# 3．研究開発領域

第 3 章では、環境・エネルギー分野の 4 つの俯瞰区分の中から第 2 章で述べた検討に基づいて抽出された合計 92 の研究開発領域のそれぞれについて、現状と課題、国際比較を記述する。

以下は、それぞれの研究開発領域について、専門家（CRDS 環境・エネルギー研究戦略会議および専門会議の委員、執筆協力者）の協力を得て、科学技術・研究開発の国際比較および注目すべき研究開発の動向の調査を行い、その結果をとりまとめたものである。各研究開発領域に関して、次の項目を含む。

（1）研究開発領域名
（2）研究開発領域の簡潔な説明
（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向
国内外の動向には研究開発と政策の両方に関するものを含む。
（4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）
領域に存在する技術的なボトルネック、知識の欠如、または制度上の課題（産官学連携、府省連携、ファンディング制度、インフラ、知財戦略、標準化）などについて記す。
（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）
ホットな研究開発課題、当該分野の潮流を生むような新しい知見や新技術の創出、国際的なファンディング動向など近年のトピックスなどについて記す。
（6）キーワード
当該研究開発と関連の深い重要な専門用語を複数記載する。
（7）国際比較
原則として日本、米国、欧州、中国、韓国を比較し、「基礎研究」、「応用研究・開発」、「産業化」の 3 つのフェーズについて、現状およびトレンドを記す。また各国の状況および評価の際に参考にした根拠などについて記す。
（8）引用資料
上記（1）～（7）の記述の根拠となる論文や総説などの情報について記載する。

このうち（7）国際比較は、表の形にし、次の用語および記号の約束を用いている。

フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国立研究所などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　：量産技術・製品展開力のレベル

現　状
各国の技術力の現状　（我が国の現状を基準にした相対評価ではなく絶対評価）
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている
○：ある程度の活動・成果が見えている
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない
×：特筆すべき活動・成果が見えていない

トレンド … 各国の技術力が過去と比較して近年どのように変化してきているか
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## 3.1　エネルギー供給区分

エネルギー供給では、我が国のエネルギー・フローの概観から求められる主要課題（図2.2.17）から、日本の技術力、競争力を高め、基礎研究から実装まで繋げたシナリオ、技術革新による多様性を機軸とした新たなエネルギーベストミックスを展開し、３Ｅ＋Ｓを達成しながら持続可能な社会を実現するためには以下を考慮する必要がある。

・多様性を基軸とした新たなベストミックスでは、量的規模・寄与、時間スケール、空間スケールを踏まえた総合的判断が必要
・将来の長期的姿と今の姿を繋ぐ、間のシナリオと技術を俯瞰し、必要な科学技術をいつまでに実現しなければならないか、直ぐの実現は困難でも、革新的技術、技術の元になる科学的研究は何か。一次エネルギー、二次エネルギー、エネルギー利用形態では、エネルギーキャリア、蓄電、エネルギー貯蔵・輸送、などの使い方、タイムスケールに合わせたベストミックス、電力改革が進む中、短期的にはスピード感が必要
・化石エネルギーと再生可能エネルギーのインテグレーションのフィージブルな姿を、科学ベースの普遍的な主導原理、考え方に基づき示すことが必要
・国際的なバーゲニングパワーを持てる資源技術とビジネスモデルとは何か
・国内バイオマスの大規模利活用の可能性などの既存産業の転換が必要

これらの視点から、石油、天然ガス、石炭、再生可能エネルギーのエネルギー源とエネルギー供給への要求から、山元（採掘）から輸送・利用までの流れの中で、各段階における問題点を整理し、それらから導かれる課題を抽出し、エネルギー供給における研究開発領域を図2.2.18に示すように整理した。

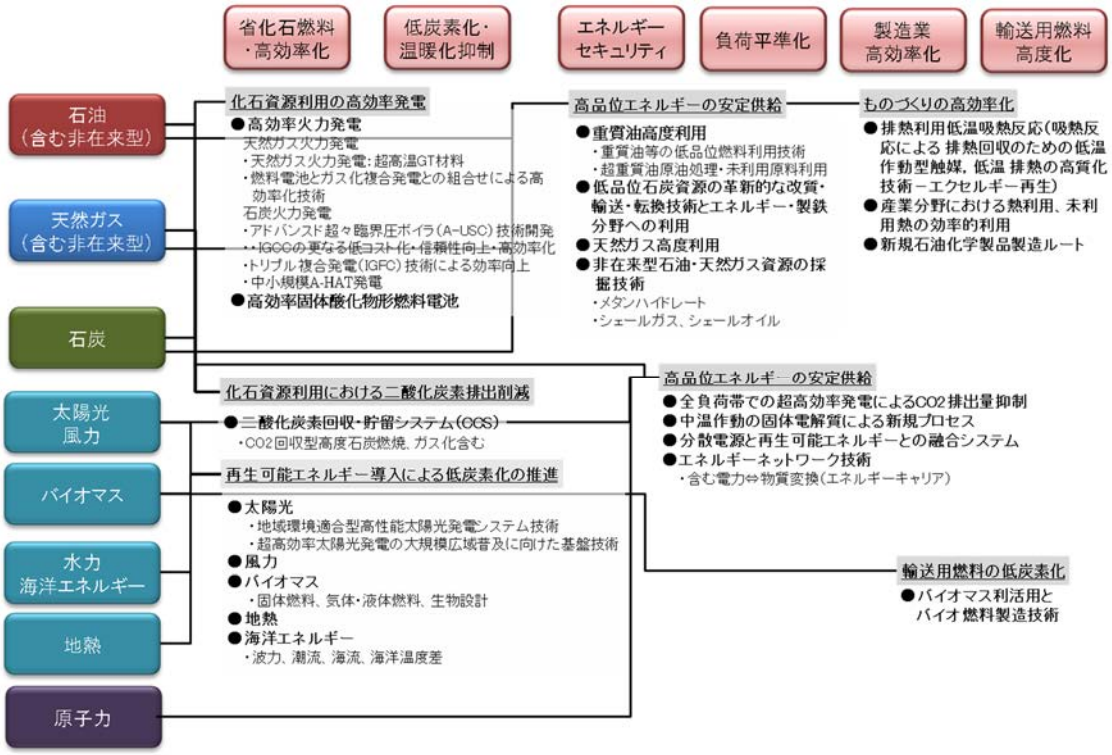



**図 2.2.18　エネルギー供給区分の俯瞰図（再掲）**

ほかにも図 2.2.11（エネルギー供給区分の現状俯瞰と課題）に示す通り、エネルギー供給区分においては多くの課題があげられるが、我が国のエネルギー利用におけるベストミックスおよびカントリーリスク回避の視点で重要となる技術課題を精査し、とりわけ重要度の高いものとして以下の 20 領域群を選定した。なお、ガス化技術、ガス化ガスの分離技術として研究開発領域として特に取上げていないが、石炭、バイオマス、重質油の高度利用、CCS の実用化においては横断的な技術であり、研究開発項目の中に重要な研究開発項目として含まれている。

3.1.1　化石資源利用の高効率発電（省化石資源消費・高効率化）
- 3.1.1.1　高効率火力発電
- 3.1.1.2　高効率固体酸化物形燃料電池

3.1.2　化石資源利用における二酸化炭素排出削減（低炭素化・温暖化抑制）
- 3.1.2.1　二酸化炭素回収・貯留システム（CCS）

3.1.3　再生可能エネルギー導入による低炭素化の推進（低炭素化・温暖化抑制）
- 3.1.3.1　太陽光
- 3.1.3.2　風力
- 3.1.3.3　バイオマス（固体燃料、液体・気体燃料、生物設計）
- 3.1.3.4　地熱
- 3.1.3.5　海洋エネルギー（波力、潮流、海流、海洋温度差）

3.1.4　高品位エネルギーの安定供給（エクセルギー、セキュリティ、負荷平準化、環境負荷低減）
- 3.1.4.1　重質油の高度利用
- 3.1.4.2　低品位石炭資源の革新的な改質・輸送・転換技術とエネルギー・製鉄分野への利用
- 3.1.4.3　天然ガスの高度利用（超高効率発電・天然ガスからのコプロダクション（トリジェネレーション）・LNG 冷熱利用技術による高効率化）
- 3.1.4.4　非在来型石油・天然ガス資源の採掘技術
- 3.1.4.5　全負荷帯での超高効率発電による $CO_2$ 排出量抑制
- 3.1.4.6　中温作動の固体電解質による新規プロセス
- 3.1.4.7　分散電源と再生可能エネルギーとの融合システム
- 3.1.4.8　エネルギーネットワーク技術

3.1.5　ものづくりの高効率化（製造業高効率化，低位熱高度利用）
- 3.1.5.1　排熱利用低温吸熱反応（吸熱反応による排熱回収のための低温作動型触媒、低温排熱の高質化技術－エクセルギー再生）
- 3.1.5.2　産業分野における熱利用、未利用熱の効率的利用
- 3.1.5.3　新規石油化学製品製造ルート

3.1.6　輸送用燃料の低炭素化

3.1.6.1　バイオマス利活用とバイオ燃料製造技術

これ以降、上記20領域について詳述する。

## ３．１．１　化石資源利用の高効率発電（省化石資源消費・高効率化）

### ３．１．１．１　高効率火力発電

#### （１）研究開発領域名

高効率火力発電

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

日本の発電の 90%を火力発電が担っている現在、高効率火力発電は極めて重要な技術であり、火力発電の高効率化は単に日本国内のみならず、国際貿易収支や地球温暖化問題など国際的にも重要なものである。高効率火力発電は次の 3 つの分野に大別され [1)]、特に第 2 世代、第 3 世代の高効率火力発電の開発を推進してきた。

①第 1 世代：単純サイクル（ボイラー蒸気タービンの組合せ）
②第 2 世代：ダブル複合発電（ガスタービンー蒸気タービンの組合せ）
③第 3 世代：トリプル複合発電（燃料電池ーガスタービンー蒸気タービンの組合せ）

したがって研究開発の領域もそれぞれの分野に分かれている。第 1 世代については成熟期にある技術をさらにもう一歩進める研究開発であり、第 2 世代ではまさに現在最盛期を迎えつつあり、第 3 世代は将来の更なる飛躍を可能とする揺籃期にあるといえる。また火力発電で使用する燃料についても、化石燃料のほとんどを輸入に頼っている我が国では、ベース電源としての石炭、ミドルとしての天然ガスおよびピーク電源としての石油が重要である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

第 1 世代である蒸気タービン技術は 100 年以上にわたって営々と技術の改良がなされ、効率向上が実現されてきたが、その最大の貢献はタービン入口蒸気の高圧化・高温化であった。圧力はすでに 25 MPa 以上の超臨界圧となっており、温度も現在鉄系材料の限界に近い 630℃程度となっている。この技術は超々臨界圧（USC : Ultra Super Critical）と呼ばれ、実質的に日本が材料開発・実機テストを経て実用化したものであるが、これは鉄鋼・重工メーカー・電力会社が緊密に協力し、かつ、的確な国の支援があり開発に成功したものである。これ以上の効率向上を実現するためには、700℃級の蒸気温度が必要であり、これは A-USC（Advanced-Ultra Super Critical）プロジェクトと呼ばれ開発が進められている。このために新たな耐高温材料の開発が必要であり、現在の鉄系材料に代わり、ニッケル合金材料を使用することになる。

第 2 世代のダブル複合発電（GTCC：Gas Turbine Combined Cycle）は、使用燃料が天然ガスと石炭で現在の技術段階が異なる。天然ガスが燃料の場合、主機であるガスタービン技術がほぼ円熟期を迎えつつあり、ガスタービン入口ガス温度はすでに 1600℃が商用機として実現されている。現在、1700℃のガスタービンの実現が最大の開発目標であり、2020 年までの実用化が期待されている。燃料が石炭の場合、固体である石炭を粉砕後、ガス化し、ガス精製の後、ガスタービンで燃焼する石炭ガス化複合発電（IGCC : Integrated Gasified Combined Cycle）となる。これも 25 万 kW の実証試験を終了し、これから商用機が建設される段階であり、2020 年を目標に 50 万 kW 商用機 2 基の計画

が着々と進められている[2, 3]。

第 3 世代のトリプル複合発電に関しては、最高温のトッピング機器を構成する高温型の固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）が技術の鍵となる。SOFC そのものについてはさらなる性能向上、耐久性向上のために種々の基礎的な研究開発が全世界で進められているが、火力発電において SOFC がその真価を発揮するためには、1000℃に近い高温での作動を最大限に生かす複合発電が必要である。このため SOFC とマイクロガスタービンを組合わせた 250 kW 級の実証試験も進められている[4]。このような技術開発を通して、より大型のトリプル複合発電の研究開発が進むことが期待されている。

また、天然ガスを燃料とした中小規模の高効率発電技術として、高水分空気利用ガスタービン（A-HAT：Advanced -Humid Air Turbine）[5] や 3.1.2.1 で述べる二酸化炭素回収・貯留システム（CCS：Carbon Capture and Storage）に適した発電方法として、酸素燃焼発電（Oxy fuel Combustion）[6] などの開発が行われている。

### （４）研究開発推進上の課題･ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

第 1 世代の発電技術の要は、より高温に耐える材料、すなわちニッケル合金をボイラや蒸気タービンといった大型機器に適用可能とする材料開発である。このような高温材料は強度が高温クリープ強度で決まるため、10 万時間の実験によるデータ取得が不可欠であり、膨大な試験装置と費用が必要である。現在までも「A-USC 開発」ということでそれなりの支援はなされてきたが、真に高効率化と経済性の両立を可能とし、商用化に到達するには抜本的な研究開発と強力な財政支援が必要である。USC 開発のときには鉄系材料であったため、日本の鉄鋼メーカーは抜群の技術力を有していたが、ニッケル合金に関しては、日本は必ずしも強くはなく米国が圧倒的に優位である。このハンデキャップを克服するのは並大抵ではない。この課題解決には、エネルギー基本計画でも研究開発が謳われ、同じような耐高温ニッケル合金を使用する「高温ガス炉」の研究開発とも協力して進めるのが得策と考えられる。

第 2 世代のダブル複合発電については、天然ガスについてはより高効率なガスタービンの開発が課題となっている。ガスタービン入口ガス温度がすでに 1600℃となっている現在、1700℃に耐える材料、製造方法、翼の冷却方法などを総合した技術革新が必要である。石炭については IGCC となるが、さらなる効率向上のため、湿式ガス精製に代わる乾式ガス精製の開発、所内動力低減のための高効率空気分離装置の開発などが課題である。

第 3 世代のトリプル複合発電は、第 2 世代のダブル複合発電のトッピング機器としての SOFC の開発が重要課題となる。SOFC は分散電源として 250 kW 級の実証試験が進められているが、大規模なトリプル複合発電に適用するためには、システムに適した SOFC の開発、信頼性向上（石炭ガス中の微量元素による劣化制御や大容量化にともなう経時変化の把握など）、製造方法を含めた低コスト化が課題である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

第 1 世代については 700℃級の蒸気条件の採用をめざす A-USC プロジェクトが世界

各国で進められてきた。このうちヨーロッパでは再生可能エネルギーへの手厚い保護による風力発電などの設備急増により、電力会社の経営が急激に悪化し、ほとんどのプロジェクトが中止または延期となっている。また米国でもオバマ政権の石炭火力建設禁止-天然ガスプラント推進の方針により研究開発は事実上ストップしている[7)]。

第2世代については、まず、天然ガス使用のダブル複合発電では1700℃級ガスタービンの研究開発を着実に進めることが重要である。米国ではシェールガス重視の方針から、天然ガス複合発電が次々に建設されるものと考えられる。また、世界市場でもGE社によるAlstom社買収により、その世界市場占有率は50%を越え、着実に米国製造業の復権に貢献するものと考えられる[8)]。一方、IGCCについては、日本において商用化の足取りが着実に進んでいる。空気吹きIGCCでは、勿来の250 MW実証機が実証機としての使命を終え、2014年4月より商用機となり、現在順調に運転中である。また、福島復興IGCCプロジェクトとして、2020年運転開始を目標に福島県に500 MW級IGCC商用機を2基建設するプロジェクトが進行中である。さらに、酸素吹きIGCCとして、大崎クールジェンプロジェクト170 MWが2013年3月着工され、2017年の運転開始を目標に建設中である[9)]。米国では2013年6月に761 MWの商用第1号機Edwardsportプラントがインディアナ州で運転を開始したが、低い効率と大幅な予算超過による経済性の悪化が問題となっている。また、2014 年に運転開始予定であったミシシッピ州のKemperCountyプラント582 MWも1年以上の工程遅延と大幅な予算超過が報告されている。その意味で順調に進んでいる日本のIGCC技術がいっそう注目されている[10)]。

第3世代では、米国でBloom Energy社が、200 kW機を分散電源用として、SOFCをすでに数十機販売しており、日本でもソフトバンクの強力な援助を受けて販売拡大を図っている[11)]。またGE社は2016年にSOFCを販売すると公表している[12)]。日本では250 kWのNEDOプロジェクトが進行しておりマイクロガスタービンとのハイブリッドシステムの実証が進んでいる。しかし、SOFCの実用化のためには安定した大量生産技術の確立による大幅なコストダウンが不可欠であり、この製造技術の向上も大きな課題である。天然ガス利用のトリプル複合発電が実用化されれば、これとIGCC技術を組合せることにより、燃料電池石炭ガス化複合発電（IGFC：Integrated Gasified Fuel Cell Combined Cycle）の実用化も有望になってくると考えられる。いずれにしてもSOFCは将来の高効率火力発電の鍵を握る最重要技術といえる。

### （６）キーワード

高温材料、ニッケル合金、USC、A-USC、IGCC、SOFC、IGFC

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・第3世代の発電技術の核となるSOFCについては、性能向上、耐久性向上など基礎研究が着実に進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・1700℃級ガスタービン、中小規模A-HATの開発研究が着実に進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・空気吹きIGCCは勿来250 MW実証機が実証研究を終了して2013年4月より商用機となり、さらに福島復興IGCCプロジェクトとして500 MW機2基の計画が2020年運転開始を目標に進められている。<br>・酸素吹きIGCCは大崎クールジェンプロジェクトが2013年3月建設着工し、2017年の運転開始に向け建設が進められている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・現在USC、IGCCなどの大がかりな基礎研究は積極的に進んでいるとはいえない状況にある。<br>・然し、ニッケル合金材料については圧倒的な実績を誇っている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・2013年6月25日に発表されたオバマ政権のClimate Action Planにより、「天然ガス重視・石炭火力非推進」の方針が出され、これまでのクリーンコール技術推進の強力な支援が崩れつつある。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・2013年6月運転開始した米国商用IGCC第1号機Edwardsportは予算の大幅超過が問題となっている。<br>・2014年6月運転開始予定であった米国商用IGCC第2号機Kemper Countyプラントは工程遅延と予算の大幅超過が問題となっている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・大学を中心にUSC関係の地道な研究が進んでいる。A-USC関連の研究が進んでいたが、再生可能エネルギーの大幅な増加、火力発電の稼働率低下により停滞気味である。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・再生可能エネルギーの大幅な増加、火力発電の稼働率低下により、電力会社の経営が急激に悪化し、A-USC実機テストなどのプロジェクトは軒並み中止または延期となっている。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・現在の電力会社の窮状ではA-USC実用化の見通しは立たず、またIGCC商用機の具体的なプロジェクトもない。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・各世代とも傑出した研究開発はない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・超々臨界圧（USC)プラントは日本からの技術導入により国産化が計られてきた。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・超々臨界圧（USC）プラントが続々と建設され、国際マーケットにも進出してきており、日本の強力なライバルとなりつつある。<br>・石炭ガス化については欧米よりのライセンスにより化学や石油化学の分野で多くのプラントが建設されてきた。一方、IGCCについてはGreenGenプロジェクトの運転成功の情報はいまだない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・各世代とも傑出した研究開発はない |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・石炭ガス化については、基本技術を欧米からライセンスを受ける方針である。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・IGCCについては技術は海外から導入し、設計・製作を韓国で実施する方針で進んでいる。Shellの技術導入により韓国で製作したTaean250 MW実証プロジェクトの建設が進んでいる。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 金子祥三. 日本機械学会誌, 2013, vol. 116, No.1133, p. 10-13.
2) 環境省. 福島復興大型石炭ガス化複合発電設備実証計画(広野)に係る計画段階環境配慮書に対する環境大臣意見.
http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=24758&hou_id=18364
3) 経済産業省. 東京電力株式会社「福島復興大型石炭ガス化複合発電設備実証計画(広野)計画段階環境配慮書」にたいする意見について.
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/files/hirono_igcc/hirono_igcc_daijiniken.pdf
4) NEDO 共同研究事業 （固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発）. 2013-2017.
5) 高効率ガスタービン実用化技術開発（AHAT）に関する施策・事業の概要について. 日立製作所他. （2012年）
6) 発電プラントのゼロエミッション化に向けて. 石炭火力における酸素燃焼技術を用いた$CO_2$回収システム. IHI 技報 Vol.52 No.1. （2012年）.
7) Executive Office of the President. The President's Climate Action Plan, June 2013.
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/image/president27sclimateactionplan.pdf
8) 日本経済新聞. 2014年6月23日. 朝刊. 提携先 GEに決定
9) 大崎クールジェン株式会社. 環境影響評価準備書のあらまし.
http://www.osaki-coolgen.jp/release/aramashi-pdf/aramashi.pdf
10) Thomas W. Overton. Does IGCC Have a Future? POWER, July 2014, p. 54-55.
11) Bloomenergy. http://www.bloomenergy.com/customer-fuel-cell/. （参照 2014-08-10）.
12) 日本経済新聞. 2013年12月4日朝刊. 米GE、日本で火力改修や燃料電池に参入---副会長が表明

### ３．１．１．２　高効率固体酸化物形燃料電池

#### （１）研究開発領域名

高効率固体酸化物形燃料電池

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

燃料電池の中でもっとも発電効率が高い固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）を分散型電源として本格普及させるための低コスト化・高耐久化技術、および中・大規模用に高効率発電を達成するためのシステム化技術の研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

我が国のエネルギー政策において、燃料電池は重要なキーテクノロジーとして位置付けられている。加えて固体酸化物形燃料電池（SOFC）は燃料電池の中でももっとも高い発電効率が得られ、天然ガスや石炭ガス化ガスなどの多様な燃料にも対応が可能であり、小型分散型から大規模火力代替システムまで広い適用性をもつことから、実用化の期待が大きい。上記状況を背景に、家庭用 SOFC システム（エネファーム・タイプ S）が 2007 年度から 2010 年度の NEDO 助成による実証研究を経て [1]、JX 日鉱日石エネルギーが 2011 年度に、大阪ガス・京セラ・アイシン精機・トヨタ自動車（共同開発）が 2012 年度に販売を開始し世界に先駆けて実用化された [2,3]。今後、本格普及のためには低コスト化と耐久性の両立が最大の課題となっている。一方、数 kW から数 100 kW の中容量システムならびにそれ以上の大容量システムの開発も実施されているが、これらはまだ技術開発の途上にある。

海外においても SOFC の技術開発は活発に行われている。特に中容量のシステムは米国で市場導入が進められおり、日本国内にも同システムの導入が開始されている。以下に海外の動向をまとめる。

- 米国では 2001 年から DOE において、SOFC の性能・耐久性向上・低コスト化を目的とした技術開発（SECA プロジェクト）を推進している [4]。現在、本プロジェクトでは石炭ガス化複合発電（IGFC）の研究を中心に検討が実施されている。Fuel Cell Energy、Versa Power Systems、UTC Power、Delphi、Rolls-Royce が参画している。企業単独の開発では Bloom Energy が 2010 年に 100 kW 級 SOFC システムの商品化に成功し、事業展開を積極的に行っている。カリフォルニア州を中心に Google、Apple、HONDA、Walmart、Nokia、AT&T、eBay、Bank of America などをはじめとする多数の企業のほか、データセンター、病院、銀行、市庁舎などへ累計 100 MW 以上の導入実績がある。さらに 2013 年には日本市場に参入するためソフトバンクと合弁会社ブルーム・エナジー・ジャパンを設立し、現在までに 200 kW 級システム 3 台が国内に導入されている [5]。
- 欧州では、EU の財政支援により SOFC 関連のさまざまなプロジェクトが推進されている（SOFC-FACT、SOFC-LIFE、MET-SAPP、DESING など）。ドイツの Callux プロジェクトでは SOFC および PEFC の家庭用 CHP（Combined of Heat and Power）のフィールド試験が実施されている。SOFC では HEXIS と Vaillant が参画している。

オーストラリアの CFCL はドイツとイギリスに工場を設立し 2 kW 級システムのフィールド試験を数百台規模で実施している。イギリスの Ceres Power は金属支持形 SOFC を用いた家庭用 CHP を開発中で、2014 年度より British Gas と実証試験を予定している。

・韓国では、1 MW の SOFC 開発を進めてきた Rolls-Royce Fuel Cell Systems（米国）を LG グループが買収し実用化に向けた開発を進めている[6]。また Fuel Cell Energy（米国）から技術移転を受けた POSCO Energy が大容量の溶融炭酸塩形燃料電池（MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell）の生産・販売を進めており、累計 113 MW 以上の実績がある。なお POSCO Energy は日本市場での MCFC 販売に乗り出す方針を示している[7]。

以上のように海外においても家庭用から業務用・事業用に至るさまざまな規模の SOFC の技術開発が積極的に進められている。いずれの技術も市場導入あるいは普及拡大には、コスト・耐久性・信頼性などの面で課題は多数あると考えられるが、今後我が国が SOFC 分野で国際競争力を確保していくためには、次の課題解決が必要である。

・セルスタックの発電効率向上、低コスト化、高耐久性化
・業務用、事業用規模のシステム化

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

① セルスタックの発電効率向上、低コスト化、高耐久性化
- 電解質導電性向上・電極過電圧低減、セルおよびセルスタック構造の最適化などによる SOFC 単体での発電効率向上。
- セルスタックの出力密度向上による材料削減、安価な材料の適用による低コスト化。
- 作動温度低減（電解質導電性向上・電極過電圧低減）による耐久性の向上。

② 業務用、事業用規模のシステム化
- 中大容量に適したセルおよびセルスタックの開発、複合発電のための SOFC セルスタックとガスタービン・蒸気タービンとの組合せによるシステム最適化（起動停止・加圧などの運転条件最適化を含む）およびシステムの低コスト化。

これら課題解決では特にセルスタックの開発が重要になる。SOFC のセルスタックはセラミックで構成されるため、化学変化や構造変化が顕在化するのに時間が掛かる。そのため長期耐久性の評価などでは、セラミックス材料の微細な変化を精度よく解析できる基礎研究が重要になる。我が国の大学、研究機関はこの分野において高いレベルを有しており、現在 NEDO 事業において実施中であるが、産学連携の体制整備が有効である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

2014 年 4 月 11 日に閣議決定された新たな「エネルギー基本計画」において、家庭用燃料電池については市場自立化に向けた導入支援を行うとともに、低コスト化のための

研究開発などを引き続き実施すること、また業務・産業分野の燃料電池については早期の実用化・普及拡大に向けて技術開発や実証などを推進し市場創出を図ることが示された。我が国の燃料電池の開発は主に NEDO 事業を中心に進められている。現在 NEDO では 2013 年度からスタートしたプロジェクトにおいて、次の研究開発を実施中である[8)]。

① SOFC の耐久性迅速評価方法に関する基礎研究
・セルスタックメーカーにおける低コストと高耐久性を両立した SOFC 開発を加速するための、9 万時間以上の耐久性を短期間で見通すことができる迅速評価方法の開発と検証。
② SOFC を用いた業務用システムの実用化技術実証
・中容量（数～数 100 kW）SOFC システムの導入効果検証および課題抽出。
③ SOFC を用いた事業用発電システムの要素技術開発
・トリプルコンバインドサイクルシステムの SOFC セルスタックの開発、SOFC とガスタービンとの連携技術の開発。
④ 次世代技術開発

### （６）キーワード

固体酸化物形燃料電池（SOFC）、固体イオニクス、酸素イオン伝導、コンバイドサイクル発電

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・NEDO事業において開発企業、大学、研究機関の連携体制による、SOFCの本格普及を目指した研究開発が推進されている。本事業の中でセルスタックの耐久性・信頼性に関して、劣化機構の解明と評価方法の検討によって4万時間耐久性（電圧低下率0.25%/1000時間以下）と250回起動停止に対する見通しが得られている。また本手法を用いて、9万時間以上の耐久性を比較的短期間で見通すための迅速評価方法の研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・業務用システムならびに事業用複合発電システムの実証試験がNEDO事業で実施されている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・家庭用SOFCシステム（エネファーム・タイプS）は、2007年度から2010年度のNEDO助成による実証研究を経て、JX日鉱日石エネルギーが2011年度に、大阪ガス・京セラ・アイシン精機・トヨタ自動車（共同開発）が2012年度に販売を開始した。現在、後発企業も市場投入に向けて研究開発を進めている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・米国エネルギー省（DOE）などの政府機関、民間企業、国立研究所、大学などが参加したSECA（Solid State Energy Conversion Alliance）プログラムで研究が進められてきたが、DOEの予算削減から現在基礎研究は停滞気味である。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・SECAプログラム第2期として、石炭ガス化ガスに対応した大容量コンバインドサイクルのシステム化開発が進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・Bloom Energyが2010年に100 kW級SOFCシステムの商品化に成功し、カリフォルニア州を中心に大手企業への導入を進めている。また2013年にはソフトバンクと合弁会社（ブルームエナジージャパン）を設立し、3台の200 kW級システムを日本国内に導入している（2014年6月現在）。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・欧州連合における財政支援制度のもとで、さまざまな技術開発プロジェクトが推進されている。<br>・基盤研究ではユーリッヒ研究所（独）、スイス連邦素材研究所、インペリアルカレッジ（英）が劣化観測手段の高度化に積極的に取り組んでいる。<br>・企業では平板型SOFCの開発が主流であり、動作温度の低温化と金属サポートセルの研究開発が活発である。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・マイクロCHPの開発・実証が活発になっており、ドイツではCalluxプロジェクトでPEFCとSOFCのフィールド実証研究が2008年より開始され、HEXISとVaillantがSOFCシステムで参画している。イギリスではCeres PowerとBritish Gasによる実証研究の計画が進行している。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・CFCL（Ceramic Fuel Cells Limited）は2 kW級システムの開発を行っており、ドイツ、日本、イギリス、フランス、オランダなどでフィールド試験による耐久性検証を進めている。Wartsila（フィンランド）はTopsoe Fuel Cells Ltd（デンマーク）からセルの提供を受け20 kW級および50 kW級システムを開発し実証研究を行っている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・中国科学技術部の863、973プロジェクトにおいて、大学、研究機関によるセルスタックの基礎研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・数 kW級の円筒型セルスタックならびに平板型セルスタックの開発が研究機関により実施されている。 |
| | 産業化 | × | → | ・863、973プロジェクトにおいて、石炭ガス化複合発電への適用を目指した計画がある。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・大学、研究機関によるセルおよびセルスタックの基礎研究が実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・1 MWのSOFC開発を進めてきたRolls-Royce Fuel Cell Systems（米国）をLGグループが買収し実用化に向けた開発を進めている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・Fuel Cell Energy（米国）から技術提供を受けたPOSCO Energyが大容量MCFCの生産・販売を推進している。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）http://www.nef.or.jp/sofc/
2）http://www.noe.jx-group.co.jp/newsrelease/2011/20110915_01_0950261.html
3）http://www.kyocera.co.jp/news/2012/0305_yuki.html
4）http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/
5）http://www.bloomenergy.co.jp/
6）http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464285912702043
7）例えば、日経産業新聞2014年6月1日.
8）http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100060.html

## ３．１．２　化石資源利用における二酸化炭素排出削減（低炭素化・温暖化抑制）

### ３．１．２．１　二酸化炭素回収・貯留システム（CCS：Carbon Capture and Storage）

#### （１）研究開発領域名

二酸化炭素回収・貯留システム（CCS：Carbon Capture and Storage）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

世界の一次エネルギー消費は、2012年の石油換算13,371百万 t（Mtoe）からレファレンスケースで2040年には19,276 Mtoeに達し、石油、天然ガス、石炭の化石資源は2012年の10,928 Mtoe（約82%）から2040年15,200 Mtoe（約79%）になると予想されている[1)]。地球温暖化対策として、再生可能エネルギー、原子力とともに、CCSは化石燃料への高い依存が続く中、発電部門や鉄鋼業、セメント業などの産業部門からの$CO_2$排出削減のための重要な低炭素化技術と位置付けられ、2014年には22の大規模プロジェクトが操業・建設中であり、$CO_2$回収量は年間約40百万 t（2012年排出量32.6 Gt）になる[2)]。CCSは$CO_2$の分離・回収、輸送、貯留、モニタリングの技術で構成される。現状、CCSは高コストであり、石油増進回収（EOR：Enhanced Oil Recovery）への利用など付加価値がないと経済的に成立することは困難である。特に、分離・回収部のコストが大きく高効率化、低コスト化、貯留における環境負荷の評価のための実証試験が必要であり、長期的な視点から研究開発を推進する必要がある。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

CCSは、2008年3月策定された「クールアース5－エネルギー革新計画」で重点的に取組むべき21のエネルギー革新技術の一つとして選定され、2008年7月開催のG8洞爺湖サミットでは、「2020年までにCCSの広範な展開を始めるために、各国ごとのさまざまな事情を考慮しつつ、2010年までに世界的に20の大規模なCCSの実証プロジェクトが開始されることを、強く支持する」と宣言された。2010年10月閣議決定された地球温暖化対策基本法案でもCCS開発、促進のために必要な施策を講じるとされている[3)]。また、2013年9月に改訂された環境エネルギー技術革新計画でもCCSが取上げられ、2014年の第4期エネルギー基本計画でも、高効率火力・LNG火力発電の有効活用の促進の中で、「2020年頃のCCS技術の実用化を目指した研究開発や、CCSの商用化の目途なども考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready導入に向けた検討を行う」とされている[4)]。

米国オバマ大統領が2013年6月に発表した「気候行動計画」では、公的金融のクリーンエネルギーへの転換の主導として、海外における石炭火力発電所の新設に対する米国政府による公的金融資金を停止する提案を行っている。2013年9月には気候行動計画の一環として、米国環境保護庁（EPA：Environmental Protection Agency）は、大気浄化法に基づく石炭火力発電所の排出基準約500 g/kWhを発表した。これは、石炭ガス化複合発電に燃料電池を加えたIGFCでもクリアできない厳しいもので、CCSが前提となっている[5)]。

2014年4月にまとめられた、気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）の第5次報告書第3作業部会の報告『気

候変動2014 - 気候変動の緩和』[6] においても、一次エネルギーに占める低炭素エネルギー（再生可能エネルギー、原子力、CCS付火力）を2010年比で2050年に3～4倍近くに増加させる、電力に占める低炭素エネルギーを2010年比で2050年に8～9割まで増加させるとともに、2100年までに、CCSなしの火力発電をほぼ完全に廃止し、高効率天然ガス火力においてもCCSが必要とされている[6]。

2014年10月現在、CCSプロジェクトは、操業中13、建設中9、精査段階14、評価段階13、構想段階6、合計55プロジェクトがあり、$CO_2$処理量は合計1億 t/年（操業中のもの約27百万 t/年）となっている。国別に見ると、米国19、中国12、欧州8、カナダ7、豪州3、その他6プロジェクトとなっている。排出源別では、火力発電所23、天然ガス精製13、化学品生産5、肥料生産4、石炭液化3、合成天然ガス2、水素製造2、石油精製1、鉄鋼1となっている。また、貯留タイプ別では、EORがもっとも多く29、陸上、海水下帯水層22である。輸送形態では、配管輸送が50、海上輸送3となっている[4, 7]。

CCSを構成する分離・回収、輸送、貯留、モニタリング技術の開発状況は以下の通りである[8-11]。

① 分離・回収

$CO_2$の分離・回収法は、対象とするシステムにより異なり、燃焼後回収（Post-Combustion）、燃焼前回収（Pre-Combustion）、燃焼中回収（Oxy-Combustion、Oxy-Fuel、酸素燃焼）に大別される。燃焼後回収は、ほぼ大気圧で運転されるシステムに適用され、既存の石炭焚火力発電所ボイラなどの発生燃焼排ガスから$CO_2$を回収するもので、回収技術として、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離法、深冷分離法がある。燃焼前回収は、圧力が高いシステムに適用され、化学プラントの天然ガスの水蒸気改質・尿素製造プラント、石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated Gasifierd Combined Cycle）などの石炭の部分酸化により$H_2$、CO、$CO_2$の生成ガスを製造し、燃焼前に分離・精製しプロセス利用するもので、物理吸収法、物理吸着法が適用される。燃焼中回収は、事前に酸素製造装置により酸素を製造し、プロセス中の窒素を除去し、プロセスガス、燃焼排ガス中の$CO_2$を高め$CO_2$を回収し易くするシステムである。また、天然ガスを燃料として酸素を用いて燃焼し、排ガスを$CO_2$と$H_2O$として、$CO_2$を回収するシステムも検討されている。ほぼ大気圧で運転される石炭火力発電所では化学吸収法、セメント・鉄鋼プラントでは膜分離法、化学プラントでは物理吸着法、石炭ガス化複合発電（IGCC）は、高い圧力で運転されるため物理吸収法が有利とされている。分離・回収技術を以下に示す。

(1) 化学吸収法

・アミン法（MEA法）、アンモニア法（E$CO_2$）、熱炭酸カリ吸収法（Benfield法、Catacarb法）がある。アミン吸収法では日本企業が先行しているとされている。排ガス条件、吸収液寿命、環境影響を評価する必要があるが、エネルギー効率は2.35～3.8 GJ/t-$CO_2$が必要とされている（RITEの吸収液RH-3cでは1.5、MDEAでは1.93 GJ/t-$CO_2$と評価している）。
・分離・回収コストに関しては、IPCC、IEA、RITEの試算が行われており、IPCCでは29～74 $/t-$CO_2$（新設石炭火力発電向29～51 $/t-$CO_2$、既設石炭火力発電向45～73 $/t-

$CO_2$、新設天然ガス火力発電向37～74 \$/t-$CO_2$、IEAでは、新設石炭火力発電向で40～74 \$/t-$CO_2$、RITEでは¥4,256～7,752 /t-$CO_2$（新設石炭火力発電向¥4,256 /t-$CO_2$、既設石炭火力発電向¥7,752 /t-$CO_2$）とされている。

・アンモニア法は、排ガス中の不純物（酸素、硫黄酸化物、窒素酸化物）の影響による吸収液の劣化により石炭火力発電所への適用は難しいとされてきたが、松島発電所、米国Barry発電所（三菱重工）、三川発電所（東芝）、デンマークEsbjerg発電所（CESAR, FP7）でアミン法、米国Mountaineer発電所（Alstom）、R.E. Burger発電所（Powerspan）でアンモニア法の実証試験が行われている。

(2) 物理吸収法

・高温・高圧の石炭ガスから$CO_2$を分離する場合に適し、Purisol法（吸収液N-メチル・ヒロリドン）、Rectisol法（吸収液メタノール）、Selexol法（吸収液ポリエチレングリコールのジメチルエーテル）、Flour Solvenni法（吸収液ポリプロピレンカーボネート）が主流である。

・分離・回収コストに関しては、IPCCでは13～37 \$/t-$CO_2$（新設IGCC向け Selexol 法）、IEAは2005年～2009年のデータを基に18～79 \$/t-$CO_2$（IGCC向け）とされている。

・米国2件（Summit Power、Southern California）、英国1件（Hartfield）などIGCCでの物理吸収法による大規模実証試験計画が世界的に存在する。日本でもEAGLEプロジェクトにおいて試験が行われた。いずれもSelexol法が用いられている。

(3) 膜分離法

・化学吸収法、物理吸収法に対して消費エネルギーが少ないことから研究開発が行われているが、ガスの種類に応じた$CO_2$の高選択率、高生産性での分離回収が課題となっている。また、新設石炭火力発電での分離・回収コストは83 \$/t-$CO_2$と試算されており、いまだラボスケールでの試験が中心で、商用化されたものはない。

・日本では、RITEにおいて分子ゲート膜構造のコンセプトで分離膜の研究に取組んでいる。

(4) 深冷分離法

・空気製造装置、天然ガス中のヘリウム分離、合成ガス中のCO分離として実用化されているが、加圧下－20℃～－40℃で$CO_2$を液化・蒸留分離するもので、CCSとしては実用化されていない。

(5) 物理吸着法

・圧力、温度を変化させて固体媒体に吸着・脱着するスイング法が用いられ、PSA法、TSA法、PTSA法があり、固体媒体を移動させる、移動層、流動層方式も検討されている。現状、数 MW規模プラントでの実証段階であるが、大規模プラントでの適用は困難と考えられる。

(6) 酸素燃焼（Oxy-Fuel）

・酸素を燃焼材として用い排ガス中の$CO_2$濃度を95%以上の高濃度として回収する技術であり、他の分離・回収技術と併用することが可能である。回収した$CO_2$を再利用するため、$CO_2$ Recycle Power Generationとも言われる。

・新設石炭火力発電向で27～72 \$/t-$CO_2$とのIPCC、IEAの試算がある。

・豪州Callideプロジェクトでは、IHI、三井物産、電源開発、豪州石炭協会、CS energy

社、Schlumberger社、Glencore社のジョイントベンチャーにより、経済産業省と豪州連邦政府、クイーンズランド州政府支援の下、2012 年よりCallide A発電所 30 MW 4 号機で実証運転を開始し、累計4,600 時間の運転を達成し、$CO_2$回収量は75 t/日の計画である。米国では、石炭火力からの大規模CCS実証、酸素燃焼によるCCS実証プロジェクトであるFutureGen 2.0, IllinoisがDOEにより進められている。130万 t/年の$CO_2$回収の計画である。また、スペインではCIUDENにより、2011年～2012年に30 MWth級実証試験を行い、300 MWe級の実証試験も計画中とみられる。

(7) 化学ループ燃焼

・金属の酸化と還元を利用したもので、2つのリアクターで金属粒子を周回させることにより、酸素を輸送し燃料の燃焼を行うものである。理論的に消費エネルギーがもっとも少ない方法とされているが、配管の磨耗、金属粒子の耐久性が課題とされている。
・実証試験の段階であり、CCSへの適用事例はない。ALSTOM社が1～3 MWth規模でのパイロット試験を実施している。石炭エネルギーセンターと産業技術総合研究所などでは、石炭ガス化を触媒により行うために、NEDO「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト次世代高効率石炭ガス化技術開発」において、2009～2013年度にCa系キャリアを使用した燃焼法の検討を行った。東京ガスでは、神奈川工科大学と共同で、2020年までにコプロダクションシステムの実現に向けた研究を行っている。

② 輸送

$CO_2$輸送は、気体、液体、固体の状態が考えられる。固体の場合、エネルギー消費が多く経済性が劣る。大規模$CO_2$回収・貯留プロジェクトでは、プラント内利用や配管輸送あるいは船舶輸送が適している。

(1) 配管輸送

天然ガス、水素、石油の輸送としてパイプラインが世界中に広く敷設されている。水蒸気を含む$CO_2$は腐食性をもつため材料に耐食性材料の使用、大規模$CO_2$の輸送ではリーク検知の検討が必要であるが、米国で特に熟達しており配管輸送の技術は確立されているといえる。構想段階から運転中のCCSプロジェクトの内、41件は陸域間パイプライン、9件が陸－海域間パイプラインでありほとんどが輸送距離250 km以下である。

(2) 船舶輸送

・操業中のCCSプロジェクトでは船舶輸送の実績がなく、建設中CCSで韓国2件（海域帯水層貯留）、構想中のCCSで中国1件（枯渇油田貯留）となっている。いずれも、石炭火力からの$CO_2$を回収するシステムである。実用化では、港の貯蔵設備仕様（貯蔵量、停泊期間）などの検討が必要である。
・三菱重工は2004年、IEAのGreenhouse Gas R&D Programmeで船舶輸送の検討を行い、1,000 km以下の輸送コストを約10 \$/t-$CO_2$、液化、貯蔵、港湾コストが主で、船舶コストの割合は大きくないが、輸送距離の増大に伴い輸送コストが増大すると試算している。（財）エンジニアリング振興協会は、2010年度に実施したNEDOの「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト発電から$CO_2$ 貯留までのトータルシステムのフィージビリティスタディ　$CO_2$輸送システムの概念設計」で検討を行っている。千代田化工建設は、シャトル船・海上圧入方式の技術、経済性検証を行って

いる。

・IPCCの検討では、600万 t/年の場合、輸送におけるパイプラインと船舶輸送の損益分岐輸送距離を1,000 kmとしており、10～15 $/t-$CO_2$と試算している。RITEでは、国内のパイプライン建設コストが高く、損益分岐距離は190 kmで船舶輸送が有利としている。

③ 貯留

・$CO_2$の貯留のメカニズムは、①物理的（構造的・層序的、残留$CO_2$トラッピング）、②化学的（溶解、鉱物トッピング）とされ、貯留期間が長いほど化学的トラッピングの貢献が大きくなるとされている。

・貯留は、①帯水層、②枯渇油ガス田、③EOR、④炭素固定、⑤海洋隔離がある。現在運転中のプロジェクトは、帯水層、EORへの貯留が主である。海洋隔離は、米国、ノルウェー、日本、カナダなどの国際コンソーシアムにより、現場試験が提案され、ハワイ島沖で2001年に2週間の試験が予定されていたが、環境保護の視点から国際的な海洋実験が中止となった。日本は、貯留ポテンシャルに乏しいため、長期的に取組むべき課題として位置付け研究が継続して行われている[12, 13]。おのおのの貯留の課題と経済性は以下とされている。経済性については、貯留場所、条件により大きな幅がある。

(1) 帯水層　：高圧による圧入性が課題。ノルウェー他で3件の商用化プロジェクトがある。陸域0.2～6.2 $/t-$CO_2$、海域0.5～30.2 $/t-$CO_2$

(2) 枯渇ガス田　：商用段階のプロジェクトはない。陸域0.5～12.2 $/t-$CO_2$、海域3.8～8.1 $/t-$CO_2$。

(3) EOR　：米国を中心にほとんどが商業的に成立している（米国7、ブラジル1、カナダ1）。米国の陸上事例で、原油1バレルあたり15 US$と仮定した場合、－14.8 $/t-$CO_2$と試算されている。

(4) 炭素固定　：米国、カナダ、ポーランド、中国、日本（夕張炭鉱）での実験プロジェクトがある。メタン回収の収益が見込めるため－20～150 $/t-$CO_2$（IPCC 2005）、－5.59 $/t-$CO_2$（MIT）の試算がある。

④ モニタリング

モニタリング技術は以下のように整理されており、油ガス田開発の実績が多い、反射法地震探査が主流であり、他のモニタリング技術もCCSでの実績がある。経済性については、IPCCの0.03 US$/t-$CO_2$やRITEによる海域での事前調査、モニタリング費用の試算がある。

(1) 地下（貯留層）

・地震探査法：反射法地震探査（2D/ 3D/4D 反射法）、弾性波トモグラフィ、微小地震

・地震探査以外/坑内測定：電気/電磁探査、重力探査、物理検層、坑内検層

(2) 地表

・地表傾斜、リモートセンシング、地球化学的調査（pH、p$CO_2$センサ）、生物学的調査

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

CCSプロジェクトは、発電部門では、2014年10月カナダBoundary Dum発電所（EOR、1.0百万 t/年）で操業が開始され、米国では、2015年から2016年にかけてKemper County Energy Facility（EOR、3百万 t/年）、Petra Nova Carbon Capture Project（1.4百万 t/年）が開始予定となっている。鉄鋼部門として、Abu Dhabi CCS Project（EOR、0.8百万 t/年）の計画が進んでいる。CCSの経済性を考えた場合、EORによる収益がビジネスモデルで重要視されているが、将来的には帯水層への貯留が必要となり、そのためには分離・回収におけるシステム効率向上、Oxy-Fuelなどの燃焼法の確立、コスト低減などが大きな課題としてあげられる。また、構想～計画段階のプロジェクトの早期実現のためには、財政的、政策的支援が必要である。輸送規模（貯留ポテンシャルの関係）、貯留地に関する初期段階の特性評価、さらにモニタリングによる環境影響評価など、国際的な協力が必要と考えられる。

RITEによるCCS試算では、現状の分離・回収～貯留コストはシステム、対象により異なり、5,000～15,000円/tと試算されている。新規石炭火力では帯水層貯留システムコストを7,300円/t（分離・回収：4,200、輸送：800、圧入：2,300）と見積もっている。分離・回収コストは海外とそれほど差異はないものの、輸送ではパイプラインの高価さ、貯留では圧入量の少なさが高コストの要因とされている。分離・回収のコストでは再生時の熱、昇圧時の電力消費が高コストの要因で、再生工程での熱負荷、回収設備費の低減、発電プロセスとの熱統合、昇圧プロセスの効率アップ、などが必要である[13)]。また、NEDO「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトゼロエミッション石炭火力トータルシステム調査研究」が2008年～2012年に実施されている[14, 15)]。酸素吹IGCCから$CO_2$を分離・回収し、船舶あるいはパイプラインで輸送、地中あるいは海底貯留するシステムについて経済性を評価している。CCSにより、発電効率が約25%低下し、輸送形態、貯留場所により処理費用には幅があり、約6,000～11,000円/t-$CO_2$、発電単価はCCS無し11.6円/kWhに対し、16.3円/kWh（輸送無）、19.2～20.3円/kWh（船舶輸送）、17.9～19.9円/kWh（パイプライン輸送）とされている。日本では船舶輸送における輸送コストが約45%を占めており、海外のコスト評価と大きく異なる点である。また、日本の貯留サイトは海域に多く、容量も小さいため船舶輸送が適しており、分離・回収を物理吸収法から深冷分離へ変更、船舶輸送をバージ船とした貯蔵タンク削減、大規模輸送、貯留により約14%の処理コスト削減になると試算している。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）[7, 8, 15, 16)]

1991年、化石燃料使用で排出される温室効果ガスの削減に関し、技術が果たし得る役割に関する情報を提供することを目的として、CCSに焦点を置いた国際共同研究プログラム「IEA温室効果ガスR&Dプログラム」が創設されている。米国、カナダ、中国、韓国、ペルシャ湾岸諸国、欧州（英国、スペイン、オランダ)、ノルウェーで大規模なR&Dおよび導入・展開活動が進められいる。オーストラリア、ドイツは大規模R&Dを行っているが、導入・展開は停滞している。また、ブラジル、メキシコで大規模なR&D、インド、南アフリカでR&Dプログラムが進められている。さらに、カナダで2014年に開始された石炭火力発電所の排ガスからの$CO_2$回収プロジェクトは、世界初の発電部門でのCCSプロジェクトとして注目されている。

日本

・日本CCS調査株式会社は、貯留層タイプにより勿来・磐城沖地点（生産終了油・ガス層）、日本海沿岸地域（構造性帯水層）、苫小牧地点（非構造性帯水層）、北九州地点（非構造性帯水層）の4地点から、調査進展がもっとも早い苫小牧沖を実証試験地点として選定し、2012～2015年度で設計・建設・試運転を行い、2016年以降実証試験を行う計画としている[17]。

・豪州のGallide A発電所の酸素燃焼プロジェクトでは、IHIが既設石炭火力を酸素燃焼に改修、2012年よりボイラ運転を開始し、世界初の酸素燃焼パイロットプラントとして注目されている。

・鉄鋼業では、「革新的製鉄プロセス技術開発（COURSE50）」で、コークス炉ガスに含まれる水素を利用した水素還元製鉄、高炉ガスから化学吸収法、物理吸着法により$CO_2$を分離回収し、$CO_2$排出量を30%削減する低炭素製鉄を目指している[18]。

・日本は燃焼後回収システムの化学吸収法で世界的リーダであり、アルジェリアのIn Salahプロジェクト、ノルウェーのStatoilプロジェクト、米国のSouthern Companyプロジェクトにおいて、$CO_2$回収設備で参画している。

米国

・構想段階から操業中プロジェクトが19件あり、その内EORが17件であることが特徴である。

・DOEは、CCS支援策としてRegional Carbon Sequestration Partnerships（RCSP）、Clean Coal Power Initiative（CCPI）、Future Gen 2.0などに積極的な予算化を行っている。RCSPでは、9ヶ所での大規模な地質検査であるフェーズⅢを進めている。Future Gen 2.0では、酸素燃焼、$CO_2$回収、含塩層隔離を2016年より開始予定である。CCPIでは、Summit TX Clean Energy、HECAのIGCC、$CO_2$回収の商業化実証、Southern CompanyのIGCC、ガス輸送、$CO_2$回収を2014年～2018年に行う計画である。また、Illinois Industrial CCS Project（ICCS）では、Air Products and Chemicals, Inc.がメタン水蒸気改質からの$CO_2$回収を2013年から行っており、Archer Daniels Midlandが2013年より、Leucadia Energyが2015年よりエタノールプラントからの$CO_2$回収を進めることとなっている。

欧州

・多くのCCSプロジェクトが計画されていたものの、経済危機や$CO_2$取引価格低下により、プロジェクトが中断あるいは中止されている。

・CCS資金供給メカニズム（NER300）では、燃焼後4件、IGCC 8件、酸素燃焼4件、産業用4件など合計22件のCCSプロジェクトが申請されている。英国とオランダで活発に研究開発が行われており、両国の申請は13件にのぼる。英国ではLongannet、Kingsnorthで基本設計（FEED : Front End Engineering Design）が完了しているが、プロジェクトとしての進捗はなく、NER300に沿って実施する計画である。また、オランダではROAD プロジェクトのFEEDが完了した状況である。OXYCFB 300 Compostillaプロジェクト（スペイン）は30 MWth規模での試験が終了し、Belchatow（ポーランド）では地質学的スクリーニングを進めている。IGCCと天然ガスコンバインドサイクルを併設したStatoil / Snohvit（ノルウェー）が進行中であるが、環境問題によ

り遅延の見込みとなっている。

中国

・中国華能集団公司（Huaneng Group）主導で、GreenGenプロジェクト（ニア・ゼロ排出型IGCCポリジェネレーション）を2006年より開始し、2000 t/d石炭ガス化装置および250 MW級IGCC、石炭を利用した水素製造、水素発電、$CO_2$回収に関する研究を行っている。
・豪州連邦科学技術研究機構（CSIRO：Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation）とChina Huaneng Group（CHNG)の共同事業として、800 MWeの熱電供給石炭火力プラントの燃焼排ガスから300 t-$CO_2$/年を回収するプロジェクトが2008年より、HuanengおよびTPRIが主導し、660 MWeのUSCボイラの燃焼排ガスから120,000 t-$CO_2$/年を回収するプロジェクトが2010年より稼動している。
・SKLCC（State Key Laboratory of Coal Conversion）のもと、1995年より基礎研究を開始し、現在、200～600 MWeスケールの酸素燃焼、100万 t-$CO_2$/年を回収しEORに用いる実証試験の準備を進めている。
・中国では、精査段階4、評価段階2、構想段階6、合計12のプロジェクトが計画されている。石炭液化（CTL：Coal to Liquid）を含む化学品生産6件と半数を占めるのも特徴である。

韓国

・2010年7月、CCS実証のための包括的なアクション・プランが発表され、2012年~2015年に100 MWe級の石炭酸素燃焼の詳細設計、建設を行う計画である。火力発電からの$CO_2$回収プロジェクト（燃焼前回収あるいは酸素燃料、燃焼前回収）2件が評価段階にある。
・浦項産業技術科学院（RIST）は、アンモニア水を利用し高炉ガスから$CO_2$を回収するプロジェクト研究を行っている。

石炭クリーン利用技術（CCT：Clean Coal Technology）として、ガス化技術とともにCCSの分離・回収技術は重要な技術であり、また、化石資源やバイオマスからの化学品生産においてもガス化や分離・回収技術は、今後も大きな役割を担うものである。また、東芝の超臨界$CO_2$サイクルや川崎重工の水素燃焼タービン燃焼技術[20]、豪州褐炭のCCS水素製造[21]など注目される技術である。

### （６）キーワード

CCS、分離・回収、輸送、貯留、モニタリング、Pre-Combustion、Post-Combustion、Oxy-Fuel、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離、深冷分離、化学ループ燃焼、帯水層、EOR

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・RITEでは、分子ゲート膜構造のコンセプトで分離膜の研究に取組んでいる。<br>・RITEで省エネプロセスを目標とした疎水性吸着剤を開発、AISTでセリウムの酸化物を用いた多孔質吸着体の合成する技術を開発した。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・経済産業省「二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業」で、夕張市の炭層への$CO_2$ 圧入実験を2002~2007年度まで実施した。<br>・三菱重工は、関西電力と共同開発したKS-1吸収液の実証を行い、RITEおよび電源開発の協力を得て、松島石炭火力発電所で2006年～2008年10 t/日、5,000時間以上の連続運転実証を実施。東芝は、2009年より三川発電所内で石炭火力発電所から高性能の吸収液の実証を開始。2011 年より、米国Alabama PowerのBarry発電所で、500 t/日の$CO_2$回収・貯留実証試験を開始している。<br>・IHIは、1989年より酸素燃焼の研究開発を開始し、1990年代に基礎研究およびFSを行い、2008 年から豪州Callide酸素燃焼プロジェクトに参画している。2015 年以降の商用化を目指している。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・海外のプロジェクトに多くの企業が参画している。国内では日本CCS調査株式会社が苫小牧沖を実証試験地点として選定し計画を進めているが、CCS実証、商業化は未実施である。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・Exxon Mobilは、1980年代から深冷分離技術Controlled Freeze Zone（CFZ）」を開発。米国ワイオミング州のLaBargeガス処理プラントでパイロットテストを実施。<br>・ALSTOM社が、DOE のプロジェクトで2008～2011年、Ca系のキャリアを用いた化学ループ燃焼技術を開発した。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・2009年より米国Mountaineer石炭火力発電所におけるCCS実証試験が開始されたが、2011年に気候変動政策動向の不明確さ、景気低迷からプロジェクト中止が発表された。カナダTransAlta社によるPioneerプロジェクト（Keephills-3発電所）で、冷却アンモニア法による100万 t/年の実証試験が予定されている。2008年～2010年にR.E. Burger プラント内にある、1 MWパイロット施設で$ECO_2$プロセスの試験を実施した。<br>・Babcock & Wilcox Companyは、2001年からのラボスケール試験、2007年からはBarbertonの30 MWth級のパイロット試験装置で酸素燃焼技術開発を実施。Future Gen 2.0にも取り組んでいる。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・DOEのCCS支援策RCS、CCPI、Future Gen 2.0などで予算化し、商用化にむけての実証試験を行っている。EORへの適用など、カナダとともに現在もっとも積極的にCCSを進めている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・ALSTOM社が1～3 MWth規模で、Fe系酸素キャリアを用いた化学ループ燃焼のパイロット試験を実施している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・FP6で実施されたCASTORプロジェクト後、FP7において2008年～2011年 石炭火力発電所からの実証事業を行った。デンマークのEsbjerg 発電所では、約1650円/t-$CO_2$、2 GJ/t-$CO_2$を目標とした新規吸収液の開発を行っている。<br>・Alstom Powerは、ドイツVattenfall社30 MWthパイロットプラントで微粉炭燃焼方式酸素燃焼技術の実証を行った。 |
| | 産業化 | △ | ↘ | ・多くのCCSプロジェクトが計画され、世界をリードしていたものの、経済危機や$CO_2$取引価格低下により停滞している。NER300では22件のプロジェクトが申請されているが、商用化に向けて課題がある。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・SKLCCのもと、1995年より基礎研究を開始し、200～600 MWeスケールの酸素燃焼、EORの実証準備をしているが、基礎研究としてのR&Dは実施されていないと思われる。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 中国 | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・CSIROとCHNGが共同事業として、800 MWeの熱電供給石炭火力プラント燃焼排ガスから、300 t-$CO_2$/年を回収するプロジェクトを2008年開始。<br>・HuanengおよびTPRIのもと、660 MWeのUSCボイラの燃焼排ガスから$CO_2$を回収するプロジェクトが2010年より稼動している。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・合計12のプロジェクトが計画されており、石炭液化（CTL：Coal to Liquid）を含む化学品生産6件と半数を占める。石炭ガス化プラントが多く運転されており、CCS実証計画、技術の展開を積極的に行っている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・KIERKEPRIは、実証プロジェクトで炭酸ナトリウムや炭酸カリウム系の吸着剤の開発を行っている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・2010～2014年で10 MW規模で、物理吸着法に実証プロジェクトを実施している。2014年のプロジェクト終了直後、300 MW規模での商用化を目指す計画である。<br>・浦項産業技術科学院（RIST）は、アンモニア水を利用し高炉ガスから$CO_2$回収するプロジェクト研究を行っている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・2010年7月包括的なアクション・プランが発表され、2012年~2015年にの石炭酸素燃焼の詳細設計、建設を行う計画で、2件の評価段階プロジェクトがあるのみである。 |

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （8）引用資料

1) アジア・世界エネルギーアウトルック2014.（財）日本エネルギー経済研究所.（2014年10月）.
2) 世界のCCSの動向：2014 サマリーレポート. GLOBAL CCS INSTITUTE.（2014年11月）.
3) 地球温暖化対策基本法案.（2010年10月）.
4) エネルギー基本計画. 経済産業省.（2014年4月）
5) 米国による海外石炭火力発電所新設に対する公的融資制限及び規制案の評価.（公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）システム研究グループ.（2014年10月）
6) Climate Change 2014：Mitigation of Climate Change. IPCC.（2014年4月）.
7) Status of CCS Project Database. GLOBAL CCS INSTITUTE.（2014年10月）.
8) The Global Status of CCS 2014. GLOBAL CCS INSTITUTE.（2014年11月）.
9) 二酸化炭素回収・貯留に関するIPCC特別報告書（日本語版）. GLOBAL CCS INSTITUTE.（2013年9月）.
10) IPCC. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage.（2005年）
11) 環境省. 平成25年度シャトルシップによるCCSを活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書国内外の技術動向調査.（2014年3月）
12) 二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発事後評価報告書. 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会.（2010年3月）

13) RITE. 日本における地中貯留の経済評価と有効性. CCSワークショップ2007資料. （2007年2月）.
14) （財）エネルギー総合工学研究所. ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト ゼロエミッション石炭火力トータルシステム調査研究ケーススタディに基づくトータルシステム評価. （2013年8月）.
15) NEDO.「クリーンコール技術開発（CCS技術）に関する成果報告会」発表資料一式. （2013年8月）.
16) John Gale. 世界のCCT/CCS開発の概要. J-COAL CCTセミナー. （2012年6月）.
17) 日本CCS調査株式会社. 苫小牧CCS実証試験の概要と現況について. CCSのあり方に向けた有識者懇談会. （2013年6月）.
18) 日本鉄鋼連盟. 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会（第7回）資料「日本鉄鋼連盟説明資料」. （2014年12月）
19) 東芝プレスリリース, 超臨界$CO_2$サイクル火力発電システムの燃焼器実圧燃焼試験に成功. （2013年8月）. http://www.toshiba.co.jp/about/press/2013_08/pr_j0101.htm
20) 川崎重工プレスリリース. 低NOx水素ガス燃焼技術を開発. （2014年2月）. https://www.khi.co.jp/news/detail/20140220_1.html
21) 川崎重工. 豪州ビクトリア褐炭利用による水素製造と$CO_2$フリー水素チェーン. （2013年8月）.

## ３．１．３　再生可能エネルギー導入による低炭素化の推進（低炭素化・温暖化抑制）

### ３．１．３．１　太陽光

#### （１）研究開発領域名

太陽光

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

太陽光利用には農作物系や微生物系のバイオマス生産、人工光合成システム、そして太陽光発電がある。このうち、人工光合成はまだ基礎研究段階にあり実用化研究について議論する段階にない。太陽光発電の普及拡大には、引き続き発電コストの低減を進める研究開発を行うと同時に、電源としての信頼性向上と電力系統への負荷軽減を実現する研究開発、新たな導入形態および用途の拡大に繋がる研究開発など、さまざまな課題に取り組むことが必要であり、以下の、①地域環境適合型高性能太陽光発電システム技術開発、②超高効率太陽光発電の大規模広域普及に向けた基盤技術研究を行う。

① 地域環境適合型高性能太陽光発電システム技術開発

太陽光発電システムの導入拡大には、日本の多様な地域環境に適合する高性能太陽光発電システムの研究開発が喫緊の課題であり、低照度環境、高温環境、低入射角などで高効率発電が可能な次世代太陽電池の研究開発を行うとともに、建材一体型太陽電池（付加価値建築資材 BIPV：Building Integrated Photovoltaicsなど）、超軽量太陽電池、収納可能な太陽電池の開発を行う。また、オフグリッド使用に耐える蓄電・出力平準化機能をもつシステム、太陽光と太陽熱や風力などの複合発電が可能なシステム、メンテナンスや補修が可能な太陽光発電システムの開発などを総合的に進める。また、エネルギー蓄積システム（蓄電池、揚水発電、燃料電池など）、他の発電システム（ディーゼル発電、風力発電など）のハイブリッド発電システムにより、安定した電力の供給と設備稼働率の向上を目指した新たな「使い方」の創造、あるいは、マイクログリッドや、ZEB（Zero Enegy Building）、ZEH（Zero Energy House）における、エネルギーマネジメントシステムによるBCP（Business Continuity Plan ）対応の基幹電源化により、太陽電池の新たな応用分野を開く。

② 超高効率太陽光発電の大規模広域普及に向けた基盤技術研究

汎用太陽電池モジュールの変換効率を現在の20%程度から40%程度に高め、それによって大規模広域普及を可能にするための基盤技術研究を総合的に進める。具体的には、①新構造太陽電池の研究開発（4接合以上の多接合型、量子ナノ構造型、ホットキャリア型、多励起子生成型、有機無機ハイブリッド型など）、②低コスト高効率化を可能にする光物理研究開発（新集光システム、光マネジメント、波長変換技術、アップコンバージョン、ダウンコンバージョンなど）、③その他の新規概念太陽電池、の課題に取り組む。

現在主流の結晶シリコン太陽電池は、変換効率20%を超えるものが販売され量産技術の開発に移りつつある。一方、CISなど化合物太陽電池も変換効率を着実に向上させ、有機系太陽電池の開発が期待されている。特に、色素増感太陽電池と有機薄膜太陽電池の中間的な構造をもつ有機無機ハイブリッド太陽電池の一つである有機金属ハ

ライドペロブスカイト太陽電池で19%を超える変換効率も報告されている。Ⅲ−Ⅴ族太陽電池は、人工衛星への搭載などの特殊な使用が主であったが、その効率は40%（集光時）を超える結果が得られており、多くの電力量を得られる発電装置として期待される。

### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

① 地域環境適合型高性能太陽光発電システム技術開発

現在、戸建住宅用太陽光発電の普及率は全体で約3.3%であるが、九州地方の普及率が6%を超える一方、北海道や北陸東北地方では普及率1%に満たない。普及率の低い地域は、低照度で総日照量が少なく、また、降雪地帯で既存の結晶系シリコン太陽電池に不向きな場所が多い。さらに、日照条件のよい地域でも強風のため基礎工事に多大なコストを要し、事業化できない場合もある。太陽電池の普及拡大には、地域環境にも適合する高性能太陽光発電の研究開発が必要である。研究開発課題は、以下の項目に集約できる。

(1) 低照度環境で高効率発電が可能な太陽電池
(2) 高温環境で発電効率が落ちない太陽電池
(3) 垂直設置でも総発電量を維持できる広入射角太陽電池
(4) 建材一体型太陽電池
(5) 簡易施工が可能な超軽量太陽電池
(6) 過酷環境時（降雪期、強風期）に保護・収納可能な太陽光発電システム
(7) オフグリッド使用に耐える蓄電・出力平準化機能をもつ太陽光発電システム

必要条件は、低コスト材料と低コスト製造が可能な太陽電池であり、薄膜系太陽電池や有機系太陽電池がベースになる。また、ハイブリッド発電を可能にする高性能インバータの設計と、出力安定化と発電ピークシフトを可能にする程度の小規模蓄電ハイブリッドシステムの開発が必要となる。低照度環境、高温環境、低入射角などの太陽光発電に不利な条件で高い発電量を維持できる太陽電池は、すでにいくつか知られている。然しながら、これまでの太陽電池の評価は、AM1.5（Air Mass1.5：地表面に垂直に届く場合をAM1として、平均的な太陽光スペクトルを示す大気距離が1.5倍であるAM1.5が世界的な基準とされている）、1 kW/m²という日照条件のよい環境を基準としており、多様な地域環境に適合する太陽電池の開発はあまり進んでいない。また、建材一体型太陽電池や軽量太陽電池の研究開発例もあるが、既存の太陽電池を建材に張り付けただけのものが多く、この状況は海外でも同様である。

② 超高効率太陽光発電の大規模広域普及に向けた基盤技術研究

新材料・新規構造などを利用して「変換効率が40%超」かつ「発電コスト７円/kWh」の研究開発を行う。すでに研究室レベルでは、3接合セルで集光システム（306倍）を利用して43.5%の変換効率が報告されているが、これを実用化するための安価かつ量産に向けた具体的なアプローチは以下の通りである。

(1) モノリシック型多接合太陽電池

・Ⅲ-Ⅴ系、Ⅲ-Ⅴ-N 系材料などで、組成制御により光波長に対応したセルを構成し

た一体型多接合太陽電池
・量子構造などの光吸収波長をチューニングした材料を用いた量子ドットタンデム太陽電池、量子ドット増感型タンデム太陽電池などの量子効果型の多接合太陽電池

(2) メカニカルスタック型多接合太陽電池
・光吸収波長の異なる複数セルを機械的に積層することで、材料の選択に自由度の高い超高効率多接合太陽電池
・材料への自由度を利用した、シリコン系材料、Ⅱ-Ⅵ族、有機系、有機無機ハイブリッドなどとの実用性の高い異種多接合太陽電池
・大面積化が可能な薄膜系異種多接合太陽電池についても検討すべきである

量子ドット構造などの新しい量子ナノ技術の導入により、変換効率60%以上の超高効率太陽電池の可能性が報告されている。ここでは量子ドット構造、超格子構造、マルチバンド材料などの量子ナノ構造や分子系ナノ材料とこれらを用いた新しい太陽電池構造の開発により、太陽光全波長利用あるいは変換時の損失低減による超高効率太陽電池の可能性を実証すべきである。具体的なアプローチを以下に示す。

(1) 中間バンド構造太陽電池
・量子ドット超格子型の中間バンド材料の開発・利用により幅広い波長域の太陽光を有効変換する太陽電池

(2) ホットキャリア太陽電池
・量子ナノ構造材料中で励起されたキャリアは伝導帯中を緩和する時間が長くなる。高いエネルギー状態のホットキャリア活用による太陽電池の可能性の実証が必要

(3) マルチエキシトン効果型（MGE：Multiple Exciton Generation）太陽電池
・量子ナノ構造により、大きなエネルギーをもつフォトンから複数のキャリアを発生させることで太陽光を効率よく電力に変換するMEG 型太陽電池の可能性の検討

また、太陽光を波長分割してそれぞれに適合した複数セルで受光・変換する、あるいは蛍光材料など波長変換材料を開発してデバイスに適合するように波長変換を行うなど、太陽光を効率よくエネルギーに変換する光マネジメント技術の可能性の探索と実証も必要である。

・フォトニック材料、フィルター/ミラー方式などで光を分割し、複数セルで受光するシステムの材料・構造の開発
・シングレットフィッション、アップ・ダウンコンバージョン材料などで太陽電池に適した波長に波長変換を行う材料を開発する。現状の太陽電池では利用されていない、光電変換概念を利用した超高効率太陽光発電の可能性を実証する。現在、日本のメーカーは多接合型太陽電池と集光システム（306 倍）を組み合わせ、43.5%を超える世界最高の変換効率を報告したが、これが海外メーカーによって数か月で塗り替えられる状況にある。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

研究内容が多岐に亘るため、単独の企業が独自で取り組むと研究投資に対する費用対効果が悪くなる。政府主導で共同研究（研究開発部分）と役割分担（市場化部分）を適切に進めながら実用化を加速することは不可欠である。また、中長期の集中研究拠点を核とし国際的な人材獲得も視野に入れた革新的な基礎研究の強化と、その成果の迅速な応用展開に向けたネットワーク連携が重要な鍵となる。そのためには国策としての総合的な研究開発戦略の企画推進力強化が不可欠である。世界の太陽電池産業全体が過酷な価格競争に巻き込まれている中で、高性能太陽電池の開発を企業だけに任せることは、国際競争上も好ましくない。諸外国でも太陽光発電の技術開発に多額の国費が投入されている現状を見ると、日本でもこのような研究開発に重点投資すべきである。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

① 地域環境適合型高性能太陽光発電システム技術開発

化合物半導体系（CIGS）太陽電池の実績[3]や、有機系太陽電池のフィールド実証試験などを通じて、これらが低照度環境でも発電量を維持できるため、現行の評価基準で同程度の定格電力の結晶系シリコン太陽電池よりもトータルの発電量を多くできる可能性が見えてきた。プラスチック基板を用いた色素増感太陽電池を基本構造として、容易に組み立て・分解収納が可能な、ユニット式太陽電池が提案された[4]。中国・韓国・台湾の企業が製品レベルの有機系太陽電池の製造を開始した一方、米国の有機系太陽電池メーカーが破綻[5]。中国・台湾では、政府の助成をもとに大学教授らが企業を立ち上げている[6]。

② 超高効率太陽光発電の大規模広域普及に向けた基盤技術研究

EUでは、基礎研究から応用研究まで幅広く研究開発を支援する第7次欧州研究開発フレームワーク（FP7 : Seventh Framework Programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities）が2007年から2013年まで7年間総額533億ユーロの予算で進められ[18]、その中の共同研究プログラムで、日本（NEDO）とEUの太陽光発電技術に関する共同技術開発プロジェクト「世界最高効率の集光型太陽電池の技術開発」に500万ユーロが提供された（2011～2014年）。マドリード工科大学（スペイン）、BSQソーラー（スペイン）、フラウンフォーファー太陽エネルギーシステム研究所（ドイツ）、PSE（ドイツ）、インペリアルカレッジロンドン（イギリス）などが参加[19]。2014年以降は2020年までの７年間総額800億ユーロのフレームワークHORIZON 2020がはじまり、太陽光発電関連の進展が予想される。

### （６）キーワード

薄膜太陽電池、有機系太陽電池、軽量太陽電池、建材一体型太陽電池、BIPV、ZEB、ZEH、超高効率太陽電池、多接合、量子ドット、中間バンド、集光、多励起子生成（MEG）、アップコンバージョン、シングレットフィッション、ペロブスカイト、光マネジメント

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・有機系太陽電池（色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池、有機無機ハイブリッド太陽電池）の基礎研究のレベルは高い。近年研究者が増え、分光法や理論的考察により各種メカニズムを明らかにする研究例が増えつつある。<br>・超高効率太陽電池の概念に係わる大学・公的機関からの研究発表は多く出ており、応用研究の下支えをしている。<br>・光マネジメントに関連する、太陽電池以外の光物理・光化学の研究が進んでおり、これも応用研究を支えている。<br>・太陽電池の研究開発目標が主に変換効率で設定されるため、超高効率を謳う研究がNEDOプロジェクトなどで支援されている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・太陽電池の変換効率をまとめたSolar cell efficiency table [8] において、色素増感太陽電池および有機薄膜太陽電池の最高効率は、いずれもシャープ（色素増感セル11.0%)、ソニー（色素増感モジュール9.9%）、三菱化学（有機薄膜セル10.0%）、住友化学（有機薄膜モジュール5.2%）といった日本メーカーの記録である通り、これらの分野での応用研究レベルは高い。<br>・シャープが今年5月、化合物3接合太陽電池で世界最高変換効率となる43.5%（集光時）を報告[20] するなど、超高効率太陽電池作製技術が蓄積されている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・薄膜シリコン系太陽電池では先行したものの、結晶シリコン系太陽電池の低価格化により競争力を保てなくなっている。CIGS系は本格的に生産が開始され、普及しつつある。<br>・有機系太陽電池では、三菱化学と大成建設によるBIPV実証検討が開始されているものの、多数販売される段階には至っていない。<br>・色素増感太陽電池では、最近日本写真印刷が色素増感太陽電池を使った照明器具の販売を開始した[9]。太陽誘電は簡単に組立・分解が可能な有機系太陽電池を開発[4]。リコーは、ICタグに搭載した試作品を発表した。<br>・海外市場に出るためには、各国の環境を十分調査する必要がある。特にシステム技術に関しては海外規格への対応が重要。<br>・超高効率太陽電池は研究開発段階にあり、産業化に向けた技術開発はまだ進められていない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・有機系太陽電池の研究例は有機薄膜太陽電池に関するものが多い [10]。<br>・米国エネルギー省の大型プロジェクトとして2007年から3年間の基礎研究助成[11] が行われて以降、大型プロジェクトは展開されていないが、多くの成果が出続けている。国立再生可能エネルギー研究所（NREL）の2010年度の太陽光発電関連予算が7969万ドル、2012年度要求額は7297万ドル[12] というように、研究所予算の裏付けがある。<br>・米国エネルギー省（DOE）の大型プロジェクトとして2007年から3年間の基礎研究助成[6] が行われて以降、大型プロジェクトは展開されていないが、多くの成果が出続けている。現在のDOEの大型プロジェクトは太陽光を利用した燃料生産に関するもの[7] だけであるが、研究所予算が手厚くなっており、NRELの2010年度の太陽光発電関連予算が7969万ドル、2012年度要求額は7297万ドル[21] というように、研究所予算の裏付けがある。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・日本企業から提供された材料を使い、カリフォルニア大学ロサンゼルス校（UCLA）が有機薄膜太陽電池セルの世界最高効率10.6%を達成[13]。<br>・CIGS太陽電池セルの変換効率は、NRELによる19.6%がefficiency table上の世界最高値[8]。<br>・Solar Junction社が世界最高の集光時セル変換効率（同率）を報告するなど、開発レベルは高い。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ○ | → | ・カドミウムーテルルを材料とする太陽電池メーカーFirst Solarが急成長し、一時世界トップシェアを占めていた。<br>・有機薄膜太陽電池を製造・販売する企業Konarkaが立ち上がっていたが、破綻[5]。<br>・国土が広いため、当面は、環境に適合した製品を開発するよりも、製品に適した環境を探すほうが容易とみられる。<br>・超高効率太陽電池は研究開発段階にあり、産業化に向けた技術開発はまだ進められていない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・有機系太陽電池の研究では、スイスおよびスウェーデンの研究機関における色素増感太陽電池の報告例が目立つ[14, 15]。<br>・基礎研究から応用研究まで包括する大型プロジェクトが進行中で、その枠組みの中で超高効率太陽電池の研究が行われている[4]。<br>・中間バンド構造型、ホットキャリア型などで実績をあげている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・Solar cell efficiency tableでアモルファスシリコン太陽電池の最高効率はスイスのOerlikon Solarによって報告された10.1%[8]。<br>・色素増感太陽電池の論文レベルでの最高効率は、スイス連邦工科大学ローザンヌ校によって報告された12.3%（2011年）[16]。<br>・2003～2008年に約1500万ユーロをかけたFULLSPECTRUMプロジェクトで、3接合セルで集光時変換効率39.7%を達成[22]。2接合セルでも32.6%。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・従来型の結晶系シリコン太陽電池で、一時世界シェアトップに立ったドイツのQセルズが破綻し、今年韓国企業に買収された。<br>・英国では色素増感太陽電池を販売する企業が現れている。スイスのSolaronixなどが色素増感太陽電池向け材料を中心事業としている。<br>・超高効率太陽電池は研究開発段階にあり、産業化に向けた技術開発はまだ進められていない。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・有機系太陽電池では、日本やスイス、米国などから帰国した研究者が多数の論文を発表している。以前は他国での研究の模倣が多かったが、最近急速に特色ある成果をあげつつある[15]。<br>・多くの人材が欧米研究機関に送り出されており、帰国して今後実績をあげていくと見込まれる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・従来型の結晶系シリコン太陽電池の製造技術を諸外国から導入。<br>・有機系太陽電池では既存技術の組み合わせで製品レベルまで製造。<br>・太陽電池の低コスト化に対する意識が高く、まだ超高効率太陽電池の応用研究には着手できていないとみられるが、今後急速に進展する可能性が高い。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・従来型の結晶系シリコン太陽電池のメーカーが世界シェア上位に並び、低価格パネル製品を大量に生産している。<br>・有機系太陽電池を製造する工場がすでに稼働状況にある[6]。<br>・超高効率太陽電池は研究開発段階にあり、産業化に向けた技術開発はまだ進められていない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・有機系太陽電池の材料の物性に関する研究報告が急増している。<br>・多くの人材が欧米研究機関に送り出されており、帰国して今後実績をあげていくと見込まれる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・サムスンSDI社が色素増感太陽電池の試作品を公表している。<br>・2010年度の太陽電池技術開発関連政府予算は642億ウォン[17]。<br>・太陽電池の低コスト化に対する意識が高く、まだ超高効率太陽電池の応用研究には着手できていないとみられるが、今後急速に進展する可能性が高い。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・ハンファグループがドイツQセルズを買収し、従来型でシェア拡大。<br>・超高効率太陽電池は研究開発段階にあり、産業化に向けた技術開発はまだ進められていない。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO). 太陽光発電ロードマップ(PV2030+). 2009年6月. http://www.nedo.go.jp/content/100116421.pdf.
2) 日本学術振興会. 次世代の太陽光発電システム第175委員会監修. 太陽電池の基礎と応用（小長井誠・山口真史・近藤道雄編著/培風館）. （2010年6月）
3) SBエナジー株式会社. 実証実験データ. http://www.sbenergy.co.jp/ja/business/attention.html
4) Tech On. 2011年10月5日. http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20111005/199012/
5) コナルカ社. プレスリリース2012年6月1日. http://www.konarka.com/index.php/site/pressreleasedetail/konarka_technologies_files_for_chapter_7_bankruptcy_protection
6) OPV Tech社. http://www.opvtech.com/en. MKE Technology社. http://www.mketech.com.tw. Taiwan DSC PV Ltd. http://www.tdp-dsc.com
7) 聯合ニュース2012年4月5日. http://japanese.joins.com/article/966/149966.html
8) M. A. Green, et al., Solar cell efficiency tables (version 40), Prog. Photovolt. Res. Appl. 2012, 20, 606.
9) 日刊工業新聞Web2012年9月12日. http://www.nikkan.co.jp/dennavi/news/nkx0320120912qtkf.html
10) J. Peet, A. J. Heeger, G. C. Bazan. "Plastic" solar cells: self-assembly of bulk, heterojunction nanomaterials by spontaneous phase separation, Acc. Chem. Res. 2009, 42, 1700.
11) 米国エネルギー省2006年公募「Basic Research for Solar Energy Utilization」. http://science.doe.gov/grants/pdf/DE-FG02-06ER06-15.pdf
12) 米国エネルギー省2012年度予算要求書. http://www.cfo.doe.gov/budget/12budget/Content/FY2012Lab.pdf
13) 住友化学プレスリリース2012年2月14日. http://www.sumitomo-chem.co.jp/newsreleases/docs/20120214.pdf
14) M. Grätzel, et al., Materials interface engineering for solution-processed photovoltaics. Nature 2012, 488, 304.
15) A. Hagfeldt, et al., Dye-sensitized solar cells, Chem. Rev. 2010, 110, 6595.
16) A. Yella, et al., Porphyrin-sensitized solar cells with cobalt(II/III)-based redox, electrolyte exceed 12 percent efficiency. Science 2011, 334, 629.

17) 亜洲経済日本語ニュース 2009年10月13日.
http://www.ajnews.co.kr/kor/view.jsp?newsId=20091013000019
18) European Commission FP7公募について.
http://ec.europa.eu/research/energy/eu/news/news_en.cfm?news=20-07-2010
19) 経済産業省産業技術環境局資料.
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001620/031_06_00.pdf
20) NEDOプレスリリース2012年5月31日.
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100129.html
21) 米国エネルギー省2010年公募「Energy Innovation Hub - Fuels from Sunlight」.
http://science.doe.gov/grants/pdf/SC_FOA_0000214.pdf
22) Photovoltaic Solar Energy： Development and Current Research.
http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2009_report-solar-energy.pdf

### ３．１．３．２　風力

#### （１）研究開発領域名

風力

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

風力発電は、風の運動エネルギーを翼などの要素を介して回転運動へ変え、その運動により電気に変換する電力変換装置で、係る各要素技術、周辺技術、さらにシステム全体を最適化する技術基盤を系統的に構築する必要がある。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

大気に循環する風の運動を電気に変換する風力発電は、風の力を回転力に変換し発電機を回転させ発電を行う。流入する風の運動エネルギーから電気エネルギーへの変換効率についてみると、風の運動からタービン回転運動への理論最大変換効率が約60%、現在の商業用風力発電機の総合変換効率は約30～40%と比較的高い。また、風力発電機に流入する風の運動エネルギーは、風を受ける面積に比例し風速の3乗に比例する。地上に対する回転軸の方向で区分され、水平軸風車、垂直軸風車と呼ばれる。水平軸風車で商業発電用としてはプロペラ型風車が主流である。垂直軸風車には、ダリウス風車、サボニウス風車のほか、垂直直線翼風車などがある。大きさは、直径1 m程度のマイクロ風車から、直径120 m、定格出力5 MW の大型風車までさまざまな大きさのものがある。さらに、設置場所も一般家庭や山小屋、単基の風力発電設備、大型商業ウィンドファーム、近年では洋上に建設される場合も増加してきた。洋上風力発電では、海底に基礎構造物を建造しその上に風車を設置する着床式風力発電と海上の浮体構造の上に風車を設置する浮体式洋上風力発電システムが存在する[1, 2)]。

風力発電研究開発領域の近年トレンドは大型化であった。先に述べた通り風車のエネルギー取得量は、風車の面積に比例するため、効率が同じ特性を示すブレード設計が可能であればブレード長さを大きくすることで発電量を大きくすることができることになる。風は上空ほど強くなるため風車の高さを高くすることで、風速の早い領域で運転することが可能となり発電量を増加させることが可能となる。そのため風車の大型化によって1機当たりの発電出力を増大させるとともに、複数機配置によってウィンドファーム全体の出力を増大させることで、全体の発電コストを低減可能となるため、ウィンドファームの大規模化が進展してきた。発電容量を大きくできるメリットがある一方で、洋上、大型化は、設置の難しさや構造上の耐久性の観点から設置コストや各部の重量、強度について新たな課題が発生している。これらの課題を解決するべく国内で大型風力発電機開発プロジェクトが実施されている。従来の陸上風力発電機においては、増速器方式の風車が主流であるが、歯車とベアリングで構成される複雑な機構で、重量がかさむことやメンテナンス頻度が多いことから、軽量かつ構造が簡便な増速機構の風車や増速機を用いないダイレクトドライブ方式の風力発電機が開発されている。また油圧ポンプを用いて、高圧の油圧エネルギーに変換し油圧モータを駆動させ発電させる油圧発電方式を用いる風力発電機も開発されている[3)]。

また、近年風車のオペレーション＆メンテナンス（O&M：Operation and Maintenance）

に係るコストは年々増加傾向にあり、その課題が明らかになってきており、O&Mに関する研究開発も国内外で進みつつある。風力発電機は約1万点におよぶ機械部品からなり、安全に運用するためには、適切なメンテナンスが必要である。特に、日本のように複雑な地形が多いサイトにおいては、乱流、台風、雷など気象条件の厳しい環境に起因する故障やトラブルが多く発生し、風車の稼働率の減少、メンテナンスコストの増大などが問題となっている。伝達系、増速機などの大きな部品については、部品調達と交換に係る時間（ダウンタイム）とコストが大きくなり、風力発電事業に対するインパクトが大きくなってしまう。今後の洋上風力発電を考えた場合には、さらに海況により風車設備へのアクセスが制限されるようになることから、風力発電機器の信頼性向上、メンテナンスの容易性なども重要なキーファクターと予想されている。

電力系統技術開発も重要とされている。風力発電は風によって出力が大きく変動することから、大量に導入された場合、発電出力変動の増大に対応すべき周波数調整能力が不足し、周波数変動が拡大する可能性があり、国内でも各電力会社の調整力の大きさに応じた導入量に制約が発生している。欧州ではTWENTIESプロジェクトにおいて、風力発電の大量導入時の系統連系制御に係る技術開発が進められており、系統連系制御に係る技術の利点と効果の検証が進められている。スペインでは、CECRE（再生可能エネルギーコントロールセンター）が設置され、GEMASと呼ばれる制御・監視システムを用いて、リアルタイムで監視・制御し、風力発電の発電電力を最大限に活用しつつ、各種電力を制御している。スペインでは、これらの集中制御システムとともに、発電量予測を併用している。FP7においても重点開発項目の一つとして発電量予測技術の高精度化を目指したSAFEWINDプロジェクトが実施されている。国内でも系統安定化を目的にした風力発電量予測高度化、系統安定運用技術開発プロジェクトが進められている。

風力発電の技術的な展望とともに、社会受容性の問題も重要な研究とされている。風力発電による騒音問題、バードストライク問題や景観の問題など風力発電の設置に伴う周辺環境への影響、地域への受容性についても国内外で多く取り上げられている。昨今、風車からの音の発生メカニズムやその予測についての研究開発やバードストライクを回避するための対策技術開発、風車が設置されることによる影響の定量的予測推定技術の開発なども進められている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

科学的技術課題として、陸上、洋上といった設置環境の多様性と厳しい気象環境に対する資源評価リスク、運用・故障リスクと信頼性の高い風車設計評価技術の確立があげられている。その上で、複数の専門分野を総合的に評価判断できる設計技術、数値シミュレーション技術の確立、発電効率の向上、大型化を実現する各コンポーネントの軽量化・高信頼性化・低コスト化、前方風計測制御による安定化、運用面をサポートするメンテナンス技術開発、最適化が必要である。また、社会受容性を加味した環境負荷の低い風力発電機の開発も望まれる。政策的観点からは、今後の再生可能エネルギー拡大を考慮した際には、風力発電事業を支えるO&M要員の圧倒的な不足が容易に予想されるため、総合的な知見を有する大学・研究所などの高等教育機関における専門家の育成は喫緊の重点課題である。また、関連して国内部品サプライヤを育成することで、地域産業

活性化を促し、部品調達時間とコストを低減できると考えられる。また、大量導入に向けた送電線などのインフラ整備、そして、気象環境が過酷な我が国だからこそ実践できている風力設計技術、O&M技術知見を活かした輸出産業化を目指すことも政策課題として重要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

日本において、NEDOによる「洋上風力発電等技術研究開発」では、我が国特有の海象条件の把握や洋上風力発電システムの実証、超大型風力発電システム技術開発、洋上観測プラットフォーム開発が進められている。またNEDO「風力発電高度実用化研究開発」では、設備利用率向上を目指した高効率メンテナンス（スマートメンテナンス）技術研究開発、主要コンポーネントの性能向上に向けた研究開発、10 MW超級大型風力発電システムに関する調査研究などが進められている。また、浮体式洋上風力発電システム開発は、環境省、経済産業省においてそれぞれ長崎県沖、福島県沖にて実証研究開発が世界を先んじて進められている。環境省では、低騒音風車開発、バードストライク対策技術開発など社会受容の高い風力発電技術開発が進められている。

三菱重工業は、英国での実証に向けた7 MW機の開発を進めている。英国アルテミス社が保有していた油圧トランスミッション技術を用いた洋上風車用油圧ドライブトレインの開発、新型ブレード開発を進めている[3)]。日立製作所は2012年より世界初のダウンウィンド方式の5 MW級洋上風力発電システムを開発し、実証試験を行っている[4)]。

欧州では、欧州フレームワーク計画（FP）にて国家横断的な技術開発が行われてきた。風車設計に係る基礎研究は、FP1（1984～1988年）から開始されており、将来的な風車設計技術の確立に向けた風車後流（ウエイク）や乱流に関する研究、フィールド試験やシミュレーション技術、風洞試験などの基礎研究開発、発電量予測評価技術、系統連系技術開発、モニタリングシステム開発、浮体式洋上風力研究なども実施されてきた。米国では、DOE Wind Programにおいて、既存陸上風車の低コスト化、安定化、系統連系安定化開発のほか、洋上風力発電のための10 MW超級風力発電機用ドライブトレイン開発、NRELにおける90 m超級ブレード試験設備の導入などを実施している[6)]。

### （６）キーワード

洋上風力発電、高効率メンテナンス、強強度軽量ブレード、発電出力予測、数値シミュレーション

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・NEDO「風力発電高度実用化研究開発」では、設備利用率向上を目指した高効率メンテナンス（スマートメンテナンス）技術研究開発、主要コンポーネントの性能向上に向けた研究開発、10 MW超級大型風力発電システムに関する調査研究などが進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・経済産業省では「洋上風力発電等技術研究開発」において、洋上風況観測及び洋上風力発電システム実証、超大型風力発電システム技術研究、洋上風況観測技術、地域共存型洋上ウィンドファーム基礎調査などの開発、着床式、浮体式洋上風車実証実験が、千葉県銚子沖、北九州沖ならびに福島県沖で行われている。福島県沖では、「浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」が行われている。<br>・環境省では「洋上風力発電実証事業」において、浮体式風力発電技術の実証（構造設計、経済性、気象・海象対応、安全性、環境影響評価、漁業協調）が、長崎県五島椛島沖で行われている。<br>・NEDOの「海洋エネルギー発電システム実証研究」として、佐賀県玄界灘で浮体式潮流・風力ハイブリッド発電の実証試験が行われている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・三菱重工業は、英国での実証に向けた7 MW機の開発を進めている。英国アルテミス社が保有していた油圧トランスミッション技術を用いた洋上風車用油圧ドライブトレインの開発、新型ブレード開発を進めている。<br>・日立製作所は2012年より世界初のダウンウィンド方式の5 MW級洋上風力発電システム開発し、実証試験を行っている。 |
| 米国[7] | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・DOEが主導し、年間数億ドルの資金を投じAtmosphere to Electrons（A2e）プロジェクトとしてコスト低減に向けた基礎研究開発が実施されている。国立再生可能エネルギー研究所（NREL）、サンディア国立研究所（SNL）、パシフィックノースウェスト国立研究所（PNNL）などが協力し、実験試験施設構築、大気科学、風況、風力発電所の空気力学、タービン技術の開発、および高性能コンピューティングなどの基礎研究が進められている。<br>・国際エネルギー機関（IEA）風力エネルギー研究開発の主要メンバとして、10分野のTaskに参加し、積極的に研究開発へ取り組んでいる。<br>・環境への影響を配慮した環境研究助成を実施。DOE PNNLでは洋上風力、海洋および流体動力学技術開発の潜在的な環境への影響について情報や研究データベースや知識管理システムを構築し、生態系DB開発など進めている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・2009年コロラド州NRELで設置した1.5 MW風力タービンにより、米国は初の大規模な風力タービンと風の技術の性能を向上させ、風力エネルギーのコスト低減を実現した。その後次世代風力発電技術としてSMARTロータ開発、先進要素技術開発としてサンディア国立研究所、大学などと連携をしてエネルギー取得効率の高い部品開発を進めている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・DOE/NRELが主導し小形風車の技術基準の確立と認証試験制度の構築、技術水準の向上と低コスト化がCompetitiveness Improvement Project（CIP）として進められている。<br>・風力発電が多くの構成要素から成る点を重視し、サプライチェーンとしての産業競争力拡充を目指した産業化推進プログラムが実施されている。製造プロセスの高度化、高効率化、量産を意識した製造からの設計アプローチ、大型風車の課題となる物流課題分析などにも踏み込んだ支援策が進められている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・大学研究所連携が進んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・先駆的に進めている風力発電であったが、近年は洋上風力において課題が多く近年はその導入が鈍化している。それらの課題を解決すべくいつくかのプログラムが進められている。<br>・SOPCAWINDプロジェクト[2)]では、風力発電が多くの科学研究分野にわたることを考慮した分野横断的なデータベース統合ソフトウェアが開発された。環境、電波障害、騒音、日照および景観などの情報を考慮し最適な風力発電施設を配置するためのソフトウェアである。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・ノルウェーのStatoilHydro社とドイツのSiemens社が、浮体式洋上風力発電（2.3 MW機）の実証（Hywindプロジェクト）を2009年からノルウェーのカルモイ沖12 kmで実施している。これは世界初の2 MW級浮体式洋上風力のフルスケール実証試験である。設計コンセプトや性能の確認を行っており、次フェーズではより大型化・軽量化した風車で大規模な実証ウィンドファームを建設し、コスト低減した浮体式洋上風力の早期の実現を目指している。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・中国風力エネルギー学会と大学との基礎研究連携が進み、実用的なフィールド試験なども進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・2007年にアジアで初となる海上風力発電モデルプロジェクト「東海大橋洋上風力発電プロジェクト」の入札を実施し、2010年2月には全発電機の組み立てが完了、同年6月に運転を開始している。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・Sinovel製の3 MW機が34基設置、総発電容量102 MWのウィンドファームが展開中。また、その他にも水深が5 m以下の沿岸域において、Rudong（30 MW）、Jiangsu Xiangshu（6 MW）、Shandong Rongcheng（6 MW）など、複数の洋上風力発電所が建設されている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・韓国電力公社（KEPCO）による中規模サイズの洋上風力発電フィージビリティ調査<br>・南西海域における2.5 GW洋上風力開発プロジェクト |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | 韓国風力発電協会が中心に下記のような研究開発を実施している。<br>・浅水域用・深水域用基礎の開発<br>・浮体式洋上風力の基礎に係る要素開発<br>・洋上風力用テストサイト（5 MW）の開発 |
| | 産業化 | ○ | → | ・大型風車、高性能ヨー制御システムの開発 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）福島洋上風力コンソーシアム. [Online]. Available :
http://www.fukushima-forward.jp/gaiyou/index.html
2）環境省ホームページ. http://www.env.go.jp/annai/kaiken/h24/s0831.html

3) 三菱重工業プレスリリース.[Online]. Available :
http://www.mhi.co.jp/news/story/1111285136.html
4) 日立製作所プレスリリース.
http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2012/07/0712.html
5) ECホームページ. http://cordis.europa.eu/fp7/projects_en.html
6) DOEホームページ. WindProgram,http://www1.eere.energy.gov/wind/index.html
7) Technology Roadmap Windenergy. IEA. 2009.
8) Wind Research and Development. [Online].Available :
http://energy.gov/eere/wind/wind-research-and-development?__utma=1.1530731217.1407689423.1407689423.1407689423.1&__utmb=1.1.10.1407689423&utmc=1&__utmx=-&utmz=1.1407689423.1.1.utmcsr=(direct)|utmccn=(direct)|utmcmd=(none)&utmv=-&utmk=214685847. [Accessed:10-Aug-2014].
9) DSIREホームページ. New Energy for America. Barack Obama and Joe Biden. 2009.
http://energy.gov/sites/prod/files/edg/media/Obama_New_Energy_0804.pdf
10) DOE ホームページ. Wind Program Newsletter.
http://apps1.eere.energy.gov/wind/newsletter/detail.cfm/__articleId=32 ） [10] , SOP-CAWIND, OnlineAvailable : http://www.sopcawind.eu/. [Accessed: 11-Aug-2014].

### ３．１．３．３　バイオマス（固体燃料、液体・気体燃料、生物設計）

#### （１）研究開発領域名

バイオマス（固体燃料、液体・気体燃料、生物設計）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

生物資源であるバイオマスの有効利用にあたり、日本は世界に先駆けた課題先進国と言える。バイオマスの利用拡大のため、以下の研究開発を推進する。

① バイオマス混焼率拡大技術：石炭火力発電における混焼率を高める粉砕、燃焼、前処理技術の確立
② バイオマス由来燃料混合利用促進技術：小規模でも高効率な利用を実現していくためのバイオマス混合利用の促進技術
③ バイオマスエネルギー増産加速化に必要な生物機能解析基盤技術：バイオマス資源の生産特性を向上させるための、生物機能解析技術ならびに新規生物設計を可能とする技術

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

① バイオマス混焼率拡大技術

バイオマスを小規模でも高効率に利用する際のもっとも適切な技術は、石炭火力発電所における混焼技術であり、我が国でバイオマス利用推進が始められた2001年以降、導入が進められた。バイオマスを大規模な火力発電所で燃焼すれば、発電効率は大規模火力の発電効率がそのまま利用できる。一方、バイオマスを供給するための付加設備のコストは、発電設備全体を構築するよりもずっと小さな額で済む。既存のプロセスを使うことのメリットを最大限利用する技術である。また、バイオマスのみを用いて発電技術を実現しようとすると、我が国においてはバイオマスの収集可能量が数 t/d～数百 t/dであることが一般的であるため、約5 MW程度の出力が最適と考えられ、容易に高効率なプロセスは構築できない。直接燃焼蒸気タービンサイクルは規模とともに効率は大きく低下し、100 kWのスケールでは発電効率は数%程度まで低下する。バイオマスの混焼は我が国で広く用いられている技術であるが、全体の熱供給に対するバイオマスの割合である混焼率はエネルギーベースで数%に止まることが多い。これは主に、粉砕が問題となっているためである。バイオマスは石炭と異なり粉砕性が悪く、バイオマスを石炭と同時に粉砕すると、粉砕動力の増加、粉砕特性の劣化が確認される。そのため、バイオマスの粉砕特性を向上させる必要がある。また、バイオマス種類により、炉の腐食につながるアルカリ金属、アルカリ土類金属が多く含有されるケースがあり、この場合には混焼率を約30～40%に制限することもある。バイオマスの粉砕性向上として、近年200～300℃で熱処理を行う半炭化が注目されている。また、燃焼に際しては、灰の溶融特性、炉の腐食特性ならびに灰の付着性を解明し、これに基づいたアルカリ・アルカリ金属含有灰に対する燃焼技術開発が求められる。研究課題として以下があげられる。

(1) 混焼前処理としての半炭化技術の確立
(2) 灰の溶融特性、炉の腐食特性ならびに灰の付着性の解明
(3) アルカリ・アルカリ金属含有灰に対する燃焼技術開発

② バイオマス由来燃料混合利用促進技術

我が国において、バイオマスの収集規模には限界があり、また、そのコストも高いため、大規模な程高効率となるエネルギープロセスにおいて、バイオマス利用は極めて不利となる。また、バイオマス由来燃料のみで利用することは設備投資が高く、そのための技術開発が求められ極めて不利となる。バイオマス由来燃料を実用的に利用し、温室効果ガス削減に資するには、小規模燃料生産を既存のプロセスで用いられている燃料と混合することを考えて行う技術開発が求められる。

バイオマス由来燃料には、気体、液体、固体燃料があるが、固体燃料は主に混焼に利用される。ここでは、気体燃料と液体燃料を生産する技術の開発を進める。気体燃料とすることで、都市ガスとの混合利用、水素エネルギーシステムとの連携が可能となる。また、液体燃料は軽油ならびにガソリンとの混合利用が進められる。

気体燃料の生産技術として期待されるものには、嫌気性発酵ガス化、水熱ガス化、高温ガス化、急速熱分解、アルコール発酵、油脂転換油があげられる。嫌気性発酵ガス化は、空気がない条件で含水性のバイオマスを発酵させる技術でメタン発酵技術に代表される。メタン発酵は確立された技術であるが、低コスト化、特殊原料発酵技術、水素発酵技術の開発が必要である。低コスト化のためには、廃水ならびに発酵残渣の処理が不要となる技術、反応速度を高める技術が求められる。また、特殊原料としては、窒素分を多くふくむ原料、塩分を含む原料の発酵が必要である。水素発酵技術の確立は次世代エネルギーキャリアとして認められている水素のエネルギーネットワークとの直接的な連携を行うものである。水熱ガス化は、高温高圧の水中でガス化を行い、含水性バイオマスをメタン発酵よりも数桁早い速度で100%近いガス化率でガス化する技術である。実証運転が行われる段階にあるが、反応機構をより詳細に確認し、タールなどの副生物生成の抑制、プラント実証と普及を進めることによる低コスト化が求められる。高温ガス化は、前の2つの技術と異なり、乾燥系バイオマスをガス化する技術である。タールの生成制御と処理を適切に行い、小規模、高効率、安価な技術が求められている。急速熱分解は、バイオマスを500℃近い温度まで急速に昇温し、即座に冷却することによって分解効率を制御して油成分を得る技術である。アルコール発酵は、エタノール発酵、アセトン・ブタノール発酵に代表される技術であり、草や木などのリグノセルロース系バイオマスからのエタノール生成技術、抽出発酵や同時糖化発酵による速度と収率の向上、濃縮効率の改善技術が求められている。

油脂燃料転換油の生産には、メタノールなどと反応させて得るバイオディーゼルならびに油脂を水素化して得る水素化バイオ燃料がある。バイオディーゼルについてはグリセリンの副生を抑制し、触媒を不要とする技術の開発、水素化バイオ燃料については反応機構の確認と適切な触媒の開発が求められている。研究開発課題を以下に示す。

(1) 嫌気性発酵ガス化

乾式メタン発酵、高温メタン発酵、含窒素化合物のメタン発酵、塩分を含む原料のメタン発酵ならびに水素発酵技術の確立

(2) 水熱ガス化

各種代表化合物の反応機構確立、相互作用の解明およびタール生成抑制技術の確立

(3) 高温ガス化

タール生成反応機構の解明とタール生成抑制ならびに処理技術の確立

(4) 急速熱分解

各種代表化合物の反応機構確立、相互作用の解明および生成油安価改質技術の確立

(5) アルコール発酵

安価な高効率糖化酵素の開発ならびに抽出発酵、同時糖化発酵技術、膜分離などの高効率濃縮技術の確立

(6) 油脂転換油

各種超臨界アルコールを用いたバイオディーゼル生産技術の確立および油脂の触媒水素化反応の機構解明ならびに安価な触媒開発

③ バイオマスエネルギー増産の加速化に必要な生物機能解析に係わる基盤技術

バイオマス資源となる生物は、デオキシリボ核酸（DNA：Doexyribo Nucleic Acid）の情報にしたがって、リボ核酸（RNA：Ribonucleic Acids）形で情報を取り出し、タンパク質を合成し、各種の生化学反応を進行、代謝を行い合成するとともに、各種の必要な反応生成物を生産している。原理的に、これらの反応のモデル化により生物の挙動を表すことができ、また、遺伝子操作により反応制御することで、所定の物質を多く生産し生物の成長速度を向上させることが可能となる。

モデル化においてもDNA情報を用いるゲノム解析、トランスファーRNAの情報を用いるトランスクリプトーム解析、生成したタンパク質の情報を用いるプロテオーム解析が行われている。現在では、酵母のような真核微生物について細胞内で起きている反応をリストアップし、定常状態を仮定した物質収支から、各反応がどの割合で進行しているかをモデル化し実際の状況を再現するレベルにある。今後、これらの反応を速度論的に表し、非定常の状態に拡張して各種の外的条件に対する応答をモデル化していく必要がある。また、これを酵母だけでなく微細藻類などの他の微生物、さらには、微生物ではない一般の植物へも展開することが求められる。研究開発課題を以下に示す。

(1) 酵母における各反応速度論的解析
(2) 酵母の外部刺激に対する反応応答のモデル化
(3) 酵母以外の微生物に関する代謝反応系のモデル化
(4) 多細胞生物への展開

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

① バイオマス混焼率拡大技術

(1) 混焼前処理としての半炭化技術の確立：半炭化そのものは確立した技術だが、最近の技術でもあり、特に混焼前処理としての粉砕性を考慮した最適化は行われていない。また、IGCCへの適用などの最先端石炭火力への応用も一部行われている段階である。
(2) 灰の溶融特性と炉の腐食特性の解明：高温の炉内を実際に観察することは容易ではなく、灰が溶融した場合にどのような挙動を示すかが確認できない。
(3) アルカリ・アルカリ金属含有灰に対する燃焼技術開発：灰が溶融しない条件での運転を余儀なくされるためにバイオマスが数十%以上の混焼ボイラでは燃焼温度を

石炭火力ほど上げることができない。灰の溶融を考慮した炉の設計、実証運転が求められている。

② バイオマス由来燃料混合利用促進技術

(1) 嫌気性発酵ガス化

・乾式メタン発酵技術の確立：低含水率のため安定な操作が困難であり、発酵阻害の影響を受けやすい。発酵阻害物質の高効率除去あるいはその無害化技術が求められる。

・高温メタン発酵技術の確立：メタン発酵は多くの微生物が共同して行う反応であり、各微生物の役割の解明および微生物叢による反応のモデル化と耐熱化が求められている。

・含窒素化合物のメタン発酵技術の確立：含窒素化合物は、アンモニアとなって発酵を阻害する。アンモニアの無毒化あるいは除去して安定運転を実現する技術が求められる。

・塩分を含む原料のメタン発酵技術の確立：海洋バイオマスの利用は、今後ますます求められる。高効率な耐塩性のメタン発酵微生物叢の確保と実証が求められている。

・水素発酵技術の確立：水素生成量に限界があり、前処理による生成率の向上、メタン発酵同様に各微生物の役割解明と微生物叢による反応のモデル化、制御が求められる。

(2) 水熱ガス化

・各種代表化合物の反応機構確立ならびに相互作用の解明：グルコース、グアヤコールなどを用いた反応機構の解明は進められているが、油脂、アミノ酸他、各種のモデル化合物による反応機構の確立が十分になされておらず、また、相互作用も確立されていない。

・タール生成抑制技術の確立：反応モデルに基づいてタールの生成機構を確認し、これを抑制する反応操作を確立することがポイントとなっている。

(3) 高温ガス化

・タール生成反応機構の確立：ガス化のモデルは確立されつつあるが、タール生成まで含めたモデルの確立には至っていない。

・タール生成抑制ならびに処理技術の確立：タール生成を抑制する技術を確立し、また、生成ガス中のタールを適切に処理する技術を開発し安定運転に資する必要がある。

(4) 急速熱分解

・各種代表化合物の反応機構の確立ならびに相互作用の解明：熱分解中の各種物質の挙動は解明されつつあるが、その相互作用まで含めたモデル化ならびに制御が求められる。

・生成油安価改質技術の確立：単純な水素化による改質は確認されている。その反応機構の確認、モデル化、制御を行う技術の開発が最適・安価な改質技術として必要である。

(5) アルコール発酵

・安価な高効率糖化酵素の開発：各セルロース結晶面に対して作用しやすい酵素を安価に製造する技術がなく、第2世代エタノールの価格が高価で実用化に至っていない。酵素開発をさらに進める必要がある。
・抽出発酵、同時糖化発酵技術の確立：発酵や酵素反応の生成物阻害を抑制しながら進行させる抽出発酵、同時糖化発酵の技術開発が低コスト化のためにも求められる。
・膜分離などの高効率濃縮技術の確立：エタノール生産では濃縮エネルギーの高コストが課題で、膜分離、吸着濃縮技術など、省エネルギー・低コストな濃縮技術が必要である。

(6) 油脂転換油
・各種超臨界アルコールを用いたバイオディーゼル生産技術の確立：超臨界アルコール使用で触媒が不要で迅速な反応実現が確認されているが、過分解の抑制、安価なプロセスの実現の観点で実用化に至っていない。
・油脂の触媒水素化反応の機構解明ならびに安価な触媒開発：油脂の水素化によって軽油相当の油が得られることは知られており、実用化プラントもあるが、反応機構の解明に基づいたより安価な触媒開発が必要である。

③ バイオマスエネルギー増産の加速化に必要な生物機能解析に係わる基盤技術

(1) 酵母における各反応速度論的解析：各酵素反応の速度論的解析のため、酵素反応の速度論を*in situ*で測定する仕組みが必要であり、また、細胞内の各器官についての変化を追う観察手法が必要である。
(2) 酵母の外部刺激に対する反応応答のモデル化：酵母の外部刺激が各酵素反応に及ぼす影響の機構ならびにその定量化が求められる。
(3) 酵母以外の微生物に関する代謝反応系のモデル化：該当微生物の遺伝子解析完了およびその微生物について速度論的解析、代謝反応系のモデル化を行う必要がある。
(4) 多細胞生物への展開：細胞間の物質や信号のやりとり、生物全体としての挙動と細胞の挙動の関連付けを定量的に行う必要がある。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）[1)]

① バイオマス混焼率拡大技術

日本では、固定価格買取制度（FIT：Feed-in-Tariff）が開始され、小規模のバイオマス専焼発電の計画、導入が進んでいる。これらには、循環流動層ボイラやストーカ炉が使用されており、糸魚川に最大50 MWのバイオマス発電所があり[2)]、さらに、約310 MWの計画が進んでいる[3)]。大規模石炭火力でのバイオマス混焼は、発電事業者がメーカーと一緒に混焼の研究、実証試験を行ってきているが、経済性の観点から約5cal%程度の混焼にとどまっている。一方、2001年～2003年に石炭・バイオマス混焼技術として5～10cal%混焼技術の開発[4)]、バイオマスエネルギー技術研究開発戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（実用化技術開発）において、2010年～2013年「バイオマス専用粉砕方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発」として、25cal%混焼技術の開発[5)]、2011年～2012年「石炭火力微粉炭ボイラに混焼可能な新規バイオマス固形燃料の研究開発」として半炭化の研究が行われている[6)]。

海外では、欧州で第7次研究・技術開発枠組計画（FP7：Seventh Framework Programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities）で、さまざまなバイオマス混焼の経験を積むプロジェクトとして、バイオマス混焼率を50cal%に高め、モニタリングするプロジェクトが行われた。バイオマス混焼、専焼の技術の開発・導入が進んでおり、すでに50cal%以上の混焼の実績がある。欧州ではコジェネレーションでの普及が進んでおり、2009年の発電実績は62 TWh（設備容量約14,000 MW）となっている。また、FP7ではトレファクションに関する研究SECTORが採択されている。米国では、省エネルギー・再生可能エネルギー局（EERE : Energy Efficiency &Renewable Energy）で10 MW、20 MWの混焼発電計画、石炭混焼率20%を目標とした研究開発が進められている。中国、韓国では目立った研究開発は行われていない。中国は、再エネ発展第12次5カ年計画で、2015年までにバイオマス電源設備を13,000 MWとする計画となっているが、農産物、メタン、ごみ焼却となっており固体バイオマスは含まれていない[7]。韓国は、2012年に定めた、電力需要の2%を再生可能エネルギー供給するために、2020年に500万 tのペレット輸入を計画している（2012年 75万 t）[8]。

石炭火力での混焼、バイオマス専焼のほか、ガス化発電、メタン発酵発電なども小規模ながら行われている。

② バイオマス由来燃料混合利用促進技術[9]

日本では、文部科学省で、植物バイオマスから酵素による原料化、バイオプラスチック創製のためのバイオマスエンジニアリング研究を、先端的低炭素化技術開発（ALCA）で、また、戦略的創造研究推進事業（CREST、さきがけ）で、超高効率バイオマス糖化、触媒技術を活用した木質系バイオマスの間接液化、藻類・水圏微生物の機能解明と制御などの基盤技術の開発が行われている[10]。NEDOの戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業では、バイオマスガス化、液体化（BTL）、微細藻類由来バイオ燃料製造の研究開発が行われている[1]。

欧州では、FP7にてサトウキビのエタノール変換（CANEBIOFUEL）、バイオディーゼル燃料製造の研究（DIBANET）、バイオマスからのDME製造（BIODME）、バイオリファイナリーによるバイオ液体燃料（GLYFINERY）などの液体燃料製造や原料栽培に関する研究が行われている。米国では、EEREにより策定された「バイオマス複数年プログラム計画（Biomass Multi-Year Program Plan）」に沿って技術開発が行われている。特に、セルロース系からのエタノール生産に重点が置かれており、セルロース系原料によるバイオリファイナリー、熱化学処理の実証、エタノール発酵用微生物、低コスト糖化酵素の開発などが行われている。米国農務省とのバイオマス研究開発イニシアティブ（BRDI：Biomass Research & Development Initiative）とも連携し進められている。中国ではセルロース系エタノールプラントの規模拡大計画が複数あり、韓国では、バイオブタノールへの燃料転換、合成油生産技術などがあげられるが、主だったプロジェクトはみられない。

③ バイオマスエネルギー増産の加速化に必要な生物機能解析に係わる基盤技術

米国DOEおよびUSDAにより13件のバイオエネルギー生産関連プロジェクトに対し、4,100万米ドル相当の研究資金が提供された。それらにはグアユールゴムのゲノム解析による生産性の安定化などに関する課題が含まれている。我が国ではJSTによるCREST、さきがけ（「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」、「二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と生産物活用のための基盤技術の創出」）および先端的低炭素化技術開発（ALCA）や、NEDOによる「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（次世代技術開発）」などにより、バイオマスエネルギー生産の基盤技術関連の研究プロジェクトが多々進行中である。

### （６）キーワード

混焼、半炭化、アルカリ金属、アルカリ土類金属、燃焼技術、灰溶融、メタン発酵、水素発酵、水熱ガス化、高温ガス化、急速熱分解、超臨界アルコール、酵素、膜分離、水素化、遺伝子組み換え、ゲノム、トランスクリプトーム、プロテオーム、発酵、遺伝子、バイオインフォマティクス

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・植物バイオマスからの酵素による原料化、バイオプラスチック創製のためのバイオマスエンジニアリング研究、戦略的創造研究推進事業（超高効率バイオマス糖化、触媒技術を活用した木質系バイオマスの間接液化、藻類・水剣微生物の機能解明と制御などの基盤技術）の開発が行われている。<br>・耐乾燥性、耐塩性など、ストレス環境下で高等植物が耐性を示すメカニズムが分子レベルで明らかにされてきており、より高い生産性をもつ植物の育種が期待できる[11)]。<br>・微生物による発酵的な物質生産では、代謝工学的な手法を導入することで、有用物質生産を支える基盤技術の確立が期待できる。<br>・バイオエタノール生産に重要な、担子菌や海洋生物由来の多糖分解酵素などに関する知見も増えつつある[12)]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・バイオマスエネルギー技術研究開発戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（実用化技術開発）において、石炭焚ボイラでの混焼、半炭化技術の開発が行われた。<br>・戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業で、ガス化、BTL、微細藻類由来バイオ燃料製造の研究開発が行われている。<br>・遺伝子操作作物の栽培試験に制約があり、産業化への移行が難しい状態である。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・大規模石炭火力でのバイオマス混焼の実証試験などを行ってきているが、約5cal%程度の混焼にとどまっている。<br>・バイオマスエネルギー研究のためのツールが産業化されているが、バイオマスエネルギーそのものの産業化例は非常に少ない。理由は、供給できる「量的」制約によるところが多く、実証試験的な試みも、企業のCSR的な観点によるものが多い。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・米国の強みは大学間、公的機関間の共同研究構築体制の巧さにあり、それが結果として基礎研究レベルを非常に高くしている。<br>・DOEおよびUSAD、さらには国防省（空軍）からの巨大予算により、コンソーシアムが展開され、基礎的な生物学から燃料回収の工学的な分野まで幅広い研究が進展している[13)]。<br>・DOE傘下のJoint Genome Instituteにおける多様な生物の遺伝子情報解析が、これらの研究の下支えになっている[4)]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・EEREで10 MW、20 MWの混焼発電計画、石炭混焼率20%を目標とした研究開発が進められている。また、バイオマス複数年プログラム計画において、セルロース系原料によるバイオリファイナリー、熱化学処理の実証、エタノール発酵用微生物、低コスト糖化酵素の開発などが行われている。<br>・外来遺伝子の導入による高機能組換え植物のフィールド栽培実験が行われている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・豊富な農業資源を元に、糖質を原料とする第一世代エタノールに関してすでに産業化のレベルに達している。<br>・バイオケミカル法を用いたプロジェクトでは、2010年度にはデモ段階およびパイロット段階のものが公表されているが、設備建設に若干の遅れがみられている。<br>・藻類由来燃料生産についてもデモ段階およびパイロット段階のプロジェクトが進行中である。しかし、石油由来製品とのブレンドでの実証試験が実施されている段階である。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・ドイツやイギリスなどを中心に、天然有機化合物の合成あるいは合成生物学的な研究で、世界をリードしているグループが存在する。<br>・北欧を中心に、多糖分解酵素など、木質バイオマスの利用に関する研究が盛んに行われている。<br>・オランダのWageningen大学を中心に、藻類由来燃料生産に関する教育・研究体制の確立が進められている[15)]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 欧州 | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・FP7で、さまざまなバイオマス混焼の経験を積むプロジェクトとして、バイオマス混焼率を50cal%に高め、モニタリングするプロジェクト、トレファクションに関する研究が行われた。また、サトウキビのエタノール変換、バイオディーゼル燃料製造の研究、バイオマスからのDME製造、バイオリファイナリーによるバイオ液体燃料などの液体燃料製造や原料栽培に関する研究が行われている。<br>・木質系バイオマスの利用を視野に入れた多糖分解酵素に関する展開が進んでおり、パイロット段階に進んでいる。<br>・閉鎖系システムによる藻類培養技術を蓄積している。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・石油メジャーによるバイオ燃料生産研究に対する投資が行われている。投資先はEU内に留まらず米国にも波及している。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・学術論文などのレベルは格段に向上しつつある。<br>・中国科学院を中心としてバイオ燃料生産に向けた藻類などの有望品種の取得が行われている。<br>・バイオマス液化技術に関しては、生産コストが高く基礎研究規模に留まっている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・稲藁などを利用した、直燃発電による中小型バイオマスガス化発電については施設件数も多く進展している。<br>・熱分解ガス化DME合成システムが実証段階にある。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・2015年までにバイオマス電源設備を13,000 MWとする計画となっているが、農産物、メタン、ごみ焼却が対象となっている。<br>・セルロース系エタノールプラントの規模拡大計画が複数ある。<br>・人件費および土地の利用し易さなどから、物質生産を目指した藻類の屋外培養池の建築が、イスラエルなどの外国資本導入により行われている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・KAISTを中心に藻類由来燃料生産に関するコンソーシアムが形成され、有望な品種のコレクションも充実しつつある[16)]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・教育科学技術部が先進的バイオマス研究開発基盤の形成を目指した施策を2010年に始動しており、燃料・素材転換技術などの研究開発を急いでいる |
| | 産業化 | ○ | → | ・2020年に500万 tのペレット輸入を計画（2012年 75万 t）。<br>・バイオブタノールへの燃料転換、合成油生産技術の開発が行われている。<br>・バイオ産業は医薬系を視野に入れた物が中心であり、バイオ燃料生産に関しては二次的な物になっているのが現状である。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）NEDO.「バイオマスエネルギーの技術の現状とロードマップ」.NEDO再生エネルギー技術白書第2版, 4章.（2012年12月）.
2）サミット明星パワー株式会社 HP. http://www.summit-myojyo-power.co.jp/index.html
3）アジア・バイオマスエネルギー協力推進オフィス HP. http://www.asiabiomass.jp/ 他
4）NEDO.「日本のクリーンコールテクノロジー石炭・バイオマス混焼技術」.（2002年3月）.
5）NEDO.「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（実用化技術開発）バイオ

マス専用粉砕方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発」.（2013年1月）.
6) NEDO. 成果報告書詳細「平成23年度－平成24年度成果報告書バイオマスエネルギー技術研究開発戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（実用化技術開発）石炭火力微粉炭ボイラに混焼可能な新規バイオマス固形燃料の研究開発」.（2014年5月）.
7) 海外電力調査会. 各国の電力事情中国.（2014年1月）.
http://www.jepic.or.jp/data/ele/ele_07.html
8) USDA. Joseph A. et al., The Asian Wood Pellet Markets.（2012年5月）.
9) 日本エネルギー学界. アジアバイオマスハンドブック.（2008年1月）.
10) 文部科学省研究開発局環境エネルギー課. バイオマス利活用施策の取組状況.（2012年2月）.
11) Todaka et al., Rice phytochrome-interacting factor-like protein OsPIL1 functions as a key regulator of internode elongation and induces a morphological response to drought stress. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2012. 10.1073/pnas.1207324109 .
12) Igarashi et al., Traffic jams reduce hydrolytic efficiency of cellulase on cellulose surface. Science. 2011, vol. 333. p. 1279-1282.
13) http://energy.gov/articles/agriculture-and-energy-departments-announce-new-investments-drive-innovation
14) http://genome.jgi.doe.gov/genome-projects/
15) http://www.algae.wur.nl/UK/Home/
16) http://chemical.eng.usm.my/ICENV2012/Ji-Won.php

### ３．１．３．４　地熱

#### （１）研究開発領域名

地熱

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

我が国は世界の活火山の約8%を擁する屈指の地熱資源大国でありながら、10年以上政策的地熱研究開発を停止していた[1)]。地熱は本来、我が国の得意分野であり、世界シェア70%を誇る地熱蒸気タービンや次々に開発中の小型バイナリー発電設備技術、各種センサや地震学の応用による革新的地下探査技術、高温掘削技術など、要素技術は高いレベルにある。今後は豪雪地帯の地熱カスケード利用技術や次世代EGS発電（後述）など、これらを恒久性の高い地熱利用システム技術に発展させ、再び世界をリードすべきである。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

我が国は1974～1992年度の工業技術院サンシャイン計画の頃まで、地熱資源量評価技術、地熱探査技術、地熱材料技術、地熱掘削技術、地熱検層技術、地熱発電技術などの地熱研究開発を体系的に進め、世界をリードしていた[1)]。この時代には日本製の地熱蒸気タービンが世界シェアの90%を占めていた。1995年には岩手県葛根田地熱地域において500℃を超える、当時、世界最高温度の地熱掘削が実施された[2)]。これらの地熱研究開発を反映して、1990年代前半には我が国の地熱発電設備容量が約210 MWから約530 MWまで、一挙に2.5倍に増大した。しかし、1997年施行のいわゆる新エネルギー特措法（RPS法：Renewables Portfolio Standard）においては、地熱が新エネルギーから除外され、これ以降、政策的地熱研究開発の予算が激減し、2002年度に停止された[1)]。その後、我が国の地熱研究開発が復活したのは東日本大震災後のことであり、10年間の空白が生じた。2013年より石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）で地熱資源開発調査事業、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）で環境配慮型高機能地熱発電の技術開発の推進として「地熱発電技術研究開発事業」が開始されている。

世界の地熱研究開発は1997年以降も拡大している。最近の特徴はイタリア、米国、ニュージーランド、アイスランドといった火山国だけでなく、ドイツ、フランス、オーストラリアといった火山の乏しい諸国が地熱研究開発を推進するようになったことである。その結果、高温岩体発電の概念を拡張し、亀裂や水の不足に加えて、熱の不足まで大深度掘削によって工学的に解決しようとするEnhanced Geothermal SystemまたはEngineered Geothermal System（敢えて訳せば涵養地熱システム、以下EGSと呼ぶ）が世界の地熱研究開発の主流となった[3)]。ドイツなどは30℃/kmといった陸域のどこでも得られる地温勾配を利用し、大深度掘削を行うことによって、地熱発電を実現した。このタイプの地熱発電はミュンヘン南郊外などの街中で建設可能であり、火山に依存せず、陸域のどこでも地熱発電が可能な時代が開かれた。

地熱研究開発は地下探査開発領域と地上発電設備領域に大きく分けられるが、両者は相互に密接に関係している。例えば、上述のように火山の乏しい諸国が地熱開発を行うようになると、温度的に蒸気フラッシュ発電の適用が難しいため、バイナリー発電設備

の研究開発ニーズが拡大するようになった。バイナリー発電設備の製造はこれまで、イスラエルORMAT社の独壇場であった。我が国では高温の地熱資源が豊富なこともあって、タービンメーカーは長らくバイナリー発電設備を製造しないままであった。しかし、国内に27,000個以上もの温泉泉源をもつ我が国はもともとバイナリー発電の市場形成に有利であった。ごく最近になって、我が国のメーカー各社が多種多様の小型バイナリー発電設備を製造するようになった。これらは地熱蒸気タービンと同じように、世界のバイナリー発電市場を席巻する可能性を秘めている。

我が国は早急に10年間の空白を埋める必要があり、具体的に進めるべき地熱研究開発課題としては以下があげられる。

1. 地熱井掘削の成功率を向上させ、地熱発電開発コストを低減するための高精度の革新的地下イメージング技術・地熱探査技術の開発。世界最先端の地震学の応用や、火山の火道の透視に成功した宇宙線ミュー粒子利用の地下イメージング技術など、我が国にはいくつもの独創的シーズ技術がある。
2. 大深度掘削時代に向けて低コスト掘削技術・高温掘削技術・掘削同時検層（Measurement while drilling）技術の開発。ドイツでは国家的プロジェクトとして自動化した大型掘削リグの開発を進めているが、我が国では地球内部をフロンティアと見なす気運に欠け、これまでこの領域での投資が弱く、今後はロボット技術の応用などが期待される。
3. 高度に持続的な地熱発電を可能にするための地熱貯留層シミュレーション技術・地熱貯留層モニタリング技術の開発。我が国では温泉との立地の競合という課題があり、細心のモニタリング技術が必要とされている。
4. 地熱発電の裾野を広げるための小型バイナリー発電設備技術。最近、国内メーカーが多種多様の設備を開発中。
5. 超小型熱電素子技術（ビスマス - テルル系など低温領域のゼーベック効果を利用した発電技術）の開発
6. 一単位の熱水系資源を高温の蒸気フラッシュ発電、中温のバイナリー発電、地域暖房、恒久的地熱融雪設備などに至るまで、高度な地熱カスケード利用によって何重にも利用するシステム技術の開発。これまでの地熱カスケード利用はアイスランドの地熱発電・地熱暖房の2段階利用程度に留まっている。
7. EGS発電など大深度を利用した次世代地熱発電技術の開発。この実用化のためには、後述の注入水損失や誘発地震リスクの克服が最大の研究課題であり、大深度掘削が前提のため、国家的プロジェクトが必要。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

前述のように、現在、世界の地熱研究開発の中心的課題は次世代地熱発電技術としてのEGS発電技術である。しかし、従来の高温岩体発電にしても、最近のEGS発電にしても、実用化に当たっては、2つの技術的課題を抱えている。1つは注入水損出であり、いま1つは誘発地震リスクである[4]。注入水損失の問題を定量的に明らかにしたのは我が国の湯沢雄勝や肘折の高温岩体実験である[5]。それによれば、注入井1坑、生産井1坑の場合、回収できる水の量は注入した水の量の30%程度に過ぎず、注入した水の70%程度が天然

の亀裂を通じて、系外に逃げてしまう。そのため、大規模な発電においては、常に大量の水を補給し続けなければならないことになり、大きな技術的障壁となる。他方、高温岩体発電やEGS発電においては、注入井から高圧で水を注入し、水圧破砕によって、地下に人工的な亀裂をつくる。これは岩石の意図的な破壊であり、小さな地震の発生は想定の範囲内である。しかし、最近、大深度井を使った水圧破砕実験において、予想外に大きな地震が起こり、社会問題となる事例が起こっている。スイスのバーゼルでは、深度5 kmの実験井を使って水圧破砕実験を行ったところ、予想外に多くの地震が起こった。そのため、注水を止めたにもかかわらず、坑底付近でM3.4の地震が起こり、建物に被害が出た[6]。EGS発電が次世代地熱発電として期待されることは間違いないが、世界のEGS発電の研究開発においては、この2つの障壁をいかにして克服するかが最大の技術的課題となっている[4]。

我が国の地熱研究開発は極端から極端に振れた歴史であった。我が国は1974～1997年度の間、世界をリードするほど、地熱研究開発に投資していた。しかし、我が国は1998～2010年度の間には、政策的地熱研究開発をほとんど放棄した。東日本大震災後、再び、地熱研究開発に大きな投資を進めようとしている。このような極端から極端へのエネルギー政策がもっとも費用対効果を低くすることは自明である。10年の空白時代の間に失われた人的・技術的損失は簡単に取り戻せない。この点から言えば、長期的な研究開発の継続性こそ、もっとも尊重されるべき政策的課題である[1]。

我が国における地熱発電の開発リードタイムは、縦割り行政の中で10年以上掛かっており、その結果、開発コストが世界標準の2倍も掛かっている。これには一元的な許認可制度を導入し、開発リードタイムを抜本的に短縮すべきである。我が国は狭い国土の約4%もの地域を国立・国定公園に定め、ほとんどの火山をこれに含めている。そのため、我が国のもっとも良質な地熱資源の多くは開発が規制されている。地球温暖化抑制・異常気象の抑制というマクロな環境政策を推進するためには、ミクロな環境政策である国立・国定公園の規制緩和が考慮されるべきである[1]。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

International Partnership for Geothermal Technology（IPGT）とは地熱技術協力に関する国際的パートナーシップであり、気候変動やエネルギー安全保障に関して、地熱研究開発を積極的に進めている諸国が相互に協力、補完し合って、さまざまな共同研究や共同プログラムを進めていこうというものである[7]。最初のIPGTは2008年にアイスランドにおいて、オーストラリア、アイスランド、米国の間で調印された。2010年にはスイスが調印した。2011年にはニュージーランドが調印した。地熱研究者のレベルでは、我が国も再三にわたって、参加を勧誘されてきた。しかし、参加資格として、各国の政策的地熱研究開発予算が確保されていることが最低の条件であり、日本はこの条件を満たしておらず、参加することができなかった。このIPGTに明瞭のように、最近では、オーストラリアやスイスといった、火山に乏しい諸国が積極的に地熱研究開発を進めている。その場合の地熱研究開発課題は必然的にEGS発電となっている。

Iceland Deep Drilling Project（IDDP）とはアイスランド深部掘削プロジェクトであり、2008年から、ポツダムのInternational Continental Scientific Drilling Project（ICDP、

国際大陸科学掘削計画）の一環として進められている。これにはアイスランドの地熱企業3社のほか、ノルウェーStatoil社などもスポンサーとして参加している。第1期にはアイスランド北東のクラプラ地域において、2008年から2009年にかけて地熱井が掘削され、深度2096 mで流紋岩質マグマに遭遇して掘り止めとなった[8]。このプロジェクトは現在のところ、世界で唯一、極限的高温領域に挑戦している地熱研究開発プロジェクトである。2013年頃からは第2期プロジェクトとして、掘削サイトをレイキャネス半島に移し、再度、掘削が進められつつある。

我が国でも、岩手県葛根田地熱地域において、1995年に深度3729 mの地熱井（WD-1a井）が掘削され、坑底温度が500℃を超えた。この地熱井は深度3100 mより深い部分で、岩石が流動的に変形するため、亀裂がなく、熱水が循環しない延性帯に遭遇した[9]。もし、この延性帯において、敢えて、水圧破砕によって亀裂を造成し、EGS発電を行えば、延性帯に包囲されているため、注入水損失と誘発地震リスクを同時に抑制できるだろう[10]。この提案がJapan Beyond Brittle Project（JBBP）として、ICDPワークショップ案に採択され、2013年3月12～16日にJBBP－ICDPワークショップが東北大学において開催されることとなった[11]。しかし、この提案はまだ本格的なプロジェクトに至っていない。

### （６）キーワード

地熱発電、革新的地下イメージング技術、低コスト掘削技術、地熱貯留層モニタリング技術、バイナリー発電技術、次世代地熱発電技術、EGS発電、注入水損失、誘発地震リスク

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・産総研は環境省予算で温泉共生地熱貯留層管理システム実証研究を、東北大学や産総研は文部科学省予算でEGS発電の基礎的研究を開始しているが、まだ緒に就いたばかりである。九州大学は古くから総合的な地熱研究を行っている。ごく最近、富山大学や弘前大学も地熱研究を開始している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・2013年度から、NEDOやJOGMECが10年ぶりに政策的地熱研究開発を再開した。NEDOはスケール抑制技術等低温バイナリー発電技術の高度化を、JOGMECは空中重力探査など地熱貯留層探査技術の高度化などを推進している。しかし、米国エネルギー省などと比べると、要素技術開発的であり、研究開発の系統性に乏しいと言わざるを得ない。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・三菱重工、東芝、富士電機の3社が世界最先端の地熱蒸気タービン技術を維持し、世界の地熱蒸気タービンの70%を供給している。<br>・多数のメーカーが国産小型バイナリー発電設備を開発し、その販売を開始した。<br>・地熱発電所の建設は1999年に、3300 kWの八丈島地熱発電所が運転を開始して以来、15年間も低迷したままである。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・米国エネルギー省地熱部は系統的かつ戦略的な研究開発課題に取り組んでおり、244もの課題を推進している。そのうち、基礎研究予算はSouthern Methodist大学の地殻熱流量の研究など、大学にも手厚く配分されている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・米国エネルギー省地熱部はGeothermal Technology Programとして、毎年数億円規模の地熱研究開発を行って来た。これが2009年には約400億円規模に拡大された。その244もの研究開発課題においては、米国地質調査所の地熱資源量評価、ローレンスバークレー国立研究所の地熱探査技術、Utah州立大学の地熱掘削技術、AltaRock Energy社のEGS発電技術、バイナリー発電設備メーカーの低温バイナリー発電技術、地熱システム開発など、研究開発課題が網羅的かつ系統的に進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・米国では地熱発電開発市場も順調に伸びており、地熱発電開発分野においては、研究開発から市場形成まで、ベンチャー企業に対しても手厚い予算配分がなされている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・イタリアやアイスランドなどを除いて、欧州は火山や高温地熱資源に恵まれていない国が多い。しかし、最近、ドイツ、フランス、スイスなど、これらの諸国が積極的に地熱研究開発を行っている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・ドイツではドイツ地球科学研究センター（GFZ）がEGS発電の研究を行い、自動化された掘削リグを開発している。ドイツでは地球内部も資源・エネルギーのフロンティアとして認知されている。<br>・スイスではEGS発電の目的で、2006 年にバーゼルにおいて深度5 km のBasel-1井が掘削され、水圧破砕の実験が行われた。このとき、予想以上に微小地震が発生したため、送水を停止したが、M3.4の地震が発生し、結果的に実験は中止に追い込まれた。しかし、その掘削深度からみても、スイス政府の地熱研究開発に対する並々ならぬ熱意が明瞭である。<br>・アイスランドではアイスランド深部掘削プロジェクト（Iceland Deep Drilling Project, IDDP）が進められ、第1期の掘削はアイスランド北部のクラプラ地熱地域で2008～2009年に行われ、深度2.1 kmで流紋岩マグマを貫き、掘り止めとなった。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ◎ | → | ・ドイツでは中規模ながら、5つの地熱発電所が稼働している。これらの地熱発電所は火山に依存せず、陸域における普通の地温勾配を利用して開発されているため、市街地に位置する地熱発電所となっている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・中国科学院や北京大学などがチベット南部、雲南省など、高温地熱資源の調査研究を行い、EGS発電研究の動きもある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・PetroChinaなどが石油天然ガス開発を背景に、大深度掘削技術をもつ。独自に蒸気タービン開発にも進出している。 |
| | 産業化 | △ | → | ・チベット南部の八羊井（Yangbajing）地熱発電所は蒸気フラッシュ発電であり、このほかのバイナリー発電設備を含めて、24 MWの地熱発電所が稼働中。インドネシアなどにおいては安価なタービンを販売し、アフリカにおいては地熱掘削会社が活躍している。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・KIGAM（韓国地質鉱物資源研究院）や各大学が、積極的に地熱探査技術やバイナリー地熱発電の研究を推進している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・KIGAM（韓国地質鉱物資源研究院）が浦項（Pohang）などでEGS発電の研究を行っており、深度2 kmを超える掘削が行われている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・蒸気フラッシュ発電が可能な地熱地帯は見つかっていない。浦項（Pohang）地域などにおいて、バイナリー地熱発電の可能性を探っているところである。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向



## （８）引用資料

1) 村岡洋文. 日本の地熱エネルギー開発凋落と将来復活の可能性. 日本エネルギー学会誌. 2007, vol.86, p.153-160.
2) Ikeuchi, K. et al., High-temperature measurements in well WD-1a and the thermal strucuture of the Kakkonda geothermal system. Japan. Geothermics, 1998, vol.27. p. 591-607.
3) Tester, J.W. et al., The Future of Geothermal Energy : Impact of Enhanced Geothermal Systems on the United States in the 21st Century. Prepared by the Massachusetts Institute of Technology, under Idaho National Laboratory Subcontract No. 63 00019 for the U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA. 2006. 358p.
4) Goldstein, B. et al., Chapter 4 : Geothermal Energy, in IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation edited by Edenhofer. O. et al., Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA, 2011. p. 401-436.
5) Kaieda, H. et al., Review of the Ogachi HDR project in Japan. Proceedings of World Geothermal Congress 2005, Antalya. Turkey, 2005, 7p (CD-ROM).

6) Häring, M.O. et al., Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. Geothermics. 2008, vol.37, p. 469-495.
7) http://internationalgeothermal.org/IPGT.html
8) Pálssona, B. et al., Drilling ofthewellIDDP-1. Geothermics, 2014, vol.49, p.23-30.
9) Muraoka, H. et al., Deep geothermal resources survey program：igneous, metamorphic and hydrothermal processes in a well encountering 500℃ at 3729 m depth. Kakkonda, Japan, Geothermics, 1998, Vol.27, p. 507-534.
10) 村岡洋文ほか. 延性帯地熱系の把握と涵養地熱系発電利用への展望. 地学雑誌, 2013, vol.122, p. 343-362.
11) Muraoka, H. et al., ICDP/JBBP Workshop. Scientific Drilling. 2014, vol.17, p. 51-59.

### ３．１．３．５　海洋エネルギー（波力、潮流、海流、海洋温度差）

#### （１）研究開発領域名

海洋エネルギー（波力、潮流、海流、海洋温度差）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

海洋は、地球表面全体の約4分の3を占めていることから太陽熱エネルギーを貯蔵し、また大気に熱を放出する役割を果たしている。海洋の表層に蓄えられた熱が海洋と大気との間でエネルギー変換されて生成された風、さらにはその風と地球の公転・自転運動によって励起された海流や波浪など、多様なエネルギー形態で膨大なエネルギーが海洋に賦存されている。主な海洋エネルギー形態である、波力、潮流、海流や海洋温度差発電の研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向 [1)-4)]

多様なエネルギー形態で海洋に内在されているエネルギーを有効的に取り出すためには、エネルギー形態に適合した方法でエネルギー変換をする必要がある。

1. 波力エネルギー

波が保有しているエネルギーの大きさは、北緯40℃前後のヨーロッパや北アメリカの西海岸近くの海洋でもっとも大きく50～90 kW/mとなっている。一方、大陸の東海岸に位置する日本沿岸では、10～30 kW/mとなっている。したがって、より大きい波のエネルギーがあるポルトガル、スペイン、イギリス、ノルウェーやアイルランドで波力エネルギーの研究開発が進められてきた。波のエネルギーを変換する方式は、ほとんど力学的エネルギーの変換で、(a)可動物体型、(b)振動水中型、(c)越波型の3種類に大別される。いずれの変換方式においても、エネルギー変換の大きさは、大きくても数100 kW程度となることからこれらの変換装置が並列的に複数配置されることになる。

可動物体型変換装置は、大きいエネルギーの直接変換となることから主にヨーロッパ西海岸に位置する国々で広く開発研究が進められている。一方、波のエネルギーが大きく変化する場合可動部がダメージを受けやすいという欠点がある。2008年以降、実用化に向けた1 MW級の波力発電装置の実証試験が盛んに行われてきたが、商用化までには至っていない。

振動水中型は、装置内に空気室を持ち、その空気室内での波の上下振動を空気の脈動流に変換した後空気タービンを用いて発電している。したがって、比較的小さい波のエネルギーの変換に適していることから、この型が日本でもっとも広く研究開発されている。また、空気のもつエネルギーが一般に小さいことから、波のエネルギーの変動に容易に追従でき、かつ台風などの異常波浪に対しても装置を安全に担保できるという利点がある。日本では、”海明（1978～1980、1985～1986）”や”マイティホエール（1998～2003)”での実証試験が過去に行われたが商用化までには至っていない。再生エネルギーへの注目から、新しいシステムの振動水中型の研究が最近行われるようになったが、実証試験のレベルまで至っていない。

越波型は、浮体の両側に張り出したリフレクターで波の振幅が増大されることによって、波を浮体前面で越波させて浮体内のタンクに海水を貯蔵し、海表面との水位差を利

用して低落差水車を回して発電している。越波型の波力発電装置は、デンマークやノルウェーで2003年から実証試験が行われているが、比較的高い波が発生する地域に限定されており、世界的にはあまり注目されていない。

いずれの発電方式も、想定される発電装置の最大規模は1 MW級で分散型となる。また、発電装置の具体的な型式は、数多く提案され、その実証試験中で商用化の段階まで到達していない。商用化されている発電装置は、振動水中型の航路標識用装置のみである。海外での実証試験は、継続中あるいは終了しているが、商用化されたのはドイツ社製の18.5 kW（×16基)しか見当たらない。

一方、国内では、実証研究は2003年にいったん終了したが、海外での実証研究に触発されて、2011年からNEDO事業で3つの発電方式についての開発研究が新たに進められ、2012年から実証試験が進められている状況で商用化の段階には入っていない。実用化に向けたフィージビリティスタディでは、発電コストを2015年 40～60 円/kWh、2020年 ～20 円/kWh、2030年 5～10 円/kWhという目標が設定されている。

2. 潮流・海流エネルギー

潮流エネルギーと海流エネルギーは、流れのエネルギーを利用するという点ではほぼ同じであるがその特性が基本的に全く異なっている。潮流の場合、その流れは周囲の地形に大きく依存し、かつ、1日に2回生じる干満の差を利用することから非定常的な流れから、一方、海流は、メキシコ湾流や黒潮流のように一様かつ巨大な流れからエネルギーを取り出すことになる。したがって、両者の特性を考慮しながら発電装置の開発が進められている。

3. 潮流エネルギー

干満の差を利用してエネルギーを取り出すことから潮流エネルギーによる発電は、比較的沿岸部の近くで行われるためヨーロッパ諸国で注目され、多くの実証試験が実施されている。ノルウェーでは、2003年から2009年まで300 kWの実証試験を行い、発電電力を電力網に接続することに成功している。さらに、その出力を1000 kWまで増大し、2012年から実証試験を行うことになっている。また、英国においても2003年、最大300 kWの発電に成功している。その後、600 kW（×2基）まで出力を増大させている。さらに、これらの発電装置を配列することによって10 MWの潮流発電を計画している。また、アイルランドにおいても1 MWの実用規模大の実証試験を2009年から行っている。アメリカや韓国においても、潮流発電の実証試験が行われている。一方、日本での潮流発電は出力10 kWという実験室レベルの出力であるが、2010年から開始されている。また、2011年からNEDO事業でより大きい出力の潮流発電が進められている。

4. 海流エネルギー

海流のもつエネルギーは膨大であるが、設置場所が沿岸部から離れていることや比較的深層になることから海流の速度などの測定、エネルギー賦存量の推定や発電装置の構想段階にあり、海流発電の実証試験はまだ始まっていない。ただ、流れからエネルギーを取り出すという共通点を考慮すると発電装置の設置方法や発電電力の送電方法さえ決まれば、急展に展開する可能性がある。

5. 海洋温度差エネルギー

海洋の表層部の温海水と深さ1000 m前後の深層部の冷海水とでは、その温度差が約10～ 25℃程度存在している。この温度差を利用して、温海水中の熱エネルギーの一部を電気に変化するのが海洋温度差発電で、基本原理は火力発電と全く同じであり、また、地熱や排熱回収としてバイナリー発電が行われている。

海洋温度差発電では、両者の温度差が20℃以上あれば、その熱変換効率は2～3%と非常に小さいながら定常的に発電することができることを実験室レベルで実証している。2013年から沖縄県久米島において50 kWの実証試験が行われている。NEDO事業で、熱交換器性能の向上により熱変換効率を改善する研究は実施されているが、具体的な実証試験が実施されるまでには至っていない。一方、諸外国の中でアメリカやフランスでは、海洋温度差発電の計画や意向は示されているが、実証試験を具体的に進める段階まで至っていない。インドネシア、台湾やインドにおいても、海洋温度差発電には興味を示しているが、実証試験や商用化に向けた具体的な計画作成までになっていない。



### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

波力エネルギーについては、ヨーロッパ諸国で1 MW級の実証試験が行われているが、商用化まで進んでいない。その要因として、可動物体型が主流であるため装置の耐久性と安定性の問題が指摘されている。さまざまな発電装置が提案されているが、各装置の特性（性能や耐久性など）を整理し、妥当な発電システムへ向けた検討が必要である。ヨーロッパでは、実海域実験フィールドが整備され、そこで性能・試験法・評価などの共通化が検討されているが、我が国にはそのような実海域実験フィールドがない。装置の性能とは別に、台風などなどの設計範囲外の波力エネルギーへの対策が必要なためコストが高くなる。また、多数の小規模分散型装置のため、大規模発電が難しいことや送電線への接続が難しいことがあげられる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

日本では、NEDO事業の支援を受けて、海洋エネルギーの波力、潮流に関するフージビリティスタディを終了し、発電コストの見通しが公表された。さらに、実証試験が大学などの研究機関と企業が共同して行われようとしている。海洋温度差発電については、沖縄県久米島にて50 kWの実証試験が継続中であり、ハワイでは、10 MWの実証試験の計画がある。

欧州では、可動振動型の実証試験をほぼ終了し、その成果を踏まえて商業化を進めようと計画しているが、具体的な進展についての報告はみられない。

### （６）キーワード

海洋エネルギー、波、潮流、潮汐、海流、温度差、エネルギー変換

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・大学や研究所にて活発な研究が行われている。発電方式について、さまざまな形式が提案されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・大学と企業が協力して、NEDO事業での支援を受けて実証試験が開始されようとしている。 |
| | 産業化 | × | → | ・実用化については、実証試験での成果次第である。コストが大きな課題で、実用化は20年先となると考えられる。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・大学や研究所での研究はなされているが、一部に限定されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↘ | ・潮流に関する実証試験が行われている。 |
| | 産業化 | × | ↘ | ・実用化のレベルまで到達するにはさらなる実証試験が必要となる。 |
| 欧州 | 基礎研究 | △ | ↘ | ・基礎研究はほぼ終了し、実証試験に進んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↘ | ・2008年から欧州各国で波力発電の実証試験が実海域で実施されたが、2012年頃からに実証試験を終了している。 |
| | 産業化 | △ | → | ・小型の波力発電装置が商用化された。<br>・可動振動型については一部実証試験を終了後、商業化へは進んでいない。 |
| 中国 | 基礎研究 | × | → | ・研究活動や成果が公表されていない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・1980年に中国初の潮汐発電の実験プラントが完成したが、それ以降活動がみられない。 |
| | 産業化 | × | → | ・商業化に関する情報は見あたらない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・2010年以降大学や研究機関での活発な研究報告がみられる。 |
| | 応用研究発 | △ | → | ・実証試験へ向けた報告はあるが、実際に行った結果は公表されていない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・2011年世界最大の潮汐発電が運転開始した。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）KANRIN 日本船舶海洋工学会誌. 第41号, pp.7 - 31. （2012年3月）.
2）木下健（編）. 海洋再生エネルギーの市場展望と開発動向. サイエンス＆テクノロジー社. （2011年）.
3）NEDO.「海洋エネルギー技術研究開発」基本計画と実施計画. n.d.
4）平成25年度NEDO新エネルギー成果報告会.「海洋エネルギー技術研究開発に関わるNEDOの取り組み. （2013年12月）.

## ３．１．４　高品位エネルギーの安定供給（エクセルギー、セキュリティ、負荷平準化、環境負荷低減）

### ３．１．４．１　重質油の高度利用

（１）研究開発領域名

重質油の高度利用

（２）研究開発領域の簡潔な説明

将来の燃料油需要の低下および我が国のエネルギーセキュリティに対応するため、在来型の石油系重質油に対しては付加価値の高い化学品への変換技術の、カナダのビチューメンに代表される非在来型超重質油に対しては製油所での処理を可能とするアップグレーディング技術の基盤的技術開発を推進する。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

環境負荷低減の観点から安定的に高品位な燃料またはエネルギーを供給することは不可欠である。重質油は一般に、そのまま重油の基材として用いられたり、分解によりアップグレードされガソリンや灯軽油の燃料油に変換されたりする。日本における将来の燃料油需要は数%/年の割合で減少し、中でも重油需要がもっとも大きく減少すると予測されているため [1]、重質油を燃料以外の高付加価値品へ変換する研究開発を推進する必要がある。

重質油を分解する流動接触分解装置（FCC：Fluid Catalytic Cracking）においては、付加価値の高いプロピレン増産を目的に、中国石油化工集団（CINOPEC）が開発したDCC プロセス（Deep Catalytic Cracking）[2] および UOP（米国）が開発した PetroFCC プロセス [3] がすでに商業化されている。近年我が国では、JX 日鉱日石エネルギーがプロピレンを増産する HS-FCC プロセスの実証化に成功している [4]。これらは重質油から直接化学品（オレフィン類）を製造するプロセスであるが、一方でこれらプロセスから生成する多環芳香族を含んだ分解軽油（LCO：Light Cycle Oil）などの更なるアップグレーディング技術の開発が近年行われており、将来的にも重要な研究と言える。例えば、NOVA Chemicals を中心とした北米の研究グループは重質軽油から水素化分解により BTX（ベンゼン、トルエン、キシレン）を製造する ARORINCLE プロセスを開発し、パイロットスケールまで進んでいる [5]。また CINOPEC も同様な水素化精製による LCO からの BTX 製造に着手した [6]。日本では JX 日鉱日石エネルギーが、LCO を水素を使用せずに分解して BTX を製造する FCA プロセスの開発に取り組んでいる [7]。

また、資源に乏しい我が国においては、エネルギーセキュリティの観点から非在来型資源である超重質油（ビチューメン、オリノコタールなど）の処理を可能とする改質技術の開発に取り組む必要がある。井戸元の権益を獲得する場合、単なる投資のほかに改質技術が要求されることもあり、このような技術開発は上流部門に対しても大きく貢献できる。

超重質油の改質技術の商業化実績はいくつかあるものの、熱分解、水素化分解、溶剤抽出などのさまざまなタイプのプロセスが現在でも積極的に開発されている。特に北米での開発が先行しており、Headwaters 社はアップフロー型の水素化分解固定床プロセ

ス（HCAT プロセス）を開発し、すでに商業化している[8]。Ivanhoe Energy 社（カナダ）は井戸元設置を前提とした熱分解型プロセス（HTL プロセス）を開発し、実証化運転が終了している[9]。欧州では、Ellycrack 社（ノルウェー）による Viscositor プロセス（熱分解）のパイロット評価が終了し[10]、Eni 社（イタリア）は水素化分解スラリー床プロセス（EST プロセス）を開発し、商業化している[11]。中国では中国石油大学と CINOPEC による超臨界溶剤抽出法を用いてアスファルテン除去を特徴とした SELEX-ASP プロセスが開発され、実証化レベルにある[12]。日本においては、超臨界水を用いた改質プロセス開発が日揮により行われており、カナダでのパイロット試験が終了している[13,14]。さらに千代田化工建設らによるスラリー床水素化分解プロセス（SPH プロセス）がベンチスケールで開発されている[15,16]。このように超重質油のアップグレーディングプロセス開発においては、日本はやや遅れをとっており、他社プロセスよりもいかに経済性が高いプロセスを開発するかがカギとなる。

重質油を主基材とする舶用燃料（C 重油）の硫黄分に関して、第 58 回海洋環境保護委員会の審議の結果、現行の上限値 3.5%に対して、新たに 0.5%とすることが決定された[17,18]。この規制に対応するためには、南方系の低硫黄原油の処理だけでは量的に不十分であり、中東系原油の重質油を従来よりも過酷な条件で水素化精製する必要がある。したがって、既存の残油脱硫装置の強化に伴い、製油所全体のフローが大きく変わる可能性がある。

以上の動向を踏まえ、公的資金を用いた重質油の有効利用に関する具体的な研究開発課題として以下があげられる。

1. 重質油分解から生成する多環芳香族の高付加価値化
   FCC 装置から生成する分解軽油（LCO）や分解重油（CLO：Clarified Oil）からの化学品（BTX）製造プロセスの開発
2. 超重質油の改質技術の確立
   ビチューメンなどの超重質油を在来型原油と同などに処理できるコスト競争力のある改質技術の開発
3. 環境規制に対応した重質油処理技術の強化
   残油直接脱硫装置における高性能触媒の開発および製油所全体の最適処理フローの確立

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

1. 重質油分解から生成する多環芳香族の高付加価値化

   既存の FCC 装置と BTX 製造を目的としたアップグレーディング装置の組み合わせであり、FCC 装置における運転条件により原料となる多環芳香族の性状が変化し、最終的な BTX 収率に大きく影響する。したがって、両者の最適化が大きな課題である。また、後段装置では多環芳香族を原料とするため、高 BTX 選択性はもとより高寿命触媒の開発が不可欠となる。

2. 超重質油の改質技術の確立

   いまだ、基礎研究の段階であり、実証化までのスケールアップにおいて系内の均一性、ライン閉塞などのエンジニア的課題がある。また、改質生成油が既存製油所でど

の程度処理可能かという検証も行う必要がある。

3. 環境規制に対応した重質油処理技術の強化

船舶大気汚染防止に関する舶用燃料の硫黄分規制は、暫定的なものであり、後処理として排ガス洗浄装置の設置による SOx 低減も可能としているため、今後の対応が流動的である。したがって、重質油処理の強化技術開発をすぐに行うよりも、まずは硫黄分規制が既存製油所にどのようなインパクトを与えるかの調査研究から進めるべきと考える。

## （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・JX 日鉱日石エネルギーが水島製油所にて、重質油処理量 3,000 バレル/日の実証化試験を実施した [4, 19]。
・2013 年 Eni 社の EST プロセスが Sannazzaro de Burgondi 製油所（イタリア）で初めて商業的に採用され、稼働した [11]。
・ロシアのニジネカムスク製油所において、KBR の残油スラリー床水素化分解プロセス（VCC プロセス）の導入が決定し、2016 年稼働予定 [20]。
・軽油と潤滑油の併産を目的に、National Refinery Ltd.社が製油所（パキスタン）に UOP の Uniflex プロセスを採用し、2016 年稼働予定 [21]。

## （６）キーワード

重質油、残油、流動接触分解、水素化分解、スラリー床、プロピレン、BTX、舶用燃料、硫黄分規制、分解軽油

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・超臨界水による超重質油の改質研究に対して大学や国立研究機関に公的資金が投入されている[22]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・JX日鉱日石エネルギーによる、水素を用いない独創的なFCAプロセス（LCOからBTX製造）がほぼ確立されつつある。<br>・千代田化工建設による、超重質油のスラリー床水素化分解プロセス開発が開始した。<br>・日揮の超臨界水による超重質油改質プロセス開発が、パイロットスケールまで進んでいる |
| | 産業化 | ○ | → | ・JX日鉱日石エネルギーによるHS-FCCプロセスの3,000バレル/日実証化試験が終了し、世界レベルに達している。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | ↘ | ・米国本土における大学などの基礎研究は近年減少し[23]、逆にカナダやメキシコにおける研究が盛んである。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・Chattanooga社は水素を用いてビューメンから合成原油を製造する流動床プロセス開発においてパイロット試験まで進んでいる[24]。<br>・Western Research InstituteがWRITEプロセス(熱分解)の実証試験3,000バレル/日をカナダで実施する[25]。<br>・電子線放射による重質油の分解というユニークなプロセス開発をPetrobeamが行っており、パイロット試験まで終了している[26, 27]。<br>・上記以外にカナダにおいて多数の超重質油改質プロセス開発が行われている[28]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・プロピレン増産型のPetroFCCプロセスおよび超重質油改質のUniflexプロセスをUOPが商業化している[3, 29]。<br>・Headwaters社の超重質油改質プロセスHCAT（スラリー床）が商業化されている[8, 30]。<br>・KBRの超重質油改質プロセスVCC（スラリー床）がロシアで2016年商業化予定[20]。<br>・エネルギー省（DOE）の援助を受け、Ceramatec社のアルカリ金属を使用した残油改質プロセスが商業化検討することになった[31]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・重質残油の改質に関する研究は欧州各国で行われているが、北米のレベルまでには至っていない[32, 33]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・Eni（イタリア）などのプロセスライセンサーと大学とが共同研究している場合が多い[34-36]。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・Eniが重質残油の改質プロセス（EST）を商業化している[11]。<br>・Ellycrack社（ノルウェー）の残油熱分解プロセスViscositorが実証化段階に来ている[10]。 |
| 中国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・中国石油大学などを中心に精力的に基礎研究が行われている[37-38]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・CINOPECを中心に企業や大学で新規プロセス開発、既存プロセスの改良などを活発に行っている[6, 39-42]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・CINOPECが開発したプロピレン増産型FCCプロセスがすでに商業化されている[2]。<br>・超臨界溶剤抽出による超重質油の改質プロセスSELEX-ASPがすでに商業化ベースにある[12]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・大学などで基礎研究は実施されているがレベルは低い[43, 44]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・既存設備の効率化に向けた研究を実施している[45, 46]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・外部からのプロセス導入が主で、自国での開発はみられない。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 平成25～29年度石油製品需要見通し（総合資源エネルギー調査会）. n.d. http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/sekiyu/shijo_chosa/pdf/011_s01_00.pdf
2) L. Yujian et. al., “Advances in DCC Process and Catalyst for Propylene Production from Heavy Oils”. China Petroleum Processing and Petrochemcal Technology, Vol. 13(1), 1-5 （2011).
3) UOP HP. http://www.uop.com/integration/
4) Y. Fujiyama et. al., “Process development for integration of refining and petrochemical pro-duction”. TOCAT7 KYOTO2014. IL-B02. （2014).
5) http://www.docstoc.com/docs/74205833/Technology-for-Producing-Petrochemical-Feedstock-from-Heavy
6) 第6回日中韓石油技術会議. （2013）. http://www.pecj.or.jp/japanese/overseas/conference/pdf/conference12-05.pdf
7) JPEC報告書（2013）：分解軽油等新規アップグレーディングプロセスの開発. http://www.pecj.or.jp/japanese/report/2014report/h26data/1.1(3)-2.pdf
8) http://www.headwaters.com/data/upfiles/download/HW_HTI.pdf#search='HCAT+headwaters'
9) E. Veith, “Releasing the value of heavy oil and bitumen; HTL upgrading of heavy to light oil”. World heavy oil conference, p727 Beijing. China. （2006）.
10) http://www.bloomberg.co.jp/article/2009-10-05/a9YjQM6GFJIs.html
11) http://www.eni.com/en_IT/company/operations-strategies/refining-marketing/refining-rf/refining-marketing-refining.shtml
12) http://pubs.acs.org/doi/ipdf/10.1021/ef2003359
13) JOGMEC 平成24年度業務実績報告. http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004005/pdf/032_03_00.pdf
14) http://www.kagakukogyonippo.com/headline/2013/12/24-14066.html
15) JPEC報告書（2013）：先進的超重質油改質（SPH）プロセスの開発. http://www.pecj.or.jp/japanese/report/2014report/h26data/1.1(3)-1.pdf
16) 藤井重孝, 安室元晴. 化学工学, 78(1), 35-37. （2014）.
17) http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000003.html
18) http://www.mlit.go.jp/common/000025280.pdf
19) http://www.noe.jx-group.co.jp/company/rd/intro/nenryo/e71_cordinne_fcc.html
20) http://www.businesswire.com/news/home/20120215005649/ja/

21) http://www.uop.com/?document=more-value-from-the-bottom-of-the-barrel&download=1
22) http://www.pecj.or.jp/japanese/report/2008report/08S4-2.pdf
23) 例えば　W. Montgomery et. al., Fuel, Vol. 113, p426-434. （2013）.
24) http://www.chattanoogaprocess.com/documents/Chattanooga_Process.pdf#search='chattanoogaprocess'
25) http://www.westernresearch.org/uploadedFiles/News/Daily%20Oil%20Bulletin%20-%20MEG%20Demo.pdf
26) http://www.petrobeam.com/technology.html
27) Y. Zaikin et. al., Radiation Physical and Chemistry. Vol. 84, p6-9. （2013）.
28) L. Castaneda et. al., Catalysis Today. Vol. 220-222, p248-273. （2014）.
29) http://www.world-petroleum.org/docs/docs/petrofed2012/Presentation/session%202/1_Soumendra%20Banerjee.pdf#search='UOP+uniflex'
30) http://www.headwaters.com/data/upfiles/download/HW_HTI.pdf#search='headwaters+HCAT+process'
31) http://www.energy.gov/fe/articles/innovative-technology-improves-upgrading-process-unconventional
32) H. Luik et. al., Fuel processing Technology. Vol. 124, p115-122. （2014）.
33) A. Hart et. al., Fuel, Vol. 119. p226-235. （2014）.
34) C. Ferreira et. al., Fuel, Vol. 129. p267-277. （2014）.
35) T. Nguyen et. al., Chem. Eng. Sci.. Vol. 94. p214-223. （2013）.
36) R. Caniaz et. al., Chem. Eng. Res. Des. in press. （2014）.
37) http://www.pecj.or.jp/japanese/overseas/conference/pdf/conference06-17.pdf
38) Y. Liu et. al., Fuel Processing Technology, Vol. 106, p281-288. （2013）.
39) http://www.asiam.co.jp/news_oilgas.php?topic=014102
40) W. Chen et. al., Fuel, Vol. 106, p498-504.（2013）.
41) http://www.pecj.or.jp/japanese/overseas/conference/pdf/conference06-22.pdf
42) http://www.pecj.or.jp/japanese/overseas/conference/pdf/conference04-05.pdf
43) J. Lee et. al., Fuel Processing Technology, Vol. 119, p204-210. （2014）.
44) H. Eom et. al., Fuel, Vol. 126, p263-270. （2014）.
45) http://www.pecj.or.jp/japanese/overseas/conference/pdf/conference12-09.pdf
46) http://www.pecj.or.jp/japanese/overseas/conference/pdf/conference06-23.pdf

### ３．１．４．２　低品位石炭資源の革新的な改質・輸送・転換技術とエネルギー・製鉄分野への利用

#### （１）研究開発領域名

低品位石炭資源の革新的な改質・輸送・転換技術とエネルギー・製鉄分野への利用

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

埋蔵量が多い一方で、高効率・大規模利用が進んでない褐炭の革新的改質（アップグレーディング）技術（＝負物性（高含水率、自然発火性など）の消去、正物性（高熱化学反応性など）の強化、新物性の賦与）、改質褐炭の物性を最大限活用する電力・燃料・素材などへの高効率・高付加価値転換技術、ならびに、改質・転換技術の実装を可能とする長距離輸送技術の開発（基盤研究を含む）などを含む。また、製鉄分野としては、高炉法による銑鉄製造に必要なコークスの高強度化を図ることは、$CO_2$排出量の削減のために必要不可欠である一方で、石炭価格の高騰や良質資源の枯渇が懸念され、海外に賦存する劣質・未利用固体炭素資源を原料とする高強度コークス製造が今後ますます重要となる。劣質だが安価な固体炭素資源の前処理やバインダー添加により、高強度かつ低コストで、新規なコークス製造技術開発を実現する技術が望まれる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

褐炭は、石炭総確認可採埋蔵量の約1/4を占めるが、現在に至るまでの利用量はごく一部であり、国際取引は限定的である。それ故に、褐炭の大規模・高効率利用とバリューチェーンは、そのための技術とシステムを開発、実装できれば、我が国におけるエネルギー資源の多様化と安全保障、産炭国との相互的互恵関係の構築、世界的な省資源に貢献する。我が国は、中長期的に供給逼迫の可能性が高い瀝青炭・亜瀝青炭の依存から脱却すべきである。本研究開発領域には、褐炭の革新的な改質、燃料・素材への転換および輸送技術が含まれるが、以下には基盤技術確立と実装のための応用研究開発が重要と考えられる技術を述べる。

褐炭が「低品位」であるのは、高含水率（低発熱量）、乾燥後の自然着火性、アルカリ・アルカリ土類金属含有などの、プロセスの性能、安定性、安全性に負の影響をもたらす物性（負物性）に由来する。一方、有機質や無機成分に目を向けると、褐炭は瀝青炭などの高品位炭にはないユニークで優れた物性（正物性）をもつ。正物性を最大限活用した転換は、従来の石炭利用にはない高効率・クリーンなエネルギー転換や素材製造、すなわち、高品位炭の代替としての価値を大きく超えた高付加価値利用を可能にする。これまでの褐炭改質は、負物性の消去、減衰を目的とするものが多いが、今後は、正物性を活用する改質・転換、さらには正物性の強化、新たな物性の賦与を可能とする改質技術[1)]を獲得し、加えて、採掘から最終転換にわたるバリューチェーンを構築する必要がある。

「乾燥・脱水」は負物性消去のための最重要技術である。蒸発式乾燥では、乾燥のための燃料投入を限りなくゼロに近づける低温ボイラ廃熱や太陽熱を活用し、空気風量（動力）を最小化する低温（～100°C）乾燥技術[2)]、潜熱を再生するヒートポンプ技術[3)]が、一方、非蒸発式乾燥では、新物性賦与（有機質組成・構造改質、無機質除去）機能を強

化し、より温和条件での操作を可能とする水熱処理[4]、そして、溶剤利用脱水（水と水溶性あるは非水溶性溶剤との置換による脱水）技術[5]が特に重要である。いずれの技術も廃水処理・水溶性有機物の転換利用、乾燥・脱水後の自然着火防止を含めたエネルギー消費・コストの最小化と改質褐炭の付加価値最大化が鍵となる。アルカリ・アルカリ土類の除去は、これを脱水と組み合わせることによって褐炭に新たな価値を付加するが、除去を可能とするためには酸性水が必要であるため、$CO_2$由来の炭酸や有機酸を利用する技術が求められる。

乾燥・脱水褐炭には自然発火を防止するための後処理が必須である。冷間[6]あるいは熱間[7]（>100°C）の成型（ブリケッティング）、低温乾留（熱分解）[8]はもっとも合理性のある処理である。冷間成型には、残留水分の量最適化や安価な発火防止剤添加の技術が求められる。熱間成型は、自然発火性を抑制し、同時に高強度炭化物（コークスなど）に転換可能なブリケット製造法[7]として期待される。低温乾留は、褐炭を揮発成分が適度に残留する低煙、無煙燃料に改質できる[8,9]ので、燃焼だけでなく、次世代の低温ガス化用燃料としての付加価値を褐炭に与えるが、併産するオイル（タール）の高付加価値化、高度利用技術を併せて開発する必要がある。後処理を不要にすることも可能である。乾燥褐炭の輸送（山元～港湾～タンカー輸送～利用サイト）をすべて不活性雰囲気中で行えば、乾燥後処理をすることなく自然発火を防止できる。

褐炭は、適切な溶剤を選択すれば、従来の液化よりもかなり低温、低圧で有機質の大部を溶解でき、褐炭に熱可塑性（軟化溶融性）、超低灰分という新物性を賦与する[10]。Hypercoal[11]は溶剤改質（脱灰）褐炭の代表例であるが、新物性を活用した経済性のある適用先（プロセス）の選択と実証が必要である。一方、水系溶剤中の転換はいまだ基礎研究の域にあるが、ポテンシャルは高い。先述した改質や乾留では、有機物を比較的高い濃度で溶解した水が不可避的に発生する。固体触媒を利用した水熱ガス化[10,11]は、有機物を積極的に転換する方法として期待できる。褐炭はアルカリ性水溶液への溶解性が高いので、水熱ガス化はリグニン（黒液）転換などの次世代技術と共通基盤をもつ。水溶液は、酸性、アルカリ性のいずれの場合でも、水電解において電圧降下剤（非酸化剤）として働き、化学エネルギーを純水素に変換[12]できるので、電力・化学エネルギー統合も視野に入れるべきである。

ガス化（気固系）は、燃焼とともに褐炭をもっとも大規模に活用できる技術として期待される。技術的にかなり成熟した高温ガス化（噴流床ガス化）技術への褐炭適用は検討事例[13]がすでにあり、流動層ガス化でも実証研究[14]が進んでいる。褐炭の正物性、改質褐炭の新物性を最大限活用きるのは、次世代の低温ガス化とこれを組み込んだ複合サイクル（A-IGCC、A-IGFC）[15]である。最近提案された超高効率のガス化燃料電池複合サイクル（S-IGFC）[16]には、触媒能を強化した無煙化褐炭は至適原料と考えられる[17]。基礎研究段階ではあるが、従来よりも大幅にエネルギー効率を向上した低温ガス化法[17-19]が提案されており、スケールアップ研究が期待される。

開発に先立っては、褐炭を何処でどの状態まで処理、改質、転換すべきかを総合的に検討する必要がある。褐炭を化学エネルギーあるいは炭素資源として我が国に持ち込むシステムには、部分的に乾燥した褐炭から水素[20]や液体燃料までの多様なオプションが存在する我が国が資源購入のバーゲニングパワーを獲得、維持するための戦略は単純で

はない。

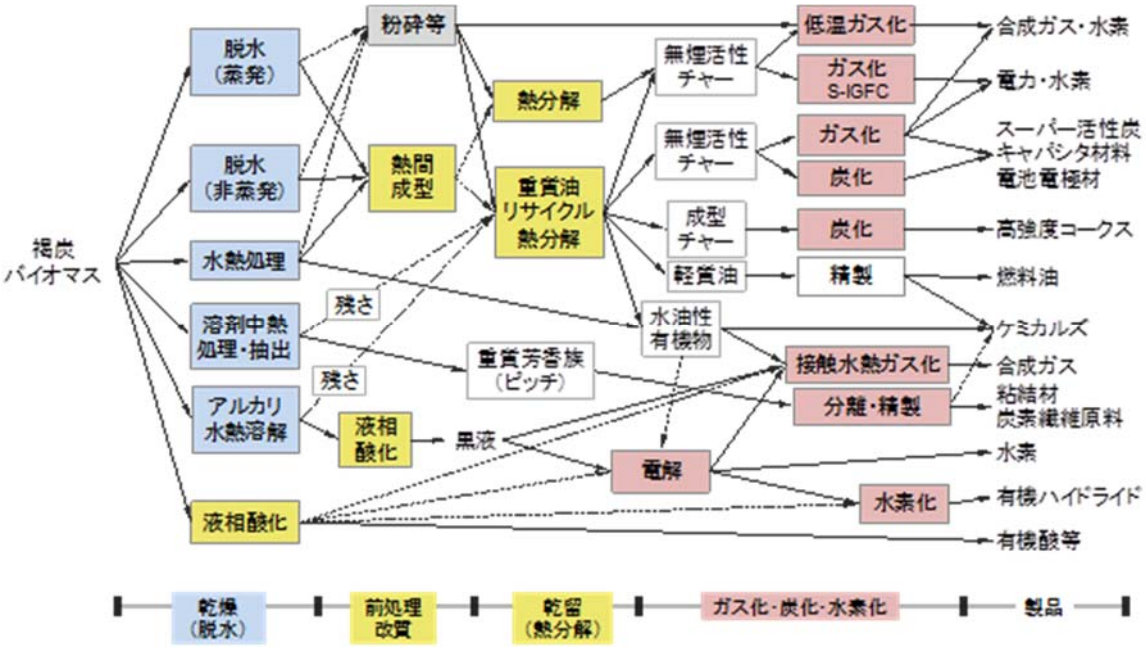



**図 1. 負物性消去、正物性強化・賦与を伴う前処理・改質・転換のスキーム例。資源付加価値、製品オプションが連鎖的に発生する。**

このような状況の中、製鉄分野としては「革新的製鐵プロセス（COURSE50)」や「革新的塊成物（フェロコークス）製造プロセス」に代表される我が国独自の製銑技術開発は、今後の我が国の工業社会を支える基盤技術と位置づけられている。これらの技術の実現のためには、高炉内で高反応性かつ高強度な品質をもつコークスを製造する技術開発が要求される。近年の世界的な鉄鋼需要の増大や、良質資源の価格高騰により、我が国の鉄鋼製造業分野においては厳しいコストダウンが要求され、原料費が価格に占める割合が 7 割を超えるまでに達し、利益が上がりにくい状況にある。この現状を打開し、高品位な鋼材の国際競争力をいっそう高めるためには、原料費の抑制が急務である。鉄鉱石のメジャー支配が進む中で、鉄鉱石還元剤となる固体炭素資源については低品位・未利用炭を含めればまだまだ資源は豊富であり鉄鉱石ほどの不安はない。しかし、高強度なコークス製造に必要不可欠な良質な粘結炭は、資源が石炭中の 2 割程度と少なく、価格も一般炭よりも高値で推移している。このため、鉄鋼メーカーは少しでも安価な劣質・未利用固体炭素資源の利用を目指して、石炭配合技術の開発や「次世代コークス製造技術（SCOPE21)」によるコークス炉建造を行い、コークス品質を維持しつつ原料費低減を目指している。コークスの工業的強度の指数であるドラム指数（DI：drum index）は、高炉の管理上重要であるが、DI が 1%増加すれば銑鉄 1 t 製造に必要なコークス（燃料）の量を 1.71%減少させることが可能であり、このため、鉄鋼各社は高強度なコークス製造を目指した技術開発を行っている。日本鉄鋼連盟における COURSE50 でも、高強度コークスが指向され、将来状況を見込んだ高炉法においても DI の増加要求は大いに求められている。しかし、劣質な石炭原料を使用すれば DI の減少を招き、結果的に高炉操業の不安定化やトータルでのコスト増加につながるため、原料価格の面で有利な劣

質な石炭を多量使用するには至っていない。日本鉄鋼協会では、劣質・未利用炭素資源を用いた場合においても強度を維持できる機構を見出すため、大学と企業の共同研究により、基礎研究を実施してきた。欧州では ULCOS（Ultra-low Carbon Dioxide Steelmaking）や IDEOGAS などのプロジェクトが立ち上がり、企業や大学の広範囲なネットワークのもと、低炭素排出製鉄研究が進められている。中国では人件費が低いことからまだ具体的な研究開発の動きは乏しい。韓国では直接還元技術開発を積極化させているが、技術的困難に直面している。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

短期的には、国内石炭火力などへの褐炭（改質褐炭）の早期導入がなされるべきであり、海外向けでは、欧州などへの輸出が行われようとしている超々臨界圧微粉炭火力[21]、IGCC、オンサイト乾燥技術のさらなる改良と新規技術導入が重要である。前者の場合、技術・システム開発には確実性が期待できるが、実装には産炭地から港湾への輸送インフラなどの開発・整備が不可欠であり、大規模プロジェクト実施には政府の決断が必要になる[22]。

中長期的には、負物性消去、正物性強化、新物性賦与の概念に基づく各種の改質および転換技術を開発、次いで、これらから成る「付加価値が連鎖的に発生する」プロセスのシーケンス、ネットワーク（図1[23] を参照）を構築し、従来のエネルギー・資源効率を大幅に上回る電力、燃料、素材供給システムを我が国と産炭国に実装すべきである。改質および転換技術の基盤研究は、産学連携体制をもって可能な限り早急に、組織的に開始すべき課題である。他の重質炭素資源転換技術に関しても同様だが、ハイペースの技術基盤形成と技術開発には、主体的に研究開発を推進できる研究機関へのリソース配分が欠かせず、人材（研究者、技術者）育成も重要であるが、これらは技術開発が加速しない原因（ボトルネック）となっている。

一方で製鉄用の石炭としては、劣質・未利用固体炭素資源のうち、劣質炭と称される石炭はコークス化しにくい性質があり、前処理が必要とされる。また粘結性が不足しているため、粘結助剤としてバインダーの添加が指向される。しかしどのような前処理が効果的なのか、どのようなバインダーをどの程度混合すれば、DIが向上するのか、などの機構は不明瞭である。大学では最先端技術に関する基礎研究が指向されているため、石炭や製銑研究を実施している研究者は減少する一方である。可能な限り早期に予算のある研究開発プロジェクトを行わなければ、大学の人材が失われ、その結果、企業の人材に影響を与えることが懸念される。企業の研究開発活動は、原材料費の高騰によってさかんになってきているが、基礎研究を短期間に遂行するだけの素地は失われていると思われる。産総研では炭素資源に関する研究を継続しており、本開発領域に大いに注力できる状況にある。

石炭はさまざまな種類があるが、コークス製造に適した石炭への改質技術の開発により、亜瀝青炭から褐炭に至る膨大な石炭資源をコークス製造に使用できる可能性がある。また、輸入が困難な褐炭については、海外での改質によるバインダーの製造を行うことで、液体として輸入できる可能性があり、劣質石炭とバインダーの組み合わせによる高強度なコークスの製造が可能になることも期待される。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

褐炭の改質やガス化などの転換技術、ビジネスに関する最近の注目すべき動きを以下に列記する[1), 2)]。併せて、基盤研究の新展開[3)]も示す。

1. 国の支援を受けた産業界主導のプロジェクト、事業構想（国内）

・蒸気流動層乾燥装置と潜熱回収装置（蒸気圧縮機）を組み合わせた高効率な潜熱回収型褐炭乾燥システムの基盤技術開発（三菱重工他、FY2010–2012）[24)]
・合成ガス製造用二塔式常圧流動層ガス化プロセスの開発（IHI、FY2011–）[24)]
・褐炭水熱改質スラリー化実証プラントの運転研究（日揮、FY2012– 継続中）[4)]
・ポーランド褐炭高効率火力発電建設プロジェクトの契約（三菱日立パワーシステムズ、2014）[21)]
・NEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト：クリーンコールテクノロジー実用化可能性調査；低品位炭利用促進事業可能性に関する検討（FY2014）[25)] 以下の低品位炭利用ビジネスモデル検討事業が採択された。①低品位炭利用による改質PCI炭製造（三菱重工・三菱商事）、②インドネシア・スマトラ地域における未利用低品位炭からのSNG供給・$CO_2$EOR事業（三菱重工）、③豪州褐炭由来電力向け改質炭製造における実用化可能性（九州電力、電源開発、東京電力、新日鐵エンジニアリング）、④豪州の低品位炭から水素を製造するバリューチェーンのビジネスモデル（川崎重工、電源開発）、⑤中国／石炭ガス化市場におけるECOPRO/EPCビジネス展開（新日鉄エンジニアリング）

2. 産業界主導のプロジェクト事例（海外）

・加圧成型・脱水と事後低温乾燥を組み合わせた褐炭ペレット製造技術（Coldry）の開発と実証（ECT、豪州）[26)]
・二室式流動層ガス化プロセス技術（MILENA、iMILENA）の開発とパイロット規模（0.8　MWth）実証（ECN、豪州、–2013）[27)]
・高速流動層（トランスポートガス化炉、TRIG™）を組み込んだ商用褐炭IGCC（583 MW）の建設（米国、2014）[28)]
・中国中煤能源集団公司は、内モンゴル自治区フルンボイル市と共同で、褐炭改質総合利用プロジェクトの推進に合意し、褐炭の熱分解により、コークスを製造している。規模は1000万 t/年×2、総投資額は180億元（2012年6月）
・豪ビクトリア州政府は、CarbonNetプロジェクト（CCS計画）の中で、褐炭からのコークス製造の実施を計画。豪州政府とビクトリア州政府は、同プロジェクトのフィージビリティスタディに1億ドルの資金提供を表明 （2012年2月）

3. 基盤研究（シーズ創出、我が国）

・低品位炭とバイオマスのタイ国におけるクリーンで高効率な利用法を目指した溶剤改質法の開発（JST、SATREPS事業、FY2013–）[29)]
・革新的褐炭・バイオマス改質の科学基盤（JST、科学技術戦略推進費、FY2010–2012）[1)]
・マイルド熱分解とエクセルギー再生に基づく低品位炭有効利用プロセスの開発（JST、戦略的国際共同研究推進事業 FY2013–2015）[30)]

・日本鉄鋼協会では、「劣質・未利用炭素資源コークス化技術研究会」を2010年度より立ち上げ、バイオマスやオイルサンドビチュメンなどの未利用資源、ならびに低品位な石炭から作成したハイパーコールなどをバインダーとして用いた際のコークス強度向上に関する研究開発を、鉄鋼大手各社ならびに全国の大学の研究者・国研の研究者とともに共同で進めている。

### （６）キーワード

褐炭、改質、脱水（乾燥）、成型、乾留（熱分解）、ガス化、水熱ガス化、チャー、コークス、炭素材、水素製造、劣質炭改質、高機能バインダー、コークス強度向上、バイオマス利用

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・基盤研究に携わる研究者の層が薄く、学術論文数も横ばいである。個々の研究は世界的に見てもトップレベルだが、レベル維持には人材育成が急務。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・比較的多くのエンジニアリング企業が乾燥技術、ガス化技術の開発に取り組んでいる。詳しくは(3)、(5)および参考文献を参照されたい。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・(3)、(5)に述べたように、商用化に向けた調査・実証研究は比較的多いが、ほとんどは実証までの段階で終了、停止。ボトルネックの一つはここにある。ひとつの実施例としては、神戸製鋼は、褐炭を対象に油中脱水技術（UBC技術）を開発し、インドネシアで実証試験を実施した[31]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↘ | ・ガス化に関する研究は少なくないが以前から継続的に水準は高い。自国石炭を対象とする研究が主であるため、改質などに関する研究事例はあまりない。鉄鋼分野は米国はパイが小さく目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↘ | ・実証研究や基礎研究に比較して、このレンジの研究で目立ったものが少ない。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・(3)、(5)に述べたように、褐炭を対象とするガス化などの実証技術は、建設中の商用炉（KBR社、TRIG™）をはじめとして世界トップレベルにある[28]。改質に関しても、マイクロ波加熱技術を適用したプロセス（CoalTek）[32]は中国との合弁により内モンゴルにおけるプラント建設の承認を得ている。鉄鋼に関しては目立った動きはない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・褐炭産出国であるドイツ、チェコ、ポーランド、トルコでは改質、転換の研究はいずれも活発である。物性などに関する研究は、世界最高水準の研究レベルにある。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・ドイツでは、熱機械的な脱水（MTEプロセス）の開発[33]、二塔式流動層ガス化（褐炭）のパイロット規模試験研究[34]が推進されている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・EU内の4カ所の褐炭火力プラントにおいてCCS実証試験を開始あるいは計画中[35]（～2020）。鉄鋼としてはEUのFP7における取組としてULCOSが動いており、バイオマスを利用した製鉄プロセスが展開中である。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・学術論文数の伸びは他国を圧倒して大きい。政府による研究費の支援が大きい。国内トップレベルの研究は世界のトップレベル研究と遜色ない。褐炭熱分解油からの燃料、ケミカルズ製造に関する研究が多いのは他国にみられない特徴。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・大学などの公的研究機関と企業（公司）の産学連携研究、ベンチャー研究が極めて盛んである。山東省科学院工業省エネセンターと山東天力乾燥設備公司が、高温蒸気による褐炭乾燥CCT（Clean Coal Technology）技術を共同開発した。多くの場合、海外の技術を積極的に導入し、一気に実証段階へと進む手段を取る。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・ここ10年の商用プラントの建設、運転はもっとも多く、極めて活発。多くがGTLやケミカルズ製造を目的とするのが特徴[36]。一方で中国の製鉄産業規模は日本の7倍程度と非常に大きいが、製鉄分野の産業化の動きはまだあまり見えていない。 |
| 豪州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・一定数の研究者が褐炭改質・ガス化研究を継続しており、知見の蓄積がある。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・ガス化：乾燥を組み込んだIGCC（Dual Gas）の60 MW規模実証計画が2013年に凍結[37]。乾燥・成型：Coldryプロセスの商用規模 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ○ | → | 実証は中断[31]。いずれも環境団体よる反対の影響。一方、2014年7月に豪州政府は炭素税廃止[38] を決定し、今後の動向が注目される。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・製鉄分野については、基礎研究はあまり盛んではないが、研究者が増えつつある。研究内容としては、既存技術のフォローアップ的なものが多い。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・製鉄分野で海外技術の取り込みなどによる実用化が進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・製鉄産業の規模が大きく、また鉄鋼分野のエネルギー原単位がドイツよりも低く、日本に次いで世界第2位であり高効率低二酸化炭素排出を実現している。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 科学技術戦略推進費「革新的褐炭・バイオマス改質技術の科学基盤」報告書. JST（2013）. http://scfdb.tokyo.jst.go.jp/pdf/20101470/2012/201014702012rr.pdf
2) 林潤一郎他. 化学工学, 75. 566-568. （2011）.
3) 中低温熱利用の高度化に関する技術調査報告書. JST（2013）. http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/RR/CRDS-FY2013-RR-02.pdf
4) 低品位炭の熱水改質技術（2012）. http://www.jcoal.or.jp/coaldb/shiryo/material/Mr.%20Suyama.pdf
5) 日経サイエンス特集「知の探求者たち」第6回（2011）. http://criepi.denken.or.jp/press/journal/nikkei/2011/vol6.pdf
6) COLDRY Overview.（2013）. http://www.ectltd.com.au/coldry/coldry-overview/
7) A. Mori et al., Energy Fuels, 26, 296-301.（2012）. dx.doi.org/10.1021/ef201168g
8) H. Yang et al., Energy Fuels, 27, 3209−3223. （2013）. dx.doi.org/10.1021/ef4001192
9) 双日/栗本鉄鋼所. （2013）. http://www.sojitz.com/jp/news/2012/02/20120224.php
10) 低品位炭改質技術（UBC）. 石炭エネルギーセンター・コールデータバンク. http://www.jcoal.or.jp/coaldb/shiryo/other/2_4D2.pdf
11) M. Morimoto et al., Fuel, 87, 546-551. （2008）. doi:10.1016/j.fuel.2007.02.037
12) S. Kudo et al., Energy Fuels, 28, 76-85. （2014）. 0.1021/ef401557w
13) 電源開発/日揮. http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201207/20120000000770.html
14) IHI技報（2012）. http://www.ihi.co.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/4f971dd0f10457faebf81bd38f1ec71d.pdf
15) 次世代高効率石炭ガス化発電プロセス. 石炭エネルギーセンター・コールデータバンク.

http://www.jcoal.or.jp/coaldb/shiryo/other/2_2B5.pdf#search='A%2FIGCC+A%2FIGFC'
16) NEDO研究評価委員会資料．（2013）． http://www.nedo.go.jp/content/100536426.pdf
17) J.-i. Hayashi et al., Energy Fuels, 28, 4-21. （2014）. dx.doi.org/10.1021/ef401617k
18) 林潤一郎. 化学工学, 76, 190-192. （2012）.
19) A. Sharma et al., Proc. 2013 Int. Conf. Coal Sci. Tech., State College, PA, 147-152. （2013）.
20) 川崎重工. http://www.jcoal.or.jp/coaldb/shiryo/material/b_2_2.pdf
21) 三菱日立パワーシステムズ. http://www.mhps.com/news/20140717.html
22) 九州電力資料（2014）. http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen_nenryo/kougyo/pdf/002_04_00.pdf
23) 林潤一郎. 低品位炭・バイオマス高度利用システムと反応工学の役割. 化学工学会第46秋季大会要旨.（2014）.
24) クリーンコール分野に係る技術に関する施策・事業評価報告書. （2013）. http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H24/130129_clean2/clean2-siryou2.pdf
25) http://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100075.html
26) The Coldry Process. http://www.ectltd.com.au/coldry/the-coldry-process/
27) http://www.milenatechnology.com/fileadmin/milenatechnology/user/documents/reports/Indirect_gasification_-_A_new_technology_for_a_better_use_of_Victorian_Brown_Coal.pdf
28) http://en.wikipedia.or GWiki/Kemper_Project
29) http://www.jst.go.jp/global/kadai/pdf/h2504_h25.pdf
30) http://www.jst.go.jp/inter/sicorp/country/china.html
31) 神戸製鋼. 600 t/dayプラントによる改質褐炭プロセスの実証. 神戸製鋼技報. 2010, vol.60, No.1, p. 71-75.
32) CoalTek社ホームページ. http://coaltek.com/news/
33) C. Vogt, Fuel, 93, 433-442.（2012）. doi:10.1016/j.fuel.2011.08.049
34) S. Kern et al., Energy Fuels, 27, 919-931. （2013）. doi：10.1021/ef301761m
35) http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H25_2013/2013-005.pdf
36) 化学原料生産用のガス化技術開発(中国)石炭エネルギーセンター・コールデータバンク. （2013）. http://www.jcoal.or.jp/coaldb/tech/cct/etc/post_5.html
37) Dual Gas Final Report. http://www.dualgas.net.au/www/609/1001127/default.asp
38) http://jp.wsj.com/news/articles/SB10001424052702303768704580034462399476590

### ３．１．４．３　天然ガスの高度利用(超高効率発電･天然ガスからのコプロダクション(トリジェネレーション)・LNG 冷熱利用技術による高効率化)

（１）研究開発領域名

天然ガスの高度利用技術（超高効率発電・天然ガスからのコプロダクション（トリジェネレーション)・LNG 冷熱利用技術による高効率化)

（２）研究開発領域の簡潔な説明

(2)-1. 天然ガスによる超高効率発電

天然ガスを利用した発電システムとして、ガスエンジン、ガスタービン、そして燃料電池などがあげられる。近年、ガスタービンの発電効率向上は目覚ましく、火力発電所における大型の天然ガス焚きガスタービン・コンバインドサイクルシステムでは、発電効率が60%LHVを超えるレベルに達している[1)]。一方、燃料電池の発電効率向上も顕著であり、特に固体酸化物形燃料電池（SOFC）では、同様に60%LHVを超える発電効率が実証されている[2)]。本項では、さらに、65%LHVを超える発電効率を達成する、超高効率の発電技術開発について整理する。

(2)-2. 天然ガスからのコプロダクション（トリジェネレーション）

天然ガスを利用して、電気と熱を生み出す技術がコジェネレーションである。さらに天然ガスを原料として、電気、熱、に加えて水素を併産する技術をコプロダクション、もしくはトリジェネレーションという。本稿では、SOFCを活用して、電気、熱、水素を併産するトリジェネレーション技術を整理する。

(2)-3. LNG冷熱利用技術による高効率化

現在、主に海水と熱交換され放散されているLNG冷熱を有効利用するための要素技術、または、システム技術の構築について整理する。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3)-1. 天然ガスによる超高効率発電

超高効率の発電効率を得るためには、カルノーサイクルに基づく発電システムには限界があり、燃料電池、特に固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）の技術を極めるしかない。SOFCの効率を高める手法としてこれまで主に取られてきたのは、SOFCセルとガスタービンとを組み合わせるガスタービンコンバインド（ハイブリッドシステム）技術である[3)]。1990年代後半から2000年代にかけて米国Westinghouse社が、世界で初めてハイブリッドシステムを実証し[4)]、その後、英国Rolls-Royce[5)]、日本では三菱重工業がSOFCハイブリッドシステムの開発を行ってきた[3)]。SOFCハイブリッドシステムの技術的ポイントは、SOFCから排出される未利用のオフガスをガスタービン用の燃料として活用し、SOFC出力＋ガスタービン出力として全体の出力を増加させて発電効率を高める点である。もう一点、ハイブリッドシステムにおける効率を高める工夫は、燃料、および、酸化剤である空気を加圧する点にある。加圧により、SOFC自体の発電効率を向上させ、さらにはタービン出力も増加させることができる。三菱重工業では、さらに、後段に水蒸気タービンをカスケード接続することにより、究極的に発電効率を高

める、“トリプルコンバインドシステム”の開発に着手している。燃料電池には基本的にスケールメリットがないが、一方ガスタービンや蒸気タービンなどの熱機関ではスケールメリットが期待でき、システムを大型化することにより、70%LHVに達する高効率を目標とする、究極の高効率発電システムが期待される[6]。

SOFCタービンハイブリッドシステムと多少コンセプトは異なるが、米国GE社は、SOFCとガスエンジンを組み合わせたガスエンジンハイブリッドシステムを提案し、現在65%LHVの発電効率を目標に開発中である[7]。このシステムは、SOFCの発電時の余剰熱を利用して都市ガス改質を行い、改質ガスの一部をSOFCの本体発電に、一部をガスエンジン燃料に利用するというシステムであり、エクセルギー再生の概念を利用してシステム効率を上げるというコンセプトを取っている。

一方、最近のSOFCシステムは単体でも発電効率向上は目覚ましく、必ずしもガスタービンやエンジンを組み合わせなくても、50%LHVを超える効率を容易に達成できるレベルまで技術が向上している。ドイツのCFCL社は、1.5 kW級の小型のシステムながらも、発電効率60%LHV超を達成している[2, 8]。また、米国Bloom Energy社[9] も、初期値ではあるが、60%LHVを超える発電効率を達成していると報告されている。タービンハイブリッドならずとも高効率が達成できる要因は、燃料の使用方法にある。そもそも、タービンハイブリッドの原点は、燃料の有効利用にあった。SOFCシステムでは、残念ながら、原燃料は発電用には100%は利用できない。これは、SOFCが酸素イオンを電荷担体とする電池であるからであり、燃料利用率（投入燃料のうち発電用に利用された割合）が上昇すると、燃料中の酸素分圧が上昇し、アノードを構成するニッケルが酸化されて構造破壊が起こるからである。より詳細には、燃料中のガス成分の拡散が律速となって起こる濃度過電圧と呼ばれる現象も加わり、80%程度の燃料利用率でも“燃料枯れ”と呼ばれる、燃料の枯渇現象がみられることもある。したがって、安全を考慮すると、燃料利用率70～80%で運転するのがSOFCの一般的な運転方法であり、燃料利用率が上がらないことがSOFCの発電効率を引き下げている要因である。未利用の燃料（オフガス）はセル部から排出され、その後に空気と混合して燃焼させ、その燃焼熱を燃料改質などに利用するように工夫されている。タービンハイブリッドシステムは、オフガスをガスタービン用の燃料として有効利用し、発電量を増やす工夫が成されたシステムである。

単体でのSOFCの効率を上げるためには、電池の性能を向上させるとともに、燃料利用率を上げることが重要である。タービンハイブリッドとは異なる思想で、直接燃料利用率を上げることにより、SOFCの発電効率を向上させたのが、CFCLやBloom Energyである。これらのメーカーは電池における燃料フローをカスケード（複数の電池に対し、燃料を直列に供給すること）にし、燃料利用率を一段高めることにより高い発電効率を得ている。

ガスタービンを利用せず、常圧のSOFCシステムにおいて、65%LHVを超える超高効率の発電効率を達成するためには、セル部の工夫に加えて、システムとしても特別な工夫が必要である。超高効率を達成するために考慮すべき要点は以下である。

・セルにおける過電圧の軽減（電極の工夫や部材間の界面抵抗の低減）
・セル部の構造の工夫による濃度過電圧の軽減
・システムとしての燃料利用率の向上

・高効率でも熱自立できるトータル熱マネジメント

上記のうち、特に、システムとして燃料利用率を向上させる工夫はもっとも重要である。燃料利用率を向上させる方法として、燃料オフガス中の酸素成分を低減させる方法が考えられる。一つの方式であるが、燃料オフガスから$CO_2$、$H_2O$を除去すれば、オフガスの残存成分は$H_2$およびCOのみとなり、再度フレッシュな燃料として利用することができる。これを“オフガスのリフレッシュ”と呼ぶ。オフガスリフレッシュの方法としては以下の方法が考えられる。水蒸気は、熱交換により凝縮させて除去できる。$CO_2$を除去、もしくは分離回収する方法は多様に存在するが、その中で、$CO_2$分離回収に必要なエネルギー損失が少なく、コスト的に安価で、かつ、SOFCシステムとのマッチングがよい方法を選別する必要がある。例えば、$Li_2SiO_3$のような酸化物材料は、可逆的に$CO_2$を吸収・放出することができる[10]。500℃から600℃程度の温度領域で、温度スイング吸着（TSA : Temperature Swing Adsorption）もしくは圧力スイング吸着（PSA : Pressure Swing Adpsorption）により、エネルギー損失少なく$CO_2$を分離除去できる。また、$CO_2$分離膜を用いて$CO_2$を分離する方法も考えられる。今後、最適な$CO_2$分離除去方法が選別され、燃料リフレッシュ技術が確立すれば、常圧式のSOFCで65%LHVを超える超高効率が期待できる。まだ、国内外で、本アイデアに基づく超高効率SOFC発電を実証した事例はなく、新コンセプトに基づく新しい技術開発である。

(3)-2. 天然ガスからのコプロダクション（トリジェネレーション）

水素社会の入り口として、化石燃料からの水素製造は、技術的にも、量的にも、コスト的にももっともフィージブルな方式である。一般的に化石燃料から水素を製造する場合には、特に、都市ガス改質の場合は、触媒を用いて都市ガスと水蒸気を反応させて改質ガスを製造し、改質ガスを精製することにより純水素を得ている。改質反応は吸熱反応であるが、平衡論および速度論的観点から、高温で反応させる必要があり、したがって、700～800℃の熱を供給する必要がある。結果として熱損失が大きくなり、通常、水素製造効率（投入した都市ガス、および電気的な全エネルギーに対する製品水素のエネルギー）は80%程度にとどまる。もし、改質のための熱供給を削減できれば、水素製造効率を向上させることができる。

SOFCコプロダクション（トリジェネレーション）の技術は、SOFC発電時の余剰熱を利用して、電気、熱に加えて水素を併産する技術であり、本来SOFCシステムで発生している余剰熱を改質用の熱として利用することが可能であり、結果として水素製造効率を高めることができる。世界で初めてSOFCトリジェネレーションを実証したのは日本である。2007年～2009年に東工大で実施されたAESプロジェクトにおいて、10 kW級SOFCを利用して水素を製造し、ボトミングで固体高分子形燃料電池（PEFC : Polymer Electrolyte Fuel Cell）を組み合わせてSOFC+PEFCのハイブリッドシステムが実証されている[11]。その後米国のFuel Cell Energy（FCE）社はUC Irvineと共同で、オレンジカウンティーにおいて、溶融炭酸塩形燃料電池（MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell）を用いたトリジェネレーションシステムを実証し、現在も稼働中である。このシステムは、消化ガスを利用してMCFCを運転し、MCFCの熱は消化ガス製造用に活用、電気は売電、水素は水素ステーションにて燃料電池自動車（FCV : Fuel Cell Vehicle）に充填

するという、まさしくトリジェネレーションの概念を実証したシステムである[12)]。米国DOEのChu前長官も、本施設を見学し、この技術の素晴らしさに感銘を受けたと報告されている[13)]。

最近になり、米国FCEとカナダのVillage Farms社は、バンクーバーにおいてクワドロジェネの実証を行っている[14, 15)]。これは、バイオガスを利用して、MCFCを運転し、電気、熱、水素を併産するとともに、$CO_2$を分離回収し、野菜栽培用に利用するシステムである。このように米国を中心にトリジェネレーションの実証が進んできているが、世界的に見て、いまだSOFCトリジェネを大規模に実証した例はない。この理由は、トリジェネレーションを効率的に行うためには、一定規模レベルの中・大型のSOFCシステムが必要であり、現在のところ、中・大型のSOFCシステムを開発できるメーカーが限られているからである。日本では、三菱重工業などが、中・大型のSOFCの開発を行っており、今後世界に先駆けてSOFCトリジェネの実証や、トリジェネ運用を先導できる可能性は高い。

トリジェネレーションシステムの適用先は、主に産業用用途であろうと想像されるが、特に水素ステーションとのマッチングがよいと考えられる。トリジェネレーションシステムは、運転方法によって電気/熱/水素の比率を変えることができる。すなわち、電気を主にした運転をしたり、水素製造の割合を増やしたりといったことが可能である。このことは、トリジェネレーションシステムを水素ステーションで活用した場合に、運用の面で威力を発揮する。水素ステーションでは、FCV導入初期においてはFCVの台数が少ないために設備稼働率が上がらないことが想定される。トリジェネレーションの柔軟性により、水素需要が少なく水素製造が不要の場合には電主運転を実施して売電を行い、水素需要が増えた場合には発電量を減らして水素製造量を増やすなどの、状況に応じた運転が可能であり、オーバーオールで見た設備稼働率を上げることが可能である。

(3)-3. LNG冷熱利用技術による高効率化

LNGは、メタンを主成分とする沸点－162℃の極低温液体である。原油と比較して世界に広範に賦存する天然ガスはその4分の1がLNGとして液化され、LNG船によって消費地に運ばれている。世界のLNG生産量は、現在年間2,4000千万 tであるが、日本は世界第1位の輸入国で年間9000万 tを輸入しており、第1次エネルギー消費量の2割を担っている。輸入されたLNGはガス化され、7割が発電用、残りが都市ガス用として使用されているが、大規模LNG基地では、主に海水が気化熱源として使用される。また、各地のLNGサテライト基地では主として大気の熱を利用してガス化される。代表的なLNG冷熱利用技術である冷熱発電においても、わずか年間800万 tのLNGが利用されているのみであり、LNG冷熱の大部分は依然として有効利用されることなく海水や大気中に放出されている。この冷熱を積極的に利用することが省エネルギーや環境問題の観点から今後ますます重要となってくると考えられる。海外のLNG液化基地では、原料ガスを液化する段階で多量のエネルギーが消費される。そのエネルギーはいわゆる冷熱エネルギーとしてLNG中に蓄積されるため、消費地におけるガス化段階で再利用することができる。LNG冷熱は、カルノーサイクルで得られる仕事量：エクセルギーで表され、例えば大気圧下－160℃のLNGを20℃に気化させるまでに250 kWh/t-LNGのエネルギーを取り出すことができる。また、冷熱は低温であればあるほどクオリティが高い。

これまで、冷熱発電、空気液化分離、液化炭酸ガス・ドライアイス、冷蔵倉庫、BOG（Boil Off Gas）再液化、冷凍食品製造などが主なLNG冷熱利用技術として実用化され稼働している。

**・冷熱発電**

冷熱発電は石油危機後の省エネブームの中で注目を集め、その後、都市ガス事業者や電力事業者によって多くが建設された。発電方式には、ランキンサイクル、天然ガス直接膨張サイクル、ランキン直膨組み合わせサイクル、ブレイトンサイクルの4方式がある。代表的なのは、ランキンサイクルである。ランキンサイクルとは、海水を高温源、LNGを低温源、フロン、プロパン、炭化水素混合冷媒などを作動流体として発電する方式である。作動流体は、まずポンプで昇圧された後、気化器で海水により気化される。その後、膨張タービンを回転させ発電し、凝縮器においてLNGにより凝縮され再度ポンプに吸入される。過去において冷熱発電設備は盛んに建設されたが、火力発電所が蒸気タービンから燃料供給圧力の高いガスタービンへとリプレースが進み、取り出せるエクセルギーが減少していることなどを背景として、今後の新設は難しくなっている。

**・空気液化分離**

LNG冷熱を利用した空気液化分離による液化酸素、液化窒素の製造は早くから実用化され、現在、数多くのプラントが稼働している。プロセスは、精製、液化分離、冷熱補給の3段階から構成される。精製プロセスでは、除塵後、昇圧、冷却され、水分と二酸化炭素が除去された空気が精留塔へ送られる。液化分離プロセスでは、精製された空気が－180℃まで冷却された後、精留塔で液化され、液化酸素と窒素ガスに分離される。また、アルゴン塔でアルゴンが分離される。冷熱補給プロセスでは、窒素ガスが昇圧されLNGの冷熱を補給されて精留塔下部の液化器で液化窒素となる。LNG冷熱を利用しない従来方式では、空気分離に要する冷熱は冷凍機および膨張タービンによって与えられている。一方、LNG冷熱を利用すれば、熱交換器が必要となるものの、冷凍機および膨張タービンが不要となり、設備費が安価になるとともに、必要な電力量も1/4～1/5に削減できる。

**・液化炭酸ガス、ドライアイス**

近年、液化炭酸ガス、ドライアイスの需要は冷凍食品の普及に伴い伸びている。通常液化炭酸ガスは、圧縮、予冷精製、液化精留の工程からなり、運転圧力は3～4 MPa、予冷、液化熱源に冷凍機を使用して製造されている。この冷却部にLNGにより冷却された冷媒を循環して間接利用方式によって液化炭酸ガス・ドライアイスの製造が行われている。LNG冷熱を利用することにより、冷凍機を省略することができ、従来の設備では冷凍機を使用して液化するが、LNGの冷熱を利用すれば電力費は1/2に削減できる。

**・冷凍倉庫**

冷凍倉庫において、通常は冷凍機で作り出される冷熱に代えてLNG冷熱を利用すれば、設備費のかなりを占める冷凍機や付帯設備が不要となる。また、LNGを利用した冷凍倉庫では、通常の冷凍機では実現しにくいマグロなどの保存に適した－60℃レベルの冷熱を容易に作り出すことができる。最近の電力費の上昇する環境においては、LNG冷熱の利用はさらに有利となる。また、LNG受入基地は比較的消費地に近い都市近郊に立地していることが多く、冷凍食品の輸送に有利なケースが多いと考えられる。

上記のように、冷熱利用の現状としては、冷熱利用の手段は過去から数々検討されて

きているにもかかわらず、それほど多くが実現されていない。その理由は、すべて採算性評価にかなわないためである。今後電力費や$CO_2$コストが上昇するなど環境が変化すれば、冷熱発電など、冷熱利用設備が建設される可能性はある。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

研究開発上の最大の課題は、$CO_2$の分離除去をどのような方式で行うかということであり、また研究開発推進上の課題は、業務用用途の中・大型のSOFC技術が確立されておらず、技術開発の順番として、まず、通常のSOFCを実用化し、その上で超高効率SOFCを開発するという手順にならざるを得ない点である。

SOFCトリジェネレーションの開発上の課題も、上記と同様に、中・大型のSOFC開発の進行が前提になる点である。特に水素製造上の要点としては、最終的な水素の精製の部分をどのような手法で行うか、ということである。

冷熱を利用後のLNGはガスとしてLNG受入工場に返送され、発電用燃料または都市ガスとして送出される。したがって、発電やガス製造パターンによって冷熱利用量は制約を受けることになる。冷熱利用設備の採算性を高めるには、設備利用率をできるだけ高める必要があるが、LNG火力発電所、ガス製造量は一般に稼動変動が大きい。また、利用率を高めるには設備規模を最低ロードに合わせ小型化する必要があるが、一方で設備は小型化するにしたがって採算性が悪くなってしまう。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

超高効率SOFCに関しては、世界的に見て、ある程度セル性能を向上させて電池効率を上げていこうとする試みはされているが、今のところは専ら耐久性向上の方に力が注がれている。一方、米国GE社は、SOFCとガスエンジンを組み合わせたガスエンジンハイブリッドシステムで65%LHVの超高効率発電を掲げた開発を実施している。SOFCシステム単体での超高効率化とは手法は異なるが、超高効率発電を掲げて開発を行っているメーカーは存在し、今後の動向は注視する必要がある。SOFC単体で65%LHVを超える効率を狙おうとするような、超高効率発電に向けた試みはまだ成されていない。

SOFCトリジェネに関しては、すでに米国でMCFCトリジェネの実証、実利用例が挙がってきており、今後ともに増えていくことが想像される。

日本国内の大きな動向として、2020年東京オリンピック・パラリンピックがあげられる。オリンピック・パラリンピックにおいて、さまざまな先進的技術のデモンストレーションが計画されつつある。本件技術は、時間的に見ると、オリンピック・パラリンピックでの技術実証というのは最適なタイミングであり、研究開発が進捗すれば、オリンピック・パラリンピックの場を借りての先進的技術実証の可能性が大きいと考えられる。

LNG冷熱利用は、それ自体技術的には成熟した分野であるが、さまざまな産業分野の状況変化により適用形態が変化してきている。以下に最近のトレンドをまとめる。

**・データセンター**[16)]

IT化の進行に伴い、データセンターの需要が急増している。データセンターでは、サーバーから発生する発熱を冷却する必要があり、そのため、恒常的に大量の電力を消費する。この冷却にLNG冷熱を利用できれば、大幅な電力使用量の削減が可能となる。デ

ータセンター自体を寒冷地に設置し外気によって冷却する方式が北海道石狩市で実現されているが、LNG冷熱を利用することも可能である。実現のための課題としては、前述の通り、日本では湾岸地帯に立地するLNG受入基地に近接する必要があるが、データ輸送ケーブルルートと用地との位置が適切であるか、沿岸部の高塩分レベルの空気の機器への影響はないか、埋立地が多い海岸地帯における軟弱地盤の影響はないかなどを解決する必要がある。

**・低温植物工場**[17)]

近年、コンビニ、ファミリーレストランなど向けに、清浄な野菜を、日照、温度、湿度を制御する人工気象下で気候に左右されず効率よく栽培し、安定供給できる植物工場が実用化されている。栽培する作物の生育条件が低温である場合、これにLNG冷熱を適用できれば安価な栽培が可能である。また、低温性魚類の養殖についても同様の可能性がある。また、LNG受入基地は比較的消費地に近い都市近郊に立地しているため、製品の輸送上も有利であると考えられる。課題としては、植物工場自体の採算性、LNG受入基地隣接用地の確保などがあげられる。

**・極低温抵抗ケーブル**[18)]

極低温抵抗ケーブルは、低温で金属抵抗の減少する効果を利用し送電容量を増加させることを狙ったケーブルである。この技術は、開発研究段階であり、その研究には通常液体窒素が使用されているが、温度レベルだけを考えるとLNGの利用も可能である。この技術については、万一の漏洩の場合の安全性確保が課題となる。

## （６）キーワード

高度天然ガス利用、高効率分散型電源、超高効率SOFC、トリジェネレーション、コプロダクション、水素製造、冷熱発電、空気液化分離、液化炭酸ガス、ドライアイス、冷凍倉庫、低温植物工場、極低温抵抗ケーブル

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・超高効率SOFCに関し、$CO_2$分離回収と組み合わせたコンセプトが提案されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・SOFC+PEFCハイブリッドシステムに関し、東工大にて実証試験済み。<br>・今後オリンピック絡みで、超高効率SOFC、トリジェネの実証が進むことが期待される。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・オリンピック以降実用化が進むことが期待される。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・SOFCセル自体の研究は大学レベルで進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・FCEはMCFCに関するトリジェネ実証を複数行っている。SOFCのトリジェネ実例はまだない。<br>・Bloomenergyが60%LHVを超えるSOFCの実用化済み。耐久性を向上させる試みがなされている。<br>・GEはSOFCとガスエンジンとのガスエンジンハイブリッドシステムにより、65%LHVの超高効率発電システムを提案し、現在プロト機試作中である。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・Bloomenergyが60%LHVを超えるSOFCの実用化済み。超高効率の例はまだない。今後、シェールガス活用の活発化とともに、トリジェネによる水素製造の動きが活発化する可能性がある。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・SOFCに関する基礎研究レベルは日本と同等であるが、トリジェネなどの高度利用の例は少ない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・高効率SOFCに関し、独のCFCLが1.5 kWシステムの実証試験を繰り返し実施している。<br>・トリジェネに関してはまだ研究開発の動きはみられない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・SOFCの実用化は進むが、再生可能エネルギー志向の強いヨーロッパではトリジェネや高効率SOFCへの発展は可能性が薄いと考えられる。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・SOFCの基礎研究に関しては一定レベルの報告がされているが、超高効率発電やトリジェネなどの高度利用の研究報告はほとんどない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・開発レベルの研究進展はない。今後デモレベルの開発事例が出てくる可能性はある。 |
| | 産業化 | × | → | ・特筆すべき状況にない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・SOFC自体は積極的な研究が行われているが、超高効率利用やトリジェネなどの高度利用の研究報告はほとんどない。ただし、SOFCOと米国FCEは資本関係にあるため、今後FCEからのトリジェネなど技術移転の可能性はある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・開発レベルの研究進展はない。今後、SOFCO社中心でデモが実施される可能性はある。 |
| | 産業化 | × | → | ・特筆すべき状況にない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) https://www.mhi.co.jp/news/story/1112205149.html.
2) K. Föger and T. Rowe. International Gas Research Conference Proceedings, Vol. 3, 2011, p. 2296.
3) Y. Kobayashi, Y. Ando, H.Kishizawa, K. Tomida, and N. Matake. ECS Transactions Vol. 51, Issue 1, 2013, P.79.
4) R. George. Proceedings of the American Power Conference, Vol. 59-1, 1997, p.548.
5) F. Trasino, M. Bozzolo, L. Magistri, and A. Massardo. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 133, Issue 2, 2011. Article number 021701.
6) http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/483/483016.pdf.
7) http://www.gereports.com/post/92454271755/the-new-power-generation-this-fuel-cell-startup-could
8) http://www.bluegen.info/.
9) http://www.bloomenergy.com/.
10) K. Essaki, K. Nakagawa, M. Kato, and H. Uemoto. Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 37, Issue 6, 2004, p. 772.
11) H. Yakabe, H. Yoshida, and S. Amaha. ECS Transactions Vol. 25, Issue 2 PART 1, 2009, p. 301.
12) http://www.apep.uci.edu/3/research/partnership_TRI-GEN.aspx.
13) http://www.fuelcelltoday.com/media/1713685/fct_review_2012.pdf.
14) http://www.newswire.ca/en/story/1327135/village-farms-international-inc-in-collaboaion-with-quadrogen-power-systems-inc-and-fuelcell-energy-inc-announces-the-first-ever-7-5-million-quad-ge
15) http://fcel.client.shareholder.com/releasedetail.cfm?releaseid=744021
16) http://internet.watch.impress.co.jp/docs/news/20111116_491170.html.
17) http://toyokeizai.net/articles/-/9467.
18) 瀬古. 北海道大学工学部研究報告, 1983, vol.116, p.39-50.

### ３．１．４．４　非在来型石油・天然ガス資源の採掘技術

#### （１）研究開発領域名

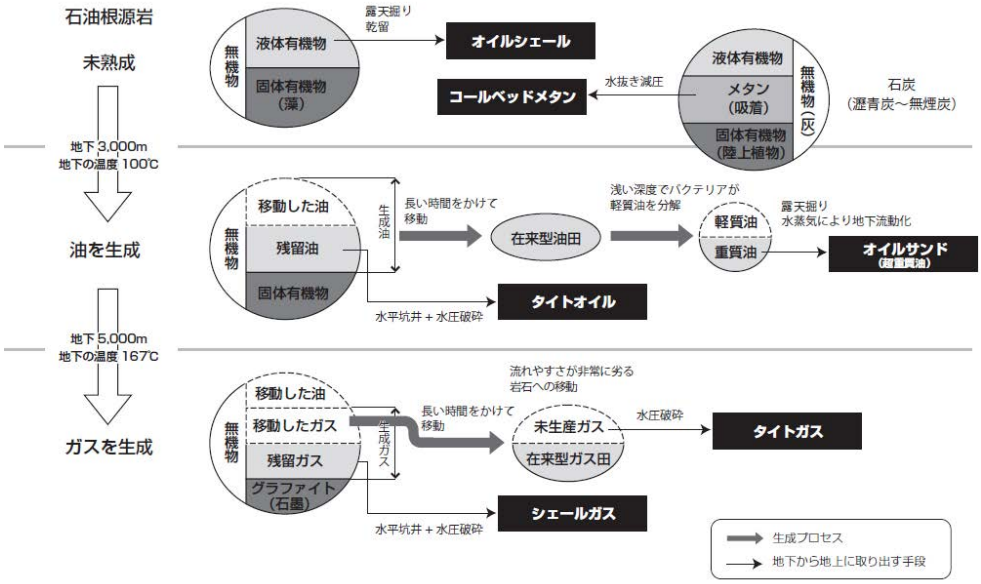
非在来型石油・天然ガス資源の採掘技術

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

近年、石油・天然ガスの採掘をめぐる環境の変化には、油価の高値変動、イージーオイル（在来型油田）の減退、新規需要市場のシフト（中国・インド）、人材入れ替え、低炭素化、資源ナショナリズムの台頭があげられる。国営石油会社は在来型油田の埋蔵量の 80%近くを支配している。埋蔵量へのアクセスが縮小する環境下に置かれた国際石油会社は、石油開発の対象を地下から採り出しやすい「在来型」から採り出し難い「非在来型」の油や天然ガスにシフトしている。このような近年の石油開発の環境の変化が、シェールガスを含む「非在来型の石油や天然ガス」の世界的な開発を後押している。このような中で、我が国では、近海に存在するメタンハイドレートを対象として、掘削、輸送、精製、貯蔵、および利用など、メタンハイドレートの効率的な利用に向けたトータルシステムに関する研究開発が進められている。

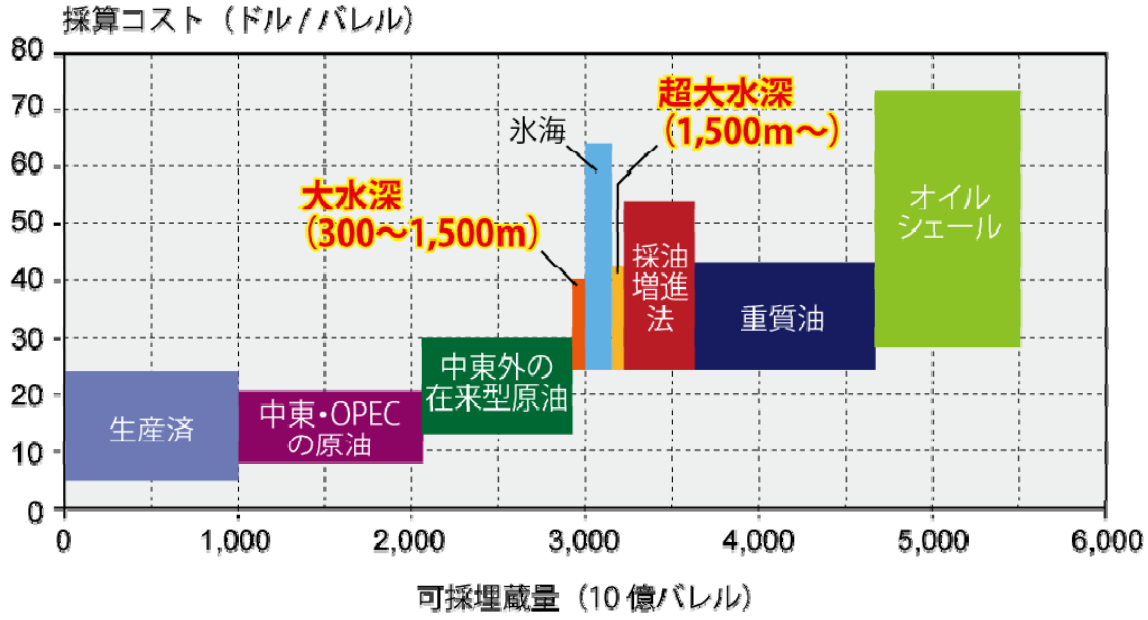
#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

採掘技術はメタンハイドレートを除けば、確立済みである。主な在来型・非在来型の石油・天然ガスの成り立ちと石油・ガス層の形成について、以下の図にまとめる。これらの掘削のうち、オイルシェールの採掘がもっとも高コストである。氷海の下の油田・ガス田の掘削についてはこれからの開発対象となっている。




出所：奥井明彦（2012）ほかに基づき作成

非在来型の油とガスの起源と生成イメージ




出所：国際エネルギー機関（IEA）、世界石油工学者協会（SPE）資料を基に JOGMEC 調査部作成

**原油の可採埋蔵量と採算コスト**

メタンハイドレートは、近年の調査により、日本近海において、国内消費量換算で 100 年超の賦存量があるとの試算が示されている。メタンハイドレートの資源開発としては、2001 年度より、官民学共同のメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（MH21）にて、主として賦存量調査と掘削技術開発に関する研究開発が進められてきているが、調査範囲は極めて限定されており、掘削方法も十分に確立されていない。そこで、日本周辺海域における賦存量の正確な把握とともに、海底下に賦存するメタンハイドレートの経済的な生産技術の確立が急務となっている。また、生産が開始された際の国内輸送・貯蔵システムの整備や最終利用形態まで含めたライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）、さらにはメタンハイドレートサイトへの $CO_2$ 貯留技術（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）など、メタンハイドレート利用技術について、トータルシステムとしての研究開発を推進すべきである。

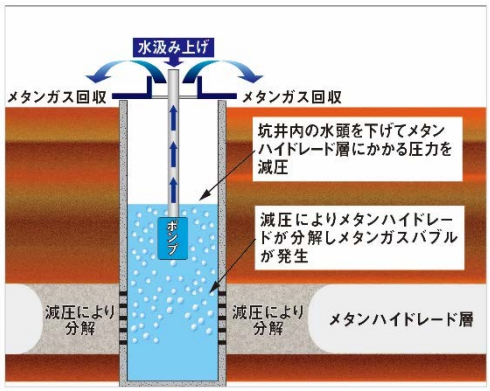
近年の研究より、メタンハイドレートは、砂礫中に分散する孔隙充填型 [6] と海底表層近傍に高純度なものが堆積する表層型 [7] に分類できることが分かってきた。日本近海では、太平洋側に孔隙充填型が、日本海側に表層型が賦存することが確認されている。米国石油メジャーなどの海外資本は、純度が高く採掘が容易だと考えられる表層型に注目し、日本海の資源量調査のため、国内大学への資金提供を開始している。メタンハイドレートの賦存量調査には、従来高コストな電磁震源探査法や曳航式電磁探査法 [8] が主として用いられてきたが、表層型に限っては、より簡便かつ低コストな計量魚群探知機による音響探査法 [9] が有効で、すでに実用化がなされている。今後は、こうした効率的な調査法により、日本国内全体の賦存量分布を把握する必要がある。

メタンハイドレートの掘削技術としては、減圧法 [10] が提案されている（次図参照）。減圧法は、孔隙充填型メタンハイドレートに有効だとされており、南海トラフ周辺海域において、実証試験が開始されている。他海域において賦存が確認されている表層型メ

タンハイドレートに対する有効な掘削技術については、海洋土木工学分野における全く新たな研究開発を進める必要がある。

掘削されたメタンハイドレートの輸送、精製、貯蔵、および利用のそれぞれの技術については、既存技術の応用が可能だと考えられる。洋上での気液分離とパイプライン輸送、硫黄分などの微量物質除去技術、メタンガスの一時貯蔵技術について、新たなシステム開発が必要だと考えられる。

メタンハイドレートサイトに対して、国内プラントから回収された $CO_2$ の貯留が可能になれば、メタンハイドレート版石油増進回収（EOR：Enhanced Oil Recovery）が可能となり、$CO_2$ 排出量の低減に資すると考えられる。そこで、新たにメタンハイドレートサイトへの $CO_2$ 貯留技術についての技術開発を進めることで、さらに大きな効果を生むことができると考えられる。なお、$CO_2$ 貯留については、環境影響評価が不可欠であると考えられる。




メタンハイドレートの採掘技術（減圧法）

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

日本のメタンハイドレート開発の目標と現在の達成度（出所：石油技術協会）として以下の項目が望まれる。

① 日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化。現状としては海底疑似反射面（BSR：Bottom- Simulating Reflection、メタンハイドレート胚胎層の下限とされる）分布図の改定。メタンハイドレート賦存層内に濃集帯の存在することを発見し、その抽出法を確立する。

② 有望メタンハイドレート賦存海域のメタンガス賦存量の推定。達成度としては東部南海トラフ地域のメタンハイドレート層のメタンガス原始資源量の推定を確率論的に容積法により実施。

③ 有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択、並びにその経済性の検討。達成度としては東部南海トラフ地域で濃集帯を選択し、それらの経済性評価から技術的課題を抽出し検討。

④ 選択されたメタンハイドレート資源フィールドでの産出試験の 2011 年までの実施。達成度としては基礎試錐などの成果を考慮して、フェーズ 2 の期間は 2015 年までに修正。

⑤ 2016 年までに商業的産出のための技術の整備。達成度としては 2018 年までに修正

が見込まれる。

⑥　環境保全に配慮した開発システムの確立。東部南海トラフ地域の環境ベースの整理、基礎的な機器の開発、シミュレータの開発。

また、掘削技術については、対象海域に賦存するメタンハイドレートの特性に応じて適用が可能でかつ高効率な技術を開発する必要がある。一方で、メタンハイドレートの国内利用を推進するためには、国内パイプライン網やガス貯蔵技術の整備が必要である。併せて、CCS 技術との統合的運用を目指して、メタンハイドレートサイトへの$CO_2$貯留の技術開発、および環境影響評価を進めることが期待される。政策的課題として、賦存量調査と掘削技術開発を早急に確立するとともに、広く国内外に公表し、海外の化石資源依存脱却への可能性を示すことにより、化石資源に関わる海外ビジネスに関するパラダイムシフトを促し、いっそうのエネルギーセキュリティの向上を図ることが望まれる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

石炭・石油・天然ガスといった化石燃料の資源量限界論は200年前から存在するが採掘技術の進展で歴史的にも可採年数は維持・増加し続けている。

重質油の今後生産増が見込まれる地域として、カナダ・ベネズエラのほか、ブラジル、米国、中国、中東諸国。技術課題は、溶剤圧入や火攻法などのEOR、炭酸塩岩、オンサイト改質への知見が必要。環境保全も重要で、SOR（Steam Oil Ratio）削減、水の再利用、天然ガスの使用削減、CCSにも注目が集まる。

北米では中・軽質原油であるシェールオイルの経済合理的な生産が顕著となり（2011年120万バレル/日、 2012年200万バレル/日、 2013年350万バレル/日）、採算コスト（40～50ドル/バレル）で競合する重質油開発にとって逆風である。

2035年までの石油天然ガス展望（EIA, ExxonMobil, IEA, OPEC）によると、一次エネルギーの伸びは年率1.2%～1.7%であり、2035年の一次エネルギー需要は2010年の32%～54%増といわれる。このような状況を踏まえ、化石燃料の時代が継続するレンジとしては2035年75%～82%といわれ、石油、天然ガスの需要増は年率0.7%～1.0%、年率1.6%～2.3%が見込まれる。

我が国に関しては、メタンハイドレートを始めとして、日本列島周辺での資源開発が近年注目されている。その商業的開発には、遠隔操作で深海での作業をこなすロボットなどの性能向上が欠かせない。日本の海運会社、造船会社やエンジニアリング会社がもつ技術を、メタンハイドレート採掘事業に取り込み検証を重ねることで国際的に通用する実のあるものにできる。メタンハイドレートの資源開発としては、2001年度より、官民学共同のメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（MH21）にて、主として賦存量調査と掘削技術開発に関する研究開発が進められており、2013年1月から、南海トラフ海域において産出実証試験が行われている。

日本海側の表層型メタンハイドレートが相次いで発見されていることを受け、2012年9月、日本海側の10府県が海洋エネルギー資源開発促進日本海連合（秋田県、山形県、新潟県、富山県、石川県、福井県、京都府、兵庫県、鳥取県、島根県、会長は山田啓二京都府知事）を設立し、日本海側海域の賦存量に関する合同調査プロジェクトを立ち上げ

た。

米国エネルギー省は、MH21とのアラスカ陸上産出実証試験共同プロジェクトの成功を受け、2012年8月、メタンハイドレートに関する研究を加速するため、新たに14のプロジェクトを立ち上げた。主なものに、産出時の環境影響評価、残渣の性状分析、および海域資源調査がある。

韓国は、2014年から韓国名ウルルン海盆（日本名対馬海盆）の竹島西方海域における生産を開始するとのプレスリリースをしており、実現すれば世界初の実用化事例となる。

## （６）キーワード

改質/乾留、水平坑井、水圧破砕、水蒸気による地下流動化、減圧法、メタンハイドレート、シェールガス、シェールオイル、コールベッドメタン

## （７）国際比較

エネルギー資源はビジネス商品から、技術・商業・政治リスクがある戦略物資に変わったことを認識すれば、80年代後半から90年代の「原油価格低迷時代（13～19ドル/バレル）」に活動低迷を余儀なくされた日本企業の海洋石油開発ビジネスへの再度参入の可能性は大きく広がっている。ビジネス参入に際しては、海洋石油開発や重質油・シェール資源採掘の経験に長けた欧米企業とパートナーシップを結ぶことの重要性はいうまでもない。採掘技術の習熟度としては米国、欧州、中国、日本、韓国の順。資源量の多寡、石油採掘の歴史に大きく依存している。また海底油田掘削については北欧やブラジルが高いレベルの技術を有している。

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・石油採掘の歴史はあるが、資源小国であるため、メタンハイドレート掘削以外は限定的。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・メタンハイドレートについては精力的な研究開発が進められている。これ以外は資源小国であるため目立った動きはない。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・資源小国であり技術力はあるが展開力が足りない。技術を推すためのファイナンスが重要。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・資源大国であり、長い石油採掘の歴史に基づいた石油・ガスに関する研究開発が大学・公的機関・企業で行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・石油・ガスの資源大国であり、長い石油採掘の歴史に基づいた技術力に根差した研究開発が精力的に進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・石油・ガスの資源大国であり、現在シェールガス・シェールオイルを中心に多くの商業化が進められている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・北海をはじめ石油採掘の歴史あり、これに基づいた基礎研究がなされてきた。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・国内外での石油採掘の歴史に基づいた応用・開発が行われてきた。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・BPやShell、Total、Statoilなど大手による石油ガス採掘が進められている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・資源大国であり国営石油を中心として精力的な研究開発が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・資源大国であり国営石油を中心として精力的な研究開発が進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・資源大国であり、かつ周辺の国からの権益確保もふくめ目立った動きが多い。近年は重慶近郊などでシェールガス掘削を試みている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・資源をあまり有しておらず国内での目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・資源をあまり有しておらず国内での目立った動きはない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・資源小国ながら、海洋石油開発技術（掘削リグの建造）においては実績多数。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）伊原賢．「石油資源の行方」．コロナ社（共著）．（2009年4月）．
2）伊原賢．「天然ガスパイプラインのすすめ」．日本工業出版（共著）．（2011年3月）．
3）伊原賢．「シェールガス争奪戦」．日刊工業新聞社．（2011年9月）．
4）伊原賢．「シェールガス革命とは何か」．東洋経済新報社．（2012年8月）
5）伊原賢．「天然ガスシフトの時代」．日刊工業新聞社（共著）．（2012年12月）
6）藤井他．地学雑誌, 2009, vol.118, no.2, p. 814-834 .
7）松本他．地学雑誌, 2009, vol.118, no.1, p. 43-71.
8）後藤他．地学雑誌, 2009, vol.118, no.2, p. 935-954.
9）青山他．地学雑誌, 2009, vol.118, no.1, p. 156-174 .
10）山本他．地学雑誌, 2009, vol.118, no.2, p. 913-934 .

### ３．１．４．５　全負荷帯での超高効率発電による$CO_2$排出量抑制

#### （１）研究開発領域名

全負荷帯での超高効率発電による$CO_2$排出量抑制

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

今後、ますます厳しい負荷変化調整が要求される石炭火力発電では、負荷応答速度が速く、幅広い負荷範囲において安定運転可能でかつ高い発電効率を維持できる$CO_2$排出量を最小限に抑制できる技術の開発、さらには、$CO_2$の分離・回収技術を組み合わせても高い発電効率となる方式に発展できる技術の開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

火力発電分野においては、$CO_2$排出量の削減に加え、今後大量に系統と連系されることが予想される再生可能エネルギーの不安定性の補完能力なども強く求められる。そこで、需要に応じて速やかに出力を調整できるとともに、定格負荷時に高効率なだけでなく、全負荷帯を通じて高い発電効率を有し、プラントの運転期間全体を通して$CO_2$排出量を最小にできる技術の開発が必要となる。また、今後ますます強くなると思われる$CO_2$排出抑制に対する要請に対応可能とするため、$CO_2$回収技術を組み合わせても、所要動力を極めて小さくして高い発電効率を維持できる高度な火力発電システムへと発展できる方式を開発すべきである。

微粉炭火力においては、すでにさまざまな低負荷運転、負荷変化運転がなされているものの、最低負荷のいっそうの切り下げ、負荷追従速度の向上が期待されている状況である。一方、微粉炭火力に比べて大幅な発電効率の向上が期待できる石炭ガス化を核にした石炭ガス化複合発電や石炭ガス化燃料電池複合発電においては、まだ負荷追従性の向上や最低負荷の切り下げ、といった視点では検討がなされておらず、まさに今後、このような視点からの技術開発は重要となると思われる。$CO_2$回収技術についてはさまざまな方式が提案されているものの、いずれの方式も$CO_2$回収により大幅な効率低下とコスト上昇は避けられず、高発電効率と$CO_2$回収を両立できる方式は、まさにこれからの開発課題だと考えられる。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

微粉炭燃焼を核としたシステムの場合は、低負荷時に濃度が希薄となるバーナ内微粉炭を適度に濃縮するなどバーナ構造の最適化を中心とした技術が重要となる。一方、石炭ガス化を核にしたプロセスにおいては、低負荷におけるガス化炉の安定運転技術およびガス化炉とガスタービンまたは燃料電池の連系技術など、複雑なシステム構成において負荷変化時の最適運転方法を多様な視点から探索するとともに、これらのシステムの高効率という特性を発揮できる負荷範囲の解明など、必要な要素技術を開発しなければならない。また、燃焼およびガス化に共通な課題として、微粉炭を製造するための粉砕機の負荷追従性と低負荷運転安定性の向上が重要となる。加えて、高効率な$CO_2$回収のためには、$CO_2$の回収位置の最適化と回収技術の高度化だけでなく、$CO_2$を回収しやすいガス条件への設定など、より多面的な視点からの検討が必要となる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・勿来の空気吹きIGCC実証機は、2012年度で所定の目標が達成され、実証試験を2012年度末で終了し、2013年度からは商用運転が行われている。
・EAGLEプロジェクトにおいて、石炭ガス化ガスからの$CO_2$回収エネルギーの低減に向けて、化学吸収方式、物理吸収方式の試験研究が行われた。
・大崎クールジェンプロジェクトが進行中であり、その第1段階である酸素吹きIGCC実証試験設備の建設が2013年3月より進められており、実証試験は2016年度より開始される予定である。
・海外のIGCCプラントとして、中国GreenGenプロジェクトおよび米国Edwardsportプロジェクトが2012年に試運転を開始した。

### （６）キーワード

石炭ガス化複合発電（IGCC）、低負荷高効率化、高効率の二酸化炭素回収（CCS）

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・微粉炭火力用バーナ技術開発において、現状の最低負荷20%を遙かに下回る負荷帯における燃焼促進技術開発が進められている。<br>・微粉炭火力技術において、負荷変化時の主蒸気管温度偏差を最小限に抑えるためのシステム検討が進められている。<br>・大学や研究機関においてガス化技術・$CO_2$回収技術に関する基礎的研究が幅広く実施されている。<br>・低品位炭の改質・利用拡大、熱分解・燃焼・ガス化反応モデリングや数値解析技術などの基礎研究が行われている。<br>・また、$CO_2$回収技術の分野では、酸素燃焼方式の概念をIGCCと組み合わせた新しいシステムの基盤技術開発や膜分離技術に関する研究なども進められている。<br>・石炭ガス化燃料電池発電に適用可能な技術として、固体酸化物形燃料電池（SOFC）により既存GTCCをリパワリングし、幅広い負荷範囲で高効率運用するコンセプトが提案されている[1)]。<br>・SOFCを高速で負荷変化させた場合のガスタービン運用条件に与える影響が分析されている。<br>・$O_2$-$CO_2$ガス化技術と燃料電池を組み合わせることにより、発電効率を高く維持しながら炭酸ガス回収を行うシステムの概念が提案されている[2)]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・微粉炭火力技術において、蒸気タービン系抽気蒸気量調整による負荷の瞬間的変動への対応技術が検討されている。<br>・空気吹きIGCC実証機プロジェクトが順調に進捗し、IGCC実証機は2013年度より商用運転に移行している[3)]。また、酸素吹きEAGLEプロジェクトに引き続き、燃焼前回収方式$CO_2$回収型IGCCやIGFCを視野に入れた大崎クールジェンプロジェクトが進められている[4)]。<br>・日本と豪州の共同プロジェクトとして、豪州カライド発電所における酸素燃焼方式$CO_2$回収技術の実証試験が開始されている[5)]。<br>・固体酸化物形燃料電池（SOFC）とマイクロガスタービンのハイブリッドシステム実証試験では、約5000時間のシステムの耐久試験、起動時間短縮に関する試験、および超高速の負荷変化試験などが実施されている[6)]。<br>・大崎クールジェンプロジェクトの実証試験第3段階として、$CO_2$を酸素吹きIGCCから回収した後に燃料電池にて発電を行う実証試験が計画されている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・微粉炭火力技術において、負荷追従3%以上を達成可能なワイドレンジバーナが実用化されている[7)]。<br>・石炭ガス化技術に関して、三菱重工が空気吹きガス化/酸素吹きガス化ともに実用化段階の技術として、米国や中国などへの展開を進めている[8)]。<br>・2020年の運転開始を目指して、福島県に50万 kW級IGCCを2基建設するプロジェクトが進んでいる。<br>・三菱重工と関西電力が開発した化学吸収液を用いた$CO_2$回収技術が商用規模の米国石炭炊き火力のEORプロジェクトで採用された[9)]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・米国の大学・研究機関における基礎研究は、米国エネルギー省のサポートもあり、幅広い分野で高いレベルにある。<br>・石炭利用分野に関して、基礎的な実験研究に加え、高度な数値解析技術の活用も進められつつある。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・ガス化技術を中核とした各種システムの高度化（コスト低減、効率向上）に向けた研究開発が数多く行われている。<br>・米国エネルギー省のサポートを受け、酸素製造用酸素分離膜、粉体供給ポンプ、$CO_2$回収用$H_2$-$CO_2$分離膜、ガス精製技術などのさまざまな技術開発が継続して進められている[10)]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ◎ | → | ・GE社、CB&I社の保有するガス化技術は、これまでに化学合成用を中心に、世界各国で数多くの実績がある[11, 12]。現在、発電用を含め、自国のみならず、グローバルに事業展開をしている。<br>・米国内では、Edwardsport IGCC（GE社技術）が運転を開始し、両社のガス化技術を用いたプロジェクトは、海外も含め複数進行中である（インドJamnagarプロジェクト[13]、韓国POSCOプロジェクトなど）。<br>・KBR社のTRIG技術を用いたKemper IGCCが2014年より運転を開始する予定である[14]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | △ | → | ・石炭関連技術については、古い歴史を持ち、大学・研究機関で裾野の広い基礎研究が行われている。<br>・石炭のキャラクタリゼーション、熱分解に関する研究や$CO_2$貯留に関留守研究が多い傾向が見受けられる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↘ | ・$CO_2$回収貯留に関して、積極的に取組んでおり、酸素燃焼方式や燃焼前回収方式の実証プロジェクト計画がある。しかしながら、必ずしも順調に進捗してないものも見受けられ、$CO_2$回収の実証に積極的に取り組んできたVattenfallがCCS開発の取りやめを発表するなど、その動向を注視する必要がある[15]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・Shell社は、化学合成用ガス化技術に関して、豊富な実績を持ち、発電用に関しても、自社技術を有している[16]。また、Uhde社もスペインPuertollano IGCCでの実績を持ち、海外を含め事業展開を図っている[17]。<br>・近年では、Siemens社が化学合成プラント、IGCCプラントに対して、積極的な事業展開を図っていることが注目される[18]。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・国内での研究に加え、海外への留学を通じて、研究の水準は着実に上がってきている。<br>・低炭素化をテーマにした国際会議の開催を積極的に行うなど、最新の供給動向把握と海外研究機関との交流により、自国の基礎研究の拡充を図っている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・ガス化技術に関し、後述の技術が実用化の段階まで来ており、これらの改善検討が継続して行われているようであるが、ガス化技術分野での応用研究・開発は一段落の感がある。<br>・国際的な技術動向を見極めながら、自国の優位性を高める技術開発を進めてきていることから、今後、$CO_2$回収分野などでの研究開発が加速されることが推測される。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・ガス化分野において、過去は、GE社やShell社などの海外技術の導入が中心であった[19]。<br>・自国のガス化炉技術の開発も進められ、HCERI（Huaneng Clean Energy Research Insititute）炉によるGreenGenプロジェクトが運転を開始し、すでに、同技術の海外展開を図っている[20]。<br>・また、中国ではOMB（Oposit Multi Burner）炉やTU炉なども開発され、化学合成用としてプロジェクトが進み、自国内で多数稼働している[21-23]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・大学・研究機関で石炭利用技術に関する基礎研究は継続的に行われてきている。<br>・基礎研究としての水準は着実に上がってきており、例えば、釜山大学では、Pusan Clean Coal Centerにおいて、石炭燃焼・ガス化に関し、基礎実験から数値解析まで総合的に研究が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・米国で記載したPOSCOプロジェクトや後述のTaean IGCCプロジェクトのように、コアとなるガス化技術は海外から導入する流れが多い。<br>・このような状況の下、既存技術・他国技術の評価を可能とするような研究開発の進展がみられる。<br>・また、Partial/non slaggingガス化炉の開発を進めており、20 t/d規模のガス化炉を設置し、Taean IGGCの支援を行うこととしている[24]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | △ | ↘ | ・Taeanプロジェクトなどの IGCC導入計画が進められているものの、コアとなるガス化技術は海外技術である。<br>・海外ガス化炉メーカーとの協業により、ガス化分野での国内産業の育成・強化を図ろうとしている。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 吉葉他．”既存GTCCのSOFCによるリパワリング時の性能”．電力中央研究所研究報告M13003,2014.5
2) 吉葉, 幸田．”Efficiency analysis of a coal gasification molten carbonate fuel cell with gas turbine combined cycle including $LCO_2$ capture”. ASME Turbo Expo 2008, 2008/6/13.
3) Nunokawa, Makoto. “Progress in NAKOSO 250　MW Air-Blown IGCC Demonstration Project”. International Conference on Power Engineering 2013, 2013.
4) 藤井準次．”大崎クールジェンプロジェクトの概要及び今後の計画について”．日本エネルギー学会誌, 2013, vol. 92, no. 2, p. 408-412.
5) カライド酸素燃焼プロジェクト, http://www.callideoxyfuel.jp/, (cited 2014-07-25)
6) 小林由則, ”分散電源としての燃料電池の可能性（大型次世代燃料電池SOFC開発状況と今後の展開)”．東京大学生産技術研究所 第18回CEEシンポジウム「固体酸化物形燃料電池の新たな展開」2014.4.25.
7) 沖他．”微粉炭用内部セパレート型ワイドレンジバーナの開発-事業用ボイラにおける実証試験“. 電力中央研究所研究報告W94019,1995.6
8) Sakamoto, Koichi. “Progress Update of MHI Air Blown IGCC and Oxygen Blown Gasification Plant”, POWER-GEN International 2013, 2013.
9) 三菱重工株式会社.プレスリリース. http://www.mhi.co.jp/news/story/1407155547.html, (cited　2014-07-25)
10) U.S. Department of Energy. Gasification Systems Projects & Performers. http://www.alrc.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/pubs/projects-performers.html, (cited 2014-07-25)
11) Fair, DeLome. “Global Gasification Solutions”. Gasification Technologies Conference 2013, 2013.
12) Amick, Phil. “E-Gas Technology Gasification for the Refining and Coal Chemical Industries”. CoalGas 2014, 2014.
13) Maitra, Partha. “The Jamnagar Gasification Project”. Gasification Technologies Conference 2013.（2013）.
14) Mohmand, Faisal. “TRIG Technology & Project Updates”. Gasification Technologies Conference 2013.（2013）.

15) Vattenfall, Press release. “Vattenfall opts for efficient research projects to boost its business”. http://corporate.vattenfall.com/news-and-media/press-releases/2014/vattenfall-opts-for-efficient-research-projects-to-boost-its-business/. （cited 2014-07-25）.
16) Schenk, Hubert W. “Gasification Opportunities and Challenges”. 6th International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies. （2014）.
17) Radtke, Karsten. “ThyssenKrupp Uhde’s HTW and PRENFLO Technologies”. Gasification Technologies Conference 2013. （2013）.
18) Hannemann, Frank. “Economical and Environmental Targets for Gasification/SFG Technology Update”. 6th International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies. （2014）.
19) Higman, Chris. “State of the Gasification Industry -the Updated Worldwide Gasification Da-tabase”. Gasification Technologies Conference 2013. （2013）.
20) Li, Guangyu. “Industrial Application of Two Stage Dry Pulverized Coal Gasification Technology”. 2012 Gasification Technologies Conference. （2012）.
21) Yu, Guangsuo. “Opposed Multi-Burner gasification and its application prospects”. 6th International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies. （2014）.
22) Jiansheng, Zhang. “Innovativeness and Development of Tsinghua Gasification Technology”. Gasification Technology Conference 2013. （2013）.
23) Morrison, Geoffrey. “China’s coal gasification development and deployment programme”. 6th International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies. （2014）.
24) Yun, Yongseung. “Development of Partial/Non-Slagging Entrained-bed Coal Gasifier to Lower Capital Cost”. Gasification Technologies Conference 2013. （2013）.

### ３．１．４．６　中温作動の固体電解質による新規プロセス

#### （１）研究開発領域名

中温作動の固体電解質による新規プロセス

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

低温において酸素イオンを電気化学的にポンプアップすると、通常の熱活性化された酸素とは異なる電子状態の酸素を得ることができ、この酸素を用いることで、選択的な触媒反応を行うことが可能となることがわかっている。近年、低温で酸素を移動させるために、格子歪の正の効果が見出されており、従来になく低温での酸素イオン伝導が実現しつつある。一方、中温電解は、新しい未利用熱エネルギーの利用法として着目されており、電解と発電を同じセルで行うことが可能な、可逆動作セルはエネルギーの蓄積媒体として注目されている。今後は作動温度の低温化などにより、興味ある部分酸化などの反応を生じることが期待されるとともに、新しい蓄エネルギーデバイスになることが期待されている。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

電気化学的に活性化された酸素は通常の熱励起された酸素に比べ、酸化能が高く、ユニークな酸化反応を生じることが分かっている。酸素イオン伝導性を有する固体酸化物上で電気化学的に活性化された酸素を利用する電気化学反応器は、選択的な反応プロセスの開発が期待されながら、従来の酸素イオン伝導性固体電解質は作動温度が高く、反応は生成物が限定され、選択的な反応を行うことができず、電力を投入して行うことの意義が見出されてこなかった。

一方、現在、多くの未利用熱エネルギーがあり、その有効利用が期待されている。現在有効に利用されていない熱エネルギーの温度は200～400℃程度であることから、この温度域で、吸熱反応で、選択的な反応を行うことのできるプロセスの開発が望まれている。近年、高温電解による有用物質の生産とその逆動作に相当する燃料電池の発電が検討され、可逆動作形燃料電池と呼ばれエネルギーの新しい貯留方法として期待されている。

水素をエネルギーのキャリアとして利用とすることの重要性が近年、国内外で認識され、国内でも大型の研究プロジェクトとして組織的な検討が精力的に開始されている。現状ではこのようなプロジェクトとして対象としているのは主に、太陽光や太陽熱が中心であり、未利用熱エネルギーを積極的に回収しようとする研究は組織的には行われていない。一方で、再生可能エネルギーの平準化を目的に、欧米を中心に高温電解の基礎研究が開始され、組織的な検討が開始されている[1)]。しかし、これらの研究はあくまでも高効率電解のための検討であり、作動温度などを下げて、未利用熱を有効に利用しようとする組織的な動向にはない。

未利用熱の有効利用として意味のある低温での、可逆的に動作可能な固体酸化物形電解セルの開発が国内外で活発化しようとしている。このような低温での未利用熱エネルギーを利用した有用化合物の合成やエネルギー蓄積では、従来になく低温で酸素をポンプアップする必要があり、新しい概念のイオン伝導性材料の開発が期待されている。格

子歪を導入した酸素イオン伝導体におけるイオン伝導の向上現象が見出され、これを利用する新しい概念の固体電解質の開発と、可逆的に動作可能な高活性電極の開発など、今後、系統的な検討が行われることで、エネルギーの貯蓄を目的とした、また新しいエネルギー・物質の利用体系の構築が期待されている。このような目的で、有用なプロセスの一例として、高温水蒸気電解や$CO_2$電解、および$CO_2/H_2O$共電解による合成ガスや炭化水素の直接合成が期待されている。特に、共電解による$CH_4$合成では500℃以下の低温で電解することで、達成できることが報告されており、$CH_4$を経由するエネルギーの蓄積が期待されている[3, 4]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

現在の未利用熱利用の手法は熱交換なので、エクセルギーの低下が大きく、再利用に向いていない。そこで、等温で、かつ吸熱反応を進めることで、時間と空間を超えたエネルギーの輸送技術の実現が期待されている。このような観点で、中低温熱を有効利用できる固体電解セルを利用する中温電解技術の開発が望まれているが、良好な電解質や電極材料の開発などに課題があり、実現できていない。一方で、固体電解質形電解セルは逆動作させると燃料電池となり、可逆動作セルはエネルギーの貯蓄デバイスにもなるが、このような可逆セルの開発は、NEDO（固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発プロジェクトなど）などで一部の検討は行われているものの、これまでは個別の基礎研究であり、組織だった研究開発は行われていない。可逆動作形セルにおいて、エネルギーを仲介する物質が有用な化合物である場合には、電解プロセスは、有用物質の合成プロセスとしても興味ある新規な反応プロセスにもなるが、我が国においては電力を投入して、有効利用されていないエネルギーの質を向上させようとする試みへの理解が十分得られず、ボトルネックとなっている。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

この分野を推進する新しい知見として、酸素イオン伝導体中の格子歪が、酸素イオン伝導性を大きく向上させることの発見がある。近年、$Y_2O_3$安定化$ZrO_2$や$CeO_2$などのナノ薄膜において、歪により導入される格子の膨張により、酸素イオン伝導性が数桁にわたり向上できることが見出され、その実際のデバイスへの応用が期待されている[5]。このイオン伝導に及ぼすナノサイズ効果を上手く利用することで、従来になく低温での酸素イオン伝導が実現できる可能性がある。一方、高温水電解技術は、現在、高効率な水素製造法として一部のプロジェクト（例えば、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）など）で検討が開始されているが、高活性な電極材料の開発などが必要で、大学などを中心に基礎研究が行われつつある。特にNiにFeなどを複合した材料が優れた活性を示すことが見出されている。

### （６）キーワード

電気化学、中温電解、固体イオニクス、触媒効果

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・固体酸化物形燃料電池の分野で日本はもっとも先進的であり、多くの基礎研究が行われており、研究者層も厚い。歪効果に関して、基礎研究が開始されており、今後、表面触媒への応用などの研究が加速すると考えられる |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・固体酸化物形燃料電池の分野で、応用研究をサポートする多くの研究機関があり、電解技術などへの応用を視野に入れたセルの開発は今後加速すると期待される。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・固体酸化物形燃料電池を可逆的に運転し、エネルギーの蓄積を考えている企業があり、これらの企業を中心に産業化が加速すると考えられる。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・原子力の核熱の適応を視野に入れた電解技術の開発が盛んにおこなわれているとともに、格子歪を利用する触媒活性向上効果やイオニクス材料の薄膜作成に関して基礎研究が精力的に行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・大型の固体酸化物形燃料電池の開発のための応用研究が国立研究所を中心に精力的に進められており、水素製造を視野に入れて今後は開発が活発化すると考えられる。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・水蒸気電解の大型の装置の開発を行った企業があり、今後もこれらの企業を中心に開発が活発化すると考えられる。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・固体イオニクス関係の多くの研究者があり、この分野をけん引する大学や研究機関も多いので、基礎研究はもっとも精力的な地域であり、高温電解技術への強い関心と可逆エネルギーの有効利用の観点から研究が盛んで、今後も活性化すると考えられる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・国立研究所を中心に、応用研究も活発に行われており、特に、ドイツJulich研究所、デンマークのRiso国立研究所などで応用研究が行われており、今後も活性化すると考えられる。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・いくつかの企業が電解装置を精力的に開発しており、産業化が視野に入っている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・固体酸化物形燃料電池の基礎研究がいくつかの大学などの機関で行われているが、全般的に研究の活性は高くない。今後は水素製造や燃料電池の開発への関心が高まり、開発が活性化すると考えられる。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・いくつかの研究所で応用研究が行われているが、開発は活性とは言えない。 |
| | 産業化 | × | → | ・現在までに、固体酸化物形燃料電池の分野までを含めて目立った産業化の動きが見えず、電解技術についても産業化の動きは全く見えない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・いくつかの大学で、固体酸化物形燃料電池への興味は示しているものの、逆動作の高温電解技術は、まだ、十分活発ではない。今後、欧州や日本の動きに連動して活発化すると考えている |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・エネルギー関係の国立研究所でSOFCのセルの開発やスタック開発が活発に行われ出しているので、現状では高温水蒸気電解や可逆動作形セルの開発が引き続き行われると考えられる。 |
| | 産業化 | × | ↗ | ・現在までに、固体酸化物形燃料電池の分野までを含めて目立った産業化の動きが見えないが、今後は周辺諸国の状況を受けて、特にエネルギー蓄積の分野で、産業化が活発化すると考えている。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) M.A. Laguna-Bercero. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells： A review, J. Power Sources, 2012, vol. 203, p. 4-16.
2) J.E. O'Brien, Nuclear Technology, Review of the potential of Nuclear Hydrogen for Addressing Energy Seculity and Climate Change. 2012, vol. 178, p.55-85.
3) C. Costentin et al., Catalysis of the electrochemical reduction of carbon dioxide, Chem. Soc. Rev., 2013, Vol.42, p. 2423-2436.
4) Z.L. Zhan et al., Syngas production by coelectrolysis of $CO_2$/$H_2O$ : The Basis for a Renewable Energy Cycle. Energy & Fuels, 2009, vol. 23, p. 3089-3096.
5) J.L.M. Rupp. Ionic diffusion as a matter of lattice-strain for electroceramic thin films. Solid State Ionics, 2007, Vol. 207, p.1-13.

### ３．１．４．７　分散電源と再生可能エネルギーとの融合システム

#### （１）研究開発領域名

分散電源と再生可能エネルギーとの融合システム

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

低炭素社会と震災を教訓とした防災型社会に貢献する、エネルギー地産地消スマートコミュニティ構築技術が求められている。太陽光、風力といった地域の自然エネルギーを最大限に電力として活用、排熱を有効に活用する分散型コジェネシステム、蓄電池などでコミュニティ需要とマッチングさせ、広域電力グリッドを安定化させる情報技術との融合領域の研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

太陽光、風力といった自然エネルギーを活用した発電は「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が2011年8月30日成立[1)]、2012年7月1日から一般電気事業者、特定電気事業者、特定規模電気事業者による再生可能エネルギー全量買取（FIT：Feed-in-Tariff）制度が始まり普及が進んだ。これら、自然エネルギー由来の電力は国内未利用資源の活用促進と化石資源輸入抑制、温室効果ガス（$CO_2$）排出削減に貢献している。このほか、太陽光発電は昼間電力ピーク時の供給に有効であり、電力需要ピークに合わせ建設されてきた一般電気事業者の発電設備投資の抑制と、原子力発電がすべて停止している状況下での電力供給安定にも貢献している。

再生可能エネルギーと並んで低炭素社会、防災型社会構築技術として注目されているのが、オンサイト電源である。電気と熱両方を供給でき、最新鋭コンバインドサイクルより20ポイント以上高い、総合効率約80％を発揮するオンサイトコジェネレーションへの期待は特に大きい。一般に発電用内燃エンジン、ガスタービンなどは、急激な負荷変化や低負荷運用などで発電効率が落ちる傾向にある。したがって、これらを調整電源として利用した場合、大きなエネルギー損失が生じる。しかし、コジェネレーションは、部分負荷運用などで発電効率が低下する分排熱エネルギーが増加し、その損失エネルギーを蒸気や温水として回収できるため、部分負荷運用でもエネルギー利用総合効率を毀損することがないという長所を有している。今まで、オンサイトコジェネレーションは電気、熱の消費を設置個所で完結させる必要があったため、経済的運用が極めて困難であった。しかし、電力システム改革で他電気需要に対して連動した運転・融通ができるようになるので、経済的運用が可能となる。オンサイトコジェネレーションはもっとも高いエネルギー利用効率で調整電源として利用でき、さらには災害時の地域電源としても大きな可能性を秘めている。

一方、出力制御できない再生可能エネルギー電源の調整は二次電池を導入する、あるいは離島など系統容量の小さな地域では電力系統そのものに電池を導入し安定化を図るなどの取組みがなされ一定の成果[2)]を上げているものの、充放電サイクルでエネルギー損失が生じる、安全性確保のために冷却エネルギーを必要とする、あるいはコストが高いなど電池には課題が多い。再生可能エネルギーの大量導入時の出力調整を電池だけで達成するのはコストやエネルギー損失の問題で、現実的ではない。情報技術（ICT：

Information and Communications Technology）で、オンサイトコジェネを再生可能エネルギー電源と連動させ、調整機能として使用するシステムは低コストでかつ低炭素な方法として極めて有効である。

一般的な大容量電力ネットワークの安全設計は、再生可能エネルギー発電のように利用率の小さな電源設備であろうとも、エリアに存在する電源の総容量をよりどころとしているため、最大出力をもとに評価される。これが、FIT制度で増加しつつある再生可能エネルギーの導入制限要因ともなっている。電力需要に関係なく、自然条件によってのみ出力を変化させる再生可能エネルギー電源は、近隣エリアに設置されたコジェネレーション電源を需要見合いで連動させることで計画的なエリアの電力消化を達成し、広域電力ネットワークの安定にも貢献する。ICTで地域コミュニティの需要監視と再生可能エネルギーを含むオンサイト小型電源、蓄電を一元管理・制御し、再生可能エネルギー電気の地消を進め、広域電力ネットワークの安定化を図る試みが始まっている。

東京大学で提案されたDigital Grid[3]は、需要地点に設置する小規模電力貯蔵装置や発電装置などを、パワールーターを介して系統と非同期的に接続、系統から供給を受ける電力を能動的に変化させることができるシステムである。この技術を利用すると需要変動を特定エリアで吸収し、系統から供給を受ける電力を常に一定にすることができる。米国のEPRI（Electric Power Research Institute）でも、再生可能エネルギー大量導入に対する系統安定化、電力ネットワーク増強投資低減のために、Integrated Grid[4]という概念が提案されている。電力消費と連動していない再生可能エネルギー電源を含む分散電源（DER：Distributed Energy Resources）の系統接続（逆潮）コストは高く経済的にも不利であると指摘、これらDERをICTで電力消費情報と連動させるシステム（Integrated Grid）を必要としている。東京大学とEPRIは、需要をリアルタイムで測定し、価格や電化製品の制御を組合せて需要を制御しようとする従来のスマートグリッドでは電力系統安定に関わる調整能力が不足であること、系統内に包蔵される再生可能エネルギー、分散電源、電力貯蔵装置などをすべてICTで連携、協調させる技術こそが低コストで広域電力ネットワーク安定化に貢献できることを指摘している。

今までに電力会社から需要家に対して一義的に行われてきた電力供給は、電力自由化により電力の供給/消費の双方向コミュニケーションが不可欠となる。さらに、分散して存在するDERおよび蓄電池も情報通信システム技術で一元管理下とすれば、低コストで広域ネットワーク安定に大きく貢献する。すなわち、現在供給サイドによる需給調整から、供給/消費両サイドでICTによる電力需要情報共有化、需給アンバランスを分散する多数のDERおよび蓄電池で需給調整するシステムの開発が進んでいる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

日本では戦後一貫し9社独占体制で電力供給が行われてきた。この体制は戦後の経済復興需要を力強く支えてきたが、当初の目的と大きく乖離しており、現在、電力システム改革が遂行されている。現在日本の電力輸送コストは米国の4倍と極めて高く[4]、この電力輸送料金圧縮と過剰投資抑制は危急の課題である。電気事業法改正で2016年より電力自由化が始まるが、依然市場には一般電気事業者という強大なマーケッターが存在しており、最新ICTによる需給調整システム導入には、ローカル制御といえども抵抗が予想

される。電力消費と発電設備間に双方向情報通信システム技術を適用、両者を連携することは系統運用の簡素化、電力ネットワーク設備増強投資の抑制などに不可欠である。日本の電力市場の活性化と価格低減、電力広域ネットワーク安定化に資する技術の開発・導入推進には、公平な電力市場を構築する政策を進展させるという市場へのメッセージが不可欠である。

使用される技術は電力技術、情報通信技術、熱利用技術で新たに開発されるものは少ないものの、これらを融合して電力需給調整に利用することに関してはまだ経験は少ない。今後指向される双方向情報通信システムは、大型電源/個別需要間のみにとどまらず、DERや蓄電池運用、さらに需要家間のアグリゲーションなどその利用価値は多岐にわたる。その汎用性を担保するシステムセキュリティや規格化の検討も必要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

蓄電池や多様なオンサイト電源も活用することで、低コストで再生可能エネルギー大量導入を指向する日本独自の融合技術は野心的なものであり、将来世界の電力インフラ整備に欠かせない制御技術となりうる。これらの検証は主にスマートグリッドの中で取り扱われており、検証の一部として進められている。国内では、横浜市、豊田市、けいはんな学研都市（京都府）、北九州市の4地域[5)]をはじめ、2013年6月現在145地点でスマートグリッド実証実験が行われている[6)]。これらには多数の国内企業が参加し、電気・熱エネルギーばかりか交通システムなどを含め、人々のライフスタイルの見直しなど、新たな社会システムを提案、地域エネルギー・マネジメント・システム（CEMS：Community Energy Management System）の構築を目指している。Digital GridもJSTのSTARTプロジェクトとして、2013年度より電力技術、情報技術、金融技術を組合せ次世代型電力サービスの提供を目指した取組みを開始している[7)]。

米国では、2008年に連邦スマートグリッドタスクフォースを立ち上げ、34億ドルの資金が100件のプロジェクトに配分された。米国のスマートグリッドは電力系統ICT化およびスマートメータ導入を目指すものでもある[8, 9)]。EUでは2005年に欧州テクノロジープラットホームがEU委員会内に設置され、ドイツなどの再生可能エネルギー推進政策による系統不安定化の対策として、ローカルな調整機能を強化するためにスマートグリッドを導入。再生可能エネルギー導入量を増やし、20%の温室効果ガス削減につなげることを目標としている[10)]。中華人民共和国では2010年から5か年の天津エコシティプロジェクトが発足、2,500億元が投じられる計画であり、再生可能エネルギーを20%以上組込むことを目指している[11)]。韓国では済州島で国内168社が参加するプロジェクトが進行中で、2030年までに政府資金が27.5兆ウォン投じられる予定である[12)]。

世界のこれらの動きに加え、日本のNEDOは米国、EU、アジア各国と連携しCEMSに係る取組みを実施中である[13)]。海外でイメージされるスマートグリッドは、どちらか言えば旧式の電力輸送設備、系統運用システム更新という側面が強い。一方、すでに安定したネットワークを有する日本では、環境性・低炭素、災害に強いコミュニティ構築といったさらに高い目標を設定している。この高い目標達成には、リアルタイムの需要測定と単価や電化製品制御で需要調整する従来のスマートグリッドの発想ばかりでなく、天候などによる需要プレディクション、DERや蓄電池の制御を加えた系統安定化対策が

必要である。

### （６）キーワード

再生可能エネルギー、コジェネレーション、蓄電池、DER、FIT、電力システム改革

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・大学で電気工学が中心となり、電力技術としてマイクログリッド、スマートグリッドの研究実施。<br>・ICTを駆使した双方向情報技術の重要性が再認識され大きく進展、電気以外のエネルギー・サービスも含め低炭素・防災社会構築を指向。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・国内145か所で蓄電池、電気自動車を組込んだスマートグリッド実証が進行中。横浜市などでは、熱、オンサイトなどあらゆるエネルギー・マネージメントを統合した試験も進行中。<br>・福岡県みやま市では電力購入連携と種々のサービス融合などの効果検証が行われる。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・2016年電力自由化を見据えた事業計画が多数進行し、240以上の新電力が届出されている。今後このPPSが中心となって各地で事業展開。<br>・異なるメーカー機器、地域での連携のための規格化など標準化、システムセキュリティが課題。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・EPRIでは大量の再生可能エネルギーがグリッドに導入された場合、コミュニティでの電力消費調整が必要と指摘。再生可能エネルギー、小型オンサイト電源、蓄電池などトータル制御する方向で研究。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↘ | ・DOE（エネルギー省）が所管官庁。エネルギー安全保障の観点で取組み。<br>・2008年から本格始動、約1,000万台のスマートメータ敷設完了。ニューメキシコ州ロスアラモスで2 MWの太陽光、1 MWの蓄電池を使った連携制御試験実施中。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・NIST（国立標準研究所）、IEEE（電気協会）などが技術の国際標準化を目指した取組みを開始。<br>・テキサス州では電力とガスを販売する会社（CPE社）が家庭スマートメータ無線信号を電柱上Communication Control Unit（通信制御装置)で受信、自動検針システムを運用、さらにデマンドレスポンスなど高付加価値利用試験運用中。<br>・スマートメータデータを使った省エネなど高付加価値システム構築に、IBMやアルバカーキなどが参画。 |
| 欧州 | 基礎研究 | × | ↘ | ・ドイツの環境政策で大量導入された再生可能エネルギーの系統連系に伴う安定化研究。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・温室効果ガス削減目標達成する手段として、再生可能エネルギー大量導入を位置付け、EU委員会内に専用部局を設置。ドイツ（再生可能エネルギー全般）、オランダ（風力）、デンマーク（バイオマス）、イギリス（洋上風地力）、イタリア（太陽光）などでそれぞれ地域性ある再生可能エネルギー活用、電力ネットワーク安定化実証事業実施。<br>・各国の重電に加え、石油会社、保険、銀行などが参加することが特徴。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・サハラ砂漠での太陽光事業（DESERTEC）など、保険、金融、石油会社などが支援する大型プロジェクト発足。<br>・2050年欧州電力の15%を再生可能エネルギーで賄うことを目標としており、系統安定化対策として導入される計画。EUは複数の国が網目状の送電ネットワークで連携されているので、日米とコンセプトが若干異なっている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↘ | ・精華大学では再生可能エネルギーをより多く包蔵させる都市型と無電化地域を対象とする農村型でおのおの最適化を図る研究が進行中。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↘ | ・シンガポール政府と連携した天津エコシティPJで技術検証、再生可能エネルギーを20%利用する計画。ビル省エネ、蓄電池で再生可能エネルギー許容量増加を指向。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・クリーンエネルギー米中2国間協定を締結、新たに揚州市にスマートグリッドデモセンターを設立、電力管理、スマート家電、系統運用ソフトの製品検証を両国共同で実施。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | × | ↘ | ・SGなど企業で基礎研究 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↘ | ・済州島を実証場所とし、集中的に資金投入。10のコンソーシアムを立上げ、韓国168社が参画、総投資額1,060億ウォン。<br>・3,000世帯が参加し、小規模再生可能エネルギー、電気自動車充電、ビルエネルギーマネージメントなどと連携制御する試験実施中。 |
| | 産業化 | × | ↘ | ・産業化の強い思いはあるものの、現在はビルの省エネ診断程度にとどまっている。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 経済産業省資源エネルギー庁HP. 新エネルギーについて（なっとく！再生可能エネルギー）http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/legal.html
2) 小島武彦, 福屋善文. 離島向けマイクログリッドシステム. 富士時報, 2011, vol.84, No.3, p188-193.
3) Rikiya Abe, Hisao Taoka and David McQuilkin. Digital Grid：Communicative Electrical Grids of the Future. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID. 2011, Vol.2, No.2, p399-410.
4) EPRI report (2014) The Integrated Grid. http://tdworld.com/site-files/tdworld.com/files/uploads/2014/02/integratedgridepri.pdf
5) Japan Smart City Portal HP. http://jscp.nepc.or.jp/article/jscp/20120817/319944/
6) 環境エネルギー産業情報HP. 日本国内の主なスマートコミュニティ実証実験プロジェクト（2013年6月25日現在）. http://www.sangyo-times.jp/pdf/kn/130628a.pdf
7) JST 大学新産業創出拠点プロジェクト H25年度第3サイクルプロジェクト一覧. http://www.jst.go.jp/start/project/h25_03.html
8) 百瀬剛. スマートグリッドとICT【Ｉ】. 電子情報通信学会誌, 2011, vol.94, No.12, p1067-1071.
9) 村瀬一郎, 佐藤明男. 米国を中心としたスマートグリッドの動向. 情報処理, 2010, vol.51, No.8, p978-985.
10) HPC systems HP. http://smartgrid.hpc.co.jp/jikken_kaigai.html
11) Min Yong他. 中国のスマートグリッド市場における地域自立・環境調和型電力システムの制御技術. 東芝レビュー, 2011, vol.66, Mo.6, p22-27.
12) 李秀澈他. 韓国のスマートグリッド事業の推進戦略と成果. 名城論叢. 2013, vol.14, No.1. p111-137.
13) NEDO公開資料. 国内外のスマートグリッド実証実験について. 2012. http://www.ipa.go.jp/files/000013515.pdf

## ３．１．４．８　エネルギーネットワーク技術

### （１）研究開発領域名

エネルギーネットワーク技術

### （２）研究開発領域の簡潔な説明

石油、石炭、天然ガスなどの化石資源、原子力エネルギー、太陽、風力、海洋、バイオマス、地熱などの再生可能エネルギーの一次供給元から、燃料や電力といった形態で、産業（Industry）、業務（Commercial)、家庭（People's lives)、輸送（Transportation)などの必要なエネルギー需要に、必要なエネルギーを送り届けることがエネルギーネットワーク技術である。シェールガスなどの非在来型の化石資源や住宅屋根のPV（Photovoltaics）や洋上風力など多様かつ分散型の再生可能エネルギー電源の利用、電気自動車に代表される利用エネルギーの転換などにより、エネルギーネットワークの地理的な範囲、求められる機能は変化しつつある。

本領域では、エネルギーネットワークのうち、もっとも大きな変化が求められている電力分野のネットワーク技術である送電と需給調整サービス、また送電技術のその補完的位置にあるエネルギーキャリアについてもふれる。エネルギーキャリアとしてはアンモニアや有機ハイドライド、液体水素などが提案されており、変動する再生可能エネルギー由来の電力を、高効率に水素あるいは水素キャリアに転換する、あるいはエネルギーキャリアから電力などに効率的に変換するための各要素技術、さらに、システム全体を統括最適化しうる技術基盤の研究開発を推進する。



### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向 [1-6)]

シェールガスなどの非在来型の化石資源や住宅屋根のPVや洋上風力など多様かつ分散型の再生可能エネルギー電源の利用、電気自動車に代表される利用エネルギーの転換などにより、エネルギーネットワークのうち送電網のカバーすべき範囲と求められる機能は大きく変化しつつある。

電力分野のネットワーク技術である送電技術は、1)電力の供給源から需要への電気エネルギーの輸送に始まり、2)電力需給に必要な需給調整サービスのエネルギー/電力貯蔵サービスと組み合わせた提供、3)電力の市場取引き機能の一部の分担がある。また、大量のエネルギーの輸送と貯蔵を補完する機能として化学物質によるエネルギーキャリア技術も注目されている。

1）電気エネルギーの輸送

電気エネルギーの輸送には、通常、50 Hz あるいは 60 Hz の交流送電技術が用いられる。大電力の送電においては、損失の大勢を占める電線の抵抗損失を低減するためにさまざまな電圧が使われる。我が国では、66 kV、132 kV、154 kV、187 kV、220 kV、275 kV、350 kV、500 kV などの電圧が使用されている。送電線としては Ultra High Voltage 送電と呼ばれる 1000 kV 設計（現在 500 kV 運用）が最高の電圧であり、送電線の碍子、開閉機器、変圧器が開発されている。交流送電の送電能力向上のために、電圧や送電電力の調整を行う無効電力調整器や位相調整器など、半導体技術を活用した FACTS

（Flexible AC Transmission Systm)と総称される直列/並列機器が用いられる。また、太陽光発電や風力発電の変動に耐える送電網の安定運用のための、状態監視技術（Synchrophasor などの活用が技術開発中)、電源および送電網の機器の最適制御技術にも大きな技術開発の可能性がある。

長距離、大容量の送電あるいは比較的長距離の電力ケーブルが使われる場合、送電損失のさらなる低減、事故電流の低減、発電機の同期運転に関する不安定現象の解消などの目的で、直流送電が用いられる。現在の電力システムは交流が基本であるため、直流送電では、端点に大容量の半導体素子で構成される交直変換器が設置され、電力エネルギーの交流と直流の間の変換を通して、送電を行う。直流送電では、送電線路は交流の場合より安価になるが、端点の変換器を含めた変換設備の費用が余分にかかる。このため、交流と比較して技術特性に加えて経済性などが改善される場合、直流送電が選択される。

国際連系を含む系統間連系線については、電気エネルギーを輸送するという意味では特段の変わりはない。しかし、国際連系の場合を含め一般に需給調整が独立して行われる電力系統の間の連系においては、系統事故時の応援のルールを含め、さまざまな時間領域の需給調整に連系線をどう活用するかについては、国あるいは系統別のセキュリティの考え方の整理に始まり、電力系統の運用・制御をどのように行うかについて、リスク分析を含めた解析技術の確立が必要である。

将来の送電技術に大きな影響を与える可能性があるのが超電導技術である。1980 年代の後半の高温超電導現象の発見以来、高温超電導（実用的には−195.8℃、77K の液体窒素温度以上）を応用した超電導送電技術への期待は大きく、研究、実証試験が継続的に行われている。米国ニューヨーク州での導入[7]（AC 34.5 kV、350 m、2006-2008)、我が国では、横浜市での交流超電導送電実証試験[8]（AC 66 kV、2007-2013)、石狩市での直流超電導送電実証試験（DC 50 MW 程度、500 m、2015-)などがある。現在の我が国のエネルギー技術の分類において、超電導技術は、送電損失などの低減により省エネルギー技術とされている。しかし、従来の送電線の損失は数百 km の距離でも電圧を適切に選択することで最大で数%程度で省エネルギー効果は限られ、超電導送電技術の実用化は、送電ルートが限られる大都市の高密度送電であることに注意が必要である。

2) 需給調整サービス[9]

従来の送電網においては、多数の発電機と無数の需要をつなぐことで、それぞれが独立して需給を行う場合に比べて、需要の変動や発電機の事故の発生時も安定かつ経済的な電力需給を実現してきた。分散型の PV や風力発電の導入においても、送電網に多数のシステムを接続することで、合計の発電量の変動を相対的に小さくし、電力システム運用で不可欠なこれらの発電予測の誤差も小さくすることができる。これは、送電網による受動的な需給調整サービスである。

これに対し、PV や風力の周波数制御領域、ランプ変動（数十分～数時間の継続的な出力の減少または増加）領域を含めたさまざまな領域の変動が、低炭素な電力システムひいてはエネルギーシステム実現の障害となっている。これらの課題は、欧米の既存の電力システム、電力卸市場の運営においても大きな障害を引き起こし始めている。これら

の問題は、電力需給に係るあらゆる構成要素を最適活用するための新たな需給調整に関わる個別技術と全体を最適に組み合わせて活用する技術の確立が必要となる。すなわち、電力需給に存在するさまざまな変動に対応する調整力を、経済性、安定性、環境性を保ち確保するためには、従来電源である火力発電、揚水発電、水力発電、熱併給発電[10]などの特性改善、PV、風力発電の抑制を含めた調整力活用、エネルギー貯蔵要素を含めた需要の能動化による調整力活用、送電網の拡大・増強による混雑の解消をなどの個別の技術開発が必要である。さらに、個別の技術を最適に組み合わせて電力システム全体を運用するためには、需要と発電予測に基づき、前日、当日あるいは準リアルタイムの起動停止計画に代表される運用計画技術の高度化が必要である。また、将来の電力需給の変化を想定して、それぞれの技術の必要性に基づく最適な設備計画技術が、エネルギーネットワーク技術で今後取り組むべき重要分野である。

電力需給おけるこれらの運用計画、設備計画における着目点には以下のものが含まれる：

- 我が国および海外の多くで現在の最大設備量を占める火力発電の既存の調整機能の最大活用
- 揚水発電（特に揚水運転中にも需給調整ができる可変速揚水）、現在開発されているバッテリーなどの各種のエネルギー貯蔵技術のそれぞれの特性に応じた最大活用
- 分散電源や種々の需要など極めて多数の小規模な対象を、効率的、効果的に本来の利用目的を大きく損なわずに需給調整に活用するためのアグリゲーション技術
- 送電網、連系線の混雑管理と最大活用
- 需要予測、発電予測技術の確立、精度向上、避けられない予測誤差の定量情報提供
- 上記の諸点を含め今後の技術発展を考慮できる起動停止計画、シミュレーションの技術、実際の電力システムの運用技術

3) エネルギーキャリア

「エネルギーキャリア」は、「変動する再生可能エネルギー由来の電力を、高効率に水素あるいは水素キャリアに転換する、あるいはエネルギーキャリアから電力などに効率的に変換するための各要素技術、さらに、システム全体を統括最適化しうる技術基盤を系統的に構築する」ものとして、『研究開発の俯瞰報告書環境・エネルギー分野（2013年)』に取り上げられ、日本では2013年度より水素分野として複数のナショナルプロジェクトが立ち上がった。ヨーロッパでは、EUでの取り組み[10]と並行して、バイオマス、余剰電力からの水素などの製造と供給を目指して、2012年以降ガス会社3社（2013/4に2社参加）による“carbon-neutral gas supply[11]”への取り組み、関連の技術開発が行われている。本分野の取り組みにおいては、上記俯瞰報告書の政策課題に指摘があるように、水素などの製造のための一次エネルギー源となる「再生可能エネルギーの利用を含めたエネルギー利用システムのシナリオ検討」を加速し、各課題に適切な開発目標を与えることが肝要である。再生可能エネルギーを化学的エネルギーとして貯えるためのエネルギーキャリアは、電気的エネルギーとして貯える蓄電池に比べて大容量のエネルギー貯蔵・輸送・利用が可能であり、分散型エネルギーシステムにおける再生可能エ

ネルギーの平準化・最大限活用、国内および大陸間輸送、緊急時のエネルギー供給などに有効な手段と考えられる。エネルギーの需給変動は、短期間・小規模なエネルギー貯蔵は二次電池あるいは系統による融通で、長期間・大規模なエネルギー貯蔵はエネルギーキャリアによる貯蔵で、と棲み分けながら利用することになると考えられる。昨今のエネルギー事情から、エネルギーキャリアの安定的利用技術確立のニーズが顕在化してきたが、研究開発には時間を要することから、中長期に亘る基盤技術確立に向けた取り組みが必要といえる。

すでに、電力からのエネルギーキャリア（水素）への転換方法として水電解があり、これは、食塩電解などにおいて工業化されている電解技術が基盤となり、当該分野において日本の技術は大きくリードしている。しかしながら、エネルギー転換効率や、変動する再生可能エネルギーに対する耐久性など課題も多く、投入電力の制御（変動抑制）と併せて検討すべき点が多い[12]。また、その後段にあたる水素から化合物キャリア（メチルシクロヘキサンあるいはアンモニアなど）の合成工程ならびにその逆工程においても、既存技術はあるが、転換効率の向上や反応熱の利用・供給などにおいて課題が存在する。さらに獲得した水素エネルギーの利用については、現在、家庭用燃料電池（エネファーム）に代表されるように、定置用あるいは自動車用の燃料電池として技術開発および実証試験が進められているところである[13]。エネルギーキャリアの本格的実用化に向けては、効率の向上を中心とするこれら要素技術の確立ならびに、マッチングや安全対策なども含めたシステム全体技術の確立について、国策として早期に基盤技術形成に取り組む必要がある。

中長期的には、エネルギー転換効率のさらなる向上にむけて、エネルギーキャリアと電力とを直接転換しうる技術が必要になるものと考える。電力によってトルエンと水から直接メチルシクロヘキサンに転換し、あるいはメチルシクロヘキサンと酸素から直接水と電力を取り出すことができれば、水素を介さずにエネルギーの転換が可能となり、高効率なシステムの実現が期待できる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

科学技術的課題

従来電源である火力発電、水力発電、揚水発電、熱併給発電などの運用特性改善、再生可能エネルギー発電の出力調整、FACTS（Flexible AC Technology)、蓄電・蓄熱などエネルギー貯蔵要素を含む需要の能動化など、個別の需給調整技術の高度化に向けた可能性評価、目的達成型の研究開発が必要である。エネルギーキャリアに関しては、すでに海外でも実証に近い段階あるいは実証試験を行うプロジェクトが存在するものもある。しかしながら、再生可能エネルギーの大量貯蔵という観点で効率や耐久性、関連材料の製造技術については未解決の課題も多く、経済性も含めた実用技術確立には程遠い状態である。革新的な材料の開発や全体を通した総合的なシステム最適化技術の開発がこれから必要となる。日本は各要素技術において高いレベルを有しており、これをベースに総合的な開発を進めることで十分な技術競争力を確保できるものと考える。

このような研究を推進していくうえでは、劣化機構の解明などの基礎研究の強化が不可欠である。また、材料と制御の両面からのアプローチが重要であり、産業界との連携

も含めた異分野融合による総合的な研究開発の推進がカギとなる。当該分野の基盤研究強化は、産業競争力の強化とともに将来の資源確保につながる可能性を有しており、我が国のエネルギー戦略においても重要な意味をもつものと考える。

政策的課題

エネルギー需給構造が変化する中で優れた技術を導入するためには、その価値を正しく評価し、導入される技術に相応の価値を与える制度、運用ルールを整備することが必要である。特に、電力分野では電力の価値がこれまでのエネルギーから調整力にシフトする中、海外で運用され、日本でも導入検討が進められている電力市場の制度設計、電力システム運用ルールの改善は喫緊の課題である。

再生可能エネルギーの導入を含む今後のエネルギー需給のニーズを満たすエネルギーネットワーク技術は極めて多様で、それぞれの再生可能エネルギー導入の種類やレベルにより、多様な技術の優先順位、必要時期は大きく異なる。再生可能エネルギー導入量を含めた需給条件の見通しによる需給調整の必要量の見通しに基づき、各要素技術および総合的な需給運用に関する技術開発計画の立案により、研究開発予算の最適な配分を実現することが不可欠である。

エネルギーキャリアとしては、普及シナリオの実現に向けた制度上の課題明確化と解決、安全性および社会受容性の検証、再生可能エネルギーの利用を含めたエネルギー利用システムのシナリオ検討、エネルギーキャリアの利用拡大あるいは燃料電池自動車の普及を可能とするための技術・材料のより広範囲な探索への継続的資源投入、などがあげられる。



### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

エネルギーネットワーク技術領域においては、送電や二次エネルギーなどの要素技術に加え、電力自由化や再生可能エネルギー導入の進展のもとで、毎日の電力システム運用の基礎となる、需要と発電予測に基づく起動停止計画とシミュレーション（Unit commitment and Simulation including demand and generation forecast）技術の高度化が不可欠である。

我が国においては、太陽光発電、風力発電の予測技術は一定の進展がみられることから、今後、多様な要素技術の最適運用、導入評価に適用できる、エネルギーネットワークシステムの最適運用計画、最適設備計画の確立、高度化が重要と考えられる。エネルギーキャリアの関連については、電解などの水素の製造技術および燃料電池を中心とした利用技術については日本をはじめ各国で技術開発と普及推進に向けた取り組みが進められている[14]。再生可能エネルギーからの水素製造は、特に欧州において実証試験が積極的に進められてきた[15]。最近では、ドイツの「Hybrid Power Plant」プロジェクトにおいて石油・ガス、電力、エンジニアリング、鉄道といった各分野の欧州企業も参画し、クリーンな電力と熱と水素を供給する大がかりなプロジェクトが立ち上がっている。アメリカにおいてもDOEのプログラムにおいて実用的（水素貯蔵量5.5重量%、温度範囲0～100℃）な水素貯蔵材の開発が推進されている[16]。現在、アンモニアボランなど窒素系の貯蔵材が候補の一つとなっているが、技術的課題も多い。アジアでは、近年韓国が

水素エネルギー利用に関して積極的な技術開発と普及政策を進めている。例えば、「水素タウンモデル事業」といった大規模事業を発表するなど、水素エネルギー利用の普及を推進している[17]。

一方で再生可能エネルギーをエネルギーキャリアのように化学エネルギーとして貯蔵する技術については、水素を除いて多くはなされていない状況にある。このような中、ドイツの SolarFuel 社は、風力などの再生可能エネルギーを用いて水と $CO_2$ からメタンを製造する技術を発表している。これにより再生可能エネルギーの貯蔵と、電力網とガス供給網を連結することを目指すもので、現在 250 kW 規模での実証が計画されている[18]。

## （６）キーワード

交流送電、直流送電、FACTS（Flexible AC Transmission System)、架空送電線（Overhead transmission line)、Cable （ケーブル)、超電導ケーブル、SVC （Static Var Compensator)、SVG （Static Var Generator)、Variability、Flexibility、Reserve Margin、Operational Reserve Margin、火力発電、揚水発電、水力発電、熱併給発電ほかの運用特性向上、太陽光発電、風力発電の抑制、調整力向上、機器による需要の能動化、アグリゲーション、エネルギー/電力貯蔵、バッテリー、系統間連系線の運用高度化、需要予測、PV/風力発電予測、前日/当日/直前の電源の起動停止計画、リアルタイム運用解析、送電網の混雑管理を含めた運用解析、エネルギーキャリア、再生可能エネルギー、負荷平準化、電力変換、水素、アンモニア、有機ハイドライド

## （7）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・火力発電、太陽光発電、風力発電、送電など、高温材料、パワーエレクトロニクスなどの基礎研究のレベルは高い。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・NEDO、資源エネルギー庁、環境省などのファンドにより、太陽光発電、需要の能動化、太陽光発電や風力発電の発電予測など特定の分野においては、世界最高水準の実績がある。ビジョンや戦略の不足、国内の実際の市場からのシグナルの不足あるいは歪みのため、産業側が有望分野に応用研究の幅を広げるための方向性が不足している。<br>・水素キャリア（メチルシクロヘキサンやアンモニア）については要素技術について大学、研究機関や一部民間企業において研究開発が行われているが、システムやサプライチェーンをまたぐ統合的な研究開発が必要な状況である。<br>・水素貯蔵材についてNEDOのプログラム（HydroStar）などでさまざまな材料開発およびシステム開発が行われている。ただし、自動車に要求される作動温度や作動圧力の点で実用化が見通せる水素貯蔵材料、およびシステムがないのが現状である。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・IEC、IEEEの関連規格に対しいくつかの積極的な働きかけを行っているが、個別の要素技術に限られている。ネットワーク技術分野の規格に関し、国内の取り組みあるいは海外への取り組みが必要。<br>・太陽光発電、風力発電、バッテリーなどに共通な基本要素である系統連系用インバータの分野では、家電用、産業用などの分野と異なり海外と比較して大きな競争力の低迷が目立つなど、いくつかのキーとなる分野での力不足がみられる。<br>・再生可能エネルギーの導入量が少ないなど、送電分野の課題が発生しない状況が続いたため、電力システムの運用、設備計画の課題が顕在化せず、産業としてのニーズが見通せていない。<br>・産業競争力懇談会（COCN）による燃料電池自動車・水素インフラ整備に関する政策提言を経て、水素利用技術研究組合（HySUT）が設立されている。HySUTでは水素ハイウェイおよび水素タウン実証を実施しており、水素インフラに関する技術の実用化に向けた検証が進められている。さらに、2012年9月に自動車各社から2015年に燃料電池自動車を市場投入することが公表された[20)]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・NREL（National Renewable Energy Laboratory）をはじめとする国立研究所、大学などが、要素技術からシステム技術まで、幅の広い基礎研究を実施している。<br>・DOEにおいて水素貯蔵技術に関する研究開発プログラムが進められている。アミドイミド系やアンモニアボラン系のような含窒素系水素貯蔵材などが応用可能な材料の有力候補としてあげている。ただし、現時点で実用化につながる成果がみられていない[16)]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・企業の参加に加え、DOE（Department of Energy）やDOD（Department of Defense）などのファンドのもとで、国立研究所、大学などに加え、多くのベンチャー企業が参画した厚みのある応用研究が行われている。<br>・ノースダコタ州、ニューヨーク州などで「Wind to Hydrogen」プロジェクトが実施されている[21)]。文字通り風力発電による電力から水素を製造し、燃料電池自動車あるいは水素エンジン発電機による電力供給が実施された。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・連邦および各州の規制機関であるFERC（Federal Energy Regulatori Comission）、PUC（Public Utility Commision）、電力システムを運営するISO（Independent System Operator）などの活動により、多様でかつ先進的な制度、運用ルールが試みられ、産業化をけん引している。<br>・FERC、NERC（North American Electric Reliability Corporation）などにより多様な試みを一つの制度にまとめようとする動きは、技術体系の標準化に向けた大きな推進力となっている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・低炭素化、EU 統合市場化を進める EU の政策のもと、EU の FP7、各国独自の技術開発政策に基づき、独 Fraunhofer 研究所などの研究機関、Siemens などの大手企業および多くのベンチャー企業が基礎研究を行っている。<br>・水素については広範囲において研究開発が進められている。有機ハイドライドについては、1980 年代にユーロ・ケベック計画（カナダで製造した水素をヨーロッパに海上輸送する）において研究された経緯があるが触媒に課題が残されていた。<br>・最近では、自動車会社などがカルバゾール系化合物をキャリアとするシステムについて研究している例がある [22]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・低炭素化、EU 統合市場化を進める EU の政策のもと、EU の FP7、各国独自の技術開発政策に基づき、多くの実証試験が継続的に実施され、多数の研究機関、大手およびベンチャー企業が参画している。<br>・再生可能エネルギーからの水素製造については早い時期から試験・実証されている。イギリス（The PURE Project）、ノルウェー（Utsira）、スペイン（RES2H2）、スコットランド（Hydrogen Office PJ）、フランス（Vignola）など多くの国で実施されている [23]。ドイツでも多くのプロジェクトが実施されているが、特に「Hybrid Power Plant」プロジェクトは石油・ガス、電力、エンジニアリング、鉄道といった欧州企業が参画し、クリーンな電力と熱と水素を供給する大がかりなプロジェクトである。ドイツの Solarfuel プロジェクトは風力発電からの電力を用いて $CO_2$ と水からメタンを製造するというものである [18]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・多数の国で構成される EU の域内のインフラ整備と技術の国外輸出に向けた産業戦略として、EU のエネルギー規制機関である ACER（The Agency for the Cooperation of Energy Regulators）、電力システム運用者 TSO の協議会である ENTOSO-e の連携により送電網の技術を規定するネットワーク規定の策定を推進しており、最初のパッケージが本年から来年にかけて制定見込みである。<br>・このネットワーク規定の制定により、先端技術の適用性が見通せることで、技術の産業化は大きく推進されている。<br>・ドイツのノルトライン・ウェストファーレン州では“水素 HyWay プログラム”2008 年から開始し、研究開発と実証支援を打ち出している [14]。<br>・2008～2013 年に EU は 4.7 億ユーロを水素・燃料電池技術開発と実証に投入するとされている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・太陽光発電、風力発電の世界最大の生産国になる中、全方位的に厚みのある基礎研究が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・風力発電の遠隔地への大量建設が行われ、送電網の整備の遅れから一部の風力発電機が連系待ちとなる事態が発生する中、課題解決を目指したさまざまな試みとして応用研究が加速している。<br>・中国の工学系人材は、北米をはじめとして世界の電力の市場、運用期間、製造業で活躍している。これらの人材が国内に戻ってくれば、応用研究は他分野同様大きく進展する可能性がある。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・国内は、電力システムのインフラが不足する中での大幅な電力需要の拡大、地方の電化促進など、途上国型の内需を支える技術として、国内の必要性に応じて成長しつつある。<br>・国外に向けては、他産業同様、国内の市場への対応と並行して、途上国および先進国の市場に低価格を特色に進出する可能性は高い。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・低炭素化のための再生可能エネルギー導入を目的とした Smart Grid（次世代送配電網）に力を入れており、その一部として送電技術の進歩もみられる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・核となる重電技術の有力メーカーが少なく、自国技術による産業化は、IT などを活用する分野中心となる。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・同上 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 経済産業省. 超長期エネルギー技術ビジョン. http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g51013a41j.pdf
2) 経済産業省. 技術戦略マップ. http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str-top.html
3) IEA. Technology Roadmaps, http://www.iea.org/roadmaps/.
4) EU. COM(2013) 253 Energy Technologies and Innovation.
5) EU. Energy infrastructure priorities for 2020 and beyond. http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/strategy/2020_en.htm
6) U.S. Department of Energy. Smart Grid. http://energy.gov/oe/services/technology-development/smart-grid
7) 住友電工ホームページ. http://www.sei.co.jp/super/cable/albany.html. （2014年8月）.
8) NEDOホームページ. http://www.nedo.go.jp/activities/FK_00155.html. （2014年8月）.
9) IEEE. The Grid of the Future, PES-Magazine. March-April pp26-36. （2013年).
10) EU 燃料電池と水素の共同実施ホームページ. http://www.fch-ju.eu/.
11) 欧州のガス業界団体Gas Naturallyホームページ. http://www.gasnaturally.eu/gas-week-2013/towards-100-carbon-neutral-gas-supply-in-2050-progress-report-signing-ceremony
12) 光島重徳. 再生可能エネルギーの有効利用のための水電解技術. 燃料電池, 2012, vol. 12, p. 31.
13) 経済産業省. 新たなエネルギー産業研究会燃料電池分科会報告書. （2012年）.
14) http://www.iphe.net/docs/iphe_policy_update_120911_web.pdf
15) http://www.fch-ju.eu/
16) http://www.hydrogen.energy.gov/storage.html
17) http://www.knrec.or.kr/
18) SolarFuel GmbH. http://www.solar-fuel.net/fileadmin/user_upload/pi-2012-ZSEIWESSSolarFuel-Inauguration250kW-plant.pdf
19) 燃料電池実用化推進協議会. http://www.fccj.jp/pdf/22_csj.pdf
20) 経済産業省. http://www.meti.go.jp/press/20110113003.html
21) http://nrel.gov/hydrogen/proj_wind_hydrogen.html
22) 18th World Hydrogen Energy Conference, 2010 Proceedings, p. 189. 2010.
23) 例えば, http://www.hi-energy.org.uk, http://www.res2h2.com/, http://www.hydrogenoffice.com/, http://www.statoil.com/en/NewsAndMedia/features/Pages/HydrogenSociety.aspx など
24) http://www.fchea.org/core/import/PDFs/Connection/Connection October2012.pdf

## ３．１．５　ものづくりの高効率化（製造業高効率化、低位熱高度利用）

### ３．１．５．１　排熱利用低温吸熱反応（吸熱反応による排熱回収のための低温作動型触媒、低温排熱の高質化技術－エクセルギー再生）

#### （１）研究開発領域名

排熱利用低温吸熱反応（吸熱反応による排熱回収のための低温作動型触媒、低温排熱の高質化技術－エクセルギー再生）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

150℃～400℃の熱は、自動車、発電、各種産業において排熱として大量に排出されており、我が国の全電力消費の 1/3 程度の熱エネルギーを大量に捨てている。本領域は、以下のようなトピックを含み、社会におけるインパクト、化石資源消費削減や再生可能エネルギー導入に対する大きな波及効果を有し、新規学問領域の創出、我が国の研究開発プレゼンスの向上につながる研究開発を推進する。

・中低温域（150～400℃）で作動可能な革新的な電気化学反応
・種々の物質合成を目的とした新規電気化学反応およびそのためのプロセス・デバイスの開発
・排熱域の低温で作動可能な吸熱反応によるエクセルギー再生とそのための触媒技術
・中低温域で作動する熱、化学物質、電気エネルギーの相互変換を効率良く選択的に行うための材料・プロセス開発

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

一般に化学反応は熱力学的平衡ならびに反応速度論的制約を受け、吸熱反応は高温を必要とする。低温でも熱力学的平衡的に有利な反応を選び、高性能触媒により反応速度を上げることができれば、150℃～400℃程度の未利用低温排熱を化学エネルギーとして再生すること（エクセルギー再生）が可能になる。このためには吸熱反応を低温で駆動できる高性能触媒の開発が重要である。併せて、付随したユーティリティーとして、低コスト高効率バイナリー外燃機関、熱駆動冷凍サイクルや高温ヒートポンプなど、不可逆損失を抑制し熱利用効率を向上させるためのプロセス基盤技術の研究開発が重要となる。また低位の熱需給の実態を明らかにして、これら基盤技術の適用を促進することが肝要である。エネルギーの高度な有効利用を考えるとき、150℃～400℃程度の低中温排熱を従来の単なるコジェネレーションとしての暖冷房や給湯などの熱源として利用するのではなく、高付加価値化して再利用する、すなわちより高質なエネルギー（高温熱源）へエクセルギー増進をはかり、できるだけ多くの仕事（電気）を取り出せるようなシステムを構築することが必要となる。

再生可能エネルギー利用拡大が叫ばれるが、現状ではそのポテンシャルは低く、化石資源中心のエネルギー社会を変えるには至っていない。また工場などの排熱はいまだに200℃程度以下のものについてはほとんど廃棄されている。このような熱を生かして、吸熱反応に供給して化学的ポテンシャル回収を行い、再生可能エネルギーの転換などに用いることができれば、高効率なエネルギープロセスが構築可能である。長期的な視点では、究極的には再生可能エネルギーをベースとしたエネルギーシステムが構築される必

要があるが、現状では再生可能エネルギーの転換による電力あるいは水素製造、ならびにそれらの貯蔵・輸送が大きな壁となっている。バイオマスからの水素製造が一時もてはやされ、ガス化や発酵経由での水素製造が提案されてきたが、可食性バイオマスを原料とすることは食糧との競合から問題があり、非可食性バイオマス（セルロースやリグニンなど）はガス化においては含水率の高さによる低い熱量が、発酵においては単糖化が問題となり普及には至っていない。現在、後者の多糖類の単糖化はさまざまな触媒プロセスが提案されつつあり今後に期待が持てるが、発酵後に得られた低濃度エタノールの蒸留は潜熱回収の難しさや共沸の点から今後とも大幅な効率改善は見込めない。一方で、この低濃度エタノールをダイレクトに水蒸気改質する反応は吸熱反応であり、これにより高濃度水素へと一段で転換可能である。このための触媒は現在 400℃程度で活性を示しており、今後さらなる低温化（触媒の高活性化）を図ることで、排熱を利用した熱回収型（エクセルギー再生型）水蒸気改質が可能になれば、これまで捨てていた熱を回収して用い水素へと再生することで、再生可能エネルギー利用、水素製造とエクセルギー回収が同時に実現可能となる。このような提案はこれまでに非常に少なく、国外でもほとんど研究の例がない。

中低温熱を用いたエクセルギー再生については、これまではエネルギー供給が確保されていたこともあり、個別技術の採算性の観点から当面の経済性が見通せない技術について研究が進んでいない。しかし、昨今のエネルギーを取り巻く環境の変化から、今後さらに大幅な省エネルギーが不可欠となり、我が国に於ける熱エネルギー利用の実態を総合的に把握するとともに、体系的な研究開発の推進を図ることが急務となっている。このような低温排熱を活かしたプロセスを確立するうえでは、熱需要の実態を明らかにすることで不可逆な加熱プロセスを削減することが基本である。付随するユーティリティーとして、ヒートポンプは、可逆的な電気エネルギーによる熱の移動を可能とするが、その効率の向上や高温度域への適用などの課題がある。逆に低位の温度差から高効率で電力に変換する技術の高度化などの課題がある。

また、現在の化学産業は石油の主にナフサ成分を出発物質としたものであるが、再生可能エネルギーを基とした持続可能型社会の確立のためには、再生可能エネルギーによる物質生産が必要になることはいうまでもない。従来、電力は化石資源から半分以上のエネルギー損失によって作られた極めて高級なエネルギー源であったため、電力を用いた物質生産はソーダ電解やアルミ精錬など一部に限られてきた。有機物の電解合成技術はファインケミカル分野でしか成長していない。しかしながら、再生可能エネルギーの大量導入による持続可能型社会の確立のためには、電力のみでなく物質生産を再生可能エネルギーに頼る必要がある。また、再生可能電力による物質生産は、エネルギーネットワークにおいて平準化のためのバッファともなり得るため、再生可能エネルギー導入を促進するものと期待できる。

電力からの物質生産は、特に電力が豊富な欧州などでは盛んに研究が進められており、再生可能電力からのメタン生産などの実証プロジェクト計画が進んでいる。これは欧州の高緯度地域の風力や北欧の水力など、再生可能電力が比較的豊富であるからである。日本においては再生可能電力の導入が遅れていることから、電力による物質生産に対して興味が低く、この分野を戦略的に研究支援し諸外国をリードする必要がある。日本は

二次電池材料などにおいて世界を凌駕する卓越した材料技術を有している。この技術を応用しつつバルクケミカルを電力で生産できるプロセスや材料を見出すことが求められる。これまで化石資源を基とした化学プロセスでは化学資源は原料であるとともに熱源であり、熱反応によるプロセスとなっている。電力による物質生産では電気化学ポテンシャルによる化学反応であることが本質的に異なることであり、研究課題が多く残る。具体的には $CO_2$ からの化学品合成や $N_2$ からのアンモニア合成、各種金属の電解精錬などを再生可能電力によって行う化学プロセスなどが研究対象として上げられる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

現在は低温作動の吸熱反応自体の対象が少なく、今後新たな反応を見出していくことも必要となる。ここで取り上げている技術課題の解決には、漸進的な技術の蓄積が土台となる。原理的には既知であり、主に経済的な効果により技術・研究開発の推進が左右されてきた。しかしながら今後は、エネルギーの安全保障、環境課題解決への貢献といった視点が必要で、そうした観点から一定程度の公的支援により基盤となる技術開発を推進する必要がある。それは、我が国の関連産業の国際競争向上につながり、結果的に我が国全体の経済効果をもたらす可能性が高い。経済効果を把握するためには熱需給の実態を把握することが必要であるが、電気と異なり低位の熱需給の把握は極めて難しい。各地域で相当数の端末機器に温度などの検出端を設け、環境条件も含めてその時間変動から季節変動まで記録するなどの作業が必要となるが、個別企業での対応は困難であり、公的支援が不可欠である。また、電気化学により化学品を大量生産するという革新的発想は、従来の石油化学に基づく科学技術の中には全くないために、極めて原始的な段階にあるとしか言わざるを得ず、基礎的なところから長期間の研究開発が必要である。このような化学プロセスの研究開発では短期的な経済性の視点から既存の石油化学プロセスと比較し、そのプロセスのフィージビリティを過小評価しがちである。再生可能電力が化石資源より必ず安価になる時期がくることを見越した長期的研究支援が必要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

再生可能電力の導入が進んでいる欧米において、電力からの化学品への生産は注目されているテーマである。例えば米国では ElectroFuels という電力と $CO_2$ より炭化水素燃料を生産する基盤研究がエネルギー省（DOE）によって 2010 年より始まり、44.5 百万ドルの予算が計上されている。これは微生物を利用した電気化学反応によりガソリンまたはディーゼル燃料を代替できる炭化水素の生産を目指している [1)]。また、ドイツでは SolarFuel という余剰再生可能電力と $CO_2$ からメタンを生産し、都市ガスに送る実用化研究の計画も進んでいる [2)]。このように再生可能電力からの化学燃料の生産の研究は、世界各国で基盤研究から実証実験まで多岐にわたる取り組みが行われている。特に、再生可能電力が電力に占める割合の高い欧州において、電力による有用化学品への変換技術の注目度は高い。本課題は、これらの電力からの燃料生産のみでなく、現在石油化学工業に基づいて生産されているエチレン、プロピレン、アンモニア、尿素などバルク化成品の生産を、再生可能電力と $CO_2$ や $N_2$ によって行うことを目指すものであり、国内の電力、石油会社などのエネルギー関連会社のみならず化学会社の将来像を描くもので

ある。

## （６）キーワード

中低温熱利用、低温作動高性能触媒、電気化学反応、吸熱反応、エクセルギー再生、再生可能電力、電力による物質生産、負荷平準化、$C_1$ケミカル

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・電気化学、触媒化学の技術レベルは高いが、電力による化学品合成の視点がない。一方で、排熱や吸熱に限定しない触媒研究については、多くの研究者が高いレベルの研究を進めており、今後の展開が期待される。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・再生可能の先進諸外国より明らかに導入が遅れていて、それに基づく科学技術が育たない。NEDOは国際共同研究プログラムにおいてジメチルエーテル（DME）の海外における生産と国内への輸送、国内での利用を想定し、国内に輸入したDMEを排熱を用いて低温水蒸気改質することにより20ポイント程度のエネルギー効率向上が可能であることを示した。 |
| | 産業化 | △ | → | ・国家は再生可能電力を2030年までに30%程度導入するとしているが具体的な動きが不透明。震災後、再生可能電力への期待は大きい。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・再生可能電力のみならず、Powering the planet[3]など太陽光などの自然エネルギーからの化学品合成には多大な研究投資が行われ続けている。触媒開発においてはかつては高いレベルを有していたが研究者の減少により近年は低迷している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・ElectroFuels[1]のようなプロジェクトがDOEを中心に進んでいて、基礎から応用までを見据えた研究体制になっている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・グリーンニューディール政策のため再生可能エネルギーの注目度は高いが、最近はシェールガス、シェールオイルに頼る動向も強い。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・水電解、燃料電池といった再生可能エネルギーに基づく科学技術への注目は高い。特に水素エネルギー関連では米国よりも優位な科学技術を有する。触媒に関してはフランス・ドイツを中心として基礎的研究は高いレベルにある。研究者の数、母体も多い。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・北欧など電力の豊富な地域を抱えるため、電解水素による水素ネットワークなど電解技術には古くから多くの研究投資がされている。北欧はHyNor[4]、The Scandinavian Hydrogen Highway Partnership（SHHP）[5]などの水素エネルギー実証実験も進んでいて、再生可能電力に基づく化学燃料生産には積極的である。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・SolarFuel[2] では6 MW級の実証プラントを2013年に稼働させるとしている。<br>・ドイツやスペインではすでに再生可能エネルギーの電力に占める割合が1/4～1/3であり、電力網に入れるだけでなく、他に有効利用することが求められてきている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・欧米、日本追従型の学術研究なのでナノテクなどの視点がいまだに高く、出口の見えた研究が少ない。触媒分野の基礎研究に対して研究資源を積極的に投入しており、特にここ数年の伸びが極めて大きい。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・再生可能エネルギー導入量は多いが、化学品に変換するという技術が注目されていない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | △ | → | ・再生可能エネルギー導入量は多いが、化学品に変換するという技術が注目されていない。しかし、国際的に各種工業材料の生産拠点がある。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・欧米、日本追従型の学術研究なのでナノテクなどの視点がいまだに高く、出口の見えた研究が少ない。基礎研究はあまり盛んではない。研究者数も多くない。研究内容としては、既存技術のフォローアップ的なものが多い。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・日本と同様、再生可能の導入は大幅に遅れていて、そこからの化学品生産という視点はあまりない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・再生可能がほとんど導入されていない現状で産業化は見込めない。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）U.S. Department of Energy. Electrofuels.
http://arpa-e.energy.gov/ProgramsProjects/Electrofuels.aspx
2）SolarFuel GmbH. http://www.solar-fuel.net/en/contact/
3）Powering the Planet. N.S. Lewis. California Institute of Technology 資料.
http://authors.library.caltech.edu/9302/1/LEWmrsb07.pdf.
http://www.ccisolar.caltech.edu/index.php
4）北島暁雄．ノルウェー水素道路プロジェクトーHyNorー日本語要約．日本機械学会誌，2010, vol. 113, p. 862.（HyNor http://hynor.no/）．
5）The Scandinavian Hydrogen Highway Partnership.
http://www.scandinavianhydrogen.org/

### ３．１．５．２　産業分野における熱利用、未利用熱の効率的利用

#### （１）研究開発領域名

産業分野における熱利用、未利用熱の効率的利用

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

産業分野におけるエネルギーの使用では、製造プロセスにおいて素材を化学反応や加工を行うため、ある温度まで加熱するプロセスで使用されるエネルギーが大きな割合を占める。この製造プロセスでのエネルギー効率を高めるためには、加熱利用後の排熱から熱回収して製造プロセスに再生活用する技術や、最終的に出てしまった廃熱を利用して発電するなどでエネルギー回収する技術が重要となる。これらの産業分野における熱の有効利用に関する基盤技術群の研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

産業分野でエネルギーを多く使用する素材製造プロセスでは、金属、化学から食品に至るまで、素材をある温度に一定保持して加工し、また次の工程に移動して別な温度に保持して加工する、という事が多く行われる。この温度の制御が製品品質に重要な影響を与えるとともに、大きなエネルギーを必要とする源ともなっている。

産業分野の省エネルギーは、加熱に使われた後の熱を極力プロセス内で有効利用することで最終的な廃熱量を減らす方向と、最終的に発生してしまった廃熱を電力変換や蓄熱によってプロセス外において有効利用を図る方向とで構成されている。

製造プロセスでの熱の有効利用を図るべく、過去に多くの国家プロジェクト（例えば高温空気燃焼、産業間エネルギーネットワーク、内部熱交換蒸留など）が実施され、各種製造プロセスの省エネルギーに一定の成果を上げてきた。さらにプロセス固有の必要な部分のみの局所的加熱技術（レーザ、マイクロ波など）などでの省エネ化技術開発も推進されてきた。このような努力の結果、日本のほとんどの業種において製造に要するエネルギー原単位を世界の中でもっとも低く下げることに成功している[1,2]。ただし、近年、国内のこのようなプロセス開発による省エネ新規テーマはあまりみられず、新たな導入普及も停滞気味に思われる。

製造プロセスでのエネルギー消費の無駄を極力減らす理論基盤として、エクセルギー再生や自己熱再生の理論があり、加熱利用後の排ガスを再圧縮しプロセスの加熱源に再生利用することで、通常に行われている熱のカスケード利用（上述の国プロなど開発もほとんどはカスケード利用に留まる）よりも大幅にエネルギー消費を低減することが可能になる[3]。エクセルギー再生を実現するためには、高温対応が可能な圧縮装置などの技術的な困難さも存在するため、適用範囲には制約もあろうが、産業分野の製造プロセスでの熱の有効利用による省エネの可能性はまだまだ残されている。実プロセスへの適用としては、バイオマス乾燥やバイオエタノール蒸留プロセスなどで開発が進められているところである[4,5]。

また、2013 年度から開始された「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発プロジェクト」における、高温ヒーポンプ技術の開発は、排熱を活用して 200℃クラスの製造プロセスの熱源として活用を可能にするものであり、エクセルギー再生を目指すもので

はないが、製造プロセスにおける省エネルギーにつながる事が期待される[6]。

最終的に発生してしまった廃熱の有効利用に関しては、汎用的なユニットの開発などで近年の応用技術の進展が進んだ領域と思われる。バイナリー発電装置の各種規模や各種温度範囲での装置の市販が近年進んでいる[7]。さらに、各国の自動車の燃費規制の強化に対応して、自動車排ガス熱からの発電として熱電素子開発が進んでいる[8]。「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発プロジェクト」では、自動車排熱に向けた熱電材料の開発と小型の高効率排熱利用発電技術が計画されている[6]。熱電素子の性能向上・コスト低減が実現すれば、産業分野での最終的な廃熱からの電力回収の可能性も出てくる。

また、この廃熱の有効利用の技術は、産業分野での活用に留まらない。東京電力福島第一原発事故以降のコジェネレーションや熱利用技術の重視、地域活性化の重要な手段となる分散型電源の発電の際に発生する熱の有効利用の課題解決手段と重なる部分が多い。中規模産業分野での排熱回収機器と地域の分散型発電の排熱は、同程度の規模で重なる部分が多いことから、産業用途の技術が民生や農業分野で活用される可能性もある。小型バイナリー発電装置にしても、熱電素子にしても、日本が世界の中で製品や技術の優位性を有している分野であるが、特に熱電素子に関しては欧米での発電システムとしての開発競争が厳しくなっている[8]。

産業分野でのプロセスの省エネルギー化、熱の有効利用については、それぞれの製造企業が各様の製造プロセスに合わせてプロセス改造や省エネ機器導入を進めてきた。日本における産業分野での省エネ機器の開発・導入は、企業個別に検討が進められる傾向にあり、運用データなども外部には出て行かない傾向がある。事業者は導入決定の際に、どれだけの省エネ効果が見込めるか、実際の運用状況に合わせて定量的にコスト効果を予測する必要があり、この算定方法は機器製造各社で必ずしも統一されていない。

一方、現在はものづくり変革の時期と言われており、米国、ドイツなどで、スマートコミュニティの構想を製造業に持ち込み、省エネ化についても推進する動きがある。この構想は日本の個別の省エネ技術と両立するものではあるが、日本が機器単独の差別化で発想を続けていると、世の中の流れと異なってしまい、製造プロセスの中に日本の機器が取り込まれない危険性があることを予知しておきたい。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

製造プロセスそのものを見直し、熱をプロセス内で有効利用する研究開発課題としては、エクセルギー・自己熱再生を具体的に実現するための諸課題に対処することが重要である。技術的課題としては、現在、プロジェクト取組のある乾燥とエタノール蒸留よりも高い温度を必要とするプロセスで実証し、エクセルギー再生の現実的な適用可能範囲を拡張することがあげられる。そのためには、高温対応の圧縮装置の実現などが技術的なボトルネックになる。政策的には、機器開発者の協力を得るために、政策的に実証して開発リスクを下げるとともに、市場についての現実的な絵姿を描くことと考えられる。

製造プロセスの見直しとしては、製造プロセスの中で必要な部分のみを加熱するための新規な手法の提案も重要である。伝熱関係の研究者が新しい技術発信ができること、

企業側がそれらの提案をキャッチできる事が不可欠であり、多様な研究領域の研究者交流、および産学の交流機会の活性化が重要である。

発生してしまった廃熱からのエネルギー回収については、熱電素子やバイナリー発電などが汎用的に活用でき、現在の日本の強み領域でもあるため、継続的な推進が望まれる。

熱電素子については、ナノテクノロジーを活用した材料設計開発技術が研究推進上のボトルネックにあるが、日本の場合は、素材とモジュール開発までは強いが、システムとの連携が不足と指摘されている [8]。材料開発サイドに適切な目標値の設定を与えるためにも、材料設計サイドとシステム開発サイドとのコミュニケーション活性化が重要である。

バイナリー発電に関しては技術的なボトルネック解消よりも、導入が促進されるための、適切な規模での普及政策が重要と思われる。

その他、さまざまな発電のアイデアがあり、熱電素子やバイナリーだけを着目すべきではない。断続的な高温排熱の有効利用などの課題に、まだ現実的な解の得られていない分野が存在する。現在も各種の提案に対する補助制度があるが、それらを継続していくべきである。

産業分野での熱の有効利用技術は、実際の世界の工場の中で採用されていくことが重要である。世界的なものづくり革新の潮流の中で、ものづくりに有効な機器として情報システムに組み込んでもらうための標準化などの戦略が政策的に必要となる可能性がある。



### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

エネルギー関連では、欧州全体は Horizon2020 で大きな開発が動く計画であり、現在、具体的な内容検討が進みつつある [9]。その中には、産業分野の省エネルギーについても含まれており、熱の内部での有効活用や外部での有効活用のプログラムも存在する。ただし、現時点では特筆すべき特徴があるように思われない。米国では、DOE が Next Generation Manufacturing Processes でさまざまな低エネルギー消費の製造プロセスを支援しており [10]、小型バイナリーでの排熱回収発電の開発も含まれるが、特に新しい内容を見出していない。

一方、情報技術（ICT : Information and Communications Technology）を活用したものづくりの効率化や産業分野での省エネ推進に関しては、米国、欧州ともに強い動きがある。熱の有効利用は、その中の一部に含むだけで一見無関係にも思われるが、大きなインパクトとなる可能性がある。米国では GE、IBM などが参加する Industrial Internet Consortium という団体が 2014 年 3 月に立ち上がった [11]。この団体は産業構造への Internet 導入の標準化を推進する団体で、産業構造の更なる高度化・高効率化を進めるもので、製造プロセスの省エネは本構想のごく一部にすぎないが、スマートコミュニティの発想をすべての製造業に持ち込もうという動きと考えられる。米国 DOE でも、操業データ解析からエネルギー消費を下げる提案があった [10]。欧州でも、シーメンス、ダイムラーなどが連合し同様な構想をもつ [12] ほか、欧州議会の製造業の省エネ推進の計画においても ICT により導入を促進する趣旨のプログラムも動いている [9]。

中国の産業分野では 2014 年 5 月に「2014～2015 省エネ排出削減目標」の設定があった[13]。個々の機械製品については高いスペックを求め普及促進を図るものの、プロセスの改善は見当たらず、製造プロセスの省エネ化の開発については、2010 年の 12 次 5 ヶ年計画からの大きな変更はないものと思われる。

日本でのプロジェクトは(3)項にて記載した。個別の注目技術として、ふく射面表面にマイクロキャビティを設けることでふく射の波長を制御し、被加熱対象の吸収しやすい波長に合わせることで加熱効率向上が可能である事の報告が東工大よりあった[14]。また、この波長選択ふく射輸送により高温ふく射を利用した光発電も可能となり、効率面では課題もあると想定されるが、断続的な高温排熱からの発電の可能性がある。

### （６）キーワード

製造プロセス、熱利用、未利用熱、エクセルギー再生、自己熱再生、熱電素子、バイナリー発電、スマートコミュニティ、熱輸送

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・製造プロセス改善の基盤となる、エクセルギー解析、伝熱、蓄熱、の学術基礎は研究者の厚みもありレベルも高い。熱電素子の材料設計基礎研究レベルなどのレベルも高いが、論文数は米国に劣っている[8)]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↘ | ・さまざまな製造プロセスの省エネ化が国家プロジェクトも活用して取り組まれた。しかし、新たな製造原理に基づく製造プロセス開発に関しては、近年開発への資源投入が少ないように見える。熱電素子の特許件数では世界トップであり、H26年度から「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発プロジェクト」も開始され、排熱発電機器・材料の開発のレベルは高い。一方で、ICTを含んだ標準化などの応用研究面では他国に比べて取組が弱い可能性がある。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・製造業のエネルギー消費原単位は世界の中で最高レベルにあり[1, 2)]、省エネ技術の産業化が進んだと言える。排熱発電プロセスについては、機械的な発電から熱電素子などの発電まで含めて製品化は盛んに実施されている。しかし、熱利用に関しては、欧州や韓国などに比べて、導入を促進する政策的な後押しが弱い[14, 15)]。近年のICTの進展による標準化動向の中では、世界に遅れる可能性も否定できない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・過去は省エネに関する研究取組は一般的には熱心ではなく、軍・NASA関連など限定分野の基礎研究では強い印象であった。しかし、近年DOEプロジェクトの取組も強化され[10)]、例えば熱電素子に関する論文数で世界トップなど、産学連携取組が強化されている[8)]。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・DOEプロジェクトで製造プロセス省エネ化の応用研究・開発についても進められているが、エネルギーコストが他国よりも相対的に低く、省エネや排熱発電関連の応用研究の推進力は一般的にはあまり高くないと考えている。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・製造業の省エネ技術導入は高くない[1)]。しかし、GEなどによるICT活用による合理的ものづくりの推進の動き[11)]は省エネ化の推進とも関連していると思われる。個々の省エネ機器・材料ではなく、システムとしての省エネの産業化の動きがみられる。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・製造プロセス改善に関連する伝熱関連の研究者の数は多くないが、物理、化学などの基礎研究者層があり、製鉄や化学プロセスなどでの革新的な提案力がある。熱電材料の論文発表数は日本と同程度[8)]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・欧州議会はHorizon2020の中で産業分野での省エネにも取組む動きがある[9)]。北欧、ドイツなどでの地域熱供給も盛んで、もともと熱利用に関する応用的取組の技術基盤が高い。熱電素子に関する特許出願も増えており、日本がモジュールで強いことに対して、自動車排熱回収システムとしての特許出願が多い[7)]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・製造プロセスの省エネでは日本に次いで進んでいると考えている[1)]。地域での熱利用などは法整備もあり進んでいる国も多く、熱利用に関してもっとも産業化に成功している。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・基幹産業の爆発的成長から伝熱関係の研究者は急速に拡大しているが、革新的な省エネ提案はまだ少ない。熱電材料研究はまだ少ない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・大学を中心にさまざまな応用研究がなされているが、一般的にレベルはまだ高くない。熱電素子は特許出願が急増している。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・製造でのエネルギー原単位は改善の途上にある。省エネの産業化は今後本格化すると思われる。政策としての省エネの規制レベルは高く、汎用品については日本よりも進んでいる場合も多い。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・関連する伝熱関係の研究者の厚みは平均的。熱電材料研究の論文発表は少ないが、サムスンでは基礎的研究も推進していると推測。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・熱電素子で米国に対する個別企業の出願特許数は、東芝に次いでサムスンが２位と健闘している[8)]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・製造業における省エネ機器の導入には熱心と聞いている。また、地域の熱利用に関しては政策的に促進しており、日本よりも進んでいる[16)]。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) https://www.keidanren.or.jp/policy/2011/113besshi6.pdf.
2) 秋元 他. エネルギー・資源学会研究発表会特別セッション. （2014年6月）.
3) 堤. 革新的エネルギー技術エネルギーカスケード利用からエクセルギー再生へ エネルギーベストミックス研究会. （2010年1月）.
4) http://www.omc.co.jp/jst/
5) 科学技術動向. No,129. （2012年5-6月）
6) 金属系材料研究開発センター. JRCM NEWS, No.326. （2013年12月）.
7) 科学技術振興機構研究開発戦略センター. 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2013年）第2版, p.106-109.
8) 特許庁. 平成25年度特許出願技術動向調査報告書（概要）熱電変換技術. （2014年3月）.
9) http://ec.europa.eu/easme/energy_en.htm
10) http://energy.gov/eere/amo/next-generation-manufacturing-processes
11) http://www.iiconsortium.org/
12) 日本経済新聞. 2014年4月15日.
13) JETRO上海ニューズレター エネルギー・環境レポート, 2014年5月下期号
14) 花村. 波長選択ふく射とエネルギー変換. 日本伝熱学会, 特定推進研究特別セッション2014. （2014年5月）.
15) 村木. 海外におけるコジェネ支援策. 再生可能エネルギー等の熱利用に関する研究会. （2010年12月）.
16) http://www.toyro.co.jp/img/img-report/b.daigaku_1303.pdf

### ３．１．５．３　新規石油化学製品製造ルート

#### （１）研究開発領域名

新規石油化学製品製造ルート

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

現在、オレフィン類、芳香族類など基礎化学品の製造は主に軽質ナフサの熱分解や重質ナフサの接触改質を通したルートが主流である。ただし、近年は石油中の余剰留分からの製造、石炭、シェールガスのような石油以外の炭化水素資源からの製造、またバイオ資源をルートとする製造など多岐にわたり、さまざまな研究開発ステージで検討されてきており、この分野での研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

日本での石油化学製品はナフサクラッカーによって製造されているが、海外では、例えば、北米シェールガスや中東石油随伴のガスのような安価なエタン原料を出発とした製造が台頭しつつある。石油化学における主製品であるエチレンに関しては、後者の海外製造法がコスト的に優位にあり、日本や欧州のようなナフサクラッカー経由の製造法は競争力が低いと言わざるを得ない。しかし、後者はエチレンに特化した製造であり、ナフサクラッカーで併せて製造してきた、プロピレン、芳香族などの石油化学製品を効率的に製造することは不得手にしている。このような状況を踏まえ、石油化学製品製造法が大きく転換する中、これから供給不足が懸念されるプロピレン、芳香族など、基礎化学製品の競争力のある目的製造法が求められてきている。さらに原料も必ずしも石油に留まらず、石炭、ガス、バイオマスを出発物質として、化学品を製造するルートも精力的に研究開発され、すでに事業化にこぎつけた例もある。

プロピレンに関しては、重油の接触分解により生成することは従来から知られていたが、その触媒、プロセスを改良して、よりプロピレン収率を向上させる方法の検討が進められている。例えば経産省の「革新的次世代石油精製等技術開発事業」の一環として、JX 日鉱日石エネルギーは、自社製油所敷地内で HS-FCC（High Severity Fluid Catalytic Cracker）プロセス実証化に目処を付けた。同じ接触分解では、原料に制約はあるものの、中国では先んじて DCC（Deep Catalytic Cracking）プロセスを実稼働させている。一方、同国では旺盛なプロピレン需要に応えるため、豊富に存在する安価な石炭を合成ガスに転換し、メタノールを得た後、UOP の技術である MTO（Methanol to Olefins）または Lurgi の技術である MTP（Methanol to Propylene）によるプロピレン製造がすでに行われており、今後も建設が計画されている。一方で大連化学物理研究所が独自開発した DMTO（Dmethyl-ether/Methanol to Olefins）や DMTP（Dmethyl-ether/Methanol to Propylene）プロセスも実機稼働中である。さらに、次世代型プロセス開発を SINOPEC などで継続検討している。日本でも日揮/三菱化学が共同で DTP（Dominant Technology for Propylene Production）プロセスを開発し、パイロットスケールでの評価まで進んでいる。

芳香族も今後の需要増が見込まれるものの、現在はナフサクラッカーまたは石油精製での接触改質で主に製造されており、北米シェールガスや中東石油随伴ガスのエタンク

ラッカーからは得られない。今後、石油留分中の余剰となると思われる留分、例えばLPG、軽質ナフサなどから芳香族を製造するプロセスは近年目立った進歩はないが、シェブロンのAROMAXプロセス、旭化成ケミカルズのα-プロセス、UOPのCyclarプロセスはすでに実用化されている。またJX日鉱日石エネルギーは軽質炭化水素から芳香族を得るZ-Formerプロセスは実証試験を終了し、現在JPEC研究としてLCO（Light Cycle Oil）からのBTX（Benzene, Toluene, and Xylene）製造の研究を進めている。

原料利用拡大の一環で、バイオマスの利用も行われている。米国Gevo社がバイオ原料由来のイソブタノールからのパラキシレン製造をパイロットスケールで実施し出荷した。イソブタノールをイソブテンに転化し二量化した後、環化脱水素して製造したものである。米国と欧州では第二世代バイオリファイナリーの技術開発に精力的に取り組んでおり、実証研究から実用段階のレベルにある。米国では、DOEやUSDAの支援を受けたプロジェクトが進められ、INEOS Bio社が都市固形ゴミと木質バイオマスからエタノールを出荷している段階にあり、他にも運転開始予定の計画もある。欧州では商業規模デモプロジェクトで、Inbicon社が麦わらからエタノール、$C_5$糖蜜などの製造、Beta Renewable社が農業残渣などからエタノールを製造している。

### （４）研究開発上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

新規プロセス技術は基礎研究開発からスタートし、スケールアップ研究を経て完成に至るまで、長い時間を要する。各研究開発ステージにおいて必要なものは異なり、特にスケールアップ段階において研究費の負担は大きく、国の資金面での支援が必要である。研究開発要素としては、触媒、プロセスエンジニアリング、シミュレーションなどあるが、各研究ステージにおいて必要とするパートナーで連携しながら効率的に研究開発を推進していけるよう、ナショナルプロジェクトを活用するケースも出てくる。

また原料を輸入せざるを得ない我が国は国際競争力の観点から不利な状況にある。海外にある安価な資源を活用できるよう権益獲得および輸送路確保に向けた政策支援が必要と考えられる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- プロピレン製造に関しては、国内ではJX日鉱日石エネルギーが同社水島製油所内において、3000バレル/日のHS-FCCプラントの運転を終え、当初目標の成績を確認、開放後のプラントの不具合も見出されず、重質油からプロピレンを製造する技術の実証化に成功した。
- 米国では、UOPがすでに実証化を終えているプロパン脱水素（PDH：Propane dehydrogenation）により、シェールオイル中のプロパンからのプロピレン生産が増加していくと予測されている。
- 中国では、プロパン脱水素、さらに豊富な石炭を原料としたメタノールからのプロピレン生産がすでに稼働している。さらに自国で改良したDMTOプロセスを実用化し、さらに建設が計画されている。
- バイオリファイナリーに関しては米国および欧州でエタノール製造事業化が進められており、第二世代バイオリファイナリーが商業規模でデモ運転されている。またバイ

オ由来イソブタノールからパラキシレンを製造するパイロットプラントが稼働している。

## （６）キーワード

石油化学、プロピレン、BTX、ナフサ、バイオリファイナリー、触媒プロセス

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・NEDOプロジェクト「触媒を用いる革新的ナフサ分解プロセス基盤技術開発」の中で、ナフサの接触分解によるオレフィン製造に関して研究開発に取り組んだ[1)]。<br>・NEDOグリーンサステナブルケミカルプロセス基盤技術開発の中で、合成ガスからプロピレンを製造・分離するプロセスの研究開発を実施した[2)]。<br>・三菱化学がゼオライト触媒を用いたエチレンからのプロピレン合成法の特許を出願した[3)]。<br>・東工大でAgゼオライト触媒を用いたエチレンとメタンからのプロピレン合成の基礎研究を実施した[4)]。<br>・JPEC技術開発「分解軽油等新規アップグレーディングプロセスの開発」の中で芳香族を製造するプロセス開発に取り組んでいる[5)]。<br>・NEDO新エネルギー技術開発　バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発の中で、セルロース系バイオエタノールからプロピレン製造の先導研究を実施した[6)]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・METI「革新的次世代石油精製等技術開発事業」の中でプロピレン収率向上型の重質油流動床接触分解として、JX日鉱日石エネルギーがHS-FCCプロセス開発を水島製油所で実証試験を実施した[7)]。<br>・NEDO「省エネルギー革新技術開発事業プロジェクト」の中で、メタノールからプロピレンを製造するプロセスとして三菱化学/日揮でDTPプロセスの実証化を行った[8)]。 |
| | 産業化 | △ | → | ・旭化成ケミカルズが開発した低級オレフィンからプロピレンを製造するオメガプロセスの商業化を達成した。また同社が軽質ナフサ、LPGから芳香族を製造するプロセスとしてアルファプロセスを商業化した[9)]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・メタン酸化カップリングをMITにて基礎研究実施中で、デモプラントも計画中である[10)]。<br>・エチレンからのパラキシレン製造をノースカロライナ大において基礎研究実施中である[11)]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・Gevo社がバイオ原料由来のイソブタノールからのパラキシレン製造をパイロットスケールで実施し、出荷した。イソブタノールをイソブテンに転化し二量化した後、環化脱水素して製造している[12)]。<br>・第二世代バイオリファイナリーによるエタノール製造はエネルギー省（DOE）、農業省（USDA）プロジェクトとして行われている。計画遅れから、現段階では商業化前のプロジェクトが多い[13)]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・プロパン脱水素によるプロピレン製造プロセス、UOP社Oleflex、Lummus社Catfinおよびメタセシス反応によるプロピレン製造プロセスLummus社OCTはすでに実機稼働中[14)]。<br>・メタノールからプロピレンを製造するプロセスとしてUOP社MTOプロセスが採用されている。<br>・軽質ナフサ、LPGから芳香族を製造するプロセスとしてシェブロン社（Aromax）、UOP社（プラットフォーミング、Cyclar）、に実績がある[15)]。<br>・INEOS Bio社では都市固形ゴミや木質バイオマスからのバイオエ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | タノール製造、出荷が開始されている[16]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | △ | → | ・FINA Technologiesでトルエンとメタンからのエチルベンゼン製造の特許が出願された[17]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・ATOFINA（現TOTAL)の$C_4$,$C_5$オレフィンを処理してエチレン、プロピレン収率を高めるプロセス（OCP）をMTOと組み合せて実証試験した[18]。<br>・第二世代バイオリファイナリーの商業デモプラントを建設し出荷を開始。Inbicon社（デンマーク）は麦わらからのエタノール、C5糖蜜製造。Beta Renewables社（イタリア）は稲わら、麦わらなど農業残渣からのエタノール製造。後者は北米、中国、ブラジルへの展開を進めている[19]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・メタノールからプロピレンを製造するプロセスとしてLurgi社MTPプロセスが実用化されている[20]。 |
| 中国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・MTO、MTPの触媒およびプロセス開発を中心に検討が進んでいる。特許出願も多い。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・MTO、MTPはすでに商業スケールにある一方で新たな改良は進んでいるものと思われる。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・石炭由来のメタノールからエチレン、プロピレンなどのオレフィンを製造するプロセスMTO、MTPがすでに実機稼働中である。中国独自プロセスDMTO、続いてS-MTOの商業化を達成した[21]。<br>・SINOPECが開発した、軽油留分からのプロピレン増産型流動接触分解DCCプロセスはすでに実機が稼働している。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・基礎研究で目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・応用研究で目立った動きはない。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・SKがKBRと共同で開発したナフサ接触分解プロセス（ACOプロセス）の実証試験を韓国にて実施。中国陝西省でACOのライセンス実績あり[22]。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）参考資料

1）http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201403/20130000000760.html
2）http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201405/20140000000062.html
3）例えばJP2011-78962A特許
4）http://www.chemenv.titech.ac.jp/lab/kuudo.html
5）JPEC平成26年度技術開発・調査事業成果発表会要旨集
6）http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201405/20130000000835.html
7）http://www.noe.jx-group.co.jp/newsrelease/2011/20110518_01_1016062.html
8）http://www.nedo.go.jp/content/100510451.pdf#search='DTP+%E6%97%A5%E6%8F%AE+%E4%B8%89%E8%8F%B1%E5%8C%96%E5%AD%A6'
9）https://www.asahi-kasei.co.jp/asahi/jp/news/2006/ch060615.html

10) http://www.technologyreview.com/news/425622/natural-gas-upgrade/
11) http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja307612b
12) http://ir.gevo.com/phoenix.zhtml?c=238618&p=irol-newsArticle&ID=1935464&highlight=
13) JPECレポート2014年度第5回
14) http://www.comp.tmu.ac.jp/icnet/_src/sc2740/icn2072.pdf#search='Oleflex+Catofin'http://www.comp.tmu.ac.jp/icnet/_src/sc2717/icn2049.pdf#search='%E3%83%A1%E3%82%BF%E3%82%BB%E3%82%B7%E3%82%B9+%E3%83%97%E3%83%AD%E3%83%94%E3%83%AC%E3%83%B3
15) 新版石油精製プロセス(石油学会)
16) http://www.ineos.com/Global/Bio/Company/Ineos%20US%20Bio%20bro_AWFinal.pdf
17) US8269053
18) http://www.totalrefiningchemicals.com/SiteCollectionDocuments/Press_releases_news/2010/news-chem_week_april2010.pdf
19) http://www.inbicon.com/Pages/index.aspx
http://www.betarenewables.com/
20) http://www.process-worldwide.com/engineering_construction/plant_design/basic_detail_engineering/articles/328824/
21) JPECレポート2012年度39回
22) http://www.businesswire.com/news/home/20111018005772/ja/

## ３．１．６　輸送用燃料の低炭素化（輸送用燃料の高度化）

### ３．１．６．１　バイオマス利活用とバイオ燃料製造技術

#### （１）研究開発領域名

バイオマス利活用とバイオ燃料製造技術

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

バイオマス利活用技術の中で、従来の自動車用燃料代替のためのバイオ燃料（エタノール、バイオディーゼル燃料BDF：Bio Diesel Fuel）製造技術に加えて、食料と競合しないリグノセルロース系バイオマスから次世代の航空・ジェット燃料製造を目指したガス化経由のBTL（Biomass To Liquid）/XTL（X To Liquids)、ドロップイン型バイオ燃料、藻類由来油などの第2、第3世代バイオ燃料製造技術の研究開発が進められている。

2011年3月11日の東日本大震災以降、2012年7月の固定買い取り制度（FIT：Feed-in-Tariff）導入により、バイオマスを発電用燃料に転換する技術開発が加速され、種々の廃棄物系バイオマスからの嫌気性バイオガスの製造技術や固体燃料（トレファクション：半炭化、ペレット）の製造技術の研究開発と実証が進められている。また、二酸化炭素回収・貯留システム（CCS：Carbon Capture and Storage）技術を併用して温室効果ガスの削減を促進するBECCS（Biomass Energy CCS）のコンセプトに基づいた石炭などの化石資源代替を目指した研究開発への展開が図られていおり、これらのバイオマス利活用の研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

バイオマス利活用とバイオ燃料製造技術の研究開発については、日本では2012年9月のバイオマス事業化検討チームによる戦略の中でバイオマス技術ロードマップ（バイオ燃料）が取りまとめられている。それによると、生物化学的反応（糖化・発酵）では、現状の糖・澱粉からの第一世代バイオエタノール製造プロセスから今後5～10年間でセルロース系の第二世代バイオエタノール製造技術を確立することが記述されている[1)]。また、熱化学的変換では、現状の廃食用油や油糧作物からエステル化によって製造されているBDFから、今後10～20年でBTL（ガス化・触媒液化、急速熱分解、水熱液化）による合成バイオ軽油やバイオジェット燃料、バイオオイルを製造する技術開発への展開が述べられている。

また、2013年から、農水省を中心とした関係府省（内閣府、総務省、文部科学省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省）による「バイオマス産業都市」構想がスタートしている[2)]。バイオマス産業都市とは、経済性が確保された一貫システムを構築し、地域の特色を活かしたバイオマス産業を軸として、低環境負荷で災害に強いまち・むらづくりを目指す地域のことであり、地域のバイオマスを活用した産業創出と地域循環型エネルギーの強化を目指している。今後5年間に約100地区のバイオマス産業都市の構築を目指し、関係府省が共同で地域を選定し連携して支援する予定で、2014年3月までに全国から16地域が選定されている。これは、バイオマス事業化戦略で謳われているバイオマス産業の6次産業化による地域活性化と雇用創出を目標として、地域分散型のエネルギー（熱、電気やガス、液体燃料）供給システムを自治体が中心となって構築するプ

ログラムである。

日本でも未利用資源量が比較的大きい下水汚泥や食品残渣などの廃棄物系バイオマスのメタン発酵について、欧州のようにバイオガス生産・利用システムを構築する研究開発・実証がスタートしている[3]。バイオガス生産システムは、高水分であるためエネルギー効率が悪く、依然としてコストが割高であるが、欧州のようにバイオガスのガスライン導入などのインフラ整備や、FITを活用した発電やコジェネを組み合わせることによって、短期的に実用化が可能な技術として期待されている。

IRENA（International Renewable Energy Agency）のRemap（Renewable Energy Roadmap 2030）では、2030年までのバイオ燃料の導入見通しを報告しており、その中で先端的な次世代バイオ燃料はバイオエネルギー液体燃料需要の37%程度を賄うであろうと予想している[4]。

EUは、20-20-20パッケージと言われる2020年気候変動・エネルギー政策の一環として2009年に再生可能エネルギー指令（RED：The Renewable Energy Directive）と燃料油品質指令の改訂版を採択した。この指令では、2020年までにEU加盟国が達成すべき義務として、EU全体で再生可能エネルギーシェア20%と輸送部門における再生可能エネルギーシェア10%を制定した。そのほかに、再生可能エネルギーよって発電された電力、水素の利用も可能としている[5-8]。

バイオ燃料導入については、種々のベンチマークで厳格な持続可能性基準に適合したバイオ燃料のみがカウントされる仕組みになっている。具体的には、2016年末まではGHG（Greenhouse Gas）削減量35%以上、2017年1月1日以降は50%以上、2018年1月1日以降は60%以上のGHG削減量が求められている。また、REDにおいては輸送部門の10%目標で廃棄物・残留物・非食用リグノセルロースから生産されたバイオ燃料についてはGHG削減量を2倍カウントするインセンティブが設けられている。

米国エネルギー省（DOE：United States Department of Energy）では、次世代バイオ燃料開発プロジェクトに600万ドル助成を発表し、2017年までにクリーンで再生可能、かつコスト競争力の高い即時利用可能なバイオ燃料を1ガロン当り3ドルで生産することを目標にしている[9]。これらのプロジェクトでは、バイオマスから生産する再生可能な炭素と水素を最大限にすることでバイオ燃料の生産コストを低減させることを目指している。

また、DOEでは、持続可能で低価格の藻類バイオ燃料開発促進プロジェクトに対して350万ドルの助成を発表し、藻類原料の多収量化が可能な統合的生産システムの開発を目指している[10]。

中国では、農作物剰余物やその他のバイオマス材料を主要原料として、加工固体成型燃料、メタンガスを生産する技術を推進するとしている[11]。さらに、高い効率の発酵促進剤と反応装置を研究開発し、茎を使った一定規模のメタンガスプロジェクトの技術改良、バイオ酵素転化、分裂分解と液化などの技術を研究開発し、液体輸送燃料や水素、化工製品を生産するなど一定の方向性を示している。「973計画2011年編報予算書プロジェクトリスト」では、リグノセルロース資源高効率生物分解転化における重要な科学課題研究のようなバイオマスエネルギー関連プロジェクトも取り上げられている。

また、中国科学院・同院大連化学物理研究所は、高効率なメタン転換技術研究におい

て無酸素条件でエチレン、アレーン、水素などの高価値化学品の生産に成功したと発表している[12)]。同技術は、合成ガスを製造する高エネルギー消費型プロセスを脱却し、$CO_2$排出量ゼロを実現し、炭素利用率が100%に達するとしている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

バイオマス利活用システムとバイオ燃料の製造技術は、主として発電や輸送用燃料の化石資源を代替し、炭酸ガス削減による地球温暖化防止を目的に開発が進められているが、土地利用変化を伴う食料との競合や資源量の制約などにより、持続可能性基準に適合したバイオ燃料製造だけでは地球温暖化防止への効果が限定的である。また、未利用のバイオマス資源は、種々の農林水産業の生産物や生ごみ・家畜糞尿を含む廃棄物などから成り、それぞれの水分量や熱量、エネルギー密度などが異なり、収集・利用システムが確立されていないため、製造コストが大きくなることが問題となっている。

今後の研究開発については、バイオ燃料の単独生産だけでなく、既存の製材や紙パルプ産業などとの連携によるウッドリファイナリーやホールクロップコンセプトによる未利用農業残渣を食品産業などの連携により利用可能なバイオマス量を確保するとともに、バイオマス資源に応じてバイオ変換や熱化学変換プロセスを組み合わせて設計するための、新たなバイオマスリファイナリー産業を構築することが必要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

種々の廃棄物系を含むバイオマス資源を効率良くエネルギー変換するには、その水分や性状などに応じた転換プロセスを最適化する必要がある。特に水分の多い生ごみや汚泥、家畜糞尿などはメタン、水素などのバイオガスあるいは高付加価値な炭化水素へ転換しながら、同時に廃水処理と残渣の有効利用（堆肥化や液肥利用を含む）を実現する必要がある。

また、成長速度の速い微細藻類を大量に培養し、第3世代バイオ燃料などを生産するプロセスの研究開発も進んでいるが、クローズなラボ試験レベルから小規模なオープンポンドでの実証が行われている状況である。火力発電所などから排出される炭酸ガスを高濃度で利用する大規模な培養システムや、砂漠などの日射量が多い地域でのクローズドな高効率フォトバイオリアクター設計、あるいは実際に湖沼や海水でも培養可能な微細藻類やマクロ藻類などの大量培養システムを開発する必要がある。

### （６）キーワード

セルロース系バイオエタノール、藻類由来バイオ燃料、バイオ燃料持続可能性基準、バイオエネルギーCCS、バイオガス

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | △ | ↘ | ・第2、第3世代バイオ燃料の要素技術研究は継続しているが、応用研究や産業化へシフトしつつある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・食料と競合しない第2世代バイオ燃料の応用研究が継続しているが、バイオマス資源の制約などにより伸び悩んでいる傾向がある。 |
| | 産業化 | × | → | ・東南アジアなどの海外でのバイオ燃料生産技術の実証・実用化への展開がみられるが、持続的な原料調達システムが構築できていないなどの理由により、進捗が滞っている状況である。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・セルロース系バイオエタノール、微細藻類からのバイオジェット燃料の研究開発が加速されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・セルロース系バイオエタノール、微細藻類からのバイオジェット燃料の製造技術の実証に向けた応用研究が進捗している。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・セルロース系バイオエタノール製造技術の事業化が進捗している。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・セルロース系バイオエタノール、微細藻類からのバイオジェット燃料の研究開発が加速されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・セルロース系バイオエタノール、微細藻類からのバイオジェット燃料の製造技術の実証に向けた応用研究が進捗している。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・航空用バイオジェット燃料製造の事業化が加速されている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・第2、第3世代バイオ燃料の要素技術研究は継続している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・食料と競合しない第２世代バイオ燃料の応用研究が継続しているが、バイオマス資源の制約などにより伸び悩んでいる傾向がある。 |
| | 産業化 | △ | ↘ | ・食料との競合により第一世代バイオ燃料の生産量が頭打ちとなっており、自動車燃料用のバイオ燃料製造の事業化が進捗していない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↘ | ・第2、第3世代バイオ燃料の要素技術研究は継続しているが、応用研究や産業化へシフトしつつある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・食料と競合しない第２世代バイオ燃料の応用研究が継続しているが、バイオマス資源の制約などにより伸び悩んでいる傾向がある。 |
| | 産業化 | △ | → | ・東南アジアなどの海外でのバイオ燃料生産技術の実証・実用化への展開がみられるが、持続的な原料調達システムが構築できていないなどの理由により、進捗が滞っている状況である。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）バイオマス事業化戦略概要.
http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/pdf/gaiyo.pdf. 農林水産省HP
2）バイオマス産業都市：
http://www.maff.go.jp/j/biomass/25yosan/youkyu/pdf/sangyo_tosi.pdf. 農林水産省HP
3）バイオマス廃棄物のメタン発酵（着手段階）. JST-LCS-FY2013-PP-05 .（2014年3月）.
4）Remap-Renewable Energy Roadmap 2030.（IRENA, 2014）.
5）Japan Petroluem Energy Center News.（2014年7月）.
6）Medium-Term Renewable Energy Market Report 2013.（IEA, 2013）.
7）World Energy Outlook 2013.（IEA, 2013）.
8）NEDO再生可能エネルギー技術白書・第２版.（2014）.
9）http://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-awards-6-million-advance-cost-com-petitive-biofuels DOE 2014/7/15
10）http://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-awards-35-million-develop-cost-competitive-algal-biofuels. DOE 2014/7/17
11）第十二次五ヶ年計画における緑色発展の実態と動向.
http://www.spc.jst.go.jp/environment energy/
12）http://crds.jst.w/20140620/201406201832/. 中国科学誌, 元記事公開日. 2014/05/10

## 3.2　エネルギー利用区分

エネルギー利用の目的は、人類の生活を豊かにするさまざまなサービスを提供することである。一方でエネルギー利用は多くの環境負荷を発生させる。したがってエネルギー利用に際しては、より豊かなサービスの提供と環境負荷の削減という 2 つの側面に留意することが必要である。ここでは環境負荷を $CO_2$ 排出量で代表させる。茅恒等式（Kaya、1990）などを参考にし、エネルギー利用全体を以下のように 3 つの社会的な期待として分類することとした。

$$CO_2 = \text{サービス} \times \frac{\text{エネルギー}}{\text{サービス}} \times \frac{CO_2}{\text{エネルギー}}$$

右辺の第 1 項「サービス」は、多様な社会的要請に応えるエネルギーサービスのことである。ここでのエネルギーサービスとは、エネルギーを消費することで我々が得られる生活や仕事などのアクティビティに必要なサービスのことをさす。第 2 項の「エネルギー／サービス」は、エネルギー効率の高いサービスの提供である。第 3 項の「$CO_2$／エネルギー」は、低炭素化を実現するエネルギー利用である。

社会における課題には、地球環境問題の深刻化や国際協力や国際貢献などのソーシャルな面と、脱物質化や個人の価値観の多様化などのパーソナルな面がある。加えて、ネットワーク・情報化社会への対応や都市への人口集中に対応したコンパクシティなど、そのソーシャルとパーソナル両面を横断的に考えなければならない課題もある。

上記の前提と、2.2.2.(2)で述べたようなエネルギー利用の方向性から、社会の期待と課題で分類した俯瞰図を図 2.2.19 に示した。

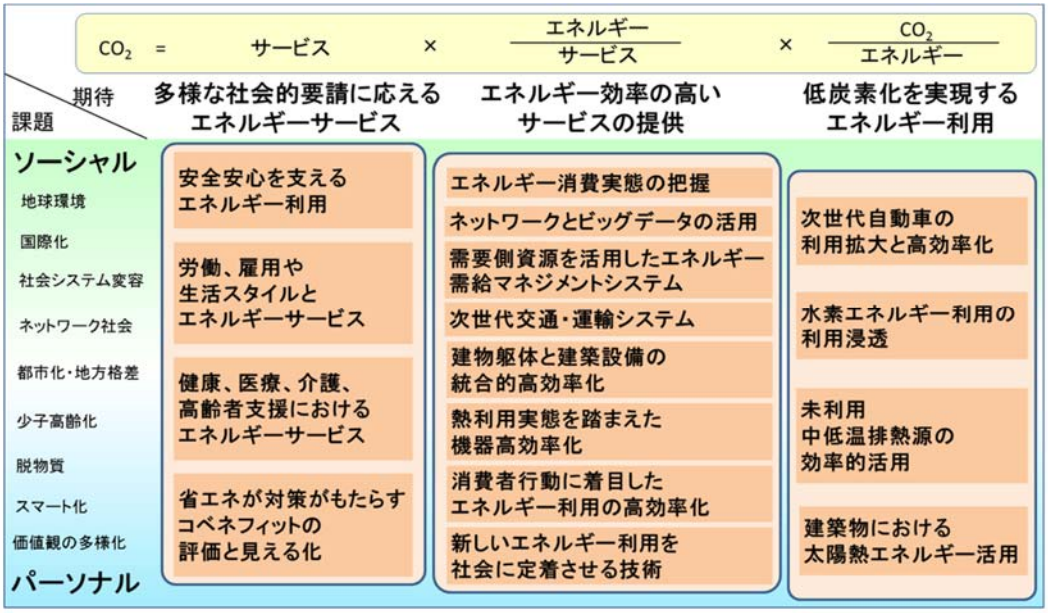



**図 2.2.19　エネルギー利用区分の俯瞰図　（再掲）**

本区分では、3つの社会の期待のもとに、以下に示す計16の研究開発領域を抽出した。

3.2.1　多様な社会的要請に応えるエネルギーサービス
- 3.2.1.1　安全安心を支えるエネルギー利用
- 3.2.1.2　労働、雇用や生活スタイルとエネルギーサービス
- 3.2.1.3　健康、医療、介護、高齢者支援におけるエネルギーサービス
- 3.2.1.4　省エネ対策がもたらすコベネフィットの評価と見える化

3.2.2　エネルギー効率の高いサービスの提供
- 3.2.2.1　エネルギー消費実態の把握
- 3.2.2.2　ネットワークとビッグデータの活用
- 3.2.2.3　需要側資源を活用したエネルギー需給マネジメントシステム
- 3.2.2.4　消費者行動に着目したエネルギー利用の高効率化
- 3.2.2.5　熱利用実態を踏まえた機器高効率化
- 3.2.2.6　建物躯体と建築設備の統合的高効率化
- 3.2.2.7　次世代交通・運輸システム
- 3.2.2.8　新しいエネルギー利用を社会に定着させる技術

3.2.3　低炭素化を実現するエネルギー利用
- 3.2.3.1　次世代自動車の利用拡大と高効率化
- 3.2.3.2　未利用中低温排熱源の効率的活用
- 3.2.3.3　建築物における太陽熱エネルギー活用
- 3.2.3.4　水素エネルギーの利用浸透

次項より各研究開発領域について説明する。

## ３．２．１　多様な社会的要請に応えるエネルギーサービス

### ３．２．１．１　安全安心を支えるエネルギー利用

#### （１）研究開発領域名

安全安心を支えるエネルギー利用

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

エネルギー利用者が安全･安心の面から期待する便益である供給安定性や価格安定性、環境・健康への負荷低減のために、エネルギー制度設計などにおいてリスク回避の便益を貨幣価値評価し、費用対便益を把握したいとのニーズがある。また今後、ICT活用などによるエネルギーの更なる高度利用や新たな付加価値サービス利用の期待に対し、得られる便益と犯罪などのリスクとのトレードオフ関係を明らかにし、社会的に受容されるサービスと対価の水準を見出す必要がある。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

エネルギー利用者が安全・安心の面から期待する便益として、供給安定性（途絶リスクが小さい）、価格安定性（燃料高騰や為替変動の影響を受けるリスクが小さい）、環境・健康への低負荷性（有害物質などにより人体や生態系が悪影響を受けるリスクが小さい）があげられる。エネルギーの制度設計や価格政策、エネルギーシステムへの投資計画においては、こうしたリスク回避の便益を貨幣価値評価し、費用対便益を把握しようとするニーズがある。この領域の研究は、ライフラインの途絶抵抗係数（Resiliency Factor）という指標で評価する研究事例や、停電に対する支払意思額（WTP：Willingness to Pay）、受入補償額（WTA：Willingness to Accept）の調査事例があり、これまでに国内、海外のいずれの研究報告も、停電コストが通常の電力単価の数十倍に相当するとの結果が得られている。

また、今後スマートメーターに代表されるICTとエネルギーの需給システムの融合により、デマンドレスポンスなどのエネルギーのさらなる高度利用や新たな付加価値サービスが期待されるが、ここで用いられるエネルギー利用データは個人の生活習慣情報となることから、データセキュリティのあり方をめぐる課題が存在する。新たに得られる便益とデータ漏えいによる犯罪などのリスクとのトレードオフ関係を明らかにし、社会的に受容されるサービスと対価の水準を見出す必要がある。

a. エネルギーのライフラインのレジリエンスに関する研究 [1-3)]

東日本大震災（2011年3月）や米国のハリケーンサンディ（2012年10月）など、自然災害によって広域的に生じた長時間のライフラインの供給停止や、その後続いた輪番停電、節電要請などの経験は、今日の都市のエネルギーシステムが抱えるリスクをあらためて顕在化させた。我が国では国際競争力の維持・強化に対し意識の高い大都市の自治体行政や民間の大手開発事業者を中心に、都市機能が集中するエリアのエネルギー面のレジリエンス強化のため、自立分散型電源の保有率を高めるなど、市民や企業・テナントに対するさらなる安心の確保に乗り出している。

1985年に、米国のApplied Technology Council（ATC）において地震災害発生時のラ

イフライン途絶の経済的影響の評価マニュアル化を検討した地震被害評価に関する調査報告書であるATC-13は先駆的な研究とされている。これに基づき発表されたライフラインの途絶抵抗係数は、その後多くの災害影響分析に利用されている。このほかにも特に欧米において産業分野を対象とした研究が比較的多く存在する。一方、生活者や執務者の安心の観点からの評価は、心理的な影響を含めて取り扱う必要があり、意識調査と社会科学的な視点を組み合わせた評価が不可欠と考えられているが、研究事例は少ない。

b. エネルギー利用者の安全・安心に関するWTP、WTAと費用対便益評価の研究 [4-6]

エネルギーの小売自由化が先行する海外では、エネルギーの安全・安心の面の品質の１つである停電と価格に対する消費者の選好に関し、WTPやWTAで定量的に計測した研究事例が比較的多く存在する。一方、我が国では小売の全面自由化に至っていないこともあり、研究事例は少ない。これまでに国内、海外のいずれの研究報告も、停電コストが通常の電力単価の数十倍に相当するとの結果が得られている。

関連する動向として、例えば環境対策として地域の再生可能エネルギーへの投資を促進する場合、同時に地域のエネルギーの自立度が高まり、安全・安心の便益をもたらす、といった副次的な便益がある。こうした便益を包含する概念として「コベネフィット」の考え方がある。これは気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）の第5次評価報告書 [7] で大きくとりあげられ、災害などに対するレジリエンス強化やエネルギーセキュリティ向上などの便益も含まれる。同報告書には欧米の研究者のコベネフィットに関する論文が引用されている。

c. エネルギー使用データのセキュリティ [8-10]

スマートメーターやBEMS（Building Energy Management System）、HEMS（Home Energy Management System）などで取得されるエネルギー使用情報は、個人の生活習慣情報が含まれる個人情報に該当し、安全・安心・防犯などの観点からも、この情報を扱う者には、個人情報保護制度上の適切な対応が求められる。エネルギー使用データをプライバシー情報ととらえてデータコントロール権をどのように設定するかは新しい問題である。この問題に対し、米国では標準技術研究所（NIST：National Institute of Standards and Technology）がスマートグリッドのサイバーセキュリティに関するガイドライン（2010年9月）を作成しており、欧州ではEUデータ保護指令（2012年1月）の中に一定の指針が存在するが、まだ権利などの関係が明確になっていないとの認識が一般的である。日本でも今後のエネルギーシステム改革に伴い、供給サイドの多様化やサービス提供主体の構成を踏まえた、各需要家のデータを保有・管理する主体やデータコントロール権を整理する必要がある。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

a. 供給途絶以外の事象に対する安全・安心の研究の蓄積

エネルギー利用者にとり安全・安心の観点からは、供給途絶以外にも、節電要請の制約リスクからの解放、燃料価格高騰や為替による価格変動のリスクヘッジ、健康や生態系への影響リスクの抑制、などの多様なニーズがある。いくつかのリスクは規制的手法

がとられるが、利用者が追加的対価を支払ってこうした安全・安心を確保するニーズもあり、これを把握するとともに、費用対便益の関係を具体的に示す定量的な研究の蓄積が必要である。

b. エネルギー使用データの利用環境整備

スマートメーターの普及が、電力やガスなどの需要家のデータを把握するインフラとして、デマンドレスポンスなどでの利用と併せて、研究目的でのアクセスも可能な環境整備が期待される。データの保有・管理主体の明確化や、匿名化・集約化などの技術的課題の解決、サードパーティに対し提供されるべきデータを規定したルールの早期策定が望まれる。

c. 安全と安心をつなぐ統合的な取組み

例えば国際的な安全規格の基本指針であるISO/IEC Guide51（1999年）で示された「安全」に関する定義「許容されないリスクから解放された状態」が、リスクマネジメントなどの分野で広く用いられている [11] が、「安心」に関する定義はない。日本学術会議によると「安全とは、客観的にみて危険や危害の生じるおそれのないことであり、安心とは、主観的な心のあり様として不安のないこと」とされ、リスクに対する心理や社会の受容性などのアプローチが必要不可欠とされている [12]。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・国際標準化機構（ISO）によれば、2012年7月に持続可能かつレジリエントなコミュニティの開発をテーマとする専門委員会の設立に関するフランスの提案が採用され、ISO/TC268が発足した。2014年6月には委員会の規格原案ISO37101“Communities Sustainable Development and Resilience – Part 1: General Principles and Requirement” [13] が発表された。同委員会には政策関係者や地域エネルギーサービス事業を国際展開している実務者が参加しているほか、社会セキュリティを扱うリスクマネジメントの国際標準を議論するISO/TC223委員会からのリエゾンメンバーを招聘するなど、地域への安全・安心の提供という面で注目に値する。

・デンマークのコペンハーゲン市は、広域熱供給インフラが発達し、自立分散型エネルギーシステムのネットワークを形成する都市のベストプラクティスとして注目される（2013年に欧州環境首都賞を受賞）。熱搬送事業者が共同で設立した中立機関（2008年設立当時の名称はVarmerlast）は、過去の熱の需要データと、翌日の国際電力取引市場（Nordpool Spot）の価格、天候予測と、各地の熱搬送可能容量に基づき、地区内に分散する熱電併給（CHP：Combined Heat and Power）プラント所有者と翌日の熱生産量を調整し、熱の供給安定化と価格の最小化を図っている [14]。このための熱供給に関する需要家データはVarmelastが一元管理し、運用のためのデータベースと最適化ツールなどを開発している。これまでの運用を経て予測精度や運用成績は向上しているが、今後は風力発電増加の影響を受け、電力価格が低下した場合に、CHPの稼働率が下がり熱の原価を押し上げる可能性も出ている。

・米国エネルギー省（DOE：Department of Energy）や米国環境保護庁（EPA：

Environmental Protection Agency）は、2012年10月のハリケーンサンディによる大規模停電時にCHPシステムが重要な役割を果たした実績を受け、翌年9月にCHPを集合住宅および重要施設の防災およびエネルギーインフラのレジリエンス向上に用いるためのガイドを発表した[15]。この中で、CHPの便益として総合効率の高さ、省エネ性向上、消費者の電力コストの平準化とともに、非常時対応、系統インフラの新設需要抑制と系統安全性強化などをあげている（引用例：コネティカット州のGreenwich病院で、2,500 kWのCHPが7日間の停電中も通常の活動を維持）。系統電力との相互連結および切り替え制御がシームレスに行えるためには、初期コストが5～10%増大する可能性があるとしている。

・日本では東日本大震災以降、大都市圏の自治体行政や民間開発事業者を中心に防災・減災対策の一環で地区・街区レベルの分散型エネルギーシステムの導入を推進する動きがある。こうした意思決定に資する知見として、自立分散型電源の導入による地域の業務・生活継続計画（BLCP：Business and Living Continuity Plan）への貢献に関する便益を貨幣価値換算し、費用対便益の評価を試みた産学官の共同研究事例がある[16]。また、停電コストのデータとして、例えば東日本大震災後の計画停電の実績などを踏まえた（一社）電力系統利用協議会のアンケート調査（企業3,506社、個人2,495名）で、予告がある場合の需要ピーク期時間帯（2時間）に計画停電を被った場合の停電コストの具体的な調査結果がある（例えば、大口事業所については2,198～4,763円/kWh、個人については夏季5,999円/kWh、冬季4,317円、など）[17]。この結果においては、東日本大震災以前の調査よりも大きい値になったとしている。海外の調査結果との比較もあり、上のような検討機会に有効と考えられる。

### （６）キーワード

支払意思額（WTP）、受入補償額（WTA）、途絶抵抗係数（Resilience Factor）、自立分散型エネルギーシステム、業務・生活継続計画（BLCP）、データコントロール権

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・エネルギーの小売り自由化が進んでいる欧米に比べ、研究事例は少ない。<br>・停電コストに関するアンケート調査に基づく分析事例が産業分野、業務分野に対して存在。東日本大震災後、停電コストが増加したなどの分析あり。<br>・家庭分野については心理的不安や生活不便などの計量化が困難とされてきた項目も存在し、分析事例は少ない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・電力以外に、ガス、水道などの複数ライフラインが同時に途絶する事象を対象としたWTPやWTAの調査は存在するが、事例は少ない。<br>・大手建設会社でオフィスビルの電源多重化を実施し、潜在的テナントに対する実地見学後にWTPのアンケート調査を実施。<br>・スマートメーターやスマートグリッドとプライバシー保護に関し、政府により制度検討会が設立され審議中。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・2011年3月の東日本大震災以降、国際競争力強化を目指すエリアを中心に、自治体行政や民間開発事業者が自立分散型電源を導入する動きや、住宅メーカーが太陽電池や燃料電池を含む停電対応仕様を積極的に打出している。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・小売自由化が進んでいるため電力品質（停電）と価格に関する定量分析が比較的多く存在。<br>・電力品質（停電）に関する消費者の選好を把握する調査に基づきWTPとWTAの乖離を説明し、供給計画や価格政策に貢献した例もみられる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・1985年に地震災害発生時のライフライン途絶抵抗係数（Resiliency Factor）が発表され、その後多くの災害影響分析に利用されている。<br>・2010年9月に国立標準技術研究所（NIST）がサイバーセキュリティに関する検討の枠組みを立上げ、ガイドラインを策定。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・2012年10月のハリケーンサンディの経験を踏まえ、コージェネレーションを防災およびインフラのレジリエンス向上に用いるためのガイド（DOE、EPA）や、導入支援策（ニューヨーク市など）が相次いで発表。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・EU域内で、国別の制度や電源構成、停電に対する受容性の違いなども含めた停電コストに関する分析データが多く、国際比較研究も行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・国際電力取引市場の発達により、調整可能電源やリザーブ電源などの価値が安全・安心の観点から市場で取引され、基礎データが蓄積されつつある。<br>・2011年12月に欧州委員会ガス＆エネルギー局に設置されたSmart Gird Task Forceがデータセキュリティ、データ管理、データ保護に係る規制勧告を発表。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・今後、風力発電の増加の影響を受け電力市場価格の不安定な変動が見込まれる。ガスタービンなどの調整可能電源の価値が高まることが考えられる。 |
| 中国 | | － | － | （評価に資する情報なし） |
| 韓国 | | － | － | （評価に資する情報なし） |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 梶谷、多々納. 2007. 災害時の複数供給系ライフライン途絶による住民への経済影響の調査. 土木計画学研究論文集. Vol.24, No.2
2) 蟻生、後藤. 2007. 需要家から見た供給信頼度の重要性と停電影響－国内需要家調査および首都圏停電調査に基づく分析－. 電力中央研究所報告書. No.Y06005
3) Applied Technology Council, Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13, Redwood City, California, 1985
4) 宮田. 2010. 電力の品質と価格に対する家庭部門の選好－停電へのWTPとWTAの分析から－. 行動経済学. 第3巻. p39
5) 西野、他. 1982. わが国における停電コストの評価, 電力中央研究所研究報告. No. 582007
6) Reicl, et al. 2013. Power Outage Cost Evaluation: Reasoning, Methods and an Application, Journal of Scientific Research & Report. Vol. 2(1), p.249-276
7) IPCC Working Group III. 2014. CLIMATE CHANGE 2014 Mitigation of Climate Change.
8) National Institute of Standard and Technology. 2010. NISTIR7628: Guidelines for Smart Grid Cyber Security.
9) European Commission / SGTF (Smart Grid Task Force) / EG2: Regulatory Recommendations for data safety data handling and data protection. 2011
10) 総務省情報通信政策研究所. 2012. スマートグリッド関連サービスにおけるプライバシー・個人情報保護に関する調査研究報告書.
11) (一財) 日本規格協会. 2011. リスクマネジメントと業務継続マネジメントの標準化.
12) 日本学術会議. 2005. 安全で安心な世界と社会の構築に向けて－安全と安心をつなぐ－.
13) ISO/TC268, ISO/CD37101 Sustainable development and resilience of communities - Management systems - General principles and requirements. 2014.
14) Copenhagen Energy.2008. District heating in Copenhagen: An Energy Efficient, Low Carbon, and Cost Effective Energy System.
15) US DOE. EPA. 2013. Guide to Using Combined Heat and Power for Enhancing Reliability and Resiliency in Buildings.
16) (一社) 日本サステナブル建築協会. 2014. エネルギーイノベーティブタウン調査委員会報告書.
17) (一社) 電力系統利用協議会. 2014. 停電コストに関する調査報告書.

### ３．２．１．２　労働、雇用や生活スタイルとエネルギーサービス

#### （１）研究開発領域名

労働、雇用や生活スタイルとエネルギーサービス※

※）ここでの「エネルギーサービス」とは、エネルギーを消費することで我々が得られる生活や仕事などのアクティビティに必要なサービスのことを示す。

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

近年、労働・雇用のスタイル、生活のスタイルは情報化の進展などによって大きく変化しており、これらの変化は必要とするエネルギーサービスを変化させ、将来のエネルギー需要を大きく変容させる可能性をもつ。本領域では、以上の中でも近年研究が盛んな、建物内での居住者の行動の変容について、センシング技術など建築や住宅のスマート化を背景とした居住者行動の詳細なモデル化とこれを考慮した高度なエネルギーマネジメントによるエネルギー消費の削減、これらを実現するための空調や照明のパーソナル化技術の研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

民生部門のエネルギー消費は、主として居住者が要求するエネルギーサービス要求によって発生し、エネルギーサービスは居住者の生活スタイルに大きく依存する。過去においても、第三次産業に従事する労働者の増加は我が国のオフィス需要を大きく増加させ、民生業務部門のエネルギー消費を増大させた主たる要因となっており、また家庭における少人数世帯の増加は世帯数の増加を通じて我が国における民生家庭部門のエネルギー消費を増大させた主たる要因となっている。近年でも、生活スタイルの変化に関して、例えば若者の車離れなどの事象が観察されており、我が国における地球温暖化問題やエネルギー問題の将来を議論するに当たって、単に省エネルギー技術の進展を考慮するだけでなく、将来のワークスタイル、ライフスタイルの変化を予測し、それに伴うエネルギーサービス需要の変化、さらにはエネルギー消費量の変化を中長期のエネルギー需要予測、温室効果ガス排出量予測に考慮できるようにすることは大変重要な課題となってきている。

例えば近年、特にホワイトカラー労働者においてはフレックスタイム制・裁量労働制などによる勤務時間の多様化、在宅勤務など労働場所の多様化が進行している。これらの労働スタイル、生活スタイルの変化はオフィスや住宅において必要とされるエネルギーサービスの内容や質を変化させ、民生部門を中心として将来のエネルギー利用の形やエネルギー需要を大きく変容させる可能性をもっている。例えば、在宅勤務の進展がエネルギー消費の変化に与える影響として、ロムら[1)]は、1997年の時点で在宅勤務などにより2007年までの10年間で全米の非住宅建築の5%に相当する30億平方フィートの事務所面積が不要になり、全米の民生用電力消費の1.5%に相当する350億kWhの電力が節減されると予想していた。我が国でも、総務省[2)]は、在宅勤務によってオフィスの電力消費が43%削減され、家庭でのエネルギー消費増を考慮しても全体で14%の電力消費削減が期待できるとしている。このように、労働スタイルや生活スタイルを変化させることによる、人間側のエネルギーの使い方の変容は、今後のエネルギー消費の増減に対し

て、各種の省エネルギーのためのハード面の技術開発と同等なインパクトをもっており、今後の研究が期待される分野である。

このような労働スタイル、生活スタイルの変化は、以下のようなこれまでみられなかった空間の使い方、エネルギーサービスに対する新たな需要を生じさせている。

・在宅勤務のようにオフィス労働のスタイルが多様化し、インターネットの進展によりオフィス労働が特定の空間に拘束されなくなったことから、空間の使われ方については従前に比べて使用時間の増大と、使用密度の低密度化が同時に進行している。
・女性や高齢者、外国人など室内環境に対する嗜好が異なる人々が、職場や労働環境を共有する様になり、これらに配慮したエネルギーサービスが求められるようになっている。
・オフィスにおいては、健康性、快適性だけでなく、労働者の知的生産性への影響をより詳細に考慮したエネルギーサービスあるいはエネルギーマネジメントが求められるようになっている。

これらは、環境調整のためのエネルギーサービスを、空間内部で均一にとらえるものから、よりパーソナルなものへと転換していくこと、すなわちエネルギーサービスのミクロ化、パーソナル化を意味している。この背景には、当然センシング技術の発達をはじめとしたオフィスや家庭のスマート化の動向が大きく影響を及ぼしている。

これを受けて、パーソナルな環境調整技術については、スマートオフィスの研究開発の一環として、高度なセンシング技術とともに、タスク･アンビエント照明、タスク･アンビエント空調、床吹き出し空調など種々の技術が登場してきている状況である。

これらハード面での研究と平行し、ソフト面では新たな研究分野として居住者行動（Occupant Behavior）の研究分野が注目されている。センシング技術の発達により、空間内の人間の在･不在情報だけでなく、どの人間がどのような状態にあるのかまでを検知できるようになり、それぞれに最適なエネルギーサービスを供給することで、居住者の生産性向上と省エネルギー性を同時に達成することが可能になってきている。

このような人間の行動に関する研究は文理融合型研究として新たな学術分野を形成する可能性が高いことと同時に、情報通信技術の発展によるスマート化の進展に対して建築環境調整技術が対応していくうえで必要不可欠の研究開発分野であるといえる。

2014年に発表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）の第5次報告書第3部第9章 [3)]（建築）においても、「behavioural and lifestyle impacts」という項目が設けられ、居住者の振る舞いが建築のエネルギー消費に対して大きな影響を及ぼすことが示されている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

人間の行動パターンの変化がエネルギー需要に及ぼす影響は、それを表現できるエネルギーシミュレーションプログラムを開発したり、実空間における詳細な計測を行ったりしなければ定量的に評価することができない。しかし、今までの建築環境調整技術、エネルギー利用技術に関する研究開発ではこのような生活スタイルの変化によるエネルギー消費の変化はほとんど研究されてこなかった。

本分野は今後のスマートハウスやスマートビルの開発においても基幹となり得る研究開発分野といえ、情報分野のセンシング技術、心理・行動学分野などとの融合による以下のような新しい研究開発領域の推進が期待される。

・建築空間内における人間行動の予測手法の開発、数理モデル化。人間の時間の使い方に関する社会的な研究から、建築空間の使われ方の予測などを含む。
・さまざまなセンシング技術の活用による、建築空間内の人間行動の検知技術の研究開発。これには単なる人間の行動状態だけでなく、人間の生理・心理状態、プロダクティビティなどの検知も含まれる。
・パーソナル化された建築空間における環境調整技術（空調･照明など）の研究開発。床や天井といった建築躯体と一体化した照明･空調技術だけでなく､机や椅子など家具を含めた、これまでにないような発想の空間環境調整技術の研究開発。近年アンビエント側の空調システムとして温度の比較的高い冷水を利用した放射空調など省エネルギー技術の開発が進んでおり､タスク側の新しい温度調整技術の開発が求められている。
・人間行動を基軸とした、建築空間内のエネルギー消費予測。上記で述べたような、センシング技術とパーソナル化された環境調整技術が考慮できるエネルギーシミュレーションモデルの開発。

また、よりマクロな人間の労働スタイル･生活スタイルの変化とエネルギー利用の変化を見ていく上では、以下のような研究課題も存在する。我が国が地球温暖化問題などで世界をリードしていく上では、2050年、2100年など中長期の将来におけるエネルギー需要の姿を明確に描き、それに基づいた低炭素社会の姿を示す必要があり、人口や生活スタイル、土地利用の姿など社会のマクロフレームの変化とそれに伴うエネルギー利用の姿を科学的に予測する研究が必要である。

・将来の労働スタイル・生活スタイル・都市の姿の変化を考慮できる、定量的評価が可能な将来社会予測シナリオモデルの開発。
・上のモデルで描かれる将来のマクロフレームを入力条件として、ボトムアップ型（人間の生活スタイルから都市･地域・国土のエネルギー消費を積み上げる）のシミュレーションによる、中長期エネルギー需要予測技術の研究開発。
・若者の車離れなど、輸送･移動に関係する労働スタイル･生活スタイルの変化が輸送システムのエネルギー利用に与える影響（公共交通機関の利用拡大とそれに伴う都市のコンパクト化、トラック輸送業界の人手不足に起因する輸送システムの変化など）の予測、対応策についての研究開発。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）の国際共同研究開発プログラムEBC（建築とコミュニティにおけるエネルギープログラム）の下において、2013年より2017年までの予定でAnnex 66として“Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings（建物における居住者行動の定義とシミュレーション）”がスタートしている[4)]。ここではOccupant Behaviorを人間の空間内の動きだけでなく、機器の操作、窓開けなどの環境調節行為を含むものとし、その定量化とモデル化、建築のエ

ネルギー消費に及ぼす影響の評価、建築計画や運用への応用までを展望した研究計画となっている。

建築のエネルギーシミュレーションに関する国際団体IBPSA（International Building Performance Simulation Association）が主催する国際会議Building Simulationにおいて、近年“Human Behavior”のセッションが多数設けられているなど、研究の活発化が認められる。

### （６）キーワード

パーソナル化、居住者行動、情報化、労働スタイル、生活スタイル

（７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・人間行動に関する研究分野に関して特に顕著な研究は行われていないが、一部の大学などにおいて人間行動からエネルギー消費を予測する研究についての取り組みがみられる。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・スマートオフィスの研究開発では大手建設会社のモデルオフィスなど、多くの事例がみられる。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・人感センサなど、多様なセンシング技術に関して国際的に優位である。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・国立ローレンスバークレー研究所において居住者行動およびそのエネルギー消費に及ぼす影響に関する研究が実施されている。IEA EBC Annex66の代表を中国とともに務めている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・建築の情報化（スマート化）に関してはかなりの実績を有する。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・建築の情報化（スマート化）に関してはかなりの実績を有する。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・建築の居住者行動モデルに関する研究はスウェーデン、イギリスなどで実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・目立った動きはない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・目立った動きはない。 |
| 中国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・精華大学を中心に居住者行動に関する研究が活発に実施されている。IEA EBC Annex66の代表を米国とともに務めている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・目立った動きはない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・目立った動きはない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・スマートコミュニティ関連の研究は各電機メーカーにより活発におこなわれている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・目立った動きはない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) ジョセフ･ロム，アーサー･ローゼンフェルト，スーザン・ヘルマン著、若林宏明訳. 2000. インターネット経済･エネルギー･環境―電子商取引がエネルギーと環境に及ぼす影響のシナリオ分析―. 流通経済大学出版会
2) 総務省. 2011. テレワーク（在宅勤務）による電力消費量・コスト削減効果の試算について http://www.soumu.go.jp/main_content/000113937.pdf

3) IPCC: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Chapter 9 Buildings
http://report.mitigation2014.org/drafts/final-draft-postplenary/ipcc_wg3_ar5_final-draft_postplenary_chapter9.pdf
4) IEA-EBC Annex66 WEBサイト
http://www.annex66.org/

### ３．２．１．３　健康、医療、介護、高齢者支援におけるエネルギーサービス

#### （１）研究開発領域名

健康、医療、介護、高齢者支援におけるエネルギーサービス※

※）ここでの「エネルギーサービス」とは、エネルギーを消費することで我々が得られる生活や仕事などのアクティビティに必要なサービスのことを示す。

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

高齢化やライフスタイルの変化、また医療技術の進展にともない、エネルギー消費構造も大きく変化すると考えられる。消費構造の変化に伴う新たなエネルギーサービスやそれを可能にする研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

高齢化やライフスタイル、ライフステージの変化にともない、エネルギー消費構造も大きく変化すると考えられる。一般的には、高齢化に伴い在室時間が長くなり、また世帯人数も減少するため、エネルギー消費量は増加すると考えられる。一方、医療費を抑制し、健康寿命を延伸させるには、屋内での不慮の事故防止のほか、筋肉トレーニングや屋外での活動、他者との交流などが効果的とされる。これらは都市形態や交通インフラ、地域コミュニティの状況とも密接に関係することから、間接的にエネルギー消費量にも影響すると考えられ、社会システムあるいはシステム解として対策を考える必要がある。

また、先端医療分野では粒子線照射治療のような大規模かつエネルギーを大量消費する治療法が確立されるなど局地的なエネルギー需要を発生するようになった。拠点的な病院には放射線治療に用いる直線加速器のような先端医療機器が導入されるようになり、医療機関がさらにエネルギー多消費型の施設に変化している。他方、質の高い療養生活や終末期への期待も大きく、在宅での治療や終末医療の役割が大きくなると考えられ、住宅における耐停電性にもこれまで以上の質が求められる。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

我が国が直面する少子高齢化や人口減少という局面は、先進国のみならず途上国もいずれ直面する問題であり、課題先進国として臨床的に研究開発を行える環境にある。研究開発の方法論としては、未来シナリオの作成、あるいは望ましい未来を設定してバックキャスティング的に現時点における課題を抽出し、研究開発テーマとする方法がある。我が国の未来シナリオは、現時点においては単純なトレンド予測的なものが多いが、社会の複雑な因果関係を模擬するシステムダイナミクス的なアプローチをもつ予測は、分野横断的な取り組みが求められ甚だ貧弱な状況にある。

エネルギーサービス分野においても、これまでの方向性は人口増、経済の拡大に伴う需要にどう対応するかであり、需要が減少する局面にどう対応するか、あるいは生産労働人口が減少し、非労働力人口が増加する局面での多様なエネルギーサービスの有り様については議論が始まったばかりである。

研究開発推進上の課題としては以下が考えられる。

a. 人口・建物の地理的分布とエネルギー消費の関係を表すための民生・運輸部門エネルギー需要予測モデルと関連したメタデータベースの構築

高齢化および人口減少は、居住地の選択や建物の利用方法に大きな影響を与えると考えられるが、これらを加味した民生・運輸部門エネルギー需要予測モデルはみられない。モデル構築に必要となる各種メタデータベースも不足しており、その収集と構築が望まれる。

b. 医療・介護施設におけるエネルギー利用に関する研究（省エネ型の医療・福祉機器の開発を含む）

医療器具の目的は生命の維持であり治療であるため、エネルギー消費量については二次的な問題といえるが、高齢化にともない医療や介護のエネルギー消費量は増加しており、本来の目的は維持しつつ、より省エネルギーの機器を開発する必要がある。また、医療機関における災害時の電力供給の確保や、きめ細やかで実効性ある事業継続計画（BCP：Business Continuity Planning）の立案など、実証的な研究が求められる。また、これらの医療機関は加湿や入浴、洗濯などの熱需要が多く、太陽熱エネルギーの活用や廃熱・未利用エネルギーの検討も必要である。

また、このような高い信頼性、あるいは高効率のエネルギー供給を実現するには、系統電力などの従来型の方式のほか、近隣と連携したエネルギー供給体制も考えられる。そのためには、都市計画的な空間計画とエネルギー供給を同時に検討する枠組みが求められる。

c. 自宅での介護・医療向けの省エネルギーとエネルギーセキュリティ

老齢人口の増加に伴い、医療・介護施設の不足が予測され、自宅で治療や介護、また終末期を迎える機会も増えると考えられる。このように自宅においても生命に関わる医療機器が利用されるようになることから、災害時における高い耐停電性を実現するエネルギーサービス、もしくは停電に対応できる医療機器の開発が求められる。

d. トランジッション・マネジメント研究

あるべき社会像をいかに実現するか、そのプロセスは工学的技術革新のみならず、経済的政治的、あるいは地域的な合意形成が不可欠で複雑である。このようなトランジッション・マネジメントに関する研究は、欧米では合意形成論とともに活発に行われているが、我が国では議論が始まったばかりである。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

住宅分野においては、2014年度に「スマートウェルネス住宅等推進モデル事業」が開始され、高齢者、障害者または子育て世帯の居住の安定確保および健康の維持・増進に資し、高い省エネルギー性能を有する住宅への支援が開始されている。

また省エネルギー対策による直接的便益（EB：Energy Benefit）と、例えば健康面や知的生産性の向上などの省エネ以外の間接的便益（NEB：Non-Energy Benefit）を併せ

て検討するコベネフィットの研究が、欧米や日本で行われている。

### （６）キーワード

ICT、センシング、ITS、エネルギー需要予測、政策制度の設計・評価、モーダルシフト、エネルギー自立、トランジッション・マネジメント

### （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・2007年に国立環境研究所他が「2050 日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討」を発表した [1)]。<br>・2007年に国土交通省に健康維持増進住宅研究委員会 [2)] が設置され、住宅の断熱性能と疾病の関係性を研究。<br>・2014年開始のスマートウェルネス住宅等推進モデル事業 [3)] の一環として、エネルギー消費量と健康に関するアンケート調査を実施予定。<br>・コベネフィットに関連する研究が活性化。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・健康維持増進住宅研究委員会の成果を元として、CASBEE健康チェックリスト[4)] が作成される。<br>・2012年、東京都は「水道版スマートメーター（使用水量の見える化、みまもりサービス）に関する技術」について、共同研究者を募集 [5)]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・住まい9つのキーワード―設計ガイドマップ [6)] が刊行され、健康に配慮した住宅建設が活発化。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・基礎研究としては特筆すべきものは見当たらない。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・コベネフィット研究として、LEED（Leadership in Energy and Environmental Design）や国際エネルギースタープログラムの格付けと不動産価格 [7)] や健康維持性 [8)] との関連に関する研究が行われている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・スマートメーターを活用した高齢者見守りサービスが実用段階。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・基礎研究としては特筆すべきものは見当たらない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・EUや研究機関によりトランジッション・マネジメント研究が行われている[9)]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・スマートメーターを活用した高齢者見守りサービスが実用段階。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・特筆すべき成果が見当たらない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・特筆すべき成果が見当たらない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・特筆すべき成果が見当たらない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | × | → | ・特筆すべき成果が見当たらない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・2009年にサムソン物産は次世代環境共生住宅として「グリーントゥモロー」を建設。省エネルギーとともに健康管理にも重点が置かれている [10)]。 |
| | 産業化 | × | → | ・2005年に韓国健康住宅協会が設立され、産学連携した研究開発が行われている。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 国立環境研究所他. 2007. 2050 日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討
http://2050.nies.go.jp/report/file/lcs_japan/2050_LCS_Scenario_Japanese_080715.pdf
2) 国土交通省. 2007 .健康維持増進住宅研究委員会 WEBサイト
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_tk4_000068.html
3) スマートウェルネス住宅等推進事業室. 2014. スマートウェルネス住宅等推進モデル事業 WEBサイト
http://iog-sw.jp/
4) （一社）日本サステナブル建築協会. 2011. CASBEE健康チェックリストの概要
http://www.ibec.or.jp/CASBEE/casbee_health/files/pamphlet.pdf
5) 東京都. 2013. 水道版スマートメーター（使用水量の見える化、みまもりサービス）に関する技術
http://www.metro.tokyo.jp/INET/BOSHU/2013/02/22n24201.htm
6) 健康維持増進住宅研究委員会他. 2013. 健康に暮らす住まい9つのキーワード―設計ガイドマップ. 建築技術.
7) M. J. Nils Kok. 2012. The impact of energy labels and accessibility on office rents. *Energy Policy*. vol. 46, p. 489-497.
8) K. R. Smith, E. Haigler. 2008. Co-Benefits of Climate Mitigation and Health Protection in Energy Systems: Scoping Methods. Annu. Rev. Public. Health. 第29巻. pp. 11-25.
9) D. A. Loorbach. 2007. Transition Management New mode of governance for sustainable development, AD Druk.
10) samsungvillage. 2009. Living a Life the Sustainable and Smart Way
http://www.samsungvillage.com/blog/2011/11/10/samsungblog-living-a-life-the-sustainable-and- smart-way/

### ３．２．１．４　省エネ対策がもたらすコベネフィットの評価と見える化

#### （１）研究開発領域名

省エネ対策がもたらすコベネフィットの評価と見える化

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

居住空間における断熱向上がもたらす健康維持増進効果など、エネルギーの効率的利用がもたらすさまざまな便益、すなわちコベネフィットの評価と活用を推進する。便益に併せて副作用としての損失についても、工学と医学、人文・社会科学の学際的な研究を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

エネルギーの効率的な利用は、さまざまな便益をもたらす。例えば省エネがもたらす多面的便益として、化石燃料の消費削減に伴う大気汚染防止やそれに伴う健康改善、さらには、燃料輸入費用の削減、エネルギーセキュリティの向上などを指摘することができる。多面的便益は、省エネルギーにつながる直接的便益（EB：Energy Benefit）と、省エネ以外の間接的便益（NEB：Non-Energy Benefit）に大別できる。EBとNEBとを合わせて、ここではコベネフィットと呼ぶ。

住宅断熱への投資を考える場合、費用対効果の観点からの判断が重要となる。断熱向上による省エネ効果であるEBのみでは投資回収は容易ではない。しかし健康改善というNEBを加えると投資回収がはるかに容易になり、断熱の普及に弾みがかかることになる。

また住宅の断熱化については、これに関係するステークホルダーごとにさまざまなコベネフィットを提供する[1)]。まず居住者にとってのコベネフィットは、EBとしては光熱費の削減がある。NEBとしては、健康性や快適性、遮音性、安全性の向上、メンテナンス費用削減、知的生産性向上などのさまざまな正の便益があるが、一方で住宅購入費や改修工事費の増加のような負の便益もある。次に住宅供給産業においては、断熱材を多く使用するために建設時のエネルギー消費量が増え建設コストが上昇する負の便益があげられるが、建物の付加価値向上やCSR（企業の社会的責任）推進への貢献という正の便益になるNEBがある。行政や社会というステークホルダーにおいては、EBとして化石エネルギー輸入量の減少や$CO_2$排出量の削減があり、NEBとしては環境政策推進への貢献や環境政策に対する市民の意識向上、産業活性化の促進、雇用創出などがあげられる。

従来は、住宅断熱による便益としては光熱費削減のEBのみに価値判断をおいた評価がなされてきた。しかし、上記のとおり省エネルギー化にはさまざまなNEBという価値が含まれている。省エネルギー化による便益を考える場合、従来のEBに加えてNEBも含めたコベネフィットの評価が重要となり、この研究が必要となる。

国内でのコベネフィット評価の代表的な研究として、住宅の断熱性向上に伴う疾病改善率の定量化やコベネフィットを金額換算して断熱工事の投資回収に関する研究がある[2)]。住宅の転居に伴い断熱性能が向上した人々1万人以上を対象とし、有病割合の改善に関する調査（アンケート調査）を行った。その結果、心疾患や脳血管疾患など評価した10種類の疾患すべての有病割合が、転居前から転居後に大幅に低下した。この有病割合の改善をNEBとして貨幣価値換算した結果を用い、住宅の断熱工事費用の投資回収年数が約29年

から約16年に短縮されるとの試算をしている。加えて医療費の行政負担分を考慮すれば、投資回収年数はさらに短縮されると試算している。

また、オフィスにおける知的生産性の価値をNEBとする研究も行われている[3]。調査結果によると、夏季屋内における執務環境が約26℃のときに知的生産性（加算テストやタイピングテストなどの知的作業）の効率のピークが現れ、室温がそれより高くても低くても知的生産性が低下することが解った。これは節電と知的生産性のトレードオフ問題が発生することを示している。EBの観点では夏季における冷房による室温設定は高めの方がよいが、知的生産性が低下すればその分を補填するための労働時間延長や人員の増加、残業による冷房稼働時間の増加など、さまざまな負のNEBが発生することが考えられる。知的生産性が求められる職場や学習環境において省エネ化に取り組む場合には、EBだけでなくNEBを含めたコベネフィットの観点での検討が必要である。

低炭素化に向けた面的エネルギー利用におけるコベネフィットに関する研究も行われている[4, 5]。面的エネルギー利用とは、隣接する建物間のエネルギーの融通を通じて、建物単体では成し得ない省エネルギー化や$CO_2$削減を図る取組みを指している。本研究では、都心の駅前地区をモデルとしたケーススタディを行い、同地区において低炭素化に向けた取組みを実施した際の、EBとNEBに着目した費用対効果について分析している。低炭素化対策にかかる総コスト（費用）とEBとの比較ではコストの方が大きいが、NEBを金額換算してEBと合算した便益として比較すると、便益の方がコストよりも大きくなる結果が試算されている。

海外においても、建築物の断熱化が健康にもたらすNEBの定量化に向けた研究が行われている。例えば、ニュージーランドにおける大規模な介入実証実験では、断熱改修を行った住宅と行っていない住宅における室内快適性と居住者の健康状態（風邪、不眠など）の差異を定量的に調査し、住民の欠勤が減少し、主観的な健康感が向上したことを報告している[6]。

建築分野におけるエネルギー消費や$CO_2$削減を対象としたコベネフィットに関わる研究としては、健康価値の定量化のほかに、環境（生態系）の価値や経済・金融的価値、サービス提供の価値、社会的価値などをNEBとして評価した研究が、北欧や英国、米国などで行われている[7]。また、NEBが本来の目的である省エネルギーの価値を超える場合があることも指摘されている[8]。

また、建築分野以外の民生部門や運輸部門においても、コベネフィットの評価や見える化は重要である。例えば自動車の燃費向上や電動化によるEBは化石燃料消費量の削減であるが、NEBとなる大気汚染防止費用削減や大気浄化による健康性向上、道路維持管理コスト低減などをコベネフィットとして評価し、エネルギーの効率的利用を推進していくことも重要となる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

もっとも重要な研究課題は、断熱向上などのエネルギーの効率的利用がもたらす波及効果を広く俯瞰し、新たな価値意識とともに新たな便益をなるべく数多く発見することである。そのためには幅広い視点、価値観が必要とされ、工学系の研究者だけでなく、社会学、経済学、教育学、倫理学、消費者行動学、心理学、脳生理学などの研究者が参

画した学際的な研究が必要である。

次に重要な研究課題は、発見された新たな便益を定量化し、例えば貨幣価値換算して示す、“見える化”の手法を開発することである。前述した住宅断熱化と健康増進に関する研究では、有病割合の改善を休業損失予防と医療費削減による便益として貨幣価値に換算し、“見える化”している。ただし、こうした試算はアンケート結果に基づき算定されたものであり、便益が過大評価されている可能性がある。また、疾病改善に対しての医学的・疫学的裏付けが必要である。このように、“見える化”手法の開発に当たっては、NEBの貨幣価値換算の精度向上や、得られた結果の妥当性の精査も課題と考えられる。

また、エネルギーの効率的利用は便益だけでなく副作用としての損失も発生させることがある。例えば、換気設備を設置せずに住宅の省エネのため気密性を向上させると室内空気汚染を招き、シックハウス症候群を誘発する可能性がある。したがって、エネルギーの効率的利用の計画においては、コベネフィットと損失を体系的にレビューし、前者の最大化と後者の最小化のための方策を見出す研究が必要である。なお、こうした研究を実施する際にも、上述したようなさまざまな分野の研究者の参画が必要である。

コベネフィットに関する重要な社会的課題として、エネルギーに視点を置いた価値であるEBのみが重視され、エネルギー以外の価値であるNEBが広く社会に認められていないということがあげられる。例えば、建設などの事業評価において内部収益率（IRR：Internal Rate of Return）を算定する際には、電気料金などの光熱費削減といったEBは算定に含まれるが、NEBについては算定に含まれていない。また、断熱や空調機器により建物内の温熱環境を管理・調整する際には、EBである省エネルギー化のみに焦点が当てられ、建物内にいる居住者の健康面や知的生産性の向上（または低下）といったNEBについては、あまり考慮がされていない。省エネ対策がもたらすコベネフィットの評価と見える化を推進するためには、金融機関を含めた社会全体がコベネフィットによる価値を広く認知し、実社会がこの考えを取り入れて導入していくための、政策的支援や制度化も必要である。



### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・コベネフィットに関する国際的議論が活発化している。2014年4月に公表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）第5次評価報告書の気候変動の緩和策に関する第三作業部会報告書（AR5WGⅢ）において、建築分野における気候変動の大半の緩和策は、エネルギーコスト削減に加え、健康増進など多様なコベネフィットを提供することが明示されている[9)]。報告書においてコベネフィットはさまざまな面から整理されており、例えば健康・環境面では屋内外の汚染抑制やエコシステムの保全、上水・下水量の抑制などがあげられ、経済面においては雇用創出やエネルギーセキュリティ、建物の資産価値向上などがあげられている。さらに社会面においては燃料貧困緩和や騒音改善、女性や子供の生産的時間増加などがあげられている。一方で副作用面も提示されており、換気不足による有害物質の増加や燃料貧困者の支出増加などをあげている。IPCC報告書においてコベネフィットの評価が高まっているのはよい進展であり、日本でこれまで進んでいた健康に

関するコベネフィットの研究事例が世界に広く認知されるようになってきている。

・国土交通省における高齢者・障害者・子育て世帯の居住の安定確保および健康の維持・増進に資する事業として「スマートウェルネス住宅等推進モデル事業」が2014年度より始まっている[10]。その中において、住生活空間の健康影響を医学・疫学的見地に基づく研究と追跡調査を全国で行おうとしている。本事業は、医学と建築環境工学の研究連携で行うことが、従来にない特長の一つである。

・省エネルギーのEB的な観点において、夏季・冬季の冷暖房による室内温度はそれぞれ「28℃」「20℃」を環境省では推奨している。近年、東京都など一部自治体では、NEBである快適性や知的生産性向上の観点からの「賢い節電」を推進しており、例えば夏季においては「実際の室温で28℃を目安に、それを上回らないように」との推奨に変化している[11]。

・低炭素化に向けたコミュニティや街単位の面的エネルギー利用に対する取り組みにおいては、長期に渡って多額投資してもなかなか利益率向上に寄与することが難しい。品川駅前地区をケーススタディとした研究例では、街区の不動産価値向上や地域の業務・生活継続計画（BLCP：Business and Living Continuity Plan）への貢献、執務者の知的生産性向上などのNEBを金額換算することで、費用対便益が大幅に改善することを示している[4,5]。

・欧州における効率的エネルギー経済を推進する研究協議会（ECEEE：European Council for an Energy Efficient Economy）[12]においても、コベネフィットに関する研究が近年、注目されてきている。ECEEEには建築系やエネルギー系の研究者に加え、社会学者や経済学者、心理学者、哲学者などの学際的な研究者が参加している。米国にも同様の研究協議会（ACEEE：The American Council for an Energy-Efficient Economy）[13]が存在する。一方日本では、建築や化学、電気などの各専門分野の学会内でそれぞれが研究推進しているのが現状であり、ECEEEのような学際的な研究協議会が存在しない。

### （６）キーワード

EB（Energy Benefit）、NEB（Non-Energy Benefit）、断熱、健康、知的生産性、貨幣価値換算、見える化、内部収益率（IRR）

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・建築分野において健康とコベネフィットに関する研究が行われている。<br>・知的生産性をコベネフィットとする研究は他国ではみられない研究である。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・建物断熱の普及を図るために、健康増進を貨幣価値換算した研究成果がみられる。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・IPCC/AR5報告書より、コベネフィットに関する議論が活発化している。<br>・国交省により、高齢化対応や健康維持・増進に資する住宅推進の事業が、医工連携や住宅事業者を巻き込んだプロジェクトとして始まっている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・建物の省エネや$CO_2$削減に対して健康価値の定量化や経済・金融的価値をコベネフィットとする研究が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・建物の省エネや$CO_2$削減に対して健康価値の定量化や経済・金融的価値をコベネフィットとする研究が行われている |
| | 産業化 | △ | → | ・コベネフィット研究に対するプロジェクトや支援はあまりみられない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・概論的なNEB研究への着手は、日本よりも早い時期から始まっている。<br>・研究は日本と並んで先行しており、研究例も多い。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・研究は日本と並んで先行しており、研究例も多い。<br>・特に北欧やイギリス、ドイツなどで研究が進んでいる。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・IPCC/AR5報告書より、コベネフィットに関する議論が活発化している。<br>・ECEEEにおいて、コベネフィットに関する研究が注目されている。<br>・2008年のリーマンショック後の景気対策のために、健康増進などのコベネフィットに着目した建物の改修やリノベーションを促進するプロジェクトがある（renovate EU）[14]。 |
| 中国 | 基礎研究 | × | → | ・特筆すべき活動はみられない。 |
| | 応用研究・開発 | × | → | ・特筆すべき活動はみられない。 |
| | 産業化 | × | → | ・特筆すべき活動はみられない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | × | → | ・特筆すべき活動はみられない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・先行する日本や欧州の研究を追って、研究が始まりつつあるようである。 |
| | 産業化 | × | → | ・特筆すべき活動はみられない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 村上周三． 2012. スマート＆スリム未来都市構想（エネルギーフォーラム）.
2) 伊香賀俊治,江口里佳,村上周三,岩前篤,星旦二,水口仁,川久保俊,奥村公美. 2011. 健康維持がもたらす間接的便益（NEB）を考慮した住宅断熱の投資評価．日本建築学会環境系論文集．76．666．735-740
3) 多和田友美,伊香賀俊治,村上周三,内田匠子,上田悠. 2010. オフィスの温熱環境が作業効率及び電力消費量に与える総合的な影響. 日本建築学会環境系論文集. 75．648．213-219
4) カーボンマイナス・ハイクオリティタウン調査報告書
http://www.jsbc.or.jp/project/2010/pdf/carbon_minus.pdf
5)工月良太,伊香賀俊治,村上周三. 2010. エネルギーの面的利用がもたらす間接的便益（NEB）に関する研究－ステークホルダーの多面的便益の抽出とその配分に関する研究．日本建築学会環境系論文集. 75. 653. 645-652
6) Philippa Howden-Chapman, Anna Matheson, Julian Crane, Helen Viggers, Malcolm Cunningham, Tony Blakely, Chris Cunningham, Alistair Woodward, Kay Saville-Smith, Des O’Dea, Martin Kennedy, Michael Baker, Nick Waipara, Ralph Chapman, Gabrielle Davie.2007. Effect of insulating existing houses on health inequality: cluster randomised study in the community, BMJ, doi:10.1136/bmj.39070.573032.80.
7) Diana Ürge-Vorsatz, Aleksandra Novikova, and Maria Sharmina, Counting good: Quantifying the co-benefits of improved efficiency in buildings, ECEEE 2009 Summer Study · ACT! INNOVATE! DELIVER! REDUCING ENERGY DEMAND SUSTAINABLY, p.186.
8) Martin Schweitzer and Bruce Tonn. 2002. Nonenergy Benefits from the Weatherization Assistance Program: A summary of Findings from the Recent Literature, ORNL/CON-484.
http://weatherization.ornl.gov/pdfs/ORNL_CON-484.pdf
9) IPCC AR3 WG3 WEBサイト
http://www.ipcc-wg3.de/
10) スマートウェルネス住宅等推進モデル事業
http://iog-sw.jp/entries/
11) 東京都環境局 WEBサイト
http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/
12) ECEEE WEBサイト
http://www.eceee.org/
13) ACEEE WEBサイト
http://www.aceee.org/
14) RENOVATE EUROPE　WEBサイト
http://www.renovate-europe.eu/

## ３．２．２　エネルギー効率の高いサービスの提供

### ３．２．２．１　エネルギー消費実態の把握

#### （１）研究開発領域名

エネルギー消費実態の把握

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

エネルギーの有効利用と省エネルギー化を図るためには、時刻別や消費先別などの消費実態を把握するとともにその将来予測をする必要がある。そのために、安価で信頼性あるエネルギー消費の計測を実現するセンシング技術や効率的にデータを収集する制度的問題の解決、省エネルギー対策を立案するためのエネルギー消費の決定要因の分析、将来の需給体制の基礎となるエネルギー消費の予測の研究開発の推進が必要である。また、これらのデータを活用することにより社会構造変化を促す社会技術などの研究も必要である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

産業や運輸部門、民生業務や家庭部門におけるエネルギー消費実態は、エネルギーの有効利用と省エネルギー対策立案の基礎情報であり、技術開発の方向性を定める上でも、省エネルギー政策を立案する上でも、また将来予測を行う上でも基盤となる情報である。

事業者単位のエネルギー消費実態では、一定規模以上の事業者が、エネルギーの使用の合理化等に関する法律（以下、省エネ法）に基づき、定期報告書を政府に提出している。しかし、その指標となる「エネルギー使用に係わる原単位」はセクター別ベンチマーク指標が設定されている10事業を除き、各事業者がおのおの自由に設定できるため、横並びで評価できない。またデータを収集した目的以外での利用は厳しく制限されているため、政府としてもデータを収集してはいるが、活用は限定的という状況が続いている。

各業界団体もエネルギー消費実態を把握する調査を実施しているが、サンプル数が乏しかったり規模や地域に偏りがあったりして信頼性に乏しいのが現状である。マクロ的な視点では、資源・エネルギー統計や電力調査統計、産業連関表などにより、部門別のエネルギー消費実態が把握されているが、使用先別などの詳細な内訳については推計に留まっている。我が国では2010年に、産官学が連携して作成した全国レベルの非住宅建築物のエネルギー消費量データベース（DECC：Data-base for Energy Consumption of Commercial building）が公開され、月別のエネルギー消費量に関しては一定の信頼性あるデータが入手可能になったが、サンプル数が不十分な用途や地域があることや、時刻別・消費先別のデータがないなど、依然データベースとしては十分ではない。

スマートメーターやBEMS（Building Energy Management System）、HEMS（Home Energy Management System）に代表されるICTの進化により、エネルギー消費実態の収集そのものは容易になりつつある。この大量のデータ（ビッグデータ）には、新たな技術開発の方向性を示し、また効果的な対策や政策立案を支援できる可能性が秘められている。しかし、その収集方法や取り扱いには、プライバシーの侵害や情報漏洩といったセキュリティの問題もあり、その活用には技術革新のみならず社会的な合意形成が不

可欠である。欧米はスマートメーターの導入においては日本に先行しているが、その利用については日本と同様の問題を抱えている。

我が国ではトップランナー方式として知られる家電機器などの機器別のエネルギー効率の公開は、市場メカニズムを用いたエネルギー効率の改善政策として高く評価されている。欧米や中国でも同様の制度を整備し効果を上げている。欧米では建築物においても、環境性能を公開することにより、市場メカニズムを用いて建築ストックの質の向上を図っている。米国では Energy Star による建築物の格付けが公開されているほか、EU加盟国では不動産取引時にエネルギー消費実態に基づく格付け情報を建物所有者が提供することを義務づけている。このように社会制度を通じてエネルギー消費実態をビッグデータとして把握し、そのデータ活用により市場メカニズムを働かせ、よりエネルギー効率の高い製品、建築が選好され、社会のエネルギー効率の改善が自律的に進む社会制度設計に関する研究が、欧米では積極的に行われている。

### （4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

エネルギーの消費実態の把握に関連する研究開発は、大きく次の5つに分けられる。

a. センシングに関連する技術開発

エネルギー消費実態の把握は、より精緻化、より社会制度化する傾向にあり、コストダウンと信頼性を高める必要がある。料金精算に使用する場合は計量法の対象となり日本では有効期間での交換が求められることから、コストと信頼性の両立が極めて重要となる。

b. データの収集に関連する制度的課題

制度によって収集されているエネルギー消費のデータは必要最小限のデータであることが多く、かつ使用目的が制限されている。学術目的や各種団体が収集したデータは偏りがある場合が多く、かつ守秘義務がある場合も多い。エネルギー事業者も同様に守秘義務を負っている。このような制約の中で、国民や事業者に負担をかけず、有意なエネルギー消費データを蓄積するには、守秘義務の緩和やデータの相互利用、あるいは公的制度の中で自動的にデータ収集が進むような制度構築が求められる。このような研究成果は、途上国における制度設計支援として展開することで、より効率的にデータ収集でき、また発展段階に応じた商品開発や制度設計にも寄与できると考えられる。

c. エネルギー消費の決定要因の分析

エネルギー消費の決定要因を精緻に分析することにより、新たな技術開発や運用による省エネ、効果的な政策に関する示唆が得られる可能性が高い。従来の統計解析や数値シミュレーションに加え、ビッグデータやオープンデータなど新たなデータも利用可能になりつつあり、これまでとは異なった精度での決定要因分析が可能になりつつある。

d. 気候変動やライフスタイルの変化を織り込んだ、将来のエネルギー消費の予想

少子高齢化や人口減少による社会構造の変化、それに伴う都市の縮退やさらなる一極

集中、地球温暖化の進行やライフスタイルの変化など、エネルギー消費の環境は刻一刻と変化している。効率的なエネルギー需給体制を計画するには、変動する要素を織り込みながらベースとなるエネルギー需要を予測するモデルの構築が不可欠である。特に寿命が長い建築物に関する省エネルギー対策を立案するには、これら将来の環境変化を織り込んだLCA（Life Cycle Assessment）的発想に基づく技術開発や設計、制度設計が必要である。

e. 社会構造変化を促すエネルギーデータの活用

エネルギー効率などの環境性能を格付けし、性能を見える化することで競争を促すトップランナー方式などは、自動車やエアコンなど一部の耐久消費財に導入され成功を収めている。しかし、更新サイクルが長い建築物では新築建築物の評価だけでは不十分で、既築建築物の評価手法の開発とその情報の活用に関する社会システムの開発が望まれる。日本は政策的に新築に重点が置かれてきたことから対策が遅れているが、欧米ではすでに制度の運用が開始され、不動産価格にも影響を与えていることが分かっている。特にテナントビルにおける省エネ性能の向上は、省エネルギー投資による受益者が建物利用者となり、建物所有者の投資意欲が乏しい。これらは環境性能を含む不動産情報の透明性を高めることにより改善すると考えられるが、日本は非常に遅れており対策が求められる。

## （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

近年、不動産取引時における環境性能の把握と公開を定めた欧州指令EPBD（Energy Performance of Buildings Directive）や米国のCBECS（Commercial Buildings Energy Consumption Survey）やEnergy Star評価と不動産価値の統計的相関分析が積極的に行われ、数%から10%程度の差異が存在することが指摘され始めている。このような分析に基づき、環境性能の違いが投資利回りにも影響するとして、グローバル不動産サステナビリティ・ベンチマーク（GRESB：Global Real Estate Sustainability Benchmark）のような不動産投資ポートフォリオの格付けも普及し始めている。このような評価では実績値を重要視しており、我が国としても評価に耐える実績値データベースの構築が期待されている。

また、その実態把握の手法としても、国際連合環境計画（UNEP：United Nations Environment Programme）が「COMMON CARBON METRIC（共通のカーボン指標）」として標準化を進めており、それらへの対応も重要となる。

## （６）キーワード

ICT、ビッグデータ、センシング、需要予測、消費者行動、コベネフィット、エネルギーマネジメント

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・省エネ法のセクター別ベンチマークが10業種 [1] で策定されており、そのための基礎研究は概ね完了。<br>・民生業務部門建築物ベンチマークは現在策定に向けて検討中。<br>・民生業務建築物のエネルギー消費実態については、行政による届出制度 [2]やDECC [3] などの学術研究や民間団体による調査 [4] が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・スマートメーターやBEMSなどを活用した詳細なデータ取得の方法については、計測区分の定義の共通化など実効性と負担を低減する努力が必要 [5]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・スマートメーターやICTを活用した制御が自動車や一部空調機器で登場。<br>・実態データのオープンデータ化など、データを産業化に活かすためのさらなる法整備が必要。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・民生業務建築物ではCBECSによる実態把握が行われている [6]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・CBECSに基づく格付け評価に関する研究が積極的に行われている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・LEED（Leadership in Energy and Environmental Design）やEnergy Starによる格付けが民間事業として行われ、不動産価値にも反映し始めている[7, 8]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・EU28カ国の事業種別のエネルギー消費量の原単位を調査している。エネルギー消費量効率に関するデータベース（ODYSSEE）と対策に関するデータベース（MURE）が公開されている [9]。<br>・EPBDの基礎データとして、エネルギー消費実態調査が各国で行われている [10]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・2010年にUNEPがCOMMON CARBON METRICとして建築物の二酸化炭素排出量の算出方法を標準化 [11]。<br>・EPBDの格付けの相違による不動産価値の違いなど、経済的観点からみた研究が行われている [12]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・各家電製品に基準値が定められ、エネルギーラベルによる性能の見える化が行われている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・かつては日本との共同研究も行われていたが、積み上げ的なエネルギー消費実態については外部から詳細がわかりにくくなってきている。<br>・中国精華大学建築節能研究中心は、中国建築節能年度発展研究報告を毎年出版している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・1997年中華人民共和国節約能源法（省エネルギー法）が制定され 、順次改定が続けられている。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・省エネルギー法が制定され、建築物の省エネルギー対策設計基準も制定されたが、基準を満たす建物の割合は低い。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・民生業務建築物のエネルギー消費実態把握は学術研究として行われている段階。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・2025年からすべての新築建築物に対して二酸化炭素を排出しないゼロ・エネルギー建築の義務化。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・家電製品については、韓国エネルギー管理公団により1992年よりエネルギー効率の届け出とラベリング制度が開始。自動車や冷蔵庫など32製品が対象。2010年からは集合住宅のエネルギー消費量をインターネットで公開し、競争原理によい選好が進むよう工夫している。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 資源エネルギー庁 省エネ法の概要
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/summary/pdf/2014_gaiyo.pdf
2) 東京都 地球温暖化対策報告書
http://www8.kankyo.metro.tokyo.jp/ondanka/seido/index.html
3) （一社）日本サステナブル建築協会 DECC非住宅建築物の環境関連データベース
http://www.jsbc.or.jp/decc/
4) （一財） 日本ビルエネルギー総合管理技術協会. 2014. 建築物エネルギー消費量調査報告【第36報】
5) 空気調和・衛生工学会 平成26年度 学術調査研究事業 活動計画
http://www.shasej.org/gaiyou/iinkai_keikaku2014/gakujyutsukenkyujigyo.pdf
6) EIA Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS).
http://www.eia.gov/consumption/commercial/
7) M. J. Nils Kok. 2012. The impact of energy labels and accessibility on office rents. Energy Policy. 46. 489-497.
8) JETROレポート.2011. 米国の省エネルギー推進(建築物に対する省エネ支援-LEED の認定効果)
http://www.jetro.go.jp/world/n_america/us/environment/trends/1103005.pdf
9) ODYSSEE MURE PROJECT
http://www.odyssee-mure.eu/
10) E. Commission Concerted Action (CA) EPBD.
http://www.epbd-ca.eu/
11) U. SBCI. Common Carbon Metric.
http://www.unep.org/sbci/pdfs/uNEPSBcicarbonmetric.pdf
12) N. Dirk Brounen. 2012. On the economics of energy labels in the housingmarket. Journal of Environmental Economics and Management. 62.166-179.

### ３．２．２．２　ネットワークとビッグデータの活用

#### （１）研究開発領域名

ネットワークとビッグデータの活用

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

ここでのネットワークとビッグデータの活用とは、配電ネットワーク、電気自動車運行ネットワーク、HEMS（Home Energy Management System）ネットワークなどさまざまなネットワークから収集されるビッグデータを分析し、平和で安全・安心して暮らしていくためのエネルギーサービスやマーケティングの可能性を探究することである。これに向けた課題として、エネルギー消費データなどを収集できる実証プロジェクトなどの公的支援や、HEMS機器などの継続的利用に向けた技術の研究、サイバーセキュリティの確保といった取組の産官学連携があげられる。また、ネットワークとビッグデータの活用を実践するための機械学習のような基盤技術を用いた、独創的なエネルギー利用サービスの実現に向けた、産官学連携の研究プロジェクトも必要である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ネットワークの活用とは、従来、Google、Yahoo、Microsoft などのWeb 上の情報検索を提供する民間組織が、一般に開放されているネットワーク化されたWeb上のビッグデータを収集、分析、分析結果に基づいたサービスを消費者へフィードバックするということを主に意味してきた。一方、エネルギー分野では、スマートメーターの導入などにより、ネットワーク化されたスマートグリッドが構成され、エネルギー消費の膨大な詳細データが以前より低コストで収集できるような状況になりつつある。つまり、エネルギーの分野でも膨大なデータの収集、分析、分析に基づいた情報をユーザへフィードバックするといったネットワークの活用ができるような状況になりつつある。エネルギー分野では、スマートメーターに基づくネットワークやHEMS間のネットワークなど、従来存在しなかったネットワークの活用の研究がしばらく継続すると予測される。

ビッグデータの活用とは、従来、Google、Yahoo、Microsoft などが日々蓄積される情報検索情報に基づき、検索語に対するWebページのランキング更新など、ネットワーク化されているWeb上のデータを分析し、分析結果に基づいたサービスの消費者への提供というものが主だったものであった。現在は、エネルギー消費などのエネルギー利用に関連するデータが、スマートメーターやHEMSネットワークから低コストで収集可能となりつつある。そのため、ビッグデータの活用には、収集されたエネルギー利用関連のデータを分析し、エネルギーの利用や選択の場面での消費者心理の研究や、消費者心理にまで踏み込んだサービスの開発なども含まれてくる。エネルギー分野では、消費者心理にまで踏み込んだサービスを開発するために、エネルギー消費における人間の行動のセンシングや、国内外におけるスマートコミュニティ実証プロジェクトなど公的に支援された事業において、エネルギー消費行動データに基づく消費者のエネルギー利用の分析、分析結果に基づくサービス創出といった研究が、しばらく継続すると予測される。

国際比較については、ネットワークとビッグデータの活用を実践するデータマイニング、機械学習、最適化技術、可視化技術などの基盤技術の研究では、米国・日本・欧州

で非常に高い研究レベルを維持している。中国・韓国は、日欧米に留学していた優秀な学生が研究者として多数帰国しており、ある程度の基盤技術の研究レベルを維持している。エネルギー分野におけるネットワークとビッグデータの活用研究については、大きなプロジェクト研究が米国・欧州・日本においてほぼ同時期に推進されている。ネットワークとビッグデータの活用は、ネットワーク化されたある種のコミュニティが存在し、そのネットワーク上で蓄積できるデータが存在することが前提となるため、Google、Yahoo、Microsoft などのWeb 上の膨大なデータを扱う組織がネットワークとビッグデータの活用に関する研究を先導してきた。今後は、エネルギー分野において、スマートメーターなどの継続的にデータを収集できるネットワークの構築と、収集されたデータの分析結果に基づく、新たなエネルギーサービスの創出研究が進展すると予測される。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

エネルギー分野におけるネットワークとビッグデータの活用においては、スマートメーターを基盤とするネットワークやHEMSネットワークなどがまだ本格的に実運用されていないため、どのようなデータが、どれくらいの時間間隔で収集されるのかも不明なところがある。そのため、エネルギー消費に関するデータを収集するネットワークが実運用されるまでは、エネルギー消費反応データなどを収集できるスマートコミュニティ実証プロジェクトなどのような公的に支援された事業によって、ネットワークとビッグデータの活用の研究を牽引する必要があり、これは世界的な課題となっている。

スマートメーターで収集されるエネルギー消費のデータやHEMSネットワークで収集されるエネルギー利用関連データなどのビッグデータを分析し、消費者心理に踏み込んだ研究やサービス開発が国内外で盛んになりつつある。しかし、消費者心理に踏み込んだ研究やサービス開発は、消費者個々人のエネルギー利用関連データが収集できることが前提となるが、HEMSにおける「見える化」が数ヶ月で飽きられてしまう状況を考えると、継続的なエネルギー利用関連データの収集は困難な状況が危惧される。そのため、今後は「見える化」に代わる「興味持たせる化」、「振り向かせる化」といった技術の研究開発が重要となると考えられる。

エネルギー分野におけるネットワークとビッグデータの活用は、デマンドレスポンスやリアルタイムプライシングなどのサービスとの関連が深い。いずれのサービスも個人情報を扱う一種のフィードバックを含む制御系であり、プライバシー保護とサイバーセキュリティの確保が非常に重要となる。プライバシー保護については、JST-CRESTの「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」[1)] でプライバシー保護に関連する研究課題が採択されるなど、研究が進行中といった状況にある。エネルギーを制御するネットワークは、従来は他のネットワークとは分離されていたため、物理的にサイバーセキュリティが確保されていた。しかし将来、消費者への有用なサービスを提供するためには、電気自動車（EV：Electric Vehicle）運行ネットワークやHEMSネットワークなどさまざまなサービスネットワークとエネルギーを制御するネットワークとを物理的に分離することは難しくなってくる。安全に、安心してネットワークとビッグデータを活用するためには、さまざまなネットワーク情報との統合が求められる制御系ネットワークにおけるサイバーセキュリティの確保を継続的に研究・教育する組織

が必要となると考えられる。

我が国では、ビッグデータ分析の基礎研究に携わる研究者は多く、高い研究レベルを維持している。前述のJST-CREST「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」など、ビッグデータ活用の基礎研究に関連するプロジェクトもあり、現在、その研究レベルの維持が可能となっている。基礎研究レベルの維持は可能なものの、エネルギーの安定供給を満たしながら、消費者側の視点からのエネルギーを用いた新たなサービスを研究するような大規模なプロジェクトが我が国にはない。また、我が国の大学には、エネルギー供給の仕組みとエネルギーを利用したサービスについて、体系的に学べる専攻がない。エネルギー分野におけるネットワークとビッグデータの活用において、学術および産業応用の面で国際的な競争力を高め、我が国の成長戦略を実現するためにも、産官学が連携し、ネットワークとビッグデータを活用した独創的なエネルギー利用サービスの探索・開発・実現研究プロジェクトを継続して、立ち上げていく必要がある。

ネットワークとビッグデータの活用により、安全、安心な社会を築いていくためには、ビッグデータ分析ができる人材確保のための教育制度の設計、ビッグデータにおける個人情報保護制度の設計、ビッグデータの所有権制度の設計などが必要となる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- スマートメーターが導入され、初期のスマートグリッド構築が進みつつある米国、欧州、日本において、需要家から収集される大量のデータを用いたエネルギー消費分析などに関する公的なプロジェクトが散見される。従来エネルギー供給者側の視点からのデータ分析が中心であった。今後は国民全体の利便性向上などを考え、エネルギー消費者の視点からのエネルギー消費に関するデータ分析、エネルギーと情報とが融合した新たなサービスの創出が必要となることが考えられる。
- EVの将来の導入を考え、米国、欧州、日本において、EVの充放電サイクルの有効性検証、EV充電ステーションとの最適配置などを検討する公的なプロジェクトが散見される。今後は、交通流通ネットワーク、配電ネットワーク、HEMSネットワークなどさまざまなネットワークが混在する、より現実に即した形式で、より大規模なスマートコミュニティ実証試験を産官学が共同で行う必要があると考えられる。
- Google、Yahoo、Microsoft では、Web 上の大量データをビッグデータとしてもっているため、ビッグデータを活用する技術開発に早い時期から取り組んできた。現在、ビッグデータの活用については、米国、欧州、日本、中国、韓国で公的支援による大きなプロジェクトが実施されている。このプロジェクトによって、ビッグデータ分析の基礎技術は発展すると予測される。今後は、ビッグデータの活用によって、安全、安心な暮らしが実現できることを示す独創的なプロジェクトが必要になる。

### （６）キーワード

ビッグデータ、機械学習、最適化技術、データマイニング、可視化技術、電気自動車、ネットワーク、スマートコミュニティ、セキュリティ

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・日本の大学・公的機関・民間機関の基礎研究レベルは高い。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・横浜、豊田、京都、北九州の4地域でのスマートコミュニティ実証（2010～2014）など、電力需要や自動車関連データなどを用いた国・民間レベルでの研究開発が行われている。スマートメーター導入なども始まっており、電力自由化進展に伴う電力アグリゲータなどさまざまな主体による応用研究が増えている。日本版オートデマンドレスポンス（ADR：Automated Demand Resopose）の仕様確定なども今後行われていく。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・インターネットやE-commerce、ゲームなどの企業は大規模のデータ分析を用いたサービスを実施している。エネルギー分野においても中規模なデータを活用したサービスが登場し始めている。交通情報によるナビゲーションなどはサービス運用されている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・米国の大学・公的機関・民間機関における基礎研究レベルは非常に高く、ほとんどの研究領域において世界をリードしている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・カリフォルニアでの自動デマンドレスポンス実証、2008年からボルダーでのスマートグリッド実証などに早期から取り組んでいる [2]。また、電力データからの用途推定などの研究も進んでいる [3,4]。<br>・カリフォルニア州で1千万台(導入率55%超)、テキサス州で600万台（30%超）のスマートメーター導入が進んでおり、openADRの導入なども進みつつある。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・Google、Facebook、Amazonなどは自社でビッグデータに基づく検索、SNS販売などの各種サービスを提供するとともに、今後のビッグデータサービスの基盤となるクラウドサービスを適用している。<br>・Opower社は電力消費データ解析に基づく情報提供による節電支援サービスを行っている [5]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・欧州の大学・公的機関・民間機関における基礎研究レベルは高い。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・アムステルダム（オランダ）、マルタ共和国、マラガ（スペイン）などでの各種スマートシティ実証プロジェクトがある [6]。IQDA（Irish Qualitative Data Archive）ではスマートメーターによるデータ公開などオープンデータ化も一部されている [7]。<br>・BIG（Big Data Public Private Forum）-Project、European Strategic Energy Technology (SET)-Plan などで各種プロジェクトが実施されている。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・スマートエネルギーとビッグデータの活用をコンサルタントする企業が現れ始めている [8]。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | | ・米国への多数の留学生らが本国へ帰国し、基礎研究レベルは向上している。クラウドコンピュータを開発している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・天津市など13都市のエコシティ計画などでのスマートシティ実証事業を実施している。<br>・「2012年におけるハイテク・サービス業の研究開発と産業化に関する通知」でのビッグデータ分析ソフト開発と活用サービス創出を重点支援対象に指定した。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・実証研究レベルが主で産業化に至った例は見当たらない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・米国への留学生らが本国へ帰国し、大学で一定レベルの基礎研究力を維持している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・済州道のスマートグリッド実証団地などが実施されている。 ビッグデータ分析については、2012年11月「ビッグデータマスタープラン」発表、「ビッグデータ分析活用センター」開所によるデータ処理環境整備、「公共データポータル、オープンデータ広場」など公共データ公開など国家で政策的取組みを行っている。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・実証研究レベルが主で産業化に至った例は見当たらない。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 独立行政法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業CREST「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-6.html
2) SMARTGRID.GOV WEBサイト
https://www.smartgrid.gov/
3) Putting Energy Disaggregation Tech to the Test (GTM RESEACH)
http://www.greentechmedia.com/articles/read/putting-energy-disaggregation-tech-to-the-test
4) J. Zico Kolter, Matthew J. Johnson. 2011. REDD: A Public Data Set for Energy Disaggregation Research. In Proceedings of the SustKDD Workshop on Data Mining Applications in Sustainability
http://www.cs.cmu.edu/~zkolter/pubs/kolter-kddsust11.pdf
5) Michela Beltracchi. 2012. Introduction to Opower Delivering customer insights and value
http://sedc-coalition.eu/wp-content/uploads/2012/12/Opower.pdf
6) Sample of European Smart Grids Projects (Smart Grids European Technology Platform)
http://www.smartgrids.eu/projects
7) Irish Qualitative Data Archive WEBサイト
http://www.iqda.ie/
8) SMARTER ENERGY MANAGEMENT.
http://www.t-systems.com/umn/t-systems-use-case-big-data-analysis-for-utilities-/_1/blobBinary/T-Systems-Use-Case_Big-Data-Energy-Management.pdf?ts_layoutId=989624

### ３．２．２．３　需要側資源を活用するエネルギー需給マネジメントシステム

#### （１）研究開発領域名

需要側資源を活用するエネルギー需給マネジメントシステム

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

太陽光発電など自然変動電源の大量連系時の統合制御エネルギーシステムを効率的に構築するために、これまで評価が進んでいない需要側資源を活用するエネルギー需給マネジメントシステムの技術基盤を確立する。技術進歩により低コスト化が期待される定置用ならびに自動車用の蓄電池システム、分散型電源、エネルギーマネジメントシステムを含む多様な需要側資源を活用するシステムの系統的研究とともに、省エネルギー行動リコメンドなどの行動変容プログラムや人間の行動心理の解明などの社会科学的側面の研究も推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

次世代型エネルギー需給マネジメントシステム（スマートグリッド）の確立には、分散型電源やリチウムイオン電池、HEMS（Home Energy Management System）、BEMS（Building Energy Management System）などを含む多様な需要側資源を連携させる双方向通信技術およびエネルギー需給マネジメントなどの制御技術に重点的に取り組む必要がある[1)]。系統制御システムとしては、2030年代までに太陽光発電や風力発電など自然変動電源が大量に導入されると予想されることから、それらとの連系時の統合制御エネルギーシステムを確立する必要がある。我が国では、北海道、東北地方が風力発電の好適エリアであり、導入容量も大きい[2)]。これまで風力発電連系の募集枠に対して、応募の合計出力が上回っている。これは、主に周波数調整などの系統運用制約に起因するが[3-5)]、地域間連系線の活用により広域での周波数調整や系統用蓄電池の導入による周波数調整の実証事業が計画され、実証試験データに基づき、最適な需給変動対策のポートフォリオが構築されようとしている。現在、2020年頃の完成を目指して、電力システム改革が進んでいるが、全国規模で需給調整・周波数調整を行えるようになる。

供給信頼度を向上させる送電系統広域監視制御から需要家機器制御まで、電力系統のすべてのバリューチェーン（発電、送配電から電気利用まで）上に関わる研究プロジェクトが国内外で進行中である。2000年代以降、欧米ならびにアジアの各国が、国をあげての研究開発戦略を構築し、スマートグリッドを中心とするグリーン成長戦略に基づき、実装段階に達してきている。

米国の一部など風力発電の普及が進んでいる地域では、電力市場において、系統安定化のためのアンシラリーサービス、特に周波数制御のサービス提供に需要側資源が参画し始めている。風力発電・太陽光発電の普及が進んでいるスペインなどでは余剰発電の出力抑制が必要となっており、より低炭素化を進めるには、再生可能エネルギー電源の出力を最大限利用する次世代エネルギーネットワークの必要性が高まっている。現状では、需要機器との双方向通信が可能なスマートグリッド化が十分進んでおらず、分散型電力貯蔵装置としての利用が期待される電動車両など需要側資源が本格的に電力市場に参加できる状況にはない。我が国同様、欧米でも公的助成を受け、社会実証試験が進行

中である。国内では、電力システム改革における需要側資源活用の加速化や自動化デマンドレスポンスによるインセンティブ型デマンドレスポンス制御試験、電気自動車（EV: Electric Vehicle）や プラグイン・ハイブリッド車（PHV：Plug-in Hybrid Vehicle）のスマート充電が研究されつつある。

米国では、エネルギー省（DOE：Department of Energy）およびエネルギー規制委員会（FERC：Federal Energy Regulatory Commission）がデマンドレスポンスを供給側資源と同様に扱う政策を基本とし、需要側資源の積極的活用を目指している。我が国では、電力供給不足を背景に、ネガワット取引など市場メカニズムに基づくデマンドレスポンスが実プログラムとして導入され始めた段階である。政府は、新しいエネルギーミックスを実現する手段の一つとして、スマートメーターの導入加速や柔軟なダイナミックプライシングの検討を開始したところである。高い電力系統技術基盤の上に産業界の経験的努力により当該分野で世界に類を見ない高品質を保持してきたが、規制改革などの社会科学、需要家行動の行動科学分野の研究との融合などの面で遅れている。最近、ようやく、行動経済学に基づくデマンドレスポンス実証データ分析が始まったところであるが、米国ではすでに実用化されている。

また、大型ハリケーンによる大規模停電の発生・復旧遅れやサイバーアタックの懸念を踏まえて、北米では、電力の供給信頼度の向上（レジリエンス向上、広域監視制御）と電力市場・運用の広域化（market to market coordination）が大きな話題となっている。欧州でも再生可能エネルギー電源の出力変動対策としてさまざまな電力市場制度（運転予備力の調達など）が導入され、産業用需要家の需給調整能力を活かす取組みがフランスなどで始まっている。

具体的な研究開発課題は、以下があげられる。

a．スマート化の要素技術

スマート化のための要素技術である、各種センサ開発やその材料開発、及びデバイス開発が必要である。

b．建築、地域、都市スケールにおけるエネルギーのさらなる有効活用

スマートハウス、及びタウンマネジメントとリンクしたエネルギーマネジメントシステムにより、地域や都市スケールにおけるエネルギーのさらなる有効活用を実現する。

c．エネルギーマネジメントシステムの階層化と多重化

HEMS、BEMS、CEMS（Community Energy Management System）間の階層制御、及びグループ制御の仕組みが必要である。また、将来に全国連系の独立送電系統運用者（ISO：Independent System Operator）が構築される際の、システム制御や通信制御の仕組みが課題である。さらには、個別的利用から集団的利用に向けたアグリゲーターシステムの活用も検討する必要がある。

d．消費者行動分析、行動経済学的分析

エネルギー消費や自動車走行などのビッグデータを収集・活用した、消費者行動分析

や行動経済学的分析が必要である。

e. エネルギーの供給サイド資源と需要サイド資源の統合化

再生可能エネルギー電源の出力予測の可能性を見極め、再生可能エネルギー統合（ランピングなどシステム柔軟性の資源）により、エネルギーの供給サイド資源と需要サイド資源の統合化が必要である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

現状の技術レベルは、供給サイドはかなり向上してきたが、大量データ処理、リアルタイム情報通信制御などでの根本的な障壁があり、需要サイドでは制御効果の確実性を確保する需要家行動解明など未解明の研究領域がある。現在の国内外の実証試験は、既存技術の統合が中心で、経験的に性能向上を図っている段階である。供給側、需要側の双方の要素技術群の技術進歩、センシング技術と無線ネットワーク技術が融合したセンサネットワーク、大規模データ処理などを統合した次世代エネルギーネットワークの数理的基盤、需要家行動原理をモデル化した需要予測技術・制度設計など、広範な研究開発領域が存在する。

国が関与すべき、資金投入すべき研究環境整備は、個人情報保護とユーザの受容性を確保した上で、産業振興につながるビッグデータ整備支援である。

また､開発されたエネルギーマネジメントシステムの社会実装を図る各種規制改革(交通、都市計画、税制、公共政策）の推進も課題である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・欧州における洋上風力と高圧直流配送（HVDC：High-Voltage Direct Current）によるスーパーグリッドを構築する計画がある。欧州の北海エリアは水深が浅く、着床式で大規模で洋上風力発電所やケーブルの設置が容易であり、HVDCによりそれらを連系し、スーパーグリッド構築を目指している。
・欧米における変動電源や変動需要のバランシング技術、貯蔵技術があげられる。出力変動の大きい再生可能エネルギー電源を大量に需要変動に合わせて、瞬時瞬時の需給バランスをとるための電力貯蔵技術などがある。エネルギー貯蔵に関する米国のカリフォルニア州の規制などが例としてあげられる。
・風力発電など変動電源が大量に連系してきた米国テキサス州や欧州では、出力予測外れに伴う予備力供給や周波数調整型のアンシラリーサービス型デマンドレスポンス[6)]が導入され始めている。
・分散協調型エネルギーマネジメントシステムが注目されている。これは、需要地に設置される分散型エネルギー資源を広域エネルギーネットワークと協調的に連携制御するエネルギーマネジメントシステムである。我が国の社会システム実証事業が代表例である。
・カスタマイズされた省エネルギーレポートによる行動変容プログラムが進んでいる。これは、スマートメーターなどにより計測された詳細な世帯ごとの電力消費データを用いて消費世帯特性を分析し、行動科学的知見を反映した省エネルギーアドバイスレ

ポートにより需要家行動を継続的に変容させるプログラムである。我が国で実証試験が実施された[7]。

・EVのためのICTが注目されている。単に移動手段のインテリジェント化（例えばITS）にとどまらず、スマートグリッドでの連携による再生可能エネルギー電力の支援や分散型自立エネルギー拠点としての災害対応力強化が期待される。

### （６）キーワード

需要側資源、分散型エネルギー資源、デマンドレスポンス、分散協調型エネルギーマネジメントシステム、アンシラリーサービス型デマンドレスポンス、次世代エネルギーマネジメントシステム、スマートグリッド

## （７）国際比較 [8-13)]

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・大学（東大、北大、早大など）、研究機関で基礎研究（太陽光発電出力予測技術、エネルギーマネジメントなど）に取り組んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・系統技術から需要家技術までバランスよく、応用研究を推進している。特に太陽光発電の周波数変動対策や余剰電力対策について、系統側対策と需要側対策の最適な組み合わせが得られることが期待される（宮古島メガソーラー実証研究など）。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・送配電自動化、蓄電池、Vehicle to Home などの分野で世界をリードしている。また、実証試験を通して産業化、特に輸出産業化に取り組んでいる（スマートコミュニティ・アライアンス）。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・大学、DOE国立研究所などをネットワーク化し、スマートグリッド、マイクログリッドに関する基礎研究を推進している。IEEEでスマートグリッド専門誌やグループを組織し、情報通信や需要側資源の基礎研究で世界をリードしている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・政府補助金により、ニューメキシコ州における日米共同プロジェクトを含め、各地でスマートグリッド、マイクログリッドの実証試験が行われている。一方で、地元への費用便益の説明不足などから、順調に試験が進んでいない事例もみられる。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・インフラ側に比べて、デマンドレスポンスプログラムなど下流側の産業化で進んでいる。特に、電力系統運用・市場運営が一体化された北東部や風力発電比率の高いテキサス州などで高度なデマンドレスポンスプログラムが開発・運用されている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・風力発電の大量連系を可能とする系統安定化技術（パワエレ、制御技術を含む）や他のエネルギーキャリア（水素など）との代替・補完を考慮したエネルギーシステム研究が推進されている。洋上風力の開発・利用（高圧直流送電（HVDC）を含む、北海油田で開発した基盤技術を活かせる）で世界をリードしている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・EUプロジェクトとしてスマートメーター、統合システムを中心にスマートグリッド実証事業が進んでいる（JRC EC）[9)]。Fraunhofer研究所（独）が事務局となり、Sandia NRELなど欧米の20の大学・研究機関が、分散型エネルギー源（DER）のスマートグリッド連系試験ネットワークを構築している [10)]。電力系研究機関（CESI）が再生可能エネルギー電源の急拡大を考慮した欧州電力市場を対象として市場シミュレータを開発している [11)]。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・電力系統運用者が再生可能エネルギー制御センターを創設し、風力発電の大量連系を実現した。国際連系を通じて、欧州大で広域運営することによって、風力発電の変動を吸収しているなど、我が国と電力システムが異なる点に注意する必要がある。欧州の特徴は、スマートグリッド開発は電力市場の域内統合と強く結び付いている点にある（欧州指令の大きな政策目標の実現に向けて、技術開発戦略と電力システムの制度設計が一体化される必要がある）。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・Hafei工業大学などで、マイクログリッドなどの基礎研究に取り組んでいる [12)]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・配電自動化など今後、中国で普及すべき技術は試験的導入段階にある。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・国家電網を中心に、関連するグループ企業で、スマートメーターなど要素技術の産業化に取り組んでいる。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・KEPCO,Inha大学などで、PVなど再生可能エネルギー電源と蓄電池の最適制御などマイクログリッドなど要素研究、V2Gの基礎研究に取り組んでいる [13]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・済州島での実証事業を踏まえて、2013年頃に実証用のスマートグリッドを構築する予定である（実際は進捗に難）[14]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・国をあげて産業界（製造事業者、設置工事、電気事業者）と一体となって輸出産業化に取り組んでいる [14]。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 新電力供給システムの研究動向調査専門委員会. 2011. マイクログリッド・スマートグリッドを含む新電力供給システムの研究動向. 電気学会技術報告. 第1229号
2) NEDO再生可能エネルギー技術白書 2014
http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html
3) 浅野浩志. 2012. 特集解説「出力変動電源の系統連系技術」. 電学論B. 132. 4. 297 - 300.
4) 浅野浩志. 2012. デマンドレスポンスによる需給安定化. 電気学会誌. 132. 10. 688 - 691.
5) 浅野浩志. 2012. 電気料金による電力需要の調整と市場機能による需給調整. 電気評論.
6) 浅野浩志,山口順之. 2014. 国内外のデマンドレスポンス実証と活用の動向. 電気評論.
7) 向井登志広他. 2014. 高圧一括受電マンションにおける電力ピーク抑制策の実証研究：2013年夏のピーク抑制・意識変容効果の検証. エネルギー・資源.
8) FERC Staff Report. 2011. Assessment of Demand Response and Advanced Metering.
9) JRC EC. 2011. Smart grid projects in Europe.
10) DERlab Testing Facilities on Microgrids. 2012. Evora 2012 Symposium on Microgrids. September 2012, Evora, Portugal.
11) P. CAPURSO, B. COVA, E. ELIA, P. PORTOGHESE, M. STABILE,F. VEDOVELLI, A. VENTURINI. 2012. Market Integration in Europe: a market simulator taking into account different market zones and the increasing penetration of RES generation. CIGRE.
12) Meiqin Mao. 2012. Multi-Agent Based Simulation of Microgrid Energy Mgmt, Evora 2012 Symposium on Microgrids, September 2012, Evora, Portugal.
13) Dong-Jun Won. 2012. Operation of Grid-connected Microgrid on KEPCO Test-bed, Evora 2012 Symposium on Microgrids, September 2012, Evora, Portugal.
14) 韓国知識経済省資料.

### ３．２．２．４　消費者行動に着目したエネルギー利用の高効率化

#### （１）研究開発領域名

消費者行動に着目したエネルギー利用の高効率化

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

人間行動に起因するエネルギー消費量のばらつきは無視できない大きさであり、効率的なエネルギー利用を促すことによる省エネルギーのポテンシャルは大きい。本研究開発領域では、エネルギー消費情報のフィードバック、削減目標の設定、他者との比較、具体的な行動指針の提示など、心理学などの人間行動に関する科学的知見に基づく多様な動機づけ手法により行動変容を促すシステムやサービスの開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

家庭生活に関わるエネルギー消費量は建築物や機器の性能によって変動するが、消費者の行動も大きな変動要因であり、米国では行動変容によって約20%の省エネルギーが可能と推計されている[1,2]。米国に限らず、比較的エネルギー消費量の少ない他の先進国でも同様の省エネルギーポテンシャルがあると考えられている。これは省エネルギーが、最新技術を全面的に導入する場合の物理的なポテンシャルはもちろんのこと、経済合理性のある行動によるポテンシャルと比較しても、極めて低い達成水準に留まっていると考えられるためである。

省エネルギーにおけるこのようなギャップが生じる理由については、1970年代頃から多くの研究成果が示されており、近年ではさまざまな省エネルギーバリアの存在が認識され、政府が補助金などの政策によって市場に介入する論拠となっている。省エネルギーバリアにはさまざまな種類があり、情報の非対称性（商品に関する購入側の情報不足）、テナント・オーナー問題（省エネ投資者と受益者が異なる）、資金制約（初期費用を借りる信用力がない）が良く知られているが、近年、消費者が認識の限界やバイアスによって必ずしも合理的に行動しないこと（限定合理性）も省エネルギーのバリアの一つとして注目を集めている。したがって、消費者の行動変容による省エネルギーを実現するには、心理学や行動経済学などの行動科学の知見を活用することが有効かつ不可欠と考えられるようになっている。

消費者の行動変容による省エネルギーを実現するための基本的な方策として、従来、各種の省エネルギー行動の内容と効果に関するリストの提供、建築物や機器のエネルギー消費効率や省エネルギー基準の達成状況あるいは光熱費の目安の提供（ラベリング制度など）など、消費者に対する情報提供が実施されてきた。これらの取り組みのなかで、各種の省エネルギー行動の効果測定、消費者の省エネルギー行動実施実態の把握、標準的な生活パターンや機器の使用パターンの把握が進められ、消費者行動とエネルギー消費の関係をモデル化し、行動変容の省エネルギーポテンシャルを評価することが可能となってきた。

欧米諸国では1970年代以降、消費者に対するエネルギー消費情報のフィードバック（日本では「見える化」と呼ばれることがある）によって、エネルギー消費に対する関心を高め、行動とエネルギー消費の関係を理解することを支援する取り組みが行われて

きた。具体的には、エネルギー事業者が請求書にエネルギー消費に関する詳細情報を添付する取り組みや、計測に基づくエネルギー消費情報（電気の時刻別や機器別の消費量、自動車のリアルタイム燃費など）の提供による省エネルギー効果の測定などの実証的研究がある。日本でも1990年代頃から同様の実証的研究が進められてきた。

エネルギー消費情報のフィードバックにおいては、単に消費量を見せるのではなく、適切な目標設定や他者との比較を行うことによって、消費者がもつ「目標は達成すべき」「エネルギーの浪費は恥ずかしい」といった心理（規範）に訴えることや、競争意欲を引き出すことが有効と考えられている。また、光熱費に言及する際は、行動経済学のプロスペクト理論を参考に、省エネルギー行動を実施する利益よりも実施しない損失に焦点を合わせることや、フレーミング効果（同じ条件が見せ方によって異なって見える効果）を利用して光熱費削減額をまとまった大きさで示すこと（例えば「1日10円」より「3年間で1万円」）などが推奨されている。具体的に取り組むべき省エネルギー行動を示す場合にも、従来のように省エネルギー行動の長いリストを提示するのではなく、対象者の省エネルギーの達成レベルや実施状況に応じて限定した項目を提示することが、実行意図を高めるのに効果的と考えられている。

家庭向けの詳細情報付き請求書は、現在「ホームエネルギーレポート」と呼ばれ、米国を中心に電気・ガス事業者での導入が進んでおり、ホームエネルギーレポートの作成・送付を代行するサービスが急成長している [3]。内容は消費トレンド、近隣の類似世帯との比較による省エネルギー度の評価、推奨される省エネルギー行動などであり、短時間で目を通せるシンプルな構成となっている。

住宅内のエネルギー消費量を計測してフィードバックするシステムは、国内ではHEMS（Home Energy Management System）と呼ばれている。プロトタイプの開発や実証的研究は2000年代に入ってから本格的になった。ビジネスモデルが未成熟で商業的な展開は進んでいなかったが、東日本大震災後にHEMSの補助金制度が導入され、太陽光発電などを備えたスマートホームの中核システムとして注目が高まり、徐々に普及が進んでいる。海外では、英国などが電気・ガス事業者に顧客家庭における$CO_2$削減を義務づける制度を導入した結果、義務履行のためにHEMSを大量導入する動きを誘発し、欧州のHEMSビジネスの成長をもたらした。

世界各地で行われた家庭の電力消費情報のフィードバックに関する実証的研究を整理した研究 [4]によると、省エネルギー効果は、詳細情報付き請求書の送付で平均3.8%、日・週単位のフィードバックで8.4%、家庭全体の電力消費計測によるフィードバックで9.2%、機器別計測付きのフィードバックで12.0%とされている。この結果はまだ中間的評価と考えるべきであり、今後も研究成果の蓄積が必要である。特に効果の持続性については知見が乏しい。実証的研究成果を適切に比較するため、取得データや省エネルギー効果の評価方法を共通化させることも重要課題である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

ホームエネルギーレポートについては、各地で数万世帯規模の実証試験により省エネルギー効果が一定期間（複数年間）持続することが実証されているが、具体的にどのような行動が省エネルギーに寄与しているかについては検証途上にある。今後、ホームエ

ネルギーレポートを幅広い地域で普及させるには、米国の諸州のように電気・ガス事業者に自社顧客を対象とする省エネルギープログラムの実施を義務付け、併せて実施費用を料金への上乗せなどにより回収できる制度を導入するなどの制度的インフラが整う必要がある。なお、国内ではそのような制度的インフラは未整備であるが、米国の大手サービス事業者と提携してウェブ上でサービスを実施している電気事業者や、独自のサービスを提供している電気事業者がある。

HEMSなどの計測によるフィードバックはホームエネルギーレポートに比べ高コストになるため、費用対効果の改善が課題となっている。前述のように平均的には10%前後の省エネルギー効果が実証されているが、導入先による効果のばらつきは大きく、また、効果の持続性を否定する研究もみられる。ビジネス性の向上のため、省エネルギー・省コストの側面だけでなく快適、健康、安全・安心、エンタテイメントなど総合的に住宅サービスを進化させる取り組みが競われているが、フィードバックのアプローチやインタフェースの改善のための実証的研究と効果測定が引き続き必要である。

行動に影響を及ぼす要因の多様性を考えれば、画一的なサービスやインタフェースが受容される領域は狭いため、サービスやインタフェースのカスタマイズ、ターゲティング、マーケット・セグメンテーションが重要と考えられている。年齢、性別、居住地域、所得、社会的地位、宗教といった基本属性に加えて環境意識、嗜好、気質（例えば、挑戦と失敗の回避のどちらを志向するか）などの属性も重要視されている。高い目標設定や難易度の高い行動を失敗回避志向の消費者に促せば、省エネルギー行動意欲を減退させる可能性がある。したがって、マーケティング学、環境心理学や教育心理学などの成果に学ぶことも重要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

欧米諸国では省エネルギーに関する研究会議において早くから行動変容の促進が着目されており、米国では2007年から毎年、行動・エネルギー及び気候変動会議（BECC：Behavior Energy and Climate Conference）が開催され、約700人の行動科学や省エネルギーの専門家、実証事業実施者らが参加し、知見を共有している[5)]。欧州でも同様の研究会議（Behave）がBECCに比して小規模ながら2～3年ごとに開催されている。国内では2014年に各分野の研究者らによる省エネルギー行動研究会が発足し、研究会議（BECC JAPAN）が開催されている。

国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）の「デマンドサイドマネジメント（DSM）テクノロジーとプログラム」に関する実施協定（国際共同研究）では、DSMにおける行動変容をテーマとしたタスク（Task24）が2012年から開始されている。同じくIEAの「建築物とコミュニティにおけるエネルギー（EBC）」プログラムでは、建築物使用者行動の定義とシミュレーションに関する部会（Annex 66）が2013年に承認され、2014年末から開始される予定である。

行動科学の知見は当然ながら省エネルギーの分野に限らず、広く応用可能である。環境関連の分野では、ごみの分別や公共交通の利用などの環境配慮行動の促進に早くから活用されている。英国政府では、行動科学の知見を政策に活用する専門チーム[6)]を編成し、例えば、建築物のエネルギー性能証書（ラベル）の改定を行っている。今後、他分

野における応用例や成果に学ぶことも重要になると考えられる。

HEMSの技術的側面については、スマートフォンやタブレットの表示端末としての利用やデータをクラウドに蓄積するクラウド型HEMSが拡がっている。また、機器別のエネルギー消費情報を提供するHEMSでは導入するセンサの数が増え、高コストとなるため、家全体の電力消費データを計測・解析し、機器別の消費量に分解する技術（ディスアグリゲーション技術）を国内外の大学、研究機関や企業が開発を進めている。この技術をスマートメーターに実装することで、より安価に機器別フィードバックが実現する可能性がある。

家電製品自体がセンサを持ち、HEMSと連携する可能性もある。国内外の大手家電メーカーではエアコンや冷蔵庫、テレビなどの主要家電製品にエネルギー消費情報（電気代、消費電力の水準や省エネモードのステータスなど）をフィードバックする機能を搭載している。HEMSと連携して情報を一元的に管理し、遠隔で操作・設定する仕組みもある。他の機器や端末との連携は、自動車やサーモスタット（空調温度調節装置）などとも始まっており、自動車メーカーやIT系事業者がこの分野に参入している。今後、異なるメーカー・ベンダーによる機器の連携のため通信プロトコルやデータ仕様などの標準化戦略がいっそう重要になると考えられる。

### （６）キーワード

フィードバック、ホームエネルギーレポート、HEMS、行動科学、スマートメーター

## （７）国際比較 7)

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・家庭のエネルギー消費行動の実態把握から、行動科学の知見を応用した省エネルギー行動の促進に関する研究に進みつつある。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・1990年代末頃からHEMSなどによるフィードバックの実証事業が実施された。近年はスマートコミュニティなどの実証事業において、大規模なフィードバックの実証が進められている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・2011年以降、補助金制度によるHEMS導入が進み、HEMSソリューションベンダーが増えている。<br>・住宅業界がスマートホームの展開に注力している。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・行動科学と省エネルギーに関する研究会議が毎年開催され、約700名の研究者、実証事業実施者らが参加している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・電気・ガス事業者に対する省エネルギー規制などを背景に、行動科学の知見を応用した多くのフィードバックの実証事業が実施され、効果の検証が進んでいる。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・ホームエネルギーレポートなどのサービス事業者が急成長している。<br>・HEMSソリューションのベンダーが多い。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・行動科学と省エネルギーに関する研究会議が定期的に開催され、知見が共有されている。米国の研究コミュニティとの関係も深い。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・電気・ガス事業者に対する$CO_2$削減規制などを背景に、行動科学の知見を応用したフィードバックの実証や、HEMS関連ソリューションの開発が進められている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・電気・ガス事業者に対する$CO_2$削減規制などを背景に、HEMSの普及が進み、HEMSソリューションのベンダーが多い。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・IEA EBCプログラムのAnnex66（建築物使用者行動の定義とシミュレーション）に関する清華大学の研究チームが主導。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・スマートメーターやHEMSの製造事業者は多数存在するが、フィードバックの実証の取り組み状況は不明。 |
| | 産業化 | △ | → | ・スマートメーターの導入が進んでいるが、フィードバックの普及状況は不明。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・家庭の省エネルギー行動の実態把握に関する研究例があるが、行動科学の知見を応用する動きの有無は不明。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・済州島におけるスマートグリッド実証事業の一環として、フィードバックの実証が進められている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・スマートメーターの導入が進んでいるが、フィードバックの普及状況は不明。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Dietz, Thomas., Gerald T. Gardner, Jonathan Gilligan, Paul C. Stern, and Michael P. Vandenbergh. 2009. Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions.
Proceedings of the National Academy of Sciencesof the United States of America. 106, 18452–18456.
2) Frankel, David., Stefan Heck, Humayun Tai. 2013. “Sizing the potential of behavioral energy-efficiency initiatives in the US residential market.” McKinsey & Company.
3) Opower社　WEBサイト
http://opower.com/
4) Ehrhardt-Martinez, Karen., Kat A. Donnelly, John A. “Skip” Laitner. 2010. Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-Review for Household Electrici-ty-Siving
Opportunities. American Council for Energy-Efficient Economy.
5) Behavior, Energy & Climate Change (BECC) Conference
http://beccconference.org/
6) UK Cabinet Office, Behavioural Insights Team
https://www.gov.uk/government/organisations/behavioural-insights-team
7) 三菱総合研究所「スマートメーターの導入・活用に関する各国の最新動向」2013年11月
（経済産業省スマートメーター制度検討会（第13回）参考資料1）

### ３．２．２．５　熱利用実態を踏まえた機器高効率化

#### （１）研究開発領域名

熱利用実態を踏まえた機器高効率化

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

日本は省エネルギーに関しては世界トップレベルにあり、省エネ機器の効率でも世界を圧倒している。この状況を引き続き継続することが重要であり、本領域は、熱利用を前提とした機器の性能向上やアプリケーションなどについて言及し、その領域を、外燃機関を中心とした電力への変換技術、ヒートポンプ技術、要素技術、高度エネルギー活用術の4つに分類して現状と課題を示す。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

排熱などの未利用エネルギーの活用は、導入コストや設置スペースの観点からメリットが少ないため、ユーザは導入には消極的にならざるを得なかった。しかし、現在の日本が抱えているエネルギーに関わるさまざまな課題、例えば温暖化ガスの削減やエネルギーのベストミックス、電力問題（電源の逼迫、電力自由化）などを考えれば、熱利用機器の技術開発が必要不可欠である。また東日本大震災後、原子力発電の停止などによって電力価格上昇が社会問題となっている。さらには紛争などによるエネルギー供給の断絶やエネルギー資源の枯渇などエネルギー資源の供給には、不安定要素も多い。これらを踏まえても熱利用の地道な研究開発が必要不可欠である。特に我が国におけるプロセス排熱は100℃未満の温水、250℃未満のガスが914 PJ/年にものぼると推計されている[1)]。この温度レベルの低温エネルギーの有効利用を実現していくことが重要となる。

世界的に見れば、欧州諸国では排熱を利用したエネルギーを積極的に導入しようとしている。韓国でも電力問題から、排熱利用の導入の検討が始まっている。一方で米国は、シェールオイル活用への扉が開かれ、また電気ボイラが相変わらず多用されている現状を見れば、未利用の熱エネルギー活用の本格議論はもう少し先の話と考えられる。中国は、太陽熱の利用が進められ、現状では太陽熱集熱器の大半が中国で生産されているが、全土的に排熱を有効活用するには機器の技術レベルが追いついてきておらず、まだこれからといえる。

未利用エネルギーの活用方法は、そのまま熱のエネルギーとして活用するのか、あるいは電気エネルギーに変換するのかということに大別できる。電気エネルギーに変換可能であればそれが最善の策であるが、コストや変換効率を考えればそれは容易ではない。このため、未利用熱エネルギーを用途に応じた温度レベルまで変換したり、除湿のエネルギー源として応用したりするなどに含め、総合的な視点で熱の効果的な利用技術や利用方法を考えていく必要がある。

産業分野では、蒸気として消費する年間のエネルギー消費量は1,360 PJ/年[1)]と膨大である。この蒸気の温度は通常180℃程度であるため、この温度まで排熱のエネルギーを変換ができれば、適応が可能である。民生分野では、エネルギー消費量の約半分が空調や給湯で消費される。ここには、低質な熱エネルギーの応用が容易である。運輸部門では、車の走行に要するエネルギーが主となるが、車室内空調にも多くのエネルギーが費やさ

れている。暖房にはエンジン排熱を活用できるが、エンジンのない電気自動車の場合には暖房のために多くの電力を消費することが課題となっている。

本領域は以下の4つの領域に分類して説明する。

a. 外燃機関を中心とした電力への変換技術

未利用エネルギーを電気エネルギーに変換するためには、外燃機関の活用が有効である。低温の熱源で駆動可能なバイナリー発電やカリーナサイクル発電の研究開発が進められている[2-6]。バイナリー発電で地球温暖化係数（GWP : Global Warming Potential）の高い動作流体を冷媒として用いることは課題であり、低GWPな動作流体の探索と、それに最適な低コストの要素機器の開発が必要である。またその駆動エネルギー源としては、地熱利用に世界的な注目が集まっている。

このほかにスターリングエンジンや熱音響エンジンは、コンパクトで低騒音であるだけでなく、低GWP流体を用いて比較的低温の熱を使った発電が可能である[7-9]。ただし、効率や電力密度の面からは課題も多く、利用対象は限定的となる。スターリングエンジンは潜水艦用ではすでに実用化され[10, 11]、また宇宙用や車載用などにも応用検討が進められている。

b. ヒートポンプ技術

熱利用を考える上ではヒートポンプは非常に重要な技術である。技術面では日本が世界を圧倒している[12, 13]。この背景には、日本が気候的に比較的温暖であり、エアコンを中心にヒートポンプの導入による機器効率向上の効果が大きかったこともあげられる。欧米や韓国では寒冷になる地域が多く、寒冷地で機器性能が大きく低下するヒートポンプでは、導入によるメリットが小さかった。近年、高性能な寒冷地向けヒートポンプが開発され、スプリット型（セパレート型）の高性能機器が欧米で導入され始めた段階である。韓国でもこれまでは床下暖房の一種であるオンドル（温突）の利用が中心であったが、やはり効率のよいヒートポンプの導入が本格化しつつある。中国も同様である。個別技術として、以下に分類する。

a）冷媒

欧州ではF-ガス規制により高GWP冷媒の規制が始まっている。低GWP冷媒の探索とそれを用いた機器の開発が求められている。低GWP冷媒に関してはR1234yfを用いたカーエアコンの搭載が国内外で始まっているほか、我が国ではこれを用いた自動販売機も普及しつつある。空調用途に関しては、国内外の冷媒メーカーからR1234yfまたはR1234ze(E)とR32を含む複数の混合冷媒が提案されており、我が国は冷媒物性や伝熱に関する基礎研究から機器メーカーによる応用研究・開発まで、世界の先陣を切って研究開発に取り組んでいる。なお、米国には冷媒を製造する2大企業があり、その動向には注視が必要である。

b）電動ヒートポンプ

電動ヒートポンプでは、利用範囲の拡大が重要な研究開発課題の一つである。100℃以下の排熱を用い、産業用途として200℃取り出しを目指した開発が始まっている（現状では120℃が限界）。そのためには、この温度レベルに対応可能な冷媒の探索や冷凍

機油の開発が求められる。また、磁気軸受の採用によりオイルフリー圧縮機の開発も始まっている。地中熱や下水熱を熱源としたヒートポンプの開発も進められている。欧州では、下水熱の利用や温室効果の小さな自然冷媒であるアンモニア－水を動作流体とするハイブリッド機器の開発も進められている。

c) 熱駆動ヒートポンプ

熱駆動ヒートポンプでは、産業用途として180℃の水蒸気が取り出せる第二種吸収ヒートポンプの開発がほぼ完了している。ただし、作動圧力が大気圧を越えてしまうため、法規対応の問題が残されている。第一種吸収ヒートポンプについては機器開発がすでに終了し、現状以上の高効率化は難しい。動作流体は長年臭化リチウム－水系であったが、イオン流体のような腐食性の少ない媒体にも注目する必要がある。

d) 熱駆動冷凍機

低温排熱を用いた冷凍機としては、吸収冷凍機が一般的である。ただし、NEDO事業による三重効用形の開発や太陽熱を駆動源とするソーラークーリングシステムの開発により、その研究開発はほぼ終了している。駆動熱源のさらなる低温化も難しい。逆に200℃程度の熱を駆動源とできれば吸収式冷凍機を三重化することが可能となるため、トラフ方式の太陽熱集熱器により三重効用吸収冷凍機を駆動するプロジェクトも進められている[14]。また吸着式冷凍では、新しい吸着材や熱交換方式、低温排熱による駆動が可能な新サイクルが期待されている。

e) 潜顕熱分離空調

ヒートポンプでは潜熱と顕熱を分離すると大幅な性能向上が期待できる。このため、ヒートポンプの熱交換器に直接吸着材を塗布したり、吸収溶液を熱交換器に直接流下させるハイブリッド型のヒートポンプも開発されている。吸着材については、高分子やメソポーラスシリカ、温度依存性のある新しい吸着材が開発されている。

c. 要素技術

a) 熱交換器

熱交換器については着実な技術革新が進んでいる。特にマイクロチャンネル熱交換器に注目が集まっており、コンパクト化や伝熱管管内に滞留する冷媒充填量の低減、機器の軽量化が可能となる。また、冷媒の等分岐の実現や伝熱時の律速段階となるガス側の伝熱性能向上に関する基礎研究が進んでいる。低GWP冷媒として開発された非共沸冷媒用の熱交換器の最適化も進んでいる。特にガス側については、数値流体力学（CFD）などによる高度数値解析が比較的容易に実施可能になってきており、従来とは全く異なる発想の熱交換器の開発が期待されている。

b) 膨張機、圧縮機

バイナリー発電において地熱からの蒸気を直接用いるために、異物に強く、しかも低コストのタービンの開発が進められている。ヒートポンプに関しては、$CO_2$冷媒がショーケースや自動販売機、冷蔵倉庫などへ適用され始めており、これらの用途の場合では膨張ロスが大きいため、膨張エネルギーの回収が効率向上には有効な手段である。そのために新たな膨張機の開発やエジェクタによる膨張エネルギーの回収のための研究開発が行われている。また圧縮機に関しては、インジェクション型の圧縮機などが開発さ

れており、これらの高性能化や高効率駆動が可能な運転範囲の拡大が次なる課題である。

c) 熱搬送

熱搬送に関して研究開発されている技術としては、シャーベット状氷や塊・粒状氷を用いた氷水搬送技術、界面活性剤の添加による配管抵抗低減技術、水和物スラリ（潜熱利用）の搬送、大温度差冷温水搬送、吸収溶液による吸収冷凍機からのダイレクト熱輸送などがあげられる。国内においてはいずれの研究開発も行われているが、実用上で普及に至っている技術は大温度差冷温水搬送のみである。コージェネレーションを活用した大規模地域冷暖房のような場合にはいかにうまく熱融通を行うかが鍵となるので、熱輸送に要するエネルギーを削減することが極めて重要となる。

d. 高度エネルギー活用術

ヒートポンプや要素技術の性能はかなりのレベルにまで向上しており、単体性能向上によるシステム全体の性能向上は限界に来ている。したがって、供給側が需要側のヒートポンプの運転状態を制御するようなデマンドレスポンスの検討が始まっている。さらには、ユーザが機器の制御を知ることなく、過去のデータベースから機器の特性を学習し、予測しながら最適に運転する制御手法も提案されている。また、ヒートポンプでは制御性の悪さから機器性能が大きく低下しているケースが散見される。制御系を含めた実働運転性能については実態がなかなか掴みにくいが、制御性能の改善により 50%もの性能改善の余地があるとの結果もある。

欧州ではスマート化が進められており、熱と電気の需給バランスの調整が可能なヒートポンプが非常に重要な機器と考えられている。蓄熱も改めて重要となるといわれている。韓国や中国、米国でもスマートグリッド実証実験が行われているが、熱の利用まで含めたエネルギーのトータルの有効活用については、まだこれからの課題とされている。

このほか、空間温度分布を把握する小型高感度赤外線アレイセンサや人感センサを活用した省エネや快適性制御などが実用化されている。また、機器の制御は通常は初期設定に基づいて行われることが多いが、運用データなどを中央監視側に集約し、機器ごとに最適な運転制御方法を導出して、機器そのものの制御系自体を更新する制御技術も実用化されつつある。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

最大の課題は排熱の利用形態に関する情報があまりにも少ないことである。どの温度帯や用途に向けた機器を開発すればよいか、これではメーカーでビジネスモデルが立てられない。

a. 外燃機関を中心とした電力への変換技術

外燃機関に関しては、コストと効率が問題である。低温の未利用エネルギーを活用しようとすると、効率はかなり低下する。にもかかわらず、通常の設備と同等かそれ以上にコストがかかる。低コスト化を実現する新しい材料開発や設計方法の確立が必要である。バイナリー発電における駆動熱源の低温化は重要であり、最適な冷媒の探索を含め

た基礎研究からの取り組みが求められる。低GWPな動作流体の探索と、それに最適な低コストの要素機器の開発も研究開発課題としてあげられる。また、一定の条件を満たすバイナリー発電設備の電気事業法の規制緩和がかなり進められているが、さらなる規制緩和が進まなければ事業展開が難しいといわれている。スターリングエンジンや熱音響エンジンなどについてもコストと効率が課題であるが、加えてこれらの機器についてはアプリケーションの探索も課題である。

b. ヒートポンプ技術

ヒートポンプに関しては、冷媒が大きな問題となる。低GWP冷媒が求められているが、まだ決定的な冷媒が開発されていない。新たな冷媒や炭化水素系の自然冷媒が検討されているが、毒性や引火性などの課題がある。機器設計は冷媒で決まるため、冷媒が決まらないと新しい機器開発に移りにくい。電動ヒートポンプでは利用範囲の拡大が重要な研究開発課題の一つである。熱駆動のヒートポンプでは低コストでより低温の排熱を用いて駆動可能なシステム開発が求められている。最近、吸収式や吸着式に新しい媒体や材料が登場しており、これらにも期待したい。またハイブリッド化などによるさらなる高効率化や用途の多様化の実現も期待される。

c. 要素技術

熱交換器では材料が大きな課題である。これまでに銅やアルミ、チタン、ステンレスなどの高価な材料が用いられており、低コストな材料や従来の発想を超越した低コスト熱交換器構造などの検討が必要である。また熱輸送技術の課題としては、シャーベット状氷での搬送では低密度であること、塊・粒状氷での搬送では高効率製氷方法が未着手であることがあげられる。また界面活性剤添加では導入と継続的添加のコストがかさむこと、水和物スラリについては導入コストが膨大であることが課題としてあげられる。一方、基本的構成部品であるポンプやファンの高効率化が望まれているが、磁気軸受など搬送装置自体の高効率化には限界がある。

d. 高度エネルギー活用術

今後のスマート化による各機器の最適な運用が求められるが、それぞれの機器がデータをやりとりするのに必要なデータの管理方法や通信方法などの統一規格が確立されていない課題がある。技術の進展を図るためにはこうした課題の解決が必要である。欧州はこのような規格づくりが非常に早く、日本でも早急な対応が必要であると考えられる。今後、エネルギーのトータルマネージメントが求められてくる状況において、機器の制御とその上層階となる機器同士の連携制御が求められる。通信方法の共通化などが重要となる他に、機器の内部の運転状態も可視化されることが望まれる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・資源エネルギー庁2012年～2014年「次世代型熱利用設備導入緊急対策事業」では、さまざまな最新の熱利用設備の導入に対して補助金が交付された。ここでは、ヒートポンプ、バイナリー発電、高性能熱交換器、潜熱回収ボイラなどに対する交付が多い。

継続的な熱利用設備への支援が必要と考えられる。

・バイナリー発電における地熱の活用として、例えば環境省委託事業「地球温暖化対策技術開発事業/温泉発電システムの開発と実証（名称：松之山温泉バイナリー発電実証試験設備）」が展開された。しかし特段の新しい技術創出はなく、今後もコストダウンを中心とした開発が主体となると考えられる。

・スターリングエンジンや熱音響エンジンに関するプロジェクトとして、太陽エネルギーを利用したシステム開発や発展途上国向けの簡易発電システムなどの開発が進められている。

・NEDOのノンフロン化プロジェクトや次世代ヒートポンプ技術開発プロジェクトでさまざまな新しい技術が確立された。これまで不可能と考えられていた200℃取り出しのヒートポンプの開発も始まっている。

・熱交換器について、拡散接合や3Dプリンターのような新たな製作技術が登場により、これまでとは全く異なる発想の熱交換器の開発が期待されている。

・熱搬送に関しては、氷の潜熱利用に関する研究がNEDOの次世代ヒートポンプ技術開発で実施され、その結果、高効率な製氷技術の開発が必要なことが示された。現状では食品業界先導で極低温の製氷に特化されており、0℃に近い製氷技術の検討も必要である。

・データベースから機器の特性を予測するとともに学習しながら機器を最適に運転する制御手法や、機器自体の制御手法の運転時に更新する技術などがある[15, 16]。

### （６）キーワード

地熱、カリーナサイクル、有機ランキンサイクル（ORC：Organic Rankine Cycle）、バイナリー発電、スターリングエンジン、熱音響エンジン、超臨界サイクル、低GWP冷媒、高温取り出し、第二種、新吸着材、低温熱駆動、熱交換器、3D、膨張機、低コストタービン、エジェクタ、スラリ、潜熱蓄熱材、水和物、高効率製氷、BEMS、HEMS、スマート化、人感センサ、連携制御

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・九州大学における熱交換器や、豊橋技術科学大学におけるエジェクタのような要素技術開発の一部については、大変高いレベルにある。これがこの分野が世界を圧倒している原動力である。<br>・低GWP冷媒の研究で世界をリードしている。冷媒そのものの開発も進められているが、採用には安全面などの考慮も必要である。<br>・熱音響エンジンは、大学研究室レベルで効率3倍を実現している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・早稲田大学にて200℃取り出しを実現する高温ヒートポンプの開発や地熱、下水熱利用を実現するヒートポンプの開発が進んでいる。また、180℃の蒸気生成を行う第二種ヒートポンプの開発も終了している。NEDOのような公的機関の支援が有効に機能している。<br>・カーエアコンの世界シェアは5割を越えている。一方で、冷媒の課題がある。<br>・低温排熱を活用可能なバイナリー発電用の冷媒探索も始まりつつある。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・ヒートポンプについてはさまざまな形態のものが産業化されている。$CO_2$ヒートポンプの開発などは日本の独壇場である。<br>・バイナリー発電やスターリングエンジン、熱音響エンジンなどについては、どの分野に応用できるかが重要であるが、太陽エネルギー、排熱利用などのさまざまな応用分野の探索も行われている。<br>・規制緩和により、スターリングエンジンが10 kW未満の一般用電気工作物としての販売が可能となる。普及への突破口となる可能性がある。<br>・地熱発電では、九州の八丁原発電所、北海道の森発電所、東北の松川発電所があげられる。<br>・現在は技術主導型の商品開発であるが、今後はマーケット主導のニーズ志向の商品開発も必要と考えられる。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・幅広い研究は世界トップクラスといえる。基礎研究に費やされている研究費が圧倒的である。例えば、イリノイ大学におけるマイクロチャンネル研究や、パデュー大学における圧縮機の基礎研究などレベルも高い。要素技術からシステム化技術までまんべんなく実施されている。<br>・国立標準技術研究所（NIST）による冷媒物性のデータベース化は世界を圧倒している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・太陽熱、バイオマス燃料を活用可能な有機ランキンサイクル（ORC）の開発を手がけるベンチャーが複数あり、研究を進めている。<br>・オークリッジ国立研究所（ORNL）における寒冷地向けヒートポンプの開発など、ヒートポンプ普及に向けて多様な研究開発が成されている。<br>・軍による支援が非常に手厚い。陸軍支援用の移動型のヒートポンプなど多彩な研究開発が軍の支援によってなされている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・多様な中小企業が誕生し、非常に活躍するのがこの国の特徴である。このため、外燃機関を中心にさまざまな機器が開発されている。<br>・米国スタイルの開発（国、大学、ベンチャー、企業を一体としたコンソーシアムスタイルで大学がリーダーシップを取る）で失敗を恐れないスタンスが最大の強みである。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・例えば、ノルウェーのSINTEFにより$CO_2$冷媒ヒートポンプの基礎研究が盛んに実施されている。しかし、この分野で欧州が特段先行している技術はない。<br>・新技術というよりも、スマート化やFガス規制のような環境政策による推進が特徴である。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・ドイツでは500 kWを越えるカリーナサイクルが開発されている。またOrmat社は日本の大学も含めた研究グループを構築し、米国機械学会（ASME）を中心に活動し、有機ランキンサイクル（ORC）の開発を進めている。<br>・Hybrid energy社による圧縮・吸収ハイブリッドヒートポンプシステムのような複合化技術などは、今後欧州が進めていく技術の方向性を示していると考えられる。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・産業化については常に世界の先頭を行っている。新しいヒートポンプの活用方法やコージェネレーション技術は先端を進んでいる。ただし、これらが本当に高効率で高性能な技術であるわけではない。<br>・スウェーデンのKockums社がスターリングエンジンを潜水艦用に実用化し、この分野では世界トップレベルである。<br>・スマート化、分散化には非常に力を入れており、次世代のヒートポンプは、スマートコミュニティに対応させることが重要と力説されている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・ヒートポンプについては、まだ日本を追従している状況である。<br>・太陽熱集熱器については、良く研究された新しいものが次々と提案されており、世界トップクラスである。<br>・外燃機関については、例えばスターリングエンジンを中国科学院が研究を始めている段階である。 |
| | 応用研究・開発 | × | → | ・未利用熱を有効活用する技術レベルにはまた達しておらず、高品質なエネルギーを高効率に活用することが中心である。<br>・例えば、上海交通大学により吸着式ヒートポンプの研究開発が盛んに行われているが、日本が先行している。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・ヒートポンプの圧縮機などは、日本のメーカーも多くが中国で生産を行っている。特に吸収ヒートポンプはほとんどが中国の生産になりつつある。<br>・MEC社のCHP（熱電併給）ユニットは中国で6,000 台生産し3,000台を出荷している。スターリンエンジンに関しても世界の生産工場になる可能性がある。 |
| 韓国 | 基礎研究 | × | → | ・あまり特筆すべき研究は見当たらない。ただし、国内の電力不足が非常に懸念されており、どのような方向に進むべきか技術の調査を進めている段階と考えられる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・あまり特筆すべきものはない |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・サムスンやLGといった企業における産業化するための技術開発のスピードは速く、エアコンやヒートポンプについて海外各国のニーズに合った製品をいち早く開発し、展開している。また、済州島にスマートグリッド施設を展開するなど、新しい動きも始まっている。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）齋藤潔. 2014. 180℃蒸気生成を可能とする第二種吸収ヒートポンプの開発　日本機械学会誌.Vol. 117,　No.1148, p. 481.
2）NEDO. 2014. 再生可能エネルギー技術白書. 森北出版
3）日本地熱学会. 2014. 地熱エネルギーハンドブック. オーム社
4）Global Geothermal WEBサイト
http://www.globalgeothermal.com/
5）Knowledge Center on Organic Rankine Cycle technology
http://www.kcorc.org/en/literature/
6）NEDO. 平成19年度～平成20年度成果報告書　エネルギー使用合理化技術戦略的開発／エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発／排熱利用小型温度差発電システムの研究開発
7）日本機械学会誌. 2011年8月号
8）日本機械学会 講習会. 2010. スターリングエンジン・熱音響エンジンを用いた排熱利用技術の開発動向. No.10-43
9）日本機械学会誌. 2013年8月号
10）防衛省経理装備局 艦船武器課. 2011. 艦船の生産・技術基盤の現状について.
http://www.mod.go.jp/j/approach/agenda/meeting/seisan/sonota/pdf/04/001.pdf
11）日本機械学会誌. 2012年8月号
12）NEDO.平成21年度成果報告書　次世代型ヒートポンプシステムに関する調査
13）NEDO.平成21～22年度成果報告書　ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発／実用的な性能評価、安全基準の構築／エアコン用低GWP混合冷媒の物性とLCCP評価
14）Hajime Yabase1, Kazuyuki Makita1. 2012. Steam Driven Triple Effect Absorption Solar Cooling System. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue.
15）上田悠、太宰龍太、綛田長生、伊香賀俊治、加藤彰浩. 2010. 学習/多目的最適化機能を組み込んだ空調制御技術の実験的研究. 計測自動制御学会論文集. Vol.46, No.8, 439 - 447.
16）Junya Nishiguchi, Tomohiro Konda, Ryota Dazai. 2011. Adaptive Optimization Method for　Energy Conservation in HVAC Systems. ASHRAE Transactions.

### ３．２．２．６　建物躯体と建築設備の統合的高効率化

#### （１）研究開発領域名

建物躯体と建築設備の統合的高効率化

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

我が国の住宅・建築部門におけるエネルギー消費量は過去20年間において増加しており、省エネ基準の見直し実施や建物の省エネ基準への適合義務化の計画など、より高い省エネ性能をもった住宅や建築物への機運が高まっている。こうした背景のもとで、ネット・ゼロ・エネルギー・ビル（ZEB：Zero Energy Building）やネット・ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH：Zero Energy House）を実現するために、建物躯体の工夫や再生可能エネルギーの利活用、高効率な設備機器の導入を適切に行うことによって統合的効率化を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

地球温暖化は世界人類共通の緊急かつ喫緊の課題である。先進国に限らずほとんどの国々における共通の問題として、民生用エネルギー消費の急激な増加があげられる。国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）やクリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ（APP）、気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）などにおいて、建築物の省エネルギー施策に関する国際的な議論が行われている。

我が国の住宅・建築物部門におけるエネルギー消費量は、日本全体の3割以上を占め、かつ過去20年間に著しく増加している。一方で、東日本大震災を契機として国内のエネルギー需給が大きく変化するとともに、国民のエネルギーや地球温暖化などに関する意識が向上しつつある。また、2012年には13年ぶりに省エネ基準が見直され、住宅と建築物の省エネ基準について、一次エネルギー消費量を指標として、断熱性能に加えて設備性能や再生可能エネルギーの利用も含め総合的に評価できる基準に一本化されることになった。さらに日本政府の発表によると、2020年までにすべての建物の省エネ基準への適合を段階的に義務化することになっており、より高い省エネ性能をもった住宅や建築物への機運が高まっている。

こうした背景のもと、ZEBやZEHを実現するために、建物躯体の工夫や再生可能エネルギーの利活用、高効率な設備機器の導入を適切に行うことによって統合的効率化を進めることが大いに期待されている。

ZEBの定義[1)]は、「建築物における一次エネルギー消費量を、建築物・設備の省エネ性能の向上、エネルギーの面的利用、オンサイトでの再生可能エネルギーの活用などにより削減し、年間の一次エネルギー消費量が正味（ネット）でゼロまたは概ねゼロとなる建築物」とされる。この定義では、オフサイトの再生可能エネルギー活用などは含まず、都市部の特性（建築物が集中立地）を踏まえエネルギーの面的利用などのポテンシャルを加味した建物やその敷地におけるオンサイト措置を評価の対象範囲としている。また、本来は地球環境に対する影響を評価するためには建設から解体までの建築物のライフサイクルで評価することが重要であり、地球環境に与えるインパクト、すなわち環

境負荷の大きさを定量的に評価するライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）が妥当だが、ZEBではあくまでも建築物の運用時のエネルギー消費量のみに注目している。ちなみにこれまでに欧米でも同様の論議があったようだが、ZEBの「E」はエネルギーではなく、エミッション（$CO_2$）の頭文字と捉えることもできる。ただし今のところその考え方は採用していない。ZEHの定義もこのZEBの定義に順ずると考えてよい。一方、建物で消費するエネルギー量を正確に上回る再生可能エネルギー利用は難しいため、海外ではNZEB（Nearly Zero Energy Building）という表現を用いることもある。

建物や住宅の省エネ化を促進してZEB化やZEH化を目指すためには、太陽の光、風など自然を取り込んだパッシブ技術の活用（自然採光、自然換気など）、躯体の断熱性能の向上（高性能な断熱材・窓など）、高効率な設備機器の導入（LED照明、デシカント空調、タスクアンビエント照明・空調、高効率給湯システムなど）、再生可能エネルギーなどの導入（太陽光発電システム、蓄電池システム、太陽熱利用システムなど）、さらにこれらを最適に制御するエネルギー管理システム（BEMS：Building Energy Management System、HEMS：Home Energy Management System）の導入により、システム全体で省エネを追求することが必要となる。

さらに、建物や住宅の企画設計段階や建設段階、運用段階における取り組みが重要である。企画設計段階においては、建物躯体と建築設備を統合的に評価するための環境影響評価手法や統合的エネルギーシミュレーション手法が不可欠であり、また、建設段階、運用段階においては、システムの設計・施工・機能テストが建築主の運転・維持要求に適うものであるかを検証するためのコミッショニング（性能検証）の仕組みが重要となる。

一方、既存ストックの環境配慮改修を行って良質な社会資産を増やすという観点からは、新築の建物や住宅に関する省エネルギー手法のみならず、既築の建物や住宅ストックの資産価値や改修要否の判断を行うことのできる性能評価手法と、それに適用可能な省エネルギー手法の開発も必要となる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

ZEB化、ZEH化を目指すための省エネルギー技術について、具体的な研究開発課題として以下があげられる。

- 建物や住宅において、自然採光や自然換気の効果を企画設計段階で正確に予測するパッシブ技術導入のためのシミュレーションツールの開発。
- 躯体の断熱性能を向上させる高性能な断熱材と窓（サッシおよびガラス）材料の技術開発。
- 高効率な設備機器の技術開発、およびその最適な利用方法検討のための建物躯体と設備機器の統合的エネルギーシミュレーション手法の開発。
- 高効率でかつ低コストの施工を実現するための再生可能エネルギー利用システムの開発。
- 建物や住宅に導入されるシステムの性能を正しく発揮するための最適制御を行うエネルギー管理システムの開発。

・企画設計段階や建設段階、運用段階における意思決定のための、建物や住宅の環境に関わる性能を総合的に評価する環境影響評価手法の開発。
・建物や住宅の建設段階、運用段階において運用可能なコミッショニング手法の開発。
・既築の建物や住宅ストックの資産価値や改修要否の判断を正確に行うことのできる性能評価手法、およびそれに適用可能な照明や空調の簡易改修が可能な省エネルギー手法の開発。

各技術課題については、国内外において十分なレベルとはいえないが、すでに実証されつつある。日本は各技術において高い技術開発のポテンシャルを有しており、これをベースに世界を先導する総合的な開発を進めることで、よりいっそうの技術競争力を確保すべきである。

しかしながら、新規開発のシステムは総じて高価格帯のものが多く、企画設計段階における提案があっても、VE（Value Engineering）の過程を経て実際の建物に導入されることが少なくなっている。このことは結果的に、建物躯体と建築設備の統合的高効率化を推進するための技術の普及促進や技術開発そのもののペースを遅延させることになっている。また、新技術の普及、波及のためには、製造コストに加えて物流コストなどの観点からも検討が必要である。

政策的課題としては、省エネルギーに関する建物や住宅の実効的な規制や基準の整備があげられる。政府や自治体などの補助金や税制優遇などのインセンティブも期待される。

国内外では、これまでに建物や住宅に対して省エネルギー技術や再生可能エネルギーの導入を促進するための制度として、エネルギー供給事業者に省エネルギーの量的な数値目標を課すとともに、省エネルギー証書の取引制度を導入し、一般家庭における効率的な省エネの達成を促す制度や、再生可能エネルギーによる発電電力を国の定める固定価格で買い取る固定価格買取制度（FIT：Feed-in Tariff）が適用されつつある。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

建物や住宅に用いられる断熱材は、一般に繊維系、発泡プラスチック系、その他に大別される。繊維系には、グラスウール、ロックウール、セルロースファイバなどがあり、発泡プラスチック系には、押出法ポリスチレンフォーム、硬質ウレタンフォーム、高発泡ポリエチレン、ビーズ法ポリスチレンフォーム、フェノールフォームなどがある。このほかに注目される高性能断熱材としては、真空断熱材（VIP：Vacuumed Insulated Panel）とエアロゲルがある。VIPは、多孔質の芯材をフィルムで包み、内部を1～200 Paまで減圧したものであって、熱抵抗値が他の断熱材よりも高い。ただし、減圧するためのコストが大きく、非常に高価であることが課題であるため、日本国内では住宅の部分断熱改修に採用されるなどの限られた範囲での使用が目立つ。VIPに関して、米国の全米住宅建設業者協会（NAHB：National Associations of Home Builders）リサーチセンターなどを中心に研究が行われている。エアロゲルは、ナノメートルオーダーの空孔を有する脆弱な多孔質体で構成される。熱抵抗値が高いが原材料・製造装置が高価であることから価格が非常に高く、日本国内では住宅用にはほとんど普及していない[2)]。

窓におけるサッシの素材は、現在はアルミが主流であるが、高断熱サッシとして、アルミ樹脂複合サッシ、樹脂サッシ、木サッシが開発されている。またサッシの形状の設計工夫も検討が進んでいる。米国では現在、グラスファイバ（硝子繊維）を用いた高性能サッシの技術開発が行われている。ガラスの断熱性能向上のために、中空層厚みの増加、ガラス面への金属膜コーティング、中空層への低熱伝導率ガスの注入、中空層の真空化などの技術開発が進められている。その他には高性能ガラスの技術として、サーモクロミック（Thermochromic）技術やエレクトロクロミック（Electrochromic）技術がある[2)]。米国エネルギー省（DOE：Department of Energy）とローレンスバークレー国立研究所（LBNL：Lawrence Barkley National Laboratory）は、共同でエレクトロクロミック・ウインドウの研究開発を長く続けてきている。サーモクロミック・ウインドウは、窓を特殊なフィルムでコーティングすることで、温度に応じて可視透過率を調整し、必要以上に室内温度が上昇することを防止するものである。また、 エレクトロクロミック・ウインドウは、非常に小さな電圧を印加することで、明暗の切り分けを可能にするコーティング機能を有するガラスである。

太陽熱利用システムについては、面積当たり一次エネルギー削減量で太陽電池を上回る再生可能エネルギー利用システムとしてさらなる普及が期待されており、新たな機器認証と環境価値認証制度の方向性の検討が日本国内で進められている[3)]。対象となるシステムは、強制循環式の給湯または暖房とソーラークーリングである。計量の要件は、家庭用は「簡易計測」または「見なし計測」、業務産業用は積算熱量計または「簡易計測」による。既存の制度では、特定計量器による計量が要件となり、申請に係るコストの低減が課題となっている。環境価値の指標は、「太陽熱利用量」、「一次エネルギー削減量」、「$CO_2$削減量」が候補である。

日本における建物躯体と設備機器の統合的エネルギーシミュレーション手法として、The BEST Program（BEST：Building Energy Simulation Tool）があり、継続的に開発とメンテナンスが行われている[4)]。BESTは、建築物の企画・設計段階から運用段階にわたり、空調・照明などの各種エネルギー消費量を算出する総合的なシミュレーションプログラムである。ユーザの利用目的に合わせて、簡易版・基本版・専門版で構成されており、建築･設備設計の各段階（企画･基本設計･実施設計）、運用･改修段階に応じて、各版の使い分けができる。簡易版は、建築物規模と用途、設備の概要を入力することにより、設備システムの最大負荷と年間エネルギー消費量（装置容量と年間光熱水量）を把握することができる。基本版は、簡易版よりさらに詳細条件を入力でき、基本設計時の外皮計画（開口部仕様と断熱性能）、設備システムの検討に利用できる。専門版では、建築外皮（開口部の寸法と仕様：シングルガラス・ダブルガラス・二重サッシ・エアーフローウィンドウ、庇・方立の寸法、断熱材厚さなど）や各設備システム（設備システム・空調ゾーニング・空調機容量と制御方法、ブラインド制御方法と照明設備調光システムなど）の詳細設計検討の際に、建築物全体のエネルギー消費量を把握した上での最適設計解を求めることが可能である。米国では、イリノイ大学、カリフォルニア大学、LBNLによって開発され、DOEから配布されている建築物のエネルギー消費量予測ツールであるEnergy Plusがある。

国内の建物や住宅の環境影響評価手法としては、建築環境総合性能評価システム

CASBEE（Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency）があり、継続的に開発とメンテナンスが行われている[5)]。CASBEEは、建築物の環境性能で評価し格付けする手法であり、省エネルギーや環境負荷の少ない資機材の使用といった環境配慮はもとより、室内の快適性や景観への配慮なども含めた建物の品質を総合的に評価するシステムである。CASBEEの特徴は、建築物の環境に対するさまざまな側面を客観的に評価するという目的から3つの理念、すなわち、建築物のライフサイクルを通じた評価ができること、「建築物の環境品質（Q）」と「建築物の環境負荷（L）」の両側面から評価すること、「環境効率」の考え方を用いて新たに開発された評価指標「建築物の環境性能効率（BEE：Built Environment Efficiency）」で評価すること、に基づいて開発されている。このほかには、米国の非営利団体である米国グリーンビルディング評議会（USGBC：The U.S. Green Building Council）により開発された建築物の環境性能評価手法であるLEED（Leadership in Energy and Environment Design）、などがある。これらのコミッショニングへの活用も行われつつある。

### （６）キーワード

ZEB、ZEH、パッシブ技術、高性能断熱材、高性能窓、高効率設備、統合的エネルギーシミュレーション、再生可能エネルギー利用、エネルギー管理システム、環境影響評価、コミッショニング、省エネルギー改修

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・技術開発に注力しているが、まだ成果が十分ではない。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・高機能な建材や省エネルギー機器の開発が進んでいる。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・他国と省エネ政策レベルやそれに伴う産業化に大きな差はみられない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・技術開発に注力している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・高機能な建材や省エネルギー機器の開発が進んでいる。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・他国と省エネ政策レベルやそれに伴う産業化に大きな差はみられない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・技術開発に注力している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・高機能な建材や省エネルギー機器の開発が進んでいる。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・他国と省エネ政策レベルやそれに伴う産業化に大きな差はみられない。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・特に目立った動きはみられない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・特に目立った動きはみられない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・他国と省エネ政策レベルやそれに伴う産業化に大きな差はみられない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・特に目立った動きはみられない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・特に目立った動きはみられない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・他国と省エネ政策レベルやそれに伴う産業化に大きな差はみられない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）ZEBの実現と展開に関する研究会. 2009. ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の実現と展開について ～2030年でのZEB達成に向けて～
2）経済産業省　建築材料等判断基準ワーキンググループ資料
http://www.meti.go.jp/committee/gizi_8/19.html
3）Takashi Akimoto , Shunichi Eguchi, and Takahiro Tsurusaki. 2014. Research on Establishment of Environmental Value of Solar Thermal Utilization, Part 1: Widespread Use

of Solar Heat and Its Policy Issues in Japan. Grand Renewable Energy 2014.
4) The BEST Program WEBサイト
http://www.ibec.or.jp/best/index.html
5) CASBEE 建築環境総合性能評価システム WEBサイト
http://www.ibec.or.jp/CASBEE/index.htm

### ３．２．２．７　次世代交通・運輸システム

#### （１）研究開発領域名

次世代交通・運輸システム

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

本領域では、自動車の走行環境および運転の仕方の改善による省エネルギー化、小型モビリティが利用されやすい社会システムのあり方、自動車から中大量輸送機関へのシフトを促進するシステム、物流に関する研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

日本の石油消費の約4割が自動車用燃料に使われる中、交通・運輸システムにおける省エネルギーおよび$CO_2$発生量削減は喫緊の課題である。省エネルギー化を推進する次世代自動車の技術そのものは他の研究開発領域で扱われるが、本領域では、自動車の走行環境および運転の仕方の改善による省エネルギー化、小型モビリティが利用されやすい社会システムのあり方、自動車から中大量輸送機関へのシフトを促進するシステムに関する研究開発を推進する。

日本では自動車燃料の約1割が渋滞によって無駄に消費されているといわれる。渋滞緩和のための新技術には、まず情報提供および経路誘導による道路ネットワークの効率的活用があげられる。そのためには道路の混雑状況をなるべくもれなくリアルタイムに知る必要があり、これまでの交通情報収集方法である路上の感知器などインフラに依存するものから、個々の車をセンサと考えるプローブ情報システムへと移行しつつある。スマートフォンの普及により、一般の乗用車からも通信コストをほとんど気にすることなくプローブ情報を収集することができるようになったが、それには一般ドライバが自車の情報を発信するインセンティブがないと実用規模での実現は難しく、そのためのエコシステムがひとつの研究課題である。

都心部などにおける交通集中による渋滞は、経済学でいう外部不経済現象であり、渋滞に加担する個々のドライバが社会的費用を負担していないことに起因する。この費用を負担させる仕組みが、シンガポールやロンドンで実施されている「ロードプライシング」である。日本でも大都市や観光地での自動車流入抑制策として度々話題にあがるが、技術的課題と社会的受容性からいまだ実施された例はない。そこには、車載機を通して料金収集する場合、ゲートなどを設けることなく車載機の未装着車をどのように判別して取り締まるかという技術的課題と、どのようなロードプライシングなら社会的受容性が高いかという社会的課題が存在しており、その解決が望まれる。

さらに、先進諸国では道路利用料金制度の検討と社会実験が始まっている。すべての自動車がガソリンか軽油を使って走行している場合には、それらの燃料に課税することで実質的に道路の利用料を払っていることになり、その税金で道路整備や維持管理を行ってきた。しかし今後、自動車の電動化が進むことでこのメカニズムが成り立たなくなる。一方で、ICTの進展により、個々の車の位置を把握して課金することも可能になっており、今後このような「どこでもロードプライシング」ともいわれる一般道路を含む道路利用料金制度に向かって各国は大きく舵を切って行くことが考えられる。また、この

ような料金制度を導入することで、上述のロードプライシングをさらに一般化した形で渋滞をマネジメントすることができる。日本では道路利用料金制度に関する交通工学的研究、社会的研究、技術的研究開発がほとんど行われておらず、早急な取り組みが求められる。

運転の方法による省エネルギー化には、エコドライブの促進があるが、先進的な研究開発課題としては、交通流の整流化、すなわちなるべく等速度・等間隔で車を走らせる制御技術、そしてその先には世界中でしのぎを削っている自動運転技術がある。自動運転技術そのものは本領域の範囲外であるが、どのようなスペックの自動運転車両がどの程度ネットワークに混入しているかによる交通流への影響分析は今後の研究課題である。その際に使用される、路車間通信や車車間通信の技術開発もあげられる。

超小型車など次世代自動車そのものの技術開発は別領域で扱われるが、普及過程にある次世代自動車の合理的な利用方法に関する研究開発があげられる。具体的には、シェアリングの技術的・社会的課題解決、物流など商用での効率的利用方法などがある。

自動車から、よりエネルギー効率のよい交通機関への転換策としては、従来の「私的交通機関＝自家用車」「公共交通機関＝鉄道・バス」という二者択一の構図から、その中間領域を狙ったシステムの活用が考えられる。具体的には、車や自転車のシェアリング、オンデマンド型中量公共交通機関、ライドシェアリング、パークアンドライドなどのインターモーダル政策などの推進策と、それらにICTを活用して高度化し、より利便性の高いシステムの提案が必要である。

また物流に関して、共同輸配送や拠点集約などによって物流効率化が進んでいるが、商取引形態やライフスタイルの変化などによる将来の物流取扱い量の増加も懸念される。省エネルギーの観点からの技術的研究、社会的研究も必要である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

個人の交通行動を分析する際のデータ取得の課題がまずあげられる。伝統的にはアンケート調査によって交通行動を詳細に尋ねていたが、そのような調査に回答してくれる人の割合は減っており、回答者が高齢者に偏るなどのバイアスもみられる。一方で、ICTの進展により、携帯端末のGPS軌跡、自動車のプローブデータ、ETCの支払い履歴、鉄道自動改札の乗車履歴などの新しいデータ取得方法が出現してきたが、これらも近年の個人情報保護意識の高まりで利用の制限が厳しくなっている。

ロードプライシングや道路利用料金制度に関しては、「道路無料開放の原則」という道路法上の制約がある。このために、規制緩和や条例制定などの法的な下ならしをした上でないと実証実験ができないことが大きな課題である。また、都心部乗り入れ課金に対しては、社会的合意形成が必要で、首長などの強力なリーダーシップが必要である。さらに、ガソリン税は常に大きな政治的課題になってきたが、ガソリン税の撤廃または低率化（環境税化など）と道路利用料金制度導入への大きな方向転換には、政治的決断が必要となる。

自動運転技術そのものは本領域の範囲外であるが、まず道路交通法上の課題や事故を起こした時の責任分担といった社会的課題、少数の自動運転車が一般車に混在して走行する場合の他車への影響といった交通工学的課題は依然として大きい。また、最近米国

で自動ブレーキなど高度走行支援車へのハッキングが可能なことが実証されたが、今後ますます自動化される要素が大きくなっていく中で、自動車内LANのセキュリティ確保という課題も顕在化してきている。

また物流におけるエネルギー利用効率向上のために、その構造の解明を可能とするビッグデータを、ICTを利用して整備することが必要である。人流や物流を集約化したデータベースは、人流、物流に係るエネルギー利用における需要側資源として活用できる可能性をもつ。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・米国のGoogleが2009年ごろより自動運転車の開発を進め、公道での実証実験を重ねている。2014年には、車体の設計や製造も自社で行った、ハンドル・アクセル・ブレーキのない完全自動運転車の試作車を発表した。これは、車が必要なときにだけ呼び出す、究極の自動運転を目指しており、自動運転車の公道走行を認めているカリフォルニア州、ネバダ州、フロリダ州などで実証実験を積み重ねている。
・ダイムラー、フォルクスワーゲン、BMW、Audi、ボルボなどの欧州車メーカー、GM、Fordなどの米国車メーカー、トヨタ、ホンダ、日産、スバルなどの日本車メーカーは、それぞれ自動運転化を視野に入れた高度な運転支援車の開発に取り組んでいる。アダプティブクルーズコントロール、レーンキープアシスタント、自動ブレーキなどのアプリケーションが市販車に実装されてきている。
・日本の国土交通省は、2012年より「オートパイロットシステム」と呼ばれる、高速道路上での自動運転の検討会を開催しており、2013年10月に中間報告書を発表した。
・2014年より戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）において、自立システムと協調型システムを組み合わせた自動運転（自動走行）システムを実用化することを技術的目標とした産学官共同プログラム「自動走行システム」が始まった。この中での自動走行システムの開発･実証項目として､道路情報と車や歩行者の交通情報や交通規制、路面状況などの動的情報を高度複合化した地図情報（グローバルダイナミックマップ）の構築が進められる予定である。
・トヨタ、ホンダ、日産の各カーメーカーは、自社車の会員のカーナビからプローブ情報を収集し、会員に渋滞情報として提供している。カーナビメーカーのパイオニアも同様の取り組みをしている。野村総合研究所は、タクシー位置情報や携帯カーナビ利用者の走行データを分析して、携帯カーナビサービスに渋滞情報を提供している。
・日本の国土交通省、都市間高速道路会社（NEXCO3社）、都市高速道路会社（首都高速道路など）は、主に高速道路上に設置されたITSスポット（DSRC（Dedicated Short Range Communication）アンテナを設置した箇所）において、ITSスポット対応カーナビからプローブ情報を収集し、道路区間の所要時間情報や急ブレーキ頻発個所などの分析を始めている。
・2011年3月に起きた東日本大震災の被災地では、被災直後からのカーナビ搭載車の走行履歴を「通れた道マップ」として公開し、非公式情報ながら道路の被災情報および復旧情報として日々の生活と復旧活動に役立った。その後、山梨県などにおける大雪時にも同様の情報が公開され、災害時における個々の車の通行情報が社会的価値をも

つものとして認識され、災害時にそのような情報を収集・公開するシステマティックな仕組み作りに取り組まれている[1)]。

・ITSを使った都心部乗り入れ課金は、1998年にシンガポールのERP（Electronic Road Pricing）に始まり、2003年のロンドンでのCongestion Charging、2006年のストックホルムのCongestion Tax、2012年のミラノのArea Cでそれぞれ運用開始されている。シンガポールでは、ガントリーに取り付けられたDSRCアンテナと車載機の間の通信でICカードから料金を引き下ろすETC方式であるが、よりフレキシブルなシステムにするために、ERP IIと通称される新システムに移行しようと実証実験中である。ERP IIはDSRCと衛星測位の併用システムになる見込みである。

・走行距離に応じた道路利用料金制度は、欧米ではRoad User Charges（RUC）、VMT（Vehicle-Mile Traveled） Fees、Usage-based Chargesなどと称されて、理論的および技術的研究と実証実験が行われている。RAND Corporation の2010年のレポートでは、距離計ベース、OBD（On-Board Diagnosis）ソケット接続、GPSベースなどさまざまな距離計測方法と料金徴収方法の利害得失を比較している。また、米国連邦道路局は米国各地における道路利用料金制度に関する調査検討レポートを整理しており、それによればミネソタ州、オレゴン州、ワシントン州において実証実験が行われている[2-4)]。

・EUにおける道路利用料金制度は、2016年までの第1フェーズでは、道路インフラ維持コストを利用者負担原則とするために大型車に対する道路利用料金制度を導入し、2016年から2020年までの第2フェーズでは、騒音・地域的大気汚染・渋滞という外部不経済の内部化を目的に、大型車またはすべての自動車を対象に利用料金を課すことを目標としている。一部の国、例えばドイツではすでに大型車に対する道路利用料金をGPS付き車載機を用いて課している[5)]。

・世界中でカーシェアリングの会員や車両は増え続けているが、そのほとんどが、借り出したデポと同じデポに返却する「リターン型」である。EUでは、異なるデポに乗り捨てられる「ワンウェイ型」のカーシェアリングがすでに商業ベースで始まっている。パリにおいて2011年から始まったAutolib’は、Bollore社が開発した電気自動車を路側に設けた駐車・充電スペースから借り出し・返却するワンウェイ型のカーシェアリングである。2014年1月現在で、2,000台の車両、850箇所のステーション、4,400台分の駐車スペースが供給されている。ダイムラー社の子会社が運営するcar2go は、予約不要で運営地域内であればどこにでも乗り捨てられるシステムをとっており、欧州および北米の30都市において、各都市において数百台規模で運営されている。

### （６）キーワード

プローブ情報、ロードプライシング、道路利用料金制度、次世代自動車、自動運転、路車間通信、車車間通信、カーシェアリング、ライドシェアリング、パークアンドライド、オンデマンド交通

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・次世代自動車や自動運転に関する基礎的研究は進んでいる。<br>・ロードプライシングや道路利用料金制度に関する研究はまだ少ないが、国土交通省国土政策総合研究所が勉強会を開催している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・超小型車、燃料電池車、自動運転車などの開発は、各カーメーカーが競って行っており、世界のトップクラスにある。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・次世代自動車の産業化はある程度進んでいるが、例えば電気自動車の普及は予想より進んでいない。<br>・運転支援システムを搭載した車両は今後普及して行く。<br>・カーシェアリングやサイクルシェアリングは、他国と比べて展開が遅い。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・道路利用料金制度に関する理論的・技術的研究が進んでいる。<br>・自動運転に関する基礎的研究が進んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・プローブ情報、特にCAN情報の活用に関して、研究開発が進んでいる。<br>・自動運転車の開発と実証実験は、Googleが抜きんでている。<br>・次世代自動車の開発も進んでいる。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・GMやFordは運転支援技術の搭載を進めている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・道路利用料金制度に関する基礎的研究が進んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・自動運転に関しては、ダイムラー、フォルクスワーゲン、BMW、ボルボなどのメーカーが競って開発している。<br>・道路利用料金に関する実証研究がおこなわれている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・サイクルシェアリングのビジネスモデルが欧州から始まっている。<br>・Autolib’ やcar2go などの先駆的なカーシェアリングが大規模に展開されている。<br>・ロードプライシングの理論発祥の地である英国をはじめ、イタリアや北欧で実運用されている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・学会や研究集会において、「緑色交通」「低炭素交通」は大きなキーワードになっている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・自動運転車の開発は今後着手され、実証実験なども実施されると思われる。 |
| | 産業化 | △ | → | ・国家プロジェクトとして、新しい交通システムが導入されるケースが多いが、継続的な事業化に成功するケースは多くない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・国立研究所や大学において自動運転化の研究は行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・国立研究所や大学において自動運転化の実証実験は行われている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・現代自動車などのカーメーカーは、次世代自動車に関しては欧米・日本に後れをとっている。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）ITS Japan. 2014. 日本のITS.
2）Sorensen, P. (RAND Corporation). 2010. System Trials to Demonstrate Mileage-Based Road Use Charges. National Cooperative Highway Research Program.Transportation Research Board.
3）Max Donath, Shashi Skekhar, Pi-Ming Cheng, Xiaobin Ma. 2003. A New Approach to Assessing Road User Charges: Evaluation of Core Technologies. Minnesota Department of Transporta-tion.
4）US Department of Transportation. Federal Highway Administration. Innovative Program Delivery. Road Pricing Study Report
http://www.fhwa.dot.gov/ipd/revenue/road_pricing/study_reports/auto_use_costs.aspx
5）European Commission Mobility and Transport Transport Model Road
http://ec.europa.eu/transport/modes/road/road_charging/charging_hgv_en.htm

### ３．２．２．８　新しいエネルギー利用を社会に定着させる技術

#### （１）研究開発領域名

新しいエネルギー利用を社会に定着させる技術

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

新しいエネルギー利用技術を社会に定着させるための取り組みとして、エネルギーやエネルギー政策の特徴や特殊性などに着目した社会的技術の開発、制度作りといった政策や対応が必要となる。またその定着のためには、ICT などのさらなる発展と脳科学、社会心理学、行動経済学などの学問分野に基づく新たな領域の発展も期待される。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

エネルギー技術開発・普及の現状を見ると、特に普及面で十分ではなく新しいエネルギー利用を社会に定着させるための取り組みが必要である。世界のエネルギー需給が大きく変化しつつある現在、日本も含め世界のエネルギー技術の開発・普及政策も変動期に入っていくことになる可能性が高い。今後、ますますイノベーションを促進し社会に定着させるためには、エネルギーやエネルギー政策の特徴や特殊性などに着目した社会的技術の開発、制度作りといった政策や対応が必要となる。

エネルギー政策のテーマである 3 つの E、すなわちエネルギー安全保障、環境保全および経済性を長期的な観点から解決する鍵は技術であることに疑いはない。どうすればエネルギー分野でイノベーションを促進し新しい技術を社会に定着させることができ、そのためにはどのような技術や制度の枠組みが求められているかを考える必要がある。

エネルギー技術やエネルギー分野のイノベーションには、他の技術分野と異なる特徴や特殊性がある。主要な点として、第一に、エネルギー技術は上記 3 つの E といった政策目標を含む国のエネルギー政策と密接な関係がある。例えば、1973 年の第一次石油危機直後にスタートした「サンシャイン計画」のように国の政策や方針に基づき政府が予算措置を講じて進められることも多い。第二に、石油資源開発のように、国の外交政策や安全保障など必ずしも経済と直接関係しない幅広いような政策分野も関係する。例えば、石油や天然ガスの開発・採掘技術の進歩がシェール層の石油・天然ガスの経済性を向上させ、シェールガスなどの生産量が飛躍的に高まった結果、米国の外交・安全保障政策にも影響を与えているともいわれている。第三に、多くのエネルギー技術革新が $CO_2$ の排出抑制を目的とし主として環境保全の観点からの規制や外部不経済性により推進されるという側面もある。すなわち、電力がその典型的な例であるが、エネルギーは他の商品やサービスと異なり差別化が困難であるため、ともすれば外部不経済性を減少させることなど需要サイドが刺激されることが重要となる。第四点としては、長期的な視点からの投資が必要なことである。エネルギー技術はリードタイムが非常に長く、一度建設されるとエネルギーインフラの寿命は長期にわたる。したがって、このような施設の立地などに当たっては社会的な受容が重要となってくる。第五に、Global Energy Assessment 2012 [1] によれば、研究、開発、実証から普及に至る多段階のプロセスであるエネルギーの革新システムは、線形ではなくより複雑なものであり技術だけでなく政府や民間企業などの参加者や情報の流れ、制度、相互作用なども重要であると

の指摘がされている。先述のとおり、さまざまな相互作用、特に社会や制度との双方向の関係がより重要となるということである。また、市場との関係についても、新しいエネルギーシステムへの移行は社会技術的な側面も大きいことから、社会的側面や社会システムの対応についても一般の技術の場合と比較してより慎重に考慮されねばならない。

技術開発の現状について現状を概観すると、国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）の「エネルギー技術展望 2012（Energy Technology Perspective 2012）[2)]」によれば、いわゆる「450 ppm シナリオ」、すなわち今世紀末において気温上昇を 2℃以内とする目標を達成するためには、電力部門を中心にすべての最終需要部門でいっそうの $CO_2$ 削減を進める必要があるとしている。また、技術的側面からも省エネルギー技術、再生可能エネルギー技術、二酸化炭素回収・貯留（CCS：Carbon Capture and Storage）などにより、$CO_2$ 削減が求められるとしている。この目標に対して技術開発の現状をみると多くの分野で十分な進展がみられないと評価されている。将来が比較的明るいのは再生可能エネルギーのうち太陽光や風力、運輸面での省エネルギーくらいで、期待される進歩を実現するためには追加的対応が不可欠とされている。また、IEA 諸国の技術開発に対する財政支出をみると、総額では最初のピークは 1980 年にあり、再上昇を始めたのは 2000 年以降である。使途としては、長年原子力が中心だったが、最近では再生可能エネルギーと省エネルギーが伸びている。

これを踏まえてエネルギー分野のイノベーションを促進するために有効な手立てとして、どのような政策の枠組みが必要か、各国のベスト・プラクティスを集め分析・検討した結果を IEA が取りまとめている。それによれば、第一に、エネルギー技術政策が全体として戦略的に優先順位がつけられ、首尾一貫性が確保されていなければならないとされている。IEA 加盟国においてはエネルギー技術をつかさどる省庁は必ずしもエネルギー政策官庁と一緒ではないからである。第二に、各主体間のよい連係が必要で、また優れたガバナンスも求められる。第三に、民間セクターとの協力が必要である。特に、政府予算が民間の資金と組み合わさることでさらに有効になる。第四に、効果的な監視（モニタリング）と成果と資金の因果関係などの評価である。現状では多くの国では体系だった監視や評価は行われていない。最後は国際協力の必要性であり、特に財政が厳しい中ではその重要性が増す。

上記のようなエネルギー政策の特徴・特殊性やこれまでの議論などを踏まえて、具体的にどのようにエネルギー分野でイノベーションを促進し、社会に定着させるための社会的技術や制度作りといった政策や対応が必要になってくるのかについて示す。第一に、予算措置を講じて技術開発予算の充実や環境規制の導入、排出権取引制度など新たな制度の創設といった非財政的措置、あるいは環境税の賦課などいろいろな政策を柔軟に組み合わせることが必要である。先述のとおり、技術的な課題が克服されたとしても、新しい技術が社会に定着していくためには、多くの場合さまざまな社会や市場における受け入れに関する障害があり、その適切な解決のためには技術と社会・市場の特性、例えば許認可の手続きなどや電力市場の特性なども勘案した複合した政策が必要である。第二に、技術の成熟度によっても政策や対応は異なってくる。例えば、技術の成

熟度が低ければ、予算措置による研究開発助成によりさらなるイノベーションを促すことがまず重要であるし、市場における展開の段階では、市場における当該技術の競争力を補完するような政策、技術や市場の特性に即したインセンティブ(例えば固定価格買取制度など)を付与することが求められる。さらに既存技術とのコストの差が小さくなると、よりソフトで市場に対して非介入的な手法、例えば、グリーン認証などが有効になる。最終的には、省エネルギーのように、基準づくりなどが有効である。このように絶えず政策とその成果を監視し、展開させないといけない。第三として、今後地球温暖化防止の観点からは、省エネルギーがもっとも重要な技術であり、幅広い需要サイドの対応が重要となる。より一般的にも、普及段階のインパクトをみれば、需要サイドにおける政策や対応の重要性が高まる。第四に、エネルギーのみに特有というわけでは必ずしもないが、エネルギーが多分野の政策課題と関係することから、エネルギーの専門家のみならず多分野の専門家を巻き込んでいくことが重要であり、そういう場を作ることが求められる。その前提として、エネルギーやその政策に対する共通認識を醸成し、リテラシーを向上させていくことが不可欠である。具体的には、エネルギーやエネルギー政策に関連する指標およびその評価基準も作成・開発していくことで、可視化され幅広いベースで評価が可能となる。

また、多くの技術分野でもさまざまな試みがなされているが、ロードマップも共通認識を醸成し、リテラシーの向上の観点から評価されるべきものである。また、中立的な評価機関の設立なども検討されるべきである。この関係では、エネルギーやエネルギー政策に関係する人材育成も、初等教育段階から専門的な段階、また一般的な教育システムの外においても必要である。

次に、新しいエネルギー利用技術を社会に定着させる具体的な技術について解説する。本領域では、ICT の発展および社会心理学や行動経済学などの人文社会科学と脳科学などに基づく技術の開発が鍵となると考えられる。エネルギーそのものの普及促進ではないが、ICT と社会心理学に基づく普及促進技術の例として Amazon などによる Web アプリケーションがあげられる。こうしたアプリケーションでは ICT を通じて、消費者の過去の Web 上での購入実績を分析し、個別の消費者の嗜好性などを推定し、それに基づいて、新たな製品などの購入を推薦する。エネルギーの分野でも、近年、スマートメーターの普及が急速に進展しており、消費される電力量の時系列での情報が利用できる可能性が高まっている。現在のところ、これは個人情報であるため、その扱いには個人情報保護法も踏まえた慎重な検討が必要であるが、将来的には、個人情報保護と新しいエネルギー利用技術の普及促進を両立させるような新たなシステムが確立される可能性はある。特に、家庭やオフィス全体だけでなく、個別の機器によるエネルギー消費の時系列推移情報があれば、機器の効率などが推定できるとともに、消費者の機器利用実態も分析できる。ここに上述した社会心理学、行動経済学、脳科学などの知見を踏まえた分析を加えることにより、個々人の限定合理性や嗜好を踏まえた効率の高い省エネ機器の購入促進や省エネルギーを考慮した機器の利用法などを、ICT を利用して消費者に直接伝達することができる。これにより、新しい利用技術を飛躍的に普及促進できる可能性がある。本領域では、文献 3)、4)をはじめとして、萌芽的な取り組みがみられるものの本格的な研究開発および社会実装が期待される分野である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

クリーンなエネルギー技術の開発・イノベーションとその普及が将来の世界のエネルギー問題の多くを解決することを踏まえ、一部についてはすでに言及したが、あらためて課題・ボトルネックについてまとめると以下のとおりである。

先述のとおり、エネルギー技術開発・普及については、現状では特に普及面で不十分である。このために、それぞれの政策環境に応じた横断的でかつ柔軟なエネルギー技術開発政策が求められる。残念ながら、必要なイノベーションを促進し、社会に定着させるための社会的技術や制度作りといった政策や対応をすべてうまく実施している国はない。国際機関や国際会議などの場を活用して、各国がそれぞれのベスト・プラクティスから学びそれぞれの政策環境を踏まえて政策に反映させることはもっとも現実的な出発点であると考えられる。

特に、世界のエネルギー需給が大きく変化しつつある現在、日本も含め世界のエネルギー技術政策も変動期に入っていくことになる可能性が高いが、このような時にこそ中立的・客観的な技術評価を行うことは、政策決定の前提として極めて重要である。エネルギー技術は多次元的でさまざまな形で多分野に影響を与える。これらを可視化して最終的な政策判断のための科学的な（evidence-based）前提材料を作ることが大事である。また最終的な判断としては一定の柔軟性が必要で、一定の幅をもって考えるということが求められる。その幅を考えるうえでの前提としてその多様なインプリケーションをしっかり評価しておくことも重要である。

イノベーションの成果を定着させるためには、多くの場合予算措置だけだと政策としては十分ではなく、規制緩和、税制、知的財産権保護などさまざまな政策と組み合わせる必要がある。例えば、注目を浴びている分散電源のほとんどは以前から発明されていたのだが、日本で普及しなかったのは電力市場が十分に開かれていなかったこととも関係している。またすべて市場に任せればすべてうまくいくということではなく、エネルギー政策をそれ自身だけではなく産業・経済政策の視点も組み合わせて広い視野で政策を検討していくこともますます重要となってくると思われる[5)]。

また、ICTの発展および社会心理学や行動経済学などの人文社会科学と脳科学などに基づく技術の開発においては、上述した個人情報の保護と利用の摩擦が大きな課題となることは論を待たない。本問題の解決にはICTにおけるセキュリティの向上や情報漏洩の防止技術の開発のみならず、個人情報保護法などの法制度の分析と新たな制度設計などの検討も必須となる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

日本では、科学技術分野全体に関して、質の高い研究開発をイノベーションにつなげ科学技術イノベーション政策を協力に推進するために総合科学技術・イノベーション会議の司令塔機能を与える方針などが決定されている（2014年6月「科学技術イノベーション総合戦略2014」）[6)]。また、「エネルギー基本計画」が決定され（2014年4月）[5)]、エネルギー関係技術の開発に関し、「開発を実現する時間軸と社会に実装化させていくための方策を合わせて明確化することが重要」とし、同時に、「指標の整備等についても、検討を行っていく」としている。

現在国家プロジェクトとして進められているスマートグリッドに関する実証実験においても新たな知見が得られつつあるが、今後、社会心理学、行動経済学、脳科学などの知見に基づいて、ICT などで得られるエネルギー関連のビッグデータを分析することにより、新たな知見が生まれ、本領域が飛躍的に発展する可能性を秘めている。

## （６）キーワード

3 つの E、省エネルギー、ベスト・プラクティス、首尾一貫性、ガバナンス、民間セクターとの協働、モニタリング、政策の柔軟な組み合わせ、共通認識の醸成、リテラシーの向上、指標と評価基準、ロードマップ、人材育成、司令塔機能、ICT、社会心理学、行動経済学、脳科学、限定合理性

## （７）国際比較

| 国・地域 | 現状 | トレンド | 各国の状況・評価の際に参考にした根拠等 |
|---|---|---|---|
| 日本 | ○ | → | ・「エネルギー基本計画」（2014 年 4 月） [5] および「科学技術イノベーション総合戦略 2014」（2014 年 6 月） [6] をそれぞれ策定 。 |
| 米国 | ○ | → | ・「気候行動計画」（2013 年 6 月）を発表、既存発電所の二酸化炭素排出基準を設定する規制案を提示（2014 年 6 月）。CAFE(燃費基準)の引上げ（2012 年 8 月）。 |
| 欧州 | ○ | → | ・欧州委員会は″Energy 2020″(2010 年 11 月)および″Energy Roadmap 2050″（2011 年 12 月）を採択、2030 年に向けたエネルギー・政策枠組みを発表（2014 年 1 月） [7]。 |
| 中国 | △ | → | ・「第十二次五カ年計画」（2011 年～2015 年）（2011 年 3 月）、「エネルギー発展第十二次五カ年計画」（2013 年 1 月） [8-10]。 |
| 韓国 | △ | → | ・「低炭素グリーン成長国家戦略」(2008 年)、「低炭素グリーン成長基本法」(2010 年 1 月)、「第二次国家エネルギー基本計画」（2014 年 1 月）。 |

（註 1）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 2）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）Global Energy Assessment 2012
http://www.iiasa.ac.at/web/home/about/news/Global-Energy-Assessment-now-available.en.html
2）International Energy Agency. 2011. Good Practice Policy Framework for Energy Technology Research, Development and Demonstration (RD&D). Energy Technology Perspective 2012.
3）独立行政法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター. 2014. 民生家庭部門の省エネルギー促進からの低炭素社会実現　低炭素社会の実現に向けた技術及び経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書. LCS-FY2013-PP-09.
4）独立行政法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター. 2014. 家庭の省エネ促進と省エネ価値市場の創成のための政策パッケージデザイン　「電気代そのまま払い」の実現とグ

リーンパワーモデレータ（GPM）の創出」　低炭素社会の実現に向けた技術及び経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書. LCS-FY2013-PP-08.

5) 経済産業省 エネルギー基本計画
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/

6) 内閣府 科学技術イノベーション総合戦略2014～未来創造に向けたイノベーションの懸け橋～
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/index.html

7) European Commission (EC)
http://ec.europa.eu/energy/strategies/2011/roadmap_2050_en.htm
http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/documentation_en.htm

8) 電気事業連合会 海外電力関連情報 中国の電気事業
http://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_jigyo/china/detail/1231593_4770.html

9) JOGMEC 北京事務所 習近平政権下の中国のエネルギー政策・外交の行方　―経済改革とエネルギー安全保障の実現に向けて―
http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/4/4985/201309_001a.pdf

10) 中華人民共和国在日本大使館WEBサイト
http://www.china-embassy.or.jp/jpn/

## ３．２．３　低炭素化を実現するエネルギー利用

### ３．２．３．１　次世代自動車の利用拡大と高効率化

#### （１）研究開発領域名

次世代自動車の利用拡大と高効率化

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

次世代自動車は、排気のクリーン度や低燃費特性、低炭素特性などの点で通常のガソリン車やディーゼル車の従来車を上回ることを特長とし、これには電気自動車やハイブリッド車、プラグイン・ハイブリッド車、燃料電池自動車などが含まれる。これらの開発・実用化と普及に関しては、我が国は国際的にリードしている状況であり、さらなる先端的な技術開発と産業振興のための政策の推進が必要とされる領域である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

次世代自動車は、排気のクリーン度や低燃費特性、低炭素特性などの点で従来のガソリン車やディーゼル車を上回ることを特長とし、今後の実用化と本格的な普及が期待されている。これには、電気自動車（EV : Electric Vehicle）、ハイブリッド車（HV : Hybrid Vehicle、またはHEV : Hybrid Electric Vehicle）、外部充電によるEV走行が可能なプラグイン・ハイブリッド車（PHV : Plug-in Hybrid Vehicle 、またはPHEV : Plug-in Hybrid Electric Vehicle）、燃料電池自動車（FCV : Fuel Cell Vehicle）などが含まれる。これらの開発・実用化と普及に関しては、我が国は国際的にリードしている状況にあって、運輸分野における省エネルギーとともに、先端的な技術と産業の振興のための重要な政策対象とされている [1)]。

我が国の自動車メーカーは、この十数年にわたり諸外国メーカーに先んじて次世代自動車の開発・実用化に取り組み、製品化を推進している。とりわけHVは、我が国において普及が本格化しており、各社が取り組んでいる車両の製品化に関わる技術開発の面では、競争領域に入っているといえる。

しかしながら、エンジン・電動系のコンポーネントやその材料・素材のレベルでは、まだ基礎から応用にわたって研究開発が必要な対象も多い。すなわち、エンジンの高効率化のための基礎技術、次世代自動車走行用二次電池（バッテリー）の高性能化と内部現象の解明、パワー半導体と関連システムの高効率・コンパクト化、燃料電池のスタックの高性能化と内部現象の解明、さらに、各種の従来素材の改良や新素材の開発、希少金属などの使用量の抑制や代替物質の開発が必要とされている。それらの性能向上の集積が車両自体の性能の改善に大きく寄与する効果がある。これらの技術開発については、産学官の連携体制のもとで研究が推進されている事例が多い。

HVやEV、PHVの製品化はすでに実現しており、FCVについても2014年末より量産化による市場への導入がはじまっている。特にFCVの開発に当たっては、一社で担うリスクを避け、それぞれが技術を共有する国際的な協力体制の構築も進められている。すなわち、トヨタ自動車とBMWの提携、日産自動車・ルノーとダイムラー、フォード間での提携、本田技研工業とGMでの提携などの例であり、部品の共通化や生産規模の拡大によってコストダウンを図る狙いがある。

その一方で新興国を含む国際市場において、内燃機関を用いた従来車は自動車メーカーにとって、既存技術を改善し利用する点でコスト的に有利なことから依然として重要な開発対象となっている。具体的には、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）やNEDO事業としても実施されているエンジンシステムの高効率化技術[2]や車両の軽量化技術[3]の研究開発を中心として、今後も強化される燃費基準への適合、さらにはそれを上回る燃費性能の達成に向けて取り組まれているのが実情である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

EVに関しては、我が国のメーカーが他国メーカーに先んじて量産化を果たしているが、今後、いっそうの普及を図るためには、バッテリーと電動系コンポーネントのコスト抑制による車両価格の低減が必要とされている。また、EVの一充電航続距離が100～200 km程度であり、NEDOのロードマップに示されているように、バッテリーのエネルギー密度の向上によるいっそうの航続力伸長が課題とされている[4]。また、バッテリー残量の低下に対する運転者の不安を解消するためには、急速・普通充電設備の適切な配置と拡大が必要である。このため、経済産業省によって2012年度から2014年度の3年間、設置費用に対する大規模な助成が行われている[5]。EVとFCVでは、それぞれ充電インフラと水素供給ステーションの適切な設置拡大が不可欠であり、それによって今後の本格的な普及が大きく左右される状況にある。

PHVではこれらの充電設備を利用することも可能であるが、ハイブリッド走行によってバッテリー残量に対する不安がなく、全体の航続距離が大きく伸びることが長所とされ、普及が進むとする見方もある。また、EVを小型や超小型に都市内の短距離移動の手段に特化して使う事業例も国内外でみられる。そのなかには、これらをカーシェアリング用に活用する試行例もみられる。

FCVでは、燃料電池スタックの高性能化をはじめ、低温運転性能や信頼耐久性の確保が進み、車両として製品化の域に達しつつある。2014年末にはトヨタ自動車からは世界初の本格的な量産車が発売され[6]、2015年には本田技研工業、2017年には日産自動車が発売を予定している。これらの燃料電池スタックで触媒として使われる白金の量もこの十数年間で大幅に低減されている。この点では高コスト要因がある程度は抑制されつつある反面、関連コンポーネントや周辺機器類も含めた車両全体の大幅なコスト低減が課題とされている。それを克服するためには、従来車との車両価格やランニングコストの差を抑える支援策として、現在行われている公的な購入補助と税の減免措置を中長期にわたって継続する必要がある。

水素貯蔵容器については、炭素繊維などによって強化・軽量化され、35 MPaと70 MPaの充填圧のものが利用されているが、いずれも製造コストを大幅に低減するとともに、容器と充填の安全性に関わる国際基準調和を我が国が主導して推進する必要がある。また、水素供給ステーションに関しても、設置費用に約5億円を要するのが現状であり、それを半減することが目標とされている。ステーションでの水素供給に関わる課題については、水素供給・利用技術研究組合（HySUT）によって自動車メーカーとエネルギー企業が共同して行う実証事業を通じて解決が図られている[7]。

我が国では、4大都市圏を中心に2015年までに100基のステーション設置が予定されて

おり、諸外国の計画を大きく上回っている。しかしながら、これによって水素の供給によって営業収益を得ることは難しく、ステーションの維持費用も含めた国の支援が不可欠とされている。また、燃料コストについてもガソリン価格並みのレベルにまで低減しなければならない。さらに、このような新たな燃料の利用に当たっては、社会的な理解と受容性を促す官民の連携による努力も不可欠である。

FCVに使われる水素はナフサや天然ガスから改質反応によって生成しているのが現状である。しかしながら、長期的な観点からFCVの普及によるいっそうの低炭素化を実現するためには、化石系原料を脱して再生可能なエネルギーを利用した水素製造技術を開発し実用化する必要がある。その際、いわゆる “Well-to-Wheel” に基づいた低炭素特性とエネルギー効率に対する適正な評価を行うことが求められる。

また軽量化技術は次世代車のみならず従来車も含めて、車両の運動性能向上、動力システムの小型化への寄与による車両重量の低減など環境対策の負担も軽減されるという極めて好ましい循環がもたらされる。我が国の鉄鋼メーカーは高張力鋼や超高張力鋼の技術分野で先行しており、すでに採用が部分的に始まっている。その他には、アルミニウムなどの軽金属やCFRPを含むプラスチックの利用が進められている。それぞれの特徴を活かし、形成・加工の難しさやコスト増加、生産のグローバル化への対応、リサイクル性の確保などの課題を克服した上で普及することが望まれる技術である。その際、車両同士の衝突時の双方の安全性を図る“コンパティビリティ性（共存性）”を確保することも技術的な課題となる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

2020年以降、各国では自動車の燃費基準の強化が予定されており、中長期的にも強化の傾向は一段と強まるものと予想される。特に$CO_2$の排出低減のためもっとも厳しい基準が提示されているEUでは、従来車の燃費改善に加えて、電動化の必要性が高まるものと予想される。また、補機類用バッテリー電源の48ボルト化やエンジンのアイドルストップと再始動、回生制動、出力の補助などの機能を有するマイクロハイブリッド化を推進しようとする動向もある。これらは、メーカー間の競争領域に入る課題といえる。

EUでは、ドイツにおける e-mobility にみられるように、小型EVを都市内の短距離移動用に利用する産学官連携の実証事業が進められている。これには、カーシェアリング事業も含まれ、フランスの各市でも同様の事業例がある [8]。

米国では、2012年からエネルギー省の主導による電気や代替燃料も含めた自動車分野の基礎研究と普及に関わる支援事業が幅広く行われている [9]。その一環として、2013年から“EV Everywhere Grand Challenge”を掲げ、10年以内に全米でEVやPHVの本格普及を図るため、充電インフラ設置個所の増設や関連する車両技術の目標を提示している [10]。

中国では、次世代車の開発は先進国に比べて遅れているのが現状である。最近著しく悪化している大都市の大気汚染の改善策として、EVの大量導入を目指して国と自治体によるEVの購入助成が進められており、これによって内外メーカーの量産が大きく促されているものと予想される。

### （６）キーワード

ハイブリッド車、プラグイン・ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池自動車、リチウムイオン電池、次世代二次電池、燃料電池、パワー半導体、水素供給ステーション、車両軽量化技術

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・次世代自動車用のモーター、バッテリー、燃料電池、それらに関連するコンポーネント、電子制御技術や素材に関して行われている産学の基礎研究の分野では国際的に先行している。（NEDOなどの事業） |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・上記の基礎研究から応用研究にわたって国際的に先行しているが、各メーカーの戦略によって研究開発の対象が異なる。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・我が国の自動車メーカー各社では、それぞれの技術戦略の違いはあるが、全体として、HVやEVの製品化と量産化に関しては、国際的に大きく先行している。FCVについても量産化を前提にした市場導入の準備と水素供給ステーションの設置が進められている。（各企業の実績より） |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・エネルギー省所管の各国立研究所では、広範な基礎研究が実施されている。コンポーネントに関する基礎研究や性能を評価する計算コードの開発が取り組まれている [11]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・カリフォルニア州による Zero Emission Vehicle Program に対応して、EVやPHV、FCVの開発を各メーカーに求めている。連邦レベルでは充電インフラ整備に取り組んでいる [10]。 |
| | 産業化 | △ | → | ・次世代自動車はコスト高であり、短期的な収益性が従来車に劣るため自動車メーカーでは積極的な製品化に消極的な傾向がある。多様な自動車用代替燃料の普及に力点が置かれている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | △ | → | ・従来車を対象とした研究に重点が置かれている傾向がある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・我が国が先行しているHV技術の後追いを避け、従来車の性能改善に重点が置かれている。航続距離の伸長を目的にしたPHVが注目されている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・次世代自動車の製品化は行われているが、生産は小規模な状況に止まっているのが現状である [8]。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・次世代自動車に関連する基礎研究では、大学を中心に取り組まれているが、立ち遅れているのが現状である。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・大学が産業界からにニーズに応えて取り組まれている例があるが、必ずしも成功していない（例として、同済大学や精華大学でのFCVの開発研究がある）。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・HVやEVについては量産化している企業があるが、国内市場を主な対象としており、性能や信頼性、耐久性の面では、国際市場の水準よりも劣っている。今後大都市の大気汚染の改善のため、EVの導入が予想される。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・企業の研究所において行われているのが現状である。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・次世代自動車全般にわたって取り組まれているが、FCVに開発に重点を置いている。他の車種に関しては必ずしも顕著な成果はみられない。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・FCVの積極的な量産化に取り組み、2014年から欧米への限定販売を開始している。自動車用リチウムイオン電池に関しては、大規模の量産化の投資が行われており、欧米の自動車メーカーへの供給では、コスト面で極めて優位な状況にある。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 経済産業省 次世代自動車戦略研究会. 2010. 次世代自動車戦略2010.
2) 内閣府. 2014. 戦略的イノベーション創造プログラム 革新的燃焼技術
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/
3) NEDO. 2014. 革新的新構造材料等研究開発
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100077.html
4) NEDO. 2013. 二次電池技術開発ロードマップ
http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf
5) （一社）次世代自動車振興センター. 2012年度～2014年度. 次世代自動車充電インフラ整備促進事業
http://www.cev-pc.or.jp/hojo/hosei_index.html,
6) トヨタ自動車（株）. 2014. 燃料電池自動車の販売開始について
http://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/3274916/
7) 水素供給・利用技術研究組合. 2014. WEBサイト
http://hysut.or.jp/
8) IEA. 2013. Global EV Outlook 2013
http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook_2013.pdf
9) 米国エネルギー省自動車技術室. 2014
http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office,
10) 米国エネルギー省. 2014. EV Everywhere Grand Challenge
http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office-ev-everywhere-grand-challenge
11) 米国エネルギー省. 2014. エネルギー関連国立研究所の活動
http://energy.gov/science-innovation/national-labs

### ３．２．３．２　未利用中低温排熱源の効率的活用

#### （１）研究開発領域名

未利用中低温排熱源の効率的活用

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

中低温熱はエクセルギー率が低いため、これまで必ずしも有効に利用されてきたとは言い難い。本研究開発領域では、未利用の中低温の熱源に対し、外燃機関、熱駆動冷凍サイクルや高温ヒートポンプなどを適用する際の課題を解決するための研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

中低温の熱利用技術は、これまでは主として経済性の観点から技術導入とともに研究開発も遅れていた。しかしながら、マクロなエネルギーバランスから明らかなように熱需要は膨大であり、未利用の中低温排熱も同時に大量に排出されていることから、その省エネポテンシャルは非常に大きい。また、昨今のエネルギー価格の高騰や資源ナショナリズムの台頭といった環境変化から、今後いっそうの省エネルギーが不可欠となっており、中低温の熱利用に改めて注目が集まっている。我が国における熱エネルギー利用の実態を総合的に把握するとともに、熱利用技術の研究開発を推進することが急務となっている[1)]。

中低温熱利用における第一の課題は、熱需要の実態が明らかでないため、技術開発ターゲットを絞りきれないことにある。例えば、産業分野においては、熱の利用を示す温度や流量データは製品製造プロセスと密接に関連するため、企業秘密としてオープンにされることは少ない。また、水産加工や食品産業などといった中小規模の産業分野においては、殺菌、乾燥といった中低温熱需要が非常に多いが、利用形態や規模が多種多様でその実態がほとんど把握されていない。同様に民生分野においても、テナントビルに代表されるように形態、用途、規模が多様であり、その利用実態が不明である。そのため、架空の使用条件を想定した技術開発が進められることになる。まずは、これらの熱需要の実態を明らかにした上で、実使用条件における真の技術課題を抽出することが重要となる。このような状況の中、HEMS（Home Energy Management System）やBEMS（Building Energy Management System）技術の進展とともに、実証実験が開始されるようになってきており、電力需要についてはデータ収集が進みつつある。ただし、省エネポテンシャルが大きい熱需要については、温度データの集積は比較的容易であるものの、流量データの収集が困難であるという課題がある。

数十℃～数百℃程度の温度を有する熱源には、地熱、地中熱、温泉、太陽熱などの再生可能エネルギー、熱機関や燃料電池などの発電機からの排熱、製造ラインからの工場排熱などがあるが、これらの熱源の多くは小量で空間的にも分散するため、数十kW～MW程度の中小型システムへのニーズが高い。熱利用技術は一般に成熟した技術と認識されることがあるが、中低温熱利用においては、特に費用対効果の面からいっそうの改善が必要である。温度変化する熱源との温度差の小さいサイクルの開発（超臨界サイクル、トリラテラルサイクル、VPC（Variable Phase Cycle）など）、温暖化係数が小さ

く安全な作動流体の開発、高効率膨張機・圧縮機、低コスト高効率熱交換器、防汚、耐熱性の高い冷凍機油、オイルフリー化技術、システム研究（熱源とのマッチング）などの研究課題があげられる。例えば、熱源温度が100℃程度のバイナリー発電では、冷媒のR245faが作動流体として用いられる場合が多いが、より高温の熱源にも適用できる作動流体の開発が求められる。また、排熱発電に限らず、中低温熱で再生が可能な吸着式、吸収式などの熱駆動冷凍サイクルも同様にいっそうの低コスト化、および高効率化に向けた研究開発が必要である。

熱需要は大きくは給湯、空調、乾燥、殺菌、濃縮、蒸留などに分類される。そのほとんどは200℃程度以下の中低温であるが、現在はその多くが化石燃料の燃焼（ボイラなど）で賄われている。これは、ひとえにボイラのイニシャルコストと燃料コストが、他技術と比較して圧倒的に安価なためである[2)]。しかしながら、昨今の燃料価格の高騰により、従来の燃焼式に頼った加熱プロセスを見直す機運が高まっている。特に、ヒートポンプは理想的には不可逆損失無しに熱を利用することができる技術であり、このヒートポンプ技術を現状の冷凍空調用途から、暖房、給湯、乾燥、殺菌といったさまざまな用途へ拡大する動きが強まっている。例えば、近年120℃程度の蒸気を発生させる高温型のヒートポンプが製品化されている[3)]。しかしながら、さまざまな温度域の熱需要に対応するためには、より高温まで適用可能な高効率ヒートポンプが必要である。具体的な研究開発課題としては、高温用サイクルの開発（二段サイクル、超臨界サイクル、逆ブレイトンサイクルなど）、温暖化係数が小さく安全な作動流体の開発、高効率圧縮機・膨張機、低コスト高効率熱交換器、耐スケール性、高温に耐える冷凍機油、あるいはオイルフリー化技術、システム研究（熱源とのマッチング）などがあげられる。

中低温熱はエクセルギー率が低いために、一般に動力に比して熱交換量が圧倒的に大きくなる。例えば、我が国のエアコン性能は諸外国に比べて非常に高いレベルにあるが、その主たる要因は非常に大型の熱交換器を搭載していることによる[4)]。すなわち、製品競争力を向上させる上で、熱交換器の低コスト化は避けて通れない[5)]。また、排ガスからの熱回収などの新規な用途に対しては、熱サイクルへの耐久性や凝縮水による腐食などが課題となる。この場合、材料としてステンレスを利用することになるが、低い熱伝導率による性能低下をどのように挽回するか、良好なドレン排水をどう実現するかといった従来にない課題が発生する。熱交換器技術は、これまで用途ごとに独自に進化してきており、新規な用途にそのまま適用できるケースは必ずしも多くない。新たな用途における新規な設計を世界に先駆けて我が国で開発し、知財を確保した上で世界標準を握る戦略が望まれる。また、下水熱や温泉熱を利用する場合はスケール付着や防汚への対策が不可欠である。一般に、高性能伝熱促進面はスケール付着に弱いため、低コスト化の大きな障壁となっている。

さらに、中低温熱を利用する場合に注意を要する点として、希薄分散する熱をバイナリー発電装置あるいはヒートポンプなどの本体まで導くための配管などの周辺機器コスト、およびその建設コストが高いことがあげられる。場合によっては、これら周辺コストが熱源機本体コストを上回るケースがあることが報告されている[6)]。バイナリー発電において、熱収集のためのコストが無視できる場合には、機器を高効率化し、イニシャルコストあたりの出力を高めることが有利となる。しかしながら、この場合は高温熱源

と環境温度との熱源間温度差が大きくなる、すなわち高温熱源はほとんど温度変化することなく高温のままバイナリー発電機から環境に放出されることになり、熱源の保有するエンタルピーのわずかな量しか利用されずに廃棄されることになる。これは、我が国のエネルギー問題に量的に貢献するという観点からは、望ましい形ではない。他方で、地熱発電のように熱を引き回すコストが大きい場合は、熱源の保有する有限のエクセルギーを最大限回収することが重要となる。先述のVPC、トリラテラルサイクル、超臨界サイクルなどは、熱源利用後の排出温度を環境温度程度まで低下させて仕事を回収することができるサイクルであり、熱源の保有するエクセルギーを回収するという観点から有利となる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

前節までに解説してきた技術の多くは原理的には公知であるが、既存技術に対して競争力を向上させるためには、今後とも継続的な研究開発が必要である。しかしながら、これまで主として経済的な面から研究開発投資が滞ってきた。一方で、現在の燃料価格や電力料金の高騰は、従来競争力の低かった技術の経済的な導入障壁が下がってきていることを示唆している。また、エネルギー安全保障や環境問題への貢献といった視点からも、これらの熱利用技術は重要である。その技術開発は、どちらかといえば漸進的な技術の蓄積が土台となるが、一定規模の公的支援によって、基盤技術の継続的な研究開発を推進すべきである。このことは、我が国の関連産業の国際競争向上につながり、結果的に国全体としての経済効果をもたらす可能性が高い。

現状では、膨大な量の中低温熱が利用されずに廃棄されているが、これらは散在している場合が多く、またその実態が明らかでない場合が多い。この情報不足が研究開発を進める上での主なボトルネックの一つとなっている。さまざまな需要地における温度流量条件や機器の稼動実態について、環境条件も含めてその時間変動から季節変動まで情報収集する必要があるが、個別企業での対応は困難であり、公的な支援が不可欠である。

また、技術的には低コスト化が最大の課題である。地熱については固定価格買取制度（FIT：Feed-in Tarrif）が適用され、コスト障壁はかなり低下したが、他の熱源についても同様な支援が求められる。また、コスト要因の大きな割合を占める熱交換器については、スケール、霜、煤などに耐性のある伝熱促進技術が必要とされている。これら熱抵抗となる物質の化学反応や輸送現象は非常に複雑であるが、基礎研究シーズと開発現場を橋渡しすることで、ブレークスルーが達成される可能性がある。

さらには、小型バイナリー発電の場合は、大型発電設備を前提とした電気事業法の適用が適当ではないとの意見があり、規制緩和や新たな企画の整備が求められている。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・2012年度に、文部科学省と経済産業省の合同検討会である未来開拓連携の一テーマとして「未利用熱エネルギー」が議論され、2013年10月に、「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（略称：TherMAT）」が設立された[7]。 これは、18の企業、1つの一般法人と産総研から構成される技術研究組合であり、膨大な量の未利用熱エネルギーを削減・回収・利用するための要素技術（断熱、遮熱、蓄熱、ヒートポンプ、熱

電変換、排熱発電、熱マネジメントなど）を革新し、システムとして確立することを目的としている。

・地熱発電導入の三大障壁は、高い導入コスト、国立公園問題、そして温泉問題といわれている [8]。FITが地熱や温泉熱にも適用され、出力15,000 kW以上は27.3円/kWh（15年間）、15,000 kW未満は42円/kWh（15年間）の買い取り価格となり、コストについては大きく前進した。ただし、環境アセスメントや適用先へのカスタマイズなどが必要であることから、太陽光発電のような短期間での導入拡大は困難である。残りの障壁である国立公園問題や温泉問題の解決とも合わせ、2020年以降の普及拡大が期待されている。

・大型の地熱発電用タービンは、日本メーカー3社（東芝、富士電機、三菱重工業）が全世界の7割近くのシェアを占めており、圧倒的な競争力を保っている。

・近年、バイナリーシステムの研究開発が活発である [9]。MWクラスでは、イスラエル系米国企業のOrmat社が圧倒的な実績を有しており、非常に高い市場シェアを握っている。出力は250～15,000 kWと幅広く、空冷凝縮器などのモジュール化により低コストを実現している。富士電機も同様のシステム（2,000～10,000 kW）を2010年から販売開始している。三菱重工業もイタリアのTurboden社の数百～10,000 kWのオーガニックランキンサイクル（ORC：Organic Rankine Cycle）の販売を開始している。

・数百 kW以下のクラスのバイナリーシステムとして、三井造船が米国 Energent社の100、400 kW級システムを導入している。川崎重工は、ラジアルタービン出力250 kWのバイナリーシステムを2010年から発売している。第一実業は、2013年から米国Acces Energy社のオーガニックランキンサイクル設備の販売を開始した。また神戸製鋼所は、スクリュー圧縮機を転用したマイクロバイナリーシステムを販売している。75～95℃の温水、110～130℃の低圧蒸気を利用できる。

・小型のバイナリーシステムの開発も進んできている。株式会社IHIは、ラジアルタービンで20 kWという超小型のバイナリーシステムを2013年から販売している。アネスト岩田が5.5、11 kW、アルバック理工が3 kW級のいずれもスクロール膨張機を用いた小型システムを開発している。その他、上記のTherMATにおいても小型のバイナリーシステムが開発対象の一つとなっている。

・蒸気発生ヒートポンプに関しては、神戸製鋼、東京電力、中部電力、関西電力の4社が、65℃の温排水から120℃/0.1MPaGの低圧蒸気を発生する製品を2011年に発表している [3]。COPは3.2であり、後段に蒸気コンプレッサーを追設することで165℃/0.6MPaGまで昇温昇圧することが可能である。

・三菱重工業、東京ガス、三浦工業は、ガスエンジン冷却水温度を110～115℃に高めることで、大気圧レベルのフラッシュ蒸気を生成し、これをさらに圧縮機で再圧縮して0.7 MPaGの蒸気を生成する全蒸気取り出しコージェネレーションシステムを共同開発している [10]。ガスエンジンの高い発電効率を維持したまま、利用しにくい温水をニーズの高い蒸気にアップグレードできることから、中小規模の蒸気需要の多い工場などへの適用が期待されている。

## （６）キーワード

断熱、伝熱、熱輸送、蓄熱、バイナリー発電、外燃機関、ヒートポンプ

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・研究者数も依然多く、基礎研究もまだ競争力を有している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・冷凍空調技術を転用した新技術が近年多く開発されている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・上記技術を用いた新製品も発売が続いている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・基礎研究自体は地道に続いている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・ORCなどの開発は実施されている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・ターボ冷凍機やコンプレッサーを始め、既存技術や製品力は高い。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・自然冷媒などの基礎研究は強い。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・伝統のある企業が地道に開発を進めいている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・イタリアのTurboden社が小型バイナリーシステムの納入実績がある。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・論文発表数が近年増加している。まだレベルは高くないが、今後進展する可能性あり。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・技術導入の進展が進むと今後急速に力をつけてくる可能性あり。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・技術導入の進展が進むと今後急速に力をつけてくる可能性あり。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・エアコンなどの小型機での研究開発は大きく進んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・グローバルに現地ニーズに合わせた開発が進んでいる。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・中大型機は現時点では強くないが、小型機の技術転用が進めば伸びる可能性あり。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター. 2013. 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2013年）第2版. CRDS-FY2013-FR-02.
2) 鹿園直毅. 2008. 小温度差熱利用技術の可能性. 季刊すまいろん. 2008年夏号, pp. 54-58.
3) 中部電力. 2011. 高効率蒸気供給システム「スチームグロウヒートポンプ」の開発・販売について
http://www.chuden.co.jp/corporate/publicity/pub_release/press/3138620_6926.html
4) 総合資源エネルギー調査会, 省エネルギー基準部会 エアコンディショナー判断基準小委員会.2006. 最終取りまとめ
5) 鹿園直毅. 2013. エクセルギー損失削減に貢献する伝熱促進技術. 機能材料. Vol.33 No. 7, pp. 13-19.
6) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構. 2013. 小規模地熱発電及び地熱水の多段階利用事業の導入課題調査手引書
7) 経済産業省. 2013. 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（略称：TherMAT）の概要
http://www.meti.go.jp/policy/tech_promotion/kenkyuu/saishin/48.pdf
8) 公益財団法人自然エネルギー財団. 2013. 国際シンポジウムREvision2013 - 新しい自然エネルギーの未来を創造する
http://jref.or.jp/activities/events_20130226.php
9) 矢野経済研究所. 2013. バイナリー発電システムの最新動向＆市場展望.
10) 鈴木、長面川、石田、吉栖、高井、山野. 2013. 分散型発電用ガスエンジンKU30GSIの高効率化と排熱利用技術. 三菱重工技報. 50(3), pp. 67-72.

### ３．２．３．３　建築物における太陽熱エネルギー活用

#### （１）研究開発領域名

建築物における太陽熱エネルギー活用

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

住宅や業務ビルなどの建築物において化石燃料消費を低減させるためには、太陽光発電に加えて太陽熱を有効に利用することが課題となる。また太陽熱により温水を製造して暖房・給湯に利用するだけでなく、従来電力によって賄っている冷房空調にも応用するために、本領域では要素となる集熱技術や熱エネルギー変換・蓄熱・利用システムを構築するとともに経済性の向上を図る。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

太陽熱利用はすでに実用化されており、太陽熱利用のシステムは太陽集熱器、蓄熱槽、ポンプなどの循環系および制御系で構成される。

太陽集熱器には、温水で回収する平板型集熱器と真空管型集熱器が普及している。世界的には真空管型の比率が高く、これは主に中国で真空管型の利用が多いためである。真空管型は温水温度が高い状態での断熱性能が良く、高温水の回収に適した技術である。一方、日本では真空管型集熱器のメーカーがなく、海外から輸入している。日本では個別住宅用の平板型集熱器の外形寸法を太陽光発電モジュールと同じにして外観デザインを改善させたり、施工性を高めるなどの技術開発が進められている[1)]。また、集合住宅用のセントラル給湯システムのコストダウンを目指した技術開発も行われている[1)]。

一方、蒸気レベルの高温で太陽熱を回収するための集光型集熱器の開発に向けた研究が日本のプロジェクト事業として実施されている。これは太陽熱発電を想定したプロジェクトであるが、太陽熱を利用した冷房（ソーラークーリング）に対する熱供給にも応用可能であり、さらには産業用のプロセス加熱への展開も見込まれる。当該プロジェクトではトラフ型ミラーを用いた線集光タイプの真空管型集熱器の性能を評価するための試験装置の開発が進められている[2)]。なお、集光比が高い場合には太陽追尾が必要となるが、複合放物面鏡（CPC：Compound Parabolic Concentrator）や非結像レンズを用いた非追尾型の集光集熱器[3, 4)]の研究も行われている。住宅や業務ビルなどに追尾装置をおくことは難しい点があることから、非追尾型の技術開発が課題と考えられる。

建築の観点からは、建物の屋根や屋上でなく、壁面に集熱器を設置する方式が海外で実用化されている。日本ではベランダ用として垂直に設置する平板型集熱器が開発され、近年一部の集合住宅に導入されている。中高層建物では屋上面積が限られていることから、建築と一体的に壁面に集熱器を設置する方法は太陽熱利用の導入促進に寄与すると予想される。

蓄熱槽については従来温水蓄熱が使用されており、住宅用として日本では200～300リットル、海外では500リットル程度の容量が利用されている。この蓄熱槽の小型化に向けた技術開発として、潜熱蓄熱材を用いる蓄熱方式[5)]やケミカル蓄熱[6)]、吸着材を用いた蓄熱の研究開発が行われている。

太陽熱が不足する場合の補助熱源としてはガス給湯器が使われることが一般的である

が、近年ヒートポンプと組み合わせたシステムも実用化している。欧州では蓄熱槽・補助熱源・制御系を一体化したコンビシステムと呼ばれる設備が提供されている。これは個別の機器を組み合わせるのではないため、システムの運用が統合的になされること、ユーザから見て一つの事業者にアクセスすればよいことなどのメリットがある。

業務ビルでは冷房負荷が住宅よりも大きいことから、太陽熱によるソーラークーリングの技術開発が求められる。世界的に見るとソーラークーリングの導入は増加傾向にあり、その大部分は欧州である。ソーラークーリングの方式には、吸収冷凍機、吸着冷凍機、エジェクタ、それからデシカント空調と組み合わせる技術があげられる。吸収冷凍機は従来の二重効用吸収冷凍機に太陽熱を受ける一重効用サイクル用再生器を付加した技術が開発されている。吸着冷凍機では、近年開発されたゼオライト系吸着材が低温駆動に適していることから65～70℃の太陽熱温水を熱源とする設備が実現している。エジェクタ方式では85℃程度の太陽熱温水を熱源とし、エジェクタにより蒸発器を低圧にすることによって冷水を生成する仕組みが開発されている [7]。またデシカント空調と組み合わせる技術としては、従来のデシカントロータの再生に80℃程度の太陽熱温水を用いたり、除湿後の空気を冷却するために太陽熱駆動の吸着冷凍機で発生した冷水を用いる方式がある。いずれも技術的には実現されているものの、経済性に改善の余地がある。冬季は暖房負荷に太陽熱が利用できるが、従来は夏季に太陽熱を利用する先がなかった。ソーラークーリングは夏季の太陽熱利用を拡大する効果を持ち、太陽集熱器などの設備の通年運用を可能とする意義がある。

太陽熱利用を促進するためにグリーン熱証書制度ができているが、証書を得るためには利用した太陽熱を計量することが不可欠である。また集合住宅のセントラル方式の熱供給においても課金のために計量が必要である。しかしながら計量装置はコストアップ要因となるため、熱量計の低コスト化が課題である [8]。オーストラリアでは計量せずに「みなし」によって太陽熱利用量を評価することが制度化されている。

以上を踏まえ、太陽熱利用を促進するための研究開発課題は以下のとおり整理できる。

・太陽集熱器の低コスト化。
・建物壁面に設置する方式の太陽熱集熱器の開発。
・非追尾による集光集熱による太陽熱回収温度の高温化。
・蓄熱槽の蓄熱密度の高密度化・小型化、季節間蓄熱手法の確立。
・ソーラークーリング用太陽熱駆動冷凍機などの小型化・低コスト化。
・太陽熱計量器の低コスト化、太陽熱利用量の推定手法の確立。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

太陽熱給湯器の家庭への普及が低迷している理由として、経済性が低いことがあげられる。屋根置き型の太陽熱温水器をLPGを使用する世帯に導入する場合には回収年数が6年程度 [9]と経済性は比較的よいが、強制循環型ソーラーシステムを都市ガスを使用する世帯に導入した場合には20～30年程度かかると試算されている。したがって、コストを下げる技術開発が極めて重要である。集熱器には輻射損失を抑えるために選択吸収膜と呼ばれる長波長の赤外光の放射率が小さいコーティングが使われているが、低コストで有効な選択吸収膜材料の開発が課題にあげられる。また、欧州で開発が進められている

ようなプラスチック製の集熱器のように、使用素材を大きく変える技術開発が日本では見受けられない。

建物に太陽熱を導入する場合、低コスト化のために屋根や壁面などの建物と集熱器が一体となる導入方法が有効である。海外では個別住宅や集合住宅で集熱器が建物と一体的にデザインされた事例が多い。このように住宅などの建物と融合する太陽熱利用システムの導入形態を確立し、ユーザに認知されることが重要である。また、蓄熱槽のコンパクト化や熱エネルギー変換を図るには高温での太陽熱回収が有効である。そのためには集光集熱技術の開発が必要であるが、現在実用化されているものは真空管型集熱器の裏側にCPCなどの反射鏡を設置した例がある程度であり、今後非追尾による集光集熱器の開発が求められる。

寒冷地であるカナダで太陽熱暖房比率90%を実現した事例[10]がある。給湯を太陽熱で100%賄う住宅を実際に建築した事例はわずかながら日本にも存在する。給湯負荷が高い日本において100%太陽熱住宅の実証研究を進め、一般性のある建築方法論を確立させることの意義は大きい。

オーストリアでは太陽熱利用の産業応用を進める中で太陽集熱器や建築設備としてのエンジニアリング技術を育成し、輸出産業とする政策を取ってきている。日本ではこのような産業政策的な視点で太陽熱関連技術が捉えられていない。将来的に再生可能エネルギー利用が進むことを考えれば、集熱器単品の生産ではなく、太陽熱エンジニアリング産業を形成する技術開発が、長期的に日本の技術力を活かすことにつながる。

以上から、要素技術の研究開発に加え、太陽熱を有効かつ経済的に利用するためのエンジニアリングにつなげる系統的な研究開発を推進し、建物と一体的に導入する方法論を確立することが今後の大きな課題である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

欧州では平板型でありながら真空式の太陽集熱器が開発された[11, 12]。集光機能や太陽追尾機能がなくても200℃の高温を得られる。また、国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）のSolar Heating and Cooling Programmeでは低コスト化をめざしてオールプラスチックによる平板型集熱器の開発が進められている[13]。

寒冷地であるカナダ・アルバータ州の52軒の住宅群で、地中を季節間蓄熱に利用して太陽熱で暖房の90%を賄えることが実証されている[10]。数年間の運転の結果、季節間蓄熱が十分に機能する状態が観測されている。

世界最大のソーラークーリングシステムは2011年にシンガポールにあるUnited World College of South East Asiaに設置されている。集熱面積は3,900 m²にも及び、キャンパス内のすべての温水負荷と大部分の冷熱負荷を賄っている[14]。東南アジアは今後冷熱負荷が増加すると見込まれること、冷熱負荷が通年あることから、ソーラークーリングに適した地域である。日本の吸収冷凍機メーカーはインドネシアでソーラークーリングの実証試験を進めている[15]。

ソーラークーリングの冷熱供給の熱源機として吸着冷凍機が利用されている。実用化されている吸着冷凍機は単段型と呼ばれる吸着材熱交換器を2基ペアにして運転する方式であり、70℃程度の温水で駆動できる。さらに低温の60℃程度の温水でも運転可能な

二段吸着冷凍機が提案されている[16]。熱源温度の低温化によって太陽熱を有効利用できる範囲が拡大することが期待される。

## （６）キーワード

太陽熱利用、集熱器、蓄熱、ソーラークーリング、吸収冷凍機、吸着冷凍機、デシカント空調、エジェクタ、熱量計

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・太陽集熱器の試験装置の開発が大学および企業の連携によって進められている。<br>・ケミカル蓄熱などの新しい材料の研究が大学で行われている。<br>・非追尾型集熱器の研究は大学において進められている。 |
| | 応用研究 | ○ | → | ・戸建住宅に太陽熱を利用して燃料消費を半減させるプロジェクト[5]や熱量計の簡易化がNEDOで進められている[8]。<br>・潜熱蓄熱材を用いた蓄熱方式の研究が研究機関や企業で進められている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・平板型集熱器のメーカーが確立している。<br>・ソーラークーリングのための吸収冷凍機、吸着冷凍機、エジェクタ方式、デシカント空調器の製品化ができている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・非追尾型の集光集熱器の研究、ソーラークーリングへの応用が大学において進められている[4]。 |
| | 応用研究 | △ | → | ・トラフ型など高温集熱技術の研究開発が研究機関[17]において進められている。<br>・プラスチック製太陽集熱器の研究が研究機関[17]で行われている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・太陽熱発電は米国内で実用化され、発電事業が行われている。<br>・太陽熱を業務ビルに導入した事例は多数あり。工業プロセスにも一部で使われている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・プラスチックによる平板型集熱器の研究開発がIEAのプログラムとして企業で進められている。 |
| | 応用研究 | ◎ | ↗ | ・真空式の平板型集熱器が企業で開発された。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・小型の吸着冷凍機を供給するベンチャー企業が複数ある。<br>・大規模な太陽集熱器を用いるシステムの開発を扱う企業がある。デンマークでは大規模に太陽集熱する地域熱供給プラントが複数運転している。 |
| 中国 | 基礎研究 | × | → | ・集熱器などの要素技術に関する目立った研究は見受けられない。 |
| | 応用研究 | △ | → | ・太陽熱を利用する建築物の研究が大学で行われている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・中国は世界最大の太陽熱温水器の導入国であり、海外にも製品を輸出している。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・集光集熱による高温熱回収の研究が大学および研究機関で進められている。 |
| | 応用研究 | △ | → | ・太陽熱を活用する建築の研究が研究機関で進められている。 |
| | 産業化 | × | → | ・目立った太陽熱給湯器メーカーは見受けられない。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 東京都環境局　新築住宅への太陽熱新技術等提案事業
http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/energy/renewable_energy/ne2/taiyonetu/new-tech.html
2) (一財)ファインセラミックスセンター. 2014.
太陽熱レシーバ評価のための人工光源シミュレータ開発
http://www.jfcc.or.jp/25_press/r14_2.html
3) A. AKISAWA, et. al. Concentration performance of circular glass tube with internal prisms of non-imaging Fresnel lens, O-Th-6-1, Grand Renewable Energy 2014, 27 July-1 August, 2014, Tokyo.
4) Roland Winston. Thermodynamically Efficient Solar Concentration. UC Solar Symposium, 9 December, 2011.
http://www.ucsolar.org/files/public/documents/12-9-11%20present%20final_R%20Winston.pdf
5) NEDO太陽熱エネルギー活用型住宅の技術開発
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100037.html
6) T. Noguchi, et. al. Investigation of reaction accelerating and analysis model for $Na_2S$-$5H_2O$ chemical heat storage, P-Th-19, Grand Renewable Energy 2014, 27 July-1 August, 2014, Tokyo.
7) 日比谷総合設備（株）.2012. 廃熱・太陽熱利用エジェクタ式冷房システムの実用化について.
http://www.hibiya-eng.co.jp/assets/files/news/2012_12_05_ejyekuta.pdf
8) NEDO 再生可能エネルギー熱利用計測技術実証事業
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100043.html
9) 資源エネルギー庁 あったかエコ太陽熱
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/attaka_eco/df/kankyou.html
10) Drake Landing Solar Community　WEBサイト
http://dlsc.ca/about.htm
11) SRB Energy社　WEBサイト
http://www.srbenergy.com/pages/caracteristicas-del-colector
12) TPV Solar社　WEBサイト
http://www.tvpsolar.com/index.php?context=technology
13) IEA/Solar Heating and Cooling Programme,Task39

http://task39.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Task39-Highlights-20131.pdf
14) Singapore Economic Development Board　WEBサイト
http://www.edb.gov.sg/content/edb/en/news-and-events/news/news-archives/2011/solid-asia-unveils-solar-cooling-system-at-uwcsea-singapore.html/
15) 川崎重工業（株）. 2014. インドネシアで太陽熱利用空調システムの実証試験を開始（川重冷熱工業）
http://www.khi.co.jp/news/detail/20140120_1.html
16) Abul Fazal Mohammad Mizanur RAHMAN, Yuki UEDA, Atsushi AKISAWA, Takahiko MIYAZAKI, Bidyut Baran SAHA. 2012. Innovative Design and Performance of Three-Bed Two-Stage Adsorption Cycle under Optimized Cycle Time, Journal of Environment and Engineering.7(1), 92-108.
17) National Renewable Energy Laboratoryホームページ, http://www.nrel.gov/solar/

### ３．２．３．４　水素エネルギーの利用浸透

#### （１）研究開発領域名

水素エネルギーの利用浸透

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

水素は、環境負荷低減やエネルギーセキュリティ、省エネルギー性、産業振興といった多くの意義を有するエネルギーとして注目されている。現状のところ製造・輸送を中心に研究開発が行われているが、水素の普及にあたっては利用側の技術開発をいっそう推進し、水素の大量利用を実現することが重要である。このため分散型電源、燃料電池自動車と水素ステーション、水素発電など、水素エネルギーの利用に関する研究開発を推進する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

水素に関する研究開発を各チェーン（製造、輸送・貯蔵、利用）で概説すると以下の通りである。

製造については、副生水素、原油随伴ガス、褐炭といった未利用エネルギーや再生可能エネルギーを含む多様な一次エネルギー源からさまざまな方法で製造が可能であり、この点が水素の特長のひとつである。原理的にはほぼ完成された技術が多く、現時点における研究開発項目はコストダウンや水素製造装置の高耐久性化がメインとなっている。

輸送・貯蔵については、すでに水素の特性を踏まえてさまざまな方式が提案されている。具体的には、高圧水素や液体水素といった体積圧縮や相変化により大量の水素を輸送・貯蔵するもの、アンモニア、メチルシクロヘキサンといった化学的に異なる物質に変換し、輸送・貯蔵を容易にするもの、に大別される。日本においてはすでに実用化されている高圧水素は別として、液体水素、アンモニア、メチルシクロヘキサンといった各キャリアにつき、内閣府の国家プロジェクトである戦略的イノベーションプログラム（SIP：Stragitic Innovatation Promotion Program）のエネルギーキャリア分野を筆頭に産官学による積極的な研究開発が行われている [1)]。

利用については、分散型電源、燃料電池自動車(FCV：Fuel Cell Vehicle)＋水素ステーション、水素発電といった各用途に向けた研究開発が国内外で積極的に行われている。本項では水素利用関連の研究開発を中心に記載する。また、水素エネルギーの利用を円滑に行うために必要となる安全性の確保に向けた取り組みなどについても述べる。

a. 分散型電源

代表的な分散型電源のひとつである燃料電池は日本が世界に先駆けて実用化・商用化した技術である。特に家庭用向けの燃料電池については、2009年の発売後、順調に普及台数を伸ばし2013年度末時点で全国における導入台数が8万台以上 [1)] に達している。また、海外展開も開始 [2)] され、今後とも日本企業を中心に世界的な規模でのいっそうの普及拡大が期待されている。

現在実用化済みの燃料電池は、天然ガスやLPGといった化石エネルギーを燃料としており、化石エネルギーによる発電システムと見なすことが一般的であるが、実際にはシ

ステム内部で化石エネルギーを水素に改質し、その水素により発電しており、水素駆動型エネルギーシステムである。

すなわち、水素直接供給により発電が可能であり、燃料電池は水素利用を促進するにあたって重要な技術である。水素駆動型燃料電池は、改質器が不要となるためコンパクト化・低コスト化が図られ、高効率で負荷応答性の高い分散型電源となり得る。すでにNEXT21と呼ばれる実験集合住宅でのフィールドテストも行われており、実現に向けた技術的課題はほぼ解決済みであるが、今後に向けた技術的課題として以下があげられている[3)]。

- 現行型の化石燃料駆動型燃料電池と比較して、高い水素利用率が想定されるため、耐久性を維持しつつ、高い水素利用を可能とする燃料電池の開発・実証。
- 純水素型燃料電池ユニットと組み合わせ可能な水素燃焼型バックアップボイラ（水素バーナーなど）の開発・実証。
- 水素漏洩事故防止の観点から、水素付臭剤などの必要な措置に関する開発・実証。

b. FCV＋水素ステーション

2015年の実用化開始を控えたFCVについては、国内メーカーが世界に先駆けて2014年の発売を発表するなど普及に向けて着々とプログラムが進行している。今後については、燃料電池技術をフォークリフトや船舶などに拡大するとともに、2025年度頃に同車格のハイブリッド車同等の価格競争力をもつことを目指している[3)]。また、欧米においては自動車に対する環境規制がさらに強化されることが想定され、この流れの中でFCVにかかる期待もますます大きくなると考えられる。ついては、この分野で世界的なイニシアティブを担うことを視野に入れた研究開発が欠かせない。

また、FCVの普及にあたっては、燃料を補給するためのインフラ整備が欠かせないが、四大都市圏を中心に2015年度内に100ヵ所程度の水素ステーションを確保する計画である[3)]。現在の水素ステーションの水素の供給源は高圧水素のローリー輸送や炭化水素改質水素が主であるが、今後の普及拡大に向けて、液体水素や有機ハイドライド、アンモニアなどの多様なエネルギーキャリアを活用するべく研究開発が行われている。

c. 水素発電

水素を安定かつ大量に活用するための有力な手段として水素発電の実用化があげられる。水素発電は水素消費段階において$CO_2$を排出しないため、水素製造段階において二酸化炭素貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）などを活用する、もしくは再生可能エネルギーを活用する、などの技術を組み合わせることにより、環境負荷の極めて低い発電方法になる可能性を秘めている。

すでに国内外において水素タービン開発が行われているが、燃焼温度が高く、燃焼速度が速い水素を低 NOx で燃焼するため水噴射型が主流となっている。国内においては、従来型の水素タービンよりも高効率かつ低コストのシステムを目指して、SIPのプログラムにおいてドライ型水素タービンの開発が開始されている。また、同じくSIPのプログラムとして水素エンジンの実用化を目指した要素開発も開始される予定である[1)]。これらの技術の実用化にともない、水素の安定的かつ大規模な需要が発生し、製造・輸送・

貯蔵･利用の一連の水素サプライチェーンが構築され､水素のコストが低下することで、上記の分散型電源やFCVなどへの波及効果が期待されている。

その他、安全性の確保に向けては、国内でも高圧ガス保安法をはじめとした法規制により担保されている｡その一方で､法規制が普及にあたってのネックになる場合もあり、安倍政権の規制改革会議において水素インフラ整備が取り上げられるなど、規制の再点検・見直しも検討されている状況である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

水素エネルギーの利用浸透に向けた研究開発については、国内外において前述した水素エネルギーのさまざまなポテンシャルが認識されており、積極的に推進されている。我が国でも、先般閣議決定されたエネルギー基本計画において「“水素社会”の実現に向けた取り組みの加速」が明記され､基礎的なエネルギーキャリア研究についてはSIPをはじめとしたプログラムが進行するとともに、各事業者も水素の事業化に向けて積極的な技術開発を推進している。

科学技術的課題としては、まずは水素エネルギー利用技術のコストダウンの実現があげられる。例えば、FCVの普及に向けては、2025年ごろに車両価格を従来型車両（ハイブリッド車）との価格競争力を有することが目標であり、水素価格についても2015年にガソリン車の燃料代と同等以下、2020年ごろにハイブリッド車の燃料代と同等以下、の実現が目標となっている [3)]。さらには水素発電については、2020年代後半にプラント引き渡しコストで30 円/$Nm^3$程度､すなわち発電コストで17 円/kWh程度を下回ることを目指しており、この実現に向けた技術開発が必要である [3)]。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

エネルギー自給率の低い我が国にとって、多層化・多様化した柔軟なエネルギー需給構造の構築は極めて重要であり、水素はその実現に向けた重要なエネルギー源である。国内では内閣府が文部科学省と経済産業省と連携してSIPを立ち上げ、その中の研究テーマのひとつとしてエネルギーキャリアの研究開発を推進している [1)]。ここでは、海外余剰水素や再生可能エネルギー由来水素を活用した、液体水素、有機ハイドライド、アンモニアといった多様な水素エネルギーキャリアの実用化に向けた研究開発を、製造・輸送・貯蔵そして利用の各チェーンをにらみながら実施しており、特に利用については水素タービン、水素エンジンの開発、アンモニアを活用した燃料電池やアンモニア発電の開発などを行う計画である。

### （６）キーワード

水素､分散型電源､燃料電池､燃料電池自動車､水素ステーション､水素タービン、水素エンジン、液体水素、有機ハイドライド、アンモニア

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・SIPをはじめとする研究開発プログラムが進行中であり、水素利用の分野においても基礎研究が進められている[1)]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・特に水素エネルギーキャリアの実用化に向けて、有機ハイドライド方式、液体水素方式、アンモニア方式といった多様な研究開発が進行中である。<br>・SIPにおいて、2020年東京オリンピック・パラリンピックにおける技術実証をマイルストーンにおいており、今後のいっそうの研究開発の加速が計画に織り込まれている[1)]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・家庭用燃料電池については順調に普及拡大が進んでいる。また、積極的に海外展開を図る企業も現れており、世界的に見ても最先端と位置づけられる。<br>・2014年にFCVの発売がアナウンスされ、また国内100か所程度の水素ステーション建設も行われる計画である。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・米国エネルギー省（DOE : Department of Energy）において水素関連技術の技術開発を実施しており、毎年1億ドルの予算を計上している。ただし、オバマ政権においては、一時期電気自動車とプラグイン・ハイブリッド車の開発に力点が置かれ、水素関連の技術開発については削減傾向にあったが、最近水素への関与を強めつつある[3)]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・米国再生可能エネルギー研究所(NREL : National Renewable Energy Laboratory)により「Power to Hydrogen」プロジェクトが進められている。風力による電力から水素を製造し、電解槽の寿命や電力系統との親和性、規制との適合性などを確認している[4)]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・カリフォルニア州を中心に燃料電池車および水素ステーションの普及が進められており、毎年2,000万ドルを投じて州内で100か所まで水素ステーションを整備することを発表済である[5)]。<br>・一方、州レベルの動きを支援しつつ、FCV普及と水素ステーション展開を全米に拡大するために、DOEは官民パートナーシップ「H2USA」を立ち上げるなどの対応をおこなっている[6)]。<br>・燃料電池については、数100 kW級SOFCを実用化しており、多数の顧客企業に導入を図っている[7)]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・広範囲において研究開発が進められている。<br>・有機ハイドライド系の一種であるカルバゾール系（複素環式）化合物をキャリアに適用する研究がドイツで進められている[8)]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・ドイツを中心として、欧米各国でも再生可能エネルギー由来の電力を水素に変換する Power to Gas の取組が積極的に行われている。<br>・水素タービンについてはイタリアのENEL社が運転を行うなど実用化への取り組みが進んでいる。なお、この水素タービンは蒸気噴射型である[9)]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・各国で水素ステーション普及に向けた取り組みが進められている[10)]。<br>・ドイツでは連邦政府による「水素・燃料電池技術革新プログラム（NIP）」により2007～2016 年の10 年間で合計14 億ユーロ（官民が半額ずつ出資）を水素・燃料電池技術開発に投資中である[10)]。<br>・英国では英国は3 つの省（運輸省、エネルギー・気候変動省、ビジネス・イノベーション・職業技能省）が連携して、水素エネルギーの実用化を目指している。特にエネルギー・気候変動省は、$CO_2$ 削減の切り札としての水素エネルギーに注目している[10)]。<br>・北欧においては、ノルウェーの水素ハイウェイ計画「HyNor」、デンマークの水素ハイウェイ計画「HydrogenLink」、スウェーデンでの水素ハイウェイ計画「HydrogenSweden」などが進められており、これらのスカンジナビア諸国はスカンジナビア水素ハイウェイパートナーシップ（SHHP）を組み、連携して水素インフラ構築に進んでいる[10)]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・基礎レベルではあるが、再生可能エネルギーとともに水素関連研究開発を実施している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・中国科学院や大学を中心に研究開発を推進している。 |
| | 産業化 | △ | → | ・今後増加するエネルギー需要への対策として再生可能エネルギー導入に関する政策がとられている。また、各主要都市においてハイブリッド車、電気自動車、燃料電池自動車などの次世代自動車を1,000台以上導入するプログラムを実施している [11]。<br>・燃料電池自動車については、2014年に全国的なデモを実施するとともに2015年に100台生産予定である [8]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・水素貯蔵合金などの開発が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・未来創造科学省を中心に第三次科学技術基本計画（2013～2017年）を策定した。推進課題「未来エネルギー･資源の確保･活用」で水素エネルギー技術が国家戦略技術にあげられている [12]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・燃料電池自動車を2025年までに世界市場に180万台、水素ステーションを2020年までに168か所建設の計画である。FCVについては、2013～2015年にEUに合計90台を導入予定であり、光州広域市でも2014年6月に運用を開始している [8]。<br>・「New and Renewable Energy（NRE）導入政策」により現状全エネルギーの3.18%の導入状況であるが、2035年に一次エネルギーの11%を導入する計画である。これに伴いNRE導入支援策も整備されている [8]。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）独立行政法人科学技術振興機構　SIPエネルギーキャリア　WEBサイト
http://www.jst.go.jp/sip/k04.html
2）パナソニック（株）. 2013. 欧州初の家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの販売を開始
http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/2013/09/jn130910-3/jn130910-3.html
3）経済産業省. 2014. 水素・燃料電池戦略ロードマップ
http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004-2.pdf
4）NREL Hydrogen and Fuel Cell Research
http://www.nrel.gov/hydrogen/proj_wind_hydrogen.html
5）California Fuel Cell Partnership カリフォルニア ロードマップ（概要版）
http://cafcp.org/sites/files/CaFCP_RoadMap2012_JP_CaFCPUP_0.pdf
6）Hydrogen and Fuel Cells Program $H_2$USA Update
http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_apr14_4_markowitz.pdf
7）Bloomenergy WEBサイト
http://www.bloomenergy.com/

8) 相澤芳弘. 2014. WHEC全体総括. HESS 第145回定例報告会
9) 科学技術・学術政策研究所 Science & Technology Trends October 2010.トピックス4 イタリアで世界初の水素火力発電設備が竣工
http://data.nistep.go.jp/dspace/bitstream/11035/2182/1/NISTEP-STT115-7.pdf
10) NEDO 水素エネルギー白書
http://www.nedo.go.jp/content/100567362.pdf
11) Fuel Cell Today. Fuel Cell and Hydrogen in China 2012
http://www.fuelcelltoday.com/media/1587227/fuel_cells_and_hydrogen_in_china_2012.pdf
12) 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 科学技術・イノベーション動向報告　韓国編～2013年度版～
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/OR/CRDS-FY2013-OR-03.pdf

## 3.3 原子力区分

2.2.2 で述べたように、原子力区分においては、（1）原子力をより安全に維持・活用する場合に取り組むべき研究課題、（2）原子力の将来にかかわらず取り組むべき研究課題、（3）原子力に依存しない場合に取り組むべき研究課題、の３つの観点から構成し、原子力の利用を社会的な観点から俯瞰的に捉え、諸課題を図のように抽出・整理した。領域の構成は、「原子力発電の社会的位置づけが明確となる目次構成とすること」、「持続可能な社会が実現していくためのグローバルな視点、地球全体の視点を入れること」、「社会がどう受け入れるか考慮すること」を基本的な方針とした。

（1）原子力をより安全に維持・活用する場合に取り組むべき研究課題　については、以下の 8 領域を選定した。

3.3.1.1　リスク評価と管理の手法
3.3.1.2　原子炉の設計・建設・維持
3.3.1.3　原子炉の保全学
3.3.1.4　原子力に関する防災
3.3.1.5　過酷事故への対応
3.3.1.6　原子力基盤技術の開発
3.3.1.7　新型炉（核融合含む）の研究・開発
3.3.1.8　核燃料サイクルの技術

（2）原子力の将来にかかわらず取り組むべき研究課題　については、以下の 14 領域を選定した。

3.3.2.1　高レベル放射性廃棄物の管理・処分
3.3.2.2　低レベル放射性廃棄物の管理
3.3.2.3　使用済み核燃料の管理
3.3.2.4　プルトニウムの管理手法
3.3.2.5　ウラン廃棄物の管理手法
3.3.2.6　原子炉の廃止措置（デコミ）
3.3.2.7　福島第一原子力発電所事故への対応
3.3.2.8　環境修復の手法
3.3.2.9　環境・人体への放射線影響（防護含む）
3.3.2.10　原子力に関するリスクと人間・社会
3.3.2.11　原子力に関する規制
3.3.2.12　3S（原子力安全、核セキュリティ、保障措置）
3.3.2.13　原子力に関する国際的視野
3.3.2.14　原子力の政治経済学

（3）原子力に依存しない場合に取り組むべき研究課題　については、以下の 1 領域を選定した。

3.3.3.1　国際的視野、社会的視野を含んだ原子力に依存しないための戦略
なお、原子力発電に依存しない場合において（2）の 3.3.2.3 ～ 3.3.2.6 の 4 領域は、特に考慮すべき共通項目であることを明記した。

これ以降、各領域の詳細な内容を記述する。
なお、原子力区分に関しては、多くの略語が本文中に記載されているため、447 頁以降に略語一覧を掲載した。

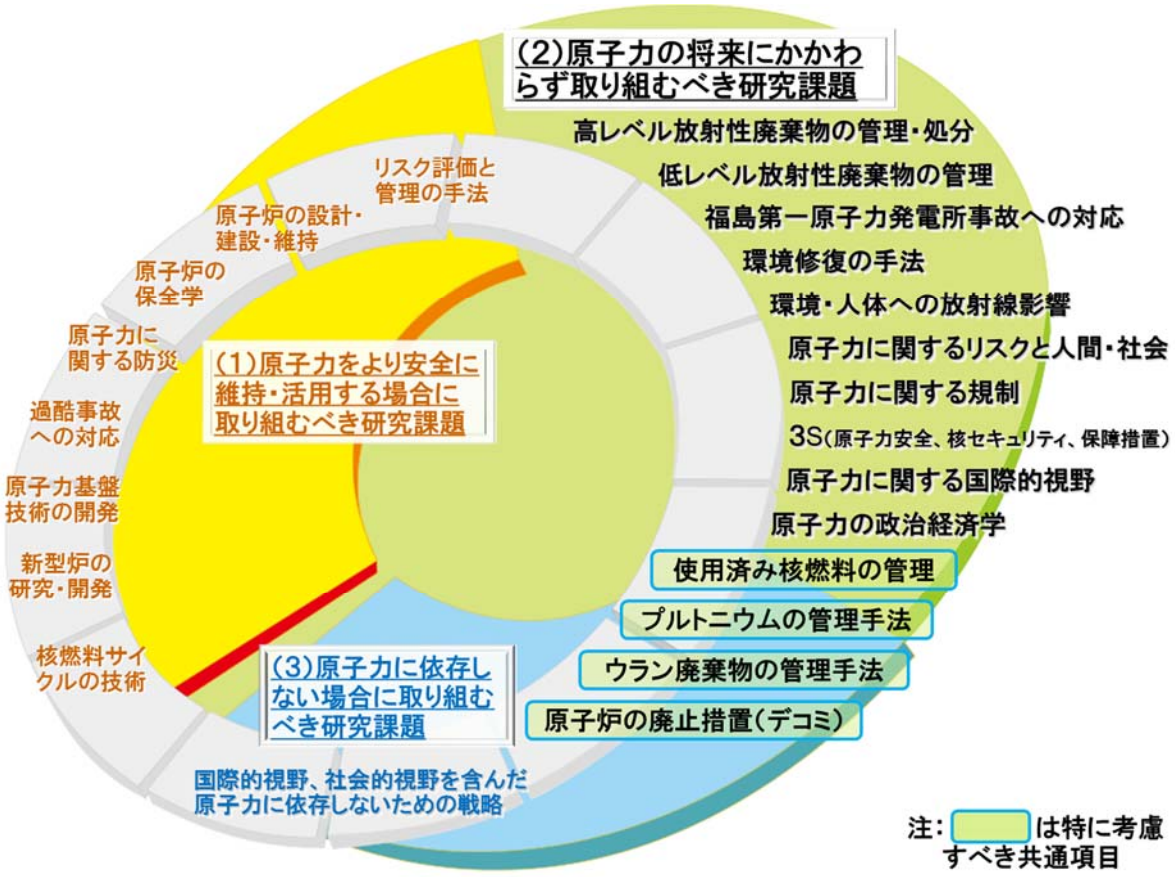



**図 2.2.20　原子力区分の俯瞰図（再掲）**

## ３.３.１　原子力をより安全に維持・活用する場合に取り組むべき研究課題

### ３.３.１.１　リスク評価と管理の手法

#### （１）研究開発領域名

リスク評価と管理の手法

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子力施設におけるさまざまなリスクを定性的･定量的に評価する手法の開発。また、その評価結果を活用し、原子力施設の安全性向上対策などを効果的に行うための管理手法の開発。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島第一原子力発電所事故）により、原子炉施設、再処理施設、核燃料加工施設などの原子力施設全般の安全性向上が極めて大きな課題になっている [1, 2]。

一般に、科学技術において絶対安全は存在せず、安全な状態とはリスクが受容可能なレベルまで低減されていることとされている。すなわち、この受容可能なレベルを安全上の目標（安全目標）と考えることができる。安全目標を設定する際には、「どこまで安全であれば十分に安全か？（“How safe is safe enough？”）」が一つの大きな問題となり、古くから繰り返し問われてきた。原子力関連施設においては、原子力施設が存在することによる付加的なリスクが、日常のリスクに比べて有意なレベルでないことという考え方が国際的に採用されている [3]。

安全の定義上､原子力施設の安全性は､それらのリスクを定量評価することによって、初めて明らかにできる。そのリスク評価手法は、リスクトリプレットと呼ばれる、以下の三つの質問に対する答えを与えるものと考えることができる：What can go wrong？（何がどのように起こるのか)、What is the likelihood of that happening？（どれぐらい起こりやすいか)、What are the consequences？（起こった場合の影響は)。リスク評価手法は、評価対象とするハザードの特徴に応じて定性的から定量的までさまざまな手法が存在する [4] が、以下では代表的な手法についてその概要を説明する。

1) 定性的評価によるスクリーンアウト手法：福島第一原子力発電所事故の主要因が大津波であったように、原子力施設の外部で発生するハザードは、施設の安全性に大きな影響を及ぼす可能性がある。したがって、地震、津波、洪水、高潮、火山、森林火災、航空機落下など数十にも及ぶ外的ハザードに対するリスクを評価対象とする必要がある。これらのハザードの中には、明らかに施設の安全性に影響を及ぼさないものもあり、①発生頻度が極めて小さいことが明確か、②当該のハザードの影響が及ぶ範囲内にプラントが存在しないことが確認できるか、③当該のハザードが進展していくタイムスケールがプラントの寿命に比べて十分長いか、④ハザードが到達したと想定しても炉心損傷につながる起因事象を引き起こさないか、などの判断基準により、当該ハザードをより詳細なリスク評価の対象とすべきかどうか、予備的にスクリーニングすることが可能である。本手法は、比較的実施が容易であるが、一方で非常に複雑な事故進展などを扱うことはできない。福島第一原子力発電所事故の背後要因の一つとし

て、外的ハザードに対する包絡的なリスク評価が行われていなかったことが指摘されており [2]、日本原子力学会において外的ハザードに対するリスク評価手法の標準策定が進められている。

2）保守的バウンディング評価：定性的評価により除外できなかったハザードについて、保守的な（安全側の）解析条件設定を行い、その条件においてもハザードが施設にリスクを与えないことを評価する手法である。条件設定によっては、保守性が非現実的なほど大きくなる可能性がある。

3）確率論的リスク評価：確率論的リスク評価（PRA：Probabilistic Risk Assessment）は、原子力施設の内外で発生するハザードに起因して発生する炉心損傷確率、格納容器閉じ込め機能喪失確率、放射性物質放出量、周囲への影響などを定量評価する手法である。核燃料が溶融するなど、炉心が大規模に損傷する炉心損傷事故が発生する確率の評価をレベル 1PRA、事故時の放射性物質閉じ込めのために設置されている格納容器の閉じ込め機能喪失が発生する確率およびその際に外部に放出される放射性物質量の評価をレベル 2PRA、外部に放出された放射性物質による周囲への影響評価をレベル 3PRA と呼んでいる。確率論的リスク評価では、時間とともに進展する事故の様相（事故シーケンス）を、機器動作や運転員操作の成功・失敗により枝分かれする樹形図状のイベントツリーによって展開する。機器動作や運転員操作などの成功・失敗確率を与えることにより、炉心損傷に至る事故シーケンスを特定し、また、その確率を定量的に評価することができる。この評価結果は、プラントの脆弱性を特定する際に特に有用であると考えられている。確率論的リスク評価は、原子力分野で開発された手法で [5, 6]、大規模かつ複雑な体系におけるリスクを定量評価できることから、航空や宇宙など他分野においても利用されている。確率論的リスク評価は、事故シーケンスを網羅的に確認できる、複雑なシステムにおけるサブシステム間の干渉効果を定量評価できる、評価結果の不確かさを確認できるなどの優れた特徴がある一方、解析モデルを作成するのに非常に大きな労力を要する、非常にまれな事象を扱うため、確率を実績データに基づいて設定できない場合がある、未知のメカニズムに基づく事故進展を取り扱うことができない、モデルにあたって仮定や前提を用いる必要がありその妥当性の吟味が必要、操作ミスあるいはリカバリー操作などの人的要因の取り込みにさらなる検討が必要、などの課題がある。外的ハザードに対する確率論的リスク評価は、今後取り組みを強化していく必要があるが、特に影響が大きいと考えられる地震および津波に対する確率論的リスク評価手法が日本原子力学会の標準として整備されている [7, 8]。

4）安全余裕度評価（ストレステスト）：原子力施設の事故は、「想定外」により発生する場合がある。この「想定外」には三通りあり、①事象自体は考慮していたが実際に発生した事象が設計時の想定を上回っていた場合、②事象自体は認識していたが発生確率が低いと認識し設計時に想定していなかった場合、③事象自体が認識されていなかった場合、である。このような「想定外」が発生した場合でも、設計限界に至るまでの安全余裕により、その影響を吸収できる場合がある。そこで、さまざまなハザードに対する安全余裕を評価することで、原子力施設のリスク低減の傍証とすることが可能であると考えられる。これが安全余裕度評価（ストレステスト）と呼ばれるもので

あり、欧州において、原子力施設の安全余裕の評価手段の一つとして用いられている[9]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

1）包絡的外的ハザード評価手法の開発

原子力施設において考慮すべき外的ハザードの種類は極めて多く、これらの外的ハザードによるリスクを包絡的に評価する手法を検討・開発していく必要がある。すべての外的ハザードに対して、詳細な確率論的リスク評価を適用することは難しいため、効果的な定性的スクリーニングの利用も合わせて検討を行っていく必要がある。

2）ハザードカーブの設定

一般に外的ハザードは、その影響が大きくなるほど発生頻度が減少する。ハザードの大きさと発生頻度の関係を評価したものをハザードカーブと称する。地震や津波によるリスク評価において、ハザードカーブは重要な入力となるが、これを適切に設定する必要がある。ハザードカーブの設定は、関連する学協会間で、その利用目的を十分に共有した上で密に連携を取りつつ実施する必要がある。

3）標準の策定

リスク評価手法は、実施手順や評価条件を明確に文書化した標準やガイドの形にすることが望まれる。リスク評価は、評価範囲（レベル 1:炉心損傷、レベル 2:格納容器機能喪失、レベル 3:敷地外影響）、原子力施設の状態（例えば発電用動力炉であれば、停止時、出力運転時）、事故の原因となる事象（施設内部、施設外部自然現象、施設外部人的事象）を考慮して行う必要があるため、そのスコープはこれらの組み合わせとなり広範囲にわたる。これらの組み合わせのうち、より優先度が高いスコープに対して検討・開発・標準策定などを進めていく必要があり、そのためには、関連する学協会などでの協議が必要である。

4）複数ハザード・マルチユニット・マルチサイトに対するリスク評価

外部ハザードは、複数のハザードを引き起こすことがある（例：地震の後の火災）。このような複数のハザードが同時に発生する場合のリスク評価手法についての取り組みを強化する必要がある。また、外部ハザードは複数の原子炉（マルチユニット）、複数の発電所サイト（マルチサイト）において同時に影響を及ぼす可能性があり、このような状態におけるリスク評価の定量化も重要である。

5）リスク評価手法の高度化

最先端のシミュレーション技術を用いることで、地震動による原子力施設の建屋および内部に設置されている機器の振る舞い、津波の遡上と波力が施設に及ぼす評価などを、詳細な物理モデルに基づいて評価可能となりつつある。現在のリスク評価においては、設計で想定されたハザードがある大きさを超えると、設備などが機能喪失するとして保守的な評価がなされている場合が多い。しかし、実際には、設計時における機器の耐力の余裕、ハザード評価時の保守的な前提などにより、潜在的な安全余裕があると考えられる。最先端のシミュレーション技術により、より現実的な耐力評価を行うことにより、原子力施設が潜在的に有している安全余裕を定量化することが可能となり、これによりリスク評価結果の不確かさを低減することが可能となる。

6）人材の確保と養成

国内においては、これまで確率論的リスク評価などのリスク評価に対する取り組みが、特に大学において限定的であったことから、リスク評価全般に係わる人材が不足している。大学での人材育成も合わせて原子力関連工学科、原子力関連専攻以外でも体制の強化に取り組む必要がある。

## （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

福島第一原子力発電所事故に関する各種報告書では、リスク低減の取り組みを体系的に検討する上で、これまで確率論的リスク評価が効果的に活用されてこなかったことから、リスクの定量評価手法を活用し、安全性向上策を構築すべきであるとの指摘がなされている [1)]。

2013 年 7 月に施行された原子力規制委員会による動力炉に対する新規制基準においては、炉心損傷を含む重大事故への安全対策を求めている。この際、原子炉の炉型（加圧水型軽水炉、沸騰水型軽水炉）ごとに、代表的な事故シーケンスを確率論的リスク評価に基づき設定し、さらに、個別プラントにおいて確率論的リスク評価を実施することで、個別プラントの特性を加味した形で有意な炉心損傷・格納容器損傷を引き起こす事故シーケンスの同定を求めている。また、これらの事故シーケンスに対して安全対策の有効性評価を求めている。5 年ごとに原子力事業者が実施する「総合的な安全性評価」においては、個別プラントに対して確率論的リスク評価を実施し、安全対策を行う上でこの結果を活用することを求めている。このように、リスク評価手法が規制に利用されつつある。

福島第一原子力発電所事故を受けて設置された総合資源エネルギー調査会原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループにおいては、リスクマネジメントが最重要課題として取り上げられ、低頻度の事象を見逃さない網羅的なリスク評価の実施、深層防護の充実を通じた残余のリスクの低減、我が国特有の立地条件に伴う地震・津波などの外的事象に着目したプラントごとの事故シーケンスおよびクリフエッジの特定と、既存のシステムでは想定されていない事態への備えおよび回復を含むレジリエンスの向上などが提唱されており、リスク評価への取り組みが原子力事業者の動きとして行われている [10)]。

## （６）キーワード

安全目標、定量的リスク評価、定性的リスク評価、総合的リスク低減、ストレステスト、外的ハザード評価、確率論的リスク評価

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・福島第一原子力発電所事故の教訓として、確率論的リスク評価の活用を含むリスク評価の重要性が再認識されている。標準の策定、リスク評価手法の高度化などさまざまな取り組みが精力的になされている。<br>・一方で、福島第一原子力発電所事故以前の取り組みは低調であったことから、米国などに比べると遅れがある。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・発電用原子力プラントやそのほかの原子力施設における重大事故評価の際、確率論的リスク評価によって事故進展シナリオの特定が行われ、この事故シナリオに対して安全性評価が求められるなど、規制への導入が進んでいる。ただし、取り組みは緒に就いたばかりである。 |
| | 産業化 | × | → | ・リスク評価手法ソフトウエアの自主開発などの取り組みはまだなされていない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・1970 年代から確率論的リスク評価に対する取り組みがなされ、広い範囲で基礎研究が行われている。外的事象に対する包絡的なリスク評価も 1990 年代に実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・1979 年のスリーマイル島 2 号機事故を契機として、本格的にリスク情報を活用した規制が行われている。すべての規制上の意思決定において、確率論的リスク評価を活用する方針がとられている。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・確率論的リスク評価の際、国際的に用いられているソフトウエアが開発され、商業ベースで提供されている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・原子力発電所を多数有するフランスでは、1990 年代初頭から確率論的リスク評価が実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・2012 年に、従来の安全評価（決定論的手法に基づく）を補完するものとして、規制において確率論的リスク評価を導入することをフランスが決定。<br>・英国では、1980 年代にサイズウエル B 原子力発電所（加圧水型軽水炉）導入の際にレベル 1～3 の確率論的リスク評価が実施されている。<br>・フィンランドでは、1980 年代に設定された規制指針において、新設炉に対して設計時に考慮すべき確率論的設計目標が示されている。 |
| | 産業化 | × | → | ・商業用ソフトウエアの開発など、目立った動きはみられない。 |
| 中国 | 基礎研究 | × | → | ・リスク評価手法に関する国際会議などにおいては、研究開発に関する報告はあまりなされていない。 |
| | 応用研究・開発 | × | → | ・応用研究について、目立った動きはみられない。 |
| | 産業化 | × | → | ・産業化について、目立った動きはみられない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・リスク評価手法に関する国際会議などで研究開発に関する報告がなされている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・応用研究について、目立った動きはみられない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・産業化について、目立った動きはみられない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 「原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書」, 原子力災害対策本部, (平成23年).
2) 「福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言: 学会事故調 最終報告書」, 日本原子力学会, (2014年).
3) 「平成15年度版原子力安全白書」, 第3章, 原子力安全委員会, (平成15年).
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/hakusyo/hakusyo15/mokuji.html
4) “Perspectives Gained From the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) Program,” NUREG-1742, (2002).
5) J. W. Hickman, et al. “PRA Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants,” NUREG/CR-2300, NRC, (1982).
6) Lee McCORMICK (著), 西原 英晃, 杉本 純, 村松 健(訳), 「原子力発電システムのリスク評価と安全解析」, 丸善出版, (2013).
7) 「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準: 2007(AESJ-SC-P006:2007)」, 日本原子力学会, (2007).
8) 「原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2011(AESJ-SC-RK004:2011)」, 日本原子力学会, (2011).
9) http://ec.europa.eu/energy/nuclear/safety/stress_tests_en.htm
10) 総合資源エネルギー調査会原子力の自主的安全性向上に関するWG会合資料, (2013～2014).
http://www.meti.go.jp/committee/gizi_8/21.html#anzen_wg

### ３．３．１．２　原子炉の設計・建設・維持

#### （１）研究開発領域名

原子炉の設計・建設・維持

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

主として発電用原子炉施設の設計、建設および維持に関わる研究および開発

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

現在、世界各国における発電用原子炉の主流は、軽水炉である。本稿では、主として発電用軽水炉の設計、建設および維持に関わる研究・開発について述べる。

1）設計・建設

米国において 1950 年代に開発された加圧水型および沸騰水型の 2 タイプの軽水炉が日本国内に導入され、使用されている。1950～1960 年代中旬にかけて建設された原子炉は第 1 世代炉と呼ばれ、日本国内では旧原子力研究所に建設された動力試験炉（JPDR、廃止措置済）がこの世代に相当する。第 2 世代炉は 1990 年頃までに建設されたものであり、発電用原子炉としては敦賀 1 号機（沸騰水型）、美浜 1 号機（加圧水型）など、実用化後のもっとも初期の発電プラントを含んでいる。第 2 世代炉の建設は、当初、米国の原子炉メーカーからの技術導入によって進められ、後に国産化率が向上した。第 3 世代炉は、第 2 世代炉の運用経験を踏まえ、国内の技術開発を元に安全設備の強化、熱効率の向上、設計の標準化などが進められたものであり、1990 年頃以降に建設されている[1,2]。

現在の最新の原子炉は、第 3+世代と呼ばれるもので、国内メーカーが開発した ABWR、APWR、米国 Westinghouse 社が開発した AP1000、米国 GE 社が開発した ESBWR、フランス フラマトム社が開発した EPR などがその代表例である。第 3+世代炉心は、反応度制御系の多様化、冷却系の多重化、系統分離の強化、物理現象に基づき動作に動力源を要しない受動安全系の導入、航空機落下への設計対応、過酷事故への設計対応、長期間の全交流電源喪失への対応など、第 2, 3 世代炉と比べより強化された安全設備が導入されている。第 3+世代炉は、ほぼ実用化の段階に入っており、海外において新規原子力プラントとして導入が進みつつある[3]。

第 4 世代炉は、2030 年以降に導入が計画されている革新型の原子炉であり、現在研究が進められている。受動安全系の大幅な導入、物理的な現象を用いた原子炉の反応度制御（固有安全性）の強化、核物質の軍事転用を困難とする技術の導入（核拡散抵抗性・核物質防護性）、発電コストの低減（経済性）などを目標として、超臨界圧軽水炉、ナトリウム冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス炉、ガス冷却高速炉、溶融塩炉の 6 タイプが第 4 世代原子力システム国際フォーラムで選定され、研究開発が進められている[4]。

近年、米国では小型・長寿命でモジュール型の原子炉が注目を集めており、エネルギー省が研究資金を提供している。従来のように大型の原子炉を単独で設置するのではなく、小型の原子炉を複数基設置する考え方である。原子炉を小型化することで原子炉停止後の崩壊熱除去が容易になるなど、固有安全性・受動安全性が向上する反面、スケー

ルメリットが活かしにくくなり、建設コストが上昇する可能性がある。これらの中小型炉は、既存の電力ネットワークによる電力供給が困難な遠隔地などでの電力・熱供給にも合わせて期待が持たれている。

福島第一原子力発電所事故以降、国内では、原子力への依存度をできるだけ低減する方向となっている。一方、海外においては、特に新興国を中心に旺盛なエネルギー需要に応える形で、新規原子力発電所の建設計画が進められている。国際エネルギー機関によると [5]、世界の原子力発電の発電量は、2011 年の 2584TWh から、2035 年には 4294TWh に約 70%増加する見通しが示されている。アジアにおいては、中国において 100 基以上、インドにおいて約 40 基の建設計画があるなど、原子力の大幅な導入が計画されている。またベトナム、タイ、マレーシア、アラブ首長国連邦、サウジアラビア、トルコなどで新規に原子力を導入する計画が進められている [3]。

2）維持

国内においては、1960 年代中頃から商業用軽水炉が導入され始めており、運転開始後、30 年以上経過している経年プラントの数が増えている。原子力発電プラントでは、原子炉圧力容器、格納容器、ベースマット（基礎）コンクリートなどの少数の例外を除き、機器の交換が可能であり、定期検査時に行う点検結果などから機器の劣化状況を把握・予測し、予防的に機器の交換を行っている。取替が困難な機器については、劣化の状況を定期的に計測・評価している。また、運転開始後 30 年を迎える原子力発電プラントについては、30 年を超えるまでに、原子炉施設の安全性を確保するための機器・設備について経年劣化に関する技術評価を行い、この評価結果に基づき、30 年を超えてからの 10 年間に実施すべき保守・維持管理に関する方針を定めている。経年劣化に関する技術評価については、安全確保の観点から、非常に幅広い研究開発がなされている。

国内においては、2012 年に改訂された原子炉等規制法により、発電用原子炉施設の運転期間は、運転開始後 40 年とされている。ただし、原子力規制委員会の認可を受けることで、1 回に限り 20 年間を超えない期間（政令で定める）において、運転期間を延長できるとされている。海外においては、米国やスウェーデンにおいて、機器の余寿命などの評価を通じて安全性確認が行われ、運転開始後 60 年までの運転許可が発給されつつある状況である。

また、維持のみならず、福島第一原子力発電所事故を受けて、既存の軽水炉に対する安全対策が強化されつつある。従来の規制では事業者の自主的対応とされてきた炉心損傷などの過酷事故への対応が新たに規制要件化され、既設の原子力発電所に対しても、バックフィットの形で対応が要求されている。新規制基準においては、意図的な航空機落下などの人為事象に対する対応も要求されている。このため、原子炉建屋と離隔された場所に、過酷事故に対応するための制御盤や冷却系などの安全機器を新たに設置することを求めている。また、格納容器が過酷事故時の過大な圧力により損傷するリスクを低減するため、格納容器圧力を低減するフィルタードベントなどの設置が要求されている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

1）原子炉設計技術の維持・発展

国内において、原子力への依存低減の方向から新規原子力発電所の設置が困難である状況のもと、原子炉の設計技術の維持・発展が大きな課題になる [6]。伊勢神宮の遷宮にみられるように、技術の伝承は20年単位で行っていく必要がある。一般に20年経過すると技術を所有している人材が入れ替わることから、技術伝承が困難になると言われている。米国では、1970年代以降、30年以上にわたって新規発電用プラントの建設がなかったが、その間に原子炉圧力容器の製造技術などが失われ、現在では、大型機器の多くを海外（特に日本）に依存している状況である。原子炉の設計技術は、安全確保のためにも不可欠であることから、その維持に対する取り組みをどのように進めていくかが課題となる。

2）サプライチェーンの確保

原子力発電所の設計・建設・維持は、非常に幅広い分野に及ぶ。したがって、いわゆる原子炉設計メーカーのみならず、幅広いサプライチェーンが存在して成り立つものである。一方で、2014年8月現在、国内で稼働している原子力発電所はなく、原子力発電所の停止期間が延びるほど、このサプライチェーンを維持することが困難な状況になると予想される。

3）人材の確保

福島第一原子力発電所事故の後、原子力分野に進む学生の数が減少しており、将来的に原子力発電所の設計・建設・維持に関する活動に大きな影響が出ることが懸念されている。特に、安全確保の面から影響が出る可能性があることが大きな課題としてあげられる。原子力は総合工学であることから、原子力分野のみならず、土木・機械・電気工学などから原子力に係わる人材を集める方策についても検討が必要である。

4）経年評価技術の高度化

現在、経年劣化の評価は、個々の機器に対して実施されている。この評価結果は、機器の取替やメンテナンスなどの保全活動の入力として用いられている。一方、将来にわたって、個々の機器の経年劣化がプラントの安全性に与える影響を定量的に評価するためには、1)個々の機器の経年劣化予測、および2)原子力発電所をシステムとしてみたときの各機器の経年劣化の影響、の二つの観点から評価を行う必要がある。経年劣化の進展予測を行うためには、さまざまな劣化モードに対して物理的・現象論的な理解を深める必要があるが、特に材料系の劣化に関しては、まだ十分な理解が得られていないものもあり、継続して物理的現象の解明に取り組む必要がある。これらの経年劣化の予測を受けて、各機器が地震などの外的ハザード時に機能喪失する確率を評価し、その機能喪失確率を確率論的リスク評価の入力として用いることで、個々の機器の経年劣化事象がプラント全体のシステム安全にどの程度影響するかを定量的に評価することが可能となる。このような取り組みはまだ緒に就いたばかりであり、経年プラントの数が増加して行く中、今後の進展が期待される。

5）安全対策の高度化

福島第一原子力発電所事故の教訓を受け、既設の原子炉に対する安全性の向上策を積極的に行う必要がある。このためには、例えばリスク情報の活用など、従来十分に取り

組まれていなかった課題を系統的に解決していく必要がある。その観点から、安全性の高度化に必要となる技術ロードマップの策定を通じて研究課題を整理しておくことが望まれる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

現在、米国、中国、フィンランドにおいて第 3+世代炉の建設が進められている。また、米国内においては、複数の立地点において、第 3+世代炉の導入計画があり、米国原子力規制委員会（NRC：Nuclear Regulatory Commission）の認可を受けつつある状況である。

第 3+世代炉は、もともと動力源を必要としない受動的な安全系統が特徴の一つであったが、福島第一原子力発電所の事故後、その重要性が再認識され、特に長期間の全交流電源喪失への対応が強化されている。第 3+世代炉では、受動系の安全機器により、72 時間にわたる余裕時間（運転員が介入しなくても安全が保たれる期間）が一般的に確保されている。

高温ガス炉は、その高い固有安全性能から、あらたに脚光を浴びている [7]。この炉型では、燃料を含む微粒子を炭化ケイ素（SiC）で被覆し、その被覆粒子燃料を黒鉛からなる母材の中に分散させた形で燃料コンパクトを作成し、この燃料コンパクトを減速材の黒鉛ブロック中に規則的に配置することで炉心を構成している。冷却は、一般的にヘリウムガスが使用されている。高温ガス炉は冷却材出口温度が非常に高い（900℃以上、軽水炉は 300℃程度）ことから、この熱そのものを利用して化学的なプロセス（IS プロセス）を通じて水素製造などを行うことが検討されている。高温ガス炉は、被覆粒子燃料および減速材の黒鉛の耐熱性能が非常に高いこと、冷却材に不活性のヘリウムガスを使っていること、炉心の温度上昇により核分裂が抑制される特性があること、炉心内の黒鉛の熱容量が大きく温度変化が緩やかであることなどから、高い固有の安全性を有している。そのため、長期間の全交流電源喪失など、軽水炉では厳しい事象においても、輻射と自然対流により崩壊熱を除去可能であり、動的機器の動作を期待しなくても炉心損傷に至ることはない設計が可能であるとされている。我が国においては、2014 年に策定されたエネルギー基本計画において、高温ガス炉の開発を国際協力のもとに推進することが示されている。

### （６）キーワード

第 3 世代炉、第 3+世代炉、第 4 世代炉、高温ガス炉、経年劣化、メンテナンス、サプライチェーン

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・福島第一原子力発電所事故後、安全研究基盤の再構築が急がれている。また、原子力分野に関わる人材を確保・育成する方策について政府としての取り組みがなされている。<br>・原子炉の安全評価に使用するソフトウエアの一部に海外（特に米国）のものが使用されており、ソースコードの開示制限が生じた場合の影響などが懸念されている。このため、ソフトウエアの国産化の取り組みも行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・主として、安全性向上に関する研究が精力的に行われている。特にシビアアクシデント関係の研究が多く行われている。 |
| | 産業化 | ○ | ↘ | ・設計・建設に関しては、海外における新規発電所の受注への取り組みがなされている。<br>・一方で、国内において、新規プラントの建設が不透明であり、サプライチェーンの維持などが課題となっている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・設計から維持まで、幅広い分野において基礎研究がなされている。<br>・大学、国立研究所、民間の協働体制がうまく機能しており、これに対して、米国エネルギー省（DOE：United States Department of Energy）などの資金が配分される形となっている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・原子炉の安全評価に広く用いられるソフトウエアを開発・メンテナンスするなど、応用研究についても幅広い分野で取り組がなされている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・新規プラントの建設が進行中であり、複数の立地点において、新規プラントの建設計画がある。これらに対し、米国のプラントメーカーが主として契約を獲得している。<br>・一方、長期間にわたって米国内で新規プラントの建設がなかったことから、主要機器（圧力容器など)の製造技術が米国内から失われており、これらを海外に依存している。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・フランスでは基礎研究が継続して行われている。ドイツにおいては、脱原子力政策がとられているが、安全確保のための基礎研究の重要性が認識されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・脱原子力政策がとられているドイツ、スイス、ベルギーなどでは、応用研究は限定的である。フランスでは、応用研究も含めた取り組みがなされている。安全性評価に関しては、欧州として、原子炉の安全評価を行う統一ソフトウエアの研究開発が行われている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・東欧、フィンランド、英国などにおいて、新規プラントの建設、計画が進められている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・原子力発電の導入を積極的に進める方針であることから、研究開発に従事する人数は多い。<br>・基礎研究の内容は急速に充実しつつある。また、国際会議などでの研究成果発表も積極的に行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・国内で多くのプラントが建設中であり、また、建設計画も多い。<br>・これらに関連し、多くの実用化研究が行われている。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・プラントの建設は、現時点では海外の技術導入によって進められている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・米国に留学経験のある指導者が、欧米との協力関係のもと、広く基礎研究を進めている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・国内に多様なタイプの原子炉があり、幅広く応用研究がなされている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・アラブ首長国連邦の新規原子力プラントの建設を受注するなど、積極的にプラントの海外輸出に取り組んでおり、政府としてこの取り組みをサポートしている。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 「軽水炉発電所のあらまし」, 原子力安全研究協会, (2008).
2) 日本の原子力発電開発の歴史、ATOMICA.
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=16-03-04-01
3) 世界の原子力発電開発の動向（プレスキット）、日本原子力産業協会、(2014).
http://www.jaif.or.jp/ja/joho/press-kit_world_npp.pdf
http://www.jaif.or.jp/ja/joho/index_press-materials.html
4) 第4世代炉の概念、ATOMICA.
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=07-02-01-11
5) “World Energy Outlook 2013,” International Energy Agency, (2013).
6) 今後の原子力政策について、総合資源エネルギー調査会、基本政策分科会資料、資源エネルギー庁, (2013).
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/007/pdf/007_002.pdf
7) 原子力技術開発の動向、総合資源エネルギー調査会、基本政策分科会資料、資源エネルギー庁, (2013).
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/008/pdf/008_003.pdf

### ３．３．１．３　原子力の保全学

#### （１）研究開発領域名

原子力の保全学

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子力発電所などにおける安全を確保するためには、設計製作において十分な余裕をもってシステムが稼働することを保証することが重要である。一方で、これらのシステム（機器だけではなく、組織などのソフト的なものも含む）は、時間とともに劣化する。ハード的には腐食や振動などによる構造の劣化などに伴い、配管や弁などが損傷することによって、本来、設計で保障されている機能が担保できなくなる。ソフト的には、人事異動や慣れなどにより、設計で期待されているマネジメントが遂行できなくなり、機能が担保できなくなる。これらの機能が、時間の経過があったとしても、安全を確保するために十分な余裕をもって担保されていることを保証することが保全である。原子力発電所や飛行機などの複雑なシステムになればなるだけ、保全の考え方が重要となる。40 年や 60 年にわたる長期間、保全を確保するためには、常に新しい保全学を開拓し続けていくことが重要である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向 [1,2)]

保全学は、ハード的な機器の機能維持を担保するための領域と、ソフト的なマネジメントシステムとしての組織を含めた機能維持を担保するための領域に大きくわけられる。これらは相互に関連している。

機器や系統システムの機能維持を担保するための保全学には、運転・保守管理などを含めた通常時の保全学と、長期的な維持管理を担保するための高経年劣化管理に関する保全学がある。いずれも、内容はオーバーラップしている。

運転・保守管理などを含めた保全においては、リスク情報を活用する保全を構築することが重要である。数十万点に及ぶ機器や系統システムについて、もっともリスクを低減する保全の手法を開発し、また優先度や重要度を明確化したうえで、重要な系統に対して重厚な保全を実施することになる。このリスク情報を保全に活用することがもっとも進んでいるのは米国である。発電所のリスクを定量的に数字で求め、保全の手法についての意思決定を、リスクを元に実施している。このためには、確率論的リスク評価（PRA：Probabilistic Risk Assessment）と呼ばれる定量的リスク評価手法を確立するとともに、その信頼性を高めるための努力が必要である。米国や台湾においては、PRA を現場の保全に活用することで、安全性を高めると同時に、PRA の信頼性を大幅に高める努力を継続してきている。一方、日本では、PRA を保全に用いる試みは、停止時などに一部用いられているが、ほとんど使われていないと言ってよい。このため、データベースの充実度や、信頼性については、非常に遅れている。PRA を高度化することと、保全の信頼性を高めることは同一であり、現場で PRA を有効活用することによって保全を充実させることが必要である。

高経年劣化管理については、メカニズムの整理とデータベースの構築が、日本原子力学会において進められてきている。これらのデータベースの整理を継続的に進めて行く

とともに、リスクの概念を応用した、より信頼性の高い管理を進めることが必要である。特に、発電所建設当初から交換の効かない、コンクリート構造物、ケーブル、原子炉容器などの経年劣化に関する知見を充実させていくことは、世界共通の課題である。

マネジメントシステムを保全していくことは、これからの重要な研究開発課題である。福島第一原子力発電所事故の事故原因は、発電所、事業者、国、規制当局などのマネジメントシステムが十全に機能しなかったことも一つの要因と考えられる。国際原子力機関（IAEA：International Atomic Energy Agency）などにおける定期安全レビュー（PSR：Periodic Safety Review）や、日本原子力学会が提案している予防的安全レビュー（PSR+：Proactive Safety Review）などを活用し、マネジメントシステムの保全を担保していくことが重要であり、また、重要な研究開発課題である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題） 3)

原子力保全学を研究開発していくうえでもっともボトルネックとなっているのは、PRA 技術の信頼性を高めることである。具体的には、計算手法の開発も課題であるが、やはり故障率やシナリオなどのデータベースの充実も必須である。現在、原子力発電所が稼働していないため、故障データベースの入力が少なくなってきている。また、PRA の信頼性を高めるためには、毎日の保全で活用して経験値を上げることが重要である。そのためには、オンラインメンテナンスを実施することが必要であり、これにより原子力発電所の安全を大幅に高めるとともに、保全のリスク情報活用の信頼性を大きく高めることができる。日本においても、オンラインメンテナンスを積極的に利用することが期待される。

なお、日本の場合は 13 カ月ごとの定期検査が要求されている。より安全な発電所を構築するために、検査間隔の最適化や、検査方法の最適化、リスク情報による検査などを検討していくことも必要である。

これらの課題に対応するための人材確保は急務である。専門的知識を有し、さらに社会人として、また、ジェネラリストとしての一般教養を身につけた人材を原子力関連学科のみならず機械，電気，化学工学などの卒業生も含め幅広く確保する必要がある。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

PRA（確率論的リスク評価） 4,5)

確率論的リスク評価（PRA）技術は、米国で開発が進められており、現在は世界中で利用されている技術である。事故の発生シナリオとその発生確率を評価することで、炉心溶融や放射性物質放出に繋がるリスクにおいて、どのような設備や系統の寄与が大きくなるかを定量的に評価することができる。このため、保守管理においてリスクを用いることは、危険性の高いシステムや系統に対して重点的な保守を行うことや、システムそのものの改善を進めることによって、より効果的に安全性を高めることができる。1990 年代に、米国ではこの PRA を保守管理において積極的に応用することを目的とした、保守規則（メンテナンスルール）を設定した。さらに保守だけではなく、リスクを、発電所の活動を評価する指標としても導入し、ROP（俯瞰的原子炉評価）として、発電所全体の安全性を見える化している。日本においては、古くから、PRA の重要性は認識

されてきていたが、ほとんど原子力安全においては利用されてなかった。今後、特に現場における PRA の活用を積極的に進めることを目的とした研究開発が進められる必要がある。

高経年化評価 [6)]

原子力発電所においては、保守管理において、ほとんどの部品は新品に交換されていく。一方で、原子炉容器やケーブル、コンクリートなど交換ができないシステムも多数存在する。これらのシステムは、高温、放射線、中性子線、地震など、さまざまな環境の履歴や、荷重の履歴を受ける。材料の損傷メカニズムを評価し、システムとしての寿命を知ることによって適切に保全し、長期的にシステムを安全に利用していくことが可能となる。科学的に材料劣化を評価し、保守記録と合わせて評価することで、長期にわたり安全性を確保できることを説明することが重要となる。高経年化評価は、原子力発電所のすべての重要なシステムについて、長期間の利用に対する評価を与えていくものである。このためには、設計段階から、また、試運転を含む運転開始からの継続的な評価が重要となってくる。また、新品に交換されていくのは、部品だけではなく、組織や人員も重要な視点となる。さらに、社会情勢の変化や新しい科学的知見の充実など評価手法そのものも、時間とともに変化していく。これらの長期的な時間の経過における、ハードウェア、ソフトウェア、環境を含むすべての変化が原子力安全に著しい影響を与えないことを保証していく活動が高経年評価である。日本や米国が世界的にも先導して進めており、今後もより積極的な研究が必要な領域である。

オンラインメンテナンス [7)]

原子力発電所の安全を担保するためには、リスクを管理したうえで保守保全を進める必要がある。このとき、日本においては原子炉を止めて保守を行うことが、世界では運転中に行うことが一般的である。こういったオンラインメンテナンスは、十分に管理された状態で、わずかなリスクの短期的な増加を許容することにより、発電所全体の大きなリスクを低減する活動ととらえることもできる。オンラインメンテナンス（運転中保全）は、十分信頼性の高い PRA が整備されていることが前提となる。

RCM（信頼性重視保全）

保全活動にリスクの概念を持ち込み、リスクによって点検間隔や交換間隔を評価するとともに、定期的に取得されるデータから劣化傾向を推定し、点検や交換作業を実施する保守の方法である。機器の故障データベースや、運転中の状態データベースといった大量の情報を元に保全を進める方法であり、ある意味、IT 応用保全と言ってもよい。PRA を用いることによって、より充実した信頼性重視保全（RCM：Reliability Centered Maintenance）を行うことができるが、日本ではあまり普及していない。

シビアアクシデントマネジメント [8)]

充実した保守保全を行ったとしても、事故が発生しうることを考慮し、事故が起きた場合において炉心溶融を防ぐためのマネジメント策をあらかじめ検討しておくものであ

る。さらに炉心溶融が起きた場合を想定し、放射性物質放出を防ぐためのマネジメント策についても検討する。アクシデントマネジメントは保全と強く関連しており、刻一刻と変わる状態変化の中で、どの系統が利用できて、どの系統が利用できないのかを管理するとともに、効果的なマネジメント策を考案し、改善を進めていくことが必要である。日本原子力学会で標準化が進められているが、さらなる改善を行うことが重要である。また、放射性物質を放出することを想定した防災とのリンクも重要な課題である。

### （６）キーワード

高経年化評価、リスクマネジメント、信頼性重視保全、PRA、オンラインメンテナンス、シビアアクシデント

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | △ | → | ・高経年評価に関する取り組みが進められている。<br>・津波 PRA など外部事象に絡んだリスク評価に関する取り組みが進められている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↘ | ・法律遵守を目指した保守保全を要求されている。<br>・まだ机上検討にとどまっている PRA も多く、今後、現場の状況を反映した実践的な取り組みが必要とされる |
| | 産業化 | △ | → | ・海外での輸出を考慮し、PRA などの充実が図られている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・高経年評価に関する取り組みを積極的に進めている。<br>・PRA について、レベル 2 やレベル 3 の見直しを含め検討が進んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・発電所の現場におけるリスク評価の充実が図られている。<br>・規制当局によるリスク評価の活用が進んでいる。<br>・より高度な PRA の開発が進められている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・リスク評価を用いた保守の高度化により、安全性が目に見えて高まっており、国民が原子力発電所の安全を享受しているとともに、事業者は経済的にも潤う、双方に都合のよい関係が構築され、さらに産業化が進んでいる。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・高経年化評価に対する検討が進む。<br>・リスク評価の導入に積極的な国が多い。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・システムの標準化により、保全の最適化が進められている。例えば、フィンランドでは 12 ヶ月ごとの燃料取替停止、24 ヶ月ごとの保全など。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・欧州においては西欧原子力規制者協会（WENRA ：Western European Nuclear Regulators' Association）が、原子力発電所をより安全にするための活動を積極的に実施し、その中で保全活動の最適化が進められている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・新規プラント建設や新型炉設計が積極的に進められており、原子力保全に関しても積極的な研究開発が進んでいる。<br>・基本的にはプラント輸入国の仕組みをそのまま輸入していたが、新型炉や輸出においては保全の考え方が重要となる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・リスクやシビアアクシデントマネジメントなどに関する研究に、国家として積極的に投資している。 |
| | 産業化 | ○ | – | ・不明。しかし、原子炉を輸出する場合には保守保全技術が重要であるため、戦略的に進めていると考えられる。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・米国などの輸入であるが、リスク評価を積極的に導入している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・近年の、ケーブル品質に関する重大な課題が公になったのち、品質保証を含めた保全に関する検討が進められている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・海外プラント建築、運転においては、保守管理技術の輸出も重要な視点であり、米国の仕組みをベースとした応用が進んでいる。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 岡本孝司「安全規制の高度化」NDEシンポジウム2013, (2013)
2) 日本機械学会. A-TS 08-08「原子力の安全規制の最適化に関する研究会」,
欧米での原子力安全規制及び原子力プラントの運用、保全を中心とした活動状況
http://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-08/index01.html
3) 日本機械学会. A-TS 08-08「原子力の安全規制の最適化に関する研究会」,
新検査制度の定着と今後の課題
http://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-08/index.html
4) 岡本孝司「原子力発電所のリスク評価とは」エネルギーレビュー Vol.34, No.10 (2014)
5) JANSI Annual Conference 2014,(2014年4月24日)
6) 日本原子力学会「原子力発電所の高経年化対策実施基準」AESJ-SC-P005:2008
7) 吉田智朗「原子力発電所におけるオンラインメンテナンス導入のためのリスク評価の検討」(2006)
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/senmon/shidai/risktask/risktask012/siryo31.pdf
8) 日本原子力学会「原子力発電所におけるシビアアクシデントマネジメントの整備及び維持向上に関する実施基準」AESJ-SC-P008:2014 (2014)

### ３．３．１．４　原子力に関する防災

#### （１）研究開発領域名

原子力に関する防災

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子力または放射線の緊急事態時には、公衆および作業者の健康影響を防護し、インフラおよび環境への影響を効果的に低減し、影響を受けた地域ができる限り通常の社会経済活動へ復帰できるよう支援するための対策が求められる。原子力防災は実務そのものであり、関係機関が緊急事態の時間的推移に沿って、計画・準備段階から対応段階、復旧段階において関連するさまざまな分野で準備すべき人と技術の基盤を整備する必要がある。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

福島第一原子力発電所事故後、その教訓を反映し同様の原子力災害が発生する可能性を十分に低減するため、深層防護の原則の再確認と安全機能の喪失に対するアクシデントマネジメント策の強化が各国で進んでいる。同時に、事故を完全に防止することはできないので、深層防護の第 5 層に当たるサイト外の緊急時対応計画を適切に立案・整備し、資源配分、訓練、実地演習、評価および日常の管理から得られた経験に基づく知見を反映して絶えず見直していく必要がある。

国際放射線防護委員会（ICRP : International Commission on Radiological Protection）の 2007 年勧告後、原子力防災に係る新しい放射線防護の考え方 [1,2] が示され、国際的に緊急時マネジメントの考え方 [3] や国際原子力機関（IAEA : International Atomic Energy Agency）による新しい判断基準 [4] が定着しつつある。そこでは、緊急時対応における実質的な目標を確実に達成できるよう、もっとも効率的かつ効果的な方法によって防災システムを確立するという管理的アプローチ [5] が採用されている。公衆および作業者の放射線影響の防止、個人および集団における放射線以外の影響の防止、財産および環境の保護、通常の社会経済活動への復帰という目標を定め、対策の正当化・最適化の原則と同時に、過去の緊急事態や防災訓練の経験、緊急事態の詳細な分析や理解、そして国際法から導かれた原則に基づく対応の戦略を検討し、そこから準備と対応の詳細な要件が導かれている [5]。

各国では、緊急事態への備えを改善するために、事態の時間的推移に沿って準備、緊急時対応（危機管理段階および影響管理段階）および復旧に関する方策の再検討が進められている。これには、緊急時対応段階から復旧段階への移行期における国としての復旧準備の検討も含まれている。危機管理段階では、事業者、地方、国の関連機関間の迅速で強固な連携を維持するためのクライシスコミュニケーションのハード・ソフト面の強化、事故現場でのファースト・レスポンダーの防護を含む緊急時手順・ガイダンスの見直し・改善への取り組みである。また、地震、津波などの外部起因事象によって地域、国あるいはサイトのインフラが重大な損傷を被る複合災害の状況下における緊急時対応計画の実効性の確保も大きな課題である。そのため、自然災害を含む外部事象を考慮した確率論的リスク評価（PRA : Probabilistic Risk Assessment）によるリスク情報を活

用した緊急時対応計画における防護措置（避難、屋内退避と安定ヨウ素剤の予防服用など）の組み合わせを含む防護戦略の検討、避難時間推定などのシミュレーションモデルの研究開発 [6] も実施中である。放射性物質の広範な環境汚染後の影響管理の段階では、福島第一原子力発電所事故で大きな役割を果たした航空機モニタリングを含む迅速な環境モニタリング技術の開発、個人スクリーニングやホールボディカウンターを含む簡易で迅速な個人モニタリング技術の開発、広域の除染技術の開発が重要な課題である。

チェルノブイリ事故や福島第一原子力発電所事故の経験から、防護措置の意思決定およびその実行については放射線防護上、まだ課題がある。防護措置の意思決定支援技術については、欧米で長年研究開発が行われているマルチクライテリア意思決定分析（MCDA : Multi-Criteria Decision Analysis）手法 [7] に代表されるような基盤技術の開発も重要分野である。特に長期にわたる復旧段階への移行に際しては、避難者の懸念を理解し、それに対して適切に対処するため、ステークホルダーを効果的に関与させる仕組みやプロセスの構築にあたり社会学的アプローチとの協同が重要となる。これは、放射線防護の国際コミュニティとの連携によって、国際的に取り組むべき課題でもある。

福島第一原子力発電所事故では国内関係機関の間だけでなく、各国政府、規制機関や緊急時対応センターとの国際的な情報交換およびデータ提供などのコミュニケーションを大幅に改善する必要性が認識された。欧州ではチェルノブイリ事故後、欧州委員会（EC : European Commission）が緊急放射線情報交換システム（ECURIE : European Community Urgent Radiological Information）や放射線データ交換プラットフォーム（EURDEP : European Radiological Data Exchange Platform）を長年整備している。我が国も韓国、中国を含む東アジア周辺諸国との国際的な枠組み、技術基盤の整備が必要であろう。また、食物摂取制限のための基準に代表される緊急時の勧告、基準が国によって異なること、発災国の防護勧告と異なる勧告を諸外国が発災国に在住の自国民に対して行うなどのコミュニケーションの不備の改善を図るために、原子力緊急事態に関する国際的な情報交換のあり方を検討すべきである。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

原子力防災の分野は、オンサイトにおける緊急時対応（広い意味でのアクシデントマネジメントに相当し、ここでは対象としない）からオフサイトの緊急時対応まで広範である。オフサイトの緊急時対応も、放射性物質の放出源情報（ソースターム）、環境移行挙動、人への被ばくおよび健康影響評価とその関連する分野の裾野が広い。東海村 JCO 臨界事故、福島第一原子力発電所事故後を見ると、それを契機としてさまざまな分野の研究者が一時的にこの領域に参入してくるが、その継続性がないというのがこれまでの経験である。原子力防災を専門とする研究者は極めて限られているのが実態であり、海外の原子力発電所の事情にも通じた原子力防災に関わる専門家、研究者の養成が必須の要件である。原子力防災の最終的な目標は、緊急事態に際して人の放射線およびそれ以外の健康影響の防止、インフラと環境の防護であり、それを遂行するのはまさしく実務である。このように、原子力の安全は、極めて目的重視型で、かつ生起する確率は稀でも社会・経済的インパクトが非常に大きい。このため、決して備えを怠ってはならない領域においては、トップダウン的アプローチでニーズを限定的に検討する必要がある。

また、不確実さが非常に大きい危機管理段階での防護戦略、ステークホルダーの関与が政策決定に必須となる復旧段階での効果的な方策、の策定に関与する人材、資源、技術基盤の整備を支える研究開発が必要である。

繰り返しになるが、生起する確率は稀でも常に準備を怠ってはならない原子力防災を原子力特有のものとせず、一般災害に対する防災と共通の枠組み（All hazard approach）の中で強化するのがもっとも効果的であり、世界共通の認識である。そのためには、関係当局、機関の連携がもっとも重要となる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

チェルノブイリ事故の影響が大きかった欧州では、国境を越える影響という観点から欧州委員会（EC）の主導する共同研究が数多く進められた。その延長上にある原子力・放射線危機対応・回復に係る欧州プラットフォーム（NERIS プラットフォーム：European Platform on Preparedness for Nuclear and Radiological Emergency Response and Recovery, 2010 年設立）[8]は、原子力または放射線緊急事態の対応および復旧の備えを効果的に改善するために、国、地方当局、技術支援機関（TSO：Technical Support Organization）、事業者、研究機関、大学、非政府組織（NGO：Non-Governmental Organizations）などあらゆる関係機関（2013 年現在、51 機関）から構成されるプラットフォームで、さまざまなプロジェクト支援、共同研究を組織している。

フランスでは、原子力安全規制当局（ASN：Autorité de Sûreté Nucléaire）が中心となり 2005 年に原子力事故後管理運営委員会（CODIRPA：COmité DIRecteur pour la gestion de la phase Post Accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation d'urgence radiologique）[9]が設置された。同委員会へは、行政当局、事業者、協会・団体、有識者など、事故後管理に携わる多くの関係者が参画している。これはチェルノブイリ事故の経験から、フランスが国土の広範な汚染を引起す原子力事故の影響を想定し、事故後の人と環境を防護するための対策改善を目的としている。福島第一原子力発電所事故後もその経験を反映した改善計画が進行中である。

米国では、原子力規制委員会（NRC：Nuclear Regulatory Commission）が NUREG-0654/FEMA-REP-1 Suppliment 3「防護措置戦略のガイダンス」を福島第一原子力発電所事故後に改定した。この改定には米国の PRA 技術用いた原子力災害解析（SOARCA：State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses）研究の成果やサンディア国立研究所のレベル 3PSA 手法による防護措置効果の検討の成果が反映されている。

### （６）キーワード

緊急時マネジメント、緊急時対応計画、クライシスコミュニケーション、防災訓練・演習、レベル 3PRA

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・福島第一原子力発電所事故を契機に、新たな個人モニタリング機器の開発、無人航空機モニタリングの開発、除染技術、農作物対策技術、放射性物質の環境移行挙動、線量再構築モデルの開発など、さまざまな分野での基礎研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・原子力災害対策指針に基づいて実効的な地域防災計画策定のためにリスク情報を活用した防護措置戦略のガイダンスなどの研究が進められている。<br>・地域防災計画策定に有用な避難時間推定などのシミュレーションモデルの応用などが開始されている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・福島第一原子力発電所事故後、その教訓と国際基準を反映した原子力災害対策指針が策定された。その実効性を改善するための更なる見直しが継続中である。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・緊急事態への防護目標を達成するための基本的な技術基盤はすでに整備されているといってよく、防災訓練・演習手法の改良、リスクコミュニケーション分野などで基礎的研究は継続している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・長期間検討されていた NRC の NUREG-0654/FEMA-REP-1 Suppliment 3「防護措置戦略のガイダンス」が福島第一原子力発電所事故後に改定された。この改定に際しては、PRA 手法による防護措置効果の検討が NRC の委託でサンディア研究所を中心に進められた。<br>・10 年来改定作業が続いている防護措置クライテリアのベースである米国環境防護庁（EPA : United States Environmental Protection Agency）の防護措置マニュアルも最終局面を迎えている。<br>・米国放射線防護測定協議会（NCRP : National Council of Radiation Protection and Measurements）は、ICRP2007 年勧告を考慮した復旧期の防護ガイダンスを作成中である。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・スリーマイル島原子力発電所事故以後、法的枠組み、事業者・地方政府・国の緊急時対応計画、技術支援システム、評価・監査システムなど、防災システムの整備がもっとも進んでいる。9.11 以降はテロ起因の防災訓練・演習を充実させている。福島第一原子力発電所事故の教訓の反映のステップも開始されている [10)] |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・NERIS プラットフォームを中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・NERIS プラットフォームを中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。<br>・北欧諸国では、従来から共同で意思決定支援技術の開発が進められていた。現在も、防護措置効果の研究、防災訓練・演習の共同研究が進められている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・欧州各国では、チェルノブイリ原子力発電所事故以後、東欧市域でも法的枠組み、事業者・地方政府・国の緊急時対応計画、技術支援システム、評価・監査システムなど、防災システムの整備が進んだ。特に、国境を越える災害対応の連携に力を入れている [11)]。<br>・欧州委員会（EC）が迅速放射線情報交換システム（ECURIE）や放射線データ交換プラットフォーム（EURDEP）を長年整備している。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・特段の動きは、みられない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・特段の動きは、みられない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・近年の原子力発電所の増設計画に沿って、法的整備も進み、緊急時対応計画は IAEA 基準に沿って整備されている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・特段の動きは、みられない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 応用研究・開発 | △ | → | ・福島第一原子力発電所事故以前には、日本と同様のソースターム、環境線量予測システムの整備が重視されてきていた。<br>・福島第一原子力発電所事故後、日本の原子力災害対策指針の策定を受け、緊急時計画範囲（EPZ：Emergency Planning Zone）の検討などが開始されている模様。 |
| | 産業化 | △ | → | ・国レベルの原子力防災は、米国型の対応が一応整備されている。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) ICRP Publication 109, 緊急時被ばく状況における人々の防護のための委員会勧告の適用, 日本アイソトープ協会（2013）.
2) ICRP Publication 111, 原子力事故または放射線緊急事態後の長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用, 日本アイソトープ協会（2012）.
3) OECD/NEA, Strategic Aspects of Nuclear and Radiological Emergency Management, Radiation Protection 2010, OECD (2010).
4) IAEA Safety Standards, GSG-2, IAEA (2011).
http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000120491.pdf（日本語翻訳版）
5) IAEA Safety Standards, GS-R-2, IAEA (2002).
6) 藤田雅久, et al., 原子力発電所災害における避難計画策定のための支援システム開発, 土木計画学研究・論文集, No.28, I_25-I_34, 2011.
7) K.N. Papamichail and S. French, 25 Years of MCDA in nuclear emergency management, IMA journal of management mathematics 24(4), 481-503 (2013).
8) NERISプラットフォーム：http://www.eu-neris.net/
9) CODIRPA:
http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/News-releases/National-doctrine-for-nuclear-post-accident-management
10) United States Government Accountability Office (GAO), EMERGENCY PREPAREDNESS NRC Needs to Better Understand Likely Public Response to Radiological Incidents at Nuclear Power Plants, Report to Congressional Requesters, GAO-13-243 March 2013.
11) European Commission, OFF-SITE NUCLEAR EMERGENCY MANAGEMENT AND RESTAURATION OF CONTAMINATED ENVIRONMENTS, SAMEN and MOSES thematic clusters, EUR 21297 (2007)

### ３．３．１．５　過酷事故への対応

**（１）研究開発領域名**

過酷事故への対応

**（２）研究開発領域の簡潔な説明**

主として軽水炉を対象として、設計基準事故を超える過酷事故（シビアアクシデント）時の原子炉・格納容器内の熱流動挙動および環境に放出される放射性の核分裂生成物（FP：Fission Products）の挙動を明らかにするとともに、過酷事故の防止対策および影響軽減対策（両者を合わせてアクシデントマネジメント）の有効性を評価するため、基礎・基盤的研究から大規模な実験および総合解析コードの開発などの研究開発を実施する。

**（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向** [1)-3)]

過酷事故時の炉心の溶融進展については、米国やフランスの研究用原子炉を用いた炉心溶融実験やドイツの電気加熱による模擬実験、日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）の原子炉安全性研究炉（NSRR：Nuclear Safety Research Reactor）を用いた実験などにより、燃料の過熱と損傷・溶融挙動，水素発生挙動が明らかにされ、解析モデルが開発された。燃料の損傷では、低融点の制御棒材料が最初に溶融・落下し、その後の空間を被覆材や構造物の融体が落下することが実験的に示された。特に，燃料が溶融した構造物や制御棒と反応すると、純物質の融点より低い融点の共晶物質を生成し、融解することがあることが判明した。ただし、世界的に基数が圧倒的に多いため実験数が多い PWR 体系に比べて、$B_4C$ 制御材の影響、スペーサ、チャンネルボックとの相互作用、ドライシーケンスの状況を含めた BWR を対象とした実験データは少ない。

原子炉圧力容器の健全性については、スリーマイル島事故炉心の調査が国際協力によって行われ、約 19t の溶融炉心が複数の経路から原子炉圧力容器下部ヘッドに再移動したことが明らかになった。下部ヘッド壁は最大 1100℃程度まで昇温したと推定された。また、スリーマイル島事故で下部ヘッドが破損しなかった溶融炉心冷却メカニズムとして、大規模な炉心融体の再移動が生じる前に、クラスト層が形成され、下部ヘッド内壁とデブリクラスト間のすき間や固化デブリのクラックに冷却水が侵入したと推定され、実験でもこれを支持する結果が得られている。福島第一原子力発電所事故におけるように海水注入が長引いた場合、ボイルオフにより海水が高濃度化し、炉心部（出入口含む）に析出し、流路を閉塞する可能性がある。また、下部ヘッドデブリベッドの除熱特性に影響を及ぼす可能性がある。

格納容器内挙動については、格納容器健全性への脅威となり得る種々の現象について研究が行われた。そのうち、溶融炉心と冷却材が接触したときに発生し得る水蒸気爆発について、内外で実施された多くの実験を通じて、溶融炉心の水中におけるブレークアップ、蒸気発生、溶融炉心と冷却材の混合、溶融炉心の固化など、水蒸気爆発過程の初期条件に係わる知見が得られ、解析コードの整備が進展した。特に、実燃料を用いた溶融炉心の場合、水蒸気爆発は生じにくいことなどが実験的に明らかにされた。水蒸気爆

発過程については、実験データベースや解析手法の整備は進展しているものの、溶融炉心内金属成分（ジルコニウムやウラン）の酸化熱発生による爆発の大規模化や爆発の規模に及ぼすボイド率の影響に関して課題が残されている。

格納容器直接加熱（DCH：Direct Containment Heating）については、原子炉容器の破損箇所からの高速蒸気流の速度は、原子炉容器破損面積に依存するが、原子炉容器壁の破損箇所、初期面積、拡がり挙動は必ずしも明確になっていない。ただし、デブリ分散が発生する場合の高速ガス流による液滴発生限界、液滴発生率、液滴径、また、デブリ分散時の圧力・温度上昇は評価可能であり、モデル開発とコードへの組み込みが行われている。PWR に関しては高圧シーケンスにおける過熱蒸気自然循環や SG 伝熱管を含めた原子炉冷却系配管などの破損に係わる研究が実施されており、格納容器健全性の脅威とは見なされていない。ただし、BWR についてはほとんど研究が実施されていない。

溶融炉心と格納容器床のコンクリートとの反応（MCCI：Molten Core Concrete Interaction）については、ドライな条件でのコンクリートの浸食に関する多くの実験に基づき、解析モデルはほぼ確立している。、現象は複雑で、MCCI の抑制が期待される早期上方注水に関する実験データは不足している。特に、注水時に溶融デブリの上部に形成されるクラストについて、コンクリート侵食に伴う非凝縮性ガス発生によるクラストへの浸水効果およびクラスト上面への沸騰熱伝達率に及ぼす影響に関するデータが不足している。また、溶融デブリの対流熱伝達率について、コンクリート侵食に伴うガス発生による対流熱伝達率の増加のデータが不足している。また、BWR ドライウェル床面のドレインピットの影響に関して検討が不十分であり、侵食には異方性があるがそのメカニズムについては解明が不十分である。

格納容器の過圧による破損についても、スケールモデルを用いた米国などで試験が行われ、設計圧力の 3～4 倍までの耐性があることや、過圧破損のモードは、鋼製格納容器では破裂的、コンクリート製格納容器では鋼製ライナ部でリークが生じることなどが明らかにされた。ただし、格納容器からの漏洩格納容器設計条件を超えた圧力・温度条件における漏洩率に不確かさが大きく、これまでのデータの再検証が必要である。

格納容器内の水素挙動については、水素混合についての実験と解析がすでに多く実施されている。水素の燃焼についても実験が行われ、理論構築、解析モデルの開発が行われている。スプレイ作動時における水素燃焼に関しては知見が少ないが、現在、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA：Organization for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency）の THAI2（Thermal-hydraulics, Hydrogen, Aerosols and Iodine）計画で実験を実施中である。水素燃焼対策として、イグナイタ、触媒による水素処理設備（PAR：Passive Autocatalytic Recombiner）が実機配備されている。ただし、福島第一原子力発電所事故を踏まえて、過酷事故晩期の格納容器圧力高圧維持による水素および FP 漏えいの抑制や水素爆発の防止の観点からの水素処理設備に関する研究が今後は重要である。

ソースターム（環境に放出される核分裂生成物の種類と量）挙動については、高温燃料からの FP 放出実験が米国、フランス、日本などで実施され、放出に及ぼす温度や雰

囲気の影響が明らかにされた。特に、JAEA の VEGA（Verification Experiments of radionuclides Gas/Aerosol release）実験では、1MPa までの圧力の影響について初めて実験的に調べられ、高圧ではセシウムなどの放出が抑制されることを明らかにした。原子炉冷却系内の FP 挙動では、FP の冷却系内や格納容器内での移行挙動に関する実験がフランス、イタリア、カナダなどで実施され、FP の安定な化学形やエアロゾルの沈着、再蒸発、再浮遊などの挙動が明らかにされた。ただし、制御材やほかの炉心構成物質のヨウ素、セシウム、テルルなどの化学への寄与に関しては解明が不十分である。格納容器内の FP 挙動については、フランス、カナダなどで行われた実験などに基づき、ヨウ素挙動についての基本的な評価枠組みは構築されているものの、水相内不純物の影響や高水温条件下のヨウ素化学、BWR での低酸素濃度雰囲気条件下における水相内反応、気相ペイント壁やエアロゾル表面におけるヨウ素の吸着および有機ヨウ素の生成などが残された課題である。特に、福島第一原子力発電所事故におけるような、格納容器ベント時に起こりうるプール水の急減圧下、減圧沸騰下でのプールスクラビングによる FP 除去効果に不確かさがある。また、福島第一原子力発電所の 3 号機のように炉容器の減圧と格納容器ベントがほぼ同時に行われる場合に想定される、サプレッションプールへの FP 蒸気を含む高温ガスが大量に流入する状況下における知見はほとんどない。さらに、福島第一原子力発電所事故におけるような水相内ヨウ素化学に及ぼす海水の影響については知見がない。

アクシデントマネジメントの有効性に関する研究では、過酷事故発生防止策として、JAEA の ROSA-V（Rig Of Safety Assessment-V）計画において、炉心冷却操作の最適化などが明らかにされた。また、過酷事故の影響軽減策として、PWR で格納容器キャビティに注水して原子炉圧力容器底部を冠水させ、原子炉圧力容器を外部から冷却することにより、原子炉圧力容器下部ヘッド内で溶融炉心を冷却・保持する対策の有効性について、実験および解析的研究が幅広く実施された。限界熱流束に対する相関式が開発されているが、ほかのプラントに対しては相関式の適用性の検討が必要である。MCCI 軽減策として格納容器に水張りするアクシデントマネジメントに関連して、溶融炉心ジェットの水中におけるブレークアップ長さに係わる研究が実施されている。冷却性を評価する上で重要な格納容器床面における溶融炉心の堆積挙動については知見が不十分である。

解析コードの開発では、水蒸気爆発、MCCI、水素混合・燃焼、FP 挙動など個々の単一現象の解析に特化した専用解析コードが開発され、実験結果に基づき検証が進められた。また、シビアアクシデント時のプラント全体の挙動を解析するため、熱水力挙動と炉心損傷、ソースターム移行などの現象論モデルを統合することにより、研究成果が集大成された総合解析コードが開発された。米国原子力規制委員会（NRC：Nuclear Regulatory Commission）は MELCOR、米国産業界は MAAP、欧州では ASTEC などのコードが開発され、我が国では JAEA の THALES などのコードが開発されている。個々の事故シナリオにおける事故進展の時間的スケール、格納容器破損モード、ソースタームの評価に利用され、福島第一原子力発電所事故の解析でも利用されている。さらに、物理現象を精緻に表現した多次元の数式・理論式で構築した機構論的モデルを用いて詳細な解析を実施するための詳細解析コードが開発されている。米国規制委員会は SCDAP/RELAP5、米 ISS は RELAP/SCDAPSIM、フランス IRSN は ICARE/CATHARE、

ドイツ GRS は ATHLET-CD などのコードが開発され、我が国では経済産業省の支援によりエネルギー総合研究所において SAMPSON コードが開発されている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

過酷事故現象は、一般に炉心の大幅な損傷や溶融が伴うことから、溶融炉心と冷却材の相互作用、溶融炉心とコンクリートの反応、水蒸気ないし水素雰囲気中での FP エアロゾルの挙動や水素の格納容器内での挙動など、一般に多成分・多相流が関与するとともに、高温･非平衡など現象として複雑な系の熱流体力学、物理、化学の混合課題であることに大きな特徴がある。科学技術的課題としては、こうした複雑な現象を解明するためには、異なる分野の多くの専門家の協働により、基礎・基盤的研究から比較的大規模な実験、総合解析コードを有機的に結びつけるとともに、達成可能で合目的的な研究課題として目標を明確に限定する必要がある。また、福島第一原子力発電所事故における、炉心、原子炉容器、格納容器の損傷箇所や損傷程度など、今後の調査により重要な知見が得られることが期待されるが、高線量下の作業のため、調査は相当長期にわたると予想されていることも課題であろう。

政策的課題としては、福島第一原子力発電所事故前までの大幅な予算縮減により、過酷事故に関する研究規模が縮小された結果、90 年代までは一定程度いたこの分野の専門家がほとんど枯渇していることである。福島第一原子力発電所事故を踏まえ、シビアアクシデント研究を中心とする安全研究基盤の充実強化を図り、研究を通じて優秀な人材を育成することは、我が国ばかりでなく国際的な安全性の向上に貢献する。産学官の連携と適切な役割分担により、国際協力も視野に入れて、この分野の研究開発を効果的・効率的に進めつつ、若手の研究者の参画を得て専門家を中長期的に育成することが政策的課題として重要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

欧州では、2004 年より 19 ヶ国が参加する過酷事故研究ネットワーク（SARNET : Severe Accident Research Network of Excellence）を EU（European Union）内に設立して、過酷事故に関する共同研究、研究成果のデータベース化、教育・人事交流などを実施している [4]。SARNET では、過酷事故における優先課題を、1）原子炉における溶融炉心冷却、2）溶融炉心コンクリート反応（MCCI）時における溶融炉心冷却、3）圧力容器外水蒸気爆発、4）格納容器内の水素混合・燃焼、5）ソースタームに及ぼす高燃焼度燃料および MOX 燃料（Mixed-Oxide Fuel）の酸化の影響、6）原子炉冷却系および格納容器内におけるヨウ素化学の 6 項目に絞って研究開発を重点的に進めている [5,6]。

我が国の日本原子力学会では、福島第一原子力発電所事故前から熱流動部会熱水力ワーキンググループの下のシビアアクシデント・サブワーキンググループにおいて研究課題の整理と優先度付けが行われ、事故後に見直しが行われた。一方、解析モデルの開発・改良の観点から、同学会「シビアアクシデント評価」研究専門委員会が 2011 年 10 月より PIRT （Phenomena Identification and Ranking Table）手法に基づく研究課題の抽出を進めている [7]。この一環として、総合解析コード SAMPSON の開発が経済産業省の支援の下、エネルギー総合研究所を中心として産官学の参画により進めている。2013

年 2 月より、既設軽水炉の安全対策の高度化を図る観点から、国が実施すべきシビアアクシデントを含む安全研究の網羅性や緊急度・重要度を明確化する技術マップの策定が同学会「安全対策高度化技術検討」特別専門委員会で進められている。さらに、2012 年 10 月からは熱水力ワーキンググループの下に基盤技術サブワーキンググループにおいて、シビアアクシデント研究ロードマップの作成に着手している。今後はこれらの検討結果に基づき、重要なシビアアクシデント研究が着実に実施され、その成果が現場などへ反映されて行くことが期待される [8,9]。

国際研究協力プロジェクトとして、OECD/NEA の主催により、福島原子力発電所の事故炉の廃止に向けた燃料デブリの取り出しの準備として、シビアアクシデント解析コードの改良、および事故進展と現在の炉心状況の解析のための共同研究計画（BSAF 計画：Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project）が進められている。本計画には、フランス、ドイツ、日本、韓国、ロシア、スペイン、スイス、米国の 8 ヶ国が参加し、 JAEA をホスト機関として、国内関連研究機関、産業界の協力により、2012 年 11 月に開始し 2014 年 3 月までの予定で、各国で利用可能な総合解析コードを用いた解析を実施している [10]。

### （６）キーワード

シビアアクシデント、過酷事故、炉心損傷、溶融炉心、水蒸気爆発、溶融炉心コンクリート反応（MCCI)、格納容器直接加熱（DCH)、水素爆発、核分裂生成物（FP)、ソースターム、エアロゾル除去、ヨウ素化学、総合解析コード、詳細解析コード

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本[11] | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・筑波大学、早稲田大学、東京大学、京都大学、JAEA などで基礎的な研究を実施している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・福島第一原子力発電所事故後にJAEAでは応用を目指した新たなプロジェクトを開始している。エネ総研では、総合解析コードSAMPSONの開発を実施している。東京電力では格納容器フィルターベント、東芝ではコアキャッチャーなどの開発を進めている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・日立、東芝、三菱などの産業界では、主として国プロジェクトのもとでシビアアクシデント対策機器の開発を進めている。 |
| 米国[11,12] | 基礎研究 | ○ | → | ・Perdue 大学、Wisconsin 大学などで基礎的な研究を実施している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・サンディア国立研究所（SNL：Sandia National Laboratories）で総合解析コード MELCOR、ISS 社で RELAP/SCDAPSIM の開発を進めている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・Westinghouse 社などで PAR などが産業化されている。 |
| 欧州[11] | 基礎研究 | ◎ | → | ・放射線防護・原子力安全研究所（IRSN ：Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, フランス）、スウェーデン王立工科大学（KTH ：Kungliga Tekniska högskolan,）などを中心とした SARNET の枠で基礎的な研究を実施している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・これまで、フランス、ドイツなどで大規模な炉心損傷・FP 挙動実験が実施されてきたが、現在も IRSN などで比較的大規模な実験を実施するとともに、総合解析コード ASTEC の開発が SARNET の枠で実施されている。また、OECD/NEA 主催による水素挙動に関する大規模実験が原子力・代替エネルギー庁（CEA：Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, フランス）、ポール・シェラー研究所（PSI ：Paul Scherrer Institute, スイス）などで実施されている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・AREVA 社（フランス）などで格納容器フィルターベント、水素再結合器などが実用化されている。IMI Nuclear 社（スイス）は PSI と共同で有機ヨウ素を高率に除去できる第 2 世代格納容器フィルターベントを開発している。 |
| 中国[11)-13] | 基礎研究 | ○ | → | ・上海交通大学（SJTU ：Shanghai Jiao Tong University） 、西安交通大学（XJTU ：Xi'an Jiao Tong University）などで基礎的な研究が実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・SJTU、上海核工程研究設計院（SNERDI：Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute）などで応用を目指した比較的大規模な熱流動実験が実施されている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・産業化では現在までの所あまり見るべき点は少ない。 |
| 韓国[11,14] | 基礎研究 | ○ | → | ・KAIST（Korea Advanced Institute of Science and Technology）、浦項工科大学校（POSTEC：POhang university of Science and TEChnology）、韓国原子力研究所（KAERI：Korea Atomic Energy Research Institute）などで基礎的な研究が実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・KAERI などで応用を目指した格納容器健全性、コアキャッチャーなどに比較的大規模な実験が実施されている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・産業化では現在までの所あまり見るべき点は少ない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Y. Abe, Phenomena Identification in Severe Accident Sequence and Safety Issues for Severe Accident Management of Light Water Reactors, International Workshop on Nuclear Safety and Severe Accidents (NUSSA), Sept. , 2012, Beijing, China.
2) 杉本　純. 福島事故を踏まえたシビアアクシデント研究の展望. エネルギー・資源. 2013, vol. 34-4, p. 2-6.
3) 杉本　純　他. シビアアクシデント研究協力に関するCSARP計画の成果. 日本原子力学会誌. 1997, vol. 39-2, p. 123-134.
4) http://www.sar-net.eu/node/4
5) Magallon, D., et al., European expert network for the reduction of uncertainties in severe accident safety issues (EURSAFE), Nuclear Engineering and Design, 2005, vol. 235, p. 309-346.
6) Jean-Pierre Van Dorsselaere, et al.; Sustainable integration of EU research in severe accident phenomenology and management, Nuclear Engineering and Design, 2011, vol. 241, p. 3451-3460.
7) Sakai, N., et al.: Phenomena Identification Ranking Table (PIRT) for the MAAP Enhancement Project, ICONE-21, July 29-August 2, 2013, Chengdu, China.
8) Sugimoto, J.: Important Severe Accident Research Issues after Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Station, ICONE21, July-August 2013, Chengdu, China.
9) 杉本　純. フクシマ後の原子力安全の再生に向けて -シビアアクシデント研究者の反省と教訓，今後の展望 -. 日本原子力学会誌. 2014, vol. 56-3, p. 162-163.
10) https://www.oecd-nea.org/jointproj/bsaf.html
11) http://www.asmeconferences.org/ICONE22/pdfs/FinalProgram.pdf
12) Corradini, M., Nuclear Safety: Lessons Learned after Fukushima, International Workshop on Nuclear Safety and Severe Accidents (NUSSA), Sept. 7-8, 2012, Beijing, China.
13) http://iwsar.com/Xu-Cheng.pdf
14) http://iwsar.com/Yong-Hoon-JEONG.pdf

### ３．３．１．６　原子力基盤技術の開発

#### （１）研究開発領域名

原子力基盤技術の開発

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子力基盤技術には、原子核・原子炉工学、熱流動、燃料・材料工学、原子力化学、環境科学、放射線防護、放射線影響などがあり、各分野で基盤的データベースや計算コード、先進技術などを開発している。ここでは、その中でも原子力に特有の原子炉物理および原子核工学に関して記述する。原子炉物理は、その名の通り原子炉における種々の核的性質を予測する技術で、基本的には原子炉内の中性子のふるまいを計算する。放射線の物質や生体中でのふるまいを記述するシミュレーション技術においても核燃料を取り扱わないだけで、ほぼ同様の計算を行う。核データは、この輸送計算における入力データの役割を果たす、原子核で起こる各種反応の確率、原子核の崩壊に係る情報などに係るデータであり、原子核工学研究によって得られ、データベースにまとめられて使用される。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

原子力技術は、工学的にあらゆる分野を包含し、全体のバランスの上に成り立っていると言える。基盤技術という意味では、原子力に関わるすべての分野における基盤となる技術が存在するが、その範囲が広いため、本領域では原子力に特有な分野に限定して記述することとする。原子力発電を火力発電と比較すると、蒸気でタービンを回して発電する部分は共通であるが、蒸気を発生させる部分において熱の発生過程が核反応（核分裂反応、核融合反応など）である点が大きく異なる。また、放射線の利用で言えば、放射線とその対象（物質の物理または化学的反応、細胞または個体レベルの生物反応など）によってもその反応機構が異なるため、多くの知見を必要とする研究開発領域である。このような広範囲の研究開発領域を支える原子核的な研究分野として、核データおよび原子炉物理の分野 [1] がある。このほか、原子炉の冷却・除熱に係る熱的な研究基盤技術に熱流動分野、原子燃料や原子炉材料の物性研究、再処理・群分離および廃棄物処理・処分に関わる分離・分析などの原子力化学研究、放射性核種の移行挙動を含む環境動態の研究などがあるが、対象が広範囲に及ぶため本領域では言及せず、シミュレーションコードやモデリング技術および教育訓練の部分にとどめる。

原子炉物理における「輸送計算」は、原子炉における核分裂の連鎖反応の進行度合いおよび原子炉出力を表す臨界性の計算、燃料の核的な燃焼に伴う構成元素または構成原子核の変化の割合を示す燃焼計算、内部放射線の遮蔽計算などに用いられる。この計算には、もっとも計算上モデル化の不確かさを持ち込まないモンテカルロ法による計算（正確には「連続エネルギーモンテカルロシミュレーション」）があるが、複雑な原子炉全体を記述するためにはまだ計算機の能力が十分と言えない。このため、原子炉の詳細な構造を平均化（均質化）したり、中性子のエネルギーによって複雑に変化する原子核反応の確率をエネルギーごとに平均化したりして、実際の原子炉設計などに用いている。これを先の「モンテカルロ法」に対して「決定論的手法」という。こういった計算では、

原子炉などのモデリング技術により不確かさが変化するので、コードに対してモデル化の信頼性（verification）および計算結果がどれくらい実際のものを再現できているかの妥当性（validation）検証が不可欠となる。このような信頼性および妥当性検証のことを「V&V」（Verification and Validation）と呼び、コードおよび全体の計算結果に対する不確かさの指標を伴った情報として提供される。このため、炉物理コード検証のためのベンチマーク実験に関するデータベースの整備も国際協力で実施されている。一方、炉物理コードは、各国でそれぞれ開発されているが、近年、核不拡散のためか輸出規制がかかることが多くなってきている。

核データベースは、原子核反応の起こりやすさの確率、反応当たりのエネルギーの収支、核分裂において生成される核種および中性子の割合、崩壊に係る放出エネルギーや放射線の強さの情報をまとめたものである。原子核反応に関しては、「評価済核データファイル」と呼ばれるデータベースとして、表のように基本的に各国でまとめられている。

表　世界の評価済み三大核データファイルの比較

| 核データファイル | ENDF/B-VII.1/0 | JEFF-3.1.2/1 | JENDL-4.0 |
|---|---|---|---|
| 開発国 | US | EU | Japan |
| 公開年 | 2011/2006 | 2012/2009 | 2010 |
| 総格納核種数 | 423/393 | 381/381 | 406 |
| ガンマ線データ格納核種数 | 286/206 | 216/136 | 354 |
| 二重微分断面積格納核種数 | 255/171 | 161/83 | 319 |
| 共分散データ格納核種数 | 190/26 | 36/36 | 95 |
| 主な評価計算コード | GNASH<br>EMPIRE | TALYS | CCONE<br>POD |
| 自給率 | 51%/60% | 12%/20% | 96% |

注：ここで「評価済」とあるのは、原子炉などで必要な原子核反応データは、数百核種に対して中性子の広い範囲のエネルギー（おおよそ $10^{-5}$～$10^{7}$ eV の 12 桁をカバーする範囲）に亘るものを対象とするため、すべて実験で求めているわけではない（ただし、実験データの収集に関しては、50 年以上前から国際協力で進められている）。

原子核の崩壊および原子核構造データに関しては、国際協力（国際分担）が進んでおり、データベースが整備されている。

原子炉物理に関連するコードや核データベースに関しては、国際原子力機関（IAEA：

International Atomic Energy Agency）[2] や経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA：Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency）[3] などを中心とした国際協力によって、取りまとめられている部分と各国で独自に整備しているものとがある。データの収集は効率的に国際協力で行われるものの、コードやデータベースに関しては各国の事情により興味の対象が若干異なるため、独自のものとなっている（(7) 国際比較　参照）。

原子炉物理および核データは上記のように原子力の基盤技術であるが、原子力工学専門家養成という意味では脆弱化している。原子炉物理を専門とする講座をもつ大学（北海道大学、東北大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、東京都市大学、東海大学、近畿大学など）は限られており、その中に核データに関する専門の講座はない。より基礎科学的な原子核物理などに各データに関する研究室はあるが、その内容は基礎的な素粒子や物理理論であるため、いわゆる工学的なデータを扱うような教育は行われていない。したがって、日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）のような研究機関での教育訓練や他分野専門家への原子力教育の充実が必要となる。特に核データに関して言えば、上述したように膨大なデータベースを整備する人材の枯渇は、(4) で述べるが、種々のコードやデータベースの国産化を進めなければならない現在において、死活問題になりかねない。

そのほか、熱流動や材料損傷の分野では、可能な限り基本原理から計算できるようなシミュレーションコードが開発されつつあるが、妥当性検証のための実験データ不足などのため、前述の原子炉物理および核データに関する V&V のような検証については、今後の課題となっている。人材確保に関しては大学に関連する学科が存在するものの、実際の応用研究につなげるためには研究機関などでの教育訓練が必要である。また、V&V にも関連するが、種々の技術的な検証のためには実験が必要であるが、これらの各種分析技術、計測技術などの人材を継続的に維持しなければならないことにも注意しなければならない。特に、燃料工学や原子力化学などの研究分野では、核燃料物質および放射性核種の取り扱い技術の継承が重要であるが、大学における放射化学などの講座の減少、大学・JAEA での取り扱い施設の廃止措置などにより、人材の育成・技術の継承がますます困難な状況にある。材料の照射損傷研究においては、国内外を問わず中性子照射に利用できる材料研究炉が少なくなっていることや照射に長時間を有することから、イオン加速器などを利用した模擬照射試験法の開発が注目されてきている。若手研究者の人材育成の観点からも大学、研究機関が協力して進めていくべき課題である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

近年、米国が核不拡散に係る輸出規制として、モンテカルロ輸送計算コード MCNP などの輸出規制を打ち出してきた。最初は、最新のコードは国外に出さないという非常に厳しいものであったが、のちに、日本に対しては実行形式のコードは提供する（改訂が可能なソースコードは未提供）とのこととなった。MCNP は日本国内に多くのユーザが存在するので、一時期騒然となったが、JAEA が開発した同等の機能をもつコード MVP および臨界計算機能はないがほぼすべての放射線の輸送計算が可能な PHITS などがあったため対応可能であり、後の緩和も伴って現在は沈静化している。一方、MCNP に核

データライブラリとして評価済核データファイルから処理を行うコード NJOY についても同様なことが起こる可能も示唆され、重要なコードの国産化が不可欠であるとの指摘がなされている。ソースコードが未公開で内容が検証できないコードを国内で使用することは V&V の面から危険であり、かつ、海外へ原子炉を輸出することを検討している現状において、国産の設計コードと一体化できないことは大きな不利要因となっている。これに対して、国内の関連機関においては、可能な限り対応しようとする努力が続けられてはいるものの、安易に解決できない状況である。

輸送計算コードや核データの国産化のためにも、国内の研究者が協力して開発を実施する必要がある。一方、原子力規制委員会における透明性確保のため、規制と開発における役割分担を明確化する方向で議論が進んでおり、「規制のためのコードなど」と「開発のためのコードなど」との区別の問題がある。本来は、どちらも同じ学術分野の成果として得られるものであるが、これらの開発方針が分断されており効率的でないと思われる。

近年、原子炉の耐久性（構造材の長期健全性）を示す指標である放射線による照射損傷や上述した V&V に係る不確かさの問題などに関する規格基準類の整備・拡充が、国際標準化機構（ISO : International Organization for Standardization）や日本原子力学会標準委員会などで議論され始めている。これら機関に、原子力基盤技術に係る輸送計算コードや核データが、正しく認知され、その継続的な整備（国産化を含む）を推奨されることが、人材確保や研究開発のために不可欠となる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

放射性廃棄物の有害度低減のための加速器による核変換研究 [4] や医療用加速器（陽子線や炭素線によるがん治療およびホウ素中性子捕獲療法）に関して、近年、プロジェクト研究が進められつつある。これらの基盤データとして、マイナーアクチノイド（MA : Minor Actinoid）や長寿命核分裂生成物（LLFP : Long-Lived Fission Products）核種および高エネルギー核データの整備の必要性が提言されている。また、関連する輸送計算コード PHITS の開発が進んでいる。核変換研究においては、これまでの実験室レベルでの小規模な MA や LLFP の分離試験を大規模な工学試験に拡大し、分離、燃料製造、再処理の実証試験が期待されている。

福島第一原子力発電所事故以来注目を浴びるようになったが、それ以前から原子力施設の廃止措置に関連し、施設内構造物中での放射化物生成量の推定が問題とされてきていた。この量をできるだけ正確に予測することにより、廃止措置の過程で廃棄物を低減でき、この経済効果により、さらに廃止措置事業を促進することができる。このため、原子炉物理における燃焼計算およびそのための放射化断面積などの核データ整備が重要となってきている。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価では、処分に由来する公衆の被ばく線量に大きく影響する難分析長寿命核種のインベントリ評価が重要である。燃焼・崩壊計算コードによるインベントリ評価法を確立するためには、難分析長寿命核種の精確な分析法による実測値と計算値の比較検証が求められる。これは、福島第一原子力発電所事故で発生する廃棄物にも共通の課題である。

## （６）キーワード

原子力基盤技術、核データ、原子炉物理、熱流動、燃料工学、材料工学、原子力化学、環境科学、放射線防護、放射線影響、シミュレーションコード、モデリング技術、データベース、国際協力、教育訓練、人材育成、規格、基準

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・原子炉物理コード開発（MVP（モンテカルロ）、MOSRA/SRAC（決定論）、PHITS（モンテカルロ）など）。<br>・評価済核データファイル（JENDL）。評価済核データファイルに関しては、添付資料「世界の三大核データファイルの比較」を参照。<br>・原子炉熱流動コード開発（ACE3D（炉内熱流動）、TPFIT（気液二相流）、NASCA（サブチャンネル））<br>・シビアアクシデントコード開発（SAMPSON（炉心溶融）、THALES（ソースターム）、JUPITER（溶融物移行））<br>・地球上の任意地点からの放射性物質放出に対応した大気拡散予測システム開発（WSPEEDI） |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・上記研究成果などを利用して、原子力企業（三菱、東芝、日立、その他燃料メーカなど）ごとに独自の開発を実施している。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・炉心設計などの分野で、米国産などのコードが利用されている。<br>・日本国内の原子力事故に対応した大気拡散予測システム SPEEDI が、原子力規制委員会の監督の下、原子力安全技術センターにおいて運用 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・原子炉物理計算コード開発（MCNP（モンテカルロ）、SCALE（システム）、NJOY（核データ処理コード））。<br>・評価済核データファイル（ENDF）。評価済核データファイルに関しては、添付資料「世界の三大核データファイルの比較」を参照。<br>・原子炉熱流動コード開発（TRAC（システム安全）,RELAP（システム安全）、TRACE（システム安全）、COBRA-TF（サブチャンネル））<br>・シビアアクシデントコード開発（MAAP（炉心溶融）、MELCOR（炉心溶融）） |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・上記研究成果などを利用して、原子力企業（GE、ウェスチングハウスなど）ごとに独自の開発を実施している。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・炉心設計など核特性解析の分野で、炉物理核データが利用されている。<br>・大気拡散予測については、ローレンスリバモア国立研究所 NARAC（National Atmospheric Release Advisory Center）において、世界の原子力事故に即座に対応するシステムが運用されている |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・原子炉物理計算コード開発（TRIPOLI（モンテカルロ、フランス）、APOLLO（決定論、フランス）、WIMS/MONK（決定論/モンテカルロ、英））。<br>・評価済核データファイル（JEFF）。評価済核データファイルに関しては、添付資料「世界の三大核データファイルの比較」を参照。<br>・原子炉熱流動コード開発（Trio-U（気液二相流）、FLICA（炉内熱流動）），CATHARE（システム安全）<br>・シビアアクシデントコード開発（ASTEC（ソースターム）） |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・上記研究成果などを利用して、原子力企業（アレバなど）ごとに独自の開発を実施している。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・炉心設計など核特性解析の分野で、炉物理核データが利用されている。<br>・緊急時大気拡散予測システムとして、欧州連合を中心に利用される RODOS が開発されている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・各種炉型の原子炉（高速炉、軽水炉、高温ガス炉など）を開発しているので、原子炉物理計算に関する研究はあるはずであるが、外国へ情報があまり伝わっていない。核データとの連携はあまり行われていないようである。<br>・評価済核データファイル（CENDL）を独自に開発。ただし、JENDL（日本）、ENDF（米国）、JEFF（欧州）の三大ファイルに比べると、質・量ともに若干劣る。<br>・原子炉熱流動コード開発（SNPSDC（システム安全））|
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・原子炉導入を進めていることから、開発が進んでいると思われるが、情報が少ない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・原子炉導入を進めていることから、開発が進んでいると思われるが、情報が少ない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・原子炉物理に関して独自の研究はあるが、特筆すべき情報は少ない。<br>・独自の評価済核データファイルはない。NEA 加盟国として JEFF に協力。また、米国の ENDF にも一部貢献。<br>・原子炉熱流動コード開発（MARS（システム安全）、SPACE（システム安全））|
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・原子炉導入を進めていることから、開発が進んでいると思われるが、独自研究開発についての情報が少ない。基本的に海外技術導入型と思われる。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・原子炉導入を進めていることから、開発が進んでいると思われるが、独自研究開発についての情報が少ない。基本的に海外技術導入型と思われる。 |
| 国際機関 | 基礎研究 | ○ | → | ・OECD/NEA における原子炉物理および核データに関する活動：原子力科学委員会（NSC：Nuclear Science Committee）において、加盟国の提案により共通の問題に関する共同研究を推進。特に、原子炉物理コードの検証のためのベンチマーク実験データベース（ICSBEP（臨界）、IRPhE（そのほか）など）が国際協力により進められている。<br>・IAEA における核データ活動：国際協力（日本、米国、欧州、中国、ロシアなど）による原子核反応実験データベース EXFOR のとりまとめ、国際核融合炉のための評価済核データファイル FENDL の編集など。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・OECD/NEA における NSC 以外の各員会（安全研究など）との連携による応用。 |
| | 産業化 | － | － | ・なし |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）日本原子力研究開発機構　原子力基礎工学研究センターホームページ
（http://nsec.jaea.go.jp/）
2）IAEA/NDSホームページ（http://www-naweb.iaea.org/napc/nd/index.html）
3）OECD/NEAデータバンクホームページ（http://www.oecd-nea.org/databank/）
4）文部科学省　原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会ホームページ
（http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/070/index.htm）

### ３．３．１．７　新型炉（核融合を含む）の研究・開発

#### （１）研究開発領域名

新型炉（核融合を含む）の研究・開発

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

世界的に見れば原子力発電の新規導入を計画している国が多数あり、長期的展望の下で段階的に実用発電に供する新型炉の技術を確立する必要がある。技術開発の成熟度と海外動向を考慮して、特に、次世代軽水炉・第 4 世代炉・小型炉・ナトリウム冷却高速炉・高温ガス炉・核融合炉の研究開発が重要である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

米国エネルギー省より、2030 年頃からの実用化を目指して、安全性や経済性に優れた第 4 世代原子炉の研究開発が提唱され、第 4 世代原子力システムフォーラム（GIF：Generation-IV International Forum）の枠組みが作られた。その中で、一般的な概念を示すために発電用原子炉の開発世代が次のとおり定義された [1]。

- 第 1 世代（Gen-I）
  1950 年代から 1960 年代前半に運転を開始した初期の原型炉
- 第 2 世代（Gen-II）
  1960 年代後半から 1990 年代前半に建設された商業用原子炉
- 第 3 世代（Gen-III）
  1990 年代後半から 2010 年代頃に運転開始した原子炉で、第 2 世代の改良型として開発された原子炉
- 第 4 世代（Gen-IV）
  現在、研究が進んでいる原子炉で、高い安全性、火力発電所と比肩できる経済性、放射性廃棄物の負担の最小化および高度な核拡散抵抗性などの特徴をもつ革新的原子炉

現在の発電用原子炉は第 2 世代と第 3 世代原子炉であり、主に軽水炉である。これらの研究開発を通じて、建設コスト低減のための標準化や先進的な安全方策を取り入れた次世代軽水炉（第 3 世代＋）の技術が確立されつつある。一方で、一般的な原子力発電所は建設コストが高いと言われており、投資リスク回避のため小型炉開発が最近活発化してきている。非軽水炉分野では、ナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉が軽水炉と同様に 1950 年代から研究開発が進められており、現在では第 4 世代炉開発において実用化に近いと考えられている。これらは、ウランやプルトニウムを燃料として原子核分裂反応を維持することで発熱させ、タービンと発電機で発電させる。それに対し、水素やヘリウムによる核融合反応を利用するのが核融合炉である。ここでは、これら新型炉について述べる。

1)次世代軽水炉（GenIII+）

次世代軽水炉は基本的には現行第 3 世代の改良であり、炉心損傷頻度の低減、建設コストや建設工期の低減、長寿命化、高燃焼度化、航空機対策を実現したものである [2]。

従来設計と大きくなる点はパッシブセーフティ（受動安全）を取り入れたことにある。これは異常時に電源駆動機器による制御や運転員による介入なしに自然循環などの物理現象によって事故発生を防ぐ概念である。米国では AP1000 や ESBWR といったこの概念を積極的に設計に取り入れた原子炉がある。AP1000 は、2011 年に米国規制当局 NRC（Nuclear Regulatory Commission）から設計認証を受けた。その際、NRC 議長より、AP1000 の設計は簡素化され、固有、受動的あるいは革新的な安全およびセキュリティ機能を有することで安全余裕を向上させており、有意な放射性物質放出なしに航空機衝突に対して耐えることができると評価された。我が国でも 2009 年に国策として次世代軽水炉（第 3 世代＋）の開発に着手し、濃縮度 5%超燃料、免震技術、80 年寿命のための新材料と水化学、建設工期短縮のための建設技術、パッシブ・アクティブ技術の最適組合せ、プラントデジタル化技術を枢要技術に掲げた [3]。しかし、2011 年 3 月以降は開発を大幅に縮小化することになった。現在、我が国の APWR や ABWR（第 3 世代炉）は、輸出の可能性についても検討されているが、欧米で開発された AP1000 や EPR（第 3 世代＋）は世界中で採用されており受注競争が激しくなっている状況である。福島第一原子力発電所事故の教訓を取り込み、プラント輸出を通じて世界の原子力安全に貢献するためには、次世代軽水炉開発などに継続的に取り組む必要がある。

2)第 4 世代炉（Gen IV）

第 4 世代炉とは高い安全性･信頼性の実現などを開発目標とした革新的原子炉であり、2002 年にナトリウム冷却高速炉、ガス冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス冷却炉、超臨界圧水冷却炉、溶融塩炉の 6 炉型が選定された [4]。ナトリウム冷却高速炉はフランス、ロシア、インド、中国、韓国および EU（European Union）では積極的に研究開発が進められており、GIF でもっとも活発である。超高温ガス冷却炉は高温ガス炉を発展させたもので、出口温度は 950℃以上を念頭に設計されている。これら 2 炉型は後述する。ガス冷却高速炉はフランス主導で欧州中心に ALLEGRO の研究開発が進められているが､最近は減速傾向である｡鉛冷却高速炉はロシアで BREST や SVBR 設計が先行し、現在では欧州で ALFRED プロジェクトが推進されるとともに、ベルギーで燃料・材料試験を目的とした MYRRHA 炉の建設計画がある。超臨界圧水冷却炉は、相対的に研究に着手した段階と言え材料試験など課題解決を図る必要がある。溶融塩炉はトリウム液体燃料をポンプで循環し熱交換器で熱を除去するシステムであり、米国で実験炉を建設した実績があり、最近はいくつかの国で研究開発が開始されている [5]。

3)小型炉（小型モジュラー炉、受動的・固有安全炉）

IAEA の定義によれば、出力 30 万 kWe 以下が小型炉、それから 70 万 kWe 以下が中型炉とされている [6]。出力あたりの建設コストは高くなるが、投資リスクは低くなる。また、電気料金の高い僻地であれば、大きな電気出力も必要でないことから、小型炉は発電競争力を有している。さらに、水素製造や熱利用などの多目的利用を可能とする。機器が小型であることから、工場製造および機器輸送が容易であり、現地工事が少なく建設工期を短くできるメリットがある。機器の標準化によって複数基設置のモジュラー型を志向することもある｡また､異常時に受動安全や固有安全を取り入れた設計が多い。

世界では 2011 年時点で 125 基の中小型炉があり、28 か国で 17 基が建設中である。米国では 2012 年に mPower 設計を選択し 5 年間の開発資金援助することになった。2013 年には 2 回目の開発提案申請を受け付け、NuScale が選択された。中国では小型高温ガス炉、インドでは重水冷却炉の開発がなされている。ナトリウム冷却高速炉は米国では 1989 年に PRISM と SAFR、我が国では東芝の 4S（寿命期間中に燃料交換不要）の開発が進められた。

4)ナトリウム冷却高速炉

開発の歴史は長く商業的にも電力供給しており、400 炉年（原子炉数×稼働年）の運転経験（非水炉の中では一桁長い）を有している原子炉である。高速炉は高速中性子を燃えないウラン 238 に吸収させることで燃えるプルトニウム 239 に変えることによって燃料を増殖させることが可能である [7]。また、放射性毒性が強く寿命の長いマイナーアクチノイド（MA : Minor Actinoid）の核変換ができ、高レベル放射性廃棄物を減量させることができる特徴を有しており [8]、その重要性はエネルギー基本計画 [9] でも記述されている。この炉は、ナトリウムの優れた特徴により、原子炉は低圧にすることができる。また、高沸点のため単相ナトリウムで炉心冷却ができ、電気駆動を不要とする自然循環による崩壊熱除去が可能である。一方、ナトリウムは水や空気と接触すると急激に反応する特性などがある。

我が国には実験炉「常陽」と原型炉「もんじゅ」があるが、「もんじゅ」においては 1995 年にナトリウム漏えい事故が起きた。現在は両炉とも再稼働準備を進めている。米国では、EBR-I、EBR-II、Fermi-I、FFTF などの実験炉を建設し多くの実験データを取得したが、原型炉建設時に核不拡散政策により大型炉開発は中止された。フランスでは、実験炉 Rapsodie、原型炉 Phenix、実証炉 Superphenix を建設し、開発を進めてきたが、政治的理由により Superphenix を廃炉にした。現在は ASTRID の開発を精力的に進めている状況であり、「もんじゅ」で燃料の照射試験を計画している。欧州では英国やドイツでも初期に開発が行われていた。ロシアは、実験炉 BOR-60、原型炉 BN-350（カザフスタン）、実証炉 BN-600 と着実に開発を進め、商業炉 BN-800 が 2014 年に臨界に達した。中国およびインドも実験炉を建設し、世界中で開発競争が増してきている。

我が国は、第 4 世代炉として JSFR の開発を、2011 年までは欧米ではリードしてきた。現在、我が国が主導してナトリウム冷却高速炉の安全基準の国際標準化を働きかけており、それを新興国が参照している状況である。開発先進国として積極的に世界貢献を果たすべく国際協力を進める一方で、高速炉技術の国際標準化競争に乗り遅れないようにする必要がある。

5)高温ガス炉

黒鉛減速ヘリウム冷却熱中性子炉であり、熱電併給が可能である。その熱源は製鉄などの産業熱源として、また水素製造や石炭液化などでも利用できる。セラミックスで被覆した粒子状燃料を用いることが特徴的で、1600℃の高温状態においても被覆材の閉じ込め機能は損なわないことが実験的に示されている。被覆粒子燃料の封入方法によりブロック型とペブルベッド型の燃料体に分類できる。ヘリウムガスは 100 気圧以下に加圧

するが、ヘリウムの漏えい事故時が生じても黒鉛減速材の熱容量が大きいため燃料温度は急激に上昇しない固有の安全特性を備えている [10,11]。

開発の歴史は古く英国、米国、ドイツで開発が先行した。米国では、1990 年代に安全性と経済性を向上させた GT-MHR の設計が行われ、2000 年代に原子力 2010 プログラムや NGNP プログラムなどを発表し、水素利用の検討に着手した。南アフリカではペブルベッド型の PBMR 建設を推進していたが、2009 年に経済的理由により中止になった。中国ではペブルベッド型実験炉 HTR-10 を建設し、2003 年に定格運転を達成した。実証炉 HTR-PM は建設中で、2017 年に建設完了予定であり、本格的な実用化展開を図っている。我が国では実験炉 HTTR が建設され 2004 年に 950℃で定格運転を達成した。水素製造技術も併せて開発している。資源国カザフスタンとの研究協力や HTTR を用いた安全性試験国際共同研究プログラムを実施するなど、これまで技術開発を先導してきた我が国は固有安全を有する高温ガス炉の研究開発を積極的に進め国際貢献の一役を担う必要がある。

6)核融合炉

核分裂は重いウランやプルトニウムを用いるのに対し、核融合は軽い水素やヘリウムを用いてエネルギーを発生する。地上の太陽と呼ばれる核融合炉だが、地球上で核融合反応を発生させるためには、人工的に数億℃もの高温環境を作り出す必要がある [12]。この核融合反応を起こすための高温高圧の反応プラズマを閉じ込める技術が開発課題として大きかった。長期的な視野をもって研究開発が進められており、原型炉開発のための技術基盤構築の課題として、原型炉概念の構築と設計、構成要素に関する研究開発（超電導コイル、ブランケット、ダイバータ、駆動システム、理論・計算、炉心、燃料、材料、規格・基準、安全、運転・保守）が整理されている [13]。

現在の閉じ込め技術の主流は我が国でも研究されてきたトカマク型(JAEA の JT-60)であり、1988 年に日米欧ソにより開始された国際熱核融合実験炉（ITER：International Thermonuclear Experimental Reactor）で実証を視野に入れて研究が推進されている。ITER は韓国、中国、インドが加わりフランスで建設中であり、我が国では、 ITER を補完し、原型炉へ向けた検討を欧州と連携して行う「より幅広いアプローチ（BA：Broader Approach)」活動として ITER 遠隔実験、シミュレーション、サテライトトカマクなどの研究が行われている。ITER をはじめ核融合研究はグローバル化しており、長期的展望の下で各国が研究を進めている。我が国は BA 活動で整備される施設を活用して産学官が緊密に連携して上記課題を解決して実用化への道筋を確度の高いものにしていく必要がある。長期にわたり計画的に研究開発を進める必要があるため、若手研究者の育成とともに産学官の組織基盤の構築および維持が重要となる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

1）次世代軽水炉については、材料試験を除き 2015 年に終了予定の計画だったため、当初の技術的課題は 5 年程度で解決可能と考えられる。また、2013 年に施行された規制基準に適合するためにはシビアアクシデント対策などの安全性向上技術が課題としてあげられる。政策的課題は、縮小化されたプロジェクトを再開できるように人材維持

を図るとともに、将来の既設炉のリプレースの可能性に対応できるように安全性向上技術開発を進める必要がある。また、我が国単独ではなく国際協力の活用などの検討が必要である。

2) 第4世代炉については、ナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉を除けば、実験炉も十分に建設されておらず実用技術確立までには程遠く、技術的に課題が多い。高温ガス冷却高速炉については、発熱密度が高く高温ガス炉と比べて炉心溶融の可能性が高くなるため安全性向上技術の開発とともに、燃料開発などが必要である。鉛冷却高速炉については、懸念されていた材料腐食などの研究開発が進められ、別途開発が進められている放射性廃棄物低減を目的とした加速器駆動原子力システムの成果が共有できる可能性があるが、プラントとしての技術確立には安全性や保守補修などの課題が残る。超臨界圧水冷却炉については、高温高圧であるため被覆管などの材料開発の課題は困難を極めている。溶融塩炉については、材料の長期健全性、化学状態制御、大型熱交換機器などが課題としてあげられる [14]。これら第4世代炉の政策的課題としては、2030年以降の実用化を目指しているものであり、原子力縮小化傾向時には長期的視野にたって人材維持を図りながら基礎研究を進める必要がある。

3) 小型炉については、既存技術の小型化で、その特徴を発揮するものであることから、大きな技術的課題はない。政策的課題としては、我が国では電力自由化によりコスト競争が厳しい中で小型炉導入のメリットがなく、僻地立地の可能性を検討する必要がある。

4) ナトリウム冷却高速炉については、実用炉の技術開発確立に向けて、「常陽」「もんじゅ」を用いた照射試験による許認可データの取得に加えて、安全性と信頼性を向上させる技術開発、コスト低減のための革新技術（基礎的な開発は終了）の許認可に向けたデータ取得が課題として残っている。政策的課題としては、国内プロジェクトを再開できるように技術競争力を確保しつつ、海外プロジェクト（ASTRIDなど）への参画により技術基盤を維持していく必要がある。

5) 高温ガス炉については、「HTTR」を用いた技術実証や併設水素製造技術開発に加えて、燃料の超長期安定性などの技術的課題があげられる。政策的課題としては、技術実証に向け現状の研究開発体制を維持し、中国やカザフスタンなどとの国際協調を進める必要がある。

6) 核融合炉については、ITERとBA活動の中で技術課題が整理されている。政策的課題としては、ほとんどが国際共同研究であるためITER機構との協力など継続的な人材供給が長期に必要であるとともに、原型炉開発に向けた研究基盤体制と計画が必要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

1) 次世代軽水炉については、国外では実用化段階であり、受注競争が激化している。

2) 第4世代炉については、鉛冷却高速炉は、ロシアでは連邦特別プログラム(2005-2010)の中でBREST-300とSVBR-100の開発・建設が進められている。溶融塩炉は、トリウムを資源（レアアース採掘時の残渣として発生）にもつ中国ではトリウム溶融塩炉開発計画を2011年に発表した。

3) 小型炉については、米国では 2012 年に小型モジュラー炉認可支援プログラム（5 年間）を発表し、mPower 炉を選定した。その 2 回目の公募を 2013 年に発表し、Nuscale 炉を選定した。助成金は 50%上限とされた。民間では、ビル・ゲイツ氏をオーナーとするテラパワー社が 2008 年に TWR と命名した新たな原子炉開発を開始した。TWR の基本炉型は金属燃料ナトリウム冷却高速炉で、過渡時の安全性や電源喪失の除熱性能の高い固有安全炉で、実用化に向けて研究機関と産業界との国際協力で開発を進めている。

4) ナトリウム冷却高速炉については、フランスではプロトタイプ炉の設計・開発を進めている ASTRID プロジェクトを推進しており、欧州における開発を先導している。ロシアでは BN800 炉が臨界となり運転が順調であり、BN1200 炉（商用炉）を設計し、実用化に向けてしのぎを削っている。中国では、CEFR 実験炉の運転を含めて国家エネルギー科学技術計画（2011-2020）で研究開発に取り組んでいる。韓国では、原子力研究開発事業の中でナトリウム炉の予算が全体の半分を占めるほど重点化して、プロトタイプ炉 PGSFR の設計を進めている。インドでは、実験炉を現在建設中であり、同サイトにさらに 2 基を建設し、別サイトに 2 基を建設する計画である。

5) 高温ガス炉については、米国では、NGNP プロジェクトが立ち上がりフェーズ 1（2005～2010）でプラント概念設計検討が終了したが、フェーズ 2（当初は 2011～2021；プラント詳細設計、許認可、建設、運転実証）に移行できないでいる。欧州では、過去の実績を踏まえて欧州圏内に建設して実用化をリードしたいと考え、いくつかのプロジェクトを立ち上げている。南アフリカでは、リーマンショックで 2010 年に PBMR 開発が中止に追い込まれた。中国では、HTR-10 と HTR-PM プログラムが国家エネルギー科学技術計画の中で位置づけられている。韓国では、原子力水素開発実証プログラムが 2000 年から開始されており、原子力研究開発予算の中では、2 番目に重要な項目となっている。

6) 核融合炉については、ITER プロジェクトは、2013 年に本部建屋が完成した。

### （６）キーワード

新型炉、次世代軽水炉、第４世代炉、小型炉、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉、核融合炉、APWR、ABWR、常陽、もんじゅ、JSFR、HTTR、ITER

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・福島第一原子力発電所事故は炉心溶融を伴うシビアアクシデントの現象解明や解析コード開発などが進められている。<br>・第 4 世代炉のナトリウム冷却高速炉や鉛ビスマス炉などについては材料・熱流動・核特性に関する研究が進められている。<br>・小型炉（4S）、高温ガス炉（HTTR）の開発は縮小化されている。<br>・核融合では実験炉 ITER がフランスで建設中であり、シミュレーションなどの補完的な研究（BA 活動）を主に青森県六ケ所村にて実施中。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↘ | ・国際競争力を目指した次世代軽水炉の開発は縮小化されている。<br>・技術的優位だった第 4 世代炉としてのナトリウム冷却高速炉（JSFR）の開については、国際的に調和する安全基準を策定中。<br>・ナトリウム冷却高速炉（もんじゅ）は性能試験を中断しているが、国際共同研究の場としてナトリウム取扱研修に活用されている。 |
| | 産業化 | △ | ↘ | ・第 3 世代炉（APWR、ABWR）は輸出されているが、次世代軽水炉などの新型炉については現状では産業化の議論に至っていない。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | → | ・シビアアクシデント耐性燃料などの新型材料開発、積極的にシミュレーション技術を活用する計算技術開発などの研究が活発である。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・小型モジューラー炉の開発が活発である。mPower 炉や NuScale 炉などの軽水炉改良版に加えて、非軽水炉であるナトリウム炉（PRISM）やガス炉（PBMR）もあげられる。<br>・ビルゲイツ氏が出資したテラパワー社によりナトリウム炉（TWR）の開発が進められている。<br>・エネルギー省は認可支援のための資金援助を含めて積極的に開発を推進している。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・次世代軽水炉 AP1000 は米国と中国で建設中であり、英国などでも建設計画があり、次世代軽水炉は勢いがある。 |
| 欧州 | 基礎研究 | △ | → | ・欧州全体で共同して着実に研究を進めている。<br>・核融合では実験炉 ITER を建設中であり、世界の中心となって着実に推進している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・第 4 世代炉のナトリウム冷却高速炉 ASTRID の予備的な概念設計段階であり、多額の予算で研究開発を進めている。規制側と調和を図りながら概念設計に進める準備をしている。<br>・第 4 世代炉のガス冷却高速炉 ALLEGRO は予算を削りつつも研究開発は継続している。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・次世代軽水炉 EPR はフランスとフィンランドと中国で建設中であり、英国や米国などでも建設計画があり、次世代軽水炉は勢いがある。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・ナトリウム冷却高速炉は中国原子能科学研究院（CIAE：China Institute of Atomic Energy）により実験炉 CEFR が 2011 年に初送電を達成し、性能試験を実施している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・ガス炉は精華大学により実験炉 HTR-10 の知見を踏まえて、実証炉 HTR-PM を建設している。 |
| | 産業化 | △ | → | ・自主技術で開発するため、(次世代軽水炉ではない)軽水炉 CAP1400 の設計を推進している。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・ガス炉の燃料体である TRISO 燃料を多目的照射炉 HANARO で照射実験を行い、基礎研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・ナトリウム冷却高速炉は PGSFR を設計中であり、自然循環試験ループを製作するなどして研究開発を推進中。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | △ | → | ・米国 System80+をベースに自主技術で開発された次世代軽水炉 APR1400 は UAE に輸出成功しており、他国でも受注競争に参加している状況である。<br>・小型モジュラー炉 SMART は海水淡水化と熱供給が可能な多目的原子炉であり、海外輸出戦略を展開している。 |
| ﾛｼｱ | 基礎研究 | △ | → | ・第 4 世代炉の鉛冷却高速炉 BREST300、鉛ビスマス冷却高速炉 SVBR100 を建設計画であり、幅広く基盤技術を開発することが目標とされている。小型の熱利用コジェネ炉や浮揚型原子炉の研究開発も実施中。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・ナトリウム冷却高速炉は堅実に開発を維持しており、実験炉 BOR60、原型炉 BN600 に次いで、実証炉 BN800 が 2014 年に初臨界を達成した。BN1200 実用炉の設計も進めており、実用段階に近くなってきている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・軽水炉 VVER は東欧や中央アジア諸国を中心に輸出しており、燃料供給も合わせて輸出産業と位置づけている。 |
| ｲﾝﾄﾞ | 基礎研究 | △ | → | ・大学や研究所で軽水炉を中心に研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・ナトリウム冷却高速炉は PFBR 原型炉を建設しており、さらに同型炉を複数建設し、技術確立を図っている。 |
| | 産業化 | × | → | ・輸入して技術習得が優先であり、産業化までには発展していない。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
2) http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Advanced-Nuclear-Power-Reactors/
3) http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90331c05j.pdf
4) http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Generation-IV-Nuclear-Reactors/
5) http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E003617.pdf
6) http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Small-Nuclear-Power-Reactors/
7) http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Fast-Neutron-Reactors/
8) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/061/houkoku/1344598.htm
9) http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf
10) http://www.iae.or.jp/htgr/pdf/00_summary01/00_1.pdf
11) http://www.iae.or.jp/htgr/pdf/02_result/infomation/02result_20130903_04.pdf
12) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/056/shiryo/attach/1338925.htm
13) http://www.aesj.or.jp/~fusion/aesjfnt/rensai.htm
14) http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2013/siryo17/siryo2-2.pdf

### ３．３．１．８　核燃料サイクルの技術

#### （１）研究開発領域名

核燃料サイクルの技術

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子力発電で一度使ったウラン燃料（使用済燃料）は、分別処理することで、もう一度原子力発電の燃料としてリサイクルできる。ウラン資源を再利用すれば、エネルギーを長期にわたり安定供給することが可能となる。

発電後の使用済燃料の中の核分裂していないウランや、原子炉内で生まれたプルトニウムを再処理して取り出す技術、これを再利用するための濃縮技術および燃料加工技術が含まれる。再加工した燃料は軽水炉または高速炉で再利用されることになる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向 [1-5)]

再処理技術に関しては、大きく湿式法と乾式法に分けられ、大型商業施設として稼動しているものは湿式法を採用している。再処理技術は、1944 年米国で原子爆弾製造を目的にプルトニウム生産炉の燃料からプルトニウムを回収することからスタートした経緯があり、核拡散防止の観点からもウラン濃縮技術と並んで機微技術に属する。初期の軍事用プルトニウム生産、天然ウラン・ガス炉燃料再処理というステップを経て、現在の主流である軽水炉使用済燃料の処理へと進んだ結果、機械的前処理法にピューレックス（PUREX : Plutonium Uranium Redox EXtraction）溶媒抽出法を組み合わせた方式（湿式法）が世界的に確立されている。

湿式法は溶液を用いる連続処理であるため、大規模化したときのスケールメリットが大きく、このため各国の商業施設で採用されている。湿式法は空気中の処理が可能であり、軽水炉燃料の再処理で実績が豊富である一方、有機溶媒を使用するため、放射線による劣化により二次廃棄物が発生する。また、元来プルトニウムの単離を目的としたプロセスであるため、日本では核拡散抵抗性の観点で最後のプロセスでウラン溶液と混合する必要がある。高レベル放射性廃棄物処分の負荷を低減するためにマイナーアクチノイド（MA : Minor Actinoid）を回収する場合には MA 回収工程を付加する必要がある。

乾式法は商用段階には至っていないが、有機溶媒などを使用せず、溶融塩や液体金属を使用するため、溶媒劣化がなく、冷却時間の短い使用済燃料も処理可能であり、二次廃棄物も少ない。また、原理的にプルトニウムの単離ができず、また、MA や希土類の核分裂生成物（FP : Fission Products）の一部がウラン-プルトニウムに同伴するため、核拡散抵抗性が高い。金属燃料サイクルの場合、ウラン-プルトニウム合金の回収物には MA が同伴するため、MA のサイクル内の閉じ込めが容易である。バッチ式の処理のため、小規模施設でも経済性が悪くならないことが期待される。しかしながら、実用化に向けては、高温での運転に長期に耐える材料やプロセス内の核物質の計量管理方法など課題が存在する。

我が国では日本原子力研究開発機構（JAEA : Japan Atomic Energy Agency）を中心に 1999 年 7 月から 2006 年 3 月まで実用化戦略調査研究が行われ、FBR、再処理、燃料製造などに関するこれまでの研究開発により得られた知見や事故の経験などを踏まえ、

幅広い FBR サイクル技術の中から技術選択肢の評価を行い、革新的な技術を取り入れつつ、競争力のある実用化候補概念の構築とその研究開発計画などの検討・策定を行った。国は、その研究成果を評価し、酸化物燃料を用いたナトリウム冷却 FBR、PUREX 法の簡素化を図り MA 回収も行う先進湿式法再処理、燃料粉末の取扱いを改善し遠隔操作により燃料を製造する簡素化ペレット法燃料製造の組合せを現在の知見で実用施設として実現性がもっとも高い実用システムの主概念とし、今後は実用化に集中した技術開発を行い、FBR サイクルの研究開発を加速すべきとした。2006 年からは、文部科学省・経済産業省・電力会社・メーカ・JAEA が一体となって、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT：Fast reactor Cycle Technology development project）プロジェクト」を進めてきた。また、軽水炉から高速増殖炉への移行期における核燃料サイクルに適用可能な再処理技術に関して、湿式法や乾式法を含むさまざまな再処理技術を対象として検討が行われた [6)]。

濃縮技術に関しては、微細穴を透過するときの拡散速度の違いを用いる「ガス拡散法」、遠心力の場で質量差による違いを用いる「遠心分離法」、電磁場で質量差による違いを用いる「電磁法」、およびノズルから吹き出す速度差を利用する「ノズル法」などが考え出された。また化学的に酸化還元時の反応差を利用した「イオン交換法」、光化学反応速度差を利用した「光化学的分離法」などがある。これらの方法は、すでに第二次世界大戦以前から原理的に可能であることが知られていたが、1960 年に米国のメイマンがレーザーを発明すると、レーザー光線を照射して分離する「レーザー法」が提案され、1970 年代から世界各国でガス拡散法および遠心分離法に代わる次世代のウラン濃縮法として研究開発が行われた。レーザー法には、ガス拡散法、遠心分離法などで利用される六フッ化ウランを使用する「分子レーザー法」と「SILEX 法（Separation of Isotopes by Laser EXcitation）」、金属ウランを高温にして発生させたウラン蒸気を使用する「原子レーザー法」がある。また、塩酸ウラン溶液を使用するイオン交換法についても次世代濃縮法として開発が行われた。

現在、商業用ウラン濃縮工場に採用されているのはガス拡散法と遠心分離法であり、ガス拡散法については、米国とフランスに、遠心分離法については、英国、オランダ、ドイツ、中国、ロシア、日本に商業用ウラン濃縮工場がある。ほかの方法については、実験室規模からパイロットプラントに至る色々な段階まで研究開発が行われたが、SILEX 法を除いてすべて開発は中止された。開発内容は、機微技術のため不明である。

MOX 燃料（Mixed-OXide fuel）は、天然ウランまたは回収ウランの二酸化物にプルトニウム二酸化物を混ぜて焼き固めたペレット燃料である。軽水炉に用いる MOX 燃料のプルトニウムの含有量（富化度）は平均すると数% 以下であり、高速増殖炉用の MOX 燃料では約 20%である。プルトニウム含有量の少ない軽水炉用 MOX 燃料は、ウラン酸化物燃料の性質とおおよそ類似している。ウラン酸化物燃料の製造とほぼ同様であるがプルトニウムを含むことから、プルトニウム混合工程が追加されるほか、必然的にプルトニウムスポットをチェックする検査工程もまた追加される。プルトニウムがウランより強いα放射体であること、臨界量が小さいことから、その取扱いにおいてウラン施設よりも厳しい安全上および保障措置上の規制が課せられる。

また、これら再処理の技術の研究レベル、技術レベルを国際交流も含めて高く維持す

るため、広い見識と豊かな教養をもった有能な研究者、技術者を育成していかなければならない。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）[1-4)]

湿式法による商業再処理施設では、経済性を向上させるために建設・運転費の削減は重要な課題であり、建屋敷地面積の削減と運転コストの削減を同時に達成するため、抽出サイクルの性能向上と全工程の簡素化による高度化が検討されている。また、気体、液体の形で発生する放射性廃棄物の適切な処理による環境放出低減化、運転・保守の遠隔化による従事者の被ばく低減化、材質、設計、施工に関する品質管理の高度化、保障措置対応の向上、深層防護設計に基づく安全確保、稼動率の向上など、多面的な技術開発の進展により大型施設が稼動しているが、継続的な改善のためにはこの取組みの継続が必要である。

個別プロセスで見ると、燃料の燃焼度が高まるにつれ残渣の量が増えるため、溶解液から残渣を除去（清澄）することが重要になり、最近の大型再処理施設では遠心式が採用されている。装置が回転機であるため保守が重要となる。また、PUREX 法の分離プロセスは非常に早いため、燃料の高燃焼度化による溶媒の放射線劣化対策として溶媒と水溶液との接触時間を短くするため、抽出装置がミキサセトラからパルスカラムに変わってきており遠心抽出器の採用も検討されている。

再処理はウラン資源有効利用のために使用済燃料からプルトニウムを回収し、それを FBR で利用することを基本としているため、先進的リサイクル技術の確立に向けた検討を継続していくことが重要であり、我が国では FaCT プロジェクトがこれに当たる。先進湿式法再処理では、晶析技術開発、ウラン・プルトニウム・ネプツニウムの共回収技術、抽出クロマトグラフィなどについて技術開発が、簡素化ペレット法燃料製造では脱硝・転換・造粒技術、成型技術などについて技術開発が進められた。

政策的な課題としては、現在商用 FBR がなく当面はプルサーマルとして軽水炉で利用することが考えられているが新規制基準対応もあり利用計画は進展していない。用いられている再処理技術がウラン、プルトニウムを高純度に分離回収するためのものであることから、回収したプルトニウムの平和利用のための使用計画が明確になっていることが国際的に重要である。我が国では核拡散抵抗性を考慮して、回収したプルトニウムはウランとの混合物として貯蔵されるが、それでもプルサーマルでの利用計画が明確でないことで批判を受けることがある。

濃縮技術は機密措置のため詳細は明確ではないが、主流技術である遠心法に関しては経済性向上のために、単機の分離能力向上やメンテナンスフリーの運転時間の延長が求められ、遠心機の材料開発、製造技術高度化などの技術開発が進められている。

MOX 燃料製造については、ウラン新燃料に比べ放射能が高い（特にアルファ線、中性子線が著しく高い）ため、燃料の製造については遠隔操作化を行い、作業員の不要な被ばくに十分配慮して行う必要がある。二酸化ウラン中に二酸化プルトニウムを混ぜることにより、燃料の融点が上がるが、熱伝導率が下がり、電気抵抗率が上がり、これにより燃料温度が高くなり溶けやすくなる。使用済 MOX 燃料の再処理では、使用済ウラン燃料に比べ、プルトニウムの取扱量が増えるため、臨界への配慮が重要になることや溶

媒劣化が起こりやすくなること、核分裂生成物のうち白金族の収率が増えるため、不溶解残渣が増加する傾向にあること、MOX 使用済燃料を再処理した高レベル廃液には発熱性の MA を多く含むため、それをガラス固化した場合、地層処分施設に熱的影響を与える可能性があることなど、対応すべき点がある。フランスでは MOX 使用済燃料の再処理に関して当初 APM（1962 年にマルクールで建設された再処理パイロットプラント）で研究が進められ、その後 UP2-400、UP2-800 においては、使用済 MOX 燃料溶解液を使用済ウラン燃料溶解液あるいは再処理で回収したウラン燃料溶解液で希釈することにより商用炉で発生した MOX 使用済燃料の再処理に成功している。我が国の東海再処理施設においては、同様の方法でふげん MOX 燃料の再処理を成功させている。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）[4,9)]

我が国においてはウラン資源有効利用の観点から、FaCT を進めてきたが、福島第一原子力発電所事故を受けて、現在、プロジェクトは事実上凍結の状態にある。その一方で、2013 年 9 月に文部科学省から示された「もんじゅ研究計画」に沿って放射性廃棄物の減容・有害度低減のための研究開発が進められつつある [7)]。

甘粛省嘉峪関では年間 800t の商業用再処理プラントの建設を AREVA 社の技術支援を得て計画しているが、2020 年頃には年間 800tHM の六ヶ所再処理工場と同規模の商業工場をフランスより導入し、運転する計画で、2013 年 4 月 25 日、中国とフランスの首脳（習近平主席－オランド大統領）が 再処理工場建設契約前の仕様を取り決めた同意書にサインした。

GE 日立によるレーザー法濃縮施設（SILEX 法）はパイロットプラント運転を経て 2012 年に許認可を取得した。今後商業化の最終判断が行われる予定。

### （６）キーワード

先進的リサイクル技術、MA 回収、Pu 利用、MOX 使用済燃料再処理、核拡散抵抗性、保障措置

## （７）国際比較 [1,8,9]

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | △ | → | ・大学の研究環境変化およびJAEAへの研究集中化により研究者数が減少している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・FaCT プロジェクトが進められてきたが、福島での事故を受けて事実上凍結。乾式再処理に関しては電中研で研究が進められている。放射性廃棄物の減容・有害度低減を目指す研究が進められつつある。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・六ヶ所のサイクル施設の建設（再処理、MOX）・操業（濃縮）が進んでいる。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | → | ・再処理路線は放棄されているため目立った研究活動は行われていない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・GE 日立社によるレーザー法濃縮施設（SILEX 法）はパイロットプラント運転を経て 2012 年に許認可を取得した。今後商業化の最終判断が行われる予定。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・濃縮は USEC 社がガス拡散法、LES 社が遠心法による工場で生産している。政策により商業用再処理は行わない。再転換・燃料加工設備は順調に運転されている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・英国原子力公社（UKAEA : United Kingdom Atomic Energy Authority）、フランス原子力・代替エネルギー庁（CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives）などの研究機関や大学において広範な研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・英国においては UKAEA が、フランスにおいては CEA が核燃料サイクルに関する研究開発を行っている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・再処理に関しては、フランスのラアーグ、英国のセラフィールドで大規模な工場が操業している。濃縮はフランスのトリカスタンに国際共同企業体ユーロディフ（EURODIF : European Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Consortium）が大規模なガス拡散法の工場を操業し、遠心法は URENCO 社がカーペンハースト（英）、アルメロ（オランダ）、グロナウ（ドイツ）に濃縮工場をもつている。MOX 燃料加工工場はマルクール（フランス）とデッセル（ベルギー）で操業中である。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・東工大・小澤教授の日中大学間核燃料サイクル学術討論会の状況などから広範囲にわたり戦略的に研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・上記同様、産業化に向けたマイルストーンを明確にして開発が進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・酒泉に軍事用再処理プラント、蘭州には多目的再処理プラント（50t/y）が稼動している。甘粛省嘉峪関では年間 800t の商業用再処理プラントの建設を AREVA 社の技術支援を得て計画している。ウラン燃料加工工場は 1950 年代より建設が開始され設備容量が順次拡大されている。国策が再処理路線のため、MOX 燃料製造のためのパイロットプラント建設が中国核工業総公司とベルゴニュークリア、ベルギー原子力研究センター（SCK-CEN : Studiecentrum voor Kernenergie - Centre d'étude de l'Energie Nucléaire）などとの間で技術指導・技術移転が図られる予定である。 |
| 韓国 | 基礎研究 | × | → | ・ワンススルー政策により核燃料サイクルに関する研究はほとんど実施されていない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・韓国原子力研究所（KAERI : Korea Atomic Energy Research Institute）において、次世代炉・先進的核燃料リサイクルの研究開発を行っている。使用済み燃料の再処理技術開発の一環として、世界で初めてパイロプロセスのすべての工程を工学規模の一貫工程で模擬できる試験施設の PRIDE（PyRoprocess Integrated inactive DEmonstration facility）を 2013 年上半期中に完成、試運転を経て、年内に運営を開始する予定である。 |
| | 産業化 | △ | → | ・韓国電力公社傘下の KNFC 社において、再転換および燃料の成型加工を実施している。再処理・濃縮施設に関しては保有の放棄を宣言している。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 原子力百科事典「ATOMICA」、(財)高度情報科学技術研究機構（RIST）
2) 「原子力ポケットブック2012年版」、(社)日本電気協会
3) 「原子力年鑑2014」、(社)日本原子力産業協会
4) 「核燃料サイクルを巡る現状について」新大綱策定会議（第4回）資料第2-1号、内閣府原子力政策担当室、平成23年2月
5) 電中研ニュース、460、2009年7月
6) 「核燃料サイクル分野の今後の展開について【技術的論点整理】」、高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会、2009年7月7) 「もんじゅ研究計画」、文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 もんじゅ研究計画作業部会、2013年9月
8) 平成24年度発電用原子炉等利環境調査（諸外国における原子力発電及び核燃料サイクル動向調査）最終報告書、一般財団法人 日本エネルギー経済研究所、平成25年3月
9) Science Portal China、中国の核燃料サイクルレビュー、中国科学技術月報2013年6月号（第80号） （www.spc.jst.go.jp）

## ３．３．２　原子力の将来に関わらず取り組むべき研究課題

### ３．３．２．１　高レベル放射性廃棄物の管理・処分

#### （１）研究開発領域名

高レベル放射性廃棄物の管理・処分

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

過去の原子力発電利用を通してすでに発生している高レベル放射性廃棄物、ならびに今後の原子力発電利用により発生する高レベル放射性廃棄物および使用済み核燃料を、科学技術的に妥当で、経済的に合理的で、社会的に受容可能な形で管理・処分するための研究開発領域である。そこには、福島第一原子力発電所事故により発生したデブリについても同様に安全に管理・処分することも含む。本領域では、高レベル放射性廃棄物、使用済み核燃料、デブリの総称として、高レベル放射性廃棄物と称するものとする。

少なくても既存の高レベル放射性廃棄物とデブリの管理・処分のための研究開発は、それらの発生者として現世代が全責任を負っているが、同時にそれは将来世代の意思決定プロセスに相応の柔軟性を保証するものでなければならない。また、放射性廃棄物の管理・処分の問題は、デブリを含めてすでに発生した廃棄物についての対応は求められるのであって、我が国が原子力に依存しないと決めたとしても、廃棄物問題からは決して解放されない。本研究開発領域は、処分の性能評価・安全評価を支える物理、化学、数学から、処分場の設計・建設・操業・閉鎖までの工学技術のほか、世代内・世代間倫理や国際政治まで幅広い。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

高レベル放射性廃棄物の管理・処分では、いわゆる工学・自然科学という範疇に絞っても、ピコ秒レベルで発生する物理反応、化学反応の理解から 100 万年を超える時間スケールでの性能を論理で立証する性能評価の体系化や、原子・分子レベルでの反応の理解から数 km 以上の空間スケールでの地層の安定性や海水準変動・地球温暖化の影響などを取り込む評価を可能とする研究開発が不可欠である。また、高レベル放射性廃棄物の管理・処分システムの構築とは、自動車開発のように、試験や実際の事故・故障を通しての安全性向上という既存の人工物の開発と同じ方法論が取れないこと、すなわち数世代という時間枠ですら安全を実証することは不可能という人類がこれまで経験したことのない人工システムの構築を意味する。さらに事故や故障を通して同時に発展する安全基準・安全規制のあり方も、安全を決して実証できない人工システムを対象とすることでこれまでの考え方とは異質なものとならざる得ない。

また、工学、物理、化学、数学に重心をおく研究開発領域だけが対象となるのではない。核不拡散や核セキュリティといった国際政治との関係、立地地域と処分施設ならびに日本という国全体との共生のあり方、倫理観や文明史観における世代間のギャップをどのように考えるのか、といった研究領域も含まれる。

高レベル放射性廃棄物の管理・処分について、具体的には以下のような研究開発課題例が存在する。なお、主要な放射性核種の吸着挙動解明、コロイドや微生物の影響の定量化、掘削影響領域での物質輸送の理解、地下処分施設建設のための掘削技術の高度化、

日本に処分場を建設できる安定な地層は本当にあるのかといった過去 30 年間重要な研究開発課題として指摘され続けてきているものは他書 [1-3] に譲る。ただし、それらの課題は下記の課題例とも相互に密接に関連しており、重要であることには変わりはない。

1.高レベル放射性廃棄物の管理・処分における性能評価の信頼性向上

管理・処分システムが長期にわたってどのような振る舞いをするのかについてシナリオを想定し、モデルを構築して、将来の最大被ばく線量率を計算し、安全基準値より小さいことを示すことは性能評価のごく一部に過ぎない。性能評価とは、決して実証し得ないシステムの振舞いを、上述の計算やそれを支える物理、化学、数学を含め、有形・無形の知識･知恵のデータベース化や体系化などを包含して記述する論理の総体をいう。国ごとの事情も勘案し、科学技術的にはもちろん、経済的、社会的、環境的にいかにロバストな論理体系とできるかが問われている。

2.長期リスクに対応した安全規制科学の確立

高レベル放射性廃棄物の管理・処分の通常シナリオでは、そのリスクは小さくまた最大リスクは数 10 万年後に現れることになっている。また、管理・処分システムが安全であることは、実験や試験を通して実証することは決してできない。そのようなリスクを対象とする安全規制の考え方は確立していない。また、閉鎖後モニタリング終了までででも数 100 年とされる時間枠内でも、操業許可時や閉鎖許可時とは違う知識や技術の発展があり、社会的要請の変化もあり得る。それに柔軟に対応し社会的に合理的な安全を確保するための安全規制に関する技術開発が望まれる。

3.可逆性と回収可能性に関する技術開発と制度整備

可逆性は処分計画を段階的に進め、それぞれの段階において可能な選択肢を残すことによって、所定の期間、処分場の管理に柔軟性を残すことを意図する。回収可能性は、廃棄物の処分場への埋設段階を逆戻りさせる可能性を意図する。我が国における、可逆性および回収可能性の定義とその社会的、技術的な位置づけを明確にするとともに、管理・処分戦略の中にどの程度取り込むべきなのか、国のエネルギー政策や安全規制との関係をどうするのかを明らかにし、そのための技術開発を行う必要がある。

4.核不拡散・核セキュリティ確保のための技術開発と制度設計

使用済み核燃料やデブリの中には、原子炉級のプルトニウムが含有される。原子炉級のプルトニウムは核兵器転用が可能であるため、使用済み核燃料やデブリの管理施設、処分施設には相応の核不拡散・核セキュリティ確保のための技術開発、制度設計が求められる。インサイダー対策や出入口監視カメラの設置などほかの原子力施設と同様な課題のほか、地下 300 m 以深への遠隔での埋設や、埋設作業と処分坑道埋め戻し作業が並行して進む、閉鎖後数 100 年後には安全確認のためのモニタリングは終了することが想定されているなどの処分施設特有の特性に対応する必要がある。そしてそれらを勘案した保障措置、核物質防護の制度設計が求められる。

5.分離変換技術開発

かつて分離変換技術は、主にインベントリのハザードを大幅に低減するものとして研究開発されたものであり、分離変換によっても高レベル放射性廃棄物管理・処分は必須ではあるが、一部においては、処分システムでのリスク低減の効果がみられる[4]。ただ、使用済み核燃料の処分で重要となるセシウム 135 やヨウ素 129 への対応など、高レベル放射性廃棄物処分システム高度化の一翼を担うものとしての位置づけを明確にした上で、例えば加速器駆動核変換システム（ADS：Accelerator Driven System）による変換のための核特性評価や燃料製造技術開発、燃料挙動評価といった要素技術の実証と確立、窒化物燃料の乾式再処理技術の実証と確立、ADS をコアとした分離変換トータルシステムの設計や原子力システム全体での評価が望まれる[5]。

6.社会的意思決定

高レベル放射性廃棄物管理･処分における大きな課題は最終処分場の選定問題である。この問題は、処分場候補地だけの問題ではなく、原子力エネルギーを利用している国民全体の問題でもある。処分場候補地を含む地域コミュニティと国民全体が一緒になって意思決定することを支援するための、情報の提供方法、住民の主体的参加と理解促進方法（処分場受け入れを前提とするのではなく、参加と理解の結果受け入れないという意思決定を住民が行うことを支援する方法も含まれる）、主に便益のみを享受する消費地とリスクも負うことになる候補地との関係、何世代にもわたる長期的リスクを現世代の判断だけで引き受けるという決定ができるのかという世代間倫理の問題などのほか、原子力政策や処分実施主体の組織論などに関する研究開発が必要である。

7.知識や情報の長期管理と継承

高レベル放射性廃棄物が、いつ、どこに、どのような経緯で、どれだけ、どのような形態・状態で埋設されたのかなどの知識や情報を、何世代にもわたって正確に伝承できるようにするための技術開発は必須である。これがいかに困難な課題であるかは、エジプトのピラミッドの建設理由が専門家の間でも意見が一致していないこと、多くの重要な書籍や書類が戦火や政権交代の中で消失し隠滅されてきたこと、パソコンの OS の更新により過去のデータが読めなくなること、古代文字で解読できていない文字があることなどから、容易に理解できる。

8.デブリの管理・処分特有の課題

多くのところで上記 1～7 と重なるが、デブリの保管方法、保管容器の長期健全性、デブリの地下環境中での安定性の理解などのほか、デブリの処分方法は一般の高レベル放射性廃棄物と同等でよいのか、管理・処分施設立地は社会的にどのように考えるべきなのか、合理的な処分を実現するための処理方法はどうあるべきか、などの課題がある。

高レベル放射性廃棄物処分の管理・処分の研究開発領域の多くは世界共通であるが、一方で例えばカナダの場合、氷河期には最大で厚さ 3 km の氷床に覆われることによって地下水流動や地質構造に変化が生じる可能性がありそれらを定量的に予測する必要がある。また、オンタリオ州南西部の地下水はイオン強度が 5～8 mol/L（海水は 0.7 mol/L）

の高塩濃度であるため、そこでの放射性核種の物質輸送の解明が重要となる。さらに、原油を満載した列車が脱線し多数の死者・行方不明者を出した 2013 年のラック・メガンティック事故の例にみるように、鉄道で高レベル放射性廃棄物を輸送する際の安全確保技術（竜巻など悪天候の影響なども含む）が求められているなど、それぞれの国固有の事情による研究開発項目は、それぞれの国で着実に進められている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

地質環境が複雑で地震や火山の活動が活発な我が国では、地質環境の長期安定性に関する科学技術的合意が専門家の間でも必ずしも取れているという段階に至っていないことをはじめ、核不拡散・核セキュリティ・核物質防護の分野で米国の専門家と対等に議論できる専門家がほとんどいないことや、放射性廃棄物管理・処分の専門家と一般社会とはもちろん、社会科学や倫理学、歴史学などの専門家とのコミュニケーションがほとんど皆無であるだけではなく、物理や化学の専門家、さらには放射性廃棄物管理・処分以外の原子力の専門家との連携も弱い。他流試合を避け、小さいアカデミアの中だけで閉じてしまっている。ただし、これは我が国だけにみられる問題ではない。また社会科学系分野やほかの自然科学系分野にも放射性廃棄物管理・処分分野を理解しようという意識がないことにも問題がある。

また、本分野は、材料面、場所、冷却、社会工学、維持管理、品質保証など放射線以外にもさまざまな分野の技術を総合しなければならない重要技術である。撤退、推進に関わらず必須の技術であり、原子力関係のみならず材料、機械、電気、化学など多様な人材の確保が急務である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国では、2012 年 1 月にブルーリボン委員会により放射性廃棄物管理を含むバックエンド対策の代替案が検討され勧告が出された。現在連邦議会でも勧告に沿った検討が進められるとともに、勧告への対応に関連した研究開発も開始されている [6,7]。

カナダでは「適応性のある段階的管理」が実施され、2014 年 7 月現在で 14 箇所（すべて原子力施設が立地していない自治体）においてサイト選定の評価が進められている [8]。数年内に 1、2 箇所に絞り込まれる予定である。

英国では、原子力産業界と政府が共同で「英国の原子力の将来」と題した報告書を 2013 年 3 月に取りまとめ、「地層処分場の開発は優先度の高い課題」とした [9]。この報告書は、英国の原子力開発の中長期戦略となるものであり、地層処分に関するマイルストーンが設定された。

中国では、2006 年に決定された「高レベル放射性廃棄物地層処分に関する研究開発計画ガイド」 [10]に基づき、技術開発とサイト選定が着実に進められている。

### （６）キーワード

高レベル放射性廃棄物、使用済み燃料、デブリ、廃棄物管理、廃棄物処分、性能評価・安全評価、長期リスク管理、核不拡散、核セキュリティ

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・大学や研究機関において世界トップクラスの基礎研究が継続的に実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・福島第一原子力発電所事故以降、応用研究・開発レベルでの研究は世界的に顕著な成果をあげるには至っていない。 |
| | 産業化 | × | ↘ | ・福島第一原子力発電所事故以降、サイト選定プロセスは事実上停止している。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・ブルーリボン委員会の勧告に対応した基礎研究が大学や研究機関で進められている [6]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・使用済み燃料の長期化した貯蔵を支援する研究開発、発熱性廃棄物処分のための岩塩処分場のフィールド試験、同意に基づくサイト選定プロセスの計画策定ほか、ブルーリボン委員会勧告に対応した使用済み燃料処分などプログラムが予算の裏づけのもとで実施されている [6]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・米国エネルギー省（DOE：United States Department of Energy）は、2013 年 1 月に「使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の管理・処分戦略」を公表し、2025 年までに使用済燃料の中間貯蔵施設が使用可能となるようにサイト選定と許認可を実施すること、2048 年までに地層処分場を実現するように処分場のサイト選定とサイト特性調査を進めることなどのスケジュールを示した [7]。<br>・連邦議会でもブルーリボン委員会の勧告に基づいた法案の審議が進んでいる。 |
| ｶﾅﾀﾞ | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・大学や研究機関において高塩濃度における物質輸送、鉱物空隙水化学、吸着のデーターベース化などが着実に進められている [11,12]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・カナダ楯状地の結晶質岩系での処分システムの安全評価に続き、堆積岩系での安全評価も実施できるレベルに達している [13]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・21 箇所の関心表明を受け、サイト選定プロセスが進められ、14 箇所まで絞り込まれている [8]。数年内に 1、2 箇所に絞られる予定である。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・高塩濃度や標準状態よりも高い温度での化学熱力学、物質輸送などに関する基礎研究が継続して実施されるとともに、欧州内でのベータベース整備も進んでいる [14,15]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・フランス・ビュール地下研究所やスイス・モンテリ岩盤研究所などで、ガス拡散、微生物活動、母岩への熱影響などさまざまな応用研究や技術開発が進められている [16,17]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・フィンランドで放射線・原子力安全センターによる建設許可申請書に対する安全審査の第一段階が完了した。<br>・スウェーデン・フォルスマルクにおける立地・建設許可申請書に対する安全審査が実施中である。 |
| 中国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・大学や研究機関により基礎研究が精力的に行われている [18]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・甘粛省北山の地質環境などを意識した応用研究や技術開発に関する論文も最近多く発表されるようになっている [19]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・過去の調査で選定された 5 箇所の候補地域のうち、甘粛省北山とその周辺での調査が進んでいる。さらに新疆地域も追加された。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・乾式再処理を前提にした処分に関する研究を中心に、基礎研究が大学や研究機関において実施されている [20]。ただし、米韓原子力協定改定時における乾式再処理承認を目指し、国内に相当の学術的・技術的背景があるという証拠を積み上げたいという事情もあると思われる。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・使用済み核燃料の処理・処分に関する方針策定が議論されている途上で、放射性廃棄物管理基本計画が 2014 年中に決定される予定である。このため、応用研究や技術開発に顕著な活動はまだみられていない。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・公論化と呼ばれる社会的コンセンサスを得るための枠組みやスケジュールが決定された [21]。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 長﨑晋也, 中山真一編, 放射性廃棄物の工学, オーム社 (2011).
2) 電気事業連合会, TRU廃棄物処分技術検討書: 第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ (2005).
3) 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業の安全確保(2010年度版), NUMO-TR-11-01 (2011).
4) J. Ahn and T. Ikegami, Effective Application of Partitioning and Transmutation Technologies to Geologic Disposal, Eighth Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning & Transmutation, Las Vegas, Nevada, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD/NEA), Nov. 9-11, 2004.
5) 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会(第 5 回), 配布資料2-1, 2-2, 3 (2013).
6) http://energy.gov/ne/downloads/used-fuel-disposition-campaign-disposal-research-and-development
7) DOE, Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste (2013)
8) http://www.nwmo.ca/home?language=en_CA
9) https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/168048/bis-13-627-nuclear-industrial-strategy-the-uks-nuclear-future.pdf
10) http://www.gov.cn/gzdt/2006-02/23/content_208957.htm
11) S. Nagasaki, Impact of Colloid Formation on Safety Assessment of Waste Disposal in Brine, Proceedings of PBNC 2014, Vancouver, Canada, August 24-28 (2014).
12) NWMO, Technical Program for Long-Term. Management of Canada's Used Nuclear. Fuel – Annual Report 2012, NWMO-TR-2013-01 (2013).
13) NWMO, Adaptive Phased Management: Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock, NWMO-TR-2013-07 (2013).
14) https://www.thereda.de/
15) https://www.hzdr.de/db/res3t.login

16) http://www.andra.fr/international/
17) http://www.nagra.ch/en
18) 例えば、JF. Liu, et al., Characterizing the Mechanical Tensile Behavior of Beishan Granite with Different Experimental Methods, 2014, Inter. J. Rock Mech. Mining Sci., Vol. 69, 50-58.
19) 例えば、ZG. Ah, et al., Multi-geophysical Investigation of Geological Structures in a Preselected High-level Radioactive Waste Disposal in Northwestern China, 2013, J. Environ. Eng. Geophys., Vol. 18, 137-146.
20) 例えば、B. Wang, et al., Finite Element Analysis of Stresses and Deformations Occurring in the Spent Nuclear Fuel (SNF) Disposal Canister Deposited in a Deep Geological Repository, 2014, Nucl. Eng. Design, Vol. 266, 166-179.
21) http://www.misowe.kr/activity/news.asp?menu=10&idx=310&state=view

### ３．３．２．２　低レベル放射性廃棄物の管理

#### （１）研究開発領域名

低レベル放射性廃棄物の管理

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明 [1)]

原子力発電所をはじめとする原子力関連施設や大学の研究機関、放射性医薬品を利用する病院などからは、紙、布、ゴム手袋、雑固体、洗浄廃液などさまざまな低レベル放射性廃棄物が発生する。これらの低レベル放射性廃棄物は焼却、圧縮、固化などの処理を行った後、ドラム缶などに収納し、おのおのの施設の敷地内貯蔵庫に安全に保管されている。放射性廃棄物の減容は、物理的・化学的な安定化とともに貯蔵や処分における負担を軽減する上で有効であり、従来からさまざまな処理技術が開発されてきている。

我が国では、低レベル放射性廃棄物の処分は、放射能濃度に応じて 3 種類（ 1）放射能レベルが極めて低い廃棄物、2）放射能レベルの比較的低い廃棄物、3）放射能レベルの比較的高い廃棄物）に分類し、すでに 1）および 2）の廃棄物の処分が実施されている。

放射能レベルが極めて低い廃棄物を対象としたトレンチ処分方式の浅地中埋設処分は、旧日本原子力研究所東海研究所（現日本原子力研究開発機構原子力科学研究所）の動力試験炉 JPDR の解体によって発生した非常にレベルの低いコンクリートなど廃棄物の埋設実地試験の処分方式として採用されている。また、放射能レベルの比較的低い廃棄物を対象としコンクリートピットを設置した浅地中処分は、日本原燃（株）の六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターにおいて 1992 年 12 月以降実施している。放射能レベルの比較的高い廃棄物を対象にした余裕深度処分については、六ヶ所村において本格調査が行われた。

また、RI・研究所等廃棄物は、施設解体物分を含め多くが浅地中処分の対象物であり、日本原子力研究開発機構が処分施設の開設目標を平成 30 年として検討を進めている。

処分する廃棄体中の放射性核種濃度を確認することは法令要求であるだけでなく、処分後の安全性を評価するうえで重要であり、さまざまな放射能濃度決定方法が開発され運用されている。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向 [1-3)]

原子力発電所で発生する低レベル放射性廃棄物には、建物の換気、洗濯廃液、使用済みのペーパータオルや古い作業衣や手袋など、「気体状のもの」、「液体状のもの」、「固体状のもの」があり、これらは性状を踏まえて管理、処理される。気体状のものは、放射性物質を減衰させ、フィルターにかけて粒子状物質を除いたあと、放射性物質の濃度を測定し、安全を確認し排気筒から放出される。その後は排気筒モニタで排気中の放射線量を測定し、測定値はリアルタイム情報として各電力会社のホームページ上で公開されている。液体状のものは、ろ過し、脱塩され、あるいは蒸発濃縮される。濃縮液はセメント、アスファルトなどで固化し、ドラム缶（200 L）に詰められ発電所内の放射性固体廃棄物貯蔵庫に安全に保管される。また、蒸留水は再利用するか、放射性物質の濃度を測定し安全を確認したうえで海へ放出される。このように、処分施設に埋設される前に

は、廃棄物は減容および安定化のために固化処理される。

放射性の固体状廃棄物としては、可燃性のもの、難燃性のもの、金属のように不燃性のものが発生する。一般的には、減容のためこれらの廃棄物のうち可燃物については焼却処理を行い、難燃物や不燃物については圧縮処理または溶融処理が行われている。

圧縮装置には、廃棄物をドラム缶の内部で圧縮する方式と、廃棄物を圧縮機内部で円筒形など一定形状に圧縮形成した後にドラム缶に充填する方式がある。加圧力は 5～200t のものが大半であったが、2000 t 級の高圧縮装置の採用が進んでいる。

焼却設備にはさまざまな方式があり、燃焼様態からは燃焼に十分な空気を供給して積極的に燃焼させる過剰空気燃焼式と、低酸素濃度の高温雰囲気下で廃棄物を熱分解させ、発生するガスに空気を吹き込んで燃焼させる熱分解ガス化燃焼式に分類される。また、炉の形式からは固定炉床、可動炉床、流動床に分類される。焼却能力としては 15～300 kg/h のものがほとんどである。排ガスの処理には、セラミックなどの無機材料をろ過材とする高温フィルターのほか、バグフィルタ、サイクロン、排気冷却器、HEPA フィルター（High Efficiency Particulate Air Filter）、排気洗浄塔（スクラバ）などが、目的に応じて選択・組合わされて用いられる。大半の焼却設備は、廃棄物を焼却し灰として取り出すものであるが、高温で焼却するとともに灰を溶融してガラス質の粒子（グラニュール）にする高温焼却炉も国内の原子力発電所に導入されている。

不燃性廃棄物に関しては、近年、さらに高い減容安定化効果をもつ溶融処理技術が開発され、国内の一部では実規模施設が整備されて導入が進んでいる。溶融方法は、1）誘導溶融、2）プラズマ溶融、3）マイクロ波溶融がある。

ドイツ、スウェーデン、フランス、米国では、再利用を目的とした金属廃棄物の溶融処理が工業規模で行われている。ステンレス鋼や炭素鋼などの廃材を主な対象とし、それぞれの国の放射能レベル基準にしたがって区分した後、溶融処理によってインゴット、鋼管、レールなどに作り替えて、原子力施設などの限定された範囲での再利用や、一般鋼材と同様の非限定的な再利用を図っている。

金属以外の廃棄物の溶融処理の例は少ないが、スイスでは、アールガウ州に建設した放射性廃棄物の集中処理と中間貯蔵を行う ZWILAG 中間貯蔵施設に、プラズマ焼却・溶融設備を整備して試運転を行っている。この設備は、スイス国内の原子力発電所、医療機関、研究機関などで発生する廃棄物の減容、安定化のために使用される。また、ロシア国営廃棄物処理機関 RADON のモスクワ科学工業協会には、廃棄物を焼却しその焼却灰をスラグ（ガラス状の固形物）化する焼却炉とプラズマ溶融炉の複合設備が整備された。

原子力施設において発生する放射性廃棄物は、安全に貯蔵、処分するために、各種の材料を用いて安定な形態に固化される。低レベル放射性廃棄物の固化法としては、セメント固化法、アスファルト（ビチューメン）固化法およびプラスチック固化法がある。このうち我が国を始め世界的にももっとも多く採用されているものがセメント固化法である。

セメント固化法は、原子力発電所から発生する放射性廃棄物のうち、放射性濃縮廃液、使用済みイオン交換樹脂、フィルタスラッジ、放射性スラリー、焼却灰および不燃性の雑固体を水硬性セメントと混和して、通常は 200 L ドラム缶などに充填して固化、もし

くは、ドラム缶中に固体廃棄物を充填しておき、その空隙にセメントミルクを注入して固化するものである。放射性廃棄物のセメント固化における利点は、セメント自体が安価であり、また、装置が簡単で処分容器内で固化処理も可能であり、放射線による劣化が起こりにくいなどがある。一方、欠点としては、減容性が期待できず増容となること、耐浸出性が劣ることなどである。しかし、近年、優れたセメント固化手法や混和材料の開発がなされ、ますます利用が期待されている。

アスファルト固化法は、原子力発電所、使用済核燃料の再処理施設などで発生する低レベル放射性廃棄物を加熱・溶融したアスファルトとともに混合し、固化体内に安定に閉じ込める廃棄物処理法である。廃棄物中の残存水分のほとんどが作製過程において除去されるので、セメント固化法に比べ優れた減容効果を持ち、また、耐浸出性も高い。廃棄物を数十%の高濃度まで含有可能であることも特徴である。問題点としては、固化体自身が可燃性であることなどがある。アスファルト固化体は、廃棄物塩を高濃度で含むため純粋なアスファルトとは異なる性質をもつ。固化体内での塩の不均質化や塩の吸水による固化体の膨潤は浸出特性に悪影響を及ぼす。国際的にアスファルト固化体の発生量は減少している。

放射性廃棄物の放射能濃度決定方法は、評価の対象となる廃棄物の種類や核種の条件を十分に考慮して、核種ごとに決定する。方法としては、1）非破壊外部測定法、2）スケーリングファクタ法、3）平均放射能濃度法、4）理論計算法、5）廃棄体破壊分析法、6）原廃棄物分析法、がある。対象の廃棄物の放射能濃度が高くなるほど分析が困難になるため、理論計算法などの解析的手法の適用が重要となる。また、処分後の安全評価で重要な核種には難測定核種もあるため、それらの分析手法の開発も行われている。

低レベル廃棄物処分場については、現状すでに浅地中処分施設（ピット）は操業されているものの埋設対象は原子力発電所の運転廃棄物に限定されている。今後は、廃止措置にともなう解体廃棄物やサイクル施設からの廃棄物を埋設可能とするよう検討が必要である。また、余裕深度処分施設に関しては、旧原子力安全委員会で検討が進められたものの現在は規制基準が未整備のため、制度が明確になった後にさらなる技術検討が必要な段階である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

廃棄物の処理・処分の観点では、原子力発電所で発生した廃棄物でさえ、そのすべてが埋設対象となっていないため、埋設のための技術基準を満足できるような処理技術の開発が課題であり、その際には環境に影響を及ぼす物質への配慮も必要である。サイクル施設のように今後本格的に操業する原子力施設からの廃棄物や、RI・研究所等廃棄物のように雑多な廃棄物が混在するものについては、主要な放射性核種を同定することと、その放射能濃度決定法の検討が重要である。

低レベル廃棄物の処分に関しては、幅広い廃棄物が対象となるものの、まだ一部の廃棄物の処分しか行われていない。規制制度に関しては、余裕深度処分について未整備である。今後、廃止措置が進むことを考えると、解体によって発生するすべての廃棄物の処分先、再利用先を確保することによって円滑な廃止措置実施が可能となるため、処分

先の立地とクリアランスの廃棄物および放射性廃棄物でない廃棄物（NR 物：Non Radioactive Waste）の再利用先の確保が重要な課題である。これらが進まないと日本原電・東海発電所、浜岡発電所 1、2 号機の廃止措置の進捗に影響を与えるおそれがある。

処理技術に関しては、まだ埋設施設に搬出できておらず発電所で保管を継続している廃棄物も、いずれは処分できないと廃止措置が完了できないことから、当該廃棄物について処理技術の開発および処分後の安全性評価の検討を進め、すべての廃棄物を処分可能とすることが必要である。また、廃止措置が進むことにより廃棄物発生量は一段と増加することになるが、最終処分先の確保が非常に難しいことを鑑みれば、減容・安定化技術をさらに進めて、廃棄物の管理・処分の負担を軽減することが肝心である。

低レベル放射性廃棄物ではないが、クリアランスレベルの廃棄物および NR 物の再利用や産廃処分が進められないと、原子力施設における廃棄物管理の負担が増え、最悪の場合、それらを放射性廃棄物として処分せざるを得ない状況も考えられるため、クリアランスレベルの廃棄物および NR 物の再利用や産廃処分を進めることは低レベル放射性廃棄物量の低減に寄与するものと考える。

処分施設の安全性の評価は、ほかの原子力施設と異なり長期の評価が求められるため、評価の信頼性を向上させるために、データの蓄積のみならず、不確実性の取り扱い方、長期のシミュレーション技術開発などの取組みを着実に実施していくことが重要である。

法体系が異なるものの、福島第一原子力発電所事故に由来する除染廃棄物も放射能レベルとしては大部分が低レベル放射性廃棄物と同等であり、現在は除染技術開発が各機関において実施されている。除染廃棄物の最終処分方法については、従来の検討成果を活用して安全かつ合理的な方式を今後定めていく必要がある。

以上のように低レベル放射性廃棄物の処理･処分の重要性は今後ますます高まるため、技術開発のみならず、確実に処理・処分を実施するためにも人材確保は大きな課題である。また、処理・処分を進めるためには事業者は説明責任を根気よく果たしていくとともに、国も規制制度の安全性についてわかりやすく説明していくことが肝要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

環境法関連では放射性物質の除外規定が外されたことにより、放射性廃棄物中の環境影響物質への配慮がますます重要になっており、難測定核種の濃度決定方法の開発のみならず、廃棄物中の組成評価手法の開発が重要となってくる。

福島第一原子力発電所事故に由来する除染廃棄物については、中間貯蔵に向けた取組みが進みつつあるが、その後の最終処分について、立地だけでなく廃棄物特性を踏まえた技術的検討を加速することが重要であり、動向が注目される。

新規制基準では放射性廃棄物処分場の安全確保のために、埋設後施設閉鎖までの間のモニタリングの重要性が高められており、埋設施設に擾乱を与えない効果的なモニタリング手法の開発が進められるものと考えられる。

処分後の長期評価は放射性廃棄物処分の特徴であり、従来から検討されていたが、より現実的な評価が求められており、限られたデータを基にした外挿評価の信頼性を向上させるために研究開発が、よりいっそう活発に進められると思われ、国際的にも各種解析手法の開発ならびにデータベースの拡充が期待される。また、処分の安全性を示すた

めに国際的に Safety Case の作成・提示が有効と考えられており、我が国でも Safety Case と呼ばれるすべての安全論拠の文書体系の作成を念頭に日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）における知識管理システムの開発がなされている。

### （６）キーワード

放射能濃度決定法、難測定核種、モニタリング手法、Safety Case、不確実性、減容、安定化

## （７）国際比較 4-6)

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・福島第一原子力発電所事故による除染廃棄物に関する研究が各機関において盛んに行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・JAEA による除染モデル実証事業が行われている。<br>・発電所廃棄物においても処理技術の高度化検討が行われている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・浅地中ピット処分を日本原燃（株）の六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターにおいて 1992 年 12 月以降実施。<br>・研究施設等廃棄物の処分を JAEA が準備中。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | → | ・処理処分技術に関する大学などによる研究の情報は少ない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・WCS 社はクラス C を超える放射性濃度の廃棄物（GTCC：Greater Than Class C）および TRU（TRans-Uranium)廃棄物の受入長期貯蔵の認可取得。 |
| | 産業化 | ○ | ↘ | ・バーンウェル処分場（サウスカロライナ州）、リッチランド処分場（ワシントン州）、クライブ処分場（ユタ州）、WCS テキサス処分場（テキサス州）が操業中で、A-C クラス廃棄物を受入。州間協定に基づき処分をするため事業者によっては処分サイトがないという問題を早急に解決する必要がある。 |
| 欧州 | 基礎研究 | △ | → | ・処理処分技術に関する大学などによる研究の情報は少ない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・特に顕著な活動は行われていない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・主要各国とも低レベル放射性廃棄物処分場は整備済み。 |
| 中国 | 基礎研究 | × | → | ・処理処分技術に関する基礎研究情報はない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・蒸発減容された中・低レベル液体放射性廃棄物の処理方法については、アスファルト（ビチューメン）固化、セメント固化技術が、1994 年からフランス原子力・代替エネルギー庁（CEA：Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives）の技術協力を得て実証されている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・1999 年には「西北廃棄物処分場」（甘粛省北山地区）の工事が終了し、試験操業段階に入った（処分容量：6 万 $m^3$)。また、中低レベル廃棄物処分用の水圧注入インシチューグラウト処分施設（液体廃棄物を水圧で直接地層に注入・セメント固化する）も建設されている。<br>・2000 年には稼動中の広東嶺澳・大亜湾原子力発電所から 5km 離れた北龍サイトに低・中レベル放射性廃棄物処理場が試験操業を開始している（処分容量：8 万$m^3$)。<br>・両処理場に関しては 2011 年 1 月、中国国家核安全局が操業許可を発給し、本格操業を開始している。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・KAIST（Korea Advanced Institute of Science and Technology）により基礎研究が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・韓国水力原子力社の傘下の原子力環境技術院（NETEC: Nuclear Environment Technology Institute）が放射性廃棄物処理処分の研究開発およびサイト確保事業を担当している。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・韓国放射性廃棄物管理公団（KRMC：Korea Radioactive Waste Management Co.）により 2008 年 8 月より建設中の中・低レベル放射性廃棄物の処分場である慶州市の「月城（ウォルソン）原子力環境管理センター」の建設工事が 2014 年 6 月 30 日に完了し、2014 年 7 月中旬に竣工検査を実施予定であることを公表した。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 「原子力年鑑2014」、(社)日本原子力産業協会
2) 「原子力ポケットブック2012年版」、(社)日本電気協会
3) 原子力百科事典「ATOMICA」、(財)高度情報科学技術研究機構（RIST）4）諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて(2014年版)、原子力環境整備促進・資金管理センター
5) 平成22年度　放射性廃棄物海外総合情報調査報告書、原子力環境整備促進・資金管理センター
6) 諸外国における低レベル放射性廃棄物処分の現状について、ＲＩ・研究所等廃棄物作業部会(第４回)、資料第４－１－１号、2010

### ３．３．２．３　使用済み核燃料の管理

#### （１）研究開発領域名

使用済み核燃料の管理

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

使用済み核燃料の貯蔵能力の拡大需要に備えて、コンクリートキャスク貯蔵の実用化技術および長期貯蔵に必要な経年劣化管理技術を開発する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1) 国内外の動向

米国では 1980 年代に金属キャスク貯蔵が実用化したが、1990 年以降、経済的なコンクリートキャスク貯蔵技術が開発され、現時点では約 9 割を占める [1)]。また、使用済燃料の長期貯蔵に向けた大規模な研究開発を推進している。欧州ではドイツで金属キャスク貯蔵 [2)] が実用化され、今後予想される長期貯蔵に備えた定期安全レビューを法制化しつつある。スペインでは、コンクリートキャスクおよび金属キャスク貯蔵技術が実用化している [3)]。韓国では、毎年約 700t 以上の使用済燃料が発生しており、サイト内の中間貯蔵容量は 2016 年には貯蔵容量の限度に達する見込みである [4)]。韓国ではコンクリートキャスク貯蔵を選択肢の一つとして、実用化に備えて、航空機衝突時の評価試験などの研究開発を行っている [5)]。

国際原子力機関（IAEA：International Atomic Energy Agency）では、世界各国での使用済燃料の再処理や処分計画の遅れなどから、使用済燃料の長期貯蔵に備えて技術文書の作成や長期経年劣化管理計画作成の技術文書技術の作成に着手している。

日本においては、使用済燃料はこれまでに約 1.7 万ｔが発生しており、今後も原子力発電に伴い発生することになる。エネルギー基本計画では、使用済燃料の再処理やプルサーマルなどを推進するとしているが、それまでの間、使用済燃料の安全な管理が不可欠である。これまで、使用済燃料の輸送・貯蔵兼用金属キャスクによる貯蔵技術が実用化しつつあるが、今後の貯蔵能力の拡大需要に備えて、コンクリートキャスク貯蔵方式などの代替方式の要素研究が行われている。

2) コンクリートキャスク貯蔵技術の実用化

コンクリートキャスクは、コンクリート製貯蔵容器とステンレス鋼製の円筒状密封容器（キャニスタ）より構成される。キャニスタ内の使用済燃料の崩壊熱については、上下に設けた空気の流通口を通じ外気を自然対流させることにより、効率的に除去する構造となっている。

コンクリートキャスクのメリットは、次のような点である。金属キャスクより経済的で製造期間が短い（12 か月）、貯蔵後の処分が金属キャスクに比べて簡単、直接キャニスタを空冷するので金属キャスクに比べて冷却能力が高い、コンクリート容器は貯蔵専用のため、輸送重量の制限を受けず貯蔵時の遮蔽設計が可能、縦横の寸法比が地震時に転倒しにくい形状、製造に際し地元産業を活用できる割合が大きい、原子炉の燃料デブリやデコミで発生する高線量の放射性廃棄物の貯蔵にも使用可能、である。

一方、我が国での実用化には次のような課題がある。キャニスタはオーステナイト系ステンレス鋼製の溶接密封構造を採用しており、キャニスタ蓋溶接部の施工時の溶接欠陥を検出する超音波探傷試験技術の信頼性を確認する必要がある。さらに、我が国特有の海岸立地を想定した場合、貯蔵施設へ流入する冷却空気に塩分が含まれることにより、応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）によるキャニスタの密封機能喪失が懸念される。このため、SCC の発生条件の解明、空気中やキャニスタ表面の塩分濃度の測定技術開発、SCC 防止技術が必要である。次にこれらの研究の現状の概略を述べる[6)]。

① キャニスタの蓋溶接部超音波探傷試験技術

人工欠陥を付与した実径大のステンレス鋼 304 L 製のキャニスタ蓋モデルを対象に、超音波探傷結果の画像化による識別可能性が評価されている。その結果、初層溶接部に故意に生じさせた割れや融合不良などのき裂状欠陥は、概ね識別可能であった。

② キャニスタの応力腐食割れ予防技術

a) SCC 発生の 3 因子と SCC 発生防止基準

SCC は応力と環境と材料の三つの因子が重畳したときに発生する現象である。これらの 3 因子に対して、キャニスタは、素材がオーステナイト系ステンレス鋼であること、海塩粒子が付着する可能性があること、溶接部近傍に引張残留応力が存在することから、SCC が生じる懸念がある。対策の一例として、応力と環境による SCC 対策シナリオが考えられている。まず、最初のシナリオでは、キャニスタ表面への付着塩分量測定で限界塩分量を超えるか否かの判断を行うことで、SCC の発生を抑える。仮に、限界塩分量を超えたと判断した場合でも、き裂進展管理のシナリオに移行し、SCC によるき裂貫通を抑制する。すなわち、貯蔵期間中にキャニスタ表面塩分濃度が SCC 発生限界濃度を超えることがなければ、SCC 発生の心配はない。仮に表面付着塩分濃度が限界量を超え、万一 SCC が発生したとしても、き裂進展を管理することにより密封機能を維持できると考える。

海塩による大気中 SCC が生じやすい湿度と温度条件で SCC 試験を行った結果、304 L および 316 L ステンレス鋼の限界塩分濃度の閾値が、実験室レベルでの研究で明らかにされている。

b) 応力対策（残留応力緩和処理の効果）

実験室で実径大の 304 L ステンレス鋼製キャニスタを用いた SCC 発生試験が行われ、残留応力緩和処理の効果が確認されている。溶接部の一部に残留応力緩和処理した実径規模キャニスタ試験体に塩分を付着させ、SCC 発生条件を超える雰囲気の恒温恒湿槽内に置き、SCC 発生に及ぼす残留応力の効果が調べられた。試験の結果、残留応力未処理の溶接部表面にき裂が多数発生したが、ショットピーニングを施した溶接部にはき裂の発生はなく、溶接残留応力改善処理の有効性が確認された。

c) 環境対策

ア．気中・表面付着塩分量評価

自然環境下でのコンクリートキャスク内のキャニスタ表面を模擬した試験片上への付着塩分量評価試験が行われた。その結果、付着量に時間および温度による依存性はみられなかった。これは、SCC 発生の閾値以下の微量の塩分が、初期に付着するが、その後、ほとんど値は変化せず、増加しないことを示して

いる。すなわち、キャニスタの鉛直表面では、空気が表面と平行に流れ、空気中の海塩粒子が表面に付着・増加する量が小さいことを示している。

イ．流入塩分低減技術開発

コンクリートキャスクに自然対流効果で流入する空気中の塩分を、水平に設置された多段の金属薄板表面に付着させることで低減させる技術が開発され、その効果が確認されている。

ウ．キャニスタ表面付着塩分濃度の非破壊試験手法（レーザー誘起ブレイクダウン分光法）

レーザー光を用いて、キャニスタ表面に付着した塩分濃度を非破壊かつ非接触で測定する手法が開発されている。

d）材料対策

高耐食性の二相ステンレス鋼やスーパーステンレス鋼を用いてキャニスタを製造することで、SCC 対策とする研究が行われ、304 L や 316 L ステンレス鋼よりも SCC 発生の閾値となる塩分濃度が高くなることが実験で分かっている。ただし、これら材料は高価であることや、溶接性などに留意しなければならない。

以上の SCC 対策技術は、いずれも実験室レベルの研究段階にあり、これら技術の有効性について、実規模のコンクリートキャスクを海岸近くの実環境下に、通年および複数年設置して、SCC 予防対策などの系統的な確証試験を行うことが望ましい。

3）使用済燃料の長期貯蔵技術の開発

使用済燃料貯蔵施設においては、経年劣化現象の解明・理解とモニタリングや検査による経年劣化の早期発見と対応が重要である。

① 金属キャスクの貯蔵後輸送の規則適合性

数十年に及ぶ使用済燃料貯蔵の期間中には、輸送規則などの改訂があり得るので、貯蔵後輸送時にその改訂を輸送・貯蔵兼用キャスクにどのように反映させるかが課題となる。すなわち、輸送規則は貯蔵中（例えば 50 年間）に進化・改訂される可能性があり、貯蔵開始時に製造・使用されてきた輸送・貯蔵兼用金属キャスクが貯蔵後の規則に適合しなくなる可能性がある。いわゆる改訂規則のバックフィットの是非である。どのような条件であれば、貯蔵後の安全輸送が可能になるのか、研究が必要である。

② コンクリートキャスク貯蔵の経年劣化管理計画

a）キャニスタの閉じ込め性能モニタリングの技術と解析手法の開発

SCC により、キャニスタの溶接部などにき裂が貫通すると、ヘリウムが漏洩する結果、ヘリウムの対流による除熱性能が乱される。その結果、キャニスタ表面の温度分布も変化することが実験で分かっている。このような現象の解析手法が確立されれば、ヘリウム内圧や温度などの設計条件が異なっても、解析で予測することが可能になる。今後、異なる設計のキャニスタのコンクリートキャスク貯蔵においても、この原理に基づくモニタリングが可能になるので、早急な開発が望まれる。

b）キャニスタの SCC き裂検査技術の開発

コンクリートキャスク貯蔵中のキャニスタ表面に万が一、SCC き裂が発生しても、

早期に発見できれば、き裂貫通による閉じ込め性能が損なわれる前に何らかの対策が可能になる。現在までのところ、研究室レベルの知見では、渦電流による SCC き裂の非破壊検査技術が有望である。コンクリートキャスク貯蔵にこのような検査技術を適用するには、遠隔の自動検査システムの実規模大の技術開発が必要である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

科学技術的課題

コンクリートキャスク貯蔵における内のステンレス鋼製キャニスタの潮風塩分による SCC 対策技術や SCC 検査技術などは、実験室レベルでの開発の目処は、得られているが、実用化には、実際の海岸近くの自然環境下での系統的な大規模かつ、長期（加速試験を含む）にわたる確証試験が必要である。このような確証試験は、予算規模の点で民間での実施は困難であり、国によるプロジェクト研究が必要である。

政策的課題

世界的な動向と同様、我が国においても使用済燃料貯蔵期間の長期化の可能性を見越しておく必要がある。長期貯蔵は、その立地や経済性に支障をきたすので、貯蔵期間や貯蔵後の使用済燃料対策などの政策や制度を明確にしておく必要がある。輸送・貯蔵兼用金属キャスクには、貯蔵後輸送時の輸送規則適合性の制度的課題がある。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

総合エネルギー調査会原子力小委員会では、国のエネルギー基本計画（2014 年 4 月）における「使用済燃料の貯蔵能力の拡大」に向けた政府の取組を強化するため、どのような施策を講じていくかが問われている。

また、日本学術会議では、我が国で進まぬ高レベル放射性廃棄物処分に使用済燃料処分も含めて、暫定保管の具体的検討を行っている。

米国では、エネルギー省や原子力規制委員会が、使用済燃料貯蔵期間の長期化に備えて、大学や研究機関での研究開発を推進している。

IAEA でも、使用済燃料の長期貯蔵が世界の動向と考え、関連の技術文書などの作成をしている。

### （６）キーワード

コンクリートキャスク貯蔵、長期貯蔵、経年劣化管理、モニタリング、応力腐食割れ

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・金属キャスク貯蔵の基礎研究はほぼ終了している [6]。<br>・コンクリートキャスク貯蔵におけるステンレス鋼キャニスタの蓋溶接部の超音波探傷試験やステンレス鋼の塩化物応力腐食割れ感受性評価がほぼ終了している [6]。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・金属キャスク貯蔵の応用開発研究はほぼ終了している [6]。<br>・コンクリートキャスクの除熱性能試験、キャニスタの落下試験など、一部の応用開発研究は終了している [6]。 |
| | 産業化 | × | ↘ | ・金属キャスク貯蔵の確証試験はほぼ終了している [6]。<br>・コンクリートキャスク貯蔵の実規模・実環境下での確証試験が未実施。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・米国エネルギー省（DOE：United States Department of Energy）から大学での基礎研究として、次の研究が委託されている [7]。<br>・100 年以上の中間貯蔵のための材料評価。<br>・使用済燃料貯蔵用キャニスタ材料の寿命評価<br>・乾燥および搬送中の使用済燃料被覆管温度解析・試験<br>・使用済燃料への放射線および熱的影響<br>・乾式キャスクの確率論的リスク評価<br>・使用済燃料長期貯蔵のための超耐損傷性および自己検知性を有するコンクリート材料<br>・乾式キャスク貯蔵におけるアルカリ骨材反応損傷の超音波診断・予測<br>・使用済燃料プールおよび乾式キャスクの自然対流実証試験<br>・長期間の乾式貯蔵キャスク貯蔵における耐震性能<br>・使用済燃料貯蔵施設の構造健全性モニタリング<br>・輸送キャスクの構造健全性リスク評価<br>・次世代貯蔵システムのためのナノ改良コンクリートの開発 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・DOE から研究機関に、次の使用済燃料長期貯蔵研究が委託されている [8]。<br>・長期貯蔵中の使用済燃料貯蔵システムの健全性実証<br>・長期貯蔵後の回収・輸送の技術開発<br>・高燃焼度燃料の輸送技術開発 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・電力会社による使用済燃料貯蔵施設の長期貯蔵に向けた許認可期間の更新が始まっており、規制当局の審査要領が公刊されている [9]。<br>・現在 1900 基の乾式貯蔵キャスクが使用されているが、90%はコンクリートキャスクで、金属キャスクからコンクリートキャスクへの切り替えが進んでいる [10]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | △ | → | ・ドイツで、金属キャスク貯蔵の基礎研究はほぼ終了している。<br>・フランス・ドイツで MOX 使用済燃料長期貯蔵中のヘリウム蓄積・拡散について研究。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・金属キャスク貯蔵の応用開発研究はほぼ終了している。<br>・フランスがコンクリートキャスクと金属キャスクの融合方式を開発・設計。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・ドイツ、スイス、チェコなどで金属キャスク貯蔵が実用化している。<br>・使用済燃料の長期貯蔵に備えて、乾式貯蔵の経年劣化管理計画について、規制当局から勧告（草案）が公刊されている [11]。<br>・スペインでコンクリートキャスク貯蔵中。<br>・スイスはコンクリートキャスク貯蔵技術の導入を予定。<br>・アルメニア、ウクライナでコンクリートキャスク貯蔵を導入。 |
| 中国 | 基礎研究 | × | ↘ | ・使用済燃料乾式貯蔵の基礎研究はあまり盛んではない。 |
| | 応用研究・開発 | × | ↘ | ・使用済燃料乾式貯蔵の応用開発研究はあまり盛んではない。 |
| | 産業化 | × | ↘ | ・使用済燃料乾式貯蔵は実用化していない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・長期貯蔵における使用済燃料被覆管の特性調査 [12]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・コンクリートキャスクへの飛来物衝突解析・試験 [13]。 |
| | 産業化 | × | ↗ | ・貯蔵のニーズは逼迫しており、立地が迫っている。 |
| 台湾 | 基礎研究 | △ | → | ・SCC、耐震設計などの研究を実施。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・米国メーカーより、技術導入。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・貯蔵のニーズが逼迫しており、コンクリートキャスクを 60 基程度、国内で製造済。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Jeff Williams. DOE’s Storage and Transportation Activities. NEI Used Fuel Management Conference. May 6-8, 2014.
2) Christoph Gastl, “Interim Storage of Spent Nuclear Fuel (SNF) and Vitrified Highly Active Waste (HAW) in Germany”, IAEA Technical Meeting on Spent Fuel Storage Options, 2-4 July 2013.
3) Fernando Zamora, Manuel Garcia, et al., “Spanish Regulatory Approach for Dual Purpose Casks for Spent Nuclear Fuel”, IAEA International Workshop on the Development and Application for a safety Case for Dual Purpose Casks for Spent Nuclear fuel”, 19-21 May 2014.
4) 韓国で使用済燃料公論化委員会が発足http://www2.rwmc.or.jp/nf/?p=10764
5) Sanghoon Lee, et al. Impact Analyses and Tests of Concrete Overpacks of Spent Nuclear Fuel Storage Casks. Nuclear Engineering and Technology. Vol.46, No.1, p.73-80, 2014.
6) 電力中央研究所.　使用済核燃料貯蔵の基礎.　ERC出版. 2014.
7) https://inlportal.inl.gov/portal/server.pt/community/neup_home/600/fy13_r_d_awards
8) DOE. Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel, Jan 2012.
9) US NRC. NUREG-1927. Standard Review Plan for Renewal of Spent Fuel Dry Cask Storage System Licenses and Certificates of Compliance. March 2011.
10) J. Williams. DOE’s Storage and Transporattion Activities. NEI Used Fuel Management Conference. May 6-8, 2014.
11) RSK/ESK-Gesschaftsstelle. Alterungsmanagement bei der trockenen Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder Abfälle in Behältern. ESK 25/Info-AM. 18.01.2012.
12) J. Kim, et al. A Study on the Initial Characteristics of Domestic Spent Nuclear Fuels for

Long Term Dry Storage. Nuclear Eng. Tech.. Vol. 45, No.3, June 2013.
13) S. Lee, et al. Impact Analyses and Tests of Concrete Overpacks of Spent Nuclear Fuel Storage casks. Nuclear Eng. Tech.. Vol. 46, No.1, June 2014.

### ３．３．２．４　プルトニウムの管理手法

**（１）研究開発領域名**

プルトニウムの管理手法

**（２）研究開発領域の簡潔な説明**

原子力に依存しなくなった後にいわゆる「プルトニウム鉱山」を残さないためには、新たなプルトニウムを生成することなく、蓄積したプルトニウムを効率的に燃焼する原子炉技術の開発が必要となる。この技術には大きく分類して、軽水炉や高温ガス炉といった原子炉の炉型で分類できる炉技術群と、燃料の母材成分（ウラン、トリウム、不活性母材）や燃料形態（ペレット、被覆粒子、溶融塩）によって分類できる燃料技術群が存在する。

**（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向**

原子力に依存しない場合、軽水炉の使用済燃料に含まれるウランやプルトニウムなど重元素のエネルギー資源としての価値はなくなるため、それらを回収・利用することを主目的とした再処理に対するインセンティブは低下する。再処理を行わない場合、使用済燃料は一定の一時貯蔵期間を経て直接処分されることとなる。直接処分はスウェーデン、フィンランド、米国などが元来採用している方式であり、日本においても技術的には可能とされている [1)]。

この直接処分廃棄体は、使用済燃料に存在したすべての重元素を含むため、再処理後のガラス固化体に比べて（発電量単位当たりの）容積が大きい。また放射性毒性が高くその存続期間も長い。これは廃棄体中に超ウラン元素、とりわけプルトニウムが含まれることが主要因であるが、核物質でもあるプルトニウムを処分場内に長期に残存させることは、地球環境保全のみならず、核拡散の観点からも望ましくないとの見方がある。廃棄体は処分後、核分裂生成物の放射能減衰にともない接近が容易になることや [2)]、プルトニウム 240（半減期 6500 年）の減衰により核分裂性プルトニウム同位体の比率が相対的に高まり、プルトニウム自体の物質的魅力度が高まる傾向があるためである [3)]。

原子力に依存しなくなった後に処分場を含めプルトニウムを残存させない、もしくはその量を減じるとともにプルトニウム組成を劣化させ、環境や核拡散上の懸念を最小化するため、さらには超長期に存続する放射性廃棄物の世代間倫理的問題を軽減するためのプルトニウム燃焼技術の開発が、いくつかの国（主として再処理政策をとらない原子力先進国）で進められている。

発電と同時にプルトニウム燃焼を行う動力原子炉、もしくはプルトニウムの燃焼を主目的とした専焼炉の種類として、軽水炉（LWR）、CANDU 炉、液体金属冷却高速炉（FBR）、高温ガス炉（HTR）、液体溶融塩炉（MSR）、加速器駆動未臨界炉（ADSR）などがあげられる。また、これらの原子炉へ装荷される燃料種類として、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料（U-MOX : Uranium -Mixed OXide）、トリウム・プルトニウム混合酸化物燃料（T-MOX : Thorium-Mixed OXide）、U-Pu-Zr 三元合金燃料、岩石型燃料（ROX : Rock like OXide）、被覆粒子燃料（CPF : Coated Particle Fuel）、溶融塩などがある。

これらの炉型と燃料の組み合わせにはある程度自由度があるが、比較的技術開発が進

んでいるのは、LWR と MOX or ROX 燃料、CANDU 炉と MOX 燃料、FBR と MOX or 合金燃料、HTR と CPF 燃料の組み合わせである。溶融塩炉については、溶融塩に燃料を溶解させた従来概念と、溶融塩は冷却材としてのみ使用し燃料には固体の CPF を用いる概念の 2 通りがある。ADS の燃料としては合金燃料、窒化物燃料、そして溶融塩を用いる概念も検討されている。以下では、「炉型＋燃料」組み合わせのおのおのの炉概念について技術的特徴や開発状況について簡潔に述べる。

軽水炉で U-MOX 燃料を用いる（いわゆるプルサーマル）方式は、40 年以上前に実用化され、全世界で 6,000 集合体以上の使用実績があり、特にフランス、ドイツの二国でその大半を占める。日本では、廃止措置中の新型転換炉（ATR）「ふげん」で約 800 体、軽水炉では、2009 年 12 月以降、4 基で約 100 体の MOX 燃料が使用されている [4]。

ウランを母材とする U-MOX 燃料は、プルトニウムを消費する傍ら、大量に存在するウラン 238 からの新たなプルトニウム生成を避けられない。一方、トリウムとプルトニウムを混合した T-MOX 燃料では、燃焼ビルドアップの出発物質は質量数が 6 ほど小さいトリウム 232 であるため、効率的なプルトニウム燃焼が可能である。近年ではノルウェーの Thor Energy 社が、各国の企業や研究機関とコンソーシアムを構成し、軽水炉へ T-MOX 燃料を実装するための許認可に必要な知見やデータの取得を目的に燃料製造試験や実験炉での照射を行っている。約 90t の分離済み原子炉級プルトニウム在庫をかかえる英国は [5]、プルトニウムの効率的燃焼方法としてこの T-MOX 燃料に関心を示し、英国国立原子力研究所（NNL : National Nuclear Laboratory）がこのコンソーシアムに参加している [6]。

ROX 燃料は、旧日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構、JAEA : Japan Atomic Energy Agency）が研究開発を進めている燃料である。これは、YSZ（Yttria-Stabilized Zirconia）粒子球をスピネルマトリックス中に分散させた粒子分散型燃料であり岩石と同様の結晶構造をもつ。母材に重元素を含まない、もしくは少量（<10at%）しか含まないためプルトニウムの効率的燃焼が可能であるとともに残存核分裂性物質が少ない。また核分裂生成物（FP : Fission Products）保持特性や燃料組織安定性に優れているため使用済燃料を直接処分できる特徴を有する。照射試験、照射後試験、地質学的安定性を調べる進出試験が実施され、良好な結果が得られている。ウランを含まないためドップラー効果が小さく反応度事故時の安全性に課題があったが、エルビウムもしくはウラン、トリウムなど重元素の少量添加で回避できる見通しが得られている [7]。

CANDU 炉の燃料には本来天然ウランが用いられるが、U-MOX、T-MOX、もしくはそれらとトリウム燃料ピンをバンドル内で独立配置して、プルトニウムを利用した高燃焼度化とトリウムの有効活用を狙った技術開発が中国、カナダで行われている [8]。中国はレアアースの副産物として大量に生じるトリウムを CANDU 炉で利用するための技術開発を、カナダ AECL の支援の下 2007 年頃から開始し、燃料製造、照射試験、照射後試験を実施している。トリウム利用政策を掲げるインドも、CANDU 炉を基に国産技術化した PHWR や詳細設計段階にある新型重水炉 AWHR を対象に、プルトニウム燃焼技術が検討されている。なお AHWR は外部から供給されるプルトニウムを消費しつつウラン 233 を自給するよう設計された炉である [9]。ただし、近年は軽水炉の輸入が進んでいるためか、中国ほどの開発活動はみられない。

高速炉は本来、原子力を持続可能エネルギーとするためにプルトニウム増殖を行う原子炉型であるが、炉心を取り囲む径軸ブランケットを削除することでプルトニウム燃焼炉に比較的容易に変更可能である。フランスは 1990 年代初頭に高速炉での Pu 燃焼を目的とした CAPRA（Consommation Accrue de Plutonium dans les Réacteurs à Neutrons Rapides）計画を実施し U-MOX 燃料高速炉を [10]、米国は 2000 年代後半の GNEP（Global Nuclear Energy Partnership）構想の中で TRU 金属燃料先進燃焼炉（ABR）と再処理および燃料製造を行う施設である統合核燃料取扱センター（CFTC：Consolidated Fuel Treatment Center）を検討し [11]、高速炉を用いた効率的プルトニウム燃焼の基本的な見通しを得ている。

高温、高燃焼度に対する耐性の強い CPF を用いた高温ガス炉によるプルトニウム燃焼技術が検討されている。米国のオークリッジ国立研究所（ORNL：Oak Ridge National Laboratory）や日本の JAEA では、その究極的概念として、化学的に不活性な YSZ を母材とする $PuO_2$-YSZ 被覆燃料粒子を用いて 500 GWd/ton 以上の超高燃焼度を達成する Deep Burn 型高温ガス炉の開発を進めている [12]。

プルトニウム燃焼を目的とした溶融塩炉では、フリーベ（$LiF$-$BeF_2$）と称するフッ化物溶融塩に、親物質としてトリウムを $ThF_4$ 形で混入した混合溶融塩（約 500℃以上で液体）に、核分裂性物質として少量の $PuF_3$ を混合したものを燃料とする。溶融塩炉は 1960 年代に ORNL で実験炉が建設・運転された以降しばらく研究開発は沈静化していたが、中国は 2010 年 3 月にトリウム溶融塩炉プロジェクト開始を政府決定し、上海応用物理研究所（SINAP：Shanghai Institute of Applied Physics）を中心として、2011 年 1 月より TMSR（Thorium Molten Salt Reactor）計画を開始した。核燃料を溶融塩に溶解させた溶融塩炉は工学的課題が多いため、当面は米国の ORNL や大学の協力を受けつつ、燃料に固体の CPF を用い溶融塩を冷却材として使用する FHR から手がけ、2 MW 出力の PB-FHR 実験炉を 2017 年に建設する計画である。ただし、PB-FHR では燃料ペブルにトリウムやプルトニウムではなく低濃縮ウランが用いられる可能性が高い。PB-FHR に続いて、溶融塩燃料を用いた 2 MW 出力 MSR 実験炉の建設を 2020 年と予定している [6]。

未臨界で運転する加速駆動未臨界炉（ADS）は、安全設計上の反応度係数の制約が小さくプルトニウム燃焼性能を最大化しやすい反面、燃焼による実効増倍率低減が大きく、燃焼末期で必要となる陽子ビーム電流値が大きくなり燃料集合体の設計温度の点から成立性が厳しくなる難しさがある [13]。フランス（CEA、CNRS）、ドイツ（KIT）、イタリア（ENEA）、スイス（PSI）、ベルギー（SCK・CEN）、米国（DOE）、日本（JAEA、京都大学）、韓国（KAERI）など多くの国が一部実験炉建設も視野に入れ基礎研究に取り組んでいる。燃料/冷却材に溶融塩を用いる ADS 概念では上述の問題はなく、ロシア、日本、インドなどが検討しているが、臨界溶融塩炉と同様な開発課題を克服しなければならない。安定性が高く安価な大電流・高エネルギー加速器の開発も並行して進められている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

米国、カナダ、スウェーデン、そしてフィンランドは、使用済燃料からプルトニウム

を回収・利用することなく直接処分する方針を従来から掲げてきた。また、原子力に依存しない、もしくは依存度低減を表明している国として、ドイツ、スイス、ベルギー、イタリアがあげられるが、これらの国がプルトニウムを燃焼処分するか、使用済燃料のまま直接処分するかは明確でない。これら以外の、今後大きな経済発展を遂げようとする中国、アジア、中東などの多くの国々は、原子力を持続的エネルギー源としてとらえているため、燃料資源であるプルトニウムを意図的に燃焼させる技術開発には積極的でない。解体核からの兵器級プルトニウムや再処理後の余剰プルトニウムを除き、商業プルトニウム燃焼処分技術の研究開発は世界的に積極的には推進されていないのが実情である。

ただし、原子力に依存しない場合のプルトニウム燃焼技術と、今後も原子力を継続利用する場合に必要となる原子炉や燃料の技術基盤は重複する部分が少なくないため、政策に応じて柔軟に相互流用が可能と考えられる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

一定規模のプルトニウム燃焼を早期に実現するためには、既設基数の多い軽水炉もしくは CANDU 炉を活用することになる。U-MOX 燃料はすでに実用化されている技術であるが、取り出し時のプルトニウム量は装荷時の 3 割減程度であるため [14]、さらに燃焼効率を高めるには、ウランを含まない T-MOX や ROX 燃料とするのが有効である。ただし、T-MOX の場合には母材のトリウムから核分裂性のウラン 233 が生成されるため、使用済燃料中に残存する核分裂性物質を最小化することが要求される場合には不適なオプションとなる。JAEA が開発してきた ROX 燃料軽水炉は、プルトニウム処理量も大きく、原子力への依存をなくすシナリオにもっとも適合する概念と考えられる。

高燃焼度耐性が高いとされる CPF はプルトニウムを燃焼しきる燃料形態として有望である。再処理政策をとる国では、再処理に不向きな CPF 燃料やそれを用いる高温ガス炉が主流概念に据えられることはなかったが、原子力への依存をなくすシナリオにおいての役割は大きい。ただし、ガス炉自体の建設基数が極少のため、早期に大量のプルトニウム処理を行うことは難しいと予想される。これは実証段階にある高速炉、さらには基礎実験段階にある溶融塩炉や ADS についても同様である。

### （６）キーワード

MOX、ROX、トリウム、被覆粒子、Deep burn、軽水炉、ガス炉、高速炉、溶融塩、ADS

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・ROX-LWR、Deep Burn 型 CPF-HTR、ADS の基礎研究では世界を先導。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・MOX 燃料高速炉（プルトニウム消費でなく増殖目的だが共通技術多）開発は停滞気味。HTTR を有するがプルトニウム燃焼用燃料開発は基礎レベル。 |
| | 産業化 | ○ | ↘ | ・MOX 軽水炉の運転実績は福島第一原子力発電所事故で停滞。MOX 燃料加工工場建設は 2017 年 10 月竣工予定。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・Deep Burn 型 CPF-HTR、溶融塩冷却固体燃料 FHR の基礎研究実施。FHR では中国をバックアップ。先進燃焼高速炉（ABR）検討は低迷気味。 |
| | 応用研究・開発 | × | ↘ | ・実証レベルの技術開発なし。 |
| | 産業化 | △ | ↘ | ・解体核プルトニウムを軽水炉用燃料に加工する MOX 工場（サバンナリバー）を 2007 年に建設開始していたが、財政難のオバマ政権は 2014 年 3 月中止を決定。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・ノルウェー企業が欧諸国や Westinghouse を含む国際コンソーシアムを設立しプルトニウム燃焼目的のトリウム燃料（T-MOX）開発中。<br>・ADS の基礎研究や実験炉建設計画を精力的に推進中。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・フランスは MOX 燃料高速炉 ASTRID（プルトニウム消費でなく増殖目的だが共通技術多）を 2019 年頃建設開始予定。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・フランス、ドイツは MOX 軽水炉の運転実績最多で世界を牽引。 |
| 中国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・CANDU 炉やガス炉でのプルトニウム燃焼に関し、U-MOX や T-MOX 燃料技術を開発中。将来のトリウム溶融塩炉実現を目的に 2011 年から TMSR 計画を開始。プルトニウム燃焼も視野に、まずは PB-FHR 実験炉の建設を 2017 年に予定。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・高速実験炉 CEFR は 2010 年に臨界、2014 年フルパワー達成予定。高速実証炉 CDFR の概念設計を開始し 2023 年運開予定。<br>・10 MW ペブルベッド型高温ガス実験炉 HTR-10 は 2003 年送電開始、30 MW 同実証炉 HTR-PM を 2012 年に建設着工。（いずれもプルトニウム燃焼目的ではないが関連技術として） |
| | 産業化 | × | → | ・原子力拡大政策のためプルトニウムを燃焼する技術実用化は意図していない。高速炉商業化は 2030 年を予定。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・軽水炉の使用済燃料（SF）に 1%程度残存するプルトニウムを燃料として有効利用するため、SF を破砕→酸素中加熱で揮発性 FP 排除→CANDU 燃料に再加工する DUPIC 燃料をカナダ、米国と開発中。<br>・超高温ガス炉 VHTR、ADS の開発も行っている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・プルトニウム単体を分離せず TRU を一括回収する乾式再処理試験施設 PRIDE を建設完了し 2014 年からウラン試験を開始。これと対をなす金属燃料高速炉（KALIMER）は 2020 年許認可、2028 年建設開始を予定。 |
| | 産業化 | × | → | ・原子力拡大政策のためプルトニウムを燃焼する技術実用化は意図していない。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 杤山修、原子力委員会 新大綱策定会議 （第１２回）資料第１－１号 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の処分について
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sakutei/siryo/sakutei12/index.htm
2) Waltar, A.E., Omberg, R.P., An Evaluation of the Proliferation Resistant Characteristics of Light Water Reactor Fuel with the Potential for Recycle in the United States. Final Report. Pacific Northwest National Laboratory (November, 2004).
3) 千葉敏、高温ガス炉の持続可能性 －クリーン燃焼高温ガス炉とADSによるTRU変換システムを用いたバックエンド問題の解決－、 日本原子力学会2013年秋の大会
4) 「原子力・エネルギー」図面集2014、日本原子力文化財団
5) International Panel on Fissile Material (http://www.fissilematerials.org/)
6) 平成24年度発電用原子炉等利用環境調査（諸外国における高い安全性・信頼性の実現等を目標とした革新的原子炉研究開発の動向調査)、経済産業省原子力政策課
7) 山下 利之、プルトニウムを燃やす新型燃料「岩石型酸化物(ROX)燃料」の開発、セラミックス Vol.39, No.10, pp.817 - 821, 2004/10
8) 高木 直行、動き始めた中国のトリウム燃料利用 －第二回トリウム利用国際シンポジウムに参加して－, 原子力eye Vol.55 No.12, 2009
9) 高木 直行、インドにおける持続可能な新型炉の開発動向 －バーバー原子力研究所・炉物理部を訪問して－, 原子力eye、Vol.55 No.8, 2009
10) 山下英俊、第29回IAEA/IWGFR定例年会報告、PNC-TN1410-96-030, 1996
11) 日本原子力研究開発機構、平成12年以降の分離変換に対する国外の状況変化、原子力委員会、研究開発専門部会、第2回分離変換技術検討会資料第２-１号、平成20年10月1日
12) Lance L. Snead et.al., Deep Burn: Development of Transuranic Fuel for High-Temperature Helium-Cooled Reactors, ORNL/TM-2010/300, October 2010
13) Sugawara Takanori et.al., , Investigation of Pu-burner accelerator-driven system with burnable poison, International Youth Nuclear Congress 2012 (IYNC 2012)
14) 日本原子力研究開発機構、廃棄物の減容・有害度の低減のためのシステム概念と研究開発課題、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会、原子力科学技術委員会もんじゅ研究計画作業部会（第１０回）資料２、2013/7

## ３．３．２．５　ウラン廃棄物の管理手法

### （１）研究開発領域名

ウラン廃棄物の管理手法

### （２）研究開発領域の簡潔な説明

ウラン廃棄物は、ウラン鉱石の製錬・転換、ウラン濃縮、再転換、原子炉燃料製造・加工や研究施設などから発生するウランに汚染された放射性廃棄物である。ウランは自然界に広く存在し、また自然崩壊により、数十万年後に、放射能が最大となるため、その処理・処分にあたり、これらを考慮する必要がある。また、ウランは国際核物質管理対象物質であり、放射性廃棄物として処分するためには、一定量のウランが含まれている場合は、保障措置を解除する必要があり、ウランの定量化（計量管理手法）が必要となる。

一方でウラン濃縮により発生する劣化ウラン（ウラン 235 の割合が天然ウランよりも少ないウラン）は、有用資源として位置付けられており、ナトリウム冷却高速炉燃料への利用が考えられている。

ウラン廃棄物や劣化ウランとも、ウランに関連する事業をどのようにしていくかに関わらず、今後の対応が必要になる。

### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ウラン核種は、天然起源の放射性核種であり、自然界にも広く存在し、半減期が長いという特徴がある。また、ウランは機器・設備の内表面の付着物であり、主要な部分は除染が比較的容易である。ウラン関連施設の廃止措置にあたっては、除染による有用資源の回収を行い、微量なウランが含まれた放射性廃棄物（ウラン廃棄物）を減容・安定化処理して、処分することになる。

1）ウラン回収・除染技術

ウラン取扱い施設の解体後のウラン回収・除染方法には、解体後に行う硫酸や水ジェットを用いた湿式法があるが、二次廃棄物の発生や廃液の処理といった観点から、なるべく使用しないほうが望ましい。二次廃棄物を極力低減する手法としては、$IF_7$ を用いた濃縮設備の解体前のウラン回収・除染方法の技術 [1]、また、廃液中に含まれるウラン回収技術として、エマルジョンフロー法の技術開発が行われている [2]。

2）廃棄物中の微量ウランの定量化

ウラン廃棄物を処理し、廃棄体として処分あるいはウランを使用し、除染した解体物（金属）をクリアランスして再利用を行うためには、含まれているウランを定量化する必要がある。ウラン廃棄物を処分するためには、廃棄物中の微量なウランを定量化（廃棄体確認など）して保障措置を解除する必要がある。また、クリアランスを行う際にも、解体金属に含まれる微量なウランを定量化する必要がある。測定対象となる廃棄物は、焼却灰・可燃物・難燃物・金属と多種多様であるため、測定方法も含めて工夫が必要である。

現在、日本原子力研究開発機構（JAEA : Japan Atomic Energy Agency）にて、10 Bq/g程度（極低レベル廃棄物としてウランを処分することを想定した濃度）のウランの定量化が可能なパッシブγ法とウラン廃棄物の多数を占める鉄材に対して高感度測定が可能なアクティブ中性子法を中心に研究開発が進められている [3, 4]。

ウラン廃棄物の管理手法として、有用資源としてのウランの回収・除染技術や保障措置や処分などの観点からウラン廃棄物中の微量ウランの定量化についての技術は、まだ開発段階であるが、今後数万本の廃棄体（処分体）中のウランの定量化に必須となる技術であり、実用化が急がれる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

1)ウラン廃棄物対策

ウラン廃棄物については、2000 年に原子力委員会により、「ウラン廃棄物の処理処分の基本的考え方」がとりまとめられた。その後、2010 年に原子力安全委員会（現在の原子力規制委員会）で、「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」が取りまとめられた。これは、従来の対象であった浅地中処分に加えて、余裕深度処分も対象として追加し、最新の科学的知見を取り入れている。

放射性廃棄物の処理・処分は、発生者や発生源によらず一元的に処分すること、また、国はそのために制度を整え、場合によってはできるように制度を変えていくことが、国の方針（原子力委員会政策大綱）であるが、ウラン取扱施設から発生するウラン廃棄物については、原子力安全委員会は、基本的考え方の中で以下のように述べている。「ウラン廃棄物については、自然起源の放射性物質を主たる組成とする放射性廃棄物であり、長期にわたり放射能の減衰が期待できず、かつ、安全性の判断に当たり自然環境中の放射能との関連なども考慮する必要があると考えられることから、本基本的考え方の適用対象外とする。」

すなわち、現在に至るまで、ウラン廃棄物については、処分のための安全規制制度が確立されていない状況にある（図）[5]。ウラン廃棄物は、JAEA が実施主体となっている「研究施設等廃棄物処分事業」で処分される多種多様な発生源の廃棄物の一部である。この事業の処分対象となるウラン廃棄物は、JAEA のみならず、多数の中小のウラン使用施設を設置している事業・研究機関およびウラン加工メーカーのものも含まれている。したがって、処分事業に必要な時期までには確立しておくことが急務である。

**放射性廃棄物処分に係る制度化・事業化の状況**

| 廃棄物の区分 | | | 発生場所 | 原子力委員会 処分方針 | 原子力安全委員会 安全規制の考え方 | 原子力安全委員会 濃度上限値 | 原子力安全委員会 安全審査指針 | 安全規制に係る関係法令等 | 事業化の動向 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 高レベル放射性廃棄物 | | | 再処理施設 | 報告（1984年5月、1998年5月） | 報告（2000年11月、2002年9月、2007年5月） | | 今後検討 | 整備済（2008年4月） | 原子力発電環境整備機構が文献調査を行う地域を公募中 |
| 低レベル放射性廃棄物 | 超ウラン核種を含む放射性廃棄物（TRU廃棄物） | | 再処理施設 MOX燃料加工施設 | 報告（2000年3月、2006年4月） | 報告（2007年7月） | 報告（2007年5月）（地層処分を除く） | | 整備済（2008年4月） | 原子力発電環境整備機構が文献調査を行う地域を公募中 |
| | 原子炉施設から発生する廃棄物 | 放射能レベルの比較的高い廃棄物（余裕深度処分） | 原子炉施設 | 報告（1998年10月） | 報告（2000年9月、2007年7月） | 報告（2000年9月、2007年5月） | 報告（2010年8月） | 整備済（2008年4月） | 六ヶ所村において、日本原燃(株)が本格調査を実施 |
| | | 放射能レベルの比較的低い廃棄物（浅地中ピット処分） | | 報告（1984年8月、1985年10月） | 報告（1985年10月、20007年7月） | 報告（1987年2月、1992年6月、2007年5月） | 報告（1988年3月、1993年1月、2001年3月） | 整備済（2008年4月） | 六ヶ所村において、日本原燃(株)が埋設を実施中 |
| | | 放射能レベルの極めて低い廃棄物（浅地中トレンチ処分） | | | | 報告（1992年6月、2000年9月、2007年5月） | 検討済（1993年1月、2001年3月） | 整備済（2008年4月） | 日本原子力研究所が試験研究炉（JPDR)の解体廃棄物の埋設を実施 |
| | ウラン廃棄物 | | ウラン濃縮・燃料加工施設 | 報告（2000年12月） | 一部検討済（2006年4月） | 今後検討 | 今後検討 | 一部整備済（2008年4月） | 研究施設等廃棄物については、日本原子力研究開発機構が検討中 |

浅地中処分：今の社会の中（法律等の制度が継続する期間）で決着がつく処分

「放射性廃棄物廃棄物の基本的考え方と課題」バックエンド週末基礎講座より
2012 年 11 月 17 日　原子力安全研究協会　杤山　修

**図　我が国の廃棄物処分の安全規制制度の整備状況**

2)劣化ウラン対策

ウラン濃縮施設で 3～5%に天然ウランを濃縮すると、製品のバイプロダクトとして劣化ウランが発生する。この劣化ウランは昇華しやすい $UF_6$ の状態にて、JAEA の人形峠環境技術開発センターに約 2,600t、ウラン濃縮事業を行っている日本原燃株式会社に約 12,000t が保管されており、現在、約 14,600t の劣化ウランが我が国に有用資源として保管されている。

劣化ウランについては、我が国では、2005 年に策定された原子力委員会の原子力政策大綱において、「劣化ウランは、将来の利用に備え、適切に貯蔵していくことが望まれる」[6]、また「濃縮後の再転換については、これが可能な事業者は、国内において 1 社となっている。」としている。原子力政策大綱は、ほぼ 5 年ごとに改定されていたが、2012 年 10 月に策定作業を中止することを決定した。しかしながら、2014 年 6 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、原子力が重要なベースロード電源と位置づけられており、濃縮事業は今後も継続されることになった [7]。

したがって、劣化ウランは今後とも増え続けることになり、これを将来の利用に備えて適切に貯蔵していくためには、昇華しやすい $UF_6$ ではなく、再転換を行い、$U_3O_8$ にして固体状で貯蔵することが必要である。核燃料サイクルを継続していく場合には、政策課題としての対応が求められる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

1)ウラン濃縮施設解体前のウラン回収・除染技術

ウラン施設の運転停止後に解体撤去していく必要があるが、解体物や廃液などには、多くのウランが含まれている。資源の少ない我が国においては、解体物やウラン資源を有効利用していく必要がある。ウラン施設のうち、濃縮施設（遠心分離施設）は運転停止後に機器・系統内に多量のウランが付着している。これを解体前に取り除くと、二次廃棄物の発生を防ぐとともに、運転設備がそのまま利用できることになり、放射性廃棄物の大幅な低減につながる。また、有用資源としてのウランの回収を容易に行うことができる。この技術として、$IF_7$ガスを用いたウランの回収・除染技術は画期的な方法であり、二次廃棄物の発生がほとんどなく、系統内のウランも 96～99%が回収可能である。この技術は、商業用のウラン濃縮施設の設備更新前のウラン回収・除染にも適用されている。

2)廃棄物中のウランの定量化

ウラン廃棄物の処分についての安全規制制度は今後の課題であるが、ウラン廃棄物中のウランの定量化は処分を行っていくためには必須の技術である。パッシブγ法は、技術的には新しいものではないが、定量解析方法として新しい方式である等価モデル方式を開発中である。廃棄物中のウランは均一に分散しているわけではなく、偏在している。この等価モデルは偏在している場合でも定量化が可能となる解析方式であり、今後の技術実証が期待される。

## （６）キーワード

ウラン廃棄物、ウラン除去・回収、微量ウランの定量化、保障措置、劣化ウラン政策、核燃料サイクル

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 研究開発 | ○ | → | 現在我が国では実用に近いレベルの研究開発が行われている。 |
| | 産業化 | ○ | → | 国内にとどまらず、上記技術の確立が、ほかの同様な施設を有する諸外国にも適用できるものと考えられる。 |
| 米国 | 研究開発 | － | － | ウランを含む施設からのウラン回収・除染およびウラン廃棄物の定量化についての研究は、ほとんど実施されていない。 |
| | 産業化 | － | － | － |
| 欧州 | 研究開発 | － | － | ウランを含む施設からのウラン回収・除染およびウラン廃棄物の定量化についての研究は、ほとんど実施されていない。 |
| | 産業化 | － | － | － |
| 中国 | 研究開発 | － | － | ウランを含む施設からのウラン回収・除染およびウラン廃棄物の定量化についての研究は、ほとんど実施されていない。 |
| | 産業化 | － | － | － |
| 韓国 | 研究開発 | － | － | ウランを含む施設からのウラン回収・除染およびウラン廃棄物の定量化についての研究は、ほとんど実施されていない。 |
| | 産業化 | － | － | － |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 江間晃ほか, フッ化ヨウ素ガスによる系統除染技術開発 －$IF_7$処理条件とウラン除染結果の評価－, JAEA-Technology 2008-037, 2008, 50p.
2) 日本原子力研究開発機構プレス発表，エマルションフロー法での除染廃液からのウラン除去 2014．5．2
3) 横山薫，杉杖典岳 放射性廃棄物収納容器中のウラン放射能簡易定量評価のためのパッシブγ線計測，RADIOISOTOPES,59, 707-719 (2010)
4) 日本原子力研究開発機構プレス発表，原子力施設の解体物などを詰めたドラム缶中に偏在するウランの総量を非破壊測定する技術を実証，2014.5.2
5) 杤山修，放射性廃棄物廃棄物の基本的考え方と課題，バックエンド週末基礎講座，2012.11.17
6) 原子力委員会，原子力政策大綱，2005.10.11
7) 経済産業省，エネルギー基本計画，2014.4.11

### ３．３．２．６　原子炉の廃止措置（デコミ）[1)]

#### （１）研究開発領域名

原子炉の廃止措置（デコミ）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子炉施設の廃止措置（デコミ）は、残存放射能を含む施設特性の評価技術、除染および解体技術、遠隔操作技術、放射性廃棄物の処理技術、廃止措置工事を円滑に遂行するためのプロジェクト管理技術など、さまざまな技術の組合せにより実施される。廃止措置工事は既存技術で対応可能であるが、安全で合理的な作業の実施には、現場の状況に合わせた技術の改良や開発が求められる。また、廃止措置工事で発生する放射性廃棄物の処理処分の実施には国の関与が必要であり、廃棄物対策を含む廃止措置プロジェクトの推進体制に係る政策面での検討や研究開発が必要である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

国外では、すでに 100 基に及ぶ原子炉施設で廃止措置に係る工事が行われ、そのうち 15 基以上の原子力発電所の廃止措置が終了しており、廃止措置工事を進める上で、技術上の大きな障害はないと考えられている。しかし、特に事故後の施設のように、高放射線下で進められる廃止措置工事は容易ではなく、作業者の被ばく低減・安全確保や放射能汚染の拡大防止などなどに関して多大の努力が払われる。

我が国では、事故で停止した福島第一原子力発電所に加え、東海発電所、ふげん発電所、浜岡原子力発電所 1、2 号機の廃止措置が進められている。これらの原子炉施設の廃止措置工事では、周辺機器の撤去作業などが進められており、高度な技術が必要とされる炉心部機器の解体はまだ行われていない。他方、これまで、我が国では、動力試験炉（JPDR）の廃止措置プロジェクトを初めとして、試験研究用原子炉の廃止措置工事や幾つかの技術開発が行われ、遠隔解体、低レベル放射能汚染の測定など多くの技術情報や経験が蓄積されている。これまでに培われた廃止措置の技術は、これから実施される商業用原子力発電所の廃止措置にも適用可能と考えられるが、商業用原子力発電所では、残存放射能レベルが高いこと、放射性廃棄物の発生量の低減（解体廃棄物の減容のみでなく、解体工事の二次廃棄物の抑制も含む）が必要なことなどにより、廃止措置する施設固有の条件に応じた技術の改良が必要となる。また、経済性の追求など廃止措置プロジェクトに課せられる要求事項はさまざまなものがあり、現場に密着した課題を見出し、その解決に向けた技術開発や改良、リスク分析を含む最適な計画立案、意思決定などに係る検討が必要になる。さらに、これまでに蓄積された経験や技術情報の将来に向けた整理・移転など知識マネジメントに係る研究開発も重要である。加えて、廃止措置工事で発生するクリアランス物の有効利用や放射性廃棄物（低レベル）の処理処分は重要な課題であり、これらは、商業用原子力発電所のみならず大学や研究機関の原子炉施設も対象となるため、我が国としてその推進方策を明らかにするとともに、国や研究機関の役割を明確にし、環境負荷をできる限り低減するための政策や技術に係る研究が必要となる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

廃止措置工事を進めるためには､廃止措置に係る戦略･計画の検討が前提条件であり、十分な検討の下で作成された最適な廃止措置シナリオに基づく具体的な技術の改良および開発が必要である。これまで、廃止措置プロジェクトの費用評価も含めて最適なシナリオ評価の管理（プロジェクトマネジメント）に係る研究は少なく、これからの原子炉施設の廃止措置の遂行のボトルネックとなることが懸念される。

他方、廃止措置において廃棄物対策は重要な課題であるが、クリアランス検認の合理性やクリアランス物の有効利用やサイト解放に係る具体的な技術や政策上の検討（課題の摘出も含む）がなされていない。事業者のみでなく官民一体となり、おのおのの役割を明確にした上で、廃棄物対策の推進を目指す必要がある。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

原子力施設の廃止措置は試験研究施設や開発段階の施設を対象にして 1980 年代から開始されたが、これら比較的小型施設の廃止措置が概ね終了し、その知見が蓄積されてきた。また、米国では経済性に問題のある商業用の原子力発電所などを対象にした廃止措置が 1990 年代から始められたがその幾つかは終了した。これらの知見を反映し、作業員による手作業を遠隔装置や高性能機器を用いて作業の効率化を図る技術の改良が進められつつある。また、3 次元 CAD（Computer Aided Design）を用いた、施設概要や廃止措置手順の説明に加え作業分析なども進められるようになった。

福島第一原子力発電所 1～3 号機の燃料デブリ取り出し作業には、遠隔操作装置の開発など多くの技術開発が必要になる。作業員による手作業に頼らない高度な遠隔操作技術、また、計算機を使用した廃止措置作業シナリオの分析、3 次元 CAD による作業分析など、更なる高度化を進める流れにある。

### （６）キーワード

プロジェクトマネジメント、廃止措置シナリオ、知識マネジメント、遠隔操作、3 次元 CAD

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | × | → | ・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・個別の施設などを対象として、コスト低減、被ばく低減、安全向上などを目的に、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分などの開発が実施されている [2)]。<br>・特にレーザーによる除染や切断技術について精力的な研究が実施されている [3)]。<br>・また、シナリオ評価技術など、廃止措置全体の最適化に関する技術開発が行われている [4)]。<br>・サイト解放に関する検討は福島第一原子力発電所事故のフォールアウトなどの影響もあり進んでいない [5, 6)]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・2005 年に廃止措置規制が整備され、クリアランス制度も同時に導入された。<br>・日本原子力発電東海発電所などいくつかの発電所で、廃止措置が進み、関連技術が成熟化している。<br>・低レベル放射性廃棄物に関しては、青森県六ヶ所村の施設において処分が実施されている。ただし、解体廃棄物および研究所等廃棄物については、処分場が立地していない。<br>・原子力発電所および研究炉において、実際のクリアランス測定および検認が行われ、一部において再利用も行われている [7)]。 |
| 米国 | 基礎研究 | × | → | ・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・廃止措置の効率向上のため、冷戦の遺産である施設を対象とした浄化に伴う、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分などの技術開発が盛んに実施されてきている [8)]。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・廃止措置の規制制度は確立しており、国内で 10 基以上の原子力発電所の廃止措置が完了しており、技術は成熟している [9)]。<br>・低レベル廃棄物処分場も利用可能なものがいくつか運用されている。<br>・ただし、クリアランスについて検討は行われたものの、完全には制度化されていない [10)]。<br>・サイト解放についての基準や詳細な手順が運用され、実際の解放が行われている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | × | → | ・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・廃止措置の効率向上のため、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分などの開発が各国で実施されている [8)]。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・廃止措置の規制制度は各国でほぼ確立しており、各国で数十基の原子力発電所が廃止措置に移行し、実際の解体作業が行われているものが多数あることから、技術的には成熟している [9)]。<br>・ドイツ、スウェーデンなどではクリアランスが制度化され、実際の測定や検認、再利用が実施されている [11)]。<br>・主要国では、低レベル放射性廃棄物処分場が運用されている。<br>・ドイツ、英国などでは、サイト解放についての基準が運用され、解放されたサイトがいくつかある。 |
| 中国 | 基礎研究 | × | → | ・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・一部研究炉の廃止措置研究が進んでいるが、商業炉の廃止措置についての研究・開発は進んでいないと思われる [12)]。 |
| | 産業化 | △ | → | ・廃止措置の制度は法制化されているが、実際の廃止措置が進んでいないため、詳細化はされていない [12)]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | × | → | ・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・いくつかの高経年の発電所を対象に、廃止措置を想定した検討や研究開発が進みつつある。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・2 基の研究炉について廃止措置が実施されているが、商業炉については検討段階にある [13)]。<br>・クリアランス制度が整備されており、実際のクリアランス測定および検認が行われ、一部において再利用も行われている [13)]。<br>・慶州市に低レベル放射性廃棄物処分場が建設され、2015 年には運用が開始される [13)]。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) (財)原子力発電技術機構廃止措置総合調査委員会編. 廃止措置技術ハンドブック 除染・解体・再利用編. 2007年5月
2) 長崎晋也他. 放射性廃棄物の工学. 2011 . オーム社
3) 大道 博行. Laser Review. 原子炉廃止措置における光・レーザー技術の適用可能性（レーザー学会創立40周年記念）-- (「原子力施設の保守安全,廃止措置のためのレーザー技術」特集号). 2013年11月
4) 芝原 雄司他. 原子力施設の廃止措置における大型機器解体シナリオの最適化に関わる検討. 日本原子力学会和文論文誌. 2013年9月
5) 山中 武、水越 清治. 原子力施設のサイト解放基準に関する考察. 原子力安全基盤機構. JNES-RE-2013-2038. 2014年2月
6) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 廃止措置安全小委員会. 廃止措置の終了の確認に係る基本的考え方（中間とりまとめ）-主な論点と今後の検討の方向性について-. 2011年1月
7) ATOMICA(11-03-04-10). 日本のクリアランス制度
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=11-03-04-10
8) R&D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities. OECD/NEA. 2014年7月
http://www.oecd-nea.org/rwm/pubs/2014/7191-rd-innovation-needs.pdf
9) 山中 武、水越 清治. 廃止措置規制の継続的改善に関する考察. 原子力安全基盤機構. JNES-RE-2013-2034. 2014年2月
10) ATOMICA(05-01-03-25). クリアランスに対する米国の取組み.
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=05-01-03-25
11) ATOMICA(11-03-04-05). 各国における放射性廃棄物規制除外（クリアランス）の動向
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=11-03-04-05

12) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. China. 2011年10月
13) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Korea. 2011年10月

### ３．３．２．７　福島第一原子力発電所事故への対応

**（１）研究開発領域名**

福島第一原子力発電所事故への対応

**（２）研究開発領域の簡潔な説明**

福島第一原子力発電所事故への対応については、国などが中心になって取りまとめた「東京電力福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置などに向けた中長期ロードマップ」（以下、中長期ロードマップ）に基づいて進められている。その中では、エンドステートに関わる明確な全体像の記載はないが、燃料デブリの取り出し後、燃料デブリ・廃棄物を敷地外に搬出・処分と記述されている。本領域では、この中長期ロードマップを参考にして、その一部について以下に記載する。

**（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向**

炉内状況把握に関する技術開発について、格納容器や圧力容器内の状況を推定することは、溶融燃料（デブリ）取り出しを含む発電所の廃止措置作業を進める上で重要であるため、既存のシビアアクシデント解析コードを用いて事故進展を推定するとともに、解析コードの改良を行って炉内状況やデブリ分散に関する予測精度を高めるための研究開発が、技術研究組合国際廃炉研究開発機構（IRID：International Research Institute for Nuclear Decommissioning）を中心に行われている。また、圧力容器下部ヘッドの破損挙動などに関する実験データの取得やモデル化も IRID、日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）、大学などで進められている。さらに、欧米を中心に開発が続けられてきた各国の解析コードを比較しつつ福島第一原子力発電所での事故進展挙動などを評価することを目的とした経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA：Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency）主催の国際ベンチマーク解析プロジェクト（BSAF：Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project）が、我が国の提案により 2012 年に開始された。BSAF には、米、フランス、ドイツ、ロシア、韓国など 8 ヶ国、15 機関が参加し、我が国からは原子力規制委員会、JAEA、電力中央研究所およびエネルギー総合工学研究所の 4 機関が参加している。BSAF においては、福島第一原子力発電所のプラント情報などを整理した情報ポータル（https://fdada.info/）の整備、公開も行われており、BSAF メンバー以外にも事故事象解析のための境界条件が提供されている。

事故荷重・環境変化による構造物健全性評価については、燃料取出し&使用済み燃料取出しと密接な関係がある。このため、2013 年 6 月の中長期ロードマップ改訂時には、使用済み燃料プールからの燃料取り出し、原子炉格納容器などからの燃料デブリ取り出しについて、各号機の状況を踏まえ、複数のプランを用意し検討を進めることとしている。1、2 号機ともにプランの絞り込みや修正・変更を行う時期的なポイントとして、2014 年度上半期を「判断ポイント」と設定している。3 号機原子炉については、建屋上部ガレキ撤去後の建屋躯体調査が実施されている。4 号機については、原子炉建屋および使用済み燃料プールの健全性を確認するため、これまで 8 回の点検が実施され、安全に使用

済み燃料を貯蔵できる状態であることを確認済みである。

ロボット開発について、原子炉建屋内外の瓦礫などの解体撤去作業には、無人重機が使用され、原子炉建屋内の偵察に米国 iRobot 社製の PackBot などが使用された。その後の原子炉建屋内の調査には、より走破性の高い Quince や SurveyRunner などの国産ロボットも開発され使用され始めている。今後の原子炉建屋内の狭隘部や高所部の偵察、除染、解体撤去、溶融燃料などの回収に多数の遠隔ロボットが必要になると考えられ、それらの開発が始められている。

発生した放射性廃棄物の処理・処分に関する研究開発は、中長期ロードマップに沿って、IRID が中心となって実施している。IRID における研究開発は、JAEA および東京電力が中心となって実施しており、国内外の大学、メーカー、関連機関などと連携して進めている。事故により発生した、放射性廃棄物は、汚染のレベルが多岐にわたりその物量も大きいことなど、従来の原子力発電所で発生する放射性廃棄物と異なる特徴があるため、従来の放射性廃棄物とは異なる点を把握したうえで、研究開発を実施する必要がある。これら放射性廃棄物は、汚染範囲が広く、高線量箇所もあることなど、非常に多くの不確実性があり、これを解消し適切に管理することが事故廃棄物に関する対策、技術開発の大きな課題となっている。この放射性廃棄物処理･処分に関する研究開発は、「性状把握」、「長期保管方策検討」、「廃棄物の処理に関する検討」、「廃棄物の処分に関する検討」の 4 つの観点から研究開発を行っている。特に「性状把握」と「廃棄物の処理に関する検討」および「廃棄物の処分に関する検討」に関しては、研究開発成果を相互に活用しながらそれぞれの開発計画にフィードバックし、廃棄物管理戦略（廃棄物ストリーム）を最適化することが重要である。

溶融燃料の取出しについて中長期ロードマップでは、最速ケースでは、2020 年前半に燃料デブリの取り出しを開始する工程となっている。原子炉格納容器（PCV：Primary Containment Vessel）/原子炉圧力容器（RPV：Reactor Pressure Vessel）の内部調査技術と PCV/RPV からの燃料デブリ取り出し技術に関して、国内外の英知を結集すべく情報提供依頼（RFI：Request for Information）、続けて提案提供依頼（RFP：Request for Proposal）が実施されている。

福島第一原子力発電所における汚染水問題への対策では、1．汚染源を取り除く、2．汚染源に水を近づけない、3．汚染水を漏らさない、の 3 つを基本方針としている [1)]。技術的難易度が高いと考えられる海水浄化技術、土壌中放射性物質補修技術、汚染水貯蔵タンク除染技術、無人ボーリング技術、トリチウム分離技術の 5 つの技術については、検証事業を実施している [2)]。また、汚染水処理対策委員会の下に設置したトリチウム水タスクフォースにおいて、福島第一原子力発電所の汚染水を高性能多核種除去設備（ALPS：Advanced Liquid Processing System）で処理した後に残るトリチウム水の扱いに関する総合評価を実施している [2)]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

ロボット開発に関しては、これまでに投入された数十台の遠隔ロボットのうち 5 台が未帰還となっている。このうち 3 台は通信系のトラブルによるものと考えられており、原子炉建屋のように無線が到達しにくいところでも確実かつ高速で通信できる無線シス

テムが必要となっている。また、除染や解体撤去などの長時間かかる作業や、格納容器などの極めて線量率の高いところの偵察や作業を念頭に、遠隔ロボットの耐放射線性の向上について検討を加速する必要がある。さらに、今後、狭隘部や高所部の偵察、除染、解体撤去、溶融燃料などの回収に多数の遠隔ロボットが必要になると考えられる。これら多数のロボットの効率的な運用、管理などを行うため、メーカーごとにロボットを開発する体制から、基本方針の作成を集約し、メーカーでの開発を指導・管理しながら、ロボットを開発する体制の整備も望まれる。

除染に関して、建屋全体については、遠隔作業装置の開発、除染方法選定のための汚染状態の把握、個別の遮へい装置の開発、内包汚染物質撤去のための工法確立と装置開発など、また上部階の除染については、遠隔除染装置の昇降、１階高所除染では、線源の特定や高所に届く除染装置の開発などが課題であり、新たな対策が必要となっている。下図に想定汚染の模式図を示す。ここで、除染技術の分類、適用性検討の項目は、技術カタログに掲載された主要な除染要素技術を示している。これらは、国内外への公募の結果集まった除染技術であり、どのような汚染に有効かという視点で分類されている。抽出された技術について、遠隔機器への搭載性や狭隘部への適用性といった観点で関係者による評価を行い、まず低所での除染方法を確立し、各汚染形態に対して、適用可能と考えられる除染技術を分類し、課題を明確にしている。

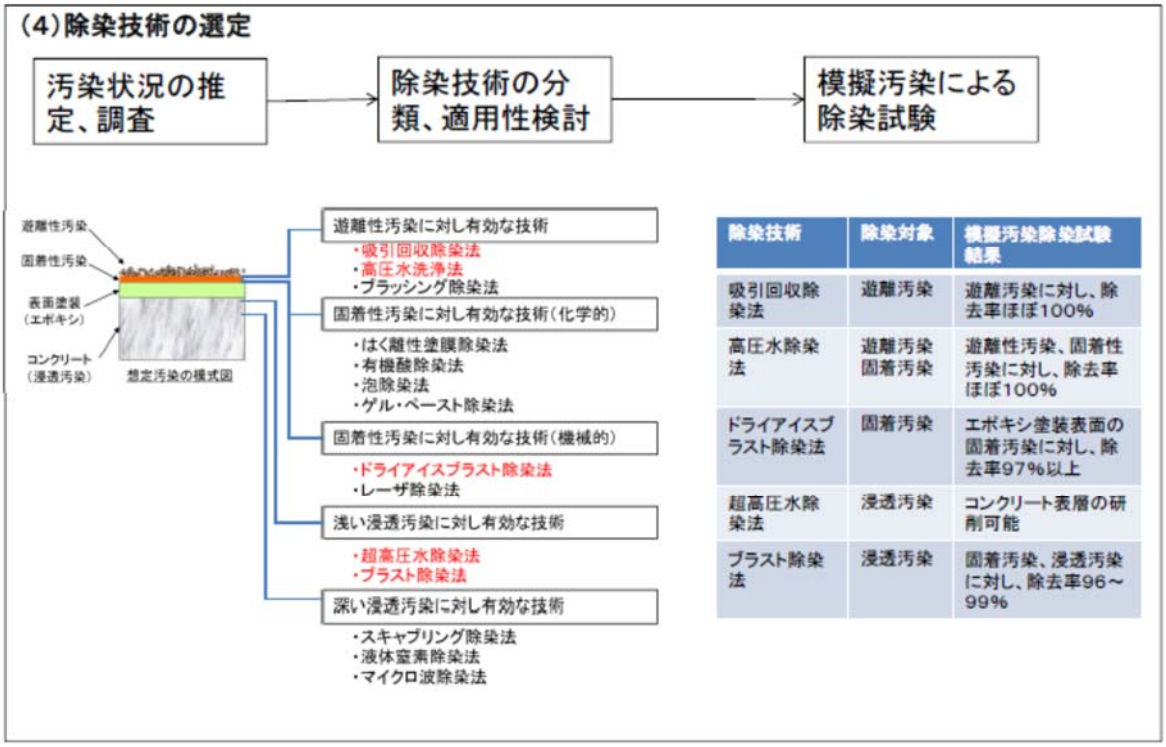



図　想定汚染の模式図

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

諸外国の専門家とともに事故進展や炉内状況を解析的に評価し、また各国のシビアアクシデント解析コードの改良に貢献するため、我が国は OECD/NEA 主催の国際ベンチ

マーク解析プロジェクト（BSAF）を提案した。米、フランス、ドイツ、ロシア、韓国など 8 各国が参加し、2012 年 11 月に開始。2014 年内に成果をとりまとめる。ソースターム評価の精度向上を目指した第 2 期計画の検討も並行して進められている。

また、今後必要となる狭隘部や高所部の偵察、除染、解体撤去、溶融燃料などの回収に必要な遠隔ロボットの開発が、国の補助事業で進められている。

除染装置の開発は、2011 年度の国の補助事業により開始している。また、総合的に線量を低減させるための作業計画の検討については、2012 年度により開始している。

溶融燃料の取出しについては、IRID では、RFI を実施し、提供された情報を詳細に検討した結果、RFP のテーマ選定並びにその技術仕様を作成した。

汚染水対策としての凍土方式の陸側遮水壁については、1～4 号機を囲む凍土遮水壁構築の本体工事を着工した。小規模凍土壁の閉合および遮水性を確認した[2)]。また、ALPS については、フィルタや吸着材が 62 核種を除去できる条件を確認した[2)]。

さらに、国は必要な人材を確保するため、2013 年度に必要な基礎基盤研究および人材などの情報に係る事前調査を行った。これを踏まえ、2014 年度より、「国家課題対応型研究開発推進事業（廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム委託費）」を開始した。また、福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プランとして、JAEA に廃炉国際共同研究センターを 2015 年度に設置した。この加速プランでは、人材育成についても強化することとしている。

研究情報基盤の整備として、政府関係機関が発信するインターネット情報や学会発表の書誌情報については、JAEA において「福島原子力事故関連情報アーカイブ」としてデータベースの構築・提供が行われている。このほか、IRID において実施している廃止措置に関連する研究開発については、適宜、国の会議体（廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議など）において共有・公開されている。

## （６）キーワード

ロボット、除染、解体撤去、放射線計測、ガンマカメラ、耐放射線性、放射性廃棄物処理・処分、核種分析、原子力発電所廃止措置、遊離性汚染、固着性汚染、除染技術、総合的線量低減、燃料デブリ、冠水、気中取り出し、汚染水問題に関する基本方針、廃炉・汚染水問題に対する追加対策、凍土方式の陸側遮水壁、国際廃炉研究開発機構、多核種除去設備、国際原子力機関、トリチウム水、耐震安全性、経時変化

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基本研究 | － | － | ・IRID にて、事故時のプラント挙動分析、シビアアクシデント解析コード（MAAP、SAMPSON）の高度化および関連する模擬試験を実施している。JAEA では、シビアアクシデント解析コード THALES2 の開発と、THALES2 および MELCOR を用いた事故進展解析を実施している。<br>・東京工業大学、北海道大学、東北大学、京都大学、九州大学、長岡技術科学大学が共同し「福島原子力発電所で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究」を実施している。<br>・トリチウム水の処理については、蒸留法、同位体交換法、電気分解法、そのほかの方法が開発されている。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・IRID の提案が国の補助事業に採択され、中長期ロードマップに沿った研究開発を実施している。<br>・トリチウム分離プラントの実績はあるが、福島第一原子力発電所のトリチウム水は、この実績と比較しても、濃度が数桁低く、量が数桁大きい。 |
| | 産業化 | － | － | ・JAEA にてパワーマニピュレータ型の動力試験炉遠隔解体装置や遠隔保守作業用の両腕型バイラテラルサーボマニピュレータなどが開発され、実用化されている。<br>・第二セシウム吸着装置として、東芝などが開発した SARRY（Simplified Active Water Retrieve and Recovery sYstem）が整備され汚染水処理（セシウム除去）が実施されている。<br>・多核種除去設備として、東芝などが開発した ALPS が整備され汚染水処理が実施されている。 |
| 米国 | 基本研究 | － | － | ・トリチウム水の処理については、蒸留法、同位体交換法、電気分解法、そのほかの方法が開発されている。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・スリーマイル島事故で発生した 3 個のゼオライトベッセルについて PNNL でガラス固化処理試験を実施し、16 個をコンクリート・オーバーパック（HIC : High Integrity Container）し埋設保管した。 |
| | 産業化 | － | － | ・MELCOR コード、MAAP コードを使用して事故進展解析を行い BSAF に参加している。<br>・原子力施設の廃止措置について、オークリッジ国立研究所などの国立研究所が中心となって、所要の遠隔ロボットを開発し、実用に供してきている。<br>・セシウム除去設備として、KURION 社の設備が整備され汚染水処理（セシウム除去）が実施されている。 |
| 欧州 | 基本研究 | － | － | ・フランス原子力・代替エネルギー庁（CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives）、放射線防護・原子力安全研究所（IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire,フランス）にて幅広い実験的研究が進めてきた。また、カールスルーエ工科大学（KIT : Karlsruher Institut für Technologie,ドイツ）においても、再冠水時の燃料集合体挙動などに関する研究を継続している。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・KIT、CEA にて原子力施設を廃止措置するための遠隔機材開発を継続している。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | － | － | ・KIT では WAK（Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe）再処理施設にて BROOK 社（スウェーデン）の小型無人重機に油圧アームを搭載した遠隔ロボットを開発し、塔槽類の解体撤去を行った。<br>・GroupeINTRA（フランス）では、遠隔ロボットを配備しており、常時、訓練と整備、継続的に更新を行っている。また、CEA では、BROOK 社の小型無人重機を改良したロボットを用いて、セル内機器の解体撤去を行った。<br>・BROKK 社では、作業員に変わって解体撤去作業を行う、小型無人重機型ロボットを製造している。<br>・除染設備として、AREVA 社（フランス）製設備が整備され汚染水処理（セシウム除去）を実施したが、操業開始約 3 ヶ月後から休止している。<br>・エネルギー・環境・技術研究センター（CIEMAT : Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas, スペイン）、ポール・シェラー研究所（PSI ：Paul Scherrer Institute, スイス）は、MELCOR コードを用いて福島第一原子力発電所事故の進展解析を行い、BSAF に参加している。 |
| 中国 | 基本研究 | － | － | ・特筆すべきものはない。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・特筆すべきものはない。 |
| | 産業化 | － | － | ・特筆すべきものはない。 |
| 韓国 | 基本研究 | － | － | ・特筆すべきものはない。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・トリチウム分離のプラントについて実績はある。 |
| | 産業化 | － | － | ・韓国原子力研究所（KAERI : Korea Atomic Energy Research Institute）は、事故進展解析について独自コードを開発する動きもあるが、BSAF には MELCOR コードを用いて参加している。 |
| ロシア | 基本研究 | － | － | ・チェルノブイリ事故以降、燃料溶融や溶融炉心コンクリート相互作用（MCCI : Molten Core Concrete Interaction）などに関する多様なシビアアクシデント研究が展開された。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・チェルノブイリのデブリ分析および処理は、クルチャトフ研究所（KI : Kurchatov Institute）が中核となって実施した。また、アレクサンドロフ科学技術研究所（NITI ：Nauchno-Issledovatel'skii Tekhnologicheskii Institut im. A.P. Aleksandrova）、ロシア科学アカデミー原子力安全研究所（IBRAE : Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences）、LUTH、サロフ研でシビアアクシデント研究が継続されている。 |
| | 産業化 | － | － | ・IBRAE は、ロシア型加圧水型原子炉（VVER : Voda Voda Energo Reactor）でのシビアアクシデント解析を目的にした SOCRAT コードを開発してきたが、これを BWR に対応させ BSAF に参加し福島第一原子力発電所事故の進展解析を行っている。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140217/140217_01f.pdf
2）http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140609/140609_02h.pdf

### ３．３．２．８　環境修復の手法

#### （１）研究開発領域名

環境修復の手法

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子力発電所、そのほかの原子力施設の事故により広く環境中に放出された放射性物質で汚染された環境を除染などにより修復し、環境再生を図る技術とその技術開発の現状を述べる。放射性物質に起因する放射線量率の低減、土壌中の放射性物質の除去を合理的、効率的に行うことが必要である。また、汚染環境は土壌、建物、森林など多種多様に渡ることからそれぞれに適した技術を選定、開発しなければならない。さらに、環境修復では多量の汚染物、土壌、瓦礫、草木類、などが発生するため、体積の減容、焼却などによる安定化が必要となる。加えて、多量の汚染物を貯蔵、処分する施設、場所を整備することが環境修復を迅速に行うには不可欠となる。住環境、生活環境の修復には除染とともに地域再生が不可欠である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災に起因して、福島第一原子力発電所の炉心損傷や建屋の爆発で放射性物質が大気中に多量に放出され、福島県を中心として東日本に広がり、広範囲にわたり土壌、建物、農地、河川・湖沼、森林などの汚染がもたらされた。それをもたらした放射性核種は、セシウム 134（半減期 2.06 年）、セシウム 137（半減期 30.2 年）、ヨウ素 131（半減期 8.04 日）が主要なものである。そのうちヨウ素 131 は半減期が短いため中長期に影響を及ぼすのはセシウムの放射性核種であり、線量や濃度の低減にあたってはこのセシウムが主要な対象となる。この汚染により放射線量が高い地域では、住民の長期にわたる避難生活が余儀されている。このため放射線量や土壌表面、土壌中の放射性核種の濃度を低減させて、住民が以前のように安心して生活し、生産活動に従事できるように環境を修復していくことが重要となる。

このためにもっとも基本となるのが放射性核種の除去や単位面積・体積当たりの濃度を薄めることであり、前者は比較的汚染度が高いところ、後者は汚染度が比較的低いところに適用できるが、修復の対象は多種、多様であり、その対象物により適切な技術を選定していく必要がある。主要な修復技術としては、建物や屋根に対しては、放水洗浄、ブラシ洗浄、ふき取り、閉じ込め、屋根の葺き替えなど、敷地や庭に対しては表土の剥ぎ取り、表土と下土の入れ替え、芝刈り・草の除去、灌木の剪定、落ち葉の回収、樹木、灌木の伐採、閉じ込め（汚染物の表面固定）などがある。また、道路などに対しては散水洗浄、側溝・法面の泥、草、枯葉などの除去、固定化、剥ぎ取りと再舗装などが、農地（畑地、水田）に対しては耕起、表土の剥ぎ取り、代掻き、土壌洗浄（物理的、化学的)、植物栽培による土壌浄化（ファイトレメディエーション）がある。さらに、森林に対してはモニタリング、落ち葉の回収、樹木、灌木の剪定・間伐、集水域での水処理、濃集域における堆積物の除去、立ち入り制限・摂取制限などがある。しかし、同一技術を適用しても、除染係数が低いものから高いものまで変化し、除染の対象とする物質の性質（表面形状、気候、汚染後の経過期間など）により大きく変化することがこの除染

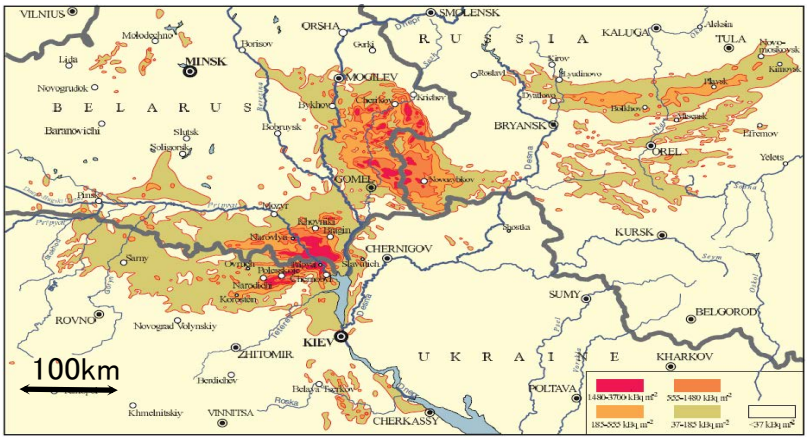
の特徴である。

このように除染対象は建物、土壌、農地、森林など多岐に渡り、汚染した土壌、瓦礫、草木類が多量に発生する（福島県の除染からは 1500 万～2800 万 $m^3$ の汚染物が発生すると予想されている）。このためにはそれらを保管する場所（仮置き場）の整備が、効率的に除染するためには必要であるが、仮置き場設置に住民の理解が得られない場合には、暫定的に現場保管を行って進めているところもある。これらの汚染物には庭、公園、森林などから発生する草木類などが多く含まれている。それらの有機廃棄物は腐敗、分解による温度上昇、ガス発生が予想されるため、火災などの発生を抑制するため焼却などによる減容化と安定化が必要とされる。

さらに、福島県の除染で発生する放射性廃棄物の保管・処分法は、仮置き場保管（3 年間）、その後の中間貯蔵（30 年間）とそれに続く最終処分となっている。しかしこれらの施設の設置には、住民の理解と受け入れという大きな課題が存在する。また、現在（2014 年 7 月）でも現場保管や仮置き場が 1 万か所以上存在するが、これを福島県内数か所に予定されている中間貯蔵施設に合理的、効率的に運搬することも課題となっている。さらに、中間貯蔵施設搬入までには時間を要することから 3 年間以上の仮置き場での保管も考慮しなければならず、技術面も含めて住民に対する不安の払しょくも今後の課題である。

一方、放射性物質は時間の経過とともに風雨などにより森林からダム、ため池、宅地、農地などへの移行も懸念され住民の関心となっている。さらには、この放射性物質による地下水汚染の懸念も住民の高い関心となっている。

国際的な汚染の事例としては、いくつかあげられるが中でも広範囲に影響を及ぼしたものとして、国際原子力事象評価尺度（INES：International Nuclear Event Scale ）で福島第一原子力発電所事故と同じもっとも大きいレベル 7（深刻な事象）として位置付けられた旧ソ連（現ウクライナ）にて 1986 年に炉心が溶融し、爆発して多量の放射性物質が広範囲に飛散したチェルノブイリ原子力発電所 4 号炉の事故がある。チェルノブイリ発電所の事故では炉心自体が爆発したため、その中に装荷されている核燃料物質であるウランやプルトニウム 、さらに各種の核分裂生成物が広範囲に飛散した。その領域は、セシウム 137 濃度 40 kBq/$m^2$ 以上の汚染が 200,000 $km^2$ 以上に及んでおり、そのうちの 71%はベラルーシ、ロシア、ウクライナであった。これにより 34 万人が避難し、村や住居の移動をしなければならなかった。一方、福島第一発電所の事故では、40 kBq/$m^2$ 以上の領域は約 5100 $km^2$ であった。図に同じ尺度で示したチェルノブイリ事故と福島第一原子力発電所事故により汚染した地域の地図を示す[1,2]。同地図で同じ色は同じ汚染程度を示している。




Surface ground deposition of Cs-137 near Chernobyl.（IAEA “STI/PUB/1239” , 2006）

Same dimension

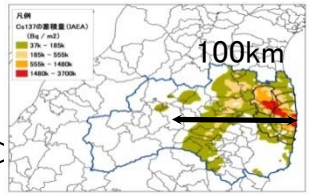



図 チェルノブイリ事故と福島第一原子力発電所事故により汚染した地域の比較

一方、両者における土地の利用形態も異なっている。福島の場合は、セシウム 137 により 300 kBq/m² 以上汚染したところの土地利用形態は、市街地が 5%未満、水田・畑地などの農業地が 20%未満、山林が 75%以上（全村避難に至った飯舘村、川内村では 90%以上が山林）であるのに対し、チェルノブイリ発電所周辺は農用地が 43%、森林 39%および河川・湖沼地帯が 2%となっており、福島の場合は森林の占める割合が大きい。チェルノブイリ事故による汚染の場合、腐植化した砂質土では 1996 年時点でもセシウムはその 95%程度が表層 2 cm 以内にとどまっていると報告されている。しかし、ストロンチウムは移動しやすく同時点で表層 2 cm 並びに 50－60 cm 深さの場所に多くが存在している。一方、芝土に用いられた砂質のグレイ土ではセシウムは、1987 年時点で 80%以上が表層 5 cm 以内にとどまっていたが、2000 年には表層には 40%程度となり深さ 20 cm 程度まで移動していたという報告がある。

チェルノブイリ事故で汚染された都市や村では、1986～1989 年にかけて大規模な除染が行われ、水や特殊洗浄液による建物の洗浄、居住地区の清掃、汚染した表土の除去、道路の清掃と洗浄、表面水（川や湖）の水源での除染が行われた。これらは合計で約 1000 の居住地で数万の家屋や公共建物と 1000 以上の農場が対象となった。除染効果は、同じ除染方法を使っても差が出ており、空間線量率の低減率が 2/3 から 1/15 まで変化している。しかしその後、チェルノブイリ発電所周辺では除染の費用が大きくかさむため、汚染地区全体での総合的な除染はなされなかった。

次に大きな環境の汚染事故として、1957 年に旧ソ連の再処理施設（MAYAK）で高レベル放射性廃液タンクの冷却機能の喪失により、発熱し化学爆発を起こして、周辺環境が広範囲に汚染した。この汚染領域は、$7.4\times10^{10}$ Bq/km² 以上の汚染が長さ 105 km 幅 8-9 ㎞におよびその面積は 1000 km² となっている [1)]。また、$3.7\times10^{9}$ Bq/km² 以上の汚染は長さ 300 km、幅 30-50 km におよびその面積は 200,000 km² であった。このタンク内に貯蔵されていた主な放射性核種は、セリウム 144（+プラセオジム 144）が 65.8%、

ジルコニウム 95（＋ニオブ 95）が 24.8%、ストロンチウム 90（+イットリウム 90）が 5.4%およびルテニウム 106（+ロジウム 106）が 3.7%であった。ここでとられたサイト内除染方法は、高汚染の場所では新しい土壌で表面を覆うことにであった。比較的汚染が低い領域では汚染した土壌を汚染していない下部の土壌と入れ替えることであった。これにより約 320,000$m^3$の汚染土壌が発生している。当初計画された環境修復は、村や住居の移転、放射線モニタリングシステムの開発や食物や飼料の検査、居住地域や農業地の除染と、農業企業体の再構築であった。また汚染地の主な除染方法は、コンクリートやアスファルトの道路では水による洗浄であり、自動車や鉄道貨車などについては水洗浄、リンシングや汚染の固定化という方法が取られた。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）[3)]

科学技術的課題

除染にあたってまず重要なことは除染の対象となる場所の詳細な線量を知ることであり、放射性物質はそれが出す放射線の種類（アルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線）とそのエネルギーにより周辺に及ぼす影響が異なる。福島第一原子力発電所事故の場合には、汚染の源となっているのはセシウム 134（半減期 2.06 年）とセシウム 137（半減期 30.1 年）であり、長期に影響を及ぼすのはセシウム 137 である。このセシウム 137 によるガンマ線（正確には、セシウム 137 がベータ崩壊により準安定なバリウム 137m になり、それが安定なバリウム 137 に変わるときにエネルギー0.662MeV のガンマ線を放出）は影響の範囲が 20 m 以上に及ぶため、その場の線量がその地点での汚染なのか、ほかの場所の汚染が影響しているのかを知ることが重要である。

除染方法の選定にあたっては、同じ方法を適用しても場所や対象物によって効果が大きく異なるため、その特徴に応じて個別に判断することが必要である。また特に広範囲の除染には、必要となる時間やコスト、発生する廃棄物量を考慮して、効率的かつ合理的に除染方法を選定することが必要である。

除染により極めて多量の放射性の汚染物質が発生する。その多くは土壌、ガレキ、草木類の有機物であり、これらの量の低減は必要な技術となっている。土壌は分級などを使う物理的除染や化学薬品（アンモニアなど）を添加することによる化学除染があるが、現状の技術では大きな除染効率が得られなく、費用も高価なものとなっている。このため効率的な方法で安価で高い除染係数が得られる除染技術が求められている。また、このためにも放射性セシウムがどのような形態で土壌などのどこに取り込まれるのか、吸着されるのか早急に解明する必要がある[4)]。

除染により発生する草木などの有機物については時間の経過とともに腐敗、可燃性ガスの発生、発熱、高温化などにより、ときには発火する危険性が存在する。このためには燃焼させて減容とともに安定化を図ることが必要である。燃焼させる場合には燃焼後に発生する飛灰、主灰の長期安定化のための固化技術なども求められる。

また、農地などでは穀物、果樹などへの取込みが懸念されているが、ここ 2、3 年の研究で実際にそれらの生産物に取り込まれるセシウムの量（移行係数）はかなり低いことが分かってきているが、移行のメカニズムは明らかとなっていない。このため取り込まれる機構や穀物、果樹中での濃縮機構なども明らかにする必要がある[5)]。

今後の大きな関心として時間の経過（年単位）とともに放射性物質は風雨や河川の流れなどにより移行することが予想されるため、除染後も定期的に調査（動態調査）しておくことが必要である。現在、森林からため池や河川に、また河川の流れによりセシウムがどのような速度で移行するか明確になっていないのが現状である。また、汚染された場所の住民にとっては時間の経過とともに、地下水の汚染が大きな懸念となっている。このため、長期間にわたり表面土壌から地下水への移行についても調査しておくことは重要な課題である。

政策的課題

環境修復は宅地、農地、河川、道路などの除染、地域再生と多分野にまたがり、多くの行政機関が直接関係するため、全体を管理、統括して進める制度設計が不可欠である。また、現在除染特別地域については国直轄で、また汚染状況重点調査地域では各自治体単位で除染計画が策定され除染実施区域が定められている。その一部には優先順位の考え方も導入されている。今後、除染計画の見直しの過程において利害関係者による議論がなされ、放射線防護の確保と社会・経済的な要因などがバランスした計画のもとに除染が実施されることが必要である。除染の推進にあたっては、多量に発生する廃棄物を保管する場所、施設の確保が極めて重要である。このため仮置き場、中間貯蔵施設などの安全確保と周辺住民への理解の促進がキーとなる。

除染した後に発生する放射性物質は濃度が低いものも多量に発生するため、土壌や、金属、コンクリート類などは放射線影響を十分考慮したうえで、特に低いもの（クリアランスレベル以下）については無条件の使用が、クリアランスレベル以上ではあるが適切な処置をして国際放射線防護委員会（ICRP : International Commission on Radiological Protection）の推奨値である年間の追加被ばく線量が 1 mSv 以下であれば、堤防の中心殻や道路の下層の土壌として利用できるような再利用の推進に向けた改善、基準の策定、地元住民の理解促進が必要である。

また環境修復は、住民の生活インフラの整備、生産活動拠点の整備など地域活性が不可欠であり、除染とともに地域再生を同時に進めなければならない。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

このほかの大きな環境修復としては米国の例がある。米国では、軍事用の原子力技術開発が活発であった 1980 年ころまでの負の資産として、国立の原子力施設（サバンナリバー、ハンフォード、オークリッジなど）の環境修復が大きなプロジェクトとして進められている。汚染源は多様であり、サバンナリバー施設は、ウラン、テクネチウム 99、ヨウ素 129、硝酸塩、ハンフォード施設はテクネチウム 99、ウラン、クロム、ストロンチウム 90、オークリッジ施設は水銀である。これらのサイトの修復には環境保護庁が毎年多くの予算をつけて、土壌、地下水、河川の修復作業が続けられている。

一方、福島第一原子力発電所の事故を受けて、なかでも国際原子力機関（IAEA : International Atomic Energy Agency）は早くから福島の教訓を取り入れたガイドラインの見直しや技術報告書の作成を行っている。ここではそのいくつかを紹介する。

・IAEA は 2007 年に”Remediation process for areas affected by past activities and accidents”という安全ガイド（Safety Guide, IAEA No.WS-G-3.1）を刊行した。しかし、今回福島第一原子力発電所事故を受けてこの改定作業を実施している。そこでは公衆の被ばくを減らすために現存被ばく状況への修復戦略、環境修復の基準など広い範囲にわたって見直しが行われている。
・IAEA ではこれまでに各国に存在する負の資産の修復について、”Technologies for Remediation of Radioactively Contaminated Sites”; IAEA-TECDOC-1086（1999）を取りまとめたが、現在福島第一原子力発電所のサイト外の環境修復の基本的考え方、戦略、使われている除染技術などを大幅に取り入れた技術報告書が作成中である。
・事故による環境修復から多量に発生する汚染廃棄物の管理について、技術報告書を作成している。この報告書では、量的制約、迅速さおよび効率を考えると通常時の許認可では環境修復の速度に障害が出ることから、事故などで発生する放射性廃棄物の許認可を加速させるための簡素で効果的な制度とその方法について、および政策決定上考慮すべき重要な課題について報告がまとまられる。

### （６）キーワード

環境修復、除染方法（技術）、福島第一原子力発電所事故、放射性廃棄物、セシウム 134、セシウム 137、米国原子力施設（サバンナリバー、ハンフォード、オークリッジ）、チェルノブイリ発電所事故、汚染廃棄物・土壌の貯蔵

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 [4,6,7] | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・土壌中のセシウムの動態（吸着機構、脱着機構）についての研究が進んでいる。<br>・土壌中（深度方向）へのセシウムの移行が経年的に調べられている。<br>・環境中での移行動態の評価、線量評価モデル、シミュレーションコードの開発が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・土壌の成分（土壌の種類、交換性カリウム濃度）と作物中への放射性セシウム、放射性ストロンチウムの移行率との関係が明らかになってきている。<br>・環境中での放射性セシウムの移行動態の研究が進んできている。<br>・汚染水中の放射性セシウム、ストロンチウムの除去材、技術の開発が行われている。<br>・汚染土壌からの放射性セシウムの除去技術が進められている。<br>・環境修復には多大なコストを要するため、除染の効果とコストの関係に関する分析がなされている。<br>・地域再生のモデル評価が進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・建物、宅地、農地などを対象にしてそれぞれに適した放射性物質除去技術を使って修復事業が行われている。<br>・農地除染のための農業機械の開発が行われている。 |
| 米国 [8] | 基礎研究 | ○ | → | ・地質、水質の変化によるセシウムの吸着特性が調べられている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・汚染の性質の把握、モニタリング、除染、モデリングなど一連の流れで修復が行われ、そのための技術開発、比較、実証も同時に行われている。<br>・剥ぎ取り、洗浄、固定化、物理的・化学的手法で高放射能濃度と低放射能濃度の土壌選別が行われている。<br>・長期間にわたる土壌、河川中の放射性セシウムや放射性ストロンチウムの移行評価（動態調査）が行われている。<br>・除染性能向上、コストの削減が可能なより効率的で効果的な技術の探査が行われている。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・原子力研究開発施設（ハンフォード、サバンナリバー、オークリッジなど）で土壌汚染、河川汚染からの環境修復事業が 1980 年代ころから進められている。<br>・汚染された地下水の処理（汲み上げ、除染、地下に再注入）が行われている。<br>・大規模な地下水汚染処理施設が建設中である。 |
| 欧州 | 基礎研究 | － | － | ・特に目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・原子力廃止措置機関（NDA：Nuclear Decommissioning Authority, 英）が中核となって廃止措置、環境回復に関する技術開発が行われている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・英国にてセラフィールド原子力施設の老朽した原子炉廃止措置、汚染土壌の回復計画が進められている。また、研究開発用の高速炉など（現在廃止措置段階）を運転していたドーンレイ原子力施設の汚染土壌の回復計画が作成されている。 |
| 中国 | 基礎研究 | － | － | ・特に目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・特に目立った動きはない。 |
| | 産業化 | － | － | ・特に目立った動きはない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | － | － | ・特に目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・特に目立った動きはない。 |
| | 産業化 | － | － | ・特に目立った動きはない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ウクライナ（旧ソ連）[1)] | 基礎研究 | × | － | ・特に目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↘ | ・土壌、水、食物のモニタリングを行い、汚染地図を作成することを行った。<br>・環境修復は困難であり、高汚染地では村や居住地の移転が主であった。<br>・農地や牧草地については深い層までの耕起を行ったり、高濃度のカリウムの添加を行った。 |
| | 産業化 | × | － | ・特に目立った動きはない。 |
| ロシア[1)] | 基礎研究 | △ | ↘ | ・環境中、食物ならびに食物連鎖系でのストロンチウム 90 とセシウム 137 の挙動調査を行った。<br>・人間の体内中でのストロンチウム 90 とセシウム 137 の分布の把握。<br>・異なる土壌中でのストロンチウム 90 とセシウム 137 の移行挙動の把握。<br>・河川・湖沼地のストロンチウム 90 とセシウム 137 の蓄積、分布。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・高汚染地では１ｍ厚さのクリーンな土壌でカバーし、低汚染地では汚染土壌の剥ぎ取りを実施した。<br>・道路に対しては水洗浄をしたり、表土 10 cm 程度の剥ぎ取りを行った<br>・自動車や鉄道貨車の洗浄を行うとともに、高汚染地では鉄道軌道上とその周辺の土壌の剥ぎ取りを行った。 |
| | 産業化 | × | ↘ | ・現段階でも開発の段階であり本格的な産業化による修復はなされていない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) International Experts’ Meeting on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, IAEA Headquarters in Vienna, Austria, from 28 January to 1 February 2013
2) IAEA, “Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience”, IAEA, Vienna, 2006
3) 福島第一原子力発電所事故「その全貌と明日に向けた提言 - 学会事故調最終報告書 - (一財)日本原子力学会、丸善出版、平成26年3月
4) http://aerap.dc.affrc.go.jp/research/01top.html
5) http://www.naro.affrc.go.jp/project/challenge/project23/index.html
6) http://www4.pref.fukushima.jp/nougyou-centre/kenkyuseika/kenkyu_seika_radiologic.html
7) 農業及び土壌の放射能汚染対策技術国際研究シンポジウム, 農林水産省, 2012年3月8日～10日、郡山市
8) Japan/U.S. Department of Energy Workshop on Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Cleanup, Feb.13-15, 2012, Hanford Site in Richland, Washington State

### ３．３．２．９　環境・人体への放射線影響（防護を含む）

#### （１）研究開発領域名

環境・人体への放射線影響（防護を含む）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

環境放射線と放射能、放射性物質の環境挙動、放射性物質の体内動態、放射線の計測と線量評価、放射線の人体影響と防護、などのキーワードに代表される、実測定と解析計算に基づく知見の集積、その成果を利用しての防護理念の構築と関連技術の開発に関する基盤的研究について記載する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

「環境放射線と放射能」に関しては、国連科学委員会（UNSCEAR：United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation）の 2008 年報告書で、ラドンによる被ばく線量が自然放射線源からの被ばく線量の約 50%を占めているとされ [1]、欧州による屋内ラドンの疫学調査の結果より、国際放射線防護委員会（ICRP：International Commission on Radiological Protection）や世界保健機構（WHO：World Health Organization）がラドンの肺がんリスクの有意性を報告書にまとめている [2, 3]。WHO は飲料水中ガイドラインを現在検討中である。国内では 2011 年 12 月に「新版　生活環境放射線（国民線量の算定）」が公表され、最新の国民線量が提示された。

「放射性物質の環境挙動」に関しては、福島第一原子力発電所事故に関連する研究が集中的に進められている [4]。また、再処理施設や放射性廃棄物処分施設、自然起源の放射性物質（NORM：Naturally Occurring Radioactive Material）などに着目した研究も継続して進められている。

「放射性物質の体内動態」に関しては、ICRP が関連のモデルを提示し [5]、摂取量から線量を計算するための換算係数を整備している。これらのモデルを解析するソフトウェアが国内外で開発 [6,7] されている。

「放射線の計測と線量評価」に関しては、福島第一原子力発電所事故を受けて、特に環境計測を目的とした低線量領域を対象として、エネルギー分析が可能で、かつ指向性の高い測定器の開発が進められている。低線量内部被ばくを正確に評価する検出器が整備されつつある [8]。

「放射線の影響と防護」に関しては、線量基準の設定に用いられる LNT モデル（人体に対する放射線の影響にしきい値なしとする仮説、Liner Non-threshold Theory）の妥当性や低線量における放射線リスクに関する議論が活発である。また、水晶体、循環器系疾患など、放射線被ばくが非がん疾患に与える影響についても注目が高まっている [8, 10]。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

「環境放射線と放射能」について、一部の国や地域における屋内ラドン調査で使用された測定器の中にラドン 220 の影響を受けているものがあり、このことがラドンの人体影響を小さく見積もる原因になっていることが問題となっている [11]。ラドンおよびトロ

ンによる被ばく線量の評価手法の確立と校正場の整備が重要である。欧米においてはラドンによる防護規準が設けられているが、我が国ではまだ議論が始まっていない。

「放射性物質の環境挙動」について、福島第一原子力発電所事故に関連した研究を進め、周辺住民の事故直後や将来の線量を正確に評価する必要がある。その結果を今後の政策へ反映させるとともに、被ばく線量を効果的に低減するための対策などに活用することが重要となる。特に、適切な環境モニタリングを継続的に実施するとともに、地域特性を反映したより現実的な評価のためのモデル・パラメータ研究が重要となる。その際に生じる不確実性の取扱いに関する議論も忘れてはならない。

「放射性物質の体内動態」について、標準的な欧米人を想定してICRPの線量換算係数が計算されている。しかし、欧米人と日本人では食生活や代謝などが大きく異なるため、より正確な被ばく線量評価のためには、標準的な日本人に対する代謝パラメータについて検討することが課題となる。例えば、日本人のヨウ素に関する代謝を明らかにし、関連の指針などに反映させる必要がある。

「放射線の計測と線量評価」について、低線量の放射線を長期にわたり測定すること[12, 13]や、細胞レベルの放射線影響を評価するための検出器開発が課題となっている[14]。また、環境測定においてスポット的に汚染された箇所の同定や線量分布測定を正確に行うための高度な技術と装置の開発が重要である。

「放射線の影響と防護」について、放射線被ばくから疾病発現にいたるまでの詳細な生物学的メカニズムを解明し、さらに、それを検出するための生物学的指標の開発が必要である。また、リスクを総括的な視点で判断できる疫学データは将来的にも重要であり[15]、原爆被ばく者、高自然放射線地域住民、放射線業務従事者などを対象とした継続した疫学調査の意義は極めて大きい。これら生物学と疫学とを繋ぐためのモデル化研究・システム生物学的研究の発展も必要である[16]。

これらの研究的課題を国民の理解を得ながら克服し、推進するための背景を整えることも重要である。関連する政策的な課題のひとつとして、放射線や放射性物質に関する国民全体のリテラシー醸成がある。義務教育に放射線教育が導入されたばかりではあるが、福島第一原子力発電所の事故に起因した国民感情の影響も強く残り、学校における科学教育としての放射線の扱いもいまだ手探りの状況が続いている。人工放射線の有効利用、自然放射線の理解、事故後の放射性物質汚染状況とのかかわりなどを適切に整理し、教育することが求められている。放射線リテラシーの醸成に資する仕組みづくり、特に指導者やコミュニケーターの継続的な育成に取り組むことが重要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

「環境放射線と放射能」について、例えば、2009～2011年度に文部科学省科学技術振興調整費による「自然放射線被ばく研究ネットワークの構築」のプロジェクトがある（目的は、アジア主要国における自然放射線源による被ばく線量の測定法を標準化すること。被ばく状況調査および疫学調査を実施）[17]。欧州ではラドンによる被ばくの低減を目的として2013年に欧州ラドン協会（非政府組織）が設立された[18]。

「放射性物質の環境挙動」については、例えば、UNSCEARは福島第一原子力発電所事故初期の線量評価を実施し、報告書が公開された[4]。IAEAでは、放射線影響評価に

関するモデルとデータの向上のためのプロジェクト MODARIA[19]（Modelling and Data for Radiological Impact Assessment）が進められている。また、ヒト以外の生物相への影響を把握する研究も重要であり、例えば ICRP はタスクグループ活動を展開し、関連の情報を収集している。このような活動に積極的に参加することにより、関連の研究活動を展開することが必要である。

「放射性物質の体内動態」については、例えば、ICRP が現在の体内動態モデルの全面的な見直しを実施している[20]。さらに、内部被ばく線量を計算するための各臓器・組織間の比吸収割合についても、ICRP が刊行物をまとめる予定である。これらを踏まえて、最新のモデルおよび知見に基づいた内部被ばく線量評価システムを国内で構築することが重要となる。

「放射線の計測と線量評価」について、例えば、国際的な議論が続いている眼の水晶体の線量限度の変更に関する各国の採用動向を IAEA が調査している。これは、医療分野のみならず、原子力分野、そして福島第一原子力発電所作業員にも関連する。眼の水晶体被ばくの実態調査、人体ファントムを使用した線量測定および従事者の水晶体被ばく評価が行われている[21]。

「放射線の影響と防護」について、例えば、ICRP では低線量・低線量率領域におけるリスク評価のあり方や、個人の放射線感受性の議論が進められている[10,22]。欧州委員会では産官学および多様な専門家が一体となり、低線量放射線影響と防護に関するプロジェクトが進行しつつある。今後数年～十数年にわたって新知見創出と議論の蓄積が考えられ、我が国においても中長期的な横断的・専門的な大規模な取組みが必要であろう[23]。

## （６）キーワード

環境放射線、環境放射能、放射性物質の環境挙動、放射性物質の体内動態、放射線計測、線量評価、放射線の人体影響、放射線防護

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・環境放射能に関して、線量評価のためのパラメータが取得されているとともに、実験動物を用いたラドンの被ばく影響研究が実施されている。<br>・例えばダイヤモンドや各種シンチレータを用いた新たな放射線検出器の開発が進んでいる。<br>・原爆被ばく者の追跡調査、高放射性自然地域の疫学調査など、国際的基準に参考とされ得る品質の高い研究が行われている。<br>・放射線照射設備により動物実験も実施可能であり、実験的に生物学的メカニズム解明に貢献できるポテンシャルを有する。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・ラドン・トロンを弁別した測定技術が開発されすでに製品化。特にトロン校正場の構築技術に関しては世界をリードしている。<br>・大気環境モデルについては日米欧が協力し、同一レベルで研究が進められている。農作物への移行データは着実に取得されている。<br>・国内で開発されたソフトウェアによって体内動態モデルの解析が可能。<br>・線量測定と画像情報を組み合わせた線量分布画像表示システムにつき、実用器が開発されている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・ラドンおよびトロン測定の校正施設が整備されており、国際共同比較実験を実施している。トレーサビリティ制度の構築により産業化の拡大へ。<br>・土壌表面の汚染度測定に関連して、α線、β線、γ線を同時分析できる検出器などが開発されている。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | → | ・ラドンおよびトロンに関する基礎研究成果の報告は少ない。<br>・ミシガン大学にて CZT（CdZnTe）を使用したコンパクトな放射線可視化カメラが開発された。<br>・BEIR-VII で新たな線量・線量率効果比（DDREF : Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor）が示されている。<br>・放射線作業者 100 万人規模の疫学調査が進行中である。<br>・放射線防護に向けて研究を統合する活動はあまり行われていない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・エレクトレットタイプの新しいラドン・トロンモニタが製品化されている。エネルギー省環境測定研究所（EML: Environmental Measurements Laboratory）にはラドン測定器の校正場があるが、現在は稼動していない。<br>・大気環境モデルについては日米欧が協力し、同一レベルで研究が進められている。<br>・独自に体内動態モデルを開発し、米国放射線防護測定協議会（NCRP ：National Council of Radiation Protection and Measurements）レポートとしてまとめているものの、ここ数年では大きな進捗は特にみられない。<br>・日本への協力としてキュリオン社による汚染水浄化技術が福島第一原子力発電における多核種除去設備（ALPS： Advanced Liquid Processing System）に採用されている。<br>・ロボットを用いた生物線量評価システムの開発が進められており、将来的な個人の放射線感受性予測への応用などが視野に入っている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・ラドン測定や濃度低減サービスが充実している。<br>・軍事用として用いられている GM（Geiger-Müller）サーベイメータや ZnS(Ag)シンチプローブなどにつき、各国で採用件数が上昇している。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・WHO ガイドラインを受け、水中放射性核種に関する測定技術開発や放射能評価研究が行われている。また、学校、観光洞窟などにおけるラドン濃度の現地調査も積極的に行われている。<br>・フランスやドイツの大学が環境中に放出された放射性物質の拡散シミュレーションを行っている。<br>・学際的欧州低線量イニシアティブ（MELODI ：Multidisciplinary European Low Dose Initiative）による欧州大での放射線防護に直結した生物研究が進みつつある。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・屋内や土中ラドン濃度を基にした欧州全域マッピングが実施されている。<br>・大気環境モデルについては日米欧が協力し、同一レベルで研究が進められている。<br>・体内動態モデルが ICRP 勧告にまとめられ、新しいモデル開発も進んでいる。<br>・ドイツやイタリアにおいて重粒子線治療の線量測定および評価に関する応用研究が行われ、臨床にフィードバックされている。<br>・規制と研究との意見交換が活発に行われている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・多くの国で屋内ラドンの規制レベルが設けられ、企業、研究所や政府によって一般家屋内のラドン測定サービスが実施されている。<br>・フランスを中心として線量計の生産が盛んであり、高精度なものが多い。また、ウクライナなどの線量計メーカーが、福島第一原子力発電所事故以来、日本にも多くのサーベイメータを輸出している。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・甘粛省や広東省には高自然放射線地域があり、疫学調査が実施されている。鉱山などの特殊環境におけるラドン調査も実施されている。<br>・医学放射線物理系の大学において、放射線治療線量の実測とシミュレーションが実証研究の対象となっている。<br>・原子力発電所立地地域において、環境放射線モニタリングが実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・復旦大学や南華大学で新しいラドン測定技術の開発が進められている。ラドンおよび壊変生成核種に対する校正場が構築されている。<br>・大気環境、陸域環境研究ともに、特筆する研究は行われていない。<br>・日本開催の「アジアにおける被ばく医療に関するワークショップ」に参加するとともに、内部被ばく線量評価コード（MONDAL3：monitoring to dose calculation ver.3）が適宜配布されている。<br>・医療放射線被ばく測定に関する重要性の認識に劣り、放射線診断能力向上と線量低減の研究が進んでいない。 |
| | 産業化 | × | → | ・低層住宅におけるラドン防護策の標準指針や屋内空気質標準が出されている。一般家屋向けラドン測定サービスはない。<br>・環境測定用検出器として GM 計数管が主流であるが、品質が保たれていないものも多く存在する。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・韓国標準科学研究所では 2012 年にラドン放射能標準の開発を行った。NORM に関する研究が大学や研究機関において実施されている。<br>・CZT 半導体検出器を用いて陽電子断層撮像装置の精度管理が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・国立環境科学研究所による 20 万家屋を対象とした屋内ラドン調査プロジェクト（2011～2020 年）がある。<br>・EMRAS-II などに積極的に参加し、放射性物質のコメへの移行モデルや環境防護のためにモデル構築などを行っている。<br>・ボクセルファントムを導入した計算技術などの向上がみられる。<br>・国家主導で核融合エネルギーおよび線量測定技術を重点育成技術としているが、顕著な進展はみられない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・屋内ラドンの大規模調査が始まったことから今後は測定サービスの需要の可能性がある。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf
2) M. Tirmarche, J.D. Harrison, D. Laurier, F. Paquet, E. Blanchardon, J.W. Marsh. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1), 2010.
3) WHO handbook on indoor radon - a public health perspective: http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf
4) UNSCEAR 2013 Report: "Sources, effects and risks of ionizing radiation". Volume I comprises the main text of the 2013 Report to the General Assembly (A/68/46) and one scientific annex: Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami (2013).
5) International Commission on Radiological Protection, “Human alimentary tract model for radiological protection”, ICRP Publication 100, Ann. ICRP36(1-2) Elsevier Ltd. (2006)
6) 放射線医学総合研究所, MONDAL3, http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/RPD/mondal3j.php（2014年7月25日）
7) Birchall, A., Jarvis, N. S., Peace, M. S., Riddell, A. E. and Battersby, W. P., “The IMBA Suite: IntegratedModules for Bioassay Analysis” *Radiat. Prot.Dosim.***79**(1-4), 107-110 (1998)
8) 松井英介、「低線量」放射線内部被曝をいかに知るのか（特集 放射線測定とその評価をめぐって)都市問題 102(11), 20-25, 2011
9) K. Ozasa et al., Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950-2003:An Overview of Cancer and Noncancer Diseases, RADIATION RESEARCH 177, 229-243 (2012)
10) ICRP Task Group 91, Radiation Risk Inference at Low-dose and Low-dose Rate Exposure for Radiological Protection Purposes, http://www.icrp.org/icrp_group.asp?id=83 (last accessed 4 July 2014).
11) S. Tokonami. Why is 220Rn (thoron) measurement important. Radiat. Prot.Dosimetry.141(4):335-339 (2010).
12) 新田裕史、東日本大震災被災地における環境モニタリング　学術の動向, 18 (7), 26-33, 2013
13) Ogino H, Ichiji T, Hattori T, “Verification of screening level for decontamination implemented after Fukushima nuclear accident.”, Radiation Protection Dosimetry 151(1), 36-42, 2012
14) http://www.nirs.go.jp/information/event/report/2014/04_18/houkokusho.pdf
15) 放射線医学総合研究所, 低線量・低線量率放射線影響研究分野における研究推進方策, http://www.nirs.go.jp/information/event/report/2012/1122.shtml (last accessed 4 July

2014).
16) 甲斐他, 放射線リスク評価における疫学と生物学のギャップを超えるためのアプローチ, 2010年保物セミナー, http://anshin-kagaku.news.coocan.jp/hobutsu2010_kai.pdf (last accessed 4 July 2014).
17) 科学技術振興機構のホームページ：
http://www.jst.go.jp/shincho/program/kadai/pdf/h23jisshi/200915502011pp.pdf
18) ヨーロッパラドン協会のホームページ：http://radoneurope.org/
19) http://www-ns.iaea.org/projects/modaria/
20) International Commission on Radiological Protection, Consultations, http://www.icrp.org/consultation_page.asp (July 25, 2014)
21) http://www.rea.or.jp/kikaku/rea_news/news/2012_72.pdf
22) International Commission on Radiological Protection2013 Annual Report, (in press).
23) 岩崎他, 欧州における低線量リスク研究動向の分析, 電力中央研究所報告L09007, (2010).

### ３．３．２．10　原子力に関するリスクと人間・社会

#### （１）研究開発領域名

原子力に関するリスクと人間・社会

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子力利用は広範、複合的かつ潜在的なポテンシャルが大きいリスクを内包し、その適切な管理によって初めて成り立つ。しかし、そのリスクの内実を適確、多面的、包絡的に把握するとともに、人間の認知や社会にとっての重大性・重要性の観点を合わせて検討し、適切なリスク・ガバナンス（リスクを適切に管理する仕組みや活動の総体を指す）を構築する取り組みはまだ十分ではない。この課題を解決するためには、学際的な探究によりリスクを多面的に把握すること、それらに対する人びとの認知や選好を知悉し、倫理的評価・検討を交えた上で対処の原則を社会的に共有すること、これらの検討結果が示す条件を満たし、専門的な妥当性と民主的な正統性をともに満たすリスク・ガバナンスの具体的な設計を行うことが必要となる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

欧米では 1970 年代から科学技術に関する社会的意思決定を改めて民主化し、人びとの多様な価値観や要求を科学技術政策や科学研究・技術開発そのものに積極的に入力することで、上記に示した課題の解決を図ろうとの努力が目立つようになった。いわゆる（市民）参加型社会的意思決定（政策決定）の動きである。専門知や専門家と非専門家である市民やほかのステークホルダー（利害関係者）の間を取りもつために、さまざまな手法が考案され、既存の代議制民主主義との接合が試みられてきた。コンセンサス会議、サイエンス・ショップ、市民陪審などの試みがつとに知られており、1990 年代後半から、日本においても関連分野の研究者などによって試行と検討が重ねられてきた [1)]。

原子力分野に関しても、欧米ではこうした考え方に基づく制度が多くの国で実装され、運用されている。例えば、高レベル放射性廃棄物処分の分野では、積極的に参加型社会的意思決定の拡大が取り組まれてきた分野である。スウェーデン、フィンランド、フランス、カナダ、英国、スイス、ベルギーなどで、参加型社会的意思決定プロセスの導入による政策の再構築が図られ、さまざまな課題に直面しつつも、多くの成果があがっている [2)]。

日本の原子力分野においても、こうした海外での動きは関係機関や関連分野の研究者などによって早くから認識され、取り組みが着手されてはいた。早い時期のものでは、1996 年から 1999 年にかけて開催された原子力政策円卓会議があげられる。同会議は原子力に批判的な研究者や市民団体の代表を委員に加えたことは、まさに「参加」の拡大と言える。同時期には上述の高レベル放射性廃棄物処分問題についても、従来よりも原子力利用に対する立場や専門分野の範囲を拡大して有識者を招いた「高レベル放射性廃棄物処分懇談会」が原子力委員会によって設置され、議論が行われた [3)]。こちらは直接的に高レベル放射性廃棄物処分政策における事業化の制度設計に寄与した点で、実際に政策形成・決定に接続した参加型社会的意思決定プロセスの試みとして注目される。

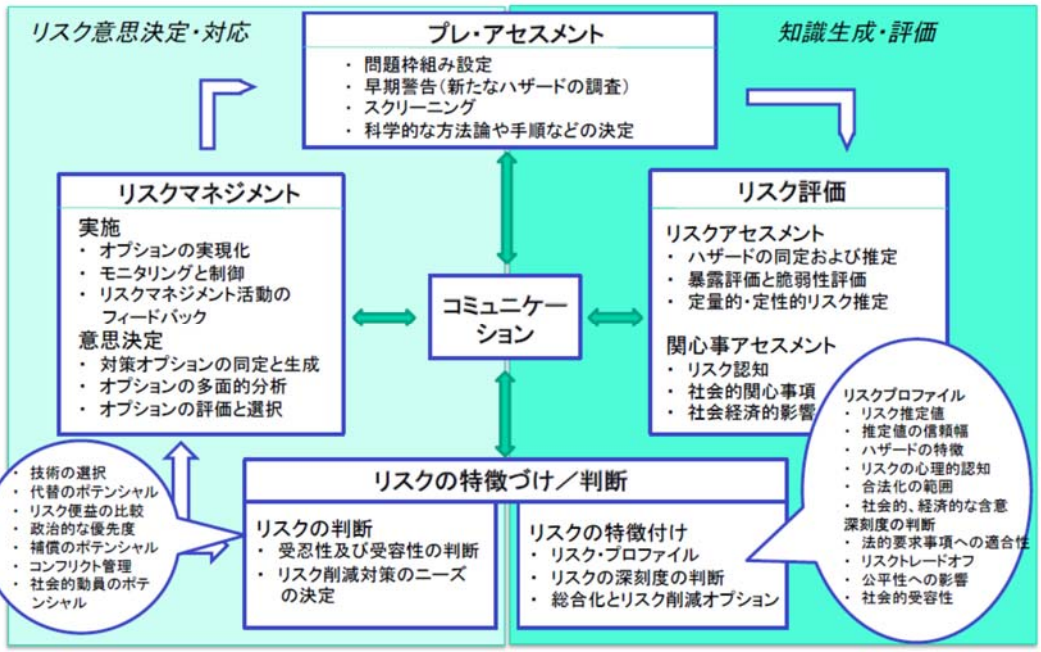
2000 年代に入ると、「双方向」や「市民」などの語を冠し、広報にとどまらない「広

聴」を目的に掲げた取り組みは一般化し、研究者が主宰する、学術的な裏付けをもつ参加拡大の手法開発も複数、取り組まれるようになっている [4]。

また、リスクの顕在化を未然にいかに適切に抑え込むかという課題だけではなく、万一の事態が発生した場合の社会の回復力をいかに高めるかという視点も重要であるという、「レジリエンス」の考え方が東日本大震災・福島第一原子力発電所事故後の日本においては注目されている [5]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

国際リスク・ガバナンス評議会（IRGC：International Risk Governance. Council）はリスク・ガバナンスの総体を下記に示す図のように整理している（「リスク・ガバナンス・フレームワーク」）[6]。




これまでの日本における議論、とりわけ工学的な議論は、「リスク」の含意を極めて狭義に捉える傾向がある。典型的には「危害の程度×危害の発生確率＝リスク」とし、「危害」を死亡確率などの特定の尺度で代表させることが一般的だ。しかし、この整理は、そもそもリスクには多面性があり、その性質を特定し、それに応じた評価を行い、その上でリスクの受忍可否や限度、具体的なリスク管理の方法を決定し、実際に適用する必要があることを含意している。この「フレームワーク」はこうしたリスク・ガバナンスのプロセスを大きく４つのフェーズに分けた上で、それらの不断のサイクルと見なしている。また、各部面すべてに「コミュニケーション」が関わることを明確にしている。こうした認識を踏まえて日本の現状を眺めると、例えば以下のような項目に課題がある。

①「プレ・アセスメント」の重要性

そもそも何がリスクなのか、どのようなリスクに対処すべきなのかといった、対処すべきリスクを洗い出すフェーズが重要である。また、その作業を多様なステークホルダーの参加を得て行うことで、リスクへの対処に漏れが生じたり、リスクについての認識

に齟齬が生じたりする可能性を低減しなければならない。

②「リスク評価」における公平性

「リスク評価」を狭義に工学的なものと捉え、定量化しているように見受けられる。また、「関心事アセスメント」は意識されていないか、是正すべき対象と捉えている場合もある。実際には人びとの不安や関心の在処が現実の社会の動きを大きく左右し、リスク受忍についての決定やリスク管理の上で取り得る選択肢が規定されることを肝に銘じなければならない。

③「受忍性および受容性の判断」における予断

「リスクの特徴づけ／判断」として示されている、リスクの性質を捉えた上で対処するステップを十分に意識しなければならない。さまざまな質的な差異をもつリスクを、死亡確率や金銭化した被害総額など、単一の尺度で共役しないようにすべきである。また、リスク受忍の判断が帰結主義的（代表的には功利主義的）な倫理的規準に偏らないようにしなければならない。

④「リスクマネジメント」についての理解

リスクの性質、内容、大きさと社会の意向を把握した上で行われる「リスクマネジメント」は本来的に極めて経営的なタスク（トップレベルの意思決定）としての性質をもつにもかかわらず、社会や組織の意思決定とのつながりが意識されておらず、事業の現場における「安全確保」と混同されている場合がある。

⑤「コミュニケーション」についての理解

リスク・ガバナンスにおけるコミュニケーションは、このフレームワークも参照した文部科学省の有識者委員会の報告書が示すように、「リスクのより適切なマネジメントのために、社会の各層が対話・共考・協働を通じて、多様な情報および見方の共有を図る活動」である [7]。ところが、日本においては、リスク評価やリスクについての判断の結果を周知することや、防災情報を広く周知することなど、特定の一部分を「リスク・コミュニケーション」そのものと見なす誤解が存在する。また、その際に、行政機関、事業者、専門家などの側の見解を、市民やほかのステークホルダーに伝達することを「コミュニケーション」という言い方で表現していると思われる例も少なくない。

以上のような課題群に加え、日本においては、2011 年 3 月に発生した福島第一原子力発電所事故がもたらした教訓や影響を極めて重く受け止める必要がある。

一般に、参加の拡大は意思決定に入力される知を多様化し、その質と量の向上に資するとされるが、いわゆる政府事故調の中間報告が指摘するように例えば地震・津波研究や土木工学研究の分野と原子力利用との間では専門知が適切にやりとりされず、リスク管理の欠陥が結果的に見過ごされた可能性がある [8]。

また、従来においては、原子力過酷事故のリスクは現実的には特段の考慮を要しないレベルに十分確実に抑え込まれているとの前提のもとで、さまざまなリスク・ガバナンス改善の取り組みがなされ、市民やステークホルダーの参加拡大もその文脈を踏襲していたが、現実に発生した出来事（事故）がそうした暗黙に共有されていた事柄を完全に否定する結果となった。

他方、同事故は我々の社会が対処の経験を（十分に）持たないさまざまなリスクへの

対応を待ったなしに迫ってきた（例：緊急事態の過酷環境下での原子力事故への対処、大規模な避難の実施、避難の長期化、低線量放射線被ばくの健康影響の見極めと管理、事故施設の安定化や長期にわたる廃止措置の実施、など)。こうした事例に対しては、リスクの性質を把握し、評価し、管理するというリスク・ガバナンスの各部面においてイノベーティブに対処方法の立案・実施を行うことが求められる。福島第一原子力発電所事故後のエネルギー政策見直し論議の中で政府が行った討論型世論調査（DP：Deliberative Poll）についてのさらなる分析と検証、原子力関係省庁などが実施してきた「双方向」を銘打つ市民参加イベントや福島第一原子力発電所事故を受けた原子力規制改革や安全性向上対策を上記の視点から評価して見直す検討など、すぐにも取り組むべき課題は多い。上述した「レジリエンス」についての研究やその成果の社会への実装化も、日本においてはまだその端緒が見いだされるに過ぎず、今後の研究が期待される。

また、同事故の発生とその後の一連の経緯が、原子力利用に主たる責任を負うべき関係主体や関連専門家に対する社会からの信頼を大きく毀損していることも深刻な問題である。基本的な信頼を欠く状況では、リスク・ガバナンスのためのいかなる制度設計も、実務手法も、関連研究も何らの力も持ち得ない。いわゆる信頼の非対称性原理に鑑みれば、信頼の回復には相当の時間と努力を要する。中長期的に原子力分野の政策、行政、事業が良好実績を蓄積し、社会全体の信頼を取り戻すことが、関連知見を生かすための最低限かつ必須の条件である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

上記のような問題を解決するためには、確かな情報や専門知に基づく妥当な判断の担保という命題と、幅広い参加による政治的な正統性の確保や入力される知の多様化という命題という、2 つの異なる（ときには相克しうる）命題を両立できるリスク・ガバナンスを構想し、実現する必要がある。科学技術社会論を中心に、関連の分野では 2000 年代からこの問題についての議論が続き、具体的に高レベル放射性廃棄物処分を取り上げて解決策として熟議民主主義の採用を提言した研究もある [9]。

これと並行して、具体的な対処策を見いだす取り組みもまた、各国でなされている。原子力関係においても、例えばフランスでは、2015 年にも予定される高レベル放射性廃棄物処分場の設置許可申請に先立って、2012 年に高レベル放射性廃棄物処分の実施主体である放射性廃棄物管理機関（ANDRA : Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs）が公開討論国家委員会（CNDP : Commission Nationale du Débat Public）に包括的な公開討論の実施を付託し、CNDP は 2013 年から 2014 年にかけて公開討論会や市民会議を実施した [10]。ANDRA は 2014 年 5 月に公開討論を経て市民会議が提言した内容を取り入れた改善案を政府に提案しており、参加型社会的意思決定プロセスを経た政策形成・決定が事業進捗の不可欠な一部となっていることが伺える。また、同国の原子力分野では地域情報委員会（CLI ：Commission Locale d' Information）の活用もまた、上記の 2 つの命題を両立する取り組みと言えるだろう [11]。

日本においては、特に高レベル放射性廃棄物処分政策について、原子力委員会、日本学術会議、総合資源エネルギー調査会などからの提言があり [12]、政策の見直しが現在進行中である。これが上記の課題群を克服しうるものとなるかは、原子力分野全体のリス

ク・ガバナンスにとっても大きな試金石となるはずだ。

また、リスクについての公共的な議論を実りあるものにするためには、事実認識のレベルでの齟齬をなるべく解消することが有効であるとの観点から（このステップはステークホルダー間の信頼構築にも有効である）、共同事実確認（ジョイント・ファクト・ファインディング）と呼ばれる手法を日本で試行する研究も行われているほか[13]、「レジリエンス」についても、東京大学が2013年度に「レジリエンス工学センター」を設立したことにもみられるように、まさに組織だった研究が着手されたところであり、今後の成果が期待される。

### （６）キーワード

リスク・ガバナンス、参加型社会的意思決定、専門知、熟議民主主義、共同事実確認、レジリエンス

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 研究開発 | ○ | → | ・リスクとそのガバナンスの捉え方が狭く、分野間で分断されている。<br>・工学的なリスク研究とリスク認知についての研究（社会心理学など）、リスクへの対処の原則や手法についての研究（政治哲学、倫理学、科学技術社会論など）の協働が待たれる。<br>・「レジリエンス」についての研究は初期段階にある。 |
| | 実装化 | ○ | → | ・政府による討論型世論調査（DP：Deliberative Poll）の実施、研究者グループによる「共同事実確認」の試行など、実装化に向けた萌芽は少なからず認められるが、実際の政策形成・決定に明確に結びつくような成果に乏しい。 |
| 米国 | 研究開発 | ◎ | ↗ | ・そもそも工学的にリスクを把握し、管理する手法の研究開発の中心であると同時に、社会心理学的にリスク認知について把握する研究の伝統も長い。現在でも研究開発は活発である。 |
| | 実装化 | ○ | → | ・原子力分野においては、欧州に比べると、（市民）参加型社会的意思決定を政策の質の向上に活かすという方向性は強くないようにみられる。政策の見直しは専門家動員によって行い、民主的正統性の担保は積極的な透明性の確保や手続き的公正によってなされることも多い。 |
| 欧州 | 研究開発 | ◎ | ↗ | ・高度産業社会において、民主的価値を擁護しつつ、リスクをいかに適切に管理するかという課題に早くから取り組んで来ている。関連研究の拠点や有力研究者が多数みられる。<br>・（市民）参加型社会的意思決定手法の多くの開発、試行の発信地である。 |
| | 実装化 | ◎ | ↗ | ・各国が（市民）参加型意思決定をリスク・ガバナンスに積極的に取り入れているほか、欧州連合（EU：European Union）のフレームワーク・プログラムによって全欧州的な推進・支援が行われている。<br>・冷戦終結後に民主化・経済発展を遂げた中東欧諸国にそれらの成果を移転する試みもみられる。 |
| 中国 | 研究開発 | △ | ↗ | ・政治体制の違いもあり、従来、これらの分野の研究でのプレゼンスは高くないと思われてきたが、経済発展に伴う環境問題の激化など、関心は高まっており、関連研究も強化されるものと思われる。清華大学には公共政策大学院が設置されており、院長の教授は最近、東京大学での科学技術ガバナンス関連の学術行事に参加している。 |
| | 実装化 | △ | → | ・こちらも政治体制の違いがあるため、他国と同列の比較は難しいが、今後何らかの取り組みがなされる可能性はある。 |
| 韓国 | 研究開発 | ○ | ↗ | ・日本と類似の状況にあるものと思われるが、最近、KAIST（Korea Advanced Institute of Science and Technology）において、原子力工学科と科学技術政策学科の協働が開始されたとの情報があり、今後、原子力分野においても取り組みが強化されるものと思われる。 |
| | 実装化 | ○ | → | ・日本と類似の状況にあるものと思われる。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 一連の経緯を概観できる文献として、例えば小林傳司『トランス・サイエンスの時代：科学技術と社会をつなぐ』NTT出版、2007
2) 経緯や現状の概観は、経済産業省資源エネルギー庁「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2014年版）」参照。Web版は原子力環境整備・資金管理センター「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」http://www2.rwmc.or.jp
3) 原子力委員会　高レベル放射性廃棄物処分懇談会「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について」、1998
4) 例えば八木絵香『対話の場をデザインする：科学技術と社会のあいだをつなぐということ』大阪大学出版会、2009
5) 例えば政府は2013年に「ナショナル・レジリエンス（防災・減災）懇談会」を設置している。http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/resilience/
6) International Risk Governance Council (IRGC) “IRGC’s White Paper Risk Governance - Towards an Integrative Framework,” 2005. 引用した日本語訳の図は東京大学政策ビジョン研究センターの谷口武俊教授の提供による。
7) 文部科学省　安全・安心科学技術及び社会連携委員会「リスクコミュニケーションの推進方策」（平成26年3月27日）、2014
8) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会「中間報告」、2013年
9) ジュヌヴィエーヴ・フジ・ジョンソン『核廃棄物と熟議民主主義−倫理的政策分析の可能性』、舩橋晴俊、西谷内博美（監訳）、新泉社、2011
10) Commission Nationale du Débat Public (CNDP) “Report on the public debate: Project to develop the reversible deep geological radioactive waste disposal facility in Meuse / Haute-Marne (Cigéo) 15 May - 15 December 2013,” 2014.
11) 菅原慎悦「我が国における原子力防災制度改革の動向と課題 ―フランスの原子力防災体制におけるステークホルダー関与の実態と我が国への教訓―」電力中央研究所報告、研究報告Y12013、2013
12) 原子力委員会の提言としては、原子力委員会（「今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について（見解）」、2012。日本学術会議の提言としては、日本学術会議「回答　高レベル放射性廃棄物の処分について（2012年9月）」、2012、同「報告　高レベル放射性廃棄物問題への社会的対処の前進のために」、2014、さらに、同「報告　高レベル放射性廃棄物の暫定保管に関する技術的検討」、2014があげられる。総合資源エネルギー調査会の提言としては、総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物WG「放射性廃棄物WG中間とりまとめ」、2014が出されている。。
13) 同研究については研究プロジェクトのウェブサイト参照。http://ijff.jp/

### ３．３．２．11　原子力に関する規制

#### （１）研究開発領域名

原子力に関する規制

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子力利用のリスクを許容し得るレベルに抑えるためにも、また社会的受容性を獲得する上でも、行政による規制は重要な役割を果たす。原子力利用の増大、再処理など利用形態の多様化などの実態も踏まえた上で、効果的規制のあり方や制度実現への道筋の研究が必要である。法制度の整備は立法府が責任をもって行うものであるが、それは社会から信頼されるものでなければならない。規制の有効性評価には原子力技術の特性や利用者のマネジメントの実態などを踏まえる必要がある。こうしたことから、多方面の専門家が参画した研究が法制度整備を支えねばならない。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

原子力規制は原子力利用によるリスクの低減が目的であり、そのためには、まずその技術的特性を踏まえなければならない。規制は法令に基づく行為であることから、法学・行政学の知見も必要である。さらには、規制政策が科学的に妥当であるだけでなく社会から公正なものと認められることも大切である。したがって規制政策への信頼確保にはどうすればいいかなど、規制のあるべき姿の研究も必要である。すなわち原子力規制の研究は、工学と、法学・政治学、さらには広く人文・社会科学分野全般にまたがる学際的研究である。

我が国には 1981 年に設立された日本エネルギー法研究所 [1]があり、研究テーマの一つとして主として法的観点から原子力安全規制の問題を取り上げてきている。また、科学技術と社会の良好な関係構築を追求する立場から原子力規制を考える場としては、科学技術社会論学会 [2] などがある。工学と社会科学などとの学際的研究は 2007 年から東京大学において原子力法制研究会が実施し、その成果 [3-5]は 2011 年の福島第一原子力発電所事故後の法改正に活かされたが、その後は中断状態にある。

原子力災害の被害は国境を越えて広がることから、国際原子力機関（IAEA：International Atomic Energy Agency）が安全基準を定め、加盟各国がその責任において規制する支援としている。我が国の原子力安全の確保は、確立された国際的な基準を踏まえること [6]としており、この基準を守ることは義務である。

IAEA は加盟各国に対しその安全基準に基づいて専門家によるピアレビュー・評価サービスを提供しており、我が国は 2007 年に総合原子力安全規制評価サービス [7]（IRRS: Integrated Regulatory Review Service）を受け入れている。そこで受けた指摘の主なものは次の通りである。

1.法制度と政府の責任：特に安全指針策定の関係で、原子力安全・保安院と原子力安全委員会の役割を明確化すべき（勧告）
2.規制機関の権限と機能：産業界との間で率直で隠し立てがなくしかもフォーマルな、相互に理解し尊重しあう関係を醸成し続けるべき（提言）
3.　規制機関の組織：能力向上プログラムを強化し人員計画を作成すべき（勧告）

4. 許認可プロセス：
①許認可の根拠全体を要約する包括的文書の作成と、定常運転開始前の包括的審査というホールドポイントを追加すべき（提言）
② 同程度の安全性を確保できる場合に代替技術の採用を奨励すべき（提言）
③設計基準を超える事故を考慮し、補完的に確率論的手法やアクシデントマネジメントに関する体系的アプローチを継続すべき（提言）
5. 安全評価：
① 軽微な検査所見や事象報告に何を期待しているのか明確にすべき（勧告）
②検査や行政処分は原子力事業者が国内外の経験から教訓を得る効果的プロセス構築につながるようにすべき（勧告）
③保安規定に人的・組織的要因を含む安全確保の要素が盛り込まれるよう、規制要件の見直しを継続すべき（勧告）
6. 検査および行政処分・措置：
①検査官がいつでもサイトで検査（文書審査を含む）を行える権限を確保すべき（勧告）
②検査の種類や頻度を柔軟に変えることや、検査結果に基づいた検査プログラムの修正をおこなうべき（提言）
③ 設備の製造業者の品質保証プログラムの検査を実施すべき（提言）
7. 規則および指針の整備：原子力安全・保安院が民間規格の活用を含め責任をもつて当たるべき（勧告）
8. 規制機関のマネジメントシステム：理念や原則論でなく実践的なシステム整備に努めるべき（勧告）

これらのうち 1.と 7.の点は、福島第一原子力発電所事故後の原子力規制委員会の設置により、すでに一定の対応が行われた。4.①については、法改正により新基準へのバックフィットが要求されたことで、規制基準が改定されるごとにホールドポイントが置かれることになり、ある意味では提言以上の対応がとられたが、許認可の根拠全体を要約する包括的文書作成の提言には対応できていない。4.③の提言の関係では、シビアアクシデント対策は規制要件化されたが、確率論的手法の活用が規制制度に盛り込まれたとは言い難い。6.③の製造業者の品質保証プログラム検査は導入された。しかし、今なお、そのほかの指摘事項にはまだ十分対応できておらず、2.や 8.のように一部後退したものすらあるのが実情で、国際基準への適合にはかなりの努力が必要である。

IAEA の安全基準は、事故・トラブル経験を反映し、改定され続けているが、原子力施設は多重防護（defense-in-depth）により分厚く安全を守らねばならないことを一貫して説いている。福島第一原子力発電所事故発生時は現在の基準 SSR-2/1 [8]は発行直前であったが、その前の安全基準である NS-R-1 [9] でも多重防護は 5 層からなるとし、その第 4 層の防護策である設計基準事故を超えるシビアアクシデント対策の重要性について明記している。SSR-2/1 ではさらに踏み込んで、設計拡張状態すなわち設計基準事故より厳しい事故などの状態を導出し、検討することを要求している。IAEA の動きに合わせ、原子力安全委員会もシビアアクシデント対策の高度化を目指してはいた [10] が、シビアアクシデントの発生に間に合わず、その後、原子力規制委員会が設計拡張状態を導出し、

規制基準化している [11]。原子力規制の研究には、このような遅れを指摘することで規制改革を迫る効果もある。

なお、米国や欧州では新設炉への規制とは分けて既設炉の基準を考えるのが普通である。リスク低減の目標値についても異なる値とし、ALARA（As Low As Reasonably Achievable）の原則にしたがって継続的に安全性向上を追求する姿勢である。このような考え方を社会に受け入れてもらう方策の検討は、どこまでのリスクなら受容可能かといった議論とともに、まさに工学と人文・社会科学の学際的研究が必要な分野の一つの例である。

2007 年の IRRS の評価対象分野ではなかったが、IAEA の安全基準では緊急事態に対する準備と対応 [12] も定めている。そこには予防的防護措置準備区域（PAZ：Precautionary Action Zone）の範囲を定めておかねばならないと明記されていたにも拘らず、我が国が対応したのは福島第一原子力発電所事故後であった。シビアアクシデント対策とともに国際的基準を踏まえていなかった大きな問題点の一つである。緊急事態への対応では、地方自治体が国の防災基本計画に基づき地域の実情に即して地域防災計画を立てることになっており、その役割は大きい。国と地方自治体の役割分担の見直しなど、高い視点からの検討が行われることが好ましい。また、緊急事態への対応能力は事業者とともに規制機関にも要求されるが、その十分性は今現在まだ示されておらず、今後の大きな課題である。さらに緊急時にこそ事業者と規制機関の連携が大切となるが、そのためには日頃からの連携が必要で、そのあり方も研究課題である。

原子力規制への信頼醸成を目指して原子力安全・保安院は自ら多くの対話活動を実施してきた [13]。また、学会などが主催するワークショップ [14] などに積極的に関わってきた。原子力規制委員会の組織理念では国内外の多様な意見に耳を傾け、孤立と独善を戒めるとしているが [15]、実際にはそれに反して対話活動に消極的であり、特に規制される側との率直な対話を避けているのではないかとの批判もある [16]。一方的に批判するのではなく、そういう場の形成はどうあるべきかを提案する研究も大切である [17]。

原子力規制は法制度の問題であり、その整備の責任は国にある。しかし規制される側の協力が不可欠で、IRRS が指摘するように規制機関と産業界間の相互に理解し尊重しあう関係を構築しなければならない。原子力規制は高度に技術的課題であることから、まずは学会のような学識経験者も交えた透明性の高い場で規制機関と産業界が意見交換し、規制改革の原案を作成する。それをさらに地方自治体代表、消費者代表、マスコミ代表といった全ステークホルダーの集まる審議会で確認し、改革を実施することが望まれる。ステークホルダー間において相互に理解し尊重しあう関係が確立している国では、原子力に関する規制を研究開発領域とまで捉える必要はないとも言えるが、我が国では力を入れなければならない領域であることを認識しなければならない。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

研究開発推進上の課題・ボトルネックはすべて政策的なものである。したがって規制機関が責任をもって規制制度の実効性向上に努めるなら、原子力規制の研究は不要とすら言える。ただ、これまでの規制機関にも問題意識をもつ者はいたが、担当者が頻繁に異動すること、後任者に問題意識が継承されないことから、1，2 年で可能な制度改革に

留まっていた。また、専門性不足の問題も大きい。法改正で導入されたノーリターン・ルールは単に原子力推進組織への転職を規制するものであり、専門性向上には寄与していない。例えばIRRSの勧告6.①や提言6.②はあらかじめ決められた項目を決められたとおりに確認する検査の形骸化への批判であり、毎回指摘事項がほとんどない項目は検査頻度を減らし、指摘のある項目へ重点化することを説いている。そのような検査の実効性は適切に指摘する検査官の能力に依存するが、能力向上策の検討は始まったばかりである[18]。業務内容の適切性を継続的に見直すには規制機関自身のマネジメントシステム構築が必要であるが、それもようやく始まったところであり[19]、確立された国際的な基準への適合はこれからである。このような状況の解決に原子力規制の研究は必要である。また、社会にとって規制、特に原子力規制のもつ意味、規制のあり方、規制組織のあり方、規制に関わる人材の確保、養成、あり方、国際整合性などについて研究する研究者、規制担当者の確保が重要である。

産業界には、原子力規制について国に陳情はするものの、自ら積極的に改革案を作ろうとしないという問題がある。安全確保の一義的責任は原子力施設を管理する者にあるのにも拘らず、規制の要求を超える対策の実施には消極的である。そのような中で規制機関と産業界が対峙すると、産業界側からは規制を緩める要望だけが出され、国民の理解は得られにくい。まずは規制の要求を超えた安全確保策を自主的に講じるとともに、安全確保の十分性に関する国民への説明責任を果たすべく、第三者機関による確認などの重層的な制度を自らの負担で用意すべきで、そういう指摘をする研究も必要である。

さらに付言するならば、原子力規制は国の責任であり、産業界の意見を聞くことすら責任の放棄だとする我が国の風潮にも問題がある。原子力に理解を示す者を原子力ムラの住民だとして、すべての政策決定から締め出そうとするマスコミの論調すらある。このような中で原子力規制のあり方について冷静に検討するためには、まずは規制する側とされる側の対話の重要性をあらゆるステークホルダーが認識することから始めざるを得ない。規制と社会の関係を考える研究はその解決に重要な役割を果たす。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

原子力規制は、歴史風土や法体系、政治制度などさまざまな要因を考慮して制度設計すべきものであるから、国によって最適なあり方に差が生じるのは当然である。さらに利用経験の蓄積や技術進歩を踏まえ、規制のあり方は継続的に改善されなければならない。そこで主導的役割を果たすべきは規制機関自身であるが、(4) で述べた課題の解決には産業界はもちろん、広く国民の理解も必要である。

原子力規制委員会は2013年12月、IRRSの受け入れを決定した。原子力安全の確保のために確立された国際的な基準を踏まえることとしている我が国としては当然のことである。今回IRRSがどのような指摘をするにせよ、きちんと対応するには原子力規制の課題の検討は急務である。主なステークホルダーによる検討開始が望まれる。

### （６）キーワード

原子力規制、国際的基準、国際原子力機関、総合原子力安全規制評価サービス、相互理解、ステークホルダー、科学技術社会論

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 研究開発 | △ | ↘ | ・東京大学の原子力法制研究会は休眠状態にあり、ほかには技術と法制度の両面から改善策を提案しようという動きはみられない。 |
| | 実装化 | △ | → | ・福島第一原子力発電所事故を受けて法改正はなされたものの、新制度への対応に手一杯で、原子力規制の実効性をさらに上げようとする動きはみられない。 |
| 米国 | 研究開発 | ◎ | → | ・1979 年のスリーマイル島事故後設立された原子力発電運転協会（INPO：Institute of Nuclear Power Operations）が原子力発電所運営の質を向上させるための活動を実施するとともに、規制機関ほかとの関係調整も行っている。<br>・原子力エネルギー協会（NEI：Nuclear Energy Institute）が規制法制に関する政策を立案し、規制機関ほかに産業界の声を届けている。 |
| | 実装化 | ◎ | → | ・原子力規制委員会（NRC：Nuclear Regulatory Commission）は従来から全交流電源喪失事故の規制やテロ対策の義務付けなど、規制の実効性を高める改革に積極的である。<br>・NRC は福島第一原子力発電所事故直後に短期タスクフォースを設置し報告書を公表、また NEI から多重防護強化策の提案を受けつつ具体策をとるなど、素早く対応している。 |
| 欧州 | 研究開発 | △ | → | ・フランスのプラントメーカ Areva 社や電力会社 EDF は国が多くの株式を保有する国策会社ともいえる存在で、規制機関と良好な関係にあるため、民間独自の規制改革への働きかけは目立たない。<br>・そのほかの国でも民間からの規制改革を望む働きかけは目立たず、規制機関と良好な関係があるものと考えられる。 |
| | 実装化 | ◎ | → | ・欧州には原子力規制機関が構成する西欧原子力規制者会議（WENRA：Western European Nuclear Regulators' Association）という組織があり、各国の規制改革を指導している。<br>・福島第一原子力発電所事故後、WENRA の提案により EU 加盟国は直ちにストレステストを実施するなど安全確認を実施した。 |
| 中国 | 研究開発 | － | － | ・特に情報がない。 |
| | 実装化 | △ | → | ・中国は 2010 年に IRRS を受け入れ、法や規制機関の整備などに関する厳しい指摘を受けたが、今のところフォローアップ調査を受け入れていない。 |
| 韓国 | 研究開発 | － | － | ・特に情報がない。 |
| | 実装化 | △ | → | ・韓国は 2011 年に原子力安全委員会が原子力振興を担う教育科学技術部から大統領直属に再編されたところである。<br>・2013 年、関連書類の偽造発覚により多くの原子力発電所が運転停止に追い込まれるなど、規制改革に向けた課題は多い。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) http://www.jeli.gr.jp/
2) http://jssts.jp/
3) http://www.n.t.u-tokyo.ac.jp/nishiwaki/tonnbunn-toukou-houkokusyo/2008gijyutu-houkokusyo.pdf
4) http://www.n.t.u-tokyo.ac.jp/nishiwaki/tonnbunn-toukou-houkokusyo/2009gijyutu-houkokusyo.pdf
5) http://www.pp.u-tokyo.ac.jp/SEPP/research/documents/report200906.pdf
6) 改正原子力基本法 第2条第2項
7) http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/genshiryoku/files/report2.pdf
8) http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1534_web.pdf
9) http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1099_scr.pdf
10) http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/info/20101202.pdf
11) http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_anzenkijyun/data/0021_06.pdf
12) http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1133_scr.pdf
13) http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/koho/
14) 例えば http://ponpo.jp/SSWS/
15) http://www.nsr.go.jp/nra/idea.html
16) 例えば、政権与党である自由民主党のプロジェクトチームからも批判が出されている。自由民主党 原子力規制に関するPT「原子力規制行政強化に向けての緊急提言 ――国民と世界からの「信頼と信認」確保を目指して――（2013年12月3日）」。
https://www.jimin.jp/policy/policy_topics/pdf/pdf125_1.pdf
17) そうした研究の方向性を示す重要な一例として以下があげられる。田邉朋行「原子力規制体制の制度的課題とその解決策　―敦賀発電所敷地内破砕帯問題―」電力中央研究所報告、研究報告Y13024、2014。
18) http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h26fy/data/0001_03.pdf
19) http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h26fy/data/0010_04.pdf

### ３．３．２．12　3S（原子力安全、核セキュリティ、保障措置）

#### （１）研究開発領域名

3S（原子力安全、核セキュリティ、保障措置）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

原子力平和利用を推進する上で、安全（Safety）とともに保障措置（核不拡散、Safeguards）および核セキュリティ（Security）に配慮した原子力システムを構築することが重要である。本領域ではこれら 3S に係る制度基盤・技術基盤を系統的に研究する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

原子力においては平和利用の拡大と同時に核拡散の懸念も増大するという特殊性があり、それに対する配慮は重要である。

原子力の平和利用は「核兵器の不拡散に関する条約（NPT：Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons）」第 4 条に基づく各国固有の権利であり、各国は自国の状況に応じた原子力活動を行う権利を有している。しかし、同条では、原子力平和利用の権利は NPT 第 1 条および第 2 条に定める核不拡散義務を遵守することが前提であることが明記されていることから、各国は原子力平和利用における国際的な透明性・信頼性を確保することが必要である。しかし現実には、NPT 下において秘密裏に核兵器を取得使用とする国は歴史的に後を絶たず、いかに核不拡散を担保しつつ平和利用を推進するかが常に国際社会の課題となっている。

一方、上述の国家による拡散に加え、近年、ソ連崩壊後、核物質の防護に対する関心が高まり、特に 9.11 以来、非国家主体（テロリスト）による核拡散の懸念が増大している。2009 年、米国オバマ大統領によるプラハ演説を契機に、核セキュリティサミットを中心に核セキュリティ強化についての世界的取り組みが展開されて、現在も多くの具体的な検討や研究開発が実施されている。

国際原子力機関（IAEA：International Atomic Energy Agency）は、原子力発電を導入しようとする国が整備すべき事項を 19 項目の形に整理しているが [1)]、国際的な核拡散への懸念の高まりなどを踏まえ、その中でも重点的に取り組む必要がある事項、すなわち、原子力安全とともに、保障措置（核不拡散）、核セキュリティを 3S として最重要課題として取り上げ [2)]、国際的な協力の下にその実現を図っていくことを目的とした 3S イニシアティブが、2008 年の G8 北海道洞爺湖サミット首脳宣言および続くラクイアサミットの G8 首脳宣言に盛り込まれた。以下、核不拡散（国家を対象）、核セキュリティに係る研究開発領域について、最後に 3S 全体への取り組みの現状について説明する。

保障措置（核不拡散）に係る研究開発について

NPT 下において非核兵器国は包括的保障措置協定が義務付けられているが、この協定に基づく保障措置の対象となるすべての核物質について、国内計量管理制度を確立し維持することが基本とされる。国内のすべての平和的な原子力活動に係る原料物質および特殊核分裂性物質について国内計量管理制度を適用するに当たり、その原料物質および

特殊核分裂性物質が核兵器そのほかの核爆発装置に転用されていないことを確認するためにIAEAと協力するという考え方である。保障措置の実施にあたっては、計量管理を主要手段とし、封じ込め・監視を補助手段とする方法が採られてきた。

1997年には、包括的保障措置に加え、未申告の原子力活動や核物質がないこと、また保障措置下にある核物質の軍事転用がないことを検認するためにIAEAに付与される追加的な権限などを記載した「追加議定書」がIAEAで採択された。従来の「申告された核物質」が兵器に転用されていないことを検証する査察から、「未申告施設」が存在するかもしれないという前提に基づく査察へと変革した。法的には従来の「包括的保障措置協定」に加え、「追加議定書」を発効することにより、申告すべき情報およびIAEAの入手する情報が拡大、また「補完的アクセス」とよばれる方法により査察範囲が大幅に拡張（申告施設以外も基本的に査察が可）されるとともに、「環境サンプリング」と呼ばれる手法により、仮に未申告活動などがあった場合に、いわば「証拠」を押さえる、ということが可能な形態に変わった。包括的保障措置協定 ＋ 追加議定書の組み合わせに基づく保障措置が適用された場合、「情報」に基づく新たな査察手段を併せて駆使すれば、核物質の抜き取り、原子力施設のプロセスの不正な使用はもとより、核兵器製造に係る秘密裡な活動の存在などについては、非常に高い確率で検知できる状況にあると言える。このような新たな手法に則り、かつ査察の効率化を図るために「統合保障措置」とよばれる新しい概念に基づく保障措置が適用されるようになった。統合保障措置は、従来の包括的保障措置協定に基づく申告された核物質の転用がないことを検認する査察（従来型の査察、正確性）と、追加議定書に基づき、IAEA に新たに付与された権限を行使して、当該国に未申告の核物質および原子力活動がないことを確認する（完全性）活動を、最適な形で組み合わせて、保障措置の強化と効率化を同時に実現しようとするものである。これにより、核物質の転用、および未申告の核物質および原子力活動が存在しないとの「結論」が出れば、その国家における保障措置の効率化、すなわち、ある意味での緩和が行えるということになった。これまでの施設単位の査察からサイト単位へのアプローチへ変更、また必要な情報（当事国の申告、検認活動の結果、オープンソースなど）からその国の過去、現在、未来の核（平和）利用計画に一貫性があることを評価するなどが適用され、「国レベルの統合保障措置アプローチ」という方法・考え方が適用されるに至っている。

このような背景の下、保障措置に係る研究開発は、加盟国によるIAEA保障措置技術支援計画（MSSP：Member State Support Programme、1977年に開始）に基づき進められてきた今日では 20 か国および1国際機関の参加のもと行われており、我が国による研究開発協力はJASPAS（Japan Support Programme for Agency Safeguards）と呼ばれている。IAEAでは、国際保障措置に必要と思われるMSSPの研究開発項目について示しているが、最近では、2014-2015年における必要とされる項目について次の領域ごとにまとめられている[3)]：1）測定方法および測定技術-破壊分析（破壊分析（DA：Destructive Assay）、環境サンプリング分析（ES：Environmental Sampling）など）、非破壊分析（NDA：Non Destructive Assay）、非立会い測定技術、2）トレーニング、3）システム・スタディー保障措置アプローチ概念研究や品質管理、4）情報処理-サテライトイメージ、情報解析、統計解析、情報セキュリティ、5）封じ込め・監視技術、リモ

ートモニタリング技術、6）保障措置評価（DA・ES 分析結果解析）および運営支援。

核不拡散対策としては、上述のような保障措置とともに、輸出管理や二国間協定により濃縮・再処理といった機微技術の取得を制限するなどの措置が採られているが、今後の原子力利用のグローバル的な拡大の可能性を視野に入れれば、そのような制度による措置だけでは限界があるという考え方が根強い。今後、より強力かつ効果的な不拡散対策が求められている。

その 1 つの対策として「核拡散抵抗性」という考え方が取り上げられ議論されるようになった [4]。核拡散抵抗性をもつ技術とは、原子力システム自らが核不拡散性の高い性格を有するものであることを意味する。「保障措置」が、外部から付加した抵抗性の制度的な対策（外在的措置）であるとすれば、「核拡散抵抗性技術」とはシステム自体の内に秘めた不拡散対策（内在的措置）、すなわちシステム自体が核拡散（転用、不正使用など）を起こしにくいような技術を示す。一般に、外在的措置（保障措置）と内在的措置（抵抗性技術）両者の組み合わせにより、核不拡散として効果を示すとされるが、後者については、例えば、プルトニウムの単離が困難となるように、扱う物質の特性やプロセス設計に抵抗性を考慮すること、プルトニウムが仮に盗取されても兵器への転用が困難な物理化学形態であること、兵器としての価値の低いプルトニウムであることなどが、技術的対策案として現在検討されている。いずれにしても、近未来の商業規模での展開を見据え、核拡散抵抗性を向上させたモデルの開発について、核燃料サイクルおよびその保障措置技術の先駆者である我が国が、率先して検討し国際社会に提案していくことが今求められている。

オバマ政権は、上記のような保障措置を含む核拡散抵抗性の必要性を唱える一方で、民生用核燃料サイクルに取り組むための多国間協定の確立には高い関心を寄せている [5]。代表的な多国間アプローチでは、核燃料サイクルが、各国に保持するには非効率的な技術であるという特徴に基づき、その国際的共有化など、国際協力枠組みのなかで濃縮・再処理のような機微技術を含むサイクル全体を国際的に効率的に展開しようと試みられている [6]。保障措置においても、多国間管理による施設であれば、国家による転用・不正使用のリスクは減少し、さらの多国間協力の一環として「地域による保障措置」の実現化など併せて考えれば、その効果を、多国間枠組みという制度で補完すること、多国化により保障措置の効率化が図れることなど）利点は多大である。ただし、現在、国際的に議論されている多国間アプローチが、燃料供給保証、すなわち核燃料サイクルのフロントエンドにおける核燃料供給途絶時の保証に焦点が置かれているため [7]、使用済み燃料の処理処分といったバックエンド問題への解決策への適用性についても今後併せて検討していくことが重要と思われる。

核セキュリティに係る研究開発について

核セキュリティとは、「核物質、そのほかの放射性物質、その関連施設およびその輸送を含む関連活動を対象にした犯罪行為または故意の違反行為の防止、探知および対応」[8]であり、さらにテロリストなどにより、1）核兵器の盗取、2）盗取された核物質を用いた核爆発装置の製造、3）放射性物質の発散装置（いわゆる「汚い爆弾」）の製造、4）原子力施設や放射性物質の輸送などに対する妨害破壊行為、という脅威が想定される [9]。

核セキュリティについてIAEAでは、2002年1月に核セキュリティ諮問委員会（AdSec: Advisory Group on Nuclear Security）が設置され、同年3月には核セキュリティ基金が設立されるなどIAEAでの活動が開始された。近年、前述の核セキュリティサミットなどの支援とともにIAEAや国連、有志国による各種の取組を通じて国際協力が強化されている。我が国は、原子力の利用経験が長く、高い水準の技術や人材を有しているが、セキュリティという面においては、必ずしも他国に比べ認識は高くない。よって、この分野で他国と同じレベルでリーダーシップを発揮するためには、まずセキュリティの重要性を認識し、いわゆるセキュリティ文化を国内で高めていく必要がある。

このような背景の下、核セキュリティに係る研究開発については、日米核セキュリティ作業グループによる活動が参考になろう[10]。ここでは、核セキュリティに関し；a)研修訓練（アジアの中核拠点としてのトレーニングセンター）の実施、b) 核鑑識，核物質の検知および測定に係る技術の研究開発、c)新規施設の設計における核セキュリティに関する優良事例の共有（セキュリティ・バイ・デザイン）、d) 輸送のセキュリティに係る協力（盗取または妨害破壊行為の機会の減少）、e) 研究炉などからの高濃縮ウラン利用の低減化、f) IAEA による核物質及び原子力施設の防護に関する核セキュリティ勧告（INFCIRC/225/Rev.5）の理解の深化と勧告の履行の推進、g)施設における盗取および妨害破壊行為に対処する対応、h)高濃縮ウランおよびプルトニウムの管理に係る物質の魅力度低減、について取り組みがなされている。

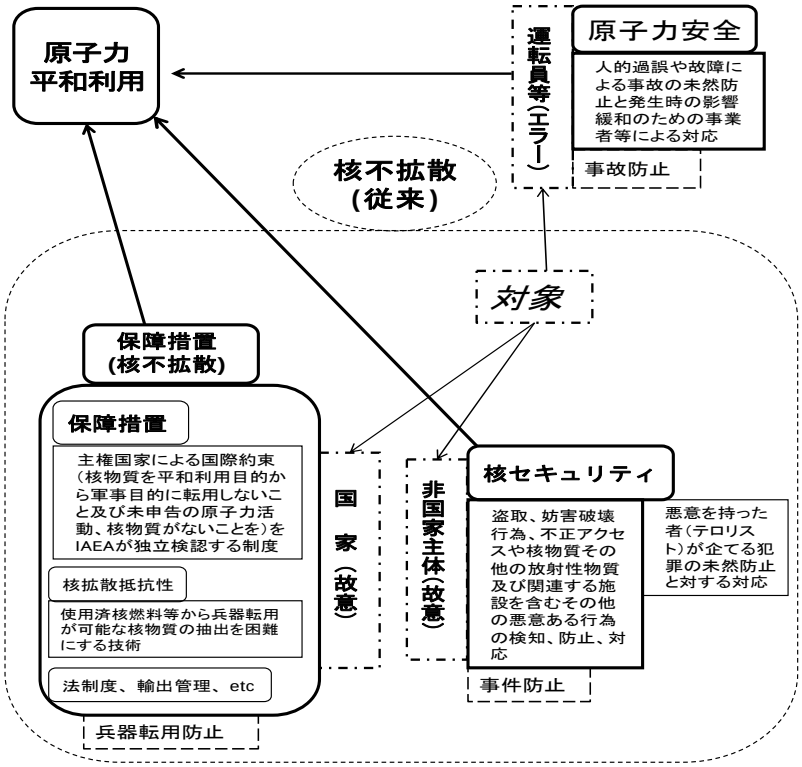
そのほか、福島第一原子力発電所事故を契機に、核セキュリティでは、インサイダー脅威を含む原子力施設への妨害破壊行為に対する対策の必要性が重視されており、それによるリスクの究明の研究が必要である。同時に、施設内で活動している関係者の位置情報を自動的に確認できる方法や不審な動きを検知するような異常事象早期検知、意図的な行為による計画外行動を検知することについても研究が必要と考えられる。

安全に係る研究開発について

安全に係る研究は、これまで原子炉から核燃料サイクルまで多岐にわたり実施されてきたが、福島第一原子力発電所事故に際し、改めてその基本的な研究開発のあり方が問われた。事故以前は、想定外の事故は起こらないという前提に立った研究であり、その結果、過酷事故への取り組みが十分なされなかった。また、多段階で事故を防ぐ「深層防護」の考え方が徹底されず過酷事故への備えができていなかった点から国際標準から遅れをとっていたことが指摘されている（日本原子力学会事故調報告書）。今後は、このような安全に係るこれまでの取り組みの問題を認識し、改めて安全研究に取り組むことが求められる。

3S 全般に係る研究について

3S の向上について、特に各 S 間の相乗効果という点を中心にIAEAなどにおいて検討を行っているが、それは、あくまで各国が原子力の平和利用を円滑に進めていくことを支援するためのものであり、いたずらに手続きを複雑化することなく、また規制項目の追加に繋がる要素は極力排除するよう議論がなされている。3Sについては、以下のとおり条約などの基本的枠組みは整備されている。




- 原子力安全→原子力安全条約
- 核セキュリティ→核物質防護条約
- 保障措置（核不拡散）→NPT（IAEA との保障措置協定）

しかしながら、その目的、対象、取組み状況は上図に示すように大きく異なっているとともに、それらに係る重要性認識度（文化）にも差があると思われる。「原子力安全文化」という言葉に象徴されるように、安全確保活動の実効性を高めるため、安全を最優先する基本姿勢は共有されている。一方、核セキュリティ文化についての議論が IAEA でなされ、概念が固まりつつあるものの、各国間でその重要性の認識に差がある。また、保障措置を中核とする「核不拡散文化」という概念については議論はなされていない。国家として保障措置の重要性は理解されているものの、原子力技術導入の程度の差により国民の核不拡散文化（重要性の認識）には差があると思われる。

3S に係る問題点としては、1）各 S 間の重要度認識のアンバランス（文化の差）、2）各 S 間の連携不在（原子力安全、核セキュリティおよび保障措置（核不拡散）は、これまで独立して進められてきた。最近、安全とセキュリティの連携などが一部で考えられはじめているが、まだ不十分である。3S をパッケージで捉えた場合に見えてくる新たな相乗効果などについて検討を深めることが必要である。例えば「3S バイデザイン」であり、相乗効果を認識した設計を行うことにより、より 3S について効果的、効率的な施設設計が可能、原子力安全と核セキュリティには相反する場合が想定されるケースもあるが、それらを認識しながら設計することにより、より実質的に有効な取り組みが可能と考えられる）がある。

3S 間で相乗効果が期待される技術分野とそれを発揮する方策として、例えば、現在、核不拡散（保障措置）として核物質の封印管理（監視）が実施されており、封印破損を査察時に光学的あるいは電子的に探知することとしている。この現行の封印管理（監視）を改良し、封印が破壊されたと同時に発報させることは技術的に可能であり、これにより核セキュリティにも応用できると考えられる（このような付加機能を取り入れることについては、IAEA 保障措置との調整は別途必要であろう）。また、原子力安全上の理由から管理区域内に設置されている監視カメラについて、赤外線探知・首振り・ズームなどの遠隔制御あるいは自動化機能を付加することにより、核物質防護区域への不正なアクセスを探知可能とすれば、補完機能として核セキュリティにも活用できると考えられる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（技術的課題、政策的課題）

上述のように核不拡散（保障措置）に係る技術開発は、時代ごとの IAEA のニーズに従い、加盟国の支援により実行されてきており、検知・封じ込め監視、リモートモニタリング、情報収集解析、評価などの分野において高度な技術が確立されてきた。保障措置においては、正確かつ適時に核物質の転用を検知することが重要であるが、核物質取扱い施設規模の拡大に伴い、保障措置の「正確性」について更なる性能向上が求められている。しかし、検知・分析技術については、その感度・精度に自ずと限界があるため、測定精度に起因する核物質特有の不明核質量（MUF : Material Unaccounted For）が問題視されることがある。それを補完するための技術として近適時性のある計量管理技術やオンサイト分析所の設置など取り組まれているが、さらなる技術として、例えばプラント内の核物質の移動をタイムリーに把握するための濃度情報を含むソリューションモニタリングなどが望まれている。また、追加議定書による「完全性」については、環境サンプリングなどにおける更なる性能向上はいまだ可能であると考えられ、それに向けた取り組みをいかに進めるかが今後の課題となっている。さらに、保障措置全体において、分析・計測および解析の迅速性は常に課題である。さらに保障措置の効率化について、「リアルタイム高度監視システム」の開発が進められている。使用済燃料直接処分の議論の本格化にともない、これまで燃焼計算に基づく計量管理が行われてきた使用済燃料中のプルトニウムについてもその直接測定のニーズがクローズアップされている。

核拡散抵抗性については、制度・枠組み以外に技術（外在的抵抗性）として核拡散抵抗性を確保する方策が多方面で研究されている。例えば、マイナーアクチノイド（MA : Minor Actinoid）を混合した燃料の研究や燃料のディープバーンや回収されたプルトニウムの専焼技術などによるプルトニウムの低品位化など、原子力システムおよび取扱う物質固有の核拡散抵抗性を高める研究開発がなされている。しかし、原子力システムの核拡散抵抗性を評価する手法については、第 4 世代原子力システム国際フォーラム（GIF : Generation-IV International Forum）や革新的原子炉及び燃料サイクルに関する国際プロジェクト（INPRO[11] : International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles）の議論を通し確立されつつあるが、これらは抵抗性を高めるためのガイドラインに過ぎない。また保障措置のような制度による手法と異なる点は、すべての国家にこれら抵抗性の高い技術を採用させることは困難であることであり、すなわち潜

在的に拡散を目論む国家に対しても、いかに抵抗性の高い技術を適用させるかという課題が残される。

多国間アプローチは、3S 向上の究極の手段とも言えるが、多国間協力は各国の利害が絡むため政治的な面が非常に強くその実現には長期的な取組みが必要である [12)]。

核セキュリティについての研究開発は、先に示したような領域において推進されているが、検知・測定においては、感度や精度のターゲットが存在せず、国際的な推進においても、サミットのようなイベントを契機とする合意に基づく取組みはあるものの、保障措置と異なり強制力のある具体的な国際的な制度や協定などはなく、IAEA を中心として作成されるガイドラインを基にした核セキュリティ強化への取組みが各国ベースでなされているのが現状である。技術開発については、核検知技術および核鑑識技術の研究開発が日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）を中心に実施されているが、それらを実際に適用する体制については必ずしも明確になっておらず、技術確立に向けた研究開発成果を将来のユーザへいかに反映するかといった政策的課題が残されている。

3S 全般に係る取り組み（3S 文化確立・向上）のボトルネックは先に示した通り、各国間での重要性の認識の差、各 S 間の重要度認識のアンバランス（文化の差）、各 S 間の連携不在などであり、安全文化に比べほかの 2S に係る重要性の認識を国内・国際においていかに高めるかが政策的課題である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

核不拡散（保障措置）に係る技術開発では、近年特に、情報量の増大に基づく改良、環境サンプリングやリモートモニタリングといった技術分野で保障措置の進化が遂げられてきたが、限度のある IAEA の人的・財政的リソースにおいて保障措置エフォートのかけ方を決めるためには施設や核物質における拡散リスクを評価する方法を考えることが不可欠である。この観点から、ステートレベルコンセプトが IAEA 理事会で継続的に議論されている。換言すれば、IAEA 保障措置をいかに効率的に実施するかというための新たな方策である。ここではステートファクターというものを基に国別に評価されるが、そこには国内計量管理制度の技術的能力や保障措置実施への当事国の協力やそこでの保障措置技術能力などが含まれることから、今後も保障措置技術における技術レベルを向上させていくことは重要である。一方、福島第一原子力発電所事故以来、使用済燃料中の取扱問題がクローズアップされつつあり、近年使用済燃料中のプルトニウムをいかに求めていくかという技術テーマが取り上げられるようになった。これについて従来のパッシブ・アクティブ中性子技術の改良や、高エネルギーガンマ線を発生させ、高エネルギーの 2 次ガンマ線（X 線）からプルトニウム量を求める方法など、新たな測定技術の開発が進められており注目されている。また福島第一原子力発電所における溶融燃料の計量管理のための測定技術をいかに確立するかという課題も議論されている。ただ、保障措置においては、査察への実用化という観点でのコストパーフォーマンスおよび適用し易さが重要と考えられ、基礎技術の研究開発とは異なる観点からの技術の選択が重要となる。

多国間アプローチは、近年 IAEA を中心に積極的な議論がなされ、そのいくつかが、

現在国際枠組みとして樹立されつつある。ただし、その議論の焦点は、フロントエンド（燃料供給）に置いたものが多く、今後、使用済燃料や高レベル廃棄物を含め、いかにバックエンドにおいて国際枠組みを形成するかが焦点となっている。その点では、東京大学の研究[12]や国際原子力エネルギー協力フレームワーク（IFNEC[13]：International Framework For Nuclear Energy Cooperation）における議論が注目される。

核拡散抵抗性については、GIF/INPRO とも福島第一原子力発電所事故以来、若干停滞気味であるが、核拡散抵抗性の議論から端を発した物質魅力度が、核セキュリティ分野で盛んに議論されている。例えば日米核セキュリティ作業グループでは、高濃縮ウラン・プルトニウムなどの物質による核テロ誘引を低下するための核物質の魅力度評価がなされ、さらに共同研究の提案内容の実現可能性を検討する共同インパクト分析を行うという米国の提案を日本側が検討中である[14,15]。米国は、英国およびフランスとの間においても物質の誘引に関する評価を行っており、今後注視していく必要がある。

核セキュリティについての研究開発では、上述の核セキュリティサミットに関連した技術開発が、核鑑識、核検知の分野で積極的になされている。また 3S 全体とも関連するが、確率論的安全評価手法（PSA : Probabilistic Safety Assessment）によるハザード分析を核セキュリティ、核不拡散へ応用するという議論が始まっている。原子力施設において、核セキュリティ、保障措置の分野に応用し、脆弱性の同定やシナリオ分析などに活用するというものである。核セキュリティ・核不拡散においては、敵対者・転用者が悪意をもつて意図的な行動により核兵器取得や妨害破壊行為を起こすという考え方が安全と異なるが、そのような観点を含めた PSA 分析の開発が課題となる。

3S 理解増進（文化）については、2014 年の米国核物質管理学会において、3S 文化に焦点を当てた特別セッションを企画するなど活発な議論がなされている[16]。韓国の専門家は、福島第一原子力発電所事故後は特に 3S 文化の構築の重要性を認識したことを表明、IAEA の専門家は、IAEA における原子力施設 3S ワークショップについて紹介し、3S は平和利用の基礎、安全文化は基本だが、核不拡散・セキュリティ文化を同レベルまで引き上げることが重要、そのためには効果的で明確な責任のある政府・組織構造が不可欠、3S は独立したものではなく共通のインフラを整備すべき、などとした。米国の専門家は、安全と核セキュリティは施設へのインパクトがあり、核不拡散（保障措置）は国際へのインパクトが強く、これについては国家がしっかり受け止めることが肝要だと述べている。いずれの専門家も、今 3S のうちの、安全だけでなく核不拡散（保障措置）核セキュリティ文化の向上を図る時であることを強調した。

### （６）キーワード

核不拡散、保障措置、包括的保障措置、追加議定書、核セキュリティ、3S、INFCIRC225、INFCIRC153、INFCIRC540、非国家主体、テロ、核拡散抵抗性、多国間アプローチ、核検知、核鑑識、破壊分析、非破壊分析、IAEA

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | △ | → | ・検知への加速器など高度技術の適用（基礎科学レベル）。 |
| | 応用研究 | ○ | ↗ | ・核不拡散（保障措置）。<br>1)使用済燃料中プルトニウム（福島を含む）の NDA<br>2)JMOX（Japanese MOX）に焦点を併せた技術開発<br>・核セキュリティ（サミットでの宣言に従い推進）。<br>1)各種 新検知の開発<br>2)ヘリウム 3 代替中性子検出技術開発<br>3)核鑑識技術開発（世界レベルへむけ取組み中）<br>4)物質に特化したセキュリティレベル化研究（日米）<br>5)核セキュリティ総合支援センター設置 |
| | 実用化 | △ | → | ・核不拡散・セキュリティ技術とも実用化は多くない。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | → | ・基礎技術研究は減少、応用技術へ。 |
| | 応用研究 | ○ | ↗ | ・核不拡散（保障措置）。<br>1)IAEA－MSSP に従い研究開発を推進<br>2)米国エネルギー省（DOE：United States Department of Energy）／ロスアラモス国立研究所（LANL：Los Alamos National Laboratory）にて使用済燃料中プルトニウムの非破壊測定（NDA）が開発中<br>3)プルトニウムの解体核からの廃棄技術が進行<br>・核セキュリティ。<br>1)核鑑識では米国国研が欧州 JRC-ITU とともに世界をリード<br>2)各種検知装置の開発で国際イニシアティブ<br>3)3)物質に特化したセキュリティレベル化研究 |
| | 実用化 | ○ | ↗ | ・空港、港湾での検知強化。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・核セキュリティ。<br>1)欧州共同研究センター 超ウラン元素研究所 イタリア環境保護研究所（JRC-ITU（Ispra）：European Commission Joint Research Center, Institute for Transuranium Elements（Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale））において遅発ガンマ線（DG：Delayed Gamma-ray）法が、JRC-IRMM では、即発捕獲ガンマ線分析（PGA：Prompt Gamma ray Analysis）法や中性子共鳴透過分析（NRTA：Neutron Resonance Transmission Analysis）法が進められる。 |
| | 応用研究 | ○ | ↗ | ・核不拡散（保障措置）。<br>1)IAEA－MSSP に従い研究開発を推進<br>・核セキュリティ。<br>1)核鑑識では JRC-ITU が米国国研とともに世界をリード<br>2)物質に特化したセキュリティレベル化研究（米･英、米･フランス） |
| | 実用化 | △ | → | ・核不拡散・セキュリティとも新技術の実用化は多くない。 |
| 中国 | 基礎研究 | － | ― | ・特に情報はない。 |
| | 応用研究 | － | ― | ・特に情報はない。 |
| | 実用化 | － | ― | ・特に情報はない。 |
| オーストラリア | 基礎研究 | △ | → | ・基礎技術研究は多くない。 |
| | 応用研究 | ○ | ↗ | ・核不拡散（保障措置）。<br>1)IAEA－MSSP に従い研究開発を推進 |
| | 実用化 | △ | → | ・核不拡散・セキュリティとも新技術の実用化は多くない。 |
| カナダ | 基礎研究 | △ | → | ・基礎技術研究は多くない。 |
| | 応用研究 | ○ | ↗ | ・核不拡散（保障措置）。<br>1)IAEA－MSSP に従い研究開発を推進 |
| | 実用化 | △ | → | ・核不拡散・セキュリティとも新技術の実用化は多くない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・基礎技術研究は多くない。 |
| | 応用研究 | ○ | ↗ | ・パイロプロセス-高速炉路線のための核拡散抵抗性研究。<br>・教育訓練センターの充実。 |
| | 実用化 | △ | → | ・核不拡散・セキュリティとも新技術の実用化は多くない。 |

## （８）引用資料

1）IAEA文書Milestones Approach
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1305_web.pdf
2）「3S」とは、保障措置（Safeguards）、原子力安全（Safety）及び核セキュリティ（Security）の頭文字
3）IAEA STR-277 2013年12月IAEA発行
4）久野,J-S.Choi：核拡散抵抗性と保障措置－次世代核燃料サイクル設計における核不拡散対策の基本的考え方, 日本原子力学会誌, Vol.51, No.2, p22-27 (2009)
5）核不拡強化のための海外散動向調査報告書
http://www.jaea.go.jp/04/np/activity/2010-11-01/mextcons_2008-01.pdf
6）Choi,久野：原子力eye Vol . 55, No.5, p59-63 (2009)、鈴木達治郎、日本原子力学会誌Vol49 No.6 (2007)など
7）直井、小林、若林、田崎、原子力eye, Vol.56, No.2, p52-56 (2010)
8）原子力委員会報告書「核セキュリティの確保に対する基本的考え方」H23）
9）外務省：http://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/n_s_ne/page22_000968.html
10）日米核セキュリティ作業グループ（概要と成果）
http://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/n_s_ne/page18_000243.html
11）GIFPR&PP手法：第4世代国際フォーラム（GIF：Generation Ⅳ International Forum）核拡散抵抗性と物理的防護評価専門家グループ（PR&PP Proliferation Resistance And Physical Protection）の評価手法。対象とする原子力システム全体を対象にして、脅威ごとに解析を実施して強弱を評価するシステム応答評価。定量的評価である。INPRO手法：革新的原子炉及び燃料サイクル国際プロジェクト（IAEA-INPRO : International Atomic Energy Agency International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles）の評価手法。原子力システムが兵器製造目的に転用されないための措置についての要件、指標、許容レベルを定めて評価する属性評価。システム全体あるいは個々のプロセスについて評価する定性的評価である。
12）国際保障学研究会MNA報告書(2013.03)
http://www.flanker.n.t.u-tokyo.ac.jp/modules/labDownloads/index.php?page=single-file&cid=1&lid=5
13）International Framework For Nuclear Energy Cooperation (IFNEC),
http://www.ifnec.org/
14）http://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/n_s_ne/page18_000243.html,
15）C.Bathke, Summary of Joint US-Japan Study of Potential Approaches to Reduce Nuclear Materials for Use in Nuclear Explosive Device by a Potential Terrorist of Sub-national Group, Proc. Global 2013.
16）Interface among 3S Session, 55th INMM Annual Meeting, July 20-24, 2014, Atlanta, USA

### ３．３．２．13　原子力に関する国際的視野

**（１）研究開発領域名**

原子力に関する国際的視野

**（２）研究開発領域の簡潔な説明**

世界的な原子力発電導入国の増加に伴う核拡散の懸念の対処、核セキュリティや安全確保に向けた国際協力の在り方について、エネルギー資源を巡る国際関係も踏まえた検討を行う。

**（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向**

近年、中東やアジアなどの新興国では経済発展やエネルギー安全保障を理由とした原子力発電導入の機運が高まっている。米国や欧州先進国でも、地球環境問題への対処やエネルギー安全保障上の理由から、原子力の位置づけを見直す動きがある。一方、イランの核開発問題、イラクを中心とした中東情勢、原子力技術導入国増加に伴う核関連技術拡散の懸念など、原子力発電利用に伴う国際情勢のリスク要因は年々増大しており、これらのリスクに適切に対処していくためには最新の国際情勢の把握と分析が必要である。

それに加え、2011 年 3 月の福島第一原子力発電所事故を受け、原子力発電の新規導入検討国のみならず多数の既設発電所の運転実績がある先進国においても、原子力安全の強化、特に自然災害やテロなど外部脅威への対策、および万一の事故時における国境を越えた迅速な情報共有と国際協力の在り方が重要となってきている。この分野における調査・研究は我が国では比較的新しい分野であり、中東やロシアとの緊張感のある国際関係が恒常化している欧州や、2001 年の同時多発テロを経験した米国における研究実績には我が国にとっても参考になるところが多い。

我が国では、日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）において核拡散防止の枠組みおよび関連技術開発動向の調査・分析が行われている。2014 年 4 月に組織変更で発足した核不拡散・核セキュリティ総合支援センター（ISCN：Integrated Support Center for Nuclear Nonproliferation and Nuclear Security）[1)]では、核不拡散に係る国際動向に対応し、技術的知見に基づく政策的研究を行うとともに、核不拡散に関連した情報を収集し、分析を行っている。代表的な調査・研究としては 2010 年 9 月に発行された「核不拡散に関する日本のこれまでの取組みとその分析; 原子力平和利用の信頼確立の要素と今後の課題」[2)] があげられる。これは、これまでの日本の核不拡散対応を“国内法の担保”“国際核不拡散体制へのコミットメントと貢献”“保障措置”など、7 つの措置に分類して評価を行い、それぞれの措置に関して、我が国の原子力平和利用に対する信頼確立の要因となった事項および今後の課題を抽出したものである。また、「アジア地域の原子力平和利用の信頼性・透明性向上に関する研究」として、東南アジアを中心としたアジア諸国の核不拡散体制の整備状況などの調査、課題の抽出、協力プログラムの策定などを実施している。

ISCN ではプロジェクト調査に加え、月刊発行文書「ISCN ニューズレター」[3)] において、「英国における民生用プルトニウム所有権の移転」など、核拡散防止や核セキュリテ

ィと関連の深い事項について最新動向を取り上げている。「米ベトナム原子力協定に係る米国議会での議論」など重要な特定トピックスについて、国際関係・国際情勢、原子力協定締結の背景などの多角的な観点から解説を加えている。

公益財団法人日本国際問題研究所軍縮・不拡散促進センターでは、軍縮および大量破壊兵器の不拡散に係る外交・安全保障政策の企画・立案に有用な分析や政策提言を実施している。近年の主要な研究成果としては、外務省委託事業「核兵器使用の多方面における影響に関する調査研究」[4]、核軍縮に向けた各国の取組状況を調査・評価した広島県受託事業「核不拡散条約（NPT : Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons）体制等貢献事業」[5] があげられる。

米国では政府機関・民間研究機関ともにこの分野の研究が幅広く行われている。
政府機関で本分野を所掌するのは国務省であり、その中の国際核不拡散・核セキュリティ局（ISN : Bureau of International Security and Nonproliferation）で核拡散防止や二国間協定などに係る調査を実施している [6]。ISN では IAEA の原子力局（Office of Nuclear Energy）に対して、新興国の原子力発電事業環境整備プロジェクト（Peaceful Use Initiative）への資金提供も行っている [7]。
核不拡散研究センター（CNS : James Martin Center for Nonproliferation Studies）では核不拡散を中心に広く米国を中心とした安全保障・国際関係問題を調査・研究している [8]。近年の研究成果としては、韓国の使用済燃料蓄積が北太平洋地域の核セキュリティに与える影響の地政学的分析 [9]、ロシアが中距離核戦力（INF : Intermediate-range Nuclear Forces）条約に違反したとする米国政府の声明に係る分析 [10] などがあげられる。

米国を代表するシンクタンク・戦略・国際問題研究センター（CSIS : Center for Strategic and International Studies）では、PONI （Project on Nuclear Issues）というプロジェクトで原子力国際協力関係研究を総括している [11]。国防・学術界・産業界・行政府といった機関で横断的に活用できる知見と研究者を育成することを目的に、多様な研究を行っている。PONI は政府、研究機関、政策立案者、事業者など幅広い専門家集団 1300 人で構成されており [12]、英･フランスにも研究拠点が存在している。

政策シンクタンク・ブルッキングス研究所（Brookings）でも原子力政策や国際原子力協力の研究を実施している [13]。主要な研究分野は原子力エネルギーの政策決定過程やエネルギー政策上の位置づけなどであったが、福島第一原子力発電所事故以降は原子力の潜在リスクが意思決定に与える影響や社会的受容性についても研究を行っている。イランの核脅威が国際情勢に与える影響も研究事例の一つとなっている。

英国で国際協力や核拡散防止を扱う研究機関・研究課題としては以下があげられる。
オックスフォードリサーチグループ（ORG : Oxford Research Group）では、国際関係や安全保障を広く扱う中で核拡散防止研究などを実施している [14]。最近では「核のない世界」を取り上げ、米国オバマ大統領の「核兵器のない世界の実現」構想にも言及して解説を加えている [15]。

英国国立原子力研究所（NNL : National Nuclear Laboratory）は原子力の基礎研究を行う国立研究機関であり、核拡散抵抗性と核物質防護についての研究を実施している [16]。最近ではその分野の最新知見をとりまとめた「核拡散抵抗性と核物質防護に関する政策

提言」を発表 [17] し、国際原子力エネルギー協力フレームワーク（IFNEC : International Framework For Nuclear Energy Cooperation）や第 4 世代原子力システム国際フォーラム（GIF : Generation-IV International Forum）などの国際協力枠組みにおける透明性をいかに高めていくべきかを分析・提言している。

そのほかの欧州諸国で代表的な研究機関としては、スウェーデンに本拠をおくストックホルム国際平和研究所（SIPRI : Stockholm International Peace Research Institute）があげられる。SIPRI では核拡散防止・核セキュリティを中心とした原子力国際協力および関連技術を調査するだけでなく、自らロシアおよびウクライナの原子力船における核兵器解体プロジェクトを手掛け、核物質防護（PP : Physical Protection）、使用済燃料輸送リスクの調査研究も実施している [18]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

核拡散防止や核セキュリティ面での国際協力のあり方研究や、その根拠となる国際動向の調査という分野では、日本の研究水準は国際的にみて決して低くはないが、米国との比較では質、量ともに相当な差があると言わざるを得ない。これは各省庁に割り当てられた予算規模が日米で 2 桁程度の違いがあることや、予算割り当ての柔軟性に日米で違いがあることにも起因しているが、そもそも日本では核拡散防止や核セキュリティ面の研究の歴史がまだ浅く、研究のシーズも限定的であることが最大の要因であろう。学部や大学院でこの分野の講座をもつ大学も限られており、全米で数十の大学がこの分野での研究成果を競い合っている米国とは対照的である。核拡散防止や核セキュリティを巡る国際情勢の調査・研究体制を拡充していくことは、原子力産業の国際競争力向上を目指すにあたり必須であるといえる。

国際的視点でもう一つ重要なのは、我が国の「原子力三原則」があくまで我が国の原則であり、他国の原則とは必ずしも相容れないという現実を踏まえることである。「核兵器のない世界」構想の背景には依然として新たな核兵器開発を継続中の国、核軍縮交渉で自国の安全保障を最優先にする国が存在する。かつて世界の多くの国で核兵器開発競争が行われていたこと、現在でもそれに類似した行動をとっている国があることを踏まえた研究と提言が重要であり、その観点からは、この分野の研究拡充には国際政治・外交・安全保障といった視点の研究との相互交流が強く望まれる。

以上を踏まえ、政策的課題として 3 点をあげる。

1 点目は研究体制の拡充、公的部門の研究予算の拡充である。日本でこの分野に優れた知見・実績をもつ研究機関は極めて限られており、有識者も概ねその機関に集中していることから、予算の配分先を増やすより、優れた研究実績のある機関への重点配分のほうが望ましいであろう。

2 点目は、国際関係的な視点を強化した新たな研究分野の創出である。「国際関係」「法」「政治」「技術（工学）」といった従来の仕切りを超え、それらのすべてを包括した「国際関係に基づく原子力エネルギーの利用に係る考察」のような、いわばトランス・サイエンス的な問題意識と取り組みが今後は必要となってくる。従来の研究項目の分類では収まりきれないことも予想されるため、研究開発施策立案・制度設計側の認識も改める

必要があろう。

3 点目は、このようなトランス・サイエンス的な問題意識を持ち、幅広い分野の知見を活用できる人材の育成である。そのためには専門的教育プログラムの強化もさりながら、国語、数学といった基礎基盤科目をまずはしっかり身につけていることが重要であり、特に総合的教育を旨とする大学などにおけるカリキュラムの強化が期待される。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

原子力施設、とりわけ商業用原子力発電所やウラン濃縮プラントなどのサイクル施設における核拡散抵抗性や核セキュリティの強化は古典的な課題であるが、近年の傾向として、その懸念が使用済燃料の管理のあり方に及んでいることがあげられる。従来は、使用済燃料保管施設での安全対策と言えば主に臨界防止であったが、福島第一原子力発電所事故の際に 4 号機使用済燃料プールに大量の燃料が保管されていたことをきっかけとして、使用済燃料の保管がもたらす技術および地政学的リスクについての研究が行われている。

一例をあげれば、米国のシンクタンク Nautilus Institute が 2011 年から 2013 年にかけて実施した” Spent Fuel and Reduction of Radiological Risk/Deep Borehole and Spent Fuel in East Asia”では、東アジア（日本・韓国・中国）における使用済燃料およびその処分の現状を各国の研究者から報告し、それをベースとして使用済燃料の保管方法（水プール、乾式キャスクなど)、安全管理体制、事故時のリスク管理のあり方が議論された。併せて、米国の原子力発電所を舞台とした外部脅威による使用済燃料からの放射性物質放出リスク評価結果も示され、東アジアで同様の事象が生じた場合の国際的な影響についても議論された [19)]。

事故時の情報共有と国際協力のあり方も近年関心が高まっている研究分野である。例としては、東アジア経済研究センター（ERIA : Economic Research Institute for ASEAN and East Asia）における「原子力安全管理に係る国際協力のあり方」があげられる [20)]。これは福島第一原子力発電所事故を契機として、原子力施設の大事故時の迅速な情報共有と国際協力の具体的な方法について議論し、とりまとめたものである。価値観の異なる多くの国が国境を接している欧州における既存の体制・枠組みを参考として、その東アジア版構築に向け議論を重ねているところであり、今後の研究の進展が期待される。

### （６）キーワード

核拡散防止、核拡散抵抗性、核セキュリティ、国際協力、安全保障

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | 大学や日本原子力研究開発機構などで恒常的な情報収集・分析・最新の知見に基づく提言がなされている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | 日本原子力研究開発機構・国際問題研究所などで、国内施策や外交政策立案に資する研究や国際会議などが行われている。 |
| | 産業化 | － | － | － |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | 国務省・戦略国際問題研究センターや多数の大学・シンクタンクなどで、原子力利用と核拡散防止の両立や核セキュリティ強化、国際的な技術支援のあり方などの基礎研究が実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | シンクタンクなどにおいて、研究プロジェクトや国際フォーラムの形で、政策立案に資する提言が多くなされている。<br>近年、核脅威がもたらす地政学リスクの研究が多様化・活性化している。 |
| | 産業化 | － | － | － |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | 英国国立原子力研究所や民間シンクタンクなどで、核拡散防止・核セキュリティなどの基礎研究が継続的に実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | シンクタンクなどにおいて、研究プロジェクトや国際フォーラムの形で政策立案に資する提言がなされている。 |
| | 産業化 | － | － | － |
| 中国 | 基礎研究 | － | － | 目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | 目立った動きはない。 |
| | 産業化 | － | － | － |
| 韓国 | 基礎研究 | － | － | 目立った動きはない。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | 目立った動きはない。 |
| | 産業化 | － | － | － |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）日本原子力研究開発機構　核不拡散・核セキュリティ総合支援センター、
http://www.jaea.go.jp/04/iscn/index.html
2）『核不拡散に関する日本のこれまでの取組みとその分析』核不拡散科学技術センター、2010年9月
http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2010-040.pdf

3) 『ISCNニューズレター』、2014年8月
http://www.jaea.go.jp/04/iscn/nnp_news/attached/0208.pdf
4) 外務省　http://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/ac_d/page23_000872.html
5) 広島県　http://www.pref.hiroshima.lg.jp/site/peace/hiroshimareport2014.html
6) 国務省　国際核不拡散・核セキュリティ局　http://www.state.gov/t/isn/58378.htm
7) 国務省ファクトシート、2014年8月6日　http://www.state.gov/t/isn/factsheet/230375.htm
8) CNS　http://www.nonproliferation.org/research/
9) “Rethinking Spent Fuel Management in South Korea”、2013年8月10日、CNS
http://www.nonproliferation.org/rethinking-spent-fuel-management-in-south-korea/
10) “Russian Cheating Is Not New−Neither is Compelling Them Back Into Treaty Compliance”、2014年7月31日、CNS
http://www.nonproliferation.org/russian-cheating-treaty-compliance/
11) CSIS　http://csis.org/program/project-nuclear-issues
12) CSIS　http://csis.org/programs/project-nuclear-issues/poni-membership
13) ブルッキングス研究所　http://www.brookings.edu/research/topics/nuclear-energy
14) オックスフォード研究所　http://www.oxfordresearchgroup.org.uk/ssp
15) “A Sustainable Approach to Nuclear Zero: Breaking the Nuclear-Conventional Link”, 2013年10月25日、オックスフォード研究所
16) NNL　http://www.nnl.co.uk/science-technology/position-papers/
17) “Proliferation Resistance and Physical Protection -Position Paper”, NNL
http://www.nnl.co.uk/media/1054/prpp_position_paper_-_final.pdf
18) SIPRI　http://www.sipri.org/research/disarmament/nuclear/researchissues/strengthening_reduction/G8/eu_g8/sweden
19) Nautilus Institute
http://nautilus.org/wp-content/uploads/2013/08/Meeting_Intro_5-28-13_von_Hippel.pdf
20) “Study on International Cooperation Concerning Nuclear Safety Management in East Asian Countries” 2013年6月、ERIA
http://www.eria.org/publications/research_project_reports/FY2012-no.28.html

### ３．３．２．14　原子力の政治経済学

#### （１）研究開発領域名

原子力の政治経済学

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

合理的なエネルギー政策の形成を目的として、原子力やそのほかのエネルギー源の位置付けを経済性などの観点から客観的に評価できる分析ツールを構築、利用することなどを通じて、エネルギー全体の将来シナリオを開発する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

我が国では、2011 年 3 月の東日本大震災ならびに福島第一原子力発電所事故を受けて、原子力発電を中核的エネルギー源として位置付けてきたエネルギー政策の再検討が現在行われている。それに際して、中長期的なエネルギー構成の中で、さまざまな将来見通しが予期される原子力発電やほかのエネルギー源の位置付けを、経済性などのさまざまな観点を踏まえて客観的に評価することが重要となる。そのためには、原子力発電などを定量的に評価できる分析ツールを開発し、適切に利用することなどを通じて、原子力を含めたエネルギー構成の整合的な将来シナリオを作成する必要がある。

現在、エネルギーモデルの開発・利用、経済計算や、将来シナリオの作成を通じて、原子力発電やそのほかのエネルギー源の政策的評価が内外において実施されている。エネルギーモデルの場合、さまざまな技術のコスト、特性やエネルギー・フローを詳細に考慮に入れた技術評価モデル（ボトムアップ型モデル）や、経済とエネルギーの巨視的関係を定量化し、それらに基づくモデル（トップダウン型モデル）が主として開発、利用されている。経済計算では、最新のモデルプラントの技術データに基づいた各電源の発電コストの計算と電源間でのコストの比較検討が行われている。そして、エネルギーモデルの分析結果や、経済計算など定量的な情報に基づき、エネルギー構成の将来シナリオが検討されている。

特に日本では、福島第一原子力発電所事故以降、最新のエネルギー情勢を踏まえ、精力的に原子力発電とそれを含めたエネルギー構成の評価が行われている。事故以降、原子力発電の安全性に対する不安が高まり、当時の政府は、2012 年 9 月に「革新的エネルギー・環境戦略」を発表し [1]、2030 年代に原子力発電所の稼働をゼロとするエネルギーミックスを目指す政策が示された。再生可能エネルギーの導入拡大、省エネの推進を主要な機軸としている。しかし、従来の我が国の原子力政策の大転換を伴うため、原子力発電所の稼働を中長期的にゼロとする政策実現に向けて、数多くの社会経済的課題が顕在化すると考えられる。そのため、その実現可能性に関して、技術的対策やコスト負担などの経済的影響の評価などを通じて、多くの分析が行われた。一例として、エネルギー・環境会議コスト等検証委員会が 2011 年 12 月に、各電源の発電コストの試算結果を公表した [2]。典型的なモデルプラントを想定し、2030 年時点に想定される発電コストを計算している。試算の結果、原子力発電の発電コストは 8.9 円/kWh 以上に達する可能性があり、火力発電とほぼ同等のコスト水準であると報告されている。

また、総合資源エネルギー調査会基本問題委員会は、将来の原子力発電の位置付けな

どに関して検討を行い、「エネルギーミックスの選択肢の原案について」を公表し、2030年の原子力発電比率に関して４つの選択肢（0%程度、15%程度、20%～25%程度、電力市場での需要家の選択に委ねる）を示した[3]。すべての選択肢において、約１割の節電（2010 年比）、再生可能エネルギー比率を 25～35%まで増加させることを方針としている。各選択肢がエネルギー需給と経済に与える影響が試算され、原子力発電への依存度低下が電気料金を上昇させ、経済への悪影響が増大するとの結果が報告された。

また、2050 年の原子力発電の複数の選択肢が、我が国の電源構成に与える影響に関して、エネルギーモデルを用いた分析が行われている[4]。このモデルは、大量導入に向けた期待が高まる太陽光や風力発電の出力変動やバッテリーを詳細にモデル化している点に特徴がある。分析の結果、厳しい $CO_2$ 排出削減実施の下で（2030 年までに $CO_2$ 排出量を 1990 年比 3 割削減）、原子力発電の比率が将来縮小する場合、その程度に応じて、原子力発電の代替電源として太陽光発電が 2050 年に 2.2 億 kW～3.9 億 kW 導入され、総発電量に占める太陽光発電比率は 3 割～6 割に達し，太陽光発電への依存度が大きくなる。そして、2050 年の電灯・電力料金は 2 割～6 割上昇（世帯当たり月額 1,100 円～4,000 円上昇）すると試算されている。

欧州でも 2050 年という長期を見据えたエネルギーシナリオが作成されている。「エネルギー・ロードマップ 2050」[5]や「低炭素経済ロードマップ 2050」[6]によって示された欧州のエネルギー構成のシナリオでは、主に再生可能エネルギー、原子力、省エネ、二酸化炭素回収・貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）の 4 技術に着目したエネルギーミックスが提示され、EU（European Union）加盟各国が最適なエネルギー政策を立案するように促している。EU の温室効果ガス（GHG： GreenHouse Gas）を 2050 年までに 1990 年比 80～95%削減する重要政策として、再生可能エネルギー比率の引き上げ、省エネ推進、インフラ整備を強調している。また、電力価格はいずれのシナリオでも 2030 年まで上昇するが、新技術への持続的な投資は、コスト負担よりも、域内の雇用増加、輸入燃料削減などの便益の方が大きく、経済的影響は少ないと指摘されている。

米国では、米国エネルギー省エネルギー情報局が、ボトムアップ型とトップダウン型のエネルギーモデルを用いて、今後 30 年間におけるエネルギー構成の見通しを毎年発表している[7]。「2014 年エネルギー年次見通し（AEO2014：Annual Energy Outlook 2014）」では、2040 年までの米国のエネルギー構成を予測分析している。分析のポイントとして、米国の天然ガス国内生産が引続き拡大し、2040 年には天然ガスが石炭を追い越し発電比率で最大となる可能性などが示されている。発電構成では、電力需要の伸びの鈍化、「シェール革命」に伴う価格競争力のある天然ガス供給の拡大、環境保護庁（EPA: United States Environmental Protection Agency）の環境規制の実施が、これまで経済合理性があり電力供給の中核にあった石炭火力を抑制し、石炭火力の発電比率は現状の約 4 割（37%）から 2040 年には約 3 割（32%）へ低下すると予測されている。一方、天然ガス発電の比率は現状の 30%から 2040 年には石炭火力を上回り 35%に達すると試算されている。原子力発電量自体は微増で推移するが、その発電比率は現状の 19%から 2040 年には 16%へ低下する見込みである。また、数箇所の原子力発電所が閉鎖する見込みのため、原子力設備量は現状の 1 億 200 万 kW から 2020 年には 9,800 万 kW に縮小

するが、2025 年以降、新規発電所が運転開始し、2040 年には 1 億 200 万 kW へ推移する。そして再生可能エネルギー（水力含む）が総発電量に占める比率は現状の 12%から 2040 年には 16%まで増加する。

中国でも能源研究所が、ボトムアップ型のエネルギーモデルを利用することにより、2050 年までのエネルギー構成を分析し公表している [8]。最新の分析では、需要面では省エネを着実に進めれば 2020 年以降の一次エネルギー消費および電力消費の伸びを大幅に抑制することが可能であると評価する一方、供給面では、原子力発電と再生可能エネルギーが大幅に拡大し、石炭火力への依存度を低減可能であると分析している。特に再生可能エネルギー、原子力の導入ポテンシャルは大きく、2050 年で原子力 4～5 億 kW、水力 4～5 億 kW、風力 4 億 kW、太陽光 2～6 億 kW の潜在的な導入可能量が存在すると分析している。原子力発電に関しては、福島第一原子力発電所事故の影響は軽微であり、2020 年 8,000 万 kW、2030 年 1 億 5,000 万 kW～2 億 kW まで導入拡大する可能性があると指摘している。

韓国も定量的なエネルギー開発計画を公表するようになった。韓国政府は、2014 年 1 月に第二次国家エネルギー基本計画を公表し、2035 年までのエネルギー需給見通しを示した [9]。原子力導入計画に関しては福島第一原子力発電所事故などをうけて、第一次国家エネルギー基本計画では原子力発電比率を 2030 年までに 41%へ拡大する予定であったが、第二次計画では 2012 年の 26.4%から 2035 年に 29%へ引き上げる方針が示され、第一次計画に比較して下方修正が行われている。

そして国際機関においてもエネルギー構成における原子力の位置付けに関して、数多くの分析が試みられている。国際エネルギー機関（IEA : International Energy Agency）は、トップダウン型のエネルギーモデルを用いて、将来数十年を分析した世界エネルギー見通しを毎年公表している。最新の見通し「Word Energy Outlook 2013」[10]では、現状の新規原子力発電所の建設テンポは、福島第一原子力発電所事故後の安全規制の見直しの影響を受けて国際的に鈍化しているが、長期的には中国、韓国、インド、ロシアや中東に牽引される形で継続的に増加すると見込まれている。その中で、新技術の展開を織り込んだ「新政策シナリオ」では、2035 年には世界の原子力発電の設備量は 5 億 7,800 万 kW に達し、現状の約 1.5 倍まで拡大する見通しが示されている。また欧州では固定価格買取制度などの政策支援を受けて太陽光や風力発電といった出力間欠性電源の普及が急速に進んでいるが、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA : Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency）が、これらの普及が原子力発電に与える影響を定量的な分析ツールを用いて評価している [11]。分析の結果、短期的には間欠性電源の普及は、燃料費の高い火力発電を代替するため原子力への影響は軽微であるが、長期的には資本の代替効果を通じて、間欠性電源が原子力発電を代替する可能性があることを定量的に分析している。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

定量的な分析ツールを用いたこれまでの内外の原子力発電の分析では、垂直統合型の独占的電力市場を前提とした評価が主として行われている。我が国において今後実施される可能性のある発送電分離など電力市場自由化の下での原子力発電の位置付けは重要

となる。また、核燃料サイクル、特に核燃料燃焼前後でのプルトニウムをはじめとする同位体組成の変化を詳細に考慮に入れたエネルギー政策の評価があまり行われておらず、これらを考慮に入れた定量的ツールの開発と評価が重要な課題として位置付けられる。

国際的な電力自由化の中で、我が国でも規制緩和の流れを反映して自由化が徐々に進められたが、電力事業体制の抜本的改革は行われてこなかった。しかし、2011 年の福島第一原子力発電所事故以降、原子力発電に依存しない新しい電力ビジネスモデルの創出や需要家の選択肢の拡大を図るためには、電気事業改革が不可欠であるとの認識が広まり、2013 年 11 月に改正電気事業法が参議院本会議で成立した。同法により、電力システム改革が今後 3 段階で進められる予定である。この後、電力システム改革の推進と我が国における原子力発電の位置付けを関連させた政策的議論が重要となる。例えば、原子力発電所の過酷事故リスクなどへの政府の政策支援を明確にせず発送電分離を進めれば、電気事業者は安定的な事業収益を確保できず、財務基盤の脆弱化により、投資リスクの大きい原子力発電を放棄する事態や、バックエンド事業の運営が円滑に進まない可能性もあるからである。電力市場自由化の下で原子力発電の位置付けを経済性などの観点から分析できる政策評価ツールの開発が必要である。また近年英国では、電力市場自由化の下で、原子力発電導入促進のため、原子力に対しても固定価格買取制度導入を検討し、原子力発電所の建設に向けた投資インセンティブ確保を目指す政策的な動きが現れている。

また、核燃料サイクルの同位体組成も考慮に入れた詳細な政策分析も今後の課題である。従来のエネルギーモデルでも中長期的な原子力技術評価が行われているが、おもにウランやプルトニウムの物質バランスのみに着目した評価が行われている [12]。しかし、プルトニウムには分裂性、非分裂性同位体が存在するため、核不拡散政策や高速増殖炉を含めた核燃料サイクルに係る政策をより精緻に分析するためには、放射性物質の同位体組成を考慮に入れた原子力技術評価ツールの開発が必要である。軽水炉、使用済み燃料貯蔵、再処理、高速増殖炉、地層処分などの一連の原子力技術の位置付けに関して、同位体組成を考慮した実効的でより説得性のある原子力政策立案に資する定量的なモデル分析が必要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

国際原子力機関（IAEA：International Atomic Energy Agency）が近年、トリウム資源の導入可能性を報告している [14]。具体的には、トリウムを燃料とする原子炉と、既存炉である軽水炉などとの発電コストの比較分析や、ボトムアップ型のエネルギーモデルを用いた 2100 年までの世界の発電構成見通しを分析している。発電コストの比較分析の結果、ウラン価格にも依存するが、トリウム燃料を消費するワンスルーの重水炉については、経済優位性をもつ可能性が示されているものの、短中期的にトリウム燃料サイクル技術が持続的に市場展開されるためには、既存炉を上回る経済性、核不拡散性、安全性などを確保する必要があると指摘されている。

## （６）キーワード

原子力発電、エネルギーモデル、発電コスト、電力市場自由化、核燃料サイクル、エネルギー需給見通し、同位体組成

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | 福島第一原子力発電所事故以降、大学および研究機関において数多くの分析ツール開発や将来のエネルギー構成の評価が行われている。著名な国際学会でも発表が数多くみられる。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | － |
| | 産業化 | － | － | － |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | 米国エネルギー省エネルギー情報局は過去数十年にわたり詳細なエネルギーモデル開発に継続的に取組み、近年ではシェールガス開発も詳しく考慮した上で、内外のエネルギー需給を分析している。同モデルの分析結果は頻繁に引用されている。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | － |
| | 産業化 | － | － | － |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | 大学、研究機関、国際機関において分析ツール開発や将来のエネルギー構成の評価が行われている。国際的に見ても厳しい欧州の温室効果ガス排出規制下でのエネルギー構成見通しについて数多くの研究が行われている。著名な国際学会でも発表が数多くみられる。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | － |
| | 産業化 | － | － | － |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | 他国の分析ツールを参照しながら、大学、研究機関において分析ツール開発や将来のエネルギー構成の評価が行われている。世界最大のエネルギー消費国であり、多くの研究課題が存在していると考えられるが、独自性のある研究の形跡はあまりみられていない。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | － |
| | 産業化 | － | － | － |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | 他国の分析ツールを参照しながら、研究機関などにおいて分析ツール開発や将来のエネルギー構成の評価が行われている。ただし国際会議の場において、インパクトのある発表はそれほど多いとは言えず、独自性のある研究はあまり存在しない模様である。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | － |
| | 産業化 | － | － | － |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) エネルギー・環境会議，革新的エネルギー・環境戦略，2012
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120914/20120914_1.pdf
2) エネルギー・環境会議コスト等検証委員会，コスト等検証委員会報告書，2011
http://www.npu.go.jp/policy/policy09/pdf/20111221/hokoku.pdf
3) 経済産業省，エネルギーミックスの選択肢の原案について，2012
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_problem_committee/pdf/sen-takushi.pdf
4) 小宮山涼一, 藤井康正, 原子力の長期シナリオと太陽光・風力発電の大量導入を考慮に入れた日本の長期エネルギー需給に関する分析, 電気学会論文誌B, Vol. 132, No. 9, pp.780-79, 2012
5) European commission, Energy Roadmap 2050, 2011
http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2012_energy_roadmap_2050_en.pdf
6) European commission, Roadmap for moving to a low-carbon economy in 2050, 2011
http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/index_en.htm
7) EIA/DOE, Annual Energy Outlook 2014, 2014
http://www.eia.gov/forecasts/aeo/
8) Jiang Kejun, Green Roadmap: China’s power sector’s pathway to lower carbon emissions, 2011
9) ATOMICA，韓国のエネルギー事情とエネルギー政策，2014
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=14-02-01-01
10) OECD/IEA, World Energy Outlook 2013, 2013
http://www.worldenergyoutlook.org/
11) OECD/NEA, Nuclear Energy and Renewables, 2012
http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2012/7056-system-effects.pdf
12) 山地憲治, 長野浩司, 燃料サイクル最適化モデルの開発 -高速増殖炉実用化条件の解析-, 1988
13) 経済産業省，低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて～次世代送配電ネットワーク研究会 報告書～，2010
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/electric_power_industry_subcommittee/001_038/pdf/038_009.pdf
14) IAEA, Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems, 2012

## ３．３．３　原子力に依存しない場合に取り組むべき研究課題

### ３．３．３．１　国際的視野、社会的視野を含んだ原子力に依存しないための戦略

#### （１）研究開発領域名

国際的視野、社会的視野を含んだ原子力に依存しないための戦略

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

エネルギー安定供給を目指す従来の国家戦略の下では顕在化しなかった不整合性が福島第一原子力発電所事故により顕在化した。それは主に原子力利用における出口の部分に顕われており、レジリエントな国家戦略の構築と実施を妨げている。多様なステークホルダーの意向を踏まえつつ整合性のある技術選択肢のパッケージ（複数）を構築、実施するための方法論を確立する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

一次エネルギーの安定供給と国際社会における発言権の確保を目指して、日本の原子力利用政策は、核燃料サイクル、高速炉という技術的中核の実現に向けて進められてきた。エネルギー資源の乏しい日本において国家生存のもっとも重要な一次エネルギーの安定供給の基礎を原子力によって確保するという明確な動機があった。しかし、2011 年の福島第一原子力発電所事故以降、それまでの国家戦略と原子力関係者に対する国民の支持と信頼は毀損し、それに代わる戦略を立てる基本的な合意点を見い出せないでいる。事故後の多くの議論を経て、原子力発電への依存度を逓減する方向性では国民多数の支持を得られた観があるが、それを具体化するための基礎と手順が確立されていないように見受けられる。例えば、技術的成熟度の度合いや緊急性の異なる複数の技術的オプションが時系列を考慮したシナリオの中で検討されるのではなく、同列に比較されている。また、依存度逓減を多数が支持するといっても、なぜそれを目指すのかという根本的な動機と逓減後のビジョンに関しては同床異夢であるにもかかわらず、異なるステークホルダー間に存在する非均質性を塗りつぶし、原子力発電賛成反対の二分法によって議論がなされるため、すこし踏み込んだ具体論になると議論が発散する。このように議論が浅く混迷する主な理由は、たとえ原子力利用逓減を企図するにしてもそれによってどのような状況がもたらされるのか、つまり、「出口」の部分に関する十分な理解を構築し、共有してこなかったことによると考えられる [1)]。

「出口」は短期（前期）、中期、長期（後期）に分けて考えることができる。短期の出口はすでに存在する使用済み燃料の処理とほぼ同義であり物質のインベントリ管理と捉えることができる。この段階の処理の仕方によって、中期、長期で適用できる選択肢も変わり、もたらされるリスクも影響を受ける。福島第一原子力発電所事故後の状況においては、この段階で国民の信頼を得ない限り先には進めない。また、国民の健康リスクだけでなく、現在のプルトニウムストックパイル問題のように短期的であり、かつ、二国間あるいは国際問題に影響を与えるリスクもある。中期において考えなければならないのは、老朽化した炉の退役と更新の問題である。これは、原子力利用をどの程度継続するのか（中期をどのくらい長く続けるのか）という点と関連し、インベントリ管理と処分の問題にも影響する。さらに、長期的・究極的には原子力システム全体の最終的撤

退に対しても検討し、これら、短期、中期、長期のどのフェーズに対しても矛盾のない整合性のあるシナリオを構築する必要がある。

最終的に原子力に依存しない場合のシナリオを完了するまでに許される時間スパンの長さによって、必要とされる、あるいは供用可能な技術が異なってくる。しかし、もし、原子力への依存をなくすのであれば、それをどの程度の時間で行うのかは、国民の合意のもとに定めるべきことであり、逆に国民は合意形成の議論を進める上でどの技術がいつ供用可能になるのか、そしてその効果や影響を知りたがるであろう。

この鶏と卵のような関係の中で、まず定めなければならない「定点」は、前述のように、原子力への依存をなくすことによって何を実現したいのか、という根本的な問いに対する国民の意思を正しく把握することであろう。「出口戦略」構築とは、原子力への依存をなくすことによって何を実現したいのか、という根本的な問いに対する国民の合意形成に資する客観的な知識を体系的に提供しつつ、短期、中期、長期のどのフェーズに対しても矛盾のない整合性のあるシナリオを構築することである。出口戦略構築では、提供される知識の中に何を含めるのかも含めて社会的議論からのフィードバックを得て、随時修正を加える（adaptive）という、反復的（iterative）で柔軟な（flexible）対応により技術的現実性を提示しつつ国民の求める将来像を収斂させていく。そして、そのためには自然科学と人文社会科学の協働による国民的合意形成の方法論を構築することが不可欠である。これは、知識体系を主に科学技術の専門家が用意し一方的に提示した上で、いわゆるパブリックアクセプタンスを増進するために人文社会科学を利用するという従来原子力開発でとられていたアプローチとは根本的に異なる、あるいは方向性が逆のものである。

もし原子力への依存をなくすとしたら、どのようにして実現できるのか、どのような影響があるのか（国民の負担はどの程度になるのか)、それに対する対策はあるのか、という問いは、高度な国家レベルのリスク管理上の問いである。しかし、実際にその戦略を実施に移すかどうかということとは別に、当然行っておくべきリスク管理上の図上演習であったはずだが、そのような国家の根幹にかかわることに関して準備を行ってこなかった。ただ、このような状況（出口部分のシナリオを不明確なままに放置しておいたこと）は日本だけではなく、原子力を利用してきたほぼすべての国にあてはまる。数少ない例外を探すとすれば、成功例としてのスウェーデン、フィンランド、そして反面教師としての米国と韓国であろう。

スウェーデンは 1980 年に 30 年後には原子力に依存しないことを国民投票で決定し、それに向けて中間貯蔵施設の運用、廃炉で発生する低レベル廃棄物にも対応した低レベル廃棄物処分施設の運用、さらに使用済み燃料最終処分場のサイト選定（2009 年）と技術、規制システム開発を進めてきた。いわば出口戦略とその理論的技術的基盤を着実に整えてきた最先進国である。興味深いことに、これらの出口部分の見通しがついた頃、既設原子炉の新規炉へのリプレースメントを認める国民投票結果が得られている。

フィンランドは西側とロシアの両方の炉が併存する複雑な状況におかれてきた。ロシア製の炉から出る使用済み燃料はロシアが引き取り再処理することになっていたが、さまざまな国民的議論、国際情勢の変化などを経て 1997 年自国における処分に方針を定め 2001 年にオルキルオトを最終処分地として選定することに成功した。

米国は歴史的にもっとも早く放射性廃棄物を発生させ、その問題の困難さを認識した国である[2)]。また、1970年代から現在まで何回か試みたにもかかわらず使用済み燃料の処分に関する方針が定まらない。インドの核実験後、再処理を禁じる国策が確立し以後踏襲されてきたが国立研究所ではさまざまな技術的オプションが研究されてきた。1990年代後半のクリントン政権下では経済競争原理から自然発生的に原子力に依存しない方向への流れがあったが、1999 年に大統領科学技術諮問委員会（PCAST：President's Council of Advisors on Science and. Technology）が原子力への依存をなくした場合のインパクトの大きさ、特に米国の原子力分野における国際的指導性の低下に対して警告してから、ブッシュ大統領のリーダーシップによっていわゆる原子力ルネッサンスが起きた。これは原子力への依存をなくすという崖っぷちに立ってみてその深遠さを改めて認識し、前述の中期の期間を延長することで原子力への依存をなくすことを先送りにする努力と見ることもできる。しかし、巨大で長期な投資を必要とする原子力発電が米国の金融投資環境にマッチせず、期待したほどの盛り上がりを見せることはなかった。オバマ政権下では伝統的な民主党の反再処理政策が踏襲され、さらに国内政治力学によってヤッカマウンテン処分場計画が中止されるに至った[3)]。これらの動きと並行して、科学アカデミーは、段階的、反復的で柔軟な意思決定プロセスを含む技術開発の必要性を1990年代から数次の研究調査委員会によって明らかにした[4-6)]。ヤッカマウンテン処分場計画が中止されたあとの方向性を諮問されたブルーリボン委員会の報告書[7)]は主にこの科学アカデミーにおける議論を踏襲している。

韓国は 1980 年代から本格的な原子力発電の展開を始め、現在では総発電量の４割を超えるまでになっている。複雑な周辺国際環境のため、米国から使用済み燃料の管理に関して厳しく制約を加えられており、使用済み燃料直接処分のみが認められている。しかし、2014年に失効する原子力協定の改定交渉の中で韓国は米国に対して乾式再処理を認めるよう要求している[8)]。その動機は複数認められるものの、韓国にとって実際上もっとも重要と思われることは、蓄積する使用済み燃料に見合うだけの中間貯蔵容量が不足していること、さらには最終的な処分地の選定プロセスにすら入れない国民合意の欠如という状況を乾式再処理という技術的方策によって打開しようということである。しかし、技術開発計画が先行し、それを支えるべき国民合意の有無や米国との交渉の行方などが不明であり状況は予断を許さない[9)]。（2015 年 4 月 22 日、米韓原子力協定妥結、仮署名）

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

前述のように、世界を見渡せばいくつかの成功例があるものの、今の日本はそれらの成功例よりも格段に複雑で喫緊の必要性に迫られている。ことが起きてしまいすでに図上演習にとどまらず、自然科学と人文社会科学の有機的協働による adaptive、iterative で flexible な方法論を見いだし、実際にそれを用いて国民的合意を構築し今の閉塞状態を打開することが求められている。

このプロセスは２つの要素を必須とする。すなわち、膨大な専門知（繰り返し指摘するが自然科学だけでなく人文社会科学を含めることが肝要）を駆使して問題の所在と根源を客観的に提示することができる専門家集団とそれを用いて幅広いステークホルダー

が合意できる選択肢を探索する参加型の議論を進める仕組みである。専門家集団は、ステークホルダー会議からのフィードバックを注意深く分析しさらに提案をする、というフィードバック・ループを実現することを求められる。しかし、あくまでも主体はステークホルダー会議であり専門家集団はそのアドバイザーに徹する必要がある。そのため、専門家集団に含まれる専門家には高度の専門性はいうまでもなく、高度の倫理性と公益性、そして社会的なリテラシーが求められる。一方、ステークホルダー会議にも高度の倫理性と公益性が求められる。従来の円卓会議のように自説の主張をぶつけ合うのではなく、専門家集団から出てきた提案に基づき過不足を述べ、ほかのステークホルダーのもつ利害を理解しようとする姿勢とリテラシーが求められる。

米国であれば通常、科学アカデミーと連邦議会が協働してこのようなプロセスが進められるであろうが、日本においては具体的で膨大な作業を伴う専門家集団の仕事をこなし、社会的信頼を得ている学際横断的な組織は見当たらない。まずはこの出口戦略構築に特化した専門家集団を新たに編成し必要な予算措置を講じることを検討する必要があろう。ステークホルダー会議も新たに編成することが考えられるが、脳死移植の前例のように党議拘束を外した国会の委員会で行うことも考えられる。

技術的には、膨大な数に上る検討・評価項目をまずはもれなく列挙し、さらにステークホルダー会議との議論によって優先順位付け、絞り込みを行い、さらにはそれらを適切に評価する手法の開発が課題となる。また、多数の性能評価指標に関して、複数の選択肢を俯瞰的に比較するための手法の開発も課題となる。地層処分の性能評価手法の開発においてすでに一定の蓄積があるものの、性能評価指標の数が格段に大きくなることが予想され、迅速な評価を可能にする技術革新が求められる。またこれらの膨大な評価結果を求められた切り口で表示してみせる知識マネジメントシステムの構築が必須となる [10]。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- 日本原子力研究開発機構の地層処分グループが開発を進めてきた性能評価技術と知識マネジメントシステムはそのプロトタイプとして有効。
- 米国ブルーリボン委員会の答申とその後の動き。例えば、エネルギー省による The Fuel Cycle Evaluation and Screening プロジェクト（アイダホ国立研究所主導）。
- スウェーデンの既設炉のリプレースメントを容認する国民投票結果がもたらす既存の枠組み（処分施設の容量など）への影響とそれに対する国民、住民の反応。
- 韓国と米国の原子力協定交渉の行方と韓国の使用済み燃料管理。
- オランダ・デルフト工科大学における responsible innovation 概念の研究 [11]。

### （６）キーワード

原子力発電、出口戦略構築、自然科学と人文社会科学の協働、国民合意形成、

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・核燃料サイクルの要素技術に関する技術開発は基礎研究レベルにおいて他国を先導するレベルにある。<br>・ただし、福島第一原子力発電所事故後、雨後の筍のように言及されてはいるものの原子力と社会に関する基礎的研究、特に自然科学との協働に資する研究には特筆すべき成果がない。左記の現状に対する評価◎は個別の要素技術に関するものであって「出口戦略構築」に必要な基礎研究に対するものではない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・核燃料サイクルの要素技術のうち応用研究段階にあるものの中に重要な意味をもつものが含まれているものの（例えば、高温ガス炉、高速炉）、出口戦略的観点から再検討されておらず従来のコンテクストでの開発が続けられている。 |
| | 産業化 | × | ↘ | ・中間貯蔵施設、低レベル処分場など産業化の段階に到達しているものの、地層処分施設、再処理工場など枢要な施設が供用のめどが立っていない。<br>・またそれらの原子力に依存しないための戦略における位置づけがなされていない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・卓越した技術力とイノベーションで他国が試したこともない多くの可能性を実験的に研究した蓄積があり、いったん国家社会の求める方向性が定まればそれを実現するだけの潜在的実力を備えている。<br>・科学アカデミーを中心に原子力と社会の関係に関する議論の蓄積があり、この分野においても世界を先導してきた。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↘ | ・プロトタイプ規模の開発で留まり日の目を見なかったアイデアが多数あり、情勢の変化に応じて対応できる分厚い蓄積がある。<br>・社会的な合意形成プロセスに対してもさまざまな試行錯誤を重ねてきた。TRU（TRans-Uranium）廃棄物処分場の核廃棄物隔離試験施設（WIPP：Waste Isolation Pilot Plant）において顕著な成功を収めたが、それ以外については顕著な成果がない。 |
| | 産業化 | × | ↘ | ・ブルーリボン委員会の答申後、オバマ政権から見るべき対応がない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・核燃料サイクルの要素技術に関する技術開発は基礎研究レベルにおいて他国を先導するレベルにある。<br>・社会的合意形成の基礎的研究やEU（European Union）域内の国際処分場に関する研究など、着実に成果を上げている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・多様な欧州各国の実情を反映して多様な選択肢を抱えている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・フィンランド、スウェーデンで世界初の使用済み燃料の処分場が運用を開始する可能性が高い。また、フランスでは核燃料サイクルをフルに利用した方法による開発が進んでいる。ドイツの脱原発政策も欧州の多様性が可能にする試行と捉えることができる。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・核燃料サイクルの基礎的研究は軍事技術をベースに一定の成果を上げている。地層処分の概念検討などが進んでいる。<br>・社会体制の違いから、国民合意形成に関しては西側とは異なるアプローチがとられるであろうが、どのような取り組みがされているのか見えていない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・高速炉、高温ガス炉など応用研究段階にあって将来出口戦略に利用できそうな技術がみられる。<br>・しかし、それらの開発を進める動機の中に出口戦略が含まれているかどうか見えていない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・原子力民生利用の勃興期にあり、発電所増設に忙殺されて包括的な出口戦略構築を検討する余裕がない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・乾式再処理、高温ガス炉の基礎研究、地層処分の概念研究などが進んでいる。<br>・低レベル処分場サイト選定の際に社会的合意形成の貴重な経験をしたがその後の展開が見えていない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・乾式再処理のプロトタイプを建設し天然ウランによる実験を計画中。<br>・社会的合意形成に関しての取り組みが見えない。 |
| | 産業化 | × | → | ・2020 年代半ばに使用済み燃料貯蔵のスペースが満杯になるが具体的対応が見えない。また、米国との原子力協定改定交渉の行方が不透明。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 安 (2012) 原子力発電「出口戦略」構築のすすめ、科学、82(6): 623-628.
2) Walker, JS (2009) The Road to Yucca Mountain, The Development of Radioactive Waste Policy in the United States, University of California Press.
3) 安 (2011) 時論：ヤッカマウンテン処分場計画の終焉と今後、日本原子力学会誌、53(11), 2-3, 2011.
4) National Research Council (1990) Rethinking High-Level Radioactive Waste Disposal, A position Statement of the Board of Radioactive Waste Management, Washington, DC, National Academy of Sciences.
5) National Research Council (1995) Technical Bases for Yucca Mountain Standards、Washington, DC, National Academy of Sciences.
6) National Research Council (2003) Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, 2001、One Step At a Time, the Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Wastes, Washington, DC, National Academy of Sciences
7) Blue Ribbon Commission on America’s Nuclear Future (Jan, 2012) Report to the secretary of energy, January 2012. Washington DC: Blue Ribbon Commission on America’s Nuclear Future;158 p.
8) Ko, W.I. and Kwon, W.H. (2009) Implications of the New National Energy Basic Plan for Nu-clear Waste Management in Korea, Energy Policy, 37, 3484-3488
9) Ahn, J. (2014) Roles and Effects of Pyroprocessing for Spent Nuclear Fuel Management in South Korea, Progress in Nuclear Energy, 75: 49–62
10) Umeki, H., Takase, H., and McKinley, I.G. (2011) Geological disposal: KM challenges and solutions, Knowledge Management Research & Practice, 9: 236-244.
11) Delft University of Technology (2014) Responsible Innovation (LDE) http://www.tbm.tudelft.nl/en/study/minors-and-electives/minors/minors/responsible-innovation-lde/

### ３．３．３．２　３．３．２章と共通の研究課題

（１）研究開発領域名

3.3.2 章と共通の研究課題

（２）研究開発領域の簡潔な説明

本章において下記領域の内容については、3.3.2 章「原子力の将来にかかわらず取り組むべき研究課題」と共通かつ特に考慮すべき領域と思慮し、3.3.2 章に記載する。

「使用済み核燃料の管理」

3.3.2.3 章「使用済み核燃料の管理」（361 頁）に記載。

「プルトニウムの管理手法」

3.3.2.4 章「プルトニウムの管理手法」（368 頁）に記載。

「ウラン廃棄物の管理手法」

3.3.2.5 章「ウラン廃棄物の管理手法」（374 頁）に記載。

「原子炉の廃止措置（デコミ）」

3.3.2.6 章「原子炉の廃止措置（デコミ）」（379 頁）に記載。

## 原子力区分　略語一覧

3S：原子力安全（Safety）、核不拡散（保障措置 Safeguards）、核セキュリティ（Security）
4S：小型ナトリウム冷却高速炉（Super-Safe, Small & Simple）

**A：**

ABR　：TRU 金属燃料先進燃焼炉（Advanced Burner Reactor）
ABWR　：改良型沸騰水型軽水炉（Advanced Boiling Water Reactor）
ADS：加速器駆動核変換システム（Accelerator Driven System）
AdSec：IAEA 核セキュリティ諮問委員会（Advisory Group on Nuclear Security）
ADSR：加速器駆動未臨界炉（Accelerator Driven Subcritical Reactor）
AECL：カナダ原子力公社（Atomic Energy of Canada Limited）
AEO2014：2014 年エネルギー年次見通し（Annual Energy Outlook 2014）
ALARA の原則：合理的に達成可能な範囲でできる限り低くすること
（As Low As Reasonably Achievable）
ALFRED：鉛冷却高速炉（Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator）
ALPS：多核種除去設備（Advanced Liquid Processing System）
ANDRA：放射性廃棄物管理機関
（Agence Nationale pour la gestion des Dechets RAdioactifs, フランス）
APM：1962 年にマルクールで建設された再処理パイロットプラント
（Atelier Pilote de Marcoule, フランス）
APWR　：改良型加圧水型原子炉（Advanced Pressurized Water Reactor）
AREVA：アレバ社（フランス）
ASN：フランス原子力安全機関（Autorité de Sûreté Nucléaire）
ASTRID：高速増殖技術実証炉
（Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration）
ATR：新型転換炉（Advanced Thermal Reactor）
AWHR：新型重水炉（Advanced Heavy Water Reactor）

**B：**

BA：より幅広いアプローチ（Broader Approach）
BEIR：電離放射線の生物学的影響に関する委員会
（Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation）
BSAF 計画：福島第一原子力発電所事故に関する国際ベンチマーク解析計画
（Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project）
BWR：沸騰水型原子炉（Boiling Water Reactor）

**C：**

CANDU 炉：カナダ型重水炉（CANadian Deuterium and Uranium reactor）
CAPRA 計画：フランスのプルトニウム燃焼計画
（Consommation Accrue de Plutonium dans les réacteurs à neutrons RApides）
during an Accident of Reactor and safety Evaluation）
CCS：二酸化炭素回収・貯留（Carbon dioxide Capture and Storage）
CDFR：中国の高速実証炉（China Demonstration Fast Reactor）
CEA：フランス原子力・代替エネルギー庁
（Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives）
CEFR：中国の高速増殖実験炉（China Experimental Fast Reactor）
CFTC：統合核燃料取扱センター（Consolidated Fuel Treatment Center）
CIAE：中国原子能科学研究院（China Institute of Atomic Energy）
CIEMAT：エネルギー・環境・技術研究センター
（Centro de Investigaciones Energeticas, MedioAmbientales y Tecnologicas，スペイン）
CLI：地域情報委員会（Commission Locale d' Information，フランス）
CNDP：公開討論国家委員会（Commission Nationale du Débat Public，フランス）
CNRS：フランス国立科学研究センター
（Centre National de la Recherche Scientifique）
CNS：核不拡散研究センター（James Martin Center for Nonproliferation Studies，米）
CODIRPA：原子力事故後管理運営委員会
（COmité DIRecteur pour la gestion de la phase Post Accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation d'urgence radiologique，フランス）
CPF：高レベル放射性物質研究施設（Chemical Processing Facility）
CPF：被覆粒子燃料（Coated Particle Fuel）、
CSIS：米国戦略国際問題研究センター
（Center for Strategic and International Studies）
CZT：テルル化亜鉛カドミウム（CdZnTe）

**D：**

DA：破壊分析（Destructive Assay）
DCH：格納容器直接加熱（Direct Containment Heating）
DDREF：線量・線量率効果比（Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor）
DG 法：遅発ガンマ線（Delayed Gamma-ray）法
DOE：米国エネルギー省（United States Department of Energy）
DP：討論型世論調査（Deliberative Poll）
DUPIC 燃料：CANDU 炉で再使用する PWR の使用済燃料
（Direct Use of spent PWR fuel In CANDU）

**E：**

EC：欧州委員会（European Commission）
ECURIE：欧州共同体緊急放射線情報交換システム
（European Community Urgent Radiological Information）
EDF：フランス電力会社（Électricité de France）
EML：米国エネルギー省環境測定研究所（Environmental Measurements Laboratory）
EMRAS：放射線安全のための環境モデリング
（Environmental Modelling for RAdiation Safety）
ENEA：イタリア原子力・代替エネルギー研究開発委員会
（National Commission for Nuclear Alternative Energy Sources）
EPA：米国環境保護庁（United States Environmental Protection Agency）
EPR：欧州加圧水型炉（European Pressurized Water Reactor）
EPZ：防災対策重点地域（Emergency Planning Zone）
ERIA：東アジア経済研究センター
（Economic Research Institute for ASEAN and East Asia）
ES：環境サンプリング（Environmental Sampling）
ESBWR：高経済性単純化沸騰水型原子炉
（Economic Simplified Boiling Water Reactor）
EU：欧州連合（European Union）
EURDEP：欧州放射線データ交換プラットフォーム
（European Radiological Data Exchange Platform）
EURODIF：国際共同企業体ユーロディフ
（European Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Consortium）
EXFOR：国際原子核反応実験データベース（EXchange FORmat）

**F：**

FaCT プロジェクト：高速増殖炉リサイクルの実用化に重点を置いた研究開発プロジェクト。（Fast reactor Cycle system Technology development project）
FBR：高速増殖炉（Fast Breeder Reactor）
FFTF：高速中性子束試験装置（Fast Flux Test Facility）
FHR：フッ化物塩冷却高温炉（Fluorite High Temperature Reactor）
FP：核分裂生成物（Fission Products）

**G：**

G8：主要国首脳会議（Group of Eight）
GE：ゼネラル・エレクトリック社（General Electric Company）
GHG：温室効果ガス（GreenHouse Gas）
GIF：第 4 世代原子力システム国際フォーラム（Generation-IV International Forum）
GM：ガイガーミュラー計数管（Geiger-Müller）
GNEP 構想：国際原子力エネルギー・パートナーシップ構想

（Global Nuclear Energy Partnership）
GTCC：クラス C を超える放射性濃度の廃棄物（Greater Than Class C）
GT-MHR：ガスタービンモジュール型高温ガス炉
（Gas-Turbine Modular Helium Reactor）

**H：**

HANARO：韓国の研究用多目的照射炉（High-flux Advanced Neutron Application ReactOr）
HEPA フィルター：エアフィルタの一種（High Efficiency Particulate Air filter）
HIC：高性能容器（High Integrity Container）
HTR：高温ガス炉（High Temperature Reactor）
HTR-10：ペブルベット型高温ガス実験炉（High Temperature Reactor-10, 中）
HTR-PM：ペブルベット型高温ガス実証炉
（High Temperature Gas-Cooled Reactor-Pebble bed Module, 中）
HTTR：高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor, 日）

**I：**

IAEA：国際原子力機関（International Atomic Energy Agency）
IBRAE：ロシア科学アカデミー原子力安全研究所
（Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences）
ICRP：国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection）
ICSBEP：国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト
（International. Criticality Safety Benchmark Evaluation Project）
IEA：国際エネルギー機関（International Energy Agency）
IFNEC：国際原子力エネルギー協力フレームワーク
（International Framework For Nuclear Energy Cooperation）
IMI Nuclear：IMI Nuclear 社（スイス）
INES：国際原子力事象評価尺度（International Nuclear Event Scale）
INF：中距離核戦力（Intermediate-range Nuclear Forces）
INFCIRC：IAEA の刊行物（Information Circulars）
INIS：国際原子力情報システム（International Nuclear Information System）
INPO：米国原子力発電運転協会（Institute of Nuclear Power Operations）
INPRO：革新的原子炉及び燃料サイクルに関する国際プロジェクト
（INternational PROject on innovative nuclear reactors and fuel cycles）
IRGC：国際リスク・ガバナンス評議会（International Risk Governance. Council）
IRID：技術研究組合国際廃炉研究開発機構
（International Research Institute for Nuclear Decommissioning,）
IRPhE：国際炉物理ベンチマーク実験プロジェクト
（International Reactor Physics benchmark Experiment project）
IRRS：総合原子力安全規制評価サービス（Integrated Regulatory Review Service）

IRSN：放射線防護・原子力安全研究所
（Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, フランス）
IS プロセス：ヨウ素（I）－硫黄（S）系熱化学水素製造プロセス
ISCN：核不拡散・核セキュリティ総合支援センター
（Integrated Support Center for Nuclear nonproliferation and Nuclear security）
ISN：国際核不拡散・核セキュリティ局
（bureau of International Security and Nonproliferation）
ISO：国際標準化機構（International Organization for Standardization）
ISPRA：イタリア環境保護研究所
（Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale）
ISS：Innovative Systems Software 社（米）

**J：**
JAEA：日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency）
JASPAS：日本による IAEA 保障措置技術支援
（JApan Support Programme for Agency Safeguards）
JMOX：国内 MOX 燃料加工事業（Japanese MOX）
JPDR：日本最初の発電用試験原子炉（Japan Power Demonstration Reactor）
JRC-IRMM：欧州共同研究センター 標準物質・計量研究所（European commission Joint Research Center, Institute for Reference Materials and Measurements）
JRC-ITU：欧州共同研究センター 超ウラン元素研究所
（European Commission Joint Research Center, Institute for TransUranium elements）
JSFR：高速増殖実証炉・商業炉（Japan Sodium-cooled Fast Reactor）
JT-60：臨界プラズマ試験装置（JAERI Tokamak 60）
JUPITER：大型高速増殖炉炉心臨界実験
（Japanese-United states Program of Integral Tests and Experimental. Researches）

**K：**
KAERI：韓国原子力研究所（Korea Atomic Energy Research Institute）
KAIST：カイストゥ（Korea Advanced Institute of Science and Technology）
（旧称：韓国科学技術院）
KALIMER：韓国新型液体金属燃料高速炉（Korea Advanced Liquid Metal Reactor）
KHNP：韓国水力原子力株式会社（Korea Hydro & Nuclear Power Limited）
KI：クルチャトフ研究所（Kurchatov Institute, ロシア）
KIT：カールスルーエ工科大学（Karlsruher Institut für Technologie, ドイツ）
KNFC：韓国原子燃料株式会社（Korea Nuclear Fuel Co., Limited）
KRMC：韓国放射性廃棄物管理公団（Korea Radioactive waste Management Co.）
KTH：スウェーデン王立工科大学（Kungliga Tekniska Högskolan）

**L：**

LANL：ロスアラモス国立研究所（Los Alamos National Laboratory, 米）
LES：ルイジアナ・エネルギー・サービシズ
（ウラン濃縮会社、Louisiana Energy Services, 米）
LLFP：長寿命核分裂生成物（Long-Lived Fission Products）
LNT：しきい値無し直線仮説（Liner Non-threshold Theory）
LWR：軽水炉（Light Water Reactor）

**M：**

MA：マイナーアクチノイド（Minor Actinoid）
MCCI：溶融炉心コンクリート相互作用（Molten Core Concrete Interaction）
MCDA：マルチクライテリア意思決定分析（Multi-Criteria Decision Analysis）
MELODI：学際的欧州低線量イニシアティブ
（Multidisciplinary European LOw Dose Initiative）
MODARIA：包括的なモデリングプロジェクト
（MOdelling and DAta for Radiological Impact Assessment）
MOSRA：決定論的手法コードシステム（MOdular System for Reactor Analyses）
MOX 燃料：混合酸化物燃料（Mixed-Oxide Fuel）
MSSP ：IAEA 保障措置技術支援計画（Member State Support Programme）
MSR：液体溶融塩炉（Molten Salt Reactor）
MUF：不明核質量（Material Unaccounted For）
MYRRHA：加速器駆動未臨界炉
（Multipurpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications, ベルギー）

**N：**

NCRP：米国放射線防護測定協議会
（National Council of Radiation Protection and measurements）
NDA：原子力廃止措置機関（Nuclear Decommissioning Authority, 英）
NDA：非破壊分析（Non Destructive Assay）
NEI：米国原子力エネルギー協会（Nuclear Energy Institute）
NETEC：原子力環境技術院（Nuclear Environment TEChnology Institute, 韓）
NGNP：次世代原子力プラント（Next Generation Nuclear Plant）
NGO：非政府組織（Non-Governmental Organizations）
NITI：アレクサンドロフ科学技術研究所
（Nauchno-Issledovatel'skii Tekhnologicheskii Institut im. A.P. Aleksandrova,ロシア）
NNL：英国国立原子力研究所（National Nuclear Laboratory Limited）
NORM：自然起源の放射性物質（Naturally Occurring Radioactive Material）
NPT：核兵器の不拡散に関する条約
（Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear weapons）
NR 物：放射性廃棄物でない廃棄物（Non-Radioactive Waste）

NRC：米国原子力規制委員会（Nuclear Regulatory Commission）
NRTA 法：中性子共鳴透過分析法（Neutron Resonance Transmission Analysis）
NSC：原子力科学委員会（Nuclear Science Committee）
NSRR：原子炉安全性研究炉（Nuclear Safety Research Reactor）
NuScale：NuScale Power 社（米）

**O：**

OECD/NEA：経済協力開発機構原子力機関
（Organisation for Economic Co-operation and Development,Nuclear Energy Agency）
ORG：オックスフォードリサーチグループ（Oxford Research Group, 英）
ORNL：オークリッジ国立研究所（Oak Ridge National Laboratory）

**P：**

PAR：静的触媒式水素再結合装置（Passive Autocatalytic Recombiner）
PAZ：予防的防護措置準備区域（Precautionary Action Zone）
PB-FHR：球形燃料フッ化物塩冷却高温炉
（Pebble Bed Fluorite High temperature Reactor）
PBMR：ペブルベッドモジュール型高温ガス炉（Pebble Bed Modular Reactor, 南ア）
PCAST：米国大統領科学技術諮問委員会
（President's Council of Advisors on Science and. Technology）
PCV：原子炉格納容器（Primary Containment Vessel）
PFBR：高速増殖原型炉（Prototype Fast Breeder Reactor, インド）
PGA 法：即発捕獲ガンマ線分析法（Prompt Gamma ray Analysis）
PGSFR：高速増殖プロトタイプ炉（Prototype of Gen-IV Sodium-cooled Fast Reactor）
PHWR：加圧型重水炉（Pressurized Heavy Water Reactor）
PIRT：重要度ランク表（Phenomena Identification and Ranking Table）
PONI：CSIS 傘下の核イシュープロジェクト（Project On Nuclear Issues）
POSTEC：浦項工科大学校（POhang university of Science and TEChnology, 韓）
PP：核物質防護（Physical Protection）
PRA：確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment）
PRIDE：韓国のウラン試験用乾式処理試験施設
（PyRoprocess Integrated inactive DEmonstration facility）
PRISM：革新的小型モジュール原子炉（Power Reactor Innovative Small Module）
PSA：確率論的安全評価（Probabilistic Safety Assessment）
PSI：ポール・シェラー研究所（Paul Scherrer Institute, スイス）
PSR：定期的安全レビュー（Periodic Safety Review）
PSR+：予防的安全レビュー（Proactive Safety Review）
PUREX 法：ウランとプルトニウムを回収する溶媒抽出法
（Plutonium Uranium Redox EXtraction）
PWR：加圧水型原子炉（Pressurized Water Reactor）

R：

RCM：信頼性重視保全（Reliability Centered Maintenance）
RFI：情報提供依頼（Request For Information）
RFP：提案提供依頼（Request For Proposal）
ROX：岩石型燃料（Rock-like OXide）
RI：放射性同位体（RadioIsotope）
RODOS：緊急時意思決定支援オンラインシステム
（Real-time On-line DecisiOn Support system）
RCM：信頼性中心保全（Reliability Centered Maintenance）
ROP：原子炉監視システム（Reactor Oversight Process）
ROSA-V：冷却材喪失事故模擬試験装置（Rig Of Safety Assessment-V）
RPV：原子炉圧力容器（Reactor Pressure Vessel）
RWMC：放射性廃棄物管理委員会（Radioactive Waste Management Committee）

S：

SAFR：ナトリウム冷却新型高速炉（Sodium Advanced Fast Reactor）
SARNET：過酷事故研究ネットワーク
（Severe Accident Research NETwork of excellence）
SARRY：単純型汚染水処理システムー第二セシウム吸着装置ー
（Simplified Active water Retrieve and Recovery sYstem）
SCC：応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking）
SCK-CEN：ベルギー原子力研究センター
（StudieCentrum voor Kernenergie - Centre d'étude de l'Energie Nucléaire）
SF：使用済燃料（Spent Fuel）
SILEX 法：レーザー原子法（ウラン濃縮法の一つ）
（Separation of Isotopes by Laser EXcitation）
SINAP：上海応用物理研究所（Shanghai INstitute of Applied Physics）
SIPRI：ストックホルム国際平和研究所
（Stockholm International Peace Research Institute）
SJTU：上海交通大学（Shanghai Jiao Tong University）
SMART：システム一体型モジュラー炉
（System-integrated Modular Advanced ReacTor, 韓）
SNL：サンディア国立研究所（Sandia National Laboratories）
SNERDI：上海核工程研究設計院
（Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute）
SNPSDC：国家核ソフトウェア開発センター
（State Nuclear Power Software Development Center, 中）
SOARCA：最先端技術に基づく原子力災害解析
（State-Of-the-Art Reactor Consequence Analyses）
SPEEDI：緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム

（System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information）
SRAC：決定論的手法コードシステム（Standard Reactor Analysis Code）
SVBR-100：鉛ビスマス冷却高速炉（Svintsovo-Vismutovyi Bystryi Reaktor, ロシア）

**T：**
THAI2 計画：格納容器挙動研究計画（容器冷却、水素、エアロゾル、ヨウ素など）
（Thermal-hydraulics, Hydrogen, Aerosols and Iodine）
T-MOX：トリウム・プルトニウム混合酸化物燃料（Thorium-Mixed OXide）
TMSR：トリウム溶融塩炉（Thorium Molten Salt Reactor）
TRISO：被覆燃料粒子燃料（TRistructural ISOtropic）
TRU 廃棄物：超ウラン元素（TRans-Uranium）を含む放射性廃棄物
TSO：技術支援機関（Technical Support Organization）
TWR：進行波炉（Traveling Wave Reactors）

**U：**
UKAEA：英国原子力公社（United Kingdom Atomic Energy Authority）
U-MOX：ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料（Uranium-Mixed OXide）
UNSCEAR：原子放射線の影響に関する国連科学委員会
（United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation）
URENCO：ウレンコ社（英国、ドイツ、オランダが共同で出資するウラン濃縮会社）
USEC：ユーゼック（ウラン濃縮会社、米）

**V：**
V&V：信頼性および妥当性検証（Verification and Validation）
VEGA 実験：放射性物質放出実験
（Verification Experiments of radionuclides Gas/Aerosol release）
VHTR：超高温炉（Very High Temperature Reactor）
VVER：ロシア型加圧水型原子炉（Voda Voda Energo Reactor）

**W：**
WAK：カールスルーエ再処理工場（WiederaufarbeitungsAnlage Karlsruhe, ドイツ）
WCS 社：米国の廃棄物処分会社（Waste Control Specialists）
WENRA：西欧原子力規制者協会（Western European Nuclear Regulators' Association）
WHO：世界保健機構（World Health Organization）
WIPP：米国核廃棄物隔離試験施設（Waste Isolation Pilot Plant）
WSPEEDI：世界版緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム（Worldwide version of System for Prediction of. Environmental Emergency Dose Information）

**X：**
XJTU：西安交通大学（Xi'an Jiao Tong University）

**Y：**

YSZ：イットリア安定化ジルコニア（Yttria-Stabilized Zirconia）

**Z：**

ZWILAG：スイスの中間貯蔵施設会社（Zwischenlager Wurenlingen AG）

## 3.4 環境区分

環境区分の俯瞰では、環境問題をその取り組みの歴史から捉えることから始めた。まず、60 年代から 70 年代にかけて行われた公害への取り組みは事後対応的・対処療法的なものであった。80 年代以降、地球規模の環境問題が認識されるようになり、気候変動に対する緩和策・適応策などのように未然防止的な取り組みがなされているが、自然災害には事後対応的であるといえる。そして、今後予測される環境問題は、気候変動のような不確実性が高い事象や災害などの不連続性の高い事象が多く、従来の個別的対策ではなく包括的な取り組みが求められる。そして、環境に影響を及ぼす事象を予測し先手を打つという考え方が必要であり、対策が事後対応的であった異常気象や自然災害をも対象に含め、「環境設計・創造」という考え方が重要であると考え、これを環境区分の俯瞰における基本理念とした。さらに、俯瞰にあたっては、環境は人の健康を含む生命の持続性の基盤であることから「次世代のための環境」を前提とすること、普遍的な課題解決型科学技術の記載を目指すこと、さまざまな社会状況が変化しつつある 2015 年という時点を強く意識することとした。

これらの考え方は今後の研究開発の方向性を考慮する上で重要な視点であり、この視点から抽出された研究開発の推進が必要と考えられる。

上記の基本的考え方に沿って検討した結果、5 つの項目が抽出された。

1. 持続可能な人間居住

   地球規模の問題に対処する意味でも、地域の問題の解決を図る意味でも、都市の環境負荷をどのようにして下げるかが重要な課題である。とりわけ、GHG 発生量の多くを占める運輸・交通の今後のあり方、環境負荷が小さくても快適な居住環境の形成は優先的に取り組むべきである。今後、人口の急増が予想される開発途上国の都市環境の居住性を向上させると同時に環境負荷を低減する技術を開発できれば、日本が地球環境保全に大いに貢献できる。

2. 生態系サービスの適正管理

   人間社会と生態系との関係を踏まえた生物多様性や遺伝資源の研究開発も促進すべきである。そのためには、生物学や生態学など研究者に加えて、農学や林学、薬学、工学、経済学など、生態系や遺伝資源の利用を中心としてきた分野の研究者も加わった総合的な研究体制を整えることも必要となるであろう。

3. 持続可能な生産と消費

   製品のライフサイクルを通じて生じる環境負荷を把握し、より小さくするための研究開発はこれまでも日本で先進的に進めてられてきたが、今後も、いっそうの強化が求められる。産業の下流部門ではレアメタル、ベースメタル、リンなど、枯渇が懸念される元素の回収と再利用に係る技術を緊急に開発すべきである。

4. 災害による環境への影響低減と環境の再創造

   東日本大震災以降、防災や減災など、災害への取り組みの必要性が再認識されている。自然災害のリスクや災害に伴う工場などの事故による有害物質放出のリスク、住民とのリスクコミュニケーション、被災地の復興・再建の手法に関する研究開発もいっそうの努力が求められる分野である。

5. 観測・計測とその情報に基づく環境管理

情報に基づいた環境の管理は、環境の把握だけでなく、環境に影響を及ぼす事象を予測し先手を打つという点においても必要不可欠の分野である。本分野ではすでにさまざまな取り組みがなされ多くの実績が蓄積している。これらの実績を生かし活用していくための包括的なしくみの構築が求められている。同時に、既存の手法では不十分な観測・計測技術の進展など、残された課題への対応とそれを広く普及するための取り組みも忘れてはならない。

なお、環境分野における科学技術の研究開発においては、実現可能性や経済性と同時に社会的受容可能性に留意しなければならない。市民参加が不可欠となっている現状を踏まえれば、新たな技術が社会にどのように受け入れられるかまでを踏まえた研究開発でなければならない。そして、市民やマスメディアと専門家の間のリスク認知に大きな乖離があることは古くから知られているが、福島第一原子力発電所事故後、それが以前より大きな問題となってきた。技術の受容可能性をどう評価するか、また、受容できる技術をどう開発していくかもひとつの課題である。

以上の5項目のもとに以下の33の研究開発領域を設定し俯瞰を実施した。

3.4.1　持続可能な人間居住
- 3.4.1.1　建築と住環境（室内環境、建物の環境性能、建物周辺の環境）
- 3.4.1.2　都市・地域計画（コンパクトシティ、インフラ管理含む）
- 3.4.1.3　モビリティとその管理
- 3.4.1.4　安全な水の供給（水道と安全性確保）
- 3.4.1.5　水環境管理（下水道、浄化槽、湖沼、水辺創造など）
- 3.4.1.6　人間居住による環境負荷（GHG排出、水、大気への排出、緑地の喪失）
- 3.4.1.7　都市環境と健康影響（大気、化学物質、緑地、熱環境等）
- 3.4.1.8　開発途上国の人間居住と適正技術

3.4.2　生態系サービスの適正管理
- 3.4.2.1　生物多様性の保全と持続的利用
- 3.4.2.2　陸域資源と生態系管理（含む陸水）
- 3.4.2.3　沿岸域および海洋の資源と生態系管理
- 3.4.2.4　流域レベルの生態系管理（森林から海まで）
- 3.4.2.5　生物多様性及び生態系サービスの評価
- 3.4.2.6　生態系サービスの管理システム・制度のための技術管理

3.4.3　持続可能な生産と消費
- 3.4.3.1　製造業におけるグリーン技術（ゼロエミッション、環境配慮設計、クリーナープロダクション）
- 3.4.3.2　サプライチェーンの環境マネジメント
- 3.4.3.3　LCAに基づく生産と消費管理
- 3.4.3.4　廃棄物の発生抑制

3.4.3.5　リサイクル技術（都市鉱山含む）
3.4.3.6　水の循環利用技術
3.4.3.7　有害物質のマネジメント（PRTR、RoHS含む）
3.4.3.8　元素の循環と利用（リン・窒素）
3.4.3.9　開発途上国による循環型技術（農村型小規模バイオガス化装置）

3.4.4　災害による環境への影響低減と環境の再創造
（図2.2.21では「定常時」「非定常時」として2階層で表現）
3.4.4.1　自然災害（地震、津波、台風、干ばつ、豪雨、豪雪、火山等）が地域環境へ及ぼすリスク
3.4.4.2　人為的災害（工場等での事故、危険物質運搬時の事故等）が環境へ及ぼすリスク
3.4.4.3　災害のリスク（人間への被害、環境への被害）の予防対策
3.4.4.4　災害発生直後の環境情報観測・把握手法とリスク軽減手法
3.4.4.5　災害廃棄物処理と利活用
3.4.4.6　自然環境の回復過程の促進
3.4.4.7　社会環境の再創造手法

3.4.5　観測・計測とその情報に基づく環境管理
3.4.5.1　地球規模の環境モニタリング（リモートセンシングと実測）
3.4.5.2　地域の環境と人間活動の把握（地域の環境計測、人間活動とその影響の把握）
3.4.5.3　環境情報基盤の整備と活用（ユビキタス情報、環境ビッグデータ、GIS）

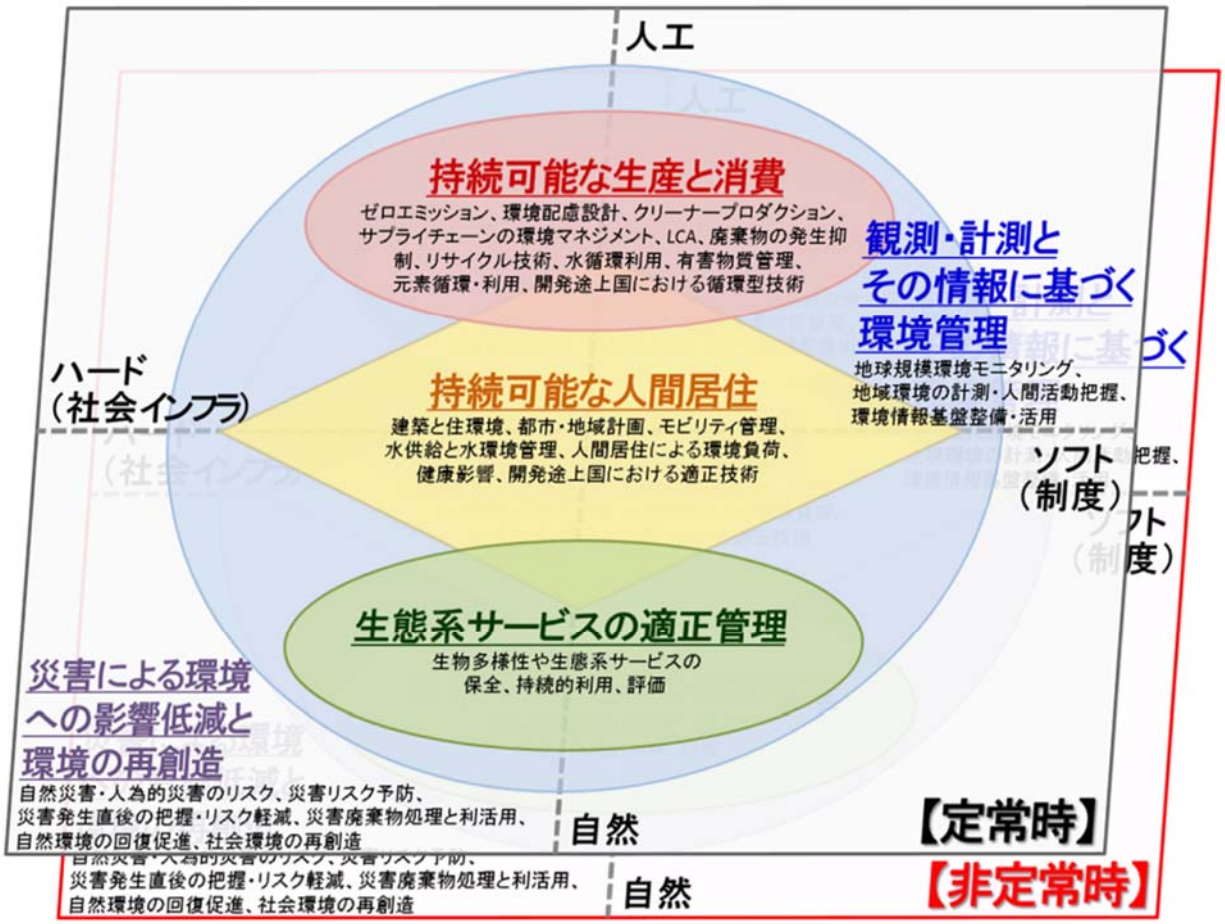



図 2.2.21　環境区分の俯瞰図（再掲）

## ３．４．１　持続可能な人間居住

### ３．４．１．１　建築と住環境（室内環境、建物の環境性能、建物周辺の環境）

#### （１）研究開発領域名

建築と住環境（室内環境、建物の環境性能、建物周辺の環境）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

人間が生活する環境を計測評価、制御、最適化、改善、保全する技術に関する研究開発領域である。社会状況の変化にともない、環境に求められる性能は変化していく。それに応える技術開発が求められる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本領域は、人々が生活する上で適正な環境を保持するための技術開発領域である。そのためには、環境を計測評価し、適切な環境に是正し、環境を制御していく技術が求められ、かつ、そのために必要なエネルギー消費の削減や廃棄物の削減が求められることになる。建物内環境[1, 2]について言えば、ホルムアルデヒドなどの化学物質[3]、カビや細菌などの微生物[4]、ダニやねずみなどの小動物、音・光・温熱[5]・臭気・電磁波などの物理環境、省エネ性能[6, 7]、バリアフリーなど多様な分野に及ぶ[8]。また、建物外環境について言えば、日常安全・災害安全などの安全性[9]、多様な健康影響要因による保健性[10]、各種サービスを利用できるための利便性、緑地・景観・文化面などを含めた快適性[11, 12]、環境・社会・経済の諸点からの持続可能性にかかわる広義の環境が含まれる[13]。

これら居住環境は、人が生活する上での基本条件を用意する上で重要な分野であるために、国内外と問わず、多くの研究開発が行われている。国際的には欧米および日本が研究をリードしており、中国、韓国、台湾、シンガポールなどでも研究が盛んである。近年では、特に中国が急激に伸びている。

室内化学物質分野では、個々の注目される物質の挙動や生体への影響度、対処策は解明・整備されてきたが、他物質との反応やそれによる二次的な汚染の問題は未解明な部分が多い。また、室内微生物分野においては、近年、抗菌処理や除菌処理を行う装置・器具なども増えてきたが、感染を防止する仕組みをより多様に組み入れていく技術開発が必要であろう。室内環境の制御は効率性から集中式をとることも多いが、個別にカスタマイズできることによる満足度の上昇効果が知られており、適切な方法論の開発も必要である。人によって環境に対する感覚はかなり異なり、また、若年層と高齢層の相違があることもよく知られている。個々に快適な環境を整備する技術開発は今後も続けられねばならない。近年の省エネ促進の社会状況の中で、活動効率も含めた居住環境の適正化こそが必要なはずであり、その技術開発も待たれるところである。

建物環境を総合的に評価する仕組みとして、日本では建築環境総合性能評価システム（CASBEE：Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency）[14]が開発されている。似た試行は、海外でもあり（LEED：Leadership in Energy and Environmental Design（米国）、BREEAM：Building Research Establishment Environmental Assessment Method（イギリス）、GBTool：Green Building Tool（カナダ））、それぞれの地域性に根ざしたシステムとして発展してきている[15]。このよう

な評価による建物の格付けなども進みつつあり、建物の環境性能をいかに社会に位置づけ、適切な環境配慮を促進するかが問われている。

建築外環境である住環境においては、安全性を担保するための災害リスク対処の技術は、災害発生予測の難しさ、社会のリスク認知への理解不足（リスク軽視・過剰反応の両方を含む）、対応方法の難しさも相まって十分に進んでいない。災害に加えて、犯罪に対する安全性も社会の注目をあびている。さまざまなセンサ機器の設置や情報分析の技術や社会基盤が整備されてはいるものの、犯罪は後を絶たない。重篤な犯罪をいかに未然に防ぐかは大きな技術開発課題である。

日本では人口減少社会に入り、利便施設が需要に伴って拡充されるような時代ではなくなった。そのため、今後は利便施設の縮小撤退が現実のものとなっていく。そのため、生活利便性をいかに保持するか、換言すれば同じ機能をいかに効率的に確保できるかが重要となる。公共サービスのあり方も含め、このような縮小社会におけるサービス技術開発は喫緊の課題である。同様なことが、快適性についてもいえるだろう。どのような場所でも快適性が得られるような空間開発を進めることが難しくなる可能性がある。その場合に、負担を最小化した局所的な快適性の維持保全が必要な技術となる。

住環境の中でも、持続可能性は今後に向けて大きな課題である。これは自然科学的な技術だけではなく、社会技術も含めた総合的な対応が必要となる。マネジメントシステムも含めた技術開発が重要になっていく。現在、例えば、国際標準化機構においても、スマートシティのマネジメントシステムについて、ISOが検討されている。適切なマネジメントは、技術開発だけでなく、国際標準化、デファクト化なども含め、戦略的な展開をも必要としている。住環境分野は自然科学と社会科学の融合的な技術開発が必要であり、学際的な研究開発体制の構築・支援も重要となっている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

この分野における研究開発は、狭い分野内で推進していくフェーズというよりも、すでに、社会制度や他分野との連携でいかに定着・具現化を進めるかというフェーズに来ている。もちろん、室内環境やエネルギー効率を高める個々の尖った技術開発は今後も続けられるであろうが、今後のブレークスルーはむしろ、分野間連携にあると思われる。例えば、福祉・医療とも連動した室内環境制御技術、モニタリングと連動した各種マネジメント技術、制度やルールを設計するメカニズムデザインと連動した制御技術などが考えられる。

残念ながら、現行のさまざまなルールは、主としてその分野のみを対象に構築されてきたものが多く、新たな技術やビジネスモデルとして連携していくためには、社会制度変革も合わせて行っていく必要がある。

環境マネジメントについては、世界標準化の動きがみられるが、居住環境に関する多くの分野がヨーロッパ主導である。ただし、近年、特に中国の進出がめざましく、日本としてもそのような活動にも力を入れていく必要がある。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

室内空気質関連では、科学的知見を集約する試みがある[16)]。EUの試みについては、

Jantunen, et al.（2011）[17] にまとめられている。そこでは、より詳細な健康影響の解明、暴露パターンの解明、原因物質解明方法の開発、換気とエネルギー、最適空気質コントロール手法の開発などの重要性が強調されている。世界保健機関（WHO）では学校における空気質の問題について検討し、レポートが出されている [18]。

エネルギー関連では、日欧米でゼロエネルギー住宅のための研究が盛んに行われているだけでなく、すでに制度的な整備も始められている。米国ではエネルギー省のBuilding America Programがそのためのファンディングを行っている。日本でも、研究成果や社会普及の状況に呼応して、エネルギーの使用の合理化等に関する法律（省エネ法）が改正され、建物の省エネ性能に関する規制が進化してきている。中国、韓国でも近年の研究開発や実用化に向けた開発の動きはめざましい。

住環境関連では、強靱で持続可能なインフラに関する米国国立科学財団（NSF）研究費のプログラムが進められている [19]。

### （６）キーワード

環境評価、最適制御、保全技術、空気質、温熱環境、音環境、省エネ性能、ゼロエネルギー住宅、高齢化対応、防災性、防犯性、利便性、快適性、持続可能性、強靱性

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・大学のほか、国の研究機関としては、国立環境研究所が環境研究を先導している。住環境分野は、都市・建築関連の研究機関が基礎研究を推進している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・CASBEEを開発し、実務的な環境評価の面では先端的なシステムの一つとなっている。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・環境技術は世界をリードしているが、米国・ヨーロッパよりは市場シェアが小さい。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・室内空気質関連で、科学的知見を集約する試みがある [6]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・LEEDで建物の環境性能評価の仕組みを開発し、先端的なシステムの一つとなっている。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・環境技術は世界をリードしており、市場シェアは１国でヨーロッパに匹敵する。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・EU全体および各国の研究費配分機関が研究プロジェクトを推進しており、先進的な研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・イギリスではBREEAMで建物の環境性能評価の仕組みを開発し、先端的なシステムの一つとなっている。<br>・WHOでは学校における空気質の問題について検討し、レポートが出されている [18]。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・環境技術は世界をリードしており、環境政策を経済政策と連携させて推進している。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・近年、活発に国際会議を企画し、開催している。<br>・中国科学院（CAS）の都市環境研究所（IUE）が都市環境研究を先導している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・近年、活発に国際会議を企画し、開催している。<br>・欧米とともにゼロエネルギー住宅の開発の国際プロジェクトに参加している。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・主要国に比べると産業化は遅れている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・国立環境研究院（NIER）は環境分野の研究を先導している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・欧米とともにゼロエネルギー住宅の開発の国際プロジェクトに参加している。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・2009年に大統領直轄のグリーン成長委員会を組織し、グリーン国家戦略でグリーン産業の成長を目指している。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Evans, G.W. (2003) “The built environment and mental health” *Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine*, **80**(4), 536-555.
2) Rashid, M., C. Zimring (2008) “A review of the empirical literature on the relationships between indoor environment and stress in health care and office settings: Problems and prospects of sharing evidence” *Environment and Behavior*, **40**(2), 151-190.
3) Salthammer, T., S. Mentese, R. Marutzky (2010) “Formaldehyde in the indoor environment” *Chemical Reviews*, **110**, 2536-2572.
4) Pasanen, A.-L. (2001) “A review: Fungal exposure assessment in indoor environments” *Indoor Air*, **11**, 87-98.
5) Yu, B.F., Z.B. Hu, M. Liu, H.L. Yang, Q.X. Kong, Y.H. Liu (2009) “Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health” *International Journal of Refrigeration*, **32**, 3-20.
6) Dounis, A.I., C. Caraiscos (2009) “Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment: A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 1246-1261.
7) Swan, L.G., V.I. Ugursal (2009) “Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 1819-1835.
8) 室内環境学会（編）(2010)『室内環境学概論』東京電機大学出版局
9) Carver, A.C., A. Timperio, D. Crawford (2008) “Playing it safe: The influence of neighborhood safety on children’s physical activity: A Review” *Health & Place*, **14**, 217-227.
10) Moudon, A.V. (2009) “Real noise from the urban environment: How ambient community noise affects health and what can be done about it” *American Journal of Preventive Medicine*, **37**(2), 167-171.
11) Matsuoka, R.H., R. Kaplan (2008) “People needs in the urban landscape: Analysis of *Landscape and Urban Planning* contributions” *Landscape and Urban Planning*, **84**, 7-19.
12) Bowler, D., L. Buyung-Ali, T.M. Knight, A.S. Pullin (2010) “Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence” *Landscape and Urban Planning*, **97**, 147-155.
13) 浅見泰司（編）(2001)『住環境：評価方法と理論』東京大学出版会
14) CASBEE（建築環境総合性能評価システム） http://www.ibec.or.jp/CASBEE/
15) Kajiwara, Y., T. Inoue, T.N. Goh (2011) “Analysis of building environment assessment frameworks and their implications for sustainability indicators” *Sustainability Science*, **6**, 233-246.
16) Indoor air quality scientific findings resource bank http://www.iaqscience.lbl.gov/
17) Jantunen M., Oliveira Fernandes E., Carrer P., Kephalopoulos S. (2011) *Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ)*, European Commission Directorate General for Health and Consumers. Luxembourg.

18) WHO, Regional Office for Europe (2011) “Methods for monitoring indoor air quality in schools” Reprot of a meeting, Bonn, Germany, 4-5 April 2011, WHO, Regional Office for Europe.
19) NSF, Resilient and Sustainable Infrastructures
http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=13545&org=NSF

### ３．４．１．２　都市・地域計画（コンパクトシティ、インフラ管理含む）

#### （１）研究開発領域名

都市・地域計画（コンパクトシティ、インフラ管理含む）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

人間の居住と自然環境を持続可能にしつつ、温室効果ガス（GHG：Greenhouse Gas）を始めとする環境負荷を減らすことができ、インフラ管理という意味でも効率的な都市・地域計画の分野からのアプローチとして、すでに各国で認知されているコンパクトシティの動向とその実現のための政策的課題に関する研究開発領域である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

人間の居住を持続可能なものとし、その一方で、緑地保全に配慮しつつ、エネルギー利用を効率化し、気候変動（地球温暖化）の主な原因となるGHGを削減するためには、人の居住や人、モノの移動の基盤となる都市・地域の空間形態自体から見直し、環境に配慮することも重要である。

建物や緑地の配置を変えて土地を効率的に利用しながら自然環境を守り、買い物や病院、職場などの土地利用の用途を混合させて歩きやすい範囲で生活が充足する集約拠点を形成し、それらをつなぐ移動をGHG排出の少ない公共交通で結ぶコンパクトシティ（集約型都市構造）という考え方が注目されている。これまでは、人口増加とモータリゼーションの進展によって次々に郊外が開発され、都市の拡大が進んできたが、現在は人口減少と少子高齢化の時代に入っており、このまま何もしなければ、将来は都市の至る所で空き地や空き家が増加することが懸念される。ますます公共交通も採算がとれず運営できなくなるなど、悪循環に陥ってしまう可能性もあり、特に高齢者で車が運転できない人は移動も困難になってしまう。コンパクトシティは、このような交通の面だけでなく、都市域をコンパクトにすることによるインフラ整備・維持管理の効率化と、それによる費用縮小という効果も期待されている。

コンパクトシティという言葉が初めて出現したのは1970年代とされる[1)]。その当時発表されたDantzig and Saaty（1974）の研究[2)]では、その定義が空間次元に加え時間次元も含めて都市空間を有効活用することとされた。その後、コンパクトシティに関する議論は一度断絶するものの、自然環境・生態系ベースで人間のテリトリーのコンパクト化を考える自然保護の立場、コミュニティ・ヒューマンベースで人間の住まい方としてのコンパクト化を考える建築・居住環境の立場、そして都市計画の立場の各分野で徐々にそのニーズが高まっていった[3)]。さらに、現在のようなサステイナビリティや交通環境といった観点でコンパクトシティが議論されるようになったのは、1990年代以降である[4)]。欧米におけるコンパクトシティ論争について、カスバート（Cuthbert, 2006）によると、コンパクトシティの中心的な概念である密度について、果てしない論争が行われてきたが、明らかなことは二つあるという。一つは、自動車に依存した都市形態を志向する都市計画はもはやあり得ないこと、二つ目はこのプロセスを実現するためにも公共部門の地位・役割を確立・回復すべきだということである[5)]。我が国でも、引き続き今日まで「コンパクト性」や「コンパクトシティの定義」を巡って、空間モデルなどの

数量的あるいは文化的な視点での議論、実際の都市空間のコンパクト性の解析やタイプ分けなどの探求がなされている。コンパクトシティがもたらすと考えられるアウトプット、アウトカムの効果は、経済、交通、環境、社会分野でさまざまな指標を設定して、数量的解析的な調査研究が進められている[6]。例えば、近年では、GHGの削減だけでなく、人々の生活の質（QOL：Quality of Life）の変化や、行政の財政負担の効率化、エネルギー分野からの低炭素化との関連など、さまざまな視点から、低炭素型都市やコンパクトシティの効果あるいは考慮すべき観点を示す研究が行われてきた。また、コンパクトシティを進める上での問題点、実現方策など、実際の政策に生かすための実務的な視点からの研究も進みつつある。

政策面では、2000年頃から青森市を始めとして自治体レベルでのコンパクトシティ推進が早くから表明されてきた。国レベルでは2006年の国土交通省社会資本整備審議会「新しい時代の都市計画はいかにあるべきか。（第一次答申）」で初めて集約型都市構造を目指すべきとの答申が具体的に示された。その後、2006年のまちづくり三法改正、2010年の「低炭素都市づくりガイドライン」策定・公表、2012年の都市の低炭素化の促進に関する法律制定・施行などを経て、2014年に都市再生特別措置法等の一部を改正する法律が施行され、具体的に都市機能誘導区域、居住誘導区域等を定める改正都市再生特別措置法に基づく立地適正化計画制度が設けられた。

海外でもコンパクトシティが推進されており、2010年にOECDが加盟国34カ国を対象に行った調査によると、少なくとも26カ国でコンパクトシティ政策あるいはそれに相当するアプローチが政策文書として示され、多くの国でそれを実施する手段（規制面、財政面問わず）も整えていることがわかっている[7]。我が国を含め先進国、開発途上国を問わず、「コンパクトシティ」という言葉を使うかは別にして、都市のスプロールを抑制して、一定の密度の居住地形成と複合機能用途の適切な配置の土地利用により、コンパクトな構造をもった都市を目指す政策、計画、プロジェクトを進めることは、共通した認識になっているといえよう[6]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

実は、「コンパクトシティとは何ですか？」というシンプルな問いに答えることはいまだ容易ではない[8]。それは、前述のようにさまざまな分野でそのニーズが高まってきたこと、そのため、立場により空間密度、集積性・連続性、混合土地利用、人口・住宅配置、都市施設配置、交通、近接性などの多様な視点から定義されること、その期待される効果も自動車依存低減、公共交通維持、健康増進、エネルギー消費・GHG削減、自然的土地利用の保全、中心市街地活性化、インフラ整備・維持管理コスト削減など、広範に及ぶことが一つの要因であろう。一方で、研究面では定義や是非に関する論争から、実現に向けた議論の段階に移っている。かつて、1990年代のコンパクトシティ論争で、批判的な立場での代表的な論者であったブレヘニ教授が所属していた英国レディング大学のホームページ[9]でも、かつての論争の的となっていたコンパクトシティ政策への疑問というよりも、経済、社会、環境にできるだけマイナスの影響を及ぼさずに、確実にコンパクトシティを実現する政策・計画のあり方、都市のコンパクト化や市街地の封じ込め・集約化を具体的に計画、デザインする方法、都市のコンパクト化の効果を高める

手法、といった論点が示されている[6]。

政策面でも、都市形成の歴史、社会的・政策的背景は国によって異なり、コンパクトシティに関する世界共通の政策パッケージが存在しているわけではない。例えば、「Smart Growth」、「New Urbanism / Neo Traditionalism」、「Transit-Oriented Development （TOD）」、「Eco City」、「Urban Village」、「Edge / Edgeless Cities」、「Urban Renaissance / Regeneration」、「Mega-Region」などのコンパクトシティに類似・相反する計画概念をさまざまな標語を用いて抽象化することが、コンパクトシティの国際的な共通理解をより難しいものにしているといえよう[10]。現在行われている世界のコンパクトシティに関する取り組みは、文献7)に詳しい。そこでは、コンパクトシティ政策の成果に対する懸念の多くは、コンパクトシティの概念の誤解に基づくものであり、都市設計の仕方を工夫しコンパクトシティ政策を適切に策定すれば対処することができると述べている。その上で、ビジョンの明確化、大都市圏内の各政府レベルにおける垂直的一貫性、企画立案・実施への継続的な市民参加、官民連携などによるインフラ整備を含む実施戦略のための投資資金調達、透明性、モニタリング、説明責任、報告の重要性を指摘している。

特に我が国においては、政府の進める政策のうち、都合のよりよい、実施可能なプロジェクトだけを導入して事足れり、となりがちである[6]。国土交通省モデルでは市街地境界は曖昧であり[6]、コンパクトな都市を目指しているにも関わらず、中心部の居住者を減らし、郊外化を促進する制度・政策が併存している[11]自治体が多く、法律上もまだ市街化調整区域での開発が可能である。コンパクトシティは「目的」ではなく、中心市街地活性化、環境負荷低減、行政コスト縮減、生活の質の向上など、おのおのの自治体が抱える課題を解決するための「手段」であり、その意味でも長期的な視点が重要であることを忘れてはならない。また、中山間地域は都市政策の範疇とは別の視点でとらえる必要があり、コンパクトシティで注目するのは都市の中の都心・駅周辺と郊外であることにも注意が必要である。

人口流入・増加が続くことを前提に形成される海外のコンパクトシティと比較すると、（自国内だけの）大きな人口減少・超高齢化社会ありきで語られる日本の集約型都市構造の形成もしくは賢い縮退（スマートシュリンク）の考え方は、世界的にかなり特殊な挑戦であることがわかる。「賢い縮退」の考え方を政府レベルで大規模に検討・実践している海外事例を見つけるのは難しい。そうした都市管理モデルは、まだ確立されていないともいえる[10]。将来縮退する市街地を具体的に想定したコンパクトシティ像まで議論が進むと、途端に議論百出しまとまらないというのが現状である。即地的な是非のみならず、実現に至るいわばビジネスモデルがいまだ想定できていないことが大きな要因[12]と指摘されている。また、人口減少過程では、中途半端な中心市街地への集約化、誘導政策を進めると、かえって都市のマネジメント費用を増大しかねない。ここには、プロセスの問題、居住地選択の問題などさまざまな問題を内包している。人口減少を前提とした都市空間の再編の可能性、手法などの提案、調査研究は課題の深刻さに比べて、まだ始まったばかりといえよう。世界最先端の研究課題でもある。まず、都市、地域空間の変動実態の解析、課題の解明、将来予測を進める必要がある[6]。さらに、コンパクトシティを進めた際の行政コストの観点からは研究が行われてきており、国土交通省で

も行政コストを含むさまざまな評価指標が示されている[13]。しかし、都市化した地域からの「撤退費用」の点については、ほとんど語られていない。ライフサイクルを終えた町の建築物やインフラを、そのまま打ち捨てておくわけにはいかない。地方財政の構造面ばかりではなく、都市・地域ランドスケープ・美観形成の観点からも、縮退の社会的価値を考える必要がある[10]。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- 最近の再生可能エネルギーへの関心の高まりやスマートグリッド導入を考えると、既存の都市の構造の中で再生可能エネルギーをどう配置していくかという点で、コンパクトシティ政策とエネルギーとの関連はまだ研究の余地がある。
- コンパクトシティはヒートアイランド現象を悪化させかねない[7]という指摘もある。撤退した郊外を適切に緑化すれば気温上昇を抑えられるという研究結果もあり[14]、都市の中の緑地配置を気象影響も考慮して設計していく必要がある。そのためには都市・地域計画の研究分野だけでなく領域気候モデルの研究分野との連携が必要である。また、ヒートアイランド現象は前述のエネルギー需要にも影響を及ぼしかねない。
- 地球全体の気候変動との関連では、コンパクトシティは主に自動車依存低減によるGHG削減という気候変動に対する緩和策という面で着目されてきた。近年は気候変動により風水害が増加してきており、そのリスクが高い地区を避けて集約させるという点では、気候変動への適応策にもなりうる。緩和策と適応策を考慮した土地利用という意味でのコンパクトシティに関する研究[15, 16]はまだ始まったばかりである。一方で実務レベルではカナダで先進事例がある[17, 18]が、評価や検証に関する研究が必要である。
- 我が国では、東日本大震災以降、包括的な都市リスク管理の概念として「レジリエントシティ（Resilient City）」という標語も頻繁に使われるようになってきたが、海外の文献から、コンパクトシティの形成と防災の考え方の関係性を読み取るのは難しい[10]。前述の気候変動適応策だけでなく防災分野全般という意味では、このような概念からのアプローチも重要である。我が国でも研究プロジェクト[19]が進行しつつあり、世界をリードすることが期待される。
- 経済成長の見込まれる開発途上国においては、自然を守りながら経済成長を促進するグリーン成長が重要であり、OECDでその一つの戦略としてコンパクトシティが位置づけられている[7]。また、特に交通分野の低炭素化の戦略として、不必要な交通需要の抑制（AVOID）、低炭素交通モードへの利用転換（SHIFT）、交通エネルギー消費効率の改善(IMPROVE)の各戦略によるアプローチが提案されており[20, 21]、コンパクトシティはAVOID戦略の一つとして位置づけられ、例えば、アジア地域で研究プロジェクト[22]が行われた。また、国際的な取り組みとして、クリーン開発メカニズム（CDM：Clean Development Mechanism）に代わり開発途上国による適切な緩和行動（NAMA：Nationally Appropriate Mitigation Action）では、低炭素化に伴うコベネフィットを重視して各開発途上国が必要としている政策を提示する仕組み作りが進められており、先進国は財政、技術そして人材育成の分野でNAMA

への支援を行う。

## （６）キーワード

コンパクトシティ、集約型都市構造、都市・地域計画、人口減少社会、超高齢化社会、インフラ整備・維持管理コスト削減、スマートシュリンク

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・サステイナブルシティやコンパクトシティ論を中心にその概念や論争などを検討した理論的な研究は、サステイナブルシティやコンパクトシティの考え方が出現した1990年代に多数みられ、その代表的なものとして林の研究 [23] があげられる。<br>・日本で特にコンパクトシティという言葉が大きく取り上げられるようになってきた2001年から2002年にかけて、関連の学会誌や論文集に特集として取り上げられたり [24-26]、学会でセッションが組まれたりするなど、コンパクトシティ導入の是非とその効果および留意すべき点について論争が繰り広げられた。<br>・2001年にはコンパクトシティの取り組み状況と課題についてまとめた書籍 [4] が、2007年にはその続編として日本型コンパクトシティのあり方を提起した書籍 [5] がまとめられている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・近年も、さまざまな学会で再考すべき概念として特集 [27-32] が組まれている。<br>・東京都市圏における私鉄沿線の高密度な土地利用は、コンパクトシティを意図していないが、結果的に公共交通志向型開発（TOD：Transit-Oriented Development）となっている。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・国土交通省東北地方整備局や中国地方整備局、そして自治体レベルでは青森市などの東北の都市を中心としてさまざまな行政主体がコンパクトシティ整備を推進する立場を明らかにした。<br>・その後、ようやく中央省庁レベルで導入が検討され始め、2001年には都心居住の推進という形で国土交通省でもコンパクトシティの推進が示された [33]。<br>・富山市ではLRT（Light Rail Transit）を軸として居住地を誘導する政策を進めている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・米国ではスプロールによる郊外への分散と都心の衰退が深刻化しており、直接的にはコンパクトシティを意図していないが、地域・都市圏レベルでの都市成長管理政策であるスマートグロースにコンパクトシティの概念が含まれている。<br>・地区レベルの計画としては、TODの考え方が取り入れられてきた。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・農地保護の課題に直面していたポートランドでは、1970年代から州法により総合土地利用計画調整法を制定し、広域都市圏を構成する全市に都市成長境界の採用を義務付けた。1994年には望ましい50年後の地域将来像を検討するためにPeter Calthorpeの協力で4つのシナリオを提示して住民の意見を求め、都市成長境界線の拡大を最小限に抑えた2040成長構想を作成した。ポートランドは現在も好事例として注目されている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・地域イノベーションクラスター・プログラムや持続可能な地域社会のためのパートナーシップ、地域再活性化イニシアチブなどの国レベルの政策が策定され、現在ではアーリントンやシカゴなどの多くの都市でコンパクトシティに相当する施策が進められている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・1990年、欧州委員会の「都市環境に関する緑書」により、サステイナブルシティが欧米の都市・地域計画の基本的なキーワードの一つとなったことに始まり、1998年に「EUにおける都市アジェンダに向けての意見書」が提出され、この中でサステイナブルな都市像としてコンパクトシティが推奨され、EUのコンパクトシティ推進の立場が明確にされた。<br>・英国のMike Jenks教授によるコンパクトシティ3部作 [34-36] に代表されるように、英国を始めとする欧州がこの分野をリードしてきた。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・英国やノルウェーではサステイナビリティの理念に対応して自動車依存型の都市をつくらないための方向性を示したガイダンスが示された。また、すでに廃止されてはいるもののオランダではABCポリシーのように直接的に土地利用の高度化、コンパクト化を目指す試みもなされた。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・ドイツ、デンマーク、スウェーデン、フランス、スイスなど、多くの国でコンパクトシティの考え方が政策に取り入れられている。<br>・グリーンベルトの考え方をベースにスプロールを抑制し自然や農業を重視する政策や、高密度住宅地開発、都心での自動車流入抑制と歩行者・自転車空間を重視する政策、ブラウンフィールドの再開発、自動車に依存しない居住地開発など、国によりさまざまな政策が取り入れられている。 |
| 中国 | 基礎研究 | × | → | ・中国ではコンパクトシティは「紧凑城市」と訳され、欧州で始まり米国などで発展した理論として文献でも紹介されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・中国における都市化は急激に進行しており、各都市のコンパクト度や経済的持続可能性に関する研究が行われている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・深セン市の光明新区やその他の都市の新都心でコンパクトシティの考え方が取り入れられているとされる。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・韓国でもコンパクトシティは欧州で始まった理論として紹介されている。<br>・1970年代からソウルを始めとする都市で、過剰な都市膨張と空地の消失を阻止するため、グリーンベルト政策が取り入れられてきたが、それがかえって都市内での住宅供給不足の原因になっており、近年になって境界の見直しが行われている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・コンパクトシティの概念は議論の段階ではあるが、政府は政策イニシアチブを打ち立てている。2011年に改訂された国土総合開発計画における都市戦略の中でコンパクトシティが明記されている。<br>・2010年の新都市計画基準では新都市における持続可能なグリーン成長を目指す都市、2009年の低炭素のグリーンシティのための都市計画ガイドラインでは、エネルギー効率のよい省エネ空間構造を達成するために交通政策を組み込んでアクセス性を向上させ、都市構造計画を再編成することとしている。<br>・2012年には国土海洋部（MLTM）がOECDと共同で都市再生とコンパクトシティに関する国際会議を開催し、2013年からOECDと共同で韓国の都市へのコンパクトシティ政策の適用のための研究を行う計画であることを示した。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・ソンド新都市では都市機能を複合させ高度に集中させつつ、各種施設が全住民に近く移動がスムーズな効率的な都市を目指している。<br>・ソウルでも長期賃貸住宅を供給するSHIFT住宅プロジェクトが開始されている。<br>・韓国の実情に合わせた政策パッケージは十分に整備されておらず、今後の動向が注目される。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 谷口守: 用語と解説「コンパクトシティ」, 交通工学, 37(2), pp.27-28, 2002.
2) Dantzig, G. B. and Saaty T. L. (監訳/森口繁一・訳/奥平耕造・野口 悠紀雄): コンパクトシティ -豊かな生活空間 四次元都市の青写真-, 日科技連出版社, 1974.
3) 中道久美子: 博士論文コンパクトシティ整備を通じた交通環境負荷低減策に関する総合的研究, 2009.
4) 海道清信: コンパクトシティ-持続可能な社会の都市像を求めて-, 学芸出版社, 2001.
5) 海道清信: コンパクトシティの計画とデザイン, 学芸出版社, 2007.
6) 海道清信: コンパクトシティ 第3回「コンパクトシティ その論点と課題」, 交通工学, 49(3), pp.56-61, 2014.
7) OECD: Compact City Policies -A Comparative Assessment-, OECD Publishing, 2013.
8) 谷口守・肥後洋平：コンパクトシティを再考する-最近の動向をふまえて-, 特集 コンパクトシティの現在, 土地総合研究, 春号, 土地住宅総合調査会, 2013.
9) PeBBu initiative: Domain 4- Performance Based Built Environment, Compact City, http://www.reading.ac.uk/PeBBu/state_of_art/urban_approaches/compact_city/compact_city.htm
10) 村上迅: コンパクトシティ 第2回「コンパクトシティに関する海外での考え方と取り組み」, 交通工学49(2), pp.81-88, 2014.
11) 唐渡広志: 都市のコンパク化は正当化できるか？：郊外化と市場の失敗, 特集 コンパクトシティ, 日本不動産学会誌, 24(1), pp.23-28, 2010.
12) 中村英夫: コンパクトシティ 第2回「コンパクトシティ形成に向けた国の取り組み」, 交通工学, 49(1), pp.91-96, 2014.
13) 国土交通省都市局都市計画課: 都市構造の評価に関するハンドブック, http://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi_tosiko_tk_000004.html
14) Adachi, S. A., Kimura, F., Kusaka, H., Duda, M., Yamagata, T., Seya, S., Nakamichi, K. and Aoyagi, T.: Moderation of summertime heat-island phenomena via modification of the urban form in the Tokyo metropolitan area, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(8), 2014.
15) Williams, K, Joynt, J. and Hopkins, D.: Adapting to climate change in the compact city: The suburban challenge, Built Enviromnemt, 36(1), pp.105-115, 2010.
16) 中道久美子, 山形与志樹, 瀬谷創: 東京都市圏の気候変動緩和・適応策の相互作用に関する土地利用シナリオの$CO_2$排出量評価, 土木学会論文集D3, Vol.69, No.5, pp.I_381-389, 2013.
17) Richardson, G. R. A. and Otero, J.: Land use planning tools for local adaptation to climate change. Government of Canada, 2012, http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/files/landuse-e.pdf
18) Smart Growth BC, British Colombia, http://66.51.172.116/

19) 環境情報技術を用いたレジリエントな国土のデザイン(研究代表者: 名古屋大学 林良嗣), 大学発グリーンイノベーション創出事業 グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス事業 環境情報分野,
http://www.sustrac.env.nagoya-u.ac.jp/grene/about.html
20) Dalkman, H. and Brannigan, C.: Transport and Climate Change; Sustainable Transport, A Sourcebook for Policy-makers in Developing Cities, GTZ, 2007.
21) 中村英夫・林良嗣・宮本和明（編著）: 都市交通と環境－課題と政策, 運輸政策機構, 2004.
22) S-6-5アジアにおける低炭素都市・交通システム実現方策に関する研究(研究代表者: 名古屋大学 林良嗣), 環境省 環境研究総合推進費S-6,
http://2050.nies.go.jp/s6/theme/s_6_5_j.html
23) 林良嗣: 環境負荷削減のための都市の土地利用・交通政策, 環境研究, No.86, pp.66-73, 1992.
24) 日本不動産学会: 特集・都市のコンパクト化を考える, 日本不動産学会誌, Vol.15(3), 2001.
25) 交通工学研究会: 特集コンパクトな市街地と都市交通, 交通工学, Vol.37, 増刊号, 2002.
26) 日本都市計画学会: 特集：人口減少化の居住と地域づくり. 都市計画. No.240. 2002.
27) 日本都市計画学会: 特集：密度論再考. 都市計画. No.255. 2005.
28) 日本不動産学会: 特集コンパクトシティ, 日本不動産学会誌, No.92, 2010.
29) クッド研究所, 学芸出版社企画: 特集2 その後のコンパクトシティ, 季刊まちづくり, No.36, 2012.
30) 日本都市計画学会: 特集：縮小社会における都市再編の手法～コンパクトシティは実現可能か？. 都市計画. No.303. 2013.
31) 計画行政学会: スマートシュリンクとこれからの都市政策, 計画行政, Vol.36, No.4, 2013.
32) 日本地域開発センター: 特集 見えてきた!? 縮退時代のまちづくり, 地域開発, No,594, 2014.
33) 国土交通省社会資本整備審議会: 新しい時代に対応した都市計画はいかにあるべきか。（第一次答申）,
http://www.mlit.go.jp/singikai/infra/toushin/images/04/021.pdf, 2006.
34) Jenks, M, Burton, E. and Williams, K.: The Compact City: A Sustainable Urban Form? E&FN Spon, 1996.
35) Williams, K., Burton, E. and Jenks, M.: Achieving Sustainable Urban Form, E&FN Spon, 2000.
36) Jenks, M. and Burgess, R.: Compact Cities: Sustainable Urban Forms for Developing Countries, E&FN Spon, 2000.

### ３.４.１.３　モビリティとその管理

#### （１）研究開発領域名

モビリティとその管理

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

人や物資のモビリティ（移動性）を支える交通・運輸部門は大量のエネルギー消費とインフラによって支えられており、大気汚染や騒音・振動の主因となっているとともに、温室効果ガス排出量も人間活動の約4分の1を占める。また、そのサービス利便性は国や地域の経済的・社会的持続可能性に影響を与える決定的要因の一つでもある。交通は交通主体（人や物資）・交通具（自動車や鉄道車両など）・交通路（道路や鉄道線路など）の3要素から構成され、それぞれについての研究の蓄積は膨大である。一方で、それら全体のシステムを検討する研究は必ずしも多くない。持続可能な社会を支える交通をつくり出すためには、システム全体を包括的に扱うフレームが必要である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1. 交通を対象とした研究の従来動向

交通に関する研究を3要素それぞれから見た場合、交通主体に対しては主に経済学や地理学、心理学といった分野から、交通行動や交通網、交通活動が社会経済に与える影響といったさまざまな事象の調査分析が行われている。交通具については、自動車工学や鉄道工学といった、交通機関・手段ごとに発達した車両製造・維持管理を扱う工学分野があり、それを機械工学や電気工学といった基礎工学が支えている。また、交通路については土木工学の領域である。このように交通に関する学問分野は極めて多岐にわたっている。

また、多数の交通路から構成される交通網の整備や維持管理は国・自治体の基本的な事業の一つであり、その整備計画策定にかかる調査分析や策定手法、実施方法、評価といった観点から研究が進められてきている。主なアプローチとして、オペレーションズ・リサーチのような数理計画的手法、実態の調査分析をベースとする土木計画的手法、経済理論を交通部門に応用して分析を行う経済学的手法があげられる。これらは、交通主体の行動状況と、交通網の整備状況との相互関係を扱うものであるが、交通具については所与のものとして扱われるのが一般的である。また、交通活動の大半は他の活動に付随して生じる派生需要であるため、経済や人間活動のメカニズムの中で論じられることも多い。また、鉄道や航空、海運といった運輸産業は交通網と交通具を合わせもって計画し経営することから、その具体的な方法論が主に経営学の分野から研究されてきた。

2. 交通部門の環境負荷・エネルギー消費に関する研究

交通活動はそのエネルギーを人力・畜力から化石燃料や電力に転換したことで、飛躍的なモビリティを提供できるようになったが、それと引き替えに環境負荷発生や化石燃料枯渇といった問題に寄与する運命となった。日本では1970年代後半から、自動車や鉄道による公害問題が深刻となり、その対策を検討すべく研究が集中的に行われた。モータリゼーション進展が日本より早かった欧米諸国ではより早く問題が生じたが、日本は

土地利用規制が緩く、幹線交通路のすぐ近くに密集市街地があるような地域が大都市を中心に多数あるため、被害がより深刻であった。同様の状況にあったのが米国カリフォルニア州である。対応として、厳しい大気汚染物質排出規制を車両に課すことが行われ、それをクリアするためのエンジンや排出装置といった部分の技術開発が大きく進んだ。その後、燃費向上や二酸化炭素排出削減が強い社会的要請となったが、現在でももっともその対応に大きく貢献しているのは車両革新であり、それを支えるのが車両に関する工学の進展である。自動車のシェアが高いために化石燃料への依存が極端に強いのが交通部門の特徴であったが、近年ではバイオエタノールの導入や、電気自動車・燃料電池自動車などの新エネルギー自動車も実用段階に入ってきている。

一方、自動車への依存を減らすという選択肢もある。モータリゼーションは環境・エネルギー問題のみならず、渋滞や都市拡散、交通事故といった負の効果をもたらすという観点から、大量輸送手段や徒歩・自転車による代替を図るというものである。ただし、これを実際に効果的に機能させるためには、これらの交通手段の利便性を自動車に対抗できるよう高めることが必要である。ヨーロッパでは鉄道・路面電車・バスという従来型交通機関を乗り越え、費用対効果や都市活性化へのインパクトの観点から洗練されたLRT（Light Rail Transit）[1,2] やBRT（Bus Rapid Transit）[3] という新しい交通機関が生まれ、開発途上国を含め世界に広がりつつある。このような交通路・交通具改善に関する研究が行われるとともに、社会心理学的手法を応用して交通主体の考え方を変容させるモビリティ・マネジメントの研究も近年進展している。さらに、交通需要発生状況を規定する都市・地域の構造も変えていく必要があるが、これに関連するコンパクトシティなどの動向は別項に譲る。

環境負荷発生・エネルギー消費量削減技術・施策の評価においては、その科学的な効果推計手法が必要であり、研究が進んでいる。国や都市レベルでの評価については方法論の整備や適用が進んでおり、政策目標のモニタリングにも用いられるようになりつつある。交通量・状況を推計した上でそれに環境負荷発生・エネルギー消費量原単位を乗じる構造が一般的である。交通計画・交通工学分野で開発が進められてきた交通需要予測モデルを応用するものと、産業連関分析や応用一般均衡分析といった経済学的手法を用いて、他の活動との代替・補完関係を考慮して交通活動量を推計するものとがある。前者は交通サービスレベル変化の詳細な検討に、後者はリバウンド効果など、交通活動の変化が他の活動に及ぼす影響を含めた検討に適している。

交通具や交通路の環境負荷・エネルギー面からの評価手法としてライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）の適用も行われている。例えば、自動車は多数の部品を組み立てて製作することから、各部品の原材料採取・輸送や製造工程における環境負荷発生やエネルギー・資源消費の把握も丹念に行うことが必要である。また、走行時の環境負荷削減を意図する設計はしばしば製造・組み立て時の環境負荷増加を伴うことから、その包括的評価にも適している。LCAの普及によってデータベースが充実し、交通具の環境負荷やエネルギー・資源に関するインベントリ（目録）整備も可能となってきた。この情報を広く開示したり、環境負荷削減策の検討に用いたりする例が増加してきている。また、交通路はその建設時、および主な資材である鋼やコンクリートの製造時に膨大な二酸化炭素排出とエネルギー消費を伴うことから、その推計評価手法

開発も行われており、特にLCAの適用は日本でいち早く研究が進んでいる。交通路の計画・設計は供用後の交通需要（交通主体の行動決定）や交通具の挙動に影響を与えることで環境負荷・エネルギーを長期的に大きく変化させることがあり、その把握も含めたLCA手法の開発も行われている [4]。

3. 近年における主要な課題

環境・エネルギーのみならず交通活動自体の社会経済的パフォーマンスを最適化することを意図した交通システムの変革への分野横断的取り組みが近年注目されている。その主な牽引力がICTである。交通においては、ICTを代替サービスと見る場合と補完サービスと見る場合がある。前者については、通信の発達でフェイストゥフェイスのコミュニケーションが不要となり交通需要が減少するという考え方と、むしろ交流が活発化し交通需要が増加するという考え方が存在するが、最近では日本で若年層の自動車保有が減少するなど、前者の傾向が現れつつある。ICT分野ではこれを環境負荷・エネルギー削減効果として扱う場合もある。一方、ITS（Intelligent Transport Systems）技術によって交通活動を最適化する取り組みは先進国で精力的に研究開発と実用が進んでいる [5]。その中で渋滞緩和やエコドライブ支援といったアプローチで環境負荷・エネルギーを削減する研究も行われている。日本ではETC（Electronic Toll Collection System）やVICS（Vehicle Information and Communication System）導入による削減効果がすでに検証されており、環境負荷を削減できる経路や交通機関選択を案内するナビゲーションシステム、環境負荷の小さい公共交通や自動車・二輪車シェアなどに誘導する情報提供も進められている。

さらに、ICT活用をさらに進め、交通需要の適切な削減と、交通整流化による利便性・安心安全性向上を総合的に進める構想も、都市スマート化の一つの具体的取り組みとして先進国を中心に急速に進んでいる。それらの特徴は、従来あまり行われてこなかった交通具に関する分野と交通路に関する分野との協働である。一つの大きな目標は自動車の自動運転であるが、これを実現するためには車両技術はもとより、道路整備や交通制御技術の見直し、道路・沿道状況のデータベース化も必要である。このような取り組みを通じて、交通で結ばれるリアルな空間と、ICTで結ばれるバーチャルな空間が渾然一体となっていくことが見込まれる。

### （4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

第一に、関連分野が多岐にわたっており、その間の障壁が高いことがあげられる。日本でも交通に関する学際的な学会は存在しておらず、既存学問分野から派生した学会が多数ある状態で、近年重要になっている交通システム全体を包括的にとらえ見直す取り組みに十分対応できない。特に交通路関連研究と交通具関連研究の間の交流が薄いため、新しい交通具の開発が交通路側の対応を経て実用化に至るまでの間の困難となっている。例えば、電気自動車や燃料電池自動車は充電・水素ステーションの整備が、新しい公共交通システムも軌道が整備されないと実用に至らない。ITSについては横断型でのITS世界会議が組織化されているが、学会というよりコンソーシアム的な存在である。また、交通政策は多数のステークホルダーが関わり、特に交通路関連研究は国・自治体や交通

事業者の関心が高いはずであるが、研究と実務の間に距離がある。対象地区を決めて関連分野が一堂に会し協働するプロジェクトベースでの研究が必要と考えられる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

交通分野の研究では基礎データを得るための実態把握や意識調査などに膨大な費用と時間を必要とすることが問題であったが、近年ではGPS・携帯情報端末やセンシング技術、ICカードの普及によって、大量のデータを容易に収集することができるようになった。これらのビッグデータを解析し活用する技術の進歩が求められている[6,7]。また、自動運転やスマートシティの実現に向けたさまざまなビッグプロジェクトが各国で進んでいる[8]。これらは環境負荷・エネルギー削減を目的の一つとしており、プロジェクト実施によって開発されるさまざまな周辺技術による効果も期待できる。

LRT・BRTを中心とした費用効率性の高い公共交通の普及は、欧米はもとより開発途上国で現在急速に広がっている。渋滞対策や都市開発が主な目的であるが、環境・エネルギー面での効果も期待され、特にアジア地域では膨大な効果が見込まれる。開発途上国による適切な緩和行動（NAMA：Nationally Appropriate Mitigation Action）の案件としても注目されており、そのプロジェクト提案や認証手続きにも資することが期待される[9]。

### （６）キーワード

ITS（Intelligent Transport Systems）、スマートシティ、自動運転、ICT、電気自動車・燃料電池自動車、LRT（Light Rail Transit）・BRT（Bus Rapid Transit）、ビッグデータ

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・車両技術、交通工学・計画手法とその環境・エネルギー分析への応用に関する研究は厚みがある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・各分野の厚みに比べ横展開が弱いのが問題。制度や財源の問題もあって実用になかなか至らない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・自動車関連については着実に進展しているが、新エネルギー導入についてはまだ実証段階。<br>・公共交通については散発的な取り組みにとどまり、他国から取り残されている。他国への輸出競争力もない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・自動車・道路系だけでなく公共交通の研究も近年増えてきているがまだ弱い。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・ITS・自動運転の分野で着実に進展。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・ICT関連分野が主導しスマート化の新しい流れをつくりビジネスを起こしている。ただし、有意な環境負荷削減効果を見せるまでには至っていない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・環境分野に関しては先進的。ソフト技術の検討も進んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・低環境負荷・省エネルギー型交通システムのソリューションを提示する実践的研究の場が多く、プロジェクトも多数行われている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・国・自治体の都市・交通政策として定着しており、新たな実践が次々に行われている。また、公共交通運営のノウハウをもつ国際企業も現れている。二酸化炭素排出大幅削減を達成する事例も多数。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・先進国の後追いの段階にある。新しい知見を生み出すレベルに至っていない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・膨大な交通需要やそれに伴う環境・エネルギー問題に対応する観点から、実務的な研究が多数実施。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・巨大な投資をバックに、先端的なプロジェクトが多数進む。ただし、環境・エネルギー面での検討はまだ十分な状況ではない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・交通システムに特化した研究機関があり、日本に比べて組織的。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・環境・エネルギー関係については他国に比べて進んでいるという状況ではない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・ソウルの都市圏交通システムや環境復元の取り組みは先進的として有名。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 青山吉隆：LRT導入の課題と展望、国際交通安全学会誌 Vol.34, No.2、pp.6-10
http://www.iatss.or.jp/common/pdf/publication/iatss-review/34-2-01.pdf
2) 松橋啓介、工藤祐揮：低炭素都市の実現に向けたLRTの役割、国際交通安全学会誌 Vol.34, No.2、pp.39-46
http://www.iatss.or.jp/common/pdf/publication/iatss-review/34-2-05.pdf
3) 国土交通省：BRTの導入促進等に関する検討会　資料（2013年10月）
http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk1_000011.html
4) 国土交通省国土技術政策総合研究所道路交通研究部道路環境研究室：社会資本のライフサイクルアセスメント（ポータルサイト）
http://www.nilim.go.jp/lab/dcg/lca/top.htm
5) 野崎敬策：中長期ITS推進の動向と展望: 環境(EST)ITSと防災・災害ITS、電子情報通信学会技術研究報告、ITS 111(219), 49-56, 2011
6) 国土交通省道路局道路交通管理課ITS推進室：ビッグデータを活用した道路行政の展開～IT技術によって道路ネットワークを賢く使う～、道路、Vol.877（2014年4月号）、pp.12-15
7) 馬渡真吾：道路交通分野のビッグデータ活用　米国におけるビッグデータへの取組～、道路、Vol.877（2014年4月号）、pp.28-31
8) 内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「自動走行システム」研究開発計画（2014年5月23日）
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf
9) 国際協力機構：気候変動対策支援ツール／緩和策　Ver. 2.0（2014年3月）
http://www.jica.go.jp/activities/issues/climate/mitigation_j.html

### ３．４．１．４　安全な水の供給（水道と安全性確保）

#### （１）研究開発領域名

安全な水の供給（水道と安全性確保）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

安全な水の供給は、健康な生活と健全な社会活動の維持に不可欠であるが、多方面で困難な課題に直面している。それらを包括的に解決し、安全な水供給を将来にわたり安定して継続するには、限りある資源と資産をいかに効率的かつ持続的に利用し、どのような方法論で的確に水の安全性を担保するかが鍵となる。水循環の中で水供給をとらえる系統的な研究と、水道の安全性を科学的かつ国民が理解しやすい形で管理する方法論の確立が求められる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

我が国の水道システムが抱える課題は、大きく以下に集約される。

1. 水量に関わる課題
   水資源の時間的･空間的な偏在、不安定化（豪雨・渇水の増加、降水・融雪パターンの変化）
2. 水質に関わる課題
   原水水質の低下、汚染物質の多様化、水の安全性やおいしさに対する要求水準の高まり
3. 危機管理に関わる課題
   大規模災害など非常時への備え、故障やヒューマンエラーへの備え
4. 経営に関わる課題
   施設維持更新費の増大、水需要量の減少に伴う事業収入減、技術者不足

水資源の偏在や不安定化をふまえて水利用の効率化が求められる中、第 4 期科学技術基本計画では、グリーンイノベーション推進のための重要課題の一つとして水循環システムの持続性強化を掲げている。また、水循環基本法が成立し、その効果的運用へ向けて実効的な法整備が待たれている。したがって、水道システムを水循環の一部として俯瞰的にとらえ、その文脈の中で水供給のあるべき姿を探求するための知識の集積、技術開発、体制作りが求められる。具体的には、水循環サイクルにおける重要管理点の抽出と重要度の順位付け、安全な水供給の観点からみた水循環スケールの最適化、水道事業と下水再生事業の連携（革新的水処理技術の共同開発、戦略的な用途振り分け、料金体系の相互調整、実務者の相互研修など）に関する研究と、その成果を社会実装に結びつける政策的枠組みの構築が望まれる。

我が国の水道水の安全性は、水道水質基準を満たすことで担保されている。基準値は項目ごとに固有の数値で規定され、事業者は試験時に全水質項目が基準値以下であることを根拠に水の安全性を担保している。一方、水質は時々刻々と変動するという認識の下、基準値に統計的概念を取り入れる国もある。例えば米国では、急速ろ過法のろ過水濁度について、4時間ごとの測定データの毎月の最大値が1 NTU（Nephelometric

Turbidity Unit）以下、かつ95%値が0.3 NTU以下を維持するよう規定している[1)]。水質が常に変動することは自明であり、日本でも同様の運用が水道水の安全性向上に寄与するか、国内の実測値に基づいて議論する必要がある。具体的には、過去の膨大な水質データを解析し水質の変動幅について統計的に調査する研究や、水質の常時監視を国内多地点で実施しデータを一元的に解析する大規模な研究協力体制の構築が望まれる。

水道を介した健康被害の多くは感染症であり、微生物の制御は今なお浄水処理の最重要課題である。水中の病原微生物は多種多様であり、特定の指標細菌の挙動だけで安全性を担保するには限界がある。近年、欧米では、定量的微生物リスク評価（QMRA：Quantitative Microbiological Risk Assessment）の概念が重要視されている。QMRAとは、人が微生物に曝露し健康を害するリスクを数学的に推定する手法である。オランダでは、1万人に一人の感染（$10^{-4}$の感染確率）は社会的に許容すると定め、水道水質基準に「QMRAによって腸管系ウイルス、クリプトスポリジウム、ジアルジアなどの年間感染リスクが$10^{-4}$以下と評価されること」と明示し、実務者が扱いやすいソフトウェアをツールとして配布している[2)]。日本でも同様の微生物リスク管理を目指すのか、その有効性や実務上の課題について、知見の集積が望まれる。その際、社会的に許容するリスクレベルに関する国民的な議論と理解が不可欠であり、そのための教育、啓発、情報提供のあり方などについて、リスクコミュニケーション研究など社会科学との連携が有効と期待される。

厚生労働省が示した新水道ビジョン[3)]では、水道の理想像として安全・強靭・持続を掲げている。強靭な水道とは、危機管理能力に優れたシステムを意味し、①非常時に速やかにもとのシステムを復旧できること、②非常時に利用可能な応急的設備を備えていること、③平時から複数の要素技術を併用しリスクを分散しておくこと、などの策があげられる。③はマルチバリア方式と呼ばれ、欧米など多くの国で重要な概念となっているが、日本では、浄水場への自家発電装置の導入など②の対策を手厚くする傾向があり、マルチバリア方式はむしろ無駄の多いシステムとして敬遠される傾向がある。リスク管理の観点からマルチバリアの強みは明らかであり、日本でもシステムの冗長性を許容する可能性と適切な許容幅（無駄と安全確保をどう線引きするか）について研究が求められる。さらに、水道システムの強靭さを比較可能な形で数値化し、直感的に理解しやすい形で国民に伝える方法論の確立が望まれる。

水道事業経営上の課題も顕在化している。日本の水道インフラの多くは高度経済成長期に整備されており、それらが一斉に更新時期を迎えている[4)]。一方、人口減少に伴う水道事業の収入減は避け難く、施設更新費を賄えない恐れがあり、特に中小規模の事業体でその懸念が大きい。施設の老朽化による漏水などの事故は、貴重な浄水を浪費するだけでなく、突然の断水・浸水などで社会生活に重大な影響を及ぼす恐れがある。よって、既存施設の戦略的な維持管理とスマートな縮小のための研究、具体的には、水道施設のダウンサイジング方法論の確立、施設更新計画立案支援ツールの開発、施設の長寿命化技術の開発などが望まれる。

国内の水道施設は更新需要が主となる中、日本の技術開発の停滞を避け技術者を持続的に養成するには、国外市場の開拓が有効である。ビジネスと国際協力を両立し日本と相手国にWin-Win関係を構築できる可能性もある。現在、浄水膜など一部の要素技術に

おいて日本の国際的評価は高いものの、施設の計画から保守まで含めたトータル水道システムとしての国際展開に日本は苦戦している。今後は、既存要素技術の改良や革新的新技術創出のための基礎研究を継続する一方で、日本に強みのある技術の国際規格化（ISO取得）や水道システムのパッケージ化など、国際競争力を高める取り組みが求められる。欧州では、水分野のイノベーションを加速させ研究・ビジネス・市民社会を結びつけることに特化した組織として2013年に欧州水イノベーション・パートナーシップ[5]を発足しており、その効果や限界を分析することで、日本に有用な知見が得られる可能性がある。

以上より、安全な水供給の観点から研究開発が特に望まれる分野として以下があげられる。

1. 水循環を意識した水供給システムの構築と貴重な水資源の効率的利用
2. 水道水の安全性を担保する方法論の見直しと危機管理の強化
3. 水道施設の維持更新支援とスマートな施設縮小の方法論の確立
4. 日本発の水技術・水システムの国際競争力強化

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

日本の水道水質基準は、2003年に大幅改定が行われ、その後も最新の知見に照らして逐次改正が行われているが、基準設定の根本的な枠組み（スキーム）は制定以来変わらず、許容できる上限を固有値で示し、その値以下であれば安全とのロジックで運用されている。しかしながら、統計的推計や数値モデルの適用など、合理的なリスク管理手法がすでに開発されており、水道水の安全性を担保する方法論のパラダイムシフトを議論する時期に来ている。また、近年、リスク評価上は重大でないと推定される水質基準超過が給水停止につながり多大な社会的損失を生じる事態も発生しており[6]、水道水質基準のスキーム再考と併せてその運用のあり方まで踏み込んだ検討が求められる。

水道システムを水循環の一部としてとらえることの重要性は学術的にすでに広く認識され、先行研究プロジェクトも存在するが、水道、下水道、環境水（河川・湖沼・地下水）、農業用水が厚生労働省、国土交通省、環境省、農林水産省に分割管理され、知見や統計も分散して存在するため、領域横断的な研究に取り組みにくい実態がある。よって、政策的課題として、水関連統計データの一元管理とデータベース化、水関連予算の府省を超えた流動化、共通ウェブサイトの開設と情報発信、関連府省共催による水シンポジウムの定期開催など、実効力のある水関連府省の連携強化が求められる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

欧州では、2007-2013年のEU第7次フレームワーク・プログラムによる水関連事業への助成総額が10億ユーロを超えている[7]。また、2014年からスタートした新助成プログラムHorizon 2020では、安全で豊富な水供給の確保が主要課題とされ、第一回公募で1億6,500万ユーロ近くが水関連事業に配分される見込みである[7]。

中国では、「国家中長期科学技術発展規画綱要」で制定する国家プロジェクトの一つとして、対象課題241件、公的資金投入額33.5億元の水プロジェクトを実施中である。研

究領域はモニタリング早期警戒、都市、湖、川、飲用水、政策の6分野で、水処理技術のボトルネックを解消し、重点流域を対象に水質改善、水源保護、水環境の浄化などに取り組むとしている。6分野いずれもすでにプロジェクトの第一段階を完了し、技術開発1,000件超、国内外の特許取得1,733件など、顕著な成果をあげている[8)]。また、まもなく施行される水質汚染防止行動計画（水十条）への総投資額は2兆元超と報道されている[9)]。中国では、水が将来の経済発展を制約しかねないとの危機感が強く、水処理研究への国家的投資は増大し続けている。

日本では、2009年度よりJSTが戦略的創造研究推進事業としてCREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域[10)]を推進し、浄水技術や水資源管理システムの開発に加え、水循環の文脈の中でその社会実装の提案を目指している点が特筆に値する。また、2014年度に創設された戦略的イノベーション創造プログラムでは「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」[11)]を課題とし、情報通信・ロボット技術の活用による国内インフラの高水準での維持、魅力ある維持管理市場の創造、海外展開の開拓を目指すとしており、安全な水供給の持続性を論ずるうえで注目に値する。

## （６）キーワード

水循環、安全、水道水質基準、リスク評価、施設維持更新、国際水ビジネス、府省連携

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・産学がそれぞれまたは連携して基礎研究を継続。<br>・浄水膜など一部の要素技術で国際的評価が高い。<br>・省エネルギーや低$CO_2$排出など環境関連技術で国際的評価が高い。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・要素技術の開発と社会実装の乖離が課題。<br>・国内最大規模の実証実験施設ウォータープラザが稼働し、官民が連携して先進的水システムの開発・評価・情報発信を本格化[12)]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・ウォータープラザが水ビジネスの国際戦略拠点として機能[12)]。<br>・チーム水・日本としてオールジャパン体制での国際ビジネスを展開[13)]。<br>・大学や研究機関に産学連携や特許取得の支援組織を設置する動きあり。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・安全管理に統計的概念やリスク管理手法を取り入れる素地があり、QMRAの社会実装実現に特化した専門機関CAMRA（Center for Advancing Microbial Risk Assessment）が存在。<br>・省エネルギーや低$CO_2$排出の技術で欧州や日本に遅れ。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・水とエネルギーの強靭なシステム構築のため府省連携や産学NGOの連携に努力[14)]。<br>・気候変動適応策として新規インフラ開発と既存インフラ強化を推進中[15)]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・国際ビジネス展開で欧州水メジャーに遅れ。<br>・伸びる産業を重点的に育成する政治的合意形成がなく、国家安全保障や医療の向上という目標達成の一手段として水産業を支援[16)]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・水関連研究に多額の公的資金を投入（2007-2013年で10億ユーロ超、2014年の新プログラムで年間1億6,500万ユーロ）[7]。<br>・ドイツでは、2014年に新研究助成プログラムを開始し、浄水施設の省エネルギー推進技術の開発、浄水プロセスからエネルギーを生産する研究など、12プロジェクトに2,700万ユーロを支援[17]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・オランダ応用科学研究機構（TNO）によるタンザニアでの分散型地下水処理技術提案[18]など、EU圏の内外で実証試験を多数実施。<br>・細菌のリアルタイム検出[19]など、実務ニーズをふまえた測定技術を開発。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・水分野の研究・ビジネス・市民社会を結びつける目的で2013年に欧州水イノベーション・パートナーシップ（EIP Water）を発足[5]。<br>・フランスでは、宇宙研究との連携による水産業創出を支援。新産業創出が有望な分野として、増水予知、河川航行支援、地表水の効率管理、疫病の感染防止などを特定[20]。<br>・ドイツでは、2008年に公的資金を投入して水産業支援NGO（German Water Partnership）を設立し、会員企業間の連携と情報共有を推進[21]。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・水関連プロジェクトへの国家投資が多額。公的資金33.5億元を投資した大規模水プロジェクトでは、モニタリング早期警戒、都市、湖、川、飲用水、政策などの全6研究領域に取り組み、国内外の特許を1,733件取得[8]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・突発的水環境リスク評価早期警戒技術システムを開発し、水源から蛇口まで、システム管理、早期警戒、モニタリング技術の研究開発を強化[22]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・水資源の汚染や不足が経済発展の制限になりかねないとの危機意識のもと、水関連の技術開発と産業化に公的資金を投入[8]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・国をあげて水研究を支援。ECO-STAR（2004-2011）、SEAHERO（2007-2012）、Blue Water & Green Energy、Eco-Smart（2011-2022）、G-Best（2011-2016）など、水関連の大規模国家プロジェクトを連動させ、多くは基礎研究から応用、産業化まで支援[21, 23]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・基礎研究を統轄する基礎技術研究会と、応用・産業技術研究を統轄する産業技術研究会を統合し、国家科学技術研究会を発足[24]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・強力な国家支援による水企業育成（ドーソン、Kウォーターなど）[23]。<br>・ODAによる水関連フィージビリティスタディとプロジェクト実施[21]。<br>・「研究開発サービス業振興法」の制定に向けた動きを本格化。営利目的の研究開発サービス業を支援するため、政府が5年ごとに振興基本計画を策定するほか、専門担当者養成機関、研究開発サービス業協会などを設立する予定[25]。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 米国環境保護庁（EPA）, Comprehensive Surface Water Treatment Rules Quick Reference Guide: Systems Using Conventional or Direct Filtration.
http://www.epa.gov/ogwdw/mdbp/pdfs/qrg_mdbp_surfacewatertreatment_convent_direct.pdf
2) 伊藤禎彦, オランダの水道事情, 空気調和・衛生工学, 85巻9号, p.9-16, 2011.
3) 厚生労働省, 新水道ビジョン, 2013.
http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/newvision/dl/newvision-all.pdf
4) 国土交通省, 日本の水資源, 2014.
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_fr2_000012.html
5) 欧州水イノベーション・パートナーシップ（EIP Water）.
http://www.eip-water.eu/
6) 厚生労働省, 水道水源における消毒副生成物前駆物質汚染対応方策検討会資料.
http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000002gthr-att/2r9852000002gtmb.pdf
7) JST CRDS デイリーウォッチャー, 欧州委員会プレスリリースにもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20140212/201402121214/
8) JST CRDS デイリーウォッチャー, 中国科学報ネット版ニュースにもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20140606/201406061574/
9) JST CRDS デイリーウォッチャー, 中国科学報ネット版ニュースにもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20140718/201407182417/
10) JST CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域.
http://water.jst.go.jp/
11) 内閣府, 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」研究開発計画.
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/7_infura.pdf
12) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）, NewsRelease.
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0458A.html
13) チーム水・日本.
http://www.waterforum.jp/twj/
14) 米国エネルギー省（DOE）, Ensuring the Resiliency of Our Future Water and Energy Systems.
http://www.energy.gov/articles/ensuring-resiliency-our-future-water-and-energy-systems
15) 米国大統領府報道官室, FACT SHEET.
http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/07/16/fact-sheet-taking-action-support-state-local-and-tribal-leaders-they-pre
16) 経済産業省, 産業技術調査事業報告書, 2013.
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E002789.pdf
17) JST CRDS デイリーウォッチャー, ドイツ連邦教育研究省報道発表にもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20140423/201404231370/

18) JST CRDS デイリーウォッチャー, オランダ応用科学研究機構ニュースにもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20130913/20130913885/
19) JST CRDS デイリーウォッチャー, 欧州共同体研究開発情報サービスにもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20140624/201406242269/
20) JST CRDS デイリーウォッチャー, フランス国立宇宙研究センター報道発表にもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20131105/201311051022/
21) NEDO報告資料.
http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100115c05j.pdf
22) JST CRDS デイリーウォッチャー, 中国科学報ネット版ニュースにもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20140609/201406091578/
23) グローバルウォータージャパン連載記事.
http://gwaterjapan.com/writings/1211eneco.pdf
24) JST CRDS デイリーウォッチャー, 在韓日本大使館情報にもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20140707/201407072465/
25) JST CRDS デイリーウォッチャー, 在韓日本大使館情報にもとづく記事.
http://crds.jst.go.jp/dw/20140709/201407092463/

### ３．４．１．５　水環境管理（下水道、浄化槽、湖沼、水辺創造など）

#### （１）研究開発領域名

水環境管理（下水道、浄化槽、湖沼、水辺創造など）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

持続可能な水資源の確保のための、下水道、浄化槽のような汚水処理技術の開発・評価、都市および流域レベルでの管理に関する研究開発領域である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

水環境管理における主要な対策の一つとして、大型の集中処理システムである下水道は、大都市や人口密集地域において有効に機能しており、下水道技術は成熟しつつある。2014年7月には新下水道ビジョン[1)]がとりまとめられた。ここでは、循環型社会、強靭な社会、新たな価値の創造、国際社会などがキーワードとしてあげられており、実際、標準活性汚泥法のような通常の有機物除去から、窒素・リン除去などの高度処理、膜を利用して水循環を促進する膜分離活性汚泥法（MBR : Membrane BioReacter）などが普及しつつある。アナモックスプロセスのような新しい処理技術も実証段階にあり[2)]、さらには、メタン、一酸化二窒素のような排水処理由来の温室効果ガスの排出削減や2011年の東日本大震災を契機とした災害対応の研究・実装が進められている[3-5)]。ただし、人口が想定よりも少ないと費用を使用料で賄うことは難しく、一般財源が投入されているのが現状であり、今後の人口減少に伴う財源の確保やコスト削減のためのアセットマネジメントが盛んに検討されている[6)]。一方、分散型処理システムである浄化槽は、コンパクト化を中心とした研究開発がなされており、欧州の類似技術と比べても十分に小さく、単独処理浄化槽と同等程度の大きさになりつつあることから、単独処理浄化槽の合併転換の政策的な後押しが期待されている。また、震災時にも被害が極めて少ないことが報告されており、災害対応としての浄化槽研究も進められている[7,8)]。さらに、近年では、気候変動の緩和と適応、低炭素・資源循環・自然共生の社会創りなどの観点からも研究が進められつつある[9)]。

海外に目を向けると、上下水道サービスの国際規格（ISO 24510～24512）が発行されるなど[10, 11)]、グローバル化が進んでいる。アジア、アフリカを中心として水環境管理、排水処理のニーズが高く、大都市では下水道の導入に向けた試みがなされている。課題としては、下水道サービスを持続的に提供するための経済的な裏付けの確保に加え、ランニングコスト低減のための省エネ技術、多くの大都市が位置するデルタ地帯での下水管きょ敷設の技術的な課題や維持管理の技術移転などがあげられる。さらに、上下水道サービスを扱うISOの委員会（ISO/TC 224）では、傘下にいくつものWGが設置されてアセットマネジメントや災害対応なども検討されているが、その中で、WG8では、分散型排水処理システムに関する規格作りも進められており[12)]、管理主体や汚泥清掃などの一連のサービスを網羅する形となっている。特に分散型の場合、浄化槽のような高度な処理技術からコンポストトイレやセプティックタンク（腐敗槽）など、技術バリエーションが非常に多く、それぞれ、処理能力や維持管理方法に大きな違いがあることから、このようなマネジメントの規格作りは重要な位置づけにある。

欧州では、排水処理指令に基づいて排水処理施設の整備が進められているが、技術評価に関する欧州規格が整備されており、民間による技術開発を適切に促進できる仕組みになっている[13]。

アジアでは、我が国が主導するアジア水環境パートナーシップ（WEPA：Water Environment Partnership in Asia）にて、各国が水質管理上の目標を定め、必要とされる以下の取り組みが進められている[14]。

1. 社会・経済状態や水環境の現状に見合った法規制、基準設定の見直し（例：産業構造や排水の水質に基づく排水基準など）
2. 水環境管理戦略、流域レベルでのアクションプランの策定を通じた、地域の水環境管理の強化
3. 政策立案のための科学的根拠の強化・改善（例：限られた予算内で行う効果的な水質モニタリング、データ保管体制の改善）
4. 汚染源管理の強化（例：適切な生活排水処理の促進や汚染総量規制制度の導入）
5. 水質管理への汚染者負担原則の導入、市場メカニズムを活用した法令遵守のインセンティブ付与
6. 水環境管理に従事する国、地域レベルの組織の強化と技術的な能力開発推進
7. 民間企業、市民、コミュニティの水環境保全に対する意識啓発と参加促進

また近年では、排水処理からエネルギーなどの付加価値を生み出すための研究が進められている。メタン発酵のような古くからの研究が継続されている一方で、微生物燃料電池のような新たな発見から進められている研究もある[15,16]。また逆に、バイオエタノールなどの燃料開発のように、新たに高濃度の排水の処理が必要となる新エネルギー系産業も目立ってきている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

社会経済の状況によって、市場に結びつきやすい応用的な研究が中心となっている現在、水処理の機能を革新的に向上させる上では、基礎研究としての現象把握やメカニズム解明を重要視していくことが肝要である。その意味で、微生物の挙動や群集としての特性を把握するための分子生物学的な解析技術の向上、ミクロ・マクロスケールでの物質収支を把握するための水質・ガスのセンサ技術、プロセス全体を数値モデルで表現し、適切な制御を行うための解析技術などの向上・低コスト化などが重要と考えられる。

一方、応用研究としても、高度処理はエネルギーとのトレードオフがあり、併せて、温室効果ガス排出にも配慮が必要である。例えば、窒素を除去する多くのプロセスでは、窒素除去をしない場合よりもエネルギーを消費し、かつ、$N_2O$が発生する。問題の中心は水であっても、エネルギーや気候変動など、さまざまな観点からさまざまなバウンダリーで評価していく必要がある。

また開発途上国においては、水環境管理に対する理解を深めるため、排水処理などの水環境改善による潜在的な経済効果の定量的な解析・評価方法の確立も重要な課題である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

JSTが推進する戦略的創造研究推進事業で2009年に発足したCREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域では、膜分離などのトップレベルの技術から、微量化学物質や病原微生物のモニタリング、処理など、水の再生利用もふまえた持続可能な水利用に向けた研究が進められている[17]。また、JSTのSATREPSでも、分散型技術でアフリカの持続可能な水・衛生システムを開発するなどの水関連プロジェクトが推進されている[18]。

環境省の環境研究総合推進費では、気候変動が水資源に及ぼす影響やアジアの埋立地浸出水対策、貯水池の生態系サービスなどに関する研究が推進されている[19]。

排水だけでなく、エネルギーや廃棄物、食料などの課題を含めて計画する考え方も広まってきている[20-22]。ドイツの例では、循環を志向した大規模なプロジェクトがあり、ハンブルグの新興住宅地において雑排水、トイレ排水のバキュームネットワークを構築し、雨水を含めて再利用し、さらに、廃棄物、エネルギーとの組み合わせで相乗効果を有するような仕組みが検討されている[23]。北九州では、海水淡水化プロセスに下水処理プロセスの一部を利用することにより、環境負荷を低減する統合システムのデモンストレーションが行われている[24]。

新たなトレンドとしては、ナノテクノロジーの活用による水処理技術の開発がある。吸着、膜処理、光触媒、消毒・抗菌、センシングなどの分野で技術開発研究が進められているものの、コストや人・環境への影響についての更なる研究が必要とされている[25]。

### （６）キーワード

生活排水、下水道、浄化槽、有機物、窒素、リン、高度処理

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・大学および研究機関において研究が進められているが、基礎研究へのより大きなリソース配分が期待される。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・下水道技術、特に膜技術は世界的に優位にある。<br>・浄化槽をはじめとした分散型処理の技術開発は世界的に優位にある。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・要素技術は非常に高いレベルを有しているものの、施設の運営は行政主導で進められてきたため、要素技術に加えて管理・運営まで含めた一括提案については欧米企業の後塵を拝している部分がある。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・微生物系の学会をはじめとして、微生物燃料電池の基礎研究が盛んに研究されている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・環境保護庁（EPA）は、フィラデルフィア市をパイロット地域として、合流式下水道の越流問題など、都市水系の水質を守るグリーンインフラ研究に500万ドルを拠出 [26]。<br>・人工湿地の研究が盛んに行われてきた。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・GE社は大手膜メーカーを買収し、事業展開を加速させている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・微生物学の自然化学的な基礎研究が根付いており、大学や国立研究機関に多くの著名な研究者がいる。<br>・フランスでは､研究費のうち基礎･応用研究への投資割合が高い [27]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・北欧を中心として、ドライトイレ（コンポストトイレ）の開発・普及が進められてきている。<br>・人工湿地の研究が盛んに行われてきた。<br>・持続可能なリン利用に関するプラットフォームが立ち上がるなど、リン資源回収・利用に関する活動が活発である [28]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・EUの排水処理指令により、排水処理普及の向上が義務付けられている。<br>・HAMBURG WASSERは、排水の再利用を含めた大型プロジェクトを進めている [23]。<br>・欧州の多くの水メジャーがアジア・アフリカへの展開を進めている。<br>・北欧を中心として、ドライトイレ（コンポストトイレ）の開発・普及が進められてきている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・大学、研究機関において、研究されている。<br>・研究費のうち開発研究への投資が大きく、基礎研究の割合は小さい [27]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・主要大学における海外の企業との共同研究も多く、活発に研究されている。<br>・膜分離技術におけるファウリング防止など、種々の実証研究が進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・下水処理率の向上が政策として強力に進められてきている。<br>・南水北調プロジェクトに関連して多くの課題が指摘されている。<br>・水質汚染対策「水十条」に2兆元以上投入される見通しである [29]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・研究費のうち基礎研究への投資は日本と同程度である [27]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・韓国環境部は、富栄養化による藻類の大量発生に関して、国内主要6研究機関と覚書を締結し、藻類発生メカニズムから藻類抑制技術に至るまで広範囲にわたり研究を行うこととしている [30]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・米国を参考にしたTMDLs（Total Maximum Daily Loads）と呼ばれる総量規制が導入されたことにより、四大河川を中心に流域管理がなされて、地域の経済活動も活発化している。<br>・食品廃棄物の汚水から自動車用バイオガス燃料を生産する施設が完成し、その他の有機性廃棄物への展開が進められている [31]。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）国土交通省（2014）新下水道ビジョン
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000307.html
2）日本下水道事業団（2010）アナモックス反応を利用した窒素除去技術の評価に関する報告書
https://www.jswa.go.jp/g/g4/g4g/pdf/gihyo-26.pdf
3）国土交通省（2009）下水道における地球温暖化防止実行計画策定の手引き
http://www.mlit.go.jp/common/000036176.pdf
4）東京都（2013）東京都下水道局事業概要 平成25年版
http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/jg25/jg25.htm
5）国土交通省（2012）下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000170-1.html
6）日本下水道事業団. アセットマネジメント（AM）手法導入の本格的な支援の推進
https://www.jswa.go.jp/gesuidou_jigyou/gyomushien_menu/pdf/2-1.pdf
7）環境省. 浄化槽サイト
https://www.env.go.jp/recycle/jokaso/eco/13.html
8）環境省. 循環型社会形成推進研究採択課題概要
http://www.env.go.jp/houdou/gazou/15438/jisedai.html#2107
9）みずほ情報総研株式会社（2014）平成25年度アジアの低炭素社会実現のためのJCM大規模案件形成支援事業報告書、pp.237.
10）下水道協会誌（2013）TC224上下水道サービス第9回ハイファ総会報告
11）下水道協会誌（2014）下水道分野における国際標準化の最新動向
12）楊新泌（2013）分散型汚水処理の国際標準化に関する動向（3）－ISO／TC224／WG8第3回リスボン会議の報告－、月刊浄化槽、446、31-37.
13）欧州における小規模排水処理施設の現状と認証制度、月刊浄化槽、446、13-21.
14）環境省・地球環境戦略研究機構（IGES）（2012）アジア水環境管理アウトルック2012
http://www.wepa-db.net/pdf/1203outlook/01_jp.pdf
15）東京大学（2013）生きた微生物が電気エネルギーを作り出す仕組みを解明 -微生物発電のメカニズム解明により、従来モデルに較べて1000倍以上の効率での電気生産が可能-
http://www.t.u-tokyo.ac.jp/epage/release/2013/2013040801.html
16）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2013）微生物燃料電池の廃水処理性能向上、実用レベルに―活性汚泥法と同等の廃水処理性能を実現―

http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100197.html
17) JST CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域
http://water.jst.go.jp/index.html
18) JST. SATREPSの活動事例. 環境・エネルギー
http://www.jst.go.jp/global/case/environment_energy_1.html
19) 環境省. 環境研究総合推進費. 実施課題一覧
http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/index.html
20) International Water Association (2013) Water 21, August, 27-29.
21) International Water Association (2014) Water 21, April, 15-18.
22) 米国エネルギー省（DOE）. Ensuring the Resiliency of Our Future Water and Energy Systems
http://www.energy.gov/articles/ensuring-resiliency-our-future-water-and-energy-systems
23) Hamburg water cycle
http://www.hamburgwatercycle.de/
24) NEDO（2014）海水淡水化と下水処理を統合した新規水処理システムを開発 ―従来比30%以上の大幅な省エネ・低コスト化を実証―
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100254.html
25) Xiaolei Qu, et al. (2013) Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment, Water Research, 47, 3931-3946.
26) 国立環境研究所（2014）アメリカ環境保護庁、都市の水質を守るグリーンインフラ研究のため国内5大学に500万ドルを提供
http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=12755
27) 文部科学省（2011）科学技術要覧　平成23年版
28) European Sustainable Phosphorus Platform
http://www.phosphorusplatform.org/
29) JST（2014）CRDS デイリーウォッチャー. 中国、水質汚染対策「水十条」に2兆元以上投入
http://crds.jst.go.jp/dw/20140718/201407182417/
30) 国立環境研究所（2013）韓国環境部、緑藻の適切な管理に向けた研究開発で6研究機関と協力覚書締結
http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=12641
31) 国立環境研究所（2011）韓国、食品廃棄物の汚水からバイオガス燃料を生成し、バス・ごみ収集車に利用
http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=5897

### ３．４．１．６　人間居住による環境負荷（GHG 排出、水、大気への排出、緑地の喪失）

#### （１）研究開発領域名

人間居住による環境負荷（GHG排出、水、大気への排出、緑地の喪失）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

生活の質（QOL：Quality of Life）を維持、向上させつつ居住に関わる活動に伴う環境負荷を少なくするためにさまざまな技術やシステムが開発されている。そのような技術やシステム群の導入を支援するための技術やシステムを構築するとともに、導入しやすくなるような社会的な仕組みを創出する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

人間居住による環境負荷は、エネルギーや製品、水など、資源の利用に伴い排出される汚染物質や温室効果ガス、廃棄物など物質の排出や、人間活動における土地や空間の利用による緑地の喪失など多岐にわたる。

物質の排出に伴う環境負荷については、省エネや節水など資源利用の効率化により環境負荷の排出そのものを減らすための技術開発や制度設計と、排気ガス処理や廃水処理、廃棄物処理など発生した環境負荷による環境影響を削減するための技術開発が行われている。一方で、土地や空間の利用に伴う負荷については、緑化などの人工物に自然共生的な要素を組み込む技術の開発や土地や空間を有効に活用するための制度設計が行われている。また、このような技術開発や制度設計を実社会のもとに実装していくための実証試験も行われている。

人間居住による環境負荷を削減するための技術・システム開発は多岐にわたり、個々の環境技術やシステムの開発、制度設計については他の研究開発領域で取りまとめられているためここでは対象とはしない。一方で、これらの技術やシステムを実社会に効率的に導入し、人間居住による環境負荷を総合的に削減していこうとする取り組みがある。このような取り組みは、人間居住の場としての最少のユニットである住宅レベルで導入されるものから、住宅のまとまりである地区やコミュニティといったスケールでまとめて導入し得るもの、もっと広い都市レベルといったスケールで導入されるものもあり、対象とする取り組みの特性により異なる。ここでは、地区やコミュニティといったスケールで人間居住に伴う環境負荷を削減するものとして導入されている取り組みについて、その社会への実装に関わる研究開発に焦点をあてる。

環境技術の社会への効率的な導入として近年注目を集めているのは、ICTを利用したスマートなシステムの構築である。特にエネルギーマネジメントの分野では、スマートメーターの導入とスマートグリッドの構築によりエネルギーの有効利用および再生可能エネルギーの利用拡大を図る試みが注目を集めている。この技術はもともと電力利用を対象として開発されたものであるが、基本となるのはICTを利用したリアルタイムでの情報把握と連携されたさまざまなシステムの効率的な運用であるため、電力以外のエネルギー（熱利用）の効率化、エネルギー以外の水利用などの資源管理やそれに伴う環境負荷の排出の管理にまで拡張していくことが可能である。特に、防災などの観点から自律分散型の社会インフラの重要性が指摘されており、それを支えるシステム技術として

有効なものである。さらには、利用電力量をスマートメーターにより表示することで、利用者側へのエネルギーの利用状況をリアルタイムで提供(見える化)することができ、エネルギーなどの資源の有効利用に対するインセンティブを創出する効果も期待できる。

スマートグリッドは、1990年代後半に電力系統の老朽化対策として米国で生まれた概念である。その後、グリーンニューディール政策の中で、再生可能エネルギーとセットで重要な政策課題となった。EUでも再生可能エネルギーの普及拡大と各国間での電力取引の活性化を図るために電力供給システムの信頼性の確保が問題となり、スマートグリッドの実証・普及事業が進められている。中国などの新興国では、増え続ける電力需要への対応と、電力供給システムの近代化のため、スマートグリッドの実証事業が進められている。また、韓国でも2009年にスマートグリッド事業団を設置し、国策としてスマートグリッドの実証事業を進めている。実証試験としては2008年のコロラド州ボールダー（米国）での実験を皮切りに、天津（中国）、アムステルダム（オランダ）、済州島（韓国）などで次々と開始されている [1)]。

日本国内では、スマートコミュニティの国際展開、国内普及のため経済界全体としての活動を推進する組織として「スマートコミュニティ・アライアンス」が2010年4月に経済産業省の主導で設立され、海外の動向把握、国際標準化に向けた取り組み、ロードマップの作成、HEMS機器の通信方式の詳細仕様作成などの活動を進めている。さらに、「次世代エネルギー・社会システム実証事業」として、横浜市、豊田市、けいはんな学研都市（京都府）、北九州市において、実証事業を2011年度より行った。これらはいずれもエネルギーシステムのマネジメントにとどまらず、交通システムや一般家庭におけるライフスタイルの変革も視野に入れたものとなっている。また、国内9地域においてスマートコミュニティの普及に向けた技術開発を行うことを目的とした「次世代エネルギー技術実証事業」が実施されている。さらに、東日本大震災の被災地域においても再生可能エネルギーの活用を前提とした「スマートコミュニティ導入促進事業」が開始されている [2)]。

これまでに述べたスマートコミュニティが主として都市を対象としたものであったのに対し、農山漁村地域における豊かな再生可能エネルギー資源を利用したスマートビレッジの構築を支援する取り組みを農林水産省が行っている [3)]。また、チャレンジ25地域づくり（環境省）[4)]、集約都市開発支援事業・先導的都市環境形成総合支援事業（国土交通省）[5)]、ICTまちづくり推進事業（総務省）[6)] など、各省庁からの支援のもとに国内のさまざまな地域においてスマート技術を利用したコミュニティづくりが始まっている。

一方で、電力以外のマネジメントにおけるICTの導入は、電力と比べると遅れている。熱については、地区内の複数熱源からの熱の効率的な管理を行うサーマルグリッドの実証実験が世界で初めての試みとして2014年8月に大阪で始まったところである [7)]。水については、マルタでは電力とともに水道にもスマートメーターを設置し、水道料金の徴収などに役立てている事例はあるものの、スマートメーターの導入については各国で検討されている段階である [8)]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

電力に関しては、スマートメーターの導入が進むとともに、スマートコミュニティの

実証試験が各国で進んでいる。また、さまざまな電力機器などをスマートシステムにつなぎ、制御管理していく技術開発が進んでいる。以上ように開発されつつある技術の実社会への導入という点から考えると、このようなシステムを利用することに対する利用者の受容性など、利用者側の視点に立った社会科学的な検討は少ない。デマンドレスポンス実証などスマートシステムの運転管理のための利用者に関する情報の収集と分析は進みつつあるが、スマートなシステムを導入することにより住民やコミュニティが長期的にどう変容し、そして環境負荷がどの程度削減されるかを予測するためには、社会科学的な検討のさらなる充実が必要である。実証試験においてもライフスタイルの変容まで着目して行われているものもあるが、多くは技術の導入可能性に焦点をあてたものであり、実際の利用者を巻き込みながら、さまざまな検討を進めていく必要がある。

また、電力、ガス、水道、下水道、ゴミ収集など、環境管理に関するサービスの実施者やサービス形態が異なることも、これらを統合してICTを用いてスマート化していく際に制度的な障害となる可能性がある。

なお、スマートコミュニティを構成する個々の技術開発は民間ベースでも進んでいくものと思われるが、実証試験の円滑な実施と地域住民の積極的な関与、さまざまなサービスの統合などを行っていく際には、地域の行政機関の積極的な関与が必要となる。一方で、地域の行政機関では、スマート化に関するプロジェクトを進めるうえでの人的資源や経済的基盤が不十分な場合が多く、今後の課題となるものと思われる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

前述した「次世代エネルギー・社会システム実証事業」において、例えば横浜市などでは広域な既成市街地を対象とした実証試験が行われ、2013年から一般住宅も含めた大規模なデマンドレスポンス実証が始まった[9]。世界的に見ても既成市街地の一般住宅を対象とした実証試験はまだ限られており、このような実証試験の成果から既成市街地への導入可能性が高まると、社会全体への普及が加速されるであろう。

また電力以外では、前述したように「サーマルグリッド」の実証が大阪市で始まったところである。特に中心市街地や未利用熱源がある地区においては、その効率的な利用をはかるうえで注目されるものである。水道分野でも、フランスの水道事業者が今後4年間で約8,000戸にスマートメーターの導入を行うことを決定し、水道料金の検針の効率化をはかるとともに、ユーザーへの使用量の通知を行うことを計画している[10]。

### （６）キーワード

スマートコミュニティ、スマートシティ、スマートグリッド、スマートメーター、再生可能エネルギー、省エネ、省資源、節水

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・スマートグリッドに関する取り組みはやや他の先進国と比べて遅れて始まったものの、スマートグリッドを支える技術的な集積があり、現在さまざまな支援のもとに実証試験が開始されている。また、サーマルグリッドなど電力以外の分野への応用も進んでいる。<br>・国内での実証試験のほかに、海外（米国、フランス、中国、インドなど）においても実証試験を開始している [3)]。 |
| 米国 | 基礎研究 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・グリーンニューディール政策の中で再生可能エネルギーとセットで重要政策課題となった。スマートメーターの整備が先行して実施された。<br>・2008年にコロラド州ボールダーで世界で初めての実証プロジェクトを開始。その後、Smart Grid Demonstration Projectとして30の実証事業、Smart Grid Investment projectとして174の普及事業が2012年までに行われた [1)]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・2006年にSmart Grids Vision & Strategyを発表。スマートメーターの整備が先行して実施された。<br>・2009年にアムステルダム（オランダ）で「インテリジェント・シティ」プロジェクトの開始。その後、マンハイム（ドイツ）、ニース（フランス）、ボーンホルム（デンマーク）など各国において、277の実証および普及事業の実施 [11, 12)]。<br>・水道分野でのスマートメーターの設置（フランス）の動き。 |
| 中国 | 基礎研究 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・2020年までのStrong and Smart Grid達成ビジョンを発表（2009年）。天津など13都市でエコシティ（Eco City）プロジェクトを実施しているが、その中でスマートグリッドも一部導入。 |
| 韓国 | 基礎研究 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・（個々の技術により異なる） |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・2009年にスマートグリッド事業団を設立。済州島での6,000戸を対象とした実証試験を開始。<br>・2010年にスマートグリッド国家ロードマップを策定 [1)]。 |

（註１）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 李秀澈・澤田貴之・伊藤賢次・松尾秀雄・佐土井有里（2013）韓国のスマートグリッド事業の推進戦略と成果――済州道スマートグリッド実証事業を題材として――、名城論叢、14(1)、pp.111-137
2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2013）再生可能エネルギー技術白書第2版、
http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html、2013年12月12日
3) 農林水産省（2012）平成23年度食料・農業・農村白書「2. 食料・農業・農村の動向」（第4章　農村の振興・活性化）、
http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h23/pdf/z_all_4.pdf、2012年4月24日
4) 環境省（2014）チャレンジ25地域づくり事業、
http://www.env.go.jp/policy/local_challenge25/、2014年8月16日参照
5) 国土交通省（2014）低炭素型の都市・地域づくり、
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_mn_000011.html 、2014年8月16日参照
6) 総務省（2014）ICTによる環境にやさしいまちづくり、
http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictriyou/02ryutsu02_03000064.html 、2014年8月16日参照
7) 大阪市（2014）熱版スマートグリッド「サーマルグリッドシステム」による建物間熱融通の実証実験を開始します、
http://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000278412.html、2014年8月12日
8) Automated Revenue management Services (2014) Smart Meters,
https://www.smartutilities.com.mt/wps/portal/Public%20Area/Services/SmartMeters/、2014年8月22日参照
9) 横浜市（2013）横浜スマートシティプロジェクト(YSCP) 家庭部門 夏季 DR 実証（速報）～ デマンドレスポンス（DR）で最大ピークカット効果 15.2%を確認 ～、
http://www.city.yokohama.lg.jp/ondan/press/h25/131023press.pdf、2013年10月23日
10) Sensus (2014) Sensus Announces First iPERL Smart Meter Rollout in France
http://sensus.com/web/uk/news/display?news_id=sensus-announces-first-iperl-smart-meter-rollout-in-france-uk、2014年2月
11) 日本貿易振興機構（2011）欧州のスマートグリッド戦略、ユーロトレンド　2011年7月
12) 日本貿易振興機構（2011）欧州主要国のスマート・グリッドへの取り組み、ユーロトレンド、2011年11月

## ３．４．１．７　都市環境と健康影響（大気、化学物質、緑地、熱環境等）

### （１）研究開発領域名

都市環境と健康影響（大気、化学物質、緑地、熱環境等）

### （２）研究開発領域の簡潔な説明

都市化は世界的に進行し、今や地球上の人口の約半数は都市に居住するようになっている。都市化は、産業化、グローバル化とともに地球環境変動の大きな駆動力ともなっている。開発途上国を中心に、都市の大気汚染や水質汚染の問題は顕在化しており、近隣国への越境汚染の問題も指摘されるようになった。また、世界的にも、残留性、生物濃縮性、長距離移動性が顕著で毒性を有するPersistent Organic Pollutants（POPs）や日々新たに生産される化学物質や新規素材などの生物や人への影響が危惧されている。地球温暖化による熱環境変動も、感染症分布の変化などを介し、人類の健康に影響を及ぼす可能性が指摘されている。一方、癌や生活習慣病、アレルギー疾患といったいわゆる「現代病」が先進国を中心に激増してきたが、これらの増加と都市環境要因との関連性を推測する研究も存在する。このように、都市環境とその変容が、生物や人類の健康に及ぼす影響を評価あるいは予測し、そのメカニズムを明らかにするとともに、リスクコミュニケーションを実践し、対策・軽減・未然防止に結びつけることを目的とする研究開発領域である。

### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

近年、地方より都市への人口の移動と偏在が世界的に進み、今後、特に、開発途上国において顕著となることが推計されている[1)]。同時に、都市は産業化やグローバル化の拠点でもあり、地球環境変動の駆動力が密に存在する空間ともなっている。

産業化、都市化による化石燃料の大量消費は、温室効果ガス（GHG）の多量排出とともに、窒素酸化物、硫黄酸化物、あるいは、PM2.5をはじめとする粒子状物質などの大気汚染物質をも大量に排出し、経済発展の著しい開発途上国の大都市居住者を中心に、健康影響を顕在化させている。低質の化石燃料は、水銀や砒素、カドミウムなどの重金属や多環芳香族炭化水素の発生源ともなりうるため、これらによる健康影響も危惧される。事実、インドや中国をはじめとするアジア諸国やBRICSにおいて、粒子状物質増加による早期死亡や経済損失は、今後も年々増加するものと推計されている[2)]。加えて、これらの大気汚染物質は、長距離輸送と変質により、近隣の国々にも越境汚染による健康リスクを誘起しうる。一方、先進国においても、地表オゾンの増加とそれによる早期死亡は、今後も増加するものと推計されている[2)]。日本においても、オゾン、PM2.5や黄砂による越境汚染の問題、また、増加しつつあるアレルギー疾患の代表といえる花粉症の原因となるスギやヒノキの花粉の健康影響が危惧されている。そのため、国内外を問わず、大気汚染とその健康影響の速やかな現状把握と対策が急がれている。しかし、大気汚染による健康影響に関する研究は、主に欧米の先進国を中心に進展してはいるものの、開発途上国における実施例は概して少ない。日本においてさえも、PM2.5の観測地点は増加しつつあるが、健康影響に関する研究実施例は十分とはいえず、環境基準値も欧米の疫学研究データを基に決定されている。大気汚染物質に関しては、呼吸器系、

免疫系、循環器系に疾患をもつ人々や小児、高齢者などに影響が出現しやすいことが、先進国を中心に多々報告されている。今後は、このような高感受性（脆弱性）要因を念頭に置いた研究開発推進がますます重要性を増すものと考えられている。

開発途上国においては、過去の先進国における公害事例と同様に、都市上流域の開発・発展が、渇水や洪水、下水の流入などとともに、重金属や化学物質（農薬を含む）による水質汚染をもたらすケースも経験されている。上水の不足が顕在化し、下水の再利用の必要性が増している都市域もある。一方、先進国においては、過去に公害をもたらしたような高毒性物質の大量曝露やそれによる毒性影響発現の可能性は減じている。しかし、POPsによる健康影響、特に長期影響や経世代影響の問題が今なお危惧されている。また、低毒性物質の少量曝露によるかく乱影響（脳・神経系、免疫・アレルギー系、生殖・内分泌系への影響）の問題や日々増加する環境汚染物質の複合曝露による健康影響の問題も、未解決のまま残存している。

加えて、ナノマテリアルに代表されるような新規素材による健康影響も十分には明らかにされていない。後述（(7) 国際比較）のシェールガスの事例のように、新たなエネルギーの創出が、新たな環境汚染を生じる可能性も示唆されている。

一方、生活習慣病やアレルギー疾患などの「現代病」の増加と都市環境要因との関連性も指摘されている。実験的には、POPsによる糖尿病や脂肪肝などの生活習慣病の増悪[3)]、低毒性化学物質曝露による行動異常、アレルギー疾患増悪[4)]、ナノマテリアルによるアレルギー疾患増悪[5)]や発ガンの可能性などが報告されており、少なくとも部分的には細胞・分子レベルのメカニズムも明らかにされている。このように、都市環境要因の変容による「現代病」の増加・増悪の可能性について、今後も研究の集積が望まれる。

地球温暖化に関連し、地表オゾンの増加による健康影響の問題や水系感染症の増加、節足動物媒介感染症の分布変動、都市におけるヒートアイランド現象とも関連した熱中症の増加などの問題が危惧されている。多環芳香族炭化水素にも発ガン物質は存在するが、オゾン層の破壊に起因する紫外線増加による皮膚ガン増加の問題も危惧されている。

一方、都市環境要因による健康影響の予測、評価、メカニズムの解明に関する研究とともに、リスクコミュニケーションも重要であり、先進国を中心に個別的に実践的研究が推進されているが、十分とはいいがたい。

本領域においては、都市環境の変容による健康影響を明らかにし、対策、軽減、未然防止に結びつけることが最終目標となる。しかし、PM2.5の例にも代表されるように、発生源対策などにより影響を軽減することは可能ではあるものの、未然防止を達成することは困難であり、リスク管理の概念の普及と共有化に関する取り組みも、より重要になるものと考えられる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

1. 都市環境要因、健康影響のいずれも多岐にわたるが、一部の都市環境要因による一部の健康影響が研究対象となっているに過ぎない。
2. 高感受性（脆弱性）集団を対象とした研究も端緒についたばかりという状況にある。
3. リアルワールドで想定される「環境要因の複合曝露による健康影響」の問題は、ほとんど手付かずの状況にある。

4. 死亡などの重大な健康影響に対し、比較的軽度の、しかし、QOL（Quality of Life）には密接に関連するというレベルの健康影響を客観的に評価することは今のところ困難である。
5. 既存疾患の増悪や「現代病」の増加・増悪における環境要因の寄与率推計は未確定である。
6. 疫学研究において、リアルワールドにおける曝露評価、特に個人曝露評価はしばしば困難である。長期的な観察研究や経世代影響に関する研究には時間と資金を要する。対象にできる環境要因と健康影響は限定的とならざるを得ない。
7. 実験的研究において、人への外挿手法が未確立である。
8. 越境汚染や地球環境問題の解決には、多国間にわたる対策、政策が不可欠であるが、その枠組みの作成や取り組みの進展は容易とはいえない。
9. 経済的発展、技術開発が政策的に優先、あるいは、先行し、環境問題、健康影響が後発的に発生・進展することが多く、早期診断、早期治療が困難な場合が多い。

以上のような広範囲にわたる都市環境要因による健康影響にかかる研究を、民間企業が限定的資金によって推進することは困難であり、また、収益性も少なくとも短期的には乏しいと考えられる。加えて、国民、人類の健康、未来を左右する公益性が最優先されるべき課題であることからも、公的資金による戦略的かつ長期的な研究開発推進が必須と考えられる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- 国連環境計画（UNEP）、金採掘における水銀削減のため実践ガイドを公表（2012/7/2）[6]。
- 国連環境計画（UNEP）、開発途上国の化学物質リスク低減のため管理強化が必要とする報告書を発表（2012/9/5）[7]。
- 米国環境保護庁（EPA）、ナノ材料の健康や環境への影響を研究（2012/12/11）[8]。
- 欧州環境局（EEA）、新技術のもつ危険の兆候に予防原則による対応を求める報告書を発表（2013/1/23）[9]。
- 米国環境保護庁（EPA）、子どもの健康と環境に関する報告書『アメリカの子どもと環境第3版』を公表（2013/1/25）[10]。
- 欧州委員会、PM2.5の長期曝露は動脈硬化や小児呼吸器疾患、出産への悪影響をもたらす可能性、神経発達・認知機能や糖尿病との関連性、循環器・呼吸器疾患による死亡との因果関係を指摘（2013/1/31）[11]。
- 国連環境計画（UNEP）と世界保健機関（WHO）、内分泌かく乱物質に関する最新の報告書を発表し、更なる研究を求める報告（2013/2/19）[12]。
- 米国環境保護庁（EPA）、有害化学物質の健康や環境への潜在的リスクに対し、一般に使用されている23種の化学物質のリスク評価を開始すると発表。多くは難燃剤で神経発達影響の存在が示唆されている（2013/3/27）[13]。
- 欧州環境局（EEA）と欧州委員会共同研究センター（JRC）、複数の環境要因による複合的な健康リスクの研究が必要とする『環境と人の健康』を公表。生活習慣病のリスクも指摘（2013/5/30）[14]。

- アフリカ28カ国、国連環境計画（UNEP）で化学物質のライフサイクルにわたる安全管理を強化するためのロードマップ案を策定（2013/7/4）[15]。
- 米国環境保護庁（EPA）、環境汚染物質の健康リスク情報を収載している「統合リスク情報システム」（IRIS：Integrated Risk Information System）を強化（2013/7/31）[16]。
- 米国環境保護庁（EPA）、化学物質の脳発達への影響研究に300万ドルを提供と発表（2014/2/12）[17]。
- 欧州化学物質庁（ECHA）、REACH規則に基づく2014～2016年の物質評価計画（CoRAP：Community Rolling Action Plan）を公表（2014/3/26）[18]。
- 「短寿命気候汚染物質（SLCP：Short-Lived Climate Pollutants）削減のための気候と大気浄化の国際パートナーシップ（CCAC：Climate and Clean Air Coalition to Reduce Short-Lived Climate Pollutants）」、SLCP削減により気候や農業、健康の改善を図る取り組みに約1,000万ドル拠出合意（2014/4/4）[19]。
- 米国環境保護庁（EPA）、化学物質とナノ材料の健康と環境への影響理解のため、二大学に900万ドルを助成と公表（2014/4/10）[20]。
- フランス環境・持続可能な開発・エネルギー大臣、内分泌かく乱物質の国家戦略の内容を公表（2014/4/29）[21]。
- 気候変動による環境の大規模な変化が健康に及ぼす影響と必要な対策を研究する、イギリス国立健康研究所の健康保護研究ユニット（NIHR HPRU：The National Institute for Health Research Health Protection Research Unit）が発足（2014/5/7）[22]。
- 環境省、10万組の大規模な疫学調査「子どもの健康と環境に関する全国調査（エコチル調査）」を進行中[23]。

### （６）キーワード

都市化、産業化、グローバル化、大気汚染、窒素酸化物、硫黄酸化物、PM2.5、黄砂、花粉、オゾン、水質汚染、土壌汚染、重金属、多環芳香族炭化水素、越境汚染、POPs、新規素材、現代病、健康影響、高感受性（脆弱性）要因、経世代影響、かく乱影響、複合曝露、複合影響、早期死亡、温暖化、熱中症、リスクコミュニケーション、リスク管理、未然防止

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↘ | ・水質に関しては、膜処理技術など、社会実装を重視した研究が展開されている。空気質に関してもいくつかの大学や研究所を中心として、基礎研究のレベルは高く、革新的な研究成果の発信もある。しかし、健康影響に関する疫学的研究、実験的研究ともに、予算面、人材面（特に若手の人材面）では、他領域や欧米、中国に比較し、十分とはいいがたい。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↘ | ・水質分野では、国の中央研究所に位置する研究組織が貧弱で、十分に機能していない。全体でも、研究費の規模を含め、十分な実用的研究成果を得られる体制になっているとはいいがたい。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・水質、空気質ともに、都市環境汚染は概ね改善から不変といった状況にある。近年、空気質を中心に、越境汚染の問題がクローズアップされている。福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による汚染も課題となっている。<br>・水処理用膜の国際的シェアは高く、海外での市場開発に貢献している。大気汚染物質削減、空気清浄技術のレベルも高く、国際的な大企業が存在し、世界に展開している。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・水質に関しては、下水再利用に関連した基礎研究など、多岐にわたり、かつレベルが高い。空気質に関しても、大規模な疫学研究が複数、長期にわたって実施されている。健康影響に関する疫学的な研究も実験的な研究も複数の機関で取り組みが進展してきている。予算面、人材面で日本を凌駕している。ナノマテリアル廃棄物への評価など、新しい研究も始まっている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・水質に関しては、下水処理水再利用の実用化に向けた検討が進んでいる。シェールガス掘削に関連する排水処理技術開発も活発である。空気質も含め、日本に比較し、大きな予算が配分されている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・水質、空気質ともに、都市環境汚染は概ね改善から不変といった状況にある。しかし、資源採掘や災害に伴う局所的汚染も報告されている。空気質に関し、PM2.5の環境基準が年間平均値を12 μg/m$^3$に強化された。<br>・水質に関しては、下水処理水直接飲用再利用が導入され、拡大していく趨勢にある。シェールガス掘削では、セラミック膜による処理が実用化された。空気質についても国際的大企業の取り組みが存在する。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・オランダやスイス、英国やドイツなど、研究所や大学における研究レベルは高い。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・オランダ、英国、フランス、ドイツなどの企業や研究所で研究・開発が進められている。EUにおけるREACH規制が存在し、それに関連する研究計画、化学物質評価計画、管理計画も提案されている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・水質、空気質ともに、環境汚染は概ね改善から不変といった状況にある。他国企業による汚染物質排出も含め、越境汚染の問題も存在している。日本に比較し、化学物質の管理、規制は厳密である。また、予防原則の概念も浸透しているように見受けられる。物質循環も順調に進んでいると推察される。<br>・導入することが好ましいとのエビデンスが得られた場合、速やかに実用化が図られる傾向が認められることが、我が国との大きな差とも考えられる。国際的大企業の取り組みが存在する。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・研究レベルは高いとはいえない。しかし、教員や学生の陣容が急速に拡大しており、研究レベルは上がっていくものと予想される。研究論文の事前チェック体制が整備されてきており、今後、国際誌におけるシェアが高まることに寄与するとも予想される。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・海外技術に依存している状況だが、これに追従する国内での研究開発が活発に行われており、やがて独自技術として定着していくものと考えられる。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | △ | ↗ | ・水質、空気質ともに、環境汚染は深刻である。エネルギー消費による大気汚染はもちろん、下水汚泥の発生量も急激に増加し、適正な処理処分が大きな課題となっている。不適正な処理により汚染された土壌や鉱山廃棄物における重金属汚染も大きな問題となっている。越境汚染物質の排出源の１つともなっている。<br>・海外企業の技術に依存してきたが、国内の財閥系企業や地元企業が力をつけてきているように見受けられる。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・国家レベルでの大型プロジェクトが進められ、研究と実務の連携が重視されている。基礎研究レベルの向上にも寄与している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・国家プロジェクトが推進され、温室効果ガス排出量評価、ライフサイクルアセスメントなどの領域の研究も包括した総合的な最適化も志向されている。下水汚泥について、陸上処分のための技術の開発などが活発に行われている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・水質、空気質ともに、環境汚染は概ね改善から不変といった状況にある。越境汚染の問題も存在している。<br>・水質関連では、政府主導で水産業育成戦略が作成され、国際競争力を高める努力が継続されている。韓国水資源公社が国内用水供給のほか、海外展開に力を入れている。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) WHO. Children's environmental health.
http://www.who.int/ceh
2) OECD. OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction.2012.
http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/oecdenvironmentaloutlookto2050theconsequencesofinaction.htm
3) Yanagisawa R, et al.: Env Health Persp 122: 277-283, 2014.
4) Koike E, et al.: Environ Health Persp 118：472-478, 2010.
5) Inoue K, et al.: Toxicol Appl Pharm 237: 306-316, 2009.
6) UNEP. Low-Mercury and Mercury-Free Solutions to Hand for Some Sectors of Gold Mining Industry at INC4 Meeting. 2012.
http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2691&ArticleID=9207&l=en
7) UNEP. Urgent Action Needed to Reduce Growing Health and Environmental Hazards from Chemicals: UN Report. 2012.
http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2694&ArticleID=9266&l=en
8) EPA. EPA and Consumer Product Safety Commission Collaborate to Research Health Impacts of Nanomaterials. 2012.

http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/b3bdde177a3e570985257ad1006309d2!OpenDocument

9) EEA. The cost of ignoring the warning signs - EEA publishes ‘Late Lessons from Early Warnings, volume II’. 2013. http://www.eea.europa.eu/media/newsreleases/the-cost-of-ignoring-the

10) EPA. EPA Releases New Report on Children's Health and the Environment in America. 2013. http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/1fe31a8bc6eb3c4385257afe0061b1f4!OpenDocument

11) EC. Environment: Newly found health effects of air pollution call for stronger EU air policies. 2013. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-72_en.htm

12) UNEP. Effects of Human and Wildlife Exposure to Hormone-Disrupting Chemicals Examined in Landmark UN Report. 2013. http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2704&ArticleID=9403&l=en

13) EPA. EPA Announces Chemicals for Risk Assessment in 2013, Focus on Widely Used Flame Retardants. 2013. http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/c6be79994c3fd08785257b3b0054e2fa!OpenDocument

14) EEA. Europe’s environment now healthier – but new risks emerging. 2013. http://www.eea.europa.eu/highlights/europe2019s-environment-now-healthier-2013

15) UNEP. African Nations Pledge Increased Efforts in Sound Management of Hazardous Chemicals. 2013. http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2723&ArticleID=9562&l=en

16) EPA. EPA Strengthens Chemical Assessment Process to Protect Public Health. 2013. http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/8a405bfd605159cd85257bb9005f6dd6!OpenDocument

17) EPA. U.S. EPA Awards U.C. Davis $800,000 to Study How Chemical Exposures May Impact Brain Development. 2014. http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/206d2e120e50727e85257c7d00694a2d!OpenDocument

18) ECHA. ECHA adopts the substance evaluation plan for 2014 – 2016. 2014.

http://echa.europa.eu/view-article/-/journal_content/title/echa-adopts-substance-evaluation-plan-for-2014-2016

19) UNEP. CCAC Invests $10 Million in New Work to Reduce Short-Lived Climate Pollutants, Focuses on Human Health. 2014.
http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2764&ArticleID=10809&l=en

20) EPA. EPA Awards Over $9 Million to Universities for Research to Help Predict the Implications of Chemicals on Human Health and the Environment. 2014.
http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/bcb62b6c968ccac485257cb600705a2e!OpenDocument

21) Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Ségolène Royal préside le Conseil national de la transition écologique et présente la stratégie nationale contre les per-turbateurs endocriniens. 2014.
http://www.developpement-durable.gouv.fr/Segolene-ROYAL-preside-le-Conseil.html

22) Met Office. How will climate change affect health in the UK?. 2014.
http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2014/health-hpru

23) 環境省. エコチル調査
http://www.env.go.jp/chemi/ceh/

### ３．４．１．８　開発途上国の人間居住と適正技術

#### （１）研究開発領域名

開発途上国の人間居住と適正技術

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

開発途上国において健康で文化的な人間居住を持続的に可能にする基盤としての水と衛生に関わるインフラ整備のために、健康リスク低減あるいはQOL（Quality of Life）上昇の効果はもちろん、導入や維持管理に必要なコストや技術レベルの観点からも適正な技術を開発する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

開発途上国における人間居住の基盤は、身体や財産の安全が確保されている条件では「水と衛生」であり、2000年9月に採択されたミレニアム開発目標（MDGs : Millennium Development Goals）でも、2015年までに達成すべき8つの目標と18のターゲット、48の指標を掲げた中で、2015年までに「安全な飲料水及び衛生施設を継続的に利用できない人々の割合を半減する」としている。MDGsの水と衛生分野における現状は、「安全な飲料水へのアクセス」の目標達成に向けた取り組みが進展している一方で、「基礎的な衛生施設へのアクセス」の目標達成は大きく遅れており、衛生分野（トイレ、汚水処理など）に国際的に焦点を当て、対応が促されている。

このような中、適正技術（Appropriate technologies）の開発に注目が集まっている。適正技術は、かつては中間技術（Intermediate technologies）、もう一つの技術（Alternative technologies）とも言われ、いわゆる最先端の技術ではないものの、当該地域で供給可能な資材、資金、人材のもとで、地域住民に受容・維持される技術を指し、技術のもつ工学的合理性と使用者である住民の選好に適ったものである。例えば、トイレ・衛生にかかわる適正技術には、衛生改善とともに、し尿資源の活用、生活用水源である地下水・ため池などの表流水の水質保全、そして使い易さなどが求められる [1)]。

よって、適正技術に関する研究開発の方向性は、自然に応用研究・開発に偏りがちであり、先進国ですでに実用化、産業化された技術を開発途上国向けにモディファイするような方向での研究開発が主流である。一方、開発途上国の人間居住の改善を目的として、全く新しい原理を見出すような基礎研究の例は少ない。

前者の例として、我が国においては、JSTとJICAの共同で、研究開発およびそこで開発された技術の社会実装を支援する地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）でプロジェクト [2)] が推進されており、その中で、熱帯での水再利用を目的とした膜分離活性汚泥法（MBR : Membrane BioReactor）システム（東京大学・山本和夫教授の研究グループ）がタイで、UASB-DHSシステム（Up-flow Anaerobic Sludge Blanket -Down-flow Hanging Sponge）（東北大学・原田秀樹教授の研究グループ）がインドで、バイオトイレ（北海道大学・船水教授の研究グループ）がブルキナファソで、それぞれ技術の実証試験を行った。

また、土木学会環境工学委員会に設置された環境中間技術小委員会では、我が国がこれまでに開発してきた環境分野の適正技術（環境中間技術と呼んでいる）の種類をリス

トアップするとともに、技術導入の際に配慮すべき項目などを整理し、同技術の普及を促進する活動を行っている。彼らは、環境中間技術は、費用対効果、維持管理技術だけを見ても、開発途上国のものだけでなく我が国の人口減少地域にも適用できるものとして注目している。

海外における適正技術の研究開発の事例には以下のようなものがある。

- スイスのEAWAGにおける「途上国の水と衛生」研究分野（SANDEC）では、太陽光による水の消毒システムをはじめ、開発途上国向けの水供給・処理、下排水管理、都市固形廃棄物管理のための技術開発を行っている [3]。
- 国連大学のサステイナビリティ高等研究所（UNU-IAS）では、開発途上国において持続可能な開発のために環境政策を計画、実施する支援ツールや情報基盤の整備を目的としたWater and Urban Initiativeを進めており、その中には、水処理や低炭素技術に関する適正技術も含まれる [4]。
- タイのアジア工科大学（AIT）では、ゲイツ財団（Bill & Melinda Gates Foundation）の支援を受けて、適切な処理・リサイクル技術でヒトの糞便を衛生的に分離する新たな衛生施設の開発を行っている [5]。
- 基礎研究の例では、ナノテクノロジーを開発途上国の水処理に利用しようとする試みがある [6]。

産業化に関連して、（水と衛生に限らず）適正技術そのものに対する反論もある。International Development Enterprise（IDE）の創設者Paul Polakは、彼のブログの中で、適正技術開発の主体が市場向けにデザインするしたたかで強情な企業家ではなく、善意をもったもの作り屋だったために経済的な観点が欠落し、1973年にシューマッハーが提唱して始まった適正技術のムーブメントが終焉を迎えたとし、その代替としてBase of the Pyramid（BOP）ビジネスの考え方を推奨している [7]。BOPは、世界人口でもっとも割合が高い貧困層をターゲットにして、彼らが購入できる商品を開発する考え方であり、薄利多売を目指した動きである。後述するように、ゲイツ財団などがスポンサーとなり、BOP型の適正技術の開発が進んでいる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

開発途上国における人間居住を支える適正技術の開発は、先進国でみられるような、少しでも清澄な飲み水を提供し、少しでも下排水から汚濁物質を取り除くために最大限の努力を尽くす技術開発とは、その思想が異なる。開発途上国のそれぞれの事情（人口動静、電力事情、技術を理解して維持管理ができる人材の数など）を考慮して、導入や維持のためのコストや、維持管理の容易さなどの境界条件のもとで、開発する技術のレベルを最適化する必要がある。言い換えると、明確な出口戦略のもとで技術開発が求められる。

開発途上国側の視点からは、先進国と同等の居住環境を求めて、最新技術を導入したいニーズがあるかもしれない。しかし、先進国の人間居住の課題の多くはその利便性・快適性であるのに対して、開発途上国ではいまだに健康リスクの低減が第一義的な目標であり、その対策には猶予がない。限られた時間や予算の中でできるだけ多くの人が技術の恩恵にあずかり、社会全体での健康リスクを低減するための技術開発を推進するた

めには、開発途上国と先進国の「平等」とは何か、そして開発途上国の中での「平等」とは何かについてコンセンサスを得ることが、政策的な課題といえる。

また、現在、開発途上国の人間居住に関するプロジェクトは、先進諸国の対外援助政府機関やNGOが独自に進めているケースが多い。中には、複数の国が同じ地域で類似したプロジェクトを推進していることもあり、より効率的に技術開発や導入を行うためには、国際機関などが中心となり交通整理を行うことも政策的な課題の一つである。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ゲイツ財団は2012年に、近代的な公衆衛生施設を利用できない世界中の25億人のためにトイレを発明するコンテストを開催し、アイデアの実現に向けて資金提供を行うプロジェクトを決定した[8)]。このコンテストにおけるトイレの条件としては、水、電気、汚水処理システムがなくても稼働し、汚染物質を排出せず、できればエネルギーなどのリソースを生み出し、1日あたり5セントで稼働することが求められている。(7)の表中には一部だけを掲載しているが、米国および欧州を中心に、世界各国の研究機関や企業などによる実証レベルでのプロジェクトが実施されている（一部はすでに終了している）。
- 日本でもゲイツ財団ほどの規模ではないものの、日本の技術力を開発途上国のニーズに結びつけるためのプロジェクト公募（例えば、See-D Contest[9)]）が行われている。また、JICAがBOP事業を支援するスキームを有している[10)]。
- 情報の提供という重要な観点では、アジア13か国の各国環境大臣のリーダーシップのもとで参加するWater Environment Partnership in Asia（WEPA）が、下排水処理のための適正技術（現在稼働中の技術）に関するデータベースを構築し、ウェブ上で公開している[11)]。(7)に記載していない適正技術に関する情報も、本データベースから検索できるかもしれない。

### （６）キーワード

水、衛生、持続可能な社会、開発途上国、適正技術

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・おおむね終了している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・東京大学による熱帯向けMBRは、タイにおいて実証試験を実施している。東北大学他によるUASB-DHS技術は、インドにおいて実証試験を実施している。北海道大学他によるバイオトイレは、ブルキナファソにおいて実証試験を実施している。 |
| | 産業化 | × | → | ・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・おおむね終了している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・藻類を用いた排水処理技術（Quantitaive Bioscience）、MFC（Microbial Fuel Cell）を用いた家庭排水からの発電（マサチューセッツ大学）、ヤシ殻を原料としたバイオフィルターを用いた排水処理（RTI International）、微生物による下水から燃料への転換技術（ワシントン大学）など、多くの技術開発プロジェクトが、ゲイツ財団の援助を受けて実施中（一部はすでに終了）。 |
| | 産業化 | × | → | ・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・おおむね終了している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・スイスEAWAGのSANDECによって、適正技術の開発が精力的に進められている。<br>・尿を転用するドライトイレ（スイスEAWAG）、エネルギー産出型節水トイレ（英国Loowat社）、ナノ粒子を用いた汚泥からのバイオガス生産向上（バルセロナ大学）、ナノ膜を用いたトイレ（クランフィールド大学）など、多くの技術開発プロジェクトが、ゲイツ財団の援助を受けて実施中（一部はすでに終了）。 |
| | 産業化 | × | → | ・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・おおむね終了している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・国内の水質汚濁の問題に対応するために適正技術開発とその実証化が進められている [12)]。 |
| | 産業化 | × | → | ・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・おおむね終了している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・韓国特許庁（KIPO）が適正技術のデータベース化を始めた [13)]。 |
| | 産業化 | × | → | ・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 高橋邦夫, 高村哲, 農業地域におけるエコサン・トイレの普及活動－現状と今後の展開, 一般社団法人海外環境協力センター会報
2) JST SATREPS, http://www.jst.go.jp/global/
3) EAWAG, Water and Sanitation in Developing Countries, http://www.eawag.ch/forschung/sandec/gruppen/index_EN
4) UNU-IAS, Water and Urban Initiative, http://ias.unu.edu/en/research/water-and-urban-initiative.html#outline
5) AIT, AIT among UNESCO-IHE partners in Gates Foundation project, http://www.ait.ac.th/news-and-events/2011/news/ait-among-unesco-ihe-partners-in-gates-foundation-project/?searchterm=AIT%20among%20UNESCO-IHE%20partners%20in%20Gates%20Foundation%20project#.VMXCAP6sV8E
6) Brame, J., Li, Q., Alvarez, P.J.J. (2011) Nanotechnology-enabled treatment and reuse: emerging opportunities and challenges for developing countries. Trends in Food Science and Technology, 22, 618-624.
7) PaulPolak, The Death of Appropriate Technology I：If you can’t sell it don’t do it, http://www.paulpolak.com/the-death-of-appropriate-technology-2/
8) Sustainable Sanitation Alliance（SuSanA）, Research projects funded by the Gates Foundation, http://www.susana.org/en/resources/research/gates-foundation/all-projects
9) See-D Contest, http://see-d.jp/
10) JICA, BOPビジネス支援センター, http://www.bop.go.jp/list/jica
11) WEPA, Database of technologies in operation, http://www.wepa-db.net/technologies/top.htm
12) QIAN Yi, WEN Xianghua, HUANG Xia (2007) Development and application of some renovated technologies for municipal wastewater treatment in China. Front. Environ. Sci. Engin. China, 1(1): 1-12
13) KIPO, Appropriate Technology, http://www.kipo.go.kr/kpo/user.tdf;jsessionid=9863ca6b30d5fd041a9370704778aea0acc893dab8d4.e34RahyTbxmRb40Laxy-PahaRah0Ne0?a=user.english.html.HtmlApp&c=91016&catmenu=ek02_04_02

## ３．４．２　生態系サービスの適正管理

### ３．４．２．１　生物多様性の保全と持続的利用

#### （１）研究開発領域名

生物多様性の保全と持続的利用

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

生物多様性の現状や機能を評価するとともに、気候変動や土地利用の改変に伴う将来予測を行う。また、そうした科学的知見をもとに、生物多様性の保全や多様な生態系サービスを維持するうえで必要な社会制度を模索する研究を行う。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

現在は第6の大量絶滅の時代とも言われ、地球規模での生物多様性の減少が起きている。生物多様性はそれ自体に歴史的な価値があるだけでなく、人類にさまざまな自然の恵み、すなわち生態系サービスをもたらす源泉と考えられている。持続可能な社会の発展を実現するには、生物多様性の保全と持続可能な利用を探る科学の発展が不可欠である。2010年に名古屋で開催された第10回生物多様性条約締約国会議（COP10）で決議された20の愛知目標は、その実現のために必要な2020年までの具体策を示している。現在、その達成のための科学的評価と政策の実現が求められている。

生物多様性の研究は多岐にわたり一般的な整理は難しいが、ここでは4つに類型化したい。まず、生物多様性と生態系機能ないしは生態系サービスとの因果関係に関する定量的研究である。この分野は、欧米を中心に1990年代から小規模の野外実験や室内実験で、主に一次生産量を目的変数とした研究が進められてきたが、その後はさまざまな機能についての研究も進んできた。しかし、実際の保全・管理の現場に比べて時空間スケールがあまりに小さいため、応用には程遠い状況にあった。こうした背景から、最近では景観スケールで複数の機能やサービスを評価する研究が進んでいる[1)]。その代表が作物への送粉サービスであり、ハナバチの種数や景観の異質性が作物の結実に重要であることが実証されている。ただ、その他の生態系サービスについて、生物多様性がどの程度重要であるかはよくわかっていない。日本ではプロットスケールでの研究は進みつつあるが、大スケールでの研究は大幅に立ち遅れている。生物多様性と生態系サービスの研究から得られる成果は、生物多様性がなぜ必要か、どのような多様性がどの程度必要か、という問いに答えるうえで重要であり、今後、さまざまな地域でさまざまな時空間スケールにおいて、多様性と複数のサービスの関係性を明らかにする必要がある。

2番目は、生物多様性を減少させている要因、すなわち駆動因の解析である。世界的には人為による土地改変、生物の過剰採取、外来種、気候変動が主要因とされており、国内外を問わず相当数の証拠が得られている。日本においては、気候変動の影響についての証拠や予測はまだ十分ではなく、今後の課題である。一方で、上記の要因は単独で働くことはむしろ少なく、複合的に働くことが多いと考えられている。それらの複合的影響や将来予測については、国内外を問わず、十分な評価は行われていない。また日本では、人為管理の減少（アンダー・ユース）も重要視され、草原や雑木林の管理放棄が最終氷期以降から生き残ってきた生物の脅威になっている。一方で、人為管理の減少は、

大型哺乳類や一部の外来種の増加をもたらしていることも指摘されているが、十分な証拠に乏しい。今後こうした問題は、人口減少社会を迎える他国でも顕在化するに違いなく、日本発の先駆的な研究として発展が期待される。

3番目は、生物多様性の減少を防ぐ具体的な手法開発である。これは、世界各地で事業ベースで行われている生態系の再生や復元に代表されるが、科学的モニタリングに基づいた順応管理が必ずしも十分に行き渡っているわけではない。特に日本の場合、モデリングによる定量予測や間接影響の評価は遅れている。個別の例でいうと、外来種の駆除に関する技術開発は進んでいるが [2]、生態系レベルでの復元の数値目標や、生息地管理による外来種の低密度管理の研究は不十分である。また、絶滅種の再導入はイギリスやオセアニア諸国では盛んで成功例も多いが、日本ではトキやコウノトリなどが、ようやく端緒についたばかりであり、科学的評価や予測はほとんど行われていない。さらに、生息地の連結性の向上は、分断景観や温暖化に伴う生物の移動を可能にするうえで重要である。欧米では実際の生物の移動をモデリングし、景観デザインに応用した研究もあるが [3]、我が国では、河川など一次元（線）的な生態系以外では大きく立ち遅れている。

4番目は、生物多様性の保全や持続的利用を実現する社会や制度についての研究である。まず国立公園などの保護地域の選定には、最近費用対効果が高い場所を空間明示的に推定するアルゴリズム（Marxanなど）が普及し、温暖化や土地改変による将来予測、土地のコストや開発リスクなどの社会要因も組み込んだ保護区の推定も進んでいる。この研究は、近年オセアニアを中心に研究が大きく発展しているが [4]、我が国ではまだ端緒についたばかりである。さらに、保全の社会的インセンティブや規制の在り方に関する研究も進みつつある。認証制度や生物多様性オフセットは有効と思われるが、その科学的評価はまだ途上といえる。こうした評価を体系化する際には、社会の状態と生態系の状態の相互作用を明示的に組み込んだモデルが必要であるが、現在は理論が先行していて、実証に役立つ研究開発が急務である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

ここでは研究開発上の課題を3つあげる。

1. 生物情報や環境情報の不足：我が国ではイギリスなどに比べ、解像度の高い生物の広域分布データが圧倒的に不足している。環境省は、1970年代から断続的に行った自然環境保全基礎調査により、国土スケールでの生物の分布データ（3次メッシュ：約1 km四方）を収集してきたが、資金不足により植生図以外は継続の予定がないらしい。環境省主導で進めているモニタリングサイト1000がその代役を果たすとも言われているが、面的な情報ではなく、希少種が記録されにくいなど、代役を果たせるとは思えない。また、植生データの整備もデータ収集から10年以上のタイムラグがあり、リアルタイムの情報が使える状況にない。生物情報は、分布の要因推定や将来予測、その検証などに必須であることから、その不足は多様性評価のボトルネックとなっており、米国やイギリスのように [5] 国が主体となって継続的な資金提供の体制を作るべきである。
2. 社会シナリオと土地利用変化のリンクの立ち遅れ：生物多様性の状態を空間明示的に将来予測することは、保護区設定やインセンティブの設定など、さまざまな政

策の意思決定に不可欠である。気候シナリオについては、すでにさまざまな予測モデルから提供されており、日本でも1 kmの解像度でダウンスケーリングがされている。しかし、生物の分布推定に必要な将来の土地利用シナリオは未作成である。その最大の理由は、社会要因と環境変化をリンクさせるロジックが構築されていないことにある。すでに未曾有の人口減少社会に突入しつつある我が国では、社会科学者と生物学者が連携し、将来の土地利用変化を推定する研究開発はまさに急務である。社会シナリオと環境のリンクについての研究は、国際的な政策とも深く関連している。経済のグローバル化は、貿易を通した生物多様性への負荷を促進していることがわかりはじめている。日本の場合、TPPの推進により、農地面積が今後大きく変貌する可能性があるが、そうした国際的政策を国内の土地シナリオ分析に組み込む必要がある。産・学・官、そして海外の組織とも連携した学際的な研究開発が望まれる。

3. 生物多様性の文化的価値：人類にとっての文化的サービスは、生態系サービスの評価のうちでもっとも研究が遅れている。生物多様性は、人間が感じる生活の豊かさ、地域社会のきずな形成、子供の教育効果など、さまざまな文化的側面とリンクしているに違いない。単なる事例研究を超えた体系化と、それに基づいた適切な政策オプションの模索は、生物多様性の保全や持続的利用を実現するうえで非常に重要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

生物多様性の保全や持続的利用についての大型プロジェクトは、海外で盛んになっている。英国自然環境研究会議（NERC）の援助で行われているBESS（Biodiversity and Ecosystem Service Sustainability）[1)] では、さまざまなシナリオごとに、生態系サービスを提供できる生物多様性の閾値を推定する研究が進んでいる。これは社会科学者と連携した「学際的生物多様性科学」の樹立を目指したものであり、フューチャー・アース（FE : Future Earth）や生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム（IPBES：Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services）への貢献を念頭に置いている。また、EU主導のBiodivERsA[5)] は、欧州15カ国21の研究助成団体からなる組織で、ヨーロッパスケールでの生物多様性関連の学際研究を促進するための資金提供をしている。米国では資源開発庁（USAID）[6)] が大規模な資金を投入して、主に熱帯地域（アマゾン、東南アジア、東アフリカなど）の生物多様性の保全と社会の持続可能な発展に関する研究を支援している。日本では手薄な生物多様性と食の安全、健康との関係も対象研究としている点は注目すべきである。オーストラリアでは環境省や研究機構の支援で、環境政策の意思決定に資する研究開発（保全優先順位、生物多様性オフセット、戦略的アセスメントと持続性計画）が行われており[7)]、特にモデルや統計の新技術の開発が特徴的である。日本でも愛知目標やIPBESに対応した政策対応型の大型研究が立ち上がっており[8)]、今後社会科学者と連携したシナリオ分析や政策支援型の研究が期待される。

生物多様性のモニタリングについては、全米生態観測ネットワーク（NEON：National Ecological Observatory Network）[9)] が立ち上がり、10年間で4.3億ドルの

巨額を投じて、気候変動や土地利用変化、外来種の侵入などのデータがリアルタイムで一般公開される予定である。イギリスでは複数の組織が自然環境研究会議（NERC）や環境・食料・農村地域省（DEFRA）らの支援で、さまざまな生物のモニタリングが実施されている（（７）国際比較参照）。

## （６）キーワード

生態系機能、生態系サービス、絶滅危惧種、外来生物、気候変動、レジリエンス

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・生物多様性の観測に関しては、特に沿岸生物のモニタリング技術の高度化が進んでいる。湖沼では環境DNAによる新たなモニタリング手法の開発が進み、土壌では微生物のメタゲノム解析が進んでいる。（科研費、JST-CRESTなど）<br>・生物多様性の減少要因の解明や外来種の影響評価が進んでいる。耕作放棄地の問題や大型哺乳類の増加要因の解析はまだ途上である。（科研費、環境省推進費S-9）<br>・温暖化による生物分布の変化は、基礎データの集積は進みつつあるが、将来予測はサンゴやブナなどに限られている（環境省推進費S-8、S-9）。<br>・生物多様性と生態系機能、生態系サービスの関係の研究は、欧米に比べて立ち遅れている。<br>・生物多様性の指標開発は各生態系で進められているが、数値目標や閾値の有無など評価は遅れている。（科研費、農林水産省研究費） |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・外来種の駆除や大型哺乳類による被害防除に関する技術の高度化は進んでいる。しかし、低密度管理の手法や数値目標の評価は遅れている。（環境省推進費、農林水産省研究費など）<br>・絶滅種の再導入は、トキやコウノトリなど一部の種で進められているが、それらを支える自然再生や環境保全型農業の効用評価や持続可能性の評価は遅れている。（環境省推進費）<br>・保護区の効率的な探索についての研究は進行中である。しかし、社会シナリオを考慮した解析は立ち遅れている。（環境省推進費S-9）<br>・貿易による生物多様性への負荷の研究が進められている。生物多様性オフセットの研究は立ち遅れている。（環境省推進費S-9） |
| | 産業化 | × | → | ・研究開発による産業化は特に進展していない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・国立科学財団（NSF）は最近、遺伝的多様性、系統的多様性、機能的多様性の相互作用を解明する研究枠Dimension of Biodiversity[10]を設け、この分野の基礎研究を推進している。<br>・生物多様性観測の大規模ネットワーク（NEON、米国生物季節ネットワーク（USA-NPN：USA National Phenology Network[11]））に対する資金援助が充実しており、各組織が独自の分析を行うとともに、情報を広く社会に公開し、さまざまな評価や予測に資するシステムを構築している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・地球規模で重要な生物多様性を有する熱帯地域で、持続可能な保全と社会の発展を保証する研究が展開している。密輸の取り締まり、食の安全、健康なども考慮している。（USAID、NSF） |
| | 産業化 | × | → | ・研究開発による産業化は特に進展していない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・イギリスでは生物多様性モニタリングとその評価が、国から豊富な資金援助を受けて英国自然保護委員会（JNCC）[12]やInsect Pollinators Initiative[13]により継続されている。新たなモニタリングツールの開発も進んでいる。（BESS）<br>・温暖化による分布予測変化ついての研究が進んでいる[14]。（NERC、European Commissionの支援による）<br>・景観スケールでの生物多様性と生態系サービスおよびそのトレードオフの研究が進んでいる。（BESS、BiodivERsA） |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・開発途上国における保護区のプラニングや住民による生物資源の持続利用の研究が進められている。（Darwin Initiative[15]）<br>・社会シナリオごとに生物多様性の減少の閾値を特定する研究が進められている。（BESS） |
| | 産業化 | × | → | ・研究開発による産業化は特に進展していない。 |
| 豪州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・生物多様性の減少要因の解明、外来種の多種間相互作用、生息地連結性の評価、海洋生物のモニタリングなどが広く行われている。（NERP：National Environmental Research Programs[4]） |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・優先的な保護区の抽出、管理上の海洋ゾーニング、低コストでの最適モニタリング手法、社会生態連結モデルによる政策の意思決定への支援、生物多様性オフセット、バイオバンキングなどが進められている。（NERP, CEED：Centre of Excellence for Environmental Decisions[7]） |
| | 産業化 | × | → | ・研究開発による産業化は特に進展していない。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・米国との共同プロジェクトによる生物多様性、生態系の評価が進んでいる。（NSF[10]） |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・主に農業生態系を中心に、外来種の管理システムの構築が進められている。（Program 973[16]） |
| | 産業化 | × | → | ・研究開発による産業化は特に進展していない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | － | － | ・顕著な活動や成果は把握できていない。 |
| | 応用研究・開発 | － | － | ・顕著な活動や成果は把握できていない。 |
| | 産業化 | － | － | ・顕著な活動や成果は把握できていない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）Biodiversity & Ecosystem Service Sustainability （BESS）. http://www.nerc-bess.net/
2）環境省. 環境研究総合推進費. http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/gaiyou/
3）Brad H. McRae, Brett G. Dickson, Timothy H. Keitt, and Viral B. Shah 2008. USING CIRCUIT THEORY TO MODEL CONNECTIVITY IN ECOLOGY, EVOLUTION, AND CONSERVATION. Ecology 89:2712-2724.

http://www.esajournals.org/doi/abs/10.1890/07-1861.1

4) National Environmental Research Program（NERP）. NERP Environmental Decisions Hub.
http://www.nerpdecisions.edu.au/

5) BiodivERsA. http://www.biodiversa.org/

6) United States Agency for International Development（USAID）. USAID'S BIODIVERSITY POLICY.
http://www.usaid.gov/biodiversity/policy

7) Centre of Excellence for Environmental Decisions（CEED）. http://ceed.edu.au/

8) アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合研究 [環境省 環境研究総合推進費 S9].
http://s9.conservationecology.asia/theme

9) National Ecological Observatory Network（NEON）. http://www.neoninc.org/

10) National Science Foundation（NSF）. Dimensions of Biodiversity.
http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503446

11) USA National Phenology Network（USA-NPN）. https://www.usanpn.org/

12) Joint Nature Conservation Committee（JNCC）. http://jncc.defra.gov.uk/

13) Biotechnology and Biological Sciences Research Council (BBSRC). Insect pollinators initiative.
http://www.bbsrc.ac.uk/pollinators

14) The University of York. The York Reseach Database. Prof. Chris D Thomas, FRS. Projects.
https://pure.york.ac.uk/portal/en/researchers/chris-d-thomas%2875de1a24-019b-4791-8397-c8632e27de07%29/projects.html

15) Darwin Initiative. http://www.darwininitiative.org.uk/project/funding-scheme/

16) Institute of Plant Protection（IPP）, Chinese Academy of Agricultural Sciences（CAAS）. http://www.ippcaas.cn/Html/2009_03_26/2585_11735_2009_03_26_12269.html

### ３．４．２．２　陸域資源と生態系管理（含む陸水）

#### （１）研究開発領域名

陸域資源と生態系管理（含む陸水）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

地球温暖化や土地利用変化などさまざまな環境変動の中で、陸域資源およびそれが生み出す陸域生態系サービスを持続的に保全・利用することが今後の人類にとって最大の課題である。そのため、現時点における陸域生態系の資源およびサービスの評価ならびその変動をもたらす自然・社会要因を抽出し、将来予測に資する知識を創出するための研究開発を行う。ここでは、陸域資源の養分物質であると同時に汚染物質として知られ、日本における研究が十分ではない窒素の生物地球化学に関わる問題として、陸水を含む生態系管理と陸域資源に関する研究開発について述べる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

世界規模での環境問題には、地球温暖化をはじめとしてさまざまな要因があげられている。それらに対して現在の地球システム全体が有する環境の許容限界囲を「Planetary bounadary」と定義し、グローバルな評価が行われている[1)]。表１に示すように気候変動の問題と並んで、生物多様性損失と窒素循環過剰が地球環境の不可逆変化を回避する限界をすでに超えてしまった問題である[1)]。限界値の3倍以上である窒素過剰の問題は陸域資源の持続的利用と環境保全に深く関わっており、世界各地でのさまざまな研究が展開されている。

**表1．地球システムにおける各問題のPlanetary boundaries（地球システムの許容限界）の限界値、現状値、工業化以前の値（Rockström et al. 2009[1)] より抜粋）。現状値が限界値を超えている場合には、そのプロセスがすでに地球システムの不可逆変化を回避する許容境界値を超えている状況にあることを示す。**

| プロセス | パラメータ | 限界値 | 現状値 | 工業化以前の値 |
|---|---|---|---|---|
| 気候変動 | 大気二酸化炭素濃度（$ppm_v$） | 350 | 387 | 280 |
| 生物多様性損失 | 絶滅率（種/100万年） | 10 | ＞100 | 0.1–1 |
| **窒素循環** | 人間活動のために固定された大気窒素（$10^6$×Mg/年） | 35 | 121 | 0 |
| オゾン層破壊 | オゾン濃度（Dobson unit） | 276 | 283 | 290 |
| 淡水利用 | 淡水消費量（$km^3$/年） | 4,000 | 2,600 | 415 |
| 土地利用変化 | 耕地利用率（%） | 15 | 11.7 | 極めて低い |

窒素はあらゆる生物の必須養分であるため、森林や草地などの自然生態系の一次生産はもちろんのこと、食糧生産のために大量の窒素が必要となる。また、化石燃料の燃焼に伴って生じる窒素酸化物は大気中の酸性物質として挙動する。大気中の窒素ガスは不活性ガスであるため、そのままでは養分としての利用が限られていたが、20世紀初頭に工業的に窒素ガスからアンモニアを合成する技術（Haber–Bosch法）が開発されて以来、

大気から陸域に反応性窒素（Reactive nitrogen：窒素ガス以外の窒素化合物の総称）として固定される窒素量は自然界に生じる量と比べて、2倍以上に増大する結果となった[2)]。環境中に過剰に放出された反応性窒素は大気、土壌、水の富栄養化をもたらし、陸域生態系の構造や機能、そこからもたらされるさまざまな生態系サービスの劣化を生じさせる。

したがって、陸域資源の持続的利用と環境保全の両立を図るために、陸域における窒素汚染の問題と人間活動の関わりについて、国内外でさまざまな研究が行われてきた。欧州では全域における窒素汚染の問題について、200名を超える研究者からなる多角的な統合評価が実施された[3)]。そこでは、前世紀において人類が大気窒素ガスを反応性窒素に変換することで、全球の窒素循環をかつてないほど変化させてしまったこと、それによって窒素肥料の利用が増えることで世界の人口が増加した一方、環境や人間の健康について相当の悪影響をもたらしていることが示されている。特に、水質や大気の汚染、温室効果ガス、生態系、生物多様性、土壌劣化が深刻な課題としてあげられている。例えば、欧州における淡水のほとんどにおいて生物多様性劣化の基準値である窒素濃度を超えており、EU人口の3%が環境基準を大幅に上回る50 $mgL^{-1}$以上の硝酸態窒素を含む飲料水を利用している。また、窒素酸化物やアンモニアなどの大気汚染物質は粒子状物質や亜硝酸、オゾンの生成を伴い、人間の呼吸器や作物への悪影響を引き起こしている。そして、食糧やエネルギーの利用と環境・生態系保全の両立を図るための国際的で多面的な共同研究の必要性を提起している[3)]。米国では気候変動における窒素の役割を中心として、さまざまな生態系モニタリングや野外実験、包括的な評価が実施されている[4)]。統合報告書では、気候システムにおける大気窒素汚染の影響、陸域農業システムにおける窒素循環の問題、人間活動に由来する水圏への窒素流出の影響、窒素汚染と生物多様性の関係、窒素汚染が人間の健康に及ぼす影響について米国全体での現状と課題についてまとめられている[4)]。その結果、米国における人間活動の結果として増大した反応性窒素は気候変動、生物多様性劣化、大気・水域の深刻な汚染をもたらしており、窒素汚染削減に向けた取り組みが急務であることを指摘している。

国内においては日本全体の窒素循環やフロー解析について、主に統計資料やシミュレーションモデルを用いた研究事例が見受けられ、人間活動による窒素循環の増大によって地下水や河川水、沿岸域での水質悪化など、生態系・生物多様性や環境の汚染を引き起こしていることが示されてきた[5,6)]。しかしながら、それらの研究による現状認識をふまえて、今後の生態系管理のあり方や陸域資源の保全方策に向けての踏み込んだ議論や研究情報については依然として不十分である。

中国や韓国においては国家レベルのプロジェクトとして生態系変動や環境モニタリングに関するネットワーク研究が注目され、取り組みが進んでいる。しかしながら、人間活動の影響による窒素循環の変化やそれが生態系に及ぼす影響に関する研究は極めて限定的であり、その研究開発は依然として不十分である[7-9)]。また、今後において産業発展や人口増加が見込まれる東南アジア地域、南米・アフリカ地域における窒素資源の変容や生態系影響はとても重要であるのにも関わらず、その研究は極めて不十分であるのが現状である[9)]。

東南アジアなどの開発途上国においては国連気候変動枠組条約に関連して、森林減少・

劣化に伴う温室効果ガス削減の取り組みが進められ、削減活動に対して経済的インセンティブを与えるメカニズムの推進が議論されている（REDD+：Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries Plus）。また、生産から流通、加工に至るまでの環境保全に配慮し、持続的な木材生産を推奨するための森林認証制度が国際的な認証機関である森林管理協議会（FSC：Forest Stewardship Council）などを中心に進められている。窒素循環の過程で生成される亜酸化窒素（$N_2O$）は二酸化炭素やメタンと同様に温室効果ガスであり、硝酸態窒素は水圏における汚染源となりうる。したがって、生物生産の養分そして環境中（大気、土壌、水など）での汚染物質としてふるまう窒素の問題は地球温暖化抑制に貢献が期待されている森林の炭素固定機能やその他の環境保全機能にも大きな影響を及ぼすため、グローバルおよび地域スケールの視点からの持続的な森林管理体制の構築を進める上でも、適正な窒素資源利用や管理を進めることが必要である [9]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

人間活動の結果として増大した窒素循環は、養分としてのポジティブな影響を上回る速度で増加し、地域、国、全球レベルでのさまざまな生態系影響を引き起こしている。それらは今後の陸域資源の環境保全型持続的利用とそれに対応する生態系管理のあり方を検討する上で欠くことのできない視点である。大気窒素ガス（$N_2$）が工業的あるいは生物的に陸域生態系に固定され、それがさまざまな経路を経て生態系への影響や環境汚染を引き起こす連鎖的影響は、ひとつの系から別の系へと影響が伝搬していくことから窒素カスケード（Nitrogen Cascade）と呼ばれている [2]。窒素カスケードの解明と生態系管理に資する研究開発を進めていくためには、ひとつの学問領域を超えた学際的な視点や取り組みが必要である。また、人間活動によって増大した窒素循環が、どのように生態系の構造や機能（炭素固定を含むさまざまな環境保全機能を含む）にインパクトを与え、それを基にどのように将来の生態系管理法を構築するのかという問いに対応できる研究を展開するためには、生態系の変動に合わせた長期的かつ広域スケールでの研究開発が必要である。現状では、窒素に関連した大気汚染や水質汚染を防ぐためのトップダウンアプローチとしての法規制や環境基準の設定などは比較的進んでいる。しかしながら、生態系プロセスや生態系サービスに与える窒素循環の影響を長期的にモニタリングし、その評価や将来予測につなげるような研究を支援する長期的な研究予算の枠組みが極めて少ない。数年規模での成果を基本とした現行の研究予算システムは限定的な現象や特定の反応を明らかにするためには効果的であるが、窒素カスケードを含むダイナミックな生態系影響を考慮に入れた研究開発の取り組みには不十分であり、ひとつのボトルネックとしてあげられる。

また、政策や法規制によって自治体あるいは国レベルで実施可能なトップダウンアプローチとは別に、食糧やエネルギー消費に関わる個人消費者の視点から人為由来の窒素汚染問題をボトムアップアプローチで削減するための研究や評価技術の開発が必要である。それによって、陸域資源の有効活用と環境保全を視野に入れたトップダウン・ボトムアップ両面からのガバナンスを構築するための科学的知見の創出が期待される。さらに、食糧や飼料、エネルギーの国際貿易に付随する全球規模での窒素フローの変化と、

それが地域レベルでの環境汚染、資源管理、生態系管理に及ぼす影響と生態系サービスとの相互関係に関する科学的知見も不十分であり、国際共同での学際的な研究開発が必要とされる [9-11]。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

ランドスケープレベルでの環境・生態系情報を長期的にモニタリングし、その環境影響や生態系サービス評価を進めている取り組みとして、米国国立科学財団（NSF）の長期的な財政支援を受けて設立された長期生態学研究ネットワーク（US-LTER : US Long-Term Ecological Research Network）が稼働している。US-LTERでは、窒素の生物地球化学研究に関連して陸域資源や生態系管理に関する多くの学術成果をあげ、その基礎データを広く公開している [12]。NSFは近年、US-LTERおよび関連ネットワークを包含する形で、全米生態観測ネットワーク（NEON : National Ecological Observation Network）を開始し [13]、地球温暖化や生物多様性損失、窒素汚染問題を含むさまざまな環境問題に対応した科学情報を包括的にモニタリングし情報公開するための取り組みを推進している。長期生態学研究（LTER）の取り組みは欧州、北南米、東アジア・オセアニアなど世界各地に拡大し、国際LTERネットワークとして、さまざまな時空間スケールにおける生態系および人間－環境相互作用系をとりまく多様な研究課題に取り組んでいる [9, 14, 15]。中でも、気候変動下における人為由来の窒素循環過剰がもたらす生態系機能の変化やサービスの劣化について、国際LTERネットワークレベルでの研究イニシアチブが開始されている [9, 16]。日本のLTERネットワークもその加盟ネットワークとして数々の個別研究を進めており、国際LTERネットワークでの研究イニシアチブを牽引する役割を担っているものの [9]、長期的・国際的ファンディングの不足もあり十分な機能を果たしてはいない。

また、国際的なスケールでの窒素汚染問題を取り扱う研究プラットフォームとして国際窒素イニシアチブ（INI : International Nitrogen Initiative）があげられる [16]。INIは国際窒素会議を始めとした研究者間の情報共有・情報発信、国際共同研究推進の取り組みを進めるほか、窒素汚染に関する政策提言や各種レポートの出版を進めている。INIと連携して進められている「窒素フットプリント」評価の研究は、本領域に関連する最近の注目動向のひとつとしてあげられる。それは、消費者が食糧やエネルギーを最終消費することに対し、それらが生産され、流通、消費されるまでの過程で環境中（大気、土壌、水域）に放出される窒素ロス量を「窒素フットプリント」として評価する取り組みである [17]。消費者の最終消費量を基準として評価される窒素フットプリントとその変動要因の解析により、社会経済要因や個人要因などで変動する消費者行動の結果として環境中に放出される窒素ロス量の予測研究の開発に貢献でき、消費者レベルでの窒素削減行動を促すための科学的知見が創出されることが期待される [17]。

### （６）キーワード

窒素循環、生物地球化学、窒素カスケード、長期生態学研究、窒素フットプリント、国際共同研究

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・生態系レベルでのさまざまな窒素の生物地球化学に関する研究蓄積があり、気候変動・大気汚染を含む研究開発が進展しつつある[16, 17]。しかしながら、長期的な観測に基づいた研究については依然として不足している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・国家スケールでの窒素フロー・収支の解析が進み、日本全体での現状認識が進んできた[5, 6]。しかしながら、それを元にした政策提言やメカニズム解明につながる研究開発については十分ではない。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・エネルギー・食糧の低自給率、少子高齢化・地域過疎化による社会構造の変化、中国・ロシアなどからの長距離越境大気汚染（PM2.5含む）に対応した窒素フットプリント、それに伴う窒素汚染や生態系影響に関する研究が遅れている[9-17]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・米国生態学コミュニティやUS-LTERにおける窒素の生物地球化学、それに関連した生態系構造・機能に関する基礎研究に傑出した成果があり、進展を続けている[12, 13]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・気候変動に関連した窒素環境問題の統括的な報告書が出版されるなど[4, 11]、基礎研究をベースとした応用研究の進展が認められる。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・NEONなどトップダウンによる統括的研究推進の体制が整備され、衛星リモートセンシングとの連携やビッグデータの取り扱い、生態系サービスの経済評価など、関連分野を先導する研究開発が進められている[11, 13]。<br>・窒素フットプリントの評価手法が開発され[17]、それに基づく環境中への窒素ロス削減に関する科学提言への取り組みが進展している。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・ICP-Forests（International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests）[19]を始めとするサイトベースでのモニタリング研究により傑出した基礎研究が進んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・欧州全域スケールでの窒素汚染に関する統合評価が進められ、窒素カスケードの定量的評価など活発な応用研究の進展が認められる[4]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・窒素の生物地球化学に関する経済評価なども進められており[4]、気候変動との関連でも国家ネットワークレベルでの研究が進められている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・中国科学院（CAS）の主導によるトップダウンアプローチでの生態系監視網が整備され、いくつかの基礎研究における成果が認められるとともに、今後のますますの発展が期待される[8, 20]。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・基礎研究およびその研究論文出版に対して、それを活かした応用研究が不足している。 |
| | 産業化 | × | → | ・都市部を中心とした大気汚染（PM2.5を含む）、地域における土壌・水汚染が深刻化しているものの対策や研究開発が遅れている[21]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・森林研究所および環境部によるKLTERの取り組み[22]によって、いくつかの基礎研究開発は進んでいるもの、窒素循環に着目した生態系研究について目立った成果は得られていない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・2013年に国立生態学研究所が設立され、基礎研究のみならず応用研究の開発が期待される[23]。 |
| | 産業化 | × | → | ・目立った取り組みや進展は認められていない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Rockström et al. (2009) A safe operating space for humanity. Nature 461: 472-475
2) Galloway et al. (2008) Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. Science 320: 889-892.
3) Sutton et al. (2011) The European Nitrogen Assessment. Cambridge: Cambridge University Press
4) Suddick et al. (2012) The Role of Nitrogen in Climate Change and the Impacts of Nitrogen-Climate Interactions on Terrestrial and Aquatic Ecosystems, Agriculture, and Human Health in the United States: A Technical Report Submitted to the US National Climate Assessment. North American Nitrogen Center of the International Nitrogen Initiative (NANC-INI), Woods Hole Research Center, 149 Woods Hole Road, Falmouth, MA.
5) Shindo et al. (2009) Nitrogen flow associated with food production and consumption and its effect on water quality in Japan from 1961 to 2005 Soil Sci. Plant Nutr. 55 532-45
6) 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」(2006) バイオマス利活用システムの設計と評価，農業工学研究所，つくば
7) Kang H (2001) Effect of nitrogen deposition on terrestrial ecosystems. Korean J. Environ. Biol. 19: 232-238 (in Korean with English abstract)
8) Fang et al. (2011) Atmospheric deposition and leaching of nitrogen in Chinese forest ecosystems. Journal of Forest Research 16: 341-350.
9) Shibata et al. (2014) Consequence of altered nitrogen cycles in the coupled human and ecological system under changing climate: The need for long-term and site-based research. AMBIO (Online)
10) Lassaletta et al. (2014) Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. Biogeochemistry 118: 225-241.
11) Compton et al. (2011) Ecosystem services altered by human changes in the nitrogen cycle: a new perspective for US decision making. Ecological Letters 14: 804-815.
12) Driscoll et al. (2012) Science and society: The role of long-term studies in environmental stewardship. BioScience 62: 354-366.
13) National Ecological Observation Network, http://www.neoninc.org/
14) International Long-Term Ecological Research Network, http://www.ilternet.edu/
15) International Nitrogen Initiative, http://www.initrogen.org/

16) Vihervaara et al. (2013) Using long-term ecosystem service and biodiversity data to study the impacts and adaptation options in response to climate change: insights from the global ILTER sites network. Current Opinion in Environmental Sustainability 5:53-66
17) Leach et al. (2012) A nitrogen footprint model to help consumers understand their rol in ni-trogen losses to the environment Environ. Development 1: 40-66
18) 佐竹研一(編) (2010) 特集「窒素汚染と大気・水環境」, 地球環境 15(2), (社) 国際環境研究協会
19) ICP-Forests (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests), http://icp-forests.net/
20) Lu et al. (2013) Long-term nitrogen addition decreases carbon leaching in a nitrogen-rich forest ecosystem. Biogeosciences 10: 3931-3941
21) Liu et al. (2013) Enhanced nitrogen deposition over China. Nature 494: 459-462
22) KLTER (Korea Long-Term Ecological Research Network), http://www.klter.org/emain.htm
23) National Institute of Ecology, http://www.nie.re.kr/nie_eng/index.html

### ３．４．２．３　沿岸域および海洋の資源と生態系管理

#### （１）研究開発領域名

沿岸域および海洋の資源と生態系管理

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

乱獲、水質汚染、海岸改変、外来種問題、気候変動など、多様な人為的負荷が多重に作用して劣化が著しい沿岸域および海洋の生物多様性と生態系機能について、持続的に資源および生態系サービスを利用するための基礎的研究および応用的技術を体系的に構築する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1. 基礎的研究の動向

陸域に比較して、生物多様性・生態系サービスの研究が十分に進展していない海域生態系では、全球的なモニタリングによる生物多様性の全容の把握、および、生物多様性・生態系サービスの関係性や変動機構の解明の継続が最重要課題である。海洋生物多様性については2000年代に行われたCensus of Marine Life（CoML）により全球的な知見が飛躍的に増加した[1)]。また、データベース構築や種検索にかかる多様な関連プロジェクト（例えば、OBIS（Ocean Biogreographic information System）[2)]、EOL（Encyclopedia of Life）[3)]、WoRMS（World Register of Marine Species）[4)]）などが立ち上がり、海洋生物多様性・生態系の知見の向上に貢献している。一方、CoMLの成果を海洋生態系の保全や海洋生物資源の持続的利用に結びつける研究プログラムが立案されている（LiCO：Life in a Changing Ocean）[5)]が、2000年代終盤以降の世界的な経済成長の停滞の影響もあってその展開は不十分であり、各国・地域ないしは特定の生物群・生態系に焦点を絞って非組織的に進行しているのが現状である。

2. 海洋生物資源の保全に向けた研究開発

海洋生物資源の保全、管理については、水産有用種に関する研究が進んでいる。科学的根拠に基づく資源管理の徹底が重視されるようになり、資源評価に関連する漁獲可能量制度（TAC：Total Allowable Catch）や個別漁獲割当（IQ：Individual Quota）、漁獲割当量に譲渡性を付与した方法（ITQ：Individual Transferrable Quota）による管理が米国、欧州を中心に展開されている。日本においてもTACとIQが導入されており、ITQの導入が現在検討されている。このほか、韓国においてはTACとIQが導入されている一方で、中国は、TACやITQの法律上規定はあるものの未実施とされている。

3. 海洋保護区を含む海域の空間利用計画による保全・持続的利用に向けた研究開発

空間利用計画による保全・持続的利用に向けた研究開発については、オーストラリアのクイーンズランド大学において保護区の選定などを目的として開発されたMarxanにより[6,7)]、保全と利用の観点から効率的かつ科学的に保護区を選定する研究が、グレートバリアリーフなどを中心に展開されている[8)]。公海域の保全施策の推進を目的として、生物学的・生態学的に重要な海域（EBSA：Ecologically or Biologically Significant

marine Area）の候補地を選定する専門家ワークショップが、北太平洋および北西大西洋の公海域や地中海において開催されてきており、東南アジア海域においても同様の会議が2015年に予定されている。日本でも本分野における研究が急速に進展し、その成果は環境省によるEBSA候補地選定事業などに有効に生かされているが、米国および欧州に比較すると遅れをとっている。今後、保護区のネットワーク化、各保護区管理効果の評価などの研究を推進する必要がある。

4. 移入種の生態系影響評価・管理に関する研究開発動向

日本および中国、韓国、ロシア、カナダ、米国が参加する北太平洋海洋科学機構（PICES：The North Pacific Marine Science Organization）において、海産外来種の情報収集システム開発が現在行われている[9]。また、米国では、スミソニアン環境研究センターを中心に海産侵入種を対象とした多角的な生態学的アプローチによる研究を進展している。日本では、国立環境研究所や主要分類群学会を中心にデータベースの構築や、侵入経路の解明などの研究が進みつつあるが[10]、海産種の生態系への影響評価をふまえたリスク分析、予防などなどは個別事例に留まっており、今後の研究課題である。

5. 気候変動影響、適応策に関する研究開発

気候変動が海洋生物・生態系に与える影響の研究については、ここ数年間で各サブシステムにおける重要なプロセスの特定[11]および全海洋系への影響評価[12]が進展した。応用的な面においては、各種の現在の分布域と環境要因との関連性を元に、各種気候変動シナリオに基づいて、将来の分布変動を予測する手法が確立しつつある。例えば、日本ではサンゴ礁の将来の分布域が水温上昇と海洋酸性化の複合作用を受けて減少することなどが予測された[13]。また、気候変動影響に関する基礎的研究においては、各種の分布や生物量の変動が、物理的環境要因（水温、pHなど）だけでなく、種間相互作用や進化的反応、幼生分散の制約などさまざまな影響を受けて複雑に変化することが明らかになってきた[14]。さらに、気候変動予測の成果を将来の海洋資源・生態系の管理に反映させる試みについては、例えば、上記3で取り上げた海洋空間利用計画のような取り組みに対して、将来の分布変化をふまえた保護区の設定法の検討が行われている。しかし、現状では多くの研究は各種ごとの分布予測にとどまっている。生物多様性全体や生態系機能の将来予測やそれをふまえた保全管理策の研究の進展が望まれる。

6. 社会科学との連携研究の進展

海洋における生態系サービスの経済学的評価についても、欧米で先端的な研究が進んでいる[15,16]。また、生態系サービス診断評価ツールの開発（Marine InVEST）[17]など、技術的進展も著しい。日本では最近になって、干潟の経済評価やBlue Carbon Sinkの定量的評価などが環境省や国土交通省、農林水産省主導で進んだ[18-21]。これらの研究の進展は、今後、海洋を対象とした二酸化炭素排出権取引や、生物多様性オフセットの導入などと関連して、政策決定や産業振興に関連してくると思われる。海域の各種生態系サービスの現状については、Halpernらの一連の研究により全球レベルでの時空間変異が明らかになってきた[22,23]。特に、沿岸生態系の脆弱性や回復可能性について、海洋資源・

生態系サービスの減少と、沿岸域のほかの負荷（人口増加、海水面上昇、Food Security、貧困問題、統治機構など）を同時に検討する必要性が認識されるようになり、海洋工学や環境経済学、人類学などの分野を取り込んだ領域統合的なアプローチが進みつつある。この分野については、特に欧州で関心が高い。また、多様な人間活動による負荷が深刻な開発途上国の沿岸海域を対象として、国際的な協力研究が進みつつある。日本は東南アジアを中心にJST-JICAの地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）[24]や、総合地球環境学研究所のプロジェクトなどによる多数の研究が進みつつあるが、その多くは二国間協力研究であり、異なる研究プロジェクト間の連携による統合的な理解が進んでいる状況とはいえないのが現状である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

前述の通り、沿岸域および海洋の資源と生態系の効率的な管理に向けては、海域生物多様性および各種生態系サービスの全球的な変異を明らかにする必要がある。現在入手可能な広域スケール情報は、地域ごとの主要海域生態系（例：サンゴ礁、藻場、干潟など）の分布・変動をとらえるには解像度が低すぎる一方、局所スケールでの高解像度の空間情報を全球レベルで入手するのは技術的・資金的に非常に厳しいのが現状である。したがって、地域レベルで得られる断片的な高解像度空間情報を、グローバルスケールに拡大する（外挿・内挿する）空間統計学的な方法の技術開発が重要な課題と考えられる。

このような広域・高解像度の長期データ、空間データは、いわゆる「ビッグデータ」であり、その効率的・効果的な分析には、インフォマティクスの知識・技術をもつ人材の育成・登用が不可欠である。また、各国のさまざまな機関・組織で取られたビッグデータのアクセスと利用については、オープン化されていないものが多い（特に日中韓）。これを解決するため、共通プラットフォームの開発運用に向けた技術的検討、およびデータ利用に関する合意形成プロセスの構築が必要である。

海洋資源と生態系サービスの評価、およびその管理においては、その利用に関する社会学および経済学的な解析が不可欠である。しかし、これらの社会経済学的研究は、沿岸海域の資源、生態系サービスの変動に関する最新の科学的知見を十分に生かしていないのが現状である。また、グローバルな社会経済学的解析をする研究と、各沿岸海域の地域社会を対象とした研究は、それぞれ独立して進んでおり、統合的な視点が欠けている。この解決に向けて、グローバル・ローカルな社会科学と自然科学（海洋学、生態学）の有機的な連携による社会・生態学システム（Social-Ecological System）により統合的な研究を推進することが求められている。

沿岸海域における海洋生態系の研究は、世界でもっとも生物多様性が高い東南アジアなど熱帯海域での研究が不十分である。しかしながら、先進国への養殖魚介類の輸出拡大などに伴う海域利用の変化（例：マングローブにおける養殖池の開発）、リゾート開発などが無秩序に行われてきた結果、生物多様性喪失および生態系サービス劣化が著しい速度で進んでいる。このように開発途上国の海域利用の変化はグローバルな経済動向に著しく影響される。近年研究が進んできたFootprint研究[25,26]はこの評価に有用であるが、国レベルの経済統計を利用する場合が多く、各地域の海域利用の実情を反映した

研究アプローチの開発が必要である。

最後に、ここにあげた基礎的・応用的研究が、沿岸生物多様性や生態系サービスへの持続的利用の実質的な改善に結びついているかどうかの検証は十分に行われていないのが現状である。効果的な検証方法の開発、長期的な検証をふまえた順応的管理法などについて、技術面および研究制度・環境面の整備が求められる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

我が国では、JST-CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」研究領域が2011年より開始されている。この研究領域は、海洋生物多様性の研究について、これまでの各種ボトルネックを克服するための新技術開発を目指しており、高解像度各種センサや海中ロボットの開発、海洋ゲノミクス、リモートセンシング、生態系モデリングなど多様な研究課題が進行中である [27)]。

米国では、2013年よりMarineGEO（The Marine Global Earth Observatory）がスミソニアン協会のTMON（Tennenbaum Marine Observatories Network）の主導のもと開始された [28)]。この事業は、米国スミソニアン協会に所属する研究機関が協同し、各地の調査フィールドや、膨大な学術情報・資料を基に、生物多様性の広域長期研究を推進しようとする事業であり、世界中の海洋研究者が注目している。本事業は、生物多様性と海域のレジリエンスの関係性を解明し、持続的利用に貢献することを目的としている。

欧州では、これまでの複数の研究コンソーシアム（EUR-OCEANS、MarBEF、Marine Genomics Europe）を統合する形で、EuroMarine projectが2011年より準備され、2014年よりEuroMarine+として本格的に始動した [29)]。海洋生物多様性、生態系の主に基礎的な研究分野において、遺伝子から生態系までの研究を統合的に推進することを目標としている。

沿岸生態系のさまざまな景観を対象に、研究者の国際的なネットワーク研究による広域比較研究が進展している。例えば、アマモ場ではZEN（Zostera Experimental Network）[30)]、コンブ林ではKEEN（Kelp Ecosystem Ecology Network）[31)] などのネットワークが形成され、統一した観測・実験による生態系の変動様式や生物多様性・生態系サービスの関連性の評価が行われている。中でも、熱帯から温帯の岩礁域・サンゴ礁域を対象としたReef Life Survey [32)] は研究者のみならず民間のSCUBA団体のボランティアなどの協力も含めて、世界各地の非常に多数の地点で生物多様性の情報を取得しており、その統合解析成果は、Nature誌に複数発表されている [33, 34)]。

生態系や生物多様性の保全を含む地球環境問題の解決につながる分野統合的研究を推進するため、ベルモント・フォーラム（BF：Belmont Forum） [35)] による国際共同研究事業が2012年より開始されている。沿岸海域では、Coastal Vulnerabilityをテーマとした7研究課題が進行中である。

### （６）キーワード

長期モニタリング、生態系サービス評価、全球的解析、水産資源管理、海洋保護区、外来種、気候変動、社会・生態学システム

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・環境省が実施しているモニタリングサイト1000事業においてサンゴ礁調査が2003年から、沿岸域（磯、干潟、アマモ場、藻場）調査が2008年から開始され [36]、気候変動や東日本大震災の影響評価などにも貢献している。<br>・その他にも各種機関、団体による海洋生物多様性・生態系の長期モニタリングが各種実施されているが、広域な日本の沿岸を十分に網羅しているとはいえない。また、多くの事業は単年度予算で実施されており、長期的な継続性の担保は必ずしも保障されていない。<br>・海洋生物多様性の全容把握、損失率、将来変動の予測研究に関する環境省環境研究総合推進費によるプロジェクト（S-9）が2011-2015年にかけて進行中であり、主要海洋生物・生態系の分布推定や将来予測、およびEBSAの選定方法など基礎的・応用的研究の両面において一定の成果をあげている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・EBSA候補地の科学的な選定方法や保全の優先順位付けに関する研究が急速に進展している [37, 38]。<br>・外来種管理においては、国立環境研究所が海産種を含む侵入種データベースを作成しており [10]、種ごとの生態情報や現在の分布状況、文献などを集積した網羅的なデータベースが構築されている。このほか、藻類ではDNAマーカーを用いた侵入経路の解明が進んでいる。<br>・最近になって、干潟の経済評価やBlue Carbon Sinkの定量的評価など、生態系サービスの評価に関する取り組みが、環境省や国土交通省、農林水産省主導で進展している [18-21]。<br>・JST-CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」研究領域による新たな技術開発が進行中である [27]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・基礎・応用研究の成果が、持続的漁業の確立に向けた国レベルの協議会での議論に生かされている。<br>・知床半島、石垣島などにおいて、地域住民、行政、研究者が一体となったGood practice、Co-production、Co-managementの実践が進みつつある。<br>・政策への反映：海洋生物多様性保全戦略や生物多様性国家戦略の策定、およびそれに基づく諸施策の立案や企画が進行している。例えば、生物多様性条約COP10で作成された愛知ターゲットの一つである海洋保護区の設定においては、科学的方法論を用いた重要海域の抽出により候補地の選定が行われた。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・スミソニアン協会のMarineGEO/TMONなどに代表される海洋生物多様性の大規模長期研究がますます振興されつつある。<br>・US-LTERの沿岸域サイトが長期生態系データを取得してさまざまな影響解析に利用しているのに加え [39]、各州の大学の海洋研究所や海洋大気庁（NOAA）／海洋漁業局（NMFS）などの政府系研究機関、さらにはNGOなどが多様な先進的研究を続けており、その成果の集積および新たな知見の提供は世界的に群を抜いている [40]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・海洋生物および物理環境データが充実しており、海洋保護区候補地の優先順位付けおよび海洋保護区のネットワーク化、保護区の有効性の評価の研究が進展している。<br>・外来種管理においては、スミソニアン環境研究センターを中心に研究が進展している。例えば、10年間のバラスト水の移動に関する全球データ集積と解析により、主要種の侵入経路や生態系への影響が明らかになった [41]。また、米国内の侵入種のデータベース（NEMESIS）[42] や商船から集約されたバラスト水の起源や量、またそれらの解析結果などの情報を集積したデータベース（NBIC）[43] などを構築している。<br>・主要各大学に海洋生物多様性・生態系サービスの経済価値評価や社会学・生態学システムの研究を行うグループがあり、研究成果も多い。例えば、UCSB（University of California, Santa Barbara）のSustainable Fisheries Groupは [15]、保全と持続的漁業の両立や海洋保護区（MPA：Marine Protected Area）の効率的な設計やその経済価値の評価について一定の成果を出している。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・研究機関、NGO、企業などの連合体による研究・保全の実践活動が各地で盛んに行われており、沿岸海域の生物多様性・生態系機能の維持や保全に一定の役割を果たしている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・経済危機による研究資金の全体的な縮小はあるものの、引き続き海洋生態系・生物多様性に関する多数の研究課題が実施されている。<br>・EuroMarine+の設立による分野横断的な基礎研究の進展が期待されている。<br>・経済危機以降も、欧州の企業が出資した海洋生態系の基礎研究が盛んであり、例えば深海生態系を対象としたINDEEP（深海生態系の科学調査に関する国際ネットワーク）などのプロジェクトが民間企業の出資のもと、展開されている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・北東大西洋において15カ国の政府からなるOSPAR（北東大西洋の海洋環境を保護するためのオスロパリ条約）が科学的データを用いて公海域における海洋保護区の設定をしている [44]。<br>・産学連携による大型研究：European ComissionのFP7において海洋生物多様性に関する課題は70件以上にわたる。次期大型研究計画であるEU Horizon 2020でもAquatic resourcesなどの分野で募集が予定されている [45]。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・ノルウェーやアイスランドなどの北欧を中心に、科学的資源管理が順調に進み、水産資源の持続的利用が達成されている。その結果水産業従事者の収入の増加などの経済学的効果も上がっている [46]。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・海洋生態系のモニタリングプログラムが長期にわたり実施されている。<br>・海洋生物多様性・生態系の情報を取り扱う各種データベースが整備されつつある。例えば、Biodiversity Clearing-House Mechanism of China や China Oceanic Information Network 、 Asia Biodiversity Conservation and Database Networkなどの情報ノードが運用され、Catalogue of Life Chinaは2013年に最新版が更新された。<br>・中国長期生態学ネットワーク（CERN：Chinese Ecosystem Research Network）は従来陸域生態系を研究対象の中心としてきたが、近年、黄河河口域や山東半島などにおいて集水域の生態系変動や人間活動が沿岸域に与える影響の評価などの研究も進みつつある。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・中国科学院（CAS）ではYellow River Estuary（黄河入海口）とYantai（煙台）をコアサイトにした沿岸生態系動態の統合的研究をすすめており、一定の成果をあげている。<br>・海面変動予測と脆弱性のリスク評価技術の開発などの事業計画が進みつつある [47]。 |
| | 産業化 | △ | → | ・多様な取り組みにより、一部には環境の改善（Swan estuaryのアマモ場再生による生態系の改善など）がみられたところもある。しかしながら、沿岸域の多くは水質汚染などの劣化が依然として深刻であり、保全管理研究や事業の効果の検証には時間がかかると思われる。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・Korean coastal wetland survey や Shallow-water biodiversity surveyなどの長期モニタリングが数年間にわたり展開されており、韓国沿岸海域の生物多様性・生態系の全容や変動様式が明らかになりつつある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・National Fisheries Research & Development InstituteやKorea Institue of Ocean Science & Technologyなどを中心に、有用水産資源のモニタリングや資源管理策に関する研究が進む。一部は2020年代までの長期的な事業継続が予定されている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・海洋水産資源についてTACとIQの導入による先進的な管理が進みつつあるが、資源の回復、持続的利用に関する成果に結びつくかどうかについての評価にはまだ時間がかかると思われる。<br>・研究機関と企業の連携による沿岸域の生物多様性・生態系モニタリング事業 [48] などあるが、詳細情報が入手困難である。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Census of Marine Life（CoML）. http://www.coml.org/
2) Ocean Biogeographic Information System（OBIS）. http://www.iobis.org/
3) Encyclopedia of Life（EOL）. http://eol.org/
4) World Register of Marine Species（WoRMS）. http://www.marinespecies.org/
5) Life in a Changing Ocean（LiCO）. http://lifeinachangingocean.org/
6) Ball, I.R., H.P. Possingham, and M. Watts. Marxan and relatives: Software for spatial conservation prioritisation. 2009, Chapter14, 185-195. in Spatial conservation prioritisation: Quantitative methods and computational tools. Eds Moilanen, A., K.A. Wilson, and H.P. Possingham. Oxford University Press, Oxford, UK.
7) The University of Queensland. Marxan. http://www.uq.edu.au/marxan/
8) Fernandes, L., Day, J., Lewis, A., Slegers, S., Kerrigan, B., Breen, D., Cameron, D., Jago, B., Hall, J., Lowe, D., Innes, J., Tanzer, J., Chadwick, V., Thompson, L., Gorman, K., Simmons, M., Barnett, B., Sampson, K., De’ath, G., Mapstone, B., Marsh, H., Possingham, H., Ball, I., Ward, T., Dobbs, K., Aumend, J., Slater, D., and Stapleton, K. Establishing representative no‐take areas in the Great Barrier Reef: large‐scale implementation of theory on marine protected areas. Conservation Biology.2005,19 ,6.
9) 大谷道夫，風呂田利夫，横山寿，加藤雅也．PICES における海産外来種データベースの開発計画．日本プランクトン学会報．2009，56(2)，183-189.
10) 国立環境研究所．進入生物データベース. http://www.nies.go.jp/biodiversity/invasive/
11) Harley CDG, Randall Hughes A, Hultgren KM, Miner BG and others. The impacts of climate change in coastal marine systems. Ecol Lett. 2006, 9,228-241.
12) Hoegh-Guldberg O, Bruno JF. The impact of climate change on the world's marine ecosystems. Science. 2010, 328, 1523-28. DOI: 10.1126/science.1189930
13) Yara Y, Vogt M, Fujii M et al. Ocean acidification limits temperature-induced poleward expansion of coral habitats around Japan. Biogeosciences. 2012, 9, 4955-4968.
14) 仲岡雅裕．気候変動にともなう沿岸生態系の変化?生物群集から考える.(大串隆之・近藤倫生・仲岡雅裕編）シリーズ群集生態学４ 生態系と群集をむすぶ. 京都大学学術出版会. 2008, 179-204.
15) University of California, Santa Barbara. Sustainable Fisheries Group. http://sfg.msi.ucsb.edu/about-us/people/sfgteam/steve-gaines
16) VALMER. http://www.valmer.eu/

17) The Natural Capital Project（NatCap）. http://www.naturalcapitalproject.org/
18) 環境省. 環境研究総合推進費「藻場の生態系サービスの経済的価値評価：魚類生産の「原単位」から「日本一」をさぐる」(H21～H22)
http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/backnumber/suishinhi/jpn/projects_underway/pdf/RF097.pdf
19) 環境省. 湿地が有する経済的な価値の評価結果について. 2014.
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=18162
20) 所立樹，細川真也，三好英一，門谷茂，茅根創，桑江朝比呂. 沿岸域のブルーカーボンと大気中$CO_2$の吸収との関連性に関する現地調査と解析. 港湾空港技術研究所報告. 2013,52,1.
21) 渡辺謙太，桑江朝比呂. 浅海域における炭素隔離機能の評価へ向けた元素比・安定同位体比による有機物動態の解析. 港湾空港技術研究所報告. 2013，52，3.
22) Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkow, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Heinemann, D., Lenihan, H. A., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R. and Watson, R. A global map of human impact on marine ecosystems. Science.2008, 319 (5865), 948–952.
23) Halpern, B. S., Longo, C., Hardy, D., McLeod, K. L., Samhouri, J. F., Katona, S. K., Kleisner, K., Lester, S. E., O'Leary, J., Ranelletti, M., Rosenberg, A. A., Scarborough, C., Selig, E. R., Best, B. D., Brumbaugh, D. R., Chapin, F. S., Crowder, L. B., Daly, K. L., Doney, S. C., Elfes, C., Fogarty, M. J., Gaines, S. D., Jacobsen, K. I., Karrer, L. B., Leslie, H. M., Neeley, E., Paly, D., Polasky, S., Ris, B., Martin, K. S., Stone, G. S., Sumaila, U. R. and Zeller, D. An index to assess the health and benefits of the global ocean. Nature.2012, 488, 615–620.
24) JST SATREPS. http://www.jst.go.jp/global/
25) Lenzen, M., D. Moran, K. Kanemoto, B. Foran, L. Lobefaro, and A. Geschke. International trade drives biodiversity threats in developing nations. Nature, 2012, 486, 109-112.
http://dx.doi.org/10.1038/nature11145
26) Weinzettel J, Hertwich EG, Peters GP, Steen-Olsen K, Galli A .Affluence drives the global displacement of land use. Glob Environ Change. 2013, 23, 2, 433-438.
27) JST CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」研究領域.
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah23-3.html
28) Marine Global Earth Observatories（MarineGEO）. http://www.si.edu/MarineGeo
29) EuroMarine+. http://www.euromarineconsortium.eu/
30) Zostera Experimental Network（ZEN）. http://zenscience.org/
31) Kelp Ecosystem Ecology Network（KEEN）. http://www.kelpecosystems.org/
32) Reef Life Survey（RLS）. http://reeflifesurvey.com/
33) Stuart-Smith RD, Bates AE, Lefcheck JS, Duffy JE, Baker SC, et al. Integrating abundance and functional traits reveals new global hotspots of fish diversity. Nature, 2013, 501, 539-542.doi: 10.1038/nature12529

34) Edgar, G.J., Stuart-Smith, R.D., Willis, T.J. et al. (2014) Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. Nature, 506, 216‐220. doi:10.1038/nature13022
35) Belmont Forum（BF）. http://igfagcr.org/
36) 環境省生物多様性センター. モニタリングサイト1000. http://www.biodic.go.jp/moni1000/index.html
37) Nakajima, R., Yamakita, T., Watanabe, H., Fujikura, K., Tanaka, K., Yamamoto, H., Shirayama, Y. Species richness and community structure of benthic macrofauna and megafauna in the deep-sea chemosynthetic ecosystems around the Japanese archipelago: an attempt to identify priority areas for conservation. Diversity and Distributions. 2014,1-13.doi: 10.1111/ddi.12204
38) Yamakita T, et al. Identification of important marine areas around the Japanese Archipelago: Establishment of a protocol for evaluating a broad area using ecologically and biologically significant areas selection criteria, Marine Policy.2014, in press.
39) The Long Term Ecological Research Network（The LTER Network）. http://www.lternet.edu/
40) United Nations World Ocean Assessment. http://www.worldoceanassessment.org/
41) Miller, A. W., Minton, Mark S. and Ruiz, Gregory M. Geographic Limitations and Regional Differences in Ships' Ballast Water Management to Reduce Marine Invasions in the Contiguous United States. Bioscience. 2011, 61(11), 880-887. doi:10.1525/bio.2011.61.11.7
42) Smithsonian Environmental Research Center（SERC）. National Exotic Marine and Estuarine Species Information System（NEMESIS）. http://invasions.si.edu/nemesis/index.jsp
43) SERC. National Ballast Information Clearinghouse（NBIC）. http://invasions.si.edu/nbic/
44) OSPAR Commission, 2013, An assessment of the ecological coherence of the OSPAR Network of Marine Protected Areas in 2012.
45) European Commission. Horizon 2020. Aquatic Resources. http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/area/aquatic-resources
46) The Common Fisheries Policy （CFP）. Success stories in sustainable fisheries management. 2012. http://cfp-reformwatch.eu/2012/02/success-stories-in-sustainable-fisheries-management-%E2%80%93-28-february/
47) China Ocean and Climate Change Information Network. http://www.cocc.gov.cn/gzdt/201407/t20140707_31487.html
48) Korea Marine Environment Management Corporation（KOEM）. https://www.koem.or.kr

### ３．４．２．４　流域レベルの生態系管理（森林から海まで）

#### （１）研究開発領域名

流域レベルの生態系管理（森林から海まで）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

上流域の森林地帯、中流域の農業地帯、下流域の湿地帯、沿岸域の都市など、河川のネットワークを通じてさまざまな物質やエネルギーが上流から下流へ、もしくは下流から上流へ運ばれ（サケの遡上や羽化昆虫の飛翔など）、結果としてさまざまな生物が生息している。これら流域がもつ生態系サービスと生物多様性を高度に発揮するための管理・再生指針および技術に関する研究開発を行う。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

生物多様性保全のための保護区の設定については、古くからユネスコの人間と生物圏計画（MAB：Man and Biosphare Programme）で言われてきた、核心保護地域と周辺の緩衝地域（コアとバッファー）の考え方が支持されてきたが、1990年辺りから、保護地としてのコアやそれをつなぐコリドー（回廊）だけでは、希少種などの保全はできないとの考え方が一般的になった。つまり、人間の生産活動が実施されているエリア（コアに対してマトリックスと呼ぶ）での管理を見直し、生態系プロセスに準拠した考え方を取り入れていくマトリックス管理が支持されるようになってきた。そこでは保護地域の重要性は認めつつも、生物多様性や生態系サービスの保全のためには、農業や林業、漁業など、人間の生産活動そのものに、生態系プロセスに配慮した技術の導入が必要になる。

これらの考え方を先導する基礎的研究は、欧米を中心に実施されてきており、日本を含めてアジア諸国からの貢献度は低い。その内容は、①生産行為や管理行為を撹乱としてとらえ、その頻度や規模を自然撹乱（例えば山火事や風倒など）のそれに模倣するように実施する方法、②自然撹乱後に残される生物学的遺産（biological legacy）が次世代の生態系回復に重要であるとの研究成果から、生産行為を行う時も、すべてを収穫せずに、一部重要な生物学的遺産を残す方法、③陸域と水域のエコトーンである水辺域の保全を図る考え方などが示されている。さらに、陸域と海域とのつながりについては、④サケ科魚類の遡上が陸域の生産性や生物多様性に与える影響を吟味し、管理目標に加えることなどが議論されている。これらの考え方や技術についての評価は、米国やカナダ、EU諸国を中心に、大規模フィールド実験を行いながら検証されつつある[1)]。残念ながら、③を除いて、このテーマにおける日本やアジアの研究は極めて少ない。③については、1990年～2000年代にかけて、陸域と水域の相互依存系に関する先進的な実験的研究が日本で実施され、水辺域管理についての多くの知見が集積されている。

流域を通じた生態系サービスについては、日本においては森林がもつ水源涵養機能が古くから注目され、多くの基礎的研究がなされ、国民的な支持を得て30を超える都道府県で水源環境税が導入されている。また、1897年の森林法によって定められた保安林制度により、森林のもつさまざまな生態系サービス（土砂流出・崩壊防止、飛砂、防風など）についての基礎的研究が実施され、世界的にも注目される成果が得られている。さ

らに、日本のグループがアムール川流域を対象として行った研究から、川に溶存した鉄分が基礎になって、海の一次生産に影響を与えているという新たな知見が発信され、鉄供給源としての湿地や河川周辺の河畔林の重要性が指摘されている[2)]。

一方で、基礎的研究から応用的技術に向けて、米国を中心に開発された生態系サービスの空間評価ツールInVEST（Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs）は、さまざまな国において使用され、シナリオ設定とその評価が試行されている。また、欧州を中心に生態系と生物多様性の経済学（TEEB：The Economics of Ecosystems and Biodiversity）報告書が作成され、対策を取らない場合の経済的損失、評価手法の標準化などが検討されている。欧州でも生態系サービスの地図化は盛んに行われており、ビオトープマップなど、すでに揃っている基礎データに、文化的景観要素を加えてさまざまな解析手法が提案されている。日本でも、湿地の生態系サービスについての経済評価や流域のもつ生態系サービスの地図化が、環境省による検討委員会で実施されている。さらに、国際的には生物多様性及び生態系サービスに関する政府間プラットフォーム（IPBES：Intergovernmental Science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services）が立ち上がっており、日本もこれまでの科学的知見の整理と評価手法の高度化を急ぐ必要がある。また、リオデジャネイロで開催されたリオ＋20において、世界銀行が主導した自然資本宣言は注目に値する。59ヶ国および民間企業88社が、クリーンな空気、クリーンな水、森林をはじめとする生態系の自然資本の経済価値を、ビジネスの意思決定や各国の国民経済計算システムに組み込むことに合意しており、今後ますます生物多様性や生態系サービスの価値を測る科学的手法の開発が必要となる。

流域における生態系管理を進める上で、劣化した生態系を再生する技術は、注目を集めている。再生技術分野のなかの緑化分野では、市街地や公園・庭園、森林において日本には多くの実績があり、菌根菌を利用した緑化工法など、個別には優れた技術が発展しているが、生物多様性と生態系サービスを発揮するための包括的な景観レベルのデザイン論にはなっていない。この分野におけるEU諸国の科学的・技術的発展はめざましく、LIFEプログラム[3)]、Habitat Directive（Natura 2000）などを活用しながら[4)]、エコロジカルネットワーク整備や自然再生が着実に進められ、科学的に評価されている。

日本においては、過去に絶滅したコウノトリやトキを、地域の環境保全の象徴種として野生復帰させる試みが実施され、営巣や餌環境の解析が進み、環境保全型農業や河川改修事業が実現し、その効果が科学的に解析され論文として発表されている。さらに、自然再生地や世界自然遺産区域（知床や屋久島など）における管理の考え方として順応的管理の考え方が定着し、モニタリングデータの解析に基づいた施策・技術の改良、見直しが行われるようになり、その成果は国際的に注目されている。さらに流域レベルの生態系管理・復元については、釧路湿原を含む釧路川流域、さらに米国フロリダ州キシミー川流域で、森林から河川、農地、湿地生態系のつながりが議論され、物質の移動と生態系の変化、復元に関する多くの研究成果が発表されている[5)]。また、人工洪水など、ダムを使って実験的に洪水を起こし、下流域の物理・化学・生物の変化を研究し、ダム管理に生かす試みが、米国のコロラド川や日本（ダムの弾力的運用）でも実施され、その効果が期待されている。

さらに、地球温暖化による自然災害ポテンシャルが増大するなかで、EUを中心に発達

してきたグリーンインフラの考え方が注目されている。生態系がもつ防災や減災機能を流域管理や街づくりに生かしていく考え方で、急激な人口減少による放棄林地・農地の発生など、さまざまな生態系が劇的に変化する日本においては、早急に進めなければならない課題である。将来、洪水氾濫区域からのヒトの撤退が可能になれば、その場所は、現在急激に姿を消している撹乱依存種（撹乱がなくなると絶滅する種）を保全できる自然再生区域になる。そして同時に、地球温暖化に伴う洪水規模の増加に対応した緩衝空間として、防災的にも機能する。

リモートセンシングやGISによる空間情報の収集、解析に関する研究は、世界的に進んでいる。また、生物種の生息ポテンシャル評価（例えばMaxEnt）、空間明示型の多様性保全プログラム（例えばMaxranやZonation）、生態系サービス評価モデル（例えばInVEST）などがWEB上で公開され、妥当性が国際誌上でも議論され、有効性の検討やプログラムの改良が進んでいる。さらに、水理・水文・生態などの複合現象を解析するために、異なった機能をもつ要素モデルを一体的に協調・稼働させるためのプラットフォームCommonMP[6]、さらに米国地質調査所（USGS）との共同で河床変動や洪水氾濫をシミュレートできるソフトiRICが日本で開発され[7]、これらのソフトを使った研究成果が徐々に発表されている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

流域における生態系管理の課題を科学的に解明するためには、流域スケールのフィールド実験が必要になるが、日本では小流域における水文観測に限られる。こうしたフィールド実験を実施するためには、行政の協力が不可欠であるし、行政の施策を正しく評価するためにも、研究機関との協力が必要となる。米国やカナダでは、生物学的遺産の効果検証のために、国有林や州政府が協力し、森林収穫方法を実験的に変える試みがなされている。その成果は数多くの国際誌に掲載され、科学的検証を経た技術となって、世界に発信されている。日本でも、少しずつ官学協働プロジェクトが実施され、自然再生事業の順応的管理の一環として、フィールド実験とモニタリング調査が行われるようになってきたが、欧米と比べるとまだ低いレベルに留まっている。

さらに、流域生態系評価で必要となる基礎情報について、日本では水文・気象学的情報は整備されているが、生物情報については極めて不十分であり、解析できない空白地域が多い。例えば、環境省による自然環境保全基礎調査の植生調査1/25000も、国土の半分程度に留まっており、なかなか進展しない。さらに、各省庁で実施されている情報が個別に管理されており、統合的に使用できる環境にはない。また、林野庁の森林調査簿データなど、公開されていないものも多い。さらに、都道府県レベルにおける基盤情報の整備状況は、都道府県によるばらつきが大きく、一般的にはデータベースとしては整備されていない。一方で、都道府県レベルで行われる事業に対して、多くの生物調査が実施されており、位置や種情報が自動的に大学や博物館に集められるシステムが必要である。

また、生態系管理や自然再生事業の評価、順応的管理を実施するためにも、事業に対するモニタリング調査は必須である。しかるに、多くの事業においてモニタリング経費が十分に確保されておらず、事業終了と同時に終了し、その後の評価が行われていない

ケースも多い。今後、データベースやモニタリングを効率よく実施するためにも、短時間で効率的に広域情報を得るための新たなツールの開発（リモートセンシング、無人飛行機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle）、レーザプロファイラ、DNAバーコーディング、環境DNAなど）が必要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

全米生態観測ネットワーク（NEON：National Ecological Observatory Network）が予算規模としても群を抜いている。米国全土を20の地域に区分し、コア観測拠点を建設し、ヒトの活動が生態に及ぼす影響を30年間にわたって観測する全米生態観測ネットワークプロジェクトである。予算規模も壮大で、総額4億3,400万ドルを交付することを発表している。また、水が浸透する地球表面に注目した米国CZO（Critical Zone Observatory）プログラムがスタートし、流域管理の大型プロジェクトとして注目を集めている。

生態系管理の分野では、実践が重要であり、そうした成果を積み上げているのはEUであろう。Birds Directive、Habitats Directive（Natura 2000）やLIFEプログラムの実施によって、保護区やそのネットワーク、自然再生事業が実施され、科学的に検証されている。また、流域管理の視点からWater Framework Directiveが知られており、EU水域（地下水を含む）の水質を持続可能に利用でき、生態学的に健全な状況にし、洪水および渇水の影響の緩和などを統一的な水管理によって実現することを目標にしている。

日本では環境省環境研究総合推進費戦略的研究開発領域（S-9）として「アジア規模での生物多様性観測・予測・評価に関する総合的研究」が開始され、さまざまな陸域生態系の生物多様性ならび生態系サービス評価が実施され、成果が出つつある。こうした成果は、日本の保護地区の拡大、保全政策、世界的な動きであるIPBESなどに反映されると考えられる。

流域における生態系管理を支えるための、国際研究プログラムとしては、フューチャー・アース（FE：Future Earth）が注目される。このプロジェクトは国際科学会議（ICSU）が推進する地球環境変動分野の４つの国際研究計画を統合するものであり、学術の専門家だけでなく、社会の多様なステークホルダーが協働して研究活動の設計を行うことに特徴がある。日本学術会議をはじめ、日本の研究者の積極的な参加が期待される。

技術的には、リモートセンシング、無人飛行機（UAV）、レーザプロファイラ、DNAバーコーディング、環境DNAなど、新たなモニタリング技術が開発されており、流域レベルの生態系管理を実施するために必要なツールになるだろう。

### （６）キーワード

生物多様性、生態系サービス、自然資本、自然再生、順応的管理

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・小流域レベル（数km²）の水文・物質循環の現地観測については多くの研究成果があり、機能（サービス）評価も可能である。大流域では水文・水理モデルが多い。世界的に汎用性のあるモデルが公開されつつある。<br>・Biological legacyが回復に与える影響については、倒木上更新に関する研究が多く、技術的発展は少ない。<br>・森林と河川の相互作用系、陸域と海域のつながり、生態系の連結性については、世界的にも先進的な研究がなされている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・自然再生や生態系管理計画の実施、モニタリングは、国内で数多く実施されており、一部国際的にも発信されている。<br>・埋土種子を使った湿地や湖沼の再生などの技術は、確実な発展を遂げている。<br>・ダムの弾力的運用に認められるように、生態系プロセスの模倣技術は、徐々に実践に移されている。<br>・流域・国土レベルの生物多様性評価については近年進み、一部国レベルの保全戦略に使われている。また生態系サービス評価も進みつつある。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・自然資本の経済評価など、徐々に生態系サービスの価値が国民経済に組み込まれつつある。三井住友信託銀行は、自然資本宣言に署名。<br>・グリーンインフラの整備が、国土強靭化計画で議論されている。<br>・自然再生技術の高度化が図られ、一部産業化されている。<br>・レーザプロファイラ、リモートセンシング、無人飛行機（UAV）による広域調査はすでに産業化されている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・Bological legacyや撹乱の頻度・強度を考慮した生態系管理、水辺域の機能評価、広域な生物・環境データをもとにした生物多様性、生態系サービス評価など、大規模フィールド実験も実施しながら、多くの分野で先進的な成果を上げてきた。<br>・上記の解析に必要なモデルをWEBで公開することによって、世界の研究をリードしてきた。<br>・生態系管理についての大規模プロジェクトを次々に発案・実施し、さまざまな生物圏・地圏を網羅する形で、成果が着実に積みあがっている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・生態系管理の考え方を現地で実践し、モニタリングで検証し、課題がある場合は、管理方法を変更するなど、順応的管理の基礎を築いている。<br>・リモートセンシングや環境DNAなど、新たな技術開発においても、多くの予算がつぎ込まれ、国際的にリードしている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・多くの生態系管理技術は、大学や研究機関が行政もしくはNGOと協力しながら実施しており、ビジネスとしての広がりは限定的であると思われる。<br>・モニタリングや基礎データ収集のための、レーザプロファイラ、リモートセンシング、無人飛行機（UAV）による広域調査はすでに産業化されている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・Biological legacyの評価や生物多様性に配慮した生態系管理、ならびに湿地管理の考え方は進んでいる。<br>・生態系サービスの評価も、文化景観に力点を置いて数多く実施され、国際的に発信されている。米国よりも日本景観に適合する。<br>・EU内での産業の粗放化効果、放棄地の自然回復、自然再生事業の効果評価では、高い業績をあげている。<br>・エコトープ区分とその応用など、流域レベルの基礎研究も古くから実施され、成果を上げている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・さまざまなDirectiveを通じたEUによる着実な自然再生事業、生態系ネットワークの形成が行われている。<br>・EUとしてグリーンインフラ戦略を採択し、地球温暖化による気候変動をふまえたヨーロッパ各国におけるさまざまなグリーンインフラが研究され、国際的に発信されている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・流域レベルの地球温暖化に対する適応策の提言がなされ、$CO_2$ガスの着実な低減など、産業を通じて具体化する力は世界でもっとも高いと思われる。<br>・自然再生事業の着実な実施は、森林、農地、河川、湿地など、あらゆる生態系に及んでおり、近自然工法に代表される技術で世界をリードしている。<br>・生物多様性オフセットやバンキングの運用、生態系サービスの経済評価などが積極的に行われている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・開発圧力が強く、生態系管理についての基礎的研究もあまり発信されていない。<br>・水質や大気など、日本がかつて経験した数多くの公害問題を抱えており、まずはそうした環境を産業ベースでどうやって解決していくかが中心に据えられている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・国の緑化政策により、広範囲で造林が進められている。<br>・急激な産業発展に伴う生態系サービスの劣化に対応するため、InVESTによる評価を行ったり、水資源開発と利用ならびに水質維持の研究が必要となっている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・流域レベルにおける産業化は、水資源の枯渇など、危機的な生態系サービスの劣化に対するものに限られ、全体的には高くない。<br>・資源の輸入国として、廃棄物、汚水処理などが課題になっている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・朝鮮戦争直後の禿山の緑化をすることが、下流への土砂流出を抑えるために重要であり、過去40年間、緑化事業の基礎的研究が実施されてきた。<br>・花崗岩におけるマツ類の造林については、基礎的な研究が進んでいる<br>・現在成立している森林の多様性は低く、病虫害の研究は進んでいるが、生物多様性、生態系サービス研究のレベルは低い。<br>・山林火災とその後の植生回復の研究はさかんだか、撹乱は負の効果という認識が強く、生態系管理の基礎的研究レベルは低い。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・湿地造成や、都市域でのビオトープ造成などについて、造園分野を中心に自然再生に関する研究がさかんになっている。<br>・陸域の再生のなかでも、川や湿地の再生事業が数多く実施されている。ソウルで実施されたチョンゲチョン川の再生事業は世界的に有名である。残念ながら、再生事業の科学的評価があまり行われておらず、現状の研究レベルも高くない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・エコツーリズムを中心とした観光産業への寄与があると思われるが、総合力としては強くない。<br>・都市域では、チョンゲチョン川の再生にみられるように、ビオトープ造成で周辺地域の産業化、観光化が認められるが、限定的である。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）Kohm, K. A., Franklin, J.F.　eds. (1997) Creating a Forestry for the 21st Century: The Science Of Ecosytem Management. Island Press.
2）白岩孝行　(2011) 魚附林の地球環境学―親潮・オホーツク海を育むアムール川. 昭和堂.
3）European Commission. LIFE Programme. http://ec.europa.eu/environment/life/
4）European Commission. The Habitats Directive/Natura 2000 Network. http://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/habitatsdirective/index_en.htm
5）中村太士編　(2011)　川の蛇行復元－水理・物質循環・生態系からの評価－. 技報堂出版.
6）CommonMPプロジェクト推進委員会監修／椎葉充晴・立川康人編 (2011) CommonMP入門 ～ 水・物質循環シミュレーションシステムの共通プラットフォーム ～ 技報堂出版.
7）iRIC（International River Interface Cooperative）ソフトウェア. http://i-ric.org/ja/

### ３．４．２．５　生物多様性及び生態系サービスの評価

#### （１）研究開発領域名

生物多様性及び生態系サービスの評価

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

生物多様性及び生態系サービスは価値が少ない、または分からないものとして扱われる場合が多い。生物多様性及び生態系サービスは、人間を含めた多くの生命に多大な恩恵をもたらすものであるのにも関わらず、これらの財が市場を経由して取引が行われないことによって、過剰に利用されることがある[1)]。この問題を解決する一つの手段として、環境経済評価手法がある。この手法によって価格がゼロとして扱われる生物多様性及び生態系サービスの価値を金銭的に評価し、最終的に消費者余剰の推定値を用いて環境政策に役立てることが可能となる[2,3)]。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

生態系と生物多様性の経済学（TEEB：The Economics of Ecosystem and Biodiversity）が近年では注目を浴びた研究開発領域である。TEEB以外にもエコシステムパートナーシップ（ESP：The Ecosystem Services Partnership）が国際的に各地域においても成果をとりまとめており、東アジアチャプターも発足している[4)]。本領域の説明を行うために、生物多様性及び生態系サービスの経済評価を研究課題とし、事例として沖縄サンゴ礁の経済評価を行っている、吉田ら[5)]によるサンゴ礁保全政策による経済評価について概要を紹介する。その次に国内外の経済評価事例について、表にまとめる。

1. サンゴ礁保全政策による経済評価の例[5)]

現在、気候変動により生物多様性の危機が生じている。一般的には危機に瀕している種を保護すべきであると考えられる。しかし、気候変動によって死滅の危機にさらされるような種を保護することが経済的に妥当かどうか、費用便益・対策の面からは不明である。そこで気候変動によって減少する種を保護する価値を、生物多様性の減少とともに定量的に評価し、また、保護する場合はどのような保護シナリオが妥当かについて、沖縄のサンゴ礁の死滅（白化）を具体事例として検討した。

個人が沖縄のサンゴ礁に対し、どれ程の経済価値を感じているかを明らかにするために、サンゴ礁に対する効用関数を推定し、各属性に関するパラメータから各係数の限界支払意思額（MWTP：Marginal Willingness To Pay、単位あたりの変化に対する支払意思額）を推定する。加えて、提供される情報の詳細さが人々の価値判断に与える効果を推定することで、どの程度の情報を出すことが市民の価値判断を上げることができるか特定可能となる。これを科学コミュニケーションの一環として考え、個人に提供される情報の価値（限界支払意思額）やその他の回答に与える効果・影響）について検討する。そして、提供する情報によって個人がサンゴ礁に認める価値の違いについて検討する。

本調査ではコンジョイント分析（表4参照）を用いて沖縄のサンゴ礁保全対策の経済評価を行った。なお、この調査の対象は実際の人口分布に合わせてランダムに男女に聞くことが望ましい。まず、表１のように回答者を4つのグループに分け、それぞれ異なっ

た事前情報を与えて比較することでその影響を見ることができる。事前情報は、アンケートに答える前に表1に記載の情報を各グループに与えた。

**表1. 各グループへの情報提示方法**

| | |
|---|---|
| グループ1： 動画情報 | グループ2： 詳細情報 |
| グループ3： 簡略情報 | グループ4： 情報なし |

分析手法としては、通常コンジョイント分析の一種である選択型実験を行うことが多い。具体的には表 2 のような表を回答者に提示し、回答者には 3 つの対策の中からもっとも好ましいものを一つ選んでもらう。回答者に対し、表 2 のような設問を一人につき 8 回繰り返した。各回で対策の中身は変化するが、対策 3 は現状であるので毎回同じである。

**表 2. 選択型実験の例**

| 2100 年の状況/目標<br>各属性 | 対策 1 | 対策 2 | 対策 3<br>（現状維持） |
|---|---|---|---|
| サンゴ礁の景観がどれくらい維持されるか（LAND） | 70%維持 | 50%維持 | 10%維持 |
| サンゴ礁の面積をどれくらい保全できるか（ARIA） | 70% | 40% | 10% |
| 沖縄に分布するサンゴ 400 種のうち何種を保全できるか（SPECIES） | 300 種 | 300 種 | 50 種 |
| 九州以北で増えるサンゴの割合（KYUSHU） | 5% | 10% | 30% |
| 対策を実行するためにあなたが払う必要がある寄付金の額（PRICE） | 2000 円 | 500 円 | 0 円 |
| | ↓ | ↓ | ↓ |
| もっとも好ましいと思うものを一つ選んでください | ▭ | ▭ | ▭ |

以上の選択結果をもとにサンゴ礁の各属性に対する限界支払意志額の推計を、情報提示方法別に出すことが可能になる。

結果の例として以下のようなことがわかる。個人は「サンゴ礁の面積の保全対策」に対して、相対的にもっとも高い限界支払意志額をもっている。また、次に「サンゴ礁の景観の保存」への限界支払意志額が高い。一方で、「サンゴ礁の種の保全」に対しては、限界支払意志額は低い。加えて、温暖化の影響によってサンゴ礁の分布域が北上することによって「九州以北でのサンゴ礁の割合」が増えることに対しては、不効用を感じることが明らかになった。

情報提示の違いによる限界支払意志額への効果については、サンゴ礁のそれぞれの属性に対する限界支払意志額は、情報の与え方によって異なる結果が得られた。サンゴ礁の面積に関しては動画情報、種の保全に関しては詳細情報、九州以北で増えるサンゴ礁の割合に関しては簡略情報、サンゴ礁の景観に関しては動画情報によって、限界支払意志額が高くなることが明らかになった。サンゴ礁に関しては、どの情報の与え方が、限界支払意志額を高めることに対して一意に有効ということはなく、情報の与え方それぞ

れに有効な側面があることがわかった。

2. 国内外の経済評価事例

表3に国内、表4に国外の経済評価の事例を示す。

**表3. 国内の経済評価事例**

| No. | 事例 | 評価対象生態系 | 場所 | 評価手法 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 全国的なシカの食害対策の実施により保全される生物多様性の価値 | 森林 | 全国 | CVM |
| 2 | 奄美群島を国立公園に指定することで保全される生物多様性の価値 | 森林 | 鹿児島県 | CVM |
| 3 | 沖縄県やんばる地域における絶滅危惧種の経済価値評価 | 森林 | 沖縄県 | CVM<br>ｺﾝｼﾞｮｲﾝﾄ分析 |
| 4 | 宮城県大崎市蕪栗沼を対象にした生態系サービスの価値評価 | 農耕地 | 宮城県 | CVM<br>ｺﾝｼﾞｮｲﾝﾄ分析 |
| 5 | 釧路湿原における自然再生事業の評価 | 湿地 | 北海道 | ｺﾝｼﾞｮｲﾝﾄ分析 |
| 6 | 函館市松倉川の生態系の評価 | 河川 | 北海道 | CVM |
| 7 | 奄美大島に生息するリュウキュウアユを保全する価値 | 河川 | 鹿児島県 | CVM |
| 8 | 熊本市における地下水涵養機能保全政策の評価 | 森林 | 熊本県 | CVM |
| 9 | 横浜市における郷土種に配慮した森林公園整備の評価 | 都市部 | 神奈川県 | ｺﾝｼﾞｮｲﾝﾄ分析 |
| 10 | 六甲山系における森林の公益的機能の評価 | 森林 | 兵庫県 | ｺﾝｼﾞｮｲﾝﾄ分析 |
| 11 | 森林の公益的機能の評価 | 森林 | 全国 | 代替法 |
| 12 | 屋久島の生態系保全の価値 | 森林 | 鹿児島県 | ﾄﾗﾍﾞﾙｺｽﾄ法<br>CVM |

表 4. 国外の経済評価事例

| No. | 事例 | 地域区分 | 評価対象生態系 | 場所 | 評価手法 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 鉱床開発により損害を受けるカカドゥ国立公園の環境の価値 | オセアニア州 | 森林 | オーストラリア | CVM |
| 2 | ダムの撤去により回復する河川生態系の価値 | 北アメリカ州 | 河川 | アメリカ | CVM |
| 3 | バルディーズ号事故の生態系被害額の算定 | 北アメリカ州 | 海洋 | アメリカ | CVM |
| 4 | サンゴ礁のレクリエーション価値 | オセアニア州 | 海洋 | アメリカ<br>ハワイ | TCM<br>CVM |
| 5 | スリランカにおけるアジア象の保全価値 | アジア州 | 草地 | スリランカ | CVM |
| 6 | 重要な生物群系を擁する湿地の保全価値 | アフリカ州 | 湿地 | 南アフリカ | 代替法 |
| 7 | ルセル国立公園の価値（保全管理の効果） | アジア州 | 森林 | インドネシア | 市場価格法<br>CVM |
| 8 | 工業地帯における湿地の生態系サービスの価値 | アフリカ州 | 湿地 | ウガンダ | 代替法 |
| 9 | 海洋生態系の価値 | オセアニア州 | 海洋 | モルディブ | 市場価格法<br>代替法 |
| 10 | 水質浄化サービスへの対価 | 北アメリカ州 | その他 | アメリカ | 代替法 |

※表3･表4：文献6)を参考に作成。評価手法については表5参照。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

環境評価手法には問題点が多く指摘されているが、これまでにないシナリオをどう評価するかについて、いまだもっとも望ましい評価手法であるといえる。しばしば指摘されてきた注意しなければならない課題や欠点をここでまとめる。

トラベルコスト法などの顕示選好法には、実際の評価額を少なくとも考慮できるという利点があるが、評価額に含まれる価値の対象範囲が狭い、つまり「非利用価値」を評価額に含めることができないという問題がある。また、コンジョイント分析などの表明選好法には、「非利用価値」を評価額に含めることができるという利点はあるが、財の価格の推定の基になる支払い意志額などについて、回答者に直接尋ねるという方法をとることから、評価額にバイアスが生じるという問題が指摘されている（過大もしくは過少に推定される）。

さらに、（代替法を除く）環境評価手法もまた社会調査の一種であるが故の課題がある。それは各手法がアンケート調査に依存していることにより、回答者が真の値を回答しないインセンティブが存在する場合、評価額にバイアスが生じるということである。このように環境評価手法には欠点や課題があるが、米国海洋大気庁（NOAA）ガイドラインに近い適正な調査を実施することにより、バイアスをできるだけ少なくし、評価額がバイアスをもつという欠点を克服することが可能である。どのような手法・分析法も短所と長所をもっているが、それらをふまえたうえで、環境評価手法を用いた適切な金

銭評価により環境政策や公共政策に対し貢献することが重要である。各手法の欠点と利点などについて、表5にまとめる。

表5. 環境評価手法の利点と欠点

| 評価手法 | 顕示選好法 | | | 表明選好法 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 代替法 | トラベルコスト法 | ヘドニック法 | CVM | コンジョイント分析 |
| 内容 | 環境財を市場財で置換するときの費用をもとに評価 | 対象地までの旅行費用をもとに評価 | 環境資源の存在が地代や賃金に与える影響をもとに評価 | 環境変化に対する支払意思額や受入補償額を尋ねることで評価 | 複数の代替案を回答者に示して、その好ましさを尋ねることで評価 |
| 適用範囲 | 利用価値<br>水源保全、国土保全、水質などに限定 | 利用価値<br>レクリエーション、景観などに限定 | 利用価値<br>地域アメニティ、大気汚染、騒音などに限定 | 利用価値および非利用価値<br>レクリエーション、景観、野生生物、生物多様性、生態系など幅広く適用可能 | 利用価値および非利用価値<br>レクリエーション、景観、野生生物、生物多様性、生態系など幅広く適用可能 |
| 利点 | 必要な情報が少ない<br>置換する市場財の価格のみ | 必要な情報が少ない<br>旅行費用と訪問率などのみ | 情報の入手コストが小さい<br>地代、賃金などの市場データから得られる | 適用範囲が広い<br>存在価値やオプション価値などの非利用価値も評価可能 | 適用範囲が広い<br>存在価値やオプション価値などの非利用価値も評価可能<br>特定の環境対策以外に複数の代替案を比較して評価可能 |
| 欠点 | 環境財に相当する市場財が存在しないと評価できない | 適用範囲がレクリエーションに関係するものに限定 | 適用範囲が地域的なものに限定 | アンケート調査の必要があり、情報入手コストが大きい<br>バイアスの影響を受けやすい | アンケート調査の必要があり、情報入手コストが大きい<br>バイアスの影響を受けやすい<br>研究蓄積が少なく、信頼性が不明 |

出典）文献 7-10）を引用し作成。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

本領域の注目動向として、TEEB（生態系と生物多様性の経済学）があげられる。TEEBは生物多様性と生態系サービスの価値を認識し意思決定や行動に反映させるために価値を可視化することを目的に研究が進められ、生物多様性版スターン・レビューといわれる報告書を作成している。

TEEBは2007年にドイツ・ポツダムで開催されたG8+5環境大臣会議で欧州委員会とドイツにより提唱されたプロジェクトであり、2008年5月にドイツ・ボンで開催された生物多様性条約第9回締約国会議（CBD-COP9）の閣僚級会合で、第1フェーズの成果として中間報告が発表された。第2フェーズではさらなる研究と各ステークホルダーに向けた報告書の作成が進められ、2010年のCBD-COP10までに一連の報告書がとりまとめられた。現在は第3フェーズとして各国におけるTEEBの取り組みを支援することなどにより、政策決定などにおける生物多様性の価値の主流化の実践を進めている。また、水と湿地、海洋と海岸、自然資本といった特定のテーマに関するより詳細な報告書も発表し

ている[11)]。

## （６）キーワード

生物多様性及び生態系サービス、環境評価、顕示選好法、表明選好法、費用便益分析、WTP、MWTP、利用価値、非利用価値、TEEB

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・上記の表3に示す通りとおり、生物多様性及び生態系サービスについて経済評価研究が多く行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・経済評価研究の結果が実際の政策の根拠として用いられている。公共事業を行うかどうかの指針として、費用便益分析が用いられている。しかし、実施遂行のために不適切な方法を用いて恣意的に利用されている問題点がある。<br>・環境省の「環境経済の政策研究」で生物多様性及び生態系サービスについて経済評価研究が実施されている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・近年、環境政策として、環境税や$CO_2$・水質の排出量取引の導入が検討されているが、施行には至っていない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・上記の表4に示す通り、生物多様性及び生態系サービスについて経済評価研究が多く行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・「エクソン・バルディーズ原油流出事故」発生によって、世界でもっとも早くから、バルディーズCVM調査など、政策決定などにおける生物多様性の価値の実践を進めている[12)]。<br>・カリフォルニアでは、Caulerpa taxifolia（イチイヅタ、キラー海藻とも呼ばれる）が2000年に発見された。地中海での影響を考慮した事前の偶発事故対策に基づき、根絶作業が17日後に開始された。海洋漁業局、地域の水質管理局、電気供給会社、州の漁業狩猟局と農業局の代表からなる協力グループ（南カリフォルニア Caulerpa アクションチーム）が作られた。結果として、完全な根絶に成功した。<br>・エルワ川ダム撤去についても、CVM研究の結果が政策の根拠として用いられている。1992年にダム撤去が決定し、2011年に撤去が実施された[12)]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・従来からオハイオ州・カリフォルニア州など多数の州において水質排出量取引が政策導入されている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・生物多様性及び生態系サービスについて経済評価研究が多く行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・これまでに、イギリス、ドイツ、オランダでは、包括的な生態系の価値評価が進められてきている。<br>・地中海に面した国々における次の事例がある。地中海では、1984年にCaulerpa taxifoliaの発見（1 $m^2$の面積）に対して素早い対応を取ることに失敗したことで、在来の光合成ベントスの種や観光、商業漁業と遊漁、ダイビングのようなレクリエーション活動への悪影響を伴って、この海洋藻類の大量増加を可能にさせてしまった（1991年までに31 ha、2001年までに12,140 ha、スペイン、フランス、イタリア、クロアチア、チュニジアにまたがる）。地中海のネットワークは、範囲の拡大を制限するための協力を作り上げてきた。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・EUレベルで、「砂漠化と（遺伝的資源の多様性も含めた）生物多様性の損失を食い止めることを目的とし、自然体系、自然生息地、野生動植物の機能を、保護、保全、回復、開発する」という目標を掲げ、政策として施行しようとしている[13)]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・特に2000年以降において、Wang et. al.（2007）[14] などのような経済評価研究は存在するが、米国、欧州、日本のように多数の基礎研究はされていない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・2013年には、中国が国ごとの生態系サービスの経済的価値評価に関心があることを正式に表明している。このような中国政府の動向が示すように、今後、経済評価研究の結果が政策に応用されると考えられる。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・政府は環境と経済双方の調和がとれた発展への転換に向けて環境への認識を高め、「第11次5ヵ年計画」期間中には中国の環境保護事業は顕著な進展を見せた[15,16]。関連法の整備、関連施設の建設など各種プロジェクトの推進、関連規制の運用強化、環境への負荷が高い立ち遅れた生産設備の排除など、さまざまな取り組みが進められ、対応が求められている各業界や地方政府、そしてそれらに対して環境サービスを提供する企業における先進技術導入ニーズも高まりを見せた[15]。<br>・「国民経済・社会発展第12次5ヵ年規画綱要」では、「経済発展方式の転換」を加速し、同時に「グリーン発展」をキーワードとして、「循環経済」、「低炭素技術」、「環境・生態保護の持続可能性」を今後の新たな発展の指針とすることが明記された[16]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・Kwak et. al.（2003）[17] のような生態系サービスの経済評価研究はあるが、他国とくらべて多くはない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・経済発展に伴い、1960年代から韓国政府は環境政策の強化を進めている。<br>・環境影響評価研究の結果を環境政策の根拠にすることは、以前から行われているが、環境経済評価研究は政策に応用されてはいない。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・政府は、$CO_2$削減対策を行おうとしていることから、今後、経済評価研究の結果が政策の根拠となることは十分ありえる。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）Managi, S. (Eds.) (2012). "The Economics of Biodiversity and Ecosystem Services." Routledge, New York, USA.
2）Managi, S. and Kaneko, S.（2010）. "Chinese Economic Development and Environment." Edward Elgar Publishing Ltd, Cheltenham, UK.
3）Managi, S. (Eds.) (2014). "Handbook of Environmental Economics in Asia." Routledge, New York, USA.
4）The Ecosystem Services Partnership（ESP）. http://www.es-partnership.org/esp（2014年8月17日閲覧）
5）吉田友美・高野宏平・藤井賢彦・山野博哉・熊谷直喜・中静透・馬奈木俊介（2014） 『サンゴ礁保全政策に関する経済評価』、環境経済・政策学会2014年度要旨集。
6）環境省生物多様性センター. 経済的価値の評価事例. http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/jirei.html

7) 栗山浩一・馬奈木俊介（2012）「環境経済学をつかむ　第2版」、有斐閣。
8) 栗山浩一（1997）『公共事業と環境の価値 - CVMガイドブック』、築地書館。
9) 栗山浩一（1998）『環境の価値と評価手法 - CVMによる経済評価』、勁草書房。
10) 馬奈木俊介（編集), 地球環境戦略研究機関（編集）(2011)『生物多様性の経済学―経済評価と制度分析』、昭和堂。
11) 環境省生物多様性センター. 生態系と生物多様性の経済学（TEEB）. http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/teeb.html（2014年8月17日閲覧）
12) 環境省生物多様性センター. 第1回生物多様性の経済的価値の評価に関する検討会資料. http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/pdf/k1_2_20120927.pdf（2014年8月17日閲覧）
13) 日本貿易振興機構（JETRO）ブリュッセル・センター. 2006. EUの環境政策と産業. https://www.jetro.go.jp/jfile/report/07000517/eurotrend_kankyoseisaku.pdf（2014年8月17日閲覧）
14) C. Wang, H. Ouyanga, V. Maclaren, Y. Yin, B. Shaoa, A. Boland, Y. Tian (2007)," Evaluation of the economic and environmental impact of converting cropland to forest: A case study in Dunhua county, China", Journal of Environmental Management, Volume 85, Issue 3, November, pp.746–756
15) 日本貿易振興機構（JETRO）北京センター. 2009. 中国の環境産業に関する調査報告書. http://www.jetro.go.jp/jfile/report/07000126/china_kankyo.pdf（2014年8月17日閲覧）
16) JST中国総合研究センター. 2011. 中国の第十二次五カ年規画における緑色発展の実態と動向. http://www.spc.jst.go.jp/investigation/downloads/r_201109_01.pdf
17) Seung-Jun Kwak, Seung-Hoon Yoo and Sang-Yong Han　(2003), "Estimating the Public's Value for Urban Forest in the Seoul Metropolitan Area of Korea:　A Contingent Valuation Study", Urban Stud, Volume 40, Issue 2207.

### ３．４．２．６　生態系サービスの管理システム・制度のための技術管理

#### （１）研究開発領域名

生態系サービスの管理システム・制度のための技術管理

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

2000年代に入り、サブグローバルからローカルまでの複数の空間スケールでの生態系サービスの科学的評価が世界各地域で実施されてきた。この科学的評価では、生態系サービスの過去からの変化傾向や変化要因の評価だけでなく、これまでの対応策の有効性評価、そして中長期的な未来の生態系変化に関する将来シナリオ分析が含まれる。生態系サービス管理には、行政による規制的手法から経済的手法、情報的手法などの対応だけでなく、多様な主体連携による生態系の長期的・広域的なモニタリング技術、そして将来シナリオから生態系変化を予測するモデリング技術、生態系サービスのサプライチェーンを通じた管理とそのための基準づくりが重要となる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

2012年4月、生物多様性分野におけるIPCC（気候変動に関する政府間パネル）として、生物多様性及び生態系サービスに関する政府間プラットフォーム（IPBES：Intergovernmental Science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services）が設立され、世界規模で生態系サービスの科学的評価が定期的に実施されることになった。IPBESは、科学的評価、能力開発、知識生成、政策立案支援の4つの機能を柱とする。IPBESは、意思決定機関として全加盟国が参加する総会と、IPBESの管理運営機能を担うビューロー、IPBESの活動を科学・技術的な側面から支える学際的専門家パネルで構成される。さらに、2013年12月の第2回総会では、2014年から5か年の作業計画についても議論され、4つの目的別の作業計画の詳細が承認された。

目的1は、IPBESの主要機能を実施するための科学と政策のインタフェースの能力と知識基盤の強化を目的として、能力養成ニーズの優先順位づけや先住民および地域住民の知識体系（ILK：Indigenous and Local Knowledge）との協働のためのガイドライン作成が行われることになっている。これら目的1の能力養成とILKに関しては、期限付・タスク特定のタスクフォースが立ち上げられることになった。目的2は、主に準地域、地域、地球規模での生物多様性と生態系サービスに関するアセスメントに関する作業計画であり、目的3は、テーマ別、方法論的課題に関する生物多様性及び生態系サービスのアセスメントに関する作業計画である。IPBESでは、テーマ別アセスメントや迅速アセスメントなど、ミレニアム生態系評価（MA：Millennium Ecosystem Assessment）にはなかったアセスメントが作業項目として組み込まれ、それぞれのテーマ別に専門家グループが形成されることになった。目的4では、各種アセスメントに要する情報とデータの管理をいかにするか、アセスメントの成果や結果をいかに伝達し政策支援や能力養成につなげるか、IPBES全体のプロセスの有効性をいかに評価するか、について作業計画が定められている。情報・データ管理については、目的1と同様に、タスクフォースが設定されることになった。

IPBESの概念枠組みは、人間と自然の間の複雑な相互作業を高度に簡略化したモデル

であり、当該モデルには、その主要な構成要素と要素間の関係、IPBESの目標との関係が記述されている。多様な学問領域の研究者、政策立案者、地域社会の関係者など、多様なステークホルダーが、共通理解のもとで協働してIPBESの作業計画を実施していくためには、この概念枠組みが共通の知的基盤になる。MAでは、1. 人間と生態系の要素との間には動的な相互作用があり、人間の状態を変えることが直接的・間接的に生態系に変化をもたらし、その生態系の変化がひるがえって人間の福利に変化を引き起こしていること、また、2. そのような生態系サービスと人間の福利との間の相互作用は単一スケールで生じるだけでなく、複数の時空間スケールにまたがって生じうる、という仮説のもとで概念枠組みが構成されていた。IPBESで新たに作成された概念枠組みでは、MAと異なり、①自然（生物多様性と生態系）が独立した構成要素として明示的に組み込まれ、②人間の福利に直接的に影響を与える因子として、生態系サービスだけでなく、人為的資産（Anthropogenic assets）が明示的に追加されたほか、③直接・間接的な変化要因、生態系サービス、人為的資産のそれぞれの要素に働きかける因子として制度とガバナンスが明確に位置づけられた。

特に、日本などの先進国では、人間の福利は生態系サービスだけに依存しているわけでなく、社会インフラや生産基盤、生産技術、金融、輸入品を含めて人為的資産が果たしている役割が無視できない。この点は、日本の里山・里海評価（JSSA：Japan Satoyama Satoumi Assessment）[1] でもしばしば指摘されてきた課題であり、②の要素の追加はこうした議論が反映された成果である。また、生物多様性と生態系サービスの評価では、これまで生態学者など自然科学者が中心的な役割を果たしてきた。だがMA以降、アセスメントの実施やその成果の社会実装における、社会科学分野の知見が果たす役割に対する認識は大きく変化している[2, 3]。IPBESでも同様の認識が持たれており、③のとおり概念枠組みの中心的な要素として制度やガバナンスが配置されている。

一方、日本国内では、里山・里海がもたらす生態系サービスの重要性やその経済および人間開発への寄与について、科学的な信頼性を持ち、かつ政策的な意義のある情報を提供することを目的として、JSSAが2006年後半から計画され、その成果は2010年10月の愛知県名古屋市での生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）にて報告された。JSSAでは、過去50年間に里山・里海のランドスケープは大きく変化し、生物多様性を失い、システムとしての回復力が低下したこと、里山の変化は、近年では経済のグローバル化、人口減少、都市化といった要素の複合による里山の利用低減によるところが大きいこと、里海については、乱開発、汚染、気候変動による変化があげられることが指摘された。また、これまでに行われてきた対応策は個別的なものが多く効果が限定的だったが、市民参加に基づく統合的なアプローチが増加しつつあり、効果的な生物多様性の保全と生態系サービスの利用に向けた更なる進展が期待されることが指摘された。さらに、多様な主体との協働によって、生態系サービスという公益を提供する里山・里海の生態系を持続的に維持する社会制度として「新たなコモンズ」の創造が必要であるとの提案がなされた[1]。

IPBESと並んでこの分野における国際的な動きとして重要なのが、「統合的地球環境研究プログラム」であるフューチャー・アース（FE：Future Earth）である。地球環境変化研究は、これまで4つの国際プログラム（WCRP、IGBP、DIVERSITAS、IHDP）

が進められてきたが、人類活動による地球システム変化の理解に基づく人類・生命圏の持続的な生存基盤の追及には、自然科学と人文・社会科学との文理融合の学際的研究が必要であり、さらに持続型社会への転換には科学者と社会のさまざまなステークホルダーとの超学際的連携・協働が必要である。FEはこのような学際的研究と、超学際的な連携・協働のための国際的な枠組みとして設計され、国際科学会議（ICSU）、国際社会科学協議会（ISSC）、国連環境計画（UNEP）、国連大学（UNU）、国連教育科学文化機（UNESCO）、国際研究資金配分機関（IGFA）、ベルモント・フォーラム（BF：Belmont Forum）の７つのアライアンスの連携で進められている。2014年7月には、FEの恒久国際事務局を担う組織として、日本も加わった5ヶ国による分散型連携事務局連合が選定された。

グローバル規模での生物多様性に関する総合的な評価としては、「地球規模生物多様性概況（GMO：Global Biodiversity Outlook）」が4次にわたって公表されてきた。2014年10月の生物多様性条約COP12にて公開されたGBO-4では、リオ+20に合わせて作成された「リオ+20のための持続可能な発展シナリオ」[4] に基づいて、生物多様性条約戦略計画2011-2020で示された2050年ビジョン（2050年までに、生態系サービスを維持し、健全な地球を維持しすべての人に必要な利益を提供しつつ、生物多様性が評価され、保全され、回復され、賢明に利用される）と2020年までの20の個別目標を定めた愛知目標の達成可能性についての検討結果が含まれている。なお、GBOの日本版として実施されたのが、日本の生物多様性の総合評価（JBO：Japan Biodiversity Outlook）である。JBOでは、環境省が日本の森林、農地などの生態系の区分ごとに、評価のための指標を設け、各指標の推移を説明するデータを基に、過去50年の生物多様性の損失の大きさと現在の傾向の評価が行われ、2010年5月に評価書が公表された。

また国際的には、研究プロジェクト「生態系と生物多様性のための経済学（TEEB：The Economics of Ecosystems and Biodiversity）」が欧州委員会とドイツにより提唱され、2008年５月に第１フェーズの成果として中間報告が発表され、現在はプロジェクトの第３フェーズとして、各国におけるTEEBの取り組みを支援することなどにより、政策決定などにおける生物多様性の価値の主流化の実践が進められている。

EUでは、欧州科学技術研究協力機構（EU-COST）が地球システム科学と環境マネジメント（ESSEM）という領域において、「グローバル生物多様性モデリングの調和（HarmBio：Harmonizing Global Biodiversity Modelling）」を研究活動（Action）のひとつとして実施している。この活動では、生物多様性の変化の将来予測の信頼性を高めるため、陸域、淡水域、海域生物多様性のモデルとデータセットの調和を支援する。そうすることでより透明性が高く、科学的にも頑健な生物多様性モデルの開発を加速させ、究極的にはさまざまな政策オプションの中から、最先端の生物多様性変化予測に基づいた環境意思決定を可能にする。

このほか、生物多様性や生態系サービスとした調和を含めた伝統的な農業文化を地域認定する仕組みとして、国連食糧農業機関（FAO）が2002年から開始した世界農業遺産（GIAHS：Globally Important Agricultural Heritage Systems）がある。GIAHSは、社会や環境に適応しながら何世代にもわたり発達し、形づくられてきた農業上の土地利用、伝統的な農業とそれに関わって育まれた文化、景観、生物多様性に富んだ、世界的

に重要な地域を次世代へ継承することを目的としたプログラムである。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

2012年4月の正式設立から約2年を経て、複数のテーマごとにタスクフォースや専門家グループが形成され、IPBESによるさまざまな科学的評価に向けた活動が本格化することになった。2012年にはエルゼビアからEcosystem Servicesという名称の学術誌が創刊されるなど、今後さらにこの分野での学術的な蓄積が進むと思われる。

IPBESの新たな概念枠組みでは、人間の福利の構成要素として、IPBESや生物多様性条約の基本的な理念ともいえる自然共生（Living in harmony with nature）の概念が明記された。「自然共生」は、我が国の「21世紀環境立国戦略」（2007年6月閣議決定）や生物多様性基本法（2008年制定・施行）にも示されている概念である。この自然共生の概念は、日本をはじめとするアジア地域に広く散見されるほか、ラテンアメリカ地域にも「母なる地球との共生」という類似の概念がある。これはまた、MAの概念枠組みが欧米的・功利主義的であるという批判があったのに対し、IPBESではさまざまな世界観や自然観が反映できるような新たな概念枠組みづくりが進められた結果でもある。ただし、このような多様な価値観や自然観の尊重をいかに科学的な評価に組み込んでいくのか、そしてそれをどのようにガバナンスにつなげていくのか、先行モデルであるIPCCではほとんど扱われてこなかった課題群にIPBESは取り組んでいくことが求められている。

一方、生物多様性と生態系サービスの低下に対して、組織的でなく、個別アプローチで場当たり的に対応するのではなく、熟慮した適応と緩和の戦略を通して、変化を予測し、その結果として悪影響を最小限にして、重要な好機としてとらえ、先見的な対応が必要となる。生態系のように不確実性と複雑性の高い課題に関して、将来シナリオ分析が求められるのは、生態系管理に対して事後的（reactive）に対応するのではなく、事前対応（proactive）の具体的な選択肢（オプション）を明らかにすることができるからである。近年、生物多様性と生態系サービス分野では、社会経済シナリオとそれと連動したモデル開発が活発に進められている。

生物多様性・生態系サービスの管理・ガバナンスに関しては、以下のような課題をあげることができる。

- 先住民および地域住民の知識体系の科学的評価およびガバナンスの組み込み
- 生態系サービスの経済評価に基づく管理・政策介入支援
- 生態系サービスをめぐるシナジーとトレードオフの評価とそれに基づく管理の方法の確立（生態系サービスの受益負担構造の科学的評価とそれに基づく管理の仕組みの提示）
- 生物多様性に関する将来シナリオとモデリングによる中長期変化の予測
- 異なる生態系タイプ地域での長期的・広域的なモニタリングの継続
- 国境を超えたサプライチェーンでビジネス展開している企業による取り組み強化とパートナーシップ強化（サプライチェーンなどを通じた生態系や生物多様性に対する基準づくりと、基準づくりのための技術開発を含む）
- 研究成果による政策立案支援と多様なステークホルダーとの協調・協働

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

IPBESでは、2014年に「生物多様性と生態系サービスのシナリオ分析とモデリングのための政策立案支援ツールと方法論に関する評価」に関する専門家グループを立ち上げ、シナリオ分析とモデリング、政策支援ツールと方法論についてのスコーピングに着手している。

また、ベルモント・フォーラム（BF：Belmont Forum）（地球の環境変動研究を行う世界の主要先進国・新興国の研究支援機関及び国際的な科学評議会の集まり）は、2014年の活動の一つとして「生物多様性と生態系サービスのシナリオ」分野の共同国際公募を実施した（6-7月）。本公募では、社会経済的なシナリオと地球規模の生物多様性の変化による影響モデルとの統合により、生物多様性に関する新たな将来シナリオの導出と本分野における国際的なネットワーク形成が図られる。これにより、土地利用変化、外来生物の侵入、過剰な開発、気候変動と汚染のような地球規模の変化の将来の影響についての情報提供、順応的な管理戦略に向けた政策支援、社会経済の発展する経路と政策オプションの選択肢の評価が可能となる。さらに、ベルモント・フォーラムでは、2017年に同テーマで国際共同研究プロジェクトに向けて他のファンディング主体と共同で第二回目の公募を行う予定である。

### （６）キーワード

生態系サービスへの支払制度（PES：Payment for Ecosystem Services）、直接支払、生態系サービスのシナジーとトレードオフ、生物多様性オフセット、自然再生、環境配慮型事業、土地利用規制、森林環境税、認証制度、将来シナリオ、モデリング、モニタリング、IPBES、 フューチャー・アース（Future Earth）、TEEB

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・生態系管理のための国内外のさまざまな既存の制度、ツール、取り組み（土地利用規制、生物多様性オフセット、環境税、生態系サービス評価ツールなど）に関してのレビューが実施され、現状の整理と課題の把握が行われている [5]。<br>・日本の里山・里海評価（JSSA）では、グローバル化／ローカル化、自然志向・適応重視／技術志向・改変重視という2軸を設定し4つの里山・里海の将来シナリオが作成された [1]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・具体的なツールの開発では、大阪大学グループにより、産業セクターの生態系サービス依存性を、各セクターの直接依存だけでなく産業間取引を介した間接依存、輸入による域外依存も含めた定量評価のための枠組みが開発されている [6]。<br>・国土交通省は、①国民生活への影響が深刻化するシカ、タケの増加による生態系サービスへの影響評価、および②人工林、農地、草地などの放棄による生態系サービスの変化予測を実施した [7]。また同省は、2030年の日本社会が持続可能であることを大前提に、日本社会の未来像についてさまざまな外部要因をもとに四つの異なるシナリオを提示している [8]。<br>・生物多様性オフセットは日本ではまだ制度化されていないが、愛知県で試行中。これは開発による生態系への影響を、生態系ポテンシャルマップ（指標種17種の生息適地のマップを作成）に基づく生態系ネットワークの形成に役立つ場所や内容で代償する制度（「あいち方式」）[9]。<br>・企業と生物多様性イニシアティブ（JBIB：Japan Business Initiative for Biodiversity）により、企業の製品・サービスを対象に生物多様性への依存と影響の内容を図式化、可視化する、「企業と生物多様性関係性マップ®」が開発されている [10]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・農村あるいは里山・里海において、生態系サービスを明示的に扱わないまでも、土地利用規制や景観形成、多面的機能、資源管理、環境配慮、生物多様性保全などの名目で多様な手段が生態系サービスの管理に関して存在している。一方で、制度間の連携や調整が不足しており、また関係主体間の調整のための効果的枠組みも不在である [5]。<br>・生態系サービス支払い（PES）類似制度として、中山間地域直接支払交付金、農地・水保全管理支払、環境保全型農業直接支援対策、森林環境税などがあるが、まだ事例が少ない傾向にあることが指摘されている [5]。森林環境税は2003年に高知県で初導入後増加傾向にあり、現在30以上の自治体で導入済み。また、企業によるPESの取り組みは、熊本県白川流域における半導体工場の農家の地下水涵養の取り組みに対する支払など、実施例がみられる。<br>・「エコロジカルネットワーク評価技術」（鹿島建設(株)、都市再生機構、(財)都市緑化技術開発機構と共同開発）など、生態系に配慮した都市開発を支援する評価ツールが複数開発されている [11]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・国立社会・環境統合センター（SESYNC）が、国立科学財団（NSF）からの助成のもとメリー大学に2011年に設立された。SESYNCは、米国における数少ない超学的研究センターのひとつで、異なる学術分野とステークホルダーをつなぐことで人間と生態系の複雑な相互作用についての知識増進に貢献する。<br>・生態系サービスに関わる評価ツールとしてSocial Values for Ecosytsem Services（SolVES）や、生態系サービスの社会的価値を定量化しマッピングできるツールや生態系サービスの空間フローを定量化することで、発生地と受益地について把握できるツールである生態系サービスのための人工知能（ARIES：ARtificial Intelligence for Ecosystem Services）など、多数のツールが開発されている [12]。<br>・Final Ecosystems Goods and Services Classification System（FEGS-CS）では、生態系サービスの計測、マッピング、モデリング、評価の基礎を提供する。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・生態系に関する意思決定支援ツール（環境保護庁（EPA））[13]、地域、州の科学者や技術者による水域システムの因果関係評価に使うための情報システム（CADDIS：The Causal Analysis/Diagnosis Decision Information System）、米国の主要な生態系、生態系サービスおよびその現状（劣化）による影響についての情報提供ツール（Eco-Health Relationship Browser）など、意思決定・情報支援ツールが数多く開発されている。<br>・生態系や生態系要素のアセスメント、モニタリングを行うための空間的フレームワーク、人々が自然から得られる便益を地図ベースのインタフェースで可視化して理解を促すためのツール（EnviroAtlas）が開発されている。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・森林所有者に対して生態系サービスの向上を促す政府主導の支払プログラムは現在少なくとも14ある[14]。また、政府以外から提供される自主的・民間ベースのPESプログラムも多数存在する。<br>・政府の規制をもとに発展した生態系サービスの市場としては、排水権取引、ウェットランド・バンク、コンサベーションバンクやキャップ・アンド・トレードプログラムによる排出権取引などがある[15, 16]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・生態系サービスの地図化に関しては、ローカルスケールや地域スケールにおける生態系サービスの分布、生態系サービスの供給と需要の比較、特定の生態系サービスの経済価値評価などを目的として、さまざまな試みが行われている。方法も多様であり、土地利用・被覆データに代替させる比較的シンプルなものから、植物の機能特性など生態系のメカニズムや、生態系モデルを組み込んだもの、気候変動や土地利用変化予測などのプロセスも組み込んだ生態系サービスの変化予測など多様なものがある[17]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・EU生物多様性戦略2020では、各国に生態系と生態系サービスの状態を地図化および評価することを求めている。Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services in the European Union（MAES）は、EUおよびそのメンバー国で統一的な手法を適用するためのイニシアチブで、詳細な全体的フレームワークや評価のためのインディケータに関する技術報告書が2冊出版され、いくつかの地域でテスト適用されている[18]。<br>・生物多様性オフセットに関連して、EUメンバー8カ国を含む15のパートナーが参加するThe REMEDE Projectにより、野生生物ハビタットなどに対する損害の評価のための技術的手法を開発中[19]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・EU加盟国はノーネットロス政策を有し、1992年のEUハビタット指令により、野生生物ハビタットを「適切な保全状態」に物理空間として維持または復元することを義務付けている。2004年EU環境責任指令により、PPP原則（汚染者負担の原則）により野生生物ハビタットに損害を与えたものはそれを復元するか、復元費用を支払うことが義務付けられており、開発事業者に対し生物多様性オフセットを義務付けているといえる [16, 20, 21]。<br>・PESに関しては、EUは共通農業政策（CAP : Common Agricultural Policy）により、山岳地帯などの条件不利地域における農業の存続の確保（人口水準の維持と景観の保全）や、環境負荷の軽減、景観の保護などに資する農法の推進に対し、直接支払が受けられる制度がすでに実施されている。<br>・EUにおいて、農産物・食品を対象にした地理的表示の保護制度が活用されている。これは、品質などの特徴と地域環境とのつながりを重視するとともに、基準（明細書）を定め、その基準に適合していることを公的な担保措置により確保することを通じた、一種の品質保証の仕組みであり、保護原産地呼称（PDO：Protected Designation of Origin）および保護地理的表示（PGI : Protected Geographical Indication）の2種類がある [22]。<br>・2010年に国際自然保護連合（IUCN）などと協力して、事業者における生物多様性の取り組みを進めるため欧州委員会環境総局に生物多様性とビジネスプラットフォーム（The EU Business and Biodiversity Platform）を設置 [23]。<br>・ILTER（International Long Term Ecological Research）の欧州版LTER-europe [24]。2010年にはGEO BON（The Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network）（GEOSS（Global Earth Observation System of Systems）の中で生物多様性に特化したもの）の設立にともない、欧州委員会によってDOPA（the Degital Observatory for Protected Area）が設立される。その後、EBONE（European Biodiversity Observation Network）（2008-2012年）を経てEU BON（European Biodiversity Observation Network）（2012-2017年）が設立された [25-27]。<br>・オランダ政府は、Innovative Fundを設置し、企業の生物多様性と生態系サービスに関わる認証制度など革新的な取り組みを支援。2011年には持続可能な貿易に関する認証制度に関わるSustainable Trade Initiativeを設立 [23]。<br>・英国では、2012年に環境・食糧・地域省（DEFRA）が自然資本の保全と行動計画の優先順位の明確化のために自然資本委員会を設置 [28]。2013年には、DEFRAによる生態系市場タスクフォースの最終レポート公表 [23]。PESに関しては、英国政府およびEUが資金提供し、農業経営者に支払い、レクリエーションなどの自然資源の利用者の生態系サービスの受益が守られる制度が導入されている [29, 30]。<br>・フランスでは、PESとして1993年からVittel社が酪農業者に資金提供している。適正な管理をすることで地下水自然が守られ、Vittel社を含む河川流域機関の生態系サービスの受益が可能になる [29, 30]。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・中国生態系研究ネットワーク（CERN : China Ecosystem Research Network）が1988年に設立され、生態系と気候変動により受ける影響などのモニタリングが行われている。ただし、生物多様性モニタリングは、現状ではまださまざまな課題があるとされている（乏しいサンプリングデザイン、基準の欠如、使えるデータの未利用など）[31]。<br>・中国政府、中国科学院（CAS）、日本の国立環境研究所は、共同で西部中国における統合的な生態系評価を実施し、国土の7割の生態系サービスをマッピングし、サービスに影響を与えうるドライバを特定した。水と食料供給サービスのトレンドと将来シナリオ、炭素貯蔵と生物多様性、生態系サービスと人間の福利の関係についてモデル分析がなされた [32]。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・生物種のモニタリング技術基準を向上させることを目的としてDemonstration of Technology for Monitoring Major Species Resourcesプロジェクトを2007年から開始 [31]。<br>・生態系サービスのマッピングとモデリングツールであるInVESTをBaoxing Countyに適用、成果は同郡の土地利用次期マスタープランに反映されることとなった。開発を行う際に生態系サービスの主要な供給源を避けるように開発地域を設定するためInVESTが使用された [33]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | △ | → | ・PES類似制度として、企業や地元のコミュニティにインセンティブを与えることで、森林伐採を禁止し植林を促進するNatural Forest Conservation Program（NFCP）が1998年から行われているほか、農家に穀物や現金で補助金を給付することで、急斜面地での農地を森林や草地に転換するGrain to Green Program（GTGP）も1999年から導入されている [34]。<br>・中国森林認証スキーム（CFCS）[35, 36] ではこれまで200万haの森林が認証を受けている。このスキームには森林管理（FM）、加工・流通（CoC）、竹林、炭素吸収林、非木材林産物、森林生態系サービス、絶滅危惧種の商業育種の計7タイプあり、FMとCoCは発布されたが他の制度はまだ制定中である。<br>・生物多様性オフセットは、森林法および環境影響法のもとで導入が進みつつある。例えば国内林の伐採事業による、回避し最小化できない悪影響を補償するために、ノーネットロス／ネットゲインを目指して植林活動を実施など。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・生物多様性に関わる地理情報と現状におけるモニタリング技術については、アジア太平洋地域（AP-BON）[37] では日本（J-BON）と並び基礎研究を牽引している（K-BON）。長期的に生態系を観測する国際ネットワーク（ILTER）に関しては、国内に拠点（KLTER）をもつが、生態学的長期観測の歴史は浅い。近年サイト数を増やしており、今後の成果が期待される [24]。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・環境影響評価については、手法・制度が整備されている [38] 一方で、生態系サービス評価に関わる応用研究は進んでいない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・生物多様性オフセットについては1998年にノーネットロスに関する法制度が導入されている [16, 20, 21]。生物多様性に関する法律は、2013年に生物多様性の保全および利用に関する法律として施行されており、名古屋議定書の採択後、韓国においても基本法が整備されたことになる [39]。<br>・水資源に関わる税金や、環境保護税・大気汚染税の制度があり [40]、税収を環境関連特別会計に入れて、大気・水環境保全に使用するほか、自然環境保全を目的とするプロジェクトにも使用している [41]。韓国独自の企業の意識啓発を促す仕組みは確認できない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 国際連合大学高等研究所・日本の里山・里海評価委員会（編）（2012）里山・里海　自然の恵みと人々の暮らし．朝倉書店
2) Larigauderie A and Mooney HA (2010) The Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services: moving a step closer to an IPCC like mechanism for biodiversity, Current Opinion in Environmental Sustainability, 2: 9-14.
3) Perrings C, Duraiappah A, Larigauderie A, Mooney HA (2011) The Biodiversity and Ecosystem Services Science-Policy Interface, Science, 331(6021): 1139-1140.
4) Roehrl RA (2012) Sustainable development scenarios for Rio+20. A Component of the Sustainable Development in the 21st Century (SD21) project. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development.

5) 橋本禅・齊藤修（2014）農村計画と生態系サービス（農村計画学フロンティア4），農林統計出版.
6) 町村尚・松井孝典・Robert. N. Shaw・盛岡通（2010）「生態系サービス利用」を尺度とする新たな社会システムの構築．環境情報科学，39（3），76-81
7) 国土交通省（2013）「平成24年度生態系サービスと国土管理に関する調査」（報告書概要版）http://www.mlit.go.jp/common/001020440.pdf
8) 国土交通省（2005）「2030年の日本のあり方を検討するシナリオ作成に関する調査概要」http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/futurevision/
9) 愛知県「自然環境の保全と再生のガイドライン　平成 25・26 年度 試行版」http://www.pref.aichi.jp/0000059680.html
10) 企業と生物多様性イニシアティブ（JBIB）「企業と生物多様性の関係性マップ」http://jbib.org/activity-jbib/relation-map/
11) 鹿島建設(株)（2008）「エコロジカルネットワーク評価技術を開発」http://www.kajima.co.jp/news/press/200809/17c1-j.htm
12) US Geological Survey（USGS）. http://www.usgs.gov/
13) United States Environmental Protection Agency (EPA) (2014) Ecosystem Research - Ecosystems Services, EPA, http://www2.epa.gov/eco-research/ecosystems-services
14) Mercer DE, Cooley D, and Hamilton K (2011) Taking Stock: Payments for Forest Ecosystem Services in the United States, Forest Trends, http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_2673.pdf
15) Forest Trends (2011) Ecosystem Market place: State of Biodiversity Markets- offset and com-pensation programs worldwide- 2011 update, Forest Trends, http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_2848.pdf
16) 田中章（2011）生物多様性オフセット制度化の国際的広がりと今後の課題：CBD COP10での動向を含めて，東京都市大学環境情報学部紀要，第十二号．p. 27-32.
17) Maes J, Egoh B, Willemen L, Liquete C, Vihervaara P, Schägner JP, Grizzetti B, Drakou EG, LaNotte A, Zulian G, Bouraoui F, Paracchini ML, Braat L and Bidoglio G (2012) Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. Ecosystem Services, 1, pp. 31–39
18) European Commission. Ecosystem Assessment. http://ec.europa.eu/environment/nature/knowledge/ecosystem_assessment/index_en.htm
19) The REMEDE Project. http://www.envliability.eu/docs/ProjectBrochure_D14_eftec_311006_FINAL.pdf
20) 田中章（2009）生物多様性オフセット制度の諸外国における現状と地球生態系銀行”アースバンク”の提言、環境アセスメント学会誌7(2):1-7
21) いであ株式会社（2012）平成23年度生物多様性分野の代償措置に関する評価手法等調査業務報告書
22) 内藤恵久(2013) 地理的表示の保護について－EUの地理的表示の保護制度と我が国への制度の導入－．農林水産政策研究．20．37-73.

23) 環境省生物多様性センター. 欧州委員会及び欧州各国の動向.
http://www.biodic.go.jp/biodiversity/private_participation/int/02.pdf
24) ILTER. http://www.ilternet.edu
25) GEO BON. https://www.earthobservations.org/geobon.shtml
26) EBONE.
http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Projects/EBONE-2.htm
27) EU-BON. http://www.eubon.eu
28) Natural Capital Committee. https://www.naturalcapitalcommittee.org
29) IGES (2012) 経済価値の内部化による生態系サービスの持続的利用を目指した政策オプションの研究 最終研究報告書
30) De Groot RBA and Hermans LM (2009) Broadening the picture: negotiating payment schemes for water-related environmental services in the Netherlands, Ecological Economics, 68: 2760 – 2767
31) Nakano S, Yahara T and Nakashizuka T (2012) The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region: Toward Further Development of Monitoring, Springer Science & Business Media, ebook,
http://books.google.co.jp/books?id=iI7BbU9kjvQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false
32) Millennium ecosystem assessment (MEA) (2005) 'China Integrated Ecosystem Assessment of Western China', MEA,
http://www.unep.org/maweb/en/SGA.WesternChina.aspx
33) Natural Capital Project, n.d., 'Applying InVEST to Spatial Planning: China, Colombia, Hawaii and Indonesia', Natural Capital Project,
http://www.naturalcapitalproject.org/pubs/NatCap_InVEST_and_Case_Study_Summary_TEEB_2010.pdf
34) Liu J, Shuxin Li ZO, Tam C and Chen X (2008) 'Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services', Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 105, no. 28, pp.9477-9482.
35) PEFC (2014) China's National Forest Certification System Achieves PEFC Endorsement, PEFC,
http://pefc.org/news-a-media/general-sfm-news/1459-china-s-national-forest-certification-system-achieves-pefc-endorsement
36) China forest certification scheme (2014) China forest certification scheme,
http://www.cfcs.org.cn/english/zh/index.action
37) AP-BON. http://www.esabii.biodic.go.jp/ap-bon/index.html
38) 環境省（2004）諸外国の環境影響評価制度調査報告書
http://www.env.go.jp/policy/assess/4-1report/file/12.pdf
39) 国立国会図書館. 立法情報【韓国】生物多様性の保全及び利用に関する法律の制定
http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_3491896_po_02510208.pdf?contentNo=1

40）環境省（2012）税制全体のグリーン化推進検討会 第5回 資料
https://www.env.go.jp/policy/tax/conf/conf01-05.html
41）NPO法人野生生物保全論研究会（2012）愛知ターゲット目標3の達成とグリーン経済への転換に向けて②.
http://www.jwcs.org/data/Aichi%20Biodiversity%20Target%203%20No2%20for%20web.pdf

## ３．４．３　持続可能な生産と消費

### ３．４．３．１　製造業におけるグリーン技術（ゼロエミッション、環境配慮設計、クリーナープロダクション）

#### （１）研究開発領域名

製造業におけるグリーン技術（ゼロエミッション、環境配慮設計、クリーナープロダクション）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

製造業における環境負荷削減を図るためのゼロエミッション、環境配慮設計（DfE：Design for Environment）、クリーナープロダクション（CP：Cleaner Production）などを支援する技術開発、データベースの構築およびLCA（Life Cycle Assessment）などの評価手法の開発やその応用に関する検討を行う。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

製造業などの生産者が自ら生産する製品などについて使用され、廃棄物となった後まで一定の責任を有する拡大生産者責任（EPR：Extended Producer Responsibility）の一般原則に基づき、生産者などにおける環境配慮に関する取り組みが求められている。

現在、有害化学物質の規制や省エネルギー化への対応、さらにはライフサイクルにおける温室効果ガス排出量の削減などの観点から製品・サービス・企業活動などにおける取り組みを要求するさまざまな動きがでてきている。これらの動向から読み取れるのは、議論の入口（有害化学物質、省エネルギー化、温室効果ガスの削減など）は異なっていても、出口、すなわち、ライフサイクル全般にわたっての環境配慮の推進は共通の要求事項であるという点である。

一般的に、生産者が求められる取り組みは、環境問題などに対する社会的な要請に応じて、大気や排水などの汚染物質などを処理するEP（End of Pipe）型の対応から、より低環境負荷な生産プロセスなどの導入を図るCP（Cleaner Production）型の対応へと変遷してきた[1)]。近年では、欧州における廃電気電子機器の回収・リサイクルなどを対象とした枠組みであるWEEE（Waste Electrical and Electronic Equipment）指令[2)]や鉛、水銀などの6種類の物質の含有の制限を規定したRoHS（Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment）指令[3)]をはじめとして、有害化学物質に対する規制が強化される傾向がある。また、もっとも上流サイドでの予防措置といわれる環境配慮設計や、生産現場のみならず、企業全体として環境配慮に対する環境マネジメントシステムの導入や製品などの製造・使用・廃棄・リサイクルまでの環境負荷を分析・評価するLCAの導入に関しても注目が集まっている。

製品単体での環境配慮設計に関する特筆すべき動向としては、欧州におけるEuP（Energy-using Products）指令／ErP（Energy-related Products）指令[4)]があげられる。EuP指令は、エネルギー使用製品のライフサイクル全般にわたっての環境配慮を要求している指令である。原材料の選択、製造、包装・輸送および流通、設置および保守、使用、エンド・オブ・ライフといったライフサイクル全般にわたって環境配慮設計のパラメータを明記している。さらに、消費者が製品に関わる環境側面を比較できるように、

当該製品の環境特性やパフォーマンスに関する情報を付属させることや、エンド・オブ・ライフの段階において、解体、リサイクルあるいは処理・処分に関する情報を提供することを求めている点に特徴がある。ErP指令は、EuP指令の対象製品を拡張したものであり、環境配慮設計を義務づけていることからEcodesign指令とも呼ばれている。大きな変更点としては、EuP指令では、電気や石油などのエネルギーを直接消費する製品が対象であったのに対し、窓や断熱材、シャワーヘッドなどの間接的にエネルギー消費に影響する製品（エネルギー関連製品）にも拡張している点があげられる。

従来、これらの取り組みは、企業内部での取り組みが中心であったが、最近では、企業の社会的責任（CSR：Corporate Social Responsibility）の観点から、消費者や投資家に対して、その環境パフォーマンスの開示を要求される動きも顕著となっている。製品のライフサイクルにおける環境負荷を$CO_2$に代表される温室効果ガス排出量で表示するカーボンフットプリント（CFP：Carbon Footprint of Products）、企業活動やサプライチェーンにおける間接的な温室効果ガス排出量の情報開示を行うGHG Protocol [5] に関する議論などがその代表例といえる。企業活動における間接的な温室効果ガスの排出量を意味するSCOPE3を中心に、企業自らが算定・公表し、他社との差別化を図る動きが活発化している [6]。このように、製品や企業単体で行われていた取り組みを組織やサプライチェーン全体に拡張する動きがみられる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

本領域における課題としては、規制などの実効性の担保と標準化の困難性があげられる。例えば、WEEE指令は、電気製品などが10製品群に大別されているが、対象製品となるか否かの判断については、事業者が自主的に行う必要がある。また、同指令は、最低限のルール化を前提とした指令（Minimum Requirements）であることから、EU加盟各国が独自の厳しい国内法（上乗せ）を制定することも可能となっていることから、その動向も含めて注視することが要求される。また、RoHS指令では、EUのみならず、日本、中国、韓国、タイ、アルゼンチン、トルコ、米国（カリフォルニア州）、ノルウェー、インドなどの各国でルール化される動きがあり、国際的な製品などを提供する生産者はこれらの動きを把握する必要がある [7]。

近年、CFPやSCOPE3などのように温室効果ガスのみに着眼したアプローチが中心となっているが、複数の環境負荷に注目するマルチクライテリア手法にも注目が集まっている。さまざまな環境問題を考慮することは重要であるが、その算定を行う事業者の負荷の増大、評価そのものが複雑になること、一般消費者に理解しにくいことなどの課題が指摘されている [8]。

また、日本や欧州の研究機関などを中心に環境配慮設計の定量化やLCA手法の高度化に関する研究は継続的に実施されているが、独自手法の開発・改良にとどまっており、標準性の高い手法開発には至っていないのが現状である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国のEPEAT（Electronic Products Environmental Assessment Tools）[9] が注目すべき動向といえる。EPEATは、米国における電子製品の環境影響の総合評価システムで

あり、米国・連邦政府の調達条件として位置づけられている制度である。IEEE（米国電気電子技術者協会）1680で定められた基準にしたがって、その達成度合いを3段階（ゴールド、シルバー、ブロンズ）で評価するものである。具体的には、環境配慮という観点から取り扱いに注意を要する素材の選定、使用済み製品の管理、省エネルギー、製品寿命と製品ライフサイクルの拡張、パッケージング、企業の業績などが主たる評価項目となっている。EPEATは、とりわけ北米市場への展開を考慮する際には必須条件となりつつある [10]。

また、EUで2011年より取り組まれている製品・組織の環境フットプリントも注目すべき動向である。これは、欧州共通の環境負荷の評価指標の構築を目指したものであり、欧州長期成長戦略のひとつに位置付けられている資源効率化政策に基づくアプローチである。2013年～2016年にパイロット事業が行われており、①算定基準の開発プロセス、②検証方法、③コミュニケーション方法の試行を目的としている [8]。

我が国においては、環境省・経済産業省などが取り組んでいるサプライチェーンにおける温室効果ガスの排出量の算定に向けた取り組みが注目される。サプライチェーンにおける温室効果ガスの排出量の算定に取り組む企業の情報開示や国内外の動向などを発信するプラットフォームとして、グリーン・バリューチェーンプラットフォーム [11] を開設している。現段階では、情報開示を行っている企業などの情報レベルが必ずしも統一されていないが、国際的にも注目されている分野であるため、その動向や成果を注視したい。

また、最近では、太陽光発電や電気自動車などやICTなどの使用・運用段階における温室効果ガスの削減の貢献度を定量化しようという試みがみられる [12]。SCOPE3では、あくまでも「排出量の算定」を目的とした取り組みであるが、その貢献度評価を行うことへの企業などのニーズは高く、今後、注目すべき分野である。

## （６）キーワード

拡大生産者責任（EPR）、環境配慮設計（DfE）、LCA、EP（End of Pipe）、CP（Cleaner Production）、有害化学物質、温室効果ガス（GHG）、カーボンフットプリント（CFP）、SCOPE3

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・環境配慮設計の定量評価手法やLCA手法の開発が複数の企業、研究機関などで継続的に行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・(一社)産業環境管理協会 [13] において、LCAに関するデータベースの構築などが継続的に行われている。<br>・環境省・経済産業省主導により、サプライチェーンにおける温室効果ガス排出量の算定に向けた取り組みが支援されている [6]。<br>・アジア各国への環境配慮設計などの普及啓発に向けた取り組みもみられる [14]。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・家電リサイクル法、自動車リサイクル法、資源有効利用促進法などの枠組みに基づき、電気・電子製品、自動車などを中心に環境配慮設計事例などに対する取り組みはなされている。今後は、これらの蓄積された知見を国内外に積極的に発信していくことが求められる。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・LCAに関するデータベースの構築などに関する継続的な研究開発が行われている [15]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・IEEEによって定められた評価基準に基づき開発されたEPEAT [9] が特筆すべき動向といえる。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・EPEATが米国・連邦政府の調達条件として位置づけられており、国際的にも波及効果が大きい取り組みとして認知され始めている。製品によっては、EPEATの準拠が北米への事業展開には必須となりつつある [10]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・LCA手法や環境負荷評価の指標開発において、複数の企業、研究機関などで継続的に行われている [15]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・製品・組織のLCAに関するパイロット事業が2013～2016年で行われている。欧州統一の評価指標の構築に向けた動きであり、その成果と政策などへの反映が注目される [8]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・WEEE指令、RoHS指令、EuP/ErP指令などを主導しており、本領域において、世界的な影響力を持ち続けている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・LCAなどに関する研究事例が報告され始めている。廃棄物問題、資源問題は重要な政策的課題であることから、今後、活発化することが予想される。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・廃棄物、リサイクルに関連する事業者の誘致を目的とした「静脈産業園」を全国各地で整備する計画である [16]。このなかで、産学官連携による新しい研究テーマの一環として、本領域に関する取り組みが加速化する可能性がある。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・冷蔵庫、エアコン、洗濯機、テレビなどのリサイクルを規定した「廃棄電器電子製品回収処理管理条例」や有害化学物質を規制する「電子情報製品汚染予防管理弁法」が施行した [17]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・環境配慮設計に関する国際会議であるEcoDesign2013を主催するなど、本領域への関心の高まりが伺える [18]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・韓国環境産業技術院（KEITI）[19] を中心に、LCAや環境配慮製品に関する研究が継続的に行われている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・電気・電子製品および自動車の資源循環を規定した「電気･電子製品及び自動車の資源循環に関する法律」や有害化学物質の管理を要求する「有害化学物質管理法」が施行した [20]。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 市川芳明．環境適合設計の実際．2001.
2) Europian Commission. Waste Electrical & Electronic Equipment (WEEE). http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/legis_en.htm
3) Europian Commission. Recast of the RoHS Directive. http://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/index_en.htm
4) Europian Commission. Ecodesign. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/index_en.htm
5) GREENHOUSE GAS PROTOCOL. http://www.ghgprotocol.org/
6) 環境省．サプライチェーンにおける温室効果ガス排出量に関するページ. http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/comm.html
7) 小野田弘士．環境配慮設計とLCAの基礎理解．World Eco Scope．2013.
8) みずほ情報総研(株)．― 環境フットプリント ― 欧州における環境負荷見える化の政策．2013. http://www.mizuho-ir.co.jp/publication/column/2013/0611.html
9) EPEAT. http://www.epeat.net/
10) LCA日本フォーラム（JLCA）．環境効率セミナー（総会記念セミナー）資料．アメリカEPEAT（電気製品環境評価ツール）の最新動向について．2010. http://lca-forum.org/environment/forum/seminar/pdf/2010/0823_3.pdf
11) グリーン・バリューチェーンプラットフォーム. http://www.gvc.go.jp/
12) 【例】JEITAグリーンIT委員会. http://home.jeita.or.jp/greenit-pc/
13) （一社）産業環境管理協会. http://www.jemai.or.jp/
14) 経済産業省．環境に配慮した生産に関連するアジアのネットワークの概要. http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g11026g28j.pdf
15) 【例】EcoBalance. EcoBalance2012 Oral program. http://ilcaj.sntt.or.jp/EcoBalance2012/program/index.html
16) 経済産業省．平成23年度インフラ・システム輸出促進調査等委託費「中国大連市における高付加価値カーボン原料等供給型タイヤリサイクルに関する事業化可能性調査報告書」2012. http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h24fy/h2412-chinatire/h2412-chinatire-07_01.pdf

17）日本機械輸出組合（JMC）. 中国における最近の製品環境規制動向. 2012. https://jmcti.org/jigyou/pdf/H23kankyo_20120328_china.pdf
18）EcoDesign2013. http://ecodesign.or.kr/ecodesign2013/
19）Korea Environmental Industry & Technology Institute（KEITI）. http://www.keiti.re.kr/eng/action.do
20）環境省. 中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会 小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会（第2回）資料. 2011. http://www.env.go.jp/council/former2013/03haiki/y0324-02/mat02.pdf

### ３．４．３．２　サプライチェーンの環境マネジメント

#### （１）研究開発領域名

サプライチェーンの環境マネジメント

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

企業のサプライチェーンに起因する環境負荷、環境影響および資源消費を追跡・計測・モデル化・評価し、環境面でのホットスポットを特定することで、製品設計や原材料調達に関する意思決定の改善を通して、サプライチェーンの持続可能性を高める。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

製品の原料採掘から製造、流通、消費者への販売に至るまでの企業のサプライチェーン（またはバリューチェーン）は、近年のグローバル化に伴って、ますます複雑化している。そのため、自社が直接的に管理するプロセスに加え、原材料の調達先や廃棄物処理の委託先など自社の製品のサプライチェーン全体を把握して、物流の最適化によるコスト削減や、そこに潜在するリスク要因の管理を図るサプライチェーンマネジメント（SCM：Supply Chain Management）が、企業の事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）や企業の社会的責任（CSR：Corporate Social Responsibility）の観点からも重要性を増している。特に、このような地球規模のサプライチェーンは、生活水準の向上や労働環境の改善、貧困の緩和を可能にする一方で、抑制できないエネルギーや水、その他の資源への渇望が地球に負担を与えるという負の側面が懸念されている[1)]。Science誌（2014年6月）において「Rethinking the Global Supply Chain」と題した特集が組まれていることは、こうしたサプライチェーンの環境マネジメントへの科学の貢献が求められていることを示す、ひとつの証左であるといえる。特に、持続可能なサプライチェーンの包括的管理の鍵として、ライフサイクル評価（LCA：Life Cycle Assessment）などの科学的手法が、どこに改善のための労力を集中させるべきか研究するために利用されうると指摘されている[2)]。こうしたホットスポットの特定・評価は、製品の改善、サプライヤの選定を含む企業の持続可能性の戦略、消費者のライフスタイル、調達のオプション、持続可能な消費と生産の国家政策などの意思決定を指南しうる[3)]。以下では、従来の製品のLCAの範疇を超えた、企業のサプライチェーンの環境マネジメントの手法としてのLCAやフットプリント分析の活用と、関連する規格や基準の動向について述べる。さらに、注目動向として、近年の社会LCA（SLCA：Social LCA）の発展とサプライチェーンの社会面でのホットスポット評価、サプライチェーンリスク管理（SCRM：Supply Chain Risk Management）との関連性にも言及する。

近年、LCAの適用対象は、従来の A. 製品レベルから、B. 組織（企業）、C. 消費者・ライフスタイル、D. 国家レベルへと拡張している[3)]。これらのうち、特にサプライチェーンの環境マネジメントと関連性が強い適用対象は、B. 組織のLCA（OLCA：Organizational LCA）である。温室効果ガス（GHG：Greenhouse Gas）排出に関しては、製品のカーボンフットプリント（CFP：Carbon Footprint of Products）[4, 5)]に加えて、GHGプロトコルの「スコープ3算定報告基準」[6-8)]や国際標準化機構（ISO）における「組織のGHG排出量の定量化および報告」[9)]、CDP（Carbon Disclosure Project）[10)]

などに代表されるように、企業などの組織に対して、自社の直接的な排出（いわゆるスコープ1）や電力や熱など調達するエネルギー起源の排出（いわゆるスコープ2）だけでなく、原材料調達など自社のサプライチェーンに起因する負荷の算定および報告を求める動きが活発になっている。こうした負荷の算定においては、ライフサイクルインベントリ（LCI：Life Cycle Inventory）の方法が適用される。システム境界の設定やカットオフの問題がないという利点から、特にデータ収集（追跡・計測）を優先するべき排出源のスクリーニングのための二次データとして、環境産業連関分析（EIOA：Environmental Input-Output Analysis または EEIO：Environmentally Extended Input-Output）による環境負荷原単位の有用性も期待されている [6, 7]。

当然、サプライチェーンの環境マネジメントが対象とするべき問題はGHG排出のみではなく、カーボンフットプリント以外にも、各種の環境フットプリントが分析されている [11]。欧州委員会（EC）は、2013年に「製品の環境フットプリント（PEF：Product Environmental Footprint）」および「組織の環境フットプリント（OEF：Organisation Environmental Footprint）」についての勧告を公表している [12]。OEFを実施する目的として、ホットスポットに着目した環境影響の削減や、サプライチェーンのリスク管理などの戦略的な意思決定、組織の環境パフォーマンスの投資家や他の利害関係者への開示が明記され、結論にはサプライチェーンのホットスポットの特定や改善可能性を含むことが必須とされるなど、サプライチェーンの環境マネジメントへの適用を前提としていることが分かる。また、対象とする製品のサプライチェーンや組織の活動に関連する、あらゆる環境問題を含んだ影響評価（インベントリの影響領域への集約）が求められており、気候変動、オゾン枯渇、生態毒性、人間毒性、酸性化、富栄養化、水資源枯渇、鉱物・化石資源枯渇、土地利用といったさまざまな影響領域と、それぞれの影響評価モデルが提示されている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

サプライチェーン管理者（企業）の意思決定は、サプライチェーンに関わる地域の持続可能性に影響を与える [2]。そのため、地域依存性のある環境影響や地域偏在性のある資源消費の計測・評価には地域レベルの解像度が求められるが、サプライチェーンの地域的なホットスポットを特定するための方法は、世界的にも未成熟である。その背景には、これまでのLCAやフットプリント分析の主眼がライフサイクル“全体”での環境影響を計測・評価することにあり、インベントリのデータベースや影響評価の手法開発の方向性も、集約・合計された環境影響を簡便に導出することに向いていたという状況がある。技術的には、地域的な環境負荷や資源消費のフロー（インベントリ）の多くは国レベルの解像度で整備されている一方で、影響評価の手法の地域的な解像度は環境影響の性質に依存するため、それらのマッチングが困難な課題となっている [3]。また、インベントリと影響評価の両面において、データベースやモデルのグローバル化が課題として残されている。EIOAによる輸出入を考慮した環境負荷原単位の算定 [13, 14]、地球規模での地域的な影響評価への展開 [15-17] が進められているが、地球規模のサプライチェーンのホットスポットを特定するという目的に対しては、地域的な解像度や網羅性の点では発展途上である。

また、一般化されたインベントリ（二次データ）のデータベースの充実によって、LCAを実施する企業が自らインベントリ（一次データ）を収集し、モデル化する機会や必要性が少なくなったことが、意図しない結果として、LCAの実践と自社固有のサプライチェーンのホットスポットの特定との間に乖離を生んでいることも考えられる。LCAという手法の範疇では、「ホットスポットの特定のためであれば、粗い推計でも十分」という割り切りもありえる[3)]。しかし、特に水資源消費や土地利用といった地域依存性・偏在性の無視できない影響領域については、企業が自社のサプライチェーンを追跡し、それに起因する負荷や影響の計測・モデル化・評価を通して、精確にホットスポットを特定するという一連の手順について、より具体的な方法の提示が求められる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

SCMは元来、環境面だけでなく経済面、社会面を含む概念であるが、SCMと密接に関わるLCAの将来的な発展性としても、前述の地域的な詳細性・精確性に加え、経済面や社会面の評価への拡張が期待されている[3)]。環境面、経済面および社会面のパフォーマンス指標によって構成される枠組みは「ライフサイクル持続可能性分析（LCSA：Life Cycle Sustainability Assessment）」と呼ばれ、製品を対象とした従来の（環境）LCAに対して、評価指標の範囲の拡張と、メソレベル（企業の製品ポートフォリオなど）や経済圏全体への分析対象の拡張が想定されている[18)]。経済面の分析にはライフサイクルコスティング（LCC：Life Cycle Costing）、社会面にはSLCAが適用される。

SLCAについては、2009年に公表された指針において、環境LCA（ELCA）と対比させつつ、SLCAの技術的な枠組みが提示されている[19)]。具体的な評価指標としては、人権、労働条件、文化遺産、貧困、疾病、政治紛争、先住権などがある。SLCAの適用対象としては、社会面でのホットスポットを特定して潜在的な負の影響とリスクを減少させることが例示されており、サプライチェーンの環境マネジメントの目的とも整合的である。

社会面でのホットスポットのスクリーニングや評価に利用可能なSLCAのデータベースの整備は、ELCAと比べて不十分であるものの、いくつかの事例が公表されつつある[20)]。ただし、一般化されたデータでは、地域的に精確なホットスポット評価ができないという問題は、環境マネジメントとも共通する課題である。社会面での評価は、環境面と比べても地域依存性が重要であり、地域的なホットスポット評価の具体的な事例の蓄積が求められる。また、ELCAのインベントリ（環境負荷や資源消費のフロー）と異なり、SLCAが対象とする不適正行為は、統計データとして捕捉されないことも多く、実態の把握が困難であることが、精確な計測・評価やデータベースの整備を妨げる可能性にも注意しなければならない。

### （６）キーワード

サプライチェーン、バリューチェーン、ライフサイクル評価（LCA）、環境フットプリント、ホットスポット、社会LCA（SLCA）、サプライチェーンリスク管理（SCRM）

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備されている（IDEAJLCA LCAデータベース）。EIOAによる環境負荷原単位が公表されている（3EID）。輸出入を考慮した環境負荷原単位が算定されている [14]。CFPのデータベースが公表されている [5]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・規格・基準など：CFPについて独自の基準を公表している [5]。スコープ3について指針を公表している [8]。GHGプロトコルによるスコープ3の基準化に関与している [6]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・経営の効率化のためのSCMに関するコンサルティングに加え、環境分野では、産業界の環境管理を支援する法人がLCAソフトウェア（MiLCA）やCFPプログラムを提供している。コンサルティング会社によるスコープ3やCDPに関するコンサルティング、建設分野を中心としたLCAのコンサルティングなどが提供されている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備されている（U.S. LCI Database）。EIOAによる環境負荷原単位が公表されている（CEDA，EIO-LCA、OPEN IO）。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・規格・基準など：GHGプロトコルによるスコープ3の基準化に関与している [6]。環境保護庁（EPA）がLCAの原則と実施についての報告を公表している。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・コンサルティングなど：ライフサイクル情報管理システム、持続可能性計測のサービス、LCA実施のサービスなどが提供されている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備・更新されている（ELCD，Ecoinvent，Gabi Databases，CPM LCA Database）。英国ではEIOAによるスコープ3の環境負荷原単位が公表されている（Supply Chain GHG Emission Factors）。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・規格・基準など：GHGプロトコルによるスコープ3の基準化に深く関与している [6]。ISOによるOLCAの規格化に深く関与している [9]。ECによる環境フットプリントの勧告が公表されている [12]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・コンサルティングなど：企業のサプライチェーンの持続可能性のためのソフトウェアやコンサルティングの提供、LCAソフトウェア（SimaPro）やLCAのコンサルティングの提供、バリューチェーンのホットスポットやフットプリント分析のためのソフトウェアの提供などがみられる。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備されている（CLCD）。EIOAによる環境負荷原単位が算定されている [21, 22]。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・規格・基準など：GHGプロトコルによるスコープ3の基準化に関与している 6)。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・コンサルティングなど：LCAソフトウェアの提供が行われはじめている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↘ | ・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備されていたが（Korea LCI Database）、現在の動向は不明。 |
| | 応用研究・開発 | × | ↘ | ・規格・基準など：CFPについて独自の認証を実施予定とされていたが、現在の動向は不明。 |
| | 産業化 | × | → | ・コンサルティングなど：該当するビジネスは確認されていない。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Wible, B., Mervis, J., and Wigginton, N.S.: “Rethinking the Global Supply Chain,” *Science* 344 (6188), pp. 1100-1103 (2014)
2) Dooley, K.J.: “The Whole Chain,” *Science* 344 (6188), p. 1104 (2014)
3) Hellweg, S. and Milà i Canals, L.: “Emerging Approaches, Challenges and Opportunities in Life Cycle Assessment,” *Science* 344 (6188), pp. 1109-1113 (2014)
4) International Organization for Standardization (ISO): *ISO/TS 14067: Greenhouse Gases – Carbon Footprint of Products – Requirements and Guidelines for Quantification and Communication*, http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=59521 (2013)
5) 産業環境管理協会：「CFPプログラム：カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム」, https://www.cfp-japan.jp/（2014年8月12日 閲覧）
6) Greenhouse Gas (GHG) Protocol: *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*, http://www.ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard (2011)
7) Greenhouse Gas (GHG) Protocol: *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions*, version 1.0, http://www.ghgprotocol.org/feature/scope-3-calculation-guidance (2013)
8) 環境省・経済産業省：「サプライチェーンを通じた温室効果ガス排出量算定に関する基本ガイドライン」, Ver. 2.1, http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/comm.html（2014）
9) International Organization for Standardization (ISO): *ISO/TR 14069: Greenhouse Gases – Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions for Organizations – Guidance for the Application of ISO 14064-1*, http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=43280 (2013)
10) Carbon Disclosure Project (CDP): *Supply Chain Report 2013-14: Collaborative Action on Climate Risk*, https://www.cdp.net/en-US/Results/Pages/Supply-Chain-Reports.aspx (2014)
11) Hoekstra, A.Y. and Wiedmann, T.O.: “Humanity’s Unsustainable Environmental Footprint,” *Science* 344 (6188), pp. 1114-1117 (2014)

12) European Commission (EC): “Commission Recommendation of 9 April 2013 on the Use of Common Methods to Measure and Communicate the Life Cycle Environmental Performance of Products and Organisations,” *Official Journal of the European Union*, L 124, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013H0179 (2013)
13) 南斉規介 編：「特集 世界経済を対象とした多地域間産業連関表の開発と応用」『日本LCA学会誌』9 (2), pp. 67-107（2013）
14) Nansai, K., Kondo, Y., Kagawa, S., Suh, S., Nakajima, K., Inaba, R., and Tohno, S.: “Estimates of Embodied Global Energy and Air-Emission Intensities of Japanese Products for Building a Japanese Input-Output Life Cycle Assessment Database with a Global System Boundary,” *Environmental Science & Technology* 46 (16), pp. 9146-9154 (2012)
15) Itsubo, N.: “Development of LIME 3 –Globalization of LCIA Methodology based on Endpoint Modeling–,” International Symposium on Life Cycle Impact Assessment –Towards Development of Global Scale LCIA Method–, Yokohama (2012)
16) 伊坪徳宏・湯龍龍・村上佳世・本下晶晴・栗山浩一・吉田謙太郎・時松宏治：「地球規模に拡張したライフサイクル影響評価手法（LIME 3）の開発」，第8 回 日本LCA学会研究発表会，草津（2013）
17) Jolliet, O.: IMPACT World+: “A Regionalized LCIA Method at Global Level,” International Symposium on Life Cycle Impact Assessment –Towards Development of Global Scale LCIA Method–, Yokohama (2012)
18) Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., and Rydberg, T.: “Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future,” *Environmental Science & Technology* 45 (1), pp. 90-96 (2011)
19) United Nations Environment Programme (UNEP): *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*, http://www.unep.org/publications/search/pub_details_s.asp?ID=4102 (2009)
20) Benoît Norris, C.: “Data for Social LCA,” *International Journal of Life Cycle Assessment* 19 (2), pp. 261-265 (2014)
21) Peters, G.P., Weber, C.L., Guan, D., and Hubacek, K.: “China’s Growing $CO_2$ Emissions – A Race between Increasing Consumption and Efficiency Gains,” *Environmental Science & Technology* 41 (17), pp. 5939-5944 (2007)
22) Guo, J., Zou, L.L., and Wei, Y.M.: “Impact of Inter-Sectoral Trade on National and Global $CO_2$ Emissions: “An Empirical Analysis of China and US,” *Energy Policy* 38 (3), pp. 1389-1397 (2010)

### ３．４．３．３　LCAに基づく生産と消費管理

#### （１）研究開発領域名

LCAに基づく生産と消費管理

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

グローバル化した現代経済の複雑なサプライチェーンのもと、生産・消費活動は、直接・間接に数多くの環境影響を引き起こしている。環境影響軽減を実現する有効な戦略の同定が求められている。そこでは、ある環境影響から別の環境影響への単なる負担変位（burden shifting）を回避しなくてはならない。そのためには、資源採掘から廃棄に至る製品ライフサイクル全般にわたって生じるすべての環境影響を定量的に考慮することが必要である。この目的に資するのが製品の全ライフサイクルに関わる環境影響を定量的に評価するLCA（Life Cycle Assessment）である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

LCAは国際標準化（ISO 14000シリーズ）された唯一の環境影響評価手法であり、全世界において共通の環境影響評価手法として公部門・民間部門における意思決定において広く採用されている[1,2]。LCAは製品（サービスを含む）がその全ライフサイクル（資源採掘、生産、流通、使用、廃棄・リサイクル）を通じて発生する環境負荷因子と資源消費、およびその環境・健康・資源枯渇への影響を定量的に評価する[3]。現在のLCAの基礎を築いたのは1969年の米国における清涼飲料に関わる研究にある。その後の普及を経て1991年に不適切なLCAの乱用に対する批判に対応する形でISO国際標準化が行われた[4]。LCAの枠組みに関わるISO 14040では、LCAを①目的設定、②調査範囲（負荷因子・資源・システム境界・機能単位）設定、③インベントリ分析（Life cycle inventory analysis）、④影響評価（Life cycle impact assessment）、⑤解釈、の段階からなると規定している。評価する製品システムの機能を定量化したものが機能単位である（例えば、排気量2,000 ccの自動車をある走行条件の下、10年で10万km走行）。機能単位がシステム境界内で発生させる環境負荷因子・資源消費量（例えば、$CO_2$、$CH_4$、$N_2O$、NOx、SOx、銅鉱石）を同定するのがインベントリ分析である。これに必要なデータ整備と計算手法もインベントリ分析に含まれる。影響評価は、インベントリ分析結果を科学的知見から得られた特性化係数（characterization factor）を用いて地球温暖化、オゾン層破壊、酸性化、光化学オキシダント、生体毒性などの「インパクトカテゴリ（midpointとも呼ばれる、これに対して因果関係の最終段階、例えば皮膚がんはendpointである）」に変換し、影響を評価する。LCAを実施する際に中心をなすのがインベントリ分析と影響評価である。インベントリ分析では、従来から用いられている積み上げ法（process-based LCA）と並んで、産業連関分析を併用した方法（hybrid-LCA）が用いられている。

LCAの典型的な用途は特定の製品システムについての環境負荷評価と負荷低減方法の同定であったが、近年、応用範囲は多様化し広範になっている[2,5]。まずあげられるのが、単一因子に限定したLCAである。$CO_2$に限定したカーボンフットプリント（ISO 14067）、水消費に限定したウォーターフットプリント（ISO 14046）が具体例である。従来の製品LCAを拡張したものとして、企業など組織のLCAに関わるScope 3-type LCA（ISO

TS14072）があげられる。Scope 3基準は、米国の環境シンクタンクである世界資源研究所（WRI：World Resources Institute）と、持続可能な発展を目指す企業連合体である持続可能な開発のための世界経済人会議（WBCSD：World Business Council for Sustainable Development）が共催するマルチステークホルダー方式のパートナーシップである「GHGプロトコル」が、開発および発行主体となっている。調査対象を環境負荷以外にまで拡張したものとして、製品ライフサイクルに関わる全費用を推計するライフサイクル費用分析[6]、社会的影響（労働条件など）を評価対象とした社会LCA（SLCA：Social LCA）[7,8]、および、製品システムの環境影響を製品システムがもつ価値との比較で評価するEco-efficiency（ISO 14045）があげられる。また、LCAによる定量的製品環境負荷データを宣言・公開するものとしてタイプIII環境ラベル（ISO 14025）がある。

LCAの政策への応用は、特に欧州で進んでいる。EU委員会電気製品指令はLCAで得られた知見に依拠しているが、使用段階が最大の環境影響をもつと同定されたことから、電気製品はエネルギーラベルをもつことが義務付けられている（European Parliament and Council, “Directive 2005/32/EC Energy-using Products”（2005））。廃棄物管理における意思決定へのLCAの応用としては、古典的な廃棄物序列（削減＞再使用＞リサイクル＞エネルギー回収＞埋め立て）からの逸脱が妥当とされる場合を同定するためにLCAが必要とされている（“Directive 2005/32/EC Energy-using Products”（2005））。LCAがエネルギー部門における政策決定に大きく貢献した例としてバイオ燃料をあげることができる。バイオ燃料は、一時、化石燃料よりも無条件に環境負荷が低いと認識されていたが、LCA研究[9]が逆の場合があることを示した。これを契機に、スイス政府は、廃棄物由来でないすべてのバイオ燃料について、税制優遇措置を得るためにその化石燃料に対する環境的優位性をLCAで示す必要がある、との法制化を行った（Federal Department of the Environment Transport Energy and Communications, regulation 641.611.21（2009））。

米国においても、LCAが環境保護庁（EPA）の政策・規制決定において使用されている。例として、Energy Independence and Security Act of 2007（EISA）が、再生可能燃料としての適合性審査においてライフサイクル温室効果ガス排出削減量評価を求めていることがあげられる[10]。

こうした背景の下、欧州ではLCA研究・応用に携わる人材の層が厚く、雇用の機会に恵まれていることから関連大学院も充実している。ベルリン工科大学（TU Berlin）、スイス連邦工科大学（ETH）、ノルウェー工科大学（NTNU）、ライデン大学環境科学センター（CML）、スウェーデン王立工科大学（KTH）、デンマーク工科大学（DTU）、リーズ大学などが例である。LCAの今日の国際的普及に貢献したISO化においてはSETAC-Europe（Society of Environmental Toxicology and Chemistry-Europe）が中心的な役割を果たしてきた。さらに、欧州委員会がもつ研究機関であるEU Joint Research Center（JRC）がEuropean Platform on Life Cycle Assessment（EPLCA）を創設し、データベース整備、マニュアル作成などを行っている。層の厚い人材を生み出し、SETAC・JRC主催会議で発表される研究成果がやがてISO規格となり、それがまたLCAに関わる人材の層を厚くするという好循環を実現している。

日本は、LCAにおける国際会議Ecobalanceを20年前から隔年で主催し、国主導でデー

タベースを整備するという他に例を見ない取り組みも行った。民間企業でのLCA応用は盛んである。しかし、欧州と大きく異なり、公部門の各種政策にLCAを反映することは廃棄物政策を含んで行われてこなかった。物質的な対象物の開発を目的としないLCAでは、国際的に影響のある論文作成が極めて重要である。Scopusを用いた分析（※1）によるとトップ100論文に日本から入るのは、東京大学平尾雅彦教授（44位）、工学院大学稲葉敦教授（65位）、東京都市大学（産総研）伊坪徳宏教授（78位）であった。国別論文数では、米国が圧倒し、日本はスペイン、イタリア、英国、スウェーデン、ドイツ、オランダ、スイス、フランス、中国、デンマークに続く12位であった。フランス・中国とは僅差であるが、近年における中国の躍進は著しい。

一方、全体的な論文数でははるかに小規模であるものの、産業連関分析を用いたインベントリ分析（hybrid-LCA）においては、日本は米国、中国、ノルウェー、英国に次ぐ5位であり、中国以下とは僅差である（※2）。日本から10位以内に入っているのは、早稲田大学中村慎一郎教授（8位）と早稲田大学近藤康之教授（10位）である。日本がこの分野において強みをもつのは、米国と並んで世界最高水準の産業連関データが整備されていることが大きくかかわっている。関連する動向として環境省が環境分野分析用産業連関表の作成に着手したことは、注目に値する [11]。

欧州のような公的部門での応用がないことから、LCA専門家の雇用機会は限られ、人材育成について欧州のような好循環を実現することができていない。LCAの国内専門学会として2004年に創設された日本LCA学会は、数年来、会員400名前後で推移している。学生会員の大半は卒業と同時に退会しているのが実情である。上記の主要大学でも特に博士課程においてLCA関連分野を専攻する学生は減少傾向にある。

LCAは評価技術であり、新素材・新製品などの物質的対象物を開発するものではない。一方、進行する温暖化や人口増加の下、企業・組織に、今後、ますます厳格な環境対応が求められていく事は確実である。環境対応の評価に関わるのがLCAであるので、その国際規格の動向は、企業・組織活動の方向性を大きく左右する可能性をもつ。したがって、国際規格を単に受け入れていくのではなく、その決定プロセスにも能動的に関与していくことが、日本企業の「規格リスク」を回避するために必要である。そのためには、学理的なLCA研究において世界をリードする先端的研究を推進することが求められる。公的部門の政策決定におけるLCAの採用は大きな契機となるだろう。

（※1）検索式：TITLE-ABS-KEY("LCA") AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar") AND (LIMIT-TO(LANGUAGE,"English")［2014年8月検索時（以下同様）］

（※2）検索式：TITLE-ABS-KEY("LCA" and "hybrid") AND LANGUAGE(english) AND ( LIMIT-TO(SRCTYPE,"j" )

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

・データ整備：LCAの普及および上で述べたその対象領域の拡張に伴い、より高い精度をもったデータベースの整備と公開が求められている。精度の向上（不確実性の低減）には地域性の反映が必要である（例えば電力構成）[12]。その一方で国際貿易を通じた全球的な相互依存性の考慮も求められている [13]。この相反する要請（精度の向上と対象の拡大）を両立しつつ、ますます多様化する要請に応じたデータベースの整備・維

持は大きな課題である。

・反発効果（Rebound effects）：家電製品の省エネ化は他の条件を一定とすれば家計のエネルギー関連支出を軽減する。この軽減分がどのように支出されるかによって、当初の省エネ効果は打ち消されてしまう可能性がある。例えば、電気代が低下したので、その分、空調の使用時間を長くする場合である。これを反発効果という[14]。換言すれば、反発効果とは「他の条件にして一定」が成り立たない場合でもある。これは下記のConsequential LCAとも関連することであるが、機能単位に関するより現実的なシナリオを作成することが求められよう。

・Consequential LCA（CLCA）：省エネ機器が普及すると経済全体でエネルギー需要が減るから、供給条件が変わらないとすればエネルギー価格が低下し、それは経済全体で市場メカニズムを通じて広範な効果、例えば技術・製品代替、をもつ可能性がある。この市場メカニズムを通じた広範な効果をも考慮しようとするのがCLCAであり、これを考慮しない従来のLCA（Attributional LCA）と区別される。”市場メカニズムを通じた広範な効果を考慮する”ことは概念上は理解できることである。しかし、それを透明性をもって定量モデル化することは最大の課題である[15]。

・社会LCA（SLCA）：必要性は広く共有されているが、データベース・方法論の双方において未解決の課題が多い[8]。

・関連科学コミュニティとの連携：インパクト評価は最新の科学的知見を反映することが求められるが、LCAコミュニティの中のみでこれを行うには限界があるし、非効率的である。より専門化し規模も大きな研究コミュニティ（例えば、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）や世界保健機関（WHO））との連携を進めるべきである[12]。

・日本における政策的課題：環境政策において欧州のようにLCAが活用されていない。欧州のような研究と応用の好循環を実現するには、手始めに公部門の関与が大きい廃棄物政策からLCAを活用することが望まれる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・マテリアルフロー分析（MFA：Material Flow Analysis）との連携：一国の消費者全体や都市全体など巨大な規模をもつ対象を機能単位として設定する場合が増えている[13, 16]。この場合、その規模ゆえに、従来の製品LCAのような「他の条件にして一定」を仮定することは妥当でなく、システム全体のマスバランスとの整合性を考慮する必要性が生じる[17, 18]。例えば、ある副産物・廃棄物について大規模なリサイクルを想定したとして、実際にそれだけの量が調達できるかということである。システム全体のマスバランスを考慮するのがMFAである。MFA分野の研究では、日本はLCAをはるかに上回る国際競争力をもっている。Scopusによれば（※3）、日本の論文数は米国に次ぐ2位、10位以内の研究機関に3機関（東京大学、国立環境研究所、東北大学）が入り、10位以内の著者に4名の日本人が入っている（醍醐市朗准教授・松野泰也准教授（東京大学）、中島謙一主任研究員（国立環境研究所）、長坂徹也教授（東北大学））。LCAとMFAを融合した新領域における日本の貢献が大いに期待される。

・国際貿易に体化された全球的環境フットプリント研究：国際貿易を通じた全球的投入・産出相互依存関係を高い解像度の下で定量化した大規模な産業連関データ（多地域間

産業連関モデル、MRIO：Multi-regional Input-Output Model）がEU（EXIOPOL, CREEA, WIOD）と豪州（Eora）を中心とした大規模プロジェクトで開発されている[19-22]。特に、Eoraグループは国際貿易と生物多様性の関連を初めて定量化した[23]。

（※3） 検索式：TITLE-ABS-KEY("material flow analysis") AND ( LIMIT-TO(DOC-TYPE,"ar" ) ) AND ( LIMIT-TO(LANGUAGE,"English" ))

## （６）キーワード

ISO 14000シリーズ、インベントリ分析、インパクト評価、インパクトカテゴリ、ライフサイクル費用、eco-efficiency、積み上げ法LCA、ハイブリッドLCA、産業連関分析、カーボンフットプリント、ウォーターフットプリント、Scope 3-type LCA、規格リスク、マテリアルフロー分析（MFA）

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↘ | ・水消費に関わるインパクト影響研究では国際的に注目される成果を生んでいる[24]。それ以外のインパクトカテゴリについては近年特に見当たらない。大学院水準の若手の育成に先細り感がある。<br>・Hybird-LCAの方法論研究とそれをさらに空間的に拡張した多地域分析（MRIO）では世界水準にある（国別論文数5位、Scopusによる）。インパクト同様に大学院水準の若手の育成に先細り感がある。研究者層が薄いため、論文生産数が限定される。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・Hybird-LCAとそれをさらに空間的に拡張した他地域分析（MRIO）の応用では世界水準にある（Scopusによる）。大学院水準の若手の育成に先細り感がある。<br>・国立環境研究所によってHybird-LCAに準じた産業連関表による環境負荷原単位データベース（3EID：Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables）が整備・維持され、公開されている。<br>・民間企業での応用は盛んであるが、インパクトカテゴリの範囲が狭く、多くの場合に地球温暖化効果に限定されている。英語を母国語としない欧州諸国と比べ、英語での発信が少ない。<br>・公共部門での応用は参考にとどまり、政策に反映されることがない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・LCA関連国際規格の動向には注目しているが、自ら発信・提案することが少ない。規格が議論されるSETAC-WGなどへの参画が低水準にある。<br>・国内向け応用ソフトは各種開発されているが、国際的な展開には至っていない。<br>・民間企業が国立環境研究所の開発した3EIDデータベースをその製品群に特化して解像度を上げ、国内向に日本語のみで公開している。<br>・インベントリデータベース開発は、一時、官主導のもと、民間の協力で行われたが、その後の維持・更新が課題となっている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・国別論文数でその他を圧倒している（Scopus）。特にインパクト評価に強みをもつ[25, 26]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・民間企業のみでなく、環境保護庁（EPA）の政策決定にもLCAが活用されている[10, 27]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ◎ | → | ・各種企業団体がインベントリデータベースを作成している。<br>・連邦政府機関がインベントリデータベースを作成している [28]。<br>・EPAがソフトウェアを作成している。<br>・国立標準技術研究所（NIST）が建築系LCAソフトを公開 [29]。<br>・Scope IIIを提唱。<br>・カーネギーメロン大学がHybrid LCAに基づくweb上でのLCA計算サービスを無料で提供している [30]。日本の国立環境研究所が提供している3EIDが大気汚染物質と温室効果ガスに重きを置いているのに比べ、水消費、土地利用、毒性物質放出（TRI：Toxics Release Inventory）まで網羅している。<br>・EPEAT（Electronic Products Environmental Assessment Tools）global rating system for greener electronicsの省エネ評価（EEBC：The Electronics Environmental Benefits Calculator）でLCAを使用。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・地域別論文数では米国を圧倒している。<br>・EU委員会の研究機関JRCやSETACを中心にインパクト・インベントリ両分野で層の厚い研究が行われている。その中で、ISO規格につながる多くの規格を提唱している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・民間企業のみでなくEU・国レベルにおいて公部門での政策決定にLCAが多く活用されている [5]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・国際的に広く使われているデータベース（ECOINVENT）・ソフトウェア（SimaPro、Gabiなど）を開発・販売している。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・論文数を急速に増やしている（国別10位、Scopusによる）。それを担っているのは主に欧米に留学して大学院教育を受けた人々である。<br>・国際的に注目される研究を生み出すには至っていないが、米欧日の成果を吸収して急速に発展しつつある [31]。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・論文数を急速に増やしている。それを担っているのは主に欧米に留学して大学院教育を受けた人々である。<br>・中国の環境影響に対する国際的関心が高まっていることを反映した事例研究が多い。 |
| | 産業化 | × | → | ・いまだ途上にある。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・国際的に注目される研究を生み出すには至っていない。国別論文数で23位、量的に日本より一桁小さい（Scopus）。<br>・社会LCAに関する検討が公的機関で開始されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・国別論文数で23位、量的に日本より一桁小さい（Scopus）。<br>・国際的に注目される研究を生み出すには至っていない [32]。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・国主導（KNCPC：Korea National Cleaner Production Center）でLCAインベントリデータベースを整備 [33]。<br>・各種ソフトウェアが開発されている。<br>・カーボンフットプリント実施で日本より先行（2009-）[34]。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Finkbeiner, M.; Inaba, A.; Tan, R.; Christiansen, K. & Klüppel, H.-Jü. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044 The international journal of life cycle assessment, 2006, 11, 80-85
2) Finkbeiner, M. From the 40s to the 70s–the future of LCA in the ISO 14000 family The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 1-4
3) Joint Research Center, European Platform on Life Cycle Assessment, http://eplca.jrc.ec.europa.eu/
4) EPA: Life Cycle Assessment: Principles and Practice, EPA/600/R-06/060, http://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/pdfs/chapter1_frontmatter_lca101.pdf
5) Hellweg, S. and Canals, L. M. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment, Science, 2014, 344, 1109-1113
6) Hunkeler, D. and Lichtenvort, K. and Rebitzer, G. (Eds.) Environmental Life Cycle Costing CRC Press, 2006
7) Benoît C, M. B. (Ed.) Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products UNEP, 2009
8) Jørgensen, A. Social LCA–a way ahead? The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18, 296-299
9) Scharlemann J. P. W. and Laurance, W. F., How Green Are Biofuels, Science 319, 43-44 (2008)
10) EPA Lifecycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions from Renewable Fuels, http://www.epa.gov/otaq/renewablefuels/420f10006.pdf
11) 環境省. 環境分野分析用産業連関表の作成に向けて. 2013. http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/pdfdata/201312.pdf
12) Huijbregts, M.: A critical view on scientific consensus building in life cycle impact assessment The International Journal of Life Cycle Assessment, Springer, 2014, 19, 477-479
13) Hertwich E & Peters G, Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis, Environ. Sci. Technol., 2009, 43, 6414-6420
14) Hertwich, E. G. Consumption and the rebound effect: an industrial ecology perspective J. Ind. Ecol., Wiley Online Library, 2005, 9, 85-98
15) Zamagni, A.; Guinée, J.; Heijungs, R.; Masoni, P. & Raggi, A. Lights and shadows in consequential LCA The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17, 904-918
16) 加藤 博和　柴原 尚希：都市・社会資本・交通を対象としたライフサイクルアセスメント研究の現状と課題，第33 回土木計画学研究・講演集，2006
17) Nakamura, S.; Kondo, Y.; Kagawa, S.; Matsubae, K.; Nakajima, K. & Nagaska, T. MaTrace: Tracing the fate of materials over time and across products in open-loop recycling Environmental Science & Technology, ACS Publications, 2014

18) Sevigné-Itoiz, E.; Gasol, C. M.; Rieradevall, J. & Gabarrell, X. Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market Resources, Conservation and Recycling, Elsevier, 2014
19) The Eora MRIO Database. http://worldmrio.com.
20) CREEA. http://creea.eu/ EXIOBASE. http://www.exiobase.eu./
21) World Input-Output Database. http://www.wiod.org
22) EXIOPOL. http://www.feem-project.net/exiopol/
23) Lenzen, M.; Moran, D.; Kanemoto, K.; Foran, B.; Lobefaro, L. & Geschke, A. International trade drives biodiversity threats in developing nations, Nature, 2012, 486, 109-112
24) Motoshita, M.; Itsubo, N. & Inaba, A. Development of impact factors on damage to health by infectious diseases caused by domestic water scarcity The International Journal of Life Cycle Assessment, 2011, 16, 65-73
25) Bare, J.; Gloria, T. & Norris, G. Development of the method and US normalization database for life cycle impact assessment and sustainability metrics Environmental Science & Technology, 2006, 40, 5108-5115
26) Lautier, A.; Rosenbaum, R. K.; Margni, M.; Bare, J.; Roy, P.-O. & Deschênes, L. Development of normalization factors for Canada and the United States and comparison with European factors, Science of the Total Environment, 2010, 409, 33-42
27) EPA. Life-Cycle Assessment. http://www.epa.gov/sustainability/analytics/life-cycle.htm
28) National Renewable Energy Laboratory（NREL）. U.S. Life Cycle Inventory Database. http://www.nrel.gov/lci/
29) NIST. BEES（Building for Environmental and Economic Sustainability）. http://www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm
30) Carnegie Mellon University. EIO-LCA. http://www.eiolca.net/
31) Nie, Z.-r.; Gao, F.; Gong, X.-z.; Wang, Z.-h. & Zuo, T.-y. Recent progress and application of materials life cycle assessment in China Progress in Natural Science: Materials International, 2011, 21, 1-11
32) KITECH: Korean social LCA method as a tool for evaluating product sustainability, 2013 http://www.ciraig.org/pdf/event/ACVs2013/session%203/May6_16h55_Dong-hoo_Kim.pdf
33) KNCPC. LCI DATABASE. http://www.kncpc.re.kr/eng/topics/Lci.asp
34) Korea Environmental Industry & Technology Institute（KEITI）. Carbon Footprint Labeling Activities in KOREA. http://www.ftis.org.tw/active/download/1_6.pdf
35) EPA. LCA resources. http://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/resources.html#Software

### ３．４．３．４　廃棄物の発生抑制

#### （１）研究開発領域名

廃棄物の発生抑制

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

廃棄物の発生抑制を推進するための研究であり、開発領域は、1. 発生抑制対象の設定・効果推定、2. 促進メカニズムの設計、3. 発生抑制に資する要素技術・システムの開発、4. モニタリングと評価改善など、広範囲にわたる。特に食品廃棄物の削減が注目されている。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

廃棄物の発生抑制は、廃棄物対策においてリサイクル（再生利用）や熱回収などよりも優先すべきとされているが、その実施状況は遅れている。日本の第三次循環型社会形成推進基本計画（2013年閣議決定）において2R（Reduce=発生抑制、Reuse=再使用）重視が打ち出されたことや[1)]、EUでの2008年改正廃棄物枠組み指令2008/98/ECにおいて加盟各国に対し2013年までに廃棄物発生抑制プログラムの策定を義務づけたことなど[2)]、発生抑制の取り組みを加速する動きがみられる。

発生抑制は、廃棄物になってからの対策ではなく、廃棄物になる前にとる対策である。このため、廃棄物となる前の製品やサービスの企画・設計・製造・流通・使用・消費段階にまで、その対策は及ぶ。電子書籍サービスによる紙の代替、製品の長寿命化設計、製造工程での収率の向上、容器包装の簿肉化・軽量化、発注精度の向上（売れ残り廃棄品の削減）、適切な修理・メンテナンスによる長期使用、食べきり・使い切りなどは、いずれも廃棄物の発生抑制対策である。廃棄物の発生抑制が指し示す範囲は、日本と欧州・OECDとで多少異なる。日本では発生抑制は、再使用（リユース）を含まない概念とされているが、EUの廃棄物枠組み指令や、OECDの定義では、発生抑制（Waste prevention）に、リユースも含む[3)]。（ただし、EUにおいては、廃棄物ではないものをリユースする行為と、いったん廃棄物となったものに手を加えてリユースする行為は区別され、後者はPreparing for re-useとして、発生抑制には含まない。）また、EU、OECDの定義では、量的な抑制だけでなく、質的な抑制（有害性の抑制）も発生抑制概念に含む[3)]。

発生抑制の対象となる廃棄物としては、食品廃棄物（流通ロス、食べ残し）や容器包装、使い捨て商品（紙おむつ、ホテルの歯ブラシ）、紙ごみ（ジャンクメール）など削減可能と判断しやすいものが、しばしばあげられる。また、家電製品、電池など有害性が懸念されるものもしばしば対象となる。特に食品廃棄物に関しては、国際連合食糧農業機関（FAO）が世界生産の1/3にあたる約13億tの食料が毎年廃棄されていることや食品廃棄物にかかる経済的コストが7,500億ドルにのぼると指摘したこと[4,5)]、EUの欧州議会が2025年までに食品廃棄物を半減する目標を設定したこと、日本の食品リサイクル法において業種別の発生抑制目標が設定されたこと[6)]など、各国で注目され、取り組みが進められている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

2R研究に求められる役割としては、以下がある[7,8]。

1. 2R促進対象候補の設定と効果推定・優先順位付け
- 発生抑制可能量の見積もり
- 2R行動の受容可能性の調査
- 2Rに関するLCA研究

2. 促進メカニズムの設計
- 促進施策の設計
- 促進施策事例のデータベース化
- 消費者の2R行動要因の分析
- サプライチェーンにおける関係者の利害得失分析
- 事業者に対する経済的インセンティブ付与の制度設計
- 社会実験による仮説検証、知見獲得

3. 発生抑制に資する要素技術、製品、システムの開発
- 食品のロングライフ化
- 容器包装の薄肉化、軽量化
- 製造プロセスにおける収率の向上
- 製品の小型化・長寿命化
- 販売量予測の高精度化（過大発注による売れ残り削減）
- インフラの集約・コンパクトシティ化

4. モニタリングと評価・改善
- モニタリング指標の設定
- 計測手法の開発
- 指標の計測・施策効果の事後検証

1. について、発生抑制可能量の網羅的な推定が欧州や日本ですでになされており[9]、2Rに関するLCA研究[10,11]も近年増えつつある。今後は、推定の精度を高めることや内訳を明らかにすることが必要である。例えば、日本における食品ロス（本来食べられるにもかかわらず廃棄されている食品）の発生量推定値は、食品事業者300～400万t/年、家庭200～300万t/年の合計500～800万t/年と、不確実性が高い[6]。

2. の促進メカニズムの設計については、消費者・事業者の双方を対象として、今後の研究の充実が期待される。

消費者行動の心理学モデル研究によると、リサイクル行動においては社会規範評価（周囲からのプレッシャー、同調圧力）の影響が強いのに対し、発生抑制行動においては廃棄物の発生を抑制するべきであるとの個人的規範や利他的価値観の影響が強いことが指摘されている[12,13]。社会実験などにより、これらの知見をさらに発展させ、多岐にわたる発生抑制行動のそれぞれに適した介入方策を解明していくことが期待される。

事業者の発生抑制の促進方策としては、拡大生産者責任の適用による発生抑制への経済的インセンティブの付与や、サプライチェーンの関係者間の協議による商慣習の見直

し[14]などがある。拡大生産者責任とは、製品が廃棄物となった際に、その処理・リサイクルの責任を製造者が負う制度である。

3. の要素技術開発は関連する各分野において研究開発を進めることが期待される。

4. について、発生抑制量は直接には測定できず、何らかのベースラインを設定し、そこからの変化を測定することとなり、種々の方法が提案されている[15-17]。施策効果を把握可能な精度をもった計測手法の開発が望まれる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

＜食品廃棄物＞

- 英国Love Food Hate Wasteキャンペーン：非営利組織WRAP（Waste and Resources Action Programme）が2007年より開始した食品廃棄物削減に関する消費者対象の啓発キャンペーン[18]。可食部の廃棄を21%削減するなど、大きな効果を上げている[19]。
- 食品関係事業者による商慣習の見直し：日本国内における食品流通業界では、食品の製造日から賞味期限までを3分割し、納品期限を1/3まで、販売期限は2/3までとする1/3ルールが慣行となっている。これを緩和する協議が関係者で進められ、社会実験の結果廃棄量削減効果が確認されている[14]。

＜容器包装＞

- 減装（へらそう）ショッピング：容器包装の少ない商品をNPOごみじゃぱん（神戸大学石川雅紀教授代表）が選定し、店頭でのPOPなどにより推奨する取り組み[20]。推奨商品の売り上げ増、メーカーによる減装商品の開発などの成果を上げている。

### （６）キーワード

Waste prevention、2R、食品ロス、フードバンク、商慣習、サプライチェーン、拡大生産者責任、有料化、社会実験、発生抑制の計測・モニタリング手法、取組事例集

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | △ | → | ・[△] 特に目立つ研究はない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・[↗] 環境省環境研究総合推進費にて「食品ロス削減に向けた社会経済システムの分析に関する研究」を研究開発テーマに設定。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・[○] 容器包装の薄肉化・軽量化の進展（ただし限界に近づきつつある）。<br>・[○] レジ袋辞退率の向上。<br>・[↗] 第三次循環型社会形成推進基本計画での2R重視の明示。<br>・[↗] フードバンク団体の増加。<br>・[↘] リユース瓶の衰退。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | → | ・[△] 特に目立つ研究はない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・[○] 発生抑制のLCAへの組み込みについて先導的な研究がなされている（カナダ）[10]。 |
| | 産業化 | × | → | ・[×] 廃棄物の発生抑制について政府目標の設定などがない。<br>・[○] フードバンク団体の活発な活動。食中毒などに対する事業者の責任免除の体制の整備 [21]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・[○] 発生抑制の計測手法 [15-17] や消費者の行動要因モデル [12] について先導的な研究がある。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・[↗] 2012年から2016年にかけFUSIONS（Food Use for Social Innovation by Optimising Waste Prevention Strategies）プロジェクトによる研究推進がされている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・[○] 2014年を「ヨーロッパ反食品廃棄物年」と位置づけ、期限表示と包装の適正化、フードバンク活動の優遇の啓発を行っている。<br>・[↗] 改正廃棄物枠組指令での各国の発生抑制プログラム策定により、今後進展が期待される。 |
| 中国 | 基礎研究 | ― | ― | ・特筆する動きはみられない。 |
| | 応用研究・開発 | ― | ― | ・特筆する動きはみられない。 |
| | 産業化 | ― | ― | ・特筆する動きはみられない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ― | ― | ・特筆する動きはみられない。 |
| | 応用研究・開発 | ― | ― | ・特筆する動きはみられない。 |
| | 産業化 | ○ | ↘ | ・早くから使い捨て商品の禁止法を制定し、先行していたが、その後の進展はあまりない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 環境省. (2013). 第三次循環型社会形成推進基本計画. http://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_3.pdf
2) European Commission DG Environment (2008). Analysis of the evolution of waste reduction and the scope of waste prevention. Framework contract ENV . G . 4 / FRA / 2008 / 0112.
3) 田崎智宏, 渡辺浩平. (2011). 海外における廃棄物発生抑制・リユースの取り組み. 廃棄物資源循環学会誌, 22(4), 272-278.
4) FAO. (2011). Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention-
5) FAO. (2014). Food Wastage Footprint: Full cost accounting.
6) 長野麻子. (2014). 食品リサイクルをめぐる現状と課題-食品ロス削減を通じた経済成長への貢献-. 廃棄物資源循環学会誌, 25(1), 5-12.
7) 山川肇, 橋本征二, 田崎智宏, 藤井実. (2011). 2R研究の現状と課題 -2R効果指標の可能性-. 廃棄物資源循環学会誌, 22(4), 300-307.
8) European Commission (2012). Preparing a Waste Prevention Programme Guidance document.
9) 大森恵子. (2011). リデュース・リユース（2R）の推進に向けた政策の動向について. 廃棄物資源循環学会誌, 22(4), 263-271.
10) Cleary, J. (2014). A life cycle assessment of residential waste management and prevention. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(9), 1607-1622.
11) 新保雄太, 中谷隼, 栗栖聖, 花木啓祐. (2012). 家庭における廃棄物発生抑制行動のライフサイクル評価. 環境科学会誌, 25(2), 95-105.
12) Cecere, G., Mancinelli, S., and Mazzanti, M. (2014). Waste prevention and social preferences: the role of intrinsic and extrinsic motivations. Ecological Economics, 107, 163-176.
13) 前田洋枝, 広瀬幸雄, 河合智也. (2012). 廃棄物発生抑制行動の心理学的規定因. 環境科学会誌, 25(2), 87-94.
14) バイオマス資源総合利用推進協議会. (2014). 平成25年度食品廃棄物対策環境整備 商慣習等の改善による食品廃棄物等の発生抑制の推進 報告書 (p. 68).
15) Sharp, V., Giorgi, S., and Wilson, D. C. (2010). Methods to monitor and evaluate household waste prevention. Waste Management & Research, 28(3), 269-80.
16) Zorpas, A. and Lasaridi, K. (2013). Measuring waste prevention. Waste Management, 33(5), 1047-56.
17) Bräutigam, K.-R., Jörissen, J., and Priefer, C. (2014). The extent of food waste generation across EU-27: Different calculation methods and the reliability of their results. Waste Management & Research, 32(8), 683-694.
18) Love Food Hate Waste. http://www.lovefoodhatewaste.com
19) WRAP. (2013). Final Report on Household Food and Drink Waste in the United Kingdom 2012.
20) NPO法人ごみじゃぱん. http://gomi-jp.jimdo.com/活動紹介/減装商品/
21) Schneider, F. (2013). Review of food waste prevention on an international level. Waste and Resource Management, 166(4), 187-203.

### ３．４．３．５　リサイクル技術（都市鉱山含む）

#### （１）研究開発領域名

リサイクル技術（都市鉱山含む）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

レアメタルや貴金属などのリサイクル技術の研究であり、研究例は極めて多い。多くの場合には、金属製錬の分野で用いられてきた湿式処理技術が適用されるが、高温処理（塩化揮発法、溶融塩電解）やバイオ技術が用いられる例も増えている。日本は資源のリサイクルやレアメタルのリサイクルの研究と実操業の分野で世界の最先端の技術をもっている。世界のリサイクル技術をリードし、世界のリサイクル産業に貢献している。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

都市に大量に廃棄される使用済み家電製品や電子機器などには、貴金属やレアメタルなどの金属資源が多く含まれており、これらは都市生活の中に埋もれた鉱山に例えて「都市鉱山」と呼ばれる。日本には金属の高度な選鉱・製錬技術があり、これを用いて使用済み製品から金属を回収リサイクルすれば、都市は金属を産み出す鉱山となる。鉱物資源に乏しい日本にあって、都市鉱山が注目され、物質・材料研究機構の試算によると我が国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵する。しかし、これらの都市鉱山では、一製品当たりの含有量が微量であったり、素材と混合されていたりするため、技術的およびコスト的に鉱物資源の抽出が容易ではない。また、数多くの製品が市中に散在しているため、製品回収コストが高くつくことも、資源回収が進まない理由の一つとなっている[1)]。その結果、有用金属を含んだ製品が廃棄されたり、海外に流出していたりするのが現状である。これらの問題解決には、有用金属を効率的に抽出・分離する技術の開発や使用済み製品または有用金属を含む部品の効率的な回収網の整備が不可欠である。技術のブレークスルーや考え方のブレークスルーが必要となるであろう。

リサイクルの対象となる二次資源は、リチウムイオン電池、ネオジム磁石、自動車排ガス浄化触媒、石油脱硫触媒、無電解ニッケルめっき廃液、超硬工具廃棄物、携帯電話、プリント基板、熱電対などに含まれる貴金属類などである。これらの二次資源は、人工的に作られた廃棄物資源であり、総称して都市鉱山と呼ぶことがある[2)]。

日本は世界需要の約2割を占めるレアメタルの消費大国である。レアメタルを備蓄し集中的に管理する国家備蓄倉庫が茨城県の工業団地に3万7,000 $m^2$の敷地面積で存在し、7種の鉱種が保管されている。国家備蓄対象鉱種と定められているのは、Ni、Cr、W、Co、Mo、Mn、Vの7種類のレアメタルである。国家備蓄制度は石油危機に刺激されて1983年に創設されたもので、国内消費量の60日分を目途に国が7割、民間が3割の割合で備蓄している。上にリサイクル対象の例をあげた二次資源は国家備蓄対象となるものである[3)]。

リサイクルに使われる処理技術、すなわち分離・回収技術には、これまでに選鉱製錬の分野で用いられてきた技術が応用できる。これらの技術に加えてバイオリーチングや磁気アルキメデスの原理の適用などの新しい技術が使われる。

研究例が多く、必要性の高いものは、自動車産業と関連するリチウムイオン電池やネオジム磁石（Fe70%、Nd、Pr、Dy、Tbなどの希土類元素30%、B 1%の組成）や自動車

排ガス浄化触媒（Pt、Pd、Rhの三元触媒）である。ネオジム磁石のリサイクルはすでに大手企業3社でリサイクルが実施されている。処理法は主に湿式処理であり、高温で消磁後に粉砕・酸溶解・水産物沈殿による除鉄・溶媒抽出法による希土類分離である。酸溶解の工程でバイオリーチングを適用する試みがある。ネオジム磁石は、①組成が変わらない、②多量に発生する、③将来にわたって発生する、というリサイクルに適した条件を満たしている点で処理しやすい二次資源である[2)]。

リチウムイオン電池は、携帯電話やパソコンの電源として利用され、現在は電気自動車やハイブリッド自動車の動力源として利用されている。処理技術には焼成・粉砕・ふるい上産物とふるい下産物に分粒・ふるい下産物の湿式処理が適用される。正極剤に用いられる$LiCoO_2$が回収対象であったが、正極剤は$Li(Co_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3})O_2$や$LiMn_2O_4$や$LiFePO_4$のような安価な材料に変化している。上記のリサイクルの条件を満たさない二次資源であり、今後どのような処理技術を適用するのかは大きな問題である。技術のブレークスルーが必要とされる。電池関連で、ハイブリッド自動車の動力源として用いられている電池にニッケル水素電池がある。ある自動車会社は使用済みニッケル水素電池を分離・回収して元のニッケル水素電池に戻そうとする試みをもっている。一方で、これまで通りステンレス原料に回す考え方もある。

Pt、Pd、Rhの貴金属は、そのほとんどが自動車排ガス浄化触媒として利用される。貴金属は溶銅中に分配（溶解）しやすい性質があるので、ハニカム状のコージェライト（$2MgO・2Al_2O_3・5SiO_2$）にコートされた3元素は高温下で銅中に溶解回収される。銅を酸化して貴金属と分離した後に貴金属は溶媒抽出法､分別沈殿法などを利用して分離･回収される[2)]。

石油脱硫触媒は、アルミナ担体に二硫化モリブデンとコバルトを担持させた触媒で、これによって石油中のイオウ成分を水素化脱硫するものである。脱硫過程で石油中のイオウが硫化水素として除去されるとともに、石油中のバナジウムやニッケルが触媒に吸着して触媒はその効果を失う。これが廃触媒で、モリブデンやバナジウムは酸化焙焼後に水酸化ナトリウム溶液で溶解された後に、モリブデン酸アンモニウム、バナジン酸として回収される。希薄な液では陰イオン交換樹脂による吸着・溶離を経て回収される。問題点はニッケルやコバルトが未溶解残渣として残り、回収対象になっていないことである[4,5)]。

無電解ニッケルめっき廃液は、ハードディスク製造でアルミ円板に無電解でニッケルめっきを行った後に記憶媒体をのせてハードディスクを製造する工程で生じる。伝導性のない物質にめっきすることができるという特徴をもつ。ニッケルイオンは液中で次亜リン酸によって還元されてメッキ被膜となる。ハードディスク使用量はパソコンの生産量の増加に伴って、増加の一途をたどっている。ニッケルは高価なレアメタルの一つで国家備蓄対象成分である。分離技術には、溶媒抽出法が用いられる。ニッケルの分離・回収だけでなく、次亜リン酸の有効利用（肥料または農薬）も図るべきである。環境調和型リサイクル技術からゼロエミッション型のリサイクル技術への転換も大事なブレークスルーである。協同効果という現象を利用した溶媒抽出法で１回の抽出操作でめっき廃液からそのままニッケルを98%の割合で抽出可能である。抽残液には次亜リン酸が酸化されて亜リン酸として残っている。ここからナトリウムを除去すると、肥料または農

薬への利用が可能になる。

都市鉱山ビジネスは日本が資源を一方的に「使う」だけの国ではなく、資源を「つくる」面でも強みを発揮できる国であることを私たちに教えてくれる。天然資源は資源国で「採れる」ものであり、「つくる」より「使う」ものというイメージが強い。しかし、科学技術の発展に伴い、地下にあった金属資源が地上に所在を変えて、日本は巨大な都市鉱山を抱える「地上の資源国」となっている。さらに、レアメタルの消費大国であると同時に、実は世界に冠たるレアメタルの生産大国でもある。鉱石を製錬して純度の高いレアメタルを取り出す技術で日本は世界最高水準であり、この技術力があるからこそ、都市鉱山から資源を創り出すことができるのである。

金属資源はエネルギー資源と違って、消費するものではなく使用するものであり、かなりのものはどこかに形を変えて残っている。この意味では、日本は資源国である[3-5]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

超硬工具や蛍光灯やリチウムイオン電池のような難処理廃棄物が増加している。これらの二次資源をリサイクルして再利用できるようにするには、何らかのブレークスルーが必要である。例えば、蛍光灯の蛍光体であれば$Y^{3+}$と$Eu^{3+}$の酸化物および$La^{3+}$、$Ce^{3+}$と$Tb^{3+}$のリン酸塩で構成される。希土類の分離には蛍光体を溶解する必要がある。$Y^{3+}$と$Eu^{3+}$の酸化物は硫酸で溶解できるが、$La^{3+}$、$Ce^{3+}$と$Tb^{3+}$のリン酸塩は簡単には溶解しない。遊星ボールミルによるメカノケミカル処理によって水溶性の希土類水酸化物に変換するなどの必要がある。この例のように、何らかの工夫によって技術的に処理できるものであると考えられる。国の研究予算ではリサイクルという分野が減りつつあるが、都市鉱山開発のために今後もリサイクル研究・実用化試験を継続する必要がある。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

リサイクルに適用できそうな新しい分離技術として、次のような研究がある。

- レアメタルを選別・回収できるバイオ技術－アーミング微生物－（京都大学）
- 金属回収素材としてのコケ植物原糸体（理化学研究所）
- 金属イオン還元細菌による貴金属・レアメタルの分離（大坂府立大学）
- 磁気アルキメデス法による希土類の分離（大阪大学）
- 連続向流泡沫分離法によるGaの分離濃縮（名古屋大学）

これらは新技術と考えてよいものであろう。バイオ関連技術が多いが、この分野に研究費が多く投資されていることと関係していると思われる。資源を持たない我が国にあってリサイクルの重要性は極めて高いので、バイオ技術にかたよらない国の予算上の配慮が重要である。

### （６）キーワード

レアメタル、国家備蓄元素、分離技術、リチウムイオン電池、ネオジム磁石、廃触媒、都市鉱山

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・リサイクル関係の基礎研究は極めて多く行われており、世界の最先端にある。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・家電リサイクルにより解体業者にてエアコン・冷蔵庫・洗濯機などのモーターから、また自動車リサイクルによりハイブリッド自動車駆動モーターのネオジム磁石を回収し、磁石から希土類を分離している。リチウムイオン電池などの他の二次資源については処理技術が確立されつつある。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・ネオジム磁石やリチウムイオン電池などの二次資源について多くの実施例がみられる。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・リサイクル関係の基礎研究は行われており、米国鉱物金属材料学会（TMS）には廃棄物減容化（リサイクル）の委員会がある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・リサイクルの応用研究はあまり進んでいない。回収業者が各社に競合させ、回収・販売している。最終的に日本・中国・ベトナムでリサイクル処理される。 |
| | 産業化 | × | → | ・廃棄物は最終的に日本・中国・ベトナムへ輸出されるので、産業化は十分に進展していない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・リサイクル関係の基礎研究は行われているが、活発ではない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・磁石メーカーにて発生した研磨粉・固形屑や電池などの二次資源は中国・ベトナムへ販売され、中国やベトナムで処理される。 |
| | 産業化 | × | → | ・廃棄物は日本・中国・ベトナムなどへ輸出されるので、リサイクルの産業化は十分でない。 |
| 中国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・リサイクル関係の基礎研究は極めて多く行われており、日本の技術と競合するほどに活発である。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・中国国内および海外からの輸入回収品は分別され、質のよい磁石や二次資源は加工して一部リユースされる。残りは中国の精錬メーカーへ販売され、中国でリサイクルされる。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・種々の二次資源について多くの実施例がみられるが、環境対策が十分ではない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・リサイクル関係の基礎研究はよく行われている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・回収業者が各社に競合させ、リサイクル原料を回収している。最終的に日本・中国・ベトナムへ輸出して、処理される。 |
| | 産業化 | × | ↘ | ・二次資源は日本・中国・ベトナムなどへ輸出されるので、リサイクルの産業化は十分ではない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 南條道夫：都市鉱山開発―包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け、東北大学選鉱製錬研究所彙報、第43巻、第2号、239-251頁（1988年）
2) 田中幹也：レアメタルのリサイクル、化学と教育、59巻、10号、520-523頁（2011年）
3) 西村山治ら:レアメタルと再資源化の可能性、環境資源工学、第61巻、第2号、83-89頁（2014年)
4) 経済産業省：レアメタルのリサイクルに係る現状（産業構造審議会 第15回廃棄物・リサイクル小委員会資料）（2011年）
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0003198/015_04_00.pdf
5) 経済産業省：レアメタルリサイクルについて（産業構造審議会・中央環境審議会合同会合中間とりまとめの概要）（2012年）
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0003198/pdf/report01_01_00.pdf

### ３．４．３．６　水の循環利用技術

#### （１）研究開発領域名

水の循環利用技術

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

水のリサイクルは、さまざまに使われた水に何らかの処理を行い、再び同じあるいは別の用途に利用する行為である。再生水を製造する原水、利用用途とも極めて多様である。ここでは、都市で発生する廃水に焦点を当て、特に下水処理水を原水として、処理を行うことで製造される再生水にスコープを当てる。本領域は、再生水の製造に限らず、リスクマネジメント、水の輸送を含む再生水のエネルギーなど広範囲な研究開発項目が含まれる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

再生水は、トイレや散水などの非飲用の都市利用、農業利用、工業利用、レクリエーションや環境維持用水、さらに飲料用水に至るまでの多様な用途に世界で使われている[1, 2, 3]。この用途ごとにどのような水質を確保すればよいのかが研究開発の一つの焦点である。これに併せて、下水の処理方法による原水の水質も多様であり、再利用用途も広範囲であることから、再生水製造も下水処理そのものから工学的再生水処理、さらに自然による浄化までを含め、さまざまな処理技術がある。再生水に関する研究開発は以下のように分類できる。

1. 水の再利用の計画論
2. 再生水の用途開発と実践
3. 再生水製造技術
4. リスク管理と消費エネルギー論

1. 水の再利用の計画論（再生水利用の必要性と安全性の確保の技術）

水資源の枯渇、水質汚濁、洪水、地下水の汚染や低下など、多くの水をめぐる問題から、世界人口が90億人を超える21世紀半ばには、水は石油に代わる最重要問題になると予測されている。世界的には都市の人口増加、産業開発、灌漑農業の拡大により水需要が増大し続け、水資源不足がより深刻化している。さらに淡水資源は、不適切な排水管理によっても脅かされており、水資源の枯渇に拍車をかけている。これらの課題に対処するためには、新たに水資源を開発し、適正な水使用を図る必要がある。水利用の改善、水資源の拡大には、多くの方法があるが、循環型社会を目指した方法に再構築されなければならない。中でも下水処理水の再利用技術は、環境、経済面からますます重要となっている。

下水処理水の再利用には多くの利点がある[1]。都市活動がある限り、都市はさまざまな水源から水供給がなされるため、都市から出される排水量は干ばつの影響をあまり受けない。再生水は量的質的に安定した水資源である。適切に処理された再生水は、水質に応じた水の使用、いわゆるカスケード利用を行うため、淡水水資源の節約、環境への放流を行うための下水処理の負担の軽減を図ることが可能である。また、再生水には窒

素やリンなどの栄養素が含まれており、特に農業資源としての利用が可能である。下水処理水の再利用により、環境への水の排出量を減らし、汚染物質の環境への負荷を軽減できる。大規模な水資源開発による環境破壊、河川流量減少による希釈容量の低下、大量水使用により発生する排水からの汚染負荷は大きなものとなるので、下水処理水の再利用は、水資源の保全と同時に環境破壊や環境汚染という環境管理面から非常に重要な意味をもつ。さらに、利用目的に応じた水質レベルで処理して再利用することは、環境規制が厳しい地域では環境へ放流するための下水処理エネルギーを節約し、コストを抑制できることにもなる。水資源が不十分な地域では、遠隔地から水を輸送するためのエネルギーは膨大なものになるので、これまでの水システムに比べて、近くの水資源を用いることによって輸送のエネルギーを小さくできる。

しかし、下水にはさまざまな化学物質や病原性微生物が含まれているため、適切な水質管理がなされていない下水処理水の再利用は、人の健康にリスクをもたらす。微生物による感染リスクは､適切な再利用の処理と消毒､利用用途の選択や維持管理によって、健康へのリスクを許容可能なレベルにマネジメントできる。また、下水処理水に含まれる重金属などの規制項目以外に、内分泌かく乱化学物質や医薬品など毒性情報が十分明らかでない化学物質が存在することが報告されている。このような化学物質による人への直接的あるいは食物を介した間接的な影響、さらに灌漑利用や環境用水など開放型利用では、地下水、土壌や水生生物への環境影響なども考慮した適切な処理と利用方法が必要である。

2. 再生水の用途開発と実践（広がる再生水の利用範囲）

再生水の適用用途は広範囲に及ぶ。我が国では、1984年非飲用の都市用水としてトイレ用水利用が新宿副都心で始まり、このほか非飲用の都市用水である洗浄用水、散水用水、修景用水、環境用水、農業用水、工業用水、融雪用水の範囲に広がっている[4)]。中国、韓国でも同様に、非飲用を目的とした再利用が行われている。一方、米国では、カリフォルニア州を中心に一般市民が接触するレクリエーション利用、農作物灌漑、非飲用の都市用水利用が行われてきたが､このほか間接的飲用（IPR : Indirect Potable Reuse）を目的として再生水の地下水涵養がカリフォルニア州で1960年代から始まり、アリゾナ州、フロリダ州、テキサス州へと広がってきた[1, 2)]。2013年からは、テキサス州で水道への直接供給を行う再生水事業が始まり、ロサンゼルスなどでも大規模な直接的飲用利用（DPR : Direct Potable Reuse）が検討されている。直接的飲用利用は1968年から始まった南アフリカのナミビアに次ぐ事業であるが、改めて世界的な関心を集めている。欧州では、農業利用を目的としたスペインなど南欧が中心であったが、欧州委員会は2012年公開した「Water Blueprint」[5)] の中で、欧州の環境保全に再生水は重要で、経済成長の基礎になるとする水の基本政策を出している。英国、ベルギーでも水資源の逼迫から河川水や地下水を介した間接的再利用が2000年代から行われ始め、さらに広がりがみられる。このほか、マレーシアから水を輸入しているシンガポールでも、間接的飲用を目的とした再利用が2002年から始まった。水の不足に悩まされているオーストラリアでは、1999年にアデレードで大規模な農業利用が始まり、2012年からはパースで地下水を経由した間接再利用の実証実験が始まり、2015年に実施段階に移行する予定である[2)]。

中東では、イスラエルが20世紀初めから下水の農業利用を行ってきており[6]、近年点滴灌漑装置に代表される再生水の輸送、利用段階の技術に長けている。

このように、多様な用途ごとに必要となる再生水の水質レベルは異なり、また再生処理し、輸送するのに許容されるエネルギーやコストも、既存水資源との競争性は地域によって異なる。したがって再生水に関する技術体系も歴史的、地域的に多様である。

3. 再生水製造技術

再生水製造技術は極めて多様な組み合わせがあるが、一般には下水の一次処理である沈殿処理、二次処理である生物処理、それに続く高度処理、さらには工学的な自然浄化に分けられる。

再利用用途によってどの汚染物質をどの程度除去する必要があるかは異なる。病原微生物は、原虫、細菌、ウイルスによってサイズ、消毒耐性、感染性が異なる。また化学物質も硝酸性窒素、総溶解性蒸発残留物（TDS：Total Dissolved Solids）、ホウ素、臭素酸や過塩素酸、重金属、消毒副生物、微量化学物質などで再生水製造の単位操作の機能が異なる。

再生水製造の単位操作の選択に当たっては、原水がどのようなレベルであるのか、つまり二次処理が標準活性汚泥法レベルか、ラグーンや酸化池などそれよりも低い処理レベルか、あるいは窒素・リン除去が行われるような高度な生物処理か、あるいはさらに膜分離活性汚泥法（MBR：Membrane BioReacter）のような高い処理水質なのかという点がまず重要となる。我が国でMBRが開発されたが、国内での適用は浄化槽を中心とした範囲に限られてきた。ようやく2000年代に入って下水道での利用が始まり、近年、国でも積極的にMBRの研究開発が推進されている[7]。特にエネルギー削減とファウリング防止を中心に研究が進められている。また、後述するようにMBRの国際規格を我が国が先導して作成する動きが出ていることは望ましい傾向である。再生水利用の視点からは、MBRによって細菌や原虫の高い除去率が期待でき、ウイルス類も高い除去が期待できるが、ウイルスを含めて内分泌かく乱物質や医薬品類などのリスク要因の除去可能レベルは十分明らかではない。このため、再利用用途での従来の下水処理法と比べた場合の優位性、後段での処理の改善性をさらに研究する必要がある。

また、二次処理水に続く高度処理についても、凝集、ろ過、活性炭吸着、精密ろ過膜（MF：Microfiltration）／限外ろ過膜（UF：Ultrafiltration）やナノろ過膜（NF：Nanofiltration）／逆浸透膜（RO：Reverse Osmosis）といった膜ろ過などの物理処理、クロラミン、塩素、オゾン、UV、促進酸化処理（AOP：Advanced Oxidation Process）といった化学処理、生物活性炭などの生物処理などさまざまな選択肢がある。特に飲用利用を目的とした再利用では、ROなどの膜技術がその中心となってきているが、それでも除去ができない化学物質の削減にAOPを追加する例が多い。さらに、土壌帯水層処理（SAT：Soil Aquifer Treatment）、Riverbank filtration、直接地下水注入、帯水層貯留・回収（ASR：Aquifer Storage and Recovery）、湿地浄化、貯留池などの自然浄化システムを単独、あるいはさまざまに組み合わせた再生水製造システムも選択できる。これらの組み合わせはどのようなものがよいのかは、必要となるエネルギー、コスト、土地利用状況、地下水管理などの視点からも異なり、技術的なシステム最適化はまだ十分

ではない。

4. リスク管理と消費エネルギー論

再生水をどの水質レベルにするためにどのような単位操作を組み合わせるべきかが課題になるが、基本的に水質改善とそれに要するエネルギー、コストはトレードオフの関係にある。再生水の水質基準は、1978年に定められたカリフォルニア州コードTitle22[8, 9, 10]が有名であり、この規格では必要とする水質レベルを非飲用用途によって分類しただけでなく、再生水製造に必要な処理プロセスをも定めたものである。病原微生物は、大腸菌群数での基準が定められているが、不特定の市民が接触する用途については、ウイルスの再生水過程での除去率として5.2－Logを満足できる処理プロセスが定められており、代替方法についてもこの規格を満たすことを求めている。米国の連邦政府は、環境保護庁（EPA）が再生水のガイドライン[2]を作成しているが、実際の規制は各州が定めた再生水の基準に基づいており、多くは大腸菌、大腸菌群を指標として使われている。日本では、国土交通省が、トイレ用水、散水用水、親水用水、修景用水に用途を定めており、快適性、大腸菌あるいは大腸菌群を指標とした再生水基準値、それを達成するための処理要件を一部定めている。中国、韓国についても、同様に都市や農業の用途ごとに再生水の水質が定められている。欧州では、EUとして定められた水質規格はなく、各国で基準値は異なっており、統一した再生水の規格はまだ作られていない。欧州委員会は、このことが再生水を農業利用して生産した農作物の流通の障害になりうるとして、EUでの再生水基準の必要性を述べている[5]。注目されるのがオーストラリアであり、連邦政府の飲料水、レクリエーション、再生水についてガイドラインがリスク評価をもとに定められている[11]。

国際規格としては、農業灌漑用に2006年に世界保健機構（WHO）が再利用基準の改定時にリスクアセスメントを一部入れて基準化した[12]が、処理だけでなく、灌漑段階、収穫・流通段階、調理・利用段階での利用法を考慮したマルチプルバリアの考え方が導入されている。国際規格ISOは2011年、TC253として農業利用分野がイスラエル主導でスタートしたが、2013年改めて水の再利用全体をカバーする規格としてTC282が設置され、農業利用をイスラエル、都市利用を中国、そして日本がリスクと機能評価を幹事国として担当するスキームで進んでいる。特に、日本は、ISOの水分野では初めての幹事国となっており、MBRの規格とともに、HACCP（Hazard Analysis Critical Control Point）に基づいたリスク評価による再生水の水質基準の考え方を提案する予定である。この考え方に基づいて、必要な再生水の製造段階で削減すべき、病原微生物や化学物質のレベルを求めることができる。また再生水プロセスで注目すべき概念は、除去機能の信頼性であり、必要となる除去レベルをどの程度の確率で担保することができるのかという概念である。除去効果が平均的には高くても、除去率の変動が起こる信頼性が低いプロセスは、安全性の視点から問題となるため、処理過程の評価方法として重要な概念となる。

再生水を利用するためにエネルギーがどのくらい必要なのか、他の水源と比べてどの程度なのかが大きな課題である。世界各地でどのような原水からどのような再生水用途の水質レベルをどの程度のエネルギー消費で生み出せるのかは、ケースバイケースの現地実験などで行われている。日本においても再生水の製造のためにどの程度必要なのか

が研究されるようになり、処理システム開発の目標ともなってきた。

しかしながら、再生水に必要なエネルギーは、再生水製造段階だけではなく、どの規模でどの範囲に再生水を送るのか､ネットワークも含めて検討を行う必要がある｡近年、オーストラリアや米国カリフォルニア州では、新たな水の再利用計画が、これまでの水資源の消費エネルギーと比べどの程度有利なのか検討が行われている。日本ではこれまで再生水での消費エネルギーについての検討はほとんど行われて来なかったが、最近、国土交通省は、再生水施設での単位水量当たりの消費エネルギーは、プロジェクトごとに大きな相違があり、再生水の単位水量当たりの平均エネルギー消費量は全国の水道水の単位水量当たりのエネルギーよりも数倍大きいことを明らかにしている。再生水の製造とともに輸送に関わる再生水エネルギーを含めた評価を行い、再生水の利用計画に反映させることが必要である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

世界的には、水資源が不足している地域を中心に、再生水の利用は急速に拡大し、非飲用利用のみならず、飲用利用にまで進み始めている。これらのプロジェクトでは、水資源、水環境、さらにエネルギー管理、低炭素化への政策との連携がみられる。我が国では、再生水の製造を担う、膜、酸化処理、吸着などの単位操作の基礎技術を有しているが、再生水をシステムとして計画、実施、運営する体制は、極めて貧弱である。この理由として、再生水のプロジェクトが、これまで限られた都市でしか行われておらず、再生水を水資源の安定供給や水環境管理、さらにエネルギー節減や低炭素化に役立てるという政策立案が遅れてきたことが理由の一つと考えられる。しかし、2014年に入って水循環基本法の成立や水資源政策、下水道政策の転換[13,14,15]などが国レベルでみられ、今後の政策運営の進展を期待したい。

また再生水の水質基準は各国ごとに大きく異なり、その根拠は、経験的あるいは測定可能性の視点からであったが、1990年代に特に病原微生物リスクを定量的に評価する定量的微生物リスク評価（QMRA：Quantitative Microbial Risk Assessment）が定着してから、用途ごとにどの程度削減すべきか、その水準を満たすためにどのような処理レベルが必要であるかが、まとまり始めている。しかしながら、一般市民へのリスクをどのように説明し、合意を得るのかリスクコミュニケーションが極めて重要となり始めている。

2012年、全米研究評議会（NRC）[16]は、水の再利用の推進についての連邦議会からの諮問に対して、人の健康、社会、環境問題に関する面と、再生水の処理機能と品質確保の面から研究開発すべき課題を提案している。まず人の健康、社会、環境問題に関する面からは、次の7つをあげている。

1. 下水処理水が混入する水源で、事実上（de facto）飲用利用されているレベルを定量化し、計画的な再生水の利用との相違がどの程度であるかを認識すること
2. 再生水に残留する成分に人が曝露される場合の健康影響に関する知見の不足点を明確にすること
3. 再生水に複合して存在する化学物質や現在未知の物質（unknown unknowns）による人の健康影響を評価する方法の開発を進めること

4. 水系感染症サーベイ、調査方法、行政機構、疫学的研究方法や機能を強化すること
5. 再生水を環境用水として使う場合に鋭敏な生態系への影響を評価すること
6. 水管理の意思決定を行うために、再生水以外の水資源と比べた場合の再生水の費用や利便性を定量化すること
7. 再生水の飲用利用において、環境による緩衝作用と工学的なマルチプルバリアに対する市民の受容性を研究すること

一方、再生水の処理機構と品質確認については次の7つの点をあげている。

1. 環境での緩衝作用としての汚染物質の減衰についての理解を深めること
2. 残留している物質が再生水の処理過程で有害物質に変化する可能性をさらに理解し、その変化を抑制し、除去する方法を開発すること
3. さまざまな単位操作やマルチプルバリアでの病原微生物の除去率の変動性やその機構の理解を進め、これらのプロセスを最適化すること
4. 再生水の病原微生物をPCRにより検出する方法とその生残性との関係を定量化すること
5. 水の再利用をリスク評価し、危機やシステムの障害の発生を検出するための技術やデータを改良すること
6. 再利用シナリオごとにプロセスの機能をモニタリングに利用できるインディケータやサロゲートを見出し、測定するためのオンラインでリアルタイムに近い分析監視技術を開発すること
7. 将来の水管理に備え、新たな再利用のアプローチや技術のニーズを解析すること

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

まず注視される動向は、これまで各国によって考え方が不統一で、また経験やモニタリングの容易性から定められていた再生水の水質レベルを、リスク評価法を適用し、再生水製造段階として必要となる汚染物質の除去レベルを決定するための国際規格ISO/TC282を我が国が幹事国として主導することが2013年に決まったことである。同時に、再生水での汚染物質の除去レベルを確保するために必要な水再生機能の評価方法も我が国が主導することとなった。特に、我が国ではMBRの開発と国内外への展開を進めることに産業界は大きな期待を抱いているため、国際規格を主導できることは、我が国の水関連の産業界に大きなビジネスチャンスを与える可能性がある。

再利用におけるエネルギー評価は、これまで単位プロセスを中心として行われてきたが、輸送から再生水製造、配水までを含め、どの程度必要で、他の代替水資源と比べてどのような利点、欠点を有しているのか、さらに環境影響、温暖化対策の視点からもどのように評価されるのかといった総合化が進んできている。この分野は我が国では極めて遅れているため、海外での再生水をビジネス展開するためには、この分野の研究開発を強化する必要があろう。

日本、中国、韓国の東アジア諸国は、非飲用の再利用用途を中心に展開してきたのに対して、米国や欧州、オーストラリアやシンガポールなどでは、非飲用利用に加えて、計画的な飲用利用の再生水事業も展開してきた。特に、2013年から米国テキサス州ビッ

グスプリングで始まった直接的飲用利用（DPR）の事業は大いに注目される。地下水や土壌、さらに表流水の貯留や希釈といった環境バッファーと比べ、RO膜とAOPなどの工学的バリアを多重化することで信頼性の向上が期待できること、エネルギーやコスト評価においても、間接的飲用利用（IPR）よりも優れる場合があることなどが、このようなDPR展開に大きく寄与していると思われる。我が国ではこれまで飲用利用を意図した研究開発はほとんど行われてこなかったが、今後、海外展開や我が国でも離島などの水資源開発を考えるとこの分野の研究開発を推進する必要がある。

## （６）キーワード

直接的飲用利用（DPR）、間接的飲用利用（IPR）、非飲用利用、リスク評価、エネルギー評価、国際標準規格、膜処理技術、膜分離活性汚泥法、オゾン処理、紫外線消毒、促進酸化処理（AOP）、病原微生物、化学物質、マルチプルバリア

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・膜技術、MBR用のMFのほか、分離膜としてのUF、さらに海水淡水化から始まったRO、NFの技術開発を、メーカー、大学が独自にあるいは連携して進めている。日本が有利である膜技術はRO、セラミック膜であるが、新たな膜材料の開発とともに、ファウリングの原因物質追求が大学を中心に進められている。またオゾン酸化処理の研究も多い。<br>・JST-CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域 [17] で、水の再利用の推進を目的に、膜技術の開発、酸化処理と膜の組み合わせ技術、再生水安全評価、再生水システム開発が複数の研究チームで実施中。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・2009年国土交通省の日本版次世代MBR技術展開プロジェクト（A-JUMP）[7] により下水道へのMBRの適用の実証実験が行われた。<br>・2009～2013年度まで新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）省水型・環境調和型水循環プロジェクト [18] で海水淡水化と下水再利用を統合した省エネルギー型造水プラントの実証試験を実施した。<br>・2009～2013年まで最先端研究開発支援プログラム（FIRST）[19] で膜技術による海水淡水化とともにMBRとFOの組み合わせ技術開発を推進した。<br>・経済産業省予算による造水促進センターなどを通じたISO/TC282の標準化に対応したMBRなどの実証調査が2014年からスタートした。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・工場での回収率は80%を超え、下水処理場外での再利用も311施設に及ぶが、水量的には全国の下水処理水量の1.3%にとどまっている。<br>・国土交通省は2005年「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」の改訂、2010年北東アジア標準協力フォーラム「都市における再生水利用に関する北東アジア協力会議（通称RWUUA会議）」による日中韓３国の主導での下水再生水質管理の国際規格作りを推進している。また2013年、日本、中国、イスラエルが幹事国となる水の再利用の国際標準ISO/TC282がスタートし、日本は、水の安全性と処理機能の評価について世界を先導することとなった。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | ・1970年代からカリフォルニア州、環境保護庁（EPA）、内務省開墾局（USBR）などが大学、コンサルタントと連携し、RO膜による再生水処理技術、病原体や微量化学物質のモニタリング技術が研究されてきた。1990年代からリスク評価技術が研究され、再利用の処理レベル評価にもカリフォルニア州などで実施された。しかし、近年、大学などでの基礎研究は減少しているとの情報がある。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・1960年代からカリフォルニア州を中心に非飲用の再生水の実証規模の研究が行われた。<br>・カリフォルニア州など西部の公共団体が再利用プロジェクトを行うため、コンサルタントを中心に実証実験が行われている。<br>・またカリフォルニア州など西部の州では、州、公共団体など、大学、コンサルタントやメーカーと連携してDPRの研究が積極的に行われている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・水資源が不足し、排出基準の厳しいカリフォルニア州、アリゾナ州、フロリダ州などを中心に、畑地灌漑用、環境水利用、工業用水、都市用水を中心に事業が進められてきた。<br>・カリフォルニア州オレンジ郡、ロサンゼルス、南カリフォルニア、サンディエゴ、マイアミ、アリゾナ州スコッツデール、フロリダ州オーランド、マイアミ、テキサス州サンアントニオ、イーストフォークロー、バージニア州で、地下水、表流水、貯水池を介したIPRが進んでいる。<br>・2013年からテキサス州ビッグスプリングでDPRが始まった。<br>・農業利用は数多く行われているが、カリフォルニア州では再生水の60%が農業利用されており、モントレー郡での生食野菜などを対象とした例が有名である。<br>・工業用にはミネソタ州マンケートで発電冷却用水、フロリダ州ポーク郡マルベリーで冷却用水に使われている。<br>・カリフォルニア州コードTitle22再生水規格がこれまで先導している。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・ドイツ、英国、フランス、オランダなど多くのEUの国々でMBRの研究が行われている。<br>・ドイツの大学を中心にし尿分離、雑用水利用の研究が行われている。地下水での微量化学物質への影響評価を目的に地下水での下水由来の微量化学物質の動態の研究が行われている。<br>・フランスなどでは膜のほかオゾンによる再利用の研究が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・英国テムズ・ウォーター社は、ロンドンでの将来の水資源確保のため、IPRのための実証規模の実験を行っている。<br>・フランスでは、中東、アジア、アフリカでの再利用プロジェクトを意識した応用研究が水メジャーを中心に進められている。 |
| | 産業化 | ○<br>場所によっては<br>△<br>× | ↗ | ・IPRは英国Langford、ベルギーWulpenで表流水、地下水を介して行われている。<br>・農業利用は、フランスのClermont-Ferrand、ギリシャCreta、Thetealonik、Chalkidaなどの地域、イタリアEmila Romagnaで行われ、スペインでは下水処理水の22%が農業利用され、Canary諸島では、電気透析プロセスによる再生水を果樹に灌漑利用する試験が行われている。キプロスでは下水処理水が農業水需要の11%を満たす予定。<br>・英国東アングリア Flag Fen で工業用水利用されている。<br>・英国水道産業研究所（UKWIR）から再生水の都市での利用について積極的な提案が出ている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・大学、国の研究機関で、再生水の評価、MBR、膜、酸化技術の開発が進んでいる。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・第12次五カ年計画での再生水利用の目標を達成するため、事業の実施主体である公共団体が、水務集団、大学、メーカーなどと連携してMBR、膜処理、酸化技術などを組み合わせた実証規模での研究を行っていると思われる。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・2009年現在、再生水生産量は1,238万$m^3$/日で水利用の8%は再生水が利用されており、第12次五カ年計画では、水資源賦存量が600 $m^3$/人/年の地域では再利用率を30%以上、1,500 $m^3$/人/年の地域でも20%を目標とするため、304億元の投資を行い、新たに2,589万$m^3$/日の再生水供給能力とし、水利用の15%を再生水利用する予定である。<br>・北京市Beixiaheo処理場ではMBR＋ROで処理された再生水がオリンピック公園で修景利用されている。北京市高碑店下水処理場では50万$m^3$/日以上が工業用水と農業用水に供給されている。<br>・中央政府は再利用水の都市雑用水、修景用水、地下水涵養、工業用水、農地への基準値を定めている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↘ | ・科学技術研究所（KIST）でナノテクノロジーを利用した再生水技術の基礎研究が行われている。また、大学レベルではMBRや膜処理による水処理技術の開発、ファウリング防止の研究が行われてきた。微量化学物質の挙動調査が最近始まった。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・国立環境研究院（NIER）で雑排水の再利用の研究が進められている。<br>・2013～2022年までの環境技術開発のロードマップ（Eco-TRM2022）を定め、エネルギー効率の高い下水高度処理開発に18,740億ウォンを10年間で投資する計画を立てている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・全国で2000年に下水処理水再生水は下水処理水量の2.9%の再利用率にとどまっていたが2008年には10.8%に増加した。利用用途は56%が場内利用、30%が河川水量、8.5%が農業利用、2.1%が工業利用である。<br>・雑用水利用は全国で271施設、発生する雑用水の26%が使われていて、トイレ用水が42.4%、工業用が24.1%、散水用に14.4%が使われている。<br>・雑用水や下水処理水を含めて全国の8.8億$m^3$/年（2008）の利用を25.4億$m^3$/年（2020）に引き上げる計画を立てている。 |
| オーストラリア | 基礎研究 | ○ | → | ・大学、連邦科学産業研究機構（CSIRO）などで、膜処理技術、地下水涵養、微量化学物質など再生水技術やリスク評価などが行われている。また、水の再利用のエネルギー面からの評価研究が盛んである。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・上下水道を管理運営している公共団体を中心に、コンサルタント、メーカー、大学などと連携して再利用計画、実験を行っている。<br>・クイーンズランド州ブリスベーンでは、再生水の飲料利用を目指して膜処理の研究が進められていたが、渇水状況が緩和したことや市民の合意の問題から、プロジェクトの実施が止まっている。<br>・パースでは2012年から地下水を介したIPRが実証実験されている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・上下水道を管理運営している公共団体が、都市、農業での非飲用利用を中心に行ってきた。南オーストラリアのバージニアなど再生水の30%が農業利用に使われている。<br>・水資源の需給がひっ迫している西オーストラリアでは地下水涵養によるIPRが行われる予定である。<br>・シドニーでは、下水道からの下水を自ら直接取水してMBRで建物内の雑用水やゴルフ場の散水を民間レベルで行う Sewer Mining が実施されている。<br>・連邦環境・水・遺産・文化省が、飲用水利用、地下水涵養など再利用のガイドラインを、リスク評価に基づいて病原微生物、化学物質のガイドライン値とマネジメント法を定めている。 |
| シンガポール | 基礎研究 | ○ | → | ・大学を中心に膜処理、酸化処理、病原微生物、化学物質のモニタリングと影響評価が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・国の上下水道の実施機関である公共事業局（PUB）が国内外の大学や企業と連携して、MBR、膜処理、酸化技術、モニタリング、影響評価に関する研究を活発に行い、エネルギー削減に関する研究を進めている。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・NEWater（下水再生水、414千$m^3$/日）として貯水池を介したIPRが行われているほか、工業利用も行われている。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) T. Asano, F.L. Burton, H.Leverenz, R. Tsuchihashi, G. Tchobanoglous, Water Reuse, Isses, Technogies, and Applications, McGrawHill, 2007.
2) USEPA, Guideline for Water Reuse, Office of Water & Office of Wastewater Management, USEPA, 2012.
3) UK Water Industry Research, Establishing a Robust Case for Final Effluent Reuse -An Evi-dence Base, UKWIR Report ref. No.14/WR/29/3, 2014.
4) 国土交通省、新たな社会的意義を踏まえた再生水利用の促進に向けて、下水処理水の再利用のあり方を考える懇談会報告書、2009、
http://www.mlit.go.jp/common/000037487.pdf
5) European Commission, A blueprint to safeguard to Europe’s water resources, 2012,
http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0673&from=EN
6) 田中宏明、岡本誠一郎、世界で進展する農業灌漑用下水再生水プロジェクト、水土の知、Vol. 79、No. 11，pp. 809-812、2011
7) 国土交通省、日本版次世代MBR技術展開プロジェクト【通称：A-JUMP】、
http://www.mlit.go.jp/report/press/city13_hh_000069.html
8) CDPH (California Department of Public Health). 2008. Groundwater Recharge Regulation Draft. Sacramento, CA: CDPH.
9) CDPH. 2009. Regulations Related to Recycled Water: January 2009. California Code of Regulations, Title 22, Division 4, Chapter 3, Water Recycling Criteria. Sacramento, CA: CDPH.
http://www.cdph.ca.gov/certlic/drinkingwater/Documents/Lawbook/RWregulations-01-2009.pdf
10) CDPH. 2011. Groundwater Replenishment Reuse Draft Regulation.
http://www.cdph.ca.gov/certlic/drinkingwater/Documents/Recharge/DraftRechargeReg-2011-11-21.pdf

11) Environment Protection and Heritage Council, the Natural Resource Management Ministerial Council and the Australian Health Ministers' Conference, Australian Guidelines for Water Recycling
：Managing Health and Environmental Risks 2006
：Managing Health and Environmental Risks (Phase 1)
：Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Augmentation of Drinking Water Supplies
：Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Stormwater Harvesting and Reuse
：Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Managed Aquifer Recharge
http://www.recycledwater.com.au/index.php?id=16
12) WHO. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, Volume 2, Wastewater Use in Agriculture. Geneva, Switzerland: WHO Press, 2006a..
13) 国土交通省、下水処理水の再利用水質基準等マニュアル、2005、
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/04/040422/05.pdf
14) 国土交通省、今後の水資源政策のあり方について～「幅を持った社会システム」の構築（次世代水政策元年）～中間とりまとめ、2014、
http://www.mlit.go.jp/common/001035683.pdf
15) 国土交通省・日本下水道協会、新下水道ビジョン、2014、
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000307.html
16) Committee on the Assessment of Water Reuse as an Approach to Meeting Future Water Supply Needs; Water Science and Technology Board (WSTB); Division on Earth and Life Studies (DELS); National Research Council、2012
17) JST、戦略的創造研究推進事業 CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域、
http://water.jst.go.jp/project/index.html
18) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、海水淡水化と下水処理を統合した新規水処理システムを開発―従来比30%以上の大幅な省エネ・低コスト化を実証―、2014、
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100254.html
19) 最先端研究開発支援プログラム（FIRST）、Mega-ton Eater System 、
http://www.jst.go.jp/first/about-us/kurihara-masaru.html

### ３．４．３．７　有害物質のマネジメント（PRTR、RoHS 含む）

#### （１）研究開発領域名

有害物質のマネジメント（PRTR、RoHS含む）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

特定の化学物質について順次、規制を設けていく後追い型の対策から、人の健康および環境に潜在的リスクがある化学物質を網羅的に把握、評価、認可ないし規制していく事前型の対策へシフトしつつある。効率的な化学物質管理は環境保全のみならず、我が国の生産性向上に不可避となるため、個別技術とシステムの開発を総合的に行う必要がある。具体的には、化学物質のリスク評価、リスク評価方法の改善、リスク評価結果やサプライチェーンにおける化学物質フローの効率的なシェアリングシステム、そして簡易スクリーニング技術の開発が求められる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

＜個別規制からPRTRへ＞

1970年代までは環境媒体や化学物質ごとに個別に規制が設けられてきたが、1970年代～2000年代はそれを網羅的に管理、規制していく方向にシフトしている。米国では有害化学物質管理法（Toxic Substances Control Act、1976年）により、環境保護庁（EPA）が米国内で生産、流通している化学物質の排出目録（インベントリ）調査を実施している。これを補完しているのが有害化学物質放出目録（TRI：Toxics Release Inventory）であり、民間企業に有害化学物質の使用および環境排出量の報告を義務付けている。ただし、TRIは化学物質の管理を主眼に始まったものではなく、地域住民が身近に使用、排出されている化学物質を知る権利をもとにしたものである（Emergency Planning and Community Right-To-Know Act、1986年）[2)]。

欧州での化学物質管理の起源はオランダであり、1974年に排出登録制度（Emission Registration）を始めている[3)]。ここでまとめられたデータベースを用いて、国家環境政策計画（National Enviornmental Policy Plan）の効果を評価している。英国では環境保護法（Environmental Protection Act、1990年）により、総合的汚染規制（Integrated Pollution Control）を導入している。欧州では米国よりもより総合的リスク管理に重点をおいたものであった[3)]。

1990年代にはOECDを中心に化学物質管理の必要性や手法が共有化され始め、地球サミット（1992年）のアジェンダ21第19章に環境汚染物質排出移動登録制度（PRTR：Pollutants Release and Transfer Register）の基本的な考え方が明示されている[4)]。そして1995年にOECD/PRTRマニュアルがとりまとめられた[5)]。PRTRでは、有害化学物質の種類、排出量、移動量、媒体、発生源の地理的分布を把握するものであり、地域レベルでのリスク管理を目指したものといえる。我が国では1999年に化学物質排出把握管理促進法（化管法）として法制化された。

＜RoHS、そしてREACH規制へ＞

2000年代から、潜在的リスクがある化学物質について、より事前に対策、管理する流

れとなっている。2002年のEU指令（DIRECTIVE 2002/95/EC）において急増する電子・電気機器を対象に6種の化学物質（鉛、水銀、カドミウムなど）の含有量を規制したのがRoHS（Restriction of Hazardous Substances、特定有害物質使用制限）である。なお、対象となる電子・電気機器はWEEE指令（Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment）（DIRECTIVE 2002/96/EC）で規定されている。これまでも化学物質が基準値以下となっているか簡易的にスクリーニングできる技術は求められていたものの、RoHS規制によって技術開発が本格化している。特に持ち運び型のX線蛍光分析装置が開発され、商品化されている。RoHS規制の考え方をさらに拡大させたものがREACH規制（Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals）である（2006年、Regulation（EC）No.1907/2006）。EU内での物質の自由な流通と効果的な化学物質管理を両立させるため、登録（Registration）、評価（Evaluation）、認可（Authorisation）、規制（Restriction）をあらゆる化学物質（Chemicals）に適用するものである。よって、産業プロセスで使用、取扱される物だけでなくあらゆる製品に規制が適用される。製造・輸入を取り扱う企業はその量に応じて、使用・取扱される化学物質を2010年～2018年までに欧州化学物質庁（ECHA）へ登録しなければならない。我が国の化学物質審査規制法（化審法、1973年）や米国の有害化学物質管理法（Toxic Substances Control Act、1976年）が新しく製造・輸入される化学物質を規制するのに対し、REACH規制では既存の化学物質についても新たな化学物質と同じように安全性評価などのデータ登録を求めている。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

REACH規制と同様の規制を我が国でも導入する必要が生じた場合、輸入や国内市場を主とする企業に与える負担が無視できない。既存の化学物質においてREACH規制対策としてすでに安全性評価がされたデータや、今後評価されるデータを公平かつ効率的にシェアリングし、新規制の導入における企業負担を軽減できるかは今後の政策的課題である。(一社)産業環境管理協会や製品評価技術基盤機構の有効な活用が望まれる。

製品評価技術基盤機構が、改正化審法における優先評価化学物質の選定手法（スクリーニング評価手法）やリスク評価手法を提案している。同様の手法を化学物質全般に適用、評価するには、マンパワーの面において産学官の連携が必須となると考えられる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

化学物質管理やその基準作成のためのリスク評価は従来、欧米主導であったが、ナノ材料のリスク評価においては産業技術総合研究所（安全科学研究部門）が新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成（ナノ粒子の特性評価手法の研究開発）を受けた研究を初めとして世界的にリードしている[6)]。ナノ材料の開発は世界的に進んでいるが、そのリスクや有害性評価は相対的に遅延している。有望なナノ材料については開発研究とそのリスク評価を組み合わせて推進することで、迅速な実用化を図ることが望まれる。

製品中の化学物質が適正レベルか調査するあたり、二つの手法がある。一つはサプライチェーンでの化学物質フローから推定するものであり、広範な製品を一括して調査で

きる利点がある。詳細分析のためのスクリーニングとして活用することが望まれる。もう一つは持ち運び型の簡易分析装置であり、RoHS規制を契機としてカドミウムや水銀分析用の蛍光X線分析装置が開発、商品化されている（(株)リガクなど）。規制強化に伴って市場規模も拡大することが予想され、特に中国において産学官連携で研究開発が進んでいる。

### （６）キーワード

化学物質、管理、規制、PRTR、RoHS、REACH

### （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・ナノ材料の環境リスク評価においては世界的にリードしている。<br>・製品評価技術基盤機構や産業技術総合研究所、国立環境研究所にリスク評価の専門家を多く配置しており、研究力は高い。しかし、欧州と比較すると予算規模が桁オーダーで小さい状況にある。<br>・化学物質のインベントリ研究については製品評価技術基盤機構や産業技術総合研究所、大学の限られた専門家がリードしているが、米国と比較して弱い。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・産業技術総合研究所や国立環境研究所において、環境多媒体、暴露評価のためのシミュレーションモデルが公開されている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・スクリーニングのための持ち運び型分析装置がすでに国内メーカーから商品化されており、新たな規制による需要にも対応できる開発力を有している。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・環境保護庁（EPA）によって多くの化学物質の排出目録が整備されており、インベントリ研究を進める人材も多く配置されている。インベントリ研究を世界的にリードしている。<br>・化学物質のリスク評価研究については、欧州との共同研究よりも米国内で独自に進めている傾向にある。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・EPAなどで、環境多媒体、暴露評価のためのシミュレーションモデルが公開されている。特に民間企業が化学物質排出量を推定するためのサポートツールの開発が充実しつつある。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・スクリーニングのための持ち運び型分析装置がすでに国内メーカーから商品化されており、新たな規制による需要にも対応できる開発力を有している。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・リスク評価研究全般において、世界的にリードしている。<br>・化学物質のインベントリ研究については、大学を中心にした専門家グループがリードしている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・REACH規制と並行して、各国で独自となっている溶出試験などの分析試験方法を共通化させるプロジェクト（Harmonization）を推進中であり、規制と共通化を戦略的に実行中である。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・RoHS規制やREACH規制に対応した持ち運び型分析装置の開発、商品化がなされており、他国の輸出業者向けのコンサルティングサービスも豊富である。REACH規制の経験蓄積によって、他地域での規制開始時ではこの経験が有利に働くことが予想される。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・中国科学院（CAS）を中心に、リスク評価や排出インベントリの論文発表が増加している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・目立った動きはない。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・スクリーニングのための持ち運び型分析装置の開発を産学官連携で急速な勢いで実施中である。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・インベントリ研究では、限られた大学の専門家がリードしている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・目立った動きはない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・目立った動きはない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) US EPA: U.S. Environmental Protection Agency, Toxic Substances Control Act. Inventory Reporting Requirements. (42 FR 64572). 1977
2) US EPA: U.S. Environmental Protection Agency, The Emergency Planning and Community Right-to-Know Act, EPA 550-F-12-002, 2012
3) 大島輝夫, 浦野紘平, 内藤克彦, 織朱實, David M. Ogden, Thomas W. Zosel, Frances Irwin. 化学物質管理の新しい手法「PRTR」とは何か, 化学工業日報社, 1997
4) United Nations Sustainable Developments. Chapter 19 of AGENDA 21, United Nations Conference on Environment & Development, Rio de Janerio, Brazil, 3 to 14 June 1992
5) OECD. Pollutant Release and Transfer Registers (PRTRs): A Tool for Environmental Policy and Sustainable Development - Guidance Manual for Governments, OECD/GD(96)32, 1996
6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）. ナノ材料リスク評価書 （研究プロジェクト（P06041）「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」最終研究報告書）2012

### ３．４．３．８　元素の循環と利用（リン・窒素）

#### （１）研究開発領域名

元素の循環と利用（リン・窒素）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

植物は土壌よりさまざまな元素を吸収することで成長する。その中で、植物の生長に必須な元素を農業用栄養塩類と呼び、窒素、リン、カリウムなどの元素が該当する。これらの元素は肥料の三元素と呼ばれ、土壌の生産力を高め、高い収穫効率を維持するために必須である。一方でこれらの元素が環境負荷物質として排出されると、水圏、土壌圏に対して富栄養化、酸性化などを引き起こし、大きな環境問題を引き起こす[1,2]。一次資源の供給側に目を向けると、窒素は高エネルギー消費プロセスであるハーバー・ボッシュ法を介した大気中窒素のアンモニア固定ならびに天然ガス改質によって社会に供給され、リンはリン鉱石を精錬・精製することで主に供給されている。原料供給に関わる枯渇懸念、地政学的リスク、環境影響などにより、昨今は未利用資源の有効活用に向けた技術開発ならびに、資源利用効率向上に向けた社会システム構築のために、国内外でさまざまな取り組みがなされている。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1. リンの循環と利用について

社会に流入するリンのフローはリン鉱石を出発点として、大別して湿式リン酸と乾式リン酸の二つの形態で流入する。前者は農業における肥料、後者は高純度リン酸が必要とされるめっきや表面処理、食品添加物などが主な用途である。それ以外にも鉱物資源などに微量に含有されるリンの流入フローがあるが、その多くは一方通行の流れの中で拡散・散逸している。唯一の例外である濃縮プロセスは鉄鋼生産における脱リンプロセスであり、鉄鋼資源に含有されるリンの総量は我が国のリン鉱石輸入量に匹敵する[3]。現状では、スラグ中のリン分は一部、土壌改良材として用いられている以外は拡散・散逸している。

ただし、もっとも大きな拡散は肥料利用の後の土壌圏に向かうフローであり、リン資源の利用効率向上の鍵は、土壌科学の知見蓄積と利用技術の向上にある。下水汚泥や畜産糞などは一部肥料原料として循環しており、MAP（Magnesium Ammonium Phosphate）法やHAP（Hydroxylapatite）法が主に適用されている。

人口増大、肥料需要増大を背景に、将来にわたった高品質・安価なリン資源の安定的供給の懸念から、欧州、米国でさまざまな産学官共同によるリン資源ガバナンスを議論する場がつくられてきた。欧州は圏内にリン資源の供給源を持たないことから、この問題に対してここ数年で積極的に議論を進めている。2014年7月にEUは20の供給懸念資源（Critical Raw Materials）の一つにリン鉱石を加えた[4]。

2. 窒素の循環と利用について

社会に流入する窒素は大きく化石燃料、アンモニアの2つに由来が分かれる。農業・工業的な窒素源として流入する形態の多くは後者であり、前者はエネルギー供給などの用途で用いられた後、内包する窒素のほとんどは窒素酸化物として排出拡散する。窒素酸

化物の排出は酸性化、温室効果などの環境影響をもたらすことから、排出総量は各種の環境規制のもと排出抑制が義務づけられている。そのため、排ガス処理工程で窒素酸化物の一部は副生アンモニアとして回収しており、副生硫安などの形で肥料として循環利用されている[5]。

環境負荷物質としての窒素はそのフローが複雑であり、かつ工業製品、輸送サービスなど需要によって引き起こされる化石燃料燃焼に伴う窒素酸化物排出と、食糧消費によって引き起こされる肥料利用に伴う水圏、大気圏への排出は温暖化（$N_2O$）、酸性化などの環境影響を引き起こす。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

1. 資源利用効率向上に関わる共通の課題

窒素、リンともに肥料を介した利用が大きな需要を占めているが、その利用効率向上に向けた土壌診断、適正な農業用栄養塩類の利用管理が求められる[6]。土壌科学の発展を実現するためのデータ蓄積、農業従事者への情報周知、適正管理に向けたインセンティブ付与などが求められる。これらを実現するための現状の課題として以下があげられる。

① 適正な管理と規制に基づく循環資源マーケットの整備不足
② 循環資源利用に関わるインセンティブの欠落
③ 経済的に受容される技術導入のコストと価格のミスマッチ

2. リンについて

拡散しているリンのうち、回収ターゲットになりうる濃縮プロセスを有する工程は少ない。そのうちの一つであり、量的にも大きな回収ポテンシャルを有する鉄鋼スラグの組織は大別するとリン濃縮相とマトリックス相とに分類される。鉄鋼スラグ中のリンを分離回収する方法として、固体として濃縮相を単体分離する機械的分離と化学的分離とが考えられる。化学的分離は原理的には文献7)で示されるように還元回収であるが、現状、経済合理的な手法は確立していない。そのため、効率的な資源回収・再資源化技術開発と、産業化のための経済的・効率的な条件確立が期待される。

3. 窒素について

窒素循環に関わるプロセスの解明は重要であり、植物の窒素代謝、土壌圏・推計における窒素動態解析に基づく農業生産での効率的な窒素利用技術の開発が求められる。富栄養化、酸性化抑止の観点からは大気による反応性窒素の輸送・沈着についても、併せてプロセスの解明が課題である。

また、アンモニア供給のためのハーバー・ボッシュ法は、高温高圧の反応条件下、鉄系触媒を用いて窒素ガスと水素ガスからアンモニアを合成するエネルギー多消費型プロセスであり、これに代わる低エネルギー消費型の窒素固定技術開発が望まれる[8]。循環利用に関しては、すでに人や家畜の排泄物などの廃棄物中に固定されている窒素を活用、資源化するための技術開発（コンポスト、液肥などの高効率化、有効利用技術）は積極的に開発、実装が取り組まれており、更なる適用が望まれる。前述したように窒素は環境負荷物質として排出されると、大気圏においては酸性化、温暖化などの影響を及ぼし、水圏においては酸性化、富栄養化の原因物質となる。そのため、これらに対応した除去

技術、中和技術の発達はあるものの、副生アンモニアの利用以外の回収・循環技術の積極的な導入はあまりない。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

1. 高効率リン・窒素利用に向けた農業技術開発

水圏、土壌圏における過剰な窒素は酸性化、富栄養化を引き起こすことから、健全な窒素循環の実現、もしくは肥料生産から農作物生産プロセスに至るまでにリン・窒素ロスを最小にする技術が必要とされる（例えば、農業生物資源研究所の林らによって行われている根粒共生系の総合的理解による､低窒素肥料農業を目指した基礎的研究など)。

2. リン資源利用効率向上に向けた技術

鉄鋼スラグからのリン回収について、磁気分離法[9,10]、マイクロ波法[11,12]、$CaF_2$添加によるリン濃縮相の肥大化[13]、還元雰囲気制御によるリン鉄生産[14]、アルカリ金属炭酸塩法[15]など、いくつかの新技術の創出が行われている。

その他の未利用資源の活用技術として､無電解ニッケルメッキ廃液のリン酸の資源化、表面処理汚泥のリン含有汚泥資源化、鶏糞発電の残渣を肥料として再資源化、下水汚泥焼却灰からのリン回収[16]などがそれぞれ取り組まれている。

3. 窒素資源利用効率向上に向けた技術開発

ハーバー・ボッシュ法は高温高圧下で窒素をアンモニアとして固定化する技術であるが、エネルギー消費の大きなプロセスであることから、これに代わる穏和な反応条件下で進行する簡便で経済的な次世代型窒素固定法の開発[8]が求められる。

硫酸アンモニウムはナイロン原料のカプロラクタム製造の際の廃液からの回収、コークス炉からの副生アンモニアなどから生産される。これらの副生物の利用効率を向上することで、国内窒素資源生産性の向上が見込める。

4. リンに関する国内外の産学連携拠点

国内外における産学官共同でリン資源ガバナンスを議論する場としてはリン資源リサイクル推進協議会（大竹久夫教授、大阪大学）[17]があり、定期的にシンポジウム・ワークショップを開催している。欧州における拠点としてはGlobal TraPs（Prof.Emir. R. Scholtz, ETH, スイス）[18]、European Sustainable Phosphorus Platform（EU）[4]があげられる。また米国では国立科学財団（NSF）のResearch Cordination Networkによる Sustainable Phosphorus Initiative（Prof. J. Elser, ASU, 米国）[19]があり、アリゾナ州立大が中心となって研究シーズと産業ニーズのマッチングが行われている。また、Peak Phosphorusの提言を行ったDr. D. CordellがGlobal Phosphorus Research Initiative（Dr. D. Cordell, UTS, 豪州）[20]を運営しており、積極的な情報発信を行っている。これらのコミュニティからの参加者が集う会合として2014年9月に4th Sustainable Phosphorus Summit（Montpellier, 仏）[21]が開催された。

5. 窒素に関する国内外の産学連携拠点

窒素・リンの循環はPlanetary boundaryを大きく越えていることが指摘されていることように、国際的にその持続可能な利用と循環システムの構築が求められている[22]。食糧・エネルギー供給に関わる窒素フロー・循環について産学官連携で議論をする場とし

てInternational Nitrogen Initiative [23] では、窒素利用に関するデータ、N footprint calculatorなどの可視化ツールの提供を行い、国際的な研究ネットワークを形成している。N footprintは主にProf. J.Gallowayらがその研究をリードしており[2, 24, 25]、我が国においては2015年3月にN-Footprint workshopが当該グループと共同で開催を予定している（主催：柴田英明教授、北海道大学）。3年に一度International Nitrogen Conferenceが開催されている（2013年ウガンダ、2016年オーストラリア）。

### （６）キーワード

Planetary boundary、黄リン、製鋼スラグ、副生アンモニア、ハーバー・ボッシュ法、

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・鉄鋼スラグからのリン回収に関する基礎研究は古くからあり、これまで多くの研究蓄積がある。鉄鋼業は近年、資源価格の高騰、CSRの観点から資源循環技術の導入に関心をもっており、新日鐵住金、JFEなどはリン資源リサイクル推進協議会の会員となっている。<br>・水環境の規制が十分に機能しており、排水からのリン・窒素除去技術は十分に研究が進められおり、産業においても十分に適用されている。しかしながら回収・再資源化の観点では十分とは言えない。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・リンの国内マテリアルフロー分析（MFA：Material Flow Analysis）、経済活動の背後で直接・間接に需要されるバーチャルリンなどのフローを可視化する研究は進められている [26]。<br>・リン資源リサイクル推進協議会（会長：大阪大学大竹久夫教授）ならびに総合地球環境学研究所FSプロジェクト（生物多様性が駆動する栄養循環と流域圏社会－生態システムの健全性、代表：京都大学奥田昇教授）など、産学官連携のリン・窒素マネジメントのコミュニティがある。<br>・文献[27]で持続的窒素循環に向けた重要性を指摘しており、農地における窒素固定に関わる土壌科学の進展、高効率アンモニア合成に関わる研究ともに進められており、基礎研究の発展はある。<br>・Prof. Gallowayが提唱するN footprint initiativeの日本版データベースは北海道大学柴田英明教授らにより整備が進められている。進藤らによる窒素フロー解析など、フローの可視化については、非常に重要な知見が得られている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・汚泥からの回収リンの肥料利用や、鶏糞発電の焼却残渣の資源化など積極的に取り組み事例がある。<br>・ただし、東日本大震災による放射性核種残存の影響により東日本の汚泥利用については停滞している。<br>・プラスチック資源化の際に副産物として生産されるアンモニアの排煙脱硝剤としての利用などが行われている。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・回収分離・精製に関する技術開発状況はほとんど見えてこないが、低品位リン鉱石の直接利用などに関わる研究、産業化は進められている。<br>・窒素循環に関する研究は土壌栄養管理ならびに大気圏・水圏の環境保全の観点からさまざまある [28, 29]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・NSF-RCNプロジェクトによりArizona Stats U. Prof. Elserがリードしてリンの循環、持続的な管理に関わる研究マッチングが行われている。これにより循環技術開発、産業化が後押しされる可能性がある。<br>・Prof. Gallowayが提唱するN footprint calculaterにより、経済活動の裏側で直接間接で発生する窒素排出に関わるデータが整備されている。可視化については、非常に重要な知見が出ているが、循環利用に関わる新規技術の開発が積極的に行われているという印象はない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・回収分離・精製に関する技術開発状況はほとんど見えてこないが、低品位リン鉱石の直接利用などに関わる研究、産業化は進められている。<br>・排水処理に関する研究の進展と、実際のプロセスへの適用の間に隔たりあり。行政府における排水管理、資源循環推進力はそう大きな圧力ではないように見受けられる。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・リン回収は下水汚泥からのMAP法による回収を中心に進められている。あるいは汚泥の直接農地還元（BioSolid）も積極的に行われている。<br>・畜産糞の資源化ならびに都市排水汚泥のリン循環が積極的に取り組まれている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・欧州における国際的リン資源管理プロジェクトが実施されている。<br>・リン資源を持たない欧州は、資源確保に対して危機感をもっており、技術動向に関するレポート発行、産学官連携の活動を活発に行っている。<br>・欧州各国（ドイツ、スウェーデンなど）でリン回収に関わる数値目標を設定して、積極的な産業育成につとめていることから、リン回収技術向上ならびに、循環資源からの黄リン生産技術開発の取り組みがなされていた。 |
| | 産業化 | ◎ | ↘ | ・欧州における唯一の黄リン供給を担っていたThermphos社が2012年に経営破綻したことにより、これまで進められてきた循環資源を用いたリン酸・黄リン製造に陰りが懸念される。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・特に水圏汚染懸念からリン・窒素のマテリアルフロー解析が行われつつある。<br>・鉄鋼スラグからのリン回収に関しては文献10)のように、鉄鋼業と連携した研究が行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・中国農業科学院、精華大学などで窒素、リンのフロー研究が積極的に行われている。<br>・Sustainable Phosphorus SummitやGlobal TraPs, International Nitrogen Initiativeへの参加あり。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・リン資源供給国であるが、今後の人口増大・肥料需要増大を予想して、リン資源循環、資源効率性向上技術の導入に関心が高い。また水処理技術が不全であることによる環境悪化も大きな懸念であり、今後、産業化に向けた駆動力はおおいにある。<br>・大気圏に排出される排ガス規制の観点から、除去技術の導入も積極的に進められるものと思われる。現状では途上。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・鉄鋼スラグに関してマイクロ波を用いたリン分離回収技術の論文あり [11, 12]。 |
| | 応用研究・開発 | × | ↗ | ・Sustainable Phosphorus SummitやGlobal TraPs, International Nitrogen Initiativeへの参加はみられない<br>・前大統領がソウルにおける水環境改善を指示し、4大河川（漢江・洛東江・錦江・栄山江）再生事業に取り組むことから、排水に対する環境保全意識が高まってきている。ただし除去技術の実装であり、再資源化技術の実装に関する意識は伴っていない。 |
| | 産業化 | × | → | ・主に中国からリン鉱石を輸入し、肥料をアジア諸国に輸出しているが、リン・窒素循環に関する目立った事例はない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Elser, J. and E. Bennett, *A broken biogeochemical cycle.* Nature, 2011. **478**(7367): p. 29-31.
2) Galloway, J.N., et al., *Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions.* Science, 2008. **320**(5878): p. 889-892.
3) Matsubae-Yokoyama, K., et al., *A Material Flow Analysis of Phosphorus in Japan.* Journal of Industrial Ecology, 2009. **13**(5): p. 687-705.

4) ESPP. *European Sustainable Phosphorus Platform*. http://www.phosphorusplatform.eu/.
5) 鈴木, 仁., *窒素酸化物の事典*. 2008: 丸善株式会社.
6) Socolow, R.H., *Nitrogen management and the future of food: Lessons from the management of energy and carbon.* Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999. **96**(11): p. 8.
7) 塩見, 純., 佐野 信雄, 松下幸雄, *転炉スラッグの脱燐.* 鉄と鋼, 1977. **63**(9): p. 9.
8) 西林, 仁., . *鉄触媒は「窒素固定能」を秘めていた！ 常温常圧の窒素ガスからのアンモニア変換に光明.* 化学, 2013. **68**(6): p. 5.
9) Yokoyama, K., et al., *Separation and recovery of phosphorus from steelmaking slags with the aid of a strong magnetic field.* Isij International, 2007. **47**(10): p. 1541-1548.
10) Diao, J., et al., *Recovery of Phosphorus from Dephosphorization Slag Produced by Duplex High Phosphorus Hot Metal Refining.* Isij International, 2012. **52**(6): p. 955-959.
11) Kim, T. and J. Lee, *Recovery of Fe and P from CaO-SiO2-FetO-P2O5 Slag by Microwave Treatment.* Materials Transactions, 2011. **52**(12): p. 2233-2238.
12) Kang, Y.B., T. Kim, and J. Lee, *Valorisation of steelmaking slag by microwave treatment.* Ironmaking & Steelmaking, 2012. **39**(7): p. 498-503.
13) Zhou, H.M., Y.P. Bao, and L. Lin, *Distribution of P2O5 between Phosphorus-Enrichment Phase and Matrix Phase in Phosphorus-Containing Slag.* Steel Research International, 2013. **84**(9): p. 863-869.
14) Yamamoto, T. and K. Urata, *Method for manufacturing synthetic rock phosphate [WO 2014017499]*. 2014.
15) Kajiwara, T., E. Yamasue, H. Okumura and K.N. Ishihara, *The dissolution of phosphorus from β-calcium phosphate milled with alkali metal carbonate.* CAMP-ISIJ, 2013. **26**(1).
16) 菅原, 龍., . *平成24年度 環境研究総合推進費補助金 研究事業総合研究報告書「いわて発戦略的地産地消型リン資源循環システムの研究」*. 2013.
17) リン資源リサイクル推進協議会. *リン資源リサイクル推進協議会*. http://jora.jp/rinji/rinsigen/
18) GT. *Global TraPs* Available from: http://www.globaltraps.ch/.
19) PRCN. *The Phosphorus Sustainability Research Coordination Network*. http://sustainablep.asu.edu/.
20) GPRI, *Global Phosphorus Research Initiative.* http://phosphorusfutures.net/
21) SPS2014, *Sustainable Phosphorus Summit 2014.* http://sps2014.cirad.fr/
22) Rockstrom, J., et al., *A safe operating space for humanity.* Nature, 2009. **461**(7263): p. 472-475.
23) INI. *International Nitrogen Initiative*. Available from: http://www.initrogen.org/.
24) Galloway, J.N., et al., *Nitrogen cycles: past, present, and future.* Biogeochemistry, 2004.

**70**(2): p. 153-226.

25) Gruber, N. and J.N. Galloway, *An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle.* Nature, 2008. **451**(7176): p. 293-296.

26) Matsubae, K., et al., *Virtual phosphorus ore requirement of Japanese economy.* Chemosphere, 2011. **84**(6): p. 767-772.

27) JST-CRDS, 戦略プロポーザル「*持続的窒素循環に向けた統合的研究推進*」. 2012. http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/SP/CRDS-FY2012-SP-01.pdf

28) Pinder, R.W., Neil D. Bettez, Gordon B. Bonan, Tara L. Greaver, William R. Wieder, William H. Schlesinger, Eric A. Davidson, *Impacts of human alteration of the nitrogen cycle in the US on radiative forcing.* Biogeochemistry, 2013. **114** **Open Access**(1-3): p. 15.

29) Baker, L.A., *Can urban P conservation help to prevent the brown devolution?* Chemosphere, 2011. **84**(6): p. 779-784.

### ３．４．３．９　開発途上国による循環型技術（農村型小規模バイオガス化装置）

#### （１）研究開発領域名

開発途上国による循環型技術（農村型小規模バイオガス化装置）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

開発途上国の貧困農家の有機性廃棄物処理およびエネルギー自給を目的とした分散式循環型技術を扱う。個別家庭あるいは公共施設の敷地内に設置された装置により、家畜排泄物、し尿、生ごみなどの有機性廃棄物を原料として嫌気性微生物発酵を行い、メタンガスを主成分とするバイオガスを得る。先進国で普及している工業化バイオガス技術と異なり、無加温・無動力・安価な素材・簡素な構造で処理する技術開発、処理に供する原料探索、家庭でのバイオガスエネルギー利用設備開発などを研究開発課題とする。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

中国、インドなどアジア地域を中心として、貧困農家を対象とした有機性廃棄物からのガス燃料生産を目的とした循環型技術（農村型小規模バイオガス化装置）が広く普及している。本技術は、主に家庭で調理に使用する石炭や薪の代替燃料としてメタンを6～7割含むバイオガスを生産することを目的とする。

先進国で広く利用されている大規模バイオガス化装置と異なる点は次の通りである：

(i)　小規模でオンサイト処理
(ii)　安価・簡素な構造
(iii)　基本的に運転のために電気・燃料などを必要としない
(iv)　回収ガスは家庭内で都市ガスの代替として使用する

世界各国でさまざまな構造のバイオガス化装置が開発されてきたが、主要な方式は以下の3つである [1)]：

(ア)　地中設置式固定ドーム型
(イ)　地中設置式浮遊ドラム型
(ウ)　地上設置可動式プラグフロー型

バイオガス化装置の発酵部の容積は、(ア)と(イ)のタイプでは数$m^3$～百数十$m^3$、(ウ)のタイプは十$m^3$以下である。数十$m^3$以上の規模のバイオガス化装置は、個別家庭ではなく密集した集落などで共同の処理を行う場合に使用される。撹拌・温度は効率的な発酵にとって不可欠であるが、恒常的な撹拌の設備や温度を制御する仕組みを有していない。原料投入槽、発酵槽、発酵液貯留槽は連結されている。発酵原料の投入は投入槽からの自然流下で、貯留槽から取り出された発酵液は液肥などに利用される。典型的なバイオガス化装置の耐用年数は25～35年で、設置費用は200～400 USDである [1)]。生産されるガスは、家庭用のバイオガス化装置の場合は1日あたり平均1 $m^3$ほどで、一家庭で調理に使用するガスをまかなう程度である。

これまでに海外の複数の研究グループによって、本技術の導入による環境的・経済的効用の評価がなされており、またそれらは数式でモデル化されている。例えばGroenendaalらによると、農家の女性が家事に要する時間は家庭用バイオガス化装置導入によって十～十数%減少するとしている [2)]。Fengらは、家庭用バイオガス化装置導入

により、家庭あたりの年間の薪使用量は1.44 t、$CO_2$排出量は1.73 t減少すると推定した[3)]。

本技術は、一部の国（特に中国とインド）ではすでに産業として成立している。ポテンシャルとして中国には約1億4千万基、インドには約2千万基の小規模バイオガス化装置が導入可能と見積もられている。普及の点で、中国ではポテンシャルの約3分の1、インドではポテンシャルの約5分の1まで普及が進んでいる。両国では、小規模バイオガス化装置の政策的な推進には約50年の歴史がある。従来は農村振興策と見なされていたが、2000年代からは再生可能エネルギーとして位置づけられるようになった。中国の再生可能エネルギー中長期発展計画によれば、2020年までにポテンシャルの70%まで普及を進める計画である。その結果生産されるバイオガスは180億$m^3$（=3億9千万GJ）と見積もられており、主要な再生可能エネルギーのひとつである[4)]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

利用者である貧困農家にとって政府助成金は重要である。アジア地域での小規模バイオガス化装置の政策的な導入推進の下で、建設費の数十%に相当する政府助成金が農家による導入を後押ししている。しかしながら、その導入後の維持管理に対する補助がないことが、特に低所得者にとって技術の利用を継続する事を困難にしている。戚らが調査を行った地域では導入した農家のうち3割は使用を停止していたという[5)]。

小規模バイオガス化装置は各家庭に導入されるという特性上、維持管理は利用者である農家の責任となる。それゆえ、維持管理をサポートする体制が必要とされている。そのような現状に鑑み、中国では近年になってバイオガス技術者の育成が政策的に行われている。それに係るアジアにおける国際拠点としてAsia-Pacific Biogas Research and Training Center（BRTC）が中国成都にある。

一方で技術的な側面では、これまでに明らかとなっている課題として、(a)不安定なメタン生成；(b)農家が調達する原材料の不足；(c)15℃以下の低温条件での効率性低下；(d)農業残渣など難分解性の原料の処理の困難さ；(e)厨芥など油脂を含んだ原料の処理；(f)無撹拌のために堆積物蓄積や死水域生成による有効槽容積減少などがある[1, 4, 5)]。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

中国四川省では100万家庭への小規模バイオガス化装置導入を目指した大規模なクリーン開発メカニズム（CDM：Clean Development Mechanism）プロジェクトが進められている。我が国では、2008年よりベトナムカントー市[6)]、2009年より中国重慶市[7)]、2010年よりバングラデシュ[8)]において、貧困農家を対象とした農村小規模バイオガス化装置CDMプロジェクトを実施している。また、トヨタ環境活動助成プログラム「ベトナム農村におけるバイオガス発電技術の市場開発促進」などのプロジェクトも実施されている。導入されている技術は基本的には上述のアジアの伝統的な方式であり、我が国の技術を活用した技術改善などが期待される。

### （６）キーワード

バイオガス、再生可能エネルギー、分散型施設、液肥、低コスト、無動力

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | × | → | ・日本の研究者による開発途上国の小規模バイオガス化に係る技術的研究および社会経済的研究はほとんどない [9]。 |
| | 応用研究・開発 | × | → | ・学術界、産業界ともに、開発途上国小規模バイオガス化に係る応用研究や開発は極めて低調である。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・アジア各国で小規模バイオガス化技術普及のCDMプロジェクトを実施してきた。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | → | ・中米諸国などを対象とした小規模バイオガス化装置の処理特性やエネルギー利用などの調査研究が報告されている [10, 11]。 |
| | 応用研究・開発 | × | → | ・目立った動きは見受けられない。 |
| | 産業化 | × | → | ・目立った動きは見受けられない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・技術開発研究はこれまでにいくつか報告されている [12-14]。アジア、アフリカ、中南米諸国を対象とした小規模バイオガス技術の社会経済的研究も報告されている [15, 16]。学術的な研究は近年増加傾向である。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・開発途上国の小規模バイオガス化装置の環境・経済的影響の評価、あるいは現地への技術導入などの報告が多い。 |
| | 産業化 | △ | → | ・日本と同様CDMなどのプロジェクトを通して開発途上国の小規模バイオガス化技術普及に関わっている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・中国農業部の研究機関において小規模バイオガス化技術の建設・運転管理について、詳細かつ多数の国家標準が作成、体系化されている [17-19]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・これまでに数多くの農村小規模バイオガスプロジェクトが実施されており、そうしたプロジェクトを通して果樹栽培、畑作、養豚、養魚、バイオガスを組み合わせた資源循環型農業システムの開発・普及が進められてきた。三位一体システム、四位一体システム、五配套システムなど、地域特性に合わせた農業システムが構築されてきた [4]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・中国国内ではすでに大規模に展開されており、産・官共同で関与するビジネスモデルが成立している。すでに4,000万基以上の装置が導入されている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | × | → | ・開発途上国向けの小規模バイオガス化技術に関する研究事例はほとんど確認されていない。 |
| | 応用研究・開発 | × | → | ・目立った動きは見受けられない。 |
| | 産業化 | × | → | ・目立った動きは見受けられない。 |
| その他アジア諸国 | 基礎研究 | ○ | → | ・特にインドの研究者を中心として、発酵槽・ガス利用機器の新技術開発や上述の伝統的な装置の特性評価、モデル化などの研究が数多く行われている[20-22]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・インド、東南アジアなどで数多くの小規模バイオガスプロジェクトが実施されている（例えばNational Project on Biogas Development（India）、Biogas Programme for the Animal Husbandry sector of Viet Nam）。中国と同様に果樹栽培、養魚、養豚、バイオガスなどを組み合わせた資源循環型農業システムの普及が試みられている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・中国ほどではないが、アジア地域（特にインド・ベトナム）での普及拡大が顕著である。中国と同様に、小規模バイオガス化技術の国家標準策定、バイオガス技術者の訓練などが行われている [23-25]。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Rajendran, K. et al. Household biogas digesters–A review.Energies.2012, Vol.5, p.2911-2942.
2) van Groenendaal W. and Gehua, W. Microanalysis of the benefits of China's family-size bio-digesters. Energy. 2010. Vol.35, Issue 11, p.4457-4466.
3) Tingting, F. et al. Productive use of bioenergy for rural household in ecological fragile area, Panam County, Tibet in China: The case of the residential biogas model. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol.13, Issue 8, p.2070-2078.
4) 小林他 中国農村地域における家庭用バイオガス施設の現況. 用水と廃水. 2011. Vol.53, no.9, p.707-717.
5) 戚他. メタンガスの活用による農山村振興の実態と課題－中国湖北省恩施市を事例として－農村計画学会誌. 2008. Vol.27, p.203-208
6) 国際農林水産業研究センター（JIRCAS）. 豚の排せつ物のバイオ燃料化で地球温暖化防止に貢献 - ベトナムの低所得農家を対象としたバイオガス事業が国連CDM理事会に登録 - . 2012.
https://www.jircas.affrc.go.jp/press/2012/press04.html
7) (株)PEAR カーボンオフセット･イニシアティブ. 重慶のバイオガス.
http://pear-platform.org/project_china_b
8) (株)PEAR カーボンオフセット･イニシアティブ. バングラデシュのバイオガス.
http://pear-platform.org/project_bang
9) Kobayashi T. and Li Y.Y. Performance and characterization of a newly developed self-agitated anaerobic reactor with biological desulfurization. Bioresour. Technol. 2011. Vol.102, p.5580-5588.
10) Heltberg, R. Household Fuel and Energy Use in Developing Countries–A Multicountry Study; Oil and Gas Policy Division. The World Bank: Washington, DC, USA, 2003.
11) Lansing, S. et al. Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system. Ecol. Eng. 2008. Vol.34. p.332-348.
12) Martí-Herrero, J. Reduced hydraulic retention times in low-cost tubular digesters: Two issues. Biomass Bioenergy. 2011. Vol.35, p.4481-4484.
13) Axaopoulos, P. et al. Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester. Solar Energy. 2001. Vol.70, Issue 2, p.155-164.
14) Axaopoulos, P. et al. Energy and economic analysis of biogas heated livestock buildings.

Bio-mass and Bioenergy. 2003. Vol.24, No.3, p.239-248.
15) Day, D.L. et al. Biogas plants for small farms in Kenya. Biomass. 1990. Vol.21, p.83-99.
16) Smith, J.U. The Potential of Small-Scale Biogas Digesters to Alleviate Poverty and Improve Long Term Sustainability of Ecosystem Services in Sub-Saharan Africa; University of Aberdeen. Institute of Biological and Environmental Science: Aberdeen, UK, 2012.
17) 中国国家質量監督検験検疫局 戸用沼気池標準図集. GB/T4750. 2002.
18) 中国農業部 農村家用沼気発酵工艺規程. GB9958. 1988.
19) 四川省质量技术监督局 农村户用沼气池使用管理规程. DB51. 2008.
20) Khoiyangbam, R.S. et al. Methane emission from fixed dome biogas plants in hilly and plain regions of northern India. Bioresour. Technol. 2004, Vol.95, p.35-39.
21) Limmeechokchai, B.; Chawana, S. Sustainable energy development strategies in the rural thailand: The case of the improved cooking stove and the small biogas digester. Renew. Sustain. Energy Rev. 2007. Vol.11, p.818-837.
22) Raheman, H. A mathematical model for fixed dome type biogas plant. Energy. 2002. Vol.27, no.1, p.25-34.
23) Nguyen, V. and Chau, N. Small-scale anaerobic digesters in Vietnam - development and chal-lenges. J. Viet. Env. 2011. Vol.1, no.1, p.12-18.
24) Bala, B.K. and Hossain, M.M. Economics of biogas digesters in bangladesh. Energy. 1992. Vol.17, p.939-944.
25) Hiremath, R.B. et al. Sustainable bioenergy production strategies for rural India. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2010. Vol.15, Issue 6, p.571-590.

## ３．４．４　災害による環境への影響低減と環境の再創造

### ３．４．４．１　自然災害（地震、津波、台風、干ばつ、豪雨、豪雪、火山等）が地域環境へ及ぼすリスク

#### （１）研究開発領域名

自然災害（地震、津波、台風、干ばつ、豪雨、豪雪、火山等）が地域環境へ及ぼすリスク

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

地震、火山噴火、津波、台風、暴風、豪雨、豪雪、洪水、渇水などの自然現象により引き起こされる災害のリスクを管理するために必要となる、自然現象把握のための観測技術、発生機構を考慮したモデリング技術、さらにそれによって引き起こされる環境への影響を定量的に評価する手法の研究開発領域である。なお、大規模災害の原因になりうる極端現象に対しては、適応策の検討も重要な課題であり、影響を軽減するためのリスクマネジメント研究に役立つ形での研究開発の成果取りまとめが求められる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1. 災害につながる自然現象の分類

自然災害は、自然現象が被害を引き起こして発生することから、被害対象とその脆弱性から災害の程度やその環境への影響は異なる。被害・影響として、人命、財産、社会基盤、産業基盤（固定資本）、都市機能、不動産価値、経済活動・ビジネス、社会コミュニティなどさまざまな対象に対して多面的に認識することが必要である。その際、災害を発生させる自然現象の対象としては、① 地震、火山噴火や津波、② 台風、暴風、豪雨、洪水や干ばつなどの二つに大きく分けることができると考えられる。前者は、地殻活動に深く関与している一方で、後者は地球温暖化に伴う気候変動や気象変化に深く関わっている。

2. 国内での動向

① 地震、火山噴火や津波などに関する研究開発

地震や火山活動に関しては、2008年から文部科学省による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」において、1) 地震・火山現象予測のための観測研究、2) 地震・火山現象解明のための観測研究、3) 海底における観測技術の開発や宇宙技術などの利用の研究が推進された[1)]。2013年からは「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」[2)]において、1) 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究、2) 地震・火山噴火の予測のための研究、3) 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究が文部科学省主導で進められている。産業技術総合研究所地質調査総合センター[3)]でも、地震・火山災害の将来予測と評価技術の開発の研究が進められおり、「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究」[4)]が実施された（2013年度終了）。さらに、防災科学技術研究所[5)]にて、地震・火山・風水害・雪氷災害の観測・予測技術に加えて、耐震技術開発、災害情報活用手法に関して研究開発が実施されている。地震・津波観測監視や地震予測モデルの研究に関しては、海洋研究開発機構地震津波海域観測

研究開発センター[6]において、東海、東南海、南海地方の地震・津波観測監視システムの構築と地震予測モデルの研究を実施している。

② 台風、暴風、豪雨、洪水や渇水などに関する研究開発

1) 気候変動予測に関する研究開発

文部科学省「21世紀気候変動予測革新プログラム」[7]において、温暖化予測モデルの高度化および予測、不確実性の定量化・低減、自然災害に関する影響評価の研究が展開された（2011年度終了）。これらの成果を継承する形で、2014年6月には環境省から気候変動による影響評価のための気候変動予測結果も公表されている[8]。

2) 気候変動適応に関する研究開発

台風や豪雨などは気候変動に大きく影響を受けることから、気候変動適応戦略イニシアチブのもと、「気候変動適応研究推進プログラム」[9]、「地球環境情報統融合プログラム」[10]が文部科学省主導で推進されている。

気候変動適応研究推進プログラムでは、研究テーマとしては、ⅰ）先進的なダウンスケーリング手法の開発、ⅱ）データ同化技術の開発、ⅲ）気候変動適応シミュレーション技術の開発が設定されている。

地球環境情報統融合プログラム[10]は、2011年3月に終了した「データ統合解析システム（DIAS）」を継承するもので、地球規模課題、特に気候、水循環、生物多様性・農業・水産業に関する科学知の深化と公共的利益創出のための情報基盤のパイロットシステムが構築されたことを受けて、DIASを高度化・拡張し、さまざまな分野の利用者が、超大容量で多様なデータ・情報を協働して統融合し、新たな価値を創出できる情報基盤（ワークベンチ）のプロトタイプを構築し、地球規模課題解決に向けて、科学的先端性を持続的に発揮し、実利用によって公共的利益を実現できる運用体制を設計・提案するための研究を展開している。

2009年には、環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究（S-4）「温暖化影響総合予測プロジェクト」[11]により、長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価の成果が公表されている。温暖化影響に関する包括的な研究であり、8つの指標について温暖化影響を定量的に評価したものである。それに基づく温暖化影響の危険な水準を検討し、さらに安定化排出経路に関する科学的な知見を提示している。

また、環境省環境研究総合推進費による「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」（S-8）[12]、「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究」（S-9）[12]、「地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究」（S-10）[12]が実施されており、温暖化や気候変動に伴う影響評価や予測、さらにはリスク管理に関する研究が展開されている。

これらの成果を受けて、2013年には、気候変動の観測・予測・影響評価に関するレポート「日本の気候変動とその影響（2012年度版）」[13]が環境省から公表されている。

3) 自然災害のリスク管理に関する研究開発

代表的な研究成果としては、2011年11月に公表された、「気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書」[14]（SREX：Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance

Climate Change Adaptation）があげられる。この報告書では、災害リスクと影響の主要な決定要因は、曝露と脆弱性であることから、ⅰ）曝露と脆弱性、極端現象とその影響及び災害損失の観測・所見の整理、ⅱ）災害リスク管理と気候変動に対する適応、ⅲ）過去の極端現象における経験、ⅳ）極端現象の将来予測とその影響及び災害損失の評価、ⅴ）変化する極端現象及び災害のリスクに対する準備と対応について整理されている。

また、京都大学防災研究所の総合防災研究部門が中心となり、災害リスクマネジメント研究に関して、国際応用システム分析研究所（IIASA）と2000年から2009年まで合同会議を開催してきた[15]。

4) 行政における応用的な研究開発

気候変動への適応の観点から、2008年6月に環境省地球温暖化影響・適応研究委員会により「気候変動への賢い適応」[16]が取りまとめられている。また、水災害分野においては、国土交通省で検討が進められてきている。まず、2008年6月に「水災害分野おける地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方」[17]が国土交通省社会資本整備審議会から答申されている。また、国土交通省国土技術政策総合研究所において、政策反映のためのプロジェクト研究「気候変動下での大規模水害に対する施策群の選定・選択を支援する基盤技術の開発」（2010～2013年度）が実施された[18]。さらに、土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）[19]では、中期プログラムとして、水関連ハザードに係わる観測・予測・分析を行うための手法を開発し、水関連災害リスクを評価する研究が推進されている。

また、内閣府中央防災会議の「大規模水害対策に関する専門調査会」は、2010年に大規模水害発生後の被害を最小限にとどめるための対策について検討を進め、「大規模水害対策に関する専門調査会報告 首都圏水没 ～被害軽減のために取るべき対策とは～」[20]を公表している。地震分野においては、2013年3月に中央防災会議防災対策推進検討会議のもとで、東日本大震災をふまえた南海トラフ地震の想定規模と予想経済被害額の見直しも行われている。

3. 海外における動向[21, 22]

自然災害としては、地震、火山噴火、台風、暴風、暴雨、猛暑、寒波、洪水、砂漠化、竜巻、山火事など、非常に多様であり、世界各国はそれぞれの自然・社会状況に応じて対応策を講ずるために、基礎研究、応用研究がさまざまな機関において推進しているが、先端的で高度な研究開発は、我が国以外では米国と欧州に限られていると判断される。

米国における自然災害としては、ハリケーン、竜巻、津波、地震、火山噴火、地すべり、干ばつ、洪水、寒波などがあげられる。また、欧州諸国では、イタリアを除いて火山噴火や地震の発生は少なく、河川の氾濫や洪水の発生に伴う大きな被害が出ている。

① 地震、火山噴火などの関連[23]

米国では、火山災害に対する研究についても地質調査所（USGS）[24]が主体で実施しているが、日本のように必ずしも地震予知と火山噴火予知の観測研究が連携して行われてはいない。一方で、イタリアなどのヨーロッパ諸国の一部やニュージーランドのように地震や火山噴火活動が活発な地域では、日本と同様に地震と火山の研究の連

携が盛んである。

例えば、米国における代表的な研究プログラムとしては、下記のものがあげられる。

1）国家地震災害軽減計画（NEHRP：National Earthquake Hazards Reduction Program）[23)]

本計画には、連邦緊急事態管理庁（FEMA）、国立標準技術研究所（NIST）、国立科学財団（NSF）、地質調査所（USGS）の4つの政府機関が参画している。

このうち、USGSは全世界で大きな地震が起きるとリアルタイムで情報をホームページで公開しており[25)]、著名な地震研究者も多く所属するなど、地震学の世界の研究者にはよく知られている組織である。

2）地震予知可能性についての国際共同実験（CSEP：Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability）[23)]

地震予知に関する研究としてその活動を高く評価されている。

② 台風、暴風、豪雨、洪水や渇水などの分野

1）米国[26)]

2011年には、10億ドル以上の被害額のあった大規模な自然災害が14件発生し、ハリケーン・カトリーナの発生した2005年に次ぐ被害総額を記録した。続く2012年にもハリケーン・サンディが東海岸を直撃し、近年、ハリケーンによる災害が相次いでいる米国では被害を縮小するための対応策が求められた。これらの状況を受けて、政府機関、および民間企業によって災害に対するさまざまな取り組みが実施されている。例えば、下記のようなプログラムがあげられる。これらのプログラムを支える科学的な知見を生み出すべく、気候変動、その影響評価や適応策に関する研究開発が、大学や国の研究機関により実施されてきている。

ⅰ）ハリケーン予測向上プロジェクト（HFIP：Hurricane Forecast Improvement Project）

海洋大気庁（NOAA）では、2007年よりハリケーンの進路および強度をより正確に予測するための研究プロジェクトが進められた。本プロジェクトでは、ハリケーンモデルを活用することで、国立ハリケーンセンター（NHC）によるハリケーンの進路予測の正確度が近年目覚ましく向上してきている。本プロジェクトにおいて、海軍省（DON）や航空宇宙局（NASA）、国立科学財団（NSF）、内務省（DOI）をはじめとする6つの政府機関、およびコロラド州立大学やペンシルバニア州立大学を含む8つの学術機関と共同で、ハリケーン予測モデルの開発に係る研究に注力している。

ⅱ）気候変化対応プログラム（Responses to Climate Change Program）

気候変化・変動により生じる国の水インフラに対する潜在的な脆弱性を削減するために、実用的で、全国的に一貫性を持ち、費用対効果があるアプローチおよび政策を策定、実施した。陸軍工兵隊水資源研究所（IWR）、他の連邦科学・水管理機関、その他の利害関係者と連携した取り組みである。また、2008年に設立された「連邦気候変化および水に関する作業部会（CCAWWG：The Federal Climate Change and Water Working Group）」は、内務省開拓局（USBR）、陸軍工兵隊（USACE）、海洋大気庁（NOAA）、地質調査所（USGS）によるものである。

iii）陸軍工兵隊（USACE）による気候変化適応プログラム

2010年から2014年までに、下記の項目を実施することが予定されている。

- 影響に対する脆弱性のテストの実施
- 気候変化への対処として許認可を決定する規制当局への支援
- 下記の内容に関する検討方針の作成および実証
- 水規制および貯水システムの運営
- 変動する条件のもとでの水文頻度解析
- 降雪条件および氷の影響、沿岸侵食および氷河ダムの決壊による予期せぬ洪水事象
- 気候変化が生態系に与える影響

iv）連邦緊急事態管理庁（FEMA）による次世代公衆警報システム（IPAWS：Integrated Public Alert Warning System）開発プロジェクト

国家的非常時に国民への直接的な警報伝達手段を確立することを目的に、2009年にブッシュ前大統領の大統領命令により開発が進められ、2012年に導入が完了した次世代公衆警報システムである。

2) 欧州 [27)]

欧州全体としての動向として、2000年12月に施行されたEU水枠組み指令（WFD：Water Framework Directive）のもと、河川流域計画（River Basin Management Plan）を策定するよう要求しており、最初の計画は2009年12月22日までに提出され、6年おきに更新しなければならないとされている。そして、2007年11月に発効したEU洪水指令（Flood Directive）により、WFDで設定した流域単位を用いて洪水リスクの評価と管理の枠組みを構築することになっている。

上記のような指令のもとで、下記のような気候変化への適応の検討、洪水リスクの評価と管理の枠組みの構築を支える科学的な知見を生み出すべく、気候変動、その影響評価や適応策に関する研究開発が、大学や国の研究機関により実施されてきている。

ⅰ）気候変化への適応に関する白書

EUが気候変化の影響に適応するための二段階の戦略的アプローチを構築するもので、戦略の第1段階（フェーズ1）は2012年まで実施され、2013年以降のフェーズ2で実施するEUの包括的な適応戦略の基礎を準備する。気候変化への理解を深め、採りうる適応措置を増やすこと、また、どのようにEUの重要な政策に適応措置を組み込むかという点に重点が置かれている。フェーズ1アプローチは、以下の4項目が基軸とされた。

- EUへの気候変化の影響および結果に関する明確な知識ベースの構築
- 適応策のEUの主要政策分野への取り込み
- 適応策を効率的に実施するための政策手法の一体化（市場を基盤とした手法、ガイドライン提示、官民協働（PPP：Public Private Partnership））
- 適応策に関する国際協力

ⅱ）水枠組み指令指針文書24：変化する気候条件における流域管理

2009年11月に、気候変化への適応に関する指針文書が公表され、洪水リスクの評

価と管理の枠組みの構築のために、以下の項目について指針が示されている。なお、洪水リスク予備評価は2011年12月22日までに、洪水ハザードマップおよび洪水リスクマップの整備は2013年12月22日までに、そして、洪水リスク管理計画の策定は2015年12月22日までに完了することが求められている。

・気候モデル、予測、シナリオ、影響の可能性と不確実性
・管理のための適応能力の開発
・水枠組み指令と適応
・洪水リスク管理と適応
・渇水管理・水不足と適応

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

自然災害によって引き起こされる環境影響あるいはそのリスク関する研究開発は、地震発生、火山活動、さらには台風や干ばつなど気候変動に大きく左右されることから、その影響評価は自然災害の特殊性に留意すべきである。すなわち、非常に低い発生確率、非常に大きな被害規模、発生確率や被害規模の不確実性が高いことである。そして、災害に伴う直接的な被害だけでなく、外部や他者への負の影響も含めて広範な影響を考慮することが必要となる。

これらの特殊性を考慮すると、自然現象の予知や将来予測の精度向上のために調査研究、そのモデリング技術、それを裏付ける観測手法の高度化がバランスよく推進されることが必要である。すなわち、現象の把握のための調査や観測、そのデータのアーカイブ化、観測結果を再現できるモデル化やシミュレーション技術、そしてリアルタイム計算のための高速化、モデル予測精度の検討を支えるモニタリングやモデル検証データの取得など、学際的な枠組みで研究プログラム、プロジェクトを継続的に実施することが求められる。同時に、短期的な成果主義とならないように、若手研究者の育成も含めて長期的な視点での研究成果の蓄積、継承を目指したプログラム、プロジェクトとすべきである。

特に、気候変動に関わる研究開発は、国際的な枠組みのなかで先端的な研究成果を生み出し、DIASで実施されているように、最新の気象観測結果やモデルシミュレーション結果をアーカイブ化してデータ共有できることが研究開発推進には必須である。また、対象とすべき現象が大規模でありその災害も広域化していることから、国際的な協力関係のなかで、気象観測や災害状況把握のためのネットワーク構築、広域での観測に有効な衛星センサや衛星画像の活用研究も重要性が高いと考えられる。

政策的な課題としては、さまざまな主体がこの研究開発領域を推進させるためにも、火山活動や地殻変動に関わる地震や火山噴火が問題となる地域、沿岸域が問題となる津波や高潮、温暖化に伴う気象変化に伴う発生する地球規模での自然災害など、自然災害のタイプ別に、その災害に影響を受けて先端的な研究を実施している海外諸国の研究機関と連携する国際共同研究の推進が求められる。その際、我が国がリードしている地震や津波研究、気候モデルや気象モデルの研究では、米国や欧州とともに中核拠点として国際的な研究開発を推進することが必須である。

また、気象予報ビジネスは、気象業務法の制約のなかで実施されていると思われる。

今後の社会的な便益を考えると、気象庁と国土交通省の公的機関と民間機関がいかに補完的に機能するかを考えたうえで、研究開発を進めることが期待される。

さらに、自然災害リスク評価やリスクマネジメントの研究開発に関しては、保険会社など民間企業のビジネスとの関係性も深いことから、民間企業のCSRとしてだけでなく、企業と社会がWin-Win関係となる連携研究プロジェクトを支援する仕組みが求められる。その際、研究成果の公表や社会での共有のあり方に留意が必要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

1. 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書（AR5） [28-30]

2014年3月31日に、第2作業部会報告書（影響・適応・脆弱性）が公表された。本報告書では、新たな知見をもとに、観測された影響と将来の影響および、脆弱性について地域・分野別に、より具体的に評価するとともに、適応策についても実際の適用を念頭に整理されている。また、世界全体の気候変動による主要リスクの抽出とその評価を行ったことに加えて、地域別の主要リスクとそれに対応した適応の有無によるリスクの変化について評価している。

したがって、今後は自然現象の予知、それに伴う災害発生や被害予測、さらにその対策や適応策を含めた形で、災害の影響評価やリスク評価、さらにはリスク管理に向けた知見を生み出すことが期待される。そのためにも、外力である自然現象の将来予測精度を向上させること、影響要因とその影響度の定量化を充実することが求められる。

2. 日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測

環境省から2015年度夏頃に予定している「適応計画」策定に向けた取り組みとして、日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測を行った結果が2014年6月6日に公表されている。この種の予測結果の活用が期待される。

3. 大学などの研究機関の活動支援

東北大学災害科学国際研究所 [31] における寄付研究部門のように、保険会社が大学や研究機関と連携した講座や実証実験を進めているように、研究開発の成果が実社会やビジネスとつながる環境を支援すること、また、東北大学とNECと国際航業により大規模地震発生時の津波浸水被害をリアルタイムに予測する実証事業 [32] のように、大学と企業の連携が推進されることが期待される。

### （６）キーワード

気候変動、適応策、極端現象、観測監視システム、リアルタイム観測、活断層、長周期地震動、局地的大雨、XバンドMPレーダ、影響評価指標、リスク評価指標、適応策評価指標、ハザードマップ、リスクマップ、リスクマネジメント、リスクコミュニケーション

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・地震や火山活動に関しては、2008年から「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」、2013年からは「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」が文部科学省主導で進められている[1]。<br>・地震・火山・風水害・雪氷災害の観測・予測技術に加えて、耐震技術開発、災害情報活用手法に関して、防災科学技術研究所にて研究開発が進められている[5]。<br>・海域断層、活断層調査、地震の長期予測に必要となる調査観測データ収集の基礎研究が展開されている。また、海域において地震・水圧計を設置してリアルタイム観測網を整備して、緊急地震速報や津波警報の高度化即時予測技術開発、地震発生メカニズムの解明のための研究が進められている[6]。<br>・自治体の防災計画策定の支援や被害軽減のため、地震被害予測、長周期地震動ハザードマップづくりなどの地震防災研究も進められている。<br>・「21世紀気候変動予測革新プログラム」[7]において、温暖化予測モデルの高度化および予測、不確実性の定量化・低減、自然災害に関する影響評価の研究が展開された（2007～2011年度）。<br>・台風や豪雨などは、気候変動に大きく影響を受けることから、気候変動適応戦略イニシアチブのもと、「気候変動適応研究推進プログラム」[9]、「地球環境情報統融合プログラム」[10]が文部科学省主導で推進されている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・2009年に、地球環境研究総合推進費戦略的研究プロジェクト[11]による長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価の成果が公表された。<br>・2013年に、気候変動の観測・予測・影響評価に関するレポート「日本の気候変動とその影響（2012年度版）」[13]が環境省から公表された。<br>・2010年に、内閣府中央防災会議「大規模水害対策に関する専門調査会」[20]が、大規模水害発生後の被害を最小限にとどめるための対策について検討を進めた。<br>・2013年に、中央防災会議防災対策推進検討会議の下で、東日本大震災を踏まえた南海トラフ地震の想定規模と予想経済被害額の見直しが行われた。<br>・2008年に「水災害分野おける地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方」[17]が国土交通省社会資本整備審議会から答申された。<br>・国土交通省国土技術政策総合研究所において、政策反映のためのプロジェクト研究「気候変動下での大規模水害に対する施策群の選定・選択を支援する基盤技術の開発」（2010～2013年度）[33]が実施された。<br>・土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）[19]では、中期プログラムとして、水関連ハザードに係わる観測・予測・分析を行うための手法を開発し、水関連災害リスクの評価する研究が推進されている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・XRAIN情報[34]が企業にも提供される予定であることから、これらの情報を活用した企業活動が活性化するものと推察される。<br>・（株）ウェザーニューズなどのようにモニタからの情報提供を受けて気象予報に活用している企業が活躍しており、現在気象庁や国土交通省、さらには気象協会のような公的な機関が提供している気象情報の提供に関して、公的な役割の一部を民間企業が行うことも検討すべきである[35]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・政府機関などが中心となり長期に渡って取り組んでいる自然災害予測の研究や緊急時の警告システムの開発プロジェクトの成果がある。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・地震予知研究の体制も構築されている[23]。<br>・全球モデルの運用による数値予報センターがあり、現業での高解像度モデル（格子間隔 5 km以下）もカナダとともに二つが運用されている[35]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ○ | → | ・災害リスクマネジメント研究[36]では、地震やハリケーンのような大災害リスクへの対処としてリスクを移転・分担することで災害発生の前後における資産や環境の平滑化を可能とするリスクファイナンシング研究が展開されている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・地震や火山関連の研究は、イタリアなどの当該災害のある諸国で実施されているが、大半の国では洪水や干ばつなどの水災害を対象とした基礎研究が実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・気象予測では、重要な全球モデルの運用において、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）による予報精度が世界一と言われている。また、英国、フランス、ドイツも同時の数値予報センターを有している[35]。<br>・国際応用システム分析研究所（IIASA）が政策科学やシステム科学という学際的・国際的研究者コミュニティのネットワークの中核として影響力を有している[36]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・現業での高解像度モデル（格子間隔5 ㎞以下）は、欧州内9か国で運用されていることから、気象予測など応用研究は進展していると判断される[35]。 |
| 中国 | 基礎研究 | × | → | ・災害状況観測、情報収集、評価システムの開発の遅れが認識されているが、目立った研究開発成果は公表されていない。また、自然災害情報の蓄積なども体系立てて行われていないものと思われる[37,38]。<br>・気候変動影響評価の報告書はいまだ発表されておらず、将来の自然災害に深く関わる、観測された気候変動や将来気候予測に関する整理はなされていないものと思われる。 |
| | 応用研究・開発 | × | → | ・自然災害の頻発を受けて、2010年10月の第12次5ヵ年計画建議[37,39]においても、洪水防止・地質災害防止対策を重点とする防災減災システムの建設の重要性は謳われているが、応用的な研究開発の成果は国際的には公表されていない。 |
| | 産業化 | × | → | ・気象予測に関連した全球モデルでの数値予報センターはあるものの、現業での高解像度モデル（格子間隔5 ㎞以下）の運用はない[35]。<br>・自然災害への保険などの制度も不明であり、産業化に関する顕著な活動や成果は把握できていない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・2013年に、High Impact Weather Research Centre（Gangneung-Wonju National University）により、GIS技術とモデルによる12時間気象予測を組み合わせて、自然災害を予測するツール開発をしている例がある[40]。<br>・気候変動影響評価の報告書（Korean Climate Change Assessment Report 2010 : Technical Summary）[41]を環境部、国立環境科学院（NIER）が公表しており、観測された気候変動と気候予測がまとめられている。しかし、将来影響に関する研究・調査の不足と、対象分野における適切な適応戦略構築のための脆弱性に関する調査・研究の不足をあげている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・消防防災庁（NEMA）[42-44]が、自然災害に対応するための総合的な政策を統括しており、国立防災研究所（NIDP）が研究や技術開発を担っている。目立った成果は国際的に公表されていない。<br>・土木関連では建設技術研究院（KICT）において、降雨予測や治水対策関連の研究開発が実施されていると判断される。KICTは日本の国土技術研究センター（JICE）と合同技術セミナー[45]を継続的に実施してきている。<br>・韓国中央政府による雨水収集管理の推進を受けて、一部大都市（ソウル、スウォンなど）ではICT活用の雨水利用と豪雨対策とを統合した管理の動きがある[46]。 |
| | 産業化 | △ | → | ・気象予測に関連した全球モデルでの数値予報センター、現業での高解像度モデル（格子間隔5 ㎞以下）の運用が日本と同様に行われている[35]。<br>・土砂災害などの早期警戒技術のアジア共同開発に、日本とともに参加しており、一部、産業化に関する活動が実施されている[47]。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 文部科学省. 平成26年版科学技術白書 第2部 第3章 我が国が直面する重要課題への対応.
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa201401/detail/1349647.htm
2) 文部科学省. 「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」実施計画（平成23年度修正版）. 2011.
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/sonota/1288570.htm
文部科学省. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）. 2013.
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/1341559.htm
3) 産業技術総合研究所. 地質調査総合センター.
https://www.gsj.jp/HomePageJP.html
4) 産業技術総合研究所. 地質調査総合センター. 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究.
https://www.gsj.jp/researches/project/multiple-geohazards/index.html
5) 首相官邸. 行政改革推進会議. 独立行政法人改革等に関する分科会第１ワーキンググループ（第６回）配布資料. 防災科学技術研究所における研究開発の概要.
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/gskaigi/kaikaku/wg1/dai6/siryou2-2.pdf
6) 海洋研究開発機構（JAMSTEC）. 地震津波海域観測研究開発センター.
https://www.jamstec.go.jp/donet/j/
7) 文部科学省・JAMSTEC 21世紀気候変動予測革新プログラム
http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/
http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/reports.html
8) 環境省. 日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について（お知らせ）. 2014.
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=18230
9) 気候変動適応研究推進プログラム.
http://www.mext-isacc.jp/
10) 地球環境情報統融合プログラム.
http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/dias/
11) 環境省. 地球環境研究総合推進費戦略的研究プロジェクト「温暖化影響総合予測プロジェクト」成果発表について～地球温暖化「日本への影響」-長期的な気候安定化レベルと影響

リスク評価- ～. 2009.
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=11176
12) 環境省環境研究総合推進費
S-8　温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究
http://www.nies.go.jp/s8_project/
S-9 アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合研究
http://s9.conservationecology.asia/
S-10 地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究
http://www.nies.go.jp/ica-rus/index.html
13) 環境省. 気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート『日本の気候変動とその影響』（2012年度版）.2013.
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=16548
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep130412/report_full.pdf
14) 環境省. 気候変動に関する政府間パネル（IPCC)「気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書」の公表について（お知らせ）. 2011.
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14453
IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX).
http://ipcc-wg2.gov/SREX/report/
15) 京都大学 防災研究所 沿岸災害研究分野
http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/ja/index.php?Research%2FProject#w4109020
http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/japanese/?page_id=322
16) 環境省, 地球温暖化影響・適応研究委員会報告書「気候変動への賢い適応」。2008.
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=9853
http://www.env.go.jp/press/files/jp/11627.pdf
17) 国土交通省. 社会資本整備審議会. 水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）. 2008.
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf
18) 国土交通省. 第11回気候変動に適応した治水対策検討小委員会 資料3. 水災害分野に係る最近の主な動向等.
http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouiinkai/kikouhendou/11/pdf/s3-1.pdf
19) ICHARM中期プログラム（およそ 5 年）.
http://www.icharm.pwri.go.jp/about/pdf/m_programme_J.pdf
20) 内閣府. 中央防災会議「大規模水害対策に関する専門調査会」. 大規模水害対策に関する専門調査会報告　首都圏水没～被害軽減のために取るべき対策とは～. 2010.
http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/daikibosuigai/pdf/100402_shiryo_2.pdf

21) 岩城成幸、「VI 自然災害と緊急時対応」、『総合調査報告書　主要国における緊急事態への対処』、国立国会図書館調査及び立法考査局、2003.
http://www.ndl.go.jp/jp/diet/publication/document/2003/1/20030109.pdf
22) NICT欧州連携センター、調査報告書「欧州における耐災害ICTの研究支援政策及び研究開発の動向調査」-. 2012.
http://www.nict.go.jp/int_affairs/int/4otfsk000000osbq-att/re121130.pdf
23) 文部科学省. 科学技術・学術審議会 測地学分科会（第26回）・地震火山部会（第9回）合同会議 資料3. 最近の海外における地震予知研究の動向（報告）. 2012.
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/siryo/__icsFiles/afield-file/2012/07/18/1323577_05.pdf
24) 米国地質調査所（USGS）. Natural Hazards.
http://www.usgs.gov/natural_hazards/
25) 村川恭介、米国の地震観測体制、スペースレフ.
http://www.spaceref.co.jp/homepage/colum/images/US_earthquake_observation.pdf
26) (株)NTTデータ、米国における災害への取組みの最新動向、2013.
27) (一財)国土技術研究センター. 欧米諸国における治水事業実施システムー気候変化を前提とした治水事業計画ー. 2011.
http://www.jice.or.jp/jishu/t1/201107070.html
28) AR5 第1作業部会の報告『気候変動2013 - 自然科学的根拠』
環境省. 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書 第1作業部会報告書（自然科学的根拠）の公表について（お知らせ）. 2013.
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17176
IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. 2013.
http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/
29) AR5 第2作業部会の報告『気候変動2014 - 影響・適応・脆弱性』
環境省. 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書 第2作業部会報告書（影響・適応・脆弱性）の公表について（お知らせ）. 2014.
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17966
IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. 2014.
http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/
30) AR5 第3作業部会の報告『気候変動2014 - 気候変動の緩和』
環境省. 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第５次評価報告書 第３作業部会報告書（気候変動の緩和）の公表について（お知らせ）. 2014.
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=18040
IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. 2014.
http://ipcc.ch/report/ar5/wg3/
31) 東北大学. 災害科学国際研究所. 地震津波リスク研究部門（東京海上日動）.
http://irides.tohoku.ac.jp/organization/donation/01.html

32) 日本電気(株). 東北大・NEC・国際航業、大規模地震発生時の津波浸水被害をリアルタイムに予測する実証事業を推進. 2014.
http://jpn.nec.com/press/201408/20140801_01.html
33) 国土交通省国土技術政策総合研究所. 国総研資料第749号　気候変動適応策に関する研究（中間報告）.
http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0749.htm
34) 国土交通省. XRAIN（XバンドMPレーダネットワーク）配信エリア新設. 2014.
http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000786.html
35) 東京大学 エネルギー工学連携研究センター（CEE）ワークショップ「再生可能エネルギー発電導入のための気象データ活用」講演資料. 気象庁数値予報の現状と展望. 2014.
http://www.ogimotolab.iis.u-tokyo.ac.jp/html/workshop/20140325/20140325_12.pdf
36) 損害保険料率算出機構. 地震保険研究. 「第1章　米国における災害リスクマネジメント研究の最近の動向」『巨大災害リスクに関する研究』. 2003.
http://www.giroj.or.jp/disclosure/q_kenkyu/No04_B.pdf
37) 宮尾恵美. 「中国の気象災害への取組み　―気象災害防御条例の制定―」. 外国の立法. No.245. 国立国会図書館調査及び立法考査局. 2010.
http://www.ndl.go.jp/jp/diet/publication/legis/pdf/024507.pdf
38) JST. SciencePortal China. 中国の地震防災の現状と展望. 2008.
http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/0901earthquake/r0901_he.html
39) 財務省財務総合政策研究所. 平成22年度第1回中国研究会. 中国共産党第12次5ヵ年計画建議のポイント. 2011.
http://www.mof.go.jp/pri/research/conference/china_research_conference/2010/22_01a.pdf
40) United Nations Office for Outer Space Affairs（UN-SPIDER）. South Korea develops new GIS-based weather model to forecast disasters. 2013.
http://www.un-spider.org/about-us/news/south-korea-develops-new-gis-based-weather-model-forecast-disasters
41) 韓国政府環境部 韓国国立環境研究院（NIER）. Korean Climate Change Assessment Report 2010: Technical Summary
http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/09/5254103.pdf
42) 平成18年度大学教育の国際化推進プログラム『リスク管理共通教育中核教員団の養成』講演会「韓国の災害リスクとリスク管理教育」.金賢珠「韓国の災害管理システムと国立防災研究所の役割」. 2007.
http://www.soft.risk.tsukuba.ac.jp/miyamoto/FD_reports2006/shiryo/kouenn-kai_0703021.pdf
43) 藤原夏人. 「韓国の災害法制」. 外国の立法. No.251.国立国会図書館調査及び立法考査局. 2012.
http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_3487063_po_02510008.pdf?contentNo=1
44) National Disaster Management Institute, Korea
http://eng.ndmi.go.kr/

45) (一財)国土技術研究センター. 第23回/第24回 日・韓建設技術セミナー
http://www.jice.or.jp/international/nikkan/201310010.html
http://www.jice.or.jp/international/nikkan/201210010.html
46) 韓国における雨水集水管理の現状
水循環　貯留と浸透Vo. 78, 78-43, 2010　雨水貯留浸透技術協会
47) JST.旧科学技術振興調整費平成19年度採択課題「土砂災害等の早期警戒技術のアジア共同開発」.
http://scfdb.tokyo.jst.go.jp/pdf/20071450/2009/200714502009rr.pdf

### ３．４．４．２　人為的災害（工場等での事故、危険物質運搬時の事故等）が環境へ及ぼすリスク

#### （１）研究開発領域名

人為的災害（工場等での事故、危険物質運搬時の事故等）が環境へ及ぼすリスク

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

産業活動に伴い環境に排出される有害物質による汚染（公害）に加えて、工場などの設備・施設の故障や操作ミスなどによって起こる火災・爆発、有害化学物質の漏洩や危険物質などの運搬時に起きる人為的災害が、人間の生命・健康、生活環境、生態系などに及ぼすリスクへの対応と対策、さらにリスクの予測と予防に関する技術的および政策・制度的な研究が今後とも重要である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

工場などの製造設備･施設の定常的な運用時に排出される有害物質による大気、水質、土壌などの汚染、いわゆる産業公害のほかに、工場などの設備・施設の故障や人為的な操作ミスなどによって突発的に起こる火災・爆発、有害物質の漏洩、放出などの事故、自動車、列車などによる危険物質などの運搬時に起きる事故による災害がある。これらの人為的災害による環境へのリスクを把握、評価し、リスクを適切に管理していくことは、「化学物質が人の健康と環境にもたらす著しい悪影響を最小化する方法で使用、生産されることを2020年までに達成する」というヨハネスブルグ宣言の目標に沿っており、安全と安心の確保された社会の確立に資する重要な研究開発領域である。

化学工場などで起こる事故、危険物質などの輸送時に起こる事故には、可燃性、引火性、爆発性などをもつ危険物質の燃焼や爆発、有害化学物質の漏洩、放出、流出などがある。1976年、イタリアのセベソでは、テトラクロロベンゼンから2,4,5-トリクロロフェノールを製造する工程で異常な温度上昇が起こり、非意図的に生成したダイオキシンなどが大気中に放出されて多数の人、家畜が暴露され、1,800 haもの土地が汚染された[1)]。1984年にはインド、ボパールの農薬製造工場でタンクの安全弁が破裂し、毒性の高いイソシアン酸メチルが約40 t流出、拡散して数千人が死亡し[2)]、土壌、地下水の汚染が長期間続いた（BBC2004年放送）。日本ではこれほど大規模な災害は発生していないが、過酸化ベンゾイル（1990年、8名の死亡）、ヒドロキシルアミン（2000年、4名死亡、近隣住民など約60名が負傷）など危険物の爆発や硫化水素、ホスゲン、一酸化炭素など毒性の強い物質の漏洩、放出が起こっている[3)]。

これらの人為的災害を契機として安全に対する要求が高まり、化学工業界による安全ガイドラインの作成、国や自治体などによる法規制などが進められてきたが、災害の発生は依然として続いている。日本原子力研究開発機構の化学工場などでの事故に関するデータベース[4)]には、2000年から2010年の10年間に国内外で起こった約350件（国内：約240件）が記載されている。事故の原因となった物質あるいは漏洩、放出、流出した物質は100種類近くもある（LNG、LPG、ガソリンなどの炭化水素類、有機溶剤や酸素、窒素、硫黄、塩素、フッ素などを含むさまざまな有機化合物に加えて、アンモニア、窒素酸化物、シアン化水素、塩酸、硫酸、塩素、ホスゲン、フッ化水素やフルオロスルホ

ン酸、硫黄、硫化水素、リン酸、三塩化リンなどの無機化合物）。なお、2001年のフランス南部の肥料製造工場における硝酸アンモニウム300 tの爆発（周辺住民を含む31名の死亡と約2,500人の負傷者）[3] など、大規模な粉じん爆発が世界的に繰り返し発生している。

輸送中の災害件数は工場などのそれよりも少ないが、2004年にイランで起こった貨物列車で輸送中の硫黄、ガソリン、化学肥料、原綿などの爆発（死者300名以上、多くが消防隊員）[3]、2005年に米国サウスカロライナ州で起こった2台の貨物列車の衝突による積荷の塩素ガス流出（9名の死亡、500名以上の被災）[3] などの大規模な災害がある。日本では危険物を搭載したトラック・タンクローリーの事故が多く[5]、5 t積みタンクローリーの横転事故によるLPガスの噴出と炎上（1965年、5名の死亡、負傷者26人、家屋焼失31棟）を筆頭に、首都高速道路側壁への衝突で満載していたガソリンと軽油の炎上（2008年）などがあり、化学物質関連では、積載したタンク中の過酸化水素の爆発（1990年）、交通事故で出火してクロルピクリンが漏洩（1993年、１名の死亡）、横転でステアリン酸クロライド1.6 tが流出し、雨水との反応で塩化水素が発生（1997年、菊川事故）などがある。

産業公害は1950年代後半から1970年代の高度経済成長期に発生し、発生源周辺の住民などに多大な健康被害をもたらした。「四大公害病」（イタイイタイ病、水俣病、第二（新潟）水俣病と四日市ぜんそく）の公害、その後の大気汚染問題（窒素酸化物、浮遊粒子状物質、有害大気汚染物質など）、水質汚濁問題（有機汚濁物質、窒素とリン、有害物質など）について、大気汚染防止法、水質汚濁防止法などによる規制をベースとして、総合的な防止対策（排出抑制基準などの制定、排ガス・排水など処理技術の開発、公害防止設備などの導入推進などへの投資と支援、公害防止を担う人材の育成と活用）の実施によって汚染物質の排出量が抑制され、環境リスクが低減されてきた。一方、光化学オキシダントや微小粒子状物質（PM2.5）のように、環境基準達成率が依然として低く、原因の解明、対策が進められている課題もある。

産業公害と工場などの事故との際立った違いは、前者が施設・設備の定常的な運用時に排出される有害物質によるものであるのに対し、後者では事故がどこで、いつ発生するかほぼ予測できないこと、短い時間内に現場の作業者、輸送担当者、近傍の住民が被災すること、さらに、漏洩、流出した有害物質が周辺地域の大気、水、土壌などを汚染し、人、動植物などが暴露されて健康被害などが生じることである。前述したように、化学工場などにおける災害の事象、原因は一様ではなく、漏洩、流出、拡散される有害物質も多種多様である。

これらの人為的災害によるリスクへの対応には、災害の状況と原因の把握およびリスクの評価が必要であり、その結果に基づいてリスクを適正に管理する技術、方法などを検討、実施していくことになる[6]。具体的には次に示すような項目と研究開発課題があげられる。

1. 災害の状況と原因の把握

① 原因物質などの同定（分析測定）

・原因物質、反応生成物を分析測定する技術、機器の開発と整備（迅速・簡易分析が可能な検知管、センサなど、原因物質、反応生成物の同定、定量用の分析機器、分析シ

ステムの開発）
・原因物質などに関する情報の迅速な入手（有害物質の物理的化学的性状、暴露で生じる症状などに関するデータ、事業者などのもつ情報、積荷書類や危険有害性を周知する標札、標識など）
② 漏洩、流出した有害化学物質などの挙動と汚染状況の推定
・火災・爆発による物質、エネルギーなどの拡散・移動を計算／推測するモデルの選択／開発（災害発生後短時間内で挙動の推定）
・漏洩、流出した有害物質などの環境動態モデルの選択／開発（有害物質の反応、変質も考慮して有害物質などの濃度の空間的、時間的変化などをシミュレーション）

2. リスクの評価

人為的災害では、化学工場などでの火災・爆発などの物理的現象による危険性および、漏洩、流出した物質の有害性による健康、生態系への影響の、二つの潜在的なリスク（ハザード）がある。これらのハザードに暴露される量（確率）をかけることでリスクが評価される [7]。

① 火災・爆発などによるリスク（フィジカルリスク）の評価
・人や構造物などに対する被害の大きさ（影響度）の評価：プロセスの種類・条件（温度、圧力など）および化学物質の物理的・化学的な特性（可燃性、燃焼性、引火性、発火点、蒸発性など）などに関するデータ [8] の収集とモデル計算による影響度の推定・評価
・発生する確率の評価：プロセスのハザード解析とヒューマンエラーなどの考察
② 有害性による健康、生態系へのリスク評価
・原因物質、反応生成物などの有害性評価：刺激性、窒息性、麻酔性、毒性、発がん性などのデータ [8] の収集、毒性試験の実施など
・有害物質の暴露量評価：災害発生場所、環境媒体中の有害物質濃度の実測あるいはモデルによる計算、暴露の経路、有害物質取込み量の計算・推定、毒性・リスク評価の指標 [8]
・疫学調査：被災地域における人の集団を対象とした疾病と原因物質などへの暴露の因果関係調査

3. 対策と予防（リスク削減、リスク管理）

公害対策では主として後処理技術（排煙脱硫法、活性汚泥法など）の開発と導入によって汚染物質の排出量が削減されてきたが、化学工場などや輸送中の事故の処理としては、放水、薬剤散布などに留まることが多い。人為的災害のリスクを減らす対策としては、事故発生の予防、事故による被災・被害の最小化が主に検討されてきており、次のような項目がある。

① 技術的対策 [9]
・設備の設置場所（隔離など）、機器の構造・操作の単純化、受動的・能動的な安全装置、換気、漏洩防止、警報など
・穏和なプロセスへの転換、危険・有害物質の使用削減・代替など
② 管理的対策（マニュアルの整備と徹底）[9]
・事故発生確率の高い設備の稼働開始・終了時あるいは異常時での対応手順、プラント

の保守プログラム、プロセスの危険性分析、人への暴露の削減、避難手順など
・ヒューマンエラーの最小化
・プロセス安全マネジメントシステムの構築と運用、ハザードアセスメントなどの実施
③ 人為的災害に関するデータベースの構築と活用 [10)]
・過去に発生した人為的災害に関して、事故の原因、状況などを解析し、再発防止の方針、方法などが記載されている資料（報告、論文など）の収集とデータベース化

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

公害防止に関しては、防止技術・装置などのコスト、エネルギー消費量などを低減する技術開発が民間主体で継続されている。一方、環境装置などのビジネスは縮小傾向が続いており、東南アジアなどへの輸出競争力の強化が技術面だけではなく政策的課題にもなっている。大気中で生成する光化学オキシダントや微小粒子状物質（PM2.5）の環境基準達成率は依然として低く、前駆物質（窒素酸化物、揮発性有機化合物など）の発生源インベントリ（排出箇所、排出量など）、大気中での生成機構とシミュレーションモデル、国境を越えた移流などを明らかにする総合的な研究の推進や中国、韓国などとの協力が求められている。なお、2013年10月に熊本市および水俣市で、「水銀に関する水俣条約」が全会一致で採択されており、今後、水銀の地球規模でのリスク管理のために発生源対策を含むさまざまな取り組みが求められている。

化学工場などでの災害に関しては、火災、爆発など高速の現象による物質、エネルギーの拡散移動、環境中における有害化学物質などの変換・反応、沈着などをシミュレーションするモデルについて基礎研究の充実と実用化の推進が重要である。化学工場などで火災、爆発、漏洩、流出などの事故が起こった場合、消防法、高圧ガス保安法、毒物・劇物取締法、労働安全衛生法、大気汚染防止法、水質汚濁防止法などの法律にかかわる措置が必要であり、届出先は多くの行政機関にまたがっている。このため、個々の省庁に人為的災害のデータ、データベースが分散しており、これらを統合して、災害発生時に容易にアクセスして必要な情報を取得・利用できるデータシステムの構築が求められている。化学物質の有害性などについても同様であり、省庁横断的な情報基盤の整備と運用が重要である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国では、化学工場などの災害による人的損失は減少しているが物的損害は拡大する傾向が指摘されている。その理由として、プラントなどの運転・制御の自動化が進み、作業者の安全・健康上のリスクが減る一方で、危険性を感知して問題に対処する能力のある熟練作業者の減少があげられている [9)]。日本では2011年からの4年間に火災・爆発と死亡を伴う大きな事故が5件（シリコン、アクリル酸、塩化ビニルモノマー、レゾルシンの製造施設、マグネシウムなど金属加工施設）も発生しており、「人材不足と急激な増産が事故増加の背景にある。生産工程の自動化が進んでも、機材の調整などはまだ人手によるところが多い」との指摘がある [11)]。長距離輸送の高速バス、トラックでも事故が増加しており、人為的災害のリスク増加の対応には人文・社会科学の観点からの考察も求められている。

先進的材料として期待されているカーボンナノチューブ、フラーレン、酸化チタンなどのナノマテリアルの研究開発が進み、量産化の段階に入ってきた材料が出てくるに伴って、製造・取扱い作業現場でのリスク評価（ナノマテリアルの濃度計測、暴露量、有害性など）から製品の利用、廃棄の過程も含めたライフサイクルにおける安全性（リスク）が活発に検討されている。今後、ナノマテリアルの製造、輸送時に起こりうる事故によって発生が予想される事象、リスク評価、さらに災害の予防、リスク管理に関する基盤的研究の展開が重要である。

### （６）キーワード

人為的災害、安全、環境リスク、分析測定技術、環境動態モデル、データベース（有害性、災害事例）、リスク評価、リスク管理

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・リスク評価に必要な有害物質の分析測定技術、環境動態モデルなどの研究は欧米と同等のレベルになってきている。<br>・有害性のリスク研究は欧米とほぼ同水準になっているが、フィジカルリスクについてはやや劣っている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・有害物質などの分析測定技術は高いレベルを維持しており、国際標準化活動も活発になってきている。<br>・有害性、毒性のデータ取得、予測については国際機関などのプロジェクトへの参加などによってレベルが上がっている。<br>・有害性、人為的災害の事象、原因などの情報、データベースを統合化し、アクセスしやすいシステムの構築・運用が求められている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・有害物質の処理装置などの省エネ・省コスト化が進められているが、環境装置関連のビジネスは順調とはいえない状況にある。<br>・工場などでの災害が減少していない状況であり、人材の確保、育成が求められている。<br>・災害のリスク評価、リスク管理関連のビジネス化の兆しはみられている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・分析測定技術は日本と同等レベルであるが、リスクの評価、対策についてはシミュレーションモデル、有害性のデータベースをはじめとして、ほぼすべての項目で高い研究水準を保っている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・現実のニーズを把握し、それに対応した技術、手法、データベースの開発が継続している。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・プロセスの安全性を包括的に評価し、管理する手法を開発し、実際の事業所などに適用していくビジネスモデルができているが、市場規模は大きくはない。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・分析測定技術は各国のポテンシャルで、モデル、データベースなどについてはEUとして開発を推進して、高い水準を維持している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・分析計測技術では国際標準化、認証制度などによって市場における優位性を保っている。<br>・環境マネジメント、リスクマネジメントなどについても国際標準化を主導している。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・有害性に関するデータベース、システムを構築し、REACH（Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals）などを実施して新たなビジネスとしている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・環境研究への投資が増加しており、分析測定技術では一部の大学、研究機関の研究水準は欧米、日本並みになっている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・PM2.5などによる大気汚染、産業排水による深刻な水質汚濁などを背景に、有害物質の処理技術、クリーナープロセスの開発、導入が活発になっている。リスク評価関連の国際学会開催などに熱心であり、国内での研究者数も増加しており、国際標準化にも積極的である。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・環境装置関連では東南アジアなどで強い競争力をもっている。<br>・中国版REACHを開始しているが、人為的災害に関するリスク評価、管理については特筆すべきものは見当たらない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・欧米、日本と比較するとややレベルは劣るが、技術の実用化、制度・システムなどに関する国際標準の導入に積極的である。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・大規模な人為的災害が頻発しており、今後、安全の確保に向けた制度設計、研究開発が活発になると予想される。 |
| | 産業化 | △ | → | ・東南アジア地域での環境装置などのビジネスが伸びている。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど)、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 畑村創造工学研究所. 失敗知識データベース.
小林光夫、田村昌三、イタリア・セベソの化学工場での爆発
http://www.sozogaku.com/fkd/hf/HC0300002.pdf
http://www.sozogaku.com/fkd/cf/CC0300002.html
2) 郡山一明、化学災害の健康危機管理、J.Natl.Inst.Public Health, 52 (2), 123、2003.
3) 国立医薬品食品衛生研究所. 安全情報部. 化学物質が関係する主な事故事例について : 国内外の主な事故事例
http://www.nihs.go.jp/hse/c-hazard/jirei/jirei.pdf
4) 日本原子力研究開発機構
http://eventinfo.jaea.go.jp/chem/search.php
5) 長岡技術科学大学. 安全安心社会研究センター.
三上喜貴 . 道路を走る危険物～タンクローリー事故. 「安全と健康」誌、(2009) .
http://safety.nagaokaut.ac.jp/~safety/?page_id=405
6) 日本学術会議. 日本の展望委員会. 安全とリスク分科会. 提言 リスクに対応できる社会を目指して、2010.
http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-tsoukai-10.pdf
7) (一社)日本化学工業会. ケミカルリスクフォーラム
http://chemrisk.org/
8) 製品評価技術基盤機構. 化学物質総合情報提供システム（CHRIP）.
http://www.safe.nite.go.jp/japan/db.html
国立環境研究所. 化学物質データベース（WebKis-Plus）.
http://w-chemdb.nies.go.jp/
9) カーク・オスマー 化学技術・環境ハンドブックII、第60章、安全、日本化学会監訳、丸善(2009).
10) 厚生労働省. 化学物質による災害発生事例について.
http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei10/
労務安全情報センター. 安全衛生と災害事例.
http://labor.tank.jp/r_saigai/
(公財)日本中毒情報センター.
http://www.j-poison-ic.or.jp/homepage.nsf
11) (株)東洋経済新聞社. 東洋経済オンライン. 工場異変～日本の製造業は大丈夫か～安全・品質・モラルが問われる. 2014.
http://toyokeizai.net/articles/print/32488

### ３．４．４．３　災害のリスク（人間への被害、環境への被害）の予防対策

#### （１）研究開発領域名

災害のリスク（人間への被害、環境への被害）の予防対策

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

自然災害や人為的災害で失われるものは、生命や財産といった直接的なもののほか、家族・知人との縁絆や精神衛生、培われた風土、土地・景観、食糧生産基盤、築き上げた社会インフラ、清浄な空気や水、固有の生物・生態系など幅広い。災害が発生する場所や時期は、その対策準備に要する時間と労力の規模に比べると不特定で非定常である。災害リスクの予防対策は、①災害予測とリスク評価、②被害の未然防止技術、③リスク情報の共有、④各国における災害管理制度の整備と推進、⑤保険などを利用したリスク移転などであり、国際的な協力のもと、災害対策と環境保全が経済の健全な発展との調和に不可欠であることの科学的根拠を具体的に示していく必要がある。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

環境基本法のもととなる公害対策基本法や自然環境保全法では、産業構造の変化と大規模化に伴う公害問題の発生や国土の開発に伴う自然環境の消失を防ぎ、さらなる被害の未然防止や保護を目的にしてきた。これらの点は環境基本法でも継承されており、環境基本計画においてさまざまな対策が行われている。しかし、災害により発生する突発的な環境汚染や環境破壊に対しては、経済の健全な発展との調和どころか、人の生命や健康、自然環境そのものまでもが大きく損なわれてしまうという脆弱性が存在している。

災害には、地震・津波、台風・豪雨、干ばつ・寒波などの自然災害と、産業事故や輸送事故などの人為的災害がある。これらの災害によって失われるものは、生命や財産といった直接的なもののほか、家族・知人との縁絆や精神衛生、培われた風土、土地・景観、食糧生産基盤、築き上げた社会インフラ、清浄な空気や水、固有の生物・生態系など幅広い。また、災害が発生する場所や時期は、直前にある程度の予想ができるものもあるが、その対策準備に要する時間と労力の規模に比べると不特定で非定常なものである。英国のリスク評価会社Maplecroft社が発表したNatural Hazards Risk Atlas 2014[1)]によれば、地震や台風などの自然災害による経済リスクは、世界197か国の中で日本がもっとも高く、次いで米国、台湾、中国、インドまでが「extreme」に、メキシコ、フィリピン、イタリア、オーストラリアが「high」にランクされていて、自然災害の発生が比較的少ない英国は16位にランクされている。また、産業災害については、イタリア・セベソの農薬工場におけるダイオキシン類の飛散事故やインド・ボパールの化学工場における有害ガスの漏出事故があまりに有名である。

災害リスクの予防対策は、①災害予測とリスク評価、②被害の未然防止技術、③リスク情報の共有、④各国における災害管理制度の整備と推進、⑤保険などを利用したリスク移転などに分類できる。過去における災害の発生状況が異なるため、対策の進捗具合は地域によっても大きく異なる。日本は、干ばつや寒波による災害は他の国に比べて比較的少ないものの、その他の自然災害や人為的災害については甚大な被害の経験を有する。

災害予測とリスク評価については、数ある災害に対して予測シミュレーションの高精度化やそのためのモニタリング体制の整備が求められている。特に、それぞれの場所や時期、規模などで過去に例のない「想定外」の甚大災害をいかに精度よく予測できるかが災害予防における最大の関心事になっている。災害別には、台風や豪雨については、地球観測や地球シミュレーションの技術が発達してきており、数日前にはある程度の予測が可能になってきており、警報発令などの措置がきめ細かく行われるようになってきている。地震や津波に関しては、数十年内規模での予測精度に留まっており、社会経済的な時間の長さと比べて、効果的な対応がまだまだ難しい状況にある。化学工場での人為的災害についても、リスクアセスメントツールが開発されている。しかし、これらはいずれもハザードの予測であり、人や環境への被害の予測には至っていない。

被害の未然防止技術については、これまで築いてきたインフラを災害から守るための技術が各分野で発達してきており、水道施設や下水道施設をはじめとする環境保全インフラについても、当該インフラの機能停止やそれによる二次的環境災害の発生について調査研究が行われている[2)]。

リスク情報の共有については、災害予防のもっとも基本的な対策として、さまざまな取り組みがある。過去に起こった自然災害や人為的災害を収集・整理し、その原因を分析して教訓事例としたデータベースや、台風や竜巻などの発生状況をリアルタイムで情報発信するシステムが運用されており、津波などでは観測情報を瞬時に通達する国際協力体制も整備されている。リスク情報を共有することにより、災害発生時の心構えや緊急避難が可能になり、人への影響を軽減できる可能性がある。

災害管理制度の整備と推進については、国連を中心にした動きとともに、各国が法整備や基本計画を策定して取り組んでいる。1994年の国連防災世界会議では「より安全な世界に向けての横浜戦略：防災のためのガイドラインー自然災害への予防、備え、軽減ーとその行動計画」（「横浜戦略」）が採択され、災害リスクや災害による被害の軽減に関する画期的な手引きとなったが、直後の1995年に阪神淡路大震災を経験し、災害に対するガバナンスやリスクの特定、知識管理と教育、潜在的なリスク要因の軽減、効果的な応急・復興のための備えなどがさらなる課題として浮かび上がった。このため、2005年の同会議では「行動枠組2005–2015（兵庫行動枠組）」が採択され、災害によるコミュニティ・国の人命および社会的・経済的・環境的資産の損失を大幅に軽減することが期待されている。そして、2011年の東日本大震災を経て、2015年には仙台にて同会議が開催され、「仙台防災枠組2015-2030」が採択された。同会議の開催国である日本でも、2011年の東日本大震災の経験も含め、国土強靭化基本法（2013年）および同計画（2014年）を策定し、回避すべき起きてはならない最悪の事態のうち重点化すべき15のプログラムを選定して重点的な取り組みを始めている。環境分野では、自然生態系を積極的に活用した防災・減災対策や、災害廃棄物の迅速かつ適正な処理システムや汚水の適正な処理体制の構築、災害発生時における環境汚染および国民の健康被害を防止するための有害物質の貯蔵状況などに関する情報共有や有害物質排出・流出時における監視・拡散防止などがあげられている。また、内閣府では「災害対策標準化検討会議」が2014年3月に報告書をまとめている。海外においても、米国では、あらゆる災害・危機に対する国家レベルでの一元的な災害・危機対応システムであるIncident Command System（ICS）や

米国危機管理体制 National Incident Management System（NIMS）が確立されており、巨大災害発生時には大統領が災害宣言（Declaration of Disaster）を発令し、連邦緊急事態管理庁（FEMA）が災害・危機対応業務を直接統制する仕組みもある。欧州では、甚大な健康影響と環境被害をもたらしたセベソ事故の教訓に基づき、セベソ指令I, II, IIIにより、危険物質を伴う大規模災害を予防し、災害が発生した際の人間や環境への危害を最小限にすることを目的とした予防的管理が行われている。

保険などを利用したリスク移転については、災害発生時の復旧資金を確保したり、資金調達の流動性を高めるためのものである。干ばつや洪水などの気候変動により農業や観光業が被害を受けた際に保険金が支払われ、従事者の生活や活動の支援に充てられる。また、環境汚染リスクの高い産業に対し、突発事故により発生する人身被害や財産損失の生命救急や財産保護、汚染の処理や拡散防止に必要な費用として保険加入を義務付けるものもある。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

災害リスクに関する研究開発推進上のもっとも大きな課題は、技術的にはリスク評価の精緻化とインフラの老朽化の問題であり、政策的には被害対象者と為政者とのリスクコミュニケーションの問題である。突発的に発生する災害について、被害の発生場所と発生時間を予測することは極めて難しい。このため、遍くリスク概念の導入が必要と考えられるが、経済成長を伴わない形でのインフラの再整備や災害予防対策については社会的な合意形成が難しく、まして、災害対策と環境保全を秤にかけることにもなりかねない。東日本大震災の教訓を風化させないうちに、かつて開発と環境がそうであったように、災害対策と環境保全が経済の健全な発展との調和に不可欠であることの科学的根拠を具体的に示していく必要がある。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

経済発展を続けるアジア諸国や経済再生を目指す日本で災害が頻発していることから、当該国にとっても、それを支援する欧米諸国にとっても、災害予防を組み込んだ新しい経済モデルの実現がひとつの鍵になる。高度化するICTの支援に基づく数値シミュレーションやリアルタイム観測技術は有効な武器になる。

### （６）キーワード

東日本大震災、経済発展との調和、インフラ、過去の教訓、リスク評価、リスク情報、災害管理制度、災害保険

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・2013年12月11日施行の「国土強靱化基本法」では、「災害に対する脆弱性を評価し、優先順位を定め、事前に的確な施策を実施して大規模自然災害などに強い国土および地域を作り、自らの生命と生活を守るべく地域住民の力を向上させることが必要である。」として、「国土強靱化基本計画」を2014年6月3日閣議決定し、環境分野を含む8つの「事前に備えるべき目標」と45の「起きてはならない最悪の事態」を設定して計画を推進している [3]。<br>・環境省は2011年度に、災害事前・事後の迅速な資金確保を可能とする対策として、気候変動への適応策としての保険などリスクファイナンス手法の調査を行い、国際環境協力の可能性を検討した [4]。<br>・国連防災世界会議を開催し、「横浜戦略（1994）」や「兵庫行動枠組（2005–2015）」「仙台防災枠組（2015-2030）」を採択して、国際協調の下での災害リスクの軽減を目指した戦略的・体系的アプローチを推進している [5]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・2014年6月24日閣議決定の「科学技術イノベーション総合戦略2014」では、復興再生を加速化するため、①住民の健康を災害から守り、子どもや高齢者が元気な社会の実現、②災害にも強いエネルギーシステムの構築、③地域産業における新ビジネスモデルの展開、④災害にも強い次世代インフラの構築、⑤放射性物質による影響の軽減・解消をあげて取り組んでいる [6]。<br>・2014年6月24日閣議決定の「日本再興戦略 改訂2014」では、災害対応ロボットをはじめとしたさまざまな分野のロボットなど最先端技術の発信や、自社系列全体の事業継続計画（系列BCP（Business Continuity Plan））に基づく製油所からSSまでの一貫した耐震・液状化対策や物流円滑化などの災害対応能力の強化、電気・ガスの自然災害に対応した復旧迅速化対策を推進することとしている [7]。<br>・JSTでは、災害や事故などの失敗を分析した「失敗知識データベース」と「失敗まんだら」を作成し、その原因と影響を整理して公表した。2011年4月より畑村創造工学研究所HPから公開されている [8]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画（第四次計画）」では、安全性、安定供給、経済効率性、環境への適合がエネルギー政策の重要な視点であり、バランスのとれた低廉で安定的な電源構成や、省エネルギー性や再生可能エネルギーとの親和性、電力需給ピークの緩和、災害に対する強靭性などを有するコージェネレーションの家庭用途を含めた導入促進を図ることとしている [9]。<br>・経済産業省は2010年度に「効果的な公害防止への取り組み事例集」をまとめ、「平常時」と「異常発生時」における環境管理への取り組みを区別して整理・公表した [10]。<br>・「台風リアルタイム・ウォッチャー」や「世界の大気汚染：リアルタイム気質指数ビジュアルマップ」、「高解像度降水ナウキャスト」、「雷ナウキャスト」および「竜巻発生確度ナウキャスト」などリアルタイムの災害情報が官民から発信されている [11]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・あらゆる災害・危機に対する国家レベルでの一元的な災害・危機対応システム（ICS）や危機管理体制（NIMS）が確立されている。巨大災害発生時には大統領が災害宣言を発令し、連邦緊急事態管理庁（FEMA）が災害・危機対応業務を直接統制する仕組みもある。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・2014年7月に米国商務省の国立標準技術研究所（NIST）は、災害の影響を軽減し被災後の早期回復を可能にするため、地域のCommunity Resilience Center of Excellenceを設置し、建物や通信や電力などのインフラシステムのツール開発を発表した [12]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・2008年6月に米国保健福祉省（UNHHS）の災害情報管理研究センター（DIMRC）は、Enviro-Health LinksのWebサイトを開設し、自然災害や人災からの復旧情報、州・市当局への手引きや州の防災対策室へのリンク、緊急時対応要員への情報、環境浄化作業員や有害化学物質取扱作業員への指針などの情報を提供している [13]。<br>・環境保護庁（EPA）および海洋大気庁（NOAA）では、化学物質の放出や火災・爆発が周辺地域に与える潜在的な危険性を予測し、化学災害特有の災害時における危機管理のためのコンピュータ支援情報を提供するCAMEO（Computer-Aided Management of Emergency Operations）システムを開発し公開している [14]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・甚大な健康影響と環境被害をもたらしたセベソ事故の教訓に基づき、セベソ指令I, Ⅱ, Ⅲにより、危険物質を伴う大規模災害を予防し、災害が発生した際の人間や環境への危害を最小限にすることを目的した予防的管理が行われている [15]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・ECの共同研究所（JRC）では、「セベソⅡ指令」で規定された事故報告をECへ提出するための公式リポジトリEMARS（Major Accident Reporting System）を運営し1982年から収集した700以上の災害や事故の事例の原因や環境影響などを整理している [16]。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・欧州安全衛生庁（EU-OSHA）では、オンライン対話方式の簡潔なリスクアセスメントツールOiRA（Online interactive Risk Assessment）を開発・公表し、小零細企業における安全衛生管理の支援を行っている [17]。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・中国の国家災害防止・軽減科学技術発展『12・5』特定計画では、重大自然災害に関する基礎研究や予測・予報およびモニタリングと早期警報技術、被災状況と総合リスク評価技術システム、緊急救助と意思決定・指揮のコア技術、災害後の回復再建技術、予防と生態系修復技術、災害防止・軽減の新素材、新技術、新装置の研究、総合災害防止・軽減科学技術基盤の建設、重点地域における総合災害防止・軽減技術の統合・実証などを位置付けている [18]。<br>・2014年6月9日に北京で開催された「第2回災害リスク総合研究国際会議」では、「中国政府は災害防止・軽減に向けた取り組みや科学技術の応用による防災を重要視する。中国科学技術協会は災害リスク総合研究計画（IRDR）を後押し、災害発生のメカニズムを探索し、災害救助システムを構築する」ことが表明された [19]。<br>・中国民政部は2014年1月4日に有害物質を含む濃霧などの深刻な大気汚染を「自然災害」と認定した [20]。<br>・中国気象局の研究者は、大気汚染防止行動計画の実行に向けて人工的な雨や風などはまだ研究・試験の初期段階と発表している [21]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・中国環境保護部は、第12次5カ年計画（12・5計画）において「2015年までに化学品の環境リスク管理制度体系をほぼ確立し、重点予防抑制する産業や企業や化学品を指定して、化学品による環境汚染と突発的環境汚染事故が頻発する状態を有効に抑制する。」とし、累積的な環境リスク系25種類と突発的環境汚染事故頻発系15種類に区別した重点予防対策を行っている [22]。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・中国各地において、緊急地震速報システムや津波予警報システム、台風早期警報システムが整備・導入されている [23]。<br>・2013年1月に中国環境保護部と保健監督委員会は「環境汚染強制責任保険モデル事業の展開に関する指導意見」を公表し、特定の業種に対して「環境汚染強制責任保険」の加入を義務付けた [24]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・韓国第3次科学技術基本計画では、5大推進分野／20推進課題／30重点国家戦略技術の中で、自然災害や社会的災害への予防・対応を重要課題に位置付けて推進している。韓国の産学官の専門家による自己評価では、韓国は世界トップの技術をほとんど保有できておらず、災害・安全分野でも対象技術がないと評価している [25]。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・韓国の大学教授によれば、日本のJST-RISTEXなどに比べ、韓国では、災難・災害・事故に備えた科学技術研究がほとんどない状況と評価している [26]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 産業化 | △ | → | ・国家戦略技術分野において科学技術とICTを接続して既存産業に活力を呼び入れるため全省庁が協力して行う研究開発プロジェクトの主要課題として、センサネットワークによるインフラの事故・災害警報および社会的弱者の保護（GPS、センサ、アプリ）の推進があげられている [25]。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Maplecroft. Natural Hazards Risk Atlas 2014.
http://maplecroft.com/portfolio/new-analysis/2014/02/19/natural-hazards-risk-atlas-2014/
2) 土木学会. 平成17年度土木学会重要課題研究報告書　環境と防災連携型の技術と制度. 2006.
http://committees.jsce.or.jp/s_research/system/files/H17j_06.pdf
3) 内閣官房. 国土強靭化. http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/
4) 環境省. 報告書「環境リスクを移転する仕組みに関する基礎的情報調査」. 2012.
http://pub.iges.or.jp/modules/envirolib/upload/3825/attach/CAI_QS_climate_adaptation_and_risk_finance.pdf
5) 国連災害リスク軽減事務局（UNISDR）兵庫事務所
http://www.unisdr.org/kobe
6) 内閣府. 科学技術イノベーション総合戦略2014.
http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/
7) 首相官邸. 成長戦略で、明るい日本に！.
http://www.kantei.go.jp/jp/headline/seicho_senryaku2013.html
8) 畑村創造工学研究所. 失敗知識データベース.
http://www.sozogaku.com/hatamura/index.php
9) 経済産業省. エネルギー基本計画について.
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/
10) 経済産業省. 効果的な公害防止への取り組み事例集. 2010.
http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100630d04j.pdf
11) 国立情報学研究所. 台風リアルタイム・ウォッチャー.
http://typhoon.mapping.jp/
Air Quality Index China (AQICN). 世界の大気汚染：リアルタイム気質指数ビジュアルマップ.
http://aqicn.org/map/world/jp/
気象庁. 高解像度降水ナウキャスト.

http://www.jma.go.jp/jp/highresorad/?areaCode=205
気象庁. レーダー・ナウキャスト.
http://www.jma.go.jp/jp/radnowc/

12) 米国商務省国立標準技術研究所（NIST）. NIST Tech Beat. NIST Announces Competition for Community Resilience Center of Excellence. 2014.
http://www.nist.gov/el/coe-070914.cfm

13) USHHS Disaster Information Management Research Center (DIMRC). Disaster Recovery and Environmental Health.
http://sis.nlm.nih.gov/enviro/disasterrecovery.html

14) USEPA. CAMEO. http://www2.epa.gov/cameo

15) EC　Chemical Accidents (Seveso I, II and III) - Prevention, Preparedness and Response
http://ec.europa.eu/environment/seveso/index.htm

16) EC-JRC. EMARS. https://emars.jrc.ec.europa.eu/?id=4

17) EU-OSHA. OiRA. https://osha.europa.eu/en/topics/oira/index_html

18) JST SciencePortal China. 国家災害防止・軽減科学技術発展『12・5』特定計画. 2012.
http://www.spc.jst.go.jp/policy/science_policy/125plans/125field_09.html

19) JST CRDSデイリーウォッチャー. 第2回災害リスク総合研究国際会議が北京で開催. 2014.
http://crds.jst.go.jp/dw/20140714/201407142414/

20) J-CASTニュース. 深刻大気汚染を「自然災害」と認定. 2014.
http://www.j-cast.com/2014/01/08193693.html?p=all

21) JST SciencePortal China. 人工的な煙霧除去、現在はまだ研究段階. 2014.
http://www.spc.jst.go.jp/news/140102/topic_1_04.html

22) 日中韓の化学物質管理政策に関するセミナー. 講演2「中国における化学物質管理政策の最新動向」. 2013.
http://chemical-net.info/pdf/D3-2-China-JingYE-JP.pdf

23) JST SciencePortal China. 雲南盈江地震、揺れ到達の12秒前に速報に成功. 2014.
http://www.spc.jst.go.jp/news/140601/topic_1_02.html
JST SciencePortal China. 中国津波予警報システム　地震発生15分以内に自動警報. 2013.
http://www.spc.jst.go.jp/news/130102/topic_3_04.html
JST SciencePortal China. 台風の進路予報が世界最先端のレベルに. 2013.
http://www.spc.jst.go.jp/news/131201/topic_5_03.html

24) 王長君. 多発する環境汚染事故　特定業種に保険加入義務. NIKKEI ECOLOGY 2013.7 p94
http://www.keieiken.co.jp/pub/articles/2013/pdf/2013-07nk_eco.pdf

25) JST CRDS. 科学技術・イノベーション動向報告 韓国編 ～2013 年度版～. 2014（Rev.3）.
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/OR/CRDS-FY2013-OR-03.pdf

26) 中央日報. 【中央時評】日本は災難・災害に備えて研究しているが、韓国は･･･. 2014.
http://japanese.joins.com/article/645/185645.html

### ３．４．４．４　災害発生直後の環境情報観測・把握手法とリスク軽減手法

#### （１）研究開発領域名

災害発生直後の環境情報観測・把握手法とリスク軽減手法

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

災害発生直後の環境情報観測という一つの研究開発領域ははっきりとは形成されていないように思われるが、さまざまな関連する研究開発は行われている。災害には多様な規模や態様がある。東日本大震災のような大規模な自然災害から、工場事故や漏出事故など規模、原因、観測や発生するリスクとその対策はさまざまに異なる。それぞれの事例に対応する災害発生直後の対応のなかには、国土防災に近い視点が求められるものから、事故現場での緊急対応の視点までさまざまな対応が含まれることになる。

本稿では、災害発生に伴う、主に有害物質や化学物質の観測・把握手法とリスク軽減に関連する課題について述べる。環境情報観測については、土砂災害、洪水災害あるいは地震、津波あるいは事故など災害の物理現象的側面に対する観測や把握も重要であるが、これらは、より防災の視点で整理されると考え、ここでは有害化学物質などによるリスク要因の環境情報観測について記述する。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

有害物質や化学物質に関する環境情報観測とリスク軽減という課題を考えると、観測や把握を求められる目的は、それぞれの地点に所在する住民あるいは当事者の安全を担保するための観測、把握とリスク軽減策ということになろう。現実には、巨大災害であるほど、このような観測、把握やリスク軽減をはかるための資源が損傷され、観測にも軽減策にも制約が発生して異なる手法が必要になるかもしれない。しかし、個々の地点と時点で求められる安全確保の課題自体が大きく異なることはないのではないかと思われる。すなわち、ある地点と時点においてリスク軽減の基礎となる環境情報観測、把握に関する研究開発領域が本領域と考えると、およそ以下の3つの研究開発が関連すると思われる。

1. 化学テロ対策としての環境情報観測、把握技術。いわゆる法科学の一分野といえる。
2. 地震などの自然災害から大小さまざまな工場や現場での事故、漏えいなどへの対処として実施された環境調査などの検討。環境部局による調査研究から産業における安全マネジメントの一環、あるいはその事故対策の取り組みといえる。
3. モバイル型分析機器開発など、技術的な観点からの取り組み。分析化学的あるいは技術開発的な分野。

このうち、1. は多くは治安関連部局が中心となって、化学テロ対策などとして取り組まれてきたものである [1)]。対象となる化学テロ剤などに対して先端的、精力的な開発が行われている。一方、本領域のより一般的な環境情報という視点からは、この種の研究が扱う物質は通常の産業や一般環境で広く扱われているとは限らない。また、技術的には致死的な被害を避けるために十分な程度の感度をごく短期間に達成することが主課題であり、この点に特化した迅速あるいは高感度の技術が研究されている。このことは、おそらく技術および目的において災害時の環境情報観測一般に共通の一面と、民生用の

より広範な化学物質のリスク軽減にかかわる2. とはいくらかずれがある側面とが、ともにあると考えられる。

2. はより民生的な事故の観測や対策であり、産業界自身の安全管理部局とともに、消防部局や環境部局が中心となって実施してきており、さまざまな災害や事故対応の調査や対策に関する報告例がある[2-5]。対象となる化学物質は1. より広範となるため、物質や毒性のスペクトルが大きくなり、それに対応する観測とリスク軽減策が求められることがこの開発の一つの課題となる。一方、安全を担保すべきリスクレベルは1. と比較して相対的に低く指向されることが多いと考えられ、例えば一般環境の規制基準のような低い濃度まで観測可能な高感度技術が求められる場合があり得る。ただし、化学テロ剤のような極端な強毒性物質でなければ、現実に要求される感度は必ずしも1. の課題ほど高くないかもしれない。また1. の課題では、例えば数分というような時間内での検知がしばしば求められるが、2. ではもう少し長い、例えば数時間という程度でも十分な場合もあろう。このような違いはあるが、両者にはある程度類似の技術的課題もあるように思われる。

3. は一例としてモバイル型あるいは可搬型、簡易型などさまざまなタイプの分析機器、調査機材の技術開発が進められている[6-9]。これらの一部は1. 2. のような課題から通常の作業場の安全管理まで、共通の技術として応用されている。実験室における高速分析や、野外での試料サンプリング機器などの開発もある。これらの技術開発が指向する感度や試料適応の範囲はさまざまである。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

上記(3)で述べた研究開発は、いずれも広くは災害発生直後の環境情報観測・把握とリスク軽減手法にかかわると考えられる。技術的には一定の蓄積があり、現在も研究が進められている。ここで研究開発推進上の課題、ボトルネックはむしろその体系化と制度的課題にあるように思われる。

1. の課題は、各国とも治安関連当局やおそらく軍事関連活動の中で進められていると思われ、最新の技術と実績が豊富である。一方で、テロや軍事作戦に付随した場合以外には一般市民や民生的課題との接点は少ないとも思われる。ここでは、この種の法科学的、治安・軍事に係る知見と民生領域の技術の共有が主要な課題となろう。

2. の課題は、何らかの災害発生直後の環境情報把握として多くの実例がある。化学分析による観測から、大規模な事例ならば航空機などによる遠隔モニタリング、あるいはシミュレーションによる予測技術[10]などさまざまな検討が行われているが、多くは事例調査であり、将来の災害への対処としての体系化の視点が乏しいように感じられる。

3. の課題はより技術的なものであるが、モバイル型分析機器などには多くの製品がすでに市販されており[9, 11]、技術的には電源、可搬性、感度、試料への適用性など多くの課題が当然存在するが、この技術の応用、目標が必ずしも定まっていない印象がある。

このように、さまざまな研究開発が進められているが、上述のようにおそらくもっとも大きなボトルネックは、1., 2., 3. の各分野が横断的に連携して、あるいはシステムとして体系的に研究されていないことにあるように思われる。1. の課題は他の領域とやや孤立しており、3. では、新旧さまざまな分析法や調査手法が必ずしも整理されていない。

2. の課題の対処では、個々の場面で現れる多種多様な物質やリスク要因に対して、どのようなレベルまで観測を行い、どこまでのリスク軽減を図るべきか、社会的に十分合意のとれた情報取得の方法や管理水準がまとめられていない。今後の研究開発では、技術的な過去の蓄積を足場として、あるいは従来はやや分野の異なった研究開発をより体系的に、研究開発領域として発展的に進める先導が求められる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

制度面の取り組みとして注目される動向として、米国における緊急時対応の体系がある。米国は、9.11テロまた炭疽菌テロなどへの対応に端を発して、災害時を含み広く緊急時に事態に関連する行政当局が連携して対応にあたる体制を構築してきた[13)]。この中には、災害発生直後の行政部門の迅速な連携が目標とされ、例えば環境情報の観測とリスク低減の課題はこのような緊急時対応の中で位置づけられるよう設計されている。米国環境保護庁（EPA）では、例えば緊急時に対応するモバイルラボを複数所有し、それらが常時出動可能となる体制を整備している。これは、例えば近年のハリケーン・カトリーナへの対応などでも活用された[14)]。

米国の取り組みは注目されるが、各国とも何らかの緊急時対応の体制を有していると思われる。しかし、軍事作戦は別として、自然災害や民生的な事故に対して米国ほどに多部局が連携する体制があるようには思われない。日本国内でも例えば環境省の事例[15)]などがあるが、1., 2., 3. の各分野とも個々の部門がともすればやや独立して開発を進めているように思われ、米国の取り組みとは対照的なように思われる。米国のような制度的な構築は、可搬型装置などの産業化へは重要なインセンティブにもなっていると思われる。

### （６）キーワード

災害時、緊急時、観測、リスク管理、モバイル分析技術、迅速分析技術

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・各分野における個別の基礎研究が実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・各分野における個別の技術開発が実施されている。法科学的研究とともに化学工場事故や流出事故などの際の監視研究などが報告され、シミュレーションモデル導入や情報整備[10]も行われている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・機器や方法の製品開発が行われている[8]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・分析技術の開発、毒性情報の収集などとともに、それらを体系化する努力が進められている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・機器開発などの努力は継続して複数のメーカーや研究組織で継続されている。シミュレーションモデルなども開発。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・可搬型分析装置、モバイルラボなど実用的な環境情報の観測、把握の産業化が行われている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・各分野における個別の基礎研究が実施されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・化学工場事故時の調査などや管理施策の検討が行われている。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・機器や方法の製品開発が行われている。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・化学工場事故などにおいて実施された監視研究などの成果は多数報告されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・化学物質管理の施策が全般に開始された段階で、その中で災害時としての化学工場事故などに伴う管理も検討され始めている。 |
| | 産業化 | × | → | ・分析機器などの開発はあまり見受けられないように思われる。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | ・化学工場事故や流出事故などにおいて実施された監視研究などの成果は多数報告されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・家庭用品の重大事故事例があり、これを受けて事故時対応が化学物質管理施策の中で位置づけられつつある。しかし、中毒情報などの集積が不十分とも指摘されている[12]。 |
| | 産業化 | × | → | ・分析機器などの開発はあまり見受けられないように思われる。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）瀬戸康雄、他「生物化学テロ事件に対処する質量分析技術」J. Mass Spectrom. Soc. Japan (2008) 56, 91-115

2）森田昌敏、陶野郁雄（編）「兵庫県南部地震と環境」環境庁国立環境研究所、平成7年7月

3) 平成8年度科学技術振興調整費「ナホトカ号油流出事故による環境影響に関する緊急研究」成果報告書、科学技術庁研究開発局、平成9年10月
4) Hou, Y., Environ. Monit. Assess. (2012) 184, 4855-4859
5) Lee, M. and Jung, J.Y., Marine Poll. Bul. (2013) 339-344
6) 財団法人機械システム振興協会　委託先　日本分析機器工業会「モバイル型分析装置の現状と将来展望に関する調査研究報告書　要旨」平成15年3月。
http://www.jaima.or.jp/jp/publication/pdf/01.pdf
7) 平成9年度環境庁公害調査委託費による報告書「緊急時における化学物質分析調査マニュアル」財団法人日本食品分析センター、平成10年3月
8) 豊田岐聡、他「マルチターン飛行時間型質量分析計」J. Mass Spectrom. Soc. Japan (2012) 60, 87-102
9) インフィコン(株). ガスクロマトグラフ. ハプサイト（HAPSITE）ER.
http://www.inficon.jp/gc/hapsite.php
10) 経済産業省「CAMEO・MARPROT・ALOHA　日本語版」
http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/cwc/link.html
11) FEMA. FEMA 549, Hurricane Katrina in the Gulf Coast: Mitigation Assessment Team Report, Building Performance Observations, Recommendations, and Technical Guidance.
http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/4069
12) Kim, K.H., et al. Journal of the Korean Medical Association (2013) 56, 724-735
13) FEMA. National Response Framework (Second Edition), Department of Homeland Security, May 2013,
http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/32230?id=7371
14) FEMA. Hurricane Katrina in the Gulf Coast. 2006.
http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1520-20490-4067/549_cvr_toc.pdf
15) 環境省、自治体環境部局における化学物質に係る事故対応マニュアル策定の手引き、平成21年3月

### ３．４．４．５　災害廃棄物処理と利活用

#### （１）研究開発領域名

災害廃棄物処理と利活用

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

災害廃棄物処理と利活用に関する研究開発は、不定期ではあるが、必ず発生する地震や台風などの災害発生に伴う課題として、都市機能や社会機能の進展、複雑化とともに社会要請的課題として始まってきた研究開発領域である。日本では、1995年の阪神淡路大震災における災害廃棄物問題が大きな社会問題になったのをきっかけに、書誌学的要素を含めた取り組みがはじまり、2011年の東日本大震災で本格的な取り組みになりつつある。世界をみれば、21世紀に入ってからの災害頻発を受けて、この分野への取り組みが本格化しつつある。本領域の研究開発課題には、災害廃棄物発生の量的・質的把握とその予測、処理処分や再利用のための対策技術、災害廃棄物管理に関する政策学的、行動論的検討などがある。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

国立環境研究所が2012年4月に発出した「災害環境研究の俯瞰」[1)] のなかで、震災廃棄物の処理に関する研究課題として、震災対応ネットワークの活用による各種技術情報の作成･提供や災害廃棄物の発生原単位および量の推算を含めた各論的課題を掲げている。これらの各論的課題を含めて、災害廃棄物管理における研究開発領域は、より一般的には次のように整理できる。

1. 災害廃棄物発生と性状、その予測 [2)]

災害の種類と災害廃棄物特性、災害廃棄物の発生原単位および量の推算が、継続的な課題である。災害は、地震や津波、台風、洪水、火山噴火、火災などのさまざまな原因で生じ、過去10年間の世界をみても、多くの大災害により世界の社会インフラが破壊されてきた。2011年の東日本大震災以外にも、2004年のスマトラ島沖地震、2005年のハリケーン・カトリーナ、2008年の四川大地震、2011年のニュージーランドやトルコでの地震などである。災害の原因やその大きさ、地域社会の産業形態、建築物密度などにより、発生する災害廃棄物の種類や量は大きく変わるため、この災害廃棄物発生情報をより一般化することが求められている。

2. 災害廃棄物対応の技術とシステム [3-4)]

処理技術や利活用技術の開発から、その社会実現に向けた政策論的、計画論的研究が進められている。具体的には、災害廃棄物の現場分別や仮置き場における破砕選別技術の開発と評価、仮置き場での堆積廃棄物の火災予防・安全性評価に関する技術やシステムは、現場的な要請の多い課題である。有害物質関連の課題として、石綿含有廃棄物の適正管理、PCB含有災害廃棄物への対応、海水被り廃木材の塩素分の分析および燃焼試験などは、災害時に特に心配される課題である。水産廃棄物の処理方法や津波堆積物の性状調査と処理指針策定も、災害時には緊急性をもって対応が求められる。

3. 地域協力や国際協力 [5-8)]

日本の東日本大震災においても、災害廃棄物に重点をおいた国連環境計画（UNEP）

の調査団を受け入れたが、こうした国際協力は欠かせない。とりわけ、開発途上国や島嶼国においては、復旧や復興における地域協力や国際協力は、必要欠くべからざる要素でもある。災害廃棄物への対処も、地域協力や国際協力と切り離せない対応となる。そのため、国際機関におけるこの分野の基礎情報蓄積とともにガイダンス的取り組みも期待されているところである。

なお、放射能汚染廃棄物の管理問題については、環境区分においても汚染廃棄物対応に取り組まざるを得ない研究開発課題となっており、独立して把握していくことが適切であろう。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

国立環境研究所が、2013年3月にまとめた「東日本大震災後の災害環境研究の成果」[9]においても、上述の「災害環境研究の俯瞰」での内容の先進性と合理性を失っていないとして、災害廃棄物関係研究開発は、1. 処理処分・再生利用技術の開発・高度化・評価、2. 関連施設の長期的管理・解体など技術の確立、3. 測定分析・モニタリング技術の確立、4. フローストックの把握・管理システムの高度化、に一般化されている。こうした課題の検討に向けて、国立研究機関を中心とした政策研究的取り組みとともに、幅広い研究者の継続的取り組みが求められている。ただ、緊急対応的研究に重点が置かれがちであり、社会構造論的な研究や書誌学的研究などを、より基礎的な研究として継続的に推進する支援が求められている。

現時点においては、放射能汚染廃棄物の発生問題がより深刻であるといえ、放射性物質の物性や挙動、処理処分技術の開発、管理モニタリング手法の確立といった課題が目白押しである。加えて、こうした工学的課題とともに、放射性物質の環境挙動メカニズムの解明やリスクコミュニケーション・マネージメント手法の確立も重要な課題となっている。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

2014年3月には、環境省において「巨大災害発生時における災害廃棄物対策のグランドデザイン」[10]が取りまとめられたところである。その中では災害廃棄物処理システムや技術に関する課題として、次の課題があげられている。

1. 災害廃棄物の資源循環を促進し、焼却における残渣率を適正に管理するための分別・選別技術の開発
2. 海面最終処分場の活用促進に向けた課題の検討
3. 発災後、速やかに災害廃棄物の発生量を算定し、また処理の進捗に応じて要処理量を把握する一連の手法の開発
4. 災害廃棄物に対するトリアージ的対応手法の開発
5. 仮置場などの評価・選定手法、一次・二次仮置場の全体フロー設計基準の開発

このうち、トリアージ的対応とは、発災直後に生活環境などに著しい悪影響を与える可能性のある災害廃棄物や関連する課題を、事前に想定すると同時に、発災後速やかに優先順位をつけて取り組むための手法を開発することをいう。東日本大震災においても、

水産廃棄物や腐敗性廃棄物や堆肥などからの悪臭発生や衛生状態悪化、津波堆積物（ヘドロ状）や油汚染物による衛生問題などが発生し、その都度対応が行われてきた。それらの課題および対応を整理・検証し、リスク評価などを行い、対応すべき製品群と優先順位、対応・処理方法、必要な事前の備えなどを明らかにし、マニュアル化することが求められている。

## （６）キーワード

災害廃棄物、がれき、地震、津波、水害、事前計画、トリアージ的対応

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・国立環境研究所「災害環境研究の俯瞰」（2012年4月）、「東日本大震災後の災害環境研究の成果」（2013年3月）。 |
| | 応用研究・政策開発 | ◎ | ↗ | ・内閣府の巨大災害時の災害廃棄物予測、環境省「巨大災害発生時における災害廃棄物対策のグランドデザイン」（2014年3月）。 |
| 国際機関 | 基礎研究 | ○ | → | ・国連環境計画（UNEP）の東日本大震災報告。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・国連機関（国連環境計画（UNEP）や国連人道問題調整事務所（OCHA））での取り組みや蓄積に力が注がれている。<br>・アジア地域での展開。 |
| 米国 | 基礎研究 | △ | → | ・顕著な活動や成果は把握できていない。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・連邦緊急事態管理庁（FEMA）と環境保護庁（EPA）の取り組みが代表的。FEMAは、資格と効果的ながれき処理計画、緊急時の連邦政府管理を骨格としたガイドを準備。EPAは、事前計画と補助的活動、実行方法の３要素に分けた指針を策定。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ・四川大地震の記録に関する学術成果の発信がみられる。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・顕著な活動や成果は把握できていない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・政策研究への取り組みには資源投入されているが、基礎研究への展開には力点は置かれていない、もしくは不明。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・水害関連の政策研究への取り組みは進んでいる。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）国立環境研究所：災害環境研究の俯瞰（2012年4月）

http://www.nies.go.jp/shinsai/overview.html
2) 平山修久、大迫政浩：東日本大震災での災害廃棄物対応と今後の備え、環境技術、43[5]、258-263 (2014)
3) Asari, M., Sakai, S., Yoshioka, T., Tojo,Y., Tasaki, T., Takigami, H., Watanabe, K.: Strategy for separtion and treatment of disaster waste: a manual for earthquake and tsunami disaster waste management in Japan, Mater Cycles Waste Manag 15: 290-299 (2013)
4) 廃棄物資源循環学会：災害廃棄物分別・処理実務マニュアル、ぎょうせい (2012)
5) United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs(OCHA) Environmental Emergencies Section: Disaster Waste Management Guidelines. 2011. (https://docs.unocha.org/sites/dms/Documents/DWMG.pdf)
6) UNEP: Managing post-disaster debris: the Japan experience (2012) (http://www.unep.org/pdf/UNEP_Japan_post-tsunami_debris.pdf)
7) US FEMA: Public Assistance−Debris management guide (2007) (https://www.fema.gov/public-assistance-local-state-tribal-and-non-profit/debris-management-guide)
8) US EPA: Planning for Natural Disaster Debris (2008) (http://www2.epa.gov/large-scale-residential-demolition/disaster-debris-planning)
9) 国立環境研究所：東日本大震災後の災害環境研究の成果（2013年3月）
http://www.nies.go.jp/shinsai/outcome.html
10) 環境省巨大地震発生時における災害廃棄物対策検討委員会：巨大災害発生時における災害廃棄物対策のグランドデザインについて－中間とりまとめ、2014年3月
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17995

### ３．４．４．６　自然環境の回復過程の促進

#### （１）研究開発領域名

自然環境の回復過程の促進

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

放射能汚染からの自然環境の回復過程は長期にわたり複雑である。大雨時の山林からは膨大な量の放射能が濁りとともに海へ運ばれ[1)]、食物連鎖による沿岸生物への濃縮が今後も長期間続く。沿岸への放射能拡散抑止対策は重要で、効果の伴った安全宣言は地域経済の命綱である。既往技術と実施実績報告[2)]のある自然由来ナノサイズマテリアル利用も併せた技術開発は、それを可能にする。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

2011年3月の東日本大震災とともに生じた放射能汚染は自然環境に大きな影響を与えた。自然環境への影響は長期にわたるとともに複雑であり、その回復過程には未知の要素が大きく、自然が有する回復力をいかに人工的に支援するかが大きな課題である。その意味で、放射能汚染は災害からの自然環境回復の促進と評価に関するもっとも挑戦的な課題であるので、本課題に絞って記述する。

自然環境回復過程を福島第一原子力発電所事故からの回復の立場で評価すると「かなり厳しい」と評価できる。放射能汚染源で圧倒的な第一要因である広域な山林・田畑から沿岸までにおいて自然環境保全への回復努力は認めづらく、将来展望は極めて不透明である。

人と自然環境共存の立ち位置から眺めれば、放射能汚染の深刻な南東北から北関東は地域経済が自然環境に大きく影響される地区となる。健全な自然環境や生態系が人々の暮らしに及ぼす影響は、川を経て海へ運ばれる放射能の影響を受ける漁業と水産関連産業を大きく直撃している。放射能被害の健康面を含む実態解明（その有無に関わらず）が、風評被害沈静化を促す効果の大きさは見通しづらい。風評被害は経済活動や震災復興後の地域産業活性化ですでに実害となっている。大雨時に山林から河川経由で沿岸に運ばれる放射能は、80 mmから100 mmの降雨時の現地調査に基づく予測では、一度の降雨で10兆ベクレル（Bq）を超えるが、降下放射能全体からしてわずかな輸送量にすぎない。一度の大雨で陸から海へ運ばれる放射能輸送量は、福島第一原子力発電所の冷却水由来放射能と桁違いの大きさである。放射能沿岸拡散問題の放置は、自然環境と人々の暮らし双方に、福島第一原子力発電所事故からの復興を今に増して困難にするだろう。対策を技術面から推せば、日本が得意として来た幾分野かにまたがる技術の協調／協同が基礎になる。新たな技術には、米国が積極的に力を注いでいる環境修復へのナノサイズマテリアルの（現地適応型）実用化技術[2)]も含まれる。当該技術は資源循環型社会へと発展していく可能性もあり、国際的な技術開発の流れを「セシウム（Cs）」吸脱着からスタートできる。自然環境・生態系を、人との関わりや人との共存の立場に意義を見いだす世界的な考え方に照らしても、今回の放射能海洋拡散問題の帰着ポイントへ向けた日本の姿勢や対策への取り組み手法は極めて重い責務を持ち、世界中の科学者や海外政府からの評価を受けるだろう。実現可能な放射能対策技術に基づく放射能海洋拡散抑

止対策は早急に望まれる。

放射性セシウムの海洋拡散抑止は河口沖に設営する微細濁質抑留システムで大幅な減少が見込める。住宅地、里山地区における除染後の放射能リバウンド抑止へは、要所要所への微細濁質抑留濾過槽設置が有効で[3]、有力な放射能再汚染対策となるだろう。それらに関わる各領域研究の連結が必要になる。その中で、日本の得意とする研究開発領域・日本生まれの技術シーズには、

- 微細粒子沈殿効率を著しく改善する沈殿効率上昇技術（傾斜板）、海草類表面の特異的な微細濁質付着現象（広く確認されている）の技術化
- 高浸透性水による微細粒子界面脱吸着現象の加速（セシウム脱吸着など）技術[4]
- 森林、里山源流への間伐材チップ利用濁質抑留濾過槽のリン濃縮と濁質除去効果[5,6]とセシウム削減効果[2]
- 高浸透性水利用海砂除塩による植生可能砂転換技術[7]
- 好気性微生物と嫌気性微生物利用の生化学反応の沿岸生態系への応用技術[8]
- 貝殻や魚介類中への重金属、希少金属の高濃度集積[9]

の実績が報告されている。ヨーロッパ系研究からは、自然環境下の観測に基づく実フィールド中の濁質と水質間の相互作用、自然の位置づけを核とした環境修復対策例が報じられている。河川から海洋へと流出する濁質含有物質の沿岸域拡散に伴う環境負荷増大と地域沿岸生物生存リスクの関わり[10]が、沿岸生態系と人間生活に及ぼすリスク増大要因となる[11,12]。

一方で、淡水流入の閉鎖性海域の濁質流入負荷増大と流入淡水量増加が長期間減衰傾向だったマングローブ域を回復させた要因[13]であるという、河川の濁質由来物質輸送が場所によっては沿岸生態系に逆方向の働きをする内容の報告がある。両者は河口沖沿岸生態系の衰退と回復に河川由来濁質輸送量の関わりが大きい事を説明している。さらに、重金属含有量の大きな底質の浚渫（しゅんせつ：水底の土砂を掘削すること）が、沿岸で汚染物質の生物濃縮を加速させる報告[14]もある。沿岸河口近傍が沿岸生態系にとって重要な箇所であり、陸起原濁質の影響の強い区域であることを述べている。これらは、川と海の繋がりが沿岸生態系や人の生活に大きな影響を及ぼすことを繰り返し述べている。この報告では、自然環境と河川由来濁質の関係は重くとらえられており、福島第一原子力発電所事故後の川から海への濁質移動と放射能拡散対応の遅れが懸念される。底質間隙水中のイオン状態や物理化学的変化は、溶存酸素や酸化還元電位の変化に依存し、これらは底質表層底生生物の働きや有機物の関わりで決められることも示されているが[15]、陸域由来濁質の沿岸底質堆積後、溶存酸素供給や底質撹拌コントロールが、底質間隙中のイオン存在状態と溶出抑止策へ繋がる可能性を示唆している。これは、同時に天然存在ナノサイズマテリアル利用環境修復[16,17]への布石でもある。砂粒子の物理的破壊による安価なナノサイズマテリアル作成技術（Water hammer、Water jet利用）は、セシウム・金属イオン脱吸着特性評価と環境修復や資源利用への展開と素材生産に直結する。海草類のもつ代謝産物による生物凝集機能や、貝殻中の高濃度金属イオン集積は、河口域から沿岸の物理条件下で利用可能な環境修復技術と資源回収技術への展開可能性を示している。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

**【放射性セシウム含有微細粒子の「沈殿抑留（河口沖に大きな掘り込みを造る）」手法】**

- 森林や田畑表面と河川浮遊物中に含まれ、陸域降下放射能の多くを含む、微細～極微細粒子の「沿岸域沈殿抑留」手法への課題に対し、日本で発達し沈殿効率の画期的上昇をもたらした古典的手法（傾斜板など）の沿岸利用における効果の検証ともなる。
- 大雨時増水河川の濁質沿岸拡散は、容易に沈降する粒径粒子と、沈降せず遠方まで運ばれる微細濁質を分画して評価可能な、流れモデルおよび粒子移動モデル開発が必要になる。この開発のベースには日本で活発だった漂砂、浮遊砂研究や、世界中に存在する数多くの拡散モデルの寄与が大きいだろう。
- 「沈殿抑留」区域の波浪や波による沈殿効率低下／流出抑止策への検討には、間伐材魚礁などの投入効果検証なども必要となり、同時にこれはセシウムの魚介類への生体濃縮回避システムと、自立型沿岸漁業活性化技術に繋がっていく。
- 傾斜板付着海藻への微細濁質付着抑留効果の影響評価およびその回収方法も、セシウムなど濁質由来物質の沿岸物質収支･食物連鎖を介した放射能拡散評価に大切となる。傾斜板表面付着貝類の「貝殻」への金属イオン濃縮効果や、セシウム濃縮効果の検証も同様である。
- 「沈殿抑留」区域周辺には鉄鋼スラグなどを利用した盛土で漂砂堆積を抑止する必要もある。
- 河口域で抑留沈殿する微細濁質の底質環境中、好気から嫌気条件へ移行した後の底質間隙中に起こる放射性セシウムなどの脱吸着反応のメカニズム解明と支配要因の解明からコントロール手法の検討も忘れてならない。
- 沈降微細濁質の「浮泥」状態、「ヘドロ存在」状況などの確認、当該条件下での回収システム（ロボットなど）開発も重要になる。
- 山間や森林渓流などをポイントとして大雨時に発生する放射性セシウム含有微細濁質の抑留と流出抑止に効果の見い出せたチップ濾過槽による濁質（セシウム）削減効果[4, 5, 6]の検証と実務に向けた維持管理手引き作成も課題になる。

**【放射性セシウム含有微細粒子抑留後の「生態系の変化と放射能移動」への課題】**

- 微細濁質や海藻類有機物による底質無酸素化の進行と食物連鎖による抑留放射能の系外移動の評価；系外移動抑止対策へ向けた検討。
- 海藻付着濁質由来放射性セシウムの去就と食物連鎖による系外移動の評価。
- 「沈殿抑留」区域全体の物質フローに関与する生物と、物理力の影響評価など。

**【回収後の微細濁質処理の課題】**

- 沈殿微細濁質や海藻類と一緒に回収される底質＝海砂の洗浄と海砂中からのセシウム分画濃縮手法が有効かを検討する。
- セシウム含有底質回収後の海砂の物理的破壊（Water hammer、Water jetなど）によるナノサイズマテリアル化への検討は、洗浄時脱着セシウムなどの再吸着能へ及ぼす影響と濃縮に及ぼす影響の評価と一体で行う事で、ナノサイズマテリアルの環境修復などへの技術展開の見通しが可能になる。
- 貝類回収手法と貝殻処理の最適手法の検討は、「沈殿抑留」海域で可能な処理手法と、陸上移送後処理手法の総合的な効果の比較検討となる。

・セシウム分画濃縮後残留海砂処理は、海砂洗浄処理の一端である。これは植生利用を可能とする海砂改良（植生可能除塩）が従来不可能だったが、海岸林の消失に伴い要望の高いテーマで、沿岸開発に伴う技術移転の可能性に繋がるテーマとなる。
・いずれにしても、濃縮後放射性セシウム廃棄物の最終処理に向けた検討は必須である。

**【政策的課題】**

・森林や源流域渓流由来放射性セシウム局所的抑留捕捉システムに関しては、管轄する担当行政の調整が必要になるだろう。
・河口沖に設ける「沈殿抑留」区域設置への課題は大きい。現行法で河口付近を管轄する行政や漁業権設定は不明といった情報もある。台風などの波浪から底質の再懸濁／浮遊を抑止するため、水深10 m以上の深さの掘り込みが必要であるが、河口から沖1 km程度の範囲に、放射能拡散抑止「沈殿抑留」区域の設営や実務的研究には、各行政間の調整が必須である。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

魚介類流通は、基準値（放射能100 Bq/kg）に満たない魚介類で可能である。しかし、放射能汚染の現実は、放射能レベルの正しい健康リスク影響が分からない事もあり、リスク根拠の正当性以前の議論で、これが魚介類や生鮮食品流通の実態を支配しているように思える。消費者の見えない不安が消費地で当該地域からの生鮮食品購入意欲を後退させ、当該地域経済の回復を遅らせている。目に見える対策と、サイエンスとして成立する客観的評価の公表を伴った対策技術、「安全宣言」の国内と世界へ向けた積極的な発信効果への期待はあるが、そのための具体的な動きや効果が明快な対策は行われていない。

ここまでに記す事項は、河口から海へと運ばれた放射能を河口近くの大形凹みで抑留し、放射能の海洋拡散や、魚介類への移動を抑止する周辺情報である。

放射性セシウム海洋拡散抑止策実施に先立ち、実用化を目指した実証実験は重要である。具体的には河口沖に大きな掘り込みを造ることになる。これには、さまざまな分野の研究者・専門家の知恵の集積、日本発の幾つかの技術の重ね合わせが必要となる。一連の技術確立と実用化へ向けた進捗が、今後の生態修復技術を基盤として発展する可能性もあるだろう。

### （６）キーワード

広域拡散放射能、森林、河川、濁質、セシウム、河口沖、沿岸拡散、抑止対策、沈殿抑留

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・自然環境の回復過程評価は①ダメージ②メリット③難問の３方向に分かれる。①は多数の報告例がある。②は魚介類の水揚げ量・サイズだが報告例はみられない。回復過程評価の困難な③には復興の妨げとなっている③−1 原子力発電所事故関連評価、③−2 沿岸域と海砂の除塩があげられる。②と③とが関わるヘドロ関連課題は、嫌気条件下から好気条件下への変化における分解特性の基礎研究をあげる事ができる。一方、欧米と同じ「人へ関わる生態系」の観点からの自然環境や生態系に関わる研究は放射能関連の報告が多い。放射能リスクの明確な根拠や、環境負荷低減研究の進捗は報告されていない。[7, 8, 10, 18] |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・自然環境の回復過程の方向性を示す応用研究へのシーズは、除染関連研究例と沿岸域植生回復や除塩などの基礎研究に幾つか見いだせる。基礎研究で明らかにされている、山間地から流域と沿岸への放射能拡散の抑止対策や、除染地区空中線量リバウンド対策は、基礎研究をベースにフィージビリティステージへの格上げで解決できると考えられる。基礎研究として安価かつ入手容易な天然ナノ素材利用例に源流でのリン高濃度集積他が、海洋貝殻ではアルカリと土類金属（ストロンチウム）集積効果が確認されている。自然環境中でのほぼ無限のナノ素材と有機物の組み合わせによるナノサイズマテリアル利用技術の成熟は今後自然環境修復と密接に関わる中で産業化への可能性が示される。[1, 3-6, 9] |
| | 産業化 | × | ↘ | ・循環型社会の創出を目指す大きな方向性は見いだせず、個々の目指す方向へ産業化が展開している（弱点&強み）。古典的な自然環境の回復技術に関連する新技術の産業化は見いだせず。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・ハリケーンなど自然災害後に特化した自然環境の回復過程評価に関する基礎研究は見いだせなかったが、湿地環境保護と復元や、絶滅危惧種の保全に多くの経験則をもっている。さらに地球環境全体を見据えた環境修復や生態系保全を念頭においた基礎研究を、自然界にも存在するナノマテリアルを利用して本格的に始めている例を幾つか見いだせた。災害復旧や自然環境の修復のテーマでは括れない、次のステージを狙った基礎研究の活発な動きは、大学や研究所を巻き込み、効率的に進めている。環境や生態系保全は、人との関わり方を基準とし考えるスタイルが明確。[19, 20] |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・基礎研究と歩調を合わせたフィールドテストへ実験段階は進んでいる。ナノサイエンスの商業的応用はまだフィージビリティスタディ段階だが、干潟環境中へ持ち出した検証など実験フェーズへ進んでいる。ナノサイエンス研究と他の産業との連携分野での進捗状況詳細は不明。湿地、沿岸、森林など古典的テーマの中に進歩的な応用研究例を見いだすことができず。放射能関連の事故後の評価は人や家畜に関する確率論的報告は見いだせるが、それ以外は困難。[16, 17, 20] |
| | 産業化 | ○ | → | ・ナノマテリアルの産業化を目指した動きは、幾つもの報告で明らかだが、特記できる報告例を見いだす事は困難だった。実務を進める環境保護庁（EPA）、陸軍工兵隊（USACE）などの環境保全への関わりは、災害時／定常的な変化を問わずモデル事業となり得るが例を見いだせず。古典的課題への予算措置などを参考に見ても、災害時に特化した自然環境の復元／修復の動きや生態系回復への新たな産業化進展例を認める事はできない。[16, 17, 19, 20] |
| 欧州:全体 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・自然災害のみを対象とする回復過程評価に関わる基礎研究はほとんど見当たらない。欧州における自然環境への取り組みの基本姿勢は「人への関わり」と「回復力」がベースとなっている。米国での研究とは異なり、古典的な研究から生態系や環境保全へ向けた将来展望を進める傾向が強い。東南アジアや南米との共同研究も散見できる。新たな環境保全技術への方向性より、生態系の基本的な理解や陸域の影響が海洋に及ぼす影響評価など地球環境全体への関心を大きな方向性とした研究スタイルで、新産業の創出へ繋がる情報を見いだせず。[10-18, 20-24] |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・サイエンスとしては優れた基礎研究例が多い事から、新たな応用研究の生まれる余地は大きいと予想できる。しかし現段階で次世代を見据えた応用研究への進捗報告は見いだせず。新たな政策の示す循環型経済では、今までの「採取−利用−廃棄」スタイルから“a circular economy”への変換が明記され、その影響が資源や一次生産と密接に関わる自然環境の回復過程評価にどう影響するか今後目を離せない。[25] |
| | 産業化 | × | ↘ | ・大雨や地震・津波など非定常時を想定した自然環境の回復過程評価に繋がる産業化に関する情報は、欧州以外の国でも見いだせるGIS、リモートセンシングによる観測・評価などの予防関連技術を見る事ができる。それ以外に、新しい自然環境の回復過程に資する技術開発の産業化は見いだせず。 |
| 欧州:英独仏 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・【英】東南アジアや南米の国との共同研究をベースとした基礎研究は調査観測を重視。災害の引き起こす自然環境への影響を、大きな自然環境の変化の一部ととらえた視点からの研究例では、災害だけでなく定常時に連続する変異の観測も併せ検討。自然の変化を大きく受け入れながら陸から海への物質輸送と生物への影響を考慮。自然活動が引き起こす陸域由来の物質輸送が沿岸生態系や生物群落へ及ぼす影響を検討している。サイエンスの中でも現地調査に主軸をおいた研究スタイルとなっている。新産業の創出へ繋がる情報を見いだせず。[20, 24]<br>・【独】イギリス同様東南アジア共同研究をベースとした基礎研究は調査観測を重視した内容。インドネシアの火山噴火で流出する火山泥濁質の輸送研究例では、生態環境から社会生活への影響を考察。[11, 12, 20]<br>・【仏】海洋の珊瑚礁などを扱った研究は見いだせるが、突発的な災害時の環境変化の回復過程を扱った研究例は見いだせない。[13, 20] |
| | 応用研究・開発 | × | ↘ | ・【英】サイエンスとしては優れた基礎研究例が多いが、現地調査観測をベーストするものが中心で、直接応用研究へ繋がるようなフェーズとは異なる。ただし現地調査の解析例では陸起原資源や汚染源の沿岸底質中の存在を明らかにしており、応用研究の生まれる方向に展開していく可能性を予見できる。現段階では、まだ応用研究への展開例は見いだせない。[20]<br>・【独】火山由来泥の輸送、濁質の及ぼす自然環境のダメージ予想は、サイエンス、ナノマテリアル分野への展開の可能性を否定できない。ただし現段階では自然環境の回復過程に繋がる応用研究への展開例は見いだせなかった。[20]<br>・【仏】珊瑚礁回復や、修復技術は古典的なものであって、現在から将来へ繋がるような目新しい技術への応用研究は見当たらず。[20] |
| | 産業化 | × | ↘ | ・【英】自然環境の回復過程に大きく関連する新技術開発の産業化は見いだせず。[20]<br>・【独】自然環境の回復過程に大きく関連する新技術開発の産業化は見いだせず。[20]<br>・【仏】自然環境の回復過程に大きく関連する新技術開発の産業化は見いだせず。[20] |
| 中国 | 基礎研究 | × | − | ・地震や大雨災害時の災害後の評価や環境保全の回復過程に特化した、または、準じた基礎研究は見いだせない。 |
| | 応用研究・開発 | × | − | ・関連情報見いだせず。 |
| | 産業化 | × | − | ・関連情報見いだせず。 |
| 台湾 | 基礎研究 | △ | → | ・災害被災地の植生回復をベースとした生態系保全に向けた研究取り組みは、フィールド直結型となっていて優れている。さらに、リモートセンシングや災害発生を予想できる箇所の遠隔モニタリングシステム導入など、防災を目指す動きは明確に住民と技術を近づけている。地震や大雨による12億$m^3$を超える土石流で大被害を多くの犠牲者を出した経緯が、大掛かりな復興対策に盛り込まれ、災害対策研究予算も大型となっている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・土石流からの復旧事業の特徴は、上流域でのコンクリート使用を極力控えた斜面安定化工法や、緑化・植生回復となっている。ダムに流入した2,000万$m^3$の堆積土砂の搬出への取り組みは、大雨（台風時）で増水した河川流に堆積土砂を載せ中流から下流へと移動する手法を用いている。この手法は、台湾の急峻な地勢を利用した地域特性上手に取り入れたもので、年間50万$m^3$もの堆積土砂処理が可能となった。[26, 27] |
| | 産業化 | △ | → | ・急勾配（高さ対斜面奥行きが1：0.3の勾配）斜面、高さ30 m、幅45 m区間を対象とした工事例に併せた植栽・緑化工法に伴う斜面安定化工法では、植栽成長後二酸化炭素排出量削減効果が82.500 t（50年生育を仮定）と見込まれる。温暖化ガス削減効果も当初から考慮し、コンクリート未使用による温暖化ガス削減効果と併せた環境保全効果が工事例とし提示されている。[26, 27] |
| 韓国 | 基礎研究 | × | - | ・本テーマに関連する災害時の環境保全の回復過程に特化するまたは準じた基礎研究は見いだせなかった。 |
| | 応用研究・開発 | × | - | ・韓国中央を流下する洛東江に連続して建設されたダム群、干拓地の人口港湾都市づくりなど、前政権時代の名残の環境関連の古典的研究は見いだせるが、本テーマに関連する応用研究例は見いだせない。 |
| | 産業化 | × | - | ・関連情報見いだせず。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 東京大学生産技術研究所, 担体固定化吸着剤を用いた環境中からの小規模分散型セシウム回収プロセスの実用化 「枝葉・樹皮等からのセシウムの脱離・脱着」環境省委託業務報告書, H26年, 3月.
2) 国立大学法人名古屋大学, 放射能汚染土壌の飛散防止・洗浄・固化を行う生物処理実用システムの開発 土壌洗浄抽出工法の設計と最適化 環境省委託業務報告書, H26年, 3月 26-30.
3) 小林達明 山本理恵, 里山ランドスケープの放射性物質汚染に関する問題と今後の展望日緑工誌, 2012, 38(2)265-273.
4) 国立大学法人名古屋大学, 放射能汚染土壌の飛散防止・洗浄・固化を行う生物処理実用システムの開発 木質チップ濾過 環境省委託業務報告書, H26年, 3月 76-104.
5) 鳴子ダム管理所, 平成23年度鳴子ダム貯水渇水対策検討業務国土交通省東北地方整備局鳴子ダム管理所, H24年, ３月.
6) (株）ニュージエック, ダム湖等の生態系修復による環境保全技術の開発研究 関西電力受託業務報告書, H21年&H22年, ３月.
7) 杜の海砂研究会, 海砂（浚渫土砂）の有効利用のための除塩技術の開発 財）東北地域づくり協会報告書, H26年, .

8) Tomoyuki HORI et.al, Biodegradation Potential of Organically Enriched Sediments under Sulfate- and Iron-Reducing Conditions as Revealed by the 16S rRNA Deep Sequencing Journal of Water and Environment Technology, , 2014, 12, 4 357-366.
9) 大越健嗣　編著, 海のミネラル学成山堂書店, H19年, 4月 63-65, 78-79.
10) A. Serafim, et.al, Evaluation of sediment toxicity in different Portuguese esturies:Ecological impact of metal and polycyclic aromatic hydorocarbonsEstuarine,Coastal and Shelf Science, 2013, 130, 30-41.
11) Tim C.Jennerjahn, et.al, Environmental impact of mud volcano inputs on the authropogenically altered Porong River and Mudura Strait coastal water, Java, IndonesiaEstuarine,Coastal and Shelf Science, 2013, 130,152-160.
12) Tim C.Jennerjahn, Steve B Mitchell, Pressures,stress,shocks and trends in estuarine ecosystems-An introduction and sysnthesisEstuarine,Coastal and Shelf Science, 2013, 130, 30-41.
13) Marie Garrido, et.al, Resilence and stability of Cymodocea nodosa seagrass meadows over the last four decades in a Mediterranean lagoonEstuarine,Coastal and Shelf Science, 2013, Frence.
14) E.M. Fonseca, et.al, Stormwater impact in Guanabara Bay(Rio de Janeiro): Evidence of seasonal variability in the sediment heavy metalsEstuarine,Coastal and Shelf Science, 2013, Brazil & U.K.
15) Alexandra M.F. Rao, et.al, Alkalinity production in intertidal sands intensified by lugworm bioirrigationEstuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, Belgium &.
16) Greg Gervais, P.E., Sustainable Nano-based Remediation: Current Issues and Concerns - USEPA PerspectivesTechnology Innovation and Field Services Division US , 2013, 41796.
17) CoT/NSET/NEHI, Progress Review on the Cordinated Implementation of the National Nanotechnology Initiative 2011 Environmental, Health, and Safety Research StrategyNational Science and Technology Council　Committee, 2014, June 25 14-16.
18) Nakanishi・Tanoi Eds., Aguricultural Implications of the Fukushima Nuclear AccidentSupringer Open , 2013, .
19) 桜井善雄　訳・編, エバーグレースよ永遠に-広域水環境回復をめざす南フロリダの挑戦-信山社サイテック, 1999, 1 - 91.
20) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング（株）, 欧米主要国における環境保全政策に対する会計検査の手法と事例平成 21 年度会計検査院委託業務報告書, 平成22年, 2月.
21) Elliott,M.,Whitfield,A.K, Challenging paradigms in estuarine ecology and management. Estuarine,Coastal and Shelf Science, 2011, 94, 306-314.
22) S.B.Mitchell,R.J.Uncles, Estuarine sediments in macrotidal estuaries: Future research requirements and management challengesOcean & Coastal Management, 2013, 79, 97-100.
23) 環境展望台 , 国連環境計画、多国間環境協定の適切な実施を確保するため最高会計検査機関国際組織（INTOSI）と覚書締結ニュース, 2013, 41891.

24) F.X. Roig-Munar, et.al, Risk Assessment of Beach-Dune System Erosion: Beach Management Impacts on the Belearic IslandsJoulnal of Coastal Research, 2012, Spain.
25) Europian Commision,『循環型経済:思い切った革新が課題』"Circular economy: the great innovation challenge" Community Research and Development, 2014, 7月.
26) Chia-Chun HO, et.al, Ecological countermeasure guidelines and case hisories in Taiwan5-th Asia Regional Conference on Geosynthetics, 2012, January 1-10.
27) Ching-chiang Kuo, Using ecotechnology to redirect Taiwan's construction works awy from conventional methodEcological Engineering, 2006, 28, 325-332.

### ３．４．４．７　社会環境の再創造手法

#### （１）研究開発領域名

社会環境の再創造手法

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

災害や危機のない社会を作ることは理想であるが、私たちが投入できる資源には限界がある。限られた資源を使って少しでも「強くしなやかな社会」の実現を図るためには、脅威となるリスクを同定し、それに対してどう備えるべきかを明確化していかなくてはならない。そのためには、ハザード・曝露量・脆弱性から成る関数系として被害をとらえ、被害の予防策を講じる旧来のエンジニアリングアプローチだけでは限界がある。むしろ、たとえ被害が発生したとしても、災害発生後の人間の活動や時間の推移によって災害を乗り越える力を向上させる「レジリエンス」のアプローチが必要となる。その際、万が一被害が発生してもそこから回復できる力をどう備えるかは重要な研究対象となり、社会環境の再創造過程の究明は、レジリエンスアプローチにおける重要な研究開発課題である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

20世紀が科学技術の発展によって経済活動の拡大と人口爆発を招いた結果、21世紀は「リスク社会」であるという指摘があり、さまざまな種類のリスクから社会の安全・安心を守り、持続的な発展を続けていくことが人類全体に求められている。その中でも、我が国が立ち向かうべきリスクの第一は自然災害である。自然災害に対する研究や対策は随分進んだ印象があるが、結果から見ると、世界では自然災害の件数も被害額も増加している。また、20世紀にさまざまな恩恵をもたらした科学技術の発展そのものがもつ陰の部分として、環境汚染や食の安全問題、情報通信による社会の混乱など、新たにさまざまな種類のリスクが生み出され､配分されていることにも直面しなければならない。

リスクが重大になればなるほど、そうした事態の発生は避けなければならない。しかし、投入できる資源に制約がある中で、十分な予防策を講ずることは困難である。むしろ、万が一被害が発生しても、そこから立ち直ることができる力、言いかえれば社会環境の再創造力を備えておくことも忘れてはならない。このような概念はレジリエンスと言われ、2005年の第2回国連防災世界会議の中で採択をされ、以来防災研究の中心テーマとして議論がされてきた。

社会環境の再創造に関連する概念として、復旧・復興がある。広辞苑によれば、「復旧」とは「もと通りになること」と定義され、「復興」とは「ふたたび盛んになること」とされている。まさに、復旧は被災の影響を「ゼロ」に戻していく過程であり、復興は被災前の状態より「プラス」の状態をつくり出していくものだといえる。水害対応を中心として整備されてきた我が国の災害対策の基本的な考え方は「復旧」であり、災害対策基本法にも「復興」という概念は存在していなかった [1)]。関東大震災からの帝都復興、戦災復興という言葉があるように「復興」とは面的な破壊を受けた市街地を都市計画に則って再生する【都市再建】が「復興」そのものだと考えられていた。いわば、道路や

港湾などの社会基盤の復旧および公園などの都市計画を含めた「目に見える風景の変化」のみが重要視されてきた。1995年に発生した阪神淡路大震災は、我が国でも重要な経済活動を担う大都市圏を襲い、社会基盤を復旧する都市再建だけではまちの活気が戻らないことが明白となり、復興のプロセスとして【経済再建】の重要性が認識された。また、350万人に及ぶ膨大な被災数が生まれたことから新たに被災者の暮らしを立て直す【生活再建】が第3の復興目標に掲げられた。すなわちハード面だけではなく、初めて「被災者視点」というソフト面からの復興が考慮された。

阪神淡路大震災は災害からの復興という新しい研究関心を生み、復興過程に関する実証的な研究群を生み出した。完成までに10年間を要した阪神淡路大震災からの復興過程の研究から、都市再建、経済再建、生活再建という３つの復興目標の達成は、3層構造を持ちつつすべて同時並行で進んでいき、そこには「目的と手段の関係」が存在していることが明らかになった。すべての復興の基層にあたる「社会基盤の復旧」には発災から2年を要した。第2層目は都市再建と経済再建で構成される。都市再建のうち「住宅再建」は5年で完了したが、「都市計画」の実現には10年の歳月を要した。経済再建については、新しい産業構造への転換を目指した「経済の活性化」や「中小企業対策」がなされたが、当時の日本の経済的な停滞も影響して10年では完了しなかった。そのため、第3層目に位置する生活再建も発災から10年の時点では「8割復興」に留まった。下の2層が実現されない限り、3層目の生活再建が達成されることは難しい。目的と手段の関係を構造化したこの復興モデルは、基本的には東日本大震災における復興過程についても妥当性を持ち、今後復興政策を実行していく上で非常に重要なものである。

特に、失ったまち並みを修復する都市再建や、停滞した経済活動の活性化とは異なり、多様な被災者ニーズが基礎となる生活再建においては、震災発生当時「何をもって生活再建とするか」という共通理解は存在していなかった。震災から5年目に神戸市が実施した震災検証の一環として行われたワークショップを通じて、生活再建に必要な要素が7つに集約されることが明らかになった [2)]。7要素の中でも「すまい」「くらしむき」「こころとからだ」の3つの要素が安定することは震災の直接的な影響を緩和し、「人と人とのつながり」が「まち」の地域活動への住民参加を促し、その結果被災者自らが震災体験を肯定的に評価するといった相関関係の存在も検証されている[3)]。被災者にとっての復興とは、「人生の再構築」という意味合いをもっているのである。

「人と人とのつながり」は社会関係資本として多くの復興研究で注目される変数となった。社会関係資本を考える際には、個人をベースとしたつながりを超えた主体間のつながりも検討に含める必要がある。社会の再構成を担う自助・互助・共助・公助をつなぐためには、地域の文化・歴史をふまえた上で、いわゆる産・学・公・市民などのさまざまな社会主体が関わる必要がある。既存のコミュニティを超えて、それらの多様な社会主体をどのようにつなぎ、よりいっそう大きな力を引き出す場をどう作り出すか、といった視点からの検討が今後必要である。また、社会制度は当面の必要に応じて時点時点で個別に作られるのが常であり、災害対応や危機対応という場面でそうした社会制度が複雑に重なり合い、時に矛盾する。それらをつないで整合的な社会制度とすることも大切なチャレンジである。

視野を米国に向けると、米国における国土安全保障に関する科学技術研究開発の中で「重要な社会基盤防御 CIP（Critical Infrastructure Protection）」に関する研究では前述のように社会環境を階層的にとらえている[4]。それはテロの脅威に対して国の安全にとって不可欠な11の社会基盤を定義し、3層で整理している。上水、エネルギー、通信をもっとも基礎となる社会基盤とし、それを利用して第2層の社会基盤システム（金融システム、交通システム、化学工業）が機能し、それら2層を前提として第3層の社会サービス（物流、食料確保、防災、医療、教育）を提供するというモデルである。これらの社会基盤は各種の民間活動を支えるとともに、環境の影響を安定化させる役割をもつ。環境の影響にも階層性を見いだすことができる。もっとも基底となる自然環境の層があり、その上に構築される「モノ」の世界である人工構造物の層、それらをもとに営まれる「コト」の世界である社会・文化の層が存在する [5]。これら環境層間の安定がゆらぐことが社会環境の再構築を促す契機となるといえる。こうした階層モデルは社会が多くの構成要素からなる自由度の大きなシステムであり、予測できないことが起こるという前提で、被害抑止と緩和に加えて、被害の復元も含めた『レジリエンス』を考える必要がある。

従来の防災モデルは被害予防を目的としており、D=$f$(H,E,V)という関数で表される。被害（Damage）を規定する要因として、脅威となるハザード（Hazard）の性質、その影響に曝露（Exposure）される人間社会の規模と、社会がもつ脆弱性（Vulnerability）を想定し、自然現象として災害を見なし、理学・工学の分野を中心にHとVに関して重点的に研究されてきた。しかし、近年続発する大規模災害は災害による被害を完全に予防することができないことを示唆し、モデルの限界を示している。それに代わるモデルとして、たとえ災害が発生しても、それを乗り越える力をもつことに着目するレジリエンスモデルに関心が集まっている。そこでは、被害発生に関わる前記の3要因に加えて、そこからの立ち直りに関わる人間の活動（human Action）と時間間隔（Time adaptation）も加えて、より総合的に防災をとらえる枠組みとして、R＝ $f$(H,E,V,A,T) と定義されている。すなわち、レジリエンスを高めることは、土木や建築という個別の学問分野の問題ではなく、学際的（研究が複数の学問分野にかかわること）な課題という認識を持たなければならない。ひとつの学問分野から見て「それは常識であり、基礎的な知識だ」と言われるようなことでも、すべての知識を統合化した全体像の中ではその意味づけが変化しうることを理解し、防災の全体像を社会に還元していくことが求められている。

そこでは、予防力と回復力の全体最適を考えることができる専門家、マルチハザードの評価ができる専門家の育成も必要である。そして、リスク評価の結果、重大なリスクと評価された場合に適切な予防策を講ずる能力をもっている人も、万が一災害が発生する場合を想定してそれに対応する危機対応従事者の育成も必要である。この3つのバランスがなければ、レジリエンスは向上しない。具体的には、予防力と回復力のベストミックス、リスクマネジメントとクライシスマネジメントのパッケージ化、中長期的・戦略的な事業継続マネジメントとして多重防御や自立・分散・協調に関する科学的根拠に基づいた手法が求められている。

＜具体的な近年の動向＞

・日本では、JST RISTEXにおいて、2012年より「コミュニティ」と「つなぐ」という２つの言葉を大切なキーワードとし、「コミュニティがつなぐ安全・安心な都市・地域の創造」研究開発領域が開始されている [6]。１．コミュニティの特性をふまえた危機対応力向上に関する研究開発、２．自助・共助・公助の再設計と効果的な連携のための研究開発、３．安全・安心に関わる課題への対応のために個別技術・知識をつなぐしくみを構築する研究開発、４．コミュニティをつなぐしくみの社会実装を促進するための研究開発（法規制や制度などの整理分析、新たな取り組みへの仕掛けづくり）などの研究開発などが実施されている。
・中国では、2011年より中国科学技術部（MOST）とJSTとが「地震防災」、「気候変動」の2分野に関する研究交流の支援を実施している [7]。特に「巨大地震災害時における効果的災害対応を実現するための日中比較研究交流」では、近年に発生した地震災害での対応事例を日中間で比較研究することにより、災害時における効果的な危機管理・災害情報システムおよび災害対応計画のあり方を解明することを目的としている。具体的には、日本側は阪神・淡路大震災、東日本大震災などの分析を担当し、中国側は四川大地震などの分析を担当する。本研究交流により、両国の研究チームが相互補完的に取り組むことで、地震災害による人的・物的被害および経済的・社会的影響が軽減されることが期待されている。
・米国では、国際災害研究委員会（IRCD）がAnnual Natural Hazards Research and Applications Workshopを1975年から毎年開催している。本年度も学際的な視点から、官民連携・災害研究結果の社会実装・持続可能性とレジリエンスの相乗効果/トレードオフ・高齢化と脆弱性、などに関する発表が行われた。日本からも東日本大震災について発災後の3年間を振りかえり、大規模災害時の復興計画について議論された [8]。
・欧州では、国際科学会議（ICSU）が自然災害の影響軽減という喫緊の必要性を認識し、国際社会科学会議（ISSC）と国連国際防災戦略（UNISDR）の共催で、2008年10月に自然災害に関する国際研究プログラムが開始された。このプログラムは「災害リスク統合研究計画」と呼ばれ、研究が進んでも災害が減らないのはなぜかという疑問に正面から取り組んでいる。特に、このプログラムでは、理学、工学のほか、社会、経済、保健衛生など諸科学分野の研究者から共同して、災害リスクの原因を解明し、その上で行政組織とも共同して、科学的知見に基づくリスク削減の意思決定を実践に移すことが目指されている [9]。
・また欧州は、ニーズ主導によるコミュニティ／クラスター形成に取り組んでいる [10]。
・韓国では、2013年2月の新政権発足後に省庁やセクター間の壁をダイナミックに乗り越える試みが行われ、未来創造科学省の機能強化が図られた [11]。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

・社会学ではコミュニティの成立要件として地域性・共同性・つながり性について議論してきた。しかし、農業革命や産業革命を経て、人間社会はコミュニティの成立要件を崩しながらも人が暮らしていけるような社会を作り出してきている。情報革命が進行しインターネットが当たり前となった中で、地域性というものを解除したコミュニティも存在するといえる。空間的に分散していても志を同じくする人々の集まりもコ

ミュニティととらえて新たな現実に即した研究開発を行う必要がある。
・東日本大震災以降、レジリエンスの考え方が広がっているものの、それを「国土強靭化」と名付けることで、公共事業の復活と強化がなされている。レジリエンスを強靭化と読み替えることで、構造物による被害抑止というかつての目標を掲げたロバスト（頑強性）の意味で利用される概念になっている可能性や、『粘り強さ』も、構造物が一瞬で崩壊しないようにという構造物による機能低下抑止の部分だけの考え方である可能性がある。基幹的な施設の強度を高めて壊れないように『予防力』を上げることは、レジリエンスを高める一つの構成要素だが、それだけではではない。想定を超える外力が来てしまった時にどう対応するかまで含めて総合的に考える必要がある。
・災害時におけるビッグデータやマイナンバーの活用へ対する関心が高まっているが、ELSI（Ethical, Legal and Social Issues）の面からの議論は継続されるであろう。情報保護・共有に関する一人一人のリテラシーを高めるとともに、広域連携を前提とした災害対応業務の効率化を可能にするために、独立したセキュリティポリシーに基づくプロジェクト型クラウドシステムを開発する必要がある。
・防災科学技術分野における社会科学系の研究は、災害発生から復興の完成までの一連のイベントを対象とした、信頼性の高い調査に基づく継続的な科学的記述を基礎とする実証型のサイエンスであることへの認識が不足している。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・「被災者生活再建支援システム」は、災害の発生後、「建物被害調査員を確保できない」「調査票をデータ化するのが大変」「り災証明発行に膨大な手間がかかる」「支援対象者の特定や公正公平な支援が困難」といったボトルネックを解消し、被災者の生活再建がスムーズに進むよう支援するシステムである。本システムは、京都大学をはじめとする産学共同研究チームが2004年の新潟県中越地震後の小千谷市役所、2007年の能登半島地震後の輪島市役所、同年の新潟県中越沖地震後の柏崎市役所、2011年の東日本大震災後の岩手県など、数々の被災地における被災者生活再建支援業務を支援する中で蓄積された多くの研究ノウハウを統合し、システム化されたものである。2013年台風18号の際の京都府での災害、台風26号による伊豆大島土砂災害などでも活用された。2014年6月20日よりNTT東日本がクラウド型の被災者生活再建支援サービス「Bizひかりクラウド 被災者生活再建支援システム」の提供を開始している [12]。
・内閣府総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）が自らの司令塔機能を発揮して、府省の枠や旧来の分野の枠を超えたマネジメントに主導的な役割を果たすことを通じて、科学技術イノベーションを実現するために2014年度に新たに「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）」が創設された [13]。CSTIが重点課題として10課題を選定している。社会環境の再創造に関連が深い課題としては、「レジリエントな防災・減災機能の強化」と「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」がある。
  - 「レジリエントな防災・減災機能の強化」では、府省連携により災害情報をリアルタイムで共有・利活用する仕組みを構築するとともに、地域における防災リテラシーを向上させることで、国民一人ひとりの防災力の向上を目指し、これらの目標達成のために、①予測：最新観測予測分析技術による災害の把握

と被害推定；②予防：大規模実証試験などに基づく耐震性の強化；③対応：災害関連情報の共有と利活用による災害対応力の向上、の三項目について研究開発が始まる [14]。

- 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」では、世界最先端のICRT（ICT: Information and Communication Technology ＋ IRT： Information and Robot Technology）など、システム化されたインフラマネジメントを活用し、国内重要インフラの高い水準での維持管理、魅力ある継続的な維持管理市場の創造、海外展開の礎を築くことを目指し、この目標達成のために、①点検・モニタリング・診断技術の研究開発、②構造材料・劣化機構・補修・補強技術の研究開発、③情報・通信技術の研究開発、④ロボット技術の研究開発、⑤アセットマネジメント技術の研究開発を研究開発項目に掲げ、維持管理に関わるニーズと技術開発のシーズとのマッチングを重視し、新しい技術を現場で使える形で展開し、予防保全による維持管理水準の向上を低コストで実現させることの研究開発が始まる [15]。

### （６）キーワード

都市再建、経済再建、生活再建、コミュニティ（地縁型・テーマ型）、自助・互助・共助・公助、ソーシャル・キャピタル（社会関係資本）、レジリエンス、人間活動、時間（アダプテーション）、多重防御、自立・分散・協調、リスク評価、リスクコミュニケーション、事業継続マネジメント（BCM：Business continuity management）、プロジェクト型クラウド

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・内閣府「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）」が創設され、予測・予防技術の向上が目指されている[13]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・内閣府「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）」が創設され、対応技術の向上が目指されている[13]。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・ビッグデータの活用について、ICTの進展に伴い多種多量なデータの生成・収集・蓄積などがリアルタイムで行うことが可能となり、そのようなデータを分析することで未来の予測や異変の察知などを行い、利用者個々のニーズに即したサービスの提供、業務運営の効率化や新産業の創出が期待されている[16]。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・コロラド大学ボルダー校（UCB）にある自然災害センターがNatural Hazards Research and Applications Workshopを実施[8]。<br>・米国国防高等研究計画局（DARPA）が防衛科学研究室（主に数学、物理、化学、生物、材料工学、医学など）、情報処理技術研究室（主にネットワーク、通信、情報収集など）、マイクロシステム技術研究室（主に半導体やマイクロマシンなど）の基礎研究を行っている[17]。<br>・JST国際科学技術共同研究推進事業（戦略的国際共同研究プログラム）で日米共同研究課題「ビッグデータと災害」領域を実施[18]。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・コロラド大学ボルダー校（UCB）にある自然災害センターがNatural Hazards Research and Applications Workshopを実施[8]。<br>・米国国防高等研究計画局（DARPA）が先進技術研究室、情報活用研究室、特別技術研究室、戦術研究室を設け、応用研究を行っている[17]。<br>・国立科学財団工学局（NSF ENG）では関連する研究への助成が行われている[19]。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・知識生産＝基礎研究の重要性から連邦政府による基礎研究への継続的支援をイノベーション政策の基本に据えており、その姿勢はパルミサーノレポートからオバマ政権のイノベーション戦略に至るまで共通している。また、近年では知識生産の担い手としての自国人材の育成にも力が入れられている[10]。<br>・ホワイトハウスの国家準備体制、国家保護、緊急対応を担当する部局が2009年に国家安全保障スタッフ「レジリエンス部門」に統合されるなど、公共政策の分野でもレジリエンス概念を採り入れる動きがある[20]。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・市民・社会・経済、さらにはインフラ・サービス・政治的な安定性や繁栄を守るための研究とイノベーションが推進されており、危機・災害への抵抗力の強化については、危機・災害時におけるさまざまなタイプの非常事態管理を支援する技術・能力の開発や、非軍事力と軍事力の相互運用性の促進、情報の信頼性・一貫性とすべての取引・プロセスの追跡可能性の保護などのテーマに取り組んでいる[20]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・同上 |
| | 産業化 | △ | → | ・欧州においては、EUの成長戦略「欧州2020」の一環として実施されている「イノベーション・ユニオン」政策のもと、高齢化や環境問題、社会の安全などの社会的課題への取り組みを強化している。具体例として、産学連携プログラム「欧州イノベーション・技術機構（EIT）」では、気候変動、ICT、持続可能なエネルギーなどの経済・社会的課題に基づいたバーチャルな連携コミュニティを形成しながら、これら課題を解決する研究・人材育成に力を入れている[10]。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・地震の予知・予報と構造物、建築物の耐震対策にはいまだ大きな困難があり、中国の地震防災の方針では「予防を中心とし、防災と救助を結び付けて総合的に被害軽減を図る」と強調されている[22]。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・中国地震局内には地球物理学、地質学、地殻変動学、土木工学、地震予知学などの研究所と地球物理探査、地殻変動測量などのセンターが設けられ、地球科学、数学力学、通信技術、コンピュータ科学など専門分野の確かな基礎を備えた多くの科学技術人材が、地震被害の予防と軽減についての科学的な研究を進めている[22]。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・中国の大学・研究機関の多くは、研究開発の主体であるだけでなく、自らがビジネスを展開して収益を得ることが求められており、短期的には国際科学技術協力を通じて得られたグローバルな知を消化・吸収し、再度イノベーション（Re-Innovation）を創出する主体として、長期的には中国のオリジナルな研究開発成果に基づくイノベーションを創出することが期待されている[11]。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・2013年2月の新政権発足後の省庁再編により、科学技術政策の司令塔機能である国家科学技術委員会（NSTC）が、幅広い所管および科学技術予算配分権を有する実施官庁である未来創造科学省に吸収され一体化した。これにより、韓国の科学技術行政はかつてないほど強力な司令塔をもつことになった。特に、科学技術とICTを接続して既存産業に活力を呼び入れ、国民の利便性を向上させるための全政府プロジェクト「創造経済ビタミンプロジェクト」（外部から吸収しなければならないビタミンの特性を科学技術とICT接続の象徴として命名された）が推進され、農業(A)、文化(C)、環境(E)、食品(F)、政府(G)、インフラ(I)、安全(S)など各分野別に①該当産業の活力および競争力の向上、②国民の利便性向上および社会問題の解決が可能な課題を発掘して推進されている[11]。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・同上 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・未来創造科学省による2013年度政策方針の主な政策として、2017年までに科学技術とICT融合（衛星映像ビッグデータ処理など）の10プロジェクト推進による新産業創出、クラウド法制定、ビッグデータ分析・活用センター構築、M2M試験事業推進を通じたインターネット新産業育成などがある。また、国家情報化のため、文化・医療など民間の活用度が高いDB構築、社会各分野でのICT実装などの推進もあげられている[23]。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 林春男：阪神淡路大震災から１５年を経て～わかったこと，変わったこと～阪神淡路大震災からの復興，自然災害科学 J. JSNDS 29-3 pp.303-317，2010
2) 田村圭子，林春男，立木茂雄，木村玲欧：阪神・淡路大震災からの生活再建7要素モデルの検証－2001年京大防災研復興調査報告－，地域安全学会論文集，No. 3，pp. 33-40，2001
3) 立木茂雄，林春男，矢守克也，野田隆，田村圭子，木村玲欧：阪神・淡路大震災の長期的な生活復興過程のモデル化とその検証：2003年兵庫県復興調査データへの構造方程式モデリング（SEM）の適用，地域安全学会論文集，No. 6，pp. 251-260，2004
4) Ted G. Lewis, Critical Infrastructure Protection in Homeland Security: Defending a Networked Nation, Wiley-Interscience, 2006

5) 程潔，重川希志依，目黒公郎，山崎文雄，中林一樹，林春男，田村圭子：首都直下地震における問題構造解明のためのＴＯＣ論理思考プロセスの適用，地域安全学会論文集，No. 11，pp. 225-234，2009
6) JST RISTEX「コミュニティがつなぐ安全・安心な都市・地域の創造」研究開発領域. http://www.ristex.jp/examin/anzenanshin/
7) JST. 戦略的国際科学技術協力推進事業「日本－中国研究交流」平成２３年度新規課題の採択に関して. 2012. http://www.jst.go.jp/pr/info/info859/sankou.html
8) 39th Annual Natural Hazards Research and Applications Workshop. http://www.colorado.edu/hazards/workshop/current.html
9) 水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）. http://www.icharm.pwri.go.jp/about/commitment_j.html
10) 経済産業書. 平成25年度 産業技術調査事業（持続可能な発展のためのイノベーション政策に関する調査）.2014. http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2014fy/E004005.pdf
11) JST CRDS. 科学技術・イノベーション動向報告 韓国編～2013年度版～. 2014. http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/OR/CRDS-FY2013-OR-03.pdf
12) 東日本電信電話(株), News Release「Bizひかりクラウド　被災者生活再建支援システム」の提供開始について. 2014. http://www.ntt-east.co.jp/release/detail/20140520_01.html
13) 内閣府. 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）. http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html
14) SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」. http://www.jst.go.jp/sip/k08.html
15) SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」. http://www.jst.go.jp/sip/k07.html
16) 総務省. 平成25年度版情報通信白書. 第1部 第3節 1 (1) ビッグデータの概念. http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc113110.html
17) DARPA. http://www.darpa.mil/default.aspx
18) JST. 国際科学技術共同研究推進事業（戦略的国際共同研究プログラム）. 日米共同研究課題（「ビッグデータと災害」領域）の募集のお知らせ. 2014. http://www.jst.go.jp/sicp/announce_usjoint_2.html
19) JST/CRDS 2012年度システム科学技術 俯瞰ワークショップ報告書. http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/WR/CRDS-FY2012-WR-08.pdf
20) 岡野内俊子. 地域レジリエンスと事前復興. かながわ政策研究・大学連携ジャーナル. No.4 ②. 2013. http://www.pref.kanagawa.jp/uploaded/attachment/573599.pdf
21) JST CRDS. 科学技術・イノベーション動向報告 ～EU編～ （2013年度版）. 2014. http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/OR/CRDS-FY2013-OR-04.pdf
22) JST Science Portal China. 中国の地震防災の現状と展望. 2008. http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/0901earthquake/r0901_he.html
23) 総務省. 平成25年版情報通信白書. 第2部 第11節 (4)韓国の情報通信政策の動向. http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc24b140.html

## ３．４．５　観測・計測とその情報に基づく環境管理

### ３．４．５．１　地球規模の環境モニタリング（リモートセンシングと実測）

#### （１）研究開発領域名

地球規模の環境モニタリング（リモートセンシングと実測）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

地球規模の環境問題として取り扱う必要がある緊急の課題は温室効果ガスの増加による気候変動ならびにオゾン層減少の問題であり、同時に地球規模に変化する地球表面（例えば植生や氷床の変化など）の監視も重要な領域である。ここでは近年始まった衛星による温室効果ガス観測やその他のグローバルなリモートセンシング技術開発に加え、現場での大気中温室効果ガスやオゾン層破壊関連物質の観測を行うための各種プラットフォーム（地上、船舶、航空機など）での実測技術に関する開発状況を取り扱う。衛星を含めた温室効果ガスの観測ネットワークは全球規模の大気輸送モデルなどを統合利用した最適な観測・評価システムとの連携が今後重要となる。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

将来の地球環境変化は気候変動に関わるものが大きく、ここ数十年から100年以内にはグローバルな影響が顕著になると予測されている。こういった予測の確からしさが増すにつれ、気候変動予測に不可欠な全球の温室効果ガスや粒子状物質の動態把握や炭素循環観測の不確実性低減、海洋や地球表層に現れる自然の変化の早期検出、および炭素管理の意思決定が与える効果の評価が求められている。また、そのために地球表層・海洋・大気についての必要十分な観測・評価システムの確立が喫緊の課題とされている[1)]。

例えば、地球温暖化に関連して大気環境のうちの温室効果ガス観測については、我が国は2009年1月に温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT：Greenhouse gases Observing SATellite）「いぶき」を打ち上げ、地球を周回しながら二酸化炭素およびメタンのグローバルな観測を行う技術を確立したほか、その後継機（GOSAT-2、2017年度打ち上げ予定）の開発もすでに開始している。また、衛星リモートセンシングに加えて後述する民間航空機や船を使った半球規模の実測もすでに長期間行っていることと合わせて、地球規模の温室効果ガスモニタリングについては我が国は世界をリードしているといえる。

以下に各種のリモートセンシング（遠隔計測）を使った地球規模の環境モニタリングの現状について、1. 静止衛星によるもの、2. 大型～中型衛星によるもの、3. 国際宇宙ステーションによるもの、4. 小型によるものに大別して説明する。

1.静止衛星によるもの

定常的な気象観測を目的とする静止気象衛星については、日米欧が中心となって構築した5機程度の衛星からなる体制がすでに構築・定常運用されている[2)]。さらに近年では静止気象衛星に搭載するセンサを高度化し、定常的な気象観測以外の分野での利用拡大を目指す衛星や、定常的な気象観測を主目的としない衛星が計画／運用され始めている。前者としては、我が国のひまわり8／9号（2014年打ち上げ／2016年打ち上げ予定）[3)]や

韓国のCOMS-1（2010年打ち上げ）[4, 5]がある。ひまわり8／9号では防災や地球環境監視における利用が検討されている。COMS-1は海色観測をその主目的の1つとしている。後者としては、欧州宇宙機関（ESA）のSentinel-4（2018年打ち上げ予定）がある。Sentinel-4では大気組成／大気汚染監視をその主目的としている。

2.大型～中型衛星によるもの

大型～中型衛星による地球規模の環境モニタリングは、衛星リモートセンシングの代表格として日米欧によって幅広く行われている。また、中国やインドなどによる衛星も運用されているが、そのデータ利用は当該国以外ではあまり進んでいない。

大型～中型衛星は太陽同期と呼ばれる軌道に投入されることが多い。太陽同期軌道の衛星による観測は、常に一定の地方時（例えば午前11時など）に数日～数週間間隔で行われるため、比較的長い時間スケール（週～月単位など）の環境モニタリングに適している。さらに大きい衛星であるため、重量や電力などの負荷の大きい高性能センサの利用が可能である。

中でも1 km程度の空間分解能、数千kmの刈り幅を有する受動型光学センサ（カメラ）による全球観測については、陸域植生や海洋植物プランクトン、南極氷床の長期変動の監視などに使用可能な数十年に及ぶ観測データがすでに蓄積されている。さらに米国ではそのようなセンサに関する研究開発は基本的に終了したとして、2011年に打ち上げられたSuomi NPP衛星より、研究開発機関である米国航空宇宙局（NASA）[6]から現業機関である米国海洋大気庁（NOAA）への移行が進められている。

数十mの分解能、数十km～数百kmの刈り幅の受動型光学センサ（カメラ）についても、米国のLandsat衛星シリーズなどにより1970年代から観測が行われている[7]。このような観測は刈り幅が狭く数週間に1回程度の頻度になるため、月より短いスケールの環境モニタリングには向かないが、その高い分解能を生かした地域スケールの土地被覆監視などに活用されている。特に米国により1970年、1990年、2000年、2005年、2010年時点の全球データセットがすでに構築されている。

また、マイクロ波（電波）を使った観測は、雲などの影響を受ける光学観測を補間するものとして活用されている。マイクロ波を使った能動型センサとしては、地表観測に適した合成開口レーダ、降雨レーダ、海上の風向・風速を測定する海面散乱計などがある。合成開口レーダは被雲率の高い熱帯雨林地域の森林伐採などの監視に活用されているが、Lバンド（波長24cm）やXバンド（波長3cm）などの種類があり、その用途や搭載する衛星側の電力や大きさなどの制約により使い分けられている。我が国では1990年代よりLバンドの衛星搭載合成開口レーダを開発・運用しているが、近年ではXバンドを用いる民間衛星が増えている[8-10]。マイクロ波を用いた受動型センサとしては、海面温度や広域海氷分布の監視に利用されるマイクロ波放射計が日米により開発・運用されている[11]。

さらにオゾンホールや越境大気汚染、地球温暖化に関係して、大気中の各種微量ガスを観測する衛星も運用／計画されている。成層圏オゾン／オゾンホールの観測については、日米により1979年からの衛星データが蓄積され[12-13]、オゾンホールの消長が定常的に監視されている。また、主要な大気汚染物質である$NO_2$についても衛星による観測体

制が整い、中国などにおける排出インベントリと衛星観測値の比較などが行われている。近年では主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの衛星観測も我が国のGOSATなどにより行われるようになった[14]。また、レーザレーダによる雲・エアロゾル観測も開始されている[15]。ただし大気汚染などの時間スケールは一般に週より短いため、1機の極軌道衛星ではその時間変動を的確に把握できない場合がある。このため複数の衛星の組み合わせ利用や次に述べる国際宇宙ステーションの利用なども検討されている。

3.国際宇宙ステーションによるもの

国際宇宙ステーションには我が国が提供した日本実験棟「きぼう」（JEM）があり、その曝露部に設置したセンサによる地球環境観測が可能である。すでに我が国がSMILES（超伝導サブミリ波リム放射サウンダ、2009～2010年）による大気微量成分（成層圏オゾンなど）の観測を行ったほか、米国による可視近赤外域ハイパースペクトルカメラの観測も行われている[16]。

国際宇宙ステーションには、軌道傾斜角の小さい太陽非同期の軌道のため中低緯度地域の高頻度観測が可能であること、他の地球観測衛星より高度が低いため能動型センサに有利であること、などの特徴がある。これらの特徴を生かした地球環境モニタリングとして、我が国において受動型光学センサによる大気汚染監視や能動型光学センサ（レーザレーダ）による森林樹高観測などの検討が進められている[17]。

4.小型衛星によるもの[18-23]

大型～中型衛星では開発・打ち上げコストや開発期間の問題があるため、より低コスト／短期間で打ち上げが可能な小型衛星の利用が近年進んでいる。ただし小型であるため、搭載できる機器の重量や電力に制約があり、地球観測分野では小型のカメラ（可視域および熱赤外域）を搭載する例が大半である。その一方で、同種の衛星を多数打ち上げることが可能になるため、複数衛星を利用した高頻度撮影（1日に1～数回の撮影）を特徴とする民間サービスも開始されている。

以下では、特に温室効果ガス観測に関してまとめる。

温室効果ガス観測に特化した衛星として初めてGOSATが打ち上げられてから5年以上データが蓄積されてきた。アメリカでの観測衛星OCOは2009年の打ち上げに失敗したため、これまではGOSATが世界で唯一の温室効果ガス観測専用の衛星であった（OCO-2は2014年に打ち上げに成功している[24]）。GOSATは極軌道を回りながら太陽光を光源として地表で散乱して戻ってくる赤外線と地表面や大気から放射される赤外線をフーリエ変換赤外分光法（FT-IR）法で分光して、二酸化炭素とメタンの濃度を観測する衛星である。地表面で散乱される赤外線から解析される濃度としては、大気を鉛直方向に積算した「カラム平均濃度」が得られる。GOSATの観測点は100～300 km四方程度に1点程度であり、各点について1ヶ月間に10回程度観測が行われるため、晴れていれば多数のデータが得られる。しかし実際には、雲に覆われた地域や太陽高度が低い地域、海洋などの反射光が弱い地域の濃度は推定することができない。このため現在は、雲やエアロゾルなどに関する各種のスクリーニング条件を通過した二酸化炭素、メタン濃度デー

タを配信している。また、GOSATの1点1点の観測精度は、実測データの精度よりも一桁落ちるが、多数のデータを採ることができるために地域ごとの特徴を捉えることが可能になっている。これによって、アマゾンや中近東、シベリア、アフリカなどこれまでデータの存在しなかった領域での二酸化炭素やメタンの濃度データが得られるようになってきた。

一方で、地上観測などの現場での温室効果ガスの実測技術として、二酸化炭素の観測には歴史的に分光しない非分散赤外線吸収法（NDIR）が用いられてきた。これは連続的に二酸化炭素濃度を観測できる精度の高い分析法で、精度は0.1 ppm以下と考えられる。濃度レベルの低いメタンや$N_2O$、フロン類はガスクロマトグラフ法を基本として、GC-FID（Flame Ionization Detector）検出（メタン）やGC-ECD（Electron Capture Detector）検出（$N_2O$や$SF_6$）、GC-MS（Mass Spectrometer）（フロン類）などが観測に用いられてきた。これらは、サンプリングされた空気を検出器に適当量打ち込み、そのシグナルを得るために、間欠的なデータが得られることになる。また、FID検出には水素が必要であるために、またECDは$^{63}$Niなど放射性物質を検出器に用いるために、地上観測所には配置できるが、安全性の面などから船舶や航空機などの搭載が困難な技術である。

数年前から赤外吸収法の１種であるキャビティリングダウン法（CRD法）が実用化されてきた。これは、半導体赤外線レーザ技術の進歩とともに出現した技術であるが、対象物質の単一の赤外線吸収ラインに合わせて波長掃引を行いつつ、その吸収波長での吸収量を時間測定するものである。キャビティは3面（もしくは2面）の鏡で多重反射するようになっており、長光路のセルになっている。赤外線はパルスで放出されそのキャビティ中で対象ガスにより吸収され、減衰していく速度が時間分析されることで、濃度に換算するものである。この方法は、赤外線の強さに依存しないため、感度に変化が起こらない精度のよい分析法であり、また単一の分子種を計測するため、炭素同位体比や窒素、水素同位体比測定にも用いられる。さらに、この方法はメタンなど濃度の低い物質にも感度が出せるためにGC-FIDに代わる安全かつ連続的な測定ができる技術として、地上ステーションでの観測に加え、船舶、航空機、車など移動体でも使われるようになってきた。

このようなin situの観測所は国際的には100箇所程度ある（すべての観測所から連続データが採取されているわけではない）が、歴史的にはハワイや南極の観測から始まったアメリカのスクリプス海洋研究所のキーリング博士の業績やそれを引き継ぎ拡大した米国海洋大気庁（NOAA）、また豪州連邦科学技術研究機関（CSIRO）などの機関が行って来た経緯がある。アジア太平洋地域では日本の国立環境研究所（NIES）の地上、船舶、航空機を用いた広域立体観測が進行している。船舶としては、アジア路線や、太平洋路線、オセアニア路線など定期的な商業路線での観測が長年行われており、また、航空機観測としては、シベリアの吸収量変化を調べるためのロシアでの航空機観測とJALを用いた商業路線での広域観測（CONTRAILプロジェクト）が進行している。気象庁でも、3箇所の定点での観測、また、ヨーロッパでは、欧州委員会（EC）による観測計画が整備され、地域的な観測網がある。ルフトハンザによる航空機観測も行われている。

このように､温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)をはじめとする地球環境観測衛星、

航空機、船舶、地上観測ネットワークなどを利用した温室効果ガスの観測が行われ、多様なデータが蓄積されてきたことにより、大気中温室効果ガス濃度と輸送モデルを用いて、大気の側から地表の温室効果ガス収支を推定する手法（トップダウンアプローチ）が発展してきた。これは、インバース解析と一般に言われる手法であり、これまでのシミュレーションモデル（通常はフォワードモデル）を逆に解いていくものであり、発生吸収量を大気濃度変化から求めるものである。

地球表面、特に陸域における植物などによる温室効果ガス吸収量は、通常現場の観測から求めることが行われている。これは、微気象学的方法によるが、測定技術として時間的に高分解能で（つまり高速で、例えば10 Hzで）二酸化炭素濃度やメタンを測定するという技術が必要である。地域的なフラックスを測定するためには、各生態系で多点での観測が必要であり、観測のネットワークが必要であるが、現在では国際的なネットワークとしてのFLUXNETが観測手法の標準化やデータ流通促進を推進しており、2014時点で600地点を超える観測点が活動に参加している。アジア地域では、国立環境研究所が主要な事務局機能を担うAsiaFluxが地域ネットワークとしての役割を果たし、空白域を縮小するための観測点の拡大や人材育成に取り組んでいる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

まず一般的にリモートセンシングにおいてネックになっていることなどを下記にまとめた。

1. 衛星から直接計測／推定できる物理量／情報と、現業としての環境モニタリングで必要とされる物理量／情報の間にギャップが一部あることが、衛星データ利用の障壁になっている面がある。
   例1：衛星観測では土地被覆（例：草地）が分かるが、環境モニタリングとしては土地利用（例：畑地）の情報も必要である。
   例2：大気汚染について衛星では鉛直方向の積算値の監視になるが、健康被害などの面では地表付近の情報が必要である。
2. 衛星観測はその計画立案から打ち上げ、データ取得／解析までに要する時間が10年近くになることもあり、環境モニタリングの最新のニーズに必ずしも追随できていない。また一般にデータの継続性が保証されないため、現業としての環境モニタリングに組み込むことは容易ではない。
3. 我が国としての宇宙開発／宇宙利用についてはユーザ省庁の費用分担が強く求められているところであるが、1衛星プロジェクトに数百億円かかる現状では、費用対効果の面で宇宙利用を積極的に進めることは難しい。この問題を回避する方策としては以下が考えられる。
   1) 衛星／センサ開発および打ち上げの費用の少なくとも現状の数分の1以下への削減。
   2) 安価な小型衛星の更なる活用とそのために必要な衛星自体の性能向上および各種地球環境モニタリングセンサの大幅な小型化／低消費電力化。
   3) 複数のユーザ省庁が一つの地球観測衛星に共同出資するスキームの確立。
4. 欧米の公共衛星（国が予算の大半を負担するもの）については無償ですべてのデー

タを、用途を問わずに提供する方針がほぼ共通に採用されているが、我が国では有償データ配布の方針が一部にあるため、欧米の衛星データにユーザが流れる傾向がみられる。

次に、温室効果ガス実測観測での課題などを以下に整理する。

ここでの大気温室効果ガス観測技術開発の特徴として重要なものは、①観測の精度と②観測の代表性である。①観測精度という面から述べると、温室効果ガスの多くは比較的長寿命でありその間に地球上で混合が起こり比較的均一に分布するため、濃度の平均的な年変化率は1%以下でしかないことが多い。例えば、二酸化炭素濃度の年上昇量は0～3 ppm程度である。二酸化炭素濃度は現在ほぼ400 ppmに達しており、年変化率は1%以下であることがわかる。メタンの変化率も同様で、1,800 ppbに対して、濃度の年上昇量は0～13 ppb程度である。さらに加えるならば、大気の移動拡散の性質から、経度方向の濃度分布は比較的少ないため、吸収や排出などの濃度分布を観測するためにも観測精度が必要になる。これらのことから、計測側からの問題には、観測に必要な精度が高いことから計測機器（方法）のバイアスの除去や標準ガスの精度管理の技術的問題を検討する必要性が存在する。

計測方法のバイアスに関しては、それぞれの計測法に依存しているが、赤外吸収を用いる場合は、赤外吸収ラインの形が周りに存在する主要ガス（大気では窒素、酸素、アルゴン）の存在率に影響される場合と同位体存在比に関して吸収量の差が影響する場合がある。NDIR（非分散赤外吸収）法やCRD法では、例えば極端なケースとして、標準ガスを空気ではなく窒素ベースで作ってしまうと、%オーダーの見かけの変化として観測されてしまう。また、$^{12}$Cと$^{13}$Cの存在比が天然の二酸化炭素と異なる標準ガスを用いると、それがバイアスになる可能性もある。

温室効果ガスフラックスの観測には、10分の1秒という高速度で濃度の変動を測定できる応答の速い測器が必要で、これを気象観測用のタワーの上などの外気にさらされる場所に年間を通して設置しなければならない。このため、高時間分解で高い精度が要求されると同時に、熱帯の高温多湿、寒帯の低温、暴風雪などの気象条件にも耐える安定な測器の開発が課題である。このような測器として、二酸化炭素フラックスを測定するための赤外分析計は2000年を過ぎる頃から精度と安定性が増したため、現在では世界規模で普及しているが、メタンフラックス計は現在開発が進んできている。今後、メタンをはじめとする二酸化炭素以外の温室効果ガスについても、野外での長期観測に耐える機器開発と改良が進めば、世界規模での各種温室効果ガスのフラックス長期観測が可能となる。

温室効果ガス測定の世界的な比較実験は、世界気象機関（WMO）の下に組織的に行われつつあるが、WMOの設定する精度範囲にすべての機関がそろうことはまだ難しい。特にメタンや$N_2O$に関しては、機関ごとにある程度のギャップが存在する。しかしながら、二酸化炭素に関しては、ほぼ0.1 ppmの範囲の誤差に多くの機関がそろっている。これらは、測定の問題と標準ガスの製作上の違いなどによるものが混在しており、今後さらなる検討がされていくと考えられる。

衛星観測（リモートセンシング）においては常に感度校正というものができるわけで

はないので、精度や感度変化については常に別の方法との比較をしながらそれを担保しなければならない。そのため太陽光を地上からFT-IRで分光してカラム濃度を求める観測網と協力しながら精度管理を行っている。しかしながら、絶対精度の向上はそれだけでは望めないので、今後の課題となっている。

もう一つの課題である、②温室効果ガス観測値の代表性の問題は、グローバルにどれだけ多くの地域をカバーしたデータを収集できるかということに関係する。現在の観測点の配置は北半球の中緯度に多いが、熱帯地域や北極域、大陸内陸部に少ない。アジア地域には観測点は非常に少なく、観測点がない国がむしろ多い。これらの観測点の不均一性は、地球表面での代表的なデータがある地域は取得できていないことにつながり、地球上のフラックス（単位時間・単位面積当たりの輸送量）の推定について、重要なホットスポットなどの見逃しや、フラックス精度不十分につながる。現在、これについては、すべてではないが衛星による観測が補ってくれている地域が存在し、その観測の空白域が少しずつ狭くはなっているが、衛星と実際の現場データとは精度や質が異なるために、すべてが解決されているわけではない。今後、衛星データの精度や質の改善が望まれている。例えば衛星観測では、GOSAT-2が今後打ち上げられることになっているが、GOSATでは雲によるデータ採取不可能というケースが多く、熱帯域などのデータが大きく失われているがこれを改善するための方策なども検討されている。

現在、大気濃度データを使ったトップダウンアプローチによる吸収排出量推定という技術が進んでいるが、一方で地表で観測された温室効果ガス収支を衛星データやモデルで積み上げ広域化する手法（ボトムアップアプローチ）の研究も発展している。しかし、トップダウン・ボトムアップ手法を統合し、多様な観測データを融合し、全球の温室効果ガス収支をオペレーショナルに評価する実用的な手法は確立していない。

緊急に取り組むことが必要とされる課題は、全球規模で衛星・航空機・船舶・地上観測によるデータを解析システムに融合し、観測値と計算値がもっとも整合するよう解析システムのパラメータを自動的に調整する手法を開発することである。これにより、国別・地域別の炭素収支の精緻な評価を行い、炭素循環のいわゆるホットスポット（気候変化が炭素循環を変化させ、それが気候変化を加速させる地域）の変化を早期検出する。炭素循環の変化を早期発見してその影響を発信することは、国際社会に対し温暖化対策の緊急性を強く訴えることとなり、持続可能な地球環境と社会の実現に向けた貢献となる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

地球観測に関する政府間会合（GEO：Group on Earth Observations）における観測計画としての全球地球観測システム（GEOSS：Global Earth Observation System of Systems）の構築のためにCarbon Strategyを作成し、その実行計画として統合的地球規模炭素観測（IGCO：Integrated Global Carbon Observation）システムにより、統合的な観測やデータの流れの改善などを含む、科学者から、政策担当者までの情報の通り道を作るということが目指されている。

地域的な観測計画として、米国のCarbon Cycle Science PlanやEC諸国でのGHG-Europe、統合炭素簡素システム（ICOS：Integrated Global Observing Strategy）

といった計画が進行中である。中でもICOSは2014～2031年のヨーロッパにおいて長期にわたり温室効果ガスを地上や航空機、タワー、地上FTS、生態系観測ステーションなども含めて観測する計画であり、地域的な高密度のフラックス情報の提供を目指している。

国際連携に基づく衛星による二酸化炭素観測としては、欧州のEnvisat（2002～2012年）、我が国のGOSAT（2009年～）、米国のOCO-2（2014年～）がすでに打ち上げられたほか[24]、計画としては中国のTansat（2016年打ち上げ予定）[25]、我が国のGOSAT-2（2018年打ち上げ予定）の打ち上げが予定されている。GOSAT-2では、雲回避のシステムなどより多くのデータがとられる工夫が追加される予定である。また、エアロゾルについてのセンサを強化する予定になっている。このように二酸化炭素については結果として国際連携による長期的な衛星観測体制が整いつつある。

中分解能（数十m程度）衛星画像に関する欧米の連携としては、米国のLandsat-8（2013年～、30 m分解能）と欧州宇宙機関のSentinel-2（2機体制、1号機は2014年、2号機は2016年打ち上げ予定、10～60 m）については、相互に校正された互換性のあるプロダクト（画像）を無償で一般公開する取極が2013年2月に交わされた[26]。3機の衛星の連携により全球の中分解能衛星画像（雲を含む）が3日ごとに得られることになり、従来1 km程度のスケールであった数日程度の間隔の全球環境監視が今後は数十mのスケールで実施可能になる。一方で、米国を中心とする午後衛星コンステレーション計画があり、米国では午後1時半頃に赤道を通過する太陽同期軌道に複数の異なる地球観測衛星を投入し、ほぼ同時に取得されたさまざまな衛星観測データを複合利用する取り組み（Afternoon Constellation, A-Train）が進められている[27]。2014年7月現在、A-Trainには米国衛星が5機、日本およびフランスの衛星が1機ずつ含まれている。従来、複合利用をするためには1機の大型衛星に複数のセンサを搭載する必要があったが、その場合打ち上げ失敗時の影響が大きいほか、開発コスト／期間の面でも問題があった。このような問題はコンステレーション方式では軽減される。

アジア太平洋域地域においては残念ながら国際的な観測計画が共有化されてはいない。しかし、この地域は気候変動に係わるホットスポットとして、永久凍土地域、熱帯林、北方・熱帯の泥炭地などが含まれ、気候変化への応答において大きな関心がはらわれている。また、中国やインドなどの人口増大国、急速な経済発展を遂げつつある東南アジア諸国を抱えており、人為起源排出量の予測という面からも重要である。以上のことから、インド、中国、マレーシア、インドネシアでの観測協力が進みつつある。こういったアジア・太平洋域に重点をおいた観測体制の強化を図り、高い時間空間分解能でこの地域の温室効果ガス収支の変化を早期に検出できる手段をもつことは、国際環境問題に係る交渉上、極めて重要である。

東南アジアにおいては、途上国の森林減少・劣化に由来する温室効果ガス排出量の削減活動（例えば、REDD+：Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries Plus）が重要であり、その対策が各途上国において実施される際の測定・報告・検証（MRV：Measure, Report, Verify）システムの構築が重要視されている。REDD+をはじめとする緩和策の議論をより有効なものにするため、衛星を含めた複数の手法による温室効果ガス観測を統合的に利用して削減効果を実測す

るための試みも行われつつある。

### （６）キーワード

地球規模、環境モニタリング、温室効果ガス、GHG、炭素循環、CRD、CONTRAIL、GOSAT、OCO、リモートセンシング、衛星、静止衛星、小型衛星、光学、レーザレーダ、マイクロ波、GEO、GEOSS、MRV、REDD+

### （７）国際比較

■地球規模の衛星に関するリモートセンシング技術の国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・大学や研究機関によって研究開発が進められているが、その規模は近年必ずしも拡大していない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・大学や研究機関によって研究開発が進められているが、その規模は近年必ずしも拡大していない。 |
| | 産業化 | ○ | ↘ | ・我が国の衛星であってもその主要部材を海外調達するケースが近年少なくない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・その時の政権の方針にある程度左右されるが、一定規模の投資が常に行われ、アクティビティも高い。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・環境分野の衛星については、老朽機の代替／更新計画などがあまり進んでいない。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・今までに国のプロジェクトなどで開発された技術を積極的に活用している。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・欧州全体として一定規模の投資が継続的に行われている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・欧州全体として一定規模の投資が継続的に行われている。またCopernicusなどの将来計画も着実に推進されている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・さまざまな産官の連携が行われている。 |
| 中国[28] | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・非常に多くの投資が行われ、多数のプロジェクトが推進されている模様だが、その成果はあまり外部からは見えていない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・気象衛星に関する衛星「風雲」は各種のセンサを搭載している。非常に多くの投資が行われ、多数のプロジェクトが推進されている模様だが（その運用数は現在38基程度）、その成果はあまり外部からは見えていない。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・アクティビティは高いが、環境分野における技術は高くはない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・大学や研究機関によって研究開発が進められているが、特筆すべき成果はあまり出ていない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・2010年に打ち上げられた静止衛星（COMS-1）関係の研究開発が精力的に進められている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・欧州からの技術吸収フェーズからまだ脱却できていない。 |
| インド[29] | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・非常に多くの投資が行われ、多数のプロジェクトが推進されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・地球科学、気象、森林、農業、水資源、海洋変化、水産業へのプロジェクトが推進されている。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・継続的に開発が行われており、産業利用やデータ販売などが進んでいる。 |

■温室効果ガス実測技術の国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・大学および研究機関において研究開発が進められている。温室効果ガス観測衛星および各種プラットフォーム（船舶、航空機、衛星）を利用した温室効果ガス関連観測の分野、ならびに大気輸送モデルを用いた地表の温室効果ガス収支の逆解析手法において、世界的に見ても優位またはほぼ同等のレベルにある。ただし、今後当該分野を担う研究者の育成には大きな懸念がある。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・大学および研究機関において研究開発が進められているが、全球規模あるいは国レベルでの地球規模温室効果ガス収支の評価を長期的に可能にする、組織的かつオペレーショナルな観測・解析システムの構築においては、欧米にやや遅れをとっている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・産業化・量産に向けた活動には結びついていない。$CO_2$ゾンデ技術開発をしている会社がある。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・大学および研究機関において研究開発が進められている。温室効果ガス関連の各種観測分野、全球規模での大気輸送モデル開発、ならびに大気輸送モデルを用いた温室効果ガス収支の逆解析による全球および国レベルでの温室効果ガス収支評価の分野において、世界的に優位なレベルにある。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・大学および研究機関において研究開発が進められている。全球および国レベルでの温室効果ガス収支の評価を組織的に実施可能である。Aircoreという大気の鉛直サンプリング技術を開発。 |
| | 産業化 | ○ | ↗ | ・CRDの技術では世界をリードしており産業化・量産に向けた顕著な活動がある。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | ・大学および研究機関において研究開発が進められている。温室効果ガス関連の各種観測分野、全球規模での大気輸送モデル開発、ならびに大気輸送モデルを用いた温室効果ガス収支の逆解析による全球および欧州規模での温室効果ガス収支評価の分野において、世界的に優位なレベルにある。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・大学および研究機関において研究開発が進められている。全球および欧州規模での温室効果ガス収支の評価を組織的かつオペレーショナルに実施している。 |
| | 産業化 | △ | → | ・産業化・量産に向けた活動には結びついていない。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・中国科学院（CAS）や大学を中心として、海外機関との共同研究などに基づき研究開発が急速に進展している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・国レベルでの温室効果ガス収支の評価が実行可能になりつつある。 |
| | 産業化 | × | → | ・産業化・量産に向けた活動には結びついていない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | ・大学を中心として、海外機関との共同研究などに基づき研究開発が進展している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・国レベルでの温室効果ガス収支の評価が実行可能になりつつある。 |
| | 産業化 | × | → | ・産業化・量産に向けた活動には結びついていない。 |
| インド | 基礎研究 | △ | ↗ | ・大学を中心として、海外機関との共同研究などに基づき研究開発が進展している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | ・大学を中心として、海外機関との共同研究などに基づき研究開発が進展している。 |
| | 産業化 | × | → | ・産業化・量産に向けた活動には結びついていない。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど)、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) 地球環境研究センター「地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動は悪のための研究ロードマップ」CGER－REPORT－I112-2013、117ｐ
2) 気象庁気象衛星センター. http://www.jma-net.go.jp/msc/ja/
3) European Spase Agency(ESA). SENTINELS -4/-5 AND -5P. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinels_-4_-5_and_-5P
4) http://web.kma.go.kr/eng/biz/observation_04.jsp
5) http://kosc.kordi.re.kr/oceansatellite/coms-goci/introduction.kosc/
6) http://npp.gsfc.nasa.gov/
7) http://landsat.usgs.gov/science_GLS.php
8) http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index_j.html
9) http://www.pasco.co.jp/products/terrasarx/?gclid=CKn5ys-D278CFVGVvQodSU0A7Q
10) http://www.spaceimaging.co.jp/product/cosmo_skymed.html
11) http://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom_w/index_j.html
12) http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/
13) http://db.cger.nies.go.jp/ilas2/en
14) http://www.gosat.nies.go.jp/
15) http://www.nasa.gov/mission_pages/calipso/main/
16) http://smiles.tksc.jaxa.jp/indexj.shtml
17) https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iss-jem-hrep
18) http://www.sstl.co.uk/
19) http://www.dmcii.com/
20) http://www.pasco.co.jp/products/rapideye/?gclid=CIi7zeOI278CFVWSvQodXbIARg
21) http://www.wakayama-u.ac.jp/ifes/uniform/index.html
22) http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/~rising2/jp/
23) http://www.esa-ghg-cci.org/?q=overview
24) http://oco.jpl.nasa.gov/
25) https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tansat/

26) http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/ESA_NASA_collaboration_fosters_comparable_land_imagery/
27) http://atrain.nasa.gov/
28) 辻野照久、各国の地球観測動向シリーズ（第3回）中国の地球観測活動の方向性―欧州から学び地球観測応用範囲を拡大―、科学技術動向、138号、No.9,33-40(2013)
29) 辻野照久、各国の地球観測動向シリーズ（第5回）インドの地球観測活動の方向性―持続可能な資源利用に貢献する世界有数の地球観測衛星群―、科学技術動向、140号、No.11、29-34(2013)

### ３．４．５．２　地域の環境と人間活動の把握（地域の環境計測、人間活動とその影響の把握）

#### （１）研究開発領域名

地域の環境と人間活動の把握（地域の環境計測、人間活動とその影響の把握）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

環境への人間活動の影響を定量的に把握するための指標として、近年、化学マーカーが用いられている。雨天時越流下水のマーカーとしての糞便指標や、老朽化した下水管路網からの漏水による地下水汚染マーカーなどである。これらの化学マーカーは生物化学的酸素要求量（BOD：Biochemical Oxygen Demand）や大腸菌などの従来の指標を補完・代替する潜在性がある。化学マーカーの標準化、基準化を進めるとともに、これらを用いた体系的な人間活動の影響把握の調査が必要である。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

水環境汚染の実態把握にはBOD、化学的酸素要求量（COD：Chemical Oxygen Demand）、栄養塩類、大腸菌などの指標が用いられてきた。これらの従来型の指標は汚染の実態を総体として評価するのに優れているが、さまざまな発生源から水域へ供給されるため、汚染源の特定やそれに基づく発生源対策には不十分である。化学マーカーがこれらを補完するための指標として有効であり、本領域では化学マーカーに焦点をあて記述する。

化学マーカーとは、ある特定の発生源から環境へ負荷される、環境中で安定な化学物質である[1)]。これまで数十種の化学物質が化学マーカーとして提案され、実用化されてきた。この中で21世紀の水環境汚染の低減につながるマーカーとその応用動向や開発動向を以下に例示する。

21世紀の先進国の大都市では下水道が100％普及しており、都市河川においては下水処理水の占める割合が大きくなっている。通常の下水処理では除去しきれない医薬品や抗生物質が下水処理水として都市水域へ供給される。医薬品や抗生物質の中でも、難分解性の成分は下水処理水のマーカーとして、下水処理水の水域への負荷を調べるための化学マーカーとして用いられている[2-4)]。鎮痒剤のクロタミトン[4)]や抗てんかん剤のカルバマゼピン[2,4)]などが下水処理水の化学マーカーとして、欧米、日本、並びに東アジア諸国で用いられている。

東京や大阪のように古くから下水道が普及してきた大都市では、合流式の下水道を採用しているため、一定以上の強度の降雨があると、未処理の下水が雨水とともに都市水域へ放流される雨天時越流下水が発生する。雨天時越流下水による水質悪化は糞便性大腸菌などの微生物指標で調査されているが、微生物の増殖・死滅などの問題があり、信頼性に欠ける。それを補完・代替する意味で、糞便指標のコプロスタノール[1)]や下水のマーカーの直鎖アルキルベンゼン[1,5)]などが提案され、実地で応用され、有用性は十分に確認されてきた[6)]。しかし、これらの化学マーカーと公衆衛生の間の定量的な関係は確立されていない。今後、公衆衛生的な観点から、これらの化学マーカーを定量的に扱い、基準化（公衆衛生上問題となる化学マーカー濃度を設定）していくことが必要であ

る。このような基準化は、先進国だけでなく、下水道普及が遅れており、未処理の下水による汚染が問題になっている開発途上国において人間活動の影響を評価し、対策を立案していく上でも有用である。

地下水は大都市の自己水源として重要であり、防災的にも量・質を保全することが必要である。先進国で、老朽化した下水管路網が破損して、下水が地下水を汚染していることが問題化している[7]。地下水への下水の混入箇所を特定して、対策を講じることが必要である。地下水への下水混入を特定するためのマーカーとして、難分解性の医薬品・抗生物質[4]や合成甘味料[8,9]などが水溶性の下水マーカーとして応用されている。これらの下水マーカーの中でも合成甘味料が、その分析操作が簡便であることからマーカーとして用いる調査が欧米を中心に活発に行われてきている[8-11]。

都市表面流出水、特に道路排水も、21世紀の都市が抱える大きな水質汚濁源である。表面流出が時空的に大きく変動することから、従来型の指標を用いて定量的に把握することは困難であり、化学マーカーの開発が求められてきた。これまでに、タイヤ摩耗粒子に由来するベンゾチアゾール類[12]やレジン酸[13]が道路排水のマーカーとして提案され、応用的な研究が行われてきた。しかし、これらのマーカーは物性が水溶性と粒子吸着性の中間的なものであることもあり、定量的な取り扱いが難しく、欧米でも応用例は少ない。水溶性の強いマーカーと粒子吸着性の強いマーカーの開発が必要である。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

それぞれの汚染源についてのマーカーごとに研究開発状況は異なり、課題・ボトルネックも異なるので、汚染源ごとに記載する。

糞便汚染のマーカーとしてのコプロスタノールと直鎖アルキルベンゼンについては、マーカーとしての有用性はこれまでの基礎研究[1,14,15]や応用的な調査[6,16,17]から十分に明らかにされてきた。公衆衛生学的な視点からの基準化が必要である。これまでこれらのマーカーと糞便性大腸菌の関連を調べる研究が行われてきたが[18,37]、それらでは旧来の微生物指標を補完することはできても代替することができない。環境微生物や公衆衛生学の研究者とマーカーを扱う化学者が共同して、公衆衛生的な視点から微生物指標と化学マーカーの徹底した比較を行い、化学マーカーの基準化を行うことが求められる。

化学マーカーの分析はガスクロマトグラフ-質量分析計（GC-MS：Gas Chromatography Mass Spectrometry）や高速液体クロマトグラフ-タンデム質量分析計（LC-MS/MS：Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry）を使って最終的な測定が行われる。さらに、それらの機器に注入する以前に煩雑な前処理が必要な場合が多い。機器が高価であることと前処理が煩雑であることが、化学マーカーをルーチンな指標として利用する際のボトルネックである。前処理の簡便化、分析機器のコストダウンが必要である。特に、環境の質の把握のためのモニタリングに対する位置付けを高め、公的機関が継続的に実施することが必要である。

地下水の下水マーカーの合成甘味料に関しては、他のマーカーに比べて格段に前処理が軽減され、多数の試料をルーチン分析できる環境が整ってきた。しかし、化学マーカーに環境基準がないため環境基準を見直すとともに、公的機関による化学マーカーの活用も検討していく必要がある。また、大学、研究所側には化学マーカーの現場への応用

の基盤があるので、官学の連携促進が望まれる。

道路排水のマーカーについては、水溶性および粒子吸着性のマーカーについて、それぞれ決定的なマーカーが開発されていない。全く新しいマーカー検索への挑戦をはじめ、最新の機器を活用して、水溶性および粒子吸着性のマーカーの検出・開発を目的とした基礎的な研究が必要であろう。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

粒子吸着性の化学マーカー（下水関係）は1998年頃までに基礎的な研究が出そろっていた[1)]。それに加えて、ここ10年間で医薬品・抗生物質を水溶性のマーカーにする研究が進展してきた[3,4)]。その延長線上で合成甘味料を水溶性の下水マーカーとして開発し、応用する調査が進んできた[8,9)]。粒子吸着性と水溶性が出そろったこともあり、各種化学マーカーを総括し、世界的な標準化や基準化を提案するレビューペーパーもでてきた[19)]。標準化や基準化のための国際学会における化学マーカーの特別セッションも検討されており、それを契機に国際標準化や基準化が進む可能性もある。

2020年東京オリンピックでは、東京湾内のいくつかの海域が会場として利用される計画である。一方、それらの会場が雨天時越流下水の影響を受ける可能性も懸念されている。雨天時越流下水による東京湾岸部の屎尿汚染を検討する専門家の会合も持たれている。会合では、雨天時越流下水の影響を測るための指標が旧来の微生物指標であり、信頼性に欠けており、コプロスタノールなどの化学マーカーの導入も必要ではないかと議論されている。国際的な視点からの水質指標という点からも化学マーカーの基準化を検討する時期であると考えられる。

### （６）キーワード

指標化合物、分子指標、雨天時越流下水、地下水汚染、屎尿汚染、道路排水、合成甘味料、医薬品・抗生物質、コプロスタノール、直鎖アルキルベンゼン、タイヤ摩耗物

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ・糞便指標 [1)]、下水マーカー [1, 4, 20, 21)]、道路排水マーカー [12)] について、基礎研究は多数行われてきており、中には世界初のもの [12, 22)] もあり、世界的に進んだ水準にあると評価される。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・大学や研究所の研究者によるマーカーの応用研究 [6, 17, 21, 23)] は進んでいる。<br>・行政機関によるマーカーの応用例は、環境省のモニタリングに一部マーカーが応用されているのみで、全体的に進んでいない。環境省の海洋環境モニタリング調査でも2009年度まではマーカーを測定していたが [36)]、2010年度以降の調査では測定が打ち切られ、欧米に遅れをとっている。官学連携の応用研究も極めて少ない。 |
| | 産業化 | × | → | ・民間の分析会社がマーカーを独自に分析したり、分析可能項目として商業化しているところは見あたらない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・糞便指標 [14, 15)]、下水マーカー [1, 3, 5)] について、基礎研究は多数行われてきており、世界的に進んだ水準にあると評価される。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・大学や研究所の研究者によるマーカーの応用研究 [16, 24)] は進んでいる。<br>・行政機関によるマーカーの応用も進められている。 |
| | 産業化 | ◎ | ↗ | ・民間の分析会社がマーカーを独自に分析したり [25)]、それを使って調査提案を行政に対して行った例もある。産業化は進んでいると評価される。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | ・下水マーカー、特に水溶性の下水マーカー [2, 8, 26)] に関する研究は世界をリードしている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・大学や研究所の研究者によるマーカーの応用研究 [9)] は進んでいる。 |
| | 産業化 | △ | → | ・目立った動きはない。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・マーカー開発の基礎研究はほとんど行われていない。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | ・他国で開発されたマーカーの中国の環境への応用 [27-33)] は極めて活発に行われている。 |
| | 産業化 | △ | → | ・目立った動きはない。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | ・マーカー開発の基礎研究はほとんど行われていない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・海域での応用例 [34)] と陸水での応用例 [35)] はあるが全体に数は少ない。 |
| | 産業化 | △ | → | ・目立った動きはない。 |

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1) Takada, H., Eganhouse, R., *Molecular markers of anthropogenic waste: Their use in determining sources, transport pathways and fate of wastes in the environment,* in *The Encyclopedia of Environmental Analysis and Remediation,* R. Mayers, Editor. 1998, Wiley and Sons: p. 2883-2940.
2) Clara, M., Strenn, B., Kreuzinger, N. (2004) Carbamazepine as a possible anthropogenic marker in the aquatic environment: investigations on the behavior of Carbamazepine in wastewater treatment and during groundwater infiltration., *Water Research*, **38**, 947-954.
3) Glassmeyer, S.T., Furlong, E.T., Kolpin, D.W., Cahill, J.D., Zaugg, S.D., Werner, S.L., Meyer, M.T., Kryak, D.D., pp (2005) Transport of Chemical and Microbial Compounds from Known Wastewater Discharges: Potential for Use as Indicators of Human Fecal Contamination, *Environmental Science & Technology*, **39**, 5157 - 5169.
4) Nakada, N., Kiri, K., Shinohara, H., Harada, A., Kuroda, K., Takizawa, S., Takada, H. (2008) Evaluation of Pharmaceuticals and Personal Care Products as Water-soluble Molecular Markers of Sewage, *Environmental Science & Technology*, **42**, 6347-6353.
5) Eganhouse, R.P., Olaguer, D.P., Gould, B.R., Phinney, C.P. (1988) Use of molecular markers for the detection of municipal sewage sludge at sea, *Marine Environmental Research*, **25**, 1-22.
6) 平成14年度建設技術研究開発助成制度事業「環境中における雨天時下水道由来のリスク因子の変容と動態」代表：古米弘明.
http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h15giken/h14/pdf/03.pdf
7) Wakida, F.T., Lerner, D.N. (2005) Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study, *Water Research*, **39**, 3-16.
8) Buerge, I.J., Buser, H.-R., Kahle, M., M√ºller, M.D., Poiger, T. (2009) Ubiquitous Occurrence of the Artificial Sweetener Acesulfame in the Aquatic Environment: An Ideal Chemical Marker of Domestic Wastewater in Groundwater, *Environmental Science & Technology*, **43**, 4381-4385.
9) Wolf, L., Zwiener, C., Zemann, M. (2012) Tracking artificial sweeteners and pharmaceuticals introduced into urban groundwater by leaking sewer networks, *Science of The Total Environment*, **430**, 8-19.
10) Van Stempvoort, D.R., Roy, J.W., Brown, S.J., Bickerton, G. (2011) Artificial sweeteners as potential tracers in groundwater in urban environments, *Journal of Hydrology*, **401**, 126-133.
11) Sidhu, J.P.S., Ahmed, W., Gernjak, W., Aryal, R., McCarthy, D., Palmer, A., Kolotelo, P., Toze, S. (2013) Sewage pollution in urban stormwater runoff as evident from the widespread presence of multiple microbial and chemical source tracking markers, *Science of The Total Environment*, **463,Äì464**, 488-496.
12) Kumata, H., Yamada, J., Masuda, K., Takada, H., Sato, Y., Sakurai, T., Fujiwara, K. (2002) Benzothiazolamines as Tire-Derived Molecular Markers: Sorptive Behavior in

Street Runoff and Application to Source Apportioning, *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 702-708.

13) Kumata, H., Mori, M., Takahashi, S., Takamiya, S., Tsuzuki, M., Uchida, T., Fujiwara, K. (2011) Evaluation of Hydrogenated Resin Acids as Molecular Markers for Tire-wear Debris in Urban Environments, *Environmental Science & Technology*, **45**, 9990-9997.

14) Murtaugh, J.J., Bunch, R.L. (1967) Sterol as a Measure of Fecal Pollution, *JWPCF*, **39**, 404-409.

15) Walker, R.W., Wun, C.K., Litsky, W. (1982) Coprostanol as an indicator of fecal pollution., *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, ***12***, 91-112.

16) Writer, J.H., Leenheer, J.A., Barber, L.B., Amy, G.L., Chapra, S.C. (1995) Sewage contamination in the upper Mississippi River as measured by the fecal sterol, coprostanol, *Water Research*, **29**, 1427-1436.

17) Isobe, K.O., Tarao, M., Zakaria, M.P., Chiem, N.H., Minh le, Y., Takada, H. (2002) Quantitative application of fecal sterols using gas chromatography-mass spectrometry to investigate fecal pollution in tropical waters: western Malaysia and Mekong Delta, Vietnam, *Environ Sci Technol*, **36**, 4497-507.

18) Leeming, R., Nichols, P.D. (1996) Concentrations of coprostanol that correspond to exsiting bacterial indicator guideline, *Water Research*, **30**, 2997-3006.

19) Harwood, J.J. (2014) Molecular markers for identifying municipal, domestic and agricultural sources of organic matter in natural waters, *Chemosphere*, **95**, 3-8.

20) Hayashi, Y., Managaki, S., Takada, H. (2002) Fluorescent Whitening Agents in Tokyo Bay and Adjacent Rivers:‚Äâ Their Application as Anthropogenic Molecular Markers in Coastal Environments, *Environmental Science & Technology*, **36**, 3556-3563.

21) 高田秀重（2013）水溶性有機汚染物質による環境問題，*水環境学会誌*, **36**, 308-313.

22) Ishiwatari, R., Takada, H., Yun, S.-J., Matsumoto, E. (1983) Alkylbenzene pollution of Tokyo Bay sediments., *Nature*, **301**, 599-600.

23) Isobe, K.O., Zakaria, M.P., Chiem, N.H., Minh, L.Y., Prudente, M., Boonyatumanond, R., Takada, H. (2004) Distribution of linear alkylbenzenes (LABs) in riverine and coastal environments in South and Southeast Asia., *Water Research*, **38**, 2449-2459.

24) Eganhouse, R.P., Sherblom, P.M., *Assessment of the chemical compositions of the Fox Point CSO effluent and axxociated subtidal and intertidal environment: Organic chemistry of CSO effluent, surficial sediments and receiving waters*. 1991, Commonwealth of Massachusetts: Boston, MA.

25) Hunt, C.D., Dragos, P., King, K., Albro, C., West, D., Uhler, A., Ginsburg, L., Pabst, D., Redford, D. (1996) The fate of sewage sludge dumped at the 106-mile site - sediment trap study results, *Journal of Environmental Engineering*, **2**, 285-323.

26) Stoll, J.-M.A., Poiger, T.F., Lotter, A.F., Sturm, M., Giger, W.

27) Peng, X., Zhang, G., Mai, B., Min, Y., Wang, Z. (2002) Spatial and temporal trend of sewage pollution indicated by coprostanol in Macao Estuary, southern China, *Marine Pollution Bulletin*, **45**, 295-299.

28) Peng, X., Zhang, G., Mai, B., Hu, J., Li, K., Wang, Z. (2005) Tracing anthropogenic contamination in the Pearl River estuarine and marine environment of South China Sea using sterols and other organic molecular markers, *Marine Pollution Bulletin*, **50**, 856-865.

19) Ni, H.-G., Lu, F.-H., Wang, J.-Z., Guan, Y.-F., Luo, X.-L., Zeng, E.Y. (2008) Linear alkylbenzenes in riverine runoff of the Pearl River Delta (China) and their application as anthropogenic molecular markers in coastal environments, *Environmental Pollution*, **154**, 348-355.

30) Ni, H.-G., Shen, R.-L., Zeng, H., Zeng, E.Y. (2009) Fate of linear alkylbenzenes and benzothiazoles of anthropogenic origin and their potential as environmental molecular markers in the Pearl River Delta, South China, *Environmental Pollution*, **157**, 3502-3507.

31) Wang, J.-Z., Guan, Y.-F., Ni, H.-G., Liu, G.-J., Zeng, E.Y. (2010) Fecal steroids in riverine runoff of the Pearl River Delta, South China: Levels, potential sources and inputs to the coastal ocean, *Journal of Environmental Monitoring*, **12**, 280-286.

32) Kannan, N., Kim, M., Hong, S.H., Jin, Y., Yim, U.H., Ha, S.Y., Son, Y.B., Choi, D.-L., Shim, W.J. (2011) Chemical tracers, sterol biomarkers and satellite imagery in the study of a river plume ecosystem in the Yellow Sea, *Continental Shelf Research*, **33**, 29-36.

33) Wang, J.-Z., Zhang, K., Liang, B. (2012) Tracing urban sewage pollution in Chaohu Lake (China) using linear alkylbenzenes (LABs) as a molecular marker, *Science of The Total Environment*, **414**, 356-363.

34) Lee, H., Hong, S., Kim, M., Ha, S., An, S., Shim, W. (2011) Tracing origins of sewage and organic matter using dissolved sterols in Masan and Haengam Bay, Korea, *Ocean Science Journal*, **46**, 95-103.

35) Joo, Y.H., Kawano, M., Jung, K.Y., Tatsukawa, R. (1994) Determination of fecal pollution for well and surface waters from livestock raising areas in Korea using coprostanol as an indicator, *Toxicological & Environmental Chemistry*, **45**, 57-67.

36) 環境省海洋環境モニタリング調査結果について.
http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=24256&hou_id=17983

37) Isobe, K.O., Tarao, M., Chiem, N.H., Minh, L.Y., Takada, H. (2004) Effect of Environmental Factors on the Relationship between Concentrations of Coprostanol and Fecal Indicator Bacteria in Tropical (Mekong Delta) and Temperate (Tokyo) Freshwaters, *Applied and Environmental Microbiology*, 70, 814-821.

### ３．４．５．３　環境情報基盤の整備と活用（ユビキタス情報、環境ビッグデータ、GIS）

#### （１）研究開発領域名

環境情報基盤の整備と活用（ユビキタス情報、環境ビッグデータ、GIS）

#### （２）研究開発領域の簡潔な説明

環境・エネルギー問題について、これまでにさまざまな情報が蓄積されてきており、それらの有効活用が社会的な課題となっている。その活用のためのツールとなるべき情報基盤技術は、近年急速に進歩・発展してきているが、それをさらに有効に活用するために、より環境の分野に適合した形での活用技術の開発およびそれらを組み合わせたシステムの構築、さらには有効活用のための政策的課題の克服を目指す。

#### （３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

地球温暖化、生物多様性減少などに代表される地球規模の環境問題が注目されるようになって久しい。それらの問題に対して、1992年の地球サミット以来、さまざまな国際的な取り組みが進められてきており、それに関連する技術面や政策面での研究開発も多方面で進められてきている。

それらの取り組みや研究開発に伴い、環境に関わる多くの情報が蓄積されるようになってきた。代表的なものが環境モニタリングデータであるが、それだけにとどまらず、人間社会に関わるさまざまな情報は、環境問題への対策や未然防止策を考える上で、必要かつ有効なものといえる。地球規模の問題に対するためには、地球全体をカバーするような情報が必要であり、それらの集積が進んできたことによって、いわゆるビッグデータと呼ばれるような大規模なデータ集合体が実在するような状況となってきている。

一方、情報を扱うための技術やシステムについても、ここ数十年の間に極めて急速に進歩してきた。その代表的な要素としては、コンピュータ性能の目覚しい向上、インターネットに代表される情報通信機能の向上があげられ、それらは情報基盤と呼ばれて、社会基盤の一つとしてとらえられるようになってきた。日本では1960年代から情報社会あるいは情報化社会という用語がみられるようになり、1980年代からのパソコンの普及、1990年代からのインターネットの普及を経て、情報通信機器やシステムが社会を支えることが常識化し、その流れは第二次産業から第三次産業へのシフトという形で、日本の産業構造さえも変化させてきたといえる。そのような動きは、日本を上回る情報大国である米国はいうまでもなく、全世界的に広がっていると言っても過言ではない。

それらの中で、「ユビキタスネット社会」というキーワードがあげられる。ユビキタスネットとは、「『いつでも』（昼でも夜でも24時間）、『どこでも』（職場でも家でも、都会でも地方でも、移動中でも）、『何でも』（家電も身の回りの品も、車も食品も）、『誰でも』（大人も子供も、高齢者も障害者も）、ネットワークに簡単につながる社会の実現」と定義される[1)]。総務省は、平成24年版情報通信白書において、すでに「ユビキタスネットワーク環境の完成」という表現を使っており、すでに実用段階に入っているといえる[2)]。海外でも、国ごとのばらつきはあるものの、世界各国で同様な状況が進んでいることは確実である。

環境情報についても、このユビキタスネットの機能を十分に活用することによって、

有効な環境の管理が行われることが大いに期待され、そのための技術的、政策的な取り組みが課題となっている。技術面では、総務省は完成という言葉を使っているが、一通りの基礎的な要素技術が開発され、基本的な機能が実現した段階という意味であって、具体的な利用技術や、利用のための制度などについては、今後もさまざまな研究開発が求められることは間違いない。

これらの観点から、すでにいくつかの研究開発が進められており、高岡ら[3]による研究や藤井ら[4]による研究は、その代表例といえる。また総務省では、「ユビキタスネット社会の進展と環境に関する調査研究会[5]」の設置、「ユビキタス特区における環境立国プロジェクト[6]」の推進などの施策を進め、平成22年版情報通信白書[7]において、サステイナブル社会実現のためにテレワークを推進することが必要と指摘しているなど、環境情報に関する多くの方面で、ユビキタスネット社会の活用に向けた動きが進んでいる状況にある。

2番目のキーワードとして、「ビッグデータ」があげられる。ビッグデータという用語は近年多くの分野で盛んに使われるようになったが、その定義は必ずしも明確になっていない。総務省は平成24年版情報通信白書[2]において、要約すると以下のように説明している。

- 量的側面：典型的なデータベースソフトウェアが把握し、蓄積し、運用し、分析できる能力を超えたサイズのデータ。
- 質的側面：構成するデータの出所が多用であり、利用目的からその対象が画定できるようなデータ。

さらにビッグデータの特徴は、データの利用者やそれを支援する者それぞれの観点によって異なるが、共通する特徴として、多量性、多種性、リアルタイム性などがあげられるとしている。ICTの進展によって、このような特徴をもった形でデータが生成・収集・蓄積されることが可能かつ容易になってきており、異変の察知や近未来の予測などを通じ、利用者個々のニーズに即したサービスの提供、業務運営の効率化や新産業の創出などが可能となる点に、ビッグデータ活用の意義があるとしている。

これらの定義には、なお曖昧な点が含まれるが、環境情報においてもビッグデータと呼ぶことが可能なものが出現しつつあり、今後それらが増えていくことは確実である。具体的には、オンライン化された環境モニタリングデータや気象観測データは、現在すでに上記のビッグデータの定義に合致しているとみることができる。そのような状況から、その活用のための研究開発が重要な課題となることは確実といえる。

ビッグデータについては、国際的な動きも急速に進んでおり、日本よりも欧米が先行する状況にある。具体的な動きの例としては、世界最大規模の電気通信系国際学会であるIEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）が2012年からビッグデータに特化した国際学会を毎年開催しており、第3回は2014年10月に開催された[8]。そのセッション構成は、ビッグデータの構築技術、解析技術、活用技術など多方面にわたっており、多数の研究者の参加があった模様である。ただし、プログラムを見る限り、環境情報に直接関わる講演は少ない。なお、IEEEは研究者と産業界を交えたビッグデータに関する国際会議（Congress）も毎年開催している。米国の国レベルでは、大統領府科学技術政策局（OSTP）が「ビッグデータ研究発展イシシアティブ」を発表して、政府の

戦略として取り組む姿勢を明確にしており、研究開発予算が2億ドルに上っている。

国内では、総務省が情報通信審議会ICT基本戦略ボードに「ビッグデータの活用に関するアドホックグループ」を設けて、活用に向けた国レベルの取り組みの検討を開始し、平成25年版情報通信白書[9]では国としての活用推進の方針を示すとともに、産業界における活用状況や事例の紹介を行っている。その中で、直接環境情報に該当するものはみられないが、エネルギーや農業気象分野の事例があげられており、環境情報に関連する例として注目される。

3番目のキーワードとして、地理情報システム（GIS：Geographic Information System）を取り上げる。GISは、位置や空間に関するさまざまな情報をコンピュータ上で重ね合わせて分析を行ったり、情報を可視化したりするツールのことである[10]。このGISは、ユビキタスネットやビッグデータと比べると歴史が長く、1960年代にはすでに実用レベルのシステムが実現していた記録があるとされている。1980年代にはGISソフトウェアが商品化されるようになり、地図情報を必要とする多くの分野で利用されるようになった。環境情報も、空間的な位置情報の重要性が高い分野であることから、GISが活躍する余地が非常に広いということができる。システム自体の歴史が長いことから、環境情報への活用を目的とした研究例や書物は多数あり、例えば小山ら[11]、山本[12]、大西[13]などがあげられる。

国際的にみると、日本で市販されているGISソフトの多くが海外で開発されたものであることから、欧米、特に米国が要素技術面ではもっとも研究開発が進んでいるとみることができる。ただし、環境情報に関するGISの活用については、日本もすでに高いレベルに達しているといってよい。GIS単体としての機能は、すでに完成の域に近いレベルに達しているとみられることから、今後はユビキタスネットやビッグデータのような新しい流れとGISをどのようにして結びつけるかが重要となるものと思われる。

### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

まず前項で取り上げた3つのキーワードのそれぞれに対して、環境情報への活用の面からみた課題やボトルネックとなり得る点を指摘する。

最初に、ユビキタスネットについては、現状ですでに一般市民の多くがタブレット端末やスマートフォンを使って、多くの環境情報を得ることが可能となっていることを前提に考える必要がある。これらの機能がすでに実現し、誰もが端末機器を所持できるようになっていることから、技術面での課題はすでに解消されてきているといってよい。逆に、ユビキタスネットの弱点ともいうべき問題点を、どのように克服するかという点が、最重要課題といえる。その問題点の第一は、情報の一人歩きである。市民が情報を正しく理解し、正しく利用することが必須であるが、現在でもインターネット経由の情報はしばしば誤解を招き、誤った利用をされている実態があることから、今後その対策の必要性はさらに高まると予想される。対策として、例えば情報活用に関する教育を充実させることや、流通する情報の理解の助けとなるような情報を付加することなどがあげられる。問題点の第二は、情報弱者の存在である。ユビキタスネット社会から取り残される市民は、今後減少することは確実ではあるものの、ゼロになることはないとみる必要がある。これは環境情報に限ったことではないが、情報を受け取れる人と受け取れ

ない人の格差をどのようにして解消するかは、大変重要な政策課題といえる。総務省でもすでに取り組みが始まっているが [7]、短期的に解消する見通しは立っていない。

次にビッグデータについては、現在のハードウェア・ソフトウェアで処理しきれないデータ量という定義からみて、それだけの大量のデータを処理するための技術が最優先課題といえる。宇宙開発や気象予測などでは、分散処理の技術が多く適用されていることから、ビッグデータの分析も、それらと同様の技術の利用が当面の方策と考えられる。一方で、環境情報のビッグデータが今後増えてくる際に、情報の信頼性や統一性が大きな問題となる可能性が高い。前述のように、ビッグデータは情報の出所も多様である点に特徴がある。出所が多様であるということは、情報の獲得方法（一般には計測方法）が多様である可能性を否定できないことになる。環境情報の多くは、機器を用いた計測データであることから、計測方法が異なれば、比較や分析には適さないことになる。ビッグデータが有効に活用されるためには、情報獲得方法の統一をどのように実現するかが、技術面でも政策面でも大きな課題といえる。また、ビッグデータに対する技術的な取り組みは、現時点では主に情報機器メーカーあるいは情報通信企業が中心になって進められている傾向が強いことから、国レベルでの政策面での施策の必要性も指摘しておきたい。

3番目のGISについては、前述のようにすでにシステム開発技術面では完成の域に近づいていることから、単独の要素技術としての技術的な課題はほとんどないとみてよい。ただし、情報の可視化機能によって情報流通が盛んになることが、ユビキタスネットについて述べたのと同様の問題、すなわち情報の一人歩きを引き起こす可能性は否定できない。また、地図情報の誤りは重大な影響をもたらす可能性があるので、誤り対策が最大の課題ともいえる。

最後に、3つのキーワードを総合した課題にふれる。すでにビッグデータとGISを組み合わせたデータ処理が、マーケティングなどに活用されるような動きがある。また、ユビキタスネットを通じたビッグデータの利用や、ユビキタスネットにGIS機能を加えるような動きも、今後増えてくることが確実視される。そのような動きに対しては、個別課題でもふれた情報の信頼性確保や誤り対策、さらには情報セキュリティ対策が、より重要性を増してくることが考えられる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

環境情報に限ったことではないが、情報通信分野で近年ユビキタスネットとともに注目されているシステム技術に、クラウド・コンピューティングがある。これは、離れた場所にあるハードウェア、ソフトウェア、データを含めたコンピュータ資源を、ネットワークを通じて利用するシステム方式または機能を指す用語である。用語自体は2006年に出現したとされているが、システム的には従来からあったTSS（Time Sharing System）、VAN（Value-Added Network）、ASP（Application Service Provider）などのサービス形態の発展形とみることができる。このクラウド・コンピューティングの普及は、これまでの情報通信機器の高速化・大容量化による情報通信コスト削減をさらに上積みする形となり、ビジネスモデルの変化にも貢献していると考えられる。このような動きは、環境情報の分野でも、本領域で取り上げたユビキタスネット、ビッグデー

タ、GISの活用を促進するものと期待される。

### （６）キーワード

環境情報、情報基盤、ユビキタスネット、ビッグデータ、GIS、クラウド・コンピューティング、有効活用、情報獲得、情報信頼性

## （７）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|---|---|---|---|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | ・大学などの研究機関を中心に取り組まれてはいるが、欧米、特に米国が先行しており、必ずしも優位とはいえない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | ・要素技術面では欧米に立ち遅れた面もあるが、応用技術としては、すでに高いレベルにある。<br>・総務省が各種の推進プロジェクトを設けており、産業界もそれに呼応していることから、今後さらなる向上が期待される。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・クラウド・コンピューティングに代表される新しいビジネスモデルがいち早く取り入れられ、世界的にみても優位にある。<br>・ビッグデータの活用について、産業界が積極的に取り組む姿勢が顕著である。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ・情報基盤技術に関する基礎研究は、従来から米国が牽引してきた経緯があり、現在もそれは変わっていない。<br>・大学と研究機関と企業が競い合いつつ連携する形ができていることから、今後も優位を持続すると予想される。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ・現在ももっとも情報基盤整備が進んだ国であり、世界的な優位は揺るがない。<br>・ビッグデータ研究発展イニシアティブに多額の予算が投入されるなど、今後も優位を保つ要因が多い。 |
| | 産業化 | ◎ | → | ・多くの情報通信産業があり、新しいビジネスモデルへの対応力も高いので、引き続き優位にある。<br>・独占化、寡占化が進み、今後の発展性にはやや疑問がある。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ○ | → | ・従来から情報通信分野の基礎研究では米国の先行を許しており、現在もその状況は変わっていない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・ドイツではある程度の独自性、優位性をもった研究開発がみられる。<br>・他国では顕著な成果をもたらすような活動が見えていない。 |
| | 産業化 | ○ | → | ・ドイツは相変わらず情報通信機器の大量輸出国であるが、他国には勢いがみられない。<br>・EUはクラウドコンピューティングを推進して雇用創出と経済成長を図る方針を打ち出したが、米国と比較すると遅れは否めない。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | ・もともと研究よりも他国の技術の移入に力を入れており、研究面での独自性や優位性はない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ・もともと研究よりも他国の技術の移入に力を入れており、研究面での独自性や優位性はない。<br>・ICT政策に力を入れる姿勢がみられるようになってきているが、予算などの具体性が見えていない。 |
| | 産業化 | △ | ↗ | ・独自の産業化の規模が小さく、現時点では優位性は高いとはいえない。<br>・移入した技術を活用した産業化の能力が高く、情報基盤技術においても今後活性化が見込まれる。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↗ | ・大学や研究機関における研究の活発化の傾向がみられる。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ・従来から応用研究に優位性があったが、近年も堅調に推移しているとみられる。<br>・ビッグデータ活用に力を入れており、「スマート国家具現のためのビッグデータ・マスタープラン」を2012年に発表している。 |
| | 産業化 | ○ | ↘ | ・一時期は大きな成長がみられたが、経済低迷の影響を受け、停滞あるいは低下傾向にある。 |

（註 1）フェーズ
基 礎 研 究 フ ェ ー ズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産 業 化 フ ェ ー ズ ：量産技術・製品展開力のレベル （環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （８）引用資料

1）総務省、よくわかるu-Japan政策、ぎょうせい、2005.
2）総務省、平成24年版情報通信白書、2012.
3）高岡美佳（研究代表者)、「サステイナブル・ユビキタス社会実現のための要素技術に関する研究」終了報告書、科学技術推進機構社会技術開発センター、2007.
4）藤井進（研究代表者)、「ユビキタス環境下におけるサステイナブル生産システムの構成と運用に関する研究」研究成果報告書、科学研究費成果報告、2012.
5）総務省、ユビキタスネット社会の進展と環境に関する調査研究会報告書、2005.
6）総務省、ユビキタス特区事業の推進、
http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictriyou/yubikitasu.html
7）総務省、平成22年版情報通信白書、2010.
8）IEEE、2014 IEEE International Conference on Big Data、
http://cci.drexel.edu/bigdata/bigdata2014/
9）総務省、平成25年版情報通信白書、2013.
10）村山祐司、柴崎亮介、GISの理論、朝倉書店、2008.
11）小山修平、橘淳治、GISの応用--地域系・生物系環境科学へのアプローチ、森北出版、2003.
12）山本佳世子、GISによる環境保全のための土地利用解析、古今書院、2006.
13）大西文秀、環境容量からみた日本の未来可能性-低炭素・低リスク社会への47都道府県3D-GIS-MAP、大阪公立大学共同出版会、2011.