

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、考え方に基つき示すことが必要
- ・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。

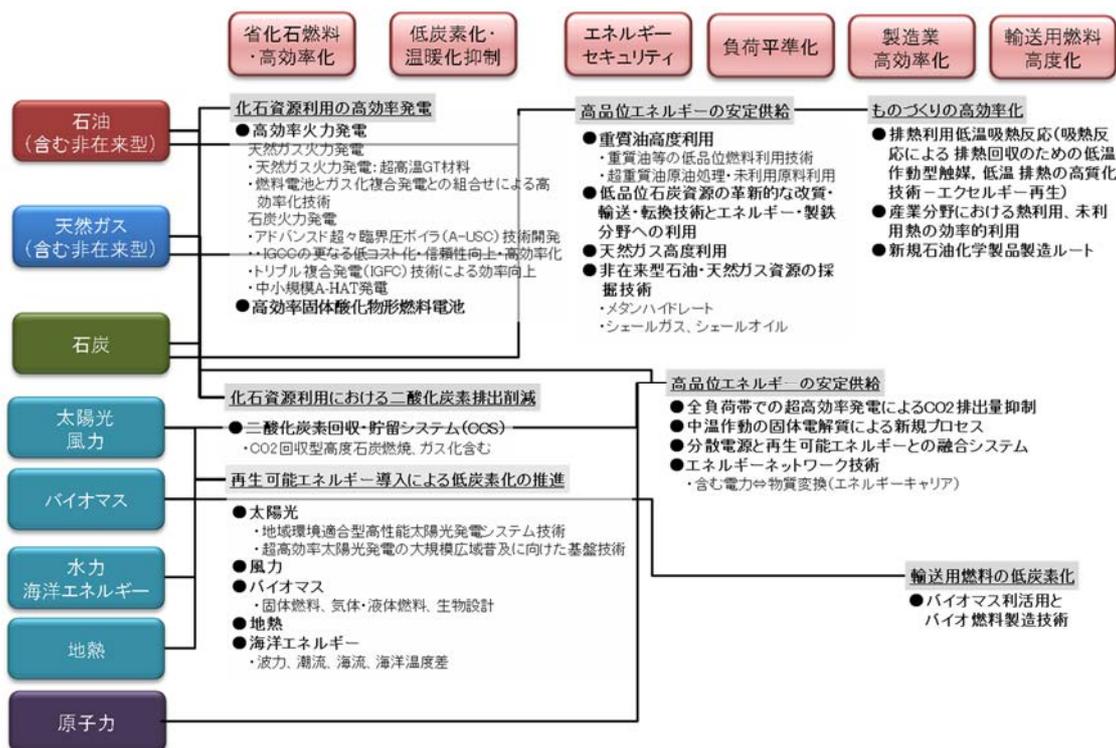


図 2.2.18 エネルギー供給区分の俯瞰図 (再掲)

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 CO₂ 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ーエクセルギー再生)
 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－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－ガスタービン－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步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°C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°C となっている現在、1700°C 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°C 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°C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250MW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500MW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170MW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761MW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582MW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技術がいつそう注目されている¹⁰⁾。

第3世代では、米国でBloom Energy社が、200kW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250kW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。 ・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。 ・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。 ・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、国際市場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。 ・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/hiro-no_igcc/hiro-no_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CO₂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低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 が大容量の熔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、コンバインドサイクル発電

(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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。

研究開発領域
エネルギー供給区分

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.noel.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) からレフアレンスケースで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CO₂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、CO₂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CO₂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」で重点的に取り組むべき21のエネルギー革新技术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、CO₂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

CO₂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、既存の石炭火力発電所ボイラなどの発生燃焼排ガスからCO₂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 Gasifier Combined Cycle）などの石炭の部分酸化によりH₂、CO、CO₂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CO₂を高めCO₂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CO₂とH₂Oとして、CO₂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（ECO₂）、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-CO₂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-CO₂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-CO₂（新設石炭火力発電向29～51 \$/t-CO₂、既設石炭火力発電向45～73 \$/t-

CO₂、新設天然ガス火力発電向37～74 \$/t-CO₂、IEAでは、新設石炭火力発電向で40～74 \$/t-CO₂、RITEでは¥4,256～7,752 /t-CO₂ (新設石炭火力発電向¥4,256 /t-CO₂、既設石炭火力発電向¥7,752 /t-CO₂) 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CO₂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-CO₂ (新設IGCC向け Selexol 法)、IEAは2005年～2009年のデータを基に18～79 \$/t-CO₂ (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CO₂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-CO₂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り組んでいる。

(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CO₂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CO₂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CO₂を再利用するため、CO₂ Recycle Power Generationとも言われる。
- ・新設石炭火力発電向で27～72 \$/t-CO₂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、CO₂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CO₂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つ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

CO₂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CO₂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CO₂は腐食性をもつため材料に耐食性材料の使用、大規模CO₂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CO₂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-CO₂、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CO₂貯留までのトータルシステムのフェージビリティスタディ CO₂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-CO₂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

- ・ CO₂の貯留のメカニズムは、①物理的（構造的・層序的、残留CO₂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、長期的に取り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 : 高压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-CO₂、海域0.5~30.2 \$/t-CO₂
- (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-CO₂、海域3.8~8.1 \$/t-CO₂。
- (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-CO₂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-CO₂（IPCC 2005）、-5.59 \$/t-CO₂（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-CO₂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、pCO₂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 Dam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CO₂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・CO₂、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ている。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CO₂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（構造的帯水層）、苫小牧地点（非構造的帯水層）、北九州地点（非構造的帯水層）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CO₂を分離回収し、CO₂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ーであり、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、CO₂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、CO₂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、CO₂回収の商業化実証、Southern CompanyのIGCC、ガス輸送、CO₂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CO₂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CO₂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CO₂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

- ・中国華能集团公司 (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、CO₂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-CO₂/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-CO₂/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-CO₂/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CO₂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CO₂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CO₂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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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り組んでいる。 ・ 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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CO₂ 圧入実験を2002~2007年度まで実施した。 ・ 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CO₂回収・貯留実証試験を開始している。 ・ 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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 (Kepphills-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ECO₂プロセスの試験を実施した。 ・ 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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-CO₂、2 GJ/t-CO₂を目標とした新規吸収液の開発を行っている。 ・ 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	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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CO₂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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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-CO₂/年を回収するプロジェクトを2008年開始。 ・ HuanengおよびTPRIのもと、660 MWeのUSCボイラの燃焼排ガスからCO₂を回収するプロジェクトが2010年より稼働している。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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CO₂回収するプロジェクト研究を行っている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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CO₂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_i0101.htm
- 20) 川崎重工プレスリリース. 低NO_x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CO₂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 Energy 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。

- ・フォトリソグラフィ材料、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)、フラウンホ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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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。 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池の変換効率をまとめたSolar cell efficiency table⁸⁾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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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⁹⁾。リコーは、ICタグに搭載した試作品を発表した。 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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⁾。 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。 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⁹⁾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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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⁾。 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⁾。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・カドミウム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。 ・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⁾。 ・国土が広いと、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。 ・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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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)}。 ・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⁾。 ・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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁾。 ・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⁾。 ・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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁾。 ・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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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⁾。 ・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	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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⁾。 ・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	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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, hetero-junction 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) 亜細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ふ。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超大型風力発電機用ドライブトレイン開発、NRELにおける90 m超大型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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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試験が、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。 ・ 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、長崎県五島桙島沖で行われている。 ・ 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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ーとして、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。 ・ 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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。

研究開発領域
エネルギー供給区分

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くつかのプログラムが進められている。 ・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 ・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。 ・浅水域用・深水域用基礎の開発 ・浮体式洋上風力の基礎に係る要素開発 ・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&utmccn=\(direct\)|utmcmd=\(none\)&utmcsr=\(direct\)|utmccn=\(direct\)|utmcmd=\(none\)&utmzv=&utmz=1.1407689423.1.1.utmcsr=\(direct\)|utmccn=\(direct\)|utmcmd=\(none\)&utmzv=&utmk=214685847](http://energy.gov/eere/wind/wind-research-and-development?_utma=1.1530731217.1407689423.1407689423.1407689423.1&_utmb=1.1.10.1407689423&utmccn=(direct)|utmcmd=(none)&utmcsr=(direct)|utmccn=(direct)|utmcmd=(none)&utmzv=&utmz=1.1407689423.1.1.utmcsr=(direct)|utmccn=(direct)|utmcmd=(none)&utmzv=&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碎、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、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、粉碎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碎性が悪く、バイオマスを石炭と同時に粉碎すると、粉碎動力の増加、粉碎特性の劣化が確認される。そのため、バイオマスの粉碎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。バイオマスの粉碎性向上として、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、灰の熔融特性、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) 灰の熔融特性、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、窒素分を多く含む原料、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、高温高压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°C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) 灰の熔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、灰が熔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：灰が熔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認し、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。欧州ではコー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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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⁾。 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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」制約によるものが多く、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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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⁾。 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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⁾。

研究開発領域
エネルギー供給区分

欧州	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・学術論文などのレベルは格段に向上しつつある。 ・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。 ・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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・熱分解ガス化DME合成システムが実証段階にある。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・2020年に500万 tのペレット輸入を計画（2012年 75万 t）。 ・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。 ・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-myojiyo-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年度ー平成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年以上政策的な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、各種センサー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、政策的な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卷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オン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つは注入水損失であり、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れ、社会問題となる事例が起これている。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れた。そのため、注水を止めたにもかかわらず、坑底付近でM3.4の地震が起これ、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年の空白時代の中に失われた人的・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、ポツダムでの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、水圧破碎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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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、水圧破碎の実験が行われた。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。 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 structure 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) Pálsson, B. et al., Drilling of the well IDDP-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°C 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°C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して計画しているが、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。 ・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、分解によりアップグレードされガソリンや灯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船用燃料 (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船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 SO_x 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、船用燃料、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。 ・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。 ・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⁾ 。 ・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⁾ 。 ・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)} 。 ・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)} 。 ・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)} 。 ・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⁾ 。 ・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⁾ 。 ・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⁾ 。 ・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/sekiryu/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 Petrochemical 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 production”. 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ドプロセスの開発。
[http://www.pecj.or.jp/japanese/report/2014report/h26data/1.1\(3\)-2.pdf](http://www.pecj.or.jp/japanese/report/2014report/h26data/1.1(3)-2.pdf)
- 8) http://www.headwaters.com/data/upfiles/download/HW_HTL.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](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.chattanooga-process.com/documents/Chattanooga_Process.pdf#search='chattanooga-process'
- 25) <http://www.westernresearch.org/uploadedFiles/News/Daily%20Oil%20Bulletin%20-%20OMEG%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/etrofed2012/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（アップグレード）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、CO₂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惠関係の構築、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、CO₂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（ブリケットティング）、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分を溶解でき、褐炭に熱可塑性（軟化溶解性）、超低灰分という新物性を賦与する¹⁰⁾。Hypercoal¹¹⁾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免的に発生する。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するのは、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。

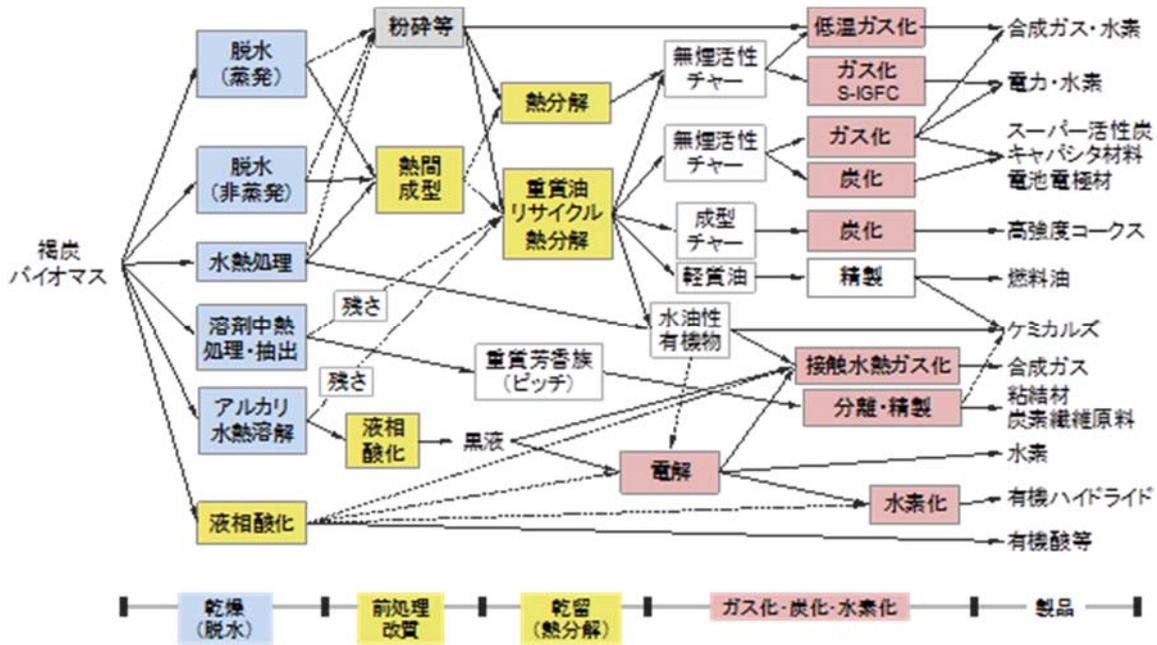


図1. 負物性消去、正物性強化・賦与を伴う前処理・改質・転換のスキーム例。
資源付加価値、製品オプションが連鎖的に発生する。

このような状況の中、製鉄分野としては「革新的製鉄プロセス (COURSE50)」や「革新的塊成物 (フェロコックス) 製造プロセス」に代表される我が国独自の製鉄技術開発は、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な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1t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1²³⁾を参照）を構築し、従来エネルギー・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、石炭や製鉄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・CO₂EOR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 (新日鐵エンジニアリング)

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是、内モンゴル自治区フルンボイル市と共同で、褐炭改質综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)
- ・ 豪州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ピッチャ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 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会社が、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⁾ 。いずれも環境団体による反対の影響。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](http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.037)
- 12) S. Kudo et al., Energy Fuels, 28, 76-85. (2014) . [10.1021/ef401557w](http://dx.doi.org/10.1021/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.ihico.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/shiryu/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/shiryu/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-siryu2.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](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.org/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焼きガスタービン・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-Royce⁵⁾、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CO₂、H₂Oを除去すれば、オフガスの残存成分はH₂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。CO₂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、CO₂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、Li₂SiO₃のような酸化物材料は、可逆的にCO₂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) もしくは圧カスイング吸着 (PSA : Pressure Swing Adsorption) により、エネルギー損失少なくCO₂を分離除去できる。また、CO₂分離膜を用いてCO₂を分離する方法も考えられる。今後、最適なCO₂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、および電氣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において、熔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、CO₂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°C 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2,400千万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中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°C のLNGを 20°C 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°C 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、通常は冷凍機で作られる冷熱に代えて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°C 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CO₂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、CO₂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働変動が大きい。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当たって採算性が悪くなってしまふ。

(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。 ・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。 ・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。 ・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。 ・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-collaboion-with-quadrogen-power-systems-inc-and-fuelcell-energy-inc-announces-the-first-ever-7-5-million-quad-g>
- 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

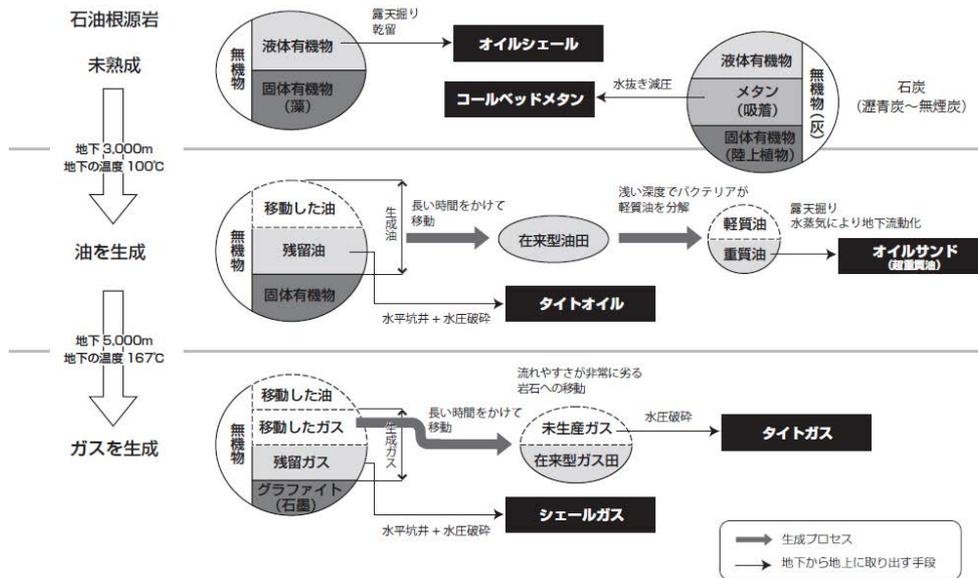
非在来型石油・天然ガス資源の採掘技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

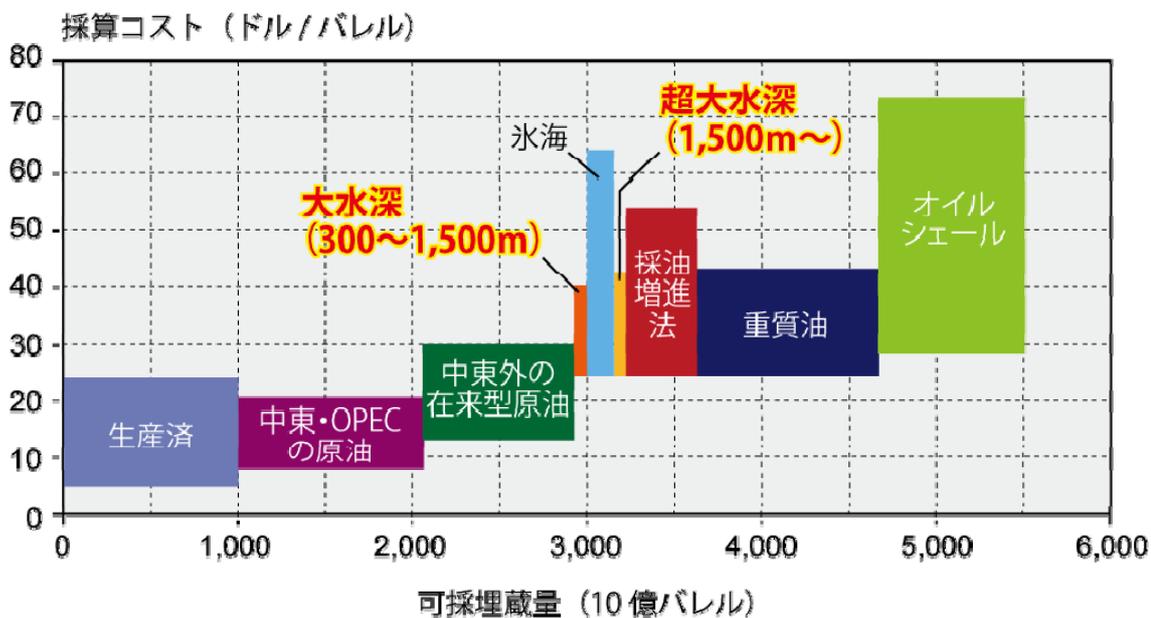
近年、石油・天然ガスの採掘をめぐる環境の変化には、油価の高値変動、イージーオイル（在来型油田）の減退、新規需要市場のシフト（中国・インド）、人材入れ替え、低炭素化、資源ナショナリズムの台頭があげられる。国営石油会社は在来型油田の埋蔵量の80%近くを支配している。埋蔵量へのアクセスが縮小する環境下に置かれた国際石油会社は、石油開発の対象を地下から採り出しやすい「在来型」から採り出し難い「非在来型」の油や天然ガスにシフトしている。このような近年の石油開発の環境の変化が、シェールガスを含む「非在来型の石油や天然ガス」の世界的な開発を後押ししている。このような中で、我が国では、近海に存在するメタンハイ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CO₂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。

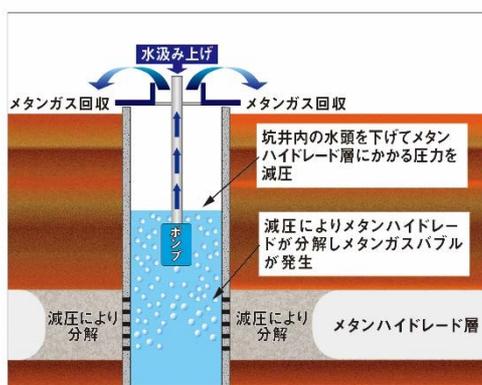
近年の研究より、メタンハイドレートは、砂礫中に分散する孔隙充填型⁶⁾と海底表層近傍に高純度なものが堆積する表層型⁷⁾に分類できることが分かってきた。日本近海では、太平洋側に孔隙充填型が、日本海側に表層型が賦存することが確認されている。米国石油メジャーなどの海外資本は、純度が高く採掘が容易だと考えられる表層型に注目し、日本海の資源量調査のため、国内大学への資金提供を開始している。メタンハイドレートの賦存量調査には、従来高コストな電磁震源探査法や曳航式電磁探査法⁸⁾が主として用いられてきたが、表層型に限っては、より簡便かつ低コストな計量魚群探知機による音響探査法⁹⁾が有効で、すでに実用化がなされている。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 CO₂ 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、CO₂ 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 CO₂ 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、CO₂ 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CO₂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、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。

研究開発領域
エネルギー供給区分

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CO₂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CO₂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CO₂排出量を最小限に抑制できる技術の開発、さらには、CO₂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、CO₂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CO₂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CO₂排出抑制に対する要請に対応可能とするため、CO₂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。CO₂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CO₂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CO₂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CO₂回収のためには、CO₂の回収位置の最適化と回収技術の高度化だけでなく、CO₂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CO₂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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・大学や研究機関においてガス化技術・CO₂回収技術に関する基礎的研究が幅広く実施されている。 ・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。 ・また、CO₂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。 ・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⁾。 ・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。 ・O₂-CO₂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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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CO₂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⁾。 ・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CO₂回収技術の実証試験が開始されている⁵⁾。 ・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⁾。 ・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、CO₂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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁾。 ・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⁾。 ・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。 ・三菱重工と関西電力が開発した化学吸収液を用いたCO₂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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス化技術の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。 ・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、CO₂回収用H₂-CO₂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⁾。

研究開発領域
エネルギー供給区分

	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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）。 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 石炭のキャラクタリゼーション、熱分解に関する研究やCO₂貯留に關留守研究が多い傾向が見受けられる。
	応用研究・開発	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> CO₂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、CO₂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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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⁾。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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、CO₂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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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⁾。 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⁾。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国で記載したPOSCOプロジェクトや後述のTaeon 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。 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。 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、Taeon IGCCの支援を行うこととしている²⁴⁾。

	産業化	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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 LCO₂ 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 Database” . 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°C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。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CO₂電解、およびCO₂/H₂O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CH₄合成では500°C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、CH₄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) など一部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、Y₂O₃安定化ZrO₂やCeO₂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ため、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。

研究開発領域
エネルギー供給区分

（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 Security 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 CO₂/H₂O : 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（CO₂）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 Grid³⁾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 Grid⁴⁾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トが存在しており、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フォームが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予測、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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 国内145か所で蓄電池、電気自動車を組み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。 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	△	↓	<ul style="list-style-type: none"> 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り組み。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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り組みを開始。 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。 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やアルパカーキなどが参画。
欧州	基礎研究	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	△	↓	<ul style="list-style-type: none"> 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	△	↓	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。

研究開発領域
エネルギー供給区分

韓国	基礎研究	×	↘	・ SGなど企業で基礎研究
	応用研究・開発	△	↘	・ 濟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。 ・ 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す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 System)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°C 、 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。

電力需給に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す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 supply¹¹⁾”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

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システムによる融通で、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られる。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じ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られる。

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する。

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 CO₂ 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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、需要の電動化、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。 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。 水素貯蔵材について NEDO のプログラム (HydroStar) など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	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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、幅広い基礎研究を実施している。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 連邦および各州の規制機関である FERC (Federal Energy Regulatory Commission)、PUC (Public Utility Commission)、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。 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。

研究開発領域
エネルギー供給区分

欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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 CO₂ と水からメタンを製造するというものである¹⁸⁾。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・ドイツのノルトライン・ヴ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⁾。 ・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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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](http://www.fchea.org/core/import/PDFs/Connection/Connection%20October2012.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、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°C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、C₁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、最近ではシェールガス、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れた科学技術を有する。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。 ・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－HyNor－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、高温ヒート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ー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はある。

(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⁾ 、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はないと考えている。
	産業化	△	↗	・製造業の省エネ技術導入は高くはない ¹⁾ 。しかし、GEなどによるICT活用による合理的な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はない。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。

研究開発領域
エネルギー供給区分

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月下旬号
- 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じ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 (Dimethyl-ether/Methanol to Olefins) や DMTP (Dimethyl-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、シェブロン社の 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、C₅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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁾。 ・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⁾。 ・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⁾。 ・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⁾。 ・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⁾。 ・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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁾。 ・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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁾。 ・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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁾。 ・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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁾。 ・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。 ・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 (プラットフォーム、Cyclar)、に実績がある¹⁵⁾。 ・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

研究開発領域
エネルギー供給区分

				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と組み合わせて実証試験した ¹⁸⁾ 。 ・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⁾ 。 ・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%A E+%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。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を中心となって構築するプ

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に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、CO₂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 Petroleum 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-competitive-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CO₂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「CO₂／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トシティなど、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。

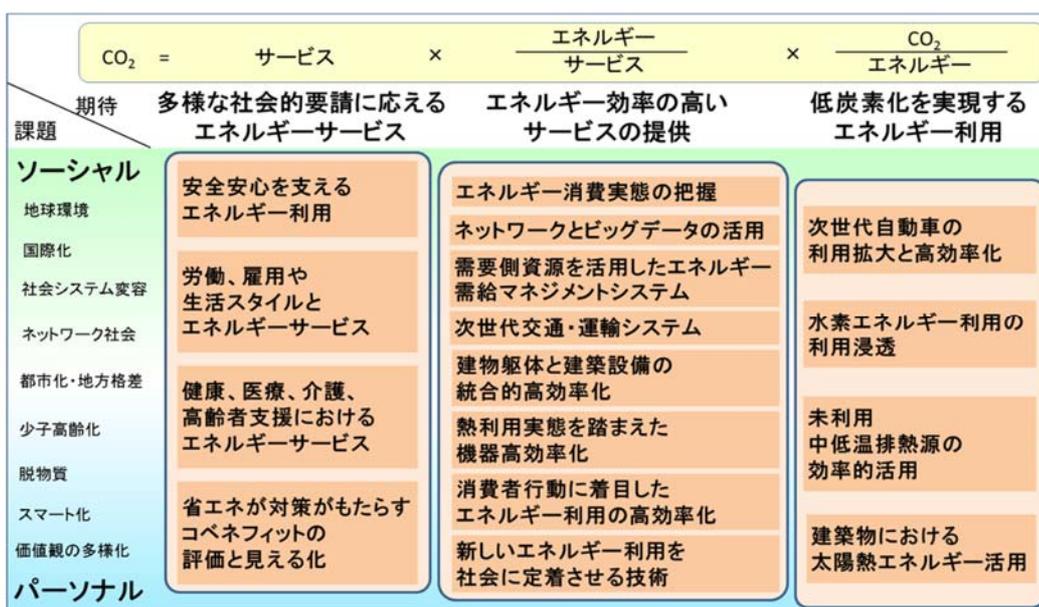


図 2.2.19 エネルギー利用区分の俯瞰図 (再掲)

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り組み

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Varmelast) 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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 Grid 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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た。

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きている。
- ・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

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—. 流通経済大学出版社
- 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ト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。モデル構築に必要な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

高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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁾。 ・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。 ・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。 ・コベネフィットに関連する研究が活性化。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・EUや研究機関によりトランジション・マネジメント研究が行われている⁹⁾。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・特筆すべき成果が見当たらない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・特筆すべき成果が見当たらない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・特筆すべき成果が見当たらない。
韓国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・特筆すべき成果が見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・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は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CO₂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°C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CO₂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ですが、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CO₂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。 ・ 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。 ・ 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。 ・ 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。 ・ 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。 ・ 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。 ・ 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,星且二,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、各事業者がおの自由で設定できるため、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つ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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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DECC³⁾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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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⁾。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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⁾。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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、競争原理により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/gakujuysukenkyuujigyo.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/uNEPSBcarbonmetric.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う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る、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含む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)} 。 ・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。 ・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⁾ 。 ・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。 ・「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。

研究開発領域
エネルギー利用区分

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 RESEARCH)
<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mend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、電力システム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攻撃の懸念を踏まえて、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（ラッ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	○	↑	・ 国家电网を中心に、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。

研究開発領域
エネルギー利用区分

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めた大きさを示すこと（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CO₂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

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、エンタテイン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が広がっている。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（ディスプレイ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ますます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。 ・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。 ・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 Sciences of 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 Electricity-Saving 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ー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°Cの水蒸気を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°C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、CO₂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、水和物スラリー（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きている。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、効率はかなり低下する。にもかかわらず、通常の設定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、冷媒が決まらなる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、シャーベット状水での搬送では低密度であること、塊・粒状水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、水和物スラリー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ジメントが求められる状況において、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、カーリーナサイクル、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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。CO₂ヒートポンプの開発などは日本の独壇場である。 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。 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。 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。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。

研究開発領域
エネルギー利用区分

欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 例えば、ノルウェーのSINTEFによりCO₂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。 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	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ドイツでは500 kWを越えるカー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。 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	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ヒートポンプについては、まだ日本を追随している状況である。 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。 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	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 未利用熱を有効活用する技術レベルにはまだ達しておらず、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。 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> あまり特筆すべきものはない
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 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、総田長生、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

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 (CO₂) 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・維持要求に合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生かすための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由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、セルローズ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」、「CO₂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・エアーフローウインドウ、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CO₂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ー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ー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い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・公開するシステム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、Bollere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、予約不要で運当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。 ・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。 ・運転支援システムを搭載した車両は今後普及して行く。 ・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。 ・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。 ・自動運転車の開発と実証実験は、Googleが抜きこんでいる。 ・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。 ・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。 ・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。 ・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 Transportation.
- 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CO₂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 2012¹⁾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°C 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 CO₂ 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、CO₂ 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にいるからである。第二に、各主体間のよい関係が必要で、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須である。特に、政府予算が民間の資金と組み合わせ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層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と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的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

研究開発領域
エネルギー利用区分

- 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_jigyoku/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CO₂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	△	↑	・大学が産業界からニーズに応じ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がたい。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の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働実態について、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°Cの温水、110~130°C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°Cの温排水から120°C/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°C/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°C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「スチームグローヒートポンプ」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ますが、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⁾と経済性は比較的良好だが、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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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⁾。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 平板型集熱器のメーカーが確立している。 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ます。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 真空式の平板型集熱器が企業で開発された。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 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	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 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 Na₂S-5H₂O 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_eiyekuta.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/kankyoku.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：Strategic Innovation 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

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カ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、液体水素や有機ヒドライド、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CO₂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NO_x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⁴⁾。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/Nm³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。 ・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。 ・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⁾ 。 ・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⁾ 。 ・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。 ・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。 ・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⁾ 。 ・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⁾ 。 ・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⁾ 。 ・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⁾ 。 ・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⁾ 。 ・「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 H₂USA 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>