

2. 研究開発領域

2.1 エネルギー資源探査・開発技術

（1）研究開発領域の定義

エネルギー資源探査・開発は、地中および海底下に存在するエネルギー資源を利用するための科学的調査や関連技術開発等を含む領域である。ここでは在来型・非在来型資源開発事業のライフサイクルに合わせ、①探鉱段階、②開発段階、③生産・操業段階に係わる適用技術や研究開発を対象とする。

（2）キーワード

■探鉱段階（衛星探査技術）

資源探査衛星、陸上広域資源探査、石油資源遠隔探知、ランドサット（Landsat）、パルサー（Palsar）、アスター（Aster）、光学センサ

■開発段階（水平坑井掘削技術）

坑井掘削法、水平掘、マルチラテラル仕上げ工法、水圧破碎法（フラクチャーリング）、大編距坑井掘削

■生産操業段階（環境保全技術）

ゼロエミッション技術、産業廃棄物地下再圧入、炭酸ガスによる原油増産法（CO₂EOR）、炭酸ガス地下貯留（CCS）、マイクロバブル CO₂EOR 攻法、掘削屑処分法、随伴水処理・処分法、モニタリング

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■探鉱段階（衛星探査技術）

探鉱段階の研究・開発技術では、物理探査技術が主であり、広域地域の地質情報の概要的な分析、或いは狭い特定地域の地質特性分析・評価に区分される。衛星探査は前者の分野である。

衛星探査技術は、（1）資源産出国との交渉が不要で、（2）広域地域の地質情報の分析が一度に可能であり、（3）インフラが整備されていない未開発地域場所においても現地探査なしで簡易的調査も可能であるため、探鉱初期の情報収集手段として極めて有用である。衛星探査技術の研究開発を推進することで、効率的な資源有望地域の絞り込みが可能となり、探鉱精度の向上と資源開発リスクの低減につながる。また、継続的に研究開発を実施し、高度な衛星探査技術を維持することで、技術提供・移転等を通じた資源産出国との関係強化が可能となり、国外での探査案件・資源開発案件参入の機会増大が期待出来る。すなわち、衛星探査技術の研究開発を通じて、我が国の安定的なエネルギー資源の確保に資することが可能となる。

■開発段階（水平坑井掘削技術）

在来型の油・ガス田の資源は生産と共に、油・ガス層圧力の低下や水生産の増加などによって生産能力が低下する。それを補う方法として、各種新技術が研究・開発されてきた。その一つとして、近年多くの油ガス田の坑井で採用している水平坑井掘削技術がある。これは通常の坑井が垂直に掘られ、油・ガス層と交わる部分から生産をするのに対して、油・ガス層の中を

水平に掘り進み、坑井の生産性の向上を図るものである。

水平坑井掘削技術は、(1) 地上の地形障害物がある場合、有効である、(2) 貯留層が薄い場合、油・ガス生産性を効率良く生産が可能であり、開発段階の掘削技術として極めて有用である。この掘削技術の研究開発を推進することで、探鉱段階で確認された資源を効率的に開発生産が可能である。

非在来型タイトオイル・ガス（シェールガス）の開発では、この掘削技術の他に、水圧破砕法（フラクチャー技術）の併用が、今日の米国でのシェールガス開発の起点となった。それ故、この開発段階の掘削計画では、国内外の油・ガス田の開発の増産に有効となる。この技術の応用として、国内の海洋 CCS 構想においても、従来の傾斜掘削方法より、水平坑井掘削方法は掘削コストを低減でき、より有効な技術である。

■生産操業段階（環境保全技術）

石油・天然ガス開発産業の生産操業の研究開発分野では、生産増強促進等の正部分と環境保全の汚染処理技術開発や管理対応策等の負部分の検討がなされてきた。

環境保全技術は、生産操業時の汚染物質の業界のゼロエミッション方針を基に、汚染物資を除去回収し、再資源化や再有効利用化が進められている。このゼロエミッション構想の基に地下貯留層や有効である地層へ汚染物質を圧入し、汚染物の再利用化や廃棄処分技術を長年の研究開発および実務経験で既に実証化している。この長年の蓄積技術は、安全且つ適切に地下に貯蔵する管理体系が石油・天然ガス開発産業で確立されている。

特に典型的な地下貯留層への圧入技術としては、CO₂ 圧入生産向上（Enhanced Oil Recovery）および CCS（Carbon Capture & Storage）分野が環境保全技術の事例であり、国際的な地球温暖化政策促進が大規模に実施可能であり、極めて有用で技術開発分野である。この技術の研究開発を推進することで、地球規模の環境汚染の CO₂ 低減に大きく貢献する。又、高度な環境技術の提供・移転等を通じた資源産出国との関係強化が可能となり、国外での資源開発案件参入への機会増大や CCS 技術移転が期待出来る。

それ故、産油国に対して、この環境技術の研究開発および経験を通じて、我が国の安定的なエネルギー資源の確保に資することが可能であり、国際的にも環境技術移転に大きく寄与・貢献すると考えられる。CCS は、再生可能エネルギーや原子力とともに発電部門の CO₂ 排出の削減に寄与するが、これらの直接適用が困難な鉄鋼業やセメント業などの産業部門では特に重要とみなされている。

商業規模の CCS は、設備当たりの CO₂ 削減規模が年間数百万トンと大規模なことに起因して、初期投資が極めて多額となるが、IPCC 第 5 次報告書等でも言及されているように、一定の前提条件下ではコスト効率の高い削減技術である。（石炭＋CCS:15.2-18.7 円/kWh、太陽光:12.7-15.6 円/kWh、風力:13.6-21.5 円/kWh、バイオマス専焼:29.7 円/kWh）このことを考えると、CCS は、他の削減技術が成熟し、CCS に匹敵するコストで大幅削減に寄与できるようになるまでの期間に係る社会的費用を低く抑えるため、可能な限り早急に導入し、時期が来れば速やかに他の削減策に席を譲る短中期的技術とみなすことが適切である。

[研究開発の動向]

■探鉱段階（衛星探査技術）

衛星による資源探査は、1966年から米国で開始された地球資源観測衛星計画（Earth Resources Observation Satellites Program）に端を発する。同計画では、（従来、軍事目的で培ってきた）宇宙技術を地球資源探査等、人類に直接利益のある分野に応用するという理念のもと、地球資源探査のための基礎データの収集を目的とした人工衛星の打ち上げが行われた¹⁾。同計画で打ち上げられた衛星（LANDSAT 1～3）のデータは、1980年代の初頭から民間で利用可能となり、これ以降、衛星データが民間会社による資源探査に利用されるようになった。これに伴い、我が国でも1981年（昭和56年）から「石油資源遠隔探知技術の研究開発プロジェクト」に基づき、衛星による資源探査技術の研究開発が開始された²⁾。LANDSAT1～3に搭載されていた光学センサ（分解能80 m）は、可視域から近赤外域にかけての複数の観測波長域（バンド）のみを対象としていたため、反射スペクトル（物質表面に様々な波長の光をあてた時の反射率を波長の関数として表わす）の解析による鉱物資源の特定は困難であり、この段階では、衛星データは主に写真判読的に広域地質構造を把握する目的で利用されていた。1980年代の後半に入ると、短波長赤外域付近のバンドも計測可能な光学センサ（分解能30 m）を搭載したLANDSAT4、5が打ち上げられ、これらのデータが利用可能となる1990年代には、この波長域に特徴の現れる鉱物の反射スペクトルを利用した（変質鉱物のマッピング、等）資源有望地域の抽出が開始された^{3,4)}。

我が国においても、1992年に、資源探査を主目的とした地球資源衛星「ふよう1号」（JERS-1）が打ち上げられ、日本独自の衛星探査が開始された。この衛星では、光学センサに加えて、合成開口レーダ（SAR：進行方向にマイクロ波を照射し、地表からの反射を受信する能動型のセンサ、昼夜を問わず計測可能であり、雲の影響を受けにくい）も搭載された。両センサはそれぞれ以下の特徴を有している⁵⁾。

- 光学センサ：短波長赤外域（中間赤外域）に3つのバンドを持ち、LANDSAT4、5に比べて、より詳細な鉱物種の推定が可能
- SAR（Synthetic Aperture Radar）：マイクロ波の中でも波長の長いLバンドを利用することで植生の内部に侵入し、植物により地表が覆われている熱帯雨林等の湿潤地帯でも、地表に現れた断層等の重要な地形情報の取得を可能

我が国では、JERS-1以降も、継続的に光学、SARの両センサの研究開発が続けられており、光学センサに関しては、可視から熱赤外域までの14バンド（この内、短波長赤外域6バンド、熱赤外域5バンド）を観測できる「ASTER」が開発され、1999年に米国産の地球観測衛星「TERRA」に搭載して打ち上げられた。これにより、反射スペクトルの分析から13種程度の鉱物分類が可能となり⁴⁾、油ガス層の形成に重要となる炭酸塩岩や堆積岩の識別がある程度可能となった。現在は、可視から短波長赤外域まで計185バンドの観測が可能なハイパースペクトルセンサ（HISUI）の開発が進められており、より高度なスペクトル解析による堆積岩の岩質の推定精度の向上（30程度の鉱物分類が可能）が見込まれている⁶⁾。SARに関しては、JERS-1に搭載されたSARの性能を更に向上させたLバンドの合成開口レーダ「PALSAR」（分解能10 m）が開発され、2006年に陸域観測技術衛星「だいち」に搭載されて打ち上げられた。これにより、植生の密な領域においても、褶曲・断層等の詳細な地形解析が可能となった。「PALSAR」の観測データを「ASTER」等の光学データと組み合わせた資源探査の研究開発事

例が複数報告されている⁶⁾。また、2011年に「PALSAR」の運用は停止したが、2014年以降は、「だいち」の後継機である「だいち2号」にて、Lバンドの合成開口レーダ「PALSAR-2」（分解能3m）が稼働中であり、2020年にはLバンドの合成開口レーダさらなる後継機の打ち上げが予定されている⁷⁾。我が国では、上記の光学センサおよびSARの開発と並行して、これらのセンサから得られたデータの解析・利用技術についても、「石油資源遠隔探知技術の研究開発プロジェクト」²⁾のもと、世界最高水準の技術開発を目標として、画像データの補正や堆積岩の区分システムといった個別要素技術の開発から、堆積盆データベースの構築、「ASTER」および「PALSAR」の運用システムの開発まで、衛星資源探査の黎明期から幅広い取り組みが行われている²⁾。表2.1-1に我が国の資源探査における衛星データの利用技術の変遷を示す。

表2.1-1 我が国の資源探査における衛星データの利用法の変遷³⁾

年代	主な衛星センサ	キーワードとなる技術など
1990年以前 資源分野におけるリモートセンシング利用の始まり	Landsat MSS、TM など (光学センサ中心)	写真地形判読（可視近赤外画像から地質・地質構造判読、短波長を加えた画像から炭酸塩岩や変質帯の抽出など）
1990-2000年 画像判読と資源情報抽出研究	Landsat TM、SPOT、JERS-1 OPS、SAR	スペクトル解析（短波長マルチスペクトルデータを用いた炭酸塩鉱物抽出、変質鉱物部類）、地形解析（DEMを利用）
2000-2010年 実利用への展開	ASTER、PALSAR 高空間分解能光学センサ	詳細スペクトル解析（変質帯分類、岩相分類（ケイ酸塩含有量比）など） 差分干渉SAR処理 GIS技術の活用
2010年以降 衛星データの高精度化・多様化・高頻度化 基盤データベース整備	ASTER、PALSAR 高空間分解能光学センサ（光学、SAR） 複数衛星システム	より高度なスペクトル解析（鉱物同定） 高空間分解能衛星データ（光学、レーダー）を用いた融合処理・詳細解析 グローバルデータベース整備（IT技術の活用）

国外においても、衛星資源探査の分野では、「ASTER」および「PALSAR」のデータ利用が一般的である。これは、探査衛星の開発が積極的に行われている欧米を含めて、近年までこれらのセンサの有効な代替手段が存在しなかったことによる⁶⁾。

ただし、光学センサに関しては、短波長赤外域に「ASTER」ほどのバンド数を有さないが、データ入手の容易さから、「LANDSAT7」に搭載されたETM+や、「LANDSAT8」に搭載されたOLI（Operational Land Imager）のデータの利用も一般的である⁸⁾。また、2014年に打ち上げられた商用衛星「WorldView-3」も、0.3mの高分解能を誇り、短波長赤外域に8つのバンドを持つことから、資源探査への活用事例が報告され始めている^{8,9,10)}。SARに関しては、前述の様に、PALSARの後継であるPALSAR-2が2014年から稼働を始めており、これによる代替も可能である⁶⁾。

近年では、エネルギー資源分野における衛星探査技術は、探鉱段階のみならず、SARデータの差分干渉処理による高精度の地表変位検出技術を利用した油田管理および油・ガス供給能力の予測、変化や環境汚染状況分析（フレアガス量の推定、植生の経年年化、流出油の海上漂流軌跡等）や継続的モニタリングによる環境対策等の開発・生産段階にも幅広く適用されつつある^{11,12,13)}。

■開発段階（水平坑井掘削技術）

水平坑井掘削技術の開発歴史は、1929 年米国テキサス州で実施され、その後各国で生産性向上のため、1950-1960 年代はソ連・中国で実施されていたが成功事例は数少ない。

これらの要因は低原油価格、および掘削機器の未発達が要因に挙げられている。1970-1980 年代になると掘削機器の高性能技術開発が進み、経済的にも技術的にも研究開発・実証試験から確立した期間であった¹⁴⁾。

更に 1990-2000 年代には、商業的に水平坑井技術の利用の促進が進められ非在来型のタイトオイル・ガス開発が典型的な成功事例であり、今日の米国では、タイトオイル・ガス開発に伴いコンデンセイト油の生産に寄与し、米国が世界最大の産油国になっている^{15,16)}。この技術は、在来型・非在来型の資源開発に必要であり実際に適用されている。その事例を以下に挙げる。

● 在来型油・ガス田に対して

①貯留層の油層位置を維持するために随伴水*・ガス流体層からの産出抑制を可能とする。

*注）随伴水とは原油を採掘する際に排出される水、原油と混在している地下水や原油採掘時に油井に注入する水。

②垂直方向のフラクチャが発達している油層への適用

③経済的にアクセス出来難い遠隔地の油層への適用

④重質油で層へのスチーム攻法（SAGD: Steam Assisted Gravity Drainage）：図 1 参照

⑤低厚さの油層への適用

⑥部分的に衰退した油層

● 非在来型タイトオイル・ガス / 炭層メタン（コールベッドメタン）に対して

⑦非在来型のタイトガス・オイル層において、フラクチャーリングを併用する事で、浸透率が 1md（ミリダルシー）以下の生産にも適用可能である。

⑧コールベッドメタン層への適用

これらに効果的に対応するために、マルチラテラル（Multi-Lateral Wells）と称する掘削技術と坑内仕上げ技術が研究開発され、コスト削減等の経済性に富んだ技術が商業化された。

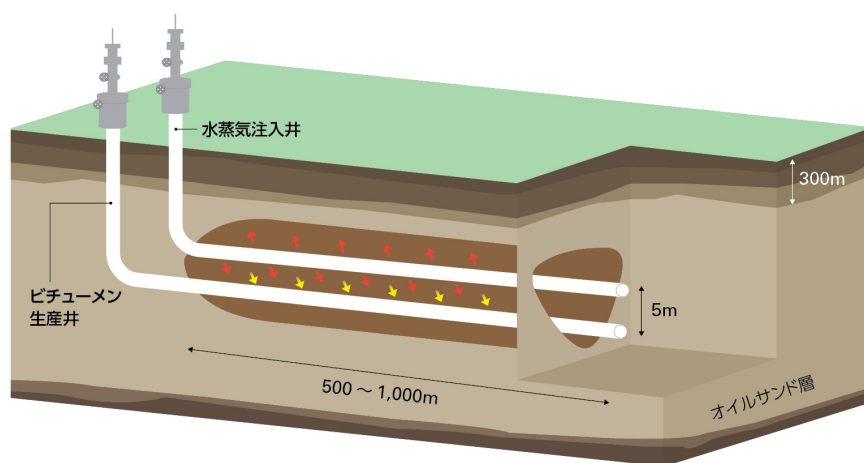


図2.1-1 カナダのSAGD法による重質油の生産概略図

出所：石油資源開発（株）

図 2.1-1 は水平坑井にてスチームライン（上部）と原油生産ライン（下部）を有する。

■生産操業段階（環境保全技術）

石油・天然ガス開発産業は、一般の石油精製や石油化学産業と異なり、陸上の工場にとどまらず海洋での開発活動も多く環境問題は広範囲の地域への影響を与えて国境を超えボーダレス化した環境対応が必要で常に国際的な視点で捉えることが要求される。

又、大規模油・ガス田の石油開発は、探鉱－開発－生産－廃坑までのライフサイクル期間が30年以上も続くので各ライフサイクル段階の環境対策が必要で、対応技術や対策手法は国際的な標準化対応が進んでいる産業である。更に、生産操業段階の産業廃棄物のゼロエミッション化の対応技術に関して、従来の油層・生産技術を応用した地下圧入技術を利用し、最も進んでいる業界である。この点が石油開発産業における環境対応技術の特徴であり、この研究開発動向について示す。

● ゼロエミッションへの技術

石油・ガス開発産業における環境課題は1990年代まで、陸上・海上油田の生産活動の規制は一般の産業と同様に、排気ガスの大気汚染や海洋油汚染対策が主体であった。

1990年代に入ると、北海油田の開発もピークになり海洋汚染問題が顕著なり、環境課題も明確化された。この課題の克服として北欧（ノルウェー）産油国が環境税を新設した。

この環境税法改正制度に伴い、欧州系大手石油開発企業（BP, Shell, Total, Statoil 等）は「環境ゼロエミッション」を世界的に提案し、現在では色々な産油国で検討・検証作業が実施しており、商業プラントも建設されている¹⁷⁾

石油開発産業における今日の環境ゼロエミッションは、産業廃棄物をできるだけ地下に圧入する方式が採用されており、地球温暖化対策の1つであるCO₂の地下貯留層への技術はこの圧入技術を利用しCCSプロジェクトを促進させている原点である。

この関係を図式化すると、図2.1-2のように再利用するか、廃棄処分するかに区分される。

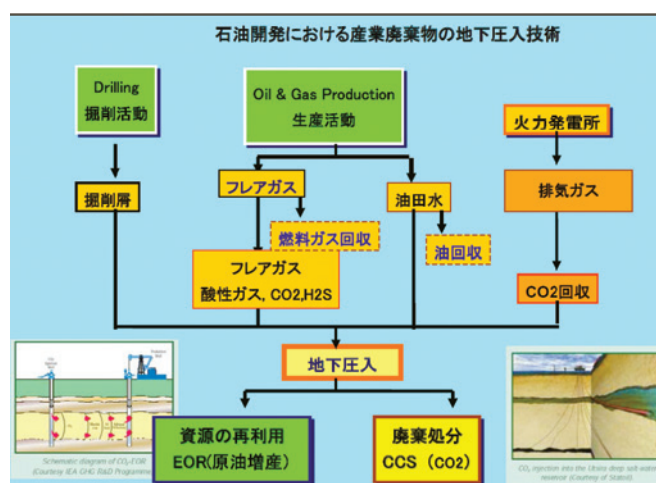


図2.1-2 石油開発の廃棄物資源のゼロエミッション関連図(日本オイルエンジニアリング作成)

石油開発のゼロエミッション技術は、資源の再利用技術の1つとして、原油増産と廃棄物処分を同時に実施する事により、経済的に負の環境対策をビジネス価値への転換を図ったことが特色である¹⁸⁾。

● CO₂EOR および CCS

地中貯留は、地下にあった炭化水素化合物を人類が利用して元に戻すというごく自然な考え方に基づくものであり、貯留方式として、EOR（Enhanced Oil Recovery）、EGR（Enhanced Gas Recovery）、ECBM（Enhanced Coal Bed Methane）、帯水層貯留（CCS）などがある^{19,20,21}。

EOR は、石油増進回収を目的として油層に CO₂ を圧入するもので、米国では 1970 年代からエネルギー国家戦略の基に、政策的に行われていた^{22,23,24,25}。前述に記載したように、CCS に関しては 1990 年後半から北海やアルジェリアにて実証試験が実施されている。さらに ECBM は、石炭層に吸着しているメタンを CO₂ によって置換させ、CO₂ 貯留とメタンの回収を図ろうとする研究もされている。

一方、我が国においては、1990 年後半から、産業技術総合研究所（産総研）や地球環境産業技術研究機構（RITE）が取り組んでいるのが CO₂ を帯水層に貯留するシステムの開発である^{26,27}。

地層水を含んだ隙間の多い砂岩層からなる帯水層の上部に気体や液体を透さないキャップロックと呼ばれる固い層が存在することにより、帯水層に圧入した CO₂ を長期に安定して閉じ込めるものである。帯水層貯留の技術は、基本的に天然ガスの地下貯留や石油増進回収等で蓄積された地中へのガス圧入・貯留技術を応用できるので、最も即効的且つ、有効であると言われており、実証試験プロジェクトが日本では 2016 年から苫小牧 CCS 実証試験²⁸）および世界各国で検討・建設が実施されている。現在も継続して地下での CO₂ 挙動解析や CO₂ 漏洩モニタリング手法の研究がなされている²⁹）。

● CO₂EOR 以外の具体的事例は、

① 余剰ガス（フレアガス）の燃焼廃棄の大気汚染：

油・ガスでのフレアガスはガス市場での有効利用の他に、油層のガスキャップへの圧入による油層の圧力維持に利用し、原油生産の延長や増産活動に活用している。

② 随伴水の廃棄の河川・海洋汚染：

在来型資源（油・ガス田）では随伴水を適切に処理して、油層へ再圧入利用（水攻法）、非在来型資源（タイトオイル・ガス等）では、フラクチャリング時の戻り汚染水を処理後に、再利用して使用し水資源の節減を図っている。

③ 掘削屑・マッド廃棄処分の海洋汚染：

掘削時の地下からの廃棄物を微細の粉碎しスラリー化して地下へ再圧入廃棄し、海洋汚染の防止を図っている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

■ 探鉱段階（衛星探査技術）

● ハイパースペクトルセンサ

現在一般的に利用されている「ASTER」等のマルチバンドのスペクトルセンサを超えるスペクトル解析能力を有する衛星用ハイパースペクトルセンサの開発が我が国および欧米各国で進められている。現在までに打ち上げられた衛星用のハイパースペクトラルセンサとしては、米国の「EO1」衛星（2000 年打ち上げ）に搭載された「HYPERION」、英国の「PROBA」衛星（2001 年打ち上げ）に搭載された「CHRIS」が知られているが、前者は信号雑音比（SN

比）が実用レベルに達していない、後者は可視近赤外波長域のみにバンドを有するのみである等、いずれも実験的な色彩が強く、資源探査に実用的に利用可能ではない³⁰⁾。今後打ち上げが予定されている衛星用ハイパースペクトルセンサとしては、以下の4件が挙げられる³¹⁾。

- － HISUI（日本）：分解能 30 m、バンド数 185
- － EnMap（独）：分解能 30 m、バンド数 232
- － HypsIRI（米）：分解能 60 m、バンド数 213
- － PRISMA（伊）：分解能 20 ～ 30 m、バンド数 249

● ディープラーニング技術の適用

マルチスペクトルセンサやハイパースペクトルセンサのデータを用いたイメージ分類（岩相分布のマッピング等に利用）には、従来、**Support Vector Machines** 等の教師付の機械学習が用いられてきた。しかしながら、こうした解析は、不均質な大気の状態、地表での光の散乱、等の影響によって極めて非線形性が強く、ある規定されたルール上で分類を行う機械学習では必ずしも良い結果を得られるわけではないことが明らかになっている。近年、ディープラーニング技術がこの分野にも適用され始めており、幾つかの期待できる成果が上がってきている³²⁾。

■ 開発段階（水平坑井掘削技術）

● マルチラテラル仕上げ工法（Multi-Lateral Wells）

マルチラテラル仕上げ工法は、1本の坑井から油・ガス層に複数の水平坑井掘削し、同時に坑井仕上げをする方法である。複数の貯留層を同時に生産井に仕上げることにより、開発コストを削減化が可能であり、更に坑井の生産性を向上させる事が可能である。

従来の単独垂直、或は傾斜掘削工法に比較して、水平掘削法は約2倍強程度のコストが必要であるが、このコスト低減のために、マルチラテラル水平坑井掘削・仕上げ工法が、2000年以降研究開発されている。この方法によって、米国のタイトオイル・ガス開発資源の低コスト開発化が可能となり、今日の非在来型資源の開発・促進となった。

● 水圧破碎法（Hydric Fracturing Technology）³³⁾

水圧破碎法は、地下の岩体に超高压の水を注入して亀裂を生じさせる手法である。高温岩体地熱発電や、タイトオイル・ガス（シェールガス）の採取に用いられている。

シェールガス開発の場合、約2000－3000 m地下の頁岩層（シェール層）にガスが貯留層とし分布し頁岩の中に分散している。坑井を単に掘削しただけでは、頁岩中のガスを取り出すことができない。そこで掘削後に坑井に水を高压で注入し、水平坑井の周りの頁岩を破碎し、ガスが流動し易くする割れ目を作ることになる。しかしながら、地下は極めて高压な状態であり、頁岩を破碎した後も割れ目が閉じてしまう。そこで坑井の地層の特徴に合わせた砂などを水と共に頁岩の割れ目に押し込み、ひび割れを固定・安定化する。この一連の技術の水圧破碎と言い、亀裂を維持する特殊な砂粒の材料はプロパントと呼ばれる。

この水平掘削の際は、特殊な砂粒（プロパント）や、酸・防腐剤・ゲル化剤・摩擦低減剤などの化学物質を添加した水が使われており、フラクチャリング流体（fracturing fluid）またはフラッキング水（fracking water）とよばれ、2000年代初期においては、これらのフラッキング時の使用する化学物質による地下水の汚染、大量の水使用による地域の水資源不足の可能性、フラッキング排水の地下圧入による地震発生の危険性といった問題点³⁴⁾が指摘されていた。API（米国石油学会）では、2012年からガイドライン³⁵⁾を作成し、2017年時点ではこれらの対応・対策が改善されている。

● 大編距坑井掘削（Expanded Reach Drilling :ERD）

近年、油・ガス田の開発に際して、厳しい海洋環境下で経済性に乏しい鉱区、或いは陸上での環境保全規制が厳しい鉱区では、垂直な地層地点から新規の掘削が困難な場所が増加している。この打開のために、傾斜堀・水平の掘削法を更なる研究・開発を進め、大編距坑井掘削技術が実用化され、2010年には掘削地点から約10km程度まで遠隔地の貯留層への資源開発が可能となっている³⁶⁾。この技術は、油・ガス田の開発のみならず、掘削場所が制限されるCCSのCO₂貯留層への適応も可能であり、今後の適応性の検討を含めた技術開発が求められている。

■生産操業段階（環境保全技術）

● マイクロバブル CO₂EOR・CCS

地下貯留技術として、CO₂EOR・CCS開発技術が大規模なCO₂削減対策として注目されている。現在、CO₂EORを適用した油田は、米国がもっとも多く約120箇所以上の実績が存在する。従来型CO₂EORのガス水相互圧入法（WAG: Water And Gas）では、効果が上がりにくい、或いは比較的厚い油層や不均一性の高い貯留層に対して、圧入するCO₂をマイクロバブル化することで有効溶解表面積を大きくし、原油の回収率の効率向上を目的にした技術である。我が国においては、2013年からJOGMEC（独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構）およびRITEが実証試験の概念設計³⁷⁾を進めており、現在はマイクロバブル発生製造技術、ラボ試験、および油層シミュレータの開発等の実証的な研究開発を実施している。この革新的なWAG技術向上が確立できると、生産性の低い油田にCO₂を圧入し石油回収率の向上や油田の寿命の延長を図ると共に、地球温暖化対策のためのCCS事業への貢献が期待できる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■生産操業段階（環境保全技術）

- 2017年にはテキサス州のW.A. Parish 石炭火力発電設備において、日本のJBICおよびJX石油開発が出資したPetra Novaプロジェクトが開始された。
- 2017年12月の炭素隔離リーダーシップフォーラム（CSLF）では、計画の詳細はまだ作成されていないものの、アラブ首長国連邦における追加の5つの施設についての計画が発表された。
- 中国のYanchang 統合CCS実証施設は2017年3月に建設が開始されている、さらに、中国にはさまざまな計画段階にある大規模施設が7つあり、韓国とオーストラリアはそれぞれ2施設を計画中である。
- 経産省が日本CCS調査（株）に委託した圧入実験が長岡市で2016年から開始され、2017末には累積圧入量10万トンを記録している。
- 環境省は2050年を目指した長期目標の実現におけるCCSの重要性を認識し、石炭火力発電所を対象としたCCS一環実証を目指して、2013年からの事前検討プロジェクトを経て、2016年から「環境配慮型CCS実証事業」を実施している。ここでは、大牟田市にある三川発電所からの排出CO₂の半分以上（500t／日以上）を回収し、船舶による輸送を経て、沖合の海底下に貯留することを目指している。
- 経済産業省と環境省が共同で出資して「二酸化炭素貯留適地調査事業（2014年～）」を実

施しており、環境省事業ではここで同定される候補地を実証事業で利用する。

（5）科学技術的課題

■探鉱段階（衛星探査技術）

衛星資源探査に利用する各種センサの研究開発分野において、日本は世界トップレベルの技術力を保持しており、今後も継続的な研究開発により、それらを維持・発展させることが期待される。我が国では、技術宇宙基本計画工程表³⁸⁾に基づき、継続的にこれらのセンサの研究開発を実施することが計画されている。これらの研究技術は、資源探査のみならず、環境モニタリングの把握にも利用でき、今後のセンサ研究開発の技術力が問われている。

- ①ハイパースペクトルセンサの開発
- ②先進光学衛星の継続開発（分解能、観測幅の向上）
- ③先進レーダ衛星の継続開発（分解能、観測幅の向上）

■開発段階（水平坑井技術）

我が国は油・ガス田の貯留層の水平方向の広がり小さい状況下のため、実施する機会が非常に少ない。それ故、水平坑井掘削技術および水圧破砕法の技術は欧米の実務の知見等を学習しつつ、国内においては遠隔地の障害の事由で山間部油田と海洋ガス田の2か所だけの事例であり、数は少ないが実績も上げている。

今後は継続的な研究開発により、生産性の向上のため油層の再開発や遠隔地からの掘削技術への適用性研究分野を検討し、技術を発展させることが期待される。

- ①油・ガス田の水平坑井の掘削およびマルチラテラル仕上げ法の実務の適用
- ②既存油田の水圧破砕法による不整合油層の再開発の適用
- ③CCS貯留モデルでは、海洋での掘削はコストが高いため、陸からのERDや水平坑井の可能性も検討しており、CCSプロジェクトでの水平坑井の適用検討
- ④油・ガス田以外に、山間部や沿岸部に穴を空けてケーブルやパイプ等を通す技術の応用として、パイプラインやケーブルを敷設する事の適用検討の促進

■生産操業段階（環境保全技術）

我が国の石油・ガスの地上設備における環境対策技術は世界トップレベルの技術力を保持しており、今後も継続的な研究開発により、これら技術向上が更に発展が図れている³⁹⁾。

しかしながら、我が国の石油開発産業界の基盤が弱いため、地下の圧入技術分野での経験が乏しい状況にある。この問題の打開のために研究開発を実施することが肝要である。

- ①CO₂EORの経済性の富む開発計画の促進
(我が国の最先端の油層技術とCO₂回収技術の組み合わせの海外技術移転)
- ②CO₂EORのマイクロバブル攻法等の高効率圧入法
- ③CCS貯留層のCO₂挙動メカニズムの解析
- ④CCS特有な地下シミュレータの研究開発
- ⑤地下貯留層のCO₂モニタリング技術（反射波弾性探査等）
- ⑥CO₂漏洩モニタリングセンサーの開発
- ⑦CCS安全且つ経済的なモニタリング手法の確立
- ⑧統合システムの運用実証・再生可能エネルギーの大量導入時における火力発電所併設
CCSのフレキシブル運用に伴うCO₂回収プラントの運用、船舶やパイプラインによる輸

送、圧入等の統合システム運用の実証試験。

（6）その他の課題

■探鉱段階（衛星探査技術）

内閣府の宇宙政策委員会の宇宙民生利用部会において、我が国における衛星データの利用全般に関して、以下のような課題が指摘されている⁴⁰⁾。

①継続性のある衛星データが必要

政府観測衛星は、試験研究開発目的で運用されており、センサが必ずしも継続的に搭載されていない（例えば、「JERS-1」、「PALSAR」、「PALSAR-2」の間に運用の空白期間が存在していた部分がある）。継続的に同じデータが使われるようにする必要がある。

②データの所在が分かり難い

各衛星の所有者もしくはデータ販売者が、各自のポータルサイト等でデータを取り扱っており、横断的にどのようなデータが存在するのか俯瞰できる環境にない。データカタログの整備や、政府系データのオープンフリー化を推進しデータアクセスを容易にする等の取り組みが必要である。

③衛星データ加工の難易度が高い

衛星のデータ間で、情報を複合利用しようとした場合、ビット数や利用ソフトの相違、撮影方法の相違、等によってデータ加工が困難となる。衛星開発の段階から、他分野データとの組み合わせを念頭に置き、加工しやすい衛星データフォーマットを整備する等の取り組みが必要となる。

④リアルタイム情報・静止衛星

近年は資源開発だけでなく、環境保全や事故時の対応等のモニタリングにも利用されている。我が国の気象観測でも定点観測のために静止衛星が活用され、リアルタイムの情報が取得されおり、迅速の対応が可能となっている。リアルタイムに監視できる静止衛星も長期的な国際協力の視野で検討すべき課題でもある。

■開発段階（水平坑井技術）

水平坑井・大偏距掘削技術の課題⁴¹⁾

これらは実証された掘削技術であるが、最先端技術であり、掘削リスクは以下の課題が存在する。

①ホールクリーニング

水平坑井や Extended Reach Well のような高傾斜井の場合には、掘削屑（カッティングス）は水平坑井の構内に残り堆積すると、閉塞現象を起こす恐れがある。この閉塞現象が生じないように、定期的にモニタリングを実施し、堆積したカッティングスを機械除去する技術が必要である。

②トルク（Torque）およびドラグ（Drag）

掘削壁と掘削管の摩擦により生じる問題がある。摩擦力を最小にするために適切な掘削シミュレーションを行い、安全且つ信頼性のある掘削技術が必要である。

③掘進率の向上

ERD や水平坑井掘削の場合、高傾斜で且つ掘削推進長さが長くなるので、掘削ビッドへの荷重を効率的に伝達できない場合が多い。事前に的確な掘削シミュレーションを行い、

荷重伝達を把握し掘進率を向上させる事が必要である。

④ ウェルコントロール（坑井制御）

掘削中は常に垂直掘削時に限らず、ERD や水平坑井掘削時にも、異常高圧層に遭遇するリスクが存在している。ERD や水平坑井掘の場合、坑内の異常高圧挙動に対応する高信頼性の坑井制御技術の開発が必要である。

■ 生産操業段階（環境保全技術）

CCS に関しては、海外では大規模な事業が数多く実施されている現実を見ても、既に 2005 年に発行された IPCC の特別報告書にも記載されているように、CCS は既存技術の組み合わせで実施できることは明白である。もちろん、確立した技術ではあっても、さらなる普及のためにはコストダウンを図るための不断努力が必要なことは言うまでもないが、CCS が真に気候変動対策技術として実効的なものとなるための課題は、世界的にも次の 3 点であると認識されている：

- ・法規制枠組みの整備
- ・資金調達の仕組みの整備
- ・社会的合意の獲得

経済産業省は 2018 年 6 月の「CCS の実証および調査事業のあり方に向けた有識者会議」の検討会において、下記の課題が示され、このロードマップも提案されている²⁶⁾。

- ① CCS 安全性評価技術
- ② CO₂ 分離回収技術のコスト低減
- ③ 我が国の CCS 貯留ポテンシャルの調査、貯留適地の同定
- ④ 国際機関との協力（CCUS）
- ⑤ 産油国との二国間での CO₂EOR/CCS 共同研究

（7）国際比較

■ 探鉱段階（衛星探査技術）

サービス業者自身が技術開発を行っているものが多く、基本的に国別の比較は困難。また、サービス業者間の技術レベルの差はほとんどないため、国際比較ができず掲載していない。

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			Not Available
	応用研究・開発			N/A
米国	基礎研究			N/A
	応用研究・開発			N/A
欧州	基礎研究			N/A
	応用研究・開発			N/A
中国	基礎研究			N/A
	応用研究・開発			N/A
韓国	基礎研究			N/A
	応用研究・開発			N/A

■開発段階（水平坑井技術）

サービス業者自身が技術開発を行っているものが多く、基本的に国別の比較は困難。また、サービス業者間の技術レベルの差はほとんどないため、国際比較ができず掲載していない。

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			Not Available
	応用研究・開発			N/A
米国	基礎研究			N/A
	応用研究・開発			N/A
欧州	基礎研究			N/A
	応用研究・開発			N/A
中国	基礎研究			N/A
	応用研究・開発			N/A
韓国	基礎研究			N/A
	応用研究・開発			N/A

■生産操業段階（環境保全技術）

生産・操業段階に係わる適用技術や研究開発における CCS を中心に国際比較をまとめる。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	CO ₂ EOR 油層技術に関しては、JOGMEC が 2000 年以降油層シミュレーションやラボ実験等の基礎的研究に関して十分な知識を持ち、海外産油国（UAE/ベトナム等）とも共同研究が進められている。 CCS に関しては、RITE を中心の IPCC との共同研究や貯留層の効果的な CO ₂ 溶解貯留技術等の研究も検討し、マイクロバブル CO ₂ 圧入技術に関しては世界初の革新的な WAG 方式研究が進み、ラボ試験の段階に至っている。 CO ₂ 回収プロセスについては分離回収手法の開発が継続されている。 RITE、産総研、東京大学、九州大学などで CO ₂ の地中注入後のモニタリングや CO ₂ 漏洩検知に関する研究が行われている。 RITE、産総研は膜法と貯留関連の技術開発を実施している。
	応用研究・開発	○	↗	CO ₂ EOR に関して、日本での適用は、油田規模が小さいため、1990 年代に小規模実証試験が油田で実施した実績しかない。海外事例では 1990 年代にはトルコ国営石油と実油田での実証試験、2016 年米国の油田で商用規模の実績がある。海外産油国（UAE、インドネシア等）で、日本の最先端の CO ₂ 回収技術（無機膜）の現地での性能実証試験も計画され、1-2 年後は評価が可能である。今後、地上の CO ₂ 回収設備を含めた油層評価技術の基礎的構築が可能と推察される。 CCS 分野は、2015 年から苫小牧の陸上大規模実証試験（経産省）の実施や洋上タンカーでの CCS 構想（環境省）の実証試験計画が進められており、陸上・洋上 CCS の応用研究開発に関して、2030 年以降の本格 CCS 案件の実現化計画が進められている。CO ₂ EOR 及び CCS 技術に関しては、油田開発の先進国である米国・英国、ノルウェー国と技術格差が短縮され、日本の独自研究開発の発揮できる可能性が強化されている。

日本	応用研究・開発	○	↗	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～2015 年に豪州 Callide 酸素燃焼プロジェクトに参画した。2015 年以降の商用化を目指している。 川崎重工は、RITE とともに固体吸収剤を用いた CO₂ 回収技術の開発を行ってきており、関西電力の舞鶴石炭火力に 40 t/日の実証設備を付設する計画である。また、JCOAL と共に米国ワイオミング州との CCS センターの活動に参加し、同センターでの実証を目指した FS に着手する予定である。 東芝は、2016 年度から環境省の「環境配慮型 CCS 実証事業」に参画し、2020 年の完成を目指して三川火力発電所に 500 t/日以上以上の回収を目指す実証プラントの建設を開始している。また、同プロジェクト内でみずほ情報総研と共同で回収プロセスからの排出物による環境影響に関する研究も実施している。さらに、米国 NET Power 社が実証を目指している超臨界 CO₂ サイクルに向け、CO₂ タービンと燃焼器を提供している。 RITE と鉄鋼 5 社が COURSE50 プロジェクトで開発・実証した吸収液を新日鉄住金エンジが商業化し、新日鐵住金室蘭製鉄所で 1 号機が稼働した。 経済産業省では日本 CCS 調査に委託して 2016 年に苫小牧 CCS 実証試験を開始した。 佐賀県では、環境省の補助を受け、ゴミ焼却場から CO₂ を回収し（10 t/日）、藻類の培養プールに一部を供給する CCU プロジェクトを実施している。 経産省と環境省は共同事業として、2014 年度から貯留適地調査事業を実施している。
米国	基礎研究	◎	→	DOE では主として、傘下の National Energy Technology Laboratory (NETL) を通じて、学界や企業の基礎研究を積極的に支援している。トランプ政権になっても、基礎研究についての予算の大幅削減といった傾向はみられない。 米国での CO₂EOR の研究開発は、1970 年代から国家エネルギー戦略計画から原油増産政策が実施され、基礎研究レベルは 1990 年台でほぼ完了している。 CCS に関する基礎研究分野はオバマ政権下で、DOE、USGS、EPA 等が CO₂EOR の実施した学習経験を含め、安全性、環境保全モニタリング等のガイドライン等の整備がされ着実な実績を上げている。
	応用研究・開発	◎	→	米国での CO₂EOR の応用研究開発は、前述のごとく国家エネルギー戦略から実施され、約 130 件の陸上油田で実施された経験があり、世界のトップランナーの技術国であり、CO₂EOR・CCS 技術力は非常に高い。但し、CO₂EOR を主体とした油田圧入 CCS 構想の実績で、帯水層型 CO₂EOR/CCS の実績は 2 件しかない。 それゆえ、CCS に関しても、DOE、EPA、民間石油企業、電力企業等が CO₂EOR/CCS 型が油・ガス田・帯水層への CO₂ 貯留を検討しているが、オバマ政権からトランプ政権に移行後、進展はやや低調になっている。 DOE の CCS 支援策 RCSP、CCPI など予算化し、商用化にむけての実証試験を行っている。 現在稼働中の CCS プロジェクト 17 件中 12 件が米国、カナダで行われている。EOR を中心に、カナダとともに現在もっとも積極的に CCS を進めている。 DOE は Regional Carbon Sequestration Partnerships (RCSP) で全米を 7 つの地区に分けて企業組合が主体とする貯留サイトの調査を実施している。 米国内には EOR 用の CO₂ パイプライン網が整備されている。 カナダでは、Boundary Dam プロジェクトで、世界で初めて石炭火力発電所から商用規模で CO₂ を回収し、EOR 用に販売している。 カナダではオイルサンド改質用の水素製造時に発生する CO₂ を回収し、帯水層へ貯留する Quest プロジェクトを実施している。

欧州	基礎研究	◎	↑	【英国】 CO₂EOR に関しては、国際石油資本である BP が国際的に石油開発の技術を 2000 年までに蓄積し、基礎研究部門はほぼ完了している。CCS に関しては、同国は GCCSI (Global CCS Institute) の本部が設置され、国際的には先駆的な政策を提言している。また、同国の政策 (DECC) においても CCS Ready (CCR) 法に基づき電力企業に対して CCS が義務けられており、老朽化した北海ガス田や帯水層に CO₂ を貯留する技術検討及び経済性評価の研究開発が進められている。当面の大型実証はキャンセルされたものの、産学官のネットワークで 1400 のメンバーが加盟している UK Carbon Capture and Research Centre (UKCCSRC) を中心とした基礎研究体制が確立されている。 【フランス、ドイツ、オランダ】 民間の国際石油企業が存在し、独自の CO₂EOR の基礎研究は進んでいる。 一方、北海の油・ガス田の開発も英国、ノルウェーとの競争もあり、自国海域で CCS 構想計画も進められている。 【ノルウェー】 政府及び Statoil 社を中心に自国領海の海洋石油開発を実施している。CO₂EOR の油田に関しては国内実績が無いが、石油・ガス産出国の中で、1992 年世界で初めて産業物濃度排出規制から総量規制に転換した国であり、CO₂ 削減計画が進められている。CO₂ 削減に関しての法制度も含めた基礎研究分野は、世界でも最も進んでいる国家である。それ故、CCS に関しては、1996 年に世界初の海洋油ガス田にて年 90 万トン CO₂ 圧入大規模海洋帯水層 CCS (Sleipner 油・ガス田) 案件を実施している。 産業科学技術研究所 (SINTEF)、ノルウェー工科大学 (NTNU) を中心に基礎研究から開発研究までを活発に実施している。
	応用研究・開発	○	↑	各国で、海洋 CCS 計画の実施に向けた安全性や経済性評価基準、法整備等の検討が進められており、2020 年以降は具体的な実施案件の建設計画が進められる。 【英国】 CO₂EOR に関しては、BP が国際的な石油開発企業として、CO₂EOR の油田の実施の経験を有する。一方、CCS に関しては BP と Statoil 社が同国ガス公社と 2004 年にアルジェリア国の陸上ガス田 (In Salah) で世界初の年 100 万トン圧入の大規模実証試験 (陸上深部帯水層) に実施している。更にこれらの経験を通じて、北海における英領の海洋の油・ガス田に対しても、CO₂EOR や老朽化したガス田・帯水層に CO₂ を貯留する大規模実証試験の実践的な計画が進められている。 2 件の商業規模の CCS プロジェクト (Peterhead, White Rose) が計画され、関係者の期待を集めていたが、2015 年 11 月になって急に商業化プログラムへの 10 億ドルの出資を取り消すとの発表があり、両プロジェクトともキャンセルとなった。 Capture Ready の法制化や、FiT-CFD など、石炭火力に対する CCS の適用の動機となり得る様々な施策を発効しており、投資環境が整えば大規模プロジェクトの実現に結びつく環境を整えつつある。 英国初の CCS 設備が整った工業地域を創設し、その地域の産業施設から排出される CO₂ 回収し、パイプラインで輸送・貯蓄するという構想で FS が進められている Teesside CO₂ Hub プロジェクトが、2017 年に欧州委員会により欧州の共通利益プロジェクト (Project of Common Interest: PCI) の 1 つとして認定された。 【オランダ】 2018 年、の Port of Rotterdam Authority、Gasunie、EBN によるロッテルダム港エリアでの CCUS の実現可能性調査の結果、技術的に実現可能であり、費用対効果も高いと結論付けたことを公表した。本プロジェクトでは、回収した CO₂ のパイプラインによる輸送、CO₂ の一部の野菜の温室栽培への利用、及び北海の海底下廃ガス田への貯留から成る計画で、年間 200 万～500 万トンの CO₂ の貯留を見込むものである。

欧州	応用研究・開発	○	↗	【ノルウェー】 Sleipner 試験の経験を踏まえて、更に 2004 年アルジェリア国陸上 CCS や、2008 年自国 LNG 基地の天然ガス中の処理設備で CO₂ を回収し、約 150 km 離れた海底帯水層へ年約 70 万トン圧入している実績があり、帯水層の CO₂ 挙動、流動シミュレーション、CO₂ 固化解析、漏洩モニタリング等の貯留層解析技術を有している。日本での海洋 CCS 計画においては、学ぶべき事項は多い。 析、漏洩モニタリング等の貯留層解析技術を有している。日本での海洋 CCS 計画においては、学ぶべき事項は多い。 ノルウェーでは商業規模の回収プラントを備えた CO₂ Technology Centre Mongstad (TCM) を運用し、メンバーの委託により吸収液の試験、アミン生成物の環境影響などの試験を実施している。 ノルウェーでは、セメント工場、肥料工場、ゴミ焼却場から排出される CO₂ を回収し、船舶で中間貯蔵施設に輸送し、パイプラインで沖合の海底下に貯留するフルチェーン CCS 構想について検討を進めている。また、この貯留層に国外からの CO₂ を受け入れるビジネスについても検討を行っている。
中国	基礎研究	△	↗	有数の石炭産出資源国であるので、2000 年以前は産業のエネルギーは石炭に依存していた。それ故、石炭火力発電所からの CO₂ 排出が主たる要因で世界の CO₂ 排出量が最大の国家である。 近年、国内大気汚染問題や国際非難的な要因で、国家政策として、再生エネルギー技術・省エネ技術の研究・開発力のレベルは急激に高まっている。 CO₂EOR に関しては、国営石油企業（Sinopec, PetroChina）で国内油田の適用検討が独自に進められている。基礎研究の歴史が浅いため、十分な技術力を保有していないと想定される。また CCS 分野も同様と予想される。 吸収液開発などでは新規性は低い論文は数多く出版されている。
	応用研究・開発	○	↗	CO₂EOR/CCS に関しては、計画中から建造中までを含めて国営石油企業が陸上油田で 8 案件が検討され、CO₂ 源としては天然ガス処理設備、石炭火力発電所、石油化学等の排出 CO₂ であり、種々の CO₂ 源を考慮しているのが特徴である。 前述の基礎研究項目で言及したように、独自だけでは限界で技術力は米国等の海外先進国の支援が必要であり、上記案件の半数は米国との共同研究であり、今後も海外勢の技術支援が必要である。 The Yanchang（延長石油）が進めている CCS 実証プロジェクトは 2017 年 3 月に建設が始まった、中国初の CCS 統合型プロジェクトである
韓国	基礎研究			NA
	応用研究・開発	△	→	韓国では 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、300MW 規模での商用化を目指す計画であるとされていたが、その後の展開については言及がみられない。 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。

（註 1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註 2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ 1～2 年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) 岡本謙一「人工衛星によるリモートセンシング」,『電波研究所季報』22 巻 121 号: 457-482, 1976.
- 2) 経済産業省「石油資源遠隔探知技術の研究開発プロジェクトの概要について」2007.
- 3) 汐川雄一「資源分野における貢献」,『日本リモートセンシング学会誌』31 巻 2 号: 240-246, 2011
- 4) 俣野米治「資源探査における衛星リモートセンシング技術の進歩」,『地学雑誌』113 巻 6 号: 878-881, 2004.
- 5) 石井吉徳「JERS - 1 への期待」,『日本リモートセンシング学会誌』12 巻 3 号: 317-321, 1992
- 6) 経済産業省「宇宙産業プログラムの実施状況」, 宇宙産業プログラムに関する施策・事業評価検討会, 2015.
- 7) 宇宙航空研究開発機構『ALOS-2 SOLUTION BOOK』, 3rd edition, 2018.
- 8) Bei Ye, *et al.*, "Assessment of WorldView-3 Data for Lithological Mapping," *Remote Sensing*, 9, (11): 1132, 2017.
- 9) Lasica Rebecca, "A new age for oil and gas exploration remote sensing data and analytics are changing the industry," *Earth Imaging Journal*, accessed November 12, 2015.
- 10) Asadzadeh Saeid, *et al.*, "Investigating the Capability of WorldView-3 Superspectral Data for Direct Hydrocarbon Detection," *Remote Sensing of Environment*, 173: 162-173, 2016
- 11) 並川貴俊「石油・天然ガスの探鉱・開発分野での SAR データ活用と、ALOS-2 への期待」, ALOS-2 ワークショップ, 2011.
- 12) 丸山裕一「資源開発における衛星地球観測の役割とこれからの方向性」, 総合科学技術会議 分野別推進総合 PT フロンティア PT 第 6 回会合, 2008.
- 13) Miegbielle V., *et al.*, "Use of Remote Sensing Radar Techniques for Oil and Gas O&G Facilities Survey in Offshore Domain for Environment and Exploration: Oil Slicks Detection and Interpretation Seeps and Spill," *SPE Health, Safety, Security, Environment, & Social Responsibility Conference - North America*, 2017.
- 14) "Horizontal wells," *Innovative Technology Summary Report*, DOE/EM-0378, Sep., U.S. Department of Energy, 1998
- 15) *SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium*, Dallas, Texas April 5-8, Society of Petroleum Engineers paper 82018, 2003.
- 16) "Horizontal Environmental Well Design and Installation," Directed technologies Drilling, Inc., 2004.
- 17) Oil and Gas for the 21st Century - OG21, Statoilhydro ASA, 2009.
- 18) "The Emissions Gap Report 2017," United Nations Environment Programme (UNEP).
- 19) Brownsort Peter, "Worldwide Comparison of CO2-EOR Conditions," Scottish Carbon Capture & Storage (SCCS), 2015.
- 20) "The Global Status of CCS," Global CCS Institute, 2016.

- 21) ” Strategic Analysis of the Global Status of CCS, Report 4: Existing CCS Research and Development Networks around the World,” Global CCS Institute, 2009.
- 22) ” Untapped Domestic Energy and Long Term Carbon Storage Solution 2017,” NETL, U.S. DOE.
- 23) Meyer James P., “Summary of CO₂EOR Injection Well Technology,” American Petroleum Institute (API), 2014.
- 24) ” CO₂-EOR offshore Resource Assessment,” DOE/NETL-2014/1631, 2014.
- 25) Mahendra K. Verma, "Fundamentals of Carbon Dioxide-enhanced Oil Recovery (CO₂-EOR): A Supporting Document of the Assessment Methodology for Hydrocarbon Recovery Using CO₂-EOR Associated with Carbon Sequestration," *Open-File Report*, 2015.
- 26) 経済産業省 地球環境連携・技術室, 資料3 「CCS の現状について」, CCS のあり方に向けた有識者懇談会 (第1回), 2012.
- 27) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構『RITE Today』, 2014-2017.
- 28) 「苫小牧 CCS 大規模実証試験」 日本 CCS 調査株式会社,
<http://www.japanccs.com/business/demonstration/index.php> (2019年2月1日アクセス).
- 29) 環境庁地球環境局「我が国における CCS 事業について」, 2017.
- 30) Kashimura Osamu, 「HISUI 開発の現状とデータの利用可能性」, 第4回 ALOS-2/3 ワークショップ, 2012.
- 31) 横矢直人, 岩崎晃「ハイパースペクトル画像処理が拓く新しい地球観測 (<特集> 宇宙に挑む人工知能技術)」, 『人工知能』 29 巻 4 号: 357-365, 2014
- 32) Zhu Xiao Xiang, *et al.*, "Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5, (4): 8-36, 2017
- 33) 伊原賢「シェールガス革命とは何か: 石油開発技術者の視点」『物理探査』 66 巻 4 号: 243-251, 2013
- 34) 『油ガスでの水処理関連技術・市場の最新動向』, S&T 出版, 2014.
- 35) ” Hydraulic Fracturing Guideline,” American Petroleum Institute (API), Aug. 2017.
- 36) 大備勝洋「大幅コストダウンと環境保護に威力: 大偏距掘削 (ERD) 技術 —サハリン1 開発等での実用化進む技術革新—」, 『石油・天然ガスレビュー』 39 巻 4 号, 2005.
- 37) Xue Ziqiu, 「マイクロバブル CO₂ 圧入方式革新的 WAG (Water-Alternating-Gas) 技術開発」, JOGMEC Techno Forum 2014.
- 38) 内閣府宇宙開発戦略本部「宇宙基本計画工程表 (平成 29 年度改訂)」, 2017.
- 39) 香山幹「石油開発最新事情: IEA-ROR, 第 38 回年次総会参加報告」『石油・天然ガス資源情報』, 2017.
- 40) 内閣府宇宙開発戦略推進事務局「宇宙データ利用促進の取組状況等について」, 宇宙政策委員会 宇宙民生利用部会 第 17 回会合, 2017.
- 41) Review Aspects of Horizontal and Multilateral Wells, Joshi Technologies International, Society of Petroleum Engineers, Sep. 2008.

2.2 火力発電

（1）研究開発領域の定義

火力発電に関する科学、技術、研究開発を記述する。

火力発電は、石油・石炭・天然ガス〔液化天然ガス（LNG）〕などの化石燃料やバイオマス・廃棄物等燃料の反応熱エネルギーを電力へ変換する発電方法の一つである。今後の燃料として中心的な役割を果たすと考えられる天然ガスと石炭およびバイオマスを対象とする。

- ①天然ガス火力発電：シングルサイクルガスタービン発電、〔ガスタービン－蒸気タービン〕ダブル複合発電、〔燃料電池－ガスタービン－蒸気タービン〕トリプル複合発電など
- ②石炭火力発電：ボイラー－蒸気タービンによる発電、石炭ガス利用のダブル複合発電、石炭ガス利用のトリプル複合発電など
- ③バイオマス火力発電：石炭との混焼ボイラー、或いはバイオマス専焼ボイラー－蒸気タービンによる発電など

（2）キーワード

天然ガス、石炭、ガスタービン、蒸気タービン、ボイラー、燃料電池、ケミカルループ燃焼、コンバインドサイクル発電、石炭ガス化複合発電、トリプル複合発電、超臨界 CO₂ サイクル、CO₂ 排出量、ゼロエミッション、再生可能エネルギー、AI 技術

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

火力発電は 1 次エネルギーの中で 35% 程度の割合を占め、エネルギー起源の CO₂ 排出量も同程度を占める。従って国全体のエネルギー消費や CO₂ 排出量の議論では、その影響度の大きさから、最優先の検討分野となる。与えられたエネルギー源を最大限活用し、社会の便益に供するためには“高効率”が非常に重要である。“火力発電の高効率化”は、長年の重要な研究テーマであり、その研究成果は社会に大きく貢献してきた。また、火力発電の主要機器は高度な技術力を結集したもので、その国の工業技術レベルの象徴であり、国際競争力の源泉でもある。

2018 年 7 月に策定された第 5 次エネルギー基本計画¹⁾では、温室効果ガスを 2030 年時点で 26%、2050 年時点で 80% 削減という環境適合に対する極めて野心的な目標が謳われ、2030 年の電源構成目標は、2015 年 7 月に策定された長期エネルギー需給見通し²⁾が引き続き採用された。天然ガス利用発電と石炭利用発電を合わせた火力発電の比率は、再生可能エネルギーの進展を考慮して、2013 年度の 88% から 2030 年度 56% に低下するが、火力発電が依然電力供給の主力である。上記目標の達成には、発電効率の向上を極限まで目指すとともに、ゼロエミッション技術や再生可能エネルギーとの調和的または統合的な技術の着実な導入が重要である。変動する再生可能エネルギーを補完する調整力を火力発電が担うことにより、電力系統の安定性維持の点からも火力発電には意義がある。

〔研究開発の動向〕

1900 年初頭の火力発電の実用化以来、“効率向上”は常に最優先の研究開発テーマであった。

効率向上による燃料費の節減といった経済的効果は勿論であるが、近年は CO₂ 削減という環境面、社会面での効果も大きく評価されている。そのため火力発電は基幹電源（ベースロード）として、高い信頼性を持ち、安定して高効率で発電できることが強く求められてきた。

■天然ガス火力発電

燃料が天然ガスの場合、研究開発は主に複合発電（GTCC: Gas Turbine Combined Cycle）が対象となるが、ガスタービンと他のシステムを組み合わせるハイブリッド発電の開発も進められている。

現在、GTCC の大容量機（40 万 kW 程度）のガスタービン入口ガス温度は既に 1600℃（発電効率 52%、CO₂ 排出量原単位 340g/kWh）に達している。国内では、現在、経産省高効率ガスタービン技術実証事業のうち、1700℃級高効率ガスタービン技術実証事業³⁾において、2020 年までの 1700℃級ガスタービン（発電効率 57%、CO₂ 排出量原単位 310g/kWh）実用化に必要な先端要素技術を大容量機に適用する実証試験を実施中である。課題は、低 NO_x 燃焼器の開発、高性能冷却システムの開発、低熱伝導率遮熱コーティングの開発、高負荷・高性能タービンの開発、高圧力比・高性能圧縮機の開発、および超耐熱材料の開発等である。米国エネルギー省（DOE）は、2018 年から 1700℃級ガスタービンの実用化に向けて、新たに 7 社に対して 350 万ドル規模のプロジェクトを立ち上げた⁴⁾。対象は高温部品の耐熱性、最終段翼の耐久性、セラミック翼、および低 NO_x 燃焼器等の開発である。EU では、FP7（欧州の第 7 次研究・技術開発のための枠組み計画）の中で、ETN（European Turbine Network）という非営利団体が主導しガスタービン技術の開発を進めている⁵⁾。

複合発電のうち、固体酸化物形燃料電池（SOFC: Solid Oxide Fuel Cell）と組み合わせたガスタービン燃料電池複合発電（GTFC: Gas Turbine Fuel cell Combine cycle）（発電効率 63%、CO₂ 排出量原単位 280g/kWh）については、NEDO で、2025 年頃の実用化を目指し、2015 年度から 2 ヶ年の 250kW 級 SOFC・マイクロガスタービンハイブリッドシステムによる実証試験、および 2016 年度から 3 ヶ年の要素技術開発がそれぞれ進められている。これらの知見をベースに 1,000kW 級の小型 GTFC（蒸気タービンなし）の商用化技術を蓄積した上で、10 万 kW 級の中型 GTFC（蒸気タービンあり）の高圧化に係る要素技術の開発を行うこととしている⁶⁾。また、本成果は後述の石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC: Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle）開発プロジェクト（大崎 Cool Gen プロジェクト）に反映されることとしている⁶⁾。

天然ガス燃焼ガスタービンの高効率化技術に高湿分空気ガスタービン（AHAT: Advanced Humid Air Turbine）（発電効率 51%、CO₂ 排出量原単位 350g/kWh）がある。GTCC に比べて起動時間が短く、負荷変化率が高いこと、最低負荷が低いことなど、再生可能エネルギー電源との協調性が高いことが期待されている。2004 年度から経産省高効率ガスタービン技術実証事業のうち、高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業として始まり、圧縮機・タービンマッチング、タービンの高湿分条件での健全性、最低負荷での燃焼安定性等を検討し、2017 年度に 40MW 級実証機試験を完了している。今後は派生システムである Smart-AHAT、CO₂ 回収型クローズドサイクル AHAT および CO₂ 回収型 IGHAT（Integrated Gasification Air Humid Turbine）等の開発に進展していくことが期待されている³⁾。

その他の天然ガス燃焼システムとしては、米国において CO₂ 分離回収（CCS: Carbon Capture and Storage）が高効率に実現可能な酸素燃焼技術と CO₂ タービン技術を統合した超

臨界 CO₂ サイクル発電技術の開発が進められている。国内重電メーカーも参画する同プロジェクトでは、2018 年にアメリカ・テキサス州にあるパイロットプラントに設置した 50MWth 燃焼器（300MW 級商用プラント用）の燃焼試験に成功している⁷⁾。さらに、DOE は 2018 年より新たに 50 万ドルの超臨界 CO₂ サイクル発電技術開発プロジェクトをスタートさせた⁴⁾。DOE では、その他に、300 万ドルを投じ、タービンベースのハイブリッドヒートエンジンの開発を 2018 年よりスタートさせている⁴⁾。

■石炭火力発電

燃料が石炭の場合、研究開発は従来のボイラー・蒸気タービン発電か、ガスタービンを用いる複合発電に大別される。また、全く異なるものとして、ケミカルループ燃焼発電（排ガスが CO₂ と H₂O のみとなる燃焼法による発電）の研究開発も進められている。

ボイラー・蒸気タービン発電では、国内では 1995 年頃から実機導入が始まった超々臨界圧（USC: Ultra Super Critical、主蒸気圧力 25MPa、温度 600～630℃、発電効率 40%、CO₂ 排出量原単位 800g/kWh）が主流となっている。新たな USC の導入は、石炭火力に対する世界的な逆風のため、日本からの技術導入により国産化を図った中国等、アジア地域に主として見られる。更なる高効率化を目指し、700℃級の先進超々臨界圧（A-USC: Advanced-Ultra Super Critical、主蒸気圧力 35MPa、温度 700℃、発電効率 46～48%、CO₂ 排出量原単位 700g/kWh）の開発が進められている。国内では、2008 年から基本設計が始まり、主としてボイラーやタービン材料の開発が中心に進められている。2017 年度以降、700℃再熱器部品から段階的に実用化されていく予定である⁸⁾。また、NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラムにおいて 750℃級材料開発に向けた基礎検討が行われている⁹⁾。海外では、米国 DOE および OCDO（Ohio Coal Development Office）により、2000 年代初頭から、蒸気条件 760℃・35MPa 級の A-USC ボイラー・タービン材料開発の研究プロジェクトが立ち上がっており、2016 年には FEED（Front End Engineering Design）を終えている¹⁰⁾。欧州では、1998 年から COMTES700 プログラムで材料開発や要素設計の研究が始まり、現在は COMTES+ プロジェクトにおいて 2021 年の 500MWe 級実証試験に向けて製造工程を中心とした開発が進められている¹¹⁾。中国、インドおよび韓国においても、近年、産官学による開発プロジェクトが動き出している状況である¹²⁾。

ボイラー・蒸気タービン発電と CCS と統合する技術に酸素燃焼技術がある。日豪政府協力のもと、国内の電力会社と重電メーカーおよび商社の企業連合がオーストラリアクイーンズランド州のカライド A 発電所において、2012～2015 年に酸素燃焼および CO₂ 回収実証試験を実施した。次期案件として、カナダアルバータ州サンダンス発電所における EOR（Enhanced Oil Recovery）による酸素燃焼 / CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage）プロジェクトが検討されている¹³⁾。米国では DOE が主導し、2012～2020 年にかけて、大学・研究機関等 14 者と計 3 千 2 百万ドル規模の加圧酸素燃焼技術、パイロットスケール炉設計、フレームレス燃焼技術、およびシステム最適化等の研究開発を進めている¹⁴⁾。ドイツでは、SFB/TRR129 Oxyflame プロジェクトがアーヘン工科大等 3 大学により進められており、酸素燃焼条件における石炭の反応性の解明やモデル化等の基礎研究や関連シンポジウムが行われている¹⁵⁾。

一方、石炭を用いる複合発電である石炭ガス化複合発電（IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle）については、国産の空気吹き IGCC、および海外の酸素吹き IGCC、どち

らも 1990 年代後半から 2010 年頃にかけて実用化されている。国内では 2020 年度の運開を目指し、広野と勿来にてそれぞれ 540MW の空気吹き IGCC 商用炉が建設中である¹⁶⁾。オランダとスペインには 1990 年代より商用運転を続けてきた IGCC が存在したが、経済的理由からオランダは 2013 年に商用運転が終了し、スペインは 2016 年に解体されるため運転が停止した。米国では 1990 年代より Tampa と Wabash River にて IGCC が商用運転されているが、さらに 2013 年に Edwardsport にて 761MW の IGCC が運転開始している¹⁷⁾。また、中国では 2013 年に Tianjin にて 265MW の IGCC（GreenGen プロジェクト）¹⁸⁾、さらに韓国では 2016 年に Taean にて 200MW の IGCC が運開している¹⁹⁾。今後運開予定の計画は全て CCS との統合システムである。国内で酸素吹き IGCC 実証試験中の大崎 Cool Gen プロジェクトは、現在、IGCC/CCS システム実証試験設備の建設を進めており、2019 年頃からの実証試験を予定している²⁰⁾。

さらに、酸素燃焼 IGCC という新たなコンセプトの国産技術が、2008 年から NEDO 事業の CO₂ 回収型クロード IGCC（発電効率 42%、CO₂ 回収率 100%）の開発として進められている²¹⁾。米国では 2017 年に Kemper にて運開予定であった 582MW の IGCC/CCS がコスト増のため LNG 火力へ計画変更されている。2018 年に Elk Hills で運開予定であった 400MW の IGCC/CCS（HECA（Hydrogen Energy California）プロジェクト）が CO₂ 引取契約の遅れのため中止となった。Texas Clean Energy Project（TCEP）は、2021 年頃の運開を目指す石油増進回収法（EOR：Enhanced Oil Recovery）による 400MW の IGCC/CCUS プロジェクト（DOE 資金 4 億 5 千万ドル）であったが、スポンサー企業の不適切支出問題により DOE 資金の引き上げがあり、2017 年に倒産した。上述の中国 GreenGen プロジェクトでは、IGCC を 400MW 級へ拡張するとともに CCS を追設する計画で、2020 年代に運開を目指している¹⁸⁾。

石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC：Integrated coal Gasification Fuel cell Combined cycle）（発電効率 55%、CO₂ 排出量原単位 590g/kWh）については、NEDO において 2025 年頃の実用化を目指し、2016 年度から 2 ケ年で IGFC システムの検討を、2016 年度から 4 ケ年で燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究を行っている⁶⁾。本 IGFC 開発プロジェクトのベースは、前述の大崎 Cool Gen で実証試験中の IGCC/CCS プラントであり、2021 年頃の実証試験を予定している。

ケミカルルーピング燃焼技術は、CO₂ 分離・回収装置や空気分離設備が不要な中小規模石炭火力向け（100～500MW）（発電効率 46%、CO₂ 排出量原単位 700g/kWh）に適した技術である。2030 年頃の実用化を目指し、NEDO により 2015 年から 6 ケ年の要素技術開発プロジェクトが進められている²²⁾。米国では DOE が主導し、2015～2020 年にかけて、プラントメーカーや大学・研究機関 7 者と計 1,100 万ドル規模の低コストキャリア開発やシステム最適化、大規模プラント FS 等の研究開発を進めている²³⁾。

■バイオマス火力発電

再生可能エネルギーの一環として、燃料にカーボンニュートラルであるバイオマスを用いるバイオマス燃焼発電が増加している。バイオマス燃焼は基本的に火力発電の技術が適用され、①固定床 ②流動床 ③噴流床 の各方式が燃料種、容量、運用性などを考慮して選定されている。木材チップ、ペレットなどの多用されるバイオマス燃料は固体であり、粉碎・乾燥技術、燃焼技術、生成灰の伝熱面への付着によるトラブル防止などの研究開発が進んでいる。また同じく固体燃料である石炭燃焼ボイラーとの親和性が良いので、石炭・バイオマスの混焼ボイラー

の技術開発も進んでいる。バイオマスペレットに関しては需要の大きな欧州で規格化、標準化が進み、生産量も大きい。近年では需要をまかないきれず、北米産のバイオマスペレットが大量に輸入されている。

近年、欧州を中心に再生可能エネルギー特に風力発電や太陽光発電が強く推奨され、経済的支援のもとに大きく伸長し、ドイツでは年間発電電力量の30%を占めるに至っている。再生可能エネルギーは燃料不要という利点はあるが、発電が自然任せであるため出力が不安定で予測困難という変動性を有している。変動出力を需要とマッチさせるためには、そのギャップを埋める調整力が必要である。蓄電池は容量制限や価格の点からまだまだ不十分であり、実質的に火力発電が調整力を担っている。このため従来の安定した高効率運転という要求に加えて、急速起動停止、急速負荷変化などの特性が要求されるようになり、その分野の研究開発が進んできている。

さらに、将来、大量の再生可能エネルギーが導入された場合、余剰エネルギーを貯蔵し、タイムシフトして使用することが必須となると考えられ、電気からガスに変換するパワー・ツー・ガスも議論されている。この場合、ガス燃料としてはメタンのほか水素、アンモニアなどが考えられ、これらの混焼または専焼を可能とする研究も進んでいる。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

1. ゼロエミッション火力発電技術

国内外で新展開を考える場合、ゼロエミッションのキーワードは極めて重要である。従来型システムの高効率化研究開発のインセンティブは縮小傾向にある。ゼロエミッション火力発電の実用化に向けて様々な技術の研究開発が進められており、その多くは石炭火力が対象であるが、天然ガスを対象としたものも存在する。従来 CCS 設備の運用コストによる熱効率低下が問題とされてきたが、これを克服する技術の開発が進められている。

① CO₂ 回収型クローズド IGCC (Oxy-fuel IGCC/CCS) ²¹⁾

NEDO 事業として、現在電力中央研究所と三菱重工業が実施する CO₂ 回収型クローズド IGCC プロジェクトは、2015～2019 年度の 5 ヶ年 45 億円規模の第 2 フェーズに移行し、50 トン/日ベンチスケールガス化炉試験運転等による要素研究開発が進められている。酸素燃焼条件における石炭反応の解明やモデル化等の基礎研究や商用プラント FS 等を通じて、多くの知見が見出されている。また、文科省フラッグシップ 2020 ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発との連携により、Oxy-fuel IGCC 用石炭ガス化炉の熱流体・構造連成大規模解析による先進的設計システムの開発が進められている ²⁴⁾。

② 超臨界 CO₂ サイクル発電 ⁷⁾

米 NET Power 社が東芝、Exelon、McDermott および 8 Rivers Capital との共同研究のもと、米テキサス州 La Porte に建設した超臨界 CO₂ サイクル発電の実証試験において、2018 年東芝が開発した 50MWth 燃焼器の燃焼試験に成功した。これは 300MW 級商用プラントスケールの燃焼器に相当する。このプロジェクトにおいても、文科省フラッグシップ 2020 ポスト「京」の開発プロジェクトとの連携により、燃焼器の熱流体・構造連成大規模解析による先進的設計システムの開発が進められている ²⁴⁾。また、DOE は 2016 年

から3ヵ年で9百万ドルの基礎研究（超臨界CO₂リーケージ対策技術、酸素燃焼器）プロジェクトを進めている²⁵⁾。

2. 再生可能エネルギー電源大量導入時の火力発電技術

不安定な再生可能エネルギー電源が接続された電力系統を安定運用するための負荷変動対応の電源として、高効率かつ機動性に優れるGTCCが有望である。NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラムのもと、2014年より、日本ガスタービン学会が主導し、国内重電メーカーおよび大学・研究機関が調査研究を進めてきた。2030年までに実現すべき目標性能は、100MW級ガスタービンでホットスタート起動10分、負荷変化率20%/分、および最低出力10%（一軸式）である。現在は、2018年度から4年間プロジェクトとして、高繰り返し熱応力への耐久性、失火・逆火防止技術、システム全体の安定制御等の課題を解決するための非定常熱応力低減技術、安定的燃焼技術、軽量新材料技術およびシステム制御技術等の開発に、非定常数値解析や新規材料開発の面から取り組んでいる²⁶⁾。

3. 再生可能エネルギーと火力発電との統合技術

再生可能エネルギーと火力発電との統合システムは、エネルギー供給に対する量的寄与と環境性向上を同時に図る低炭素化に向けた重要な技術である。太陽光発電や風力発電と動的な連係システムを形成するものも存在するが、ここで取り上げるものは、運転状態が相互に影響を及ぼすようにシステムとしての完全な統合を図っているものである。主として、太陽熱アシスト技術となる。

①太陽熱アシスト石炭火力

太陽熱でアシストされる熱源が300℃以下の低温熱源であれば給水加熱に²⁷⁾、300℃以上の高温熱源であれば蒸気発生に²⁸⁾使用可能である。電力需要に応じて、給炭量を節約するモードやボイラーの定格負荷以上のモードで運転することも可能であり、従来の石炭火力よりも柔軟な運用が可能である。また、ハイブリッド太陽熱集熱燃焼器（HSRC: Hybrid Solar Receiver Combustor）という燃焼器と太陽熱集熱器を統合した蒸気発生システムも提案されている²⁹⁾。これとMILD（高温空気・低酸素濃度・排ガス再循環）燃焼技術を組み合わせると格段に高効率化と低NO_x化を図ることが可能である³⁰⁾。

②太陽熱アシスト天然ガス焚ガスタービン

太陽熱は輻射窓で直接的に、または何らかの蓄熱材料を介して間接的にガスタービン圧縮機の入口または出口の空気を予熱することにより、高効率化に寄与する³¹⁾。ただし、高温加圧空気の予熱には蓄熱材料の耐熱性など技術的課題が残されている。定温常圧空気の予熱であれば直接加熱方式が採用可能で、技術的ハードルは高くない。

③太陽熱アシストケミカルループ燃焼

ケミカルループ燃焼の固体酸素キャリア粒子の燃料側反応器における還元反応を利用し、太陽熱エネルギーの熱化学的貯蔵が可能となる。この貯蔵エネルギーは、酸化剤側反応器の酸化反応により回収することが可能である。仮にキャリア粒子の貯蔵容器を設置すれば、太陽熱エネルギーの長期貯蔵が実現可能である。なお、この太陽熱エネルギー貯蔵の利点は、必要時に随時使用可能ということに加えて、太陽熱集熱器における温度以上に高い温度での熱供給が可能という点にもある³²⁾。

④太陽熱アシスト燃料改質・酸素製造

太陽熱でアシストされる熱源が900℃以上であれば、固体炭素燃料を水蒸気改質によりガ

ス化することで、ランキンサイクルからガスタービン複合発電サイクルへと利用するサイクルを高効率化することが可能である³³⁾。また、700℃以上であれば、水や空気からの熱化学的分離法により酸素製造を行うことが可能である³⁴⁾。

4. AI 技術の火力発電への活用技術

石炭火力発電所のボイラーの安定的かつ効率的な運転に必要な、給炭量や空気投入量、ボイラ圧力、バーナ燃焼性、蒸気温度、および排ガス特性など数多くのパラメータを深層学習により最適化するシステム³⁵⁾、発電所の保守計画、備品管理、および燃料の最適化を行うシステム³⁶⁾、画像やセンサ等リアルタイムデータから異常検知を図るもの^{37,38)}等、様々な提案がなされている。今後は、AI 技術は火力発電所の設計、運転および管理に必要不可欠なものになる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

1. 天然ガス焚ガスタービン複合発電に関するプロジェクト

日本では、経済産業省高効率ガスタービン技術実証事業（2012～2020年、約536億円）³⁾として、1700℃級高効率ガスタービン技術実証事業（三菱重工業）が実施されている。NEDO次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電基盤技術開発（約51億円）⁶⁾では、ガスタービン燃料電池複合発電技術（三菱日立パワーシステムズ、日本特殊陶業：2016～2018年度）が実施されている。米国では、DOE Advanced Turbine Technology Project（2018～2021年、約350万ドル）⁴⁾が、GE（高温部品耐熱性、翼最終段、空力・伝熱）、Siemens Energy（セラミック翼、チタン・アルミナ翼、低NOx燃焼器）、United Technologies Research Center（セラミック翼）をメンバーに進められている。

2. 石炭ガス化複合発電（ゼロエミッション技術）に関するプロジェクト

日本では、IGCCの研究開発が継続して進められ、空気吹きに関しては商用規模の540MW2基が福島県に建設中であり、酸素吹きについても大崎クールジェンで実証試験が続けられており、世界を圧倒的にリードしている。NEDO次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電基盤技術開発（約51億円）⁶⁾では、燃料電池石炭ガス適用性研究/IGFCシステムの検討（電源開発、中国電力：2016～2017年度）にて、燃料電池石炭ガス適用性研究/燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究（電源開発：2016～2019年度）が進められている。一方、欧州ではIGCCのみならずA-USCの研究プロジェクトも中止され、火力発電の高効率化の研究開発はストップしている。

3. その他のゼロエミッション火力発電技術

米国では、超臨界CO₂サイクル火力発電プロジェクト（NET Power Allam Cycle Project）⁷⁾や超臨界CO₂サイクル火力発電プロジェクト（DOE、2016～2019年、9百万ドル）²⁵⁾が進められ、欧州では、EU Horizon2020 ACT Project（2016～2020年、1千3百万ユーロ）³⁹⁾が実施されている。

4. 再生可能エネルギー電源大量導入時の火力発電技術

日本では、上記のように、NEDO次世代火力発電等技術開発にて、次世代火力基盤技術/機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究（2018～2021年）（電力中央研究所、三菱重工業）が開始した。欧州では、EU Horizon2020 FLEXTURBINE Project（2016～2018年、6千5百万ユーロ）³⁹⁾が進展している。

5. 再生可能エネルギー（太陽熱）と火力発電との統合技術

欧州では、太陽熱発電とマイクロガスタービンを組み合わせた 3-10 kW の発電システムを開発するプロジェクトが、EU FP7 OMSoP Project (Optimised Microturbine Solar Power System) (2013 ~ 2017 年、580 万ユーロ)⁴⁰⁾ として実施されている。

6. アンモニア直接利用発電技術（SIP エネルギーキャリア）

日本では、アンモニアの CO₂ フリー燃料としての利用技術確立を狙い、アンモニア直接利用発電技術開発が進展している。具体的には、アンモニア混焼による中小型ガスタービン (50kW、2MW) 発電技術開発 [IHI, トヨタエナジーソリューションズ、産総研、東北大] や、アンモニア分解の水素による大型ガスタービン混焼発電技術開発 (数百 MW 級) [三菱日立パワーシステムズ、三菱重工業]、石炭混焼発電技術開発 [IHI, 中国電力、中部電力、東北電力、関西電力、電中研] 等が実施されている。既存石炭火力発電所でのアンモニア混焼発電試験では、シングルバーナーでの 20% 混焼実証を踏まえ、中国電力水島発電所 2 号機 (石炭ボイラー・蒸気タービン) でアンモニア混焼発電試験に成功している。今後、燃焼シミュレーション技術の確立とそれを用いた大型化 (既設発電所レベル) への適用や、既設発電所での本格導入に向けた具体的設計と経済性・安定供給に向けた検討が進められる。

(5) 科学技術的課題

電力出力が天候に依存し変動する再生可能エネルギー導入の進展に伴い、出力制御可能な火力発電には、電力調整に俊敏に対応し電力系統を安定化できるよう、負荷変動対応速度の向上や待機する最低負荷の引き下げ、電力要求時の起動時間短縮等のニーズがますます高まる。また、火力発電設備は、より電力単価を下げるため、設備の稼働率向上や信頼性向上が求められる。化石燃料焚き火力発電は、CO₂ 排出量を抑制するため、非化石燃料であるバイオマス等を焚くことにより CO₂ 原単位削減が期待される。このように、火力発電にはこれまでにない設備仕様の実用化にむけた技術開発が、継続して求められている。

技術の困難性の高まりに対して、デジタルツインと呼ばれる、実用機器で起こる実現象を事前に正確に予想できるような解析手段の構築が必要である。この実現のためには、バーナーなどの燃焼器やボイラー内部の詳細な現象を把握・理解することが重要であり、未踏複合現象解明に基づく複合現象モデルを活用した解析ツールと解析を実現可能とする解析インフラの整備が肝要となる。

また、完成した実用機器の設備稼働率の向上には、定期点検期間の短縮や定期点検間隔の延長が鍵となる。このためには、機器損傷予測可能な IoT/AI を活用した遠隔監視技術、運転診断技術の開発及び検査・改造工事の効率化も必要となってくる。

天然ガス火力複合発電 (GTCC) については、より高効率なガスタービンの開発と、蒸気サイクルとの全体最適マッチングが課題となっている。1600 °C 級ガスタービンが既に実用化されている現在、1700 °C 級のガスタービン開発が目標であり、2020 年の実証機運転を達成するため、超高温に耐える先進的冷却技術、耐壊食・腐食性の高い遮熱コーティング技術、耐熱合金開発に加え、圧縮機・タービンの高効率化、超希薄予混合・高排ガス再循環条件における安定 (燃焼振動・逆火抑制)・低 NO_x 燃焼技術、高性能シール・軸受技術、翼制振技術、先進製造技術、特殊計測技術、検査技術等の継続的開発が必要である。1700 °C 級では、ガスタービンの排気温度も上昇し 600 °C を超える。このように、より高温になった排熱回収ボイラーおよ

び蒸気タービンにて使用することを目的とした、600～700℃レベルの鉄系の高温材料開発も重要になってくると考えられる。さらに、1700℃機実用化に対し、3Dプリンターを適用した革新的製造技術やITを駆使した計測・制御・検査技術の開発も課題である。今後のさらなる高効率化競争には、1800℃級GTの開発も視野に入れる必要がある。そこでは従来技術の延長では達成できない大きな技術革新が求められるため、新コンセプトに基づいた総合的な技術開発が必要である。

一方、低炭素社会の実現に向けて、水素を利用したガスタービン開発が必要とされている。既に開発に着手している水素燃料を利用したガスタービンでは、全く新しい燃焼技術が必要とされるため、国の支援を得た欧米競合企業に対して後れを取っている。今後、市場が立ち上がるまでに開発を加速する必要がある。また、上記したように、今後の再生可能エネルギー大量導入をにらみ、系統調整能力の高いGTには、急速起動性・高負荷変動対応能力が求められるため、この対応技術開発が継続して必要である。

石炭火力発電については、700～750℃級の先進超々臨界圧（A-USC）発電の開発に向け、耐熱性能700℃以上のFe-Ni基合金やNi合金の開発、高温部品（650℃域）における材料単価を下げるための先進フェライト系鋼の開発、10万時間以上の耐高温クリープ試験実証、耐水蒸気酸化性、耐石炭灰高温腐食性試験実証などが課題となる。上記に加え、CO₂原単位削減に向けた石炭/バイオマスの混焼比率の増加や、バイオマス専焼等のバイオマス燃焼比率向上のために、利用可能なバイオマス種を増加させる前処理技術やバイオマスのハンドリング性の向上、石炭と比べ多く含まれるアルカリ金属類の影響や灰分の有効利用等、様々な取り組みが必要とされる。

石炭ガス化複合発電（IGCC）については、従来のボイラー蒸気タービンによる発電に比べて20%程度の効率向上が見込めるが、現状設備コストが割高であり普及が進んでいない。出力当たりの設備コストを低下させるには、石炭ガス化炉のガス化転換率向上、熱サイクルの最高温度引き上げ、現状の湿式ガス精製に替わる乾式ガス精製技術の開発、空気分離装置の高効率化による動力低減などが課題である。また、ガスタービン高温部品の石炭ガス化ガスに対する耐壊食・腐食性コーティング技術開発や、海外でのCO₂排出量削減に資するための、粗悪な海外炭への対応性検証も課題となる。

トリプル複合発電（GTFC）では固体電解質燃料電池（SOFC）が将来の高効率火力発電の鍵を握る最重要技術である。SOFCの大型化技術、すなわち、大型セル・スタックの成形・製造技術、信頼性・耐久性・保守性の向上などの開発が課題である。また、SOFC実用化には、安定した大量生産技術の確立によるコストダウンも必要である。GTFCが実用化されれば、これとIGCC技術の組み合わせにより、IGFCの実用化も有望になってくると思われる。

ゼロエミッション火力発電については、IGCC（IGFC）/CCSにおいて、クローズドIGCCにおける酸素燃焼石炭ガス化炉最適化や、クローズドIGCCにおける酸素燃焼ガスタービン燃焼技術、再生熱交換器の高効率化、IGFC/CCSにおけるCO₂回収設備の運用コスト低減などが課題となる。超臨界CO₂サイクル火力発電の課題としては、高耐久性の耐熱・耐圧材料の開発、酸素燃焼の安定（燃焼振動抑制）制御技術、一貫システムの試験実証、熱システム最適化、システム全体の性能、運用性および信頼性の向上などが挙げられる。

再生可能エネルギー（太陽熱）と火力発電との統合技術については、間接伝熱方式の伝熱効率向上（空気加熱、蒸気加熱）や実用スケール試験実証、バーナー設計最適化（HSRC）、空

気加熱の最高温度向上などが課題となる。

AI の火力発電への活用技術に関しては、発電所保守管理計画支援、発電所運転条件最適化、トラブル予兆検知・回避操作支援、要素技術開発効率化などが課題である。

なお、火力発電高効率化のための作動流体の高温化とそれを可能にする高温材料の開発の重要性については、これまで継続して強調されてきたが、さらなるプラント効率の向上のためには、低温側の改善すなわち、低温側熱回収による効率向上も重要になってくると考えられる。この場合、排気ガス中の水蒸気の潜熱回収は非常に効果大きい。低温での耐食性を備えた高性能の熱交換器はますます重要になると考えられる。

（6）その他の課題

火力発電は、大型かつ多様な要素機器が高度に統合されたものであるため、新たな技術開発には多額の予算と長いリードタイムが必要である。ところが、企業においては収益優先の立場から、長期的な基礎研究が非常に難しくなっている。特に、高効率化の鍵となる高温材料の開発などは顕著である。基礎的な要素技術開発から、大規模な実証試験に至るまで、各開発段階において産学の緊密な連携が重要となっており、技術革新を開発の次段階へスムーズにロスなく進めていくことが求められる。

IGCC の普及推進には、JCM（二国間クレジット）等の仕組みを活用した、海外市場への展開が望まれる。さらに、IGCC から排出される石炭スラグの高付加価値利用技術の一貫として、JIS 規格化が進められているが、規格化検討の加速とともに、国際社会での規格化に向けた支援などが期待される。

火力発電のゼロエミッション技術開発については、短期的に実用化を図るため、国際連携による CCS 実現が重要である。国が主導して、連携関係の構築を進めることが期待される。また、長期的には国内 CCS を念頭に、国の責任において社会受容を進めるよう対策を講じていく必要がある。超臨界 CO₂ サイクル発電技術については、国内法規制（高圧ガス規制等）から海外で実証試験せざるを得ない状況が生じている。国際競争力の面から、大きな損失であり、規制緩和等が求められる。

AI/IoT 技術が今後の研究開発において重要な要素となり、今後益々多様な人材を活用した領域横断型のプロジェクトが不可欠となる。米 DOE のように、1 つのテーマに対して複数プロジェクトの採択を行い、開発オプションを広げることが大切である。1 テーマ 1 プロジェクト採用だと、国際的なトレンドによっては開発リスクが高まる可能性がある。また、研究者雇用で専従義務を課すなど、若手人材の活用に柔軟性を欠くことが散見される課題がある。適切なエフォート管理により、複数プロジェクトに関わることができ、広い見識と経験を持つ若手人材の育成が求められる。長期間の技術開発とセットになった人材育成が重要である。

火力発電等電力インフラにおけるレジリエンスの重要性については、2018 年 9 月の北海道胆振東部地震による大規模停電の際、改めて認識された。火力発電設備の耐震性の確保に関し、国の技術基準への明確な規定化などが期待される。

（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	○	→	● GTCC のための単結晶材、冷却技術、耐熱コーティング技術等の開発が進められている。 ● A-USC 向け Fe-Ni 合金や Ni 基合金、先進フェライト系鋼の研究開発が行われている。 ● CO₂回収型クローズドIGCCの基礎要素試験研究が進められている。 ● IGCC ボトミングサイクル抽気蒸気を用いた高効率化研究が進められている。 ● GTCC の負荷運用性向上に向けた研究開発が進められている。 ● 超並列大規模数値シミュレーション技術のゼロエミッション火力技術開発への適用に関して府省間連携が進められている。 ● 文科省 ALCA プロジェクトでガスタービン用の高温材料の開発、遮熱・断熱セラミック材料の開発、600～800℃の高温材料の開発が精力的に行われている。 ● 基礎研究分野における大学・研究機関からの論文数は横ばい傾向にある。基礎研究では、最先端レベルにある。
	応用研究・開発	◎	→	● Fe-Ni 基合金や Ni 基合金を使った主蒸気管や管寄せ部の耐久試験が行われている。 ● 大崎 Cool Gen プロジェクトにより、IGFC/CCS 実証試験が行われている。 ● CO₂回収型クローズドIGCCのベンチスケール試験（乾式ガス精製含む）が行われている。 ● マイクロガスタービンと SOFC のハイブリッド発電システム実証試験が進められている。 ● 540MW 級空気吹き IGCC プラント 2 基が建設中である。 ● 超臨界 CO₂ サイクル発電の商用スケール燃焼器試験に成功した。 ● 次世代火力発電のロードマップに従い、1700℃ガスタービンの実用化を世界に先駆けて実現することが期待される。 ● 欧米の研究開発投資が縮小傾向に中、日本の研究への注目が大きくなってきている。
米国	基礎研究	◎	↗	● DOE のサポートにより、大学・研究機関における新技術に関する基礎研究への投資が幅広い分野で常に行われている。 ● DOE/NETL において、酸素燃焼、およびケミカルループ燃焼に関する基礎研究が盛んに行われている。 ● 基礎研究分野における大学・研究機関からの論文数は上昇傾向にある。基礎研究では、最先端レベルにある。MIT、プリンストン、スタンフォード、カリフォルニア工科大、UC バークレー、他多数。
	応用研究・開発	○	→	● DOE は 2016 年より、超臨界 CO₂ サイクル発電技術に関する 9 百万ドルのプロジェクトを開始し、商用規模 CO₂ サイクル実証試験研究を積極的に推進している。 ● DOE において、2018 年より新たに TIT 高温化技術、超臨界 CO₂ サイクル発電技術、およびタービン・ヒートエンジンに関する応用研究開発が開始された（7 百万ドル）。 ● 褐炭利用の流動床ガス化 IGCC プラントとして建設された Kemper County 582MW は 2016 年 7 月に石炭ガス化成功と報じられたが、大幅な予算超過と、安価な天然ガスによる競争力喪失のため、石炭ガス化を断念し、結局天然ガスコンバインドプラントとして運転継続されることが 2018 年に決定された。HECA の IGCC/CCS 実証プロジェクトも中止となった。 ● トランプ政権の誕生とともに、EPA 環境基準の見直し、石炭火力復活のための支援策などが打たれているが、シェールガスの安価で大量の生産状況のもとでは、天然ガスコンバインド火力が圧倒的な競争力を有している。

欧州	基礎研究	○	→	【EU】 ●大学・研究機関において幅広い基礎研究が行われている。基礎研究では、最先端レベルにある。 ●火力発電分野への投資は減少傾向にある。 ●石炭の高効率化への研究は殆ど中止されたが、変動電力対応の急速起動停止・負荷変化や、バイオマス燃焼、廃棄物処理燃焼などについては研究が継続されている。 【英国】 ●希薄予混合燃焼に関する基礎研究では、世界をリードする立場にある（ケンブリッジ大）。 【ドイツ】 ●SFB/TRR 129 Oxyflame プロジェクトにより酸素燃焼分野の基礎研究を積極的に進めている。本分野の基礎研究に関する論文数は上昇傾向にある（アーヘン工科大、ボーフム大、ダルムシュタット大）。 ●石炭燃焼・ガス化研究では、上記に加えてシュツットガルト大、エッセン・デュイスブルク大、フライブルグ工科大等で基礎研究が盛んである。 ●石炭の高効率化への研究は殆ど中止されたが、変動電力対応の急速起動停止・負荷変化や、バイオマス燃焼、廃棄物処理燃焼などについては研究が継続されている。 【フランス】 ●ガスタービン燃焼に関する基礎研究では、世界をリードする立場にある（CERFACS、IMFT-UMR、EM2C-CNRS、LMFN-CORIA 等）。
	応用研究・開発	△	↘	【EU】 ●CCS 関連研究が盛んに進められてきているが、近年は中止になるものも多い。 ●COMTES+ により 500MWe 級 A-USC 実証試験に向けた製造工程に関する開発が進められている。 ●GTCC 等の高コストな火力発電技術はメリットオーダーにより運用される機会が減っている。 ●欧州の IGCC プラントは、運用停止や解体が決まったものがある。 ●再生可能エネルギー重視の政策のもと、火力発電の高効率化に関する研究や支援策は低迷し、A-USC や IGCC 関係のプロジェクトは殆ど中止となっている。しかしポーランドを初めとする中欧ヨーロッパ諸国は石炭への依存度が大きいと、引き続き IGCC などの石炭の高効率利用に関心が高い。 【英国】 ●英国政府は国内の石炭火力発電所の運転を 2023 年から制限し、2025 年には閉鎖するとしている。天然ガス火力ならびに再生可能エネルギー電源との協調についての研究開発が進められている。 【ドイツ】 ●2018 年末までに石炭火力廃止のための検討委員会を立ち上げ、廃止時期を検討中である。 ●天然ガス火力の価格競争力はほとんどない。 ●ドイツでは褐炭火力発電は原子力の次に発電原価が安く、電気料金の高騰防止に貢献し、また褐炭産業はそれなりの雇用を生んでいるため、褐炭火力廃止の是非について、国の委員会を設立し、2018 年末を目標に決定することになっている。 【フランス】 ●火力発電比率の低いフランスでは応用研究・開発は多くない。 ●もともと原子力重視の方針のもと、火力への支援は最低限にとどめられており、目立った研究開発は無い。 【ポーランド】 ●石炭火力発電比率が約 90% のポーランドにおいて、日本の重電メーカーによる石炭火力開発プロジェクトが進行している。

中国	基礎研究	◎	↑	●近年の海外留学者の積極的な人材登用、豊富な研究資金の投入により、基礎研究力は着実に上昇している。基礎研究分野の論文数が激増している。 ●火力発電分野の国際会議の主催が増えている。人材交流も含めて、海外研究期間との連携を積極的に進めている。
	応用研究・開発	◎	↑	●USC 技術については、既に技術輸出国となっている。A-USC 技術についても、二段再熱式の積極的な開発を進めている。 ●国産技術のガス化炉である HCERI 炉を用いた IGCC/CCS の Green Gen プロジェクトを着実に進めている。 ●ノズル対置ガス化炉（OMB 炉）や TU 炉等、様々な形式の国産ガス化炉が積極的に提案され、実用化に結びつけている。 ●いろいろな世界の動きはあっても、石炭依存のエネルギー事情の根底は変わらず、石炭火力発電の高効率化の役割は大きい。多くの老朽石炭火力を廃止して、大量の USC プラントを建設し、また世界初の USC 二段再熱プラントを建設するなど高効率化が着実に進んでいる。しかし、USC プラントの過剰生産設備を抱え、輸出に活路を見出そうとしている。
韓国	基礎研究	○	→	●大学・研究機関における基礎研究は継続的に行われている。 ●基礎研究分野の論文数は横ばい傾向にある。 ●日本の大学・研究機関との提携をベースに、積極的な人材交流や技術交流を図っている。
	応用研究・開発	○	→	●Taeon IGCC プロジェクトは 2016 年実証試験を開始したと発表されたが、運転性能や運転状況などは公表されていない。

（註 1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註 2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ 1～2 年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) 資源エネルギー庁「第 5 次エネルギー基本計画」,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 2) 経済産業省「長期エネルギー需給見通し」,
http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 3) 経済産業省「高効率ガスタービン技術実証事業」,
http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihu101/siryo2-1_3.pdf (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 4) DOE Advanced Turbine Technology Project,
<https://www.energy.gov/fe/office-fossilenergy> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 5) European Turbine Network, <https://etn.global> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 6) NEDO「石炭ガス化燃料電池複合発電に活用する調査・要素技術開発を開始 一次世代火力発電技術の早期確立を目指す」,
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100580.html (2019 年 2 月 1 日アクセス) .

- 7) NET Power Allam Cycle Project,
<https://8rivers.com/portfolio/allam-cycle/>（2019年2月1日アクセス）。
- 8) NEDO「次世代火力発電等技術開発／次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」に係る実施体制の決定について」,
https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100138.html（2019年2月1日アクセス）。
- 9) NEDO「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」,
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100039.html（2019年2月1日アクセス）。
- 10) DOE/NETL and OCDO,
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1332274>（2019年2月1日アクセス）。
- 11) A. D. Gianfrancesco ed., “Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants,” *Elsevier*, 2017.
- 12) 国家能源局電力司「中国の高効率かつクリーンな石炭火力発電の発展における現状と展望」,
日中経済協会, 2014.
- 13) J-Power「カライド酸素燃焼プロジェクトで世界初の発電所実機での酸素燃焼・CO₂回収一貫実証が完了」,
http://www.jpowers.co.jp/news_release/pdf/news150302-2.pdf(2019年2月1日アクセス)。
- 14) DOE/NETL, Oxy-Combustion Projects,
<https://www.netl.doe.gov>（2019年2月1日アクセス）。
- 15) SFB/TRR 129 Oxyflame, <http://www.oxyflame.com>（2019年2月1日アクセス）。
- 16) 三菱日立パワーシステムズ「勿来 IGCC パワー合同会社および広野 IGCC パワー合同会社向け石炭ガス化複合発電設備フルターンキー契約で連続受注、出力 54 万キロワット」,
https://www.mhps.com/jp/news/20161201_02.html（2019年2月1日アクセス）。
- 17) DUKE ENERGY, Edwardsport IGCC,
<https://www.duke-energy.com/our-company/about-us/power-plants/edwardsport>（2019年2月1日アクセス）。
- 18) 常磐共同火力, 海外の IGCC プロジェクト,
<http://www.joban-power.co.jp/igccdata/igcc/>（2019年2月1日アクセス）。
- 19) Taeon IGCC Project Update,
<https://www.globalsyngas.org/uploads/downloads/2015-9-2-Seungmin-Doosan.pdf>(2019年2月1日アクセス）。
- 20) 大崎クールジェンプロジェクト, <https://www.osaki-coolgen.jp>(2019年2月1日アクセス)。
- 21) NEDO「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト」,
https://www.nedo.go.jp/activities/EV_00043.html（2019年2月1日アクセス）。
- 22) NEDO「CO₂ 分離型化学燃焼石炭利用技術開発に着手 ―CO₂ 分離・回収コスト 1,000 円台／t を目指す―」,
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100464.html（2019年2月1日アクセス）。
- 23) DOE/NETL, Chemical Looping Combustion Projects,
<https://www.netl.doe.gov>（2019年2月1日アクセス）。
- 24) 文部科学省フラッグシップ 2020 ポスト「京」重点課題⑥革新的クリーンエネルギーシステムの実用化 高圧燃焼・ガス化を伴うエネルギー変換システム,

- <https://postk6.t.u-tokyo.ac.jp/research/>（2019年2月1日アクセス）。
- 25) U.S. DOE,
<https://energy.gov/fe/articles/doe-invest-30-million-projects-developing-components-advanced-turbine-and-supercritical>（2019年2月1日アクセス）。
- 26) NEDO「機動性に優れた高効率ガスタービン複合発電の要素技術開発に着手 ー再生可能エネルギーの安定的大量導入と CO2 排出量削減の両立を目指すー」
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100996.html（2019年2月1日アクセス）。
- 27) You Ying and Eric J. Hu, "Thermodynamic Advantages of Using Solar Energy in the Regenerative Rankine Power Plant," *Applied Thermal Engineering* 19, (11): 1173-1180, 1999.
- 28) Sarada Kuravi *et al.*, "Thermal Energy Storage Technologies and Systems for Concentrating Solar Power Plants," *Progress in Energy and Combustion Science* 39, (4): 285-319, 2013.
- 29) G.j. Nathan, D.l. Battye and P.j. Ashman, "Economic Evaluation of a Novel Fuel-saver Hybrid Combining a Solar Receiver with a Combustor for a Solar Power Tower," *Applied Energy* 113: 1235-1243, 2014.
- 30) Jin Han Lim *et al.*, "Assessment of the Potential Benefits and Constraints of a Hybrid Solar Receiver and Combustor Operated in the MILD Combustion Regime," *Energy* 116: 735-745, 2016.
- 31) Reiner Buck *et al.*, "Solar-Hybrid Gas Turbine-based Power Tower Systems (REFOS)," *Journal of Solar Energy Engineering* 124, (1): 2, 2002.
- 32) Hui Hong and Hongguang Jin, "A Novel Solar Thermal Cycle with Chemical Looping Combustion," *International Journal of Green Energy* 2, (4): 397-407, 2005.
- 33) Nicolas Piatkowski *et al.*, "Solar-driven Gasification of Carbonaceous Feedstock—a Review," *Energy Environ. Sci.* 4, (1): 73-82, 2011.
- 34) Pegah Haseli, Mehdi Jafarian and Graham J. Nathan, "High Temperature Solar Thermochemical Process for Production of Stored Energy and Oxygen Based on CuO/Cu₂O Redox Reactions," *Solar Energy* 153: 1-10, 2017.
- 35) 三菱日立パワーシステムズ「AIを活用した次世代火力運用サービスの協働開発について」,
<https://www.mhps.com/jp/news/20170913.html>（2019年2月1日アクセス）。
- 36) 東京電力フュエル & パワー「AIによる火力発電所運営の最適化について ～東電 FP と日本タタ・コンサルタンシー・サービスズが AI 開発・導入に向けて基本合意締結～」,
http://www.tepco.co.jp/fp/companies-ir/press-information/press/2018/1491431_8629.html（2019年2月1日アクセス）。
- 37) Pál Tóth, Attila Garami and Bernadett Csordás, "Image-based Deep Neural Network Prediction of the Heat Output of a Step-grate Biomass Boiler," *Applied Energy* 200: 155-69, 2017.
- 38) A. Fichera and A. Pagano, "Application of Neural Dynamic Optimization to Combustion-instability Control," *Applied Energy* 83, (3): 253-264, 2006.
- 39) "Secure, clean and efficient energy," Funded Project under Horizon 2020.

40) OMSoP Project,

<https://omsop.serverdata.net/Pages/Home.aspx>（2019年2月1日アクセス）.

2.3 CCU（Carbon Capture and Utilization）

（1）研究開発領域の定義

CCUに関する科学、技術、研究開発を記述する。CCUは、大気中、あるいは火力発電所や工場などから排出されるCO₂を回収（Capture）し、有効活用（Utilization）する技術である。産油国ではCCUは石油増進回収（EOR：Enhanced Oil Recovery）を意味することが多いが、日本、EUでは幅広いCO₂有効利用全般を指す。ここでは、CO₂の分離・回収、輸送の技術およびCO₂利用技術に関する研究開発を対象とする。また、大気中のCO₂の直接回収も含める。有望なCO₂有効利用技術として、人工光合成に代表される太陽光エネルギーを駆動力としたCO₂還元に基づくメタノール・ギ酸・CO等の燃料合成や、触媒化学的プロセスによるCO₂を原料とする様々な有機・無機分子との反応による化成品及びその中間体の合成、さらにはそれらの高分子化によるCO₂固定があげられる。ここではコンクリートや炭酸塩（骨材利用）は省略する。

（2）キーワード

人工光合成、光触媒、二酸化炭素固定化、燃料合成、化成品合成、CO₂資化細菌

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

現在の化学工業製品のほとんどは石油から作られているが、言うまでもなく石油は有限の化石資源である。その代替として二酸化炭素を炭素資源として有効利用する研究開発が発展すれば、その技術は化石資源に依存しない生産技術として、社会的意義は極めて大きい。不活性な分子である二酸化炭素を活性化する新たな分子変換手法の開発が必須であり、科学技術的にも重要な課題である。CO₂から付加価値の高い物質が得られれば、CCUに経済的意義が生じ、CO₂は資源として重要となる。CO₂が固定化される期間は物質の性質や用途によって異なるが、生成したCO₂を再利用するというカーボンサイクルを構築できる。また、ソーラー水素（太陽エネルギーによる水分解水素）と組み合わせることによりCO₂は水素キャリアーとして利用できる。

CO₂有効活用技術の開発意義は、地球環境の保全・保護にある。しかし、将来的には化石資源制約後の化学品製造体系の構築に繋がる。従って、CO₂があるから利用するのではなく、CO₂量を削減するために活用し、かつ有用化学品に変換するというのが本旨となる。研究開発の究極のゴールは、大気中CO₂の絶対量の削減を可能とする化学品製造技術の開発である。

[研究開発の動向]

CO₂の化学的変換では、水素と反応させる人工光合成、他の分子と反応させる化学品合成の2つが主な手法である。コストの問題により、世界的にはターゲットが「燃料から原料（付加価値品）にシフト」しつつあるが、その点では、日本は欧米の後追いという印象が強い。

化学的変換で将来的に最も期待されるのは人工光合成である。CO₂再資源化の方法として、おもに二つが提案されている。一つは、太陽電池の電力と電極触媒により水を分解し、得られた水素を使ってCO₂をメタノール（ $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ ）やメタン（ $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ）に変換するものである。他にCO、ギ酸、ホルムアルデヒド、エチレン、エチ

レングリコールなどの合成が検討されている。水素製造のインパクトが圧倒的に大きい。CO₂と水素からメタノールが製造でき、メタノールからほぼ全ての化学品が製造できる^{1,2)}。一方、生成物がギ酸など水溶性の化合物である場合は、余程の高濃度で生成しない限り、分離精製の負荷が大きく実用化は困難である。

もう一つは、太陽電池の電力により CO₂ を直接電気化学的に還元するものであり、電極と電解液がある電解槽に太陽電池を接続させたものと、電極触媒と太陽電池を一体化（セル化）させたものがある。水を電子源とする CO₂ の直接変換も報告されている³⁾。これまで主流だった半導体光触媒、分子触媒等を個別に用いた系からそれらを融合した研究が大きく進展しつつある。これは分子触媒のみを用いた CO₂ 還元反応の場合では、電子供与体いわゆる犠牲試薬が必須であった。これに対して水の光分解に有効である半導体光触媒は主に水素製造反応に用いられていたが、両者の特徴を活かし、水の酸化側を半導体光触媒、CO₂ の還元側を分子触媒で機能させることにより、水と CO₂ からギ酸・CO 等の燃料合成系が構築されつつあり、一酸化炭素への変換に関し 80% を越える量子収率が達成されている⁴⁾。また、ルテニウム複核錯体と窒化炭素からなる複合光触媒を用いると可視光照射下での CO₂ のギ酸への還元反応に対して特異的に高い活性を示し、通常同時に発生する水素を抑制し、CO₂ のギ酸への還元選択率も 75% から 99% まで大幅に改善されることが報告されている⁵⁾。

しかし、CO₂ の変換反応（触媒反応）に過度に目が向き、「生成物の分離精製」などモノづくりの視点に欠ける研究開発も多い。人工光合成（水素製造を含む）では現時点で世界のトップであり世界を先導している。最近では光触媒研究は中国が量的には凌駕しているが、わが国が、依然、質的優位にある。

化学品合成では、CO₂ を原料とするカーボネート化合物の画期的な製造技術（脱水反応が鍵）が旭化成により開発された⁶⁾。2017 年には旭化成で新製法の実証が行われ、さらに改善が行われている。三井化学が固体触媒を用いて二酸化炭素と水素からメタノールを生産する技術を開発し、パイロットプラントによる検証を行った⁷⁾。また、CO₂ をポリマー（ポリカーボネートやポリラクトンなど）の原料として活用する触媒の研究開発も活発である（将来性は生成ポリマーの性能次第）。たとえば、尿素合成（ $2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2 \rightarrow (\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ）やポリカーボネート合成（ $2\text{ROH} + \text{CO}_2 \rightarrow (\text{RO})_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ）などがある。主には①「酸・塩基両機能性触媒を用いた CO₂ の化学的変換技術」、②「均一系触媒を用いた CO₂ とエポキシドあるいはジエン・アルケンとの交互共重合」、③「遷移金属錯体を利用した炭素-炭素結合生成を伴う（カルボキシ化）CO₂ 固定化の触媒的プロセス」等である。例えば①では Cu/CeO₂ を水素と CO₂ とを用いたアニリンの N・メチル化反応の触媒として用いると、ほぼ 100% の選択性で反応が進行することが報告されている⁸⁾。②ではパラジウム触媒によるラクトン中間体の生成に続くラジカル重合によって、33 mol% という高い CO₂ 含有率を持つ CO₂ とブタジエンの共重合体が得られることが報告されている⁹⁾。③ではゲルマニウム・パラジウム錯体を用いることでアレンを CO₂ によってヒドロカルボキシ化（主に CO₂ をカルボキシ基として導入）することができており、単離収率は最大で 95% にまで達している¹⁰⁾。有機分子と二酸化炭素を直接反応させ、有用なカルボン酸誘導体を合成する触媒反応が最近アカデミアで注目され、さまざまな新触媒反応が報告されている¹¹⁾。産業界から注目されているのが、エチレンと二酸化炭素からのアクリル酸合成である¹²⁾。

この他近年では CO₂ の光還元ではなく、可視光エネルギーを利用して CO₂ を有機分子に取

り込むカルボキシ化に関する研究例も見られるようになってきている（例えばパラジウムと光酸化還元系を用いて CO_2 をアリルハライドに取り込むカルボキシ化¹³⁾ など）。総じて人工光合成系は CO_2 還元が中心で、触媒化学的プロセスでは CO_2 を高分子材料の原料あるいは有機分子のカルボキシ化への利用が中心である。

CO_2 の有効活用でもっと注目されてよいのは、 CO_2 とメタンからの合成ガス（ CO 、水素）の製造〔ドライ改質〕である。メタンは資源量が豊富であるためドライ改質は将来的に活用したい反応であるが、大きな吸熱反応（投入エネルギー大＝ CO_2 排出量大）である。実用化には、効率的な熱補給や反応温度の低温化のための研究開発が必要である。

これらの他に、生物化学的変換（藻類、 CO_2 資化細菌）もあるが、欧米が先行している¹⁴⁾。生物化学的変換では、その CO_2 削減効果を期待するには、一定規模以上の生産スケールが必要である。この意味でベンチャーの技術開発のフォローが重要となる。この領域では、 CO_2 資化細菌を用いる CO_2 から化学品製造の技術開発が、欧米のベンチャー企業（Syngip、LanzaTech、INVISTA 等）を中心に 2010 年頃から活発化している¹⁴⁾。一方、藻類を用いた燃料油生産の研究開発は、米国で約 30 年前に開始された。2005 年前後に多くのベンチャー企業（Cellana、Chevron、Argenol Biofuels 等）が誕生したが、コストの問題から、開発を断念、もしくはターゲットを付加価値品に変更したものも多い。日本では IHI、ユーグレナ、デンソー等が公的資金の援助を受けながら藻類燃料油製造の研究開発を行っている¹⁵⁾。また、アカデミアからは CO_2 資化細菌を用いる化学品合成のプロジェクト提案が出始めているが出遅れ感はない。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

- NEDO と人工光合成化学プロセス技術研究組合は、東京大学とともに、太陽電池材料として知られる $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ をベースとした光触媒で、非単結晶光触媒の中で世界最高の水素生成エネルギー変換効率 12.5% を達成した¹⁶⁾。
- 豊田中央研究所は、半導体と金属錯体触媒を複合化した板状の「人工の葉」素子が太陽光照射下、水と CO_2 から有機物であるギ酸（ HCOOH ）を生成することを報告した。その太陽光変換効率（4.6%）は植物の光合成反応の効率に匹敵する¹⁷⁾。
- 東京理科大学は、酸化コバルト修飾 BiVO_4 、還元型酸化グラフェン、 CuGaS_2 を組み合わせた Z-スキーム型粉末光触媒系が可視光照射下、水を電子源とし、 CO_2 を還元して CO を生成することを見いだした¹⁸⁾。
- CO_2 と水からの化学品合成は基礎研究の段階にある。発表される論文数は多いが、信頼性に乏しいものが含まれる¹⁹⁾。この領域では、水を電子源として CO_2 の還元を達成（＝原理的な可能性を実証）した、東理大・工藤、東工大・石谷らの研究が注目される^{18,20,21)}。石谷らは低濃度の CO_2 （0.5-1%）でも働く金属錯体光触媒も報告している²²⁾。様々な排出源からの CO_2 に対応できる技術に繋がる可能性がある。最近、Robert らは可視光と CO_2 （＋犠牲電子供与体）からメタンを選択率 12-17% で生成させる錯体光触媒を報告した²³⁾。また、2016 年に昭和シェル石油はメタン（と少量のエチレン）の合成に成功したと発表している²⁴⁾。メタンは燃料・原料として有用であり、かつ水に溶解しない。
- 従来、化学量論量の金属還元剤を必須としていたハロゲン化アリールと二酸化炭素から芳

香族カルボン酸を得る反応を、可視光エネルギーを利用した還元手法を用いて二種の金属錯体触媒を用いるだけで効率よく行うことに成功¹³⁾した。

- エチレンと二酸化炭素から遷移金属錯体を用いてアクリル酸を得ることに成功²⁵⁾した。
- 人工光合成系はCO₂還元が中心であり、生成する物質がメタノール、ギ酸や一酸化炭素に限られる。これに対して光エネルギーを利用してCO₂をカルボキシ基として有機分子に取り込むカルボキシ化に関する研究が出てきつつある（例としてビニルベンゼンのビニル基に光酸化還元系を用いてCO₂をカルボキシ基として結合²⁶⁾など）。今後CO₂を多様な素材への転換を考えると重要な技術としてあげられる。
- 触媒化学的CO₂によるカルボキシ化の中でもコバルト触媒と亜鉛粉末と言った比較的単純な構成の触媒反応によってアルキンのカルボキシ亜鉛化反応が進行することが報告されている²⁷⁾。今後単純な炭化水素のカルボキシ化によるカルボン酸の合成や還元体の多様なアルコールへの展開も含めて重要な技術としてあげられる。
- CO₂とメタンから合成ガス（CO、水素）を製造するドライ改質において、最近、富山大・椿らによりメタンの部分酸化と組み合わせることにより、投入エネルギーに由来する排出CO₂以上のCO₂を資源化できる可能性が示された²⁸⁾。触媒寿命・触媒再生の技術開発の進展を期待したい。
- 生物化学的変換に関連して、Syngip（オランダ）は、2016年にCO₂からイソブテン製造のパイロット試験を開始した¹⁴⁾。2017～2018年には1,500L発酵槽を用いたデモ生産開始が計画されている。藻類油に関しては、IHIはタイにおいて1万m³の屋外大規模培養池を用いた藻類油生産のためのパイロット試験を2017～2018年に実施するとしている¹⁵⁾。経済性の評価結果が待たれる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本：

- 科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業・「先端的低炭素化技術開発」（ALCA）
温室効果ガス排出の低減を目指した低炭素技術開発に特化した研究プログラム。CO₂の低減技術や有効利用に関する研究も含まれる。
- 科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業・「低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出」（先導的物質変換領域、ACT-C）
低炭素社会の実現や、医薬品・機能性材料等の持続的かつ発展的な生産など、我が国のみならず世界が直面している諸課題の解決に貢献しうる「触媒による先導的な物質変換技術の創出」を目指す。3つの中心項目の一つが「有用物質へ変換する二酸化炭素還元法等の創出」。
- 経産省・未来開拓研究：グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発（革新的触媒）「人工光合成化学プロセス技術研究組合（ARPCChem）」
- 新学術領域研究 I4LEC（Innovations for Light-Energy Conversion）<http://photoenergy-conv.net>
- 今年度から環境省が開始した「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」があげられ、対象は「二酸化炭素の回収・資源化を通じた炭素循環社会モデル事業」と「人工光合成技術を活用した二酸化炭素の資源化モデル事業」である。実証内容は清掃

工場から回収した CO₂ の資源化、廃棄物焼却施設からの CO₂ を利用した化学品製造に関する炭素循環モデルの構築実証に加え、人工光合成技術として、CO₂ と水から syngas（一酸化炭素＋水素）を高効率に常温常圧合成する炭素循環モデルと多量 CO₂ 排出施設における人工光合成技術を用いた地域適型 CO₂ 資源化モデルの構築実証が進められている²⁹⁾。

米国：

- JCAP（Joint Center for Artificial Photosynthesis）は、太陽光、水、および二酸化炭素のみを使用して燃料を生産するための新しい効果的な方法を見つけることを目的とした、米国エネルギー省エネルギーイノベーションハブとして 2010 年に設立されている。

韓国：

- 韓国人工光合成センター KCAP（Korean Center for Artificial Photosynthesis）は、韓国文部科学省の支援を受けて、気候変動に対処するための新しい革新的技術である人工光合成の実施と商業化の基盤を築くために設立されている。他に、炭素の資源化計画などのプロジェクトもある。

欧州：

- ヨーロッパにおける国際的な 31 の研究機関と企業とのパートナーシップで行う、CO₂ 回収、利用および貯蔵に関するプロジェクト（ALIGN-CCUS プロジェクト、2017-2020）では、6 つのワーキングパッケージ（WP）のうち、WP4 は産業環境で排出される CO₂ の回収、水素製造、他エネルギーへの転換、およびこれらトータルプロセスの設計と構築に重点を置いている。旭化成ヨーロッパはアルカリ水電解システムを提供している^{30,31)}。
- FP7 の後継として、HORIZON2020 がある。
- UK のシェフィールド大学が中心となって組織している The Carbon Dioxide Utilisation Network がある。UK の EPSRC Grand Challenge Network を活用しアカデミア・産業界・政府が参加し、特徴的なこととして生物化学・有機化学・無機化学等の領域を超えた組織として活動している³²⁾。

（5）科学技術的課題

- ・現時点で多くは基礎研究レベルの段階であり、まずその基盤をしっかりと確立する必要がある。さまざまな触媒反応系の開発、新しい二酸化炭素固定化反応の開発、これら反応の効率の向上を目指した研究等、多面的な基礎研究を積極的に推進する必要がある。
- ・現在、多くの反応が実験室レベルでの研究成果であり、小スケールでの反応である。これをいかにスケールアップし企業レベルでの研究に展開していくかが重要な課題である。その際、エネルギー収支の問題や経済性の問題が大きな課題となると予想される。
- ・可視光を利用する二酸化炭素固定化反応が、この 1、2 年世界的に急速に発展している。これを実用的なものとするためのフローシステムでの反応開発や光照射効率の問題等の解決が急務である。
- ・CO₂ 有効活用の研究開発は実用化されて初めて意味がある。モノづくりの視点（「原料調達」／「反応」／「分離精製」）が必須である。特に、分離精製は重要であり、これがないと実用化はできない³³⁾。従って、水を電子源（溶媒）とする人工光合成では、水素（最重要）とともに水に溶解しないメタン、エタン、エチレンなど炭化水素の製造を目指すべきである。メタンは低反応性であるため、他の化学品への変換を考えればエタン、エチレ

ンがより好ましい。CO は水に溶解しないが、未反応の CO₂ との分離が必要である。CO₂ と水から CO と水素を製造し、反応後の混合物 CO/ 水素/ 未反応 CO₂ からメタノールを製造するといった実用性を考えたアプローチも必要である。

- ・ CO₂ の有効利用とりわけ人工光合成技術の実証は環境省が約 5 年間集中投資した「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」における成果が、実証への時間的見極めの一つの大きな指針となる。
- ・ 人工光合成型 CCU では、H₂ の生成コスト削減に尽きる。電気分解に用いる水酸化触媒の開発（長寿命化・高効率化）、可視光にตอบสนองし、かつ、高い還元力をもつ光触媒の開発、大表面積の光触媒デバイスを安価に製造する技術開発が望まれる。CO₂ の直接再資源化では気相 CO₂ と直接反応し、気体生成物（CO など）を生じるガス拡散電極の開発も重要である。
- ・ 人工光合成技術のさらなる展開として研究例は少ないが CO₂ を単純なアルコールやギ酸に還元するのではなく、有機分子と CO₂ とを結合させ炭素数を拡張し、高度な化成品への展開できるような研究技術が必要とされる。
- ・ 人工光合成技術以外の CO₂ の有効利用技術に関しては、触媒化学的プロセスによる CO₂ を原料とした化成品や高分子への転換に関して今後社会的ニーズがある物質が合成できるかが鍵となる。さらに CO₂ から合成した材料の素材としての長寿命化が CO₂ の長期固定と言う点で重要になる。
- ・ 化石資源と組み合わせた CCU では、リフォーミング、メタノール合成、MTO の各プロセスにおいて、CO₂ 発生量の抑制に繋がる新しい触媒材料（低温作動、高活性、長寿命など）や革新的プロセス技術（平衡制約を免れるなど）の開発が課題である。
- ・ CO₂ 資源化の際に発生する CO₂ 量（正確には、資源化に必要なエネルギーを得る際に発生する CO₂ 量）が CO₂ 資源化量よりも大きければ CO₂ を資源化したことにはならない。この重い課題を克服する必要がある。
- ・ エネルギー投入の大きい反応（=CO₂ の排出量大）は社会では受け入れられない。有用ではあるが高温かつ吸熱反応であるドライ改質では効率的な熱供給と共に反応の低温化が必須である²⁸⁾。特殊反応場（電場環境、マイクロ波照射環境など）が反応の低温化に有効であることが知られている。
- ・ ターゲットとする反応/化合物の選定は、狙う化学品の価値（展開の広さ）と製造（モノづくり：化学工学）の両面からの十分な検討が必要である。

（6）その他の課題

- ・ 研究開発の推進や成果の社会実装を進めるにあたって障壁となっている事項としては、依然として CO₂ をどのような物質にすれば良いのかと言う目標が定まっていないことがあげられる。現状人工光合成技術、触媒の反応技術も含めて、CO₂ を活用した先の物質は多様である。この多様性を各産業界の要求することといかにマッチするかが今後の研究開発の推進や成果の社会実装を進めるにあたって重要な要因となる。ただし、着実に CO₂ の有効利用技術の社会実装へ向けた取り組みは上述の環境省の事業の他、若手研究者の育成として今年度公募があった NEDO 未踏チャレンジ 2050「CO₂ を有効活用し化学品を得る技術」の動向も注視する必要がある。CO₂ の有効利用技術に関する研究はこれまで栄枯

盛衰を繰り返してきていることもあり、研究者が十分に多い分野とは言えない。この分野の発展のためにもさらなる若手研究者の CO₂ の有効利用技術に関する育成プログラムが必要である。

- ・光触媒を用いた還元反応が重要なトピックスとなっているが、還元により得られる一酸化炭素やメタノールを実際にどのように利用するか、そのまま有機合成反応へ組み込むような発想の研究が必要と考える。光触媒の研究者と有機合成化学者の連携が必要である。
- ・人工光合成型 CCU の場合、多分野の基礎研究と異分野連携の積み重ねによる革新的光触媒材料の開発が必要であり、これらの研究を積極的に支援する仕組みを構築することが望まれる。先述の NEDO プロジェクトと科学研究費補助金の新学術領域研究は時宜を得たものであるが、目的を絞りながらも中長期視点に立つ複数のプロジェクトを持ち、多分野の研究者が参画してこの難題を克服することが必要である。
- ・前提となるのは、既存法に比べて CO₂ 排出の少ない化学品製造法の開発である。将来的に本研究開発は、化石資源枯渇後の CO₂（および補完的に非可食バイオマス）を用いる「化学品製造体系の構築」に繋がっていく。従って、本研究開発では、そのターゲット化合物は、化学品として「価値」があり（＝広範な化学品への変換が可能）、しかもモノづくりとして「実現性」がなければならない。また、実現性という切り口からは、「既存の技術やインフラにより他の化学品に変換可能である」ことも重要である。現状のターゲット化合物は、酢酸、メタノール、CO、メタン、エチレングリコール、エタノール、酢酸、カーボネート、アクリル酸、ポリカーボネート、ポリラクトンなど多岐にわたる。これらの中には、既存法に比べて CO₂ の排出量が増加するものも含まれる。また、基礎研究として成功してもモノづくりとして実現性がほとんどないものもある^{1) 33)}。従って、「既存法に比べて CO₂ の排出が少ない」および「化学品製造体系の構築」という視点からターゲット反応および化合物の見直しと優先順位付けが必要である。同時に、研究者には、CO₂ から「いま合成できる化合物の合成効率を上げる」のではなく、人類にとって「価値ある化学品を作る」という研究開発が期待される。
- ・我が国の二酸化炭素固定化に関する基礎研究のレベルは極めて高く、現時点で世界を先導するものであることは確かである。しかし、欧米各国、特に中国の追い上げは厳しく、現在の先導的地位を維持するのは容易ではない。現在の研究は、個々の研究者に依存したものとなっており、今後、CCU センター等の拠点を設置し、これを核とした取り組みが期待される。その際、長期的な視野に立ち、企業との連携を実現することも重要である。

（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	◎	↑	●人工光合成の分野で世界トップクラス（堂免、工藤、石谷ら）。しかし、実用化を見据えたターゲット化合物の選定とはなっていないことが多い。この分野の課題は一般に太陽エネルギー変換効率の向上と言われるが、その前に意味のあるターゲット化合物の選定ではないか〔日本以外の国にも当てはまる〕。
	応用研究・開発	◎	↑	●化学企業（旭化成）が CO ₂ を原料とするカーボネート製造、尿素（← CO ₂ 原料）を用いるイソシアネート製造および高効率水電解システム（再生エネルギー由来電力の使用を想定）を開発。これらの技術はいずれも世界トップレベル。一方、NEDO・人工光合成化学プロセス技術研究組合の研究開発成果も世界トップクラスである。
米国	基礎研究	◎	→	●化学的変換・生物化学的変換ともに基礎研究の層が厚く、世界を先導している。シェールガス・石油の開発進展およびトランプ政権の政策が基礎研究にネガティブな影響を与える可能性。
	応用研究・開発	◎	→	●化学的変換・生物化学的変換ともに多くのベンチャーが活発に開発を進めている。シェールガス・石油の開発進展およびトランプ政権の政策が基礎研究にネガティブな影響を与える可能性。
欧州	基礎研究	○	↑	【EU】 ●均一系光錯体触媒でフランスとスウェーデンが強い。均一系光錯体触媒と半導体光電極の組み合わせも検討されている。 【英国】 ●均一系光錯体触媒に強い。Reisner のグループが引っ張っている。 【ドイツ】 ●歴史があり、かつて人工光合成の中心地の一つであったが、研究者が減り停滞、現在、回復途上。今後に注目。 【フランス】 ●CO ₂ の電気化学還元で歴史を持っている。スウェーデンとともに欧州の人工光合成を引っ張っている。Artero のグループが活発な研究活動。
	応用研究・開発	○	↑	【EU】 ●天然ガス輸送のためのパイプライン網が整備されているため、ドイツを中心として多くの Power to Gas プロジェクトが進行中。 【ドイツ】 ●脱原発を決定しており、Audi g-gas プロジェクトなど多くの Power to Gas および Fuel プロジェクトが進行中。CO ₂ と再生エネルギー由来の水素から製造したメタンを燃料とする車の販売（CO ₂ の排出量を 80% 削減）が始まっている。 【アイスランド】 ●地熱発電の電力を用いる水の電気分解により水素を製造。この水素と CO ₂ からメタノールを約 4,000t/ 年製造（CO ₂ の絶対量を削減）しガソリンの添加剤として使用〔アイスランドのガソリン市場の 2.5% 相当〕。規模は小さいが実用化レベル。
中国	基礎研究	△	↑	●人工光合成の研究者数、論文数が増加し、かつ研究レベルも向上。以前は大連が研究の中心であったが全土に広がっている。近い将来、世界中の中核グループに入ってくると予想される。
	応用研究・開発	×	→	●見るべき成果はない。
韓国	基礎研究	△	↑	●巨大プロジェクト（KCAP）が動いているが、特筆すべき成果はない。
	応用研究・開発	×	→	●見るべき成果はない。

（註 1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註 2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている
△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) 市川真一郎, 藤田照典「将来の化学品原料源の選択と開発すべき技術」, 『エネルギー・資源』 38: 126-130. 2017.
- 2) 日本学術会議, 記録, SCJ 第23期 -290919-23541200-068, 平成29年9月19日.
- 3) 石谷治「二酸化炭素還元光触媒開発の最前線」, 『触媒』 60巻2号: 63-69, 2018.
- 4) Tatsuki Morimoto *et al.*, "Ring-Shaped Re(I) Multinuclear Complexes with Unique Photofunctional Properties," *Journal of the American Chemical Society* 135, (36):3266-3269, 2013.
- 5) Takayoshi Oshima *et al.*, "Undoped Layered Perovskite Oxynitride Li₂LaTa₂O₆N for Photocatalytic CO₂ Reduction with Visible Light," *Angewandte Chemie International Edition* 57, (27): 8154-158, 2018.
- 6) 旭化成株式会社「ポリカーボネート樹脂原料の新製法を実証プラントで検証 —CO₂ 排出量削減、安全な原料を用いた製法で省エネを実現—」,
<https://www.asahi-kasei.co.jp/asahi/jp/news/2017/ch170807.html> (2019年2月1日アクセス).
- 7) 三井化学株式会社「CO₂ からのメタノール合成プロセスの実証パイロット設備建設について」,
https://www.mitsuichem.com/jp/release/2008/2008_0825.htm (2019年2月1日アクセス).
- 8) Masazumi Tamura *et al.*, "Selective N-Methylation of Aniline to N-Methylaniline with CO₂ and H₂ by CeO₂-supported Cu Sub-nanoparticle Catalyst," *Chemistry Letters* 46, (8): 1243-1246, (2017).
- 9) Ryo Nakano, Shingo Ito and Kyoko Nozaki, "Copolymerization of Carbon Dioxide and Butadiene via a Lactone Intermediate," *Nature Chemistry* 6, (4): 325-331, 2014.
- 10) Chuan Zhu, Jun Takaya and Nobuharu Iwasawa, "Use of Formate Salts as a Hydride and a CO₂ Source in PGeP-Palladium Complex-Catalyzed Hydrocarboxylation of Allenes," *Organic Letters* 17, (7):1814-1817, 2015.
- 11) Andreu Tortajada *et al.*, "Transition-Metal-Catalyzed Carboxylation Reactions with Carbon Dioxide," *Angewandte Chemie International Edition* 57, (49): 15948-15982, 2018.
- 12) Xiao Wang, Hui Wang and Yuhuan Sun, "Synthesis of Acrylic Acid Derivatives from CO₂ and Ethylene," *Chem* 3, (2): 211-228, 2017.
- 13) Katsuya Shimomaki *et al.*, "Visible-Light-Driven Carboxylation of Aryl Halides by the Combined Use of Palladium and Photoredox Catalysts," *Journal of the American Chemical Society* 139, (28): 9467-470, 2017.

- 14) グリーンケミカル市場の現状と将来展望【海外編】(株式会社シード・プランニング, 2016).
- 15) 株式会社 IHI 「NEDO 「バイオジェット燃料生産技術開発事業」 のパイロットスケール試験設備の整備をタイで着手」 ,
https://www.ihi.co.jp/ihi/all_news/2017/other/2017-11-06/index.html (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 16) NEDO 「非単結晶光触媒で世界最高の水素生成エネルギー変換効率 12. 5%を達成 —人工光合成による環境に優しいモノづくりの実現を目指す—」 ,
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101013.html (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 17) 株式会社豊田中央研究所 ,
<https://www.tytlabs.co.jp/sflabmorikawa/theme.html> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 18) Akihide Iwase *et al.*, "Water Splitting and CO₂ Reduction under Visible Light Irradiation Using Z-Scheme Systems Consisting of Metal Sulfides, CoO_x-Loaded BiVO₄, and a Reduced Graphene Oxide Electron Mediator," *Journal of the American Chemical Society* 138, (32): 10260-10264, 2016.
- 19) 工藤昭彦, 新学術領域「革新的光物質変換」ニュースレター, 1 巻 8 号, 2018 年 8 月 8 日 .
- 20) Go Sahara *et al.*, "Photoelectrochemical Reduction of CO₂ Coupled to Water Oxidation Using a Photocathode with a Ru(II)–Re(I) Complex Photocatalyst and a CoO_x/TaON Photoanode," *Journal of the American Chemical Society* 138, (42): 14152-14158, 2016.
- 21) Haruka Nakanishi *et al.*, "Highly Active NaTaO₃-Based Photocatalysts for CO₂Reduction to Form CO Using Water as the Electron Donor," *ChemSusChem* 10, (1): 112-118, 2016.
- 22) Takuya Nakajima *et al.*, "Photocatalytic Reduction of Low Concentration of CO₂," *Journal of the American Chemical Society* 138, (42): 13818-13821, 2016.
- 23) Heng Rao *et al.*, "Visible-light-driven Methane Formation from CO₂ with a Molecular Iron Catalyst," *Nature* 548, (7665): 74-77, 2017.
- 24) 昭和シェル石油株式会社 「ガス拡散電極を用いた人工光合成技術で水と二酸化炭素から炭化水素の直接合成に成功 - 太陽光エネルギー変換効率 0.71% を実現 -」 ,
http://www.showa-shell.co.jp/press_release/pr2016/1205.html (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 25) Núria Huguet *et al.*, "Nickel-Catalyzed Direct Carboxylation of Olefins with CO₂: One-Pot Synthesis of α , β -Unsaturated Carboxylic Acid Salts," *Chemistry - A European Journal* 20, (51): 16858-16862, 2014.
- 26) Kei Murata *et al.*, "Construction of a Visible Light-driven Hydrocarboxylation Cycle of Alkenes by the Combined Use of Rh(i) and Photoredox Catalysts," *Chemical Communications* 53, (21): 3098-3101, 2017.
- 27) Keisuke Nogi *et al.*, "Carboxyzincation Employing Carbon Dioxide and Zinc Powder: Cobalt-Catalyzed Multicomponent Coupling Reactions with Alkynes," *Journal of the American Chemical Society* 138, (17): 5547-5550, 2016.
- 28) 楊国輝, 米山嘉治, 椿範立 「二酸化炭素によるメタンの改質反応と新規触媒開発」『触媒』 60 巻 2 号 : 98-104, 2018.

- 29) 環境省，報道発表，<https://www.env.go.jp/press/105816.html>（2019年2月1日アクセス）．
- 30) ALIGN CCUS, <https://www.alignccus.eu/>（2019年2月1日アクセス）．
- 31) 旭化成株式会社「ヨーロッパにおける低炭素社会の実現に向けた実証プロジェクトへの参画について ～アルカリ水電解システムを用いた水素関連事業の展開～」，
<https://www.asahi-kasei.co.jp/asahi/jp/news/2017/ze171114.html>（2019年2月1日アクセス）．
- 32) CO2 Chem, <http://co2chem.co.uk/>（2019年2月1日アクセス）．
- 33) 藤田照典『触媒技術の動向と展望 2018』：26-42, 2018.

2.4 原子力利用

（1）研究開発領域の定義

原子力エネルギー利用に関する科学、技術、研究開発を記述する。以下の4領域を対象とする。

- ①新型原子炉：第4世代原子炉や、高度な安全性、持続可能性、良好な経済性等を開発目標とした革新的原子炉などの将来の原子力エネルギーシステム、核燃料技術など
- ②核融合炉：核融合工学に関する材料、機器、システム設計、国際熱核融合実験炉プロジェクトの動向など
- ③原子力安全：リスク評価、ヒューマンマシンシステム、シビアアクシデント対応、緊急時における影響低減技術など
- ④使用済燃料等の処理・廃止措置：使用済燃料・放射性廃棄物の再処理・リサイクル技術、廃止措置および安全評価など

（2）キーワード

①新型原子炉

第4世代原子炉、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉、小型モジュール炉、受動的固有安全

②核融合炉

プラズマ、核融合反応、磁場閉じ込め、慣性閉じ込め、トリチウム、ブランケット、高エネルギー粒子、非線形多体運動、国際熱核融合実験炉（ITER）、中心点火、高速点火、高エネルギー密度科学

③原子力安全

リスク評価、シビアアクシデント、アクシデントマネジメント、原子力防災、福島第一原子力発電所事故

④再処理

核燃料サイクル、再処理、使用済燃料、放射性廃棄物、廃止措置

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

①新型炉

我が国や世界のエネルギー供給安定性、地球温暖化防止、環境負荷低減等を図るために、放射性廃棄物の減容化・潜在的有害度低減に貢献できる高速炉、水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ固有安全性も有する高温ガス炉などの第4世代原子炉、ならびに将来の原子力エネルギーシステムに係る研究の進展及び技術の確立を図ることの意義は極めて大きい。

②核融合炉

長期的第1次エネルギー資源のより先進的な獲得手段として核融合炉がある。核融合炉は、核分裂炉と比べて中性子増倍反応に伴う再臨界の可能性がなく、核融合炉内を外部から超高温に加熱しない限り核融合反応が起こらない固有のシステム安全性をもつ。また、炉内に燃料を注入し核燃焼させ、ブランケット部（核融合炉の内壁を構成する装置のひとつで、冷却、燃料生産、遮蔽の3つの機能を担う）で中性子とトリチウム原子核との核反応で発生する放射性物質のトリチウムのハザードポテンシャルが、I-131換算値で軽水炉よ

り3桁小さいという特徴を有する。核融合開発は、その固有の安全上の特性を生かした上で、特に電力システムの安定性を維持できる負荷追従性の高い電源開発の必要性を充足し、社会に受け入れられるエネルギー資源の利用を目指す努力がなされている。

③原子力安全

福島第一原子力発電所事故で顕在化したように、原子力施設でひとたび重大な事故が発生すると、その影響は空間的・時間的に非常に広い範囲に及び、甚大なものとなりえる。そのため、原子力施設の安全性を確保することは、社会的に重要なミッションである。科学技術分野においてゼロリスクは現実的に達成不可能であるが、ゼロリスクを目指しつつ、社会通念上、許容されるレベルまで原子力施設のリスクを抑制する取り組みを行う必要がある。

④再処理

原子炉から取り出される使用済燃料には、再び燃料として使用できるプルトニウム、ウランが含まれており、これらを再処理により分離・回収し、燃料に再加工して原子炉にリサイクルすること、即ち輪の閉じた核燃料サイクルを成立させることが、資源の乏しい我が国の基本方針となっている¹⁾。この意味で、再処理分野の研究開発領域は重要である。将来的には高速炉燃料サイクルが望まれるが、当面は、軽水炉へのプルトニウムリサイクルが進められる。

[研究開発の動向]

①新型炉

第4世代炉は、高い安全性・信頼性の実現などを開発目標とした革新的原子炉であり、2002年にナトリウム冷却高速炉、ガス冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス冷却炉、超臨界圧水冷却炉、熔融塩炉の6炉型が選定された²⁾。我が国は熔融塩炉以外の研究開発に携わっている。

ナトリウム冷却高速炉の開発の歴史は長く商業的にも電力供給運転をしており、400炉年（原子炉数×稼働年）の水炉に注ぐ運転経験を有している原子炉である。高速炉は高速中性子を燃えないウラン238に吸収させることで燃えるプルトニウム239に変えることによって燃料を増殖させることが可能である³⁾。また、放射性毒性が強く寿命の長いマイナーアクチノイド（MA：Minor Actinoid）の核変換ができ、高レベル放射性廃棄物を減量させることができる特徴を有しており⁴⁾、その重要性はエネルギー基本計画⁵⁾でも記述されている。この炉は、ナトリウムの優れた特徴により、原子炉を低圧にすることができる。また、高沸点のため単相ナトリウムで炉心冷却ができ、電気駆動を不要とする自然循環による崩壊熱除去が可能である。一方、ナトリウムは水や空気と接触すると急激に反応する特性などがある。最近では、シビアアクシデントに対する防止対策と影響緩和対策に関する研究が盛んである。

高温ガス炉の開発の歴史は古く英国、米国、ドイツで先行したが、トラブルにより欧米では開発が衰退状態に陥っていた。我が国では高温工学試験研究炉（High Temperature engineering Test Reactor、以下 HTTR）が建設され2004年に950℃で定格運転を達成した⁶⁾。高温ガス炉は熱電併給の役割を担う場合が多く、製鉄などの産業熱源に加え、水素製造や石炭液化などの利用が期待される。HTTRは黒鉛減速ヘリウム冷却熱中性子炉で

あり、セラミックスで被覆した粒子状燃料を用いることが特徴的で、1600℃の高温状態においても被覆材の閉じ込め機能は損なわれないことが実験的に示されている。ヘリウムガスは100気圧以下に加圧するが、ヘリウムの漏えい事故時が生じて黒鉛減速材の熱容量が大きいため燃料温度は急激に上昇しない固有の安全特性を備えている⁷⁾。

②核融合炉

磁場閉じ込め方式核融合については、原子力委員会核融合専門部会が、1972年策定の第三段階基本計画⁸⁾をもとに、2005年に「今後の核融合研究開発の推進方策」（推進方策報告書）を立案し、核融合原型炉開発に必要な戦略、原型炉に求められる基本技術と技術開発の進め方、原型炉段階への移行に向けた考え方等が議論され、検討が進められた。2013年には、原型炉開発に必要な技術基盤構築の中核的役割を担うチームが発足し、2017年には、現在までの研究開発状況とITER計画を始めとした内外の取り巻く状況を踏まえ、核融合科学技術委員会で「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」が決定された⁹⁾。それに付随して、「原型炉開発に向けたアクションプラン」^{10)・11)}と「項目的解説」¹²⁾がまとめられ、公開されている。

レーザー核融合については、国内では、大阪大学が、重水素とトリチウム混合ガスを充填した燃料容器にレーザー照射をおこない、核融合点火に必要な温度まで加熱する事に1983年に成功し、また固体密度の600倍の圧縮にも1986年に成功している。この結果は、米国でその後検証され、記録更新がなされている。この成果を基に、レーザー核融合国立点火施設（National Ignition Facility：NIF）が米国リバモア研究所に2009年に建設された。同規模のレーザー核融合研究施設がフランス（LMJ：Laser Mega Joule）と中国（神光III）でも建設中である。結果的にNIFでは2013年の当初プロジェクト終了までに点火に至らなかったが、核融合による α 粒子の自己加熱が発生し、核融合反応が急激に増え、プラズマの持つエネルギーの6倍の核融合エネルギーが観測された¹³⁾。現在NIFの次の展開に向けた実験を行いつつ、詳細計画が議論されている。

③原子力安全

原子力の安全性は、主要な原子力事故を節目に研究や取り組みのあり方が変化してきたといえる。以下では、主要な原子力関連の事故と、原子力安全に関する研究について概要を述べる¹⁴⁾。

スリーマイルアイランド原子力発電所2号機事故は、1979年に発生した事故であり、人的ミスなどに起因する原子炉水位の低下から炉心の大部分が溶融に至ったものである。この事故は、マンマシンインターフェース、ヒューマンエラーの防止、シビアアクシデント対策の重要性を認識するきっかけになった。また、確率論的リスク評価の有用性が再認識され、安全性向上に利用する動きが広まった。

チェルノブイリ原子力発電所4号機事故は、1986年に発生した事故であり、原子炉の出力暴走に伴い、原子炉および建屋が爆発的に破壊されたものである。この事故では、安全文化及び固有の安全性の重要性が注目された。過酷事故時に格納容器内の圧力を下げるために使用されるフィルタードベントは、本事故の後に欧州などで導入が進んだ。

福島第一原子力発電所事故は、2011年に東京電力福島第一原子力発電所1-3号機で津波に起因して発生したシビアアクシデントである。この事故を受けて、原子力基本法、原子炉等規制法などが改正され、原子力規制委員会が新たに発足するとともに、動力炉、核燃

料サイクル施設、研究炉などに対して規制基準が大幅に見直され、多くの施設に対しシビアアクシデント対策が義務付けられた。この事故では、特に外的事象に対する原子力施設の安全性や深層防護の重要性が焦点となっている。

④再処理

軽水炉の使用済酸化燃料の再処理については、基本的に確立された技術であり、日本原燃（株）の六ヶ所再処理工場が竣工間近の状態にある。六ヶ所再処理工場では、東日本大震災前に顕在化した高レベル放射性廃液のガラス固化工程の運転不安定性の問題に対する解決策を見出し¹⁵⁾、震災後の新規規制基準への対応を進めているところであり、平成33年度（2021年度）上期が竣工時期となっている¹⁶⁾。再処理で回収したプルトニウムを混合酸化物（MOX）に加工するための工場が、同じく六ヶ所に建設中であり、このMOX燃料工場の竣工時期は平成34年度（2022年度）上期とされている¹⁶⁾。

一方、高速炉燃料の再処理技術開発として、高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCTプロジェクト）において、晶析法や新規装置を適用した先進湿式法再処理技術の開発が進められていたが¹⁷⁾、震災後中断された形になっている。また、六ヶ所再処理工場でも適用されているプルトニウム・ウラン溶媒抽出法（Plutonium Uranium Redox EXtraction、PUREX法）をベースとし、プルトニウムを単離しない（常にウランを共存させる）コプロセス法¹⁸⁾や新しい抽出剤としてモノアミドを用いる再処理¹⁹⁾の研究開発も続けられている。

ウラン、プルトニウムを分離した後の高レベル放射性廃液はガラス固化され、中間貯蔵の後、地層処分されることとなっているが、「将来の幅広い選択肢を確保するため、放射性廃棄物の減容化・有害度低減などの技術開発」⁵⁾として、マイナーアクチノイド（ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム）などの長寿命放射性核種の分離変換技術の研究開発も進められている。分離技術、高速炉や加速器駆動システムを用いる核変換技術ともに、原理実証はなされており、工学規模試験の一手前にいる。

原子力機構の東海再処理施設は、使用済燃料約1,140トン再処理した我が国初の本格的な再処理施設であるが、廃止措置されることとなり、平成30年6月に廃止措置計画が認可されている。廃止措置の完了までには約70年を要する見通しで、長期的対応が必要である。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

①新型炉

我が国では、第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全性向上技術として、炉心溶融防止のための受動的炉停止機構と損傷炉心の原子炉容器事象終息のための再臨界回避方策を開発してきた。フランスは、内部ブランケットと上部プレナム（原子炉の炉心周り冷却材が充填している空間）を設けたゼロボイド炉心を設計し、炉停止失敗時のナトリウム沸騰開始後の炉心溶融を回避する技術を開発している。2018年に入り、フランス政府は次期高速炉の低出力化を要求し、小型プラントの設計に着手した。高温ガス炉については、我が国はポーランドで展開する高温ガス炉技術の協力を2017年に開始した。炉設計、燃料・材料、安全評価等の協力を進めている。

②核融合

磁場閉じ込め方式核融合においては、文部科学省核融合科学技術委員会の磁場閉じ込め方式核融合のアクションプランに広い項目でチェック・アンド・レビュー（C&R）の項目が挙げられ、政府、研究所、原型炉合同特別チーム、大学、産業界等の実施機関・組織が記載されている。このうち、第1回のレビューは、現在実施中あるいはすぐに開始すべきアクションであり、2020年頃に各進捗状況が確認される。具体的な達成目標として、ITER技術目標達成計画の作成、定常高ベータ化準備研究推進、ITER超伝導コイル等の主要機器の製作技術の確立、JT-60SA（ITER計画と並行して日本と欧州が共同で実施するプロジェクト）の研究開始、80dpaレベルまでの中性子照射下環境の試験に供する低放射化フェライト鋼等材料の供出、国際核融合材料照射施設（International Fusion Material Irradiation Facility, IFMIF）の中性子源概念設計の完了、ブランケットコールド試験、ダイバーター（核融合炉を構成する機器のひとつで、粒子排気、熱除去、プラズマ閉じ込め改善の3つの機能を担う）開発指針決定、超伝導コイル要素技術等炉工学開発計画作成、原型炉全体目標の策定等がある。続いて、2025年に予定されるITER運用開始から数年以内に第2回C & R項目がまとめられている。その内容として、JT-60SAによる高 β 非誘導電流駆動運転達成、ITER運転開始、低放射下フェライト鋼の80dpaまでの重照射データの検証、IFMIF建設開始、ダイバーター機能材料の初期照射挙動の評価、材料照射データの取得、各種炉工学技術開発とともに発電ブランケットの基盤技術整備、ITER・テストブランケットモジュール（TBM）の1号機製作と安全性確認試験が検証され、原型炉の概念設計が準備される。ITER重水素・トリチウム（DT）燃焼実現の確認後に行われる原型炉建設への移行判断までに実施完了すべき項目として、ITERによるQ値（核融合炉プラズマの高温化加熱に必要なエネルギー供給と実際に発生する核融合エネルギーの比であるエネルギー増倍率）=10程度以上の維持と燃焼制御、500MWの熱出力発生、300-500秒の長時間燃焼、ITER非誘導電流駆動プラズマの実現、安定な高 β 定常運転領域の実証、運転保守を通じた統合化技術の確立、リチウム確保技術の確立、ブランケットとダイバーター機能材料の初期照射データ取得、原型炉工学技術を裏付ける技術の確立、社会受容性と実用化段階における経済性の見通し確保、安全規制法令規制の方針策定等が挙げられる。

ステラレーターを代表とするヘリカル方式の磁場閉じ込め形式の炉の実験が、引き続いて、日本では核融合科学研究所（NIFS）の大型ヘリカル装置（LHD）を使って長時間燃焼実験が進められている。現在重水素・重水素（DD）実験が行われ、イオン温度1億2000万度（10keV）までの加熱に成功し、約50分の連続運転にも成功している。ドイツでは、モジュラータイプのヘリカル核融合装置（ベンデルシュタイン7-X）がマックスプランク研究所で2015年に完成し、運転が始められている。長時間プラズマの達成、グラファイトタイルによる高温プラズマからの保護が図られ、現在までに 6×10^{26} Ks/m³の核融合3重積の値が達成されている。

慣性閉じ込め方式核融合では、NIFでターゲット設計の変更、製作技術の向上、レーザーの増強などが引き続き検討されている。一方、フランス（Laser Mega Joule）やイギリスを中心としたEUでは、衝撃波点火方式が検討されている。この方式は、低温高密度に圧縮した状態でさらに強いレーザーを照射し、発生した向心衝撃波が中心で衝突する事に

より点火しようとするもので、NIF で問題となった爆縮末期の中心高温部と周辺の主燃料間の流体力学的不安定性は影響しないとされている。国内では流体力学的不安定性の影響が少ない高速点火方式が研究されている。

③原子力安全

自主的安全性向上・人材育成ロードマップの作成²⁰⁾については、2013年2月より、既設軽水炉の安全対策の高度化を図るため、研究開発技術ロードマップの策定が日本原子力学会「安全対策高度化技術検討」特別専門委員会で進められ、2015年3月にロードマップの最終案が報告された。

新検査制度の導入については、原子力事業者が自らの責任で施設の検査を行い、規制組織がその検査内容を監視・評価する新しい検査制度について検討が進み、2018年下半年よりテスト的な導入が開始される。新検査制度は、米国の原子炉監督プロセス（reactor oversight process）に基づくものである。

原子力発電所・研究炉の再稼働と廃止措置については、現行規制基準に適合した加圧水型原子力発電所（九州電力川内1,2号機、玄海3,4号機、四国電力伊方3号機、関西電力高浜3,4号機、大飯3,4号機）が再稼働した。また、近畿大学や京都大学の研究用原子炉も規制基準に適合し、運転を再開している。一方、再稼働せず、廃止措置を選択する原子力発電所、研究炉の数も増えた。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

①新型炉

ナトリウム冷却高速炉については、ロシアでは、実証炉 BN800（スヴェルドロフスク州ザレーチヌイのベロヤルスク原子力発電所に設置）が2016年10月から商業運転に入り、実用炉 BN1200 が設計中である。建設が早ければ2025年に着工し2032年に完成する見込みであり、世界で最も実用段階に近い。中国では、中国高速実験炉（CEFR）が2014年12月に100%出力運転を達成し、実証炉 CFR600 が2017年12月に建設開始され2023年に完成予定である。フランスでは、ナトリウム冷却高速炉 ASTRID の小型炉設計に2018年に着手した。

高温ガス炉については、中国では実証炉が建設され、2018年には運転開始が見込まれている。インドネシアでは、小型炉の詳細設計を2018年に開始した。ポーランドは我が国と覚書を2017年に締結し、鋭意協力を進めている。

米国では、小型モジュール炉（SMR）を含む革新炉開発を後押しするため、2015年に原子力技術革新加速ゲートウェイ（GAIN）プログラムを、2017年に「革新炉開発と導入のビジョンと戦略」を公表、2018年には様々な燃料や冷却材を試験するための多目的試験原子炉（VTR）プロジェクトを立ち上げ、新型炉開発の機運が高まっている。英国では、2013年に策定した「原子力産業戦略」に基づき、2015年にはSMRを含む原子力研究開発への予算措置を、2017年には第四世代SMR開発の予算措置プログラムを発表し、革新炉導入に向けた研究開発を推進している。カナダでは、原子力科学技術ワークプランに基づき、2017年にSMR開発の「10年プラン（2016-2026）」を策定、主要な技術的課題を解決しSMR商用化の可能性を実証するSMRイニシアチブを進めている。

②核融合炉

磁場閉じ込め方式核融合では、ITER 共同研究プロジェクトが、日本、欧州連合、米国、ロシア、中国、韓国、インドの7極の国際共同研究で実施され、核融合エネルギーの実現性実証のための実験施設建設が、フランスのサン・ポール・レ・デュランス市で進められている。目標は、2025年プラズマ点火、2035年DT燃焼実証、自己点火条件の達成、およびQ値10以上の実証である。

レーザー核融合では、大阪大学において高速点火方式による爆縮プラズマを点火に必要な5keV (5.8x10⁷K) までに加熱する事を目標とした改良が加えられている。具体的には、点火レーザービーム、加熱物理プロセスの改良等である。最新のシミュレーションでは、追加加熱レーザーを照射しなければならず、タイミング制御が限られたショット数の間に習熟できるかが課題となっている。

もう一つの試みとして、光創成科学技術大学院大学で半導体レーザーを使つての高速点火方式の核融合実験装置（CANDY）が2015年より実施されている。メリットの1つは、ターゲットへの毎秒の繰り返し実験が可能であることであり、水素ペレットを使った実験が実施されている。

国外で現在建設が最も進んでいるのは、フランスのLMJである。当初の計画ではNIFとほとんど同じ間接照射の中心点火方式であったが、NIFの結果を受け、次の段階を計画中である。

③原子力安全

原子力施設の安全性向上対策^{21) 22)}については、安全性を自主的に向上させ、また、規制基準に適合させるため、様々な安全性向上対策が原子力事業者にて検討・実施されている。原子力発電所の場合、地震・津波・竜巻などの外部ハザードに対する施設の防護、電源の強化、冷却系・注水系の追加、柔軟な事故対応を可能とする可搬型設備の配備などが行われている。

福島第一原子力発電所事故のベンチマーク研究プロジェクト（BSAF）²³⁾に関しては、国際研究協力プロジェクトとして、経済協力開発機構／原子力機関（OECD／NEA）の主催により、福島原子力発電所の事故炉の廃止に向けた燃料デブリの取り出しの準備として、シビアアクシデント解析コードの改良、および事故進展と現在の炉心状況の解析のための共同研究計画（BSAF計画：Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project）が進められている。第一フェーズは2012年～2015年、第二フェーズは2015年から2018年に実施された。

④再処理

国の革新的研究開発プログラムImPACTにおいて「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」の研究開発が、分離変換技術開発の一環として、平成26年度より30年度までの計画で進められてきた。対象は長寿命核分裂生成物であり、別途マイナーアクチノイドを分離変換する必要があるが、同位体の偶奇分離と加速器による核変換を組み合わせた方法による特許「放射性廃棄物の処理方法」が「21世紀発明賞」を受賞するなどの成果が出ている。

（5）科学技術的課題

①新型炉

ナトリウム冷却高速炉については、安全性と信頼性を向上させる技術開発、コスト低減のための技術開発、放射性廃棄物核変換技術の開発が課題として残っている。特に、安全性向上技術とシビアアクシデント研究は他の新型炉についても共通の課題である。今後は、機器の性能や設計の妥当性・裕度を確保する重要な段階であり、データの蓄積が求められる。高温ガス炉については、HTTRを用いた技術実証やタービン発電による発電効率向上や併設水素製造などの技術開発に加えて、新たな燃料開発など燃料の超長期安定性の技術的課題があげられる。今後は、高温ガス炉特有のセラミックス被覆燃料の安全性、空気侵入時における黒鉛酸化挙動、負荷変動対応運転の更なる検証等の研究テーマが挙げられる。

ナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉を除いた第4世代炉や小型炉など革新的原子炉については、まだ研究段階であり、材料開発、燃料開発に加え、静的安全系や自然対流冷却および機器一体型構造等の検討など、取り組むべき研究テーマは多方面にわたる。

軽水炉燃料では、事故時耐性燃料（ATF）の開発が進められており、実炉照射データ取得、製作性向上等が求められる。

②核融合

磁場閉じ込め方式核融合炉については、発電実証に向けて必要となる技術課題が整理されている。そのうち、ボトルネックとなる課題は、炉内に設置されるダイバーターの粒子制御と受熱を担う機器であり、その技術的制約が核融合炉の出力規模の決定要因になっている。ダイバーターは、原型炉で想定される運転条件と現在の科学的理解と技術的成熟度の乖離が大きい。この課題の解決のためには、JT-60SA等を用いた実機運転、ITERの運転で蓄積される経験知、小型装置による基礎研究、数値モデルの高度化と実験検証、革新概念の原理実証と性能向上という幅広い切り口からアプローチして、問題解決を図る事が求められる。

ITERの次ステップとなる原型炉では、耐放射線材料開発、トリチウム増殖比が1以上、ダイバーター開発、プラズマ閉じ込め容器等の規格基準の確立等が求められる。米国中心に数10のスタートアップで多種のプラズマ閉じ込め方式の小型核融合炉開発が進められており、ITER及び原型炉とは異なるアプローチでの核融合炉実用化が進む可能性もある。

レーザー核融合については、直接照射及び間接照射時における爆縮末期の点火部と主燃料の境界に発生する流体力学的不安定性（燃料のミキシング等）をほとんど制御することはできないという技術的な課題がある。ミキシングの影響がない程度に爆縮コアを大きくするか、不安定性が成長し始める種を如何に小さく許容できるレベルに押さえるかが鍵である。

中心点火方式では、爆縮全体を通じた流体力学的不安定性の抑制が重要であり、ターゲット製作、供給方式、レーザービーム間のパラメトリック効果（レーザー光の電磁波間のエネルギー相互作用）によるエネルギー移動について更なる研究が求められる。高速点火方式では、追加熱レーザーでどこまで加熱できるかが一番の課題である。一般に電子温度が高くなると加熱効率が下がるため、波長 $1.06\ \mu\text{m}$ のレーザーを用いた電子加熱だけでは困難ではないかと考えられている。例えば、外部磁場による高速電子のガイド、イオン加熱の併用等の検討の余地は十分にある。衝撃波点火方式は、未だ本格的な実験はなく、爆

縮末期にレーザーが到達するカットオフ面は、流体力学的不安定性で凹凸になっていると考えるのが現実的であり、十分な向心衝撃波を作れるか等が課題である。

③原子力安全^{20), 21), 22), 24)}

過酷事故進展解析・過酷事故対応については、個々の物理現象に対して実験などによる検証データの取得を進めるとともに、機構論的な解析モデルの開発を進めることが望まれる。また、過酷事故発生時の効果的な意思決定方法などについて検討する必要がある。さらに、熔融炉心と冷却材、炉構造物、コンクリート等との反応挙動の実験データ取得及び解析モデル構築、コアキャッチャー等の対策検討及び効果実証、格納容器破損形状の解析及び検証が求められる。緊急時における影響低減技術では、フィルターベント時の希ガス分離技術、状況把握・意思決定支援技術、放射性物質拡散予測精度向上等がある。

リスク評価に関する研究テーマとしては、包絡的外的ハザード評価手法の開発、ハザードカーブの設定、標準の策定、複数ハザード・マルチユニット・マルチサイトに対するリスク評価、リスク評価手法の高度化、新知見取り込み時の意思決定方法の確立等が挙げられる。

安全余裕の拡大と定量化については、新型被覆管の導入、最新の解析手法の導入などを進める必要がある。また、これと併せて、新しい解析コードや評価手法の認証方法を確立する必要がある。

シミュレーション手法の高度化については、様々な外的事象に対するシミュレーション手法の開発に取り組む必要がある。

原子力防災については、オンサイト・オフサイトの連携技術の開発が挙げられる。

④再処理

再処理を中心とする核燃料サイクル分野において研究開発対象となる技術課題は、コストの低減と安全性の確保であり、実用化を目指すものである以上、基盤的研究の段階からアカデミアと産業界が連携してこれらを意識する必要がある。

放射性廃棄物では、福島第一原発からの燃料デブリの管理・処分方法の検討、高レベル放射性廃棄物（HLW）地層処分の長期安全評価手法の高度化、分離核変換技術の研究等が求められる。廃止措置では、被ばく及びコストの低減、跡地利用を考慮した全体プロジェクト（除染、解体、保管・処分他）マネジメントの最適化検討、クリアランス物の有効利用を促進する検査・処理技術の開発が期待される。

（6）その他の課題

①新型炉

第4世代炉は、2030年以降の実用化を目指している。原子燃料サイクルとの整合性を考慮の上、国際協力を活用し、長期的視野に立って人材維持を図りながら必要な基盤研究を進めることが求められる。ナトリウム冷却高速炉については、国内プロジェクトを再開できるように技術競争力を確保しつつ、開発先進国として積極的に世界貢献を果たすべく、国際協力を活用しながら技術基盤を維持していくことが重要であると考えられる。

高温ガス炉については、技術実証に向け現状の研究開発体制を維持し、中国やカザフスタンなどとの国際協調を進めるとともに、水素利用等の産業推進を図ることが求められている。また、ポーランドとの協力を深め、我が国の技術で2030年までにポーランドに実

用炉を建設できるよう官民が協力していくことが期待される。

世界では、投資リスクを考慮して小型炉を指向している。我が国でも、社会的ニーズの明確化とともに、開発段階から、小型炉の特徴を踏まえた審査基準確立により、仕様の最適化・合理化／投資リスク低減を図りながら、再生可能エネルギーとの共存を可能とする、経済合理性のあるミドル電源としての小型炉を開発することは検討に値する。

事故時耐性燃料（ATF）技術開発では、国際協力による実炉照射データ蓄積や安全審査基準の構築が望まれる。

②核融合炉

核融合炉開発は、長期的かつ裾野の広いプロジェクトであるため、設計から建設完了までに10～20年程度かかり、その運転による技術開発にはさらなる年月を要することになる。従って、先行プロジェクトで蓄積した技術を次期プロジェクトに継承するとともに経験のある人材を次期計画に有効に活用することが重要である。政策的課題としては、これらのプロジェクト間の繋がりを考慮した開発戦略を練り、技術の断絶や人材の谷間ができないような研究基盤体制を構築することが求められている。

磁場閉じ込め型核融合においては、ITERが国際共同事業として進められている状況を鑑みると今後は、材料、製作、検査法、安全性等に関して国際標準化が進むと考えられ、関連する国際協力に戦略的に取り組むことが期待される。また、サプライチェーンを含む体制構築や核融合炉スタートアップが国内で芽吹く為の基盤整備も必要である。

レーザー核融合方式は、原型炉を目指す磁場閉じ込め核融合方式に比べ、未だ原理実証段階であるため、レーザー核融合研究は、高エネルギー密度科学の一環として研究が進められている。本研究は、国際連携も視野に入れた高速点火方式での点火燃焼を狙う計画をもつ日米英の間で検討されており、高エネルギー密度科学に関する共同研究を円滑に進めるためには、ショット数確保に関するバックアップが求められる。

③原子力安全^{20), 21), 22), 24)}

原子力の利用に関し、「社会に受容されるリスクレベル」に関するコンセンサスを作る一つの方策が、安全目標の設定である。原子力規制委員会の原子炉安全専門審査会・核燃料安全専門審査会などで議論が進められているが、まだ途上である。

リスク情報の活用とリスク情報に基づく統合的意思決定については、リスク情報を活用した安全性向上の実践を積み重ねるとともに、不確実さの取り扱いも含めた統合的意思決定プロセスの構築に取り組んでいく必要がある。リスク評価関連では、リスク情報を活用した規制の整備、利用目的に応じたリスク評価の性能規定、リスク評価人材の継続的育成が求められる。

過酷事故進展解析・過酷事故対応については、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、シビアアクシデント研究を中心とする安全研究基盤の充実強化が図られつつあるが、熔融炉心物性・挙動等の基盤研究推進、国際協力を活用した研究体制の構築、安全性向上対策に対する審査基準の整備などの継続した取り組みが期待される。緊急時における影響低減では、対策・モニタリング・意思決定プロセス等を含めた対応計画のガイドライン策定が求められる。

原子力防災については、現在、原子力規制委員会が、放射性物質の拡散予測ではなく緊急時モニタリングの結果により緊急時対応を実施するとしている。一方、立地地域からは、

緊急時対応の際、放射性物質の拡散予測を参考にしたいとの声があり、どのように対応していくかが課題である。

原子力人材については、福島第一原子力発電所事故の後、原子力分野を指向する学生数が減っており、将来にわたる人材供給に懸念が生じている。どのように安全を確保する人材を確保していくかが課題となる。

④再処理

原子力エネルギー利用目標は 2030 年で電力比率 20% 程度と示されており、これに向け、再処理中心の核燃料サイクルに関する研究開発活動や技術基盤を維持・発展させていくには、長期的視点での使用済燃料に対する対応方針（全量再処理、直接処分、貯蔵等）策定が必要である。六ヶ所再処理工場の稼働し、使用済燃料から回収されたプルトニウムがプルサーマル燃料として軽水炉でリサイクルされることが重要となる。六ヶ所再処理工場の次の再処理工場は、産業活動が続く以上、技術基盤の維持・強化が求められ、人材確保、研究・技術者のモチベーション維持が期待される。「将来の幅広い選択肢を確保するため」と位置付けられている分離変換技術の研究開発は、若者を引き付ける要素を持っており、その他の分野の研究開発を含め地道に活動を継続し、上記課題に対応していくことが重要であると考えられる。また、本分野の研究開発では、放射性物質、核燃料物質を取り扱う必要があり、そのための施設が鍵であるが、現在我が国に存在する核燃料サイクル関連試験施設はわずかで老朽化の問題も抱えており、新施設の建設が期待される。

本研究開発領域の共通のその他課題として、大学や企業で原子力関連実験環境が縮小していることが挙げられる。2030 年での原子力エネルギー利用目標を考えると、原子力分野の人材育成の観点からも、原子力関連の実験環境の再構築が求められる。また、本領域に係わる企業や大学は、社会との共通言語を構築して、研究成果や社会への貢献をわかりやすく説明することや、安全性向上を見える化することなどがより大切である。

(7) 国際比較

(1) 新型炉

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	●福島第一原子力発電所事故の教訓、知見を踏まえ、炉心熔融を伴うシビアアクシデントの現象解明や解析コード開発などが進められている。 ●ナトリウム冷却高速炉や高温ガス炉などについては材料・熱流動・核特性に関する研究が進められている。
	応用研究・開発	△	→	●ナトリウム冷却高速炉「常陽」および高温ガス炉 HTTR は再稼働のために新規制基準に対応している。 ●技術的優位だったナトリウム冷却高速炉の開発は縮小化されているが、国際協力で技術を維持しつつ、国際的に調和する安全基準を策定する。 ●高速炉開発会議戦略ワーキンググループは、高速炉戦略ロードマップを 2017～2018 年で検討してきたが、2018 年 12 月に、ロードマップの骨子を発表。今後、以下の 3 つのステップで推進する。①競争を促し、様々なアイデアを試すステップ（当面 5 年間程度）、②絞り込み、支援を重点化するステップ、③今後の開発課題及び工程について検討するステップ。 ●高温ガス炉については、ポーランドと 2017 年に覚書を締結し、我が国の技術でポーランドに研究炉及び実用炉を建設すべく協力関係を強めている。

米国	基礎研究	△	→	●シビアアクシデント耐性燃料などの新型材料開発、積極的にシミュレーション技術を活用する計算技術開発などの研究が活発である。 ●大統領の諮問委員会であるブルーリボン委員会での結論に基づき、基礎・基盤研究に特化して着実に研究開発を実施している。
	応用研究・開発	○	→	●小型モジュール炉の開発が活発である。mPower 炉や NuScale 炉などの軽水炉改良版に加えて、非軽水炉であるナトリウム炉（PRISM）やガス炉（PBMR）もあげられる。 ●ビルゲイツ氏が出資したテラパワー社によりナトリウム炉（TWR）の開発が進められている。 ●エネルギー省は、2017 年に革新炉開発を後押しするための GAIN プログラムを立ち上げるとともに、2018 年に様々な燃料や冷却材を試験するための多目的試験原子炉（VTR）プロジェクトを立ち上げ、資金援助を含めて積極的に開発を推進している。
欧州	基礎研究	△	→	【EU】 ●欧州全体で共同して着実に研究を進めている。 【ベルギー】 ●MYRRHA 炉は、ベルギーの SCK・CEN が中心となって開発を進めている多目的の加速器駆動核変換システム（ADS）の原型炉と位置づけられており、欧州内ではナトリウム炉に次いで優先度が高い。 【ポーランド】 ●日本の技術による高温ガス炉を導入しようとしている。
	応用研究・開発	○	→	【EU】 ●欧州は、計画として、ガス冷却高速炉 ALLEGRO はスロバキアを、鉛冷却高速炉はルーマニアを建設予定地に選定し、中欧を中心として研究開発を継続している。また、ナトリウム炉、ガス炉、その他の炉型についても欧州計画の中で設計研究が行われている。 【フランス】 ●ナトリウム冷却高速炉 ASTRID は概念設計段階であったが、2018 年に入って予算緊縮化のため実証炉低出力化とシミュレーション等による代替計画の組合せで計画変更を行った。実用化時期を 21 世紀後半に先延ばしして実用化に至る道筋を検討している。
ロシア	基礎研究	○	→	●鉛冷却高速炉 BREST300、鉛ビスマス冷却高速炉 SVBR100 の建設計画があり、幅広く基盤技術を開発することが目標とされている。小型の熱利用コジェネ炉や浮揚型原子炉の研究開発も実施している。 ●第 4 世代炉研究の一環として、超臨界圧水軽水炉や熔融塩炉の研究も実施している。 ●多目的研究用であるナトリウム高速炉 MBIR を 2015 年に建設開始、2020 年に運転開始予定である。
	応用研究・開発	◎	↗	●ナトリウム冷却高速炉は堅実に開発を維持しており、実験炉 BOR60、原型炉 BN600 に次いで、実証炉 BN800 が 2015 年に送電を開始した。 ●実用炉である BN1200 も開発中であり、安全性については第 4 世代原子力システム国際フォーラム（GIF）で定めた安全設計基準を採用する。連邦特別プログラムで高速炉サイクル技術を最優先に開発することを決定し予算化している。2025 年に建設開始し、2032 年に完成する見込みである。
中国	基礎研究	○	↗	●第 4 世代炉研究の一環として、ナトリウム冷却炉、鉛冷却炉、高温ガス炉、超臨界圧軽水炉や熔融塩炉の研究を精力的に実施している。
	応用研究・開発	◎	↗	●ナトリウム冷却高速炉は、PWR に次ぐ最重要炉型と位置づけ、CIAE により実験炉 CEFR が 2011 年に初送電を達成し、性能試験を実施している。原型炉は建設せず、実証炉 CFR600 が 2017 年に建設開始され、2023 年に完成予定である。ロシアの協力により実証炉の導入による早期実用化を目指す方針である。 ●ガス炉は、自国で知的財産権を持つことを目的に、精華大学により実験炉 HTR-10 の知見を踏まえて、実証炉 HTR-PM が 2018 年に運転開始を予定している。

韓国	基礎研究	△	→	●ガス炉では TRISO 燃料を多目的照射炉 HANARO で照射実験を行い、基礎研究が進められている。 ●鉛ビスマス冷却高速炉 URANUS-40 や核変換炉 PEACER-300 を設計しており、HELIOS ループで熱流動試験が実施されている。
	応用研究・開発	△	↘	●ナトリウム冷却高速炉は PGSFR を設計中であり、自然循環試験ループを製作するなどして研究開発を推進している。ただし、政府方針により開発は減退傾向。 ●ガス炉は 600MWt 実証炉の NHDD 計画が設計段階だが進められている。
インド	基礎研究	△	→	●大学や研究所で軽水炉を中心に研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	●ナトリウム冷却高速炉では FBTR 実験炉が 1985 年から運転中、PFBR 原型炉 (500MWe) が 2015 年に完成しており、2018 年に臨界を予定している。また、同型の実用炉 (600MWe) をツインプラントとして建設する計画である。 ●当面は酸化物燃料、プルトニウム燃料サイクルとするが、将来はトリウム燃料サイクルとする。

(2) 核融合

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
日本	基礎研究	○	→	●文科省核融合科学技術委員会が原型炉開発総合戦略タスクフォースを組織し、原型炉開発に向けたチェック・アンド・レビュー (C&R) とアクションプランを策定。 ●量子科学技術研究開発機構 (QST) 六ヶ所核融合研究所で展開している幅広いアプローチ (Broader Approach : BA) 活動により、ITER 後の原型炉に向けた研究開発、シミュレーション研究が展開。研究規模の範囲は限定的。 ●自然科学研究機構 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) による DD 実験が実施され、炉閉じ込め条件の改善、10keV 加熱に成功した。FFHR (Force-Free Helical Reactor) の DEMO 炉概念設計が進み、原型炉設計に反映する。 ●レーザー核融合では、爆縮プラズマ点火温度 5keV までの加熱を目標に高速点火原理検証プロジェクト (FIREX) が進められ、要素実験は完了し、統合実験に向けた準備が行われる。 ●光産業創成大学院大学 / 浜松フォトニクスで繰り返しレーザーを用いた核融合物理実験 (CANDY) が実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	●ITER 建設のため、高度技術を要する機器調達を担い、産業界の技術蓄積、人材育成が着実に進められている。 ●QST 那珂研にサテライトカマク JT6-SA が建設中。2020 年運転開始。 ●大阪大学レーザー科学研究所にて、高エネルギー密度科学の研究が進められ、実験室宇宙物理、超高压状態の再現により、惑星物理実験、オームデンスマターの実験研究を実施している。 ●産業用加工レーザーとして有望な低温冷却 Yb:YAG セラミックレーザーの研究を実施している。
米国	基礎研究	○	↘	●プラズマ物理、核融合炉材料、トリチウム安全性等の研究で最先端にあるが、基礎研究の計画、人的資源活用面で下降傾向にある ●引き続き ITER プロジェクトに参加し、資金拠出を継続する ●国立点火施設 (NIF) プロジェクトに関する実験結果詳細が IFSA-2017 で発表され、次の展開を図るための補足実験と開発研究を実施中。 ●ロチェスター大のオメガレーザーと OMEGA-EP を用いた中心点火、高速点火の核融合実験を実施中。
	応用研究・開発	◎	→	●ITER 初期から中心的役割を果たすが、米国エネルギー省は、核融合をエネルギー研究ではなく、科学研究と位置づけし、核融合研究全体が停滞傾向。 ●NIF の有効活用のため、共同利用施設として運営が始められ、日本との共同研究も積極的に実施されている。 ●数 10 のスタートアップで多種のプラズマ閉じ込め方式の小型核融合炉開発が進められている。

欧州	基礎研究	○	→	【EU】 ●欧州内の協力体制 EUROfusion の下で、各研究所の研究を組織化し、研究開発を展開し、ロードマップを策定する。 【フランス】 ●LMJ (Laser Mega Joule) の建設が進められ(2022 年以降)建設完了、2017 年に 8 ビーム短パルス運転開始。
	応用研究・開発	◎	↗	【EU】 ●ITER ホスト極として相当規模の資金を投入し、ITER 建設を推進している。 【ドイツ】 ●ベンデルスタイン 7-X のモジュラー型の磁場閉じ込め核融合装置が運転開始され、高プラズマ閉じ込め実験が進行している。 【フランス】 ●LMJ の一部ビームの共同研究が公募されている。
中国	基礎研究	○	↗	●ITER ホスト極の一つで、資金を出し ITER 建設に寄与するとともに、合肥に超伝導トカマク装置 EAST を運転中、高い加熱温度、プラズマ閉じ込めを達成。 ●綿陽に神光 (Shen Guang) III が運転開始され、0.1 8 MJ のレーザーを使って間接照射による基礎研究を実施中である。
	応用研究・開発	◎	↗	●ITER の次の実験炉国内計画として、トリチウム燃料サイクルを含む中国核融合工学実験炉 CFETR を計画 ●上海光機所にて高密度科学の研究を実施
韓国	基礎研究	○	→	●KAIST でターゲット照射の基礎実験が行われているが、主流は磁場核融合である。
	応用研究・開発	○	→	●ITER ホスト極の一つとして資金を供出し、ITER 建設に寄与するとともに、超伝導トカマク K-STAR を運転し、技術力、特に超伝導に関する技術を持つ。

(3) 原子力安全

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	●原子力安全に関する公募研究が実施されており、リスク評価、安全評価技術、事故耐性燃料、モニタリング技術、原子力防災など、幅広い分野での取り組みが進められている(25)。大学・研究機関においても、基礎的な研究が実施されている。
	応用研究・開発	◎	↗	●原子力施設の安全性向上対策として、解析手法、設備、マネジメントシステム改善など、様々な取り組みがなされている。
米国	基礎研究	◎	→	●1970 年代から確率論的リスク評価に対する取り組みがなされ、広い範囲で基礎研究が行われている。外的事象に対する包絡的なリスク評価も 1990 年代に実施されている。
	応用研究・開発	◎	↗	●1979 年のスリーマイル島 2 号機事故を契機として、本格的にリスク情報を活用した規制が行われている。すべての規制上の意思決定において、確率論的リスク評価を活用する方針がとられている。 ●過酷事故に関しては、サンディア国立研究所で総合解析コード MELCOR、ISS 社で RELAP/SCDAPSIM の開発を進めている。 ●手順書類 FLEX など、安全確保のためのマネジメントについて取り組みが進んでいる。

欧州	基礎研究	◎	→	【EU】 ●高経年化評価に対する検討が進んでおり、リスク評価の導入に積極的な国が多い。 【フランス】 ●原子力発電所を多数有するフランスでは、1990年代初頭から確率論的リスク評価が実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	【EU】 ●欧州においては西欧原子力規制者協会（WENRA：Western European Nuclear Regulators' Association）が、原子力発電所をより安全にするための活動を積極的に実施し、その中で保全活動の最適化が進められている。 ●防災については、原子力災害に関する危機管理のための欧州プラットフォーム（NERIS）を中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。
中国	基礎研究	○	↗	●新規プラント建設や新型炉設計が積極的に進められており、原子力保全に関しても積極的な研究開発が進んでいる。 ●過酷事故に関しては、上海交通大学、西安交通大学などで基礎的な研究が実施されている。また、各種解析コードの開発が国の予算などで進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	●リスクやシビアアクシデントマネジメントなどに関する研究に、国家として積極的に投資している。 ●上海交通大学、上海核工程研究設計院などで応用を目指した比較的大規模な熱流動実験が実施されている。 ●近年の原子力発電所の増設計画に沿って、法的整備も進み、緊急時対応計画はIAEA基準に沿って整備されている。
韓国	基礎研究	○	→	●ソウル大学、KAIST、浦項工科大学校（UNIST）、韓国原子力研究所（KAERI）などで基礎的な研究が実施されている。
	応用研究・開発	◎	↗	●保全、防災においては、米国型の対応が整備されている。 ●韓国原子力研究所などで応用を目指した格納容器健全性、コアキャッチャーなどに比較的大規模な実験が実施されている。

（4）再処理

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	○	→	●将来の再処理技術、分離変換技術に関する基礎的研究は継続されている。
	応用研究・開発	○	↘	●再処理の安全性、事故時影響等に関する研究が実施されている。 ●高速炉燃料サイクルに関する研究開発は震災後中断されている。
米国	基礎研究	○	→	●マイナーアクチノイド分離技術などに関する基礎研究は常に一定の活動がある。
	応用研究・開発	△	→	●再処理を行わない戦略をとっているため、応用研究は限定的である。
欧州	基礎研究	○	→	【EU】 ●EU内研究協力で、核燃料サイクル路線をとらない国においても大学等での基礎的研究は一定水準が保たれている。 【フランス】 ●再処理等への応用のための基礎研究は継続されている。分離変換技術におけるマイナーアクチノイド分離の術開発については、所定の成果を得たとの判断がなされ、今後は低いレベルで活動が維持される。
	応用研究・開発	△	→	【EU】 ●応用研究は国別の対応が基本となっていると考えられる。 【フランス】 ●再処理は基本的に確立された技術であるとの認識であると考えられるが、なお、高度化、改良などのための研究開発が行われている。
中国	基礎研究	○	↗	●国を挙げて、核燃料サイクル、再処理、分離変換技術に関する研究開発を推進している。分離変換技術では、加速器による核変換の研究開発など、かなりの予算、人員を移入して推進している。
	応用研究・開発	○	↗	●国を挙げて、核燃料サイクル、再処理、分離変換技術に関する研究開発を推進している。新施設を建設し、ホット試験を開始するなど活動はさらに活発化している。

韓国	基礎研究	○	→	●使用済燃料の乾式処理に関する基礎研究は引き続き実施されている。
	応用研究・開発	△	→	●使用済燃料の乾式処理による再処理の実用化に関する研究開発は、国際的立場などなどの事情により、限定される。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) 原子力委員会『平成 29 年度版 原子力白書』2018 年 7 月 ,
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2018/zentai.pdf> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 2) The Generation IV International Forum,
https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 3) The World Nuclear Association, Fast Neutron Reactors,
<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 4) 文部科学省「もんじゅ研究計画」,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/061/houkoku/1344598.htm (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 5) 資源エネルギー庁「第 5 次エネルギー基本計画」,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/ (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 6) 一般財団法人エネルギー総合工学研究所 高温ガス炉プラント研究会「高温ガス炉の概要」
http://www.iae.or.jp/htgr/pdf/00_summary01/00_1.pdf (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 7) 岡本孝司「高温ガス炉の課題」, 一般財団法人エネルギー総合工学研究所, 2013,
http://www.iae.or.jp/htgr/pdf/02_result/infomation/02result_20130903_04.pdf (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 8) 原子力委員会「第三段階核融合研究開発基本計画」,
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryo/kakuyugo05/siryo2_3.pdf (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 9) 核融合科学技術委員会「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1400117.htm (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
- 10) 岡野邦彦, 飛田健次「核融合原型炉開発の動向 アクションプランと核融合工学研究の進

- 展」『日本原子力学会誌』2018年10月号。
- 11) 「アクションプラン構成表」第12回核融合科学技術会議資料，
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2017/12/28/1399735_003.pdf（2019年2月1日アクセス）。
 - 12) 「チェック・アンド・レビュー項目（案）」核融合科学技術会議資料，
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afiedfile/2019/02/18/1400137_01.pdf（2019年2月1日アクセス）。
 - 13) E. I. Moses, C. J. Keane, R. Al-Ayat, B. A. Remington, G. W. Collins 「米国立点火施設 - National Ignition Facility - におけるレーザー核融合および高エネルギー密度科学研究の展望」『プラズマ・核融合学会誌』87巻5号：295-301, 2011.
http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2011_05/jspf2011_05-295.pdf（2019年2月1日アクセス）。
 - 14) Lee McCormick 著，西原英晃 監訳，杉本純，村松健 訳『原子力発電システムのリスク評価と安全解析』（丸善出版，2013）。
 - 15) 大久保哲朗，兼平憲男「六ヶ所再処理工場のガラス固化試験と新型炉開発 核燃料サイクル施設におけるガラス固化技術の確立への取り組み」『日本原子力学会誌』57巻8号：511-516. 2015.
 - 16) 日本原燃株式会社「再処理工場およびMOX燃料工場のしゅん工時期の変更について」，
<https://www.jnfl.co.jp/ja/special/nuclear-cycle/step/file/20171222.pdf>（2019年2月1日アクセス）。
 - 17) 日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門，日本原子力発電株式会社研究開発室「研究開発室高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT プロジェクト）ーフェーズⅠ報告書ー」，JAEA-Evaluation 2011-003，2011.
 - 18) Yamamoto, *et al.*, “Development of U and Pu Co-Recovery Process (Co-Processing) for Future Reprocessing,” Proceedings of International Nuclear Fuel Cycle Conference (GLOBAL 2013), Salt Lake City, USA, 2013, Paper 7797, in CD-ROM.
 - 19) Yasutoshi Ban *et al.*, "Uranium and Plutonium Extraction from Nitric Acid By N,N-Di(2-Ethylhexyl)-2,2-Dimethylpropanamide (DEHDMPA) And N,N-Di(2-Ethylhexyl) Butanamide (DEHBA) Using Mixer-Settler Extractors," *Solvent Extraction and Ion Exchange* 32, (4): 348-364, 2014.
 - 20) 軽水炉安全技術・人材ロードマップ
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denkijigyou/jishutekianzensei/pdf/report02_01_00.pdf（2019年2月1日アクセス）。
 - 21) 電気事業者の原子力安全研究への取り組み：
http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/genshiryoku_jishuteki/pdf/009_01_02.pdf（2019年2月1日アクセス）。
 - 22) 日本原子力学会「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ 2017（熱水力 RM 2017）平成28年度報告書」
http://www.aesj.or.jp/~thd/committee/TH-RM/TH-RM_r.pdf（2019年2月1日アクセス）。
 - 23) ” NEA Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power

- Station (BSAF) Project,” Nuclear Energy Agency (NEA), OECD,
<https://www.oecd-nea.org/jointproj/bsaf.html>（2019年2月1日アクセス）.
- 24) 原子力規制委員会「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」,
<http://www.nsr.go.jp/data/000158682.pdf>（2019年2月1日アクセス）.
- 25) 文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」,
<https://www.kenkyu.jp/nuclear/index.html>（2019年2月1日アクセス）.

2.5 太陽光発電・太陽熱発電

（1）研究開発領域の定義

太陽光発電・太陽熱発電に関する科学、技術、研究開発を記述する。太陽光発電および太陽熱発電は、太陽の光・熱エネルギーを電力へ変換する発電方式である。特に発電システムとしての低コスト化、効率向上、用途開発などの観点からの動向を対象とする。宇宙太陽光発電も含める。

（2）キーワード

長期信頼性、劣化機構の解明、リスク・安全性評価、保守のスマート化、建材一体型太陽電池（BIPV）、車載型太陽電池、発電予測、スマートインバータ、無線電力伝送、大型宇宙構造物、宇宙輸送、宇宙環境物理、蓄熱システム、高温化・高効率化、高温用溶融塩、高温用熱媒体、超臨界 CO₂ タービン、燃料化技術

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

我が国におけるエネルギー自立の必要性和パリ協定発効にみられる地球温暖化対策への世界的モメンタムの高まりから、第5次エネルギー基本計画¹⁾では、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた取組みを進めることが明記された。なかでも太陽光発電（PV）は、風力と並び、将来的に大型電源としての活用が期待されている。また、第5期科学技術基本計画で提唱された Society 5.0²⁾では、太陽光をはじめとする多様なエネルギーをAI等によりの確に連携させ安定的にエネルギーを供給する社会像が示されている。さらに、エネルギー・環境イノベーション戦略³⁾においても非連続な技術革新が期待されており、PVの重要性は今後も増していく。

宇宙太陽光発電は、地上太陽光の弱点である自然条件による発電の不安定さとそれに伴うコスト増を、宇宙空間に太陽電池を設置することで発電を安定化させ、コスト減をはかることのできるシステムである。現在実用化が始まりかけている無線電力伝送技術の発展に加え、太陽光発電の高度利用や各種宇宙技術の発展が見込まれる。

太陽熱発電（CSP）は、安価な蓄熱システムを組み込むことにより、日射が無い場合でも電力供給が行える利点がある。また、日本が得意とするタービン等の発電プラント技術を活用できる。集光・集熱を行うため国内よりも直達日射量が多い地域で有効だが、本地域は発展途上国が多く、化石燃料の輸入により高コストの発電を行い、電力不足を解消している地域も多い。これらの地域にはCSPが適する。部品製造やメンテナンス等に就業機会があり、雇用改善にも役立つため、世界銀行は発展途上国へのCSPを後押ししている。

[研究開発の動向]

■太陽光発電

世界の2017年の太陽光発電（Photovoltaics: 以下PV）導入量は98GWで、累積400GWとなった⁴⁾。世界の平均的なPV発電コストは、0.07～0.31 USドル/kWh（2017年）となり、最低で0.02 USドル/kWhのケースもあり、トップランナーでは、他の電源よりも安い

発電コストを実現している⁵⁾。セル・モジュールのコスト低下と導入拡大が進む中、システムのコストダウンも進んだ。しかし、日本のPV発電コストは世界と比べて高く⁶⁾、発電コスト低減に向けた研究開発が必要である。目標値としては、日本7円/kWh（2030年、NEDO PV Challenge）⁷⁾、米国3-5セント/kWh（2030年、DOE SunShot計画）⁸⁾、ドイツ4.5～7.2ユーロセント/kWh（2030年、連邦経済エネルギー省 BMWi による見通し）⁹⁾などが掲げられている。このような中、システム技術としては、長期信頼性の向上、設置場所やアプリケーションの多用途化、電力系統へのインテグレーション、運用ソフトウェアコスト低減に関する研究開発がトレンドになっている。

長期信頼性を向上させ、システムが長寿命になればコスト低減に繋がる。最も普及している結晶Si系モジュールの酢酸による劣化機構が究明され、対策が進められている。メガソーラーなどの高電圧システムでの電位誘起劣化（PID）については、耐性材料や屋内信頼性試験方法（CIGS系を含む）の開発が進められている。PERC系モジュールの光・温度誘起劣化（LeTID）など新たな劣化機構も研究されている。NREL Reliability Workshop、EU Sophia、Sayuri PV、IEA PVPS Task 13 など国際的取組が活発で、PVQAT と IEC の連携による標準化も検討されている。欧米の研究者が多く、国内より検討が進んでいる（酢酸による劣化解明は国内成果）。汚れ影響の推定など、発電電力量の不確実性を低下させるモデリングについても海外が活発に研究している。リスク・安全性の分析と対策も求められており、事例として、EU Bankability プロジェクトにおけるファイナンス時のリスク分析や Sunspace Alliance によるベストプラクティクスの整備などがある。火災と感電（特に消防隊員）に関しては海外での整備が進み（米国電気工事規定での義務化など）、標準化も検討されている。国内では、住宅用PVの火災が発生し、メカニズムの解明と対策が進められており、これに関連して、モジュールの安全弁とも言えるバイパス回路の故障事例の確認や現地点検技術の開発が進められている。土木・建築分野のリスク増加も課題となっている。構造崩壊、モジュール飛散、土砂崩れ、洪水などの事故や災害が国内で増加している。海外でも台湾の台風事故などがあるが、国内が相対的に多く、構造設計の見直しや災害時リスクの周知などの整備が進められている。保守のスマート化として常時監視システムの高度化が検討されている。また、省力化としてドローンと画像技術の利用研究が進んでいる。効率的な監視・点検技術が実用化されつつあるが、技術的裏付けや問題箇所の具体的な発見方法などの研究が必要な状況にある。モジュールおよびシステム（増加が予想される中古品を含む）の性能評価の低コスト化・迅速化へのニーズから、屋外で取得した電流・電圧特性の補正方法や日射計の代わりにモジュールを使う方法などが国内で検討されている。

導入の多様化としては、水上設置が世界的にも増加（特に中国）している。シンガポールでは水上システムの比較試験を行い、O&M方法など含め検証している。国内でも風荷重などの風洞実験が一部実施されているが、信頼性よりも導入が先行している。農業利用についても、中国で導入が拡大している。国内でも営農型（もしくはソーラーシェアリング）と呼ばれ、導入が少しずつ進んでいるが、構造設計などに課題があり、設計指針の整備が求められている。建物一体型はBIPVとも呼ばれ、日本、欧州におけるプロジェクトが進んでいる。国内では、ZEH（net Zero Energy House）、ZEB（net Zero Energy Building）との連動による導入拡大が期待されており、ZEBでは設置面積が小さいことから、壁面への高効率太陽電池の工夫設置が期待されている。建材としての性能評価も含め、IEA PVPS 15による国際的な情報交換

や IEC による標準化検討が行われている。PV 搭載自動車については、日本（トヨタなど）を中心にコンセプトが提案され、NEDO における FS や IEA PVPS TASK 17 の立ち上げなどに進展している。運輸部門に関連して、海外では道路一体型 PV の開発も進められている。

電力系統との高度な協調技術として、自律調整機能（電圧安定化、周波数安定化、力率調整、出力制御、ソフトスタート等）と電力会社・アグリゲータとの双方向通信機能が実装されるスマートインバータが開発され、標準化が進んでいるが、具体的利用方法について検討・検証が求められている。発電予測については、各国でプロジェクトが立ち上がっている。IEA PVPS TASK 16 においても国際的な情報交換の場が作られている。日射量モデルの改良、衛星観測データや全天カメラ画像によるリソースの増加や、深層学習、アンサンブル学習などの予測手法が研究されている。国内の各電力会社でも発電出力把握方法の検討が進み、実装されている。日射量からの推定モデルが基本であるため、スマートメータ等の実測データによる補正や検証が必要である。出力制御については、海外でも実装されているが、国内ではより高度なリアルタイム制御、日射の短時間予測を利用した制御計画の修正などの研究が行われている。蓄電池の導入も進められているが、コスト低減が求められている。

融資、顧客獲得、許可、設置、労働、検査などのソフトコストは、ハードコストに比べて低下しておらず、住宅用および商用システムの総コストの半分以上を占めるとの試算がある（米国 DOE）¹⁰⁾、米国では手続きコスト低減に向けた FS などが行われている。国内では、技術開発ではなく調査が行われている程度であり、さらなる対応が求められている。

■宇宙太陽光発電

宇宙太陽光発電は、1970 年代の宇宙開発競争の流れを受け、当時研究が始まっていたマイクロ波送電技術を採用して、次の宇宙開発の手段として研究が始まったものである。しかし、その後 1990 年代に入り宇宙太陽発電は深刻化する地球温暖化の対策の一つとしても注目を集めるようになる。地上太陽光発電、風力発電が普及段階に入った現在は、太陽光発電の高度利用の観点に加え、再び人類の宇宙進出の礎としても注目されている。1990 年代までは国レベルの研究開発が主流であったが、アジア域は変わらず国主導であるが、欧米では他の宇宙技術と同様民間企業での研究開発が始まっている。

技術的には宇宙太陽光発電提唱当初から、実用化がされていない無線電力伝送がキー技術であると考えられ、現在に至るまで様々な要素研究や実証実験が行われている。無線電力伝送は 2010 年代に入り様々な実用化の検討が始まり、一部の商品化 / 標準化もなされるようになっている^{11)・14)}。また宇宙用高効率軽量高耐宇宙線用太陽電池や、大型宇宙構造物の展開 / 建造 / 保守、宇宙空間における高圧電力の取り扱い、そして安価な宇宙輸送（地上からの打ち上げや軌道間輸送等）等の研究と実証の必要性が叫ばれているが、世界中での宇宙開発のダウンサイジングに伴い、これら宇宙関連技術の実証研究例はあまり多くはない。

無線電力伝送は新半導体の開発や大型ビーム制御アンテナの開発、実用化に伴う様々な回路技術やシステム技術が急速に進歩している。宇宙太陽光発電に用いるビーム型と呼ばれる無線電力伝送方式とは多少異なる、民生応用のユビキタス型や電磁誘導方式は技術的にクリアすべき課題は減っており、電波法による周波数割り当てがないことが最大の問題となっている。ビーム型ではマイクロ波を用いた無線電力伝送用 GaN 半導体増幅器の効率が 80% 近く（5.8GHz 帯）になっており、要素技術としては更なる高効率化や量産化が求められている。ビーム制御はアンテナのサイズの問題もあり、地上実証レベルや宇宙からの実証レベルではまだ課題が多

い。これらの開発は、現在日本がリードしているが、米国では民間企業が3年1,750万ドルの研究開発費を大学へ投入したり、中国宇宙庁 CAST 等中国で様々なビーム型無線電力伝送実証実験が実施されたりしており、今後予断を許さない。

■太陽熱発電

PV 発電コストの急落により太陽熱発電（Concentrating Solar Power: CSP）のプラント建設数は予測を下回る状況にあったが、蓄熱を組み込むことにより電力需要曲線に合わせた低コストの電力供給が可能であることが評価され、再び増加傾向にある。現在、高温・高効率化を目指したタワー型の集光系を用いたプラントが増えている。また、低コストの蓄熱を実現するため熱媒体に 565℃まで使用可能な硝酸塩系溶融塩を用いたプラントが増えている。CSP の研究開発は発電のみならず、高温の熱を利用した燃料製造、CO₂ の有効利用や工業用熱供給の分野にも広がりつつある。

CSP の特徴として、太陽からまっすぐ地上に降り注ぐ「直達日射」の量によって発電コストが大きく変わることが挙げられる。直達日射量は乾燥地帯で豊富であり、米国南西部、南北アフリカ、中東、豪州などでは低コスト発電が可能である。世界で最も直達日射量が多いといわれるチリ北部の砂漠地帯での発電コストは、24 時間電力供給が可能なプラントで 0.06 USD/kWh と言われている。最新タワー型プラントの年平均発電効率（太陽光→電力）は約 25%に達しているものと推測される。CSP の発電コストは PV に比べ高いという評価がある。しかし、最近の CSP プラントでは蓄熱システムにより日射が無い時間帯でも発電でき、蓄熱システムは PV で使用される二次電池よりも低コストであり、電力の安定供給まで含めた発電コストは CSP の方が優位である。また、ボイラも標準装備されるため長期間日射が無い場合にもバックアップ発電所は不要であり、PV に対する優位性がある。CSP の発電コストはプラント規模が大きいほど低下するため、数十 MW 以上の規模が低コスト発電には好ましい。

CSP の研究開発ターゲットは高温化による高効率化と低コスト化である。高温化の目標温度はプラントの発電方式によって異なる。蒸気タービンは現行の 565℃から 650℃への昇温が検討されているが、超臨界・超超臨界条件の蒸気タービンは大型化するため CSP に適さない場合が多い。このような場合には超臨界 CO₂ タービンの方がより小型で高効率に発電できるため活発な研究開発が行われている。太陽熱と組み合わせた超臨界 CO₂ タービンの温度条件は 550～800℃と幅広いが、高温の方が高効率となる。現行 565℃のタワー型プラントの蒸気タービンの効率は 42～43%、650℃の蒸気タービンを用いた場合は 46～47%、750℃の超臨界 CO₂ タービンでは 50%以上が見込まれている。これらのプラントでは熱媒体を高温用溶融塩もしくは固体微粒子とし、低コストの蓄熱をセットにできる強みがある。ガスタービンを使用する場合には 850℃から 1000℃（可能であればそれ以上）を目標としている。この場合の熱媒体は空気であり、多孔質セラミックス等を用いた特殊なレシーバ（集光集熱装置）を必要とする。

CSP の主要技術は集光集熱、熱輸送（熱媒体）、蓄熱、発電方式に大別できる¹⁵⁾。集光集熱については、集光太陽光の吸収を高く、またそれによって温度が上昇した表面からの放射による損失を可能な限り低減する必要がある。このため、光吸収性が高く高温での酸化安定性の高い被膜の開発¹⁶⁾や選択吸収性があり放射損失が低い膜構造の研究開発が行われている¹⁷⁾。また、レシーバの構造を工夫することによる熱効率向上もある¹⁸⁾。熱媒体については、高温化に向けた硝酸塩系以外の溶融塩の研究、溶融金属系熱媒体の使用、空気の利用などが検討され、

一部は実用化されている。また、最近では金属酸化物の微粒子を熱媒体 / 蓄熱 / 熱媒体として使用する動きもある¹⁹⁾。蓄熱については、顕熱蓄熱の低コスト化があり、スラグのような安価な固体蓄熱材料の使用やサーモクラインシステムと呼ばれる一つのタンクに高温・低温の熔融塩を入れるシステムの開発が進んでいる²⁰⁾。熔融塩を用いた潜熱蓄熱では、低い熱伝導率を補うシステム開発が必要であり、熱伝導率が高い金属系の潜熱蓄熱材料に関する研究が盛んである。特に Al-Si 合金が注目されている。化学蓄熱は材料と反応の絞り込みがかなり進んできたが、一番の課題は繰り返し耐久性の向上である。発電方式については、上述のように蒸気タービンの高温化、超臨界 CO₂ タービンやガスタービンをを用いる動きがある²¹⁾。また、このような回転機器を用いた発電の他に熱光起電力発電（TPV）や熱電変換を用いる動きもある²²⁾。発電以外の用途への熱利用についても活発な研究開発が行われている。集光太陽熱を利用した水の熱分解による水素製造や、水と CO₂ を金属酸化物により分解し、液体燃料を製造する技術²³⁾ などの多くの利用法が検討されている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

■太陽光発電

NEDO が PV 搭載自動車の実現による運輸部門の温室効果ガス削減効果などを調査した結果²⁴⁾、2050 年に全ての次世代自動車（EV、PHV、HEV）に PV が搭載された場合、乗用車に期待される排出削減量の 9% に相当する量が削減でき、また、利用パターンによっては、年間の充電作業回数をゼロにできるとの試算結果が得られた。太陽光発電の農地への適用拡大も進展している。化合物多接合型などの高効率モジュールの適用に向けた技術展開や、劣化機構の解明等による長期信頼性の向上が期待され、IEA PVPS TASK 17 “PV for transport supports the solar mobility” も立ち上がった。

第三世代の静止気象衛星（ひまわり 8、9 号）の観測データを活用した、従来よりも高分解能の時空間（2.5 分、1km メッシュ）における日射量&発電量推定技術の研究開発が進められている。

Peer to Peer（P2P）通信方式を利用した再生可能エネルギー発電所と利用者の直接電力取引の導入が検討されている。仮想通貨で注目されるブロックチェーンを活用する技術の開発も進められており、蓄電池や EV の所有者との PV 電力取引なども含めた様々な電力取引形態の実現が期待される。

■宇宙太陽光発電

マイクロ波帯での GaN 半導体の開発の発展（日本）^{25)・27)} や、無線送電実証の進展、新しい宇宙太陽光発電システムデザインの発表（米民間企業²⁸⁾、英民間企業²⁹⁾、中国宇宙庁³⁰⁾、中国大学³¹⁾）が着目される。JAXA が、宇宙太陽光発電へつなげるスピンオフ技術（成層圏無線中継機や大型展開構造レーダーアンテナ衛星等）検討を進めている。

■太陽熱発電

高温化・高効率化が注目動向である。現在普及している硝酸塩系熔融塩に代わる高温用熔融塩の開発が欧米を中心に行われている。塩化物系熔融塩と炭酸塩系熔融塩に絞り込まれつつあるが、防食技術の開発が検討課題¹⁶⁾。日本も研究開発を行っている。

700 ～ 800℃の熱を創り、輸送・蓄熱するタワー型プラントの熱媒体・蓄熱媒体として固体

微粒子（金属酸化物等）を用いる動きが世界的に顕著である²³⁾。固体微粒子は耐熱性が高く、高温の熱輸送と蓄熱が可能である。課題は安定的に使用可能な循環システムの構築である。

高温用の熱媒体として Na を使うシステムがパイロットプラントレベルで動いている³²⁾。Na の低密度、高熱伝導率が特に重要視されている。水との接触は危険だが、Na と超臨界 CO₂ を熱交換することでリスクを下げることも検討されている。超臨界 CO₂ は超臨界 CO₂ タービンにて使用する。

新規蓄熱・発電システムとして、高温の金属系相変化材料と起電力発電（Solar-Thermophotovoltaic (TPV)）（もしくは TPV+ 熱電子発電）で安定電力供給を行う動きがあり²²⁾、潜熱蓄熱と組み合わせて一定温度での発電が可能である。

蒸気タービンに代わり、ガスタービン、超臨界 CO₂ タービンを用いたシステムの研究開発が行われている²¹⁾。高温の熱エネルギーを利用した水熱分解による水素製造、水と CO₂ の分解による合成ガス製造などの燃料化技術の開発なども積極的に行われている²³⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■太陽光発電

海外の大型プロジェクトとしては、欧州の Horizon2020、米国の Sunshot イニシアティブなどがあり、各国において基礎研究から応用研究、実用化を含む広範なテーマについて研究開発を推進している。

国内では NEDO が実用化に向けた複数のプロジェクトを推進している。「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」³³⁾ では、先端複合技術型 Si 太陽電池、高性能 CIS 太陽電池、革新的新構造太陽電池（ペロブスカイト、量子ドットなど）のセル・モジュール開発を中心としたプロジェクトを推進している。「太陽光発電リサイクル技術開発」³⁴⁾ では、使用済みモジュールの回収・分解・再利用などの技術開発を行っている。「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発」³⁵⁾ では、セル・モジュール以外の BOS や維持管理のコスト低減を目的として、周辺機器の高機能化や、追尾・反射・冷却等の機能付加による発電量の増加、施工や取付に関する部品点数の削減や施工時間の短縮、発電器機・設備の健全性の自動診断や故障回避、自動修復、システムの劣化予防や長寿命化、人件費の削減等に寄与する監視・メンテナンス技術などを開発している。また、システムの構造安全・電気安全等の課題に関する調査・研究・実証、建築物に大量設置する環境を模擬した ZEB 化への課題抽出と解決に向けた開発・検証を行っている。JST「未来社会創造事業」においても主にセルに関する基礎的研究が行われている。

経済産業省「新エネルギー等の保安規制高度化事業（電気施設保安技術高度化の評価・検証事業）」³⁶⁾ では、先進的な保守管理技術を、実際の設備に導入して有効性を評価しつつ、電気保安規制等のあり方を検討している。常時監視の計測データをもとに発電量の低下傾向を劣化予兆として早期に検知する技術などを評価している。PV だけが対象ではないが、系統との協調技術に関連して、JST CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」³⁷⁾ では、エネルギーと情報を双方向・リアルタイムで処理し、需要と供給の状況把握や協調制御を可能とする理論、需要と供給それぞれの利己的意思決定をエネルギーシステム全体の社会的利益に繋げるために、人間行動や社会的合理性を組み込んだ理論および基盤技術などを研究している。NEDO「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」

³⁸⁾ では、再生可能エネルギーが電力系統に大量導入された際の、余剰電力の発生、周波数調整力の不足等への解決策として、予測技術や出力変動制御技術を考慮した需給シミュレーションシステムを開発し、実際の電力系統で検証を行っている。また、再生可能エネルギーの受入可能量拡大のために設置が義務化された遠隔出力制御システムの開発と実証試験を行っている。

■宇宙太陽光発電

現在も継続している経産省宇宙産業室主導の宇宙太陽光発電を目指した無線電力伝送技術開発は新半導体の開発の成功や、それらを用いた 2015 年度に実施された 50m 級ビーム型無線電力伝送実験の成功は世界中で注目されている。

中国宇宙庁での SPS 研究活動は近年全貌が見え始め、世界中で注目を集めている。西安、成都、武漢、上海等各都市各研究機関で無線電力伝送や宇宙太陽光発電のシステム設計や実証実験が行われている。

無線電力伝送は 2011 年に日本の研究者主導で設立した米国国際学会 IEEE Wireless Power Transfer Conference の設立をはじめとする世界中での学会活動や、電磁誘導型の携帯電話無線充電器の世界規格 Qi の展開、電気自動車の無線充電を含むすべての無線電力伝送の周波数問題の ITU（International Telecommunication Union）での議論³⁹⁾等、実用化/標準化/法制化の議論が進化している。日本では、2014 年 10 月に宇宙太陽発電学会が設立されている。

■太陽熱発電

EU は高温の金属系潜熱蓄熱と TPV 及び熱電子による発電を組み合わせた Amadeus と呼ばれるプロジェクトを行っている²²⁾。潜熱蓄熱の温度は約 1500℃であり、タワー型プラントを用いて高温の熱供給を行う。また、その温度で放出される赤外光と熱電子を用いて安定した発電を行うものである。同じく EU において、太陽熱を用いて水及び CO₂ を熱分解して合成ガスを製造し、液体燃料を製造する Sun to Liquid と呼ばれるプロジェクトを行っている²³⁾。高温の金属酸化物と水及び CO₂ を反応させ、酸化された金属酸化物は太陽熱によって還元され繰り返し使用可能とするシステムである。熱媒体として金属系微粒子を用いる CSP に関心を持つ各国の機関が集まり、Developing Particle-Based CSP Systems と呼ばれるプロジェクトが始まっている（日本から新潟大学が参加）¹⁹⁾。

(5) 科学技術的課題

■太陽光発電

太陽光発電システムに関する科学技術的課題は以下が考えられる。

- ・インフラ維持のスマート化に向けた、定期点検の延伸と現地作業の省力化、AI 利用によるアセットマネジメント、常時監視による不具合早期発見に関する技術の開発
- ・システムリスクの低減化に向けた、構造および土木リスクの評価（架台崩壊、土砂崩れなど）、既設システムのリスク低減（架台の補強、地盤のずれ監視）に関する技術の開発
- ・多様性に対応するシステム設計技術として、ドローン等によるデジタル測量、多種多様なシステムの発電電力量推定に関する研究開発
- ・ソフトコストの低減化に向けた、設計図面等の自動デジタル化ツール、足場レス施工技術、超軽量モジュール、AC モジュール、非接触給電技術とドローン施工の組み合わせなどの研究開発
- ・PV 搭載自動車の普及に向けた、高効率・高信頼性太陽電池セルおよびモジュール、太陽

- 電池の実装方法（曲面对応、色制御）、部分影等による損失抑制技術等の研究開発
- ・ ビックデータ、AI 活用による短時間予測の高精度化、数値予報モデルの改良やアンサンブル予報の利用による前日予測の高精度化、予測の大外れの検出技術などの研究開発
 - ・ 電力の需給調整（発電を調整して負荷と一致させる）における予測制御技術として、リアルタイムユニットコミットメント（発電の起動・停止計画）、系統の空き容量を活用するコネクト & マネージ、出力制御の最適配分、VPP（仮想発電所）、EV 連動、PMU（電力系統解析を行うフェーズ情報計測装置）によるリアルタイム系統状況把握などの技術開発
 - ・ 柔軟性を有する太陽光発電に向けた、スマートインバータの開発（調整力、電圧サポート、遠隔制御等）、集中管理制御なしで並列運転できる疑似慣性力を持つインバータなどの研究開発
 - ・ 人口減少にともなうインフラ縮退などを考慮した太陽光発電の導入形態に関するビジョン研究。また、これらに対応する需要と一体化した自立型太陽光発電システムの開発

■宇宙太陽光発電

マイクロ波帯での GaN 半導体の更なる開発、ビーム制御技術、無線電力伝送技術、宇宙構造物技術、宇宙環境物理学に関する早急な宇宙実証実験の実施などが課題である。

■太陽熱発電

CSP（＋蓄熱システム）の流れは世界的に高温化・高効率化にある。これに合わせた研究開発課題は以下の通りである。

- ・ 集光技術：既存技術の高効率・低コスト化で対応可能であると判断されるため、新しいシステムの研究の必要性は低い。
- ・ 集熱技術：大気中且つ高温下でレシーバ表面の太陽光の吸収率を高め、赤外放射を抑えるコーティングの研究開発が課題である。
- ・ 熱媒体：システムの高温化に適する熱媒体は、空気、高温用熔融塩、低融点金属、固体粒子にほぼ絞られている。これらを総合的に比較検討し、最適なものに関して研究する必要性が高い。
- ・ 蓄熱技術：高エネルギー密度・低コスト化の研究、特に潜熱蓄熱と化学蓄熱について新規材料の探索が課題である。化学蓄熱は熱輸送・長期蓄熱にも耐えられるが、現在主流の気固系では繰り返し耐久性の向上が求められる。他の反応系の探索も重要である。
- ・ 発電技術：比較的規模が小さい高温条件下での発電には、超超臨界蒸気タービンよりも超臨界 CO₂ タービンのほうが適しており、この分野の研究開発が課題である。欧米や韓国等では研究開発が活発に行われているが、日本では東芝による米国との共同開発、大学レベルでの小型タービン開発以外は行われていない。

共通の科学技術的課題として、デジタルツインを活用した大規模システムの包括的設計手法の確立が挙げられる。各発電システム全体及び構成部品のモデル構築が重要となる。

（6）その他の課題

■太陽光発電

国内では固定価格買取制度（FIT 法）により導入が急拡大し、設備設計や施工の不良、地域との軋轢などの課題が発生しており、研究機関や産業界が協力してこれらの解決に取り組む必要がある。FIT 法改正により他法令遵守、保守点検等の義務化を図り、電気事業法においても設計基準の適正化（JISC8955 および電技解釈改定）や使用前自己確認制度の導入など、適正化に向けて法整備が行われた。しかし、すでに導入されている既設案件の適正化が課題となっており、これらのリスク評価、是正・補強、不具合の早期発見などの致命的リスクの低減技術が求められる。また、行政等による保安のスマート化として、AI 技術の活用と法規制の緩和による合理化、ランニングコスト低減が期待される。

研究開発の体制として、国内では導入ビジネスにリソースが割かれたことから、システム技術に関する産業界の参入が少ない。今後は産学連携を強化する必要がある。特にビジネスがアセットマネジメントやエネルギーマネジメント、サービスなどのストックに対する産業への転換が必要であるため、ソフトコストの低減を含め、これらを支える技術の重要性が高まっている。

市場の 9 割を占める結晶 Si 系のトレンドはしばらく継続すると予想される。中国・台湾がシェアの 7 割以上を占めるが、国際競争力の観点では、多様化するシステム形態と連動したデバイス開発が必要である。例えば、車載や ZEB（Zero Energy Building）など面積が限られ、信頼性が求められるアプリケーションに対して、高効率且つ高信頼性の太陽電池を採用することなどが想定される。システムレベルからセルまでの一貫した研究開発を行い、標準化と連動して国際競争力を高めることが求められる。

国内のシステムコストの高止まりの一因は、商流における中間マージンがある。太陽電池と住宅等建物流通の標準化により、中小工務店、ビルダー向けの新築への導入拡大施策が肝要である。ZEB、ZEH（Zero Energy House）と連動した、屋根と太陽電池のサイズ、施工方法の標準化や設計支援ツールの技術開発とともに、中小工務店、ビルダー向けのアライアンスの形成などが求められる。

スマートグリッド等の電力系統へのインテグレーションについては、風力などの他の再生可能エネルギー、EV や定置用、系統用を含めた蓄電池、ヒートポンプなどのデマンドレスポンス技術などを含めたエネルギーシステムにおける研究開発が重要である。発電予測など太陽光発電に関する要素技術についても、電気工学、気象学、AI 技術などの融合研究の推進が期待される。

■宇宙太陽光発電

宇宙太陽光発電に向けた研究開発の途中で生まれる派生技術の応用研究推進や、スピンオフ技術の実用化が課題である。宇宙太陽光発電のような長期大規模システムの研究に取り組める腰をすえた研究環境の整備も必要と考える。

■太陽熱発電

太陽熱発電システムは、蓄熱により夜間発電も可能であり、この安定性という点も考慮に入れた評価指標構築とその発信が重要である。

CSP の国際的な研究プラットフォームに SolarPACES（Solar Power and Chemical Energy Systems）があるが、日本は未加入であり、これにより研究開発が大きく遅れている。

SolarPACES は国際エネルギー機関 IEA の技術協力プログラムであり、国単位での参加が必要である。現在、SolarPACES には 19 か国が参加しており、参加国間での共同研究開発を積極的に行っている。これらの成果は一部の表面的な部分しか開示されないため、非参加国は重要な研究成果を共有できない。これと同じような状況は同じ技術協力プログラムの一つであり、工業用熱供給や住宅での熱利用技術等に関わる SHC（Solar Heating and Cooling）にも当てはまる。技術協力プログラムへの参加費用は年間 1 万ユーロとのことであり、参加することが期待される。

（7）国際比較

〔太陽光発電〕⁴⁰⁾

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	● NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」：2030 年までに 7 円 /kWh の実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池セル・モジュールの開発を実施。 ● 長期信頼性を確保するため、産総研を中心にモジュールの耐久性向上、実環境下での出力測定や寿命予測、劣化要因と予防対策技術などの開発を進めている。
	応用研究・開発	○	→	● NEDO「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト」：BOS や維持管理の分野を対象に、発電コスト低減を目的に、現地のメンテナンスや遠隔監視技術などが産学連携により進められている。 ● NEDO「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト」：企業を中心に、低コストのリサイクル、撤去・回収技術等、使用済み PV システムの適正処分を実現する技術を開発・実証している。 ● NEDO「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」：系統連系技術は電力会社、大学を中心に出力制御や予測技術の検討が行われている。
米国	基礎研究	◎	↗	● 米国 DOE の SunShot 計画において、2030 年までに補助金なしで電力事業規模太陽光発電システムの平均 LCOE を 3 セント /kWh まで削減するという高い目標を掲げ、国立研究所（NREL、Sandia National Laboratory など）を中心に信頼性や評価技術を研究開発している。 ● DOE エネルギー高等研究計画局（ARPA-E）では、集光等を高度に組み入れた次世代高効率モジュール等の研究を推進している。
	応用研究・開発	○	→	● SunShot 計画の目標達成に向けて、市場障壁の撤廃、ハードウェア以外のコストの削減、技術革新等を産学連携で推進している。 ● 系統連系される発電量の正確な予測技術の開発、系統運用者や電力事業者が使用するエネルギー管理システムへの予測技術の組み込み等を推進しているほか、研究者と共同で太陽光発電の科学的知識基盤を構築するとともに、モジュールの性能、信用性、製造性を改善する新型商業用製品を製造する技術などを開発している。
欧州	基礎研究	◎	↗	【EU】 ● EU の 2014 ～ 2020 年までの 7 か年計画である科学技術計画 Horizon 2020 において、EU 諸国の大学、研究機関、企業等の連携の下、新概念のセルやシステムまでを含む多数の研究開発プロジェクトを推進している。 【ドイツ】 ● ドイツ連邦経済エネルギー省（BMWi）及びドイツ連邦教育科学技術省（BMBF）が、様々な側面から太陽光発電の研究開発を支援している。 ● TUV, Fraunhofer ISE を中心に品質管理及び寿命、分散配置型系統連系形システム及び独立形システム技術、BIPV、リサイクル、システムの環境的影響に関する研究等を推進している。 【フランス】 ● フランス国立太陽エネルギー研究所（INES）などが研究開発を行っているが、研究分野の大半は材料科学に関するものである。

欧州	応用研究・開発	○	↗	【EU】 ● Horizon 2020 では、基礎研究だけでなく、実用化を目指した応用研究・開発も実施されている。建物一体型（BIPV）の大規模普及に向けた技術、設置サイトに特化したシステムの生産性向上に関する技術、熱利用とのハイブリッド化技術、高度予測技術、低コスト化に向けたシステムマネジメント技術などの開発が行われている。 【ドイツ】 ● 上記の枠組のもと、エネルギーマネジメントや蓄電システムなどの系統連系形・独立形太陽光発電システム、ソリューションの経済的運用技術、新材料及び生産監視システムの導入など、効率的で費用効果の高い生産コンセプト、品質、信頼性、寿命に焦点を当てた新たなモジュール・コンセプトの導入などの応用研究開発も推進している。 【フランス】 ● INES などがシステム技術に関する研究（道路やドローンへの組み込み技術、AI 技術による不具合検知など）を行っている。 【スペイン、イタリア】 ● スペイン、イタリア等の大学、研究機関において研究開発が散見される。イタリア新技術・エネルギー・環境庁（ENEA）とエネルギーシステム研究会社（RSE）では、エネルギー貯蔵、BIPV に関するシステム技術開発を推進している。
中国	基礎研究	○	→	● 好調な PV 産業に支えられ、セルおよびモジュールの変換効率では世界記録を更新するなどの技術力を背景に、システムレベルでも積極的な基礎研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	● 多様なシステム技術について、実用化を目指した大規模なフィールド実証などが産学連携下で進められている。中国メーカーは欧州の研究機関との共同研究開発も数多く進めている。
韓国	基礎研究	△	→	● システム技術については、あまり研究開発例をみない
	応用研究・開発	△	→	● システム技術については、あまり研究開発例をみない
豪州	基礎研究	○	→	● オーストラリアではオーストラリア国立大（ANU）、ニューサウスウェルズ大学（UNSW）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）が中心となって研究開発が行われている。
	応用研究・開発	○	→	● オーストラリアではオーストラリア国立大（ANU）、ニューサウスウェルズ大学（UNSW）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）が中心となって研究開発が行われている。

〔宇宙太陽光発電〕

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	○	→	● マイクロ波無線電力伝送に関する SIP プロジェクトの始動、経産省宇宙太陽光発電プロジェクトの継続。また国内の学会活動の活発化と日本が牽引する国際学会活動の発展
	応用研究・開発	○	→	● マイクロ波無線電力伝送コンソーシアムの拡大 ⁴¹⁾ 。ITU における日本の積極的な関与。ただし議論が多いが商品化が他国に対して大幅に遅れ。
米国	基礎研究	△	→	● 2000 年代の NASA の宇宙開発の停滞と呼応した宇宙太陽光発電研究の停滞（現在の研究の主流は Naval Research Laboratory。宇宙太陽光発電に関する学会（IEEE WiSEE）の設立と運営。
	応用研究・開発	○	↗	● 民間企業主導の宇宙太陽光発電に関する研究投資。マイクロ波無線電力伝送のベンチャー企業主導の実用化の発展と米国内での周波数の認可（2017.12）。
欧州	基礎研究	×	↘	【EU】 ● 宇宙太陽光発電に関連するプロジェクトは 2010 年代以降あまり聞かず。 【英国】 ● 民間企業から宇宙太陽光発電の新提案あり。

欧州	応用研究・開発	△	↑	【EU】 ●マイクロ波無線電力伝送のうち、IoT用の技術に関してはEU中心のコンソーシアムの発足と実用化の進展。電動バス用無線充電器（電磁誘導）を全国展開で実用化。 【イタリア、ポルトガル、スペイン】 ●特に、マイクロ波無線電力伝送研究と実用化が活発。
中国	基礎研究	◎	↑	●中国宇宙庁を中心に宇宙太陽光発電の新提案あり。
	応用研究・開発	◎	↑	●マイクロ波無線電力伝送のみならず様々な宇宙技術の実証実験計画有。ITUでの議論にも参加。電動バス用無線充電器（電磁誘導）を全国展開で実用化。
韓国	基礎研究	○	→	●韓国宇宙庁 KERI が宇宙太陽光発電に意欲。
	応用研究・開発	○	↑	●ビーム型マイクロ波送電に関するプロジェクトが始動。様々な無線電力伝送（電磁誘導中心）に実用化が進む。
東南アジア	基礎研究	△	↑	●マレーシアの通信研究所が日本と連携してIoT用無線電力伝送用研究費を獲得（2018）。シンガポールで宇宙太陽光発電に関するシンポジウムを開催（2017）
	応用研究・開発	△	→	●無線電力伝送技術に興味。

〔太陽熱発電〕

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	○	↑	●新潟大学が中心となって集光太陽熱を利用した水熱分解による水素製造とそれに使用する金属酸化物に関する研究。 ●タワー用レシーバに適する高い光吸収性を有する被膜（ナノフロンティアテクノロジー社 ¹⁸⁾ 。パラボラトラフのような線集光用レシーバおよびそれに使用する選択吸収膜の開発 ¹⁹⁾ 。高温用熔融塩（塩化物、炭酸塩）の研究。
	応用研究・開発	△	→	●豊田自動織機はパラボラトラフのような線集光用レシーバを開発し、現在海外で評価中。
米国	基礎研究	◎	↑	●DOEがGen3 CSP (Generation 3 Concentrating Solar Power Systems) プロジェクトを実施中 ¹⁶⁾ 。NRELやSandia等の多くの国研と大学が参加。 ●プロジェクトはCSPの高温高効率化を目指し、700℃以上で使用する熱媒体の開発とそれを用いるシステムの研究が中心。熱媒体は高温熔融塩、固体微粒子、気体の3種類を並行して研究。 ●集光系はタワーでそれに係るシステムの研究を実施。蓄熱は、化学蓄熱、新規の蓄熱システムに関する基礎研究。
	応用研究・開発	◎	↑	●熔融塩タワーの低コスト化及び低コスト熔融塩トラフの開発。SkyFuel社は熔融塩トラフの既存の石炭火力発電所への導入。Hyperlight Energy社はプールに浮かべたプラスチックの円筒に反射鏡を張り付けた、低コストリニアフレネルコレクタの開発と実証試験を実施中。 ●ジョージア工科大は熔融スズを用いた稼働温度1500℃の高温CSPシステムとそれに係る要素機器の開発。 ●STEALSプロジェクトでは高温の太陽熱供給可能なタワー、金属系潜熱蓄熱と熱電変換を組み合わせた小型太陽熱発電システムの開発。
欧州	基礎研究	◎	↑	【EU】 ●NEXT-CSPプロジェクト：固体微粒子を熱媒/蓄熱媒体とし、800℃の運転を可能とするシステムを構築。 ●AMADEUSプロジェクト：1500℃前後の金属系潜熱蓄熱システムとTPV及び熱電子を用いた高効率発電技術 ¹⁷⁾ 。 ●Sun to Liquidプロジェクト：金属酸化物を用い、太陽熱を利用してCO ₂ と水から合成ガスを製造し、可搬性の液体燃料を作るCCUプロジェクト ²³⁾ 。 【英国】 ●英国では太陽熱発電に関する研究は一部の大学を除きやられていない。クランベリー大学では反射鏡並びにレシーバチューブガラス管のエロージョン・アブレーション特性に関する研究。

欧州	基礎研究	◎	↑	【ドイツ】 ●ドイツはスペインとともに EU の中で太陽熱研究の中心的存在。DLR と Fraunhofer 研究所が太陽熱に関する研究の中心となっている。CSP 及び太陽熱による燃料製造などにかかわる多くの分野で基礎研究を行っている。EU のプロジェクトにも多数参加している。 【フランス】 ●国立研究機関である CNRS やペルピニオン大学などで低コスト顕熱蓄熱材料の基礎研究。固体微粒子を使用するレシーバ、蓄熱システムに関する研究。太陽熱を利用した燃料製造に関する基礎研究等。 【スペイン】 ●国研である CIEMAT と CENER 並びに各大学、民間研究機関で基礎研究を行っている。 ●高温用溶融塩の研究、物性値向上を目指した分散系溶融塩の研究、蓄熱システム全般の基礎研究等多方面。 ●太陽熱利用燃料製造（Sun to Liquid プロジェクト）では小型のパイロットプラントを完成させ実験を行っている²³⁾。
	応用研究・開発	◎	↑	【EU】 ●MATS (Multipurpose Applications by Thermodynamic Solar) は、太陽熱発電、蒸発法の海水淡水化との組み合わせで、電力と水供給を目指すプロジェクト。エジプトのアレクサンドリア近辺にパイロットプラントを建設。 ●CoMETHy – solar steam reforming heated by solar salts at 550°C : 550°C の溶融塩トラフによる安定的な熱供給を利用したメタンの改質による水素製造を目指すもの。完成しているイタリアの溶融塩トラフ技術を用いたもので、パイロットスケールレベルにある。 ●MUSTEC - Market uptake of Solar Thermal Electricity : CSP の市場展開を促進するためのプロジェクト。 【ドイツ】 ●ドイツ独自に行っている研究・開発は、新しい概念の低コストヘリオスタットの開発。太陽熱で駆動するソーラガスタービン用レシーバの開発及びそのシステム開発。 ●太陽熱でガスタービンを駆動するソーラガスタービンにかかわるシステム開発、レシーバ開発等も行っている。 【フランス】 ●リニアフレネル型の開発を行っているメーカーが複数ある (CNIM、EUROMED、CEA)。国の補助金により国内にパイロット～商業規模のプラント建設を実施。 ●同技術を生かし、EU のプロジェクトとしてヨルダンにプラントを建設。 ●アスベストの高温ガラス化処理による熱衝撃に強い固体蓄熱材の製造。 【スペイン】 ●Abengoa Solar、SENER 等太陽熱にかかわる企業が多く、世界のプラントの半分以上はスペイン企業が係る。 ●プラントレベルの高効率化や低コスト化などは企業自体が実施するか、国研の CIEMAT などとの共同研究開発を行っている。なお、上述の EU プロジェクトの大部分にも参加し応用研究や開発を行っている。
中国	基礎研究	○	↑	●多方面の基礎研究を行っているが、先行する欧米の研究の後追いが多い。現状考えられる様々な熱媒体、集光系を用いたプラントを建設するための基礎研究を実施。
	応用研究・開発	◎	↑	●発電容量 50MW クラスの様々な方式の「実証プラント」を多数建設し、技術の向上を図っているが、欧米の CSP 先進国の後追いが多い。それを応用したプラントの建設も盛ん。熱媒体として低融点のシリコンオイルを用いたパラボラトラフ型プラントの建設等。
韓国	基礎研究	○	→	●金属酸化物の酸化還元を利用した水熱分解による水素製造。一部日本の新潟大学と共同研究。
	応用研究・開発	×	→	●空気を熱媒体としたタワー型発電システムではパイロットスケールの発電プラントを有する。

豪州	基礎研究	◎	↗	● オーストラリアは ASTRI (Australian Solar Thermal Research Institute) とよばれる研究組織を作り国研、大学等で総合的な CSP に関する研究を行っている。実施内容はヘリオスタットの低コスト化、レシーバの高効率化、新規高温蓄熱材料、潜熱蓄熱材料とシステム、超臨界 CO ₂ タービンの研究等。
	応用研究・開発	◎	↗	● Vast Solar 社は Na を熱媒とするタワー型プラントを開発し、実証運転を実施中。 ● Na 熱媒を用いるタワー型プラントの今後の展開としては、超臨界 CO ₂ タービンと組み合わせ安全で高性能なシステム開発を目指す。リニアフレネル型コレクタを用いた石炭火力発電所への熱供給などの実証がある。

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2) 「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) 資源エネルギー庁「第5次エネルギー基本計画」,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/ (2019年2月1日アクセス) .
- 2) 内閣府「Society 5.0」,
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html (2019年2月1日アクセス) .
- 3) 内閣府「エネルギー・環境イノベーション戦略 (NESTI2050)」,
<https://www8.cao.go.jp/cstp/nesti/gaiyo.pdf> (2019年2月1日アクセス) .
- 4) IEA PVPS Task 1, Snapshot of Global Photovoltaic Markets, 2018,
<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=266> (2019年2月1日アクセス) .
- 5) IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2017,
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf (2019年2月1日アクセス) .
- 6) 資源エネルギー庁「2030年エネルギーミックス必達のための対策～省エネ、再エネ等～」,
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/022/pdf/022_006.pdf (2019年2月1日アクセス) .
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「太陽光発電開発戦略 (NEDO PV challenges)」,
<https://www.nedo.go.jp/content/100575154.pdf> (2019年2月1日アクセス) .
- 8) U.S. Department of energy, “The SunShot Initiative,”
<https://www.energy.gov/eere/solar/sunshot-initiative> (2019年2月1日アクセス) .
- 9) Fraunhofer ISE, “Was Kostet Die Energiewende?,”
[https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/Energie-Rohstoffe/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11%20\(1\).pdf](https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/Energie-Rohstoffe/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11%20(1).pdf)

- (2019年2月1日アクセス)。
- 10) U.S. Department of energy, “Soft Costs,”
<https://www.energy.gov/eere/solar/soft-costs> (2019年2月1日アクセス)。
 - 11) Naoki Shinohara, “Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series),” ISBN 978-1-84821-605-1, (Great Britain and United States: ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., 2014).
 - 12) (中国語訳) 張超訳, Naoki Shinohara, “Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series),” ISBN 978-7-302-48696-1 (中国: 精華大学出版社, 2018).
 - 13) Naoki Shinohara ed., “Recent Wireless Power Transfer Technologies Via Radio Waves,” ISBN 978-879360-924-2, (EU: River Publishers, 2018).
 - 14) Naoki Shinohara ed., “Wireless Power Transfer: Theory, Technology, and Applications,” ISBN 978-178561-346-3 (UK: The Institution of Engineering and Technology, 2018).
 - 15) 吉田一雄, 児玉竜也, 郷右近展之『太陽熱発電・燃料化技術』(コロナ社, 2012).
 - 16) K. Tsuda, “Development of high absorption, high durability coatings for solar receivers in CSP plants,” SolarPACES 2017.
 - 17) Y. Okuhara, “Solar Selective Absorbers Based on Semiconducting beta-FeSi₂ for High Temperature Solar-Thermal Conversion,” SolarPACES 2017.
 - 18) J. Pye, “Optical and Thermal Performance of Bladed Receivers,” SolarPACES 2016.
 - 19) Hany Al-Ansary, “Overview of Worldwide Research Efforts on Developing Particle-Based CSP Systems,” SolarPACES 2017.
 - 20) A. Belén Hernández, “Parametric Analysis and Optimization of a Combined Latent-Sensible Packed Bed Energy Storage System,” SolarPACES 2017.
 - 21) M. Mehos, *et al.*, NREL/TP-5500-67464, 2017.
 - 22) EU, AMADEUS,
<http://www.amadeus-project.eu/> (2019年2月1日アクセス)。
 - 23) EU, SUN-to-LIQUID,
<http://www.sun-to-liquid.eu/> (2019年2月1日アクセス)。
 - 24) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書」, 2018, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100909.html (2019年2月1日アクセス)。
 - 25) J-Space Systems「SSPS 宇宙太陽光発電システム」, 平成21年度～平成26年度,
https://ssl.jspacesystems.or.jp/project_ssps/wp-content/uploads/sites/17/2016/06/160603_4.pdf (2019年2月1日アクセス)。
 - 26) J-Space Systems「SSPS 宇宙太陽光発電システム」, 平成26年度～平成28年度,
https://ssl.jspacesystems.or.jp/project_ssps/wp-content/uploads/sites/17/2016/06/ 平成26-28年度太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発 1.pdf (2019年2月1日アクセス)。
 - 27) J-Space Systems「SSPS 宇宙太陽光発電システム」, 平成29年度以降,
https://ssl.jspacesystems.or.jp/project_ssps/wp-content/uploads/sites/17/2017/04/ 平成29年度以降太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発 1.pdf (2019年2月1日アクセス)。
 - 28) John Mankins, “SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily

- Large PHased Array,”
https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/mankins_sps_alpha.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）。
- 29) Ian Cash, "CASSIOPeiA Solar Power Satellite," *2017 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*, 2017.
- 30) Xinbin Hou, "Space Solar Power Concepts and MR-SPS," *Proceedings of Space Solar Power Satellite (SSPS) Workshop 2017*, Daejeon, Korea.
- 31) Baoyan Duan, "On New Developments of Space Solar Power Satellite (SSPS) of China," *Proceedings of Asia Wireless Power Transfer Workshop (AWPTW 2017)*, Singapore.
- 32) J. Fisher, "Vast Solar' s Grid-Connected Pilot Plant: Modular Tower Technology with Liquid Sodium HTF," *SolarPACES 2016*.
- 33) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」, 2018,
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100101.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）。
- 34) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト」, 2018,
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100070.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）。
- 35) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト」, 2018,
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100071.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）。
- 36) 経済産業省「平成 29 年度新エネルギー等の保安規制高度化事業（電気施設保安技術高度化の評価・検証事業）報告書」, 2018,
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000007.pdf（2019 年 2 月 1 日アクセス）。
- 37) 科学技術振興機構 CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」, 2018,
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah24-1.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）。
- 38) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」, 2018,
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100069.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）。
- 39) ITU Report, ITU-R SM.2392-0, "Applications of wireless power transmission via radio frequency beam," <http://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2392>（2019 年 2 月 1 日アクセス）。
- 40) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「IEA PVPS レポート 世界の太陽光発電市場の導入量速報値に関する報告書 翻訳版」, 2018,
<http://www.nedo.go.jp/content/100785821.pdf>（2019 年 2 月 1 日アクセス）。
- 41) ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム WiPoT,
<http://www.wipot.jp/>（2019 年 2 月 1 日アクセス）。

2.6 風力発電

（1）研究開発領域の定義

風力発電に関する科学、技術、研究開発を記述する。風力発電は、風の運動エネルギーを風車（風力タービン）により回転力に変換し、歯車（増速機）などで増速した後、発電機により電力へ変換する発電方式である。設置する場所で陸上風力、洋上風力（浮体式、着床式）に分かれる。ここでは、風力発電に係る各要素技術、周辺技術、さらにシステム全体を最適化する基盤技術などを対象とする。

（2）キーワード

風力発電、洋上風力発電、浮体式、着床式、ダウンウィンド型風車、空中風車、運転保守、環境アセスメント、系統連系

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

風力発電は風の運動エネルギーの約 45% を電力に変換できる。経済的に大量導入可能なので、再生可能エネルギーの中では水力発電の次に大規模に利用されている。現代の大型発電風車は、主に揚力型、水平軸、Upwind（ロータをタワーの風上に配置）、プロペラ式 3 枚翼の特徴をもつ。風向に追従して首を振るヨー制御、強風時に翼のひねり角度を変えて風を受け流すピッチ制御、風速に合わせてロータの回転数を増減する可変速運転、の 3 つの制御を標準装備している。主軸系の構成は、ロータと発電機の間に歯車式の増速機構（増速機）を挟む方式が主流（約 80%）で、ロータに大直径の多極同期発電機を直結するギアレス方式が少数派（約 20%）である。これは数十年に渡って性能、強度、コストで淘汰されて進歩した結果であり、今後も大きくは変わらない。2 枚翼、Downwind（＋受動ヨー制御）のみが、まだ代替策として検討が続いている。

世界の風力発電は 2017 年末で累計 539GW（約 36 万台）、新規 52.5 GW（約 3 万台）に達している^{1) 2)}。日本は累計 3,399MW（2,225 台）、新規 169MW（77 台）となっており、世界の 0.6%（世界 19 位）、0.3%（同 23 位）である。年間電力供給に占める比率は、世界は 5%、EU は 11.6%、日本は 0.6% である。既に 10% を越える地域は 15 ヶ国（＋米国 14 州）に上り地球温暖化防止に大きく貢献している^{3) 4)}。年商は約 10 兆円、関連雇用も数百万人であり、産業効果（地域の経済と雇用への貢献）も大きい。特に洋上風力発電は、累計 18.8GW、新規 4.3GW/年と急成長中である¹⁾。毎年 1 ～ 2 兆円（数千億円 / 案件）が動く新産業として、各国と大手重電企業（GE、Siemens、三菱重工、日立製作所他）の注目を集めている。

[研究開発の動向]

風車は、有史以前から中近東で製粉に利用され、中世には地形が平坦で安定した偏西風が吹く欧州で、製粉、灌漑、製材など様々な動力源として活用されてきた。発電用の風車は今から 120 年前の 1897 年に英国と米国で独立して誕生した。1891 年にデンマークの Poul la Cour が揚力翼型と回転数調整装置を持つ、4 ～ 6 枚翼の水平軸風車を実用化し、20 ～ 30kW 級の風車が農村電化の独立電源として普及した。1941 ～ 1945 年の米国の Grandpa's Knob 風車

(1250kW) は、交流発電機を用いて世界で初めて送電網に連系した。デンマークでは la Cour の弟子の J Juul が 1947 年頃から風車の連系試験を始め、後継した Gedser 風車 (200kW) は 1957 ～ 1967 年の 10 年に渡って安定して運転された。この他にも 100kW 以上の風車の開発が各国で 10 件以上行われたが、風の挙動や疲労強度の知見が足りず、ほぼ全てが不成功に終わった。日本では 1938 ～ 60 年頃に山田基博氏が開発した木製 2、3 枚翼の風車 (200 ～ 300W) が 1 万台以上作られ、農村電化に役立った。しかし安価な火力発電による送電網の普及で、風力発電は下火になった。

現代風車は、オイルショック (1973 年と 1978 年) の石油代替電源ニーズの下で、無人運転を可能にする電子制御技術と、軽量高強度のガラス繊維強化プラスチック複合材料 (GFRP) の発達の恩恵を受け、実用化された。1980 年代にはデンマークを中心に、水平軸プロペラ式 3 枚翼鋼製モノポールタワー、ストール制御 (高風速時の流入角では失速が生じて定格出力以上の発電を防ぐ設計、翼はハブに固定)、軸系は増速機と籠型誘導発電機、プロペラの回転数は一定 (固定速) という安価に大量生産可能な設計 (デンマークモデル) が確立して普及した。

風車は経済性の追求から 1990 年代後半に急速に大型化して、2000 年頃にはロータ径 50m、定格出力 1MW を越えた。これに伴い、出力制御と強風時停止を確実に行うために、翼根部に旋回輪軸受を設置して翼のねじり角度で出力を制御するピッチ制御がストール制御にとって代わった。さらに電力変換装置 (インバータ / コンバータ) を介して連系することで、風速の強弱に合わせて回転数も増減する可変速運転 (瞬間的な風速変化による出力変動を平準化できる) も普及した。さらに 2010 年頃から瞬間的に系統電圧が低下しても風車の運転を継続する機能 (LVRT: Low Voltage Ride Through) も標準装備されている。

風力発電の普及に伴い、事業融資の際に風車の信頼性を担保するための認証制度が発達した。まずドイツの損害保険会社の Germanischer Lloyd (GL、今は DNV 傘下) が 1993 年にガイドラインを制定した。翌 1994 年には IEC-61400 (JIS C 1400 が対応) が国際標準として制定された。同標準では風の強弱に応じて風車をいくつかの種別に分類している。約 3 ～ 5 年毎に改訂が行われている。欧州主導だったため、台風や山岳 (複座地形) への対応が遅れていたが、1998 年のインドでのサイクロン被害と、2003 年の日本の沖縄宮古島での台風被害を契機に、日本の新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が「日本型風力発電のガイドライン」策定事業 (2005 ～ 2007 年度) を実施し、IEC 日本委員会から改訂を提案して、次の第 4 回改訂では台風に応じた基準風速 ($V_{ref\ Tropical}$) と山岳部の乱流に応じた高乱流 (A+) が追加される予定である (表 2.6-1)。

風力発電のコストは技術進歩と大量普及に伴い低下を続けている⁶⁾。今では好条件 (高風速、低労賃、広大な平地) の地域では、モロッコで 33 ドル / MWh (3.7 円 / kWh) など、火力発電よりも安くなる場合も生じている。1991 年に始まり、2002 年頃から大規模化 (例: デンマーク Horns Rev の 2MW × 80 台) した洋上風力発電 (着床式) でも、初期トラブルを克服して約 1GW/ 年の大量導入が始まった 2010 年頃から産業化が進み、2015 年以降の入札では洋上発電所端で 10 円 / kW を下回る事例も出てきている。

風力発電の技術開発の主な目的は立地拡大と経済性向上である。立地拡大では、まず陸上の低風速地域 (表 1 の Class III の平均風速 7.5m/s) 向け風車、具体的にはより長いブレード (ロータ径 100m 以上)、高高度タワー (ハブ高 100m 以上) が開発されて、広く普及した⁴⁾。

表2.6-1 IEC61400-1の第4版におけるWind Class5)

Class		I（高風速）	Ⅱ（中風速）	Ⅲ（低風速）	S（特注）
ハブ高さにおける 年平均風速 V_{ave}	(m/s)	10	8.5	7.5	設計者が 規定する (例：洋上で 年平均風速が Class Iを 越える)
基準風速 V_{ref}	(m/s)	50	42.5	37.5	
	Tropical (m/s) V_{refT}	57	57	57	
乱れ強度 I_{ref} (-)	A+	0.18（極めて強い 例：山岳）			
	A	0.16（乱れが強い 例：丘陵）			
	B	0.14（乱れは中間 例：平野）			
	C	0.12（乱れが弱い 例：洋上）			

ブレードの延伸は、先細形状（Slim blade）による荷重軽減、風上側に予め湾曲（Prebend）させた形状で風荷重によるタワーヒットを回避する、内部構造（Box girder）を軽量化、繊維の積層設計の最適化、翼製法の VarRTM 化（鋳型をシールして真空吸引しつつ樹脂を注入する手法）等により達成された。

高高度タワーの実現には共振回避と曲げモーメントに耐える基部強度が必要である。後者にはタワー基部の大直径化が望ましいが、輸送制約（4m を越すと歩道橋やトンネルを通れない）と両立させるために、種々の工夫（コンクリート製方式、トラス方式、円周分割方式、支線支持方式等）が行われている⁷⁾。

次の立地拡大の動きは洋上風力発電である。欧州の北海とバルト海は、氷河時代、陸地であったため、数十 km 沖合でも深さ 100m 未満である。陸上の適地に風車を立て尽くした欧州では、1991 年のデンマークの Vindeby（450kW × 5 台、老朽化で 2017 年に撤去）を嚆矢に、ドイツの West of Duddon Sands wind farm（2014 年 10 月運開、3.6MW × 108 台 = 389MW）など、大規模な洋上風力発電所が次々に建設されている。水深と海底地質に応じてタイプを使い分けているが、安価で施工性が良いモノパイル基礎が主流（80%以上）である³⁾。

洋上風力発電は、基礎と風車の据付に高価な建設専用船を使うため、陸上設置よりも工事費用が高い。建設専用船（Jack up vessel）は、海底まで脚を伸ばして船体を海面上に持ち上げ、波浪で揺れずにクレーン作業できる。建造費は約 200 億円、賃貸費は約 2 千万円 / 日である。定格出力の大きな風車を採用して設置台数（据付工事の工数）を削減するニーズが極めて強い。既にロータ径 164m、定格出力 9.5MW の風車（V164）が商用化されており、更に三菱 Vestas、SGRE（Siemens Gamesa）、Senvion 他の風車メーカーが 10 ～ 14MW 風車を開発中である。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

1) 着床式洋上風力発電の施工効率化やコストダウンに関する技術開発

下記技術が英国の研究機関 Carbon Trust の支援で実証研究が進み、実用化されている。

①ブイ上のドップラー風速計による洋上風速計速

- ・ 空中の塵や水滴の電波反射の波長変化から遠方の風速を計測できるドップラー風速計を、開

発海域の浮標（ブイ）に設置して、洋上風力サイトの現地風況を把握する。

②サクシヨンバケット（Suction Bucket）式の洋上風車基礎^{8) 9)}

- ・バケット内部を水流で攪拌しつつ、土砂を吸引することで基礎を砂中に埋設できる。高価な建設専用船によるハンマー打設不要、モノパイル基礎（30m 以上打設）より浅い約 10m の砂層でも風車を支持可能、撤去が容易、等の利点あり。

③タンク内爆発式（Blue Piling）のモノパイル基礎打設工法^{10) 11)}

- ・基礎の上部に半分強の水を入れたランクを被せ、その中でガス爆発させて持ち上げた水の落下時の力積でモノパイルを打設する工法。自動化（建設専門船不要）と静音性に優れ、基礎上面の打ち傷も防止できる利点がある。

2) 浮体式洋上風力発電の実証研究^{12) 13)}

- ・2009 年ノルウェーでの Statoil Hydro（現 Equinor）によるスパー型浮体の 2.3MW 風車×1 台を嚆矢に、ポルトガル、日本、英国、フランスで 2018 年末までに 10 台以上の実証運転中である（表 2.6-2）。各プロジェクトを表 2.6-3 に示す。
- ・1MW 以上の実証機レベルまで進んでいるのは、スパー型、バージ型、セミサブ型の 3 種類である。係留方式は懸垂式（Catenary）のみ実用化されており、緊張型（Tension Rig、浮体を小型化可能）はまだ研究段階である。現状では建設コストがまだ陸上の 3 倍以上（約 100 万円 /kW）であり、本格的な商用化にはコストを半減させる必要がある。

表2.6-2 浮体の形式と得失¹²⁾¹³⁾

タイプ	スパー型	バージ型	セミサブ型
構 造	細長く単純な形状	平底の荷船、舢舨（はしけ）の形状	半潜水型浮体形状
水 深	100 以上	100m 以浅	50 ～ 100m
重量とコスト	比較的安価	比較的高い	比較的高い
風車の据付作業（施工性）	沖合で作業（高価な起重機船が必要）	埠頭で艀装（工事容易）	埠頭で艀装（工事容易）
特 徴	風車のピッチ制御の工夫が必要	開口部の内外水位差で波浪荷重を減衰	安定性が良い
代表的なプロジェクト例	Hywind GotoFOWT	Floatgen	WindFloat FukushimaFORWARD

3) 風車の運転保守に関する技術開発

①風車の寿命診断システム（CMS:Condition Monitoring System）

- ・主軸受、増速機、発電機、等の主要機器に種々のセンサーを設置して常時監視することで、重大故障の発生を事前に検知するシステムが開発、実用化されている（図 2.6-1）¹⁴⁾。

②運転データの Big Data 解析による風車の運転の最適化

- ・大手風車メーカー（Vestas、SGRE、GE、Enercon 等）は、10 年以上前から自社の既設風車数千～数万台の風車の運転データを遠隔監視システム（Scada）で自社サーバに蓄積している。数十年分の Big Data をスーパーコンピュータで人工知能（AI）解析することで、設置サイト毎の運転方法の最適化や、故障予知、寿命延長運転の提案等が可能になっている。

③風車の運転保守へのドローンの活用

- ・風車の点検や保守作業へのドローンの活用が広がりつつある。Aerones 社等は、寒冷地の風車で、風車停止中に、ドローンから温水を噴射してブレードに付着した氷雪を除去する。

④洋上風車へのアクセス方法の改良

- ・Ampelmann 社等は、油圧シリンダーで上下動を補償することで、波の高い荒天時でも確実に作業員が洋上風車に上陸できる渡船橋を開発実用化している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

1) 洋上風力関連

- ・EU では Offshore Wind Accelerator という統合的な洋上風力の技術開発プログラムが運用されている¹⁶⁾。特に技術的成熟度（TRL：Technology Readiness Level）が高く、実用化が近い開発（例：上記「新展開・技術トピックス」の¹⁾ ②③）は英国研究組織 Carbon Trust を中心に実証試験が行われている¹¹⁾。
- ・日本では風力発電の技術開発は、NEDO を中心に行われている^{9) 14)}。

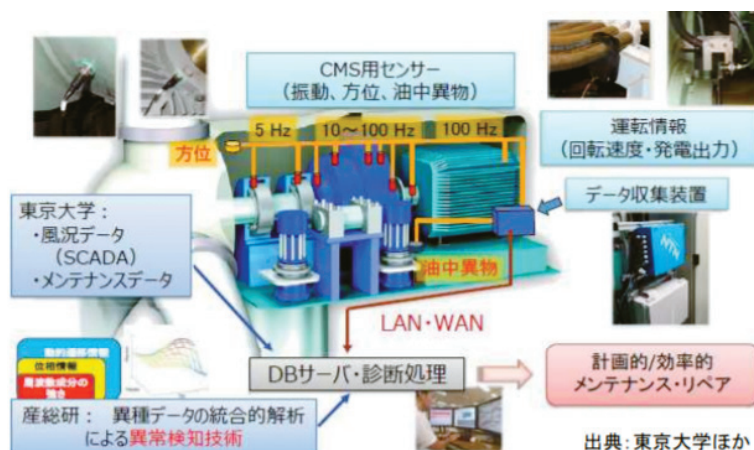


図2.6-1 風車のスマートメンテナンスシステム(NEDOの開発例)¹⁴⁾

2) 浮体式洋上風力発電プロジェクト

- ・世界の主な浮体式洋上風力発電プロジェクトの実績と計画を表 2.6-3 に示す。

表2.6-3 各国の浮体式洋上風力発電プロジェクト（2018年9月時点、JWPA調べ）

運開	国名	実施主体（Project 名）	風車	浮体
2009	ノルウェー	ノルウェー Statoil 社 (Hywind)	2.3MW	スパー型
2011 ～ 16	ポルトガル	米国 Principal Power 社 (WindFloat)	2MW	セミサブ型
2013	日本 (長崎)	環境省→五島市 / 戸田建設 (GOTO FOWT)	2MW	スパー型
2013 2016 2017	日本 (福島)	経産省 / 丸紅 (FukushimaFORWARD)	2MW 7MW 5MW	セミサブ型 セミサブ型 改良スパー型

2017	英国 (スコットランド)	ノルウェー Statoil 社 (Hywind Scotland)	6MW × 5 基	スパー型
2018	フランス (大西洋岸)	フランス IDEOL 社 (Floatgen)	2MW	セミサブ型
2018	日本 (北九州)	NEDO/ 丸紅、日立造船、グローバル (NEDO 次世代洋上風力開発)	3MW	バージ型 (Moonpool)
建造中	英国	Kincardine Offshore (Scottish Offshore Demonstration)	2MW × 6 台 + 8.4MW	セミサブ型
建造中	ポルトガル	WindPlus/ スペイン EDP、 三菱商事、千代田化工他 (WindFloat Atlantic)	8.4MW × 3 台	セミサブ型
建造着手	日本	戸田建設 (五島市沖洋上風力発電事業)	2.1MW × 8 台 + 5.2MW	スパー型
計画中	ノルウェー	ノルウェー Equinor、出光興産 (Hywind Tampen)	8MW × 11 台	スパー型

(5) 科学技術的課題

立地拡大と経済性向上は引き続いて重要課題である。

立地拡大では、Google 出資の Makani Power（グライダー式）とソフトバンク出資の Altaeros（気球式）の空中風車開発が数百 kW 級の実証試験の段階にある。既に大量の変動電源（風力と太陽光が電力の 15% 以上を供給）が導入されている欧州では、余剰電力の安価な処理法として、揚水発電、コジェネ発電所の発電比率変更、熔融塩による蓄熱、水素製造（天然ガス配管への混入やアンモニア製造）等が活用されてきている。蓄電池は高価なため優先順位は低い。南米、アフリカ、中近東、東南アジア等の新興市場は既存の欧州工場から遠く、輸送費削減と地元経済雇用のニーズから、現地工場開設が求められる（LCR:Local contents requirement）。タワー工場自体を移設可能なパッケージ化して現地生産する例（ドイツの建設大手 Max Bögl がタイに設置）も出てきている¹⁷⁾。

経済性向上では、15MW を越える超大型洋上風車も開発が検討されているが、大型化に伴って開発費が高騰（10MW 級で約 500 億円）しているため、開発投資を回収できるだけの市場の確保と、開発投資を負担する大企業への風車メーカ集約（寡占化）の課題が顕在化している。技術的には、ダウンウィンド（タワーの風下でロータを回転、風荷重で翼が押されてもタワーに当たらないので軽量化可能）、2 枚翼（例：表 2 の中央、コンパクトで輸送と建設に有利）、分割翼（輸送制約緩和）、超電導発電機（磁力が強いので発電機を小型化可能）等が一部の風車メーカで商用化され、実機レベルの試作機建設が行われている。欧州の着床式の洋上風力発電では、風況調査、機器の製造、輸送、建設、その後の運転保守まで、据付精度向上による Transition piece 不要工法、タワー一体輸送据付による建設スピードアップ、双胴船式の高速アクセス船、等、サプライヤーチェーン全体で多様かつ網羅的なコスト削減が進められている。その結果、欧州洋上風力の発電原価（洋上発電所端）は 10 円 /kWh 以下にまで下がっている。

国の主力電源として位置づけられた再生可能エネルギー特に風力発電は、今後さらに導入が進むと予想される。生涯発電コスト（LCOE）の低減が最重要課題で、風車機器単体、関連施設での発電コスト低減が必須となっている。稼働率の向上、発電ロス低減、翼やパワートレイン等などの性能向上や長期信頼性確保、保守費削減などが課題である。

洋上風車ではこれらに加えて、潮力、波力に対する海中基礎強度検討、送電系統最適化、設

置コスト低減、メンテナンス性の向上、長期保守に必要な運転情報・機器診断技術、また大型海上クレーンの使用を最小とする機器構造・保守技術の開発などが課題である。

課題克服のため、短期的には、稼働率向上のための予防保全技術、長期保守に必要な運転情報・機器診断技術、翼やパワートレイン等の性能・品質向上及び長期信頼性確保、保守性の向上と保守費削減、中長期的には、大型部位の長期信頼性確保の為に負荷制御や翼構造素材の開発、高圧送電を含む送電系統最適化、安価な洋上構造物（浮体式、着床式）の開発などが求められる。

現在、大規模な風力発電システムの設計は実証試験に依存しているが、今後のシステム大型化に伴い、科学技術的課題として、デジタルツイン（実用機器で起こる実現象を事前に正確に予想できるような解析手段）を活用した大規模風力発電システムの包括的設計手法の確立が挙げられる。風力発電システム全体及び構成部品のモデル構築が重要となる。

（6）その他の課題

欧州は、EU 司令で各国に再生可能エネルギー大量導入を各国に義務付けし、100GW 規模の壮大な導入目標を掲げて、数十年将来を見据えて一貫して総合的な産業育成政策をとっている。これが長期安定した大市場を生み、分厚い産業基盤の形成に成功している。世界的には、産業界の寡占化が進んでいる。

一方、日本は、風力発電の将来の導入目標は 2030 年に 10GW（2017 年末で累計 3.4GW、新規は約 500MW/ 年、世界市場の 1% 未満）、電力供給の 1.7% と小さい。法制面でも多くの規制（環境アセスメント、系統連系）や不足（一般海域での洋上風力）が残されており、国内の風力開発は事業リスクが高い状況が続いている。このため関連企業の開発投資や大学における人材育成も小規模に留まっており、研究開発を支える産業と人材の層が薄い。風力発電の本格的な発展のためには、国による積極的な大量導入計画の制定と、一貫性のある産業育成政策が求められる。

洋上風車に関しては、送電網や蓄電、水素などとの連携を見据えた再生可能エネルギーの電力運用システムの整備、洋上風車の建設やメンテナンスのための港湾基地の整備や一般海洋域での再エネ発電利用促進法案の整備、欧州に比べて高額な輸送・建設費用の低減、事業者が計画から運用までのリードタイムを短縮できるような省庁間の垣根を越えた関連法規の整備や規制緩和などの取り組みが必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	● NEDO「風力発電高度実用化研究開発」で大型軸受の故障予測の CMS (Condition Monitoring System) の開発を支援。 ● 台風や冬期雷といった東アジア特有の気象現象に対しては、日本のアカデミアによるガイドラインや標準の制定で世界を主導し、国内の産業競争力向上に貢献の可能性あり。
	応用研究・開発	△	→	● NEDO が日本の気候風土に合致した風力発電の発電量予測システムの実用化研究を実施中。 ● NEDO が北九州市沖で浮体式洋上風力発電のコスト低減を狙った新プロジェクトを実施中。

米国	基礎研究	△	↘	●エネルギー省（DOE）が、2015年に、2050年までの風力発電の見通しに関する「Wind Vision」長期計画を発表。電源構成比率の目標として、2020年までに10%、2030年までに20%、2050年までに35%を掲げている。目標達成のため、陸上及び洋上の風力ポテンシャルを精緻に測定・予測する基礎研究や、洋上風力発電の配置・運転の最適化に関する基礎研究などに取り組んでいる。
	応用研究・開発	×	↘	●トランプ大統領はDOEの再生可能エネルギー関連予算を大幅に削減している。
欧州	基礎研究	◎	→	【EU】 ●大学・公立研究所の連携が進んでいる。公的研究プログラムも多い。 ●洋上用大型風車開発では、2006～11年のUpWind研究に続いて、翼開発のODB（Offshore Wind Demonstration Blade Project） ¹⁸⁾ 、耐エロージョンのBeLeB研究 ¹⁹⁾ 等が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	【英国】 ●Offshore Wind Accelatorを中心に英国Carbon Trust等による洋上風力発電のコスト低減に向けた技術開発・実証研究が活発に行われている。 【ドイツ】 ●ドイツを中心に、Class IIIの低風速地域向けのロータ径とハブ高の大きい高性能風車が大量に普及している。
欧州	応用研究・開発	◎	→	【フランス】 ●フランスIDEOL、ノルウェーEquinor等による複数の浮体式洋上風力実証プロジェクトの建設が進んでいる。
中国	基礎研究	△	→	●中国風車メーカーの大半は、欧米系の風車メーカー・設計コンサル会社からの技術供与を受けて風車製造に参入。自主開発は稀で知財権も軽視。 ●Goldwindは独風車メーカーVensysを買収して海外進出の知財権をクリア。
	応用研究・開発	△	→	●2011年頃から中国政府は風車メーカーの国際競争力強化に向けて、2.5MW以上の大型化とLVRT（Low Voltage Ride Through）装備を政策誘導。
韓国	基礎研究	×	↘	●不況で風力発電へのモチベーションが低下。撤退した企業が多い。
	応用研究・開発	△	→	●済州島で斗山重工業（Doosan Heavy）の3～5MW風車による着床式洋上風力の実証プロジェクトが運転中である。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) Global Wind Energy Council (GWEC), "Global Wind Report 2017," 2018年4月, <http://gwec.net/cost-competitiveness-puts-wind-in-front/> (2019年2月1日アクセス)。
- 2) BTM Consult ApS / Navigant Consulting, Inc., World Wind Energy Market Update 1997-2015.
- 3) WindEurope, "Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2017," 2018年2月, <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope->

- Annual-Offshore-Statistics-2017.pdf（2019年2月1日アクセス）。
- 4) U.S. DOE, ” 2017 Wind Technologies Market Report,” 2018年8月,
<https://www.energy.gov/eere/wind/downloads/2017-wind-technologies-market-report>
（2019年2月1日アクセス）。
 - 5) IEC61400-1 4th Edition の FDIS 原稿。
 - 6) IRENA, ” Renewable Energy Auctions: Analysing 2016 Executive Summary,” 2017年1月24日,
http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REAuctions_summary_2017.pdf（2019年2月1日アクセス）。
 - 7) ” Sky is the Limit – 维斯塔斯高塔筒技术,” China Wind Power 2017 での Vestas 発表、2017年10月。
 - 8) 日立造船株式会社「洋上風力発電施設に「サクシオンバケット基礎工法」適用への取り組み」,
<http://www.hitachizosen.co.jp/release/2018/02/002975.html>（2019年2月1日アクセス）。
 - 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「洋上風力発電の低コスト化に向けた新たな技術開発に着手」, 2018年9月10日,
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101019.html（2019年2月1日アクセス）。
 - 10) Fistuca, “Blue Piling Technology,”
<https://fistuca.com/blue-piling-technology/technology/>（2019年2月1日アクセス）。
 - 11) Carbon Trust, “Carbon Trust Offshore Wind Accelerator launches new project to reduce costs and underwater noise in offshore wind construction,” 2018年3月13日,
<https://www.carbontrust.com/news/2018/03/offshore-wind-accelerator-blue-pilot/>（2019年2月1日アクセス）。
 - 12) A. Henderson et al., “Floating Support Structures Enabling New Markets for Offshore Wind Energy,” EWEC Conference 2009, Marseille, France.
 - 13) Carbon Trust, “Floating Offshore Wind: Market and Technology Review,” Prepared for the Scottish Government, 2015年6月,
<https://www.carbontrust.com/media/670664/floating-offshore-wind-market-technologyreview.pdf>（2019年2月1日アクセス）。
 - 14) 伊藤正治「風力発電技術研究開発に係る NEDO の取り組み」, 平成 27 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会, 2015年10月30日,
<http://www.nedo.go.jp/content/100778423.pdf>（2019年2月1日アクセス）。
 - 15) Robin Whitlock, ” Aerones develops de-icing and cleaning drone for wind turbines,” Renewable Energy Magazine, 2018年3月22日,
<https://www.renewableenergymagazine.com/wind/aerones-develop-deicing-andcleaning-drone-for-20180322>（2019年2月1日アクセス）。
 - 16) Carbon Trust, “The Offshore Wind Accelerator,”
<https://www.carbontrust.com/offshore-wind/owa/>（2019年2月1日アクセス）。
 - 17) Max Bögl, “Use of Wind Power in Thailand: Mobile factory for international markets,” 2017年,
<https://www.max-boegl.de/en/news/use-of-wind-power-in-thailand>（2019年2月1日ア

クセス）。

- 18) ODB: The Offshore Wind Demonstration Blade Project,
<http://odb-project.com/our-work/>（2019年2月1日アクセス）。
- 19) BeLeb: Development of a method for determining the service life of rotor blade coatings,
<https://www.iwes.fraunhofer.de/en/research-projects/current-projects/beleb.html>（2019年2月1日アクセス） /
https://www.iwes.fraunhofer.de/en/press---media/archiv_2017/effective-prevention-of-rain-erosion-on-rotor-blades.html（2019年2月1日アクセス）。

2.7 バイオマス利用

（1）研究開発領域の定義

バイオマス利用に関する科学、技術、研究開発を記述する。

ここではバイオマスを燃料や電力等の二次エネルギーに利用する技術とシステム技術、バイオマスから複数形態のエネルギーや他製品を生産するシステム技術（バイオリファイナリー）を対象とする。

（2）キーワード

非食用バイオマス、第二世代バイオ燃料、第三世代バイオ燃料、バイオマス発電、バイオガス製造、バイオマスコジェネ・トリジェネ、トレファクション（半炭化）、BECCS（Biomass Energy CO₂ Capture and Storage）、CCU（CO₂ Capture and Utilization）、

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

バイオマスは、食料と競合せず持続可能な生産が可能であることが必須条件となるため量的な制約はあるものの、再生可能エネルギーの中で唯一の炭化水素資源であり、かつ石炭、石油、天然ガスや水素、ならびに化学品原料等への転換も可能であることから、貴重な資源として有効利用が図られている。また、再生可能エネルギーの中でベース電源的な役割を果たせるのは大型水力や地熱発電であるが、今後すぐに普及拡大が見込まれないため、バイオマスは天候等によって変動する太陽光や風力発電の平準化のための補助的なベース電源の役割を果たすことも期待されている。さらに、2050年の炭酸ガス削減80%に向けて石炭火力への混焼やIGCC（ガス化複合（ガスタービン、スチームタービン）発電）、IGFC（ガス化トリプル（ガス・スチームタービン、燃料電池）サイクル）への導入によって化石資源代替を図っていく上でも、バイオマスの役割は大きいと考えられる。特に、石炭火力でのCCS及びCCUによるCO₂有効利用技術に加えて、BECCSによってネガティブエミッションを達成することも重要であり、その実現のためには大規模な植林や農業残渣等の未利用バイオマス資源を有効利用することによって、食料と競合せず、かつ持続可能なバイオマス資源の生産サイクルを構築することが求められている。

さらに、熱電併給のコジェネだけでなく、バイオガス（水素を含む）やバイオケミカル併産型のトリジェネレーション型のバイオリファイナリープロセスの研究開発も展開されている。

[研究開発の動向]

食料と競合しないリグノセルロース系バイオマスから自動車用燃料用の第2世代バイオ燃料（エタノール、BDF（Bio Diesel Fuel）やガス化経由のBTL（Biomass to liquid）、ドロップイン型バイオ燃料を含む）製造技術に加えて、次世代のジェット燃料製造を目指した藻類由来油等第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。また、2012年7月の再生可能エネルギー固定価格買い取り制度（FIT）導入により、種々のバイオマスを燃焼による発電だけでなく、熱分解ガス化や嫌気性メタン発酵による熱電併給（コジェネ）型の利用技術の実証・実用化が促進されている。同時に、石炭火力発電混焼用のバイオマスのトレファクション：

半炭化技術やペレット製造プロセス（バイオマス専焼用も含む）の実証・実用化も進んでいる。この中でバイオマスガス化は学術研究が多く、2017-18の1年間で1200報を超える論文が世界中で出版され、180件を超える特許が出された。最多は中国（330報）、次いで米国（110報）、イタリア（80報）であった。

さらに、CCS（CO₂ 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）やCCU（CO₂ Capture and Utilization）、ならびにバイオケミカル併産型のバイオリファイナリーへの展開も図られている。

REN21（21世紀のための自然エネルギー政策ネットワーク。自然エネルギーの促進を図るために政府機関、国際機関、NGO、産業界、地方自治体、研究機関など各ステークホルダーの考えを共有し、活動を奨励しようとする世界規模の政策ネットワーク。2004年設立、本部はフランスのパリ）が発表したエネルギー自然エネルギー世界白書2018¹⁾によると、2017年の再生可能エネルギー（大型水力を含む）は世界の電力供給の約25%を賄っており、そのうちバイオマスの占める割合は5.6%程度（全体では1.4%）に微増していることが報告されている。バイオマスについては、熱利用や輸送用燃料や他の化学原料等としての用途開発が進んでいる。ガソリン代替用のバイオエタノールは微増（約1.06億kL）で、軽油代替用のFAME バイオディーゼルも3100万kLで横ばい、水素化植物油（HVO）は650万kLで漸増している状況であるが^{2, 3)}、これは原油等の化石燃料価格が比較的安定していることも一因であろう。日本でも、2011年の東日本大震災と2012年のFIT導入に伴い、バイオマス利用が発電にシフトしており^{4, 5)}、運輸用のバイオ燃料を含む熱利用が停滞気味であり、第三世代のバイオジェット燃料製造技術、バイオ水素やケミカル併産型のバイオリファイナリープロセスの研究開発へシフトしている状況である^{6, 7)}。

バイオマスのエネルギーとしての用途拡大のためには、熱利用による化石資源代替が重要であるが、これも原油等の化石燃料価格の低価格安定傾向のため伸び悩んでいる状況である。しかしながら、2015年のパリ協定発効に伴って、2050年に向けて世界的に大幅な炭酸ガス削減が求められているため、化石資源の代替に効果的なバイオマスを主とした自然エネルギー熱利用への支援策やインセンティブ政策を打ち出すことが喫緊の課題となっている。例えば、World Bioenergy Association（WBA）等は、バイオエネルギーへの安定的な投資環境の整備のため、今後の化石資源に対する統一的なカーボンプライシングの導入を求めている^{1, 2, 5)}。EUでは2018年1月に可決された再生可能エネルギー新指令（REDII）で再生可能エネルギー熱の取り扱いが重要視されているが、バイオマス以外の風力や太陽光エネルギー等の変動を吸収できるヒートポンプ技術等が開発されており、地域熱供給網における供給温度が低温化していることから、熱源としてヒートポンプや大規模な太陽熱集熱器を採用する事例が見られている^{1, 2, 5)}。

発電市場の世界的な傾向では、これまでの石炭火力へのバイオマス混焼に加えて、大規模な石炭火力発電所でバイオマスへの燃料転換事例が増えている^{1, 2, 5)}。イギリスのDrax発電所やカナダのOntario発電所では100%バイオマス燃料への転換が実現されている。他にも、ガス化発電分野で石炭や天然ガスを木質バイオマスに転換する事例も見られている。特に、デンマークのオーステッド社が2017年2月に2023年までに石炭使用を停止し、自然エネルギー電力の増大を発表し、石炭火力発電所でのバイオマス転換を推進している。デンマークの石炭火力発電所は熱電併給プラントであるため、地域の熱需要に合わせて発電所の出力を調整することも有利な点であることから、より効率の良いエネルギー需給システムが構築されてい

ば既設の石炭火力発電所を再利用することも期待されている。このような状況の下で日本でも、国内外のバイオマスのトレファクション（半炭化）技術の開発によって、主として石炭火力での混焼率の向上を目指している。

上述したような大規模な石炭火力発電所におけるバイオマス転換が拡大すると、木質バイオマス需要が急激に増大するため、木質バイオマス等の持続可能性基準の導入をセットで実施しなければならない^{1, 2)}。これは、将来的に利用可能なバイオマス資源の供給不足を招くことにもつながることが危惧されている。また、ドイツでは以前の全量買い取りが保証されていた時と制度が変わり、自ら売電することが求められるようになり、小規模な発電事業者は需要家の電力需要を束ねて効果的な販売を行うアグリゲーターを介して VPP（Virtual Power Plant）を構築して売電を行うようになってきている。ドイツでは、約 1000 のバイオガスプラントと契約し、変動する電力需要に合わせて稼働割合を調整しながら対価を得ている会社もある^{1, 2)}。このような場合は、出力調整が容易なバイオガスによるガスエンジン発電が主となっているが、木質バイオマス発電プラントも調整力等の条件を満たせば参入可能であり、将来のバイオエネルギー発電の導入拡大モデルになると期待される。

アジアでは、日本や韓国のように海外の化石資源依存度が高い国では、再生可能エネルギーによる発電割合を大きくし、炭酸ガス削減を図るため木質ペレット等によるバイオマス発電が増大しているが、国産の木質バイオマス資源だけでは賄いきれないことから、東南アジアや北米等からの木質ペレットの輸入に頼らざるを得ない状況である⁸⁾。一方、中国では、国内の農林バイオマスによる直接燃焼発電とごみ焼却発電が 9 割以上を占めているが、最近ではごみ焼却発電の割合が大きくなってきている⁹⁾。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

バイオエネルギーの将来展開を考える上で、2017 年に IEA 等の国際機関から重要なレポートが公表されており、IEA は 5 年ぶりに **Technology Roadmap** を発表し、熱と電力に加えて輸送部門も含めた総合的な内容となっている³⁾。特に、地球温暖化防止に向けた 2℃シナリオと整合する量的な見通しを示している。具体的には、バイオエネルギーには他の自然エネルギーに対応できない輸送用燃料や産業用の熱利用の増大が今後見込まれており、太陽光や風力等の変動しやすい自然エネルギーを補完する役割が重要視されている。欧州では、バイオマスの熱利用に対してインセンティブを付与する熱 FIT も導入されている。自然エネルギー財団がこのような国際的な動向をまとめて、日本のバイオエネルギー戦略の再考に関するレポートが出されている⁵⁾。

また、2050 年に向けた脱炭素化の促進に向けて、世界的に石油を主体とする化石資源由来のプラスチックや化学原料等をバイオマス由来に転換する動きも加速されつつある。その中で、**Bioeconomy** という新しいビジョンに基づいて、バイオマスをエネルギーだけでなくマテリアルとして積極的に利用することによって農地・森林等の適切な管理を前提として生態系の炭素固定を加速し^{10)・12)}、バイオマス由来の CO₂ 回収（BECCS）も促進するネガティブエミッションを実現するコンセプトが示されている。

さらに、持続可能なバイオマス利活用の国際的動向として、輸入バイオマスのトレーサビリティが重要視されてきている。特に、日本では、FIT 制度導入に伴って海外からの木質チップ・

ペレットやPKS（輸入ヤシ殻）等のバイオマスの輸入が急拡大しており、FITの対象としてディーゼル発電用にパーム油までも輸入する動きがあり、日本に対する批判にもなっている。木質バイオマスについては、FSC®等の森林認証によって、違法伐採木材をFITの対象としないように、所謂「合法木材」を燃料とするバイオマス発電をFITの条件としている。しかしながら、今後急速に木質バイオマスの輸入が拡大すると、ベトナム、インドネシア等の東南アジア諸国で、持続可能な伐採・植林のサイクルが保証されているかどうかを事前に確認する必要があると考えられる。また、東南アジア等で大量に副生しながら未利用の農業残渣を有効利用することによって化石資源代替可能なバイオ燃料を効率良く生産し¹¹⁾、廃棄物系バイオマスからの環境調和型・ゼロエミッションのバイオエネルギーを併産するエコシステムの重要性も指摘されている¹²⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

バイオマスは、量的な制約はあるものの、地熱発電や水力等のベースロード電源を担える再生可能エネルギーと同様に補助的なベースロード電源やエネルギーとして石油や石炭、天然ガス等の化石資源を直接的に代替し、温暖化防止に貢献できる役割を果たすことができるので、NEDOでは脱炭素社会を見据えたバイオマスエネルギー利活用プロジェクトも公募されている。また、バイオマスは発電だけでなく、運輸用燃料を含めた熱利用、バイオガス（メタン、水素）製造、生分解性プラスチック等の原料としてのエネルギー、マテリアル利用への展開が期待されており、特に木質バイオマスの成分分離技術の高度化、所謂バイオリファイナリーによるセルロースナノファイバーやヘミセルロースやリグニン由来物質からのケミカル製造プロセスの実証・実用化プロジェクトが推進されている。

さらに、種々のリグノセルロースバイオマスや微細藻類由来の機能性・健康食品や医薬品原料としての用途開発も図られている。バイオマス資源は、元来木材や食料としての利用が本筋であり、その高付加価値利用を図ることによって、生ごみや畜産・農業系の廃棄物系バイオマスを含めて総合的に熱電供給やマテリアル利用することが環境保全的にも経済的にも優位であると考えられる。

米国DOE（エネルギー省）は、2018年9月、バイオエネルギー変換、ドロップインバイオ燃料やこれに関連したエネルギー作物の低コスト生産研究などに8000万ドルを支出することを発表した¹³⁾。Neste Oil社はバイオ燃料に関してシンガポールへ重点投資を行い、現在260万トンのバイオディーゼル油の生産能力を、2022年に100万トン拡張する¹⁴⁾。他に同社はロッテルダムで100万トン、フィンランドのポルヴォーで100万トンのバイオ燃料を生産している。これらによりバイोजェット燃料や化学品原料油を生産する。また同社とClariantは持続可能な化学品材料を共同で開発することに合意し、家具、スポーツ用品、衛生用品、エレクトロニクス、自動車などのプラスチック材料やコーティング材料に用いられる添加剤溶液をバイオベース原料とすることで、石油の使用量とGHGの削減を目指す¹⁵⁾。GRE2018国際会議・バイオマスセッション（パシフィコ横浜）で、ドイツのDr. Andrea Kruseは、農業残渣等の未利用バイオマスの有効利用の一つとして、水熱前処理による成分分離や引き続く化学反応や炭化処理等を組み合わせることにより、ヒドロキシメチルフルフラール（HMF）やセルロースナノファイバー、リグニン誘導体等の有用物質を回収・製造でき、水熱炭化処理を組み合わせると先進的なバイオ炭素材料を製造可能であることを報告している¹⁶⁾。農業残渣等の未利用

バイオマスは熱分解・ガス化によるコジェネレーションやバイオエタノール等の原料としても有効利用できるが、水熱処理や化学反応・炭化反応を組み合わせることにより、HMFや炭素材料等の有用物質のコプロダクション型アグロファクトリープロジェクトを提案している。

（5）科学技術的課題

バイオマス利活用における科学技術的な課題として、次の5つが挙げられる。

① バイオリファイナリー

バイオリファイナリーについては、いくつかの分類がなされているが、基本的にはバイオマス原料を主成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニン等に成分分離し、各々の性質に応じた利活用を図るものである。バイオマス原料は木質バイオマスのみならず、稲わらやもみ殻、バガス等の農業残渣が含まれるが、それぞれの原料によって分離される成分の特徴が異なるため、石油リファイナリーのような大量生産プロセスの構築が難しいことが課題の一つである。その課題解決のためには、製材所や製紙・パルプ産業において比較的原料調達が容易な木質バイオマス等のカスケード利用を図るうえで、その未利用残材の利活用を図ることが挙げられる。これまで石油や石炭等の化石資源にエネルギーの一部を依存していた製材・製紙産業において、自前で熱電供給をしながらバイオケミカルやバイオプラスチック原料を併産することは、脱化石資源を図る上で中長期的に取り組むべき課題の一つである。

② 廃棄物系バイオマスゼロエミッション

日常的に排出される生ごみ、下水汚泥等の廃棄物系バイオマスは水分が多いため、化石資源を投入して焼却処分されており、自前のエネルギーでゼロエミッション型の有効利用を図ることは、非常に重要である。最近ではFITの導入によりこれらの廃棄物系バイオマスからのバイオガス製造による発電事業も推進されているが、その過程で副生する固体残渣や廃液を有機肥料や液肥として有効利用するゼロエミッションシステムも農工連携のアグリビジネスとして注目されている。このような廃棄物系バイオマスのゼロエミッションプロセスは、大都市で大量に排出される生ごみ、下水汚泥だけでなく、農村部での農産物残渣や家畜糞尿の有効利用によるエネルギー・食料併産システムの構築にもつながり、地産地消型の地方創生プロジェクトの一つとして長期的に取り組むべき課題である。

③ CCUを含む人工光合成

バイオマスのカーボンニュートラル性を最大限に活用して、BECCS（Biomass Energy CO₂ Capture and Storage）に加えて、CCU（CO₂ Capture and Utilization）を含む人工光合成プロセスの研究開発が注目されている。火力発電所や高炉等から排出される化石資源由来の炭酸ガスは比較的大規模なCCSプラントが必要であるが、ビール・酒造等のバイオマス利用において排出または副生する炭酸ガスをさらに回収・再利用すれば、比較的小規模であってもネガティブエミッションとしてのGHG削減効果が見込まれる。人工光合成を含むCCUとしては、再生可能エネルギー由来の水素を活用して、例えばギ酸やメタノール、メタン、DME等をエネルギーキャリアとして炭化水素資源として再利用し、化石資源代替を図ることも有望視されている。

④ 省エネルギー木造住宅

古来より世界に誇る木の文化を有する我が国は、昨今広まりつつあるCLT（Cross

Laminated Timber）等を活用した木造建築へ回帰し、快適な省エネルギー木造住宅を普及させることも木質バイオマス利活用の有効な方法である。CLT は、欧州で開発された工法であり、板の層を各層で互いに直交するように積層接着した厚型パネルの呼称で、間伐材や細い木材の高度有効利用の観点から日本でも普及拡大が図られている。CLT の利用拡大によって住宅・ビルや公共建造物等の省エネルギーを追求することは日本が誇る木の文化の復活を促し、快適で、かつ民生部門由来の炭酸ガス削減を同時に達成する上で、必要である。このような木造建築の普及は、日本伝統の大工技術の継承と木材の利用拡大・自給率向上の点からも、中長期的な日本の省エネライフスタイルを確立する上で非常に有意義である。

（6）その他の課題

バイオマスのエネルギー利用については、単に発電や熱利用だけでなく、バイオマスニッポン総合戦略でも謳われているように、そもそもバイオマスによる化石資源代替を促進し、正味の炭酸ガス削減を実現して地球温暖化防止に貢献することが第一優先課題である。2012 年から実施された再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）は、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故の影響が大きかったことは事実であるが、太陽光や風力、地熱、水力等の他の再生可能エネルギーと共に、我が国のエネルギー自給率の向上に寄与することが本題であり、単に FIT による利益追求によって、国民負担が拡大し、しかも輸入された PV パネルやバイオマス利用を促進する結果になっていることは FIT のマイナスの部分といえよう。

これに加えて、バイオマス利用については、エネルギー自給率のみならず、木材や食料自給率の向上の面からもコストベネフィットを考慮すべきである。また、石炭火力へのバイオマス混焼についても、単に発電効率だけでなく、炭酸ガス削減と共に PM、SO_x、NO_x 等の大気汚染物質の削減効果も加味して、環境影響を含めた費用対効果を検討すべきである。量的な制約を伴うバイオマスの持続可能性は重要な課題であるが、本来は日本に未利用で存在するバイオマス資源を極限まで有効利用することが追求されるべきであろう。

このような観点で今後のバイオマス利活用拡大への政策や法規制については、第 5 次エネルギー基本計画で示された 2030 年でのエネルギーミックス実現から 2050 年の炭酸ガス 80%削減を実現するための総合的な再生可能エネルギー政策であると考えられる。単に、石炭等の化石資源の利用撤廃と再生可能エネルギー最大を目指すだけでなく、環境影響ミニマムとエネルギー自給率向上及び究極の省エネ社会を実現することが必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	リグノセルロース系バイオマスの成分分離リファイナリーと用途開発に関する研究は推進されている。
	応用研究・開発	△	→	FIT 対象のバイオマス発電の開発は進んでいるが、バイオ燃料の実証研究は停滞している。
米国	基礎研究	○	→	バイオマス由来のケミカルや医薬品・健康食品、バイオプラスチック等の研究は継続している。
	応用研究・開発	○	→	非食用バイオマスからのバイオ燃料製造に関する研究開発は継続されている。

欧州	基礎研究	○	↑	国際的に持続可能なバイオマス利活用システムの提案と課題解決のためのスキームが議論されている。 地産地消型バイオマス利活用スキームの提案と再生可能エネルギーの最大利用システムが議論されている。 【英国】 CO ₂ 削減と化石資源代替を実現するためのバイオマス利活用スキームが提案されている。 【ドイツ】 地産地消型バイオマス利活用スキームの提案と他の再生可能エネルギーとの組合せ最適化が議論されている。 【フランス】 未利用バイオマスの高付加価値利用に向けた触媒反応プロセスの研究開発が継続している。
	応用研究・開発	◎	↑	エネルギー政策として、バイオマス発電だけでなく、CHPにおける熱利用による化石資源代替が推進されている。 脱化石資源に向けた再生可能エネルギーの利用拡大が進み、小型バイオマス発電が拡大している。 【英国】 脱石炭火力に向けて、バイオマスの混焼や専焼プラントへの転換が加速されている。 【ドイツ】 脱原発と脱化石資源に向けた再生可能エネルギーの利用拡大が進み、小型バイオマス発電が拡大している。 【フランス】 バイオマス発電と非食用バイオ燃料製造に関する研究開発は継続されている。
中国	基礎研究	△	→	第2、第3世代バイオ燃料の製造研究が継続している。
	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。
韓国	基礎研究	△	→	未利用バイオマスからの高付加価値物質の製造研究が継続している。
	応用研究・開発	○	↑	木質ペレットやバイオ燃料の導入拡大が進められている。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) "Renewables 2018 Global Status Report," Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), Institute for Sustainable Energy Policies (ISEP).
- 2) バイオマス産業社会ネットワーク「バイオマス白書 2018 ダイジェスト版」.
- 3) Frankl Paul, "IEA Renewable Perspective: Tracking Clean Energy Progress 2018," NEDO Session at Grand Renewable Energy, 2018年6月.
- 4) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング「バイオマス発電を含めたバイオマス利用のあり方に係る調査 報告書」, 平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査, 2018年2月.
- 5) 自然エネルギー財団「日本のバイオエネルギー戦略の再構築：バイオエネルギー固有の役

- 割発揮に向けて」, 2018 年 4 月 .
- 6) 藤井照重他『再生可能エネルギー技術』, 森北出版, 2016.
 - 7) 『知の散歩シリーズ 1 再生可能エネルギーで地域を変える』, 弘前大学出版会, 2017.
 - 8) アジアバイオマスオフィス,
https://www.asiabiomass.jp/topics/1211_03.html (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
 - 9) 国家再生可能エネルギー編著『2016 年中国再生可能エネルギー産業発展報告』, 中国経済出版社, 2016.
 - 10) 中川仁 他『農林バイオマス資源と地域利活用 - バイオマス研究の 10 年を振り返る -』, 養賢社, 2018.
 - 11) IRENA, “Biofuel Potential in Southeast Asia: Raising food yields, reducing food waste and utilising residues” , 2017.
 - 12) Meyer Markus A. and Leckert Florian S., "A Systematic Review of the Conceptual Differences of Environmental Assessment and Ecosystem Service Studies of Biofuel and Bioenergy Production," *Biomass and Bioenergy*, 114: 8-17, 2018
 - 13) U.S. DOE,
<https://www.energy.gov/articles/departments-energy-announces-36-projects-bioenergy-research-and-development> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
 - 14) *Hydrocarbon Processing*, December 12, 2017.
 - 15) *Biofuels Digest*, November 6, 2018.
 - 16) *Proceedings of Grand Renewable Energy International Conference 2018*, Biomass Session, パシフィコ横浜, 2018 年 6 月 21 ~ 22 日 .

2.8 その他の再生可能エネルギー利用（地熱、海洋）

（1）研究開発領域の定義

地熱エネルギーと海洋エネルギー利用に関する科学、技術、研究開発を記述する。

地熱エネルギー利用では地熱発電があり、高温の地熱によって生成された水蒸気により直接あるいは低沸点媒体と熱交換して蒸気タービン発電機を駆動して電力を発生させるものである。

ここでは、地熱資源の特性把握技術（物理探査や地化学探査など）や掘削技術、地熱発電技術として、フラッシュ発電、バイナリー発電および、高温岩体発電、涵養地熱システムを対象とする。

海洋エネルギー利用では、海洋発電がある。ここでは、海流、波、潮汐、塩分濃度、海水の温度差による再生可能な運動エネルギーを利用した発電方式を対象とする。

（2）キーワード

■地熱エネルギー

地熱発電、空中物理探査手法、低コスト掘削技術、貯留層評価・管理技術、環境モニタリング技術、バイナリー発電技術、EGS（地熱増産システム）発電、スケール対策、誘発地震、超臨界地熱

■海洋エネルギー利用

波力発電、潮汐発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■地熱エネルギー

地熱発電は、地熱という再生可能エネルギーを活用した発電であるため、運転に際していわゆる温室効果ガスの二酸化炭素の発生が火力発電に比して圧倒的に少なく、燃料の枯渇、高騰などの心配が少ない。また、他の主要な再生可能エネルギーを活用した発電と異なり、天候、季節、昼夜によらず安定した発電量を得られる。資源量も多く、特に日本のような火山国においては大きな潜在力を有すると言われる。このように地球温暖化への対策手法となることやエネルギー安全保障の観点からも各国で利用拡大が図られつつある。

我が国は世界の活火山の約8%を擁する屈指の地熱資源大国でありながら、10年以上政策的地熱研究開発を停止していた¹⁾。地熱は本来、我が国の得意分野であり、世界シェア70%を誇る地熱蒸気タービンや次々に開発中の小型バイナリー発電設備技術、各種センサや地震学の応用による革新的地下探査技術、高温掘削技術など、要素技術は高いレベルにある。今後は豪雪地帯の地熱カスケード利用技術（地熱発電からの排熱で調理、温室栽培や雪を溶かすように熱を段階的に利用する技術）や次世代EGS発電など、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ることが望まれる。

■海洋エネルギー利用

海洋に存在する波浪、潮汐、潮流・海流、海洋熱、塩分濃度差等の持つ海洋エネルギーは、膨大な資源量を有する。これらのエネルギーは、波力発電、潮汐発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電、塩分濃度差発電等として利用可能なため、次世代のエネルギー源として認識され

ている。現在、欧米諸外国を中心に、その利用技術の開発が精力的になされ、新しい海洋エネルギー産業が勃興しつつある。わが国においても、第二期（平成 25 年度～ 29 年度）及び第三期（平成 30 年度～ 34 年度）海洋基本計画において、海洋再生エネルギー利用技術開発の必要性が謳われ、現在、海洋エネルギー利用技術に関する、NEDO や環境省等の大型研究プロジェクトが継続実施されている。

[研究開発の動向]

■地熱エネルギー

日本では 1980 年代に、新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）において、地熱開発促進調査が開始され、国内 60 以上の地熱開発可能性の調査が行われた。そのうち、特に有望であった地域は、90 年代に地熱発電所が建設された（柳津西山、八丈島など）。また、地熱資源調査や技術開発が様々な視点で行われ、全国地熱資源総合調査にはじまり、地熱貯留層の構成する断層系の調査・解析手法を開発する「断層系貯留層探査法開発」および後継の「貯留層変動探査法開発」、既存の地熱貯留層よりさらに深い深度での地熱開発可能性を岩手県の葛根田地熱地域で調査した「深部地熱資源調査」、国産バイナリー発電機の開発や炭酸カルシウムなどのスケール対策、掘削技術の開発を中心とした「深部地熱資源採取技術」そして、山形県肘折での「高温岩体発電技術」の実証試験が行われた。2000 年までに、地熱発電所は国内 18 地点、設備容量約 54 万 kW に達し、電源構成割合で 0.2% に達したが、2002 年度をもって「貯留層変動探査法開発」のなどの国による技術開発は終了するとともに、調査予算も大幅に縮小した。また、地熱資源の 80% が国立公園内にあり調査が不可能だったことや、温泉地の地熱開発に対する懸念が強いことも地熱開発が停滞する原因になった。

2000 年以後の日本の地熱開発が停滞している間に、アメリカ、フィリピン、インドネシア、ニュージーランド、メキシコ、イタリア、アイスランド、ケニア、トルコなどでは着実に地熱発電量を増大させており、世界の合計でみると、2000 年の 7,974MW から 2015 年には 12,636MW まで増大している²⁾。この世界の地熱発電所建設の動きに対し、日本はフラッシュ発電タービンや、配管技術等で貢献しており、現在の世界の地熱発電量の 70% を日本の富士電機、三菱日立パワーシステムズ、東芝の 3 社がしめている²⁾。さらに坑口装置も世界の 50% ほどのシェアがある。その一方で、バイナリー発電技術や坑内探査技術、掘削技術などはアメリカなど海外が強い状況である。

地球温暖化対策としての CO₂ 排出削減に地熱が貢献できることから、日本の地熱開発に対して復活の動きが見え始めた。2000 年までの地熱開発促進調査で有望地域とされていた秋田県湯沢市の山葵沢地域での発電所建設が合意に達し 2019 年頃に 40MW 規模の発電所の運転開始を目指すことになった。また、環境省も地熱プロジェクトを立ちあげることになり、「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」、「温泉発電システムの開発と実証」、「高傾斜泥水制御技術の開発」といった温泉や公園の問題の解決に向けたプロジェクトが開始された。そして、2011 年 3 月の福島原発事故以後、エネルギー政策が大幅に見直され、地熱の技術開発・調査が本格的に行われるようになった。

政府の取り組みでは、経済産業省の地熱実務を行う組織として、従来から地下資源の探査・開発を行ってきた独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）に 2012 年度より地熱部を設置した。そこでは、地下探査・掘削といった開発企業の負担を軽減するために、

地熱資源調査・環境調和支援として、日本の企業が国内で地熱資源調査を行う場合に、調査費の一部（地質調査・物理探査・地化学調査等に関する経費や坑井掘削調査等に関する経費）を助成金として交付制度を設けた。従来、地熱調査・研究を担当していた NEDO は、2013 年度から「地熱発電技術研究開発」が開始され、おもに地上設備に関する研究開発を行うこととなった。

2012 年に FIT（再生可能エネルギーの買い取り制度）が導入され、地熱の場合は 15,000kW 以上の設備では 1kWh あたり 26 円＋税、15,000kW 未満の場合は 40 円＋税の調達価格で 15 年間の調達期間が設定された。

環境対応としては、国立公園等での地熱開発について 2012 年 3 月に条件付きながら規制緩和が行われた。国立公園は規制が厳しい順に、特別保護地区、特別地域の第 1 種、第 2 種、第 3 種そして普通地域と分類される。従来は、特別保護地区、特別地域はすべて調査のため立ち入りが禁止され、普通地域でも開発不可能であったが、現在は、特別地域第 2、第 3 種や普通地域については、小型かつ環境配慮、住民との合意形成の条件を満たせば地熱開発が許可されるようになり、例えば福島県土湯温泉地域の温泉バイナリー発電機（400kW）は国立公園内に設置されている。

■海洋エネルギー利用³⁾⁻⁹⁾

波力発電、潮流発電、海洋温度差発電等の海洋エネルギー発電技術の開発は、1970 年代のオイルショックを機に、わが国を含め、世界的に開始されたが、その後の石油価格下落によるエネルギー危機の緩和や装置のコストダウンが困難等の理由から、各国の研究開発費が削減され、研究開発は低調となった。しかしながら、2000 年代からの石油価格の高騰、地球温暖化に関連して、海洋エネルギー発電技術は、再び、脚光を浴び、その発電技術の開発は世界的なブームとなっている。

①波力発電・潮流発電・海流発電・潮汐発電

波力発電と潮流発電は、海洋エネルギー利用技術の中心で、欧州（特に英国）や米国を中心に進められている。波力発電装置は、次の 3 つに大別される。

- (ア) 波エネルギーを空気エネルギーに変換して空気タービンを回して発電する“振動水柱型”
- (イ) 波浪中で運動する物体の運動エネルギーを油圧エネルギーに変換して油圧モーター等を回転させる“可動物体型”
- (ウ) 波を貯水池等に越波させ、この貯水池の落差により生じた水流を用いてタービンを回転させる“越波型”

近年の世界的な海洋エネルギー利用技術開発の活発化に伴い、NEDO が中心となって大型の研究開発プロジェクト（2011 年度～2018 年度）を実施した。このプログラムでは、事業化時に発電コスト 40 円 /kWh 以下のシステム開発を目指す「海洋エネルギー発電システム実証研究（9 プロジェクト）」と、事業化時に発電コスト 20 円 /kWh 以下のシステムの要素技術開発を目指す「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発（9 プロジェクト）」の 2 つを実施した。この内、「海洋エネルギー発電システム実証研究」に関して、(株) IHI は、鹿児島県口之島沖の黒潮海域で、100kW 規模の海流発電としては世界初となる水中浮遊式海流発電システムの実証機実験を行い、最大 30kW の発電出力を確認した。エム・エムブリッジ（株）他は既存の防波堤に振動水柱型装置を追加設置した固定ユニット装置（多重共振型波力発電装置）を開発中で、山形県酒田市で衝動タービンを搭載した 15kW

装置の実証実験を行い、その性能を確認した。「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」に関して、九州工業大学、(株) 協和コンサルタンツ他は、相反転プロペラ式潮流発電技術を開発し、長崎湾沖で、実用化時の想定実機（プロペラ直径 7m, 流速 4m/s の場合、定格 500kW）の 1/7 スケールモデルを用いた曳航試験で、設計発電効率を上回る 43.1% の発電効率を確認した。

海外の波力発電プロジェクトでは、ポルトガルアゾレス諸島のピコ島において、400kW の沿岸固定式の振動水柱型発電装置が 1999 年から稼働している。振動水柱型装置を防波堤に組み込んだスペインの Mutriku 波力発電システム（300kW）は 2011 年に完成した商用機で、出力は 1.5GWh である。韓国のジェジュ島でも 500kW の沿岸固定式の振動水柱型波力発電装置が 2017 年から稼働中である。浮体型の振動水柱型装置としては、アイルランドの OceanEnergy 社が、後ろ曲げダクトブイ型 500kW 装置の実海域実験を準備中である。

可動物体型装置では、スウェーデンの Seabased 社の装置がある。これは、単一浮体の鉛直運動を利用してリニア発電機を用いて発電するもので、スウェーデンの Stotenäs では、36 基から構成される合計出力 1MW の Wave farm が建設されている（2015 年）。フィンランドの AW-Energy 社は、海底ヒンジの振り子型装置 Waveroller を開発して、100kW 装置 3 基に関する実海域実験をポルトガル沖で行っている。中国では、可動物体型の 200kW Sharp Eagle が 2017 年に、万山列島の海域に設置され、継続運転を行っている。

海外の潮流発電プロジェクトでは、英国 Marine Current Turbine 社が SeaGen プロジェクトにて、北アイルランド Strangford 湖の入江に、水平軸型のプロペラ 2 基で出力 1.2MW の装置を 2008 年に設置した。スコットランドの北海岸とストローマ島の間の海域では、第 1 期 MeyGen プロジェクトにおいて、1.5MW の水平軸型プロペラ方式潮流発電装置 4 基（合計 6MW）が完成した（2017）。Nova Innovation プロジェクトにて、100kW の水平軸型プロペラ方式潮流発電装置 3 基（合計 300kW）が Shetland 島に完成した（2017）。Cape Sharp Tidal JV は、OpenHydro 社のタービンを用いた 2MW 装置の実海域実証実験を、カナダの潮流発電実証実験サイト FORCE で行い、性能を確認した。フランスの Sabella 潮流発電装置（1MW）は 2015 年にグリッドに接続され、稼働中である。

潮汐発電では、フランスのランス発電所（240kW）、韓国の Sihawa 発電所（254MW）、カナダの Annapolis Royal（20MW）、ロシアの Kislaya（9MW）等がある。

海外では、波力発電、潮流発電、潮汐発電のそれぞれにおいて商用プラントが稼働しているものの、日本では実海域実験レベルに留まっている。海外では、英国が最も積極的に、波力発電と潮流発電装置の実用化研究を行っている。

②海洋温度差発電

1970 年代のオイルショック以降、各国で海洋温度差に関する研究開発が進められたが、その後のエネルギー緩和に伴い、多くの研究機関は研究開発を中止した。そのような中で、佐賀大学は研究開発を継続しており、現在、数十 kW 級の実証研究では世界トップレベルにある。近年、米国、韓国、オランダ、フランス、中国などが、研究開発を再開している。発電装置の設置方法として、陸上設置型と浮体式とした洋上設置型があるが、現在稼働中の沖縄県久米島（100kW）やハワイ（105kW）の装置は、100kW 級の装置で、陸上設置

型である。近年、世界各所で 1MW 級の浮体型装置の建設計画が提案されている。今日では、海洋温度差発電の商用展開の推進を考え、海洋温度差発電による電力の単独利用でなく、汲み上げた大規模海洋深層水を利用して、海水淡水化と漁場造成、水素製造、リチウム等の有用金属回収を含めた複合利用が推進されている。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

■地熱エネルギー

経済産業省の長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス）において、2030 年までに地熱発電の設備容量を約 140 ～ 155 万 kW（電源構成割合で 1.0 ～ 1.1%）にまで導入を促進する目標が掲げられている。その達成には、現在 58%程度である利用率を 83%まで向上させる必要がある。

そのため、JOGMEC では、新規開発地点の開拓と開発機関の短縮のための事業や研究開発を実施している¹⁰⁾。新規地点開拓のためには、2012 年度以後、助成事業を実施しており、2017 年度には 27 件（うち新規 9 件）が採択されている。

JOGMEC の調査事業としては、2013 年度から空中物理探査が国内 19 地域で実施され、さらに 2017 年度からは空中物理探査で見いだされた重力や電磁データのアノマリー（法則・理論から見て異常な事象）を示すエリアにおいて、地下の温度構造や地質構造を把握するためのヒートホール調査が開始されている。

さらにリードタイムの短縮、コスト削減、出力の安定化の技術課題を解決するための技術開発として、地熱貯留層探査技術開発、地熱貯留層評価・管理技術開発、地熱貯留層掘削技術開発の 3 項目の技術開発が実施されている。

地熱貯留層探査技術開発では、地熱貯留層（断裂系）の空間的な位置を可視化するために、弾性波探査の適用および他の探査データを含めた統合解析手法の開発を行った。鹿児島県山川地熱発電所周辺などで 3 次元弾性波探査の結果、地層中の断裂の可視化技術の有効性を検証し、実用化にめどがついた。

地熱貯留層評価・管理技術開発では、地下における熱水・蒸気の流れの評価精度向上と熱源部への水補給の適切化のために福島県柳津地熱発電所で涵養試験を実施しており、一部の生産井で、地化学分析により涵養効果を示唆する挙動を確認している。

地熱貯留層掘削技術開発では、坑井の掘削期間短縮、コスト抑制にむけて、掘削効率・耐久性とも従来のローラーコーンビットより優れた PDC (Polycrystalline Diamond Compact) ビットの開発を実施した。国内地熱開発地域で実証試験を実施し掘削能率は目標を達成した。今後は耐久性の課題克服を行う予定である。

今後の技術開発事業としては、坑井近傍探査技術、透水性改善技術、酸性流体発生機構解明技術、逸泥対策技術、小型ハイパワーリグの開発などの研究計画を策定している。

JOGMEC のその他の取り組みとしては、2016 年度より地熱開発研修制度を創設し、特に地熱掘削技術者向けの研修を行っている。さらにニュージーランドの GNS Science との共同ワークショップを実施して、特に双方が抱える技術課題や社会受容性（温泉・間欠泉、観光、環境関連）の情報交換を行っている。また、国内でも定期的に地熱シンポジウムを開催するなど地熱理解促進に向けた取り組みを行っている。

スケール対策技術では配管材料の改質や、磁気や高周波など物理的な手法を用いてのスケール付着抑制や回収技術が開発された。発電所の環境保全対策等技術開発では、硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発、温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発、エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発など環境や景観、温泉に配慮した技術開発が行われた。2018年度には、新規に地熱エネルギーの高度利用化に係る技術として、発電所の還元井延命化技術や未利用エネルギーを活用可能にする技術、発電所の運転管理高度化に係る技術、具体的には、還元井の寿命を2倍以上にする技術の確立や、これまで未利用であった pH3 の酸性熱水が噴出する地熱井を利用可能にする技術の確立、IoT や AI 等のイノベーション技術を活用についての公募が実施された。

NEDO の技術戦略研究センターでは、長期的な地熱発電量の増大を目指して、特に導入量の飛躍的な増大には、非従来型地熱発電（EGS）技術の適用がブレイクスルーとなりうることから、EGS 技術の世界各地の導入状況、タイプ分け、そして従来型を含めた開発への課題をまとめ、2016年7月に技術レポート『TSC Foresight』Vol.12 地熱発電分野として公表した¹¹⁾。その中で、超臨界温度領域の利用可能性調査が1つの課題となっており、アイスランドで実施された IDDP プロジェクトや国内で実施された葛根田深部地熱プロジェクトにおける超臨界での開発課題の整理が行われている。

高温の温泉熱を利用したバイナリー発電は東北大震災後の FIT 導入により九州大分の別府地域などで導入が進められ、地熱発電所内でのバイナリー発電機も含めると国内 36 か所、合計 21MW のバイナリー発電所が震災以後に設置されている¹²⁾。

■海洋エネルギー利用

①波力発電の性能向上のための制御技術

波力発電装置は、出力を大きくするために、入射波周期と装置の可動部の運動周期を一致させる共振装置である。実際の海の波は、入射する波の周期と波高が時々刻々変化する不規則波であるので、共振状態を作ることが難しい。近年、入射する波を時々刻々計測しながら、Power take-off システムのダンピング係数を調整する制御法が提案されている。今後、制御法の高度化により、発電出力を高める工夫が進む。

②潮流発電関連新技術

近年実施された潮流発電に関する NEDO プロジェクトで、有望な技術が提案されている。相反転プロペラ式潮流発電装置では、プロペラと発電機に関して、相互に逆回転する二段のプロペラとそれらが連結された内外二重の回転電気子から構成されているため、磁界を切る相対速度が速くなり、高出力を得ることができる。また、プロペラの回転も少なくできるので、キャビテーションや水中騒音問題に有利となる。また、橋脚利用式潮流発電装置では、装置全体が海中にあるため、非接触動力伝達機構を提案している。この方法では、発電機を完全密閉にして、磁石を用いて、ダリウス型タービンによる外部の回転を発電機に伝達するものである。

③海洋エネルギー実証試験海域の整備

波力発電、潮流発電・海流発電、海洋温度差発電装置の商用化のためには、実機レベルで、発電性能や大波浪作用下での装置の安全性の実証試験が可能な海域確保が必要である。各国はそれぞれ独自に実証試験海域を保有しており、現在、グリッド接続された実証試験海域が世界中で 28 か所ある。英国の EMEC (European Marine Energy Center) は、スコッ

トランド政府等からの出資を受けた代表的な実証研究センターで、波力発電と潮流発電の両方に関する試験海域を持つ。世界中の装置の性能を評価して、装置の認証データ取得のための試験センターとなっている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■地熱エネルギー

よりポテンシャルの高い地熱資源の開発可能性の調査として、超臨界温度領域での地熱開発可能性調査が世界各地で行われている¹³⁾。

超臨界温度領域の岩体の掘削は、近年アイスランドで IDDP プロジェクトが行われ、2010 年には IDDP-1 で 440℃ の超臨界流体の生産を確認し、2017 年には IDDP-2 で 4000 m、420℃ まで掘削を行い、現在噴気試験の準備中である¹⁴⁾。また、イタリアの DESCRAMLE プロジェクトでは、深度約 3,000 m で 500℃ の熱源の存在を確認している¹⁵⁾。さらに、EU とメキシコが共同でメキシコのロスアズフレス地熱地域付近で EGS と直接噴気の 2 通りの考え方での超臨界地熱資源調査を計画している¹⁶⁾。DOE は高温地熱利用と火山防災の観点からのプロジェクトをニューベリーで進めている¹⁷⁾。

日本では、2015 ～ 2017 年度にかけて NEDO により「超臨界地熱開発実現のための革新的掘削・仕上げ技術の創出」¹⁸⁾、2017 年度には「天然・人工地熱システムを利用した超臨界地熱発電の詳細検討」のプロジェクトで超臨界地熱発電の可能性調査が行われ、2018 年度から「超臨界地熱発電技術研究開発」が開始されている。

在来型の地熱資源については、空中物理探査手法、地熱貯留層評価・管理技術、PDC ビット開発、環境保全対策技術（硫化水素拡散予測など）および高傾斜掘削をふくむ掘削技術の開発は、いずれも地熱資源のより詳細な把握、地熱資源の維持管理、環境への配慮のために重要なテーマであり、従来の地熱開発において課題となっていた地熱資源の不確実性や、公園・温泉等への配慮を克服することにより、すでに JOGMEC が開発支援をしている有望地域の開発促進に結びつくものである。

また、NEDO では、地熱発電技術として、AI-IoT の適用、酸性流体（フィリピン等で問題となっている）の利活用などの研究課題を開始している。

■海洋エネルギー利用

①海流発電装置「かいりゅう」

(株) IHI は、NEDO の「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」及び「海洋エネルギー発電システム実証研究」において、水中浮遊式海流発電システムを開発し、鹿児島県口之島沖の黒潮海域で、100kW 規模の海流発電としては世界初となる水中浮遊式海流発電システムの実証機「かいりゅう」の実海域実験を 2017 年に行い、最大 30kW の発電出力を確認した。装置の全長は約 20m で、直径 11m の 50kW タービン 2 基（合計 100kW）を搭載している。2018 年にスタートした 3 年間の新 NEDO プロジェクトで、装置の長期実証実験が実施される予定である。海流発電に関しては、台湾も黒潮を対象とした発電装置の研究を継続実施している。

② MeyGen プロジェクト

スコットランドの Atlatis Resources 社によって進められている「MeyGen プロジェク

ト」は潮流発電では世界最大のプロジェクトで、第1期工事では、2017年に、スコットランドの北海岸とストローマ島の間の海域で、1.5MWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置4基（合計6MW）が建設された。2021年までに新たに53基が追加建設され、合計86MWの潮流発電ファームが建設される予定である。

③海洋インバースダム構想

海洋インバースダムとは、巨大な箱型のダム空間（函体）を海中に構築し、その中に海水を出し入れすることで蓄電と発電を繰り返すものである。ダム内部に海水を流入させる際、海面の位置エネルギーを利用して水車発電機で発電し、また深夜電力等の外部電源により水車発電機を揚水ポンプとしてダム内部の海水を外部に排水する際に、位置エネルギーを貯蔵することで蓄電池のように機能する¹⁹⁾。2014年10月、「一般社団法人海洋インバースダム協会（KID-S: Marine Inverse Dam Society）」が設立され、海水揚水発電における大規模エネルギー蓄積機能を持つ海洋インバースダム構想の実現に向け、研究開発や具体的な事業調査が行われている²⁰⁾。

（5）科学技術的課題

■地熱エネルギー

30MW規模のフラッシュ型地熱発電を開発する場合、有望地域が国立公園内あるいはその近傍である場合が多く、これまで十分調査されてないために、貯留層の状況が不明であることが多い。地下データの採取とデータベース整備が必要である。JOGMECの空中物理探査で公園内を含む地下の状況は判明しつつあるが、今後はより詳細な解析が求められ、さらに公園に影響を及ぼさない地上調査法により、貯留層の的確な把握、それに基づいた適正規模な発電が求められる。

有望地域は山岳地域であり、掘削のための用地確保が難しいこと、さらに貯留層がより高温で、流体が酸性になりうることから、傾斜掘削を含む掘削技術の向上、そしてドリルビットの改良など、掘削コストの低減に直結する技術開発が必要となってくる。高温の酸性流体を想定した配管などの腐食対策、リスク評価も必要である。

公園の問題だけでなく、温泉への配慮も必要となってくる。温泉貯留層と地熱貯留層の関連を考察し、温泉への影響がなく温泉と共存可能な地熱開発の手法の開発が必要となってくる。

EGSは、水圧破碎の確実性、特に坑井間の連結を可能にすることが必要である。これまでのEGSでは、注水した水が半分程度しか回収できないため、周辺河川などからの補給が必要であったり、坑井間の距離が短いために貯留層が急冷却を起こしたり、さらに水圧破碎時などの誘発地震、注水による内部消費電力やコストの問題などが生じている。このような課題に対応する必要がある。

今後取組むべき研究テーマとして、次を示す。

- 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・地熱探査技術及び掘削技術の開発。
- 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。
- 地熱開発の社会受容性を確認し、開発への理解を促進させるための技術開発（環境・温

泉モニタリングの高精度化)

- より高温（超臨界領域を想定）の地熱資源開発のために、高温で使用可能な坑内検層機器および高温での掘削技術の開発。またそれに伴う配管等の地熱材料の評価技術の開発。さらに酸性流体の発生機構の解明
- 発電機の効率の向上。

■海洋エネルギー利用

海洋エネルギーの賦存量は非常に大きいものの、エネルギー密度が低いため、1か所あたりで得られるエネルギーが少なく、高効率化、大規模化が求められる。また、海洋環境での長期使用に耐えうる高信頼性も必要となる。特に、暴風時等の異常外力によるリスクや腐食環境のリスクは、長期間での実証が必要である。

再生可能エネルギーの普及促進には、低コスト化とシステム・サプライチェーン全体を通じた課題解決の両方を同時に検討する必要がある。

次に、発電方式別の科学技術的課題を示す。

- 波力発電は、高効率・低コストの装置開発、台風等の荒天時における装置の安全性の確保、一部方式における波の周期による単機出力変動抑制のための複数機での平準化が挙げられる。
- 潮流発電は、高効率・低コストの装置開発、浮体型装置では、台風等の荒天時における装置の安全性の確保、潮流の早い海域における施工法の開発がある。
- 海流発電は、発電装置の係留技術、姿勢・水深の制御技術、陸から離れた海域での効果的な施工・長期メンテナンスの効率化確立である。
- 海洋温度差発電は、施工法を含めた深層水取水管の低コスト化があり、大規模発電では、取水管の大口径化と、その長期耐久性が挙げられる。浮体型装置の場合、動揺する浮体と取水管の接続方法も課題である。また、大規模化した場合、排出する表層水より低温でかつ栄養分の多い深層水の環境影響に対する考慮が必要である。
- 装置への生物付着対策として、装置表面の塗装法等、新技術の開発が必要である。
- 海洋エネルギー利用装置に共通する基礎的で、大学等で行う研究開発課題は、（ア）大幅にコスト低減が可能な海洋エネルギー変換装置の革新的システムの提案、（イ）大電力直流送電、（ウ）沿岸・海洋を考えた場合のエネルギー貯蔵（沿岸廃坑や海底高圧タンクの利用等）、（エ）エネルギー輸送媒体の変換効率の飛躍的向上（海上で水素を製造する等）、（オ）装置を多数配置したファーム用革新的係留システムと新材料の開発（海上工事とメンテナンスコストの軽減を目的） 等がある。²¹⁾

（6）その他の課題

■地熱エネルギー

日本における地熱発電の開発リードタイムは10年以上要しており、開発コストが世界標準の2倍程度となっている。そのため、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る必要がある。特に環境アセスメントの短縮化は重要であり、早期の短縮の実現および環境アセスメントが必要な閾値の引き上げや、固定買取価格制度の継続的な運用も開発促進のために必要である。

良質な地熱資源の多くは国立公園内の特別保護地域に該当するため、開発が規制されている。

しかし、世界的に議論されている生態保護地域と、日本の公園の区分には差異があり、またケニアなど公園内での開発を積極的に推進している国もある。したがって、公園内の生態系に配慮した調査・開発をするのはもちろんであるが、公園の規制の全面的な見直しも必要かと思われる。

温泉商業地域が地熱開発に懸念を示すことなどから、有望地域であっても地元との調整が進まない地域が多い。しかしながら地熱資源は数少ない安定した国産資源であることから、地元との合意が段階的であっても進んでいくような体制作り、あるいは小規模な発電から環境影響を見ながらの段階的な開発が可能になるような法律（地熱法）の整備が必要となる。その場合、開発費用が最初から大規模な発電所を作るのに比べコストがかかることが想定されるので、その対応が可能な施策、場合によってはドイツが導入しているような、開発に伴う保険制度の導入も検討する必要がある。

■海洋エネルギー利用

我が国は、内閣府総合政策本部が、2014年から、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電、洋上風力発電の実証試験海域の選定を開始して、現在までに、6県8海域を選定済みであるが、選定後に、実証試験を行うために必要となる系統連系のためのケーブル敷設、波浪の計測等のインフラ整備に関して、国からの資金援助が無い場合、実証試験海域は、まだ稼働していないのが現状である。実証試験海域のインフラ整備は国が行い、試験管体はベンチャーキャピタルとしての資金で賄うことで、装置の淘汰が行われ、実用化に至る高性能な装置が早期に実現されると期待されるため、実証試験海域のインフラ整備を国が早期に行うことが求められる。

開発ステージにおける開発資金の支援とリスク管理^{22)・24)}については、以下の課題がある。海洋エネルギー利用装置の開発は、次のように、ステージ1からステージ5の順に、進められる。次のステージに進むためにはステージゲートをクリアする必要がある。

- a) ステージ1: 提案した構想の検証（小型模型を用いた水槽実験）
- b) ステージ2: 設計評価（実機の1/25～1/10スケールの中型模型を用いた水槽実験）
- c) ステージ3: 実機の1/10～1/2スケールの大型模型を用いた実海域試験
- d) ステージ4: 原寸プロトタイプ（1/1スケール）の実海域試験
- e) ステージ5: 原寸プロトタイプ（1/1スケール）の複数機配列に関する実海域試験

我が国の研究開発費の支援・補助は、現在、ステージ1は文科省の科研費等の助成金、ステージ2は文科省の基礎研究費等の助成金、ステージ4とステージ5は経産省やNEDOの補助金（必要な研究開発費の2/3を補助）、の形で行われているが、ステージ3の支援が無いために、基礎技術の革新が、経産省やNEDOの実証試験に繋がらない。ステージ3の研究開発費の支援・補助を行う制度の確立が求められる。

技術的なリスク管理に関しては、各ステージでの試験方法の標準化、特に、実海域試験での試験方法について注意が必要である。

経済的なリスクに関しては、原寸プロトタイプの実海域試験を行うステージ4、ステージ5においては、海洋エネルギー利用技術が新しい技術であるため、実海域での大規模装置の試験や複数機配列試験や維持管理の面での不確実性が存在する。これらの不確実性のリスクについては、海洋エネルギー保険および保証基金を設立し、リスク（設置、運用における故障）の一部をカバーする等の方策が必要である。また、社会的リスクでは、対象海域を利用する漁業者の他に、将来の他の海洋利用者との衝突を防ぎ、海洋環境への影響を最小限に抑えるために、

関係者の同意プロセスを整備する仕組みを設ける必要がある。

海洋エネルギーの実証・実現においては、（ア）漁業権との調整、（イ）定期点検の期間、について議論となる。漁業権は、沿岸域では協議相手が明確であるが、沖合の場合は協議する相手が非常に多くなるため、個別プロジェクトで対応することは難しい。電気事業法において、風力発電は3年に1度の定期点検が義務付けられているが、海洋エネルギーについては記載がないため、1回/年の検査が求められることが予想される。しかし、頻繁にはアクセスしにくい場所に設置された海洋エネルギー発電設備の場合、その信頼性に応じて、保守期間の見直しができることが望まれる。また、海底の送電や変電設備等の付帯設備に要する費用も高額であること、ソフト・ハードのサプライチェーンの整備が必要であることに対しては、国による支援が必要である。

（7）国際比較

■地熱エネルギー

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	産総研では、再生可能エネルギー研究センター（FREIA）を中心に地熱探査技術や温泉モニタリング技術、超臨界地熱資源などの課題に取り組んでいる。また、九州大学などいくつかの大学が総合的な地熱研究を行っている。 また、NEDOでは将来の超臨界地熱資源の開発可能性に関する研究に着手している。
	応用研究・開発	◎	↑	2013年度より、NEDOやJOGMECが政策的な地熱研究開発を実施している。NEDOではスケール対策技術やバイナリー発電の他に景観設計や硫化水素モニタリング、温泉モニタリングなど環境に配慮した研究を実施し、2018年度の新規課題ではAI-IoT技術の適用や酸性流体適用技術、そして超臨界地熱に関する研究を開始する。JOGMECでは空中磁気探査をメインに人工涵養技術、掘削技術の開発を行っている。 2013年以後、温泉バイナリーを中心に小規模な発電所の建設が36カ所で行われ合計21MWとなっている。その中には国立公園内に建設した土湯の例などがある。大規模発電所は、2019年運転開始予定の山葵沢地熱発電所に続き、岩手県八幡平地域で2地点の開発が進められているが、その他の地点は地元との合意形成、詳細な調査などを要する状況である。 フラッシュタービン技術や坑口装置技術は世界トップレベル
米国	基礎研究	○	→	米国エネルギー省（DOE）では継続的な研究開発課題に取り組んでいる。その中で従来型地熱開発可能性の再評価として「PlayFairway」として、資源開発の技術的な可能性、社会受容性を含めた総合的な基礎解析を国内の多数の大学で実施し、GRCなど地熱の国際会議で成果公表をするとともに、DOEもよりよい解析のための手法を地熱研究者とともに検討を行っている。 将来技術のEGSに関してもFORGEプロジェクトとして主要大学で基礎研究を実施している。 2017年の政権交代に伴い、地熱研究開発予算が減少傾向にある。
	応用研究・開発	○	→	DOEが推進する技術開発の中でSALTという低温地熱からの資源回収の応用的な研究も進行中である。また、DOEでは基礎と同時に応用研究も進行しており、バイナリー発電設備メーカーのバイナリー発電技術、ローレンスバークレー国立研究所などでの地熱探査技術、スタンフォード大学やユタ大学などでのトレーサー技術開発、そしてPlayFairwayでの地熱開発可能性総合解析など、研究開発課題が系統的に進められており、それが世界最大の発電量に結びついている。 Newberryにおいては超臨界温度領域の開発や火山防災をターゲットとした研究開発が進められている。

欧州	基礎研究	◎	↑	ヨーロッパ全体の地熱資源分布についても調査が行われている。 【イタリア】 世界で初めて地熱発電を実用したこともあり、独自のタービン技術、探査技術等の研究が行われている。 超臨界地熱の実現可能性調査として DESCRAMBLE プロジェクトが行われ、2017 年に深度 2,900 m で 500℃ の岩体の存在を確認した 【スイス、オランダ、ハンガリー】 WGC などの国際会議での基礎研究成果公表が多くなっている。 【英国】 EGS については 90 年代に研究が行われていたが、近年新たな EGS プロジェクトのための研究が行われている。 【ドイツ】 2015 年の世界地熱会議（WGC）では、ドイツが発表件数第 2 位であり、その内容も掘削、探査技術、スケール対策など基礎的な案件が多い。 【フランス】 ソルツにおける EGS プロジェクトでの探査、モニタリングの基礎データの解析・評価を継続している LabEx G-eau-thermie profonde において、8 年間、約 3300 万ユーロでの深部地熱資源の研究開発予算がついている。 【アイスランド】 深部掘削プロジェクト（IDDP）が実施されているが、そのための基礎研究も盛んに行われている。
	応用研究・開発	○	↑	【イタリア】 2010 年から 5 年間で設備容量を 70MW 増加させている。また、近年は超臨界地熱資源の調査も行っている。 【英国】 国内での火山活動がないため、地熱利用は EGS あるいは直接利用となる。2 地域での EGS プロジェクト、直接利用、地中熱利用の実現に向けての調査が行われている。 【ドイツ】 ドイツにおいては中規模ながら、7 つの地熱発電所で 27MW の発電をしており、カーリナサイクルも 2 カ所稼働している。またこれらの発電所は市街地に位置している。 フランス、EU と共同でソルツ EGS プロジェクトを継続させている。 【フランス】 本土においても地熱発電開発は行われており、2 カ所のデモ開発に対して出資されているが、実用化されているのはグアドブール（カリブ海の領土）地域であり、その地域の 6% の発電を地熱でまかなっている。 ドイツ、EU と共同でソルツ EGS プロジェクトを継続させている。 【アイスランド】 アイスランドの IDDP プロジェクトは、第 1 期に超臨界温度領域の資源の存在を確認し、第 2 期では深度 4,600 m、426℃ の掘削を完了させ、噴気試験に向けての準備を進めている。また、アイスランドでは 2010 年からの 5 年間で 90MW 発電を増加させ、国内の発電の 30% 以上を地熱でまかなっている。
中国	基礎研究	○	→	中国科学院などが、特にチベット南部や雲南省などの坑井データをもとに地熱ポテンシャルの評価をしており、また EGS に関する調査も行っている。また、2015 年の WGC でも発表件数第 4 位である。
	応用研究・開発	○	→	チベット南部の八羊井（Yangbajing）地熱発電所で蒸気フラッシュ発電が行われるなど、バイナリーを含めて約 28MW の地熱発電所が稼働中である。また、中国は暖房や地中熱利用などの直接利用にも力を入れており、その設備容量やエネルギーは世界一である。 台湾については、地熱発電のためのポテンシャル評価が進められている。
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発電技術の研究をしている。特に KIGAM は国内数百以上の地温勾配や熱流量のデータから地熱データベースおよび国内の地熱分布をとりまとめて、地下 6.5km までのポテンシャルを求めている
	応用研究・開発	△	→	NEXGEO 社が KIGAM や大学と浦項（Pohang）で EGS 発電の開発研究を行っており、深度 4km を超える掘削が実施されたが、水圧破砕時の地震発生の影響で現在開発は中断している。またバイナリー発電の可能性調査も行われている。

■海洋エネルギー利用

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	○	↑	第二期（平成 25 年度～平成 29 年度）、第三期（平成 30 年度から 5 年間）の海洋基本計画において、海洋再生可能エネルギーの実用化のための技術開発と発電事業の産業化の推進、装置の実証実験のための実証フィールド建設の推進が謳われた。 海洋温度差発電：佐賀大学において、1973 年から現在まで、継続的に、熱交換器、システムに関する研究を継続実施中。 波力発電：1960 年代に世界初の航路標識ブイ式の振動水柱型装置（OWC）を実用化。固定式、浮体式 OWC 装置に関する基礎研究及び実海域実証実験を JAMSTEC 等で継続実施した。 潮流・海流発電：NEDO 要素技術開発プロジェクトで、水中浮体式黒潮発電、水平軸型及び鉛直軸型潮流発電装置 3 方式に関する要素技術研究を実施。
	応用研究・開発	○	↑	海洋温度差発電：NEDO 実証プロジェクトとして、沖縄県久米島で実海水を用いた 100KW プラントの実証試験を実施、継続稼働中。 波力発電：NEDO 実証プロジェクトとして、振動水柱型、可動物体型等に関する各種開発を、大学と民間会社共同で実施して、実証実験、設計において、30 円 /kWh の目標を達成。 潮流・海流発電：NEDO 実証プロジェクトで、IHI 他が水中浮体式黒潮発電 100kW 装置を製作し、鹿児島県沖の海域で性能を確認。30 円 /kWh の目標を達成。 政府は、海洋再生エネルギー装置の実海域性能を評価するための実証フィールド 8 海域を選定した。しかし、系統連携は未接続。
米国	基礎研究	◎	↑	The U.S. Department of Energy (DOE) Water Power Technologies Office's (WPTO) Marine and Hydrokinetic Programs (2017 年策定) で、現在から 2035 年までの海洋再生可能エネルギー利用の方針を策定済み。 19 大学と 6 国立研究所が、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電等の海洋エネルギー利用に関する研究を実施している。研究分野は、装置の性能評価に関する実験や数値解析、power take-off システム、制御システム等である。
	応用研究・開発	◎	↑	28 企業が海洋エネルギー利用装置に関する研究を行っている。 ハワイ州立自然エネルギー研究所の 105KW 海洋温度差発電プラントが稼働中である。 OPT 社は、40kW 可動物体型波力発電装置を製品化している。 ダイレクトドライブ発電機を搭載した可動物体型波力発電装置 500kW 装置を開発中である。 波力発電に関する 7 つの実証実験サイト、潮流発電に関する 3 つの実証実験サイト、海洋温度差発電に関する 1 つの実証実験サイトを持っている。

欧州	基礎研究	◎	↑	【EU】 欧州委員会では、海洋エネルギー分野でリーダーシップをとることを目的に、政策を策定済み。2050年までに、海洋再生可能エネルギー関係で、100GWの設備容量の新設、40万人の雇用確保を目標としている。このために、基礎研究に関する公的研究ファンドを加盟国に配分している。 【英国】 英国は欧州の中でも波浪・潮流のエネルギーの資源量が豊富なため、海洋エネルギー利用に積極的である。特に、スコットランドが積極的である。 スコットランド政府関係から、61の波力発電関連プロジェクトが、24.4百万ユーロの研究開発費を獲得した。 【ドイツ】 2025年までに、全電力の40～45%を再生可能エネルギーによる電力を目標としているが、風力や太陽光がメインである。 15の大学や研究所が波力発電や潮流発電の研究を行っている。潮流発電と波力発電に関する12の技術プロジェクトに国の資金が提供されている。 【フランス】 潮流発電を中心に研究開発を実施中である。 Eel Energy社は、弾性振動板を利用した新形式潮流発電装置（1MW）を開発中である 【ポルトガル】 波力発電と洋上風力発電を中心に研究開発を実施している。 波力発電に関しては、振動水柱型装置を中心に、ウェルズタービンや衝動タービンのような空気タービンの研究で成果を出している。
	応用研究・開発	◎	↑	【EU】 欧州委員会では、海洋再生エネルギーの応用研究・開発に関する公的研究ファンドを加盟国に配分している（2016年：8件、2017年：5件）。 【英国】 1.5MWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置4基（合計6MW）で構成される第1期MeyGenプロジェクトが完成（2017）。 100kWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置3基（合計300kW）で構成されるNova Innovationプロジェクト完成（2017） 波力発電と潮流発電に関する世界標準の実証実験サイトEMECをオークリー諸島に保有。世界各国からの装置が持ち込まれ、実証実験が実施されている。グリッドに接続されている。両実験サイトとも外力が厳しい場所と穏やかな場所の2か所を保有している。EMECの運営で地域の雇用に貢献している。また、波力発電に関する世界標準の実証実験サイトとして、Carnwall沖の海域にWaveHubも建設されている。 【ドイツ】 280kW潮流発電に関するプロジェクト、6kWの鉛直軸サボニウス型潮流発電に関する研究を実施中である。 波力発電に関するNEMOSプロジェクトが進行中。エネルギー貯蔵に関するSTENSEAプロジェクトが進行中。 【フランス】 240MWのランス潮汐発電所は、1967年から継続して稼働中である。 Sabella潮流発電装置（1MW）は2015年にグリッドに接続され、稼働中である。 波力発電と洋上風力発電の実証実験サイトとして、SEM-REVを建設している。また、潮流発電の実証実験サイトとして、SENEOHとPaimpol-Brehatの2か所を保有している。これら3か所の実証実験サイトは、グリッドに接続されている。 【ポルトガル】 アゾレス諸島のピコ島で、振動水柱型波力発電の実海域実験が10年間継続して実施されている。
	中国 基礎研究	○	↑	2020年までに、50MW以上の海洋再生可能エネルギーの利用が、2016年からの5か年計画の政府目標として謳われた。 2017年に111の海洋再生可能エネルギープロジェクトに12.5億元の予算が配分された。 水平軸型のプロペラ式潮流発電装置の研究開発が浙江大学で継続的に行われてきた。

中国	応用研究・開発	◎	↗	2017年に波力発電、潮流発電等の4つの研究プロジェクトが、137百万元の公的研究開発費を獲得した。 200kWの可動物体型波力発電装置 Sharp Eagle が2017年から稼働中。 2017年に、浙江大学で開発した水平軸型のプロペラ式潮流発電 650kW 装置が、グリッドに接続された。
韓国	基礎研究	○	↗	政府は、2030年までに、1.5GWの海洋エネルギー関連施設の建設目標を公表している。国立の研究所である KRISO を中心に、波力発電、潮流発電の研究開発を実施中。 KRISO が 20kW の海洋温度差発電設備を保有済み。現在、1MW 海洋温度差発電プラントの建設を Kiribati で計画中。 KRISO が振動水柱型、可動物体型の波力発電に関する基礎研究を継続実施中。波力発電実証フィールド建設も準備中。
	応用研究・開発	◎	↗	Sihawa 潮汐発電所（254MW）を建設済み（2011年） 波力発電：KRISO が 500kW の振動水柱型装置を Jeju 島に建設済み。 300kW の浮体式の振り子型装置も製作済み。 1MW 潮流発電装置を Uldolmok で建設済み。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

全体として参考とした文書

- 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 環境分野（2017年）」（CRDS-FY2016-FR-03）・「研究開発の俯瞰報告書 エネルギー分野（2017年）」（CRDS-FY2016-FR-02）（2017年3月）。

- 1) 柳澤教雄,「地熱発電の現状」,『日本エネルギー学会誌』93(2014):1140-1147.
- 2) Bertani R., “Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report”, *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, PaperNo.01001, 2015.
- 3) 近藤一郎,『海洋エネルギー利用技術』,森北出版,2015.
- 4) IEA-OES, “Annual Report – An Overview of Ocean Energy Activities in 2017”, www.ocean-energy-systems.org (2019年2月1日アクセス)。
- 5) IEA-OES, “Annual Report – An Overview of Ocean Energy Activities in 2016”, www.ocean-energy-systems.org (2019年2月1日アクセス)。
- 6) IEA-OES, “Spotlight on Ocean Energy (2018)”。
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構,「海洋エネルギー」,『NEDO 再生可能エネルギー技術白書』,6章,第2版,森北出版,2014.
- 8) 田窪祐子,「海洋エネルギー技術研究開発に係る NEDO の取組」,平成29年度 NEDO 新

- エネルギー成果報告会, 2017.
http://www.nedo.go.jp/events/report/ZZFF_100015.html (2019年2月1日アクセス) .
- 9) IEC/TC114, Presentation of latest status on wave, tidal and other water current converters, Seattle meeting, 2018.
 - 10) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 「平成 29 年度地熱部事業成果報告会資料」, 2018.
 - 11) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター, 「地熱発電分野の技術策定にむけて」, 『TSC Foresight』, 12, 2016.
 - 12) 火力原子力発電技術協会, 『地熱発電の現状と動向 2017 年』, 2018.
 - 13) Dobson P., *et al.*, “Supercritical Geothermal Systems - A Review of Past Studies and Ongoing Research Activities” , *Proceedings, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2017.
 - 14) Fridleifsson G.O., “IDDP-2 – Drilling into the supercritical at Reykjanes” , *Proceedings, New Zealand Geothermal Workshop*, 2017.
 - 15) Bertani R., *et al.*, “The First Results of the DESCRAMBLE Project” , *Proceedings, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2018.
 - 16) Jolie E., *et al.*, “GEMex – A Mexican-European Research Cooperation on Development of Superhot and Engineered Geothermal Systems” , *Proceedings, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2018.
 - 17) Cladouhos T., *et al.*, “Super Hot EGS and the Newberry Deep Drilling Project” , *Proceedings, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2018.
 - 18) 長縄成実, 「超臨界地熱開発実現のための革新的掘削・仕上げ技術の創出」, 『地熱技術』, 43: 57-63, 2018.
 - 19) 電力土木技術協会「海洋インバースダム」 ,
http://www.jepoc.or.jp/tecinfo/library.php?_w=Library&_x=detail&library_id=386 (2019年2月1日アクセス) .
 - 20) 海洋インバースダム協会 ,
<http://kid-s.jp/index.html> (2019年2月1日アクセス) .
 - 21) 木下健, 「海洋エネエネルギー利用推進の課題」, 文部科学省 科学技術・学術審議会 海洋開発分科会 (第 33 回) , 2012.
 - 22) IEA-OES, “ANNEX II Extension, Development of Recommended Practices for Testing and Evaluating Ocean Energy Systems” , 2011.
 - 23) TPOcean, "Strategic Research Agenda for Ocean Energy", November 2016,
https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2017/03/TPOcean-Strategic_Research_Agenda_Nov2016.pdf (2019年2月1日アクセス) .
 - 24) Ocean Energy Forum, "The Ocean Energy Strategic Roadmap",
https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/sites/maritimeforum/files/OceanEnergyForum_Roadmap_Online_Version_08Nov2016.pdf (2019年2月1日アクセス) .

2.9 電気エネルギー利用

（1）研究開発領域の定義

電気エネルギー利用のうち、特に分散型エネルギーマネジメントに関する科学、技術、研究開発を記述する。再生可能エネルギー拡大を背景に電気の需要家が consumer から prosumer に変貌し、電力エネルギーシステムを構成する重要なセクターに転換していく分散化の流れを中心とし、関係する機器、システム、センシング、ICT、データマネジメント、最適化制御等の総体を本研究開発領域とする。

（2）キーワード

分散型エネルギーリソース（DER）、プロシューマー、ディマンドリスポンス（DR）、VRE 出力変動対応技術、エネルギー・リソース・アグリゲーション（ERA）、バーチャルパワープラント（VPP）、トランザクティブ・エナジー／P2P、エネルギーデータサイエンス、V2H／V2G、ZEB／ZEH、スマートインバーター

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

持続可能な世界の実現に向けて、再生可能エネルギーが拡大し、その大宗が電気エネルギーであることから、エネルギー最終利用形態の電化は必然的潮流である。このパラダイム転換を伴っても、電気エネルギーは安定かつ低廉に確保され、品質が維持されなければならない。しかし、需要家側に大量導入された分散型エネルギーリソース（DER）が個々勝手に動作すると、電力ネットワークの安定な運用や周波数、電圧等の基本的品質の確保が困難になる。一方、需要家が DER を保有する目的には、エネルギーコストの低減や災害時でも必要な電気利用を可能とするレジリエンス確保等もあるため、需要家単位のメリット最大化とエネルギーシステム全体での運用・品質維持のための最適化という異なる目的を同時に達成できる仕組みの構築が求められる。

加えて IoT の潮流により、需要家の電気消費量、電力システム運用に関わる電流・電圧や設備情報、及び PV 発電量等に関係する気象データなどは、デジタル化が進むと想定される。複雑化する電力ネットワーク運用のためには、これらデジタルデータを用いた最適化システム（グリッド EMS : GEMS）が必要となり、需要家においても電気消費量や保有する DER の最適な運用のために EMS（BEMS、HEMS）が不可欠なものとなる。このように分散して存在する EMS は異なる目的の下で個々に運用が最適化されるが、EMS 間でデータを共有し活用する仕組みがあればさらに大域的なエネルギーシステム全体での効率向上、温暖化ガス排出削減、設備のスリム化・稼働率向上等の効果が期待される。さらに、本領域の広義の視点からは、他の社会インフラ、例えば交通システムなどとの連携により、人の動きの影響を考慮した都市レベルでの多角的・包括的な最適問題や、人口減少に伴う過疎化・行政コスト増大といった重点課題への対策検討の基礎を提供することが期待できる。

[研究開発の動向]

電気利用を考える時は、料金やこれを決めるメカニズムの理解も重要となる。歴史的には世

界共通に総括原価型電気料金が採用され、電力供給と料金の安定化に寄与した。研究開発もこの両面の観点から、規模拡大への対応、高電圧化による損失低減、設備のコンパクト化、コストダウンが中心であった。電気事業やその技術の成熟に伴い、欧米では1990年代から自由化が進められ、市場取引への移行による競争原理の導入、効率化による料金低減が追及された。現在は、第3の波が到来していると考えられている。即ち、これまでは電力システムは安定供給を前提としつつ経済原理で考えてきたが、昨今は地球環境問題への社会的要請や需要家のニーズに応えることが中心になっている。例えば、経済性の観点のみでは導入が進まない再生可能エネルギーをはじめとする低炭素技術や省エネルギー推進について、各国は政策による導入誘導を図っている。具体的には、欧州の Clean Energy For All Europeans package¹⁾、我が国のエネルギー基本計画²⁾ 等がある。米国ではエネルギーに関しては州毎に政策が決められ、カリフォルニア州の Integrated Energy Policy Report³⁾ やハワイ州の Energy Policy Directives⁴⁾ 等が先導している。

経済原理から社会的要請へと重点が移行したことにより、技術的・政策的に様々な課題が出てきており、主要な研究開発動向もこれに付随するものとなっている。各国のエネルギー政策は、共通して再生可能エネルギー導入拡大と需要側のエネルギー利用の高効率化、および電化促進を求めている。また多くの国の政策として建物・住宅の省エネルギー化が掲げられている。日本での ZEB/ZEH（ネットゼロエネルギービル／住宅）²⁾、米国・カリフォルニア州でのグリーンビルディング等では、省エネルギー建物の定義を定量的に明確化し、断熱・高効率機器の導入による単体での省エネルギー化を基本として、再生可能エネルギーのオンサイトでの発電や外部からの購入を促進している。カリフォルニアでは、一定規模以上のビルにデマンドリスポンス（DR）への対応を義務付ける方向であり、BEMSや機器の自動制御が求められることになる。DR普及には、ISO、TSO/DSO（日本では一般送配電事業者）、小売り事業者との通信が必要となることから、インターフェースの標準化が進められている。また、需要サイドの大きな動向としては、運輸の電化、即ち電気自動車（EV）へのシフトがある。

再生可能エネルギーは、ドイツや日本では固定価格買取制度（FIT）、米国各州では Renewable Portfolio Standard（RPS）などの政策誘導により、風力や太陽光発電（PV）といった変動性再生可能発電（VRG）の導入が急速に進んだ。風力発電の普及は、欧州北部、アメリカ中西部等、また PV についてはドイツ、カリフォルニア、ハワイ、アリゾナ等で特に顕著である。この VRG の拡大は電力貯蔵の必要性を増大させている。また、住宅太陽光発電（Roof top Solar）の導入も各地で進み、同様に電力貯蔵の導入も進んでいる。EV も含めると、これらの分散型エネルギー資源（DER）は需要家内（電力メーターの内側）で起こることから Behind-the-Meter（BTM）の資源と呼ばれる。以下に VRG の普及による課題を示す。

- 発電量の予測や制御が困難：発電量が天候に依存して変動するうえ、VRG 設備の導入が電気事業者の計画に基づいたものではなく、優遇政策等に左右されるなど予測が困難である。さら DER は系統運用者が制御できないエネルギー資源になる。
- 電気の流れの双方向化に伴う課題：従来の電力システムは一方向の電気の流れが前提であるが、Prosumer からの発電の増加により双方化の進展し、課題が顕在化している。例えば、送電網と配電網の相互作用を考慮した電力システム全体の運用の在り方や、系統混雑・電圧逸脱等の局所的な課題への対応などが挙げられる。
- 系統での慣性力不足による過渡的な安定性の課題：PV、一部の風力発電、バッテリーな

どのインバーター接続の発電設備・機器の総量の増加に伴い、火力発電設備などの従来の慣性力を有する調整電源が減少し、系統事故などの擾乱に対する系統の安定性が低下する。

- 市場における価値の検討：PVのように導入時に何らかの経済的な補助が関与し、発電に要する燃料費がゼロである資源を市場に取り込んだ時の経済的価値・料金の考え方について新たな検討が必要である。

これら課題に伴う各国の技術開発や取組は、VRGやDERをどのようにして電力システムの計画・運用に取り込み、変動の緩和・制御に貢献させ、市場に取り込んでいくかである。またDERの主要機器である蓄電池の急速な価格低下が進行中であることも考慮する必要がある。このような状況を踏まえた上で、以下に主要な研究開発や実装に向けた技術、制度の動向を示す。

● 住宅でのPV発電電力の自家消費促進

- 逆潮流量と電気料金を相殺する Net Metering (NEM) の廃止（ハワイなど米国）、FIT終了後の買取ルール（日本）に伴う技術導入。例えば、バッテリーの設置、PV・電力需要との協調制御、このための HEMS、クラウドコントロールシステム等。

● 分散型エネルギー資源（DER/DR）の活用・統合制御による Flexibility の創出と系統運用サポート、および市場への統合

- 蓄電池によるアンシラリーサービスやランピングサービス（ダックカーブ対策）、EV充放電・給湯機による周波数制御・需要シフト（電力ピークマネジメント）。また需給調整市場、エネルギー市場、容量市場への参入化。
- 米国において連邦エネルギー規制委員会（FERC）は、2011年10月ISO/RTO卸電力市場に、高速ランピング調整力を提供可能な電源に対する対価提供を義務付ける「FERC Order 755」を發布し、2018年2月には、電力貯蔵システムの容量市場、エネルギー市場、及びアンシラリーサービス市場参加を阻む障壁の除去を系統運用機関に義務付ける「FERC Order 841」を發布⁵⁾。

● DER統合の技術的検討

- 需要家側にあるDER/DRの統合制御（VPP）のため高度な制御手法と情報通信技術・標準化の検討、DER導入可能量（Hosting Capacity）評価、設備計画・解析ツールの構築、スマートインバーターや分散蓄電池の管理・制御手法の検討、マイクログリッド内での活用・系統連系など多岐の検討⁶⁾。

● VRGの発電量の予測、気象データ活用、精度評価と計画・運用への活用

● その他

- 上記の進展と並行して、新しい機能の系統側のSCADA、EMSへの搭載、需要家のEMSとのData・情報連携、ISO・TSO・DSO・アグリゲーター・需要家の各システムのアーキテクチャー・市場との連携ならびに最適化を実現する制御手法・アルゴリズム開発等
- 社会的に進展するIoT、Big Dataと解析、電力エネルギー用AIの開発・活用。
- 需要家の需要制御や保有するDER制御に対する理解促進。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

- 世界各地で VGR、DER を活用し、Flexibility を創出し、系統運用・電力市場で活用するためのプロジェクトが進行中
 - 日本では、経済産業省が 2016 年 1 月に設置したエネルギー・リソース・エネルギー・アグリゲーション・ビジネス（ERAB）の検討体制と VPP 実証事業⁸⁾において、電力システム制度検討・市場設計との連携、標準通信規格の整備、計量方法、サイバーセキュリティ等の検討により、DER 統合型 Flexibility 創出を進めている。
 - 2001 年にカリフォルニア州にて発生した大規模停電を契機に、米国において、電力位相計測装置（PMU: Phasor Measurement Unit）による監視制御システム（SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition）の高度化が進んでいる。2015 年時点においては 1700 個を超える PMU が米国の電力系統全域に設置され、これらによって計測される周波数をリアルタイムで監視可能な制御システムを構築している⁷⁾。本データを活用した系統状態把握に加えて、異常予兆検知、事前対応との研究が実施されている。
- 自家消費に向けたシステム構築や制御
 - 米国では、PV 導入促進策である NEM が電力系統への対価の不公平感から、廃止の動きがある。また日本では、住宅用等 10kW 以下の PV 設備で、2019 年から、FIT 切れの設備が大量に発生する。このため今後世界的に、需要のシフトによる需要創出（シフト DR や上げの DR という）や蓄電池・EV への充電など、自家消費に向けたシステム構築や利益最大化の制御等が重要になる。
- PV や風力発電の Flexibility を提供する機能や制御の技術検討やハードウェアの設計・開発・運用
 - PV の例：インバーターに自律制御機能（Advanced Functionality）を持たせ、系統運用のサポートを向上させる技術、さらにはこれを最大限活用するための各制御機能を定義するパラメーター設定に関するシミュレーション検討・実フィールド試験など。
 - 風力発電の例：ブレードのピッチ角制御による出力制御や出力の増減制御・周波数制御。
- 送電系統と配電系統の統合化のためモデル化、シミュレーション手法の検討、ツールの開発
 - 従来は送電系統と配電系統両者を分離した検討が可能。しかしながら配電系統や需要家内部（BTM）に DER が増加し、周波数調整のような電力系統全体のサポート機能を担うとともに、配電系統の電圧制御のために無効電力制御を常時行う状況になると、無効電力の総計が上位の送電系統に及ぼす影響や発電機脱落等の系統事故の際の系統全体の過渡的な振る舞いの変化等の定量的な検討が必要になる。
- サイバーフィジカルシステム（CPS）の計画・運用のための制御アルゴリズム、データ処理手法等
 - 電力系統や需要家の機器、さまざまなセンサーの設置によりデジタル情報として取得可能となり、アセット管理、Flexibility 創出、需要家エネルギーコスト最小化、Resilience 向上など、各目的に応じた EMS の設計や複数 EMS 間の相互協調を行うための制御アルゴリズム、データ処理手法等が必要。
- サイバーセキュリティ
 - デジタル化によるサイバー攻撃が脅威となっている。米国では 2009 年に電力系統のサイバーセキュリティに関するツールの開発やガイドラインの作成が加速化した。2010 年にはスマートグリッド向けガイドラインである NIST IR 7628 が 2010 年に発行され、2014

年にその改訂版が発行されている⁷⁾。今後、IoT が進行し、需要家の BTH に設置される小容量のシステム・デバイスも含めた“制御系”に発展していく上で、サイバーセキュリティの検討は益々重要になると考えられる。

- 需要家の電力消費データの活用

需要家の電力消費データは今後の電力システム運用や新たなサービスビジネスの展開において有用性が高い。需要予測への活用など、今後の不確実性拡大、DR 活用、DER 普及等において重要性が高まる。世界的にスマートメーターの導入が進められており、15 分～30 分粒度の消費電力データが蓄積されていくことになる。我が国では、2020～2024 年目途に全世帯のサービスメーターがスマートメーターに置き換わる。またサービスメーターの電流センサーデータ等を活用したデータ解析により需要家内の機器毎の電力消費パターンに分解する技術（Non-Intrusive Load Monitoring：NILM または Disaggregation と呼ばれる）の開発が進んでおり、需要内の個々の機器の使われ方を把握し、機器故障検知、不在検知などのサービスへの活用が指向されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

<国内>

- 2016 年度から大規模な VPP 実証事業⁸⁾ が行われており、リソースの拡大とともに近未来に制度化される需給調整市場の各商品メニューに対応した VPP の制御特性、確実性等の検討が進められている。2018 年度は V2G を新たな VPP リソースとして実証に取り込む。
- NEDO 事業の一環で、風力・太陽光発電等 VRG の増大に向けて、気象情報や履歴データを駆使した発電予測技術、蓄エネルギー機器（蓄電池、CAES 等）の制御による変動緩和技術⁹⁾、風力・PV の出力制御システムと技術の標準化、PV 発電と需要家負荷の組合せエネルギーマネジメント・アグリゲーションによる余剰電力の有効活用、次世代の配電系統計画・運用・制御やスマートインバーターの活用研究¹⁰⁾ などが進められている。
- JST の未来社会構築実証事業において、持続可能な超スマート社会に向け、電力、交通の 2 大インフラの低炭素化視点での統合と、安心・安全で活力ある街の構築に寄与する様々なサービス提供の仕組みを連携させる超スマートシティ・サービスマネジメント・プラットフォームの構築を目指すプロジェクトが開始している¹¹⁾。電力システムと交通システムのモデリングを一体的に行う手法開発を中心に、サービスやイベントなどと連動した住民の動きも取り込んだデータ統合の仕組みと、これを活用したサービス創出のためのデータ連携インターフェースの研究等が進められている。

<国外>

- 送電系統 / 高圧配電系統への再生可能エネルギー導入拡大を目的とした実証試験として大規模再生可能エネルギーの統合（Integration of Large-scale renewable energy sources: L_RES）が米国・欧州を始めとして進められている。検討事項としては、洋上風力発電の統合、風力発電群の統合による電圧・周波数管理のための新しい制御検討、出力調整可能な電源群の統合に向けた新しい市場の検討・評価のための計算プラットフォームの構築、RES の出力予測、配電事業者のデマンドマネジメント統合によるアンシェラリーサービスの提供を含む⁶⁾。
- 中国の西部（貴州、雲南、広西等）から東部（広東、上海、北京等）へ、長距離・超高圧

送電技術を用いて電気を送電し、東側の電力不足を解消する計画¹²⁾「西電東送」プロジェクトが進められている。

- **Renewable Energy Integration Demonstrator Singapore (REIDS)** プロジェクト：シンガポール経済開発庁・環境水資源省の助成の基で南洋理工大学と 31 の国内外の企業（2018 年 7 月時点）が共同で実施している数百万シンガポールドル規模のマイクログリッド実証事業である¹³⁾。太陽光、風力、潮力発電とディーゼルエンジン、廃棄物発電、power to gas などの技術を組み合わせたテストベッドになっている。
- 2017 年に米国ニューヨーク市のブルックリン地区で、ブロックチェーン技術に基づき P2P で再生可能エネルギーの電力取引を地域内で行う実証（Brooklyn Microgrid プロジェクト）が始められた。電力取引システムはスマートメーターを用いて、LO3 Energy 社によって開発された。P2P による新しい電力取引によって、再生可能エネルギーの余剰電力が発生した際に、電力消費の促進より需給調整が行われることや、新しいビジネスモデルの創出が期待されている¹⁴⁾。

（5）科学技術的課題

- **VRG/DER 拡大に伴う電力系統との連携・協調、諸課題への対応**
VGR/DER が大量に導入された電力システムで起こる諸現象の解明、特に慣性力低下、パワーエレクトロニクス機器の高度化、系統故障時に起こる過渡現象の安定供給に必要な対策の開発システムのモデリングの精緻化、各種 DER や需要、ならびにこれらを集合化したモデルの精緻化、送電・配電系統モデルの統合手法・シミュレーション手法（T-D Interface）の開発・整備が必要。また、シミュレーション高度化のための電力系統モニタリングのレベル向上（PMU による広域モニタリング、配電系統のセンシングポイント拡大）。さらに、インバーター接続の DER の拡大と火力発電の減少に伴う慣性力（Inertia）不足への対応（回転型調相機や電力貯蔵の活用等）、インバーター高機能化（Advanced Functionality）が必要になる。
- **階層型監視制御アーキテクチャー、分散システム間協調**
電力システムは、系統運用者、発電事業者、小売り事業者、そして電力市場と需要家がある。欧米では、系統運用者として主として送電系統を運用する ISO / TSO と配電系統を運用する DSO が分かれて存在している（日本では一般送配電事業者に統合されている）。さらに DR や VPP などを需要家と各事業者・市場を仲介するアグリゲーターが新たな第 3 の事業者として現れた。デジタル化の潮流において、各事業者・需要家はそれぞれの領域を最適化するシステムを保有する必要がある、同時にこれらのシステム間でデータの連携を行う必要がある。このような階層型の監視制御の機能分担、必要なデータ種・粒度・交換タイミング、分散するシステム間での協調と目的とする最適化の実現に関する研究開発ニーズが高まっている。
- **小規模電力の需要家間取引**
DER/DR の電力システムへの統合の視点が主軸になっている一方で、市場を介さない電力売買の仕組みの研究（P2P 取引、系統制約殿整合問題等）、取引データの管理とセキュリティの確保（Blockchain の活用、決済との連携等）が関心を集めている。
- **通信技術**：多数の DER を統合化するための低コスト通信技術、データモデル標準化、通

信プロトコル標準化、市場への統合（要求と Grid Code）、サーバーセキュリティ確保
今後益々拡大する DER を通信で結び統合制御できるようにするシステムの研究開発・実運用が始まっている。しかしながら、データモデルや通信プロトコルについては既存のものが存在している中、如何に相互接続性を容易にするように標準を整備していくかが課題になっている。特に住宅用のシステムや機器、さらには近年流行している IoT デバイスなど、低価格・低リソースの対象のサイバーセキュリティの確保には、幅広い業界を横断した検討と対策が必要となる。

- 不確実性の予測と計画および運用への適用

VRG の増大により出力を予測する技術開発の重要性が増す。広域気象情報、衛星データや過去の発電実績データをもとに深層学習に代表されるデータサイエンスの手法を適用し、電力システムの運用に役立つ精度を確保する。特に周波数変動を一定以内に収めるため、既存の発電機や統合された DER/DR の動作特性から、どれくらい先の予測が必要になるか運用ニーズとの整合をとりながら、必要な精度を見極めた研究開発が肝要となる。

- 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を、プライバシー保護可能なオープンデータベースの開発も含めて実施する。また、消費と供給電力の動的な挙動を考慮した電力価格、インセンティブ設計手法などの行動経済学的研究も必要となる。

- IoT/ ビッグデータ / 人工知能の応用

時間粒度・空間粒度が異なる膨大なエネルギーデータ（Energy Granular Data）に対して、通信ネットワークの負荷低減を目的としたデータスリム化・スクリーニング・特徴抽出を実施する方法論の研究開発が必要。また、マルチスケールエネルギーリソースのアグリゲーションによる高速・高精度需給調整力の創出方法論に関する研究も今後有用になる。こうした課題に、IoT/ ビッグデータ / 人工知能という急速に進化している科学技術を取り込むことも今後の重要な方向性である。

（6）その他の課題

- オープンデータ整備

- 需要サイドでは、新たなデータ処理方法（data driven analytics）や制御手法の有効性検証に実データの利用が不可欠であるが、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。ベンチマーキングに使えるオープンデータが整備されていないため、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、制御効果の確実性を確保する需要家行動など未解明である。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・電力市場の制度設計など、広範な研究開発領域が未実施のまま残されている。
- データを異なる事業者の壁を超えて利活用し、新たな価値を創出して社会実装にまでつなげていくのが重要である。各種事業者間の利益相反があることから、中立で公平な立ち位置である学が牽引・調整役となり、官による制度設計を踏襲しながら多種多様な企

業が連携した産学官連携プラットフォーム型の EMS 研究開発や事業モデル研究などを推進していくべきである。

- 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エネルギー・ビッグデータ整備支援である。またデータを集める仕組み自体も整っておらず、例えば補助事業においてはデータ提供を義務付けるなどの工夫も必要になる。
- その他
 - 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。
 - 実証補助事業を行う経産省、環境省等と総務省、国交省（自動車運行情報など）など省庁間の連携。
 - あわせて国際標準化の推進、電化の推進、EV の課金システム・計量への仕組み、さらには近々開設される市場への統合なども課題となっている。

（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	○	→	● JST CREST 事業 ¹⁵⁾ 、NEDO 事業 ^{9,10)} などの実証事業において、電気自動車や再生可能エネルギーの導入拡大に向けた分散型 EMS に関する技術開発や社会実装・実現に向けた研究として、衛星データを用いた予測技術、蓄電池・スマートインバーターによる出力制御技術、ユニットコミットメントモデルなど、多岐にわたる研究が大学、研究機関にて取り組まれている。
	応用研究・開発	◎	↑	● 継続的な再生可能エネルギー電源の導入、電力系統の安定化を目的として、太陽光発電/風力発電の出力制御技術、ディマンドレスポンス DR/VPP、ネット・ゼロ・エネルギー・ビル (ZEB)、ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス (ZEH)、配電損失最小化の実証試験など、電力会社を始めとした多くの企業・研究機関、自治体が参画した実証試験が数多く進められている。近年では、電動車用電池の再利用 ¹⁶⁾ 、バーチャルパワープラント (VPP) 構築、VPP / V2G アグリゲーター ⁸⁾ 、スマートインバーターその他、IoT、AI 技術を活用したサービス・電力ビジネス開発 ¹⁷⁾ 、ブロックチェーン ¹⁸⁾ に関する実証試験も活発に行われている。
米国	基礎研究	◎	↑	● エネルギー省 (DOE: Department of Energy) は The Grid Modernization Laboratory Consortium (GMLC) とよばれる、14 の国立研究所及び複数の大学、産業界などからなる研究所連合を発足させ、電力系統近代化を目的とした 88 件の研究プロジェクトを進めている ¹⁹⁾ 。先進的なエネルギー貯蔵システムの開発、再生可能エネルギーと電力系統の統合など、幅広い領域についてカバーしている。
	応用研究・開発	◎	↑	● サイバーセキュリティに関するスマートグリッドのガイドラインや、ツールの開発などが継続的に行われている。また、AMI と PCT (Programmable Communicating Thermostats) による自動化システムを用いた、ディマンドレスポンスの検証効果が報告されている ⁷⁾ 。IEEE1547 によって、分散型電源の連系要件の標準化が行われており、これに応じて先進的な制御機能を具備したスマートインバーターの開発・実装が行われている ²⁰⁾ 。また、米国初となるロードアイランド州ブロック島南岸沖の商業用風力発電プロジェクトを契機に、欧州と比較して遅れをとっていた洋上風力発電も開発が加速化している ²¹⁾ 。

欧州	基礎研究	◎	→	● EU 全体の R&D は 540 件であり、資金はおよそ 2000 億円に達する。国家プロジェクトから企業間連系と幅広く行われており、主にスマートネットワークマネジメント、需要家側のマネジメント、分散電源と蓄電システム統合の 3 つが挙げられる⁶⁾。2017 年はディマンドリスポンスのための解析ツール作成や評価・Intelligent electricity distribution network のためのパワーエレクトロニクス機器や通信セキュリティ²²⁾、並びに送配電協調のための通信や電気・ガス統合活用に関する検討が進められている²³⁾。 ● (英国) 欧州の中で、ドイツに次いで 2 番目に R&D のプロジェクト件数が多い⁶⁾。トピックは、いずれも ICT 技術に基づいており、リアルタイム通信に基づく系統運用やスマートメーターを活用したディマンドリスポンスによる電力需要の制御、蓄電池やスマートインバーターによる配電系統の制御など多岐に渡り、活発に行われている。 ● (ドイツ) 欧州の中で、最も R&D のプロジェクト件数が多い⁶⁾。英国と同様に ICT 技術を活用したリアルタイム通信に基づく系統運用や蓄電池による電力需給バランス調整に関する検討が実施される。さらに、電気自動車の普及拡大を受け、アンシラリーサービスに関する検討も盛んに行われている。 ● (フランス) フランス電力会社 (EDF) では、新しいエネルギーシステム (ヒートポンプ、デジタルシステム) の開発や、原子力発電所制御システムの安全性の向上等を優先事項として、27 の国籍からなる開発部門による研究開発が進められている²⁹⁾。また、大手エネルギー事業者 Engie は電力のみではなくガスについてもあらゆる用途 (暖房・自動車等) で不可欠であると主張し、バイオメタンや合成メタン、水素などによるガスのクリーン化を優先事項としている³⁰⁾。
欧州	応用研究・開発	◎	→	● EU 全体での実証試験は 410 件、資金はおよそ 4700 億円に達する。とりわけ、フランス、ドイツ、デンマークにおいて実証が盛んに行われている。EU Horizon 2020 での取組として、分散電源と蓄電池との統合活用や商業施設用の大規模燃料電池の実証などが行われている⁶⁾。加えて、広域計測システム (WAMS) の構築や、EV・PHV の V2G やアンシラリーサービスへの活用⁶⁾、並びに電力系統での大規模蓄エネ装置の活用、系統監視システム、卸売市場に関する実証試験が進められている²³⁾。 ● (英国) 低炭素化社会の実現に向け、ガスから電力へのシフトを促すことを目的に、ヒートポンプを用いた電力需給調整能力の実証検証が NEDO, BIS (Department for Business, Innovation and Skills, DECC (Department of Energy and Climate Change) としてマンチェスター市の共同で実施された²⁴⁾。また、2018 年 4 月にブロックチェーン技術と住宅用再生可能エネルギーを用いた需要家間の電力取引を成功させるなど、需要家のエネルギーマネジメントにおける実証が行われている²⁵⁾。 ● (ドイツ) Forschungscampus Mobility2Grid という実証プロジェクトでは、2016 年から 2020 年 12 月にかけて、電気自動車と電力系統の統合プラットフォームの開発を目的に、ベルリン地区における電力や暖房需要や電力品質、信頼性を考慮した充放電計画に関する実証が実施されている^{26,27)}。また、uGrip というプロジェクト²⁸⁾では、マイクログリッドにおける蓄電池が電力市場へ与える影響に関する検討が行われており、蓄電システムに着眼した実証が多い。 ● (フランス) 水素によるエネルギー貯蔵技術が注目されている。大手エネルギー事業者 Engie を中心として国内初の Power to gas 実証プロジェクト「GRHYD」を開始した³¹⁾。同プロジェクトには原子力・代替エネルギー庁 (CEA)、水素事業者 McPhy など 10 の機関が参加し、電気分解による水素製造と貯蔵およびガス配管網からの混合ガス (水素と天然ガス) 供給を試験的に実施する。

中国	基礎研究	◎	↑	●中国最大の電力会社である国家电网（SGCC：State Grid Corporation of China）は、2015年以降、産学連携による先進的な基礎研究の推進を背景に、38研究領域352件のスマートグリッド関連の研究プロジェクト ³²⁾ を進めている。研究領域としては、電力システムにおける人工知能の活用や再エネ電源の統合、配電自動化技術など多岐に渡る。
	応用研究・開発	◎	↑	●中国東北三省を始めとした郊外における風力発電などの再エネ電源の大量導入を背景に、都心への長距離・超高压送電（AC/DC） ³³⁾ に関する研究が特に進んでいる。その他に、中国初の離島型マイクログリッド（Yongxing Island）に関する実証プロジェクト ³⁴⁾ も進められている。
韓国	基礎研究	◎	↑	●韓国国内の学術論文の約三割を助成している韓国研究基金（National Research Foundation of Korea）では、2015年度時点でエネルギー・環境技術分野における戦略的研究開発プロジェクトを81件進行している ³⁵⁾ 。研究領域としてはスマートシティにおけるブロックチェーン技術の応用 ⁴³⁾ や系統運用における電気自動車利用 ³⁶⁾ など多岐に渡る。
	応用研究・開発	◎	↑	●韓国エネルギーの中心を担う韓国電力公社は2013年で終了した済州島スマートグリッド実証以降、発電事業5件 ³⁸⁾ 、送配電事業7件 ³⁸⁾ 、エネルギービジネス関連事業6件 ³⁸⁾ を国外で受託するなど、加速的にスマートグリッド技術の輸出産業を成長させている。また、2018年5月には同社のAMI技術に英国Arm社のIoTサービスを合わせることで、堅牢なサイバーセキュリティを構築する方針を発表している ³⁹⁾ 。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) European Commission, “Clean Energy for All Europeans,”
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-all-europeans>（2019年2月27日）。
- 2) 資源エネルギー庁「第5次エネルギー基本計画」,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf（2019年2月27日）。
- 3) California Energy Commission, “Integrated Energy Policy Report 2018,”
http://www.energy.ca.gov/2018publications/CEC-100-2018-001/CEC-100-2018-001-V1_pages.pdf（2019年2月27日アクセス）。
- 4) Hawaii State Energy Office, “Energy Policy,”
<http://energy.hawaii.gov/energypolicy>（2019年2月27日アクセス）。
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「エネルギー情報局が発表した『米国蓄電池市場の

- 動向』の概要」,
- <https://nedodcweb.org/wp-content/uploads/2018/06/EIA-Battery-Storage-Trends.pdf>
(2019年2月27日アクセス) .
- 6) Joint Research Centre (JRC), “Smart grid projects outlook 2017.”
- 7) U.S. Department of Energy, “Smart Grid Investment Grant Program Final Report,” 2016.
- 8) 環境共創イニシアチブ「平成30年度「需要家側エネルギーリソースを活用したバーチャルパワープラント構築実証事業費補助金」(VPP)」,
<https://sii.or.jp/vpp30/public.html> (2019年2月27日アクセス) .
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「電力系統出力変動対応技術研究開発事業（平成26年度～平成30年度）」,
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100069.html (2019年2月27日アクセス) .
- 10) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業（平成26年度～平成30年度）」,
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100075.html (2019年2月27日アクセス) .
- 11) 科学技術振興機構 未来社会創造事業「超スマート社会の実現」,
<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/super-smart/index.html#theme01> (2019年2月27日アクセス) .
- 12) Xiaotian Chen, ” The Impact of China's "West to East" Electricity Transmission Project on Energy Poverty” All Theses 2286, (2015):
https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.co.jp/&httpsredir=1&article=3291&context=all_theses (2019年2月27日アクセス) .
- 13) Energy Research Institute of Nanyang Technological University,
<http://erian.ntu.edu.sg/REIDS/Pages/AboutREIDS.aspx> (2019年2月27日アクセス) .
- 14) BROOKLYN MICROGRID,
<https://www.brooklyn.energy/> (2019年2月27日アクセス) .
- 15) 科学技術振興機構 CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah24-1.html (2019年2月27日アクセス) .
- 16) 中部電力株式会社, トヨタ自動車株式会社「電動車用電池のリユース・リサイクル事業の実証開始について」
<https://newsroom.toyota.co.jp/jp/corporate/20930377.html> (2019年2月27日アクセス) .
- 17) 大東建託株式会社, 東京電力パワーグリッド株式会社, 株式会社ギガプライズ「IoTプラットフォームを活用し、業界初の「スマートライフサービス」を実現するスマート賃貸住宅の実証試験を開始」,
http://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/press/2018/1483167_8687.html
(2019年2月27日アクセス) .
- 18) 関西電力株式会社「豪州パワーレジャージャー社とのブロックチェーン技術を活用した電力直接取引プラットフォーム事業に係る実証研究の開始について」

- http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2018/0424_1j.html（2019年2月27日アクセス）。
- 19) U.S. DOE,” DOE Grid Modernization Laboratory Consortium (GMLC) – Awards,”
<https://www.energy.gov/grid-modernization-initiative-0/doe-grid-modernization-laboratoryconsortium-gmlc-awards>（2019年2月27日アクセス）。
- 20) Electric Power Research Institute, “IEEE 1547-New Interconnection Requirements for Distributed Energy Resources Fact Sheet,” 2016.
- 21) U.S. Department of Energy, “2016 Offshore Wind Technologies Market Report,” 2016.
- 22) Henrik Dam, “Towards an integrated EU energy system: LCE1 & LCE3,”
https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/2_dam_henrik.pdf(2019年2月27日アクセス)。
- 23) Rémy Dénos , “Towards an integrated EU energy system: LCE2, LCE4, LCE5,”
https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/3_denos_remy.pdf(2019年2月27日アクセス)。
- 24) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 News Release「英国・マンチェスターにおけるスマートコミュニティ実証で協力協定」,
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100255.html（2019年2月27日アクセス）。
- 25) 海外電力調査会 , <https://www.jepic.or.jp/world/>（2019年2月27日アクセス）。
- 26) Mission Innovation, “Smart Grids Innovation Challenge Country Report 2017,”
https://smartgrids.no/wp-content/uploads/sites/4/2018/04/MI_IC1_Country_Report_2017.pdf（2019年2月27日アクセス）。
- 27) Forschungscampus Mobility2Grid,
http://forschungscampus-euref.com/bilder/M2G_OnePager_EN_161129.pdf（2019年2月27日アクセス）。
- 28) uGrip, <http://ugrip.eu/>（2019年2月27日アクセス）。
- 29) EDF France, “EDF Reserch & Development Strategy,”
<https://www.edf.fr/en/the-edf-group/world-s-largest-power-company/activities/research-and-development/edf-research-development-strategy>（2019年2月27日アクセス）。
- 30) 海外電力調査会 , <https://www.jepic.or.jp/world/>（2019年2月27日アクセス）。
- 31) ENGIE, “The GRHYD demonstration project,”
<https://www.engie.com/en/businesses/gas/hydrogen/power-to-gas/the-grhyd-demonstration-project/>（2019年2月27日）。
- 32) Mission Innovation, “Smart Grids Innovation Challenge Country Report 2017,”
https://smartgrids.no/wp-content/uploads/sites/4/2018/04/MI_IC1_Country_Report_2017.pdf（2019年2月27日アクセス）。
- 33) China Electric Power Research Institute,
http://www.epri.sgcc.com.cn/html/epri/col1010000020/2014-01/06/20140106182439291532858_1.html（2019年2月27日アクセス）。
- 34) China Southern Power Grid,
http://www.csg.cn/xwzx/2018/gsyw/201805/t20180528_167827.html（2019年2月27日アクセス）。
- 35) National Research Foundation of Korea,
http://www.nrf.re.kr/eng/cms/page/main?menu_no=209（2019年2月27日アクセス）。

- 36) Pradip Kumar Sharma and Jong Hyuk Park, "Blockchain Based Hybrid Network Architecture for the Smart City," Future Generation Computer Systems 86: 650-55, (2018)
- 37) Haneul Ko, Sangheon Pack and Victor C. M. Leung, "Mobility-Aware Vehicle-to-Grid Control Algorithm in Microgrids," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 19, no. 7: 2165-174, (2018):
- 38) Korea Electric Power Corporation,
<https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/B/htmlView/ENBJHP001.do?menuCd=EN020804>
(2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 39) Arm,
<https://www.arm.com/company/news/2018/05/arm-drives-smart-utilities-for-kepcos-behind-the-meter-project> (2019 年 2 月 27 日) .

2.10 熱エネルギー利用

（1）研究開発領域の定義

熱エネルギー利用のうち、民生部門、産業部門での熱の有効利用に関する科学、技術、研究開発を記述する。

次の3つの柱を考える。なお、太陽熱の熱としての利用を含める。

- ①蓄熱技術 工場の排熱を短時間または長時間蓄えて、工場の製造プロセスの予熱に利用し、化石燃料消費量の削減を図るものである。ここでは、蓄熱材とそれを用いた蓄熱システムを対象とする。
- ②熱再生利用技術 熱を利用する際に減少するエクセルギーを再生（補充）することで、中低温領域の熱需要を満足させる技術である。これにより、従来の化石燃料の燃焼に依存して熱供給する体系を変革でき、化石燃料の消費を削減できる。ここでは、熱再生（熱が持つエクセルギー率を高める）技術の理論、およびその要素技術として、熱交換、熱輸送、ヒートポンプ（機械方式、化学方式）技術を対象とする。
- ③居住空間の熱マネジメント（スマートビル・ハウス、断熱、遮熱、調光ガラス等）建築物において外部からの流入出熱を小さくして、夏・冬期の冷・暖房負荷を削減する技術である。ここでは、建築物向けの高性能な断熱材料、遮熱機能を持つ遮熱材料や遮熱窓の調光ガラスを対象とする。

（2）キーワード

■蓄熱技術

エネルギー貯蔵、熱エネルギー、再生可能エネルギー非定常電力、電気自動車、産業熱回収、エネルギーシステムの負荷・供給平準化、低炭素化

■熱再生利用技術

圧縮・膨張、蒸発・凝縮、吸着・脱着、伝熱（熱伝導、熱対流、熱放射）、熱交換器、ヒートポンプ、地球温暖化係数 GWP（Global Warming Potential）

■居住空間の熱マネジメント

ゼロ・エネルギー・ビル（ZEB）、ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）、省エネ、創エネ、エネルギーマネジメント、高断熱化、建物外皮性能、国際規格、ヒートアイランド現象

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■蓄熱技術

2016年の日本の最終エネルギー消費 13.3 EJ/y（Exa=10¹⁸）における産業部門シェアは46%（6.2 EJ/y）、家庭部門は14%（1.9 EJ/y）であり、エネルギー消費の大半をしめ、日本の省エネルギー、低炭素化への影響力が大きい部門である¹⁾。一次エネルギーは電力、熱エネルギーに変換され消費され、消費後は低品位な熱として環境に放出される。最終エネルギー消費のうち電力は26%（3.42 EJ/y）である。それ以外の74%（9.9 EJ/y）の大半は熱エネルギーとして利用され何らの熱変換プロセスを行い有効利用される、この際大量の排熱放出が伴っている。ある産業分野の排熱実態調査では利用可能な排熱量は全消費エネルギーの3.5%程度との報告がある*²⁾。熱変換プロセスの排熱ポテンシャルをこの3.5%とすると0.34 EJ/y（11

GW) に相当する。日本政府が計画する再エネ導入量は設備容量 70 GW で、大半が太陽電池 (PV) である。一般的な PV の年間稼働率を 12% とすると実効出力は 8.4 GW に相当する。熱と電力の区別は厳密にすべきであるが、排熱ポテンシャルは量的には再エネに対して比肩できるほどに大きいことから、排熱を中心とした熱エネルギーの有効利用は社会の低炭素化のための一つの重要手法である。

熱エネルギー利用のためには、まず時間的な供給と需要のギャップを埋めるための熱を貯める（蓄熱）機能が必須である。それを効率的に輸送するインフラ整備も必要となる。100℃以下の環境温度に近い排熱の回収、変換は従来から進んでおり、近年の社会的な技術要求は蓄熱の高密度化、熱貯蔵／出力の高速化、そして低コスト化である。これらへの対応には科学技術が必要であり、開発された技術が持つ社会、経済的意義は高い。

* 注記） 2010 年度基準での主要産業分野の利用可能な排熱量（0.23 EJ/y）対産業部門の最終エネルギー消費（6.58 EJ/y）の割合として試算。

■熱再生利用技術

熱再生利用技術には、①地域、建物群レベルの熱供給システム技術、②機械装置レベル（吸収式、吸着式、ヒートポンプなど）の技術、③材料レベル（吸収剤、吸湿材、冷媒）の技術がある。社会・経済的意義については、熱供給事業などの地域、建物群レベルの取り組みが最もインパクトが大きいと思われるが、まちづくりや防災などとも関連するインフラの整備であり、熱再生利用技術を単独で考えることはできない。機械装置レベルの技術については、IOT や AI 技術を活用した省エネ技術、ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の実現へ向けた建物全体の省エネ技術への展開、空調技術については、空気清浄、湿度管理など IAQ（インドア・エア・クオリティー）技術との融合がある。これらは事業としても魅力的な技術開発分野である。材料レベルの技術としては、低 GWP 化へ向けた次世代冷媒の開発、個別の用途に合わせた吸収剤、吸湿材の開発などがあり、科学技術的意義は最も大きい。

■居住空間の熱マネジメント

日本の民生部門はエネルギー消費の 3 割を占める。民生部門は産業、運輸部門に比べ増加が顕著であることから、徹底的な省エネルギーの推進が求められる。閣議決定された「エネルギー基本計画」の中に「建築物については、2020 年までに新築公共建築物等で、2030 年までに新築建築物の平均でゼロ・エネルギー・ビル（ZEB）を実現することを目指す」と目標が示されている。日本の二酸化炭素排出量を 2030 年までに 2013 年度に比べて、民生部門で約 4 割の削減が求められている。これを実現するために、居住環境の質を維持し、向上しながらエネルギー消費量も同時に抑えていく対策が必要である。そのためには、技術的な面から建築物の断熱・省エネ性能を高めることは重要かつ不可欠である。また、太陽エネルギーなど再生可能エネルギーの活用、エネルギーネットワークのスマート化を図ることも重要な課題に挙げられる。そして、一般の消費者に現状や省エネ推進の理解が得られるよう情報提供を進める必要がある。建物が集中する都市域では都市高温化（ヒートアイランド）が取り上げられる。ヒートアイランドの対策（緩和策）として、街路空間の材料や形状の改善が注目されている。知見の集積が十分なレベルにあるとはいえず、具体的な街区設計への応用も進んでいない。これらの対策には空調利用の削減など、都市の省エネルギー・低炭素化や高温化への適応策としての貢献も期待される。

[研究開発の動向]

■蓄熱技術

①産業部門の蓄熱

2010 年度推計で産業部門で、100℃以上の利用可能な排熱エネルギーは 0.113 EJ/y、そのうち化学産業が 32% (0.036 EJ/y)、鉄鋼産業が 25% (0.028 EJ/y) であり²⁾、これら産業の蓄熱、有効利用は省エネルギーへの実効性が高い。産業プロセスの温度域は環境温度付近から鉄鋼の 1500℃程度まで広域である。高温になる程、顕熱蓄熱では放熱損失が大きくなるので、高温では何らかの化学変換が有効であり、化学反応を用いた蓄熱（化学蓄熱）、さらには物質変換（燃料改質、熱化学水素製造）により高温熱エクセルギーを高効率に回収することが検討されている。

蓄熱方法には顕熱、潜熱、化学蓄熱がある。顕熱は貯湯槽としてコージェネレーションシステムの熱エネルギー貯蔵に利用されており、家庭の温水供給用、燃料電池の排熱蓄熱から地域熱供給用の大型蓄熱までが普及しており、技術的に確立している。次に潜熱蓄熱が良く検討されている、特に環境温度付近の 0℃から 30℃付近までの潜熱蓄熱が、保冷、室内温度調整等で普及している。

②不安定再エネの蓄熱

新たな市場として再エネの蓄熱利用が重要である。近年の急速な再エネ普及において再エネの不安定電力の効率的な受入れが重要な問題になりつつある。再エネ先進国のドイツでは再エネが電力供給の 30% 超を担っているが、二酸化炭素排出係数 450 g-CO₂-eq./kWh (2015 年) は殆ど減少せず、デンマーク (同 174 g)、フランス (同 46 g) に対して、2～10 倍である³⁾。その理由は PV などの再生可能エネルギーの変動は秒単位であり変化に対して、再エネの出力変動を補う火力発電の出力変動運転が火力発電の低効率化を導き、結果として CO₂ 排出を増やしているからである。このため再生可能エネルギーの大量導入に応じて出力安定化のためのエネルギー貯蔵が重要になっている。とくに国際電力網を持たない日本はドイツより深刻な影響が今後懸念される。貯蔵には蓄電池が期待されるが高コスト、変動への対応性の限度、低い火災安全性が課題である。これに対して熱エネルギー貯蔵は設備コストが蓄電池の 1/40~1/100 程度と推定されることから近年世界的に検討されている。Siemens (ドイツ、電力メーカー世界大手) は、砕石への貯蔵を検討している。MIT (Massachusetts Institute of Technology、米国) は、耐熱煉瓦を蓄熱材にした研究を米国エネルギー省、電力会社の支援を受けて行っている。これらは再エネの P2H2P (Power to heat to power 電力→熱→電力) を目指しており、今後の普及が考えられる。

③電気自動車の蓄熱

電気自動車は輸送部門に該当するが、家庭のエネルギーマネジメントの一環を担う可能性がある。自動車分野での電化が急速に進んでおり電気自動車、燃料電池自動車の普及が見込まれる。車内空調のエネルギー消費は Joule ベースで自動車全所用エネルギーの 30-40% と見積もられ大量のエネルギーを要する。空調へのリチウム電池利用は電池容量、コストへの大きな負担であり、低コストの蓄熱による負担解消の意義は大きい。

自動車用には室内に潜熱材パッケージが置かれ環境温度の急激な温度変化の緩和に利用されている。また、省エネ運転としてアイドリングストップ機能があるが、1 分程度のエ

ンジン停止時に追加エネルギー無しでの冷熱、温熱供給にも潜熱蓄熱は有用である。顕熱蓄熱の蓄熱容量は 0.2 MJ/L 以下、潜熱蓄熱のそれは 0.5 MJ/L 以下である、これ以上の高密度の需要が特に自動車分野で高く、蓄熱容量 2 MJ/L 以上の化学蓄熱の研究が進む。

④日本および他国の状況の概観

顕熱蓄熱は欧州において広く普及している、地域コージェネレーションが普及し、MW 規模の大型排熱の貯蔵に顕熱蓄熱が導入されている。また太陽熱の蓄熱も進み、家庭用、住居用の温熱供給向けとともに、吸収式ヒートポンプと連携した冷房も商品化が進んでいる。潜熱蓄熱材料は水、有機物、熔融塩が主であり種々の温度域に対応した製品がラインアップされ普及している。日本でも製品開発が進んでいる。化学蓄熱はフランスが 1980 年代に黎明期を作り、日本ではムーンライト計画 (1978-1992) 以後、種々の系の検討が進んでいるが、商品化の例は少ない。最近、再生可能エネルギーの P2H2P むけとして 700℃ 前後の高温化学蓄熱事例も検討されている。

■熱再生利用技術

①エアコン⁴⁾

空調機と言えば、ルームエアコンに代表される冷暖房機がその代表である。ヒートポンプとも呼ばれ、給湯用エコキュートもヒートポンプ技術の 1 種であり、コンビニの食品ショーケースに代表される冷凍・冷蔵庫、更にはビル空調のビル用マルチエアコンまで展開されている。冷凍・空調事業のキーとなる蒸気圧縮式冷凍サイクル (逆カルノーサイクル) であり、基幹製品群である。図 2.10-1 には世界のエアコン需要の最新データを示す。2011 年度の中国の需要は 3,740 万台であり、日本の需要 910 万台の 4 倍以上である。

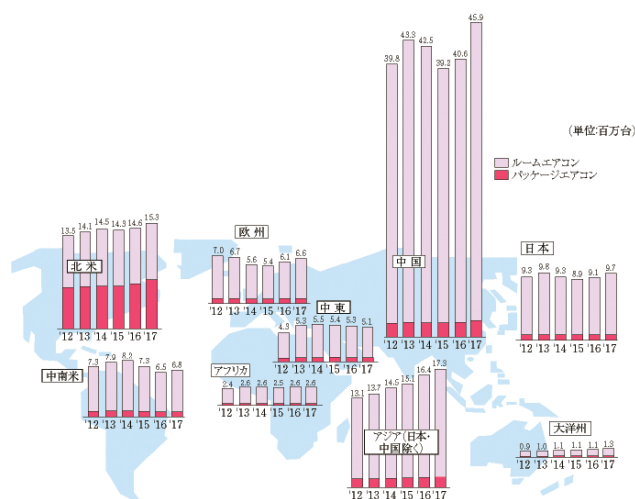


図2.10-1 世界のエアコン需要(2012～2017)

(出典：日本冷凍空調工業会 世界のエアコン需要推定⁵⁾)

地球環境問題がここ 10 年来大きくクローズアップされ、オゾン層破壊防止のために CFC (Chlorofluorocarbon) 冷媒と HCFC (Hydrochlorofluorocarbon) 冷媒が規制され、更に地球温暖化防止のために HFC (Hydrofluorocarbon) 冷媒も規制されてきた。近々では、米国のデュポンとハネウエルから地球温暖化係数 GWP (Global Warming Potential) の

低い冷媒として HFO1234yf の開発と商品化がなされてきた。

グローバル No. 1 のビジネスが成立する背景には、各国の規格に合格する性能が必要である。ヒートポンプ技術の性能評価は COP（Coefficient of Performance：成績係数）で代表される。COP を上げるために、日本のヒートポンプメーカー各社は、インバータ技術と電子制御技術を、国内メーカーのみの競争の中で発展させて、パワーエレクトロニクス技術としてチップ化して埋め込み、ブラックボックス化してきた。

今、日本の冷凍空調業会では、GWP の低い R1234yf, ze, R32, 自然冷媒等を搭載した、COP の高いヒートポンプの開発に向け、新たな開発を始めている。

②欧米先行主導によるセントラル空調方式

従来は大型熱源ターボ冷凍機（ex.1000 kW 級）をベースに 7℃ の冷水を複数空調ゾーンに熱搬送し、各熱交換器（AHU：Air Handling Unit）により各ゾーンを冷房する VWV（Variable Water Volume）、又は VAV（Variable Air Volume）方式が、欧米主導のいわゆるセントラル空調方式であった。暖房の場合は、冷凍機の代わりに石油ボイラまたはガスボイラが使われる。その規格が米国の ASHRAE：American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers（米国暖房冷凍空調学会）の規格であり、日本の JIS 規格はただ追随するのみであった。しかし、1970 年頃から、欧米の模倣ではなく、日本独自の空調方式が研究開発され始めた。

1970 年代は、ルームクーラーと呼ばれていたが、そのうち暖房にも使えるヒートポンプと名前が変わり、インバータが搭載され、一気に電子化が進んだ。更に 1 台の圧縮機で、複数台の室内機を同時に運転するマルチヒートポンプが開発され、更に 20 年前には、30 台以上の室内熱交換器と接続可能なビル用マルチエアコンが開発された。極めつけは、その 30 台以上の室内機が冷房運転も暖房運転も同時に可能な、冷暖同時運転ビル用マルチ VRF（Variable Refrigerant Flow）が誕生したことである。

まさに、日本国内のみで進化したガラパゴス化技術であり、本邦独自製品である。VRF は直膨マルチあるいはダクトレス空調方式と呼ばれ、欧米のダクトを使用するセントラル空調方式と対比して用いられる。この VRF 空調方式はダクト不要、水配管不要となり、熱源側冷凍サイクルがエネルギー搬送まで冷媒による潜熱搬送し、省工事、省エネ、工場一貫生産となっており、その分、製品の信頼度も高い。技術課題も工事業者も、セントラル方式とは全く異なり、世界中にまだどこにも規格がなく、現在グローバル展開中である。中国、韓国、中近東、東南アジア、インド、ブラジル等での空調システムはセントラル方式と VRF 方式とを併用しつつ、次第に VRF が増加傾向にあり、ASHRAE 規格と EU 規格に取り込まれつつある。

③ VRF 空調方式に必要な技術

ルームエアコンの室外機には、圧縮機インバータ電子基板と電子膨張弁と回転数可変送風機用 DC ファンモータが搭載されている。これら 3 つのアクチュエータはすべてマイコンで制御されており、あるいは自律分散的にあるいは協調して制御されており、制御アルゴリズムはパワエレ技術と共にブラックボックスになっている。

一方、欧米型セントラル空調方式の冷凍機は固定速運転であり、部分負荷運転時は ON-OFF を繰り返すしかなく、COP の年間効率を表す APF（Annual Performance Factor）は連続運転時に比べて相当劣り、省エネに反する。

北欧等の寒い国でも昨今の電子機器の増加に伴い、データセンタや電算機室用空調も含めて執務ビル空調では一部冷房が必要な暖房主体運転が必要であり、逆に冷房主体で一部暖房の負荷発生もあり、負荷比率が自在に変化しても対応可能な冷媒回路とその制御が組まれている。

④次世代空調システム

日本の蒸気圧縮式ヒートポンプは極めて国際競争力が高く、今後も世界への販路拡大が期待される。しかし、次世代の技術が必ずしも準備できているとは言えない。既存技術の改良や冷媒の環境規制への対応のみならず、革新的な技術の開発が必要である。

■居住空間の熱マネジメント

室内外の環境品質を低下させることなく、大幅な省エネルギーを実現する ZEB（ネットゼロエネルギービル）や高い断熱性能と高効率設備による可能な限りの省エネルギー化と再生可能エネルギーの導入により、年間で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 ZEH（ネットゼロエネルギーハウス）に注目が集まっている。ZEB、ZEH は、快適性と大幅な省エネを両立して建築物のエネルギーの自立を目指しており、民生部門のエネルギー削減対策において非常に重要な位置を占めている^{6)・13)}。

建築物の設計段階では、断熱、日射遮蔽、自然換気、昼光利用などの建築計画的な手法（エネルギーハーベスト技術：パッシブ手法）を最大限に活用して、寿命が長く改修が困難な建物外皮の省エネルギー性能を高度化することが大切である。建築物が竣工した後の運用も重要な評価対象となる。長期間の性能保持のためのメンテナンス、複数機器の組み合わせによる効率的なエネルギー消費、エネルギー消費量の見える化も恒久的な消費エネルギー削減には重要な項目である。

ZEB、ZEH は省エネ基準より高い水準の強化外皮基準が要件になっており、省エネ・創エネによるエネルギーコストのメリットに加え、温熱環境の改善による快適性の向上、ヒートショックのリスク低減など健康面のメリットも期待される。

ZEB は、ヨーロッパが先行しており、計算方法は統一されているが、ZEB の基準は各国の判断に委ねられている。アメリカはエネルギー省が 2015 年に ZEB の定義を公表している。省エネルギー建築であり、実際に外から供給されるエネルギーが境界内での再生可能エネルギーが外部に供給されるエネルギーと等価か低くなる状態であると規定している。日本でも資源エネルギー庁や関係学会での議論が深まってきている。ZEB を構成する要件として、負荷の抑制、再生可能エネルギー導入および利用、設備システムの効率化が組み込まれている。ZEB の先進事例も報告される件数が増加している。気候条件の違いで、アメリカ、韓国は日本と同様に冷房と暖房どちらも重要であり、東南アジアは冷房のみ、ヨーロッパは冷房も考慮されているが主に暖房に重点を置いている。湿度に関しても、アメリカ、ヨーロッパでは夏季に湿度が低く、自然換気として外気が使いやすい、木造外装が変色しても長持ちする。再生可能エネルギー利用は、アメリカ、韓国、東南アジアでは太陽光発電が主力であり、一部地中熱利用も散見される。ヨーロッパでは省エネルギー建物により一次エネルギー消費を抑えることに力点が置かれている。バイオマス燃料によるコージェネレーションが採用されている事例が多い。

建物単体から街並み、都市形態を通して、より広域のエネルギー、熱環境の問題に直面している。夏の最高気温が 40℃を超える状況になると、熱中症での搬送者の増加も必死で、健康問題にも関心が集まっている。都市の高温化、ヒートアイランド現象が拍車を掛けている。

ヒートアイランド現象の原因として表面素材の影響、人工排熱の問題、風通しや夜間の放射冷却と関係が深い建物群による都市の表面形状の影響などが挙げられている。このうち表面素材に関しては建物単体の熱性能とも関係が深く、建物外部の都市空間に与える熱負荷にも大きく影響するため、多くの取り組みがされている。住宅に関しては最低限の断熱性能を持つ新築住宅の割合は5割程度であり、既存住宅を含めると満足な断熱性能を持つ住宅の割合は非常に小さい。省エネルギーの観点から、既存住宅の断熱改修も大きな課題である。断熱材の高性能化は、こうした需要に対しても有効な手段である。一般に建築外皮の中で断熱上最も弱点となる部位は、窓など透明部位である。このため、採光を考慮した上で断熱性能の向上を図る高性能な窓システムの開発は重要である¹⁴⁾。

建築物省エネ法における基準の一つに「窓や外壁などの外皮性能を評価する基準」が設けられている。外皮性能は外皮平均熱貫流率（UA）と冷房期の基準平均日射熱取得率（ η AC）で評価される。例えば、開口部の熱貫流率の評価には JIS A 2012-1、ISO10077-1 及び ISO9050 などが用いられる。省エネ義務化の動向と連動して、建築物省エネ法に基づく省エネ性能の表示制度が2015年4月からスタートしている。日本では建物全体を総合評価するツールとして CASBEE（建築環境総合性能評価システム）が普及している。海外では、アメリカの LEED、ENERGY STAR、イギリスの BREEAM などが性能システムのツールとして用いられている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

■蓄熱技術

①反応器システムの高性能化

- 1) 活性炭等を利用した吸着蓄熱システム カルソニックカンセイ（株）、九州大 宮崎隆彦グループ¹⁵⁾

活性炭を利用した吸着式ヒートポンプに本研究グループが新規に開発した活性炭（SAC）を用いた吸着熱交換器を作製し、蓄熱システムとして検討。熱交換器の吸着剤充填部分の外形容積に対する比出力に換算で約 3 kW/L を実証。また、新規吸着材量を用いた自動車向け冷熱供給実証試験を行い、圧縮式冷凍システムによる燃費の悪化を約 88% 低減できることを示している。居住空間の熱マネジメントにも応用が期待できる。

- 2) セラミックハニカムの化学蓄熱装置への応用、名古屋大学 小林敬幸グループ¹⁶⁾

SiC セラミックハニカムを用いた塩化カルシウム／水系化学蓄熱装置を開発した、当ハニカムは耐蝕性、伝熱性に優れており、化学蓄熱システムの実用性を高めることに成功している。充填層向け熱交換器の開発は重要な研究要素である。

- 3) 化学蓄熱材料の伝熱促進 東京工業大学 加藤之貴グループ¹⁷⁾

化学蓄熱材料の伝熱促進は装置全体の性能向上に重要である。酸化マグネシウム／水系（MgO/H₂O）について、膨張化グラファイト（EG）との混合を試み、EG 混合比の向上による伝熱促進効果を示した。さらに各混合材料の反応性を調べ、所定の条件では化学蓄熱材料：EG 重量比＝8：1 程度が最適であることを示している。この混合材料を用いた充填層実験にて反応性能向上を実証している。

- 4) 伝熱面の機械的制御、東北大学 丸岡伸洋、埜上 洋グループ¹⁸⁾

潜熱蓄熱材（PCM）凝固層剥ぎ取り型高速熱交換潜熱蓄熱槽を提案した。本機構は伝熱

面が回転円管で、隣接する固定羽根が存在する点が特徴である。この機構により放熱時に回転伝熱管表面に生成した PCM 凝固層を固定羽根により機械的に剥ぎ取ることで伝熱面を更新でき、高い放熱速度の維持を実現している。

②蓄熱材料開発

5) カプセルコンポジット、神戸大学 鈴木 洋グループ¹⁹⁾

塩化カルシウム／水系化学蓄熱の実用の上で塩化カルシウムの金属腐食性への対応が課題である。材料の化のためは塩化カルシウムをナノ孔マイクロカプセルに内包させる方法を提案し、潮解性の改善および腐食性の改善、反応速度の向上を実現している。

6) 高温蓄熱用マイクロカプセル PCM 開発、北海道大学 能村 貴宏グループ²⁰⁾

Al-Si 基合金系 PCM マイクロ粒子への化成処理と酸化処理によるコア-シェル型マイクロカプセル PCM (MEPCM: Microencapsulated PCM) 合成法を提案し、500°C 以上の高温領域で使用可能な MEPCM の開発に成功した。MEPCM はシェルが化学的に極めて安定であり、これが物理/化学的なバリアー層として機能する。

7) シリカゲル充填層内吸脱着現象の X 線可視化 富士シリシア、東京工業大学 平井秀一郎グループ²¹⁾

普及の進んでいるシリカゲル／水系吸着式ヒートポンプのさらなる高性能化のためにはシリカゲルの吸脱着効率を向上させることが必要である。しかしシリカゲル内部で生じる水分吸脱着現象の基礎的なメカニズムは明らかではない。そこで本研究では、X 線透過計測システムを用い、吸着式ヒートポンプを模擬したシリカゲル充填層内を可視化した。新規材料開発の基礎科学的な知見を見出している。

8) 高温化学蓄熱 東京工業大学 加藤之貴グループ²²⁾

次世代太陽集熱システムのための 650°C 域の化学蓄熱を検討し、オルトケイ酸リチウム (Li_4SiO_4) / CO_2 系を提案し材料開発を行った。この化学蓄熱充填層とゼオライト充填層を接続し熱駆動での化学蓄熱、さらに 790°C までの昇温（ヒートポンプ）操作を確認している。この温度域の熱駆動化学蓄熱の実施例は世界に例がほとんど無い。

③新たな化学エネルギー変換

9) 炭素循環エネルギーシステム 東京工業大学 加藤之貴グループ²³⁾

二酸化炭素を余剰エクセルギーにて還元し一酸化炭素に変換し、工業プロセスで再利用を行う。炭素が循環利用され、 CO_2 環境排出の抜本的な削減に寄与できる。固体酸化物電気分解セルにて CO_2 高温電解の実証に成功している。新たな化学蓄エネルギー分野。

■熱再生利用技術

①熱交換器の性能向上

1) 扁平管熱交換器

従来の円管熱交換器を扁平管熱交換器にすることで、管内の冷媒から伝熱管への伝熱面積拡大、フィン効率改善、伝熱管とフィンの密着性が改善し、熱交換性能が向上する。実用化されている。

2) 冷媒分配問題

様々な条件において、気液二相流を複数の伝熱管に均等に（所望の流量比、ボイド比に）分配する。古くからある問題であるが、ヒートポンプの性能向上に欠かせない技術である。

3) 結露・着霜問題

温度、圧力（流動抵抗）をセンシングし、結露、着霜量を予測し、運転モードを切り替える技術、結露・着霜の問題を解決する新規伝熱面の開発など、高湿度環境、寒冷地などを含む様々な環境におけるヒートポンプの性能向上を目指す技術である。

②低 GWP 冷媒の開発、評価²⁴⁾

地球温暖化係数 GWP（Global Warming Potential）の低い冷媒として HFO1234yf、ze、R32、自然冷媒等を搭載した、COP の高いヒートポンプの開発を行っている。また、その性能試験や安全評価についても行っている。また、次世代冷媒の開発、環境規制のルールづくりなども重要なテーマである。

③全熱交換器（Enthalpy exchanger）の開発^{25)・32)}

全熱交換器とは、換気によって失われる空調エネルギーの全熱（顕熱＝温度と潜熱＝水分（湿度））を交換回収する省エネルギー装置のことである。国内（建築物衛生法）では特定建築物の居室内の CO 含有率を 10 ppm 以下、CO₂ 含有率を 1000 ppm 以下に管理する目標値が示されており、目標値達成のためには換気装置の設置が不可欠である。

建物の熱負荷は室内熱負荷と外気負荷（換気で導入した空気を空調処理する熱負荷）から成る。先に述べた ZEB の実現へ向けた取り組みが進むと、室内熱負荷は減少すると考えられるが、外気負荷は在室人数に応じて変動するものであり、基本的には変わらない。したがって、建物の全熱負荷における外気負荷の割合が大きくなる。したがって、換気をしながら外気負荷を削減できる全熱交換器の開発はますます重要になる。全熱交換器の開発においては、機械装置レベルの開発（機構（静止型、回転型など）の提案）、材料レベルの開発（高機能、高性能の透湿材（水分分離膜）、吸湿材などの開発）が行われている。

④IoT や AI 技術を活用した熱利用技術

主に空調機器において、機器単体の運転制御のみならず、周辺機器との連動、建物全体の制御などが進んでいる。将来は変動する電力系統からの電力供給に合わせた運転制御なども対象になる。

■居住空間の熱マネジメント

① ZEB、ZEH のロードマップ

今後の建築分野における省エネを確保し、優良な建物ストックを形成するために躯体の高性能化が重要であり、省エネ基準を強化した高断熱基準を ZEB、ZEH 基準として設定した。その上で快適な室内空間を保ちながら、エネルギーを上手に使うためには、空調設備、換気設備、照明設備、給湯設備等の高効率化が重要である。ZEB、ZEH の「高断熱基準」「設備の効率化」で 20%以上の省エネを満たした上で、太陽光発電等によりエネルギーを創ることで、正味でゼロ・エネルギー目指している。

②建築物の性能指標、性能評価

建物の省エネルギー性能を表示する第三者認証制度として「BELS（Building-Housing Energy-Efficiency Labeling System）」があり、2017 年 4 月からは ZEH の基準を満たした住宅には ZEH マークを表示できるようになった。また、自社の ZEH が占める割合を 2020 年度までに 50%以上となる ZEH 普及目標を公表した企業を登録する「ZEH ビルダー登録制度」が創設されており、国の補助制度において活用されている。既に 5000 を超える企業が登録されている。

③エネルギーマネジメントシステム（EMS）

エネルギーマネジメントシステム（EMS）は、電気、ガス、熱などのエネルギーの見える化や設備の最適運用などを実現するシステムである。商業施設向けの（BEMS）は、既に導入されている建物内の照明や空調、OA 機器などの設備を、ネットワークを通して集中管理するシステム（BAS（Building Automation System））を管理下におくことで、エネルギーの効率的な管理を比較的容易に行うことが可能である。家庭向けの HEMS では、電気の使用量を可視化して省エネに役立てることが、最大の目的である。将来的には、各家庭で容量の大きな蓄電池を活用することが目指されており、HEMS は電力需要のピーク時に合わせて、自動的に蓄電池からの給電に切り替えるなどの対応を行うことができる。これにより、電力需要のピークがならされると余剰電力が減って、大幅な省エネが達成できる。

④高性能断熱材

高齢化・医療費の高騰がすすむ中で住宅の健康化をすすめるために屋内温度を欧米並みに維持しようとするれば、日本の平均的な住宅における貧弱な断熱程度では、確実に欧米以上のエネルギー消費を伴う。すなわち、現状ベースではなく、健康化ベースで考えれば、現状以上の高断熱化は必須であり、その点で、より高性能な断熱材が必要となる^{33), 34)}。

現状で、ほぼ静止空気と等しいレベルの断熱性能をもつ建築用断熱材の断熱性能を飛躍的に高めるためには、静止空気とは異なるものに依存するしかない。答えは、ガスを充填するか、より熱伝導性の低い材料でより細密構造とするか、空気を抜くかの3つである。それぞれは、Gas Filled Pane (l GFP)、Aerogel Based Material (ABM)、Vaccumed Insulation Panel (VIP) と呼ばれる。

このうち真空断熱材（VIP）は、断熱材等に使用される多孔体をアルミホイル等のフィルム（ラップ材と呼ぶ）で覆い、内部の空気を抜いて真空状態を維持する。通常の断熱材では限界である静止空気の断熱抵抗から飛躍的に大きい断熱抵抗をもつ。当然ながら、コスト以外の普及阻害要因として、経時変化に対する不安がある。真空（実際には、完全に空気がない状態ではなく、大気圧の100分の1程度であるが）維持はラップ材の遮蔽性能に依存する。金属性のフィルムをラップ材に用いることで、経時変化を非常に小さく保つことができる一方、金属が連続する端部では、一般の中央付近に比べ、流れる熱が大きくなることが確認されている。すなわち、初期性能と経時変化がトレードオフの関係になっているのが、VIPの本質的な課題である。

⑤高性能窓

断熱性能の観点から、単板ガラスを複層ガラスにすることでガラス中空層の熱抵抗により熱貫流率は概ね半減し断熱性は大幅に向上する。さらに中空層内の対流による伝熱を抑えるためのAr、Kr、Xeなど不活性ガスの封入や真空化、赤外放射による伝熱を抑えるための中空層内ガラス表面低放射率化（Low-E化）、などにより一層断熱性を向上させた高性能ガラスも各種開発・実用化されている。日射遮蔽性能の観点から、視界・眺望の確保を図り、その上で入射する日光を活用し消灯・調光など照明制御を行うという手順が有効と考えられる。光としては導入したいが熱は排除したいという点については、可視域では出来るだけ透過させ、赤外域成分は反射する遮熱型Low-Eガラスが効果的ではあるが、日射の直射成分の強さ、さらにはその変動を考慮すると、ガラス単独での対応は困難であ

り適切に制御されるガラス間中空層に設置された自動ブラインドとの併用が不可欠である³⁵⁾。

⑥クールルーフ、クールロード

クールルーフとは、既存の建物の屋根面に日射反射率の高い塗料（高反射性塗料）を塗布したり、あるいは高反射性屋根材や屋上緑化を施すことで、夏季に屋根の表面温度と内部温度の上昇を和らげることを意味する。都市ヒートアイランド対策効果が期待できる屋根仕上げとして屋上緑化だけでなく、高反射率塗料、保水性建材などの屋根材も開発されている。これらの技術によるクールルーフ化による効果は、適用する地域、建物用途、断熱性能などにより大きく異なる。クールロードの代表的な構造は、開粒度アスファルト層の空隙に保水性グラウトを充填したもので、保水性グラウトは雨水を蓄える機能を持っている。保水された水分は、蒸発する時に気化潜熱を舗装体から奪うため、路面温度の上昇を抑えることができる。このため、都市部の「ヒートアイランド現象の緩和」や住宅街の「熱帯夜の減少」などに対して有効な舗装と期待されている。実用化にあたっては、長期性能の保持が必要であり、セルフクリーニングの機能を有し、汚れや劣化の影響を受けにくい材料の開発が必要である。高反射性材料に関しては、人体の熱ストレスや体感温度への影響、周辺環境への影響に十分に配慮する必要がある。反射の指向性を制御した再帰反射特性を有する材料の開発も検討されている³⁶⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■蓄熱技術

①未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）（2013-）³⁷⁾

省エネ、CO₂削減の更なる推進が必要とされる中、運輸・産業・民生の分野において一次エネルギーの半分が利用されず廃熱になっているという課題を解決するために、探索的な材料開発から、中核となる機器・システム・マネジメント技術に至るまでが検討されている。新たなクラスレートハイドレート潜熱蓄熱材（融点 10℃、0.3 MJ/kg）、化学蓄熱材料（作動温度 30℃、0.5 MJ/kg）を開発している。

②日本伝熱学会特定推進研究、研究課題“熱エネルギーシステムのための化学蓄熱の高出力密度化”（2016-2019）³⁸⁾

本研究は熱エネルギー有効利用のための、実装可能な高出力密度を有した化学蓄熱技術の検討を目的としている。蓄熱対象としては低温熱（50～100℃）程度が量的に、中温熱（100～300℃）が質的に重要である。また、利用においては例えば移動体向けであれば熱出力密度 1 kW/L、蓄熱密度 1 MJ/L 程度が目安である。特に起動時など極めて短時間に放熱を行うサーマルキャパシターとして、出力密度 2 kW/L の達成は化学蓄熱の社会実装に重要な目標と考えられる。これらの実現を検討している。

③日本鉄鋼協会スマート製鉄研究会（2015-2017）

鉄鋼プロセスから発生する二酸化炭素を外部エクセルギーを用いて還元し一酸化炭素を製造し鉄鋼プロセスで循環再利用するシステムを提唱し、その実現性を産学で検討した。二酸化炭素還元研究が集約されている。

④国際エネルギー機関 IEA ECES Annex 30 （2016-2018）

「経済性を備えたエネルギー運用と CO₂ 排出削減のための蓄熱」をテーマに検討が行わ

れ現行蓄熱技術の評価指標を明らかにし、核技術の相対的な価値を検討している。

■熱再生利用技術

① NEDO 研究プログラム

- 1) 再生可能エネルギー熱利用技術開発
- 2) 未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発
- 3) 高効率低 GWP 冷媒を使用した中小型空調機器技術の開発
- 4) 省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発
- 5) 次世代型ヒートポンプシステム研究開発

② TherMAT 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合³⁹⁾

③ 米国：エネルギー高等研究計画局（ARPA-E）⁴⁰⁾

- 1) BEETIT Building Energy Efficiency Through Innovative Thermodevices (Program Status: Alumni)
- 2) DELTA Delivering Efficient Local Thermal Amenities (Program Status: Active)
ウェアラブル機器など Localized Thermal Management Systems (LTMS) を開発する。
- 3) HITEMMP High Intensity Thermal Exchange through Materials and Manufacturing Processes (Program Status: Active) 厳しい条件でも使用可能な熱交換器の提案

④ Stanford University

Bits & Watts 21 世紀型の電力系統（風力、太陽光など様々な変動する電力源から構成される電力系統）をエネルギーの基盤とした場合、何か起こるかをテーマにした研究・教育プログラム⁴¹⁾。

■居住空間の熱マネジメント

東京オリンピック・パラリンピックへ向けての暑さ対策

東京 2020 オリンピック・パラリンピック競技大会開催といった観点からも、暑さ対策を進めていくことが求められている。そこで、東京 2020 大会競技会場周辺で、かつ、観光客等が多く集まる注目度が高い地域において、人の感じる暑さを緩和するクールエリアを創出することが検討されている。

(5) 科学技術的課題

■蓄熱技術

① 化学蓄熱装置の高性能化

化学蓄熱は蓄熱密度が高く室温～1000℃までの貯蔵が可能であり、潜在的な応用先は多い。しかしながら反応性能が不十分、熱交換器を含めた装置が大きく、また、他の蓄熱方法に比べ複雑であることが市場化を妨げている。このため、装置のコンパクト化、低コスト化が需要である。特に反応層は伝熱律速になることが多く、反応層の伝熱促進が重要である、さらに熱交換機能を有する反応器の伝熱促進、コンパクト化が重要である。

② 化学蓄熱材料、腐食防止

各種の温度域での反応が可能な化学蓄熱材料の開発が必要である。高い反応速度と繰り返し反応耐久性がある。また、腐食に対する蓄熱材料、容器の改良が必要である。

③ 低温駆動ヒートポンプ

0℃以下の低温の環境周囲から低エクセルギーの熱を吸収し昇温できるとヒートポンプとして利用価値が高まる。化学蓄熱では低圧力の反応性の向上が求められるための材料開発、低温反応系の開発が必要。

④再生可能エネルギーシステムの熱エネルギー貯蔵

新たな市場として再エネの蓄熱利用が重要である。近年の急速な再エネ普及において再エネの不安定電力の効率的な受入れが重要な問題になりつつある。再エネ先進国のドイツでは再エネが電力供給の30%超を担っているが、二酸化炭素排出係数[g-CO₂-eq./kWh]は殆ど変化が無い³⁾。PVなどの再生可能エネルギーの変動は秒単位であり変化する。再エネの出力変動を補う火力発電の出力変動運転が火力発電の低効率化を導き、結果としてCO₂排出を増やしている。火力発電の支援が無いと電力の質の低下を招き社会に悪影響が拡散する。このため再生可能エネルギーの大量導入に応じて出力安定化のためのエネルギー貯蔵がいよいよ重要になっている。再エネのP2H2P（電力→熱→電力）を目指しており、今後の普及が考えられる。

⑤二酸化炭素の循環利用

二酸化炭素を余剰エクセルギーにて還元し一酸化炭素に変換し、工業プロセスで再利用を行う。炭素が循環利用され、CO₂環境排出の抜本的な削減に寄与できる。固体酸化物電気分解セルにてCO₂高温電解の実証に成功している。新たな化学蓄エネルギー分野。

■熱再生利用技術

地域、建物群レベルの熱供給システム技術開発においては、スタンフォード大学のBits & Wattsプロジェクトなどが参考になるであろう⁴¹⁾。安定した電力システムを前提とした熱利用技術ではなく、変動する電力システムなど、様々な条件における熱利用技術をIoTやAI技術と組み合わせると考えるというテーマは、技術的意義のみならず、社会・経済的意義もあり、将来のまちづくりやエネルギー問題を考える上でも重要なテーマになる。

機械装置レベルの研究開発テーマにおいては、国内のプロジェクトは極めて現実的な熱利用技術を対象としたものに限定されている。米国では、熱交換器の技術開発においては、高温高压で動作可能なもの、宇宙空間に適応可能なものなども対象になっており（HITEMP, ARPA-E）、一方、空調の技術開発にはウェアラブル機器なども含まれる（DELTA, ARPA-E）⁴⁰⁾。対象を広げることにより、新しい熱利用技術の創出が期待できる。

■居住空間の熱マネジメント

①条件の厳しい地域のZEB、ZEHの実現

寒冷地、多雪地、日照条件の厳しい都市部狭小敷地でのZEB、ZEHの実現へ向けた取り組みが、今後必要となってくる。

②BEMSの普及

BEMSは、HEMSよりも大きな省エネ効果が期待できますが、システムが高度で大がかりになるため、初期投資コストが高くなることが普及の妨げになる恐れがあります。導入すれば、一定以上の省エネと経費削減効果が期待できるが、投資コストの回収に時間がかかるため、導入に二の足を踏む企業が多いのが現状です。そのため、政府では、EMSを導入する企業を対象とする補助金事業を行っています。現在行われているものとしては、経済産業省の「エネルギー使用合理化等事業者支援補助金」がある。

③先進的断熱材

断熱性能、耐久性能、施工性に優れた新たな建築用断熱材開発への要求が高まっている。真空断熱材（VIP）複合断熱パネルの開発としては、周囲をウレタンで被覆してパネル状にしたものでVIP周縁部の熱橋の影響を小さくし、施工も容易にしたものである。高耐久超断熱材の研究開発としては、VIPの芯材としてナノ多孔構造を制御したセラミックス粒子を用いる技術で、低真空でも高い断熱性を示し、長期耐久性に優れ、使用期間の長い住宅や建築物での使用が可能となる。真空断熱材以外では、エアロゲル断熱材が注目されている。エアロゲルは、空気分子の平均自由行程よりも小さなナノサイズの多孔性を有するもので、シリカ、カーボン、アルミナなどを素材としたエアロゲルが研究されている。シリカエアロゲルは、透明性が高くまた、断熱性能にも優れていることから窓用の断熱材として期待されているが、その物理的な性能として柔軟性を持たずに非常に脆く割れやすいという特徴を持つ。このため、現在でも実用化はあまり進んでいない。

新たな断熱材の開発の際、その性能を正しく評価することが最も重要であることは論を俟たないが、高性能であるが故の測定上の問題も生じる。高性能断熱材の熱伝導率を正確に測定するためには、従来と同じ装置では限界がある。また、保護熱板法（GHP法）を含め熱伝導率測定装置は、ある程度均質な材料の測定を前提としている。このため、真空断熱材のように、製品の中央部と周縁部とで断熱性能が大きく異なる製品の測定は非常に困難であり、仮に測定をしたとしてもその評価方法は非常にむづかしい。現在、周縁部も含めた評価法がJIS原案作成において検討されており、その規格化が待たれる。

（6）その他の課題

■蓄熱技術

①市場競争力のある化学蓄熱システム

熱エネルギー貯蔵の高密度化には化学蓄熱が適当であるが材料、熱交換機能付き反応器の両方の開発が必要である。現行では系が複雑であるので、簡易で低コストの装置開発が、技術的課題である。

②排熱源、熱需要の見える化

例えば、産業分野の実態調査で100℃以上の排熱ポテンシャルは0.41 EJ/y（13 GW）に相当する。日本再エネ導入量8.4 GWであり排熱ポテンシャルは量的には再エネに対して十分大きい。よって、排熱を中心とした熱エネルギーの有効利用は社会への低炭素化において重要である。しかし、この発生源のデータは2004年以降見られず、熱の回収、融通の見通しをたてることが困難なままである。また、上記の排熱量は現場の申告を基準としたものであり、工学的にはその潜在量はまだ大きいと予測される。よって、公的な組織が主導し、排熱源、熱需要の見える化が重要である。

■熱再生利用技術

全熱交換器は機械装置と換気装置の中間のようなものであるため、社会実装のためには空調機器メーカーと建設業界との連携が必要である。また、全熱交換器に用いる水分分離膜や吸湿材を材料のレベルから開発する場合には、材料メーカーと機械メーカーの連携が必要である。同様に、IoTやAI技術を用いた熱利用技術と周辺技術との統合的なオペレーションを社会実装する場合は、多業種間の連携が必要である。

■居住空間の熱マネジメント

①国際規格、標準

種々のケースにおいて建物の熱性能の評価を行うことになるが、国際規格や各国規格または団体規格など標準化された規格が引用されることが多い。各国における評価手法は若干異なる状況にあるが、WTO/TBT 協定（貿易の技術的障害に関する協定）の発効に伴って国際規格への整合化が図られている。そのため、JIS などの国家規格を評価手法に引用していたとしても、間接的に ISO の評価手法を用いているケースも想定される。国際規格における作業は、なかなか困難な場面もある。各国の気候風土や技術水準が異なり、文化も様々であり、様々な背景をベースに、国際規格の場に意見を主張してくる。このような国際的な場面において、継続して日本の立場・意見を維持・主張していく必要がある。学会と国内審議団体が連携して国際的な活動へ参画する仕組みが期待される⁴²⁾。

②認証制度、実証事業

認証製品については、認証書やロゴマークを交付するとともに、ホームページに製品の概要の掲載をしている。環境省では環境技術実証事業を実施している。環境技術実証は平成 28 年 11 月に ISO14034 として国際標準化されており、我が国の環境技術実証事業は本規格に整合している^{43)、44)}。技術認証および環境技術実証は、新技術の開発、普及に役立つと思われる。たとえば、大阪ヒートアイランド対策技術コンソーシアムでは、ヒートアイランド現象の緩和に効果のある技術を認証し、技術力を持つ企業の支援や対策技術の普及促進を図っている。現在、9 つの認証対象技術分野について、それぞれ対策技術の性能の良否を判断するための基準を設け、適合性を判断している。

(7) 国際比較

■蓄熱技術

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	◎	↗	北大、東工大、名古屋大などで蓄熱技術の基礎的な報告は定期的に報告がある。
	応用研究・開発	△	→	NEDO 北大などで、潜熱蓄熱輸送が検討。応用研究の取り組みは少ない。
米国	基礎研究	○	↗	電力網の負荷安定化、停電対応のための蓄熱検討が MIT, DOE、電力会社などで検討されている。
	応用研究・開発	○	↗	産業プロセスの高効率化のためのプロトタイプ蓄熱検討が DOE などで検討されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	電力網の負荷安定化のための Power to Gas 検討が進んでいる。水からの水素製造、再エネの蓄熱。IEA Annex で地蓄熱技術が検討されている。 【英国】 Warwick 大で化学蓄熱の検討が進められている。 【ドイツ】 DLR で太陽熱、産業熱の化学蓄熱研究がされている。ZAE, Fraunhofer 研究所が再エネの潜熱蓄熱研究。 【フランス】 Perpignon 大などで潜熱、化学蓄熱蓄熱研究が良く進んでいる。余剰電力を用いた電気分解水素製造。 【オランダ】 TNO (旧 ECN) 自動車用吸着式蓄熱、化学式蓄熱の実証研究。 【スペイン】 Llleidat 大、Barcelona 大で、再エネ、太陽熱の顕熱、潜熱研究が進められている。

欧州	応用研究・開発	◎	→	電力網の負荷安定化のための再エネの蓄熱 【英国】 Sunanp 社の潜熱蓄熱システムが路線バス等に搭載利用されている。 【ドイツ】 Bosh 社が吸着式食器乾燥機、SolTech, InveSor 社が太陽熱駆動吸着式冷房装置を市販している。Siemens が再エネ熱蓄熱→発電システムの基礎プラント検討。Volkswagen 社らが共同で電力網の負荷安定化のための Power to Gas 組合を作り、再エネ電力→水素プラントの応用研究が進行。 【フランス】 Areva 社で余剰電力を用いた電気分解水素製造の販売を行っている。 【オランダ】 — 【スペイン】 Andasols 社で太陽熱の顕熱貯蔵＋水蒸気発電システムが商用稼働している。
中国	基礎研究	◎	↗	上海交通大で吸着式ヒートポンプ、蓄熱が広範に検討されている。
	応用研究・開発	◎	↗	Broad 社等で吸着式ヒートポンプ、潜熱蓄熱装置が市販されている。
韓国	基礎研究	○	→	Seoul 国立大など、蓄熱、熱化学水素製造、基礎研究が進められている。
	応用研究・開発	△	→	

■熱再生利用技術

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	○	→	熱再生利用技術のシーズに成り得る（多孔質材料や膜材料など）材料の研究のレベルは高い。（マイクロ・ナノスケールの輸送現象、マクロスケールの熱流体現象など）輸送現象に関する研究も盛んである。AI、IoT技術の熱再生利用技術への応用はこれからである。具体的には、冷凍機器の本体の制御技術は優れているが、他の機器との接続やインターネットとの接続が問題である。
	応用研究・開発	○	→	熱交換器、圧縮機、電子膨張弁など、日本の冷凍・空調分野の技術レベルは高い。しかし、次世代技術の開発が課題である。2016年の冷凍空調機器の（生産、輸入、輸出）は（20,606,813、2,548,886、1,830,350千US\$）である。世界有数の規模である。
米国	基礎研究	◎	↗	熱再生利用技術のシーズに成り得る材料の研究のレベルは高い。輸送現象に関する研究も盛んである。AI、IoT技術の熱再生利用技術への応用も大学レベルから企業のレベルまで様々なレベルで展開中である。例えば、スタンフォード大学の Bits & Wats プロジェクト ⁴⁵⁾ がある。
	応用研究・開発	○	→	個別の要素技術（ハードウェア）は日本が優れているものも多いが、AI、IoT技術は米国が進んでいる。例えば Autogrid 社 ⁴⁶⁾ のような企業がある。2016年の冷凍空調機器の（生産、輸入、輸出）は（31,448,403、8,888,772、4,828,863千US\$）である。環境・エネルギー技術への取り組みは、米国連邦レベルでは、停滞しているように思われるが、個別の取り組みは必ずしも停滞していない。ASHRAE（アメリカ暖房冷凍空調学会） ⁴⁷⁾ はこの分野の国際的組織として強い影響力をもつ。
欧州	基礎研究	○	→	熱再生利用技術のシーズに成り得る研究のレベルは高い。世界の冷凍機の冷媒規制についてもイニシアチブをとっている。 【英国】 熱再生利用技術のシーズに成り得る研究のレベルは高い。 【ドイツ】 熱再生利用技術のシーズに成り得る多孔質材料や膜材料の研究のレベルは高く、Enthalpy Exchanger などの機械装置への各種材料の応用についても大学のレベルで取り組んでいる。例えば、RWTH Aachen University の研究グループの論文 ⁴⁸⁾ がある。 【フランス】 熱再生利用技術のシーズに成り得る研究のレベルは高い。

欧州	応用研究・開発	○	↗	EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) により、2020 年末までに、すべての新築住宅を nearly zero energy building とすることが求められており、熱再生利用技術に対する意識は高い。ZEB については学術的・技術的な取り組みというよりも政策主導の取り組みと思われる。また、ZEB の実現は、PV の導入だけでなく、バイオマスエネルギーの利用なども積極的である。必ずしも先進的な技術ではないが、環境の意識が高い。 【英国】 1990 年比で 80% 以上温暖化ガスを削減する。家庭用暖房を完全に脱炭素化する。2016 年の冷凍空調機器の（生産、輸入、輸出）は（878,501、1,901,946、607,586 千 US\$）である。 【ドイツ】 ZEB はドイツに最も多く存在する。温暖化ガス削減の意識も高い。2016 年の冷凍空調機器の（生産、輸入、輸出）は（3,341,489、3,986,480、3,611,566 千 US\$）である。 【フランス】 2050 年までにすべての建築物を省エネ基準にリノベーション。2016 年の冷凍空調機器の（生産、輸入、輸出）は（NA、2,770,271、2,014,172 千 US\$）である。冷凍技術の国際機関 International Institute of Refrigeration (IIR)⁴⁹⁾ の本部がパリにあり、伝統的にこの分野に強い影響力をもつ。
中国	基礎研究	△	↗	熱再生利用技術の基盤技術の研究は盛んである。冷凍・空調工学の講座が主要大学にある。
	応用研究・開発	○	↗	熱交換器、圧縮機などの機械要素技術開発、設備分野の技術開発を大学で行っている。2016 年の冷凍空調機器の（生産、輸入、輸出）は（NA、2,000,445、20,006,603 千 US\$）である。輸出は世界最大。
韓国	基礎研究	△	→	熱再生利用技術の基盤技術の研究は盛んである。冷凍・空調工学の講座が主要大学にある。
	応用研究・開発	○	→	2016 年の冷凍空調機器の（生産、輸入、輸出）は（NA、1,038,089、3,597,768 千 US\$）である。

■居住空間の熱マネジメント

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	◎	↗	ZEB, ZEH の定義が検討されている。 ヒートアイランド対策技術の性能評価に関する研究が多数報告されている。 ヒートアイランドに対する適応策の検討を始めている。 高性能断熱材の開発が行われている。
	応用研究・開発	○	→	ZEB の先行事例が増加している。 ヒートアイランド対策技術の実証研究が始まっている。
米国	基礎研究	△	→	ZEB, ZEH のガイドラインが設けられている。
	応用研究・開発	○	↗	建物総合評価ツール LEED、ENERGY STAR を認証された物件が増えている。
欧州	基礎研究	◎	→	ZEB, ZEH の計算方法が決められている。 温度変化により変色するサーモクロミック機能を有する高反射塗料の開発が行われている。 体感温度の提案がされている。
	応用研究・開発	○	→	イギリスでは建物総合評価ツール BREEAM による認証が実施されている。 ドイツでは風通しなど気候に配慮した都市計画がなされている。
中国	基礎研究	△	↗	ヒートアイランド対策のガイドラインが設定された ⁵⁰⁾ 。
	応用研究・開発	△	↗	ガイドラインに基づいた都市計画が検討されている。
韓国	基礎研究			Not Available
	応用研究・開発			Not Available

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) 資源エネルギー庁「平成29年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2018）」,
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018html/2-1-2.html>（2019年2月1日アクセス）。
- 2) 三菱総合研究所「平成24年度新エネルギー等導入促進基礎調査（省エネルギー・再生可能エネルギーに関連する熱の有効利用促進施策に関する調査）報告書」。
資源エネルギー庁「平成24年度（2012年度）におけるエネルギー需給実績（確報）」。
- 3) 資源エネルギー庁「地球温暖化について」,2018年3月,
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/studygroup/ene_situation/007/pdf/007_013.pdf
（2019年2月1日アクセス）。
Electricity Map, <https://www.electricitymap.org/>（2019年2月1日アクセス）。
- 4) 松岡文雄, 大宮司啓文「次世代冷凍システム」,『化学工学』,(77): 195-200, 2013.
- 5) 日本冷凍空調工業会「世界のエアコン需要推定」,
<https://www.jraia.or.jp/statistic/demand.html>（2019年2月1日アクセス）。
- 6) 田辺新一「ZEB実現の可能性」『冷凍』90巻1058号: 869-873, 2015.
- 7) 秋元孝之「環境負荷低減に寄与するスマートウェルネス住宅普及促進の展望」『エネルギー・資源』38巻4号: 177-181, 2017.
- 8) 田中宏和「ZEH（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス）の普及に向けた施策の動向について」『光発電』41: 90-101, 2018
- 9) 萩原伸治「建物の省エネルギー性能」『建材試験情報』3, 4月号: 26-27, 2018.
- 10) 澤地孝男「燃費の比較を可能にする省エネ基準とこれからの住宅性能について」『冷凍』91巻1063号: 319-330, 2016.
- 11) 佐藤努「住宅設備とHEMS（Home Energy Management System）」『太陽エネルギー』42巻3号: 25-30, 2016.
岩本静男「米国・韓国・東南アジアのZEB視察報告」『空気調和・衛生工学』90巻1号: 1-10, 2016.
- 12) 岩本静男「欧州のZEB視察報告」『空気調和・衛生工学』90巻10号: 843-854, 2016.
- 13) 公益社団法人空気調和・衛生工学会100周年記念資料「ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）先進事例集」
- 14) 一ノ瀬俊明「ヒートアイランド現象とその対策」『新都市ハウジングニュース』(89): 1-3,

- 2018.
- 15) Miyazaki Takahiko, *et al.*, "Study toward high-performance thermally driven air-conditioning systems," *AIP Conference Proceedings*, 020002, 2017.
 - 16) 市瀬篤博, 小林敬幸 他「第 55 回日本伝熱シンポジウム講演論文集」, 2018 年 5 月 .
 - 17) Massimiliano Zamengo, *et al.*, "Thermal Conductivity Measurements of Expanded Graphite-Magnesium Hydroxide Composites for Packed Bed Reactors of Chemical Heat Storage/Pump Systems," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 49(3): 261-67, 2016.
 - 18) 丸岡伸洋, 埜上洋 他「第 6 回潜熱工学シンポジウム」, 35, 2016.
 - 19) Suzuki Hiroshi, *et al.*, "ICOPE-15-1053 Heat and Mass Transfer Characteristics in a Calcium Chloride/hollow Silica Particle Composite," *The Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE)* , 2015.
 - 20) Nomura Takahiro, *et al.*, "Microencapsulated Phase Change Materials with High Heat Capacity and High Cyclic Durability for High-temperature Thermal Energy Storage and Transportation," *Applied Energy*, 188: 9-18, 2017.
 - 21) Yasuda Keisuke, *et al.*, "G224 Analysis of Water Adsorption and Desorption on Silica Gel by X-ray CT," *The Proceedings of the Thermal Engineering Conference* 2015.
 - 22) Takasu Hiroki, *et al.*, "Application of Lithium Orthosilicate for High-temperature Thermochemical Energy Storage," *Applied Energy*, 193: 74-83, 2017.
 - 23) Nepomuceno Maria Caprisse Azucena and Kato Yukitaka, "Development of Disk-type Solid Oxide Electrolysis Cell for CO2 Reduction in an Active Carbon Recycling Energy System," *Energy Procedia*, 131: 101-107, 2017.
 - 24) 日本冷凍空調学会「微燃性冷媒リスク評価研究会 最終報告書」,
https://www.jsrae.or.jp/committee/binensei/risk_jap.html (2019 年 2 月 1 日アクセス) .
 - 25) Daou K., *et al.*, "Desiccant Cooling Air Conditioning: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, (2): 55-77, 2006.
 - 26) Lowenstein Andrew, "Review of Liquid Desiccant Technology for HVAC Applications," *HVAC&R Research* 14, (6): 819-839, 2008
 - 27) Mei L. and Dai Y.j., "A Technical Review on Use of Liquid-desiccant Dehumidification for Air-conditioning Application," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, (3): 662-689, 2008.
 - 28) O' Connor Dominic, *et al.*, "A Novel Design of a Desiccant Rotary Wheel for Passive Ventilation Applications," *Applied Energy*, 179: 99-109, 2016.
 - 29) Stabat Pascal and Marchio Dominique, "Heat and Mass Transfer Modeling in Rotary Desiccant Dehumidifiers," *Applied Energy*, 86, (5): 762-771, 2009.
 - 30) Angrisani Giovanni, *et al.*, "Effect of Rotational Speed on the Performances of a Desiccant Wheel," *Applied Energy*, 104 : 268-275, 2013.
 - 31) Kabeel A., "Adsorption-desorption Operations of Multilayer Desiccant Packed Bed for Dehumidification Applications," *Renewable Energy*, 34, (1): 255-265, 2009.
 - 32) Koester S., *et al.*, "Modeling Heat and Mass Transfer in Cross-counterflow Enthalpy

- Exchangers," *Journal of Membrane Science*, 525: 68-76, 2017.
- 33) 藤本哲夫「先進的断熱材の開発動向」『伝熱』56巻235号:14-19, 2017.
- 34) 岩前篤「建築用断熱材関係の研究開発動向」『建材試験情報』1月号:20-21, 2016.
- 35) 井上隆「建物外皮における熱と光の制御」『伝熱』56巻235号:9-13, 2017.
- 36) 鈴木喜弘「脚光浴びるクールルーフ」『Roof & Roofing』:42-47, 2006.
- 37) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合,
<http://www.thermat.jp/> (2019年2月1日アクセス) .
- 38) 日本伝熱学会特定推進研究, 研究課題「熱エネルギーシステムのための化学蓄熱の高出力密度化」(2016-2019) ,
<http://www.htsj.or.jp/announcement/1010.html> (2019年2月1日アクセス) .
- 39) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合,
<http://www.thermat.jp/> (2019年2月1日アクセス) .
- 40) ARPA-E, <https://arpa-e.energy.gov/> (2019年2月1日アクセス) .
- 41) Stanford University, "Bits & Watts Initiative,"
<https://bitsandwatts.stanford.edu/> (2019年2月1日アクセス) .
- 42) 萩原伸治「熱環境分野から－建物の熱性能に関する評価と国際規格について－」『日本建築学会大会 研究懇談会「建築環境工学の国際的展開と建築学会の役割」』:16-21, 2016.
- 43) 日本ヒートアイランド対策技術コンソーシアム「ヒートアイランド対策技術の開発・普及及び効果的・効率的な対策の推進」『新都市ハウジングニュース』89:12-13, 2018.
- 44) 環境省「海外の制度事例」『平成20年度 ヒートアイランド対策の環境影響等に関する調査業務報告書』:61-79, 2009.
- 45) Stanford University, "Bits & Watts Initiative,"
<https://bitsandwatts.stanford.edu/> (2019年2月1日アクセス) .
- 46) AutoGrid Systems, Inc., <https://www.auto-grid.com/> (2019年2月1日アクセス) .
- 47) ASHRAE, <https://www.ashrae.org/> (2019年2月1日アクセス) .
- 48) Koester S., *et al.*, "Modeling Heat and Mass Transfer in Cross-counterflow Enthalpy Exchangers," *Journal of Membrane Science* 525: 68-76, 2017.
- 49) International Institute of Refrigeration,
<http://www.iifir.org> (2019年2月1日アクセス) .
- 50) 地球環境委員会 都市と気候適応小委員会 東アジア諸都市のヒートアイランド検討ワーキンググループ「東アジア・日本の諸都市のヒートアイランド対策ガイドラインと評価ツールの比較に関する研究」『日本建築学会技術報告集』21巻47号:199-204, 2015.

2.1.1 化学エネルギー利用

（1）研究開発領域の定義

再生可能エネルギーを用いて発電を行い、この電力を使用して水素や他の化合物に変換し、エネルギー貯蔵・輸送・利用や物質利用を目的とした技術の研究開発領域を「化学エネルギー利用」と定義する。ここではエネルギー物質変換として、現在注目を集めている「エネルギーキャリア」と「Power to X」技術につき記載する。再生可能エネルギー由来の電力を利用しない「人工光合成」は、「CCU」の領域にて記載する。

（エネルギーキャリア）

「エネルギーキャリア」とは、エネルギーの供給と利用における時間的、空間的なズレを補うために、エネルギーを水素（液体水素含む）あるいは水素をアンモニア・有機ハイドライドなどの他の化合物に変換して貯蔵、輸送することを目的としたエネルギー媒体を示す。エネルギーキャリアの製造、貯蔵・運搬、利用の技術についての研究開発を対象とする。

（Power to X）

「Power to X」は、再生可能エネルギーから得られる余剰電力を、電力部門だけでなく、運輸や化学・産業部門での利用に供するための技術である。この領域に属する主要な技術は、電力からの水素製造、水素の天然ガスへの混入、水素発電等の水素利用技術および水素から他の化合物を製造する等の転換技術であり、これらに対する研究開発を対象とする。

（2）キーワード

エネルギーキャリア、再生可能エネルギー、水素、液体水素、アンモニア、有機ハイドライド、Power to Gas, Power to X、電気分解、メタネーション、水素発電

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

エネルギーの安全保障確保と CO₂ の排出量削減は、我が国にとって必須の課題である。水素は化石燃料・再生可能エネルギー等の多様な原料から製造が可能であり、使用時に CO₂ を排出しない特性を有するため、上記の課題に対する有効な手段となる可能性がある。

（エネルギーキャリア）

地球温暖化ガスの排出抑制を達成するため、再生可能エネルギー由来の電力の導入拡大が必要になる。再生可能エネルギーは、製造と使用の時間・空間的なズレが大きいことから、貯蔵・輸送して利用することが望ましい。蓄電池と比較して、特に大容量、長期間・長距離のエネルギー貯蔵・輸送・利用に有利な方法として、再生可能エネルギー電力を水素あるいは他の化合物に変換して運ぶ、「エネルギーキャリア」の技術が注目されている。この技術は、化石燃料を産出元で CO₂ 回収貯留（CCS : Carbon dioxide Capture and Storage）との組み合わせることで生産した CO₂ フリー水素を大規模に輸入する際にも活用できることから、我が国では国家プロジェクトにより研究開発が推進されている。

（Power to X）

再生可能エネルギー由来の電力（Power）を利用してメタンや水素（Gas）を製造し、これらをガス導管に注入して輸送、利用する技術（Power to Gas）が従来から提案されていたが、さらに発展した概念が Power to X である。すなわち得られた水素を他の物質（X）に変換することにより、電力セクターのみならず輸送や化学等の他のセクターでも利用する技術の総称である。今後、再生可能エネルギーの大規模導入により発生する余剰電力への対策および電力系統制約という課題への対応が必要となるが、「Power to X」技術はその解決に貢献できるだけでなく、熱や運輸部門で使用される燃料の脱炭素化を進める技術としての意義も期待できる。

〔研究開発の動向〕

平成 29 年 12 月に閣議決定された「水素基本戦略」に、2050 年以降を視野に入れて、将来目指すべき姿や目標として官民が共有すべき大きな方向性・ビジョンが示された。これにより、エネルギーキャリアおよび Power to X の研究開発の今後の方向性が明示されたことになる。

（エネルギーキャリア）

NEDO では、平成 26 年度に開始した「水素社会構築技術開発」の一環として「大規模水素エネルギー利用技術開発」を実施している¹⁾。その中で、「未利用エネルギー由来水素サプライチェーン構築」を目的として「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」（液体水素）、および「有機ケミカルハイドライド法による未利用エネルギー由来水素サプライチェーン実証」（メチルシクロヘキサン）を実施している。またこれらを推進する技術研究組合として、それぞれ HySTRA および AHEAD が設立された。

平成 26 年度に内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の一つのテーマとして、「エネルギーキャリア（新しいエネルギー社会の実現に向けて）」が設置され、各種のエネルギーキャリアにつき研究開発を開始した。アンモニアに関しては、直接利用を含めて、早期の社会実装の可能性が大きいと判断がされ、SIP の成果を実用化・事業化へ発展させる取り組みを検討することを目的として、「グリーンアンモニアコンソーシアム」が設立された。

エネルギーキャリア関連に特化した政策としては、2013 年度に、METI「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」ならびに ALCA 特別重点プロジェクト「エネルギーキャリア」がスタートした。その後、前者は 2014 年度から NEDO「水素利用等先導研究開発事業」、後者は 2014 年秋から SIP として再スタートした。前者においては、低コスト水素製造技術開発（アルカリ水電解の高効率低コスト化＝25 万円/Nm³/h の半減）や、有機ハイドライドの脱水素反応の効率化などが進められている。

現在、エネルギーキャリアの研究開発は、液体水素、アンモニア、有機ハイドライドの 3 つが重点的に進められている。また上記の 3 種類以外にもジメチルエーテル、メタノール、メタン、水加ヒドラジン、FT 合成燃料、ジベンジルトルエン、ギ酸、シュウ酸、金属水素化物、金属酸化物などが知られ、それぞれ基盤レベルの研究開発が進められている。

再生可能エネルギー由来の電力からエネルギーキャリアを製造する際に、エネルギー転換効率をさらに向上させる技術として、電力から水素を経由せずにエネルギーキャリアに直接転換する技術も検討されている。例えば電気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するなどである。またアンモニアについても、水と空気と再生可能電力による電解合成

も試みられている。

エネルギーキャリアのうち、液体水素は水素として利用し、メチルシクロヘキサンについては、脱水素反応により水素を製造して利用する。これに対してアンモニアの利用技術として、脱水素反応により得られる水素を利用する方法と、アンモニアを直接燃料とする方法が検討されている。後者の技術としてアンモニア燃料電池、アンモニア直接燃焼が研究されている。

海外におけるエネルギーキャリアの研究は、ドイツとカナダの共同プロジェクトである「The Euro-Quebec Hydro-hydrogen Pilot Project」（EQHHPP、1986年～1998年）以降、本格的な検討は行われていない。

（Power to X）

再生可能エネルギーにより得られる水素は、CO₂フリーである点に特徴がある。経済産業省ではこの Power to Gas（X）技術を、再生可能エネルギーの導入拡大という短中期的課題への対処に利用しつつ、将来の CO₂ フリー水素の利活用に向けた足がかりにすべく、平成 28 年度に CO₂ フリー水素ワーキンググループを立ち上げた。この中で、CO₂ フリー水素の定義づけ等の議論がおこなわれつつある。

NEDO では「水素社会構築技術開発」事業の一環として、「水素エネルギーシステム技術開発」を実施している。この事業では、国内の再生可能エネルギー由来の電力による水素製造、輸送、貯蔵および利用技術を組み合わせたエネルギーシステムについて、社会実装するためのモデルを確立することを目標としている。環境省では、「地域連携・低炭素水素技術実証事業」を実施している。これは水素の低炭素化と本格的な利活用を通じて、中長期的な地球温暖化対策を推進することを目的とし、低炭素な水素サプライチェーンの実証を行うことを目的としている。

Power to X の技術内容は、再生可能エネルギーを用いる発電、その電力を用いる水の電気分解による水素製造、水素の直接利用、および水素をさらに有用物に転換する化学反応、そして有用物の利用のプロセスからなる。Power to Gas（水素）技術で製造された水素の利用先としては、現状では燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle：FCV）等のモビリティ分野や定置用の純水素燃料電池が考えられる。将来的に Power to X 技術の社会実装が進んだ段階では、例えば、熱利用の低炭素化が課題とされる工場熱源としての利用や、石油や化学、半導体などの産業分野における産業ガスや燃料・原料（X）としての利用等により、産業部門の低炭素化を図る方策として、検討が必要となる。

Power to X 技術は様々な機器・装置により構成されるが、特に再生可能エネルギー電力を用いる水電解装置がこの技術の心臓部である。水電解装置にはいくつかの方式がある。現時点で実用段階にあるものとして、アルカリ水電解と固体高分子形水電解（以下「PEM 水電解」）が挙げられる。また、高温水蒸気電解については現在研究開発段階にあり、将来的な実用化が期待される。IEA（International Energy Agency：国際エネルギー機関）によると、現在の水電解システムの設備コストは、アルカリ水電解で \$ 850 ～ 1,500 / kW、PEM 水電解で \$ 1,500 ～ 3,800 / kW 程度と報告されている。我が国では、NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010 において、PEM 技術の現状として設備コストが 140 万円 / (Nm³ / h)（約 28 万円 / kW）とされている。NEDO の技術開発指針において、水電解システムのコスト目標として 26 万円 / (Nm³ / h)（約 5 万円 / kW）を見通せる技術を確立するとしているが、これを早期に実現していくことが重要である。

欧州では、Power to X 技術により製造された水素の直接利用先として、燃料電池、燃料電池自動車用等の運輸セクター用燃料や、ガス導管注入、水素発電、製油所、製鉄プロセスでの利用等が考えられている。

都市ガスグリッドを活用する試みについては、水素は体積や熱量が都市ガスとは大きく異なることから、大量に注入する場合にはガス燃焼器の熱量調整が必要になるといった課題が指摘される。ドイツでは、我が国と比較して都市ガス導管が非常に発達していることに加え、ガスの純度があまり高くなく、水素混入による影響が少ないなど、Power to X プロジェクトを実施しやすい環境にあると考えられる。

水素発電は、水素を安定かつ大量に活用するための手段であり CO₂ フリー水素の利用により、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ガス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。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、NEDO の「水素社会構築技術開発」の「大規模水素エネルギー利用技術開発」において、「水素エネルギー利用システム開発」として水素混焼のドライ型水素タービンの開発されている。また「水素利用等先導研究開発」において「大規模水素利用技術の研究開発」として、水素専焼の技術開発が実施されている。

ドイツでは低炭素燃料を製造するために、脱硫やハイドロクラッキングといった原油の精製プロセスに Power to X 技術によって製造された水素を活用することが検討されている。こうしたプロセスの低炭素化を図るためには、バイオディーゼル燃料やバイオエタノールといったバイオマス由来の燃料を活用する、あるいは再生可能エネルギーの持つ環境価値を証書の形で取引するといった方法が存在する。これらに加え、環境価値の高い水素を原油の精製に活用することで、主要インフラの変更を行うことなく、原油から製造される燃料そのものの低炭素を図る意図である。こうした背景には、原油の硫黄含有量の増加や軽質油の需要増加に伴い、精製に要する水素需要が増加しているといった要因がある。この水素を製鉄プロセスに利用する検討、および CO₂ との反応を利用して低炭素の炭化水素系の自動車燃料とするプロジェクトも稼働している。

2017 年に策定された水素基本戦略に、CO₂ フリー水素と CO₂ よりメタネーションにより合成された合成メタンは水素キャリアの一つとして位置づけられた。合成メタンは、既存のエネルギー供給インフラを活用できることから、水素エネルギーキャリアとして大きなポテンシャルを有する。また CCS で回収した CO₂ の有効利用技術（CCUS）として、注目されている。メタネーションの触媒開発、プロセス開発が進行中である。

水素のガス導管への注入には上記のような制約があると考えられるが、メタンの注入については制約が少ないとされている。Power to X 技術により大量に水素が製造された場合には、メタネーション技術の活用が有効な解決策となり得る。一方、単に水素をガスグリッドに入れる場合に比較して CAPEX / OPEX の両面で追加的なコストが生じる点が課題となる。既存インフラの活用が可能になるといった点においてメリットを有する可能性があることから、メタネーションに係る技術開発の進展が期待される。

再生可能エネルギー由来の電力から得られる CO₂ フリー水素を原料として、ハーバーボッシュ法によりアンモニアを合成し、アンモニアを輸送・貯蔵して利用する技術開発が SIP で進行中である。特に、ハーバーボッシュ法の新規アンモニア合成触媒の開発、およびアンモニ

アを燃料とするガスタービン発電技術の進展が期待される。

「e- ガス」とは、風力発電で得られる電力で CO₂ フリー水素を製造し、これを CO₂ と反応させてメタンを製造して、メタンガス燃料（e ガス）とする CO₂ 排出ゼロのエンジン車を走らせるコンセプトである。さらに、e- ガソリン、e- ディーゼル油を製造する研究も進行中である²⁾。この燃料は原油に依存せず、既存のインフラと互換性があり、クローズド炭素サイクルを実現できることが特徴である。

ドイツでは Hybrid Power Plant プロジェクトが進められている。風力発電と水電解装置、およびコージェネレーションを組み合わせたクリーンな電力・熱・水素の同時供給の検討がされている。

ドイツ政府は、電力消費に占める再生可能エネルギーの割合を 2050 年で 80%以上に設定しているため、大量の自然変動電源の導入が必要となる。しかし導入される電源は、最大需要を遥かに上回る設備容量の規模となるため、供給過剰となる電力の有効活用が重要な課題と認識され、Power to X が検討されている。ドイツでは、現在稼動中のものだけでも約 20 のプロジェクトが確認されている。

米国は Power to X 技術の実証の初期段階にある。カリフォルニア州では 2030 年までに温室効果ガスを 1990 年比で 40%削減する目標を掲げており、電力販売の 50% を再生可能エネルギーにする目標を設定している。これに基づき ZEV（Zero Emission Vehicle）規制を始めとした様々な環境対策が行われる中で、2016 年にはガス事業者である SoCalGas が、カリフォルニア大学アーバイン校に設置されている太陽光発電設備を活用して水素を製造し、都市ガス導管に混入させる米国初の Power to gas プロジェクトを開始している。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

Hydrogen Council（水素協議会）は、水素関連技術の普及に向けたビジョンの提供・共有を活動目的とする、民間トップによるグローバルな活動団体である。2017 年 1 月、エネルギー、運輸、製造業の世界的な 13 社により発足し、現在は 53 社で構成されている（2019 年 3 月時点）。IPCC が示す 2℃シナリオ達成のためには 2050 年までにエネルギー起源 CO₂ 排出量の 60% 削減の実現に水素が活用されることにより、2.5 兆ドルの市場及び 3,000 万人の雇用が創出されると試算した。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

● CertifHy Project

EU では、より環境価値の高い水素の利活用を促進させるため、2014 年から CertifHy Project を開始した。Green Hydrogen（グリーン水素）の定義付けと認証するためのスキームについての議論が行われている。我が国でも、これに対応できる議論が必要である。

（エネルギーキャリア）

● HySTRA の事業

技術研究組合 CO₂ フリー水素サプライチェーン推進機構（川崎重工業等の 4 社）：豪州の褐炭から製造した水素を液体水素に変換し、輸送、貯蔵、利用する CO₂ フリー水素サプライチェーンの構築を行い、2030 年頃の商用化を目指した、技術確立と実証に取り組

む企業団体の事業である。HySTRA は、NEDO の「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業 [2015 年度～ 2020 年度（予定）]」の実施主体である。

● AHEAD の事業

AHEAD は、次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合（千代田化工建設等の 4 社）の略称である。本組合は、有機ケミカルハイドライド法を利用して、海外に賦存する未利用エネルギーを安定的に日本に輸送し日本国内に安定的に供給する水素サプライチェーンの試験研究及び実用化を図るため、事業を行う。

● アンモニア発電

石炭火力発電のボイラーで、補助燃料としてアンモニアを混焼させる技術が進展しており、燃料からの Fuel NOx の発生を抑える方法の開発に目処がついた。2015 年には 50 kW クラスのタービンでアンモニアの直接専焼に成功し（産業技術総合研究所）、燃焼技術の実用化にめどをつけつつある。アンモニアと天然ガスの混焼試験で、出力 2 キロワット級ガスタービンで世界初めてとなる熱量比率 20%の混焼に成功した³⁾。

(Power to Gas)

● NEDO 事業

水素社会構築技術開発事業の一環として、福島県浪江町では 10 MW の水電解装置を含む Power to X (Gas) システムの実証試験を実施する。年間に最大 900 トンの水素を製造し、貯蔵、供給する計画である。

● ドイツのプロジェクト

ドイツでは、dena（独エネルギー機構）の Power to Gas 戦略プラットフォームに基づき、約 20 件の実証が進展している。稼働中の主要な事業を下図にまとめた。（NEDO、Power to Gas に関する取り組み状況、2018.05.13）

プロジェクト名	実施事業体	規模	概要
Audi e-gas PJ	Audi, Solar F fuel 等	6.30 MW	風力発電→水素→メタン（自動車）
Audi e-diesel PJ (Power-to-Liquids)	Audi, Sunfire Climeworks 等		再エネ発電→水素→CO ₂ と反応 →石油代替燃料
CO ₂ RRECT	Bayer, Siemens 等	0.3 MW	再エネ発電→水素→CO ₂ と反応 →化学品原料
Falkenhagen Power-to-Gas Pilot Plant	EOn (Uniper) Hydrogenics	2.00 MW	風力発電→水素→合成ガス、発電・ 熱利用・自動車燃料等に活用
Thuga Power-to-Gas Demonstration Plant	Thuga 等	0.32 MW	風力発電→余剰電力→水素→ガス 導管
Project RH2-WKA	Wind project, Hydrogenics 等	1.00 MW	風力発電→水素貯蔵→不足時に発 電供給
VerbundProject “Power-to- Gas” Alpha-Anlage	Solarfuel, Fraunhofer 等	0.025 MW	再エネ発電→合成ガスや発電・熱 利用

● EU 石油精製での利用プロジェクト

欧州では FQD（燃料品質指令）や RED（再エネ指令）といった環境規制により燃料を低炭素化する必要がある。Power to X で得られる水素を、石油製品製造用水素として利用することにより、石油製品の低炭素化に貢献する。ドイツのエネルギー会社 Uniper が、

Lingen 等の製油所の FS 実施を計画中である。

- HYFUTURE（オーストリア）、GrInHy プロジェクト（ドイツ）

オーストリアのエネルギー企業の Verbund 社は、FIT 終了後の風力発電由来の水素を製鉄プロセスに統合する事業（HYFUTURE）の FS を予定している。またドイツでも GrInHy プロジェクトとして、製鉄企業 Salzgitter Mannesmann Forschung 社が製鉄プロセスの高温排熱利用した高温水蒸気電解を製鉄プロセスに統合する検討を行っている。

（5）科学技術的課題

（エネルギーキャリア）

- 水素をエネルギーキャリアに高効率かつ低コストで変換する触媒・プロセスの開発。
- 再生可能エネルギー由来の電力を用いて、水電解を経由せずに直接エネルギーキャリアを製造する電気化学的手法（新規アンモニア電解合成等）の開発

（Power to X）

- Power to X で用いる水電解装置は、応答性や対応力・耐久性が求められるため、①エネルギー変換効率、②コスト、③寿命（耐久性）の3つが重要である。最重要のコストの低減を実現するために、PEM 水電解については耐久性の確保が課題である。Power to Gas 技術の中核である水電解システムについては、26 万円／（Nm³／h）のコスト水準を早期に実現する必要がある。
- 再生可能エネルギー由来の電力、系統電力および化学反応の各工程を組み合わせたシステム最適化技術（電力制御、反応熱を有効に供給するための他の熱源との組み合わせ・コジェネ化技術）
- 電力貯蔵材料としての水素貯蔵材料開発（金属系水素貯蔵材料、吸着系水素貯蔵材料、Mg 系水素貯蔵材料、水素貯蔵システム（水素貯蔵材と高圧タンクの複合システムの軽量化、高効率熱制御技術、金属系水素貯蔵材料の反応性向上・可逆性向上・軽量化、など）

（その他）

- 水素・天然ガス混焼および水素専焼発電の効率を大幅に上回る超高効率水素発電技術

（6）その他の課題

1）技術面の課題

エネルギーキャリアの普及は低炭素社会に対する社会的要請の醸成、CO₂ フリー水素の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挙げられる。従って、中長期にわたる統合的な戦略のもとに、系統的な研究開発の推進が重要となる。

2）制度面の取組

CO₂ フリー水素の利活用拡大という観点からは、J-クレジット制度などを活用した水素製造

により CO₂ フリー水素の量的課題の解決に取り組むとともに、CO₂ フリー水素の定義に係る議論、CO₂ フリー水素活用にインセンティブを与える制度設計（省エネ法や高度化法への組み込み）などを通じて、供給側・利用側双方において CO₂ フリー水素のメリットが享受され、取引が促進される仕組み作りを検討していくことが必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	■エネルギーキャリア - 液体水素では磁気冷凍、アンモニアでは合成触媒、有機ハイドライドでは脱水素反応への膜分離技術が研究されている。ギ酸、メタノール等のキャリアとしての製造、利用に関する研究が行われている。 ■Power to X - 水電解技術高度化のための基盤技術研究、メタネーション触媒の研究が進行している。
	応用研究・開発	◎	↑	■エネルギーキャリア - SIP（内閣府戦略的イノベーション創造プログラム）において、アンモニアや有機ハイドライドを中心に製造・利用に関する技術開発を推進している。特にアンモニアの石炭混焼発電およびガスタービン発電が注目されている。 - NEDO 水素社会構築技術開発事業では、海外から CO₂ フリー水素を導入するサプライチェーンの実証事業（液体水素およびメチルシクロヘキサンを利用）が進展している。（HySTRA および AHEAD） ■Power to X - NEDO 水素利用等先導研究開発事業では、電解による水素製造技術や液体水素貯蔵技術などの開発が行われており、大型機の実証も計画されている - 複数の NEDO 事業で、混焼および専焼の水素発電技術が実施されている。 - NEDO 水素社会構築技術開発事業では、国内再エネをベースとする複数の F S が実施されている。（福島県浪江町など） その他、環境省地域連携・低炭素水素技術実証事業も実施されている。
米国	基礎研究	○	↑	■エネルギーキャリア - 磁気冷凍とボルテックス（Vortex）冷凍方式の研究を実施（DOE、NREL 再生可能エネルギー研究所）。液体水素輸送貯蔵タンクの断熱材開発と国際規格の検討がされている⁴⁾。 ■Power to X - DOE では、2020 年までにクリーン水素コスト 4 ドル/kg 水素以下にすべく、水電解をはじめ、太陽熱利用やバイオ水素技術等による水素製造等に関する研究開発プログラムを実施している⁴⁾。
	応用研究・開発	○	↑	■Power to X - H2@scale プロジェクトで、余剰電力で水素を製造し、エネルギー用途や化学産業等の多様な産業への利用を検討中⁴⁾。 - 技術実証の初期段階。カリフォルニア州では 2030 年までに温室効果ガスを 1990 年比で 40%削減する目標を掲げており、電力販売の 50% を再生可能エネルギーにする目標を設定している。これに基づき ZEV（Zero Emission Vehicle）規制を始めとした様々な環境対策が行われる中で、2016 年にはガス事業者 SoCalGas が、カリフォルニア大学アーバイン校に設置されている太陽光発電設備を用いて水素を製造し、都市ガス導管に混入させる米国初の Power-to-gas プロジェクトを開始している⁵⁾。 - DOE の水素関連プログラムでは、水分解技術の実証等も進められている。水素の液化（BOG 液化）と貯蔵を一体化したシステムの開発が行われている⁴⁾。 - 水素ステーションは 2017 年までに 51 か所、2023 年頃までに 100 か所が整備される予定。カリフォルニア州の助成を得て設置されるステーションは、33%に相当する水素供給量を再生可能エネルギー（風力、太陽光、バイオマス等）由来とすることが定められている。（NEDO 資料）

欧州	基礎研究	○	↑	■全体⁴⁾ ・基本思想：水素によりセクター間統合と貯蔵を行い、再生可能エネルギーの利用を促進する。 ・水素・燃料電池研究開発は、HORIZON2020 の燃料電池・水素の技術開発を行う官民パートナーシップ、FCH2JU (Fuel cell Hydrogen 2 Joint Undertaking) が実施。 ・FCH2JU の複数年計画 (Multi - Annual Work Plan 2014 - 2020) の内容 ・運輸部門：乗用車と水素ステーションに加え、フォークリフト、鉄道、船舶、航空向けの燃料電池のための高効率化、長寿命化、低コスト化のための製造技術。幅広い利用を想定。 ・水素製造：再生可能エネルギーや低炭素資源からの水素製造・利用 ・エネルギー貯蔵：再生可能エネルギーから製造した水素によるエネルギー貯蔵や、水素またはメタンの天然ガス導管網への混入を目的とした、水電解設備の研究開発。 ・利用技術：燃料電池コジェネの研究開発、モノジェネ燃料電池、配送や安全関連研究。 ・政府・民間それぞれが 8.84、8.66 億ユーロを拠出。 ■エネルギーキャリア 熱媒体油ジベンジルトルエンの検討が報告されている。(WHTEC2017) ■Power to X ・従来の Power to Gas は、「再エネの余剰電力による水素製造」から、「電力グリッドとガスグリッドの柔軟性の向上、市場の柔軟性の向上という” Power to X”」の概念に発展。 ・個別のビジネスケースの採算性は、制度的な支援に大きく依存。(英国) ■全体 ・2011 年に、H2 Mobility の英国版である UK H2 Mobility が設立された。 ・UK H2 Mobility の 2011-2012 年の英国の運輸部門の水素エネルギーのポテンシャル評価結果を受け、政府は産業界と共に合計 1,100 万ポンド (約 20 億円) を投じ、2015 年末までに 15 箇所の水素ステーションを設置することを発表している。(ドイツ) ■Power to X⁶⁾ ・水素から他の有用化合物への転換技術 (Audi e-diesel など) ・GrInHy プロジェクト (ドイツ)：製鉄企業 Salzgitter Mannesmann Forschung 社が製鉄プロセスの高温排熱利用した高温水蒸気電解を製鉄プロセスに統合する検討 (METI/ みずほ資料) ・製油所への利用 Uniper 社：Falkenhagen で PTG 検討 ・Sunfire 社の Power to X 構想 (その他) ■Power to X ・Hyper プロジェクト (ノルウェー)：風力由来の余剰電力と天然ガスから水素を製造し、液体水素として貯蔵・輸送する技術およびスケールアップ技術の検討。
	応用研究・開発	◎	↑	■全体⁵⁾ CertifHy プロジェクト：環境価値の高い水素の利活用を促進させるため、2014 年に開始した。 ■Power to X ・ドイツを中心に再生可能エネルギーからの水素、メタン製造について実証が進行中。地域の各エネルギー供給公社 (シュタットヴェルケ) で太陽光や風力による電力供給が拡大しており、地域間融通のための電力貯蔵に関する技術開発も進む可能性がある。(英国) ■Power to X The PURE (Promoting Unst Renewable Energy) Project：再生可能エネルギーからの水素製造に関する実証。スコットランドで実施中。(ドイツ) ■Power to X 20 件程度の実証が進行中。(フランス) ■Power to X MYRTE プロジェクト：コルシカ島での太陽光発電と電力グリッドの統合マネジメントの研究開発。

欧州	応用研究・開発	◎	↗	(その他) ■ Power to X ⁵⁾ ・ H2FUTURE プロジェクト（オーストリア）：エネルギー企業 Verbund 社が PEM 型電解装置を製鉄プロセスと統合する検討 ・ Nuon 社（オランダ）：Magnum 発電所で水素発電の実証を計画
中国	基礎研究	△	→	■全体 ・ 水素製造 ・ 石炭ガス化：2500 億 Nm ³ /年、水素製造コスト 0.55-0.85 元/Nm ³ (9.0-13.8 円/Nm ³) ・ 再エネ由来：余剰電力 1000 億 kWh/年から 250 億 Nm ³ /年 ・ 副生（コークス製造、電解等）：1000 億 Nm ³ /年 ・ 主な需要技術：FCV を想定 国と地方の補助金により普及を促進 ・ 水素の輸送には、現状では高圧水素を想定（パイプライン 24 km）。
	応用研究・開発	○	↗	■全体 2015 年に発表された Made in China2025 において、重点分野として省エネルギー・新エネルギー自動車を挙げている。普及を支援し、自動車の低炭素化・情報化のための技術開発を推進することを表明している。
韓国	基礎研究	○	→	■エネルギーキャリア 水素貯蔵材料などの研究開発が行われている。有機ハイドライド等については触媒などの基礎研究がなされている。
	応用研究・開発	○	→	■全体 FCV の製造販売、水素ステーション整備等は進展しているが、エネルギーキャリアと Power to X についての進展の情報はない。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準がどう変化しているかの評価を、参考にした根拠や専門的な見解等に基づき判断。

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「水素社会構築技術開発事業 平成 30 年度実施方針」, 2018 年.
- 2) 三木「海外の Power to Gas をめぐる動向と将来展望」『ENECO』2017-07.
- 3) 山藤泰「アンモニアで発電する燃料電池が登場」国際環境経済研究所ウェブサイト, 2018 年 8 月 6 日
- 4) 石本祐樹「World Hydrogen Energy Conference 報告書資料」, 2018 年 8 月 28 日
- 5) 資源エネルギー庁「CO2 フリー水素ワーキンググループ報告書」, 2017 年
- 6) 資源エネルギー庁「CO2 フリー水素ワーキンググループ 配布資料」, 2017 年

2.1.2 基礎化学品合成プロセス

（1）研究開発領域の定義

基礎化学品合成プロセスに関する科学、技術、研究開発を記述する。

基礎化学品、機能性化学品などの合成プロセスにおける触媒、プロセス、システム技術を対象とする。

（2）キーワード

C-H 活性化、有機分子触媒、高難度分子変換、クロスカップリング反応、分子活性化、ハイブリッド触媒、可視光酸化還元触媒、フロー法、マシンラーニング

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

我々の生活を支え豊かにする食料・衣類・プラスチック・化粧品・医薬品の多くは有機化合物である。現在では、有機 EL や有機半導体、エネルギーに関わる有機材料など多くの高性能精密有機材料も生まれており、近代社会の根幹となる製品群とあってよい。そのため、それら有機化合物を創製する社会的・経済的意義はいうまでもないであろう。有機化合物の高性能化は、より複雑な構造やこれまでにない官能基・炭素骨格の構築・変換、すなわち全く新しい概念の合成手法の開発によって革新する。したがって、新規かつ効率的な合成手法やそれを促進する触媒系の開発が望まれている。有機合成化学は機能の最小単位である分子レベルで分子を設計し、つくりあげることができ、合成化学は最小の製造業でもある。

[研究開発の動向]

すでに基礎有機合成化学に関しては理論的体系が整っており、通常の反応性をもつ化学品をつくる有機反応は数多の例が知られている。蓄積された数多の反応例はデータベース (SciFinder、Reaxys 等) によって簡単に検索できる。ある程度の訓練をつんだ合成化学者ならば、手法や効率性を考慮しなければ、既知のあらゆる化合物を合成することが可能である。しかし、現在においても分子レベルでの新しいものづくりが毎日報告され続けており、無尽蔵に存在する未知の（あるいは既知でも複雑な）化合物を大量につくりあげるためには、長期間を要するテーラーメイドの合成反応および触媒開発が必要となる。つまり、望みの化合物を簡便につくる実用的手法となると、反応性・効率性・基質一般性・化学選択性・環境応答性など未だに課題は山積みである。

例えば、クロスカップリング反応・オレフィンメタセシス・不斉触媒反応はノーベル化学賞の受賞テーマであり、最も新しい実用的と信頼性をもちあわせた革新的な反応であるが、その受賞から月日が経ち次世代型の反応開発が望まれ、盛んに研究されている。カップリング反応に関していえば、パラジウム触媒の安価な金属触媒への代替、カップリング剤の多様化などである。様々な金属触媒/配位子を開発することでこれまで用いられなかったカップリング剤を使用できるようになった。特に炭化水素の官能基化を使用せず、直接置換基や炭素官能基を導入する C-H 活性化反応は 2005 年ごろから頻繁に報告されはじめ、現在においても注目テーマの 1 つである¹⁾。また、安価な汎用官能基（フェノール誘導体・カルボン酸・エステル・アミド・ニトロ基）をもつ（芳香族）化合物を変換するカップリング反応も多く研究者によっ

て報告されている²⁾。反応を促進する触媒は精密有機合成反応の場合、均一系遷移金属触媒が主流である。均一系触媒は一般に、その金属中心にある配位子を高度に設計することによって、これまで実現困難であった変換反応を達成することができる。

一方で、特に不斉触媒分野において高価な金属を用いず触媒にも有機化合物のみを用いる有機分子触媒という分野も近年興隆している³⁾。有機分子触媒は金属触媒と比較し、水や空気下でも反応が進行し、取扱も簡便という大きな利点がある。その簡便さから多くの反応が報告されたが、その反応性や反応多様性の低さからブームは去りつつある。しかし、最近、より高度な分子設計と新規概念によって従来の欠点を抑える新規触媒が次々と報告されている。

さらに、最近注目されている反応形式として、可視光を用いて反応を進行させる可視光酸化還元触媒反応⁴⁾、電気化学的な手法（有機電解反応）により化合物を変換する手法がある⁵⁾。これらは、古くから知られていたが、近年の巧みな触媒設計により、広範囲な化合物に対しても利用できるようになりつつある。なお、合成反応開発といえば、多数のスクリーニングを伴うものであるが、その作業を簡略化させるため、マシンラーニングを駆使した触媒条件最適化がごく最近報告されている⁶⁾。この最適化手法には将来性はあるものの、いまだ実用性が高い方法とはいえない。

いずれの合成反応開発においても、環境負荷を与えない、クリーンで原子効率の高い反応が望ましい⁷⁾。開発した手法を用いて基礎化学品を合成するプロセスにおいては、小さなフラスコから大型反応器まで1つの反応を1つの容器で行うバッチ反応法がいまだに主流である。一方近年、一端からいくつかの出発原料を流入し、触媒のカラムを通じて反応させるフロー法がよく研究されている⁸⁾。これら有機合成化学の研究課題の動向において、我が国は中心的な立場にある。上述した多くの革新的な反応の第一歩が日本から見出されているが、その有用性をアピールする次段階においては他国（特に米国）に遅れをとっている。開発した新規反応の活躍の場をよく顧慮し、産学官で密接に協力し、日本発の合成反応の展開を進める必要がある。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

■ C-H 活性化反応：

これまで反応しないと考えられていた炭素－水素結合を活性化し、官能基や炭素－炭素結合に変換する反応。原料を不安定で工程数を必要とする有機金属化合物などに変換することなく直接炭素－水素結合を変換することができるため、近年のグリーンケミストリーや工業的製法の短縮化の観点からも注目されている。

■ 炭素－炭素結合活性化反応⁹⁾：

有機化合物の骨格を形成する炭素－炭素結合を切断し、化合物を変換する手法。理想的には骨格を意のままに切断し、他の化合物に変換することが可能である。

■ 高難度分子変換反応：

名称の通り変換困難で革新的な精密有機合成を目指す反応開発。上述の C-H 活性化反応や炭素結合活性化反応なども含まれる。フェノール・アミド・エステル・カルボン酸・ニトロ基などの汎用官能基を形式的な脱離基として反応する反応や、貴金属を鉄やコバルト、ニッケルなどの安価な金属に変換する反応などもこの分野といえる。

■ ハイブリッド触媒：

独立した機能をもつ複数の触媒を共存させて、それらの協奏的な効果により実現困難な化合物合成の精密制御を行う。うまく反応系を構築できれば全く新しい変換反応を行える可能性を秘めている。

■ （不斉）有機分子触媒：

高価な金属を用いず、有機化合物のみを触媒としても用いて反応を行う。一般的に禁水条件や不活性雰囲気下などの反応条件で行う必要はない。2000 年前半から反応開発が積極的に行われ、一息ついた感はある。

■ 可視光酸化還元触媒反応：

無尽蔵な太陽光をエネルギー源として用いて反応を行う。2010 年ごろから急速に発展し、現在最も注目されている反応形式である。

■ 有機電解反応：

電極から分子・分子から電極の電子の移動（酸化還元反応）を利用して反応を進行させる。廃棄物を伴わない（電解液は必要）クリーンな合成反応として注目されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■ 新学術領域「高難度物質変換反応の開発を指向した精密制御反応場の創出」：

精密に制御された反応場を創出すること、高機能・高活性・高選択性触媒を創製することを目的としている。さらにこの反応場を利用して、新反応の発見や従来達成が困難とされてきた高難度物質変換反応の実現を目指す。

■ 新学術領域「分子合成オンデマンドを実現するハイブリッド触媒系の創製」：

生体内のような複数の酵素（生体触媒）が関与する多触媒反応による有機分子の活性化や複雑な化合物の一举合成を目標に掲げている。

■ JST CREST・さきがけ「持続可能な社会の実現に資する新たな生産プロセス構築のための革新的反応技術の創出」：

反応原理の解明とともに電子やイオンの能動的制御法の開発や、それらに基づいた電気や光等を利用する新規合成反応の開拓を推進し、持続可能な社会の実現に向けた革新的反応技術を生み出す。

■ CCHF（Center for Selective C-H Functionalization）：

NSF（アメリカ国立科学財団）の資金にて設立されたバーチャル研究所。C-H 結合活性化反応の開発やそれに基づいた医薬品合成などに資する研究者・大学で構成されている

(5) 科学技術的課題

■ C-H 活性化反応：

これまで開発されてきた本反応は配位性の官能基や化合物の特性を利用するものがほとんどであった。最近ではそれらによらず触媒で制御する C-H 活性化反応へと進展している¹⁰⁾。不斉反応化、工業プロセスへの応用が課題である。

■ 炭素—炭素結合活性化反応：

自在な分子変換を目指し、歪んだ化合物などの特殊で切断しやすい炭素—炭素結合のみならず、通常の炭素—炭素結合を活性化しうる触媒開発がこの分野の発展の鍵を握っている。

■ 高難度分子変換反応：

教科書を変えるような困難な反応は次々と開発されてはいるものの、特殊な原料を用いる場合や、官能基許容性が少ない、反応条件が激しいものが多く、より精密な触媒設計による活性化エネルギーの低減を必要とする。

■ ハイブリッド触媒：

協奏的な機能を有する触媒は知られているが、それが全く新しい分子変換に活用されるような状況はほとんどなく、既存の反応の効率化が主流である。1つの触媒開発でも年月を要するため、複数の触媒による反応制御・効率化となると、より効率的な反応開発法（ハイスループットスクリーニング法）が必要である。

■ （不斉）有機分子触媒：

金属のように有機化合物との相互作用が強固でないため、共有結合もしくは水素結合を利用し触媒として作用するものが多い。金属触媒に比べ官能基許容性には優れるが、触媒量が多く必要であるといった課題がある。より高性能な有機触媒の開発が望まれる。

■ 可視光触媒反応：

酸化還元電位を調節するためある一定の限られた基質しか反応できない。触媒の改良によりその幅が拡大されつつある。光エネルギーを用いるクリーンな反応であるが、工業プロセスを考慮するとより効率的に光を照射できるかという課題もある。

■ 有機電解反応：

可視光触媒反応と同様に現状ではある一定の限られた基質しか反応できない。電解液や電極などの選択肢もあり、研究室レベルでも一定して反応を試すことができる安価な装置の開発も課題である。

（6）その他の課題

■ 研究開発と成果の社会実装：

一般的に化学品合成に関しては、有機化学特有の化学構造式を求められるため意義を理解されにくい。したがって、成果としては工業プロセスを変革できる革新的な反応であっても、利点・利益が見えにくいといったものがある。一方で、成果の社会実装を行うためには企業との初期段階からの共同研究が必要となるが、我が国は米国などと比べ、新触媒の試薬化や新反応を用いた多様な誘導化などの応用が、企業と密接な関係を築けず、立ち遅れている。例えば、ある医薬品候補化合物を新規合成プロセスで誘導化したいという場合、高価な費用を支払って、米国・中国のベンチャー企業に導出するといった傾向にある。産学が共同して、専門家のコンソーシアムで受注できるようなシステムがあれば、技術流出や産学共同の活性化につながる。

■ 連携：

多くの国内外の共同研究が重視される傾向にあるが、そもそも新反応開発は独自色が強く共同研究がしにくい分野である。その点を理解されず、実りのない共同研究（新反応開発同士）をしなければならないことがある。

■ 国際競争力・資金力：

日本のアカデミアは学生ベース（主に修士課程）であるため、初期的な発見を得るのは得意であるが、その後の反応展開力にけることが多い。その際に博士課程・博士研究員

が中心となって研究を行う米国などに、遅れを取る可能性がある。現状新学術領域などで注目反応開発分野においては資金的な援助は得られているが、応用分野のみならず基礎的な有機合成反応開発という日本の得意分野を失わないためにも継続的な公的資金投入が必要である。

（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	◎	↑	反応の発見は日本であり、精力的に研究が行われている。特に C-H 活性化反応や不斉有機分子触媒に関しては新学術領域などを中心に、すでに多くの新規化学合成プロセスが開発された。ハイブリッド触媒などの新しい形の触媒開発研究も行われている。しかしその一般性展開などの点において米国を中心に遅れをとっている。さらに最近では中国などが台頭し、反応の発見の段階においても遅れを取る場合がある。可視光酸化還元触媒反応などがその例で、日本で開発されたのにも関わらず、現在の新しい潮流はほとんど米国中心である。
	応用研究・開発	△	→	応用研究に関しては実用的であると言った意味の応用はいまだ少ない。しかし、複雑生理活性物質の合成や有機材料の短段階合成、メディシナルケミストリーなどの利用は行われている。
米国	基礎研究	◎	↑	米国での反応開発は個々の優れた研究者が行っているという印象である。一方で学術団体として特に、複数の大学の C-H 活性化研究者が集まって展開しているバーチャル研究所である CCHF は大変うまく機能している印象がある。特に密接したコラボレーションを行っているわけではないが、研究を集めることにより注目研究分野が目立っている印象がある。
	応用研究・開発	○	↑	研究者が自身の技術をすぐにベンチャー企業などに転嫁して、応用研究・開発を行う土壌がある。そのため開発された反応がすぐに技術転嫁される、もしくは興味のある大企業に会社ごと買収されることもある。試薬会社なども個々の注目研究者と共同研究を密接かつ積極的に行っており、触媒が論文発表と同時に発売されるといったことも少なくない。電解反応や可視光触媒の反応機器に関しても同様で、すでに実験室レベルで簡便に反応を行うことができる機器はすでに発売されている。
欧州	基礎研究	○	→	●反応開発は行われているが積極的ではない。ここの有機材料をつくり評価する有機物理化学分野の方が発展しているように思われる。 ●英国では C-H 活性化反応や C-C 活性化反応の開発で著名な研究者は少しいるが、有機合成化学が他国に比べて強いという印象はない。 ●ドイツでは欧州の中では圧倒的に、有機合成化学の分野においては研究が盛んに行われている。大きな化学企業、マックスプランクのような巨大な私立研究所もあり多くの研究者が化学反応開発を行っている。いずれにおいても革新的な反応の発見には関与していないが、それらの展開研究にはかなり強い。土壌としてヨーロッパのなかでも中国などの優秀な大学院生や研究者を受け入れており、彼らが精力的に研究を行っている感はある。 ●フランスでは C-H 活性化反応や C-C 活性化反応の開発で著名な研究者は少しいるが、有機合成化学が他国に比べて強いという印象はない。 ●イタリア・スウェーデン・オランダなどには一部反応開発研究を行っている研究者がいる。スペインは ICIQ (Institute of Chemical Research of Catalonia) という化学研究所があり、そこに所属する有機合成化学者は精力的に基礎研究を行っている。
	応用研究・開発	△	↓	●特に応用研究は積極的に行われていない。

中国	基礎研究	◎	↗	反応開発は簡便に始めることができることから、日本・アメリカなどに比べて後発ながら人的資源を用いた網羅的な開発が積極的に行われている。とくに C-H 活性化反応や不斉反応の配位子開発などは他国に比べても遜色ない。アカデミアの研究においては研究資金に関しても潤沢、人材も豊富であり、二番煎じ以降の研究を含めれば、最も研究報告がなされている。
	応用研究・開発	○	→	化学工業と密接につながっており行動も迅速であるため、すぐに工業プロセスなどに応用できる力を持っている。現に最新化学反応合成に対応できる合成化学企業があり、製薬企業など多数の誘導化を望む海外の企業が外注を行っている。
韓国	基礎研究	○	↘	C-H 活性化分野で活躍している化学者は一握り存在するが、その他の新反応開発という意味では他国に遅れをとっている。化学分野においては応用的要素を重視する傾向にあり、基礎化学反応開発は研究資金を獲得するのが困難であるのかもしれない。
	応用研究・開発	×	↘	特に応用研究は積極的に行われていない。

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2) 「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

- 1) Crabtree Robert H. and Aiwen Lei, "Introduction: CH Activation", *Chemical Reviews* 117 (13): 8481-8482, 2017.
- 2) (a) Tobisu Mamoru and Chatani Naoto, "Cross-Couplings Using Aryl Ethers via C-O Bond Activation Enabled by Nickel Catalysts", *Accounts of Chemical Research* 48, (6):1717-1726, 2015.
(b) Takise Ryosuke, *et al.*, "Cross-coupling of Aromatic Esters and Amides", *Chemical Society Reviews* 46 (19):5864-5888, 2017.
- 3) List Benjamin, "Introduction: Organocatalysis," *Chemical Reviews* 107 (12) :5413-5415, 2007
- 4) (a) Prier Christopher K., *et al.*, "Visible Light Photoredox Catalysis with Transition Metal Complexes: Applications in Organic Synthesis", *Chemical Reviews* 113 (7): 5322-5363, 2013.
(b) Romero Nathan A. and Nicewicz David A., "Organic Photoredox Catalysis", *Chemical Reviews* 116 (17): 10075-10166, 2016.
- 5) Yan Ming, *et al.*, "Synthetic Organic Electrochemical Methods Since 2000: On the Verge of a Renaissance", *Chemical Reviews* 117, (21): 13230-13319, 2017.
- 6) Maryasin Boris, *et al.*, "Machine Learning for Organic Synthesis: Are Robots Replacing Chemists?", *Angewandte Chemie International Edition* 57 (24): 6978-6980, 2018.
- 7) (a) Anastas Paul T., "Introduction: Green Chemistry", *Chemical Reviews* 107 (6): 2167-

- 2168, 2007.
- (b) Trost B M., "The Atom Economy--a Search for Synthetic Efficiency", *Science* 254 (5037): 1471-1477, 1991.
- 8) (a) Pastre Julio C., *et al.*, "Flow Chemistry Syntheses of Natural Products", *Chemical Society Reviews* 42 (23): 8849, 2013.
- (b) Tsubogo Tetsu, *et al.*, "Multistep Continuous-flow Synthesis of (R)- and (S)-rolipram Using Heterogeneous Catalysts", *Nature* 520 (7547): 329-332, 2015.
- (c) Li Junqi, *et al.*, "Synthesis of Many Different Types of Organic Small Molecules Using One Automated Process", *Science* 347 (6227): 1221-1226, 2015.
- 9) Souillart Laetitia and Cramer Nicolai, "Catalytic C–C Bond Activations via Oxidative Addition to Transition Metals", *Chemical Reviews* 115 (17): 9410-9464, 2015.
- 10) Wang Peng, *et al.*, "Ligand-accelerated Non-directed C–H Functionalization of Arenes", *Nature* 551 (7681): 489-493, 2017.

2.1.3 燃焼

（1）研究開発領域の定義

燃焼に関する科学、技術、研究開発を記述する。エンジン燃焼、ガスタービン燃焼、燃焼式工業炉、微粉炭燃焼などを対象とする。エンジン燃焼に関しては低排出ガス化と高効率化の同時実現に向けて研究開発が進められている自動車エンジンにおける周辺機器開発や制御技術も含めた燃焼技術も含まれる。

（2）キーワード

エンジン、工業炉、熱効率、火災、着火・消炎、化学反応、NO_x、スス・PM（Particulate Matter）、バイオ燃料、水素、アンモニア、微粉炭、ゼロ CO₂

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

燃焼技術は、動力・発電・熱需要の大部分を賄っている。ベース電源のエネルギー供給源としての利用だけでなく、短時間に出力を要する機器として代表される自動車・船舶・航空機の動力による人・物の輸送やあらゆる工業製品の製造工程に使われており、経済活動に必要な不可欠な基盤技術である。一方で、燃焼機器は CO₂ の主な排出源であり、エネルギー機器としての高効率化¹⁾や CO₂ 排出量削減に向けた取り組みが喫緊の課題である。特に、自動車用パワートレインは電動化の方向に大きく変化している一方、2040 年でもエンジンが搭載された自動車は 70% を越え、かつ自動車販売台数は増加すると予想されており、自動車のエネルギー消費量、CO₂ 排出量、排出ガスのさらなる大幅な低減のため、究極の熱効率の追求やクリーンな排出ガスの燃焼コンセプト開発が大きな方向である。また、燃焼は化学反応と熱流体が連成する極めて複雑なマルチスケール・マルチフィジックス現象であり、最も現象解明やモデル化が困難な領域のひとつとして考えられる。

[研究開発の動向]

COP21 で採択された「パリ協定」に基づき、各国は温室効果ガス排出量の大幅な削減に向けて具体的な行動を求められている。燃焼由来の CO₂ は温室効果ガス排出量の大部分を占めるため、この削減が喫緊の課題である。このため、再生可能エネルギー由来の電気エネルギーの利用を想定した燃焼機器の電化が短期的には進められてきた。しかしながら、再生可能エネルギーの導入が進むにつれて、再生可能エネルギーは時間的・空間的な偏在性が高い、電気エネルギーは高密度・長期間貯蔵が困難、といった特徴が改めて認識され、単なる燃焼機器の電化推進では経済活動と整合させつつ 2℃ 目標を達成することは困難との認識が浸透しつつある。すなわち、単なるエネルギー利用工程の電化でなく、燃焼機器の有する高い出力密度と負荷変動追従性を活用し、経済活動と整合させつつエネルギー製造・貯蔵・輸送・利用の全工程からの CO₂ 排出量削減を目指すことが求められている。

この観点において、燃焼領域の研究開発動向は大きく二つのトレンドがみられる。一つは、化石燃料を燃料とする燃焼機器のさらなる高効率化である。化石燃料はその製造・貯蔵・輸送における発熱量当たりの CO₂ 排出量は非常に小さいことから、燃焼利用時における熱効率向上が CO₂ 排出量削減に直結する。我が国の燃焼機器の熱効率は世界トップクラスにあり、最

新の自動車エンジンは熱効率 40% 超²⁾、天然ガス焚き 1500℃コンバインドサイクルは熱効率 60% 超・出力 98 万 kW³⁾、空気炊き石炭ガス化炉 1200℃級コンバインドサイクル（IGCC、実証試験）は熱効率 40% 超・出力 25 万 kW³⁾ であり、効率と規模の両面でエネルギー利用を牽引している。また、石炭は他の燃料に比べて単位発熱量当たりの CO₂ 排出量が大きく、温暖化防止の観点に対するデメリットを持つが、賦存量が豊富かつ安価で比較的価格変動が少ないことから、特にアジア地域を中心に今後も需要は増加すると予想されている⁴⁾。SIP「エネルギーキャリア」⁵⁾ では、アンモニアを燃料として直接利用する方法の一つとして、微粉炭燃焼ボイラへ導入し、微粉炭とアンモニアを混焼させる検討を行っており、760 kWth 石炭燃焼試験炉を用いた混焼試験、10 MWth 試験炉を用いた混焼試験に加え、発電用実機ボイラを用いた実証試験も実施されている。さらに、自動車エンジンの熱効率 50% を目標とした SIP「革新的燃焼技術」⁶⁾ や 1700℃級ガスタービンの研究開発⁵⁾ が進められている。「革新的燃焼技術」では、自動車用エンジンに対して産学官の連携を基盤に既存燃料に対する燃焼技術、制御技術の改善が進められており、燃料の希薄化や熱発生制御など、燃焼条件による熱効率の向上が図られている⁶⁾。エンジンの究極の熱効率として、乗用車用ガソリンエンジンとディーゼルエンジンでは最大正味熱効率 50% を、商用車用ディーゼルエンジンでは 55% が目標とされている。現在の熱効率達成レベルは、乗用車用ガソリンエンジンで 47.2%、乗用車用ディーゼルエンジンで 48.6% であるが⁷⁾、2018 年度中にそれぞれ 50% 必達を目指して研究開発が行われている。

昨今の乗用車用ガソリンエンジンでは、EGR を活用した過給直噴をベースに希薄燃焼方式（HCCI 含む）や高圧縮比化がトレンドとなっているが、⁸⁾ ノッキングや燃焼制御という大きな課題があり、それらの対策の研究開発が主流と言える。また、熱効率向上、排出ガス低減、ノック抑制の両立の観点からガソリン直噴の燃料噴射圧は、今後も高圧化していく方向である。

乗用車用ディーゼルエンジンでは、NO_x や機械損失の観点から低圧縮比（ $\epsilon = 14 \sim 16$ ）化の方向であったが、最近では前述の課題を解決しつつ熱効率向上を狙い少し高めの適度な圧縮比（ $\epsilon = 16 \sim 18$ ）で PCCI 燃焼コンセプトをベースに、排出ガス低減を維持しつつ燃焼時の冷却損失低減が研究開発のトレンドである。そのポイントは燃料噴射系であり、可変噴射率制御⁹⁾、近接多段噴射制御、燃料噴射圧の高圧化（200 → 300MPa）¹⁰⁾ の方向である。商用車用ディーゼルエンジンでは、乗用車に比べ常用エンジン回転数が低いこともあり、高めの圧縮比（ $\epsilon = 18 \sim 20$ ）の過給直噴をベースに、やはり燃焼時の冷却損失低減が研究開発のトレンド¹¹⁾ と言える。

排出ガス低減の追求に関しては、乗用車用ガソリンエンジンでは、冷間始動時の三元触媒の早期活性化が課題であり、冷間燃焼の安定化、遅角燃料噴射による膨張行程での燃焼利用、排気系に空気を噴射する三元触媒早期暖機、冷間始動時のみヒータで触媒を加熱する EHC¹²⁾ などが検討されている。また、主に欧州では、ガソリンスートをトラップし燃焼させる低圧損な GPF¹³⁾ の研究開発もトレンドである。乗用車ディーゼルエンジンの排気クリーン化では、エンジン 1 サイクル間に複数回（3 ～ 7 回）の燃料噴射を最適制御し、NO_x、スート、燃焼音、冷却損失を同時低減することはベース技術であり、後処理では、酸化触媒＋尿素水添加 SCR 触媒＋DPF の組合せが一般的である。

一方、欧米諸国においても同様に内燃機関の燃焼技術、計測技術、代替燃料の利用に対する研究開発やすすなどの環境負荷物質の排出低減を目指した研究開発、新燃焼法、新燃料を対象に研究の推進が求められており例えば¹⁴⁾、ドイツ圏の内燃機関研究コンソーシアム FVV¹⁵⁾ が

60年以上の歴史の中で、ゼロ CO₂を目指してさらに将来の燃焼研究に力を注いでいる。また、熱効率向上に取り組んでいるものの日本のレベルを超えていないが、自動車の走りにつながるエンジンの動力性能向上にも力を入れている。そのため、エンジンは、過給直噴をベースとし、ダウンサイジングからライトサイジング（適正なトルク / 出力）がトレンドとなっている。

二つ目のトレンドとして、代替燃料あるいはカーボンフリー燃料の燃焼利用が挙げられる。カーボンフリー燃料として、CCS（二酸化炭素回収貯留）により炭素成分を除去した燃料（天然ガスを原料に炭素成分を地下貯留した水素など）や再生可能エネルギー由来の燃料（バイオ燃料等）が挙げられる。水素供給が可能なパイプラインが整っており、広大な国土により豊富なバイオ資源が見込める海外において、それらの燃焼利用に関する研究開発が特に盛んである。燃焼機器は燃料の燃焼特性に厳密に整合させることで高効率化を実現しているため、同時に各種燃料の燃焼特性を調べる基礎研究も盛んである。我が国では、「水素専焼ガスタービン開発」プロジェクト¹⁶⁾や貯蔵性・輸送性に優れたアンモニアに着目した研究開発 SIP「エネルギーキャリア」⁵⁾が進められ、世界に先駆けてアンモニア専焼によるガスタービンおよび工業炉の開発に成功した。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

- 超希薄燃焼技術：SIP「革新的燃焼技術」⁶⁾で進められている研究開発。通常は火炎が形成されないような超希薄条件（空気過剰率で2以上）における燃焼を実現することで、比熱比の向上と低温燃焼により、熱効率50%越えを目指している。超希薄条件における点火・火炎伝播・ノッキング等の素過程の解明およびモデル化による基礎研究と、エンジン試験における計測・実証による応用研究が進んでいる。
- 圧縮自着火（HCCI）燃焼：超希薄燃焼ガソリンエンジンとして公表されたマツダのSKYACTIV-Xは、火花点火時期で自着火制御するエンジンである¹⁷⁾。この燃焼コンセプトを実現するために量産新技術として、筒内圧センサーや80MPaの高圧ガソリン燃料噴射弁を採用している。全域でのHCCIは実現できていないが、量産レベルでの技術進展が大きい。他に、海外でもSpark assisted HCCIの報告がある。
- ノック抑制技術：0次元詳細自着火反応計算により、ガソリンエンジンのノック抑制の可能性が示唆されている。冷炎直前のパルス状の圧縮は、冷炎後のエンドガス中の体積変化率とH₂O₂を抑制し、着火遅れ時間を大きく遅延させることを明確にした¹⁸⁾。また、副室付点火プラグ（Pre-chamber Spark Plug）からの強力な火炎噴射によって高圧縮比の燃焼室全体の燃焼を速やかに終了させることでノック抑制を図る技術が開発されている。副室のみのPassive Typeと副室に燃料噴射弁を設けたActive Typeが研究され、高圧縮比化によりそれらプラグでの冷却損失を上回る大きな熱効率向上が得られる。2018年ルマン24で優勝したトヨタのエンジンにも採用されている¹⁹⁾。
- 自動車用e-fuel研究：欧州FVVの研究テーマとして実施されており²⁰⁾、再生可能エネルギー由来の電気をを用いて、大気中や工場の排出ガスからCO₂を濃縮 / 分離し、逆水性シフト反応でCOに、水の電気分解によってH₂を生成して、両者からFT法でハイドロカーボン燃料を合成する。これらの合成燃料を自動車用燃料として、WtWのCO₂をゼロにしようという狙いを持つ。また、Audiはe-fuel戦略を継続していて、ドイツのGlobal

Bioenergies と共同で初めて 60L の e-gasoline (C_8H_{18}) の生産に成功し、エンジンベンチで試験中である²¹⁾。

- アンモニア燃焼技術：アンモニアは再生可能エネルギーで製造可能で、エネルギーキャリアとして貯蔵性・輸送性に優れることから、島国である我が国の将来エネルギーとして重要である。アンモニアはその反応性の低さから燃焼利用は難しいと考えられていたが、アンモニア燃焼特性の解明と燃焼器開発により、SIP「エネルギーキャリア」⁵⁾においてアンモニア専焼によるガスタービンおよび工業炉の開発に成功した。アンモニアが新たな燃焼用燃料と認知され、各国で多くのアンモニア燃焼研究が追従するきっかけとなっている。
- 微粉炭燃焼技術：前述の実証試験に加え、微粉炭燃焼の数値シミュレーションに関する技術開発が国内外で進められており、最近の新しい流れとしては、乱流の計算において高い計算精度と低い計算コストの両立を図るラージ・エディ・シミュレーション (LES) の微粉炭燃焼場への適用、詳細化学反応を低計算コストで実施できるフレイムレットモデルを微粉炭燃焼に適用する試み²²⁻²⁴⁾、微粉炭燃焼数値シミュレーション用のすす生成モデル開発^{25,26)}がある。また、アンモニアと微粉炭の混焼メカニズムを解明する基礎的な研究^{27,28)}も実施されており、実用化に向けた今後の発展が期待される。これらの技術開発により、低品位炭やバイオマス燃料等を実機ボイラに導入した際の事前影響評価や、新しいボイラ・バーナの効率的な開発が可能となる。さらに、日本燃焼学会では産学連携プロジェクト「設計プロセスの高度化を目指した燃焼解析のプラットフォーム開発と検証」により、微粉炭燃焼の数値シミュレーションの計算精度検証が実施され、参加企業に開発コードが提供されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

<日本>

- SIP 革新的燃焼技術⁶⁾：5年計画でガソリン/ディーゼルエンジン共に最大正味熱効率50%を達成すべく、前例にない強い産学官連携で推進されている。並行して連携している産の自動車用内燃機関技術研究組合 (AICE)²⁹⁾の各社でもそれらの研究成果を研究開発に取り込んでいる。
- SURIAWASE2.0³⁰⁾：経済産業省に設置された「自動車産業におけるモデル利用のあり方に関する研究会」において、自動車業界全体でパワートレインを中心に協調できるすりあわせ開発や実機を用いないバーチャルシミュレーション開発 (MBD) を高度化する狙いであり、日本の OEM と部品メーカー 10 社が参画し、今後は産学官連携をさらに強化して車両運動性能モデルに拡大していく方向を模索している。
- 内燃機関産学官連携コンソーシアム³¹⁾：SIP 革新的燃焼技術の出口戦略として持続可能な内燃機関の研究体制を産業総合研究所の中に設置し、産の連合体である AICE と学の連合体で構成される。現在、機動的な体制を構築中である。
- SIP「エネルギーキャリア」⁵⁾：水素エネルギー利用社会を見据えたプロジェクトである。アンモニア直接燃焼グループと水素利用グループでは、燃焼技術を基盤とした研究開発が進められている。
- 日本燃焼学会産学連携プロジェクト「設計プロセスの高度化を目指した燃焼解析のプラットフォーム開発と検証」³²⁾：企業間の非競争領域において精度検証・動作保証がなされた、

高いカスタマイズ性を有する燃焼解析のための基盤的コードの開発を目的とし、13 企業、1 財団法人、9 大学が参加した。企業からの開発資金により大学がコード開発を行い、精度を検証した上で学会を通じて企業に完成したコードが提供された。

< 米国 >

- Co-Optima³³⁾ : 2030 年までに自動車による石油の消費量を 30% 削減することを目標に、アメリカの国立研究所 9 ヶ所が中心となって進めている。新エンジンとバイオ由来新燃料の両方の開発を進めていることが特徴である。我が国の SIP「革新的燃焼技術」では既存燃料を対象に研究開発を進めていることから、新燃料の研究開発に関する動向は特に注意が必要である。
- Five Super Truck II projects³⁴⁾ : エネルギー省（DOE）主導で、トラックの車両走行燃費を 2009 年のトップランナーに対し 100% 以上向上させ、最大正味熱効率も 55% を狙うというものである。予算は年間 800 万ドル以上で、2016 ～ 2017 年の 5 プロジェクトトータルの予算は、4000 万ドルと言われている。

< EU >

- Horizon 2020: EU 最大規模の研究開発予算を持ち、省エネに関するテーマの中に、運輸（飛行機、自動車、船舶）のエンジン燃焼に関連する小テーマがある。多くのテーマにおいて研究者ネットワークを支援する形をとっており、研究者間の交流が進んでいる。SIP「革新的燃焼技術」を参考にしたとみられるプロジェクト（EAGLE³⁵⁾）が進んでおり、追い上げが顕著である。
- FVV³⁶⁾ : FVV は、ドイツを主体とする歴史ある自動車用内燃機関の研究団体であり、日本の AICE の手本となった。会員数は、自動車メーカー、技術コンサルタント会社、部品メーカー等 200 社を越え、今なおアクティブかつ先んじて内燃機関関連の多くのプロジェクトを起動 / 完了し、それら多くの成果を会員各社が製品開発に生かしている。日系企業もトヨタ、ホンダ、日産、いすゞが会員となっている。

< 中国 >

- 中国製造³⁷⁾ : 中国が世界の製造強国のトップになろうという 33 年間の超巨大国家プロジェクトであり、3 ステップで構成されている。重要な 10 大産業が挙げられていてそれぞれ高い目標を設置している。その一つに「省エネルギー・新エネルギー自動車」産業があり、EV 化を中心に電動化 + 内燃機関でエネルギー消費量と排出ガス低減に取り組んでいる。
- National Key Research and Development Plan of China（中国）: 生態系の復元と保護を旗印に掲げた 2016 年 7 月から 2020 年 12 月までの中国政府による研究開発計画で、このプロジェクトから燃焼関連の研究にも潤沢な資金が提供されている。

(5) 科学技術的課題

- 燃焼ダイナミクスの解明とモデル化 : 燃焼条件がより燃料希薄、高圧となることによって生じる不安定現象であるノッキングや燃焼振動は実質的に燃焼機器の熱効率向上や運転範囲を律速するため、その発生メカニズムを解明し、予測・回避する必要がある。しかしながら、こうした非定常燃焼挙動は熱流体・化学反応・圧力波など、複数の現象が連成する極めて複雑な現象であるため、詳細な現象解明とモデル化には先進計測・数値計算技術の適用が必要不可欠である。高いエネルギー密度と負荷変動追従性を有する燃焼機器の特

微を生かすために、今後は定常運転を想定した定常境界条件における非定常燃焼挙動から、非定常運転を想定した非定常境界条件における非定常燃焼挙動へと、研究対象の条件がさらに複雑化すると考えられる。さらに、すす生成モデル、微粒化モデルなどを組み込んだ数値解析やプラズマ支援点火（Nano second Repetitively Pulsed Discharge; NRPD, Laser Ignition, Dielectric Barrier Discharge; DBD）などの新点火手法の構築およびそのモデル化が求められている。

- 燃料多様化と詳細化学反応機構の構築：アンモニアをはじめ、従来は燃料として考えられてこなかった化学物質が燃料として考えられるようになっていく。燃焼器の設計開発には燃料種の多様化（バイオ液体燃料、低品質燃料を含む）に伴う基礎燃焼特性（燃焼速度、着火遅れ、燃焼排出物生成特性）の把握が重要であるだけでなく、燃焼反応を正確に予測可能な詳細化学反応機構の構築が必要不可欠である。特に、新燃料は既存の反応機構構築や燃焼特性計測の基盤となる前提（グループ則、薄い火炎帯等）が成立しないことがあるため、新たな学術基盤構築が求められる。
- 数値解析の計算負荷削減：数百化学種・数千素反応からなる詳細反応機構を現実的な計算リソースで計算ができるように、妥当な計算精度を実現する簡略化反応機構の構築、反応性流体に特化した時空間の乱流フィルタリング、燃焼ダイナミクスの簡易モデル構築等に関する研究が必要である。具体例としては、SIP 革新的燃焼技術で構築された3Dエンジン燃焼モデル HINOCA は精度向上や異なる燃焼コンセプトへの対応も可能にし、広く自動車産業界で活用できるMBD ツールを目指している。究極的には、デジタルツインやモデルベース燃焼制御を視野に入れ、リアルタイム～数秒程度の計算時間を目指した超コンパクトモデル・計算法の開発が必要である。また、各主モデルを、前述の新燃料に対応させていく必要もある。
- 固体燃料粒子反応数値シミュレーション技術開発：前述のように、微粉炭燃焼を対象として比較的 low コストで詳細化学反応機構を取り扱うことが可能なフレームレットモデルの開発が行われているが、肝心の微粉炭粒子から放出される揮発分の詳細化学反応機構は未だ開発されておらず、揮発分の成分として低級な炭化水素成分を仮定し、その化学反応機構を代用しているに過ぎない。したがって、今後、揮発分の化学反応機構構築に資する実験データ取得が必要となる。
- エンジン燃焼技術の進化：今後のガソリンエンジン燃焼において、熱効率を向上するためにはノッキング現象の化学的かつ物理的完全解明と、その抑制や制御技術の構築が必須であり、このノックフリー燃焼コンセプトが産学連携の1つの大きなテーマである。また、圧縮自着火燃焼では、その制御技術が大きな課題で、化学反応、温度やEGR 分布などの広範囲の制御技術がカギとなる。また、市販化踏まえた新燃料探索も重要である。さらに、ディーゼルエンジン燃焼において、さまざまな噴霧燃焼条件でのスooting 生成機構の明確化と、超低NO_x との両立が出来るスooting の大幅な低減技術の構築が重要であり、このスooting フリー（EGR レス）燃焼が1つの大きなテーマと考えられる。また、EGR 系や燃焼室のデポジットも永年の課題であり、完全に解決できていない。
- AI 技術を活用した燃焼現象の予測・制御：21 世紀初頭頃から、燃焼現象の予測・制御における人工知能の活用に関する研究が報告されるようになった³⁸⁾。一般的なニューラルネットワーク（NN）を用いて、燃焼振動などの燃焼状態の予測制御、微粉炭バーナへの

スラグ付着検知、バイオマスボイラーの出力予測、ディーゼルエンジンのシリンダ内圧力に基づく有害物質の排気量予測等の研究が実施されてきた。近年では、畳み込みニューラルネットワーク（CNN: Convolutional Neural Network）手法を燃焼状態の予測に適用する例が見受けられ、火炎の画像データを基にしたスワール燃焼器における燃焼振動の発生の検知や火炎画像による炉内の燃焼状態の予測などが報告されている。未だ基礎研究が主体ではあるものの、燃焼制御分野において、AI がこれまでの手法の代替となる有用な手法となる可能性を秘めている。

（6）その他の課題

地下資源がなく再生可能エネルギーも少ない日本の唯一の資源は、科学技術力に裏打ちされた産業競争力とその人材である。人材育成の観点では、現状の任期付教員制度は研究期間と研究の公表までの時間が短く短期的な視点での研究に注力する傾向となる課題点がある。また、研究に特化した研究員の雇用機会を設ける必要がある。

燃焼は、社会エネルギーシステムの重要な研究領域の1つであるので、持続的な産学官連携が望まれる。

（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	◎	→	●研究の質は世界トップレベルにあるが、研究者の層が薄い。近年、燃焼を主題とした大型研究（SIP）が措置されたため、継続的な措置により、産産学連携の一体化、研究者の層の厚みが形成されることが期待される。また、学界・産業界の融合の動きとして、京都大学・北海道大学・九州大学を主体とした CAE コンソーシアム ³⁹⁾ も注目すべき内容である。
	応用研究・開発	○	→	●現在は、実用燃焼機器の熱効率・エミッションはいずれも世界トップレベルにあり、日本の省エネ技術をけん引しているが、主な欧米のプロジェクトの様に産学共同で取り組む実証研究段階への大型プロジェクトが少ない。経済産業省 +AICE や内閣府 SIP プロジェクトにおいて、基礎研究の成果を実際のエンジンに応用した研究を産、学、研究機関で展開できている。また、2019 年度から AICE の第 2 フェーズの 5 ヶ年計画がスタートするので、産学連携の強化が期待される。
米国	基礎研究	◎	→	●応用機器を見据えた基盤技術としての燃焼研究を行う研究機関が複数存在し、研究の質と研究者の層の厚さは依然としてトップレベルにある。大統領選挙に伴うエネルギー政策の大幅変更により、分野によっては予算獲得が難しくなっているものの、アメリカ国立科学財団（National Science Foundation, NSF ⁴⁰⁾ ）などの予算による研究や DoE 等の潤沢な予算のもと、エンジン燃焼に関しても国立研究所、有力大学で基礎研究が積極的に実施されている。ECN（Engine Combustion Network）等の基礎研究に関わっている人材の豊富さと交流の多さ、および各国立研究所の所有するスーパーコンピュータや高エネルギー X 線解析などが積極的に活用できる環境にある。

米国	応用研究・開発	◎	↑	● 実用燃焼機器の熱効率・エミッションはいずれも世界トップレベルにあり、世界的な販売力・展開力も高い。具体的な目標物（自動車、航空機）に対する政府機関（DOE など）と財団（NSF など）、企業からの支援を基盤とした研究が進められている。例えば、DOE 主導の SuperTruck II において、自動車用エンジンとしては非常にチャレンジングな BTE:55% のシナリオ検証が主要テーマである。また、SwRI（Southwest Research Institute）のコンソーシアムとして、ガソリン正味熱効率 45% を目指した HEDGE-IV（2017～2020）⁴¹⁾ や、ディーゼルの賞味熱効率 55% を目指した CHEDE-VII（2015～2019）⁴²⁾ が、世界中のメンバーを巻き込んで実用研究が実施されている。
欧州	基礎研究	◎	→	● 国によって、燃焼研究への予算措置がされにくい、国家予算規模が小さい、などの事情があるが、EU が措置する Horizon 2020 により、多国間の研究者ネットワークが形成されており、研究の質も高いレベルにある。大学や研究機関が中心となって、エンジン燃焼に関わる様々な基礎現象解明のためのコンソーシアムが組織され、政府や企業を含め継続的に研究を行っている。石炭火力の新設は大幅に抑制されているものの、微粉炭燃焼関係の基礎研究は継続されている。 ● （英国）再生可能エネルギー由来の燃料利用に研究開発予算が大きく偏り始めており、研究者の層の厚さに減少傾向がみられる。Cambridge 大学による噴霧燃焼研究や中国の大学と共同で、微粉炭燃焼研究が実施されている。 ● （ドイツ）大学や研究機関が中心となって、エンジン燃焼に関わる様々な基礎現象解明のためのコンソーシアムが組織され、政府や企業を含め継続的に研究を行っている。また、DFG（ドイツ学術振興会）による基礎研究支援があり、バイオマス燃料の製造から実用まで行う The cluster of excellence という大規模なプロジェクトが実施されているほか、微粉炭燃焼の分野では数値解析用フレームレットモデル開発などが進行中である。DLR や大学による噴霧燃焼に関する基礎研究も実施されている。 ● （フランス）Paris Saclay, Centrale Supélec (EM2C) ⁴⁴⁾ から、燃料噴霧の蒸発・燃焼に対する基礎研究が発表されている。
	応用研究・開発	◎	↑	● フォルクスワーゲンの排ガス不正問題を契機として、自動車の電動化に関する研究開発が顕著に進んでいるが、ドイツ FVV をはじめとした技術協同組合を通じて、産学連携による燃焼の共同研究は依然として活発である。欧州委員会が取り纏める FP7 や Horizon2020 といった短期集中型+テーマを絞り込んだ産学プロジェクトが常に多数並行して進み、活発な活動がされている。 ● （英国）シーメンスとカーディフ大学の共同研究が中心となり、アンモニア燃焼に関する顕著な追い上げがみられる。 ● （ドイツ）FVV による内燃機関研究コンソーシアムが莫大な予算で継続されていて、60 年以上の歴史を重ねている。参加団体は、ドイツ圏を中心に自動車関連企業 200 社以上と有力大学が一体となった研究を実施している。基本的に 2/3 が公的資金で 1/3 を参画企業が支援する研究体制である。昨今、電動化が叫ばれているが、内燃機関搭載車は存続し続けるので、エンジン燃焼研究への予算投入は今後も継続していくと思われるが、ゼロ CO₂ (e-fuel)、低排出ガス (Regulation)、Controls、Sensors の研究テーマが中心になっていく模様 ⁴³⁾ である。また、DLR などの研究機関が液体燃焼に対する基礎研究から応用研究までを牽引している。 ● （フランス）IFPen, ONERA などの研究機関が液体燃焼に対する基礎研究から応用研究 (IFPen: 往復式内燃機関), (ONERA: 宇宙機) までを牽引している。
中国	基礎研究	◎	↑	● 燃焼への大型予算が措置されており、燃焼を主題とした State Key Laboratory 認定が複数ある。欧米から帰国した研究者が顕著な業績を出しており、全体をけん引している。National Science Foundation of China などからの予算を元に、特に国家重点大学と認定されたトップレベルの大学（清華大学 ⁴⁶⁾）などで研究員の数が増加し、研究レベルが向上している。また、上海交通大学などの大学からも液体燃料の微粒化、噴霧燃焼関係の研究発表がなされている。国際的な共同研究の動きも大きく、液滴燃焼や代替燃料の燃焼研究も行われている。微粉炭燃焼の分野では、潤沢な研究資金を背景に、世界の論文発表件数の半分以上を中国からの発表が占めている。

中国	応用研究・開発	○	↗	●実用燃焼機器の省エネ性能は依然として我が国の方が優位であるが、研究開発は旺盛に進められている。日米欧の自動車メーカーとの合弁会社から技術移転がなされはじめており、研究レベルは確実に向上している。中国製造 2025 (2016～2049) ⁴⁷⁾ において重要な 10 大産業が挙げられ、それぞれ高い目標を設置している。その一つに「省エネルギー・新エネルギー自動車」産業があり、EV化を中心に電動化+内燃機関でエネルギー消費量と排出ガス低減に取り組んでいる。超臨界のボイラ等も自国メーカーで建設できるようになっており、発展が著しい。
韓国	基礎研究	△	→	●研究の質は高いレベルにあるが、燃焼コミュニティの規模が小さいため、特定分野（例えば化学反応）では顕著な成果が見られず、全体としてもアジアの中では中国ほどの発表数は認められない。自動車産業では、Korea auto-oil プログラムが FY2017 まで実施予定で着実に進んでいるが、エンジン燃焼に関する基礎研究の新規の国家プロジェクトはないようである。微粉炭燃焼研究は引き続き活発に行われている。
	応用研究・開発	△	→	●実用燃焼機器の省エネ性能は依然として我が国の方が優位であり、特筆すべき大型プロジェクトもない。液体燃料を取り扱う実用燃焼器に対する研究も、ここ数年大きな変化はない。自動車産業については、環境府を中心に実用化事業（製作車、レロフィット、計測技術）が進行中 ⁴⁷⁾ である。事業期間は phase I が 2011.5～2016.4, Phase II が 2016.5-2021.4 で、毎年 100 億ウォン/年の予算である。ディーゼルエンジンの開発は全体的に遅れている。

(註 1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註 2) 「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ 1～2 年）の傾向として、研究開発水準がどう変化しているかの評価。

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) 1) U.S. Energy Information Administration (EIA), “International Energy Outlook 2017.”
- 2) 自動車技術会『自動車技術』71 巻 8 号 (2017)
- 3) 正田淳一郎「発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望」『日本機械学会誌』119 巻 1173 号 :434-437. (2016)
- 4) 日本エネルギー経済研究所「IEEJ アウトルック 2018 -2050 年に向けた展望と課題 -」(2017 年 10 月) .
- 5) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「エネルギーキャリア」, <http://www.jst.go.jp/sip/k04.html> (2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 6) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「革新的燃焼技術」, <http://www.jst.go.jp/sip/k01.html> (2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 7) 杉山雅則「第 4 回 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 1 期記者勉強会」 (2018 年 5 月 14 日) <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sippress.html> (2019 年 2 月 27 日アクセス) .

- 8) 古野志健男「自動車用内燃機関は消えていくのか？－SIP 革新燃焼からの提案と方向性－」
『JSME 関西支部 第 93 期定時総会・講演会講演論文集』No.184-1: 107-111, 2018
- 9) 相澤哲哉 他「逆デルタ噴射ディーゼル噴霧火炎の紫外自発光・紫外吸収・輝炎 3 種同時
高速度撮影」『自動車技術会 2018 年春季大会 講演予稿集』No.61-18: 1, 2018
- 10) F. Steinparzer, *et al.*, “The New 3- and 4-Cylinder Diesel Engines from the BMW
Group – NEXT Generation Modular,” 26th Aachen colloquium, 111-130, 2017
- 11) 渡辺裕樹 他「ディーゼルエンジンの筒内火炎挙動解析に基づく熱発生率制御と排気特性
の改善」『自動車技術会論文集』48 巻 2 号: 233-239, 2017
- 12) R. Bruck *et al.*, “Innovative Catalyst Substrate Components for Future Passenger Car
Diesel Aftertreatment,” 26th Aachen colloquium, 1075-1096, 2017
- 13) G. Rosel *et al.*, “System Approach for a Vehicle with Gasoline Direct Injection and
Particulate Filter for RDE,” 39th International Vienna Motor Symposium, 2018
- 14) Lyle M. Pickett and Scott A. Skeen, “Spray Combustion Cross-Cut Engine Research,”
FY 2018 DOE Vehicle Technologies Program Annual Merit Review, 19 June 2018,
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/06/f52/acs005_Pickett_2018_o.pdf (2019
年 2 月 27 日アクセス) .
- 15) 草鹿仁「ドイツ FVV にみる産学官連携」『ENGINE REVIEW』Vol.4, No.2 (2014).
- 16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「水素専焼タービンの先導的研究開発に着手」,
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100596.html (2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 17) マツダ「SKYACTIVE TECHNOLOGY」,
<http://www.mazda.com/ja/innovation/technology/skyactiv/> (2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 18) 三好明「低温酸化反応の怪」『第 55 回燃焼シンポジウム講演論文集』, 428-429, 2017
- 19) 清水直茂「トヨタ・ホンダも照準、超希薄燃焼の有力技術プレチャンバー：欧州エンジン
アリング大手 IAV が“激安”技術を提案」『日経 xTECH』,
<https://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/column/18/00001/00671/> (2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 20) FVV, *Renewables in Transport 2050*, 65, 2016
- 21) Audi Japan Press Center, 「アウディ、e-fuel テクノロジーでさらなる進化：新しい合成
燃料 "e-benzin" (e-gasoline) のテストを実施中」,
<https://www.audi-press.jp/press-releases/2018/b7rqmq000000lqor.html> (2019 年 2 月
27 日アクセス) .
- 22) Junya Watanabe *et al.*, "Large-eddy Simulation of Pulverized Coal Combustion Using
Flamelet Model," *Proceedings of the Combustion Institute* 36, no. 2: 2155-2163, 2017
- 23) Xu Wen *et al.*, "LES of Pulverized Coal Combustion with a Multi-regime Flamelet
Model," *Fuel* 188: 661-671, 2017
- 24) M. Rieth *et al.*, "Flamelet LES Modeling of Coal Combustion with Detailed
Devolatilization by Directly Coupled CPD," *Proceedings of the Combustion Institute* 36, no.
2: 2181-2189, 2017
- 25) H. Takahashi *et al.*, "Prediction of Soot Formation Characteristics in a Pulverized-coal
Combustion Field by Large Eddy Simulations with the TDP Model," *Proceedings of the
Combustion Institute* 37, no. 3: 2883-891, 2019

- 26) Kailong Xu *et al.*, "Predictions of Soot Formation and Its Effect on the Flame Temperature of a Pulverized Coal-air Turbulent Jet," *Fuel* 194: 297-305, 2017
- 27) 大阪大学「世界初！アンモニアと混焼する微粉炭の詳細燃焼挙動を明らかに ～再生可能エネルギーの利用拡大につながる新たな知見～」,
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20161031/index.html>（2019年2月27日アクセス）.
- 28) 科学技術振興機構 さきがけ,
<https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/project/1112064/15655993.html>（2019年2月27日アクセス）.
- 29) 自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）,
<http://www.aice.or.jp/index.html>（2019年2月27日アクセス）.
- 30) 経済産業省,
<http://www.meti.go.jp/press/2018/04/20180404003/20180404003.html>（2019年2月27日アクセス）.
- 31) 産業総合研究所「内燃機関産学官連携コンソーシアム」,
<https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/ICEC/>（2019年2月27日アクセス）.
- 32) 日本燃焼学会燃焼解析プラットフォーム研究開発プロジェクトチーム「設計プロセスの高度化を目指した燃焼解析のプラットフォーム開発と検証：進捗報告（第1報）」,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcombsj/59/187/59_61/_article/-char/ja/（2019年2月27日アクセス）.
- 33) U.S. DOE, "Co-Optimization of Fuels & Engines,"
<https://www.energy.gov/eere/bioenergy/co-optimization-fuels-engines>（2019年2月27日アクセス）.
- 34) U.S. DOE, "PACCAR Joins Energy Department SuperTruck II Initiative,"
<https://www.energy.gov/eere/articles/paccar-joins-energy-department-supertruck-ii-initiative>（2019年2月27日アクセス）.
- 35) European Commission (EC), "EAGLE,"
<https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/green-vehicles/eagle>（2019年2月27日アクセス）.
- 36) FVV, <https://www.fvv-net.de/en/>（2019年2月27日アクセス）.
- 37) みずほ総合研究所「2025年の製造強国入りを目指す中国の製造業振興策」『みずほリポート 2016年6月27日』,
<https://www.mizuho-ri.co.jp/publication/research/pdf/report/report16-0627.pdf>（2019年2月27日アクセス）.
- 38) Soteris A Kalogirou, "Artificial Intelligence for the Modeling and Control of Combustion Processes: A Review," *Progress in Energy and Combustion Science* 29, no. 6:515-66, 2003
- 39) 理化学研究所「燃焼システム用次世代 CAE コンソーシアムを設立 一産官学連携で次世代の燃焼システムものづくりのフレームワーク構築—」,
http://www.riken.jp/pr/topics/2018/20180521_1/（2019年2月27日アクセス）.
- 40) National Science Foundation (NSF), "CBET proposal submission information,"

- https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=245721&org=CBET（2019年2月27日アクセス）。
- 41) Convergent Science,
<https://convergecfcd.com/press/join-hedge-iv-consortium>（2019年2月27日アクセス）。
- 42) Southwest Research Institute (SwRI),
<https://www.swri.org/consortia/clean-high-efficiency-diesel-engine-vii-chede-vii>（2019年2月27日アクセス）。
- 43) FVV,
<http://www.fvv-net.de/en/fvv4/mission-and-vision/index.html>（2018年10月27日アクセス）。
- 44) Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, “Macroscopic Molecular Energy and Combustion Laboratory (EM2C) CNRS UPR 288,”
<http://www.centralesupelec.fr/en/macroscopic-molecular-energy-and-combustion-laboratory-em2c-cnrs-upr-288>（2019年2月27日アクセス）。
- 45) King Abdular University of Science and Technology (KAUST), Clean Combustion Research Center,
<https://ccrc.kaust.edu.sa/Pages/Home.aspx>（2019年2月27日アクセス）。
- 46) 清华大学, “Center of Combustion Energy,”
https://www.tsinghua.edu.cn/publish/teen/8273/2013/20130417103356200585813/20130417103356200585813_.html（2019年2月27日アクセス）。
- 47) Center for Environmentally Friendly Vehicle (CEFV),
https://www.cefvr.kr/index.php/?mid=sub02_01_01（2019年2月27日アクセス）。

2.14 トライボロジー

（1）研究開発領域の定義

トライボロジーは相対運動をしながら互いに影響を及ぼしあう 2 つの表面に起こるすべての現象を対象とする科学技術で、潤滑、摩擦、摩耗などを取り扱う分野である。ここでは、省エネルギー的観点から摩擦メカニズム、接触表面状態、潤滑剤の影響などの基礎的トライボロジー研究や、環境エネルギー機器・輸送機器分野への応用・実用化を見据えた研究開発の動向を対象とする。

（2）キーワード

摩擦、摩耗、焼付き、表面損傷、境界潤滑、流体潤滑、添加剤、潤滑油、ナノ計測、コーティング技術

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

トライボロジーはギリシャ語の $\tau\rho\iota\beta\omicron\sigma$ (tribos: 摩擦する) を基にした造語である。摩擦低減技術はあらゆる産業分野、生活環境における効率的エネルギー活用に不可欠であり、低炭素社会実現の観点からも極めて重要な技術である。トライボロジーの用語は、1966 年に英国の H. P. Jost による「Lubrication (Tribology) - A Report on the Present Position and Industry's Needs」で初めて使用され、その中で、潤滑改善による経済効果が英国においては年間 5 億ポンド（当時）に相当するというトライボロジーの大きな社会・経済的意義が報告されている。その後、同様な推算が各国でなされており、我が国でもトライボロジーの経済効果として、1994 年には 13.5 兆円が見込まれ¹⁾、最近の推算例でも 2002 年度で 8.6 兆円、対 GDP 比 1.7% という結果が出されている²⁾。

2015 年 12 月の COP21 パリ協定の合意を受け、世界各国で更なる CO₂ 削減努力が必要であるが、今後世界的に増加が見込まれる自動車分野におけるエネルギーの効率的利用も非常に重要となる。現在の自動車は燃料の約 1/3 はエンジンや変速等、タイヤなどにおける摩擦損失によって浪費されており、最新のトライボロジー技術を適用することで 5～10 年の短期レンジで 18%、15～25 年の長期レンジでは 61% もの削減が可能という報告がある³⁾。これらを世界全体での CO₂ 排出量として換算すれば、それぞれ 2 億 9000 万トンと 9 億 6000 万トンの削減に上り、我が国の年間 CO₂ 総排出量に匹敵する。このようにトライボロジーは、既存技術の改良や改善だけを見ても波及効果と即効性の高い工学技術であり、地球環境問題解決への貢献も多大と期待される。一方で、摩擦は固体表面・潤滑油など多くの要素が界面において複雑に絡む動的特性のために、その理解は十分には進んでおらず、従来の開発は主に経験的な蓄積に基づくものである。このため、現在の省エネルギーにおける摩擦低減技術の必要性ならびに課題の大きさからは、より合理的な設計論による開発の加速が重要となる。

[研究開発の動向]

摩擦・潤滑の利用や研究の基礎は、産業革命前後（1750 年から 1900 年頃）の研究に負うところが多く、流体潤滑理論の構築、ストライバック曲線の提案、境界潤滑の用語の導入など、現在も使われている概念や理論体系、経験式が提案されている⁴⁾。さらに 20 世紀の半ばには微

視的に摩擦現象を理解しようとする試みが見られるようになり、当時提唱された真実接触の概念に基づく摩擦の凝着理論が英国ケンブリッジ大学のパウデンとテーバーによって確立され⁵⁾、その後、同じく英国で1966年に誕生した”トライボロジー”に引き継がれる形で、現代的な摩擦や潤滑に関する研究と、その応用開発につながったという系譜にある。

トライボロジーの先端研究は、米ソ冷戦時代の宇宙開発競争にしのぎを削るNASA（米国航空宇宙局）を中心とした米国に舞台を移し、さらにモータリゼーションの到来を背景として自動車関連のトライボロジーを軸に、ドイツ、フランス、日本などへと発展の場を広げていった。一方、磁気記録装置の性能向上が急務となったIT分野では、ハードディスク装置の開発に最先端のトライボロジー技術が次々と導入されることになった。米国IBMなどを先導役とした技術開発競争の最中、微細加工技術の進歩と相まって、“マイクロトライボロジー”が新たなテーマとして取り上げられるようになった。これは今日、高度な表面分析技術と計算科学を融合した“ナノトライボロジー”へと発展し、最先端研究の一翼を担っている。医療分野では、英国リーズ大学を中心とするグループが、トライボロジーの視点から人工関節の開発に精力的に取り組む、性能の向上に大きく寄与するとともに、“バイオトライボロジー”という医工連携の新しい領域を開拓した。ほかにも、こうした動向と切り離すことのできない弾性流体潤滑（EHL）理論の進展、各種機械要素や潤滑剤、新規コーティング材料などの発明や開発と普及を通じ、トライボロジーはそれぞれの時代の産業技術の隆盛と深く関わりながら発展してきた。

以上のような変遷を踏まえ、2000年以降2010年代半ばまでのトライボロジー領域における研究開発の動向については、ナノテクノロジーに代表される表面・界面の観察評価法の進歩、DLC（ダイヤモンドライクカーボン）膜とエステル系添加剤との組み合わせによる低摩擦現象発現、樹脂複合材料の適用による発電タービン用すべり軸受の耐摩耗性向上と摩擦損失低減の実現、最小油量で潤滑するMQL（minimal quantity lubrication）といった省資源・低排出技術の開発などを引き合いにして、「研究開発の俯瞰報告書 エネルギー分野（2017年）」の「3.2.9 トライボロジー」に詳述されている⁶⁾。

こうした動向に加え、当該分野の主要な動きとして、日本トライボロジー学会の「トライボロジー・ロードマップ研究会」および「オープンイノベーションを目指した技術動向調査研究会」の活動がある。前者の研究会では、2012-2013年度の活動期間に、その成果としてトライボロジー技術俯瞰図を提示する⁷⁾とともに、当該技術俯瞰図においてまだ空白のマトリックスの技術・研究課題を埋め、それらの課題を分類整理し、分類された課題ごとに10年後の予測を行い、順次20年、50年へと可能な範囲で拡大していくことによってロードマップを作製できるようにまとめた報告書を公開している⁸⁾。この報告書では、システム・コンポーネント側からの要求に対するトップダウンからのロードマップを、自動車の省エネルギー・環境対応、鉄道、航空用エンジン、発電用ガスタービン、医療機器、宇宙機器を例にして紹介している。一方、ボトムアップからのロードマップも、転がり軸受・すべり軸受・シールのトライボロジー技術各論、材料・表面処理、潤滑剤、シミュレーション技術・摩擦摩耗試験法・加速試験法・プローブ顕微鏡による分析技術といった解析ツールなどを例にして紹介している⁹⁾。これに対して後者の研究会では、2015-2017年度の活動期間に、その成果として、初年度には「継続的な技術動向調査とロードマップへの反映」を含む4つの取り組みの必要性を中間報告し¹⁰⁾、最終的に「社会的要請とトライボロジー技術の関係」について報告書にまとめる方針である¹¹⁾。

さらに、自動車の省資源・省エネルギーに対するトライボロジー技術の貢献は、現在も研究

のターゲットとしては主流であり¹²⁾、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）の「革新的燃焼技術（日の丸内燃機関が地球を救う計画）」（研究期間：2014～2018年度）においても、乗用車用内燃機関の最大熱効率を50%に向上することを目的に、「機械摩擦損失の低減の研究」の中で以下のテーマが取り上げられている¹³⁾。

- ・低摩擦損失と耐焼き付き性及びオイル消費の低減を両立する自動車用エンジンの提案と実証（東京都市大学）
- ・潤滑油添加剤と表面改質とのマッチングに基づく相乗効果による摩擦低減メカニズムの解明（東京工業大学）
- ・境界・混合潤滑領域における耐荷重性能の改善（名城大学）
- ・カーボン系硬質膜の超低摩擦及び耐焼付き性向上の指針の提案と実証（名古屋大学）
- ・潤滑解析モデルの高度化と解析ソルバーの開発（東海大学）
- ・境界摩擦領域での摩擦係数低減を目指すナノ計測（東北大学）
- ・境界摩擦領域での摩擦係数低減を目指す分子動力学を用いた摩擦予測（東北大学）
- ・表面テクスチャを基軸としたなじみ制御による低摩擦・耐焼き付きナノ界面形成技術の開発（東北大学）
- ・自動車用内燃機関摺動面潤滑モデルの確立および新しい潤滑面設計支援解析法への展開（九州大学）
- ・エンジン内ピストン摺動部の低摩擦・耐焼付き及びなじみ促進を発現する初期三次元テクスチャ形状の提案と実証（福井大学）
- ・低摩擦エンジン油をめざした添加剤技術の最適化（香川大学）
- ・摩耗・焼付きリスクの低減 トライボシミュレータの開発（東北大学）
- ・ポリマーモノリス材料を用いた潤滑システムの開発（京都大学）

トライボロジーに関わる国際的な動向に目を向けると、2010年代半ばまでの流れについては、「研究開発の俯瞰報告書 エネルギー分野（2017年）」の「3.2.9 トライボロジー」において、第4回世界トライボロジー会議（WTC IV、2009年京都）における“Green Tribology”の提唱、2010～2015年に総額59百万ユーロが投入されたトライボロジーも基幹テーマに含むオーストリアのCOMET（Competence Centers for Excellent Technologies）プロジェクト、2008年からの5年間に総計9.7百万ポンドの研究資金を集めた英国ササンプトン大学のnCATS（national Centre for Advanced Tribology at Southampton）設立、米国DOE（The U.S. Department of Energy）による次世代先進自動車開発への175百万ドルの投入（うち4.7百万ドルが潤滑油関連プロジェクトへ配分）などが詳述されている⁶⁾。

そうした中、トライボロジーにおける最近の国際的な動きとしては、中国の台頭がある。同国では、清華大学と蘭州化学物理研究所がトライボロジー分野での国家重点実験室に指定され、研究資源の重点配分のもと活発な研究活動を展開しており、それが奏効した形で中国の台頭を象徴した催しが第6回世界トライボロジー会議（2017年9月17-22日、北京）である。世界トライボロジー会議（World Tribology Congress）は、国際トライボロジー評議会（International Tribology Council）が統轄し、開催国持ち回りで4年ごとに開かれるトライボロジー分野の一大イベントであり、第1回が1997年にロンドンで開催され、日本も2009年に京都で第4回を主催した。2017年北京の第6回会議は、8件の基調講演に加え、オーラルおよびポスターでのプレゼンテーションを合わせると1000件以上の発表を集め、過去最大級の規模で開催さ

れた。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

■ 材料に関する新たな技術動向

- ・高分子ブラシは、固体表面の表面修飾、低摩擦化材料ならびに生体内潤滑モデルとして世界的に学を中心として研究されている。しかし、高負荷など厳しい摺動条件では摩耗してしまい、1MPa 程度の穏やかな条件のみで利用できるものと考えられていた。京都大学の辻井敬亘教授は濃厚ポリマーブラシの厚膜化に成功している。膨潤溶媒も水からイオン液体や潤滑油に変更した材料が作成できるようになっており、実用用途に可能性のある日本独自の展開である。また京セラは東京大学の石原一彦教授の研究成果を元に、人工股関節のポリエチレン臼蓋カップ表面に高分子ブラシコーティングを施し、体内でのポリエチレン摩耗を大幅に抑制する技術を実用化し、「アクアラ」の商品名で臨床適用が開始されている。
- ・無機コーティングに関しては、DLC は既に新しい潤滑材料として、車にも実装され始めている。無機酸化物コーティングは、酸素存在下でも安定であるという特徴があるが研究例は僅少であった。物質材料機構の土佐らは、特定の条件で調製した ZnO の摩擦係数が半減することを見出しており、注目されている。
- ・低摩擦化添加剤として、吸着部位ならびに潤滑部位を有する高分子が東北大学栗原らにより設計されている。
- ・ゲルの機械における潤滑材料としての応用も始まっている。

■ 研究手法に関する新たな技術動向

- ・ナノテクノロジーの発展により開発・普及している様々な表面評価法（XPS、EDX、FTIR-ATR など）のトライボロジー研究への適用
- ・共振ずり測定など表面力装置を利用したずり測定による潤滑油評価と低粘度化への対応
- ・機械と材料・計測分野の融合による摩擦現象の解明による低摩擦の合理的設計の研究推進
- ・基材（機械部品の材料）と潤滑油の組み合わせによる低摩擦化技術の開発

■ 摺動面アーキテクチャの概念とその具体的研究動向

- ・固体接触や潤滑油との反応により表面状態が常に変化していくことを前提に、システムの一部として摺動表面の構造や組成などを設計する概念として、摺動面アーキテクチャが重要である。そのため、マルチスケール・テクスチャリングの考え方として、表面の構造及び組成の空間分布をナノ・マイクロからマクロレベルまでの連続したスケールで俯瞰・理解した上で、階層的な役割の振付が必要になる
- ・表面損傷の進行や摩擦環境の変化に能動的に対応する自己適応（self-adaptive）する機能表面の創製として、自己修復性と環境適応性を有する生体皮膚などの模倣（バイオミメティックス）、また加工技術として新しい付加加工技術として注目されている 3 次元積層造形技術（通称 3D プリンタ）の応用などに関する研究が出てきている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■ 国内プロジェクト

1) SIP「革新的燃焼技術」（平成 26 ～ 30 年度）

- ・損失低減チーム：排気エネルギーの有効利用と機械摩擦損失の低減に関する研究開発

2) 自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）¹⁴⁾における研究開発プロジェクト

- ・エネルギー消費量削減や CO₂ 排出量削減等が社会的に求められる状況の中で、自動車用エンジンの高効率化、低排ガス化の課題を共同で解決することを目的とした研究開発プロジェクト

3) 機械と材料・計測分野の融合による摩擦現象の解明（あるいは基礎研究の技術課題の適用）による低摩擦の合理的設計の研究推進を行うプロジェクト

- ・MEXT、光・量子融合連携研究開発プログラム、「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」（平成 25 年度～ 29 年度）

4) 厚膜濃厚ブラシの実用化

- ・JST、ACCEL 事業「濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」（平成 27 ～ 31 年度）

5) 自動車用動力伝達技術研究組合（TRAMI）¹⁵⁾

- ・自動車の CO₂ 排出抑制や価値の多様化に向けて、動力伝達技術の産学連携の基礎研究による学のサイエンス進展・産学人材育成を通して、日本の産業力の底上げと持続的な科学技術の発展に貢献することを目的に発足（平成 30 年度より）

■ 国外プロジェクト

1) COST MP1303 : “Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction”

- ・2013 年より開始されたトライボロジー研究に関する欧州共同研究の活動（2017 年の終了予定）

(COST: European Cooperation in the field of Science and Technical research)

2) 「ハノーバー宣言」（2017 年 3 月に日本とドイツとの間で採択）にもとづく国際共同研究の動き

- ・当該宣言の対象として自動車エンジンの基礎研究の内容が含まれていることに基づき、それを後押しする形で、AICE と学とが連合した研究組織を公募で 2019 年度から立ち上げた。これを母体にドイツの内燃機関研究に関する産学官コンソーシアム（FVV）と国際共同研究を開始する予定であり、エンジントライボロジーもこの研究の枠組みの中で今後推進する方向である。

■ 注目すべき国外主要拠点

1) ミュンヘン工科大学機械要素研究所（ドイツ）¹⁶⁾

- ・「歯車研究センター」とも呼ばれ、歯車と伝動要素の疲労寿命、効率、振動特性の信頼性の高い測定方法とツールの開発などの研究活動が、公的研究資金または産業界提供資金によって、業界と密接に協力して実施されている。

2) トライボロジーセンター（オーストリア）¹⁷⁾

- ・本センターは、トライボロジーにおける新しい学際的かつ総合的な知識の創出のために設

立されたプロジェクト拠点である。スマート材料、表面およびコーティング、潤滑剤および潤滑システム、高分解能摩耗測定システム、摩擦および摩耗プロセスのシミュレーションおよびモデリングなどのトライボロジーの革新的な分野における研究が実施されている。2010年4月以降、プロジェクトXTribologyが、多くの企業や科学的パートナーの協力のもと、30以上の個別研究プロジェクトの形で10年間にわたって運用されている。XTribologyの予算の約半分は、オーストリアの研究推進機関（オーストリア交通、技術革新省）とNiederösterreich、Wien、Vorarlbergの州から拠出されている。

3) サウサンプトン大国立先端トライボロジーセンター（英国）¹⁸⁾

- ・本センターは、世界中のトップ研究グループや産業界との戦略的研究パートナーシップのもと、将来の輸送およびエネルギー効率の良い機械、排出ガスおよび低保守性の再生可能エネルギーシステム制御、およびバイオテクノロジー等への展開を狙い、摩擦プロセスのセンサーや新規プローブの開発、さらに、再生可能エネルギーシステムのトライボロジー、汚れ、腐食のトライボロジーなどの実験研究、シミュレーション研究等を実施している。

4) エコール・セントラル・ド・リオンのトライボロジーラボラトリー（フランス）¹⁹⁾

- ・フランス国立科学研究センターの関連研究ユニットになる表面技術研究所（1992年設立）が母体。研究分野は、表面とトライボロジーの物理化学をベースに、固体と振動力学の新しいトピックスも統合し、産学連携で基礎研究と応用研究がバランスよく実施されている。近年、土木工学と構造物のダイナミクス、回転機械、振動音場の研究が強化されている。

5) 清華大学トライボロジー重点ラボ（中国）²⁰⁾

- ・本ラボは、百人規模で1988年11月に設立。トライボロジーとマイクロ/ナノ製造の理論と応用に関する基礎研究分野が重点推進され、摩擦、摩耗、潤滑、シーリング、表面と界面、インテリジェント機械、バイオメカニクス、マイクロ/ナノフォトニックデバイスなどもカバーする。全国主要プロジェクト、中国のハイテク研究開発プログラム、National Natural Science Foundation of Chinaの主要および主要研究プログラム、創造的研究プログラム、国際協力プロジェクト、および企業からの委託プログラムなどが含まれる。

(5) 科学技術的課題

トライボロジー研究にとっては、摩擦・摩耗・潤滑の基礎メカニズムを理解することが、まず重要な課題である。しかし、トライボロジー現象は、真実接触部と言われる固体間に挟まれた $1\mu\text{m}^3$ 未満の空間領域において、長くても1ms程度の短時間に起こる現象（温度・圧力変化、表面原子・分子構造変化、化学反応など）を捉えることが必要とされる。計測・分析技術として、極めて高度なその場観察技術（in-situ）が要求される。現在、様々な表面分析技術が開発されているが、未だに十分な時間分解能や感度を有し摩擦界面のその場観察に決定的な有用性をもたらす技術は、開発されていない。この分析・観察技術を確立することが、マルチスケール・マルチフィジクスによるトライボロジー分野シミュレーションモデル構築に役立ち、計算機シミュレーションによる数値解析技術の妥当性検証等に重要となる。

また、実用面として自動車用エンジンでは低摩擦化に向けて油の低粘度化が進む一方で、荷重や速度の条件がそれぞれ異なるエンジン要素部品を同じエンジン油で潤滑させるため、効果的な添加剤設計技術が重要となっている。また、熱効率（燃費）向上のための小型化（ダウンサイジング）・高過給化によるブレイグニッション、デポジット、燃料のシリンダ内直噴化に

よる潤滑油の燃料による希釈などが、異常燃焼と摩擦摩耗増加を引き起こす等の新たな技術課題がある。

さらに、無潤滑環境で摩擦係数が 0.01 以下となる「超潤滑」技術の開発が進んでいるが、現状では限定された材料組合せ（硬質薄膜である DLC や CNx（Carbon Nitride）の使用、相手面に触媒作用のある ZrO₂ などの利用）や環境（水素やエチレンなどのガス雰囲気や窒素ガス吹付け環境など）にて発現するレベルである。また、初期なじみにより低摩擦が実現するが、その条件は実験室的に確認されている段階であり、一般化されていない。

潤滑油添加剤による低摩擦化に関しては、MoDTC を始めとする摩擦調整剤の研究により低摩擦化が進んできているが、上述の「超潤滑」技術が無潤滑条件を前提に評価されているため、両者のシナジー効果が期待されるような研究にはなっていない。実用的な機器では、潤滑油が多く使用されており、潤滑油添加剤の有効性は高いと考えられるが、DLC 等の表面処理との組合せに関しては研究開発を継続している段階であり、「超潤滑」との組合せとなるとさらに進んだ研究が必要と考える。

中長期的に考えると、環境負荷などの観点から潤滑油の使用量を減少させる必要があると考えるが、「超潤滑」を用いて低摩擦を実現した場合に問題になるのは、摩耗寿命の評価法である。潤滑油は摩擦低減と合わせてしゅう動面を分離して摩耗を低減する役割も持つが、潤滑油の使用量を減らすと摩耗の発生が避けられなくなる。「超潤滑」の多くは硬質薄膜を用いる手法であるが、実験室的に摩耗が少ないことは確認されているものの、実験室での検証が困難な長期間（年単位～10 年単位）での運転が要求される機器での摩耗評価・予測技術が確立されないと広く適用することが難しくなる。摩擦メカニズムの観点から、硬質薄膜の摩耗評価技術、摩耗低減技術、「超潤滑」の安定発現技術などが今後取り組む課題であると考ええる。

（6）その他の課題

トライボロジーが扱う対象は、原子・分子レベルでの摩擦現象から、ハードディスクのスライダヘッド、自動車の駆動部品やタイヤ、発電タービンの軸受、電気接点、人工関節、地震予知や人工衛星など、多岐にわたっている。そのため、トライボロジーが関連する学問は機械工学を本拠としながらも、物理学や化学などの基礎分野から、材料、電気、土木・建築、航空・宇宙などの工学分野、計測や分析等に関する分野、エネルギー・環境や防災に係わる応用領域、さらにはナノテクノロジー、バイオテクノロジーといった新融合領域に至るまで、非常に幅広い範囲に跨がっている。このように分野融合の科学・技術の典型であるトライボロジーであるが、世界的には大規模なトライボロジー研究拠点が各国に存在する。一方で、日本のトライボロジー研究は大学の研究室単位で実施されている場合がほとんどであり、基礎と技術課題の融合研究を推進するのに十分な体制にはない。先進的なトライボロジー研究を推進するには、多岐にわたる領域分野の研究者による異分野融合的な取り組みが必須であり、そのような取り組みが可能になるような体制の構築が求められる。

個人会員の約 2/3 が企業の所属という日本トライボロジー学会の会員構成を見ても明らかのように、トライボロジーと産業界のつながりはきわめて緊密であり、国際競争力を高めるという観点からも、大学や公的研究機関の研究者と民間技術者との協働による研究開発力の強化が期待される。「超潤滑」のような革新的技術の製品適用のためには、大学等で継続的に実施される基礎研究に加えて、産学共同での実用化研究が不可欠であるが、実用成果に至るまでに時

間を要する場合が多い。このため、産学連携の進展には、アカデミアにおける研究者に対する研究論文数以外の評価軸への配慮がさらに重要になると考える。

また、トライボロジー分野のような産業界においても地味な分野の研究領域については、当該分野における成果の社会的認知向上などにより、若い研究者を惹きつけなければ、世界をリードできる総合力を有する優秀な研究者が育たず、新技術を担う人材が枯渇するリスクも考えられる。現実にはトライボロジー分野の研究室は、主要国立大学において減少する傾向にあり、「トライボロジー」を講義科目として開設していない理工系大学が少なからずある。高信頼性・高効率な機械を実現するための新技術開発に対する研究リソースが減少し、産業界への優秀な人材の輩出も困難になってくるおそれがある。

「超潤滑」等を含むユニークな技術の実用のためには、製造技術との連携は欠かせない。現状、自動車産業などの量産品事業では硬質薄膜を始めとする低摩擦化表面処理技術の製品適用が進んでいる。これは、小規模かつ大量の部品生産の量産効果が高いため、硬質薄膜の施工メーカーや部品への施工を実施する機械要素メーカー自身が、経済合理性に基づいた生産設備への開発を含む投資が可能であることが大きいことによる。一方、大型のインフラに関わる機械産業では単独では経済合理性が成立せず、その結果、研究成果そのものにポテンシャルがあっても実用化に結びつかない場合がある。優れた技術の産業界全体への普及による産業の競争力強化のためには、これを後押しするための製造技術開発に関する支援が行われることが求められる。

（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	◎	↗	●基礎分野の研究者の参画により、摩擦・潤滑研究の新しい展開が出ている。特に、物理、化学、材料、計測の研究者の融合研究への参画が進んでいる。（東北大学「トライボロジー融合研究拠点プロジェクト」、東京理科大学「トライボロジーセンター」等） ●トライボロジーにおける低摩擦の発現現象や焼付き及びなじみのメカニズム、カーボン系炭素膜等多くの基盤技術が大学をはじめとする研究機関で推進されている。（JST ACCEL（イノベーション創出向け研究加速プログラム）など） ●一方、高温個体潤滑剤研究などは衰退してきている。
	応用研究・開発	◎	↗	●近年の自動車の燃費向上の大きな部分が、低摩擦化技術の向上によっている。過去 20 年間で 15%²¹⁾ と燃費向上が実現している。 ●各機械要素技術（部品）の低摩擦・耐久性技術は現状でも世界トップクラスである。これらが変わらず高品質の機械システムを支えている。SIPにおける乗用車エンジンでのトライボロジー研究の推進等。
米国	基礎研究	◎	→	●基礎と応用研究の循環がスムーズである。ベンチャーから生み出された摩擦試験機が世界標準機になっている（現在は Bruker が販売）。
	応用研究・開発	◎	→	●基礎と応用研究の循環がスムーズである。例えば、ハードディスクの潤滑研究をナノテクノロジーから推進した IBM の研究者が教科書²²⁾を執筆するなど、先端研究の導入へのハードルが低い。

欧州	基礎研究	◎	↗	【EU】 ●欧州全体としては、本文中にも記載したとおり数か所の拠点があり、近隣の複数国持ち回りによる国際会議やシンポジウムの開催や共同しての若手育成などを連携して進めている。産業界との連携も強い。 ●国際会議や国際誌の発表が活発で、COST プロジェクトなどがある。 【英国】 ●官民共同でイノベーション推進する傾向が近年活発になっている。政府の Innovative UK による資金助成のほか、トライボロジー分野では IMechE や IOM3 などが協力して UK Tribology という組織を立ち上げ、国内のトライボロジー拠点を連携して経済・産業界への貢献を指向している。 【ドイツ】 ●上記 EU の一員として、基礎研究に先導的な役割を果たしているが、トレンドとしては高止まりの感が強い。
	応用研究・開発	◎	→	【EU】 ●産学の連携が強い。添加剤におけるエボニックなど世界的な企業が研究をリードしている。 ●機械システム及びその課題を明確化した産学官の連携体制。エンジン設計に有用な解析モデルでは世界有数の企業（FEV、AVL、RICARDO 等）があり、世界の自動車企業のエンジン開発のサポートを行っている。
欧州	応用研究・開発	◎	→	【英国】 ●産学連携が活発に行われており、官からファンディングを受けるなどして研究開発がされている。例えばボーイング社とシェフィールド大学が設立した Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC) は世界各国から民間企業が参画して航空関連技術開発を進めており、トライボロジー関連では難削材加工などが日本企業も参画して行われている。 【ドイツ】 ●産学連携がもともと高いレベルで行われており、トライボロジー関連では自動車の内燃機関系に関わる共同研究プラットフォームとして FVV (Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.) が発足し、ドイツ国内に研究拠点を有する自動車メーカーと部品メーカー、大学等が参画している。
	基礎研究	○	↗	●摩擦研究拠点が、清華大学（北京）の他、蘭州にある（State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, the Chinese Academy of Science（1987年創設）。百人規模の研究者（80名以上・ポストドク以上）を擁する大規模な組織。欧米で教育あるいは研究経験を積んだ中堅研究者がリーダーとして研究を率いている。研究テーマも現代的であり、まだ追従型の傾向はあるものの、応用研究への展開をにらみ、精力的に基礎研究を進めている。
中国	応用研究・開発	○	↗	●欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆する応用研究はないが、基礎研究の状況から今後の応用研究レベルの向上が考えられる。
	基礎研究	×	↘	●他国との比較でトライボロジー分野での特筆すべき基礎研究はない。
韓国	基礎研究	×	↘	●他国との比較でトライボロジー分野での特筆すべき基礎研究はない。
	応用研究・開発	△	→	●欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆する応用研究はない。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) 潤滑油協会「潤滑管理効率化促進調査報告書」（1995）.
- 2) 化学技術戦略推進機構「ST / GSC 技術開発プログラム構想—ST 戦略の具体化に向けて」（2005）.
- 3) Kenneth Holmberg, Peter Andersson and Ali Erdemir, "Global Energy Consumption Due to Friction in Passenger Cars," *Tribology International* 47: 221-234, 2012.
- 4) Bo N. J. Persson, "Sliding Friction," *NanoScience and Technology*, 2000.
- 5) F. P. Bowden and D. Tabor, "The friction and Lubrication of Solids," Oxford University Press, (first published in 1950, reprinted with additional material in 1954), paperback edition, 1986.
- 6) 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 エネルギー分野（2017年）」:502-511, 2017.
- 7) 日本トライボロジー学会「トライボロジー技術俯瞰図」（2015），
<https://www.tribology.jp/unit/s-101/fso4p100000005rj-att/ob5l5g0000000034.pdf>（2019年2月1日アクセス）.
- 8) 日本トライボロジー学会「トライボロジーロードマップ研究会 報告書」（2015）.
<https://www.tribology.jp/unit/s-101/fso4p100000005rj-att/jr41mf00000000e0.pdf>（2019年2月1日アクセス）.
- 9) 中原綱光，安藤泰久「トライボロジーロードマップの目的と報告書の概要」『トライボロジスト』61巻1号（2016）: 9-15.
- 10) 日本トライボロジー学会「2015年度（第60期）研究会報告」『トライボロジスト』61巻6号（2016）: 401.
- 11) 日本トライボロジー学会「2017年度（第62期）研究会報告」『トライボロジスト』63巻6号（2018）: 434.
- 12) 日本トライボロジー学会「創立60周年記念 自動車の省資源・省エネルギー」特集『トライボロジスト』61巻2号（2016）: 64-115.
- 13) 科学技術振興機構 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的燃焼技術，損失低減チーム」，https://www.jst.go.jp/sip/k01_team4.html（2019年2月1日アクセス）.
- 14) 自動車用内燃機関技術研究組合（AICE），
<http://www.aice.or.jp/index.html>（2019年2月1日アクセス）.
- 15) 「トヨタ・日産など11社、「自動車用動力伝達技術研究組合」を設立」『日本経済新聞』速報，プレスリリース，2018年5月15日，
https://www.nikkei.com/article/DGXLRS479753_V10C18A5000000/（2019年2月1日アクセス）.
- 16) ミュンヘン工科大学，Institute of machine elements FZG，
<https://www.fzg.mw.tum.de/en/home/>（2019年2月1日アクセス）.
- 17) Austrian Excellence Center for Tribology，
<https://www.ac2t.at/en/ac2t/>（2019年2月1日アクセス）.
- 18) サウサンプトン大学，National Centre for Advanced Tribology at Southampton，
https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/groups/ncats.page#group_

- overview（2019年2月1日アクセス）.
- 19) エコール・セントラル・ド・リオン,
<http://ltds.ec-lyon.fr/spip/spip.php?rubrique1>（2019年2月1日アクセス）.
- 20) 清華大学, State Key Laboratory of tribology,
http://www.tsinghua.edu.cn/publish/dpien/7819/2012/20120903141457094331781/20120903141457094331781_.html（2019年2月1日アクセス）.
- 21) 鈴木厚「自動車の省資源・省エネルギー予測」『トライボロジスト』61巻2号(2016): 109-115.
- 22) C. Mathew Mate, "Tribology on the Small Scale," 2007.

2.15 エネルギーシステム評価

（1）研究開発領域の定義

エネルギーシステム評価に関する科学、技術、研究開発を記述する。エネルギーシステム（社会における電気や石油など様々な形態のエネルギーの生産・配送・消費までの流れをシステムとして表したもの）を数理モデルとして計算プログラム化することにより、経済合理性や環境適合性なども考慮に入れたエネルギー技術選択や政策の有効性や妥当性の評価を目的とした研究開発領域が対象となる。

なお本領域では評価対象となるエネルギーシステムを空間スケールで分類しており、それぞれの評価の目的や課題が異なり、評価方法もこれに対応していることから、対象とするエネルギーシステム自体の主な動向、課題等についても記述する。

（2）キーワード

エネルギー変換・貯蔵・輸送技術、供給の変動性、地球温暖化問題、資源賦存量の不確実性、経済的不確実性、政治的リスク、社会的受容度、情報技術によるシステム管理

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

エネルギーシステム評価の重要性は、第一次石油危機後に注目された。第2次世界大戦後のモータリゼーションと電力消費の爆発的拡大の中で、石炭から石油にエネルギーの中心が移行したが、同時に石油依存型社会の脆弱性も明らかとなった。また1960年代は化石燃料消費に伴う環境汚染も大きな問題となった。このような資源の有限性の中で拡大する需要、環境性、経済性などの同時成立を求めエネルギーシステム評価研究が始まった。その後、石油代替エネルギー、地球温暖化問題、再生可能エネルギー開発など供給面の拡大、利用者間のエネルギー輸送、コジェネレーションやヒートポンプなど利用機器の性能向上と未利用エネルギー利用技術の再評価など需要側の技術進展によりシステム評価はさらに複雑化した。また、各国でエネルギー産業の規制改革が進み、ことに電力市場では電力（kWh）、さらに設備容量（kW）までが商品のように市場取引の対象とされ制度的にも複雑化している。

このようにエネルギーシステム評価は、単なる入力一次エネルギーに対する最終消費エネルギーの入出力変換効率だけでなく、経済性、環境負荷、さらに経済的な変動に対するリスクヘッジだけでなく、資源問題では政治的リスク、原子力では事故リスクという対象の広がり、地球環境問題では超長期的視点、地域エネルギーでは温度を考慮したエネルギーの質的側面、太陽光・風力発電では短周期的変動性など、単にエネルギーの量のみでは表せない諸問題が近年評価の鍵となっている。

[研究開発の動向]

エネルギーは産業と社会を支える基本的な要素である。しかし利便性に優れる天然ガスや石油は資源が有限かつ偏在しており供給のコストは短期的にも長期的にも変動が大きい。また大気汚染や地球環境問題を引き起こす。他方、太陽光のような無尽蔵と言って良い再生可能エネルギーはゼロコストで誰しも恩恵を受けられるものの、一般に供給の密度が薄く、収集と変換にコストがかかり、また出力は気候や天候で変動する。原子力は原理的には安定した供給を

安価な燃料費で可能とするが、事故時の影響はきわめて大きい。このようにエネルギー源はいずれも得失がある。他方、2016年時点で一人当たり一次エネルギー消費はOECD地域と非OECD地域で4.20石油換算トンと1.34石油換算トン、アフリカでは0.663石油換算トンと格差が大きい。また、先進国であっても国内に「エネルギー貧困」と呼ばれる格差がある。

電力やガソリンなど生活の基盤となるエネルギー源では、どのような価格で消費者に提供されるかが社会の基本的な問題であるが、ここには技術的成本だけではなく環境負荷のための社会的コストが必要であり、さらに実際の市場価格は税制など制度に依存する。

このようにエネルギーシステムの評価は決して一元的になされるものではなく、多面的な視点が不可欠である。特に、システム評価は、時代に合わせ社会からの要請に応えるため新たな方法論が開発されるなど、システム評価が拡張されてきた経緯がある。

ここでは、エネルギーシステムを空間スケールで分類し、本領域の方向性を示す。

(3)-1 グローバルレベルのエネルギーシステム評価

長期・グローバルレベルのエネルギーシステムの近年の最大の課題は地球温暖化問題への対応である。1988年に政府間気候変動パネル（IPCC）が設立され、特にエネルギー利用の化石燃料起源の二酸化炭素排出が大きな要因とされて以来、エネルギー、経済、環境を共存させるための定量的評価研究が世界的になされた。1990年代は主にエネルギー需要を所与としエネルギー技術選択と経済の相互関係を分析するボトムアップ型モデルと、主にエネルギー価格と市場メカニズムに着目して経済活動の中でエネルギー種が選択されていくというトップダウンモデルがエネルギーシステム評価の基本的な方法であった。次第にこれらは大気汚染や水汚染などの環境影響評価、土地利用や食糧需給評価、簡易全球大気循環モデル、水資源評価など範囲を広げた総合的評価システム体系に拡張された。このように多分野の評価モデル群を統合的に相互リンクさせたシステムは統合評価モデル（IAM）と呼ばれ、2013年に発表されたIPCC第5次評価報告書WG3（IPCC-AR5-WG3）¹⁾には日・欧・米から30の統合評価モデルが参加するに至った。日本からは、最も広範囲かつ大規模なモデル評価を続けている国立環境研究所のAIM²⁾、詳細なエネルギー技術評価ボトムアップモデルを特に詳細化した地球環境産業技術研究機構のDNE-21³⁾、コンパクトにエネルギー、経済、環境影響、土地利用を統合化したエネルギー総合工学研究所のGRAPE⁴⁾や東京理科大学のMARIA⁵⁾が参加している。

他方、モデルは大規模・精緻化されたとはいえ長期的な地球環境問題の不確実性は自然科学的にも人為的影響にしてもあまりにも大きく、これらのモデルが導く結論は決して収束しておらず評価の幅はなお広い。例えば、先のIPCC第5次評価報告書WG3では¹⁾2100年時点での2℃安定化目標と対応する430-480ppm濃度制約に対するGDP低下率は、2%-15%（中位値5%）という広い幅を与えている。モデル間に共通する知見と差異を明らかにすることは研究の方向付けにも政策提言にも重要と考えられる。このような観点から数多くのモデル比較プロジェクト（Model Inter-Comparison : MIP）が進められてきた。IPCC-AR5-WG3には9のMIPが記されているほか、2017年時点でさらに4プロジェクトが進行している。

(3)-2 国レベルのエネルギーシステム評価

(3)-1で紹介したエネルギー経済モデルの方法論は、ボトムアップアプローチ、トップダウンアプローチともそのまま1国あるいは地域のエネルギー・経済・環境評価に適用できる。エ

エネルギー需給データが整備されていれば、国単位、地域単位のボトムアップアプローチの開発は比較的容易なため、世界各国での開発例は多い。この背景には、1980年に国際エネルギー機関（IEA）から発表された高い汎用性と柔軟性を持つメインフレーム計算機上で動作するMARKALモデル⁶⁾の存在が大きい。計算機環境の進歩により経済活動との統合化や不確実性評価など様々な拡張がされ、評価ツールとして普及した。

他方、経済政策評価においては、エネルギー政策と産業との相互影響、特に一次産業から二次産業、サービス業など産業部門間の影響の波及は産業連関表を用いて分析することができ、政策上重要な意味を持つ。トップダウンアプローチの中でも、産業連関表の概念を拡張した応用一般均衡モデル（CGE）は、このような多部門間の相互関連のもとで、価格と取引額の整合性を保ちつつ詳細な経済活動を導出することを可能とする⁷⁾。一般均衡分析は高度な専門的知識を要する経済学の一学問分野であるが、計算ソフトウェアの進展とデータの整備によりCGEモデル開発は容易になり、CGEは今や研究だけでなく実務の評価ツールとして世界各国で用いられている。

基本的な差として、前者は需要を外生的に与えるのに対し後者は価格メカニズムで変化すると想定されること、前者はエネルギー技術を明示的に扱うのに対し後者は「価格」の中に体化されているなどの方法論上の相違があるが、これらは絶対的なものではなく拡張例はある。

なお、CGEは基本的に静学モデルであり、経済のダイナミックな変化そのものを扱うものではない。そのため先のAIMでも逐次最適化によって産業部門間の相互作用を見つづ動的な技術導入シナリオを導くシステムを持つ。さらにマクロ経済モデルと組み合わせた大規模な経済評価システムが日本経済研究センター等で行われているが、エネルギーシステム評価からは外れるのでここでは省略する。

また、複数の国の間のエネルギーに関わる協力連携政策の評価にも関心が集まっている。連携には大別して、(a) OPECに始まり、環太平洋パートナーシップ協定（TPP）や二国間クレジット制度などの多岐に渡る複数国際間の社会・経済的な制度設計、(b) 国際間の長距離送電線やパイプラインなどの国際間のエネルギー輸送インフラ整備に関わるもの、などがある。対象国としては、EU、ASEAN、South Asian Association for Regional Cooperation（SAARC）、中東、東アジア、先進国と発展途上国の組合せ、などがその目的に応じて取り上げられる。モデル化の手法としては、上記の国を対象としたモデル化手法が利用されるが、近年話題となっているバイオマス、水素、電力等の国際間輸送のように、技術的な因子を無視できない国際連携も評価対象となる。

(3)-3 電源計画と電力システム評価

エネルギーシステム評価において電力需給システムはやや特徴的な性質を持つ。これは、①電力の貯蔵には制約が大きいこと（揚水発電は大規模であるが貯蔵効率が約7割と損失が大きい。蓄電池は応答は速いが、容量が小さく高コスト）、②送配電は交流でなされているので、需給バランスがとれ、周波数がどの段階でも正しく管理されていなければならない、③電力需要は、通常でも季節・日間で、さらにより短時間でも変化する、などの需給双方の特性のためである。このため、電源は需要に合わせた運転が必要だけでなく周波数や電圧管理のための設備と運用が必要となる。

需要変化が1時間程度で起こり、しかも事前にわかっているとすると設備は可変費が安い順

に運転を行い、全体では予測されるピーク需要に適正な予備力を加えた設備導入を行うのが合理的なことが自明である。ただし、太陽光発電（PV）や風力発電など変動電源が主力電源化する段階では、電力の需給構造が大きく変化し、従来のように夏季午後に最大需要が発生するとは限らず、年間を通じて供給信頼度を適切に把握する必要性が高まっている。需要家に電力を送るには、送電系統の容量制約を考慮することになる。このような「上流から下流へ」エネルギーが流れる単方向ネットワークフローの想定では、電源計画は先のボトムアップアプローチと基本的に同じようなモデルで評価可能である。しかし分散型電源が需要家側に導入され、送配電系統側に逆方向のフロー（逆潮流と呼ぶ）が発生すると話は単純ではなくなる。まず既存の設備はそのような逆潮流を想定していない。第2にネットワークが周波数成分とフィードバックループを持つ場合、停電が急激に広範囲に拡大するようなシステムの安定性の問題が発生する。電源システムのエネルギーシステム評価では、このようにマクロでのエネルギー需給バランスのシステム評価と、短期あるいは瞬時のシステム安定性の問題を同時に扱うことはタイムスケール上も空間のスケール上も極めて困難なため、両者は切り離して評価されてきた。

しかし、両者にまたがる問題も近年発生してきた。再生可能エネルギー、特に太陽光発電や風力発電の急速な拡大は世界的なトレンドである。日本においても2011年3月の東日本大震災以降、世界的な太陽電池パネルの価格低下とFeed in Tariff（FIT）の導入により急速に拡大した。ここで、太陽光発電も風力発電も天候により短時間で出力が変化してしまう（これらを変動性電源とも呼ぶ）。すると送電系統はまず周波数が低下してしまうので、瞬時に供給を適切に増やし補償する必要がある。もし発電設備がタービンなど回転機で構成されていると、わずかな変化なら自動的に吸収する特性があるが、ある程度以上大きな変化が要求される場合は設備による調整を必要とする。さらに変動電源は本質的に出力予測誤差があるため、従前以上の十分な予備力がなく対応しきれなくなると系統全体が不安定化することになる。

そこで、電源計画モデルもエネルギー量の需給バランスと総コスト最小化だけでない視点を導入する必要性が生じた。まず地域の細分化と時間的な解像度の詳細化により変動性電源出力と需要の変動を明示的に扱う拡張がなされた。これにより太陽光発電の導入拡大に対する最適な蓄電設備の導入量を合わせ評価できる。この代表的なモデルが藤井らによる研究⁸⁾であり、1年の時間解像度は10分、地理的解像度は全国352地点、基幹送電線441本を扱う線形計画モデルで、規模は約2億の制約条件式と約1.5億の変数から構成される。やや簡易化された方法として、変動性電源の容量に対するタービン発電機の容量を一定値以上にする制約を加える方法がある。

これに対し、もともと中小規模の電気事業者が多い米国や国際的な送電ネットワークを持つヨーロッパでは、余剰電力の相互融通のために市場メカニズムを利用した管理システムを構築してきた。この中には、電力供給者から積極的に価格情報を消費者に流すことで需要をある程度調整しようとする需要側管理（DSM）と呼ばれる考え方が存在する。これは電力市場の形態を「需要に応じた生産」から「需要と供給のオークション」取引に変えるものである。消費者も自ら直接、あるいは家庭エネルギー管理システム（HEMS）や建物エネルギー管理システム（BEMS）によりある程度自動的に需要を調整する（Demand Response: DR）。ある程度以上需要が超過して価格が上昇すれば、予備電源の保有者もそこで市場に参加して供給を開始するかもしれない。この結果電力量の直物・先物取引だけでなく、予備的設備の保有も取引の対象となる容量市場など金融市場の方法が取り入れられてきた。この場合のエネルギーシステ

ム評価は、上記のいずれとも異なる接近法が必要となり、物理的なエネルギーシステム評価の枠を超えたオプションやボラティリティなど金融・証券市場の方法の適用と評価例が数多くみられるようになっている。日本では小売り電力自由化は導入されても発送電分離と市場制度が欧米に比べると遅れているため、実証研究よりも数理モデル研究が先行しているが、今後の電力市場の方向性から見て、日本でも考慮すべき課題である。

変動電源の連系量増加によって、周波数制御や需給バランス調整のための調整力必要量が増え、従来電源以外の調整資源（蓄電池やDRなど）が必要となる可能性がある。再エネ電源大量連系下での需給バランス維持のために、需要側資源を経済的に活用できないか、検討する研究が始まっている⁹⁾。今後、変動電源の出力予測の分布を考慮し、需要家が保有する分散型エネルギー資源を系統と統合して、経済的に再生可能エネルギー電力を主要な供給力として使っていくための計画手法、運用制御手法の開発が必要になる。

(3)-4 地域エネルギーシステム

分散電源の拡大とエネルギー利用機器の拡大は、ミクロな地域レベルで見るとさらに異なる様相と課題をもたらしている。分散電源の拡大とエネルギー利用機器の拡大は、ミクロな地域レベルで見るとさらに異なる様相と課題をもたらしている。国全体の一次エネルギー消費削減や温室効果ガス削減が目的となる国レベルおよび電力システムの低環境負荷・低コスト・需給安定が目的となる電力システムレベルと、省エネルギーと建物に統合された再生可能エネルギー・分散型エネルギーシステムの導入によるネット・ゼロ・エネルギー化が目的となる建物レベルの間であって、地域レベルのエネルギーシステムの目的は従来明確では無かったが、近年 Smart Community、Smart City、Community Energy Management (CEM) 等の概念が出現し、また自治体が主導する低炭素まちづくりというニーズもあって、地域エネルギーシステム概念とその研究開発に対するニーズは近年高まっていると言える¹⁰⁾。通常、地域エネルギーシステムで取り扱われるのは、太陽エネルギー・地熱・小規模水力・バイオマスなど地域の再生可能エネルギー資源の供給、都市廃熱の活用、都市規模の熱併給発電、それらを含めて最終エネルギーを熱の形で建物に供給する地域熱供給システム（ヨーロッパや中国など寒冷地では地域暖房、日本など温暖地では地域冷暖房、シンガポール等では地域冷房も見られる）、分散型発電を含み広域の電力システムからの供給を含めて電力需給の最適化を図る地域の電力マネジメントシステム、都市ガス・石油類・近年では水素システム等を含む燃料供給システムと、建物（電気自動車への供給を含む）その他の部門の最終エネルギー消費を都市レベルにアグリゲートした都市の最終エネルギー需要である。

空間スケールがミクロになるにつれ、エネルギーシステムも個別の機器特性や需給パターンが詳細化され、さらに省エネルギーのオプションも具体的になる。例えば、農村部ではバイオマスの供給ポテンシャルが供給の時期と量、さらに質を合わせて検討されねばならない。畜産や農業廃棄物の利用システムも同様で、収集から変換まで具体的な調査と評価を必要とする。

都市部では産業排熱の利用だけでなく、ヒートポンプ技術の向上により河川熱や地中熱、さらに地下鉄排熱のような未利用熱源利用の可能性も視野に入る。省エネルギーオプションもゼロエネルギービル (ZEB) やゼロエネルギーハウス (ZEH) が提案するようなダブルスキーン、LED タスクアンビエント、ライトシェルフなどの省エネルギー建築技術などの効果も検討課題となる。

廃棄物利用では、バイオマスだけでなく回収廃プラスチック再利用も重要課題であるが、ここでは燃焼によるエネルギー利用だけでなく、原料としてのマテリアルリサイクル、そのほかの化学的変換プロセスによるケミカルリサイクル、埋め立てなどエネルギー以外の処理方法の相互比較が資源、経済性、エネルギー効率、環境負荷、最終処分量など複数の視点から検討されねばならない。したがって、エネルギーシステムモデルも、単なるエネルギー変換だけでなく、マテリアルバランスやプロセスの温度、場合によっては圧力など化学工学的な評価を必要とするなど、熱利用でも特に熱輸送が含まれると温度や圧力など熱力学的側面が必要となる。このため、古くから評価はしばしばエネルギーだけでなくエクセルギーやエンタルピーからなされる。このように、ここでも単一の基準では不十分なものとなる。

地域エネルギーシステムでは、ヒートポンプや発電機などエネルギー機器の導入台数も数台単位となるため機器の運転特性も考慮されねばならない。例えば、大型エンジンを小出力で運転すると効率は大きく低下し、ある程度以下では停止してしまう。一般に、エネルギー機器は部分負荷状態では定格運転時の効率を発揮できないことが多く、地域エネルギーシステムではこの影響が大きくなる。しかしこのような特性はしばしば非線形かつ不連続関数となるため、数理モデル上は急激に定式化・求解とも困難さが増す。

このように地域レベルのエネルギーシステム評価は、基本的にボトムアップモデルをベースとして建築学、都市工学、化学工学、農学、機械工学、電気工学をはじめとする幅広い分野が担ってきた。特に、地理情報システム（GIS）の普及により、詳細な地理データが利用できるようになったことから日本でも東京、大阪、名古屋など大都市を対象とした詳細な分析が可能となった。反面、エネルギー利用状況の詳細なデータは、企業や個人の情報保護の観点から未公開なことが多く、システム評価のボトルネックとなっている。

次世代のエネルギーシステム要素技術として特に注目されるのが電気自動車（EV）と電力系統との連携（V2G）である。（3）-3 で述べたよう太陽電池の変動性の吸収には蓄電池が有効であるが、もし駐車中の電気自動車の蓄電池を利用できれば追加的な費用は大幅に削減できることが期待できる。ただし充電と走行の時間配分に注意しなければならない。これを考慮するには、特定地域の大量の自動車の詳細な走行データとその分析が必要となる。情報技術の発展により、このようなビッグデータの収集と活用は現実のものとなりつつあるが、まだエネルギーシステム評価としては限定的である。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

ここでは各レベルにおけるエネルギーシステム評価を実施する際に対象となるエネルギーシステム自体の注目動向を中心に述べる。

（4）-1 グローバルレベルエネルギーシステム評価

グローバルレベルのエネルギーシステムは、近年になっていくつかの大きなインパクトがあった。まず 2010 年付近からの米国のシェールオイル・シェールガスの急速な開発の進展、次いで太陽電池パネル価格の急速な低下、そして 2016 年パリ合意は世界のエネルギーシステムに大きな影響を与えている。

温暖化対策として近年注目される技術に、ジオエンジニアリング¹¹⁾がある。これには、大

気中への二酸化炭素排出を0に近づけるだけでなく吸収により「負の排出」を実現しようとするものと、より直接的に太陽放射への介入を通じて大気温度そのものを制御しようとするものがある。前者は、さらにバイオマス燃焼と排気ガス中の炭素回収隔離を組み合わせたもので BECCS と称されるシステムと、さらに直接大気から二酸化炭素を回収し貯留する Direct Air Capture (DAC) 技術などが提案されている。いずれも、二酸化炭素の分離、圧縮、地下あるいは深海への圧入貯留などの要素技術は確立したものであり、現時点でのコスト、エネルギー消費などは推計値の報告例は多い。ことに BECCS は (3)-1 で述べた地球温暖化対策のモデル比較では、2100 年 2℃ 目標達成のためには不可欠あるいは極めて高い優先度の技術となっている。

後者の直接的温度制御として、成層圏に硫酸などエアロゾルを散布し、直接地表へ到達する太陽光エネルギーを制御しようとする技術がある (Solar Radiation Mangement : SRM) コスト試算がいくつか報告されているが、問題点はコストよりもむしろ結果の不確実性と社会的受容性にみられている。

近年のゼロエミッション低炭素エネルギーシステムの要請に応えるには、重量車、航空機、船舶、素材産業でのゼロエミッション化が課題である¹²⁾。

(4)-2 国レベルのエネルギーシステム評価

国レベルのエネルギーシステムは社会経済の動向と政策により大きく変化する。近年では、まず、化石燃料から再生可能エネルギーへのシフトを念頭に置いた際の二次エネルギー（エネルギーキャリア）の将来に関する議論が活発である¹³⁾。現状では天然ガス・バイオガスに加えて、再生可能エネルギー電力と水素がその代表格であるが、その国内・国際間輸送がエネルギー変換技術はエネルギー貯蔵技術や二酸化炭素分離貯留技術（CCS）と組み合わせさせて多様なシステムが設計、評価されている。また、エネルギーと経済の相互関係における新たな要因として、情報技術の進展が大きく影響し始めている。ICT 技術の進展に伴って、スマートグリッド、スマートエネルギー、スマートタウンなど、「スマート」と付く様々なシステムを近年目にする機会が増えた。これらは必ずしも明確に定義された工学用語ではないが、太陽電池やコジェネレーションなど分散エネルギー機器を持つ需要家と大規模事業者だけでなく中小規模の発電事業者、あるいは電気自動車との接続までを含むさまざまな供給者を情報技術で連携し、最も効率的な需給を実現しようとするものである。情報技術と AI の発展は、ネットワークの運営管理だけでなく料金の瞬時的な変化の反映や詳細な課金システムも可能とした。例えば、EV や PHV など電気自動車の充電を他人の建物で行っても、常に課金が「家の所有者」でなく「自動車の使用者」になされるなら建物の電源コンセントの開放の可能性は広がる。このような広範囲の連携は、東日本大震災後に問題となった災害時の対策にも寄与するであろう。

「スマート」に関しては近年特に注目が集まり、情報技術の寄与の可能性は様々に論じられており期待も大きい。システム全体としての定量的評価はまだはっきりしない。需要家の行動が不明なことと、EV がまだエネルギーシステムと連携するに至っていないことが大きい。これらは今後の研究課題となっている。

(4)-3 電源計画システム評価

原子力発電所の拡大が望めない一方、二酸化炭素排出削減は進めねばならないため、太陽光、

風力など変動性電源の拡大は今や不可避と考えられる。そのため、需給のエネルギーバランスだけでなく系統の安定化の課題は急速に上昇している。対応策として、技術面と制度面からの展開がある。

技術面では、蓄電システムの開発がある。蓄電池も、容量－体積比（重量比）の改良を目指す大容量化－ただし寿命は5000回の充放電サイクルを基準とする蓄電池－と短周期的な充放電サイクルに強い蓄電池、さらには瞬時的応答に強いキャパシタや超電導装置など電池以外のシステムの寄与も次第に増加する。これらの進展により、エネルギーシステム上の制約は大きく緩和する。

近年では、特にリチウムイオン電池のコスト低減は著しいが、電力を制御するための半導体機器はなお安価とは言えず、次世代電源システムシステムの評価への影響は大きい。

制度面では、前述の新たな電力市場の創出、需要側管理などが小売り自由化に次ぐ送発電分離とともに現れるが、これによる経済効果、環境面への寄与などは、不確実性の高さからまだシステム評価に至っていない。

近年のトピックとして、変動性電源の急激な増加に対して、送電容量の不足から接続を拒否する電気事業者が現れたことがある。送電系統はピーク需要と事故に備えた容量が必要であり、このため設備利用率が制約される。この点は世界共通である。ただし例えば欧州では日本ほど台風や地震の災害リスクが大きいことや国際的な送電網の存在から迂回路が多くなる。日本は地域ごとの送電系統の独立性の高さからボトルネックが生じやすい現状がある。欧州では、送電空き容量の利用を高めるため「コネクト&マネージ」という言わば接続の公開市場制度が導入されている。日本政府も「日本版コネクト&マネージ」の導入を進めようとしているが、セキュリティと信頼性が確保される中でどのような効果が期待されるのかはまだ不明である¹⁴⁾。

(4)-4 地域レベルのエネルギーシステム評価

太陽電池、風力発電、バイオマス等再生可能エネルギーなどは地域に分散して導入され、必ずしも送電の基幹系統の上流に接続されるとは限られない。中小規模では下流の66kV系統や末端の6.6kVの配電網に接続されることも多いことから、エネルギーも「地産地消」をめざす流れが生まれている。この場合、LNG火力など大規模電源よりもkWhあたりでの発電費用は上昇するものの、ある程度地域内で需給が閉じていれば雇用の確保につながり人口の減少に対策になりうる点に期待がされている。地場産業の育成を含む地方の活性化の一環として期待がされているが、補助金依存にならないような施策がなければ事業としては持続可能とはならない点に注意が必要である。

従来、都市レベルでのエネルギー供給システム評価では熱供給を中心に議論がおこなわれてきた。しかし、都市廃熱を主体とするヨーロッパ等での地域暖房システムに対し、日本に多く見られるように一般ビルの空調熱源システムを拡大した形の地域冷暖房システムでは建物側のセントラル空調システムの減少、パッケージエアコンシステムの高効率化と普及という状況下でその普及にブレーキがかかり、また、地域暖房システムに対しても高断熱型のゼロエネルギー建築の普及に伴う地域の熱需要密度の低下により熱供給システムの優位性の低下が懸念されている。それにかわって、電力需給を主体としたスマートコミュニティシステム、再生可能エネルギーの変動を吸収するために製造された水素エネルギーシステムなどが注目されるよう

になっている。

近年、自治体レベルの温暖化対策評価などを目的とした、都市最終エネルギー需要のシミュレーション技術開発が世界的な潮流となっている¹⁵⁾。元来建築のエネルギーシミュレーション技術を扱っていた IBPSA（International Building Performance Simulation Association）が2年に1度開催する Building Simulation 国際会議においても、2017年にアメリカで開催された会議では、8セッションのうちの1つを都市モデルを扱うセッションが独占するなど、この分野に対する期待は高い。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

エネルギー、環境技術関連のプロジェクトは国内外に数多いが、エネルギーシステム評価におけるプロジェクトは限られる。グローバルレベルにおいては、(3)-1で述べたモデル比較プロジェクトが進展中であり、12モデルが集まった ADVANCE（2013-2017）、バイオマス起源の無機炭素と有機炭素排出に着目する EMF-30/33（2013-2016）、16プロジェクトからなる MILES（2015-2016）、CD-LINKS（2015-2019）などがあり、いくつかは活動を継続している。

国内においては、エネルギーシステム評価そのものを対象とするプロジェクトは、国立環境研究所の AIM と地球環境産業技術研究機構の ALPS-Ⅲが注目される。なお、AIM は世界だけでなく元来アジア地域を対象とする経済・環境評価プロジェクトであったことから世界各国との研究ネットワークを構築し、中国やインドネシアでは自国の評価モデルを開発している点を補足する。さらに、各種のモデルの取り組みを含めて、モデルを相互比較しようとするプロジェクトも始まっている。

ヨーロッパでは、ロシアや中東、北アフリカとのエネルギー相互依存ネットワークが古くから構築されており、天然ガスパイプライン、石油パイプライン、国際送電網が広範囲に各国を接続している。同時に、国際河川管理や環境管理の体制も長い歴史を持つことから、地球温暖化問題だけでなくエネルギー安全保障の視点、さらに再生可能エネルギー利活用についても欧州委員会としての政策を打ち出している。

アジア、オセアニア地域におけるエネルギー・環境問題を対象とした社会・経済的、インフラ的側面での協力も、今後重要性を高めていくと考えられる。

地域エネルギーシステムに関しては、日本の次世代エネルギー・社会システム実証事業（2010-2015）において、横浜、豊田、京阪奈、北九州の4都市でスマートコミュニティの実証事業が実施されたほか、ヨーロッパでは EU による CONCERTO（2005-2010）、Smart cities and communities があり、前者は省エネルギー都市のパイロットプロジェクト、後者は都市におけるエネルギー・運輸・ICTなどの分野融合によるイノベーション創出を目指している。

(5) 科学技術的課題

● エネルギーシステム評価における技術的課題としては、以下のものが挙げられる。

- ① 検証作業（複数のモデルを利用したレビューなど）、
- ② 数値計算モデル上の技術課題（非線形効果の導入、混合整数解の解法、モデルの定式化、求解の困難化など）、
- ③ エネルギー量だけではない多面的視点からの評価方法（政治的リスク、事故リスク、不確

実性、エネルギーの質的側面、PVなどの短期周期変動性、地域におけるマテリアルバランスなど）、

④電力の市場取引化による数理モデル評価（および実証試験）などが挙げられる。

また、グローバルレベルから地域レベルを通じて、いくつかの新しい動向に対して、その影響が予測できない、あるいはデータがほとんどないことがエネルギーシステム評価を行う上で大きな課題となっている。それらを以下に列挙する。

● 需要サイドの問題

エネルギー供給技術については多くの開発課題と進展があるが、エネルギー需要に関しては基盤となるデータ、方法とも限られている。例えば、マクロレベルでの電力消費は与えられても、時刻別・世帯別・地域別のような細分化されたデータはわかっていない。ことに、天候に対して冷房など用途別需要がどのように変化するかはシステム評価上重要な課題であるが、データは限られている。ヒートポンプ技術の向上により河川熱や地下熱など未利用エネルギー源が実用性を有する段階となったが、これらは広域に存在するものではなく局所性が高いので、需要の詳細なデータとのマッチングが不可欠である。

輸送需要に関しても同様であり、時刻別・目的別需要などは個別調査によっている。日本においては、少子高齢化が予想されているが、これによりエネルギー消費がどちらに動くのかはなおシナリオに依存している段階である。世界的に見ても、例えば地域内交通の分析に必須のOD需要データは、国際輸送には存在しない。

さらに、今後の温暖化対策のキーテクノロジーの一つであるバイオマスエネルギーの潜在性評価にはエネルギーと食料需要の競合が懸念されるが、特に途上国地域の食料需要の将来の推移はよくわかっていない。

● 情報化の影響

先の詳細な需要データの必要性とも関係するが、情報技術の進展により個別の活動状況の収集は可能となっており、効率的なエネルギー利用が期待されている。近年注目されるシェアエコノミーにはこの情報技術インフラが不可欠であるが、この進展がどこまでエネルギーシステムに変革を起こすのかは現在、議論が緒についたばかりである。

● スマートネットワークの可能性

需要側管理を含めた新しいエネルギー需給ネットワークシステムへの期待は特に都市部や近郊都市で大きい。前述のようにEV／PHVのエネルギーネットワークへの参加はきわめて大きなインパクトを持ち、ことに自動運転が導入されれば需給構造とも大きな影響を受けると予想される。しかしそれがどのような形で、どのレベルのものなのかは現時点ではシナリオとしての議論にとどまっている。カーシェアリングは効率的な自動車利用をもたらすであろうが、同時に新たな需要を生むというリバウンド効果が予想されるため、全体的な影響については社会実験と実証モデルの開発が必要である。

● 地産地消型エネルギーシステムの可能性

地方の創生の観点からの再生可能エネルギーの拡大と「地産地消」の方向性は、低炭素社会の在り方の一つとしてしばしば語られる。その場合、ある程度地域内で需給が閉じていれば雇用の確保につながり人口の減少に対策になりうる点、地場産業の育成を含む地方の活性化の一環として期待がされる一方、補助金依存にならないような施策がなければ事業としては持続可

能とはならない点に注意が必要であり大きな課題となっている。

（6）その他の課題

エネルギーシステム評価において、需要データやエネルギー利用状況の詳細データなどが必要となるが、それらは情報保護法との兼ね合いがあること、またそのデータが共有化されていないことが課題となる。また地域エネルギーのデータについては個々に調査しているものの統合化されていない課題となっている。

さらにこの研究領域はきわめて分野横断的であるだけでなく、地域の在り方と国際的な温暖化対策、ミクロレベルのエネルギー需要と国際エネルギーネットワークなど空間スケールの横断性、また地球温暖化と短期的な変動電源の関係性など時間スケールの温暖性など幅の広い視点が不可欠である。さらに制度の社会的需要なリスクの認知など、人文・社会科学的知見の必要性や情報技術の進展の影響などの分野横断性は特に必要である。しかしながら、このような分野横断的なシステム研究は一例えはかつての科研費の重点領域のようなテーマは現状では取り上げられず、全学術分野を結集した取り組みが不可欠であるにもかかわらず、横断的視点の必要な若手人材の確保が困難となっている点が課題である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	●エネルギーシステム評価は通常の技術開発とはやや性格が異なるが基礎研究に相当するのが現状調査、データ収集であるとするなら、大都市を中心に様々な調査がなされている。
	応用研究・開発	○	→	●地球温暖化統合評価モデル開発は、NIESのAIM、RITEのALPS-III、エネルギー総合工学研究所のGRAPEなどが継続して情報発信している。ただし、新規の参入がやや少ない点が懸念事項である。
米国	基礎研究	△	→	●温暖化研究は政治的影響を受けたが、大学の研究所、EPAなど政府機関の活動は継続しているように思われる。ただしエネルギーシステムの研究は維持されている。電源系統とEVの連携評価、EV自動運転化の社会実験など興味深いテーマも見られる。
	応用研究・開発	△	→	●温暖化研究は政治的影響を受けたが、大学の研究所、EPAなど政府機関の活動は継続しているように思われる。電力市場などの展開においては活動が継続している。
欧州	基礎研究	○	→	●輸送部門における内燃機関車からの離脱とEVの推進など、やや方向性にぶれが生じている印象があるが、カーシェアリングなど情報技術との連携は進められているので全体としては横ばいと思われる。 ●（ドイツ）PIK（ポツダム気候変動研究研究所）は温暖化対策を念頭に置いた研究を続けている。
	応用研究・開発	○	→	●欧州では歴史的に国境を越えたインフラの連携がなされている。特に電源系統では、再生可能エネルギーの導入と国境・事業者をまたぐ系統運用や新たな市場の誕生とともに、新しい管理・運用形態、リスクへの対応などの実証研究が進んでいる。 ●（英国）グリーンディールなど温暖化対応の低炭素エネルギー利用の社会的制度の導入などにもとない、独自性のある研究報告がある。ただし、これらは国情の違いによるところが大きく、直ちに研究の開発状況の高低を意味するとは言えない。 ●（ドイツ）再生可能エネルギーの大幅拡大によるシステム運用研究は継続している。 ●国際応用システム解析研究所（IIASA：オーストリア）は世界のエネルギーシステムと気候変動対策、環境影響評価の研究の中核的機関の一つであり、中長期的視点から技術イノベーションをはじめ注目すべき活動を継続している。

中国	基礎研究	○	↗	●学術誌への投稿論文は相変わらず多く、大学を中心に様々なエネルギーシステムの調査が報告されている。
	応用研究・開発	○	↗	●輸送部門では情報技術の進展を具体的に応用するとともに環境問題へも言及がある。ただ、大都市と地方では研究に濃淡がある印象がある。
韓国	基礎研究			
	応用研究・開発	○	↗	●以前はエネルギーシステム評価研究はさほど盛んではなく研究論文も限られていたが、この10年の間に国際学会での発表や論文数も増加している。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) IPCC-AR5-WG3, IPCC Fifth Assessment Report, WG-3 Full report, Figure 6.21, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf（2019年2月27日アクセス）。
- 2) S. Fujimori, T. Masui and Y. Matsuoka, “AIM/CGE [basic] manual” Discussion paper series No.2012-01, Center for Social and Environmental Systems Research, NIES, 2012.
- 3) 地球環境産業技術研究機構（RITE）, <https://www.rite.or.jp/system/research/new-earth/dne21-model-outline/>（2019年2月27日アクセス）。
- 4) A. Kurosawa, “Multigas Mitigation: An Economic Analysis Using GRAPE Model,” The Energy Journal 27, Special Issue: Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, 275-288, 2006
- 5) Shunsuke Mori,, Keisuke Miyaji and Kazuhisa Kamegai, "CCS, Nuclear Power and Biomass An Assessment of Option Triangle under Global Warming Mitigation Policy by an Integrated Assessment Model MARIA-23," Energy Procedia 37: 7474-7483, 2013
- 6) International Energy Agency, "A Group Strategy for Energy Research, Development and Demonstration," (Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 1980).
- 7) 川崎研一『応用一般均衡モデルの基礎と応用』（日本評論社, 1999）。
- 8) 杉山達彦, 小宮山涼一, 藤井康正「全国の電力基幹系統を考慮した最適電源構成モデルの開発と太陽光・風力発電大量導入に関する分析」『電気学会論文誌 B』136 巻 12 号 (2016)。
- 9) 高橋雅仁「再生可能エネルギー電源出力の不確実性を考慮した柔軟性資源計画モデルに関

- する研究」『電気学会電力技術研究会資料』PE-17: 109-112, 2017
- 10) Takaaki Furubayashi and Toshihiko Nakata, "Cost and CO2 Reduction of Biomass Co-firing Using Waste Wood Biomass in Tohoku Region, Japan," Journal of Cleaner Production 174: 1044-1053, 2018
 - 11) 杉山昌弘「技術で地球は変えられるか？－気候工学（ジオエンジニアリング）－」『計測と制御』56 (2017).
 - 12) Steven J. Davis et al., "Net-zero Emissions Energy Systems," Science 360, no. 6396: 2018
 - 13) 新エネルギー・産業技術総合開発機構『NEDO 再生可能エネルギー技術白書』1 版（総合エネルギー出版社 エネルギーフォーラム, 2010).
 - 14) 資源エネルギー庁「系統制約の緩和に向けた対応」,
http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/002_02_00.pdf
(2019 年 2 月 27 日アクセス) .
 - 15) Christoph F. Reinhart and Carlos Cerezo Davila, "Urban Building Energy Modeling – A Review of a Nascent Field," Building and Environment 97: 196-202, 2016

2.16 気候変動観測

（1）研究開発領域の定義

気候変動観測に関する科学、技術、研究開発を記述する。

気候変動観測データの生成、蓄積、処理、活用を扱う領域である。

ここでは、大気中の温室効果ガスや微粒子（エアロゾル、雲）、短寿命気候汚染物質（SLCPs）の濃度やその変化を把握するための衛星やその他のリモートセンシング、地上観測ネットワークなどの観測技術を対象とする。大気のみならず、気候変動に大きな影響を与える海洋や極地、森林、土地利用変化等の観測技術や各種プラットフォーム（地上、船舶、航空機等）も含む。得られた情報のデータ基盤や情報配信システムの整備についても対象とする。

（2）キーワード

■衛星による観測

気候変動 環境観測 衛星観測

■大気の観測

温室効果ガス、エアロゾル、雲、短寿命気候汚染物質（SLCPs）、リモートセンシング、地上観測ネットワーク、フラックス、必須気候変数（ECV）、地球温暖化緩和策

■海洋の観測

海洋温暖化（Global Ocean Warming）、海洋炭素循環（Ocean Carbon Cycle）、海洋酸性化（Ocean Acidification）、貧酸素化（Ocean Deoxygenation）、生物地球化学アルゴフロート（BGC Argo）、キャビティリングダウン分光法（Cavity Ring-Down Spectroscopy）、海洋状況把握（Maritime Domain Awareness : MDA）

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■衛星による観測

近年、異常気象が増加傾向にある¹⁾。異常気象の要因として、中緯度偏西風の蛇行（ブロッキング）、温暖化に伴う海面水温の上昇による台風への水蒸気供給量の増大など全球的な気候変動による影響の大きさが指摘されている²⁾。

気候変動あるいはそれに伴う異常気象について、長期的な地球の自然気候変動があるものの、それを助長する形で人間活動による、いわゆる人為起源による影響が産業革命以降有意に大きくなっているという指摘がなされている³⁾。地球の気候の状態を調べ、理解し、診断することが長期的な気候変動の予測及び人為起源の影響を抑制する政策を実施する上で、極めて重要である。局所的な気象状況も遠地の状況と密接に結びついている（テレコネクション）ので、地球の気候は全表面の7割を占める海洋および残りの陸地及び極域、そして大気に分け、それぞれ全球で評価する必要がある。しかし、地球の全地表面に対して、人間が現場で直接計測できる領域や時期は極めて限られており、全球を評価するために必要な均一で広域な観測を地表面上で行うことは困難である。人工衛星観測はその特徴として同じ計測器により全球の地表面およびその近傍の表層を均質かつ周期的・継続的に計測することを可能とした唯一手段であり、全球の気候を観測的に評価するベースデータ取得の観点から極めて重要な観測手法と言える。

■大気の観測

炭素等の循環研究では数値シミュレーションが重要な役割を担っているが、その検証と不確実性の軽減のためには観測が必須である。2015年に採択されたパリ協定による地球の平均気温の上昇を2℃より十分下方に抑える長期的な目標に向けた緩和サイクルの世界的な進捗状況を定期的に確認し、取組を強化していく「グローバル・ストックテイク」が実装されるに際し、人為起源排出の管理や森林減少・劣化の抑制策（REDD+）の有効性を観測から評価する視点が重要となっている。近年は、二酸化炭素よりも寿命が短い温暖化に寄与するメタン、対流圏オゾン、ブラックカーボン*等の短寿命気候汚染物質（SLCPs）が、それらの対策により即効的な温暖化緩和効果が期待されることから、注目を集めている。エアロゾルや雲にも人間活動の影響が及んでいるが、自然変動分も含め、それらの相互作用やプロセス、気候応答に関する理解度は不十分である。

*注）ブラックカーボンとは大気中に含まれる微粒子であり、大気の加熱効果を持つ。炭素を主成分とする燃料が燃焼した際に発生する。

温室効果ガス、エアロゾルや雲、SLCPsを対象とし、その収支にかかわる陸上生態系や海域を含め、特色を持った衛星観測や地上/船上/航空機観測を実施すること、数値モデルを牽引できる観測情報を提供し、循環や収支の理解を高めるだけでなく、気候および地球システムへの影響とフィードバック機構についても理解を促進するような鍵となる知見を提供することが求められている。

■海洋の観測

産業革命以来、温暖化によって地球表層に蓄えられた 3×10^{23} ジュールの熱量の90%以上は、地球表面のおよそ70%を占め、大気のおよそ250倍の質量と4倍の比熱を有する水で満たされた海洋に蓄えられている⁴⁾。海洋の温暖化は、その三次元的な循環を変化させ、大気との熱や水蒸気の交換パターンを変化させることで気候変化を引き起こす要因となるほか、温暖化による海洋内部への酸素供給の減少と合わせて海洋生態系の変化も引き起こしている。また、化石燃料消費によって人為的に排出されたCO₂のおよそ30%は、物理化学的に海洋に吸収されている⁵⁾。海洋はCO₂を吸収することで、その大気中の濃度増加を抑制しているが、これは海水に炭酸を添加していることを意味しており、弱アルカリ性の海水は、産業革命以来、中性方向へと「酸性化」している。海洋の酸性化もまた、海洋の生態系に深刻な影響を広範かつ長期に及ぼすと危惧されることから、「もうひとつの二酸化炭素問題」と呼ばれている⁶⁾。

こうした海洋の物理的・化学的な変化の実態や原因を、それらの気象・気候や生態系への影響を含めて理解し、気候変化の予測や防災のほか、海洋の持続的な利用に役立ててゆくことは、海洋からさまざまな恩恵を受けている世界の多くの国々にとって喫緊の課題である。

[研究開発の動向]

■衛星による観測

現業気象関係の国際枠組みはCoordination Group for Meteorological Satellites (CGMS)によって維持されている。一方、科学的あるいは気候診断の地球観測については、国際的な調整枠組みとしてCommittee on Earth Observation Satellites (CEOS)において、各国の観測衛星開発計画の情報共有がなされており、それを軸として、温室効果ガス、降水、陸域などの目的に応じVirtual Constellationが国際協力による相互データ交換・評価の仕組み

が構築されている。観測対象となる気候システムに必要な物理観測パラメータは国連 World Meteorological Organization (WMO) 下に置かれた Global Climate Observation System (GCOS) により、Essential Climate Variables (ECVs) としてリスト化されており、それを CEOS に答申することにより、観測パラメータの整理がなされる⁷⁾。特に長期観測が重要なパラメータについては Climate Data Records (CDR) として識別される⁸⁾。こうした活動においては欧州が観測衛星の計画作成・調整などで積極的に利用し、その推進を牽引している。

国際協調システムを含む衛星計画を前提とし、科学的な研究ターゲット（地球温暖化、バイオマス評価、エアロゾル、極端気象、大気汚染など）については IPCC（気候変動に関する政府間パネル）報告書を起点とした議論が行われている。

①地球温暖化

地球温暖化については、IPCC AR5（第5次評価報告書）において人間活動による温暖化への影響が確定的という報告がなされており、その主要因となる二酸化炭素排出を含む炭素循環を定量的に評価することを目標とし、大気中の CO₂ 量の観測の高精度化を日本の GOSAT シリーズ（環境省/国環研/JAXA）が担っている。GOSAT（Greenhouse Gases Observing Satellite、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」）は、2009年に我が国が打ち上げた。GOSAT は熱赤外（TIR）域だけでなく短波赤外（SWIR）域のセンサを同時に搭載する世界唯一の衛星であり、対流圏全層に感度を有する形で気候変動の主要因である二酸化炭素とメタンの濃度を観測し、そのデータを利用して大陸規模での二酸化炭素等の排出・吸収強度を推定するなど、炭素循環研究等に活用されている。また、都市部などからの二酸化炭素やメタンの排出インベントリの高精度化研究にも活用されている。GOSAT-2 衛星の打ち上げが 2018 年度に予定されている。GOSAT-2 は GOSAT に比べ、センサ感度の向上やインテリジェントポインティング（晴天域を能動的に選定して観測効率を高める）を採用するなど、データ数と測定精度が向上する。米国は 2014 年に OCO-2 衛星（Orbital Carbon Observatory、軌道上炭素観測衛星）を打ち上げた。その複製機である OCO-3 センサは 2018 年以降に国際宇宙ステーションに搭載される予定である。中国は OCO-2 衛星と類似した TanSat 衛星を 2016 年末に打ち上げた。欧州は、大都市などをターゲットにした高空間分解能を有する MicroCarb 衛星を 2021 年に打ち上げる予定である。

②森林バイオマス量

CO₂ の主な吸収源となる陸域での森林バイオマス量の評価については、ALOS シリーズ（陸域観測技術衛星「だいち」）、GCOM-C（Global Change Observation Mission – Climate、気候変動観測衛星「しきさい」）、宇宙ステーション搭載植生ライダー（JAXA【日本の宇宙航空研究開発機構】）などが担う。気候変動に関わるエアロゾル・雲の観測として、我が国は 2017 年末に GCOM-C 衛星を打ち上げ、放射も含めた気候変動に関わる様々な因子の観測を行っている。GCOM-C 衛星に搭載されている多波長光学放射計（SGLI: Second Generation Global Imager）センサの技術的な新規性・優位性は、近紫外チャンネル搭載、高空間分解能観測、偏光観測にある。

③エアロゾル・雲

エアロゾル・雲については、GCOM-C（JAXA）、EarthCARE（Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer、ESA【欧州宇宙機関】/JAXA/NICT【情報通信研究機構】）が担う。

地球の放射収支を大きく左右するエアロゾル・雲～降水のプロセスの正確な理解や、時間的変化の早いこれらの観測的把握が、放射収支からの評価上、大きく影響している。世界最先端の観測能力を有する可視赤外放射計（AHI: Advanced Himawari Imager）を搭載した静止気象衛星ひまわり 8 号が 2014 年 10 月に打ち上げられ、2015 年 7 月より定常運用を開始した。ひまわり 9 号は 2016 年 11 月に打ち上げられ、2017 年 3 月より待機運用を行っている。ひまわり 8・9 号は、これまでの静止気象衛星に比べて時間・空間解像度ともに 2 倍向上し、高時間・高空間解像度のエアロゾル観測が可能である。

④極端現象

極端気象については、GCOM-C, GCOM-W（JAXA）や GPM コア衛星（全球降水観測計画主衛星、NASA/JAXA/NICT）が担う。極端気象は、温暖化により温まった海面水温と海面から放出される大気への水蒸気量の関連性が指摘されており、降水状況の観測と共に水循環について更に観測を詳細化する必要がある。加えて、これまで技術的に困難であった大気の風速ベクトルを計測するライダーや鉛直風を計測する雲レーダが登場し、海上風ベクトルや気象衛星の雲の変化から算出された Cloud Moving Vector による大気力学的観測に対して大幅な発展が強く期待される。

⑤大気汚染

大気汚染については、ADEOS/ADEOS-2（地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」）に搭載した ILAS シリーズ（国環研）に端を発し、対流圏上部より上方を中心とした大気汚染物質の赤外掩蔽観測がなされてきた。さらに宇宙ステーション搭載の SMILES（超伝導サブミリ波リム放射サウンダ）によってサブミリ波掩蔽観測が発展し、宇宙からの大気汚染物質観測の計画として APOLLO（Air Pollution Observation）の検討などが続いている。

⑥プラットフォーム

衛星観測データはこれまで主には衛星ミッション※ごとに整備されてきたものであるが、近年計算機技術の発達とともに、データを統合的に利用するためのインフラの整備が進められている。 ※注）衛星ミッションとは、衛星を使って達成するある目的を指す。

一カ所にデータを集積し、解析できるプラットフォームとして DIAS（データ統合・解析システム、MEXT）、Tellus（政府衛星データのオープン＆フリー化及びデータ利用環境整備事業、METI）などの国主導のものや、民間企業によるプラットフォームやクラウドサービスが提供されている。また、衛星データを一元的に提供するためのデータ提供サイトが G-PORTAL（地球観測衛星データ提供システム、JAXA）をはじめとして整備・運用されている。時間空間的に蓄積された衛星データは地理空間情報、地上観測データとあわせてビックデータとして、機械学習、ディープラーニングなどの IT 技術により情報としてサービスされる方向にある。

■大気の観測

①温室効果ガス

温室効果ガスに関連する地上観測ネットワークとしては全量炭素カラム観測ネットワーク（TCCON）の重要性の認知度が高まっている。GOSAT 等の衛星データの検証を可能とするなど、衛星観測からの濃度導出の高精度化に結びついている。高精度の地表付近濃度計測では、キャビティリングダウン法（CRD 法）が実用化され、世界的に地上ステーショ

ンに導入されつつあり、物質収支のプロセス理解に資する同位体計測にも適用される。大気中温室効果ガス濃度を大きく左右する陸域の炭素循環については、渦相関法によるタワー観測ネットワークが展開されており、全球ネットワークとして FLUXNET、そのサブ組織としてアジア域では AsiaFlux が展開されている。これらの観測により大気―陸域間の熱・水・二酸化炭素等のフラックスが連続観測され、データ公開が進められている。FLUXNET については近年大幅なデータのアップデートがあり FLUXNET2015⁹⁾ としてユーザが使いやすい形でデータが提供されている。さらに、これら地上観測ネットワークデータと衛星観測データなどに対して機械学習を行うことにより、地上観測ネットワークデータを広域化した全球プロダクトも構築され、コミュニティが利用できる。

②エアロゾル・雲

雲レーダによる雲の鉛直内部構造の観測は、気候変動に伴う放射収支の変化の評価に欠かせない方法である中、我が国は、2006 年に米国 NASA/JPL によって打ち上げられた雲レーダ搭載の CloudSat を持つ。現在、CloudSat よりも感度が 10 倍高く、世界で初めて雲内部の鉛直流の情報を衛星から取得するドップラー速度の観測が可能な雲プロファイリングレーダ（CPR: Cloud Profiling Radar）を開発している。この CPR レーダを搭載する雲エアロゾル放射ミッション（EarthCARE）による観測が 2021 年以降に予定されている。なお、強い関連性を有す降水や水蒸気の衛星観測も推進することにより、雲・降水に関わる気候変動研究の相乗効果が期待される¹⁰⁾。

エアロゾルの国際地上観測ネットワークについては、米国航空宇宙局（NASA）主導の AERONET や、日本が主導している SKYNET（主に千葉大学）、AD-NET（主に国立環境研究所）がそれぞれ、データ取得・準リアルタイム解析・データ公開を定常的に実施し、誰もがデータを使えるよう整備している。月を光源にした夜間観測、紫外可視波長帯による光吸収性エアロゾル（ブラックカーボン、ブラウンカーボンを含む）観測、雲光学特性観測、エアロゾル組成情報の高度分布導出について、技術的な発展が見られる。なお、我が国の SKYNET および AD-NET については、世界気象機関（WMO）の GAW（Global Atmosphere Watch）において、contributing network として位置づけられている。また、SKYNET の主力機材であるスカイラジオメータの多地点観測が気象庁でも開始された。地上現場大気測定技術としては、エアロゾル組成の自動連続計測のための国産装置も開発されている。ブラックカーボンの高精度計測装置や、主要無機イオン成分等の湿式計測、微量金属などの元素分析装置などがある。近年、ブラックカーボンを含むエアロゾルに関する計測ガイドライン¹¹⁾ が更新され、計測の調和化が推奨されている。エアロゾルが雲核となることに起因する気候への間接効果の不確実性は依然として大きい、その軽減を目指して雲凝結核（CCN）¹²⁾ や氷晶核¹³⁾ の観測とデータベース化が進んでいる。また、それらと化学組成や起源との対応付け（有機エアロゾルのエイジングや、未解明度の高い生物起源バイオエアロゾルなど）についても注目されている。雲生成のモデル化には質量濃度よりむしろ個数濃度の情報が不可欠であり、1 nm のサイズの極小粒子から個数濃度の計測ができる装置も開発されている。

③ SLCPs（短寿命気候汚染物質）

ブラックカーボンの質量濃度を衛星から直接測定することは難しいが、光吸収性エアロゾルの光学的な計測や、それを元にした濃度推定の実施例がある。対流圏オゾンの衛星

観測では、複数の波長帯での計測を組み合わせることなどにより、成層圏オゾンとの区別だけでなく、対流圏内の高度別計測も実現しつつある。オゾンの前駆物質として重要な二酸化窒素や揮発性有機化合物、一酸化炭素の衛星観測については、欧州では MetOp 衛星搭載の IASI、GOME-2 センサによるシリーズ計測が、10 km 弱の水平解像度を持つ Sentinel-5（大気混合と大気質を監視する）等へ継続されていく。地上からの分光リモートセンシングによる校正検証も重要である。二酸化窒素などの大気汚染物質に対しては、紫外可視波長帯の太陽直達光や太陽散乱光を利用したポータブルな受動型リモートセンシング装置（NASA/Pandora、MAX-DOAS）による高度分布計測手法が開発・改良されており、観測網として発展している。これらを衛星観測と統合的に用いることで、より正確なカラム濃度や高度分布を導出することにもつながる。対流圏オゾンアセスメント（TOAR）¹⁴⁾ では、オゾンや前駆物質の地上観測やゾンデ観測を全球規模で網羅的に収集し、気候影響等に関する評価がなされる。

④データ基盤・情報配信システム

大気成分の地上観測データは、WMO/GAW のデータを中心に、気象庁の WDCGG（World Data Centre for Greenhouse Gases）や、後発の WDCA（WDC for Aerosols）、WDCRG（WDC for Reactive Gases）に収録されているが、エアロゾル・SLCPs の観測データ発信の統一化は途上であり、プロジェクトや機関ごとのウェブ発信も多い。ファイルサイズなどの観点から衛星データも各機関から発信されることが多い。

■海洋の観測

海洋観測の分野では、海洋酸性化の脅威への認識の高まりや、国際 Argo 計画による自動昇降型中層フロート（Argo フロート）の展開による海洋の物理変動観測の飛躍的な発達が挙げられる¹⁵⁾。

海洋酸性化の進行が海洋生態系や社会への明確な脅威として研究者や社会に認識されはじめたのは、海洋酸性化がサンゴ礁など炭酸カルシウム骨格を持つ生物に近未来的に悪影響を及ぼすと予測した論文¹⁶⁾ が発表されたことがきっかけである。以後、同様の予測が多くの生物種を対象に出され、国連持続可能な開発会議（Rio+20）などを通じて、国連レベルでもその危機感が急速に広まった。それによって海洋の炭素循環や人為起源 CO₂ の収支評価の目的で実施されていた海洋の CO₂ 研究に、新しく海洋酸性化の状況把握と予測の目的が加わった。1990 年代には海洋の表層や内部の CO₂ 観測も増え、2000 年代には、そのデータベース SOCAT¹⁷⁾ や GLODAP¹⁸⁾ の作成・更新作業も国際協力が進んでおり、時系列観測点等での観測結果と合わせて、海洋への CO₂ 吸収速度の 10 年規模の変動や海洋酸性化の進行速度の実態把握が進みつつあり、地球システムモデルによる将来予測も進められている¹⁹⁾。

漂流しながら潜航・浮上を繰り返すことで水温や塩分の鉛直構造を自動で観測できる Argo フロートの開発と、国際 Argo 計画によるその全海洋規模展開によって、海洋の物理的変動の観測は飛躍的に発展した。Argo フロートは、3000 台を常時展開する目的を 2007 年に達成し、現在はおおよそ 3900 台が展開されている。各フロートは 10 日に 1 回ほどの頻度で、水温・塩分の鉛直分布を水深 2000m まで測定し、ARGOS 衛星通信や、より大容量のイリジウム衛星電話を利用して、準リアルタイムでデータを陸上に送信している。送信されたデータは、取得後 24 時間以内に全球気象通信網（GTS）により、世界中の気象機関などに配布されるほか、6 ヶ月以内に高度な品質管理を施されて、インターネット上で提供される。これによって水温・塩

分の鉛直分布のデータは飛躍的に増加し、海況監視や気象の数値予報のほか、海洋貯熱量の変化や塩分変化に基づく地球規模の水循環の変化の実態解明に大きく貢献している⁴⁾。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

■衛星による観測

①次世代静止気象衛星

静止気象衛星が、GOES-R（米国気象衛星、NASA）およびひまわり 8、9 号機が利用できるようになり、これまでの 1km 分解能から倍の 500m 分解能への高精度化および撮像間隔を 2 分半まで縮めたことによる動画観測が実現した。CGMS では今後イメージャ搭載の他に、赤外サウンダーおよび雷センサの搭載を推奨している。

②地上処理：IT 技術（プラットフォーム、大規模データアーカイブ、機械学習・ビッグデータ解析）

膨大な衛星観測データを蓄積し、相互に利用するためにクラウドベースあるいは大型計算機システムを用いたプラットフォームが国内外で整備されている。国内においても DIAS、Tellus、NICT や産業総合研究所の大規模アーカイバなどが存在している。また地球観測衛星データ、地上データなどのビッグデータから社会情報を抽出する紐付ける機械学習、ディープラーニングなどの IT 技術開発については、AIST や民間などにより急速に進みつつある。

③地上処理：衛星間データフュージョン

関連する複数衛星の観測データ結果から統合的に全球状況を把握する手法の研究が行われている。GPM（全球降水観測計画）を元とした GSMaP（衛星全球降水マップ）が代表的であり、また EarthCARE に搭載される複数種のセンサの統合解析、前述のバイオマス評価における L 帯 SAR（合成開口レーダー）/ライダーの統合処理などの活動がある。また、LANDSAT（地球観測衛星、NASA）と MODIS（可視・赤外域の放射計）のデータの統合処理による高時間・空間分解能の NDVI（正規化差植生指数）の作成（STARFM、時空間適応反射率融合モデル）や超高解像度化などの活動がある。

④陸域：植生・生態系

疎な植生や雲・雨などを透過して地表の情報が得られる L 帯の周波数を利用した SAR は走査幅を増しつつ全球の森林領域の識別とバイオマスの評価を行う。100t/ha 以上の高密度森林領域での低感度性については、ライダーによる観測評価による補間をすることで全球バイオマスの測定を実現する。L 帯 SAR は日本で 1992 年に打ち上げた JERS-1（ふよう 1 号、地球資源衛星）からの長期の観測データの蓄積があり、現在も ALOS-2 によりその観測を継続するとともに、1.5 ヶ月ごとに、熱帯域の森林変化の情報の観測および提供を継続している（JAXA/JICA）。2020 年代には、ALOS-2 の後継であり観測幅を広げた ALOS-4 や、米国で NISAR 衛星（S 帯および L 帯の合成開口レーダ衛星）などの開発が行われている。また、ライダーでは特に熱帯雨林の評価を行う米国の GEDI（Global Entrepreneurship Development Institute）および、日本の MOLI（Multi-footprint Observation Lidar and Imager）があげられる。森林評価は炭素循環の吸収源となる重要計測であり、大気中二酸化炭素計測と並行した観測が重要である。加えて、林野火災によ

る二酸化炭素排出の把握も重要であり、熱赤外などによる林野火災の発生域の把握、SARなどによる消失面積の把握、および HAZE（微粒子により視界が悪くなる現象）の観測も行われている。

⑤陸域：土地利用変化

これまで土地被覆・土地利用の把握は、年単位の変動をグローバルで扱うことは、分類の精度や計算能力の観点から困難であった。しかし、近年になり、Google Earth Engine のようなクラウドコンピューティング技術の発展により、土地利用変化、土地被覆変化を年々の単位で追跡することが可能になってきた。Google Earth Engine では、様々な衛星データ、気象データが収集されており、大量データの解析が行える仕組みを提供する。特に個人研究者レベルでは扱うことができない大量のデータを所有しており、簡単なスクリプトを書くことで様々な解析ができるようになっている。毎年更新される LANDSAT データ（分解能約 30 m）を用いたグローバルな森林伐採・植林年の把握²⁰⁾は、Google Earth Engine を利用した成果である。

⑥極域

極域は、特に温暖化の感度が強いことから、極域の海氷状況については、時間的な面積的把握が SSM/I（DMSP 搭載マイクロ波撮像装置）、AMSR-E（改良型高性能マイクロ波放射計）などから始まり継続的にマイクロ波放射計である GCOM-W により続けられている。それに加えて、SAR や MODIS、VIIRS（マルチチャンネルイメージャ・放射計）、GCOM-C による観測も続けられている。また氷床の厚さの変化を観測するため、ライダーによる氷床観測衛星の後継機が米国により打ち上げられた（ICESAT-2）。

■大気の観測

①東アジアの大気汚染の改善傾向

近年特筆すべきは、衛星観測データなどの解析から、最近是中国を含む東アジア域の大気汚染（エアロゾル、窒素酸化物、硫黄酸化物）の大気汚染レベルの改善傾向の指摘がある^{21),22)}。我が国のエアロゾルや窒素酸化物濃度の減少トレンドも報告されている。一方、対流圏オゾンの明確な減少は観測されておらず、関連の大気化学研究の今後の進展が望まれる。

②ローコスト小型センサによる計測自由度の向上と社会サービス

従来、大気汚染ガス（CO, NO_x, O₃, SO₂）や粒子状物質、温室効果ガス（二酸化炭素、メタン）の計測では、地上局に据え付けられた比較的高額な機器が必要とされてきたが、技術の進歩により、ローコスト小型センサが市場に供給されるようになり、2015 年ごろから爆発的に利用が進み始めている。ロット間の校正ばらつきや精度・選択性の不足、長期安定性などに依然として大きな課題はあるものの、多点稠密観測やドローン（UAV: Unmanned aerial vehicle）搭載などによる上空での計測なども可能となることから、発生源の識別やその近傍での計測など、目的によっては十分に気候変動理解のための観測にも資する状況となっている。北部カリフォルニアでの BEACO₂N やチューリッヒ O₃&NO₂ ネットワーク、香港での実証プロジェクトなどが進んでいる。WMO も現時点でのベストプラクティスや将来の応用に関するレコメンデーションを文書²³⁾に取りまとめている。

③エアロゾル・雲の観測

雲やエアロゾルの衛星観測は、また、三次元情報や粒径情報をより直接的に得られるレーザレーダ（LIDAR）の利用の検討が進められている。2015 年には米国航空宇宙局（NASA）

が開発した CATS（Cloud-Aerosol Transport System）が国際宇宙ステーション（ISS）に取付けられた。同機器は 3 波長（355、532、1064 nm）のライダーを搭載している。さらに、現在、日本と欧州宇宙機関（ESA）で EarthCARE 衛星を、2021 年の打ち上げを目指して共同開発中である。同衛星には前述の CPR レーダに加えて大気ライダー（ATLID: Atmospheric Lidar、レーザーの波長は 355 nm）が搭載される。

■海洋の観測

- ①大気中の CO₂ 濃度の測定には、1957 年に C.D. キーリングらがハワイ・マウナロアや南極点で観測を開始して以来、光学フィルターを使って特定波長領域の赤外線強度を測定する非分散型赤外分析計（NDIR）が使用されてきた。これに対して、近年、レーザーと高反射ミラーを内蔵したキャビティリングダウン分光（CRDS）装置が市販され、その利用が広がっている。CRDS は、CO₂ 濃度に対する出力信号の線形性が高く、安定性も優れている。そのため、正確な測定に肝要な濃度検定のための標準空気の使用本数や測定頻度を減らし、標準空気の管理等にかかる手間を大幅に減らすことができ、観測の効率化と観測ネットワークの発達にも役立っている。
- ②メタン（CH₄）と一酸化二窒素（N₂O）の濃度測定には、ガスクロマトグラフの使用が一般的だが、これらも CRDS による連続観測が可能になった。CRDS の利用は、温室効果ガスの大気・海洋間の交換量の評価に不可欠な海洋表層水との平衡空気中の温室効果ガス測定にも応用され始めている。これらの温室効果ガスは濃度が特に低いので、気液平衡の達成に要する時間が長いという原理的な問題はあるが、ガスクロマトグラフでは不可能な洋上の航走連続観測による高空間解像度の測定によって、海洋からの CH₄ 放出のホットスポットの検出などが可能になっている。
- ③Argo フロートについては、2000m 以深の深海観測用の“Deep Argo”や、乱流計を搭載したフロートの開発や展開も始まっている。これらは、それぞれ深海の貯熱量変化の評価向上や、海洋循環モデルの向上に資する乱流の実態評価に大きく貢献することが期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■衛星による観測

【国内】

① GOSAT3 (TANSO) +AMSR3

GOSAT-3 は GOSAT, GOSAT-2 に引き続き観測性能を発展させ、排出源を都市別に観測できる最終的な性能を達成する。その上で、AMSR2 後継であり、高周波数を追加した AMSR3 が相乗りする予定である。AMSR（高性能マイクロ波放射計）シリーズは特に気象分野において世界的なデファクトスタンダードのマイクロ波観測センサとなっており、更に長期の継続観測を実現する。

② EarthCARE

EarthCARE は能動 / 受動の光学 / 電波センサを組み合わせた観測衛星であり、世界初のドップラーレーダーによる鉛直風観測を行う。

③ DPR 後継（GPM 後継）

全球における降水状況の準リアルタイム観測予測システムの中心的衛星である GPM の後継について NASA との協力も含めて、今後の降水ミッションについて検討中。

④ SGLI 後継（GCOM-C/GOSAT シリーズ CAI 後継含）

多方向観測、偏光観測、近紫外バンドを用い、これまで観測困難だった陸上エアロゾルを高精度に観測する性能を有した SGLI の後継について検討中。

⑤ ALOS-5, 6（次期光学・L 帯 SAR 衛星）

大規模災害の監視、被害状況の観測を国際災害チャータ枠組みにより実現している ALOS-3,4 の後継ミッションを検討中。特に ALOS-4 は JERS-1 から続く L 帯 SAR ミッションを継続し、長期データやグローバルデータを持つ日本の特徴となるセンサである。

⑥ ISS 搭載 MOLI

能動光学センサ（ライダー）についてライダーの長寿命化技術の実用性を実証し、SAR との複合利用を証明するためのミッションを準備中。本ミッションで得られる基礎的技術を元に更にドップラーライダー（風計測）、LADAR（地表面 3 次元イメージング）などの応用ライダーへの発展が期待されている。

⑦ ドップラーライダー

民間企業からの要望を基に航空路管理、また大気力学的観測を実現するシステムを担うべく国際協力を前提に検討中。

【海外】

① GeoCarb（NASA）

静止軌道の商用通信衛星への同乗により、特定地域の常時観測性を獲得し、日変化も観測可能となる、OCO-2 の発展形（なお、OCO-3 は ISS に搭載される予定）である。

② MERLIN（DLR/CNES）

将来応用ライダーの一つとして、差分吸収ライダーの原理により、CH₄ の精密局所観測を実現するライダー衛星。将来的な CO₂ 観測への発展が期待される。

③ ADM/Aelous（ESA）

355nm 紫外レーザーを採用することでエアロゾルの少ない対流圏上部まで風向風速観測を可能とした世界初のドップラーライダー。

④ ICESAT-2（NASA）

極域の氷床厚と陸域の森林などを高精度に測定するレーザー高度計。1 号機に対して長寿命化の設計改良が加えられ、初の実用的なレーザー高度計となる予定。

⑤ RainCube（NASA）

6U サイズの Cubesat 衛星バスでは、比較的簡単な受動センサのみが搭載可能であったが、初めて能動センサである Ka 帯降水レーダーを搭載した技術試験小型衛星。

⑥ NISAR（NASA/ISRO）：NASA が ISRO と共同して開発した大型展開アンテナをもち L 帯および S 帯の SAR 観測を行う衛星。日本以外での本格的な L 帯 SAR 衛星としては初めてであり、多重バンドを搭載する SAR としても初めてとなる。

⑦ SWOT（NASA/CNES）

Ka SAR 2 機と電波高度計を搭載し、これまで 1 次元観測しかできなかった海面高度を 2 次元的に（面的）に計測する Topex/POSEIDON の後継衛星。

■大気の観測

① 温室効果ガスと大気質変動の統合的解析とデータ同化

従来独立に進められてきた温室効果ガスと大気質の研究を統合することにより、両者に共

通となる発生源（化石燃料燃焼など）の特定や、大気中輸送経路の解析、メタン寿命支配因子であり大気質の影響を強く受ける OH ラジカル濃度の評価に関する相乗効果が得られる。とくに、今後計画されている衛星観測を念頭に、両者の衛星観測を同時に大気化学輸送モデルへ取り入れるデータ同化に関して、構想を実装へ移す計画が、各国の宇宙関連機関が参加する地球観測衛星委員会 CEOS の AC-VC 会合（Atmospheric Composition Virtual Constellation）などで活発に議論されている。

②航空機観測関連

航空機観測では、米国の専用機を用いた、南極～北極にわたる高度プロファイル計測（HIPPO, ACOM 等）が長寿命気体・エアロゾル・SLCPs について総合的に実施された。また、欧米の専用機によるアジア観測（2016 年 KORUS-AQ, 2018 年 EMeRGe-Asia）も実施された。日本は観測専用機を保有しておらず、欧米や中韓にも遅れをとっている。商用航空機を利用した広域観測では、欧州の IAGOS プロジェクト、日本が主導する CONTRAIL プロジェクトが実施されている。

③北極観測研究の重点化

温暖化の進行が著しい北極域の気候環境変動プロセスやフィードバックメカニズムを明らかにするための観測研究が世界的に広く実施されている。日本も ArCS 北極域研究推進プロジェクト（2015-2019 年度）などにおいて、陸上・海洋生態系と合わせて、炭素やブラックカーボン循環の理解を進めるための現場観測などを推進している。国際的には、R/V Polarstern を海氷域に閉ざして実施する通年観測計画 MOSAiC（2019-2020）や IASC/IGAC の合同アクティビティ air Pollution in the Arctic: Climate Environment and Societies (PACES) での IMPAACT (Investigation of Multiscale Processes Affecting Atmospheric Chemical Transport) における航空機・地上・船上連携観測計画（2021）へ向けた動きも進んでいる。

④欧州の Copernicus 計画（旧 GMES 計画）

欧州委員会が推進している地球観測計画である Copernicus 計画は、衛星・航空機・船舶・地上局等の様々なソースからの地球観測データを収集し、環境および安全保障に係る各種サービスを通してユーザに信頼出来る最新の情報を提供することを目的とする。特にその Space Component では欧州宇宙機関（ESA）と EUMETSAT（European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites）を通して様々な地球観測を行う Sentinel 1～6 という 6 種類の衛星またはセンサが運用される（1A、1B、2A、3A は打ち上げ済み）。加えて Contributing missions として ESA、EUMETSAT、これらの機関の加盟国、その他の欧州諸国の衛星や国際サードパーティミッション等とも連携し、それらのデータを Copernicus の枠組みで利用可能とする。

⑤短寿命気候汚染物質（SLCPs）削減のための気候と大気浄化の国際パートナーシップ（CCAC: Climate and Clean Air Coalition to Reduce Short-Lived Climate Pollutants）

2012 年に発足した国際パートナーシップである CCAC では、大気中での化学的な寿命が数日から数十年程度と比較的短く、気候を温暖化する作用を持つメタン・対流圏オゾン・ブラックカーボン等の SLCPs の削減により、温暖化と大気汚染の対策を同時に進めることを狙っている。SLCPs の削減は身近な健康影響の低減にも結びつくという点で、新興国などでのインセンティブが期待される。

■海洋の観測

① SOCCOM (Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modelling、南大洋の炭素と気候に関する観測とモデリング)

観測船による多項目・高精度の観測とともに、生物地球化学変数や生物光学変数を測定するセンサーを搭載した BGC (Biogeochemical) Argo フロート 100 機以上を南大洋に展開してデータを収集し、数値モデリングと合わせて、炭素循環や気候に対する南大洋の役わりを解明することを目的とした National Science Foundation の資金によるアメリカの研究プロジェクト。今後の BGC Argo の国際的な普及・活用を実践面からも科学面からも方向づけてゆくと考えられる。

② VOICE (Variability in the oxycline and its impacts on the ecosystem、酸素躍層の変化とその生態系への影響)

海洋温暖化による海洋内部への酸素供給の減少によって引き起こされる貧酸素化の実態把握とその生態系への影響評価を目的に、関連する海洋物理・生物地球化学・生態系の調査を学際的かつ持続的に実施するため、世界気象機関やユネスコ政府間海洋学委員会などが支援する全球海洋観測システム (Global Ocean Observing System) が推進しているプロジェクト。現在は、観測能力の評価や、実態を把握するために必要なデータプロダクトの状況を調査している段階にある。

③ SOCAT (Surface Ocean Carbon Atlas) と GLODAP (Global Ocean Data Analysis Project)

国際的な海洋研究の学術団体 Scientific Committee on Oceanic Research とユネスコ政府間海洋学委員会が支援する International Ocean Carbon Coordination Project (IOCCP) の支援により、海洋表層の CO₂ 観測を行っている研究者や、海洋内部の炭酸物質とその関連物質などの観測を行っている研究者のコミュニティが、それぞれ国際協力で行っている観測データ統合と品質管理されたデータプロダクトの作成・更新活動及びそのデータプロダクト。大気・海洋間の CO₂ 交換速度の変化、海洋内部の人為起源 CO₂ の蓄積量の変化、海洋酸性化の動向など、海洋の CO₂ に関するさまざまな広域評価や、数値モデリングの検証などに活用されている。西太平洋域では日本の研究者が中心的な役割を担っている。

(5) 科学技術的課題

■衛星による観測

① 静止軌道・あるいは小型衛星多数フォーメーションを利用した陸域観測常時化

これまで、地球観測衛星においては、気象衛星に代表される静止衛星観測において、大気を中心とした粗解像での常時観測が行われてきた。一方、現在より詳細な解像力を必要とする陸域については MODIS センサなどの極軌道衛星データが広く用いられているが、特に熱帯雨林地域では雲の発生頻度が高く植生のモニタリングが非常に困難である。静止衛星は高い時間分解能をもち、これらを避けて熱帯雨林などの地域のモニタリングには有効に利用できる可能性がある。今後は、気象衛星以外に高分解能観測を実現する新たな静止衛星や多数小型衛星システムが求められる。この実現には、静止衛星による実現では超大型化では分割式大型望遠鏡技術や大型展開アンテナ技術等が課題であり、多数小型衛星フォーメーションによるシステムでは、超小型軽量化が求められ Ka 帯など高周波採用によるアンテナ小型化や送信デバイスの固体化、及び群衛星運用技術の確立が課題である。

②能動光学を用いた観測の高度化

受動光学（光学センサ）、受動電波（マイクロ波放射計）、能動電波（SAR、降水・雲レーダ）などについて実用的な観測衛星が開発されてきたが、今後は、受動光学や能動電波では不可能な高分解能のフットプリント研究や高精度な測距性能を利用した能動光学を用いた観測の高度化が求められる。この実現にはスキャニングなどによる高精度 3D イメージングやドップラー観測による地球大気運動観測技術の確立が課題である。

③表層下観測などを実現する新しい手法の研究

リモートセンシングは、基本的には表面から発せられる、あるいは反射される電磁波の計測により表層の情報を取るシステムとして発展してきた。今後は地中や水中などへ観測範囲を拡大する研究が期待されるが、P 帯やテラヘルツなどの電波周波数帯の採用や、電磁波計測から離れた重力加速度の計測による地下質量変化計測など新しい手法の確立が課題である。

④複数衛星による干渉観測によるリアルタイム化、高精度化

これまで、多くは単独衛星観測システムが研究されてきたが、超高分解能観測を発展させるのに必要な大型光学系 / アンテナを衛星 1 機に搭載できる大きさには限界がある。さらに高分解能化を進めるには仮想的な超巨大アンテナ・鏡の形成技術を確認し、複数衛星にまたがる干渉観測システムの構築が必要である。特に電波領域ではすでに観測対象の一部で、これは実現されているが、将来的には光学イメージング領域にまで拡張していく必要がある。

⑤ MEMS（Micro Electro Mechanical Systems：微小な電気機械システム）技術の発展に伴う要素技術の応用研究による新たな観測システム設計

従来、論理的には成立するが、製造不可能だった形状による波長特性変化や高性能化などの問題に対して、MEMS 技術の発展により、原子数個の単位でのデバイス形成が可能となってきたので、これらの新技術の適用が課題である。

⑥観測データアーカイブから社会利益をもたらす情報化手法の研究

近年多くの地球観測衛星では精細な分解能を持つ多波長の観測データが毎日膨大な量生成されている。目標とする事象が自然現象ではなく社会現象などの場合には、従来の論理的な物理的解析アルゴリズムの研究ではデータ量が多く対応できない。社会現象との相関そのものが社会的利益に直結するので、得られた情報と目標とする事象の相関解析では、ニューラルネットを用いる機械学習手法の実用化確立が課題である。

■大気の観測

①小型センサや分光技術の気候変動観測への利用

ローコストセンサに関しては長期安定性や信頼度の向上が重要である。プラットフォームの内、ドローンでの高度分布計測について、自律・自動的に繰り返し計測が達成されるようになると 3 次元データとして飛躍的にデータの有効性が高まるため、開発に取り組むべき課題である。衛星や航空機からのイメージング分光によるリモートセンシングでは、可視・紫外から近赤外～熱赤外への波長域拡張が応用範囲の大幅な拡大を生むと期待されるが、センサ素子の開発がボトルネックとなっている。

②衛星からの温室効果ガス濃度観測

GOSAT、OCO-2 のように太陽光を使う観測の場合、太陽高度が低くなる冬期や夜間の観測が出来ないが、レーザを使った計測（差分吸収ライダー等）ではこれらの問題点を回避出来る可能性がある。しかし、ライダーでは長期間に渡る運用可能性としてレーザ光源の寿命の問題等の課題がある。

③衛星ライダーによるエアロゾル観測

衛星ライダーによるエアロゾル観測については、すでに CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)、CATS が運用され、ATLID の開発が進められている。しかし CALIOP はすでに寿命を越えており、CATS は ISS 搭載のため観測緯度範囲が限定されている一方、ATLID は運用期間が 3 年と短い。このため ATLID 以降の衛星ライダー計画に着手することが求められているが、高コストのライダー開発、長期間に渡るライダー運用可能性の問題がある。

④種々のデータの統合的解析

個々の研究結果の長所・短所を踏まえて、様々な研究結果を利用した統合的な解析が進められている。種々のリモートセンシングデータや地上観測データを利用した統合的研究では、独立した各手法からの成果を多面的に見ることが必要である。

■海洋の観測

①温室効果ガス観測装置の高性能化

キャビティリングダウン分光 (CRDS) 装置など、赤外領域の分光分析装置の高性能化と低価格化は、陸上の観測点における温室効果ガス観測の高度化・効率化だけでなく、船舶等における海洋表層水中の温室効果ガス観測の高解像度化と効率化にも有益である。また、CRDS では、原理的に安定同位体比を同時に測定できる。現在、温室効果ガスの炭素 13 や窒素 15 などの安定同位体比は、サンプル大気から温室効果ガスを単離して質量分析計で測定しているが、濃度と同位体比の連続観測の展開によって、気候変化が温室効果ガスの発生・吸収・消滅に及ぼすフィードバックプロセスの研究を大きく進展させるためには、CRDS による安定同位体比の測定精度を質量分析計レベル以上に向上させることが課題である。

② BGC Argo 搭載化学センサーの高性能化

BGC Argo など、自動海洋観測装置による生物地球化学測定においては、S/N 比が小さく、特に出力のドリフト（センサー応答の時間変化）の小さい安定したセンサーの開発が肝要となる。Argo フロートの場合は、陸上で予め検定しておくとともに、海洋への投入時に現場のできるだけ近傍で観測船からの採水などによって高い精度でデータを取得し、これを使ってセンサー出力を検定する必要がある。しかし、その後、センサーを直接的に検定する機会は極めて限られる。最深潜航深度付近の海水の組成が時空間的に安定していると仮定できる場合には、観測船による過去の高精度観測のデータと比較することで検定する方法も考えられるが、一点検定に過ぎず、必ずしも他の濃度領域の出力の検定を担保できない。海洋酸性化や貧酸素化を 10 年ほどの観測で検出するために必要なデータの精度は、pH が 0.002、酸素濃度が $1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ （表層濃度の 0.5% 以下）であることから、それに匹敵する長期的な安定性を有する高性能のセンサー開発が重要な課題である。

③フロートの小型化・長寿命化・低価格化

Argo フロートは、現在、アメリカとフランスの計 4 社が製品化し、販売しているが、長さは 1m 余り、重さは 20kg ほどあって、開発初期から大きな変化がなく、船上などでの取扱いは容易ではない。また、洋上で船舶と衝突した場合などに相手を損傷させる恐れが大きいこともあり、海況監視のニーズが高い沿岸域では展開しにくい状況にある。これらの問題を克服し、Argo フロート観測を維持・発展させるためには、技術革新によるフロートの小型化・軽量化と一台当たりの観測期間の長期化（長寿命化）、そして低価格化が課題である。Argo フロートの長寿命化を図りつつ、生物地球化学センサーなど多くのセンサーを搭載させ、なおかつ運転コストを下げるには、より小型で大容量の電池の開発も課題である。同時に、Argo フロートなど自動海洋観測装置による観測の発展には、洋上の Argo フロートから迅速・安定的かつ安価にデータを送受信できる通信網の整備も課題である。

（6）その他の課題

■衛星による観測

①我が国として整備すべき観測データ項目の認識とデータ入手先についての戦略明確化、データ処理機能の強化

これまで地球観測衛星については、GCOS/CEOS で識別された ECVs リストを参考にしつつ、その充足を目指して計画立案/各々のミッション推進を実施してきた。しかしながら、我が国として気候変動観測についてどのような観測データベースを整備すべきかについて公式の設定は行われていない。他国との協力によるデータ取得も含め、観測データベース整備について、オープンな議論の下、国としての方針を定めていく必要がある。

データを扱うためのプラットフォームの整備、運用とともに、データサイエンティストの観測データへの習熟やアプリケーションの研究開発などが喫緊の課題であり、またアウトプットとしての社会情報の位置づけの検討についても課題である。米国では商業クラウド業者の提供するプラットフォームや NASA などによる研究が、欧州ではコペルニクス DIAS と HORIZON2020 などの研究開発及び人材育成において主要な役割を果たしている。

②国際協力戦略含め我が国としての地球観測計画を立案、評価判断する機能の強化

前項の議論を受け、それらの観測要求を基に、我が国の衛星観測システムをどのように実現していくかについて計画を立案し、それらを評価する必要がある。衛星観測技術の性格から広範とならざるを得ない議論を、各専門分野の立場から補助する機能の強化が課題である。

③複数省庁で利用される観測衛星の予算化の仕組み、衛星運用機関の必要性

現在、提案された衛星ミッションの予算化については、各省庁の予算に帰属されるが、共用目的で使用されるものがほとんどであり、こうしたものの予算化の仕組みを考える必要がある。また JAXA 等研究開発機関が科学技術研究を実施する一方で、開発された技術を用いた衛星を社会インフラとして継続的に運用・利用推進する目的を持つ機関の設置が課題である。

④若手研究開発人材の枯渇対策、知と経験の体系化、拠点化と国際交流強化

衛星地球観測の研究開発人材については、世代交代が必ずしも適切にできておらず急速な科学技術力低下が発生しつつある。これまでに得られた知見を体系化し、若い世代を教育・啓蒙し科学技術力を維持するための実施体制や拠点の整備が課題である。

■大気の観測

①長期観測の実施体制

国策での長期観測に関する戦略作りと計画実装が必要である。たとえば米国の NEON (National Ecological Observatory Network) では 2019 年から 30 年間の本観測実施が、欧州の衛星観測計画では MetOp などのシリーズ化によって 30 年規模の気象・地球観測衛星計画が実装されている。また欧州では ICOS (Integrated Carbon Observation System) として温室効果ガスの地上観測について EU 全体で長期にサポートする計画が実施されている。わが国での計画では 5 年程度のプロジェクトに依存する点が多い点を見直し、特色を持った長期観測を維持するメカニズムを構築していくことが必要である。例えば、GCOM-C, GOSAT, PALSAR などの我が国の高性能な後継センサを高度化しつつ、継続的に打上げていくことにより我が国の優位性を持続することができると期待される。また、次期静止気象衛星（ひまわり 10・11 号だけでなくそれ以降）の継続的な打ち上げについては、気候変動に関わる成分の計測の可能性も含めて、検討が必要である。SKYNET や AD-NET 等の地上観測ネットワークも持続的な長期観測のメカニズムを検討すべき段階にあり、特に、観測のためのインフラ（人的リソースを含む）の維持が課題となっている。

②観測専用航空機

先端的で高精度な観測装置を開発して搭載でき、エアロゾル・雲の相互作用など、現象解明の切り札となる観測が実施できる観測専用航空機が新たに必要である。

③ドローン関係

ドローンについては活発な技術開発／実証実験が進められているが、安全上の配慮から各種規制も進みつつある。今後ドローン利用を推進するためには、前提となる安全確保技術の確立が求められる。特に気象分野では大気の鉛直プロファイル観測のために必要な安全確保技術の確立が課題である。

■海洋の観測

現在、日本の海洋観測を担う観測船は、すべて日本の造船会社によって建造された船だが、観測船に搭載されている海洋観測装置や自動観測機器の大半は欧米の（ベンチャー）企業によって開発された製品である。たとえば、Argo フロートについては国内でも一社が深海用フロートを製作・販売しているが、世界の海に 4000 台近く展開されている水深 2000m までの Argo フロートはすべてアメリカまたはフランス製である。搭載されているセンサーも、国内では一社が優れた酸素センサーを開発・販売しているが、他はすべて海外製である。キャビティリングダウン分光分析装置も、すべてアメリカ製である。日本の技術開発力はこれらの分野にほとんど活かされていない。日本メーカーの参入を妨げる要因の一つとして、市場が大きいことが挙げられる。それゆえ開発にかかる資金援助の拡大が必要である。

（7）国際比較

■衛星による観測

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	○	↘	IPCC や国際会議における活動は活発であるが、欧米と比較して先端的研究を実施している人数が少なく層が薄い。若い世代の育成が間に合っていない。世代交代や拠点化などの国内体制整備が必要
	応用研究・開発	○	↘	気候変動観測衛星についての戦略立案がここ数年停止しており、次世代の衛星システムについての準備がされていない。産官学それぞれにおいて若い世代の育成努力が不足しているなど早急に次期戦略が必要
米国	基礎研究	◎	→	NASA-GIS, NOAA やスクリプス研究所、大学および軍関連の研究機関を中心とし、基礎研究についても世界をリードしており、継続中
	応用研究・開発	○	→	地球観測衛星については、Decadal Survey など長期計画を立案しているが、開発実施に至らないあるいは大きく遅れる計画も散見されており、後継機と新規ミッションのバランスを調整中。民営化より軍関連の研究推進が顕著
欧州	基礎研究	◎	→	基礎研究については欧州全体としてはすべての分野について十分な研究体制が敷かれており、ほぼすべての分野をカバーできている。しかしながら先端性については米国あるいは日本などから遅れるところもある 【英国】 基礎研究レベルでは Met Office などを中心とした研究の層が厚く、研究をリードする分野も多い 【ドイツ】 大学やマックスプランク研究所などの組織を中核として、特に電波センサを利用する分野を得意としている 【フランス】 大学を中心とした基礎研究を展開しており、特に光学センサに関する分野を得意としている
	応用研究・開発	◎	→	センチネル衛星群を含むコペルニクス計画において、継続観測に関するインフラシステムおよび得られたデータの社会利用を進めており、民営化の途上にある 【英国】 一時期開発から撤退したので、開発力はかなり低下したが、SSTL など小型衛星については世界的にリードする力を保持しており、今後中大型についても開発再開の方向性 【ドイツ】 DLR を中心とし、X-band SAR 衛星の民営化などを実施し (Tandem-X)、発展を試みている。近年ライダーに対する研究も推進中である 【フランス】 ツールーズの CNES や AIRBUS などによる光学衛星の開発は欧州をリードしており、またライダーの開発も推進している
中国	基礎研究	△	↗	欧州からのドラゴンプログラムによる科学技術移転・流入によりここ 15 年程度急速に成長しつつある。しかしながら、まだ習得中の状態であり、自ら新しい研究を確立する段階にはない。
	応用研究・開発	○	↗	国家資本集中により今後 10 年で 100 機程度の地球観測衛星を開発打ち上げるとしており、急速に技術的キャッチアップアップを行おうとしている状況である。温室効果ガス観測については、様々な観測方式による複数の衛星を打ち上げている。
韓国	基礎研究	△	→	韓国気象庁や大学などによる研究がなされているが、日米欧研究を追随するレベルに有り、急速に発展する様子はない。
	応用研究・開発	△	→	観測衛星については欧州 (AIRBUS) からの購入により観測を行っている。自らは小型の衛星開発を実施しているが実用衛星レベルの開発を自国で行う能力を持つには時間がかかると思われる。

■大気の観測

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	国際連携などを活用した特色ある観測データ収集や独自のアイデアに基づいた収支解析、大気組成のデータ同化などで一部傑出した成果が出ているが大幅には拡大していない。個々の観測などでは技術の進展がみられるが、それらを統合的に解析する分野での人材が不足している。また全般に若手研究者の育成に問題を抱えている。
	応用研究・開発	○	→	現場観測のためのユニークな観測機器・技術開発が一部にみられるが拡大していない。
米国	基礎研究	◎	↗	国として、戦略的／長期的な視点に基づいて、競争的環境の中で様々な基礎研究を進めている。問題設定に優れ、航空機観測なども用いて、課題解決を強く意識した、発見性の高い研究成果を挙げている。若手研究者の層も厚い。
	応用研究・開発	◎	→	ベンチャー企業などにおいて地上観測での先端的な機器開発を多く手掛けている。
欧州	基礎研究	◎	→	先端的な衛星データと地上観測の連携や、国際標準作りにおいて活発である。また各国が上手く連携・共同研究を進めている。 【英国】 中国との連携が活発であり、気候変動と関連するプロセス理解の増進で成果が多くみられる。 【ドイツ】 研究の層が厚く、北極観測や航空機観測などについても総合的かつ主導的に実施している。傑出した研究機関があり、組織として上手く研究が進められている。 【フランス】 マクロン大統領の施策により優秀な科学者を世界から集めるなど積極的な推進策が見られる。伝統的な赤外衛星観測と解析で進展がみられる。傑出した研究機関があり、EU 諸国、中国などを顕著な成果をあげている。
	応用研究・開発	◎	↗	ECMWF や Copernicus 計画でのサービスや、高解像度衛星の実現などにおいて、顕著な成果が上がっている。 【英国】 小型ローコストセンサの開発や実装を主導した研究が近年活発である。 【ドイツ】 精度等に優れた計測機器の継続的な開発がみられる。 【フランス】 ライダなど計測機器の継続的な開発がみられる。
中国	基礎研究	○	↗	大気汚染や温室効果ガスの現場・航空機・衛星観測に進展がみられ、自国の技術も活用しながら欧米を追いかけけている。若手研究者、博士課程学生の層が厚く、人材には非常に恵まれており、今後の著しい発展が期待される。
	応用研究・開発	△	→	独自の技術での製品化はみられるが、自国での活用の域を出ていない。
韓国	基礎研究	○	↗	静止衛星からの GOCI 後継機による海色計測や GEMS 大気汚染計測計画、PM2.5 プロジェクトなどによって研究開発が活発化している。自国のセンサ開発は乏しい。若手研究者の育成については、日本と似た問題を抱えている。
	応用研究・開発	△	→	機器開発の産業化などにおいては活発な状況はみられない。

■海洋の観測

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	◎	→	海洋 CO ₂ 観測においては、海洋研究開発機構が主に全球船舶海洋観測プロジェクト（GO-SHIP）への貢献などで海洋内部の世界的な観測を、気象庁が西部北太平洋広域の海洋表層と内部の観測を、国立環境研が商船による日本と米国やオーストラリアなどの間の表層観測を行っており、国際的に重要な貢献をしている。 アルゴについては、日本が展開している現行のアルゴの数は、海洋研究開発機構と気象庁で合わせておよそ 150 台であり、その数は突出した米国、オーストラリア、フランス、ドイツ、イギリスに続いている。しかし、生物地球化学センサーを搭載した BGC アルゴについては、海洋研究開発機構が展開する予定であるものの、現行ではゼロで、他国から大きく遅れている。
	応用研究・開発	△	→	深海アルゴの分野において、鶴見精機が“Deep NINJA”を開発し、海洋研究開発機構がこれを用いた深海観測を行っている。
米国	基礎研究	◎	→	世界の海洋観測においては、衛星観測のみならず現場観測においても、米国の寄与は極めて大きい。 海洋 CO ₂ 観測においても、GO-SHIP を主導し、海洋内部の観測を世界規模で行っている。ただし、今後も継続できるかどうかは他国と同様に楽観できる状況にはない。 アルゴにおいても、現在、世界の海で展開されている 3700 台以上のフロートのうち、2000 台以上は米国が投入したフロートである。生物地球化学センサーを搭載した BGC アルゴについても、世界の海に展開されているおよそ 300 台のうち半数は米国によって投入された。これらの多くは、NSF の研究資金による南大洋観測の SOCCOM プロジェクトによって展開されたものである。
	応用研究・開発	◎	→	温室効果ガスの観測に変革をもたらしつつあるキャビティーリングダウン分光（CRDS）装置を開発し市販している PICARRO 社、LOS GATOS Research 社はともに米国のベンチャー企業である。 世界の海に 4000 台近くが展開されている Argo フロートは、“Navis”（Sea-Bird Scientific, U.S.A.）, “APEX”（Teledyne Marine, U.S.A.）, “Alamo”（MRV Systems, U.S.A.）が米国製であり、それらに搭載されている水温・塩分・圧力センサーの RBRargo CTD sensor（RBR Ltd., U.S.A.）と SBE41 CTD（Sea-Bird Science）も、ともに米国企業の製品である。
欧州	基礎研究	◎	→	EU の研究プロジェクト CarboOcean や CarboChange による大西洋と南大洋の観測で国際的な存在感を示した。現在も大西洋の海洋観測システム AtlantOS を企画し、海洋の気候変化や物質循環の持続的観測に力を入れている。 【英国】 ブリマス海洋研究所、国立海洋学センター、大学などの研究者が、海洋観測を推進しており、海洋 CO ₂ 観測においては、GO-SHIP による大西洋内部の観測や大西洋の観測に一定の貢献をしている。 アルゴにおいては、日本とほぼ同等の貢献があるが、BGC アルゴの展開も進めている。 【ドイツ】 キール大学や GEOMAR において、海洋観測やその技術開発が活発に進められており、海洋 CO ₂ 観測においては、GO-SHIP による大西洋内部の観測や大西洋の観測に一定の貢献をしている。 アルゴの展開においても日本と同程度の寄与がある。 マックスプランク研究所などでは、気候・海洋の数値モデリングが高レベルで行われている。 【フランス】 パリ大学などの研究者が、大西洋や、フランス領を有するインド洋とその南の南大洋において、海洋 CO ₂ 観測に一定の貢献をしている。 BGC アルゴは、アメリカとフランスの研究者が中心になって推進してきた経緯もあり、米国に次ぐ 60 台近くを北大西洋や地中海で展開している。 海洋の数値モデルによる物質循環の研究も、LSCE などで行われており、高い水準にある。

欧州	応用研究・開発	△	→	【英国】 ―― 【ドイツ】 ―― 【フランス】 nke instrumentation, 社が Argo フロート “Arvor” や “Deep Arvor” を市販している。
中国	基礎研究	○	↗	青島に大規模な海洋研究所の「青島海洋科学・技術国家実験室」を設立して、世界中から人材を集めるほか、砕氷船や観測船の建造を進めるなどして、海洋研究に急速に力を入れている。海洋の CO ₂ 研究では、砕氷船による北極海観測などを実施しているが、その他の活動については状況が良く分からない。アルゴは日本に次ぐおよそ 100 台を西部北太平洋に展開しているほか、BGC アルゴの観測も開始している。
	応用研究・開発	△	→	
韓国	基礎研究	○	→	海洋研究に力を入れ、KIOST を拡充させてきた。海洋 CO ₂ 観測も実施しているが、必ずしも目立った成果を挙げているとは言えない。アルゴは主に日本海に 40 台ほどを展開しており、そのうちの 1 台が BGC アルゴである。
	応用研究・開発	△	→	

（註 1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註 2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ 1～2 年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

全体として参考とした文書

- TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ編「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析：気象研究ノート第 234 号」,2017.
 - 日本学術会議 地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会「提言 我が国の地球衛星観測のあり方について」,2017.
 - Shimoda H. and Kimura T., Comprehensive Remote Sensing 1st. ed. Elsevier: 246-280, 2017.
- 1) 気象庁「異常気象レポート 2014 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し（VIII）～」,2014.
 - 2) Herring Stephanie C., *et al.*, “Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99 (1), 2018.
 - 3) IPCC, “Climate Change 2013: The Physical Science Basis,” Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2013.
 - 4) IPCC, “Summary for Policymakers,” *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2013.
- 5) Le Quéré Corinne, *et al.*, "Global Carbon Budget 2017," *Earth System Science Data*, 10: 405-448, 2018.
 - 6) Scott Doney C., *et al.*, "Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem," *Annual Review of Marine Science*, 1: 169-192, 2009.
 - 7) Global Climate Observation System (GCOS), "Systematic Observation Requirements for Satellite Based Products for Climate," GCOS-107, World Meteorological Organization, 2006.
 - 8) University Corporation for Atmospheric Research, "Climate Data Guide, "
<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-data-records-overview> (2019年2月1日アクセス) .
 - 9) FLUXNET Network, "Fluxdata,"
<http://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/> (2019年2月1日アクセス) .
 - 10) TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ編「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析：気象研究ノート第234号」, 2017.
 - 11) World Meteorological Organization, " WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations," 2nd ed., GAW Report No. 227, 2016.
 - 12) Schmale Julia, *et al.*, "Collocated Observations of Cloud Condensation Nuclei, Particle Size Distributions, and Chemical Composition," *Scientific Data* 4: 170003, 2017.
 - 13) BACCHUS project,
<https://www.bacchus-env.eu/in/index.php> (2019年2月1日アクセス) .
 - 14) " Tropospheric Ozone Assessment Report (TOAR)," *Elementa: Science of the Anthropocene*,
<https://collections.elementascience.org/toar/> (2019年2月1日アクセス) .
 - 15) Arrhenius Svante, "XXXI. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41 (251): 237-276, 1896.
 - 16) Kleypas J. A., "Geochemical Consequences of Increased Atmospheric Carbon Dioxide on Coral Reefs," *Science*, 284: 118-120, 1999.
 - 17) Bakker Dorothee C. E., *et al.*, "A Multi-decade Record of High-quality fCO₂ Data in Version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT)," *Earth System Science Data*, 8: 383-413, 2016.
 - 18) Olsen Are, *et al.*, "The Global Ocean Data Analysis Project Version 2 (GLODAPv2) - an Internally consistent Data Product for the World Ocean," *Earth System Science Data*, 8: 297-323, 2016.
 - 19) Kwiatkowski Lester and Orr James C., "Diverging Seasonal Extremes for Ocean Acidification during the Twenty-first Century," *Nature Climate Change*, 8: 141-145, 2018.
 - 20) Hansen M. C., *et al.*, "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change," *Science*, 342: 850-853, 2013.
 - 21) Irie Hitoshi, *et al.*, "Turnaround of Tropospheric Nitrogen Dioxide Pollution Trends in China, Japan, and South Korea", 12: 170-174, 2016.

- 22) 鵜野伊津志 他「PM2.5 越境問題は終焉に向かっているのか?」,『大気環境学会誌』,52 巻, 6 号: 177-184, 2017.
- 23) World Meteorological Organization (WMO), “Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications,”
https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Draft_low_cost_sensors.pdf(2019 年 2 月 1 日アクセス) .

2.17 気候変動予測

（1）研究開発領域の定義

気候変動予測に関する科学、技術、研究開発を記述する。

気候変動予測モデルの開発は各種物理法則により構築され、観測データを用いて検証される。

ここでは、大気や海洋の物理法則から成る、地球全体（全球）レベルあるいは特定の領域を対象とした気候モデルのほか、エアロゾル、植生、海洋生態系などの要素も取り入れた地球システムモデル（ESM）やそのサブモデル、社会経済シナリオを取り入れた予測を行う統合評価モデル（IAM）等を対象とする。国際的なモデル比較研究の進捗、データ配信やカプラ等のシステム開発も対象とする。解像度やダウンスケーリングの現状、および国内または国際的に共有されている目標値は本領域の現状を知る客観的な数値として記載する。

※気象と関連の深い各種影響予測（豪雨や台風、海洋、極地）は本領域で触れるが、水資源、生態系（農林水産業含む）、健康・都市生活についての影響予測や緩和・適応については別領域で扱う。

（2）キーワード

地球温暖化、シミュレーション、気候モデル、地球システムモデル、領域モデル、海洋酸性化、土地利用変化、イベント・アトリビューション、力学的ダウンスケーリング、大型計算機、地球インフォマティクス

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球温暖化、オゾン層破壊、砂漠化、海洋汚染、酸性雨など、地球規模もしくは広域規模での環境問題が深刻化する中で、地球規模の中長期的な状態を精度良く予測する必要性が高まっている。こうした環境変化については、すでに影響が顕在化していると考える専門家も多く、さらにここ数十年から100年以内にはグローバルな影響が顕著になると見込まれることから、予測技術の高精度化が強く期待される。

地球表層・海洋・大気についての必要十分な観測に基づく高精度予測技術の確立により、全球の温室効果ガスや粒子状物質の動態把握とその将来予測の不確実性低減、海洋や地球表層に現れる自然環境や極端現象の変化の検出と予測、および温室効果ガス排出削減の国際的な意思決定が与える効果の評価などが可能となる。また予測された降水量・日射量や風速、海水温等に関するデータは、治水や再生可能エネルギー、農林水産業といった分野において利用され、大規模環境変化の影響を把握し対策を立案するために活用されるなど、他の関連分野への波及効果も大きい。

[研究開発の動向]

地球温暖化の影響が顕在化している、と考える専門家は多い。実際、2018年7月に発生した「平成30年7月豪雨」と、引き続いて日本を含む世界各所を襲った猛暑について、気象庁や世界気象機関は、背景となる要因の一つとして地球温暖化を挙げている^{1),2)}。地球温暖化の顕在化という認識は、一般社会でも広まりつつある。社会からの要請に応え、地球温暖化の影響の深刻化を避けるために、大気や海洋の運動を再現し予測する気候モデルによる予測がますます

まず重要となってきた。

2000年代はじめころまでは、気候変動における人間活動の影響検出や気候モデルによる地球温暖化予測の妥当性検証など、温暖化に関する科学的理解の増進が、地球規模の気候変動・変化の問題に携わる研究者にとって大きな課題であった。しかし2007年に公表された「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）の第4次報告書³⁾で、20世紀後半以降の温暖化が人間活動によるものとほぼ断定されて以降、科学的理解の増進に加え、温暖化への対策立案に資するデータの創出にも力が注がれはじめている。

こうした状況のもと、気候モデルを高解像度化し、今後避けられない温暖化に社会が適応するための政策（適応策）立案に資するよう、地域ごとに詳細な情報を発信する動きが盛んになってきている⁴⁾。この場合、地球全体（全球）を対象とした気候モデルでは計算機資源の面から高解像度化に限界があり、最も高解像度のものでも格子間隔20km程度である。この解像度では、細かな地形の影響を受ける降水分布などについて、精度の高い再現性が望めないため、日本周辺など特定の領域を対象とした領域モデルが用いられることが多い。ただし対象領域周辺に関する情報（境界条件）は全球モデルによる予測結果から与える必要があるため、全球モデルと領域モデル両方の再現性や予測精度を向上させていく必要がある。

このように、全球モデルで得られた予測データの一部を境界条件として領域モデルに与え、対象領域に関する予測データを高解像度化する手法を、力学的ダウンスケーリングと呼ぶ（他に、統計的なモデルを用いて高解像度化を行う統計的ダウンスケーリングという手法もある）。実際、温暖化の影響評価のために作成されたデータセット d4PDF^{4),5)}では、力学的ダウンスケーリングとアンサンブル実験（条件を少しずつ変えた実験を多数行うこと）によって大規模なデータセットを作成し、様々な分野での影響評価に役立っている⁶⁾。

領域ごとの詳細な情報提供は、日本だけでなく世界的にも大きな趨勢になっている。例えば、2021年の公表が予定されている IPCC 第6次評価報告書（AR6）では、地域的な空間規模における温暖化予測について、全12章のうち3章が充てられ、全球規模変化との関連、台風などの極端現象の変化、災害影響などについて評価がなされることになっている。

また、将来予測だけでなく、現在発生している異常高温や集中豪雨に関し、温暖化がどの程度寄与しているかを評価する、「イベント・アトリビューション」と呼ばれる研究も盛んになってきている。例えば今田ほか⁷⁾は、2013年夏の日本の猛暑に相当するような異常高温の発生確率が10倍前後になっていると評価している。国際的にも、アメリカ気象学会誌（BAMS）が毎年1回イベント・アトリビューションの特集を組むことにするなど、この種の研究の発展は著しい。極端現象発生に対する温暖化の寄与の評価は、適応策を立案するうえでも重要な情報となる。

一方、適応策だけではなく、温暖化の進行そのものを止める緩和策の立案にも、気候モデルによる予測は貢献している。こうした場合、二酸化炭素の「濃度」ではなく、人間活動による排出量を直接入力データとして与えられるよう、気候モデルに生態系の働きなどを組み入れた地球システムモデル（ESM）が用いられることが多い。ESMを用いた研究を通じた緩和策への貢献として代表的な成果の一つに、人間活動で排出されたCO₂の累積量と、その時点までの昇温とのよい比例関係を示したことがあげられる⁸⁾。このときの比例定数は「排出に対する過渡気候応答」（TCRE）と呼ばれる。国際交渉でしばしば言及される2℃目標や、2015年に締結されたパリ協定で強調された1.5℃目標の達成のために、今後の排出量をどの程

度にとどめておくべきか、その上限を定量化するのに重要な量である。TCRE 等に基づいて評価された今後の二酸化炭素排出許容量はしばしば「炭素予算」と表現される（これは英語表記の Carbon budget の和訳で、本稿執筆の 2018 年 8 月現在で定着した術語とは言えないが、ここではこう訳することにする）。

2013 年公表の IPCC 第 5 次評価報告書（AR5）の時点では、2°C 目標達成のための炭素予算は産業革命以前からの累積値で 790-900GtC と見積もられている。現在までの炭素排出量が約 550GtC⁹⁾であることを考えると、残された炭素予算は 240-450GtC と評価できる。これは現在の人為起源二酸化炭素排出量 $9.4 \pm 0.5 \text{ PgC/y}^{10)}$ の 20 数年～50 年ほどの量にあたる。1.5°C 目標に対する炭素予算となると当然これより小さくなり、現在の人為起源二酸化炭素排出量の 10 年分ほどにしかあたらないことなどを考慮すると、1.5°C 目標の達成は事実上不可能と考えられてきた。しかし近年、ESM による予測結果に基づき、1.5°C 目標達成のための炭素予算はもう少し多くて、現在の排出量 20 年分ほどにあたるのではないかと、という研究結果が複数発表されている^{9), 11)-13)}。炭素予算の他に、ESM から社会的に有用な情報として提供できそうなものとしては、様々な社会経済シナリオに付随する土地利用変化の気候影響評価、温室効果気体の年々変動の収支の精確な把握、などがあげられる。AR6 に向けては、各国研究機関が最新の ESM を用い、これらの課題に取り組むことになるだろう。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

①気候変動適応法をめぐる動向

地球温暖化対策は、温室効果気体の排出削減と吸収の対策を行う「緩和」と、既に起こっている、あるいは将来避けられない温暖化による影響への「適応」に分けられる。このうち、国内における適応策の推進のため、2018 年に「気候変動適応法」が可決された。同法成立以前に閣議決定され、今後法廷計画への格上げと拡充が見込まれる「気候変動適応計画」においては、基盤的・国際的施策の一つとして、「モデル技術やシミュレーション技術の高度化」が挙げられている。こうした背景のもと、温暖化影響評価のため、農林水産業や防災に関する科学分野との連携を強め、シミュレーションモデルによる予測データの精緻化と整備、提供する動きが促進されることが予想される。

②地球温暖化に関する国際交渉における展開

国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）履行のため 2016 年から発効したパリ協定は、2021 年から 2030 年までの地球温暖化対策の枠組みである。同協定では、2100 年時点での温暖化を産業革命以前に比して 2°C 以内に抑え、さらに 1.5°C 以内に抑える努力も進めることが言明された¹⁴⁾。同協定採択以前から国際交渉の場でしばしば言及された 2°C 目標と異なり、1.5°C 目標については温暖化影響の評価に関する研究があまり行われてこなかった経緯から、近年では 1.5°C と 2°C の温暖化で影響がどのように異なるか、評価する研究が盛んになってきており¹⁵⁾、2018 年 10 月には IPCC により 1.5°C 目標に関する特別報告書（SR1.5）が公表される予定である。

また同協定では、「自国が決定する貢献」（NDCs）として参加各国が定めた目標に従って温室効果気体の排出削減を進めることが定められており、さらに 2023 年を皮切りに

して、「グローバル・ストックテイク」と呼ばれる、上記温暖化緩和目標へ向けての世界全体の進捗状況の確認作業が行われることになっている。グローバル・ストックテイクでは、実施時点での最新の科学的知見に照らして進捗状況が評価されることが謳われており、研究の現場でもこうした場への貢献を意識した課題に取り組む傾向が強まるであろう。

③十年規模変動予測

上記のグローバル・ストックテイクにおいては、実施時期の直近数年間の気温や温室効果気体濃度の動態把握、さらには直後数年にわたっての予測が求められることが予想される。このため、2100年前後の予測のみならず、現在から先の1年以上、最大10年程度の時間スケールを対象とした予測研究が盛んになってきている¹⁶⁾。十年規模予測では、100年程度の時間スケールを対象とした予測と異なり、自然変動による揺らぎの位相を正確に取り込む必要があるため、データ同化と呼ばれる手法を用いて特定の時点に対応する観測データになるべく近い初期値を作成して予測を始めることになる。データ同化は従来、天気予報のような比較的短時間スケールの短い予測のため発達してきた手法であるが、温暖化予測に対する要請の高度化に伴いより長い時間スケールや、生物・化学過程などへの応用が進みつつある。例えばフランスの研究チーム¹⁷⁾は、「パーフェクトモデルアプローチ」（モデル結果を観測に見立てて行う予測可能性検証実験）に基づいた研究により、地球規模の炭素循環に最大6年間の予測可能性があることを示している。国内では海洋研究開発機構が、データ同化により赤道太平洋域からの二酸化炭素フラックス変動を予測する研究などに取り組んでいる。

④社会経済分野との連携とモデル結合

人間活動は、産業や森林伐採による温室効果気体の排出のみならず、耕作地の拡大などを通じ地表面の太陽光反射率（アルベド）を変えることによって気候に影響を与えている。温暖化による農業生産性の変化が、人口を支えるため必要な耕作地拡大の推定量に影響を与え、それがさらにアルベドの変化を変化させ温暖化の度合いを変えるとといった、温暖化と人間社会との相互作用の存在が指摘されている¹⁸⁾。こうした相互作用は、特に地域スケールでの温暖化予測に有意な影響を与える可能性があり、社会経済分野と気候予測分野の間の連携課題として取り組む必要がある。相互作用の整合的・包括的推定には、社会経済分野で開発されている統合評価モデル（IAM）と、ESMとの結合モデルを開発することが望まれる。実際、そうしたモデルは米国等で開発され炭素税の課税手法の検討などに応用されている¹⁹⁾。例えば米国LBNLのJonesら¹⁹⁾は、炭素税を森林伐採由来の炭素排出にも課した場合と、化石燃料と産業由来の排出のみに課した場合とでは、2100年時点での温暖化が後者において有意に抑制されることを示した。また国内では、社会経済を結合したモデルではないものの、地球システムの不確実性が将来の温暖化対策費用の見積に大きな不確実性をもたらすことなどを指摘した研究²⁰⁾などがあり、今後社会経済モデルとの結合へと発展する可能性もある。

ただし、関連するプロセスのモデル化には大きな誤差が含まれるため、モデルの適用限界などを十分検討したうえで進めるべきとの慎重論も唱えられている²¹⁾。

⑤地球環境予測を支える技術基盤

2021 年公表予定の IPCC 第 6 次評価報告書（AR6）へ向け、第 6 次結合モデル相互比較計画（CMIP6）と呼ばれる枠組みのもと各国研究機関が共通の実験デザインに基づいて行う温暖化予測のデータについては、世界中の関連分野の研究者らが自由に使えるようデータ配信システムの整備がなされる。このシステムの開発は、欧米の情報技術分野の専門家を中心として形成される「地球システムグリッド連盟」（ESGF）によって主導され²²⁾、日本からは DIAS²³⁾ の研究者らが関与している。またデータ配信システムのみならず、モデル仕様の説明やデータの内容などを示すメタデータの効率的な記述手法²⁴⁾ や、データサーバ上でのデータ解析を可能にすることで通信の負担を軽減するサーバーサイドコンピュティंगの導入も進められている²⁵⁾。前者の例として、各国研究機関が温暖化予測に用いるシミュレーションモデルの仕様や実験内容を統一的に記述できるようにした ES-DOC（Earth system documentation）²⁶⁾ といった活動を挙げることができる。後者に関しては、各国のモデル間で異なる格子点の自動変換や、一部のデータを切り出すシステムなどが ESGF の ESMF（Earth System Modeling Framework）²⁷⁾ で開発中である。さらに、気象学、海洋学、生態学、水文学など個別の分野で開発される要素モデルを効率的に結合してモデル開発を促進するカプラ技術も盛んに開発されている²⁸⁾。国内では結合用ライブラリ J-Cup の開発が進んでおり、サブモデル間で異なるグリッドシステムやタイムステップの間で、保存則を満たしながらデータ交換を行うためのより一般的な手法などが開発を進める上での課題となっている²⁹⁾。こうした地球環境予測のための技術基盤開発は、「地球インフォマティクス」などとも呼ぶべき一大分野として興隆の兆しを見せている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

①国内プロジェクト

国内における地球温暖化予測モデルおよび力学的ダウンスケーリングに用いる領域モデルの開発は、主に、文部科学省により 2017 年度より 5 年間の予定で実施される「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（統合 P）において行われている。統合 P などの成果物としての予測データは、統合 P 内での防災研究に用いられるほか、同省「気候変動適応技術社会実装プログラム」（SI-CAT）や、環境省による「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」（S-14）においても活用され、気候変動適応法に基づいた適応策立案に役立てられる。

領域モデルは、扱う空間スケールは全球モデルに比べ当然小さいものの、数 km といった高い解像度を持つことも多いため、計算負荷は全球モデルより重くなることもある。解像度を高くするとアンサンブル実験の数が少なくなるというトレードオフが常に存在するため、アンサンブル実験数を重視した d4PDF⁵⁾ では領域モデルの解像度は 20km と、比較的粗い。数 km の解像度でアンサンブル実験数 100 以上のデータセットを揃えることが望ましいが、そのためには現在の 1000 倍以上の計算能力が必要とされる。

またそれ以外にも、統合 P による温暖化予測データは、国際配信システム（ESGF）構築に参加する「データ統合・解析システム」（DIAS、文部科学省）を通じ、国内外に発信される。

②国際プロジェクト

地球環境研究に携わる世界の研究者が参加する「世界気候計画」(WCRP)は、IOC・UNESCOやICSU, WMOなどから資金を得て活動するプロジェクトであり、1980年に設立された。温暖化予測に関して、国際的に共通の実験仕様(CMIP6)を作成しているのも、WCRPの下部組織である「結合モデル作業部会」(WGCM)である。また予測データの力学的ダウンスケーリングに関する国際協力を進める「統合地域ダウンスケーリング実験」(CORDEX)もWCRPの活動の一部であり、世界をいくつかの区域に分け、参加研究機関に担当区域を割り当てたり、境界条件の与え方などを統一するなどの調整を行っている。WCRPは地球温暖化予測に関して最も影響力の強いプロジェクトとあってよい。加えて、一般社会における利害関係者も加えて地球環境に関する課題を検討し科学に基づいた解決策を探る「フューチャー・アース」においてもESMを活用した研究が展開されている。また技術基盤に関しては、予測データの管理、配信システムを開発する「地球システムグリッド連盟」(ESGF)や、メタデータの系統的な記述法を検討する「地球システムドキュメンテーション」(ES-DOC)などの国際プロジェクトがあり、上述のCMIP6と密に連携を保ちながら活動している。

(5) 科学技術的課題

①観測データの拡充とモデル評価手法の確立

ESMによるシミュレーションから出力される変数として、海陸の炭素貯留量やその収支などがあるが、こうした変数の全球的な分布に関しては観測データが乏しい場合が多く、観測データの拡充が強く望まれる。また生物化学過程を含まない気候モデルに関しても、観測の再現性に関する判断には任意性が残るうえに、地球温暖化予測に関しては現実の再現性評価だけにとどまらず、将来予測の精度まで見積もる必要がある。最近になって、現在気候の再現性と将来予測の精度を結び付けて評価するEmergent Constrainと呼ばれる手法を適用した研究が盛んになってきており、この傾向は今後も続くと思われる。

②低排出シナリオの検討

従来、ESMを用いた地球温暖化予測では、自然変動に対して温暖化のシグナルが大きくなることから、二酸化炭素などの温室効果気体の排出が比較的大きい排出シナリオに対する予測結果を解析することが通例であった。しかし、IPCCがSR1.5の編纂を決定したことが一つの契機となり、排出が小さい低排出シナリオに関する予測結果解析や、それを応用した影響評価研究が盛んになってきている。この流れはSR1.5公表後も続くと思われる。低排出シナリオにおける解析では、自然起源と人為起源の変化の分離が困難になるため統計的な処理に工夫が必要となったり、短寿命気候汚染物質(SLCP)を含む二酸化炭素以外の気候影響要因の重要性が相対的に増したりなど、従来とは異なった問題にも注意を向ける必要があり、今後大きな課題となる可能性が高い。例えば、現在の多くの地球システムモデルにおいては、メタンや亜酸化窒素の循環過程は大気化学モジュールの中で閉じているため、将来の生態系-エアロゾル/大気化学の相互作用変化を予測に反映することができない。CO₂を含む温室効果気体、エアロゾル、生態系との相互作用過程を陽に組み入

れた地球システムモデルの開発により予測の高度化を図ることが必要であろう。また、低排出シナリオにおけるシグナルの優位性を高めるため、長期的な地球温暖化予測では従来それほど重視されてこなかったアンサンブル実験の重要性も高まる可能性があり、計算機能力の向上が望まれる。

③モデル精度向上に伴う計算量増大

ESM 開発の今後の大きな方向性として、高解像度化、アンサンブル数増大、多くのプロセスを取り込む複雑化の3つが挙げられる。高解像度化は、細かな空間スケールでの大気の大気対流活動や地形の変化が重要な役割を果たす降雨過程などについて、モデルの再現性を向上させるために必須である。また、100年や1000年に一度と言った、非常にまれな集中豪雨、熱波、渇水の発生確率の変化を検出するためには、従来高々100程度が普通であったアンサンブル数を1桁は増やす必要がある。さらに前述のSLCPの取り扱いには大気中の化学反応などについて、これまでモデルに含まれていなかったプロセスも導入する必要がある。例えば、人為、自然両方のソースから排出される揮発性有機炭素(VOC)から、大気中の光酸化反応により二次有機エアロゾルが生成されるプロセスなどである。これらの方向性はいずれも計算負荷の増大を伴うことになるため、今後大型計算機の性能が順調に向上することがこの分野の発展にとって決定的に重要である。

④計算機の発展とモデルの高度化に伴うプログラムコードの複雑化

これまでのところ、計算機の性能は「ムーアの法則」と呼ばれる経験則にしたがって向上してきた。性能向上のために、並列計算やグラフィックプロセッシングユニット(GPU)など、時代に応じて新しい技術が導入されてきている。これらの技術を活用するためには、ESMのプログラムコードを書き換える必要がある。また上述の通りモデルの高度化のため多くのプロセスが加わる傾向にあり、これらが相まってプログラムコードが著しく複雑化してきている。バージョン管理ツールなどのソフトウェア導入で対応を図ってはいるが、コードに初めて触れる若手研究者などに対する障壁となる可能性がある。プログラム構造を容易に把握できるツールの開発など、モデル開発環境の一層の整備が望まれる。

⑤複合問題としての地球環境問題

ESMでは、温室効果気体の排出による気候変化のみならず、二酸化炭素の海洋吸収による海洋酸性化、農作物や生物燃料栽培、あるいは都市化に伴う土地利用変化の環境影響など、様々な問題を包括的に取り扱うことができる。一方で、こうした問題は伝統的な気候科学の範疇では取り扱えず、農学や社会経済など多様な分野の研究者との協働が必要とされる。さらに、社会問題としての地球環境問題に対処するためには一般社会における利害関係者の意見も聞きながら問題設定を行う必要がある。こうしたアプローチは、専門性を高め取り扱う問題を厳密に定義することで知見を集積し発展してきた従来型の科学のそれとは異なる。多様な分野、セクターを巻き込んでコミュニケーションの場を設けることで、連携を深めていく必要がある。

（6）その他の課題

ESM 開発には多大な労力が必要とされ、論文としての成果創出までに多くの時間を費やすことになる。加えて、出力データを管理、解析するためのサーバ管理といったメンテナンス業務に時間をとられるケースも多く、研究者らの間に、ESM 開発に深く関わることを忌避する傾向が見受けられる。こうした状況の改善のため、研究者の人事評価の際に開発面での貢献を重視したり、メンテナンス業務に専従する技術者を確保したりするといった対策をとっている機関もあるが、研究能力の指標として論文数が最重要視されるのは研究コミュニティ全体の傾向であり、機関単独での対処には限界がある。開発者の減少に歯止めがかからなければ、地球環境問題に関する日本の国際的地位の低下と言った負の波及効果につながる可能性がある。

また、地球環境問題の解決のためには、ESM による予測と産業への影響評価、適応策の立案、化石燃料使用量削減など様々な過程が必要となり、それぞれの過程に従事する関係者の協力も当然求められる。これらの過程に関しては、大型計算機を必要とする ESM による予測は文部科学省や気象庁、気候変動適応法に基づく適応策立案は環境省、化石燃料使用を始めとするエネルギー問題は経済産業省といった所掌が確立している。こうした役割分担は、作業を効率的に進める上で有効であるが、一方で、必要な連携を阻害する、いわゆる縦割りの問題につながる可能性がある。役割分担のうえでは見かけ上の重複があっても、十分な説明のもと必要な連携を進めていく柔軟な事業展開が望まれる。

技術的には、多数の変数からなる膨大な ESM 出力データを保管・配信し解析したり、多くのサブモデルを結合して ESM を開発する際の作業を支援したりするシステムが研究効率の向上のため必須であり、欧米では IS-ENES2³⁰⁾、ESMF²⁷⁾ などといったプロジェクトで、情報技術者と気候学者との連携によりそうしたシステムの開発が進展している。国内でも同様の取り組みが強く望まれる。

（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	◎	→	気象庁気象研究所、海洋研究開発機構などで ESM 開発が取り組まれている。いずれの機関でもオリジナルのモデルを開発しており研究コミュニティの潜在能力は高い。文科省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（統合 P）などで資金が拠出されているが、今後の趨勢は不透明である。地球規模の分野横断型での温暖化影響評価に関する世界初の国際プロジェクト（ISI-MIP、欧州が主導）へは、日本を拠点に活動する研究者も参加。
	応用研究・開発	○	↗	防災など適応に関する諸科学分野の研究者や、社会経済分野で温暖化緩和シナリオの開発に取り組む研究者と、気候科学者との連携が盛んになってきており、ESM の成果を適応策・緩和策立案に活用する素地ができてきた。基礎研究と同様、統合 P、文科省「気候変動適応技術社会実装プログラム」（SI-CAT）や、環境省「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」などで資金が拠出されている。気候変動適応法の成立をうけ今後関連研究が盛んになることが予想される。
米国	基礎研究	◎	↘	地球流体力学研究所、米国大気研究センター（NCAR）、オークリッジ国立研究所、NASA など多数の研究機関が ESM 開発に取り組んでいる。科学研究費削減の圧力がありトレンドとしては若干下降気味かもしれないが、早晩回復する可能性もある。

米国	応用研究・開発	◎	↘	NCAR には社会経済シナリオ開発部門が設置され、気候科学の成果を取り入れた温暖化抑制シナリオ開発に取り組むなど、ESM による成果の政策立案への応用が進展している。モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである。科学研究費削減の圧力がありトレンドとしては若干下降気味かもしれないが、早晩回復する可能性もある。
欧州	基礎研究	◎	→	EU プロジェクト CRESCENDO には 7 つの ESM 開発チームが参加しており、また別の EU プロジェクト PREMAVERA では高解像度気候モデルの開発に欧州諸国の研究機関が協力して取り組むなど、欧州全体での層は厚い。 【英国】 英気象庁ハドレーセンターなどが早くから ESM 開発を手掛けている。エクセター大学やレディング大学、イーストアングリア大学などでも ESM を用いた研究が盛んである。 【ドイツ】 マックスプランク研究所（ハンブルグ）で早くから ESM の開発が行われている。またドイツ航空宇宙センターの研究者が次期温暖化予測実験仕様策定の中心となるなど、この分野への影響力は強い。 【フランス】 フランス国立科学研究センター（CNRS）などで ESM の開発が行われている。仏国で開発された海洋モデル OPA が欧州全体の共通モデル NEMO として採用されるなど、基礎的な開発能力や科学の水準は高い。
	応用研究・開発	◎	↗	上記 CRESCENDO や PREMAVERA では社会経済シナリオ開発や温暖化影響評価と ESM との連携も重要な課題となっている。次期 IPCC 報告書サイクルで影響評価に関する部分を担う国際プロジェクト ISI-MIP においても、米国と並び欧州出身の研究者が多数主導的立場で活動している。モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである。 【英国】 ハドレーセンターが環境・食料・農村地域省およびビジネス・エネルギー・産業戦略省の支援を受けて、「英国気候予測 2018」(UKCP2018) をまとめ、適応策立案に有用な情報の提供を図るなど予測データの応用が活発である。 【ドイツ】 ポツダム気候影響研究所（PIK）を 1992 年に設立し影響評価研究を行うなど、予測データの応用に早くから取り組んでいる。ドイツ気候計算センター（DKRZ）を中心にデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである。 【フランス】 仏全国気候変動影響適応計画が 2011 年に策定され、それに基づいて仏国のモデルによる予測が影響把握に用いられるなど、予測データの応用が進んでいる。
中国	基礎研究	△	↗	現在、大気物理研究所、第一海洋研究所など中国内で少なくとも 7 つの研究グループが ESM 開発に取り組む ³¹⁾ 。海外で開発されたモデルをベースに開発を行っているケースも多いが、オリジナルに開発を進めているグループもある。国家的に気候科学分野のテコ入れを図っており、今後顕著な発展を見せる可能性がある。
	応用研究・開発	○	↗	ESM による成果を活用して緩和策立案に資するという動きには乏しいが、上述の国家的支援の効果が予測データの応用面にも及んでくる可能性は高い。「国家気候変動適応全体戦略」「国家気候変動対応計画」をいずれも 2012 年に策定しており、後者では 2020 年までの行動計画が記載されている。
韓国	基礎研究	△	↗	韓国気象庁（KMA）では、英国ハドレーセンターが開発した気候モデルをベースに ESM 開発を進める方針になっている。自国で ESM 開発に取り組むには国内基盤を一層強化する必要があるが、基礎科学研究所（IBS）を 2011 年に創設し、2017 年に気候物理センターを設置するなど力を入れている。
	応用研究・開発	○	→	2015 年に「第 2 次気候変動影響評価報告書」が公表され、様々な分野における影響や脆弱性が評価された。2020 年までの適応マスタープランも策定されている。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考・引用文献

全体として参考とした文書。

- 環境省「気候変動への適応のあり方について（報告）」、気候変動適応計画のあり方検討会、平成27年1月、

<https://www.env.go.jp/council/06earth/y060-125/mat02.pdf>（平成30年8月21日アクセス）。

- 環境省地球環境局「気候変動の影響への適応の最近の動向と今後の課題」、中央環境審議会 地球環境部会（第137回）資料、

<https://www.env.go.jp/press/y060-137/mat02.pdf>（平成30年8月21日アクセス）。

- 1) 「世界の異常気象「地球温暖化と関係」 国際機関」、『日本経済新聞』2018年7月25日オンライン、

<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO33372420V20C18A7MM0000/>（2018年8月17日アクセス）。

- 2) 『中日新聞』,2018年8月2日オンライン、

<http://www.chunichi.co.jp/article/front/list/CK2018080202000082.html>（2018年8月17日アクセス）。

- 3) IPCC, “Climate Change 2007: The Physical Science Basis,” Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2007.

- 4) 気象庁「IPCCのRCP8.5シナリオを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測」『地球温暖化予測情報』9巻：79, 2017.

- 5) database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF),

<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/>（2018年8月17日アクセス）。

- 6) 環境省、文部科学省、農林水産省、国土交通省、気象庁「気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート2018～日本の気候変動とその影響～」：130, 2018.

- 7) Imada Y., *et al.*, “The contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013,” Explaining Extreme Events of 2013: From A Climate Perspective, *Bulletin of American Meteorological Society* 95 (9): S52-S54, 2014.

- 8) IPCC, “Climate Change 2013: The Physical Science Basis,” Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

- Climate Change, Cambridge University Press: 1535, 2013.
- 9) Millar Richard J., *et al.*, "Emission Budgets and Pathways Consistent with Limiting Warming to 1.5°C," *Nature Geoscience* 10: 741-747, 2017.
 - 10) Le Quéré Corinne, *et al.*, "Global Carbon Budget 2017," *Earth System Science Data Discussions*, 2018.
 - 11) Goodwin Philip, *et al.*, "Pathways to 1.5 °C and 2 °C Warming Based on Observational and Geological Constraints," *Nature Geoscience*, 11: 102-107, 2018.
 - 12) Tokarska Katarzyna B. and Gillett Nathan P., "Cumulative Carbon Emissions Budgets Consistent with 1.5°C Global Warming," *Nature Climate Change*, 8: 296-299, 2018.
 - 13) Holden P. B., *et al.*, "Climate-carbon Cycle Uncertainties and the Paris Agreement," *Nature Climate Change*, 8: 609-613, 2018.
 - 14) Paris Agreement/CP/2015/L.9/Rev.1, UNFCCC secretariat,
<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (2018年8月19日アクセス) .
 - 15) Schleussner Carl-Friedrich, *et al.*, "Differential Climate Impacts for Policy-relevant Limits to Global Warming: The Case of 1.5 deg.C and 2 deg.C," *Earth System Dynamics*, 7, (2): 327-351, 2016.
 - 16) Boer George J., *et al.*, "The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) Contribution to CMIP6," *Geoscientific Model Development*, 9 : 3751-3777, 2016.
 - 17) Roland Séférian, *et al.*, "Assessing the Decadal Predictability of Land and Ocean Carbon Uptake," *Geophysical Research Letters*, 45: 2455-2466. 2018.
 - 18) Collins W. D., *et al.*, "The Integrated Earth System Model Version 1: Formulation and Functionality," *Geoscientific Model Development* 8: 2203-2219, 2015.
 - 19) Andrew Jones D., *et al.*, "Greenhouse Gas Policy Influences Climate via Direct Effects of Land-Use Change," *Journal of Climate*, 26: 3657-3670, 2013.
 - 20) Matsumoto Ken' Ichi *et al.*, "Impact of Climate Model Uncertainties on Socioeconomics: A Case Study with a Medium Mitigation Scenario," *Computers & Operations Research*, 66: 374-383, 2016.
 - 21) Van Vuuren Detlef P., *et al.*, "A Comprehensive View on Climate Change: Coupling of Earth System and Integrated Assessment Models," *Environmental Research Letters* ,7: 024012. 2012
 - 22) Williams Dean N., *et al.*, "A Global Repository for Planet-Sized Experiments and Observations," *Bulletin of the American Meteorological Society* ,97: 803-816, 2016
 - 23) Data Integration & Analysis System (DIAS),
<http://www.diasjp.net/> (2018年8月20日アクセス) .
 - 24) Earth System Documentation (ES-DOC),
<https://earthsystemcog.org/projects/es-doc-models/> (2018年8月20日アクセス) .
 - 25) Eyring Veronika, *et al.*, "Towards Improved and More Routine Earth System Model Evaluation in CMIP," *Earth System Dynamics* ,7: 813-830, 2016.
 - 26) Earth System Documentation (ES-DOC),
<https://earthsystemcog.org/projects/es-doc-models/> (2018年11月18日アクセス) .

- 27) Earth System Modeling Framework (ESMF),
<https://www.earthsystemcog.org/projects/esmf/>（2018年8月20日アクセス）.
- 28) Valcke S., *et al.*, "Coupling Technologies for Earth System Modelling," *Geoscientific Model Development*, 5: 1589-1596, 2012.
- 29) Arakawa Takashi, *et al.*, "Coupling Library Jcup3: Its Philosophy and Application," *Geoscientific Model Development Discussions*, 1-27, 2018.
- 30) IS-ENES2 project,
<https://portal.enes.org/ISENES2>（2018年8月20日アクセス）.
- 31) Zhou Tianjun, *et al.*, "Development of Earth/climate System Models in China: A Review from the Coupled Model Intercomparison Project Perspective," *Journal of Meteorological Research*, 5: 762-779, 2014.

2.18 水循環

（1）研究開発領域の定義

水循環に関する科学、技術、研究開発を記述する。

地域や全球など様々なスケールの水の分布や動態の把握、モデル化、シミュレーション等を対象とする。より具体的には、地球温暖化による環境の変化、産業や人口の社会的構造の変化により影響を受ける水循環の現状と将来を把握するための、観測や予測技術を対象とする。観測技術としては、衛星や地上観測、センサーネットワーク、同位体分析等を、予測技術としては流域から全球レベルの地上や地下の水循環のモデル開発とデータの活用等を含める。さらに、観測や予測技術を基盤とした気候変動への緩和や適応として、表層水と地下水の持続可能な利用と管理のための取組（河川管理やデータ配信、デジタル化、ウォーターフットプリントなど）も対象とする。

（2）キーワード

レーザー分光分析法、フェーズドアレイ気象レーダー、生体影響、ダム再生、準実時間予測、危機管理型水位計、事前放流、アンサンブル予測、水循環基本法、短時間降雨予測

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

水は生命維持と健康で文化的な暮らしに不可欠である。産業や食料生産も大量の水消費に支えられている。一方、洪水や渇水は甚大な被害をもたらす。世界では風水害が地震などよりも主要な自然災害であり、日本でも頻度や損害保険金の支払額などからみて最も深刻な自然災害は風水害である。このように、水の循環とそれにとまなう物質循環の測定、理解と予測は豊かで安全な社会の構築に不可欠である。国際的な観点からも、SDGsには水や衛生の利用可能性と持続可能なマネジメントの確保をはじめとして、貧困の撲滅、食料安全保障と農業、健康、エネルギー、女性の平等の実現など水と密接に結びついた目標が数多く含まれている。また、水が国際的な戦略物質として利用されつつあり、水資源開発や水の輸出入、水処理など水ビジネスが国際的に拡大している。

[研究開発の動向]

水循環研究は、主に水文学を中心とした素過程を探究する基礎的分野と、洪水警戒情報の発信やダムの運用などのより人に結びついた応用的研究に粗く分けることができる。さらに、基礎的研究にはリモートセンシングに代表される観測技術関連研究と全球モデルに代表されるような数値計算関連研究とに分けることができる。これらの区別は明確でなく、各分類をまたがる研究も多い。

基礎的研究として、降雨観測用レーダーの開発が進んでいる¹⁾。現在では電気系統、通信系統の技術開発が進み²⁾、ネットワーク化された降水量推定および短時間降雨予測が行われている。人工衛星を用いた観測も活発で、世界初の降雨レーダー（Precipitation Radar : PR）を搭載した熱帯降雨観測衛星（Tropical Rainfall Measuring Mission : TRMM）は、長期運用（1997-2015）により海陸問わず均質な長期降水観測データを提供し、降水システムの理解を飛躍的に高めた³⁾。現在では様々な衛星観測をもとに、JAXAが全球衛星降水量情報（Global

Satellite Mapping of Precipitation : GSMap) を発信している。

衛星観測による積雪分布の把握については、可視近赤外センサーによる積雪面積の抽出に加え、受動型マイクロ波センサーによる積雪深・積雪水量の推定も試みられており、降水と同様な全球・長期間をカバーするデータセットが作成・公開されている⁴⁾。また、地域・流域スケールでは、航空レーザー測量に基づく詳細な積雪分布の把握も試みられている。さらに、温暖化に伴う降雪・積雪量の減少や融雪流出の早期化だけでなく、アンサンブル気候予測データベース (database for Policy Decision making for Future climate change : d4PDF) を用いて将来気候のもとでの豪雪の規模や発生頻度の変化について検討した事例も報告されている⁵⁾。

蒸発の研究は、植物の茎や幹内を流れる蒸散流を測定する方法や同位体比を利用する方法など、対象が限られるものの、新たな技術の導入も図られてきた。森林樹木による蒸散量を見積もる技術として、グラニエ法など、樹液流速の測定値から単木蒸散量を見積もる安価な技術が開発され、広く普及しつつある。単木蒸散量の見積を可能とする技術は、森林管理による蒸散量や森林内の水移動の変化を予測する技術を開発する上で、非常に有効な技術である。全体としては、より短い時間スケール、より広域を対象とした蒸発（散）量の評価へ進むとともに、蒸発散の構成成分を蒸散、地面蒸発や遮断蒸発に分ける努力がなされてきている。

河川流量観測法について、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry : PIV) や粒子追跡法 (Particle Tracking Velocimetry : PTV)、LSPIV 法 (Large Scale PIV)、STIV 法 (Space-Time Image Velocimetry) が実用化されている。3次元流速観測が可能な多層式超音波ドップラー流向流速計も広く用いられている。降雨から流量を推定する手法は、現在では数値地図情報をを用いた分布型物理流出モデルが主流になりつつある。汎用ソフトとしてデンマーク水理・環境研究所の流域水循環解析統合ソフト MIKE-SHE や米国環境保護庁の SWMM (Storm Water Management Model) などが洪水対策や水資源計画に利用されている。国内では、リアルタイムの水位データを利用した同化手法の導入や数時間先の降雨データを用いた予測手法などの開発が進んでいる。安価な危機管理型水位計を全国に配置し、詳細な洪水予報も進められている。

地下水に関する研究は、地盤沈下が世界で社会問題を引き起こした 1960 年代から 1970 年代にかけては、地盤沈下問題を地下水流動問題として数値解析する研究が行われるようになった。1980 年代に入ると、有害廃棄物の投棄や不注意による有害物質の地下への漏えいによる地下水汚染問題がクローズアップされるようになり、現在に至るまで様々な研究が行われている。

水循環研究における同位体の利用については、水分子を構成する水素・酸素の安定同位体をトレーサー（追跡子）として用いる手法は降雨流出・地下水流動・蒸発散・大気水循環などの各過程について適用され、また水素や水中溶存炭素・塩素などの放射性同位体は年代測定に用いられてきた⁶⁾。これらによって水の起源・流動経路・滞留時間などの情報が実測値にもとづいて得られるようになった。レーザー分光分析法が普及し、現在では世界標準になりつつあり、この技術は航空機観測や衛星リモートセンシングなどにも応用され、新たなデータを提供している。一方、観測された同位体データを（時）空間的に補間して同位体マップを描くアイソスケープ手法が 2000 年代に大きく進展し、観測値が得られない地点での同位体比が推定可能になるとともに、応用範囲を拡大している。

応用研究としてダム運用高度化は気候変動下において期待が高まりつつある。1990 年代頃から、気象・水文予測情報と初期の人工知能技術を活用したダムのリアルタイム操作支援に関

する研究が行われた^{7),8)}。2000年代には、既存貯留施設を有効に活用することで大規模な出水への対応や利水安全性の向上を図る機運が高まり⁹⁾、ダム弾力的運用に関する研究が行われてきた。富栄養化などの水質問題、濁りによる下流河川の生物生息環境への影響に加え、高経年化による堆砂量の増大や流木対策の研究も展開されている。国は、既設ダムの長寿命化、効率のかつ高度なダム機能の維持、治水・利水・環境機能の回復・向上、ダム再生技術の海外展開、ダムツーリズム等の推進による地域振興への寄与などを掲げ、既設ダムを有効活用するダム再生事業を推進している。

ローカルな洪水や渇水も、元をただせばエルニーニョ南方振動や気候変動などに伴う地球規模の水循環変動によって生じており、その観測と理解、予測技術の向上は国際連合教育科学文化機関「国際水文学十年計画」（1965～1974年）以来の主要テーマである。地球温暖化に伴う気候変動など地球環境問題が国際的な課題となった1990年代以降、大気モデルと陸面モデルによる全球水循環変動推計などによる世界の水需給バランス推計や気候変動が水分野を通じて社会に及ぼす影響の推計などにおいて日本が世界をリードしている。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

水循環分野では近年、雨量観測技術が進んでいる。X帯に続き、C帯のレーダーも二重偏波ドップラー化されて雨量推定精度を向上し、インターネットとスマートフォンの普及に伴って、雨量推定、短時間降雨予測、3次元情報の利用、出水予測等への利用を促進している¹⁰⁾。その中ではレーダーに仰角があることでレーダーから遠いところを計測する際には上空を探知することで異なる降雨強度を算出する vertical profile of reflectivity (VPR)¹¹⁾の解決が課題となる。一方、3次元で降水システムを測定する点において牛尾¹²⁾によるフェーズドアレイ気象レーダーは30秒で天球内の radar reflectivity factor をすべて観測できる点で革新的な研究である。レーダーを用いて降水強度を推定して短時間降雨予測を行う技術は進んできている。三好ら¹³⁾はスーパーコンピュータ京を使って前出のフェーズドアレイレーダーのデータを気象庁の非静力学的メソスケールモデルに対して30秒ごとに同化を実施して30分先までを予測するビッグデータ同化手法を開発している。原理的には力学的方法を用いているので、計算能力の向上を見込めば30分以上の降雨予測に対しても期待が持てる。利用について、貯水池管理、河川管理と言った大規模施設の管理だけでなく、下水道の管理や、道路交通情報^{14),15)}と高性能レーダー雨量計ネットワーク (eXtended RAdar Information Network : XRAIN) のレーダー情報を組み合わせることで冠水等による交通障害検知の可能性があげられる。また、衛星観測においても TRMM の後継ミッションである全球降水観測 (Global Precipitation Measurement : GPM) は雪や弱い雨も対象とするため2周波レーダーを搭載、観測を継続している。流量観測においても無人航空機 (Unmanned aerial vehicle : UAV) や設置カメラ画像を用いたもの、複数の観測の様々な組み合わせが試行されている。一方で、情報量が膨大になり、解釈や理解を困難にしている事例もある。

水文学の推定値を実用に用いる研究も進んでいる。都市およびその周辺域での大気環境の再現精度は、近年の計算機能力向上と、空間平均モデルや $k-\epsilon$ モデルなどの乱流計算スキームの向上を背景に、飛躍的に向上しつつある。現在は、理想的な条件下でのシミュレーションから、より大規模な大気場の再現や、メソ気象モデルとのカップリング、データ同化など、よ

り現実な大気場でのシミュレーションへ技術開発のターゲットがシフトしている。今後は、実際に人間が往来する、複雑な3次元構造を持つ都市内部のストリートキャニオン（ビル間）における大気乱流や放射伝達など、実際に人間が生活する場の熱環境、放射環境の再現が課題である。そのためには、新たな乱流スキームや放射スキームの開発が必要となる。また、人間の生活場としての快適な都市の大気／放射環境を実現するためには、大気場のシミュレーションに加えて、大気場に対する人体の生理反応のモデリングが必要となる。

気象・水文予測情報などを活用して、出水が予測される場合にあらかじめ放流を行い、多目的ダムの貯水位を事前に下げることで洪水調節のための空き容量を増大させる事前放流操作に関する研究が近年行われている^{16),17)}。雨水の流出時間が短い傾向にある我が国ではこうしたきめの細かい操作が必要であることもあり、この研究分野では世界をリードしている。また、近年、EUや米国、日本などで提供されている現業アンサンブル気象予報のダム運用への利活用に関する研究も各国で行われている^{18),19),20)}。大ダムの新設が難しくなっており、既設ダムの高経年化対策と長寿命化に向けた技術開発が主体である。設備管理へのUAVやロボットの活用、AI、IoT、ICTなどの活用、AR、VR技術を活用した技術継承支援システムなどが最近のトピックスである。

水循環モデル開発では、ダム貯水池操作や灌漑取水、灌漑需要を推計するための穀物作付け成長モデル、地下水からの取水などの人間活動を組み込んだ陸面モデルや、氾濫を考慮可能なグローバル水動態モデルなどが開発され、現時点では日本が世界をややリードしている。また、観測雑音のため精密な氾濫計算には利用が難しかった全球デジタル標高データの大幅な改良、国際共同による準実時間でのGSMaPの配信など境界条件情報の向上により、精度の良い実時間での全球水循環モニタリングが可能となりつつある。

他に地下水の恒温性を利用したヒートポンプシステム（地下水熱利用ヒートポンプシステム）が近年注目されている。10m以深の地中温度は、年間を通じて一定であり、その温度はおおよそ平均気温プラス1℃から3℃である。この特性を利用して、夏には冷熱を使った冷房、冬には温熱を使った暖房が行われている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology）
- ・統合的気候モデル高度化研究プログラム（TOUGOU）
- ・環境省環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクトS-14、気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究（MiLAI）
- ・Panta Rhei、IAHS

（5）科学技術的課題

降水観測ではフェーズドアレイ気象レーダーなどの高時空間分解能レーダーからの同化による力学的降雨予測手法の計算速度の向上と精度向上が課題である。また、降雪の推定精度の向上も望まれている。全球の降雨推定において衛星利用が実用化され、TRMM、GPM共に正確な降水観測を実施するが、時空間的カバー率が極めて低い。ギャップをカバーするためには高性能マイクロ波放射計シリーズに代表される観測頻度の向上および長期観測の実施、降水推定

アルゴリズムの改良、ひまわり 8 号に代表される第 3 世代静止気象衛星データによる時間補完、ならびに静止気象衛星データによる降水推定手法の開発、が挙げられる。重要なことは、これらの技術的課題を現象理解および検証²¹⁾も含め包括的、かつ連動性を高めることが極めて重要である。我が国では JAXA の主導で GSMaP の開発改良を行っている²²⁾が、国際競争と国際貢献の観点からも今以上の連動性が求められる。

水循環において、蒸発散は未知のことが多い。現在、理論、技術ともある程度定常的に蒸発散量を評価出来る体制が整ってきているが、測定に必要な機材が高額なため、研究目的以外では蒸発散量の測定が行われておらず、必要な場所、必要な時に蒸発量のデータが存在しないことが最大の課題である。このため、蒸発量の時空間的な分布や変化については、未解決な問題が残されている。また、蒸発と密接に関係する様々な現象、例えば、二酸化炭素の吸収・放出、農地の灌漑や水消費、気候変化などを蒸発散とともに取り組む必要がある。

地下水も観測データ不足が研究を妨げている。帯水層の不均一性は、地下水の流動を大きなスケールで見た場合には大きな問題にはならず、その流向や流速はおおよそ把握できる。しかし、小さなスケールが対象となる場合（例えば、土壌・地下水汚染サイトなど）には、帯水層の不均一性が地下水の流れや物質の輸送を複雑にしており、地下水位や地下水質の観測精度に影響を及ぼしている側面がある。

地下水の流動とならんで観測データが不足しているのが積雪情報である。受動型マイクロ波センサーによる積雪推定手法は、積雪の面的分布だけでなく積雪量（積雪水量）の把握も可能である一方、空間解像度が低いため地域・流域内の積雪量の把握は困難である。また、林床積雪や湿雪に対する推定精度の低下などの問題を克服するためには、積雪量推定アルゴリズムの改良や積雪を対象とした陸面データ同化手法の開発などが必要である²³⁾。さらに、積雪・融雪モデルや衛星アルゴリズムの検証に利用できる地上観測データの不足も当該分野における課題のひとつであり、今後、湿雪地域を含む多様な積雪地域への検証サイト設置と長期データの取得・蓄積が望まれる。

多様な水文過程の理解に重要な同位体観測においてレーザー分光分析計はメンテナンスの容易さと堅牢さが大きなアドバンテージと言えるが、水蒸気同位体比の原位置測定においては水蒸気濃度変動に対するキャリブレーション手法が未確立といった問題がある。アイソスケイプ手法についても、地域や時間スケール（特に月単位以下）によって補間値の精度が十分ではなく、改善が必要である。

水循環研究の重要な目的である水資源利用においてダムの影響は大きく、課題は多い。気象・水文予測情報に基づいたダム事前放流では、治水水面での効果が見込まれる一方、予測情報の精度が十分でない場合には、出水後の水位を十分に回復できない可能性があるなど、利水面でのリスクの増加が懸念される。予測の不確実性を考慮した上でのロバストな操作方法の開発が課題として挙げられる。予測の精度に関する情報が含まれるとされるアンサンブル予測情報の活用は有効だと考えられるが、研究事例は十分でなく、アンサンブル予測に含まれる膨大な情報のダム操作への有効活用に向けた更なる研究が求められる。また、維持管理としてダム高経年化による堆砂量の増大へ対処しつつダム機能を維持していくために、河川の生物生息環境に配慮した土砂マネジメント手法（ダムリフレッシュ・連携排砂・通砂運用）の確立、および異常出水による流木災害の減災技術の開発は取り組むべき研究である。これらの問題に対応するため、国が推進する既設ダムの有効活用に向けたダム再生事業に加え、貯水容量や発電量の増加

を目指した「ダム嵩上げ」に係る技術開発が始まっている。

気候変動の影響はほとんどが水を通じて人間社会に悪影響を及ぼしており、気候変動影響の経済的な定量化と、適応策の費用便益、さらには、人間の well-being に及ぼす影響を踏まえた最適な緩和策と適応策のバランスを求める研究が喫緊に求められている。

（6）その他の課題

日本の水循環の研究は政策的課題の影響を強く受けている。水循環基本法（平成 26 年法律第 16 号）は、多くの関係機関にまたがる水循環施策を総合的、一体的に推進することを基本的理念としている。内閣官房の水循環政策本部（本部長：内閣総理大臣）では、水循環基本法に基づき、政府が水循環に関して講じた施策を毎年国会に報告する。この中で、科学技術振興の観点からは、①流域の水循環、②地下水、③水の有効利用、④水環境、⑤全球観測の活用及び⑥気候変動の水循環への影響に関して取り組まれたさまざまな調査研究プロジェクトの概要と成果が報告されている。健全な水循環の維持・回復のための流域の総合的かつ一体的な管理（management）を推進するために、関係する行政などの公的機関、事業者、団体、住民等が相互に連携して活動するために流域水循環協議会を設置し、流域の保全や管理、施設整備及び活動の基本方針を定めた「流域水循環計画」を策定して共有することになっている。計画の目標や目標達成のために実施すべき施策は、この計画を各地域の流域の関係者が共有し、相互に協力することによって森林、河川、農地、下水道、環境等、水循環に関する各種施策の連携のもと、効果的な課題解決が図られることになる。「水循環」に関するさまざまな活動の評価は「流域水循環計画」を策定し実行していく上で、何に貢献することにつながるのかをひとつのメルクマールにすべきである。

これらの取り組みは、わが国における健全な水循環を維持・回復することに寄与するのみならず、世界各国がそれぞれの自然・社会条件のもとで抱えている水循環にかかる課題を解決する上で、わが国がこれまで蓄積してきた、また蓄積しつつある知恵と経験を活かして、国際社会の中で応分の役割を果たしていくための基盤となるとともに、いわゆる「水ビジネス」としてわが国の経済成長の原動力になることも期待される。

世界的に水資源の不足は深刻であり、灌漑用途などのため化石水の過剰な汲み上げなどの問題が発生しており、持続可能性に係わる課題として注目を集めている。先進国都市部などの生活において直接的に利用した水だけでなく、世界の多くの水資源を利用していることを意識するため、製品やサービスの提供にどの程度水が使用されたかを表すウォーターフットプリントという概念や、食料や製品の輸出入にあたって、その生産に用いられた水資源をバーチャル・ウォーター（仮想水）として推計する手法が提案され、欧州を中心に少しずつ普及している。

(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	◎	→	●レーダーを用いた雨量観測の精度向上が進められている。 ●地球規模の水循環や気候変動適応策に関する研究が体系的に実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	●水文モデルの生態、産業、人間活動などへの利用が急速に進んでいる。 ●ダムの有効活用や柔軟運用、連携運用などの研究が世界をリードしている。 ●広域の中小河川の流出予測の開発が進んでいる。
米国	基礎研究	◎	→	●地球規模の水循環や気候変動適応策に関する研究が体系的に実施されている。 ●衛星情報を利用した全球スケールの基本データの構築で力を持ち続けている。
	応用研究・開発	◎	↗	●NSFのINSPIREにおいて地球表面水文モデルの開発が急ピッチで進められている。 ●Water CouncilやWater Startなど、行政と大学の企業が連携して事業化する技術開発や研究開発の枠組みが構築され、応用研究や革新的な技術開発が進んでいる。 ●近年のEnergy Water Nexusへの関心の高まりにより、Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)などが急ピッチでモデル開発などを進めている。
欧州	基礎研究	○	→	●第7次フレームワークプログラム (FP7) から Horizon 2020 を通じて水の効率的な利用技術のイノベーション促進を図っている。 ●モデル開発やシミュレーション分析においては、ウォーターフットプリントなどの新しい基本概念の提唱と普及には圧倒的な伝統と力がある。また、灌漑農地分布地図など、独創性と重要性の高いデータを収集・公開するなど分野全体をリードしている。 ●英国でHyporheic帯 (伏流帯) (HypoTRAIN) や応用統計水文学などの研究プロジェクトがEUのファンドで行われており、Brexit後の展開に懸念がある。
	基礎研究	○	→	●ドイツのハノーバー大学を中心とするグループが、躍進的な進歩を遂げている並列計算技術を生かした、大気乱流シミュレーションモデルの開発を行っている。近年では、実際の都市計画などへの貢献を念頭に、より現実に近い計算設定での大気乱流シミュレーションが可能になりつつある。
	応用研究・開発	◎	→	●Green Blue Cityの研究プロジェクトなど、都市雨水管理とグリーンインフラの応用研究が、多様な利害関係者を含めて展開されており、先駆的な取り組みが実施されている。 ●人間活動を含む全球水文モデルが複数、精力的に開発されている。若く才能のある人材も引き続きこの分野に流入している。 ●英国ではUKCIPが洪水のソフト適応策を充実させている。渇水も同様で複数の事例研究、実施を行っている。 ●スイス連邦工科大学チューリッヒ校とオランダのデルフト工科大学は水資源分野の世界ランキング (ARWU2018) で世界2位、3位であり、それぞれモデル開発と水文環境分野で質の高い成果を出している。
中国	基礎研究	○	→	●これまで全球スケールの水文研究には大きな関心を持っていないようである。
	応用研究・開発	○	→	●現政権が強力に開発を推進しようとしている雄安新区にかかわる水環境整備、水資源確保、都市洪水対策研究が急激に発展しようとしている。 ●モデル分野には優れた研究者が多く、予算が付けば大きく飛躍するポテンシャルは秘めている。
韓国	基礎研究	△	→	●全球スケールのモデルには、ほとんど関心を持っていないように見受けられる。
	応用研究・開発	△	→	●研究者の絶対数が日本よりもさらに少なく、複数の分野を1人の研究者が担わざるを得ない状況である。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

- 1) 深見和彦、土屋修一、山地秀幸「レーダ雨量計開発開始から50年の歩み」『河川』842号(2016):17-21.
- 2) 水管理・国土保全局河川計画課河川情報企画室「国土交通省レーダ雨量計の現状と観測技術」『河川』842号(2016)8-10.
- 3) C. Kummerow, *et al.*, “The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15(1998): 809-817.
- 4) D. K. Hall and G. A. Riggs, “MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6,” Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center (2016).
- 5) H. Kawase, *et al.*, “Enhancement of Heavy Daily Snowfall in Central Japan Due to Global Warming as Projected by Large Ensemble of Regional Climate Simulations,” *Climatic Change*, 139, no. 2(2016): 265-278.
- 6) C. Kendall and J. McDonnell ed, *Isotope Tracers in Catchment Hydrology* (Elsevier, 1999).
- 7) T. Kojiri and S. Sakakima, “Decision support system of reservoir operation considering weather forecast and hydrograph similarity,” *IAHS Publications* No.213(1993):429-438.
- 8) S. K. Jain, A. Das and D. K. Srivastava, “Application of ANN for Reservoir Inflow Prediction and Operation,” *Journal of Water Resources Planning and Management* 125, no. 5(1999): 263-271.
- 9) 国土交通省「豪雨災害対策緊急アクションプラン」(2004)
- 10) 中北英一「レーダ雨量計への思い」『河川』842号(2016):3-7.
- 11) J. Kalogiros, *et al.*, “Correction of Polarimetric Radar Reflectivity Measurements and Rainfall Estimates for Apparent Vertical Profile in Stratiform Rain,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52, no.5(2013): 1170-1186.
- 12) 牛尾知雄「30秒更新10分後までの超高速降水予報を開始～最新鋭気象レーダを活用したリアルタイム実証～」(2017)
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170704/index.html> (2019年2月1日アクセス)
- 13) 例えばJST-CRESTプレスリリース「30秒更新10分後までの超高速降水予報を開始」
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170704/index.htm> (2019年2月1日アクセス)
- 14) 三石真也、尾関敏久、角哲也「WRFによる降雨予測を活用した新たな洪水調節手法の適用性検討」『水文・水資源学会誌』24巻2号(2011):110-120.

- 15) G. Uysal, *et al.*, “Real-Time Flood Control by Tree-Based Model Predictive Control Including Forecast Uncertainty: A Case Study Reservoir in Turkey,” *Water* 10, no. 3(2018): 340.
- 16) S. Oishi, *et al.*, “Optimization of Integrated Operation of Dams Using Ensemble Prediction,” *Sustainable Water Resources Planning and Management Under Climate Change*, 133-154, 2016
- 17) D. Nohara and T. Hori, “Integrated Reservoir Operation Considering Real-Time Hydrological Prediction for Adaptive Water Resources Management,” *Sustainable Water Resources Planning and Management Under Climate Change*, 101-132, 2016
- 18) B.A. Faber and J.R. Stedinger, “Reservoir Optimization Using Sampling SDP with Ensemble Streamflow Prediction (ESP) Forecasts,” *Journal of Hydrology* 249, no. 1-4(2001): 113-133.
- 19) D. Nohara, A. Tsuboi and T. Hori, “Long-term reservoir operation optimized by DP models with one-month ensemble forecast of precipitation,” *IAHS Publications* No.331(2009): 284-295.
- 20) F. Wang, *et al.*, “Ensemble Hydrological Prediction-based Real-time Optimization of a Multiobjective Reservoir during Flood Season in a Semiarid Basin with Global Numerical Weather Predictions,” *Water Resources Research* 48(2012), no. 7: W07520
- 21) T. Terao, *et al.*, “Direct Validation of TRMM/PR Near Surface Rain over the Northeastern Indian Subcontinent Using a Tipping Bucket Raingauge Network,” *Sola* 13(2017): 157-162.
- 22) T. Kubota, *et al.*, “Global Precipitation Map Using Satellite-Borne Microwave Radiometers by the GSMaP Project: Production and Validation,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, no. 7(2007): 2259-2275.
- 23) 筒井浩行「受動型マイクロ波センサーによる積雪のリモートセンシング」『雪氷』69 巻 2 号 (2007):169-184.

2.19 水処理

（1）研究開発領域の定義

水処理に関する科学、技術、研究開発を記述する。

安全な水供給のための、微量・網羅性・即時性・簡易的な化学物質や病原微生物の分析技術、物理的・化学的・生物学的な各種処理技術などの要素技術開発に加え、デジタル化やAIを活用した効率的なシステムや、海水淡水化・再生水・超純水等を目指したシステムの構築を対象とする。途上国や災害時、過疎地での用途を目指した分散処理システムも含める。

気候変動の影響による水質の変化や、河川や沿岸での親水や生態系を考慮した水処理レベルの評価も対象とする。

（2）キーワード

飲料水、工業用水、産業排水、下水、浄水、水道水質基準、重金属、栄養塩（窒素、リン）、病原微生物、化学物質、有害物質、臭気原因物質、急速濾過、膜処理、逆浸透、正浸透、消毒、紫外線、アナモックス、微生物燃料電池、バイオマス、水道システム

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

水処理技術は多量の水を必要とする現代の暮らしや生産活動に必須の人間社会の存立に欠かせない技術である。水処理技術により、飲料に適さない様々な水を飲料に適する水質に変換したり、一度使用した水を再生利用したり、従来使用できなかった水資源を利用したりすることができる。また、公害を防止し、環境を維持するために、廃水を浄化してから環境に排出することも必要である。近年は、都市における人口集中、より利便性を追求した種々の製品の製造工程や仕様に起因する新たな化学物質等の出現などにより、河川、湖沼、地下水などの水道水源として利用してきた水道原水の汚濁が進み、これに対応した水処理技術（浄水技術）の革新が求められている。世界的な人口増、工業・農業などの産業活動の増大にともない、水資源がひっ迫している地域が増えており、海水、下水処理水などを原水として飲料水を製造する技術の開発が求められている。浄水技術の基本形は既に確立された技術ではあるものの、以上のような地域的あるいは地球的規模での状況の変化に伴い、水処理技術の革新が求められており、社会的なニーズの極めて高い領域である。また、技術の適用にあたっては、適用する地域の自然的、社会的条件が様々であることから、最適技術を適用するための手法の開発も重要なテーマとなっていることが特徴である。浄水技術は、原水とする水の性状、処理の結果、供給する水道水の水質レベル、必要とする土地の面積、必要となる建設および維持管理・運転コスト、必要な技術者の数とレベルなどの様々な要因の制限をうけるため、これらの状況に応じて適した浄水技術は異なることに留意が必要である。

とくに、世界的には、衛生的なトイレを利用できない人や安全な飲料水を入手できない人が多くおり、その解消が国連でもSDGsのひとつとして、取り上げられている。我が国の水処理技術が世界展開することによって、我が国の産業の振興はもとよりSDGsにも資することができる。

〔研究開発の動向〕

水処理には、大きく分けて用水処理と廃水処理（排水処理）がある。用水処理技術の対象とする原水は、地下水、表流水（河川水、湖沼水）、海水などの自然環境の水に加えて下水処理水も含まれる。用水処理技術は原水から生活用水、工業用水などを製造する技術であり、上水道で用いられる浄水技術も用水処理技術の一つである。一方、廃水処理技術は、生活廃水や工場廃水を環境に排出して問題のないレベルまで処理する技術であり、下水処理も廃水処理技術の一つである。広義の水処理技術には、吸着剤や膜、凝集剤などの材料・化学製品に関する技術、汚泥のかき寄せや散気装置、オゾン発生装置、水質測定機器などの機械技術、リアルタイムに送気量などをコントロールする制御技術、水資源管理や水処理設備の施工に関する土木技術などを含む。

上水道における用水処理技術は、様々な汚濁物質あるいは飲用に適さない成分を含む原水から、これらの物質を除去し、安全でおいしい飲料水を製造するための技術が求められる。技術開発内容は大きく、①濁質等、金属類、塩類、化学物質、微生物類などを効率的に水中より除去する技術、②個々の水処理技術を他の要素技術と組み合わせてシステムを構築し、場合により IoT や AI などの技術を活用しながら、より効率的に処理を行うシステムの開発、③最先端の技術開発だけではなく、途上国対応、災害時対応などの多様な条件における適用を考慮した最適なシステムの開発、などに分類される。

人為的汚染が進行していない原水を対象とした用水処理技術は、濁質および病原性微生物を除去するための緩速砂ろ過、急速砂ろ過などの濁質の除去技術と塩素消毒などの消毒技術の組み合わせた技術で基本的には対応できるが、水源水質の悪化や新規汚濁物質への対応の必要性などから、急速砂ろ過への新たな処理プロセスの付加、膜処理などの新たな技術の適用が進められてきた。また、維持管理の容易さ、必要とする敷地面積の削減などのニーズに対応するため、膜処理技術の革新が進められてきている。

微生物分解しにくい成分の分解を目的としたオゾン処理技術は 1990 年ごろから急速に普及した。紫外線（Ultra Violet: UV）照射による消毒も同時期から広まり、新しい光源として UV-LED が注目されている。活性汚泥処理においても、その運転を工夫することにより窒素やリンを除去できるプロセスが 1970 年代から次々に開発され、1990 年ごろから現在まで徐々に普及が進んできている。凝集剤、消毒剤などの水処理用薬品は、急速ろ過法が標準的造水方法となった第二次世界大戦後にその製造量が都市や産業の成長とともに大幅に増え、とくに凝集剤は高性能のものが次々と開発されてきた。また、消毒用塩素については、消毒副生成物の問題が指摘されたため、その注入方法や貯蔵方法などの技術的工夫がされてきた。

上述の技術開発の進展から、現在の先端技術の完成度として、原水水質が非常に良好で、除去すべき対象物質が濁質と細菌類（塩素によって対応可能）のみである場合、技術水準はほぼ 100% である。臭気原因物質や化学物質への対応が含まれる場合の技術水準は 90% と評価され、効率性の向上やコスト削減などが課題として残される。除去対象として、クリプトスポリジウムなどの塩素耐性の微生物が含まれる場合、地表水が対象の場合は急速砂ろ過で対応可能であり、技術水準は 95% である。急速砂ろ過以外のより効率的な膜ろ過や UV 照射を利用するシステムに関しては、効率性の向上への対応では、技術水準は 80% 程度である。

特に水資源がひっ迫している地域（中東、アメリカ西海岸、オーストラリア西部、地中海沿岸、中国など）では、海水淡水化技術の効率化が求められてきている。そのため、従来の主要

な技術であった蒸留法から逆浸透（Reverse Osmosis：RO）法を利用した技術への変化が進んでいる。RO 法について、よりエネルギー効率の良く、耐薬品性、耐久性に優れた膜の開発、加えたエネルギーを回収する技術の開発、特にほう素など海水中に含まれていて、飲料水中における濃度が制限される物質のより効率的な除去方法の開発などの実用上の要請に対応するための研究開発が進められている。RO 膜を利用した技術では日本が世界をリードしているといえる。ただし、海水淡水化システムの開発は中国、韓国などでも研究開発が進んでおり、必ずしも絶対的な優位にあるわけではない。中国では、水道水源が悪化しており、化学物質対応の浄水処理技術の開発が中心となっている。アメリカ、ヨーロッパでは、膜技術メーカーが存在するため、膜処理関連の技術において高いレベルを維持している。

また、下水処理水を水道水源として位置づける傾向は、水資源のひっ迫とともに議論が進んでいる。下水処理水の飲用利用は、間接的再利用と直接的再利用に分類される。間接的再利用は、下水処理水を一度、自然水系あるいは地下水系に開放させ、その後、適切な浄水処理によって飲料水を製造し、供給するシステムである。一方、直接的再利用は、下水処理水を RO 膜、UV 照射などの技術を駆使して一挙に飲料水として適合するレベルの水質まで変換し、そのまま自然水系に開放することなく供給するシステムである。都市域における河川水に下水処理水が含まれる割合は、場合によっては 50%以上となることもあり、直接再利用システムと間接的再利用システムにおいて、浄水処理工程における原水水質は極端に異なるわけではない。しかしながら、システム異常への対応方法、住民感情への対応など、水処理技術以外の要因により、その適用に当たっては多くの考慮すべき要因が存在する。

水処理プロセスで産生する汚泥の減量やその農業などでの利活用、栄養塩や炭素資源の地域での循環などに関しても、継続的に様々な技術開発がなされている。汚泥を嫌気性消化して得られるメタンによる発電技術などエネルギー回収技術も長く注目されている。

水処理に用いる化学製品としては、各種水処理薬剤に加えて、イオン交換樹脂、キレート吸着樹脂、活性炭、膜などがある。このうち、イオン交換樹脂は、半導体製造用水など純水製造には欠かせない技術であり、キレート吸着樹脂は、工場排水中の重金属の回収のための主要技術である。活性炭も各種水処理に広く用いられる吸着剤で用量も多い。膜については、素材改良に加え、エンジニアリング面を含めて、1990 年代から急速に水処理での使い勝手がよくなり、様々な水処理に利用されるようになってきた。とくに大きな進展が見られたのが、精密ろ過膜と微生物処理を組み合わせた膜バイオリアクター（Membrane Bioreactor：MBR）による廃水処理技術と RO 膜による海水淡水化技術である。

また、日本をはじめ世界各国の排水基準や水道水質基準は年々、厳しくなっている。対応が必要な物質が増加し、その都度、新たな除去技術の開発や既存の水処理装置の運転改良による除去率の向上が目指されてきた。ノロウイルスのように都市化とともに、下水・沿岸域・魚介類・ヒト・下水という病原体の循環経路の確立が疑われ、感染症対策としての廃水処理技術の革新が求められている。一方で、栄養塩を含んだ水を排水した方が、漁業の振興にはなるとの見方も存在し、季節によって栄養塩の除去率を調整した運転を行う技術も開発されてきている。一部の物質を完全に除去しながら、一部の物質を除去しすぎないことも水処理技術にとっては難しいチャレンジングな研究課題である。さらに、エネルギー使用の効率化、高齢化や人手不足問題に端を発する維持管理の効率化なども水処理技術に求められている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

- 海水淡水化技術のエネルギー消費量、および維持管理コスト削減は大きなトピックとなっている。そのために、より耐久性の高い膜の開発（ロバスト膜）やより透過性の高い膜が注目を集めており、ポリマーに炭素粒子を混合させるなどの技術が開発されている。
- 浄水処理技術を急速ろ過法から、より水処理性能が高度で確実な膜ろ過方式に変更する検討がなされ、維持管理コスト削減のため大型化、効率化が大きなテーマとなっている。特に、原水水質が良好とはいえない地表水への適用について、各国のメーカーがしのぎを削っている。例えば、従来のポリマー膜ではなく、セラミック膜を利用した技術の適用は進んでおり、モノリス型の円筒形膜ユニットを集積した大型ユニットの開発が注目を集めている。
- UV 照射技術は、塩素耐性のあるクリプトスポリジウム対策として極めて有効であることが分かってきているが、UV ランプに水銀を用いていることが、今後の水銀規制に関連して大きな問題となっている。近年 UV-LED の開発が進んでおり、既に製品レベルまでの開発が進んでいる。日本では 2017 年に水道技術研究センターによる UV-LED 認定制度ができています。
- RO 膜では原水側から高圧をかけることからエネルギー消費量が多いことが問題となってきたが、原水を持つ浸透圧をそのまま活用して、加圧することなく水を透過させる正浸透技術の開発が進んでいる。正浸透用の膜は RO 用の膜とほとんど同じであるものの、ユニット化の工夫、および正浸透に用いるドロー溶液の選定が課題となっている。現状ではアンモニア、二酸化炭素などの揮発性の物質を用いることが多いが、水との分離が容易なポリマーを利用したシステムの開発も進んでいる。
- 飲料水製造とは直接の関連はないが、海水と淡水との濃度差を利用し、RO 膜や電気透析膜を用いて発電するシステムの開発が進んでいる。これらは、従来のエネルギーを利用して、海水から高濃度海水と淡水を製造するシステムの逆のシステムであり、低炭素化社会への対応として注目される。
- 微生物処理に関する新たな技術としては、1990 年代後半から嫌気性アンモニア酸化（アナモックス）反応が注目され、窒素を多く含む産業排水処理への導入を念頭に、運転技術が今日まで開発されてきている。また、2000 年ごろから、微生物燃料電池にも関心が集まっており、廃水処理をしながら発電ができる可能性が追及されてきている。
- 凝集剤などの水処理薬剤の開発は各メーカーが引き続き取り組んでいる。MBR や RO など膜を用いた水処理技術の研究開発は盛んで、従来の圧力をかけて水を絞り出すのではなく、浸透圧差で水を絞り出す正浸透（Forward Osmosis : FO）技術が 2000 年ごろから着目されている。排水に含まれる栄養塩、エネルギーなどの回収、有効利用技術についても様々な試みがなされている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 水道技術研究センターでは、2015 年～ 2018 年「A・Batons（アクア・バトン）」「Aqua・Best available technology on new system (to Next Generation)」が進められている。そこでは、①自然条件等の変化が浄水処理に与えている障害を抽出し、今後、増大すると考えられる障害に対する有効な対応策を提案し、社会条件等の変化に対する膜ろ過浄水技術の活用策

の検討、②技術継承において課題となる事象の選択、分析、必要な対策等を整理し、技術継承、人材育成のためのツール等の作成をおこなっている。

- 信州大学、日立製作所、東レ、昭和電工、物質・材料研究機構、長野県の共同で「世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点」が文部科学省と JST の COI プログラム (The Center of Innovation Program)¹⁾ の一つとして推進されている (2021 年までの予定)。カーボンナノチューブを配合させた RO 膜の開発と応用技術を開発している。
- 日立製作所と東レは NEDO 「省エネルギー型海水淡水化システムの実規模での性能実証事業」 (2018 年 4 月～2023 年 3 月) を実施している²⁾。この実証事業は内閣府が 2009 ～2013 年度に実施した最先端研究開発支援 (FIRST) プログラムのひとつである「Megaton Water System」による RO 膜関連の成果を実証する機会として期待される。
- 経済産業省資源エネルギー庁「微細藻類を活用したバイオ燃料生産のための実証事業費補助金」 (2016 年度～2018 年度) では、一般社団法人藻類産業創成コンソーシアム、熊谷組、高砂熱学工業、筑波大学、日水コン、富士通クオリティ・ラボ・環境センター株式会社、MoBiol、三菱化工機が共同で、下水からの藻類バイオマスの生産を研究している³⁾。
- 米国環境保護庁 (EPA) ではテーマを設定した競争資金を提供しており、水処理と直結した研究として、2018-2020 年実施の「飲料水中の鉛の測定と制御 (総額 3,962,500 US\$)」、2018 年に Science to Achieve Results (STAR) Program として公募中の「パーフルオロアルキル化合物の分析と処理 (総額 6,000,000 US\$ を予定)」などがある。
- European Research Council は、FP7 や Horizon 2020 などの形で様々な研究に資金を拠出しているが、2017 年～2022 年に総額 1,493,734 ユーロで「還元型酸化グラフェンによる水処理」、2017 年～2021 年に総額 1,500,000 ユーロで「相分離によらない分離膜の製法」など、分離膜や水処理素材に対しての大型研究支援が目立つ。

(5) 科学技術的課題

- 産業的な実用化が期待される水処理に関する課題は機械工学 (オゾン生成器、分析機器) や化学素材 (RO 膜、MBR 用精密ろ過膜、各種吸着剤、凝集剤) の分野に多い。水処理膜、光触媒、特殊生物処理、UV、凝集剤、吸着剤などの日本が得意とする分野に集中投資を行い、実用化を促進することで産業の国際競争力の向上が期待できる。一方、学術的に注目される課題には分子生物学に係わる課題が多い。次世代シーケンサーを用いたゲノム解析、微生物群集解析により水処理プロセスに係わる微生物学 (水処理に関する微生物、病原微生物と薬剤耐性菌の拡散、挙動) の深化は水処理分野にとどまらず環境、医療、生物学分野への波及効果が期待できる。
- 世界的な水資源のひっ迫の状況を受け、海水や下水処理水を原水とする水処理技術へのニーズは高まっていく。これらの原水から飲料水を製造する技術はすでに確立されているものの、維持管理コストの削減、膜などの耐久性の改善、加圧などに必要となる電力の削減は引き続き大きな課題である。RO 膜では透過性、耐薬品性、耐久性などの性能が求められる。従来のポリアミドや酢酸セルロースなどのポリマー以外の素材を用いた膜の開発などが進んでいくと予想される。
- 浄水処理技術を適用する浄水場は、大都市圏以外では小規模で遠隔地にあり、維持管理の

ための人件費をかけることができない条件のものが多い。特に日本をはじめとする先進国において今後進むと予想される人口減少社会への対応において、これらの小規模浄水場への対応は大きな課題となる。スマートメーターなどによる IoT 技術や AI 技術を活用して、水処理装置の維持管理を遠隔操作で、自動的に行うシステムの開発が期待される。

- 広範囲の浄水場でのデータを集中的に管理し、データを分析しつつ、適切な維持管理を行う集中型管理システムの開発が進んでいる。今後の適用研究が期待される。
- 活性汚泥や急速ろ過といった歴史のある水処理プロセスにおいても、市場規模が大きいこと、新たな除去対象化合物や新たな資源としての回収対象物質が生じること、人手不足や市場化による維持管理の軽減化が求められることなどから、さらに技術改良する研究が必要である。
- 水処理、下水処理に係るエネルギー使用量は高い比率を占めており、地球温暖化の緩和策として、エネルギー高効率化が大きな課題である。下水熱の有効利用や廃水からのエネルギー生産などもシステムとして含めて検討する課題となる。また、下水からのリン資源などの有効資源の高効率回収システムは循環型社会の構築に貢献するだけでなく、資源ナショナリズムの高まりの影響を受けず資源自給率を高める技術であり注目される。
- 近年、世界各地で地震、津波、ハリケーン、豪雨などの自然災害が激甚化、多発化しており、浄水システムもこれらへの対応が迫られている。浄水技術そのものではないものの、浄水場その他の浄水システムを自然災害に対して強靱化する技術の開発へのニーズはさらに高まっていくとみられる。
- 自然災害により浄水システムが壊滅的な打撃を受けた後、迅速に簡易な浄水システムを構築するニーズも高まっている。具体的には、トラックなどに水処理装置を積載したモバイル水処理システムはすでに開発されているが、その機能向上は今後の課題となっている。具体的には、省スペースで高度な処理性能を担保できる膜処理装置を中心としてユニットを積載したものが中心となって開発が進んでいくと思われる。
- 管路システムが十分でない国・地域では浄水システムの分散化へのニーズが高まっていくと予想される。その際、原水水質により選定された各種の膜ユニットを用いた装置が中心となるとみられる。既に中国では RO 膜を利用した浄水器が広く普及しているが、これらの装置の信頼性の向上、コスト削減が技術革新の中心的なトピックとなっていくであろう。

（6）その他の課題

日本における下水処理分野では国土交通省 B-DASH の支援による実証実験では、実際に適用するレベルに近い技術を実装置に取り入れるなど、非常に大きなインパクトのある応用研究・開発が行われている。一方で、日本における浄水処理分野では、国などが主体となっている大型のプロジェクトが必ずしも十分ではなく、先進的な技術開発の実証試験などを進めていく環境としてはやや厳しい状況である。これは、水再利用や下水処理分野での状況を比較すると顕著であり、浄水処理分野でも B-DASH のようなインパクトのある支援が望まれる。

海水淡水化の分野では日本の膜メーカー主導による技術開発が進んでいるものの、海水淡水化が適用される地域が中東などの外国であり、特にプラント建設のレベルにおいて日本の国際競争力が低下していることもあり、システムとしての開発は日本では停滞している。また、浄水処理の分野でも一部の膜メーカーは国際競争力をつけて世界的な展開を実現しているもの

の、浄水システムとしての展開はまだ不十分である。従って、膜ユニットのレベルにとどまらないシステムのレベルでの国際競争力を日本の産業界がつけることによって、日本の産業界の技術開発力も上がっていくと期待される。

国内では、水道事業のほとんどは地方公共団体あるいは一部事務組合（県や市町村が事務を共同処理する組織の呼称）が行っており、地方議会などへの対応が必要である。また、水道システムはユーザーの多くは住民であって、常に正常に稼働していなければならない状況にある。従って、従来と異なる新たなシステムの導入に対しては、水道事業体は常に慎重であり、実績が多い、あるいは長期にわたる実証実験のデータがあるなどの条件が新技術導入の条件になることがほとんどである。また、水道事業体は、一部を除いて基本的には市町村であり、新技術導入のための余裕がないことがほとんどである。これらの背景は時には浄水技術の革新をためらわせる方向に働くので、例えば新技術によって十分な成果を得られなければ、全国的な組織によって救済するなどの仕組みなどが望まれる。また、技術の革新のためには、水道事業を広域化（例えば、電力事業のレベルのように全国の水道事業を数事業に集約）することが有効である。

社会普及や地方創成の観点では、魚類の養殖水、水族館、温浴施設などニッチな水処理市場の高度化といった観光産業と水処理技術の連携も一考に値する。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	●膜処理、UV 処理、高度浄水処理（オゾン・活性炭処理）、新規凝集剤（高塩基度 PAC）、MBR、光触媒などの技術、並びに業厳正微生物の処理、リスク評価などに関して、大学を中心として、継続的に行われている。
	応用研究・開発	○	→	●企業による技術開発は RO 膜、淡水化前処理用の限外ろ過膜、オゾン発生装置、MBR 装置などの膜製造および機械設備産業分野で世界的な地位を占めている。 ●下水道分野では国土交通省 B-DASH 支援により、下水道の有効利用の実証技術開発が進められている。 ●水道分野では国立保健医療科学院において飲料水の安全、公衆衛生研究が精力的に実施されているが、規模が小さい。水道技術研究センターでは、従来から産・官・学の共同研究が推進されてきているが、研究費は参加企業が支出する形態となっており、また規模も十分に大きいとは言えない。
米国	基礎研究	○	→	●海水淡水化や下水処理水再利用の分野での基礎研究は進んでいる。また、下水処理水を利用したときにリスク評価の研究は盛んである。 ●水処理分野のトップジャーナルである Water Research 誌への掲載件数も多く、水処理において重要な原理や新規の汚染物質に関する知見が発信されている。NSF (National Science Foundation) による継続的な基礎研究支援と環境保護庁 (EPA) によるテーマを絞った新規汚染物質についての知見の集積支援により、国際的に注目される研究が発信されている。
	応用研究・開発	○	↗	●膜分離技術、地下水利用技術、下廃水の再生利用などの分野で、経験が多く、産業化も進んでいる。 ●カリフォルニア州、テキサス州、フロリダ州などの水不足地域を中心に関心が高く、下水処理水の再利用について、間接および直接の飲用再利用の実用化に向けた検討が進められている。また、海水淡水化事業も盛んである。米国では初となる下水処理水の直接飲用再利用がテキサス州で導入され、今後の拡大については注視していく必要がある。

欧州	基礎研究	◎	→	● Water Research 誌、Water Science and Technology 誌などでの論文発表件数や論文の質で世界をリードしている。 ● 個別の有害物質への関心が高く、マイクロプラスチックなど新規の汚染物質に関する知見を多く発信している。アナモックス反応による窒素除去など原理的に新しい水処理方法の提案能力や薬剤耐性菌のコントロールやマイクロプラスチックの除去を目指した水処理の可能性など新しいコンセプトを打ち出す能力も高い。 ● 2018年2月にEU飲料水指令が改正され給水リスクアセスメントに関連するパラメータの導入や、微生物パラメータが強化された、この対応のため、特に微生物学的リスク管理に関する研究が進んでいくと予想される。 ● ドイツは世界初のセラミック膜などの開発実績があり、水道分野における独自の膜ユニットの開発意欲が日本よりも旺盛で、基礎研究のポテンシャルも高い。 ● オランダ KWR Watercycle Research Institute やスイス EAWAG などが高い研究レベルを保っている。塩素消毒によらない給水方式を採用していることから基礎研究のニーズが大きいと考えられる。
	応用研究・開発	◎	→	● 水メジャー（イギリスのテムズウォーター、フランスのベオリア、スエズ）の技術開発力は高く、IWA などの国際会議における発表件数も多い。 ● 水メジャーは国際展開に多くの実績があり、多様な排水や地域の状況に合わせた適切な処理プロセスの設計に強みがある。水処理プロセスの設計、更新のために有用なシミュレーションモデルが優れている。中東やアジアの発展途上国に対する水道ビジネスを広く展開しており、適用技術に関する応用研究のレベルは高い。 ● オランダでは、塩素を使用しない水道システムを維持するため、浄水処理技術の開発と導入、配水系での先進的な安全管理手法の開発と導入が進められてきた。定量的微生物リスク評価手法の整備と実務への導入が特筆される。オランダ北部の水道事業体である PWN は 2015 年に膜ろ過法を浄水場に導入するなど、膜ろ過に対する技術開発も盛んである。 ● ドイツ連邦政府の主導によりドイツ水道パートナーシップ (GWP) が組織され、海外展開を図られている。ドイツ国内では、膜処理の導入を進めると同時に伝統的なろ過技術であるバクフィルトレーションも維持されている。水道水が塩素消毒されている割合が 30% 程度から減少してきており、オランダと同様に塩素消毒を回避する方向での水道水質に関する研究が盛んである。 ● 英国では水道事業は民営化されているが、独立機関である Ofwat の監視下にあり、民営化による大きな問題は発生していない。民営化による浄水技術の基礎研究や応用研究に対する影響は確認できない。
	基礎研究	○	↗	● 水資源がひっ迫しており、上水分野だけでなく環境工学分野における教員・学生の陣容が急速に拡大し、研究レベルが上がっている。 ● IWA（世界水会議）などの国際会議における発表件数は近年顕著に増加しており、日本の発表件数を凌駕しており、研究レベルも非常に高い。精華大学などの有力校における研究レベルは、潤沢な予算を活用して、ますますレベルが上がっている。 ● 様々な水処理用吸着材料、既知の汚染物質の水処理プロセスでの挙動、最新の処理プロセスの運転経験蓄積など多数の論文発表が出てきている。特に Water Research 誌や Water Science and Technology 誌での論文掲載件数が日本の 10 倍以上と英語での国際発信力を高めている。多くの研究が National Natural Science Foundation of China (NNSFC) による支援を受けている。さらに中央政府からの支援と重複して、州政府からの支援を受けている研究も多い。戦略的に外国人研究者を招聘または連携している。研究論文を国際誌に投稿するための事前チェック体制が、国として作られており、今後とも国際誌におけるシェアを高めると予測される。

中国	応用研究・開発	○	↗	●膜処理分野では、精密ろ過膜などは、Orijinn Water、立升などの中国国内で多くのメーカーが開発・製造能力を向上させている。日本のメーカーの製品はコスト的に対抗が難しくなっている。RO 膜の開発では、まだ日本の優位性は動かないが、今後技術力の差は縮まってくると予想される。 ●水道水源の水質が良好ではないため、浄水処理における新技術の導入意欲は高い。新規の浄水処理施設の建設にあたっては、世界的な最先端技術を導入していく可能性もある。 ●国内の水需要が大きく、MBR などの新技術による下水再生利用も進められている。 ●水十条などの政策誘導が進められており、工場や鉱山に由来する重金属汚染、石炭採掘に伴う廃水など公害対策が一気に進展している。
韓国	基礎研究	○	↘	●韓国における上水道に関連する基礎研究は 1990 年代に開始され、韓国水資源公社（K-ウォーター）主体の膜処理技術の大型プロジェクトが進められてきた。K-ウォーターでは基礎研究にも積極的に取り組んでいる。 ●ナノテクノロジーを用いた水処理など新規性の高い研究は実施されているが、水処理全般の論文発表数が減少している。既存技術の改良発展のための地味だが研究の裾野を広げる着実な研究は低調である。
	応用研究・開発	○	→	●国家プロジェクトとして ECOSTAR（先進的水処理技術開発）が 2011 年まで実施されていた。また、SEAHERO（革新的海水淡水化膜開発）が実施され、海水淡水化における正浸透技術の適用、エネルギー消費量の削減などに取り組んでいる。政府主導で水産業育成戦略を作成し、水処理技術や膜処理技術の国際競争力を高める努力が継続されており、成果が出ているといえる。K-ウォーターが国内用水供給の他、海外展開に力を入れ、急速に成長している。海水淡水化分野では斗山重工業が重要な役割を果たしている。また、Seohan などの膜メーカーも力をつけており、RO 膜をはじめ各種水処理用膜を製造している。 ●下水処理水の再生利用、畜産糞尿の処理などが進展している。

（註 1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註 2）「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

1）JST「センター・オブ・イノベーションプログラム」

<https://www.jst.go.jp/coi/site/site.html>（2019 年 2 月 1 日アクセス）

2）NEDO「エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業」

http://www.nedo.go.jp/activities/AT1_00175.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）

3）経済産業省「微細藻類燃焼生産実証事業補助金」

http://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan_fy2016/pr/e/e_enecho_taka_04.pdf
（2019 年 2 月 1 日アクセス）

2.20 生物多様性・生態系の把握

（1）研究開発領域の定義

生物多様性や生態系の空間的な分布や時間的な変動を様々なスケールや切り口から観測、評価、予測するための科学的知見の集積、技術の開発、手法の開発等を行う領域である。

ここでは、陸域、陸水域、海域を中心に、観測のための各種技術（例えば追跡技術としてロガー・音声等、衛星・航空機観測技術として衛星やその他のリモートセンシング、画像解析技術として衛星データ等、生物学的情報の取得として環境 DNA 等、IoT・センサネットワーク、大規模・長期観測、データ基盤・配信システムとしてデータベース構築等）、及び生物多様性や生態系の形成・維持機構の解明や将来予測を目的としたモデル開発（機構的・統計学的）等を対象とする。気候変動による影響の予測と評価も含む。

（2）キーワード

生物多様性、生態系機能、生態系サービス、社会生態システム、大規模化、自動化、計測技術、分布推定、意思決定、自然再生、不確実性、環境変動、気候変動

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

生物多様性や生態系に関する研究開発は、野生生物や自然環境の保護の観点だけではなく、生態系の仕組みの理解、及びその安定性や多様性が維持される要因の解明を目的とする。その結果、学術的理解を深めるだけではなく、環境悪化の予測や防止、生態系の保全、環境の修復や再生について検討することが可能になる。しかし、多様で複雑な生態系の理解は未だ限定的であり、個々の種や群集の動態を追う地道な研究の他にも、新たな技術や手法と施策が融合した対応が求められている。技術躍進は目覚ましく、情報技術、センシング技術、遺伝情報の解析技術、機械学習を用いた解析や各種統計モデル、生物や物理プロセスを網羅したモデル等、様々な技術的解決によって応用の方向性を強化した研究の推進が可能になりつつある。更に近年は、食料や水、気候の安定化、文化、景観等、生物多様性を基盤として人間が享受する機能（サービス）が再認識され、それらの持続的な利用のための評価や仕組みづくりも重要な課題とされている。

社会的には、2010 年の生物多様性条約第 10 回締約国会合（CBD・COP10）で採択された 2020 年までの世界的な目標「愛知目標（愛知ターゲット）」や、SDGs の目標 14（海洋と海洋資源の保全、持続可能な利用）と目標 15（陸上生態系の保護、回復および持続可能な利用等）等の各種目標が国連と関連組織によって示され、これらに対応するプロジェクト研究の推進が求められている。また国家管轄権外区域の海洋生物多様性、遺伝資源の取得の機会及びその利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分、あるいは越境汚染などに関する外交や国家間交渉においては、生物多様性に関する科学的知見が重要な要素ともなっている。パリ協定に関連した気候変動・温暖化適応に関しても研究開発の実施が求められている。国内では 2015 年 8 月の「我が国における地球観測の実施方針」（科学技術・学術審議会 第 6 期地球観測推進部会）において生態系・生物多様性を含む地球環境の保全と利活用の両立を実現する地球環境観測の重要性が議論された。2016 年 1 月に閣議決定された第 5 期科学技術基本計画においても人間社会の存立基盤をもたらす自然資本としての生物多様性と生態系が強調されている。

[研究開発の動向]

● 生態系観測に関する国際的な枠組み

近年の生態系観測に関する国際的な流れは 1986 年の国際科学会議で決定した「地球圏・生物圏国際共同研究計画（IGBP）」に始まる。その後、1992 年の「地球サミット」で「気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）」と「生物多様性条約（CBD）」が提起されたことで IGBP に基づく一連の活動は UNFCCC に関連した「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」、「地球環境変化の人的側面国際研究計画（IHDP）」、「生物多様性科学国際協同計画（DIVERSITAS）」、「世界気候研究計画（WCRP）」に統合され、現在は「フューチャーアース」に継承されている。2005 年には、気候や気象、生態系・生物多様性を含む地球環境の変化を多角的に監視・検出し、持続可能な社会の発展に寄与することを目的とした「地球観測に関する政府間会合（GEO）」が発足している。2012 年には CBD などの関連条約を受けて「生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学・政策プラットフォーム（IPBES）」が形成され、生態系や生物多様性の現状や将来に関する動向が議論されている。

● 国際的な研究プログラム

1993 年に設立された長期生態系観測ネットワークである「国際長期生態学研究ネットワーク（ILTER）」には 44 ヶ国、700 サイト以上が登録しており、それぞれが長期観測に基づく生態系や生物多様性の変化に関するデータの収集と公開を行い、その共有を図ることで大陸規模あるいは地球規模の研究課題への取組みを促進している。その他にも生物多様性に関するデータ収集と全世界的な利用を目的とする国際プロジェクト「地球規模生物多様性情報機構（GBIF）」（2001 年発足）や「海洋生物のセンサス（CoML）」（2000～2010 年）等を通じて実際の観測データに基づく生物多様性の位置情報や空間情報のデータ収集・公開が行われるようになった。海洋では、これまでに蓄積された世界の博物館標本情報や海洋生態系を構成する各種生物の観測情報を全球規模で集約することにより、過去 100 年超の期間の海洋生物の動態をモニターする「海洋生物地理情報システム（OBIS）」（2000～2010 年）も構築された。なお OBIS プロジェクトは CoML の下で実施されていたが、2010 年の CoML 計画終了に伴って「国際海洋データ情報交換システム（IODE）」に統合された。

● 遺伝子レベルの観測

種や個体群、群集レベルの観測が進んでいるだけでなく、生物に関する Web 上の百科事典である「Encyclopedia of Life（EoL）」や、DNA 塩基配列から生物種を調べる系統学的な手法である DNA バーコーディング技術のためのライブラリを構築する「International Barcode of Life Project（iBOL）」等の蓄積が進んでおり、相互に関連しながら巨大なデータ基盤を構築している。その他にも近年のゲノム科学の進展を背景に、生物間の相互作用や環境変化の影響の把握や、環境 DNA による効率的な生物種の生息状況の把握なども急速に進められている。

● リモートセンシング技術との融合

生態系レベルの広範な時空間スケールを横断する観測にはリモートセンシングが有用な技術であり、近年特にフィールドでの生態系・生物多様性の研究とリモートセンシングの融合が促進されている。2008年に「全球地球観測システム（GEOSS）」の一環として生物多様性を観測する生物多様性観測ネットワーク（GEO-BON）が発足し、生物多様性を間接的に推定する指標群が提案されてきている。2009年には日本がイニシアチブをとる研究ネットワーク「DIWPA（Diversity in the Western Pacific and Asia）」を基礎に「アジア太平洋生物多様性観測ネットワーク（AP-BON）」が発足し、生物多様性に関する生物学的調査が進められるとともに、いち早くリモートセンシング観測の利用に向けた提案がなされた¹⁾。

● 衛星データ活用

地球環境に関する衛星観測データの無償公開が近年急速に進み、地域スケールから全球スケールまでの生態系の変化の把握に貢献しつつある。例えば2013年のランドサット衛星（1972年より運用）のデータ無料公開を受け、森林の変化等の全球レベルでの定量的評価が進められている。可視・赤外域の放射計測ではMODISが運用されている。Google Earth Engine等のクラウド上で一括で解析するツールも出現している。これにより例えば季節ごとの正規化植生指数（NDVI）を全球一括で毎年計算することも可能となっている。

● その他の観測技術

局所的な観測にはドローンなどのUnmanned Aerial Vehicle（UAV）の活用も進められている。水中の生物多様性の把握にはRemotely Operated Vehicle（ROV）や音響を使った観測技術も活用されている。生物のバイオ・トラッキング技術も進展しており、様々なロガーが開発され、個体群動態の追跡に利用されている。

● モデル開発

生物多様性・生態系の評価のためのモデル開発では、GBIFなどの生物分布情報と環境データを用い、機械学習等により各生物種の地理的分布予測を行うモデリング手法「生態ニッチモデリング」の進展が注目されている。数多くのモデルが存在するが、主要なモデルとしてはMaxEntやBiomod2、Random Forestが挙げられる。またこれらとは別に、海洋においては海洋生態系モデルが多数存在する。例えばオーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）によるAtlantis等が知られる。

● 生態系サービス研究

生態系サービスの統合的な評価は「ミレニアム生態系評価（MA）」、「生態系と生物多様性の経済学（TEEB）」、「生態系価値評価パートナーシップ（WAVES）」、IPBES等での様々な国際プロジェクトにおいて行われてきた。国や自治体、民間企業、研究機関においても同様の評価が実施されており、国・地域規模から全球・大陸規模までの現状評価および将来予測が幅広く報告されている。

● 国内動向

遺伝子情報の活用が進んでおり、2018年には環境DNAの普及に応じる形で環境DNA学会が発足した。またデータベースの整理も急速に進んでいる。例えば微生物に関する多種多様な情報を遺伝子・系統・環境の3つの軸に沿って整理統合したデータベースとして「MicrobeDB.jp」がある。国立遺伝学研究所が管理するDNA塩基配列の配列データベース「DNA Data Bank of Japan (DDBJ)」ではデータが無料公開されている。

より一般的なデータ整備関連動向としては、日本生態学会のEcological ResearchでData Paperというデータの提供と公開に特化した学術論文のセクションが追加されたことが挙げられる。国際的な情報蓄積・集約の取り組みであるGBIF、OBIS、GEO-BON、ILTER、iBOLに応じる形で、それぞれに対応する日本ノードも設立されている（JBIF、BISMaL、J-BON、JaILTER、JBOLI）。

気候変動による陸面植生の変化や、その結果起こる大気・陸との相互作用の変化などをシミュレーションする動的全球植生モデル（SEIB-DGVM等）の開発が進み、観測だけではなく予測の分野でも応用されつつある。また、状態空間モデルを含む階層ベイズモデル等の確率分布や非線形性、不確実性を高度に取り入れた統計方法の利用も進みつつある。

生態系サービスに関する行政ニーズの高まりに反し、生態系サービスの定量的評価や広域的評価の研究は停滞気味である。最近の動きとしては生物多様性と生態系サービスの状況と傾向、それらが人間の福利にもたらす効果の評価が2014年から2015年にかけて行われ、2016年に「生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書」（環境省 生物多様性及び生態系サービスの総合評価に関する検討会）として公表された事例が挙げられる。海外では仮想的市場評価法（CVM）等を用いた経済学的アプローチや、米・スタンフォード大学を中心とした自然資本プロジェクト（Natural Capital Project）が提供するInVESTの活用事例等が散見されるものの、国内での評価研究の事例は少ない。なおこの生態系サービスの現状評価や将来予測のモデリングについては方法論が確立されていない点が国際的にも大きな課題として認識されている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

● 環境DNAの活用拡大

環境DNAを活用した生物分布情報の収集に関する研究が急増した。メタバーコーディング解析も更に普及し、微生物群集の定量化がさらに容易となっている。機能遺伝子についての探索やデータベース化も進んでいる。

● 生物の生態特性に関するデータベースの整備進展

機能形質データベースの整備と利用が植物を中心に進んでいる。近年は節足動物やサンゴ、その他の海生生物等、他の分類群にも拡充しつつある。

● 生物多様性・生態系の機能的側面の解明

生物多様性と生態系機能の関係性について、植物群集だけでなく、バクテリアや魚類などの分類群の群集についても理解が深まりつつある。例えば多様性が一次生産をどのよう

にして高めるのかといった基礎的理解だけでなく、数多の生態系機能への貢献も明らかになりつつある。これにより、植物に加えて微生物や動物群集に関しても生物多様性—多機能性の関係性が明らかになりつつある。また生態系機能とサービスを支えることによる生物多様性の資本としての経済価値も評価され始めている。

生態系どうしの繋がりや生息場所の繋がりといった景観や空間的な要素が生態系や生物多様性の維持において重要であることも認識されつつある。森と川・海、島と海、集水域と湖沼等、従来独立に捉えられてきた各生態系が相互の生態系内の生物多様性を支える上で重要であることが示されつつあり、理論だけでなく、実証的な研究や市民を巻き込んだ取り組みも進められている。

生物多様性と生態系の安定性に関する理解も深まりつつある。特に気候変動等の環境変動下でどのように生物多様性がバッファとなり生態系の頑健性を担保し得るのかという課題に注目が集まっている²⁾。

● フィールドセンシング、リモートセンシング技術の発達

地球環境変動の衛星観測ミッションが展開されており、高頻度、高解像度、多バンドの衛星リモートセンシングが計画されている。2017年には気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C)が打ち上げられ、海洋や陸域環境の観測が強化された。温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)は大気中のCO₂、CH₄観測を継続している。陸上植生ではCO₂、CH₄や水蒸気フラックスを観測している研究プロジェクト(FLUXNET)の進展が見られる。海洋では世界気象機関(WMO)によるArgo計画で全球海洋の水温や酸性度の観測密度の増加とデータ統合、取得情報の高度化・高品質化の検討が進められている。

データロガー、マイコン、カメラ、レコーダー、測位・情報通信技術の普及により様々な生物と環境に関する局所スケールでのトラッキングやデータロギングが進展している。今後、従来困難であった小型動物や海洋生物についての行動データ、植物や陸上植生の季節性(フェノロジー)の年変動や地理的分布に関する画像データ、生物・非生物を問わず長期の連続観測データ、移動や分布データの収集が進むと期待されている。海洋に関しては魚群探知機をはじめとする音響モニタリングの普及が著しい。

局所リモートセンシング技術では無人機(UAV)に代表されるように従来の衛星や航空機よりも小型かつ自律的なプラットフォームが急速に普及している。Structure from Motion(SfM)による画像の結合技術をはじめとするデータ解析技術も急速に普及している。海洋分野においても技術的にはUAVに相当する無人探査機(AUV)、無人洋上機(ASV)は存在し、海洋保護区でのモニタリングに活用するなどの検討が進められている。2017年頃から中国をはじめとするドローン系の企業による安価なROVが水中ドローンとして販売され始めた。水中での観測は音響技術の蓄積があり、音響データ合成開口技術、地層データの自動合成などが試みられている。

● クラウド上の解析ツールの充実

画像解析をはじめとしてクラウド上での解析ツールが充実してきている。特にリモートセンシングではドローンの画像の結合をオンライン上で行うツールが普及している他、衛星画像の活用についてもGoogle Earth Engine上にランドサット等が一括してアーカイ

ブされており、高速な処理が全球で一括して実施できるようになっている。生物の分類にはまだ使えないものの、画像認識についても既に Google や Microsoft のクラウドでラベル化された情報を抽出できるようになっている。ただし、こうした民間のクラウド上の解析は、その便利さの反面、提供企業に偏った情報集積を招く懸念もあると考えられている。

- 高度な解析手法の開発

状態空間モデル等のベイズ統計、機械学習や深層学習、Empirical Dynamic Modelling (EDM) による因果関係推定法等が注目されている。R ソフトウェアの諸々のパッケージ導入により、各手法が容易に利用できるようになっている。EDM は R パッケージが 2016 年に公開された。

環境閾値（臨界点）の予測に関しては理論研究や微生物を用いた単純な系の実験だけでなく、リモートセンシング画像を用いた大陸スケールでの解析なども進みつつある³⁾。

- 生態系サービス評価モデル

主な生態系サービス評価手法としては、モデル、実地調査、統計情報、アンケートが挙げられる。これらのうち生態系サービス評価モデルについて精力的な研究・開発が行われている。気温や降水量などの環境情報と植生図などの生物情報を初期条件として入力することで、生態系サービスの潜在的な供給量の数値化・地図化が可能なモデルが数多く提案されおり、GUI 操作が可能なソフトウェアも整備されている（InVEST、TESSA、ARIES、LUCI 等）。陸域・海域ともにモデル開発は進展しており、世界各地での多様な使用例が報告されている。具体的には、生態系サービスのホットスポットの特定や生物多様性保全優先区との重ね合わせ、生態系サービス間のトレードオフの検証等である。

- 生物多様性保全に関する経済的評価

生物多様性保全に関して、機会費用を含むさまざまな費用の算出が進んでいる。2017 年には、保全費用を払っている国や地域ほど生物多様性保全が効果的に進んでいることが示された⁴⁾。生物多様性に要する経済的支出だけではなく、生物多様性保全により生まれる経済的価値についても評価が始まっている。自然資本連合（Natural Capital Coalition）は、企業の意思決定に対し自然資本の考え方を組み入れることを目的として、自然資本会計の世界標準となる枠組み（自然資本プロトコル）を策定している。2016 年に自然資本プロトコルの初版が公開されており、自然資本への直接的・間接的影響や依存度を特定・計測・価値評価するための手順が示されている。

- 市民科学への注目

市民科学がさらに注目され重視されている⁵⁾。他分野では情報メディアの利用の一環としてユーザにそれほど意識させずに情報を収集活用している事例もある。特にゲーミフィケーションや依存性等の心理的手法は注目されており、環境情報収集のための社会実装技術の 1 つのアプローチとして研究対象と捉えられている。例えば屋外で見つけた花や動物の名前を教えてくれたりその情報を共有したりすることができるアプリである「iNaturalist」は、市民科学のプロジェクトであり、かつナチュラリスト、市民、そして

研究者を対象としたソーシャルネットワーキングサービス（SNS）である。地球上の生物多様性に関する観察記録を共有し、種同定を助け合い、地図上に残すこと等を目指しているという。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

<海外のプロジェクト>

● 長期・広域の観測に基づく生物多様性の評価と予測に関する国際的な研究枠組み

近年最も成果を上げつつあるデータベースとして「PREDICTS」⁶⁾と「BIOTIME」⁷⁾がある。PREDICTSは、英国の大学等研究機関が中心となり、世界中から陸域の生物多様性の分布情報を集約しており、それらビッグデータに基づく統合研究を目指している。2018年7月現在、38,000種以上を含む250万件以上の生物多様性情報が記載されている。PREDICTSの主要な成果としては土地改変が陸域の生物多様性に与える影響評価や、それを基にした臨界点（閾値）の評価研究等がある。

BIOTIMEは、英国・セントアンドリュース大学のグループが牽引する国際プロジェクトであり、生物多様性の時系列変化の実データを収集している。主要な成果としては、世界中の陸域・海域の生物群集を対象に、種数と種構成の時間変化を定量化した研究や、熱帯の淡水群集を対象にした種構成の時間変化の定量化等がある。

● 実証研究や実験研究のデータ統合や理論研究の統合のための研究スキーム

米・National Center for Ecological Analysis and Synthesis (NCEAS) や独・German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv) では、世界中の実証研究や実験研究のデータの統合、理論研究等の統合のためのワークショップを頻繁に開催している。世界中からの参加者の旅費を開催者側が負担する代わりに、統合研究としてNatureやScienceなどの影響力が大きい学術雑誌に結果を公表するといった仕組みが出来上がっている。

またドイツでは「Biodiversity Exploratories」と呼ばれる、土地改変が生物多様性と生態系サービスに与える影響評価のための大型研究プロジェクトが進行している。ドイツ3地域を対象に、1,000以上の調査区を設け、動植物や微生物についてのデータを収集している。250名以上の研究者やスタッフが関わっており、個別に50以上のプロジェクトが進行している。土地改変が生物相の均質化をもたらすことや栄養段階の異なる生物群集の多様性が生態系の多機能性を支えること等、近年多数の成果を公表している。

● 生物多様性と生態系機能の関係性に関する研究プロジェクト

従来知られているものとしては米・ミネソタ州のシーダークリーク実験区における草本群集の操作実験がある。当該実験区のLTERサイトとしての研究資金は、例えば2013～2018年の5年間で得た資金のうちの一つは612.6万USドル（約7億円）だった（このときのPIは5名）。

近年では木本（樹木）群集の操作実験も行われ始めている。草原とは異なり、操作的に森林を作ることは労力も予算も要する。「IDENT」と呼ばれるプロジェクトでは、北米（米、加）と欧州（独、伊）の各地に同一の樹種の組み合わせで（北米及び欧州の在来樹種を双

方に植栽）1,640 箇所の樹木多様性試験地を設けている。実験はまだ初期段階だが、既に樹木多様性と生態系機能の関係性に関する成果が公表されている⁸⁾。

その他にも欧州では生物多様性と生態系機能の関係性に関わる多くのプロジェクトが進行している。15 カ国 24 機関の参画により、「FunDivEurope」と呼ばれる大型フィールド観測が 2010 年から実施され、多くの成果を公表している。FunDivEurope では、森林樹木群集の各国インベントリと複数の実験を組み合わせることで、草本群集を対象とした実験と同様なスキームを生み出している。また主に欧州の予算により「BEF-China」と呼ばれる大規模な樹木多様性の操作試験が中国で行われている。

気候変動などの環境変動下において、どのように生物多様性がバッファとなり、生態系の頑健性を担保し得るのかという課題に注目が集まっている。これに対し、コロラド州立大学等が中心となった「Drought Net」では、統一プロトコルに基づく野外の降水量操作実験を世界中で行っている。同様に、ミネソタ大学が中心となった窒素負荷の影響に関する野外試験も世界中で実施されている（「Nutrient Network」）⁹⁾。Nutrient Network は既に多数の成果を公表している。これらの成果には、植物多様性と生産性との関係性の評価や植物多様性と多機能性の関係性等がある。

● プラネタリーバウンダリーズ

一部には定量性に欠けるとの指摘もあるが、一般的にはストックホルム・レジリアンスセンターを中心とする地球システムの臨界点を探るプラネタリーバウンダリーズの枠組みが引き続き重視されている。2018 年には、地球が温暖化領域に入り込み抜け出せなくなるという「Hothouse earth」という仮説が新たに提唱された。

生態系変動についての理論研究と実証研究を連動させたレジームシフトや臨界点（閾値）の予測に関する研究が精力的に展開されている。研究を先導してきたオランダの研究グループは、理論からリモートセンシングでの実証まで幅広く研究を展開している。また海域を対象とした検証も進んでおり、「Ocean Tipping Points」というプロジェクトが進行している。

● 海洋生物資源の把握

米・ワシントン大学が中心となり作成管理をしている「RAM Legacy Stock Assessment Database」が一般に公開されている。このデータベースにより、世界の海洋生物の状態をより良く把握することが可能になると期待されている。加・ブリティッシュコロンビア大学も、世界の海洋生物資源の基礎情報に関するデータベースを公開している。なお同大学では、日本財団による 9 年間で約 15 億円の拠出により、「ネレウス（NF - UBC Nereus Program）」と呼ばれる国際ネットワークが 2011 年より構築されている。The Link Between People And The Sea の標語の下、海洋資源について科学的知見と政策的視点を広く共有し、研究者と利害関係者による新たな国際海洋ネットワークの構築を推進している。

● 生態系観測

米・航空宇宙局とメリーランド大学は生態系観測のミッション（GEDI）を推進している。

宇宙から地球にレーザーを照射し、レーザーが森林の表面で反射して戻ってくる時間と、その一部が林冠を透過して地面で反射して戻ってくる時間の差から、森林の高さを計測し、森林炭素蓄積の推定精度を向上させることを目的としている（レーザー測量、LiDAR）。また、日本の JAXA では国際宇宙ステーション・日本実験棟「きぼう」に搭載する地球観測 LiDAR の開発（MOLI ミッション）に取り組んでおり、2021 年頃の打ち上げを目指している。

米・生態観測ネットワーク（NEON）が 10 年間で 4.3 億ドル（約 500 億円）という予算規模で 2012 年に開始している。気候変動や土地利用変化、生物季節、生物多様性の変化などのデータがリアルタイムで収集され公開されるとしている。しかし当初は 2017 年頃に本格稼働予定であったが、予算調達等の問題により遅延しており、2019 年の稼働を目指している。

欧州では生態系や生物多様性への温暖化影響研究を一層推進するため、国内外のユーザ研究者を対象に、既存実験施設の利用促進を進めている。例えば EU 圏内には水圏生物を対象に操作実験が行える海洋・湖沼の隔離水界施設が多数建設されているが、施設をネットワーク化し、「Aquacosm」プロジェクトとして一括した利用公募を行っている。全体の 2 割を EU 圏外の研究者の利用に定めることで、研究者間の機会公平と国際的な研究推進に貢献しようとしている。

<国内のプロジェクト>

● 環境省環境研究総合推進費

S15「社会・生態システムの統合化による自然資本・生態系サービスの予測評価」（2016～2020 年度）においてアジア地域も視野に入れ、社会・生態システムの統合モデルを構築し、シナリオ分析に基づく複数の政策オプションを検討する研究が行われている。S14「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」（2015～2019 年度）では気候変動への緩和と適応における生態系保全の重要性についての研究が進められている。

● CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」（2011～2018 年）

海洋の生物多様性および生態系を把握するための先進的な計測技術と将来予測に資するモデルの研究開発が行われている。

● 北極域研究推進プロジェクト（ArCS、2015～2019 年）

北極圏の陸海域の生態系を対象とした様々な観察が行われている。

(5) 科学技術的課題

● データ基盤の未整備

データキュレーションやデータ前処理の共通化、データの流通促進等による利用の効率化が課題として指摘されている。本領域のデータは種の存在、現存量、DNA 情報など多種多様だが、種同定の精度や現存量の測定精度等、基本的な品質管理は必ずしも十分とは言えない状況にある。データの流通や共通化、解析技術の共有等、データシェアの基盤

となるプラットフォームが他分野と比べて遅れている。データの取得や整理の自動化、あるいは種分布やゲノム情報等のビッグデータの収集・解析といった各種インフォマティクス技術の普及および技術者育成も社会的な期待やニーズの高まりに追いついていない。また既存の公開データベースでも、品質管理やインターフェースの不備によって利用が十分に進んでいないものや、日本語のみで整備されたデータベースがあり、国内外での利用を促進していくための取組みが必要とされている。

● 生物分布情報と DNA バーコーディング情報

膨大に蓄積されつつあるものの、研究を進展させていく上ではまだ十分とは言えない状況にある。特に DNA バーコーディング解析のための情報は取得の歴史が浅いため、DNA 情報をもとに既知の種を網羅するにはまだ遠い状況にあると言われる。特定のプライマーでは DNA バーコーディングが困難な分類群が多いこと、種同定のための情報が不足していること等により他分類群への拡張に課題がある。土壌圏の生物は国際レベルでの進捗も見られるが情報が多分に不足していると言われている。また種の存在を確認するだけではなく、存在する種の個体数やバイオマス量などをも把握できる技術へと昇華させることも課題と認識されている。更に生物の機能と関連する形質や DNA 情報に関しては、細菌など、ごく一部の分類群で進展が見られるものの、動植物に関しては全般的には大きく不足していると言われる。地域的には特に東南アジアやアフリカの情報が不足している。

[今後取り組むべき研究テーマ]

● ビッグデータの収集・解析

情報やデータの不確実さ、複雑系、非線形性への対応のための数理統計手法の開発。

● リモートセンシング

受動的あるいは能動的なリモートセンシングの計測技術などによる、生物多様性や生態系の状態を広域に推定する技術の一層の高度化。

● モニタリング

安定同位体や DNA 情報や画像解析技術等を組み合わせた新たなモニタリング技術の開発。これによる異なる栄養段階にある分類群の食う・食われるの関係性やネットワーク構造を含めた網羅的な把握。

● モデル開発

環境変動に対する生物多様性と生態系機能の応答性を推定するための実測データに基づいたプロセスベースモデルの開発と利用の促進。

● 生物多様性の分布評価

種数以外の指標に基づく生物多様性の分布評価。GEO-BON の枠組みでは **Essential Biodiversity Variables** が提唱されているが、これら国際レベルで提唱されている指標は、必ずしも地域をまたいで網羅的に評価されていない、機能的多様性や系統的多様性といっ

た生物多様性形成プロセスや生態系機能の提供に関わる指標は必ずしも種数の傾向と一致しない等の課題が指摘されている。そのためこれら指標の時空間的分布に関してバイオームをまたいだ網羅的な把握が必要とされている。

● 社会－生態系システムの研究

自然資本としての生態系の生態学的かつ経済学的評価の実施。いくつかの生態系サービスの貨幣換算はすでに行われているが、システムとしての生態系そのものが社会的需要を踏まえてどれだけの経済価値を持つのかは定量的に評価されていない。特に資本としての自然がどれだけあるかだけではなく、生物による環境変化や生物間相互作用などの生態系プロセスを含めて、それらから生じる生態系機能とサービスの経済評価が必要と考えられている。

生物多様性に加えて生態系サービスを考慮したホットスポットや保全優先地域の検出。従来の生態系サービス評価では生態系が供給しうるサービスの潜在値に焦点が当てられてきたが、最近では人間の福利等の考慮も必要と認識されている。しかし単一指標での評価は難しく、社会学・経済学的な要因も大きな影響を与える。そのため学際的なアプローチを用いた小規模スケールでの研究を促進させ、知見を蓄積させる必要があると考えられている。

気候、人口、土地利用、経済の将来シナリオを考慮した社会・生態システムの挙動に関する予測研究も重要視されている。特に気候変動や土地変化に対する生態系の非線形変化や閾値を考慮した上での環境変動に対する適応策の構築がより重要とされている。

様々な地域やサービスに応用可能な広範かつ一般化されたレディメイド型の生態系サービスモデルの開発が求められている。生態系サービス評価に対する行政ニーズは一層高まっているが、生物種の分布予測モデル（ニッチモデリング）のような確立した手法が生態系サービスの地図化や広域評価には利用されておらず、観測データを政策決定に利用できる透明性の高いモデルの構築が必要と考えられている。

（6）その他の課題

● 研究関連データの流通や共通化

環境影響評価や水産資源調査等の公的な取組みを通じて取得されたデータの有効活用が進んでいない。データのリポジトリ（一元的な保管場所）の作成やデータ公表の検討が望まれている。またデータ取得のための許認可等手続きや国外でのデータ収集のための事務手続きに広域研究ほど手間がかかり研究を始めるにあたってのハードルになっている。

データ公開や学術論文のオープンアクセス化といった国際動向に対応した支援システムの構築が急務となっている。現在、日本では研究者個人の研究資金に依存しており、研究費削減の中、オープンアクセスのオプションに予算使用を分配する余裕がなく、欧米諸国に比してオープンアクセス化した論文やデータ公開が圧倒的に少ない状況となっている。

その他には公的資金に基づく研究で得られたデータの提供義務化、データ取得重複の回避、データ不足地域でのデータ収集等の戦略的なデータの取得、品質管理、データベース化、オープンデータの促進等が求められており、それらへの対応も課題となっている。

- 人材不足

新規人材の不足と限られた人材でのエフォート配分が深刻な課題となりつつある。研究者の流動化や研究資金のプロジェクト化によって情報交流の促進や目的の共有が図られた反面、根本的な原理等を追及する基礎実験や基礎研究、技術開発への取組みが低減しているとの指摘もある。また海外では情報科学を専攻したテクニシャンが分類学者の研究室で働く例などが見られるが、日本では依然として分野間の垣根が高い。

- 長期的な観測インフラの維持困難

長期的視野をもったモニタリングやデータベースの継続的運用の多くが未だに研究者個人による資金調達に依存しており、それゆえプロジェクト終了のたびに財政的不安を抱えざるを得ない状況は早急に解決すべき課題となっている。

- 研究にかかるコスト

遺伝情報の抽出や海洋観測技術をはじめとして、技術的には容易に大量の情報が得られるようになったが、第一線の研究に必要な情報を得るためのコストがかかる点は従前と変わらず、研究実施にあたっての課題となっている。

- 社会との関わり

生態系サービスに対する様々な考え方や分類体系が提唱されてきたが、最近になって生態系サービスという概念を「自然がもたらすもの（Nature's contributions to people）」という概念へ移行させる動きがある¹⁰⁾。生態系サービスの定義に関する議論は現在でも続いているが、欧米の一部の研究者・グループのみで行われており、アジア諸国からの意見が期待されている。

国内施策（生態系管理、自然再生、災害対応等）への反映や、国際的なプレゼンスの維持あるいは国際的な枠組み（CBD、IPBES、GEOSS 等）への貢献を視野に入れた取組みが期待されている。気候変動対策をはじめとする各種施策とのトレードオフやシナジーの検討（再生可能エネルギー適地と多様性保全地域のバランス等）、民間企業や市民を巻き込んだ研究開発の実施や意識の醸成も必要とされている。

生物多様性に関しては IPBES によるグローバルアセスメント（2016 年より順次）、環境省による生物多様性及び生態系サービスの総合評価（2016 年、JBO2）、日本学術振興会・生態科学分科会による報告（2017 年、生態学の展望）など多数出ているものの、これらの知見を政策や新たな研究につなげる仕組みは構築されていない。豪・CSIRO では、2015 年から「NESP Biodiversity HUB」と呼ばれる環境と気候変動に関するコンソーシアムが運営されており、科学的知見を効率的に政策決定や資源管理に反映させることを目標としている。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	●個人レベルで実施される理論研究は以前より本分野の日本の強みとなっている。一方、大規模かつ広域なデータ統合に基づく実証研究は、それらをリードする欧米諸国に対してデータを提供するに留まり、イニシアティブは取れていない。 ●BISMaL、JBIF、J-BONをはじめとする国内のデータノードと、博物館や大学をはじめとする協力機関の活動により、生物分布データの蓄積が進む。一方、予算確保、適切なデータ取扱い体制の整備、人手確保等の問題から、在データ以外の形式の情報の収集や、過去の情報の電子化と公開、新規の情報収集は必ずしも十分に進んでいない。 ●広域のデータ収集・蓄積では衛星データによる環境モニタリングが以前から実施されており、最近では国土数値情報などの容易に使えるデータベースにも活用されるようになってきている。
	応用研究・開発	○	→	●広域の生物多様性情報の集約や推定などが実施されている。応用研究へのニーズの高まりを背景にして生態系の環境変動や自然再生に関する研究論文も着実に公表されている。一方、国内外の政策に影響するような研究成果は限定的。
米国	基礎研究	◎	↗	●多様な研究が国際的な連携の下で行われており、多くのプロジェクトでイニシアティブを取っている。LTER などモニタリングとそのデータ整備の国際的な発信源にもなっている。その中には長期間維持されている大規模野外操作試験も含まれる。 ●物質循環、種分布、生態系プロセスモデル、土地被覆モデルなど多くのモデル開発を行っている。 ●衛星観測研究もリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	●多様な研究が国際的な連携の下で行われており、多くのプロジェクトでイニシアティブを取っている。 ●モニタリングデータの活用から各種モデルの応用まで、幅広く応用研究も実施され成果を公表している。
欧州	基礎研究	◎	↗	●GBIF、OBIS、TRY などの世界規模のデータベースを維持している。 ●多様な研究が国際的な連携の下で行われており、多くのプロジェクトでイニシアティブを取っている。特にドイツと英国が生物多様性の世界的な統合研究のイニシアティブを取っている。PREDCITS や BIOTIME のようなプロジェクトも英国主導である。ドイツは国際共同研究と国内での共同研究プロジェクトの拡充の双方に注力している。
欧州	応用研究・開発	◎	↗	●多様な研究が国際的な連携の下で行われており、多くのプロジェクトでイニシアティブを取っている。スウェーデンにはレジリアンスアライアンスの中核を担うストックホルム・レジリアンスセンターがあり精力的に活動している。GEO-BON や IPBES などの事務局もドイツにある。 ●資源管理関連では NGO からの働きかけも背景にして積極的に国際会議を開催し、その成果をとりまとめ、国際規格の作成や管理プログラムの検討等が実施されている。 ●研究者の層が厚く、基礎から応用まで多くの人材がそろっている。
中国	基礎研究	◎	↗	●近年急速に研究者人口が増加している。海外に流出した人材の呼び戻し等の人材確保を積極的に進めている。データベース拡充や観測なども大型プロジェクトとして国内外と連携して組織的に進めている。 ●化学分析や遺伝データのシーケンシング等で安価に実施できる民間企業もあり、官民ともに生物多様性研究を推進する体制が充実化している。学術論文の出版数も急増している。 ●国際プロジェクトの誘致、フィールドの提供、国際会議の支援などによって、積極的に主要な海外研究者との結びつきを強めている。また、国際誌で発表された指標をその著者らのグループと協力して早期に適応する例も見られる。国外にいる中国人研究者と連携を強めることで、国際競争力を高めている傾向も強まっている。
	応用研究・開発	○	↗	●多様な研究が国際的な連携の下で行われている。海外の主要研究者や中国人研究者との共同研究もさらに推進されており、国際競争力を高めている。

韓国	基礎研究	△	→	●情報が限定的だが K-BON が日本の J-BON とともにアジア太平洋地域の生物多様性観測ネットワーク（BON）を構成している。海洋分野では生物多様性の研究センターである「National Marine Biodiversity Institute of Korea (MABIK)」がある。また北西太平洋地域海行動計画（NOWPAP）や北太平洋海洋科学機構（PICES）等において取り組みを進めている。
	応用研究・開発	△	→	●情報が限定的だが渡り鳥については East Asian – Australasian Flyway Partnership (EAAFP) の事務局を設置するなど以前から一部の地域と分野で積極的。しかし研究や他の生態系調査とのシナジーについては不明。 ●2013 年に National Institute of Ecology が設立され基礎生態研究と生態系の問題解決のための生態系情報の提供を行っている。
豪州	基礎研究	◎	↗	●海洋生態系に関する分野ではデータ収集、データベース作成、データ解析、保全への応用のいずれにおいても精力的に活動する研究グループがある。陸域生態系に関する分野でも着実に成果が公表されている。研究者は欧米の高インパクト誌に着実に成果を公表している。
	応用研究・開発	◎	↗	●保全の管理手法に関する研究、温暖化による予測評価に関する研究、生物多様性の評価に関する研究、海洋のリモートセンシング技術に関する研究など、大学ごとに特色のある研究が大型予算を使って進められている。欧米には日本以上に遠路にも関わらず、世界各地の学会でのセッションの設定やワークショップの開催などを積極的に行う様子も見られている。 ●Atlantis のような世界的に使用されている生態系評価モデルを開発している。NESP Biodiversity HUB のような科学と政策を結びつける仕組みも着実に構築されている。
カナダ	基礎研究	○	→	●データベースの構築や国際ネットワークの構築などで世界の研究をリードしている。 ●北極圏の国として、北極圏の資源や生態系に関する観測研究を最も精力的に展開している。
	応用研究・開発	◎	→	●Ecopath/Ecosim のような世界中で広く使われている生態系モデルを開発し、応用研究を進めている。 ●ネレウスのようなデータベースと人的ネットワーク構築などを踏まえ枠組みを推進している。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

- 1) H. Muraoka *et al.*, "Linking Remote Sensing and In Situ Ecosystem/Biodiversity Observations by "Satellite Ecology" ." *The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region Ecological Research Monographs*, 277-308, 2012.
- 2) F. Isbell *et al.*, "Biodiversity Increases the Resistance of Ecosystem Productivity to Climate Extremes," *Nature* 526, no.7574: 574-577, 2015.
- 3) J. Verbesselt *et al.*, "Remotely Sensed Resilience of Tropical Forests," *Nature Climate Change* 6, no.11: 1028-1031, 2016.
- 4) A. Waldron *et al.*, "Reductions in Global Biodiversity Loss Predicted from Conservation

- Spending," *Nature* 551, no.7680: 364-367, 2017.
- 5) R. Bonney *et al.*, "Next Steps for Citizen Science," *Science* 343, no.6178: 1436-1437, 2014.
 - 6) L.N. Hudson *et al.*, "The PREDICTS Database: A Global Database of How Local Terrestrial Biodiversity Responds to Human Impacts," *Ecology and Evolution* 4, no.24: 4701-4735, 2014.
 - 7) M. Dornelas *et al.*, "BioTIME: A Database of Biodiversity Time Series for the Anthropocene," *Global Ecology and Biogeography* 27, no.7: 760-786, 2018.
 - 8) L.J. Williams *et al.*, "Spatial Complementarity in Tree Crowns Explains Overyielding in Species Mixtures," *Nature Ecology & Evolution* 1, no.4: 0063, 2017.
 - 9) E.T. Borer *et al.*, "A Decade of Insights into Grassland Ecosystem Responses to Global Environmental Change," *Nature Ecology & Evolution* 1, no.5, 2017.
 - 10) U. Pascual *et al.*, "Valuing Nature' s Contributions to People: The IPBES Approach," *Current Opinion in Environmental Sustainability* 26-27: 7-16, 2017.

2.2.1 生物多様性・生態系の管理・活用

（1）研究開発領域の定義

生物多様性や生態系から構成される「自然資本」がもたらす「生態系サービス」の持続的な利用のため、複数の生態系サービス間の連関や人間社会と生物多様性・生態系との相互作用等、社会—生態系（social-ecological system）における生態系サービスの供給および需要の解明、またそれらに立脚した自然資本と生態系サービスの管理技術やガバナンスを発展させるための科学的知見の集積、技術の開発、手法の開発等を行う領域である。

ここでは、自然資本や生態系サービスの価値評価や、それらを活用した生物多様性や生態系の保全、持続可能な形での活用方策の検討、ならびに気候変動への適応や防災・減災への活用等に係る動向を対象とする。

（2）キーワード

生態系サービス、自然資本、生態系を活用した適応策（EbA、Ecosystem-based Adaptation）、生態系を活用した防災減災（Eco-DRR、Ecosystem-based Disaster Risk Reduction）、自然を基盤とした解決策（NbS、Nature-based Solutions）、生態系管理、社会—生態系、グリーンインフラ、生態系インフラ

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

生物多様性や生態系は、食料や水の供給、気候や災害の調整や水質浄化、観光や芸術文化の源泉等、様々な生態系サービス（自然の恵み）を提供することで人間社会の生存基盤・経済・福利を支えている。また、生物多様性や生態系は、様々な生態系サービスを生み出す有限の環境資産であることから自然資本とも捉えられている。

生態系サービスや自然資本の持続性は人類の持続可能性に直接関係しているため、SDGsにおいても生態系と生物多様性の保全・再生は目標に掲げられている。その他にも、生物多様性条約（CBD）における戦略計画 2011-2020、愛知目標（2010 年）、気候変動枠組条約（UNFCCC）におけるパリ協定（2015 年）、国連防災世界会議による仙台防災枠組 2015-2030（2015 年）、ラムサール条約での決議（2015 年）等において生態系と生物多様性がもつ社会的役割の重要性が国際的に認識されている。また国内でも、第 5 期科学技術基本計画（2016 年）、生物多様性国家戦略 2012-2020（2012 年）、国土強靱化基本法（2013 年）、第 4 次社会資本整備重点計画（2015 年）、気候変動の影響への適応計画（2015 年）等において重要性が認識されている。

こうした社会的な認識の広がり一方で、「個々の生態系サービスの間の関連性」や「人間社会と生物多様性や生態系との相互作用」等、社会—生態系における生態系サービスの持続的供給と利用に関する科学的理解は未だ十分ではない。またこれらの科学的理解に立脚した生態系サービスの管理技術の開発やより良いガバナンスの探索も、国内外で掲げられた各種の目標を実現するのに十分でない状況にある。

[研究開発の動向]

国連主導で 2001～2005 年に行われたミレニアム生態系評価（MA：Millennium Ecosystem Assessment）では、地球規模で生物多様性や生態系の評価が行われた。MA で

は生物多様性や生態系がもたらす生態系サービスが人間の福利を支えているという概念が示されたほか、評価された生態系サービスの60%が劣化傾向にあると報告された。また各地でサブ・グローバル評価が実施され、日本でも「生物多様性総合評価報告書（JBO : Japan Biodiversity Outlook）」（2010年）がとりまとめられた。加えて日本では、同じ2010年に国際連合大学高等研究所（UNU-IAS）等によって日本の里山と里海を対象とした生態系サービスの変化も評価され、「里山・里海の生態系と人間の福利：日本の社会生態学的生産ランドスケープ」（JSSA : Japan Satoyama Satoumi Assessment）として公表された。

2012年には生物多様性と生態系サービスに関する科学的知見の統合、並びに科学と政策のつながりの強化を目的にした政府間プラットフォームである「生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学・政策プラットフォーム（IPBES）」が設立された。IPBESは、2018年3月までに以下に示す複数の評価報告書を公表している：生物多様性及び生態系サービスのシナリオとモデルの方法論に関する評価報告書；花粉媒介者・花粉媒介及び食料生産に関するテーマ別評価報告書；土地劣化と再生に関するテーマ別評価報告書；生物多様性及び生態系サービスに関する地域・準地域別評価報告書（アジア・オセアニア、アフリカ、南北アメリカ、ヨーロッパ・中央アジアの世界4地域）¹⁾。また現在は地球規模の生物多様性及び生態系サービスに関する評価報告書が2019年公表に向けて作成中となっている。同様の時期に日本では生物多様性国家戦略2012-2020に関する総合評価として「生物多様性及び生態系サービスの総合評価（JBO2）」が公表されている（2016年）²⁾。これら一連の報告書では、総じて生物多様性が喪失し、生態系が劣化している状況が示されている。

生態系サービスや自然資本に関する研究は、過去15年ほどの間に大きく発展してきた。生態系サービスの定量的評価と地図化、複数の生態系サービス間の関係分析（トレードオフやシナジー関係）等が可能になった他、土地利用・気候・他の影響要因の分析や、生態系や生態系サービスの空間モデリングも発展している。一方で、社会—生態系における複雑な相互作用やダイナミクス、気候変動やその他の影響要因が将来の生態系サービスに与える影響等、生態系サービスや自然資本の時空間的ダイナミクスの理解については、なお多くの研究課題が残されている。

生態系サービスの価値評価については、市場的価値と非市場的価値の両方が経済学的に分析されてきた。最近では人の健康や福利への生態系の影響を評価する研究が現れ始めている。調整サービスや文化的サービスに関する研究はまだ少ない。

生物多様性や生態系は、さまざまな生態系サービスを生み出す有限の環境資産であることから、自然資本として認識されている。この自然資本の収支を計算するための研究が進んでおり、そのうち、「包括的な富（Inclusive Wealth）」では、自然資本を含むさまざまな資本の価値が評価されている³⁾。しかし、自然資本の収支計算の方法は発展途上であり、勘定に入られていない多くの自然資本がある他、自然資本の将来価値を現在価値に換算する割引率の設定など、多くの課題が残されている。

生態系サービスと自然資本の価値評価に関する国際的な枠組みも検討が進みつつある。2010年には「生態系と生物多様性の経済（TEEB : The Economics of Ecosystems and Biodiversity）」の取り組みから報告書が公表された。世界銀行が主導する「富の勘定と生態系サービスの価値評価（WAVES : Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services）」からはSDGsと関連した自然資本の勘定に関する報告書⁴⁾等が公表されてい

る。国連統計委員会による環境経済勘定（SEEA : System of Environmental-Economic Accounting）は自然資本の勘定に関する知見をまとめた報告書⁵⁾等を公表している。また多国籍企業などの大企業においても、自然環境の価値をビジネスに反映させる取り組みが進みつつある⁶⁾。このように生態系サービスや自然資本の勘定の取り組みには進展があるものの、生態系サービスと自然資本に関する情報が多様な意思決定の場で使われることは未だ例外的であり、広く普及するには至っていない。

生態系サービスや自然資本のガバナンスに関する研究も近年進んでいる。生態系サービスに対する支払い制度（PES）、環境税、キャップ・アンド・トレード制度、環境に関する法律や規制、製品認証制度、市民意識の啓蒙等、様々な取り組みがある。しかしながら、これらの取り組みの効果影響を十分に評価できるほどに複雑な相互作用やダイナミクスをもつ社会—生態系の理解は進んでおらず、関係する生態的要素と社会的要素のモニタリングも十分ではないと認識されている。その主な原因は、生態系機能が生態系サービスを生み出す空間スケールと、ガバナンスの空間スケールにずれがあることである。そのずれによって社会—生態系の適切なガバナンスと政策決定がしばしば困難になっている。こうした中、行動経済学、社会学、心理学等の社会科学の参加によってより良い管理策や政策決定が生み出されるとの期待から、社会の多様な関係者が協力して進める順応的管理、順応的協働管理、生態系スチュワードシップに関する学際的研究が発展しつつある⁷⁾。

生態系サービスや自然資本は、気候変動適応、防災・減災、水質悪化等の生態系機能の劣化を伴う様々な社会的課題の解決に貢献すると期待されている。そのため、「生態系を活用した適応策（EbA : Ecosystem-based Adaptation）」、「生態系を活用した防災・減災（Eco-DRR : Ecosystem-based Disaster Risk Reduction）」、「グリーンインフラ」、「生態系インフラ」等、関係する多くの概念が提示されてきた。また最近は、自然の働きによって低いコストで環境・社会・経済に便益をもたらす、社会にレジリエンスをもたらすこれらの解決策を、「自然を基盤とした解決策（NbS : Nature-based Solutions）」としてまとめることが提案されている^{8) 9) 10) 11)}。NbSの複合的な効果を評価するのは挑戦的な試みだが、経済・文化・環境・生物多様性・生態系・気候変動を考慮にいれた研究が進んでいる¹²⁾。またEUでは専門家グループによってNbSに関する研究のレビューが行われており¹³⁾、Horizon 2020にも反映されている。

生態系サービスや自然資本に関連した研究における日本の研究開発力は、他国と比較して中位レベルにある。国際的に評価される研究成果が出始めているものの、全体として研究成果の国際的発信は十分でない状況にある。一方、IPBESやIUCNなどの国際的なイニシアチブに研究者が参加することで、国際的な貢献は拡大しつつある。日本の研究開発力や国際的貢献を高めていくためには、研究体制をより充実させていくことが必要と考えられている。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

● 生態系サービス研究

生態系サービスの定量評価と可視化（地図化）、生態系サービス間のトレードオフやシナジー分析、生態系サービスの駆動要因の理解と予測モデリング等において研究が進展している。生態系サービスの源泉となる生態系機能は、その生態系に存在する分類群・種・遺伝子型等によって決まるため、一つの種がもたらす生態系機能は限られている。よって

全ての生態系サービスを最大化するためには、それぞれの種や遺伝子型がもつ複数の機能の関係性を理解することが必要であり、近年その理解が進みつつある。

森林伐採による生物多様性や炭素貯蔵量への影響について空間明示的なモデリングが可能になっている他、生物多様性・生態系の保全と、食料生産、水資源、温室効果ガス排出源、再生エネルギー等との関係を、土地利用と関係づけて分析し可視化する研究が行われている¹⁴⁾。

生態系サービスのうち文化的サービスについては評価が遅れているが、ソーシャルメディアの情報を用いることで景観がもつ文化的なサービスを評価する等の研究が進められている。また個々の生態系サービスの関連性（複数の生態系サービス間の相関）とその時空間ダイナミクスを評価することで、農業政策の影響や地域間の環境の違いの影響を解明しようとする検討がなされている¹⁵⁾。沿岸生態系における生態系サービスの管理において現状評価とシナリオ分析による予測評価もなされている。

生態系サービスとそれを生み出す自然資本の価値評価では、例えば生態系サービスの市場的価値および非市場的価値を経済学的に評価することで、経済活動と生態系保全を両立させる方策が提案されている。自然資本の価値評価において経済学の資本理論に基づいた新しい手法も提案されている。また、複数種の相互作用がある状況での生態系管理を、生態系の経済的評価に組み入れる新しい方法も提案されている。

人間の福利の一面である健康に関して、生態系や生物多様性が、精神的な健康・アレルギー疾患・感染症に良い影響を及ぼすことが指摘されている。こうした生態系サービスと福利の関係については、社会の全体的な傾向と社会のマイノリティにおける傾向では異なる点がある可能性（タブー・トレードオフ）が指摘されている。

また生態系サービスの価値評価が、生態系サービスを損なうことに対する法的責任の根拠に使われることが少ないことが課題として指摘されている。現在は生態系サービスに対する支払い制度（PES）の設計、環境の便益についての理解、政策決定の優先順位づけやトレードオフ分析等で主として用いられている。

経済活動に対して生態系サービスや自然資本を反映させる試みが進んでいる。例えばESG投資が挙げられるが、グリーンウォッシュなどの懸念も示されており、科学的に裏付けのある確かな投資指標（ビジネスの環境への影響評価など）の開発が求められている¹⁶⁾。それに応えるものとして欧州ではNextGEOSS¹⁷⁾において生態系や生物多様性の観測がビジネスでも活用される仕組みが作られつつある。

生態系サービスと自然資本に関する政策や管理の効果評価についての研究も進められている。例えば生態系サービスに対する支払い制度（PES）の効果に関する研究では、経済的支援によって社会関係資本が減少することが懸念されているものの、そのような副次影響を伴わずに、生態系管理の取り組みを向上させる事例が報告されている。また、PESの科学的な正当性を担保するためのガイドラインも提案されている。保護区の設定に関する研究では、森林伐採の抑止に成功している保護区ほど保護区の解除がされにくいという、保護区のガバナンスの強化がそれらの存続にとって重要であることが報告されている。さらに、生態系サービスの知識の正当性が確保されていること（偏りがなく多くの視点が反映されていること）が、政策への科学的知見の活用に重要であることが指摘されている。

- 用語変更

IPBES では、科学的な視点が比較的強い「生態系サービス」という用語ではなく、多様な価値観を包含する「NCP (Nature's Contributions to People)」に用語使用が変更されている^{18) 19)}。

- 社会—生態系の枠組みでの研究

生態系サービスと自然資本を社会—生態系の枠組みで理解する研究や、社会—生態系のガバナンスに関する研究が進展している。例えば、人間による管理と生態系がもたらす生態系サービスとの非線形なフィードバック関係によって森林と草地と農地のモザイク状の景観が維持されていることが示された研究報告がある。また、アルプスの社会—生態系において自然資源管理が成功している社会のサイズ（人口）が示された研究もある。生態系サービスの管理やそのための多様な関係者の協力のためには順応的ガバナンスが有効であることも示されている。

社会—生態系のダイナミクスに関する研究も進展しており、社会—生態系におけるレジームシフトや、社会—生態系における人間社会のロバストネスについて、数理モデルを用いて分析する研究等が行われている。

- 防災・減災への応用

気候変動への適応や自然災害からの防災・減災等に対して果たす生態系や生物多様性の役割の重要性が認識されている。例えば気候変動適応において、生態系を活用した適応策（EbA : Ecosystem-based Adaptation）の重要性が IUCN や生物多様性条約事務局により指摘されている²⁰⁾。2016 年には EbA と生態系を活用した防災減災（Eco-DRR : Ecosystem-based Disaster Risk Reduction）の主流化に向けた報告書が生物多様性条約事務局から公表されている。またそれに続くものとして、同事務局が、気候変動枠組条約事務局や国連国際防災戦略事務局と協力して、EbA と Eco-DRR の設計や社会実装に関するガイドラインを 2018 年に公表している。EbA と Eco-DRR を実装するための多様なツールや多くの事例を紹介した学術図書も出版されている。その他にも国連防災世界会議による仙台防災枠組 2015-2030（2015 年）、ラムサール条約での決議（2015 年）、ヨーロッパ委員会による自然を基盤とした解決策（NbS : Nature-based Solutions）の推進等がある。国内でも Eco-DRR や EbA の重要性に関する認識は環境省、国土交通省、JICA などの政策や事業から見られる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 環境省環境研究総合推進費「S15: 社会・生態システムの統合化による自然資本・生態系サービスの予測評価」（代表：武内和彦、東京大学、2016 年度～2020 年度）

日本を中心にアジア地域も視野に入れながら、自然資本・生態系サービスの自然的・社会経済的価値の予測評価を行い、シナリオ分析に基づく複数の政策オプションが検討されている。最終的には、包括的な福利を維持・向上させるためのガバナンスのあるべき姿を提示することを目指している。環境研究総合推進費では、他にも環境問題対応型研究として複数の研究プロジェクトが生態系サービスや自然資本に関係する研究を実施している。

- フューチャー・アース

地球環境研究の国際研究プログラムの再編・統合がなされ、2015年からFuture Earth（フューチャー・アース）に関連づけた活動が始まっている。フューチャー・アースでは自然科学と人文・社会科学が強く連携することと、社会の多様なステークホルダーと共に行う超学際研究（transdisciplinary research）が重視されており、社会問題解決型の研究推進が行われている。2014年に62の優先研究課題からなる戦略的研究アジェンダが作られ、その下で国際的な研究プロジェクトや知と実践のネットワーク（KANs: Knowledge-Action Networks）が推進されている。

日本は5ヵ国に分散して置かれた国際本部事務局の一翼を担っており、日本学術会議と東京大学サステイナビリティ学連携研究機構が共に日本ハブの運営を担っている。またJST社会技術研究開発センターにおいてFuture Earth構想の推進事業の一環として2014年度から研究が実施されている。2018年度現在は、「貧困条件下の自然資源管理のための社会的弱者との協働によるトランスディシプリナリー研究」（代表：佐藤哲、愛媛大学）が本格研究として実施されている。2014～2016年度に実施された「フューチャー・アース：日本が取り組むべき国際的優先テーマの抽出及び研究開発のデザインに関する調査研究」（代表：谷口真人、総合地球環境学研究所）では、107の研究課題からなる「日本における戦略的研究アジェンダ」が作られている²¹⁾。

- ホライズン 2020 における自然を基盤とした解決策（NbS）に関する研究プログラム

EUでは、Horizon 2020で自然を基盤とした解決策（NbS）に関する研究プログラムが設定され、複数の研究プロジェクトが推進されている。NAIAD（NATure Insurance value: Assessment and Demonstration）プロジェクトでは、洪水や干ばつ等、水に関する災害に対しての社会的・経済的コストを抑制するため、生態系のもつ保険的価値を評価し社会実装することを目的とした共同研究が自治体や保険会社等により行われている。ThinkNature（Development of a multi-stakeholder dialogue platform and Think tank to promote innovation with Nature based solutions）プロジェクトでは、多様なステークホルダーが参加するプラットフォームを構築し、EU域や国際レベルだけでなく、地域や地方でのNbSの理解や促進を支援する研究が行なわれている。また、EKLIPSE（Establishing a European Knowledge and Learning Mechanism to Improve the Policy-Science-Society Interface on Biodiversity and Ecosystem Services）プロジェクトでは、生物多様性と生態系サービスに関する科学に基づくEU域の政策を支援する新しい仕組みを構築することを目指している。これらの他にも複数のプロジェクトが関連するテーマで推進されている。

- 米中連携による Natural Capital Project

米・スタンフォード大学が中心となり中国科学院や米・ミネソタ大学が連携して進めているNatural Capital Projectは、様々な社会的問題に対する自然を活用した解決策の実施に意思決定者と共同して取り組んでいる。実際の課題解決の過程において、既に新しいツールの開発や科学的知見が生まれている。特に、生態系サービスの地図化ツールであるInVESTは、世界的に利用されている。Natural Capital Projectの取組みは、世界各国

に広がっており、海洋沿岸域での気候変動に対する適応、生態系サービスに対する支払い制度（PES）の設計、森林生態系の再生への投資計画の策定、多国籍企業のサプライチェーンの影響評価など、多方面にわたっている。

- スtockホルム・レジリエンス・センターにおける超学際研究

スウェーデンにあるストックホルム・レジリエンス・センターでは、社会—生態系のレジリエンスや持続性科学に関して、幅広い学際的・超学際的な研究が実施されている。自然科学と人文・社会科学の多様な研究者が所属しており、陸上・海洋・都市における社会—生態系に注目し、分野横断的なテーマとして、複雑適応系・人類世におけるパターン・スチュワードシップ・社会の転換の分野の研究に取り組んでいる。研究対象は世界各国に広がっているほか、2007年に設立されて以降、論文の出版数や引用数は上昇傾向を維持している。

（5）科学技術的課題

- 生態系サービスの評価

供給サービスや調整サービスの科学的基盤は比較的整っており国内外で評価研究が実施されているが、未解決の課題も多く残されている。例えば生態系サービス評価の空間スケールを地域の政策決定や管理に合致するような詳細な水準とすることには技術的な課題が残っている。また、評価された生態系サービスの妥当性や確実性の検証は十分に進んでいない。供給サービスと調整サービスの評価手法には、さらなる高度化や精細化が求められている。文化的サービスは、評価手法そのものの開発が発展段階にあり、供給サービスや調整サービスに関する研究に比べて十分な評価研究が進んでおらず、手法開発をさらに進める必要があると見られている。

個々の生態系サービスの間の関連性については時空間的に限られた範囲でのスナップショット的な分析は散見されるが、歴史性や広域的な対象、すなわち時空間ダイナミクスの研究はまだ少ない。そのため、環境変化・気候変動・その他の影響要因の変化が将来の自然資本や生態系サービスに与える影響を高い確度で予測評価することは現状では難しいと見られている。

生態系サービスの時空間ダイナミクスを、その駆動要因とともに理解し、将来予測につなげるためには、生態系サービスの構成要素である生態系や生物多様性のモニタリングに加え、多数の事例研究を用いたドライバー（自然的、文化的、社会・経済的要因）に関するメタ分析、モデル地域での実証研究、複雑適応系やエージェント・ベース・モデルなどの数理モデルを用いた人間社会と生態系のフィードバック研究、などが必要と考えられている。

- 自然資本や生態系サービスの価値評価

近年目覚ましい発展が見られるものの、評価方法自体が発展途上である。生態系サービスと自然資本の収支に関する情報が社会のさまざまな意思決定の場で使われることは現状では例外的であり、広く普及するには至っていない。自然資本の勘定には、まだ反映されていない多くの自然資本があり、それらの抽出と主流化及び評価手法の開発が必要となっ

ている。

自然資本の現在価値と将来価値を統合的に評価することが自然資本の持続的な管理に必要となるが、将来価値を現在価値に換算する割引率の設定などについて、経済学的な分析だけでなく倫理的な分析が不足している。

- 人間の健康や福利

人間の健康や福利に与える生態系サービスとその効果については、一部の研究成果があるものの十分な評価が進んでいない現状であり、さらなる研究開発が求められている。

- 自然資本や生態系サービスの管理政策やガバナンスに関する研究

地域レベル・国レベル・国際レベルで様々な取組みが進みつつある。また、環境に配慮したビジネスや資本投資も近年急速に拡大している。しかし、これらの管理政策・ビジネス・投資などが自然資本の持続性に与える効果を十分に評価できるほどに社会-生態系の理解は進んでおらず、効果評価に必要な社会-生態系の諸要素のモニタリングも十分ではない状況。そのため、管理や投資の指標開発も十分でない現状にある。より効果的な管理政策やビジネス・投資における意思決定を促すためには、自然資本や生態系サービスに関する基準の設定、基準の評価に必要なデータと方法論の整備、更に基準達成の報告に関する仕組みなどの開発が必要になる。

行動経済学、社会学、心理学などの社会科学が参加する学際研究により、よりよい管理やガバナンス、政策決定に必要な科学的知見の創出が期待されている。科学者や行政担当者だけでなく、社会の多様なステークホルダーが協力して進める順応的管理、順応的協働管理、生態系スチュワードシップに関する学際的研究が必要とされ、その学術的発展は、社会-生態系の持続性に貢献すると期待されている。

（6）その他の課題

- 超学際研究に携わる人材の不足懸念と育成の必要性

生態系サービスと自然資本の活用と管理に関する研究は、それらの基盤となっている生態系や生物多様性に関する生態学的な研究のみならず、農学や工学などの応用分野の自然科学に加えて、社会学・経済学・歴史学・倫理学などの人文・社会科学分野の研究参加も必要になる。そのような社会-生態系の全体を俯瞰するような教育プログラムや、社会の多様なステークホルダーと協働する超学際研究に関する教育プログラムは、一部の大学（東北大学や九州大学など）での取り組みがあるものの、十分な人材育成ができていない状況にある。そのため、生態系サービスと自然資本の活用と管理に関する科学的基盤を知識生産する研究人材が現在不足しており、将来的にも人材不足が懸念されている²²⁾。

- 研究成果に対する評価基準の開発

社会-生態系の研究は学際的・超学際的であり、さまざまな学問分野や社会の多様なステークホルダーとの横断的な連携が求められる。そのため、既存の学問分野で発展してきた研究成果に対する評価基準をそのまま社会-生態系の研究に当てはめることには困難があると考えられている。学際的・超学際的研究に対する評価のあり方は既存の学問分野に

比べて十分に成熟しておらず、既存の分野に固執せず幅広い視点で社会-生態系の研究の評価を担当できる評価人材も少なく、また、学際的・超学際的研究を推進する研究助成制度も十分に整備されていないという状況にある²²⁾。社会が求める社会-生態系の学際的・超学際的研究をこれまで以上に推進していくためには、研究成果に対する評価基準の開発が必要とされている。

● 国内中核機関の必要性

諸外国には社会-生態系のレジリエンスや持続可能性に関する専門の研究機関が存在する（例えば、スウェーデンのストックホルム・レジリエンス・センターやドイツの生物多様性研究センター）。しかし、日本には、京都大学生態学研究センターや総合地球環境学研究所など関連する研究機関があるものの、諸外国の研究機関と比較すると、研究人材・研究施設・研究費のいずれにおいても十分とは言えない現状にある。学際的・超学際的な社会-生態系の研究を一段と発展させるためには、研究を中心的に先導していく中核的研究機関の拡充が必要とされている²²⁾。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	●環境省環境研究総合推進費による大型研究プロジェクト（S9、S15など）により、生態系サービスや自然資本に関する基礎的研究が進みつつあり、世界を先導するような研究成果が出始めている。しかし国際的発信は必ずしも十分ではない。 ●自然資本の経済評価については、環境経済学的な分析や包括的な富（Inclusive Wealth）の研究などで進展が見られる。 ●社会-生態系の評価やガバナンスに関する基礎的研究も進みつつあるが、他国に比較して研究の進展は遅れている。
	応用研究・開発	○	→	●IPBESやIUCNなどの国際的なイニシアチブに研究者が参加し、国際的な取り組みに貢献している。 ●全国レベルでの生態系サービスの評価が実施され、JSSA（里山・里海の生態系と人間の福利：日本の社会生態学的生産ランドスケープ）やJBO2（生物多様性及び生態系サービスの総合評価）として公表されている。しかし国際的発信は十分でない。 ●生態系サービスや自然資本に関係する概念が科学技術、環境政策、国土政策などに取り入れられているものの、政策を十分に支援するだけの研究体制は整備されていない。
米国	基礎研究	◎	↗	●生態系サービスや自然資本に係る研究は世界で最も活発になされており、この分野を先導している。 ●スタンフォード大学を中心に進められるNatural Capital Projectでは、生態系サービスの地図化で最もよく使用されるソフトウェア（InVEST）などを提供しているほか、さまざまな国における自然資本と生態系サービスの管理に貢献している。
	応用研究・開発	◎	→	●前政権では、全ての連邦機関に生態系サービスや自然インフラ（Natural Infrastructure）を考慮した計画や意思決定を行うように指示が出る等、生態系サービスが政策に積極的に取り入れられようとした²³⁾が、その後継続していない。 ●「デザインによる復興（Rebuild by Design）」による先進的な取り組みとして、生態系のレジリエンスを活用した市街地のデザインなどを実践している。 ●長期観測データをもちいて、チェサピーク湾の水質浄化が進み、水草が再生することで生物多様性が再生しつつあることが報告されている。

欧州	基礎研究	◎	↑	●生態系サービスや自然資本に関する研究は世界的にトップ水準にあり、この分野を先導している。 ●Horizon 2020 には自然を基盤とした解決策 (NbS) に関する研究プログラムが設定されており、多くのプロジェクトが実施されている。その中には、気候変動にともなう自然災害への適応研究、多様なステークホルダーが参加し NbS の社会実装を進める研究、生物多様性と生態系サービスに関する科学と政策の連携研究など、学際的・超学際的研究が多く見られ、多くの研究成果が得られている。 ●EU 全域を合わせると、生態系サービスや自然資本に関する研究は、米国とともに世界で最も活発になされており、この分野を先導している。 ●ドイツ生物多様性研究センター (iDiv : German Centre for Integrative Biodiversity Research) が 2012 年に設立され、生態系サービスや社会-生態系に関する研究を活発に行なっている。 ●スウェーデンのストックホルム・レジリエンス・センターでは、生態系サービスの管理や社会-生態系のガバナンスに関する研究を活発に行なっている。
	応用研究・開発	◎	↑	●NbS に関する研究開発分野のレビューが専門家グループにより行われている。 ●英国では全国スケールで生態系と生態系サービスの評価および影響要因の評価がなされている。
欧州	応用研究・開発	◎	↑	●英国では 2012 年に、自然資本委員会 (Natural Capital Committee) が経済問題委員会のもとに組織され、自然資本の勘定に関する年次報告書を公表している。後述の 25 Year Environmental Plan (今後 25 年間の環境計画) に対する提言なども行なっている。 ●英国では 2018 年に今後 25 年間に進める環境計画 (25 Year Environmental Plan) が政府により公表され、環境を第一とする農林水産業の推進や自然資本の保護と成長の政策に反映させることなどが盛り込まれている。
中国	基礎研究	○	↑	●生態系サービスの現状評価と地図化や、生態系管理の効果に関する研究など、国際的に顕著な研究成果を近年急速に増やしつつある。 ●生態系サービスや自然資本に関する研究は、近年急速に拡大しつつあり、世界のトップグループに入っている。 ●中国科学院生態環境研究センターには、都市と地区生態国家重点実験室が設けられ、社会-生態系の研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	●初めての全国スケールでの生態系サービス評価が行われ、2000 年から 2010 年にかけて、保全政策の結果として生態系サービスが向上していること等が明らかにされている²⁴⁾。 ●環境と経済の発展を調和させる生態文明 (Ecological Civilization) の概念を中国共産党中央委員会が 2015 年に提示し、生態系保全や再生の取り組みを進めている。 ●世界最大の PES である Sloping Land Conversion Program を 1999 年から進めており、広大な面積で森林再生、浸食防止、炭素貯蔵などを進めている^{25) 26)}。 ●重要な生態系サービスを保全するために、Ecosystem Function Conservation Areas を指定している²⁷⁾。 ●生態と環境に関する年次報告書が、生態環境省から公表されている²⁸⁾。 ●森林保全、土壌保全、砂漠化防止などの取り組みが大規模に中国全体で実施されてきたが、その効果は全体的にはポジティブであるものの、課題も残っていることが分析されている²⁹⁾。 ●森林生態系の再生などの取り組みが、二酸化炭素の吸収源の機能を向上させていることが明らかになっている³⁰⁾。 ●中国国内の保護区設定において、その効果が期待される分類群に偏りがあるほか、重要な調整サービスの保護への効果が十分でないことなどが明らかにされている²⁷⁾。
韓国	基礎研究	△	↑	●2013 年に国立生態学研究所が設立され、生態系サービスに関する研究も一部進んでいる。 ●生態系サービスや自然資本に関する研究は、個別の優れた研究はあるものの、全体として他国と比較すると多い方ではない。
	応用研究・開発	△	→	●全国レベルでの生態系評価や生態系サービスの評価は、まだ実施されていない。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

- 1) M. Karki *et al.* (eds.), "Summary for policymakers of the regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Asia and the Pacific of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services," IPBES secretariat, 2018.
- 2) 環境省, 「生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書（JBO2: Japan Biodiversity Outlook 2）」, 2016.
- 3) S. Managi & P. Kumar, "Inclusive Wealth Report 2018: Measuring Progress Towards Sustainability," CRC Press, 2018.
- 4) A. Ruijs *et al.* "Natural Capital Accounting for the Sustainable Development Goals: Current and potential uses and steps forward," PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2018.
- 5) UN, EC, FAO, IMF, OECD and The World Bank, "System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework," 2014.
- 6) P.M. Kareiva *et al.*, "Improving Global Environmental Management with Standard Corporate Reporting," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no.24: 7375-7382, 2015.
- 7) D. Armitage *et al.* (eds.), "Adaptive Co-Management: Collaboration, Learning, and Multi-Level Governance," UBC Press, 2010.
- 8) E. Cohen-Shacham *et al.* (eds.), "Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges," 2016.
- 9) European Commission, "Nature-Based Solutions,"
<https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs> (2019年2月1日アクセス).
- 10) C. Nesshöver *et al.*, "The Science, Policy and Practice of Nature-based Solutions: An Interdisciplinary Perspective," *Science of The Total Environment* 579: 1215-1227, 2017.
- 11) WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water, "The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water," UNESCO, 2018.
- 12) C.M. Raymond *et al.*, "A Framework for Assessing and Implementing the Co-benefits of Nature-based Solutions in Urban Areas," *Environmental Science & Policy* 77: 15-24, 2017.
- 13) Directorate-General for Research and Innovation, European Commission, "Nature-

- Based Solutions & Re-Naturing Cities," 2015.
- 14) L. Gao & B.A. Bryan, "Finding Pathways to National-scale Land-sector Sustainability," *Nature* 544, no.7649: 217-222, 2017.
 - 15) D. Renard *et al.*, "Historical Dynamics in Ecosystem Service Bundles," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no.43: 13411-13416, 2015.
 - 16) C.J. Vörösmarty *et al.*, "Scientifically Assess Impacts of Sustainable Investments," *Science* 359, no.6375: 523-525, 2018.
 - 17) NextGEOSS: "The European Data Hub and Platform,"
<https://nextgeoss.eu> (2019年2月1日アクセス) .
 - 18) IPBES, "Report of the Plenary of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on the work of its fifth session," 2017.
 - 19) S. Díaz *et al.*, "Assessing Natures Contributions to People," *Science* 359, no.6373: 270-272, 2018.
 - 20) A. Andrade Pérez *et al.* (eds.), "Building Resilience to Climate Change: Ecosystem-based adaptation and lessons from the field," IUCN, 2010.
 - 21) 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所「フューチャー・アース構想の推進事業：日本が取り組むべき国際的優先テーマの抽出及び研究開発のデザインに関する調査研究」,
<http://www.chikyu.ac.jp/activities/related/etc/fe.html> (2019年2月1日アクセス) .
 - 22) 日本学術会議 統合生物委員会 生態科学分科会「報告 生態学の展望」, 2017.
 - 23) M. Schaefer *et al.*, "Nature as Capital: Advancing and Incorporating Ecosystem Services in United States Federal Policies and Programs: Table 1," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no.24: 7383-7389, 2015.
 - 24) Z. Ouyang *et al.*, "Improvements in Ecosystem Services from Investments in Natural Capital," *Science* 352, no.6292: 1455-1459, 2016.
 - 25) Z. Liu & J. Lan, "The Sloping Land Conversion Program in China: Effect on the Livelihood Diversification of Rural Households," *World Development* 70: 147-161, 2015.
 - 26) J. Leshan *et al.*, "Sloping Lands Conversion Programme, People's Republic of China," IIED, 2017.
 - 27) W. Xu *et al.*, "Strengthening Protected Areas for Biodiversity and Ecosystem Services in China," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, no.7: 1601-1606, 2017.
 - 28) Ministry of Ecology and Environment, China, "2017 State of the Ecology and Environment in China," 2018.
 - 29) B.A. Bryan *et al.*, "China's Response to a National Land-system Sustainability Emergency," *Nature* 559, no.7713: 193-204, 2018.
 - 30) F. Lu *et al.*, "Effects of National Ecological Restoration Projects on Carbon Sequestration in China from 2001 to 2010," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, no.16: 4039-4044, 2018.

2.2.2 環境分析・物質動態

（1）研究開発領域の定義

環境分析・物質動態に関する科学、技術、研究開発を記述する。

環境媒体（大気、水、底質、土壌、生物）における汚染物質や微量元素・同位体の分析、環境中の物質の動態把握等を行う領域である。

ここでは、エアロゾル（PM2.5 含む）や、微量分析、一斉・網羅分析、窒素・リン、同位体、ナノ物質・マイクロプラスチック等の計測技術、それらの採取、前処理、精度管理、インフォマティクス、モデル作成の他、環境中で形を変えて移動する物質の動態把握技術を対象とする。また毒性を把握するためのバイオアッセイや AOP、構造解析等のリスク評価技術も対象とする。

温室効果ガスの動態については研究開発領域「気候変動観測」や「気候変動予測」で取り扱う。

（2）キーワード

化学物質有害性評価、影響指向分析、分野横断・統合、ノンターゲットモニタリング、多情報解析、マイクロプラスチック、化学繊維、極微小状態・構造分析、個別粒子・成分分析、重元素安定同位体比分析、微量元素・多元素分析、分離・複合分析、核内受容体・CERAPP、バイオアッセイ、AOP、バイオ計測、人工知能

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

最近の環境汚染は人為的な原因によって発生する場合が多い。経済発展等に伴う爆発的な化学物質利用の拡大の一方で、これらの適正管理と人の健康や生態系への悪影響の未然防止が益々重要となっている。

大気汚染では、化石燃料などの燃焼に伴って発生する二酸化炭素は地球温暖化、燃焼粉塵（煤）、PM2.5、多環芳香族炭化水素（Polycyclic Aromatic Hydrocarbon: PAH）類¹⁾などは肺がんやぜん息、心不全などの疾病を誘発する。海洋汚染では、とりわけマイクロプラスチック（5 mm 以下の微小なプラスチック粒子）が国際的な問題になっている。農薬等による土壌や河川の汚染も依然問題である。汚染防止対策には汚染物質の測定、動態や毒性の解明に対応できる分析技術が基盤となる。

化学物質適正管理は、ばく露と毒性情報に基づくリスク評価が基本である。各種環境媒体中の化学物質（代謝物、分解物を含む）の分析と人や野生生物への毒性評価からリスクの高低を判断し、適切な管理を進める。人間活動に伴う化学物質の環境放出と環境動態の的確な把握も重要となる。分析による実態把握の一方、環境挙動を的確に表現し対策効果を予測可能なモデルの作成並びに発生源インベントリの整備も必要となる。化学物質は主に人間の社会経済活動（社会ドメイン）において使用され、環境中（環境ドメイン）に出た後は、物質循環の流れにのって拡散し、人を含む生物、生態系（生物ドメイン）に取り込まれて影響が顕在化する。社会ドメインにおいては、主要な環境放出過程の解明、排出量の把握と基準の遵守状況の評価、対策の効果の確認などの分析が必要である。環境ドメインでは、化学物質は光分解や酸化、生物代謝等をうけつつ、その化学的性質に応じて環境媒体間に分配され、大気や水の流れに乗って移動しながら食物網を通じて生物に取り込まれる。化学物質の環境動態モデルは、発生源インベントリとあわせて将来予測や対策立案等に利用される。生物ドメインでは人や生物への毒性評

価が課題となり、対象生物、評価軸や評価のエンドポイントの選定等が重要となる。化学物質と標的生体成分（受容体、酵素など）との相互作用の理解や構造活性相関に基づく毒性発現機構の解明、有害性発現経路（Adverse Outcome Pathway: AOP）の整備と毒性評価手法の作成等が行われる。毒性評価は、生物ドメインでの影響評価、社会ドメインでの新規化学物質の製造認可や管理の必要性の判断に不可欠で、高リスクと判断された物質の管理は主に社会ドメインで進められる。たとえばナノ物質は私たちの生活や産業に不可欠な物質となっている一方、小さいがゆえ有害性が発現される可能性が懸念されており、安全性評価に向けた計測技術開発が重要な課題である。

本領域はSDGsの3：人の健康、6：安全な水、13：気候変動、14：海の豊かさ、15：陸の豊かさ、の追及と達成に向けて重要な意義を持つ。

〔研究開発の動向〕

環境分析は、公害の原因物質の探索や、有害物質の排出規制、環境レベルの監視などを目的として行われてきた。化学物質利用の拡大に伴う規制項目、監視項目の増加に対応に加え、未規制物質への規制や監視を判断するため、様々な分析法が整備されてきた。急性毒性の評価と対策が進む一方、地球規模の汚染の拡大、低濃度長期ばく露影響等が懸念されるようになり、ダイオキシン類を含む残留性有機汚染物質（Persistent Organic Pollutants: POPs）や水銀など有害元素の分析・監視手法、環境動態モデルが開発され、ストックホルム条約や水俣条約などの国際的な規制の整備が進んだ。極微量分析技術に加え、最近では多種類の化学物質の同時監視や複合ばく露の実態把握を目的として、より包括的、網羅的な化学物質分析手法並びにデータ解析・情報抽出（インフォマティクス）手法の開発が進められている。

無機元素の物質動態研究は、生物の生存可能性を支えている地球システムの理解、地球の歴史の解明、および人類活動が将来の環境へ及ぼす影響の評価に欠かせない。研究を発展させる鍵は、新しい情報を与える分析技術である。重元素安定同位体比、微量元素化学量論、極微小領域情報という新しいパラメータの利用により、無機元素の物質動態の理解が深まっている。とくに重元素安定同位体の研究は、地球環境科学の一大潮流となっている²⁾。この発展は多重検出型誘導結合プラズマ質量分析法（Multiple Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: MC-ICP-MS）の普及が導いた。MC-ICP-MS以前の安定同位体比分析は、水素、炭素、窒素、硫黄などの軽元素に限られていたが、MC-ICP-MSではほぼ全ての核種のイオン化と精密同位体比が測定可能となり、分析可能な元素が数10倍に増加した。安定同位体比は、その元素の起源により有意に異なる場合があり、状態変化、化学反応、および生物代謝により有意に変動する場合がある。濃度に加えて同位体比を測定すれば、同位体比についても質量保存式がたてられ、元素の動態をより詳細に調べられる。微量元素の多元素分析もICP-MSなどの分析機器の進歩に基づいているが、多くの場合、主要成分が測定を妨害するので、目的成分の分離濃縮も必要となる。分離濃縮技術も顕著に進歩し、高選択的かつ簡便迅速となった結果、多くの微量元素のビッグデータ、それに基づく化学量論的解析が利用可能となった。極微小領域の分析には、加速器-蛍光X線法、二次イオン質量分析法（Secondary Ion MS: SIMS）、LA-ICP-MS（レーザーアブレーションICP-MS、Laser Ablation: LA）などのより大型で先端的な装置が用いられる。この分野も、感度（1 ppt レベルまで）と空間分解能（数 nm まで）の向上、イメージングや時間変化の観測技術が顕著に進歩し、ナノ粒子の分析、計

数も可能となっている。

粒子状物質については、東アジア地域の経済成長とともに、燃焼起源の PM2.5 等の大気微粒子の越境移動や健康影響研究が盛んになってきた。銀やシリコンなどのナノ物質の開発と製品利用も進み、人や水圏生態系への影響が関心を集めている。プラスチックごみやレジンペレットによる海洋汚染の実態解明や生態系への影響の研究が進み、意図して作られたマイクロプラスチックに加え、環境中で風化・細分化されて生成されたマイクロプラスチックによる汚染の進行も明らかとなった。マイクロプラスチックが海洋表層水中を漂い外洋の環流に集積すること³⁾、沿岸の堆積物中に存在し、それらが多毛類や蔓脚類に取り込まれ、生態系に侵入する可能性が報告された⁴⁾。吸着実験や観測から有害化学物質の海洋生態系での運び屋になることが示され、含有される有害化学物質が摂食した生物組織に移行することも明らかにされた⁵⁾。北極から南極にいたる全海洋表層に広がるばかりでなく、深海堆積物にいたる海洋底にも広がることが明らかにされた。プラスチック廃棄物の海洋流入量が今後も爆発的に増加すると予想⁶⁾され、使い捨てプラスチックの削減対策が世界的に進められている。環境水中のマイクロプラスチックの計測は手作業中心で効率が悪く、採集に用いるふるいの粗さのため、正確な粒径情報が得られない課題がある。多くの場合、粗分離した環境試料を 350 μm のふるいにかけて、残った試料を目視と手作業で分類し、顕微鏡と画像解析ソフトで個数とサイズを測定し、フーリエ変換赤外分光光度法（Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR）により有機成分が同定されているが、これら全ての手順の飛躍的な改善が求められる。

大気環境基準に定められている汚染物質の中で、粒子状物質、特に PM2.5 の測定法には、①フィルタ法と②自動測定法：振動素子を用いるフィルタ振動法、 β 線吸収法、光散乱法がある。これらはいずれも粒子の大きさに基づく計測法である。PM2.5 が黄砂由来か燃焼粉塵（煤）由来か、また毒性本体の化学物質の同定・定量は重要である。捕集した PM に含まれる無機陽・陰イオン成分についてはイオンクロマトグラフィーや ICP-MS が用いられる。一方、PAH やニトロ多環芳香族炭化水素（Nitro-PAH、NPAH）は、発がん性や内分泌かく乱作用、活性酸素種産生作用などの毒性があるために、WHO や諸外国では既に環境基準や指針値が定められており、わが国でもその設定が急がれている。大気中の PAH や NPAH には高速液体クロマトグラフィー・蛍光検出法（High Performance Liquid Chromatography: HPLC）、HPLC・化学発光検出法、ガスクロマトグラフィー MS（Gas Chromatography: GC）などが用いられているが、PM 量の測定とはオフラインで別に分析しなくてはならない。一方、土壌、水、食品の有害化学物質の中で主要対象は農薬である。未規制を含む約 800 種類のポジティブリストの分析が必要で、多成分の同時分析が可能な GC-MS、LC-MS、HPLC などが用いられている。感度的に残留基準値の分析はほぼ満足できるが、広範な対象物質に対応できる前処理を含め、簡便・迅速な一斉分析法の確立が課題である。更に、有害化学物質は一般に環境中で酸化反応を受け、また微生物やヒト体内で代謝反応を受ける。PAH 代謝物の一つである PAH 水酸化体が元の PAH より強い毒性を持つ例もあり、毒性研究面では生成した毒性本体の同定と体内動態の追跡は、国際的にも殆ど手掛けられていない。

ナノ粒子の計測については、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope: TEM）が、個別粒子の粒子径測定、および粒子の凝集状態の観察の有力な手法である。TEM の装置分解能は 0.01 nm オーダーに到達し⁷⁾、環境や生体試料への適用も期待される。細胞など湿潤した試料では、極低温で周囲の水を急速凍結させて観察する Cryo-

TEM が有効である。液中のナノ粒子の粒子径測定ではレーザー回折・散乱法の分解能が向上し、10 nm オーダーの粒子径分布を測定可能となった。1 nm オーダーの測定では動的光散乱 (Dynamic Light Scattering: DLS) が主流だが、散乱強度が低いと性能が低下する問題がある。この解決のため、ナノ粒子トラッキング解析や整調抵抗パルスセンシング法⁸⁾ が注目されている。超遠心沈降法と分光法の組み合わせ法は、遠心力により沈降した粒子をフラッシュ光照射による吸光度測定で 1 nm オーダーの粒子濃度を測定する方法で測定精度、分解能、再現性が DLS よりも良いことから、再び見直されている。単一粒子誘導結合プラズマ質量分析計 (Single Particle ICP-MS: sp-ICP-MS) では、導入された溶液中のナノ粒子はプラズマで原子化・イオン化し、通常の ICP-MS 測定より非常に短い時間 (0.1 ミリ秒) でナノ粒子含有元素を測定することで、最小 1 nm オーダーの粒子径の推定およびナノ粒子中の元素分析が可能になりつつある。

化学物質リスク管理において環境分析と並ぶもう一つの柱である毒性評価では、人への影響評価を動物実験で調べるため、急性／亜急性／慢性毒性、発がん性、神経／免疫／内分泌毒性、行動試験、次世代影響など、様々な試験法が開発された。さらに、生態系への影響評価を目指して、植物や無脊椎動物など各種生物に対する試験法の確立と応用も進められている。毒性発現機序に関する知見の集積を背景に、培養細胞系や無細胞系による短期毒性試験法 (バイオアッセイ) の開発も進められた。2007 年には、毒性物質との最初の相互作用から個体レベルの毒性発現にいたる Toxicity Pathway の解明と、これに沿った一連のバイオアッセイ系による、実験動物を使わない毒性試験法の確立が提唱された⁹⁾。さらに集団や生態系への影響の Pathway を加え、AOP として概念が整理されている¹⁰⁾。

バイオアッセイをはじめとするバイオ計測については、生体影響の原因物質である個別の物質の検出や同定に留まらず、これらの物質群の総合的な生体影響を一括して評価するのに有効である。多数の化学物質が日々生み出され、世界最大級の化学物質 DB の米国化学会 CAS Registry 登録数は 2015 年に 1 億種類を超えた¹¹⁾。これら化学物質の生態系やヒト健康への影響は、個々による影響評価だけでなく、複数の化学物質の複合影響も評価する必要がある。バイオ計測は、これらの生体影響を評価する強力な手段となる。バイオアッセイは、微生物や実験動物などを利用して、その応答性から、化学物質が生体に及ぼす影響を調査する方法である¹²⁾。例えば、(1) 生態系への影響評価では、いわゆる OECD 生体毒性試験 3 点セットの藻類・甲殻類・魚類が使用され、食物連鎖のピラミッドを擬似的に構築した生態系モデルにより評価する。(2) ヒト健康への影響評価では、特に単一化学物質の生理活性評価を目的として、マウスやラットなどの哺乳動物が使用される。また、(3) 生体活性評価では、化学物質の毒性発現メカニズムに基づいた手法として、酵母などの微生物を利用した yeast-two hybrid 法や、酵素や抗原・抗体反応を利用した酵素免疫化学測定法 (Enzyme-linked immunosorbent assay: ELISA) などが使用されている。生体材料を用いたこのような手法も、広義のバイオアッセイと捉えられる。これらの手法は、環境評価やヒト健康評価に大きく貢献してきているが、化学物質から影響を受けるはずの生態系や生体系等のシステム全体のうちごく一部を切り取ったものを対象としているため、化学物質の影響すべてを評価できるわけではない。また、評価対象のさらなる拡大に対応するため、スループット能の向上に加え、費用の低減や実験期間の短縮も求められている。併せて、河川や海洋などの水環境の生体影響評価では、現場での計測が求められている。現在バイオアッセイに求められる性能は、簡便、迅速、低コスト、高精度・高

スループット、環境現場計測、複数のバイオアッセイの統合化と考えられる^{12),13)}。これらの要求に対して、バイオチップを活用したバイオアッセイが注目されている。マイクロ流路を有する Lab-on-a-chip 内で細胞や微生物などを培養し、光学イメージング・蛍光イメージング・ゲノム解析・電気化学分析などにより、エンドポイントを観測する。チップ内では、試料調製・定量 PCR（ポリメラーゼ連鎖反応、Polymerase Chain Reaction）・DNA マイクロアレイやタンパク質マイクロアレイ・結晶構造解析・ELISA・フローサイトメトリーなども可能である。チップ上でバイオアッセイを自動化し高スループットで連続・並行実施することで、複数の分析工程を短時間に行う広範囲のスクリーニングが可能となると期待される¹⁴⁾。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

（有機分析）

生物蓄積性の高い毒性物質の POPs 関連では、ストックホルム条約の有効性評価に資する長期モニタリング¹⁵⁾のほか、新規追加物質の評価、代替物質の実態把握など多くの研究が進められている。特に短鎖塩素化パラフィン（Short - Chained Chlorinated Paraffins: SCCP）は膨大な数の異性体の混合物であり、妨害も多く、その正確な定量法の開発は環境分析にとって新たなチャレンジとなっている¹⁶⁾。農薬、医薬品など生物毒性を利用する化学物質の環境監視研究も多い。特にネオニコチノイド系並びにフィプロニル等の浸透性殺虫剤による受粉昆虫などへの悪影響が懸念され、環境モニタリング、環境動態研究などが、生態毒性試験や実際の野生生物の増減等に関する研究とともに推進されて膨大な論文が報告された。近年これらをまとめた総説集¹⁷⁾や報告書¹⁸⁾が公表され、欧州では一部使用禁止などの措置がとられている。多種多様化する化学物質に対応した多成分一斉（ワイドターゲット）分析やノンターゲット分析¹⁹⁾、塩素化パラフィンのような理論同族異性体が極めて多いなどの理由でこれまで分析が困難であった物質への対応¹⁶⁾が進められていることが世界的な潮流といえる。ノンターゲット分析の開発と普及にあわせて、実際の河川水などに含まれる化学物質とその分解物、代謝物の網羅分析結果も報告が増えてきた²⁰⁾。有害物質の優先順位付けや水処理技術へのフィードバックが期待される。

連続した精密質量の測定が可能な質量分解能 1 ～ 4 万程度の飛行時間型質量分析計（Time of Flight MS: ToF-MS）の普及と世代交代が進んだことが、多成分の一斉定量と未知物質推定の同時実現を後押ししている。未知物質の組成式の推定確度は質量分解能と測定精度に比例することから、未知物質推定に特化した研究では、フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析計（FT-ICR-MS）やオービトラップ型質量分析計など質量分解能が十万以上の質量分析計の環境分野への応用も見られる²¹⁾。さらに、精密質量測定データを利用し、質量欠損情報から共通の元素比率や構造をもつ化学物質群を選択的かつ包括的に抜き出すなどのスクリーニング解析も進められている²²⁾。

広範囲かつ長期の環境モニタリングのための省力・簡便・低コストのサンプリング技術として、水や大気のパッシブサンプリング法の開発・改良が進められている^{23),24)}。水質パッシブサンプリングでは、2016年にカナダ、アメリカ、中国を中心とする国際的なネットワークが立ち上がり、比較検証が行われている²⁵⁾。

（無機・同位体・放射性核種）

同位体利用技術の展開が環境研究における大きなトレンドとなっている。発生源による同位体組成の違いを利用した発生源探索、物理化学／生物プロセスによる同位体比の変化を利用した環境動態、食物網構造解析などに加え、宇宙線や太陽光による同位体比の特異的变化（ ^{14}C 等の宇宙線起源長寿命同位体生成、あるいは水銀における質量非依存性同位体分別（Mass Independent Fractionation: MIF）の生成など）や原子力関連で放出された同位体の利用など、様々な環境同位体研究が進められている。また、生物蓄積性を有する元素・化学物質の環境動態の解析に関して、アミノ酸の代謝の違いを利用した化学形態別安定同位体分析により、信頼性の高い栄養段階の解明が実用的に利用されるようになった²⁶⁾。海洋表層での太陽光による水銀の正の MIF の生成と海洋生態系への蓄積を示唆する結果が報告され²⁷⁾、これと整合するように海洋表層大気中水銀にはわずかな負の MIF が観測された²⁸⁾。自動連続測定装置により、全球レベルで大気中水銀の化学形態別濃度や変動の様子が明らかになり、特異的な酸化と地表への沈着プロセスが次第に明らかになっている。その一方で、酸化体の測定法に疑念が生じ、検討と新たな手法開発も進んでいる。原発事故由来の放射性核種の追跡研究も進む中で ^{131}I へのばく露評価指標としての ^{129}I の環境測定²⁹⁾、或いは長寿命放射性核種の ^{14}C 等による環境中炭素循環、物質循環の研究も加速器質量分析法（Accelerator MS: AMS）により研究が展開されている。さらに、過去の核実験や核燃料再処理等の影響で海域によって ^{129}I やウランなどの放射性同位体比が異なることを利用し、海水の3次元的な流れや海洋生物の回遊の解析などの研究が進められている。AMSは小型化が進み、価格もSIMSなどと同レベルの装置が普及し始めており、LCやGCとの結合も研究されている³⁰⁾。

質量分析に基づく元素濃度や同位体組成の精密測定技術をベースに、元素や同位体の化学形態あるいは存在状態別の分布、局所的な分布、微小粒子中の濃度の解明などが研究されている。

MC-ICP-MSは、質量分解能5,000以上において、感度を損なうことなく、フラットトップピークでの高精度同位体比測定を可能にした。MC-ICP-MSによる安定同位体比高精度測定により、様々な元素の環境中での同位体分別プロセスが検出できるようになったばかりでなく、MIFと呼ばれる特異的な同位体分別が水銀などいくつかの元素で見出され、環境中での元素動態解明や発生源特定などの目的で近年研究が活性化している^{31), 32)}。LA-ICP-MSはレーザー照射により生成した原子蒸気をICP-MSに導入して元素濃度・同位体比を測定するが、レーザーアブレーションにともなって発生する原子発光や分子発光を同時に観測できる新装置により、その場の元素濃度や分子状態についての情報を得ることが可能となった。ナノSIMSは、空間分解能50 nm以下かつ高感度（ppbまで）で2次イオン像観察を実現した。安定同位体比測定は、数10 ppmの再現性で可能であり、環境試料の微小局所元素／同位体分析が進められている。GCやLCとMC-ICP-MSをつないだ化学形態別の同位体分析、LA-ICP-MSとMC-ICP-MSの結合や、LC/ICP-MSとLC/MS/MSを組み合わせた数十種類に及ぶ環境中／生体中ヒ素化合物の化学形態分析等も進められている³³⁾。

原発事故により飛散した放射性核種の空間分布を連続的、リアルタイムに計測可能な各種可搬型計測器の開発、 γ 線カメラの開発やその応用、タンデムMSベースのICP-MSによる放射性同位体の測定技術の開発などが精力的に進められてきた。Liquid-cell TEMは、溶液中の化学成分からの粒子の結晶形成を精密にTEM観察できる方法で、“炭酸カルシウムの結晶化前の非晶質粒子の出現”³⁴⁾が示されるなど世界的に盛んに行われている。

（マイクロプラスチック、ナノ粒子、PM）

マイクロプラスチックについては環境水中、水生生物中の存在が多く報告され³⁵⁾、日本沿岸の魚でも見つかっている。直径 100 nm 未満の蛍光標識ポリスチレン (Polystyrene: PS) のビーズを淡水藻類に付着させた水槽実験により、PS ビーズが食物連鎖（ミジンコ→メダカ→カワムツ）を経由して上位生物に移行することが示され、また PS 摂餌魚の活性に負の影響を与えることが報告された³⁶⁾。マイクロプラスチックは多様な高分子材料からなり、環境中で破断・細分化され、形状も定まらない。Lusher ら³⁷⁾ はこれまで報告された生物に取り込まれたマイクロプラスチックの測定条件を検討し、また見掛けで判断せずプラスチックの同定まで行うべき、と報告している。プラスチックの同定には、全反射 FTIR、顕微 FTIR、顕微ラマン、熱分解 GCMS などが使われる³⁷⁾。定量は難しく、通常、環境試料の体積や個体あたりの個数で表示される³⁸⁾。PS の蛍光特性を利用し、セルソーターを使って微生物バイオフィルム中のマイクロプラスチックを計測した事例が報告されている³⁹⁾。ナノ粒子やマイクロプラスチックの毒性研究はまだ研究途上だが、添加剤を含む組成や形状のほか、表面の状態、吸着した化学物質など様々な影響因子が検討されており⁴⁰⁾、分析項目の精密化、細分化の進展が予想される。

ナノ粒子／材料については、電極材料、コンポジット材料などの産業利用、農業、化粧品、医療分野など様々な分野での技術開発と応用が進み、利用情報の整備と環境放出量の推定も行われているが、実際の環境レベルや動態について不明点が多い。毒性研究も盛んに行われているが、結果は必ずしも調和的とはいえず、また毒性評価法の標準化の必要性も指摘されるなど、さらなる研究が必要な段階と考えられる^{41)、42)}。多層カーボンナノチューブの発がん性を示す情報が蓄積される⁴³⁾ なかで、アスベストとカーボンナノチューブの吸入毒性の類似性が指摘され、共通して中皮腫を生成すること、またその機序として腫瘍抑制遺伝子 Ink4A/Arf のメチル化ないし欠損による不活性化が報告された⁴⁴⁾ ことが注目される。銀など金属ナノ粒子の検出には、ICP-MS による一粒子分析や LA-ICP-MS、ナノ SIMS、分析電顕等の利用が進んでいる。実際に利用が進むナノ粒子／材料にはケイ素や炭素など様々な元素が含まれ、サイズ、形状もきわめて多様で、さらにナノコンポジット材料の開発・利用も進む中⁴⁰⁾、環境／生体試料のナノ粒子／材料の分析と存在実態解明にはまだ多くの課題が残されている。sp-ICP-MS において、水中金属ナノ粒子の球形近似計算による粒径推定と粒子個数測定が可能となり、40 種類以上の元素が測定可能となった⁴⁵⁾。また、測定法の標準化も進んでおり ISO/TC 229 ナノテクノロジーにて水中無機ナノ粒子の粒径分布と濃度測定の規格化 (ISO/TS 19590) がなされている。偏光散乱強度差計測 (Polarization Intensity Differential Scattering: PIDS) は、複数波長による偏光散乱測定に基づき複数の粒子が混在したサンプルでも 10 nm から 3 mm の広範囲の粒度測定が可能で、2018 年に市販装置も販売開始された。環境試料のように多様な粒子の同時測定が期待される。

PM に対して、最近 1 個の粒子で成分分析が可能な超微量分析の技術改革が進んだ⁴⁶⁾。その結果、例えば、①レーザー光散乱による粒子の数と大きさの測定と②レーザー誘起白熱法・質量分析法によるブラックカーボン、硝酸塩、硫酸塩の同時測定を行う装置が開発され、市販された。食品・生体について、①顕微鏡像に、②その極微小部分の質量分析法で得た有機物情報を画像上重ねて示す MS・イメージング法の開発が進められ、PM 中に存在する PAH 類の検出も試みられている⁴⁷⁾。金属ナノ粒子の内部構造について、X 線自由電子レーザー施設「SACLA」を光源とした X 線回折イメージング法⁴⁸⁾ によって観察した研究が行われており、PM2.5 など

環境残留・生成粒子の新たなキャラクタライゼーション法として期待される。ドローン技術は大気領域でも大きな関心を集めている。従来、飛行機や気球、あるいは高層建築物や山岳など限られた条件で実施していた上空の物理化学分析が極めて容易に実施可能になると期待される。

（バイオアッセイ・AOP・構造解析）

バイオチップを活用したバイオアッセイ法は、手作業、長時間、低い再現性などの欠点があった従来の微生物や実験動物を用いたバイオアッセイと比べ、自動化、高スループット、連続・並行実施可能で、複数の分析工程を短時間で低コスト、高精度のバイオ分析スクリーニングを可能にした。1万種以上の独立したバイオアッセイ用反応室を有し、生化学的あるいは細胞ベースのアッセイを数分以内に終わらせるチップも開発されている⁴⁹⁾。化学物質のヒト健康への影響評価では、EUを中心として、動物愛護などの倫理的な観点から、実験動物の使用に対する規制が広がっていることから、代替法の研究開発が進んでいる。バイオチップを活用したバイオアッセイ法に加え、AIや計算科学によるシミュレーションによる毒性発現メカニズムの解明や毒性予測技術の開発も進められている。特に、AOPは、高スループットな *in vitro* 細胞試験やコンピュータによる *in silico* 解析など膨大な化学物質評価データや知見を統合した毒性評価概念として、急速に注目を集めている⁵⁰⁾。

化学物質の使用・管理に関する法規制の整備が進み多くの化学物質について毒性試験・データの必要性が劇的に増加している中で、費用や設備、時間、動物愛護など様々な観点から、動物実験をやめてハイスループット技術による化学物質の新たな毒性試験・評価システムを構築する動きが進んでいる⁵¹⁾。AOPの考え方に沿って、OECDなどでも大きなプロジェクトが実施されている⁵²⁾。DNAマイクロアレイなどの遺伝子発現解析を伴うゲノミクス、次世代シーケンサーなどで転写因子を調べるトランスクリプトミクス、代謝物を質量分析装置などで網羅分析するメタボロミクスなどで得られた膨大なデータを解析するバイオインフォマティクスを活用して各種AOPを整理して、Integrated Approach for Testing and Assessment (IATA)の観点から、行政の化学物質のリスク評価・管理に適切なバイオアッセイを効率的に選定・実施することも期待されている。さらには、対象化学物質の構造からバイオアッセイ結果である各種毒性値を予測する定量的構造活性相関 (Quantitative Structure-Activity Relationship: QSAR) や、類似した化学構造、物理化学的性質を有する化学物質の毒性値を類推するリードアクロスなどの考え方も急速に普及してきている。AOP-Knowledge Base (AOP-KB)⁵³⁾ や AOP wiki⁵⁴⁾ などのポータルサイトを通じてAOPの横断的な検索ツール、AOPXplorerやEffectopediaなどの解析ツールが整備されつつあり、AOPネットワークの解析が試みられている。

タンパク質立体構造データベース (Protein Data Bank: PDB) への情報の蓄積、計算機性能の向上、高度なプログラムの開発などにより、タンパク質を標的とした *in silico* 解析による医薬品の設計が具現化されつつある。この手法を応用し、環境汚染物質の構造的特徴 (分子記述子) から有害な物質を迅速にスクリーニングする方法が開発されてきた。特に核内受容体を対象に、PDB内のタンパク質の結晶構造データを利用して、リガンド候補物質との相互作用を解析 (ドッキングシミュレーション) し、環境汚染物質の有害性を核内受容体との相互作用から評価する研究が増加している。また、核内受容体のオーソログ・パラログ遺伝子の立体構造をPDB内の結晶構造データから予測 (ホモロジーモデリング) することにより、モデル生

物ばかりでなく、非モデル生物を対象にした研究も出現している。

細胞内の各受容体結合や転写活性とホタルルシフェラーゼの発光を利用した技術の研究利用や公定法への利用、国際標準化に向けた準備などが進められている。抗原抗体反応を利用したELISAも簡易測定法として利用され、従来からの天然女性ホルモンや女性ホルモン様作用物質のほか、ネオニコチノイド系殺虫剤などの近年注目されている新規環境汚染化学物質へも適用が進んでいる。生物丸ごとの応答を試験系として用いる事例では、無脊椎動物の代表種であるオオミジンコの生殖試験を二世世代影響試験に拡大して、適用性の評価が行われた⁵⁵⁾。一方、ネオニコチノイド系殺虫剤で感受性の大きな種間差が認められ、生態毒性試験系にオオミジンコ以外に感受性の高いユスリカ幼虫を加えることとなった⁵⁶⁾。どのように試験系を構築すれば的確な評価が行えるかは、引き続き大きな課題と考えられる。

Cryo-TEMによって、液中の分子量200 kDa以下の小さいタンパク質複合体の構造解析（2015年）⁵⁷⁾や、0.2 nmの分解能での構造解析（2016年）⁵⁸⁾が可能となった。

原料となる化学物質の製造・利用等に対する法整備は古くから進められていたが、化粧品やシャンプーなど消費者が利用する製品中に含まれる化学物質について、近年注目を集めている。パーソナルケア製品中に含まれる紫外線フィルタ剤や保存料などの環境汚染実態や水生生物への影響評価については、米国環境保護庁(EPA)などが検討を開始している⁵⁹⁾。これに関連して、個人が生涯にわたって曝露する化学物質総量としてのエクスポソーム研究も盛んである⁶⁰⁾。

（モデル研究）

化学物質の物質循環や動態を扱うモデル研究として、物質循環の科学的解明の技術としてのモデル研究と、実用的な化学物質管理のためのモデル研究と大きく二つの方向性がある。前者として、全球規模でのPOPsあるいは水銀の輸送を記述する大気および海洋のモデル、半球から領域スケールのモデルなどを用いた研究が進められている。近年は全く新しいモデル開発よりも、既存モデルの改良と応用研究が多い。水俣条約の締結に伴い、水銀の全球あるいは領域スケールのモデル、形態変化や大気-海洋プロセスを統合するモデルの研究がやや活発化した。広域のモデルでは、計算機能力の向上に応じて、従来は緯度・経度2.5度程度であった空間分解能を0.5度程度まで細分化する努力が行われている。化学物質管理のための実用モデルとして、スクリーニング的なリスク評価に適用する簡易モデルが活用されている。この中で、例えば従来は不十分であったイオン解離する物質や水溶性の高い物質、また、ナノマテリアルなど微粒子の動態などに注目するモデル研究が行われた。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・欧州のSOLUTIONS、MercOx、Human Biomonitoring、MARSなどのプロジェクト

欧州で進められているSOLUTIONSプロジェクトでは、Effect-directed Analysis（影響指向型分析）手法を用い、様々なバイオアッセイを並べてその影響を指標としながら環境中化学物質を分画して、ノンターゲット分析で網羅的に（未知物質の構造決定を含めて）調べながら有害な化学物質を同定し、汚染化学物質のランク付けや、特徴付け、新規物質の同定などを行うことを目指している⁶¹⁾。欧州各国の機関に加えブラジル、中国及びオーストラリアから39機関が参加し、ライン川やドナウ川流域の河川における化学物質の有害性評価を、汚染原因物質の化学分析から生態系への影響評価まで広範な範囲にわたって実施し

ている⁶²⁾。2018年に終了し、成果公開が注目されている。水銀については観測ネットワーク構築に関わる GMOS、水銀全球動態に関する Metra 等の欧州大規模プロジェクトが終了し、環境動態に関して残る大きな課題である水銀の酸化プロセスに関する新たな MercOx プロジェクトが 2017 年秋から開始した。化学物質全体のヒトばく露状況を把握するため欧州 Human Biomonitoring プログラムも開始されている。また、MARS プロジェクトは、河川流域の生態系に対して化学物質が与える影響の解明を目指している⁶³⁾。

- ・米国の Tox21、ToxCast、CERAPP などのプロジェクト

毒性評価について、米国では NIH や EPA などの複数の政府機関が共同で Toxicology Testing in the 21st Century collaboration (Tox21) を実施している。本プロジェクトは毒性評価方法の開発や迅速試験法の開発などを目的としたプロジェクトである⁶⁴⁾。また EPA の Toxicity ForeCaster (ToxCast™) では、多数の化学物質の高スループットスクリーニングによるデータを収集して、理論毒性学的な毒性予測を行う Toxicity forecaster として公開している⁶⁵⁾。これら 2 つのプロジェクトでは核内受容体に対するハイスループットな in vitro アッセイで数千種類の化学物質をスクリーニングし、エストロゲン受容体 (Estrogen Receptor: ER) に関連した 18 のアッセイで、約 1,800 種類の共通の化学物質を試験した。EPA の National Center for Computational Toxicology によって企画された共同エストロゲン受容体活性予測プロジェクト (Collaborative Estrogen Receptor Activity Prediction Project: CERAPP) は Tox21 および ToxCast™ によって報告された ER ハイスループットスクリーニングアッセイのデータを使用し、活性予測計算モデルを開発すること、追加試験のために 32,464 種の化学物質に優先順位を付けることを目標とした国際プロジェクトである⁶⁶⁾。CERAPP には、米国とヨーロッパの 17 の研究グループが参加した。これらのグループは、それぞれ異なる QSAR および化学構造ベースの手法により、40 のカテゴリーモデルおよび 8 つの連続モデルを開発した。さらに、すべてのモデルを、化学物質の ER 結合能およびアゴニスト・アンタゴニスト活性に基づいて分類する単一のコンセンサスモデルに統合し、レファレンス物質に対する相対効力値を推定している。

- ・日本のマイクロプラスチックのモニタリング手法の調和化事業

環境省の主導で、相互比較を主な目的として、世界 10 カ国の研究機関が人工的に調整したマイクロプラスチック試料を分析し、分析値を相互比較、議論している。

- ・日米欧のナノ物質安全性評価研究

ナノ材料計測の開発は、ナノ材料自身の物性評価の目的だけでなく、ナノ材料を製造・利用する上で不可欠な安全性評価の研究と連携して行われることもある。安全性評価の研究プロジェクトは、OECD の枠組みで協力しつつ、日本、米国、EU にて 2000 年後半以降から現在まで対象物を拡大しながら各々実施されている。例えば、産業技術総合研究所は NEDO の支援でフラーレン、カーボンナノチューブ、グラフェンなどの炭素ナノ材料の安全性評価を実施している。この中で炭素ナノ材料の動物組織中定量法などが開発され、組織への残留挙動の解明に繋げている⁶⁰⁾。欧州委員会共同研究センターは、Nanocomput プロジェクトで、毒性動態挙動、ナノ材料の暴露量データ、環境運命モデル、定量的構造・物性関係

(Quantitative Structure-Property Relationship: QSPR)、および QSAR モデルなどを用いたナノ材料リスクを予測する計算手法の現状を評価している⁶⁷⁾。さらに、開発されたナノ材料の計測法の一部、例えば、sp-ICP-MS によるナノ粒子中の元素分析法は ISO の国際標準化されている。得られた研究結果から、EU では化粧品などのナノ材料を含む製品の規制が 2013 年に施行している一方、ナノ材料自身の法規制化については、EPA の使用量報告制、日本のナノ材料製造者向けの対応通達など暫定的措置、もしくは検討中とする国も多い。マイクロプラスチックについては、深刻な環境汚染の実態が報告されていることから、環境動態解明のための研究プロジェクトが各国で本格化しつつあり、高度な計測法の開発もプロジェクト内外で増えてくると予想される。

・ GEOTRACES

2000 年代後半、国際共同研究計画 GEOTRACES が始動した。本計画は、世界の研究者が協力して、重要な微量元素・同位体 (Trace Elements and Isotopes: TEIs。キーパラメータは Al、Mn、Fe、Cu、Zn、Cd) の全球的な分布を解明し、TEIs の分布を支配する過程やフラックスを評価し、環境変化に対する TEIs の応答を明らかにすることを目的とする。GEOTRACES 計画によって、外洋海水を用いる TEIs 分析法の国際相互校正が初めて実現し、世界の海洋で海盆規模の詳細な鉛直断面観測が始まった。2018 年、これまでの成果をまとめた二つめの Intermediate Data Product (IDP2017) が公表された⁵⁹⁾。現在、化学海洋学は一大変革期にある。GEOTRACES 計画は、今後 3 年ごとに 2 回 IDP を公表し、その 3 年後に最終のとりまとめを行う予定である。1970 年代に実施された国際共同研究計画 GEOSECS は、放射性核種や栄養塩元素などの全球的な分布をあきらかにし、地球の生存可能性を支えている海洋大循環と海洋生物地球化学サイクルの基本的理解を導いた。GEOTRACES 計画は、重元素安定同位体比、微量元素化学量論などの新しいビッグデータを生みだし、地球システムの理解を飛躍的に深めると期待される。

(5) 科学技術的課題

- ・ 環境分析のための先導的、先端的な装置の国内での開発、データの解析ツールの開発と整備、国際連携に基づくバイオアッセイの推進、バイオアッセイと化学分析との連携強化、などの研究テーマが基盤として重要である。これらについて、国内に拠点を構築し、産学官連携で研究を推進することが望まれる。特にマイクロプラスチックやナノ粒子／材料については、毒性評価も環境分析も世界各国とも開発が遅れている。
- ・ 化学物質の環境動態モデルは、多くが微量成分であるため迅速な分析や実験、また観測値による検証等において困難が多い。大気汚染物質などと比較すると、動態モデルに必要なパラメータ等がまったく不十分で、依然として課題である。これらの状況から、モデル予測の精度がなかなか向上せず、実験的・理論的研究双方によるブレークスルーが望まれる。国内では化学物質のモデル研究と、大気モデル、海洋モデルなど分野間の連携が弱いことも課題である。モデル予測に必要な排出インベントリの整備も依然として課題である。化学物質については PRTR 制度のより多くの国への展開が一つの可能性となりえるが、まだ不十分である。このほか、GIS との統合・連携、IT 技術としての展開など将来の可能性はある。
- ・ PM については二つの課題があげられる。第一に、大気中の粒子の数や濃度の測定とブラッ

クカーボンや硝酸塩、硫酸塩の同時測定は可能になりつつあるが、燃焼 PM の特性を知るための有機化合物との同時測定はまだ実用の域に達していない。PM_{2.5} と共に、その発生源や毒性と強く関連する PAH や NPAH などの情報を同時に得られる方法の開発が課題である。第二に、ドローン技術の進歩は、上空での捕集・測定を大きく変革することが期待される。そのための複数測定器が搭載できる装置の軽量化と測定データ情報の複合解析などが課題である。一方、細胞毒性関連では、PAH 類のみならず農薬類も含めて、毒性発現に代謝等が大きく関わっているにも拘わらず、その詳細な機序は殆ど解明できていない。どんな毒性本体が生体・細胞内のどこで生成し、何の作用に関わっているかを明らかにできる細胞画像と化学物質（反応）の情報を同時に提供できる方法の開発が一つの課題である。

- ・ マイクロプラスチックおよび付随する有害化学物質の生物影響の定量的評価手法の開発、特に、マイクロプラスチック濃度や有害化学物質濃度を現場のレベルに近いレベルで行うこと、あるいは将来起こりうるレベルでの検討が重要である。マイクロプラスチック計測法では、ふるい分けによる荒い粒径分離では環境動態解明には不十分で、より精密な粒径分離および粒径分布測定法が必要である。マイクロプラスチック付着化学物質の正確な有害性評価のためにプラスチックからの分離方法の確立も必要である。より微小な、ナノ領域までの測定手法の開発、また化学的手法とマスバランス的手法を組み合わせた起源推定方法、大量の環境試料を簡便・迅速・安価・現場測定可能とする手法の開発なども重要である。特にナノ粒子・材料分野は応用を目指した研究が急速に展開されている一方で毒性評価や環境測定手法の開発が遅れている。化学物質関連も同様だが、産業開発のスピードに環境側が追いついていけない状況が常態化してきている。
- ・ 個々のバイオアッセイは、化学物質の影響を受ける生態系や生体系のごく一部を取り出したものであることから、より実態に近い評価を行うためには、バイオチップのように各種バイオアッセイを適切に組み合わせた高スループットの評価を行う必要がある¹⁴⁾。計測技術の発展とともに、化学物質の毒性に対してより鋭敏なバイオマーカーの探索も重要となってくる。アッセイに利用される生物の死や生殖異常に至る前の高感度指標として、生体内部の反応を得られる可能性がある¹³⁾。また、バイオチップとバイオマーカーの組み合わせにより、化学物質の生体影響評価が効率化・高精度化されることも期待される。ヒトへの影響評価では、他の哺乳動物に基づく動物実験データや細胞を用いた *in vitro* 試験データに基づいて評価を行うことになるが、その際の種間あるいは *in vitro*-*in vivo* 間の評価結果の差を十分に検討する必要がある。AOP は、これらのデータを統合的に解析することで、種間外挿の妥当性の検討手段となることも期待される。同様に、毒性予測や複合毒性についても予測手段としての検討も期待される⁵⁰⁾。個人暴露評価用のバイオアッセイの研究開発も必要と考える。消費者製品中の化学物質による個人暴露については、日本では法規制の対象外となっているが、国際的には注目が高まっている⁶⁰⁾。例えば、米国ハワイ州においては、2018年7月、日焼け止めクリームなどのサンスクリーン剤の成分が使用規制対象となった。化学物質の生物への影響において環境への排出を経由した場合は、出発物質が変化し有害性が変動することも想定される。よって、バイオアッセイでは出発物質の変化に応じた暴露方法、モニタリング技術、および生体影響評価方法の統一的な試験・評価系の構築が必要となると考えられる。
- ・ 電子顕微鏡観察においては、一方向からの観察であるため大きな粒子の下に小さな粒子が隠れてしまい、小さな粒子を認識できない欠点がある。DLS などの光散乱法は大粒子による

散乱光が、小粒子の微小な散乱光測定を妨害する。これらの問題を解決するために、国内のコンソーシアム「COMS-NANO」では、分級法を用いてナノ材料をサイズごとに大まかに区分したのちに各種計測方法により粒子数分布を求める手法を提案している。

- ・sp-ICP-MSでは、ネブライズ法によって溶液をプラズマに導入する際、単一粒子ではなく多重粒子が発生する場合があります、正確な粒度分布測定が困難となる場合があります。また、高精度の粒度測定および元素定量分析のための単一粒子分散標準液の整備がされていない。
- ・CERAPPにみられるように、化学物質との核内受容体リガンド結合領域の構造を解析することにより、リガンド候補物質のスクリーニング・QSARモデル構築が可能になりつつある。一方、リガンド・種特異的な相互作用に関与するアミノ酸残基を特定することや、核内受容体-タンパク質および核内受容体-DNAなどの分子間の相互作用を予測することについては依然として精度的に問題がボトルネック課題である。

（6）その他の課題

- ・科学技術に基づく持続可能で安心安全な社会構築を目指す我が国において、二度と公害問題を起こさないため、産業界における新規化学物質や新素材開発のスピードに負けない毒性評価と環境分析技術の基盤整備が重要である。分析技術のコスト削減とスピード向上にも十分留意する必要がある。環境分析のグリーンケミストリー化も重要な課題であり、地道に、かつ着実に取り組む必要がある。
- ・環境分析や化学物質リスク管理に係わる大学等の研究活動が枯渇しつつあり、基礎力と応用展開力をともにそなえた人材育成と多様なキャリアパスの確立が強く求められる。国内の短期的視点のみでなく国際的な動向の中で政策を構成することも重要となっている。日本では分析化学や地球化学などの基礎学問を指向する研究室が縮小し、基礎学問を指向する学生も減少しつつある。そのときどきの流行や華やかな研究だけに注目するのではなく、科学技術全体の調和的発展を図る施策が必要である。国内研究機関では、高価な最先端装置を維持するための経費およびテクニカルスタッフ技術支援員の持続的な確保がきわめて難しい。科研費などの競争的資金は持続性の点で大きな問題がある。運営交付金の削減、止めどない制度改革と新規事業への対応により、研究・教育現場の疲弊が進んでいる。たとえば、水圏観測を先導してきたJAMSTECの学術研究船白鳳丸や陸水・沿岸域研究に必要な各大学保有の臨湖・臨界研究施設・研究船は老朽化が進んでいるが予算が厳しく更新が困難となっている。基盤的経費の維持・拡充が欠かせない。
- ・個別の物質のばく露経路は空気や水からだけではなく食品、家庭用品、ペット経由など多岐にわたる。環境中にある様々な物質への複合ばく露影響の総合的な評価の必要性が認識されてきており、政策的課題として野横断の枠組みの必要性が改めて指摘される。国内では経産省、環境省、農林水産省、厚労省、内閣府食品安全委員会などが含まれ、省庁の枠組みを超えた研究体制やファンディング制度の拡充が求められる。地方自治体との連携強化も重要となる。
- ・ナノ材料やマイクロプラスチックなどのサイズと同時に含有成分を明らかにするために微小領域および微量の計測を行う際、電子顕微鏡、光散乱、質量分析といった高価な機器群を駆使する必要がある。市販の機器性能では不十分で、分析装置を改良する必要もある。国内ではこれらの計測や開発を十分実施できる研究環境がほとんどない。

- ・計測法の開発の成果が論文発表で留まっているケースが多く、実際に計測を必要とする人々が望む実試料への適用可能性が担保されていないケースが散見される。優れた計測法を社会実装するためには、計測法の開発者が実用性の確保のために関わるべきであり、企業等と連携した市販装置化や国際標準化の検討を推進が求められる。
- ・化学物質の環境動態および生体影響の解明を行うためには、計測法の整備も重要だが、得られた計測データの解析と意味づけも重要であり、特に種々の計測データのビックデータ解析が不可欠になりつつある。これらに精通した人材の育成が望まれる。
- ・*in silico* 解析法の発展により、膨大なデータセットを生み出すことが可能となった。毒性学的エンドポイントを効率的に予測できれば、多くの費用・時間・実験動物を必要とする *in vivo* 試験数を低減できる。ヒトの健康および生態のリスク評価や化学物質規制・管理の意思決定を迅速化するためには、新しい評価法に由来するデータを活用するための行政的な仕組みの整備が必要である。
- ・毒性評価については、ハイスループット (*in vitro*) バイオアッセイの開発や *in silico* の解析に基づく毒性予測手法開発などの基礎研究の推進が重要である。一方で、現在の知見の不十分さにかんがみると、研究開発において動物実験など丸ごとの生物を使った試験は最も重要な実験手法であり、既知の毒性発現機序に基づくバイオアッセイの組み合わせで置き換えることは当面実現できないと見通される。生物の維持・管理が伴う *in vivo* 試験については動物愛護や煩雑さから、医学薬学を除く環境生物に関連する分野では国内での研究者は極端に少なく、海外に大きく後れをとっている。ヒト健康の影響評価のためのバイオアッセイ法を新規に研究開発する場合、一般の研究者はヒトサンプルを取り扱うことが困難なため、医療従事者等とのスムーズな連携が重要となる。研究開発における連携を上手に取り持つ仕組みが必要だと考えられる。バイオアッセイの研究成果を化学物質における法規制に反映させるべきだが、省庁など各種機関で規定されるバイオアッセイが旧来のままで実際の環境に即していなかったり、十分な評価データがなかったりする背景から、安全側にかなり偏った規制が掛けられ我が国の産業振興が阻害される可能性がある。いくつかの有望な技術の規制を定めるアッセイ法として検証する必要がある。
- ・有機分析では、高分離・高精細・高頻度な分析により収集される情報量が膨大になる傾向にあり、情報の保管、解析、共有が課題である。特に、情報解析については、未知物質を含む混合物からなる試料解析が必要なことから、メタボローム解析やゲノム解析技術の単純な応用では済まない可能性が大きい。そのため、全く新しい発想による解析手法の開発が求められるが、当該分野におけるソフトウェア開発における人材不足は顕著である。また、先端的な分析機器開発が海外中心に進んでいて、国内での装置導入費用や維持単価が上昇しがちであることに加え、装置仕様の改良やソフトウェア開発などが困難な状況である。当該分野に取り組む大学の研究室が限定されており、慢性的な人的資源不足であることもボトルネックである。
- ・先端的な無機分析機器はほぼすべて欧米製である。欧米では、先端的な装置を大学や研究所と共同開発し、販売数は少なくとも販売を全世界展開することで成功している企業がある。日本の企業ではこのような戦略はほとんどみられない。例えば、日本の平沼産業が開発した無機元素の自動濃縮装置はたいへん優れた性能をもち、価格も手ごろであったが、国内だけでは販売数が少なく、製造中止になった事例などがあげられる。

・温暖化などの地球環境問題について、IPCCのほか、従来から地球環境問題に国連環境計画（United Nations Environment Programme: UNEP）と世界気象機関（World Meteorological Organization: WMO）が取り組んでいる。最近、開発途上国の課題解決に向けて、10の国連機関が集まって地球環境ファシリティ（Global Environment Facility: GEF）を結成した。有害化学物質は大気も海洋も汚染が越境するために、その研究は政治的な影響を受けやすい側面があるが、日中韓大気環境学会で協定が締結されるなど研究者レベルでの連携協力は確実に進んでいる。計測技術の開発は独自に進めることは可能であろうが、フィールドにおける国際共同研究には科研費やJICAなどの外部資金関連事業のより積極的な運用が望まれる。

（7）国際比較

対象技術、分野が広範で個別状況が異なっているため、全体としての概況を記載する。

-	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	○	→	・基盤的研究費、若手人材、基盤的装備の衰退が続いている。産学官コンソーシアム Consortium for Measurement Solutions for Industrial Use of Nanomaterials: COMS-NANO）が設立されており、ナノ材料計測の開発と利用が盛ん。ナノ計測を含むナノテクノロジー関連の論文数は、直近5年1000件、前5年のほぼ同倍。バイオアッセイ、バイオ計測技術においては、高い技術的水準を有している。また、これら技術を組み込んだバイオチップについても、チップ上でのバイオ計測やチップ化技術について、内閣府等の大型研究費支援により、多くの研究グループが取り組んでいる。 ・個別には世界をリードする優れた研究もあるが、全体的に基礎研究は不十分。特に環境分析で先端的な機器導入例が少なく、世界的なレベルの研究がなかなか進まない。
	応用研究・開発	○	→	・日中間の政治的障壁が研究者レベルの共同研究に及ばぬ配慮が必要。NEDOプロジェクトのナノ材料の安全性評価研究など企業ニーズに基づく研究・開発が盛ん。毒性データベースや毒性予測ソフトウェアは、整備に遅れが見られる。 ・手法の応用と実態解明、ならびに政策的な応用は徐々に広がっている
米国	基礎研究	◎	→	・トランプ政権の科学技術軽視は全米地球物理学連合でも大きな問題となっている⁶⁸⁾。毒性研究の後退も見られる。ナノ計測を含むナノテクノロジー関連の論文数は、直近5年4000件、前5年の1.5倍。一方、環境分野のEPAの2018予算は他分野機関が増額の中、増額無し。(Nature (2018-03-29) doi: 10.1038/d41586-018-03700-9)。米国NIHやEPAを中心とするTox21などのプログラムにより、高スループットなバイオ計測スクリーニングを可能とする環境毒性スクリーニング技術の研究開発が推進している。個人曝露評価であるエクスポゾーム研究が進んでいる。 ・先端的な分析機器開発、CERAPP等の大規模研究が推進され、世界をリードしている。モデル研究コミュニティの多くは米国にあるが先行きの不透明感が増している。
	応用研究・開発	◎	→	・PITTCONが計測機器の世界動向を把握できる世界一大イベントになっている。従来から地球全体の地球環境問題に対する関心は高いが、アジアの大気環境問題に対する関心が増している。EPAなどでナノ材料の計測とリスク評価研究を行っており、有害物質規制法(TSCA)におけるナノ材料の取り決めを定めている。毒性予測では、EPAのToxCastプログラムが進められており、化学物質の毒性評価方法や迅速試験法などの研究開発の他、インフォマティクスによる理論毒性学的な研究も進んでいる。 ・商用モデルの多くは米国企業が開発したもので、優位性が継続。

欧州	基礎研究	◎	↑	・GEOTRACESのような国際共同観測計画を堅実にリードしている⁵⁹⁾。ナノ材料開発およびその安全利用のための法規制の検討のため、AOPモデルや計算科学によるリスク予想方法の研究などを含むナノ材料計測法の基礎研究が盛ん。バイオ計測においては、光学機器メーカーや微細加工メーカーなど、トップレベルの企業が欧州に本拠地を持つなど、高い技術的水準を有している。 ・環境分野でSOLUTIONS、水銀プロジェクト、ナノ粒子やマイクロプラスチック研究など、焦点を絞って先端的な研究を推進している。 ・英国では環境ホルモン、水処理研究などが活発に行われている。 ・ドイツがSOLUTIONSプロジェクトを主導している。 ・フランスに先端的な研究拠点が形成されている。 ・環境ホルモンやPOPsの分野ではスウェーデン、スペインの主導的な研究者が世界の研究をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↑	・ディーゼル自動車の排ガス粉塵施策の失敗感が強い。Nanocomputプロジェクトなどナノ材料の安全利用に関する検討が進んでおり、計測法の国際標準化も行っている。SolutionsおよびMARSプロジェクトなど、世界に先駆けた国際的な取り組みを実施することで、河川流域の化学物質とその生態系への影響評価を進めている。 ・化学物質管理の応用モデル開発は継続して活発。政策的にはPrecautionary approachを大胆に振りかざす。 ・ドイツが定常的な環境モニタリング、環境試料保存を推進している。Human Biomonitoringについても主導的立場にある。 ・ネオニコチノイド規制ではフランスが世界をリードしている。
中国	基礎研究	○	↑	・基盤的装備の導入・拡充が国の重要施策として進められている。地球化学や海洋学のような基礎分野でも研究者数、発表数の増加が顕著で、数量的に日本を超えた印象がある。全国の大学で大気環境関連の学部・学科・講座が急速に増加し、中国で開催される大気環境関連の国際会議が増加し、中国人若手研究者の参加者も急増して、熱気がある。ナノ計測を含むナノテク関連の論文数は直近5年で8000件、前5年の約2倍に増え、予算、特許出願数も大きく伸びている。 http://www.nihs.go.jp/mhlw/chemical/nano/nanopdf/H29houkoku/honbun/all.pdf ・機器整備も進み、素材開発の推進に歩調をあわせるかのように、先端的な環境研究も増えている。広域モデル、プロセスモデルとも多くの研究が発表されている
	応用研究・開発	○	↑	・2009年にナノ計測法の標準化を進めている（ナノ材料の不純物元素測定法） ・裾野の広がり在今后の課題。モデル応用も進んでいるが不十分な印象
韓国	基礎研究	△	→	・大気環境学会では日中韓の連携協定を締結など国際的な取り組みがみられる。 ・分析関連は分野により基礎研究を推進しているが総合的に弱い。
	応用研究・開発	△	→	・環境モニタリングの実施やモデル応用の試みは進められているようだが、データが発表されていない。

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2) 「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

- 1) K. Hayakawa ed., *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Environmental Behavior and Toxicity in East Asia*, (Springer Singapore, 2018).
- 2) F.-Z. Teng, J. Watkins and N. Dauphas, *Non-Traditional Stable Isotopes*, (Mineralogical Society of America, 2017).
- 3) C.J. Moore *et al.*, “A comparison of plastic and plankton in the north Pacific central gyre,” *Marine Pollution Bulletin* 42 (2001): 1297-1300.
- 4) R. C. Thompson, “Lost at Sea: Where Is All the Plastic?” *Science* 304, no. 5672 (2004): 838.
- 5) K. Tanaka *et al.*, “Facilitated Leaching of Additive-Derived PBDEs from Plastic by Seabirds’ Stomach Oil and Accumulation in Tissues,” *Environmental Science & Technology* 49, no. 19 (2015): 11799-11807.
- 6) J. R. Jambeck *et al.*, “Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean,” *Science* 347, no. 6223 (2015): 768-771.
- 7) Y. Jiang *et al.*, “Electron Ptychography of 2D Materials to Deep Sub-ångström Resolution,” *Nature* 559, no. 7714 (2018): 343-349.
- 8) Anoop K. Pal *et al.*, “High Resolution Characterization of Engineered Nanomaterial Dispersions in Complex Media Using Tunable Resistive Pulse Sensing Technology,” *ACS Nano* 8, no. 9 (2014): 9003-9015.
- 9) National Research Council, *Toxicity testing in the 21st century: A Vision and a Strategy* (Washington, DC: The National Academies Press, 2007).
- 10) Gerald T. Ankley *et al.*, “Adverse Outcome Pathways: A Conceptual Framework to Support Ecotoxicology Research and Risk Assessment,” *Environmental Toxicology and Chemistry* 29, no. 3 (2010): 730-741.
- 11) CAS_Registry, “CAS Assigns the 100 Millionth CAS Registry Number® to a Substance Designed to Treat Acute Myeloid Leukemia.”
<https://www.prnewswire.com/news-releases/cas-assigns-the-100-millionth-cas-registry-number-to-a-substance-designed-to-treat-acute-myeloid-leukemia-300106332.html>
- 12) 庄司良、迫田章義「バイオアッセイを用いた環境分析・計測の動向」『EICA』9巻1号(2004):2-7.
- 13) 楠井隆史「バイオアッセイと海洋環境管理」『安全工学』45巻6号(2006):408-414.
- 14) O. Campana and D. Wlodkowic, “Ecotoxicology Goes on a Chip: Embracing Miniaturized Bioanalysis in Aquatic Risk Assessment,” *Environmental Science & Technology* 52, no. 3 (2018): 932-946.
- 15) H. Hung *et al.* ed., “Persistent Organic Pollutants (POPs): trends, sources and transport modelling” *Environmental Pollution*. 217 (2016): 1-158.
- 16) J. Glüge *et al.*, “Environmental Risks of Medium-Chain Chlorinated Paraffins (MCCPs): A Review,” *Environmental Science & Technology* 52, no. 12 (2018): 6743-6760.
- 17) “Special issue: Worldwide Integrated Assessment of the Impact of Systemic Pesticides on Biodiversity and Ecosystem,” *Environmental Science and Pollution Research* 22 (2015):

- 1-154;
Updates, Part 1, *ibid.*, doi:10.1007/s11356-017-0394-3;
Part 2, *ibid.* doi:10.1007/s11356-017-0341-3;
Part 3, *ibid.*, doi:10.1007/s11356-017-1052-5
- 18) “Peer Review of the Pesticide Risk Assessment for Bees for the Active Substance Clothianidin considering the Uses as Seed Treatments and Granules,” *EFSA Journal* 16, no. 2 (2018). doi:10.2903/j.efsa.2018.5177;
“Peer Review of the Pesticide Risk Assessment for Bees for the Active Substance Imidacloprid considering the Uses as Seed Treatments and Granules,” *EFSA Journal* 16, no. 2 (2018). doi:10.2903/j.efsa.2018.5178;
“Peer Review of the Pesticide Risk Assessment for Bees for the Active Substance Thiamethoxam considering the Uses as Seed Treatments and Granules,” *EFSA Journal* 16, no. 2 (2018). doi:10.2903/j.efsa.2018.5179
- 19) E. L. Schymanski *et al.*, “Non-target Screening with High-resolution Mass Spectrometry: Critical Review Using a Collaborative Trial on Water Analysis,” *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 407, no. 21 (2015): 6237-6255.
- 20) J. Hollender *et al.*, “Nontarget Screening with High Resolution Mass Spectrometry in the Environment: Ready to Go?” *Environmental Science & Technology* 51, no. 20 (2017): 11505-11512.
- 21) A. A. Bletsou *et al.*, “Targeted and Non-targeted Liquid Chromatography-mass Spectrometric Workflows for Identification of Transformation Products of Emerging Pollutants in the Aquatic Environment,” *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 66 (2015): 32-44.
- 22) M. Ubukata *et al.*, “Non-targeted Analysis of Electronics Waste by Comprehensive Two-dimensional Gas Chromatography Combined with High-resolution Mass Spectrometry: Using Accurate Mass Information and Mass Defect Analysis to Explore the Data,” *Journal of Chromatography A* 1395 (2015): 152-159.
- 23) K. Vorkamp and P. Mayer, “Passive sampling of polychlorinated biphenyls (PCB) in indoor air: Towards a cost-effective screening tool,” *Scientific Report from DCE*, No.128 (2014).
- 24) N. J. Herkert *et al.*, “Calibration and Evaluation of PUF-PAS Sampling Rates across the Global Atmospheric Passive Sampling (GAPS) Network,” *Environmental Science: Processes & Impacts* 20, no. 1 (2018): 210-219.
- 25) R. Lohmann *et al.*, “Aquatic Global Passive Sampling (AQUA-GAPS) Revisited: First Steps toward a Network of Networks for Monitoring Organic Contaminants in the Aquatic Environment,” *Environmental Science & Technology* 51, no. 3 (2017): 1060-1067.
- 26) E-J. Won *et al.*, “Importance of Accurate Trophic Level Determination by Nitrogen Isotope of Amino Acids for Trophic Magnification Studies: A Review,” *Environmental Pollution* 238 (2018): 677-690.
- 27) J. D. Blum *et al.*, “Methylmercury Production below the Mixed Layer in the North

- Pacific Ocean,” *Nature Geoscience* 6, no. 10 (2013): 879-884.
- 28) A. Yamakawa, K. Moriya and J. Yoshinaga, “Determination of Isotopic Composition of Atmospheric Mercury in Urban-industrial and Coastal Regions of Chiba, Japan, Using Cold Vapor Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry,” *Chemical Geology* 448 (2017): 84-92.
- 29) G. Yang, H. Tazoe and M. Yamada, “Can ^{129}I Track ^{135}Cs , ^{236}U , ^{239}Pu , and ^{240}Pu Apart from ^{131}I in Soil Samples from Fukushima Prefecture, Japan?” *Scientific Reports* 7, no. 1 (2017).
- 30) W. Kutschera, “Accelerator Mass Spectrometry: State of the Art and Perspectives,” *Advances in Physics: X* 1, no. 4 (2016): 570-595.
- 31) J. G. Wiederhold, “Metal Stable Isotope Signatures as Tracers in Environmental Geochemistry,” *Environmental Science & Technology* 49, no. 5 (2015): 2606-2624.
- 32) D. Lu *et al.*, “Recent Advances in the Analysis of Non-traditional Stable Isotopes by Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry,” *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 32, no. 10 (2017): 1848-1861.
- 33) V. Taylor *et al.*, “Human Exposure to Organic Arsenic Species from Seafood,” *Science of The Total Environment* 580 (2017): 266-282.
- 34) M. H. Nielsen *et al.*, “In Situ TEM Imaging of CaCO_3 Nucleation Reveals Coexistence of Direct and Indirect Pathways,” *Science* 345, no. 6201 (2014): 1158-1162.
- 35) S. Rezania *et al.*, “Microplastics Pollution in Different Aquatic Environments and Biota: A Review of Recent Studies,” *Marine Pollution Bulletin* 133 (2018): 191-208.
- 36) Y. Chae *et al.*, “Trophic Transfer and Individual Impact of Nano-sized Polystyrene in a Four-species Freshwater Food Chain,” *Scientific Reports* 8, no. 1 (2018).
- 37) A. L. Lusher *et al.*, “Sampling, Isolating and Identifying Microplastics Ingested by Fish and Invertebrates,” *Analytical Methods* 9, no. 9 (2017): 1346-1360.
- 38) L. Mai *et al.*, “A Review of Methods for Measuring Microplastics in Aquatic Environments,” *Environmental Science and Pollution Research* 25, no. 12 (2018): 11319-11332.
- 39) L. Sgier *et al.*, “Flow Cytometry Combined with ViSNE for the Analysis of Microbial Biofilms and Detection of Microplastics,” *Nature Communications* 7, no. 1 (2016).
- 40) テクノヒル株式会社「ナノマテリアル安全対策調査事業報告書」（2017年3月）
- 41) M. Bundschuh *et al.*, “Nanoparticles in the Environment: Where Do We Come From, Where Do We Go To?” *Environmental Sciences Europe* 30, no. 1 (2018).
- 42) M. A. Rather *et al.*, “Molecular and Cellular Toxicology of Nanomaterials with Related to Aquatic Organisms,” *Advances in Experimental Medicine and Biology Cellular and Molecular Toxicology of Nanoparticles* (2018): 263-284.
- 43) E. D. Kuempel *et al.*, “Evaluating the Mechanistic Evidence and Key Data Gaps in Assessing the Potential Carcinogenicity of Carbon Nanotubes and Nanofibers in Humans,” *Critical Reviews in Toxicology* 47, no. 1 (2016): 1-58.
- 44) T. Chernova *et al.*, “Long-Fiber Carbon Nanotubes Replicate Asbestos-Induced

- Mesothelioma with Disruption of the Tumor Suppressor Gene Cdkn2a (Ink4a/Arf),” *Current Biology* 27, no. 21 (2017).
- 45) S. Lee *et al.*, “Nanoparticle Size Detection Limits by Single Particle ICP-MS for 40 Elements,” *Environmental Science & Technology* 48, no. 17 (2014): 10291-10300.
- 46) F. Laborda *et al.*, “Single Particle Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: A Powerful Tool for Nanoanalysis,” *Analytical Chemistry* 86, no. 5 (2013): 2270-2278.
- 47) S. Taira *et al.*, “Mass Spectrometry Imaging: Applications to Food Science,” *Analytical Sciences* 30, no. 2 (2014): 197-203.
- 48) T. Oroguchi *et al.*, “Growth of Cuprous Oxide Particles in Liquid-Phase Synthesis Investigated by X-ray Laser Diffraction,” *Nano Letters* 18, no. 8 (2018): 5192-5197.
- 49) Adverse Outcome Pathway Knowledge Base (AOP-KB),
<https://aopkb.oecd.org/index.html> (2018年8月16日アクセス)
- 50) Adverse Outcome Pathway Wiki,
https://aopwiki.org/wiki/index.php/Main_Page (2018年8月16日アクセス)
- 51) M. Vinken *et al.*, “Adverse Outcome Pathways: A Concise Introduction for Toxicologists,” *Archives of Toxicology* 91, no. 11 (2017): 3697-3707.
- 52) Adverse Outcome Pathway Knowledge Base (AOP-KB),
<https://aopkb.oecd.org/index.html> (2018年8月16日アクセス)
- 53) S. Montesdeoca-Esponda *et al.*, “Analytical Approaches for the Determination of Personal Care Products and Evaluation of Their Occurrence in Marine Organisms,” *Science of The Total Environment* 633 (2018): 405-425.
- 54) The Human Exposome Project,
<https://humanexposomeproject.com> (2019年2月1日アクセス) .
- 55) C. Barata *et al.*, “Validation of a Two-generational Reproduction Test in *Daphnia Magna* : An Interlaboratory Exercise,” *Science of The Total Environment* 579 (2017): 1073-1083.
- 56) 環境省 中央環境審議会 土壌農薬部会農薬小委員会（第50回）資料4「環境大臣が定める水産動植物の被害防止に係る農薬登録保留基準の設定における種の感受性差の取扱いについて（案）」（2016年3月）.
- 57) R.Y-R. Wang *et al.*, “De Novo Protein Structure Determination from Near-atomic-resolution Cryo-EM Maps,” *Nature Methods* 12, no. 4 (2015): 335-338.
- 58) M. G. Campbell *et al.*, “2.8 Å Resolution Reconstruction of the Thermoplasma Acidophilum 20S Proteasome Using Cryo-electron Microscopy,” *eLife* 4 (2015).
- 59) R. Schlitzer *et al.*, “The GEOTRACES Intermediate Data Product 2017.” *Chemical Geology* 493 (2018): 210-23.
- 60) N. Shinohara *et al.*, “Long-term Retention of Pristine Multi-walled Carbon Nanotubes in Rat Lungs after Intratracheal Instillation,” *Journal of Applied Toxicology* 36, no. 4 (2015): 501-509.
- 61) W. Brack *et al.*, “The SOLUTIONS Project: Challenges and Responses for Present and Future Emerging Pollutants in Land and Water Resources Management,” *Science of*

- The Total Environment* 503-504 (2015): 22-31. ;ibid,544 (2016): 1073-118.
- 62) Solutions Project,
<https://www.solutions-project.eu> (2019年2月1日アクセス) .
- 63) MARS Project,
<http://mars-project.eu> (2019年2月1日アクセス) .
- 64) The Toxicity in the 21 Century (Tox21) program,
<https://ntp.niehs.nih.gov/results/tox21/index.html> (2019年2月1日アクセス) .
- 65) US Environmental Protection Agency, “Toxicity Forecasting,”
<https://www.epa.gov/chemical-research/toxicity-forecasting> (2019年2月1日アクセス) .
- 66) Kamel Mansouri *et al.*, “CERAPP: Collaborative Estrogen Receptor Activity Prediction Project,” *Environmental Health Perspectives* 124, no. 7 (2016): 1023-1033.
- 67) JFE テクノリサーチ株式会社「ナノマテリアル安全対策調査事業報告書」（2018年3月）、
<http://www.nihs.go.jp/mhlw/chemical/nano/nanopdf/H29houkoku/honbun/all.pdf>
- 68) Randy Showstack, “Climate Research Funding Still Under Threat, Report Warns,”
Eos 99 (2018).

2.2.3 汚染物質の除去・浄化

（1）研究開発領域の定義

汚染物質の除去・浄化に関する科学、技術、研究開発を記述する。

大気、水、土壌中の汚染物質等の除去・浄化に係る技術、研究開発を扱う領域である。

ここでは、環境や人体への影響が懸念される物質を、排出前または排出後に除去・浄化する技術を対象とする。大気汚染に関しては排ガス中の PM（排ガス中の PM の粒子個数濃度）や大型ディーゼル排ガスの対策技術、土壌・地下水汚染に関しては重金属類や揮発性有機化合物、放射性物質（放射性セシウム等）も対象に含める。

水処理技術については研究開発領域「水処理」で取り扱う。

（2）キーワード

自動車排出ガス、排気後処理、汚染物質、触媒、粒子捕集フィルター、規制開発、リスク評価、サステナブル・レメディエーション、自然由来重金属、放射性セシウム

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

（大気）

我が国では、人の健康の保護及び生活環境の保全のため望ましい基準として、窒素酸化物や粒子状物質などの有害物質に対する大気環境基準が設定され、様々な発生源に対する排出規制が施行されてきた。これらの規制が功を奏し、我が国の都市の大気環境は著しく改善されている。しかし、オキシダントや微小粒子状物質（PM_{2.5}）などの光化学反応の寄与が大きい物質については課題が残されている。日米欧等の先進諸国を除くと、世界の各都市の大気環境は依然として深刻で¹⁾、排出ガス低減に対する要求は高い。

大気汚染源は自動車、船舶、航空等の移動汚染源と工場等の固定汚染源に大別される。都市の大気環境に大きな影響を及ぼす自動車排出ガスが特に注目される。排気ガスに含まれる大気汚染物質やその前駆物質に対する排出規制が適用されている。自動車の排出ガス抑制対策は、主に、エンジンの燃焼改善などのエンジン自体の改良と排気触媒など排気ガス後処理から成り立っている。世界の自動車市場では、環境技術の優位性を保つことが産業競争力につながり、各国を代表する自動車メーカーが高度な技術をもとにしのぎを削っている。

（土壌・地下水）

土壌汚染は揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds : VOC）のように比重が水より重い物質は帯水層にまで深く浸透し、汚染が広域化してしまう問題があり、地下水汚染と一体的に考える必要がある。土壌・地下水汚染として、現在利用されている処理は掘削除去（汚染土壌を掘削してオンサイトまたはオフサイトで浄化処理や埋め立て処分）が主体で、長期の修復期間や多額の費用負担、エネルギー消費を要する課題がある。そこで、様々な手法を駆使して、特に原位置浄化処理を目指した新技術開発や環境負荷低減を目指したグリーンレメディエーションが、大学や企業で研究されている。自然由来の重金属等による土壌・地下水汚染も国内外で引き続き課題である。さらに、我が国において 2011 年の福島第一原子力発電所事故に伴う放射性セシウムによる汚染土壌問題は継続して取り組まなければならない重要な課題で

ある²⁾。我が国では2014年から2017年にかけて東京都豊洲市場で大規模な土壌浄化事業が実施され、揮発性化学物質（ベンゼン、水銀等）摂取リスクに係わる対策が行われ、土壌・地下水汚染が社会的に高い関心を集めたことが記憶に新しい³⁾。

[研究開発の動向]

（大気）

自動車排出ガス低減技術は、規制に対応する形で技術開発が高度化してきた⁴⁾。排出ガス低減システムとして、多くのガソリン車が三元触媒システムを採用している。自動車用触媒は、多孔質状の担持体に、アルミナ（ Al_2O_3 ）、セリア（ CeO_2 ）などの酸化物と白金（Pt）、パラジウム（Pd）、ロジウム（Rh）などの貴金属を担持したもので、現在、ハニカム状のコージエライトや金属などのモノリス基材が使用されている。2000年以降の規制ではコールドスタート時のエミッション低減に重点を置く規制が導入されてきた。コールドスタートエミッションの低減には、触媒をできるだけ低温から機能させることが必要で、この規制に対応するため。熱容量が少ない高密度薄壁モノリス担体、低温活性に優れた触媒などが開発されてきた。また、排ガスの酸化・還元雰囲気変動を利用して、貴金属が結晶から固溶・析出を繰り返す自己再生機能によって貴金属粒子の肥大化による劣化を防ぎ、高活性を維持するインテリジェント触媒なども開発された⁵⁾。近年では、燃費性能に優れた筒内直接噴射エンジンを採用したガソリン車が市場投入されたが、最新のディーゼル車を超える粒子排出があったことから⁶⁾、ガソリン車に対しても粒子に対する排出規制が導入されることになった。

ディーゼル車についても、都市部の大気環境改善に向け、特に2003年以降、厳しい排出規制が導入されてきた。国内においてディーゼル車にも酸化触媒、DPF、 NO_x 触媒などの排気後処理装置が採用されている。同時に、排気後処理装置の導入のための燃料開発も進み、触媒の被毒や劣化を防止するため、我が国のディーゼル燃料中の硫黄分は10ppm以下に低減化が進んだ⁷⁾。図2.23-1に日米欧の重量ディーゼル車の規制値の比較⁸⁾を示す。

日米欧の現在の排出ガス規制値はガソリン車、ディーゼル車とも同水準であり、上述のように浄化技術は高い水準であり、汚染物質の排出量は過去と比べ著しく低減している。ディーゼル車の NO_x については、認証時と実使用条件下との排出量の乖離は問題視され、広範囲の運転条件下における排出量の低減が求められている⁹⁾。

世界最大の自動車市場となった中国やインドでは、欧州と同等の規制が数年遅れで採用されている。都市部の大気汚染対策として、排気後処理装置への要求は年々高まっており、貴金属等の資源の不足が懸念されている。

排気後処理装置は、最新の低排出ガス車を支える重要な技術であり、浄化性能としては、極めて高い水準に達している。今後の課題としては、広範囲の運転条件下における浄化性能の向上や更なる信頼性の向上、触媒等に使用する貴金属等の資源を有効に活用するための省資源化などがあげられる¹⁰⁾。これらの研究開発を効率的に進めるため、後処理装置内における粒子堆積の挙動や反応機構を解明してモデル化するための研究が進められている^{11)、12)}。

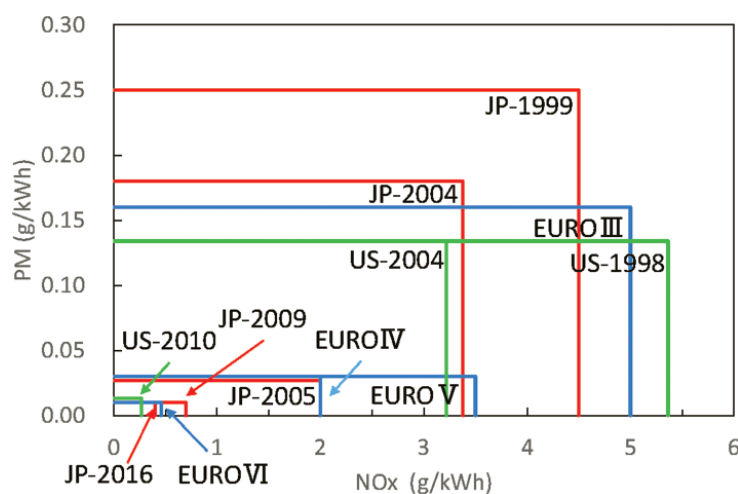


図2.23-1 ディーゼル重量車に対する日米欧の排出ガス規制値の比較

（土壌・地下水）

土壌汚染は典型 7 公害の 1 つとして古くから認識されていたものの、我が国における土壌規制対策法の成立は 2003 年と他の公害と比べ遅かった。2010 年の法改正で自然由来の重金属含有土も規制対象に加わり、2017 年の改正で特定有害物質の追加、自然由来土壌や海上埋立地に対する調査・対策の一部緩和等が施行されている¹³⁾。

一般に、土壌・地下水汚染の対策コストはきわめて高額で長期間に及ぶ。環境への負荷が小さく、比較的低コストで実施できる生物学的処理や自然機能活用による修復技術がグリーンレメディエーションと総称されている。特に生物学的処理を利用する修復技術はバイオレメディエーション、そのうち植物を用いる場合はファイトレメディエーションと呼ばれている。バイオレメディエーションは 2 種類に大別され、汚染土壌にもともと生育している微生物に水、酸素、栄養物質を供給して汚染物質の分解を促進させるバイオスティミュレーションと、汚染物質の分解菌を新たに導入するバイオオーグメンテーションがある。この処理は時間がかかるが、温和な条件のもと低コストで汚染を処理できるメリットがある。しかし、バイオオーグメンテーションは社会受容性の確保が必要となり、遺伝子組換え改良菌を利用する場合は一定の規制がかかる。我が国では、環境省と経済産業省の共管として、バイオレメディエーション指針が運用されている。現在、主に、ガソリン等の燃料油やその成分であるベンゼン、トルエン、その他の石油系炭化水素、トリクロロエチレン等の炭化水素系溶剤などの浄化に実用化されている。ダイオキシンや塩素系の残留農薬などへの応用研究も活発に行われている。鉱山跡地や鉱廃水の対策として、自然的な環境および資材を活用したパッシブ・トリートメント（自然力活用型坑廃水処理）が研究開発されている。薬剤や高いエネルギーを使用せずに、鉱物や微生物などの環境が有する自然力を活用した持続可能な対策の 1 つで、国内外の鉱山跡地への適用が期待されている。自然力を活用してモニタリングしながら浄化の進行を科学的に判断するプロトコルである科学的自然減衰（Monitored Natural Attenuation : MNA）が鉱物油などの汚染サイトで適用され始めている。欧米では数多くの実証事例が報告され、我が国でも山形県、熊本県での VOC 汚染のモニタリングと科学的な検証結果が報告されている。微生物分解が活発な状況や移流・拡散により汚染物質が急速に減衰するような環境では、MNA の導入を促進するための社会システムやガイドラインの整備が必要である。企業や自治体が持続可能な土壌汚染対

策を行うには、環境面、経済面、社会面を一体的にとらえたサステナブル・レメディエーションの考え方が重要である。効率的かつ低コストであることに加え、使用する資材の安全性や環境適用性を高め、投入するエネルギーも最小化する必要がある。企業や自治体は、操業中で資金に余裕のある段階からしっかりと土壌汚染対策を実施することが持続的な環境マネジメントの一貫と考えられる。2016年には産業技術総合研究所において、サステナブル・レメディエーション・コンソーシアムが設立され、持続可能な土壌汚染対策への取り組みが進んでいる¹⁴⁾。

自然由来の重金属等による土壌環境への負荷の軽減は重要な課題である。自然由来の重金属は低濃度で広く分布していることが多いが、我が国では、砒素、鉛、カドミウムなどのバックグラウンドでの濃度が比較的多いとされ、また平均的な曝露量も欧米と比べて高くなっている。人為的な高濃度の汚染ではないため、低コストかつ周辺環境に配慮した環境対策を行うため、土砂から重金属等の溶出を低減する技術、吸着マットなどによる重金属等の除去技術などが活発に研究開発されている。

また新規化学物質に対しては、近年、1,4-ジオキサンや塩化ビニルモノマーなどの土壌・地下水汚染分野での評価や対策が進んでいる。

2011年の福島第一原子力発電所事故の発生後は、放射性物質の除染・減容化に関する様々な取り組みがなされている。2011年度には内閣府・科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」で、放射性物質の分布状況等に関する調査研究および農地土壌等における放射性物質除去技術が開発された。また、同年度には「除染モデル実証事業」を日本原子力研究開発機構（JAEA）が受託して実施した。除染や廃炉に関連したセシウムやストロンチウム等の放射性物質を対象として、放射性物質の挙動の把握^{15)、16)}や、放射線遮蔽技術、吸着・洗浄に関する技術開発が行われている¹⁷⁾。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

（大気）

● 自動車用パワートレインの電動化

世界最大の自動車市場となった中国では、深刻な大気汚染や温室効果ガスの削減対策とともに、自国の自動車産業を育成するため、国を挙げて、動力源の電動化を進めている。その背景には、エンジン技術では、世界の先端に追いつくことが困難なことも大きな要因という認識がある。2019年から中国新エネルギー車規制（New Energy Vehicle : NEV）の導入が予定されている¹⁸⁾。これはハイブリッド車（Hybrid EV : HEV）を除いた純バッテリー式電気自動車（Battery EV : BEV）、プラグインハイブリッド車（Plug-in HEV : PHEV）、燃料電池車（Fuel Cell EV : FCEV）のみで販売数量を義務化する規制である。

欧州などでも、中国市場への対応に加え、ディーゼル車の排出ガス対策に関する不正や地球温暖化対策への対応から、ガソリン車やディーゼル車を販売禁止にする議論がなされている（表 2.23-1）¹⁹⁾。議論の段階であり、現在どの国も具体的な法規制には至っていないが、自動車業界にとって影響の大きな議論であり、注目を集めている。電気自動車等の新型車の現実的な普及予測では、2050年も HEV や PHEV、大型車の動力源として、内燃機関搭載車が残ると予測されている^{20)、21)}。EV と比較して内燃機関の技術優位性や価格競争力は高く、短中期に市場から消えないと推察されるが、各国の環境政策・産業政策

の動向に注視する必要がある。

表2.23-1 内燃機関自動車の販売禁止の議論や政治家発言など¹⁹⁾

国	内容	政治的状況	適用時期
オランダ	内燃機関を動力とする車の新たな販売の禁止	与党が提議し、下院通過	2025 年
英国	ガソリン車とディーゼル車の新たな販売を禁止	環境大臣による発言	2040 年
フランス	ガソリン車とディーゼル車の新たな販売を禁止	環境大臣による発言	2040 年
ドイツ	内燃機関自動車の販売禁止	連邦参議院が決議を採択	2030 年
インド	ガソリン車とディーゼル車の新たな販売を禁止、100%BEV 化	政府が表明	2030 年
中国	ガソリン車とディーゼル車の新たな生産・販売の禁止を検討	工業情報化部（MIIT）幹部が表明	

● 粒子個数（Particulate Number : PN）規制

欧州では、粒子状物質の排出重量に加えて、PN 規制が 2011 年からディーゼル車を対象に実施されている⁸⁾。さらに、2014 年からガソリン車、LPG 車（液化石油ガス、Liquefied Petroleum Gas : LPG）に対しても PN 規制が実施されている。PN 規制に対応するため、欧州ではガソリンエンジン用粒子捕集フィルター（Gasoline Particulate Filters : GPF）付きの車両が販売されている。我が国でも、直噴ガソリン車が普及しつつあることから、PN 規制の導入が検討しており²²⁾、今後 GPF への要求が高まるものと推察される。

● 実路走行排ガス（Real Driving Emission : RDE）試験への対応

自動車の排出ガスは、シャシダイナモを使った試験室での台上試験で測定されてきた。しかし、実路上での排出量と大きく乖離している問題から、欧州で 2017 年 9 月から RDE 試験が行われることとなった。RDE 試験は、公道上で車載排ガス測定装置（Portable Emission Measurement System : PEMS）を搭載した自動車を走らせ、実際の排出ガスを測定し、規制するものである。NOx と PN の規制上限値が設定されている⁸⁾。我が国でも、2022 年 10 月からの実施が決まっている。その他、国連の自動車基準調和世界フォーラム（UN-ECE/WP29）で、低温 / 高温における排出ガス試験を盛り込むことが検討されており、2019 年までに試験法を策定することで合意している。これにより、触媒等の排気後処理装置には、これまでより広範囲の運転条件下において、高い浄化性能が求められることとなる。

● 希薄燃焼ガソリンエンジンの開発

ガソリンエンジンの燃費向上には、希薄燃焼が有利であることは周知の事実だが、希薄燃焼範囲が限定的であることや排気中に酸素を含むため、三元触媒が適用できず、厳しい排出ガス規制への対応に対する困難さが実用化を阻んできた。最近、国内の自動車会社が、広範囲の運転条件で希薄燃焼実現できる新しい燃焼方式を開発し、高い燃費性能を示すエンジンを市販する意向を発表した²³⁾。排気後処理についての情報は公表されていないが、動向が注目される。

（土壌・地下水）

● 原位置浄化技術の新規開発

原位置浄化技術のうち化学的処理として、フェントン法や鉄粉を用いた還元処理法、薬剤による吸着処理および透過性浄化壁を用いた化学処理などがあげられる。これらは土壌汚染および土壌から溶出した重金属、VOC および鉱物油、さらには地下水の汚染に適用されている。マグネシウム化合物を用いた砒素やセレンの化学形態の変換や吸着処理、プラズマを用いた VOC の分解処理などが新規に技術開発され、実用化されている。

物理的処理としては、土壌洗浄やスパージングによる重金属や VOC の浄化・修復が行われている。土壌洗浄では、土壌粒径により汚染物質の存在割合が大きく異なることから、分級処理と選別処理のプロセスが重要となっている。スパージングは主に地下水汚染に適用され、空気や蒸気、さらには反応性のガスなどを利用した種々のスパージング技術が開発され、土壌汚染現場で実践されている。最近では、マイクロバブルの長期にわたる機能性や選択性を用いた効率的な洗浄やスパージング技術も研究開発されている。

● リスク評価に基づく合理的マネジメント

土壌・地下水汚染対策では、健康リスクに応じた合理的なリスクマネジメントが求められる。土壌汚染による健康リスクを科学的に評価するためのモデル開発が行われている。例えば、（社）土壌環境センターのサイト環境リスク評価モデル（SERAM）や、産業技術総合研究所の地圏環境リスク評価システム（GERAS）がある。また、重金属類の含有量や溶出量、形態などの情報を地理情報システム（GIS）上で統合化し活用するための環境情報システムである地圏環境インフォマティクスシステム（GENIUS）が東北大学、産業技術総合研究所、DOWA ホールディングス（株）により開発されている²⁴⁾。

リスク評価モデルの活用事例として、汚染地から離れたオフサイトでの土壌汚染のリスクマネジメント、汚染物質の地下水に沿った移動距離の推定、さらには各種の浄化技術の有効性や残存リスクの将来的な予測など、多岐にわたっている。最近では、建設発生土のリスク評価や土地利用用途に応じた浄化目標の設定などの環境政策にも活用されている。今後、法制度の中にリスク評価の枠組みを導入することにより、リスク低減とコスト軽減を同時に達成する合理的なサステナブル・レメディエーションを達成する基礎となることが期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

（大気）

排気後処理装置については、更なる浄化性能の向上や貴金属の低減などが課題である。これまでの技術開発は、主に企業で実施されてきたが、近年、触媒やディーゼル用粒子捕集フィルター（Diesel Particulate Filter : DPF）内での挙動解明やそれらを元にしたシミュレーションモデルの開発など、学術的な基礎研究の成果をもとに、実用的なソフトウェアを開発する産学連携研究が国内でも始まっている。このような研究組織は、欧州、特にドイツにおいて数十年の歴史があるが、我が国でも、ようやく産学連携した研究組織で業界共通の基礎研究を行うようになってきた。以下に、主な研究組織やその動向を紹介する。

● ドイツ内燃機関研究協会（独語: Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen:

FVV、英語：Research Association for Combustion Engines）²⁵⁾

ドイツの内燃機関に関する産学連携研究コンソーシアムで、広範囲にわたる業界共通の基礎研究等を実施している。170以上の団体が参加しており、基礎研究に加えて、専門的な人材の育成についても重点を置いている。

- 自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）

ドイツの FVV などの研究組織を参考に組織された研究組合で、自動車関連 9 企業 2 団体が加盟し、自動車用内燃機関の燃焼技術や排気後処理技術の高度化などを研究している。

- 戦略的イノベーションプログラム（SIP）「革新的燃焼技術」

内燃機関に関する基礎研究を行うプロジェクトで自動車会社と官学が連携して、AICE が実施支援している。排気後処理分野の研究においても、今後の研究成果が期待されている。

- 米国 US-DRIVE パートナシップ（United States Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy Sustainability：USDRIVE）

米国エネルギー省が主導する次世代軽量自動車の研究開発を支援するパートナーシップ。米国の自動車会社やエネルギー関係企業が参画している。電動化、水素燃料などに加えて、内燃機関の効率向上や排気浄化技術の性能向上なども研究目標に含まれている。

（土壌・地下水）

- 環境省 低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査

地下水・土壌汚染の研究開発支援について、簡易で低コスト・低負荷型の土壌汚染調査手法や対策技術を実用化して普及させるため、様々な処理技術を開発・利用してきている。環境関連企業やゼネコン、各種製造業が参入し、汚染土壌の浄化・修復を実施している。

- 国家課題対応型研究開発事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」

平成 27 年度から「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム」が実施され、①地下水および地下の広域環境評価・将来予測技術、②放射線遮蔽特性を有する土質材料開発とデブリ取り出し補助技術、③構内除染廃棄物・解体廃棄物の処分、デコミッショニング技術の開発推進とともに、人材育成が行われた¹⁷⁾。

- 欧州 AquaConSoil

1995 年から数年ごとに土壌・地下水汚染問題がテーマの欧州「ConSoil」として開催され、2013 年からは水資源管理も含めて「AquaConSoil」と拡大した。2017 年の第 14 回・国際会議からは底質環境も加わっている。2019 年ベルギーで第 15 回・国際会議が開催予定だが、土壌と水資源の一体的な観点で持続可能な利用と管理がテーマとなっている。

（5）科学技術的課題

（大気）

● 触媒の貴金属等の使用量削減

従来からの課題であるが、新興国における著しい自動車の普及により、これまで自動車触媒に使用されてきた主要な貴金属の資源が不足すると言われており、その使用量の削減や代替金属の開発が望まれている。

● ディーゼル車用 NOx 触媒の性能向上

国内では道路沿道大気の NOx 濃度は、年々、低下傾向にあるが、一般環境大気に比べて高く、更なる低減が求められており、特に、ディーゼル車の寄与が大きいため、ディーゼル車用 NOx 触媒の浄化率向上が求められている。

RDE 規制への対応には、より広範囲の運転条件下で高い浄化性能を維持することが要求される。そのため、浄化性能に加えて、低温活性、暖機性能の向上などが求められる。

ディーゼル車用 NOx 触媒は、大型車を中心に、尿素水を用いたアンモニアによる NOx 選択還元触媒（Selective Catalytic Reduction : SCR）が主流だが、中小型車については、アンモニアを使用しない NOx 触媒の研究開発についての今後の発展が期待される²⁶⁾。

● 粒子フィルターの性能向上

粒子フィルターについては、ディーゼル車（DPF）に加えて、直噴ガソリン車（GPF）への対応も必要とされてきた。気孔率の最適化や連続再生能力の向上による圧力損失の低減や信頼性の更なる向上が求められている。GPF については、粒子フィルターに三元触媒機能を持たせたものも開発されており、今後の発展が期待される。

● 再始動時における浄化性能向上

近年、燃費向上を目的として、アイドリングストップ機能搭載車や HEV、PHEV が市場投入され、普及が進んでいる。これらの車両は、信号待ちなどの間にエンジンが停止するが、この期間に触媒に空気が流れ込んで、触媒の貴金属が酸化状態になり、再始動後の排出ガスの浄化性能が低下し、特に、NOx 排出量の増加を招くことがある。最近では、触媒材料の改良により、触媒内における蒸気改質反応を促進させ、水素量を増やすことで、再始動時の NOx 排出を抑制する手法が開発されている²⁷⁾。RDE 規制対応にも有効な技術とみられ、注目される。

● 後処理装置内の挙動解明とモデル化

排気後処理装置の性能をさらに向上させるためには、後処理装置内で起きている様々な物理・化学的な現象を解明してモデルを作成し、それらを組み込んだシミュレーションソフトの開発が必要とされている。既に、産学連携の研究プロジェクトにおいて、このような取り組みが進行しているが、今後の進展が期待されている。

● 排気後処理システム全体の改良

現在の排気後処理システム、特に、ディーゼル車の処理システムは、酸化触媒、連続再生式粒子フィルター、尿素 SCR 触媒、アンモニア除去触媒など、複数の処理装置を直列に繋いだ、複雑で、それらを搭載するために大きなスペースを要するシステムとなっており、各処理装置の機能の複合化や性能向上により、コンパクトで低コストのシステムの開発が期待されている。

（土壌・地下水）

- 1,4- ジオキサンや塩化ビニルモノマーは、それらの分配特性や環境中の挙動にも不明な点が多く、環境動態を考慮した簡易調査法の開発やシミュレーション技術の確立が求められる。新規化学物質による汚染は、人為由来によるもののほか、自然界の反応プロセスで副生成物として生じるものもあり、そのメカニズムの解明も重要な研究課題である。

- 調査・分析技術

- ー安価で正確な公定法分析

土壌汚染の規制対象物質は 30 種類におよび、その分析コストは膨大である。効率的かつ低コストで実施できる一斉分析による公定法の手法や分析プロトコルの開発が求められる。

- ー現場で簡易に測定可能なオンサイト技術

公定法分析以外でも現場で簡易に汚染物質の判定や濃度レベルの検査はメリットが大きい。VOC や重金属等を対象とした現場型オンサイト測定・検査技術の開発が求められる。

- ー溶出試験を代替する試験法（カラム試験など）

重金属等の溶出試験法には多くの技術的な課題（再現性、ばらつき）があり、これを代替、補完する、ISO に準拠したカラム試験法などの公的試験法の開発が期待される。

- 浄化・修復対策技術

- ーバイオ（ファイト）レメディエーションの高度化

浄化効果の持続性や完全な浄化といった技術的な課題が多い。地質や環境の諸条件の制約がきわめて大きく、対象とする物質や汚染サイトごとに現象が異なるなどの問題がある。別々に発展してきた、微生物の改変や耐性を中心とした基礎生物学や遺伝子情報の研究と、地質環境における微生物の生態や挙動に関する研究を融合させて現場の条件に適合した効率的な技術を創出する必要がある。近年、汚染サイトで採取した微生物を汚染物質に適合させ、さらに現場の環境条件に応じた微生物群の改変を可能にする研究開発が進んでいる。

- ー複雑な汚染現場の状況と多様なエンジニアリング条件

汚染物質の溶出メカニズムには多様な要因が影響しており、実環境下での汚染物質の長期的挙動を高精度で予測することが難しい。土壌汚染の現場では、土質や地質の違い、土地の形態や利用条件などが様々であり、汚染サイトごとの個別対応が必要である。建設工事（土木）や地盤調査（地質）との連携による対策の効率化、建物直下における汚染の調査対策として水平ボーリング技術が求められる。効率性、コスト、土地の特徴や広さ、土地利用形態、社会的側面などの多様な制約条件があり、個々の技術で適用可能性が異なるため、それらの関連性を総合的に評価できる仕組みが存在しない。エンジニアリングマニュアルの整備が望まれる。

- リスク評価技術

- ーリスク評価手法の社会実装

土壌汚染対策は、リスクベースの合理的なリスクマネジメントが国際的に主流だが、我が国では技術的に成熟していない理由から導入されていない。しかし、リスク評価に基づく合理的な対策が実現する可能性が高い。

ーモデリング技術の高度化

リスク評価モデルの高度化に加えて、現場の高次元データを用いた順逆双方向の解析などの信頼性の高いリスクモデリング技術の開発が望まれる。データ駆動による数理統計的な解析技術の開発、現場での実証試験によるデータベースの蓄積が求められる。

ーリスクコミュニケーションの円滑化

土壌汚染に代表されるストック型の環境汚染問題を円滑に解決するための社会的な取り組みとして、レギュラトリ・サイエンスを基礎とした文理融合型の研究開発が必要である。ストック型環境汚染問題に対する学際的解決手法の構築と社会実装が求められる。

● 地圏環境情報の整備

ー地球化学図、土壌環境基本図の整備

土壌汚染対策では、重金属等の地域特性やバックグラウンドの把握など、もっとも基本となる土壌環境に関する各種情報の整備が遅れている。地域ごとの地質情報を反映した地球化学図、土壌環境基本図の整備、リスクマップの作成および公開が求められる。

ーリスク情報の公開と情報伝達

地球化学情報やリスク情報などを正しく理解し、市民に伝えていく仕組みが存在しない。土壌汚染リスク情報の整備およびコミュニケーションツールの開発が望まれる。

● グリーナー・クリーンアップ（greener cleanup）の社会実装

グリーナー・クリーンアップは米国環境保護庁で実践されているスーパンプランド法に基づく実行計画である。土壌汚染対策を他事業と連携で実施し、環境負荷を最小限に抑えて汚染対策する取り組みを提唱している。土壌環境に限定せず、広く地球環境問題を見据えた将来的な枠組みを構築して、大気、水質、地球環境（温暖化ガス）のトータルの環境保全を目標として、エネルギーの最小化、コストの軽減を図る技術体系である。汚染対策の資材を最小化し、廃棄物の循環を促進するため、公共事業や建設工事などと連携して総合的な設計を実現し、長期間にわたり生態系を配慮したトータルな環境改善を実践することが可能である。

（6）その他の課題

（大気）

● 途上国における都市の大気環境問題

自動車排出ガス規制が厳しい日米欧の都市部を除き、世界の大多数の都市の大気環境は、いまだ極めて厳しい状況である。原因の多くが自動車や発電所、工場、事業所等における燃料の燃焼に起因している。自動車排出ガスの低減には、排気後処理の付いた車両への代替が効果的だが、燃料の低硫黄化が達成されておらず、低排出ガスの車両が導入できない状況にある。経済的な事情から新型車への代替が進まず、古い車両が長期間使用されることも一因である。

使用過程車に対する排出ガス対策は、触媒やDPFなどの後付が効果的だが、一般的な排気後処理装置は、低硫黄燃料を前提に開発されており、途上国での適用が困難な状況にある。途上国における排出ガス低減対策は、ビジネスとして成立し難い側面もあると考えら得るが、燃料事情の悪い条件下で使用可能な排気後処理装置の開発が望まれる。

- 船舶への規制強化

自動車排気ガスを中心に記載したが、船舶においても大気汚染物質の規制が進んでいる。マルポール条約（船舶による汚染の防止のための国際条約。世界 174 か国が加盟する世界海事機関が監督）の SO_x 規制を 2020 年に 3.5% から 0.5% に引き下げることが決定している。国土交通省から、世界各国で遵守されるためのガイドライン作成などの提案が行われている。

（土壌・地下水）

- 法制度と技術開発のギャップ

我が国の環境法は分野別に制定され、土壌環境と他の環境（大気、水質、地球環境など）を一体的にとらえていないものが多い。土壌汚染対策法での問題は、国際的に主流のリスクベースの対応をとっていないこと、溶出量と含有量の両者を採用していることなどである。これらは我が国独自の考え方なので、国内外で開発した新規の対策技術を導入する際に、技術と法制度のギャップが課題となる場合が多い。バイオ（ファイト）レメディエーションのように、合理的で高度な技術であっても法制度に合わないために導入が困難な技術や手法が少なくない。

我が国では、鉱物油（ガソリン、軽油、重油など）の規制は行われていないが、トルエンやキシレンといった健康影響が懸念される化学物質が多く含まれ、消費量も多いことから鉱物油の土壌汚染に関わる法制度の整備が期待される。

- 地域特性と人材育成

我が国は、地質が複雑で鉱山活動が盛んな地域が多く、地域により重金属のバックグラウンド値の差異が大きい。このような地域特性は、居住する住民活動や農業活動、生態系を保全するための基盤となることから、土壌汚染対策への反映が重要である。土壌汚染対策法は新しい法体系のため、社会システムの整備や人材育成が追いついていない。土壌汚染野の専門的知識を有する人材がきわめて少なく、調査・評価、対策技術の現場適用の進捗が遅れている。

- アジア諸国との国際的共同事業

アジア諸国において土壌汚染対策に関する環境規制法が制定され始めている。中国では 2017 年度に「土壌污染防治法」が施行され、タイ国では地下水汚染対策を中心に法整備が進んでおり、いずれも予防措置を中心とした科学的なリスク管理の枠組みが提案されている。アジア諸国と連携して土壌汚染対策を共同で実践していくことは、国家や企業や環境対策のみならず、国際的なセキュリティの観点からも重要である。

（7）国際比較

（大気）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	●自動車の排気後処理技術に関する基礎研究は、主に、大学、国立研究機関、自動車会社や触媒メーカーの基礎研究所等において実施され、世界をリードする研究成果を生み出している。さらに、大学や国立研究機関と企業との共同研究も実施されており、これまでに、大型放射光施設 SPring-8 を利用した研究等により、貴金属が自己再生するインテリジェント触媒や貴金属に代わる鉄触媒の開発などの成果を挙げている。最近では、産業界が必要とする共通の基盤研究を産学官連携して実施する研究組織も設立され、自動車の排気ガス浄化技術についても、触媒や DPF 内での挙動解明等の基礎研究が実施されている。さらに、これらの成果をもとに、研究開発ツールとしてのモデル化の研究等を進めており、今後の発展が期待できる。
	応用研究・開発	◎	→	●ガソリン車用の三元触媒を始め、ディーゼル車用の DPF や NOx 還元触媒など、広範囲の分野で高い技術開発能力を保有している。特に、触媒担体や DPF などのセラミック製品の分野では、市場でのシェアも大きく、世界をリードしている。世界の自動車技術者、研究者が参加する米国 SAE (Society of Automotive Engineers) においても、自動車会社や触媒メーカー等から、多くの研究報告がなされている。 ●ディーゼル車の分野については、欧州に比べて、産官学の連携研究の遅れなどから、後塵を拝していると言われた時期もあったが、最近では、AICE などの研究組織が立ち上がり、欧州と同様な開発環境になりつつある。 ●自動車の排出ガス対策は、触媒や DPF などの後処理装置の性能に加えて、それらを有効に作動させるためのエンジン側の制御技術など、総合的な技術力が要求されるが、これらの分野についても、日米欧の厳しい排出ガス規制に対応できる高い技術力を有している。
米国	基礎研究	◎	→	●自動車排出ガス規制をリードしてきたことあり、広範囲の分野で、高度な研究が実施されている。基礎研究は、我が国と同様、大学、国立研究機関、自動車会社や触媒メーカー、担体メーカーの基礎研究所等で実施されている。大学等には、世界から若手の研究者が集まり、政府や企業の支援を受けて研究に取り組んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	●長期間、自動車産業の中心地として、世界を牽引してきたこともあり、米国内の企業はもとより、世界有数の自動車会社や部品メーカー等が、開発や生産拠点を置いているため、研究開発水準は高い。特に、排出ガス規制については、日欧に比べて、厳しい試験法が適用されており、技術開発に対する要求も高いことが、技術レベルを押し上げてきた要因と考えられる。
欧州	基礎研究	◎	→	●欧州では、以前から、研究コンソーシアムを組織して、企業における競争領域以外の基礎研究を産学連携して実施してきた。研究分野は、エンジンのみならず、排気触媒などの後処理分野含む広範囲に及んでいる。さらに、BASF (独)、ジョンソン・マッセイ (英)、ユミコア (ベルギー) など、世界の自動車触媒のリーダー的企業の拠点が、自動車用触媒の材料や後処理装置内の挙動解明など、広範囲の分野において高い研究能力を有している。
	応用研究・開発	◎	→	●自動車用触媒をリードする主要企業があるに加えて、世界の自動車会社より、エンジンシステム開発の委託業務を行っている、AVL (オーストリア)、FEV (独)、リカルド (英) などの著名なエンジニアリング会社が存在し、高い技術開発能力がある。米国 SAE への論文発表も多い。 ●特に、欧州では、燃費の面で有利な、ディーゼル乗用車の普及が進み、この領域では世界をリードしていたが、最近、エンジンの排ガス制御ソフトウェアの不正が発覚したことから、ディーゼル離れが起こっており、今後の見通しは不透明である。 また、粒子個数の排出規制や RDE 規制など、世界に先駆けて、新しい規制を導入しており、この分野では、一歩、先んじていると考えられる。

中国	基礎研究	○	↗	●環境触媒等の基礎研究においては、優秀な人材も多く、精力的な研究をしていると言われているが、自動車の排気浄化に関する分野では、近年、大学等から米国 SAE での報告も見られるが、注目すべき研究は、日米欧に比べて、少ない。
	応用研究・開発	○	↗	●今や、自動車、特に、乗用車では、米国を抜いて、世界一の自動車市場となった。そのため、世界の主要な自動車会社や排気ガスの後処理装置を含めた部品会社等が、現地企業との合弁等により、生産、開発拠点設けているため、応用研究や製品開発の領域では、世界的なレベルに達しているものと推察される。 しかしながら、中国政府は、エンジン車から電動車への転換を強力に推し進めており、今後の動向については、不透明感が高い。
韓国	基礎研究	△	→	●自動車の排気浄化に関する基礎研究においては、日米欧に比べて、学会（米国 SAE 等）での報告や注目すべき成果も少ない。
	応用研究・開発	○	→	●厳しい排出ガス規制がある欧米の市場に、多くの車両を輸出しており、排ガス浄化技術は、世界のトップクラスにあると考えられる。触媒等の後処理装置についても、世界の主要な触媒メーカー等の企業やそれらと提携した企業において、開発、生産が行われており、技術水準は高いと推察される。

（土壌・地下水）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	●福島第一原子力発電所事故以降、放射性物質、特に放射性セシウムの吸・脱着やモニタリングなどに関する基礎研究が加速されたものの、土壌・地下水汚染研究領域において依然として非常に重要である重金属類や揮発性有機化合物などに係る研究は予算枠の相対的な減少などにより影響を受けており、国際的イニシアティブを確保するためには、今後更なる加速が必要である。また、揮発性化学物質の摂取リスクに関する研究は急務の課題である。
	応用研究・開発	◎	→	●基礎研究と同様、放射性物質による汚染の浄化や汚染水のモニタリング技術および処理技術などの応用研究開発が加速され、復興支援に貢献したものの、自然由来の重金属類や揮発性有機化合物による土壌汚染に係る低コスト・低環境負荷対策技術の開発は関連研究予算と提案数の減少に伴い減速傾向になり、今後加速する必要がある。また、鉱山や工業跡地を中心に、持続可能な政策を目指したサステナブル・レメディエーションの研究開発が盛んに進められている。
米国	基礎研究	◎	→	●アメリカ国立科学財団（NSF）や米国環境保護庁（US EPA）などのファンドによる土壌汚染に係る基礎研究が進められている。環境微生物や植物などを利用した浄化技術やリスク管理に基づく融合研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	→	●米国 EPA や米国エネルギー省（DOE）などが管理されている実汚染サイトで、開発技術の検証や実証試験ができ、応用研究の環境としては非常に優れている。
欧州	基礎研究	◎	→	●欧州、特に英国においては、環境的側面のみならず、社会的側面および経済的側面も統合的に考慮したサステナブル・レメディエーションの研究開発が加速されている。
	応用研究・開発	◎	↗	●土壌・地下水汚染対策の新しい取り組みとして、英国を中心に提案されたサステナブル・レメディエーションに関する ISO 規格の提案が進められている。また、ドイツを中心に、PCB や多環芳香族炭化水素（PAH）およびダイオキシンなどの汚染物質に係る ISO 規格の提案も進められており、科学技術の国際的な競争は一段と激しくなっている。

中国	基礎研究	◎	↗	●環境に対する国民の関心が高まり、環境に対する投資も年々増加し、現時点では GDP の 2% 近くまで増加してきている。特に改正環境保護法の施行（2015 年 1 月 1 日より）や土壤污染防治法の公布（2017 年 1 月 1 日）に伴い、土壌・地下水汚染に係る基礎研究の予算が増大し、中国科学院傘下の研究所や各地の大学で認定された「国家重点実験室」研究が盛んに進められている。
	応用研究・開発	○	↗	●中国では、土地が 100% 国有であるため、現場または原位置実証研究が行われやすい。現在国内で開発技術した技術のほか、欧米などで開発した技術の検証やクロスチェックが複数の大型プロジェクトで行われている。
韓国	基礎研究	○	→	●韓国国内において、特に目立った動きはないが、留学生や研究者の海外派遣は目立つようになってきている。
	応用研究・開発	△	→	●海外技術の導入や外国との連携により、今後応用研究が加速される可能性が極めて高い。

（註 1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註 2）「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

（大気）

- 1) World Health Organization (WHO), “Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease,” 2016.
- 4) トヨタ自動車 75 年史 第 2 部 第 2 章 第 3 節 第 1 項「排出ガス問題の発生」、
https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/text/entering_the_automotive_business/chapter2/section3/item1.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 5) 田中裕久「自動車触媒のプロジェクト XX」『自動車技術』59 巻 1 号（2005）: 42-47.
- 6) 小林伸治 他「直噴ガソリン乗用車の粒子状物質排出特性」『自動車技術会論文集』43 巻 5 号（2012）: 1009-1014.
- 7) 石油連盟「サルファーフリーについて」、
http://www.paj.gr.jp/eco/sulphur_free/（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 8) Diesel Net, “Emission Standards,”
<https://www.dieselnets.com/standards/>（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 9) 国土交通省「排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会 資料」、
http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000035.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 10) 自動車技術会「技術ロードマップ」、
http://www.jsae.or.jp/roadmap/pdf/tec_01-6.pdf（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 11) 植西徹 他「Diesel Particulate Filter の内部輸送現象の研究（第 2 報）－ Soot cake 層に及ぼす堆積条件の影響のモデル化」『自動車技術会論文集』46 巻 4 号（2015）: 725-730.
- 12) 岡耕平 他「SCR モデルの高温領域での NO_x 浄化性能予測精度向上の試み（第 2 報）」『自動車技術会論文集』48 巻 2 号（2017）: 291-297.

- 18) DIAMOND online「巨龍・中国が世界覇権を狙って押し進める NEV 規制の中身」2018年6月4日オンライン、
<https://diamond.jp/articles/-/171315>（2019年2月1日アクセス）
- 19) 日本政策投資銀行「「EV化」とは～各国の規制動向を踏まえて～」今月のトピックス No.281（2017年12月14日）、
https://www.dbj.jp/ja/topics/report/2017/files/0000029348_file3.pdf（2019年2月1日アクセス）
- 20) Shell, “Sky Scenario,”
<https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky.html>（2019年2月1日アクセス）
- 21) BP energy economics, “BP Energy Outlook 2018 edition,”
<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>（2019年2月1日アクセス）
- 22) 環境省 中央環境審議会「今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（第十三次答申）」（2017年5月31日）、
<http://www.env.go.jp/council/toshin/t07-2901.pdf>（2019年2月1日アクセス）
- 23) マツダ株式会社「次世代ガソリンエンジン「SKYACTIV-X」」、
http://www.mazda.com/ja/csr/special/2017_01/（2019年2月1日アクセス）
- 25) Dietmar Goericke 他「The Power of Joint Research - The FVV Innovation Network」『自動車技術会 2016 年春季大会 学術講演会 講演予稿集』（2016）: 2248-2250.
- 26) 株式会社キャタラー「NO_x 浄化用触媒システム HC-SCR」、
<https://www.cataler.co.jp/aee2018/diesel/hc-scr.php>（2019年2月1日アクセス）.
- 27) 株式会社キャタラー「再始動 NO_x 排出抑制材料 (SRR-MIX)」、
<https://www.cataler.co.jp/aee2018/gasoline/srr-mix.php>（2019年2月1日アクセス）.

（土壌・地下水）

- 2) 地盤工学会 第8小委員会 8-3 地下水地盤環境「アカデミックロードマップ」、
https://www.jiban.or.jp/images/file/AR_PDF/8-3AR.pdf（2019年2月1日アクセス）
- 3) 豊洲市場土壌汚染対策専門家会議「豊洲市場における土壌汚染対策に関する専門家会議報告書」（2017年11月）
- 13) 「土壌汚染対策法の一部を改正する法律」（平成29年法律第33号）
- 14) 保高徹生, 古川靖英, 張銘「わが国と諸外国のサステナブル・レメディエーションへの取り組み」『環境情報科学』46巻2号(2017): 43-47
- 15) T. Inui, *et al.*, “Cesium Sorption/desorption Characteristics of Sodium Bentonite Affected by Major Cations in Leachate from MSW Incinerator Ash,” *Japanese Geotechnical Society Special Publication* 2, no. 53 (2016): 1841-1844.
- 16) 池上麻衣子 他「土壌の熱処理による Cs, Sr の溶出特性の変化」『土木学会論文集 G (環境)』70巻7号(2014): III_203-III_208.
- 17) 国家課題対応型研究開発事業 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技術

開発と人材育成プログラム」（事業代表者：東畑郁夫）

- 24) 地圏環境インフォマティクスシステム（GENIUS）、
<http://geoserv.kankyo.tohoku.ac.jp/genius/>（2019年2月1日アクセス）

2.24 資源・生産・消費管理

（1）研究開発領域の定義

資源・生産・消費管理に関する科学、技術、研究開発を記述する。

製品やサービスの全ライフサイクルについて、環境負荷や影響を定量的に把握し低減するための評価・管理技術を扱う領域である。ここでは、データベース構築及びライフサイクルアセスメント、物質フロー分析または物質ストック・フロー分析、各種フットプリント、ラベリング等による行動変容などを対象とする。

（2）キーワード

ライフサイクルアセスメント、ライフサイクル思考、マテリアルフロー分析、エコロジカルフットプリント（カーボンフットプリント、環境フットプリント）、環境ラベル、サーキュラーエコノミー、食料・水・エネルギーの相互依存性分析、産業共生

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

循環型社会を構築していくためには、資源の有効利用度を高め、低環境負荷な生産工程を確立しつつ、適切な消費行動をとることができるようになる必要がある。このとき、単一のプロセスや意思決定において最適であると考えた選択肢が、他のプロセスや意思決定に対して悪影響を及ぼすことがある。製品やサービスのライフサイクル全体を対象にしながら、資源のフローやストックを分析することで可視化し、任意の選択肢が与える波及効果を利害関係者間で共有することで、よりよい管理を目指すことができる。本研究開発領域はこうした目的における分析や可視化、結果の共有における方法論を開発、普及させていくものである。

資源には枯渇性資源（化石資源や鉱物資源など）と再生可能資源（自然資源など）があるが、多種の資源を複雑に利活用することで製品の製造や消費、サービス、日常の社会活動を行っている。複雑かつ拡大化するサプライチェーンにおいて、適切に資源・生産・消費を管理するためには、俯瞰的な視野における全体の可視化と、科学的な分析手法によるフローやストックの定量化が必須である。手法としてはマテリアルフロー分析やマテリアルフローコスト会計、など様々なものが提案、開発されてきている。なかでもライフサイクルアセスメント（LCA : Life Cycle Assessment）やその基礎的な考え方であるライフサイクル思考（life cycle thinking）は、製品のゆりかごから墓場までのライフサイクル全体を対象とした環境負荷や社会的影響、コストの定量的分析を行う手法として開発され、国内外で利用されている。例えば、軽量で頑丈な新素材を開発した場合、その素材を利用することで飛行機や鉄道車両、自動車などの環境性能を大幅に向上させうるが、素材そのものを生産するプロセスでは、高機能な製品を生産するために環境負荷が増大してしまう可能性がある。このようなとき、素材の製造と使用における環境負荷を比較し、素材の有効性を分析することがLCAを用いれば可能となる。消費者行動に関して、ライフサイクル思考に基づけば、例えば、自動車や家電製品の買い替えによる効果を製品の製造部分の環境負荷と使用部分の環境負荷を定量化することにより、可視化することができるようになる。このような可視化は、消費者の環境配慮行動を支援する上で重要な情報であり、共有されるべきものである。共有の方法としては環境ラベルのようなツールを開発し、情報の有効性だけでなくアクセシビリティを高めることができるようにしてきた。

このような分析と可視化、共有、判断により資源や環境負荷の持続性を高め、生産や消費を管理することができるようになる。

[研究開発の動向]

世界的な研究開発の動向を客観的に把握するために、Web of Science に 2008 年～2018 年 7 月に登録された学術論文のうち、タイトル、要旨、キーワードに “life cycle assessment” もしくは “life cycle analysis” を含んだ 13,853 件の論文に対し、書誌情報をテキストマイニング及びネットワーク分析により自動分析できる学術俯瞰システム¹⁾を用いて、計量書誌分析を行った。表 2.24-1 のとおり 2008 年から 2017 年にかけて論文数は、大きく増加している。

表2.24-1 直近10年のLCA関連論文数の増加トレンド

年	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
件数	323	463	646	784	978	1272	1500	1732	2074	2377

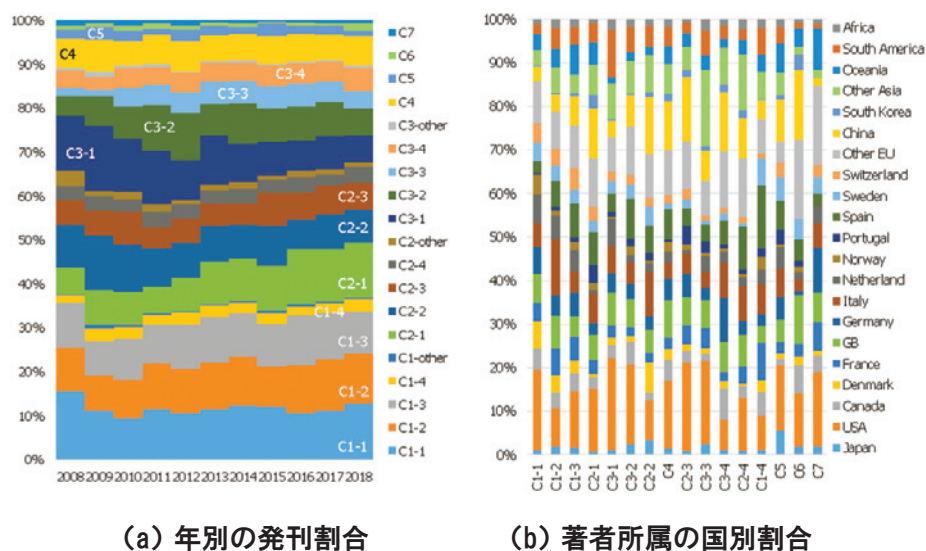
引用関係からのクラスタリングにより、上記の論文は 50 を超えるクラスタに分割された。この中で全体の 98% をカバーする特に大きなクラスタ 7 つに関して本稿では議論する。この 7 つの主クラスタ内で共通して利用されている主なキーワードは表 2.24-2 の通りである。

表2.24-2 LCA分野の論文における頻出キーワードをもとにしたクラスタリング

クラスタ	サブクラスタ	件数	キーワード
C1		4758	farm, food, land use, water
	C1-1	1568	social life cycle, input-output, sustainability
	C1-2	1443	farm, food, animal
	C1-3	1361	water treatment, land use, biodiversity
	C1-4	333	aquaculture, fishery
C2		3951	building, construction, vehicle, municipal
	C2-1	1404	building, construction, cement
	C2-2	1113	municipal solid waste, recycling
	C2-3	818	vehicle, battery, composite、
	C2-4	433	photovoltaic, payback, building
C3		3540	biomass, pyrolysis, biogas, fuel
	C3-1	1170	bioethanol, biodiesel, biofuels
	C3-2	1071	biomass, wood, pyrolysis
	C3-3	631	microalgae, biodiesel
	C3-4	607	biogas, hydrogen, digestion
C4		854	wind, turbine, capture
C5		278	symbiosis, reusable, design
C6		118	remediation, soil, contamination
C7		70	rare earth, metal, magnet

このうち相対的に件数の多い C1 ～ C3 はさらにサブクラスタを同様に学術俯瞰システムにより分析した。

これらクラスタが全体の論文数に占める年次の割合と、著者の所属機関が立地する国について、図 2.24-1 に示す。C1-1 ～ C1-4 に関しては 2010 年前後に全体の中の論文割合が減少しており、近年は微増している。C2-1 は過去 10 年で全体の中での割合を大きく増加させている分野であり、論文数も多い。逆に C2-2 や C3-1 は過去 10 年の間の割合が減少している。特にバイオマス関連の LCA については、近年は LCA による評価だけでなく、次節にて述べる最近の動向として、水消費や食料との関係に加え、循環経済からの解析を必要としており、LCA を含まない研究も増えてきている。国別の状況を見ると、米国の論文数は単独の国としては最大であり、多分野の研究報告がなされている。欧州においては、イタリアや英国、スペインなどからの報告が多く、次いでドイツやオランダ、フランス、デンマーク、スウェーデン、スイスなどからの報告が多い。アフリカや南米といった地域からの報告も増えてきている。中国からの論文数は米国に次いで 2 位であり、日本は論文数だけで見ると 17 位であった。



(a) 年別の発刊割合 (b) 著者所属の国別割合
図2.24-1 2008～2018(7月)に発刊されたLCAを含む論文の概況

計量書誌分析に加えて、研究開発の動向を把握するために、関連する学会のセッション構成について調査を行った。学会としては、LCA の概念から手法の確立を行った環境毒物化学会 (SETAC : Society of Environmental Toxicology and Chemistry) 欧州大会²⁻⁴⁾、産業エコロジー学会⁵⁾、日本 LCA 学会⁶⁾ の各研究発表会等からセッションテーマを抽出し、これに基づき、以下で研究動向を議論する。

毎年企画されているセッションとして、手法論の開発がある。特に SETAC Europe においてはライフサイクルインパクト評価のフレームワークとモデルの開発を、ケーススタディなどを通して実施している。通常的环境影響に加え、社会的な影響を定量化する Social Life Cycle Assessment (SLCA) の手法開発についても、議論されている。SLCA については上記計量書誌分析の結果のクラスタ C1-1 に該当し、2009 年にガイドライン⁸⁾ が策定される前から研究が活発化している。方法論としては、いずれの学会においても、産業連関表を用いた Input-Output Analysis が意思決定支援にどのように活用できるかを議論するセッションが国

内外で組み立てられている。資源の循環や、自治体レベルでの物質と経済の循環を分析する上でも、産業連関表を用いた分析事例が増えつつある。開発されてきた手法を実践し、ホットスポットの分析や実際に設計等に利用する事例研究も増えている。例えば、生産現場においては複数の製品を様々な資源を投入することによって併産していることが多く、その工程で利用しなくなった資源やエネルギーも他の工程でカスケード利用することができるなど、単純ではない。生産される製品も単一の機能を有しているわけではなく、環境負荷の定量化における機能単位が定まりにくい場合がある。こうした生産現場の複雑性や製品の多機能性をどのような形で考慮し、適切な分析ができるか、事例における具体的な定量化を基にしながら方法論を開発する研究発表が増えている。特に、次節にて述べる Food-Energy-Water nexus や Circular economy、Assessment of emerging technology などの関連研究では、具体的な数値を用いた議論が多く存在しており、日本 LCA 学会研究発表会では特別セッションも組まれている。また、ライフサイクル情報を格納するデータベースの開発に関する研究事例も多い。特にライフサイクルインベントリデータを格納しているデータベースが複数存在していることから、これらの互換性やバウンダリの設定に関する研究報告が例年行われてきている。

以上の調査から、研究開発動向をまとめる。資源・生産・消費管理のための手法として広範に使用されている LCA に関し、研究論文はさらに増加している。LCA については、歴史的に、基礎的な方法論の深化とともに、応用研究・開発の推進が積極的に進められてきた。LCA の適用先としては大きく、(A) 製品レベル LCA、(B) 組織の LCA、(C) 消費者/ライフスタイルの LCA、(D) 国の LCA、を挙げることができる⁷⁾。ここで、昨今の変遷として、社会の中で LCA は単純に環境負荷を分析するだけにとどまらないライフサイクル思考のための方法論として位置付けられ始めている。そのため、“LCA” を含まない物質・エネルギーの解析や、経済性の分析などにおいても、ライフサイクル全体に関する議論が必要であることは前提となりつつある。定量化すべき指標がさらに複雑化しており、研究のターゲットとされる製品やサービスについては、水素やバイオマス由来の製品製造など、新規なものもあるが、従来対象となってきた製品群についても、開発途上国に対してなど、継続的に解析が行われている。現在開発済の方法論に基づくことで、既に存在している技術システムや社会システムを何らかの指標により定量的に評価することは、様々な事例研究から可能となっているといえる。しかし、導入数が少ないシステムや、将来技術に関する分析は完全には実施できていない。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

● 計量書誌分析結果（図1）からの抽出

図 2.24-1 に示される計量書誌分析によって特定されたクラスタは、いずれも当該分野で重要なトピックである。C1-1 の *social life cycle, input-output, sustainability* では、環境性だけでなく社会性に関する評価指標を提案する研究分野であり、予てより存在していたものであるが、ESG 投資等の観点が必要となってきた中で、研究開発が再度増加している。C1-2 の *farm, food, animal* については、パーム油など開発途上国からの輸出が多い製品に関する評価が増えている。C1-3 の *water treatment, land use, biodiversity* については長い歴史があるが、定量化の方法論の確立に向けた研究が継続的に行われている。C2-1 の *building, construction, cement* については、先進国のスマートシティ構想や開発途上国の人口増、さらには自動車や情報技術の発展と普及により、急速に街づくりの概念が変わりつつある中、その生産と消費の評価が必要となってきた。C2-3 の *vehicle, battery, composite* などは、近年、導入が増えてきた蓄電池搭載の自動車の評価が活発化していることを意味しており、C2-4 や C3-1、C3-2、C3-3、C3-4 といったエネルギー関連クラスタとともに重要となってきた。

追加の分析として、Web of Science に収録の学術雑誌の中から、2016 年 1 月～2018 年 7 月までに掲載された学術論文のうち、タイトル、要旨、キーワードに“life cycle assessment”もしくは“life cycle analysis”を含んだ 4,491 件の論文に対し、学術俯瞰システムを用いた計量書誌分析を行い、各国の近年の動向を分析して下表に整理した。計量書誌分析によって得られた主なクラスタは、以下の 10 クラスタでカバー率は 75%であった；食品関連（647）、新規エネルギー技術（543）、建造物（533）、廃棄物利用（522）、水処理（241）、サプライチェーン（227）、バイオ燃料（221）、一次産業（164）、シェール・新資源（152）、Social Life Cycle Assessment（130）。ここで、括弧内は各クラスタの論文数である。いずれも図 2.24-1 の中に含まれるものであった。

● Food-Energy-Water nexus analysis: 食料・水・エネルギーの依存性解析

食料と水の生産とエネルギー消費の相互依存性に関する分析を国や地域ごとに行うものであり、食料と水に関する評価として近年多くの文献において採用されているアプローチである。単位量の水や食料を得るために必要となるエネルギーについて可視化することにより、食料と水の流れにより、エネルギーの流れを解析することが可能となる。2011 年頃から議論が増えてきている概念⁹⁾であり、FAO からガイドラインが発行¹⁰⁾され、多くの学会においてセッションが組まれる¹¹⁾など、活発化している。本領域の主要雑誌である *Applied Energy* や *Resources, Conservation and Recycling, Sustainability* などにおいて *Special Issue* が組まれるなど、研究報告も増えてきている。

● Circular economy : 循環経済

物質や資源の循環によって経済的な効果をも引き出し、生産と消費の在り方を根本的に変えることを意味しており、欧州委員会では、2030 年に向けた成長戦略の核に位置づけている。都市廃棄物の 65%をリサイクルすることや、包装廃棄物の 75%をリサイクルすること、埋め立て廃棄量を 10%削減することなどの廃棄物政策に加え、再生資源活用に基づく *raw materials* の資源枯渇と価格変動リスクからの脱却によるビジネスモデルの転

換を掲げている¹²⁾。世界経済フォーラムらによる報告書では、循環により価値の基準を再定義すべきことや、人工知能等を用いることでより高効率化された建造物や製品を生み出し得ることなどが議論されている¹³⁾。これらの提言は産業界からの関心を高め、技術開発や導入を促している。同時に、学术界においても、*Journal of Industrial Ecology* において特集号が発刊される¹⁴⁾ など、*Circular Economy* に関する研究開発が広がりを見せている。

● **Environmental footprint : 環境フットプリント**

欧州委員会は、2013年から環境フットプリントに関するパイロット事業を開始し、2017年末までに、第1期（2013年11月～日用品、工業製品及び組織）と第2期（2014年6月～食品）に分けて各製品・産業セクターに関して16の環境影響領域（温室効果ガスの排出量、資源枯渇や毒性等）について、LCA方法論をベースにした定量評価・検証のための製品カテゴリールール（*Product Environmental Footprint Category Rule : PEFCR*）、産業セクタールール（*Organisation Environmental Footprint Sector Rule : OEFSR*）を開発している。パイロット事業では、PEFCR開発等の経験において、二次データベース（環境負荷算定用に使う素材やエネルギー等の共通的な原単位）の構築、統合評価のための重み付け係数（*weighting factors*）の開発や、比較可能性を担保するためのコミュニケーションテスト等が実施されている。2018年からは、政策移行フェーズとして、環境ラベルやグリーン公共調達等の既存制度・施策への適用、環境配慮主張や情報開示の新政策を検討していくことが方針として示されている¹⁵⁾。

● **Assessment of emerging technology : 新規技術の評価**

近年、新規技術や生産システムに関して、システム評価を実施する研究に関する特集号が組まれている。例えば、*Journal of Industrial Ecology* では研究開発や政策における意思決定を支援するためのLCAに関する特集号が募集された¹⁶⁾。ここで想定されている技術は、技術成熟度がLevel 3から4といったもので、主に実験室レベルの研究段階のものから、ペロブスカイト型太陽電池など、低コスト化による実用化を目指しているような技術である。アメリカ化学会のACS Sustainable Chemistry & Engineeringにおいても、バイオ燃料の生産システムや、従来のシステムにおける更なる省エネ化による持続性の向上に関する特集号が発刊されている¹⁷⁾。材料開発に関する研究論文が多い、化学の雑誌で、こうした持続性の評価を特集することは珍しい。いずれの特集号においても、製品や生産システムだけでなく、社会システムに対しても構造的な変革をもたらさう技術にLCAといった評価手法を適用するものであり、導入してから持続性の検討をするのではなく、導入する前に可能な限り評価を行い、持続可能な技術導入を実現することを目指している。

● **Assessment of energy and environmental policy: エネルギー・環境政策の評価**

再生可能エネルギーの導入など、低炭素社会を目指したエネルギー・環境政策の重要性が増している。再生可能エネルギー電力のみならず、バイオエタノールや再生可能エネルギー熱などの利用促進に向けた制度や政策が各国で実施されてきた。今後もエネルギー技術の研究開発や普及促進に係わる効果的な政策や施策の立案が求められる。このようなエネルギー・環境政策の立案や評価に資するライフサイクル思考に基づく研究は、*Energy Policy* や *Renewable and Sustainable Energy Reviews* などの主要国際誌において近年、増えつつある。論文中にライフサイクルという言葉は必ずしも利用されていないが、ライ

フサイクル思考に基づき、再生可能エネルギー普及政策や省エネルギー政策などがもたらす社会経済影響を分析する研究が活発化している。国内でも日本 LCA 学会誌においても政策立案の支援を念頭に「エネルギーの LCA」の特集が組まれ、政策立案に資する LCA 研究の重要性が指摘されている。

今後、現実の政策や制度の立案に資するという視点から、ライフサイクル思考に基づくエネルギー技術導入に伴う影響に関する分析・評価の重要性が増しつつある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

資源・生産・消費管理に係る国内プロジェクトの動向として、近年の研究開発プロジェクトにおける LCA 等システム評価の必要性が高まっていることが挙げられる。例えば、JST 未来社会創造事業は、未来社会を構成しうる革新的な技術の研究開発と実証、導入に関するものであるが、並行して低炭素化や資源循環といった観点からの技術評価が各プロジェクトで必要とされている。戦略的イノベーション創造プログラムにおいても、LCA による技術評価を必要としている研究分野が存在している。資源・生産・消費管理における研究課題は広く材料・デバイス・システム研究と関連性が深く、学術研究だけではなく事業の中でも必須の要素となりつつある。従来からこの必要性は認識されてきたが、近年は学術雑誌における特集号の発刊や国内プロジェクトにおける要求から、重要性・緊急性が増しているといえる。

国際的にも、当該分野におけるネットワークの強化が図られている。Forum for Sustainability through Life Cycle Innovation (FSLCI) はライフサイクル思考に基づく持続可能性への挑戦に関連する、国際的な科学、産業、政策・行政に関わるステークホルダーによる組織であり、2015 年に設立された。FSLCI が主催する第 1 回国際会議が 2018 年 8 月に開催され¹⁸⁾ など、多分野の融合による資源・生産・消費管理の活動が活発化してきている。

国連環境計画 (UNEP) においても、LCA データベース間の国際協調枠組み「GLAD (Global LCA Data Access)」の構築を進めている。製品等のライフサイクルでの環境負荷を定量化するにあたっては、算出の基礎となるインベントリデータ収集に加え、二次データベースが必要となる。多様に存在するデータベース間の相互利用を実現するために、GLAD では、UNEP のもと、欧州委員会、米国、中国、日本など世界の 13 の国・地域の政府機関が運営に参加し、主要なデータベース開発者や専門家が協力して検討を進めている¹⁹⁾。

(5) 科学技術的課題

● 社会（地域）システムの変革を伴う技術システムの設計・評価プロジェクト

資源・生産・消費管理として、特定の技術システムに限った設計や評価といった研究が行われてきた。しかし、例えば木質バイオマスからの化成品や燃料、エネルギーの生産を議論する場合、林業における技術システムや社会システムの変化が、ライフサイクル全体での性能に大きく影響しうる。この変化は地域性があり、日本全国の平均的な分析結果だけでは、個別具体的な技術の導入を議論することができない。

こうした社会システムの変革を伴う技術システムとしては、国内ではエネルギーシステムが最たるものの一つといえる。例えば太陽光パネルによる電力供給は、低炭素化効果があると言われているが、これは実際に発電が行われ、その電力が使用された場合に限っての話である。地域によっては系統連系が回答保留されたり、出力抑制が行われたりと、太

陽光パネルを設置するだけではその電力が有効に使われない場合が増えつつある。一方、リアルタイム市場やアンシラリーサービスといった電力システム側の変革が議論されている中、太陽光パネルが持ちうる価値が変化する可能性がある。デマンドレスポンスなど、従来とは異なる価値を社会システムの中で持ちうる技術もありえる。こうした技術システムの価値や使用形態は社会システムの変化によるところも多く、将来の技術システムを評価することが重要となる。

- 自然科学と人文社会科学との連携に基づく技術評価
エネルギー技術の導入が社会経済システムや人々の意識・行動に与える影響を明らかにするためには、自然科学的な観点のみならず、人文社会科学的な観点からも分析することが不可欠であり、Sociotechnical な分析が必要とされてきている²⁰⁾。

低炭素社会の達成に向け、再生可能エネルギーなどの技術導入・普及政策が、社会システムにもたらす影響について事前に分析することが非常に重要となる。この点は「15. エネルギーシステム評価分野」にも深く係わり、エネルギーモデルを用いた研究も重要であるが、当該領域におけるライフサイクル思考に基づく分析や評価もまた不可欠である。例えば、木質バイオマス発電やバイオエタノールの設備建設、燃料生産、運転保守、廃棄というライフサイクルにわたる雇用創出や地域活性化などに関する社会経済分析は、それらの技術の普及促進政策の立案において重要な知見を与える。

また、消費者の価値観、ライフスタイル、行動などの変革も低炭素社会の構築においては重要な位置を占める。例えば、消費側の変革に向けて、社会においてライフサイクル思考自体を普及させるためには如何なる方策が有効か、また、製品レベルの LCA 情報などを消費者へ如何に効果的に伝達するか、などは引き続き重要な研究課題である。

以上のように、社会経済システムや人々の意識・行動の観点から、エネルギー関連技術の導入の影響を明らかにすることは今後不可欠であり、当該分野においては、ライフサイクル思考に基づく学際的な研究の重要性がますます高まっていくと考えられる。

- 最先端技術の詳細度に合わせたシステム評価

上記項目と関連するが、実際の技術開発における選択肢と、資源・生産・消費管理における評価との間に、技術システム条件の粒度の違いが存在している。例えば、蓄電池の技術開発において議論されているエネルギー容量や、電池寿命、C-rate をはじめとする充放電性能などは、現在の蓄電池 LCA における技術シナリオとして必ずしも明確に検討されていない。また、蓄電池としては移動体搭載向けのものが多く議論されているが、本来は定置型蓄電池の技術開発がもたらす低炭素化効果と比較することで、蓄電池開発の優先順位を議論すべきである。こうした技術開発の粒度との差異を埋めていき、実験的な技術開発における指針として、資源・生産・消費管理におけるシステム評価結果が利活用できるようになることが、技術システムイノベーションのマネジメントにおいて重要となりうる。

- 国際的な産業連関を考慮した技術評価

再生可能資源の利用量を増加させるために、国際的な再生可能資源の輸出入が活発化しつつある。これは、再生可能性資源が大量に入手可能な国・地域と、エネルギー需要密度が高い国・地域が必ずしも一致していないために起きるものである。国内においても、固定価格買取制度で認証されたバイオマス発電所において、輸入バイオマスの利用が多数計画されている。木質バイオマスに限らず、パーム油やパーム椰子殻など、品目が増えてき

ており、計画通りに発電が開始されると輸入量も大きく増加しうる。このとき、国内では化石の代替としてバイオマスを用いることにより低炭素化効果を見込むことができるが、実際にバイオマスを輸出している国における実態として、国・地域の社会経済に引き起こされる影響や、リバウンド効果として発生しうる化石資源消費量の増大については、国際的な産業連関を考慮しながら技術の評価を実施すべきである。

（6）その他の課題

● 過去の研究の再評価

LCAをはじめとした評価手法により環境影響などが定量化された研究が蓄積してきているが、電力システムをはじめとしたエネルギーシステムや、生産におけるインベントリが、プロセスシステムの省エネ化などによって変化している。10年など、一定の期間を経過した過去の研究対象については、Updateのための研究を実施すべきである。しかし、科学研究においては、こうした過去の結果の再評価に関して、研究費等を獲得しやすい状況にはなっていない。常に更新しながら現状を把握すべき環境性能などの技術システムの側面については、何らかの仕組みで継続的な分析を可能とすることが必要といえる。

● その他

分野間連携や若手人材の育成という観点では、当該分野の研究者ネットワークをさらに拡大していくことが必要といえる。サプライチェーンについてはますます国際化も進んでいることから、国際プロジェクトの支援も必要といえる。新規な技術開発における評価を実施するためには、新規技術のプロジェクトに対して、資源・生産・消費管理の観点からのシステム評価を義務付けるプロジェクトをさらに増やしていくことも有効といえる。

（7）国際比較

資源・生産・消費管理においては、多くの研究が実際の技術システム・社会システムを対象としたものであり、応用研究といえる。そこで、基礎研究としては手法論やデータベースの開発に関して記載し、特定の技術システム・社会システムを対象としたものは全て応用研究として記載する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	インベントリデータベースとして IDEAv2 が公開された。国内のデータベースとしては最大のものであり、多くの LCA 研究で使用可能な状態となっている。また、日本版被害算定型影響評価手法 (LIME: Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modelling) が広く一般的に利用可能となっており、インベントリデータベースと合わせて国内の状況を反映させた評価が可能となっている (2018 年には、国内評価版の LIME2 を踏襲し、グローバル評価が可能な LIME3 も公開された)。工業団体等からの提供データを格納した JLCA-LCA データベースも存在しているが、データの更新は必ずしも頻繁ではない。
	応用研究・開発	○	→	LCA やマテリアルフロー分析、産業連関分析を用いた各種研究報告がなされているが、かねてより、他国と比べて、温室効果ガス排出に特化した評価が多いことが問題となっている。近年でも、LCA を実施するとしながらも温室効果ガスを算定するだけにとどまる研究が多く、総合的な環境影響が評価されていない事例がある。国のプロジェクトにおいても、エネルギー起源の温室効果ガスの排出量のみを分析対象として公募されているものがほとんどであり、他国と比較して、環境影響の総合評価と、持続可能性の評価に関し、認識の違いができてきている。
米国	基礎研究	○	→	応用研究に比べると基礎的な手法論の研究報告は多国と同等の論文数であった。Social Life Cycle Assessment についてはイタリアやドイツ、カナダなどに比べて論文数が少ない。
	応用研究・開発	◎	↗	かねてより研究開発が盛んであり、近年もそれを維持している。いずれのクラスタにおいても上位の論文数を発刊した国としてランクインしている。特に、近年、太陽電池やリチウムイオン電池に関する研究報告が多くなってきており、建造物に関する研究事例も、中国に次いで 2 番目に多くの研究報告を挙げている。食品関連でもイタリアに次いで多い。水処理やバイオ燃料、サプライチェーン、シェール・新資源、においては、世界トップの論文数となっている。
欧州	基礎研究	◎	↗	世界最大のライフサイクルインベントリデータベース ecoinvent のデータ更新を継続的に行っている。現在の最新版は 2018 年 8 月 23 日に公開された version 3.5 である。 ecoinvent や Social Life Cycle Assessment 手法の開発は、欧州全体で執り行われていることであり、研究開発が盛んである。 イギリス化学工学会が総説した Journal である Sustainable Production and Consumption では、応用研究だけでなく、システム最適化手法における目的関数に LCA の結果などを置き、生産システムの持続性を高める方法論の議論が展開されるようになっている。 ドイツでは Social Life Cycle Assessment に関する研究が多く報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	かねてより研究開発が盛んであり、近年もそれを維持している。いずれのクラスタにおいても、欧州各国は論文数で上位に位置しており、研究が活発に行われているといえる。特に、イタリア、スペイン、英国、ドイツ、フランス、オランダ、デンマーク、スイス、ノルウェーの順に論文が多い。特定の研究機関としては、デンマーク工科大学、ライデン大学、マンチェスター大学、スイス連邦工科大学、ミラノ大学、ミラノ工科大学からの発表数が多く存在している。 なお、2013 年からは、これまでの研究成果の蓄積を踏まえ、欧州委員会が環境フットプリントのパイロット事業を開始しており、域内外のステークホルダーに参加を求めながら、日用品、工業製品、食品、組織のフットプリント評価カテゴリールール開発を進めている。 再生可能エネルギー関連や、バイオ燃料、シェール・新資源関連の研究報告が増えている。マレーシアにおけるパーム産業に関する研究報告もなされている。 ベルリン工科大学などを中心に研究報告が増えている。太陽光等の再生可能エネルギー関連について論文数が増加している。 ミラノ大学、ミラノ工科大学をはじめとするイタリアからの研究発表が増加している。特に食品関連分野においては群を抜いて多くの論文が報告された。スペインからは特に水処理に関する研究報告や太陽光、風力に関する論文が報告されている。ecoinvent を有するスイスからの研究報告も多い。

中国	基礎研究	×	↘	中国国内のライフサイクルインベントリの多くはecoinventに格納されているが、一部のサプライチェーンにとどまっており、多くは明らかとなっていない。環境影響を定量化するためのライフサイクルインパクト評価手法についても、中国の状況に合わせた解析をできる係数は、完全には整備されておらず、手法論の開発水準は高くないといえる。
	応用研究・開発	◎	↗	清華大学からの研究報告が増加しており、多くのクラスタにおいてもトップレベルの論文数となっている。特に建造物や廃棄物利用に関する研究報告は世界でトップであり、報告件数が多い。ただし、サプライチェーンに関する研究報告は比較的少ない。
韓国	基礎研究	△	↘	特に目立った研究開発がなされておらず、報告論文数も少ない。
	応用研究・開発	△	↘	特に目立った研究開発がなされておらず、報告論文数も少ない。ただ、電子産業のサプライチェーンなど、韓国が関連するライフサイクルについての研究報告が他国からなされることがある。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

- 1) 東京大学イノベーション政策研究センター、東京工業大学梶川研究室「学術俯瞰システム」、
<http://academic-landscape.com>（2019年2月1日アクセス）。
- 2) SETAC Europe 2016,
http://nantes.setac.eu/nantes/home/?contentid=1009&nv=853&pr_id=1009（2019年2月1日アクセス）。
- 3) SETAC Europe 2017,
<https://brussels.setac.org/programme/scientific-programme/>（2019年2月1日アクセス）。
- 4) SETAC Europe 2018,
<https://rome.setac.org/programme/scientific-programme/>（2019年2月1日アクセス）。
- 5) ISIE/ISSST 2017 Joint Conference,
<https://is4ie.org/events/isie-conferences/1>（2019年2月1日アクセス）。
- 6) 第13回日本LCA学会研究発表会、
http://www.ilcaj.org/meeting/13th/files/program_final.pdf（2019年2月1日アクセス）。
- 7) S. Hellweg and L. Mila I Canals, “Emerging Approaches, Challenges and Opportunities in Life Cycle Assessment,” *Science* 344, no. 6188 (2014): 1109-1113.
- 8) UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, *Guidelines for social life cycle assessment of products*, 2009,
http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1164xpa-guidelines_slca.pdf（2019年2月1日アクセス）。
- 9) Morgan Bazilian *et al.*, “Considering the Energy, Water and Food Nexus: Towards an Integrated Modelling Approach,” *Energy Policy* 39, no. 12 (2011): 7896-7906.

- 10) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), “The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture,” 2014,
<http://www.fao.org/3/a-bl496e.pdf>（2019年2月1日アクセス）。
- 11) 例えば、International Conference on Process Systems Engineering, 2018 (PSE2018),
<https://pse2018.org/index.cfm>（2019年2月1日アクセス）。
- 12) European Commission, “Closing the loop: Commission adopts ambitious new Circular Economy Package to boost competitiveness, create jobs and generate sustainable growth,” 2015,
http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_en.htm（2019年2月1日アクセス）。
- 13) World Economic Forum and Ellen MacArthur Foundation, “Intelligent Assets: Unlocking the Circular Economy Potential,” 2016,
https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Intelligent_Assets_080216.pdf(2019年2月1日アクセス)。
- 14) “Special Issue: Exploring the Circular Economy,” *Journal of Industrial Ecology* 21 (3) (2017):471-795,
<https://onlinelibrary.wiley.com/toc/15309290/21/3>（2019年2月1日アクセス）。
- 15) European Commission, Single Market for Green Products, “The Environmental Footprint Pilots,”
http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/ef_pilots.htm（2019年2月1日アクセス）。
- 16) Journal of Industrial Ecology, Call for paper, “Life Cycle Assessment of Emerging Technologies: Methodological challenges and new opportunities for impact,” 2018,
<https://jie.yale.edu/life-cycle-assessment-emerging-technologies-methodological-challenges-and-new-opportunities-impact>（2019年2月1日アクセス）。
- 17) ACS Sustainable Chemistry & Engineering, “Systems Analysis, Design and Optimization for Sustainability,” 2018,
<https://pubs.acs.org/page/ascecg/vi/systems-analysis-optimization.html>（2019年2月1日アクセス）。
- 18) FSLCI: Forum for Sustainability through Life Cycle Innovation, 1st Life Cycle Innovation Conference (LCIC 2018), 2018,
<https://fslci.org/lcic2018/>（2019年2月1日アクセス）。
- 19) UNEP, Global LCA Data network (GLAD),
<https://www.lifecycleinitiative.org/resources-2/global-lca-data-network-glad/>（2019年2月1日アクセス）。
- 20) Frank W. Geels *et al.*, “Sociotechnical Transitions for Deep Decarbonization,” *Science* 357, no. 6357 (2017): 1242-1244.

2.25 リサイクルと循環利用

（1）研究開発領域の定義

リサイクル・資源利用効率化に関する科学、技術、研究開発を記述する。

資源利用の効率性や持続可能性をより一層進めるための処理技術、リサイクル技術等を扱う領域である。

ここでは、都市鉱山を含む様々な資源の物理的処理、化学的処理、生物学的処理の要素技術開発に加え、AI や IoT、センサ、ソーティング、データ基盤整備などの情報処理技術による分離や管理技術、資源の採掘から循環利用、最終形態までを考慮した製品設計やデザインやシステム構築などを対象とする。

（2）キーワード

資源効率、都市鉱山、分離・選別技術、ソーティング、解体、トレーサビリティ、資源循環、廃棄物処理、中間処理技術、量のリサイクル・質のリサイクル、プラスチックリサイクル、臭素系難燃剤、使用履歴管理、フィードストックリサイクル、焼却残渣、新規普及製品リサイクル技術（太陽電池パネル、リチウムイオン電池、CFRP 等）、AI・ロボット応用

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

持続可能な発展が人類社会共通のゴールとなっていて久しく、資源利用という側面からは、その利用効率の向上が叫ばれ続け、例えば SDGs の目標 12.2 では「2030 年までに天然資源の持続可能な管理および効率的な利用を達成する」が掲げられている。他方で、現在開発途上にある諸国にとって、その基盤を構築するための基礎素材、そして先進諸国にとっても先進材料の利用など、資源利用そのものを避けられない場面もある。よって、可能な限り利用効率を高めること、すなわち長期利用、循環的利用、歩留まりの向上などが必須になる。

天然資源の開発現場を見れば、広い意味での劣化（低品位化、開発現場の大深度化、環境影響の拡大など）が起きつつあり¹⁾、その利用のための費用は増加し続けている。これは、天然資源を代替するリサイクル材に許容される費用も上昇していることを意味し、その利用拡大のチャンスであり、また利用拡大が我々の資源利用の社会的費用を削減することにもつながる。また我が国の立場から見れば、国内で発生する循環資源は、天然資源に乏しい我が国にとって貴重な国産資源であり資源セキュリティの意味からその利用拡大は望ましい。その際、一つの側面だけで考えるのではなく、社会的にみて持続可能な資源循環技術が望まれていることに留意する必要がある。

プラスチックについて、2015 年に世界のプラスチック生産量は 3 億 t を超えたが²⁾、適正処理技術・リサイクル技術を持ち合わせていない国・地域も存在し、その対応は喫緊の課題となっている。世界規模の資源利用効率の向上、海洋汚染対策の観点などからも研究開発の進展が期待されている。

〔研究開発の動向〕

本領域の俯瞰では、循環的利用に関わる問題に中心をおくこととした。また、課題解決型であり工学的側面の強い領域であるため、基礎学理のような学術的な意義を追求するよりも、新しい技術を使いこなすことに主眼を置くこととした。関連分野全てを網羅的に扱うことは難しいため、素材産業、例えば金属精錬等の素材技術開発の一環として整理される技術の言及は極力避けることとした。

リサイクルは大きく2種類に分類できる。それは加工ロスからのリサイクルと、使用済製品からのリサイクルである。前者は発生源が明らかで、素材の組成等の情報も得やすく、動脈側のステークホルダーを中心に組み込まれてきた。一方、後者は、時として複雑な構造をもつ人工物から、利用可能な資源を回収する行為であることから、主として含有量の多い、そして比較的単一の（特に金属）素材からなる部材を中心にそのリサイクルが進められてきた。代表的な素材が鉄鋼材であり、アルミニウム素材である。これらに加え、銅などのいわゆる非鉄ベース金属のリサイクルは比較的進んでいる。

ところが、社会的要請として違う種類のリサイクルが求められるようになってきている。その一つの対象がレアメタルなど量の少ない物質であり、更にプラスチックである。レアメタル等については、回収対象の使用済製品の中での含有量が少ないこと、また資源回収の最後段に位置する素材精錬において、いわゆる非鉄ベース金属製錬の副産物として必ずしも回収されないものがあることなどから、分離・選別の段階である程度選択的に分ける必要がある。価値が高いと言っても貴金属ほどではないことから、経済的に成立させるためには新しい技術が必要になる。また、プラスチックについては昨今の海洋ごみ、マイクロプラスチック問題などから注目を集めているとともに、そもそも使用量の大きさに比してマテリアルリサイクルの規模の小さいことが常に懸念されており、現在利用されている主要な素材の中で言えば資源利用率の全体的向上に我々が取り組むべき最後の大きな対象素材であるといえる。

上記の背景から、ここ数年の技術的变化と現時点の状況として以下があげられる。

- 金属を念頭におけば、リサイクルには人工物中に存在する対象金属を純度の高い産物へ分離濃縮する技術が必要である。常温で、物理的もしくは物理化学的な特性を利用して固体のまま濃縮するいわゆる選別技術と、熱や薬剤、電気などを用いて溶液や溶体から回収する乾式製錬、湿式製錬、あるいは電解精錬技術の二つに大別できる。このうち前者の選別技術の進展は、ここ数年の注目の高まりから急速に進化をはじめている。
- 選別技術は正確には前段を担う単体分離技術があり、その上での選別が必要になる。選別技術の進展に伴い、単体分離技術自体が変わりつつある。基本的に破碎・粉砕であることに変わりはないが、圧縮力を用いた粉砕から、対象によるものの衝撃力を用い、異相境界面を選択的に破壊する「小さなエネルギーで過粉砕を避けつつ必要な単体分離を行う」タイプの破碎・粉砕への注目が高まっている。具体的にはドラム型衝撃式破碎機（パーツセパレータやクロスフローシュレッダ）などは、小型の電子機器類からの基板脱離や、更に基板からのパーツ類の脱離を目的に徐々に現場での利用が始まっている。また、水中で高電圧放電を発生、放電経路周辺の液体を急速に気化膨張させて衝撃波を発生させる電気パルス粉砕などが注目を浴びている。
- 選別に関してはセンサを用いるソーティング技術が急速に進化している。ただし10mm以上と比較的粗粒でかつ単体分離の進んだものが対象になることから、単体分離技術との

組み合わせが必要である。近赤外線、X線、レーザーなどの利用が進んでいる。例えばアルミ合金類の相互分離は難しいとされてきたが、我が国で世界初のレーザー誘起ブレークダウン分光法（Laser Induced Breakdown Spectroscopy: LIBS）ソータが実用化された。この分析技術は、ほぼ全ての元素について ppm オーダーでの分析が可能であり、ミックスメタルや鉄合金の分類などへの適用にも期待がかかっている。

- センシングの結果の処理も必要であることから、情報処理技術の利用も急速に進化しつつある。電磁波利用の他に、画像処理による形状、大きさ、色など様々な特性のデータを用いることが出来る。これらの利用が進んでいる背景として、情報処理技術が進展していることも大きい。
- 単体分離・選別は循環資源に限ったものではなく、天然資源由来の鉱石についても技術の高度化が求められている。広い意味での鉱石の低品位化、これは欲しい成分が薄くなるだけではなく、忌避成分がより多く含まれるといったことも発生していることに起因する。こうしたことから固体分離に関する理論的な解明なども徐々に進みつつあり、これは循環資源の利用高度化に対しても好影響を与えることが期待される。鉱石については走査型電子顕微鏡画像と顕微鏡画像を組み合わせ、単体分離度を計測する自動鉱物単体分離システムの導入が進んでおり、また同様のアイデアに基づいた装置開発も進んでいる。
- 探査結果のビッグデータの分析や鉱山内での無人化へ向けたロボット技術の開発など資源関連分野全体に AI/IOT 技術の利用が急速に進んでおり、本分野も例外ではない。日本の ARENNA ソータ³⁾、フィンランド ZenRobotics⁴⁾ が先行していたが、現在では米国 BulkHandling Systems⁵⁾、米国 AMP Robotics⁶⁾ から同様の選別装置が上市されている。AI 画像認識ソータは旧来の単一分析に基づくソータに比べて、分類可能なクラス数と認識精度の点では格段に優れるが、複雑な計算アルゴリズムに基づくために処理速度は遅くなる傾向にある。現状において旧来の単一分析ソータを代替するものではなく、これまでソータが適用されてこなかった手選別工程に導入される事例が多い。こうしたことから AI 画像認識ソータでは、後段に多関節ロボットアームを配置してピックアップ選別を行う装置が主流となっている。最近では人手を上回るピックアップ速度（65 回/分）を有する装置も登場しており、米国の容器包装リサイクル現場で活用が始まっている。
- 機器に用いられるようなプラスチックのリサイクルはかなり大規模に検討されている。機器系プラスチックにおけるマテリアルリサイクルの課題は多いが、昨今の大きな課題は臭素系難燃剤である。残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約で規制対象とされていることから、廃プラスチックからこれらを含むものを選択的に除去する必要がある。家電リサイクルの一部では、透過 X 線ソータで分離するもの⁷⁾、比重分離を行うものなどが見られるが、大量に効率的に行える技術があるとは言い難い。また、自動車などにおいては、要求される品質を満たすためにタルクなどが添加されており、一口にポリプロピレンと言っても全く同じではない。結果として物理特性が異なることから物理選別を難しくしており、課題は多い。
- 日本では、材料リサイクルとフィードストックリサイクル、サーマルリサイクル（セメント原燃料化、ごみ発電、廃棄物固形燃料化など）の 3 つのプラスチックリサイクル手法が実用化されている。フィードストックリサイクルは廃プラスチックに化学的な組成変換を施した後にリサイクルする手法の総称である。日本では①原料・モノマー化、②高炉原料

化、③コークス炉化学原料化、④ガス化、⑤油化に分類されている。フィードストックリサイクル技術の研究開発としては、加溶媒分解による有機原料回収、熱分解油化、熱分解ガス化があげられる。

- ベースメタル中心のリサイクルから、含有量の大きくないレアメタル、貴金属、そして多種多様な合金類、また様々な添加剤、難燃剤などの問題の多いプラスチックなどがリサイクル対象になっていることから、その組成情報などをサプライチェーン全体で管理する、物質循環の高効率化のためのある種の情報管理が求められている。これは動脈側だけの問題ではなく、静脈産業側においても、再生材の付加価値向上のためにもトレーサビリティの確保は広く求められ、例えば静脈物流におけるブロックチェーン技術を求めた情報の制御なども検討されはじめている。⁸⁾
- 廃棄物焼却処理に関して、日本は世界最高の焼却率 80%に達しており、リサイクルされなかった可燃物もほぼ全量が焼却できている。近年では、埋立処分の約 9 割を焼却残渣が占めている。国土が狭く最終処分容量の新規確保が難しいこともあり、焼却残渣をセメント原料に加工する有効利用比率の向上が期待されている。しかし、焼却残渣にはセメントの忌避物質である塩素が高濃度に含有されているため、効率的な塩素除去技術が求められる。欧州でも日本と同じく、廃棄物の焼却処理が推進されており、焼却灰の土木資材としての有効利用が行われている。国土が広大な米国では埋立処分が多勢を占めるものの、テネシー州、ペンシルバニア州などでは焼却灰を盛土材、埋戻し材として利用している。焼却灰の循環資源化において求められる技術開発は、焼却灰中の未燃物の除去、篩選別による粒度調整、鉄・アルミニウム等の高効率の有価金属回収である。排出直後の焼却灰は活性が高く性状が不安定であり、また、重金属、無機塩類が溶出しやすいことからエージングによる前処理技術開発も課題となっている。
- 金属の精錬において、特に鉱山現場において湿式精錬が拡大しつつある。それは低品位化が進み、物理的な選鉱から乾式製錬という流れが馴染みにくく、また物流費の問題等から鉱山現場で製錬まで行う方が合理的だという背景もある。湿式精錬の一部で微生物を利用して金属を浸出させるいわゆるバイオリーチングの検討が進みつつあるが、これについて例えば電子機器類の基板からの貴金属回収への応用が進みつつあり、あわせてそのほかのレアメタル回収を念頭に置いた技術開発も動きつつある。⁹⁾

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- 欧州委員会による循環経済（Circular Economy：CE）パッケージ採択とその展開

我が国の循環型社会という発想は、より効率的な資源利用を通し、天然資源消費を削減、また環境負荷を低減しようというものだが、欧州の CE はこれを通し、環境だけではなく経済にも好影響を与えることを明示的に目標においた経済政策として整理されている。

- プラスチックリサイクルの気運の高まり

2018 年 6 月の G7 シャルルボワ・サミットにおいて海洋プラスチック憲章が発表されたが、我が国は署名しなかったこともあり、大きな話題になった。ただし、我が国が海洋プラスチックを始めとする諸問題を軽視しているわけではなく、2018 年 12 月現在、環境省がプラスチック資源循環戦略の案を作成しパブリックコメントを実施している。¹⁰⁾ 我

が国では G7 サミット以前から、自動車リサイクル法において再生プラスチック利用の促進が議論され、各ステークホルダーが実証をはじめている。いずれにせよ、これまで採算の問題などから進まなかった容器包装以外のプラスチックリサイクルが大きく進む社会的機運が醸成されたといえる。

- レアメタルブームの沈静化

レアメタルブームと呼ぶべき状況が落ち着いたが、多くのリサイクル技術研究が行われたことは本領域にとって望ましいことであり、より選択的な単体分離技術などは、レアメタル回収などが契機になって進んだといっている。現在はここで行われた研究の中で取捨選択を行い、社会実装の段階へ進むべき状況にある。

- エネルギー関連技術に対するリサイクルの必要性

太陽光パネルのリサイクルに対する懸念が広がっている。年間最大で 80 万トン余りのパネルが発生するといった予測もある。これが全量最終処分されると、最終処分場の逼迫につながる一方、太陽光パネルの素材としての価値は極めて低いことから、効率的な適正処理技術が求められている。また、リチウムイオン電池など二次電池の適正処理技術への期待が高まっている。太陽光パネルの例と同じく有価性はそれほど高くないが、紛争地域であるコンゴが主たる供給国であり天然資源供給リスクが高いため、リサイクルへの期待も少なくない。現時点で決定版とよべる技術は存在していない。

- リユース判定技術への期待の高まり

上記のエネルギー関連技術については、製品自体が進化の途上にあることなどから、利用可能な製品が使用済として発生する可能性もある。よって、リユースへの期待も高い。その他の製品についても同じくではあるが、リユース、リマニファクチャリング（リマン）など、材料リサイクル以前にすべき循環利用を進める機運もたかまりつつある。そのために、製品がリユース可能かどうかを判定する技術などへの期待も高まっている。

- 使用履歴管理の必要性

リユース等については、使用履歴を含めた製品の情報管理が必要になる。例えば自動車用二次電池では走行履歴を把握することで、リユースの可能性の簡易推定が可能となる。こうしたデータを蓄積し、学習することでより正確に判定可能となる。上述の含有物質情報の把握や、静脈産業のトレーサビリティなど、サプライチェーン全体を通じた情報管理技術の導入が望まれる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 欧州の CE 政策の実施に向け、欧州委員会 Horizon 2020（多国間研究開発・イノベーション促進プログラム）の Resource Efficiency and Raw Materials 等からリサイクル関連分野に大きな研究資金が提供されている。この多国間プログラムには、我が国の研究者も参加しているプロジェクトが散見される。¹¹⁾ 廃製品別の技術開発や流通情報網の構築など、各プロジェクトを合わせると 100 億円以上になると推定される。また、開発中の他のデータベースと連携して、EU 内の動脈産業～静脈産業に至る希少金属量やフローの可視化を目指している。EU では、技術開発だけでなく、基準や政策決定に資する情報網構築に勢力が注がれているのが特徴である。

- 米国エネルギー省の資金を利用し、Critical Material Institute (CMI) とよばれるバー

チャルの研究組織が構築され、その中でリサイクルに関する研究も実施されている。CMIの中核をなすエイムズ研究所と我が国の NEDO は協力協定を締結、情報共有等を行っている。¹²⁾ 特にレアアース関連の製錬・材料プロセスを中心に 2013 年から 5 年で 150 億円規模の研究が実施され、2018 年 12 月現在も 30 以上のプロジェクトが継続している。また、2016 年 6 月から、リサイクルやリユースに関する 70 億円規模の資金提供プログラム Reducing EMbodied-energy And Decreasing Emissions (REMADE) が開始している。

- 我が国では本領域に関連する研究は、大型プロジェクト等はあまり実施されてきておらず、個別の研究プロジェクト等が支えてきた。例えば環境省・環境研究総合推進費や科研費などのプロジェクトの中に多くの成果が見られる。最近では、2017 年から JST 未来社会創造事業・探索加速型「持続可能な社会の実現」領域がこれに密接的な課題（重点テーマ：新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新）を採択しており、本分野における期待が高い。小型家電リサイクルでは、NEDO「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」（2017～2022）の大型プロジェクトが実施されている。¹³⁾ このプロジェクトは産業技術総合研究所の戦略的都市鉱山研究拠点（Strategic Urban mining REsearch base : SURE）及び SURE コンソーシアムが核となっており、2018 年 6 月には集中研究施設である分離技術開発センター（Center for Developing Separation Technology : CEDEST）が開設し、本格研究の発展が期待されている。

（5）科学技術的課題

個別の技術課題以外で検討すべき課題は以下の通りである。

- 単体分離に関する科学的な機構解明は、現時点で利用可能な様々なシミュレーション技術等を考えれば極めて低いレベルにあり、積極的に研究開発を推し進めるべきである。これまで、当該分野は現場担当者の経験によって様々な課題を解決してきたが、理論的解明の推進が必要である。我が国の社会構造的課題である少子・高齢化などに伴う労働人口不足、経験知の喪失といった問題にも関係し、早期に手を打つべき課題である。
 - 中小規模の現場が多く、そこにある経験知は構造化されていない課題がある。これを構造化しようとするような研究も若干は見られるが、より大規模に情報の集約を進め、これらを機械学習等によって半自動的にでも利用可能にすべきである。これは上記の理論的解明と同時並行的に行われるべき課題である。
 - サプライチェーン全体を通じた情報管理技術も課題である。ブロックチェーンなどの情報セキュリティ技術との組み合わせも含め、世界全体のスタンダードの取り合いが起こることが容易に想像できる。実際フランスから CE の ISO 化に関する提案がなされており、早めの対応と、国際動向の見極めが重要になる。
- 個別の技術課題のうち、特に重要なものは以下の通りである。
- 様々なセンサーソーティング技術について対象にかかわらず、センシング技術とそこから得られた情報を処理する技術の組み合わせであるが、それらのより積極的な技術開発が必要である。
 - レアメタル等はブームが沈静化したとはいえ、本領域の対象として引き続き重要である。
 - プラスチックや太陽光パネルのガラスに見られるように、有価性は必ずしも高くはないが大

量に使われる素材の利用法は重要な社会課題である。例えば太陽光パネルのガラスについて、粉砕せずに綺麗な一枚のガラスとしてガラス以外の部材と分離する技術の開発が一部で行われているが、剥離した後のガラスの用途が実は明らかではない。再生利用は需要があって初めて成立するものであり、再生利用のための技術と、その用途開発は車の両輪である。これは特に有価性の低い素材について顕著であり、逆に再生材を使った新しい製品開発などが必要である。

- プラスチックについて、喫緊の課題としては先述の通り臭素系難燃剤含有プラスチックの除去技術が上げられる。また二次電池の適正処理技術も、急速な自動車の電化などを考えれば比較的喫緊の課題である。炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic：CFRP）の自動車部品適用拡大に伴い、CFRP リサイクル技術開発も喫緊の課題である。
- 将来的には現在ある破碎・粉砕中心の単体分離技術ではなく、ロボットによる解体へ一気に進む可能性がある。アップルコンピュータの取り組みはよく知られているが、ロボット解体は手解体を代替する技術であり、すなわちパーツレベルのリユースなど、リサイクルよりも優先順位の高い循環的利用を促進する技術である。本領域におけるロボットの利用という意味では我が国ではあまり取り組まれていない。
- 焼却処理においては、エネルギー回収（waste to energy）に留まらず、廃棄物より土木資材（粒状骨材）、土木建築資材の3要素（セメント、鉄、ガラス）の一つであるセメント原料の生産のための焼却（waste to materials）へと転換を図ることが望まれる。そのための原料たる焼却対象廃棄物性状の改質、燃焼制御、焼却残渣排出時の改質技術の開発に取り組むことが求められる。

（6）その他の課題

- 本分野の研究者人口が少ない。これまでリサイクルを担ってきた静脈産業が比較的中小企業によって構成され、あまり産業からの資金投入がなされてこなかったこと、また現場対応型のある種極めて工学的な分野であることから例えばインパクトファクターの高いジャーナルが無いことなどもあり、若手研究者にとって必ずしも魅力的な分野とは言えないことなどが背景にある。
- 研究資金について、動脈側の産業がより積極的に関わることで改善する可能性があるが、欧州が Horizon2020 から大型の資金投入を行っていることを参照すれば、我が国でもより積極的な対応があっても良いと思われる。
- 他分野との連携が比較的弱い。分離・選別技術に関する分野と素材関連分野との連携は歴史的に見てもそれなりになされてはいるものの、機械系の分野や物理シミュレーションの分野などとの連携はまだまだ少ない。バイオ関連技術の利用なども起きつつあるが、まだ十分ではない。
- 欧州などで、大型のソーティングセンターを設置するという提案が見られる。これは、ビジネスとしてみれば規模の経済を働かせるための仕組みに過ぎないが、こうした大型の処理施設は、研究開発の場として利用する可能性がある。我が国の静脈産業が比較的中小規模だが、技術開発のための資金投入とあわせ、こうした実証の場を確保するための公的促進策等が求められる。

- 国内で生産される製品の多くは海外に輸出されるため、国内都市鉱山だけを開発したのでは、需要の一部しか賄うことができない。多くの日本製品の市場は世界であり、海外で発生した廃製品をどのようにハンドリングしてゆくかは、大きな課題である。各国における廃棄物処理の法律や文化、あるいはバーゼル条約による廃棄物移動の制約などを、どのように解決してゆくかの議論も重要となる。

(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	△	→	● 単体分離の基礎研究は世界的にあまり進んでいない。我が国でも現象の機構解明などについて多少のシミュレーションアプローチが見られつつあるが決して多くない。 ● 独自の鉱山向け粉砕・選別技術の開発など、国として高い技術蓄積をもつが、技術者の高齢化、研究者人口の減少などもあり、再興が急務の課題。 ● プラスチックのフィードストックリサイクルなどの基礎研究は継続的に行われている。しかし、製品として社会に投入されるプラスチックの多様化・高機能化の速度があまりにも速く、本分野の成果が表面化しにくい側面がある。 ● 焼却残渣の循環資源化に関する基礎研究も継続的に行われている。
	応用研究・開発	○	↗	● LIBS ソータの実用化や電気パルス破砕など技術の社会実装は進みつつあるが、諸外国と比して圧倒的に進んでいる状況ではない。システムの側面は欧州に圧倒的に遅れている。他方、乾式製錬等の分野は多くの現場を持つこともあり決して弱くはないことから、分離・選別技術の開発という意味では若干の優位性がある。国際誌における論文数等でいえば非常に多いというわけではないが、本領域については和文誌に重要な論文が見られることもあり、評価は難しい。 ● 個別製品に対するレアメタルリサイクル技術は世界トップクラス。ただし、欧州開発装置をベースにしている技術や輸入品の導入が多く、オリジナル装置の開発は限定的。中小工場が多いため、装置単位での導入が主体で、大規模・集約的な選別システムや、プラントエンジニアリングに関しては未成熟。装置メーカーから見ると保守的な市場で、手選別代替 AI などの新規技術導入に慎重な工場が多く、応用研究が進みにくい風土となっている。 ● プラスチックリサイクルに関しては、高機能選別機・破砕機の導入が進んでいる。日本のリサイクル産業は欧米に比べて中小規模の企業が多数スケールメリットが得にくい構造であったが、その見直しの展望も出てきた¹⁴⁾。 ● 多くのセメント企業が焼却灰の洗浄技術、塩素パイパスの開発を行っている。環境プラントメーカーにおいても、焼却残渣から高効率の塩素除去技術を開発している。
米国	基礎研究	△	→	● 資源循環分野に強い国ではなく、それは基礎研究、応用研究ともにいえる。特に基礎研究について顕著に改善する動きがあまり見られない。 ● 鉱山向け粉砕・選別技術のポテンシャルは極めて高い。ただし、都市鉱山向け技術開発の研究者人口は少なく、CMI でも粉砕・選別技術の開発はあまり盛んには行われていない。 ● 都市廃棄物（Municipal Solid Waste : MSW、日本の一般廃棄物に相当）においてプラスチックの材料リサイクル率は10%に届かない低水準である。ただし、プラスチックリサイクルに関する基礎研究そのものの蓄積はある。
	応用研究・開発	△	↗	● CMI など実際の応用研究・開発が広がり始めている様子である。実用化する可能性があるとするならば動脈側の産業によるロボット解体など一歩先の技術開発・利用であり、アップルコンピューターの解体ロボット Liam, Daisy などがよく知られている。 ● 大規模集約的な中間処理が主体で「量のリサイクル」を実施している。光学選別に高い技術力を有する装置メーカーが少数存在するとともに、AI 大国にふさわしく、AI 選別装置メーカーが立ち上がり、市場導入が盛んになっている。

欧州	基礎研究	○	↑	●単体分離の基礎研究は世界的にあまり進んでいない。欧州も例外ではない。 ●鉱山向け粉砕・選別技術のポテンシャルは極めて高い。ドイツ、スウェーデン等を中心に研究開発も進められている。中性子線やテラヘルツ波)を利用した選別技術の研究は他の追随を許さない。レアメタルリサイクルでは、日本が優位にあるが、都市鉱山向け粉砕・選別の研究レベルは世界トップクラス。 ●埋立処理政策に対する国のスタンスによりリサイクルの現状に大きな差異が存在する¹⁵⁾。プラスチックリサイクルに関してはドイツ、英国、イタリア、スペインにおいて基礎研究が盛んで、特にドイツ、イタリアでは2010年以降研究文献数の増加傾向が顕著にみられる。 ●都市ごみ焼却残渣の無害・安定化方法として、最低3か月間のエージング処理を施すなど、焼却残渣の有効利用に伴う環境影響および環境負荷低減のための基礎的な研究がなされている。また、金属、貴金属、非鉄金属を高純度で回収するための破碎、分級、選別、回収の各技術の基礎的研究が活発である。
	応用研究・開発	◎	↑	●基礎研究よりも応用が盛んであることは間違いないが、欧州は分離選別技術について一歩進んでいる。ソーティングセンターの設置など社会実装を進める中で研究も同時並行的に進んでいる。体系的なアプローチにも優れ、情報管理やリサイクルシステムの評価などの面においても明らかに我が国などと比べ進んでいる。学術側を見ても、後者の体系的な部分に関する論文数などは非常に多い。 ●大規模集約的な中間処理が主体だが「質のリサイクル」へ移行可能な技術蓄積を有している。特に複数の装置メーカーでLIBソータ開発が一気に進展するなど、個別選別技術では世界トップ水準を維持している。最新の機械学習を用いた選別技術の研究開発も進められているが、AI選別装置の製品化は意外に少ない。集合選別技術は他国と大差ないが、これらをシステム化するプラントエンジニアリングに優れており、選別システム単位での販売が盛んである。
中国	基礎研究	△	↑	●単体分離の基礎研究は世界的にあまり進んでいない。中国も例外ではない。 ●現状の技術水準は高くないが、集約的な研究開発が進められており、諸外国の技術の分析・導入が進められている。 ●2008年頃からプラスチックリサイクルに研究文献数が急増している。近年、自動車リサイクルに関連した基礎研究も見られる。
	応用研究・開発	○	↑	●社会実装すべき現場を多く持つこと、意思決定の速度の速さなどから急速に他国をキャッチアップしている。国際誌における関連する論文数なども急速に増えつつある。天然資源開発の現場を持つことによる優位性はある。 ●手作業による人海戦術的手法が主体だったが、近年、機械化が進められている。多くは先進国製の模倣品であることが多く、欧州の最新ソータをそのまま導入するケースが目立つ。今のところ自国での製品化は見られないが、ここ数年、関連特許の出願が急増しており、AI研究人口の多さからも今後の動向には注意が必要である。 ●「循環経済政策」に伴い産業区などで大規模なリサイクルインフラ整備が行われている一方で、国内からの循環資源としての品質の良い廃プラ確保が課題である。また現状としては選別効率も低く再生資源の品質も高くない。 ●焼却残渣は、道路路盤材、セメント原料、コンクリート二次製品への利用が活発である。
韓国	基礎研究	△	→	●単体分離の基礎研究は世界的にあまり進んでいない。韓国も例外ではない。 ●現状の技術水準は高くないが、日本との交流も深く、国立研究機関による集約的研究体制は日本よりも整備が進んでいる。 ●プラスチックリサイクルに関する基礎研究は低調である。 ●焼却残渣の有効利用動向は、法律上、リサイクルが制限されていることからリサイクル施設も少なく、あまり有効利用されていない。
	応用研究・開発	△	→	●状況は我が国とある意味近く、学術的な交流も多い。また社会システムの進展度合いも非常に近いことから社会実装される技術も近い。研究論文数でみれば多くも少なくもない。 ●諸外国の技術導入により、先進国と同水準の中間処理を実施。大学などでAIの応用研究も見られるが製品化には至っていないが、ここ数年、関連特許の出願数が急増している。 ●自動車リサイクル分野でバンパーリサイクル技術成果が見られるが、その他特筆すべき事項が見当たらない。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

- 1) 村上進亮「明日を支える資源（134）＜連載：持続可能な資源の利用①＞持続可能な資源の利用」『エネルギー・資源』34巻2号（2013）：107-111.
- 2) Plastics Europe, “Plastics – the Facts 2014/2015 An analysis of European plastics production, demand and waste data.”
- 3) 産業技術総合研究所「アリーナ（ARENNA）ソータによる廃携帯電話製品の選別」、<https://staff.aist.go.jp/s-koyanaka/ARENNA.pdf>（2019年2月1日アクセス）.
- 4) ZenRobotics,
<http://zenrobotics.com/ja/>（2019年2月1日アクセス）.
- 5) Bulk Handling Systems,
<https://www.bulkhandlingsystems.com/>（2019年2月1日アクセス）.
- 6) AMP Robotics,
<https://www.amprobotics.com/>（2019年2月1日アクセス）.
- 7) 井関康人、他「家電混合プラスチックの先進的リサイクル技術」『精密工学会学術講演会講演論文集』（2013）, F31,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2013S/0/2013S_407/_article/-char/ja/#article-overview-abstract-wrap（2018年8月22日アクセス）.
- 8) 「「ブロックチェーン」活用の意義・・・透明性・信頼性・追尾可能性の確保」『環境新聞』2018年1月31日.
- 9) Arda Işıldar *et al.*, “Electronic Waste as a Secondary Source of Critical Metals: Management and Recovery Technologies,” *Resources, Conservation and Recycling* 135 (2018): 296-312.
- 10) 環境省 中央環境審議会 循環型社会部会 プラスチック資源循環戦略小委員会、
<http://www.env.go.jp/council/03recycle/yoshi03-12.html>（2018年8月25日アクセス）.
- 11) European Commission, “Towards a circular economy,”
https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_en（2018年8月22日アクセス）
- 12) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「レアメタルの有効活用などで日米が協力 ―米国エイムズ研究所と協力協定を締結―」、
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100224.html（2018年8月22日アクセス）.
- 13) 大木達也、「戦略的都市鉱山」を支える物理選別技術の新たな自動化思想―リサイクル工場の省人化を目指して、環境管理、54(7), 28-35, 2018
- 14) 林孝昌「日本のリサイクルビジネスの将来展望」『廃棄物資源循環学会誌』26巻6号（2015）:

440-448.

- 15) Plastics Europe, “Plastics - the Facts 2015 An analysis of European plastics production, demand and waste data.”
- 16) 所千晴「資源循環における固体分離濃縮技術の概要」『材料の科学と工学』54 巻 2 号 (2017): 48-51.
- 17) 古屋仲茂樹「資源リサイクリングにおけるセンサー選別技術の最近の動向」『Journal of MMIJ』129 巻 10 号 (2013): 615-625.
- 18) Marc A. Hillmyer, “The Promise of Plastics from Plants,” *Science* 358, no. 6365 (2017): 868-870.
- 19) D. Larcher and J-M. Tarascon, “Towards Greener and More Sustainable Batteries for Electrical Energy Storage,” *Nature Chemistry* 7, no. 1 (2014): 19-29.

2.26 健康・都市生活

（1）研究開発領域の定義

健康、都市生活に関する科学、技術、研究開発を記述する。

気候変動による健康および都市生活への影響予測、評価、およびそれらに関する適応方策を扱う領域である。

ここでは、気候変動による都市気候の変化と住民の健康への影響（熱や感染症）の把握、その適応のための各種方策検討（都市構造の活用やグリーンインフラ等）などを対象とする。

（2）キーワード

健康、気候変動適応策、温暖化ダウンスケーリング、予測不確実性、熱関連超過死亡（熱波、熱中症）、自然災害（洪水、台風、干ばつなど）、防災、低栄養、下痢性疾患、動物媒介感染症（デング熱、マラリアなど）、Co-benefit（共便益）、都市ヒートアイランド現象、ライフスタイル転換、地方自治体、超高齢社会、SDGs

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

健康、都市生活への気候変動影響評価とは、ハザード（危険な事象）、曝露（影響を受ける可能性のある人的・物的損害の大きさ）、脆弱性の観点から気候変動による影響をリスク評価する手法である。影響予測はモデルを用いて行う。リスク評価は IPCC 第5次評価報告書の主要なリスクの特定の考え方から、基本的に「重大性」「緊急性」「確信度」の観点で行う。世界の平均気温は、最近100年間で0.73℃上昇している。今世紀末には1986～2005年平均と比較して最大で4.8℃上昇するという予測シナリオが提示されている。温暖化が不可避で、ますます深刻化する将来に向けては「緩和」努力に加え、温暖化を前提として「適応」していくことが欠かせない。気候変動「適応策」は、2015年に採択されたパリ協定の第7条においても、強化が明確に位置付けられている。地球温暖化の進行により、社会的・経済的な影響が顕著に表れ始めており、「適応策」の能力向上、気候変動の影響に対する強靱化と脆弱性の減少も求められる。「緩和策」は、一般的に、エネルギー使用の効率化やエネルギー転換などが中心である。一方、「適応策」は、あらゆる分野に関わり、その内容・優先順位は地域ごとに異なる。気候変動の将来予測、その地域レベルへのダウンスケール、その結果を踏まえた地域への影響予測、地域特有の脆弱性とリスク評価、優先順位の特定、対策技術、社会実装化など、多岐に渡る研究がある¹⁾。健康分野では、世界的に見ると、気候変動によって熱ストレスによる死者数、下痢性疾患、洪水による死者数の増加や、感染症を媒介する生物の生息可能域の拡大などを通じたマラリアやデング熱による死亡の増加がもたらされると予測されている²⁾。我が国のような先進国では、熱ストレスによる影響と洪水や台風などによる災害などの極端な気象による影響が特に重要である。世界の人口の半分以上が「都市」に居住している現在³⁾、ライフスタイルの転換は多くの場合、都市生活におけるものとして考える必要がある。適応は、クールビズを一例として、従来の慣行からの転換を促すものも含まれる。日本のような超高齢社会で特に、熱的快適性の議論にとどまらず、健康維持さらには生命維持のために不可欠となる。とりわけ、中緯度地域では豪雨の激甚化が起こる確信度は高いと予測されている。2018年夏の多くの地域で起こった洪水被害や長引く熱波など、日本でも気候変動の影響が既に現れてお

り、深刻化が懸念されている。日本ではこれまで、温暖化対策は緩和策が中心であり、適応策の認知はまだ低い。また、単体の技術開発は進んでいるが、システムとしての社会実装はあまり進んでいない。一方、自然災害に対処するための防災対策は、既存の適応策と位置付けられる。

本領域はSDGsのうち目標3「すべての人々の健康」、目標11「持続可能な都市」に直接的に関係し、他にも間接的に関連する目標が含まれる。

[研究開発の動向]

・温暖化ダウンスケーリング

気候変動が都市生活や住民の健康に及ぼす影響を予測・評価するためには、温暖化を適切に解析・予測できるシミュレーションモデルの開発が不可欠である。シミュレーションモデル開発では、文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト:温暖化予測「日本モデル」ミッション」（2002～2006年度）の成果がIPCC第4次評価報告書に、「21世紀気候変動予測革新プログラム」（2007～2011年度）の成果がIPCC第5次評価報告書に対して大きく貢献している。「気候変動リスク情報創生プログラム」（2012～2016年度）の成果もIPCC第6次評価報告書（2021～22年公表予定）に貢献することが期待されている。

全球気候モデルの空間解像度は通常100～数100km程度であり、そのままでは都市生活や住民の健康への影響予測・評価に用いられない。そのような空間解像度のギャップを埋めるために開発されてきたのが「温暖化ダウンスケーリング」と呼ばれる技術である。ダウンスケーリングは空間詳細化を意味する。全球気候モデルの出力結果をより高解像度のシミュレーションモデルを用いて空間詳細化を施す力学的ダウンスケーリングと、広域の気象場と局所の気象要素の経験的・統計的関係に基づいて空間詳細化を施す統計的ダウンスケーリングの2つの手法に大別される⁴⁾。「適応」を主眼とした文部科学省「気候変動適応研究推進プログラム」（2010～2014年度）と環境省「環境研究総合推進費S-8：温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」（2010～2014年度）の中で世界をリードする温暖化ダウンスケーリングモデルの先導的な開発研究が進められた。特に、「気候変動適応研究推進プログラム」で開発された温暖化ダウンスケーリングモデル^{5),6)}は、世界でも類を見ない空間詳細度であり、地球スケールから大陸・国スケール、地域スケール、都市スケール、街区・建物スケールに至る気候・微気候を段階的かつ連続的に解析・予測可能なモデルとなっている。このような研究成果によって初めて、地球規模の温暖化が都市生活や住民の健康に及ぼす影響を、局所的な都市ヒートアイランドの影響と合わせて定量的かつ詳細に予測・評価でき、適応の具体的な方策を検討できるようになった。温暖化ダウンスケーリングモデルは、既に、将来の都市暑熱環境下の健康被害の推定⁷⁾や、暑熱環境に適応する都市・街区計画の検討^{8),9)}などに応用され、都市計画などの政策決定に向けても数々の重要な知見を提供している。

・熱ストレス影響

2018年夏の日本では、最高気温35度を超える猛暑が続き、各地で40度を超えるなど観測史上最高の気温の記録を軒並み塗り替えた。この猛暑による熱中症の搬送者数は9月末までに9万5千人を超え、気象庁は「命が危険な暑さ」と表現し、「災害」として警戒を呼びかけた。将来、こうした高温が常態化する前に、この猛暑さで起こった事象を検証し、科学に基づく適応策を社会実装しなければならない。地方自治体でとられた熱中症対策は予防のための普及啓発、放送等での注意喚起や高齢者の訪問・声掛けといったソフト対策が主体で、

避難場所の確保や公共施設の空調設備の設置、緑地を増やす、風の道をつくるといったハード対策はあまりなされていない。今後は適応策のメニューの充実、社会実装のための合意形成等、新たな分野の研究が望まれる。

世界を見ると、熱ストレス影響のうち、死亡に関して既に大規模な国際共同研究体制が構築されている¹⁰⁾。多くの都市に関して同一の手法で解析され、しかも統計的なバラツキを制御可能になったことで、気候や社会経済的な要因の影響の評価が可能になった。また、将来予測もより正確に行えるようになってきている。都市生活分野との関連では、ヒートアイランド現象による熱ストレス影響に関して、量的に評価した論文が発表された¹¹⁾。この論文では、ホーチミン市を細分化して、それぞれの区分における気象要因を温暖化ダウンスケーリングで推定することで、ヒートアイランドによる熱関連超過死亡の増加を量的に評価している。今後、世界各都市で同様の評価を行うことで、ヒートアイランド現象を考慮した将来予測が可能になる。これまで地球温暖化の緩和策としてエアコンを極力我慢する風潮もみられたが、熱波も災害の一つであるという認識が広がり、エアコンの適切な使用が重要という考えの転換が進んでいる。これに関連して、東日本大震災の翌年に電力消費を抑制する必要に迫られ、東京電力管内で電力消費は減少したが、熱関連超過死亡は増加しなかったことが報告された¹²⁾。詳細な検討が待たれる。一方で、熱ストレスの影響は、死亡にとどまらない。救急搬送データなど、気温が高くなることによって起こる非死亡影響の評価もなされている。そのほか、睡眠障害などの研究も行われている。

- ・ Co-benefit（共便益）

緩和とコストを考慮する場合に重要な概念である Co-benefit に基づく研究が最近、加速している。緩和に必要な化石燃料の削減は、短寿命気候汚染物質（Short-Lived Climate Pollutants：SLCPs）の減少を意味する。SLCPs には、大気汚染で重要な粒子状物質の成分やオゾンが含まれている。緩和策をとれば、粒子状物質とオゾンの減少を通じて、健康影響の減少が期待されるが、これまでは気温の影響は気温の影響として評価し、大気汚染の評価に際しては、気温を共変量としてその影響を除いて大気汚染の影響を評価されてきていた。Co-benefit を定量的に評価するために、この二つの要因をモデル化するための研究が始められている。

- ・ 極端気象による多様な影響評価

重要な極端な気象による影響についても、国際的なデータベースなどの整備により、評価が可能となってきている。しかし、地球レベルを対象とした健康分野の評価研究はほぼ死亡と経済損失に限られる。2018年の国内の多地域における豪雨、洪水に際しても、単に死亡だけでなく、避難所における生活を強いられることの問題、家族や家などを失う精神的な問題なども非常に大きな問題だが、個別の災害についての報告にとどまっているのが現状であり深堀が必要である。

- ・ 人口集中部への持続可能な水資源・食料・エネルギー供給

海外では、都市や地域との具体的なプロジェクトとして適応策を実装し、その情報を発信共有するトレンドがある。特に途上国では健康分野で安全な水供給と感染症に重点が置かれている。また、都市における貧困層の住居は、自然災害などに脆弱である場合が多い。日本でもあまり認識されていないが、都市は水資源・食料・エネルギーの一大消費地であり、その需要は周辺の地域が支えている場合が多い。今後も都市への人口集中が進む地域での、気候

変動にレジリエンスで持続可能な水資源・食料・エネルギー資源供給についてのプロジェクトが増加傾向にある。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

・気候変動の健康影響予測手法の精緻化

代表濃度経路シナリオ（Representative Concentration Pathways : RCPs）と共通社会経済経路（Shared Socioeconomic Pathways : SSPs）を組み合わせることで気候変動による健康影響予測を行う際、SSP ごとの人口を用いて熱関連超過死亡数や動物媒介感染症死亡数などの死因別死亡数を計算している。しかしながら、現時点で用いられている SSPs は、それぞれの SSP における社会経済的状況によって死因別死亡数が異なる、という公衆衛生学では常識となっている事実を考慮していない。米国 University of Washington の Dr. Kris Ebi らの研究グループは、上記の事実を考慮に入れた SSP ごとの死因別死亡率将来予測を開始した。これが完成すると、より妥当性の高い健康影響の将来予測が可能となる。

熱関連超過死亡の推定では、大きく二つの現象が明らかになりつつある。(1) リスク関数として、気温が高くて低くてもリスクが高く、その間にリスクが最低となる気温 (Minimum Mortality Temperature : MMT) が存在する。この MMT が、気候の変化に応じて変化することはわかっていたが、どの程度の早さで起こるのかは不明であった。最近、その早さに関する研究が進展している。(2) MMT に比較して、一定の高温になったときのリスクも、年代とともに一定ではないことが明らかになってきている。ただし、国ごとに状況が異なり、リスクが減少している国もあれば一定の国もある。エアコンの普及率や社会経済的状況などとの関連に関する研究が始まっている。これら二つの現象に関する理解が深まれば、熱関連死亡の将来予測がより妥当になると期待される。

・街区・建物スケール（空間解像度 1m 程度）の温暖化ダウンスケーリング

空間解像度が最小でも数 km 程度までの温暖化ダウンスケーリングがほとんどだが、近年、街区・建物スケール（空間解像度 1m 程度）に至る温暖化ダウンスケーリングのモデル開発^{5), 6)}が行われている。

・Co-benefit（共便益）

近距離の移動を車から自転車に変えることで緩和と健康増進の Co-benefit が可能であるとの報告は以前からあったが、ある地域での報告に限られていた。また、将来予測に用いるような枠組みができていなかった。最近では SLCPs に関する理解が深まり、緩和策に応じた SLCPs の将来予測が可能となってきたため、国、あるいは全球レベルでの Co-benefit の評価を目指すプロジェクトが可能となってきた。ただし、気温と大気汚染の影響を同時に評価するモデルはまだ開発途上で、大きな進展が期待されている。

・タイムライン¹³⁾

2012 年、ニューヨーク州がハリケーン・サンディ来襲時に実施した「タイムライン」という手法は注目されている。発生が予測される被害や過去に起きたことのある事象を時系列に並べ、被害の発生を抑えるために計画を作る。これをもとに住民避難を進めたニューヨーク州では被害を最小限にすることができた。国土交通省と防災関連学会が 2013 年に合同調査を行い報告書にまとめている。

- ・ハザードマップ

シミュレーションにより、豪雨時の特に都市部での浸水予測がより正確にできるようになったことから、日本では、多くの自治体がハザードマップを作成・公開するようになった。国土交通省では、洪水のほかに土砂災害、津波のハザードマップ情報も併せて提供している。先進的なところでは、地域住民と協力し、避難経路や避難が難しい高齢者などの介助の情報なども含めたマップを作成している。

- ・雨雲レーダー（高解像度降水ナウキャスト）

気象庁や各気象情報会社などが提供する雨雲レーダー等の画面が、スマートフォンなどの携帯端末で誰でも気軽に確認できるようになった。これは、防災・減災対策のツールとして有効である。

- ・VR や CG の活用

災害リスクコミュニケーションツールとして、VR や CG を用いた研究が行われている。具体的には、VR を利用して過去の災害の可視化する、または予測される状況を再現する、その疑似体験などであり、災害を我が事としてリアルにとらえるために有用である。

- ・グリーンインフラ

アメリカで発案された社会資本整備の手法で、自然環境が有する機能を社会における様々な課題解決に活用しようとする考え方。2015 年の国土形成計画の第 4 次社会資本整備重点計画に採り上げられた。

- ・都市農業¹⁴⁾

気候変動への適応という考え方のみならず、農業の担い手の高齢化、土地利用などの課題から、農産物の消費拠点である都市において、持続的な都市農業の実現が課題となっている。単なる地産地消だけでなく、教育機能やグリーンインフラとしての防災機能、新たな産業としての雇用創出、QOL の向上など多岐にわたるベネフィットも期待できる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・ヒートアイランド現象の影響評価、環境省 S-14 プロジェクト

ヒートアイランド現象による影響を、都市の区画ごとに死亡状況と気温の推定値それぞれを用意して熱関連死亡を評価する研究が最近始まった。現在はホーチミン市のみだが、他の都市でも同様の評価を行うプロジェクトが計画されており、今後数年で飛躍的に発展する可能性がある。これに関して、環境省 S-14 プロジェクトの 3 次元の建物情報を考慮に入れた都市気候のシミュレーションの発展が注目される。このシミュレーションは、1) 都市の区画ごとの正確な気温推定に大きく寄与することから、ヒートアイランド現象の影響評価に、2) 都市計画の違いによる将来の熱関連死亡数の相違の予測に用いられることから、将来の緩和・適応策に関わる政策決定への大きく貢献が期待される。

- ・国立環境研究所の SLCPs による将来影響予測

米国において Co-benefit を軸にした新たな研究が開始しており、日本の国立環境研究所でも、SLCPs が気温と大気汚染に与える影響を同時に評価するモデル開発が開始している。

- ・気候変動適応技術社会実装プログラム（Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology : SI-CAT）（2015 ～ 2019 年度）

文部科学省 SI-CAT は気候変動適応方策の確実な社会実装に重点を置いている。地方自治

体（モデル自治体を設定）のニーズを汲み取った気候変動適応方策の技術開発を実施し、地方自治体が策定する適応計画や企業における新ビジネスの創出に貢献することを目的としている。様々な研究の成果などを発信しており、地方自治体、地方大学や地域の研究機関との連携によって、地域のステークホルダーやアクターと共に行うこのような研究プロジェクトはさらに多く実施していくべきであろう。

- ・気候変動適応情報プラットフォーム（climate change Adaption information PLATform : A-PLAT）

国の法制度、国内外の先進事例、地方自治体の取組みなど、充実した情報を環境省が提供している。特に、環境研究総合推進費 S-8「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」の成果であるダウンスケーリング予測結果（格子間隔 1 km）は地理情報システム（Geographic Information System : GIS）で公表されており、地方自治体がリスク評価や将来シナリオに基づく計画を作成する際に有用である。今後、分野別の影響予測研究の充実が望まれる。

- ・「世界首長誓約（Global Covenant of Mayors）」^{15）、16）}

世界首長誓約は、世界の地方自治体の首長が、持続可能なエネルギーの推進、温室効果ガスの大幅削減、適応策の推進などを誓約し、アクションプランを策定してモニタリングしながら進める取組みである。京都議定書の枠組みでは、国によるトップダウンの取組みが主流であったが、パリ協定の枠組みからは、新たなステークホルダー、すなわち、地方自治体や NGO、企業等によるボトムアップのアプローチが主流になると考えられている。特にアメリカ合衆国では、大統領がパリ協定離脱を表明したが、地方自治体や企業によるネットワークにより取組みが推し進められている。日本では、欧州の取組みを参考に日本版「首長誓約」が 2015 年に始まり、2017 年からは欧州委員会のプログラム（International Urban Cooperation、日本では名古屋大学が受託）により、「世界首長誓約 / 日本」が立ち上がっている。

今後、脱炭素社会に転換していくためには、そのための新たなインフラまたはインフラの改修が必要であり、並行して、適応策も地域レベルで進めていかなければならない。これらは、新たなビジネスチャンスにもなり得る。今後、世界の大きな潮流になっていくと考えられる。

（5）科学技術的課題

- ・温暖化ダウンスケーリングと予測不確実性

将来の気候変動（温暖化）の影響に対する各種暑熱対策の導入効果の検討・評価に関しては、温暖化ダウンスケーリングを活用した都市暑熱環境予測が欠かせない。しかし、その将来予測においては、温室効果ガス排出シナリオ、土地利用・土地被覆シナリオ、エネルギー利用シナリオなど、様々な将来シナリオの導入が必要となる。不確定な将来に対して、どのような将来シナリオを導入するかにより、将来予測の結果は大なり小なりの差が生じる。これは「予測不確実性」と呼ばれ、将来予測において不可避である。温暖化ダウンスケーリングで用いる各空間スケールのシミュレーションモデルの選択も、大きな予測不確実性をもたらす要因の 1 つとなる。したがって、可能な限り多くの将来シナリオやシミュレーションモデルを導入した温暖化ダウンスケーリングを実施し、予測不確実性の幅を定量的に評価・把握しておくことが非常に重要となる。それを踏まえた上で、各種暑熱対策の導入効果の幅も評価・把握する必要がある。

- ・都市ヒートアイランド緩和方策

緑化、高反射率建材・塗装や保水性建材・舗装など、局所的な都市ヒートアイランドに対する緩和策の開発や、実証実験などを通じた緩和策の導入効果の検証については、建築・都市環境工学分野などで数多くの研究実績・知見がある。都市の気温上昇は地球温暖化と都市ヒートアイランドの2つの温暖化によって生じているが、今後、都市ヒートアイランド緩和方策として取り扱われてきた暑熱対策の役割がますます重要になる。地球温暖化の緩和策は日本一国の努力のみでは困難である。すなわち、日本の諸都市の場合、地球温暖化に伴う都市の気温上昇（あるいはその一部）は各種の都市ヒートアイランド緩和方策の導入によって相殺することを目指していくしかない。これまでに数多くの研究実績・知見を有する暑熱対策をさらに積極的に活用していくことが求められる。都市ヒートアイランド現象の影響評価に関して、高度なシミュレーションが可能になっているが、計算資源をかなり多く消費する課題がある。計算機の進歩、あるいは計算方法の進歩が待たれる。

- ・SSP ごとの死因別死亡率将来予測

健康影響共通の課題である。完成出来れば非常に有用であるが、どのように枠組みを考え、どのようにすすめるかも含め、議論が必要であるし、かなりの人的資源を投下する必要がある。

- ・各種疾患データ等の不足、不備

下痢性疾患、動物媒介感染症については、低中所得国で大きな問題になるが、これらの国における発生率の正確な情報を得ることが困難であるため、正確な将来予測が困難である。世界的な取り組みで、発生率の予測精度を改善することが必要である。熱関連超過死亡に関しては、(4) 注目動向に記載した通り MMT の気候に応じた変化を評価しなくてはならない。しかし死亡データの存在する期間が長期である国は少なく、その評価は簡単ではない。

極端な気象による影響に関しては、死亡数の評価など、全球で評価出来るようになってきているが、被害者の精神的な問題、避難所生活による影響などは研究が不足している。

- ・Co-benefit 評価

Co-benefit 評価のための、SLCPs の気温と大気汚染を同時に評価するモデルの開発が必要である。これまで単に一つのモデルに二つの変数を含めて対処してきており、その妥当性の評価は課題である。

- ・脆弱性評価

地域の持つ脆弱性をどのように同定し評価していくかが課題である。地域の既存の脆弱性によって現れ得るリスクが変わるからである。ドイツのプレーメンでは、将来予測はシナリオにより変動するため、現在の脆弱性評価に基づいた適応策の導入を進めている。

- ・影響分析とリスク評価

ダウンスケールにより地域の気候予測データが得られたとしても、それが、どの分野にどの程度の影響をもたらすかの影響分析とリスク評価は一部の分野でしか進められていない。これらは地域性が大きく、現象・対象ごとの解析が必要になる。研究者からの視点だけではなく、地域のステークホルダーによる「地域知」や「伝統知」も必要であり、今後の研究が期待される。

- ・適応策の優先順位

地域で適応策を進める場合、様々な分野における対策が求められてくる。その優先順位を決めていく際に、どのような手法をとればよいのか。地域のステークホルダーの参加をどの

ように得ていけば良いのかなどの課題がある。

- ・蓄積された研究資産の活用

暑熱環境下の健康影響評価に関しては、被験者実験などを通じてこれまでに数多くの研究実績・知見がある。これらの知見と、温暖化ダウンスケーリングモデルを活用した都市暑熱環境の将来予測を融合すれば、将来の暑熱環境下の健康影響評価（熱中症などの健康被害の推定など）が可能となる。ただしこの場合も、温暖化ダウンスケーリングの予測不確実性の幅に伴う健康影響評価の幅を定量的に把握しておくことが必要である。

（6）その他の課題

- ・国レベルの追加的気候変動適応策の推進、研究成果の社会実装

IPCC 第4次評価報告書・第2作業部会報告書で「最も厳しい緩和努力をもってしても、今後数十年間の気候変動の更なる影響を回避することができないため、適応は、特に至近の影響への対処において不可欠」と記載されたことをうけ、世界で気候変動に対する緩和・適応の両面作戦の重要性が認識されるようになった。しかし、「適応策」の社会における位置づけは、日本よりも海外、とりわけ自然災害の被害が多い途上国で高い。日本では2018年に気候変動適応法が成立したが、オランダが2007年、イギリスが2008年、アメリカやEUが2009年に適応に関する法や戦略を策定していた。最近の傾向として、健康・都市生活の分野では、気候変動の影響によるゲリラ豪雨や熱波、感染症の発症などで、住民に具体的な被害が生じたことが一つのきっかけとなり、研究や対策を進めざるを得ない状況になってきている。科学的には予見されていた事象であっても、社会的に認識されていない、法制度に反映されていないなどの乖離がある。実際に極端現象が起こってから社会的・経済的な被害により、一般に認識が進み、原因解明と防止対策のための研究の重要性が認められつつある。日本では歴史的にも自然災害を多く経験しており、防災対策としての「適応策」はすでに研究、社会実装の両面で進んでいる。しかしながら、気候変動の進行により、これまでの基準値を超える事象の発生や、災害の記録や対策が継承されていないことによる人的な被害も現れている。気候変動の新たなフェーズに対処すべく、「追加的適応策」のためには、学際的な研究が必要不可欠である。研究成果がまとめられ、社会へ発信されても、社会実装を行う部分で科学に基づく政策がうちだされないと結果として、長期的視点の弱い対症療法的な状態で終止することとなる。

- ・疾病発症率や健康情報などのデータ整備、アクセス性

低中所得国での感染症疾病発生率のデータが質的にも量的にも不十分である。この解決に近道はなく、国際開発における健康増進の優先度を上げ、低中所得国の公衆衛生インフラストラクチャーを構築することで低中所得国にも利益となり、その結果として良質のデータも収集可能となる。我が国を含む先進国においても、健康情報は一元管理されているわけではなく、実際の研究を行う場合には研究者が様々な規制をクリアして情報をリンクする必要がある。このために研究者の作業時間、研究費ともに大きな負担になっている。個人情報保護の観点から難しい点もあるが、一元的な健康情報の蓄積は、気候変動の影響にとどまらず、人間を対象にしたほとんどの医学研究にとって有益である。

- ・多分野連携、実務者やコミュニケーターまで含めた連携、国際、ステークホルダー連携

都市生活や住民の健康への影響評価を行う上で都市暑熱環境の予測する温暖化ダウンス

ケーリングのモデル開発・応用研究には、気候・気候学、地理学を専門とする理学系の研究者、建築・都市環境工学、土木工学を専門とする工学系の研究者の協働が必要である。膨大な計算量の対処には、計算科学を専門とする研究者と協働し、計算高速化・効率化の取り組みも必要である。都市生活や住民の健康に対する気候変動影響評価に関しては、さらに工学系の実務者とも協働して取り組む必要がある。その評価を踏まえた具体的な適応策の検討には、社会科学系や人文学系の研究者・実務者との協働も必要となる。適応方策の社会実装を行う際には、地方自治体との官学連携が不可欠であり、新しいビジネスモデルが創出可能な場合には、産との連携も必要である。学際的研究や関係ステークホルダーとのコミュニケーションを行うファシリテーターなどのスキルを持った人材が不足しており、真の分野連携が進まない。関係ステークホルダーとの連携が不足している。研究者の国際ネットワークへの積極的な参加が望まれる。境界領域であり、研究費の獲得が難しく、社会実装の分野の研究が遅れている。

（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	○	↑	● SI-CAT や温暖化ダウンスケーリングなどで世界的にも高水準の研究が行われている。
	応用研究・開発	○	↑	● 個別に先進的な研究がなされてきているが法体系の整備などで社会実装の遅れが見られている。地方自治体への社会実装などを加速するため SI-CAT、A-PLAT などのプロジェクトが進められ、強化が図られている。
米国	基礎研究	-	-	最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける。
	応用研究・開発	○	↑	● 米国環境保護庁（Environmental Protection Agency : EPA）、米国国立科学財団（National Science Foundation : NSF）、Wellcome Trust などにより適応策に関する研究支援が行われている。 ● タイムラインやグリーンインフラなどの手法を創出しており、一定のポテンシャルがある。
EU	基礎研究	◎	↑	● 本分野では基礎、応用ともに伝統的に世界をリードしており、最新の知見も世界に発信続けている。多くのプロジェクトが実施されている。 ● 英国ロンドン大学 London School of Hygiene and Tropical Medicine が中心となって Multi-City Multi-Country (MCC) 研究 ¹⁰⁾ を進めており、世界的に注目される。
	応用研究・開発	◎	↑	● 本分野では基礎、応用ともに伝統的に世界をリードしており、最新の知見も世界に発信続けている。Horizon 2020 に代表される EU 全体の枠組みに加え、英国、ドイツ、フランスといった国の単位においても健康、環境都市に関した応用研究が実施されており、地域単位の適応策に関する政策にも影響を与える研究がなされている。
中国	基礎研究	-	-	最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける。
	応用研究・開発	△	↑	● キャッチアップ型であり、強化が図られている様子であるが、深刻な大気汚染などの中国内に関心の高い分野と比べて未だ目立った応用研究の報告などは見えていない。
韓国	基礎研究	-	-	最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける。
	応用研究・開発	△	↑	● キャッチアップ型であり、強化が図られている様子だが、まだ報告数は少なく、世界的に高いインパクトの成果は見えていない。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註2）「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：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・引用文献

- 1) 三村信男 監修、太田俊二、武若聡、亀井雅敏 編『気候変動適応策のデザイン』（2015）.
- 2) S. Hales *et al.* ed., *Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s*, (Geneva: World Health Organization, 2014).
- 3) United Nations, “World Urbanization Prospects: The 2018 Revision,” 2018.
- 4) 稲津将、佐藤友徳「大は小を兼ねるのか：ダウンスケーリング」『天気』57巻4号（2010）: 195-199.
- 5) 文部科学省 気候変動適応研究推進プログラム「フィードバックパラメタリゼーションを用いた詳細なダウンスケールモデルの開発と都市暑熱環境・集中豪雨適応策への応用」（研究代表者：飯塚悟）、
<https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/iizuka.html>（2019年2月1日アクセス）.
- 6) 文部科学省 気候変動適応研究推進プログラム「都市・臨海・港湾域の統合グリーンイノベーション」（研究代表者：高橋桂子）、
<https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/takahashi.html>（2019年2月1日アクセス）.
- 7) 日下博幸 他「複数のCMIP3-GCMからの力学的ダウンスケール実験と問題比較型影響評価手法による健康影響評価：2070年代8月を対象とした東京・名古屋・大阪における熱中症および睡眠困難の将来予測」『日本建築学会環境系論文集』78巻693号（2013）: 873-881.
- 8) S. Iizuka, Y. Xuan and Y. Kondo, “Impacts of Disaster Mitigation/prevention Urban Structure Models on Future Urban Thermal Environment,” *Sustainable Cities and Society* 19 (2015): 414-420.
- 9) S. Iizuka, “Future environmental assessment and urban planning by downscaling simulations,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 181(2018): 69-78.
- 10) MCC Collaborative Research Network,
<http://mccstudy.lshtm.ac.uk/>（2018年8月20日アクセス）.
- 11) T. N. Dang *et al.*, “Green Space and Deaths Attributable to the Urban Heat Island Effect in Ho Chi Minh City,” *American Journal of Public Health* 108, no. S2 (2018): S137-S143.
- 12) Y. Kim *et al.*, “Heat-Related Mortality in Japan after the 2011 Fukushima Disaster: An Analysis of Potential Influence of Reduced Electricity Consumption,” *Environmental Health Perspectives* 125, no. 7 (2017): 077005.
- 13) 国土交通省 防災関連学会合同調査団（防災関連学会：土木学会，日本災害情報学会，日本自然災害学会，地域安全学会）「米国ハリケーン・サンディに関する現地調査報告書（第二版）—先進国の大都市を初めて襲ったニューヨーク都市圏大水害からの教訓—」（2013）

年 7 月)、

http://www.mlit.go.jp/river/kokusai/main/america/america_hurricane_201307.pdf (2019 年 2 月 1 日アクセス) .

- 14) 日本学術会議 農業委員会 農業生産環境工学分科会「報告 持続可能な都市農業の実現に向けて」(2017 年 7 月 19 日)、

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170719.pdf> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .

- 15) Covenant of Mayors for Climate & Energy,

<https://www.covenantofmayors.eu/en/> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .

- 16) Global Covenant of Mayors for Climate & Energy,

<https://www.globalcovenantofmayors.org/> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .