

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（物質表面に色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3 m）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、0.3 m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。

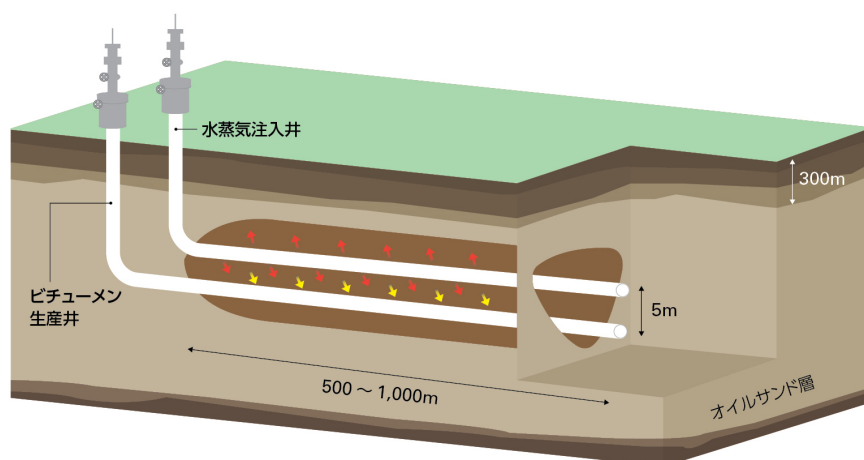


図2.1-1 カナダのSAGD法による重質油の生産概略図

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。

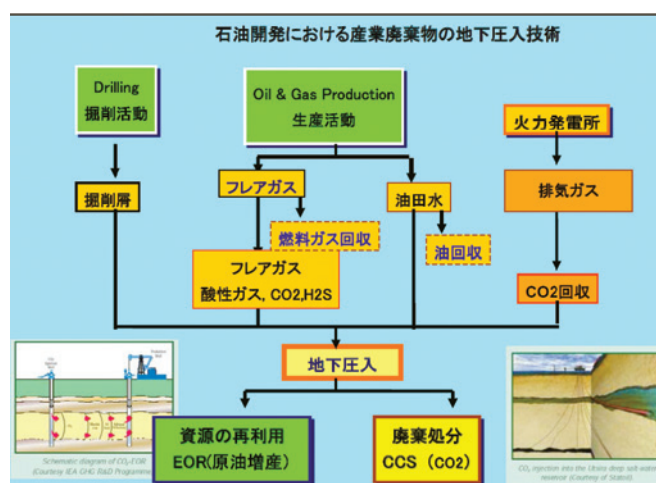


図2.1-2 石油開発の廃棄物資源のゼロエミッション関連図(日本オイルエンジニアリング作成)

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。この一連の技術を水圧破碎と言い、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開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必要がある。

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 削減に関する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が大きい。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合型 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 Yuhua 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、上海核工程研究设计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）。