３．研究開発領域

３.１　エネルギー資源開発技術

（１）研究開発領域の簡潔な説明

メタンハイドレートをはじめとする在来型・非在来型資源を対象として、掘削、輸送、精製、貯蔵、および利用などトータルシステムに関する研究開発領域である。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

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

一方で、原油の長期価格は、大部分はその採算コストに基づかなければならない。原油は、追加採掘コストの価値を持つべきである（すなわち、需要を満たす最も高い値段）。しかし、原油採掘プロジェクトの開始から、その原油を市場に流通させるまでには 7～8 年近くの長い時間がかかる。油価は市場で刻々と変わる。日々のベースで、「油価が今日は X ドル/バレルだから、X ドル/バレルより安い全ての油を生産できる」と、決められないことが資源開発の判断を難しくしている。

［動向（歴史）］

1973 年と 1979 年に発生した二度の石油危機は、我が国における石油自主開発の必要性をさらに増大させた。その対策の一つとして、石油公団が中心となって海外上流権益を取得し、石油開発プロジェクトを運営していく、いわゆるナショナル・プロジェクト方式が採られ、いくつかのプロジェクト会社が設立された。原油価格低落や為替変動の影響により、国策としての運営は難しい状況に追い込まれた。

石炭・石油・天然ガスといった化石燃料の資源量限界論は 200 年前から存在するが、採掘技術の進展で可採年数は維持・増加し続けている。2010 年以降、北米では中・軽質原油であるシェールオイルの経済合理的な生産が顕著となり（2011 年 120 万バレル/日、2012 年 200 万バレル/日、2013 年 350 万バレル/日）、採算コスト（40～50 ドル/バレル）で競合する重質油開発にとって逆風である。

石油と天然ガスの起源と生成イメージは下記の通りである。

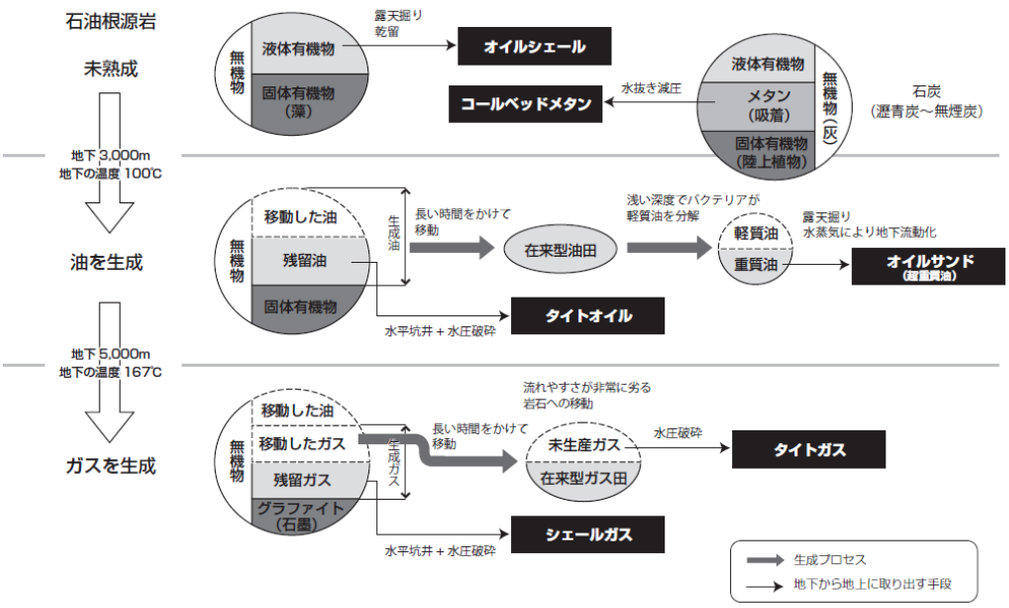


図 3-1

出所：奥井明彦（2012）ほかに基づき作成

採掘技術自体はメタンハイドレートを除けば、確立済みといえる。

1990 年代に入り、(財)エネルギー総合工学研究所などで非在来型天然ガスの一つとして、メタンハイドレートの研究が開始されている。近年の調査により、メタンハイドレートは、日本近海において、国内消費量換算で 100 年超の賦存量があるとの試算が示されている。資源開発としては、2001 年度より、官民学共同のメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（MH21）にて、主として賦存量調査と掘削技術開発に関する研究開発が進められてきているが、調査範囲は極めて限定されており、掘削方法も十分に確立されていない。

また、メタンハイドレートは、砂礫中に分散する孔隙充填型と海底表層近傍に高純度なものが堆積する表層型に分類できることが分かってきた。日本近海では、太平洋側に孔隙充填型が、日本海側に表層型が賦存することが確認されている。米国石油メジャーなどの海外資本は、純度が高く採掘が容易だと考えられる表層型に注目し、日本海の資源量調査のため、国内大学への資金提供を開始している。

賦存量調査には、従来高コストな電磁震源探査法や曳航式電磁探査法が主として用いられてきたが、表層型に限っては、より簡便かつ低コストの計量魚群探知機による音響探査法が有効で、すでに実用化がなされている。

掘削技術としては、減圧法が提案されている。減圧法は、孔隙充填型メタンハイドレートに有効だとされており、南海トラフ周辺海域において、実証試験が開始されている。他海域において賦存が確認されている表層型メタンハイドレートに対する有効な掘削技術については、海洋土木工学分野における全く新たな研究開発を進める必要がある。

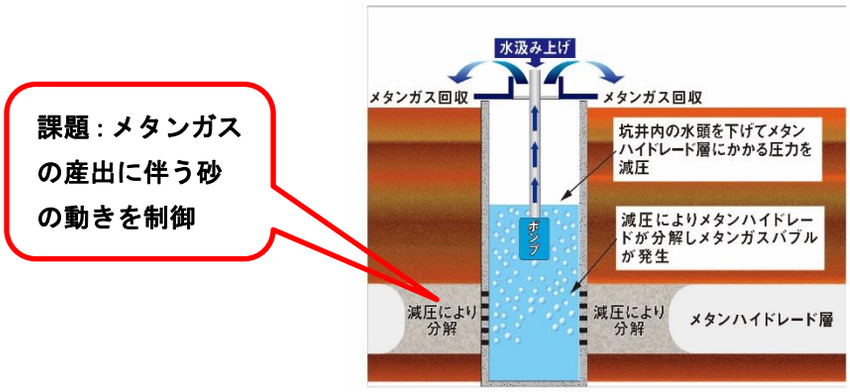


図 3-2　メタンハイドレートの採掘技術（減圧法）

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

（３）注目動向

[注目すべきプロジェクト]

メタンハイドレートの資源開発としては、2001 年度より、官民学共同のメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（MH21）にて、主として賦存量調査と掘削技術開発に関する研究開発が進められており、2013 年 1 月から、南海トラフ海域において産出実証試験が行われている。

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

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

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

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

メタンハイドレートの商業的開発には、メタンガスの産出に伴うメタンハイドレート賦存層内の砂の動きを、岩石力学の見地から如何に制御するかが課題となる。

［今後取組むべき研究テーマ］

- 日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化。
- 有望メタンハイドレート賦存海域のメタンガス賦存量の推定。
- 有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択、並びにその経済性の検討。
- 環境保全に配慮した開発システムの確立。

日本周辺海域における賦存量の正確な把握とともに、海底下に賦存するメタンハイドレートの経済的な生産技術の確立が急務となっている。また、生産が開始された際の国内輸送・貯蔵システムの整備や最終利用形態まで含めたライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）、さらにはメタンハイドレートサイトへの CO_2 貯留技術（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）など、メタンハイドレート利用技術について、トータルシステムとしての研究開発の推進が求められる。

（５）政策的課題

現状、石油やガスの採掘産業にインパクトを与えるとされるパラメーターの変動を見守りつつ、石油天然ガス資源を地下から取り出す技術の取捨選択が、採掘産業の発展にとって大事になる。現状の油価 50 ドル/バレル近辺が今後数年続くとすれば、採算コストが比較的高い重質油や大水深での石油開発は苦戦を強いられよう。

エネルギー資源はビジネス商品から、技術・商業・政治リスクがある戦略物資に変わったことを認識すれば、ビジネス参入に際しては、海洋石油開発や重質油・シェール資源採掘の経験に長けた欧米企業とパートナーシップを結ぶことの重要性は言うまでもない。

日本の海運会社、造船会社やエンジニアリング会社がもつ技術を、メタンハイドレート採掘事業に取り込み検証を重ねることで国際的に通用する実のあるものにできる。

（６）キーワード

改質/乾留、水平坑井、水圧破砕、水蒸気による地下流動化、減圧法、メタンハイドレート

（７）国際比較

各国の資源量の多寡、石油採掘の歴史に大きく依存する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	石油採掘の歴史はあるが、資源小国
	応用研究・開発	◎	→	石油採掘の歴史はあるが、資源小国（除くメタンハイドレート）
米国	基礎研究	◎	→	資源大国、石油採掘の歴史あり
	応用研究・開発	◎	→	資源大国、石油採掘の歴史あり
欧州	基礎研究	◎	→	石油採掘の歴史あり
	応用研究・開発	◎	→	石油採掘の歴史あり
中国	基礎研究	○	→	資源大国
	応用研究・開発	○	→	資源大国
韓国	基礎研究	△	→	資源小国
	応用研究・開発	△	→	資源小国

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

- JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 環境･エネルギー分野（2015 年）」
- 伊原賢「石油資源の行方」コロナ社（共著）2009 年 4 月
- 伊原賢「シェールガス革命とは何か」東洋経済新報社　2012 年 8 月
- 伊原賢「天然ガスシフトの時代」日刊工業新聞社（共著）2012 年 12 月

3.2　火力発電

（１）研究開発領域の簡潔な説明

火力発電は、石油・石炭・天然ガス(LNG)・廃棄物などの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 [1)]。今後の燃料として中心的な役割を果たすと考えられる石炭と天然ガスを対象として、ここでは、次の２つの分野の研究開発を対象とする。

① 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［ガスタービン－蒸気タービン］ダブル複合発電、石炭ガス利用の［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 天然ガス火力発電（シングルサイクルガスタービン発電、ダブル複合発電、トリプル複合発電など）

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

我が国は、COP21（第 21 回 気候変動枠組条約締約国会議）のパリ協定合意を受け、温室効果ガスの 2030 年度削減目標（2013 年度比 26.0%減）達成に向け着実に取り組むと意思表示した [2)]。再生可能エネルギー導入促進や安全性の確認された原子力発電の活用とあわせ、エネルギーの供給安定性、経済効率性からは、火力発電の高効率化を着実に推進し、バランスの取れた電源構成、即ちエネルギーベストミックスの実現が重要となる。2014 年時点では、東日本大震災による原子力発電停止に伴い、国内発電の 88%を火力発電が担っていたが、CO_2 排出量と燃料費を抑制する観点から、2016 年 6 月に策定されたエネルギーミックスでは、2030 年の火力発電の比率は 56%とし、その構成は、天然ガス(LNG)火力 27 %、石炭火力 26 %と、天然ガスと石炭の比率をほぼ半々としている。今後、各々の高効率化を進め、環境負荷を低減しつつ活用していくことが求められる。

［動向（歴史）］

石炭火力発電（ボイラー－蒸気タービンによる発電）の重要な機器である蒸気タービンの技術は 100 年以上にわたって営々と技術の改良がなされ、効率向上が実現されてきた。その最大の貢献はタービン入口蒸気の高圧化・高温化であった。第二次世界大戦前は日本の火力発電の効率は 20%を越えることはできなかった。戦後、米国から最新技術が導入され、一気に高効率化が進んだ。再生サイクル、再熱サイクルの採用と合わせて、高圧化・高温化が更に進み、1960 年代の亜臨界圧［Sub-C：Sub-Critical、蒸気圧 22.1MPa 未満、蒸気温度約 538℃、発電効率 約 36%(送電端、高位発熱量基準)、石炭燃焼時の CO_2 排出原単位 約 900g/kWh、以下同］、1980 年代の超臨界圧［SC：Super Critical、22.1MPa 以上、566℃、約 38%、約 850g/kWh］、そして 1998 年には温度 600℃のいわゆる、超々臨界圧［USC：Ultra Super Critical、約 25MPa、600～630℃、約 40%、約 800g/kWh］が営業運転を開始した。USC 技術は、実質的に我が国が材料開発及び実証試験を経て実用化したもので、鉄鋼・重工業メーカー・電力会社が緊密に協力し、かつ、的確な国の支援があり開発に成功したものである。しかし、この技術も現在の鉄系材料を使う限り 630℃程度が限界となっている。USC 発電の効率をさらに向上させるには、700℃級の蒸気温度が必要であり、この実現のた

めに先進超々臨界圧［A-USC：Advanced-Ultra Super Critical、約 35MPa、700℃、46～48%、約 700g/kWh］プロジェクトが実施されている。A-USC には新たな高温材料開発が必要であり、現在の鉄系材料に代わり、ニッケル合金材料が候補となっている。中国は、日本からの技術導入により USC プラントの国産化を計り、既にその製造能力は日本の 10 倍に達し、国内だけでなく、国際マーケットにも進出中で、二段再熱式 A-USC の研究開発も進め[3]、日本の強力なライバルとなりつつある。最近のバングラデシュの USC 商談でも、中国とインドが日本よりも遙かに安い価格で受注している。

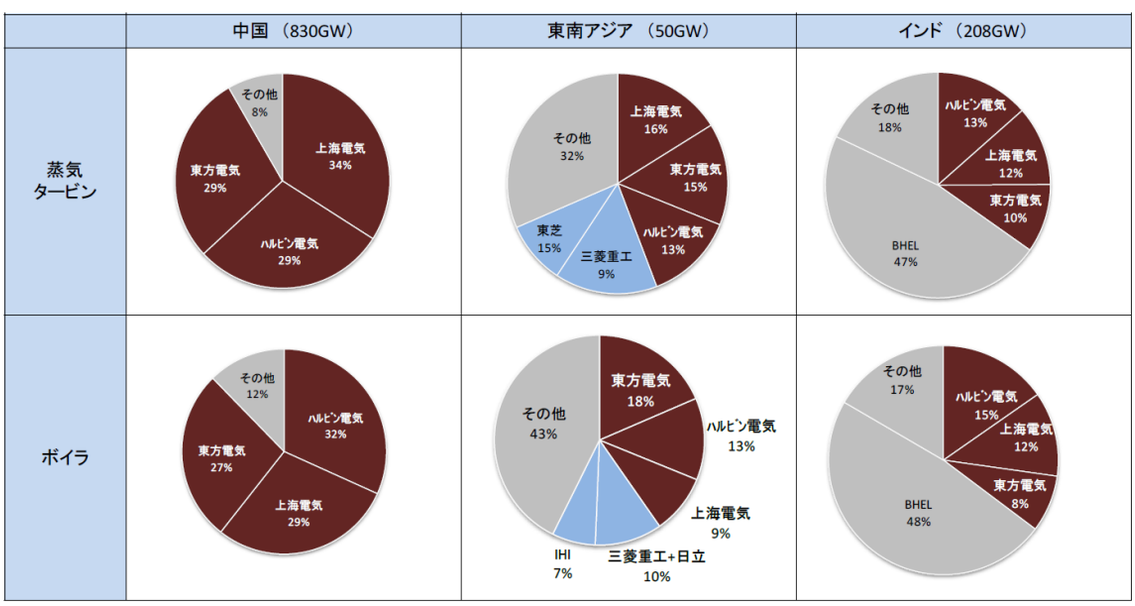
ダブル複合発電（GTCC：Gas Turbine Combined Cycle）は、使用燃料が天然ガスと石炭で現在の技術段階が異なる。燃料が天然ガスの場合、1980 年代より実用化され、主機であるガスタービンの技術がほぼ円熟期を迎えつつあり、ガスタービン入口ガス温度は既に 1600℃［発電効率 約 52%、天然ガス燃焼時 CO_2 排出原単位 約 340g/kWh、以下同］が商用機として実現されている。現在、1700℃［約 57%、約 310g/kWh］のガスタービンの実現が最大の開発目標であり、2020 年までの実用化が期待されている。米国は、エネルギー省（DOE）国家プロジェクトでガスタービンメーカーや大学に約 1000 億円（2003～2015 年）を投資して高効率化を推進してきた。欧州は、CAME-GT と呼ばれるイニシアチブの中で高効率ガスタービンの開発を推進し、現在は第 7 次欧州研究開発フレームワーク計画（FP7）の中で個別に要素技術改良の研究開発を実施している。

一方、燃料が石炭の場合、固体である石炭を粉砕後、ガス化し、ガス精製にて浄化後、ガスタービンで燃焼する石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated Gasified Combined Cycle）となる。石炭をガス化する際に空気を使う場合が空気吹き IGCC、酸素を使う場合が酸素吹き IGCC となる。酸素吹きの方が、窒素が存在しない分酸素投入量（酸素比）を減らせるためにガス化効率は高いが、一方で巨大な酸素製造設備が必要となることから、発電効率は空気吹きよりも低い傾向にある。空気吹き IGCC は日本のオリジナル発電方式であり、2007 年から 2013 年にかけて 25 万 kW 実証プラント試験を完了し、同年より商用運転が開始されている。本方式は、福島復興 IGCC プロジェクトとして展開され、500MW 機 2 基の計画が 2020 年代初頭(予定)の運転開始を目標に進められている[4),5)]。他方、酸素吹き IGCC を開発してきた欧米では、商用運転中 IGCC プラントが米国 3 件、スペイン 1 件、建設中あるいは計画中の IGCC＋CCS（Carbon Capture Storage）プラントが米国 4 件、英国 2 件となっているが、計画段階でプロジェクトが進捗していないものや安定運転ができていないものも見られる[6)]。中国は、USC 技術が日本からの技術導入であったため、IGCC は国産技術で開発すべきとの国の方針により、GreenGen IGCC プロジェクト（酸素吹き、265MW）を推進し、運転を 2013 年 6 月に開始した[7)]。今後、試験的応用を拡大し、国産化水準と経済性を高めるとされている。また韓国では 2016 年に韓国西部電力の Taean 305MW の IGCC 商用機が運転を開始する予定である[21)]。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 プラントが存在したが、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 年初頭から運転停止中（今後解体予定）である。

トリプル複合発電は、上記 GTCC や IGCC に最高温のトッピング機器を構成する高温型の固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）を組み込んだ方式で、発電効率が 5～15%（絶対値）向上することが期待されている。トリプル複合発電においては、大型 SOFC の実用化が鍵となる。SOFC そのものについては更なる性能向上、耐久性向上のために種々

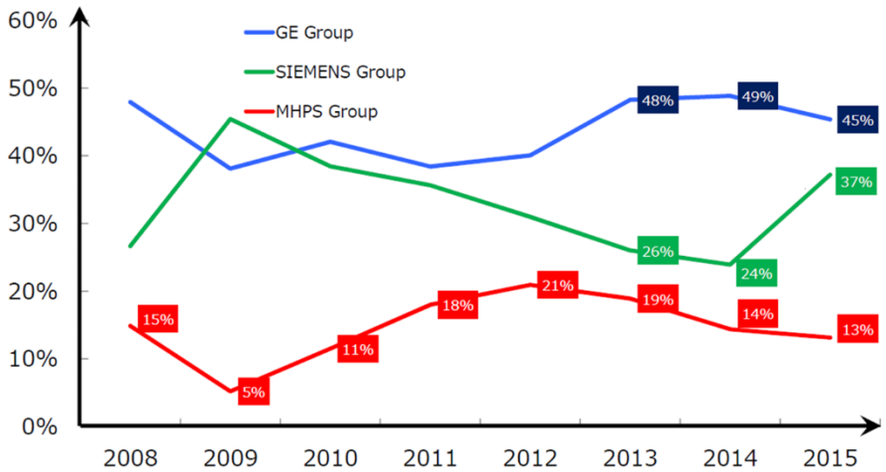
の基礎的な研究開発が全世界で進められているが、火力発電において SOFC がその真価を発揮するのは、1000℃に近い高温での作動を最大限に生かし、複合発電として実現する場合である。このため SOFC とマイクロガスタービンを組み合わせた 250kW 級の実証試験も進められている [8]。このような技術開発をさらに発展させ、より大型のトリプル複合発電の研究開発が進むことが期待されている。

火力発電機器市場動向をみると、特にアジア地域における蒸気タービン、ボイラー市場では中国発電システムメーカーのシェアが、2000 年代後半以降大きくなっている（図 3-3）。上海電気、東方電気、ハルビン電気の中国重電メーカー3 社は、中国国内の高シェアはもとより、東南アジアやインドにおいても、2001 年以降の累計で 4 割前後のシェアを占めるまでになっている。一方、ガスタービン世界市場シェアでは、図 3-4 に示されるように、GE、Siemens、MHPS(三菱日立パワーシステムズ株式会社)の 3 つのグループが市場を独占しているが、MHPS のシェアは漸減の傾向である。



（出所：McCoy Power Report よりみずほ銀行産業調査部作成）

図 3-3　アジア地域における蒸気タービン、ボイラー市場シェア（2001-2013 累計）[32]



（出典：McCoy Report）

図 3-4　ガスタービン世界市場シェアの推移

（３）注目動向

［新たな技術動向］ 9),22),25),26),27),28),29)

・ガスタービン燃料電池複合発電（GTFC：Gas Turbine Fuel cell Combined cycle）

2015 年 3 月より 250kW 級 SOFC-MGT ハイブリッド発電システムの実証試験が継続中であり、2017 年度中の商用化を目指している [12]。また、この成果を受けて、約 5 倍のスケールアップ機の 1,300kW 級システムを 2019 年度に商用化すべく計画を進めている。蒸気系を有するトリプル複合発電化については、SOFC スタックの大型化技術開発を進めるとともに、10 万 kW 級の実証事業を経て、2025 年度頃までに技術を確立し、発電効率 63%、CO_2 排出原単位 約 280g/kWh（40 万 kW 級相当）、量産後従来機並の発電単価を目指している。また、下記 IGFC の技術開発と並行して実施されている。

・石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC：Integrated Gasified Fuel Cell Combined Cycle）

酸素吹き IGCC 技術開発と同一プロジェクトにおいて一体的に開発を進めており、GTFC の技術開発とも相補完しながら開発を行ない、2018 年度から 2021 年度にかけて、生成ガス一部抽気による小型 IGFC 実証試験を予定している。GTFC の技術開発成果を活用して、2025 年度頃までに大型 IGFC の技術を確立、発電効率 55%、CO_2 排出原単位 約 590g/kWh、量産後従来機並の発電単価を実現する。

・高水分空気利用ガスタービン(A-HAT：Advanced -Humid Air Turbine） [10]

中小型基向けのシングルサイクルガスタービン発電技術として、2017 年度に要素実証事業を終了し、発電効率 51%、CO_2 排出原単位 約 350g/kWh、従来機並のイニシャルコストを実現し、将来的に GTFC の成果の活用も検討することとしている。また、負荷応答性に優れた特性を有するため、後述する再生可能エネルギーとの協調制御型火力発電システムとしての検討も進められている。

・二酸化炭素回収・貯留システムに適した発電技術

酸素燃焼発電技術（Oxy fuel Combustion）[11]、高効率で CO_2 をほぼ全量回収可能なクローズド IGCC 技術[12]、酸素キャリアによる石炭の酸化反応により CO_2 のみを排出させる CO_2 分離型化学燃焼（ケミカルルーピング燃焼）技術などの開発が行われている[13]。国内では東芝が、米国ではエネルギー省が中心となり、超臨界 CO_2 サイクル発電システムの開発を進めている。

・再生可能エネルギーとの協調制御型火力発電技術

太陽光・風力発電の大量導入時の負荷変動に対して、系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発が進められている。2030 年時点で、100MW 超の大容量機で 10 分以内、それ以下の中・小容量機では 5 分以内の起動時間を目指し、最適システム設計、各機器の過渡応答・繰り返し負荷に関する対応技術開発が進められている。

・水素・エネルギーキャリアによる火力発電技術

ガスタービン発電におけるアンモニア専焼技術や天然ガス／水素混焼技術、水素専焼技術、微粉炭火力発電におけるアンモニア混焼技術などに向けた技術開発と実証研究が進められている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］[23),24)]

700℃級の蒸気条件の採用をめざす A-USC プロジェクトは、世界各国で進められてきた。このうちヨーロッパでは再生可能エネルギーへの手厚い保護による風力発電などの設備急増により、電力会社の経営が急激に悪化、開発余力が無くなり、ほとんどのプロジェクトが中止または延期となっている。また米国でもオバマ政権の石炭火力建設禁止-天然ガスプラント推進の方針により研究開発は事実上ストップしている[14]。一方、中国は「国家 700℃A-USC 石炭火力発電技術イノベーション・アライアンス」を設立し、二段再熱式 A-USC の研究開発を進めている[3]。日本では、2017 年度以降、主に老朽火力を対象に、再熱器・再熱蒸気管より段階的な実用化（600℃級 USC と同様の導入過程）が図られる予定である。

天然ガス利用のダブル複合発電では、経済産業省、三菱重工業の 1700 ℃級ガスタービン研究開発が着目される。2020 年度頃までに 1700℃級の超高温 GTCC 技術（発電効率 57%(送電端効率、以下同)、CO_2 排出原単位 約 310g/kWh、量産後従来機並のイニシャルコスト）を実現すべく開発が進められている。また、2030 年度頃に向けて段階的に 1800℃級への高温化を図る計画である。米国では、シェールガス重視の方針から、天然ガス複合発電が次々に建設されるものと考えられる。また、世界市場でも GE 社による Alstom 社買収により、その世界市場占有率は 50%を越え、着実に米国製造業の復権に貢献するものと考えられる[15]。さらに、米国エネルギー省は、2016 年から 3 年半 3 億ドルの GTCC 開発プロジェクト（Phase2）を立ち上げた[26]。主眼は蒸気の代わりに超臨界 CO_2 を作動流体として用いるタービンシステムの開発であり、商用規模のサイクル実証試験や先進的燃焼技術開発が採択されている。国内では、東芝が米国ネットパワー社、シカゴブリッジアンドアイアン社およびエクセロン社と共同開発を進めている[27]。欧州では、FP7 において、IGCC+CCS プラントにおける水素リッチガスタービン開発（17.8M ユーロ）が 2009 年より行われている[30]。また、2014 年より Horizon2020 プロジェクト（72B ユーロ）がスタートし、CCS や CCU の関連技術の開発提案がなされているところである[30]。

一方、IGCC については、日本において商用化の準備が着実に進んでいる。空気吹き IGCC では、勿来の 250MW 実証機が実証機としての使命を終え、2014 年 4 月より商用機となり、常磐共同火力株式会社が現在順調に運転をすすめている。また、福島復興 IGCC プロジェクトとして、2020 年運転開始を目標に福島県に 500MW IGCC 商用機を 2 基建設するプロジェクト（東京電力、三菱重工業、常磐共同火力株式会社など）が進行中である。さらに、酸素吹き IGCC として、大崎クールジェンプロジェクト 170MW（中国電力、電源開発）が 2013 年 3 月着工され、2017 年の運転開始を目標に建設中である [16]。米国では 2013 年 6 月に 618MW の商用第 1 号機 Edwardsport プラントがインディアナ州で運転を開始したが、低い効率と大幅な予算超過による経済性の悪化が問題となっている。また、2014 年に運転開始予定であったミシシッピ州の Kemper County プラント 582MW も 1 年以上の工程遅延と大幅な予算超過が報告されたが [17]、2016 年 7 月には石炭ガス化に成功したと報じられた [20]。このような状況下で、実証機から商用機へと確実に進んでいる日本の IGCC 技術が一層注目されている。

トリプル複合発電技術の鍵となる SOFC に関しては、米国で Bloom Energy 社が、200kW 機を分散電源用として既に数十機販売しており、日本でもソフトバンクの強力な援助を受けて販売拡大を図っている [18]。また、GE 社は 2016 年に SOFC を販売すると公表している [19]。日本では 250kW の NEDO プロジェクトが進行しており、九州大学においてマイクロガスタービンとのハイブリッドシステムの実証が進んでいる [25]。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

- A-USC

A-USC の実用化には、伝熱管、主蒸気管、および再熱蒸気管などに適用可能な耐熱性能 700℃以上の Fe-Ni 基合金や Ni 基合金の開発、およびその他高温部品（650℃域）における低コスト先進フェライト系鋼の開発、またこれらの製造法、信頼性(高稼働率)と経済性を両立させるためのシステム設計が課題である。これには、10 万時間超の高温クリープ試験に加え、耐水蒸気酸化性や耐石炭灰高温腐食（硫化腐食）性に関する試験が不可欠である。また、熱応力・破壊力学シミュレーションや実機環境を模擬する熱流動シミュレーション技術開発との統合が重要である。製造技術の観点からは、高い溶接性や曲げ加工特性をもつことが必要で、さらに実用化に際しては、既存 USC プラントの再熱蒸気管などから段階的にリプレース導入していく方式が効率的であり、システム設計面からの技術支援が課題となる。

さらに、再生エネルギー導入拡大による系統調整に対応可能なレベルでの、負荷変化速度の向上・最低負荷の引き下げ・起動時間の短縮等も課題である。また、定期点検間隔延長に対応するために ICT、AI 技術を活用した遠隔監視技術、運転診断技術の開発も必要となってきている。

- GTCC

ダブル複合発電については、タービン入口温度（TIT）の高温化が高効率化の大きな課題である。TIT は既に 1600℃級が実用化されており、更なる効率向上には 1700℃級さらには 1800℃級を目指す必要がある。これには、耐熱合金を一方向凝固材から単結晶材に転換する

ための製造技術、高温部品の先進的冷却技術と耐壊食・腐食性の高い耐熱セラミックコーティング（TBC）技術、超希薄予混合・高排ガス再循環（EGR）条件における安定（燃焼振動抑制）・低 NOx 燃焼技術、高効率圧縮機・タービン技術等の研究開発が不可欠である。

さらに、今後再生可能エネルギー大量導入がなされることにより、GTCC の運用環境が一変する可能性が高い。国内にこれ以上の揚水発電サイトが見込めない現状では、100MW を超える大容量機についても、10 分程度の高速起動が可能となれば、太陽光・風力の一斉投入や離脱時の急速変化に対応可能な有力な予備力となり得る。これには、こうした過渡現象に対応可能な空力制御技術、燃焼制御（燃焼振動抑制）・低 NOx 燃焼技術、材料の耐熱衝撃・耐繰り返し応力技術や各部のクリアランス制御等、従来の高効率化技術開発とは異なる技術研究が必須である。また、予備力として運用する場合、上げ代・下げ代確保の観点から、50%負荷待機運転が長くなる。この負荷帯の高効率化も課題として挙げられる。

また、1700℃機実用化に対しては、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・検査技術の開発や、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も課題である。

なお、A-USC 技術開発の過程で開発された耐熱材料は、GTCC におけるボトミングサイクルにも適用可能であることを付記する。

- IGCC

石炭ガス化ガスを利用する IGCC 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、現状コストが割高であり普及が進んでいない。IGCC のさらなる効率向上には、現状の湿式ガス精製に代わる高温乾式ガス精製技術の開発、所内動力低減のための高効率空気分離装置の開発などが課題に挙げられる。

また、ボトミングサイクルからの抽気水蒸気を活用したガス化効率向上技術等、さらなる高効率化に向けたシステム最適化の検討の余地がある。

さらに、火力発電プラント入札において、IGCC 最大の弱点であるイニシャルコストの低減のための高圧容器・機器のコンパクト化や簡素化等が必要である。

IGCC は、GTCC 技術開発の過程で開発された TIT 高温化技術の適用が可能であるが、石炭ガス化ガス暴露に対するガスタービン高温部品の耐壊食・腐食性向上と、高温化に伴う先進的冷却技術や TBC 技術との両立は、GTCC よりも格段に高いハードルである。

高温乾式ガス精製採用時のフューエル NOx 生成を抑制する低 NOx 燃焼実現のため、IGCC のガスタービン燃焼器を現状の拡散燃焼器に代えて希薄予混合・多段燃焼器の実用化が必要であるが、石炭ガス化ガス含有水素による逆火問題を解決する必要がある。

なお、A-USC 技術開発の過程で開発された耐熱材料は、IGCC におけるボトミングサイクルにも適用可能であることを付記する。特に Oxy-fuel 型 IGCC では、作動流体組成によってはガスタービン出口温度がかなり高温になる場合があり、タービン段の高負荷化とともにボトミングサイクルの高効率化が有効な手法となり得る。

- GTFC、IGFC

トリプル複合発電では、大型 SOFC 技術や量産実用化技術の開発が重要である。大型 SOFC の実用化には、大型セルやスタックの安定した成型・製造技術、長時間運転の信頼性・耐久性、欠落部位補修時の保守性向上のためのスタック構造最適化技術等が課題となる。なおトリプル複合発電の実現の最大の鍵は SOFC セルの大量生産による大幅なコストダウンと、そ

れによる発電原価の低減であるので、この大量生産技術の完成も非常に重要である。GTFC が実用化されれば、これと IGCC 技術を組合せることにより、IGFC の実用化も有望になってくると考えられる。IGFC では、石炭ガスの不純物を極低濃度まで除去する技術開発が課題である。さらに、CCUS 適用時の効率低下を最小にする熱プロセスに関する技術開発も進めておくべきと考える。

- シミュレーションを活用した理論的・合理的統合手法

火力発電システムは、極めて大型の要素機器が高度に統合されたものであり、新たな技術の実用化には多額の予算と長いリードタイムが必要である。世界はもとより、国内の主要電力会社間でも激しい競争領域となってきている。低コストかつ短期間の技術開発が求められており、従来の段階的スケールアップによる経験的手法に対して、シミュレーションを活用した理論的・合理的統合手法が不可欠である。すなわち、実験・実証研究に注力するとともに、その工程を極力省力化するためのシミュレーション研究（ハードウェア開発とソフトウェア開発の両面）についても、同時並行で、かつ綿密な連携をもつように取り組む必要がある。例えば、文科省のポスト京コンピュータプロジェクトで、CCS 対応火力発電技術開発のための超並列計算ソフトウェアの開発を進める一方、NEDO ではベンチスケールプラントを用いた CCS 対応火力発電技術開発を行う。より効率的かつ効果的にプロジェクト成果を活用、発展させるためには、基礎研究から応用研究にいたる各過程のデータや成果の相互利用を促進するなど、各府省や参画機関の強力な連携が求められる。

［今後取組むべき研究テーマ］

今後 20 年程度で再生可能エネルギーの大量導入（2030 年時点でガス火力とほぼ同等の設備容量）により、我が国のエネルギー供給構造が変化し、従前の火力発電プラントの運用形態が大きく変わる可能性がある。先進的な火力発電技術開発としては、引き続き世界をリードする高効率化技術の開発に注力するとともに、高機能化技術の開発に取り組む必要がある。火力発電に求められるのは、供給力の急変に対処可能な調整予備力であり、メリットオーダーに耐えられる低コスト化（高効率化と燃料多様化）である。火力発電ラインナップの各々発電方式の特性（コストと運用性）を見極め、発電方式毎に最適な技術開発も進める必要がある。これには、国内地域毎の需給状況に応じた系統連系解析を同時に進め、火力発電に求められる効率性と運用性の必要十分条件を見極めながら技術開発を進めることが望ましい。当面は、GTCC が最も負荷応答性の点で利点があるため、分オーダー変動への対応に有利だが容量に限界のある揚水発電を補完する能力を期待する。一方、USC は当面は蓄電池とともにガバナフリー運転による瞬時周波数変動対応であるが、時間オーダー変動への対応力を増すための技術開発についても着実に進めていく必要がある。IGCC、IGFC については、ベースロード電源として期待できる。

1.　高温材料開発・高温化技術

- ボイラー伝熱管や蒸気タービンローターのような大型機器に適用可能な Fe-Ni 基合金や Ni 基合金、先進フェライト系鋼等の新規耐熱材料開発
- 10 万時間以上の長期高温クリープ実験や、腐食を伴う強度低下に対する信頼性確認試験、試験データを補完する為のシミュレーションを利用した材料評価技術の高度化・ガス分離・精製：高度な吸収・吸着操作を含む化学プロセス技術の検証

- 1700℃級超高温 GTCC 向けの超高耐熱単結晶合金材料開発
- GTCC 用ガスタービンにおいて、三次元複雑形状翼に対する 500 ミクロン以上（従来比 70%増）の溶射膜において従来並み耐壊食・腐食性を担保する耐熱セラミックコーティング（TBC）技術
- GTCC 用ガスタービンにおいて、冷却空気量を 10%以上低減しつつ従来並み翼温度を担保する先進的冷却技術（高精度翼表面乱流熱伝達シミュレーション技術の開発含む）
- GTCC 用ガスタービンにおいて、超希薄予混合・高排ガス再循環（EGR）条件における安定（燃焼振動抑制）・低 NOx（40ppm 以下）燃焼技術（高精度非定常燃焼／音響連成シミュレーション技術の開発含む）
- GTCC 用ガスタービンにおいて、メタン／水素混焼燃焼、水素専焼燃焼、メタン／アンモニア混焼燃焼、およびアンモニア専焼燃焼等の多様な燃料での超希薄予混合・高排ガス再循環（EGR）条件における安定（燃焼振動抑制）・低 NOx（40ppm 以下）燃焼技術（高精度非定常燃焼／音響連成シミュレーション技術の開発含む）
- IGCC 用ガスタービンにおける希薄予混合・低 NOx 燃焼技術（湿式ガス精製では 10ppm 以下、乾式ガス精製では 60ppm 以下）（高精度非定常燃焼／音響連成シミュレーション技術の開発含む）
- IGCC 用ガスタービンにおいて、GTCC 並み耐壊食・腐食性を担保する材料・耐熱コーティング技術
- IGCC 用ガスタービンにおいて、冷却空気量を 10%以上低減しつつ従来並み翼温度を担保する先進冷却技術

2. システム開発

- 石炭火力の高度監視技術：従来の計測点に加え、プラントの状態をより詳細に計測するセンサや計測システムの開発し、ICT、AI を活用
- IGCC における湿式ガス精製に代わる乾式ガス精製（脱硫黄、脱ハロゲン、脱アンモニア・シアン、および脱水銀・ヒ素等それぞれに対応する材料開発とシステム設計）の研究開発、高効率空気分離装置（膜分離技術等）の開発、コスト低減（コンパクト化、簡素化）技術開発、副産物である石炭スラグの高付加価値な有効利用技術構築
- IGCC におけるボトミングサイクル抽気水蒸気利用ガス化効率向上技術（1500℃級ガスタービン利用で送電端効率 48%(HHV)以上）
- 大型 SOFC 実用化のための大型セル・スタック成形・製造技術の確立による長時間信頼性・耐久性向上、スタック構造最適化技術による欠落部位補修時の保守性向上

3. 再生可能エネルギーとの協調制御型火力発電のための高機能化技術

- 急激な過渡現象に対応するガスタービン空力制御技術、燃焼制御（燃焼振動抑制）技術、低 NOx 燃焼技術、材料の耐熱衝撃・耐繰り返し応力技術、各部クリアランス制御技術
- USC における最低負荷 20%以下を実現する微粉炭バーナ技術、負荷変化時の主蒸気管温度偏差低減のためのシステム最適化、蒸気系抽気による瞬間的負荷変動対応技術
- GTCC や USC 等の各要素機器の過渡応答特性予測評価に用いる非定常熱流動・燃焼シミュレーション技術

- 火力発電所全体の過渡応答特性予測評価に用いるプラント動特性シミュレーション技術と、それに向けた各要素機器のモデル化技術
- 地域・広域間系統連系シミュレーション技術と、それに向けた火力発電所のモデル化技術
- 中・低負荷帯における高効率化技術（GTCC における吸気温度制御や水噴霧、圧縮機可変機構、GTCC や USC における着火・安定燃焼を維持するバーナ機構等の開発）

（５）政策的課題

火力発電システムは、最先端の科学と既存技術を組み合わせて実現する大型システムであるが、文科省や JST は最先端の要素技術開発に取り組み、システム化は経産省や産業界に任せるという役割分担を明確とする傾向が強かった。

「科学技術イノベーション総合戦略」（内閣府）では、基礎研究力の強化と産業化に向けて橋渡しする機能強化が唱えられており、エネルギー分野では「クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現」に向けて、生産から流通まで一貫したシステムとして府省連携で取り組むことが掲げられている。火力発電システムについても、上記の高温材料やシステムの科学技術的課題に対し、最先端の要素技術開発からシステム化まで、中長期的な技術開発については、市場ニーズに基づき内閣府、経産省、文科省、NEDO、JST が一体となって施策を行っていく必要がある。

また、従来の火力発電システムの技術開発では、高効率化技術開発がそのほぼ全てであった。しかしながら、今後 20 年程度での再生可能エネルギーの大量導入により、火力発電システムには調整予備力としての役割が強く求められる可能性が高いため、各府省の政策においても、このような高機能化技術開発も視野に入れる必要がある。さらに、火力発電システム運用最適化には、ICT、AI によるビックデータ解析システムが重要となるが、現状これらのデータは電力会社の経営データであり公開されていない。今後再生可能エネルギーの増加により、出力変動の大きな電源が系統に入ってくると、火力発電をネットワークとして有機的に活用する必要性が出てくるため、各発電所のデータを収集分析して最適な運転を行っていく必要がある。このためにプラットフォームとなるシステムの整備を国が支援していくことは日本の安定した電力供給のため望まれる。

キーテクノロジーである SOFC については、NEDO ではビルや店舗での定置用として天然ガス・都市ガスなどクリーンガスを使用するものが開発されている。石炭火力発電に使用するためには、石炭由来ガスによる劣化解明・制御のための研究開発や大規模発電条件下に置ける高耐久性・大容量化が必須であり、産学官連携の基礎基盤研究からの取り組みが望まれる。

（６）キーワード

A-USC、ニッケル合金、先進フェライト系鋼、GTCC、冷却技術、セラミックコーティング、燃焼振動抑制、低 NOx 燃焼、再生可能エネルギー、負荷運用性、IGCC、乾式ガス精製、空気分離装置、CCUS、GTFC、IGFC、SOFC

（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	◎	↗	● 耐熱高温材料の開発が着実に進められている(ALCAプロジェクト) ● A-USCへの適用候補となるFe-Ni基合金や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。 ● GTCCのための単結晶材開発、冷却技術開発、TBC技術開発がそれぞれ進められている。 ● GTCCの負荷運用性向上に向けた調査研究が実施された[28]。 ● IGCC乾式ガス精製の材料開発が進められている[12]。 ● IGCCボトミングサイクル抽気蒸気のガス化炉注入による効率向上法について、反応解析やシステム解析等の基礎研究が進められている[31]。 ● 酸素燃焼方式とIGCCを組み合わせた新たなOxy-fuel型IGCCシステムの基礎要素試験が進められている[12]。 ● 大学や研究機関、メーカー研究所等において、SOFC材料やシステム設計に関する基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	● IGCCについては着実に実用化研究が進められており、商用化への加速が期待される。 ● Fe-Ni基合金やNi基合金を使った主蒸気管や管寄せ部モックアップの耐久性試験が行われている。 ● 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[25]。 ● 空気吹きIGCC実証機プロジェクトが成功裡に完了し、2013年度より商用運転に移行している。 ● 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・CO_2回収一環実証試験が完了した。 ● 酸素燃焼方式とIGCCを組み合わせた新たなOxy-fuel型IGCCシステムのベンチスケール試験計画が進められている[12]。 ● 酸素吹きEAGLEプロジェクトに引き続き燃焼前CO_2回収IGCCやIGFCを視野に入れた大崎クールジェンプロジェクト実証試験が計画されている[24]。
米国	基礎研究	◎	→	● 米国の大学・研究機関における基礎研究は、エネルギー省のサポートにより、幅広い分野で高いレベルにある。 ● 最先端レーザーを使ったその場計測・観察技術や高度なシミュレーション技術の活用により、先進的な基礎研究を実施している。 ● エネルギー省は、2016年より、超臨界CO_2サイクル発電技術開発に対して3億ドルのプロジェクトを立ち上げ、CO_2リサイクル燃焼技術開発を積極的に推進している[26]。
	応用研究・開発	◎	→	● ガスタービンの高効率化の研究は着実に進められている。 ● エネルギー省のサポートにより、空気分離用酸素分離膜、粉体供給ポンプ、CO_2回収用CO_2分離膜等の様々な応用研究が進められている。 ● エネルギー省は、2016年より、超臨界CO_2サイクル発電技術開発に対して3億ドルのプロジェクトを立ち上げ、商用規模CO_2サイクル実証試験研究を積極的に推進している[26]。 ● GE社、CB&I社の保有するガス化技術は、これまでに化学合成用を中心に世界各国で数多くの実績がある。 ● 2013年より、Edwardsport IGCCが運転を開始した[17]。 ● KBR社のTRIG技術を用いたKemper IGCCが、2016年後半から運転開始される予定である[17]。
欧州	基礎研究	◎	→	● 大学・研究機関において幅広い基礎研究が行われている。再生可能エネルギーの変動に対応する予備力機能向上の研究が進められている。 ● EUのFP7において、水素リッチIGCC用ガスタービン開発プロジェクトが進められている（17.8Mユーロ）[30]。 ● 2014年からHorizon2020プログラム（72Bユーロ）がスタートし、CCSやCCU技術開発に関する提案がなされている[30]。 ● 石炭技術についてはドイツでは支援減少により停滞気味であるが、ポーランドなど他の欧州諸国では着実に研究が進められている。 ● CCS関連研究が盛んに進められてきたが、近年はプロジェクト中止になるものが多い。
	応用研究・開発	◎	→	● 高効率化のプロジェクトは見られないが、石炭火力の負荷変化率向上、運用性向上などについての応用研究が進められている。 ● CO_2削減のためのバイオマス混焼技術が進められている。 ● 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。

				● Shell社やSiemens社は、自社IGCCプラントの海外への事業展開を積極的に進めている。 ● 比較的高ランニングコストなGTCC等の最先端高効率火力発電システムは、メリットオーダーによりほとんど運用されない。
中国	基礎研究	○	→	● 国としての石炭重視の基本的方向は変わらず、基礎研究は着実に進められている。 ● 海外留学していた人材の積極的な登用などにより、基礎研究力は着実に進展しており、論文数が急増している。 ● 火力分野の国際会議の主催等、最新の研究動向把握と海外研究機関との交流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HCERI炉を用いたGreenGen IGCCが運転を開始し、既に同技術の海外展開を図っている。 ● OMB炉やTU炉等、様々な形式の国産ガス化炉が積極的に開発され、国内で実用化されている。
韓国	基礎研究	○	→	● 大学・研究機関での基礎研究は継続的に行われてきている。 ● 釜山大学でのPusan Clean Coal Center等、産官学連携による石炭燃焼・ガス化研究拠点整備が進められ、基礎的実験研究やシミュレーション技術開発が電力会社の技術者も交えながら進められている。
	応用研究・開発	○	→	● GTCCやIGCCについては、海外技術をライセンス生産する方式が採用されることが多く、純国産技術の開発が少ない。 ● Taean IGCCプロジェクトは、2016年より商用運転を予定している。また、2023年商用運転開始を目指すNamhae IGCCプロジェクトが昨年から始動している。これらはいずれも海外IGCC技術のライセンス生産方式である。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 金子祥三．日本機械学会誌, 2013, vol. 116, No.1133, p. 10-13.
2) 「パリ協定を踏まえた地球温暖化対策の取組方針について」（2015.12.22 、首相官邸 地球温暖化対策推進本部）.
3) 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」2014 年 12 月.
4) 環境省．福島復興大型石炭ガス化複合発電設備実証計画(広野)に係る計画段階環境配慮書に対する環境大臣意見．　http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=24758&hou_id=18364
5) 東京電力株式会社、三菱重工業株式会社、三菱商事株式会社、三菱電機株式会社、常磐共同火力株式会社．福島復興に向けた世界最新鋭の石炭火力発電所プロジェクトの推進に関する基本合意書の締結について．　http://www.mhi.co.jp/news/story/150819.html
6) 次世代火力発電協議会(第 2 回会合）参考資料 2. 2015 年 6 月.

7) 常磐共同火力株式会社、海外の IGCC プロジェクト.
http://www.joban-power.co.jp/igccdata/igcc/foreign_situation.html
8) NEDO 共同研究事業 （固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発）. 2013-2017.
9) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ 中間とりまとめ. 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会. 2015 年 7 月.
10) 高効率ガスタービン実用化技術開発(AHAT)に関する施策・事業の概要について. 日立製作所他.
11) 発電プラントのゼロエミッション化に向けて. 石炭火力における酸素燃焼技術を用いた CO_2 回収システム. IHI 技報 Vol.52 No.1. （2012 年）.
12) NEDO プレスリリース、次世代の CO_2 回収型石炭ガス化複合発電システム開発に着手、2015 年 8 月、http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100421.html
13) NEDO プレスリリース、CO_2 分離型化学燃焼石炭利用技術開発に着手. 2015 年 10 月.
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100464.html
14) Executive Office of the President. The President's Climate Action Plan, June 2013.
https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/image/president27sclimateactionplan.pdf
15) 日本経済新聞. 2014 年 6 月 23 日. 朝刊. 提携先 GE に決定.
16) 大崎クールジェン株式会社. 環境影響評価準備書のあらまし.
http://www.osaki-coolgen.jp/release/aramashi-pdf/aramashi.pdf
17) Thomas W. Overton. Does IGCC Have a Future? POWER, July 2014, p. 54-55.
18) Bloomenergy. http://www.bloomenergy.com/customer-fuel-cell/. （参照 2014-08-10）.
19) 日本経済新聞. 2013 年 12 月 4 日朝刊. 米 GE、日本で火力改修や燃料電池に参入、副会長が表明.
20) SunHerald,"Kemper energy facility reaches syngas production milestone", 2016 年 7 月 16 日
21) Gas Technologies Conference 2015, Doosan 発表資料、2015 年 9 月
22) 経済産業省、次世代火力発電協議会第 6 回資料、2016 年 5 月 30 日
23) 石炭ガス化複合発電技術.電中研レビュー Vol.57 (2016 年).
24) 大崎クールジェンプロジェクトガイド Vol.1 (2013 年).
25) SOFC-マイクロガスタービン(MGT)ハイブリッドシステム九州大学向け実証機の運転状況.三菱重工技報 Vol.52, No.4 (2015 年).
26) 米国エネルギー省化石エネルギー局
http://energy.gov/fe/articles/doe-invest-30-million-projects-developing-components-advanced-turbine-and-supercritical
27) 東芝 特集「超臨界 CO_2 サイクル発電システム」
http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2013/11/68_11pdf/a10.pdf
28) 再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発.
http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201606/20160000000495.html
29) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)エネルギーキャリア
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/
30) European Turbine Network. http://www.etn-gasturbine.eu/home/
31) NEDO 次世代火力発電等技術開発. http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100115.html
32) みずほ銀行 産業調査部リポート. Mizuho Short Industry Focus 第 128 号（2015002）.

3.3 CCUS（Carbon Capture Utilization and Storage）

（１）研究開発領域の簡潔な説明

CCUS は、火力発電所などから排出される CO_2 を回収し、貯留（Storage）する技術（CCS）と有効活用（Utilization）する技術（CCU）の総称である。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 CO_2 有効利用全般を指す。ここでは、CO_2 の分離・回収、輸送、貯留、モニタリングの技術および CO_2 利用技術に関する研究開発を対象とする。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

世界の一次エネルギー消費は、2013 年の石油換算 13,555 百万 t（Mtoe）からレファレンスケースで 2040 年には 18,963Mtoe に達し、石油、天然ガス、石炭の化石資源は 2013 年の 10,980Mtoe（約 81%）から 2040 年 14,791Mtoe（約 78%）になると予想されている [1)]。

CCS は、地球温暖化対策として発電部門では再生可能エネルギーや原子力とともに、また鉄鋼業やセメント業などの産業部門でも CO_2 排出削減のための重要な低炭素化技術と位置付けられる。2017 年には世界で 22 の大規模プロジェクトが操業・建設中の見通しであり、その合計の CO_2 回収量は年間約 40 百万 t（2012 年排出量 32.6Gt）になる [2)]。現状、CCS は高コストであり、太陽光発電に比べれば低コストであっても初期投資が大きく、地下の不確定性に起因するリスクも課題となっている。また、直接的には収益が得られないので、炭素税などの政策的なインセンティブや石油増進回収（EOR）への利用など付加価値がないと経済的に成立することは困難である。特に、分離・回収部のコストおよびエネルギーペナルティがまだ大きく、低コスト化、高効率化が必要である。また、分離・回収から貯留、モニタリングまでの全体システムおよび貯留における環境負荷の評価のための実証試験が必要であり、中・長期的な視点から研究開発を推進する必要がある。

CCU は CO_2 を廃棄物ではなく資源としてとらえる。EOR を除けば、CCS と比べると CO_2 削減量は少ないが、CO_2 を有価物に転換することで経済的に自立しつつ CO_2 削減に寄与できる可能性をもっている。まだシーズ段階であるが、長期的な視点から研究開発を推進する必要がある。

［動向（歴史）］

1991 年、化石燃料使用で排出される温室効果ガスの削減に関し、技術が果たし得る役割に関する情報を提供することを目的として、CCS に焦点を置いた国際共同研究プログラム「IEA 温室効果ガス R&D プログラム（IEAGHG）」が創設された。メンバー国は日本を含む 15 か国と EU、OPEC であり、14 の多国籍企業がスポンサーとなっている [17)]。

米国、カナダ、中国、韓国、ペルシャ湾岸諸国、欧州（英国、スペイン、オランダ）、ノルウェーで大規模な R&D および導入・展開活動が進められ、オーストラリア、ドイツは大規模 R&D を行ってきたが、導入・展開は停滞している。ブラジル、メキシコでは大規模な R&D、インド、南アフリカでも R&D プログラムが進められている [2,16)]。

我が国では、2010 年 10 月閣議決定された地球温暖化対策基本法案では、CCS 等の技術開

発や普及促進のために必要な施策を講じるとされ[3]、2013 年 9 月に改訂された環境エネルギー技術革新計画でも CCS が取上げられた。2014 年の第 4 期エネルギー基本計画では、高効率火力・LNG 火力発電の有効活用の促進の中で、「2020 年頃の CCS 技術の実用化を目指した研究開発や、CCS の商用化の目途なども考慮しつつできるだけ早期の CCS Ready 導入に向けた検討を行う」とされた[4]。2015 年 7 月の長期エネルギー需給見通しにおいても、2030 年度以降を見据えて進める取組の一つとして、二酸化炭素の回収貯留及び利用に関する技術を始めとする新たな技術の開発・利用の推進が発表された[5]。さらに環境省が 2015 年度にまとめた気候変動長期戦略懇談会における中長期的な戦略の中でも再生可能エネルギーの最大限の導入を図るにあたって、安定的に電力を供給するために火力発電による電力供給の必要性がうたわれ、その場合火力発電については CCS が行わなければならないとされ、2016 年 5 月に閣議決定された地球温暖化対策計画にも明記された。また、2016 年 6 月に資源エネルギー庁が公表した「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」では、CCUS を火力発電からの CO_2 排出量をゼロに近づける切り札となり得るともの位置付けて、長期的な視点で戦略的に技術開発を進めるとしている。

米国オバマ大統領が 2013 年 6 月に発表した「気候変動行動計画」では、公的金融のクリーンエネルギーへの転換の手法として、後発開発途上国を除き、海外における石炭火力発電所の新設に対する米国政府による公的金融資金を停止する提案を行っている。2013 年 9 月には気候行動計画の一環として、米国環境保護庁（EPA : Environmental Protection Agency）は、大気浄化法に基づく石炭火力発電所の排出基準約 500g/kWh を発表した。これは、石炭ガス化複合発電に燃料電池を加えた石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC : Integrated Gasified Fuel Cell Combined Cycle）でもクリアできない厳しいもので、CCS が前提となっている[6]。石炭火力に対しては、カナダではさらに厳しい 420g/kWh に、英国でも 450g/kWh に制限することが決まっている。

2014 年 4 月にまとめられた、気候変動に関する政府間パネル（IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change）の第 5 次報告書第 3 作業部会の報告『気候変動 2014-気候変動の緩和』[7]においても、一次エネルギーに占める低炭素エネルギー（再生可能エネルギー、原子力、CCS 付火力）を 2010 年比で 2050 年に 3～4 倍近くに増加させる、電力に占める低炭素エネルギーを 2010 年比で 2050 年に 8～9 割まで増加させるとともに、2100 年までに、CCS なしの火力発電をほぼ完全に廃止し、高効率天然ガス火力においても CCS を必要としている[7]。

2015 年 10 月現在、CCS プロジェクトは、操業中 15、建設中 7、計画中(精査段階)11、合計 33 プロジェクトがあり、CO_2 処理量は合計 55 百万 t/年（計画中のもの約 15 百万 t/年）となる見込みである。国別に見ると、米国 12、欧州 6、カナダ 6、中国 4、その他 5 プロジェクトとなっている[2, 8]。

CCS を構成する分離・回収、輸送、貯留、モニタリング、利用技術の開発状況は以下の通りである[9-11]。

①分離・回収

CO_2 の分離・回収は、対象とするガスの性状や目的とする CO_2 回収率、CO_2 純度などに応じて種々の技術を使い分ける必要がある。分離・回収技術を原理によって分類すると、吸収

法、吸着法、膜分離法、深冷分離法などがあり、吸収法には化学吸収法と物理吸収法がある。対象ガスによって分類すると、燃焼後回収（Post-Combustion）、燃焼前回収（Pre-Combustion）、酸素燃焼回収（Oxy-Combustion、Oxy-Fuel）に大別される。

燃焼後回収は、石炭焚火力発電所ボイラなどの燃焼排ガスから CO_2 を回収するもので、通常はほぼ大気圧で運転される。排ガスの圧力が低く、CO_2 濃度も低いので、回収技術としては、通常は CO_2 との反応性が高い溶液による化学吸収法が使われている。燃焼前回収は、化学プラントなどでの水蒸気改質ガスからの CO_2 除去や、天然ガスからの CO_2 除去、石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated Gasifierd Combined Cycle）など、石炭の部分酸化により生成した H_2、CO、CO_2 などからなるガスから CO_2 を分離・回収するもので、一般に圧力が高いガスに適用されるので、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法が適用される。燃焼中回収は、事前に酸素製造装置により空気中の窒素を除去し、酸素で燃焼することによって燃焼排ガス中の窒素濃度を低く抑え、CO_2 を濃縮して CO_2 回収を容易にするシステムである。なお、燃焼排ガスから CO_2 を回収するプロセスでは、含まれる酸素、硫黄酸化物、石炭灰などの影響も十分に考慮する必要がある。

ほぼ大気圧で運転される石炭や天然ガスの火力発電所や、セメント・鉄鋼プラントでは化学吸収法が適用されている。化学プラントや石炭ガス化複合発電（IGCC）のような高圧で運転されるプラントでは物理吸収法が有利とされている。化学吸収法には使用するアミン化合物により吸収特性が異なり、高圧に適した吸収液がある。CO_2 分離では、吸収液から高純度の CO_2 を放散させる「CO_2 の再生」に最も大きなエネルギーを消費する。再生温度は 120℃程度であり、低品位のエネルギーである。この低品位エネルギーの、システム内での発生方法、あるいは周辺の熱が余剰のプラントからの供給方法によって、経済性に大きな影響を与える。

ガス中の CO_2 を分離・回収する技術を以下に示す。

(i) 化学吸収法

・化学吸収法は、アンモニア製造プラントや水素製造プラント、天然ガス処理プラントなどで古くから広く使われ、省エネ、低腐食化などの技術革新が継続して行われてきた（燃焼前回収）。一方、EOR や CCS の必要性が高まるにつれて、燃焼排ガスに適用できる燃焼後回収プロセスが開発され、一部は商業規模で稼働している。

・燃焼前回収プロセスとしては、アミン法（MEA 法、MDEA 法など）、熱炭酸カリ法（Benfield 法、Catacarb 法など）がある。条件にもよるが、近年は 1.0 GJ/t-CO_2 以下と小さい溶液再生エネルギーで運転される例も多い。なお、化学プラントや天然ガス処理プラントでは、CO_2 の分離・回収は製品製造の一過程として行われ、そのコストは製品コストに含まれるので、安価な CO_2 が提供できる。

・燃焼後回収法としては、アミン法、アンモニア法（Alstom 社 CAP、Powerspan 社 ECO_2）などがあり、アミン法では日本企業が先行しているとされている。本手法は、排ガス中の不純物（酸素、硫黄酸化物、窒素酸化物）の影響による吸収液の劣化速度が大きく、メイクアップ量が経済性に悪影響を与えるとされていたが、前処理条件の適正化により石炭火力発電所への適用が可能になっている。排ガス条件、吸収液寿命、環境影響を評価する必要があるが、溶液再生に必要なエネルギーは 2.35～3.8 GJ/t- CO_2 とされている。

・燃焼後回収法に対する分離・回収コストに関しては、IPCC、IEA、RITE の試算が行わ

れており、IPCC では 29～74 $/t- CO_2（新設石炭火力発電向 29～51 $/t- CO_2、既設石炭火力発電向 45～73 $/t- CO_2、新設天然ガス火力発電向 37～74 $/t- CO_2）、IEA では、新設石炭火力発電向で 40～74 $/t- CO_2、RITE では¥4,256～7,752 /t- CO_2（新設石炭火力発電向¥4,256 /t- CO_2、既設石炭火力発電向¥7,752 /t- CO_2）と報告されている。排ガスの CO_2 濃度、水蒸気タービンからの低品位蒸気の抽気条件によって異なる。

・燃焼後回収法は、石炭燃焼排ガス中の不純物（酸素、硫黄酸化物、窒素酸化物）の影響による吸収液の劣化などに課題があったが、松島発電所、米国 Barry 発電所（三菱重工）、三川発電所（東芝）、デンマーク Esbjerg 発電所（CESAR, FP7）でアミン法の、米国 Mountaineer 発電所（Alstom）、R.E. Burger 発電所（Powerspan）でアンモニア法の実証試験が行われ、課題解決が図られている。2014 年から開始された Boundary Dam Integrated Carbon Capture and Sequestration Demonstration Project（カナダ）では, Shell/Cansolv アミン系燃焼後炭素回収技術が利用されている [20]。さらに、米国 W.A. Parish 発電所では商業規模プラント（三菱重工）を建設中で、2016 年に稼働予定である。

(ii) 物理吸収法

・高温、高圧の石炭ガスから CO_2 を分離する場合に適し、Purisol 法（吸収液 N-メチル・ヒロリドン）、Rectisol 法（吸収液メタノール）、Selexol 法（吸収液ポリエチレングリコールのジメチルエーテル）、Flour Solvenni 法（吸収液ポリプロピレンカーボネート）が化学プラントでの CO_2 分離技術として商業化されており、この技術が IGCC などにも適用できる。

・IGCC 向けの分離・回収コストに関して、IPCC は 13～37 $/t-$CO_2$（新設 IGCC 向け Selexol 法）、IEA は 2005 年～2009 年のデータを元に 18～79 $/t-$CO_2$ と報告している。

・米国 2 件（Summit Power、Southern California）、英国 1 件（Hartfield）など IGCC での物理吸収法による実証試験計画が発表されているが、まだ実証運転まで至っていない。日本でも J-power 若松の EAGLE プロジェクトにおいて 2008 年～2014 年にかけてパイロットプラント規模（CO_2 回収量 24ton-CO_2/日）の MDEA と Selexol 法の試験を実施した。

(iii) 膜分離法

・膜分離法は圧力差によって分離を行う技術であり、圧力が高いガスに適用されることが多い。1980 年代に水素回収技術として商業利用され、現在は、井戸元での天然ガス中の CO_2 除去にも高分子膜が商業規模で使われている。

・化学吸収法、物理吸収法に対して消費エネルギーが少ないことが特徴の一つであり、CO_2 分離・回収用に、高選択率と高回収率を同時に実現できる高性能膜の研究開発が行われている。特に、セラミック膜など無機膜の研究開発が活発に行われている。

・燃焼後回収への適用も検討されていて、新設石炭火力発電での分離・回収コストは 83 $/t-$CO_2$ と試算されているが、未だラボスケールでの試験が中心で、商用化されたものはない。

・日本では、RITE が、分子ゲート膜構造のコンセプトで H_2、CO_2 などの混合ガスから CO_2 を選択的に分離する、IGCC への適用を想定した分離膜の研究に取組んでいて、世界から注目されている。

(iv) 深冷分離法

・空気分離、天然ガスからのヘリウム回収、合成ガス中の CO 分離などで実用化されている。工業ガス、保冷用ガスとして広く使われている液体炭酸ガス（液炭）は、加圧下－20℃～－40℃で CO_2 を液化・蒸留して製造する。CCS においては、CO_2 の分離・回収に深冷分離法を直接使用することはないが、CO_2 を船舶輸送する場合には、回収された高濃度の CO_2 ガスを液炭に変えて輸送する。

(v) 物理吸着法

・水素製造、乾燥空気製造などで広く実用化されている。

・容器に固体吸着材を充てんし、圧力、温度を変化させて吸着・脱着を繰り返すスイング法が用いられ、目的に応じて PSA（Pressure Swing Adsorption）法、TSA（Temperature Swing Adsorption）法、PTSA 法を使い分ける。水蒸気改質法による水素製造では水素中の CO_2 などを除去するが、近年は化学吸収法に代わって PSA 法が主として採用されている。

・固体媒体を移動させる、移動層、流動層方式も検討されている。現状、数 MW 規模プラントでの実証段階であるが、大規模プラントでの適用は周辺の真空機器の容量に限界があり、スケールアップの経済性向上が見込まれず、経済的な競争力向上には吸着剤の飛躍的な性能向上が必要と考えられる。

(vi) 酸素燃焼（Oxy-Fuel）

・酸素を燃焼剤として用い、燃焼排ガス中の水分を凝縮・除去することで濃度 95%以上の CO_2 を回収する技術であり、他の分離・回収技術と併用する場合もある。回収した CO_2 を燃焼炉に再循環するため、CO_2 Recycle Power Generation とも言われる。

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

・豪州 Callide プロジェクトでは、IHI、三井物産、電源開発、豪州石炭協会、CS energy 社、Schlumberger 社、Glencore 社のジョイントベンチャーにより、経済産業省と豪州連邦政府、クイーンズランド州政府支援の下、2012 年より Callide A 発電所の石炭火力 30 MW 4 号機で実証運転を開始し、2015 年 3 月に累計 10,000 時間の運転を達成して終了した[24]。CO_2 回収量は 75 t/日である。

・また、スペインでは CIUDEN により、2011 年～2012 年に 30 MWth 級の酸素燃焼循環流動床ボイラの実証試験を行った。米国では、石炭火力での酸素燃焼による CCS 実証プロジェクトである FutureGen 2.0, Illinois が 2013 年に DOE により開始され、130 万 t/年の CO_2 を回収する計画であったが、2015 年にプロジェクトが中止された[25]。

(vii) 化学ループ燃焼

・金属の酸化と還元を利用したもので、2 つのリアクターで金属粒子を周回させることにより、酸素を輸送し燃料の燃焼を行うものである。空気分離を行わずに酸素燃焼が可能となり、理論的に消費エネルギーがもっとも少ない方法とされているが、配管の磨耗、金属粒子の耐久性が課題とされている。

・基礎試験の段階であり、CCS への適用を検討できる技術レベルではない。ALSTOM 社が 1～3 MWth 規模でのパイロット試験を実施している。石炭エネルギーセンターと産業技術総合研究所などでは、石炭ガス化を触媒により行うために、NEDO「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト次世代高効率石炭ガス化技術開発」において、

2009～2013 年度に Ca 系キャリアを使用した燃焼法の検討を行った。東京ガスでは、神奈川工科大学と共同で、2020 年までにコプロダクションシステムの実現に向けた研究を行っている。

②輸送

CO_2 輸送は、気体、液体、超臨界の状態が考えられる。気体と固体の場合、エネルギー消費が多く、液体よりも経済性が劣る。大規模 CO_2 回収・貯留プロジェクトでは、パイプライン輸送あるいは船舶輸送が適しており、パイプライン輸送では気体または超臨界状態で、船舶輸送では液体での輸送が行われる。

(i) パイプライン輸送

- 天然ガス、水素、石油などの輸送用としてパイプラインが世界中に広く敷設されている。米国では EOR 用に CO_2 パイプライン網も発達しており、通常は炭素鋼が使われる。水分を含む CO_2 は腐食性をもつため材料に耐食性材料を使用する場合もある。また、大規模 CO_2 の輸送ではリーク検知が行われる。米国では 50 年以上の実績があり、パイプライン輸送の技術は確立されているといえるが、漏洩事故が 0 ではない。
- 日本では、超臨界圧力での CO_2 パイプライン輸送が高圧ガス保安法でまだ認可されたことはない。配管工事が割高になると予想されおり、安全基準の再検討が望まれている。
- 2015 年時点で構想段階から運転中である大規模 CCS プロジェクト 45 件で、パイプライン輸送 41 件の内、32 件は陸域間パイプライン、9 件が陸－海域間パイプラインである。輸送距離 100 km 未満が 4 割あるが、250km 以上も 2 割近くあり、最長は 460km である。

(ii) 船舶輸送

- 操業中の CCS プロジェクトでは船舶輸送の実績がなく、評価中 CCS で韓国の 2 件（海域深部塩水層貯留）がある。いずれも、石炭火力からの CO_2 を回収するプロジェクトである。
- 実用化では、港の貯蔵設備仕様（貯蔵量、停泊期間）などの検討が必要である。一方、パイプライン輸送では、プロジェクト開始前に排出サイトと貯留サイト、輸送量を確定する必要があるが、船舶輸送ではプロジェクト途中での変更に柔軟に対応できるという利点がある。
- 三菱重工は 2004 年、IEA の Greenhouse Gas R&D Programme で船舶輸送の検討を行い、1,000 km 以下の輸送コストを約 10 \$/t- CO_2、液化、貯蔵、港湾コストが主で、船舶コストの割合は大きくないが、輸送距離の増大に伴い輸送コストの割合が増大すると試算している。（財）エンジニアリング振興協会は、2010 年度に実施した NEDO の「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト発電から CO_2 貯留までのトータルシステムのフィージビリティスタディ CO_2 輸送システムの概念設計」で検討を行っている。千代田化工建設は、シャトル船・海上圧入方式の技術、経済性検証を行っている。
- IPCC の検討では、600 万 t/年の場合、輸送におけるパイプラインと船舶輸送の損益分岐輸送距離を 1,000 km としており、10～15 \$/t- CO_2 と試算している。RITE では、国内のパイプライン建設コストが高く、損益分岐距離は 190 km で船舶輸送が有利としている。

③貯留

CO_2の貯留のメカニズムは、(a)物理的（構造的・層序的、残留CO_2トラッピング）、(b)化学的（溶解、鉱物トッピング）とされ、貯留期間が長いほど化学的トラッピングの貢献が大きくなるとされている。貯留は、(i)帯水層（深部塩水層）、(ii)枯渇油ガス田、(iii)EOR、(iv)石炭層への炭素固定、(v)海洋隔離がある。現在運転中のプロジェクトは、帯水層（深部塩水層）、EOR のみである。海洋隔離は、米国、ノルウェー、日本、カナダなどの国際コンソーシアムにより、現場試験を提案され、ハワイ島沖で 2001 年に 2 週間の試験が予定されていたが、環境保護の視点から国際的な海洋実験が中止となった。

日本は、CO_2排出量 100 年分相当の貯留ポテンシャルがあるとされているが [19]、大量のCO_2を貯留できるサイトを特定し、貯留可能量を確度高く推定するために、調査が継続して行われている [12, 13), 18]。おのおのの貯留の課題と経済性は以下とされている。経済性については、貯留場所、条件により大きな幅がある。

(i) 帯水層（深部塩水層）

・ 帯水層内の粒子の空隙のあり方によって、注入速度と圧入圧が異なる。高圧による圧入性が課題。ノルウェー他で 4 件の商用化プロジェクトがある。陸域 0.2～6.2 $/t- CO_2、海域 0.5～30.2 $/t- CO_2。

(ii) 枯渇油ガス田

・ 有望な貯留層であるが、商用段階のプロジェクトはまだない。アルジェリアの In Salah の天然ガス田では井戸の周辺地帯の地下へCO_2を圧入している。陸域 0.5～12.2 $/t- CO_2、海域 3.8～8.1 $/t- CO_2。

(iii) EOR

・ 米国を中心にほとんどが商業的に成立している（米国 7、カナダ 2、ブラジル 1、サウジアラビア 1）。米国の陸上事例で、原油 1 バレルあたり 15 US$と仮定した場合、－14.8 $/t- CO_2と試算されている。

(iv) 石炭層への炭素固定

・ 石炭層に CO_2を貯留する技術で、米国、カナダ、ポーランド、中国、日本（夕張炭鉱）での実験プロジェクトがある。メタン回収の収益が見込めるため－20～150 $/t- CO_2（IPCC 2005）、－5.59 $/t- CO_2（MIT）の試算がある。実際に注入したCO_2に対してCH_4生産量が予想よりも少なくい結果となり、開発は進んでいない。

(v) 海洋隔離

・ 海水温度が低下すると、液体 CO_2のほうが密度が大きくなることを利用して、3700 m よりも深い海底に液体CO_2を散布して、ゆっくりと海水にCO_2を溶解する方法と、CO_2を小さな液滴としてか 1500 m 程度の深海に散布して、液滴が上昇して海面に届く前にCO_2を海水に溶解する方法である。現在は、貯留管理の容易な海底下への帯水層貯留になった。

④モニタリング

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

また、地中における CO_2 の挙動を捉えるだけでなく、地表面や海底面への CO_2 漏洩の検知、モニタリング技術に関する研究も積極的に実施されるようになっている。例えば英国と日本の QICS 共同研究プロジェクトでは CCS に伴う海底下漏洩を模擬し、2012 年にスコットランド西海岸の Ardmucknish 湾において CO_2 漏洩実験が実施され、CO_2 漏洩に伴う潜在的生態系影響についての調査が実施されている [21]。

(i) 地下（貯留層）
- 弾性波探査法：反射法弾性波探査（2D/3D/4D）、弾性波トモグラフィ、VSP 探査
- 地震探査以外/坑内測定：電気/電磁探査、重力探査、物理検層、坑内検層、坑内温度・圧力測定、坑内歪測定、坑内地層水採集、海底地震計（海域）
- 微小振動（極微小地震）観測：坑内地震計

(ii) 地下（浅層）
- 弾性波探査法：反射法高解像度弾性波探査（3D、海域）

(iii) 地表
- 地表傾斜、リモートセンシング、地球化学的調査（pH、p CO_2 等）、生物学的調査
- 微小振動（極微小地震）観測：地表（または坑内）地震計（陸域）

(iv) 海洋環境調査
- 海況調査、海底（含む気泡）画像撮影、海底土質コア・堆積物調査、地球化学的調査（pH、p CO_2、溶存酸素等）、生物学的調査

⑤CO_2 利用

化石燃料から発生した CO_2 を利用して有用物質を製造するよりは、化石燃料から直接有用物質を生産したほうがエネルギー消費量は小さく、経済性が向上する。このような例外として、CO_2 を経由させるルートが CO を経由させるよりも合成反応熱が小さくなる製品として、メタノール、尿素、ポリカーボネート樹脂があり、これらはすでに工業化が進んでいる。メタノールは世界での使用量が、3000 万トン/年、尿素が 1.7 億トン/年、ポリカーボネート樹脂が 300 万トン/年である。これらを原料の CO_2 に換算して合計すると、1.67 億トン/年となる。世界の CO_2 発生量 329 億トン（2013 年）に対して、約 0.5%となる。

CO_2 利用技術は、回収した CO_2 を利用し、石油代替燃料や化学原料などの有価物を生産する技術であり、現在、複数の分野で技術開発が進められている。化学原料を製造するプロセスの一例としては，光触媒による H_2 生成，分離膜による H_2 分離，そして合成触媒による CO_2 と H_2 からの化学原料製造が挙げられ、3 つの段階それぞれに関して触媒や分離膜の研究開発が進められている [22]。

日本、米国の開発動向に記載した値から、CO_2 回収コストを 2000 円/tonCO_2 として、1 kmol モルの価格は 0.9 円/kmol-CO_2 となる。それと反応させる物質、具体的には H_2 の製造コストを現状の工業用 H_2 の相場 1m^3 あたり 150 円として 1 kmol モルの価格に換算すると 6720 円/ kmol-H_2 となる。この値を比較すると、製造した物質の価格は H_2 価格からほぼ決まる。CO_2 を原料とした化学合成品では、H_2 あるいは電力のような高エクセルギーな物質を使用しなければならず、上述した NEDO の「人工光合成化学プロセス技術研究」[38] はその水素製造を行うための水分解触媒の開発に注力しているし、この技術のブレークスルー無しには成立しない。このように見ると、CO_2 の大量利用は、安価な H_2 製造技術の開発と同

義であると言える。

燃料等の供給用のバイオマスとしては微細藻の生育速度が速いために着目されてきた。バイオマスの生育には、日光、栄養塩、CO_2、O_2 が重要である。日光、栄養塩、CO_2、O_2 をバランス良く藻類へ供給するには、水の撹拌が重要である。その水の撹拌動力は小さいものの、数ヶ月にわたって行う必要があり、積算するとその動力だけでも微細藻が生み出すエネルギーをオーバーする実験例が多くある。現在は大気濃度 390ppm より高い CO_2 濃度としても生育速度が CO_2 濃度に比例するわけではないので、生育期間を大幅に短縮できない。微細藻の太陽光の利用効率向上と、生育期間短縮を目指す研究が進められているが、CCUS の CO_2 利用先としては、まだ大きな消費先となる展望が開けていない。バイオマス実用化にあたって、NEDO の「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」[39] が CO_2 固定の事業化の判断を記載する。そのプロジェクトはバイオマスを利用した CO_2 利用技術のトータルシステムの開発であり、2010 年からスタートした。数年間で成果を評価して次期フェーズへ進むかどうかを決定するというシステムでプロジェクトをハンドリングしている。本プロジェクトでは、2020 年においてバイオエタノール製造コスト 40 円/L、年産 10~20 万 kL 規模、CO_2 削減率 5 割以上(対ガソリン)、化石エネルギー収支 2 以上という基準で 3 年ごとに評価し、中止か継続を決定するという評価システムを採用している。ここに、化石エネルギー収支＝（生産されたエネルギー量[MJ]）/(ライフサイクルで投入された化石エネルギー量[MJ])という定義である。

また、CO_2 の農業利用に関する研究も進められている [23]。オランダではロイヤル・ダッチ・シェルの製油所から排出される CO_2 をハーグ南部の園芸農家の温室に供給している。温室内の CO_2 濃度を通常の約 2 倍に高めることで、野菜の成長速度が 25%促進される結果が得られている。CO_2 は 30 万 t/年で供給されているが、野菜に吸収される CO_2 量に関する情報は明らかではない。

日本でも米国 DOE でも EOR 以外の回収した CO_2 利用を模索している。消化剤、シールドガス、冷媒、CO 合成、メタン合成、セメント、ミネラリゼーション（$CaCO_3$ あるいは $MgCO_3$）、カフェインや香料の抽出媒体、藻類への転換、炭酸飲料などである。今のところ、従来にない大量利用が可能な活用分野を見出すことができていない。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

日本では基礎研究がパイロット規模の範囲であったために、資金規模が欧米に比較すると一桁小さくてすみ、技術開発が着実に進められている。燃焼後回収の CO_2 回収技術に関して、国内の研究資金を活用して、三菱重工業は 2008 年頃まで 10ton-CO_2/日規模の技術開発を国内で試験を行った後、米国のサザンカンパニーと共同で、サザンカンパニーのバリー（Barry）火力発電所において CO_2 500ton-CO_2/日の実証試験を 2012 年～2014 年実施した。回収した CO_2 は米国 DOE の RCSP Phase III プログラムで発電所から 12 マイルにあるシトロネル・ドーム（Citronelle Dome）の地下 3,000～3,400ｍにある帯水層に貯留された。このような実績により、2014 年 7 月に NRG エナジー社（NRG Energy Inc.）における CO_2 回収の実証規模プラントへ展開した [26]。

石川播磨重工業は酸素燃焼技術開発を豪州クイーンズランド州の Callide A 発電所で進めた。2006 年 3 月にスタートし、2012 年 12 月～2015 年 3 月まで実験を実施し、のべ 5000 時間の CO_2 回収試験を行い、70 ton-CO_2/日規模の試験を完了した。

燃焼前回収の技術開発は、J-Power と日立製作所が若松発電所において 24 ton- CO_2/日規模の MDEA を吸収剤として用いる化学吸収法と、Selexol 吸収液を用いる物理吸収法による試験を 2014 年 3 月に完了した。

米国では CO_2 規制が厳しく、CCS を設置しないと石炭火力発電所が規制をクリアできなくなった。オイルシェール田からの天然ガスの価格が安価であり、石炭から天然ガスへの燃料転換を行うと発電量当たりの CO_2 発生量が半分となるので、天然ガスへの燃料転換が CO_2 削減対策のフロントランナーとの位置付けとなる。米国 DOE は総合的な CO_2 回収技術の開発拠点として NCCC を提供して、様々な企業が CO_2 回収新技術の開発加速を図りやすい仕組みを作ると同時に、CCS 付きの石炭火力発電所の大規模実証プロジェクトは、できるだけ民間活力を生かした形で進めさせる方針で進めている。

EU は国によって発電構成が異なり、フランスのような原子力が主体、英国・イタリアのように天然ガスが主体、ドイツ、東欧諸国のように石炭の比重が高い国等、地域の事情により様々である。EU 全体の電力ネットワークと天然ガスパイプライン網により、日本よりも自然エネルギーの導入量増大が容易であり、EU としては、自然エネルギーへの増加に力を入れている。英国、オランダ、ノルウェーとドイツが CCS 技術実証試験計画に熱心であった。2014 年 7 月に EU 欧州員会は第二期プロジェクトとして英国の White Rose Project (425MW の石炭純酸素燃焼技術で 90%回収して海洋の浅底下へ貯留)を採択した。そのプロジェクトは EU の資金を獲得できたが、2014 年 11 月に英国政府が資金提供しないとの決定をうけて中止状態となった。

中国は、当面は原子力と天然ガスと自然ネルギーを拡大する方針で CO_2 削減に努める方向である。石炭火力の CCUS 技術開発は複数の大型プロジェクトを発表しているが、いずれも計画中の状態である。

［注目すべき国内外のプロジェクト］[8), 14)]

日本

- 日本 CCS 調査株式会社は、実証試験候補地点から、調査進展がもっとも早い苫小牧沖に対して、実証試験計画（案）と貯留層評価書を経済産業省に提出し、経産省は苫小牧沖を実証試験地点として選定した。さらに、2012～2015 年度で設計・建設・試運転を行い、2016 年から苫小牧 CCS 実証試験を開始する計画を策定した[15)]。
- 苫小牧 CCS 実証試験では、2012~2015 年度の準備業務を完了し、2016 年 4 月から海底下の貯留層（帯水層）への CO_2 の圧入を開始した。
- 豪州の Gallide A 発電所の酸素燃焼プロジェクトでは、IHI が既設石炭火力を酸素燃焼に改修、2012 年よりボイラ運転を開始し、2015 年 3 月に累計 10,000 時間の運転を達成して終了した。世界初の酸素燃焼パイロットプラントとして成果を上げた。
- 鉄鋼業では、「革新的製鉄プロセス技術開発（COURSE50）」で、コークス炉ガスに含まれる水素を利用した水素還元製鉄、高炉ガスから化学吸収法、物理吸着法により CO_2 を分離回収し、CO_2 排出量を 30%削減する低炭素製鉄を目指している[16)]。

- 日本は燃焼後回収システムの化学吸収法で世界的リーダであり、三菱重工、三菱日立パワーシステムズ、東芝、IHI、がそれぞれプロセスを開発している。米国テキサス州の PetraNova 大規模 CCS プロジェクト（JX 石油開発、米国 NRG エナジー社共同の大型 EOR プロジェクトで、石炭燃焼排ガス対象の世界最大の CO_2 回収プラント、CO_2 回収 140 万トン／年、4776 トン／日）では、三菱重工の技術が採用され、2017 年 1 月 10 日に稼働を開始した。他に、燃焼前回収技術を含めて、日本の企業が、アルジェリアの In Salah プロジェクト、米国の Southern Company プロジェクト、ブラジルの Lula プロジェクト、オーストラリアの Gorgon プロジェクトにおいて、CO_2 回収設備の設計・建設などで参画している。
- 経済産業省と環境省は、日本近海の大規模貯留層候補地を調査する共同事業を 2014 年度から開始し、継続実施中である。
- 「二酸化炭素地中貯留技術研究組合」が 2016 年 4 月に設立された。2020 年ころの CCS 技術の実用化に向けた安全技術などを開発する。
- CO_2 から化学原料を製造する人工光合成について、豊田中央研究所、パナソニック、東芝、三菱化学等の企業が取り組んでおり、低コスト化、高効率化に向けた研究が進められている [27]。豊田中央研究所では、2011 年の時点においてエネルギー変換効率は 0.04%だったが、2016 年には 4.6%まで高めることに成功している [28]。

米国

- 構想段階から操業中プロジェクトが 13 件あり、その内 EOR が 11 件であることが特徴である。
- DOE は、CCS 支援策として Regional Carbon Sequestration Partnerships（RCSP）、Clean Coal Power Initiative（CCPI）などに積極的な予算化を行っている。RCSP では、フェーズⅢで、8 件の CCUS 実証プロジェクトを進めている。CCPI では、Summit TX Clean Energy の IGCC／燃焼前回収／EOR の商業プロジェクトを、Petra Nova の石炭火力／燃焼後回収／EOR の商業プロジェクトを進めている。また、Air Products and Chemicals, Inc.がメタン水蒸気改質からの CO_2 回収／EOR を 2013 年から行っており、 Kemper County Energy Facility が IGCC／燃焼前回収／EOR の商業プロジェクトを、Illinois Industrial CCS Project（ICCS）がエタノールプラントからの CO_2 回収／帯水層（深部塩水層）貯留商業プロジェクトを 2016 年から開始することとなっている。

カナダ

- 2014 年 10 月に開始されたサスカチュワン州 Saskpower 社の微粉炭燃焼の石炭火力 Boundary Dum 発電所排ガスからの CO_2 回収プロジェクト（EOR、1.0 百万 t/年）は、世界初の発電部門での CCS プロジェクトとして注目されている [29]。CO_2 回収設備の建設は日立製作所が担った。世界で初めての微粉炭燃焼排ガスからの CO_2 回収ビジネスである。2014 年から操業に入ったが、当初は予定の CO_2 回収量が実現できなかった。それでも Saskpower 社から採算は取れると発表があった。2016 年末に回収量が 100 万 ton- CO_2/年のフル操業となる予定である。回収した CO_2 はパイプラインで 66 km を輸送し、Cenovus Energy が EOR として利用している。
- 2015 年に開始された Quest プロジェクトは、オイルサンド改質用の水素を製造する設備

から CO_2 を回収し、年間 100 万 t 以上を帯水層（深部塩水層）へ圧入する。

欧州

- 多くの CCS プロジェクトが計画されていたものの、経済危機や CO_2 取引価格低下により、プロジェクトが中断あるいは中止されている。
- CCS 資金供給メカニズム（NER300）では、燃焼後 4 件、IGCC 8 件、酸素燃焼 4 件、産業用 4 件など合計 22 件の CCS プロジェクトが申請されている。英国とオランダで活発に研究開発が行われており、両国の申請は 13 件にのぼる。英国では Longannet、Kingsnorth で基本設計（FEED：Front End Engineering Design）が完了しているが、プロジェクトとしての進捗はなく、NER300 に沿って実施する計画である。また、オランダでは ROAD プロジェクトの FEED が完了した状況である。OXYCFB 300 Compostilla プロジェクト（スペイン）は 30 MWth 規模での試験が終了し、Belchatow（ポーランド）では地質学的スクリーニングを進めている。IGCC と天然ガスコンバインドサイクルを併設した Statoil / Snohvit（ノルウェー）が進行中であるが、環境問題により遅延の見込みとなっている。
- 欧州連合において 2009 年に規定された CCS 指令が 2014 年に見直され, 2015 年 1 月に最終報告書が欧州委員会に提出された [2]. CCS プロジェクトが実証から商業への移行を可能にするために，CCS 指令以外の政策が必要であるという所見が示されている。
- Carbon Clean Soluton 社は、新しい燃焼後回収技術として、インドで商業機（6 万トン／年）を稼働し、回収した CO_2 を重曹製造に使っている。Carbon Clean Solutions 社は、燃焼後回収用の独自の溶液を開発し、英国の支援を受けて、インド、中東を中心に商業化を進めようとしている。

中国

- 中国華能集団公司（Huaneng Group）主導で、GreenGen プロジェクト（ニア・ゼロ排出型 IGCC ポリジェネレーション）を 2006 年より開始し、2000 t/d 石炭ガス化装置および 250 MW 級 IGCC、石炭を利用した水素製造、水素発電、CO_2 回収に関する研究を行っている。
- 豪州連邦科学技術研究機構（CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation）と China Huaneng Group（CHNG)の共同事業として、800 MWe の熱電供給石炭火力プラントの燃焼排ガスから 300 t-CO_2/年を回収するプロジェクトが 2008 年より、Huaneng および TPRI が主導し、660 MWe の USC ボイラの燃焼排ガスから 120,000 t-CO_2/年を回収するプロジェクトが 2010 年より稼動している。
- SKLCC（State Key Laboratory of Coal Conversion）のもと、1995 年より基礎研究を開始し、現在、200～600 MWe スケールの酸素燃焼、100 万 t- CO_2/年を回収し EOR に用いる実証試験の準備を進めている。
- 中国では、精査段階 4、評価段階 2、構想段階 3、合計 9 件のプロジェクトが計画されている。石炭液化（CTL : Coal to Liquid）を含む化学品生産 4 件と半数を占めるのも特徴である。
- 2014 年 11 月に発表された中国・米国両政府による機構変動に関する共同声明（Joint

Announcement on Climate Change）以降、両国の CCS および CCUS 実施に向けた協力関係が強化されている [2)]。

韓国

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

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

RITE はかつて新規石炭火力では帯水層貯留システムコストを 7,300 円/t（分離・回収：4,200、輸送：800、圧入：2,300）と見積もった [30)]。CCS の経済試算に大きな影響を与える因子として、回収すべきガスの CO_2 濃度・圧力、CO_2 再生方法のエネルギー源、CO_2 輸送距離と方法、注入井戸の CO_2 貯留速度により異なり、だいたい 5,000～15,000 円/ton- CO_2 と試算されている。CCS の経済性を考えた場合、EOR による収益がビジネスモデルで重要視されているものの、将来的な帯水層（深部塩水層）への貯留には、分離・回収における(a)システム効率向上、(b)Oxy-Fuel などの燃焼法の確立、(c)コスト低減、(d)貯留候補地の特定などが大きな課題としてあげられる。CO_2 発生源の特性をうまく利用した分離・回収技術効率化や、システムを考慮した多角的視点からの要素技術開発も重要である。

分離・回収のコストでは再生時の熱消費、昇圧時の電力消費が高コストの要因で、再生工程での熱利用費低減、回収設備費の低減、発電プロセスとの熱統合、昇圧プロセスの効率アップ、などが必要である [13)]。CO_2 回収については、例えば、燃焼後回収で実用化されているアミン法などがあるが、CO_2 回収コストの低減が CCS 普及に向けた課題となっており、CO_2 回収量数千トン/日の処理能力で、設備費及び運転費（蒸気使用量）を半減できるような吸収液、吸収剤やシステムの改良が求められる。

一方、国内の複数の貯留適地を明らかにし、それら適地の貯留可能量推定の確度を向上するために、貯留層の調査を行い、事業リスクを低減することも重要である。そのための技術は、基本的には石油やガスの探鉱技術が利用できるが、CCS 特有の要素があるので、知見の集積と手法の改良・開発を行う必要がある。また、圧入した CO_2 の地下での長期間に及ぶ鉱物化の挙動を推定するための地化学反応に関する研究も求められる。

負荷変動対応については、IGCC に適用する CO_2 回収技術が数十年にわたって化学プラントにて運用された技術であり、負荷が変動しない定常運転では大きな課題がないと予想されるが、今後の課題は、圧力、ガス量が変動した際の CO_2 回収装置の負荷変動対応と応答速度向上にある。米国の負荷変動火力は石炭火力に比べると負荷変動特性の良い天然ガスコンバインドサイクル発電が担っているが、日本はエネルギーセキュリティーのために天然ガスと石炭火力をほぼ同程度の割合にするという方針で進めている。石炭火力に課せられた負荷変動対応を天然ガス火力と同等のミドルピーク対応にさせるという、海外よりさらに上載せし

た技術開発が必要とされている。

CO_2の利用という観点からは、回収したCO_2をC1炭素原料として有効に活用する技術開発や、ケミカルポテンシャルの低いCO_2を新たなCO_2の発生を伴わずに化合物に組み込む技術開発、化合物のC-H結合の活性化により直接CO_2を結合させる技術開発などが課題である。ラボレベルでは実用化に必要な変換効率に迫る手法も開発されつつあるが、コストおよびエネルギー密度の観点から、短中期的にCO_2地中隔離と同等のCO_2削減の量的寄与を実現することは困難であり、中長期的な技術開発が望まれる。また、CO_2利用については、尿素増産等があるが、大量CO_2の用途としてはEORに限定されている。大量CO_2を原料とする高付加価値物質の製造技術の実用化、農業分野及び漁業分野へのCO_2の有効利用が促進されれば、国内でのCCUSの実用化も有望になってくると考えられる。

［今後取組むべき研究テーマ］

CCUSの普及に向けては、低コストCO_2回収技術開発、貯留時の安全管理技術、大量CO_2の有価物への転換技術の開発が求められる。また、長期的には再生可能エネルギーの利用が拡大し、余剰電力と化石燃料由来CO_2を組み合わせた燃料リサイクル技術(Power to CH4 or CH_3OH)の開発が必要となる可能性がある。

- CO_2回収コストの低減に関する技術開発、アミン法については蒸気使用量削減を可能とする熱利用プロセス開発、設備の小型化・簡素化を可能とする気液接触装置・熱交換器の開発、CO_2吸収容量が大きく、CO_2脱離エネルギーが小さい吸収液や吸収剤の開発
- 高効率な温室効果ガス分離膜の開発、従来方法とは大きく原理が異なる、回収エネルギー低減が期待できる革新的なCO_2分離技術の基礎研究
- CO_2分離技術を組み込んだ微粉炭燃焼あるいはIGCC発電システムの負荷変動特性のチャレンジングな技術開発
- 回収CO_2を還元する物質の経済的な製造方法、触媒による反応速度の向上、反応器・反応システム改善による反応収率向上
- CO_2貯留層の貯留速度、貯留容量を精度よく予測する技術の確立
- CO_2貯留層からのCO_2貯留状況およびCO_2漏洩に関する低コストかつ長期モニタリング技術開発
- 精度の高い地質判定技術、地化学反応推定技術
- 高効率な温室効果ガス変換触媒、変換デバイス、バイオ技術等の開発
- CO_2回収・輸送・貯留の安全性を担保するための研究
- CO_2の有価物への転換技術、CO_2を原料とする新規化学反応経路及び触媒の開発、再生可能エネルギーからの水素製造の実用化並びに大型化

（５）政策的課題

CCUSは、地球温暖化対策の重要な一方策として認知され、且つCO_2回収・貯留の要素技術としては確立しているものの、地球温暖化問題への対応に特化したCCSは、外部不経済であることから、市場原理だけでの導入を見込むことができない。現在、事業者へのコスト・リスク負担が重く、普及に至っていない状況にあり、研究開発意欲を減退させない施策が必

要である。また、事業者への CCUS 実施の動機付けとしては、CO_2 排出基準規制、固定価格買取制度、炭素税、排出量取引制度等、事業者にインセンティブを与える施策を行っていく必要がある。例えば炭素税導入のノルウェーでは、1996 年から実施されている Sleipner における大規模な CCS プロジェクトにおいて、炭素税を回避するというインセンティブが大きく影響している。さらに、CCS の広範な普及には、国内貯留地点の特定、貯留可能量の把握、鉱業法・鉱山保安法に相当する法規制の整備、国民理解の増進に向けた取組が求められる。

地震の多い国内での CO_2 貯留には抵抗が大きいことが考えられることから、海外での CO_2 削減が排出権取引により国内での削減に結び付く枠組みの構築も重要である。例えば、CO_2 の利用あるいは貯留方法が、国際的な枠組みで CO_2 削減事業がビジネスとして成立するためには、先進国が途上国に対して CO_2 削減を行う際の Win-Win な仕組みの制定、および環境保全を図るための環境インパクトの評価方法、ガイドラインおよび規制のあり方を国際的に合意していく必要がある。グローバルな CO_2 削減を効果的に実施するには、企業間競争力による技術開発だけでは難しく、例えば、COP 事務局が先進国の資金をキープして、途上国に導入する CO_2 削減設備の導入に関する発注者となり、入札結果を基に CO_2 削減効果の高い設備から導入するといった新な仕組みを構築することも一案である。そのような途上国にとっても、入札企業にとっても、資金提供した国々にとっても、透明性ある仕組みの導入に、日本が積極的な貢献を行うべく、政策立案の検討が必要になってくると考えられる。

回収 CO_2 の有効利用に関しては、研究開発の促進に加えて、回収 CO_2 の有効利用に対してのインセンティブを与える施策を行っていくことが望まれる。

（６）キーワード

CCUS、分離・回収、輸送、貯留、モニタリング、CO_2 利用、Pre-Combustion、Post-Combustion、Oxy-Fuel、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離、深冷分離、化学ループ燃焼、帯水層、EOR、人工光合成、微細藻類、バイオ燃料、光触媒

（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	○	→	● 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。CO_2地中隔離プロセスではCO_2注入後のモニタリングやCO_2漏洩検知に関する研究が広がっている。CO_2有効利用については、人工光合成などの分野において、世界をリードする研究が継続されている。 ● RITEは膜法と貯留関連の技術開発を実施している。 ● CO_2分離膜として、産総研は、安価な材料(ポリフェニレンオキシド)から優れた分離性能と柔軟性を持つ新規中空糸炭素膜を開発し、低コストで破損しにくい膜モジュールの開発に世界で初めて成功。
	応用研究・開発	◎	→	● RITEは、2000～2004年に新潟県長岡市で帯水層へのCO_2圧入試験とモニタリング技術開発等を行った。その後もモニタリングは適宜行われている。 ● 経済産業省「二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業」で、夕張市の炭層へのCO_2 圧入実験を2002~2007年度まで実施した。 ● 三菱重工は、関西電力と共同開発したKS-1吸収液の実証を行い、RITEおよび電源開発の協力を得て、松島石炭火力発電所で2006年～2008年10

				t/日、5,000時間以上の連続運転実証を実施。東芝は、2009年より三川発電所内で石炭火力発電所から高性能の吸収液の実証を開始。2011 年より、米国Alabama PowerのBarry発電所で、500 t/日のCO_2回収・貯留実証試験を開始している。 ● 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。 ● 東芝は、2009年に燃焼後回収プロセスのパイロットプラントを福岡県大牟田市に建設し、運転を行っている。 ● 海外のプロジェクトに多くの企業が参画している。 ● 国内では経済産業省の委託で日本CCS調査が2016年に苫小牧CCS実証試験を開始した。商業化は未実施である。 ● 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を行っている。 ● 三菱重工は米国で石炭火力からの燃焼後回収商業プラントをEOR用に建設中で、2016年稼働開始予定である。 ● 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。
米国	基礎研究	○	→	● DOE（米国エネルギー省）のNational Energy Technology Center(NETL)、National carbon caputere center(NCCC)が企業主体のポストおよび燃焼前回収技術開発を支援している。 ● アメリカ合衆国大統領選挙の結果によっては、CO_2削減に関連する政策に大きな変化が生じる可能性もある。
	応用研究・開発	◎	→	● DOEのCCS支援策RCSP、CCPIなどで予算化し、商用化にむけての実証試験を行っている。 ● 現在稼働中または建設中のCCSプロジェクト22件中14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。 ● US DOE Clean Coal Power Initiative (CCPI)で大規模実証プロジェクトを２件支援している。 ● 米国内にはEOR用のCO_2パイプライン網が整備されている。 ● カナダでは、世界で初めて石炭火力発電所のCO_2を商業規模で回収、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CO_2を回収し、帯水層への貯留を開始した。 ● 米国、カナダでは、石炭火力に対して厳しいCO_2排出量基準を設定している。
欧州	基礎研究	○	→	● Horizon2020で吸収液、セメント製造工程からのCO_2回収技術を支援している。 ● オランダでは農業分野におけるCO_2有効利用の試みがなされている。 ● KCRCとRISTが吸収液、酸素燃焼の基礎研究を実施している。
	応用研究・開発	△	↘	● 多くのCCSプロジェクトが計画され、世界をリードしていたものの、経済危機やCO_2取引価格低下により停滞しており、一部中止もされている。 ● 操業が確定している新規の大規模CCSプロジェクトが無く、2020年頃に実施が計画されているプロジェクトを精査中。 ● 英国では、石炭火力に対して厳しいCO_2排出基準を設定している。 ● EUでは、EU指令で、300MW以上の火力発電に対してCCS readyのFSを求めている。英国はさらにCCS readyを義務付けている。
中国	基礎研究	○	→	● EORを想定したCCSの研究が見られる。
	応用研究・開発	○	→	● 合計9件のプロジェクトが計画されており、石炭液化（CTL：Coal to Liquid）を含む化学品生産4件と半数を占める。
韓国	基礎研究	△	→	● KCRCとRISTが吸収液、酸素燃焼の基礎研究を実施している。 ● CCSに関する世界最大級の学術会議であるGHGTにおいて、顕著な発表が見られない。
	応用研究・開発	△	→	● 2013年にKCRCは500MWの酸素燃焼、あるいは300MWのIGCCのCCS計画を発表するが、その後国内での具体的なCCSプロジェクトの計画が見られない。 ● Doosan Heavy Industry and Constructionsは吸収液プラントも検討していたが、現在は酸素燃焼技術開発を実施中と表明している。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

1) アジア・世界エネルギーアウトルック 2015. (財)日本エネルギー経済研究所. 2015 年 10 月.
2) 世界の CCS の動向. 2015 サマリーレポート. GLOBAL CCS INSTITUTE. 2015 年 11 月.
3) 地球温暖化対策基本法案. 2010 年 10 月.
4) エネルギー基本計画. 経済産業省. 2014 年 4 月.
5) 長期エネルギー需給見通し. 経済産業省. 2015 年 7 月.
6) 米国による海外石炭火力発電所新設に対する公的融資制限及び規制案の評価. （公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）システム研究グループ. 2014 年 10 月.
7) Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. IPCC. 2014 年 4 月.
8) The Global Status of CCS Project Database. GLOBAL CCS INSTITUTE. 2015 年 10 月.
9) 二酸化炭素回収･貯留に関する IPCC 特別報告書(日本語版). GLOBAL CCS INSTITUTE. 2013 年 9 月.
10) IPCC. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. 2005 年.
11) 環境省. 平成25年度シャトルシップによるCCSを活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書国内外の技術動向調査. 2014 年 3 月.
12) 二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発事後評価報告書. 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会. 2010 年 3 月.
13) RITE. 日本における地中貯留の経済評価と有効性. CCS ワークショップ 2007 資料. 2007 年 2 月.
14) John Gale. 世界の CCT/CCS 開発の概要. J-COAL CCT セミナー. 2012 年 6 月.
15) 日本 CCS 調査株式会社. 苫小牧 CCS 実証試験の概要と現況について. CCS のあり方に向けた有識者懇談会. 2013 年 6 月.　環境管理「苫小牧 CCS 実証試験」Vol.52　No.3. 2016 年 3 月.
16) 日本鉄鋼連盟. 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会（第 7 回）資料「日本鉄鋼連盟説明資料」. 2014 年 12 月.
17) IEAGHG. http://ieaghg.org/about-us
18) 経済産業省. 平成２８年度二酸化炭素貯留適地調査事業に係る入札可能性調査実施要領 http://www.meti.go.jp/information/publicoffer/kobo/downloadfiles/k160127002_01.pdf
19) RITE. 平成 17 年度二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書（貯留ポテンシャル）
20) 世界の CCS の動向. 2014.　GLOBAL CCS INSTITUTE.
21) RITE.　CCS 安全性評価への取り組み.　http://www.rite.or.jp/co2storage/safety/
22) NEDO.　二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発.

http://www.nedo.go.jp/activities/EV_00296.html
23) 日本経済新聞，2013 年 2 月 20 日
24) J Power. 2015 年 3 月 2 日ニュースリリース
http://www.jpower.co.jp/news_release/2015/03/news150302.html （Callide 関連）
25) IEEJ. http://ieei.or.jp/2015/05/special201504009/ （FutureGen 2.0 関連）
26) 三菱重工． 石炭燃焼排ガスを対象とした世界最大の CO_2 回収プラントを受注,
http://www.mhi.co.jp/news/story/1407155547.html
27) 日本経済新聞，2016 年 4 月 18 日.
28) Takeo Arai, Shunsuke Sato and Takeshi Morikawa, Energy Environ. Sci., 2015, 8, 1998-2002.
29) The world's first POST-COMBUSTION COAL-FIRED CCS FACILITY.
http://saskpowerccs.com
30) RITE. 日本における地中貯留の経済評価と有効性. CCS ワークショップ 2007 資料. 2007 年 2 月.

3.4　新型原子炉

（1）研究開発領域の簡潔な説明

主に高速増殖炉、高温ガス炉などの第 4 世代原子炉についての研究開発領域である。ここでは、第 4 世代炉、次世代軽水炉、小型炉についての研究開発動向を記載する。特に、第 4 世代炉については、技術開発の成熟度と海外動向を考慮して、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉を中心に記述する。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

原子力基本法に謳われた原子力利用の目的である、「将来におけるエネルギー資源の確保し、学術の進歩と産業の振興とをもって人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与する」ことに加えて、現状の科学技術では再生可能エネルギーの利用拡大において供給安定性と経済性の観点から限界があること、地球環境保全の観点から地球温暖化ガスの排出制限を行わなければならないこと、などを鑑みると、エネルギー資源の乏しい我が国としては、新型原子炉の開発が一つの選択肢として浮上してくる。

また、エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月）[1)]では、高速炉や加速器を用いた核種変換、プルサーマルの推進等も見据えた高速炉などの研究開発、水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、新型原子炉に関しての言及がある。

一方、世界的には、中国やその他のアジア諸国、中東諸国などでは、人口増加と工業化の進展などから依然としてエネルギー消費量の大幅な増加が続いており、世界のエネルギー消費量は長期的に見れば着実に増え続けていく。現在、世界で使われているエネルギー資源の約 90%は化石燃料であるが、埋蔵量の多くが中東に集中しているため、政情などによりエネルギー供給は不安定になる可能性がある。また、化石燃料の使用は大気中の温室効果ガス濃度を高めるため、第 21 回国連気候変動枠組み条約締約国会議（2015 年 12 月）にて地球温暖化防止対策の新たな枠組み「パリ協定」を採択し、すべての国が温室効果ガス排出削減に取り組むにことになっている。この様な状況の中、我が国では、震災以降、原子力発電停止に伴う化石燃料の大幅輸入による電気代の値上がり（産業界では 3 割増）や再生可能エネルギー導入による賦課金が増加していることを踏まえて、政府は 2015 年 7 月に「長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス）」を定めた。その中で、原子力発電依存度は 20～22%とされ、この規模を維持するためには、今後廃炉となっていくものに代わって新たな原子炉を新設していくことが示唆される。

世界的に見れば中東産油国を含め原子力発電の新規導入を計画している国が多数あり、我が国のみならず世界のエネルギー供給安定性や地球温暖化防止等を図るためにも、高速増殖炉、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・システム及び周辺核燃料関連技術に関する学術の進歩を成し、長期的展望の下に実用発電に供するべく新型原子炉に係る研究の進展ならびに技術の確立を図ることの意義はきわめて大きい。

［動向（歴史）］

2030 年頃からの実用化を目指して、安全性や経済性に優れた第 4 世代原子炉の研究開発が

米国エネルギー省より提唱され、第 4 世代原子力システムフォーラム（GIF : Generation-IV International Forum）の枠組みが作られた。GIF では、発電用原子炉の世代は次のとおり定義された [2)]。

(1) 第 1 世代（Gen-I）
1950 年代から 1960 年代前半に運転を開始した初期の原型炉

(2) 第 2 世代（Gen-II）
1960 年代後半から 1990 年代前半に建設された商業用原子炉

(3) 第 3 世代（Gen-III）
1990 年代後半から 2010 年代頃に運転開始した原子炉で、第 2 世代の改良型として開発された原子炉

(4) 第 4 世代（Gen-IV）
現在、研究が進んでいる原子炉で、高い安全性、火力発電所と比肩できる経済性、放射性廃棄物の負担の最小化および高度な核拡散抵抗性などの特徴をもつ革新的原子炉

ソ連のオブニンスク原子力発電所が、世界初の商用原子力発電所として稼働して以来、発電用原子炉は進化し続けている。現在の主流は軽水炉であり、第 2 世代と第 3 世代の原子炉とされる。これらの研究開発を通じて、建設コスト低減のための標準化や先進的な安全方策を取り入れた次世代軽水炉（第 3 世代＋）の技術が確立されつつある。さらに、原子力発電所建設の投資リスク回避や局所電源ニーズに応えるため、小型原子炉が注目されている。また、革新的原子炉として高度の安全性、持続可能性、良好な経済性等を開発目標とした第 4 世代炉の中でもナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉は、1950 年代から研究開発が進められており、もっとも実用化に近いと考えられている。以下に、これら新型炉の研究開発動向について記載する。

● 次世代軽水炉（Gen-III+）

基本的に次世代軽水炉は第 3 世代炉の改良版と位置づけられ、炉心損傷頻度の低減、建設コスト削減や建設工期の短縮化、長寿命化、高燃焼度化、航空機落下対策などを実現するものである [3)]。従来設計と大きくなる点は受動的な安全性を取り入れたことである。受動的安全とは、異常時に電源駆動機器による制御や運転員による介入なしに自然循環などの物理現象によって事象進展を防ぐ概念である。米国の原子炉である AP1000[4)]や ESBWR[5)]にはこの概念を積極的に設計に取り入れている。AP1000 は、2011 年に米国規制当局 NRC（Nuclear Regulatory Commission）から設計認証を受けた。その際、規制当局より、AP1000 の設計は簡素化され、固有、受動的あるいは革新的な安全およびセキュリティ機能を有することで安全余裕を向上させており、有意な放射性物質放出なしに航空機衝突に対して耐えることができると評価された。我が国でも 2009 年に次世代軽水炉（第 3 世代＋）の開発に着手し、濃縮度 5%超燃料、免震技術、80 年寿命のための新材料と水化学、建設工期短縮のための建設技術、パッシブ・アクティブ技術の最適組合せ、プラントデジタル化技術を枢要技術に掲げた [6)]。原子力委員会は 2010 年にこの取組みを評価し、プロジェクトの着実な進展を求めていた [7)]が、2011 年 3 月の福島第一原子力発電所事故以降は、その開発を安全研究に特化した計画に修正した状況である。

● 小型炉（小型モジュラー炉、受動的・固有安全炉）

IAEA の定義によれば、出力 30 万 kWe 以下が小型炉、70 万 kWe 以下が中型炉とされている [8]。小型炉では、出力あたりの建設コストは高くなるが、投資リスクは低くなる。また、大きな電気出力を必要としない電気料金の高い地域では、小型炉は発電競争力を有している。さらに、水素製造や熱利用などの多目的利用を可能とする。機器が小型であることから、工場製造および機器輸送が容易であり、現地工事が少なく建設工期を短くできるメリットがある。機器の標準化によって複数基設置のモジュラー型を志向することも可能である。また、受動安全や固有安全を取り入れた設計が多いのも特長である。2011 年時点で、世界に 125 基の小型炉があり、28 か国で 17 基が建設中である。米国では 2012 年に mPower 設計を選択し 5 年間の開発資金援助することになった。2013 年には 2 回目の開発提案申請を受け付け、NuScale が選択された。中国では小型高温ガス炉、インドでは重水冷却炉の開発がなされてきた。ナトリウム冷却小型炉は、米国にて 1989 年に PRISM と SAFR、我が国では寿命期間中に燃料交換不要という特徴を有する 4S 炉（東芝）の開発が進められた。

● 第 4 世代炉（Gen IV）

第 4 世代炉とは高い安全性・信頼性の実現などを開発目標とした革新的原子炉であり、2002 年にナトリウム冷却高速炉、ガス冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス冷却炉、超臨界圧水冷却炉、溶融塩炉の 6 炉型が選定された [9]。ナトリウム冷却高速炉は、フランス、ロシア、インド、中国、韓国および EU（European Union）は積極的に研究開発を進めている。我が国は溶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

ナトリウム冷却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）という水炉に次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 [10]。また、放射性毒性が強く寿命の長いマイナーアクチニドの核変換ができ、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 [10]、その重要性はエネルギー基本計画 [1] に記載されている。この炉は、ナトリウムの沸点が高いという特徴により、原子炉を低圧システムとすることができる。従って、単相ナトリウムで炉心冷却ができ、自然循環による電気駆が不要な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徴がある。

米国では、EBR-I、EBR-II、Fermi-I、FFTF などの実験炉を建設し多くの実験データを取得したが、原型炉建設時に核不拡散政策により大型炉開発は中止された。フランスでは、実験炉 Rapsodie、原型炉 Phenix、実証炉 Superphenix を建設し、開発を進めてきたが、政治的理由により 1998 年に Superphenix を廃炉にした。ロシアでは、実験炉 BOR-60、原型炉 BN-350（カザフスタン）、実証炉 BN-600、商業炉 BN-800 と開発を進めてきた。中国およびインドも実験炉の建設・運転に達している。

● 高温ガス炉

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。その後、米国において 1990 年代に安全性と経済性を向上させた GT-MHR の設計が行われ、2000 年代に原子力 2010 プログラムや NGNP プロ

グラムなどを発表し、水素利用の検討に着手した。中国ではペブルベッド型（後述）実験炉 HTR-10 を建設し、2003 年に定格運転を達成した。実証炉 HTR-PM は建設中で、2017 年に建設完了予定であり、本格的な実用化展開を図っている。一方、南アフリカではペブルベッド型の PBMR 建設を推進していたが、2009 年に経済的理由により中止になっている。

我が国では実験炉 HTTR が建設され 2004 年に 950℃で定格運転を達成した [11]。水素製造技術も併せて開発している。HTTR は、黒鉛減速ヘリウム冷却熱中性子炉であり、ガスタービン発電と工業プラントが併設される場合が多く、熱電併給の役割を担う。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。セラミックスで被覆した粒子状燃料を用いることが特徴的で、1600℃の高温状態においても被覆材の閉じ込め機能は損なわないことが実験的に示されている。被覆粒子燃料の封入方法によりブロック型とペブルベッド型の燃料体に分類できる。ヘリウムガスは 100 気圧以下に加圧するが、ヘリウムの漏えい事故が生じても黒鉛減速材の熱容量が大きいため燃料温度は急激に上昇しない固有の安全特性を備えている [12]。

なお、超高温ガス冷却炉は高温ガス炉を発展させたもので、出口温度は 950℃以上を念頭に設計されている原子炉である。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

我が国は、第 4 世代炉としてナトリウム炉である JSFR の開発を実施したが、中断している。現在は、2014 年 5 月締結の日仏高速炉協力に基づきフランスとの協力のもとで ASTRID の開発を進めている。ロシアでは実用炉 BN-1200 が建設中である。ナトリウム炉の安全基準について、ロシアも含め国際的に調和した安全性を要求する動きがある。

ガス冷却高速炉は、フランス主導で欧州中心に ALLEGRO の研究開発が進められている。我が国では、高温ガス炉について資源国カザフスタン等との研究協力や HTTR を用いた安全性試験国際共同研究プログラムを実施するなどの動きがある。2014 年には新規制基準に対する適合性審査を申請して、早期運転再開を目指している。

鉛冷却高速炉は、ロシアで BREST-300 と SVBR-100 が進められており、BREST-300 は設計を終了し 2020 年以降に運転を予定している。また、欧州では ALFRED プロジェクトが推進されるとともに、ベルギーで燃料・材料試験を目的とした MYRRHA 炉の設計研究が実施されており、我が国の加速器駆動システム（ADS）[13]との協力を探る動きがある。さらに、韓国が 2015 年に GIF 覚書に署名し、PEACER 開発に着手しており、米国と中国も設計を進めている。

トリウム液体を燃料とする溶融塩炉は、米国で実験炉を建設した実績があり、最近はいくつかの国で研究開発が開始されている [14]。トリウムを資源（レアアース採掘時の残渣として発生）にもつ中国では 2020 年頃臨界予定のトリウム溶融塩炉開発計画がある。米国では 2016 年に開発支援を発表している。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

次世代軽水炉については、国外では実用化段階である。福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえてバックフィットが行われているが、安全性の高い次世代軽水炉開発プロジェクトが期待される。

小型炉については、米国では 2012 年に小型モジュラー炉認可支援プログラムに加え、民間では、ビル・ゲイツ氏をオーナーとするテラパワー社が 2008 年に TWR と命名した新たな原子炉開発を開始した。TWR の基本炉型は金属燃料ナトリウム冷却高速炉で、過渡時の安全性や電源喪失の除熱性能の高い固有安全炉で、実用化に向けて研究機関と産業界との国際協力で開発を進めている。また、2015 年 9 月にはテラパワー社は中国 CNNC と共同開発するための覚書を署名した。小型炉については、重大事故に係る技術的課題が規制当局より指摘さる一方、米国エネルギー省はサイト認可手法と手順の確立も重要と考えており、有望な技術である。

ナトリウム冷却高速炉については、フランスではプロトタイプ炉の設計・開発を進めている ASTRID プロジェクトを推進しており、欧州における開発を先導している。ロシアでは BN800 が 2015 年 12 月に送電開始し、2016 年 5 月に 95%出力を達成、2017 年には商業運転に入る予定である。また、BN1200（商用炉）は 2016 年に設計終了の予定であり、現在建設中の多目的高速炉 MBIR は 2020 年運転開始の予定である。中国では、実験炉 CEFR がメンテナンスを含めて運転中であり、実証炉 CFR600 が 2018 年に設計終了予定である。韓国では、原子力研究開発事業の中でナトリウム炉の予算が全体の半分を占めるほど重点化して、プロトタイプ炉 PGSFR の設計を進めており、2028 年に燃料装荷を行うとしている。インドでは、2015 年、原型炉 PFBR が完成した。さらに、同サイトに 2 基を建設し、別サイトに 2 基を建設する計画である。

高温ガス炉については、米国では、NGNP プロジェクトが立ち上がりフェーズ 1（2005～2010）でプラント概念設計検討が終了したが、フェーズ 2（当初は 2011～2021；プラント詳細設計、許認可、建設、運転実証）に移行できないでいる。欧州では、過去の実績を踏まえて欧州圏内に建設して実用化をリードしたいと考え、いくつかのプロジェクトを立ち上げている。

英国 AMEC フォスターウィーラー社は中国核工業建設集団公司（CNEC）と高温ガス炉協力に関する覚書を 2016 年に締結した。中国では、実証炉としてペブルベッドモジュール型の HTR-PM が 2012 年から建設中であり、原子炉容器が 2016 年に到着し、2017 年には送電開始予定である。韓国では、原子力水素開発実証計画フェーズ 2 が 2012～2016 年で進められており、原子力研究開発予算の中では 2 番目に重要な項目となっている。インドネシアでも高温ガス炉導入が検討されており、実験炉の基本設計はロシアが 2015 年に落札している。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

次世代軽水炉については、2013 年に施行された規制基準に適合するためにはシビアアクシデント対策などの安全性向上技術、原子力政策の明確化が課題としてあげられる。小型炉に

ついては、商用炉としての実証が課題である。

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革新技術のデータ取得が課題として残っている。高温ガス炉については、「HTTR」を用いた技術実証や併設水素製造技術開発に加えて、安全性向上技術とシビアアクシデント研究、新たな燃料開発など燃料の超長期安定性の課題があげられる。

ナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉を除く第 4 世代炉については、技術的課題が多く実用技術確立までには大きな距離がある。鉛冷却高速炉については、放射性廃棄物低減を目的とした加速器駆動システム（ADS）の成果と共有できる可能性があるが、材料腐食を始めとしてプラントとしての技術確立には安全性や保守補修などの課題が残る。溶融塩炉については、材料の長期健全性、化学状態制御、大型熱交換機器などが課題としてあげられる [15)]。

［今後取組むべき研究テーマ］

ナトリウム冷却高速炉については、機器の性能や設計の妥当性・裕度を確認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、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、水素製造技術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 世代炉については、まだ研究段階であり、材料開発、燃料開発など、取り組むべき研究テーマは多方面にわたる。

（５）政策的課題

次世代軽水炉については、縮小化されたプロジェクトを再開できるように人材維持を図るとともに、将来の既設炉のリプレースの可能性に対応できるように安全性向上技術開発を進め、我が国単独ではなく国際協力の活用などを検討することが求められている。

小型炉については、我が国では電力自由化によりコスト競争が厳しい中で小型炉導入のメリットは小さい。僻地立地の可能性については検討の余地がある。

第 4 世代炉は、2030 年以降の実用化を目指している。将来の原子力利用が必ずしも明確ではない状況では、長期的視野にたって人材維持を図りながら枢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海外プロジェクト（ASTRID など）への参画により技術基盤を維持していくことが求められている。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。

（６）キーワード

新型炉、次世代軽水炉、第 4 世代炉、小型炉、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉、APWR、ABWR、常陽、JSFR、HTTR

（７）国際比較 [16, 17]

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、炉心溶融を伴うシビアアクシデントの現象解明や解析コード開発などが進められている。経済産業省の自主的安全向上WGにて、軽水炉の技術ロードマップが策定されている。新型原子炉の開発においてもこれらの活動を踏まえて研究が実施されている。 ● 第4世代炉のナトリウム冷却高速炉や鉛ビスマス炉などについては材料・熱流動・核特性に関する研究が進められている。
	応用研究・開発	△	↘	● 新規制基準の策定を踏まえ、それに適合する安全性を備えた概念が各炉型にて検討されている。 ● 技術的優位だった第4世代炉としてのナトリウム冷却高速炉（JSFR）の開発は縮小化されているが、仏ASTRID協力で技術の維持をしつつ、国際的に調和する安全基準を策定している。 ● 第3世代炉（APWR、ABWR）は建設、輸出の進捗が滞っている。 ● 次世代軽水炉などの新型炉については現状では産業化の議論までには至っていない。
米国	基礎研究	△	→	● シビアアクシデント耐性燃料などの新型材料開発、積極的にシミュレーション技術を活用する計算技術開発などの研究が活発である。 ● 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。 ● 次世代炉の開発においては、民間の投資も重視しており、超高温ガス炉、溶融塩炉についても研究を実施している。
	応用研究・開発	○	→	● ナトリウム冷却炉については。Clementine、EBR-I、LAMPRE、EBR-II、Fermi-I（以上は金属燃料）、SEFOR、FFTF（以上は酸化物燃料）と多くの建設・運転経験を蓄積している。 ● ブルーリボン委員会は、2012年に特定の燃料サイクルに現時点で政策として不可逆的に関与することは時期尚早であると結論、むしろ、不確かな将来に直面した際、より効果的に環境変化に適応しうるよう、放射性廃棄物管理プログラムと幅広い原子力エネルギー・システムのオプションを保持して開発を続けることが重要とした。 ● 技術的な観点、金属燃料によるナトリウム炉、乾式再処理の組み合わせを有望としている。 ● 2000年にGIFを設立した。第4世代炉の概念を追求する目的である。 ● 2006年にグルーバル原子力エネルギーパートナーシップ、2009年に国際原子力エネルギー協力枠組をそれぞれ発足させた。 ● 小型モジューラー炉の開発が活発である。mPower炉やNuScale炉などの軽水炉改良版に加えて、非軽水炉であるナトリウム炉（PRISM）やガス炉（PBMR）もあげられる。 ● 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。 ● エネルギー省は認可支援のための資金援助を含めて積極的に開発を推進している。 ● 次世代軽水炉AP1000は米国と中国で建設中であり、英国などでも建設計画があり、次世代軽水炉は勢いがある。
欧州	基礎研究	○	→	● 欧州全体で共同して着実に研究を進めている。 ● MYRRAR炉は、実用化を目指すのではなく、試験研究施設として位置付けられている。欧州内の研究開発としてはナトリウム炉に次ぐ優先度があるとされている。
	応用研究・開発	○	↗	● 第4世代炉のナトリウム冷却高速炉ASTRIDの予備的な概念設計段階であり、多額の予算で研究開発を進めている。規制側と調和を図りながら概念設計に進める準備をしている。 ● 第4世代炉のガス冷却高速炉ALLEGROは、欧州戦略投資基金計画の優先投資項目に選定され、研究開発が継続している。 ● 次世代軽水炉EPRはフランスとフィンランドと中国で建設中であり、英国や米国などでも建設計画があり、次世代軽水炉は勢いがある。
フランス	基礎研究	△	→	● 欧州全体で共同して着実に研究を進めている。 ● 一時期、ガス冷却高速炉の研究開発を進めていたが、現在はEU予算の中で基礎的な研究開発が進められている。 ● ADSについては技術課題が多いとし、研究開発は実施していない。

				● 小型炉は経済性がよくないこと、国内に市場が無いことから国内向けの開発は実施していない。
	応用研究・開発	○	↗	● 実験炉Rapsodie、原型炉Phenix、実証炉Super Phenicsと多くの実績、運転経験を有している。 ● 2030年頃に第4世代炉のナトリウム冷却高速炉ASTRIDの運転開始を予定している。2040年頃から実用炉を順次導入予定。 ● 高速炉等による長寿命放射性廃棄物の分離・変換を行う計画である。2012年12月にCEAは産業化に関する報告書を提出し、ナトリウム冷却炉が最良の解決策であると評価した。 ● エネルギー大臣は2015年に既設炉のリプレースとして第4世代炉を建設すべきとの声明を出した。
英国[18]	基礎研究	○	→	● 欧州全体で共同して着実に研究を進めている。 ● 2014年に小型モジュラー炉に関するフィージビリティスタディを実施している。 ● 「経済とエネルギーの安全保障に資する原子力の研究開発を、産官学が結束して実施する」、「短期的、長期的、商業的に成功するために適切なレベルの原子力革新と研究開発を行う」
	応用研究・開発	○	↗	● 独自に開発を行うのではなく、海外の技術を導入するという方針で、大型軽水炉、小型モジュラー炉を導入する予定。 ● 将来の実用炉の優先度は第一にナトリウム冷却炉、次に高温ガス炉である。しかし、独自に研究開発は実施していない。第4世代炉の導入は2050年頃とされ、当面の課題としてプルトニウムバーナーが検討されている。 ● エネルギー担当大臣が「英国の繁栄は原子力発電なくしては困難」と宣言し、「英国の原子力の将来」と題する戦略報告書を2013年に発表した。
中国	基礎研究	○	↗	● Gen-IV研究の一環として、超高温ガス炉、超臨界圧水軽水炉や溶融塩炉の研究も実施している。 ● GIFに関連する活動として､ナトリウム炉とガス炉に関する開発を実施している。
	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、中国原子能科学研究院（CIAE：China Institute of Atomic Energy）により実験炉CEFRが2011年に初送電を達成し、性能試験を実施している。これはロシアの技術協力による。 ● 原型炉は建設せず、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もつことを目的とし、清華大学により実験炉HTR-10の知見を踏まえて、2017年の完成を目指し実証炉HTR-PMを建設している。 ● 自主技術で開発するため、（次世代軽水炉ではない）軽水炉CAP1400の設計を推進している。2016年にはIAEAによる安全審査を完了した。
韓国	基礎研究	△	→	● ガス炉の燃料体であるTRISO燃料を多目的照射炉HANAROで照射実験を行い、基礎研究が進められている。 ● 300MWeのモジュール炉で水素製造するVHTRの検討を行っている。 ● 将来炉の許認可のための基盤研究を実施している。第一段階としてSFRの特性調査、ギャップ分析を行う。第二段階として、SFRの特性調査、評価ガイド案の作成を行うとしている。
	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。 ● 米国System80+をベースに自主技術で開発された次世代軽水炉APR1400はUAEに輸出成功しており、他国でも受注競争に参加している状況である。 ● 小型モジュラー炉SMARTは海水淡水化と熱供給が可能な多目的原子炉であり、海外輸出戦略を展開している。
ﾛｼｱ	基礎研究	△	→	● 第4世代炉の鉛冷却高速炉BREST300、鉛ビスマス冷却高速炉SVBR100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。 ● Gen-IV研究の一環として、超臨界圧水軽水炉や溶融塩炉の研究も実施している。 ● 多目的研究用ナトリウム高速炉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2014年に初臨界を達成し、2015年に発電を開始した。 ● 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、予算化している。 ● 軽水炉VVERは東欧や中央アジア諸国を中心に輸出しており、燃料供給も合わせて輸出産業と位置づけている。
ｲﾝﾄﾞ	基礎研究	△	→	● 大学や研究所で軽水炉を中心に研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	● フランスの技術をもとに独自路線でナトリウム冷却高速炉を開発する予定である。 ● FBTR実験炉（ループ型、13MWe）は1985年から運転中。PFBR原型炉（プール型、500MWe）が2015年に完成しており、2017年に臨界予定である。さらに同型の実用炉(600MWe)をツインプラントとして建設する予定である。 ● 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。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 経済産業省資源エネルギー庁、エネルギー基本計画（2014）
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf
2) The Generation IV International Forum,　https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
3) The World Nuclear Association, Advanced Nuclear Power Reactors
http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Advanced-Nuclear-Power-Reactors/
4) AP1000 PRESSURIZED WATER REACTOR, Westinghouse Electric Company,
http://www.westinghousenuclear.com/New-Plants/AP1000-PWR
5) ESBWR 開発, 日立 GE ニュークリア・エナジー,
http://www.hitachi-hgne.co.jp/activities/innovation/esbwr/
6) 次世代軽水炉等技術開発に係る中間評価について、エネルギー総合工学研究所
http://www.iae.or.jp/report/list/nuclear_energy/nxt_generation_lwr_interim-appraisal/
7) 次世代軽水炉等の技術開発に対する見解（原子力委員会）
http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/09/nxt_generation_lwr/lwr20100824_5.pdf
8) The World Nuclear Association, Small Nuclear Power Reactors
http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Small-Nuclear-Power-Reactors/
9) The World Nuclear Association, Generation IV Nuclear Reactors

http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Generation-IV-Nuclear-Reactors/

10) 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

11) 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

12) 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

13) 文部科学省、群分離・核変換技術評価について(中間的な論点のとりまとめ)（報告書)、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会（2013）
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/070/index.htm

14) 日本原子力発電・日本 NUS、平成 24 年度発電用原子炉等利用環境調査（2013/5）
www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E003617.pdf

15) 吉岡律夫・木下幹康、トリウム溶融塩炉の開発の現状について（2013/5/9）
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2013/siryo17/siryo2-2.pdf

16) 最近の世界の原子力開発動向、日本原子力産業協会 国際部、2015 年 8 月、
https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/08/recent-world-npp-trend.pdf

17) 第 20 会原子力委員会資料第 3 号、海外における高速炉開発について
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2016/siryo20/siryo3.pdf

18) The UK's Nuclear Future, HM Crown Government, 2013

3.5　核融合炉

（１）研究開発領域の簡潔な説明

原子炉は､核エネルギーを電力などに変換して取り出すためのシステムである｡本章では､その中でも軽い核種同士が融合することにより放出されるエネルギーを取り出す核融合炉を対象とする。主に磁場閉じ込め方式の一種である国際熱核融合実験炉 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)及びレーザー核融合の研究開発を対象とする。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

アジア・アフリカ諸国の経済発展に伴う世界的なエネルギー需要の増大に伴い、化石燃料等の天然資源の枯渇が懸念されている中、再生可能エネルギーの研究開発、利用促進が行われているものの、その利用にも自ら限界がある。一方、地球環境を保全する観点から二酸化炭素の排出制限が検討されており、化石燃料の積極的使用は避けなければならない。このような状況の下、エネルギー資源の乏しい我が国においては、エネルギーの安定供給を図ることも当然であるが、地球規模のエネルギー確保の観点からも新しいエネルギー源を模索することが求められている。核融合エネルギーは、燃料資源の豊富さ、発電に際して温室効果ガスの排出がないこと、原理的に核的暴走がない安心感、放射線被ばく事故の潜在的影響度の低さ、多目的熱源としての利用性等の特長を持つことから、世界規模でのエネルギー供給と温室効果ガス排出抑制の両立を可能にする将来のエネルギーと分析されている[1)]。このため、核融合に関する学術および技術の進歩をはかり、長期的展望の下で段階的に実用発電に供する核融合炉の技術開発及びその製作技術の確立は我が国のエネルギー戦略上重要である。

［動向（歴史）］

核分裂は重い元素であるウランやプルトニウムを用いるのに対し、核融合は太陽のエネルギー源となる反応であり軽い元素の水素やヘリウムを用いてエネルギーを発生する。地球上で核融合反応を発生させるためには、人工的に数億℃もの超高温環境を作り出さなければならない[2)]。

● 磁場閉じ込め方式核融合

上記核融合反応を起こすための技術の一つとして、高温のプラズマを効率よく閉じ込める技術が長年の開発課題となっていた。プラズマ閉じ込めの研究は、1950 年代から当時の科学技術庁､大学等によって開始された｡この年代に原子力委員会には核融合専門部会が、日本学術会議には核融合特別委員会が設置されている。1968 年、ソ連の考案した「トカマク」と呼ばれる磁場閉じ込め方式による実験成功を機に核融合研究の主流はトカマク方式となり、1990 年代には日本の JT-60（量子科学技術研究開発機構、以下量研機構）、米国の TFTR 及び欧州の JET に代表される大型トカマク装置で数億℃に及ぶ核融合臨界プラズマ条件が達成される等、トカマクプラズマの高性能化が進展した。

核融合の研究開発は、原子力委員会の策定した段階的アプローチによって進められている[3)]。第二段階核融合研究開発基本計画（昭和 50 年決定）の目標であった JT-60 での臨界プラズマ条件の達成を受けて、原子力委員会は、平成 17 年に決定した第三段階核融合研

究開発基本計画（第三段階計画）において、自己点火条件の達成及び長時間燃焼の実現並びに次段階（第四段階）の原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成を目標とした。これを達成するため、国際熱核融合実験炉 ITER を第三段階計画の実験炉と位置付けて、現在、フランスのサン・ポール・レ・デュランス市において建設が進められている。ITER は 1988 年に日米欧ソ（露）により開始され、その後、韓国、中国、インドが加わり、大規模な国際プロジェクトとなった。2025 年の完成後、実燃料を使って 50 万キロワットの核融合出力を 300-500 秒間持続させる計画である。建設を通して参加各極が核融合技術開発の経験を積めるよう ITER では物納方式で構成機器が参加各極で分担製作･納入を行い、ITER 国際核エネルギー機構がシステムとして統合し、組み上げる。日本の調達分担は、超伝導コイル、中性粒子ビーム加熱装置、電子サイクロトロン加熱装置、ダイバータ、遠隔保守ロボット等の先端機器であり、ITER 国際核エネルギー機構の設立に関する協定において、国内機関に指定されている量研機構の管理の下、重電メーカー等がこれらの機器の製作を担っている。

日本国内では、トカマク方式に無い特徴を持つ核融合炉の選択肢を拡げる観点から、磁場閉じ込め方式の一種であるヘリカル方式の研究及び慣性閉じ込め方式の一種であるレーザー方式の研究が学術研究に重点を置いて進められている。ヘリカル方式では、大型ヘリカル装置 LHD（核融合科学研究所）の実験が 1998 年から行われている。また、閉じ込め原理の全く異なるレーザー方式では､大阪大学が独自に開発した高出力レーザーによる｢高速点火方式｣の実験が進められている（後述）。

● レーザー核融合

レーザー核融合の原理については、不幸にして水素爆弾という形ですでに証明されている。しかし、レーザー核融合研究はいかに制御可能な小さなエネルギーで点火燃焼を起こし、発電ができるかどうかを検証するもので、軍事研究とは目的も方法も大きく異なっている。点火燃焼までは主に物理実験、燃焼実証後は主に繰り返し燃焼のための技術開発が中心である。レーザー核融合方式は各部の独立性が高く、設計に自由度があるため発電実証をする実験炉（磁場核融合では原型炉に相当。出力的には 1/10 程度）クラスまでは現存する技術の改良と、現存する材料で建設可能と考えられている。

国内では、燃料容器に重水素、三重水素混合ガスを充填し、レーザー照射を行い、核融合点火に必要な温度まで加熱することに大阪大学で 1983 年に成功し [4]、また、個体密度の 600 倍の圧縮にも 1986 年に成功している [5]。これらの結果は、その後、米国ロチェスター大学のオメガレーザーで再検証され、チャンピオン記録の更新がなされている。これらの成果を元に世界最大のレーザー核融合施設国立点火施設（National Ignition Facility : NIF）が米国リバモア研究所に建設された(1997-2009)[6]。このレーザーは将来のレーザー核融合発電所の 1 ショット分のエネルギーに近い 1.8MJ のエネルギーを 192 本のレーザービームでターゲットに照射するもので、間接照射の中心点火方式で点火燃焼を目指すものであった。同規模のレーザー核融合研究施設がフランス(LMJ)[7]と中国でも建設中である。

結果的に NIF では 2013 年のプロジェクト終了までに点火に至らなかったが、核融合で生成したα粒子による自己加熱が発生し、核融合反応が急激に増え、プラズマの持つエネルギーの 3 倍の核融合エネルギーが観測されている。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 [8]。また、米国ロチェスター大学では NIF の 1/70

のエネルギーのレーザーで直接照射の中心点火方式が研究され、爆縮されたコアの性能としてはNIFの結果に匹敵する結果が得られている。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

● 磁場閉じ込め方式核融合

ITER計画は建設における遅延により完成時期が当初計画の2020年から2025年に延期された。一方、2007 年より日欧共同事業として進めている「幅広いアプローチ(BA：Broader Approach)」活動の一部として、ITERや原型炉開発を支援するためのサテライトトカマクJT-60SAの建設を量研機構那珂核融合研究所(茨城県那珂市)で進めている(2019年完成予定)。完成後は、ITERが稼働するまでは世界最大規模の実験装置となり、その機動力を生かしてITERを補完し、また、原型炉に向けて高圧力プラズマの定常運転等の先駆的な運転技術の開発が行われる計画である。

● レーザー核融合

NIFではターゲット設計の変更、製作技術の向上、レーザーの増力などが引き続き検討されている。フランス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こと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の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大阪大学にて研究されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

● 磁場閉じ込め方式核融合

核融合発電に向けた技術基盤構築を国が設置する原型炉開発総合戦略タスクフォースと連携して推進するため、原型炉設計合同特別チームが 2016 年に設置された。このチームは、産学官連携の下で原型炉の概念設計活動と関連する研究開発を推進するオールジャパン体制の組織であり、2027年頃までに原型炉概念設計を完了する計画である。

原型炉またはその前段階となる試験装置の設計は、ITER と並行して世界各国で進められている。欧州は、日本とほぼ同じスケジュールで原型炉開発を進めており、原型炉の概念設計と要素技術の研究開発が行われている。中国は、原型炉に向けた炉内機器の工学試験のため、ITERと同様に核燃焼を行う工学試験炉CFETR(Chinese Fusion Engineering Test Reactor)を計画中で、既に概念設計を終えて詳細設計を進めている段階であり、2020年には建設判断、2030年に建設完了のスケジュールとなっている。韓国では、原型炉に向けた技術開発に先んじて原型炉K-DEMOの設計が開始されている。

原型炉に向けた炉工学技術の開発プロジェクトとして、ブランケット施設による燃料増殖試験のプロジェクト、並びに強力な核融合中性子源による炉材料試験の計画が量研機構にて検討されている。この核融合中性子源は完成すれば世界最大規模となり、日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で建設した大強度陽子加速器施設の数倍を超える中性子照射環境を提供することが可能となり、その応用は核融合炉材料の研究

開発にとどまらず、他の工業応用やラジオアイソトープの生産など医療応用への波及効果も期待される。

実験等で得られる現象を再現し、そのメカニズムを理解したり、別の条件での予測を可能にする理論シミュレーション研究も進められている。特に、プラズマの研究では ITER や JT-60SA 等の限定的な実験データを活用して第一原理解析（プラズマを構成する荷電粒子について、外部の電磁力及び相互のクーロン力による運動を追跡する解析手法）または十分検証を行った解析モデルに基づくシミュレーションコードを構築することが重要であり、十分検証されたコードを利用すれば将来の核融合炉の性能や特性を予測することが可能になる。量研機構六ヶ所核融合研究所（青森県六ヶ所村）では、現在、核融合専用のスーパーコンピューター（LINPACK 性能 1.23 ペタフロップス）が稼働中であり、燃焼プラズマのふるまい、核融合炉材料の損傷、核融合原型炉の設計解析などに有効に活用されている。スーパーコンピューターを利用したソフトウェア開発やシミュレーションは、核融合開発において重要なトレンドになると考えられる。

● レーザー核融合

国内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 までに加熱すること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 4keV 以上に加熱できる結果が出ているが、爆縮プラズマが高密度になっているときに追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。

国外では現在建設中で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、どのような展開になるか注目に値する。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

● 磁場閉じ込め方式核融合

核融合炉については、発電実証へ向けて必要となる技術課題が整理されている [9,10]。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という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 等を用いた実機試験、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、革新概念の原理検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ことが求められる。

● レーザー核融合

直接照射でも間接照射方式でも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（燃料のミキシングとも言う）はほとんど制御することはできない。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いかに小さく許容できるレベルに押さえるかが課題である。

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 1.06μm 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。

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凸凹になっていると考えるのが現実的であり、そのような状態で十分な向心衝撃波を作ることができるかどうか、レーザー強度が 1014W/cm² より高くなると、パラメトリック不安定性などで高速電子が発生し、シャープな衝撃波を立てることができなくなるのではないかなどが最大の課題である。衝撃波点火方式で単ショットベースの点火に成功しても、光学系の損傷閾値が下がることからレーザーポートの穴を大きくする必要があり（通常の中心点火方式では炉の中心から見て全立体角の 5%以下）、現実的な商用炉が設計できるか、引き続きの検討が求められる。

［今後取組むべき研究テーマ］

● 磁場閉じ込め方式核融合

ITER 建設のための技術的問題はほぼ解決されており、プラズマ制御を中心とした運転技術の確立が重要な研究課題である。ITER だけでなく、サテライト装置となる JT-60SA での実験研究と理論シミュレーション研究を連携して実施することが効果的である。ITER の次段階となる原型炉では、厳しい中性子照射に耐える材料及び炉内機器の規格基準の確立が求められる。材料の中性子照射特性データは試験片の原子炉内照射によりデータ蓄積が進んでいるが、核融合炉特有の高エネルギー中性子に対するデータが不足している。原型炉開発の技術基盤確立のため核融合中性子源の開発とそれによる材料照射試験が求められている。

● レーザー核融合

中心点火方式では爆縮全体を通し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によるエネルギー移動について、さらなる研究開発が求められる。

高速点火方式では外部磁場による高速電子のガイド、イオン加熱の併用、などの検討の余地は十分ある。また、追加熱レーザー波長を 0.53μm に変換すると（技術的には十分可能）、電子加熱だけでも点火温度に達することができる可能性があり、近年中に実験的に検証される。

（５）政策的課題

核融合装置は大規模プロジェクトであるがゆえに設計から建設完了まで 10-20 年程度を要し、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。したがって、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共に、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研究開発基盤体制を構築することが求められる。

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、安全性など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求められる。

レーザー核融合においては、原型炉を目指す磁場閉じ込め方式に比べ、レーザー核融合は未だ原理検証の段階である。そのため、レーザー核融合の研究は、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。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が日、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。

（６）キーワード

ITER、幅広いアプローチ活動（BA 活動）、JT-60SA、原型炉、レーザー核融合、燃焼、中心点火、高速点火、衝撃波点火、高エネルギー密度科学

（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
日本	基礎研究	○	→	● 量研機構六ヶ所核融合研究所で展開しているBA活動により、ITERの次段階となる原型炉へ向けた研究開発、シミュレーション研究が進展している。研究規模や範囲は限定的。 ● 文科省の核融合科学技術委員会下に原型炉開発総合戦略タスクフォースを組織し、原型炉開発へ向けたアクションプランを策定。 ● レーザー核融合では、大阪大学において爆縮プラズマの点火温度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 Iが進められている。要素研究はほぼ終了し、近日中に統合実験が行われる。 ● 光産業創成大学院大学/浜松ホトニクスでは繰り返しレーザーを用いた核融合の物理実験が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	● ITERの建設のため、高度な技術を要する機器調達を担っており、産業界の技術蓄積、人材育成が着実に行われている。 ● BA活動によりサテライトトカマクJT-60SAを量研機構那珂核融合研究所に建設中。 ● 大阪大学では全国共同利用施設として、大型レーザーを用いた高エネルギー密度科学の研究が進められている。さらに、実験室宇宙物理、超高圧状態を再現できることから惑星物理の実験、ヲームデンスマターの実験的研究が進められている。 ● レーザー核融合炉用のレーザー開発ではさらに繰り返しを上げたレーザーの開発が進められ、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が進められている。
米国	基礎研究	○	↘	● 磁場閉じ込め型では、プラズマ物理、核融合炉材料、安全性などの研究で最先端にあるが、基礎研究の計画及び人的資源の面で下降傾向にある。 ● リバモア研究所のNIFプロジェクトに関する実験結果詳細な解析が2015年9月に開催された国際会議IFSAで発表された。次の展開を図るための補足実験と、開発研究が進められている。 ● ロチェスター大学ではオメガレーザー[11]、OMEGA-EPなどを用いて直接照射による中心点火、高速点火の核融合実験が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	● ITER初期から中心的な役割を果たしてきているが、エネルギー省は核融合をエネルギー研究でなく「科学研究」と位置付けており、核融合実現へ向けた開発計画が停滞傾向。 ● リバモア研究所では世界最大のレーザーを有効に利用するため、共同利用施設としての運営が始められた。また、日本との共同研究にも積極的である。
欧州	基礎研究	○	→	● 今世紀中葉に核融合エネルギーを実現するためのロードマップを策定し、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。

				● フランス原子力庁のLMJの建設が進められているものの、ITER計画との兼ね合いで、建設経費の確保に苦慮している様子である。また、イギリスにおいてはオライオン（5kJ、10ビーム）を用いて、核融合の基礎研究と関連する物理実験が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	● ITERのホスト極として、ITER建設のために相当規模の資源を投入してITERの建設を推進している。 ● 2014年からLMJの完成した一部のビームを使用する共同研究が公募され、1年の準備期間をおいて実施され始めている。
中国	基礎研究	○	↗	● 核融合への参入が比較的遅かったため基礎研究の拡がりは限定的であるが、豊富な人的資源を活かして躍進が見られる。 ● レーザー核融合においては、上海光機所では神光I upgradeが完成し、稼働中である。また、綿陽のレーザー核融合研究所では神光III号が稼働中で、間接照射による核融合の基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	● ITERの調達や国産超伝導トカマクEASTの建設・運転を通して技術力が向上。 ● 国内計画として、ITERの次段階に相当する核融合工学試験炉CFETRの建設を中国政府に提案中であり、その設計及び機器の開発が進行中。 ● レーザー核融合においては、上海光機所にて高エネルギー密度科学の研究が行われている。ここから綿陽にもレーザー部品を供給している。
韓国	基礎研究	○	→	● 核融合への参入が比較的遅かったため基礎研究の拡がりは限定的。 ● KAISTではターゲット照射技術に関する基礎研究が行われている。KAERIでは1kJ/4beamレーザーで爆縮実験が行われている[12]。ただ、韓国でも磁場核融合が主流になっている。
	応用研究・開発	○	→	● ITERの調達や超伝導トカマクK-STARの運転を通して技術力が向上。 ● ITER以降の研究開発については独自開発というよりも国際協力に重点を置く傾向にあり、新しい枠組みを模索中。 ● 2011年にPohangのHandong Global UniversityにGlobal Institute of Laser Technology (GILT)が設立され、米国リバモア研究所と研究協力協定が結ばれ、LIFEベースのレーザー核融合プラント設計研究がスタートした。しかし、NIFの終了以降の動向は明らかではない。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 「核融合エネルギーの技術的実現性、計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」、原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会（平成 12 年 5 月）.
2) 原子力学会、よくわかる核融合炉のしくみ
http://WWW.aesj.or.jp/~fusiolvaesjfnt/rensai.htm
3) 今後の核融合研究開発の推進方策について、原子力委員会核融合専門部会（平成 17 年 10 月）.
4) C. Yamanaka, S. Nakai, T. Yabe, H. Nishimura, S. Uchida, Y. Izawa, T. Norimatsu, N. Miyanaga, H. Azechi, M. Nakai, H. Takabe, J. Jitsuno, K. Mima, M. Nakatsuka, T. Sasaki, M. Yamanaka, Y. Kato, T. Mochizuki, Y. Kitagawa, T. Yamanaka, K. Yoshida, "Laser implosion of high-aspect-ratio targets produces thermonuclear neutron yields exceeding 1012 by use of shock multiplexing" Phys. Rev. Lett., 56, 1575-1578

5) S. Nakai, K. Mima, T. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Kato, K. Nishihara, T. Sasaki, M. Nakatsuka, M. Yamanaka, H. Azechi, T. Jitsuno, T. Norimatsu, K.A. Tanaka, N. Miyanaga, M. Nakai, M. Takagi, Y.W. Chen, H.　Katayama, M. Katayama, R. Kodama, H. Nakaishi, Y. Setsuhara, A. Nishiguchi, T. Kanabe, C. Yamanaka,
13th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Washington, DC, USA, 1-6 Oct. 1990 [IAEA-CN-53/B-1-3]
6) Lawrence Livermore National Laboratory
https://lasers.llnl.gov/news
7) The Megajoule Laser facility
http://www-lmj.cea.fr/index-en.htm
8) E. I. Moses, J. D. Lindl, M. L. Spaeth, R. W. Patterson, R. H. Sawicki, L. J. Atherton, P. A. Baisden, L. J. Lagin, D. W. Larson, B. J. MacGowan, G. H. Miller, D. C. Rardin, V. S. Roberts, B. M. Van Wonterghem, P. J. Wegner
Overview: Development of the National Ignition Facility and the Transition to a User Facility for the Ignition Campaign and High Energy Density Scientific Research, Fusion Science and Technology / Volume 69 / Number 1 / January 2016 / Pages 1-24
9) 核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告（平成 26 年 7 月）.
10) 核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告 -原型炉技術基盤構築チャート-（平成 27 年 1 月）.
11) The Laboratory for Laser Energetics
http://www.lle.rochester.edu/
12) The Korea Atomic Energy Research Institute
http://www.kaeri.re.kr:8080/english/sub/sub03_03_01_01.jsp

3.6　原子力安全

（１）研究開発領域の簡潔な説明

原子力施設の安全確保のための様々なリスク評価の手法確立やシビアアクシデントへの対応、また、緊急事態時における公衆、作業者、インフラ、環境等への影響を低減するための技術基盤に関する研究開発領域である。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

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、甚大なものとなりうる[1-2]。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といえる。安全を達成することは、ゼロリスクを実現することであると捉えられることもあるが、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ことから、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[3]。なお、社会通念上、許容されるレベルの安全性を達成したとしても、ゼロリスクを目指して、新しい知見取り込みつつ継続的に安全性を高めていく取り組み（継続的改善）が重要とされている。

［動向（歴史）］

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。

1979年に米国ペンシルベニア州において発生したスリーマイルアイランド原子力発電所2号機事故[4]は、加圧逃し弁の開固着による小規模冷却材喪失事故（小LOCA）、誤認しやすい原子炉水位の表示、運転員の適切でない対応操作などが重なり、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。なお、炉心は大規模に損傷したものの、原子炉圧力容器は健全であり、周囲への放射性物質の放出は限定的であり、長期間の避難などの事態には至らなかった。この事故は、マンマシンインターフェースの重要性、ヒューマンエラーの防止などに関する取り組みを促進するとともに、軽水炉でもシビアアクシデントが起こり得るとの認識のもと、シビアアクシデント対策の充実のきっかけになった。また、本事故発生前から実施されていた確率論的リスク評価により、小LOCAによる炉心損傷確率が比較的高いことが示されていたことから、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。

1986年に旧ソ連で発生したチェルノブイリ原子力発電所4号機事故[4]は、低出力での自己制御性の低さ、いくつかの運転規則の違反などが重なり、急激な過出力が発生、原子炉および建屋が爆発的に破壊されたものであった。また、その後発生した黒鉛による火災により、大量の放射性物質が広い範囲にわたって飛散した。この事故では、原子炉が有する固有の安全性の重要さが再認識されるとともに、運転規則の度重なる違反が発生した組織のあり方（安全文化）の重要性が注目され、特に安全文化を醸成する取り組みのきっかけとなった。また、欧州では、本事故に起因するセシウムが広範囲に検出され、脱原発の動きが広がりを見せる

など社会的に大きな影響を受けるとともに、軽水炉における過酷事故対策の取り組みをさらに加速させる要因となった。例えば、欧州において、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、本事故の後に導入が進んだ。

2011 年に発生した福島第一原子力発電所事故[1-2),4)]では、地震に起因する巨大な津波により炉心冷却などの安全機能が広範囲に一斉喪失、結果として当時出力運転中であった 1-3 号機が大規模な炉心損傷に至った。溶融した燃料(の一部)は、圧力容器を貫通し、格納容器内まで広がっているものと推定されている。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新たに規制基準が策定された。新たに策定された規制基準においては、潜在的なリスクが大きい施設に対し、従来は事業者の自主的措置として導入がなされていた過酷事故対策が義務付けられるとともに、設計基準事象として種々の外的事象に対する対策が新たに求められるようになった。

また、欧州では、2004 年より 19 ヶ国が参加する過酷事故研究ネットワーク（SARNET）を EU 内に設立して、過酷事故に関する共同研究、研究成果のデータベース化、教育・人事交流などを実施している[5)]。SARNET では、過酷事故における優先課題を、(1)原子炉における溶融炉心冷却、(2)溶融炉心コンクリート反応（MCCI）時における溶融炉心冷却、(3)圧力容器外水蒸気爆発、(4)格納容器内の水素混合・燃焼、(5)ソースタームに及ぼす高燃焼度燃料及び MOX 燃料の酸化の影響、(6)原子炉冷却系及び格納容器内におけるヨウ素化学の 6 項目に絞って研究開発を重点的に進めている[6-7)]。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

設計基準事象を大きく逸脱する過酷事故については、事象および事故シーケンスが複雑であること、実験データが得にくいこと等の理由から、予測計算の不確かさが大きい。そのため、過酷事故進展解析においては、機構論的なモデル開発、部分的な実験データの取得などの研究が進められており、これらの成果が過酷事故進展解析コードに組み込まれつつある[8)]。

また、新規制基準においては、決定論的な手法のみならず、確率論的リスク評価により、プラントの弱点を見つけ出し、過酷事故対策を行うことを求めている[9)]。そのため、確率論的リスク評価に関する研究が精力的に進められている。従来、炉心損傷までの確率論的リスク評価（レベル 1）が主として行われてきたが、格納容器破損及び放射性物質の放出（レベル 2)、周囲への健康被害（レベル 3）についても取り組みがなされつつある。また、従来あまり対象とされなかった燃料プールや、多数基立地の特徴を取り扱うリスク評価も行われつつある[10)]。

さらに、過酷事故発生時の対応策（アクシデントマネジメント）に関する検討が進み、対応するための設備（ハードウエア）および体制（ソフトウエア）の整備が進んでいる。また、過酷事故時のプラントの状況（高温・高圧・高線量）におけるプラント監視のための計装系について、開発が進んでいる[11)]。これらの対応は、新規制基準への適合性確保と、自主的な安全性向上の取り組みとして実施されている。

解析コードの開発では、水蒸気爆発、MCCI、水素混合・燃焼、FP 挙動など個々の単一現

象の解析に特化した専用解析コードが開発され、実験結果に基づき検証が進められた。また、シビアアクシデント時のプラント全体の挙動を解析するため、現象論モデルを統合することによる総合解析コードが開発された。米国規制委員会は MELCOR、米国産業界は MAAP、欧州では ASTEC などのコードが開発され、我が国では JAEA の THALES などのコードが開発されている。個々の事故シナリオにおける事故進展の時間的スケール、格納容器破損モード、ソースタームの評価に利用され、福島第一原子力発電所事故の解析でも利用されている。さらに、物理現象を精緻に表現した多次元の数式・理論式で構築した機構論的モデルを用いて詳細な解析を実施するための詳細解析コードが開発されている。米国規制委員会は SCDAP/RELAP5、米 ISS は RELAP/SCDAPSIM、仏 IRSN は ICARE/CATHARE、独 GRS は ATHLET-CD などのコードが開発され、我が国では経済産業省の支援によりエネルギー総合研究所において SAMPSON コードが開発されている。

なお、原子力災害対策指針が改定され、放射性物質の拡散予測に基づかずに緊急時モニタリングの結果により防災のための行動を起こすこととされた[12]。一方、原子力発電所の立地地域からは放射性物質の拡散予測を防災に活用したいとの声も上がっている[13]。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

過酷事故進展解析においては、解析モデルの開発・改良の観点から、日本原子力学会「シビアアクシデント評価」研究専門委員会が 2011 年 10 月より PIRT（Phenomena Identification and Ranking Table）手法に基づく研究課題の抽出を進めている[14]。この一環として、総合解析コード SAMPSON の開発が経済産業省の支援の下、エネルギー総合研究所を中心として産官学の参画により進められている。また、粒子法（MPS 法）を用いた機構論的な原子炉下部ヘッド損傷過程の解明などの取り組みがなされている[15]。また、過酷事故時における格納容器内の環境（高温・高圧・高放射線・高湿度）にも耐えうる各種の計装系の開発が、経産省による発電用原子炉の安全対策高度化事業等として実施されている[11]。

さらに、原子力規制委員会の予算により、JAEA では格納容器内の熱流動、特に、格納容器加圧破損、水素リスク及び FP 挙動に関連した ROSA-SA（Rig of Safety Assessment-Severe Accident）プロジェクトを開始した。本プロジェクトの中心となる新しい大型の格納容器試験装置は、CIGMA（Containment InteGral Measurement Apparatus）と呼ばれ、欧州にある類似の大型試験装置に比べて、特に高温までの実験が可能であるとともに、CFD コードの検証にも役立てるため、詳細な計測が施されていることに特徴がある[16]。また、JAEA における解析コードの開発では、PRA 用の高速シビアアクシデント解析コード THLES2 と格納容器内の水相内のヨウ素反応速度論解析コード KICHE を結合した総合解析コード THALES2/KICHE を用いて、福島第一原子力発電所事故の解析等によりソースタームに関する技術的知見を取得することとしている[17]。

国際研究協力プロジェクトでは、OECD/NEA の主催により、福島原子力発電所の事故炉の廃止に向けた燃料デブリの取り出しの準備として、シビアアクシデント解析コードの改良、および事故進展と現在の炉心状況の解析のための共同研究計画（BSAF 計画：Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project）が進められている。本計画には、フランス、ドイツ、日本、韓国、ロシア、スペイン、スイス、米国の 8 ヶ国が参加し、JAEA をホスト機関として、国内関連研究機関、産業界の協力により、

2012 年～2015 年まで、各国で利用可能な総合解析コードを用いた解析が実施された[18]。また、引き続き 2015 年～2018 年の Phase 2 では、加、中、フィンランドの 3 ヶ国が加わり、格納容器外での核分裂生成物の挙動評価、事故後最大 3 週間程度までのプラントの状態評価を目的とした解析が、エネルギー工学研究所（IAE）をホスト機関として実施されつつある。

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、実施すべき原子力安全研究の網羅性や緊急度・重要度を明確化し、重畳を排して効率的な開発を進めていく観点から、総合資源エネルギー調査会･原子力小委員会のもと、自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループが設置された。日本原子力学会「安全対策高度化技術検討」特別専門委員会との連携のもとで、2015 年 6 月に「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」が報告されている。このロードマップにおいては、今後重点的に開発を進めていくべき分野が検討されている[19]。なお、本ロードマップは、定期的に更新(ローリング)が実施される予定である。

（４）科学技術的課題[15]

［課題（ボトルネック）］

● 過酷事故進展解析・過酷事故対応

過酷事故現象は、溶融炉心と冷却材の相互作用、溶融炉心とコンクリートの反応、水蒸気ないし水素雰囲気中での FP エアロゾルの挙動や水素の格納容器内での挙動など、複雑な物理現象を伴いながら進展する。これらの物理現象は、実験そのものが行いにくいことから、解析モデル検証のためのデータが得にくい傾向にある。また、一般に多成分・多相流が関与するとともに、高温･非平衡など現象として複雑な系の熱流体力学、物理、化学の混合課題であることから、多分野にまたがる連成解析が必要となる。さらに、こうした複雑な現象を解明するためには、異なる分野の多くの専門家の連携も必要となる。

廃止措置の過程で、福島第一原子力発電所事故における炉心・原子炉容器・格納容器の損傷箇所や損傷程度などについて、重要な知見が得られることが期待されるが、高線量下の作業のため、この調査は相当長期にわたると予想されている。

● リスク評価

外的事象に対するリスク評価は、様々なハザード評価手法を用いた取り組みがなされているが、不確かさの扱いなどまだ確立されていない課題がある。さらに、最新知見の取り込みを継続的に行うことは、福島第一原子力発電所事故の重要な教訓であるが、どのように意思決定を行うべきか、議論がなされている。また、複数基立地のサイトに対するプラント間の相互作用を考慮した確率論的リスク解析については、取り組みが進められているが、実用段階には至っていない。

● 安全余裕の拡大と定量化

新型被覆管、高精度シミュレーション手法などの採用により、安全余裕を拡大させる必要があるものの。これらの導入に必要な解析コードの認証の手続きが確立されていない。また、従来設計余裕として見込まれてきた安全余裕の内訳の定量化を進めることが望まれる。

● シミュレーション手法の高度化

安全対策高度化に用いる高精度シミュレーション計算については、着実に研究が進めら

れているが、特に大規模な実現象に関する検証(Verification & Validation)をどのように行っていくのか、検討が必要である。地震・津波については、大規模シミュレーションの活用が進みつつあるが、他の外的事象についての取り組みも望まれる。

● 原子力防災

原子力防災は、深層防護の第 5 層に位置づけられるが、第 4 層に相当するアクシデントマネジメントとの連携を強化することが求められる。

［今後取組むべき研究テーマ］

今後取組むべき個々の研究テーマについては、上述の日本原子力学会による「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ 2015（改訂版）」にもその詳細が示されているが、下記に幾つか具体的なテーマについて記載する。

● 過酷事故進展解析・過酷事故対応

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の検討が求められる。

● リスク評価

リスク評価に関する研究テーマとして、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

新型被覆管の導入、最新の解析手法の導入などがテーマとして挙げられる。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が求められる。

● シミュレーション手法の高度化

様々な外的事象に対するシミュレーション手法の開発が挙げられる。

● 原子力防災

オンサイト・オフサイトの連携技術の開発が挙げられる。

（５）政策的課題 [15)]

● 安全目標の設定

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。旧原子力安全委員会が安全目標に関する中間とりまとめをした後、安全目標そのものに関する議論は進んでいない。

● リスク情報の活用

リスク情報に基づいた規制のあり方の改善に取り組む。

● 検査制度

2015 年に実施された IRRS により、複雑な検査制度について、リスク情報の活用なども含めて、より効果的なものとなるよう、改善することが求められており、規制委員会にて検討が進められている。

● 過酷事故進展解析・過酷事故対応

福島第一原子力発電所事故前までの大幅な予算縮減により、過酷事故に関する研究規模が縮小された結果、90 年代まではある程度存在した専門家がほとんどいなくなっており、研究基盤が失われていることが大きな課題である。福島第一原子力発電所事故を踏まえ、シビアアクシデント研究を中心とする安全研究基盤の充実強化が図られつつあるが、継続してこの取り組みを行うことが求められている。産学官の連携と適切な役割分担により、国際協力も視野に入れて、この分野の研究開発を効果的・効率的に進めつつ、若手の研究者の参画を得て専門家を中長期的に育成することが重要である。

● 原子力防災

現在、緊急時対応については、原子力規制委員会は放射性物質の拡散予測を用いず、緊急時モニタリングの結果により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、このニーズをどのように取り込み、対応していくかが課題である。

● 原子力人材

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である。

（６）キーワード

外的事象、低頻度・高影響事象、リスクマネジメント、信頼性重視保全、PRA、シビアアクシデント、過酷事故、炉心損傷、溶融炉心、水蒸気爆発、溶融炉心コンクリート反応（MCCI）、格納容器直接加熱（DCH）、水素爆発、核分裂生成物（FP）、ソースターム、エアロゾル除去、ヨウ素化学、総合解析コード、詳細解析コード、緊急時マネジメント、緊急時対応計画、レベル 3PRA

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	● 福島第一原子力発電所事故の教訓として、確率論的リスク評価の活用を含むリスク評価の重要性が再認識されている。標準の策定、リスク評価手法の高度化などさまざまな取り組みが精力的になされている。 ● 一方で、福島第一原子力発電所事故以前の取り組みは低調であったことから、米国などに比べると遅れがある。 ● 津波PRAなど外部事象に絡んだリスク評価や高経年評価に関する取り組みが進められている。 ● 防災に関しては、福島第一原子力発電所事故を契機に、新たな個人モニタリング機器の開発、無人航空機モニタリングの開発、除染技術、農作物対策技術、放射性物質の環境移行挙動、線量再構築モデルの開発など、さまざまな分野での基礎研究が進められている。 ● 過酷事故に関しても、筑波大学、早稲田大学、東京大学、京都大学、JAEAなどで基礎的な研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↗	● 発電用原子力プラントやそのほかの原子力施設における重大事故評価の際、確率論的リスク評価によって事故進展シナリオの特定が行われ、この事故シナリオに対して安全性評価が求められるなど、規制への導入が進んでいる。ただし、取り組みは緒に就いたばかりである。 ● 海外での輸出を考慮し、PRAなどの充実が図られているものの、まだ机

				上検討にとどまっているPRAも多く、今後、現場の状況を反映した実践的な取り組みが求められる。 ● 原子力災害対策指針に基づいて実効的な地域防災計画策定のためにリスク情報を活用した防護措置戦略のガイダンスなどの研究が進められている。 ● 地域防災計画策定に有用な避難時間推定などのシミュレーションモデルの応用などが開始されている。 ● 福島第一原子力発電所事故後にJAEAでは応用を目指した新たなプロジェクトを開始している。エネ総研では、総合解析コードSAMPSONの開発を実施している。東京電力では格納容器フィルターベント、東芝ではコアキャッチャーなどの開発を進めている。 ● 原子力安全早退としての取り組みを進めるため、経産省/日本原子力学会により自主的安全性向上・人材育成ロードマップが作成され、ローリングが行われる予定である。 ● 日立、東芝、三菱等の産業界では、主として国プロジェクトのもとでシビアアクシデント対策機器の開発を進めている。
米国	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。 ● PRAについて、レベル2やレベル3の見直しを含め検討が進んでいる。 ● 緊急事態への防護目標を達成するための基本的な技術基盤はすでに整備されているといってよく、防災訓練・演習手法の改良、リスクコミュニケーション分野などで基礎的研究は継続している。 ● 過酷事故に関しては、Perdue大学、Wisconsin大学などで基礎的な研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↗	● 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。 ● また、高度なPRAの開発が進められ、リスク評価の活用が進んでいる。 ● NRCの「防護措置戦略のガイダンス」の改定において、PRA手法による防護措置効果が検討された。 ● スリーマイル島原子力発電所事故以後、法的枠組み、事業者・地方政府・国の緊急時対応計画、技術支援システム、評価・監査システムなど、防災システムの整備がもっとも進んでいる。9.11以降はテロ起因の防災訓練・演習を充実させている。福島第一原子力発電所事故の教訓の反映のステップも開始されている[34]。 ● 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。 ● Westinghouseなどで静的水素処理設備(PAR)などが産業化されている。
欧州	基礎研究	◎	→	● 原子力発電所を多数有するフランスでは、1990年代初頭から確率論的リスク評価が実施されている。 ● 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。 ● 防災に関しては、NERISプラットフォームを中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。 ● 過酷事故に関しては、フランスの放射線防護・原子力安全研究所、スウェーデン王立工科大学などを中心としたSARNETの枠で基礎的な研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↗	● 2012年に、従来の安全評価（決定論的手法に基づく）を補完するものとして、規制において確率論的リスク評価を導入することをフランスが決定。 ● 英国では、1980年代にサイズウエルB原子力発電所（加圧水型軽水炉）導入の際にレベル1～3の確率論的リスク評価が実施されている。 ● フィンランドでは、1980年代に設定された規制指針において、新設炉に対して設計時に考慮すべき確率論的設計目標が示されている。 ● 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、NERISプラットフォームを中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。 ● 欧州各国では、チェルノブイリ原子力発電所事故以後、東欧地域でも法的枠組み、事業者・地方政府・国の緊急時対応計画、技術支援システム、評価・監査システムなど、防災システムの整備が進んだ。特に、国境を越える災害対応の連携に力を入れている[36]。

				● 欧州委員会（EC）が迅速放射線情報交換システム（ECURIE）や放射線データ交換プラットフォーム（EURDEP）を長年整備している。 ● 過酷事故に関しては、これまでフランス、ドイツなどで大規模な炉心損傷・FP挙動実験が実施されてきたが、現在もIRSNなどで比較的大規模な実験を実施するとともに、総合解析コードASTECの開発がSARNETの枠で実施されている。 ● AREVA社（フランス）などで格納容器フィルターベント、水素再結合器などが実用化されている。IMI Nuclear社（スイス）はPSIと共同で有機ヨウ素を高率に除去できる第2世代格納容器フィルターベントを開発している。
中国	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。
	応用研究・開発	○	↗	● リスクやシビアアクシデントマネジメントなどに関する研究に、国家として積極的に投資している。 ● 上海交通大学、上海核工程研究設計院などで応用を目指した比較的大規模な熱流動実験が実施されている。 ● 近年の原子力発電所の増設計画に沿って、法的整備も進み、緊急時対応計画はIAEA基準に沿って整備されている。
韓国	基礎研究	○	→	● ソウル大学、KAIST、浦項工科大学校(UNIST)、韓国原子力研究所(KAERI)などで基礎的な研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	● 保全、防災においては、米国型の対応が整備されている。 ● 韓国原子力研究所などで応用を目指した格納容器健全性、コアキャッチャーなどに比較的大規模な実験が実施されている。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書」, 原子力災害対策本部, (平成 23 年).
2) 「福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言: 学会事故調 最終報告書」, 日本原子力学会, (2014 年).
3) 「安全目標に関する調査審議状況の中間取りまとめ」原子力安全委員会安全目標専門部会、平成 15 年 9 月.
4) Lee McCORMICK (著), 西原 英晃, 杉本 純, 村松 健(訳), 「原子力発電システムのリスク評価と安全解析」, 丸善出版, (2013).
5) SARNET - Severe Accident Research NETwork of Excellence. : http://www.sar-net.eu
6) Magallon, D., et al., European expert network for the reduction of uncertainties in severe accident safety issues (EURSAFE), Nuclear Engineering and Design, 2005, vol. 235, p. 309-346.

7) Jean-Pierre Van Dorsselaere, et al.; Sustainable integration of EU research in severe accident phenomenology and management, Nuclear Engineering and Design, 2011, vol. 241, p. 3451-3460.
8) Sugimoto, J.: Important Severe Accident Research Issues after Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Station, ICONE21, July-August 2013, Chengdu, China.
9) 新規制基準について：
https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shin_kisei_kijyun.html
10) 確率論的リスク評価日米ラウンドテーブルについて：
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/anzen_wg/pdf/011_01_00.pdf
11) 電気事業者の原子力安全研究への取り組み：
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/anzen_wg/pdf/009_01_02.pdf
12) 原子力災害対策指針：https://www.nsr.go.jp/data/000024441.pdf
13) 「原子力災害対策充実に向けた考え方」原子力関係閣僚会議決定、平成 28 年 3 月 11 日
14) シビアアクシデント評価に関する調査研究報告書(中間報告)、「シビアアクシデント評価」研究専門委員会、平成 25 年 11 月
15) http://www.f.waseda.jp/akifumi.yamaji/upload/reserch.pdf
16) Yonomoto, T., et al., Thermal Hydraulic Safety Research at JAEA after The Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Station Accident, NURETH-16, August 30-September 4, 2015, Chicago.
17) Maruyama, Y., et al., Development and Application of Methodologies for Source Term Analysis, Proc. International Experts Meeting on Strengthening Research and Development Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, February, 2015, Vienna, Austria.
18) F. Nagase, R. O. Gauntt, M. Naito, “Overview and outcomes of Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS (OECD/NEA BSAF Project)”, Proceedings of 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16) (USB Flash Drive) (2015).
19) 自主的安全性向上・人材育成ロードマップ
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denkijigyou/jishutekianzensei/report_002.html

3.7　使用済燃料等の処理処分・廃止措置

（１）研究開発領域の簡潔な説明

原子力発電所等で発生した使用済燃料の処理技術、放射性廃棄物の処理処分技術、廃止措置に関する技術に加えて、これらの安全性評価に関する技術の開発動向についての研究開発領域である

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

放射性廃棄物の問題は、1950 年代の原子力利用の黎明期から、その重要性が認識されていた[1,2]。当初は、地上や海洋での処分が検討されたが、地上施設における高レベル廃液の漏洩事故や海洋投棄を禁止する国際条約（ロンドン条約）の制定を受けて、アメリカやヨーロッパにおいて、地層処分が技術的に実現性の高いオプションとして推奨されるようになり、その処分概念の具体化が進められた。また、原子力施設の運転中及び廃止措置時に多種類の低レベル放射性廃棄物が発生する。特に廃止措置時には、その数%を固体の低レベル放射性廃棄物として処理処分する必要があり、最終的には浅地中処分が選択されている。このため、これらの安全な処理処分を行う技術が不可欠となっている。

［動向（歴史）］

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

原子力施設においては、運転中及び廃止措置時に大量の廃棄物が発生する。これら発生する低レベル放射性廃棄物は、処分の前に固型化する必要があり、セメント固化法、アスファルト（ビチューメン）固化法およびプラスチック固化法がある。また、処分時には、放射性廃棄物の放射能濃度を決定する必要がある。

国内では、運転中に発生する低レベル廃棄物の処分施設が供用中であるが、解体廃棄物の処分施設が必要である。特に、炉内等廃棄物に対する中深度処分に関して、現在、原子力規制委員会で規制制度の検討が進められている[3]。

国外では、原子力利用を進めてきた幾つかの国で、原子力施設（原子力発電所、核燃料サイクル施設等）の廃止措置が進められている。また、原子力開発に使用された原子力サイト（軍事利用を含む）などで放射能汚染した土壌の処理などを含むの環境修復も進められている[4]。

● 高レベル放射性廃棄物（HLW）の管理・処分

HLW の管理・処分に関しては、人間が設計・敷設する複数の工学的なバリア（人工バリア）と周囲の環境に内在する放射性核種の移行抑制と保持の機能（天然バリア）からなる多重バリアシステムが HLW 地層処分の安全性確保における基本的な考え方として示され、要素技術の開発が進められた。我が国においても、1976 年の原子力委員会で、地層処分を重点的に研究する方向性が示された。その後、我が国における地層処分の成立性を示すための研究開発が進められ、その成果が第一次取りまとめ「地層処分の技術的可能性」（’92）[5]、第二次取りまとめ「地層処分の技術的信頼性」（’99）[6]としてまとめられた。そして、2000 年には、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（特廃法）が制定され、

HLW 処分の実施主体として、原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立された[7]。

わが国では、エネルギーを長期的かつ安定に確保し、放射性廃棄物を適切に処理・処分する観点から、使用済燃料を再処理し、回収したウランやプルトニウムを再び燃料として利用する核燃料サイクルが原子力政策における基本方針とされてきた。2013 年 3 月の時点で、日本国内には約 17,000 トンの使用済燃料が存在している[8]。この他、約 2,200 本のガラス固化体に相当する使用済燃料がフランスやイギリスの再処理事業者の工場に運ばれ、再処理が行われた[9]。再処理に伴い発生したガラス固化体はわが国に返還されることとなっており、フランスからの返還は 2008 年に終了している。これらを含めた再処理後のガラス固化体は、国内外に約 2,500 本貯蔵されている[8]。さらに 2013 年 3 月までに貯蔵されている使用済燃料をすべて再処理した場合、既存のガラス固化体と合わせて合計約 25,000 本のガラス固化体に相当する。

NUMO では、2020 年前後までの原子力発電に相当する高レベル廃棄物（ガラス固化体 4 万本以上）を地層処分することを想定している[10]。処分施設建設候補地の公募を続けているが、現時点で候補地の応募はなく、社会的受容性の面において課題が残っている。このような状況の中、場所を指定しないジェネリックな処分場に対して、長期的な環境変遷を考慮した安全評価をもって安全性の見通しの検討が進められてきた。

放射性廃棄物の処分に係る環境負荷の低減や、処分の効率化を目指すために、分離・変換技術の研究開発が進められてきた。長寿命放射性核種の核変換は発電用原子炉サイクルを用いて核変換を行う方法と、加速器駆動システムのような核変換に最適化された専用システムを用いる階層型サイクルに基づく方法の 2 種類に大別され、それぞれに適する分離技術及び核変換技術の研究開発が、並行して進められている[11]。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

廃止措置終了確認における、サイト解放についての法制度化が今後予定されている。この際の評価手法の開発が重要である。

また、放射性廃棄物処分場の安全確保のために、埋設後施設解放までの管理期間のモニタリングは重要であり、効率的なモニタリング手法の開発が重要である。

処分後の長期評価は放射性廃棄物処分の特徴であり、より現実的かつ信頼性を向上させるための研究開発が重要であり、国際的にも各種解析手法の開発ならびにデータベースの拡充が期待される。

また、廃止措置及び放射性廃棄物処理処分は長期のプロジェクトであり、知識の維持、次世代への継承の手法を開発していくことが重要である。

廃止措置及び放射性廃棄物の処理処分（低レベル）は基本的には既存技術で対応が可能と考えられてきたが、廃止措置の費用評価、環境影響評価などに関する検討は引き続き実施されている。他方、廃止措置が必要となる施設が今後増加することが予想されることを背景に、これまでの技術を見直し、より安全で効率的な廃止措置を目指す技術開発の動きも見逃すことはできない[12]。

超ウラン元素の廃棄物処分については、2000 年に「TRU 廃棄物処分概念検討書（第 1 次 TRU レポート）」[13]が、2005 年には「TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－」がとりまとめられた[14]。これらの技術報告書を通して、超ウラン元素の廃棄物処分の技術的成立性や安全性の見通しについて理解が深まってきている。一方、2007 年の特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（特廃法）の改正によって、超ウラン元素の廃棄物の一部が、高レベル放射性廃棄物の処分同様、地層処分対象となり、実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）が関連する研究機関と連携して技術開発を進めている[5]。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

高レベル廃棄物の処分の実現に向けては社会的合意形成が不可欠であるが、原子力エネルギーを利用する国民一人一人が意思決定に参加するための土台が必要である。その土台とは、国民の理解やそのための客観的な情報の提供、政府や事業者の信頼の獲得、多様な立場・価値観を持つ国民から構成される社会での意思決定の枠組み等である。また超長期に及ぶリスクに係る安全規制制度の構築のためには、世代間倫理を含めた考え方を明確にすることが求められる。

このような中、技術的には、処分の安全評価の信頼性の確保を継続して追求する必要がある。例えば、日本原子力研究開発機構では、処分場環境での核種の振る舞いを理解する上で重要なデータを熱力学・収着・拡散データベース等にまとめてきた。しかし、これらは、ばらばらの実験条件で個別に取得されたデータの集約であり、これらを分析して系統的に理解する試みはあるものの、多様な環境条件の変化に対して核種の挙動を予測できるほど網羅されていない。また、知見を拡充するにも、処分候補地が挙がっていない現状では、データ取得条件を絞り込めない。現状では場所を指定しないジェネリックな安全評価解析も、候補地が挙がると具体的な評価を実施することとなる。調査が段階的に進むにつれて増していくデータとともに、安全評価の解析体系をより具体的に発展させていく必要があり、この段階的調査全体を通した安全評価手法の確立が必要である。ネックとなっている最終処分場については、科学的有望地を 2016 年 10 月以降に、国が提示することになっている[15]。さらに、廃棄物輸送時の安全性確保の観点から、沿岸部、特に、沿岸海底下への地層処分に関する技術的課題の整理が始められている[16]。

また、福島第一原発の燃料デブリの処分に関しては、廃棄体としての性状がガラス固化体とは異なる可能性が高いことから、従来の処分概念にとらわれない柔軟な研究開発が重要となる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

廃止措置における知識継承を目的として、原子炉施設の知識マネジメントシステムの開発が JAEA で実施されている[17]。また、国外では、3D シミュレーションを用いた廃止措置の計画検討のためのツール開発が行われている[18]。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

国内においては、革新的研究開発推進プログラムにおいて「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」のプロジェクトが進められている。ここでは、高レベル

放射性廃棄物の低減を目指して、分離変換技術の研究開発が進められている[19]。

フィンランドでは、2015 年 11 月、処分実施主体のポシヴァ社に処分場の建設許可を発給され、高レベル放射性廃棄物の地層処分場サイトが世界で初めて最終決定された。2020 年代初めに処分を開始する計画である。これまでの経緯としては、地元自治体の承認を経て、2000 年末には政府により地層処分場をオルキルオトにおいて建設する原則方針が決定[20]、2001 年 5 月に議会により承認、2004 年から地下特性調査施設（ONKALO）の建設が開始され、2012 年に処分場の建設許可申請が行われ、2015 年に政府が処分場建設を許可した。また、フィンランドの安全規制機関である放射線・原子力安全センター（STUK）[21, 22]は、最終処分の安全性を含め、原子力施設の安全性等に関する 5 件の安全規則を策定し、2016 年 1 月 1 日より施行した。この規則では使用済燃料処分場における重大事故に関する規則も導入されている。

米国では、2009 年に発足したオバマ政権が、ユッカマウンテン計画を中止し、代替案を検討する方針を示し、特別委員会（ブルーリボン委員会）で放射性廃棄物管理を含むバックエンド対策の代替案が検討された。ブルーリボン委員会の 2012 年 1 月の最終報告書において、「特に再利用の可能性が全く無い廃棄物の一部の代替処分オプション」として、大深度ボーリング孔の活用可能性を研究することが勧告された。この勧告を受け、DOE が超深孔処分のフィールド試験の計画を進めている[23]。しかし、現状では、フィールド試験候補地の立地に苦戦している。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

原子力施設から発生した放射性廃棄物については、レベルや核種等によって数種類に分類され、処分についての規制要求及び技術基準が順次整備されてきているが、炉心等廃棄物の中深度処分、ウラン廃棄物の処分など、まだ多くの対象についての整備が完了されておらず、具体的な固型化技術、廃棄体評価技術、処分後の安全評価技術についても検討の余地が大きい。

廃止措置については、長期にわたるプロジェクトの最適化、戦略シナリオ決定手法を含むプロジェクトマネジメント及び遠隔自動化技術において検討課題がある。特に、ソフトウェア技術を適用した、特性評価、最適計画検討、意思決定などに係る技術開発は廃止措置及び放射性廃棄物処理処分を合理的に進める上で重要である。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

高レベル放射性廃棄物の処分に関する課題は、社会的意思決定、福島第一原発における燃料デブリの管理・処分方法の検討、安全評価の信頼性向上等に課題がある。

また、可逆性・回収可能性と世代間倫理の考え方を明確にし、規制制度における長期的なリスクの考え方を整理することが求められる。長期に渡る地質環境の変化の予測には限界があり、多大な不確実性を伴う。この不確実性への対応は長期的リスクの考え方と密接に関わるため、安全評価の信頼性向上に加え、安全規制の制度設計が求められる。

［今後取組むべき研究テーマ］

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

放射性廃棄物については、炉心等廃棄物等の処理技術の開発および処分後の安全性評価等が挙げられる。また、ウランを含む放射性廃棄物の合理的な処分に向けての技術開発や政策に係る検討も求められる。テーマとしては、人工バリア材中及び深部地下環境中における ^{129}I や ^{14}C の主要な動態を把握及びこれら廃棄物の安全評価の信頼性向上等がある。加えて、超ウラン元素処分場の最適化も重要である。安全評価の結果を処分場の設計やバリア材料の開発にフィードバックさせ、TRU 処分システム、あるいは、高レベル放射性廃棄物との併置処分の場合は、両者を合わせた処分システム全体としての最適化もテーマとして挙げられる。

また、廃止措置においては、費用評価を含む全体の最適化及び知識継承のためのマネジメント手法の確立が必要である。これらにはソフトウェア技術を有効に活用することが求められる。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

社会的意思決定手法の開発、福島第一原発における燃料デブリの管理・処分方法の検討、処分候補地に対する具体的な安全評価に関する研究開発が挙げられる。分離変換技術に関しては、分離技術・核変換技術の開発だけではなく、これらの技術を想定した場合の、既存の概念と異なる処分概念の構築やそれに基づく基礎的な安全評価が、その有効性を判断するために必要である。

また、地層処分の安全評価では、10 万年から 100 万年にも及ぶ評価期間が設定されうるが、時間とともに、その不確実性は確実に増加する。また、安全評価で用いられる様々なモデルやパラメータにも、常に、不確実性が付随する。このような質的にも、そして、その程度においても大きく異なる不確実を安全評価に反映するための考え方、計算技術の整備が求められている。特に、非常に長期の評価では、被ばく線量に代わる、相対的に環境の長期変遷の影響を受けにくい指標の選定なども求められる。

バリアシステムに関しては、異なるバリア材同士の相互作用や熱や地下水流動、応力、化学反応など異なるプロセスの重畳が、処分システムの長期変遷とそこでの核種の移行を考える上で重要になる。したがって、処分場近傍の空間スケールにおいて、異なるプロセスを連成させ、バリアシステム全体を扱うことのできる統合的な計算モデルの開発が求められる。特に、短い時間スケール、小さな空間スケールを対象とする機構論的なモデルを、処分場から地表まで含めた広域スケールに展開するためのアップスケール技術の確立も求められる。

多様な環境を想定した処分システムの確立も必要となる。我が国の地下には、特徴的な地質環境も存在し、また、沿岸の海底下のように陸域とは異なる地下環境への処分の可能性もある[16)]。これらの様々な地質環境では、処分場の建設や設計、安全評価のために必要となる情報の整備状況が大きく異なるため、必要な知見、データを収集していくべきである。安全評価とその結果に基づく処分概念・処分場設計の最適化を繰り返していくことで、ロバストな処分システムを構築していくことも欠かせない。

（５）政策的課題

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

規制制度に関しては、中裕深度処分等について未整備である。今後の廃止措置の進展に伴い、解体によって発生するすべての廃棄物の処分先、再利用先を確保することによって円滑な廃止措置実施を可能とするため、処分施設の立地とクリアランス物の再利用が重要な課題であり、このための社会的受容を醸成する政策が期待される。また、廃止措置で発生する放射能レベルの極めて低いものの処理・有効利用を含む廃止措置・放射性廃棄物処理のビジネスとしての展開を可能にする取り組みも求められる。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

分離変換技術の開発には、地層処分の処分概念や処分サイトの選択肢の拡大可能性、大きな不確実性を含む超長期の安全確保の説明性向上、処分場面積低減などの合理化等において、その効果が期待される。ただし、分離変換技術を導入した場合でも、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度がゼロになる訳ではないため、地層処分施設が必要となることに変わりはない。また、再処理や群分離に伴って低レベル廃棄物も副産物として生成されるが、この低レベル廃棄物による被ばくリスクも高レベル廃棄物による被ばくリスクに加えて総合的に評価しなければならない。廃棄物処分に対する分離変換技術の効果を的確に評価するためには、分離変換技術を導入した新しい核燃料サイクルから生じる新しい廃棄物に対して処分概念を再構築した上で、様々な観点から総合的に評価することが必要であり、今後の課題である。特に処分の安全性については、廃棄物の低減だけに留まらず、見直された処分概念における長期的な安全評価を実施することが求められる。

また、将来の電源構成の推移次第では、使用済み燃料を全量再処理することが非合理的になることも想定される。エネルギーセキュリティに関わるリスク、再処理によるプルトニウムの抽出による核拡散リスク、地上施設での使用済み燃料の長期保管よるリスクなどを総合的に評価し、一部の使用済み燃料を直接処分するなど、柔軟かつ合理的な政策が求められる[24)]。

● 総合的な廃棄物政策の展開

我が国の放射性廃棄物対策は、発生元（事業者）に応じて区分されている。例えば、福島第一原子力発電所の事故で発生した除染廃棄物（オフサイト）は、同発電所サイト内の廃棄物とは区別して取り扱われる。また、研究所等で発生する廃棄物は、原子力発電所で発生する廃棄物とは区別されている。本来、放射性廃棄物は人間や環境に対するリスクを基本として分類し、その処理処分方策を進めることが合理的である。我が国の放射性廃棄物の処理処分方策を見直し、安全で合理性のある政策を構築することが重要と思われる。

（６）キーワード

低レベル放射性廃棄物、高レベル放射性廃棄物、超ウラン元素、廃止措置、地層処分、マネジメント、最適化、知識継承、社会的受容、安全性評価、ソフトウェア技術、社会的意思決定、安全評価の信頼性、長期的リスクと安全規制制度、再処理、使用済み燃料

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は基礎研究の段階ではない。 ● 放射性廃棄物処分に関しては、大学や研究機関いおいて基礎研究が継続的に実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	● 個別の施設等を対象として、コスト低減、被ばく低減、安全向上等を目的に、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分等の開発が実施されている[25]。 ● 特にレーザーによる除染や切断技術について精力的な研究が実施されている[26]。 ● また、シナリオ評価技術等、廃止措置全体のマネジメントに関する技術開発が行われている[27]。 ● サイト解放に関する検討が今後進められる予定である[28]。 ● 高レベル放射性廃棄物では、応用面での研究開発が進められるも、処分場選定が進まないため、国際的に顕著な成果が上がっているとは言い難い。 ● 超ウラン元素に関しては、高レベル放射性廃棄物に比べて未成熟な点も多い。 ● 比較的放射能レベルの高い廃棄物の処分に関しては、原子力規制庁から一部、規制方針が示されている。
米国	基礎研究	○	→	● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は、基礎研究の段階ではない。 ● 高レベル放射性廃棄物は、個々の要素技術や概念に関して、大学や研究期間で世界トップレベルの研究が継続されている。ユッカマウンテン計画の中止後のバックエンド対策の代替案の検討行ったブルーリボン委員会の勧告に対応した基礎研究も継続されている。
	応用研究・開発	◎	↗	● 低レベル放射性廃棄物に関して、GTCCについてはWCS社が受け入れ貯蔵の認可取得、A-Cレベルは既に操業中である[29]。 ● 廃止措置の効率向上のため、冷戦の遺産である施設を対象とした浄化に伴う、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分等の技術開発が盛んに実施されてきている[12]。 ● 高レベル放射性廃棄物の処分に関して、坑道型の地層処分に加え、超深孔処分についても研究開発を進めるべきとしたブルーリボン委員会の勧告を受け、DOEが超深孔処分のフィールド試験の計画を進めている[23]。 ● 現在稼働している唯一の地層処分場であるWaste Isolation Pilot Plant（WIPP、兵器開発の過程で発生した超ウラン元素を含む廃棄物の処分場）の操業を通したノウハウが蓄積されている。
欧州	基礎研究	○	→	● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は、基礎研究の段階ではない。 ● 高レベル放射性廃棄物は、EU圏内の人的・物的リソースを用いて、大学や研究機関において、大規模かつ集約的な基礎研究が展開されている。
	応用研究・開発	◎	↗	● 低レベル放射性廃棄物においては、英、仏、スペイン、スロバキア等多くの国で処分施設が運用されている。 ● また、フランスでは、短寿命・低中レベルの廃棄物の処分場を操業しており、ラ・マンシュサイトでは、処分場を閉鎖し、300年間の監視を始めている。 ● 廃止措置の効率向上のため、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分等の開発が各国で実施されている[12]。 ● フィンランドでは、2015年11月、処分実施主体のポシヴァ社に処分場の建設許可を発給され、高レベル放射性廃棄物の地層処分場サイトが世界で初めて最終決定された。
中国	基礎研究	○	↗	● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は、基礎研究の段階ではない。 ● 高レベル放射性廃棄物は、米国や欧州、日本で研究開発の経験を積んだ研究者を中心に、大学や研究機関で精力的な研究が展開されるようになってきている。
	応用研究・開発	△	→	● 低レベル放射性廃棄物処分場は、地方ごとに浅地中の埋設処分することが決められており、2ヶ所の処分場が操業を開始している。 ● 一部研究炉の廃止措置研究が進んでいるが、商業炉の廃止措置についての研究・開発は進んでいないと思われる[30]。 ● 高レベル放射性廃棄物については、複数のサイト調査地域が選定されたものの、原子炉導入を積極的に進めているフェーズにあり、HLW処分の応用面での技術開発における成熟度は高くない。

韓国	基礎研究	○	→	● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は、基礎研究の段階ではない。 ● 乾式再処理を前提とした処分に関する研究を中心に、大学や研究期間で研究が精力的に行われている。
	応用研究・開発	○	↗	● いくつかの高経年の発電所を対象に、廃止措置を想定した検討や研究開発が進みつつある。 ● 中・低レベル放射性廃棄物に関して、処分施設が供用されている[31)]。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 増田純男, 佐久間秀樹, 梅木博之, 地層処分の変遷 第1回地層処分黎明期（1950年代～1980年代中頃), 日本原子力学会誌 57, 325-330 (2015).
2) 安俊弘、高レベル放射性廃棄物処分：概念発展史と今日の課題、科学 83, 1152-1163 (2013).
3) 原子力規制委員会．炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について（案）．2016年5月
4) IAEA, OVERCOMING BARRIERS IN THE IMPLEMENTATION OF ENVIRONMENTAL REMEDIATION PROJECTS, IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NW-T-3.4, 2013
5) 動力炉・核燃料開発事業団、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告－平成 3 年度－、PNC TN 1410 92-081 (1992).
6) 核燃料サイクル開発機構、我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-、JNC TN1400 99-020 (1999).
7) 増田純男、佐久間秀樹、梅木博之、地層処分の変遷 第3回地層処分黎明期（2000年頃以降)、日本原子力学会誌 57, 480-485 (2015).
8) 「原子力政策をめぐる最近の動向」、経済産業省資源エネルギー庁、総合資源エネルギー調査会総合部会第2回会合資料4、2013年4月.
9) 「高レベル放射性廃棄物貯蔵管理事業」、日本原燃（株)、http://www.jnfl.co.jp/recruit/business/chozou.html.
10) 「地層処分事業の安全確保（2010年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－」、原子力発電環境整備機構、NUMO-TR-11-01、2011年9月.
11) 「核燃料サイクル」、日本原子力学会、再処理・リサイクル部会、（http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt.html)、2015年6月.
12) OECD/NEA, R&D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities, NEA No. 7191, 2014
13) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分概念検討書（第1次 TRU レポート)、JNC TY1400 2000-001, TRU TR2-2000-01, (2000).
14) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書（第2次 TRU レポート)、JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).

15) 資源エネルギー庁、科学的有望地の要件・基準についての基本的考え方、地層処分技術 WG の検討について、総合資源エネルギー調査会放射性廃棄物ワーキンググループ、第 13 回会合資料 http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/houshasei_haikibutsu_wg/pdf/013_01_00.pdf
16) 経済産業省、沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会（第 3 回）配布資料 http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/003_haifu.html
17) Y. Iguchi, et. al. Integration of Knowledge Management System for the Decommissioning of Nuclear Facilities. JSME, Vol.3, No.3. 2016 年 6 月
18) Istvan Szoke et.al, J.Nucl Sci.Tech. 2015, Vol52, No.3, 371-387
19) http://www.jst.go.jp/impact/program/08.html
20) Nuclear Waste Management at Olkiluoto and Loviisa Power Plants, Review of Current Status and Future Plans for 2010 –2012, Posiva, TKS-2009, 2010.
21) Erja Kainulainen, Regulatory oversight of nuclear safety in Finland, Annual Report 2015, STUK, STUK-B 203, 2016.
22) Finnish report on nuclear safety, Finnish 7th national report as referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety, STUK, STUK-B 205, 2016.
23) http://www.energy.gov/ne/downloads/research-development-and-demonstration-roadmap-deep-borehole-disposal
24) 日本原子力研究開発機構、わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価 -直接処分第 1 次取りまとめ-、JAEA-Research 2015-016 (2015).
25) (財)原子力発電技術機構廃止措置総合調査委員会編. 廃止措置技術ハンドブック 除染・解体・再利用編. 2007 年 5 月
26) 大道 博行. Laser Review. 原子炉廃止措置における光・レーザー技術の適用可能性（レーザー学会創立 40 周年記念）-- (「原子力施設の保守安全,廃止措置のためのレーザー技術」特集号). 2013 年 11 月
27) 芝原 雄司他. 原子力施設の廃止措置における大型機器解体シナリオの最適化に関わる検討. 日本原子力学会和文論文誌. 2013 年 9 月
28) 原子力規制庁. 総合規制評価サービス (IRRS) において明らかになった課題への対応について. 2016 年 3 月
29) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. USA. 2014 年 10 月
30) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. China. 2014 年 10 月
31) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Korea. 2014 年 10 月

3.8　太陽光発電

（1）研究開発領域の簡潔な説明

太陽光発電は、太陽の光エネルギーを直接電気に変換する発電方式である。ここでは、シリコン系、有機系、有機無機ハイブリッド型ペロブスカイト系、コロイド状量子ドット系、レアメタルフリー薄膜系、集光用化合物系などの太陽電池材料や発電システムに関する研究開発を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

近年の地球温暖化問題の顕在化、さらにはエネルギーセキュリティの確保の観点から、現在世界中でエネルギー政策の見直しが進んでいる。低炭素エネルギーのひとつとして再生可能エネルギー、特に、太陽光発電の導入が世界的潮流となる中、日本国内でも固定価格買取り制度の後押しを受け太陽光発電の普及が進んでいる。2030 年度長期エネルギー需給見通しでは、再生可能エネルギー発電の電源構成比率目標値は 22～24%（水力 8.8～9.2%程度、太陽光 7.0%程度、バイオマス 3.7～4.6%程度、風力 1.7%程度、地熱 1.0～1.1%）となっており [1)]、太陽光発電への期待は大きい。

太陽光発電の普及拡大には、引き続き発電コストの低減を進める研究開発を行うと同時に、長期に亘って持続的に太陽光発電システムを国家の基幹電源として浸透させるための長期持続循環型の太陽光発電システム技術開発が期待される。様々な課題に広く取り組むことが必要であり、高効率・低コストの革新的太陽電池の開発（ペロブスカイト、コロイド状量子ドット、薄膜タンデム、Ⅲ-Ⅴ族集光セルなど）に加え、地球規模での太陽電池普及を支えるための「レアメタルフリー薄膜太陽電池の開発（Sn 系、Fe 系をベースとする新規材料）、太陽光発電と他エネルギー形態（エネルギーキャリアである水素、数百度を利用する熱発電）を融合した太陽電池のハイブリッドエネルギー利用の基盤技術研究などが求められている。

［動向（歴史）］

太陽光発電に利用されるシリコン太陽電池は 1954 年に、アメリカのベル電話研究所でピアソン、フラー、シャピンという 3 人の研究者によって発明され、1958 年に世界で初めて実用化されたが、当時の太陽電池は大変高価であったため、当初は太陽電池でなければ電力を供給できない場所で使われた。1970 年代には、第一次石油危機を契機に、日本は石油に依存しすぎる産業構造やエネルギー調達手段に対して再考を迫られ、当時の通産省が策定したサンシャイン計画を推進した。1980 年代には、官・学・産が一体となった太陽光エネルギー開発体制が整い、同時にソーラーシステム普及の支援制度が設けられ、シリコン太陽電池の普及が始まった。

近年、結晶 Si、薄膜 Si、CIGS［$Cu(InGa)Se_2$］、CdTe、GaAs 系集光型の太陽電池では、実用化が進み、より低コスト、より高効率を目指した開発が産学連携により行われている。太陽電池モジュールの価格は順調に低下しており、大規模なメガソーラから中規模なシステムでは、システム価格に占めるモジュール価格の割合は 3～4 割程度にまで低下してきた。今後のさらなる普及拡大と低価格化には、最もシェアの大きい結晶 Si 系においてもセルの高

効率化を含めたモジュールの高効率化により、整地･架台･配線･施工等の BOS（Balance Of System）コストあたりの設置量を増やすことが求められる。これは、国際的に普及が進む低価格結晶 Si 系モジュールとの差別化においても重要な方向性となる。また太陽光発電システムとしての利用技術・標準化・規格化技術なども普及拡大につれ重要度を増している。

結晶 Si 系太陽電池では、1999 年から 15 年間にわたり単結晶 Si 太陽電池の変換効率の最高値とされてきた 25%の壁が突破された。Panasonic 社は、高品質なアモルファス Si 層により接合を形成する「ヘテロ接合」の進化と、電極を全て裏面に形成する「バックコンタクト型」を組み合わせることにより、実用サイズ（セル面積 143.7cm^2）のセルで変換効率 25.6%を達成している [2)]。SHARP も、コンソーシアム形式のプロジェクトである NEDO 委託研究「極限シリコン結晶太陽電池の研究開発」の成果を活用することにより、同様のセル構造で小面積（セル面積 3.72cm^2）ではあるが、変換効率 25.1%を達成した。また、米国 SunPower 社も 121 cm^2 のバックコンタクト型セルで 25.0%を達成している。このように、高効率化セルの開発競争においては、日本企業の高い技術力が改めて示されたといえる。一方で、従来の拡散型の発展系である PERL セルでも中国 Trina Solar 社が 22%を超える高効率を達成している。

薄膜 Si 系太陽電池は、バルク結晶 Si 系モジュールの低価格化に押され苦しい市場状況が続いており、その結果、大学等における基礎研究、産業界での量産技術開発とも、縮小傾向にある。しかし、今後のさらなる生産量増大が必須の太陽光発電市場において、材料の安定供給の面での優位性を考えると、中長期的な研究開発の継続が重要な分野と言える。またその特徴からエナジーハーベストデバイスとしての活用も期待される。

CIGS 太陽電池は、ソーラーフロンティア社が年産 1GW の生産能力を有し、小面積セルでも世界最高水準の 22.3%を誇り [3)]、日本が世界を牽引している。CdTe 太陽電池では First Solar 社が年産 2.7GW と世界を牽引する生産能力を有している。一方で、後述のとおり環境負荷が小さく豊富な元素を使った新材料（Cu_2ZnSnS_4、Cu_2O、Cu_2SnS_3、SnS、$ZnSnP_2$、FeS_2 などの鉄系半導体）などの研究開発が注目される。

集光型太陽光発電は、太陽電池の使用量が圧倒的に少量化できるため、低コスト化のための新技術として注目されており、プレーヤーが増加してきている。集光型太陽電池の関連技術は毎年、着々と進歩しており、集光用の超高効率セルで 46%、集光型太陽電池モジュールで 35%、集光型太陽光発電システムで 30%にまで伸びてきている。これらの効率向上のラーニングカーブより、2025 年には、セルで 50%超、モジュールで 45%、システムで 40%にまで効率が向上することが予測されており、今後のさらなる発展に期待できる。また、直達日射量の多い地域では、今後ニーズが増えることが予想される。2016 年には住友電工がモロッコに 1MW の集光型太陽光発電システムを設置することが決まり [4)]、高日照地域への今後ますますの進出が期待される。集光型太陽光発電は、太陽光発電の中で最も高い効率を有することより、その応用についても近年盛んに研究開発されている。たとえば、超高効率集光型太陽光発電からの電力で水を電気分解して水素を得る効率（Solar to hydrogyen: STH）において、東京大学と宮崎大学は世界最高の 24.4%を報告している [5)]。また、集光することにより高温が得られることを利用し、太陽光発電と太陽熱のハイブリッド発電についての研究も、近年注目を集めている。熱としての利用価値の高い数百度の熱をとりだすため、太陽電池も数百度で駆動させ、太陽電池と熱のトータルでの太陽光エネルギー利用効率で 45%程度が得

られている[6]。

日本はSi、CIGS、GaAs系全てに高い技術を持っているが、欧州、米国も高い技術開発力を維持しており、実用技術分野では研究機関に試作生産ラインを整備し、新材料や設備開発などの周辺産業を含む技術革新に貢献している。日本では、結晶Si太陽電池は企業主体で研究開発し高い技術水準を維持している。CIGS 太陽電池では企業が高い製造技術を有し、これを支える形で大学・国立研究所が学術的知見の蓄積・提供と新たな高効率化要素技術の開発を行っており、世界最高水準の技術を有している。多接合や量子ドットといった超高効率太陽電池などの次世代技術への研究開発も米国、日本、欧州で進められているが、先進諸国の太陽電池企業の多くは中国、韓国など新興国や CdTe 太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にあり、産業の基幹である結晶Si系太陽電池の生産はすでに新興国に追い越された。性能と信頼性、ブランド面で日本製は優位ではあるが、いつまで優位性を維持できるか不安がある。

一方、革新的太陽電池としては、材料としては、有機系、有機無機ハイブリッド型、コロイド状量子ドット系、レアメタルフリー薄膜系が将来を有する候補として考えられている。これまで、有機系太陽電池においては膨大な研究が実施されており、各種の新規材料開発によって高効率化が達成されてきた。その結果、有機薄膜太陽電池では10%以上、色素増感太陽電池では12%以上の変換効率が得られている。ペロブスカイト太陽電池では発明からわずか 7 年で 22.1%[7]の変換効率が達成されおり、急激な変換効率の上昇に伴い日本、米国、欧州、中国、韓国等、世界中で熾烈な研究開発競争がなされている。そのため、ペロブスカイト太陽電池は日本発の革新的太陽電池にもかかわらず、研究開発では世界の後塵を拝する結果となっている。コロイド状量子ドット系では 11.6%の変換効率が達成されている[8]。コロイド状量子ドットはGaAs系の真空技術を用いる量子ドットではなく低コストで形成可能な溶液プロセスで形成できるコロイドを用いた量子ドットであり塗布プロセスを利用できる低コストかつ高効率が期待できる。ただし、現状の10%を超えるものはPbS、Zn−Cu−In−Se 合金などの環境負荷の大きな元素あるいはレアメタルを利用しており、これを代替することと高効率化が求められている。

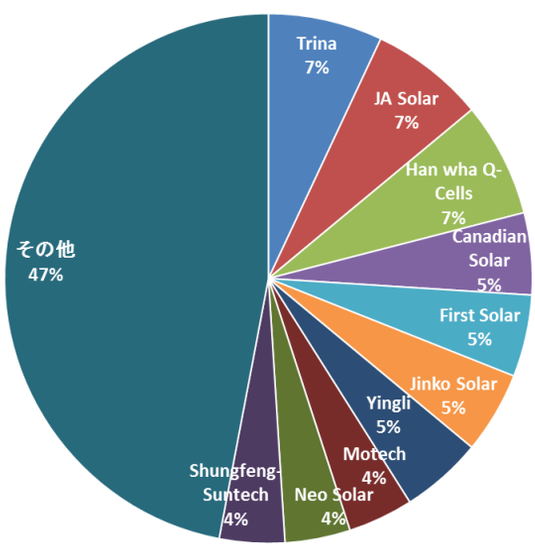
さらに、レアメタルフリー無機薄膜系では、Cu_2ZnSnS_4系では12.6%[9]、Cu_2Oでは8.1%[10]、Cu_2SnS_3系では6.7%[11]が報告されている。特にCu_2ZnSnS_4系は日本発の材料であり IBM（米）の10%近い変換効率の報告を契機に世界中で研究されている。また、SnS、$ZnSnP_2$、鉄系半導体薄膜（FeS_2など）では 5%を超える変換効率は現状では報告されていないが、バルク結晶作製と物性評価、薄膜形成技術などの太陽電池応用に欠かせない重要な基礎研究が進んでおり、中・長期的な太陽電池新材料として大きく期待できる。

さらに、革新的太陽電池として、構造としては、すでに20%以上の高効率が実証されている太陽電池同士を組み合わせたタンデム型太陽電池が将来を有する候補として考えられる。禁制帯幅（Eg）の広い太陽電池（1.5~2.0eV程度、トップセル）と狭い太陽電池（0.9~1.2eV程度、ボトムセル）を積層させることで30%以上の変換効率が期待できる。製造プロセスや材料使用量低減の観点からコスト的に有利な薄膜型タンデム（トップセルには広 Eg 組成の CIGS、ペロブスカイト、CdTe など、ボトムセルには低 Eg 組成の CIGS）や、主流である結晶Siウエハに薄膜太陽電池を積層させるウエハ型タンデム（トップセルは上記と同様。ボトムセルは結晶Si太陽電池）が有力である。また、中・長期的には、上記の有機系、レアメ

タルフリー薄膜系などの革新的太陽電池同士を組み合わせた革新的タンデム型太陽電池も重要な研究テーマである。

太陽光発電システム技術の研究開発は、実用化された太陽電池の技術革新を含め、主として日本、欧州、米国の 3 極で進められており、中国、韓国における研究開発は現段階では実用化された分野の開発成果の吸収・国産化に主眼が置かれている。しかし、今後中国勢の台頭が一層顕著になると予想される。大規模なシステムの直流側のシステム電圧は主として米国で 1500V 化の動きが盛んであり、モジュールの PID（電圧誘起劣化）耐性の向上とあわせて、システム設計の最適化技術開発が求められている。

太陽電池セルの世界市場動向をみると、2015 年の太陽電池セル（発電素子）の世界出荷量は前年比 29%増の 50.8GW で、上位 10 メーカーの総出荷量は全体の 53%を占め、中国系メーカーが多くなっている（図 3-5）[18]。2015 年の太陽電池セル出荷量の第 1 位は、2 年連続中国トリナ・ソーラー（Trina Solar）で、出荷量は 3.63GW、世界シェアは 7%であった。第 2 位は、中国 JA ソーラー（JA Solar）で、出荷量は 3.62GW、トリナ・ソーラーとの差はわずか 14MW であった。同社はセル出荷量を 2014 年から 29%増やし、トリナ・ソーラーとの差を縮めている。日本メーカーは、2014 年に京セラがトップ 10 入りしたが、2015 年では、シャープ、パナソニック、三菱電機と、どの日本メーカーもトップ 10 入りできなかった。



（出所：SPV Market Research「Annual Photovoltaic Manufacturer Shipment report」）

図 3-5　世界市場における太陽電池セルメーカーシェア上位 10（2015 年 年間出荷量）[18]

（３）注目動向

［新たな技術動向］

- レアメタルフリー薄膜

世界最高水準の研究が展開されており、光吸収層の高品質化のみならず、ｐ型光吸収層とｎ型バッファ層界面のバンド設計（キャリア再結合ロスを低減するための伝導帯接続）が積極的に活用されている[12]。硫黄系では、Cu_2SnS_3（Ge 添加）で豊田中研が 6.7%[11]、SnS で

立命館が 2.5%[13]、リン系では京都大学・立命館大学が $ZnSnP_2$ で世界初の 1%超え [14]、究極の材料として期待される Fe 系では、奈良先端科学技術大学院大学（NAIST）が発電には至っていないもの FeS_2 の物性制御（導電型、キャリア濃度）・デバイス設計に取り組んでいる [15]。また、CdTe 太陽電池でも進められているように、薄膜ではなく、理想な半導体材料に近いバルク結晶を作製して、基礎物性測定、物性制御、太陽電池構成層とのマッチング、デバイス化といった、基礎に立ち返った研究が、CZTS[16]や $ZnSnP_2$[17]で進められており、今後の研究のトレンドになると思われる。

- ペロブスカイト太陽電池

韓国化学技術研究所（KRICT）は、小面積（4mm 角）で 22.1%の変換効率を達成している [7]。また、スイスのローザンヌ工科大学では、透明導電膜の表面を緻密な酸化スズでピンホール無く覆うことで 20%を超える認証値を得ている。ペロブスカイト結晶を均一平坦な膜に成膜するために、JST 戦略的創造研究推進事業において、京都大学では鉛化合物の高純度化及び合成中間物質の検証を行い、良質なペロブスカイト結晶薄膜の作製に成功し 20%を超える変換効率を達成している。物質・材料研究機構は、電子輸送層とホール輸送層に使用する材料を無機材料に変更し、それぞれに Li イオンや Nb イオンを添加し導電性を向上させて、面積 $1cm^2$ 以上で 18.2%を達成すると共に疑似太陽光（1sun）連続照射、1000 時間の耐久試験をクリアしている。華中科技大学のグレッツェルセンターでは、有機ホール輸送材を使用せずに、カーボン電極や電子輸送層をスクリーン印刷で作製し、12.8%の変換効率を達成し、太陽光連続照射下で 1000 時間の耐久試験をクリアしている。

- コロイド状量子ドット

コロイド状の量子ドットを用いた太陽電池は主に電解液を使う増感型とナノヘテロ接合固体型の二種類があげられる。コロイド状の量子ドット増感太陽電池の光電極の表面パッシベーションが効率向上の鍵であった。2007 - 2008 年に、電通大では ZnS パッシベーションにより CdSe コロイド状量子ドット増感太陽電池の変換効率を 0.1%以下より 2%以上に向上させた。これを契機に、量子ドット増感太陽電池は世界的に注目され研究が活発になってきた。量子ドット増感太陽電池では、すでに CdS、CdSe、CdTe、PbS、Sb_2S_3、$CuInS_2$、CdSeTe、$CuInSe_{1-x}S_x$ と ZnCuInSe など様々なコロイド状の量子ドット、または core-shell 構造コロイド状の量子ドット CdSe/CdTe、ZnTe/CdSe、CdS/CdSe、PbS/CdS などが適用されてきた。中国の大学とスペインの大学および電通大との共同研究により、2014 年に CIS 量子ドット増感太陽電池で 6.66%、2015 年に CdSeTe/CdS core-shell 構造量子ドット増感太陽電池で 9%以上、2016 年に Zn-Cu-In-Se 合金量子ドット増感太陽電池で 11.6%[8]が達成されている。

一方、固体型ヘテロ接合量子ドット太陽電池は、n 型の ZnO や TiO_2 ナノ構造とコロイド状の p 型の PbS や PbSe 量子ドット層（塗布で形成）から構成される。この系では、固体の量子ドット層を形成する際に置換した量子ドット表面のリガンドと各ヘテロ界面の制御とパッシベーションはその高効率化と安定性の鍵となる。これまでに、様々な有機分子や無機分子を量子ドット表面パッシベーションのためのリガンドとして適用されてきた。また、n 型層としては、ナノワイヤーの配列やメソポーラスナノ粒子薄膜など様々なナノ構造を用いている。日本では東京大学と電通大は効率向上の指針を得るために、積極的に基礎研究を行っている。現在では、MIT やトロント大学がリードしており、PbS 量子ドットヘテロ接合太陽電池の最高効率は 11.3%[7]である。

- 集光型太陽光発電

集光型太陽光発電の高効率を活かしたアプリケーションとして、太陽電池から発生した電力を用いて水を電気分解し水素を発生させるという技術が開発されている。東京大学、宮崎大学、住友電工の共同研究により、Solar to Hydrogen の効率において 24.4%の世界最高効率を達成したことが報告されている[5)]。

集光型太陽電池と集光太陽熱のハイブリッド利用において、高温で太陽電池を動作させるという研究が報告されている[6)]。これは、400℃程度の高温を熱回収・利用したいため、太陽電池も 400℃程度で動作させてしまおうという試みである。100 倍集光下において、多接合型太陽電池を 400℃で動作させると、太陽電池の変換効率は 22%程度にまで低下するが、400℃の熱エネルギーも 23%程度で利用できるため、システムトータルとしては 45%ほどの効率が見込めるという試算が報告されている。

- 太陽光発電システム

システムの発電コスト低減に向けた各構成機器の長寿命化技術開発と、発電電力量の最大化に向けた運用技術の開発が進んでいる。維持管理技術としては、モニタリング技術、不具合箇所発見のための診断技術の開発が盛んである。モニタリングでは、セントラルインバータの出力をモニタリングするのみでなくストリング監視が広く用いられているが、低コストでのモジュール毎監視技術として、各モジュールの端子箱に電力線通信が可能な電圧センサを組み込むものが開発されている。故障診断では、モジュールの電気的特性のみではなく、屋外におけるエレクトロルミネッセンス（EL）やフォトルミネッセンス（PL）画像撮影、赤外線（IR）画像撮影と、これらを大規模システムにおいてドローンを用いて半自動で行うシステム等の開発が進んでいる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

結晶 Si 系太陽電池に関しては、2015 年より NEDO プロジェクトで、世界最高レベルの競争力を有する結晶 Si 太陽電池の実現を目指し、先端複合技術 Si 太陽電池の共通基盤に関するコンソーシアム型の研究開発が開始された。豊田工大を中心とする 6 大学コンソーシアム体制により、ヘテロ接合太陽電池など次世代型セルのオープンイノベーションプラットホームの構築が進んでいる。産業技術総合研究所では、再生可能エネルギー研究所において、次世代薄型結晶 Si モジュールの研究開発が進められている。また、同じ研究所内で実施されているシリコンナノワイヤー太陽電池の開発に特化した「革新的エネルギー研究開発拠点形成事業」では、プロジェクトの後期において、テーマの選択と集中が進んでいる。

NEDO プロジェクトで、ソーラーフロンティア、産業技術総合研究所と複数の大学からなるオールジャパン体制で CIGS 太陽電池の高効率化・物性評価をより一層進める研究がスタートし、材料設計・分析・高効率セル作製を重点的に行っている。CZTS については、日本発の材料であり、JST の CREST でも研究が進められている。

JST の ALCA では、ペロブスカイト/結晶 Si タンデム型太陽電池、フォトニックナノ構造を利用した光マネジメント、窒化物半導体、Si 系クラスレート、多元系混晶、資源戦略性に優れた薄膜太陽電池技術など挑戦的な課題が実施されてきたが、研究成果の社会還元を加速化するために、実用技術化プロジェクトへの再編が進められている。中でも新たな取り組みとして、ペロブスカイト太陽電池では、JST のさきがけ研究者を結集した横断プロジェクト

の成果が期待される。

2011 年 6 月より、集光型太陽光発電に関する日欧の共同研究開発が始まり、欧米においても集光型太陽光発電システムの重要性が再認識されている。本プロジェクトでは、日本における超高効率太陽電池・材料、集光モジュール、およびシステムに関する研究開発が活発に行われており、ヨーロッパ諸国との連携を強化している。2015 年 7 月より、超高効率・低コスト III-V 化合物太陽電池モジュールの研究開発が NEDO プロジェクトとして開始されており、超高効率太陽電池モジュールの開発を実施している。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

レアメタルフリー薄膜太陽電池では、CZTS、Cu_2SnS_3、SnS、Cu_2O、$ZnSnP_2$、Fe 系材料（FeS_2、$CuFeS_2$）などの様々な材料の研究が進められている。課題は大きく分けて界面と光吸収層の 2 点がある。薄膜太陽電池は極微領域の薄膜界面の品質に大きく性能を左右されるため界面の設計が重要であるが、薄膜の表面敏感さや界面の元素ミキシングによって界面の電子構造評価には高度な技術を要する。特に、光吸収層とバッファ層との界面設計（具体的にはそれぞれのバンド設計）が必須であるものの、最適設計・デバイス作製は十分ではない。また、光吸収層の課題としては当該の材料が真に太陽電池に適しているかどうかは現時点では明確に判断する方法がなく、Eg によって材料を選定し、デバイスを作製して性能を評価するというトライアルアンドエラーを積み重ねているという問題がある。さらに、薄膜は様々な成長方法や条件があり、ある方法で作製した薄膜が限界まで高品質化されているのかどうかの判断は困難である。よって CdTe 太陽電池でも行われているように理想に近いバルク結晶を作製し、基礎物性・物性制御法・適したデバイス構造の検討などの、基礎に立ち返った研究が必要とされている。この手法で適切な材料を選定し、低コスト化に向けた薄膜作製技術を開発することが望まれる。

ペロブスカイト太陽電池は鉛を使用している為、製造や廃棄に特別な管理が必要となり製造コスト等の上昇につながると共に、環境上のリスクも大きく安全面においても実用化への大きな障害となっている。鉛フリー化が必要であるが、鉛代替になる材料も少なくまだ十分な特性が得られていない。

コロイド状量子ドット系では、高効率化が進んでいるものの依然として PbS や ZnCuInSe などの環境負荷の大きな元素あるいはレアメタルに頼っている。これはイオン性の高いⅡ-Ⅵ族をベースとする半導体がコロイド形成しやすいという合成上の利点があるためである。ただし、太陽電池に適した Eg を持つⅡ-Ⅵ族半導体は概ね Pb や Cd などの環境負荷の高い元素を含んでいる。

発電システムでは更なる発電コストの低減と長期的に基幹電源として運用するための技術開発が課題である。発電コスト低減に向けては、太陽電池モジュールの高効率化や高温環境下でも発電効率の低下が少ない太陽電池の開発のほか、施工コスト低減や設置可能性向上に向け、軽量、フレキシブルな太陽電池開発が求められる。これらの技術は、小面積や垂直面、曲面など、電力需要地と近接した場所への設置を可能とする事から、太陽光発電大量導入時に重要となる自家消費率の向上にも有効な技術となる。長寿命化技術開発では、異なる寿命

を持つシステムの各構成機器の内、交換が必要なものを適切に検出し、交換・修理等を行うことで、システム全体としては常に健全性を維持し長期的に運用を継続するための、より高精度な不具合検出技術や点検技術、発電データのビッグデータ解析等による不具合の予兆検出等も必要となる。これらを発電量予測や EMS と組み合わせることにより、より信頼性の高い長期安定電源としての運用が可能となる。

超高効率集光型太陽光発電では、集光用多接合型化合物太陽電池の変換効率が日々向上しているため、さらなる超高効率化が約束されている。集光にはレンズ等の光学系を用いているが、現状の光学効率は 85%程度にとどまっている。また、光学系の追尾誤差許容角度（どれくらい太陽光追尾がずれても光学系が光を太陽電池に集光できるか）は現状、1 度弱であり、かなり正確な太陽追尾が必要となる。以上のことより、光学効率の向上、光学系の追尾誤差許容角度の増大、正確で安価な追尾架台の開発が、集光型太陽光発電を飛躍的に高効率化することにつながる。さらに、太陽光発電と太陽熱を同時利用するハイブリッド発電においては、利用価値の高い数百度の太陽電池駆動が必要となるため、数百度の温度に耐える太陽電池開発が、魅力的かつ重要な開発項目となる。

有機薄膜太陽電池は、比較的高い効率が達成されている一方で、基本的な動作原理について未だ不明な部分も多い。特に、材料のバンドギャップに比べて得られる電圧が他の種類の太陽電池よりも低く、この問題を解決することがさらなる効率向上の鍵となる。最近の新規な材料開発によって、この電圧ロスが小さな値を示す材料が見つかってきているが、本質的な原因を究明して材料設計に活かすための基礎的な研究が求められている。

［今後取組むべき研究テーマ］

高効率太陽光発電の大規模広域普及に向けた基盤技術研究では、汎用太陽電池モジュールの変換効率を現在の 20%程度から 40%程度に高め、それによって大規模広域普及を可能にするための基盤技術研究を総合的に進める。具体的には、(i)新構造太陽電池の研究開発［多接合型（接合界面の解明とプロセス技術開発）、量子ナノ構造型（量子ドット表面制御技術、量子ドットのサイズ・配列の制御、環境負荷の小さい元素からなる半導体で豊富な資源量のある CZTS、CTS、SnS、FeS_2 のコロイド形成技術確立）、ホットキャリア型、多励起子生成型、有機薄膜型太陽電池の基礎的動作原理解明、有機無機ハイブリッド（ペロブスカイト）型（耐久性及び含有 Pb フリー化、大面積塗布プロセス）など］、(ii)低コスト高効率化を可能にする光物理研究開発（新集光システム、集光レンズ、光マネジメント、波長変換技術、アップコンバージョン、ダウンコンバージョンなど）、(iii)その他の新規概念太陽電池開発などを推進する。

ペロブスカイト太陽電池については、鉛フリーの新材料の開発も急務である。本電池は塗布・低温プロセスでの作製が可能であるが、その反面常温での耐久性に難がある。劣化の原因は、水分・光・熱などがあり材料やプロセスの改良等で耐久性の向上がなされているが、まだ十分とは言えない。水分や光は、電子輸送層やホール輸送層の最適化が必要となる熱安定性に関しては、ペロブスカイト結晶構造が起因する為、高い耐熱性を持つペロブスカイト構造を開発しなければならない。

レアメタルフリー薄膜太陽電池では、CZTS、Cu_2SnS_3、SnS、Cu_2O、$ZnSnP_2$、Fe 系材料などの様々な材料について、基礎物性が明確となった効果的に高効率化が図れるバルク結

晶作製、半導体物性評価（特にキャリアダイナミクス評価）、デバイス構造最適化（特に構成層のバンド接続設計）が必要とされている。目標となる電子物性値、デバイス性能を明らかにした上で、低コスト製造に必須な薄膜形成プロセスの開発を行うべきである。

発電システムでは、長期持続循環型の太陽光発電システムの実現に向け、異なる寿命を持つモジュール、インバータ、架台、ケーブルなどを適宜交換しながら、発電設備としてシステムを 50 年、100 年と持続的に環境負荷を減らしながら維持していくための技術開発が重要となる。そのためには、各構成機器の長寿命化に加え、不具合検出技術と不具合の予兆検出としての点検技術や発電データの解析技術が求められる。また、交換を前提としたシステム構造やモジュール構造、低コストで交換可能な施工技術や、交換後の機器のリサイクル技術開発も求められる。太陽電池モジュールの高効率化や軽量化については継続的な技術開発を行い、機器更新時に最も適切な技術を用いて設備更新を行うことにより、発電コスト低減や環境負荷低減を実現する。

超高効率集光型太陽光発電では、光学効率の向上、光学系の追尾誤差許容角度の増大、正確で安価な追尾架台の開発が、集光型太陽光発電を飛躍的に高効率化することにつながる。太陽光発電と太陽熱を同時利用するハイブリッド発電においては、数百度の温度に耐える太陽電池開発が、魅力的かつ重要な開発項目となる。短中期的には、光学系の光学効率向上や追尾誤差許容角度の増大のための最適化設計が取り組むべきテーマとなる。これにより、集光型太陽光発電の効率を一気に向上させることが重要である。中長期的には、上記で効率を向上させた集光型太陽光発電から安定して高い出力を得るために、正確で安価な追尾架台の開発が取り組むべきテーマとなる。また、ハイブリッド発電においては、短期的に、高温で駆動可能な太陽電池を開発し、中長期的に、それらの熱発電とのハイブリッド化を進めるべきである。

（５）政策的課題

太陽電池の研究開発は、世界的な競争にさらされている。日本は太陽電池の研究水準・生産技術ともに世界トップレベルにある。これは従来の国家プロジェクトによって、企業・大学・研究所に、戦略的にファンディングが行われてきた成果である。今後、日本の優位性を確保するには、基礎研究段階からプロジェクト形式でより一層の産官学連携を実施することが重要である。特に、市場が拡大していく中で研究開発を加速するためにも、出口（生産）の見えた太陽電池（結晶 Si や CIS）については、オールジャパンともいえる大学の叡智を結集して科学的知見を厳密に煮詰めながら、企業の研究開発・生産につなげていく必要がある。このオールジャパンを形成する際には、中心的な有名国立・私立大学のみならず、地方の大学にも優れた研究の種と力量があることを忘れてはならない。また、オールジャパン体制というプロジェクトそのものには重点的にファンディングしつつ、その体制の中で複数の大学に広くファンディングすることによって、未来の太陽電池界を支える若手人材の育成にも大いに役立てるべきである。太陽電池の研究開発を進めていく上では、基礎研究段階からプロジェクト形式で産学連携を実施することが重要である。研究内容が多岐に亘るため、単独の企業が独自に取り組むと研究投資に対する費用対効果が悪くなる。

さらに、太陽光発電を国家的に持続的に普及させるには、①初期導入のバリアの低下、②継続的な運用・保守（O&M）、③運用後のリユース・リサイクル、に関連する技術について、政策的なファンディング・標準化・ガイドラインの制定を行う必要がある。①については上記のような太陽電池の研究開発による低コストな太陽光発電システムの実現、固定価格買取制度（FIT）による投資回収率の向上などが、③についてはリサイクル技術の開発などが挙げられ、その取り組みが従来行われており、今後の継続が望まれる。②については太陽光発電システムのモニタリング技術、リペア技術、発電量予測技術などの O&M 関連技術が挙げられ、その技術開発はもとより業界としての O&M の実施項目のガイドラインの明確化も今後重要になる。

エネルギー分野では基礎は「学」、実用化は「産」という役割分担は効率的ではなく、双方の融合が必須である。政府主導で実用化研究を進めるためのプロジェクト研究拠点を構築し、共同研究（研究開発部分）と役割分担（市場化部分）を適切に進めながら、ファンディングを充実させた上で、そこに産学の研究人材を投入することも有効と考えられる。また、中長期の集中研究拠点を核とし国際的な人材獲得も視野に入れた革新的な基礎研究の強化と、その成果の迅速な応用展開に向けたネットワーク連携が重要な鍵となる。そのためには国策としての総合的な研究開発戦略の企画推進力強化が不可欠である。世界の太陽電池産業全体が過酷な価格競争に巻き込まれている中で、高性能太陽電池の開発を企業だけに任せることは、国際競争上も好ましくない。諸外国でも太陽光発電の技術開発に多額の国費が投入されている現状を見ると、日本政府もこのような研究開発に重点投資することが期待される。

太陽光発電導入による電力系統への影響問題については、各国で太陽光発電の普及拡大が進む中、ドイツなどでは太陽光発電導入量が電力系統に対する連系許容限界に近づいており、特定の日を見ると風力と併せた再生可能エネルギーが半分以上の電力を供給している時間帯もある。そのため、電力系統の安定運用に向け、発電量予測技術の重要性が高まっている。翌日～リアルタイムまで予測のニーズは広く、衛星画像と地上観測データを用いて広域で正確に予測する技術の開発が進んでいる。日本国内においても同様の取り組みは進んでいるが、地上における気象庁の日射計測地点数が減少傾向にあることや、導入済の太陽電池のアレイ構成（方位など）がデータベース化されていないことから、予測の高精度化に向けて早急に取り組むべき課題は多い。また、逆潮流への対応、電力の広域融通に対応した変電・送電設備強化、さらに周波数や電圧変動の許容範囲を機器に影響しない範囲で緩和することによる変動発電源に対する許容性拡大など、電力系統自体を太陽光などの再生可能発電源に対応して改良する対応も必要である。ただし、太陽光からの発電量平準化に関しては、発電サイトや変電所に大規模蓄電設備を設置して出力を平準化することも可能であり、電力系統の強化と大規模蓄電設備の導入との間でコストパフォーマンスを熟慮した選択が重要である。

（６）キーワード

シリコン系太陽電池、薄膜太陽電池、有機系太陽電池、軽量太陽電池、ペロブスカイト太陽電池、レアメタルフリー、コロイド状量子ドット、低コスト化、高効率化、分子設計、プロセス技術、劣化機構の解明、建材一体型太陽電池、BIPV、ZEB、ZEH、超高効率太陽電池、タンデム、量子ドット

（７）国際比較

結晶 Si 太陽電池

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	● 個別の企業が次世代技術の基礎研究開発を実施することが、太陽電池産業が新興国との厳しい価格競争にあることから困難となる中、公的支援に基づく共通基盤技術の開発、オープンイノベーションプラットホームの構築が着実に進められている。NEDOプロジェクトを受託した6大学コンソーシアム、産総研、JAISTと企業群が緊密な連携の下で、先端技術を複合した高性能太陽電池や、Siの理論限界を超える技術について研究されている。
	応用研究・開発	◎	→	● 結晶Si系の技術開発は、原料技術からモジュールに至る各要素技術、実用サイズでの効率記録などの高性能化技術において世界トップレベルにある。特に、パナソニック社が世界最高効率25.6%を報告し、15年ぶりに実用サイズのセルで更新することで、その技術力の高さを改めて世界に示した。SHARP社、カネカ社も、相次いで変換効率25.1%を達成している。
米国	基礎研究	○	→	● NREL、MIT、アリゾナ州立大学などで、結晶Siの欠陥および不純物制御に関する実用太陽電池の高効率化を支援する基礎研究や、ペロブスカイトとのタンデム化など新規な取り組みが実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	● SunPower社は、裏面接合型の高効率結晶Si太陽電池で、Panasonic社のヘテロ接合型太陽電池と結晶Si系の実用太陽電池における最高効率を競っており25.2%を達成した。Si基板に関連する周辺産業でも技術開発力が高いベンチャー企業が多く、融液からの直接成長やエピタキシャル基板など新しいアイディアが生まれている。
欧州	基礎研究	◎	→	● 結晶Si系の要素技術についての基礎研究は、非常に高い研究水準を維持している。独Fraunhofer研究所、Konstanz大、ISFH、オランダECN、ベルギーIMEC、仏INES、ノルウェイNTNUなど、各国の研究機関が中核的研究機関として学界・産業界をリードしている。トンネルパッシベーションコンタクトや、キャリア選択性の新材料を利用したヘテロ接合セルなど新規な取り組みで多くの成果が報告されている。有機薄膜太陽電池の研究者の参入も多くみられる。
	応用研究・開発	◎	→	● 企業での開発の中心は、生産技術であり、研究機関との研究コンソーシアム体制が有効に機能している。装置メーカーによるターンキー製造装置の高度化も進んでおり、Roth&Rau社はPERCセルやヘテロ接合セルなど多様なセル構造に対するラインを提供している。ヘテロ接合セルは24%以上が可能としている。また、利用技術の開発や標準化、規格化では幅広い検討が行われている。
中国	基礎研究	△	↗	● 産業として急速な発展を遂げており、国家計画の下で、公的研究機関・大学が研究開発を推進している。研究員は、先進国への留学生が戻って活躍するケースや半導体分野からの転身が多い。現時点では、海外の研究機関等の追跡研究が主体であり、独創的な研究は限定的であるが、研究水準は上昇傾向にある。
	応用研究・開発	○	↗	● 企業は国外の大学や研究機関、製造装置メーカー等と連携して先端技術を導入・活用することで、高性能太陽電池の実現や、低コスト化などへの取り組みをみせている。企業間での技術情報に関する障壁が低いため、導入された先端技術が、国内全体へ拡散する速度は非常に早い。Trina Solar社は多結晶のPERCセルで21.3%を達成したことを報告している。
韓国	基礎研究	△	↘	● 韓国政府は、半導体や液晶分野に続く産業として、太陽光発電産業として育成しようと研究開発を支援している。現実的な技術を中心として、原材料からセル、システムまで研究開発が進められている。
	応用研究・開発	○	↘	● Samsungグループ、LGグループ、Hyundaiグループなど、財閥系企業が太陽電池製造に参入し、技術開発を進めてきた。卓越した半導体技術を背景として技術水準は着実に上昇傾向にある。LG電子社は、バックコンタクトヘテロ構造セルで23.4%の変換効率を報告している。

化合物薄膜太陽電池（CIS、CdTe、レアメタルフリーなど）

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	◎	↗	● CIS太陽電池では、NEDOプロジェクトでオールジャパン体制（ソーラーフロンティア社、産業技術総合研究所、東京工業大学、立命館大学、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大、龍谷大学）でコンソーシアムを形成して高効率化、材料設計、材料分析の研究を行っている。ソーラーフロンティア社が小面積セルで効率22.3%（認証機関測定）を達成している。また、自社測定ながら22.8%という世界最高効率を達成している。認証機関測定の世界最高効率は22.6%でドイツのZSWが報告している。 ● レアメタルフリー材料の研究水準が高く、ソーラーフロンティア社、産業技術総合研究所がCZTSSeでは世界最高レベル、豊田中央研究所が$Cu_2(Sn,Ge)S_3$では世界最高効率の6%を達成している。また、Cu_2O、SnS、$ZnSnP_2$、Fe系などの様々な材料でも世界最高水準の研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	● CIS太陽電池では、ソーラーフロンティア社が7cm角のサブモジュールで効率18.6%を達成。モジュール生産では1GW/年を稼動。
米国	基礎研究	◎	↗	● CdTe太陽電池では、First Solar社が小面積セルで世界最高効率22.1%を達成している。アリゾナ州立大学は単結晶CdTeを用いて効率20.3%を達成し、かつ非常に高い開放電圧（1.12V）を報告している。単結晶材料を用いた有効なドーパント選定や効率限界への挑戦などの研究が進んでいる。 ● NRELがCIS・CZTS太陽電池ともに世界最高水準の研究を行っている。 ● ワシントン大学ではペロブスカイト/CISのタンデム型太陽電池で17.4%（4端子構造）を達成している。 ● ハーバード大、MITがSnS太陽電池で世界最高水準の研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	● First Solar社がCdTe太陽電池の製造でトップ技術を有しており、技術革新により近年変換効率が著しく向上している。モジュール効率でも18.2%という高い効率を実現している。 ● 中国のHanergyが米国のMiasoleを傘下に置き、CIS太陽電池モジュールの開発・製造を行っている。
欧州	基礎研究	◎	↗	● CIS太陽電池ではドイツのZSWが22.6%（認証機関測定）という世界最高の変換効率を達成している。スイスのEMPAが見出したカリウムをCIS表面に添加する方法で良好なpn接合を形成している。本技術をベースに、世界各国でも高効率化が進んでいる。 ● EPFLとEMPA（共にスイス）がペロブスカイト/CISのタンデム型太陽電池を開発し、効率21.4%（4端子構造）を達成している。 ● CZTSなどのレアメタルフリー材料の基礎的な研究が活発に進んでいる。
	応用研究・開発	△	→	● 中国のHanergyがドイツのSoliblo を、中国のCNBMがドイツのAVANCISを傘下に置き、CIS太陽電池モジュールの開発・製造を行っている。
中国	基礎研究	△	→	● —
	応用研究・開発	△	→	● 中国のHanergyがドイツのSoliblo と米国のMiasoleを、中国のCNBMがドイツのAVANCISを傘下におき、CIS太陽電池モジュールの開発・製造を行っている。
韓国	基礎研究	△	→	● CIS太陽電池の研究活動は見られるが、まだ研究水準は高くない。CZTSなどのレアメタルフリー材料ついては研究が進んでいるものの顕著な成果は見られない。
	応用研究・開発	×	→	● —

有機薄膜型太陽電池

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	● 有機半導体デバイスの基礎研究者が参入し、大学を中心に研究者が増加した。応用物理学会でも有機分子・バイオエレクトロニクスの分科に「有機太陽電池」の分類が新設されるなど、新たなトレンドとなった。また、化学の分野においては新規な有機半導体材料の合成研究が盛んになった。最近はファンディングや企業との共同研究が減少傾向にある。
	応用研究・開発	◎	→	● 三菱化学が世界に先駆けて実用化に向けた生産技術の開発などを進めている。また、東芝が高い効率とモジュール化などを報告している。一方で、その他の企業の研究のトライアルはすでに一巡し、開発の様子を見定めている現状である。
米国	基礎研究	◎	→	● カリフォルニア大学サンタバーバラ校やスタンフォード大学など西海岸を中心に、この分野の基礎的な研究を牽引している。とくに物理と化学分野の交流による共同研究が盛んに行われている。
	応用研究・開発	○	→	● Solarmer、Polyeraなど大学発のベンチャー企業による新規材料開発が盛んに行われているが、Konarkaの破綻後は太陽電池の生産を大規模に目指す動きはあまり見られない。
欧州	基礎研究	○	→	● 大学を中心に、特にデバイス物理に係わる基礎的な研究が盛んに行われている。
	応用研究・開発	◎	→	● Heliatek、infinityPVなど、ロールトゥロールによって作成した有機薄膜型太陽電池を製品化することを目的としたベンチャー企業が複数存在している。
中国	基礎研究	○	↗	● 新規な有機材料開発に関しては、大学を中心に人数をかけることで膨大な量の材料を合成しており、大量の論文を発表している。学術的には新規性の高い研究は少ないが、世界における変換効率の競争を牽引している。
	応用研究・開発	△	→	● 有機系太陽電池の生産など応用に向けた取り組みはまだ見られない。
韓国	基礎研究	○	→	● 大学を中心に研究が進められている。
	応用研究・開発	△	→	● 有機系太陽電池の生産など応用に向けた取り組みはまだ見られない。

超高効率集光型（GaAs 系など）

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	◎	↗	● 集光型太陽電池・化合物太陽電池の研究水準は、世界トップレベルにあるが、欧米との開発競争が激化している。ナノワイヤー・量子ドットなどの新概念太陽電池を対象とするプロジェクトが、JSTやNEDOの事業として行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	● 住友電工が、現状、世界で最もアクティブな集光型太陽光発電のメーカーとなっている。集光型太陽光発電とレドックスフローバッテリを組み合わせた自立型システムの開発や、集光型太陽光発電と水電解による水素生成効率世界最高等、世界をリードしている。
米国	基礎研究	◎	↗	● NRELを中心に、超高効率多接合型太陽電池の研究が進んでいる。
	応用研究・開発	○	↘	● かつては、Amonixが世界最大の集光型太陽光発電システムメーカーとなっていたが、事業大幅縮小。
欧州	基礎研究	◎	↗	● ドイツではFraunhoferISEを、スペインではマドリード工大を中心に、超高効率多接合型太陽電池の研究や集光型太陽電池モジュールの開発が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↗	● 欧州では、大規模ではないが、集光型太陽光発電システムの会社が立ち上がっており、着々と世界各地で施工を進めている状況。
中国	基礎研究	×	→	●―

	応用研究・開発	△	→	● 追尾架台メーカーの活動のみが見られる。
韓国	基礎研究	×	→	●―
	応用研究・開発	×	→	●―

ペロブスカイト太陽電池

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	○	↗	● ペロブスカイト太陽電池は日本発の革新的太陽電池にもかかわらず、研究開発に於いては世界の後塵を拝する結果となっている。ただ、JSTやNEDOのプロジェクトを始めとした国の主導的な取り組みが始まっており、今後の成果が期待される。特に、従来に無い全く新たな試みとしては、分野横断的なさきがけ横断プロジェクトが挙げられる。
	応用研究・開発	△	→	● ペロブスカイト太陽電池は欧米では既にベンチャー企業が創設され始めているが、我が国ではまだ基礎研究段階である。
米国	基礎研究	○	→	● ペロブスカイト太陽電池に関しては多くの大学で研究されているが、カリフォルニア大学バークレー校、ノースウエスタン大学がその先頭を走っている。この内、カリフォルニア大学バークレー校は非公式ながら19.3%の変換効率を達成している。ノースウエスタン大学は鉛フリーペロブスカイト太陽電池の研究開発で高い研究水準を有している。
	応用研究・開発	△	→	● スタンフォード大学やNRELでは、SiやCIGSをボトムセル層に使用したタンデム型太陽電池への応用開発が進んでいる。
欧州	基礎研究	◎	↗	● ペロブスカイト太陽電池では固体化セルを開発したオックスフォード大学、色素増感型太陽電池のメッカであるEPFL（ハグフェルト研）が世界の研究開発の中心となっている。
	応用研究・開発	○	↗	● ペロブスカイト太陽電池では同じく英国のベンチャー企業Oxford Photovoltaicsとドイツの Fraunhofer研究所が先陣を切っている。 ● オランダのSolliance は、塗布プロセスで効率10%の15cm角モジュールを試作している。Solliance は、ペロブスカイト太陽電池モジュールの研究開発に米Nano-C, 米Solarteck, 豪dysol, 日Panasonicが参加している。また、英specific社、豪CSIRO社など、セルモジュール開発を始めている。
中国	基礎研究	○	↗	● 有機系太陽電池の研究が激減し、それに代わってペロブスカイト太陽電池について多くの大学が研究開発を推進している。華中科技大学のグレッツェルセンターでは、有機ホール輸送材を使用せずにカーボン電極を使用し、12.8%の変換効率を達成し、太陽光連続照射下で1000時間の耐久試験をクリアしている。
	応用研究・開発	―	―	●―
韓国	基礎研究	◎	↗	● ペロブスカイト太陽電池の研究開発では世界のトップレベルを走っており、韓国化学研究所(KRICT)が世界最高変換効率19.7%（Newport認証）小面積(4mm□)で22.1%を達成している。
	応用研究・開発	△	→	● 韓国GISTとオーストラリアCSIROが共同で、slot dieコーターをもいいたプラスチック基板でのRoll to Roll製造を試作している。

太陽光発電システム

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	● 産総研を中心に、主としてNEDOプロジェクトにおいて新型太陽電池に対応した標準測定手法の開発、結晶シリコン系太陽電池モジュールの劣化機構の解明や、発電量定格の策定に向けた各種太陽電池の屋外発電特性評価などが実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	● 産総研らによるNEDOプロジェクトにおいて参照用モジュールを用いた屋外における発電性能の高度測定手法開発が実施されているほか、EMSにおいてもJST CRESTにて太陽光発電大量導入を可能とするEMSに関する研究が実施されている。
米国	基礎研究	○	→	● NRELを中心にPV Module Reliability Workshopにおいて国際的に信頼性に関する知見を交換する取り組みが行われている。
	応用研究・開発	○	→	● Sandia国立研究所を中心にPV Performance Modeling Collaborativeにおいて太陽光発電の発電量評価に関するモデリングや評価手法開発における国際連携プロジェクトが行われている。
欧州	基礎研究	○	↗	● Fraunhofer ISEでは高効率化に向けた結晶シリコン太陽電池の新たな配線方法の研究などが行われている
	応用研究・開発	◎	↗	● EU PV Clusterにおいて、Innovative installations(Cluster 5)のもと、さまざまな設置方式に適応した太陽電池開発やコスト低減に向けたシステム関連技術開発が行われているほか、Fraunhofer ISEのTestLabでは、EL、PL等を用いた太陽電池の非破壊検査方法の開発が進んでいる。。
中国	基礎研究	—	—	● —
	応用研究・開発	△	→	● 研究活動は見られるが、産業界における技術開発が中心である。
韓国	基礎研究	—	—	● —
	応用研究・開発	△	→	● 研究活動は見られるが、産業界における技術開発が中心である。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 長期エネルギー需給見通し．経済産業省． 2015 年 7 月．
2) http://news.panasonic.com/jp/topics/2014/38429.html
3) http://www.solar-frontier.com/jpn/news/2015/C051170.html
4) http://www.sei.co.jp/company/press/2016/05/prs034.html
5) Nakamura, Y. Ota, K. Koike, Y. Hidaka, K. Nishioka, M. Sugiyama, K. Fujii, A 24.4% solar to hydrogen energy conversion efficiency by combining concentrator photovoltaic modules and electrochemical cells, Appl. Phys. Express 8 (2015) 107101.
6) R. France, Multijunction Solar Cells for High-temperature Operation in Hybrid CPV-CSP Systems, presented at 12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems,

Freiburg, Germany, April 25-27, 2016.

7) http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg

8) J. Du, Z. Du, J.-S. Hu, Z. Pan, Q. Shen, J. Sun, D. Long, H. Dong, L. Sun, X. Zhong, L.-J. Wan, Zn−Cu−In−Se quantum dot solar cells with a certified power conversion efficiency of 11.6%, J. Am. Chem. Soc. 138 (2016) 4201.

9) W. Wang , M. T. Winkler , O. Gunawan , T. Gokmen , T. K. Todorov , Y. Zhu , D. B. Mitzi, Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% Efficiency, Adv. Energy Mater. 4 (2013) 1301465.

10) T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, Efficiency enhancement using a $Zn_{1-x}Ge_xO$ thin film as an n-type window layer in Cu_2O-based heterojunction solar cells, Appl. Phys. Express 9 (2016) 052301.

11) M. Umehara, S. Tajima, Y. Aoki, Y. Takeda, T. Motohiro, $Cu_2Sn_{1-x}Ge_xS_3$ solar cells fabricated with a graded bandgap structure, Appl. Phys. Express 9 (2016) 072301.

12) T. Minemoto, T. Matsui, H. Takakura ,Y. Hamakawa,T. Negami, Y. Hashimoto, T. Uenoyama, M. Kitagawa, Theoretical analysis of the effect of conduction band offset of window/CIS layers on performance of CIS solar cells using device simulation, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 67 (2001) 83.

13) Y. Kawano, J. Chantana, T. Minemoto, Impact of growth temperature on the properties of SnS film prepared by thermal evaporation and its photovoltaic performance, Curr. Appl. Phys. 15 (2015) 897.

14) S.Nakatsuka, N. Yuzawa, S. Akari, T. Minemoto, Y. Nose, Fabrication of solar cells based on $ZnSnP_2$ bulk crystals, presented at 20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (Halle, Germany, September 5-8).

15) 内山俊祐、石河泰明、浦岡行治、FeS_2 薄膜太陽電池実現に向けたシミュレーションによる素子構造の探索、175 委員会第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、C-27.

16) Nagaoka, K. Yoshino, H. Taniguchi, T. Taniyama, H. Miyake, Preparation of Cu_2ZnSnS_4 single crystals from Sn solutions, J. Crystal Growth 341 (2012) 38.

17) S. Nakatsuka, H. Nakamoto, Y. Nose, T. Uda, Y. Shirai, Bulk crystal growth and characterization of $ZnSnP_2$ compound semiconductor by flux method, phys. status solidi C 12 (2015) 520.

18) 日経テクノロジーonline. http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/column/15/286991/041900018/

3.9　風力発電

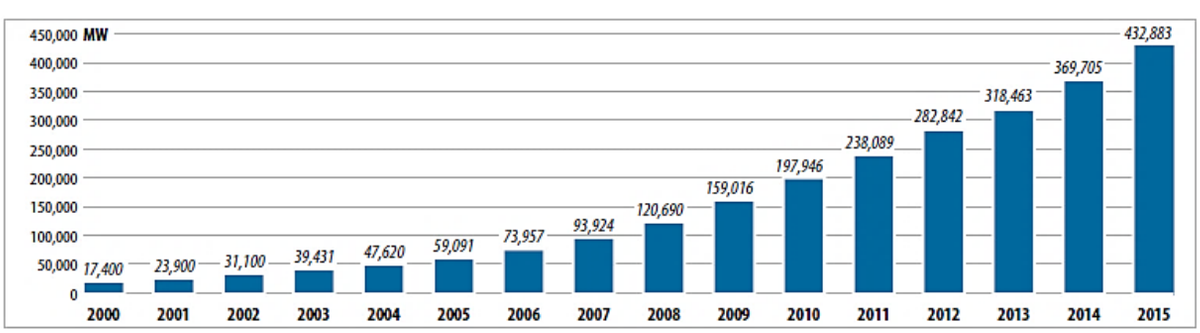
（１）研究開発領域の簡潔な説明

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

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

近年の地球温暖化問題の顕在化、さらにはエネルギーセキュリティの確保の観点から、現在世界中でエネルギー政策の見直しが進んでいる。低炭素エネルギーのひとつとして再生可能エネルギーの導入が世界的潮流となる中、世界の風力発電の導入量は 2015 年末で、累計 433GW（1GW＝百万 kW）・約 30 万台、新規 63.0ＧＷ・約 3 万台・約 10 兆円/年に達している（図 3-6）[1]。日本国内でも風力発電の普及が進みつつあるが、我が国の 2015 年までの累計導入量(括弧書きは2014 年までの導入量)は 3038(2794)MW で世界の 0.70(0.76)％ 、19（19）位，新規導入量は 260（130）MW で世界の 0.39（0.25）％ 、22（25）位に低迷している [2]。一方、我が国の 2030 年度長期エネルギー需給見通しでは、再生可能エネルギー発電の電源構成比率目標値は 22～24%（水力 8.8～9.2%程度、太陽光 7.0%程度、バイオマス 3.7～4.6%程度、風力 1.7%程度、地熱 1.0～1.1%）となっており [3]、風力発電の導入も進めていく必要がある。風力発電は産業としてのポテンシャルも大きく、風力発電拡大により、相当の経済･雇用効果が期待できる。例えば、大型風車は精密加工が必要な歯車や軸受、高効率な発電機やパワーエレクトロニクス変換器など、約 1 万点の部品から成る回転機械であり、我が国のものづくり技術を生かせる格好の機械製品であるとともに、その産業の普及や雇用創生に対する効果も大きい。そこで、風力発電の普及拡大には、さらなる高効率化、低コスト化、大型化、洋上化などに向けた研究開発ならびに基盤技術研究などが求められている。



（出典：Global Wind Report 2015. GWEC 2016 年 4 月）

図 3-6　世界の風力発電の累積導入量の推移 [1]

［動向（歴史）］[4]

地形が平坦で安定した偏西風が吹く欧州では中世から、麦の粉挽き、灌漑、製材など様々な動力源として風車が活用された。風車による発電は 1897 年に英国と米国で独立して誕生

した。1891 年にデンマークの Poul la Cour が、風洞実験に基づく高速揚力型を採用し，回転数調整装置を持つ近代設計の風車を実用化して、後の発展の基となった（図 3-7）。1918 年には農村の自家発電（独立電源）として改良型の Agrico 風車（定格出力 20～30kW）が 120 ヶ所（合計 3MW）に建設され、当時のデンマーク国内の電力需要の 3%強を供給した。

第二次世界大戦中には、エネルギー不足から風力発電への期待が高まった。1941～1945 年の米国の Grandpa's Knob 風車（1250kW）は、交流発電機を用いて送電網に連系した世界初の風車である。ステンレス製 2 枚翼ブレードの取付部の疲労強度が足りず、故障が頻発する結果に終った。デンマークでは la Cour の弟子の J Juul が 1947 年頃から風車の連系試験を始めた。それを後継した Gedser 風車（200kW）は 1957～1967 年の 10 年に渡って安定して運転された。この他にも 100kW 以上の大型風車の研究開発は、各国で 10 件以上行われたが、デンマークの Gedser 風車と西ドイツの Huetter の 100kW 風車の 2 例以外は全て不成功に終わった。日本では 1938（昭和 13）年に山田基博による国産風車が北海道稚内に設置された。この「山田風車」は木製 2～3 枚翼で出力は 200～300W 、簡便・剛健で自家発電に適していた。第二次大戦前に 200 台以上、昭和 30 年代までに 1 万台以上が作られ、農村電化に役立った。しかし結局、初期の発電用風車は、素朴な機械式制御と金属や木製の重くて剛性の弱いブレードという技術的な制約があり、経済的な電源とは言えず、商用電力網が整備されていくと、水力発電や火力発電との競争に敗れて、一旦、風力発電は下火になった。

1973 年と 1978 年の 2 度のオイルショックと、その後の 1980 年代の米国カリフォルニアの風力発電ブームが次の転機になった。この頃には、風車の自動運転を可能とする電気制御技術と、軽くて丈夫な複合材料（GFRP：ガラス繊維強化プラスチック）製ブレードを安価に量産する石油化学技術が実用化されていた。カリフォルニアにおける数千台の風車ブームに便乗した民間風車メーカの多くは、元々は農家向けに農機具や日用品を製作していたデンマークの零細企業だった。高級な設計解析ではなく、愚直な試行錯誤による改良を積み重ねることで、徐々に淘汰洗練されて、現代に繋がる水平軸プロペラ式 3 枚翼鋼製モノポールタワーという風車形式（ストール式出力制御も加えて「デンマークモデル」と呼称）が確立した。

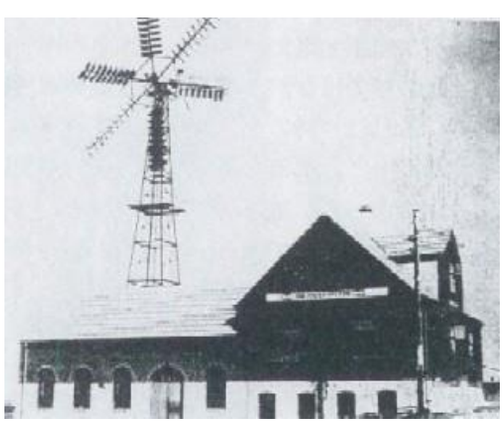


図 3-7　Poul la Cour の風車

同時期に各国で政府主導の MW 級大型風車開発が行われた（表 3-1）。航空機の知見を転用し、2 枚翼をヒンジ構造で軸につないで（ツィータードハブ）、高速回転させる先端的な設計が試みられたが、そのほとんどが運転後短時間で深刻なトラブルに見舞われて失敗に終った。当時の流体力学の知見とコンピュータの解析能力では天然の風の挙動を十分に把握できず、風車に作用する変動荷重を過小評価して疲労強度が不足したことが失敗の主原因である。またタワーの風下側（ダウンウィンド）でロータを回転させると、タワーの影の低風速の乱流領域（タワーウェイク）をブレードが通過することになり、風車が大きな変動荷重を被ると共に大きな騒音を発生させることも判明した。このため今の大型風車では、タワーの風上側でロータを回すアップウィンド式が主流である。アップウィンド式では風見鶏効果による自動風向追従は期待できないため、風車ナセル上の風向計の指示に従って電動モータで風車の向きを風向に合わせるアクチブヨー制御が標準採用されるようになった。

表 3-1　大型風車の開発例

年	1981年	1981年	1982年	1982年	1984年	1987年	1987年
名称	Mod-2	MTS-3	WTS-75	Growian	WTS-4	Mod-5B	LS-1
定格出力	2.5MW	3MW	2MW	3MW	4MW	3.2MW	3MW
国	米国	ｽｳｪｰﾃﾞﾝ	ｽｳｪｰﾃﾞﾝ	ドイツ	米国	米国	英国
開発者	DOE& NASA (Boeing)	Hamilton Standard	Hamilton Standard	Huetter	Hamilton Standard	DOE& NASA	ｴﾈﾙｷﾞｰ省 &北部水 力電力省
ロータ径	91m	78m	75m	100m	78m	99m	60m
ハブ高さ (タワー)	61m	80m	77m	100m	80m	61m	45m
ロータ 配置	ｱｯﾌﾟｳｨﾝﾄﾞ	ﾀﾞｳﾝｳｨﾝﾄﾞ	ｱｯﾌﾟｳｨﾝﾄﾞ	ﾀﾞｳﾝｳｨﾝﾄﾞ	ﾀﾞｳﾝｳｨﾝﾄﾞ	ｱｯﾌﾟｳｨﾝﾄﾞ	ｱｯﾌﾟｳｨﾝﾄﾞ
翼枚数	2枚翼	2枚翼	2枚翼	2枚翼	2枚翼	2枚翼	2枚翼
翼の 固定方法	ﾂｨｰﾀｰﾄﾞﾊﾌﾞ	ﾂｨｰﾀｰﾄﾞﾊﾌﾞ	ﾂｨｰﾀｰﾄﾞﾊﾌﾞ	ﾂｨｰﾀｰﾄﾞﾊﾌﾞ	ﾂｨｰﾀｰﾄﾞﾊﾌﾞ	ﾂｨｰﾀｰﾄﾞﾊﾌﾞ	ﾂｨｰﾀｰﾄﾞﾊﾌﾞ
発電機 形式	同期	同期	誘導	誘導	同期	同期	同期

近年の風力発電の研究開発のトレンドは大型化である。風力発電の発電量は、受風面積（ロータの面積）と風速の 3 乗に比例する。地表の凹凸による減速の影響を受けない上空程、風速が速くなり（Wind shear：高度の 1/5～1/7 乗に比例）、ロータ直径が大きく背の高い大型の風車ほど発電量が大きくなるため、経済性向上のニーズから、1990 年代後半から急激に風車の大型化が進んでいる（図 3-8）。

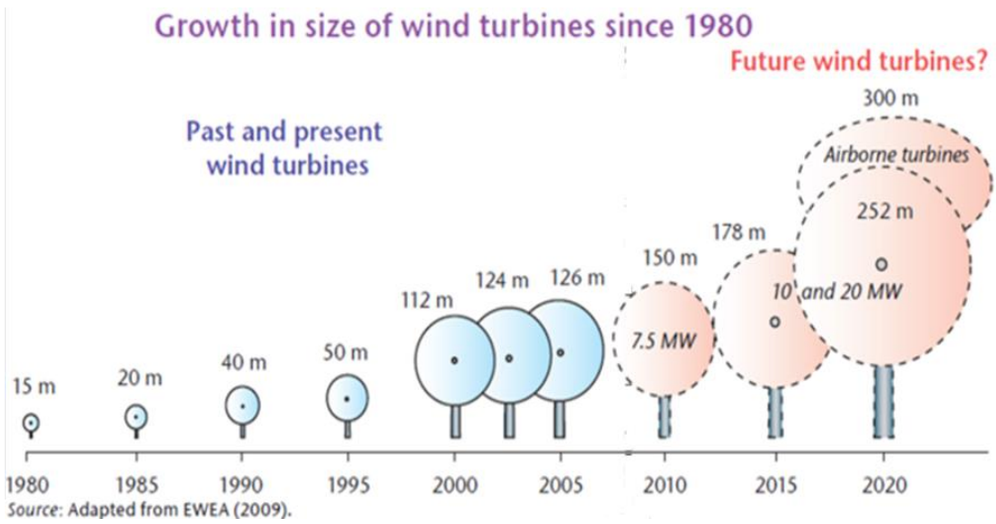


図 3-8　風車の大型化 [5)]

風車の大型化によって 1 機当たりの発電出力を増大させるとともに、さらに複数機配置によってウィンドファーム全体の出力を増大させることができる。発電容量を大きくできるメリットがある一方で、大型化や洋上化は、設置の難しさや構造上の耐久性の観点から設置コストや各部の重量、強度について新たな課題も伴う。これらの課題を解決するべく国内外で大型風力発電機開発プロジェクトが実施されている。従来の陸上風力発電機においては、増速器方式の風車が主流であるが、歯車とベアリングで構成される複雑な機構で、重量がかさむことやメンテナンス頻度が多く、更に大きなロータ径を用いる場合にはロータの回転数が低くなり、発電機への回転速度の倍率を大きくする必要が生じることから、増速機を用いないダイレクトドライブ方式の風力発電機や、油圧ポンプを用いて高圧の油圧エネルギーに変換し油圧モータを駆動させ発電させる風力発電機も開発されている [13)]。

風車の洋上化については、風速が比較的高い、風の乱れ強度が低い、風速の鉛直方向の差が小さい、風速が安定しているなどのメリットがあり、その導入がヨーロッパを中心に急速に増加しており、2014 年末で世界の導入量が 1052 万 kW に達している [14)]。一方で、洋上風力には陸上風力と比較して、建設が困難かつコストが高い（特に基礎部分）、維持・管理が困難かつ高コスト、塩害の影響を受けやすい、陸上まで長距離の海底送電ケーブルで送電しなければならない等のデメリットもあり、採算性を確保するためには 1 基当たりの発電量を増加することが必要である。このため、最近では 1 基当たりの出力が平均で 3～4MW と大型になっており、中には最大で 8MW の超大型風車も開発されている [15)]。ウィンドファームの総出力も 100MW を超えるものが多くなってきており、最大はイギリスのロンドン・アレイ発電所の 644.4MW(3.6MW×179 基, 2013 年稼働)[16)] である。また、ウィンドファームの大型化とともに陸上からの離岸距離も長くなり、100km に達するものも現れ、それに伴い設置場所の水深も深くなり、50m に及ぶものも出てきている。これらの問題を解決するため、これまでの交流ケーブルに代わり長距離送電に有利な高圧直流送電方式採用や、メンテナンスコスト削減を目的とした上述のダイレクトドライブ（ギアレス）風車導入が増加している。陸上風力においては、風車へのアクセスが容易なため、ギヤのメンテナンスはあまり問題にならないが、洋上風力においては作業船のレンタル料や故障機器の修理に伴う人件費などに

よって高コストとなる。そのため、ブレードや発電機を改良しながら増速機のギヤ比を最適化することでコストや総重量を抑えたり、また増速機を用いないダイレクトドライブ方式を採用したりする傾向が強まっている。ダイレクトドライブ方式では、増速機を用いずに低速で発電できる多極発電機を用いるため、従来の増速機を用いる方式に比べて生産コストが高いなどの欠点はあるが、増速機のコスト削減、故障リスクの回避やメンテナンスコストの削減に加え、増速機による伝達ロスの削減、重量の削減などの利点も有している。更には、深水域への設置を可能とする浮体式洋上風力の開発が我が国を筆頭に進められており、また発電機の軽量化・大容量化を目指した次世代の超電導風力発電機などの開発も進められている。

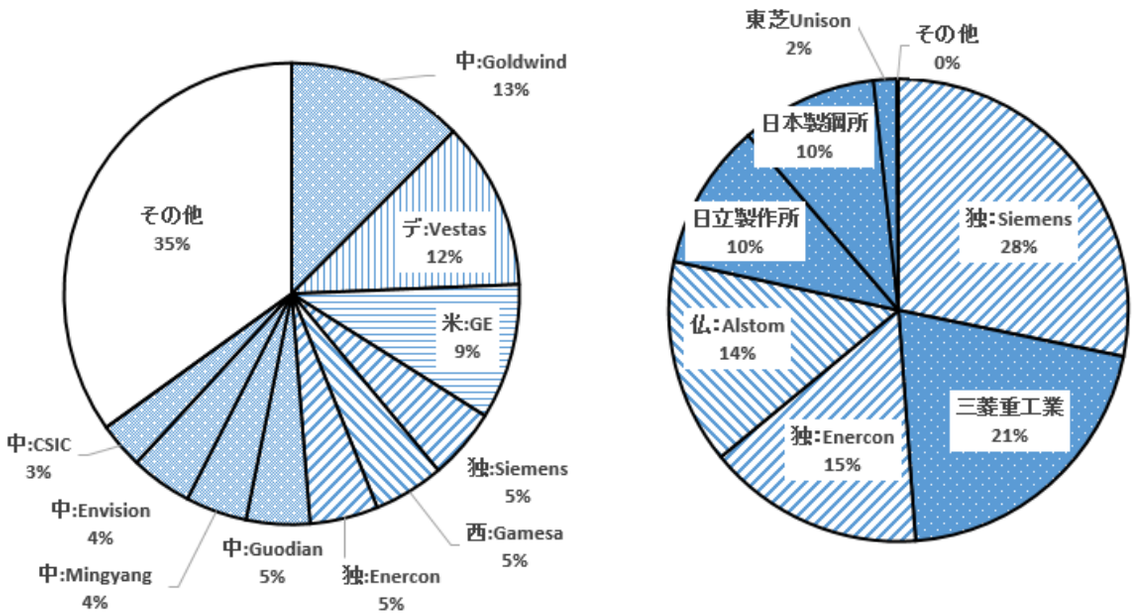
また、風車のオペレーション＆メンテナンス（O&M : Operation and Maintenance）に係るコストは年々増加傾向にあり、その課題が明らかになってきており、O&M に関する研究開発も国内外で進みつつある。風力発電機は約 1 万点におよぶ機械部品からなり、安全に運用するためには、適切なメンテナンスが必要である。特に、日本のように複雑な地形が多いサイトにおいては、乱流、台風、雷など気象条件の厳しい環境に起因する故障やトラブルが多く発生し、風車の稼働率の減少、メンテナンスコストの増大などが問題となっている。伝達系、増速機などの大きな部品については、部品調達と交換に係る時間（ダウンタ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

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

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

これらの技術開発と並行して、特に洋上風力の市場では企業間の M&A が急激に進みつつあり、SIEMENS、MHI-Vestas、GE の 3 極に統合される可能性が高い。それに伴い風車に

関する応用技術開発はこれらの動向の影響を受けることが予想される。参考までに、風車メーカの 2015 年の世界と日本の新規シェアを図 3-9 に示す。従来はデンマークの風車メーカ Vestas が 1 位を維持し、米国の GE がそれを追う展開だったが、2015 年は中国市場好況を受けて中国 Goldwind が初めて世界シェア 1 位を獲得した。なお、2016 年にドイツ Siemens がスペイン Gamesa を合併したため、次の世界シェア 1 位は合併後の Siemens になると予測されている。



2015 年新規の世界シェア
（出典：Bloomberg）

2015 年新規の日本シェア
（出典：JWPA 調べ）

図 3-9　風車メーカの市場シェア

なお大型風車は、国際標準 IEC61400 シリーズ（JIS C 1400 が対応）に則って開発と量産が行われ、DNV/GL 等の認証機関による風車の型式認証取得がビジネス上の必須要件（特に融資審査）になっている。同標準では風の強弱に応じて風車をいくつかの種別に分類している（表 3-2）。同標準は約 3～5 年毎に改訂が行われており、次回の第 4 回改訂では、日本の IEC 委員会からの提案により、台風と山岳部の乱流に応じた新種別（赤文字部分）が追加される予定である。この改訂は、平成 17～19 年度に NEDO によって実施された「日本型風力発電のガイドライン」策定事業の成果に準拠した内容になっている [6]。

表 3-2　IEDC61400-1 の第 4 版における Wind Class[7)]

<table>
<tr><th colspan="2">Class</th><th>Ⅰ（高風速）</th><th>Ⅱ（中風速）</th><th>Ⅲ（低風速）</th><th>T（台風）</th><th>S（特注）</th></tr>
<tr><td colspan="2">瞬間耐風速
[m/s]</td><td>70</td><td>59.5</td><td>52.5</td><td>80</td><td rowspan="8">設計者が規定する
（例:洋上で風況がClass Ⅰを越える）</td></tr>
<tr><td colspan="2">基準風速
Vref [m/s]</td><td>50</td><td>42.5</td><td>37.5</td><td>57</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">平均風速
Vave [m/s]</td><td rowspan="3">10</td><td rowspan="3">8.5</td><td rowspan="3">7.5</td><td>10</td></tr>
<tr><td>8.5</td></tr>
<tr><td>7.5</td></tr>
<tr><td rowspan="4">乱れ強度
Iref</td><td>A+</td><td colspan="5">0.18（極めて強い　例:山岳）</td></tr>
<tr><td>A</td><td colspan="5">0.16（乱れが強い　例:丘陵）</td></tr>
<tr><td>B</td><td colspan="5">0.14（乱れは中間　例:平野）</td></tr>
<tr><td>C</td><td colspan="5">0.12（乱れが弱い　例;洋上）</td></tr>
</table>

（３）注目動向

[新たな技術動向]

最近の風力発電は、立地が多様化してきている。寒冷地等の特殊仕様、ClassⅢの低風速地域向け風車、洋上風力発電などの技術動向が挙げられる。

まず海岸沿いの平野部を安定した偏西風が吹き、送電網と輸送のインフラが整っている欧州と、その他の地域とでは、気候や地形が異なるため、風車に求められる技術仕様も変化してきている。(2) の表 3-2 で示した台風対応もその好例である。他では、標高 3000m を越える高標高や、-40℃より低い寒冷地（CWP : Cold Waether Package）向けの特殊仕様の風車にもニーズが生じている。日本でも駒井ハルテックが、NEDO の支援を受けて CWP 仕様に改良した 300kW 風車 3 台をロシアのカムチャッカ半島に納入している [8)]。

2000 年以前は風車の大半は Class Ⅰ の高風速地域に建てられていたが、風力発電の普及拡大に伴って好風況の適地には風車が建て尽くされていった。新規の風車の立地先は ClassⅡへと移行し、最近では ClassⅢ（表 3-2、平均風速 7.5m/s）が主流になってきている。ClassⅢの風車は具体的には、定格出力（搭載する発電機の容量）はほぼ同じままで、ブレード長を伸ばしてロータ径を拡大し、より広い範囲の風を捉えて発電する華奢なタイプになる。例えば米国では 2006 年から 2015 年の 9 年間で、定格出力は 1.6MW から 2MW に 25%増加、ロータ径は 77m から 101m へと 31%増（受風面積は 72%増）となっている [9)]。また、ドイツではロータ径の拡大に加えて、コンクリート製や鋼製トラス構造の高高度タワーの普及により、ハブ高の延伸によって上空の高速風を捕まえる工夫が採られている。2014 年にドイツに新規設置された風車の平均ハブ高は 116m に達している [10)]。ドイツに倣って、米国においても鋼管とコンクリートのハイブリッド構造のタワー等を開発して、ハブ高拡大による風力発電の普及拡大を狙った報告書が発行されている [11)]。

陸上の新規立地が難しくなってきた西欧では、浅い水深の海域に風車を立てる洋上風力発電（着床式、図 3-10）が 1991 年から試行され 2010 年頃から技術開発が本格化（約 1GW/年）している。2015 年は洋上風力発電の当たり年で、累計は 12.1GW（風力発電全体の 2.8%）、新規は 3.8GW/年（同 5.4%）にまで成長した [2)]。大水深（100m 以上）向けの浮体式洋上風

力発電も、ノルウェー、ポルトガル、日本で技術実証試験が進められている。

このように最近の風力発電技術の研究開発のターゲットは洋上風力に向いており、大型の風力発電システムの開発がキーポイントとなる。洋上風力用等の大型風力発電で主力となる大出力ダイレクトドライブ同期発電機は、低速・大トルク・大型となるため、特に出力 10MW 以上で超電導発電機の導入可能性が検討されている[17)]。

超電導風力発電機の研究開発状況として、まず米国では、American Superconductor 社（AMSC 社）による 12 MVA の超電導風力発電機、Converteam 社（後に GE Energy 社に買収）による 8 MW 超電導風力発電機、GE Global Research 社による MRI 超電導技術を活用した低温超電導線材適用の超電導風力発電機、米国 AML 社による全超電導風力発電機等の研究開発が進めてられてきた。欧州でも幾つかのプロジェクトが実施されており、MgB_2 線材を利用し、高信頼性・軽量・ロバストな 10 MW 級洋上風力発電機の開発を目指す Suprapower プロジェクト、10～20 MW 級の洋上風力発電機の開発を目指す INNWIND プロジェクト、更に 3MW クラスの風車による実証研究を開始した EcoSwing プロジェクト[18)]等である。我が国では 2013～2014 年度の NEDO の風力発電高度実用化研究開発事業「10MW 超級風車の調査研究」において、鉄心を積極的に利用した超電導風力発電機の検討が進められ、高温超電導線材を使用した界磁超電導機で、固定子・回転子共に鉄心を有効に使った構造でいくつかの設計が行われた。以上のように大型超電導風力発電機の研究開発が進められており、超電導発電機として標準的な構造である空隙電機子巻線を有する界磁超電導発電機の他、鉄心を積極的に利用した突極形界磁超電導発電機と全超電導発電機が有望な発電機タイプと見られている。

2015 年時点では、陸用風車で定格出力 2～3.3MW、ロータ径 80～130m、最高部高さ 120～170m、洋上風車では定格出力 3.3～8MW、ロータ径 112～164m、最高部高さ 140～190m が主流になっている。商用風車で世界最大のものはデンマークの Vestas 社の V164 風車（定格出力 8MW、ロータ径 164m）である（表 3-3）。

図 3-10　スウェーデンの Lillgrund 洋上風力発電所（2006 年運開、2.3MW 風車×48 台）

表 3-3　最近の発電用風車の例

立地	メーカ名・機種名	仕様（定格出力･ロータ径）
陸上用	デンマークVestas V112-3.3	3.3MW・φ112m
	中国Goldwind 2.5	2.5MW・φ112m
	米国GE 2.85	2.85MW・φ103m
	ドイツSiemens SWT-3.0-101	3MW・φ101m
	ドイツEnercon E115	3MW・φ115m
	日立製作所 HTW2.1-80A	2.1MW・φ80m
	日本製鋼所 J100	3MW・φ100m
	駒井ハルテック KWT300	300ｋW・φ33m
洋上用	デンマークVestas V164-8.0	8MW・φ164m
	ドイツSiemens SWT-8.0-154	8MW・φ154m
	米国GE/Alstom Haliade 150	6MW・φ150m
	日立製作所 HTW5.0-126	5MW・φ126m

［注目すべき国内外のプロジェクト］

日本の風車工業の大型軸受技術は世界的に強い競争力を有している。NEDO「風力発電高度実用化研究開発」では、日本の軸受メーカ（NTN、JTEKT、NSK）と東京大学等が参加して、風車の設備利用率向上を目指した軸受の故障予測の遠隔監視システム（CMS）の技術研究開発を進めており、今後の産業競争力向上に繋がると期待されている。但し海外大手風車メーカに比べて、商用運転中の風車の運転データの過去の蓄積量に大きな差異があるので、これを埋めていく工夫が求められる。さらに、開発した故障予測手法を広く世界に宣伝普及して、国際標準化を図っていく必要がある。

大幅な立地拡大を期待できる将来技術として、浮体式洋上風力発電、更には空中風力発電（AWT : Air borne Wind Turbine）も研究開発が進められている。特に浮体式洋上風力発電では日本が世界をリードしており、2016 年 3 月末時点で世界にて運転中の実証機 5 台中の 3 台は日本にある（表 3-4）。環境省の長崎県五島列島沖の 2MW 浮体式洋上風車は、より人口の多い福江島に移設された後、研究終了と共に五島市に移管（O&M は戸田建設が担当）され、2016 年 3 月から営業運転を開始した。浮体式洋上風車の移設と営業運転は共に世界で初のケースである。経済産業省の福島県楢葉沖のプロジェクトでは、2 台目の三菱重工業製 7MW 風車「ふくしま新風」（浮体式では世界最大）が発電を開始しており、3 台目の日立製作所製 5MW 風車「ふくしま浜風」も 7 月 20 日に係留作業を完了して 2016 年内に発電を開始する予定である。日立製作所が採用しているダウンウィンド式の風車は、風荷重で傾いてもロータ面を垂直に維持できるため、浮体式洋上風力発電との技術的なマッチングは良い。さらに NEDO が北九州市沖でコスト削減を狙った次の浮体式洋上開発を計画している。

こうした日本の動きに対抗して、欧州では、フレームワーク計画（FP）にて国家横断的な技術開発が行われてきた。風車設計に係る基礎研究は、FP1（1984～1988 年）から開始されており、将来的な風車設計技術の確立に向けた風車後流（ウエイク）や乱流に関する研究、フィールド試験やシミュレーション技術、風洞試験などの基礎研究開発、発電量予測評価技術、系統連系技術開発、モニタリングシステム開発、浮体式洋上風力研究、大型風車開発の Up Wind、人材育成の WindSkill 等、継続的に多様な研究開発プロジェクトが実施されてきており、英国の Carbon Trust やドイツの Fraunhofer 研究所等が分担して実行している。

例えば Carbon Trust は NASA が宇宙開発用に考案した技術成熟度（TRL：Technology Readiness Level）を援用して、研究結果の早期（5 年以内）実用化を図っている。

欧州で洋上風力発電を推進してきた英国では、海洋エネルギー（洋上風力発電、波力・潮流力発電）についての種々の課題に対する応用研究であるカタパルトプロジェクト[20]を実施中である。ノルウェー、ポルトガルでも浮体式洋上風力発電の実証プロジェクトが計画されている（表 3-4）。また、欧州では、欧州風力エネルギー学会（WindEuropa：旧　European Wind Energy Association）において以下のような広範囲で包括的な EU プロジェクト[19]が実施されている。ETIPWind（欧州間の風力発電の技術プラットフォーム）、IRPWIND（長期的な研究ポテンシャルを維持するための総合戦略的調査･研究の組織化）、LEANWIND（洋上風力ライフサイクルコストの低減）、WISE Power（風力発電の社会受容性）、Market 4RES（電力市場における効率的な統合）、INNWIND.EU（洋上風力を視野に入れた単機の定格出力 10-20MW の大型風力発電機開発：洋上基礎構造、超電導発電機など）。

米国では、DOE Wind Program において、既存陸上風車の低コスト化安定化、系統連系安定化開発のほか、洋上風力発電のための 10 MW 超級風力発電機用ドライブトレイン開発、NREL における 90 m 超級ブレード試験設備の導入などを実施している[12]。

表 3-4　世界の浮体式洋上風力発電計画

設置場所	運転開始	運営者	風車	浮体
ノルウェー	2009年	Statoil Hydro (Hywind)	Siemens 2.3MW	スパー型
ポルトガル	2011年	Principal Power （WindFloat）	Vestas 2MW	セミサブ型
日本 長崎県	2013年	(環境省) 戸田建設	日立製作所　2MW*	スパー型
日本 福島県	2013年 2016年 （2016年）	経済産業省 丸紅他	日立製作所　2MW* 三菱重工業　7MW 日立製作所　5MW*	セミサブ型 セミサブ型 ｱﾄﾞﾊﾞﾝｽﾄﾞｽﾊﾟｰ型
日本 北九州市	（2017年）	NEDO 丸紅他	未公開 2台で計7.4MW	ムーンプール型
英国 スコットランド	（2017年）	Statoil Hydro (Hywind)	6MW風車×5台	スパー型

補注：*　ダウンウィンド式の風車

新規概念の風車として、将来を目指すベンチャー企業により空中風車（AWT：Airborne Wind Turbine）が研究開発されている。空中風車は、上空の高速風で効率良く発電可能で、建設工事とタワーが不要な利点がある。Google が買収した Makani Power 社はグライダー式の 600kW 機を米国で試験中、日本の Soft bank と三菱重工業も出資した Altaeros 社は気球式の 30kW 風車をアラスカで試験中である。浮体式洋上風力発電と空中風車は、技術的実現性は検証されつつあるが、まだコストが高いため、広範囲の商用化にはまだしばらく時間がかかる見込みである。

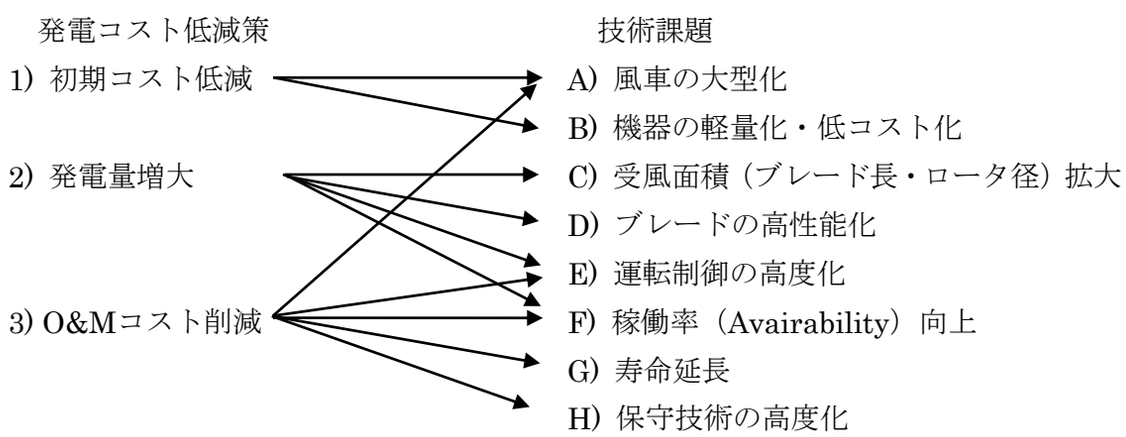
（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

風力発電の重要課題は、導入促進の観点から、発電コスト（LCOE：Levelized Cost of Energy）低減である（表 3-5）。このため、風車機器単体での発電コスト低減の技術開発が必須で、稼働率の向上、発電ロスの低減、翼等の性能の向上、機器の長期信頼性・耐久性確保、メンテナンス費削減などが主な技術課題となっている。また、洋上風車ではこれらに加え、高圧送電を含む送電系統最適化や、洋上での設置コスト低減、メンテナンス性の向上、稼働率向上のための予防保全技術、長期保守に必要な運転情報・機器診断技術、10MW 超級の超大型洋上風車、浮体式洋上風車の標準化と低コスト化などが導入促進の上で重要な課題となっている。

また、風力発電導入の更なる増大を目指す際の大きな課題として、電力系統との連系に伴って発生する問題も挙げられる。陸上、洋上といった設置環境の多様性と厳しい気象環境に対する資源環境リスク評価技術、運用・故障リスク評価技術と信頼性の高い風車設計評価技術の確立もある。

表 3-5　発電コスト低減策とその技術課題



［今後取組むべき研究テーマ］

短期的には発電コスト低減、系統連系、中長期的には大規模洋上ウィンドファームの開発、洋上風車および周辺設備の最適化と LCOE 低減による導入促進などに関する以下のような研究開発が重要と考える。

- 発電効率向上、大型化を実現するタワー、翼、パワートレインに関するコスト低減、軽量化、高効率化、高信頼性化技術の開発
- 大型部位の長期信頼性、耐久性向上の為の負荷制御および翼構造素材の開発
- 安価な洋上構造物（浮体式、着床式）の開発
- 前方風計測制御などによる荷重低減、運用面をサポートするメンテナンス技術開発（特にメンテナンス作業の機械化）
- 風車以外の建設、維持補修、撤去などの費用を低減できる風力発電設備の開発
- 風力発電の輸送・建設・撤去、リパワリングに関する研究
  （道路、鉄道、港湾などの国内インフラから生じる制約条件がコストに及ぼす影響を

評価し、結果としての発電単価改善へ必要な具体的施策を明確にする。）

- 風力エネルギー利活用および中小型風力発電機の研究
  （小型風車を用いた揚水や熱利用などの目的での風力エネルギー活用に関して、必要となるシチュエーションを掘り下げて研究を進める。）
- 蓄電池や直流連系送電線による制御、発電機出力を平滑化する方法の一つとしての有効電力優先制御などによる系統安定化制御技術の開発
- 資源環境リスク評価技術、運用・故障リスク評価技術と信頼性の高い風車設計評価技術の開発

（５）政策的課題

欧州では、各国に再生可能エネルギーの導入拡大を義務付ける EU 指令の下で、風力発電に対して一貫した育成政策と野心的な長期導入目標が示されてきた。日本でも、NEDO、経済産業省、環境省による風力発電関連の研究開発プロジェクトが実施され、NEDO の日本型風力発電ガイドライン策定事業は国際標準 IEC61400-4 の改訂に、洋上風力発電（着床式）実証研究は継続する民間の洋上開発計画に繋がる成果をあげている。その後も、環境省と経済産業省が浮体式洋上風力発電実証事業等、大型の研究開発プロジェクトを実行している。また NEDO の協力で駒井ハルテックの寒冷地仕様改良も行われている。

一方で、日本の風力発電政策は、導入推進（2012 年 7 月に固定価格買取制度（FIT）導入）と導入遅延（同年 10 月に 10MW 以上の風力開発に環境アセスを法制化）が混交の状況であり、系統連系も保証されておらず（欧米は基本的には優先接続）、2015 年に発表された政府のエネルギー長期導入見通しにおける風力発電の位置づけも 2030 年に 10GW（今後 15 年間の新規分は 7GW）に留まり、国内市場で風車メーカが量産（年産 100 台以上）して競争力を確立できる事業環境にはなっていない。

さらに、現状、風力発電所を計画・導入するためには、風況調査等事前準備に約 4 年程度、環境アセスメントに約 4～5 年、FIT 認定・系統連系契約・工事に 3～4 年、長くて 13 年程度の期間を要する[21]。風力発電の導入拡大を図るためにはこれを可能な限り迅速化する必要がある。この検討も進められているが[22]、事業化される先の時点での FIT 価格の事前決定、環境アセスメントの迅速化等も重要であると考えられる。

一方、大型風車を世界に販売するには、認証機関による型式認証取得（実際に風車を建てて発電量・電力品質・騒音・荷重等を計測する）が必須になっているが、日本には欧米のような公的な風力発電の試験サイトが無いため、国産風車メーカにとっては大きなハンディキャップになっている。風力発電事業を支える O&M 要員の人材育成も、まだ組織だった仕組みが無く、大学・研究所などの高等教育機関における専門家の育成など、早急な整備が望まれている。

洋上風車に関しては、送電網や蓄電、水素など他分野との連携を見据えた再生エネルギーの電力運用システムの整備、洋上風車の建設やメンテナンスのための港湾基地の整備、欧州に比べて高額な輸送・建設費用の低減、事業者が計画から運用までのリードタイムを短縮できるような省庁間の垣根を越えた関連法規の整備や規制緩和などの取り組みも望まれる。また、関連して国内部品サプライヤを育成することで、地域産業活性化を促し、部品調達時間

とコストの低減を実現することや、更に、大量導入に向けた送電線・港湾・建設船などのインフラ整備、過酷な気象環境に対応するための風車設計技術の開発、O&M 技術知見を活かした輸出産業化を目指すことも政策課題として重要である。

（６）キーワード

風力発電、スマートメンテナンス、洋上風力発電、浮体式洋上風力発電、空中風車、高効率メンテナンス、強強度軽量ブレード、発電出力予測、数値シミュレーション、電力系統、発電単価、ダウンウィンド型風車、アップウィンド型風車、周波数変動、有効電力優先制御、リパワリング、環境アセスメント

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	● 基礎研究は台風、乱流、雷、浮体分野で成果を上げている。 ● NEDO「風力発電高度実用化研究開発」で大型軸受の故障予測のCMSの開発を支援。 ● NEDO 風力発電高度実用化研究開発事業において、高温超電導線材を使用した界磁超電導機で、固定子・回転子共に鉄心を有効に使った大型超電導風力発電機の研究開発が進められている[23]。 ● ライフサイクルコスト低減など、中長期的な基礎研究は今後上昇が必要。
	応用研究・開発	◎	↗	● 経済産業省が福島で浮体式洋上風力発電実証研究を実施中。2MW、7MW、5MWの3台の計14MW。浮体式洋上風力の実証実験で他国を先行。 ● NEDOが北九市沖で浮体式洋上風力発電のコスト低減を狙った新プロジェクトも開始。 ● 大型蓄電システム(レドックスフロー電池)[24]、北本直流連系線[25]を用いた風力発電系統連系増大に向けた研究が進められている。 ● NEDOが日本の気候風土に合致した風力発電の発電量予測システムの実用化研究を実施中。
米国	基礎研究	◎	↗	● エネルギー省（DOE）が2008年5月に「2030年に米国の電力需要の30%を風力発電で賄う」長期計画を発表。目標達成に必要な研究項目を洗い出して組織的に研究開発を実施。 ● 陸上風車に関して、状態監視に基づく最適運用などの基礎研究は充実。 ● 超電導風力発電機の研究開発状況として、American Superconductor 社による12 MVA超電導風力発電機、Converteam社(後にGE Energy 社に買収)による8 MW 超電導風力発電機、GE Global Research 社による低温超電導線材適用の超電導風力発電機、米国AML 社による全超電導風力発電機等の研究開発等が進めてられている[23]。
	応用研究・開発	○	↗	● 米国エネルギー省(DOE)が、2014年5月、上記目標を更に発展させた風力発電の長期計画Wind Visionを発表し、2050年時点における風力発電を電力需要の35%にする目標を示すなど、積極的な姿勢が見られる。これと関連して、洋上風力プロジェクトも計画されており、Block島近海でのBlock Island Wind Farm計画、バージニア州沖合での実証研究Virginia Offshore Wind Technology Advancerment (VOWTA)計画などが進められている。 ● 2015年5月にはドイツを見習って高高度タワーの普及による風力導入拡大を呼びかけた。 ● 税制優遇制度（PTC）の採否によって導入量が年ごと大幅に変動。GEが欧州メーカ（Alstom、Gamesa）を買収のため、機器の開発では鈍化の可能性。
欧州	基礎研究	◎	→	● 大学・公立研究所の連携が進み、EU内の研究組織のネットワークを構築。広範囲なEUファンドの研究プロジェクトが後押し。欧州外への研究開発支援も積極的。 ● 10 MW 級洋上風力発電機の開発を目指すSuprapower プロジェクト、

				10～20 MW級の洋上風力発電機の開発を目指すINNWIND プロジェクト[23]、更に3MWクラスの風車による実証研究を開始したEcoSwingプロジェクト[18]等、次世代の大容量超電導風力発電機に関する研究開発を積極的に推進している。
	応用研究・開発	◎	→	● 2015年時点での洋上風力世界総容量12GWのうち約91%をヨーロッパが占めるなど、積極的に洋上風力の研究開発を進めている。特に、陸上への送電方式として従来の高圧交流送電HVACに代わり長距離大容量送電が可能である高圧直流送電HVDCを採用し、更にはドイツのDolWin2ではそれまで主流であった2レベル変換器に代わって更に高圧大容量送電に適しているモジュラマルチレベル変換器(MMC)を採用するなど、技術革新の速度も速い。 ● 2015年にEnergy Unionを結成し、EU内での施策の統一などを開始。 ● ドイツを中心に、ClassⅢの低風速地域向けのロータ径とハブ高の大きい高性能風車の開発と実用化が進む。 ● Carbon Trust等による洋上風力発電のコスト低減に向けた技術開発・実証研究が活発に行われている。 ● 洋上風力に関して2025までに€80/MWh達成目標。
中国	基礎研究	△	→	● 2020年までに250GW、2030年までに400GW、2050年までに1,000GWの設備容量を計画。 ● 中国風車メーカの大半は、欧米系の風車メーカ・設計コンサル会社からの技術供与を受けて風車製造に参入。自主開発は稀。 ● 現状は欧米メーカの製造基地として機能するが、旺盛な市場動向に合わせて、研究対象は風力エネルギー資源アセス、先進的風力発電機、ウィンドファーム建設・運用に関して欧米大学との連携を強化中である。 ● Goldwindは独風車メーカVensysを買収して海外進出時の知財権をクリア。
	応用研究・開発	△	→	● 2011年頃から中国政府は風車メーカの国際競争力強化に向けて、風の2.5MW以上の大型化とLVRT装備を政策誘導。 ● 新しい技術革新を伴ったプロジェクトなどは見当たらないが、最近は洋上風力に注力し、国内メーカにより2015年末までに360.5MW(約100基)が新規導入された。 ● 2021-2030年までは陸上と着床型洋上風力、2031年以降がは陸上と洋上での本格展開。
韓国	基礎研究	△	↘	● 不況と原油価格低下で風力発電へのモチベーションが低下。 ● 新規の技術開発という点では特段成果が見当たらない。 ● サプライヤとしての基礎研究は欧米との連携が多い。
	応用研究・開発	△	↘	● 洋上風力に関する新規導入プロジェクトはあるが、経済状況の影響もあり、あまり進展していない。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

1) Global Wind Report 2015. GWEC 2016 年 4 月.
http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2015-annual-market- update/
World Market Update 1997～2015、BTM Consult,ApS./Navigant Consulting,Inc.
2) 日本機械学会誌. 2015 年 8 月 Vol. 118、No.1161、p.487.

3) 長期エネルギー需給見通し. 経済産業省. 2015 年 7 月.
4) 風力発電技術の進歩と展開、科学と工業、83(8)、312~320（2009）
5) EWEA2009
6) 日本型風力発電ガイドライン策定事業の最終報告書、NEDO、2008 年 3 月発行
http://www.nedo.go.jp/library/furyokuhoukoku_index.html
7) IEC61400-1 4th Edition
8) カムチャッカで風力発電機とマイクログリッドシステム装置の設置工事を完了、駒井ハルテック、2016 年 4 月 15 日、http://www.komaihaltec.co.jp/sp/topics/index160415.html
9) 2015 Wind Technologies Market Report、米国 OE/Lawrence Berkeley 研究所、2016 年 8 月
https://emp.lbl.gov/publications/2015-wind-technologies-market-report
10) IEA Wind Task 26: The Past and Future Cost of Wind Energy、米国 DOE、2015 年 6 月
http://www.ieawind.org/task_26.html
11) Enabling Wind Power Nationwide、米国 DOE、2015 年 5 月
http://energy.gov/eere/wind/downloads/enabling-wind-power-nationwide
12) Wind Program Newsletter.、DOE
http://apps1.eere.energy.gov/wind/newsletter/detail.cfm/ articleId=32）[10]，SOPCAWIND, OnlineAvailable：http://www.sopcawind.eu/. [Accessed: 11-Aug-2014].
13) 三菱重工業プレスリリース. http://www.mhi.co.jp/news/story/1309275427.html
14) NEDO: 着床式洋上風力発電導入ガイドブック(第 1 版)、2015。
15) MHI ヴェスタス：http://www.mhi.co.jp/news/story/151218-1.html
16) 日本風力発電協会：風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標 V4.3、2014
17) 大崎博之: 10MW 級大容量風力発電を実現する超伝導回転機、応用物理、vol.82、no.7、pp.571-574、2013.
18) Offshore Wind.
http://www.offshorewind.biz/2015/05/08/superconductive-ecoswing-takes-on-full-sized-testing/
19) WindEuropa（EU プロジェクト）ページ https://windeurope.org/policy/eu-funded-projects/
20) カタパルトプロジェクトホームページ https://ore.catapult.org.uk/
21) 日本風力発電協会「風力発電の導入拡大実現に向けて」：
jwpa.jp/pdf/20150728_METI_shinenesyoi_13th.pdf
22) 資源エネルギー庁「ＦＩＴ制度見直しの検討状況の報告」：
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/kihonseisaku/saisei_kanou/pdf/008_02_00.pdf
23) 再生可能エネルギーシステムにおける発電機技術の現状と将来動向、電気学会技術報告第 1364 号、電気学会、2015.
24) 北海道電力 HP:
http://www.hepco.co.jp/energy/recyclable_energy/large_accumulator/index.html
25) 北海道電力 HP:
http://www.hepco.co.jp/energy/recyclable_energy/wind_power/demonstration.html

3.10　地熱発電

（1）研究開発領域の簡潔な説明

地熱発電とは、高温の地熱によって生成された水蒸気により蒸気タービン発電機を駆動して電力を発生させるものである。または、地熱が低温の場合は、イソペンタンやアンモニアなどの媒体を用いて、その蒸気により膨張発電機で発電させる。

地熱資源の特性把握技術（地熱の賦存、析出物の制御など）や掘削技術、地熱発電技術として、ドライスチーム、フラッシュサイクル、バイナリーサイクルおよび、高温岩体発電が対象となる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

地熱発電は、地熱という再生可能エネルギーを活用した発電であるため、運転に際していわゆる温室効果ガスの二酸化炭素の発生が火力発電に比して圧倒的に少なく、燃料の枯渇、高騰などの心配が少ない。また、太陽光発電及び風力発電といった他の主要な再生可能エネルギーを活用した発電と異なり、天候、季節、昼夜によらず安定した発電量を得られる。また、その稼働率は 70%と高く、温室効果ガス排出量は石炭火力発電の 1/30 と言われている。資源量も多く、特に日本のような火山国においては大きな潜在力を有すると言われる。このように地球温暖化への対策手法となることやエネルギー安全保障の観点からも各国で利用拡大が図られつつある。

我が国は世界の活火山の約 8%を擁する屈指の地熱資源大国でありながら、技術的な課題に加え、規制上の課題、周辺住民や利害関係者からの立地同意獲得の困難さのため、10 年以上政策的地熱研究開発を停止していた。地熱は本来、我が国の得意分野であり、世界シェア 70％を誇る地熱蒸気タービンや次々に開発中の小型バイナリー発電設備技術、各種センサや地震学の応用による革新的地下探査技術、高温掘削技術など、要素技術は高いレベルにある。今後は豪雪地帯の地熱カスケード利用技術や次世代 EGS（Enhanced Geothermal System）発電（地熱増産システム）などを、恒久性の高い地熱利用システム技術に発展させることにより、再び世界をリードする方向に進むことができると考えられる。

［動向（歴史）］

地殻を構成する岩石中に含まれる放射性元素が崩壊する際に発生する熱が地熱である。特に U^{238}、Th^{232} が発生する熱エネルギーが大きく、地球内部は 6000℃程度になっており、そこから地表面まで約 6000km の伝熱が生じている。このようにして生じた熱エネルギーは地球上の場所や位置によって水を媒体として発電や熱として利用されている。地熱発電の仕組みは基本的に火力発電と同じであるが、ボイラーを使って蒸気を炊きあげる代わりに地下深部の地熱貯留槽から採取される地熱流体を利用する。生産井とよばれる地熱井を通じて得られる流体がスーパーヒートスチームであるか、混相流もしくは液であるかによって発電の仕組みが異なる。一般的に、スーパーヒートスチームが得られる場合には、蒸気をダイレクトに膨張機に送り発電するドライスチーム方式が、混相流の場合は気液分離器を用いたフラッシュサイクル方式が、液の場合にはバイナリーサイクル方式が用いられる。現在、地熱発電

ではフラッシュサイクル方式（シングルフラッシュ）が 50%、バイナリーが 25%、ドライスチームが 10%利用されている。その他、ダブルフラッシュ方式が 10%弱、バックプレッシャー方式が数%、コンバインドサイクル方式が数%利用されている [1),2),3)]。

世界シェアの多くを担うフラッシュサイクル方式の熱機関は、我が国のメーカーが設備容量ベースで約 80%用いられている。地熱貯留層内の流体に含まれる物質が、スケール成分となり発電性能を低下させる可能性があるが、国内メーカーの技術は他国をリードしている。現在、世界 30 カ国弱でこの発電技術が利用されており、世界の総発電量は 1000 万 kW 超となっている。

地熱発電技術は 1904 年にイタリアのラルデレロではじめて実用化され、第二次世界大戦までは地熱発電はイタリアの独壇場であり、火山性蒸気への対策として、水を媒体としたバイナリー発電機が使用されていたが、戦争により消失した。第二次世界大戦後、アメリカのガイザーズ地熱地域、ニュージーランドのワイラケイ地域などでも開発に着手され、それらの地域はすでに 50 年以上地熱発電を継続させている。日本においても、1925 年に大分県別府市の別府温泉で試験運転が実施され、1966 年に岩手県八幡平市（旧松尾村）の松川地熱発電所が運転を開始した。その後、1974 年のオイルショックを機に、石油の代替エネルギーとしての地熱開発が世界の主要火山国で進められるようになり、資源探査技術、掘削技術、貯留層管理技術、生産技術（発電技術およびスケール対策など）が急速に進展した。特に資源探査技術や掘削技術は、石油・天然ガスで培われてきた技術を高温環境に適用する形で発展してきた [4)]。

初期に開発されたガイザーズや松川地域は、蒸気卓越型の地熱資源であり、その蒸気を直接タービンに送り込んだ。その後開発された多くの地域は生産流体が二相流体であるため、セパレーターで気液分離する。液体は地下に戻すが、その際、貯留層の急速な温度低下を招かないため、また持続可能で適切な発電規模を見積もるため、貯留層シミュレーション技術が発達し、それをもとに還元井の位置が決められた。また、この還元を積極的に利用して、高温ではあるが水がない岩体を、水圧破砕によって人工的に貯留層を造成し、熱を抽出する高温岩体発電技術の実証試験がアメリカのロスアラモスで行われ、その後数年以内にフランスとドイツの国境近くのソルツ地域、さらに日本でも山形県肘折地域や秋田県雄勝地域で調査研究が開始された。

また、1980 年代になると新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）において、地熱開発促進調査が開始され、国内 60 以上の地熱開発可能性の調査が行われた。そのうち、特に有望であった地域には 90 年代に実際に地熱発電所が建設された（柳津西山、八丈島など）。また、地熱資源調査や技術開発が様々な視点で行われ、全国地熱資源総合調査にはじまり、地熱貯留層の構成する断裂系の調査・解析手法を開発する「断裂系貯留層探査法開発」および後継の「貯留層変動探査法開発」、既存の地熱貯留層よりさらに深い深度での地熱開発可能性を岩手県の葛根田地熱地域で調査した「深部地熱資源調査」、国産バイナリー発電機の開発や炭酸カルシウムなどのスケール対策、掘削技術の開発を中心とした「深部地熱資源採取技術」そして、前述の肘折での「高温岩体発電技術」の実証試験が行われた。そして 1990 年代後半になると、国際協力の案件も増加し、インドネシア東部のフローレス島の小規模地熱開発も行うようになった。さらに 1997 年には国際エネルギー協会の地熱実施協定（IEA-GIA）において、いくつかのテーマの国際連携の Annex が開設された。そこで、日本は NEDO が

窓口になりいくつかのタスクに参加したが、特に深部地熱資源調査に関しては、日本はタスクリーダーとなり、そこで地熱資源調査、材料、掘削の調査リーダーとなった。この IEA-GIA のアネックスは少しずつテーマを変えながら現在も継続している。

地熱開発や研究に関する国際的な会議としては、1970 年代後半から、アメリカの GRC やスタンフォード大学での地熱ワークショップ、さらにニュージーランド地熱ワークショップなどが行われてきた。また、オークランド大学や九州大学などでは、国際的な地熱教育のために、発展途上国の学生を受け入れてきた。さらに、国際地熱協会（IGA）が組織化した世界地熱会議（WGC）の第 1 回が 1995 年にイタリアのフィレンツェで開催され、50 ヶ国以上の地熱関係者（技術者、研究者など）があつまり、地熱探査技術や掘削、発電技術など多くの議論がなされた。WGC は 5 年に 1 度開催されることになったが、2000 年には日本で、別府市および盛岡市を主会場として開催され、世界の多くの地熱関係者が参加した。しかしながら、その後 2002 年度をもって「貯留層変動探査法開発」などの国による技術開発は終了した。

日本では現在、約 20 カ所が稼働しており、その総発電量は 50 万 kW 超となっている。また、日本の地熱資源はアメリカ、インドネシアに次いで世界第 3 位の約 2000 万 kW 超となっており、これは原子力発電所 20 基以上に相当する。しかしながら、技術的な課題、法整備もしくは規制緩和、周辺環境、地震誘発の懸念、温泉枯渇の懸念などハード・ソフト的にいずれの側面からも若干の問題があり、導入までのタイムスケール、コスト、規制などいくつかの要因によって国内の地熱発電は約 15 年新設稼働が無い状態となっている。

その一方で、新たに温泉井戸を掘削することなく噴出した温泉の熱エネルギーを利用することで発電可能なバイナリー発電技術に注目が集まっている。日本には約 25000 程度の温泉源が存在すると言われており、そのエネルギー賦存量は 500MW 超と推算される。バイナリー発電は 100℃程度の高温熱源と数十℃の低温熱源により熱機関を作動させることで発電が可能なるため、比較的低温の地熱のみならず産業分野からの廃熱をも有効利用することが可能である [5),6)]。

一方、国内の地熱開発が停滞している間に、アメリカ、インドネシア、ニュージーランド、アイスランド、ケニア、トルコなどでは着実に地熱発電量を増大させており、世界の合計でみると、2000 年の 7974MW から 2015 年には 12636MW まで増大している [1),3)]。この世界の地熱発電に対し、日本はフラッシュ発電タービンや、配管技術等で貢献しており、現在の世界の地熱発電量の 70%を日本の富士電機、三菱日立パワーシステムズ、東芝の 3 社がしめている。さらに坑口装置も世界の 50%ほどのシェアがある [7),8)]。その一方で、バイナリー発電技術や坑内探査技術、掘削技術などはアメリカなど海外が強い状況である。探査技術についても国内の地熱での活躍の場がなくなってからは、海外の地熱や資源探査、また CCS などに活躍の場を求めていた。

そして、2008 年頃から、地熱開発に対して復活の動きが見え始めた。その背景は、地球温暖化対策としての CO_2 排出削減に地熱が貢献できるというものであった。まず、2000 年までの地熱開発促進調査で有望地域とされていた秋田県湯沢市の山葵沢地域での発電所建設が合意に達し 2019 年頃の運転開始を目指すことになった。そして、環境省も地熱プロジェクトを立ちあげることになり、「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」、「温泉発電システムの開発と実証」、「高傾斜泥水制御技術の開発」といった温泉や公園の問題の解決に向け

たプロジェクトが開始された。そして、2011 年 3 月の原発事故以後、エネルギー政策が大幅に見直され、地熱の技術開発・調査が本格的に行われるようになった。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

2012 年に地熱開発事業、特に探査技術等が石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）に移管されて以後、JOGMEC においては、国内初適用の空中物理探査手法を導入し、従来の方法より精度の高い重力探査と探査深度の深い電磁探査を行っている。その中で、空中重力偏差法探査では、地下の岩石密度分布を測定し、広域的な地質構造の把握を行っている。時間領域空中電磁探査では、地下 500m 程度までの岩石の電気抵抗の分布を測定し、高温の熱水や蒸気が存在する地熱貯留層上部の帽岩の把握を行っている。この手法は、地熱開発だけでなく、防災対策（地すべり地帯の把握）にも活用可能である。さらに、空中磁気探査では岩石の磁気的な性質を測定し、地熱や熱水と関係のある火山岩 （地熱変質帯）の分布の把握を行っている。この手法では、ヘリコプターで高度 150mを飛行し、測線間隔も 250mで、これまで不可能であった国立公園内部の物理探査も可能としている [9)]。

また、地熱発電所で必要な量の蒸気や熱水を採取できず、発電出力が変動しているケースが見られることから、JOGMEC の地熱貯留層評価・管理技術では、実証実験および数値シミュレーションを通じて、地下における蒸気・熱水の流れの評価精度をさらに向上させ、地熱貯留層の状況や経時変化を詳細に把握しながら、地熱貯留層へ人工的に涵養を行うことで、蒸気・熱水の採取量の最適化・安定化を図るプロジェクトを、福島県の柳津西山地熱発電所にて実施している。この涵養手法は、1990 年代にアメリカのガイザーズで行われた手法である。

さらに、地熱開発における坑井掘削コスト削減のため、従来の掘削ビットより耐久性・掘削能率に優れた地熱用 PDC ビットの開発に取り組んでいる [9)]。

一方、 NEDO では、2002 年度以後地熱事業を縮小させ、探査技術等を JOGMEC に移管させたが、2013 年度から新規に、新エネルギー部において「地熱発電技術研究開発」が開始された。このプロジェクトでは、ポテンシャルの高い地域への地熱発電の導入拡大を目的とし、既存の発電設備よりも、小型かつ高効率の地熱発電システムの機器開発及び低温域の地熱資源を活用したバイナリー発電システムを開発するとともに、環境保全対策や環境アセスメント円滑化等に資する取組を行う。具体的には、環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発、低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発、発電所の環境保全対策等技術開発、その他の新技術開発を行っている。これまでに 20 以上のプロジェクトが提案され、その多くは温泉バイナリーの機器開発やスケール対策技術である。スケール対策技術としては、薬品使用だけでなく、配管材料の改質や、磁気や高周波など物理的な手法を用いてのスケール付着抑制や回収技術が開発されている。そして、発電所の環境保全対策等技術開発では、硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発、温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発、エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発など環境や景観、温泉に配慮した技術開発が行われている [10)]。

その中で、超臨界温度領域の利用可能性調査が 1 つの課題となっており、アイスランドで実施された IDDP プロジェクトや国内で実施された葛根田深部地熱プロジェクトにおける超臨界涼気での開発課題の整理が行われている。

また、近年、コンバインドサイクルの開発に注目が集まっている。ここでの、コンバインドサイクルとは熱のカスケード利用を指しており、フラッシュサイクル方式の地熱発電とバイナリーサイクル方式の地熱発電を組み合わせた技術である。地熱発電では一般的に熱機関が利用されるので、高温の熱源を冷却し、その温度差を発電の推進力とする必要がある。コンバインドサイクルは、温度差を作るために冷却される熱を最大限利活用する次世代の地熱発電技術であり、現在、多くの研究開発がなされている。2016 年 5 月には、東芝がトルコの地熱発電所にてオーマット社と共同でコンバインドサイクルを建設することが報告されている（東芝が 7 万 kW クラスのフラッシュサイクル方式地熱発電を、オーマットが 2 万 kW クラスのバイナリーサイクル方式地熱発電をそれぞれ開発予定）。また、両社は高効率なコンバインドサイクル方式地熱発電システムを提案し、地熱資源の特性に応じて最適な設備の提案を通じて他社との差別化を図ると発表している。

この他、地熱資源の一つである温泉の熱を利用した発電技術開発が積極的に行われている。温泉の源泉温度範囲は広いため一概には言えないが、80-100℃程度の源泉温度がえられるならば、新たに掘削することなく発電を行えることが最大の利点である。しかしながら、浴用利用のために、下限温度は 60℃程度となり温度差を得にくく、そのため一般的なランキンサイクルに比して発電変換効率が上がりに難いという問題も有している（3-5%程度のカルノー効率しか得られない）。このような問題を解決するために、様々な温度範囲を対象として膨張機、熱媒、システムの開発がなされている。膨張機は一般的に容積式が用いられており、低温・低流量を対象とするスクルールから高温・大流量を対象とするスクリュまで検討されている（アネスト岩田、IHI、神戸製鋼など）。また、熱媒についても代替フロンや炭化水素、混合熱媒（ex.アンモニア/水）などが検討されている。

［注目すべきプロジェクト］

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

NEDO は発電側のシステム設計も対象とする「地熱発電技術研究開発」を 2013 年から推進中である。なかでも、上述した東芝が実施する「地熱複合サイクル発電システムの開発」は今後の発電方式の主力となっていく可能性がある。また、数キロワットクラスの発電を対象とするアネスト岩田の「無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システムの実用化」はオイルフリーで熱媒を循環するプロセスを開発するものであり、徹底的な熱利用を想定しており興味深い。この他、幾つかの企業や研究機関および大学等が実施しているスケール対策プロジェクトは本技術のキーとなる。最後に紹介したプロジェクトは横河電機が実施している「温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の

研究開発」である。熱資源の湧出量などを遠隔でモニタリング可能な安価な設備開発に資するものである。また、NEDO の技術戦略研究センターでは、特に長期的な導入量の飛躍的な増大には、非従来型地熱発電（EGS）技術の適用がブレイクスルーとなりうることから、EGS 技術の世界各地の導入状況、タイプ分け、そして従来型を含めた開発への課題をまとめ公表した[11)]。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

また、有望地域は山岳地域であり、掘削のための用地確保が難しいこと、貯留層がより高温で、流体が酸性になりうることから、傾斜掘削を含む掘削技術の向上、そしてドリルビットの改良など、掘削コストの低減に直結する技術開発が必要となってくる。さらに、高温の酸性流体を想定した配管などの腐食対策、リスク評価も重要になる。温泉への配慮については、温泉貯留層と地熱貯留層の関連を考察し、温泉への影響がない地熱開発の手法の開発が必要となってくる。

一方、EGS においては、水圧破砕の確実性、特に坑井間の連結を可能にすることが望まれる。これまでの EGS では、注水した水が半分程度しか回収できないため、周辺河川などからの補給が必要であったり、坑井間の距離が短いために貯留層が急冷却を起こしたり、さらに水圧破砕時などの誘発地震、さらに注水による内部消費電力やコストの問題などが生じている。このような課題に対応する必要がある。

［今後取組むべき研究テーマ］

1. より高温（超臨界領域を想定）の地熱資源開発のために、高温で使用可能な坑内検層機器および高温での掘削技術の開発。またそれに伴う配管等の地熱材料の評価技術の開発。
2. 地熱井掘削の成功率を向上させ、地熱発電開発コストを低減するための高精度の革新的地下イメージング技術・地熱探査技術の開発。
3. 高度に持続的な地熱発電を可能にするための地熱貯留層シミュレーション技術・地熱貯留層モニタリング技術の開発。我が国では温泉との立地の競合という課題があり、細心のモニタリング技術が必要とされている。
4. EGS の運用に関して、水圧破砕、循環システムの最適化を検証し、誘発地震などの環境リスクを最小にするための実証試験
5. 熱電変換効率の高い熱機関システムの開発。例えば、高効率コンバインドサイクル開発（シングルフラッシュ-バイナリーサイクルコンバインドプロセス、バイナリー-バイナリーコンバインドサイクルプロセス、バイナリー・ヒートポンプコンバインドサイクルプロセスなど）。
6. 作動流体（熱媒もしくは冷媒）の開発。50 度程度から発電可能な熱媒やピンチポイントを作らない熱媒の開発が発電コストを向上させるために求められている。
7. スケール付着がない熱交換器開発。固体壁を伝熱面とする熱交換器構造ではスケール付着を避けることは困難であるため、例えば、気液界面を伝熱面とする新しい熱交換器構造の開発などが必要である。

8. 熱カスケードを高効率化するか断熱材開発。ヒートロスがなく熱電変換効率を向上させることが可能な安価な材料開発が必要である。
9. 地熱発電機器の性能を予測するシミュレーション技術開発。
10. 地熱開発の社会受容制を確認し、開発への理解を促進させるための技術開発（環境・温泉モニタリングの高精度化）

（５）政策的課題

国立公園問題、温泉問題、発電コスト問題という日本が抱える 3 つの問題が地熱発電普及の障害となっている。現時点で可能な大規模のフラッシュ型地熱発電を開発する場合、有望地域が国立公園内あるいはその近傍である場合が多く、貯留層の状況が不明であることが多い。JOGMEC の空中物理探査で公園内を含む地下の状況は判明しつつあるが、今後はより詳細な解析が求められ、公園に影響を及ぼさない地上調査法により、貯留層の的確な把握、それに基づいた適正規模な発電が求められる。一方、世界的に議論されている生態保護地域と、日本の公園の区分には差異があり、またケニアなど公園内での開発を積極的に推進している国もある。したがって、公園内の生態系に配慮した調査・開発をするのはもちろんであるが、公園の規制の全面的な見直しも必要かと思われる。

日本における地熱発電の開発リードタイムは、10 年以上掛かっており、その結果、開発コストが世界標準の 2 倍となっている。そのため、一元的な許認可制度を導入し、開発リードタイムを抜本的に短縮する必要がある。特に環境アセスメントの短縮化は重要であり、早期の短縮の実現および環境アセスメントが必要な閾値を引き上げることを検討する必要がある。

発電コストについては、他の再生可能エネルギーに比して国主導での導入促進が少なく、技術開発が低迷している。例えば、数十キロワットクラスのバイナリー発電設備を考えてみると、設備は蒸発側と冷却側の熱交換器、膨張機、ポンプ、配管から構成されており、比較的シンプルな設備となっている。しかしながら、構成機器あたりの単価が高く、さらに熱源（温度や流量）が一定でないため、基本的に一点ものの生産が要求されるために、ペイバック期間が長く、発電コストが高くなってしまうという問題を有している。今後、この技術開発のための企業や産学との連携を通したオープンイノベーションが強く求められるであろう。

例えば、温泉発電を対象としたバイナリー発電技術開発が加速している中、我が国においても温泉発電は小規模な発電であることから、電気事業法に基づくボイラー・タービン技術者の専任について議論がなされている。概ね良好に規制が緩和され技術導入の障壁が排除されつつあるが、温泉熱も広範囲であり、小規模から大規模まで様々であることから、今後さらなる議論が必要になるものと思われる。また、熱媒についても同様に発電コスト低減に繋がる物質の導入も積極的に認めてもらえるべく議論を継続して欲しい。

また、現在でも地域によっては温泉地が地熱開発に懸念を示すことなどから、有望地域であっても地元との調整が進まない地域が多い。その一方ですでに掘削された浴用のための温泉熱を用いた発電は短時間で実装が可能となっている。地熱資源は数少ない安定した国産資源であることから、地元との合意が段階的であっても進んでいくような体制作り、あるいは小規模な発電から環境影響を見ながらの段階的な開発が可能になるような施策が必要となってくる。その場合、開発費用が最初から大規模な発電所を作るのに比べコストがかかること

が想定されるので、その対応が可能な施策、場合によってはドイツが導入しているような、開発に伴う保険制度の導入も検討する必要がある。

そして、地熱開発の成果が発電に結びつくには、10 年単位の長期的な時間が必要であるので、その間、継続的な地熱研究・開発予算と、固定買取価格制度の継続的な運用を望みたい。同時に、2000 年代のいわゆる「空白の 10 年」のために、地熱研究・開発の若手の育成が急務であり、また地熱に関する教育機関の充実が必要である。

（６）キーワード

地熱発電、空中物理探査手法、低コスト掘削技術、貯留層評価・管理技術、環境モニタリング技術、バイナリー発電技術、EGS 発電、スケール対策、誘発地震、発電コスト、熱機関、コンバインドサイクル（複合サイクル）熱利用

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	● 産総研では、再生可能エネルギー研究センター(FREA)を中心に地熱探査技術や温泉モニタリング技術、掘削技術開発に取り組んでいる。 ● NEDOでは将来のEGS開発に向けて技術戦略研究センターがEGS技術の世界各地の導入状況、タイプ分け、従来型を含めた開発への課題をまとめた報告書を作成するとともに、将来技術の研究に着手している。 ● バイナリーを含めた熱機関の熱媒開発やシステム開発が科学研究費補助金などをベースとして大学や国立研究所などで実施されている。 ● 九州大学などが総合的な地熱研究を行い、多くの学生が国内外で学会発表を行うようになってきている。
	応用研究・開発	◎	↗	● 2013年度より、NEDOやJOGMECが政策的な地熱研究開発を実施している。NEDOではスケール対策技術やバイナリー発電の他に景観設計や硫化水素モニタリング、温泉モニタリングなど環境に配慮した研究を実施している。JOGMECでは空中磁気探査をメインに人工涵養技術、掘削技術の開発を行っている。 ● 2013～2015年に温泉バイナリーを中心に小規模発電所の建設が19カ所、計10MWとなり、国立公園内の土湯の例などがある。大規模発電所は、2019年運転開始予定の山葵沢地熱発電所の建設のみで、その他の地点は地元との合意形成、詳細な調査などを要する状況である。 ● 熱機関や発電システムの開発はNEDO・地熱発電技術研究開発を中心として様々な形での産学官連携体制にて実施されている。 ● JST CRDSの中低温熱利用の高度化に関する技術調査報告書（CRDS-FY2013-RR-02）に、バイナリー発電技術開発や利用用途などについて詳細にまとめられている。 ● JST LSCのイノベーション政策立案のための提案書（技術開発編地熱発電（Vol.1）－発電量拡大に向けた設計・評価－）にて、現場技術と今後の展望が述べられている。
米国	基礎研究	◎	↗	● エネルギー省（DOE）を中心に資源からプロセスまで幅広い研究を展開（2015 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report (February 2015)） ● 「PlayFairway」として、資源開発の技術的な可能性、社会受容性を含めた総合的な従来型地熱開発可能性の再評価を国内の多数の大学で実施し、GRCなど地熱の国際会議で成果公表をするとともに、DOEも解析のための手法を地熱研究者とともに検討を行っている。 ● EGSに関してFORGEプロジェクトとして主要大学で基礎研究を実施。

	応用研究・開発	◎	↗	● オーマット・テクノロジーズ社が大型のバイナリー発電設備開発を展開し、コンバインドサイクル等の実用化開発がなされている。 ● DOEがSALT（低温地熱からの資源回収の応用的な研究）を進行中である。DOEはバイナリー発電設備メーカーのバイナリー発電技術、ローレンスバークレー国立研究所などでの地熱探査技術、スタンフォード大学やユタ大学などでのトレーサー技術開発、そしてPlayFairwayでの地熱開発可能性総合解析など、研究開発を系統的に進めている。
欧州	基礎研究	○	→	● トルコを中心に、プロセス的な開発（トリプルフラッシュ）が行われており、熱のカスケード利用に関する研究がなされている。 ● 2015年の世界地熱会議(WGC)では、ドイツが発表件数第2位であり、その内容も掘削、探査技術、スケール対策など基礎的な案件が多い。 ● アイスランド深部掘削プロジェクト（IDDP）のための基礎研究も盛んに行われている。 ● イタリアでは、膨張機（大型タービンタイプなど）の開発が展開されている。独自のタービン技術、探査技術等の研究が行われている。 ● フランス、スイス、オランダ、ハンガリーなどもWGCなどの国際会議での基礎研究成果公表が多くなっている。 ● ヨーロッパ全体の地熱資源分布についても調査が行われている。 ● ドイツ、フランス、スイスなどでEGSの研究開発が実施されている。
	応用研究・開発	◎	↗	● EGSに関する研究がなされている。 ● ドイツでは、カリーナサイクルが2カ所で稼働している。 ● アイスランドでは2010年からの5年間で90MW発電を増加させ、国内の発電の30%以上を地熱でまかなっている。 ● イタリアでも設備容量を70MW増加させている。 ● トルコは、2010年からの設備容量増加は315MWで、ケニア、ニュージーランド、アメリカと同等の伸びを示している。コンバインドサイクルの実用化開発とトリプルフラッシュ発電の導入などより精力的な開発を行っている。
中国	基礎研究	△	→	● EGS調査に関する基礎研究がなされている。 ● 中国科学院などが、チベット南部や雲南省などの地熱ポテンシャル評価をしている。WGCでも発表件数第4位である。
	応用研究・開発	△	→	● 第十二次5カ年計画 科学技術発展計画にて大型地熱の開発および普及に関するビジョンが示されている。 ● チベット南部の八羊井(Yangbajing)地熱発電所で蒸気フラッシュ発電が行われるなど、バイナリーを含めて約28MWの地熱発電所が稼働中。 ● 暖房や地中熱利用などの直接利用に力を入れており、設備容量は世界一である。
韓国	基礎研究	△	→	● 資源エネルギー探査開発会社のネクスジオ、韓国地質資源研究院、ソウル大学などで構成されたコンソーシアムが地熱発電技術の実用化に向けた開発を展開。 ● KIGAM（韓国地質鉱物資源研究院）や各大学が、積極的に地熱探査技術やバイナリー発電技術の研究をしている。特にKIGAMは国内数百以上の地温勾配や熱流量のデータから地熱データベースおよび国内の地熱分布をとりまとめて、地下6.5kmまでのポテンシャルを求めている。
	応用研究・開発	△	→	● チェジュ島にて地熱発電所開発がされている。 ● NEXGEO社がKIGAMや大学と浦項(Pohang)でEGS発電の開発研究を行っており、深度4kmを超える掘削が行われている。またバイナリー発電の可能性調査も行われている。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 江原幸雄「地熱エネルギー」オーム社 (2014)
2) 森康夫、陶山淳治「地熱エネルギー読本」オーム社（1980）
3) Ehara S.; “Susitainable Development of Geothermal Energy” Journal of the Japan Institute of Energy 87 pp.792-800 (2008)
4) 柳澤教雄「地熱発電の現状」日本エネルギー学会誌　vol.93、pp.1140-1147 (2014)
5) 「普及版環境と省エネルギーのためのエネルギー新技術体系」NTS (1996)
6) 「未利用工場排熱の有効活用技術と実用展開」サイエンス＆テクノロジー株式会社 (2014)
7) Bertani, R. Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2015.2015 PaperNo.01001
8) 柳澤教雄「WGC2015（世界地熱会議 2015 年大会）に参加して」地熱技術 Vol.40 No.3&4. pp.3-15(2015)
9) JOGMEC「平成 27 年度地熱部事業性報告会資料」　pp.140 (2016)
10) 吉田明生「NEDO における地熱技術開発の取り組み」地熱技術　Vol.40, No.1&2, pp.13-19 (2015)
11) NEDO「地熱発電分野の技術策定に向けて」NEDO 技術戦略研究センターレポート TSCForsight、Vol.12 p.27 (2016)

3.11　バイオマス

（1）研究開発領域の簡潔な説明

バイオマスは、原理的に再生可能である生物由来資源（bio-resources）を一定以上の規模（量、mass）で利用することを表す概念で、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたものである。ここでは、バイオマスを燃料や電力等の二次エネルギーに利用する技術とシステム技術、バイオマスを育成するプロセス技術、バイオマスから複数形態のエネルギーや他製品を生産するシステム技術（バイオリファイナリー）などの研究開発を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

バイオマスをエネルギー利用する意義は、(1) 非再生可能資源である化石資源（石油、石炭、天然ガス、重質油等）の代替による同資源の消費削減と同資源に由来する CO_2 排出の削減、(2) エネルギーの国際価格変動の影響を受けにくい「国産の再生可能資源」の利用、(3) エネルギー利用に伴う地域産業と雇用の創出、(4) バイオマスが廃棄物である場合の適切な処理、である [1)]。

上記（1）（2）の観点から国内のバイオマス利用をみると、国産資源としてのバイオマスのエネルギーポテンシャルは、510 PJ/年（1 PJ = 1015 J）とされている [2)]。 その多くは、廃棄物系（製材・建築廃材等）、紙パルプ系（古紙、スラッジ）、林業系（林地残材、未利用材）等の木質系バイオマスであり、農業系廃棄物、食品残渣等、家畜糞尿、下水汚泥がこれに続く。国内の木材消費は、用材、紙パルプ製品としての利用が主であるが、これらの約 70%は輸入材であり、国産材は約 30%にすぎない。非可食性バイオマスからの化成品製造のための技術開発が NEDO 主導により実施されている [3)]。 その一環として、バイオマスをベースとする地域化学産業の創出可能性に関する調査 [4)]が行われた。同調査では、国内森林（主として人工林 ; 約 1,000 万 ha）の樹齢分布の適正化が検討され、適正化により達成できる木材生産量は最大で 2,500～3,000 万 m3/年（絶乾重量：1,500～1,800 万トン/年、エネルギー：270～320 PJ）と推定された。仮に、この生産量（＝最大ポテンシャル）の「全て」を燃焼して電力を得た（発電効率 30%）とすると、年間発電電力量は、現在のわが国における電力需給量（9,250 億 kWh/年）のわずか 2.3%程度である。具体的な試算例はないが、これに農業系等バイオマスのポテンシャルを加えたとしても上記のシェアは 3%程度に留まると推定される。生産可能なバイオマスの全量をエネルギー利用するというのは、非現実的だが、上記の試算は、今後のわが国におけるバイオマスの利活用の位置づけ（つまり、何のためにバイオマスを利活用するか）再検討、再定義の必要性を示唆する。

上述のように、国内に限って言えばバイオマスエネルギー利用のインパクトは小さい。しかしながら、このことは必ずしも(1)(2)の観点に立ってエネルギー利用を否定するものではない。(3)(4)の観点に立てば、合理性も認識できる。最近、設備容量が増大している未利用材を燃料とする発電、下水汚泥をはじめとする廃棄物・石炭混焼による発電等は、地域産業創出、林業活性化、廃棄物処理、バイオマスをより低コストで利用可能とするためのインフラ・ロジスティクス形成の手段として意義がある。ただし、その場合であっても経済性は事業・産業成立の必要条件であり、後述するアドバンスド利用に関しては十分な検討がなされること

が望ましい。加えて、エネルギー利用、非エネルギー利用、あるいはこれらの統合形をいずれも対象とするバイオマスベース産業創出の検討と技術・政策課題の設定が有効である。

［動向（歴史）］

①バイオマス燃焼発電

現在、わが国の総一次エネルギー供給に占める再生可能エネルギー・新エネルギーの割合は 4.4%であり、このうちバイオマス利用によるものは 2.4%である。バイオマス利用の多くは、紙パルプ産業における黒液やバイオマス由来廃棄物の燃焼によるもので、発電を目的とする木質等のバイオマス燃焼は、近年設備容量が増大しており、とくに、2015 年度に改定された固定価格買取制度（FIT）がこれを後押ししている。ただし、バイオマス発電のバイオマスのエネルギー利用全体に占める割合は小さい。

燃焼発電技術は、石炭火力発電の技術として開発、実用化され、石炭―バイオマス混焼という形で 2000 年代くらいに普及した。木質バイオマス専焼発電は、2000 年代から実用化され、現在普及が進んでいる。各国の電力生産に占めるバイオマス利用発電が占める割合は以下の通りである [5]。日本：3.0%（黒液燃焼を含む）、米国 1.6%、カナダ：＜1%、ドイツ：5.9%、オランダ 3.7%、デンマーク：9.8%、フィンランド：16%、イギリス：4.8%、中国：＜1%、韓国＜0.5%（ただし、黒液などの廃棄物の燃焼も含まれる）。

バイオマス燃料発電については、日本では、FIT が開始され、小規模のバイオマス専焼発電の計画、導入が進んでいる。これらには、循環流動層ボイラやストーカ炉が使用されており、50 MW の糸魚川バイオマス発電所に最大約 270 MW のバイオマス発電所があり [37]、さらに、約 310 MW の計画が進んでいる [38]。大規模石炭火力でのバイオマス混焼は、発電事業者がメーカーと一緒に混焼の研究、実証試験を行ってきているが、経済性の観点から約 5cal%程度の混焼にとどまっている。一方、2001 年～2003 年に石炭・バイオマス混焼技術として 5～10cal%混焼技術の開発、バイオマスエネルギー技術研究開発戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（実用化技術開発）として、2010 年～2013 年「バイオマス専用粉砕方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発」として、25cal%混焼技術の開発 [39]、2011 年～2012 年「石炭火力微粉炭ボイラに混焼可能な新規バイオマス固形燃料の研究開発」として半炭化の研究が行われている [40]。

バイオマス専焼発電の経済性は、受入燃料の価格と規模（蒸気タービン発電効率）に強く依存する。最近の検討 [4] によれば、FIT 利用によって経済性が成立する規模の下限はおよそ 5 MWe（固定電力価格 （税抜き）32 円/kWh、燃料価格＝20 円/kg-dry の場合）である。言い換えると、FIT を利用しなければ、専焼による発電は大規模でも成立せず、熱を有価で外販したとしても結果は変わらない。バイオマス専焼の導入状況については、資源エネルギー庁による文献 6 を参照されたい。わが国では、2015 年度に NEDO 事業（バイオマスエネルギー導入に係る技術指針・導入要件の策定に関する検討）が実施され、発電および熱利用を対象とする木質バイオマス利用が地域産業として技術的・経済的に成立する条件等が調査検討され、地域導入の指針が作成されている [7]。

石炭を燃料とする大規模発電の効率は 42%程度であり、規模に限界のあるバイオマス専焼発電より高い。それ故に、石炭にバイオマス配合して利用する混焼が注目されている。国内

で稼働中および混焼開始を予定している石炭火力設備は 17 ヶ所（発電設備容量の総計；878 万 kWe）であり、混焼率は 1～3%（実績）から 30～50%（目標値）に至るものまで広範囲にわたる [7]。混焼の経済的課題は、バイオマス発生・集積地から大型火力発電サイトへの輸送コストにかかるものである。すなわち、輸送距離（加えて、集積量や木質粉砕等の前処理の要求）によって混焼、集積地における専焼の経済的優位性が逆転することがある [6]。

専焼、混焼を併せ、バイオマス燃焼・発電技術に関する最新の国際動向は、例えば文献 8-9 に詳しい。EU 諸国の多くでは、バイオマスの専焼、混焼のいずれも商用発電に導入済みである。混焼の場合、バイオマス配合率（熱量基準）は 5～8%の場合が多いが、バイオマスの事前微粉砕が適切になされれば、既設石炭火力設備に適用可能な最大配合率は 50%程度と考えられている。燃料は多岐にわたり、木質（チップ、オガ粉、ペレット）、下水汚泥（乾燥）、各種搾油残渣（パーム、オリーブ等）、穀物残渣（わら等、ペレットを含む）に関して多くの実績と経験が蓄積されている。バイオマスの粉砕は最近の技術トッピクスのひとつである。石炭用の粉砕ミルにおいて石炭とバイオマスを共粉砕する場合、後者の配合率に上限があり、バイオマス配合による動力の増大が大きい。これに対して、ハンマータイプのミルはバイオマス専焼、混焼のいずれにも適用できる。したがって、混焼発電プラントを新設する場合はハンマータイプミルの導入が望ましい。バイオマスの前処理は、石炭よりも大きな動力が必要な粉砕を容易にし、加えて、燃料としてのアップグレーディングになるペレット化も容易にする。バイオマスを 250～350℃で加熱処理するトレファクション（torrefaction）および水熱処理（熱水処理、hydrothermal treatment）は、いずれも上記要件を満足する前処理法として期待され、とくに前者は、基礎から実用検討に至る範囲で検討が進んでいる。前処理の課題に関しては後述する。もうひとつの重要な技術トピックは、バイオマス燃焼で不可避的に発生する灰に係るトラブルの回避である。バイオマス燃焼ではサブミクロンの小径灰粒子（飛灰＝フライアッシュの一部）が発生しやすい。これは揮発性の高いアルカリ・アルカリ土類金属（とくに前者）に起因する。バイオマス専焼では実運転の経験を通じて多くの問題が解決されているが、石炭専焼を前提に設計された発電プラントの場合、灰に係る問題はバイオマス配合率が 10%を超えると顕著になる。具体的には、燃料を吹き込むバーナー部、火炉、そして熱交換（蒸気発生）のためのスーパーヒーター、リヒーターを構成する金属管への灰堆積・蓄積によるファウリングの回避が重要である。ファウリングは熱交換効率を低下させるだけでなく、金属管腐食の原因にもなる。小径灰粒子は、ファイルングを起こさない場合であっても排ガス処理部、たとえば電気集塵における灰粒子捕捉効率の低下、窒素酸化物除去（SCR）のための還元触媒の被毒・活性低下もたらすことが指摘されており、適切な処理技術が求められる。これらの問題への対応には、石炭燃焼における同様、類似の問題の解決のために蓄積された技術とノウハウが有効であり、灰の問題は解決困難な問題とまでは認識されていない。

わが国における利用可能バイオマス量と石炭火力発電の規模の関係を考えると、特殊な場合を除けば、配合率が熱量ベースで 10%を超える場合はかなり限定される。今後混焼が普及、拡大するとしても、バイオマス配合率はせいぜい数%の範囲内と予想され、ハンマータイプミル導入による石炭・バイオマスの共粉砕技術、高配合率対応のバーナーや排ガス設備などの導入のインパクトは小さく、現状の石炭燃焼・発電技術の部分的な改良のほうが、コストと開発期間の両面で有利であるケースが少なくないと予想される。

海外では、欧州で第 7 次研究・技術開発枠組計画（FP7 : Seventh Framework Programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities）で、さまざまなバイオマス混焼の経験を積むプロジェクトとして、バイオマス混焼率を 50cal%に高め、モニタリングするプロジェクトが行われた。バイオマスのバイオマス混焼、専焼の技術の開発・導入が進んでおり、すでに 50cal%以上の混焼の実績がある。欧州ではコジェネレーションでの普及が進んでおり、2009 年の発電実績は 62 TWh（設備容量約 14,000 MW）となっている。また、FP7 ではトレファクションに関する研究 SECTOR が採択されている。米国では、省エネルギー・再生可能エネルギー局（EERE : Energy Efficiency &Renewable Energy）で 10 MW、20 MW の混焼発電計画、石炭混焼率 20%を目標とした研究開発が進められている。中国、韓国では目立った研究開発は行われていない。中国は、再エネ発展第 12 次 5 カ年計画で、2015 年までにバイオマス電源設備を 13,000 MW とする計画となっているが、農産物、メタン、ごみ焼却となっており固体バイオマスは含まれていない [41]。韓国は、2012 年に定めた、電力需要の 2%を再生可能エネルギー供給するために、2020 年に 500 万 t のペレット輸入を計画している（2012 年 75 万 t）[42]。石炭火力での混焼、バイオマス専焼のほか、ガス化発電、メタン発酵発電なども小規模ながら行われている。

②バイオマスの燃料転換

バイオマスを気体あるいは液体燃料に転換する技術（ガス化、熱分解、メタン発酵、微細藻類転換）の動向について述べる。

＜ガス化＞

ガス化については技術を確立して実用化という実績は現在でも限られている。タールによるトラブルなどの問題解決のための技術開発が現在も続いている状況である。

わが国では、ガスは主として中小規模、とくに出力＜2 MWe 未満のバイオマス発電に採用されるガスエンジン等に適合した気体燃料製造技術としての研究と開発が行われてきた。小規模発電では蒸気タービンの効率が低く、ガス化＋ガスエンジン発電のほうが正味の発電効率が高くなる。発電用燃料ガス製造のためのガス化は、空気を酸化剤とする部分燃焼（一部は水蒸気も積極的に活用）によるのが一般的である。空気の 80%を占める窒素は、燃焼ガスを希釈し、燃料ガスの発熱量を低下させ、反応に関与しない窒素を反応温度（800～1000℃）まで「無駄に」加熱する必要も生じ、その結果、ガス化における化学エネルギー回収率（冷ガス効率）を 5 ポイント以上低下させるという問題はあるが、現在のガスエンジンは低発熱量の燃料ガスから比較的高い効率で発電ができること [2]、酸素製造に経済的合理性がないことから、純酸素、酸素富化空気の適用は一般的でない。国内では、これまで多くの技術開発事業が実施され、補助金付きで稼働した実績 [2]は少なくないが、タール等に由来するトラブル、経済的問題によって稼働停止に追い込まれることが多く、技術普及は容易でない。

EU では、種々の中・小型バイオマスガス化・発電（熱電併給）プロセスの開発が行われてきた。ドイツ Burkhardt 社が開発した小型のガス化発電システム（V3.90 ; システム出力＝165 kWe（電）＋230 kWt（熱））はその好例である。含水率が低くハンドリング性に優れた木質ペレットを専用燃料とするガス化方式が採用されるので燃料コストの課題はあるが、発電効率が 30%（メーカー公称値）に達する点は注目に値する。ガス化の効率（冷ガス効率）やタール問題の回避に関する詳細な情報はないが、従来の固定層ガス化の弱点（例 ; タール

蒸気が迅速分解するチャコール層の滞留時間は短い）を改良した形式のガス化方式が採用されていると考えられる。

＜熱分解＞

バイオオイルを製造するための熱分解技術の開発は、数年前ほどの活発さはなく、技術開発の対象はバイオオイルのアップグレーディングによる燃料油（あるいは燃料油＋化成品）の製造にシフトしている。ただし、中国においては、熱分解（バイオオイル製造）やバイオオイルのクリーンガス（合成ガス）、液体燃料への改質に関する学術論文の発表（たとえば文献 8）が多く、国内では実証プラント、さらに商用プラントの稼働例もある。バイオオイルは、化学組成が極めて複雑であり、酸素含有率が高いので、現在の流体燃料に適合する drop-in liquid fuel にアップグレーディングするには、大きな質量損失を伴う接触熱分解あるいは水素を必要とする水素化（化学エネルギー損失大）、さらには反応後の成分分離が必要となる。これまで多くの基礎研究がなされてきたが、ごく一部を除けば商用化に至っていない。なお、バイオオイルをアップグレーディングせず、重油代替として利用する動き（Dynamotive 社、カナダ）があったが、商業生産と利用の情報は特にない。

＜メタン発酵・バイオガス発電＞

メタン発酵の技術は極めて古く、オイルショックの影響で大きく応用技術が進み、2000 年頃に実用化、その後、普及し続け、現在も続いている。

バイオガス（＝バイオマスの嫌気発酵により発生したメタンリッチガス）を燃料として国内で稼働する発電設備は 20 ほどあるが、いずれも小規模（50～350 kWe）である。12 メタン発酵・バイオガス発電の電力生産に対する大きな寄与は期待できないが、廃棄物処理プロセスとして重要な意味があり、今後は小規模でも経済性が成立するプロセス開発、改善が望まれる。国外のピックアップすべき技術検討例としては、(a) メタン発酵で発生する消化液のプロセシングによる肥料成分の回収（リン等）とリサイクルシステム、(b) 小規模メタン発酵システム [9]、(c) 廃水からのメタン製造、(d) 微細藻類を利用したバイオガス製造（原料：海藻）をあげることができる。(c) に関しては、国内でも実用化を目指した事業（馬鈴薯澱粉製造時に発生する廃水・廃棄物をモデル原料とする水熱可溶化技術を組み合わせたコンパクトメタン発酵システムの研究開発）が実施されている [10]。

＜微細藻類を利用した燃料油製造＞

自ら脂質を作り出す微細藻類を育成し、脂質（油分）を製造する技術に関する研究、技術開発は世界的に活発である。微細藻類利用による炭化水素類等燃料の製造技術は、わが国ではニューサンシャイン計画（1990～1999、事業規模＞140 億円以上）のなかで開発された。その後 10 年余を経て、産業競争力懇談会 （2011）によって改めて提言された [11]。 提言には、持続可能な輸送用燃料製造法としての GHG 排出量削減への寄与、エネルギー資源多様化や自主開発エネルギー源の獲得への貢献、燃料供給インフラへの新規投資が不要な燃料油（drop-in fuels）製造、搾油残渣の固体燃料、家畜飼料などへの適用、などの期待がある。2012 年から各種の NEDO 事業（研究、技術開発）が開始された。現在は、バイオマスエネルギー技術研究開発／戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業において、「微細藻類バイオ燃料製造に関する実用化技術強化の研究開発」、「海洋性緑藻（クラミドモラス・オルビキュラリス）による油脂生産技術の研究開発」、「微細藻類の改良（高速増殖型のボトリオコッカス株）による高速培養と藻類濃縮の一体化方法の研究開発」、「好冷性微細藻類（珪

藻）を活用したグリーンオイル一貫生産プロセスの構築」、「高油脂生産微細藻類の大規模培養と回収・燃料化」等の研究開発が推進されている。いずれも実用化に向けた高い目標が設定されるが、基礎的検討も多い[12]。

藻類によるバイオ燃料生産は、後述する国外事例を含め、長い研究開発を経ても未だ実用化に至っていないことを踏まえ、「研究開発実施者あるいはそれに準ずる者ではない第三者を主体とするフィージビリティ研究、技術・経済的アセスメント」が望まれる。例えば、約 300 の文献情報に基づいて行われた燃料製造コスト低減ポテンシャルに関するアセスメント[13]では、藻類生育速度、脂質割合、脂質濃縮率、脱水効率等の因子に関する感度解析、最適プロセスの抽出の結果、製造コストは約 500 円/kg（生育：約 300 円/kg、脱水（抽出）・燃料化：各約 100 円/kg）との厳しい評価がなされた。なお、国内研究開発（現在）の開発目標は、抽出のコストのみで約 100 円/kg（ただし、国外約 40 円/kg）であり、上記アセスメントの結果と大差はない。カーボンニュートラル性についての詳細なアセスメントの事例もある。回収油を原料とするバイオディーゼル製造に関してでは、既往の論文、レビュー等（74 件）を踏まえたアセスメント[14]が行われ、その結果、藻類育成や油分抽出等に投入されるエネルギーは、得られるディーゼル油のエネルギーの数倍と大きく、搾油（脱脂）残渣を効率よくエネルギー転換・利用しない限り、カーボンポジティブ、すなわち、化石由来 CO_2 をむしろ増大させることが指摘された。

中国では、微細藻類を利用する一種のバイオリファイナリー、すなわち、燃料（バイオディーゼル、バイオエタノール）に加えて高付加価値製品（化成品、食品、コスメティック、医薬品等）を併産するシステムを念頭に、種々の育種を対象とする実験的検討がなされている[15]。藻類育成とハーベスティングに多大のコストがかかることが強く認識されている。120 の文献（2005 年以降の学術・技術論文が主）をレビューし、製品としてのバイオ燃料（液体、合成ガス、水素）や電力を異なる種々の微細藻類の転換から得るプロセスを検討した事例も報告された[16]。これによれば、藻類の転換技術（熱化学、生化学）よりもむしろ、育種の開発と最適化（脂質収率増大、低コスト育成に適した解放池における迅速育成）、ハーベスティング技術革新、大規模化対応技術開発、転換前処理技術（脱水、成分分離）が課題として重要であることが示唆される。120 kL/day（面積 2,925 ha）規模生産を想定した最新のプロセス検討[17]では、種々の因子について感度解析を実施し、標準ケース（ハーベスティングする藻類の脂質割合＝25%、生産性＝25 g m-2 day-1）のコストは 400 円/kg-oil（1£ = 200 円とした）であること、コスト半減には脂質割合、生産性のいずれかを倍増する必要があることが示されている。微細藻類からのバイオ燃料の技術的ハードルは依然として高く、育種の改良と生産性向上、さらに高付加価値化成品製造との統合によるバイオリファイリシステムの検討が望まれる。なお、脂質増産の加速化に必要な「生物機能解析に係わる基盤技術の必要性」については、文献 1 に述べられている。

③バイオエタノール

バイオエタノール製造技術に関しては、技術自体はきわめて古く、オイルショックの時期に実用化した。とうもろこし残渣（corn stover）等を原料とするプロセス開発が 2000 年代以降米国において精力的に行われてきた。ただし、同国の政策目標（200 億ガロンのバイオエタノール製造（第二世代以降）、2022 年）を達成するのは困難な状況である[18]。米国 NERL

の調査研究[19]では、corn stover を 2,200 トン-dry/日という大規模で転換した場合のコストは約 86 円/kg-ethanol と試算された。文献 2 では、この試算をベースに木質バイオマスを原料とするエタノール製造（標準ケース：バイオマス年間転換量 167,000 dry-トン/年、エタノール収率＝23.6 wt%-dry-biomass、エタノール生産量＝50,000 kL/年）に関してプロセス因子の感度解析が行われた。その結果、標準ケースにおける製造コストは＞160 円/kg-ethanol であり、仮にエタノール収率を上限（30 wt%）、加えて酵素コストを 50%減とした場合でもコストは 120 円/kg-ethanol と試算された。一方、プロセスの革新（酵素リサイクルのための膜分離等を導入したプロセスの省エネ・省コスト化）を想定すると、エタノール製造コスト（ただし、プロセスのみのコスト；エタノール生産量＝80,000 kL/年）は 50 円/kg-ethanol 未満になるとの試算[20]もある。現在、より高性能かつ安価な酵素の開発が国内外で行われており、エタノール製造コストのさらなる低減が期待されるが、一方、微細藻類によるバイオ燃料製造の場合と同様、第三者による厳しい技術・経済性アセスメントと技術開発の連動によって実用化の条件や課題がより明確化されることが望まれる。わが国では、セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業（NEDO）において、バイオエタノール一貫生産システムに関する研究開発、セルロース系目的生産バイオマスの栽培から低環境負荷前処理技術に基づくエタノール製造プロセスまでの低コスト一貫生産システムの開発など[21]が実施されており、要素技術に関しては世界トップレベルの成果が得られているが、実用化（スケールアップなど）に向けた課題も指摘されている。

④バイオリファイナリー

バイオマスから化成品を製造するバイオリファイナリーは、2000 年くらいから研究開発が始まり、米国、EU、日本、中国等で展開されている。日本では「科学技術イノベーション総合戦略 2016」が 2016 年 5 月 24 日閣議決定され[44]、バイオリファイナリー関連の研究開発も強化される。バイオリファイナリーは、バイオマスを相乗効果のある複数のプロセスによって複合転換し、高付加価値製品を二次エネルギーとともに生産する“コプロダクション”システムと定義することができる。高付加価値製品および燃料、電力・熱を生産の対象とするシステムは、それぞれ product-driven および energy-driven と表現される。バイオリファイナリーの研究開発は世界的に活発化している。国際機関 IEA Bioenergy には専用のタスク（Task 42）が設置され、情報発信[22)~26)]が行なわれている。高付加価値製品と二次エネルギーはいずれも platform と表現され、バイオリファイナリーは platform の数によって以下のように分類される[22)~26)]。以下の分類はあくまでバイオリファイナリーにあり得る形態の一部を示したに過ぎず、バイオマス原料、バイオマスを利用するベース産業、platform の利用者等によって多様な組み合わせ[27]が生じる。本稿において述べてきたように、バイオマスの二次エネルギーへの転換に経済性を付与するのは、二次燃料が電力・熱であれエタノールであれ、容易でない。しかしながら、これらの生産を化成品・素材等の高付加価値品の製造と組み合わせることによって経済的フィージビリティが生じる場合は大いにあり得る。

2-platform：　バイオマスガス化をベース技術とするバイオリファイナリー
（合成ガス、電力・熱）※1

3-platform（a）：　紙パルプ産業におけるバイオリファイナリー
（黒液、パルプ、電力・熱）

3-platform（b）：　紙パルプ産業におけるバイオリファイナリー
（パルプ、合成ガス、電力・熱）※1
3-platform（c）：　木質を起点とするバイオリファイナリー
（C5/C6 糖、リグニン、電力・熱）※2
4-platform：　木質を起点とするバイオリファイナリー
（水素、バイオメタン(= SNG)、合成ガス、電力・熱）

※1　合成ガスは FT（Fischer-Tropsch）合成によって炭化水素（オイル・ワックス）に転換される

※2　C5/C6 糖はバイオエタノールに、リグニンは phenol 等の化成品に転換される。

バイオマス資源の変換のための固体触媒の開発研究は、触媒化学の研究分野の中の最近 10 年程度のトピックであり、非常に新しい研究分野として位置付けられている。そのため、世界で活躍する研究者も他の分野と比較して相対的に若い世代である。研究者人口という観点からすれば、欧米、中国は極めて多く、日本は明確に少ない。例えば、触媒をメイントピックスに掲げた大学内の設置されている研究センターの数も日本と比較して、欧米や中国は圧倒的に多いのが現実である。一方で、オリジナリティの高い研究という観点では、研究者人口の割には明確に顕著な成果を挙げてきたといってよく、それらの成果は、世界中でフォローされているのも現実である。基盤的な側面に着目すれば、分野をリードする視点や成果が国内から出てきている一方で、事業化という意味で日本がリードしている分野とは言えない。バイオマス資源から化学品を製造する産業は化学産業ということになるが、石油からバイオマスへの原料転換という激しい変化に対応する体力が問われることになり、日本国内の化学産業の体力が欧米の企業と比較して大きくない現状が映し出されている。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

バイオマスの酸素・水蒸気に関する研究開発（基礎研究）では、日本で、最近、冷ガス効率＞96%、炭素転換率 100%、残留タール濃度＜20 mg/Nm3-syngas となる次世代ガス化プロセス、タールフリー炭化物（バイオチャー）と軽質油のコプロダクション、バイオチャーの水蒸気ガス化と固体酸化物形燃料電池の複合による超高効率複合発電等が提案された [28]。次世代ガス化に関しては、小規模ながら連続試験による概念実証の事例 [29]がある。

バイオマス燃料、バイオリファイナリー[43]については、バイオマス由来の糖や低級有機酸等を起点（platform；C3～C6 化合物）とする化成品の製造に関する基礎、プロセス研究がここ数年の間に活発化している [30)–32)]。種々の化成品を誘導するプロセスの開発は、platform を生産するバイオリファイナリーの実装性を高めると期待される。また、バイオマスリファイナリの基礎化学品の中で、有望視されているものの一つがグリセリンである。現時点での油脂産業や植物油からのバイオディーゼル製造プロセスから比較的大量に副生している一方で、それ自身の用途は極めて限られており、変換利用が望まれている。グリセリン変換の有望なターゲット製品は、1，2－及び 1，3－プロパンジオールであり、上でも触れているように 1，3－プロパンジオールは極めて魅力的なターゲットになっている [60]。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

NEDO 実証事業により、バイオマス熱電併給株式会社、E2 リバイブ株式会社は、木質バイオマス燃焼による発電の詳細なフィージビリティ調査（範囲：伐採、集積前処理、電力供給）および事業性や地域産業、経済への波及効果を定量的に評価するツールの開発を進めている（国内）。従来の技術開発において必ずしも十分でなかった系統的、客観的な技術・経済性アセスメントの事例として注目される。

デンマーク工科大学の Clausen, L. R.は、太陽光由来電力を投入する水電解による水素・酸素製造とバイオマスの酸素・水蒸気ガス化を組み合わせ、合成ガスあるいはこれに由来するメタン（合成ガス＋水素）、液体燃料の製造システムを提案している。オリジナルの提案は 2008 年 [33]だが、酸素を適用するガス化起点のバイオリファイナリーのオプションを太陽光との組み合わせによって提示した [34]。

バイオ燃料関連プロジェクトでは、NEDO のセルロースエタノール関連事業に加えて、平成 27 年度から「革新的エネルギー技術国際共同研究開発事業」（経産省）が実施されており、セルロース系バイオマスを原料としたバイオ水素生産やブタノールの製造に関する研究開発が採択されている [50]。本事業は、米国立再生可能エネルギー研究所（NREL）等との共同研究であり、経産省と米国エネルギー省との間で合意した「日米クリーンエネルギー技術アクションプラン」に基づき、再生可能エネルギー技術分野における日米共同研究開発の一環として実施されている。バイオ燃料関連の日本側参加者は、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）である。

EU では、欧州全体の研究活動を助成する欧州委員会（EC）の主要な政策である第 7 次研究・技術開発のための枠組み計画（FP7）が 2013 年に終了し、後継プロジェクトである「ホライズン 2020：HORIZON2020」が、2014 年～2020 年の 7 年間、総額 800 億ユーロ規模で開始された [45]。

米国では、「2030 年に 10 億トン（乾燥重量）のバイオマスを用い、化石由来燃料 25%を代替､2,300 万 t のバイオ由来製品と 850KWh の電力を供給」するとする青写真（Blueprint）が発表され、これをを受けた政府や各省庁からなるバイオマス R&D ボードによる”Billion Ton Bioeconomy”が発表され、このビジョンでは上記目標に加え 170 万人の雇用と 2,000 億ドル（約 20 兆円）の市場の創出等が記載されている [46]。

中国ではセルロース系エタノールプラントの規模拡大計画が複数あり、韓国では、バイオブタノールへの燃料転換、合成油生産技術などがあげられるが、主だったプロジェクトはみられない。

バイオマスから化成品を製造するバイオリファイナリー技術の開発が米国、EU、わが国、中国等で展開されている。

日本のバイオリファイナリー関連プロジェクトでは、神戸大学の「バイオプロダクション次世代農工連携拠点」が 2008 年に始動し、バイオマスからの次世代燃料や化成品原料の生産と事業化に産学連携で挑んでいる。本拠点は、セルロース系バイオマスから多様な物質を高効率に作り出すための基盤技術を確立し､「バイオコンビナート」を形成することに挑戦している。神戸大は、微生物の代謝機能を改良し、目的とする化合物を大量生産するスーパー微生物（細胞工場）の研究では世界のトップレベルで、細胞内の数百種類の化合物を網羅的に測定する技術を活用して、細胞の機能を評価し、有用物質を効率的に生産する微生物など

を育て、細胞工場の開発に生かしている[71]。

文科省のGRENE NC-CARP プロジェクトでは、名古屋大学が、バイオリファイナリーによるバイオベースの製品をつくる研究をしている。そこでは、セルロース、ヘミセルロースあるいはリグニンを取り出して糖化して、それを基幹物質に変換し、様々な高付加価値のバイオ製品を作るための研究を進めている。

経産省、NEDO のプロジェクトとして、 2016 年度からは、「植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発」が始まった。従来、化学合成等により製造されてきた試薬・香料・化粧品等の高機能品について、植物や微生物細胞を用いた新たな手法で生産できる可能性が期待されている。本事業では、遺伝子設計に必要となる精緻で大規模な生物情報を高速に取得するシステム、細胞内プロセスの設計、ゲノム編集などを産業化するための技術開発を行い、これらを利用して植物や微生物による物質生産機能を制御・改変することで、省エネルギー・低コストな高機能品生産技術の確立を目指すとしている[47]。参加者は、神戸大学、九州大学、産業技術総合研究所、理化学研究所、キリン株式会社、味の素株式会社、三菱化学株式会社、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）[48]等である。

RITE 発のベンチャー企業 Green Earth Institute が、千葉県木更津市に Green Earth 研究所を設立し、RITE バイオプロセス法（コリネ型細菌を用いた増殖非依存型発酵技術）による化学品生産の実証実験を行い、さらに国内企業との合弁により、中国でアミノ酸のパイロット生産を開始した[49]。神戸大では、バイオ燃料やバイオ化学品生産のため人工代謝経路設計プログラム（M-path）が開発されている[50]。ここでは、天然由来の酵素での代謝経路構築のみならず、人工酵素による新たな経路の提示も行われる。こうしたプログラムおよび人工酵素を創出することにより、高効率なバイオ化学品の生産体系を構築しつつある。人工酵素創出など、合成生物学的手法を用いた物質生産は今後重要になると考えられる。

JST ALCA ホワイトバイオテクノロジーでは、ダイセルが中心となって「微生物変換と触媒技術を融合した基幹化合物の原料転換」のプロジェクトが進行中であり、これまで石油を原料として製造されている化成品を、未利用の廃グリセリンから製造する技術開発を行っている。具体的には、グリセリンをまずバイオ技術によって、汎用的な中間原料であるエリスリトールへと変換し、さまざまな高価な原料を作り分けることができる固体触媒を開発し、その反応によって、ジオールなどの工業原料を生産することを目指している[61]。

2016 年度事業では、東北復興次世代エネルギー研究開発プロジェクトにおける「東北復興のためのクリーンエネルギー研究開発の推進：微細藻類のエネルギー利用」研究も計画されている[46]。

バイオリファイナリーの基礎化学品の中で有望視されているグリセリンに関連する研究開発では、世界中で 10 年ほど前からプロパンジオールを生成物とするグリセリンの選択的 C-O 水素化分解反応の触媒開発研究が進められてきている。グリセリンの水素化分解反応の顕著な成果が日本人研究者により報告されてきていることは注目される。例えば、金属―固体酸二元機能型触媒を用いることで、酸触媒によるグリセリンのアセトールへの脱水反応と金属触媒によるアセトールの 1，2－プロパンジオールへの水素化反応が逐次的に進行し、ワンポット変換が可能であることが見出された[62]。一方で、1，2－プロパンジオール収率という観点においては、千葉大学の研究グループが収率 100%に迫る際立った成果を報告している[60]。この研究は、引き続き、JST 国際科学技術共同研究推進事業戦略的国際共同研究プログ

ラム「普遍元素酸化物触媒の合成とバイオマス変換反応展開」で行われている[63]。また、1,3－プロパンジオール製造についても、特徴的な固体触媒が日本の研究者により報告されてきている。具体的には2010年当時世界最高収率を達成したレニウム修飾イリジウム触媒や[64]、2013 年には現時点での世界最高収率を達成しているベーマイト担持白金/タングステン触媒などである[65]。グリセリンの水素化分解に関する触媒開発研究が牽引する形で、バイオマス関連化合物の C-O 水素化分解や水素化脱酸素反応に関する進展も顕著である[66]。

米国のバイオリファイナリーは、エネルギー効率・再生可能エネルギー局（EERE）により策定された「バイオマス複数年プログラム計画（Biomass Multi-Year Program Plan）」に沿って技術開発が行われている。特に、セルロース系からのエタノール生産に重点が置かれており、セルロース系原料によるバイオリファイナリー、熱化学処理の実証、エタノール発酵用微生物、低コスト糖化酵素の開発などが行われている。米国農務省とのバイオマス研究開発イニシアティブ（BRDI：Biomass Research & Development Initiative）とも連携し進められている。

Iowa State University の Brent H. Shanks を中心として、Center for Biorenewable Chemicals （CBiRC）が立ち上がっており、これは、NSF の支援により推進されている。課題として、Biocatalysis、Microbial Engineering、Chemical Catalysis という 3 つの分野が協同したプロジェクトになっており、いずれの分野においても米国のその分野を代表する研究者が名を連ねている[67]。Chemical Catalysis 分野においては、固体触媒の開発に力点があり、日本で見出されたシーズを展開するような研究も含まれている。

バイオリファイナリーの実用化では、セルロースエタノールの大規模生産が米国を中心に始まっている。2014 年の POET-DSM Advanced Biofuels, LLC（Project LIBERTY）[51]に続き、デュポンが、2015 年 10 月から商用生産を開始した。アイオワ州ネバダのコーン農地の真ん中に工場を立地し、半径 30 マイル圏内で 500 以上の農家と契約を結び、年間 37.5 万トンの原料調達を確保している。物流ではトウモロコシ葉茎の収穫・輸送の効率化でトラクター会社と共同開発しており、アイオワ州政府、大学、USDA 等との協働・支援を得ている。また、農家にエタノールを販売してもらい、それに対するライセンシング・機材供給・各種技術サポートほか、市場展開に関するコンサルティング等を行うビジネスモデルを構築している。規模は世界最大で年産 3,000 万ガロン。米国だけでなく、中国や欧州でも同様なプラント建設を進めるとしている[52]。

バイオリファイナリーの開発支援プロジェクトでは、2015 年 7 月、DOE が補助金対象事業 6 プロジェクトを発表した。内容は、藻類からのバイオディーゼル油およびジェット燃料の製造、その副製品としてポリマーおよびプロテインなどの高付加価値製品を製造する予定である。これにより事業の収益改や稼働率を上げ、製造コストを下げる狙いである。各プロジェクト合計の補助金総額は、1,800 万ドルとなっており Los Alamos National Laboratory 等が参加する[53]。民間企業では、米国 Genomatica 社では 1,4-ブタンジオールの生産にあたり、最終段階に必要な酵素を大腸菌に導入することで、その生産に成功している[54]。その他、米国 DARPA が 1.1 億ドルを投資して、合成生物学的アプローチなどを用いて 1000 の新規な有用化合物をつくる計画（1000 分子プロジェクト）を発表している。これには既知分子の高効率作製、石油由来の方法では作製できない化合物作製、新規分子開発が含まれ、化学合成原料として利用可能な化合物を合成しようとしている。

欧州では、Utrecht University の Bert M. Weckheuysen をリーダーとして CatchBio Program が進められており、Energy、Bulk Chemicals、Fine-and-Pharm、Socio-economic aspects の 4 分野の研究が進められている[68]。また、KU Leuven の Bert Sels をリーダーとした木質バイオマスから芳香族化合物を得るための触媒開発研究が FISCH という組織により支援され進められている[69]。リグニン変換に関する研究は、欧州で力が注がれているように思われる。

中国では、Chinese Academy of Sciences、Dalian Institute of Chemical Physics の Tao Zhang がリーダーとなり、National Natural Science Foundation of China の支援を受けて、セルロースやリグニンから化学品などを合成するための触媒開発研究が進められている[70]。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

バイオマス燃焼（専焼、混焼）に関しては、特筆すべきボトルネックがあるとは言えないが、技術のグローバル対応・先導の観点から、安定した高効率運転などの技術高度化のための灰微粒子の生成、ファウリングの抑制・防止技術が課題となる。

微細藻類を利用した燃料油製造、第二世代バイオエタノールに共通するボトルネックは経済性である。前述のように、技術・経済的アセスメントと技術開発の連動が望まれる。

ガス化による合成ガス製造はバイオリファイナリーのコア技術である。最近、従来にない効率を低残留タール濃度とともに達成した事例があるが、従来のレベルを超えた低温高性能ガス化の技術開発が課題である。

最近の知見によれば、簡便な熱分解によってタールフリーのバイオチャーと重質成分フリーの軽質油を併産可能である。しかしながら、これらを分離し、それぞれの物性を最大限活用する転換につなぐバイオリファイナリーの戦略がない。これを含め、本来多様な製品の組合せを実現可能なバイオリファイナリーに関する技術開発やシステム検討が欧米よりも立ち遅れており、我が国の課題である。IEA Bioenergy では、バイオリファイナリーを構成する要素プロセスの開発よりも、生産物の種類と量的バランス、システム立地条件などを想定した解析し、経済的に成立する（成立する可能性が十分にある）システム構成の探索や抽出がソフトウェアの開発と連動して行われている。製品は Platform に留まらず、医薬品、食品添加物、コスメティック等の高付加価値物も想定される。このような解析はシステム設計であると同時に今後開発、社会実装できる可能性のあるシステムに対する事前の技術・経済性アセスメントとしても機能する。このような解析、アセスメントはわが国の技術開発の弱点（あるいは軽視されている点）と言える。今後、種々の “ポテンシャルバイオリファイナリー”を想定したシステム解析、アセスメントが組織的に行われ、経済、資源供給の両面で持続性のあるシステムや要件が抽出され、技術開発との連携がなされることが望まれる。

バイオマスから化学品を製造するプロセスが、石油を原料とするプロセスに対して経済的に優位にたつためには、バイオマス原料の価格、水素などを始めとする反応試剤の価格等不利な条件を補って余りある付加価値の高い化学製品を極めて高い選択率・収率で得ることが必要となる。一方で、バイオマスの利活用が石油代替技術や環境技術であることを踏まえると、極めて高価な医薬品のようなものをターゲットにすることは適切ではなく、樹脂原料の

ようなかなりの使用量が見込めるものであることが必要となると考えられ、原料や化学製品のバリエーションは多く、どのような原料、製品に目をつけるかの戦略が極めて重要である。バイオマス化学品を製造するプロセスを実現するためには、様々な分野での技術開発が必要となっている。変換のキーテクノロジーとしては、生体触媒（酵素、微生物）と固体触媒となる。酵素反応としては、あまり生成されていないような原料を使用することができ、反応速度が十分に大きく、生成物収率が高いことと同時に、生成物濃度も十分に高い必要がある。水溶液中から生成物を分離・精製して用いる際には、希薄溶液から生成物を得るような状況ではエネルギー的な観点で極めて不利となってしまうからである。微生物にとって毒性が低く、高濃度でも微生物が持ちこたえられるような生成物に目をつけることになる。固体触媒反応については、酵素や不均一系触媒反応と比較して、一般的に選択性が十分高くないことが問題点として挙げられている。この意味でも超高選択的固体触媒の開発が重要である。また生体触媒、固体触媒のいずれの場合においても、触媒コストが高くないものを開発する必要がある。固体触媒に関して、触媒コストが嵩んでしまう場合には、長寿命触媒であるか、繰り返し使用が可能であるか等のより高い性能が要求される。

一方で、このような効率的変換を実現する技術開発と同時に、溶媒に関わる化学と工学、エネルギー効率の高い分離・精製に関わる化学工学分野も進歩していく必要がある。上述したように、バイオマス原料、そして、バイオマスに関わる基礎化学品いずれも、酸素含有率が高く、分子中に極性を持つため、沸点が高く、石油精製や石油化学で行っているような気相で反応させることは難しくなる。そのため、水や有機溶媒などの溶媒を用いる必要があるからである。

芳香族化合物等の機能性化学品の微生物生産については、芳香族化合物生産微生物開発が課題となる。芳香族化合物は、微生物では主にシキミ酸経路によって生合成され、医薬品、農薬、化粧品、香料、燃料など様々な分野で汎用されているが、原料の糖類からの生合成ステップ数が 30 以上と多く、生産性が低いため、代謝設計による芳香族化合物生産微生物の創製が必要である。

芳香族耐性微生物の創製も課題となる。石油化学系芳香族化合物（BTX やフェノール）や長鎖アルコール（ブタノール等）は強い細胞毒性を示し、微生物による効率的な実用生産が難しいので、芳香族化合物等に耐性が高い微生物育種が求められる。

［今後取組むべき研究テーマ］

IEA Bioenergy が着目する水熱処理は、燃焼において問題となるアルカリおよびアルカリ土類金属を酸の添加なしに水相に抽出除去する特性を持つ[36]。ただし、この特性を活かすには、加圧下で高濃度・高粘度スラリーを安定な操作、固液分離、事後乾燥、水リサイクル等を効率良く行う必要がある。他方、水熱処理は、技術基盤が酸加水分解によるセルロース・ヘミセルロースとリグニンの分離と同じである。後者はこれまでに研究開発の蓄積があるとは言え、化学 platform としての単糖とリグニンを併産するバイオリファイナリーの起点としては開発の余地が大きい。水熱処理と成分分離技術は、基盤を共通化した開発が可能である。

微細藻類利用によるバイオ燃料製造に関しては、まず、厳しい第三者のアセスメントを実施し、将来の技術実装可能性、燃料供給技術としての意義とインパクトを評価することが望ましい。そのうえで、必要と判断されれば、現在も取り組みがなされている高性能育種の開

発、脂質回収・脱水等の分離技術の革新に向けた技術開発を加速することが望まれる。バイオエタノール製造に関しても同様の、かつスピーディーな展開が期待される。

バイオマスの低温ガス化や、熱分解由来の軽質油、バイオチャーの転換（改質・ガス化）を、バイオリファイナリーの起点技術と認識し、必要なスペックを明確にして革新的ガス化、改質および関連プロセスの開発を実施することが有効である。加えて、多数の研究報告がある触媒ガス化、改質法の知見を構造化し、そのうえで、極めて安価（かつ極めて高耐被毒性、長寿命）の触媒の適用による 700℃未満の低温におけるタール完全改質の達成に向けた技術開発プログラムを構築するのが望ましい。

超高選択性を持った固体触媒開発に関して、バイオマスに関連する基礎化学品は一分子中に複数種類官能基を複数個持つことも多く、一般的には高い選択性を出すこと自身容易ではないが、革新的に超高選択性を実現できる精密触媒設計が求められる。この性能を安価な触媒材料で実現できることが望ましい。水溶液系での触媒を用いることが予想されるため、溶出しにくい貴金属触媒が用いられやすいが、その分触媒コストが高くなることに注意を向ける必要がある。安価な触媒材料で溶出などの問題をクリアするための合金化・複合化技術なども従来の石油精製・石油化学技術とは異なる新しい開発テーマであるといえる。

生体触媒（酵素、発酵）に関する技術については、高活性、高収率で生成物を与え、特により高濃度で生成物を与える発酵技術の開発が課題となっている。

分離・精製に関する技術については、バイオマス資源を原料として樹脂などを製造するには、樹脂原料であるモノマーの段階では極めて高い純度が必要となる。バイオマス資源からモノマーを合成するいずれかの段階で純度を挙げることになるが、発酵を用いる場合には、生成物をより高濃度で得るようにしたとしても、蒸留に代わる効率的な分離・精製技術（例えば膜分離など）の開発が求められる。

その他の周辺技術に関しては、発酵法にしても固体触媒を用いる場合でも、バイオマス資源の変換を容易にするエネルギー消費の少ない方法の開発が重要テーマである。バイオマス資源を還元するための還元剤となる水素の安価で再生可能な製造法はバイオマス資源活用のフィージビリティを確実に高めるものであり、重要な技術開発テーマの一つである。

芳香族化合物等の機能性化学品の微生物生産については、効率的な芳香族化合物生産微生物の創製、代謝設計によるターゲット化合物の高効率生産、対糖収率の向上、芳香族化合物耐性微生物の育種技術の確立などが今後取組むべき研究テーマとなる。

（５）政策的課題

バイオマス利用は化石燃料と比較してコストが高いので、CO_2 対策としての国の普及促進施策が求められる。すなわち、サプライチェーン全体への公平なインセンティブ付与や、逆に公平な費用負担の仕組み等の構築が期待される。国内では、森林資源の維持のため間伐材のバイオマス資源化、農業廃棄物の有効利用など国として推進していく必要がある。競争原理に委ねると輸入バイオマスの価格競争力が有利で世界のバイオマス資源を日本に集めることになり将来的に国際的批判を浴びる可能性がある。国内外で再生産可能なバイオマス資源の管理が重要となり国の指導が必要とされる。バイオマスは分散資源だが有効且つ経済的に利用するには大規模加工が不可欠となる。地域収集→地域一次加工（粗 BTL 化で容積減、輸

送効率アップ）→大規模最終製品加工（代替ガソリン、バイオジェット燃料等）の社会的仕組み作りが重要である。

技術の目的、内容に関わらず、これまでのわが国のバイオマス転換技術開発において十分でなかった、あるいは欠けていたのは、提案された技術提案に対する技術・経済性アセスメントと、有望なアイデアであった場合の必要課題の見極めプロセスであったと考えられる。エネルギー資源としてのわが国のバイオマスポテンシャルは小さいため、エネルギー転換技術を意義あるものとする長期的な戦略を策定するのが容易でない。これはバイオマス利活用の基本方針に関わるので、十分な議論が望まれる。上記に関しては、産・学と政策担当者が協働し、バイオマス利用技術とシステムのフィージビリティ検討やクリティカルアセスメントを実施し、システム・要素技術のスクリーニング、評価、必要技術・システムの抽出を組織的に実施し、そのうえで、技術開発プロジェクト立ち上げのしくみを作り、実践する。あるいは、技術提案を同様に検討し、提案採択後もアセスメントチームがプロジェクトに参画するといった、従来にない技術開発体制を構築することが課題となる。以上の取り組みは、将来の普及性が高いバイオリファイナリー等の開発にとくに有効と期待される。

FIT 運用開始から今年で 4 年目だが、運用期間は 20 年に限られる。冒頭に述べたように、わが国におけるバイオマスのエネルギー利用技術の実装と普及には、「量的問題」、つまりバイオマスの「量的インパクトが小さい」ことを踏まえた戦略が期待される。バイオマスエネルギー利用の意義として述べた 4 項目のうち、地域産業・雇用創出、バイオマス供給インフラ・ロジスティクスの整備に着目すれば、バイオマス利用を現在の発電・熱利用が主である現状から、高付加価値製品の生産型にシフトしていくための技術・インフラ開発のロードマップ作成、技術・システムの開発とアセスメントが両輪となる研究開発、制度開発実施への期待は大きい。バイオマスはその生産速度に釣り合った消費（CO_2 への転換）を継続すればカーボンニュートラルだが、バイオマス由来の炭素を CO_2 に転換せず、固体（樹脂、炭素）あるいは液体として社会に蓄積し、加えてその蓄積を駆動力とする製品（付加価値）の再生産ができれば、実質的にカーボンネガティブとなる。この、バイオマスにしかない炭素資源としての特性を踏まえた、アカデミア・産業界・政策担当者の連携による「将来のバイオマス利用のあり方の検討」、すなわち、政策担当者には、低炭素社会、さらには、炭素循環型社会実現のためのバイオマス利活用を、他資源の利用と産業構造、社会システムと併せて基礎から検討することが期待される。

一方、国外、とくにアジア・アフリカ諸国などの、バイオマス資源のポテンシャルが大きい国に対しては、それらとの持続的な win-win 関係構築の一手段として、わが国のバイオリファイナリー技術（燃料・電力生産と高付加価値製品の併産）を順次導入し、その後も長期にわたって改良技術導入等を継続するシナリオ、このシナリオに沿った継続的技術開発（ボトルネック解決、次世代技術育成）による国際競争力の獲得・維持が望まれる。上に述べた将来の低炭素化、炭素循環に向けたバイオマス利用（日本モデル）のグローバル普及も期待される。

非可食バイオマスを原料としたバイオ燃料のコスト高は問題となっており、米国では補助金によるセルロースバイオエタノール生産が行われている。また、セルロース資源の革新的な糖化方法がないことも最大のネックとなっている。セルロースからのエタノールやブタ

ノール生産を、さらに低コストで実現できれば、発酵原料としてセルロースへの注目がさらに上がる。古くからわが国における発酵技術水準は高いが、米国、ブラジルなどのようなセルロース原料の国内での大量生産や安定供給は困難である。制度的な問題としてガソリンへの混入割合を国家主導で決定することが重要である。米国では各州政府がバイオエタノール最低使用基準を設定している。こうした取り決めはバイオエタノール需給に大きな影響を与えている。米国におけるバイオエタノールの需要量が年率 5%増加することが予測されている。ただし、バイオ燃料か食料生産かの議論があることから、非可食部からのバイオエタノール生産が重要課題とされている。世界最大のバイオエタノール生産量を誇る米国ではブレンドウォールとよばれる E10 の壁に直面している。これはガソリンへのバイオエタノールのブレンド比率を 10%（E10）として対応してきたが、バイオエタノール生産の急成長から、再生可能燃料の義務的利用目標（RFS）を上回る生産量に達している。その後も生産量は伸びているがブレンド比率を上げない限り、米国内での消費ができない状況になっている。E15 の導入も検討されており、2007 年以降の車と軽トラックに限定して使用されるが、安全面の懸念から E10 以上の混合燃料を給油する設備の普及が止まっている。フレックス車の普及も限定的であり、現状、欧州、ブラジルへの輸出により消費していることからも、バイオ燃料生産に関する研究開発が後退するとの懸念もある。一方、日本国内では石油業界が進める ETBE と政府が進めるバイオエタノールの直接混合方式が混在している。2015 年度の流通量は、ガソリンスタンドで 3,000 か所以上、原油換算 21 万 kL を既に達成したが、消費者にとっては E3（エタノール 3%混合ガソリン）か、または ETBE の混合ガソリンのどちらを使用するのか混乱が続いており、国内のバイオ燃料導入政策を統一する必要がある [57]。

2012 年からわが国でも導入された電力固定価格買取制度（FIT）は、再生可能エネルギーの普及拡大の目的で、世界各国でも再生可能エネルギーの助成政策として用いられている。わが国でもこの流れを受け、木質チップや畜産糞尿や汚泥からのバイオマス発電事業が開始されているが [55]、バイオマス利用発電推進姿勢を明確に示すには、買取価格を他の再生エネに対して比較優位にしていく必要がある。

（６）キーワード

バイオマス、非可食性バイオマス、木質、農産廃棄物、バイオマス発電、専焼、燃焼灰、フライアッシュ、粉砕、ガス化、ガス化発電、熱分解、改質、触媒、バイオオイル、水熱処理、液体燃料、バイオ燃料、脂質、微細藻類、バイオリファイナリー、嫌気発酵、メタン発酵、バイオガス、合成ガス、バイオエタノール、酵素、プラットホーム、水素、化成品、化学プラットホーム、バイオマス成分分離

（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	◎	→	● バイオマスニッポン構想以来、バイオマス利用に係る研究者数が著しく増加したが、その後のファンドの全体的な収縮に伴い、熱化学変換に関する研究のアクティビティの向上は顕著と言えない。 ● 一方、生化学ベースの転換利用に関する研究は活発である。熱化学、生化学によらず、要素技術に関する基礎研究のレベルと独自性は世界トップレベルのものが少なくないが、要素技術に対してバイオリファイナリーのようなシステム技術の研究者の層が薄く、技術の社会実証を念頭においた組織的な産学連携を高い生産性を持って進める体制に弱さもある。 ● 大学の研究力は日本全体に少しずつ低下してきている状況は否定しがたいし、固体触媒分野においてもその影響を受けていることは確かである。バイオマス変換触媒が若い研究分野であり、相対的に若い研究者が活躍しやすい場になっており、そのために何とか現状を維持できている状況である。 ● 大学内に設置されている触媒を研究するセンターの数などは欧米と比較すると明確に少なく、研究者人口が相対的には少ない状況である。オリジナリティの高い触媒の開発研究自体は日本人の気質や能力が生かされる分野であり、研究者人口を考慮した場合には成果を生み出す確率は高いと感じる。 ● バイオリファイナリー関連では、JST・ALCAやMETI／NEDO植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発等のプロジェクト等に期待。
	応用研究・開発	○	→	● 液体燃料製造（BTL）に関する研究は、ガス化＋FT合成、バイオエタノール製造、微細藻類利用による燃料製造の技術開発が、産主体あるいは産学連携のもとに進められている。要素技術のスペックは世界トップレベルのものが少なくない。 ● しかし、バイオマスのエネルギー転換に係る技術開発全体をみると、ここ数年で活発さが向上したとは言えない。加えて、技術アセスメントや、これを通じた革新的技術やシステムの抽出、技術体系化、共通基盤を持つ技術の組織的開発のしくみはEU、米国ほど整備されておらず、研究の生産性をさらに向上する取り組みが望ましい。 ● 石油価格の変動、シェール革命など炭化水素系資源の激しい動きの中で、産業界としてバイオマス資源の利用をどのように意義付けて積極的にとらえていくかを明確にできないでいるように感じる。国内の石油精製産業や石油化学産業の新事業を考える余裕や体力が問われている。 ● バイオマス由来フェノールやバイオナイロン等の実用化開発が加速。 ● バイオ燃料生産拠点確立支援事業の中止等、バイオ燃料は採算性が厳しい。
米国	基礎研究	◎	↗	● バイオオイル製造のための熱分解技術、ガス化技術に関する基礎研究は一段落した感があるが、微細藻類を含む生化学ベースの燃料、化成品製造に関する基礎研究については先導的であり、研究者層も厚い。 ● 技術開発への組織的取り組みが一旦開始されると、基礎研究、技術アセスメント、モデリング・システム検討、パイロット研究が比較的短期間に進むのは、この分野に限らない特徴であり、頻度の高いウォッチングが求められる。 ● バイオマス変換用の固体触媒研究に関わる研究者の数は現在極めて多い。表面化学が非常にホットであった時期には一時期少なくなっていた固体触媒研究が完全に復活し、より発展した印象を持つ。 ● もともと強かったゼオライト研究をバイオマスへと展開するなど、明確な強みを持っている。特に、力のある研究者同士を終結した大きなプロジェクトやセンターを立ち上げ、研究が加速されている。 ● 2015年DOEからの補助金対象事業6プロジェクト（藻燃料）を発表。総額1,800万ドル。 ● DOEバイオ技術部門（BETO）がバイオマスから炭化水素燃料の研究に1,130万ドルを助成（2016）。
	応用研究・開発	○	→	● バイオエタノール製造技術（第一世代）に関しては世界を先導する。第二世代製造技術に関しても大規模実証がなされている。ただし、第二世代技術に関しては政府が掲げた当初目標の達成は困難である。 ● バイオマス、とくにセルロース、ヘミセルロースを原料とする基幹化成品製造（熱化学・生化学）は、Dupont社、Dow社をはじめとして米国が世界に先駆けて開発を開始しており、一定の優位性を保っている。 ● EUで活発化しているバイオリファイナリーに関しても先進性と競争力

				を有する。一方、バイオマスガス化発電技術に関しては、石炭IGCCをモデルとする大型のプロセス以外にはあまりニーズが小さく、中小規模プロセスの開発状況はEUほど活発でない。 ● バイオマス研究において事業化を成し遂げているデュポンをはじめ、米国の化学会社の実力は言うまでもないが、シェールガスやシェールオイルの影響が出ている可能性が高い。 ● 2016年USDAバイオ化学品及びバイオリファイナリー開発に2億5,000万ドルの債務保証を発表[59]。 ● 2014年から年産10万トン規模のセルロースエタノールプラントが数か所稼働。 ● Gevo（イソブタノール）、Genomatica（ブタンジオール）、Amyris（バイオ燃料）、LanzaTech（バイオ燃料）、Dupont（バイオエタノール）等でバイオ燃料やバイオ化学品の実用化が拡大。
欧州	基礎研究	◎	→	● IEA Bioenergy等の国際機関におけるEUの研究者のプレゼンスは相変わらず大きい。研究者数を考慮すれば、革新的、高い独創性を持つ研究がとくに多いとは言えないが、要素技術、システム技術を丹念に研究して技術を高めていく手法とそのバックアップ体制、国を超えた共通課題への取り組み、商用化済み技術の問題をうまく基礎研究課題に落とし込む継続的な姿勢は、EUの研究開発の強みである。 ● バイオマスの燃焼（発電・CHP）、ガス化に関しては最も経験を蓄積しており、この強みをベースとしたバイオリファイナリーのシステム化研究、システム設計ツール開発、反応設計へのCFD導入と継続的技術の進展は、他よりも一歩進んでいる。 ● 技術システムのアセスメントの効果は、バイオリファイナリーに限らず、単糖ほかの化学platformからの多様な化成品製造経路の調査、スクリーニング等にも生かされている。 ● バイオマス変換用の固体触媒研究に関わる研究者の数は現在非常に多い。世代交代が進み、新たに教授になった世代にバイオマス研究をけん引する研究者が多く層が厚い。 ● リグニンの変換やバイオオイルなどに着目した研究も多く、分析が極めて大変な研究などにも対応できるような十分な支援が行われている印象を持っている。 ● EUによるイノベーションプログラム；HORIZON2020（2014~2020）でライフサイエンス・バイオ関連予算は€200億を予定。 ● 英国、合成生物工学分野の研究開発に£60million以上を拠出[56]
	応用研究・開発	◎	→	● 熱化学変換（ガス化、燃焼）技術に関して言えば、他地域をリードする経験の蓄積があり、小型～大規模にわたるプロセス、プラント開発技術は世界をリードしている。上に述べた基礎研究の強みと同じ強みを産業界も有する。 ● 環境問題に対する意識が米国の企業と比較して根本的に高いこと、石油産業、石油化学産業の実力が高いことなどを踏まえても、着実な技術開発を行っている印象を持っている。 ● Novozymes（ﾃﾞﾝﾏｰｸ）、BASF（独）、DSM（蘭）、Purac（蘭）等で酵素やバイオ化学品の実用化が拡大。 ● EU の2020年バイオ燃料計画（再生可能燃料10%添加）は遅れる見込み[57]。
中国	基礎研究	○	↗	● 熱化学変換（触媒を含む）は、ガス化、燃焼、熱分解にいずれもアクティビティが高く、研究の質も着実に向上している。基礎研究からパイロット・実証研究への移行が他国に対して迅速である。 ● 従来から多い石炭転換利用の研究からのスムーズなシフトが見られ、研究人材は豊富である。微細藻類を始めとする生化学ベースのバイオマス研究は後発だが、活発化が顕著である。わが国よりもバイオマスポテンシャルが高く、政府の支援（大学へのState-key laboratoriesの設置、中国科学院に対する強力な資金サポート）がある。 ● バイオマス変換用の固体触媒研究に関わる研究者の数は現在非常に多い。世代交代が進み、新たに教授になった世代にバイオマス研究をけん引する研究者が多く層が厚い。 ● リグニンの変換やバイオオイルなどに着目した研究も多く、分析が極めて大変な研究などにも対応できるような十分な支援が行われている印象を持っている。 ● 現在の中国における固体触媒研究は非常にホットな領域であり、中国科学アカデミーの大連化学物理研究所を中心として、各大学でも極めて多くの研究者が固体触媒研究を行っている。合成ガス変換、光触媒、バイオマス変換等様々な分野で顕著な業績を挙げているといえる。 ● バイオマス変換に関する研究としては、フォローする研究が圧倒的に多い。とはいえ、オリジナリティの高い研究は相対的には多くないが、絶

				対数としては決して無視できるものではなく、若いアクティブな教授がどんどん採用されていて、今後はよりオリジナリティの高い成果も増えていくことが想定される。 ● 2020年E10の実現に向けてジャガイモ残りかすを原料としたバイオエタノール製造技術をNEDOと共同で実証。非可食バイオマスエタノールに注力[62]
	応用研究・開発	○	↗	● 大学の基礎研究、ベンチスケール研究から企業（大学研究者が立ち上げるベンチャーを含む）における実証研究へのステップアップが迅速である。善し悪しはあるが、法規制などの緩さも手伝っていると考えられる。 ● リスクが大きな実証研究、商用化も政府等のファンディングのもと実施されているケースが少なくない。 ● 石炭を保有する背景をうけて、石炭の利活用を最重要視している（例えば、メタノール to オレフィン、Fischer Tropsch合成など）ことを受けて、バイオマス資源の利活用は、石炭と比較すると相対的に優先順位が下がっている。中国国内の研究者のシーズをかなり早い段階でパイロットなどへ展開する点では非常に積極的であるといえる。 ● 中国企業がﾊﾞｲｵﾃﾞｨｰｾﾞﾙ燃料製造施設をフィンランドに建設（20万トン）[58]。 ● セルロースエタノールやバイオポリマー工場の建設（Chemtex）[56]。
韓国	基礎研究	○	→	● 国立研究所、大学において一定数の研究者が活動しているが、全体の規模は大きくなく、研究費の大幅な増額も見られない。 ● バイオディーゼルの新規燃料やセルロースエタノールを開発（第4次新・再生エネルギー基本計画）[64]。
	応用研究・開発	△	→	● 独自の技術開発が組織的に進行しているエビデンスが明確でない。ガス化、燃焼に関してオリジナリティの高い技術はとくに見当たらない。 ● バイオディーゼル導入に優遇税制があるが、原料は廃油が中心。バイオエタノールの本格導入は未定[59]。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 俯瞰報告書：環境エネルギー分野、JST・研究開発戦略センター（2015）
2) NEDO 再生可能エネルギー技術白書（第 2 版）; 第 4 章 バイオマスエネルギー（2013）
3) NEDO 非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発
4) NEDO 非可食性バイオマスを活用するスマート化学生産システムに関する調査（2016）
5) IEA Key World Energy Statistics 2015
6) 再生可能エネルギー各電源の導入の動向について．資源エネルギー庁、
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/004/pdf/004_06.pdf（2017）
7) NEDO、http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100084.html
8) Cai,W., Liu, W. Performance of a commercial-scale biomass fast pyrolysis plant for bio-oil production. Fuel, 182, 677-686 (2016)
9) IEA Bioenergy Annual Report 2015,

http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2016/03/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2015.pdf（2015）
10) NEDO、http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201508/20150000000477.html
11) 産業競争力懇談会 2011 年度 プロジェクト最終報告、http://www.cocn.jp/thema38-L.pdf（2012）
12) バイオマスエネルギー技術研究開発 平成 28 年度実施方針（2016）
http://www.nedo.go.jp/content/100784411.pdf
13) Kajikawa and Sugimoto, Cost reduction potential of biofuel production from microalgae. 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (2011)
14) Gao, X., Yu, Y., Wu, H. ASC Sustainable Chem. Eng. 1, 1371−1380, dx.doi.org/10.1021/sc4002406 (2013)
15) Li,J., Liu, Y. et al. Biological potential of microalgae in China for biorefinery-based production of biofuels and high value compounds. New Biotechnol. 32, 588-595 (2015)
16) Tan, C.H., Show, P.L. et al. Novel approaches of producing bioenergies from microalgae: A recent review. Biotechnol. Adv. 33, 1219-1227, http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.02.013 (2015)
17) Madugu, F. and Collu, M. Parametric Analysis for An Algal Oil Production Process. J. Energy Prod. & Mgmt., 1, 141-154 (2016)
18) 米国のバイオエタノール政策 見直しの行方,
http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_rep/monthly/201504/pdf/20_monthly_topics_1504.pdf
19) D. Humbird et al. NREL Technical Report NREL/TP-5100-47764, Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol: Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover（2011）
20) 佐賀清崇ら．セルロース系エタノール生産における酵素回収プロセスの技術経済評価．日本エネルギー学会誌，34（2013）
21) バイオマスエネルギー技術研究開発/ セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業：事後評価報告書、http://www.nedo.go.jp/content/100564258.pdf (2015)
22) IEA Bioenergy Task 42: Integration of Advanced Biofuels in the Circular Economy: Identifying major innovation options (2016)
23) Assessing Biorefineries Using Wood for the BioEconomy – Current Status and Future Perspective of IEA Bioenergy Task 42 Biorefining (2015)
24) The “Biorefinery Fact Sheet” and its Application to Wood Based Biorefining - Case Studies of IEA Bioenergy Task 42 Biorefining (2015)
25) The Possible Role of Biorefineries in a BioEconomy – Activities of IEA Bioenergy Task 42 Biorefining,
http://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/upload_mm/9/d/f/995ea908-843b-4b25-85be-75cd3dc17fe9_Jungmeier%20Long%20Version_CEBC14.pdf
26) Sustainable and synergetic processing of biomass into marketable food & feed ingredients, products (chemicals, materials) and energy (fuels, power, heat), IEA Bioenergy Task 42 (2014)

27) Sustainable Biomass Supply Chains for Biorefineries – IEA Task 42 Update, 4th Int.Forest Biorefinery Symposium, Montréal, QC (2014)
28) Hayashi, J.-i., Kudo, S. et al. Energy Fuels, 28, 4−21, dx.doi.org/10.1021/ef401617k (2014)
29) Oike, T., Kudo, S. et al. Energy Fuels, 28, 6407−6418, dx.doi.org/10.1021/ef5015296 (2014)
30) Top Value Added Chemicals from Biomass”, US Department of Energy, http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35523.pdf (2014)
31) Bio-based Chemicals: Value Added Products from Biorefineries”, IEA Bioenergy – Task 42 Biorefinery, http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-42-Biobased-Chemicals-value-adde d-products-from-biorefineries.pdf (2012)
32) From the Sugar Platform to biofuels and biochemical”, E4tech (UK) Ltd., https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/EC%20Sugar%20Platform%20final%20report.pdf (2012)
33) Mignard, D. and Pritchard, C. On the use of electrolytic hydrogen from variable renewable energies for the enhanced conversion of biomass to fuels. Chem. Eng. Res. Des. 86, 473-487 (2008)
34) Claussen, S.R. Maximizing biofuel production in a thermochemical biorefinery by adding electrolytic hydrogen and by integrating torrefaction with entrained flow gasification. Energy, 85, 94-104 (2015)
35) バイオマスエネルギーの地域自立システム化実証事業（NEDO） http://www.nedo.go.jp/content/100758483.pdf (2015)
36) Bai, L., Kudo, S. et al. Energy Fuels 28, 7133−7139, dx.doi.org/10.1021/ef501898h (2014)
37) サミット明星パワー株式会社 HP. http://www.summit-myojyo-power.co.jp/index.html
38) アジア・バイオマスエネルギー協力推進オフィス HP. http://www.asiabiomass.jp/ 他
39) NEDO. 「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（実用化技術開発）バイオマス専用粉砕方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発」（2013 年 1 月）
40) NEDO. 成果報告書詳細「平成 23 年度－平成 24 年度成果報告書バイオマスエネルギー技術研究開発戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（実用化技術開発）石炭火力微粉炭ボイラに混焼可能な新規バイオマス固形燃料の研究開発」（2014 年 5 月）.
41) 海外電力調査会. 各国の電力事情中国（2014 年 1 月）. http://www.jepic.or.jp/data/ele/ele_07.html
42) USDA. Joseph A. et al., The Asian Wood Pellet Markets.（2012 年 5 月）.
43) 日本エネルギー学界. アジアバイオマスハンドブック.（2008 年 1 月）.
44) 科学技術イノベーション総合戦略 2016 http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2016.html
45) Horizon 2020 の概要、https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FU/EU20140221.pdf
46) 日本バイオ産業人会議「進化を続けるバイオ産業の社会貢献ビジョン」（2016 年 3 月） http://www.jba.or.jp/jabex/pdf/2016/JABEX_vision%28160509%29.pdf
47) NEDO. http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100118.html
48) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）. https://www.rite.or.jp/
49) Green Earth Institute 株式会社. http://www.gei.co.jp/

50) Araki et al. “M-path: A compass for navigating potential metabolic pathways” Bioinfomatics, 31, no6 (2015): 905-11.
51) POET-DSM . http://poet-dsm.com/liberty
52) 『化学工業日報』2015 年 11 月 6 日
53) 米国エネルギー省（DOE)「藻からのバイオ化学品やバイオ燃料を支援」 http://energy.gov/eere/articles/energy-department-awards-18-million-develop-valuable-bioproducts-and-biofuels-algae
54) Harry Yim et al. “ Metabolic engineering of Escherichia coli for direct production of 1,4-butanediol” Nature Chemical Biology 7, (2011): 445-452.
55) 文部科学省研究開発局環境エネルギー課. バイオマス利活用施策の取組状況（2012 年 2 月）.
56) 米国農務省（USDA)、http://www.rd.usda.gov/
57) 「バイオテクノロジー産業の新たな発展に向けた政策提言書」独立行政法人製品評価技術基盤機構. 2016 年 1 月 14 日. http://www.nite.go.jp/data/000077028.pdf
58) EU の 2020 年バイオ燃料計画実現に警鐘. http://www.biofpr.com/details/news/9633251/Weaknesses_in_certifying_sustainable_biofuels_could_undermine_EUs_2020_renewable.html
59) 中国企業が北欧でバイオマス原料の製造施設の建設計画 https://www.rim-intelligence.co.jp/news/select/category/feature/article/600116
60) 三菱総研「平成 26 年度石油産業体制等調査研究」 http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/000795.pdf
61) Sun et al. (2016) Glycerol hydrogenolysis into useful C3 chemicals. Appl. Catal. B 193, 75-92
62) JST ALCA ホワイトバイオテクノロジー http://www.jst.go.jp/alca/kadai.html#T03
63) Miyazawa et al. (2006) Glycerol conversion in the aqueous solution under hydrogen over Ru/C+ an ion-exchange resin and its reaction mechanism. J. Catal. 240, 213-221
64) 日本-EU の共同研究プロジェクト JST-NOVACAM http://novacam.eu/
65) Nakagawa et al. (2010) Direct Hydrogenolysis of Glycerol into 1,3-Propanediol over Rhenium-modified Supported Iridium catalyst. J. Catal., 272, 191-194
66) Arundhathi et al. (2013) Highly Selective Hydrogenolysis of Glycerol to 1,3-Propanediol over a Boehmite-Supported Platinum/Tungsten Catalyst. ChemSusChem 6, 1345-1347
67) Nakagawa et al. (2015) Catalytic Total Hydrodeoxygenation of Biomass-derived Poly-functionalized Substrates to Alkanes. ChemSusChem 8, 1114-1132
68) NSF Engineering Research Center for Biorenewable Chemicals (CBiRC), Iowa State University. http://www.cbirc.iastate.edu/
69) CatchBio project, Utrecht University, http://www.catchbio.com/#
70) FISCH project, KU Leuven, http://www.fi-sch.be/nl/
71) 中国科学アカデミー、大連化学物理研究所 http://sourcedb.dicp.cas.cn/yw/zjrck/200908/t20090820_2428112.html#
72) JST news June 2016. 農工連携でバイオマスの産業化に大転換. p.4－7

3.12　エネルギーシステム評価

（1）研究開発領域の簡潔な説明

エネルギーシステムは、社会における電気や石油など様々な形態のエネルギーの生産・配送・消費までの流れをシステムとして表したものである。エネルギーシステムを数理モデルとして計算プログラム化することで、経済合理性や環境適合性なども考慮に入れた、エネルギー技術選択や政策の有効性や妥当性の評価が可能になる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

エネルギーシステムは、電気や石油などの様々なエネルギーと多数の変換プロセスで構成される複雑な物流系システムであるとともに、その構築には、多様な利害関係者の合意と莫大な投資を伴う公益性の高い社会インフラでもある。エネルギーに関する技術選択や政策立案は、世界的にも主要な政治的関心事となっており、科学的根拠に基づく透明性の高い議論の必要性が益々高まっている。特に我が国では、エネルギー安全保障、地球規模および地域規模の環境問題、経済性、更には安全安心といった社会受容性も含めた様々な観点からのエネルギーシステム評価が必要とされている。したがってエネルギーシステム評価における研究開発の目的は、このような世界や我が国のエネルギーシステムが直面する新たな課題対応のために、最新の情報処理技術に基づく数理モデルならびにデータベースの構築であり、加えて、それらを活用したエネルギー環境政策立案に資する具体的な指針や一般的な論理の導出である。なお、数理モデル構築の主な目的は、エネルギーシステムを定量的に評価することであるが、対象システムに対するモデル作成者や政策立案者の理解を深められることや、対象システムを認識するための共通の枠組みや議論のたたき台を提供できることも挙げられる。

［動向（歴史）］

エネルギーシステムを評価するためには技術と経済社会活動の相互作用をモデル化することが、工学モデルおよび経済モデル開発者に共通した課題である。エネルギーモデルの分類としては、将来こうなるだろうという予測型と、こうすべきだという規範型がある。またトップダウン型とボトムアップ型にも分類できる。トップダウン型は帰納的、経験的、マクロ的なモデルであり、過去のデータに回帰直線を引いたもの自体も一つのモデルになる。これは構築しやすいが、結果の解釈が難しいところがあり、過去に実績がないものは基本的には取り扱えない。計量経済や多部門一般均衡理論などの経済学的知見やデータに基づくモデルが多く、炭素税などの限界費用や国民経済上の負担の評価に向いている。一方、ボトムアップ型は、演繹的、合理的、ミクロ的で、多数の技術導入効果を積み上げるモデルである。例えばCO_2排出削減量とコストの関係を安価な技術から順に積み上げることでこの種のモデルを構築できる。これは、既知の技術を過大評価し、未知技術が欠落する傾向がある。大規模シミュレーションや最適化手法を用いた工学的プロセスに基づくモデルが多く、限界費用や個別政策の評価に適している。図 3-11 は代表的なエネルギーモデルの代表的の構造分類である。

工学的プロセス最適化型モデル

- 線形計画法などのよる最適化

応用一般均衡型モデル

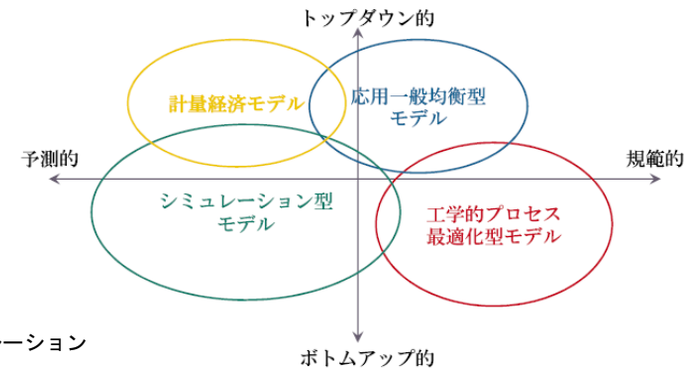
- 家計や企業の最適化行動を想定した多部門需給均衡

計量経済モデル

- マクロ経済の統計データのトレンド

シミュレーション型モデル

- フィートバック系の時間順方向のシミュレーション



出典：CRDS-FY2011-SP-07

図 3-11　エネルギーモデルの構造分類

最初の本格的なエネルギーモデルとしては、1960 年代の後半にアメリカの原子力委員会が高速増殖炉の開発に使ったモデルが挙げられる。当時としては大規模な線形計画モデルであった。その後、オイルショックを経て、石油価格上昇の経済に与えるインパクトの分析や、エネルギー資源枯渇に備えた新供給技術の導入可能性の分析が 70 年代後半から 80 年代前半ぐらいにかけて盛んに行われた。この頃、オーストリアの IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) の MESSAGE モデルや、国際エネルギー機関 (IEA) の MARKAL モデルといった、現在のエネルギーモデルの原形となるものが出てきた。また、1976 年にはスタンフォード大学にエネルギーモデルを比較検討し、研究する場として Energy Modeling Forum（EMF）[1]が設立された。また、経済モデル（MACRO モデル）とリンクさせた MESSAGE-MACRO や MARKAL-MACRO が開発された。その後、地球温暖化対策と絡めたエネルギーモデルへと展開してきた。地球温暖化対策評価用モデルとしては、80 年代の初めの米国 Pacific Northwest 国立研究所の Edmonds-Reilly モデル、その後、スタンフォード大学と米国の Electric Power Research Institute の MERGE モデル、我が国の国立環境研究所の AIM モデル（Asia Pacific Integtared Model）、旧通産省の地球再生計画の検討を目的とした東京大学と地球環境産業技術研究機構（RITE）の DNE21 モデルなどが知られている。これらは、コンピュータの発達とともに大規模化が進んでいる。

2008 年秋に結成された中期目標検討委員会（内閣官房の地球温暖化問題に関する懇談会の分科会）では、わが国の 2020 年の温室効果ガス排出量に関する具体的な目標案の検討がなされた。そこでは、AIM モデルや DNE21+モデル（DNE21 モデルの拡張モデル）などの国内の研究所や大学などの 5 つの組織が所有する複数のエネルギー経済モデルが、目標案検討のための数学的なツールとして政策決定の表舞台に現れ、6 通りの排出目標案に対して、限界費用の大きさ、国民経済上の負担、具体的な個別政策の効果などの定量的な評価がなされた。

また、2014 年 4 月に受諾された IPCC（気候変動に関する政府間パネル）による第 5 次評価報告書（AR5）の第 3 作業部会報告書には、欧米や日本を中心とする 34 モデルの研究チームによる、1229 シナリオ、9 つのモデル比較プロジェクトの成果が反映されている。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

発電部門に関しては、太陽光発電や風力発電という自然変動電源の大量導入時における電力システムにおける各種の電源（電力貯蔵も含む）の運用のモデル化が喫緊の課題となっており、実測された気象データに基づく時間解像度を高めた通年計算が採用される場合が増え、計算負荷が増大している。

スマートグリッドに関連する研究開発から、エネルギーの需要側の詳細なデータが得られつつあり、エネルギーシステムにおける消費者行動の新たなモデル化の可能性が出てきている。JST 戦略的創造推進事業（CREST）の「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」においてもエネルギーにおける消費者行動を含めた研究が進められている。

CO_2 排出削減策の評価を目的としたエネルギーモデルの場合は、CO_2 回収貯留（CCS）技術の現実的な社会経済的な導入障壁や技術的制約を考慮したモデル化も課題となっている。CCS は、大幅な CO_2 排出量削減を実現するために世界全体での大規模な実施が考えられている一方で、その実施には貯留に伴う様々なリスクの発生や追加的コストやエネルギー損失が伴うため、エネルギーシステム全体を考慮した包括的な評価が必要とされている。また、水素関連技術や電気自動車などの新技術の普及がエネルギーシステムに及ぼす影響の評価も関心を集める研究課題となっている。

この分野の特徴は、政策立案者側からの要請により、社会経済情勢、政治情勢の変化に応じて関心を集める研究テーマが変わることである。昨今では、米国のシェールガス・シェールオイル（タイトオイル）増産、電力自由化と自然変動電源の大量導入、2015 年末の COP21 での気候変動問題に関するパリ協定の影響評価などに関する研究が多い。

［注目すべきプロジェクト］

エネルギーシステム評価に関する著名なプロジェクトは、スタンフォード大学によって 1976 年に開始された EMF[1)]である。現在も継続されており、欧米や日本からの複数のエネルギーモデルの計算結果の国際比較を中心とし、様々なテーマのワーキンググループが活動中である。主に米国エネルギー省の支援を受けているが、電気事業等のエネルギー産業も寄与している。EMF のテーマは幅広く、気候変動問題には限られない。

この他に、欧州委員会から研究資金を提供された国際的なプロジェクトがある。世界の主要な気候変動の統合評価を目的としたエネルギーモデルを対象として、ドイツの PIK（Potsdam Institute for Climate Impact Research）に IAMC(Integrated Assessment Modeling Consortium)[2)]が 2007 年に設立され、PIK が事務局となって欧州の研究機関や大学が参加している ADVANCE（Advanced Model Development and Validation for the Improved Analysis of Costs and Impacts of Mitigation Policies）プロジェクト[3)]が 2013～2017 年で、そしてフランスの IDDRI（The Institute for Sustainable Development and International Relations）が主催している MILES（Improve Modelling Capacity to Support Low Emission Development Strategies）プロジェクト[4)]が 2015～2016 年で実施されている。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

自然科学であれば実験との比較でモデルの正しさを検証できるが、エネルギーモデルに関しては社会の将来予測や計画が目的であるため、自然科学のような検証作業を実施しにくい。従って専門家間のピアレビューを通した、モデル内の各種想定（外生変数の値）や論理的整合性（方程式や不等式）などについての検証が中心となる。ただ、最終的にはモデルが意思決定者の扱っている問題に即しているか、その技術や政策のオプションの選択に役立つかどうかが重要なため、意思決定者からのフィードバック、さらにモデルを調整するというようなやり取りが必要となる。複数のモデルを使ってレビューすることが、一つの重要なステップになりうる。

さらにはコンピュータが非常に発達した恩恵として、最近のモデルは非常に詳細化が可能になり、地域や部門、あるいは時間の刻みも非常に小さくとることができるようになった。しかし、モデルの詳細化やダウンスケーリングには功罪があり、モデルの構造は現実に近くなっても社会経済データなどが本当に取得できるのかという問題などがある。

最適化型のエネルギーモデルの多くは線形計画法や二次計画法を用いた数理計画問題として定式化されているが、これらの計画法では、設備容量に関する規模の経済、量産による学習効果による単価の低減効果、火力発電所等の起動停止問題や部分負荷時の熱効率低下などの特殊な非線形効果を適切に考慮できない。これらの効果を厳密に評価するためには、混合整数解計画としての定式化が必要となるが、混合整数解計画の効率的な解法は、情報科学における計算量理論の観点からも確立は困難と判断され、変数の個数が少ない小規模なモデルにしか適用できていない。

[今後取組むべき研究テーマ]

研究テーマは以下 4 つに分類できる。

- 分類 1：ボトムアップ型技術評価モデルの高度化
  - 水素利用、電気自動車、CCS などの新規技術の社会経済的制約を考慮した定式化
  - 自然変動電源や電力貯蔵設備の評価のための時間分解能向上などのモデルの詳細化
  - エネルギー需要サイドのボトムアップアプローチによるモデル化
  - 環境研究との連携
- 分類 2：トップダウン型経済モデルの高度化
  - 一般均衡の概念自身に関する問題点など、経済学そのもののフロンティア研究
  - 産業連関表の細分化、時系列データベースの整備
- 分類 3：ボトムアップ型技術評価モデルとトップダウン型経済モデルの統合
  - エネルギー環境対策のための設備投資と国民経済との相互作用のメカニズム解明
  - 社会におけるエネルギー資源以外のレアメタルなどの各種物質のバランスの考慮
  - 時間・空間・経済部門分解能を大幅に高めた大規模エネルギー経済モデルの開発
- 分類 4：短長期の様々な不確実性に対するレジリエンスの向上施策の評価
  - 震災や風水害などの自然災害に対するレジリエンスの向上施策の具体化
  - 石油や天然ガスの供給途絶に対するエネルギー安全保障施策の定量評価
  - 世界的な気候変動政策の強化など不確実な国際情勢を考慮した最適戦略の導出

- エネルギー関連の技術革新に関する不確実性の評価

➢ 分類 5：マルチエージェントシステムによる多主体競合のモデル化
- 電力市場や CO_2 排出市場の価格形成過程の分析や取引制度設計
- OPEC の影響を考慮した石油の国際的市場価格のゲーム論的分析
- 気候変動対策の国際交渉や国別排出目標のシミュレーション

（５）政策的課題

エネルギー環境政策は、原子力発電の是非や CO_2 排出目標の水準など、多くの国で政治的な争点となっており、エネルギーシステム評価を実施する際には、政治的な中立性の確保が課題となることもある。

また、特に我が国では、研究成果を社会へ還元する場がまだ少なく、博士学位を有する研究者数も多くはない。企業や地方自治体などでのコンサルタント業務のニーズは高まっているように感じられ、活躍の場も徐々に広がっているように思われるが、若い研究者のキャリアパスは、政府関係の研究機関や大学などの少数のポストに限られている。

（６）キーワード

エネルギーシステム、エネルギーモデル、エネルギー政策、環境政策、エネルギー安全保障、技術評価、意思決定、エネルギー経済、線形計画法、計量経済学、一般均衡、システム工学、最適化、シミュレーション、気候変動、電力システム、レジリエンス、マルチエージェント

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	国立環境研究所は近年、AIMモデルの需要サイドの技術の詳細化を実施している。既往のAIM(CGE)モデルでは、取り扱っている技術の種類の拡張を実施しており、家庭部門をはじめとするエンドユース技術のモデリングの詳細化を行っている[5]。同じくAIM(end-use)では、電気自動車や燃料電池自動車等のクリーンエネルギー自動車のモデリングの詳細化を行い、その結果、日本の運輸部門の二酸化炭素排出量を1990年比で81%削減可能との分析結果を報告している[6]。 日本原子力研究開発機構がDNE21とGTAP(応用一般均衡モデル)をリンクした統合モデルに、新たに高速炉を考慮して、同技術の普及可能性を分析している[7]。高速炉中の中性子照射による核燃料の特性の変化もORIGENコードによる分析結果を踏まえ、詳細に考慮している。 再生可能エネルギーの大量導入が期待される中で、発電不安定性を解消のため電力貯蔵、出力調整運用などを考慮した評価モデルの必要性が高まっている。東京大学藤井研究室では電力需給モデルとして地理的・時間的な解像度を高めたモデルを開発しており、全国200地点、年間10分間隔の時間的解像度の線形計画法による最適化モデルである。これにより超高速な計算処理能力が要求されるものの、太陽光、風力発電を大量導入した場合の電源構成や送電線のあり方を解析可能である。
	応用研究・開発	○	→	RITEがDNE21+モデルを用いて二酸化炭素排出制約の影響評価を実施している。近年の研究結果では、二酸化炭素排出削減は、米国や欧州についてはエネルギーセキュリティに与える影響は軽微であるが、アジアではガスへの燃料転換が進みガス輸入量の増加を招くため、エネルギー自給率

				を悪化させる可能性が報告されている[8]。また2100年の気温上昇を2度以内に抑制するため大気中GHG濃度450ppmを達成するためには、炭素価格645ドル/トンが必要であるとの研究結果が報告されている[9]。 東京理科大学では、MARIAモデルを用いて、福島原発事故を踏まえ、世界的な原子力依存度の低下がエネルギー市場や二酸化炭素排出量に与える影響や、原子力の代替技術として、CCSやバイオエネルギーの導入可能性に関して分析が実施されている[10]。 最近の分析例としては、COP21で議論される2030年以降の排出削減目標（約束草案（INDC））についてAIM/Enduse、AIM/CGEによる評価や、政府の長期需給見通しに先駆けてエネ研が行ったエネルギーベストミックスに関する定量評価（2015年1月）などがある。
米国	基礎研究	◎	↗	PNNL(Pacific Northwest National Laboratory)が開発したGCAMモデルにおいて、考慮する技術の詳細化やエネルギー以外の分野、例えば、水利用や大気汚染物質(SOx,NOx)の評価機能の追加等が行われている。運輸部門ではバイオ燃料、電気自動車、水素燃料電池自動車が新たに詳細に考慮されている[11]。また、水利用のメカニズムをGCAMモデルに組み込んだ統合的分析により、長期的に中東やインドでの水不足の深刻化が懸念され、エネルギー分野での水利用の高効率化技術の導入が重要との結果が報告されている[12]。さらに、GCAMモデルにSOx, NOx等の大気汚染抑制政策の評価機能を付加した上で、温室効果ガス排出削減政策のコベネフィット分析を行い、大気汚染物質削減にはそれらの直接削減技術と非化石エネルギーのベストミックス構築が費用対効果の面から適切であるとの結果が報告されている[13]。 MITが開発したEPPAモデルでは、バイオエネルギー技術(電力、熱利用)が新たに詳細に組込まれ、次世代バイオ燃料製造技術や土地利用が新たに考慮された。土地利用の変化によるGHG間接排出量の考慮の有無が、森林伐採パターンの結果に与える影響が大きいとの結果が報告されている[14]。
	応用研究・開発	◎	↗	エネルギー省エネルギー情報局(EIA)の長期を対象とする世界エネルギー需給見通しとして、International Energy Outlook(IEO)があり、World Energy Projection System Plus (WEPS+)が用いられている。これは、各部門のエネルギーモデル間で消費量、価格が均衡するように反復・収束させる統合システムである。 PNNLのGCAMモデルでは、2100年の気温上昇を2度以内に抑制するための長期的な温室効果ガス排出削減には、再エネ、CCS、原子力の役割が大きいとの結果が示されている[15]。 MITのEPPAモデルでは、各国の温室効果ガス排出量の約束草案における目標値がエネルギー需給に与える影響評価も実施されている。例えば、将来、エネルギー需要増加が見込まれる中南米に着目した分析を行い、ブラジルでは約束草案がGHG削減費用の安い森林伐採パターン、メキシコではGDP損失、さらに中南米のエネルギー貿易(バイオ燃料、石油、ガス) に与える影響が大きいことが報告されている[16]。 また米国内で開発された代表的なエネルギーモデルGCAM、EPPA、MERGE(スタンフォード大学)間での分析結果の比較検討も行われており、モデルで考慮している低炭素技術の種類、最適化手法(動学的最適化、逐次最適化)等がモデル間で異なる点が、結果の違い(エネルギー供給量当たりの二酸化炭素排出量等)に影響を与えているとの分析が報告されている[17]。 MARKALモデルとGTAPモデル(土地利用データの活用)を併用して、米国でのバイオ燃料導入可能性分析も行われており、2030年までは供給面から見て持続的なバイオ燃料供給が可能との分析結果が報告されている[18]。
欧州	基礎研究	◎	↗	イタリアの研究所FEEM(Fondazione Eni Enrico Mattei)が開発したWITCHモデルでは、二酸化炭素排出削減策としての国際的な大規模植林を技術オプションとして新たに考慮し[19]、さらに、運輸部門の技術の詳細化(電気自動車や水素燃料電池自動車等の考慮)が行われている[20]。 オーストリアのIIASAが開発したMESSAGEモデルでは、技術普及に伴う学習効果も内生的にモデル化した上で技術の普及過程を分析した結果、太陽光発電は政策支援無しでも導入拡大する可能性や、CCS付きバイオマス発電(BECCS: Bio-Energy with Carbon Capture and Storage)の普及は進まない等の分析が報告されている[21]。 ETH Zurichでは、GTAPのデータベースを用いた上で、欧州の送電網と再生可能エネルギーを考慮した応用一般均衡モデルを構築し、送電線増強が効果的な再エネ電力拡大に貢献するとの結果が報告されている[22]。 GTAP-E(応用一般均衡モデル)を用いて、国際的なカーボンリーケージに関する分析が実施されており、カーボンリーケージ回避には地域的取組よりも全世界的な取組が必要であるとの結果が報告されている[23]。 国際エネルギー機関(IEA)ETSAP(Energy Technology Systems Analysis Program)が開発したTIAMモデルは国際的に広く活用されてお

				り、最近では鉄鋼生産技術を詳細にモデル化した上で、鉄鋼部門の二酸化炭素排出削減には水素還元製鉄技術の役割が大きく、また、二酸化炭素限界削減費用が500ドル/トンであれば鉄鋼部門でのCCS導入が経済合理性をもつとの結果が報告されている[24]。 イギリスUniversity College LondonのTIAM-UCL(TIAMは元々IEAが開発した世界モデル)では、技術の習熟効果を内生的に考慮した上で自動車部門の技術の詳細化を行い、同部門では水素燃料電池自動車と電気自動車普及が脱炭素化に有効であるが、長期的には水素と電気が競合する可能性があるとの分析が報告されている[25]。
	応用研究・開発	◎	↗	欧州委員会(EC)は、複数のモデル群により気候変動問題を分析している(例えば、2030年の気候変動・エネルギーの枠組みへの影響を分析したEuropean Commission, 2014)。GHGの排出のモデルとして、PRIMES（エネルギー需給とエネルギー起源CO_2排出）、GAINS（CH_4、N_2O、フッ素系温室効果ガス）、GLOBIOM-G4M（土地利用・土地利用変化及び林業(LULUCF)からのCO_2排出）、大気汚染物質としてGAINS（SO_2、NOx、$PM_{2.5}$-PM_{10}、地表のオゾン、揮発性有機化合物(VOC)、NH_3）があり、シナリオ作成において整合性を確保するために、互いにリンクされている。 ドイツの研究所(Potsdam Institute)のREMINDモデルでは、様々な気候変動政策等のシナリオが二酸化炭素排出パスやエネルギー需給に与える影響に関して分析が行われている。近年では、国際的な気候変動対策(各国の政策実施)が15年程度遅れた場合、2100年で0.4度の気温上昇を引起し、CCS利用が国際的に利用不可能となった場合は、0.3度の気温上昇リスクがあるとの分析が報告されている[26]。また、気候変動対策としての省エネ、燃料転換、新技術普及等を効果的に促進するために必要な炭素税率に関しても様々なシナリオの下で分析が実施されている[27]。 またTIAMモデルを用いて、シェールガス生産が国際エネルギー需給に与える影響評価[28]や、欧州のエネルギー安全保障に関する分析[29]が行われている。また、割引率に関する感度分析が行われ、割引率を低く設定した場合、将来にわたる再エネの役割が大きくなる等、資本集約型技術の普及に影響を与える結果が得られている[30]。 フランスMINES ParisTechのTIAM-FRモデルでは、発電部門でのCCS付きバイオマス発電(BECCS: Bio-Energy with Carbon Capture and Storage)の導入可能性分析を行い、BECCSの利用可能性が二酸化炭素限界削減費用に大きく影響する結果が報告されている[31]。またCCSに着目した分析も実施しており、欧州では原子力依存度が低下するため特に原子力代替としての温室効果ガス削減策としてCCSが重要な役割を担い、CCS利用が見込めない場合は二酸化炭素限界削減費用が大きく上昇するとの分析が報告されている[32]。
中国	基礎研究	○	↗	中国では、IEA-ETSAPが元々開発したMARKALモデルやTIMESモデルを活用した分析を清華大学等が主として実施している。既存のMARKALモデルにおける民生部門のエンドユース技術や再生可能エネルギー技術の詳細化[33]や、TIMESモデルのセメント製造部門の技術を詳細化し、炭素税課税により、同部門では短期的には省エネ推進、長期的には燃料転換技術、高効率技術、CCS導入が進むとの結果が報告されている[34]。また、TIMESモデルに水利用モデルを追加した上で、二酸化炭素排出制約により発電部門の水消費量も削減できるといった低炭素化のコベネフィットが存在し、さらに発電所の水利用にも制約がかかれば、再エネ技術が競争力を持つとの結果が示されている[35]。 北京理工大学では包絡分析法（DEA : Data Envelopment Analysis）を用いて7地域でのパイロット実験中の排出枠取引市場（ETS）の有効性を確認した（Wang K,et. al., 2015）。また資源最適化（resource optimal allocation）分析により、2017～2020年において、ETSの全国導入によって、工業部門のCO_2削減コストを35～40%低減できる等の結果を得た（北京理工大学、2016）。中国科学院大学等がRegional Energy Economy Carbon model(REEC)を開発し、ETSと炭素税の効果について、大半の地域でETSが炭素税より効率的であるが、全国レベルでは両者の差がほぼないこと、長期的には炭素税が優れること、両者以外に補助金やR&D投資等の対策も必要等の結論が報告されている（Hongbo Duan, et. al., 2016）。一方、清華大学は交通需要モデル、自動車燃料供給モデルと統合最適化モデルからなるTsinghua China Automotive Energy Model(TCAEM)を構築し、次世代自動車をも含む2050年までのシナリオ分析を行った(China Automotive Energy Research Centre of Tsinghua University, 2013)。
	応用研究・開発	○	↗	MARKALモデルとCGEモデルとの統合(ソフトリンク)を行い、二酸化炭素削減策が中国のエネルギー需給見通しや部門別の生産額へ与える影響に関して分析が行われている[36]。また二酸化炭素排出制約下での中国におけるCCS導入可能性を分析し、2025年以降、CCSが経済合理性をもち、導入

				が開始されるとの結果が報告されている[37]。 COP21や「第13次5カ年計画」作成に合わせた低炭素社会構築に関する統合モデルによる分析が盛んである。代表例として中国能源研究所（ERI）主導の共同研究グループが行った再エネ高比率シナリオ分析とロードマップ研究がある（ERI, 2015）。それによりシナリオ分析を行い、中国が2050年に再エネが一次エネルギー消費の60%、発電電力量の85%を目指すべき等の政策提言を纏めた。関連して、例えば、CO_2排出量の2025年頃のピークアウトが可能であること、再エネ電力拡大による電力不安定性問題を解決するために、超高圧送電網整備や、ガス火力を2.2億kWへ、揚水水力を1.4億kWへ拡大するほか、BEV導入拡大を主とする1.6億kWの蓄電池の活用も必要等のっ結果が示されている。
韓国	基礎研究	○	→	IEA-ETSAPが元々開発したMARKALモデルやTIMESモデルを活用した分析が行われており、MARKALモデルと自動車普及モデルを統合することで、クリーンエネルギー自動車の普及可能性が分析されている[38]。
	応用研究・開発	○	→	TIMESモデルを用いて、2012年に韓国で施行されたRPS制度に関する分析を実施し、同制度の下で特にコスト競争力が高いPV導入が拡大し、風力発電もコスト低下が進めば電力コストを抑制するとの分析結果が報告されている[39]。またモデルEnergyPlanを用いて、韓国の電力部門の低炭素化の可能性を分析し、風力発電の導入拡大が、経済性、エネルギーセキュリティ、環境性から望ましいとの結果が報告されている[40]。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

- CRDS 戦略プロポーザル「エネルギー政策のための科学：技術・経済モデルの研究開発」CRDS-FY2011-SP-07
- CRDS ワークショップ報告書「豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデル」CRDS-FY2011-WR-11

1) EMF ホームページ https://emf.stanford.edu/
2) IAMC ホームページ http://www.globalchange.umd.edu/iamc/
3) ADVANCE ホームページ http://www.fp7-advance.eu/
4) MILES ホームページ
http://www.iddri.org/Projets/MILES-(Modelling-and-Informing-Low-Emission-Strategies)
5) Fujimori, S. et. al. Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology, Applied Energy, Volume 128, Pages 296-306, 2014
6) Oshiro, K. et. al. Diffusion of low emission vehicles and their impact on CO2 emission reduction in Japan, Energy Policy, Volume 81, Pages 215-225, 2015
7) Mukaida, K. et. al. The Effect Assessment for Fast Reactor Fuel Cycle Deployment-improvement of the Assessment Method, Energy Procedia, Volume 39, Pages 43-51, 2013
8) Oda, J. et. al. Analysis of CCS Impact on Asian Energy Security, Energy Procedia, Volume 37, Pages 7565-7572, 2013

9) Sano, F. et. al. Assessments of GHG emission reduction scenarios of different levels and different short-term pledges through macro- and sectoral decomposition analyses, Technological Forecasting and Social Change, Volume 90, Part A, Pages 153-165, 2015
10) Mori, S. et. al. CCS, Nuclear Power and Biomass An Assessment of Option Triangle under Global Warming Mitigation Policy by an Integrated Assessment Model MARIA-23, Energy Procedia, Volume 37, Pages 7474-7483, 2013
11) Yin, X. et. al. China's transportation energy consumption and CO2 emissions from a global perspective, Energy Policy, Volume 82, Pages 233-248, 2015
12) Hejazi, M. et. al. Long-term global water projections using six socioeconomic scenarios in an integrated assessment modeling framework, Technological Forecasting and Social Change, Volume 81, Pages 205-226, 2014
13) Wang, L. et.al. Win–Win strategies to promote air pollutant control policies and non-fossil energy target regulation in China, Applied Energy, Volume 163, Pages 244-253, 2016
14) Winchester, N. et. al. The feasibility, costs, and environmental implications of large-scale biomass energy, Energy Economics, Volume 51, Pages 188-203, 2015
15) Pan, X. et. al. Energy Transition within a Carbon Constrained World: How Allocation Schemes Influence the Development of Energy System in the Future, Energy Procedia, Volume 61, Pages 1310-1313, 2014
16) Octaviano, C. et. al., Climate change policy in Brazil and Mexico: Results from the MIT EPPA model, Energy Economics, Volume 56, Pages 600–614, 2016
17) Wilkerson, J. T. et. al. Comparison of integrated assessment models: Carbon price impacts on U.S. energy. Energy Policy. Volume 76, Pages 18-31, 2015
18) Sarica, K. et. al. Analysis of US renewable fuels policies using a modified MARKAL model, Renewable Energy, Volume 50, Pages 701-709, 2013
19) Favero A. et. al. Using Markets for Woody Biomass Energy to Sequester Carbon in Forests, Journal of the Association of Environmental and Resource Economists 1(1/2), Pages 75-95, 2014
20) Pietzcker, R. et. al. Long-term transport energy demand and climate policy: Alternative visions on Transport Decarbonization in Energy-Economy Models, Energy, Volume 64, Pages 95-108, 2014
21) Leibowicz, B. et. al. Representing spatial technology diffusion in an energy system optimization model, Technological Forecasting and Social Change, Volume 103, Pages 350-363, 2016
22) Abrell, J. et. al. Cross-country electricity trade, renewable energy and European transmission infrastructure policy, Journal of Environmental Economics and Management, Volume 79, Pages 87-113, 2016
23) Antimiani, A. et. al. Assessing alternative solutions to carbon leakage, Energy Economics, Volume 36, Pages 299-311, 2013
24) Morfeldta, J. et. al. The impact of climate targets on future steel production – an analysis based on a global energy system model, Journal of Cleaner Production, Volume 103, Pages 469-482, 2015

25) Anandarajah, G. et. al. Decarbonising road transport with hydrogen and electricity: Long term global technology learning scenarios, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 38, Issue 8, Pages 3419-3432, 2013
26) Luderer G. et. al. Economic mitigation challenges: how further delay closes the door for achieving climate targets. Environ Res Lett 8:034033, 2013
27) Bertram C et. al. Complementing carbon prices with technology policies to keep climate targets within reach. Nature Clim Change 5, Pages 235–239, 2015
28) Gracceva, F. et. al. Exploring the uncertainty around potential shale gas development – A global energy system analysis based on TIAM (TIMES Integrated Assessment Model), Energy, Volume 57, Pages 443-457, 2013
29) Gracceva, F. et. al. A systemic approach to assessing energy security in a low-carbon EU energy system, Applied Energy, Volume 123, Pages 335-348, 2014
30) García-Gusano, D. et. al. The role of the discount rates in energy systems optimisation models, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 59, Pages 56-72, 2016
31) Selosse, S. et. al. Achieving negative emissions with BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) in the power sector: New insights from the TIAM-FR (TIMES Integrated Assessment Model France) model, Energy, Volume 76, Pages 967-975, 2014
32) Selosse, S. et. al. Fukushima's impact on the European power sector: The key role of CCS technologies, Energy Economics, Volume 39, Pages 305-312, 2013
33) Shi, J. et. al. Modelling building's decarbonization with application of China TIMES model, Applied Energy, Volume 162, Pages 1303-1312, 2016
34) Li, N. et. al. Quantifying the impacts of decarbonisation in China's cement sector: A perspective from an integrated assessment approach, Applied Energy, In Press, Corrected Proof, 2016
35) Huang, W. et. al. Connecting water and energy: Assessing the impacts of carbon and water constraints on China's power sector, Applied Energy, In Press, Corrected Proof, 2016
36) Liu, G. et. al. A Predictive Analysis of China's Energy Security Based on Supply Chain Theory, Energy Procedia, Volume 61, Pages 184-189, 2014
37) Weilong, H. et. al. Prospective Scenarios of CCS Implementation in China's Power Sector: An Analysis with China TIMES, Energy Procedia, Volume 61, Pages 937-940, 2014
38) Lee, D. H. et. al. Analysis of the energy and environmental effects of green car deployment by an integrating energy system model with a forecasting model, Applied Energy, Volume 103, Pages 306-316, 2013
39) Park, S. Y. et. al. An analysis of the optimum renewable energy portfolio using the bottom–up model: Focusing on the electricity generation sector in South Korea, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 53, Pages 319-329, 2016
40) Cho, S. et al. Feasibility and impact analysis of a renewable energy source (RES)-based energy system in Korea, Energy, Volume 85, Pages 317-328, 2015

3.13　分散協調型エネルギーマネジメントシステム

（1）研究開発領域の簡潔な説明

分散協調型エネルギーマネジメントシステム（EMS：Energy Management System）とは需要側に設置される太陽光発電などの分散型エネルギー資源（DER：Distributed Energy Resources）を電力系統など広域エネルギーシステムと連携・協調しながら統合的に制御するエネルギーマネジメントシステムである。需要側資源としては太陽光発電や燃料電池などの分散型電源、定置用ならびに自動車用の蓄電池や蓄エネルギー機器、需要家が所有する熱利用機器や電力消費の可制御機器などを含む [1)]。さらに、電力の消費自体を制御対象とするデマンドレスポンス（DR：Demand Response）も DER の一つに含まれる。これらを活用するためのシステムの研究開発、および人間の省エネルギー行動などの行動変容の解明などの社会科学的側面の研究を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

地球温暖化対策としての、太陽光発電や風力発電を中心とする再生可能エネルギーの大量導入が全世界的に共通の傾向となっている。こうした再生可能エネルギーは出力調整が不可能なため、時々刻々変化する電力需要に適応あるいは予測を踏まえた供給量の調整および需要量自体の調整、さらには需給調整を目的とした蓄電媒体の運用などの技術が必要になる。分散協調型 EMS は、こうした目的のために、エネルギーの発生・貯蔵・消費を動的に予測・運用・制御しながら、需要側とグリッド側が一体でエネルギーを多目的かつ最適な運用を実現する。

東日本大震災後、大規模・集中型システムへの依存から、DER を活用する分散協調型システムへの移行がエネルギー政策の一つの柱となった。ここでは、EMS を街・ビル・住宅などの単位でエネルギー利用に活用するとともに、大規模グリッドとの協調により全体最適を実現する。DER は、需要側に設置される太陽光発電、燃料電池などの分散型電源に加え、定置用や電気自動車（EV：Electric Vehicle）の蓄電池や熱利用機器などで構成される。

これらの DER は段階的導入が可能で、技術革新にもプログラム更新などで柔軟に対応できる特徴を持つとともに、災害等による部分的な障害が発生しても被害を最小限に抑えることのできるレジリエンス性の高いシステム実現の要素技術として期待されている。またこのような分散型エネルギーシステムを系統側システムと ICT を用いて連携・協調し、再生可能エネルギーを大量導入することで電力の低炭素化が可能になる。さらに、DR による能動的な需給調整機能を持たせることで、系統側の柔軟性や調整力強化に資することも期待されている [2)]。将来的に、EMS は電力のみならず、熱利用や交通系との連携にも拡張される。

［動向（歴史）］

分散協調型エネルギーマネジメントシステムは、スマートグリッドが脚光を浴び始めた 2008 年当初は、電力貯蔵技術を併設し、導入拡大が進む風力・太陽光発電の変動制御を行う需給調整・周波数調整に関するプロジェクトが数多く行われた。

一方、需要サイドではスマートメータによる消費電力の可視化による省エネルギー行動の

誘発が検討された。米国では、エネルギー省（DOE：Department Of Energy）等の予算でスマートメータの設置を加速する傍ら、老朽化したインフラ整備・近代化への投資を進めた。

我が国では、次世代社会システムとして、横浜市、豊田市、けいはんな、北九州市がスマートコミュニティ実証地域に選定され、2011 年から 5 ヶ年にわたり実証試験が行われた。このようなスマートコミュニティ構築に関する社会実装的な実証事業は、それぞれの地域の特色を備えながら現在に至るまで世界各地で行われており、特に近年では離島や遠隔孤立地域のスマート化の手段としての再生可能エネルギーをベースとしたマイクログリッド構築に関する取組みにも応用されている。さらに、社会実験的な要素も取り入れられ、電力消費データ分析に行動科学的知見を反映した省エネルギーアドバイスレポートや、電力消費を下げたい時間帯にクーポンを発行して外出を促すなど需要家行動を変容させる実証試験も実施されている。

この間、2011 年 3 月に東日本大震災が発生し、その直後の電力不足等を契機として、需要側の創エネ・蓄エネ等の機能が一層重要視されるようになり、あわせて電力消費についても制御可能なスマート化を行う DR への認識が高まった。災害や故障などに起因する需給ひっ迫にダイナミックに対応できる自動 DR（ADR：Automated DR）を目指す取り組みが行われた。米国やフランスでは、既に DR が需給調整に活用されているが、日本では、国内全体に広げていくために通信規格の統一など国内の標準技術を整備しつつ、アグリゲータ事業者の育成や需要家への認知を広げることを意図した実証事業が 2013 年度から始まった。上記の 4 地域のスマートコミュニティ実証とも連携し、系統運用者・小売り事業者などがサーバーから送出する DR のメッセージを需要家の EMS で変換して需要家の機器を制御するなど、国際標準や公知の標準規格に準拠して実現する研究が行われた。

近年、変動性再生可能エネルギーの導入が急速に進み、出力変動、余剰、偏在に伴う送配電系統の増強や需給の柔軟性（flexibility）確保が主要テーマになってきている。我が国においても、2012 年にスタートした固定価格買取制度（FIT：Feed-In Tariff）の導入を受けて太陽光発電の導入が爆発的に進み、2014 年には一部地域で送配電事業者が新規連系を停止する事態に発展した。これにより、新規の太陽光発電設備は外部からの通信によって出力を制御できる機能を有することが要件化され、一部電力会社、大学、メーカーが共同で、需給状況に応じて出力を制御するシステム・機器開発を行う実証試験が行われた。住宅用太陽光発電設備については、蓄電池や電気自動車、ヒートポンプ式給湯機などの適切な利用による出力抑制を回避するための機器間の協調制御を的確に行う HEMS（Home Energy Management System）および EMS 間の協調連携の基礎研究が行われている。

我が国では、北海道、東北地方が風力発電の好適エリアであり、導入容量も大きい。これまで風力発電連系の募集枠に対して、応募の合計出力が上回っている。これは、主に周波数調整などの系統運用制約に起因するが、地域間連系線の活用により広域での周波数調整や系統用蓄電池の導入による周波数調整の実証事業が実施され、実証試験データに基づき、最適な需給変動対策のポートフォリオが構築されようとしている。また、現在、2020 年頃の完成を目指して、電力システム改革が進んでいるが、全国規模で需給調整・周波数調整を行えるようになる。

供給信頼度を向上させる送電系統広域監視制御から需要家機器制御まで、電力系統のすべてのバリューチェーン（発電、送配電から電気利用まで）上に関わる研究プロジェクトが国

内外で進行中である。2000 年代以降、欧米ならびにアジアの各国が、国をあげての研究開発戦略を構築し、スマートグリッドを中心とするグリーン成長戦略に基づき実装段階に達してきている。

欧州連合（European Union）は、2020 年の 20-20-20（順に CO_2 排出量削減、再生可能エネルギー比率、エネルギー効率向上）に続き、2030 年には 40-27-27 という野心的な数値目標を設定した。これを受け、欧州ではグリッド側、需要側で精力的な取り組みが多数行われている。RWE は欧州で 220 ものプロジェクトに取り組むとしており、発電、送電、配電、再生可能エネルギー、分散電源、電力貯蔵など全般にわたっている。特に、再生可能エネルギーの統合制御、グリッド増強技術としての超電導ケーブル、スマートフォンやタブレットを使った住宅機器の遠隔制御などに力を入れている。

米国の風力発電の普及が進んでいる地域では、電力市場において、系統安定化のためのアンシラリーサービス、特に周波数制御のサービス提供に需要側資源が参画している。風力発電・太陽光発電の普及が進んでいるスペインなどでは余剰発電の出力抑制が必要となっており、より低炭素化を進めるには、再生可能エネルギー電源の出力を最大限利用する次世代エネルギーネットワークの必要性が高まっている。現状では、需要機器との双方向通信が可能なスマートグリッド化が十分進んでおらず、分散型電力貯蔵装置としての利用が期待される電動車両など需要側資源が本格的に電力市場に参加できる状況にはない。我が国同様、欧米でも公的助成を受け、社会実証試験が進行中である。国内では、電力システム改革における需要側資源活用の加速化や自動化デマンドレスポンスによるインセンティブ型デマンドレスポンス制御試験、電気自動車（EV）や プラグイン・ハイブリッド車（PHV : Plug-in Hybrid Vehicle）のスマート充電が研究されつつある。

米国では、エネルギー省 DOE および連邦エネルギー規制委員会（FERC : Federal Energy Regulatory Commission）がデマンドレスポンスを供給側資源と同様に扱う政策を基本とし、需要側資源の積極的活用を目指している。我が国では、電力供給不足を背景に、ネガワット取引など市場メカニズムに基づくデマンドレスポンスが実プログラムとして導入され始め、2017 年度よりネガワット取引市場が整備される予定である。高い電力系統技術基盤の上に産業界の経験的努力により当該分野で世界に類を見ない高品質を保持してきたが、規制改革などの社会科学、需要家行動の行動科学分野の研究との融合などの面で遅れている。近年、行動経済学に基づくデマンドレスポンス実証データ分析が始まったが、米国ではすでに実用化されている。

また、大型ハリケーンによる大規模停電の発生・復旧遅れやサイバーアタックの懸念を踏まえて、北米では、電力の供給信頼度の向上（レジリエンス向上、広域監視制御）と電力市場・運用の広域化（market to market coordination、FERC 規則 1000 による送電計画の広域協調）が大きな話題となっている。欧州でも再生可能エネルギー電源の出力変動対策としてさまざまな電力市場制度（運転予備力の調達など）が導入され、産業用需要家の需給調整能力を活かす取組みがフランスなどで始まっている。

また、諸課題を極力低コストで解決し、安定供給を確保するための中心的なテーマは、大量の DER を束ねて、グリッドが必要とする調整力や柔軟性を提供できるようにすることであり、これを需要家毎の最適化と的確な両立を確保しながら実現するキーエレメントが分散協調型 EMS である。これまで、階層型 EMS や中小規模 EMS 間協調によりリソース間の一

定の最適協調運用は実証されてきているが、実際の需給状況に対応し、様々なステークホルダーが関係したグリッドスケールでの DER のきめ細かな協調制御は今後の課題である。

また、エネルギーリソースが需要側に普及し、需要家はエネルギーのコンシューマーからエネルギーの創出を自ら行う“プロシューマー”へ進化してきている。需要側に設置されるエネルギーリソースは、一般に容量が小さく、送配電事業者が調整力として活用したり、市場での売買を可能にするためには、複数リソースを協調させ、一定の時間帯に一定規模以上の容量のエネルギーを提供できるエネルギー・リソース・アグリゲーション（ERA : Energy Resource Aggregation）が必要となる。ERA は、分散する多数のエネルギーリソースを単一の発電所に見立てて制御することから、バーチャル・パワー・プラント（VPP : Virtual Power Plant）ともよばれ、再生可能エネルギー拡大に伴う flexibility 確保の中核的技術になりつつある。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

＜欧州の HVDC 計画＞

欧州における洋上風力と高圧直流配送（HVDC : High-Voltage Direct Current）によるスーパーグリッドを構築する計画がある。欧州の北海エリアは水深が浅く、着床式で大規模で洋上風力発電所やケーブルの設置が容易であり、HVDC によりそれらを連系し、スーパーグリッド構築を目指している。

- エネルギー・リソース・アグリゲーション

欧米においては変動電源や変動需要のバランシング技術、貯蔵技術が進められている。出力変動の大きい再生可能エネルギー電源を大量に需要変動に合わせて、瞬時瞬時の需給バランスをとるための電力貯蔵技術などがある。エネルギー貯蔵に関する米国のカリフォルニア州の規制などが例としてあげられる。一方、米国では、将来のグリッド像として、transactive energy と呼ばれる新しいアプローチが注目されている。従来の電力市場では取引されていない、DER もリアルタイムで自動制御されることにより、電力需給バランスを維持し、電力が自由に取引されている形である [3)]。米国エネルギー省やいくつかの州政府は、このアプローチにより従来の電力会社中心モデルから需要家中心モデルへ移行させることを目的としている。

- 機械学習技術の高度化と EMS への利活用：エネルギーデータサイエンス

時間粒度・抽象度が異なる膨大なエネルギーデータ（Energy Granular Data）を司るエネルギー・サイバーフィジカルシステムの考え方が注目されつつある。エネルギーデータサイエンスは、サイバー空間において蓄積された膨大なデータを縦横に分析し実世界の様々な機器やシステムの動作に結びつけ、実社会における最適なエネルギーマネジメントを実現するための重要な要素技術となると期待される。例えば、深層学習に代表される機械学習・先端データ科学の手法が電力需要、気象、人の行動の予測等 EMS の要素技術として応用され始めている。このような手法は電力系統の需給運用や機器制御の高度化等が要求される実エネルギーシステムへの実装を具体的な応用先としたエネルギーデータサイエンスのトピックとしてさらなる発展を遂げることが想定される。また、カスタマイズさ

れた省エネルギーレポートによる行動変容プログラムが進んでいる。これは、スマートメータなどにより計測された詳細な世帯ごとの電力消費データを用いて消費世帯特性を分析し、行動科学的知見を反映した省エネルギーアドバイスレポートにより需要家行動を継続的に変容させるプログラムである。我が国で実証試験が実施された。

- デマンドレスポンスの確実性向上と高速化

  風力発電など変動電源が大量に連系してきた米国テキサス州や欧州では、出力予測外れに伴う予備力供給や周波数調整型のアンシラリーサービス型デマンドレスポンスが導入され始めている。一方、国内では ADR 実証により、10 分前発動のレベルまでは一定の効果を有することが検証されている。アンシラリーサービスを対象とした FAST-DR については今後の検証課題となる。

- 電動車両の多目的充放電マネジメントの高度化

  EV／PHV の充電マネジメントや V2G 等により、変動性再生可能エネルギーに対応可能な flexible なエネルギーリソースや災害時の非常用リソースとしての実証が行われている。また、EV のための ICT が注目されている。単に移動手段のインテリジェント化（例えば ITS）にとどまらず、スマートグリッドでの連携による再生可能エネルギー電力の支援や分散型自立エネルギー拠点としての災害対応力強化が期待される。

- インバーターのスマート化による調和型自律分散化

  日本の PV の急激な導入拡大に対応して、通信機能により外部から出力制御可能なパワーコンディショナーと付帯装置の開発や、DR と類似のシステム・通信規格を使った実証がなされた。また、再生可能エネルギー導入規模が大きいドイツや米国・ハワイ州・カリフォルニア州等では、PV や蓄電池のインバーターに有効・無効電力出力の自立制御機能を持たせるスマートインバーター化が進行している。これにより分散型エネルギーリソースの flexibility を向上させる。

- 細粒度計測データに基づく配電ネットワークトポロジーと電圧の動的マネジメント

  配電自動化の整備で先端を行く我が国の送配電事業者は、既存の開閉器を配電ネットワークトポロジーの遠隔制御が可能なセンサー付き開閉器へ順次置き換えていく計画をたてている。配電ネットワーク上の空間的・時間的な電流・電圧等のデータをきめ細かく取得することで配電損失最小化を可能とする配電ネットワークトポロジーの管理 [4]や太陽光発電導入に伴いより高度な管理が求められる電圧制御の実現が検討されている。

［注目すべきプロジェクト］

＜海外の EMS プロジェクト＞

- 欧州 Horizon2020 プロジェクト

  欧州では、風力、太陽光が大量導入に対応するグリッドの柔軟性（flexibility）向上がキーワードになっており、電力貯蔵、需要制御、電気自動車のインテグレーション、水素製造等を駆使して flexibility を高める取り組みが行われている。欧州委員会（European commission）の支援の下、2014-2020 年の 7 年間の政策を規定し、大規模なプロジェクトが多数行われている Horizon2020 においては、2014-2018 年の 4 年間にわたり、欧州 10 カ国の系統運用者（TSO: Transmission System Operator）ユーティリティ、メーカー、

大学がコンソーシアムを構成し、欧州大でネットワーク容量の拡大・flexibility 向上・現在の信頼度を維持して再生可能エネルギー比率を増大する史上最大規模のパワーグリッドのプロジェクトを進めている。欧州では、北海沿岸・近郊の風力発電による電力を欧州南部の需要地に送電するために送電設備の増強が大きな課題になっており、直流送電技術、既存交流グリッドの増容量技術などが中心テーマに上げられている。欧州最大の TSO である ENTSO-E は、2050 年までの長期シナリオにおいて電力貯蔵などのリソースを総動員し、“Electricity Highway 2050” のもと効率的なグリッド形成に取り組もうとしている。

- フランス環境・エネルギー管理庁の実証プロジェクト

フランス環境・エネルギー管理庁（ADEME）は、フランスの長期エネルギー転換におけるスマートグリッド化を推進するため、再生可能エネルギー連系、出力予測、電力貯蔵、アンシラリーサービス、デマンドレスポンスの技術実証を行うプロジェクト（ENRpool プロジェクト、EDF スマートグリッドリヨンなど）を補助している。

- スマートインバーターのルール化・認証整備と実証試験

米国では、EPRI が中心となって、スマートインバーター（SMI）の機能定義や国際標準整備（IEC61850-90-7）を進めてきたが、太陽光発電の導入や蓄電池の配備が急速に進むカリフォルニア州において、SMI の機能から必要なもの抽出し、州規制当局（CPUC）が定めるグリッドコード（連系要件）CA-Rule21 に反映して義務化する。ハワイ州でも同様の動きとなっている。EPRI 監修のもと、電気事業者、関連メーカーが共同で、SMI を統合管理するシステムや通信規格の整備を進めるとともに、数台規模での実フィールドでの実証試験が進行中である。米国エネルギー省 NREL は、Western Wind and Solar Integration Study において、風力、PV の変動電源の大量連系が可能かをシナリオ分析している [5)]。

- 島しょ域スマートグリッド実証事業

ハワイ・マウイ島での島しょ域スマートグリッド実証事業（正式名称：Japan U.S. Island Grid Project、プロジェクト呼称：JUMPSmartMaui）[6)]では、離島型スマートグリッド実証が行われた。現在は、EV の蓄電池、および EV-Power Conditioning System (EV-PCS) の新技術を活用し、系統安定化・エネルギー需給バランスに貢献に向けた V2G（Vehicle to Grid），V2H（Vehicle to Home）技術、EV-VPP 機能の拡張実証が行われている。

＜国内の EMS プロジェクト＞

- VPP 構築事業

様々な分散するエネルギーリソースをアグリゲートし、あたかも単一の発電機のように動作させる技術を軸に、エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス（ERAB）の実証を行なうもので、2016 年度から 5 年間の資源エネルギー庁の補助事業であるバーチャルパワープラント(VPP)構築実証事業 [7)]が進められている。

この中で、高度制御型 DR が扱われており、2016 年から開始される一般送配電事業者による調整力調達に資するネガワットを実証する。アグリゲータが需要家を統合し、申告値に対し±10%の精度でネガワットを創出することを求める。本実証事業は、資源エネルギー庁が立ち上げた ERAB 検討会と連携し、制度・ルールに応じて必要となる技術的課題について、研究開発や検証を行う。

- 電力系統出力変動対応技術研究開発事業

天候によって出力が変動する風力発電や太陽光発電大量導入へ向けた取り組みとして、風力発電の急激な出力変動（ランプ）の予測技術、出力平滑化の為の風車制御技術や蓄エネルギー機器制御技術、また、需給バランスの維持を目的とした再生可能エネルギー出力制御技術の開発等の研究・実証が NEDO、電力会社、企業等により進められている[8]。また、これらの技術を考慮した需給シミュレーションシステムの開発も進められている。

- 大型蓄電システム緊急実証事業

再生可能エネルギーの更なる導入拡大を目指し、風力発電や太陽光発電の普及拡大に伴う周波数変動対策として、大型蓄電池による最適な制御及び管理技術の開発が進められている[9]。東北電力では周波数調整力の拡大を目指し、2015 年から火力発電の周波数制御と協調制御する大型蓄電池システムを当社西仙台変電所に設置し、効果実証を行っている。北海道電力では 2016 年から、風力や太陽光発電の出力変動によって電力系統に生じる影響を緩和し、かつ効率・寿命の最大化を図る系統用蓄電池の最適な制御・運転技術の開発が行われている。

- JST CREST 分散協調型 EMS 研究領域

2012 年 2 月の文部科学省の戦略目標の下で JST CREST の「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論および基盤技術の創出と融合展開」研究領域（2012 年度から 2019 年度）において分散協調型 EMS に関する大規模チーム型研究（早稲田大学、東京工業大学、名古屋大学、東海大学等）が立ち上がった[10),11)]。工学、理学、社会科学、経済学などの研究者により社会実装を見据えた分散協調型エネルギーマネジメントシステムの理論構築に関する研究が推進されている。本領域の研究については米国 NSF、ドイツ DFG、ノルウェーRCN などの各国のファンディングエージェンシーが採択した関連研究組織との連携が始まっており、上記 CREST チームが中心的な役割を果たす国際的な EMS 研究連携が進んでいる。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

分散協調型 EMS が究極的に目指す像は、需要家のニーズが反映された個々の EMS と電力グリッドの運用を司る単一または複数の EMS が、再生可能エネルギーの出力や電力消費などの現在値と予測値に基づき反復的に協調し、電力システム全体に存在するあらゆる資源の潜在力をフルに活用する最適運用を実現することで、予備設備を極力不要にし、あらゆるステークホルダーの Win-Win を実現することである。しかし現状は、限られた少数の需要側 EMS を限られた粗い粒度・粗い精度のエネルギーデータをもとにエネルギー管理を最適化するに過ぎず、系統側 EMS との高頻度の反復的な最適化はさらに研究途上となる。分散協調型 EMS の理想像の実現の技術的ボトルネックとして以下が挙げられる。

- 不確実性を有するエネルギー変動の予測

確実な動作と電力供給能力の十分性が求められる舞台で、不確実性を有する分散型エネルギーリソースの変動予測と、本質的に存在する不確実性を考慮したシステム運用・構築に関する基本的な方法論が体系化されていない。予測精度がマネジメント効果に及ぼす影響に関する科学的知見も不足しており、分散協調型 EMS 技術のボトルネックとなっている。

- 大量データのハンドリングとリアルタイム処理

適切な EMS 実現のための情報を計測、時間的・空間的粒度が多岐に渡る膨大なエネルギー計測データ（Energy Granular Data）のデータ処理、リアルタイム情報通信制御方法に関する知見が不足しており、分散協調型 EMS の社会的な実装を推進する上で必要十分な規模のデータをコストに見合う形で蓄積･利活用していくための方法論が欠如している。

- オープンデータ整備

需要サイドでは、新たなデータ処理方法(data driven analytics)や制御手法の有効性検証に実データの利用が不可欠であるが、現在の国内外の実証試験は、既存技術の統合が中心で、経験的に性能向上を図っている段階である。ベンチマーキングに使えるオープンデータが整備されていないため、大量データ処理、リアルタイム情報通信制御などでの根本的な障壁があり、制御効果の確実性を確保する需要家行動など未解明である。供給側、需要側の双方の要素技術群の技術進歩、センシング技術と無線ネットワーク技術が融合したセンサネットワーク、大規模データ処理などを統合した次世代エネルギーネットワークの数理的基盤、需要家行動原理をモデル化した需要予測技術・電力市場の制度設計など、広範な研究開発領域が未実施のまま残されている。

- 分散エネルギーリソースの協調制御

電力の消費・供給の挙動を科学的に分析し、様々な分散型エネルギーリソースの動的な貢献度をどのように定量化し、どのように制御していくかに関する方法論が確立しておらず、多岐にわたる分散型エネルギーリソースの潜在的なマネジメント効果の見積もりや社会的価値の適切な評価を与えることができていない。また、ネガワットを利活用するための制度設計が進む一方で、需要側の予測・計画・運用・制御等のアルゴリズムや双方向通信機能を有する需要側エネルギーリソースの研究開発など、欧米が先んじている研究開発を我が国も推進する必要がある。

［今後取組むべき研究テーマ］

具体的な研究開発課題は、以下があげられる。

- スマート化の要素技術

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

- 建築、地域、都市スケールにおけるエネルギーのさらなる有効活用

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

- エネルギーマネジメントシステムの階層化と多重化

  HEMS、BEMS、CEMS（Community Energy Management System）間の階層制御、及びグループ制御の仕組みが必要になる。また、将来に全国連系の独立送電系統運用者（ISO：Independent System Operator）が構築される際の、システム制御や通信制御の仕組みが課題である。さらには、高機能自律分散型インバーターの相互影響動作解析、個別的利用から集団的利用に向けたアグリゲーターシステムの活用、マルチレイヤー・ポジ／ネガワットリソース・マネジメント手法の研究も検討する必要がある。

- 消費者行動分析、行動経済学的分析

  エネルギー消費や自動車走行などのビッグデータを収集・活用した、消費者行動分析や行動経済学的分析を、プライバシー保護可能なオープンデータベースの開発も含めて実施する。また、消費と供給電力の動的な挙動を考慮した電力価格、インセンティブ設計手法などの行動経済学的研究も必要となる。

- エネルギーの供給サイド資源と需要サイド資源の統合化

  再生可能エネルギー電源の出力予測の可能性を見極め、再生可能エネルギー統合（ランピングなどシステム柔軟性の資源）により、エネルギーの供給サイド資源と需要サイド資源の統合化がキーとなる。これには、次世代高機能スマートメータから収集される高鮮度データを活用した準リアルタイム配電系統・需要家間協調型マネジメント手法開発、エネルギー消費、変動性再生可能エネルギー発電出力、蓄エネルギー機器の充放電電力等の高精度予測の方法論の開発、不確実性を考慮した分散型エネルギーリソース（DER）のアグリゲーションスキームの研究が挙げられる。

- IoT/ビッグデータ/人工知能の応用

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

（５）政策的課題

- 需要側の分散型エネルギーリソース（DER）の利活用の契機を高めるために、エネルギービジネスのプレイヤーとして参加可能な競争的環境（リアルタイム市場やアンシラリーサービス市場など）を、我が国が欧米に追いつくべく国際標準通信規格を踏まえながら国の制度として整備していくことが不可欠である。
- データを異なる事業者の壁を超えて利活用し、新たな価値を創出して社会実装にまでつなげていくのが重要である。各種事業者間の利益相反があることから、中立で公平な立ち位置である学が牽引・調整役となり、官による制度設計を踏襲しながら多種多様な企業が連携した産学官連携プラットフォーム型のEMS研究開発や事業モデル研究などを推進していくべきである。
- 国が関与すべき、資金投入すべき研究環境整備は、個人情報保護とユーザの受容性を確保

した上で、産業振興につながるエネルギー・ビッグデータ整備支援である。

・ 開発されたエネルギーマネジメントシステムの社会実装を図る各種規制改革（交通、都市計画、税制、公共政策）の推進が課題である。
・ 実証補助事業を行う経産省、環境省等と総務省、国交省（自動車運行情報など）など省庁間の連携が望まれる。

（６）キーワード

スマートグリッド、分散型エネルギーリソース（DER）、プロシューマー、ネガワット取引、アンシラリーサービス、自動デマンドレスポンス（ADR）、レジリエンス、太陽光・風力発電出力変動対応技術、エネルギー・リソース・アグリゲーション（ERA）、バーチャルパワープラント（VPP）、トランザクティブ・エナジー、送配電損失最小化、Energy Granular Data、エネルギーデータサイエンス、V2H／V2G、スマートメータ、スマートインバーター、HVDC

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	JST CRESTとしての研究領域の発足などにより、分散協調型EMSの基盤技術の創出や社会実装・実現に向けた研究が行われており、大学（東大、北大、早大等）、研究機関で基礎研究（太陽光発電出力予測技術、エネルギーマネジメントなど）に取り組んでいる。
	応用研究・開発	◎	↗	再生可能エネルギー電源の出力予測技術の高度化や蓄エネルギー機器を用いた出力変動補償技術の開発、太陽光発電の出力制御技術、VPP構築、デマンドレスポンスなど、送配電系統側と需要家側におけるEMSに関する技術の応用研究が産業界も参加した数多くの実証試験を通して進められている。また、国内初の取り組みとして、実際の配電網を用いた配電損失最小化の実証試験も行われている[4)]。
米国	基礎研究	◎	↗	大学、DOE国立研究所等のネットワーク化、NSF Engineering Research Center（ERC）プログラムに代表されるCURENT（テネシー大他）、FREEDM（ノースカロライナ州立大、アリゾナ州立大他）による基礎研究、IEEEのスマートグリッド専門誌やグループを組織し、情報セキュリテイや需要側資源の基礎研究で世界をリードしている。 送配電網、マイクログリッドを模擬するリアルタイムテストベッドを活用したEMS技術の研究も進められている[12), 13)]。送配電系統のモデリング、ビッグデータ活用、スマートインバーターなどの新研究テーマが見受けられる。
	応用研究・開発	◎	↗	デマンドレスポンスプログラムなど下流側の産業化で進んでいる。特に、電力系統運用・市場運営が一体化された北東部や風力発電比率の高いテキサス州などで高度なプログラムが開発・運用されている。また、高い再生可能エネルギーの導入目標を背景に、ハワイ・マウイ島のスマートコミュニティ・EV利用型のVPP実証事業[6)]、カリフォルニア州のEV充電インフラ整備などのEMSサービスの拡充や蓄電池の多目的運転実証[14)]の他、標準化やエネルギー貯蔵プロジェクトが多数ある[15)]。NY州では、Reforming the Energy Vision (REV)の一環として、住宅設置の太陽光発電と定置型蓄電池を活用したVPP事業が開始され[16)]、EMSに関する取り組みも多く報告されている。

欧州	基礎研究	◎	↗	風力発電の大量連系のための系統安定化技術（パワエレ、制御,予測技術を含む）や他のエネルギーキャリア（水素など）との代替・補完を考慮したエネルギーシステム研究が推進されている。また、系統側・需要家側のEMS実現に向け、ビッグデータ、機械学習に関する研究が大学・研究機関において活発に進められている[17]。
	応用研究・開発	◎	↗	洋上風力の開発・利用（HVDCを含む）と国際連系整備で世界をリードしている。欧州指令の大きな政策目標の実現に向けて、技術開発戦略と電力システムの制度設計が一体化される必要があるため、スマートグリッド開発が電力市場の域内統合と強く結び付いている特徴がある。FP7、EU Horizon 2020の一つとして、大学や研究機関とが共同し、TSO、DSO間の情報交換管理のためのインターフェース最適化[18]、デマンドレスポンスモデルの構築プロジェクトが推進されている。また、蓄電池システムのビジネスモデルの検証[19]、VPP[20]事業、Power to Gasの実証プロジェクトも展開されている。
中国	基礎研究	○	↗	National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)[21]、National Natural Science Foundation of China[22] などの支援を受け、デマンドレスポンス、マイクログリッド、VPPに関する研究が大学等を中心に進められている[23]。（マイクログリッドシンポジウム資料（Hafei工業大学）） エネルギー発展第十二次5ヵ年計画を背景に、広域に渡る通信に関する実証事業がなされている他、天津でのエコシティに関する実証事業、UHV（Ultra-high voltage）に関する実証がなされている。都市部では急速にスマートメータが普及し、データ活用研究も進みつつある。配電自動化技術は試験的導入段階にある。
	応用研究・開発	○	→	
韓国	基礎研究	△	→	韓国エネルギー技術評価院、未来創造科学部などの支援の下、大学・研究機関にてVPPやEMSに向けたビッグデータ解析が行われている[24), 25), 26]。また大学等で、PVなど再生可能エネルギー電源と蓄電池の最適制御やV2Gの基礎研究に取り組んでいる[27]（KEPCO,Inha大学）。 国をあげて産業界と一体となった輸出産業化に取り組んでいる[28]。済州島のスマートグリッド実証事業、マイクログリッド実証事業（K-MEG）が終了し、スマートメータの導入やEV利用型のフィードバック実証、拡張実証が行われている。
	応用研究・開発	△	→	

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 浅野浩志「電力システム運用における需要側資源の活用」電気学会誌 135 巻 11 号 2015 年 11 月
2)「電力系統の柔軟性（調整力）と需要側資源、エネルギーと動力」2016 年春季号、No.286,2016
3) David Forfia, Mark Knight, Ron Melton D.Forfia, The View from the Top of the Mountain: Building a Community of Practice with the GridWise Transactive Energy Framework, IEEE Power and Energy Magazine, Volume 14, Issue 3, May/June 2016
4) 共同発表（早稲田大学、東京電力パワーグリッド、JST）「国内初、スマートグリッド実現に向けた配電網の電力損失最小化の実証試験開始について」

http://www.jst.go.jp/pr/announce/20160420/
5) http://www.nrel.gov/electricity/transmission/western-wind-3.html
6) JUMP Smart Maui　http://www.jumpsmartmaui.com/
7) http://www.iae.or.jp/2016/05/19/vpp/
8) NEDO「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100069.html
9) 一般社団法人　新エネルギー導入促進協議会　「大型蓄電システム緊急実証事業」
http://www.nepc.or.jp/chikuden/index.html
10) JST CREST　「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah24-1.html
11) 計測と制御　特集「分散協調型エネルギー管理システム構築」Vol. 55、No. 7、2016
12) Florida State University　Center for Advanced Power Systems　Real-time digital simulator
http://www.caps.fsu.edu/
13) Clemson University Real-Time Power and Intelligent Systems (RTPIS) Laboratory
http://rtpis.org/
14) NEDO プレスリリース「米カリフォルニア州でスマートコミュニティ実証プロジェクト」
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100452.html
15) DOE Global Energy Storage database　http://www.energystorageexchange.org/
16) Consolidated Edison, Inc., (Con Edison)　“Clean Virtual Power Plant”
http://www.coned.com/energyfuture/pdf/clean-vpp-project-implementation-plan.pdf
17) V. del Razo, C. Goebel and H. A. Jacobsen, "Vehicle-Originating-Signals for Real-Time Charging Control of Electric Vehicle Fleets," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, no. 2, pp. 150-167, Aug. 2015.
18) SmartNet project　http://smartnet-project.eu/
19) M5BAT project　http://www.m5bat.de/
20) Australian Government　Australian Renewable Energy Agency (ARENA) Media Release, “Battery storage set to strengthen South Australian grid”
http://arena.gov.au/media/battery-storage-set-strengthen-south-australian-grid/
21) National High-tech R&D Program (863 Program)
http://www.most.gov.cn/eng/programmes1/
22) National Natural Science Foundation of China　http://www.nsfc.gov.cn/publish/portal1/
23) Y. Wang et al., "Guest Editorial Smart Grid Technologies and Development in China," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 379-380, Jan. 2016.
24) J. Kim and H. I. Park, "Policy Directions for the Smart Grid in Korea," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 40-49, Jan.-Feb. 2011.
25) J. Choi, M. Kim and J. Yoon, "Implementation of the Big Data Management System for Demand Side Energy Management," Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing, 2015 IEEE International Conference on, Liverpool, 2015, pp. 1515-1520.

26) M. Kim, J. Choi and J. Yoon, "Development of the Big Data Management System on National Virtual Power Plant," 2015 10th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC), Krakow, 2015, pp. 100-107.
27) H. S. Jang, K. Y. Bae, H. S. Park and D. K. Sung, "Effect of aggregation for multi-site photovoltaic (PV) farms," 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Miami, FL, 2015, pp. 623-628.
28) Ministry of Trade, Industry and Energy（産業通商資源部）, Korea
http://english.motie.go.kr/?p=5452&paged=0

3.14　直流送配電・超電導送配電

（1）研究開発領域の簡潔な説明

直流送電は長距離大電力送電や短距離でも海中及び地中にケーブルを通すときに用いられるが、需要に応じて発電所から家庭や工場などの需要家まで直流送電を使うこともある。ここでは、直流送配電として、銅やアルミなどのケーブルを用いるものと、高温超伝導ケーブルを用いてより少ない損失の送配電の実現を目指す研究開発を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

現在の送配電網では、発電所で発電した交流を変電所で、例えば 50 万 V の高電圧に昇圧してから送電し（電圧が高ければ高いほど損失が減る）、変電所などで順次低い電圧に変え、家庭や工場などの需要家では 100V から数キロ V の交流を受けて利用している。このような発電－変電－送電－配電－需要家に至る電力供給の中で､我が国における送配電ロスは約 5%であり膨大な電力が熱となって失われている。世界平均は約 8%であるが、発電量が急伸している途上国（インドなど）では 20%以上損失している国もあり、発送電システムの拡大と同時に送配電効率の改善が切望されている。

この中で、工場やオフィスなどの民生用や家庭用の電力機器の 8 割以上は交流をそのまま利用するのではなく、一度直流に変換されてから使われている。また太陽光発電や風力発電は直流電力であることや直流は蓄電が行いやすいため、瞬時停電対応や蓄電池による電力の平準化に適していることから今後直流給電の機会が増えていくことが予想されている。直流送電は、大電力を長距離にわたって送電することが可能であり、世界では広く利用されている。特に、長距離や水中及び地中では無効電力が発生しないことやケーブル導体の直流抵抗が商用周波数での交流抵抗に比べて半分以下になることなどから、銅やアルミ導体を利用しても、狭い導体断面積で低損失が実現できることが特長とされ、数百 km より長くなると、高価な電力変換器を入れても直流送電が使われることが一般的である。ただし、通常電気を使うためには必ず電圧を降圧(変圧)する必要があるが、直流の電圧変換には、パワー半導体デバイスが必要になり、通常の変圧器に比べてコスト高で損失が大きくなりやすい。このため、高電圧、大電流、高効率 DC-DC コンバータや交直インバータが必要となる（この取組みについては「パワエレ」の項で触れる）。

超伝導ケーブルは、環境常温部からの熱侵入量をゼロにすれば、原理的には損失ゼロで送配電可能な技術を提供できる。従来の金属導体（銅やアルミニウム）を用いる送配電技術では断面積当たりの通電電流密度は約 1A/mm^2 が工学的限界と言われ、大電力の供給には高電圧化が必要であったが、超伝導ケーブルにより低電圧・大電流化の方向が可能になると、電力変換器も含めて最適電圧電流の選定が別途必要になる。また、導電材料・電気絶縁材料・金属製保護材料で構成される電力ケーブルの導電材料部分を超伝導線にすることにより従来の 1/100～1/200 へと断面積を減少させ、低電圧化により電気絶縁材料も薄くすることで、ケーブル断面積を格段に減少できる。これは、同容量の銅ケーブルに比べ、重量も下がり省資源化につながるが、使われる導体部分が 1／100 以下になることは、導体部熱容量が大きく減少するため、短絡時に大きな電流が流れて超伝導状態が破れると短い時間でも温度上昇

が大きくなる。このため、銅やアルミケーブルなど同じ短絡条件で運用すると超伝導ケーブルは重大な損傷を受ける可能性が高くなる。このため、安全対策を十分に行うことや短絡条件についてのより深い検討を行い、場合によっては短絡条件の変更などが求められる。また、超伝導を利用することによって高電圧を利用しないと、中間変電所を削減することが原理的に可能になる。これは変換ロスを削減するとともに電力システムの簡素化が図れ、大幅なコスト低減につながる。

長距離送電を行う場合の交流、直流及び超伝導直流送電の損失を示した例を図 3-12 に示す。これは、ABB 社の HP を参考に 1.2GW を 1000km ほど送電することを想定している。アルミや銅のケーブル（裸線）では直流抵抗に比べて交流抵抗は大きいので、断面積が小さいケーブルでも直流送電は損失が少ない。そして、直流送電で電流密度は 1A/mm² 程度とし、銅を利用したとして損失を見積もっている。一方、超伝導直流送電では断熱 2 重管の熱侵入が主な損失となるため、熱侵入量を 1W/m とし、冷凍機の COP=0.1 と仮定した。この仮定では、超伝導直流送電は ABB が想定している銅ケーブルなどの直流送電に比べて、損失が 1/6 以下であり、交流送電に比べて 1/10 程度となる。尚、距離ゼロでの損失は変圧器や電力変換器での損失である。

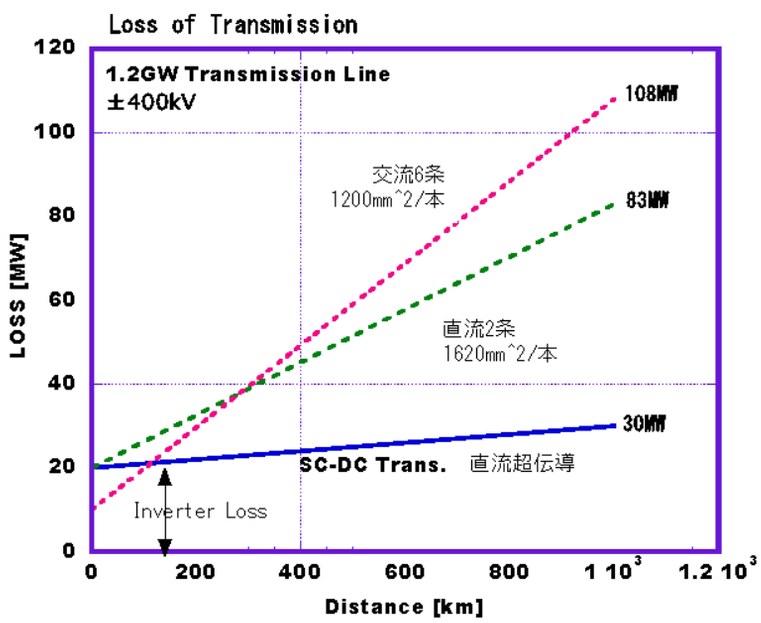


図 3-12 相交流、直流及び超伝導直流送電の損失と距離の関係

出典：文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・中部大学「低炭素化社会のための超伝導直流送配電システムの研究開発」報告書　平成 23 年度～平成 27 年度

［動向（歴史）］

1954 年に ABB（スイス）は世界で初めて HVDC（HVDC: High voltage direct current）を商用送電線に導入した。国内では 2006 年までに HVDC 技術を使った大規模なプロジェクトとして、北海道電力の系統と東北電力の系統を海底で接続する北海道・本州間電力連系設備（北本連系設備）や、中部電力と東京電力の間で 60Hz の系統と 50Hz の系統を接続する

プロジェクトなど 9 つあった。

しかしながら、日本では自励式電力変換器は直流送電系統で使われたことがなく（2016 年現在建設に入っている直流送電では利用が予定されている）、技術的には欧米だけでなく中国、韓国を追いかける立場となっている。他励式と自励式の主な違いは電力変換器（交流と直流を交互に変換できる電力機器）の回路及び利用する半導体素子にある。他励式は変換器にサイリスタなどの自己消弧ができないパワー半導体デバイスを利用する。自励式は IGBT など自己消弧機能がある素子を用いる。自励式は無効電力を供給できるため、系統安定化対策を別に設ける必要がなく、HVDC システムの全体構成を簡略化しやすい。

1980 年代までは日本が世界で一番進んでいた技術を持っていたが、主回路が 1980 年代とは大きく異なってきていて、直流送電を多端子で利用するために必要な直流遮断器の商用化も含めて諸外国と日本には大きな技術格差が存在する。このような状況を招いたのは、日本の電力機器が海外に比べて余りに高価であった側面が大きい。国内市場に広がりがなく、価格が海外に比べて著しく高価であったため、海外進出が困難となり、研究開発が進まなかった。これまでに ABB は、中国の向家ダムから上海までの 1980km の送電を直流送電で実現した。効率は 93%と高い上に、最大 7200MW もの電力を DC800kV で実証している。

一方、データセンターでは、高電圧直流配電（ここでは DC400V 程度であり、電力系統での高圧直流送電とは電圧が 3 桁以上低く、技術的には全く異なる）が実導入段階にきている。直流給電を利用することによって、電力変換器を減らすことが可能であり、これによって損失を低減すると同時に初期投資を減らすことができる。ただし、電圧が低いので、電流が極めて大きくなり、配電線の長さが短いこともあり、超伝導ケーブルを利用すると、損失の大部分は常温と定温を接続する電流リードの熱侵入量となる。したがって、ここでは電流リード端末での損失低減が実用化のための鍵を握っている。現在までに、実験で利用されている低熱侵入電流リードはペルチェ効果を利用したペルチェ電流リードのみである。他には、冷凍機の COP が低い温度では下がり、高い温度では高くなること特性があり、銅などの電気伝導率と熱伝導率の低温特性を利用した多段電流リードが提案されているが、まだ実験的な報告はない。

高温超伝導の研究は基礎・工学両面とも 1986 年の IBM チューリッヒ研究所による銅酸化物高温超伝導体の発見以降、一気に新しいフェーズに入り、新規高温超伝導体創出、新高温超伝導材料の開発に向けての研究が中心となった。その後の四半世紀の間に日本では、ビスマス系銅酸化物（1988 年）、二ホウ化マグネシウム（2001 年）、鉄ニクタイド（2008 年）など学術的にも工学的にも世界的に大いに注目される超伝導物質が発見されてきた。銅酸化物高温超伝導材料に関しては、基本特性や超伝導現象の理解などの基礎研究、長尺超伝導線の製造技術の開発、超伝導ケーブルの基本構造の開発などについて、2000 年代初頭までに大まかな輪郭が得られた。この銅酸化物高温超伝導材料の開発において日本は世界をリードし続けており、特に線材を中心に材料特性、量産性の改善がこの数年顕著である。

超伝導ケーブルに用いられる長尺高温超伝導線材として、第一世代(1G)とされているビスマス系線材（臨界温度：~110K）が住友電工社で、第二世代(2G)のイットリウム系線材（臨界温度：~90K）が米国 AMSC 社、日本のフジクラ社、古河電工社傘下の SuperPower 社で製造されており、これらがケーブル製作に用いられてきた。本格的な高温超伝導ケーブルの

試験は2001年に日本で始まり、ビスマス系超電導線は2004年に工業製品化され、超伝導ケーブルについても研究所レベルではあるが100m長さの3芯一括型ビスマス系超伝導ケーブルの実用性検証試験が実施された。米欧および中国、韓国でも実施されているが、一部を除いて変電所内や工場内でのプロジェクトであった。

2006年には米国Albany市において初めて実系統に接続する試験が行われた。日本初の実系統連係試験はNEDO「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」として、東京電力、住友電工、前川製作所が参加して、東京電力・旭変電所で2012年10月29日に長さ240mのケーブルを実系統に接続した系統連係送電が開始され、計画通り2013年12月25日まで1年以上の長期安定運転が検証された。さらに、これまでは交流ケーブル応用であったが、直流ケーブル応用開発がここ数年世界で開始された。

2013年4月より経済産業省「高温超電導直流送電システムの実証研究」（石狩プロジェクト）を開始した。千代田化工建設、住友電工、中部大学などが超電導ケーブルや超電導送電の技術を活用し、北海道石狩市の石狩湾新港地域で始まった。電気の需要地に近い変電所で直流に切り替えて、200メートル程度離れたデータセンターの敷地までと敷地内の主要配線を超電導ケーブルなどに置き換える試みが行われた。目的は、データセンター内で直流給電を行うための基本技術の獲得と高電圧大電力の長距離送電を行うための基礎になるデータを取得し、実用化のための課題を明らかにすることである。

また、ドイツ、エッセン市では現在では世界最長の1km長超伝導ケーブルの運転が2014年の4月から始められた。これは3相交流送電ケーブルが同軸3相導体を用いることと、ケーブルの中心部と周辺で冷媒の流れを逆方向にすることで冷媒循環を行っている。これは従来日本で行われてきた3芯一括型交流ケーブルに比べて導体数が半分で済むことや、冷媒循環のために別途新しく断熱2重管を準備しなくて良いので、コスト低減と断熱性能の向上につながることが大きな特長である。ただし、冷媒循環のための圧力損が長距離では大きくなるため、線路に沿ってポンプを複数導入するなどの検討が別途あり、どのようなケーブル方式が良いかは、まだ明確にはなっていない。

これらの実用化研究開発を通じて、超伝導ケーブル損失の大部分が断熱2重管の熱侵入量であることが判明してきた。そして、現状では熱侵入を下げない限り銅ケーブルなどに比べて損失が大きいことが認識されるに至っている。

一方、超伝導送電では常に低温で保持する必要があり、通電の有無に拘わらず冷凍機は電力を消費する。しかし、アルミや銅ケーブルでは通電時のみ損失が発生するため、設備利用率が半分（通電電流が半分になること）になると、損失は1/4になる。すると、超伝導を使う理由が大きく削がれる。特に、夜間など消費電力が大きく落ち込むようなシステムや太陽電池など昼間しか発電しないシステムでの利用は極めて不利になる。このため、熱侵入量はより低い目標値にする必要がある。そして、稼働率の高いシステムでの利用が超伝導ケーブルでは求められる。

関連して、長距離を細いパイプで冷媒循環するには吐出圧の高いポンプが必要になる。太いパイプを利用すれば、吐出圧は上がらないが、熱侵入量が増大する。熱侵入量の増大は冷媒循環量の増大につながり、吐出圧はその量の2乗に比例する。そして、吐出圧が高いポンプはそれ自体低温での大きな熱源になるため、損失が増大する。このため、冷媒循環のための配管での圧力損はできる限り下げる必要がある。また、断熱2重管の侵入熱量が下がり、

ポンプ吐出圧が低い長距離送電システムができたとしても,冷凍機の出口付近の温度は低く、冷凍機に戻ってくるときの温度は高くなっているため、超伝導ケーブルの臨界電流は冷凍機から遠くなると下がる。すると、超伝導ケーブルに流せる電流は冷媒温度の高い部分で決まる。例えば、80K と 70K での Bi-2223 テープ線材の臨界電流は 2 倍ほど異なる。したがって、この問題の解決には、ケーブルを導入した部分に流れる冷媒温度はあまり上がらず、冷媒循環のためのリターン部の温度が上がるようなシステムを作ると軽減できる。

2016 年に入り韓国では Y 系線材の価格が安価になり、Bi 系と同等かそれ以下になったとの報道もある。元々、Y 系線材は最終的には Bi 系に比べて安価になると言われて久しいが、ようやくその段階に到達した可能性がある。現状の臨界電流特性で、長尺テープ線材が現在の Bi 系線材の半値で作られるようになれば、今までの世界で行われた実証研究などで超伝導ケーブルは銅ケーブルより安価になる可能性が高まる。

また、日本で発見された二ホウ化マグネシウムや鉄系超伝導体はまだケーブル応用まではいってないものの、いずれも線材化までの道筋が見えてきている。二ホウ化マグネシウム線材に関しては Hypertech 社（米国）や Columbus 社（イタリア）から線材購入が可能となっており、商業化が進みつつある。一方、鉄系超伝導体は高磁場下での応用が期待されており、米国、中国、日本がそれぞれ線材化の基礎研究で熾烈な競争しており、発見時から 3～4 桁の臨界電流密度特性の向上が得られており、急速に立ち上がってきている。

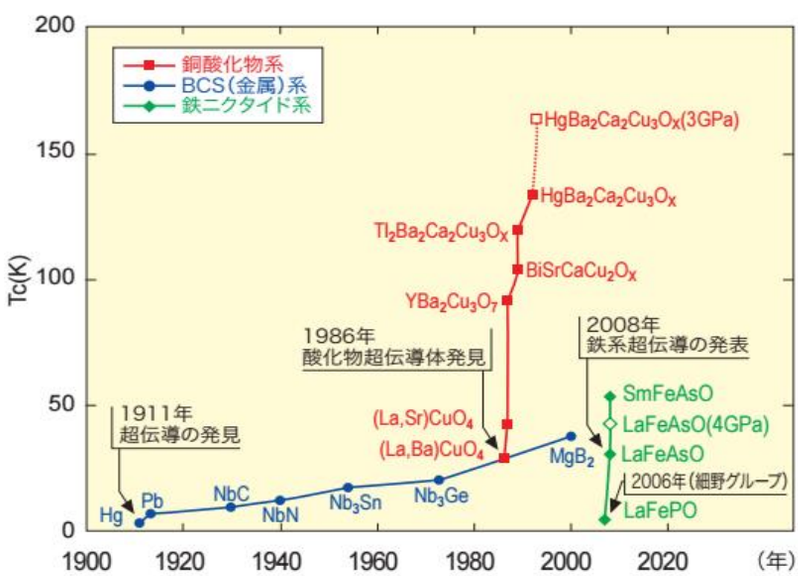


図 3-13

出典：JST 成果集 2015

一方で、超伝導現象の基本的な機構は理解されているが、臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度の決定因子については未解明な点が多く、超伝導現象の発見以後 100 年を経た今日でさえも、これらの物性を予測して新超伝導体を設計することができていない。

表 3-6

系統	物質	臨界温度	用途	備考
金属系	ニオブチタン(NbTi)	10K	現行の電磁石	
	ニオブスズ(Nb3Sn)	18K	リニア用コイル	
	二ホウ化マグネシウム	39K	MRI用超伝導磁石、限流器、極低温送電ケーブル	秋光（青学大）ら
酸化物高温超伝導体	イットリウム系（銅系）	約90K	送電ケーブル、超伝導磁石	
	ビスマス系（銅系）	約110K	送電ケーブル、超伝導磁石・ITER、電流リード	
	鉄系	55K	研究開発段階	細野（東工大）ら
その他	有機分子系、水素化物、水素等		基礎研究段階	

※液体ヘリウムの沸点は約 4K、液体窒素の沸点は 77K

（３）注目動向

［新たな技術動向］

- 直流ケーブル技術の開発が日本、米国、中国、韓国、EU、ロシアなどで進められており、石狩（計 2.5km）、サンクトペテルブルグ（2.5km）、鉄道き電線などでの直流超伝導ケーブルのプロジェクト割合が増えてきている。石狩プロジェクトでは、熱侵入量が冷媒循環往復で 1W/m 以下になったとの報告がある。また、米国や日本において、限流機能付き超伝導ケーブルの提案がなされたが、日本では実証機が作られていない。
- 数 kW～20kW 級超伝導ケーブル用の冷凍機の開発が日本やフランスで進められており、液体窒素冷却で高効率を示す冷凍機の設計・開発が進み、日本で COP=0.1 が実証された。前川製作所のターボ・ブレイトン冷凍機 COP=0.1 を到達したという 2015 年度の学会報告があることは特筆すべきことである。
- 超伝導送配電技術の航空機への応用が検討され始めた。航空機技術開発の一つの潮流として、MEA(more electric aircraft)があり、航空機での電力利用が大きくなることによって航空機の高度化と低燃費化が計れる。このために、超伝導が多用される可能性が高まっていて、EU では Airbus 社と Siemens 社の合同研究所が 2016 年に開設された。尚、この研究所の主な目標は軽量大出力超伝導モータの開発もある。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

- NEDO「高温超伝導ケーブル実証プロジェクト」において東京電力－住友電工－前川製作所による 1 年以上にわたる送電実績が得られたが、冷凍機冷却技術には課題が残った。これに対し、後継プロジェクト（2014～2016 年度）では COP=0.1 を目指した新しいブレイトンタイプの冷凍機が開発された。そして、2016 年度以降にこれを利用したケーブル実証実験が予定されている。その中では、システム全体の長期安定性、信頼性を高める試験が実系統接続の形で実施される。さらに、上記でも述べたように熱侵入量の低減の具体的な目標値が設定され、超伝導ケーブルと銅ケーブルなどとの経済性の検討が行われることになろう。

- 経済産業省プロジェクト（2014～2015 年度）：中部大学が実施してきた 200m 長直流超伝導送電試験実績をベースに、石狩新港地区にて 1000m＋500m の 2 条の直流超伝導ケーブルを設ける取組みが行われた。これは民間から提案されたプロジェクトであり、太陽電池からの直流電力をデータセンターへ給電する目標を持っている。同時に長距離送電のための課題抽出を目的にしている。2016 年度以降にも、長距離送電に向けての課題解決のために引き続き実証研究が行われる予定である。
- JST の戦略的イノベーション創出推進プログラム（S－イノベ）「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」では、鉄道総研が中心となって「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」課題が実施されている。直流区間の鉄道き電線超伝導化では現在 300m 長まで実証試験が行われたところであり、今後は長距離システムへの展開方法、鉄道電力システムの効率改善やエネルギー面での効果が検討・実証がなされた。引き続き、NEDO プロジェクトで 2016 年度から 5 年間の予定で断熱 2 重管の熱侵入量低減、循環ポンプの開発などが目標値を設定して行われる。冷媒循環の片道で 1.8W/m が 5 年後の目標値になっている。
- ドイツのエッセンで運転が始まった 1km 交流超伝導送電ケーブルシステムの運転状況・実績には、大都市域低圧交流送電の超伝導化の有効性の観点から注目が集まっている（AmpaCity プロジェクト）。これの特長は、3 相交流ケーブルが同軸 3 相ケーブルで送電され、比較的低い電圧で大電流を送電することによって、送電端でのトランスが省かれることである。ただし、2014 年から実験に入ったが、熱侵入量が大きいので、この低減のために新しい断熱 2 重管の開発が行われる予定である。尚、冷凍機は高価なため、液体窒素を真空ポンプで冷却し、循環系は熱交換器を用いて圧力を印加できるシステムを利用している。
- ドイツとオランダの TSO（Transmission System Operator, 送電会社）である Tennet 社が 2-4km の送電ケーブルプロジェクトを 2013 年から始めた。オランダの大学が協力することになっている。その他にも、ロシアの St.Petersburg プロジェクト、中国科学院のアルミ精錬直流ケーブルプロジェクト、韓国の済州島プロジェクト（500m 直流ケーブル及び 1000m 交流三相ケーブルの施設が完成し、2016 年 3 月から試験運転に入った）、オーストラリアの Queensland プロジェクト、米国 DOD 予算によるシカゴプロジェクトなどが進行している。
- 直流送電プロジェクトとしては、サウジアラビアが EU までの大規模超長距離送電施設の建設を国家プロジェクトとしたとの報道がある。また、同様な計画が北アフリカから EU への送電も非公式に政府間で行われているようである。更に、ドイツでは北海などの風力発電をドイツ南部の工業地帯に運ぶために、地中線の建設が政府から認可を受けたとのことである。架空線に比べてコスト的には 2 倍以上になるが、環境問題等から地中線が施行される。このため、技術的には必然的に直流送電になり、今後直流送電への投資は再生可能エネルギーの普及と相まって、急速に増大すると考えられる。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

- 超伝導現象の基本的な機構は理解されているが、臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度の決定因子については未解明な点が多く、これらの物性を予測して新超伝導体を設計することができていない。
- 超伝導ケーブルを作る高温超伝導線材の低コスト化が実用化のための大きな課題である。超伝導線材は金属とセラミックスの複合材料であるとともに、高価な材料が使用されており、超伝導線材の価格向上の一要因となっている。Y 系線材は Bi 系線材に比べて原理的に安価になると主張されて久しいが、（日本では）まだ Bi 系より安価なテープ線材はメーカからも供給されていない。
- 超伝導ケーブルの実用化は超伝導線材のコスト低減も大きな要因であるが、むしろ冷却技術（高い COP を持ち長寿命の冷凍機の開発、高い断熱性能の断熱 2 重管、低圧力損失の循環系、信頼性の高い循環ポンプなど）が課題である。従来の多くの断熱 2 重管はコルゲート管を利用し、MLI をテフロン・ロープなどで挟んだ構造であった。一方、MLI の断熱性能は数グラム／平米でも自重が大きく影響する結果が実験的に得られ、論文等で報告されている。したがって、従来の方法では数十キログラム／平米の圧力が印加されている構造であるため、従来までのコルゲート管方式は熱侵入量低減とは相容れない構造であるように思われる。

［今後取組むべき研究テーマ］

- 臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度の決定因子（発現機構）の解明
- 高温超伝導材料特有の課題である結晶粒界の組成的・微細組織的・電磁的特性の基礎的な理解。たとえば、ビスマス系超電導線は、Bi、Pb、Sr、Ca、Cu、O と 6 元素系で 3 つの超伝導相、10 以上の非超伝導相が出現して複雑な粒界を構成する。超伝導電流を制限している粒界の特性が十分には分かっていない。
- 超伝導物質の材料化（線材化）および既存の高温超伝導線材の低コスト化と長尺化。超低抵抗接続技術。臨界電流密度が 2 倍に上がれば価格は半分になる。また、高価な金属基材を使用しない場合はさらなる低コスト化も期待され、超伝導ケーブル全体の価格も下げることができる。システム的には、幅 4mm のテープ線材の臨界電流は既に 200A を越している。一方、端末ではこれに銅素線を半田接合することが一般的であるが、電流密度が高いため銅素線の損失及び銅素線の接続に関連する技術課題が顕在化しつつあり、送電用の線材では高い臨界電流を求めることより、低コスト及び長尺化が必要。
- 液体窒素温度領域における冷凍システムの効率向上。長期運転に対する実績や数 km 以上の長距離ケーブルの冷却の実証、断熱技術を含めた冷却技術の向上、信頼性の確保がある。
  - 断熱 2 重管の断熱性能の向上。特に、MLI の接触熱抵抗や層間での真空度の管理、真空中のガス成分管理などが性能向上の基本的な課題であり、膜の材料や製造方法も含めて学際的なテーマであり、多くの研究者の協力が必要である。日本には多層断熱膜（Multi-layer insulation、MLI）の世界的に有力なメーカがあり、質の高い MLI を得ることができる。したがって、これをどのように利用するかが研究テーマになる。
  - 断熱 2 重管は低温内管を保持するための低熱伝導率材料による支持材が必要になる。日

本では繊維会社が熱伝導率の低い非等方 FRP 材を開発しているので、再評価すべき。

- 現在の多くの超伝導ケーブルの断熱 2 重管真空は、封じきり方式である。このために、長時間のベーキングが行われている。冷凍機に比べて、真空ポンプの動力は極めて低いため（3 桁程度の違いある）、断熱性能を維持するために必要な真空維持については、どの様な方式が良いかを検討すべき。特に、ケーブル長尺化の際に大きな課題として顕在化する可能性が高い。
- 液体窒素温度領域における冷凍機の効率は理想的な効率であるカルノー効率に比べて高いもので 30%程度（COP として 0.1 程度。侵入してくる熱を冷却するため 10 倍の室温動力を必要とする）である。運転時の経済性向上のため、冷凍機の基礎的な研究を基に 40%以上を目指すことが望まれる。

- 日本では限流器（FCL）の開発がほとんど行われていない。一方、EU や中国、米国では FCL の開発が進んでいる。実証を行うための研究テーマとすべき時期に来ている。
- 多端子の直流送電を行うためには直流遮断器の開発が必要になる。特に、超伝導ケーブルが実用化されつつあるため、最適な電流電圧は従来の常伝導ケーブルとは異なってくる可能性が高い。これは電力変換器及び直流遮断器は低電圧になると、技術的にも経済的にも容易になることがあり、全面的に見直す時期に来ている。
- 現在の多くの電力網は交流系統からなっている。このため、直流送電を導入しても、必然的に部分的にならざるを得なく、その結果交直電力変換器が必要になる。そして、直流側が一般的でないため、このようなシステムは Back-to-Back とか BtoB と言われる。このため、直流送電システムの導入では既存の電力網との親和性が重要視され、系統解析の専門家が入る必要がある。

（５）政策的課題

研究者を産学から集結させ交流させる場（横断的研究組織）を設けることにより、学術分野間や基礎研究－材料開発技術間の垣根を取り除くことが重要である。別々に育まれてきた技術・知見の融合は双方の研究を加速させ、新規高機能超伝導物質の創製や、高機能超伝導材料・機器の開発につながることが期待される。

日本では ISTEC（国際高温超電導工学研究所）が 2016 年 3 月末で解散し、線材開発体制が大きく変わった（一部を産総研に承継）段階である。また、出口が見えてきそうな時点において各種プログラムの予算措置等が急激に行われなくなったために、人材不足が深刻化している。大きな予算措置だけでなく持続性ある予算および政策が措置できるかが重要な課題である。

パワエレの研究者の超伝導ケーブルの研究者が合同の研究会を作り、超伝導直流送電のための最適電流電圧のパラメータを決める作業を行い、それに沿った研究開発が望まれる。

超伝導ケーブルの大きな特長はケーブル自身が小型化されることである。しかし、短絡事故などで超伝導が敗れると、小型であるため短い時間で急激に温度上昇が生じ、破断、延焼が生じる可能性がある。この問題の解消には、安全機器の開発の他に技術に応じて規制などを見直すことも必要である。一般にケーブルが建物内に設置されたときに、建物の火事によって延焼する可能性があり、安全性を優先する時には難燃性ケーブルなどが利用されている。

一方、超伝導ケーブルは、外側被覆が金属などからできているため、非燃性ケーブルとして考えることもできる。したがって、開発の目途が立ったら政策的により安全なケーブルとして推奨することも検討課題であろう。

鉄道用超伝導ケーブルが注目を浴びているが、応用分野としては従来の電力分野を超えて進展しており、文部科学省、経済産業省にとどまらず国土交通省などの所管領域にも関係してきており、省庁間の連携が重要になる。

（６）キーワード

HVDC、電力変換器、半導体材料、直流遮断器、高温超伝導材料、超伝導ケーブル、冷却システム

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	大学や国立研究開発法人を中心に新規超伝導物質の探索、超伝導現象の理解、高温超伝導線の応用基礎物性の評価など継続して研究が進んでいる。 イットリウム系超伝導線において国プロは一旦終了したが、産総研に引き継がれるとともに大学等において性能向上が着実に実施されている。 ビスマス系線材（1G線材）、イットリウム系線材（2G線材）ともに線材作製、特性評価技術など全般的に高いレベルにあり、多くの産学の研究者がいる。一方、鉄系超伝導体の線材化はテープ線材、薄膜系線材の可能性も含めて研究が進んでいる。 ただし、大きな予算が付いたプロジェクトはなく、各大学や研究機関に任されている状態である。ISTECが解散し、大学の超伝導関連の研究室も減ってきている。
	応用研究・開発	○	→	1G線材の住友電工社、2G線材のフジクラ社はともに独自の製造技術を高めることによる性能改善に成功しており、古河電工傘下のSuperPower社では意図的にピンニングセンターを導入した長尺2G線材を開発し販売している。また、ケーブル応用ではないが、MgB2線材の開発も進んでおり、日立製作所において長尺化および量産を目指した研究が進捗している。 鉄道軌電線を除くと、今までの実験装置で研究開発を続ける状況であり、より長いケーブルを作る計画は見当たらない。
米国	基礎研究	○	→	大学を中心に超伝導線の応用基礎物性研究は継続して進められている。国立研究所としては、DOE Energy Frontier Research Centerの一つとしてCenter for Emergent Superconductivityが高温超伝導の基礎研究を続けている。 2010年頃より国からの研究費が大幅に削減されているが、企業、国立研究所にはそれまで15年間の莫大な基礎研究成果の蓄積がある。
	応用研究・開発	○	→	長尺2G線材の量産化や高機能化がAMSC、SuperPowerの2企業で進められている。 Y系線材の開発について、20以上の企業が集まって、安価なテープ線材の大量生産技術の開発が本格的に始まっている。大きなプロジェクトはまだ提案されていないが、国が主体になって進める段階から企業が開発と導入を進める段階として理解されるようになってきた。
欧州	基礎研究	○	↗	2G線材について線材性能を高めるための基礎研究は大学や国立研究所を中心に根強く続けられており、新規ピンニングセンターの導入方法の開発や、その効果に関する緻密な研究も盛んで、長尺線材開発を視野に入れたプロジェクトEUROTAPESが進行中である。概ね大学を中心としたプロジェクトが進行中であるが、長尺線材開発への展開は日米に遅れをとっている。 また、鉄系超伝導体はドイツのドレスデン大学で薄膜を中心とした研究が盛んにおこなわれている[2)]。

	応用研究・開発	◎	↗	MgB2線材についてはイタリアのColombus社においてCERNにおける加速器用超伝導ケーブルとして供給するための研究開発が進んでいる。 Y系線材の開発が進み、複数の民間企業が製造販売を開始している。また、KITが中心になり多くの民間企業があつまり、Y系線材の大量生産を行う製造技術の研究開発が進んでいる。 Ampacity Projectなどが動いている上に、送電会社などが野心的な超伝導ケーブルのプロジェクトを発表してきている。また、国内に直流送電の需要があり、一部は予算処置が取られた。
中国	基礎研究	○	↗	大学や国立研究所を中心に高温超伝導線の応用基礎特性に関する研究は継続されている。特に鉄系等における新物質探索に関しては、多くの研究者が盛んに研究を行ってきた。 一方で、1Gや2Gに見られるような実用超伝導線材の研究は活発ではなく、特性面でも日欧米等に比べてまだ十分な成果が得られていない。
	応用研究・開発	○	↗	Y系線材の開発が進み、ベンチャー企業等3社が新たに安価なY系線材の製造販売を始めている。韓国を意識し、より安価で高性能な線材を目標としている。
韓国	基礎研究	○	↗	韓国では1G線材の開発は行われておらず、2G線材が基礎研究の中心である。この他、KERIでも2G線材の研究開発が行われているが、商用生産には至っていない[3),4)]。
	応用研究・開発	◎	↗	2G線材は、SuNAM社にて商用生産されている。同社では特性向上に向けた研究開発（人工ピン導入による磁場中性能向上など）を進めるとともに、同線材を用いた応用に関する研究にも取り組んでおり、全2G線材による26TマグネットをMITとの共同研究により作製するなどの実績を上げている。 Y系線材がBi系線材より安価になったとの報告があり、国の方針と合わせて、研究開発が電力変換器も含めて検討が進んでいる。韓国電力のもっとも重要な技術開発項目の一つとして超伝導送電を取り上げている。そして、済州島では交流1km及び直流500mケーブルを電力変換器を備えて完成させ、より長いケーブルプロジェクトの検討が進んでいる。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考・引用文献

1) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書　ナノテクノロジー･材料分野（2015 年）」
2) F. Yuan, Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 065005
3) N Haberkorn,et al., Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 125007
4) Sangwon Yoon, et al., ,Supercond. Sci. Technol. 29 (2016)

3.15　パワーエレクトロニクス

（1）研究開発領域の簡潔な説明

パワー半導体デバイスをを ON/OFF することによって電力を効率良く変換･制御する研究開発領域である。パワーエレクトロニクスの研究開発は、以下の二つの分野に大別できる。一つは高効率の電力変換・制御を可能にするパワー半導体デバイス（パワーデバイス）そのものの研究である。半導体材料としては Si をはじめ、SiC、GaN、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体が対象となる。もう一つは、このパワーデバイスを使用した電力変換回路・制御機器・電動機駆動などのパワーデバイスの応用に関する研究である。パワーエレクトロニクスの応用分野は、コンピュータ電源や家電・情報機器、産業機器、鉄道・自動車・船舶・飛行機、さらに発電・送電・配電など、現代社会を支える電気エネルギーの基幹技術として、種々の分野に応用されている。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［意義］

電気エネルギーはクリーンで安全、かつ使いやすく、全エネルギー消費に対する電気エネルギーの占める割合は年々増加しつつある。日本は、高度経済成長期以降、電力消費量とあわせて電力化率を継続的に高めており、現在の約 25%から 2050 年には 50%を越えるとの予想もある。このため、電気エネルギーの変換・制御に関わる広範囲の電力・電気機器において省電力化への期待が高まっている。具体的には、太陽光発電の直流電力を交流に変換するインバータの電力損失や、電車や電気自動車のようにモーターを制御するときの電力損失を低減させることが重要であり、高効率の電力変換・スイッチング用パワー半導体デバイスの開発・普及が重要である。また、電力網の長距離化に伴う送電損失の増大を抑えるための送電電圧の高圧化が進みつつあり、パワー半導体デバイスにはより高い耐電圧、低損失（低オン抵抗）が求められている。

このような次世代パワー半導体デバイスの開発とその応用技術を確立できれば、再生可能エネルギーによる発電、電力インフラ（直流送電や系統連携）、鉄道、自動車だけでなく、工場、家電のインバータ、情報機器の電源など極めて広範囲での省電力化につながる。

［動向（歴史）］

本領域はパワー半導体デバイスの材料とデバイス構造の研究開発とパワーデバイスの電力変換回路・制御機器・電動機駆動などへの応用に関する研究といえる。1957 年に米国の General Electric 社がサイリスタの開発・実用化に成功した。1980 年代には、デバイス構造の研究が盛んになり、現在も主役である電圧駆動型のパワーMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と、続いて、IGBT（Insulated-Gate Bipolar Transistor：絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）が発明された。一般に、耐圧 600V 程度を境にして、高耐圧で低速の用途には IGBT、低耐圧や高速の用途には MOSFET というように使い分けられている。

現在普及しているパワー半導体は材料（半導体）にシリコン（Si）を用いたものであるが、Si に関しては、微細化技術の進展、ウェハ品質の向上、製造プロセスの低温化など新しい作

製プロセスの導入やデバイス構造改良（スーパージャンクション MOSFET、IGBT の世代交代など）により、性能を向上させてきた。これまで 15 年でおよそ一桁のパワー密度の向上を実現させている。Si パワーデバイスは、現在の産業競争の中心であり、特に高耐圧系は欧米と伍して優位な立場を維持している。低耐圧系に関しては、市場がディスクリートからシステム電源へ移行しており、厳しい競争に追い込まれている。

トップシェアは、インフィニオンテクノロジーズ（欧州）の 13%で、2013 年の世界市場の総売上げが 147 億ドルであるので、同社の売上げは約 19 億ドルである。次いで 2 位は三菱電機、3 位は ST マイクロエレクトロニクス（欧州）である。10 位までにルネサス、東芝、富士電機が見られる。世界の半導体全体の市場が、約 3,000 億ドル（2013 年）である（2014/6/3 WSTS ジャパンプレスリリース）ことと比較すると、半導体市場全体の約 20 分の 1 の市場に、多くの企業が参入している。

Si の材料定数の限界によるデバイス性能の限界が広く指摘されていることから、原理的に高耐圧化とスイッチのオン時の抵抗が小さい（低損失）の両立が可能な炭化シリコン（SiC）や窒化ガリウム（GaN）など禁止帯幅（バンドギャップ）の広い半導体を用いたパワー半導体の早期実用化が望まれている。これにより装置の小型化も実現する。材料そのものの性能指数で比較すると、SiC はシリコンの 440 倍、GaN は 1130 倍の性能が実現可能となる。SiC デバイスはモーター駆動などの高圧・大電流用途で有利であり、GaN デバイスはスイッチング電源などの低圧小型・高周波用途で有利である。高電圧や高温に強いという SiC、GaN のメリットは 1950 年代から認識されていたが、良質なウエハを作ることが Si と比較して難しかったため、実際にデバイスの開発が進み始めたのは 1980 年代以降である。

SiC に関しては、電力変換器に向けた SiC 製ダイオードが初めて市場に登場したのは 2001 年。着実にオン抵抗の低減などの性能向上が進められ、現在は日米欧の複数のメーカーから市販されている。ウェハでは米国 Cree 社やダウコーニング社が先行しているが、ドイツの SiCrystal や日本の新日鐵住金も量産を行っており、4 インチのウェハについては高い品質のものが世界の複数メーカーから入手可能な状況になりつつあり、一部のメーカーは 6 インチウエハの出荷も行っている。中国（台湾を含む）も新規投資により参入を始めた。SiC のショットキーバリアダイオード（SBD）は 2001 年に SiCED（現在は Infineon）で始めて商品化されて以降、着実にオン抵抗の低減などの性能向上が進められ、現在は日米欧の複数のメーカーから市販されている。2010 年には家電での最初の採用例として三菱電機が自社のエアコンの一部の機種に SiC ショットキーバリアダイオード（SBD）を採用した。モジュールの開発も活発であり、Si-IGBT と SiC-SBD と一体化した Si/SiC のハイブリッドモジュールや、縦型トレンチ構造を主構造に用いた SiC-MOSFET と SiC-SBD を一体化したフル SiC モジュールが開発・商品化されている。Cree など海外勢も SiC-MOSFET の製品化を行っているが、製品化については 2015 年ロームが SiC トレンチ MOSFET（耐圧 1200V、動作電流 100A 級）を量産開始するなど、ロームや三菱電機など日本メーカーがトップを走っている。2016 年 7 月、Infineon が Cree のパワー＆RF 部門を買収することが発表された。

富士電機は、2014 年に太陽光発電向けに SiC ダイオード（SBD）、SiC-MOSFET を採用し、昇圧回路の損失を大幅に低減させた 1MW パワーコンディショナを開発している。トヨタ自動車は、2015 年 2 月に SiC パワー素子を搭載した試作車を使って公道試験を愛知県豊

田市内で実施した。その結果、既に従来比 5%の燃費改善を確認した。2015 年 11 月に山手線新型車両に SiC が搭載され、営業運転を開始した。東海旅客鉄道（JR 東海）は、2016 年 6 月に東海道・山陽新幹線用の新型車両「N700S」を、2020 年度を目途に投入する方向で検討していると発表した。この新型車両には SiC パワーデバイスを使用した車両用電動機駆動システムを搭載して大幅な軽量化と小型化を実現し、さらなる省エネルギーを達成することを目指している。

GaN については、歴史的に GaN のバルク結晶の合成が非常に難しく、1986 年、赤崎、天野（名古屋大学）らによって、サファイア（Al_2O_3）基板上に、結晶欠陥が少なく、かつ平坦な GaN 結晶を成長させることが可能になった（GaN 結晶の成長のきっかけになる AlN の薄膜をサファイアの表面に均一に形成する。本研究にてノーベル賞を受賞）。

GaN ウェハは現在はハイドライド気相成長法で作製されており高価である。これまで自立基板材料の開発が遅れたため、サファイアや Si などの異種基板の上のヘテロエピタキシャル成長層を用いたデバイス開発が進められており、Si 基板上に成膜した GaN ヘテロ接合 FET（HEMT）でパワーデバイスを作製する GaN on Si（GaN/Si）が大きく進展している。将来的には GaN 基板を用いるホモエピタキシャル成長が望ましく、GaN 基板の成長技術の研究開発も加速している。コスト面で比較すると Si 基板が勝るため、低価格性を重視する「GaN-on-Si」と、高性能性を重視する「GaN-on-GaN」の２つの技術に２極化が始まっている。

数百ボルト級のデバイスとして米国 IR 社、EPC 社が先行して商品化を行ったが、カリフォルニア大学サンタバーバラ校発のベンチャーである Trasnphorm 社が活発に製品開発、学会でのアピールを進めており、存在感を増している。日本国内でもパナソニックをはじめとした数社が GaN/Si デバイスの商品化をアナウンスしている。また、GaN デバイスを用いた電力制御用のモジュールも一部出荷が始まっており、SiC より低耐圧の 600V 品を中心に、AC アダプター、サーバー用電源、LED 用電源、太陽光発電システム用パワーコントローラなどの製品化が検討されている。東芝ライテックは、電源回路に GaN パワー素子を適用した、ハロゲン電球形の LED 電球を開発し、2015 年 3 月に発売した

GaN パワーデバイスは現在のシリコン（Si）製品よりも高価だが、システムレベルでのコンパクト化などによりコスト削減効果は大きくなる可能性がある。

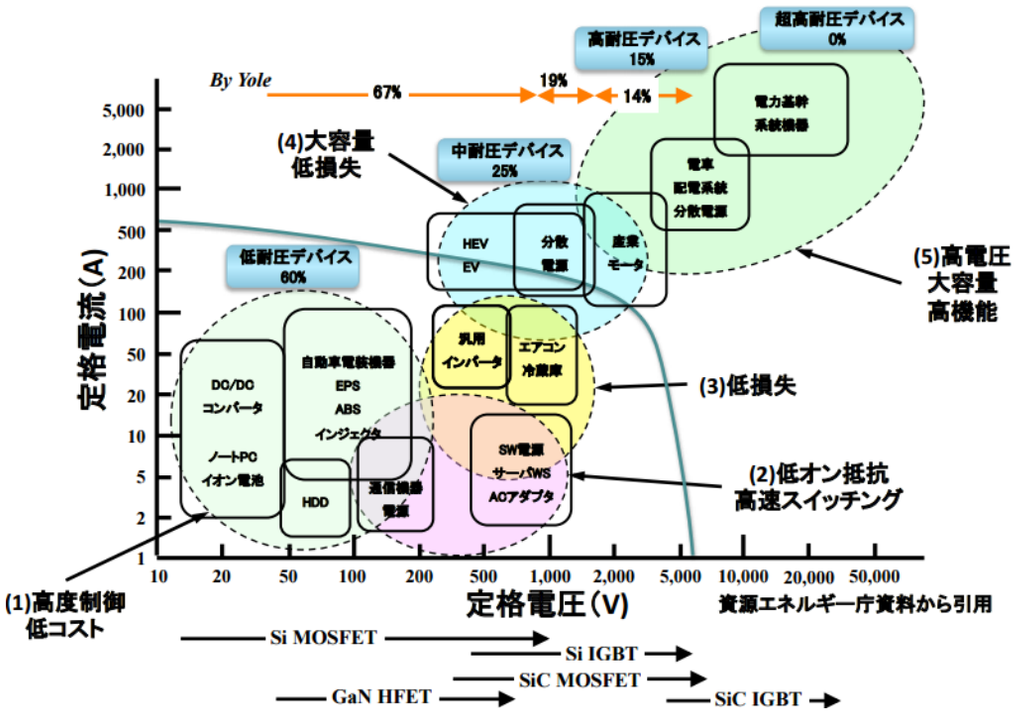


図 3-14

出典：奥村元（産総研）NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2013　資料

（３）注目動向

［新たな技術動向］

SiC 基板については、従来の昇華法による基板作製技術に対して、成長速度の高速が可能となりうる高速 CVD 法の報告が始まっている。

SiC-MOSFET を使用した電力変換回路における新たな技術動向としては、同期整流の積極的な活用である。半導体材料には関係なく、MOSFET 構造のパワーデバイスに適用できる技術である。コンピュータ電源やスイッチング電源などには、従来から Si-MOSFET に同期整流を活用してきた実績がある。一方、中高圧の電力変換器に使用する Si-IGBT は、そのデバイス構造から同期整流を活用することは不可能であった。これに対して SiC-MOSFET に同期整流を活用すると、SiC-SBD が不要となる。その結果、SiC-MOSFET モジュールのコスト低減に貢献するだけでなく、モジュールを小型化できる。2016 年 7 月に東工大と三菱電機の共同研究チームが 1.2-kV 400-A SiC-MOSFET モジュール(SBD なし)を使用した 750Vdc,100kW,20kHz 双方向絶縁型 DC-DC コンバータの実証試験結果を電気学会論文誌Dに発表した。SiC-MOSFET の寄生ダイオードの長期信頼性については今後の研究課題である。

GaN ウェハはアモノサーマル法や Na フラックス法など低価格で作製できる技術の開発も進みつつあり、SiC パワーデバイスのように同種基板上に縦型パワーデバイスを作製できる可能性もある。縦型 MOSFET の特性向上のため、絶縁膜/半導体界面特性の向上を目指したゲート絶縁膜の材料検討、堆積方法の改良、界面特性評価に関する報告が増えている。

安価な大口径 Si 基板を使う技術と、性能向上を狙って低欠陥密度の GaN 基板を使う技術

の２極化が進んでいる。なかでも、米国ベンチャーにより GaN 基板上の高耐圧縦型デバイスの研究成果が活発に行われ、耐圧とオン抵抗の相関特性において、理論限界を超える性能が報告されており注目されている。

ダイヤモンドは優れた熱伝導性と大きなバンドギャップを有する半導体であり、パワーデバイスとして魅力的な特性を有する。日本にはダイヤモンドの CVD 合成の先導的な研究、リンによるｎ型ドーピングなど当該分野での画期的な先行研究があり、そのドーピング技術を用いてダイオードやジャンクション FET（JFET)、バイポーラトランジスタ（BJT)、金属半導体接合 FET（MESFET）などの通常の半導体のデバイス構造の検討も進められている。また、最近では MOSFET の実証なども報告されている。

酸化ガリウム（Ga_2O_3）のパワーデバイス応用の研究が始まっている。Ga_2O_3 は比較的容易に大型結晶が作製可能で、ｎ型ドーピングが可能である。無色透明で電気伝導に優れていることから GaNLED 用の基板として注目を集めていたが、Ga_2O_3 自体を半導体デバイスに使う試みが数年前から試みられるようになってきており、ショットキーダイオードや MESFET などの試作が行われている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

- 米国
  - 次世代パワーエレクトロニクスのコンソーシアムが形成され、材料、デバイス、実装、回路、システム、応用の総合的な研究開発が進められつつある。一つは Power America (The Next Generation Power Electronics Manufacturing Innovation Institute）で、DOE の支援の下、SiC と GaN を対象としている。もう一つは New York Power Electronics Manufacturing Consortium で、SiC を対象としている。これらは、産業創出、社会実装を念頭に産学連携で計画されている。
  - APRA-E では、ADEPT（Agile Delivery of Electrical Power Technology）に加え、SWITCHES（Strategies for Wide-Bandgap Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems）が始まり、SiC、GaN、ダイヤモンドなどのパワー半導体研究に投資がなされている。DARPA の NEXT プログラムでは、GaN の高周波パワーデバイス研究が進行している。
  - North Carolina State University では、2008 年から NSF(National Science Fundation) の支援と民間企業を巻き込んで FREEDM(Future Renewable Electric Energy Delivery and Management) Systems Center を立ち上げた。SiC パワーデバイスの幅広い応用研究を行っている。特に米国の Cree 社の支援を受け、高圧(10kV 以上)の SiC-MOSFET や SiC-IGBT を実際に使用したパワーエレクトロニクス機器の基礎研究に注力している。
- 欧州
  - ENIAC 共同事業（JU）の中で、産学のコンソーシアムである EPPL（Enhanced Power Pilot Line）や EPT300（Enabling Power Technologies on 300mm wafers）などが進められた。前者は、300mm ウェハに基づく次世代のパワー半導体の開発パイロットラインの製造を目的として、インフィニオンテクノロジーズが幹事となり、2013~2016 に実施されてきた。
  - PowerBase はインフィニオンテクノロジーズが幹事となり、2015 年から開始。GaN を

対象としている。

- 他にもデバイス、回路、パッケージ、評価技術などの要素技術ごとに国家間と産学にまたがる横断的なプロジェクトとして、SiC パワーデバイスのプロジェクト SPEED（Silicon Carbide Power Electronics Technology for Energy Efficient Devices：2014-2017）など多数のプロジェクトが進められてきている。

● アジア

台湾が SiC に関して結晶からパワーデバイスまで一貫した研究開発を活発化させている。韓国や中国と異なり、台湾には Si パワーデバイスファブの経験、産業があるので、今後急速に立ち上がる可能性がある。一方、パワーエレクトロニクスの応用研究は、小型スイッチング電源分野では関連企業がビジネスを展開しているが、中大容量パワーエレクトロニクス機器の分野では関連企業がほとんどなく低調である。同様に大学研究者ついても限られている。

● 日本

- つくばイノベーションアリーナ（TIA-nano）の 6 つのコア研究領域の一つとしてパワーエレクトロニクスが位置づけられている。また、2012 年 4 月に産総研と産業界と共同でパワーエレクトロニクス・オープンイノベーションの推進に向けた民活型の共同研究体「つくばパワーエレクトロニクス・コンステレーションズ（TPEC）」が設立されて活発な活動が行われている。
- 2014 年度から戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「次世代パワーエレクトロニクス」が開始され、SiC、GaN、酸化ガリウム、ダイヤモンドについて、基板育成、エピタキシャル成長、デバイス、回路モジュール、パッケージ、熱設計などの広範囲な技術開発に関する産学連携プロジェクトが進められている。国内の 9 大学が参画している。国内企業から SiC-MOSFET のサンプル供給を受けながら、本格的に応用研究を開始した。
- NEDO では、2014 年から「次世代パワーエレクトロニクス技術開発プロジェクト」を実施し、Si パワー半導体のその競争力維持を念頭に、産学連携で新世代 Si-IGBT 用高品質・量産化を目指したウェハの新しい技術開発が始まった。
- JST のスーパークラスタープログラム（2013 年～）の中で、京都地区および愛知地区をコアクラスターとした地域を越えた連携が図られ、SiC デバイスおよび GaN デバイスの研究開発が行われている。
- 平成 28 年度より、文部科学省では「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」がスタート。窒化ガリウム（GaN）について、結晶（名古屋大学）を中心に、評価技術（NIMS）、パワーデバイス（名古屋大学）の 3 拠点で産官学の連携による研究開発を推進。

（4）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

● SiC はデバイス製品が上市されているため、基礎研究は終了したと思われがちであるが、MOS 界面をはじめ未解明の点が多々ある。現状は一部の特性を犠牲にして製品化を行っている状況である。

● SiC-MOSFET は同一電圧・電流の Si-IGBT と比較して、高速スイッチングが可能であり、

かつターンオフ時にはテール電流を発生しないので、スイッチング損失を大幅に低減できる。応用分野は家電製品から産業・交通・電力などその電圧・電流定格、駆動周波数も多岐にわたっている。しかし、ターンオフ時の電圧上昇率が 10-20kV/μs(Si-IGBT の 3～6 倍)であり、サージ電圧を抑制できるインバータ実装技術が課題となる。さらに高 dv/dt に起因する電動機からの漏洩電流や電磁ノイズの対策など、パワーエレクトロニクスのシステムレベルでの研究開発も急務である。

- 自立 GaN 基板については、２インチ径程度の基板が少量生産されているが、まだ欠陥密度が高いため、結晶欠陥が少なく、高品質かつ大口径の窒化ガリウム基板が必須であり、量産性を含めた基礎研究が必要である。

［今後取組むべき研究テーマ］

- SiC、GaN などワイドギャップ半導体ウェハの高品質化、大口径化や、デバイス構造の最適化、信頼性の高いデバイス作製プロセスの開発、高精度の熱設計・パワーマネージメント、周辺回路部品の開発などワイドバンドギャップの特性を活かした新機能装置を念頭に総合的な研究開発を加速していくことが必要である。
- 基礎物性の面では、いずれのワイドギャップ半導体も結晶の転位と欠陥の制御、表面・界面における課題が多く、過去の Si や GaAs 等で培われた結晶成長技術、表面・界面制御の知見や施策に学び、研究を進める必要がある。
- ダイヤモンドや Ga_2O_3 などの新規パワー半導体材料は、材料作製技術と合わせて、材料・電子物性評価、およびその応用を見据えた基礎基盤研究を進めていくことが重要である。世界に先駆けてウェハの高品質化、ドーピング制御、コンタクト、表面・界面制御などの基本課題へ取り組み、大面積化を可能にする製造技術・加工技術、絶対耐圧を出すためのデバイス技術などの研究開発を進めていく必要がある。
- 周辺技術（小型・高性能トランス、耐熱コンデンサ、配線、パッケージ、実装技術、新規回路設計、システム設計）の研究開発も今後必要不可欠である。例えば、高温動作に対応できる部品（コンデンサ、コイルなど）、放熱性に優れ、かつ寄生インダクタンスを低減した新構造モジュール・ディスクリートパッケージなどを、材料研究者と実装・回路研究者が協力しながら原点に立ち戻った研究も行う必要がある。
- 付加価値を高め世界をリードできるように、インバータ実装技術、回路・制御技術、システム技術においても強化する必要がある。特にパワーエレクトロニクス回路・制御の大学研究者と電気電子工学の他分野の大学研究者あるいは企業の研究者・技術者との共同研究を積極的に推進し、新規のパワーエレクトロニクス応用分野を世界に先駆けて開拓することも必要である。

（５）政策的課題

パワーデバイスは LSI 技術とは異なり、用途により扱うべきパワー・周波数などが多岐にわたる。パワー半導体自体も、材料・電子物性において各々が固有の特性を有している。また、産業競争・市場が、これまでのディスクリート半導体から装置・システムへの転換が進んでおり、日本においても、応用分野（家電、電気自動車、鉄道、電力インフラ）を念頭に

適切な研究開発を進める必要がある。次世代のパワーデバイスの研究開発では、産業界が直面する課題の認識が重要であり、大学の研究においても実用化に向けた技術間のトレードオフ関係を考慮した取り組みをさせるような産学連携の形態を模索する必要がある。欧州の拠点大学は企業との共同研究を積極的に行っている。ドイツの工学部教授には５年以上の企業経験が必要であり、出身企業との共同研究は当然のことながらやりやすい。

パワーエレクトロニクス応用の研究開発には、電気電子工学の幅広い知識が必要となる。具体的には、回路が基本となるが、電磁気や制御の知識、さらに最新の A/D 変換器、DSP、FPGA などのアナログ・ディジタル信号処理の知識も必要である。モーター駆動の研究開発にはモーターや磁性材料の知識が、電力系統のパワーエレクトロニクス機器の開発には電力系統の知識も必要で、パワーデバイスを使いこなすためには半導体の知識も必要となる。このため大学や企業での人材育成には時間を要する。しかし、パワーエレクトロニクス応用の研究指導ができる大学教員が少ない。その結果、理論から実験まできちんと教育を受けた大学院学生数は企業の求人数よりもはるかに少なく、需要と供給がアンバランスな状態が続いている。このように、次世代パワーエレクトロニクスを担う人材が圧倒的に不足している現実があることから、広い知識と高度な経験を積んだ学生・研究者・技術者を社会に輩出することは極めて重要であり、研究の担い手であるポスドクを含む博士研究員の役割を再認識し、国のプロジェクトでの彼らの雇用を奨励し、プロジェクト終了後には産業界への円滑な移行を促進するなどの仕組みの検討も必要である。

（６）キーワード

電力変換、パワーエレクトロニクス、パワー半導体デバイス、IGBT、MOSFET、SBD、HEMT、HBT、ワイドギャップ半導体、炭化珪素、SiC、窒化ガリウム、GaN、ダイヤモンド、酸化ガリウム、Ga_2O_3、高効率インバータ、高周波インバータ、超高圧送電、HVDC

（７）国際比較

ここでは、材料・デバイスに関する研究を「基礎研究」、その応用（回路、機器、制御）に関する研究を「応用・研究開発」として下記を記す。

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	◎	→	SiCとGaNの研究開発は裾野が広がっている。主要学術誌に掲載された研究機関は34機関（大学：20、国公立研究機関：3、メーカ：11）であり、特に企業が増えてきている。SIPでは、SiCは超高耐圧SiC-IGBTやSiCスーパージャンクションの基礎研究が進められている。GaNに関してはGaN縦型パワーデバイスの基礎研究が進められており、GaN基板の欠陥密度低減やGaN縦型パワーデバイスの基礎研究が進展している。またダイヤモンド、Ga_2O_3などの次々世代パワー半導体材料・デバイス開発も本格化してきた。
	応用研究・開発	◎	↗	SIP/次世代パワーエレクトロニクスが2014年度から立ち上がり、SiC-MOSFETの応用研究の成果が出始めてきている。日本は伝統的に家電、産業機器、自動車・鉄道・電力へのパワーエレクトロニクス応用が強い。特に日本には新幹線と在来線があり、鉄道（電車）は省エネにつながる小型・軽量化の要求が常にある。モータ駆動用インバータが複数台あり、電車は基本的に冗長システムである。このため、SiC-MOSFETなどの新技術の導入がやり易い。さらに自動車業界もSiC-MOSFETの事業化を見据えて研究開発を活発に行っている。

米国	基礎研究	◎	→	多数の大学にパワーエレクトロニクス研究センターが次々と設立されており、Si、ワイドギャップ半導体パワーデバイスを利用したさまざまなパワエレ技術の研究開発を企業も巻き込んで非常に活発に展開している。特に新構造、新発想のデバイスは他国よりも多い。研究資金はNaval Res.、DARPA、DOD、DOEなどから豊富な資金が提供されている。低耐圧系は極限までの集積化パワーチップ、高耐圧系はワイドバンドギャップ半導体投入による高周波集積化と、応用に対する技術開発ターゲットを明確に分けている。さらに、周辺技術となる受動部品、高温実装技術なども包括的に進められている。
	応用研究・開発	◎	→	ヴァージニア工科大学のCPES(Center for Power Electronics)やノースキャロライナ州立大学のFREEDMなどNSFからの支援を受け、パワーエレクトロニクスの応用研究を推進している。コンピュータ電源や通信機器電源などの分野の研究は伝統的に強いが、大学での高圧SiC-MOSFETの応用研究は、関連企業が少ないこともあり、日本よりも低調である。しかし、低圧GaNパワーデバイスの応用研究については、日本よりも大学の研究者数が多く、論文発表数も多い。 SiC関しては軍と企業が製品開発を進めている。GaNに関しては、実用化に向けて縦型MOSFET、縦型Diodeの開発が加速しており優れた特性を得ている。ベンチャー企業はもとより、コンソーシアムにおいて実デバイス・実パワーICの試作を行うなど、開発ベースの研究が進行している。
欧州	基礎研究	◎	↗	欧州全体のプロジェクトとして、材料からデバイスプロセス、実装、応用など垂直統合的に研究が進められている。国の研究機関が活発な研究を行っていることが特色と言える。特にSiおよびGaNに関して大きくプロジェクトが展開している。GaNバッファ層の品質やトラップとの関係などの研究を積極的に進めている。IMECなどはGaN横型パワーデバイスの研究を活発に行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	Infineon、STMicroなどがSiCパワーデバイスを活発に研究開発している。InfineonはCreeのSiCパワーデバイス部門を買収し、GaN-on-Siと合わせて全方位的な展開。 ABBやジーメンスなどの欧州企業は直流送電や大規模風力発電に関連したパワーエレクトロニクス応用が伝統的に強い。しかし、10年先を見据えた共同研究は必ずしも多くはない。約10年前にＡＢＢはSiCパワーデバイスの研究開発から撤退したが、2年前から再開した。大学や企業でもSiC-MOSFETの応用研究が始まっている。日本にとっては、米国以上に手ごわいライバルである。
中国	基礎研究	○	→	欧米からの研究者招聘、大学の重点化・拠点化整備を進めている。GaNに関しては、欧州研究機関で連携して信頼性を向上させるプロジェクトが始まり、ストレス試験、熱解析など幅広い研究が行われている。香港科学技術大学は以前からGaN横型HEMTに関しては世界トップレベルの研究を展開している。また、大学にて実デバイス試作が可能になってきている。
	応用研究・開発	△	↗	最近、中国政府は国策としてパワー半導体を重点項目に掲げている。パワーデバイスとそれを使用したパワーエレクトロニクス回路・制御・応用の研究に積極的に資金を投入している。しかし、実用化・事業化にはSiC-MOSFETモジュールの開発・製品化だけでは不十分である。具体的には受動部品（コンデンサ、変圧器、リアクトル）やアナログ・ディジタル信号処理技術、センサー技術などすべてが揃わない限り、世界最高性能のパワーエレクトロニクス機器・システムを製品化することはできない。しかし、10年度後には手ごわいライバルになる可能性もある。
韓国	基礎研究	△	→	しばらくSiCに関して国プロが進行していたが、昨今の経済状況の悪化のためか、国際学会などにおいても、発表件数が低迷している。大学や国立研でGaN横型HEMTに関する研究はあるが、発展途上である。SiCやGaN縦型パワーデバイスに研究は少ない。
	応用研究・開発	△	→	大学を中心にパワーエレクトロニクスの応用研究を行っている。しかし、日・米・欧の研究成果の追試や軽微な改良に関する論文がほとんどであり、先駆的・独創的な論文は極めて少ない。最新のSiC-MOSFETなどを使用したパワーエレクトロニクス機器の論文発表も少ない。中大容量パワーエレクトロニクス機器・システムを事業化している企業は少なく、当面は日本の脅威とはならないであろう。しかし、Samsung Electronics社は、最近GaNパワー半導体の研究開発に力を入れはじめている他、ローコスト・ローテクの一部のパワーエレクトロニクス製品に関しては、中国企業と韓国企業の動向も注視する必要がある。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

- JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー･材料分野（2015 年）」
- 特許庁「平成 26 年度 特許出願技術動向調査報告書（概要）パワー半導体デバイス」平成 27 年 3 月

3.16　蓄電デバイス

（1）研究開発領域の簡潔な説明

電気エネルギーを必要なときに蓄え、必要なときに取り出すデバイス・システムについての研究開発領域。自動車・輸送機器用（大型×移動型）、スマートグリッド・EMS 用（大型×定置型）、ユビキタス・モバイル機器用（小型×移動型）があり、それぞれに求められる機能・性能は異なる。

蓄電池術としては他にフライホイール電力貯蔵、超伝導電力貯蔵などの物理的蓄電技術の開発も進められているが、以下では、化学反応を利用して蓄電するリチウムイオン電池、金属-空気電池等のポストリチウムイオン電池、NAS 電池やレドックスフローなどの大規模定置型電池、およびスーパーキャパシタ（イオンの表面吸着反応を利用する電気化学キャパシタ）について取り上げる。

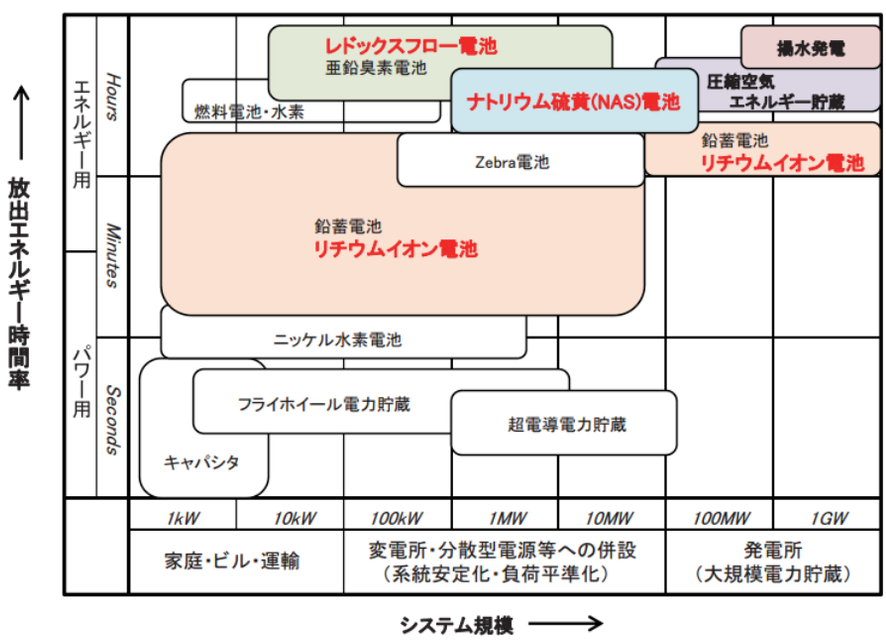


図 3-15

出典：科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター
「科学技術動向 2014 年 3・4 月号（143 号）」

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

蓄電池やスーパーキャパシタは、エレクトロニクス用などの民生用途のみならず、環境保全・地球温暖化対策としての電気自動車用途にむけて市場が急速に拡大しつつあり、高信頼性、高耐久性、高入出力特性など要求される性能が上がり、技術開発競争が世界で激化している。また太陽光や風力など気象により変動する再生可能エネルギーの最大限の活用に向け、変動の吸収緩和、出力が一定となる制御、あるいは需要側での変動緩和やピークシフトの目的から大容量の定置用蓄電デバイスのニーズも顕在化してきている。

化石燃料などの化学エネルギーは安定で、貯蔵・輸送が容易であるが、電力は電気のまま

貯蔵することが難しく、経済性も含めたシステムの構築が課題となっている。現状では、普及拡大のためには、コストの低減や性能・安全性の向上など多くの研究開発課題がある。

1990 年代に、携帯電話、ノートパソコン、デジカメなどに代表される小型電子機器が急速に普及したが、その立役者の一つが 1990 年に世界で初めて、松下電池工業、三洋電機が相次いで量産化したニッケル水素電池である。ニッケル水素電池を越えるエネルギー密度を持つ電池として登場したリチウムイオン電池は、1991 年にソニー・エナジー・テックが世界で初めて量産化した（電池工業会 web）。これは 1980 年に J.B.Goodenough と水島（現、東芝）らがリチウムイオンを吸蔵する遷移金属酸リチウムを電池の正極に使用することを提案し、その後 1983 年、吉野（旭化成）らが、正極にコバルト酸リチウム、負極にポリアセチレンという電池を試作し、「リチウムイオン電池」の原型が誕生したことに端を発する。

従来の鉛畜電池のエネルギー密度は 30Wh/kg 程度、トヨタ自動車の「プリウス」が最初に採用したニッケル水素蓄電池でも 80Wh/kg 程度である。実用化されたリチウムイオン電池は、負極に炭素系材料、正極にリチウムを含有する複合酸化物（コバルト酸リチウム、マンガン酸リチウム、ニッケル酸リチウムやコバルト・ニッケル・マンガン酸リチウム、リン酸鉄リチウムなど）、電解質に低分子有機溶媒を使った二次電池で、軽くて高容量の活物質の組み合わせを使うことと、単セル当たりの電圧がニッケル水素電池の 3 倍に当たる 3.6V と高いことから、150Wh/kg～200Wh/kg という非常に高い質量エネルギー密度を実現し、定置用や電気自動車用に使用されている。

今後、コスト面や技術面でのさらなる競争が激化するが、市販のリチウムイオン電池は現状の活物質の組み合わせで得られるエネルギー密度の限界に達しており、新しい材料の採用により高エネルギー密度化を測る必要がある。一方で、リチウムイオン電池はエネルギー密度が高い上に、可燃性の電解液を使用しているので、高温環境では冷却機構が必要となる他、過充電や短絡時には大きなエネルギーが放出され発火や破裂などの異常を起こす危険がある。

本格的な電気自動車の普及を目指したエネルギー密度の目標値として、ガソリン車の航続距離に匹敵する 700Wh/kg が示されており（経済産業省 2006 年「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」）、現行のリチウムイオン電池の延長線上の技術では原理的に達成不可能である。次世代の蓄電デバイスでは、現状リチウムイオン電池より大きなエネルギー密度が求められる。そのため、世界各国で、次世代の革新的な電池反応機構の創製、高性能電極材料の発見を目指した基礎研究および応用研究への投資が著しく増大している。リチウムイオン電池の理論的限界を目指す次世代リチウムイオン電池（エネルギー密度 250～300Wh/kg）の開発や、全固体電池、リチウム・空気電池、リチウム・硫黄電池、多価イオン電池などのポストリチウムイオン電池（エネルギー密度>500Wh/kg、革新型蓄電池とも呼ばれる）の開発が進められている。

- リチウムイオン電池
  理想的な電極は、より多くのリチウムイオン（高い容量）をできるだけ高速で（大電流で）挿入脱離でき、サイクルによる容量劣化が少ない物質で、正極は電極電位が高い物質、負極は逆に電極電位が低い物質が求められている。負極材料および正極材料に関する研究が活発である。
- 全固体型電池

過熱による変形や膨張、発火事故の解決手段として、電解液に匹敵するイオン伝導性をもつ固体電解質の開発が期待されている。固体電解質材料としては酸化物系、硫化物系、高分子系に大別される。硫化物系は有機電解液系で生ずる多硫化リチウムの溶解が起こらないため、Li-S 電池の有力電池系として検討されている。近年有機電解液とほぼ同等のイオン伝導特性を示す固体電解質 $Li_{10}GeP_2S_{12}$（LGPS＝リチウム・ゲルマニウム・リン・硫黄）も東工大、トヨタ自動車らによって発見されている。有機電解液を含むゲル高分子電解質についてはすでに 1999 年よりリチウムポリマー電池として実用化されており、有機電解液を含まない純高分子電解質に関しても研究が進められている。

- 金属-空気電池

正極として空気中の酸素を使うリチウム-空気電池に関する研究は、エーテル系電解液が適用された 2012 年以降、空気極の特性が大きく改善し、世界的な広がりを見せている。学界のみならず、トヨタ、ホンダ、現代、BMW 等の大手自動車メーカーも研究を進めている。後述の NEDO-RISING プロジェクトでは亜鉛を負極とした水溶液系亜鉛－空気電池の開発が進められている。

- リチウム-硫黄電池

硫黄は、放電電位が Li 金属基準で約 2V と層状酸化物系に比べると低いが、1675mAhg^{-1} の極めて高い比容量を持ち、ポスト LIB の正極として検討されている。有機電解液を用いると硫黄の還元生成物の溶解が起こるため、無機固体電解質、ポリマー電解質を用いる研究が進められている。

- 多価カチオン電池

Li の酸化還元は 1 電子反応であるが、多価のカチオンを用いた酸化還元は多電子反応が期待でき、高容量化のアプローチの一つとして検討されている。例えば、マグネシウム金属極は、比較的低い酸化還元電位（+0.68Vvs.Li+/Li）を示し、2 電子移動により、2.21Ahg^{-1}、3.83Ah cm^{-3} の高容量が期待できる。しかも、マグネシウムは資源的に豊富であり、その化合物の多くは毒性を示さない。アルミニウムやカルシウムを負極として用いる電池の開発も進められている。

定置用（電力用）蓄電池では、耐用年数、リサイクル性、コスト、容量が重視される。容量としては、数百 kWh 以上（平均的な戸建て住宅での使用電力量が 12kWh/日程度、ビル・商業施設では数百 kWh から数 MWh）の大規模なものが必要となる。

ナトリウム硫黄電池（NAS）は、正極に硫黄、負極にナトリウム、電解液に固体電解質のβアルミナを用いており、日本ガイシが実用化した MWh 級の蓄電池で、負荷平準化、出力安定化、バックアップ電源としての利用が進んでいる。瞬時の応答速度が速いなどの利点があり、資源的には豊富で量産によるコスト低減の見込みが高いといえる。しかし、運転時に 300℃程度を保持する必要がある点や、硫黄と金属ナトリウムを活物質として用いているため一度出火すると消火が困難である点など課題もある。

レドックスフロー電池は、1974 年、NASA が基本原理を発表したことに端を発する。現行の主な形態は正極、負極電解液にバナジウムイオンを含む硫酸水溶液を利用したもので、正極と負極との間に隔膜を介在させた電池セルに外部タンクから正極電解液及び負極電解液をそれぞれ供給して充放電を行う。この外部タンクに入った液体にエネルギーを貯蔵する二

次電池である。日本では住友電工が主体となって開発している。主な特徴として、充放電サイクルの寿命が 1 万回以上と非常に長い、ミリ秒単位での瞬時応答性が可能で、短時間であれば設計の数倍の瞬時出力が可能である、常温動作で劣化が少ない、安全性が高いとされる。一方で、エネルギー密度が低く、電解液の循環のためにポンプが必要で、大型化せざるを得ないなどの課題もある。海外では、ここ数年で研究報告が著しく増加しており、特に、米国では 2009 年頃から複数の研究開発プロジェクトが立ち上がり、近年、その成果が表れてきている。

経済産業省では、北海道電力南早来変電所にレドックスフロー電池（出力 15MW/容量 60MWh）を、東北電力西仙台変電所にリチウムイオン電池（40MW/20MWh、東芝）を 2014 年度末までに配備し、その後 3 年間で系統安定化の実証試験を実施。また環境省では、再生可能エネルギーの拡大のために、蓄電池（リチウムイオン、NAS など）を用いた太陽光や風力発電の変動を吸収する実証事業を、東北や九州の離島など全国 8 地域で、2014 年度から 4 年間で実施している。

その他、系統用電力貯蔵システムは、国内では主力である揚水発電と海外で実績のある圧縮空気貯蔵も実用化されている。

蓄電デバイスは、従来、日本の産業界が強い分野であったが、韓国、中国勢の急速な台頭、米国でのベンチャー企業による新たなビジネスモデルなどによって猛追されている。リチウムイオン電池の世界シェアはこれまで、エレクトロニクス用途において、パナソニック、ソニー等が強かったが、2012 年以降には韓国勢にシェアトップの座を譲っている。今後、蓄電池としては車載用、電力用が急激に市場拡大すると見込まれている。車載用はこれからの市場であるが、現時点ではパナソニック、オートモーティブエナジーサプライ（日産、NEC）、リチウムエナジージャパン（三菱商事、三菱自動車、GS ユアサ）が存在感を見せている。

Bloomberg New Energy Finance によれば、リチウムイオン電池の価格は 2014 年前期に kWh 当たり 540 ドルになり、2 年前の同期と比べて 20%低下、1000 ドル前後であった 2010 年と比べるとほぼ半額になった。再生可能エネルギーの導入拡大等に伴う、電力系統の安定化を図る場合、現状では、蓄電池と揚水発電を比較すると、導入コストベースで比較した場合、揚水発電は約 2.3 万円/kWh、NAS 電池で約 4 万円/kWh、鉛蓄電池が約 5 万円/kWh、ニッケル水素電池で約 10 万円/kWh、リチウムイオン電池で約 20 万円/kWh とコスト差がある。また、寿命（耐用年数）は、揚水発電が約 60 年である一方、NAS 電池が約 15 年、鉛蓄電池が約 17 年、ニッケル水素電池が約 5～7 年、リチウムイオン電池が約 6～10 年である。

スーパーキャパシタは、容量の点では蓄電池にはかなわないものの急速充放電が可能である等の特徴を有しているため、メモリのバックアップ用やハイブリッド自動車等の補助電源等に用いられている。例えば、2011 年にマツダは乗用車用として世界で初めて、電力供給用の蓄電機としてキャパシタを採用した減速エネルギー回生システム i-ELOOP を開発している。大容量化して太陽光発電や風力発電にスーパーキャパシタを組み合わせた蓄電システムが開発されており、今後も大容量スーパーキャパシタ市場の急速な拡大が期待されている。日本国内では 1970 年代後半に電気二重層キャパシタ（EDLC）が製品化され、1990 年代に各種家電に採用が始まり、2000 年代以降には携帯電話やデジタルカメラにも使われるようになった。EDLC は、電極（正極、負極ともに活性炭が一般的）の表面にイオンが近づいてできる電気二重層を電荷蓄積に利用するもので、極めて充放電が速い（入出力密度が高い）が、

エネルギー密度が低い。そこで、2 つの電極のいずれか 1 つが電気二重層を使用し、もう一方の電極が酸化還元反応を使用したハイブリッドキャパシタという概念が出て来た。リチウムイオンキャパシタは、EDLC の負極を置き換えたハイブリッド構造の蓄電部品であり、出力密度や充放電の繰り返し可能回数をリチウムイオン電池に対しケタ違いに改善し、エネルギー密度を電気二重層キャパシタの数倍に高めた。現状は、リチウムイオンキャパシタ（LIC）などの、正極（または負極）活物質にキャパシタ反応、負極（または正極）に電池反応を利用したハイブリッドキャパシタの高電圧、高エネルギー密度化に向けた研究開発が活発化している。正負極の様々な組み合わせや電解質が検討され、1000~2000F（定格電圧 3.8V）、10Wh/kg（20Wh/L）の実用セルが製品化されている。日本では、JM エナジー(JSR グループ)、太陽誘電（太陽誘電エナジーデバイス）、FDK リチウムイオンキャパシタ、日立化成、日本ケミコン、フジクラ、岡谷電機産業などがリチウムイオンキャパシタを販売または開発中である。

高速反応チタン酸リチウム負極、低抵抗アルギン酸ゲル電解質、高効率リチウムプレドープ手法やプレドープカーボンの材料・プロセス開発について東京農工大学、関西大学、山口大学、信州大学などが研究を進めている。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

- リチウムイオン電池

負極では Si に関する研究が多く（理論容量が黒鉛の約 10 倍）、充放電の可逆性向上に向けた研究が行われている他、より実用に近い SiO（Si ナノ粒子を SiO_2 マトリックス中に分散した材料）や Si-炭素複合体などを用いた負極開発が進められている。また、Li 金属に関する研究も進展しており、今後 1500mAhg^{-1} を超える容量を有する負極が開発されるとの予想がある。

正極に関しては、5V 級スピネル $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ 系による高電圧化、ニッケル含有量を高めたリチウムニッケルマンガンコバルト酸化物（$LiNi_xMn_yCo_zO_2$,Ni:Co:Mn=5:2:3,6:2:2,8:1:1、200～230mAhg^{-1}）、あるいはリチウム過剰固溶体系（Li_2MnO_3-$LiMO_2$、250～300mAhg^{-1}）と呼ばれる材料による高容量化が進められている。

これらの材料が実用レベルに到達すると、リチウムイオン二次電池の理論的限界といわれている 300Whkg^{-1} 近いエネルギー密度を有する電池の開発が可能となる。

- 全固体型電池

東工大、トヨタらのグループによって、世界最高のリチウムイオン伝導率を示す超イオン伝導体「$Li_{9.54}Si_{1.74}P_{1.44}S_{11.7}Cl_{0.3}$」（リチウム・シリコン・リン・硫黄・塩素）が発見され、これを用いた電池が最高の出力特性を達成している。

- 金属-空気電池

リチウム-空気電池の空気極については、Li_2O_2 が生成、分解する基本反応が支配的であることが確認され、100 回程度のサイクルも可能になってきた。

- リチウム-硫黄電池

近年、硫黄の還元生成物の溶解を抑制可能な溶媒和イオン液体を用いた取組みが行われ

ている。

- レドックスフロー電池
  薄型多孔質電極と新規流路構造の採用によりセル抵抗の大幅な低減が実現されてきている。新たな反応系として、キノンー臭素系、チタンーマンガン系、アルカリ型水素－臭素系などが提案され、活物質の探索範囲の拡大とともに起電力の向上が見られる。スラリー型やイオン液体の利用による高エネルギー密度化も提案されている。
- スーパーキャパシタ
  MnO_2 正極と活性炭負極を用いた 2V 級水系ハイブリッドキャパシタは日本やフランスを中心に開発が活発化している。研究段階ではあるが、正極に大容量レドックスキャパシタ電極と水系電解質、負極に Li 複合負極を、セパレーターに固体電解質を用いることで可能にした 4V 級ハイブリッドキャパシタも提案されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

- 米国ではエネルギー省(DOE)を中心として、車載用蓄電池の技術開発を進めている。自動車技術局(VTO)関連では BATT など 5 つのプロジェクトを、エネルギー高等研究計画局(ARPA-E)では BEEST,RANGE,AMPED の 3 つのプロジェクトを進めている。空気電池および硫化物系電池への研究投資が行われており、欧・日の企業も参画している。
- 科学局(SC)の Basic Energy Sciences(BES)プログラムでは、次世代蓄電池（車載用／定置用）の研究拠点として、Argonne 国立研究所を中心とする Joint Center for Energy Storage Research が 2012 年から発足している。5 年間で 120M ドルの予算が計画され、5 倍のエネルギー密度（400Wh/Kg）、1/5 のコスト実現(100 ドル/Wh)が目標とされており、現在までに数多くの研究成果が発表されている。
- 米国 MIT と DOE による Materials Project や NIMS の情報統合型物質・材料開発拠点などインフォマティクスやデータ科学をこれまでの物質･材料科学に融合させることにより、新物質・材料科学研究を加速する取組みが始まっている。
- 米国の電気自動車メーカー、テスラモーターズは、家庭用の蓄電池を日本でも発売する方針を明らかにした。価格は、蓄電容量が 10kWh の機種で 3,500 ドルと、ほぼ同じ容量の日本メーカーの製品よりも大幅に安い。2017 年に発売予定の電気自動車の普及モデルに搭載するリチウムイオン電池をパナソニックが独占的に供給すると発表している。車両価格は 3 万 5000 ドル（約 410 万円）程度。米ネバダ州にリチウムイオン電池の生産工場「Gigafactory（ギガファクトリー）を建設し、パナソニックと共同で量産を開始した。
- 欧州では官民パートナーシップ「欧州グリーンカー･イニシアティブ」等の資金を使って、10 以上の車載用蓄電池の開発プロジェクトを推進中。リチウムイオン電池の高性能化･低コスト化技術を取り扱うプロジェクトが多いが、金属空気電池、リチウムイオン電池などの革新型蓄電池開発のプロジェクトもある。
- ドイツでは EV および車載用蓄電池の分野でドイツ企業を世界トップ水準に引き上げることを目指しており、教育研究省(BMBF)の資金により「イノベーション連合リチウムイオン電池 2015(LIB2015)」、「リチウムイオン電池コンピダンス･ネットワーク(KLiB)」、ミュンスター電気化学エネルギー技術センター(MEET)」、ヘルムホルツ電気化学エネルギー貯蔵ウルム研究所(HIU)」などの研究プロジェクトを次々と立ち上げ、基礎研究、実用化研

究に力を入れている。

- 中国では「国家ハイテク研究発展計画」（863 計画）により車載用蓄電池の研究がなされている。2020 年の開発目標は、エネルギー密度 300Wh/kg、サイクル寿命 3000 回、コスト 2.5 万円/kWh である。また、「中国国家重点基礎研究発展計画」（973 計画）においては、300Wh/kg 以上のエネルギー密度を目標とした革新型蓄電池の基礎研究が行われている。
- 韓国では、2010 年の「二次電池の競争強化に向けたロードマップ」において車載用リチウムイオン電池で日本をキャッチアップするための研究開発に 4～5 兆ウォンを投資するとしている。また、リチウムイオン電池の材料の大部分を日本からの輸入に頼っているという現状を打破するために、二次電池分野の研究者の育成、電池分野の素材メーカーの育成に注力している。
- NEDO-RISING（革新型電池先端 科学基礎研究事業）では京都大学に中核的研究拠点を置きつつ大学・独法・企業の産官学連携による基礎から応用に至るまでの革新電池開発プロジェクトが進行中であり、SPring-8,J-PARC などの最先端大型研究施設の共同利用などを行いつつ基礎研究と革新型蓄電池のイノベーションをオールジャパン体制で行っている。2015 年度に第 1 期の研究が終了し、2016 年度より引き続き第 2 期(RISING II)がスタートした。
- JST の ALCA-SPRING（先端的低炭素化技術開発－次世代蓄電池特別重点技術領域）でも物質・材料研究機構（NIMS）に研究インフラである蓄電池基盤プラットフォームを設置し、全国 42 機関、82 研究室が 4 つのチームに所属し、大規模な組織的研究開発を実施している。このような国内の多くの関連アカデミア研究者が参画した産学連携研究開発が、国際的に見ても最大規模の体制の下で発足しているのは特筆すべきことと言える。ALCA-SPRING では、上述の NEDO-RISING や、NEDO 先進・革新電池評価技術開発との実質的連携を進めている。
- EU ではイオン液体を用いたハイブリッドキャパシタの大型プロジェクト（ILHYPOS, 2,866,168€, 2005/12 から 3 年）が進められ，米国では DOE Energy Frontier Research Center として認定された Fluid Interface Reactions, Structures and Transport(FIRST)Center（Oak Ridge National Lab ほか）や ARPA-E の支援を受けたグラフェン系キャパシタのプロジェクト（Georgia Tech, $2,115,000）など、開発競争は熾烈化している。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

- リチウムイオン電池

  負極については、Si は導電性が低いため導電助剤として主にカーボン系材料を混合して使用することが多く、その分活物質の量が減少する。またリチウムイオンの挿入・脱離により、体積が大きく膨張・収縮するなど寿命と容量のトレードオフの課題も多い。

- 全固体電池

  充放電に伴い電極活物質の体積変化があることから、長寿命の全固体電池を形成する電池構造や製造手法の開発が大きな課題となっている。酸化物系では特に接触抵抗が高く、電極、電解質作製の低温プロセス化技術の開発が実用化の鍵である。また、硫化物系、酸

化物系ともに電極活物質と固体電解質との界面における接触面積の増大と、特に正極活物質と固体電解質の接触界面でリチウムイオンの移動度が極端に低下して抵抗が高くなり出力特性が低下する問題もある。また、有機電解液系リチウムイオン電池と製造方法が異なることから、生産装置や設備等の製造プロセスの開発も求められる。

- 金属-空気電池

　充電時に過電圧が高く、副反応を伴うことによる劣化や大電流を流すことが困難など、重要な基礎的課題も残されている。また、リチウム金属負極のサイクル性や利用率の向上も大きな課題である。電極材料や電解質の開発を含めた基礎研究の強化と、セル化・スタック化（システム化）に向けた広範な技術開発が求められている。

- リチウム-硫黄電池

　充放電に伴い電極物質の体積変化があること、および硫黄の放電時に生成する多硫化リチウムが有機電解液によく溶解するため、その抑制手法の開発が求められている。また、エネルギー密度を高めるための正極厚膜化に伴う性能低下も課題となっている。

- 多価カチオン電池

　マグネシウム金属は、高い還元性を示し、電解質と反応して表面にイオン伝導性、電子伝導性を持たない不動態被膜を形成してしまうため、反応性のほぼない電解質溶液を用いる必要がある。そのような電解質溶液は比較的低い電位で酸化されてしまうため、適当な正極と組み合わせることができないという大きな課題がある。また、マグネシウムイオンが可逆に挿入脱離可能で 3V 以上の電圧を与える正極材料の開発も必要である。

- レドックスフロー電池

　定置用途では、セル抵抗の低減と低コスト化が課題であり、多孔質電極とセル構造について従来型からの大幅な転換が図られており、最適化された材料・構造の解明と実現が課題である。将来に向けては、エネルギー密度と出力密度のさらなる向上が課題であり、様々な反応系に対して、高い反応活性と電極の耐久性、高イオン濃度と電解液の粘性低減、など、フロー電池デバイスとして動作させるときにトレードオフとなる材料特性をいかに両立して向上させるかが課題となる。

- スーパーキャパシタ

　材料面では体積エネルギー・出力密度の向上に向けた高密度炭素材料や酸化物の開発が求められている。活性炭電極はかさ密度が低く、表面利用率が低いことや無駄な細孔があることが問題であり、精密に細孔構造を制御した高比表面積な低価格材料の開発が求められている。レドックスキャパシタ材料も同様であり、表面あるいは表面近傍でのレドックスを最大限有効活用したナノ粒子やナノシート材料及びそれらを利用した高密度多孔質電極の材料開発がキャパシタンス増大に向けた課題である。高電圧化に向けてはデバイスレベルでのハイブリッド構成を考える必須であり、高容量キャパシタ電極だけでなく、高速反応かつサイクル性を各段に向上させた電池電極（リチウムイオン二次電池技術の転用、改善）ならびに耐電圧が高い電解質など広範な技術開発が求められている。

［今後取組むべき研究テーマ］

電池反応現象を理論的に解明し、材料の選択を含めた最適システムの設計を可能にする技

術基盤を構築することが必要である。

1. 新材料開発
   新電極材料開発、電極材料界面近傍のナノレベルの三次元構造の最適設計・制御、安全性と高電圧化の両方のバランスを実現する新電解質材料開発、高安全セパレーター材料開発
2. 蓄電デバイス・システム新技術開発
   バッテリーマネージメントシステムの高性能化･高機能化、電池材料のリサイクル法開発、使用済み電池のリユース法開発
3. 電池反応の現象解明と理論モデル構築
   (2 及び 3 に共通) 電池反応の直接観察・計測技術開発、界面現象の原子レベルでの理解、性能低下・劣化機構の解明、反応理論のモデル化、計算科学による予測・シミュレーション技術開発

特に電解質材料に関する研究は重要となる。また、活物質を有効に利用するための周辺部材に関する研究も欠かせない。また、実際に電池を作製するためのプロセス開発も必要となる。

ポストリチウムイオン電池の個別課題は下記の通りである。

- 全固体電池（硫化物系）：電池作製プロセスの開発、電極(活物質)／電解質界面の設計
- 全固体電池（酸化物系）：固体電解質の開発と電池の構造化、電極(活物質)／電解質界面の設計、プロセス技術の開発
- リチウム・空気電池：空気極の高性能化と電池設計、リチウム負極のデンドライト生成抑制、可逆性の向上、取り入れる空気中の水分除去法
- リチウム・硫黄電池：硫黄極の設計のための周辺部材開発
- 多価イオン電池：材料全般に関する研究と電池化
- レドックスフロー電池：反応系・電池材料・セル構造の研究開発と最適化設計、新規なコンセプトの実証と評価

これらの電池には、実験室レベルのセルの状態で留まっているものもあり、可能な限り早く実際の電池を用いる性能実証実験研究が求められる。さらに、各電池系ともに電極（活物質）／電解質界面の現象解明をおこない、界面の設計・制御性を向上させていくことが求められる。

これらのポストリチウムイオン電池も 90 年代からの歴史があり、過去の研究を踏まえ、足腰を据えた基礎研究が求められている。

（５）政策的課題

一般的に海外では大学や国立研究所と企業の技術開発との連携が多いのに比べて、日本は個人研究や、個別テーマで研究開発が進められる傾向が強い。海外では得意な分野や材料を中心に研究を展開し、不足する部分は他の研究者と共同研究を行うことで研究を進展させている。

国内企業間競争よりも国際競争力の強化に力点を置く研究開発を行う戦略が重要と考えられ、こうした研究推進には、中長期の集中研究拠点を核とした異分野融合や国際連携も視野

に入れた革新的な基礎研究の強化と、その成果の迅速な産業界での応用展開に向けたネットワーク連携が重要な鍵となる。この観点で、上述の NEDO-RISING や JST の ALCA–SPRING の進展と、両者のシームレスな連携が今後最重要であろう。

また、日本では自動車向けの研究開発が主流であるが、欧米ではグリッド（送配電網）の安定化に大きな関心があり、定置型電池の研究開発投資も重点化されている。

（６）キーワード

二次電池、蓄電池、ポストリチウムイオン電池、金属空気電池、リチウム空気電池、全固体電池、リチウム硫黄電池、多価イオン電池、多価カチオン電池、スーパーキャパシタ、リチウムイオンキャパシタ、エネルギー密度、出力密度、界面

（７）国際比較

■リチウムイオン電池、およびポストリチウムイオン電池

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	次世代リチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池ともに基礎研究ではトップレベルを維持している。独創性の高い材料開発や高度解析技術開発では欧米に遅れをとってきたが、NEDO RISINGやALCA-SPRINGなどの大型のプロジェクトの設置により、独創性の高い材料開発や高度解析技術開発も欧米並みに進んできている。これらのプロジェクトではポストリチウムイオン電池開発がメインであり、次世代リチウムイオン電池の基礎研究は他国に少し遅れを取り始めているので要注意。
	応用研究・開発	◎	→	応用研究はおもに電池メーカー、自動車メーカー、材料メーカーで行われており、現状ではトップレベルにあるが、学界での研究はほとんどなされていない。次世代リチウムイオン電池やポストリチウムイオン電池の実用化に際しては、企業と大学との共同研究の連携により、学界で見いだされた新材料、新技術を産業に結びつける仕組みの強化が必要。
米国	基礎研究	◎	↗	DOEの多額の研究費により、アルゴンヌ国立研究所を中心に多くの研究者が基礎研究に参画している。独創性の高い材料研究者と質の高い解析技術者の連携により材料開発を進めるというスタイルは効率的。
	応用研究・開発	△	↗	国内大企業の参入が少なく、米国国内での産業化は難しいように思われる。ベンチャー企業や国立研究所などを中心に応用開発研究が行われ、近年中国の企業との結びつきも顕著となってきた。テスラモーターなど新しいビジネスモデルの提案は活発。
欧州	基礎研究	◎	↗	フランスでは固体化学が強く、これまでも材料開発に関しては世界をリードしてきた。ドイツではこれまでは研究者層が薄く、基礎研究は遅れていたが、近年の政府の多額の研究費により電池研究者が著しく増え、力をつけている。また、欧州共同体として欧州内の連携も進んできており、ポテンシャルは高い。
	応用研究・開発	△	↗	大きな電池メーカーは少ないが、材料関係ではBASFなどの巨大化学メーカーが急激に電池材料に力を入れいる。電池製造、利用技術に関してはそれほど高いとはいえないが、有力な自動車関連メーカーが電気自動車開発に力を入れている。
中国	基礎研究	○	↗	基礎研究はこれまでかなり遅れていると考えられてきたが、近年急速に材料開発の分野での基礎研究が進んできた。中国科学院を中心とした973計画においては、リチウム硫黄電池やリチウム空気電池などのポストリチウムイオン電池や高度解析技術の開発など基礎研究に力を入れており、今後さらにレベルが上がる可能性が高い。

	応用研究・開発	○	↗	電池製造技術は現状では性能や安全性の面で課題があるものの、自国消費と低コストでシェアを拡大しつつある。外国からの企業と連携し、応用開発研究を推進させている。また、電解液、活物質などの材料はこれまで日本から輸入していたが、自国生産が多くなってきている。
韓国	基礎研究	○	→	産業界での実力に比べて、基礎研究のアクティビティ、研究者層の厚さは必ずしも高いとはいえない。国外、特に米国の研究者と連携して研究を進めている研究者が多い。
	応用研究・開発	◎	↗	財閥系メーカーを中心に応用開発に関する実力は非常に高い。低コスト化技術も高く、シェア拡大に貢献している。民生用ではすでに日本を凌駕している部分もあり、電動車両用途も伸びている。近年、政府は電池材料の国産化にも力を入れている。

■レドックスフロー電池

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	○	→	萌芽的な研究成果が創出されてきたにもかかわらず、現在、他国に比較して、大学、国立研究所、民間企業のレベルで関連研究に携わっている研究者は少なく、増加する傾向も乏しい。
	応用研究・開発	◎	→	民間企業（住友電工）の着実な研究開発が大規模実証実験（北海道南早来や米国カリフォルニア州）に繋がっているが、材料メーカーなど関連部門への浸透が緩やかであり、将来にわたり競争力とプレゼンスを発揮できるかは不透明な状況である。
米国	基礎研究	◎	↗	新規な反応系や電解質膜などの材料レベルから新たな方式などのシステムレベルに至るまで幅広く展開されており、研究者と関連分野のすそ野も広く、学会においても中心となって関連分野を牽引している。
	応用研究・開発	◎	↗	大規模電力貯蔵への社会的要請をいち早く察知して、関連したベンチャー企業がいくつも立ち上がっており、競争的環境とともに活発な研究開発が進められている。
欧州	基礎研究	○	↗	PSI,ETH（ともにスイス）,Imperial College Londonなどの研究者の参画が進んできている。新規な反応系から電池性能の評価・解析など、関連研究者の人数ならびに成果報告は増加傾向にある。
	応用研究・開発	○	↗	SGL Carbon社の炭素電極材料が多くの論文で用いられるなど、知見が蓄積される状況が出来上がりつつある。Nanoflowcell社はフロー電池を搭載したとされる電気自動車を発表しているが詳細は明らかではない。
中国	基礎研究	△	↗	電極、膜材料など要素技術に関連した論文数は増加傾向にある。
	応用研究・開発	○	↗	Rongke Power社が大型実証設備（200kW/1.2MWh、3MW/10MWhなど）の納入でドイツ、米国での実績を上げてきている。バナジウムを資源として保有するため電解液製造などで優位性をもつ。
韓国	基礎研究	△	→	要素技術に関連した論文はあるが顕著な変化は見られない。
	応用研究・開発	△	→	H2社がバナジウム型システムを製造している。

■スーパーキャパシタ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	大学の研究者人口は増加傾向にある。国際学会での講演件数や参加者数は国別でみた場合は依然として高い比率を維持している。
	応用研究・開発	○	→	EDLC，LICを製造する会社の合併、合併解消、事業移転など目まぐるしく環境が変化しているなか、フジクラや岡谷電機産業など新規参入企業もあり。

米国	基礎研究	○	↗	大学や国研での研究者が増加し、マイクロスーパーキャパシタやウェラブルを目指した特殊用途を中心とした研究が増加傾向にある。
	応用研究・開発	○	→	業界最大手のMaxwellやスーパーキャパシタ専門メーカーのIOXUSなどが幅広いラインアップでEDLCを販売している。
欧州	基礎研究	◎	↗	フランスを中心に研究者人口が大幅に増加。ヨーロッパ全体の基礎研究や材料研究をけん引している。ヨーロッパ内の研究者間の交流も多く、ほとんどの研究が複数機関が関与する共同研究となっている。2009年以降、各年でスーパーキャパシタの国際会議を開くようになり、基礎研究やデバイス開発が急速にレベルアップしている。
	応用研究・開発	○	↗	ニース（フランス）のトラムへのスーパーキャパシタ搭載（ALSTOMが製造）を皮切りに応用が広がっている。
中国	基礎研究	◎	↗	グラフェンを中心に材料開発が進んでいる。スーパーキャパシタに関する論文数は，2015年に2010年比で6倍、年率50%を超える急速な伸びを示している。
	応用研究・開発	◎	↗	バス、自動車などの移動体への需要が急速に拡大し、スーパーキャパシタ駆動のバスを上海万博では発表後、全中に展開している。マーケットの拡大にあわせ、EDLCを中心に製造する会社も拡大傾向にあり。
韓国	基礎研究	△	↘	グラフェンを中心に研究がすすめられているが、以前ほどの活動が見えない。
	応用研究・開発	△	↘	VINATechKorchip, Nesscap, LS Mtron, Samwha Electricなど多数のメーカーがEDLCを製造販売しているが、以前ほどの活動が見えない。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考・引用文献

1) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー･材料分野（2015 年）」CRDS-FY2015-FR-05
2) JST-CRDS 戦略プロポーザル「次々世代二次電池・蓄電デバイス基盤技術 ～低炭素社会・分散型エネルギー社会実現のキーデバイス～」CRDS-FY2011-SP-04
3) 一般社団法人 電池工業会 http://www.baj.or.jp/knowledge/history01.html
4) NEDO「二次電池技術開発ロードマップ 2013」
5) NEDO 技術戦略研究センターレポート「TSC Foresight」Vol.4、2015 年 10 月
6) The 18th International Meeting on Lithium Batteries, Abstracts, Chicago(2016).
7) 第 56 回電池討論会要旨集、名古屋(2015).
8) International Battery Association 2016, Abstracts, Nante(2016).
9) 特許庁「平成 22 年度特許出願技術動向調査報告書 電気化学キャパシタ」 平成 23 年 4 月

3.17　蓄熱技術

（1）研究開発領域の簡潔な説明

蓄熱技術とは、工場の排熱を短時間または長時間蓄えて、工場の製造プロセスの予熱に利用し、化石燃料消費量の削減を図るものである。また、太陽熱を短時間または長時間蓄えて、日射の遮断時（夜間や曇天など）においても、工場のプロセスの安定操業を図るもの、太陽熱発電システムの利用率向上を図るものもある。次に、空調負荷の軽減で電力消費量の削減を図るものとして、夜間に冷水や氷を製造し、昼間の冷房空調に利用する冷水蓄熱、氷蓄熱がある。さらに、工場の余剰排熱を蓄熱材に貯蔵して運び、それを他工場の熱源として利用したり、建物の空調暖房に利用する技術もある。

ここでは、蓄熱材とそれを用いた蓄熱システムを対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

我が国における産業部門の製造プロセスから排出される排熱は、100℃未満の温水と、250℃未満の排気ガスを併せると、914PJ/年にものぼると推計されている[1)]。これらの低温エネルギーの有効利用の実現には蓄熱技術の確立が必要である。

一方、欧米諸国を中心に、集光太陽熱発電（Concentrating Solar Power: CSP）を核とする太陽熱利用技術が開発されている。国際エネルギー機関は、2050 年までに世界で 1089GW の太陽熱発電所が建設され、世界の発電量の 11.3%が供給されると予測している[2)]。

産業排熱は工場の操業に、太陽熱は天候の変化に影響される熱源であるため、熱の需要と供給に時間的なアンバランスが生じる。特に産業排熱は熱の需要と供給先の空間的アンバランスが生じることが多い。そこで、これらの熱の需要と供給の時間的、空間的アンバランスを解消するための蓄熱・熱輸送技術の確立が要請されている。

また、我が国の家庭や業務他部門でのエネルギー消費の約 50%は空調と給湯用途である[3)]。住宅や業務ビルなどの建築物において、太陽熱利用はすでに実用化されており、太陽熱利用システムは太陽集熱器、蓄熱槽、ポンプなどの循環系および制御系で構成される。蓄熱槽については従来温水蓄熱が使用されており、住宅用として日本では 200～300 リットル、海外では 500 リットル程度の容量が利用されている。この蓄熱槽の小型化に向けた技術開発として、潜熱蓄熱材を用いる蓄熱方式[4)]や化学蓄熱[5)]、吸着材を用いた蓄熱の研究開発が行われている。

以上より、省エネルギー技術と創エネルギー技術の両分野において高度な蓄熱システムの導入や確立が求められている。

［動向（歴史）］

発電所や工場などを含む日本国内における排熱（未利用熱エネルギー）の合計は年間 1 兆 kWh 以上もあり、国内総発電量とほぼ同じである[6)]。しかしながら、それらの熱の大部分が大気中に無駄に放出される。排熱の有する熱エネルギーを有効に利用することは、日本のエネルギー消費の削減かつ CO_2 排出削減につながる。特に中温領域の排熱（～400℃）の高効率回収・再利用に関する技術開発が必要となる。中温排熱は主に工場プロセス、ゴミ焼却、

内燃機関、燃料電池、太陽熱などから発生する。

日本では、使用されるエネルギー消費量の 18%が工業炉で消費されている。1990 年代初め、熱効率を改善する目的で、「蓄熱式（リジェネレーティブ）バーナー加熱システム」が開発された。これは、省エネルギーと排ガス NOx 濃度の大幅削減を世界ではじめて両立した技術である[7]。1994 年には水島製鉄所の連続式鋼片加熱炉に部分的に適用され、省エネルギー効果が得られた。また、1996 年には福島製鉄所の鉄鋼プロセスの大型連続式鋼片加熱炉に全面適用され、省エネルギーと低 NOx 化を実現できた。適用前のプロセスと比較し、約 25%の省エネルギー、80%の NOx 削減が得られた。

国内の排熱利用を促進するためには、複数のプロセスや工場などで 100－200℃の熱を融通し、全体の排熱を最小化することも重要である。しかし排熱を利用するためには、量、温度などの質、場所、時間の違いなどの不一致を調整する必要がある。この課題を解決するために、工場またはプロセスからの排熱を物質に蓄えること（蓄熱技術）で、他工程や工場に利用でき、排熱の利用拡大が可能となり、省エネルギーおよびコストの削減に寄与する。

蓄熱技術を大別すると、「顕熱蓄熱」、「潜熱蓄熱」、「化学蓄熱」がある。現在実用化されているのは顕熱蓄熱と潜熱蓄熱がほとんどである。「顕熱蓄熱」には煉瓦、岩石、コンクリート、水、金属塊などの比熱の高い材料を冷却あるいは加熱することで熱を蓄える。「潜熱蓄熱」は物質が相変化を起こすときに出入りする熱を利用して蓄熱する。潜熱蓄熱は蓄熱容量が大きいという利点があるが、相変化に伴う体積膨張（～15%程度）が起こる[8]。「化学蓄熱」は発熱反応および吸熱反応を伴う可逆反応が使用される。化学蓄熱は容器の断熱が不要であり、輸送･貯蔵中の熱損失も少ない。潜熱蓄熱と化学蓄熱は顕熱蓄熱と比べて蓄熱容量が大きく、熱の取り出し温度が一定になるという利点がある。蓄熱材の選定や装置の製作を行うには、蓄熱材の熱物性、反応、利用環境等を正確に把握する必要がある。

一般的に顕熱、潜熱、化学蓄熱の順に蓄熱密度は高くなるが、蓄熱システムの機器構成は複雑化する。

我が国における建物の空調用または給湯用蓄熱技術の先駆けは、1952 年、柳町政之助氏の設計・施工による水蓄熱槽を活用した空調設備の日活多摩川撮影所（現、調布撮影所）への導入であった[9]。水蓄熱槽を大まかに分類すると、完全混合型蓄熱槽と温度成層型蓄熱槽があり、冷水や温水の顕熱として蓄熱する。現在までに家庭用の小規模から産業用スケールまで様々な水蓄熱槽が普及している。また、既に太陽熱温水器としても利用されている[10]。最近では、従来の水蓄熱槽の最大 2.3 倍の蓄熱量（約 120kJ/kg）となるパラフィン系の材料を用い、蓄熱槽の小型化を目的とした潜熱蓄熱利用型蓄熱槽も盛んに検討されており、一部実用化[11]が開始されている。

蓄冷分野においては 1984 年以降、日本では氷蓄熱の導入が促進された。氷蓄熱は潜熱蓄熱の一種であり、水から氷の凝固潜熱（0°C、333J/g）にて蓄冷する。氷蓄熱では夜間の余剰電力を利用して氷を製造し、日中の冷房用冷熱源として利用することで、電力負荷の平準化を図ることができる。産業用の氷蓄熱システム「エコアイス」のみならず、家庭用の「エコアイス・mini」も販売され、現在までに広く普及している[12]。JFE エンジニアリング株式会社は、「TBAB（テトラブチルアンモニウム）」を利用した水和物スラリー蓄熱空調システム（潜熱蓄熱温度約 6-12°C）を開発し[13]、業務用建築物の空調システムの省エネ化に効果を上げている。この蓄熱温度 6-12°C は冷房用として十分低温であり、氷蓄熱にて 0°C の氷を

製造するより、冷却負荷を抑制できる [14]。国内での利用のみならず、2013 年からはタイでの実用運転（3510kWh 級）も開始された [15]。また、長期間蓄冷技術として、近年雪や氷などの自然エネルギーを使った季節間蓄熱の実用化が促進されている。例えば新千歳空港では、2009 年以降、冬期間に除雪した 70000ton の雪を貯蔵し、5 月から 9 月の空港旅客ターミナルビルの冷房の補助として使用している [16]。

建物の空調における蓄熱では、太陽や風力などの再生可能エネルギーを建築物に取り込んで使い、特別な機械設備を使わない「パッシブ」な蓄熱システムも検討されてきた。近年、パラフィン系潜熱蓄熱材や潜熱蓄熱材のマイクロカプセル化技術が進展し、潜熱蓄熱材を含有させた潜熱蓄熱建材によるパッシブ蓄熱システム [17]が開発され、欧州を中心に普及されている。

太陽熱発電分野では、安定的な電力供給を実現するための蓄熱システムが最重要要素の一つとして位置づけられ、欧米諸国を中心に開発が進んでいる。すでに、蓄熱材として液体溶融塩（硝酸塩系混合物）を用いる顕熱蓄熱システム（現在までの耐用温度 565°C 以下）が商用プラントにて運用されており、2007 年には溶融塩蓄熱システムを備えた世界初の 24 時間稼働のタワー型太陽熱発電プラント（GEMASOLR プラント、発電出力 20 MW、15 時間分の蓄熱容量）がスペインにて運用が開始された [18]。日本では 1974 年から始まったサンシャイン計画にて、香川県仁尾町に建設された 1MW 級の太陽熱発電実証プラントの蓄熱装置として、溶融塩潜熱蓄熱材（KCl-LiCl 系）を用いた潜熱蓄熱装置がスチームアクチュエーターと併用で設置され、その効果が検討された例がある [19]。サンシャイン計画以降、国家プロジェクトとして太陽熱発電開発は提起されていないが、企業レベルでは開発が推進されている。

2006 年以降、「省エネルギー技術戦略」における重点技術の一つとして、「時空を超えたエネルギー利用技術」が挙げられた [16]。三機工業（株）は、ドイツ航空宇宙研究所を中心に開発された潜熱蓄熱輸送システム：トランスヒートコンテナを 2003 年にドイツから技術導入し、その実用化に成功した。また、当初は酢酸ナトリウム三水和物（融点 58°C）のみが PCM として採用されていたが、エリスリトール（融点 118°C）を新たな潜熱蓄熱材として用いたシステムを構築することで、冷房熱源としての用途を拡大した。トランスヒートコンテナは、工業用プロセスでは低温のため捨てられていた排熱を 10～24ton 規模のコンテナに充填された潜熱蓄熱材に蓄熱し、熱需要先（主に民生分野）へとオフライン輸送し、熱供給するものである。このシステムは、オフライン方式のため、導管方式などの熱輸送と比べて、インフラ整備コストが安価で、かつ距離による影響が少なく、フレキシブルな熱輸送が可能である [20]。また、潜熱蓄熱輸送システムとして、（株）神鋼環境ソリューションの「サーモウェイ」も 2007 年までには実用化の目途がたっている [21]。

以上のごとく、顕熱蓄熱はほぼすべての温度領域で実用システムが構築されている。潜熱蓄熱は空調や給湯分野を中心として 120℃以下では、実用化が開始しており、さらなる高温蓄熱システムが太陽熱発電分野を中心に検討されている。

化学蓄熱技術は、他の蓄熱技術と同様、1970 年代のオイルショックを契機に国内外で研究開発がなされ、これまでに水素吸蔵合金系、吸着系、有機系、無機反応系などが検討されている。とくに水素吸蔵合金系、吸着系は実用化がよく進んでいる [22]。有機系、無機反応系は他に比べ実用に距離があるが、操作温度域の広さ、高密度貯蔵の観点から有望であり、近年研究、基礎研究のみならず、実用化に向けた開発が加速している。代表的な系としてアセト

ン/水素/2-プロパノール系（温熱生成 80°C 以下熱源駆動）[23]、塩化カルシウム系（冷熱生成 80°C 以下熱源駆動）、硫酸カルシウム系（冷・温熱生成 100°C レベル熱源駆動）、酸化マグネシウム系（冷・温熱生成 300°C レベル熱源駆動）、酸化カルシウム系（冷・温熱生成 400°C レベル熱源駆動）などがある[24]。

（３）注目動向

[新たな技術動向]

- 蓄熱セラミックス（東京大学・筑波大学）[25]

  蓄熱セラミックスはチタン原子と酸素原子（ストライプ型-ラムダ-五酸化三チタン）からなる。この物質の相転移を利用することで 230kJ/L の熱エネルギーを吸収・放出することができる。同物質は安定な固体無機材料であるが、圧力（60MPa）を加えることでラムダ構造からベータ-五酸化三チタンへと相転移する。生成したベータ-五酸化三チタンは、200℃以上の熱を与えるとラムダ構造に再び相転移し、室温に戻っても、そのままのラムダ構造を維持する。

- 潜熱蓄熱材マイクロカプセル[26-29]

  低温領域の熱源回収またはパッシブ蓄熱を目的とした蓄熱材開発として、SiO_2 等の無機材料を主成分とする硬質シェルからなる潜熱蓄熱材マイクロカプセルの報告例が増加してきた。今まではメラミン系樹脂などの有機物系のシェルでのマイクロカプセル化が主流であり、一部実用化にも至っているが、これらは厳密には緻密なシェル構造ではなく、コア部の潜熱蓄熱材が蒸発すること及び機械的強度の観点から不十分である懸念があった。無機系材料によるカプセル化はこれらの諸問題を克服できる技術として有望視されている。

- 計算科学からの材料設計（産総研ら）[30]

  産総研らの研究グループは、分子動力学計算から糖アルコール類が高い潜熱量を持つ要因を突き止め、より高蓄熱密度の糖アルコール系潜熱蓄熱材の設計コンセプトを抽出した。このような計算科学からの材料設計は、潜熱蓄熱材の分野では例がなかった。建物・空調分野や低温排熱回収分野に利用可能な、既存の潜熱蓄熱材の蓄熱容量を大幅に上回る新規潜熱蓄熱材の開発が期待される。

- 固-固相転移利用型潜熱蓄熱材[31]

  理化学研究所は二酸化バナジウムの一部を他の金属で置換した物質に、大きな蓄熱特性を持つことを発見し、固固相転移利用型潜熱蓄熱材を開発した。この材料は、置換金属の種類、量を変えるのみで、相転移温度を自由に選択できる。現在までに室温～120°C 程度の相転移温度を持つ蓄熱材が商品化（Smarttec HS）されている。

- 集光型太陽熱発電（CSP）向けの中温潜熱蓄熱システム[32]

  ドイツ航空宇宙研究所を筆頭に、硝酸塩系潜熱蓄熱材（融点 306°C）を使用した CSP 向けの中温潜熱蓄熱システムの開発が進んでいる。この技術は現在の液体溶融塩顕熱蓄熱技術に代わる大規模蓄熱技術として着目されている。すでに、パイロットプラントによる性能試験がすでに実施されており、コンクリート顕熱蓄熱と併用したシステムなども提案されている。

- Solar thermal fuel　太陽熱燃料（マサチューセッツ工科大学）[33]

　太陽熱燃料は、物質を日光にさらすことで分子の形態を「充電」の構成に変形させる光エネルギーを利用する蓄エネルギー材料となる。化学変化の形で貯蔵することで、長期間のエネルギー保持が可能になる。蓄えたエネルギーは、特定の温度や刺激などの限られた条件を与えることで、分子は熱を放出し、元の形態へ戻る。太陽エネルギーの利用と貯蔵を同時に高い変換効率で実現できる可能性がある。

［注目すべきプロジェクト］

- 2015 年度、トヨタ自動車（株）、中部電力（株）、東邦ガス（株）は次世代エネルギー・社会システム実証事業において、化学蓄熱材料（酸化マグネシウム系）を利用したオフライン排熱蓄熱輸送を技術、マネジメントシステム、地域電力需給制御システム、およびシステム全体の省エネルギー効果の観点から実証、検証した [34]。

- 未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発

　2013 年 10 月に、「未利用エネルギー革新的活用技術研究組合（略称：TherMAT）[35]」が設立された。TherMAT は 18 の企業、1 つの一般法人と産総研から構成される技術研究組合であり、膨大な量の未利用熱エネルギーを削減・回収・利用するための要素技術（断熱、遮熱、蓄熱、ヒートポンプ、熱電変換、排熱発電、熱マネジメントなど）を革新し、システムとして確立することを目的としている。特に、蓄熱分野では 100-150°C 程度の熱源回収をターゲットに、1MJ/L の蓄熱密度を目標とした糖アルコール系潜熱蓄熱材の開発を目標としている。また、長期間熱貯蔵可能な過冷却利用型潜熱蓄熱材の開発も実施されている。

- 高効率酸素製造装置（HT-PSA(High Temperature-Pressure Swing Adsorption)）の開発

　2014 年度、NEDO の戦略的省エネルギー技術革新プログラム実証開発フェーズ「高効率酸素製造装置（HT-PSA(High Temperature-Pressure Swing Adsorption)）の開発」では、アルミナ顕熱蓄熱体を搭載した PSA の実証試験がスタートした。本技術では、リジェネバーナーにおける高効率の蓄熱・熱回収技術を応用し、酸素吸着材（ペロブスカイト系酸化物）からの吸脱着反応熱を回収・制御することで、酸素製造電力原単位の大幅削減が予測されている（従来比 50%）[36]。このプロジェクトはいわば化学反応の制御系として蓄熱を導入している点で新たな発想と言えよう。

- Horizon2020

　2014 年より開始された Horizon2020 では、産業分野の省エネルギーについても含まれており、熱の内部での有効活用や外部での有効活用のプログラムも存在する [37]。

- Drake Landing Solar Community（季節間蓄熱、カナダ、オコトクス）[38]

　オコトクス（カルガリーの南）に建設された新興住宅地の 52 戸の家屋に、太陽熱システムが設置された。このシステムによって自家で必要な温水の 60%を供給することができる。またこの住宅地区には、総面積で 2,300m² 以上のソーラーコレクターが装備される。夏季に集めた太陽エネルギーは、公園の地下に掘削したボアホールに蓄えられ、冬にこの熱エネルギーが回収され、温水として住宅地の各戸に分配される。

- Gujarat Solar One (太陽熱発電、グジャラート、インド)[39]
  日射量の多いグジャラート州に 25MW 級の太陽熱発電プラントが建設される。また、9 時間の蓄熱が可能とする溶融塩蓄熱も導入され、1 日中の発電が可能となる。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

顕熱蓄熱は、ほぼ全ての温度レベルで成熟した技術である。一方、潜熱蓄熱、化学蓄熱技術は開発途上の技術であり、依然として複数の課題が残っている。

1. 顕熱蓄熱技術
   顕熱蓄熱システムでは蓄熱密度が低いため、システムの大型化に伴い、容器（タンクなど）の材料や積層技術に関する開発が求められる。高温領域では熱容量が小さいため（特に固体蓄熱材）、コストが高い。また、地中蓄熱（UTES）においても、レギュレーションの明確化、コストの削減、蓄熱容量の拡大も重要である。

2. 潜熱蓄熱技術

- 化学蓄熱材と違い、潜熱蓄熱システムの潜熱蓄熱材は物性（＝融点）として蓄熱温度が決まるため、蓄熱温度選択性が狭く、適当な潜熱蓄熱材の無いいわば空白の温度領域が存在することが課題である。特に建物の空調分野では、わずかな温度変化に性能が左右されるため、よりフレキシブルな蓄熱温度範囲選択性が求められる。また、潜熱蓄熱材は物性（＝潜熱）として蓄熱容量が決まるため、低温度領域の潜熱蓄熱材は特に体積当たりの蓄熱容量が化学蓄熱と比べて極めて低く、蓄熱機器の典型的な潜熱蓄熱材の熱伝導率は極めて低いため（例：$NaNO_3$: 0.56W/ m K）、潜熱蓄熱システムは潜熱蓄熱材の熱伝導律速により熱入出力速度が低くなることが課題である。特に、蓄熱材の凝固を伴う放熱過程でこの傾向は顕著となる。これは古くから潜熱蓄熱技術の普及のボトルネックとして提起され続けていた課題である。
- 潜熱蓄熱技術では、主に潜熱蓄熱材の固液相変化が利用される。中高温領域では蓄熱液体となった潜熱蓄熱材は高い腐食性を持つ。よって、これに耐えうる伝熱管、カプセルシェル、または蓄熱槽壁材料の設計、または腐食の起きない潜熱蓄熱材と構造材料の組み合わせ設計が課題である。これが中高温領域での潜熱蓄熱技術の進展を妨げている最大の原因である。
- パッシブ蓄熱の分野では、実用化されているマイクロカプセル潜熱蓄熱材のほとんどが有機系のシェル（樹脂系）である。この有機系のシェルは厳密には緻密な構造ではないため、コアである潜熱蓄熱材が気化、劣化する原因となる。また、有機系シェルでは壁などへ塗布する場合において強度不足となる課題がある。

3. 化学蓄熱技術

- 化学蓄熱技術は他の蓄熱システムよりも複雑であるため、低コストの蓄熱材および適切な反応制御・システムの開発が求められる。世界的に、実用化の事例が少ない。また、反応の繰り返しによる蓄熱材の安定性・耐久性・経済性も依然低い。
- 一般的な化学蓄熱材は、吸熱反応（蓄熱時）に蓄熱材が膨張し、発熱反応（放熱時）に収縮するため、蓄熱材の凝集や焼結による試料表面積の低下し出力低下を招くなど、繰り返

し耐久性に課題がある。

- 酸化物や水酸化物などの典型的な化学蓄熱材は熱伝導率が低く、結果として化学蓄熱システムは伝熱律速により熱入出力速度が低いことが課題である。また、同様に最高出力に到達する時間が長いことにも課題がある。

［今後取組むべき研究テーマ］

蓄熱材やシステム・反応器の開発はもちろんだが、用途やニーズに応じた蓄熱システムの選定や最適化、および評価が必要である。低コストかつ熱損失の少ない蓄熱容器や、輸送技術も求められる。また、運用時のシステム制御・監視手法等に関する研究も重要と考えられる。

1. 顕熱蓄熱システム

- 顕熱蓄熱技術は、低温領域では成熟しているが、中温（～400℃）領域は未成熟である。これは、この温度領域を対象とした比熱の高い顕熱蓄熱材（固体・液体）の開発がなされていないからである。そして、その蓄熱量が大きいことから地中蓄熱する調査研究が待たれる。その調査から規制緩和の是非が明確化されることを期待する。地中備蓄を技術的に可能とするためには断熱性が高く、大型化に対応できる容器材料の開発が必須である。

2. 潜熱蓄熱システム

- 潜熱蓄熱材の熱伝導性改善および潜熱蓄熱システムの伝熱促進に関する基礎研究は、今後も引き続き取り組まれるべきテーマである。中高温領域では溶融塩潜熱蓄熱の研究例が現状大半を占めるが、熱伝導率がもともと高い金属系潜熱蓄熱材の開発、およびその利用システムの構築も取り組まれるべきテーマであろう。材料開発では、蓄熱材単体が開発されるだけでは不十分で、それを使える形（例えばカプセル体など）の容器や保管技術までへ昇華させることが求められており、日本の高度なセラミックス製造、加工、利用技術との融合が鍵を握る。また、特に高温領域の潜熱蓄熱システムは、設計コンセプトはすでに提案されているが、現状、実証試験例は皆無であり、実証スケールでのシステム研究も急ぐべきであろう。
- 低温領域の潜熱蓄熱技術は、潜熱蓄熱材のマイクロカプセル化の達成により、応用用途が急激に多様化した。マイクロカプセル化により他の材料とのコンポジット化が容易になり、蓄熱機能付きの機能性材料の開発が可能となったことや、機能性流体としての用途が拓かれたことにその要因がある。この材料開発は、化学蓄熱と違い、物質の入出力を伴わずとも熱の入出力のみで蓄放熱する潜熱蓄熱材の強みを最大限に生かした進化と言えよう。同様に、中高温領域においても、潜熱蓄熱材のマイクロカプセル化達成されれば、固体顕熱蓄熱粒子の代替となり、新たな技術基盤が創出される可能性がある。

3. 化学蓄熱システム

- 吸熱・発熱反応での蓄熱容量の高い無機反応系化学蓄熱材の繰り返し耐久性、および伝熱特性向上に関する基礎研究は、材料とシステムの両側面から検討されることが期待される。この二つは開発当初から検討され続けている課題であり、イノベーションが期待される。
- 実機レベルでの実証研究が期待される。現段階で低温度域から高温度域までほぼ全ての温度領域で反応系とシステムが提案されているが、実機レベルでの操業に関する知見が乏しい。

（５）政策的課題

- 蓄熱は省エネルギーと創エネルギーの両分野を横断する技術である。一方、両分野を横断したプロジェクトは、わが国においては 1990 年代のニューサンシャイン計画まで遡らねばならない。産業分野で進化した蓄熱式熱交換器の膨大な知見、ノウハウは、欧米を中心に進んでいる高温太陽熱発電用蓄熱システムの開発にとって重要な基盤となりうるだろう。一方、高温太陽熱発電用蓄熱システムを中心に開発が進む潜熱蓄熱や化学蓄熱（いずれも開発途上）は、短期的なエネルギー効率改善を日々迫られる産業分野では、魅力的だが芽が出にくい状況にある。以上より、蓄熱や熱輸送技術を一つのキーワードとして省エネルギーと創エネルギーの両分野を横断したプロジェクトの策定が期待される。
- 日本ではここ数年、中低温排熱の回収に注力されている傾向がある。また、温度が高く比較的使いやすい高温排熱は回収済みであることが報告されており、排熱状況の統計調査の結果にもその成果が見て取れる。一方、これらの調査結果はいわば「蛇口を出た後」の値であり、上流側の状態量も含めたエクセルギー有効利用の観点が抜け落ちている。すなわち、エクセルギー有効利用の観点からは、高温排熱をより適切なプロセス（低エクセルギー損失）で再生・利用することが重要だと考えられ、そこでは高温の蓄熱・熱輸送技術の確立がキーテクノロジーとして浮かび上がる。エクセルギーの観点から排熱利用状況を再調査し、政策決定に利用することが期待される。
- 低温排熱の地域融通を考えたとき、既存のインフラ（エネルギーインフラ以外も含む）に熱輸送を付帯させる形態で利用する枠組みの確立が要請される。例えば、三機工業は 2014 年より総重量 10ton 程度の簡易小型熱輸送型トランスヒートコンテナを開発し、簡易なフックロールで運搬できるようにすることで、廃棄物収集ネットワークの中に排熱供給事業を組み込むことを可能にした。これにより、効率的な熱輸送によるランニングコストの低減と、小型化・簡易化により従来のインフラを利用しながらイニシャルコストの低減を試みている。低温熱源はエクセルギーが低く、価格も安いが、身近に大量に存在するため利用機器はシンプルである。何かの「ついで」に熱を輸送するスタイルは、地域熱融通の解の一つだと言えよう。

（６）キーワード

顕熱蓄熱、潜熱蓄熱、化学蓄熱、吸熱・発熱制御、蓄熱材、システム最適化、レギュレーション、太陽熱、太陽発電、氷蓄熱、水蓄熱、排熱、未利用熱

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	● 高密度・長期蓄熱材量[40] ● 本プロジェクトは未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（Thermat）が推進した高密度。長期蓄熱材量の開発プロジェクトである。 ● 蓄熱セラミックス（東京大学と筑波大学との共同）[25]

				● 蓄熱した熱を、圧力を加えることで自在に取り出すことができる新蓄熱材 ● 日本ではここ2-3年で蓄熱技術の重要性が再認識されている。TherMATの活動やSIPを中心に、特に潜熱蓄熱や化学蓄熱に関する基礎研究が精力的に進められている。 ● 各国と比較すると省エネに特化しており、TherMATに代表される低温領域（120℃以下）に関する基礎研究が重視されている傾向がある。この理由として、産業分野では低温排熱が多量に存在し、この有効利用が緊急の課題であること、他国とは違い太陽熱発電プラントを自国に建設する見込みが薄いことが考えられる。 ● 蓄熱分野における日本の研究水準は高いが、国際学術誌などへの報告数は欧州や中国と比べると少ない。
	応用研究・開発	◎	↗	● 水和物スラリを利用した蓄熱空調システム（JFEエンジニアリング）[13] ● 2005年度に川崎市などでオフィスビルに導入され、地下街や大規模商業ビル、工場など幅広い蓄冷空調分野への導入も進んでいる。 ● TherMATのごとく、大学、国立の研究所、企業で構成される組合ができ、基礎から応用研究開発までの一気通貫のプロジェクトの仕組みが作られ、機能し始めている段階である。 ● 空調や建築分野に向けた蓄熱技術では、企業を中心に様々な製品化が加速しており、企業レベルでの応用研究開発が活発化しているものと考えられる。 ● 他国と異なる特徴として、蓄熱輸送に関する実証試験レベルでのプロジェクトが実施された点などが挙げられる。
米国	基礎研究	○	↗	● Solar thermal fuel（太陽熱燃料、MIT）[33] ● 化学反応を利用して太陽エネルギーを熱として放出できる蓄熱材である。太陽熱の長期間の保存を確保し貯蔵安定性を実現した。 ● DOEは2008年に太陽熱発電用の蓄熱システムの研究開発、熱媒体の開発及び蓄熱システムの実証試験に対して事業総額6760万ドルの大型助成を実施している[41]。 ● 現在はSunshotイニシアチブプログラムのもとに、高温用の潜熱蓄熱、化学蓄熱に関する基礎研究が続いている。特に化学蓄熱に大型の予算が助成されている[42]。
	応用研究・開発	○	→	● 電気蓄熱暖房器（南ケンタッキー）[43] ● 本プロジェクトはSouth Kentucky Rural Electric Cooperative Corporation (SKRECC)が推進した家庭向けの電気蓄熱暖房器の導入・実証プロジェクトである。蓄熱材としては高密度セラミックス煉瓦を使用する。 ● Sunshotイニシアチブプログラムのもと、蓄熱システムを備えた太陽熱発電プラントの実証試験が積極的に進められている。 ● 蓄熱システムを備えた世界最大の太陽熱発電所であるIvanpah発電所が、2014年に商業運転が開始した[44]。
欧州	基礎研究	◎	↗	● 高熱エネルギー密度蓄熱材の開発COMTESプロジェクト（オーストリア）[45] ● EUが全体的にサポートし、オーストリアのAEE Intecが研究代表となる。予算額が約470万EURである。主に3タイプの蓄熱材を開発し、それぞれ固体収着蓄熱（ゼオライト）、液体収着蓄熱（水酸化ナトリウム）、過冷却蓄熱（酢酸ナトリウム三水和物）である。 ● 2014年まで実施されていたFP7の成果が続々と公開されている。その報告内容は建築・空調分野の低温領域から太陽熱や産業排熱回収用の高温蓄熱システムまで多岐に渡る。 ● ドイツ政府など各国政府レベルのファンドのもとでの研究も盛んである。
	応用研究・開発	◎	↗	● TCSPower実証プロジェクト（ドイツ）[46] ● 2011年から実証開始、約3年間のプロジェクトである。本システムは集光型太陽発電システムと化学蓄熱システムから構成される。二つの化学蓄熱システムが導入さ、それらは400~450℃で運転する酸化カルシウム～水酸化カルシウムと高温750~900℃で運転できる参加マンガン蓄熱システムである。 ● Marstal地域暖房向けのピット型蓄熱システム（デンマーク）[47] ● 予算額が約733万EURであり、2003年完成した。 ● ソーラーコレクターで集められた熱を地域暖房として使用され、余った熱を蓄熱システムに蓄えられる。新しい二つの蓄熱システムが導入され、砂利水とピット型蓄熱システムである。実証結果から、ピット型蓄熱システムは熱損が少なく、運転もしやすいシステムである。

				● Gemasolar（スペイン）[48] ● Gemasolarは溶融塩蓄熱システムを備えた24時間稼動のタワー型太陽熱発電プラントである。2011年に運転を開始し、発電出力は約20MWで、565℃に達する高温の溶融塩蓄熱システムは15時間分の蓄熱容量を持ち、夜間や曇天時にも発電可能となる。 ● 基礎研究同様、2014年まで実施されていたFP7の成果が続々と公開されて来ている。その報告内容は建築・空調分野の低温領域から太陽熱や産業排熱回収用の高温蓄熱システムまで多岐に渡る。 ● 大型蓄熱装置のパイロットレベルでの試験などが盛んに実施されている。
中国	基礎研究	○	↗	● 低温領域から高温領域まで、多数の論文が報告されており、その研究水準は徐々に向上している。
	応用研究・開発	○	→	● 太陽熱蓄熱式暖房プロジェクト（河北省）[49] ● 本プロジェクトは2万トン級の太陽熱季節性蓄熱式暖房プロジェクトであり、2015年に竣工した。6万9000本の真空管式太陽熱集中熱器を使用し、集熱面積が計1万1600平方メートルに達した。また、89トンのウォータータンク228個を使い、蓄熱容量が2万トンに達した。
韓国	基礎研究	○	→	● 岩盤空洞を利用した蓄熱の特性検討[50,51] ● 韓国地質資源研究院（KIGAM）が本研究を推進している。主な内容は岩盤空洞を利用した大規模蓄熱システムに関するフィージビリティー研究である。熱損失、熱伝達、機械的な安定性などの特性が解明され、岩盤空洞のデザイン検討も行っている。
	応用研究・開発	○	↗	● 大規模太陽熱季節性蓄熱の実証[52] ● 本プロジェクトは韓国エネルギー技術研究院（KIER）が促進している。Jincheon群に設備2000㎡のソーラーコレクターと5000㎥の大規模季節性蓄熱システムが設置されている。成功すれば、韓国の初めてのエコエネルギータウンとなる。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

- 研究開発の俯瞰報告書　環境・エネルギー分野（2015 年）3.2.3.2 節　未利用中低温排熱源の効率的活用

1) 独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター．2013．研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2013 年）第 2 版．CRDS-FY2013-FR-02
2) International Energy Agency “Technology Roadmap Concentrating Solar Power” https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf
3) エネルギー白書 2016 第二節 http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016html/2-1-2.html
4) 鹿園直毅．2013．エクセルギー損失削減に貢献する伝熱促進技術．機能材料．Vol.33 No.7，pp. 13-19.
5) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構．2013．小規模地熱発電及び地熱水の多階段利用事業の導入課題調査手引書

6) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構．2016．未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発
7) 福嶋、鈴川、秋山、加藤、藤林、多田．2002．環境調和型蓄熱式バーナの実用化と将来展望．NKK 技報．178, pp. 26-31.
8) da Cunha JP, Eames P. 2016. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. Applied Energy, Vol. 177, pp. 227-238.
9) 「蓄熱技術の歴史・現在・未来」　建設設備と配管工事 Vol. 50 (2012)
10) NEDO 再生可能エネルギー技術白書
http://www.nedo.go.jp/content/100116325.pdf
11) 大気社　ホームページ
https://www.taikisha.co.jp/service/stratherml.html
12) （社）化学工学会　蓄熱・増熱・熱輸送技術特別研究会編「蓄熱技術-理論とその応用　-第Ⅱ編- 「潜熱蓄熱、化学蓄熱」」 信山社サイテック（2001）
13) NEDO 実用化ドキュメント．2011．蓄熱媒体「水和物スラリ」で賢く冷房省エネルギー空調システム．http://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201101jfe/index.html
14) NEDO 実用化ドキュメントエネルギー問題解決に挑む エネルギー使用合理化技術実用化開発「水和物スラリ空調システム開発」
http://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201101jfe/index.html
15) NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2013 実証事業期間：平成 21 年 11 月～平成 25 年 1 月 JFE エンジニアリング(株) 国際エネルギー使用合理化等対策事業対策事業 国際エネルギー消費効率化等モデル事業 民生用水和物スラリー蓄熱空調システムモデル事業（タイ）
http://www.nedo.go.jp/content/100541208.pdf
16) 武内洋　「挑戦を続ける排熱利用-熱回収技術の現状と展望」化学工学 Vol. 73 (2009) 2-4.
17) BASF 社　ホームページ
http://product-finder.basf.com/group/corporate/product-finder/en/brand/MICRONAL_PCM
18) EDO　再生可能エネルギー技術白書　第二版　第五章　太陽熱発電・太陽熱利用
http://www.nedo.go.jp/content/100544820.pdf
19) 神沢淳　欅田 栄一　「蓄熱・増熱技術」アイピーシー（1985）
20) エネルギーの貯蔵・輸送　電気・熱・化学（2008）183-193.
21) 青木勇　中島優一　東康夫　「高効率熱輸送システム「サーモウェイ」の実用化」
神鋼環境ソリューション技報 4 (2007) 16-21.
22) 堤敦司「熱エネルギー高度有効利用と省エネルギー技術」フロンティア出版（2015）138.
23) 堤敦司「熱エネルギー高度有効利用と省エネルギー技術」フロンティア出版（2015）142.
24) 堤敦司「熱エネルギー高度有効利用と省エネルギー技術」フロンティア出版（2015）188
25) 東京大学、筑波大学．2015．永久的に熱エネルギーを保存でき、弱い圧力で放熱できる“蓄熱セラミックス”を発見．
http://www.tsukuba.ac.jp/wp-content/uploads/0115c773d702e4cc8b185c826120f0df1.pdf
26) JX エネルギー株式会社 ホームページ
http://www.noe.jx-group.co.jp/business/material/ecojoule/
27) 三菱電線工業株式会社　ホームページ

http://www.mitsubishi-cable.co.jp/reinetsu/home/chikunetsu/
28) 矢野技研株式会社　ホームページ
http://www.yano-giken.com/product/detail00.html
29) JSR 株式会社　ホームページ
http://www.jsr.co.jp/news/0000086.shtml
30) Taichi Inagaki and Toyokazu Ihida "Computational Analysis of Sugar Alcohols as Phase-Change Material: Insight into the Molecular Mechanism of Thermal Energy Storage" The Journal of Physical Chemistry C, 120 (2016) 7903–7915.
31) 株式会社高純度科学研究所　ホームページ
http://www.kojundo.co.jp/Japanese/Information/2015/20150515.html
32) Doerte Laing et al. "Development of high temperature phase-change-material storages" Applied Energy 109 (2013) 497-504.
33) Zhitomirsky D, Cho E, Grossman JC. 2016. Solid-State Solar Thermal Fuels for Heat Release Applications. Advanced Energy Materials, Vol. 6, 1502006
34) 経済産業省　ホームページ
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/sho_ene/koujo_wg/2015/pdf/002_04_00.pdf
35) 未利用エネルギー革新的活用技術研究組合　ホームページ
http://www.thermat.jp/
36) NEDO ホームページ http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100314.html
37) JST ホームページ
https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FU/EU20140221.pdf
38) Drake Landing Solar Community. http://www.dlsc.ca/
39) Gujarat Solar One. http://www.cspworld.org/cspworldmap/gujarat-solar-one
40) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（Thermat）. http://www.thermat.jp/
41) DOE ホームページ
http://energy.gov/articles/doe-funds-15-new-projects-develop-solar-power-storage-and-heat-transfer-projects-676
42) DOE ホームページ
http://energy.gov/articles/energy-department-announces-projects-advance-cost-effective-concentrating-solar-power
43) South Kentucky Rural Electric Cooperative Corporation (SKRECC). Electric Thermal Storage. http://www.skrecc.com/
44) DOE ホームページ
http://energy.gov/articles/energy-secretary-moniz-dedicates-world-s-largest-concentrating-solar-power-project
45) COMTES. http://comtes-storage.eu/
46) Thermochemical energy storage for solar power plants – European research project TCS-Power. http://www.tcs-power.eu/home.html
47) Marstal district heating system. http://www.solarmarstal.dk/

48) Torresol Energy. Gemasolar. http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/gemasolar-plant/en
49) MICOE. 20000 ton solar thermal seasonal storage and heating project (the largest in china) was completed.
http://en.micoe.com/events/20000-Ton-Solar-Thermal-Seasonal-Storage.shtml
50) Park M, Park ES, Sunwoo C. Heat transfer and mechanical stability analyses to determine the aspect ratio of rock caverns for thermal energy storage. Solar Energy, Vol. 107, pp. 171-181, 2014.
51) Park JW, Park D, Ryu DW, Choi BH, Park ES. Analysis on heat transfer and heat loss characteristics of rock cavern thermal energy storage. Engineering Geology, Vol. 181, pp. 142-156, 2014.
52) Eco-energy Town, Energy Self-reliant City and Green City.
http://www.gtck.re.kr/frt/center/en/tech/green_focus.do?pageMode=View&nttId=3697&nowNum=4

3.18　エネルギーキャリア

（1）研究開発領域の簡潔な説明

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

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

資源に乏しい我が国にとって化石燃料依存を低減しCO_2を削減することは必須の課題である。水素はCO_2を排出しないことに加え、化石燃料・再生可能エネルギーからの製造が可能であるため、エネルギー供給源の多様化にも寄与し、エネルギー安全保障に資する利点がある。

再生可能エネルギーは、エネルギーを生み出す場所と使う場所との時間・空間的なズレが大きいことから、一旦貯めて運んで使うことが望まれている。その際、蓄電池と比べて、とりわけ大容量、長期間・長距離のエネルギー貯蔵・輸送・利用に有利な方法として、水素あるいは他の化合物に変換して運ぶ、エネルギーキャリアの技術が注目されている。またこの技術は、化石燃料を産出元でCO_2回収貯留（CCS : Carbon dioxide Capture and Storage）との組み合わせることで生産したCO_2フリー水素を輸入する際にも活用できることから、我が国では国による研究開発が推進されている。

水素は利用技術として燃料電池との組み合わせにより高効率化が可能になり、燃料電池自動車、家庭用などの分散型高効率電源として、さらには複合サイクル発電などと組み合わせた発電の高効率化への応用も期待されている。その他にも、水素を燃料として発電する技術として水素ガスタービン、水素ガスエンジンの研究もされており分散型発電、事業用発電として期待されている。なお利用技術である燃料電池については、個別領域として別途記載するため、ここでは省略する。

［動向（歴史）］

水素に関連したこれまでの国内プロジェクトとしては、1974 年からのサンシャイン計画、それに引き続くニューサンシャイン計画、さらに 1993 年から 2002 年まで実施された WE-NET（World Energy Network）で実施された。WE-NET の目的は水素を二次エネルギー媒体として、再生利用エネルギーの国際的な利用を実現することであり、水素製造・輸送・貯蔵・利用等の要素技術と全体システム検討、水素インフラ技術が検討された。また、2002 年度から 2011 年度まで 2 期にわたって実施された JHFC（Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project）では燃料電池自動車（FCV）と水素インフラ等の実証プロジェクトとして実施された。さらには、2004 年からの家庭用燃料電池・補機プロジェクト、2005 年からの FC-Cubic（産総研・固体高分子形燃料電池基盤研究センター）、2006 年からの Hydrogenius（九州大・水素材料先端科学研究センター）、2007 年からの HydroStar（NEDO 水素貯蔵材料先端基盤研究事業）、2008 年からの HYPER-FC（山梨大・燃料電池ナノ材料

研究センター）などが知られる[1]。また水素インフラの課題に対しては 2009 年に設立された水素供給・利用技術研究組合（HySUT）が対応している。なお、日本では水素インフラ整備拡大を優先しており、現状においては化石燃料や副生ガスからの水素が主な供給源の前提となっている。

エネルギーキャリア関連に特化した政策としては、2013 年に経済産業省・文部科学省合同検討会の検討をベースに、METI「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」ならびに ALCA 特別重点プロジェクト「エネルギーキャリア」がスタートした。その後、後者は 2014 年秋から SIP（内閣府戦略的イノベーション創造プログラム）として再スタートしている。これら研究開発は、2020 年東京オリンピック・パラリンピックでのショーケースとしての実証を出口目標としている。また経済産業省「再生可能エネルギー輸送・貯蔵等技術開発」においては、低コスト水素製造技術開発（アルカリ水電解の高効率低コスト化＝25 万円/Nm^3/h の半減）などが進められている[2),3)]。また、2014 年 4 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、水素利用の推進が明記され、家庭用燃料電池のエネファームや FCV の普及拡大、未利用褐炭などの資源からの水素製造、水素発電の実用化などが盛り込まれた。

現在、エネルギーキャリアの研究開発は、液体水素、アンモニア、有機ハイドライドの 3 つが重点的に進められている(表 3-7 参照)。

表 3-7　エネルギーキャリアの特徴

エネルギーキャリア	水素	液体水素	アンモニア	（有機ハイドライド）メチルシクロヘキサン
化学式	H_2	H_2	NH_3	C_7H_{14}
分子量（g/mol）	2.0	2.0	17.0	98.2
標準燃焼熱（kJ/mol）	286	286	382.6	-
（kJ/g）	141.8	141.8	22.5	–
沸点 （℃）	-253	-253	-33.4	101
密度 （g/cm^3）	-	0.0706	0.682	0.769
質量水素密度 （wt%）	100	100	17.8	6.16
体積水素密度	2 kg/100 L (35 MPa)	7.06 kg/100 L	12.1 kg/100 L 液体	4.73 kg/100 L
水素放出に伴うエンタルピー変化（kJ/mol-H_2）	–	0.899	30.8	59.4
燃料電池理論起電力 （V）	1.23	1.23	1.17	1.07
輸送手段	高圧容器	タンクローリー	既存設備 (タンカー・列車・ローリー)	既存設備転用 (ガソリンと同様)

出典：CRDS-FY2012-SP-08 より抜粋

なお有機ハイドライドはトルエンに水素を付与した化合物であるメチルシクロヘキサンを用いており、利用先で脱水素反応により水素を取り出した後、残りのトルエンについては利用先から回収し、再利用することになる。また上記の 3 種類以外にもジメチルエーテル、メタノール、メタン、水加ヒドラジン、FT 合成燃料、ギ酸、シュウ酸、金属水素化物、金属酸化物などが知られ、それぞれ研究開発が進められている。

● 水素・エネルギーキャリア製造

水素を作る方法として、炭化水素の水蒸気改質による水素製造、石炭ガス化からの水素製造、再生可能エネルギー由来電気による水素製造、太陽光を活用した光触媒・光電極触媒による水素製造、などが知られる。低炭素社会の実現という視点からは、再生可能電力

による水分解や、バイオマス資源からの水素製造などが期待されている。再生可能電力（風力発電、太陽光発電、植物生育を介したバイオマス利用）由来の水の電気分解の方法としては、アルカリ水電解、固体高分子形水電解、固体酸化物形水電解（SOEC）などを始め、電気化学的触媒反応などが展開されている。

また、エネルギー転換効率のさらなる向上として、電気からエネルギーキャリアを直接転換する技術も検討されている。例えば電気によってトルエンと水から直接メチルシクロヘキサンに転換、さらにはメチルシクロヘキサンと酸素から直接水と電気を取り出すことができれば、水素を介さずにエネルギーの転換が可能となり、高効率なシステムの実現が期待できる。またアンモニアについても、水と空気と再生可能電力による電解合成が可能になれば、エネルギーキャリアという観点のみならず、工業生産という点でも大きな意義がある。

再生可能エネルギー由来の水素活用に関する海外の事例としては、ドイツにおける SolarFuel プロジェクトなどが知られる。これは余剰となる再生可能エネルギー由来の電力と、工場などから回収した二酸化炭素から、化学反応によりメタンを生産し、従来からある都市ガスパイプラインに流す（Power to Gas と呼ばれる）ものである。2009 年に 25kW の試作機を作り、再生可能電力と水と空気中の CO_2 から、メタンを 40%の効率で作ることに成功した。現在 20MW クラスを目指してプロジェクトが進められている。またドイツでは Hybrid Power Plant プロジェクトが進められており、石油・ガス・電力などがリンクして、クリーンな電力・熱・水素の同時供給を検討している。

● 運搬・利用：FCV と水素ステーション

FCV については、トヨタが 2014 年末に世界に先駆けて量産型車を発売するなど、普及に向けた動きが進行している。今後については、燃料電池技術をフォークリフトや船舶などに拡大するとともに、2025 年度頃に同車格のハイブリッド車同等の価格競争力をもつことを目指している [3]。FCV の普及にあたっては、燃料を補給するためのインフラ整備が欠かせないが、四大都市圏を中心に 2016 年 6 月時点で 77 ヵ所の水素ステーションが稼動している [4]。水素ステーションでの水素供給に関わる課題については、HySUT（現・水素供給利用技術協会）による実証事業を通じて解決が図られている。また、燃料コストもガソリン等価レベルにまで低減しなければならない。さらに、このような新たな燃料の利用に当たっては、社会的な理解と受容性を促す官民の連携による努力も不可欠である。現在の水素ステーションの水素の供給源は高圧水素もしくは液体水素のローリー輸送や炭化水素改質水素が主であるが、今後の普及拡大に向けて、有機ハイドライドやアンモニアなどの多様なエネルギーキャリアを活用するべく研究開発が行われている。

SIP エネルギーキャリアにおいても、2020 年東京オリンピック・パラリンピックにおける水素インフラ整備をにらみ、メチルシクロヘキサンをキャリアとする水素ステーションの実証化を進めている。メチルシクロヘキサンは備蓄に適した物性を有し（常温常圧で安定な液体）、エネルギー備蓄の観点での現在の石油備蓄に代わる再生可能エネルギー備蓄材料にもなりうる。今後の研究としては、脱水素に要する熱が、得られる水素の燃焼熱の 1/4 に近いことから、吸熱反応の熱マネジメントによるエクセルギー回生と、そのための低温作動可能な高性能触媒開発、それも白金など貴金属を用いない触媒の開発が望まれている。

また水素貯蔵容器については、炭素繊維などによって強化・軽量化され、35MPa と

70MPa の充填圧のものが利用されているが、いずれも製造コストを大幅に低減するとともに、容器と充填の安全性に関わる国際基準調和を我が国が主導して推進する必要がある。また、水素供給ステーションに関しても、設置費用に約 4 億円を要するのが現状であり、それを半減することが目標とされる。

● 利用：水素発電、アンモニア利用

水素を安定かつ大量に活用するための有力な手段として水素発電の実用化があげられる。水素発電は CO_2 フリー水素の利用により、環境負荷の極めて低い発電方法になる可能性を秘めている。すでに国内外において水素ガスタービン開発が行われているが、燃焼温度が高く、燃焼速度が速い水素を低 NOx で燃焼するため水噴射型が主流となっている。国内においては、従来型の水素タービンよりも高効率かつ低コストのシステムを目指して、NEDO のプログラムとしてドライ型水素タービンの開発されている。また、SIP のプログラムとして水素ガスエンジンの実用化を目指した要素開発も開始されている。これらの技術の実用化にともない、水素の安定的かつ大規模な需要が発生し、製造・輸送・貯蔵・利用の一連の水素サプライチェーンが構築され、水素のコストが低下することで、上記の分散型電源や FCV などへの波及効果が期待されている。

アンモニアのエネルギーキャリアとしての利用については、SIP エネルギーキャリアプロジェクトによって検討されている。アンモニアはこれまで肥料や化学原料として大量に使用されているが、燃料やエネルギーキャリアの検討例は限られている。SIP ではアンモニアの製造・利用技術として①CO_2 フリー水素利用アンモニア合成システム開発、②アンモニア水素ステーション基盤技術、③アンモニア燃料電池、④アンモニア直接燃焼の 4 課題が検討されている。

アンモニア直接燃焼については過去にもバスや乗用車の燃料として利用された例がある。炭化水素系燃料よりも燃えにくい燃料であるが、燃焼器への適用は可能である。SIP プログラムでは 2014 年にアンモニアと灯油の混焼によるマイクロガスタービンの運転が実施され、さらに 2015 年にアンモニア専焼で 50kW のガスタービン燃焼に成功している。燃焼中にアンモニア燃料からの Fuel NO_x の発生を抑える方法の開発が課題である。

水素キャリアとしてのアンモニアの利用法として、アンモニアの分解により水素を生成させ、水素ステーションなどのサプライチェーンへと供給することが考えられる。アンモニアの分解は触媒により 600℃程度の反応温度で比較的容易に進行させることができる。担持 Ru 触媒が活性とされる。一方、車載用の低温作動の燃料電池の ISO で定められた許容濃度は 0.1ppm とされている。これは燃料電池がプロトン交換膜を使用しているために残存アンモニアにより性能劣化を起こすためである。触媒反応後 1000ppm レベルの残存アンモニアを吸着などにより分離する技術開発が必要とされる。

アンモニアを燃料とする燃料電池については燃料適合性に優れた固体酸化物形燃料電池（SOFC）への使用が期待される。SOFC は天然ガスを燃料とした発電においてもその高い発電効率が報告されている。アンモニアの触媒による分解温度は 600℃程度であるが SOFC の運転温度は 750～900℃程度であり、燃料電池に供給すると容易に水素に分解される。またアンモニア分解は吸熱反応であり、燃料電池発電の発熱を効果的に利用することにより高効率化が期待できる。SOFC スタックに直接アンモニアを供給する方法、燃料電池室内で触媒反応器を設置してアンモニア分解を進行させる方法やアンモニアのオート

サーマル分解反応を組み合わせるなどの燃料供給方式が考えられる。2015 年にアンモニアを 10 段の SOFC スタックに直接供給して発電を行った。アンモニアを供給した発電では同じスタックに水素を供給した場合と同等の 255W の出力が得られ、アンモニア直接供給燃料電池が問題なく使用できることが明らかになった。今後の高出力化が期待されている [7]。

（３）注目動向

[新たな技術動向]

- 水電解などに用いることのできる固体電解質の開発に注目が集まっており、水を表面に有する構造によるプロトンキャリア型材料、格子内の欠陥を利用した酸素イオン伝導型材料がそれぞれ精力的に検討され、固体電解質の温度空白域であった 300～500℃のレンジを埋めつつある。この領域にて作動可能なイオン伝導材料が発見された時には、水素を絡めた多くの反応が実現可能になり、今後の研究の進展が期待される [5]。

[注目すべきプロジェクト]

- SIP エネルギーキャリアは水素を効率よく低価格で生産する技術の研究、効率よく輸送・貯蔵する液体水素やエネルギーキャリア技術の研究、規模の経済につながる水素の用途拡大に資する研究・実証が必要であるとの理由でプロジェクトが開始された。水素の製造、輸送・貯蔵はコストがかかり、現状の水素製造コストはガソリンの数倍となっている。このため、水素を効率よく低価格で生産する技術の研究、効率よく輸送・貯蔵する液体水素やエネルギーキャリア技術の研究、規模の経済につながる水素の用途拡大に資する研究・実証が必要となる。
- バリューチェーン全体を見据えた研究開発として NEDO 事業「大規模水素エネルギー利用技術開発」において液体水素、有機ハイドライドをエネルギーキャリアとして 2020 年の実証に向けて開発が推進されている。今後水素が広く国民・社会から受け入れられるための運搬・貯蔵・利用等に関する安全基準の検討や、他の燃料との競合や水素の経済評価等、それらを踏まえた導入シナリオの策定が重要となる。2020 年までにガソリン等価の FCV 用水素供給コストを、2030 年までにゼロエミッション電源として水素発電の研究開発を行い、東京オリンピック・パラリンピックでのエネルギーキャリアを活用した水素実証等も通じて水素社会の実現に向けた取組を推進する。
- CREST/さきがけ「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けた革新的エネルギーキャリア利用基盤技術の創出」。SIP エネルギーキャリアが実用化に近い技術について実証を目指して推進されるのに対し、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 CREST/さきがけではより萌芽的な基礎研究を採択し、SIP でカバーできなかったエネルギーキャリアなども検討対象としている。平成 25 年～27 年の 3 期にわたって、チーム型研究の CREST として合計 9 チーム、個人研究さきがけとして 12 研究者を採択した。エネルギーキャリアとしてはアンモニア、有機ハイドライドのほかに、ギ酸、過酸化水素、アルコール、メタンなどを取り扱い、新規触媒、電解合成、光反応など新規合成法や利用技術としての燃料電池、燃焼、分離などへの展開を検討している。この中で産総研によるギ酸を水素キャリアとして用いる方法は圧縮機を使わずに 40MPa 以上の高圧水素を連続製造できること

から、水素ステーションのコンパクト化が期待できる。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

- 再生可能エネルギーの大量貯蔵という観点での効率や耐久性、関連材料の製造技術については未解決の課題も多く、経済性も含めた実用技術確立には程遠い状態である。革新的な材料の開発や全体を通した総合的なシステム最適化技術の開発がこれから必要となる。このような研究を推進していく上では、劣化機構の解明などの基礎研究の強化が不可欠となる。また、材料と制御の両面からのアプローチが重要であり、産業界との連携も含めた異分野融合による総合的な研究開発の推進が鍵となる。

［今後取組むべき研究テーマ］

- 電力⇔水素または化合物キャリア相互変換プロセス高効率化のための新規電極・触媒材料の開発（高活性電極触媒による高効率化、内部抵抗の低減、劣化機構の解明と高耐久材料の開発、新規アンモニア電解合成など）
- 水素⇔化合物キャリア転換用触媒・プロセス開発（高転換効率触媒とこれを有効に活用しうるプロセス最適化、反応・生成熱を有効に活用しうる熱供給・熱回収・熱蓄積技術）
- 材料の設計加工技術の開発（ガス・液体の流体解析と制御、大規模化・大面積化のための材料製造・加工技術）
- 解析・分析技術の開発（反応解析・分析技術、界面や各材料での電子移動機構の解析、シミュレーションによる解析）
- 各工程を組み合わせたシステム最適化技術（再生可能エネルギー電力制御、反応熱を有効に供給するための他の熱源との組み合わせ・コジェネ化技術）
- 自動車用水素貯蔵技術については具体的な研究開発課題として以下が挙げられる。
  - 水素貯蔵材料開発（金属系水素貯蔵材料、吸着系水素貯蔵材料、Mg 系水素貯蔵材料、固溶体および窒素系水素貯蔵材料などについて、水素貯蔵のメカニズム解明とその最適構造の予測、中性子線、X 線をもちいた先端解析技術による材料評価解析技術、水素貯蔵特性の評価・推定が可能なモデル・シミュレーション技術、先端的水素貯蔵・放出材料の探索など）
  - 水素貯蔵システム（水素貯蔵材と高圧タンクの複合システムの軽量化、高効率熱制御技術、金属系水素貯蔵材料の反応性向上・可逆性向上・軽量化、など）

（５）政策的課題

エネルギーキャリアの普及は低炭素社会に対する社会的要請の醸成、CO_2 フリー水素の普及シナリオの実現に向けた制度上の課題明確化と解決、安全性および社会受容性の検証、再生可能エネルギーの利用を含めたエネルギー利用システムのシナリオ検討、エネルギーキャリアの利用拡大あるいは燃料電池自動車の普及を可能とするための技術・材料のより広範囲な探索への継続的資源投入などが挙げられる。従って、中長期にわたる統合的な戦略のもと

に、系統的な研究開発の推進が重要となる。

また FCV 用水素ステーションにおいても水素の供給ビジネスで自立することは当面難しく、ステーションの維持費用も含めた国の支援が不可欠とされている。その他、安全性の確保に向けては、国内でも高圧ガス保安法をはじめとした法規制により担保されている。その一方で、法規制が普及にあたってのネックになる場合もあることから、水素インフラにおける規制の再点検・見直しも検討されている状況である。

（６）キーワード

エネルギーキャリア、再生可能エネルギー、負荷平準化、電力変換、水素、液体水素、アンモニア、有機ハイドライド、水素ステーション、水素ガスタービン、水素ガスエンジン

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	アンモニアや有機ハイドライドのほかに、ギ酸、メタノール等のキャリアとしての製造、利用に関する研究が行われている。液化水素関連として、磁気冷凍の基礎研究や概念設計などが行われている、
	応用研究・開発	◎	↗	SIP（内閣府戦略的イノベーション創造プログラム）において、アンモニアや有機ハイドライドを中心に製造・利用に関する技術開発を推進している。ここでは、アンモニア発電や水素エンジン技術、有機ハイドライド脱水素システムの開発が行われている。 一方、NEDO水素利用等先導研究開発事業では、再生可能エネルギー導入加速と水素の利活用を促進するために、電解による水素製造技術や液化水素貯蔵技術などの開発が行われており、大型機の実証も計画されている。 NEDO事業として、日本初の5t/日クラスの水素液化機の開発されている。(川崎重工業)NEDO事業として2020年を目標にLH2運搬船、LH2積荷/揚荷基地の開発が進んでいる（HySTRA）
米国	基礎研究	○	↗	DOEでは、2020年までにクリーン水素コスト4ドル/kg水素以下にすべく、水電解を始め、太陽熱利用やバイオ技術等による水素製造等に関する研究開発プログラムを実施している。 磁気冷凍とボルテックス(Vortex)冷凍方式の研究がなされている。(DOE、NREL再生可能エネルギー研究所)またKH2輸送貯蔵ダンクとして断熱材の開発と国際規格の検討がされている。
	応用研究・開発	○	↗	自動車会社、エネルギー会社、政府機関、燃料電池関連企業等で組織されたカルフォルニア燃料電池パートナーシップ（CaFCP）がFCV・水素ステーションの普及に取り組んでおり、2020年時点のFCV保有1.8万台に対して、100箇所の水素ステーション整備を見込んでいる。 またカリフォルニア州では、2018年以降に適用される新たなZEV規制が制定され、Pure ZEV(Pure Zero Emission Vehicles)の対象はEVとFCVのみとなる。さらに同州の基準を採用する州(Section 177 States)も増えている状況である。ただしFCV向け水素供給インフラの整備が課題となっている。 DOEの水素関連プログラムでは、水分解技術の実証等も進められている。 水素の液化（BOG液化）と貯蔵を一体化したシステムの開発が行われている（NASA） 車載用低温高圧タンク(圧力350気圧、容積：300L)が開発された。(ローレンスリバモア研究所、Linde社)
欧州	基礎研究	○	↗	水素に関して広い範囲で研究開発が進められている。有機ハイドライドについては、1980年代にユーロ・ケベック計画（カナダで製造した水素をヨーロッパに海上輸送する）において研究された経緯があるが触媒に課題が残されていた。 最近では、自動車会社などがカルバゾール系化合物をキャリアとするシステムについて研究している例がある。

				液化技術としてIDEALHYプロジェクト(2011～2013年)で、高効率のオルソパラ変換触媒の研究が行われた。
	応用研究・開発	◎	↗	再生可能エネルギーからの水素製造に関する実証として、イギリス(The PURE Project)、ノルウェー(Utsira)、スペイン(RES2H2)、スコットランド(Hydrogen Office PJ)、フランス(Vignola)など多くの国で実施されている。Hydrogen Mobility Europeの第2フェイズ（H2ME-2）が欧州37団体の協力のもと、6年計画でスタートする。このプロジェクトでは、前プロジェクトであるH2ME-1のFCV　300台、水素ST　29カ所から、FCV　1230台に拡大され、水素STはさらに20か所追加される。また、電解水素STも実証試験される予定である。 最近では、ドイツを中心に再生可能エネルギーからの水素、メタン製造について実証が進んでいる。さらに、地域の各エネルギー供給公社（シュタットヴェルケ）で太陽光や風力による電力供給が拡大しており、地域間融通のための電力貯蔵に関する技術開発も進む可能性がある。 2013年EUのALKAMMONIAプロジェクトとして、アンモニアを燃料としたアルカリ燃料電池電源の開発がすすめられている。 同年イタリアMarangoni社がアンモニア/ガソリンのハイブリッド燃料による自動車を発表した。 STORHYプロジェクトで車載用複合材タンクが開発された。 車載用低温高圧タンク(350気圧)を開発し、現在水素燃料電池自動車に搭載し実証試験が行われている。(BMW社)
中国	基礎研究	△	→	基礎レベルで再生可能エネルギーとともに水素、水素貯蔵材に関する研究開発が進められている。
	応用研究・開発	△	→	2015年に発表されたMade in China 2025において、重点分野として省エネ・新エネルギー自動車を挙げている。普及を支援し、自動車の低炭素化・情報化等のための技術開発を推進することを表明している。
韓国	基礎研究	△	→	水素貯蔵材料などの研究開発が行われている。有機ハイドライド等については触媒などの基礎研究がなされている。
	応用研究・開発	△	→	燃料電池自動車の量産体制の構築と実用化に向けた取り組みが進められている。 2013年Korean Institute of Energy Researchにおいてアンモニア/ガソリン燃料による乗用車を発表した。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

- 俯瞰報告書　研究開発の新しい動向（2016 年）／CRDS-FY2016-FR-01
- 俯瞰報告書　環境・エネルギー分野（2013 年）第 2 版／CRDS-FY2013-FR-02
- 戦略プロポーザル　再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術／CRDS-FY2012-SP-08
- 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）エネルギーキャリア（新しいエネルギー社会の実現に向けて）研究開発計画（修正案）2016 年 3 月 10 日内閣府

1) 橘川武郎、エネルギー新時代におけるベストミックスのあり方、第一法規、2014
2) 水素・燃料電池ロードマップ 2013
3) NEDO、エネルギー技術戦略ロードマップ、2014

4) 燃料電池実用化推進協議会 HP
http://fccj.jp/hystation/index.html#hystop （2016 年 6 月 7 日アクセス）
5) JST-CRDS 戦略プロポーザル　反応プロセス革新　CRDS-FY2014-SP-05、2015
6) 産総研研究成果発表
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2015/pr20151211/pr20151211.html

3.19　燃料電池

（1）研究開発領域の簡潔な説明

燃料電池は、水素などの燃料と酸化剤である空気（酸素）から電気化学反応（酸化還元反応）により電気エネルギーを高効率に直接取り出す装置である。燃料電池自動車、家庭用・業務用の高効率分散型コジェネレーションシステム、さらにはガスタービンと組み合わせた複合サイクル発電への応用等が期待されている。ここでは各種燃料電池およびそのシステムを対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

燃料電池は、化学エネルギーから直接的に電気エネルギーを取り出すことができるため、カルノー効率の制約を受けない。このため内燃機関に比べてエネルギー変換効率が高く、CO_2排出の大幅削減が可能であり、今後のクリーンエネルギー時代のキーテクノロジーである。我が国における燃料電池を用いた商用化例としては、2009 年度に世界で初めて、PEFC を用いた家庭用燃料電池コジェネシステムが実用化・販売開始され、2016 年 6 月現在で累積 15 万台上が設置されている。また 2014 年 12 月には世界に先駆けて量産型の燃料電池自動車（FCV）が販売されており、高効率化や水素社会の実現に向けた対応の一つとして研究開発が推進されている。このように我が国における燃料電池は、特に応用研究・開発において強みのある分野となっている。

［動向（歴史）］

燃料電池は、セルと呼ばれる単電池が積層する形になっており、そのセルはイオン伝導性を持つ電解質膜とその両側にある燃料極（アノード）と空気極（カソード）で構成され、それぞれの極は電気化学反応を促進する触媒活性のある物質より成っている。電解質の種類によって固体高分子形（PEFC）、リン酸形（PAFC）、溶融炭酸塩形（MCFC）、固体酸化物形（SOFC）の大きく 4 種類に分類され、前者 2 つはプロトン、MCFC は CO_3^{2-}、SOFC は O^{2-} がイオン伝導体となる。また最近では、電解質にアニオン膜を用いて OH^- がイオン伝導体となる全固体アルカリ形(SAFC)が、安価な金属触媒が利用できる可能性があることから注目されている。

我が国では PEFC と SOFC の実用化が進展している。PEFC は高出力密度化や小型化が可能であり、室温付近で動作することから車載用や家庭用コジェネレーションシステムなどの用途で有望な電池である。700～900℃付近の高温で作動する SOFC は、高発電効率が特徴であり、熱電比の小さい家庭向けとして、また業務用・産業用用途や既存のガスタービンと組み合わせたコンバインドサイクル発電システムは 70%を超える高効率発電の技術としても期待されている。

燃料電池の原理は 1801 年に発見され、1839 年に水素と酸素の電気化学反応から、電気エネルギーを取り出すことに成功している。実用化は 20 世紀になってからであり、1958 年米国のユナイテッド・エアクラフト社によるアルカリ型燃料電池である。1961 年からは米国 NASA による研究が進められ、ゼネラル・エレクトリック（GE）社製の燃料電池（固体高

分子形）がジェミニ 5 号に搭載された。その後のアポロ計画ではアルカリ系の燃料電池を搭載されている。また 1971 年に米国 TARGET（ターゲット）計画で、定置用リン酸形燃料電池の開発が始まり、12.5kW の実証実験が行われた。カナダでは、1987 年にバラード社がフッ素系イオン交換樹脂膜を用いた固定高分子形燃料電池を開発し、1994 年にはドイツのダイムラー・ベンツ社がバラード社の燃料電池を搭載した世界で初めての燃料電池自動車（FCV）を発表している。

日本では、石油代替・省エネルギー技術の開発を目指して始まった 1981 年通産省の「ムーンライト計画」（93 年からは「ニューサンシャイン計画」）において、燃料電池の開発が組み込まれ、1992 年リン酸形燃料電池によるフィールドテストが行われた。90 年代にはトヨタ、日産、ホンダが燃料電池自動車の開発に着手、また家庭用燃料電池についても国内電機メーカーが開発に着手している。2011 年には、自動車・家庭用電気・エネルギー企業が参加する燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）の参加企業 13 社によって、2015 年度からの FCV の普及に向けた市販開始と 4 大都市圏での水素ス基礎研究、実用化研究としては、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の新エネルギー技術開発プログラム「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発」（2005～2009 年度）、経済産業省（METI）の「水素・燃料電池実証プロジェクト（Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project）」（2002～2010 年度）などによって実証試験と水素インフラ整備が行われてきた。セルスタックに関しては出力密度 2.5～3kW/L レベルの高性能化や高耐久化が図られ、FCV 本体の耐久性や信頼性も向上した。量産の準備を経て、2014 年 12 月、世界に先駆けてトヨタ自動車から燃料電池自動車 MIRAI が一般販売された。

定置用燃料電池については、2005～2008 年 NEDO/NEF の「家庭用 PEFC の大規模設置事業」、2007～2010 年の「家庭用 SOFC の実証試験」を経て、2009 年度に世界で初めて、PEFC を用いて家庭用燃料電池コジェネシステム「エネファーム」が実用化・販売開始され、2016 年 6 月現在で累積 15 万台上が設置されている。その後、性能向上、耐久性向上、コンパクト化、そしてコスト低減が図られている。一方 SOFC に関しては、2007～2010 年に 200 台規模の SOFC 実証試験が実施され、その成果を踏まえて、2011 年 JX 日鉱日石エネルギーが SOFC タイプエネファームの発売を開始した。2016 年 4 月より大阪ガスは発電効率 52%の燃料電池を販売開始している。また大阪ガスでは、電力自由化に合わせて、SOFC の定格一定運転を目的として、余剰電力を系統に逆潮流して買い取る、電力買取プランも提案し、普及拡大を図っている。このように家庭用定置型電源・コジェネレーション利用分野において、我が国は、他国に先んじて実用化を達成し、世界を圧倒的にリードしている。現在、家庭用燃料電池では、PEFC の総合効率が 94～95%レベル（発電効率は 40%程度）、SOFC においてはアイシン精機の最新モデルにおいて発電効率が 52%まで向上している。またコスト低減や耐久性向上の面でも大きな進歩がみられる。PEFC では、メーカー希望小売価格が、160 万円と 2009 年発売開始時点(300 万円前後)の約半分以下まで低下し、SOFC も 200 万円を切る価格になるなど、低コスト化が着実に進んでいる。耐久性の面では、PEFC は 7 万時間を超える耐久性が、SOFC でも 4 万時間の耐久性を見通すことができるようになり、着実に耐久性が向上している。なお、エネファームに関する国の補助金は当初 2015 年度で打ち切られる予定であったが、METI によるスキーム見直しの上、2016 年度以降も継続され、PEFC では 2018 年度、SOFC で 2020 年度をまで継続される予定である。

産業用燃料電池としては、三菱日立パワーシステムズが NEDO における実証試験の成果を反映した複合発電システムの分散電源として、SOFC-マイクロガスタービン（MGT）ハイブリッドシステム(定格出力 250kW、都市ガス利用)を九州大学(伊都キャンパス)におけるグリーンアジア国際戦略総合特区“スマート燃料電池社会実証”の実証研究用として 2015 年 3 月に設置し、運転継続中である。今後、2016 年度末まで、長期耐久性検証試験等を実施する予定となっている。また、業務用数 kW 級 SOFC システムとして、京セラ、三浦工業、数十 kW 級システムとして日立造船､の各社が 2017 年度の市場導入を目指して開発を継続中である。

NEDO は「燃料電池・水素開発ロードマップ 2010」を策定し、燃料電池・水素利用技術として定置用燃料電池システム、燃料電池自動車、水素インフラの 3 本柱を設定し、燃料電地に関しては特に PEFC と SOFC に注力した技術開発、実証研究、基準づくり・標準化を一体化させた研究開発が実施された。METI では「水素・燃料電池戦略協議会」が設置され、産業界との議論を踏まえて「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が 2014 年 6 月に策定された。ロードマップでは、2030 年までの水素社会の構築の工程表を提示し、家庭用燃料電池や燃料電池自動車に加えて、CO_2 フリーな水素による発電を想定することで、より一層の低炭素高効率社会の実現を目指している。この中で PEFC は、更なる低コスト化と耐久性向上のための研究開発を実施し、乗用車のみならず商用車や鉄道・船舶・航空機などへ利用先を拡大することが期待されている。なお 2016 年 3 月に改定された「水素・燃料電池ロードマップ」では、家庭用燃料電池の更なる価格低下（2019 年までに PEFC 型 80 万円、2021 年までに SOFC 型 100 万円）、FCV の普及加速（2020 年までに 4 万台程度、2025 年までに 20 万台程度、2030 年までに 80 万台程度）、水素ステーション箇所数の増加（2015 年末の数を 2020 年度までに倍増（160 箇所程度）、2025 年度までにさらに倍増）と自立化（2020 年代後半）が示されている。「日本再興戦略 2014」等においても、FCV の 2015 年販売開始、水素ステーションの設置支援、業務産業用燃料電池の 2017 年市販開始、将来的な水素発電導入や再生可能水素技術開発などが明記されている。

欧米では、バックアップ電源、フォークリフト用電源、バッテリー充電用電源、小型移動体向け電源など幅広い分野への商用化が進められており、家庭用コジェネレーションシステム以外へのアプリケーション開発は、むしろ日本よりも活発に行われている。米国では、特にフォークリフトなどで PEFC の普及が始まり、業務用においては、ブルームエナジー社などが政府や地域の補助金などを受け、データセンターなど IT 分野を中心に燃料電池ビジネスを急展開している。燃料電池フォークリフトに関して、2009 年に制定されたアメリカ復興・再投資法では、フォークリフトを含む荷役用途への燃料電池利用を促進する目的で合計 970 万ドルの予算が計上され、導入補助が行われた。その結果、2011 年までの間に 500 台程度の燃料電池フォークリフトが政府の補助を受けて導入された。政府補助の終了後も自立的な導入が進み、現在では全米で 4,000 台以上の燃料電池フォークリフトが利用されている。また、カリフォルニア州では、自動車会社、エネルギー会社、政府機関、燃料電池関連企業等のコラボレーション組織であるカルフォルニア燃料電池パートナーシップ（CaFCP）が FCV・水素ステーションの普及に取り組んでおり、2020 年時点の FCV 保有 1.8 万台に対して、100 箇所の水素ステーション整備を見込んでいる。しかし、再生可能エネルギーなどを

重視する政府の方針により 2010 年度に水素・燃料電池関連の政府研究開発予算が大幅に削減され、太陽光、バイオ燃料、蓄電などが優先されたが、2014 年度、予算抑制の方針を再び転換し、その後米国エネルギー省（DOE）の燃料電池に係る予算は、2015 年度 3,300 万ドル、2016 年度 3,500 万ドルと増加の傾向を見せている。燃料電池開発において、DOE が集中的に取り組んでいるのは白金担持量の低減と非白金触媒の開発、さらに低コストの膜・電極複合体（MEA）の開発（劣化低減を含む）である。白金担持量低減ではナノフレーム触媒をアルゴンヌ国立研究所(ANL)が開発しており、また 3M のナノ構造薄膜（NSTF）を MEA に適用して 6.8kW/g-PGM を達成している。2015 年度から触媒･MEA 等の解析を行うため、DOE の研究所（ロスアラモス国立研究所（LANL）、ANL、国立再生可能エネルギー研究所(NREL)、ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)）のコンソーシアムにより、FC-Performance and Durability（FC-PAD）が開始された。5 年間の実施を予定しており、総予算は 2,500 万ドルを想定している。SOFC 関連では、DOE の化石エネルギー関連予算により、国立エネルギー技術研究所（NETL）が主導する研究開発プロジェクトである SECA（Solid State Energy Conversion Alliance）プログラムが展開されてきたが、インダストリアルチームとして FuelCell Energy 社、LG Fuel Cell Systems 社らが参加している。なお、DOE は小型バックアップ電源として燃料電池の普及を支援しているが、家庭用の小型定置用燃料電池を普及させるプログラムは有していない。

欧州では、ドイツを中心に環境政策を強力に推進する政府の支援もあり、関連産業界の技術水準・産業技術力が上昇傾向にある。欧州燃料電池・水素共同技術イニシアティブ（European Fuel Cell and Hydrogen JointTechnology Initiative : FCH JTI）の下、2008 年、官民のパートナーシップという形態で欧州燃料電池・水素共同実施機構（FCHJU:Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking）が立上げられ、研究開発からフィールド実証まで広範囲な取組みが継続して進められている。研究開発の面では、例えば、開発する触媒、電解質材料の MEA の構成材料や接合体多孔質構造の作動模擬条件での性能・耐久性、あるいは氷点下起動・低加湿条件運転の影響の実験的解析とシミュレーション解析、さらには電池特性への不純物の影響などの非常に多くの関連研究が実施された。フィールド実証の面では、Ene.Field プログラムにおいて、1000 台の設置を目標として燃料電池（高温型 SOFC、中温型 SOFC、高温型 PEFC、低温型 PEFC）の実証試験が欧州 12 カ国で実施されている。2014 年からは FCHJU の後継組織である FCH2JU（Fuel Cells and Hydro-gen 2 Joint Under-taking）が 2024 年までの予定で設置され、新たなμ-CHP(小型熱電併給)の大規模フィールド実証である「PACE」を立ち上げて 2016 年から 2021 年までの 5 年間にてμ-CHP を 2,650 台設置する計画を立てるなど精力的に活動を行っている。また最近の状況として、特に欧州では再生可能エネルギーの導入拡大等により SOEC セルの研究開発が活発化しており、Sunfire 社や Topsoe 社等が研究開発を進めているほか、SOEC に関するプロジェクト（HELMETH、GRINHY 等）が進行中である。

ドイツは 2007 年に 10 年プログラムである「水素・燃料電池技術革新国家プログラム」（NIP:National Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie）を立ち上げ、官民共同で累計 14 億ユーロを水素･燃料電池技術開発展開に充てている。半分の 7 億ユーロが政府資金であり、内 2 億ユーロが教育研究省からのものである。R&D とデモンストレーションの二本柱で推進されており、市場形成を重視し、42%のリソースを自動車分

野に充てている。定置用燃料電池分野では 2008 年から 2015 年までの 7 年間のプログラムである Callux プログラムにて約 500 台の定置用燃料電池の実証試験を実施した。参加企業は Baxi Innotech 社（PEFC）、Hexis 社（SOFC）、Vaillant 社（SOFC）である。2016 年からは各企業での商用化に向けた市場開拓が行われている。

中国は、著しい高度成長による国外からの技術流入と、悪化する環境に対応するためのグリーン技術への政府援助の推進により、研究水準・技術開発水準・産業技術力のすべてにおいて上昇を示している。2016 年 4 月には、「エネルギー技術革命革新行動計画（2016−30 年）」「エネルギー技術革命重点革新行動ロードマップ」を発表し、燃料電池技術に関しては 15 件の重点革新任務の 1 つに掲げて、PEFC 燃料電池車と関連技術、大型 SOFC スタック、PEFC と SOFC のコジェネシステムの研究開発が進められている。また FCV の研究開発を推進しており、PEFC 搭載バスや自動車の開発は現在実証段階である。中国では、環境問題の急速な悪化を背景に今後燃料電池バスが普及する可能性があり、Ballard 社等の欧米メーカとのアライアンスも進めている。

韓国は、日本と同様の実証事業が進められ着実な技術開発水準の向上が見られる。2020 年までの予定で、燃料電池など様々なクリーンエネルギーを家庭に導入するグリーンホームプログラム（1million green home program）の下、各企業が普及に向けた研究開発に取り組んでいる。業務用・産業用燃料電池に関しては、韓国の製鉄会社 POSCO のグループ会社である POSCO Energy が米国の FuelCell Energy 社と提携し、MCFC スタックの工場を設立、また現在トータルで 100MW 以上の規模で MCFC 燃料電池発電所の導入が進められている。韓国の LG 社は、英国ロールス・ロイス社の SOFC 開発部門を買収し LG Fuel Cell System 社を立ち上げて、本格的な実用化に向けた研究開発を強化している。FCV に関しては、現代自動車が FCV の一般販売も限定的に始めているが、価格は一千万円を超える水準にとどまっており、現在韓国国内では購入者に補助金を支給して販売価格を約 765 万円にするなど普及拡大に向けて取り組んでいる。

研究開発の内容に目を向けると PEFC の場合、本格普及時の燃料電池システムコストに占める電極触媒の割合が非常に大きくなると予測されるため、Pt の使用量を現状から 10 分の 1 に削減する低白金化技術、あるいは脱 Pt 触媒の基礎研究が世界的に実施されている。前者として、①コアシェル触媒、②合金触媒、後者としては、③カーボン系触媒、④金属酸窒化物がある。さらには実用電極内での触媒の有効利用率の向上を目指した研究が行われている。また、触媒活性の向上だけで無く、耐久性や MEA としての実用性を兼ね備えた材料が求められている。

① コアシェル触媒：コアシェル触媒は、コアを白金以外の金属や白金合金を用い、触媒反応が起こる表面部分（シェル）に白金を配置する触媒である。性能に関しては、コアの Pd の構造を制御したものや、Pd-Ir を合金化したコアを用いることで最大 11 倍程度の質量活性が報告されている。耐久性に関しても従来白金触媒と比較し、高い耐久性を有する報告もある。

② 合金触媒：白金以外の金属（Co,Ni,Fe,Cu,Ag,Au,Pd,La 等）と合金化することにより、白金の質量活性を増加させる手法である。トヨタ MIRAI には白金コバルトの合金触媒が採用されており、従来の白金触媒の 1.8 倍の活性を示すことが報告されている。

Co や Ni を用いた報告が多いが、その他金属を用いた報告や三元系、四元系の合金触媒の報告もある。合金触媒は低白金・非白金触媒の中でも最も多く検討が進められている領域である。その中でも特に米国での進捗が著しく、DOE プロジェクトの成果として、従来の Pt 触媒にくらべて 25 倍程度の活性を示す格子状の構造をもった Pt3Ni 触媒が報告されている。

③ カーボン系触媒：カーボンアロイ、窒素ドープ炭素材料等がある。カーボン系触媒は、カーボン原子の集合体を主体とした多成分系からなり、それらの構成単位間に物理的・化学的な相互作用を有する材料として定義されている。多くの報告では、窒素等を含むポリマー樹脂とコバルトや鉄等の遷移金属や遷移金属錯体を混合して、炭素化することにより得られる。カーボンアロイ触媒は非白金触媒としては、高い酸素還元活性を有することが特徴である。現状としては、基礎研究段階であり、実使用環境である空気を酸化剤として評価している報告は少ないが、群馬大学・日清紡のグループおよび NEDO 固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発で東京工業大学らのグループで空気を酸化剤とした単セル試験の発電性能が報告されている。ただし現状は白金触媒と比較すると不十分であり、改善が必要とされる。

④ 金属酸窒化物：金属酸窒化物はバルブメタルとして知られている４および５族元素を用いた金属酸化物である。炭窒化物や有機錯体を焼成することにより得られ、金属種としては、Ta,Nb,Zr,Ti 等の金属酸化物が酸素還元活性を示すと報告されている。近年、高い導電性を有する Ti4O7 等を用いたオール金属酸窒化物系触媒の開発も進められているが、性能改善が必要である。本分野は日本での研究が多い領域であり、NEDO 固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発、固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発事業にて、横浜国立大学を中心としたグループ等で研究開発が進められている。また、日本国籍の特許出願が多く、中でも昭和電工(株)の出願件数が特段に多い。

- PEFC 用電解質膜

実用化されているフッ素系電解質膜では、日・米・欧を中心に活発な研究開発が継続的に行われている。特に、安定性と耐久性の向上に対する日本企業（旭化成、旭硝子など）の取り組みは世界トップレベルで、分解機構の詳細な解明とその知見に基づく分子設計が実を結んでいる。分子末端の保護、側鎖エーテル結合の数と部位の最適化、安定剤の添加により、従来膜では数百時間程度で顕著な分解が起こった高温低湿度条件においても優れた耐久性を持つ電解質膜が開発されている。また加湿器レス運転のために電解質膜の薄膜化が注目されている。10 ミクロン程度の薄膜化により水輸送能が向上し、燃料電池反応で生成される水をカソードからアノードに輸送し膜全体を加湿する。燃料電池劣化原因となるガスクロスオーバーも高くなり、耐久性とのバランスが重要となる。薄膜化の技術としては、多孔薄膜基材の細孔中に電解質ポリマーを充填した複合膜により実現される。

非フッ素系電解質膜としては、芳香族炭化水素系電解質膜を中心に様々な材料が検討されているが、精密な分子設計と物性の精確な評価で、日米の研究開発がこの分野を率いている。ブロック共重合化により低加湿対応への可能性がひらけてきたことが最近の重要な成果であり、フッ素系電解質と同程度の導電率が得られている。今後はいかに耐久性を向上させるかが開発の鍵となる。

- PEFC 用拡散層

  PEFC では、生成する水により、特に高電流密度領域での運転を阻害する。このため水を排出する技術が重要であり、拡散層および電極と拡散層の間のマイクロポーラスレイヤー(MPL)の親疎水化技術などがある。

  また、100～150℃で安定に運転できる PEFC の開発も望まれている。

- SOFC

  大きな技術課題であった耐久性をクリアするセルメーカーが増えてきている。劣化メカニズムの解明も着実に進み、形状が異なる各タイプの SOFC セルスタックにおいて、最適化が進んでいる。

  車載要 SOFC については、日産自動車が SOFC 搭載の FCV を 2020 年めどに実用化すると発表し、ブラジルでプロト機を公開した。これはバイオエタノールを燃料として、改質器により改質した後 SOFC で発電を行い、電気モーターの駆動源として利用するものである。

  業務用 SOFC では、三菱日立パワーシステムズが、SOFC ハイブリッド機を活用して、水素を製造するコンセプトを提案している。SOFC の余剰熱を利用して燃料改質により水素を製造するというアイデアであるが、SOFC から取り出すエネルギーとして、通常のコジェネレーションシステムが電気および熱のみの併産であるのに対して新たに水素を製造することが可能であり、トリジェネレーションシステムと呼ばれている。トリジェネレーションシステムでは電気、熱、水素の比率を自由に変えることが可能であり、水素ステーションでの利用などが期待される。例えば、FCV の黎明期において、ステーションの稼働率が低い時には電気と熱を供給し、FCV の台数が増えれば水素を生産する、といった自由度の高い運用が期待される。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

- 非白金触媒の更なる性能向上・耐久性向上については、活性発現メカニズムの解明が重要である。また、非白金触媒については、触媒担持量が従来の白金触媒よりも多いことから、非白金触媒に適した MEA の構成検討を行う必要がある。これらの結果を適切に評価し、効率的に研究開発を推進するには、非白金触媒に特有の評価プロトコルの整理等も今後重要になる。
- 固体アルカリ形（SAFC）: PEFC はプロトンが伝導する酸環境であり、白金以外の多くの金属は溶解するため、触媒金属が限定される。一方で、OH-イオンが膜を伝導する SAFC では、アルカリ環境であるため白金以外の多くの金属が触媒として使用可能である。課題は、アルカリ中で電解質ポリマーの耐久性が低いことから、新しい電解質膜の開発が必要なことであり、耐久性の高い電解質膜の研究開発が進められている。

［注目すべきプロジェクト］

新たな取り組みとして米国 DOE エネルギー高等研究計画局(ARPA-E)により、2014 年に中温域燃料電池に特化した 13 件のプロジェクトから成るプログラム REBELS（Reliable

Electricity Based on Electrochemical Systems）が開始された。本プログラムは 200-500℃の中温域で作動する分散型燃料電池開発により、PEFC と SOFC の両方の利点を取り込むことや新たな機能（メタン原料からの燃料電解合成など）を狙いとしたものである。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

定置用燃料電池普及の上での最大の課題は、コストである。市販の燃料電池システムは一定量の価格低下はしてきたものの、未だに自立普及するレベルには至っていない。各メーカーの努力により、性能、耐久性、信頼性は向上してきたが、今後の更なる普及拡大に向けては一層のコスト低減が必須である。また、運用上の課題も明らかになってきている。PEFC は熱主の運転であり、貯湯が満蓄になると運転が停止してしまい、稼働率が低くなってしまう。熱主の運転の結果、夏期や、熱負荷の小さな需要家にはランニングメリットが出せなくなる。一方、SOFC は、満蓄時でもラジエタによる放熱により運転が継続できるために、貯湯の満蓄による制約を受けることは無い。しかしながら、高温で作動するために、頻繁な起動・停止が難しく、電気需要の少ない深夜帯においても常時運転を継続する必要がある。その結果、電力負荷の小さい需要家では、運用の結果として、本来の高効率な発電性能が発揮できないケースも出てくる。この課題を解決するために、高効率発電を主眼として常時定格運転を継続し、余剰電力は電力系統に逆潮して、新電力が買い取る、という新しいビジネスもスタートしている。

また、PEFC では理論発電効率からかなり離れており、新しい材料の開発が待たれている。また、自動車用燃料電池は将来的なコストダウンが強く求められており、定置型とはコスト目標が大きく離れている。普及実現のためには新規材料開発が不可欠となっているが、膜、触媒などの個別材料の開発では燃料電池全体の最適化は難しく、燃料電池全体から考えた個別材料の設計・開発が重要となる。また、白金使用量を 10 分の 1 にするときにも、耐久性、実用性は譲れないため、現状の触媒材料の改良でなく、根本的な新規材料開発も必要となる。次世代 PEFC 材料の開発においては産学連携が重要となるが、従来とは異なる多様な試みが必要となる。

［今後取組むべき研究テーマ］

実用化・普及の上で重要な課題は、システムとしてのコンパクト化、高効率化・信頼性向上（高耐久化）・低コスト化の４点である。システムサイズやパフォーマンス、耐久性の面では、一定の進捗は見られるが、最大の課題はコストである。パフォーマンスや耐久性とコストとはトレードオフの関係にあり、パフォーマンスや耐久性を落とさずにコストを下げることができるかが鍵である。また、高効率・高耐久かつ低コストのセルを開発するためには、触媒の構造や電子状態の変化について構造反応解析を行うなど、材料を原子レベルやナノレベルで見直すとともに、革新的な電極触媒や電解質材料の創成、デバイス開発などが必要であり、以下のような取り組みが必要である。

① 電極触媒、電解質の原子・分子・ナノ構造制御およびその界面制御を行い、反応機構や劣化メカニズムを理解することで、低温作動用の高活性・高耐久性電極触媒層開発

に向けた材料設計指針を構築

② 低コスト化を実現するための白金使用量の低減、更には非白金系触媒の開発：システムコストにおける白金コストの占める割合は年々減少してきており、今後は、セルスタックコストの低減とともに、セルスタック以外の部分の更なるのコスト低減も推し進める必要がある。FCV では、水素貯蔵タンクやその他の関連部品、定置用 FC では改質器や燃料処理器なども大きなコスト要因であり、システム構成の見直しや、簡素化による補機点数の削減など、新たな試みが必要である。上記補機コスト低減を視野に入れたセルスタック開発が一つの焦点となる。

③ 中温作動化や多様な燃料対応を可能にする高活性電極材料の開発

④ 機動性やコンパクト化でメリットが出せる、中温（100～600℃）無加湿運転が可能な電解質の開発。

⑤ 超高効率発電を実現し、高温作動における長時間安定性を有する、燃料電池のセル・スタック・システムの開発・実証

（５）政策的課題

燃料電池普及の課題は、定置用でも FCV でも、自立普及に至るまでのコスト低減がいかに図れるかどうかである。いったん実用化されると、コスト低減の道筋は、一般的には習熟曲線と大量生産に拠るところが大きい。初期の普及拡大をサポートするために、METI は手厚い補助政策を行ってきたが、現在では、メーカーの自助努力を促すために、補助率や補助額は大幅に低減され、早期の自立普及が期待されている。一方で、定置用燃料電池の普及台数は、国のロードマップ目標である 2020 年 140 万台にはまだ遠く、販売台数の伸びも鈍化の兆しが表れ始めた。今後は、大量生産とコスト低減を繰り返す正のスパイラルから逸脱するリスクが大きくなってきている。この状況を打破するためには、大量生産によるコスト低減のシナリオだけに頼らず、新規技術開発により、抜本的にコスト低減を図る技術開発の道筋が必要である。実用化したことにより研究開発の手綱を緩めず、新規の技術開発への新たなスキーム作りが必要となる。

FCV も同様であり、水素ステーションに対する補助や、FCV 拡販のための国の補助金、及び行政区の補助金政策は柔軟に執られているが、一方で、今後の爆発的な普及にはまだ時間がかかり、大量生産の効果により FCV が低コスト化するシナリオはすぐには描きにくい。

最近の燃料電池分野の国家プロジェクトは、2015 年からの FCV の市販に向けた近々の技術課題に集中する傾向があり、その先の革新的な次世代技術に対する支援がほとんど成されていない。これらの技術開発は、ハイリスク・ハイリターンであり、一民間企業では対応は難しく、公的研究資金の投入が不可欠な領域である。

次世代を見据えた戦略として多くのシーズ技術を保有する大学・公的研究機関の基盤的研究強化と実用化に注力する企業研究をシームレスに橋渡しする必要がある。基礎学理に基づいた高性能な酸素イオン伝導体、水素イオン伝導体、電極触媒、改質触媒などの革新的材料開発は国内外で地道な基盤研究が行われているが、研究者ネットワークを分野横断的に構築して研究開発に取り組むことで、デバイス化までの研究開発を加速できる。国内には、高度な燃料電池システム技術を有する企業が多く、これらの企業が、迅速かつ効率的に大学発の

革新的デバイスのシステム化を行うことで、我が国の産業活性化、さらには、エネルギーセキュリティの問題の解決につながるものと期待される。

（６）キーワード

固体高分子形燃料電池（PEFC）、固体酸化物形燃料電池（SOFC）、電気化学、固体イオニクス、ナノ構造制御、エネルギー変換、高効率発電、XAFS などの先端計測、非白金・低白金触媒、可視化手法、逆潮流、トリジェネレーション

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ NEDOなどによる研究資金により、全国の複数の集中的拠点の研究活動により、研究水準は引き続き世界をリードしている。しかし、燃料電池導入補助金や水素ステーション設置補助金の増加等により、基礎研究や次世代技術開発への支援は減少方向。 ・ 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに幅広い研究が行われており、研究水準は世界をリードしている。主な取組み状況及び成果は以下のとおり。①コアシェル触媒：同志社大を中心としたグループではPdをコアとした触媒の検討、②合金触媒：山梨大学を中心としたグループでは、Pt-Co合金の表面に2層の白金スキン層を設けた触媒の検討。また、東工大を中心としたグループでは、規則fct3元系PtFeCo合金触媒の検討、③カーボン系触媒：群馬大学らのグループでは、各種ポリマーを炭素源として、また、各種金属種を用いて炭素化した触媒を開発するとともに、触媒の活性発現機構解明に向けた検討。共同研究先である日清紡HDでは、非白金触媒としては、世界最高レベルの発電性能を有する触媒が開発。東工大らのグループはポリイミドをポリマーとして、金属種に鉄を用いた触媒の検討。④金属酸窒化物：横国大らのグループは、ジルコニア系の酸窒化物の検討 ・ PEFCの電解質膜に関して量子化学計算を利用して、水の運動性が非常に低い状態でもプロトンが伝導する機構を見出し、低湿度環境下で優れた性能を示すPEMの設計指針（酸高密度構造）を提案した[1,2]。 ・ また、パーフルオロスルホン酸ポリマーに関して、EW500のポリマーが旭化成社から報告されている。 ・ SAFC用電解質膜の開発では、膜のアルカリ分解機構の解析が行われ、耐久性電解質膜としてヘテロ元素を有さない全芳香族からなる電解質材料の開発が行われている[3,4,5]。
	応用研究・開発	◎	↗	・ 燃料電池本体・発電システム・補機類などの技術が進展し、世界トップの水準を維持。集中研究拠点等を中心とした産官学の連携強化も図られている。 ・ 触媒についても、産官学の連携等により、低白金・非白金触媒いずれについても成果が得られてきている。詳細は以下のとおり。①コアシェル触媒：田中貴金属工業では、山梨大学で開発したPt-Coをコアとする触媒の量産化検討。また、石福金属興業では、同志社大学で開発したPdをコアとするコアシェル触媒の量産化検討。白金触媒及びその触媒層について過去5年の特許出願件数から見てみると、トヨタ・日産といった自動車メーカーからの出願が多く、世界的に見ても出願件数は多い。材料メーカーで見ると、触媒メーカーとしては、キャタラー、田中貴金属工業、エヌ・イーケムキャット等の出願が多く、白金を担持する担体として、昭和電工の出願が多い。②カーボンアロイ触媒：日清紡では、共同研究先である群馬大学で得られた触媒開発指針に基づき、開発。また、帝人では、東工大で開発したカーボンアロイ触媒の知見を活用し、PANと鉄を炭素化した触媒の開発過去5年の特許出願件数について、世界的に見てみても日本国籍の特許出願が多い。材料メーカーとしては、日清紡、旭化成、帝人、富士フィルム等の出願が多い。③金属酸窒化物：昭和電工が、横浜国大らのグループと連携して開発を進めている。過去5年の特許出願件数は世界的に見ても昭和電工の出願が圧倒的に多く、本分野を主導している。

				・ PEFCを用いたエネファームは既に15万台が設置され、燃料電池自動車の市販も始まっている。 ・ SAFCでも、実用化はまだまだだが、ダイハツ社が、水加ヒドラジン燃料、貴金属フリーの燃料電池車両の開発を発表している。 ・ SOFCの実用化も始まっている。
米国	基礎研究	○	→	・ 2014年度、予算抑制の方針を転換し、その後研究開発予算は再び増加の傾向を見せている。低白金・非白金触媒については以下の通り①コアシェル触媒：コアシェル触媒に関して多くの研究がなされている。②合金触媒：アルゴンヌらのグループでは従来のPt触媒にくらべて25倍程度の活性を示す格子状の構造をもったPt3Ni触媒がある。③カーボンアロイ触媒:Los Alamosらのグループはシアナミドとポリアニリンを炭素源とし、鉄を加え炭素化した触媒の検討。また、イリノイ大らのグループではNicarbazinやMOFなどを炭素源とし、鉄を加え炭素化した触媒の検討が行われている。カナダのINRS-ÉnergieらではMOF（ZIF8）を炭素源とし、Fe錯体を加え、炭素化した触媒の検討。また、University of Waterlooでは、Fe,Coなどの遷移金属錯体を炭素化した触媒の検討。 ・ Case Western Reserve Universityらのグループでは、グラフェン、3次元、Nドープ、PNドープ、BNドープ、CNT等、ナノカーボンを中心にした触媒の開発イオン交換基の酸性度の違いがプロトン伝導度に及ぼす影響を実験的に明らかにした上で、良好なプロトン伝導性を示すイオン交換基のデザインを示した[6)]。 ・ SAFCの開発では、高アルカリ耐性を有するイオン官能基の開発が行われ、耐久性電解質膜に展開している[7,8)]。
	応用研究・開発	○	→	・ 米国では、バックアップ電源、フォークリフト用電源、バッテリー充電用電源、小型移動体向け電源など幅広い分野への商用化が進められている DOEファンドにより、コスト低減のため、低白金・非白金触媒の開発及び、電解質膜・MEA等の開発が協力に推進されている。産官学の連携等により、低白金・非白金触媒いずれについても成果が得られてきている。詳細は以下のとおり。①コアシェル触媒：UTC Powerらで開発されたコアのPdの形状を調整した触媒。②合金触媒：3Mらのグループでは、NSTFに触媒をスパッタした触媒の開発。白金触媒及びその触媒層について過去5年の特許出願件数から見てみると、GMやフォード、UTC POWERといったシステムメーカーからの出願が多く、材料メーカーではNSTF等の開発を進めている3Mからの出願が多い。また、米国での特許出願件数は他国と比較しても多く、特許出願件数からも白金系触媒の開発については、米国が最も先進的に進められていると言える。③カーボンアロイ触媒：Los Alamosらのグループやイリノイ大らのグループで開発したカーボンアロイ触媒を量産化するための検討をPAJARITO POWDERが進めている。過去5年の特許出願状況を見てみると、ニューメキシコ大学やLos Alamosからの出願が見られるが、世界的に見ても米国国籍の出願件数は日本国籍の出願している件数と比較すると少ない。
欧州	基礎研究	○	→	・ ドイツは2007年に10年プログラムである「水素・燃料電池技術革新国家プログラム」（を立ち上げ、官民共同で累計14億ユーロを水素・燃料電池技術開発展開に充てている ・ 2014年にはFCH 2 JUが開始され、プログラムが実施される7年間で合計13.3億ユーロの予算を計上しており、燃料電池・水素エネルギーの導入を目的として、自動車用燃料電池の低コスト化や発電用燃料電池の効率向上等の研究が進められている。 ・ 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに研究が行われているが、非白金触媒については、日米と比較すると少ない。①コアシェル触媒：ドイツのTechnical University Berlinを中心としたグループで脱合金化法により処理を行ったコアシェル触媒。②・合金触媒：ドイツのTechnical University Berlinを中心としたグループでは、粒子形状を制御し、粒子径が9.5nm PtNi合金触媒を開発。デンマークのTechnical University of Denmarkを中心としたグループではPt5La合金触媒を開発。また、フランスのNRS-Universitéでは、fcc構造を有するPtCo合金触媒。③カーボンアロイ触媒：フランスのUniversite de Montpellierらのグループでは、MOF（ZIF8）を炭素源とし、Fe錯体を加え、炭素化した触媒の検討 ・ PEFCの電解質膜：高効率なホスホン化反応を利用することによって、高いIECを有し、かつ優れた熱的安定性を示すホスホン酸高分子電解質膜の開発に成功した[9,10)]。 ・ SAFCの電解質膜：放射線によりフッ素系樹脂に電解質材料をグラフト重合させた膜の開発が行われている[11)]。

	応用研究・開発	○	→	・ 新たなμ-CHPの大規模フィールド実証である「PACE」が立ち上がった。 ・ 2014年にはFCH 2 JUが開始され、プログラムが実施される7年間で合計13.3億ユーロの予算を計上しており、燃料電池・水素エネルギーの導入を目的として、自動車用燃料電池の低コスト化や発電用燃料電池の効率向上等の研究が進められている。 ・ 触媒に関しては、低白金化に関する検討が主流。①コアシェル触媒：ジョンソンマッセイでは、Pd_3Coをコアとしたコアシェル触媒。②合金触媒：ジョンソンマッセイでは、PtN合金触媒をリーチング。白金触媒及びその触媒層について過去5年の特許出願件数から見てみると、システムメーカーであるダイムラーの他、ジョンソンマッセイ、BASF等の材料メーカーが多く出願している。また、ヨーロッパでの出願では、フランス原子力庁（Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives）からの出願が多いことも特徴である。③カーボンアロイ触媒：論文では、企業が参画し、開発を進めている報告はない。また、過去5年の特許出願状況を見ても大学からの特許出願は一部見られるが、企業からの出願は見られない。
中国	基礎研究	○	↗	・「エネルギー技術革命重点革新行動ロードマップ」を発表し、燃料電池技術を15件の重点革新任務の1つに掲げている ・ 2025年以降の市場化を狙い、国産燃料電池技術の開発に向けた取組みを進めている。「中国製造2025」には2020年までに1,000台規模の試運行、2025年までに量産化の実現が目標として定めされており、これらを実現するプロジェクトとして、「863計画」、「973計画」などの中央政府のR&D活動に、水素燃料電池がテーマ設定されている。 ・ 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに研究が行われており、近年論文等による報告が増加している。しかしながら、触媒性能に関しては、日本や米国に比べると劣る。①コアシェル触媒：South China Universityらのグループでは Cu-UPD法を用いたコアシェル触媒の検討。Wuhan Universityらのグループでは化学還元法を用いたコアシェル触媒の検討が行われており、Niをコアとした触媒。Dalian National Laboratoriesらのグループでは Pd-Auをコアとしたコアシェルの開発。②合金触媒：National Central University, Taoyuanらのグループでは、ナノロッド上のPtCu合金触媒の開発。また、Wuhan Universityらのグループでは、Pt-Cu-Ag三元系合金の開発がある。③カーボンアロイ触媒：Xiamen Universityらのグループでは、炭素源(樹脂など)と3d遷移金属(Fe,Coなど)を混合し炭素化した触媒の開発が。また、South China Universityらのグループでも、炭素源(樹脂など)と3d遷移金属(Fe,Coなど)を混合し炭素化した触媒の開発を行っている。 ・ PEFC：チャネル構造の構築に向け、多置換のイオン交換基を有するユニットを利用した高分子電解質膜を多く報告している[12, 13]。 ・ SAFC：多孔性高分子やロタキサン構造を用いた高速アニオン伝導性材料の開発が行われている[14]。
	応用研究・開発	○	↗	・「エネルギー技術革命重点革新行動ロードマップ」を発表し、燃料電池技術を15件の重点革新任務の1つに掲げている ・ 過去10年間、燃料電池自動車・バスのデモンストレーションが行われてきたが、現時点で市場はなく、また市場形成に向けた政策も打ち出されていない。2025年以降の市場化を狙い、国産燃料電池技術の開発に向けた取組みを進めている状況である。 ・ 触媒に関しては、低白金・非白金いずれについても企業が関与して開発を進めている報告はない。過去5年の特許出願状況を見ても大学からの特許出願は一部見られるが、企業からの出願は見られない。
韓国	基礎研究	△	→	・ 燃料電池に関する一定レベルの基礎研究は継続されている ・ 韓国科学技術院などを中心に、国のファンドで固体高分子形やリン酸燃料電池、溶融炭酸塩形燃料電池など定置用と自動車用の両方の応用を目指して取り組んでいる。 ・ 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに研究が行われている。しかしながら、触媒性能に関しては、日本や米国に比べると劣る。①コアシェル触媒：コアシェル触媒に関しては、あまり大きな進捗はない。Korea Institute of Science and Technologyらのグループでは Cu-UPD法を用いてPd-Cu合金をコアとして用いた報告。また、KAISTでは化学還元法を用いて、Pdをコアとした触媒の開発、Sungkyunkwan Universityでは Pd-Coをコアとした触媒の報告。②合金触媒：Korea Institute of Science and Technologyでは PtNi合金触媒を熱処理（アニール）すると表面が白金層になり配列が制御され、活性・耐久性が向上することを報告。また Korea Institute of Science and Technologyでは、Pt3Laが高い活性と耐久性を示すことを報告している。③カーボンアロイ触媒：Republic of Korea Naval Academyでは、窒素含有の炭素源と遷移金属(Fe、Co)を混

				合し、炭素化した触媒の開発。また、National Institute of Science and Technologyらのグループでも窒素含有の炭素源と遷移金属(Fe、Co)を混合し、炭素化した触媒の開発 ・ PEFC:アニーリング処理し、明瞭な相分離構造を構築することによって、低湿度環境下でプロトン伝導を促進される含フッ素炭化水素系マルチブロックポリマーを開発した[15]。 ・ SAFC:エンプラ系のポリマーをベースとした、ペンダント型のアニオン交換膜の開発が行われている[16]。
	応用研究・開発	○	↗	・ 2020年までの予定で、燃料電池など様々なクリーンエネルギーを家庭に導入するグリーンホームプログラムが進められている。また、現代自動車のFCV実用化も進んでいる。 ・ 自動車用では、現代自動車で少量連続生産設備が完成。内製技術による日本メーカーに迫るスペックの車両開発が達成され確実な技術力向上が見られる。 ・ 触媒に関しては、企業からの開発状況や性能に係る報告はほぼない。また、過去5年の特許出願状況を見ると、自動車メーカーである現代自動車の出願が多く、白金系・非白金系のいずれについても出願が見られる。特筆すべきはサムソングループの特許出願が非常に多いことである。韓国内での出願のみならず、米国・欧州等にも多くの件数の特許を出願している。しかしながら、2016年4月の報道では、サムスンの燃料電池研究開発部門はコーロンに売却されることが報じられている。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

- 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー･材料分野（2015 年）
- 水素燃料電池戦略ロードマップ平成 28 年 3 月 22 日改訂版
- 水素・燃料電池戦略協議会（第 4 回、第 5 回） - 配布資料
- 平成 27 年度新エネルギー等導入促進基礎調査 水素社会の実現に向けた取組に関する調査 調査報告書
- The U.S. Department of Energy's (DOE's) 2016 Annual Merit Review 報告書
- Minhua Shao ら著、Recent Advances in Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction、
- ACS Publications, Augast 7,2015
- 平成 27 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会 燃料電池・水素分野 予稿集
- 平成 26 年度 炭素材料学会年会 予稿集
- 太田健一郎･石原顕光著 固体高分子形燃料電池の本格普及に向けた脱白金酸素還元触媒への展望
- 第 7 回新電極触媒シンポジウム 講演予稿集
- NEDO 固体高分子形燃料電池実用化技術開発 基本計画
- NEDO 固体高分子形燃料電池高度利用化技術開発 基本計画
- Sarah C. Balla ら著、Activity and Stability of Pt Monolayer Core Shell Catalysts. ECS Trans.2009,

- Velázquez-Palenzuela, A.; Zhang, L.; Wang, L.; Cabot, P. L.;Brillas, E.; Tsay, K.; Zhang, J. Fe−Nx/C Electrocatalysts Synthesized by Pyrolysis of Fe(II)−2,3,5,6-Tetra(2-Pyridyl)Pyrazine Complex for PEM Fuel Cell Oxygen Reduction Reaction. Electrochim. Acta 2011
- Yang, L.; Larouche, N.; Chenitz, R.; Zhang, G.; Lefèvre, M.;Dodelet, J.-P. Activity, Performance, and Durability for the Reduction of Oxygen in PEM Fuel Cells, of Fe/N/C Electrocatalysts Obtained from the Pyrolysis of Metal-Organic-Framework and Iron Porphyrin Precursors. Electrochim. Acta 2015
- Marina V. Lebedevaa ら著、Effect of the Chemical Order on the Electrocatalytic Activity of Model PtCo Electrodes in the Oxygen Reduction Reaction. Electrochim. Acta.2013
- Ifan E. L ら著、Understanding the Electrocatalysis of Oxygen　Reduction on Platinum and Its Alloys. Energy & Environmental Science.2012
- Chunhua Cui ら著、Octahedral PtNi Nanoparticle Catalysts: Exceptional Oxygen Reduction Activity by Tuning the Alloy Particle Surface Composition. Nano letters.2012
- Frederic Jaouen ら著、Effect of ZIF-8 Crystal Size on the O2 Electro-Reduction Performance of Pyrolyzed Fe-N-C Catalysts. Catalysts.2015
- The U.S. Department of Energy's (DOE's) 2015 Annual Merit Review 報告書
- Lin Gan ら著、Understanding and Controlling Nanoporosity Formation for Improving the Stability of Bimetallic Fuel Cell Catalysts. Nano Lett. 2013
- Wang, Y.-C.; Lai, Y.-J.; Song, L.; Zhou, Z.-Y.; Liu, J.-G.; Wang, Q.; Yang, X.-D.; Chen, C.; Shi, W.; Zheng, Y.-P.; et al. S-Doping of an Fe/N/C ORR Catalyst for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with High Power Density. Angew. Chem., Int. Ed. 2015
- Peng, H.; Mo, Z.; Liao, S.; Liang, H.; Yang, L.; Luo, F.; Song, H.; Zhong, Y.; Zhang, B. High Performance Fe- and N- Doped Carbon Catalyst with Graphene Structure for Oxygen Reduction. Sci. Rep. 2013
- Pylypenko, S.; Mukherjee, S.; Olson, T. S.; Atanassov, P. Non-Platinum Oxygen Reduction Electrocatalysts Based on Pyrolyzed Transition Metal Macrocycles. Electrochim. Acta 2008
- Cheon, J. Y.; Kim, T.; Choi, Y.; Jeong, H. Y.; Kim, M. G.; Sa, Y.J.; Kim, J.; Lee, Z.; Yang, T.-H.; Kwon, K.; et al. Ordered Mesoporous Porphyrinic Carbons with Very High Electrocatalytic Activity for the
- Oxygen Reduction Reaction. Sci. Rep. 2013,
- Matin, M. A.; Jang, J.-H.; Kwon, Y.-U. One-Pot Sonication-Assisted Polyol Synthesis of Trimetallic Core−Shell (Pd,Co)@Pt Nanoparticles for Enhanced Electrocatalysis. Int. J. Hydrogen Energy 2014
- Choi, R.; Choi, S.-I.; Choi, C. H.; Nam, K. M.; Woo, S. I.; Park,J. T.; Han, S. W. Designed Synthesis of Well-Defined Pd@Pt Core−Shell Nanoparticles with Controlled Shell Thickness as Efficient
- Oxygen Reduction Electrocatalysts. Chem. - Eur. J. 2013
- Hwang, S. J.; Yoo, S. J.; Shin, J.; Cho, Y.-H.; Jang, J. H.; Cho,E.; Sung, Y.-E.; Nam, S. W.; Lim, T.-H.; Lee, S.-C.; et al. Supported Core@Shell Electrocatalysts for Fuel Cells: Close

Encounter with Reality. Sci. Rep. 2013

1) T. Ogawa, K. Kamiguchi, T. Tamaki, H. Imai and T. Yamaguchi, *Anal Chem*, 2014, 86, 9362-9366.
2) T. Ogawa, T. Aonuma, T. Tamaki, H. Ohashi, H. Ushiyama, K. Yamashita and T. Yamaguchi, *Chem Sci*, 2014, 5, 4878-4887.
3) Takeo Yamaguchi et al Phys. Chem. Chem. Phys., 2016, 18, 12009-12023
4) Takeo Yamaguchi et al Rsc Adv., 2016, 6, 36269-36272
5) Takeo Yamaguchi et al Poly. Chem., 2015, 6, 7964-7973
6) Y. Chang, G. F. Brunello, J. Fuller, M. L. Disabb-Miller, M. E. Hawley, Y. S. Kim, M. A. Hickner, S. S. Jang and C. Bae, *Polym Chem-Uk*, 2013, 4, 272-281.
7) Geoffrey W. Coates et al J. Am. Chem. Soc., 2012, 134 (44), 18161–181642.
8) Geoffrey W. Coates et al J. Am. Chem. Soc., 2015, 137 (27), 8730–8737
9) I. Dimitrov, S. Takamuku, K. Jankova, P. Jannasch and S. Hvilsted, *Macromol Rapid Comm*, 2012, 33, 1368-1374.
10) I. Dimitrov, S. Takamuku, K. Jankova, P. Jannasch and S. Hvilsted, *Journal of Membrane Science*, 2014, 450, 362-368.
11) John R. Varcoe et al Energy Environ. Sci., 2012, 5, 8584-8597
12) S. N. Feng, K. Z. Shen, Y. Wang, J. H. Pang and Z. H. Jiang, *J Power Sources*, 2013, 224, 42-49.
13) J. H. Pang, S. N. Feng, H. B. Zhang, Z. H. Jiang and G. B. Wang, *Rsc Adv*, 2015, 5, 38298-38307.
14) Tongwen Xu et al Adv. Mater., 2016, 28(18), 3467-3472
15) D. W. Shin, S. Y. Lee, C. H. Lee, K. S. Lee, C. H. Park, J. E. McGrath, M. Q. Zhang, R. B. Moore, M. D. Lingwood, L. A. Madsen, Y. T. Kim, I. Hwang and Y. M. Lee, *Macromolecules*, 2013, 46, 7797-7804.
16) Young Moo Lee et al *Macromolecules*, 2012, 45(5), 2411-2419

3.20　モータ・トランス等用磁石材料

（1）研究開発領域の簡潔な説明

次世代自動車や家電、産業機械の心臓部であるモータ（電気エネルギーを機械エネルギーに変換するデバイス）の省エネ化に資する稀少レアアースに依存しない革新的な永久磁石（硬磁性材料）、さらには電圧の変換に使用されているトランス（電力用変圧器）やモータの鉄芯として使用され、電気エネルギーの損失を少なくする軟磁性材料についての研究開発領域である。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

モータ等の部材として用いられる強磁性体には、永久磁石のようにいったん磁化されると半永久的に外部に磁束を供給する硬磁性の材料と、その磁束、および、電磁石の鉄心のようにコイルが作る交番磁束の通り道として機能する（電流の向きを反転すると容易に磁化も反転する）軟磁性の材料とが存在する。

永久磁石は、自動車の走行モータをはじめ、パワーステアリングの駆動モータ、エアコン用圧縮機のモータ、洗濯機のドラム駆動用モータ、工作機械の位置決め・割り出しやロボットに使う産業用モータのほか、家庭内のあらゆる電化製品の可動部品類の駆動モータなど、広範囲の用途に使われている。また、エネルギー消費の観点では、モータ全体による消費電力量は、世界の消費電力量全体の 40～50%(日本では約 60%)を占めるとされている [1)]。駆動回路を含むモータの総合効率は、誘導モータに比べて永久磁石式モータが 5-10%高く、効率 90%を超える高効率モータが可能である [2)]。モータにおける電力損失は膨大な量に上り、一部の産業モータを永久磁石式にすることにより国内だけでも年間数百億 kWh の電力を節約できる。

鉄をベースとする軟磁性材料は、変圧器、発電機、モータなどの鉄心に用いられ、材料の低損失化はエネルギー変換の効率の改善に貢献する [3)]。その代表である電磁鋼板はトランスやモータなどの電気機器の鉄芯材料として不可欠な材料として、変圧器では電気エネルギーを電気エネルギーに、モータでは電気エネルギーを機械エネルギーに変換する役割を担ってきた。電力総量の中でこれらの損失が占める比率は、送電時の変圧トランスによる損失が 1%、機器内のモータやトランスの磁心で発生する損失が 2.4%と言われており、電磁鋼板による電力損失（鉄損）の比率は合計 3.4%、電力損失量では日本だけで年間 300 億 kWh の大きさになる [3) 4)]。また、温室効果ガスである CO_2 排出量 1424 万トンに相当する。（CO_2 国内総排出量の 1.1%に相当）

トランスやモータの構成要素のうち効率を大きく作用するのがこれら永久磁石、および電磁鉄心用軟磁性体という磁性材料である。今後も電動自動車の生産台数増加をはじめとするエネルギーの電化率の増加に伴い、それらの需要は増加の見込みであり、小型軽量で高い磁気エネルギー密度をもつ永久磁石と高磁束密度で低損失の電磁鉄心材料の開発が求められている。

［動向（歴史）］

永久磁石材料開発は 1917 年の本多光太郎らによる KS 鋼（コバルト・タングステン・クロム鋼）より本格化し、合金による磁石が先行し、次にフェライト（酸化物）が登場した。さらに 1970 年ごろから希土類を含む金属間化合物によって超強力磁石が作られるようになり、サマリウム・コバルト磁石で最高性能を達成する等、1970 年代から 1980 年代初頭に日本の研究者が先導する分野となった。戦略元素であるコバルトの価格が高騰し、新しい高性能磁石の必要性が認識される中、1982 年に佐川眞人（当時、住友特殊金属（株）（現在の日立金属(株)）、現インターメタリックス(株)、NDFEB(株)）らによるネオジム磁石（Nd2Fe14B 焼結磁石）により大きなブレイクスルーを迎えた [5]。現在においてもネオジム磁石は最強の永久磁石であり、人工磁石の開発は、現在のネオジム磁石まで日本人の貢献が大きい。

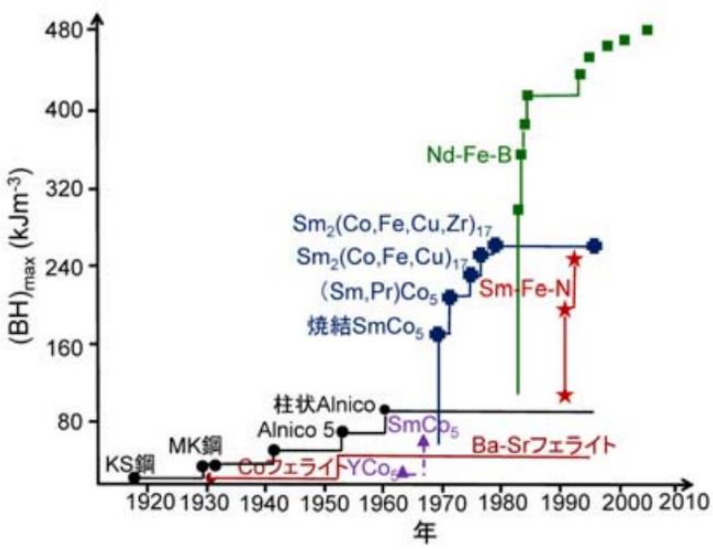


図 3-16　永久磁石の歴史

出典：宝野和博（NIMS・フェロー）

現在の磁石材料は二極化しつつあり、電動ワイパーなどの電装品やスピーカー等、寸法への制約が比較的小さな用途の磁石にはフェライトが用いられ、装置の小型軽量化と強力な磁気特性が同時に要求される用途にはネオジム鉄化合物が用いられる。

ネオジム磁石はハイブリッド自動車に 1~2kg 程度使用されているとされるが、温度が 180～200℃程度になるエンジン部など高熱下では保磁力が低下する。ハイブリッド車等、電気自動車の駆動モータでは、通常はネオジムの 20-30%を重レアアースであるジスプロシウム(Dy)で置き換えたジスプロシウム含有ネオジム磁石が使われている。

これらレアアース（ネオジム、ジスプロシウム等）は、特定国がほぼ供給を独占しており、21 世紀に入って、ジスプロシウムを始めとした各種レアメタルの価格の乱高下や供給の不安定性が顕在化し、2007 年頃から多くのレアメタルの価格が顕著に上昇し始め、資源開発や備蓄のみでは対応しきれない事態に発展する懸念が生じた。さらに、資源メジャーの M&A や占有化や国家資本の積極的参入が続く最中に、2011 年には、中国の希土類輸出制限に端を発した 30 倍以上(特にジスプロシウムの価格は 2011 年には 100 倍 [6]までに至った)の希土類価

格の暴騰が世界を襲った。このことから、レアアースの中でも特に稀少な重レアアース元素を使用せずとも同じ性能が得られる磁石が求められている。

国内磁石メーカーは 2004 年ごろから粒界拡散技術を開発し、ジスプロシウム危機の際に省ジスプロ化の手段として発展、実用化させた [7]。低ジスプロシウム組成で作製した焼結磁石の表面に追加ジスプロシウム源として化合物等を塗布し、加熱処理することによりジスプロシウムを粒界部に沿って磁石内部に拡散させ、結晶粒最外郭部に薄くジスプロシウムを追加導入することにより省ジスプロシウム化する技術であり、HEV 用磁石のジスプロシウム使用量をおよそ半減できる。ガリウム等の添加により省ジスプロシウム化する技術も併せて開発されている [8]。2016 年 7 月、大同特殊鋼株式会社と本田技研工業株式会社は、重希土類元素を全く使用せずに、ハイブリッド車用駆動モータに適用可能な高耐熱性、高磁力を実現したネオジム磁石を世界で初めて実用化している。

永久磁石のうちネオジム磁石の生産量では、既に一位の座を中国（60%強）に譲っている状況であるが、日立金属、信越化学、TDK などの日本メーカーが約 25%の世界シェアを有する [9]。

ネオジム磁石の発表から 33 年が経過した。この間、Nd-Fe-B 磁石の特性を越える新磁石の探索や製造が試みられ、いくつかの物質が新たに発見されてきたが、ネオジム磁石を越える新磁石の実現には至っていない。基本特許が切れたこともあいまって、レアアースを使用せずに、ネオジム磁石と同等以上の性能を得られる次世代磁石の開発が強く望まれている。研究開発状況を論文発表動向から見ると、日本は Nd 系・Pr 系及び L10 規則格子系の研究は盛んであるが、SmCo 系や MnAl 系等のレアアースフリー研究は低調である。この分野は、欧州、特に中国からの論文発表が増加していることから、今後は中国の研究開発状況を注視すべきである。

軟磁性材料の歴史としては、電磁鋼板は珪素（Si）を含む鉄心用の材料で、1900 年に Hadfield（英）が Fe に Si を添加して磁気特性を向上させた珪素鋼板を発明し、1903 年に製造方法が確立され、ドイツや米国において工業生産が開始された。1932 年、東北大学の増本、山本らが、Fe-Si-Al 合金の非常に高い透磁率を持つ材料を開発し、「センダスト」と命名され、東北金属（現、NEC トーキン）によって工業化された。その後、1934 年に Goss（米）が方向性電磁鋼板の製造方法を発明し、翌年から Armco 社（米）が方向性ケイ素鋼板の製造を開始した [10]。日本では 1950 年代に方向性電磁鋼板及び無方向性冷間圧延電磁鋼板の製造が、新日本製鐵、川崎製鉄により開始され、1968 年からは高磁束密度方向性電磁鋼板の製造も開始された。1960 年代から液体急冷法によるアモルファス金属の研究が始めた。その中で、東北大学の増本のグループは 1975 年に Fe-Si-B 系のアモルファス（Amomet）を開発した。1988 年、日立金属は、Nb と Cu を添加した Fe-Si-B 系アモルファスを熱処理することにより微細結晶を析出させる（結晶化）ことに成功し、工業化した。これらは、軟磁気特性はケイ素鋼より優れているが、ケイ素鋼板に比べ飽和磁束密度が低いことから、モータやトランスなどのパワー系用途に用いることが難しいことから実用化に限界があった。変圧トランスやモータの鉄心などに使用される電磁鋼板に代表される軟磁性材料では、コイルが誘導する磁束の時間変化への応答に遅れがあると使用中に損失（鉄損）が生じ、変圧器やモータの電力効率が低下する。数十年に亘り、その地道な材料特性の改善により損失低減が図られてき

たが、近年その改善は飽和に達している。2008 年、東北大学において特異なヘテロアモルファスの結晶化を利用した新たな高鉄濃度ナノ結晶合金が発明された。これは、飽和磁束密度が 1.8T を超えケイ素鋼板と遜色ないと共に、軟磁気特性にも優れている。すなわち、Fe 基アモルファス合金や従来型ナノ結晶合金に比べ飽和磁束密度が大きく、鉄損はケイ素鋼板と比較し 1/2 から 1/10 と大幅に小さいことを特徴とすることから、早期の実用化が望まれている。

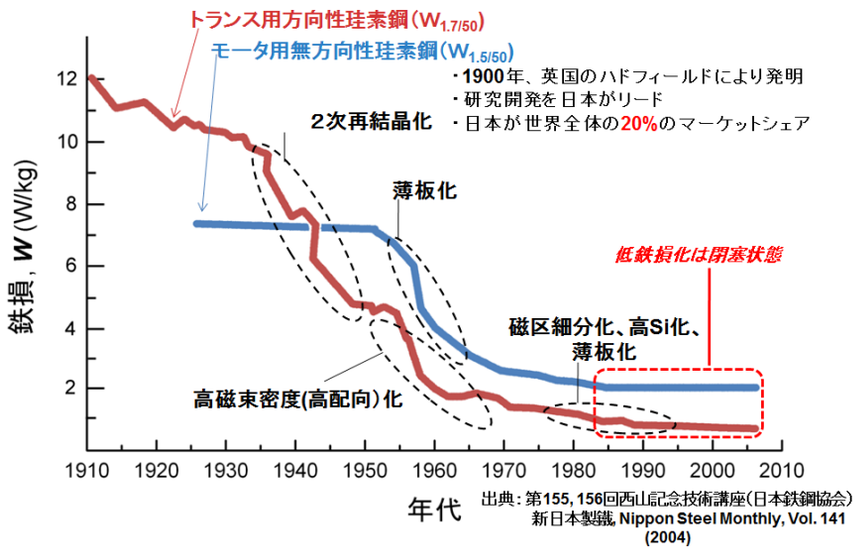


図 3-17　従来材料（ケイ素鋼板）における低損失化の歴史

（３）注目動向

［新たな技術動向］

物質・材料研究機構（NIMS）では、2014 年にジスプロシウムフリー磁石の高保磁力化に成功している [11]。結晶粒合径を磁区サイズより微細化してジスプロシウムフリー化に伴う保磁力の低下を補償する技術と、低融点の軽希土類合金を用いた粒界拡散手法による結晶粒界相の制御で逆磁区の核生成を抑制して保磁力を増強する技術からなっている。前者には微粉末プロセスに依らずに微細で清浄な結晶粒制御を達成するプロセス技術、後者は原子配置を三次元観察できる最新の解析技術といった、いずれもナノテクノロジーの発展がもたらした成果といえる。さらに、2015 年には非経験的電子論計算が予測した高磁化の化合物を実際に合成することにも成功し、ネオジム磁石の構成化合物を超える磁気物性値を持つことを明らかにするなど [12]、新物質探索面においても成果を上げている。

2016 年 7 月、大同特殊鋼株式会社と本田技研工業株式会社は、重希土類元素を全く使用せずに、ハイブリッド車用駆動モータに適用可能な高耐熱性、高磁力を実現したネオジム磁石を世界で初めて実用化した。

東北大学では、電力損失を大幅に削減可能なナノ結晶軟磁性材料の開発に成功し、鉄系ナノ結晶材料にリンを添加した圧粉磁心を用いたコンプレッサモーターによりモータ効率 3.1%向上を実証することに成功している [13]。従来型ナノ結晶合金は、アモルファス化に必要な元素を比較的多く加える必要があり Fe 含有量が制限されることから、飽和磁束密度を十

分に高くできないという課題があった。新規高 Bs ナノ結晶合金 NANOMET®は、Fe-Si-B 系合金に P と Cu を複合添加し、成分組成を適切に制御することにより、アモルファス形成限界を超えた 80at%以上の高 Fe 濃度領域において、レアアースを含むことなく 10nm 程度の均一なナノ結晶組織を得ることを可能とした。本材料は、ケイ素鋼板に匹敵する 1.8T 以上と高い飽和磁束密度（Bs）と低い鉄損を兼ね備える優れた軟磁気特性を示す。この新規高 Bs ナノ結晶合金 NANOMET®は、本材料を用いて世界最高クラスの高効率モータの試作に成功したことにより、次世代高効率モータ用の新たな軟磁性材料候補として期待されている。また、本材料の実用化、工業化、更なる特性向上を目指し、産業競争力強化法に基づく官民イノベーションプログラム（文部科学省・経済産業省）よる大学発ベンチャーが発足している。

ポストネオジム磁石として、有望視されているのは 1-12 系と呼ばれる希土類磁石と鉄ニッケル系の磁石がある。1-12 系は希土類元素 1 に対し、鉄を 12 混ぜる。NIMS が発見し、世界に研究が広がった。また隕石（いんせき）の結晶構造を採る鉄ニッケル系（L10-FeNi 規則相磁石）において、東北大学では、アモルファスから微細結晶を作る方法（上記の新規高 Bs ナノ結晶合金と同じ簡便な工業的手法 [15]）を、デンソーは窒化脱窒化法という製造法を開発した。実用化されると希土類の供給リスクから解放されると期待されている [7]。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

- 経済産業省が 2012 年に開始した「次世代自動車向け高効率モータ用磁性材料技術開発」を NEDO が引き継ぐ形で、2014～2021 年度の 8 年間という長期プロジェクトが始まっている。レアアースに依存しない革新的高性能磁石の開発、モータを駆動するためのエネルギーの損失を少なくする高性能軟磁性材料の開発ならびに新規磁石、新規軟磁性材料の性能を最大限に生かして更なる高効率を達成できるモータ設計の開発を行い、次世代自動車や家電、産業機械の心臓部であるモータの 25%省エネ化を図り、競争力を確保し、我が国産業全体の活性化に寄与することを目標としている。
- 文部科学省の「元素戦略プロジェクト＜研究拠点形成型＞」として磁石材料、電子材料、電池・触媒材料、構造材料を課題とする 4 拠点が 2012 年から 10 年間の事業として動いている。これらの拠点は SPring-8 や J-PARC、京コンピュータなどの基礎的・大型ファシリティと積極的に結びついて、材料創成、解析評価、理論の三位一体で物質の本性を理解することで抜本的代替材料開発への道を開こうとしている。磁石材料研究拠点では磁力発生原理を理論的に解明し、希少元素を全く使わない磁性材料の開発を目指している。
- 東北大学では、国内磁石メーカーとのコンソーシアムの中で微粉末プロセスの極限をねらい省ジスプロシウム化する技術の研究開発が進められている。
- JST の CREST においても 2011 年と 2012 年にそれぞれ 5 年間の永久磁石材料を対象としたプロジェクト各 1 件が採択され、それらの成果の一部は元素戦略磁性材料研究拠点に合流し継続研究される方向である。上述の NIMS の成果はこれらプロジェクトの果実である。
- 文部科学省主導の東北発素材技術先導プロジェクトにおける 3 テーマの一つである超低損失磁心材料の研究開発を実施する、東北大学金属材料研究所「超低損失ナノ結晶軟磁性材料研究開発センター」では、モータやトランスなどの磁気応用製品の電気-磁気変換に

伴う磁心損失（エネルギーロス）低減という課題に対し、高鉄濃度ナノ結晶軟磁性合金（新規高 Bs ナノ結晶合金 NANOMET®）の創製に取り組んでいる。

- 欧州では、レアアースを含まない、あるいは削減した永久磁石材料について、2011 年から 2015 年度にわたり産学コンソーシアム型プロジェクト ROMEO(Replacement and Original Magnet Engineering Options)がスロベニアのヨゼフ・シュテファン研究所を盟主として 6 企業 6 大学により構成され、ネオジム磁石代替材料技術の研究開発を行った[16]ほか、レアアースを含まない磁石材料探索に絞ったプロジェクト REFREEPM(The Rare-Earth Free Permanent Magnets)がギリシャの国立科学研センターDemocritus を盟主として進められた[17]。その他、いくつかの小規模プロジェクトが進められた[18]。現在はこれらが終了し、次期プロジェクトへの再構成が進められている状況である。新たなものとしては、INAPEM(International Network on Advanced High Energy Permanent Magnets)[19]、NOVAMAG(Novel, Critical Materials Free, High Anisotropy Phases for Permanent Magnets, by Design)[20]などがあり、理論計算主導の研究開発を目指している。
- 米国では、AMES 国立研究所を盟主として Critical Materials Institute と呼ばれる拠点プロジェクトが 2013 年に組織されて現在も遂行されており、レアアース資源から回収再利用技術に至るまでの広範な研究を進めており、その中で、セリウムなどの使い道のないレアアースをフリーレアアースと称して利用し磁石材料を創製する試みや、アルニコ磁石材料を高保磁力化する研究なども行われている[21]。それら自体は我が国の磁石産業界および材料研究にとって脅威ではないが、3D プリンタを用いたコンビナトリアル的実験遂行技術の開発[22]など、我が国では行われていない試みも行われており、継続して追跡する必要はある。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

永久磁石材料と通常の強磁性体との最も顕著な違いは、磁気異方性に由来する保磁力であり、その発現には相対論効果である電子スピン・軌道カップリングが本質的な役割を果たしていると考えられている。しかし磁石が実際に使用される高温での磁気的振舞いを電子論に基づいて正確に記述し予測することには、現在の計算科学をもってしても、いくつかの本質的な困難が残っている。一方、十分な保磁力の発現のためには、主相を微細な結晶粒に分断し、適切な粒界相を配置した微細組織を構成することが必須である。しかし、保磁力の微視的メカニズムを記述するために必要な粒界や相界面の原子論的理論や計算科学などの基盤科学、それらを天文学的個数の結晶粒からなる磁石材料の保磁力に対して定量的予測が可能な仕方で連結するための理論手法、および、組織制御の基盤となる材料熱力学に関する情報は、いまだほとんど整備されていない。

また、メカニズムの解析や理論予測に基づいて新たに磁石材料を創出するには、熱力学的合理性を持った材料設計によるものでなければ、大量生産可能なバルク材料としての社会実装は難しいことから、材料熱力学基盤の整備はとりわけ重要である。

磁石材料は典型的な多元系材料であり、特に希土類元素や化合物の測定データはほとんどなく、その整備と活用が我が国の研究開発競争力の強化に有効と考えられる。

［今後取組むべき研究テーマ］[23)]

- 永久磁石の高性能化、およびそのための指導原理の確立
  - 計算科学、物性論等を利用した新永久磁石材料の設計あるいは設計指導原理の確立
  - 原子スケールからサブミリメータースケールに及ぶ広範囲のサイズ階層にまたがる磁気構造の解析技術およびシミュレーション技術の確立
- 保磁力発生メカニズムの徹底的解明に基づいた既存材料の高保磁力化、あるいは、希少元素を使用しない新永久磁石の開発
  - 結晶粒合径を微細化して保磁力を増強する技術（清浄な結晶粒界制御のプロセス技術）
  - 結晶粒界面の制御で逆磁区の核生成を抑制して保磁力を確保する技術（原子配置を三次元観察できる最新の解析技術）
  - バルク化が困難であった材料の革新的なバルク化プロセスなど
- 開発材の社会実装を支援、加速する永久磁石材料の熱力学基盤整備
  - 本質的に多元系物質である永久磁石材料における相安定性や相生成量の定量解析および予測が可能な、関連元素全体にわたる熱力学計算用データベースの整備
  - さらに、多くの相界面を内包する永久磁石材料における組織形成原理を扱うための、非平衡過程の記述ができる材料熱力学の整備
- ネオジム磁石を超える新規永久磁石合金の探索
  - 多様な元素の特性に着目し、「電子状態」「原子配列」「階層構造」「ナノスケール複合構造」「欠陥配置」などの微視的な観点から目的機能を如何に発現させるかを検討し、計測技術や計算科学を活用した構造・機能・反応プロセスの設計
- 我が国固有技術である高鉄濃度ナノ結晶軟磁性合金の工業化、実用化の推進
  - 更なる高 Fe 濃度において、ヘテロアモルファス形成能を向上させる最適組成をデザインする。
- インフォマティックス
  - 上記諸項目を加速するための、電子論計算に基づく高速スクリーニング、および、データ同化と機械学習を含む物性値推算技術の開発
  - 電子論から出発し、原子論的描像、連続体的描像の各階層へとスケールを拡大するための物理的有効パラメータを決定する手法(すなわち、粗視化技術)の開発
- 統合的工学研究分野

電気学会では電磁アクチュエータシステムのための磁性材料について、特にインバータで駆動する際に界磁電流に不可避的に重畳され、モータ効率に悪影響を与える高周波成分による磁石材料の渦電流損失や軟磁性鉄心材料のヒステリシス損失(鉄損)に対する評価技術の調査が進められている。これらは磁性材料の加工方法や絶縁技術、組み立て技術などにもわたる広範な工学的問題を含み、これまでは学問の机上に乗ってこなかったが、重要な取組みである。

（５）政策的課題

● 長期的視点に立った基礎材料科学分野振興

磁性材料に限らず他の材料分野と共有するものであるが、特に、労多くして実が少ないという理由で敬遠され、主要大学の工学部門から姿を消しつつある熱力学計測の実験研究部門は全ての材料科学の基盤的存在であり、再興と維持が必要である。世界的に見ても材料熱力学、特に実験測定の分野は、一つのデータを得るにも材料系に特化した測定技術を開発し、実験精度を確保するための測定を多数繰り返す必要があることから、後継者が少なく衰退の危機にさらされている。この危機を乗り越えて次世代に技術継承した者こそが素材分野において競争力を維持継続できると言える。

また、既存の知識体系による評価の保守性が非連続なイノベーションの障害になる可能性もあり、国の研究機関は、失敗を許容する新しい管理手法によって、ハイリスクな研究開発に取り組むべきである。

● 大型研究施設の産業界による利用促進

大型研究施設は施設建設自体が大型物理学実験に焦点を合わせて建設されてきたが、材料科学にとっては、勝手が分かりにくくアクセスしにくい存在になっている。磁性材料に限らず、産業界の研究者が利用し新規材料の開発に役立てるに至るには、ユーザーサポート体制、および、特化された目的のために個別に製作されたオーダーメイド実験機器の設計製作とインタフェース開発のための部署を設営し維持する施策が必要である。

● 省庁間連携

新規材料の創製に成功した場合に産業界による社会実装を加速するための補助金等の施策が有効であることは明らかであるが、企業にとっては知的財産権の適切な運用により実施権が保護されることが不可欠である。単一のプロジェクトあるいは政策の設計や評価に留まらず全体最適化を目指す評価システムの設計と、それを可能とする省庁間連携が重要である。

（６）キーワード

軟磁性、ネオジム、ジスプロシウム、レアアース、保磁力、磁束、ナノ組織、粒界、原子配列、アモルファス・非晶質、ナノ結晶、電子論・計算科学、インフォマティックス

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	国内・国際会議におけるトランス材料の研究発表件数は少なく、新材料の研究は低調である。国プロとしては文科省の東北復興Pjが終了し、NEDOのMagHEMにおいても、2016年度にテーマが終了する予定で、新規テーマの募集を開始している状況。 永久磁石材料については、文科省Pj元素戦略、NEDO-PjMagHEMなどが引き続き実施される他、新規テーマ探索のための先行研究も実施中。また、JST-Pj産学共創も新規テーマを公募するなど研究投資は盛んである。 磁石に関する重要論文発表が多い機関は、NIMS、東北大学、日立金属、大阪大学、長崎大学の5機関となる。NIMSは解析に関する論文が多く、東北大学の論文はNdFeBとFePtに偏っている。日立金属は基礎から高性能化の

				研究まで幅広い。大阪大学の研究はNdFeB薄膜によるDy、Tb拡散の研究と希土類磁石のリサイクルに関する研究の2つに大別され、長崎大学は薄膜や急冷薄帯による磁気特性向上の研究とシミュレーションによるマイクロマグネティックスを行っている。 さらに、今後の研究展開としてマテリアルインフォマティクスの利用が期待されている点について、研究環境の整備が進みつつある。
	応用研究・開発	○	→	トランスなどパワーデバイスの研究開発では高周波化が進んでいる。新規の回路などの研究も盛んであるが、実用化の面からみると、産業界からの研究発表件数は多くない状況である。 モータの研究については、自動車用の可変磁気回路の新たな構造が提案され始めている。しかし、国際的な研究発表の件数は、中国や韓国と比較して減少する傾向にある。
米国	基礎研究	○	→	2011年の希土類価格高騰以降、非希土類の磁石の基礎研究が盛んとなった。国プロとしてはNSF-PjのG8とREACTが2015年に終了し、DOE-PjのCMIも2016年に終了予定。非希土類元素に関する国プロはマテリアルズゲノムなどでひきつづき行われる。 磁石に関する重要論文発表数が多いのはAmes　Laboratory,とデラウェア大学となる。Northeastern大学がFeNi磁石関連研究を継続している。
	応用研究・開発	○	↘	EV用のモータとして国内をリードしているものがインダクションモーターであり、新規構造のモータ開発は低調。また、トランスについても一時期アモルファス材料の利用で活性化された市場動向も盛り上がりを欠く状況。マグネクエンチ社は、海外の企業としては唯一、磁石に関する重要特許公開件数で目立っている。
欧州	基礎研究	○	→	EUによる大型Pjの終了後は、新規に開始されるPjが理論研究に限定されるなど、材料研究より物理寄りの内容が中心。Pjの形態についても、日本の研究グループが参加するなど、国際Pj、領域振興といった目的が中心。磁石研究分野において、これまで中心的役割を果たしていたドイツ、フランスに加えて、スペインやイタリアからも国際会議における発表が見られるようになった。新材料開発では軽希土類の利用促進等が提案されている状況であるが、研究の中心は解析技術の開発等が目立つ状況。
	応用研究・開発	△	↘	モータ・トランス共に新たなデバイス開発に関する研究発表は低調な状況。欧州の変圧器は積層による鉄心が主流であることから、巻き方式で製造するアモルファス鉄心の市場が拡大していない。
中国	基礎研究	○	↗	永久磁石関連の研究は盛んであり、国際会議における研究発表や特許出願など増加傾向にある。ただし、材料研究の中心は新材料開発よりも既存ネオジム磁石の高性能化や材料プロセスの検討による低価格化などが中心であり、これらを支えている地方大学からの研究発表も目立つ。 中国科学院は磁石関係の研究開発に関し包括的に論文発表している。山東大学は保磁力の理論的解析、モデリングに特化した研究をおこなっている。
	応用研究・開発	○	↗	モータやモータ用制御回路に関する研究は盛んであり、近年では、国際会議においても全体の発表件数の10～20%程度まで増加する傾向を示している。
韓国	基礎研究	△	→	磁性材料関連の研究はスピントロニクスやメモリー関連の弱電分野に関する研究であり、永久磁石やトランス材料の研究は少ない。ただし、材料輸入国としての立場から、希少元素の代替えには注目されており、日米欧を中心として実施されている希少金属代替え技術三極会議では、リサイクル分野を軸として、オブザーバー参加を開始した。
	応用研究・開発	△	↗	モータ、トランス、パワーデバイスに関する研究は盛んであり、近年では、国際会議における同分野の発表件数は日本とほぼ同程度のレベルに達している。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考・引用文献

1) 中道 理「モータの省エネ化が日本を救う」、日経エルクトロニクス、2011 年 6 月 23 日、データ原典は富士経済研究所調査報告(2009) http://www.fed.or.jp/tech/2008/electricpower.pdf
2) 国吉ら「省エネルギー・省資源を実現する磁性材料」、日立評論 95 (2013) 370.
3) 鉄鋼プロセス工学入門(JFE 21sst Century Foundation)
http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/index2.html 第 1 章
http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/chapter_1/1d_2.html
4) 東北発素材技術先導プロジェクト 超低損失磁心材料領域
http://nanoc.imr.tohoku.ac.jp/outline.html
5) M. Sagawa et al., “New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe”, Journal of Applied Physics, 55 (1984) 2083.
6) 日刊工業新聞　平成 28 年 9 月 27 日「革新の系譜・日本の科学技術力/ネオジム磁石-EV・ロボの実用化」
7) 中村元「高性能 Nd-Fe-B 系焼結磁石における省 Dy 技術」、日本金属学会会報(マテリア)50 (2011) 374.
8) 山崎貴司ら、「Dy フリー1600 超 kA/m NdFeB 系焼結磁石及び合金の開発と量産化」、粉体粉末冶金協会 3013 年秋季大会講演概要集(2013) p.74、講演番号 3-10B.
9) JOGMEC「電動自動車関連部材のレアメタル使用実態(Nd 磁石)」平成 26 年度(第 7 回)金属資源関連成果発表会資料
10) 一般社団法人　特殊鋼倶楽部　「特殊鋼　2014　Vol.No,5　9」
11) Akiya et al., “High-coercivity hot-deformed Nd–Fe–B permanent magnets processed by Nd–Cu eutectic diffusion under expansion constraint”, Scripta Materialia 81 (2014) 48.
12) Y. Hirayama et al., “NdFe12Nx hard-magnetic compound with high magnetization and anisotropy field”, Scripta Materialia 95 (2015) 70.
13) 2016 年 2 月 29 日プレスリリース「世界最高水準の高効率モータを搭載した圧縮機の省エネ性を実証」、http://www.imr.tohoku.ac.jp/ja/info/results/2016/0229.pdf
14) 東北大学金属材料研究所超低損失ナノ結晶軟磁性材料研究開発センター「Newsletter」
15) ＜雑誌＞ Scientific Reports/＜DOI＞ 10.1038/srep16627/ ＜タイトル＞ An artificially produced rare-earth free cosmic magnet
16) P. McGuiness et al., “Replacement and Original Magnet Engineering Options (ROMEOs): A European Seventh Framework Project to Develop Advanced Permanent Magnets Without, or with Reduced Use of, Critical Raw Materials”. JOM 67 (2015) 1306.
17) D. Niarchos et al., “Toward Rare-Earth-Free Permanent Magnets: A Combinatorial Approach Exploiting the Possibilities of Modeling, Shape Anisotropy in Elongated Nanoparticles, and Combinatorial Thin-Film Approach”, JOM 67 (2015) 1318.
18) S. Hirosawa, “Permanent Magnets Beyond Nd-Dy-Fe-B”, JOM 67 (2015) 1304.
19) INAPEM, http://www.inapem.eu/
20) NOVAMAG,
http://www.bcmaterials.net/project/novel-critical-materials-free-high-anisotropy-phases-for-permanent-magnets-by-design/

21) The Ames Laboratory, Critical Materials Institute, https://cmi.ameslab.gov/
22) J. Geng et al., “Bulk Combinatorial Synthesis and High Throughput Characterization for Rapid Assessment of Magnetic Materials: Application of Laser Engineered Net Shaping (LENS™)”, JOM 68 (2016) 1972.
23) JST 産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」HP

3.21　スマートビル・ハウス

（1）研究開発領域の簡潔な説明

スマートビル・ハウスとは、エネルギーを創り、蓄え、効率的に活用・制御することが可能な業務用建物や住宅をいう。建築物単体だけではなく、住宅、マンション、ビル、工場などの各需要管理単位でのシステム研究開発、さらには地理的に分散配置されている多数の需要側エネルギーリソースを通信制御でアグリゲートして１つのシステムとして利活用するシステムオブシステムズ(System of Systems)まで、接続される系統とのエネルギーや情報のやりとりを含む多種多様なエネルギーマネジメントシステムも研究開発対象となる。建物躯体の工夫、高効率な設備機器の導入、再生可能エネルギーの利活用、ICT 利用によるエネルギーのマネジメント・BEMS/HEMS（Building/Home Energy Management System）により、統合的効率化を目指す。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

先進国に限らずほとんどの国々における共通の問題として、民生用エネルギー消費の急激な増加があげられる。我が国の住宅・建築部門におけるエネルギー消費量は過去 20 年間において増加しており、省エネ基準の見直し実施や建物の省エネ基準への適合義務化の計画など、より高い省エネ性能をもった住宅や建築物への機運が高まっている。

2015 年 4 月の長期エネルギー需給見通しでは、エネルギー自給率向上、エネルギーコストの上昇抑制、温暖化ガス排出削減の達成のため、2030 年までの電力供給側・需要側の重点施策と目標を示している。需要側では徹底的な省エネルギーの推進を旗印に、ネットゼロエネルギービル・住宅（ZEB・ZEH：Zero Energy Building／House）の促進、自動車の電化の推進、コジェネレーションシステムの拡大、需要のスマート化（DR: Demand Response）などを重要要素としてあげている。

また、2014 年エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月 11 日閣議決定）においては、「建築物については、2020 年までに新築公共建築物等で、2030 年までに新築建築物の平均でネット・ゼロ・エネルギー・ビルの実現を、住宅については、2020 年までに、ハウスメーカー等の新築戸建の過半数をネット・ゼロ・エネルギー・ハウス化する [1)]」となっている。

次世代型エネルギー需給マネジメントシステム（スマートグリッド）の確立には、分散型電源やリチウムイオン電池、HEMS（Home Energy Management System）、BEMS（Building Energy Management System）、MEMS（Mansion Energy Management System）、FEMS（Factory Energy Management System）などを含む多様な需要側資源を連携させる双方向通信技術、およびエネルギー需給マネジメントなどの制御技術に重点的に取り組む必要がある。また、これらの間で必要な情報をやり取りすることで、街などの単位で需要家 EMS を統合する CEMS（Community EMS）により、さらに大域的な最適化を可能とするシステムも期待される。

EMS の目的は、省エネのみならず、電力システム全体の最適化である。今後太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーが大量導入されるようになると、需給バランスの確保が困難になり、電力システムの柔軟性を向上させるための対策が必要となる。EMS による需要の

制御は、重要なオプションの一つであり、2017 年開始予定のネガワット取引市場の創設を出発点として、今後需要資源の積極的な活用が期待されている。

［動向（歴史）］

住宅のオートメーションを目的としたスマートハウスの概念は 1980 年から存在したが、2000 年代後半から、地球温暖化を中心とした環境に配慮した住宅や業務用建築物の研究が開始された。建物や住宅の省エネ化を促進して ZEB 化や ZEH 化を目指すためには、太陽の光、風など自然を取り込んだパッシブ技術の活用（自然採光、自然換気など）、躯体の断熱性能の向上（高性能な断熱材・窓など）、高効率な設備機器の導入（LED 照明、デシカント空調、タスクアンビエント照明・空調、高効率給湯システムなど）、再生可能エネルギーなどの導入（太陽光発電システム、蓄電池システム、太陽熱利用システムなど）、さらにこれらを最適に制御するエネルギー管理システム（BEMS、HEMS）の導入により、システム全体で省エネを追求することが必要となる。

建物や住宅に用いられる断熱材は、一般に繊維系、発泡プラスチック系、その他に大別される。繊維系には、グラスウール、ロックウール、セルロースファイバなどがあり、発泡プラスチック系には、押出法ポリスチレンフォーム、硬質ウレタンフォーム、高発泡ポリエチレン、ビーズ法ポリスチレンフォーム、フェノールフォームなどがある。建材に関しては建材トップランナー制度が発足した.

窓におけるサッシの素材は、現在はアルミが主流であるが、高断熱サッシとして、アルミ樹脂複合サッシ、樹脂サッシ、木サッシが開発されている。またサッシの形状の設計工夫も検討が進んでいる。

太陽熱利用システムについては、面積当たり一次エネルギー削減量で太陽電池を上回る再生可能エネルギー利用システムとしてさらなる普及が期待されており、新たな機器認証と環境価値認証制度の方向性の検討が日本国内で進められている。対象となるシステムは、強制循環式の給湯または暖房とソーラークーリングである。

日本における建物躯体と設備機器の統合的エネルギーシミュレーション手法として、The BEST Program（BEST : Building Energy Simulation Tool）があり、継続的に開発とメンテナンスが行われている。米国では、イリノイ大学、カリフォルニア大学、ローレンスバークレー国立研究所（LBNL : Lawrence Barkley National Laboratory）によって開発され、エネルギー省（DOE : Department of Energy）から配布されている建築物のエネルギー消費量予測ツールである Energy Plus がある。研究的にはこれらのプログラムは用いられているが、省エネ法の改正により建築研究所で作成された WEB プログラムによって省エネ適合や省エネラベルが計算されるようになった。こうした標準化により簡易に省エネ手法の比較は可能になったが、WEB プログラムの省エネメニューに収録されていない手法に関しては効果の算定が難しくなった。研究開発された新しい手法の省エネ量の計算が客観的に認められる方法に関して検討をしておく必要がある。

一方、需要サイドで各国において最初に取り組まれたのはスマートメーターであった。需要家の消費電力を 15~30 分の単位で計量し電気事業者にデータを送るとともに、需要家に消費電力を詳細に見えるようにすることで省エネルギー行動を誘導するとともに、全需要家に設置されることから、様々なサービス展開も視野に重要な社会インフラと認識された。米国

では、DOE 等の予算でスマートメーターの設置を加速する傍ら、老朽化したインフラ整備・近代化に対して投資を進めた。我が国では、次世代社会システムとしてスマートコミュニティの構築を目指す取り組みが精力的に進められた。横浜市、豊田市、けいはんな、北九州市がスマートコミュニティ実証地域に選定され、2011 年から 4 ヶ年にわたり実証試験が行われた。このなかで、需要家毎に BEMS・HEMS などを配置するとともに、太陽光発電、電気自動車をはじめとする多様な DER（Distributed Energy Resources）を導入し、さらにコミュニティ全体の需要家間を最適に統合するために CEMS を設置するシステム構成がとられた。これは分散協調型 EMS の一つの実現形態である階層型 EMS の研究と位置付けることができ、これをもとに次世代の低炭素型コミュニティの実証が行われた。さらに、社会実験的な要素も取り入れられ、電力消費データ分析に行動科学的知見を反映した省エネルギーアドバイスレポートや、電力消費を下げたい時間帯にクーポンを発行して外出を促すなど需要家行動を変容させる実証試験も実施されている。

このように、スマートメーターで収集されるエネルギー消費のデータや HEMS ネットワークで収集されるエネルギー利用関連データなどのビッグデータを分析し、消費者心理に踏み込んだ研究やサービス開発が国内外で盛んになりつつある。これらのデータは新産業ビジョンにおいてもリアルデータとして注目されており、エネルギーだけではないビジネスに活用される可能性がある。エネルギー分野におけるネットワークとビッグデータの活用は、デマンドレスポンスやリアルタイムプライシングなどのサービスとの関連が深い。いずれのサービスも個人情報を扱う一種のフィードバックを含む制御系であり、プライバシー保護とサイバーセキュリティの確保が非常に重要となる。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

- 人間の快適性，健康性に関する研究は省エネ検討時の必要条件であるため、欧米でも盛んに研究が行われるようになった。日本ではハードウェア中心で本分野は軽視されてきたが、最近ようやく研究事例が出てきている。
- 室内環境の測定、制御に関する分野の研究がビッグデータの活用、IoT の事例として注目されている。
- 注目される高性能断熱材としては、真空断熱材（VIP：Vacuumed Insulated Panel）とエアロゲルがある。VIP は、多孔質の芯材をフィルムで包み、内部を 1～200Pa まで減圧したものであって、熱抵抗値が他の断熱材よりも高い。ただし、減圧するためのコストが大きく、非常に高価であることが課題であるため、日本国内では住宅の部分断熱改修に採用されるなどの限られた範囲での使用が目立つ。エアロゲルは、ナノメートルオーダーの空孔を有する脆弱な多孔質体で構成される。熱抵抗値が高いが原材料・製造装置が高価であることから価格が非常に高く、日本国内では住宅用にはほとんど普及していない。
- 昼光の導入技術，高性能ガラスの技術として、サーモクロミック（Thermochromic）技術やエレクトロクロミック（Electrochromic）技術がある。DOE と LBNL は、共同でエレクトロクロミック・ウインドウの研究開発を長く続けてきている。欧米では建築的な工夫に資する研究が盛んに行われているが、日本では，エアコンなどハード的な研究が主流に

なっている。

- 配電事業者がスマートメーターの導入を開始し、見える化、B ルート（スマートメーターと HEMS 間の双方向通信）通信等のサービスが広がりつつあり、将来の新たなプラットフォーム構築が進行中である[2)]。2024 年までには、全国約 8000 万台の全需要家に導入される計画であり、消費エネルギーデータも 30 分の標準スペックに加え、B ルートの活用で HEMS による 30 秒程度の粒度データの収集が可能になっている。
- 建物単体ではなく、電力需給全体の評価により、スマートハウス・ビルにおけるデマンドレスポンスの価値を定量化するためのシミュレーションが、米国 NREL（National Renewable Energy Laboratory）や日米の大学で行われている。

［注目すべきプロジェクト］

- スマートメーターが導入され、初期のスマートグリッド構築が進みつつある米国、欧州、日本において、需要家から収集される大量のデータを用いたエネルギー消費分析などに関する公的なプロジェクトが散見される。従来エネルギー供給者側の視点からのデータ分析が中心であったが、今後は国民全体の利便性向上などを考え、エネルギー消費者の視点からのエネルギー消費に関するデータ分析、エネルギーと情報とが融合した新たなサービスの創出が必要となることが考えられる。
- JST-CREST の「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」でプライバシー保護に関連する研究課題が採択されるなど、研究が進行中である。
- IEA Annex66,69 における人間行動、居住環境のデータベース構築などが注目される。日本では本分野に資金を提供することがないため、参加できない状況である。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

欧米の研究はそれを利用する人間や環境、ICT のソフト的な研究に移行している。日本の研究は、最近ではソフト的な研究も見られるが現状まではハード中心で進行しており、こうした波に乗りきることができていない。

［今後取組むべき研究テーマ］

- IoT 利用によるエネルギーのリアルタイムデータ取得と利用に関する研究開発。
- 建物や住宅において、自然採光や自然換気の効果を企画設計段階で正確に予測するパッシブ技術導入のためのシミュレーションツールの開発。単体から複数の建築物を同時にシミュレーションできる工夫が必要。
- 躯体の断熱性能を向上させる高性能な断熱材と窓（サッシおよびガラス）材料の技術開発。夏と冬を考えた技術開発の必要性。
- 高効率な設備機器の技術開発、およびその最適な利用方法検討のための建物躯体と設備機器の統合的エネルギーシミュレーション手法の開発。
- 高効率でかつ低コストの施工を実現するための再生可能エネルギー利用システムの開発。
- 建物や住宅に導入されるシステムの性能を正しく発揮するための最適制御を行うエネル

ギーマネジメントシステムの開発。

- 企画設計段階や建設段階、運用段階における意思決定のための、建物や住宅の環境に関わる性能を総合的に評価する環境影響評価手法の開発。
- 建物や住宅の建設段階、運用段階において運用可能なコミッショニング手法の開発。
- 既築の建物や住宅ストックの資産価値や改修要否の判断を正確に行うことのできる性能評価手法、およびそれに適用可能な照明や空調の簡易改修が可能な省エネルギー手法の開発。
- ビジネスとして省エネ化を推進することが可能になるようなビジネスモデルの探求。

（５）政策的課題

政策的課題としては、省エネルギーに関する建物や住宅の実効的な規制や基準の整備があげられる。政府や自治体などの補助金や税制優遇などのインセンティブも期待される。

欧米では建築物においても、環境性能を公開することにより、市場メカニズムを用いて建築ストックの質の向上を図っている。米国では Energy Star による建築物の格付けが公開されているほか、EU 加盟国では不動産取引時にエネルギー消費実態に基づく格付け情報を建物所有者が提供することを義務づけている。このように社会制度を通じてエネルギー消費実態をビッグデータとして把握し、そのデータ活用により市場メカニズムを働かせ、よりエネルギー効率の高い製品、建築が選好され、社会のエネルギー効率の改善が自律的に進む社会制度設計に関する研究が、欧米では積極的に行われている。また、グリーンリースなどの政策的な仕組みの構築や初期投資の抑制に関する技術開発が求められる。

（６）キーワード

ネットゼロエネルギービル・住宅（ZEB・ZEH）、IoT，パッシブ技術、高性能断熱材、高性能窓、高効率設備、統合的エネルギーシミュレーション、再生可能エネルギー利用、エネルギー管理システム、環境影響評価

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	電気分野を中心に優れた研究が行われているが，供給サイドの研究 電気学会では供給サイドの研究が中心である。 エネルギー・資源学会、建築学会、建築設備学会等では需要サイドの研究も多数あり。 ただし、研究領域間を横断した供給から需要までの横断的研究活動は、JST/CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」が唯一である。
	応用研究・開発	△	↘	経済産業省　次世代エネルギー・社会システム他多数の実証事業が行われている。 諸外国で行われている建築外皮に関する研究費は少ない。 人間行動に関する分野は特に遅れている。
米国	基礎研究	◎	↗	建築外皮に関する研究は先駆的。 需要資源を電力システムの運用に用いる考え方は、米国が最も先進的であり、ネットワーク事業者により濃淡はあるものの、すでにピーク対応のDR

				は実運用レベル。再エネ対応DRに関しては、各種の実証が行われている。例えばPJMでは、需要資源を供給資源と同様に位置づけ、定量的に価値が評価されている。
	応用研究・開発	◎	↗	IEEESmartGrid等でエネルギーマネジメントシステムに関する研究多数。NREL（は再エネ、DRに関する研究成果をが多数公開。 カリフォルニアなどでは再エネ対応のためのDRの実証が行われている。 NEDO ハワイPJ、ニューメキシコPJ
欧州	基礎研究	◎	↗	基準化や規制により進展
	応用研究・開発	◎	↗	建築環境系の大学コースを見直すなど，過去10年の努力がある。EPBDで規制化。ZEB普及に積極的であり実証事例多数あり。(例：NEDO LyonプロジェクトTask1におけるPEB:Positive Energy Building) ドイツなど再エネ普及が拡大している国では、住宅用太陽光発電の自家消費拡大等に関心が高まっており、NEDOも電池やHP給湯機を用いた実証をドイツシュパイヤー市で行っている。
中国	基礎研究	○	→	着実に力を付けている．英文誌の投稿は日本よりもすでに多い．
	応用研究・開発	◎	↗	政策的精力的に進めている．大学対抗，ソーラデカスロンでは日本代表よりも高得点．資金も豊富。 中国におけるスマートシティプロジェクトは大連等多数
韓国	基礎研究	○	→	民間企業によるIT技術と絡めた研究開発が推進。
	応用研究・開発	○	↗	ZEB、ZEHに関する関心は日本よりも高い。 2009年ごろから済州島でスマートグリッド実証事業がスタート。家庭における家電制御など実施。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考・引用文献

1) 未来投資に向けた官民対話（第 3 回 平成 27 年 11 月 26 日）第 3 回「未来投資に向けた官民対話」 http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/zeh/
2) 「電力会社におけるシステムの開発・整備状況及びスマートメーターの設置状況」平成 27 年 10 月 27 日資源エネルギー庁

3.22　断熱・遮熱・調光

（1）研究開発領域の簡潔な説明

断熱とは、建築物において外部からの流入出熱を小さくして、夏・冬期の冷・暖房負荷を削減する技術である。遮熱とは、太陽光の日射を吸収しないように反射することや、太陽光によって、屋根、壁、窓が温められた結果、温度の高くなった面から出る熱の輻射（放射）を遮る技術である[1,2]。調光とは、透明体の光学的特性を変化させ、光の透過量や色などを変える技術で、このような機能を持たせたガラスが調光ガラスである。

ここでは、建築物向けの高性能な断熱材料、遮熱機能を持つ遮熱材料や遮熱窓の調光ガラスを対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

世界の全エネルギーの約 45%は、住居やオフィス・工場などの建物に使用されており、その大部分が暖房と空調に使用されている[3]。また、一般住宅では、全エネルギー消費の内、給湯や冷暖房など熱に関するものが全体の半分以上を占めている[4]。

建物の断熱や熱遮断は、このエネルギー消費を押さえるために大きな役割を果たす。家屋の断熱・遮熱は、電気などのエネルギーの生産と輸送の効率を上げることや、環境に優しい新エネルギーの開発と同様に重要な課題である。例えば、建築物の断熱を高度に活用した実証実験では、冷暖房負荷が従来に比べて 1/3 に減少した実例もある[5]。

建物の熱環境は、室内外の気温差による熱移動だけでなく、日射の影響を強く受けることから、遮熱は夏季の冷房負荷を減らす上で、断熱とともに市場要請が高まり技術の普及が進んできた。建物は、様々な部位から構成されるが、その中でとくに、窓(開口部)は建物内外への熱移動が大きい。これは、窓ガラスの断熱性が比較的低いことと、窓が採光性や眺望性など室内を開放的にする視覚的・心理的な役割を担って、日射が直接入射する経路になるためである。広い意味で遮熱の考えは古くから知られ、庇や簾、葦簀などの道具や、軒、縁側、坪庭といった建物空間など、現在も生活の中に浸透している[6,7]。一方で、近年、化石燃料の使用低減、温暖化ガス排出規制など、環境問題への意識が高まり、遮熱においても新技術の提案や実用化など、様々なステージで研究開発が進んでいる。

日本の国土を広く占める温暖地では、暖冷房期の両季節に適応した技術が求められるので、調光ガラスは有力な遮熱の候補である。調光ガラスは、以下のような 3 つの目的（個別か、もしくは複合して）で用いられる。

a)　エネルギー制御により冷暖房負荷を低減する
b)　外部から入ってくる光量の制御により照明負荷を低減する
c)　視覚的な変化をもたらす

中でも近年、a)の省エネルギー材料としての目的が大きな注目を集めている。省エネルギーのために遮熱を行う場合、注意しなければならないのは、遮熱を行うことで、冷房負荷は下がるが、暖房負荷は上がることである。日射の影響は方角によって全く異なるが、特に南に向いた窓では、冬の日射の方が夏の日射よりはるかに強いため、この方向で遮熱を行うと、

透明ガラスと比較した場合、冷房負荷の低減量よりも暖房負荷の増加量の方が大きく、年間を通じた冷暖房負荷は逆に増加してしまう。ところが、もし夏と冬で遮熱のレベルを可変できる調光ガラスを用いれば、夏はできるだけ遮熱して冷房負荷を下げ、冬は日射を取り入れて暖房負荷の増加量を抑えることで、年間を通じた冷暖房負荷を下げることができる。このように、南に向いた窓では、調光ガラスを用いることにより、遮熱による省エネルギーが可能になり、これが調光ガラスの必要性を示している[8)]。

これに対して、西や東を向いた窓では、南とは逆に夏の日射の方が冬の日射より強いので、この方角で遮熱を行うと、冷房負荷の低減量の方が、暖房負荷の増加量よりも大きくなり、年間の冷暖房負荷が下がる。ただ、この方向では、できるだけ遮熱する方が年間の冷暖房負荷が下がるので、結局窓のない状態がエネルギー的には一番好ましい状態になってしまう。ところが、調光ガラスを用いて夏と冬で遮熱のレベルを変えることができれば、この窓がない状態よりもさらに冷暖房負荷を下げることができ、大きな省エネルギー効果が得られる。これが、もう一つの調光ガラスの意義を示している。

［動向（歴史）］

民生建物の省エネルギーの歴史は、第 1 次石油ショックを契機に発足した「サンシャイン計画(1974 年)」、エネルギー利用効率の向上を狙った「ムーンライト計画(1978 年)」を受け、その後の省エネ法制定(1979 年)により告示された「省エネルギー基準(1980 年)」、さらに同法改正にともなって告示された「新省エネルギー基準(1992 年)」、「次世代省エネルギー基準(1999 年)」で、より厳格な規制となって引き継がれている。これらの基準は、建物の断熱・気密性に重点がとくに置かれ、冷暖房削減の指針が示されてきた。この期間では、京都議定書(1997 年協定)、東日本大震災(2011 年)、パリ協定(2015 年)と、エネルギー供給・温暖化ガス等の環境問題がクローズアップされる経緯で、今日まで省エネ住宅への関心が高まり、ゼロエネルギーハウス(ZEH)やゼロエネルギービルディング(ZEB)といったスマート建築物の市場への普及が加速してきた。

家屋の断熱材としては、これまでグラスウールや硬質ウレタンフォームなどが普及してきているが、さらに高性能な真空断熱パネル（VIP）も海外を中心に利用され始めている。既存の断熱材については、グラスウールの繊維を熱流束と直角方向に制御することによって、熱伝導率を制御する方法が提案されている[9)]。シリカをゲル化させ超臨界で乾燥させるシリカエアロゲルは、多孔質構造がナノ構造で空気の平均自由行程より短いので、個体の熱伝導率が常圧でも空気の熱伝導率より小さくなる特色を有する。これらの多くは粉体として用いられているが、水分を吸収するとその表面張力によりナノ構造が破壊されるため、湿度が大きいわが国では、高温の断熱剤として一部に使用されているのみである。

中国では、一般住宅に VIP が使用され始めているが、経年とともに VIP の真空度低下による断熱性能劣化が問題となっている[10,11)]。ヨーロッパでは、市街地の多くが石またはレンガ造りの歴史的な建物であり、外観の変更や建て替えが不可能である。そのため、内装のみの変更が行われるが、従来の断熱材を建物の内側に設置すると、居住空間が著しく狭くなる。そこで、従来の断熱材より格段に薄い VIP を室内内装に利用することが検討されている[12)]。

近年では、部材系での技術開発が活発化しているが、それらを実用化させるべく、熱負荷

ひいては消費エネルギーの低減の効果について、以下に示す様々な観点で分析・調査がなされている[13-16]。具体的には、①遮熱の技術・方式、②遮熱性能、③使用環境、④評価・試験方法、⑤ライフサイクルアセスメント(LCA)である。①遮熱の技術・方式では、外付けブラインド、ブラインド入複層ガラス、低放射ガラス（low-Emissivity:low-E と略し、内部に特殊な金属膜を設けた複層ガラス）や、近赤外選択反射フィルムといった技術で、光吸収か反射の方式に分類され、それぞれで特徴づけられている。②遮熱性能では、光反射率・透過率・吸収率の基本光学特性に加え、日射強度の波長分布や時々刻々と変わる日射高度に鑑みて、それらの分光特性と入射角依存性が重要となる。また、日射エネルギーをガラス面が一部吸収すると、熱に変換され、伝導・対流・赤外放射として、間接的に室内に侵入する。このように、間接的な日射侵入も含めた遮熱性能は、日射熱取得係数で表される。③使用環境は、建物の間取り(方位)、建物タイプ(戸建・集合住宅、オフィスビル)、気候(暑熱・温暖・寒冷地)、生活様式(家族構成、職業)、個性(体質・感性)と幅広いが、これらは互いに関係づけられて、様々な分析が行われている。④評価・試験方法は、材料、部材・部品、屋外実証試験、シミュレーションなどが挙げられ、調べる対象範囲とともに、検討項目が変わる。⑤LCA は、製造・使用・廃棄にわたる環境負荷(CO_2 排出換算、資源消費量、安全性)、性能、寿命を総合的に分析して技術を判定する。

エネルギー消費の観点から、住宅やオフィスの暖冷房負荷は、国内の最終エネルギー消費の 1 割前後に達している[17]。一方、建物の内外の境界を通る熱流は、窓が他の部位に比べて大きい。例えば、1992 年の省エネ基準住宅で、夏は 7 割の熱が窓を通して室内に入り、冬は 5 割が流出しているとの報告がある[18]。近年、ガラスの複層化や low-E フィルムといった技術が普及し始め、窓の熱性能は格段に上がってきた。しかし、省エネ化の要望で、外壁や屋根などの断熱等級も高仕様の建物が増えており[19]、窓は大きな熱損失源である状況に変わりない。近年、遮熱の関心が高まり、窓の外側で日射を遮ることで高い効果が得られることが、実験や計算により改めて明らかになってきた。例えば、庇やシェード(簾や葦簀なども含む)といった、従来の技術が見直されてきただけでなく、その発展型と言える外付けブラインドや複層ガラス内ブラインド、さらに遮熱や遮断熱タイプの low-E ガラスの普及が進んでいる。

現在の遮熱窓は、主に複層ガラスの中に low-E 膜が組み込まれた形態、いわゆる low-E 複層ガラスと呼ばれるタイプが主流で、2006 年までは普及が僅かだったにも拘わらず、2015 年には、複層ガラスの内、約 2 割を low-E 複層ガラスが占めるという状況にまでなった(普及面積による換算)。low-E 複層ガラスは、遮熱型と断熱型に分類され、前記の普及率が全て遮熱型であるとは言えないが、それでも相当数あると推察され、遮熱技術に対する供給者・消費者の意識が高まってきたと言える。

断熱型の複層ガラスの国内出荷量は 1999 年で 8,763 千 m^2 であったのが、2015 年 15,171 千 m^2 と 1.7 倍増加である。近年の経済活動の停滞や世代毎の人口分布の変化など、経済的・社会的な背景により、新築物件の数が大幅に減少している状況を考慮すると、複層ガラスの普及率は極めて高いと言える[20]。

1996 年に透明状態または鏡状態に自在に変更できる材料が発見され、ガラスに塗膜した金属膜の光学特性を自由に制御できる機能を有する“調光ガラス”の研究が行われ始めた[9]。調光ガラスは、物理的刺激により光学的性質が可逆的に変化する材料（「クロモジェニック材料」と呼ばれる）をガラスにコーティングするか、ガラスの間に挟むことで実現することが

できる。この物理的刺激として何を用いるかによって、以下のような種類がある。

① エレクトロクロミック：電気的にスイッチングを行う
② サーモクロミック：温度によって変化する
③ サーモトロピック：温度によって散乱状態が変化する
④ ガスクロミック：周囲の雰囲気（ガス）で変化する

① エレクトロクロミックは、かなり前から研究が行われており、現在、実用化されているエレクトロクロミック材料には、a)薄膜型、b)溶液型、c)SPD 型、d)PDLC 型の 4 つのタイプがある。a)薄膜型は、調光ガラスの中でも、最も研究の歴史が長く、開発が始まったのは 40 年以上前だが、2012 年頃、アメリカのベンチャー企業 SAGE Electrochromics 社（現在はフランス Saint-Gobain 社の子会社）でエレクトロクロミック窓ガラスとして商品化され[21]、現在、欧米でビル等への導入が始まり、日本でもこの窓ガラスを使った建物が出てきつつある。b)溶液型は、元々、米国のベンチャー企業 Gentex 社が、自動車のルームミラーとして用いられる「防眩ミラー」用に開発した技術[22]を、窓ガラスに適用したものである。2012 年に航空機の窓ガラスとして実用化され、ボーイング 787 で用いられている[23]。c)SPD 型は、米国のベンチャー企業 Research Frontiers Inc.（RFI）が実用化したもので、様々なメーカーがそのパテント供与を受けて製造を行っている。現在、自動車のサンルーフや航空機の窓として使用されている。d)液晶型は日本板硝子ウムプロダクツから UMU（ウム）という標品名で販売されているが、スイッチングは非常に速く、不透明から透明への変化が 1/1000 秒、透明から不透明への変化は 1/100 秒程度である[24]。

② サーモクロミックは、周囲の温度によってその光学的性質が可逆的に変化する材料のことを指し、このような性質を持つ薄膜をコーティングしたガラスがサーモクロミックガラスである。この材料を建物の窓として用いると、冬は太陽光の熱線成分を透過し、夏は熱線を反射するという変化が自動的に起こり、暖房負荷及び冷房負荷を低減することができる。エレクトロクロミックガラスのように、自由にコントロールを行うことはできないが、膜の構造が簡単でコントロール系もいらないというメリットがある。

③ サーモトロピックガラスは白濁調光ガラスとも呼ばれ、温度が低い時は透明状態だが、ある転移温度より高温になると白濁した状態になって光を遮る。これは日本のベンチャー企業で実用化されたガラスで、ある転位温度（この温度は作製時に設定できる）以下では無色透明なのに対し、転移温度以上になると白濁した状態になり光を遮る[25]。

④ ガスクロミックガラスは、周囲の雰囲気ガスを変えることで調光を行うガラスである[26]。ガスクロミックガラスの研究はドイツで進められていたが、必ず二重ガラスにする必要があることや、またスイッチングに大量の水素を必要とすることなどから商品化にはいたっていない。

これまで実用化されている調光ガラスは、いずれも太陽光を調光層で吸収することで調光を行うが、太陽光の照射が強いと薄膜部分の温度が上がり、それが室内に再放射されることになる。これを避けるためには、吸収ではなく、反射でコントロールすることが望まれるが。そのような材用は長く見つかっていなかった。それが、1996 年にオランダのグループにより、

イットリウムやランタンなどの希土類金属薄膜がこのような反射型のクロミック特性を持つことが発見され、透明な状態と鏡の状態を切り替えできる調光ミラー（Switchable Mirror）と名付けられて一躍注目されるようになった[27]。

この調光ミラー薄膜を反射調光型の調光ガラスとして実用化するための研究は、主に日本で行われて、かなり実用化に近い段階まできている[28]。薄膜材料に関しては、当初スイッチングの繰り返しに対する耐久性が悪く、100 回ぐらいスイッチングすると劣化してしまうという問題があったが、材料としてマグネシウムとイットリウムの合金を用いることで、耐久性が飛躍的に向上することが見いだされ、実用化の目処がたってきた。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

● 真空断熱パネル（VIP）

これまで、冷蔵庫などの高性能断熱材として使用されてきた真空断熱パネル（VIP）の住宅利用が検討されている。これは、ガラス繊維や粉体断熱材を金属蒸着したプラスチック膜に包み中を真空にしたものである。VIP は、ガスによる熱伝導をほぼゼロにすることができるので、従来の断熱材に比べて約 1/10 の厚さで断熱が可能である。心材は熱伝導やふく射熱伝達を阻害する材料が使用されており、空気の熱伝導率に比べて 1/20 の熱伝導率を有する高性能 VIP も開発されている[29]。VIP を建築部材として利用する場合、真空度の低下で経年劣化することが大きな課題である。真空度がある程度低下しても心材の断熱性能低下を押さえられるフュームドシリカの利用が検討されている。フュームドシリカはコストが高いが、コストの安いパーライトや中空ガラスビース、各種繊維やカーボンを混入させてコストを下げることが検討されている[30-32]。

● 遮熱フィルム

近年、化学メーカーを始めとして、多くの企業が遮熱(あるいは遮断熱)フィルム開発への取り組みを開始している。技術の流れとしては、Ag や Au などの金属膜や、ITO、その関連の透明酸化物系といった単層膜タイプ、金属と酸化物等の多層膜系で三層・五層タイプは既に商品化されている。さらには屈折率の異なる高分子系材料を数百層重ねた多層膜タイプへと開発が移行し、これが遮熱フィルムの主流になりつつある[15]。これらフィルム化への開発では、選択波長反射による遮熱への展開も併せて行われ、多層膜タイプでは、日射の可視領域の透過率をできるだけ高めて、採光性・眺望性を確保しつつ、日射の近赤外光のみを遮蔽する技術開発が進んでいる。また、高分子のみからなる多層膜タイプでは、電磁波が通過できるため、室内においても携帯電話など無線機器への電波障害が起きにくくなるなどの利点も得られる。

● 調光技術

調光技術では、次の 2 つが挙げられる。

① プラズモン調光材料

これまでの調光材料は、スペクトルの特定の波長における吸収や反射のレベルを変える事で調光を行う物がほとんどだったが、最近、スペクトル上の吸収端波長を変える事で調光を行う新しいタイプの調光材料が注目を集めている[33]。電気の密度を変える事で

プラズモンの吸収波長を変える方式が用いられるため、プラズモン調光材料とも呼ばれる。アメリカのローレンス・バークレー研究所のグループを中心に研究が進められている。

② 有機薄膜エレクトロクロミック材料

有機系の薄膜では様々な色が出せるのに加え、真空装置を用いず、湿式法で成膜できるため、安価に製造することができる。材料としては、PEDOT（poly（3,4-ethylenedioxythiophene））や PANI（poly（anyline））といったポリマーが代表的な物で、酸化・還元反応により着消色する[34]。着色の効率が無機系の材料に比べて高く、鮮やかに発色する物が多いことから、表示素子等には適している。

［注目すべきプロジェクト］

- 真空断熱パネル（VIP）

建築物の断熱に関して、従来の断熱材に比べて 1/10 程度の厚さにできる真空断熱材（VIP）は住宅の断熱性能向上が期待できる。しかし、冷蔵庫などの家電製品の断絶材の耐用年数は 2-20 年程度なのに比べて、建築物の断熱性能は 20-100 年と格段に長期間の耐用年数が要求される。

これを克服するために、心材と被覆材の改良が重要である[31]。さらに、被覆材から多少空気が進入しても断熱性能が低下しにくいフュームドシリカを心材とすることが検討されている[35]。フュームドシリカやエアロゲルを真空断熱層として利用することは、ヨーロッパの研究グループで進められており、それらの機械力学的特性や熱的特性の研究が、分子動力学を用いて行われている[36]。また、VIP は施工時に穴を開けると使用不能となる欠点も有している。その欠点を克服するために、真空層を小分けに分割した VIP も開発されている[35]。

- 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合[37]

同組合が進めるプロジェクト内の一つ「革新的次世代遮熱フィルム」の開発では、高精度・高性能なナノ積層技術で、高い可視透明性と遮熱性を両立したフィルムの開発が進められている。実証試験により、現状の市販品より高い冷房負荷削減効果が得られている。今後、冬季の暖房に対する影響を調べ、通年での正味の省エネルギー効果の検証が計画されている。

- “INNOSHADE”プロジェクト

ヨーロッパで 2009 年から 2012 年に行われていた調光材料に関するプロジェクト[38]。特に湿式法を用いたエレクトロクロミック・シートの開発に重点を置いたプロジェクトで、技術的には大きな成果を上げて終了している。現在も、湿式法を用いた大型シートの作製に関して、この流れを受け継いだ研究がドイツを中心に行われている。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

- 断熱

次世代の建築用断熱材として、真空断熱材（VIP）が期待されているが、これが広く実用化されるためには、耐用年数と価格の大幅な改善が必要である。現在、家電用で広く使用さ

れているVIPは耐用年数が2-20年であり[39]、長期の利用では層内の真空度が低下して断熱性能が低下する。中国ではガラス繊維を心材としたVIPの価格は15ドル/m²程度まで下がっており[3]、従来型の断熱材と競合できる価格まで下がっている。しかし、耐用年数の問題は解決されていない。VIP層内の圧力が上昇しても断熱性能をある程度維持できるシリカエアロゲルやフュームドシリカを使用したVIPが開発されているが、この場合は価格がボトルネックとなっている。耐用年数が長く、低価格の心材開発が進めば、VIPの利用は大きく前進すると考えられる。

- 遮熱

遮熱技術では、①遮熱フィルムの遮熱性能・断熱性能・可視透過率の向上および、②暖冷房負荷の正味での削減効果が、現状の課題として挙げられる。

①は、実質的に遮熱材の光吸収で生じる赤外放射の問題が少なからずあり、まずは、それを低減する光学構造や材料探索を行うことが求められる。具体的な例としては、多層膜タイプの遮熱フィルムの各層間の屈折率差を拡げ、近赤外の選択反射によって実現される遮熱性能を極限まで高めることが望まれる。但し、この性能向上は限界に近付いていると考えられる。この理由は、地上での日射エネルギーは、可視域に約5割が集中しているため、可視透明性を維持したままでは、日射の遮熱性能向上は、約5割で頭打ちになるからである[40]。また、建材である遮熱フィルムが、市場で受け入れられるためには、現在のlow-Eガラスやフィルムとの競争に耐えるよう、比較的、低い販売価格に設定せざるを得ず、その意味でもハードルが高い。

②は、とくに温暖地や準寒冷地に立地する住宅などの建物では、冷房負荷よりも暖房負荷が高く、遮熱フィルムをこの地域で用いると、冬季の日射の恩恵が減り、暖房消費エネルギーが増えて逆効果になる可能性がある。これは、遮熱技術では避けられないジレンマで、この解決に向けては、現実に即した性能評価をまず行い、遮熱特性を最適値に調整する必要があると考えられる。これまで、遮熱による冷房負荷抑制の効果の検証は、各社で行われ、情報発信がなされているが、冬季の暖房負荷増加の可能性も同時に検討し、通年での正味の暖冷房負荷低減の効果を検証すべきであろう[41]。具体的には、季節ごとあるいは通年での屋外実証試験、シミュレーションなどを地域や気象などを分けて行う。さらには、LCAにより、製造・使用・廃棄までの長期的な環境インパクト(CO_2排出換算、資源消費量)を見積もり、環境負荷、性能、寿命を総合的に分析し、遮熱の効果を判定すべきと考える[42]。

- 調光ガラス

調光ガラスの実用化における最大の課題はコストにある。特に調光ガラスによって冷暖房負荷を下げようとする場合、その効果はそれほど大きくなく、年間の冷暖房費をどのくらい低減できるかを見積もると、その費用効果は1m²あたり千円程度ある。現在商品化されている調光ガラスの値段はだいたい1m²あたり15万円程度であり、これで回収しようとすると150年以上かかることになり、あまりに高すぎる。現在は、調光ガラスは視覚的なコントロールに用いられているが、少なくとも、省エネルギー材料として普及させるためには、そのコストは現在の10分の1程度に下げる必要があり、それが最大の課題である。

［今後取組むべき研究テーマ］

● 断熱

繊維系断熱材や発泡プラスチックの断熱材、従来型二重窓ガラスと低熱伝導窓枠による窓断熱など、既存の断熱技術の研究は成熟期を迎えている。建材用真空断熱材（VIP）はこれからの建築資材としてさらに研究が進められるべきである。特に、低価格な長寿命 VIP の開発は、今後の省エネ住宅のキーテクノロジーとなる可能性がある。パーライトなどの低価格断熱材と構造用強度を備えた、長寿命低価格 VIP も今後の研究進展が期待される。また、欧州で行われている既存住宅に設置可能な薄型 VIP の開発研究は、日本の既存住宅や建築物にも適用可能であり、今後の研究進展が望まれる。

断熱材の高性能化に伴い、断熱材の性能を計測する装置の高度化が必要となっている。新たな計測原理による断熱材の高精度熱伝導率測定手法[43]の標準化も今後必要となってくる。

● 遮熱

遮熱フィルムの性能向上の課題に対しては、単に反射率や透過率の物性値を材料調製によって変えるだけでなく、日射の入射角や環境の変化に応じて、光学特性が変わる、環境応答型の機能性遮熱部材の開発が待たれる。一方、暖冷房負荷の正味の削減効果を把握する課題に対しては、国内の気候条件、地域性、生活様式など、多くのパラメータを考慮した実証試験やシミュレーション予測を行うことが有効と考えられる[44]。また、エクセルギー[45]を用いて遮熱性能を評価することで、快適性など実際に近い状況での検証結果を発信できると期待される。

● 調光ガラス

調光ガラスのエネルギー性能は、断熱性能と遮熱性能で決まる。季節に応じて遮熱のレベルと断熱のレベルと最適にコントロールすることができれば、さらに冷暖房負荷を大きく下げることができる。現在研究されている調光ガラスは、ほとんど遮熱性だけを可変するものだが、今後は、断熱性についてもそのコントロールができるような調光ガラスの開発が望まれる。

（５）政策的課題

● 断熱

わが国の既存住宅 6000 万戸の内、2300 万戸が築 25 年以上である[43]。最近の新築住宅戸数は年約 90 万個であるから、既存の住宅の断熱性能向上がわが国の省エネに大きく貢献する。しかし、住宅の断熱性能向上にかかる経費の投資回収年数が 25 年以上なので、現行では築 25 年以上の住宅の断熱改修は経済的に成立困難である。

一方、従来の断熱材に比べて 1/10 程度にすることが可能な VIP の新技術が発展し、耐用年数が上昇すれば、大規模な改修なしで既存住宅への適用が可能となる。ここに、政府の省エネ助成を組み合わせることにより、わが国のエネルギー消費を一定量削減することが可能である。さらに、省エネ住宅は省エネ換気システムと組み合わせることにより、住宅内の温度を均一化して健康寿命をのばす効果もあるので、家屋断熱の対費用効果が増大する。

● 遮熱

該当なし。

● 調光ガラス

日本は窓ガラスの省エネルギー性能に関しては、世界でも最下位クラスで、非常に遅れている。外国では窓のエネルギー性能に対して罰則規定があるために、エネルギー性能の悪い窓ガラスをつけることができないが、日本ではそのような法律が無いのが大きな原因になっている。従って政策的には、窓ガラスの省エネルギー性能に対してもう少し厳しい条件を義務化すると共に、エネルギー性能の良い窓ガラスの普及を促進するための補助金の充実等が望まれる。

（６）キーワード

断熱、遮熱、熱伝導、ふく射伝熱、真空断熱材（VIP）、遮熱塗料、二重窓ガラス、シリカエアロゲル、フュームドシリカ、外付けブラインド、low-E、選択波長反射、日射熱取得係数、ライフサイクルアセスメント(LCA)、省エネルギー基準、ゼロエミッションハウス(ZEH)、ゼロエミッションビルディング(ZEB)、複層ガラス、最終エネルギー消費、赤外放射、エクセルギー、調光ガラス、エレクトロクロミック、サーモクロミック、サーモトロピック、ガスクロミック

（７）国際比較

断熱・遮熱

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	△	→	●【断熱】初期性能と経年劣化による性能低下の評価[11]。 ●【断熱】真空断熱材の熱伝導率計測の不確かさ評価[46,47]。 ●【遮熱】波長選択型の遮熱フィルム(金属/酸化物積層膜、高分子多層膜等)、塗布材、機能性賦与(光触媒作用等)の基礎研究は、概ね実用化の研究に移行。 ●【遮熱】Cs_xWO_3ナノ微粒子の化学合成による近赤外選択反射塗膜材等、新規材料の探索[48]。
	応用研究・開発	◎	↗	●【断熱】Panasonicの真空層を小分けにした真空断熱材によって施工時の損傷にも対応した[11]。 ●【断熱】Lixil:ヒュームドシリカを利用し、多孔質を微細化することで、低真空でも低熱伝導率を可能とした[11]。 ●【遮熱】遮熱ガラス・フィルム・塗布膜の性能評価法の確立の必要性。例えば、遮熱による暖冷房両方の負荷増減を通年で評価[49,50]。 ●【遮熱】住宅/非住宅、新築/既築物件に分類し、窓の遮･断熱化の現状と今後のシナリオ分析[51]。 ●【遮熱】生活様式、自然環境の活用、高性能化、施工技術、費用対効果といった観点で産業発展への指針を提示[52]。 ●【遮熱】高遮断熱型の波長選択反射、フィルム化、塗布材への実用化研究が多数進行中[53,54]。 ●【遮熱】季節により変わる日射高度とともに遮熱性能が調節されるプラスチックシート[55]。 ●【遮熱】エクセルギーに基づいた遮熱効果の分析。内側/外側ブラインドの比較、放射冷却による効果の計算解析[56]。
米国	基礎研究	◎	↗	●【断熱】NISTによる低熱伝導率材料の不確かさ評価が行われており、真空断熱材の熱伝導率測定には、熱板サイズや試料サイズの検討が重要であると報告がされている[57]。 ●【遮熱】LBNL他のグループによる高分子系の波長選択型の遮熱塗装技術の開発[58]。 ●【遮熱】太陽熱を分子の化学歪みエネルギーとして蓄積、必要時に熱として取り出せる材料[59]。

	応用研究・開発	◎	↗	●【断熱】真空断熱材は、軍事用途・航空用途での利用は勧められているが、住宅用途への展開は緩やかである[57]。 ●【遮熱】中国との共同事業による遮熱技術開発、プロジェクトが進行(DOEの下、LBNLを中心に、米中の多数メーカが参画)[60]。 ●【遮熱】low-E、波長選択型の遮熱に関する研究多数あり。 ●【遮熱】日射入射角により透過光量が変わる波長選択遮熱窓の技術分析[61]。 ●【遮熱】気候別で遮熱材のライフサイクルアセスメントを行い、経済的・環境的影響を分析[62]。
欧州	基礎研究	◎	↗	●【断熱】フュームドシリカを利用した長寿命断熱材に関する研究が行われている[30]。 ●【断熱】真空断熱材を住宅転用した場合のエネルギー消費削減量に関する研究も行われている。 ●【遮熱】Ag/SiO_2コアシェル型ナノ微粒子を用いたプラズモン吸収による波長選択型の遮熱膜の作製[63]。 ●【遮熱】形状記憶材料によるダイナミック遮熱制御技術の包括的な調査(豪、英、チリ、伊の共同作業)[64]。
	応用研究・開発	◎	↗	●【断熱】VIPの規格化を2000年より、実証試験が行われている[65]。 ●【断熱】シリカエアロゲルに微粒子を混入することで、防火性の高い外壁仕上げとして利用できるモルタルとして商品化されている[66]。 ●【遮熱】low-E、波長選択型の遮熱材の実用化研究多数あり[67]。 ●【遮熱】潜熱蓄熱材(PCM)を用いた遮熱窓材の熱的効果の検証[68]。 ●【遮熱】落葉植物を使った日除け(Bioshader)の遮熱制御性の通年実証研究[69]。 ●【遮熱】地域性に基づいた遮熱技術効果の調査分析。シャッターやブラインドといった遮熱部材に関し、暑熱地の多い南欧(地中海気候)での調査が多いが、北欧でもオフィスビル等の冷房負荷が生じる建物を対象とした分析報告も見られる[70-77]。 ●【遮熱】ブラインドの開放具合・傾斜角が居住者の心理的満足感に及ぼす影響の調査[78]。
中国	基礎研究	△	↗	●【断熱】繊維と粉体の混合断熱材で長寿命・低コスト化な真空断熱材の研究が行われている[29]。 ●【遮熱】WO_{3-x}ナノ微粒子を用いたポーラロン・プラズモン共鳴吸収による波長選択吸収膜の創製[79]。 ●【遮熱】エアロゾルCVDによるGa/ZnO膜の創製およびバンドギャップ、キャリア濃度制御による選択波長の制御[80]。
	応用研究・開発	◎	↗	●【断熱】真空断熱材の住宅利用がさかんに行われているが、真空度の低下に伴う性能低下などに関して、考慮されているわけではない[66]。 ●【遮熱】遮熱技術等に関する米国との共同プロジェクトが進行(米中のメーカが多数参画)[60]。 ●【遮熱】高性能low-Eガラス等の開発素材の安定生産と大規模化への移行(～2016年)。低製造コスト・高性能オンラインコーティングを目的としたlow-Eガラス産業化への支援(発展改革委員会)[81]。 ●【遮熱】窓ガラスの規格や認証制度の基盤整備。複層ガラスの産業規格「パッシブ低炭素建築物透明部分用ガラス」が2014年に通過[81]。 ●【遮熱】金晶（集団）有限公司は、low-Eガラスを韓国等へ輸出。また、米国自動車用ガラス大手メーカとの共同出資による生産を開始[81]。 ●【遮熱】通年でのダブルスキンガラスの効果の調査、遮熱部材の設定条件の選定[82]。 ●【遮熱】居住者の快適感に基づいた遮熱部材の推計学的制御技術の開発[83]。
韓国	基礎研究	○	↗	●【断熱】グラスウールやヒュームドシリカを様々な密度で作製し、最適化設計が行われている[84]。
	応用研究・開発	○	→	●【断熱】真空断熱材の国際標準化の提案をはじめに行ったが、現在では欧州勢が先行している。 ●【遮熱】TiO_2触媒効果を賦与した赤外波長選択反射low-Eガラスの開発[85]。

調光ガラス

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	◎	↗	● ガスクロミック方式を用いた調光ミラーシートの開発（産総研）[86] ● 銀の電解析出を用いた調光材料の開発（千葉大学）[87] ● プルシアンブルーを用いた調光材料の開発（産総研）[88] ● 金属錯体を用いた調光材料の開発（物材機構）[89]
	応用研究・開発	×	→	● 特段の活動無し
米国	基礎研究	◎	↗	● プラズモン調光材料の開発（Lawrence Barkley Laboratory）[90] ● 有機エレクトロクロミック材料の開発（Georgia Tech）[91]
	応用研究・開発	◎	↗	● エレクトロクロミック調光ガラス窓の実用化（Sage Electrochromic社、View Dynamic Glass社、Gentex社）[92] ● 有機色素を練りこんだサーモクロミックシートの実用化（Suntuitive社）[93] ● 液晶を用いた調光ガラスの実用化（Kent Optronics社）[94]
欧州	基礎研究	○	↗	● “EELICON” Smart shading systemに関するEUのプロジェクト。調光機能を持った後張りフィルムの開発を行っている[95]。 ● 水素化物薄膜を用いたフォトクロミック材料の開発(Norway,IFE)[96]
	応用研究・開発	○	↗	● エレクトロクロミック調光ガラス窓の実用化（ドイツ、eControl社）[97]
中国	基礎研究	○	↗	● エレクトロフルオロクロミック素子の開発（中国科学技術大学）[98]
	応用研究・開発	○	↗	● VO2を用いたサーモクロミックシートの実用化（上海大学）[99]
韓国	基礎研究	○	↗	● 銀の電解析出を用いた調光材料の開発（Yonsei University）[100]
	応用研究・開発	×	→	● 特段の活動無し

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

- 化学工学会誌 垣内田洋 「液晶と高分子の複合材料による遮熱制御材料の開発」第 80 号第 4 号（2016 年）

1) 断熱用語(Thermal Insulation-Vocabulary),JISA0202(2008).
2)「省エネの基本」、宿谷正則、建てる前に読む 家づくりの基礎知識(2014)pp.9～47.
3) Song, T. H., Vacuum Insulation –Achievements and Anticipations-, Proceedings of the First Pacific Rim Thermal Engineering Conference, March 13-17, 2016, Hawaii’s Big Island, USA.
4) 経済産業省資源エネルギー庁, ”エネルギー白書 2015”,
(http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-1.html)
5) ニチアス技術時報,建材事業本部 技術開発部, 空調効果を最大限に活かす断熱材,

(https://www.nichias.co.jp/research/technique/pdf/371/03.pdf)
6)「境界 世界を変える日本の空間操作術」、隈研吾、淡交社 (2010).
7)「今に生きる日本の住まいの知恵」完全版、(公財)日本住宅総合センター (2014).
8) K. Yoshimura：Journal of Energy and Power Engineering 8 p. 2012-2016 (2014)
9) Friessen, R., Huiberts, J.N., Kremers, M., van Gogh, A.T.M., Koeman, N.J., Dekker, J.P and Notten, P.H.L, "*Journal of Alloys and Compounds*" vol.253-254, pp.44-50, (1997).
10) Kim, J., Song, T. H., Yeo, I., Choi, B., The 2nd Generation Vacuum Insulation Panel, *Proc.* of 4th International Conference on Applied Energy, Suzhou, (2012).
11) NEDO, 省エネルギー技術フォーラム 2014, (http://www.nedo.go.jp/content/100580959.pdf)
12) 欧州における真空断熱材の企画開発に関する動向調査報告, (http://www.jtccm.or.jp/library/new/7_kikaku/publication/1506/1506_kaigai.pdf)
13)「高反射率材料の新展開」、松尾陽、CMC 出版 (2010).
14)「断熱材／遮熱材の開発と応用および評価・試験法」、R&D 支援センター (2012).
15)「透明断熱・遮熱ウインドウフィルム・素材の差新技術開発動向・機能性向上と将来展望」、AndTech (2012).
16)「サーマルマネジメント 余熱・排熱の制御と有効利用」、酒井孝司、NTS (2013).
17)「エネルギー白書 2015」、資源エネルギー庁.
18)「省エネルギー住宅ファクトシート VI」、全国温暖化防止活動推進センター(2006) 8.
19)「省エネルギー対策等級 4 技術基準」、住宅金融支援機構 (2012).
20)「複層ガラス/ Low－E 複層ガラス普及率の推移」、板硝子協会 (2016).
21) SageGlass 社 ホームページ　https://www.sageglass.com/
22) Gentex 社 ホームページ　http://www.gentex.com/ja
23) Gentex 社 Aerospace　http://www.gentex.com/aerospace/aerospace-overview
24) 日本板硝子ウムプロダクツ社　ホームページ　http://umu.jp/
25) Affinity 社 ホームページ http://www.afty.jp/
26) V. Wittwer, M. Datz, J. Ell, A. Georg*, W. Graf, G. Walze, Solar Energy Mater. & Solar Cells, 84 p.305 (2004)
27) N. Huiberts, R. Griessen, J.H. Rector, R.J. Wijngaarden, J.P. Dekker, D.G. de Groot, and N.J. Koeman, Nature, 380, p.231 (1996).
28) 吉村和記、応用物理、79、p.628 (2010)
29) Li, Z, Gong, L., Cheng, X., Song, T.H., Li, C. and Zhang, H., "*Materials and Design*," Vol. 99, pp.349-355, (2016).
30) Alam, M., Singh, H., Brunner, S. and Naziris, C., "*Energy and Buildings*," Vol.69, pp.442-450 (2014).
31) Vouquerel, M., Doforwstel, T., Baillis, D. and Rusaouen, G., "*Energy and building*s," Vol.54, pp.320-336, (2012).
32) Li, C., Li, B., Pan, N., Chen, Z., Saeed, M.U., Xu, T. and Yang, Y., "Thermo-physical Properties of Polyester Fiber Reinforced Fumed Silica Hollow Glass Microsphere Composite Core and Resulted Vacuum Insulation Panel, "Energy and Buildings," Vol.125, pp.298-309, (2016).

33) A.Llordes, G. Garcia, J. Gazquez & D. J. Milliron, Nature 500, p.323 (2013)
34) “Electrochromc Materals and Devices”, Edited by M.S. Monk *et al*, WILEY-VCH (2015)
35) 真空断熱材の経年劣化による性能低下， (http://www.nedo.go.jp/content/100580959.pdf) (http://www.nedo.go.jp/content/100541220.pdf)
36) Gonçalves, W., Morthomas, J., Chantrenne, P., Perez, M., Foray, G. and Martin, C. L., “Journal of Non-Crystalline Solids,” Vol.447, pp.1-8, (2016).
37) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合　－革新的次世代遮熱フィルム－ ホームページ http://www.thermat.jp/project/thermalinsulation/
38) Innoshade プロジェクト　http://www.innoshade.de/192.html
39) Gonome, H., Okajima, J., Komiya, A. and Maruyama, S., “Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,” Vol.133, pp.454-463, (2014).
40) 「板ガラス類の透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試験方法」、JISR 3106 (1998).
41) 「ビルと複層ガラス 建物用途別編」、板硝子協会 (2004).
42) 「エコガラスの LCA 報告書」、板硝子協会 (2014).
43) 平成 27 年度住宅経済関連データ, 国土交通省, (http://www.mlit.go.jp/statistics/details/t-jutaku-2_tk_000002.html)
44) 「温暖地版 自律循環型住宅への設計ガイドライン エネルギー消費 50%削減を目指す住宅設計」、国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所 (2015).
45) 「『涼しさ』感をもたらす熱環境と人体エクセルぎー収支に関する研究(その 1～3)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、宿谷昌則、pp.41-46 (2010).
46) Kobari, T., Okajima, J., Komiya, A. and Maruyama, S., “International Journal of Heat and Mass Transfer”, Vol.91, pp.1157-1166, (2015)
47) Tasaka, T. et al, Study on thermal conductivity measurement of low thermal conductivity materials, Proceedings of the 33rd Japan Symposium of Thermophysical properties, October 3-5, 2012, Osaka, Japan.
48) "Facile synthesis of homogeneous Cs_xWO_3 nanorods with excellent low-emissivity and NIR shielding property by a water controlled-release process", C. Guo *et al.*, J. Mater. Chem., 212 (2011) 5099.
49) 環境省 環境技術実証事業, 例えば、報告書 051-1302, 「窓用透明遮熱・断熱フィルム　ナノバルーンフィルム CA」(H25 年度).
50) 環境省 環境技術実証事業, 例えば、報告書 051-1001, 「透明遮熱フィルム・SC70」(H22 年度).
51) 平成 27 年度 経済産業省委託調査報告, 000662, 「平成 27 年度製造基盤技術実態等調査国内外のガラス市場の今後の需給動向等に関する調査報告書」, 矢野経済研究所 (2015 年 7 月).
52) 平成 24 年度中小企業支援調査報告, E002834, 「平成 24 年度中小企業支援調査今後の住宅関連産業発展のための検討調査報告書」, 野村総合研究所 (2013 年 2 月).
53) "Microstructure analysis of Ag films deposited by low-voltage sputtering", Kato *et al.*, Thin Solid Films, 520 (2012) 4139.
54) "Near-infrared reflection from periodically aluminium-doped zinc oxide thin films", Y. Okuhara *et al.*, Thin Solid Films, 519 (2011) 2280.
55) 「太陽光を自動調節する省エネ調光シート」, 吉村和記, 産総研 Today, 13 (2013) 14.

56) "Theoretical analysis of the performance of different cooling strategies with the concept of cool exergy", O. B. Kazanci *et al.*, Buld. Environ., 100 (2016) 102.
57) 建材試験センター　建材試験情報 2013 年 5 月号, (http://www.jtccm.or.jp/library/new/7_kikaku/publication/1305/1305_kaigai.pdf)
58) ”Berkeley Lab Scientists Developing Paint-on Coating for Energy Efficient Windows”, http://newscenter.lbl.gov/2016/02/25/berkeley-lab-scientists-developing-paint-on-coating-for-energy-efficient-windows/.
59) "Solid-State Solar Thermal Fuels for Heat Release Applications", D. Zhitomirsky *et al.*, Adv. Energy Mater., 6 (2016) 1502006.
60) ADVANCED WINDOW AND SHADING TECHNOLOGIES, http://energy.gov/eere/buildings/downloads/advanced-window-and-shading-technologies.
61) "Angular selective window systems: Assessment of technical potential for energy savings", L. L. Fernandes *et al.*, Energy Build., 90 (2015) 188.
62) "Life cycle assessment of exterior window shadings in residential buildings in different climate zones", H. Babaizadeh *et al.*, Build. Environ., 90 (2015) 168.
63) "Core–shell-typed Ag@SiO_2 nanoparticles as solar selective coating materials", T. Gao, J. Nanopart. Res., 15 (2013) 1370.
64) "Shape morphing solar shadings: A review", F. Fiorito *et al.*, Renew. Sustain. Energy Rev., 55 (2016) 863.
65) Simen, E. Bjorn, P., “*Applied Energy*,” Vol.116, pp. 355-375, (2014).
66) 建材試験情報 2016 年 7 月号, (http://www.jtccm.or.jp/library/new/7_kikaku/publication/1601/1601_tokushu6.pdf)
67) "Effect of thermal annealing on the mechanical properties of low-emissivity physical vapor deposited multilayer-coatings for architectural applications", R. Meszaros *et al.*, Thin Solid Films, 520 (2012) 7130.
68) "Experimental analysis of an external dynamic solar shading integrating PCMs: first results", A. Komerska, Energy Procedia, 78 (2015) 3452.
69) "Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy ", Kenneth Ip, Build. Environ., 45 (2010) 81.
70) "Energy simulations for glazed office buildings in Sweden", H. Poirazis *et al.*, Energy Build., 40 (2008) 1161.
71) "Solar shading control strategies in cold climates – Heating, cooling demand and daylight availability in office spaces", S. Grynning *et al.*, Sol. Energy, 107 (2014) 182.
72) "An overview on solar shading systems for buildings", L. Bellia *et al.*, Energy Procedia, 54 (2013) 190.
73) "Characterization and assessment of cool coloured solar protection devices for Mediterranean residential buildings application", M. Zinzi *et al.*, Energy Build., 50 (2012) 111.
74) "Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves", S. M. Porritt *et al.*, Energy Build., 55 (2012) 16.
75) "The Energy Upgrading of Existing Buildings: Window and Shading Device Typologies for

Energy Efficiency Refurbishment", C. Carletti *et al.*, Sustain., 6 (2014) 5354.
76) "Impact of facade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses", L. Vanhoutteghem et al., Energy Build., 102 (2015) 149.
77) "Experimental Analysis of Cool Traditional Solar Shading Systems for Residential Buildings", A. L. Pisello, Energies, 8 (2015) 2197.
78) "Occupant satisfaction with two blind control strategies; Slats closed and slats in cut-off position", L. Karsen *et al.*, Sol. Energy, 115 (2015) 166.
79) "The optical properties of low infrared transmittance WO_{3-x} nanocrystal thin films prepared by DC magnetron sputtering under different oxygen ratios", Y. Xin *et al.*, RSC Adv., 5 (2015) 57757.
80) "Aerosol assisted chemical vapour deposition of Ga-doped ZnO films for energy efficient glazing: effects of doping concentration on the film growth behaviour and opto-electronic properties", S. Chen *et al.*, J. Mater. Chem. A, 3 (2015) 13039.
81) 平成 26 年度経済産業省委託調査報告, 000037,「国内外のガラス市場の今後の需給動向等に関する調査報告書」, 矢野経済研究所 (2015 年 3 月 17 日).
82) "An experimental study of all-season operation strategy for a respiration-type double-layer glass curtain wall system in cold zone of China", X. Kong *et al.*, Build. Environ., 97 (2016) 166.
83) "Occupants' impact on indoor thermal comfort: a co-simulation study on stochastic control of solar shades", J. Yao *et al.*, J. Build. Perform. Simul, 9 (2013) 272.
84) Kim, J., Song and T. H., Yeo, I., "International Journal of Heat and Mass Transfer", Vol.64, pp. 783 – 791, (2013).
85) "Multi-functional TiO_2/Si/Ag(Cr)/TiN_x coatings for low-emissivity and hydrophilic applications", C. Loka *et al.*, Appl. Surf. Sci., 363 (2016) 439.
86) http://www.aist.go.jp/aist_j/ press_release/pr2013/pr20130123/pr20130123.html
87) https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-25620193/
88) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20121120/pr20121120.html
89) http://www.jst.go.jp/pr/announce/20160713/
90) D. J. Milliron: Nature, Vol.500, 323 (2013)
91) http://www.news.gatech.edu/2015/02/09/electrochromic-polymers-create-broad-color-palette-sunglasses-windows
92) http://viewglass.com/、http://www.gentex.com/aerospace/aerospace-overview
93) http://www.suntuitive.com/
94) http://kentoptronics.com/switchable.html
95) http://www.eelicon.eu/
96) http://www.academia.edu/1720634/Photochromic_films_of_oxygen-containing_yttrium_hydride
97) http://www.econtrol-glas.de/en/home/
98) Chen & Xu:ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 7, 11387 (2015)
99) Nature Scientific Reports 3, Article number: 3029 (2013)
100) C. Park et al: Chem. Sci., Vol. 6, 596 (2015)

3.23　照明・ディスプレイ（有機 EL、量子ドット LED 等）

（1）研究開発領域の簡潔な説明

有機 EL（OLED)、量子ドットなどに関する発光材料（素子)・デバイスについての研究開発領域である。LED（発光ダイオード）は、半導体の特性を利用して電気エネルギーを直接光に変える仕組みの光源であり、OLED とは、りん光発光素子などの有機物に電圧をかけることで有機物自体が発光する現象を用いた発光素子を指す。量子ドット LED とはナノサイズの半導体粒子で、粒子の大きさを調節するだけで発光色を変えることができる自発光素子である。ここでは、主に照明・ディスプレイへの応用を企図した有機 EL、量子ドット LED についての材料の合成技術、デバイス構造、低コスト製造・実装技術、長寿命封止技術などの研究開発について延べる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

世界の電力使用量のうち照明で消費される電力は総電力使用量の約 20%と推定されている。日本の場合は、照明に消費されている電力はおよそ日本全体の電力消費量の約 25%あるといわれており、照明大国であるといえる。家庭においても消費電力の約 16%もの割合を占めており、これまでの主流であった白熱電球や蛍光灯をエネルギー効率の高い LED や有機 EL による次世代照明に置き換えることにより、住宅・オフィス（ビル）等の省エネルギー化を図ることが期待されている。

蛍光灯は発光効率は大変優れているが、発光させるために水銀を蛍光ランプの管内に封入してある。一本の使用量はわずかではあるが、蛍光灯の製造数量は莫大であり、それらを合計すると相当量の水銀使用量になる。2013 年 1 月にスイスで合意された「水銀に関する水俣条約」の批准が各国で進められているが、早ければ 2020 年までに条約が発効することになるかもしれない。そうすれば、蛍光灯を含む水銀を使用した放電灯などがほとんど使用できなくなる可能性がある。

LED は、一般に 0.2～1mm 角サイズの点光源であり輝度の高い発光特性を備えていることが特徴である。有機 EL は比較的大きなデバイス（数 cm 角～数十 cm 角程度）が非常に軽く、かつ薄く作製可能であることが大きな特徴である。その特徴のひとつは面での発光である。このことからダウンライトや自動車のヘッドライトのように光を集中させる用途では LED 照明が、一方、自然光に近い風合いでの発光や部屋の照明のような広範囲を照らす用途では有機 EL 照明が活用されていくと予想されている。

液晶ディスプレイは、自らは光を発せず、液晶の分子の向きの変化で、常時点灯しているバックライト（LED）の光の透過量を調節しながら画像を表現している。液晶ディスプレイは、バックライトを用いる性質上、輝度やコントラスト、応答速度、消費電力などに課題がある。例えば、現在ではバックライトに青色 LED と黄色蛍光体からなる白色 LED が使用されているが、黄色蛍光体では光の三原色である赤色、緑色の中間領域の光が発せられており、それらはカラーフィルターによりカットされるためエネルギー効率を下げる大きな要因となっている。さらに、蛍光体から発せられる赤色光は真の赤色成分が少ない、カラーフィルターにより切り取られる緑色、赤色の色純度はそれほど高くないことから、自然色を忠実に

再現する広色域の表示が難しい。これらの課題を解決する、エネルギー効率が高く、より広色域を達成できるバックライトの開発が求められている。

有機 EL ディスプレイは、バックライトがなく、有機分子膜を電極で挟んだ構造であり、ディスプレイそのものを薄くできることに利点を有する。量子ドット LED（QLED）は半導体の微小結晶である量子ドット（QD）を半導体薄膜で挟み込んだ構造の薄膜発光素子で、量子ドットの材料を変えることで可視光に限らず任意の波長を発光する素子である。QLED をディスプレイに用いると有機 EL ディスプレイ（OLED）と同様にディスプレイそのものを薄くできることに利点を有する。

省エネルギーの必要性が高まる中、よりエネルギー効率の高い発光材料・デバイスとその簡便な製造方法が求められている。特に、従来の半導体製造プロセスとは異なり印刷法などの溶液プロセスを適用して素子の作製が可能であり、素子の大面積化に加え製造プロセスの飛躍的な省エネ化・低コスト化の実現が期待される。

［動向（歴史）］

20 世紀中ごろには、水銀蒸気中で放電を起こすことで得られる紫外線を蛍光体で可視光変換する技術が生まれ、蛍光体の改良が進むにつれ、電気―光変換効率がそれまでの白熱灯から飛躍的に上昇していくことになった。一方で、1996 年日亜化学が発明した青色発光 LED により、光の三原色が揃い、白色 LED が登場したことで LED 照明が広く普及し始めている他、有機 EL が注目を浴びている。

LED は、1962 年に GE のニック・ホロニアック氏が赤色 LED を発明して以来、1970 年代までに赤、黄、橙、黄緑などの各色 LED が誕生した。一般照明用光源として利用する場合、鮮やかな色光では不都合なので、白色の光が必要であるが、LED で白色を発光させるには、青色 LED が必要であった。この青色 LED の開発では、1985 年に赤崎と天野（名古屋大学）が青色 LED に必要な窒化ガリウム（GaN）の単結晶化に成功し、1989 年に青色 LED を開発した。現在の LED につながる高輝度青色 LED の量産技術は、中村（当時日亜化学）によって 1993 年に開発された。1995 年、この青色 LED に黄色蛍光体を加えた白色 LED が開発された。白色 LED の発光には多様な方式がある。当時は、青色 LED と黄色蛍光体を組み合わせて、白色発光させる方式が一般的だった。しかしこの方式には色再現性が低いという欠点もあり、その後青色 LED と赤色蛍光体、そして緑色蛍光体による光の 3 原色を利用する方法が開発された。現在、ほとんどの LED におけるこの赤色蛍光体には広崎（NIMS）らにより開発された、サイアロンが使用されている。

LED は日亜化学が世界のトップランナーであり、2014 年には世界最高となる発光効率 315.4 lm/W を達成している。世界シェアを見ると、日本勢が 30%程度でトップであったが、韓国もほぼ同じシェアとなっている他、台湾も強みを有する。

有機 EL 分野では、1987 年当時米国コダック社の研究員であった Ching Wang Tang 博士が発表した論文が契機となった [1)]。それまで有機電界発光素子は弱い光でしかなかったが、1000cd/㎡を越える光強度が 10V 以下という直流電圧で実現された。さらに、試料の膜厚は有機層だけなら 200 未満で、陽極と陰極の厚さを加えても 1 μm未満という、従来では考えられない薄さであった。有機 EL では出光興産が青色発光を実現し、1992 年には実用レベルの RGB が出揃った。照明に応用できる白色に発光する有機 EL（蛍光灯の効率（約 100 lm/W）

を凌駕する高効率白色光源となり得るポテンシャルを有する）は、1993 年に山形大学の城戸らによって実現された[2)3)]。この発明がきっかけで有機 EL の次世代照明光源としての活用が議論されるようになった。

1999 年に米国プリンストン大学のグループが、リン光発光化合物であるイリジウム錯体をドーパント材料に、アルバゾール誘導体である CBP をホスト材料に用いることで、室温で発光するリン光材料を開発した。外部量子効率 8%を記録し、特に緑色発光材料では蛍光材料の約 4 倍に当たる 20%の値を示した。これにより、ディスプレイでも、照明でもリン光材料が必須と言われ、採用が進められている。このように早くから期待されながら、照明に必要とされる明るさ（輝度）を発揮するため大きな電流を流すと、発光寿命が短くなるという性質がネックとなり実用化には時間がかかっていた。

その後、2004 年ごろから複数の企業および研究機関から、白色発光有機 EL の光源・照明としての実用化を意図した報告や、有機 EL 照明の試作品の展示などが数多くなされはじめ、2010 年ごろからは、実際に製品として販売を開始するところが出始めた。

照明用途では、住友化学は 2014 年に高分子材料を基にした 2 色を発光できる照明用パネルの量産技術の確立を発表した。コニカミノルタが世界最高発光効率となる 131 lm/W の白色パネルを開発し、本格的な事業化を発表している（2014 年 7 月）。三菱化学なども商品ブランドを立ち上げ実用化に向けて動き出している。有機 EL の高効率化の可能性は既に実験的にも証明されたといえる[4)-8)]。白色有機 EL の発行効率の理論限界は 248 lm/W であり、今後も発光効率はさらに伸びると期待されている。また寿命の観点でも、最近大きな進展が見られた。発光面積 25cm^2、発光効率が 110 lm/W で輝度 1,000cd/m^2 のとき、光出力が初期の 50%になる時の推定寿命が 10 万時間以上の高輝度･長寿命白色発光素子の報告もなされるようにもなり[9)]、有機 EL の最大の懸念であった寿命の問題も着実に解決されつつある。

フレキシブル有機 EL パネルについては、一部 LG ディスプレイが発売を開始しており、シーリングライトやスタンドに応用した商品が発表されている。

ディスプレイ分野では、1997 年、パイオニアがカーステレオに世界で初めて有機 EL ディスプレイを搭載した。有機 EL テレビが、市販品として最初に登場したのは 2007 年ソニーの 11 インチ有機 EL テレビである。もともと有機 EL は日本が卓越した技術を有しており、1990 年代にはソニーが先導して有機 EL ディスプレイ技術を蓄積してきた。また、パナソニックは 2007 年から 2014 年にかけて、独自の有機 EL 照明パネル技術を NEDO の委託事業を受託して研究開発を行い、世界トップレベルの技術に磨き上げた。しかし、各社ともさらなる生産技術開発に移行するためには巨額の開発費が必要で、二の足を踏んでしまったことにより、技術開発に遅れが生じた。

2012 年になり、Samsung や LG が 55 インチの大型有機 EL テレビの発売を発表するなど、韓国勢の有機 EL ディスプレイに対する投資が非常に活発化した。ディスプレイについては、2010 年以降サムソン、有機 EL 照明については、2014 年以降は LG、といった韓国勢に完全に追い抜かれてしまう状態が続いている。特に今では中小型有機 EL ディスプレイではサムスンが一強、テレビ用有機 EL パネルでは、LG が一強という状況で、iPhone7s（仮称）から採用予定の有機 EL パネルは、当初はサムソン一社、その後 iPhone を視野に置いた大型投資を決断した LG ディスプレイを加えた韓国勢が中核となって請け負うのではないかと目

されている。韓国 LG Display は、今後数年間で、テレビ用を含めた有機 EL パネル生産に約 10 兆ウオン（約 1 兆円）を投資するとしている。2016 年 6 月 18 日付日経新聞によれば、韓国サムスン電子が 8 兆ウオン（約 7200 億円）を投じ、有機 EL ディスプレイパネルの製造ラインを拡充し、アップルに有機 EL ディスプレイパネルを供給するとの報道があり、同じく韓国 LG Display もスマートフォン用有機 EL ディスプレイにも参入すると発表しており、大きな動きが出てきた。

QD は大きさが数 nm～十数 nm の微小半導体の単結晶で、量子閉じ込め効果により電子および正孔のエネルギーが離散化していることを特徴とする。電子・正孔のエネルギーは、量子サイズ効果のため結晶が小さいほど大きくなるので、バンドギャップ（電子－正孔対の再結合による発光波長）をその大きさで制御できる。発光はピコ秒からナノ秒の短時間で起こるので、OLED とは異なり、発光素子へと展開すると高速レスポンスを達成できる。QD の製造方法にはリソグラフィー法、エピタキシャル薄膜における自己組織化法のほか様々な方法があるが、溶液法により化学合成されるコロイダル QD は、その製造に大型の真空設備を必要としないのでマスプロダクションに適している [10)]。

コロイダル QD における蛍光発光は、1993 年に Bawendi ら MIT（米国）のグループにより作製された CdSe, CdTe コロイダル QD によるものが最初の報告となっている [11)]。MIT グループのブレイクスルーは QD 表面のパッシベーションにあると同時に Se、Te などの供給源となる原料の開発にある。これを契機に ZnSe，PbSe など主にカルコゲナイド化合物半導体のコロイダル QD が続々と開発された。1996 年にはカリフォルニア大バークレー校の Alivisatos らにより赤外線領域で発光する InAs（III-V 化合物半導体）コロイダル量子ドットが開発されている [12)]。このように 1990 年代の後半には赤外光から紫外光の広い波長範囲で発光するコロイダル QD のラインナップがほぼ完成している。それらの中でも可視光領域で発光する CdSe コロイダル QD はディスプレイ用および生化学標識用の蛍光材料として開発が進められ、2000 年前後には米、英を中心に多くのベンチャー企業が立ち上げられた。UC バークレーからの技術ライセンスを受けた Quantum Dot Corp（1998 年設立；米国）、マンチェスター大のスピンアウトベンチャーNanoco（2001 年設立；英国）、Nanosys（2001 年設立；米国）、MIT スピンアウトベンチャーの QD Vision（2004 年設立；米国）などがその代表例である。日本にはカドミウムに対する強い忌避感があるため、学界、産業界のいずれにおいても CdSe コロイダル量子ドットの研究は活発化せず、2006 年に設立された産総研ベンチャーの NS マテリアルズが国内唯一のコロイダル QD メーカーとなっている。

2013 年 6 月にソニーが QD Vision 社の波長変換システム Color IQ を搭載した広色域ディスプレイ「トリルミナス」を発売し、10 月には Amazon.com 社がタブレット端末「KindleFire HDX」に Nanosys 社と 3M 社（米国）が開発した波長変換シート QDEF を搭載した。ASUS 社のノート型 PC への搭載や、2014 年には Apple 社が QD ディスプレイの特許出願など、市場への投入と次世代技術の開発が活発化した [13)]。このような機運の高まりに応じ、NS マテリアルズも 2015 年にディスプレイ用 CdSe コロイダル QD の製造販売を強化するプレスリリースを行い、2016 年には日本電気硝子による資本参加を受けるなど開発力の向上が進められている [14)]。ただしこれらは量子ドットをバックライトの光源に用いており、ディスプレイそのものを量子ドット化しているわけではない。

自発光素子である QLED の分野では、MIT グループによる CdSe コロイダル QD 蛍光体の最初の報告の翌年となる 1994 年に、カリフォルニア大学バークレー校の Alivisatos らにより CdSe コロイダル QD を発光層とした QLED が報告されている [15]。その後、発光の色純度、輝度の改善が継続され 2002 年には MIT グループにより黄緑色で 1,000cdm^{-2} の輝度が [16]、2011 年にはフロリダ大学のグループが 10,000cdm^{-2} を超える赤色、緑色、青色発光を達成しており [17]、ディスプレイとして展開しうる輝度が達成されている。2014 年には浙江大学（中国）のグループが 20%を超える外部量子効率を有する QLED を発表しており [18]、効率の点でも OLED と同等の性能が達成されている。これらはいずれも CdSe コロイダル QD を発光層とした QLED である [19]。

カドミウムは毒性元素の一つとして EU 圏や我が国では規制対象あるいは表示義務対象となっており、カドミウムフリーのコロイダル QD 蛍光体の開発が求められている。2000 年代前半では InP がその候補として期待されたが、CdSe などのカルコゲナイド化合物半導体に比べリン化物はリン原料の反応性が高いため、大学、研究所等での技術開発が進まなかった。2005 年には Evident Technology 社（米国）が(In,Ga)P コロイダル QD を Evidot として製造販売したが可視光発光は達成されなかった。我が国でも 2008 年に産総研の村瀬らが InP/ZnS コロイダル QD の合成方法を開発したが [20]、性能において CdSe を凌駕するには至っていない。

この状況は、大阪大学の小俣と産総研の前田の共同研究グループによる $CuInS_2$ をベースとした ZnS との混晶半導体のコロイダル QD での可視発光の発表 [21]（2006 年）により一変した。カドミウムフリー化への期待が高まり $CuInS_2$、$CuInSe_2$ などの三元系化合物半導体のコロイダル QD の研究開発が、米国、中国を中心に活発化した。Los Alamos Natl. Lab.（米国）の Klimov のグループから 2011 年に 80%以上の高い蛍光量子効率が報告されるなど [22]、急速に技術開発が進んだ。$CuInS_2$ コロイダル QD を発光層とした QLED も作製されている。しかしながら、これら三元系化合物半導体のコロイダル QD では例えば $CuInS_2$ であれば Cu（銅）と In（インジウム）を 1：1 の組成に合わせ込むのが難しく、通常はいずれかが不足した組成となり点欠陥を含む QD となる。その結果、電子－正孔の再結合は欠陥準位を介したものとなり、発光の波長幅が広くなる [23]。すなわち、コロイダル QD 蛍光体の最大の特徴である高い色純度が失われる。2014 年の QD の国際ワークショップで、Samsung 社（韓国）の開発ディレクターは、カドミウムを含む QD を搭載した製品は発売しないとも述べている。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

- 高効率有機発光材料の分野では、九大の安達グループによって報告された熱活性型遅延蛍光（TADF：Thermally Activated Delayed Fluorescence）現象に基づいた発光材料の研究が裾野を広げている。従来から用いられてきたイリジウム（Ir）や白金（Pt）などの希少金属を含む錯体からの発光というりん光発光原理を用いた材料と異なり、希少金属を用いずに、従来熱として捨てられていた三重項励起状態から一重項励起状態にキャリアを戻し遅延蛍光発光できる材料の開発に成功している [24]。また、関西学院大学においても、

高効率な青色有機発光材料の研究開発が日本の材料メーカーとの協業で進んでおり [25]、今後の進展が期待される。

- 低コスト生産にむけて本格的に塗布積層型の高効率有機 EL の研究が山形大の城戸らグループで進められており、素子レベルの効率で見た場合、蒸着系との差は縮まってきている。従来から溶媒に可溶な高分子有機 EL 材料を用いた塗布型の有機 EL 素子の研究が進められていたが、分子量分布が大きくや構造的欠陥を完全に取り除くことが困難であり、特性が上がらないなどの課題があった [26]。ここにきて、低分子系の有機 EL 材料を有機溶媒に可溶化し、インクによる塗布成膜した有機 EL デバイスの研究開発が進展している。特に、今までの研究では、電子輸送層まで含めて塗布できる材料の研究が進んでいなかったが、近年、陰極層を除くすべての有機層を塗布で作製できる材料の開発が進展してきた。塗布型有機 EL デバイスを作製する上で重要なのは、下層で用いた有機材料がその上層に塗布する有機材料の溶媒に不溶であるという点が最も困難であり、溶媒自体の選択肢が限られ多くは望めなかった。有機材料の分子量が変化すると溶解性も変化するという点に着目し、溶媒に適した分子量の制御を行うことで、多積層化を実現した [27]。また、無機材料やナノ粒子を適切に活用することで、塗布可能な電子注入層や電荷発生層を塗布で形成することが可能となり [28)-30]、結果、二つの有機 EL 発光デバイスを縦方向に積層して高効率な発光が期待できるマルチフォトン構造のデバイスを塗布プロセスで実現することに成功している [31]。このデバイスは 9 層の有機層の積層で、白色リン光発光を有する世界初のものとなっている [32]。民間企業でも塗布型の研究開発が推進されており、日本では、コニカミノルタがすでにパイロットプラントを建設して開発を進めているが、まだ、量産できるレベルには至っていない模様である [33]。
- フレキシブル有機 EL パネルについて、一般照明分野以外での応用用途開発が模索され始めた。特に欧州では、OSRAM 社が車載に特化して有機 EL 照明パネルを実用化しようとしており、BMBF も後押しして、フレキシブル化の開発検討を加速してきた。この成果を受けて、欧州自動車メーカーでは、テールランプ（ストップランプ）などへの応用が模索されており、2015 年 1 月に米国で開催された、CES(Consumer Electronics Show)において、ドイツの BMW が OSRAM 社製のフレキシブル有機 EL パネルをテールランプに用いたコンセプトモデル（BMW M4）を展示した。また、BMW は 2016 年からモデル M2 としてこのテールランプを搭載した車を販売予定である [34]。一方、Audi も 2016 年 4 月に、最新モデルである 2016 TTRS Coupe にオプションではあるが、LG ディスプレイが供給する有機 EL で組み立てられたテールライトを搭載するとしており、世界で初の試みであるとしている。
- 近年では、InP コロイダル QD に再び注目が集まっている。2016 年に入りワシントン大学、エール大学（米国）の共同研究グループから [35]、また、亜洲大学、東国大学（韓国）の共同研究グループから [36]高い発光効率の InP コロイダル QD が相次いで発表されている。また、産業界では Nanoco 社はカドミウムフリーの QD 蛍光体として CFQD（Cadmium-Free Quantum Dots）を製造販売し、2013 年には Dow 社（米国）と製造販売のライセンス契約を締結するなど [37]、両社はカドミウムフリー材料に特化して開発を進めている。Nanoco 社は QD 材料の組成の詳細を明らかにしていないが、InP 系材料であることは間違いない。2016 年には CFQD はエジソン賞の銀賞を獲得するなど注目も集

めている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

- ドイツの Dresden にあるフラウンホーファー研究所（Fraunhofer Institute）や、オランダの IMEC や TNO が出資して設立したホルストセンター（Holst Centre）が、精力的に有機 EL 照明用途として、塗布型有機 EL デバイス、材料の研究開発を、メルク（Merck）などの欧州の民間企業を巻き込んで推進している。特に、Holst Centre は EU（欧州連合）プロジェクトの The Flex-o-Fab project（3 年間€11.2mil のプロジェクトで、フレキシブル有機 EL をプロジェクト終了後 6 年以内に商業化するというプロジェクト）のメンバーとしてフレキシブル有機 EL 照明パネルの開発に参画し、R2R（ロール・トゥ・ロール）による塗布型照明用有機 EL パネルを試作している [38]。基礎研究だけでなく、評価技術や製造技術まで視野に入れたプロジェクトとなっている
- その他、欧州においては、EU に基づき、有機 EL 照明に関する IMOLA（Intelligent Light Management for OLED on foil Applications）プロジェクト（2011 年～）や、本格的な実用化研究を行う COLAE（Commercialisation of Organic and Large Area Electronics）プロジェクト（2014 年～）がスタートし、EU 圏全体を巻き込んで、有機エレクトロニクスおよびその周辺分野の実用化を強力に推進している。特にドイツやオランダで、Philips, OSRAM, BASF, Merck,多数の欧州の企業がかかわってきている。
- 山形大学で推進中のセンター・オブ・イノベーション・プログラム（COI STEAM）はアンダーワンルーフで有機エレクトロニクスを推進していく体制となっており、中でも有機 EL に関しては、フレキシブルも含め塗布型有機 EL も視野に研究開発が進められている。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

有機 EL 照明が従来の照明と肩を並べるためには、1 平方メートルあたりの輝度が 3000 カンデラ、1 万時間以上の寿命、1 ワットあたり 80 ルーメン以上の発光効率、平均演色評価数 80 点以上が必要だといわれる。しかし、輝度を向上させれば寿命が短くなり、発光効率を上げれば演色性が低くなるというように、バランスを保ちながらすべてを向上させるのは難しい [39]。

今後、有機 EL を照明光源として普及させるためには、効率・寿命をより高いレベルで両立することだけではなく、照明光源としての特性、たとえば、対象物を明るく照らせること（（大光束化）光束：光源が発する光量であり、輝度と発光面積に概ね比例）、対象物の色調を正しく再現できること（高演色性化）、などを確保していくことが必要である。たとえば、家庭用の蛍光灯照明には 6,000 lm 程度の光束を放射するものが用いられているが、同等量の光束を有機 EL で得るには、輝度 5,000cd/m^2・60cm 角など、高輝度かつ大面積発光が可能なものが求められる。また、高演色性の白色発光を得るためには、青－黄等の補色ではなく、RGB3 波長の発光を呈する素子構造などを用いる必要がある。よって、高輝度・長寿命化技術、高演色性化技術、大面積素子の均一発光化技術および低コスト製造技術など、さらなる実用化を加速するための技術開発への注力が、有機 EL ディスプレイについても、有機 EL

材料（発光素子）の寿命・コスト、および製造プロセス（量産技術）の面で今なお多くの課題が残されている。

カドミウムフリー化のボトルネックは 3 点ある。1 点目は InP 系の材料における課題で、蛍光量子効率（入射光の光子数に対する蛍光の光子数の割合）、すなわち、発光効率の向上と QD のサイズ制御技術である。CdSe 系のコロイダル QD では蛍光量子効率は量産レベルでも 80%程度がうたわれており、ラボレベルでは 100%近い値も報告されている。これに対し InP 系では最新の報告でも青色で 40%、緑色で 85%、赤色で 60%程度である。また、QD 蛍光体では発光波長をそのサイズによって制御するが、InP では特に緑色より短波長の領域では僅かなサイズの違いによって発光波長が大きく変化する [40]。サイズを精密に制御できなければ色純度の高い蛍光体とはならない。2 点目は $CuInS_2$ などの三元系化合物半導体のコロイダル QD における課題であり、化学組成の揺らぎのない化学式通りの化合物の製造技術である。このような技術が完成すれば、CdSe と同等の蛍光発光特性が達成できる。3 点目は InP、三元系化合物以外の新たな材料の開発である。

また、液晶ディスプレイでの波長変換では、光源となる青色 LED から離れた位置にコロイダル QD を混錬した波長変換用フィルムが搭載されている。青色 LED のチップの直上に QD 蛍光体を塗布などにより搭載できればコロイダル QD の使用量はフィルムを使用した場合の 1 万分の 1 に低減できディスプレイの大幅なコストダウンにつながる。これらの技術開発を阻害する最大の要因は、CdSe コロイダル QD の蛍光量子効率が室温以上で大きく低下することになる。レーザ光の照射や LED の直上では 150～200℃程度の高温となるため、コロイダル QD 蛍光体が使用できない。この課題は CdSe に本質的で新たな材料を開発する以外に解決手段がない。

QLED などの自発光素子においては発光の輝度、量子効率では OLED と同程度であるが、素子全体の寿命が実用化に向けた最大のボトルネックとなっている。外部量子効率 20%以上を達成した素子でも 100 時間で輝度は半分まで劣化している [41]。

［今後取組むべき研究テーマ］

有機 EL の科学技術的課題として、①高効率化、②長寿命化、③フレキシブル化、④塗布印刷で製造できる塗布型有機 EL デバイス、などが考えられる。

高効率化について材料の視点からみると、米国を中心にして開発が進んだ燐光材料の登場によって、内部量子効率はかなり高いところまで実現できていると考えられる。より波長の短い青色発光色に実現に開発の力点が置かれるべきである。また、新たな発光メカニズムとして TADF(遅延蛍光材料：Thermally Activated Delayed Fluorescence)材料の開発が進んでおり、今後のさらなる開発が期待される。一方、デバイスの駆動電圧低減による高効率化も期待され、分子配向を考慮した電子輸送層材料の開発や、光取り出しに寄与する分子配向材料などの開発については、今後大いに注力すべき課題であると考えられる。単一分子レベルの物性はシミュレーション技術の向上によりかなり予測可能となり、高精度な分子設計が行えるようになってきているが、薄膜などの分子集合体の構造制御については、適用範囲がまだ限られている。有機エレクトロニクスで使われる π 共役電子系は平面的で本質的に異方性が強いことから、この分子集合体の制御こそが、今後の性能向上のブレイクスルーに必要となってきている。

寿命のついては、特にパーティクル（異物）が原因の劣化が顕著である。これらは有機 EL を製造する際に発生する要因であると考えられており、有機 EL を製造するメーカーの責任に起因するものであり、学術的な検討課題ではないとする研究者が多い。しかし、これが、日本の有機 EL 産業の発展を妨げてきた大きな要因であったと考えられる。つまり、パーティクルの発生要因やパーティクルがどのようなメカニズムで欠陥を引き起こすに至るか、パーティクル削減のプロセス技術、パーティクルがあっても劣化しないデバイスや材料の開発など、科学的アプローチでやるべき課題は多くあると考える。

フレキシブル化の課題については、基板の材料の開発が早急に望まれる。プラスチック基板はフレキシブル性に富み、破壊しにくいのでフレキシブル有機 EL の基板としては望ましいが、表面の平坦性に問題があることと、水分や酸素の透過性については有機 EL に耐えうるレベルのバリア性が確立できていない。一方、薄膜ガラス基板を用いることも検討されている。表面の平坦性やバリア性は全く問題なく理想的な基板だが、ガラスであるがゆえに破壊しやすく、そのハンドリング性の低さで扱いにくい。プロセスの確立と破壊しにくいガラスの開発が期待される。近年は、箔状金属を基板に用いる検討も進められている。これもバリア性や破壊しにくいという点では優れた基板候補だが、導電性であること、表面平坦性が低いことなどをクリアする必要があり、さらなる開発が期待される。

次に、透明導電膜であるが、従来から用いられている ITO ではもろくて曲げたときに破壊する可能性がある。曲げても特性の変化しない透明導電膜の材料開発が期待される。最近では、金属ナノ粒子を用いた透明導電膜の形成などが発表されている。

最後にバリア性の付与である。これは、基板側のバリア性が実現できたとしても、デバイスの上面のバリアをきっちりとしなければ、デバイスとして実用化できない。バリア性を持ったフィルムを張り合わせるなどの手法があるが、将来的には薄膜による封止方法の確立が望まれる。

塗布・印刷プロセスでは、使用する材料の溶解性と上層塗布溶媒の下層への浸透防止が極めて重要であり、下層と上層で溶解性が異なる直交溶媒を用いる手法や、光による架橋反応を利用した材料の不溶化により多積層構造を形成する。塗布型有機 EL デバイスの初期の研究段階では PEDOT:PSS と発光材料のシンプルな二層構造が主流であった [42]。水溶性である PEDOT:PSS は、ルエンやキシレンなどの無極性溶媒やクロロホルムやクロロベンゼンなどのハロゲン溶媒に不溶であるため、それら溶媒を用いることで PEDOT:PSS/発光層の二層構造が容易に形成できる。しかしながら、発光材料へのホール注入障壁や励起子消光などの課題から、ホール輸送性励起子ブロック層を PEDOT:PSS と発光層の間に挿入した三層構造が検討されはじめ、ここで大きな役割を果たしたのが架橋技術の応用である [43]。塗布成膜後の UV 照射や熱アニールにより共有結合を介した三次元的なネットワークを形成することで、成膜後に材料を不溶化し、さらにその上層への塗布多積層化を可能にしている。光架橋反応の例としては、オキセタンのカチオン開環重合 [44)-46)]やアジドのナイトレンラジカル付加反応 [47)-48)]が挙げられる。また、熱架橋反応にはスチレンのラジカル重合が挙げられる [49)-51)]。ホール輸送性を有するアリールアミン低分子材料や高分子材料に架橋性置換基を付与することで、塗布成膜による PEDOT:PSS/架橋性ホール輸送材料/発光材料の三層構造を実現している。

塗布成膜による多積層化には、光や熱架橋反応を利用した膜の不溶化以外に、極性が大きく異なる直交溶媒を用いる手法がある [52)-55)]。フルオレン骨格を有する蛍光高分子材料

poly(9,9-dioctylfluorene)(PFO)や poly(9,9-dioctylfluorene-alt-benzothiadiazole)(F8BT)はトルエンや p-キシレンに可溶かつアルコール溶媒に不溶であることから、その上層にアルコール溶媒を用いて電子輸送層や電子注入層を塗布成膜することが可能である。一般的に電子注入材料として用いられるアルカリ金属炭酸塩 Cs_2CO_3 はアルコール溶媒に可溶であることから、塗布成膜可能な電子注入材料として知られている[56)-57)]。しかし、架橋性置換基の導入は電荷移動度[58)]や発光量子効率の低下[59)]を招くことが報告されている。また、これらの架橋技術は UV 照射や長時間の高温熱アニール工程が必要である。

近年、有機 EL 材料の分子量をコントロールすることで、溶解性の違いをもたせ、さらにデバイス性能が低下しないような有機 EL 材料の合成を行う研究開発が発表され、タンデム型有機 EL デバイスを形成できるようになった[31),32)]。しかしながら、塗布型デバイスは、真空蒸着によるものと比較して効率、寿命とも特性が劣る。これは、まだ材料に高分子バインダーなどが含まれていることによることも一つの原因で、今後、高分子バインダーを添加しないオール低分子発光ユニットの開発や電荷発生および電子注入材料のさらなる改善を進めていく必要がある。これにより、発光効率と長寿命化の両立を実現し、実用水準に到達する塗布型タンデム有機 EL デバイスの開発が期待され、これが実現されると有機 EL の製造コストも大幅に低減されると期待され、照明業界、ディスプレイ業界に一大変革が起こる可能性がある。

上述したほか、大面積化に対応した製造装置の開発や、大面積を発光させるためのグリッド電極材料・プロセス開発、デバイス評価技術の開発が並行して行われるべきと考える。

量子ドット発光材料では、LED チップ上への直接塗布やレーザディスプレイへの展開を可能とする、150～200℃で高い発光効率を達成する新たな材料の開発が、社会的波及効果が最も大きい革新的技術となろう。

（５）政策的課題

EU のような巨大水平連携、韓国のような強力な垂直統合に太刀打ちできる政策が必要であり、基礎研究から実用化研究まで、プレイヤーを増やして研究の裾野を広げ、実用化に向けた産学連携の仕組みの構築や拠点形成、ベンチャー企業創出の支援などが必要不可欠と考えられる。

有機 EL では、国内においては、個々の研究グループ及び企業は高い技術を有しているものの、実用化、産業化に舵を切るためには「オールジャパン体制」を実現するための強い求心力が必要である。たとえば、九州大学は TADF 発光材料に特化した開発で特に先行しており、山形大学は、発光材料からホスト材料やキャリア輸送材料などの周辺材料までの幅広い研究開発で強みを見せるとともに、白色有機 EL デバイスやマルチフォトン構造のデバイスで知られるように、デバイス研究やそのプロセス研究というような一気通貫の研究体制が可能であり、その点で大きな強みを発揮している。このような拠点の強みをさらに発揮できるようなサポート体制の構築が重要であり、それにより、有機 EL 分野の研究開発が一層加速し、国際競争力も高まっていくと考えられる。

材料開発を行う大学、国研を核として、蛍光体メーカーあるいはわが国唯一のコロイダル

QD メーカーである NS マテリアルズ、フィルム製造などを担当できる化学メーカー、発光素子やディスプレイのメーカーとが連携したコンソーシアムの構築とその支援、その中で物質の設計と合成技術の双方を推進できる研究者の育成が必要不可欠と思われる。

（６）キーワード

有機発光材料、燐光発光材料、遅延蛍光発光材料（TADF 材料）、マルチフォトン構造、フレキシブル基板材料、フレキシブル封止材料、フレキシブル透明電極材料、プロセス技術、真空蒸着法、印刷法、塗布型有機 EL、配向性キャリア輸送材料、カドミウムフリー

（７）国際比較

有機 EL

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	◎	↗	山形大学、九州大学に有機EL研究拠点ができている。山形大学では、JSTが推進する、COIプログラムにより、社会実装も視野に入れながらアンダーワンルーフで基盤技術開発を遂行中。特に、究極のディスプレイ・照明と言われる「貼れる有機ELディスプレイ・有機EL照明」をコンセプトとした基礎研究を遂行中。九州大学では、最先端有機光エレクトロニクス研究センターがOPERAの肝いりで設立され、特に材料分野における基礎研究を遂行中。また、関西学院大学、京都大学、大阪大学などさまざまな大学で新しい材料技術の開発が進んでいる。（参考：有機EL討論会第22回例会）
	応用研究・開発	△	↘	九州大学では、経済産業省が推進するOPERAプログラムによる有機光エレクトロニクス実用化開発センターが設立され、産業化研究会も発足し、実用化を目指した研究開発が進展中。 ジャパンディスプレイ（以下：JDI）は、アップルが早ければ2017年からiPhoneを有機ELに変えるとの観測を受けて、新たに500億円を投じ、2017年春に有機ELパネルの生産ラインを立ち上げる予定との報道。日本経済新聞によると、JDIは主力拠点の一角である千葉県の茂原工場に500億円を投じ、有機ELパネルの本格生産を行う予定とのこと。パネル生産に必要な全工程を同工場で担うべく、17年春より生産ラインを試運転し歩留まりを向上させ、18年以降に投資をさらに上積みして本格生産を開始するという段階的なアプローチで臨む予定。これまでもJDIは14年春から有機ELについて小型の試作ラインを設け量産技術の研究開発を進めてきたが、水準が一定に達したと判断したことで、今回の本格投資に踏み切ることとした、とのことである。 一方でJDIは、これまでLCDパネルをiPhone用に卸してきたが、サムスンやLGと異なって有機ELディスプレイの量産実績はないため、IGZOを武器にサプライヤーとして参入を計画しているシャープ―Foxconnグループとともに、次世代ディスプレイのサプライヤーとしては「後発」扱いとなっている。JDIは、傘下にJ-OLEDを抱え、高いレベルの技術力を保有しているとも言われているが、資金的に非常に苦しく（2016年8月6日の日経報道）単独で開発を完遂させられるのか未知数。アップルやその他の企業から資金的なサポートを得ることに成功すれば、今後サムスンとLGの2党体制に食い込んでいける状況も十分想定されるがシャープの技術力も含め、その内実は不透明である。
米国	基礎研究	◎	→	1990年代から2004年にかけて世界に先駆けて有機EL技術を構築し、材料、デバイスの基礎技術もその時にアグレッシブに研究が進んだ。有機ELの基本特許といわれているC.Tang氏の特許は、2007年に切れたが、ほかにもいくつかの重要な特許が米国で権利化されている。例えば、高効率発光を実現する燐光発光材料技術は米国で生まれたもので、基本特許とその重要な関連特許は2018年ごろまで有効と考えられている。
	応用研究・開発	◎	↗	KODAK倒産後、KODAKにいた技術者、研究者が中心となり、有機EL照明パネルの製造販売会社である、OLEDWorks社を設立。2015年10月には、ドイツのAachenにあった、Philipsの有機EL開発製造部門を買収し、製造

				能力を大幅にアップ。 材料では、Universal Display Corporation (UDC)が燐光発光材料の基本特許を武器として、業界に君臨。サムソン、LGはじめ、日本の有機EL照明メーカーともライセンス契約を締結しており、安定的な収入とそれに裏付けされた研究開発力を維持している。ただし、2018年ごろに、基本特許が切れるとの観測もある。
欧州	基礎研究	○	→	BMBFが主導した、R2Flex（2011-2013:予算規模€11milliom.(約15億円)。Fraunhofer FEP(COMEDD)、Novaled, Fraunhofer IPMS, Tridonic, Heliatek, Von Ardenneなどが参画。フレキシブル有機EL照明の基盤技術を確立。
	応用研究・開発	○	↗	Flex-O-Fabプロジェクト以外にも、BMBFが2013年10月にフレキシブル有機EL照明プロジェクト（通称R2D2 : 期間2年間）を立ち上げ。この目的は、R2R(ロールtoロール)製造技術を含む新製造技術探索研究。予算規模は約€6million(約7.5億円)。Fraunhofer FEPがリーダーとしてプロジェクトを主導し、参画企業とて、OARAM, Novaled, Audiなどが参画している。2015年9月に完了し、この成果がすでに複数の企業で製品化に向けて動いているとのこと。 2016年1月からBMBFが「国際共同製品開発による産業クラスターの国際展開強化事業」をスタート。プロジェクト期間4年で、予算規模は、BMBFとドイツ国内参画企業が50%ずつ出し合うマッチングファンド形式で合計€8million(9億円)。山形大学や、英国ケンブリッジ大学にも参加要請があり。世界のマーケットに展開できる有機EL商品を早期に造出するため、国際共同製品開発を行う。
中国	基礎研究	×	→	1991年ごろから有機ELの研究を始めたといわれ、有機ELディスプレイの研究開発が先行した。有機EL照明の開発は緒に就いたばかり。北京大学や清華大学、蘇州大学、香港都市大学などで材料、デバイス研究がおこなわれているが特段見るべき成果は認められない。
	応用研究・開発	△	↗	政府主導で設備投資、技術開発投資が行われている。中国政府は昨年、「第13次5カ年計画」（2016-2020）でOLEDに投資方向を変更することにした。業界の関係者は「中国がLCD投資に対する審査を難しくし、その代わりにOLED投資を誘導している」と推測している模様。特に、照明に関しては、First-O-Light、BOE, Visionoxが顕著。ディスプレイではBOE、Tiennmaに巨大な研究開発投資がされている模様。ただ、装置は入れられてもそれを運用する技術者が不足しており、有機EL特有の「すりあわせ技術」に対する経験も浅いので、まだしばらく時間が必要。
韓国	基礎研究	○	↗	水原にある成均館大学(Sungkyunkwan University)および、ソウルの慶熙大学(Kyung Hee University)にサムソンやLGが資金を出し、政府も相当量の資金を拠出し、一丸となって、有機EL材料や有機ELディスプレイ技術の研究開発拠点として精力的に活動している。昨年までドイツのBASFも有機EL材料研究拠点を上記Sungkyunkwan大学に置いていたが、現在は撤退している。 また、全州には、フレキシブルやプリンタブル有機ELの政府系研究拠点KISTもある。
	応用研究・開発	◎	↗	ディスプレイについては、LGディスプレイが大型有機ELテレビ用パネル(55-65インチサイズ)を量産し、日本を含む世界に販売中。Samsungが中小型のタブレット、スマートフォン用有機ELディスプレイをすでにかなりの規模で量産中。現在では、すでに同サイズの液晶ディスプレイより低価格になったとの見方もある。基板サイズは、LGのテレビはG6サイズだが、今年中にG8.5サイズにアップグレード予定、サムソンの中小型有機ELパネルに使われるサイズは、現在はG4.5程度と推測されるが、今年中にG6サイズまで拡大予定で大規模投資を計画している。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

量子ドット LED

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	◎	↘	$CuInS_2$系コロイダルQDの材料開発とその発光過程の評価では世界をリードしてきた。論文の被引用件数と学界での評価は非常に高い。しかし、最近はその人的、資金的理由によりそのアクティビティが低下している。 ・ $CuInS_2$系可視蛍光を世界で最初に達成した論文（Chem. Mater.18,3330(2006).の被引用件数は184件でこの分野では非常に高い。$CuInS_2$の欠陥を同定した英国化学会の論文（J. Mater. Chem. C 2, 6867(2014)）はエディターにより「Hot Article」に選出されている。 ・ $CuInS_2$系コロイダルQDの特許（特許5136877）を我が国が保有している。 ・ $CuInS_2$以降の新技術が現れていない。
	応用研究・開発	△	→	NSマテリアルズがCdSe系コロイダルQD蛍光体をディスプレイメーカーに供給することを発表しているが、先行他社と同水準以下でありカドミウムフリーという点では進展をもたらしていない。 ・ 2014年12月ソニーはQD Vision社(米国)のColor IQを搭載したテレビを発売したが、技術的にはQD Vision社の技術である。
米国	基礎研究	◎	→	CdSeコロイダルQDによるQD蛍光体の世界初の報告、$CuInS_2$系コロイダルQDにおける世界最高の蛍光量子効率の達成など、これまでにコロイダルQD蛍光体の研究を強力に牽引してきた。それらを推進した研究者は現在もリーダーとして活躍している。 ・ CdSeでの最初の報告（J. Am. Chem. Soc. 115, 8706 (1993).） ・ InAsでの最初の報告（Appl. Phys. Lett. 69(1996)1432.） ・ $CuInS_2$での最高蛍光量子効率（J. Am. Chem. Soc. 133, 1176(2011)） ・ 自発光デバイスにおいても輝度向上において牽引的役割を担ってきた。 ・ CdSeを使用した最初のQLED（Nature 370, 354(1994)） ・ 1,000cdm^{-2}を突破した報告（Nature 420, 800(2002)） ・ 可視光全域をカバーするQLED（Nano Lett. 9, 2532(2009)） ・ 10,000cdm^{-2}を突破した報告（Nature Photon. 5, 543 (2011)）
	応用研究・開発	◎	→	液晶ディスプレイへの応用を牽引するCdSeコロイダルメーカーを有する ・ QD Vision（2004年設立）、Nanosys（2001年設立） ・ ソニー製テレビにQD Vision社のColor IQが搭載 ・ Nanosys-3M社により開発された波長変換フィルムQDEF コロイダルQDの製品化に向けて、3M社、Dow社などの巨大化学メーカーが強力なサポートを行っている（Nanosys-3Mグループ、Nanoco－Dowグループの存在）
欧州	基礎研究	○	↘	英国マンチェスター大学のO'Blienグループが一時期カドミウムフリーコロイダルQDの研究を活発に進めていた。近年は新たな成果が現れていない。その他の欧州圏各国ではコロイダルQDの研究はあまり活発でない。
	応用研究・開発	◎	↗	英国Nanoco社が米国Dow社と協力しInP系カドミウムフリーQD蛍光体の量産体制を確立しつつある。
中国	基礎研究	○	↗	コロイダルQDの合成に関する研究は、そのほとんどが後追い技術であり大きな成果を出していない。一方で、QLEDでは世界最高の外部量子効率を達成している。 ・ 世界最高効率のQLED（Nature 515, 96(2014)）
	応用研究・開発	×	→	先行技術を利用してコロイダルQDを製造販売するベンチャーは多数あるが、目立った特徴は特にない。
韓国	基礎研究	◎	↗	Samsung社、LG社が米国MITやLos Alamos Natl. Lab.に資金と人材を供与し技術開発を進めてきた。Samsung社の意向に沿ってInP系の材料でカドミウムフリー化技術を向上してきている。 ・ InP系での高い蛍光量子効率の達成（Sci. Rep. 6, 30094; doi: 10.1038/srep30094 (2016)）
	応用研究・開発	○	→	Samsung社は2016年1月開催の2016 International CESにて1000nit/10億色を再現する量子ドット技術搭載4Kテレビを出品

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

1) C. W. Tang, S. A. VanSlyke, Applied Physics Letters 51, 913 (1987).
2) J. Kido, K. Hongawa, K. Okuyama, K. Nagai：Appl. Phys. Lett., 64, 815 (1994).
3) 小田敦：応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会第 9 回講習会（応用物理学会）, 3-10 (2001).
4) T. Komoda, K. Yamae, V. Kittichungchit, H. Tsuji, N. Ide, “Extremely High Performance White OLEDs for Lighting,” SID 2012 Digest, pp. 610 (2012).
5) K. Yamae, H. Tsuji, V. Kittichungchit, Y. Matsuhisa, S. Hayashi, N. Ide, T. Komoda, “High-Efficiency OLEDs with Built-up Outcoupling Substrate,” SID 2012 Digest, 694 (2012).
6) J. Kido, Y. Fujita, N. Ide, K. Nakayama：2007 MRS Spring Meeting, O10.8 (2007).
7) T. Nakayama, K. Hiyama, K. Furukawa, H. Ohtani：SID 2007, 19.1 (2007).
8) B. W. D'Andrade, J.-Y. Tsai, C. Lin, M. S. Weaver, P. B. Mackenzie, J. J. Brown：SID 2007, 19.3 (2007).
9) K. Yamae, H. Tsuji, V. Kittichungchit, N. Ide, T. Komoda, “Highly Efficient White OLEDs with over 100lm/W for General Lighting” , SID 2013 Digest, 916-919 (2013).
10) 小俣孝久，野瀬勝弘，マテリアルインテグレーション，21(12), 15-22(2008).
11) C. B. Murray, D. J. Noris, M. G. Bawendi, J. Am. Chem. Soc., 115, 8706(1993).
12) A. A. Guzelian, U. Banin, A. V. Kadavanich, X. Peng, A. P. Alivisatos, Appl. Phys. Lett. 69, 1432(1996).
13) 日経エレクトロニクス 2014 年 3 月 3 日号, p.53
14) NS マテリアルズ社ウェブサイト（http://www.ns-materials.com/）
15) V. L. Colvin, M. C. Schlamp, A. P. Alivisatos, Nature 370, 354(1994).
16) S. Coe, W. K. Woo, M. Bawendi, V. Bulović, Nature 420, 800(2002).
17) L. Qian, Y. Zheng, J. Xue, P. H. Holloway, Nature Photon. 5, 543 (2011).
18) X. L. Dai, Z. X. Zhang, Y. Z. Jin, Y. Niu, H. J. Cao, X. Y. Liang, L. W. Chen, J. P. Wang, X. G. Peng, Nature 515, 96(2014).
19) Y. Shirasaki, G. J. Supran, M. G. Bawendi, V. Bulovic, Nature Photon. 7, 13(2013).
20) C. L. Li, M. Ando, H. Enomoto, N. Murase, J. Phys. Chem. C, 112, 20190(2008).
21) H. Nakamura, W. Kato, M. Uehara, K. Nose, T. Omata, S. Otsuka-Yao-Matsuo, M. Miyazaki, and H. Maeda, Chem. Mater. 18, 3330 (2006).
22) L. Li, A. Pandey, D. J. Werder, B. P. Khanal, J. M. Pietryga, V. I. Klimov, J. Am. Chem. Soc., 133, 1176(2011).
23) T. Omata, K. Nose, K. Kurimoto and M. Kita, J. Mater. Chem. C 2, 6867 (2014).
24) J. L. Stein, E. A. Mader, B. M. Cossairt, J. Phys. Chem. Lett., 7, 1315(2016).

25) H. Uoyama, K. Goushi, K. Shizu, H. Nomura, C. Adachi, Nature 492, 234–238 (2012).
26) T. Hatakeyama,et. al., “Ultrapure Blue Thermally Activated Delayed Fluorescence Molecules: Efficient HOMO-LUMO Separation by the Multiple Resonance Effect”, Advanced Materials Communication, (DOI: 10.1002/adma.201505491
http://www.flexofab.eu/flex-o-fab/about-us
27) Y. J. Pu, M. Higashidate, K. Nakayama, J. Kido, J. Mater. Chem. 18, 4183 (2008)
28) N. Aizawa, Y.-J. Pu, M. Watanabe, T. Chiba, K. Ideta, N. Toyota, M. Igarashi, Y. Suzuri, H. Sasabe, J. Kido, Nat. Commun. 5, 5756 (2014)
29) T. Chiba, Y.-J. Pu, M. Hirasawa, A. Masuhara, H. Sasabe, J. Kido, ACS Appl. Mater. Interfaces 4, 6104 (2012).
30) T. Chiba, Y.-J. Pu, H. Sasabe, J. Kido, Y. Yang, J. Mater. Chem. 22, 22769 (2012)
31) Y. J. Pu, N. Morishita, T. Chiba, S. Ohisa, M. Igarashi, A. Masuhara, J. Kido, ACS Appl. Mater. Interfaces 7, 25373 (2015)
32) Yong-Jin Pu, T. Chiba, K. Ideta, S. Takahashi, N. Aizawa, T. Hikichi and J. Kido, “Fabrication of Organic Light-Emitting Devices Comprising Stacked Light-Emitting Units by Solution-Based Processes”, Adv. Mater. 2015, 27, 1327-1332.
33) T. Chiba, Yong-Jin Pu and J. Kido, “Solution-Processed White Phosphorescent Tandem Organic Light-Emitting Devices”, Adv. Mater, 2015, 27, 4681-4687
34) 例えば、Lighting Japan 2015, 技術セミナー発表資料
35) http://www.oled-info.com/tags/companies/osram_opto_semiconductors
36) J. P. Park, J.-J. Lee, S.-W. Kim, Sci. Rep. 6, 30094; doi: 10.1038/srep30094 (2016).
37) Nanoco 社ウェブサイト（http://www.nanocotechnologies.com/）
38) http://www.oled-info.com/tags/companies/osram_opto_semiconductors
39) みずほ情報総研 NAVIS 019 | JANUARY 2013「[特集] 有機エレクトロニクスの可能性 —次世代技術に挑む日本」
40) G. Pellegrini, G. Mattei, and P. Mazzoldi, J. Appl. Phys. 97, 073706(2005).
41) P. K. H. Ho, J. S. Kim, J. H. Burroughes, H. Becker, S. F. Y. Li, T. M. Brown, F. Cacialli, R. H. Friend, Nature, 404, 481 (2000).
42) J. S. Kim, R. H. Friend, I. Grizzi, J. H. Burroughes, Appl. Phys. Lett., 87, 023506 (2005).
43) X. H. Yang, D. C. Muller, D. Neher, K. Meerholz, Adv. Mater., 18, 948 (2006).
44) P. Zacharias, M. C. Gather, M. Rojahn, O. Nuyken, K. Meerholz, Angew. Chem. Int. Edn., 46, 4388 (2007).
45) G. Liaptsis, K. Meerholz, Adv. Funct. Mater., 23, 359 (2013).
46) R. Q. Png, P. J. Chia, J. C. Tang, B. Liu, S. Sivaramakrishnan, M. Zhou, S. H. Khong, H. S. Chan, J. H. Burroughes, L. L. Chua, R. H. Friend, P. K. Ho, Nat. Mater., 9, 152 (2010).
47) J. Park, C. Lee, J. Jung, H. Kang, K. H. Kim, B. W. Ma, B. J. Kim, Adv. Funct. Mater., 24, 7588 (2014).
48) Y. J. Cheng, M. S. Liu, Y. Zhang, Y. H. Niu, F. Huang, J. W. Ka, H. L. Yip, Y. Q. Tian, A. K. Y. Jen, Chem. Mater., 20, 413 (2008).

49) M. S. Liu, Y. H. Niu, J. W. Ka, H. L. Yip, F. Huang, J. D. Luo, T. D. Kim, A. K. Y. Jen, Macromolecules, 41, 9570 (2008).
50) N. Aizawa, Y. J. Pu, H. Sasabe, J. Kido, Org. Electron., 14, 1614 (2013).
51) X. Gong, S. Wang, D. Moses, G. C. Bazan, A. J. Heeger, Adv. Mater., 17, 2053 (2005).
52) F. Huang, Y. Zhang, M. S. Liu, A. K. Y. Jen, Adv. Funct. Mater., 19, 2457 (2009).
53) T. Earmme, E. Ahmed, S. A. Jenekhe, Adv. Mater., 22, 4744 (2010).
54) N. Aizawa, Y.-J. Pu, M. Watanabe, T. Chiba, K. Ideta, N. Toyota, M. Igarashi, Y. Suzuri, H. Sasabe, J. Kido, Nat. Commun., 5, 5756 (2014).
55) J. S. Huang, G. Li, E. Wu, Q. F. Xu, Y. Yang, Adv. Mater., 18, 114 (2006).
56) J. Huang, Z. Xu, Y. Yang, Adv. Funct. Mater., 17, 1966 (2007).
57) C. Y. Lin, Y. C. Lin, W. Y. Hung, K. T. Wong, R. C. Kwong, S. C. Xia, Y. H. Chen, C. I. Wu, J. Mater. Chem., 19, 3618 (2009).
58) G. Liaptsis, D. Hertel, K. Meerholz, Angew. Chem. Int. Edn., 52, 9563 (2013).

3.24　熱再生利用技術

（1）研究開発領域の簡潔な説明

熱再生利用技術とは、熱を利用する際に減少するエクセルギーを再生（補充）することで、中低温領域の熱需要を満足させる技術である。これにより、従来の化石燃料の燃焼に依存して熱供給する体系を変革でき、化石燃料の消費を削減できる。

ここでは、中低温の熱需要の賦存の把握技術、熱再生（熱が持つエクセルギー率を高める）技術の理論、およびその要素技術として、熱交換、熱輸送、ヒートポンプ（機械方式、化学方式）技術を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

二度にわたるオイルショックの結果、産業部門においては、大幅な省エネルギー化がなされてきた。しかしながら、依然として産業部門全体では日本のエネルギー消費量の 45%程度を消費しており、更なる省エネルギー化が求められている。

従来、工場等では、化石燃料の燃焼により、種々の熱需要先へカスケード的に熱を供給してきた。これは、エネルギー保存の法則に従っていることからエネルギーの量は変化していないが、熱力学第二法則にあるエントロピーの増大、言い換えるとエクセルギーの損失（エクセルギー率の低下）を避けることができず、熱から取り出しうる“仕事”の量が減少する。エクセルギー率の低下幅を極力小さくすることで、再生のために投入するエネルギー量を最小化しつつ熱需要に供給することができると、産業部門の省エネルギー化に大きく貢献する。ここで、中低温領域の熱需要が必要とするエクセルギーは、未利用熱が有するエクセルギーを再生し、供給することで、十分に満足できると考える。

熱再生利用技術には、まず、中低温の熱の需要および排熱として捨てられている未利用熱がどれだけ、どこに存在するかという情報（熱需要の賦存の把握）が必須である。そして、熱再生利用技術の理論確立が必要である。熱再生利用技術の要素技術を下記に示す。

● 熱交換

中低温領域の熱を利用するためには、熱源が中低温であるが故に、小さい温度差で必要な熱を伝える高性能な熱交換器が必要とされる。熱交換能力は熱通過率×伝熱面積×温度差と表されるが、これは即ち、小温度差と低コストを両立するためには、熱通過率を促進すること（伝熱促進）、そして安価な材料への転換を図ること（材料転換）、新規な低コスト製法を採用（量産技術の転用）するしかないということを意味する[1)]。このうち、特に、伝熱促進は全ての分野に共通する基盤技術であり、非常に大きな波及効果がある。

● 熱輸送

概して、熱源（高温熱源、低温熱源）に対して熱を利用する場所は離れている。必要とされる熱輸送距離は用途によりナノスケールから数十キロメートルスケールまで存在し、それぞれ用いられる技術が異なる。しかし、共通する要求としては、輸送時の熱損失を減らし熱源の温度を極力変化させることなく高効率に運ぶことである。したがって、高効率な熱輸送技術の創出が要請される。

● ヒートポンプ

ヒートポンプを適用することで、低温の熱源を利用して熱源よりも高温の熱の生成を効率よく行うことが可能となる。

ヒートポンプは、100℃未満の排熱を活用して産業用として改めて活用可能な温度レベルの蒸気等を生成することが可能である。産業用では、180℃程度の温度レベルが必要であるが、現状の商品化されているヒートポンプでは、このレベルの温度生成は困難である。このため、家庭用だけでなく、広く産業分野にまで広く有効活用可能なヒートポンプの開発の確立が急務となっており、それに向けた要素技術、システム化技術が求められている。

● ケミカルヒートポンプ

250℃を超える高温の領域では化学変化を利用するヒートポンプ（ケミカルヒートポンプ）の研究が進んでおり、これを適用することで、化石燃料の燃焼熱に依存していた熱の供給の従来体系を脱化石燃料に転換できる。

［動向（歴史）］

● 熱の賦存の把握

熱の有効利用や管理に関する国家プロジェクトでは、ムーンライト計画の中で行われた「排熱利用技術システム」が、一連の熱利用に関するプロジェクトの最初のものである。続く、「スーパーヒートポンプエネルギー集積システム」は、高効率ヒートポンプと、蓄熱するシステムが開発されたが、このプロジェクトの中で排熱調査が行われた。また、さらに、これに続く「広域エネルギーネットワークシステム（エコエネ）」は、熱の発生地と需要地を結ぶとことを目標にされたが、この中で行われた排熱調査は、比較的広範囲に行われた [2)]。この調査は、排熱の温度領域、形態（気体、温水、固体、）、業種、設備ごとに区分、解析されている。広範囲の省エネおよび熱利用に関するプロジェクトはこのエコエネが行われた時期がムーンライト計画およびニューサンシャイン計画行の最後となる。現在は 2014 年に経済産業省の委託事業として始まった「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発」が行われている [3)]。

熱需要および排熱の調査の方法は文献による調査、現地での調査に大別され、この中間的なものとしてアンケート調査などがあり、前述の参考文献 [2)]の調査はこの方式による。

文献による調査では、産業連関表を利用する方法が比較的古くから行われている [4)]。製品ごとのエネルギー消費が求まるため、標準的な製品製造工程の例に当てはめ、熱需要の温度帯とその量を推測することが出来る。ある程度温度領域まで論じた文献調査や [5)]、手法を論じる文献調査がある [6,7)]。文献調査ではデータの出処や処理方法によって結果に差異が生じるため [6)]で述べられているようにメタアナリシスが必要である。

工業地帯で行われた現地調査には新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトで 2000 年から行われた「エネルギー使用合理化技術実用化開発事業／ピンチテクノロジーによる工場地域のエネルギー共有技術の研究開発」の中で行われたものがある [8)]。

2008 年度エネルギーの使用合理化等に関する法律（省エネ法）の改正により、特定の事業を行う事業者に対して、事業者の省エネ状況を業種内で比較できる「ベンチマーク制度」が 2010 年度から導入された。

熱使用量および排熱量の計測技術として、NEDO が行う産業技術研究助成事業の一環として北海道大学で超音波パルスによるリアルタイム混相流計の開発が行われた [9]。熱の発生源として業種あるいは事業所によっては電力も相当な割合を占めるが、電力測定技術は近年、大きな進展が見られた。1980 年代に工場内にロボットを導入する FA（ファクトリーオートメーション）が台頭したが、三菱電機が 2003 年に始めた e-F@ctory の一環として、ネットを通じた電力監視が可能な電力計測システムが市場投入された。グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト（2011 年度～2014 年度）が、革新的かつ実用的で安価な小型グリーンセンサの開発を目的に行われた。これらを用いたネットワークシステムを構築して、環境計測やエネルギー消費量等の把握（見える化）及びエネルギー消費量の制御（最適化）を可能にするような省エネを目指す実証が行われた。再生可能エネルギー熱利用計測技術実証事業（NEDO）で（2011 年度～2013 年度）流量計を中心とする簡易熱量計測技術が開発された [10]。

● 理論

1970 年代に発生したオイルショック以降、産業部門においては、熱エネルギーを循環再利用するための熱交換器を用いた熱回収（ヒートリカバリー）技術が発展してきた。この技術は、廃熱を回収し、循環再利用することで、外部から与える熱を大幅に削減することができる。特に、受熱流体と与熱流体を最適に組み合わせ、熱交換器ネットワークを構築することができるピンチテクノロジーは、視覚的にも理解しやすいことから工場への導入・普及が進んだ。

1970 年代後半から、産業界を中心に種々のエネルギーの質を定量的に評価する指標として、エクセルギーが定義された。このエクセルギーは、あるエネルギーから取り出し得る最大の仕事量を示している。エクセルギーは熱力学第二法則に従っており、何らかのプロセス（工程）を経ることで、エクセルギーは必ず損失する。

このエクセルギーを用いて 1990 年代頃からプロセスを評価するエクセルギー解析が注目されてきた [11,12]。実際、昨今の学術論文においても、現状の工場内に位置する各プロセスのエクセルギー解析を行う内容が数多く報告されている。しかし、プロセスのエクセルギー解析を行うだけでは、求められているプロセスの省エネルギー化や高効率化がなされるわけではなく、あくまでも、エクセルギーはその指標であり、プロセスを経ることで、エクセルギーが損失するということを定量的に評価した報告は皆無といってよい。また、損失したエクセルギーを元の量に戻すには、別途エネルギーが必要となる。そのため、プロセスに必要とするエネルギー消費量を削減するには、従来のプロセス内のエネルギーを循環再利用するだけでなく、プロセスにおけるエクセルギー損失を最小化することが望まれる。つまり、熱に限定すると、プロセス内の全ての熱を循環再利用するには、プロセス内の熱のエクセルギー損失を極力抑え、損失相当分のエクセルギーを何らかのエネルギーの形で与えることで熱を再生させる必要がある。ここで与えるエネルギーの量を小さくするには、高質なエネルギーを用いるのが良い。そのため、仕事を用いるのが一般的であり、結果として、加えたエネルギーはエクセルギー損失に相当する熱再生（熱の質の向上）のための仕事となる。また、熱再生のためにプロセスに与える仕事から熱を発生させると損失につながることから、熱再生には、等エントロピー変化を用いるのが最適となり、理想的には断熱変化が望ましい。

断熱変化には、物理変化、化学変化がある。物理変化（機械方式）は、断熱圧縮や膨張を用いたヒートポンプ技術の他にも磁場や電場などを用いた例が報告されている[13,14]。また、化学変化は、ケミカルヒートポンプや吸着式冷凍機などが有名である。これらの物質は 1990 年代には広く研究が進められており、実際にプロセスに用いた例が多く報告されている[15]。

2010 年頃になって、プロセス内の熱の質を等エントロピー変化の一つである断熱圧縮を用い、再生した熱を全て循環再利用することでプロセスを省エネルギーとする自己熱再生が提案され[16,17]、2012 年には NEDO プロジェクトの中でバイオエタノールの濃縮のための蒸留塔に導入し、その省エネルギー効果が実証されている[18]。

● 熱交換

熱交換技術は、これまで電力、自動車、輸送機器、冷凍空調向けの熱機関や、産業部門の加熱炉、乾燥機やプロセス工程の熱回収用途等の熱機器に広く用いられてきた。我が国の 1 次エネルギー供給は、現在ほぼ全てが化石燃料に依存しており、熱交換器は総量として膨大な熱量を扱っている。膨大な熱量を扱うために、一般に熱交換器は大型となりがちで、単体でのコストはもちろん、設備自体の大型化を招くなど、コスト上の大きな課題となっている。このため、長きにわたって伝熱促進を図ることで伝熱面積を削減し、コンパクト・省資源・低コスト化を目指した研究開発が続けられてきた。例えば、空調用熱交換器では、空気側フィンについては 1970 年代に比べて熱伝達率が約 3 倍に、管内側熱伝達率についても 70 年代に対し 3 倍以上になるなど、大きな伝熱促進が図られている[19]。これらの技術は、我が国が完全にリードし世界的に広く普及している。我が国の貢献は非常に大きなものがあるが、近年では韓国や中国メーカーの追い上げが激しくなってきており、一層の技術開発が求められる。

● 熱輸送

熱輸送の古典的な例は、電気式冷蔵庫が普及する以前に 1950 年頃まで用いられた氷式の冷蔵箱が挙げられる。冷熱源となる氷は氷屋から仕入れ、製氷工場から各家庭までリヤカーで搬送された。

数十メートル以上の熱輸送方式としては、トラックや船舶によるオフライン熱供給、熱媒体をパイプラインを介して輸送するパイプ熱輸送方式に大きく分けられる。さらにパイプ熱輸送方式に関してはポンプなどを用いた電気式熱輸送と、毛管力や重力を用いることで電力を要さない受動型熱輸送に分類される。

トラックや船などで熱供給をするオフライン熱供給は、工場やごみ処理施設などから発生する 200℃未満の低温廃熱を潜熱蓄熱材（PCM）に回収・貯蔵して、コンテナ車で離れた施設に熱エネルギーとして供給するのが一般的である。海外においては、ドイツ、フランス、アメリカで既に導入実績があり、日本においても、栗本鐵工所・三機工業が取り組む「トランスヒートコンテナ」や、神戸製鋼所・神鋼環境ソリューションが取り組む「サーモウェイ」がある[20]。

また、低温熱源の輸送としては雪・氷を船で輸送し、都市部での冷房等に活用する技術がある。例として北海道の氷を大都市に運ぶ、国土交通省北海道開発局の「雪氷輸送物流システム検討調査」が挙げられる。2005～2006 年に実証実験を行い、製氷、輸送、利用の観点から有効性の検証と課題の洗い出しが行われた。

パイプ熱輸送方式では、環境省が実施した環境研究総合推進費補助金研究事業（2010～2012 年）で、ごみ焼却排熱有効利用に向けた熱輸送、蓄熱の実験評価がなされた。アンモニア吸収冷凍機に溶液輸送配管を追加して溶液を輸送する実験的検証が行われ、50m の熱輸送が実証された。また、シミュレーションにおいては数 km の熱輸送も可能であることが示された[21)]。

電力を用いない受動型熱輸送では、NEDO の産業技術助成において、マイクロ多孔体で生じる毛細管力を熱輸送駆動力としたループヒートパイプ熱輸送技術により 4m の受動型熱輸送が実証された[22)]。

また、経済産業省の航空機用先進システム基盤技術開発において、航空機のエンジン排熱を用いた翼前縁の凍結防止のための熱輸送技術としてループヒートパイプの適用が提案され、システム成立性が検討された[23)]。

● ヒートポンプ

ヒートポンプに適用されているサイクルは、カルノーが考案したカルノーサイクルを逆に駆動する逆カルノーサイクルを基本としている。冷凍機とヒートポンプは、全く同様のサイクルであり、蒸発器による熱の吸熱（対象は冷却される）を利用した機器は冷凍機であり、凝縮器からの放熱を利用した機器は、ヒートポンプと呼ばれる。

ヒートポンプの技術は、20～50℃程度の冷温熱を利用する空調分野で発展してきた。最初の電気式エア・コンディショナは 1902 年、ニューヨーク州の Willis Carrier が発明した。印刷工場の製造工程を改善するために設計されており、温度だけでなく湿度も制御できるようになっていた。その後も Carrier（Carrier 社の創設者）の技術は様々な仕事場の生産性向上に使われた。ヒートポンプとしての暖房機は、1930 年代に登場している。

わが国では、空調機器としては、1930 年代にはじめて業務用が導入され、1950 年代には家庭用のヒートポンプ式暖房機の商品化が初めてなされた。1960 年代には、ガスエンジン式エアコンが開発され、ガスによる空調を可能とし、後の電力負荷平準化へ貢献することになる。1970 年代から冷暖兼用機が登場しはじめ、1980 年には、インバーター機が開発され負荷変動に対しても効率よく空調が行えるようになった。また、ビル用マルチエアコンもこの時期に開発され、ビル空間でも効率よく快適な環境が適用できるようになった。また、要素技術としてもスクロール圧縮機が実用化された。このころから、冷暖兼用機が急速に普及し始めることとなった。1980 年代がまさにヒートポンプがその後急速に普及する大きな転換期となった。

2001 年には、CO_2 を冷媒とする家庭用ヒートポンプ給湯機が開発された。これにより、90℃の温水を作る技術が大きく進歩した。当初は、10MPa にもなる機器のため、普及はしないだろうとの意見も多数聞かれたが、わずか 15 年程度で 500 万台が市場に導入された。このヒートポンプ給湯機の開発の際には、水と冷媒が熱交換する新しい熱交換器、高圧の CO_2 冷媒にも耐えうる新しい圧縮機、膨張ロスが大きいため、エジェクターによる膨張エネルギー回収技術が新たに開発された。

1970 年代から業務用の大型ヒートポンプも開発がすすめられ、1984～1992 年にかけて工業技術院のムーンライト計画の一環として大型省エネルギー技術開発プロジェクトが実施され、その中で、スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムの開発が進められた。ここでは、水を冷媒とし、150℃の熱源に対して 300℃で COP（成績係数）が 3 を達成す

る機器が開発された。このようにして産業用用途にも確実にヒートポンプが展開されつつある。

ヒートポンプの場合には、冷媒がその動向を大きく左右する。もともとアンモニアから始まった冷媒は、1930 年から「フレオン」という商標で生産が開始された。フロンは化学的、熱的に極めて安定であるため、開発当時は「夢の化学物質」としてもてはやされたが、1970 年代にオゾン層破壊が問題化すると、フロン類はその原因物質とされ、1985 年のオゾン層の保護のためのウィーン条約や 1987 年のオゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書により、製造及び輸入の禁止が決定された。これによりフロンの代わりとしてオゾン層を破壊しにくい HCFC や HFC が代替フロンとして利用され始めた。代替フロンの HCFC や HFC も温室効果ガスとして問題視されはじめ、地球温暖化係数（Global warming potential: GWP）が高いものは、今後規制がかけられていくであろう。

● ケミカルヒートポンプ

化石燃料に依存しない熱再生利用技術として、化学反応を利用して熱の質を変化させる技術（ケミカルヒートポンプ）に関する実証試験や実用化が相次いで報告されている。

熱源温度 100℃以下の熱再生利用においては、ゼオライト系吸着材（AQSOA®）を用いた吸着式冷凍機が商品化され、現在では 60℃前後の排熱を用いて 20℃以下の冷水を得ることが可能となっている [24)]。

熱源温度 100℃～200℃の熱再生利用においては、2000 年頃潜熱蓄熱材を用いた熱エネルギーオフライン輸送システムがドイツにて実用化され、国内でも同様の技術が 2005 年に実用化された [25)]。また、2015 年には、希土類硫酸塩と水蒸気との反応を用いた化学蓄熱材が新しい技術として発表された [26)]。

熱源温度 200℃～400℃の熱再生利用においては、1990 年代より酸化マグネシウムと水蒸気との反応を用いた化学蓄熱／ケミカルヒートポンプに関する研究が行われ、2014 年からマグネシウム系化学蓄熱材を用いた排熱輸送の実証試験がスタートした [27)]。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

● 熱の賦存の把握

国内では 2016 年 4 月の電力自由化を機にスマートセンサを用いた計測が導入され、データ収集および解析が迅速に行えるようになった。また、生産現場で配管内の流体の熱量計測を行うための流量計（熱量計）の開発が相次いで行われた [7,8)]。超音波を利用する外装式の流量計は新たな市場参入も見られる。

● 理論

2013 年に伝熱過程において損失するエクセルギー量を数式的に算出し、自己熱再生で必要となる仕事量が伝熱過程において損失するエクセルギー量とほぼ等しいことを証明した論文が報告されている [28)]。さらには、2015 年には本検討をさらに進めることで、自己熱再生が中低温領域において省エネルギー効果が大きいことを明確にしている報告がなされている [29)]。また、プロセス流体自身の熱を再生し循環再利用する自己熱再生を用いることは別の媒体を経ることがないことから、他のヒートポンプアシスト型のプロセスに比べ熱

交換器内の伝熱過程の数が減り、結果として、省エネルギー化できることがこれらの報告で明確となっている。

アメリカにおいては、温度エントロピー線図上におけるサイクル線図のずれからプロセスの効率を評価する取り組みが行われており、LNG 製造プラントを用いて検討がなされている。しかしながら、現状としては、エクセルギーの評価との明確な差異がないことから、今後更なる検討が必要となる[30]。

また、ヨーロッパの研究グループにおいては、圧縮・膨張機と熱交換器ネットワークを組み合わせた最適設計手法の提案がなされている。これらの検討が進むことで将来のプロセス設計手法が大きく変わる可能性を秘めている[31-33]。

● 熱交換

伝熱面の開発において、近年では最適化技術が大きく進展し、例えば随伴解析を用いた多自由度の伝熱面最適化が可能となってきている[34]。この手法では、数値シミュレーションに用いる格子点がすべて最適化の対象となるため、膨大なパラメータ数、即ち非常に複雑な形状の最適化が可能である。このことで、従来気づかなかった新たな伝熱促進メカニズムが見出され、新たな伝熱促進面の提案につながる可能性がある。

熱交換器材料には、従来、銅、アルミ、鉄等が広く用いられてきたが、近年、排気ガス循環（EGR）クーラーやバイナリーサイクル等、未利用熱や排熱からの熱回収といった新規な熱利用技術の開発が活発化しており、これに伴い、耐熱・耐腐食性の高い材料のニーズが高まってきている。例えば、ステンレスが代表的な耐熱・耐腐食性材料であるが、ステンレスの熱伝導率は銅の約 1/25、アルミ合金の約 1/10 であるため、フィン効率が非常に小さなものとなりやすく、従来の熱交換器設計技術では対応できないケースが多発しており、設計技術の高度化が求められている。

熱交換器に関する研究開発においては、未利用エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）は 1300℃の耐高温性能を有し、産業／工業炉からの排熱を従来比 3 倍の性能で回収する高温用高効率熱交換器を開発し、TherMAT の組合員である美濃窯業（株）から、2015 年 12 月に製品化された[35]。今回開発された熱交換器は、高温で使用される熱交換器において、トレードオフの関係にある耐高温性能と熱回収性能の両立を実現するため、従来の熱交換器の構造と材質を見直したものである。

一方、熱輻射に関しては輻射の放射波長制御技術を利用することで、従来の黒体や灰色体の仮定では発想しえないエネルギー輸送や変換が実現できる可能性が指摘されている[36]。輻射の放射波長制御を利用した加熱炉および乾燥炉、選択波長フィラメント照明、熱光起電力電池を用いた発電等が検討されている。

● 熱輸送

パイプ熱輸送においては、2016 年より愛知製鋼株式会社が電気炉から排出される排熱からエネルギーを回収・活用する試みがなされている。具体的には電気炉の排熱を蒸気エネルギーとして回収、輸送し、一部は他の製鋼設備で直接活用し、残りは発電により電力に変換し、他設備の動力源として活用する試みであり、鋼材、鍛造プロセスにおける使用エネルギーを原油換算で約 1%削減を見込んでいる。電気炉排熱を有効活用した発電事例としては国内初の試みである。2017 年 1 月の稼働を目指している[37]。

パイプ熱輸送における受動型熱輸送においては、2012 年にパナソニックエコシステムズ

がループ式サーモサイフォンの原理を利用し、重力により 3m の熱輸送を実現する技術を開発した[38]。390W/cm²の高い熱流束に対応できる技術である。

● ヒートポンプ

冷媒が技術動向のカギである。今後冷媒は、R32 や HFO 系、炭化水素系のような微燃性、可燃性を有するものとなる。このため、冷媒の充填量を減らすことが求められている。最近になり、冷媒の流動経路サイズが極めて小さく冷媒の充填量を低下できる扁平微細多穴管を用いた熱交換器が日本のメーカで実用化された[39]。

寒冷地向けでも高効率駆動が可能なヒートポンプが強く求められ、－25℃でも比較的効率よく駆動可能なヒートポンプが開発されている。着霜による性能低下は、伝熱性能の低下よりも通風経路低減による風量低下が主な原因であることも判明している。このため、エジェクターにより、蒸発器の温度レベルを上げ、前面熱交換器での着霜を低減することにより、着霜による空気の通風経路低減を防止し、性能を改善したヒートポンプも開発されている。

二元冷凍サイクルによって低段側と高段側のそれぞれの段で良い性能を発揮できる異なる冷媒を用いることにより、高効率な給湯も実現されている。ガス給湯器とハイブリッド化することにより、ヒートポンプとガス給湯器それぞれのメリットを上手に生かした形で高効率を実現した機器も開発されている。

太陽熱の変動や不足をヒートポンプで上手に補うハイブリッド機も開発されている。また、除湿機とヒートポンプを組み合わせることにより、除湿機の再生プロセスをヒートポンプからの排熱で行い、除湿冷房された快適な空気を供給するようなシステムも提案されている。

● ケミカルヒートポンプ

固体材料の潜熱を利用した潜熱蓄熱分野においては、従来からパラフィン系有機化合物や糖アルコール系有機化合物を潜熱蓄熱材として用いる研究開発が進められている。最近では 500℃以上の熱源で蓄熱を行うための Al-Si 系合金についても研究開発が進められている[40]。

固体の化学反応熱を利用した化学蓄熱／ケミカルヒートポンプ分野においては、塩化カルシウムの水和・脱水反応を用いた系で充填層型反応器を用いて 1000 回の繰返し耐久性が実証された[41]。また、他の反応系についても耐久性評価が行われている。

これまで多く研究開発が進められている潜熱蓄熱、化学蓄熱とは異なる概念をもつ蓄熱材として、五酸化三チタンの相転移を用いた「蓄熱セラミックス」が提案された[42]。この材料は加熱処理によって吸収した熱エネルギーを加圧によって取り出すものであり、今後の発展が期待される。

［注目すべきプロジェクト］

● 熱の賦存の把握

- 経済産業省資源エネルギー庁省エネルギー課は業務部門におけるベンチマーク制度の導入に向けた調査・検討を実施している。
- EU 域内の動きを紹介する。EUFORIE（European Futures for Energy Efficiency）[43]は 2015 年に始まり 2018 年まで予定で EU 域内のマクロレベル、国別レベル、地域レベ

ル（工業地帯または工場）、家庭レベルでのエネルギー効率を調べ、長期予想を行うプロジェクトである。対象として中国も含まれる。

- ENERGY-SMARTOPS[44]が 2011 年から 2015 年にかけて実施された。装置とプロセスから複数の測定を監視し、情報を取得するとともに、新しいアルゴリズムを考案提供することでプロセスの最適化を行い、エネルギーの節約も目的とされた。

● 熱交換

2013 年 10 月から、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）が経産省の委託で開始され、蓄熱技術、遮熱技術、断熱技術、熱電変換技術、排熱発電技術、ヒートポンプ技術、熱マネージメント技術、基盤技術の各プロジェクトが実施されている[45]。

● 熱輸送

オフライン熱輸送については、2014 年より新エネルギー導入推進協議会による「次世代エネルギー技術実証事業」の一環として、トヨタ自動車が中部電力、東邦ガスと共同で、1km 圏内のサプライヤーの工場から排熱を回収して運び、自社工場で使う熱輸送の実証事業に取り組んでいる。捨てられている排熱を発電や生産に利用して、燃料の使用を減らす。排熱を出す企業、排熱を利用する企業を登録し、トラックの運用計画を作成する IT システムも整備している。これまで蒸気生成に要するエネルギーを 11%低減する効果を実証した[46]。

パイプ熱輸送方式による受動型熱輸送では、TherMAT において自動車排熱の有効利用を睨んだ受動型熱輸送の研究開発が行われている。ループヒートパイプ技術により 2022 年度末までに熱輸送距離 10m、熱輸送量 3kW の無電力熱輸送を目指している[47]。

● ヒートポンプ、ケミカルヒートポンプ

産業分野では、蒸気の流通プロセスで放熱による熱ロスが多いことや最終的には 100℃以下の温度で熱が利用されることも多く、ヒートポンプによる個別分散利用で大幅な省エネルギーを実現することが推奨されてきた。しかし、次の通り、ヒートポンプ自体で高温(200℃程度)の取り出しを可能とするプロジェクトや脱フロン対策の研究も TherMAT にて進められている。

● NEDO、未利用エネルギーの革新的技術開発、2015～2022 年度

（ア） 産業用高効率高温ヒートポンプの開発
（イ） 機械・化学産業分野の高温熱供給に適した冷媒とヒートポンプシステム技術
（ウ） 低温駆動・低温発生機の開発

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

● 熱の賦存の把握

排熱量の計測には温度計、流量計等、ほぼ必要な機器は市場に出揃っているが、それを実際に取り付けるには非常にコストがかさむ。また、送風機などの機器の仕様も古いものは定格運転のデータのみ使用者に提供されている。熱回収に当たって、実際に熱が排出されていても、熱交換器にスケールや汚れが多量に付着するようなケースも多い。また、一般的な酸露点による制約の生じるケースも多い。

● 理論

課題は、熱を再生させる技術が限られていることである。熱再生のためにプロセスに与える仕事から熱を発生させると損失につながるため、熱再生には、等エントロピー変化を用いる必要があるが、等エントロピー変化が大きいものは気体の圧縮・膨張、または化学的な変化に限られている。また、これらの変化を用いても実際には装置の摩擦や抵抗などの変化過程における熱の発生により厳密に等エントロピーで変化することが難しい点がある。

同時に、非定常運転時におけるプロセス技術開発が望まれる。これは、バッチプロセスを例にしても、詳細にプロセスを表現できるモデル構築がなされていないことに由来する。対象とするプロセスのモデルに伝熱速度や物質移動速度を正しく組み込み、産学の連携のもとで、非定常時のエネルギー消費と熱再生技術の課題抽出を行うことで、将来のエクセルギーをベースとした新規プロセス設計手法の提案ができる。

● 熱交換

実際の熱交換器では、霜、煤、析出等により伝熱面が覆われ、伝熱が阻害される場合が多いため、これらのスケールの付着や成長メカニズムに関して、科学的な知見は不足しており、多くの場合はメンテナンスで性能回復を図るか、あるいは大型化することで流路が閉塞しにくくする等の対策が採られている。

また、蒸発器や凝縮器中の作動流体は気液二相流となるが、複数の流路に適切に分配することは現状でも大きな困難が伴う。これは、気液二相流は流量と乾き度という 2 つの自由度がある上に、気液界面形状の定量予測が困難なためである。現状では、実験で試行錯誤的に分配を改善させているが、数値シミュレーションによる予測が可能になると、大幅な設計工数の削減が可能となる。

● 熱輸送

オフライン熱供給においては、熱輸送を担うトラックや船舶の燃費向上、熱輸送密度向上のために高温高密度に対応する蓄熱材の開発や断熱材の更なる性能向上があげられる。

パイプ熱輸送方式においては、熱輸送効率向上のための圧力損失低減、ポンプ動力の低減が挙げられる。受動型熱輸送に関しては熱輸送距離と輸送量の増大が課題である。現在は数 kW、10m 程度の輸送の実証を目指しているが、さらに大きな熱量を長距離輸送するための技術開発が挙げられる。

● ヒートポンプ

ヒートポンプでは、熱源の情報不足が課題である。産業用の排熱を中心にヒートポンプの熱源となりうるものについて、その温度や量の調査はすでに何回か実施されているが、十分なデータが得られていない。継続した調査が必要であろう。

電力構成もヒートポンプの発展に影響が大きい。特に家庭用給湯機は夜間電力を有効活用可能ということで発展してきたが、原子力発電所が停止している状況下ではその効果が低くなってしまう。

● ケミカルヒートポンプ

課題は、熱エネルギーの授受の速度が十分でないことである。このため、技術を実用化するためには、装置の小型化、蓄熱媒体の耐久性、安全性、コストの点で大幅な改善が難

しい。熱エネルギーの授受に関わる物理的現象、化学的現象をナノメートルスケールからセンチメートルスケール・メートルスケールまで総合的に理解し、様々なスケールにおける諸問題を解決する必要がある。

［今後取組むべき研究テーマ］

● 熱の賦存の把握

熱量の簡易計測方法の技術の拡充が必要である。配管等を修正するのでなく、廉価な外付けタイプのものが望ましい。

ポンプ、送風機の流量等、比較的計測しにくい計測対象を、ポンプ、送風機の電力測定によって、インバータを使用したときにも適用できるような実用に耐えうる相関式の提供が必要である。

また、省エネルギー機器を導入するための、社会学、経済学を含めた多方面からの熱利用のためのソフトウェア作りが必要である。例えば、初期コストの回収年がどのくらいになるのか等の試算を行うものである。

● 理論

電気や磁気、さらには波動などの機械的仕事を用いた新規の熱再生技術の提案とともに、それらを生かすためのプロセス開発、熱交換技術の研究開発が望まれる。さらには、エクセルギーによる評価を組み込んだプロセス設計手法の開発とその最適設計手法の提案を目指すとともに、定常のみならず非定常運転時の最適設計および制御手法の研究開発が必要と考える。

● 熱交換

霜、煤、析出等のスケールの伝熱面への付着により熱交換性能が低下する。スケールの成長、閉塞機構の解明、制御、および予測技術の開発が必要である。

気液二相流の数値シミュレーション技術の高度化や輻射の放射波長制御技術が必要である。

● 熱輸送

トラックによるオフライン熱輸送、パイプ熱輸送方式の電力式蒸気熱輸送、受動型熱輸送、この３者の熱輸送効率的限界、コスト的限界を明らかにし、適材適所の熱輸送方式の選定を行うことが求められる。

ループヒートパイプやループ式サーモサイフォンなどの受動型熱輸送要素技術で電力を用いずにどこまで熱輸送を行えるかの限界を明らかにする取組が期待される。限界を伸ばすためには毛管力の向上、熱輸送時の熱ロスの低下、低温度差で熱輸送を実現する安全な冷媒の開発、大型に起因するより高精度なモデルの構築、低コストな製造方法、長期安定性の検証などが必要である。また、単なる要素技術の研究開発にとどまらず、熱利用システムに組み込んだ形での実証研究が求められる。

● ヒートポンプ

冷媒、熱源、高温取り出し化、コスト低減が取り組むべきテーマである。

安全性の高い冷媒、ヒートポンプの高温化に耐えうる冷媒の探索が求められる。ヒートポンプに組み込む熱交換器としては、冷媒の混合が進んだ場合には、混合冷媒でも高性能

な形式が改めて求められる。

不安定な排熱のような熱源を用いる場合には、立ち上がりがよく、排熱の変動に対しても安定した駆動を可能とする制御方法の考案が求められる。

高温取り出しのヒートポンプの場合には、起動から通常運転まで大きく温度レベルが変わるため､潤滑油の粘度が大きく変わってしまう｡このような状況にも対応可能な潤滑油、運転方法が確立されることが求められる。高温ヒートポンプは、圧縮過程で冷媒温度を高めるために、かなり高圧に圧縮する必要があり、その分、膨張過程での減圧（圧力落差）も大きなものになるので、その圧力落差から動力（エネルギー）回収を可能とする膨張機の開発が求められる。

電力、ガスが自由化された中では、従来のようなガス機器、電気機器といった分類ではなく、システムトータルとしてベストミックスをし、最も効率よく駆動可能なシステムの提案が求められる。

● ケミカルヒートポンプ

取組むべき研究テーマは、蓄熱媒体（蓄熱材、熱媒体等）、装置設計などであり、対象としては、伝熱現象、物質移動、化学反応などの解析・シミュレーションが挙げられる。また、実際のシステム運用面では生産プロセスのエネルギー的最適化等も研究対象となる。

（５）政策的課題

● 熱の賦存の把握

経団連に加盟する大企業では業種ごとに自主的に省エネに精力的に取り組んでおり、大きな成果を挙げている[48､49]ので、事業所あるいは事業者の中で対応できるものと推測される。一方で中小の企業では、省エネルギーに対する関心があっても、その具体的な方法に対する情報が乏しかったり､省エネルギーに充当する人的資源が不足している場合も多い。このようなことから、省エネに関する知識や情報を与えたり、また、プロセスの改良等の専門家を派遣する一方で、企業側からの情報を集約し、個々の例を蓄積し、細かな見直しを可能にすることが出来るような制度や体制作りの検討が必要である。

設備投資をしたものの、エネルギー価格が下がったり、または市場が縮小したり、なんらかの事情で他の事業者からの熱が受けられなくなったり、あるいは供給できなくなったりするときに初期投資の回収が困難になったときの支援を公的機関が支援する仕組みを作るかあるいは省エネ投資保険商品とし整えるなどのバックアップ作りの検討も必要である。

● 理論

産学官、府省庁や海外を含む研究者間の連携をより強化する枠組みの策定とともに、実用に向けた実験を行うために高圧ガスの限度を産業プラントレベルまでに引き上げた実験地区、またコンビナートレベルの研究開発が可能となるようなフィールドを国内外に指定し、研究機関発の研究内容を実用・実証レベルにまで引き上げる方策が望まれる。

● 熱交換

熱交換の技術開発には長い歴史がある上に、温度差がゼロという理論的上限が存在するため、不連続的な革新技術が今後生まれる可能性は高いとは言えないが、これは逆に言えば僅かな差であっても長期間優位性を保てるということを意味する。膨大な熱量を扱うこ

とから市場も大きく、エネルギー問題への量的な貢献という側面での価値が高い。幅広い分野の基盤を支える技術として、熱交換器設計のためのシミュレーション技術を高度化することが求められている。

● 熱輸送

工場からの廃熱取り出し時の既存装置改善に伴う消防法、労働安全衛生法等の規制の緩和や特例措置なども必要とされる。さらに、CO_2 削減に対する熱供給側や需要側へのインセンティブの付与や、少量危険物（冷媒等）の規制手続きの統一化なども求められる。

● ヒートポンプ

冷媒の動向がヒートポンプ開発の行方をも左右してしまうが、冷媒に関しては様々な規制がある。これについては、単に性能の良い冷媒が必ずしも主流となるとは限らないため、国としてのきちんとした見極めとできるだけ早い対応が求められる。

熱源や冷媒の方向性が明確とならないとメーカーも思い切った製品開発投資ができない状況である。これがコストダウンや産業用ヒートポンプの普及を妨げている要因の一つかと思われる。

● ケミカルヒートポンプ

熱再生利用技術を実用化するには、実証試験、熱エネルギー需給データベースの作成、熱エネルギー市場の確立の検討が必要である。これまでは理論化学、応用化学、化学工学、機械工学等の学術分野において単独で研究開発が進められる例が多く、分野間の相互連携は限定的であったが、今後は学術分野間の広い相互連携、産官学の枠を超えた共同研究実施拠点の創設による共同研究開発の促進も望まれる。

（６）キーワード

熱需要、排熱、文献調査、アンケート調査、現地調査、計測、メタアナリシス、スマートメータ、製造プロセス、未利用熱、熱の融通、省エネ投資保険、エクセルギー、自己熱再生、磁気熱量効果、誘電熱量効果、熱伝達、熱輻射、相変化、伝熱促進、オフライン熱輸送、パイプ熱輸送、受動型熱輸送、ループ式サーモサイフォン、ヒートパイプ、ループヒートパイプ、蓄熱、断熱、排熱、ヒートポンプ、高温化、熱源、冷媒、空調、産業用、熱電変換、排熱発電、ケミカルヒートポンプ、熱マネージメント

（７）国際比較

熱の賦存の把握

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	● JST、JSPS、NEDO等のプロジェクトの中で省エネ機器、熱の計測、削減が行われている。
	応用研究・開発	○	→	● NEDOのプロジェクトで、流量計の開発は積極的に行われている。いわゆる「見える化」は進みつつある。 ● 電力のスマートメータの普及が開始した。
米国	基礎研究	○	→	● 定点観測ともいうべき、一定地域の年次変化を追うなど有意義な研究がなされている。[50]
	応用研究・開発	○	→	● 古くから車両用の排熱利用がなされ、現在も多種類のエンジン（電気自動車、燃料電池車）を対象とする研究をリードする。[51,52]
欧州	基礎研究	◎	↗	● EUの研究プログラム（cordis）で計測技術・監視・制御システムを伴う新しいプロセスの導入などが、挑戦的に進められる。
	応用研究・開発	◎	↗	● 市民の啓蒙や、経営者と省エネ機器・システムの開発者を結び付けるなどの動き（cordis）が盛んである。[53]
中国	基礎研究	○	→	● 長期エネルギー需要予想などは行われている[54]。 ● COP21では2030年までに2005年比でGDP当たりのCO_2排出量を60～65%削減する目標が掲げられた。
	応用研究・開発	○	→	● 工業排熱の都市利用も検討されている。[55] ● 気体流量計の普及に向け、中国国内での気体流量計が2013年に開始された。これにより生産効率が向上するとともに、エネルギー使用量のデータ収集も容易になるものと推測される。[56] ● ISO50001の要求事項を反映した国家エネルギー管理規格を発行し、270社が取得している。[57]
韓国	基礎研究	○	→	● 引用文献は古いが、省エネのための調査・分析が行われている[58]。 ● 省エネ機器の基礎的な研究が行われている[59]。 ・
	応用研究・開発	○	→	● 工業排熱の都市利用も検討されている[60]。 ● ISO50001の取得件数は日本より多い42社（2014年）

理論、熱交換、熱輸送

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	◎	→	● 【理論】自己熱再生のみならず、内部熱交換型蒸留プロセスの基礎研究が多くなされており、基礎研究については、日本の基礎研究レベルは世界を先駆けている。 ● 【理論】熱再生利用方法の研究（ヒートポンプ技術や磁器冷凍など）も多く報告されている。 ● 【理論】プロセス設計手法と理論検討を統合的に検討がなされている。 ● 【熱交換】純粋な意味での熱交換を研究対象とする研究者は減少している。 ● 【熱輸送】受動型熱輸送技術に関しては、熱輸送メカニズムの解明、詳細モデルの構築など研究が進められつつある。
	応用研究・開発	△	↘	● 【理論】内部熱交換型蒸留プロセス、自己熱再生蒸留プロセスについては、実証プラントが作られたが、これらの実証プラントの次のフェーズの検討がなされていない ● 【理論】その他の応用検討はなされているが、実際の利用の見込みがない ● 【熱交換】特に自動車分野等で新たな技術開発が近年数多く取組まれている。 ● 【熱輸送】太陽熱利用、コジェネレーションシステムにおいても熱輸送が必要となるが日本は出遅れている。 ● 【熱輸送】蓄熱供給の実用化研究も進められているが事例は少ない。 ● 【熱輸送】受動型熱輸送技術に関しては、自動車、航空機への適用を目指した実用化研究が進められつつある。

米国	基礎研究	○	→	●【理論】プロセス全体についてサイクル線図に基づいて研究がなされている。 ●【理論】熱再生について特化した研究は少ない。 ●【熱交換】ナノ材料等の物理系へのシフトが進み、純粋な意味での熱交換技術の基礎研究はやや減少している。 ●【熱輸送】特筆すべき基礎研究は見られない。
	応用研究・開発	△	→	●【理論】プロセスの設計について実用化に向けた検討はそれほど多く報告されてはいない。 ●【熱交換】個別企業での研究は進められている。 ●【熱輸送】蓄熱供給の実用化研究が行われている。
欧州	基礎研究	○	→	●【理論】常温以下の冷熱の循環を対象に基礎検討結果は非常に多く報告されている。 ●【理論】熱交換ネットワークの最適設計についても報告例が多数存在する。 ●【理論】ノルウェーのグループでは特に、圧力変化を含むネットワーク（圧縮機と膨張機の最適配置）について検討している ●【理論】熱を全て循環再利用するという考え方ではなく、基本的に最適に熱を循環再利用することを目的として検討している。 ●【熱交換】ナノ材料等、物理系へのシフトが進み、熱交換としての基礎研究は衰退している。 ●【熱輸送】受動型熱輸送技術に関して一定の基礎研究が大学、研究機関、企業で実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	●【理論】深冷空気分離を対象に内部熱交換型蒸留プロセスの実証プラントが建設された。 ●【理論】その他の実用検討結果は、報告例が限られている。 ●【熱交換】個別企業での研究は進められている ●【熱輸送】ドイツ、デンマーク、スウェーデンなどで太陽熱利用、コジェネレーションシステムの導入が推進されており、熱輸送に関する応用研究・開発も進んでいる。
中国	基礎研究	○	→	●【理論】自己熱再生を引用した文献がみられるが、自己熱再生の本質であるプロセス流体の熱を再生し、全てプロセス内において循環再利用するという本質を理解している論文は少ない。 ●【理論】設計者の都合に合わせ、プロセスを設計し、比較しているため、プロセスが最適化された根拠が少ない例が多い。 ●【理論】種々のプロセスに熱再生技術（ヒートポンプアシスト型、蒸気再圧縮型の技術）を適用して、その経済性評価を行っている文献が数多くみられる。しかしながら、正当な評価というよりもプラント建設に向けて設計者による恣意的な評価結果が多い。 ●【熱交換】若手を含め、アカデミアの研究者数は多い ●【熱輸送】受動型熱輸送技術に関しては、大学を中心に基礎研究が進められている
	応用研究・開発	◎	↗	●【理論】基礎研究で述べた通り、種々のプロセスに熱再生技術を適用して、その経済性評価を行っている文献が数多くみられる。 ●【理論】その結果を受けてプラント建設を進めている。 ●【理論】現状、最終的なプラント例が出ているわけではないが、応用研究は今後も進むものと予想される。 ●【熱交換】民間企業での研究開発は大きく進んでいる。 ●【熱輸送】受動型熱輸送技術に関しては、低コスト製作などの研究が進められている。新規建築への太陽熱温水器設置が義務付けられており、関連して熱輸送に関する応用研究・開発も進んでいる。
韓国	基礎研究	△	→	●【理論】蒸留技術についてヒートポンプアシスト型の検討がなされている。 ●【理論】プロセスの統合的な研究例はそれほど多く報告されていない。 ●【熱交換】純粋な意味での熱交換を研究対象とする研究者は少ない。 ●【熱輸送】研究例が少ない
	応用研究・開発	△	→	●【理論】蒸留技術に特化していくつかの実用研究がなされているが、全体的にそれほど多くの報告例は存在しない。 ●【熱交換】民間企業での研究開発は大きく進んでいる。 ●【熱輸送】自然エネルギー利用が推奨されており、熱輸送に関する応用研究・開発も進められている。

ヒートポンプ（ケミカルヒートポンプ含む）

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	◎	→	● 冷媒の熱力学的物性や輸送物性の測定評価は世界のトップクラスを保持しており、測定結果は世界標準である冷媒物性計算ソフト“refprop（米国NIST）”にも採用されている[61]。 ● 九州大学は高温ヒートポンプサイクルの熱力学的な基本性能解析の基礎分野で強さを示している[62]。 ● 日本冷凍空調学会“熱交換器技術委員会”等は大学研究者やメーカーエンジニアを横断し総合的な技術交流の場を提供し、この方面の研究・開発を支えている[63]。 ● 【ケミカルヒートポンプ】化学工学会、機械学会、冷凍空調学会、鉄鋼協会等の学協会において熱エネルギー有効利用に関する研究会が活動しており、産官学それぞれの立場で研究開発が進められている。さらに、これらの学協会が主催する研究発表会、シンポジウム、工場見学会等の研究会活動を通して研究者間の情報交換が活発に行われている。
	応用研究・開発	◎	→	● 我が国には世界を代表する冷媒メーカー（デュポンやハネウェル）はないが、メーカーの商品開発能力は世界トップクラスであり、低圧蒸気（100～120℃）を製造できるヒートポンプを商品化した[64]。さらに160℃の蒸気取出しも商品化した[65]。 ● 家庭用のCO_2ヒートポンプ給湯器（商品名“エコキュート”）を世界で最初に実用化し幅広く普及している[66]。 ● 世界トップクラスの圧縮機メーカー（ターボ、スクリュー、スクロール等）があることに加え、機器メーカーはサイクル技術や熱交換器、制御に関する先端技術を有しており、世界に先駆けたヒートポンプ機器開発が可能である。 ● 【ケミカルヒートポンプ】次世代型エネルギーシステムの確立を目指したプロジェクトが進行している。2017年8月には「International Sorption Heat Pump Conference (ISHPC2017)」が早稲田大学にて開催予定である[67]。熱再生利用技術に関するプロジェクトについては、経済産業省が主導したプロジェクトが多く進められている。
米国	基礎研究	◎	→	● フッ素系冷媒の研究・開発においては世界のトップクラス。 ● DOEの支援で熱交換器やファン等の研究を行っている[68]。 ● 【ケミカルヒートポンプ】論文発表はコンスタントに続けられている ● 【ケミカルヒートポンプ】4ヵ年技術レビュー2015の中で、各種産業や製造業の成長の鍵となる技術候補の中に、熱電発電と排熱利用技術を挙げている[69]。
	応用研究・開発	○	→	● DOEやオークリッジ国立研究所（Oak Ridge National Laboratory）がヒートポンプ研究を進めているが、暖房を中心としたビルおよび住宅用である[68]。 ● 産業用の100℃以上の温水や蒸気取出しヒートポンプの研究は、これからの課題。 ● 北米カナダのHydro-Québecでは117℃の低圧蒸気取出しの研究がありこの方面の研究開発がある[70]。 ● 【ケミカルヒートポンプ】排熱利用技術、熱電発電技術等の産官学プロジェクトを実施
欧州	基礎研究	◎	↗	● フランスEDFにより、3つのプロジェクトが進んでいる。①R245faによる高温ヒートポンプの開発、②スクロール圧縮機と混合冷媒による140℃取出しの高温ヒートポンプの開発。③水冷媒による高温ヒートポンプの開発がある[71]。 ● ドイツでは、自然系冷媒のイソブタンを用いた単段・高温ヒートポンプもしくはイソブタンを高温側にR134aを低温側に用いたカスケードヒートポンプが開発されている[72]。 ● デンマークでは、自然冷媒（アンモニア、CO_2、イソブタン）の90℃取出しレベル等の研究を実施している[73]。 ● 【ケミカルヒートポンプ】コンスタントに論文発表があり、今後も引き続いて進展する可能性が高い
	応用研究・開発	◎	↗	● ドイツでは、アンモニア冷媒を用いた高温ヒートポンプが開発されている。ジーメンス社は高温ヒートポンプ用冷媒のLG6を用いた150℃レベルの出熱試験が実施された[72]。 ● ノルウェーのDrammenの地域暖房にはアンモニアの2段圧縮スクリューヒートポンプが海水を熱源とし90℃の温水を供給している[74]。

				● ドイツには日本と同様、トップクラスの圧縮機メーカーがあり、ヒートポンプ機器の研究開発は世界トップレベル。 ● 【ケミカルヒートポンプ】熱電発電、地域熱供給の熱源として再生可能エネルギーや排熱の利用率が高まっている。特にドイツやフランスでは地域熱供給の熱源として再生可能エネルギーや排熱回収分の占める割合が10%（ドイツ）、27%（フランス）となり、化石燃料からの転換が進んでいる ● 【ケミカルヒートポンプ】太陽熱利用に関する研究開発アライアンスを組織し、研究活動が活発となっている[75]。
中国	基礎研究	△	→	● 中国はIEA Annex 48（Industrial heat pummp）に参加を予定しており、本格的な基礎研究はこれからと思われる。 ● 【ケミカルヒートポンプ】論文発表数は増加傾向にある。今後も引き続いて進展する可能性が高い。
	応用研究・開発	△	↗	● ヒートポンプの研究開発は主に住宅の暖房用と思われる。産業用の実施例は100℃以下[76]。 ● 冷媒として炭化水素を推奨し、メーカーに試作をさせている。まだ、安全性等について十分な評価分析が進んでいないが、市場が大きいだけに注視する必要がある。 ● 【ケミカルヒートポンプ】技術導入が進展すると、競争力の強化が見込まれる。
韓国	基礎研究	×	→	● 特段目を引くような動きはない ● 【ケミカルヒートポンプ】論文発表数は増加傾向にある。今後も引き続いて進展する可能性が高い ● 【ケミカルヒートポンプ】2016年9月には「The 15th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC2016)」が韓国ソウルで開催された[77]。
	応用研究・開発	○	→	● ヒートポンプの研究開発は住宅の暖房用で空気熱源や地中熱源とした70℃レベルであり、産業用の高温ヒートポンプの研究はこれからと思われる。 ● オンドル文化があるため、ヒートポンプの普及を妨げているとの見方もある。ヒートポンプ導入に向けて国家として何らかの方向性を指し示すのか注目される。 ● 【ケミカルヒートポンプ】技術導入が進展すると、競争力の強化が見込まれる。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

- 研究開発の俯瞰報告書　環境・エネルギー分野（2015 年）
- 省エネルギー総覧編 集委員会編『省エネルギー総覧 2010-2011』通算資料出版会，2010
- 熱エネルギー高度有効利用と省エネルギー技術－エクセルギー損失の最小化、未利用熱エネルギーの有効利用、自己熱再生技術など最新の熱エネルギー利用技術体系－、フロンティア出版(2015)

1) 鹿園直毅，エクセルギー損失削減に貢献する伝熱促進技術，機能材料,33(7),pp.13-19(2013).
2) 財団法人省エネルギーセンター、広域エネルギー利用ネットワークシステムの開発　エネルギーシステム設計技術の研究　工場群のエネルギーシステムに関する調査研究　平成 12 年度調

査報告書、平成 13 年 5 月
3) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合ホームページ（未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発の紹介ページ）
http://www.thermat.jp/
4) 西村一彦、本藤祐樹、内山洋司、産業連関表を用いた製品のエネルギー消費量の推定、電力中央研究報告：Y95007、1996
5) Clemens Forman and others, Estimating the global waste heat potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews 57(2016) 1568-1579
6) Sarah Brueckner and others, Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions –A categorization and literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 38(2014) 164-171
7) Laia Miró and others, Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: A case study for Spain, Applied Energy 169 (2016) 866-873
8) NEDO 実用化ドキュメントホームページ- 複数工場間で熱を共有し、コンビナート全体での省エネを実現（コンビナート地域の排熱調査の紹介）
http://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201315chiyoda-corp/index.html
9) エネルギーの面的利用促進研究会、エネルギーの面的利用促進に関する調査報告書、平成 17 年 3 月
10) NEDO ホームページ（成果報告書詳細）
http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201501/20140000000806.html～
http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201501/20140000000810.html
11) 吉田邦夫編 エクセルギー工学－理論と実際－, 共立出版株式会社(1999)
12) 唐木田健一 エクセルギーの基礎, オーム社(2005)
13) Y. Kotani, Y. Kansha, A. Tsutsumi, Conceptual design of an active magnetic regenerative heat circulator based on self-heat recuperation technology, Energy, 55, 127-133 (2013)
14) Y. Kotani, M. Aziz, Y. Kansha, C. Fushimi, A. Tsutsumi, Magnetocaloric heat circulator based on self-heat recuperation technology: Chem. Eng. Sci., 101, 5-12 (2013)
15) 高性能ケミカルヒートポンプ応用事例集, サイエンスフォーラム(1991)
16) Y. Kansha, N. Tsuru, K. Sato, C. Fushimi, A. Tsutsumi: Self-heat recuperation technology for energy saving in chemical processes, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 48, 16 (2009) pp.7682-7686
17) Y. Kansha, N. Tsuru, C. Fushimi, K. Shimogawara, A. Tsutsumi: An innovative modularity of heat circulation for fractional distillation, Chem. Eng. Sci., Vol. 65, 1 (2010) pp.330-334
18) 生研記者会見 東京大学生産技術研究所／新日鉄エンジニアリング株式会社　合同記者会見 バイオエタノール製造コストを大幅削減！～自己熱再生理論を用いた省エネ蒸留プロセス実証試験～http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/992/
19) 柴田, 空調機用熱交換器の高性能化における研究開発, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2007 講演論文集, pp. 25-32 (2007).
20) 資源環境対策 Vol. 42, No. 13 (2006).
21) 平成 24 年度 環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書

https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/pdf/K2419.pdf
22) NEDO ニュースリリース　次世代熱エネルギー輸送デバイス「ループヒートパイプ」を開発
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0024-2A.html
23) 航空機用先進システム基盤技術開発（航空機システム革新技術開発）の概要について
http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H24/121129_koukuuki/koukuu5-3-5.pdf
24)（株）前川製作所プレスリリース（2012 年 4 月 17 日），
http://www.mayekawa.co.jp/ja/news/2012/pdf/news20120418.pdf
25) 三機工業（株）ホームページ，http://www.sanki.co.jp/product/thc/index.html
26) JST 新技術説明会資料，https://shingi.jst.go.jp/var/rev1/0000/1099/2016_kyoto-u_4.pdf
27)（一社）新エネルギー導入促進協議会資料，
http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150330/150330_2_5.pdf
28) Y. Kansha, Y. Kotani, M. Aziz, A. Kishimoto, A. Tsutsumi: Evaluation of a self-heat recuperative thermal process based on thermodynamic irreversibility and exergy, J. Chem. Eng. Jpn., Vol. 46, 1 (2013) pp. 87-91
29) Y. Kansha, H. Mizuno, Y. Kotani, M. Ishizuka, C. Song, Q. Fu, A. Tsutsumi: Numerical investigation of energy saving potential for self-heat recuperation, Chem. Eng. Trans., Vol. 45 (2015) pp. 187–192
30) H. Dinh, et al., Study on Cascade Refrigerant and Mixed-Refrigerant Systems for Ethylene Plants, 2012 AIChE Spring Meeting, Apr. 1-5, Houston, TX (2012)
31) C. Fu, T. Gundersen, Integrating compressors into heat exchanger networks above ambient temperature. AIChE Journal 61(11) s. 3770-3785 (2015)
32) C. Fu, T. Gundersen, Integrating compressors into heat exchanger networks above ambient temperature. AIChE Journal 61 (10) s. 3404-3422 (2015)
33) C. Fu, T. Gundersen, A novel sensible heat pump Scheme for industrial heat recovery. Industrial & Engineering Chemistry Research 55(4) s. 967-977 (2016)
34) Hasegawa, Y. and Shikazono N., Model-Based Optimization of Three-Dimensional Complex Structure for Heat Transfer Enhancement in Single-Phase Flows, Proc. 15th International Heat Transfer Conference, Kyoto, Japan, August 10-15 2014, IHTC15-8867 (2014).
35) 美濃窯業（株）プレスリリース（2015 年 12 月 24 日），
http://www.mino-ceramic.co.jp/pdf/corp20151224_2.pdf
36) 日本伝熱学界特定推進研究，波長選択ふく射輸送とエネルギー変換，HTSJ-FY2014-02，
http://www.htsj.or.jp/wp/media/1410_report.pdf
37) 愛知製鋼株式会社　ニュースリリース
https://www.aichi-steel.co.jp/news_item/20160520.pdf
38) パナソニック エコシステムズ株式会社　プレスリリース
http://news.panasonic.com/jp/press/data/2012/09/jn120914-1/jn120914-1.html
39) 村上、石橋、細川、冨山、“細径多列流路の折り返し合流部における冷媒二相流の流量分配特性”、Vol. 82 (2016), No. 838 ID:15-00685.
40) JST 新技術説明会資料，https://shingi.jst.go.jp/past_abst/abst/p/12/1265/hokkaido02.pdf
41) 名古屋大学小林敬幸研究室発表資料，

http://www.energy.gr.jp/wp-content/uploads/2016/04/CaCl2_HeatStorage_2016April.pdf
42) 東京大学プレスリリース（2015 年 5 月 12 日）, http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/27.html
43) EU コミュニティリサーチアンドデベロップメントインフォメーションサービス（以下 CORDIS と表記）ホームページ（EUFORIE の紹介）
http://cordis.europa.eu/project/rcn/194572_en.html
44) CORDIS ホームページ（ENERGY-SMARTOPS の紹介）
http://cordis.europa.eu/project/rcn/97548_en.html
45) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合(TherMAT), http://www.thermat.jp/
46) トヨタ自動車　プレスリリース
http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/3396815
47) NEDO「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」基本計画
http://www.nedo.go.jp/content/100749586.pdf・
48) 一般社団法人日本経済団体連合会、環境自主行動計画　温暖化対策編―2011 年度フォローアップ調査結果（2010 年度実績）―個別業種版、2012 年 7 月
49) 日本製紙連合会、製紙産業における地球温暖化対策の取り組み、2013 年 12 月
50) ローレンス・リバモア国立研究所ホームページ(エネルギーフロー図)
https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy
51) Ho Teng and others, Waste Heat Recovery of Heavy-Duty Diesel Engines by Organic Rankine Cycle Part I: Hybrid Energy System of Diesel and Rankine Engines, SAE paper, 2007-01-0537
52) A. Shabashevich　and others, Analysis of powertrain design on effective waste heat recoveryfrom conventional and hybrid electric vehicles, Applied Energy 157 (2015) 754–761
53) Exergyn のホームページ
https://www.exergyn.com/
54) Lynn Price and others, The challenge of reducing energy consumption of the Top-1000 largest industrial enterprises in China, Energy Policy 38 (2010) 6485–6498
55) Hao Fang and others, Industrial waste heat utilization for low temperature district heating,Energy Policy 62 (2013) 236–246
56) Xing-Ping Zhang and others, Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China, Ecological Economics 68 (2009) 2706–2712
57) アズビル株式会社ホームページ（ニュースリリース）
http://www.azbil.com/jp/news/130925.html
58) Sunhee Suk and others, A survey study of energy saving activities of industrial companies in the Republic of Korea, Journal of Cleaner Production 41 (2013) 301-311
59) Seok Hun Kang, Design and preliminary tests of ORC (organic Rankine cycle) with two-stage radial turbine, Energy 96, (2016) 142–154
60) Song Hwa Chae and others, Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park, Applied Energy 87 (2010) 1978–1988
61) NIST REFPROP Version 9.0, R1234yf, Fluid Information, Surface tension, Literature reference.

62) 近藤，小山，“廃熱利用高温ヒートポンプサイクルの基本性能に関する熱力学的考察”，日本冷凍空調学会論文集，Vo,31, No.2(2014),pp.133-144.
63) 日本冷凍空調学会ホームページ，冷凍空調技術委員会，
http://www.jsrae.or.jp/committee/refrigeration/
64) 二宮，“排熱回収ヒートポンプ式蒸気・温水製造装置”，冷凍 2008 年 7 月号第 83 巻 969 号，pp.53-57.
65) 飯塚，“日本冷凍空調学賞 技術賞「高効率蒸気供給システム SGH（スチームグロウヒートポンプ）」” ，冷凍 2014 年 6 月号第 89 巻 1040 号，pp.20.
66) 斎川，“電力中央研究所フォーラム 2010「ヒートポンプの役割と課題」”
http://criepi.denken.or.jp/result/event/forum/2010/pdf/SD09.pdf
67) ISHPC2017 ホームページ，http://biz.knt.co.jp/tour/2017/ISHPC2017/
68) ホームページ ENERGY.GOV Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
http://energy.gov/eere/buildings/success-stories
69) アメリカエネルギー省（DOE）ホームページ，
http://energy.gov/under-secretary-science-and-energy/downloads/chapter-6-innovating-clean-energy-technologies-advanced
70) Marc-André Richard, “Techno-economic evaluation of combining heat pump and mechanical steam compression for the production of low pressure steam from waste heat”, IEA Heat Pump Centre Newsletter Volume 32 - No. 4/2014, pp.50-61.
71) IEA Heat Pump Programme Annex 35 ，“産業用ヒートポンプの応用　最終報告書”（日本語），ヒートポンプ・蓄熱センター，2015 年，　PP296-307.
72) IEA Heat Pump Programme Annex 35 ，“産業用ヒートポンプの応用　最終報告書”（日本語），ヒートポンプ・蓄熱センター，2015 年，　PP307-326.
73) IEA Heat Pump Programme Annex 35 ，“産業用ヒートポンプの応用　最終報告書”（日本語），ヒートポンプ・蓄熱センター，2015 年，　PP271-273.
74) IEA Heat Pump Programme Annex 35 ，“産業用ヒートポンプの応用　最終報告書”（日本語），ヒートポンプ・蓄熱センター，2015 年，PP524-530.
75) ヨーロッパエネルギー研究アライアンス（STAGE-STE）ホームページ，
http://www.stage-ste.eu/index.php
76) J. Zhang et al.,” A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China” Applied Energy 178 (2016) 800–825
77) DHC2016 ホームページ，http://www.dhc2016.kr/index.php

3.25　触媒

（1）研究開発領域の簡潔な説明

触媒は化学反応の反応速度を速める物質で、石油精製、エネルギーキャリア変換など燃料生産に関わる触媒から、化成品やアンモニア合成、ファインケミカルなど原材料生産のための触媒、発電所・工場の排気ガス、自動車・船舶等の排気ガスなどの浄化（排出低減・無害化）のための触媒など多岐にわたる分野である。

- 触媒の主要用途による分類
- 機能性化学品（ファインケミカル・高機能品、医農薬品）
- ポリマー合成（バルクケミカル）
- 資源転換・原料多様化（石油、天然ガス、バイオマス）、基礎化学品
- 環境浄化・自動車排ガス触媒
- 燃料電池用触媒
- 光触媒（有機物分解・浄化、人工光合成）

ここでは、この中から環境・エネルギー分野に密接する資源転換と排ガス触媒について主に触れる。光触媒については、CCUS、エネルギーキャリアの項でも、バイオマス転換についてはバイオマスの領域で、燃料電池触媒については燃料電池の項にも記載している。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

現在の我々の生活を支えるエネルギーのほとんどが石炭、石油、天然ガスであり、これらの精製、変換のほとんどには触媒反応が用いられている。石炭、石油からの燃料生産、化学品生産は歴史が古く、確立されたものがあり、今後、新たな技術が生まれることは少ないと考えられる。しかし、当面の間は我々の社会は石炭、石油、天然ガスに基づいたエネルギー社会を続けていくことには疑う余地はなく、より高いエネルギー効率の新たな科学技術が必要である。

化学産業を環境、資源利用効率、またはエネルギー効率的な観点からみると大きな改善の余地が残されている。前者としては、バイオマス転換やシェールガス利用など、新たな資源とリンクした新たなる化学工業体系の構築が望まれており、後者としては、現行の官能基変換プロセスの高効率化、低環境負荷な原料を用いた新しい合成ルートの開拓、プロセスの安全性・経済性の向上などが求められている。さらには COP21 において、技術的は高いハードルの地球温暖化対策を前提とした目標が提唱された。CO_2 の削減のみならず、化学資源としての利用技術の開発についても触媒に期待される役割は大きい。

［動向］

触媒作用の研究は、19 世紀前半にロシアの化学者キルヒホッフやスウェーデンの化学者であるベルツェリウスがその作用に注目し、1901 年にドイツの F・W・オストワルトが触媒の定義を与えたときからいままでに、多くの研究者によって続けられてきた。化学分野において人類最大の発明と言われる二重促進鉄触媒を用いるアンモニア合成反応は 1913 年にドイツのハーバー、ボッシュ、ミタッシュによって実用化され、現在では人工合成されるアンモ

ニアの 8 割以上は化学肥料として地球上の 70 億人余の人口の食料の大半を支えている。また、1920 年代にはドイツのフィッシャーとトロプッシュによって、石炭から製造される合成ガス（水素と一酸化炭素の混合ガス）からガソリンや軽油などの液体炭化水素を合成する触媒反応が開発され、第二次大戦中はドイツでは年産数百万トンの液体燃料が石炭から生産されていた。原油の多くを占める重質油からガソリンや軽油など需要の多い軽質油へ変換する石油のクラッキング技術も 1900 年以前より研究は進められ、第二次世界大戦頃には触媒を流動移動層として用いる流動接触分解法(FCC)により石油のクラッキングは行われている。

触媒研究は野依（名古屋大学)、鈴木（北海道大学)、根岸（パデュー大学）らノーベル賞受賞者を輩出していることからもわかるように、いわば日本のお家芸ともいえる研究分野であり、ファインケミカル、バルクケミカル合成の基礎研究は大きく発展してきた。不均一系触媒（固体触媒)、均一系触媒ともに世界をリードする数多くの基礎研究がなされ、実用化されている。とりわけ、固体酸化学（1920 年代、東大のち早大小林ら)、排気ガス浄化（1980 年代～、自動車各社、東工大岩本)、光触媒（1960 年代～、東大藤嶋、東大堂免、理科大工藤ら)、ヘテロポリ酸（1970 年代～、東大御園生、水野ら)、金の触媒作用（2000 年代、首都大春田)、炭素炭素結合生成のための錯体触媒（1960－70 年代、名古屋大野依、東レのち東工大辻、東工大溝呂木、北大鈴木、パーデュー大根岸ら)、において世界を制し、リードしてきた。

環境浄化に関わる触媒反応は、発電所、工場など固定発生源からの排気浄化と、船舶、鉄道、自動車など移動発生源からの排気の浄化に分けて考えられる。発電所、工場などからの排気の浄化技術は、我が国は 1960~1970 年代に大気汚染、水質汚染など我が国は深刻な公害問題を克服してきたことから、高いレベルの技術を有している。工場などから排出される窒素酸化物は、酸化チタン担持酸化バナジウム触媒などを用いてアンモニアと反応させて、無害な窒素と水に変えている。しかし近年飛躍的に発展した要素があるとも考え難い。移動発生源からの排気は、ガソリン乗用車からの排気は、1970 年代より三元触媒によって改善が進められてきている。大気汚染には自動車の排ガス中などに含まれる窒素酸化物やスス（PM：Particulate Matter）が関与するが、CO、HC（炭化水素）の酸化のほか、NOx 還元も触媒の作用で同時に進行させる、コージェライト担体上に活性アルミナ - 白金 - パラジウム（またはロジウム）を含む三元触媒が開発された。これは酸化と還元を同時に行う難しい反応として知られるが、我が国の自動車業界は世界に先駆けていち早く商品化まで進め、その後の自動車王国の礎を築いた。ディーゼルエンジンの排気浄化技術は遅れていて、尿素 SCR（選択触媒還元）法や NOx 吸蔵型触媒などが実用化されてきたのは 2000 年以降である。省エネルギー社会が求められる中で、ディーゼルエンジン、ガソリンリーンバーンエンジンなどエネルギー効率の高いエンジンが注目を浴びているが、これらのエンジンに適合する排気浄化触媒の研究開発は急務である。

この分野は国内でも多くの研究者らによって取り組まれている。非貴金属化、担体効果の検討、DPF（ディーゼル微粒子捕集フィルター）の炭素燃焼活性向上など、直面している課題が多いため、今後の成長が望まれる分野である。海外では、日本では流行らなくなった古典分野の復興というのが見られる。アンモニア脱硝などというのは、論文では 2000 年台によく出ていて、日本発（岩本ら）の触媒にゼオライトの一種である ZSM-5 に銅をイオン交

換した銅／ZSM-5 がある。海外で、2004 年ぐらいに突然、新しい銅／ゼオライト（Chabacite 型）の特許が出て、実用化された。

また、世界各国に科学技術が広まるなか、触媒技術における材料戦略も重要になっている。例えば自動車排気ガス触媒（Pt,Rh,Pd など）、燃料電池用電極触媒（Pt など）には多量の貴金属類や希少元素が使われているが、これらの希少材料を使わない技術を開発しなければ、世界に広く普及する科学技術にはなり得ない。有機ハイドライド変換技術にも Pt 触媒は多用されているが普及が進んだ場合、資源量の問題が露呈するものと思われる。エネルギー・環境に関わる触媒は、その使用量もファインケミカル用途に比べれば桁外れであり、これからのエネルギー・環境に関わる触媒化学技術には材料の普遍性も重要な課題である。

近年、世界的に消費量が増えているのが天然ガス（主にはメタンおよび随伴するエタン・プロパン）である。シェール（頁岩）層からの天然ガスが今後のエネルギー社会には有望であるとの見解を 2009 年に米国が示し、シェールガス革命と呼ばれていることから、シェールガスを含む天然ガスへの依存度は高くなっている。しかし、天然ガスの利用技術は石炭、石油に比べれば歴史も浅く、その有効利用技術の発展は今後重要になってくる。米国では 2008 年からのグリーン・ニューディール政策から、化石資源依存からの脱出、再生可能エネルギーの導入が科学技術のテーマであった。しかし、2013 年にシェールガスの大規模生産が進められるとシェールガス、シェールオイルへの期待からエネルギー価格も下がりエネルギーに対する注目は薄れている。2009 年に設立したエネルギー先端研究計画局(ARPA-E)がリスクの高いエネルギー技術の応用研究に投資を行うなどの政策を行っているが、化学燃料に関するプロジェクトは Electro Fuels、Rebels を除くと非常に少ない。一方で、豊富な天然ガスから合成ガスを作り、その合成ガスからメタノールを作成し、基幹物質とする化学が注目されている。メタノール・トゥー・オレフィンを含むメタノールの需要の伸び（2014 年度の世界需要 6900 万 t/y、今後年率 7%程度の伸びが予測されている）を反映し、メタノールの増産が進められている。メタノール合成触媒については現在も基礎から応用研究まで広く展開されている。代表的な Cu/ZnO 触媒についても未だに活性点の構造及び反応中間体について新たな提案がある。またメタノールの他、合成ガスからの高級アルコール製造用触媒についても報告が散見される。アルカリ金属（Cs の例が多い）を添加した触媒に関する検討が多い。世界的には、2040 年頃までエチレンの生産用は、年 3%程度の増加が予測されており、従来法に加えメタン酸化カップリングを含む新技術の導入も検討されている。アンモニア・尿素については、大規模な新プラントの建設（米国・テキサス州、マレーシア・サバ州など）や生産量の増強（ベトナム、ロシアなど）が計画されている。プロピレンを中心とするアルカン脱水素（酸化的脱水素を含む）によるアルケン製造ならびにブテンからのブタジエン製造については、世界中で継続的に研究が行われている。ブダジエン製造については、アセトアルデヒドヒドを原料とするプロセスのパイロット試験が国内外で行われている。さらに、中国・米国では、ガスから合成軽油を製造するためのプロセスとして、継続的にフィッシャー・トロプシュ合成触媒に関する検討が行われている。Co 系、Fe 系触媒に関する検討が中心であるが、カーバイド系触媒に関する検討も精力的に行われている。これは、石炭の高度利用を意識している結果である。

非可食性バイオマス転換のための触媒として、セルロースの選択的な触媒分解、リグニン分解によるフェノール合成、ポリオールの選択水素化分解、フルフラール類の選択合成などが取組まれている。リグノセルロースの分解、糖類の分解については、触媒のみならず溶媒や反応条件（温度制御、超臨界あるいは亜臨界条件の適用など）の検討が広範に展開されている。福岡（北大）らの研究グループは、国際的に共同研究を展開し、優れた成果をあげている。

さらに、再生可能エネルギーへの期待が大きく、電力として導入されていく再生可能エネルギーを化学燃料に変え、貯める技術（エネルギーキャリア変換技術）にも注目が集まっている。有機ハイドライド、アンモニア、ギ酸などの水素化脱水素の研究が増えているが、これら化学燃料、化学品を生産するプロセスは、ほぼ触媒反応を利用したものである。一次エネルギーの多様化のなか、それに適合する化学プロセスの開発は常に必要であり、その中で触媒技術は中心的なものであるといえる。

日本の触媒製品市場は、価格ベースでは様々な貴金属を使用している自動車排ガス用途が 6 割を占める。他に割合が大きい分野は、石油化学品製造用触媒・石油精製用触媒であり、これらに高分子重合用触媒が続く。いずれの分野の出荷額も 2012 年から増加傾向にある。世界的にも、新興国の経済成長に起因する石油精製用触媒ならびに世界的な環境規制強化による環境保全用触媒の出荷額は堅調に伸びており社会的なニーズも高い。

エネルギーの主体が石炭、石油から天然ガス、バイオ資源、再生可能電力と変遷していく中で、新たなエネルギー源を基とした新たな変換プロセスを開発することが求められている。天然ガスからは水蒸気改質反応で合成ガスが得られるし、バイオ資源は発酵を経ればエタノール資源が得られる。余剰となった再生可能電力は水電解をすれば水素エネルギーに変換できる。これら新たなエネルギー源の利用は、石炭や石油のように 100 年もの研究開発の上に成り立っているものではなく、ごく最近に重要になってきたものである。大学における基礎研究のみならず、実証可能かどうか広い視野での研究が望まれる。新規なプロセスの開発のための時間、リスクは膨大であり、それを支える研究推進体制が必要である。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

<u>排ガス・希少元素関連</u>

- 自動車排気ガス触媒の非貴金属化の研究開発は急速に進歩している。Ag や Cu を基とする合金、ナノポーラス NiCuMnO 金属複合化合物、Sr と Cu を添加した $PrMnO_3$ 系酸化物などが報告されている。また、担体としても従来の Al_2O_3 を基としたものから、近年実用化が進んでいる Ce-Zr 酸化物のもの、希土類酸化物、オキソ酸塩など多様な材料が見出されてきている。

<u>天然資源利用・CO_2 関連</u>

- メタン脱水素カップリングや芳香族化は、熱力学的に高温、もしくはエネルギーを投入し

ないと進行せず、高い収率を実現することが困難な反応である。最近、海外では常識を破る方法でのチャレンジが散見される。有機金属グリーンケミストリーで有名なカナダのグループが、GaN がメタンのベンゼン化を進行させるとの報告や、高分散 Fe 触媒でメタンからエチレンやベンゼンをつくる反応を超高温（1000℃）で行い、高収率で、触媒劣化がないプロセスが提案されたり、またハロゲン化を経由する重合なども見直されている。また、マイクロ波や電場アシスト触媒反応が提案されているが、エネルギー効率の向上が課題となっている。

- メタノール・トゥー・オレフィンについては、日本で 80 年代に流行り、現在では研究者は少なくなったが、欧米は分光学を使った基礎研究を 20 年ぐらい継続し、複雑な逐次・併発反応の原理を明確化しつつある。中国も、基礎研究から一気に実プラントまで実現している。2013 年以降、均一系の触媒、錯体触媒の分野でメタノールから低温、100℃以下、常圧で駆動する高活性な水素生成の触媒が幾つか報告されている。メタノール・トゥー・プロピレンについては、シリコアルミノリン酸塩ゼオライト(SAPO-34 など)を中心に研究が展開されており、最近では、プロピレンとブテンの合計収率が 80%程度に達するなど一定の進展が見られる。
- CO_2 の化学品への変換については、メタノール合成やカーボネート合成が継続的に行われていたが、最近のトレンドの一つとして、合成ガスやメタノールというメチル化剤の代わりに CO_2 と水素の混合ガスを使う系が、錯体触媒分野で報告された。また、CO_2 を酸化剤として用いる低級アルカン脱水素反応に関して報告が散見される。2000 年代から日本では、いくつかの研究グループの検討例もある。アルケンと CO が同時に得られる興味深い系であるが、反応速度のさらなる向上が課題である。また、CO_2 とメタノールからジメチルカーボネートを経由してポリマー合成へと導く研究例も我が国から報告されている。

<u>エネルギーキャリア・水素関連</u>

- アンモニア合成触媒はエレクトライド担体を用いた Ru 触媒が注目を浴びたが、それ以外にも様々な担体が開発されている。さらに脱水素触媒の研究が進められている。
- 燃料電池分野では直接アンモニア燃料 SOFC（固体酸化物形燃料電池）、電解分野では有機ハイドライドの電解水素化など新たな分野の研究の進捗が見られ、エネルギー分野における触媒分野、電極触媒の領域の活性化が見られる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

<u>天然資源利用・CO_2 関連</u>

- JST「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（ACT-C)」（～平成 27 年度）では、二酸化炭素等の安定小分子を資源として活用する反応の研究、工業的な利用につながる不斉炭素-炭素結合生成等の反応の研究、革新的な結合形成等により優れた特性や機能を有するπ電子系分子を創出する研究、π電子系分子に官能基導入を行う等による新機能を創成する研究などを対象としている。
- JST/CREST「多様な天然炭素資源を活用する革新的触媒の創製」（平成 27 年度～）では、化石資源消費の中で天然ガスへの依存が進むなか、天然ガスであるメタンから化成品や液体燃料を直接合成する方法を開発することを目指している。従来、メタンは水蒸気改質反応を経て合成ガス($CO+H_2$)を経由すれば様々な化成品に転換できることは知られている

が、これを直接変換する革新的な触媒開発を目指している。

- NEDO「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」で、既存の化学品などの製造プロセス（ナフサ分解プロセスなど）のグリーン化などを目標に研究開発が進められてきた。光触媒により水分解で創り出した水素と、産業界から排出され回収した二酸化炭素から、基幹化学品を合成するための触媒開発が開始されている。

排ガス・希少元素関連

- NEDO 希少金属代替省エネ材料開発プロジェクトは、希少元素の使用低減を目指すプロジェクトであり、産総研などにより、自動車排ガス触媒の Pt,Pd,Rh の低減、および近年担体として多量に用いられている CeO_2 などの使用量低減技術が見出されている。
- 文部科学省「元素戦略プロジェクト（拠点形成型）」（平成 24 年度～）のうち、触媒電池材料においては京都大学に拠点を置き、自動車排ガス触媒の非貴金属化等に取り組んでいる。経済産業省（NEDO）の「希少金属代替省エネ材料開発プロジェクト」と連携しながら触媒の研究開発に取り組んでいる。

バイオマス関連

- NEDO「非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発」（平成 25～31 年度）では、実用化に向けて高いコスト競争力を有する非可食性バイオマスから化学品までの一貫転換プロセスの構築を目指している。
- NEDO「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」はバイオマスのガス化、液体燃料化（BTL: Biomass to Liquid）を含んでいて、ガス化炉とフィッシャー・トロプッシュ（FT）合成を組み合わせたシステムによって、建築廃材や間伐材からケロシンへの変換なども盛り込まれている。
- JST ALCA の特別重点プロジェクト「ホワイトバイオテクノロジーによる次世代化成品創出プロジェクト」（平成 27 年度～）で、化石資源から脱却した次世代の化成品合成一貫プロセスの研究開発を狙って、従来技術とは非連続的な、バイオマスから化成品等を製造するホワイトバイオテクノロジーの深化が進められている。

エネルギーキャリア・水素関連

- 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「エネルギーキャリア」では、化石燃料依存を低減し、再生可能エネルギーを最大限利用するために、水素のみでなくアンモニア、有機ハイドライドなどエネルギーキャリアに関する研究開発を行っている。触媒分野では有機ハイドライドの水素化脱水素反応装置の実証試験や、直接型アンモニア燃料電池の電極材料などが深く関連している。東京オリンピックまでに水素発電所の実現や、様々な水素実証実験も織り込まれている。
- JST/CREST「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」は、上記の SIP と同様に創設されたプログラムで、新規アンモニア合成触媒や、ギ酸からの水素製造、電解システムによるキャリア製造などを始めとして、エネルギーキャリア生産、利用に関する触媒技術の研究開発を行っている。
- NEDO「水素社会構築技術開発事業」で、千代田化工建設をはじめとする 7 社からなる貴企業グループを助成し、水素の製造・貯蔵・運搬に関して、風力・アルカリ電解による水素製造のモデル実験ならびに褐炭など海外未利用資源からの水素の製造・貯蔵・運搬を行い、国内で利用する水素差プラチェーンの構築に関する実証試験が行われている。

- 川崎水素戦略
  川崎市は千代田化工建設㈱と有機ハイドライド技術に基づいた水素エネルギーシステムを構築することを提言し、この中には商用水素発電所なども含まれている。有機ハイドライド技術は、脱水素反応の白金触媒において、副反応抑制などの技術が鍵となっている。
- 経済産業省 革新的水素エネルギー貯蔵・輸送等技術開発（平成 28 年度から）では、再生可能エネルギー等からの低コスト･高効率で水素を製造する次世代技術ならびに水素を長距離輸送･大規模貯蔵が比較的容易なエネルギー媒体への高効率な転換技術の開発が行われている。

<u>海外関連</u>

- Audi e-gas プロジェクト
  余剰電力と二酸化炭素からメタンを作り都市ガスへ導入する技術を開発している。現在は Audi 社が積極的に後押ししており 6MW クラスの実証実験が進められている。メタネーションはそれほど新しい技術ではないが、水電解からメタネーションまでシステムを変動電源の下で運用し、社会へ導入することを模索している。
- Electro Fuels（2010 年～）
  米国エネルギー省によるプロジェクトであり、余剰電力から液体炭化水素燃料を生産する技術の構築を狙い､生物電気化学的手法を応用することを検討している｡電気エネルギーを用いる方法、水電解から得た水素を還元剤に用いる方法の二通りの方法を用いて、CO_2 の炭化水素燃料化を目指している。ドイツの e-gas プロジェクトが実証試験の大規模化が中心であるのと比較すると、ElectroFuels は基礎レベルの研究を目指していて、実証試験レベルの技術が見出せているとは言い難い。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

一般に不均一系触媒の活性・選択性は、均一系触媒よりも劣るとされるが、最近では均一系と同程度あるいはそれらを凌駕する触媒能を有するものが見出されつつある。不均一系触媒の研究は理論的な体系化が難しく、均一系触媒は大型プロセスに向かないなど、均一系触媒、不均一系触媒にはそれぞれ長所・短所があり、それらの長所を併せ持つような触媒を開発する必要がある。ただ単に、分離・回収・再使用ができるというだけでなく、均一系触媒と同等あるいはそれらを凌駕する活性・選択性を有し、分離・回収・再使用が容易な触媒を開発することが必要である。そのためには、均一系触媒研究者と不均一系触媒研究者のより密な連携をはじめ、多様な分野間の連携が必要となる。

触媒化学分野に直結した領域に電気化学（電極触媒）がある。これらは、本来、界面での電子の授受があるかないか、反応生成物が蓄積するか定常的に流通するかどうかなど、僅かな違いがあるのみで、本質的には固液界面での表面化学反応を使いこなすのが鍵となる領域である。

また、プロセス工学との連携は重要であり、マイクロリアクターの採用なども積極的に検討する必要がある。最近、マイクロフローリアクターによる医薬品化合物を含む複雑化合物の合成例が報告され始めており、中には、不均一固定化触媒だけで医薬有効成分を合成した

例もある。さらにナノ粒子の合成など触媒を含む機能性材料の合成に有用なツールとして利用されている例も増加している。

さらに基礎的な取組として熱力学についても触媒分野や電池分野で重要となる濃厚系を記述する新たな理論体系が必要と考える。理論計算に基づいた反応メカニズムの提言ができる研究者との協調は重要である。界面化学反応の理論計算は現在最も成長している計算機化学分野であるが、萌芽的レベルであり、不均一系の触媒のモデル化などで課題が多い。また理論計算の結果を裏付ける、基礎科学的な実験研究者も必要である。

触媒化学領域は、触媒のナノ構造を構築し機能を発現させることが、ナノテクノロジーが謳われた頃からの研究のトレンドであり、微細な構造の触媒を構築する技術は大学等に十分な蓄積がある。これらを現実的にエネルギー・環境に直接関与する触媒に応用するためには、ナノ構造制御を得意とする研究者、実用触媒の性能評価が得意な研究者が連携して研究を推進できるような枠組みも必要である。

［今後取組むべき研究テーマ］

我が国が利用する化石エネルギーが、石油中心から天然ガス（シェールガス）などに変わりつつあるので、この有効利用は重要である。シェールガスの他燃料への変換反応や、シェールガスからの化学品生産（メタンに代表される低級アルカンからのブテン・ブタジエン・BTX合成・重質炭化水素資源の高効率転換及び脱硫プロセスなど）は、水蒸気改質反応を通して行わなければならず、他の反応経路の科学技術は未成熟である。特に、メタンについては、直接変換が重要である。また、中国・北米で大規模な生産が進められているメタノールについて、我が国ではその化学的利用のための触媒開発が遅れており、産業界も含め危機感を持った研究開発が必要である。

非可食性バイオマス、木質系バイオマス資源の有効利用は今後も重要になってくる。欧州でのエネルギー需給におけるバイオマス資源の割合は高い。発酵を経る生物的手法のみならず、ガス化、液体燃料化による化学的なバイオマスの直接変換技術の研究開発は今後も重要である。例えば、非可食性バイオマス（セルロースやリグニンなど）の発酵によって得られた低濃度エタノールをダイレクトに水蒸気改質する反応は吸熱反応であり、これにより高濃度水素へと一段で転換可能である。このための触媒は現在400℃以下でも活性を示しており、今後さらなる低温化（触媒の高活性化）を図ることで、排熱を利用した熱回収型（エクセルギー再生型）水蒸気改質が可能になれば、これまで捨てていた熱を回収して用い水素へと再生することで、再生可能エネルギー利用、水素製造とエクセルギー回収が同時に実現可能となる。また、リグニンからの化学品合成においても、製紙産業と化学産業の規模感の一致を考えると重要なものとなる。

自動車排気ガス浄化触媒もこれからの研究テーマとして重要である。まず、Pt,Rh,Pd や CeO_2 などの希少材料に依らない排ガス処理触媒の構築は、世界に広く排ガス触媒を普及させるためにも必須の技術である。また、ディーゼルエンジンやリーンバーンエンジンの NOx 吸蔵型排気ガス触媒についても、今後更なる改良が必要である。この種の触媒は吸蔵・除去のサイクル運転が複雑であり、NOx の除去のためには燃料を無駄に使う運転サイクルが必要

である。将来的には NOx そのものを酸素共存下でも N_2 と O_2 に直接分解する触媒の実現が求められる。

また、CO_2 をエネルギーキャリアであるギ酸へと転換する触媒や、化学品に誘導する触媒系の多様化も望まれている。水素キャリア（アンモニア・有機ハイドライド・ギ酸・メタノールなど）の製造・利用のための触媒技術も今後その重要性を増すと考えられる。

（５）政策的課題

旧来からのディシプリン間の人的、技術的障壁は厚く、これらを超えたコミュニティ作りが革新的な触媒を生み出すための最重要課題である。

エネルギー・環境に関わる技術は、国のエネルギー政策や環境基準などに大きく研究が左右される。東日本大震災を経験した我が国は、エネルギーシステムの脆弱さを痛感し、欧州諸国のような再生可能エネルギーの大量導入を掲げた。しかし、エネルギー輸入額の高騰、原子力発電の存続廃止問題、シェールガス革命による石油価格の低迷など、我が国のエネルギー情勢が不安定であり、エネルギー政策が安定かつ持続的でない今日では、エネルギーに関わる研究開発も触媒分野のみならず全てが不安定である。

また、近年は内閣府、経済産業省、文部科学省が連携して特定の研究課題に取り組んでいるプロジェクトも多く見られる。前出の元素戦略プロジェクトやエネルギーキャリアプロジェクトなどは省庁横断型として進められている。産官学の連携はエネルギー、環境分野では特に重要であり出口を見据えた基礎研究が必要であるので、多方面の省庁の連携は重要である。実用に際しては、国内のみでの展開ではなく海外展開を見据えた戦略が必要である。

（６）キーワード

燃料変換、エネルギーキャリア、バイオマス転換(BTL)、シェールガス、天然ガス変換(GTL)、自動車排ガス触媒、ディーゼル排ガス触媒、NOx 除去、CO_2 削減

（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	◎	↗	一時期のナノ構造構築を目指した触媒研究から、新規応用のための触媒研究に変化しつつある。また、有機ハイドライド、アンモニア、ギ酸などエネルギー物質の生産を掲げたプロジェクトも多く、自動車排ガス触媒の非貴金属化なども重点的に進められている。 低級アルカン（メタン・エタン・プロパン等）を効率的に化学物質に変換する技術、メタノール（将来的には合成ガス）を利用したアルケン製造技術について世界をリードするポテンシャルを持つ。 バイオマス変換触媒の研究開発は世界レベルにある。 再生可能エネルギーからの水素製造、特に光触媒・人工光合成の研究開発については世界をリードしている。光電気化学的なアプローチは急増している。 水素製造技術（水蒸気改質・オートサーマル改質・部分酸化・水電解）に関して世界レベルにある。また、水素の貯蔵・輸送に必要な要素技術では世界レベルにある。

				放射光など大型施設を利用した研究は、広範な範囲で優れた成果を挙げている。
	応用研究・開発	○	↗	産総研福島再生可能エネルギー研究所の設立や川崎水素戦略、オリンピック村水素タウン構想など、水素サプライチェーンに関する研究・開発が増加している。ただし一方、エネルギー価格が低く、バイオマスを含む再生可能エネルギーへの注目は薄れつつある。石炭転換については、実証・実用の面で遅れがある。低級アルカンを効率的に化学物質に変換する技術、メタノール（将来的には合成ガス）を利用したアルケン製造技術について世界をリードするポテンシャルを持つ。しかし、国内での展開ではなく海外展開を見据えた戦略が必要である。特に、メタンについては、直接変換が重要であり産学での研究が進む。 民間企業は省エネ化につながる運転条件の変更、プロセスの改良によって着実にグリーンプロセスを実践してきた。しかし、アジアや中東、北米のエネルギー事情などに押され、新規プロセスの実用化は国の補助頼みであり、企業独自での新規プロセス開拓意欲が乏しい。
米国	基礎研究	○	→	グリーン・ニューディール政策以降、太陽光利用など新規な再生可能エネルギー技術に向けられていた研究開発支援が、昨今のシェールガス革命、エネルギー価格の低迷で、研究開発支援も低調になっていると考えられる。 全体的に、エンジニアリングに注力した研究が増えつつあると感じられる。 合成ガス経由での燃料油製造（フィッシャートロプシュ合成）に優位性を持つ。
	応用研究・開発	○	→	シェールガスが開発されたことで、エネルギー需給が天然ガス、石油とも安定していて、新奇な触媒技術が見出されてはいない。エチレンの製造、アンモニアの製造に関するプロセスの新規導入・増産が進んでおり、世界展開を図っている。シェールガス由来の合成ガス製造、これを原料とするメタノール合成、アンモニア合成の大型プラントの稼働が進み、関連技術が発展している。テキサス州では、メタン酸化カップリングによるエチレン製造のデモプラント(1t/day)の稼働が開始されている。
欧州	基礎研究	◎	→	HORIZON2020において広範な取り組みが行われている。欧州はドイツを始め、基礎表面科学から実用触媒まで幅広い基礎研究の基盤を有していることが特長である。日本のように実験室での目先の性能に捕らわれない、本質を追及する科学研究の体制が整っている。応用物理や計算機化学などの分野で触媒を研究している研究者も多く、応用研究に集中しがちな日本とは対照的である。 メタンからメタノールへの直接酸化について現在、最も優れた系の報告がある。また、ドイツではPower to Gasによる再生可能エネルギーからメタンへの転換触媒の技術が実用を視野に開発が進められている。 放射光を用いたOperando分析を利用し、活性点構造の解析や反応機構の解析で世界をリードする研究者が活躍している。 自動車排ガス（特にディーゼル関連）触媒での優位性がある。これは、欧州でディーゼルエンジン普及率が高いことを反映している。
	応用研究・開発	◎	→	Audi e-gasプロジェクトなど、エネルギーに関して最大級の実証実験を進めている。再生可能エネルギー導入量、バイオマス導入量などエネルギー政策に関して常に進んでいて、それに見合う技術を有している。 ディーゼルエンジン車の自動車排ガス触媒などもBASF, Johnson Matthey, Umicoreなど欧州系企業が主導していると考えられる。
中国	基礎研究	○	↗	中国はエネルギーや環境に関わる触媒化学に関しては優秀な科学者を多く抱え、精力的に研究をしている国である。他の研究領域より触媒化学領域は応用化学よりの側面が強く、古くより中国の化学の中心的な立場にある。 石炭由来の合成ガス経由での燃料油製造（フィッシャー・トロプシュ合成）について優位性をもつ。 バイオマス変換触媒の研究開発は盛んであり世界レベルにある。
	応用研究・開発	○	↗	石炭ガス化による合成ガス製造、これを原料とするメタノール合成、アンモニア合成の大型プラントの稼働が進み、関連技術が発展している。これに付随してMTP（メタノール・トゥ・プロピレン）についても世界でも最大規模の検討が進められている。 中国の環境浄化触媒の実装の遅れは諸外国に比べ遅れは顕著である。しかし2012~2014年には火力発電所の脱硝が義務付けられるなど対策は進められており、今後、環境保護の観点から環境触媒の導入を急ピッチで進めると予測される。触媒の基礎研究は一定の科学技術を有しているが、社会応用に進まない同国の社会的な欠点が露呈している。

韓国	基礎研究	△	→	エネルギー変換型光触媒やアンモニア電解合成、ゼオライト・規則多孔性炭素（CMK）など多孔体の研究について世界レベルにある。最新の研究課題に取り組む研究者が迅速に増えるため、日本よりも柔軟に研究課題を選べる体制である。光触媒の研究レベルは比較的高い。
	応用研究・開発	△	→	触媒技術には一定のレベルを有しているが、特に国際的に際立ったものは見られない。触媒化学分野の成長は顕著ではない。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

1) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー･材料分野（2015 年）」
2) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書・環境･エネルギー分野（2015 年）」CRDS-FY2015-FR-02
3) JST-CRDS「俯瞰ワークショップ報告書 平成 27 年度エネルギー科学技術分野 最新研究開発動向」
4) JST-CRDS「米国 ARPA-E（エネルギー高等研究計画局）の概要」CRDS 海外動向ユニット、http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FU/US20140620.pdf
5) 触媒年鑑 2016 触媒学会編
6) 文部科学省科学技術・学術政策研究所（NISTEP） サイエンスマップ 2014
7) NEDO ロードマップ（エネルギー・基礎化学品分野の触媒開発ロードマップ、環境保全分野の触媒開発ロードマップ、機能性化学品製造分野の触媒開発のロードマップ等）
8) 触媒学会「触媒技術の動向と展望 2016」
9) 触媒学会「触媒技術の動向と展望 2015」
10) 触媒学会「触媒技術の動向と展望 2014」
11) Lu Li; Xiaoyue Mu; Wenbo Liu; Xianghua Kong; Shizhao Fan; Zetian Mi; Chao - Jun Li, Angew. Chem. Int. Ed. 2014, 53, 14106 –14109
12) Yuehui Li; Tao Yan; Kathrin Junge; Matthias Beller, Angew. Chem. Int. Ed. 2014, 53, 10476 –10480
13) Marc D. Porosoff; Myat Noe Zin Myint; Shyam Kattel; Zhenhua Xie; Elaine Gomez; Ping Liu; Jingguang G. Chen, Angew.Chem. Int. Ed. 2015, 54,15501 –15505
14) Masato Yoshioka, Toshiyuki Yokoi*, and Takashi Tatsumi, ACS Catal., 2015, 5, 4268
15) Jie Sun, Shaolong Wan*, Fen Wang, Jingdong Lin, and Yong Wang, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2015, 54 (32), pp 7841–7851
16) Thomas Lunkenbein; Julia Schumann; Malte Behrens; Robert Schlögl; Marc G. Willinger, Angew.Chem. Int. Ed. 2015, 54,4544-4548
17) Hiroyuki Miyamura; Arisa Sonoyama; Davit Hayrapetyan; Shū Kobayashi, Angew.Chem. Int. Ed. 2015, 54,10559 –10563

18) 特開 2013-212948, 仁科勇太（岡山大学）

19) Ken - ichi Fujita; Ryoko Kawahara; Takuya Aikawa; Ryohei Yamaguchi, Angew.Chem.Int. Ed. 2015, 54,9057 –9060

3.26　分離技術

（1）研究開発領域の簡潔な説明

分離技術とは、混合物から目的成分を取り出す、または不要物を除くものである。

ここでは、気体・液体の分離技術、鉱物資源・固体の分離技術を対象とする。気体・液体の分離技術では、工場から排出される CO_2 を分離・回収する技術や、いわゆるオイルサンドやシェール層の開発時に生ずる大量の随伴水・汚染水の分離技術を対象とする。鉱物資源・固体の分離技術では、低品位化が課題となっている鉱山からの希少金属(レアメタル)の分離・濃縮や、使用済み家電製品を鉱山に見立て（都市鉱山）、そこからの有用資源(レアメタル)の分離技術を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

● CO_2

CO_2 の分離回収は、地球温暖化対策として発電部門では再生可能エネルギーや原子力とともに、また鉄鋼業やセメント業などの産業部門でも CO_2 排出削減のための重要な低炭素化技術と位置付けられる。しかし、分離・回収部のコストおよびエネルギーペナルティがまだ大きく、低コスト化、高効率化が必要である。

● 随伴水・汚染水

石油や天然ガスの採掘時に伴って産出される随伴水・汚染水（ここでは随伴水と総称する）の排出量は、1 日あたり 6400 万トン（2016 年）と言われ、10 年に 2 倍になる勢いで増加している。その処理費用は、年間 4 兆円にも達しており、年率 6%で増加している。特に、非在来型の油田・ガス田では、随伴水の処理費用が急激に増加しており、低コストかつ効果的な処理技術の開発が要請される。

● 鉱山からの希少金属

金属は鉱石から選鉱･製錬を経て分離される。選鉱は物理選別とも呼ばれ、鉱石中を粉砕し有用成分を含む部分を濃化する工程である。製錬は、選鉱で得た精鉱を元素単体(あるいは合金)に分離する工程であり、一般に、99%以上の濃度まで高純度化される。我が国は、資源･エネルギーコストで圧倒的に不利であるにも関わらず、国内で、Fe、Cu、Zn、Pb、Ti、Ni、Co、V、Bi、Sn、貴金属、半導体 Si 等々の製錬が行われ、自動車から各種電化製品を含む製品の高い開発力の源泉となっている。近年、利用可能な鉱石は少しずつ難処理化しており、有用金属成分の濃度は減少し、銅鉱山の鉱石中の銅濃度は、僅か 0.5%程度であり、採掘された鉱石のほとんどが鉱山で有効利用方法のないまま”ずり”として堆積され環境破壊を引き起こしている。また鉱石中にはヒ素や水銀など有害とされる忌避成分が共存することも多い。これらの鉱石に対して全量を熱や薬剤、電気で溶かしてから分離濃縮する方法は、投入エネルギーが膨大となり環境負荷も大きい。

他には、ニッケル鉱山では広大な面積の熱帯雨林を破壊しており、希土類、錫の生産では、随伴するウランなどの放射性廃棄物の処理が問題となっている。このように、製錬業は、国内産業の

持続的発展ならびに我が国の資源セキュリティー、世界的な環境保全の観点から、新たな技術開発が求められている。

● 都市鉱山からの希少金属

近年では、都市鉱山（有用金属を含有する廃棄物）の重要性が高まり、電子廃基板からのレアメタルの回収などで銅製錬、亜鉛製錬、鉛製錬が資源循環に利用され、これら製錬業が国内に存在することの意義が改めて認識されている。そして、都市鉱山の有効利用は、海外の鉱山サイトで新たな環境破壊を起こさないという、グローバル視点での貢献が期待できる。

しかし、都市鉱山は、資源としての有用性に加えて、最終処分場の逼迫や、環境規制物質の管理、資源セキュリティの観点から、多種多様な金属の回収が求められている。都市鉱山を対象とした前処理に関しても、固体を固体のまま分離濃縮する技術であることから、有用金属の含有濃度は鉱石に匹敵するかあるいはそれ以上であっても、その鉱物学的形態は鉱石と全く異なるため、比較的長い歴史を有する鉱石に対して培われた選鉱技術をそのまま都市鉱山に適用することはできず、都市鉱山に適した新たな前処理技術開発が必要不可欠である。

［動向（歴史）］

● CO_2

CO_2の分離・回収は、対象とするガスの性状や目的とするCO_2回収率、CO_2純度などに応じて種々の技術を使い分ける必要がある。分離・回収技術を原理によって分類すると、吸収法、吸着法、膜分離法、深冷分離法などがあり、吸収法には化学吸収法と物理吸収法がある。対象ガスによって分類すると、燃焼後回収（Post-Combustion）、燃焼前回収（Pre-Combustion）、酸素燃焼回収（Oxy-Combustion、Oxy-Fuel）に大別される。

燃焼後回収は、石炭焚き火力発電所ボイラなどの燃焼排ガスからCO_2を回収するもので、通常はほぼ大気圧で運転される。排ガスの圧力が低く、CO_2濃度も低いので、回収技術としては、通常はCO_2との反応性が高い溶液による化学吸収法が使われている。燃焼前回収は、化学プラントなどでの水蒸気改質ガスからのCO_2除去や、天然ガスからのCO_2除去、石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated Gasifierd Combined Cycle）など、石炭の部分酸化により生成したH_2、CO、CO_2などからなるガスからCO_2を分離・回収するもので、一般に圧力が高いガスに適用されるので、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法が適用される。燃焼中回収は、事前に酸素製造装置により空気中の窒素を除去し、酸素で燃焼することによって燃焼排ガス中の窒素濃度を低く抑え、CO_2を濃縮してCO_2回収を容易にするシステムである。なお、燃焼排ガスからCO_2を回収するプロセスでは、含まれる酸素、硫黄酸化物、石炭灰などの影響も十分に考慮する必要がある。

ほぼ大気圧で運転される石炭や天然ガスの火力発電所や、セメント・鉄鋼プラントでは化学吸収法が適用されている。化学プラントや石炭ガス化複合発電（IGCC）のような高圧で運転されるプラントでは物理吸収法が有利とされている。化学吸収法には使用するアミン化合物により吸収特性が異なり、高圧に適した吸収液がある。CO_2分離では、吸収液から高純度のCO_2を放散させる「CO_2の再生」に最も大きなエネルギーを消費する。再生温度は120℃程度であり、低品位のエネルギーである。この低品位エネルギーのシステム

内での発生方法、あるいは周辺の熱が余剰のプラントからの供給方法によって、経済性に大きな影響を与える。燃焼後回収の CO_2 回収技術に関して、三菱重工業は国内の研究資金を活用して、2008 年頃まで 10ton-CO_2/日規模の技術開発を国内で試験を行った後、米国のサザンカンパニーと共同で、サザンカンパニーのバリー（Barry）火力発電所において CO_2 500ton-CO_2/日の実証試験を 2012 年～2014 年実施した。J-Power と日立製作所が若松発電所において 24ton-CO_2/日規模の MDEA を吸収剤として用いる化学吸収法と、Selexol 吸収液を用いる物理吸収法による試験を 2014 年 3 月に完了した。

● 随伴水・汚染水

2016 年の推定では、随伴水の 89%は、在来型の油田・ガス田から生じている。原油は、砂岩や石灰岩などの貯留岩の中に閉じ込められており、通常、水と一緒に存在している。油井の掘削直後は、原油のみが自噴する場合があるが、通常は、幾分かの水と一緒に噴出する。原油の産出を開始してから 5 年ぐらい経つと、随伴水の割合が増加してくる。これは、油層圧が低下するにつれて自噴能力が下がるため、ポンプ採掘や高圧ガスを圧入するガスリフトなどの方法がとられるためである。このような方法を用いても原油の産出量が低下してくると、水攻法と呼ばれる方法により増産が検討される。これは、油層に水を打ち込むことで生産量を維持し、原始埋蔵量（貯留槽中の原油の総量）の 4 割程度を回収するのである。この段階になると、随伴水の量は益々増加し、体積にして原油の 4～6 倍に達する。最近の原油の生産量：276 億バレル（2012 年）（0.756 億バレル／日）と随伴水の排出量：3.05 億バレル／日（2012 年）を比較すると、多くの油田で大量の随伴水を排出していることが伺える。（オマーンでは、2004 年に石油の 6 倍の随伴水が出ていたが、2013 年には石油の 24 倍になっている。国によっては、非常に深刻な問題である。）

天然ガスの生産でも状況は類似しており、最初は少ないが、徐々に随伴水の排出量が増えてくる。例えば、米国の Offshore のガス田では、水とガスの比（WGR, water gas ratio）が 90 バレル／100 万立方フィートぐらいになっており、ガスの重量に対して 7 割程度の随伴水が排出している [1)]。在来型ガス田における随伴水の量は、内陸と海洋、あるいはガス井によって大きく異なる。中東の大規模洋上ガス田では、随伴水をガスと一緒に陸上までパイプラインで運び、圧入井に廃棄している。圧入井を長期的利用や生活用水の確保のためにも、随伴水の再利用は重要な課題となっている。

1990 年ぐらいから海底 500 メートルを超える深海での石油開発が始まり、2000 年以降のオイル価格の高騰により、大深水での石油開発が活発となった [2)]。この分野の技術の進展は著しいものがあり、現在では海底 3000 メートルぐらい油田でも開発することが可能となった。2012 年のデータでは、石油生産における海底油田の割合は 27%となっており、長期的には大きくなるものと考えられる。

2000 年以降のオイル価格の高騰は、非在来型資源の開発も活発化させた。中でも重質油の開発は、随伴水の総量の 5%程度に及んでおり、今後も増加傾向にある。その代表格は、アルバータ（カナダ）のオイルサンド開発であろう [3)]。ここでは、地下数 100 メートルにある重質油を含むサンド層に連続的に水蒸気を注入し、流動性を得た重質油を回収している。この方法は、SAGD（Steam-Assisted Gravity Drainage）法と呼ばれており、生産される重質油の 2 倍程度の水を必要とする。また、重質油は、多量の随伴水と一緒に回収さ

れるため、その処理コストも大きい。

非在来型資源として、CBM（Coalbed Methane）やシェールガスの開発も盛んになっている。これらの随伴水の生成量は、それぞれ全体の 3%（CBM）、2%（Shale gas/Tight oil）を占める。2020 年には、CBM 由来の随伴水の割合が微増し、350 万トン／日程度になると予想されている。

随伴水の処理コストは、2014 年の時点で、379 億ドル（約 4 兆円）と見積もられている。コストの内訳としては、随伴水の輸送と廃棄（圧入など）が 8 割を占め、水処理費用と水処理のための設備投資がそれぞれ約 1 割を占める。水処理設備のみの市場は、3500 億円／年程度である。海底の油田やガス田の開発に限定すると、水処理設備の市場は 1800 億円／年と見積もられている。

随伴水処理の要素技術は、以下の通りである。

・HP Pressure Production Separator

スラッジを除去したのち、高圧のタンクの中で随伴水、原油、ガスの 3 相を重力で物理的に分離する。通常、50～100 気圧で運転され、原油や天然ガスから随伴水を分離するために一般的に用いられる。天然ガスの場合、高価なコンデンセート（ナフサ）を分離するためにも用いる。この場合、加圧前に冷却操作を行う。

・API セパレーター

常圧で重力によりオイルを分離する装置。直径 150 マイクロメートル以上のオイルは、この装置で除去できる。コアレッサーと呼ばれる波形の平行板をもつ構造のものは、直径 50 マイクロメートル程度のオイルを除去できる。これらの一次処理より随伴水中のオイル濃度は 300 ミリグラム／リットル以下になる。

・Gas Flotation

API セパレーターなどの一次処理が終わった随伴水に窒素ガスを吹き込む、コロイド状のオイルを気液界面に移動させる。これにより、直径 20 マイクロメートル程度のオイルを除去できる。凝集剤を加えることで、除去効率が向上する。

・Hydrocyclone

細長い円錐状の筒の中に随伴水を勢いよく注入することで、分速 3000 回転ぐらいの渦を発生させ、遠心力により軽いオイルを中心部に集めて分離する。これらの二次処理により、直径 10 マイクロメートル程度のオイルまで除去でき、随伴水中のオイル濃度は数 10 ミリグラム／リットル以下になる。

・Media filtration

砂ろ過、無煙炭やクルミ殻などを介したろ過により、オイル成分を吸着させる。複数吸着材を詰めたカラム（multimedia filter）単純であるが、随伴水中のオイル濃度は数ミリグラム／リットル以下にでき、TOC（total organic carbon）や TSS（total suspended solids）値を下げることができる。塩分濃度が高い随伴水の三次処理には特に適しているが、吸着材の入れ替えが問題となる。

● 鉱山からの希少金属

選鉱の歴史は有史以来とも言われているが、最古の記録と言われるのは、1556 年にドイ

ツの鉱山学者ゲオルク・アグリコラが執筆した鉱山書「デ・レ・メタリカ」であろう。戦後復興期は、主にアメリカから、大型選鉱機械の製造法や、水へのぬれ性の違いを利用して分離する技術である浮選に関する選鉱技術が導入され、技術の合理化を図り分離成績を向上させる試みが行われた。しかし、国内の鉱山は、貿易自由化や為替変動制の影響を受けて、海外鉱山との熾烈な国際競争に直面するようになったと共に、戦時中の乱開発などに起因する環境悪化に対する改善対策などが経営上の負担となり、閉山が相次いだ。そのような中、1955 年に秋田県北部で「黒鉱型銅鉱床」と呼ばれる銅鉱床が相次いで発見され、一大開発ブームとなった。この黒鉱とは、銅と亜鉛、鉛などが混在した複雑硫化鉱であり、当時は日本に特有で独特の鉱床であったため、分離技術に関しても浮選を中心に日本で独特の技術が開発され、選鉱技術の発展につながった。しかしこの黒鉱型鉱山も資源が枯渇し国内では 1994 年にすべて閉山した [4,5]。

基本的に鉱山の近くで実施される分離技術である選鉱は、1990 年代にほとんどの国内鉱山が閉山し海外鉱山へ進出したのと共に海外で実施されることが多くなり、自然と国内での選鉱技術研究は減速した。一方、国内には環境対策だけが必要な休廃止鉱山が残り、極度なコストダウンを求められる状況下での確実な重金属処理を達成する環境浄化技術が、分離技術の 1 つとして大きく発展した。現在でもこの環境浄化分野では日本が高精度で確実な分離技術を有する。

この間、海外で開発された分離技術として特筆すべきは、SX-EW（solvant extraction and electrowinning）法である。この方法は、それまで利用が困難であった低品位の酸化銅鉱石から銅を酸で直接進出させ、溶媒抽出法を用いて電解液まで浄化、濃縮し、電解採取法に供するというものである。1960 年代にアメリカで溶媒抽出法が開発されたことに端を発するが、1980 年代の銅価格の低迷期にアメリカでのコスト削減策として採用され広く実用化された。この方法は世界の主流を占める硫化銅鉱等の鉱石種では銅浸出が進まないという課題をかかえており、現在も技術開発が続けられている。

また、難処理化鉱石を対象とした微粒鉱石の分離技術に関しても技術開発が進められた。より小さな気泡を利用して分離するマイクロバブル浮選や、高勾配型磁選機、流動層の原理を利用するネルソン型比重選別、あるいは薄流選別の応用であるファルコン型比重選別や MGS(Multi gravity separator)などが開発され、現在もさらなる高効率化の努力が続けられている。

21 世紀に入ると、中国をはじめとする新興国の資源消費量が爆発的に増え、資源は高騰し濃度が高く質のよい鉱石が入手しづらくなったことから、再び選鉱技術開発の重要性が認識されるようになった。資源セキュリティの面から、海底熱水鉱床、レアアース堆積物、コバルトリッチクラスト、マンガンノジュールといった日本近海に賦存する海底鉱物資源を対象とした分離技術の確立も求められている。

● 都市鉱山からの希少金属

都市鉱山とは、地上に蓄積された使用済み製品を資源とみなし、資源をそこから積極的に取り出すことを試みる概念であり、1988 年に東北大の南條道夫教授らによって提唱された。1990 年代には各種リサイクル法が制定され、対象品目ごとに前処理技術の開発がすすめられた。この時期は上述の国内鉱山の相次ぐ閉山ならびに海外鉱山への進出の時期と重

なっており、多くの選鉱技術研究者がリサイクルのための前処理技術研究に着手した。都市鉱山を対象とした分離技術は、当初は古くから鉄スクラップ業界で培われたシュレッディングと、比重選別や磁選などの組み合わせであったが、1984 年にフランスで開発された渦電流選別の導入によって、アルミニウムや銅の選別が可能となった。

都市鉱山の分野では、難処理鉱石に求められる微粒に対する分離技術に加えて、塊状粒子を対象とした分離技術の開発も求められている。対象を検知・識別するセンサー部と、実際に圧縮空気やパドルなどで分離する部分とからなるソーティング技術はその有用な手段の 1 つであり、古くから色度を識別して分離するカラーソーティングは選鉱や前処理にも導入されていたが、近年では近赤外線・X 線・レーザーなどを利用して分離する技術が積極的に開発されている。

都市鉱山に求められる分離技術は、鉱石を対象とする分離技術以上に、法制定や政策によって大きく左右されるのが特徴である。特に 2010 年～2011 年には中国の輸出制限政策によりレアアースが急騰し、国内ではいくつかのレアメタルを対象とした分離技術の開発が加速した。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

● CO_2

石川播磨重工業は酸素燃焼技術開発を豪州クイーンズランド州の Callide A 発電所で進めた。2006 年 3 月にスタートし、2012 年 12 月～2015 年 3 月まで実験を実施し、のべ 5000 時間の CO_2 回収試験を行い、70ton-CO_2/日規模の試験を完了した。

米国では CO_2 規制が厳しく、CCS を設置しないと石炭火力発電所が規制をクリアできなくなった。オイルシェール田からの天然ガスの価格が安価であり、石炭から天然ガスへの燃料転換を行うと発電量当たりの CO_2 発生量が半分となるので、天然ガスへの燃料転換が CO_2 削減対策のフロントランナーとの位置付けとなる。

● 随伴水・汚染水

2014 年の夏ごろから油価が大幅に下落しており、油田やガス田の新規開発は、延期や保留になっているケースが見られる。世界の原油生産量は、伸び悩んでいるが、減ってはいない。比較的生産コストが高いカナダの重質油であっても、生産量が緩やかに増加することが見込まれている [6]。一方、随伴水の海洋投棄や地下への圧入に対する規制は、年々厳しくなっている。在来型の油田・ガス田では、年々随伴水の量が増加しており、非在来型の資源開発では、随伴水処理の新技術への期待が大きい。この分野の新たな技術動向には、以下のようなものが上げられる。

・ Sulfate 除去

海底油田の二次回収増産のために、海水中の Sulfate 濃度を NF 膜で 100 ミリグラム／リットル以下にして、油層中に圧入する技術が普及しつつあり、年間 400 億円程度の市場が生まれている。特にブラジル沖の海底油田では、このシステムが確立している。現在、RO 膜を用いて脱塩した海水と処理後の随伴水を混合し、圧入する技術が北海油田で検討

されており、BP はこのシステムに 120 億円を投資している。海洋油田の随伴水は、現在、84%が処理後に投棄されており、圧入は 13%に過ぎない（残りは、陸上に輸送）。しかし、今後は、圧入に再利用されるケースが増えるであろう。

・MPPE

随伴水の海洋投棄の規制が厳しくなり、吸着材を用いて三次処理を行うケースが増えている。その中で、高分子系の吸着材を用いたオイルの除去技術（MPPE, Macro-Porous Polymer Extraction）が普及しつつある。MPPE では、随伴水の有害成分である BTEX（Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene）を吸収し、スチーム処理により再生する。この処理は、有害物質のゼロエミッションの方針にマッチしており、その有効性が北海油田（ノルウェー）での実証されている。MPPE は、最近、オーストラリア西岸の LNG プラント（Inpex Ichthys, 2017 年から操業予定）からの随伴水処理にも適用されており、今後の展開が期待できる。なお、Ichthys は、日本初の LNG 大型プロジェクトとなる。

・セラミック膜

セラミック膜は、hydrocyclone や flotation の代替技術として注目されてきた。膜が高価であり、ファウリングしやすいなどの問題があり、利用範囲が非常に限定されていたが、最近、海底油田のプラットフォームでの利用が拡大しつつある。Liqtech 社のシリコンカーバイド膜は、北海油田での随伴水処理のためのフルスケールユニット設置が検討されている。

● 鉱山からの希少金属

・METTOP-BRX-TECHNOLOGY 法

METTOP-BRX-TECHNOLOGY 法は新しい銅電解精製のための電解槽が従来の電解槽の 1.5 倍の速度で高速電解を行うことができると主張。一部の企業で商用化されている。（オーストリア METTOP 社）

・Armstrong 法

Armstrong 法は、$TiCl_4$ の Na 還元によるチタンの製造法であり、粉末の製造に適している。2010 年には、年間 1800 トンの商業生産を開始すると報告していたが、現時点での生産能力は不明である。（サウジアラビア Cristal 社 [7]）

・鉱石からの浸出促進

SX-EW 法は低品位鉱の開発を可能にする画期的な技術革新であったが、硫化銅鉱石に対しては高効率に浸出できないという課題を有することから、バイオリーチングや、酸化促進、触媒活性化あるいは不働態形成防止などの目的による薬剤添加、加温や加圧といった試みが研究されている。また、超微粉砕による比表面積増加、あるいはメカノケミカル反応による浸出促進も研究されている。

● 都市鉱山からの希少金属

・単体分離を促進するための新規粉砕技術

高効率に単体分離を達成するために異相境界面に選択的に応力が加わるような粉砕技術が開発されている。具体的には、電気パルス粉砕、マイクロ波粉砕、圧力を利用する HPGR

（High Pressure Grinding Roll）などが検討されており、難処理鉱石や都市鉱山への有用性が確認されている。この中でHPGRは、すでにいくつかの海外の鉱山やセメント業で実用化されている。また、その有用性を確認するために、単体分離を測定する特殊固体分析技術であるMLA（mineral liberation analysis）が積極的に導入されている。さらには、特殊粉砕技術を可視化し、内部状態を詳細に明らかにするためのシミュレーション技術も開発され、選鉱をメインターゲットにした市販ソフトも製品化されている。

・都市鉱山を対象としたソーティング技術

比較的粗粒状態で高度に単体分離された塊状（現状では10mm以上）粒子については、各種のセンシング技術を利用したSensor Based Sorting（日本語的にはソーティング）が有効であり、従来型の確率的分離である固相分離（比重選別・磁選・電気的選別等々）では達成し得なかった（理想分離に近い）高度な分離が可能となる。例えば、アルミ合金類の相互分離は従来型の固相分離では不可能であったが、数年前より、透過X線および蛍光X線ソーティングを組み合わせることにより実用化プラントが建設され始めた。LIBS（Laser Induced Breakdown Spectroscopy）を利用したソーティング技術も世界に先駆けて日本で開発され、実用化の一歩手前まで進んでいる。この分析技術の特徴は水素からウランまでほとんどすべての元素の分析がppmオーダーで可能なことであり、今後、特にミックスメタルおよび鉄合金の相互分離等への適用が期待される。また、プラスチック類の相互分離においては、10年ほど前より近赤外線（NIR）吸収を利用したソーティング技術が実用化されており、日本に限らず世界中で採用されている。この分野の最新技術としては、ラマン分光やテラヘルツ波吸収特性を利用するものがあり、今後の実用化が期待されている。

・イオン液体による新規分離剤の開発

常温で液体を呈するイオン液体は、100年ほど前からその存在は知られていたものの、工業的な利用が研究開発され始めたのはここ20年ほどのことである。難処理鉱石や都市鉱山の分野でも、ここ数年、従来とは異なる選択性を有する分離剤としての利用研究が、計算化学との融合によって積極的に進められている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

● CO_2

日本の鉄鋼業では、「革新的製鉄プロセス技術開発（COURSE50）」で、コークス炉ガスに含まれる水素を利用した水素還元製鉄、高炉ガスから化学吸収法、物理吸着法によりCO_2を分離回収し、CO_2排出量を30%削減する低炭素製鉄を目指している[8)]。日本は燃焼後回収システムの化学吸収法で世界的リーダであり、三菱重工、三菱日立パワーシステムズ、東芝、IHI、がそれぞれプロセスを開発している。米国のPetraNova大規模CCSプロジェクトでは、三菱重工の技術が採用され、2016年に操業開始が予定されている。

米国では、Illinois Industrial CCS Project（ICCS）がエタノールプラントからのCO_2回収／帯水層（深部塩水層）貯留商業プロジェクトを2016年から開始することとなっている。

カナダでは、2015年に開始されたQuestプロジェクトは、オイルサンド改質用の水素を製造する設備からCO_2を回収し、年間100万t以上を帯水層（深部塩水層）へ圧入する

予定である。

欧州では、欧州連合において 2009 年に規定された CCS 指令が 2014 年に見直され、2015 年 1 月に最終報告書が欧州委員会に提出された [9]。CCS プロジェクトが実証から商業への移行を可能にするために、CCS 指令以外の政策が必要であるという所見が示されている。

中国では、2014 年 11 月に発表された中国・米国両政府による機構変動に関する共同声明（Joint Announcement on Climate Change）以降、両国の CCS および CCUS 実施に向けた協力関係が強化されている [9]。

韓国では、火力発電からの CO_2 回収プロジェクト（燃焼前回収あるいは酸素燃焼、燃焼前回収）2 件が評価段階にある。浦項産業技術科学院（RIST）は、アンモニア水を利用し高炉ガスから CO_2 を回収するプロジェクト研究を行っている。

● 随伴水・汚染水分離

・EOR（enhanced oil recovery）

中東の多くの巨大油田は、かなり老朽化しており、水攻法による二次回収が広く行われてきた。最近では、EOR（enhanced oil recovery）と呼ばれる増進回収が進んでいる [10]。この地域では、2014 年の推定では、随伴水の 63%が圧入による廃棄、30%が水攻法への利用、7%が EOR に利用されている

・CBM（Coal Bed Methane）

オーストラリア東岸のコールベットメタン CBM（Coal Bed Methane）開発には、2020 年までに 1100 億円が投資される予定であり、逆浸透膜を含めた最新の随伴水処理技術が導入されることが期待されている。CBM の開発では、石炭層の割れ目に溜まった水を抜く必要があり、ガスの生産の前に大量の随伴水が発生する。クイーンズランドだけでも年間で 2000 万トンの随伴水が生じており、これを処理しなければならない。CBM の開発では、二次回収として窒素や二酸化炭素を圧入する研究も進められており、ガス分離膜への期待も大きい。

● 鉱山からの希少金属

・JOGMEC（独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構）における銅原料中の不純物低減技術に関する基礎研究委託事業

JOGMEC では、銅鉱石中のヒ素濃度が増加していることが国内の銅製錬工程でのスラグ中のヒ素濃度を増加させ、その利用に対する懸念事項となっていることから、銅鉱石中のヒ素を現地の環境規則を遵守しつつ分離・残置することが可能となるような選鉱プロセスを開発するための基礎技術研究事業を、2015 年から 2016 年度の 2 年間、実施している。

・JOGMEC における海底熱水鉱床採鉱技術開発等調査事業に係る選鉱・製錬技術調査研究

2008 年 4 月に策定された「海洋基本計画」に基づき、沖縄海域及び伊豆・小笠原海域における海底熱水鉱床の開発に向けた選鉱および製錬技術開発事業が開始している。5 年間の第 1 期における基礎検討の後、2013 年には第 2 期事業が開始され、より実用化に近い検討が行われているが、海底熱水鉱床は生成年代が若く結晶化が進展していない上、ヒ素などの不純物の含有割合も高いことから分離技術上の課題は多く、熱水鉱床鉱石に特化した新規分離技術開発が望まれている。

・米国　DOE/ARPA-E [11)]

二酸化炭素排出量の削減、3D プリンターなどの Additive Manufactureing への期待の高まりなどから、DOE/ARPA-E 主体で、低コストを目的とした軽金属製錬、都市鉱山関係（Ti、Al、Mg、スクラップ再生）の研究が遂行されている。DOE/ARPA-E では、これまでに 19 件の研究が実行され、うち 6 件、総額 12 億円ほどがチタン製錬に投入されている。4 件が電解技術を 2 件が熱還元技術を利用した提案である。

● 都市鉱山からの希少金属

・欧州委員会による Circuler Economy(CE)政策パッケージ [12)]

EU はかねてより「Resource Efficiency」という概念を打ち出し、既存の廃棄物管理の取り込みを超えた価値観で資源効率の向上により経済と社会の持続的成長を図る政策をとなえていたが、2015 年 12 月に「Circular Economy」政策パッケージとして、サプライチェーン全体で幾重もの循環の輪を作り、消費スタイルそのものを変化させるような政策を発表している。これは資源循環を政策の中心に据えた経済政策であり、今後、この分野に大きな投資がもたらされ、新たな価値観が創出される可能性があり、日本を含め世界が動向を注視している。特に金属資源では、European Institute of Innovation & Technology (EIT) が設立した EIT Raw Materials [13)]が上述の政策実施に対する重要な拠点となっており、EU 内の資源、製錬、リサイクラー、ならびに電気メーカーなど多種業界にわたる企業が支援している。

・産業技術総合研究所における戦略的都市鉱山研究拠点（Strategic Urban mining REserch base, SURE）形成 [14)]

産業技術総合研究所では、都市鉱山の有効利用を実現するための産官学連携拠点として 2013 年より SURE を発足させた。本拠点では、製品の資源配慮設計、製品情報利用と新規分離技術を連携させるとともに、都市鉱山ポテンシャルや金属需要の予測など都市鉱山の計画的な開発を実現することによって、多くの金属種に対する経済的な資源循環の実現を目指している。

・NEDO におけるアジア省エネルギー型資源循環制度導入実証事業

NEDO では 2016 年度からの新規事業として、日本が培ってきた資源循環技術やシステムをアジアへ展開するための実証事業を行っている。また同時に日本国内では、資源供給逼迫にも対応できるように、動脈産業（主に製品の設計・製造・販売等を行う産業）と静脈産業（主に製品の回収・分離選別・最終処分等を行う産業）が一体となった資源循環システム構築を目指し、リサイクル技術やシステムの効率化や高度化を図る実証事業を行っている。

・JOGMEC における低品位銅電解精製技術実証事業

JOGMEC では 2015 年度より低品位粗銅からの銅回収を可能とするエネルギー低減電解技術の開発･実証事業を行っている。これは、リサイクル原料を主体とした銅の精製では電解採取法により電気銅として回収されているが、この方法では電力使用量が大きいのに対して、より電力使用量の少ない電解精製法を用いて電気銅を回収する試みである。不純物を多く含む低品位銅アノードを電解精製法に供した際の不動態化をいかに防ぐかが技術開発の主眼となっている。

・EU HORIZON2020 における MSP-REFRAM project [15)]

EU の「HORIZON2020」は、2014 年～2020 年の 7 年間にわたる総額 800 億ユーロ規模の研究およびイノベーションへの資金助成プログラムであり、世界に広く門戸が広かれているが、その中で、高融点金属の関連企業のネットワーク強化、研究開発の方向性の示唆、新たな市場開拓の可能性を議論する MSP-REFRAM プロジェクトが実施されている。

（4）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

● CO_2

分離・回収における(a)システム効率向上、(b)Oxy-Fuel などの燃焼法の確立、(c)コスト低減である。CO_2 回収コストの低減では、CO_2 回収量数千トン/日の処理能力で、設備費及び運転費（蒸気使用量）を半減できるような吸収液、吸収剤やシステムの改良が求められる。圧力、ガス量が変動した際の CO_2 回収装置の負荷変動対応と応答速度向上にある。日本はエネルギーセキュリティーのために天然ガスと石炭火力をほぼ同程度の割合にするという方針で進めている。石炭火力に課せられた負荷変動対応を天然ガス火力と同等のミドルピーク対応にさせるという、海外よりさらに上載せした技術開発が必要とされている。

● 随伴水・汚染水

・EOR

随伴水処理の今後の動向として最も重要なものは、EOR 技術の普及である。中東の大油田の三次回収、カナダやベネスエラの重質油、オーストラリアの CBM 開発に見られるように、随伴水を精製後、スチームとして、あるいはポリマーや薬品を混入させて油層に圧入する技術は、長期的な技術の深化が必要である。また、新しい EOR 技術として、CO_2 や炭化水素、あるいは窒素などの圧入も広まりつつある。今後の油田や天然ガス開発は、在来型や非在来型に関わらず、EOR 技術なしには生産が不可能になる。このため、三次処理レベルの次の技術を確立することは、最重要の課題となる。

- ✓ 随伴水中の Tight Emulsion の分離技術
- ✓ 随伴水中の TSS や多価イオンの分離技術
- ✓ 随伴水の脱塩技術

そのボトルネックは、耐熱性、オイル耐性、耐久性であり、これらに加えて、分離性能を一層向上させる必要がある。さらに、スチーム以外の EOR 技術に関連して、以下の分離技術の深化も重要となる。

- ✓ 随伴水や生産ガス中の炭化水素（C_1～C_8）の濃縮、分離・蒸留の技術
- ✓ 生産ガス中からの窒素や CO_2 の分離技術

・環境規制と水不足

随伴水の圧入や海洋投棄の環境への影響は、必ずしも明らかになっていないが、環境アセスメントの結果は、開発プロジェクトの許認可に決定的に影響する。海洋資源への影響などを考えると、随伴水の四次処理、即ち、有害物質の完全除去は重要であろう。また、中東や中央アジアでは、水不足が深刻化しており、灌漑や生活用水への利用も重要となる。

また、将来的には、北米のオイルサンド開発に見られるような広大な排水池の再生も必要となる。

✓ 随伴水のイオン交換やオゾン処理等による四次処理
✓ 随伴水の都市や農地への循環（Greenfield Project）
✓ 汚染地域の再生（Brownfield project）

● 鉱山からの希少金属

・固体分離技術のミクロレベルな機構解明

選鉱や前処理技術に関する現象論に関しては、長年の検討により経験知が蓄積されているが、対象は複雑な形態を呈する固体の混合物であることから、これまでその現象の直接的な観察が難しく、詳細な機構解明には至っていない現象も多い。選鉱の分野では SEM 画像と顕微鏡画像とを組み合わせ、自動的に単体分離度を計測する MLA が近年開発され、日本にも導入されつつあり、これまで詳細に解明されていなかった選鉱分離を支配する要因が直接的かつ定量的に明らかになりつつあるが、現状ではオーストラリアでのみ開発されている MLA には装置の頑丈性や、解析ソフトウエア精度・速度にもまだ課題があり、改良が望まれる。

● 都市からの希少金属

・単体分離過程の解明のための破壊の科学の確立

破砕・粉砕による単体分離はその後の分離効率を支配する重要な過程であるが、多種多様な鉱物種の混合体である鉱石や、多種多様な強度を有する材料が接合されて形成されている都市鉱山資源に対する破壊の科学は確立されていないため、省エネルギーで単体分離を達成する技術の選定は経験に基づいているのが現状である。SEM（電子顕微鏡）による破面観察など亀裂進展の詳細な観察と、組成や鉱物学的形態の破壊前後の変化を詳細に把握し、両者の知見の融合させることによって、鉱石や都市鉱山に対する破壊の科学を確立させる必要がある。

・前処理技術に対する経験知の統合と IT 化

前処理での分離対象は廃小型家電などの人工物であることから、使用されている材料や強度、構造などが製造年代やメーカーによって実に多種多様にわたっている。しかしながらこういった情報は、最適な分離技術の開発および分離プロセスの構築に当たり非常に重要な情報であり、これまでに研究者や技術者が蓄積してきた経験知を統合し、広く公開して、利用可能な情報へと集約する必要がある。前処理技術に関する経験知の IT 化は、将来的にはリサイクリングを前提とした材料、製品開発研究にもつながると期待される。

［今後取組むべき研究テーマ］

● CO_2

・CO_2 回収コストの低減に関する技術開発

アミン法については蒸気使用量削減を可能とする熱利用プロセス開発、設備の小型化・簡素化を可能とする気液接触装置・熱交換器の開発、CO_2 吸収容量が大きく、CO_2 脱離エネルギーが小さい吸収液や吸収剤の開発が必要となる。

・高効率な温室効果ガス分離膜の開発

従来方法とは大きく原理が異なる、回収エネルギー低減が期待できる革新的な CO_2 分離技術の基礎研究が要請される。

・回収 CO_2 を還元する物質の経済的な製造方法

触媒による反応速度の向上、反応器・反応システム改善による反応収率向上が望まれる。

● 随伴水・汚染水

・量産可能な無機膜

随伴水の二次処理用の無機膜は、我が国が優れた製品を要しており、実証試験レベルにある。一方、限外ろ過（UF）膜、ナノ濾過（NF）膜などの三次処理レベルの無機膜は、改良の余地が大きい。無機膜は、耐久性に優れ、随伴水処理との相性が良い。また、ガス分離膜としても優れた性能があり、生産ガス中からの窒素や CO_2 の分離技術にも利用できる。ここでの問題は、製造方法が水熱合成を利用していることで、生産性が悪いことである。無機膜で量産化可能なガス分離膜の研究を推進すべきである。

・再生可能なオイル吸着剤

随伴水中のコロイド状のオイルは、Hydrocyclone によって分離可能であるが、10 マイクロメートル以下のオイルは除去できない。また、オイルの含有量にもバラツキがあり、Hydrocyclone を通過してしまうオイルやクレゾールなどの溶存有機物も多い。吸着サイトがルーズで、簡単にオイルが脱着する吸着剤が求められている。

・カーボン系のオイル耐性分離膜

最近、研究室レベルであるが、カーボン系の NF 膜や RO 膜が開発され、多価イオンの分離や脱塩に利用できることが分かってきた。カーボン膜には、耐久性や耐熱性、オイル耐性に高いポテンシャルがあり、高温の随伴水からの EOR 用スチームの製造や Sulfate 除去を行うための最適な膜となる。このため、基材の耐久性の向上を含めて、モジュールとしての総合的な研究開発が期待される。また、カーボン系の薄膜は、生産ガス中の炭化水素成分（C_1～C_8）の濃縮、あるいは CO_2 の分離にも有効と考えられる。

・実証プラントとオペレーション技術の開発

随伴水処理では、実証プラントでの実験結果が最も重要であり、ここでのオペレーション技術により、分離ユニットの実用性能が大きく変化する。また、オペレーション技術により、当初の想定以外の性能を発揮する場合も多い。このため、分離ユニットの製造とオペレーション技術の向上は、この分野で避けて通れない研究テーマとなる。

● 鉱山からの希少金属

•液体ならびに界面の原子の挙動の第一原理計算による理解

電気分解で必要な電圧を下げるためには、溶液内抵抗に起因する部分と、反応抵抗に起因する部分のそれぞれの低減が必要である。前者は伝導度として体系化がすすんでいるが、溶液中の伝導度の原子論的な理論的研究は少ない。後者の反応抵抗に関する原子レベルでの理論的メカニズムの解明はまったく進んでいない。これらの研究を推進する必要がある。

• 放射光ならびに中性子透過を活用したサブミクロンレベルでの界面現象のその場観察

界面現象の精緻な計算を精度良く遂行するためには、精緻な実験観察が両輪として必要となる。金属製錬では、しばしば反応温度が1000℃以上の高温となり、また、厳密な雰囲気制御が必要であり、その反応の様子は未だブラックボックスのままであるので解明する必要がある。なお、観察施設は産業界の研究者が垣根なく利用できるように、1700℃程度までの温度で、超高真空からあらゆる腐食性・爆発性ガス雰囲気でのその場観察ができるような設備が望ましい。

● 都市からの希少金属

・低品位・高不純物鉱石利用のための選鉱技術の開発

今後の増加が予想される低品位・高不純物鉱石を、エネルギーをかけずに低環境負荷なプロセスで分離濃縮するための選鉱技術の開発が必要不可欠である。これらの選鉱技術開発の方向性としては、後段に従来型の製錬プロセスを想定した技術開発と、後段に電解法など湿式製錬プロセスを想定した技術開発の2つが考えられ、対象によってどちらが適するかを見極めながら開発すべきである。前者に対しては、電気パルスやマイクロ波、温度や圧力などを駆使した特殊粉砕によるこれまでにない単体分離性の実現や、新たな選択性を有する浮選剤等の分離剤の開発などが考えられる。また後者に対しては、省エネルギープロセスでメカノケミカル反応を実現する超微粉砕技術の開発や、微粒子に対して高精度に分離濃縮を実現する固固分離技術開発などが考えられる。

・各種都市鉱山資源の特徴をいかした省エネルギー型前処理技術の開発

都市鉱山資源は対象によって使用されている材料や使用されている元素、強度などが大きく異なることから、都市鉱山資源ごとに適する前処理技術を個別に検討する必要がある。特に、小型家電、希土類磁石モーター、太陽電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池などは、それぞれに対して、電気パルスや機械式粉砕、熱や圧力を駆使した特殊粉砕などによって省エネルギー型の単体分離技術を開発すべきである。また、比較的粗粒域で単体分離を達成し、それを高精度に分離するソーティング技術が確立されれば、一部の都市鉱山資源は従来型の製錬設備を介さず、直接的に電解法で回収するような画期的な省エネルギー型金属精製プロセスが実現する可能性がある。

・不純物を多く含有する金属資源を従来製錬設備で精製するための課題解決

想定されるあらゆる不純物元素について、その電極触媒挙動を把握し整理することが、喫緊の課題である。不純物挙動の体系化は、リサイクリングを前提とした材料開発研究にもつながる。

（５）政策的課題

● CO_2

CO_2を排出する事業者への CO_2分離回収実施の動機付けとしては、CO_2排出基準規制、固定価格買取制度、炭素税、排出量取引制度等、事業者にインセンティブを与える施策を検討する必要がある。

海外でのCO_2削減が排出権取引により国内での削減に結び付く枠組みの構築も重要である。例えば、CO_2の利用あるいは貯留方法が、国際的な枠組みでCO_2削減事業がビジネスとして成立するためには、先進国が途上国に対して CO_2削減を行う際の Win-Win な仕組

みの制定、および環境保全を図るための環境インパクトの評価方法、ガイドラインおよび規制のあり方を国際的に合意していくことが望まれる。

● 随伴水・汚染水

我が国には、石油や天然ガスの資源がほぼ皆無であり、オイルメジャーのような開発企業もない。資源開発には、商社が資本的にサポートし、エンジニアリング企業がプラントを設置するという状況が続いてきたが、資源開発の主体は、メジャーであり、国営企業であり、独自の技術を有する新興企業である。このため、大深水の開発や掘削・圧入技術のノウハウなど、先端分野では、かなりの遅れをとっている。大学等では、分離工学の研究者が非常に少なくなっており、産業界との隔たりも大きい。NEDO などのファンディング機関や JOGMEC などの資源の安定供給のための機関も整備されているが、研究開発を行う人材の層は、決して厚くない。

単にファンディングを増やすだけでは、このような状況を打破できず、企業連携での成果の取扱いの問題が残る。このため、大学、文科省や経産省傘下の研究所などの工学系の人材を調査・選別し、オープンイノベーションを推進し、若手の育成と開発プロジェクトを検討する必要がある。主な実施主体は、日本人のアカデミア＋産油国の若手研究者の組み合わせになり、プロジェクトの成功により、資源国との長期的な関係評価が可能になる。オイルメジャーや新興企業ではできないオープンな研究開発がプロジェクトの鍵を握る。

● 鉱山からの希少金属

製錬分野では、環境問題、資源問題、エネルギー問題に関連した種々の問題が顕在化しており、これらの解決に向けた継続的な取り組みが望まれる。しかし、既存の産業規模、また、その波及範囲も大きさにも関わらず、大学における基礎教育に携わる教員数は減少傾向であり、将来的な人材不足が懸念される。これに対して、関連学会では、合宿講義などで、各大学からスペシャリストを招き集中講座を行っているが、短い時間の講義では、習熟に限界があり、また、実体（実習）を伴わない座学での学習では、十分な理解度まで到達できていないのが現状である。よって、大学における製錬に関わる研究室・講義の再生を考える必要がある。その方法論には、産業界からの寄附講座、特定の難分離性混合物の分離工学を念頭に国費によるプロジェクト研究室、テニュアトラック制度を製錬工学に拡充し若手教員のユニークな発想に期待した研究室、などが考えられる。同時に、製錬研究で重要となる、熱力学的諸量、粘性、表面張力、熱伝導度、密度、電気伝導度などの基礎物性を高い信頼性で測定できる、米国の NIST にあたる国立研究機関が必要であろう。国研と大学研究機関の役割を再度議論する必要がある。

● 都市からの希少金属

・経産省と環境省の連携による資源循環に対する新たな価値観の創成

EU が発信した CE(Circular Economy)で、ヨーロッパでは省庁がその領域を超えて連携し、資源循環の新しい価値観を創成すべく政策が始まっている。国内においても、資源循環に関連する経産省と環境省が密接に連携し、廃棄物処理を超えた経済政策としての資源循環政策を検討する必要がある。

・長期的な資源確保戦略に基づいた産学官連携の仕組み醸成

資源循環型社会を構築するための分離技術開発は、社会からの要請も大きく、産学官が連携して取り組む課題であり、すでに JOGMEC や NEDO などで実証事業が展開されている。しかし、それらの事業は喫緊の課題に対して実装が近い技術を対象としているものが多く、また事業期間も短期間であるものが多い。長期的な視点に立てば鉱石の難処理化や都市鉱山利用の必要性は自明であることから、息の長い検討が必要である新規分離技術開発や機構解明など基礎研究に相当する事項に対しても、小規模であっても継続的に産学官が連携し、広く人材と学術的知見を育成する仕組みを検討する必要がある。

・資源国との選鉱技術に関する連携強化

資源国とはこれまでにも人材育成や地質調査などに関する連携事業が実施されているが、選鉱をはじめとする分離技術に関する連携事業は現在のところ実施されていない。地球規模の環境問題解決に対する国際連携研究に関する事業に加えて、選鉱をはじめとする分離濃縮技術に関する国際連携研究に対しても個人レベルでの連携以上の強化が望まれる。

・都市鉱山資源を対象とした分離技術開発に関する国際連携強化

EU では CE 政策パッケージに基づき、分離技術開発を含む資源循環促進のために多額の投資が予定されている。日本もこの機会に EU との国際連携を強化し、特にクリティカルメタルを対象とした分離濃縮技術の共同開発を検討する必要がある。また、日本における資源循環のあり方はアジア地域を含めた国際資源循環の視点から論じるべきであり、引き続きアジア地域との国際連携強化も望まれる。

（６）キーワード

CO_2 分離・回収、Pre-Combustion、Post-Combustion、Oxy-Fuel、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離、深冷分離、化学ループ燃焼、随伴水、EOR、大深水、SAGD、Coalbed Methane、Tight oil、Hydrocyclone、TSS、MPPE、非鉄製錬、環境保全、環境技術、持続的発展、資源の有効利用、資源循環、人材育成、反応モデル、その場観察技術、第一原理計算の利用、反応メカニズム、レアメタルからコモンメタルへ、製錬廃棄物最小化、府省連携、選鉱、鉱物処理、都市鉱山、金属資源、2 次資源、リサイクリング、前処理、中間処理、物理選別、固固分離、固液分離、単体分離、粉砕、破砕、磁選、浮選、渦電流選別、電気選別、ソーティング、MLA、粉体シミュレーション

（７）国際比較

CO_2

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	◎	→	● 三菱重工は、関西電力と共同開発したKS-1吸収液の実証を行い、RITEおよび電源開発の協力を得て、松島石炭火力発電所で2006年～2008年10t/日、5,000時間以上の連続運転実証を実施。東芝は、2009年より三川発電所内で石炭火力発電所から高性能の吸収液の実証を開始。2011年よ

				り、米国Alabama PowerのBarry発電所で、500 t/日のCO_2回収・貯留実証試験を開始している。 ● 東芝は、2009年に燃焼後回収プロセスのパイロットプラントを福岡県大牟田市に建設し、運転を行っている。 ● 三菱重工は米国で石炭火力からの燃焼後回収商業プラントをEOR用に建設中で、2016年稼働開始予定である。 ● 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。 ● CO_2分離膜として、産総研は、安価な材料(ポリフェニレンオキシド)から優れた分離性能と柔軟性を持つ新規中空糸炭素膜を開発し、低コストで破損しにくい膜モジュールの開発に世界で初めて成功。
米国	基礎研究	○	→	● DOE（米国エネルギー省）のNational Energy Technology Center(NETL)、National carbon caputere center(NCCC)が企業主体のポストおよび燃焼前回収技術開発を支援している。
	応用研究・開発	◎	→	● 米国、カナダでは、石炭火力に対して厳しいCO_2排出量基準を設定している。
欧州	基礎研究	○	→	● Horizon2020で吸収液、セメント製造工程からのCO_2回収技術を支援している。
	応用研究・開発	△	↘	● 英国では、石炭火力に対して厳しいCO_2排出基準を設定している。 ● EUでは、EU指令で、300MW以上の火力発電に対してCCS readyのFSを求めている。英国はさらにCCS readyを義務付けている。
中国	基礎研究	○	→	● 2013年にKCRCは500MWの酸素燃焼、あるいは300MWのIGCCのCCS計画を発表するが、その後国内での具体的なCCSプロジェクトの計画が見られない。Doosan Heavy Industry and Constructionsは吸収液プラントも検討していたが、現在は酸素燃焼技術開発を実施中と表明している。
	応用研究・開発	○	→	● 合計9件のプロジェクトが計画されている。
韓国	基礎研究	△	→	● KCRCとRISTが吸収液、酸素燃焼の基礎研究を実施している。 ● CCSに関する世界最大級の学術会議であるGHGTにおいて、顕著な発表が見られない。
	応用研究・開発	△	→	● Doosan Heavy Industry and Constructionsは吸収液プラントも検討していたが、現在は酸素燃焼技術開発を実施中と表明している。

随伴水（汚染水含む）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	● 大学における化学工学の研究室が少なくなっており、膜分離などの研究も、諸外国と比較して、弱い。近年、水処理に関する大型プロジェクト（CREST、NEDO、COI-STREAMなど）が実施され、ナノテクと分離技術の融合などの新たな動きがあり、若干の盛り返しが見られる。しかし、日本の産学連携は相変わらず弱く、国内の石油化学プラントの縮小傾向にあり、全体としては、弱含みである。
	応用研究・開発	○	↗	● JOGMECなどの公的資金のサポートにより、一定の技術開発が進んでいる。産業界と中東などの資源国との繋がりは深く、また信頼関係もあり、中期・長期の研究開発は、油価の低迷にもかかわらず、順調である。また、無機膜など日本が開発してきた分離機能材料が随伴水処理に普及しつつあり、全体として上向きである。
米国	基礎研究	◎	→	● 基礎研究では、トップレベルにある。DOEからの研究予算も潤沢で、テキサス大などの産油地に近い大学では、基礎研究が充実している。産学連携も盛んで有り、シニアの研究者層が厚いのも特徴である。2017年の水関連の予算としては、DOEが4500万ドル、DOIが9860万ドル（WaterSMART program）、USDAが1500万ドル、NSFが8800万ドルを計上している[16]。

	応用研究・開発	◎	↗	● 油ガス田開発におけるメジャーの相対的な地位は、やや低下したが、シェール開発なので新興企業が台頭し、技術力は非常に高い。また、GEの水処理分野への参入など、資金力を活かした迅速な事業展開が見られる。但し、水処理のベンチャーキャピタルへの投資は、2013年の5億8500万ドルから2014年の3億5800万ドルに急落している[17]。
欧州	基礎研究	○	→	● 世界企業であるBPやShellが本拠地としているイギリスやオランダは、水処理技術の基礎研究をリードしている。また、DNV（ノルウェーのオイル&ガス分野の認証機関）などには、資源開発のエキスパートも多い。European Commissonでは、2017年に1000万ユーロの予算で水処理関連のプロジェクトを募集している[18]。
	応用研究・開発	◎	↗	● 水処理に関しては、2大グローバルオペレータであるVeoliaとSuezの存在感が高い。また、英仏は、西アフリカの海底油田の開発などを手がけており、その技術力は、米国に劣らない。
中国	基礎研究	○	→	● 国内問題としての水不足や環境汚染を抱えており、かつペトロチャイナを中心に海外の資源開発にも積極的であったことから、基礎研究にも多くの資金が提供されており、かなり充実している。しかしながら、アカデミアと企業との連携は、必ずしも密ではない。
	応用研究・開発	○	→	● 水処理関連の部材や機械の生産が盛んであるが、先端技術の開発では、必ずしも進んでいないように感じられる。
韓国	基礎研究	△	↘	● 資源開発や関連する水処理技術の基礎研究が進んでいるようには思われない。大学では、エレクトロニクス関連の研究者が多く、化学工学への関心は、あまり感じられない。
	応用研究・開発	○	→	● GLによる水処理ベンチャーの買収など、一時期は、ホットな話題があったが、近年は、動きがない。分離膜などの生産装置の製造力があり、ポテンシャルが感じられるが、随伴水処理のビジネスを展開するには、総合力に欠けるように感じられる。

製錬、都市鉱山

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	○	→	●【銅製錬】銅製錬に関しての基礎研究は活発でない。最近になって、若い技術者の不足から企業での支援も出つつあるが、国内の有力大学にそのような講座がなくなったせいで効率が上がっていない。国の機関としてJOGMEC を中心に基礎研究を進める試みがなされようとしているが、長期的ではない。 ●【チタン製錬】企業に基礎研究を行う余力はほとんどなく大学で製錬の基礎研究が行われている。学術は高いレベルにあるが、人材不足であり、この点が急務である。 ●【都市鉱山】選鉱に関する研究は、近年の難処理化に対する懸念を受けて、再び活発化する兆しを見せている。選鉱分野で最も大きい国際会議であるIMPC（International mineral proessing congress）[19,20]では、欧米、中国、オーストラリアといった資源国に次いで日本から報告件数が非常に多い。前処理に関する研究は、近年の金属価格の低調を受けてややトーンダウンしている。JOGMEC[21]を中心に、選鉱や前処理の基礎研究を進める試みがされているが、プロジェクトが長期的ではないという問題点がある。
	応用研究・開発	○	→	●【銅製錬】企業をベースに行われているが、現在注力されているのは、鉱石にはない人工不純物の対策を施しながら、既存の技術・設備を活用して如何に電子スクラップを処理するかである。なお、我が国の貴金属製錬・リサイクル技術は世界的にみて高いレベルにある。 ●【チタン製錬】国内 2 社体制（生産量 6 万トン程度）。新しい製錬法の確立よりも高品質・安定操業に注力。東邦チタニウムのサウジアラビア合弁会社の商業生産の開始、中国のチタン産業の競争力向上などの影響がこの数年で現れると予想。 ●【都市鉱山】企業を中心に応用研究・開発が行われているが、画期的な新規技術は生み出されておらず、注視されているのは、既存の技術や設備を活用して、いかに難処理化する鉱石、あるいは 2 次資源に対応していくか、といった点であるように見受けられる。2 次資源の利用にあたっては、従来の鉱石には含まれない不純物対策や環境対策が必要となるため、そのための技術開発は活発である。

米国	基礎研究	△	↘	●【銅製錬】基本的には海外まかせ。ただし、新規抽出剤などの基礎分野は、化学の基礎研究として残っている。 ●【チタン製錬】DOE/ARPA-E のプログラムで計 6 件(約 12 億円)の新しいチタン製錬の研究を実施。ここ数年で急激にアクティビティーが向上している。90 年代から検討が行われている Armstrong 法のチタン粉ビジネスへの発展も余地を残している。 ●【都市鉱山】選鉱に関しては、以前に比べて米国の存在感は低下しており、目立った基礎研究は見られない。前処理に関しては、リサイクル技術開発全般が米国ではあまり活発ではなく、依然としてその状態が続いている。ただし、新規抽出剤や分離剤の開発など、化学分野に属する基礎研究は活発である。
	応用研究・開発	○	→	●【銅製錬】応用も最近は海外任せになっている。貴金属製錬の一部や環境関連の部分は少し残っている ●【チタン製錬】近年の大幅な技術力の向上はないと考えられる。 ●【都市鉱山】選鉱に関する応用研究・開発に関しても、以前に比べて米国の存在感は低下している。比較的活発であるのは、2 次資源からの貴金属回収や、2 次資源利用に伴う環境対策技術である。
欧州	基礎研究	○	→	●【銅製錬】ヨーロッパは、簡単に学問分野を切り捨てないので、基礎研究も残している。ただし、以前ほど活発ではない。ここのリサイクルや貴金属回収、環境対応の部分が対象 ●【チタン製錬】ケンブリッジ大のシーズを利用したベンチャーMetalysis が商業化へむけ試行錯誤中。しかし、これ以外の有力な研究は見当たらない。 ●【都市鉱山】欧州は伝統を大切にし、息の長い研究を継続する風土があり、そのことによって、選鉱および前処理の双方の分野において、画期的な新規技術が数十年に一度、発見されている。国際会議においても安定した基礎研究発表を続けている。前処理の分野では、貴金属回収や、環境対応に関する基礎研究が特に活発である。
	応用研究・開発	◎	↗	●【銅製錬】リサイクルや貴金属回収、環境対応の部分については応用開発がまだ行われている。特にリサイクルについては先進的な取り組みがなされている。 ●【チタン製錬】チタン製錬会社はない。仮に、上記、Metalysis が商業的に成功すれば、大きなインパクトがあるが、チタン純度、コスト面で大規模生産には困難であると判断する。 ●【都市鉱山】特に前処理の分野において、他分野の企業が共同した応用研究や開発事例が認められる[15]。特に 2 次資源利用、貴金属回収、環境対応に対する開発が活発であり、その取り組みは先進的である。
中国	基礎研究	○	↗	●【銅製錬】本当の意味の基礎研究の進み具合は不明であるが、教員、学生数が多く、いずれ日・欧に内容でも追いつき、凌駕する可能性がある。 ●【チタン製錬】熱心な大学の研究室が複数あり、近年の基礎力の向上が認められる。 ●【都市鉱山】国際会議での発表件数および論文報告数は多いものの、質の良い基礎研究ばかりではない。しかし、資源を有し、国土も広く、当該分野の教員および学生数も多いことから、いずれ、日本を含む先進国を質および量ともに凌駕する可能性がある。
	応用研究・開発	◎	↗	●【銅製錬】オリジナリティとしては若干不明であるが、新しく銅の溶錬炉などを開発し、かつ海外の新規プロセスを導入している。 ●【チタン製錬】2013 年時点で、13 社のチタン製錬メーカーがある。総生産量で 8 万トン程度。今後、品質面での向上による競争力アップが見込まれ、輸出も増えるのではないかと予想する。 ●【都市鉱山】技術は先進的ではないものの、新規開発の件数の多さとスピードは目を見張るものがある。自国のみならず、東南アジアやアフリカを中心に、数多くの新規選鉱プロセスを開発しているほか、2 次資源利用の分野においても新規炉等を開発している。環境対策が十分でない点に大きな問題がある。
韓国	基礎研究	△	→	●【銅製錬】昔からあまりこの分野に研究リソースを割いていない。湿式製錬の一部はレアメタル回収と絡み、国立研究所で一定の研究がなされている ●【チタン製錬】特段の動きなし ●【都市鉱山】従来この分野の研究は活発ではなく、選鉱を専門としている大学教員も少ない。一部、レアメタルを対象としたリサイクル技術に関する基礎研究は比較的活発である。

	応用研究・開発	△	↘	●【銅製錬】ほぼ技術的には飽和している。開発対象はやはりリサイクルと環境である。 ●【チタン製錬】特段の動きなし ●【都市鉱山】リサイクルや環境対策に関する多少の応用研究および開発が実施されている程度である。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

- Water for Onshore Oil & Gas, Opportunities in produced water management, hydraulic fracturing & enhanced oil recovery, A Global Water Intelligence Publication (2014).
- Water for Offshore Oil & Gas, Opportunities in sulphate removal, produced water treatment & deepwater operations, A Global Water Intelligence Publication (2014).
- 石油・ガス生産現場における随伴水処理技術（講習会テキスト), 技術情報センター（2014.12).
- 冬室誠,資源開発における原油・ガス生産の分離技術(分離技術シリーズ 21)分離技術会（2011.7).
- 海洋ビジネスの最前線と将来展望 2014, 富士経済（2013.12)
- White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane
- http://www.circleofblue.org/wp-content/uploads/2010/08/prodwaterpaper1.pdf
- 酒匂 幸男、銅製錬技術の系統化調査、国立科学博物館技術の系統化調査報告、Vol.6 2006.March（http://sts.kahaku.go.jp/diversity/document/system/pdf/020.pdf）
- Philip Dewhurst, Titanium sponge supply, Roskill Consulting Group report (http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/DewhurstPhilipTiUSA2013Suppl.pdf)
- 宇田哲也、これからの製錬研究、化学工学第 48 回秋季大会概要集、2016

1) Produced Water Volumes and Management Practices in the United State
http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2009/07/64622.pdf
2) 海底システムの現状 --- 何処まで信頼性を保ち、機器を海底に設置できるか
https://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/3/3127/0905_out_subsea_production_system.pdf
3) 伊原賢, 目からうろこの重質油 ～開発状況と技術～
http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/2/2113/0808_out_heavy_oil_dev_technology.pdf
4) JOGMEC, 我が国の銅の需給状況の歴史と変遷（2006 年）
http://mric.jogmec.go.jp/public/report/2006-08/chapter2.pdf
5) JOGMEC,日本の鉱業政策の歴史と変遷 －第 2 次世界大戦後－ （2006 年）
http://mric.jogmec.go.jp/public/report/2006-08/chapter3.pdf
6) 船木弥和子, 原油価格下落下でのカナダのオイルサンド・LNG プロジェクトの現状

https://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/7/7666/201601_031a.pdf
7) クリスタル社、ならびに東邦チタニウムと合弁の中東のチタン製錬工場に関する情報
http://cristalmetals.com/index.html
https://www.toho-titanium.co.jp/company/principels.html
http://www.nikkei.com/article/DGXNASDD220KR_S4A120C1TJ1000/
8) 日本鉄鋼連盟. 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会（第 7 回）資料「日本鉄鋼連盟説明資料」. 2014 年 12 月.
9) 世界の CCS の動向. 2015 サマリーレポート. GLOBAL CCS INSTITUTE. 2015 年 11 月.
10) 岡津弘明, 石油開発における採油増進回収技術, 季報エネルギー総合工学, vol.30
http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/06/200707_Vol30_No2.pdf
11) 米国 DOE/ARPA-E プログラム紹介
http://arpa-e.energy.gov/?q=slick-sheet-project/direct-production-titanium-powder
12) EU Comission, Circuller Economy Strategy
http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm
13) EIT, EIT Raw Materials
https://eit.europa.eu/eit-community/eit-raw-materials
14) 産総研, 戦略的都市鉱山研究拠点
https://unit.aist.go.jp/emri/sure/index.html
15) MSP-REFRAM project
http://prometia.eu/msp-refram/
16) Research and Development, Analytical Perspectives, 299-306, Whitehouse
https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/omb/budget/fy2017/assets/ap_19_research.pdf
17) Investument in North Americal Water Technologues Down, RWL water
www.rwlwater.com/investment-in-north-american-water-technologies-down/
18) 2017 Work Programme includes €10m funding for water research, WaterBriefing
http://www.waterbriefing.org/home/technology-focus/item/12730-horizon-2020-2017-work-programme-includes-%E2%82%AC10m-funding-for-water-research
19) XXV International Mineral Processing Congress 2010 (IMPC 2010) (6-10 September 2010, Brisbane, Australia), Proceedings.
20) XXVI International Mineral Processing Congress 2012 (IMPC2012) (24-28 September 2012, New Delhi, India), Proceedings.
21) JOGMEC 金属資源開発 技術開発・技術支援
http://www.jogmec.go.jp/metal/index.html

3.27　燃焼(全般)

（1）研究開発領域の簡潔な説明

燃焼は、化学反応と熱・物質移動現象が複合する極めて複雑な現象である。燃焼反応は数千に及ぶ素反応の組み合わせからなり、熱・物質移動現象は微細な分子スケールの拡散現象から大規模火災のような大スケールの輸送現象までを包含している。現在は燃焼が、動力・発電・熱需要の大部分を賄う基幹技術となっている。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

我が国の一次エネルギー供給構造を見ると石炭、原油、天然ガスなどの化石資源が 2014 年の段階で 90%を超える割合となっている [1)]。その多くが燃焼により消費されており、燃焼におけるエネルギー利用効率の格段の向上および温室効果ガス排出の大幅削減の重要性は容易に理解できる。特に 2015 年 12 月の COP21 において，産業化以前より地球平均気温上昇を 2℃に抑える長期目標が採択され、これに伴い革新的な技術の創生が不可欠となっている。技術革新を推進するには、その現象を支配する物理・化学過程の根本的な理解が欠かせないが、燃焼現象は化学反応と熱・物質移動現象が複合する極めて複雑な過程であり、その理解が不十分であるため革新的技術を現実のものにできない例が数多く存在している。例えば、内燃機関における予混合圧縮着火エンジン、1700℃級ガスタービンにおける希薄燃焼技術、Oxy-Fuel 燃焼などはその代表的な例といえる。したがって、燃焼の技術革新を支える燃焼科学の深化とそれに基づく革新的基盤技術の構築が求められている。

また、もう一つは種々のエネルギー源の最適な組み合わせを可能にするエネルギーキャリアの導入と、これに対応した燃焼技術の確立が重要な課題である。例えば、原子力や太陽光のエネルギーにより既存の化石燃料を置き換えるには、電気エネルギーを水素あるいは他の燃料に転換し貯蔵、配送を可能にするとともに、これを動力、熱、物質といった他の形態でも効果的に使用できるようにしなければならない。この時に、エネルギーキャリアとなる燃料の燃焼特性や燃焼機器への効果的導入を可能にする基盤技術の構築が要請されている。

［動向（歴史）］

燃焼分野には起源を 1920 年代に遡る国際研究コミュニティが存在する。1954 年に正式に The Combustion Institute として発足以来、世界中の燃焼研究の礎となってきた。今日燃焼は、発電・運輸・産業・民生等のあらゆる活動に深く関わっており、エネルギー供給、輸送、鉄・ガラスなどの素材製造、さらに宇宙活動に至るまで膨大な用途に利用されている。我が国はこの国際コミュニティで、米欧およびアジア環太平洋諸国と共に国際協力の核となる役割を果たしてきた。1950 年代に熊谷清一郎（東大）が実施した液滴燃焼に関する微小重力実験は、微小重力場が科学に貢献することを世界で初めて示し、米国による国家規模の宇宙実験活動へつながった。今日まで、燃焼学における世界最高峰の賞が 4 名の日本人に授与されている。

石炭による発電技術に関する「クリーンコールプロジェクト」においては，あらゆる側面から石炭利用技術が研究され、基礎・実用技術が蓄積された結果，我が国の石炭利用技術が

現在、世界最高水準にあることが挙げられる[2]。また 90 年代から始まった加熱工業炉のための新燃焼方式「高温空気燃焼技術」の研究開発では、均一燃焼場形成によって 30%と大幅な燃料削減と NOx の著しい低減を達成しただけでなく、あらゆる角度から検証された基礎研究を武器に同技術が種々の異種燃焼器に応用された[3]。特筆すべきは同方式の廃棄物焼却炉であり，ダイオキシンの大幅減少のみならず、廃棄物発電も可能とし圧倒的優位性を確立している[4]。また同方式のスチームリフォーマーでは、世界をほぼ独占していた欧州メーカーとの力関係を変える新方式の国産リフォーマ開発に繋がった[5]。「高温空気燃焼技術」は日本発の技術であるが、その後海外でも盛んに研究が行われており Mild-combustion, Flameless combustion といった別の呼び名で基礎および応用研究が継続されている[6]。

CO_2 問題や燃料多様化を背景に、各国が抜本的な燃焼研究進捗を目指し巨大な燃焼研究拠点の形成を進めている。近年では米・中、さらにサウジアラビアで 200 億円規模な燃焼研究拠点が設置されている。新興国とりわけ中国の台頭が目覚ましい中、我が国でも低炭素社会実現のため抜本的な取り組みが急がれる。

燃焼技術は、動力・発電・熱需要の大部分を賄う基盤技術である。それぞれの主要な動向として、エンジン燃焼、ガスタービン燃焼、燃焼式工業炉、微粉炭燃焼の技術動向について述べる。また、燃焼技術の新たな応用動向について述べる。

a) エンジン燃焼（研究開発領域を別途設定）

我が国の自動車メーカー各社のエンジンは依然として高いレベルにあり、近年の厳しい排ガス規制に対応しつつ、最新エンジンの熱効率は 38～40%に達する[7]。さらなるブレークスルーを目指して、熱効率 50%を目標に戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的燃焼技術」が進行中である[8]。本プロジェクトの研究開発対象は、ガソリンエンジンにおける超希薄燃焼、ディーゼルエンジンにおける燃料と空気の高度混合、両エンジン共通の排気再循環燃焼、制御モデリング、設計開発基盤となる高速 3D 燃焼数値計算ソフト、排気エネルギーの有効利用、燃料改質による反応性制御、機械摩擦損失低減などであり、燃焼だけでなく関連要素技術についても研究開発が進められている。また、家庭用コジェネレーションやトラックを中心に、天然ガスを用いたガスエンジンの研究開発が進んでおり、販売台数が増加している[6]。一方、海外ではエンジン単体の高効率化だけではなく、バイオ燃料由来の最適燃料の研究開発も同時並行で進められている[9]。また、オゾンやプラズマの利用による着火制御についても研究開発が進められている。

- ✧ SIP「革新的燃焼技術」（日本）[8]：自動車用内燃機関を対象に、熱効率 50%を目標とした要素技術の研究開発と実証が進められている。主要国内自動車メーカー9 社が中心となる自動車用内燃機関技術研究組合と延べ 78 大学が連携している。人的交流による持続的な産学連携体制の構築も進められている。
- ✧ SIP「エネルギーキャリア」（日本）[10]：再生可能エネルギー由来のエネルギーキャリアについて、製造・貯蔵・輸送・利用までを俯瞰的に見据えた研究開発が進められている。このうち燃焼利用分野において、アンモニア燃焼によるマイクロガスタービンの実証が実現し、大型化に向けた研究開発が進められている。
- ✧ Co-Optima（アメリカ）[9]：2030 年までに自動車による石油の消費量を 30%削減することを目標に、アメリカの国立研究所 9 ヵ所が中心となって進めている。新エンジンとバイオ由来新燃料の両方の開発を進めていることが特徴である。燃料が変われば最

適燃焼法も変わってくるが、我が国の SIP「革新的燃焼技術」では既存燃料を対象に研究開発を進めていることから、新燃料の研究開発に関する動向は特に注意する必要がある。

- ✧ 7th Framework Programme (FP7)および Horizon 2020（欧州）: EU 最大規模の研究開発予算。省エネに関するテーマの中に、運輸（飛行機、自動車、船舶）のエンジン燃焼、微粉炭燃焼ボイラの高効率化（目標効率 48%）、ゼロエミッション石炭火力発電の開発などが挙げられている。多くのテーマにおいて研究者ネットワークを支援する形をとっている。非 EU・先進国の研究者は自国のファンディング機関から支援を受ける形で参画可能（日本の場合は JST）。英国の EU 離脱により、今後の英国研究者への支援体制に注意を要する。
- ✧ Clean Combustion Research Center(CCRC)（サウジアラビア）: 前国王によって大学（KAUST: King Abdullah University of Science and Technology）が 2009 年に設立され、同時期に設立された燃焼専門の研究センターである。前国王と世界最大の石油会社 Saudi Aramco の巨額資金により、最先端の研究設備導入と著名な研究者のリクルートが進められている。設立準備段階を終え、近年は論文数・被引用数ともに、世界トップレベルになっており、急速に成長している。世界各国の学生・研究者が在籍しているが、日本人の在籍は皆無であり、今後の動向に注意を要する。
- ✧ FVV（ドイツ）: 自動車用内燃機関に関連するメーカー・サプライヤーの技術協同組合であり、産学連携による共同研究を推進している。前述の SIP「革新的燃焼技術」における産学連携コンソーシアムのモデルケースである。

b) ガスタービン燃焼

低 CO_2 排出を志向して、天然ガス焚き発電用ガスタービンについて研究開発が盛んである [11]。我が国では、タービン入口温度 1500℃級のコンバインドサイクルで熱効率 60%超・出力 98 万 kW（2016 年 7 月稼働の新仙台火力 3 号系列）を実現し、世界トップクラスの高効率・大電力供給を実現している [12]。現在、1700℃級ガスタービンの研究開発が進められており、タービン入口温度の高温化は各国共通の開発目標である [11]。また、バイオ燃料 [11]や水素 [42]と炭化水素との混焼も、各国共通の開発目標である。我が国特有の動向として、高湿分空気利用ガスタービン（AHAT）が挙げられる [11]。タービン入口温度の高温化による第一法則における効率向上とは異なり、空気の高湿化と再生サイクルの組み合わせによる第二法則における効率向上を狙っており、中小型ガスタービンで有意性が顕著となる。また、空気炊きガス化炉により石炭をガス化して燃料とする 1200℃級コンバインドサイクル（IGCC）は、熱効率 40%超・出力 25 万 kW の商用運転中であり、1500℃級による熱効率 50%超が期待されている [11]。さらに、エネルギーキャリアとして有効性が期待されているアンモニア [10]と炭化水素の混焼について研究開発が進められている。アンモニアはその反応性の低さからガスタービンでの燃焼利用が難しいと考えられていたが、産総研でアンモニア専焼による小型ガスタービン発電に世界で初めて成功した [14]。

c) 燃焼式工業炉

排熱回収により空気を 1000℃以上に加熱してから燃焼利用する高温空気燃焼技術は、従来型燃焼炉と比較して燃料消費量の約 30%削減を実現し、各種燃焼式工業炉に普及が進んでいる [15],[16]。日本発の技術の海外普及を促進させるために、日本工業炉協会が中心となり、

工業炉の効率評価法の ISO 規格化が進められており [17]、日本の高い省エネ炉をより本質的かつ公正に評価できるように、エクセルギーを用いた効率評価法の研究開発が進められている。ポスト高温空気燃焼として、高温酸素燃焼の研究開発が進められた [18]。排熱回収に排気再循環を組み合わせ、予熱した既燃ガスと酸素の混合気を酸化剤として用いることで、極限まで排気損失を低減することと、炉内が輻射性ガス（CO_2 と H_2O）で満たされることで被加熱物への入熱量が増加することとの相乗効果により、従来型燃焼炉と比較して燃料消費量の 44%削減を実現した。また、比較的低温の加熱需要に対して、マイクロコンバスタ技術を利用した密閉式ガスヒータ搭載連続加熱炉の研究開発が進められている [19),20]。強度の排熱回収により、従来型ガスバーナと比べて燃料消費量の 80%削減を実現した。

d) 微粉炭燃焼

石炭は他の燃料に比べて単位発熱量当たりの CO_2 排出量が大きく、地球温暖化防止の観点に対するデメリットを有するが、賦存量が豊富かつ安価で比較的価格変動が少ないことから、2040 年までの需要は増加し続けると予想されている [21]。石炭の利用形態の大部分を占める微粉炭燃焼技術の分野では、米国での研究活動は縮小傾向であるものの、欧州や中国では引き続き研究が活発に行われている。特に、品質は低いが安価な石炭をトラブル無く利用できるようにするため、ボイラ内での微粉炭の燃焼特性を予測する数値シミュレーション技術開発が盛んに行われている。特に、これまで主にガス燃焼場や噴霧燃焼場を対象に行われてきたラージ・エディ・シミュレーション（LES：Laerge Eddy Symulation）が微粉炭燃焼場にも適用されるようになってきており、近年、石炭燃焼 LES に関する論文の発表件数が、欧州と中国を中心に飛躍的に増加している。その他、欧州では、フレームレス燃焼により微粉炭燃焼ボイラからの NOx を低減する技術の開発 [22]が行われている。CO_2 回収貯留（CCS：Carbon Capture and Storag）の適用を見据えた酸素燃焼技術開発については、豪州のカライド発電所 4 号機（30MWe）にて実証試験が行われた [23]。その他、欧州、米国においても活発に研究が行われている。

- ✧ Mega-grant（ロシア）：全自然科学分野の中から約 160 の重点分野が選定され、研究開発と教育の両面において、大型予算により最先端の環境整備が進められている。重点分野のひとつに燃焼が選ばれ、ウラジオストックの極東連邦大学において先端燃焼研究の環境整備が進められている。
- ✧ Federal Alternative Jet Fuels Research and Development Strategy(アメリカ)[24]：2016 年に発表されたジェット燃料に対する研究戦略．代替燃料の燃焼特性，燃焼排出物に対する研究開発が求められている。
- ✧ ANR Work Programme（フランス）[25]：Societal challenges and the other knowledge challenge の項目内において新燃焼法，新燃料に対する研究が求められている。
- ✧ FLOX-COAL-Ⅱ [22]（ドイツ）：Stuttgart 大学が中心となっているプロジェクトで、石炭にフレームレス燃焼を適用することにより、火炉からの NOx 排出量を大幅に削減する技術である。
- ✧ ポスト京開発プロジェクト「革新的クリーンエネルギーシステムの実用化」[26]（日本）：スーパーコンピューターを用いた燃焼・ガス化の数値シミュレーション技術開発が進められている。
- ✧ 日本燃焼学会「設計プロセスの高度化を目指した燃焼解析のプラットフォーム開発と

検証」(日本)：日本燃焼学会および国内 13 社が協力し燃焼に関する非競争領域の数値解析プラットフォームを開発するとともに標準実験によるプログラムの検証を行っている[27]。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

- 燃料技術の新しい応用技術としては、マイクロ燃焼技術を利用して、携帯サイズ小型熱源による小型発電の研究開発が進められており、日本の研究グループが世界最高の変換効率と出力密度を達成した。マイクロ燃焼場の高い比表面積を利用して、各種材料の表面失活におけるラジカルの吸着係数を計測するプラットフォーム化が進んでいる。また、蒸気化した材料物質を燃焼場で反応させることで、各種機能性ナノ粒子の合成が研究開発されている。次世代ロケットおよびスクラムジェットの燃料として、単位体積当たりの発熱量等の要因から、水素から炭化水素に回帰する動向がみられる。
- 石炭燃焼に関する新たな動向として、ケミカルループ燃焼（CLC：Chemical Loop Combustion）が挙げられる。CO_2 回収のために、火力発電所へのケミカルループ燃焼の適用を最初に 1994 年に論文[28]で提案したのは、東工大の石田愈・名誉教授であったが、その後、実用化を目指した大きなプロジェクトは日本国内では近年まで行われてこなかった。その間に、欧州[29]や米国[30,31]で活発に研究が行われてきており、実用化を目指したプロジェクトが進行している。日本では最近になって三菱日立パワーシステムズ、JCOAL、エネ総工研、産総研が中心となった NEDO プロジェクト[32]が開始したが、日本国内でこの分野に従事している研究者は著しく少ない。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

CLC について、以下のプロジェクトが進んでいる。

- NEDO ゼロエミッション石炭火力技術プロジェクト：「CO_2 回収型次世代 IGCC 技術開発」では、O_2/CO_2 吹ガス化炉とセミクローズドガスタービンを組み合わせた発電発電システムの技術について、電中研と九州大学が中心となって開発を行っている。「CO_2 分離型化学燃焼石炭利用技術開発」では、欧米が先行している CLC の技術について、三菱日立パワーシステムズ、JCOAL、エネ総工研、産総研が中心となって開発を行っている。共に H28 年度からは NEDO「次世代火力発電等技術開発」に引き継がれている。
- SUCCESS[25]（欧州）：Vienna、Chalmers 等の大学や SINTEF 等の研究所、Shell 等の企業が参加し、$1MW_{th}$ スケールの CLC システムの技術開発を行っている。
- DOE/CLC 関連プロジェクト（米国）：Alstom 社が CLC の 1MWe プロトタイプシステムを構築するプロジェクト（FE0009484）および Babcock and Wilcox (B&W)とオハイオ州立大学が石炭を燃料とする CLC の商用化を目指したケーススタディを行うもので、同じく 1MWe の装置を構築するプロジェクト（FE0009761）が採用されている。
- DOE/Advnaced Combustion Systems（米国）：DOE では現在、先進的燃焼技術に関する公募を行っており、特に加圧酸素燃焼および CLC の分野での採用が想定されている。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

■ 燃料と酸化剤の多様化

各技術動向の共通課題のひとつとして、燃焼させる燃料と酸化剤が多様化していることが挙げられる。燃料は産地や各国の事情によりその成分が大きく異なり、バイオ燃料・水素・アンモニアなどの添加が期待され、ガス化･改質の方式により得られる燃料組成が変化する。また、排気再循環の強度や燃焼条件により酸化剤中の CO_2、H_2O、O_2、N_2、NOx、SOx、未燃炭化水素の割合が変化する。燃料組成と酸化剤組成が変化すると、燃焼特性も敏感に変化する。このため、燃料と酸化剤の組成変化に対応した新燃焼器の設計開発には、膨大な燃料組成や酸化剤組成の組み合わせに対して、燃焼特性の把握とモデル化の基盤整備が求められている。

■ 実機相当の高温高圧における基礎燃焼データ

多くの実用燃焼器では酸化剤または予混合気を加圧または予熱後に燃焼させ、さらなる高効率化のために加圧や予熱を強化する動向にあることから、高温高圧条件における基礎燃焼特性の把握が欠かせない。また、こうした基礎データはモデルの実機相当条件における妥当性検証にも不可欠である。着火特性については衝撃波管などにより高温高圧条件の基礎データが取得されつつあるが、伝播火炎の特性については、依然として基礎試験が実現できる高温高圧条件と実機相当条件に乖離があり、データも限られている。

■ ノッキングおよび燃焼振動（異常燃焼）

多くの燃焼機器において、ノッキングまたは燃焼振動の発現が実質的な性能向上を制限している。ノッキングは乱流火炎伝播と着火と圧力波の連成現象であり、燃焼振動は非定常火炎挙動と圧力波の連成現象である。いずれも古くから知られている現象であり、深刻な場合は機器破損にも至る。しかしながら、極めて短い時間スケールにおける複雑な連成現象であるため、依然として発現を正確に予測することは困難である。先進の計測技術と数値計算技術により、発生メカニズムを解明し、モデル化することで、抑制または回避方法の創出が期待される。

■ 燃焼数値解析の計算負荷

燃焼器の設計開発において実スケールの試験を繰り返すことはコスト面で非現実的であるため、数値解析による燃焼シミュレーションが必要不可欠である。しかしながら、数百化学種・数千素反応からなる詳細な燃焼反応モデルを用いた燃焼数値解析は計算負荷が膨大で、化学反応項の解の硬直性が強いため、現実的な計算リソースと時間内に解を得ることが困難である。

■ NOx、SOx、スス排出、未燃炭化水素排出

多くの分野で厳しい環境規制が導入されているため、燃焼器の実質的な運転範囲が NOx、SOx またはスス排出量によって制限されることがある。燃焼器からの排出量を規制値以下に保つための基盤技術として、NOx、SOx およびスス生成のメカニズム解明と精緻なモデル構築が求められている。また、燃焼器単体での排出量削減が不可避な場合に NOx 還元触媒や PM 酸化触媒が、各種化学プラントでは未燃炭化水素を含むオフガス処理のために酸化触媒が利用されることがある。これらの触媒によるコストやエネルギー消費の増加を極力抑える

ために、高収率・高耐久性な触媒の研究開発が求められている。

■ 微粉炭燃焼および CLC

微粉炭燃焼および CLC の共通課題として、今後の燃料性状の低品質化が挙げられる。今後の石炭の需要増により、これまで使用してきた安定的な品質の石炭が入手しにくくなり、低品位な燃料の利用拡大が求められてくる。燃料として利用する石炭の性状は、燃焼特性を通して実用機器の設計や運転に大きく影響を与えるが、その影響度を予測する技術は発展途上である。また、燃焼特性のみならず、石炭の品質が変われば灰のトラブル（伝熱面等への灰付着等）の起こりやすさも影響を受けるが、灰粒子の伝熱面付着に関する予測技術も発展途上である。また、CO_2 排出量削減を目的として、固体バイオマス燃料や可燃固体廃棄物の混焼を行ってもトラブル無く実用機器を運転できるかどうか予測する技術も求められる。

CLC は、金属酸化物をキャリアとして、キャリアを空気によって酸化する反応器と、キャリアを燃料によって還元する反応器の二つの反応器から構成され、酸化反応器からは窒素と残存酸素が、燃料反応器からは CO_2 と水がそれぞれ別々に排出されるため、CO_2 回収時に燃料反応器からの排ガスの水を凝縮させるだけで高濃度の CO_2 が得られる。課題としては、発電のコストに直結するものとして、いかに安価で耐久性の高いキャリアを開発するかという点と、未だ実用化されていない技術であるため、実用化規模へのスケールアップをしながら全体のシステムを開発する必要がある点である。

［今後取り組むべき研究開発テーマ］

■ 多様な条件における燃焼基礎特性の取得

技術動向を念頭に置きつつ、様々な燃料・酸化剤・温度・圧力条件における燃焼基礎特性を取得する必要がある。実用燃焼器の燃焼場では複数の燃焼特性が重要となることから、燃焼基礎特性として、着火遅れ時間、層流燃焼速度、乱流燃焼速度、消炎限界、火炎構造、化学種分布、温度分布、固有不安定性、微粒化特性などを取得する必要がある。これらのデータを取得するためには、燃焼場で利用可能な先進計測技術の研究開発が重要となる。可燃限界近傍の基礎燃焼特性は自然対流の影響を受けやすいことから、微小重力環境の利用が必要である。高温高圧の燃焼試験設備は大型となることから、研究拠点の整備が求められる。得られた基礎実験データは、後述する各種モデルの検証データとして広く利用される必要がある。

■ 化学反応モデルの研究開発

長年の継続的な研究開発により、各種炭化水素の単成分については信頼できる化学反応モデルが構築されつつある。モデルのさらなる信頼性と予測精度向上のため、理論計算により得られた反応速度定数の高精度化・不確かさ解析を進め、基礎実験データと比較検証することで、モデル定数の最適化を進める必要がある。また、依然として理解が進んでいない化学反応は多く（低温酸化反応、バイオ燃料由来燃料に含まれる含酸素燃料の酸化反応、混合燃料成分系におけるクロスリアクション、NOx・SOx 反応と炭化水素反応の連成、水蒸気や二酸化炭素が燃料の酸化反応に及ぼす影響、アンモニア燃焼反応、スス前駆体の多環芳香族生成反応、オゾンによる反応促進、プラズマ反応）、燃焼機器の高熱効率化と低エミッション化の極限を志向するための基盤となる”完全な”化学反応モデルの構築を目指して、継続的な研究開発が必要となる。

■ 高速燃焼数値解析法の研究開発

燃焼数値解析に要する膨大な計算リソースを大幅に削減するために、燃焼数値解析の革新的高速化法と解の精度を損なわない詳細化学反応モデルの簡略化法の両方が必要となる。また、一般に実用燃焼器は乱流燃焼の形態をとるため、乱流渦と化学反応の干渉を解く必要があるが、これを実現する直接数値計算（DNS）は実用的でない。したがって、乱流火炎の基礎特性を DNS や乱流燃焼実験で取得し、これらと比較検証しつつ、LES や RANS（Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation、レイノルズ平均モデルシミュレーション）をベースにした乱流燃焼モデルの研究開発が必要となる。

■ 異常燃焼の予測回避技術の研究開発

管内音響共鳴や強制音響場における非定常火炎挙動およびモデル燃焼器（単気筒エンジン、ガスタービン、工業炉、ロケットなどの模擬バーナ）の燃焼試験を通して、ノッキングや燃焼振動の発生メカニズムの解明が重要である。また得られた知見を元に、異常燃焼の回避方法および事前予測技術の研究開発も重要となる。これらの基盤となる、実用燃焼器に適用可能なセンシング技術および得られたリアルタイムデータの統合処理技術の研究開発が必要となる。

■ 粒子生成モデルの研究開発

燃焼器からのスス排出量を削減するために、スス生成過程（多環芳香族を代表とするスス前駆体物質が成長して一次粒子を形成、これらが重合して二次粒子を形成）の解明とモデル化が重要となる。気体から固体粒子が形成される過程は、量子力学レベルの化学反応と分子動力学レベルの運動が連成するため、分野横断的研究開発が必要となる。また、本研究開発は燃焼合成によるナノ粒子生成過程の解明とモデル化にも有益である。

■ 触媒反応モデルの研究開発

各種材料表面近傍における化学種濃度計測技術を研究開発し、表面における様々な化学種の吸着と脱着、ラジカルの失活の速度定数をモデル化し、表面反応モデルを構築することが重要になる。また、ナノオーダーの触媒粒子や担体周りの物質拡散モデルを構築することも重要になる。両者を統合することで、数値流体解析による触媒性能評価を実現し、触媒の研究開発を加速させることが期待される。

■ 固体燃料粒子反応数値シミュレーション技術開発

固体燃料の性状の変化が実用燃焼機器内における燃焼特性や灰粒子の伝熱面付着特性に与える影響を精度良く予測できる数値シミュレーション技術開発が重要である。特に、燃焼場中における固体粒子の熱分解挙動や、その後の熱分解ガスの詳細な化学反応機構について、計算精度の高いモデルの構築が重要となる。モデル構築のためには、固体燃焼場中の化学種濃度分布計測などによるモデル検証用のデータ取得も必要となる。

■ CLC 技術の確立へ向けた研究開発

日本は CLC の研究開発について、欧米に遅れをとっているが、安価で耐久性の高いキャリア開発等の分野や、実用化へ向けたシステムインテグレーション等について、日本は高い潜在力を持っているため、遅れを取り戻すためにも研究者の数を拡大していくことが期待される。

（５）政策的課題

制度上の課題としては、産学官連携研究において大学の研究を如何に活性化するかという点である。例えばドイツ FVV の場合、大学が基礎研究から技術開発のあるレベルまでを担うことができる体制を維持しているがその大きな原動力が大学の博士課程の学生やポスドクの存在である。博士学生が高いモチベーションで大学において研究を行える背景には博士学生が給与を得ながらプロジェクト内で研究活動に励みその成果が認められれば、産学連携を行っている企業や国の研究機関で職を得るという循環ができているためである。我が国ではこのような循環はできておらず、産学官連携の実働を担うのは主に修士課程の学生でありこの部分が研究の競争力の差になっている。また、燃焼領域に限ることではないが、現象の科学的理解の深さが技術力の差に直接結びつくことを産業側が理解することの一方で、大学側は科学的理解を深める際に出口となる産業応用を意識することが重要であり、両者がこのような意識を持つことができる体制づくりが望まれる[31)]。技術の標準化に関しては、わが国の優れたエネルギー機器の性能が正当に評価されるような国際標準をわが国主導で構築していくことが望まれる。

（６）キーワード

エンジン、ガスタービン、ロケット，工業炉、層流火炎、乱流火炎、燃焼速度、化学反応、固有不安定性、燃焼振動、ノッキング、簡略化反応機構、詳細反応機構、NOx、SOx、スス・PM（Particulate Matter）、低温酸化反応、着火、バイオ燃料、水素、アンモニア、微小重力燃焼、マイクロ燃焼、高温空気燃焼、高温酸素燃焼、触媒燃焼、微粒化，プラズマ支援燃焼，エネルギーキャリア、固体燃料、石炭、微粉炭、廃棄物、低品位燃料、数値シミュレーション、熱分解、CLC、灰付着

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	• 研究の質は世界トップレベルにあるが、研究者の層が薄い。近年、燃焼を主題目とした大型予算が措置され始めたため、今後研究者の層の厚みが形成されることが期待される。
	応用研究・開発	◎	→	• 実用燃焼機器の熱効率・エミッションはいずれも世界トップレベルにあり、日本の省エネ技術をけん引している。
米国	基礎研究	◎	→	• 燃焼を主題目とした大型予算が措置されにくい状況にあるが、研究の質と研究者の層の厚さは依然強トップレベルにある。 • シェールガス開発によるガス価格の下落に伴い、石炭の基礎研究は下火になりつつある。
	応用研究・開発	◎	→	• 産業界との大学の共同研究が活発である。また、具体的な目標物（自動車，航空機）に対する政府機関と大学の共同研究が進められている.
欧州	基礎研究	◎	→	• 国によって、燃焼研究への予算措置がされにくい、国家予算規模が小さい、などの事情があるが、EUが措置するFP7および後継のHorizon 2020により、多国間の研究者ネットワークが形成されており、研究の質も高いレベルにある。 • 液体燃焼に対してIFPen(フランス)，ONERA(フランス)，DLR（ドイツ）などの研究機関が基礎研究から応用研究までを牽引している。

	応用研究・開発	◎	→	• ドイツFVVをはじめとして、産業界との共同研究が活発である。 • 石炭燃焼は、CLCやフレームレス燃焼など、新しい技術開発プロジェクトが活発に行われている。
中国	基礎研究	○	↗	• 燃焼への大型予算が措置されており、燃焼を主題目としたState Key Laboratory認定が複数ある。欧米から帰国した研究者が顕著な業績を出しており、全体をけん引している。 • 微粉炭燃焼関連研究は研究発表件数が著しく増加すると共に、研究の質の向上も顕著である。
	応用研究・開発	△	↗	• 実用燃焼機器の省エネ性能は依然として我が国の方が優位であるが、研究開発は旺盛に進められている。
韓国	基礎研究	○	→	• 研究の質は高いレベルにあるが、燃焼コミュニティーの規模が小さいため、特定分野（例えば化学反応）では成果が見られない。 • 液体ロケットエンジンに対する研究に予算が付けられている。 • 微粉炭燃焼研究は引き続き活発に行われている。
	応用研究・開発	△	→	• 実用燃焼機器の省エネ性能は依然として我が国の方が優位であり、特筆すべき大型プロジェクトもない。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

1) BP Global(2014)
2) Clean coal technologies in Japan, NEDO, 2006.12.
3) Hiroshi Tsuji, Ashwani K. Gupta, Toshiaki Hasegawa, Masashi Katsuki, Ken Kishimoto, and Mitsunobu Morita, High Temperature Air Combustion -From Energy Conservation to Pollution Reduction-, CRC Press 2002, Print ISBN: 978-0-8493-1036-2
4) http://www.jfe-eng.co.jp/products/link/t02.html
5) https://www.chiyoda-corp.com/technology/future/hicot.html
6) Antonio Cavalierea, Mara de Joannonb, Progress in Energy and Combustion Science Volume 30, Issue 4, 2004, pp.329–366
7) 公益社団法人自動車技術会、自動車技術　特集　年鑑（2016 年 8 月号）
8) SIP「革新的燃焼技術」　ホームページ　http://www.jst.go.jp/sip/k01.html
9) Co-Optima, http://energy.gov/eere/bioenergy/co-optimization-fuels-engines
10) SIP「エネルギーキャリア」　ホームページ　http://www.jst.go.jp/sip/k04.html
11) 一般社団法人日本機械学会、日本機械学会誌　特集　発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望（2016 年 8 月号）
12) 東北電力 プレスリリース http://www.tohoku-epco.co.jp/news/normal/1192188_1049.html
13) NEDO、水素社会構築技術開発事業　http://www.nedo.go.jp/content/100784044.pdf
14) 産業技術総合研究所　プレスリリース
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/ pr2015/pr20150917/pr20150917.html

15) NEDO、高性能工業炉等の開発プロジェクト（平成 5-11 年度）
16) NEDO、高温空気燃焼制御技術の研究開発（平成 11-15 年度）
17) 工業炉協会　ホームページ　http://www.jifma.or.jp/index.html
18) NEDO、高温酸素燃焼技術の研究開発（平成 23-25 年度、先導研究）
19) NEDO、マイクロコンバスタ技術を利用した密閉式ガスヒータ搭載連続加熱炉の研究開発（平成 23-25 年度、実用化開発）
20) NEDO、マイクロコンバスタ技術を利用した密閉式ガスヒータ搭載連続加熱炉の研究開発（平成 26-27 年度、実証フェーズ）
21) アジア／世界エネルギーアウトルック 2015, 日本エネルギー経済研究所
22) FLOX-COAL-Ⅱ, http://floxcoal2.eu-projects.de/
23) カライド酸素燃焼プロジェクト, http://www.callideoxyfuel.jp/
24) https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/federal_alternative_jet_fuels_research_and_development_strategy.pdf (USA)
25) http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/funding-opportunities/work-programme-2016/ (FRA)
26) ポスト京開発プロジェクト「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」http://www.aics.riken.jp/jp/post-k/pi/kadai6
27) 日本燃焼学会 燃焼解析プラットフォーム研究開発プロジェクトチーム「産学連携研究事業　燃焼解析プラットフォーム開発・検証」,日本燃焼学会誌 vol.58 No.186 (2016 年 11 月号).
28) Ishida, M. et al., Energy, 19, 415-422, 1994
29) SUCCESS, http://www.clc-success.eu/
30) DOE, FE0009484 https://www.netl.doe.gov/research/coal/project-information/proj?k=FE0009484
31) DOE, FE0009484 https://www.netl.doe.gov/research/coal/project-information/proj?k=FE0009761
32) NEDO ニュースリリース　http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100421.html

3.28　エンジン燃焼(自動車)

（1）研究開発領域の簡潔な説明

エンジン(本領域では内燃機関)は、シリンダ内の吸気・圧縮・燃焼・排気の往復動サイクルにより、燃料の化学エネルギーを回転運動に変換する装置である。エンジン燃焼の特徴は間欠的な短時間での燃焼完結が必要であり、さらには圧縮時において自己着火という、他の燃焼装置ではあまり問題とならない現象の制御が重要なことが挙げられる。ここでは、低排出ガス化と高効率化の同時実現に向けて研究開発が進められている自動車用エンジンにおける周辺機器開発や制御技術も含めた燃焼技術を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］[1)2)]

自動車のエネルギー消費量は、我が国の最終エネルギー消費の 20.8%(2013 年度)と高い割合を占めており、自動車燃費を向上させることはエネルギー消費削減、CO_2 排出削減だけでなく輸送業におけるランニングコストの削減、ひいては経済の活性化の観点からも重要となる。自動車燃費向上のためには、エンジンの熱効率向上、車両の軽量化、駆動系改良、さらには車両減速時のエネルギーを電気回生するハイブリッド化などのパワートレインシステム全体からの方法などが挙げられるが、この中でエンジンの熱効率向上は自動車燃費向上のための基本的な方策の一つである。

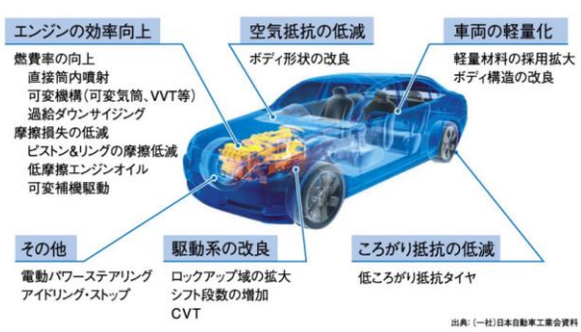


図 3-18
出典：自動車工業会

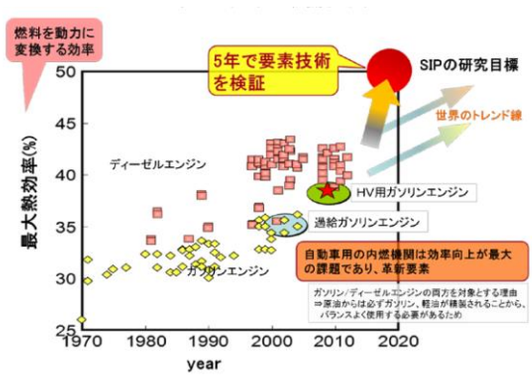


図 3-19
出典：SIP 革新的燃焼技術

なお IEA による自動車の将来パワートレーン推定では、今後 30 年以上、ハイブリッド自動車などの動力源の過半数は、内燃機関(以下、エンジン)が使われ、結果として世界の石油エネルギーの約 50%を自動車が消費するものとしている。このため電気自動車や燃料電池自動車の技術向上を考慮しても、エンジンを用いる自動車の重要性およびその燃費低減に向けた研究開発の必要性は変わらない。

［動向（歴史）］

現在自動車用エンジンは、吸気・圧縮・燃焼・排気の 4 サイクルによるレシプロ型エンジンが主流であり、1 秒間で数十回程度（2400rpm の場合、1 秒間で 20 回）の間欠的な燃焼

を用いるものである。

現在市販されているエンジンは機構上 2 種類に大別される。一つは、ガソリンのように蒸発性が高く、自己着火(高温高圧場で燃料が自然に着火する現象)しにくい燃料を用いて予め空気との混合気を形成した後に火花点火し、火炎伝播により燃焼を制御する火花点火燃焼を用いたオットーサイクルエンジン(通称・ガソリンエンジン)がある。もう一つは、シリンダ内に充填され断熱圧縮により高温高圧になった空気内に燃料(主に軽油)を高圧噴射して燃料と空気を急速に混合させ、自己着火により燃焼を開始させ、その後燃料と空気との拡散燃焼を燃料噴射によって制御する圧縮着火燃焼を用いるディーゼルエンジンがある。

エンジン燃焼は、ボイラー燃焼のような連続的燃焼と異なり、自己着火現象の制御が重要な課題となる。ガソリンエンジンでの火花点火燃焼の場合、自己着火はノッキング（未燃混合気が伝播火炎で燃焼する前に自己着火による急激な燃焼を起こし振動を与える現象。最悪エンジン損傷につながる）としてあらわれるため、抑止・回避すべき現象となる。一方ディーゼルエンジンでの圧縮着火燃焼の場合、自己着火は本来の着火方式であり、着火タイミングの制御上、重要となる。また自己着火は燃焼組成に依存した低温酸化反応(約 800K 以下)の影響を受けるため、燃料品質として自己着火性が重要となり、ガソリンでは自己着火のしにくさを表すオクタン価、軽油では自己着火のしやすさを表すセタン価（あるいはセタン指数)の指標を用いた規定がある。

エンジンに求められる性能は出力・トルクの基本性能に加え、燃費性能および排気性能である。一般に燃費性能は、高圧縮比化が可能でかつ機構上吸気を絞らないためにポンプ損失が少なく希薄燃焼となるディーゼルエンジンの方が、ガソリンエンジンよりも 2 割程度良いとされる。一方、排気性能については、燃焼時に生成する有害成分である窒素酸化物(NOx)、一酸化炭素(CO)、未燃炭化水素(HC)、さらには粒子状物質(PM)の排出物の削減、いわゆる排出ガス低減技術であり、触媒等を用いた排出ガス浄化技術の役割が大きい。しかし排出ガス浄化はエンジン燃焼制御も含めたシステム技術であり、エンジン燃焼も排気性能を高くする上で重要な要素となる。ガソリンエンジンでは燃焼時に生成する NOx、CO、HC について、燃料・空気の予混合気を量論比制御することで三元触媒よりほぼゼロにできるが、ディーゼルエンジンでは拡散燃焼で生成する NOx や PM の大幅な低減が課題になる。特に NOx は排気中の残存酸素や低い排気温度等により排気中の NOx、CO、HC は三元触媒による連続還元処理が難しいという課題もあるため、研究開発の動向として、ガソリンエンジンは燃費向上、すなわち高効率化を主眼に、ディーゼルエンジンは排出ガス特性改善(NOx と PM の同時低減)を主眼に研究開発が進められてきた経緯にある。

現在のガソリンエンジンの原形は、1877 年にドイツのニコラウス・オットーがガス燃料を用いたエンジンを開発したことに始まるとされる。その後、1985 年にやはりドイツのベンツが火花点火を用いたガソリンエンジンを搭載したガソリン自動車を開発している。一方、ディーゼルエンジンについては、ドイツのルドルフ・ディーゼルが発明し 1893 年に特許取得している。ただし振動や小型化の技術的困難さにより自動車への搭載が実現したのは 1920 年代のことである。第二次大戦後に目を向けるとガソリンエンジンではキャブレター、ディーゼルエンジンではジャーク式ポンプといった機械式制御装置が用いられていた。しかしながら，1960 年代からの排気規制強化や，燃費向上の要求に従い，精度の高い制御の必要性，コンピュータ技術の向上・低コスト化によって，電子制御が取り込まれるようになった。ガソ

リンエンジンでは，1980 年代にキャブレターに代わって，電子制御式の燃料噴射装置が使われるようになり，排気管の酸素センサーのフィードバック信号との組み合わせにより燃料噴射量を精度よく制御できるようになった。これにより予混合気の量論当量比付近で燃焼させることで、排気中の NOx、CO、HC は三元触媒により高い浄化率で同時低減か可能になった。また，1990 年代からは可変バルブタイミング（VVT : Varible Vavle Timing）も導入され,燃費改善やドライバビリティーの向上に寄与してきた。エンジンの高効率化のためには、一般的にディーゼルエンジンのように高圧縮比化させ、かつ吸気を絞らないことが望ましい。しかしながら現状のガソリンエンジンの圧縮比は、ノッキング現象が起きない上限レベル(10～12 前後)であり、これ以上の高圧縮比化のためには自己着火を抑止する技術が必要になる。現在 SIP「革新的燃焼技術」で実施されているガソリンエンジンのスーパーリーンバーン(超希薄燃焼)では、より理論サイクルに近い熱効率を得、熱損失やポンプ損失を低減するために空気過剰率(λ)を 2 以上とすることを狙いとしているが、火花点火が難しく、また火炎伝播速度の低下による燃焼の不安定化もあり、その対策技術の研究開発が進められている。

ディーゼルエンジンでも，1970 年代より段階的に強化された排出ガス規制(最終的には未規制時から NOx、PM とも 1／100 レベルまでの低減)に対応するべく、特に NOx と PM の同時改善を目指す技術開発が進められてきた。ジャーク式ポンプに代わる高圧ポンプと電子制御式の燃料噴射系を組み合わせたコモンレールシステムが 1990 年代に登場したことで、エンジンの運転状態によらずに安定した高い噴射圧力を確保できるようになった。これにより燃料と空気の混合促進，さらには既燃ガスの再導入（EGR : Exhaust Gas recirculation）や，触媒を利用した後処理システムとの組み合わせもあって，排気規制の対象となる NOx，PM の同時低減を可能としてきた。またコモンレールシステムでは 1 サイクルのうちに数 mm^3 の微量な燃料を正確に数回に分割して噴射する多段噴射などで，燃焼時に生成する排気の低減，騒音の低減，また触媒の制御なども行っている。

エンジン燃焼としては、着火と燃焼形態の違いによりガソリン燃焼とディーゼル燃焼の 2 種類以外にも成層燃焼(直噴ガソリンエンジン)、HCCI(Homogeneous-Charge Compression Ignition:均一予混合圧縮着火）燃焼がある。（表 3-8）

表 3-8　着火方式と燃焼方式の違いによる燃焼区分

混合気形成（燃焼方式）／着火方式	均質（予混合燃焼）	不均質（拡散燃焼）
火花点火	ガソリン燃焼	成層燃焼（直噴ガソリンエンジン）
圧縮着火	HCCI燃焼（均一予混合圧縮着火）	ディーゼル燃焼

成層燃焼を用いた直噴ガソリンエンジンは、吸気を絞らないため部分負荷運転時の効率を高くできる。過去には市販エンジンとしても搭載されたが、酸素存在下では三元触媒が機能しないことや拡散燃焼による PM 生成などの排気性能の点で問題があった。このため現在の直噴ガソリンエンジンは、従来同様の均一予混合燃焼のみを採用し、成層燃焼の形態は用いられていない。一方、HCCI 燃焼は均一予混合気を自己着火させる燃焼方式であり、1990 年

代に NOx と PM の大幅な同時低減が可能な燃焼技術として、ガソリンエンジンより早くディーゼルエンジンを用いた HCCI や PCCI(部分予混合圧縮着火燃焼)の研究領域に注目が集まり、一時は数多くの研究が実施された。しかし過早着火や未燃燃料の増加による燃費の悪化、中負荷以上での制御が困難など、当時の技術レベルでは解決が困難なことが多く、EGR 制御の高度化や排出ガスの後処理技術の進展と共に次第に衰退した経緯にある。現在はガソリンを用いた HCCI 燃焼、ディーゼルにおける PCCI 燃焼が研究されているが未だ実用には至っていない。これらの燃焼方式を実用化するためにはハード面以外にもソフト面として、燃焼自体の緻密な制御技術が必要となる。それぞれの基本的な機器構成と燃焼特性から HCCI では既燃ガスを利用した燃焼制御則[3),4)]，PCCI では燃料噴射を利用した制御則[5)]が検討されており，その性質上，前者は主にフィードバック制御系に関する研究[6),7)]が，後者は主にフィードフォワード制御系[8),9)]に関する研究例が多い。制御器については，研究レベルでは MPC（Model Predictive Control）の利用[10),11)]が，計算機の処理速度の向上に伴い多く試されるようになってきている。

現在は用途(乗用車 or 商用車(トラック・バス等))でエンジン技術のトレンドが異なってきており、そのため燃焼に関わる技術課題も異なる。以下に乗用車用ガソリンエンジン、乗用車用ディーゼルエンジン、商用車用ディーゼルエンジン(中～大型)に分けて最近のトレンドを記する。

- 乗用車用ガソリンエンジン

  乗用車用ガソリンエンジンでは車の燃費向上技術のために、エンジンの排気量を小さくするダウンザイジングがトレンドになっている。これは小排気量化により燃費が悪い低負荷領域での運転を回避できるためであり、低下する出力とトルクはターボ過給器により補うことになる。このためターボ過給器の特性、小排気量化にともなうシリンダサイズの減少により直接シリンダ内に複数回に分割して噴射されたガソリン噴霧の特性[12)]やガソリン噴霧とピストン、シリンダ壁との衝突挙動は混合気の形成やノック回避技術という観点からニーズの高いテーマである[13),14),15)]。また、ダウンサイジングされた直噴エンジン固有の現象としては、低速、高負荷において Low Speed Pre-Ignition（以後，LSPI）と呼ばれる異常燃焼が挙げられる[16)]。これは、エンジンオイルが起因となった自己着火現象が一因と言われている。さらに、オイル中の Ca 成分が触媒的な作用をすることで HC の自己着火反応を促進させるとも言われている[17),18)]。またダウンザイジングのもう一つの問題としては微粒子(Particulate Matter、以後 PM)、微粒子の排出数（Particle Number、以後 PN））の生成が挙げられる。このようなエンジン内の微粒子は過渡運転時においても多く生成され、常に複雑な生成過程をたどることが知られている。この現象を解明し、微粒子生成に対して感度の高い現象を表現できるモデル等[19)]によりエンジン燃制御を行う研究が行われている[20),21),22),23)]。その他、燃費改善効果が大きい技術としては、圧縮比を高め、さらに、圧縮比と膨張比の異なるミラーサイクルの利用[24)]や、EGR をターボ過給と併用し、ポンピングロスや熱損失を減らすことが求められる。しかし、EGR による燃焼速度の低下を補うため、シリンダ内の乱れを強化するが、点火性の悪化やサイクル変動を誘発することになる。したがって、火炎伝播速度の予測や強乱流場における点火特性の解明や点火装置の強化[25)]の研究のニーズがある。

3 次元数値熱流体モデリングに関しては、エンジンではバルブやピストンといった移動境界をもつことと、計算時間の観点から、RANS(Reynolds Averaged Numerical Simulation)をベースとした計算コードは産業界においては需要が高い [26]。サイクル毎の吸気、圧縮、燃焼、膨張、排気行程の一連のシミュレーション、特に燃焼過程においては、分割的に直接噴射されたガソリン燃料の混合気の形成過程 [27]、火花点火による放電から火炎核の形成、さらには、火炎伝播への移行、未燃領域の自己着火反応機構の開発および反応機構のリダクションによる Computational Fluid Dynamics[28]によるノッキングの発生予測の研究も行われている。今後は、コンピュータの性能向上とともに LES (Large Eddy Simulation)に移行すると考えられている。

その他の重要技術としては、近い将来、シリンダ内の圧力を測定し [29]、次のサイクルの制御に役立てるサイクル毎制御を行うため、オンボードレベルで可動可能な多段噴射を含む燃焼過程を記述しうる高速演算燃焼モデルはガソリンエンジンの開発に必須のツールとなる [30),31),32]。このようなツールにおいては、実走行での燃費を改善する観点からもニーズは高い。

- 乗用車用ディーゼルエンジン

近年の乗用車クラスのエンジンにおいては、排出ガスと燃費の同時改善技術として、低圧縮比化が提案されている。これは低圧縮比化により燃料噴射開始から着火までの着火遅れ期間を長くし、燃料の予混合化を促進することが目的である。一般に低圧縮比化は理論熱効率の低下をまねく。しかし乗用車クラスのエンジンサイズの場合、現状の圧縮比(16程度)を下げても、低温始動性など新たな課題は生ずるものの、機械損失・熱損失の減少や燃料噴射時期の最適化により効率改善効果の方が大きくなる。このため最近の乗用車用ディーゼルエンジンでは圧縮比 14 程度を採用するものも市販化されている。ディーゼル燃焼自体の改善による燃費向上として、噴射圧力を 300 MPa 程度まで高めた高圧燃料噴射 [4]の需要は高まることが予測されている。このため、高温、高密度の雰囲気中に噴射された高圧燃料ジェットの分裂、混合気形成さらには燃焼、排出ガス過程を明らかにすることがニーズの高い研究テーマである [33]。また、ディーゼルエンジンに対して低コストで可変圧縮比を可能にする研究のニーズが高まる可能性がある [34]。

ディーゼルエンジンにおける 3 次元数値熱流体シミュレーションにおいては、上記の開発トレンドを考慮すると軽油や重油を代替する反応機構の開発とその反応機構のリダクション、吸気、燃焼、排気行程及び NOx や微粒子をあるレベルで一気通貫で計算できるコードが必要である。ガソリンと同様に RANS のニーズは未だ高いが、今後は LES が主流になるものと予測している [35),36]。

また、ディーゼルエンジン固有の問題として、VW 事件に端を発した排出ガス不正やエンジンの保護制御領域を低減する研究は今後益々盛んになるものと考えている。特に、吸気低温における EGR による凝縮水や未燃 HC の発生、各種要因による EGR デポジットの生成とその対策を進めることは急務とされ [37),38]、経済産業省+AICE のプロジェクトでも精力的に研究が進められている。

- 商用車用ディーゼルエンジン（中～大型）

中～大型商用車用のディーゼルエンジンの研究の動向で乗用車用と異なる点は、低圧縮比化には進んではいないことが挙げられる(現状おおよそ圧縮比は 17～19 レベル)。これは、

現状で熱効率が最適条件近くになっており、低圧縮比化により熱効率の低下が顕著になるためである。

新機構のエンジンとしては、米アーケテス・パワー社はトラック用エンジンとして対向ピストン型のエンジンを開発[39),40)] 中で、最大熱効率 50%を達成しており、現在、耐久性テストを実施している注目すべきプロジェクトである。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

- Wisconsin University では反応性の異なる 2 燃料を用いた新燃焼方式(RCCI： Reactivity Controlled Compression Ignition)等の)が提案されている。
- スプリットサイクル(Volvo Trucks＋Lund University の 2 段圧縮 2 段膨張形式、イギリス Ricardo 研究所の等温圧縮行程を実現した CryoPower など)や VCR(Variable Compression Ratio：可変圧縮比)等のエンジンの開発も数多く行われている。
- SwRI(Southwest Research Institute)での Dedicated EGR では 4 気筒の乗用車用ガソリンエンジンのうち 1 気筒の排気を吸気にすべて環流し､燃料を部分酸化させることで､ノッキング発生を抑制する目的である。25%という高 EGR 率にもかかわらず失火による燃焼変動を低減でき高効率燃焼が可能となる技術である。
- エンジン制御においては、従来の事前実験による制御マップを用いたエンジン制御が限界に来ていることから、新たなモデルを利用した制御系設計や制御に注目が集まっている。モデルは、大きく二つに分類でき、実験データを基に、統計的手法によりモデルを構築する統計モデルと、物理や化学反応論に基づく物理モデルがある。前者は DoE（Design of Experiments）を利用して実験点数を可能な限り削減し、設定値（入力）と結果（出力）から様々な統計処理を用いて入出力の関係を導き出すものである。この統計処理の手法として、ニューラルネットワーク[41)]や機械学習[42)]の利用による過渡状態の再現も含めた試みがなされている。後者については、エンジン筒内の燃焼現象の複雑さより、現状では一部は統計モデルが用いられるものとなる

［注目すべきプロジェクト］

【日本】

- SIP 革新的燃焼技術(2014～18)[43)]：内閣府(および経済産業省、文部科学省、JST)主導の乗用車エンジンの熱効率をガソリン、ディーゼルエンジンとも 50%まで高めることを目標に革新的な燃焼技術、燃焼解析技術の実現

【米国】

- SuperTruck(2009～16)、SuperTruck II(2016～)プロジェクト[44),45),46)]：エネルギー省主導の 本年度からの SuperTruck II プロジェクト(年間 8 千万ドル規模)では、車両走行燃費を 2009 年当時のトップランナーから 100%以上改善することを目指す。
- Co-Optimization of Fuels and Engines (Co-Optima)プロジェクト(2016～19、19 年で終了は火花点火エンジン：Thrust I、で圧縮着火エンジン：Thrust II については 25 年頃ま

で続けるという当初計画)：

【欧州】

- 欧州委員会(European Commission)が推進する FP7(7th Framework Programme)、および Horizon2020 の各サブプログラムから、エンジン燃焼関係(主に Transport カテゴリーに属するものとして)
- CO_2RE(CO_2 REduction for long distance transport：2012～15)[47]：Daimler の中型、Volvo の大型商用エンジンをベースに総予算 1700 万ユーロで Euro VI 排気要件適合エンジンの燃費を Euro V 時を基準として 15%改善を目指すデモンストレーションプロジェクト(その他天然ガスエンジンの燃費改善も含む)。開発の前提としては、TRL6 乃至 7 レベル、2020 年までに市場に導入可能な技術の範囲内で、という条件が付いていることから、特別な新規技術についての研究開発にはなっていない。
- POWERFUL(POWERtrain for FUture Light-duty vehicles：2010～14)：POWERFUL プロジェクトは以下の(クラス A～B に属する)小型車両用 3 種のエンジンが対象で、2005 年の車両をベースに 2020 年までに CO_2 排出を 50%低減することを目指すためのコンセプト

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］[48),49)]

- 自己着火の機構解明が進んできたが、その制御技術、および着火後の燃焼制御技術については今後の課題。特に比較的単純な直鎖系炭化水素ではある程度解明が進んできたが、多成分(芳香族を含む)で構成される液体燃料の詳細な燃焼化学反応機構、Soot 生成機構等の解明が今後の課題である。
- 新たな計測手法として注目を集めている米国 Argonne 国立研究所の高エネルギーX 線を使った燃料噴霧のノズル内流れや噴射直後の噴霧構造の可視化などに関して、国内の SPring-8 ではポテンシャルは有るものの同様な計測の出来るビームは存在せず、全て米国での実験に頼っているのが現状である。
- 今後の燃焼制御の基礎となり、数値シミュレーションモデルの基となるディーゼル噴霧混合気形成や壁面での熱損失、摺動部品・回転部品の潤滑と燃焼との関連といった基本的な現象の解明が遅れている。
- 熱効率と排出ガス特性を両立する最適な燃焼過程およびそれを組み合わせて効果を発揮するエンジン機構が現状維持で良いのか、或いは全く別の機構の方が相応しいのか、熱力学的・工学的に解明することが、新たな要素技術提案のためにも必要な課題となる。

［今後取組むべき研究テーマ］

- 従来からの物理的なアプローチ(燃料噴射特性、筒内流動、燃焼室形状、過給圧等)だけでなく、燃焼制御に関する化学的なアプローチ(低温燃焼制御のための反応速度論やラジカル等の燃焼改善への寄与等)
- 熱損失や潤滑状態、高圧噴霧拡散燃焼といった未だ明らかでない基礎的な現象の詳細解明と、その推進のために必要な、新たに標準化されるべき計測・解析技術の構築

- 新たなエンジン機構、壁面遮熱構造など、原理的にはポテンシャルが有りながら過去の技術水準では実現不可能だった技術への画期的なアプローチ
- Super Computer(京など)を活用したエンジンの燃焼に関わる大規模数値シミュレーション(神戸大学の堀先生らが現在取り組んでいるが、より裾野を拡げる必要がある)
- 燃料の持つ化学エネルギーをどの様に燃焼させる事で熱エネルギーに変え、更にそれをどの様な過程(或いはパワートレーン系のエンジン以外のサブシステムでの動力回生)を経て仕事に変換するのが最も効率が高くなるか、といったエクセルギーバランスに則ったストラテジーの検討
- 基礎的な燃焼現象の研究成果からTRL6～7といったデモンストレーション可能なエンジン(要素)技術開発へと橋渡しする、様々なトレードオフのブレークスルーを可能にする新たな燃焼コンセプト

（５）政策的課題

国内の独自研究・技術開発に固執するのみではなく、国内技術レベルの底上げを狙うならばより広い視野を持つ事が最優先であり ECN や Horizon2020 といった現時点では先行しているエンジン燃焼の基礎・応用に関する国際的共同研究の枠組みへ、より研究者が積極的に参加する事への(経済的)助成も一考に価する。

国内においては米国エネルギー省のように基礎と応用を繋げる領域に対しての継続的(且つ計画的)な研究への投資と、その成果の(将来的)価値を正しく評価する開かれた場(エネルギー省では Annual Merit Review として全ての委託課題について毎年春に一般公開で開催、その発表資料および報告書集も毎年 WEB 上に公開)を整備することが重要になる。SIP の公開シンポジウムは、成果評価の公開の場としてある程度機能しているが、今後誰がどういった基準で成果を評価するかまで踏み込んだ環境整備が必要になってくる。また、SIP の革新的燃焼技術プロジェクトに対しては、研究対象を初めから「乗用車用(小型)エンジン」といった特定のカテゴリーの要素技術に絞ったことで、エネルギー消費量としてはより比率の高いその他多様なアプリケーション(トラック・バス、汎用機、建設機械、コジェネシステム、鉄道等)への技術の適用性を減ずる事にならないようにすることも配慮が必要と考えられる。

また将来燃料に関してはエネルギーの大半を輸入に頼っている国内向け技術としては課題化することが困難ではあるが、少なくとも、海外の動向に目を向け燃料の多様化に対する将来燃焼技術のコンパチビリティを常に担保していく必要がある。

（６）キーワード

排出ガス規制、燃費規制、ダウンザイジング、過給機、多段噴射、PM、VVA、サイクル毎制御、燃料高圧噴射、ディーゼル触媒、触媒反応機構、DOC、DPF、 NSR、SCR、EGR、デュアルフューエル、エンジンシステム統合制御モデル、熱損失、超高圧燃料噴射、噴霧火炎構造、ノッキング、詳細化学反応機構、超希薄燃焼(スーパーリーンバーン)、摩擦損失低減、制御マップ，モデルベースト制御，高効率燃焼方式

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	● SIP革新的燃焼技術により、産学の相互理解が深まっている。またいくつか重要な成果が創出されはじめている。一部の研究領域の研究者が不足している分野があるので強化が必要である ● 燃料に関する基礎研究が不足している
	応用研究・開発	○	→	● 基礎部分の下支えが十分でないため産学共に充分に取り組めていない ● NEDOの助成も企業が短期的に事業化することが大前提で、主な欧米のプロジェクトの様に産学共同で取り組む(直接は製品に至らないかも知れないが)将来の技術として必要と考える実証研究段階への大型助成が少なすぎるのが一因と考える ● AICE(自動車用内燃機関技術研究組合)内のディーゼル燃焼分科会に制御分科会も追加され、ディーゼル燃焼・制御分科会となり、SIPの制御チームとAICEの協力体制が強化された[50]。 ● 経済産業省+AICE、内閣府SIPプロジェクトにおいて、基礎研究の成果を実際のエンジンに応用した研究を産、学、研究機関で展開している。経済産業省+AICEのプロジェクトはFY2016が最終年度であり設備や研究結果を活用した実用化へ向かって次のステップを繋げる必要がある。 ● 商用車のエンジンの大型プロジェクトが不足している。
米国	基礎研究	◎	↗	● ECN(Engine Combustion Network)等の基礎研究に関わっている人材の豊富さと交流の多さ、および各国立研究所の所有するスーパーコンピュータや高エネルギーX線解析などが積極的に活用出来る環境にあること ● 潤沢な予算のもと、国立研究所、有力大学で基礎研究を実施している。基礎研究成果としては、目を見張るものも多いが、エンジンへ適応できるかどうかは今後の課題である。
	応用研究・開発	○	↗	● 本年度から開始するSuperTruck IIにおいて、自動車用エンジンとしては非常にチャレンジングなBTE:55％のシナリオ検証が主要テーマとなると考えられる ● 例えばUniversity of Wisconsinではその地方に数多く有る小型エンジン企業(農耕用、2輪用など)を纏めてコンソーシアムを設立し、大学として製品に直接繋がるような研究を長年続けてきている(各大学がその様な研究の中核を担っている) ● 2014年末までに，米エネルギー省のプロジェクトとして、産学連携でACCESS(Advanced Combustion Concepts - Enabling Systems and Solutions)が動いていた。熱効率向上を目指したHCCIエンジンシステムに関する内容で，Boschがプロジェクトンのリーダー的立場で、燃焼制御はミシガン大が担当した[51]。 ● エンジンへ適応して熱効率の改善に具体的に役立てるような研究は少ない。今後、USDRIVE, 21st Century Truck プロジェクト、対向ピストンエンジンのプロジェクトがどの程度、発展するか注目に値する。 ● 商用車の研究開発にも力点を置いている点が評価できる。
欧州	基礎研究	◎	→	● 大学や研究機関が中心となって、エンジン燃焼に関わる様々な(例えばCity University of Londonが中心となっているノズル内キャビテーション：IICR Cavitation Workshop、IFPENが主宰するLarge Eddy Simulationのエンジン燃焼への活用：LES4ICE、Lund Universityが主宰する予混合圧縮着火のコンソーシアム等)基礎現象理解のためのコンソーシアムが組織され、地方政府や企業を巻き込みながら継続的に研究を行っている。 ● ドイツアーヘン工大を中心に2015年からSymposium for Combustion Controlが開催されるようになった。10カ国，100名を越す参加者がおり，シングルトラックでの研究成果発表が2日間行われている[52]。 ● 独では1953年からFVVによるコンソーシアム型の内燃機関研究が莫大な予算の元、展開されていて、ドイツにおける全ての自動車関連企業と有力大学が一体となった研究を実施している。FVVではドイツ産業研究協会連合（AiF）をはじめとして2/3が公的資金で1/3を参画企業が支援する。企業から選出されChairmanのもと、大学間でチームを組んで研究を進めていくことが大きな特徴である。VW事件の影響か今後は燃料電池を研究テーマに加えるとのことで、内燃機関への予算投入が今後のエンジン燃焼研究発展の鍵である。 ● 基礎研究に対する予算としてはFVVとは別にDFG（ドイツ学術振興会）も存在する。一例として、バイオマス燃料の製造から実用まで行うThe cluster of excellence という大規模なプロジェクトがAachen工科大学で

				は行われている[53]。
	応用研究・開発	○	→	● 欧州委員会が取り纏めるFP7やHorizon2020といった短期集中型＋テーマを絞り込んだ産学プロジェクトが常に多数並行して進み、複数メーカが共同＆競合して取り組んでいる(SuperTruckも同様)。 ● 但し成果のアウトプットにはバラツキも有り、部分的には成果が公開されることはあってもなかなか欧州外から全てを把握することが難しい。 ● ドイツの内燃機関の研究コンソーシアムであるFVV(Forschungsvereiningung Verbrennungskraftmaschinene.V.）がこれから積極的に取り組むテーマの一つとして、Controls, Regulation, Sensors を掲げている。Regulation を Controls と Sensors の一つの括りとしている点は興味深い[54]。
中国	基礎研究	△	↗	● 国家重点大学を中心に燃焼の基礎研究設備の拡充が進んでいる。研究論文のレベルは全体的に上がってきていると言える
	応用研究・開発	△	→	● 日米欧の自動車メーカとの合弁会社から技術移転がなされはじめており、研究レベルは確実に向上している
韓国	基礎研究	△	→	● Korea auto-oil プログラムがFY2017まで実施予定であるが、着実に進んでいる。 ● エンジン燃焼に関する基礎研究の国プロジェクトは新規に立ち上がっていないようである。
	応用研究・開発	△	→	● 環境府を中心に実用化事業（製作車, レロフィット、計測技術）が進行中[55]。事業期間はphase Ⅰ が2011.5 – 2016.4, Phase Ⅱが2016.5-2021.4で、毎年100億ウォン/年。ディーゼルエンジンの開発が全体的に遅れている。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）参考文献

1) International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012, Pathways to a Clean Energy System, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012_free.pdf p. 443, August, 12th, 2016
2) International Energy Agency, Technology roadmap, Fuel economy of road vehicles, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Fuel_Economy_2012_WEB.pdf, p.18-19, p.24-25, August, 12th, 2016
3) Law, D., Kemp, D., Allen, J., Kirkpatrick, G. et al.,"Controlled Combustion in an IC-Engine with a Fully Variable Valve Train," SAE Technical Paper 2001-01-0251, 2001, doi: 10.4271/2001-01-0251.
4) Caton P. A., Simon A. J., Gerdes J. C., and Edwards C. F., "Residual affected homogeneous charge compression ignition at low compression ratio using exhaust reinduction," Int. J. Engine Res., vol. 4, no. 3, pp.163-177, 2003.

5) Kook, S. and Bae, C., "Combustion Control Using Two-Stage Diesel Fuel Injection in a Single-Cylinder PCCI Engine," SAE Technical Paper 2004-01-0938, 2004, doi:10.4271/2004-01-0938.
6) E. Hellstrom, J. Larimore, S. Jade, A. G. Stefanopoulou, and L. Jiang, “Reducing cyclic variability while regulating combustion phasing in a four-cylinder HCCI engine,” IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 22, no. 3, pp. 1190–1197, 2014.
7) M. Karlsson, K. Ekholm, P. Strandh, R. Johansson, P. Tunestål, and B. Johansson, “Closed-Loop Control of Combustion Phasing in an Hcci Engine Using Vva and Variable Egr,” IFAC Proc. Vol., vol. 40, no. 10, pp. 501–508, 2007.
8) R. Finesso, E. Spessa, and Y. Yang, “Fast estimation of combustion metrics in di diesel engines for control-oriented applications,” Energy Convers. Manag., vol. 112, pp. 254–273, 2016.
9) A. E. Catania, R. Finesso, and E. Spessa, “Predictive zero-dimensional combustion model for DI diesel engine feed-forward control,” Energy Convers. Manag., vol. 52, no. 10, pp. 3159–3175, Sep. 2011.
10) Ebrahimi, K. and Koch, C., "Model Predictive Control for Combustion Timing and Load Control in HCCI Engines," SAE Technical Paper 2015-01-0822, 2015, doi:10.4271/2015-01-0822.
11) V. M. Janakiraman, X. Nguyen, and D. Assanis, “An ELM based predictive control method for HCCI engines,” Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 48, pp. 106–118, 2016.
12) C.Pötsch, L. Baumgartner, D. Koch, F. Bernhard, B. Beyfuss, G. Wachtmeister(Technische Universitat Munchen), D. Wichelhaus (Volkswagen Motorsport) Optimization of the Mixture Formation for Combined Injection Strategies in High-Performance SI-Engines, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2476, 2015/9/13-17
13) A.Montanaro, L. Allocca, G. Meccariello, M. Lazzaro(Istituto Motori CNR), Schlieren and Mie Scattering Imaging System to Evaluate Liquid and Vapor Contours of a Gasoline Spray Impacting on a Heated Wall , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2473, 2015/9/13-17
14) R. Cracknell(Shell Global Solutions (UK)), W. Warnecke, J. Redmann, T. Goh(The Shell Global Solutions Deutschland), Octane Requirements of Modern Downsized Boosted Gasoline Engines , MTZ, Vol.76, No.7-8, 2015/7
15) M. Costa, P. Sementa, U. Sorge, F. Catapano, G. Marseglia, B. M. Vaglieco(Istituto Motori CNR), Split Injection in a GDI Engine under Knock Conditions: an Experimental and Numerical Investigation , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2432, 2015/9/13-17
16) M. Kassai, H. Hashimoto, T. Shiraishi, A. Teraji, T. Noda(日産), Mechanism Analysis on LSPI Occurrence in Boosted S.I. Engines, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants,No.2015-01-1867, 2015/9/1-4
17) E.Chapman(GM), V. Costanzo(Aramco Services), A Literature Review of Abnormal Ignition by Fuel and Lubricant Derivatives, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1869, 2015/9/1-4

18) K. Morikawa, Y. Moriyoshi, T. Kuboyama, T. Yamada(Chiba University), M. Suzuki(Sustainable Engine Research Center), Investigation of Lubricating Oil Properties Effect on Low Speed Pre-ignition, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1870, 2015/9/1-4
19) 森島彰紀、草鹿仁、大聖泰弘、ディーゼル燃焼における微粒子生成過程の解析－過濃予混合燃焼場における検討－、自動車技術会論文集、Vol.38, No.1、pp.151-156、2007 年 1 月
20) N. Cavina, A. Businaro, D. Moro(University of Bologna), R. Di Gioia, G. Bonandrini, D. Papaleo, M. Picerno(Magneti Marelli Powertrain), Assessment of the Influence of GDI Injection System Parameters on Soot Emission and Combustion Stability through a Numerical and Experimental Approach, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2422, 2015/9/13-17
21) H. Dageforde(Robert Bosch), M. Bertsch, H. Kubach, T. Koch(Karlsruhe Institute of Technology) , Reduction in Particle Emissions with Gasoline Engines with Direct Injection , MTZ, Vol.76, No.10, 2015/10
22) 2A. Siedentop, J. Schech, A. Bradenstahl, P. Eilts(Technische Universität Braunschweig), Thermodynamic, Optical and Numerical Investigation of a Small Direct Injection Spark Ignition Engine , 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2015/10/5-7
23) C.Disch, J. Pfeil, H. Kubach, T. Koch(Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Experimental Investigation of a DISI Engine in Transient Operation with Regard to Particle and Gaseous Engine-out Emissions , 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1990, 2015/9/1-4
24) P. Pertl, A. Trattner, R. Stelzl, M. Lang, S. Schmidt, R.Kirchberger(Graz University of Technology), Expansion to Higher Efficiency – Experimental Investigations of the Atkinson Cycle in Small Combustion Engines, 2015 Small Engine Technology Conference, No.2015-32-0809, 2015/11/17-19
25) 緒方 健一郎, 片岡 徹夫 , EGR 燃焼エンジン向け高エネルギ点火システムの検討, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.2, 2016/3
26) M. Wentsch, A. Perrone, M. Chiodi(FKFS), M. Bargende(FKFS/IVK, University of Stuttgart), D. Wichelhaus(Volkswagen Motorsport) Enhanced Investigations of High-performance SI-Engines by Means of 3D-CFD Simulations, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2469, 2015/9/13-17
27) M. Costa, F. Catapano, G. Marseglia, U. Sorge, P. Sementa, B. M. Vaglieco(Instituto Motori CNR), Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Split Injections on the Performance of a GDI Engine under Lean Operation , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2413, 2015/9/13-17
28) T. Yoso, M. Yamakawa(マツダ) , R. Tamura, J. Kusaka(Waseda University), Developments of the Reduced Chemical Reaction Scheme for Multi-component Gasoline Fuel , 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1775, 2015/9/1-4
29) A.Dulbecco, S. Richard, C. Angelberger(IFP Energies Nouvelles), Investigation on the Potential of Quantitatively Predicting CCV in DI-SI Engines by Using a One-Dimensional

CFD Physical Modeling Approach: Focus on Charge Dilution and In-Cylinder Aerodynamics Intensity , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2401, 2015/9/13-17

30) R. Amirante, C. Casavola, E. Distaso, P. Tamburrano(Politecnico Di Bari), Towards the Development of the In-Cylinder Pressure Measurement Based on the Strain Gauge Technique for Internal Combustion Engines , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2419, 2015/9/13-17

31) R. Saracino, M. R. Gaballo, S. Mannal, S. Motz(Bosch CVIT Bari), A. Carlucci, M. Benegiamo(Universita Del Salento), Cylinder Pressure-Based Closed Loop Combustion Control: a Valid Support to Fulfill Current and Future Requirements of Diesel Powertrain Systems , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2423, 2015/9/13-17

32) J. Schaub, T. Koerfer, S. Pischinger(FEV), T.Schnorbus(FEV Diesel Engine Development), Cylinder Pressure Based Fuel Path Control for Non-Conventional Combustion Modes, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2508, 2015/9/13-17

33) M. Palanisamy, J. Lorch, R. J. Truemner, B. Baldwin(AVL Powertrain Engineering), Combustion Characteristics of a 3000 Bar Diesel Fuel System on a Single Cylinder Research Engine , SAE 2015 Commercial Vehicle Engineering Congress, No.2015-01-2798, 2014/10/6-8

34) M. Diezemann, C. Schramm, M. Brauer, C. Severin(IAV) , Variable Compression Ratio in Diesel Engines , MTZ, Vol.76, No.7-8, 2015/7

35) Y. Pei, P. Kundu(Argonne National Laboratory), G. M. Goldin(Convergent Science), S. Som(Argonne National Laboratory), Large Eddy Simulation of a Reacting Spray Flame under Diesel Engine Conditions, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1844, 2015/9/1-4

36) B.Zhou, M. Horikoshi, A. Kikusato,Daisho(Waseda University), K. Sato, H. Fujimoto(マツダ) , Detailed Diesel Combustion and Soot Formation Analysis with Improved Wall Model Using Large Eddy Simulation, 2015 Small Engine Technology Conference, No.2015-32-0715, 2015/11/17-19

37) J. Serrano, P. Piqueras, E. Angiolini(Universitat Politècnica De València), C. Meano, J. Morena(GM Powertrain-Europe SrL), On Cooler and Mixing Condensation Phenomena in the Long-Route Exhaust Gas Recirculation Line, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2521, 2015/9/13-17

38) S. Favelier, A. Dutot, K. Surbled, F. Morello, C. Cherreau (VALEO Powertrain System), Low Pressure EGR Impact on Condensate and Product Specifications , 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2015/10/5-7

39) 鶴原吉郎、エンジンの革新目指す米企業の挑戦、日経ビジネス ONLINE、2016 年 7 月 5 日, http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/264450/070300038/?P=1

40) DOE, Vehicle Technology Office のホームページ、
http://energy.gov/eere/success-stories/articles/eere-success-story-fca-and-partners-achieve-25-fuel-economy, 2016/08/

41) V. Janakiraman, X. Nguyen, and D. Assanis, “Nonlinear identification of a gasoline HCCI engine using neural networks coupled with principal component analysis,” Appl. Soft Comput., 2013.
42) V. M. Janakiraman, X. Nguyen, J. Sterniak, and D. Assanis, “Identification of the Dynamic Operating Envelope of HCCI Engines Using Class Imbalance Learning,” Ieee Trans. Neural Networks Learn. Syst., vol. 26, no. 1, pp. 98–112, 2015.
43) SIP「革新的燃焼」制御チーム Web サイト,http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/scc/
44) http://energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/Adoption%20of%20New%20Fuel%20Efficient%20Technologies%20from%20SuperTruck%20-%206-22-16%20%28002%29.pdf
45) Delgado and N. Lutsey, “THE U.S. SUPERTRUCK PROGRAM EXPEDITING THE DEVELOPMENT OF ADVANCED HEAVY-DUTY VEHICLE EFFICIENCY TECHNOLOGIES”, ICCT white paper (2014)
46) http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office-annual-merit-review-presentations
47) CO2RE 資料　http://co2re.eu
http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fom_17838.pdf
http://www.ertrac.org/uploads/documents_publications/2015%20ICE%20workshop/CORE%20results.pdf
48) 矢野利明、伊藤献一、メタノール燃焼排ガス中の未燃メタノールおよびホルムアルデヒド：反応動力学的検討、日本機械学會論文集. B 編 48(429), 962-971, 1982-05-25
49) 草鹿　仁，大聖泰弘，詳細な素反応過程を考慮した多次元モデルによる天然ガス予混合圧縮着火に関する基礎的研究，自動車技術会，自動車技術会論文集 Vol.32,No.2,pp.43-48,2001 年 4 月
50) AICE（自動車用内燃機関技術研究組合）Web サイト　http://www.aice.or.jp/
51) 米国エネルギー省 Web サイト
http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace066_yilmaz_2014_o.pdf
52) Symposium for Combustion Control Web サイト
http://www.mechatronics.rwth-aachen.de/cms/Mechatronics/Forschung/~hbnw/SCC/lidx/1/
53) http://www.fuelcenter.rwth-aachen.de, 2016 年 8 月 18 日
54) FVV Web サイト　http://www.fvv-net.de/en/fvv4/mission-and-vision/index.html
55) http://www.cefv.re.kr/index.php?mid=sub02_01_01, 2016 年 8 月 18 日

3.29　トライボロジー

（1）研究開発領域の簡潔な説明

トライボロジーは相対運動をしながら互いに影響を及ぼしあう 2 つの表面に起こるすべての現象を対照とする科学技術である。潤滑、摩擦、摩耗などを取り扱う分野である。ここでは、省エネルギーの観点より摩擦メカニズム、接触表面状態、潤滑剤の影響などのトライボロジーの基礎を対象とする。また実用面では研究開発が特に注目されている分野として車関連のトライボロジーを中心に記述する。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

トライボロジーはギリシャ語の tribos（摩擦する）を基にした造語である。摩擦低減技術はあらゆる産業分野、生活環境における効率的エネルギー活用と安全・安心の鍵であり、低炭素社会実現の観点からも極めて重要な技術である。

トライボロジー研究の経済効果による社会的意義は、1966 年に英国の H. P. Jost による「Lubrication (Tribology) - A Report on the Present Position and Industry's Needs」の中でトライボロジーの用語を初めて使用すると共に、英国における潤滑改善による経済効果として年間 5 億ポンド(当時)の大きな値を報告している。その後、同様な推算が各国でなされており、我が国の最近の推算例として、2002 年度で 8.6 兆円、対 GDP 比 1.7%の値を出している [1)]。

2015 年 12 月の COP21 パリ協定の合意を受け、世界各国で更なる CO_2 削減努力が必要であるが、今後世界的に増加が見込まれる自動車分野におけるエネルギーの効率的利用も非常に重要となる。現在の自動車は燃料の約 1/3 はエンジンや変速等、タイヤなどにおける摩擦損失によって浪費されており、最新のトライボロジー技術を適用することで 5～10 年の短期レンジで 18%、15～25 年の長期レンジでは 61%もの削減が可能という報告 [2)]がある。その結果を世界全体での CO_2 排出量として換算すれば，それぞれ 2 億 9000 万トンと 9 億 6000 万トンの削減に上り、我が国の年間 CO_2 総排出量に匹敵する量となる。このようにトライボロジーは，既存技術の改良や改善を通し波及効果と即効性の高い工学技術として，地球環境問題解決への貢献が期待されている。その一方で、摩擦は固体表面・潤滑油など多くの要素が界面において複雑に絡む動的特性のために、その理解は十分には進んでおらず、従来の開発は主に経験的な蓄積に基づくものである。このため、現在の省エネルギーにおける摩擦低減技術の必要性ならびに課題の大きさからは、より合理的な設計論による開発の加速が重要となる。

［動向（歴史）］

摩擦・潤滑の利用や研究の基礎は産業革命前後（1750 年から 1900 年頃）の研究に負うところが多く、現在まで使われている経験式も提案されている。例えば、クーロン（Coulomb）による静止摩擦の研究、流体潤滑の概念の提示と流体力学による定式化並びに系統的実験（1847 年）、鉱物油の潤滑油としての使用の開始、ストライベック曲線の提案（1902 年）、「境界潤滑」の用語の導入（1922 年）などがある [3)]。さらに 20 世紀の半ばには微視的な視点か

ら摩擦現象を理解しようとする先駆的な試みが見られるようになった。例えば、ホルム（Ragnar Holm）によって提唱された真実接触面積の概念は、英国ケンブリッジ大学のバウデン（Frank Philip Bowden）とテーバー（David Tabor）により原子・分子レベルでの接着力と摩擦による新しい形の摩擦の凝着理論が確立され、それまでの摩擦の凹凸説に代わって摩擦の凝着説が広く認められることになった [4]。1966 年には、摩擦学に対し”トライボロジー”という用語が作られ、現代的な摩擦研究が開始された。

トライボロジーの先端研究は、米ソ冷戦時代の宇宙開発競争にしのぎを削る NASA（米国航空宇宙局）を中心とした米国に舞台を移し、さらにモータリゼーションの到来を背景として自動車関連のトライボロジーを中心に、ドイツ、フランス、日本などへと発展の場を広げていった。一方、磁気記録装置の性能向上が急務となった IT 分野では、ハードディスク装置の開発に最先端のトライボロジー技術が次々と導入されることになった。米国 IBM などを先導役とした技術開発競争の最中、微細加工技術の進歩と相まって、“マイクロトライボロジー”が新たなテーマとして取り上げられるようになった。さらに今日では、高度な表面分析技術と計算科学を融合した“ナノトライボロジー”へと発展し、最先端研究の一翼を担っている。医療分野では、英国リーズ大学中心とするグループが、トライボロジーの視点から人工関節の開発に精力的に取り組み、性能の向上に大きく寄与するとともに、“バイオトライボロジー”という医工連携の新しいテーマを開拓した。このほか、レイノルズ(O.Reynolds)にはじまる流体力学理論、各種機械要素や潤滑剤の発明や普及、そして新しいコーティング材料など、トライボロジーはそれぞれの時代の産業技術の隆盛と深く関わりながら発展してきた。

トライボロジーを原理的に解明しようとする研究加速への契機は、ナノテクノロジーに代表される表面・界面を見る評価法の進歩と、ハードディスクの潤滑に代表されるような技術的な要請である [5]。1990 年頃から導入された代表的な装置に、表面力装置(Surface Forces Apparatus, SFA, Tabor が現代化に貢献)、原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope, AFM）ならびに水晶発信子マイクロバランス（Quartz Crystal Microbalance, QCM）がある。また、同時に表面を単分子層レベルで観察できる、X 線光電子分光法（X-ray Photoelectron Spectroscope, XPS）などの元素組成分析法、フーリエ変換赤外分光法のような振動分光法など広範囲な表面・界面分析法が、比較的手軽に利用できるようになり、基材と表面・界面評価と摩擦特性との関連を調べるアプローチも始まっている。

我が国におけるトライボロジー研究の歴史は、戦後、東大航空研・曽田範宗先生がその基礎を作っており、その後、通産省工業技術院機械技術研究所にトライボロジー課が設置され、民間企業においても三菱重工が長崎にトライボロジー研究所を設立したのをはじめ製造産業の発展に伴い、大学から公的研究機関、民間企業に至るまで、その研究開発の場は大きくすそ野を広げた。しかし、最近では広い領域をカバーするトライボロジーの研究開発を実施する体制の維持が、特に製品毎の細分化した研究体制に移行した民間企業においては難しくなった。また、大学においても、学際領域となるトライボロジーの看板を研究室に掲げることが難しくなり、主要国立大学でもトライボロジーを専門とする研究室がないところもある。我が国でトライボロジー研究が活発に行われている大学としては、東京理科大、東北大、名古屋大、九州大、横浜国大、関西大学などが挙げられる。

工学分野の学問としてトライボロジーを見れば、自然現象の解明のみならず、得られた知見をもとに制御する技術を構築する必要がある。その場合、トライボロジーが制御対象とす

るものは、摩擦、摩耗、そしてエミッションの 3 つとなる [7]。摩擦の制御においては、機械システムのエネルギー効率を大きく支配する摩擦損失を低減するという大きな課題がある。この課題解決に当たっては、摺動面における潤滑状態を決定する設計の最適化技術が重要となる。摺動面を表面材料と潤滑剤からなるシステムとして捉え、潤滑状態に応じて必要とされる性能をデザインし、個々の要素技術に再び要求性能をブレークダウンすることが必要になる。DLC 膜に着目すれば、当初は硬くて自己潤滑性のある膜として注目を集めたものの、その用途は一部の切削工具や金型などに限られていた。エンジン部品などの摺動面材料として急速に普及するようになった背景には、エステル系添加剤（GMO）と水素フリーDLC（ダイヤモンドライクカーボン）との組み合わせによる低摩擦現象発現の発見によるものである [7]。摩耗の制御においては、信頼性や耐久性向上の観点からは耐摩耗性に優れた材料の適用が望まれる。ただし、これも摩擦面材料のみで性能が決まる訳ではないので、摺動条件を十分に加味した上での素材開発と適用技術が必要となる。例えば、発電タービン用すべり軸受の例 [8,9]では、従来のホワイトメタルに代えて耐摩耗性に優れる PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）樹脂複合材料を適用して軸受幅を減少することにより、摺動面積に比例する軸受摩擦損失を約 2/3 に低減することに成功している。また、経時変化する摺動面の状態を診断・予測可能とする摩耗の制御技術であろう。風力発電設備では、メンテナンスの問題 [10]が普及を妨げる因子であるとの指摘もあることから、「サステイナブル・トライボロジー」の推進は、ひいては再生可能エネルギー利用拡大への貢献につながるものと期待される。

エミッションの制御では、摩耗粉や潤滑油の拡散による環境汚染の防止が課題になる。ブレーキやタイヤからの摩耗粉排出や機械システムからの潤滑油漏洩を根本から無くことができれば理想であるが、現実的な対策としては、最小油量で潤滑（MQL）する技術 [11]や、仮に環境に排出されても環境負荷を最小限に止めるような物質でこれらを構成する技術を開発する必要がある。これまでトライボロジー分野では、アスベスト [12]やフロン [13]、鉛 [14,15]などに代表される環境汚染物質を環境負荷の小さい物質に代替してきたが、今後一層の環境負荷低減策が求められており [16]、生分解性潤滑油 [17]やカーボンニュートラルなバイオベース素材の利用 [18]、RoHS 指令に代表される規制物質の排除など、取り組むべき課題は多く残されている。

トライボロジーの国際的な動向を国際会議から見ると、2005 年に米国のワシントンで開催された第 3 回国際トライボロジー会議（WTCⅢ）までは、ナノテクノロジーを 1 つのキーワードとして、SPM を用いた高精度計測や分子動力学シミュレーションによる摩擦メカニズムの解明などに高い関心を集めていた。IPCC 第 4 次報告書を発表した 2007 年を境にして、WTCⅣ（2009 年京都）では、P. Jost 氏による“Green Tribology”など、会議全体を通して環境問題を強く意識した内容の発表が目立っている。2001 年にオーストリアで開催された WTCⅡ、2011 年の第 3 回 ECOTRIB の成功を担ったのが 2002 年にウィーン郊外のハイテクパークに設立された AC2T(the Austrian Center of Competence for Tribology)である。AC2T にはオーストリア政府の重点政策として多額の研究資源が投入され、140 名以上のスタッフを擁しており、活発な研究開発事業を展開している。 AC2T での研究テーマは、トライボロジー全般を網羅しており、大きく 4 つの領域（①Lubricants and Surface Interactions、②Wear Processes、③Integrated Tribodiagnostics and design、④Multiscale Computational Tribology）に分けて管理・運営が行われている。また AC2T を中心として実施される“XTribology

((a)cross Tribology)”と呼ばれる COMET（Competence Centers for Excellent Technologies）プロジェクトには、2010 年 4 月から 2015 年 3 月までの期間中に、総額 59 百万ユーロが投入された[19]。

2012 年で 39 回目を迎える国際会議 Leeds-Lyon Symposium on Tribology は、トライボロジー分野では欧州でもっとも伝統ある国際会議であり、各会議にテーマが設定されている。1997 年にロンドンにおいて WTC I との合同開催となった第 24 回会議[20]のテーマは、“Tribology for Energy Conservation”であり、環境問題解決に向けてトライボロジーが果たすべき役割について強いメッセージが発信された。また、2010 年の第 37 回会議[21]のテーマは、“Tribology for Sustainability, Economic, Environmental and Quality of Life”である。英国にはトライボロジーのメッカとも言われたケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所をはじめとして、リーズ大学、ロンドン大学インペリアルカレッジ、ノッティンガム大学など、トライボロジー研究の国際的研究拠点が点在して世界の研究開発をリードしてきたが、近年、新たにササンプトン大学がこれらに加わった。2007 年、ササンプトン大学は EPSRC（Engineering and Physical Science Research Council, 工学・物理科学研究会議）より“Science and Innovation Awards”を受賞し、これを契機として nCATS（national Centre for Advanced Tribology at Southampton）を設立している。nCATS は、この受賞により EPSRC から 2008 年 4 月からの 5 年間に約 3.2 百万ポンドの助成金を得て、民間企業や大学分を合わて総計 9.7 百万ポンドの研究資金を集めた[22]。また、“Green Tribology”というタイトルで 2011 年 9 月から 5 年間に総額約 1.2 百ポンドのグラントを EPSRC から獲得するなど、英国では P.Jost 氏のお膝元で推進される“グリーン・トライボロジー”は、今後の研究開発動向を調べる上で目が離せないものとなっている。

米国では、トライボロジーに関しては目立った大型プロジェクト等の動きは見られない。ただし、DOE（The U.S. Department of Energy）は次世代の先進自動車開発に 175 百万ドルの投入を決め、その中の 4.7 百万ドルが潤滑油に関するプロジェクトに配分されるとのことである[28]。その内訳は、新調合潤滑油の評価としてマサチューセッツ工科大学に 1.5 百万ドル、PAG（Polyalkylene glycol）基油の開発としてフォードモーターに 1.2 百万ドル、新規多機能添加剤としてのイオン液体の評価としてオークリッジ国立研究所に 1.2 百万ドル、ボロン系添加剤の開発としてアルゴンヌ国立研究所に 0.8 百万ドルとなっている。公の研究拠点としては、ジョージア工科大学とノースウェスタン大学が NSF（National Science Foundation）による支援を受け、1985 年より CSET（Centre for Surface Engineering and Technology）として、基礎から応用までの広い研究領域をカバーしている[23]。また、ナノトライボロジー分野ではオハイオ州立大学の B.Bhushan 教授らによる “Green tribology”の解説記事[24]が参考になる。

また、中国に目を向けると、清華大学と蘭州化学物理研究所がトライボロジー分野での国家重点実験室に指定され、研究資源の重点配分のもと活発な研究活動を展開している。中国ではトライボロジーの関係する国際会議が年数回行われているが、中国トライボロジー学会（Chinese Tribology Institution of CMES）主催で 3 年毎の CIST（China International Symposium on Tribology）が最もメジャーな国際会議である。2011 年に蘭州で開催された第 6 回の会議[25]では、清華大学 Q.Xue 教授よる“Green tribology: health, environment and efficiency”など “グリーン・トライボロジー”は中国でも流行のようである。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

■ 材料に関する新たな技術動向

- 高分子ブラシは、固体表面の表面修飾、低摩擦化材料ならびに生体内潤滑モデルとして世界的に学を中心として研究されている。しかし、高負荷など厳しい摺動条件では摩耗してしまい～1MPa 程度の穏やかな条件のみで使用できるものと考えられていた。京都大学の辻井敬亘教授は濃厚ポリマーブラシの厚膜化に成功している。膨潤溶媒も水からイオン液体や潤滑油に変更した材料が作成できるようになっており、実用用途に可能性のある日本独自の展開である。
- 無機コーティングに関しては、DLC は既に新しい潤滑材料として、車にも実装され始めている。無機酸化物コーティングは、酸素存在下でも安定であるという特徴があるが研究例は僅少であった。物質材料機構の土佐らは、特定の条件で調製した ZnO の摩擦係数が半減することを見出しており、注目されている。
- 低摩擦化添加剤として、吸着部位ならびに潤滑部位を有する高分子が東北大学栗原らにより設計されている。
- ゲルの機械における潤滑材料としての応用

■ 研究手法に関する新たな技術動向

- ナノテクノロジーの発展により開発・普及している様々な表面評価法（XPS、EDX、FTIR-ATR など）のトライボロジー研究への適用
- 共振ずり測定など表面力装置を利用したずり測定による潤滑油評価と低粘度化への対応
- 機械と材料・計測分野の融合による摩擦現象の解明による低摩擦の合理的設計の研究推進
- 基材（機械部品の材料）と潤滑油の組み合わせによる低摩擦化技術の開発

■ 摺動面アーキテクチャの概念とその具体的研究

- 固体接触や潤滑油との反応により表面状態が常に変化していくことを前提に、システムの一部として摺動表面の構造や組成などを設計する概念として、摺動面アーキテクチャが重要である。そのため、マルチスケール・テクスチャリング[25]の考え方として、表面の構造及び組成の空間分布をナノ・マイクロからマクロレベルまでの連続したスケールで俯瞰・理解した上で、階層的な役割の振付が必要になる
- 表面損傷の進行や摩擦環境の変化に能動的に対応する自己適応（self-adaptive）する機能表面の創製として、自己修復性と環境適応性を有する生体皮膚などの模倣（バイオミメティックス）、また加工技術として新しい付加加工技術として注目されている 3 次元積層造形技術（通称 3D プリンタ）の応用[26]など

［注目すべきプロジェクト］

■ 国内プロジェクト

1）SIP「革新的燃焼技術」

- 損出低減チーム：排気エネルギーの有効利用と機械摩擦損失の低減に関する研究開発

- 革新的要素技術：モノリス構造を利用したナノブラシの階層化による革新的高度潤滑

2) 機械と材料･計測分野の融合による摩擦現象の解明（あるいは基礎研究の技術課題の適用）による低摩擦の合理的設計の研究推進を行うプロジェクト
- MEXT、GRENE、グリーントライボロジーネットワーク（平成 23 年度～27 年度）
- MEXT、東北発素材先導プロジェクト「低摩擦領域」（平成 24 年度～28 年度）
- MEXT、光 ・量子融合連携研究開発プログラム、「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」（平成 25 年度～29 年度）

3) 厚膜濃厚ブラシの実用化
- JST、ACCEL 事業「 濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」（平成 27 年度～31 年度）

■ 国外プロジェクト
- COST　MP1303 :“Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction”[1s)]。（COST: European Cooperation in the field of Science and Technical research）2013 年より開始された研究トライボロジ―に関する欧州共同研究の活動（2017 年の終了予定）

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

トライボロジー研究にとって摩擦・摩耗・潤滑の基礎メカニズムを理解することが、まずは重要な課題である。しかしトライボロジー現象は、真実接触部と言われる固体間に挟まれた 1μm^3 未満の空間領域において、長くても 1ms 程度の短時間に起こる現象（温度・圧力変化、表面原子・分子構造変化、化学反応など）を捉えることが必要とされる。計測・分析技術として、極めて高度なその場観察技術(in-situ)が要求される。現在、様々な表面分析技術が開発されているが、未だに十分な時間分解能や感度を有し、摩擦界面のその場観察に決定的な有用性をもたらす技術は開発されていない。この分析・観察技術が確立することが、計算機シミュレーションによる数値解析技術の妥当性等に重要となる。

また実用面として自動車用エンジンでは低摩擦化に向けて油の低粘度化が進む一方で、荷重や速度の条件がそれぞれ異なるエンジン要素部品を同じエンジン油で潤滑させるため、効果的な添加剤設計技術が重要となっている。また、熱効率（燃費）向上のための小型化(ダウンサイジング)・高過給化によるプレイグニッション、デポジット、燃料のシリンダ内直噴化による潤滑油の燃料による希釈などが、異常燃焼と摩擦摩耗増加を引き起こす等の新たな技術課題がある。

［今後取組むべき研究テーマ］

① 基本的なメカニズム解明のための表面分析技術の開発
② 摺動表面の材料や形状、潤滑油添加剤などを総合的にデザインする摺動面アーキテクチャ技術の開発
③ 低粘度潤滑油の開発
④ 境界潤滑の解明と低摩擦化設計指針の構築

⑤　低粘度化のための添加剤の開発：低粘度潤滑油で進みやすい焼き付きをさける添加剤の開発
⑥　新規基材ならびにコーティングの開発、低摩耗材料の開発
⑦　原子・分子レベルでの摩擦現象の解明
⑧　MEMS における摩擦制御
⑨　表面性状（テクスチャリングや DLC）の最適化による境界潤滑領域における低摩擦・低摩耗及び表面性状と潤滑油の最適化。

（５）政策的課題

トライボロジーが扱う対象は、原子・分子レベルでの摩擦現象から、ハードディスクのスライダヘッド、自動車の駆動部品やタイヤ、発電タービンの軸受、電気接点、人工関節、地震予知や人工衛星など、多岐に渡っている。そのため、トライボロジーが関連する学問は機械工学を本拠としながらも、物理学や化学などの基礎分野から、材料、電気、土木・建築、航空・宇宙などの工学分野、エネルギー・環境や防災に係わる応用領域、さらにはナノテクノロジー、バイオテクノロジーといった新融合領域に至るまで、非常に幅広い範囲に跨がっている。このように分野融合の科学・技術の典型であるトライボロジーであるが、世界的には大規模なトライボロジー研究拠点が各国に存在する。一方で、日本のトライボロジー研究は大学の小規模研究室で実施されており、基礎と技術課題の融合研究を推進するのに十分な体制にない。先進的なトライボロジー研究を推進するには、材料、計測そして機械分野の研究者の融合研究が必須であり、そのような研究推進に適切な体制が必要となる。諸外国の学のトライボロジー研究のリーダーには電気化学（Jost）、物理化学（Tabor）、表面科学（N.D. Spencer, チューリッヒ工科大学）、化学（H. Spikes, インペリアルカレッジ）など、材料系の研究者が多く、機械分野の研究者・技術者と共同している。より積極的な基盤分野の研究者の参画が可能になるような体制が必要である。また大学教育においても「トライボロジー」を講義科目として開設していない理工系大学も少なからずあることも課題である。

（６）キーワード

境界潤滑、流体潤滑、添加剤、潤滑油、閉じ込め効果、ナノ計測、共振ずり測定、ストライベック曲線、コーティング技術、高分子ブラシ、ゲル、イオン液体、In-situ 分析（その場観察）、摩擦メカニズム、摺動面アークテクチャ

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	● 基礎分野の研究者の参画により、摩擦・潤滑研究の新しい展開が出ている。特に、物理、化学、材料、計測の研究者の融合研究への参画が進んでいる。 ● トライボロジーにおける低摩擦の発現現象や焼付き及びなじみのメカニズム、カーボン系炭素膜等多くの基板技術が大学をはじめとする研究機関をで推進されている。（CREST、さきがけ他）

	応用研究・開発	○	→	● 近年の自動車の燃費向上の大きな部分が、低摩擦化技術の向上によっている。過去20年間で15%[27]と燃費向上が実現している。 ● 各機械要素技術(部品)の低摩擦・耐久性技術は現状でも世界トップクラスである。これらが変わらず高品質の機械システムを支えている。SIPにおける乗用車エンジンでのトライボロジー研究の推進等
米国	基礎研究	◎	→	● 基礎と応用研究の循環がスムーズである。ベンチャーから生み出された摩擦試験機が世界標準機になっている（現在はBrukerが販売）。
	応用研究・開発	◎	→	● 基礎と応用研究の循環がスムーズである。例えば,ハードディスクの潤滑研究をナノテクノロジーから推進したIBMの研究者が教科書[5]を執筆するなど、先端研究の導入へのハードルが低い。SAE International (Society of Automotive Engineers) の年会では、2009年にNanotechnologyのセッションが開催された。
欧州	基礎研究	◎	→	● 欧州全体としては、数か所の拠点（資料参照）があり、シンポジウムの開催や共同しての若手育成などを連携して進めている。産業界との連携も強い。 ● 国際会議や国際誌の発表、COSTプロジェクト
	応用研究・開発	◎	↗	● 産学の連携が強い。添加剤におけるエボニックなど世界的な企業が研究をリードしている。 ● 機械システム及びその課題を明確化した産学官の連携体制（FVV等）。エンジン設計に有用な解析モデルでは世界有数の企業（FEV、AVL、RICARDO等）があり、世界の自動車企業のエンジン開発のサポートを行っている。
中国	基礎研究	○	↗	● 摩擦研究拠点が、北京と蘭州にある（State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University（1986年創立）; State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, the Chinese Academy of Science（1987年創設）。ともに百人規模の研究者（前者は87名、後者は80名以上-ポストドク以上）を擁する大規模な組織。欧米で教育あるいは研究経験を積んだ中堅研究者がリーダとして研究を率いている。研究テーマも現代的であるが、まだ追随型である。
	応用研究・開発	△	↗	● 欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆する応用研究はないが、基礎研究の状況から今後の応用研究レベルの向上が考えられる。
韓国	基礎研究	△	→	● 内燃機関のトライボロジーで特筆すべき研究はない
	応用研究・開発	△	→	● 欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆する応用研究はない。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

- SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）革新的燃焼技術（日の丸内燃機関が地球を救う計画）研究開発計画　内閣府資料
- 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)　シンポジウム資料(2014)
- SIP「革新的燃焼技術」公開シンポジウム資料（2015）

1) 財団法人 化学技術戦略推進機構,「ST／GSC 技術開発プログラム構想－ST 戦略の具体化に向けて－」(2005 年). （注：ST：Sustainable Technology, GSC: Green Sustainable

Chemistry)
2) K.Holmberg, P.Andersson, A.Erdemir, : "Global energy consumption due to friction in passenger cars", Triblogy International, 47(2012)221-234
3) B. N. J. Persson, "Sliding Friction, Physical Principles and Applications, 2nd Ed.", Springer, 2000.
4) F.P. Bowden, D. Tabor, "The friction and Lubrication of Solids", Oxford University Press, (1950, 1954), paperback edition, (1986), Reprinted in 2008.
5) C. M. Mate, "Tribology on the Small Scale, A Bottom Up Approach to Friction, Lubrication, and Wear", Oxford University Press (2008).
6) S.Sasasaki: "Environmentally friendly tribology (Eco-tribology)", Journal of Mechanical Science and Technology,24,1(2010)67-71
7) 加納真，"硬質炭素膜のトライボロジー研究動向"，トライボロジスト，58，8（2023）524-531
8) 三菱重工株式会社："タービン向け低漏洩リーフシール・耐高圧樹脂軸受"「優秀省エネルギー機器　平成 20 年度受賞機器の概要」，一般社団法人　日本機械工業連合会（2008）18-21
9) 斉藤英治，松野成之，田中恵三，西本慎，山本隆一，今野晋也，"最新鋭蒸気タービンの技術開発と展望"，三菱重工技報，52，2（2015）36-43
10) 「風力発電促進の条件整備に関する調査研究報告書」：一般社団法人日本海事検定協会（2012）（http://www.nkkk.or.jp/pdf/public_business_report_4-09.pdf）
11) 須田聡："MQL 切削用油剤の動向"，トライボロジスト, 47, 7 (2002) 550-556
12) 紺野常雄："ブレーキ，クラッチ用ノンアスベスト材の開発動向",トライボロジスト，38，5（1993）445
13) 瀧川克也：冷凍サイクルにおけるトライボロジー，トライボロジスト，43，3(1998)183-186.
14) Y.Kumada, K.Hashizume and Y.Kimura:"Performance of microgrooved bearings under mixed lubrication - Application to partial journal bearings in automobile engines, part 2," Proc. JSAE, No.9633900(1995)69-72
15) 岡本裕：すべり軸受における摩耗と疲労，トライボロジスト，Vol.47，No.8(2002) 616-622.
16) P. Laemmle & P. Rohrbach:"Application of ECLs and Today's Legislation", J. of ASTM International, 9,1 (2011) doi:10.1520/JAl103563.
17) C.A. Bailey: "USDA Programes to support development and use of biobased industrial products", J. of ASTM International, 8,6 (2011) doi:10.1520/JAl103565
18) M.Woydt: "Polyaklylene glycols as next generation engine oils", J. of ASTM International, 8,6, doi:10.1520/JAl03368 (2011)
19) F.Franek: "Tribology activities in Austria- update2011", Proc. of 3rd European Conference on Tribology, Vienna（2011）945-950
20) 「Tribology for Energy Conservation」, Elsevier Science, Netherlands (1998)
21) "37th Leeds-Lyon Symposium on Tribology Special Issue: Tribology for Sustaina-

bility: Economic, Enviroment, and Quality of Life", edited by M. Priest, Tribology International,46,1 (2012)1-298
22) 英国ササンプトン大学の nCATS の Web サイト: http://www.southampton.ac.uk/ncats/
23) CSET の Web サイト: http://www.nsf.gov/eng/iip/iucrc/directory/cset.jsp
24) M.Nosonovsky and B. Bhushan: "Green tribology: principles, research areas and challenges", Philosophical Transactions of the royal Society A, 28(2010) 4677-4694
25) Proceedings of 6th Chinese Internarional Conference on Tribology, Lanzhou, China(2011)
26) 佐々木信也，"3D プリンティングによる表面テクスチャ創製とトライボロジー"，月刊トライボロジー，329（2015）36-40
27) 鈴木　厚，トライボロジー,Vol.,61（2012）.

3.30　耐熱材料

（1）研究開発領域の簡潔な説明

耐熱材料は、耐熱性をもつ固体材料の総称で金属・合金、セラミックス、有機または無機高分子などがある。火力発電用ボイラ・蒸気タービン・ガスタービン、原子力発電用蒸気タービン、石油化学プラント、航空機用ジェットエンジン、廃棄物発電，自動車等などに利用される。多くの種類の耐熱材料があるが、条件（温度、応力、環境）によって使い分けられている。ここでは、主に耐熱鋼、Ni 基合金、チタン合金に関し、高温強度に優れた新たな耐熱材料の創成、革新的な耐熱コーティング技術の開発、耐熱材料の高性能化（低コスト・長寿命化等）などの研究開発に加えて、近年急速に注目を集めるようになった SiC/SiC 複合材料（通称 CMC）や高融点基複合材料などに関する研究開発、さらに、材料の損傷・劣化評価に関わる開発研究を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

我が国が直面するエネルギー問題において、エネルギー転換・利用効率向上による省エネルギー、排出ガス削減が求められている。このため、熱に耐え、強くて軽い革新的材料を開発し、発電等産業機器・輸送機器への実機適用を行い、エネルギー転換・利用効率向上を実現するとともに、機器の安全性・信頼性を確保する必要がある。耐熱構造材料には、エネルギー効率を高めて資源を節約し、環境負荷を下げて持続性を維持するための機能、性能の向上がより一層求められる。

また、2011 年に発生した東日本大震災以降、耐用年数が間近に迫っている多くの既設火力発電プラントでは、火力発電プラントへの依存度が極めて高い状況のもと長期間の運転が余儀なくされており、長期使用に伴う高温、高応力部位で使用されている構成材料の損傷や劣化の進行が懸念されている。さらに、近年開発されている耐熱材料の多くは，高温環境においても高い変形抵抗を有し、一般鋼材で見られるマクロな変形や劣化現象が発現しにくく、これまでの材料損傷・劣化評価手法を適用することが困難である．従って、高温機器構造物の安全性維持の観点から耐熱材料の損傷・劣化評価技術の開発に関わる研究開発が重要となる。

［動向（歴史）］

火力発電では、1950 年代後半にボイラの過熱機関や再熱機関などの高温部材に、クリープ強度、高温腐食、水蒸気酸化など、耐熱性の観点から 18-8 系ステンレス鋼が初めて使用された。1980 年代以降、蒸気条件を高温高圧化した超々臨界圧（USC ; Ultra Super Critical Pressure）プラントに向けて様々な高耐食・高クリープ破断強度のオーステナイト系ステンレス鋼が開発された [1)]。2008 年からは蒸気条件をさらに高温高圧化した先進超々臨界圧発電技術（Advanced-USC）の開発が進められてきたが、本蒸気条件下では、オーステナイト系ステンレス鋼ではもはや耐えられないため、Ni 基超合金の適用が考えられてきた。しかし一方で、Ni 基超合金は鋼に対して圧倒的に原料コスト高となるため、新規な耐熱鋼の研究開発が国家プロジェクトとして推進され [2)]、フェライト系耐熱鋼、オーステナイト耐熱鋼共に成

果を挙げつつある。

700°C 級 A-USC 石炭火力発電の研究開発は、世界各国（欧州、米国、中国、インド）で行われ、日本では、Ni 基超合金や Fe-Ni 基合金を用いたボイラ圧力部材、蒸気タービンが試作され、実用化試験が進められている。800°C を目指したボイラ用 Ni 基合金の開発・改良研究も進められている。フェライト系耐熱鋼の耐用温度は 600°C であったが、650°C 耐用の耐熱鋼（高 B-9Cr 鋼や SAVE12AD 鋼）も開発され、実用化が進められている。更に耐熱鋼の耐用温度を上げるために 15Cr 鋼や 20～25Cr 鋼の研究も進められている。

Ni 基超合金は、鍛造合金から普通鋳造合金、一方向凝固合金、単結晶合金へと進化してきた。1940 年代に開発された鍛造（Wrought）合金 N80 等がタービンの動・静翼に適用され、析出強化等により強度を上げてくると、鍛造成形が次第に困難になってきた。これに替わって、1950 年代半ばに真空溶解技術が開発され、Al、Ti 等の活性元素を多量に含む合金組成を、中子（中空な鋳物を作る場合に主型の中空部にはめ込む鋳型）を用いた普通鋳造（CC：Conventionally Cast）鋳物として精密鋳造することが可能となり、析出強化や固溶強化がさらに進んだ。しかし、得られた合金は結晶粒が多数集合した多結晶であり、結晶粒界が破壊の起点になることが課題であった。特にタービンブレードの場合、高温で高速回転しているため長時間使用すると遠心力によって結晶粒界に沿って割れが生じてしまうという問題があった。これに対して結晶制御により、一方向凝固合金や単結晶合金による鋳造材で、疲労とクリープ破壊が発生しやすいタービン翼の長手方向に垂直な結晶粒界を無くした合金が開発された。1970 年頃に米国で一方向凝固（DS：Directionally Solidified）プロセスの適用が開始されると、長手方向にかかる遠心力とほぼ平行に結晶粒界をそろえることにより、タービン翼の長手方向のクリープ強度と延性、および疲れ特性が大幅に向上した。さらに、1980 年頃には、結晶粒界を全て無くし高温強度を大幅に向上させた単結晶（SC：Single Crystal）合金が開発された。方向性凝固により優先的に成長する結晶方位は、クリープ強度に優れ、熱疲労に強いという特性を持つ。また、単結晶超合金を越えるクリープ強度を有する超合金として酸化物分散強化（ODS）超合金が開発されている。この合金は、機械的合金（メカニカルアロイ）化→押出加工→一方向再結晶という一連のプロセスで製造される。酸化イットリウム（Y_2O_3）のような長時間での高温下使用でも安定な微細酸化物が均一に分散されているため、特に 1,000°C を越える様な高温のクリープ強度に優れている。この合金は、シート状に鍛造、圧延して燃焼器などの高温部材として用いられている。1940 年代初頭の開発直後の合金の耐用温度が 730°C 程度であったものが、最近では 1,150°C まで開発が進んできた。400°C 近い耐用温度の向上に約 70 年かかっており、構造材料開発の典型的な例として、時間をかけて徐々に特性を向上させてきたことがわかる。開発合金の内、旧金属材料技術研究所で開発された TMS 以外は民間で開発されたことは注目される。PWA、Rene、CMSX 等は米国、MC はフランス、MDSC は日本のメーカーで開発された合金の商標である。特に欧米では航空宇宙産業においてエンジン開発が盛んであったため、政府が民間企業を支援し、官民一体となって耐熱合金の開発が加速された[3)]。米国では、1700°C 級ガスタービンの開発で、エネルギー省（DOE）の High Efficiency Engines and Turbines プログラム(2003～2015、約 1000 億円)により国家的な支援の下で耐熱材料の技術開発を進めてきている。

東日本大震災後、発電用高効率ガスタービンの重要性は増している。ガスタービンの高効率化では、Ni 基超合金と遮熱コーティング（TBC:Thermal Barrier Coating）の開発がキー

テクノロジーである。発電用大型ガスタービンにおいても単結晶合金の導入が進められ、1500°C 級ガスタービンが実用化されている。ヨーロッパでは第 2 世代の CMSX-4 が用いられており、米国 GE の 1500°C 級ガスタービンでは第 2 世代の Rene N5 が用いられている。物材機構の「新世紀耐熱材料プロジェクト」では、1700°C ガスタービン要素技術研究が行われた[27]。ガス温度の上昇に伴い、タービン動静翼においては遮熱コーティング（TBC）が特に重要となっている。TBC と基材との熱膨張差により、起動停止の温度変化による割れやはく離の防止が重要になる。一般的な TBC システムは、熱を遮蔽するセラミックトップコートと、Ni 基超合金基材の密着性改善と耐食性を目的としたボンドコートからなる。トップコートにはイットリア安定化ジルコニア（YSZ）が、ボンドコートには Pt-Al コーティングや MCrAlY 金属（M:Ni,Co）などが用いられている。タービン動静翼においては、TBC の破損は、基材を直接燃焼ガスに曝す危険があるため回避しなければならない。TBC の破損には、トップコート／ボンドコート界面に生じる熱成長酸化物（TGO:Thermally Grown Oxide）が原因となるはく離、熱機械疲労（TMF:Thermo-Meachanical Fatigue）によるボンドコートの割れなど種々の形態がある[28]。このため、ボンドコート材料の改良・開発、新規な TBC システムの開発、先進コーティング技術の適用、TBC の試験評価技術の開発など多くの研究が行われている。ボンドコートの耐酸化性向上（TGO の成長抑制）や、基材との元素の相互拡散抑制のための様々な研究もすすめられている。物質・材料研究機構では、基材と熱力学平衡する EQ コーティングを開発している[29]。トップコートについては、耐熱温度を向上させるための複合セラミックトップコートの研究が進められている。これらの新しいコーティングの実用化が期待される。皮膜の緻密化や遮熱性の向上のために、先進のコーティング技術（電子ビーム物理蒸着、サスペンションプラズマ溶射、コールドスプレー、ウオームスプレーなど）を TBC 成膜に適用する研究も進められている[28]。

チタン合金開発については、航空機のジェットエンジンの軽量化という点で、最近研究が再燃している[4]。航空機用チタン材料としては例として、1)純チタン、2)Ti-6Al-4V 合金（Ti-64,IMI318）、3)Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 合金（Ti-6242）、4)Ti-8Al-1Mo-1V 合金、5)Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo(Ti-17) 合金、6)Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金（Ti-6246）、7)Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al（Ti-15-3-3-3）合金、8)Ti-10V-2Fe-3Al（Ti-10-2-3）合金などが挙げられる[5, 6]。この中で、エンジン用耐熱部材に用いられているのは 2)の Ti-64 合金、3)の Ti-6242 合金、5)の Ti-17 合金、6)の Ti-6246 合金などである。Ti-64 合金は、チタン合金を代表する合金であり、強度、延性、疲労強度、破壊靭性、高温強度、クリープの各種特性や溶接性、加工性、熱処理性等の特性がバランスよく備わった合金である。低圧コンプレッサーディスクやブレードなどに用いられている。Ti-6242 合金は、1960 年後半に開発された合金で、耐熱温度は 450°C 程度である。1970 年代後半には、耐酸化性やクリープ特性を向上させるために、Si を 0.06~0.2wt%添加した Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Sn 合金が開発され、耐熱温度は 500°C まで改善されている。高圧コンプレッサーディスクやブレードなどに用いられている。Ti-17 合金は、高強度で破壊靭性に優れたチタン合金として 1970 年代に米国で開発された。耐熱温度は 400°C 程度であり、ファンディスクやコンプレッサーディスクに用いられている。Ti-6246 合金は、1966 年頃に開発されたチタン合金であり、耐熱温度は 450°C である。この合金も高圧コンプレッサーディスクやブレードに用いられている。

材料損傷・劣化評価技術に関しては、1999 年の電気事業法の改正に伴い、ボイラ設備等について定期点検間隔が最長 4 年に延長可能となり、余寿命診断指針が提示された。そして、翌 2000 年から事業者による自己責任に基づく法定自主点検に移行した。これにより、事業者が設備の安全な運用と保守コストとのバランスを考慮した保全計画を柔軟に設定できるようになった。現在までの高温機器における損傷・劣化診断と余寿命評価に用いられてきた方法は、破壊評価法、非破壊評価法、解析評価法の 3 つに大別できる。

- 破壊評価法
  実機からサンプルを採取して温度加速試験もしくは応力加速試験を行い、得られたデータを用いて直接余寿命を算出する方法であり、最も精度が高い方法である。
- 非破壊評価法
  非破壊評価は実機からサンプルを採取することなく、物性測定や組織観察等から損傷を評価し、余寿命を推定する方法である。物性の変化を測定する方法としては、硬さ計測法や電気抵抗法などがあり、また組織検査法としては、結晶粒変形法、組織対比法、炭化物組成測定法、析出物粒間距離法、A パラメータ法、ボイド面積率法、ボイド個数密度法が挙げられる。基本的にこれらの非破壊評価法では損傷マスターカーブの作成が必要となる。溶接部における内部のき裂計測には超音波法が用いられている。表面の探傷には、浸透探傷検査や磁粉探傷検査が用いられている。
- 解析評価法
  解析による評価では、診断対象箇所近傍のメタル温度データや運転データ（蒸気温度、圧力、流量等）を基に、熱応力や内圧応力を有限要素法等で計算している。そして、これらの温度、応力と材料特性からクリープ損傷則を使用してクリープ寿命比を計算する。代表的なクリープ損傷則は、寿命比則、ひずみ比則、複合則である、各法則において累積損傷率が 1 となったときに破壊が起きるものとされている。また材料の変形特性に基づいてクリープ余寿命評価を行う手法も提案されている。

上記の 3 つの評価法を組み合わせるなどして、事業者の自己責任に基づき火力発電プラントの法定自主点検を実施している。

USC、A-USC ボイラでは、特に溶接部において多軸応力の影響やクリープ疲労を考慮した寿命予測技術の開発・確立が重要である。損傷を早期に検出するために、非破壊検査技術の高精度化や新しい検査技術の実用化が検討されている。タービン翼と TBC は複雑な負荷履歴と熱履歴を受けるが、高温低サイクル疲労や熱機械疲労による損傷・破壊の予測においては、未解明の課題が多く残されており、試験評価技術の確立にむけた研究が進められている[28)]。

材料損傷・劣化評価技術に関して、近年の高温機器構造物において使用されている材料の強度，損傷，余寿命等の評価で緊要な課題は，1)短時間データからの正確な長時間強度の算出，2)溶接部における損傷やき裂の問題，3)多軸応力の損傷形態，破断寿命，破断延性への影響についてである。1)については、近年では，長時間使用したボイラ材を用いて，非破壊検査法や解析法に比べて診断精度が高いとされている破壊試験法により余寿命を予測する研究が国内のみならず国外でも活発に行われている．2)については、国内の火力発電用ボイラ等において発生している不具合事例である TypeⅣ損傷（高温・長時間領域において，母材の

10 分の 1 程度の寿命で，溶接熱影響部の細粒域で発生する損傷）について，強度低下を合理的かつ保守的に評価する必要があり，国内では実験的研究と解析的研究が活発に行われている．この問題の解決が A-USC プラントの早期実現につながるものである．3)については、平滑材および切欠材を用いたクリープ条件下の損傷形成挙動やき裂成長特性における多軸応力効果に関して，実験的および解析的研究が盛んに行われている。また破壊力学パラメータによる溶接継手材の余寿命評価の可能性も検討されている。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

近年、ジェットエンジン向けの Ti-Al 合金、Mo-Si-B 基合金、SiC/SiC 複合材料（通称 CMC）、高エントロピー合金（High Entropy Alloys; HEAs）が要注目である。

1980 年代初頭から約 20 年間にわたって興った金属間化合物材料開発のブームによって得られた大きな成果として、TiAl 金属間化合物ならびに Ti_3Al 金属間化合物を主相とする Ti-Al 合金のジェットエンジンへの実用化が挙げられる。2011 年に就航したボーイング 787 機（通称ドリームライナー）には、Rolls-Royce 社の Trent1000 エンジンと GE の GEnx エンジンが採用されている。Trent1000 エンジンには、我が国の物質材料研究機構（NIMS）が開発した Ni 基単結晶超合金が、高圧タービン動翼として搭載されていることは有名である。これに対して、GEnx エンジンには、Ti-Al 合金で作られた低圧タービン動翼が最後段に搭載されている [7]。Ti-Al 合金は Ni 基超合金に比べて比重が小さいため、エンジンの軽量化に大きな役割を果たしており、ドリームライナーの低燃費化の一翼を担っている。現在のところ、鋳造材が使用されているものと思われるが [8]、今後は鍛造材などの開発が大きなテーマになるものと思われる。耐熱温度は現在のところ 700°C 以上と考えらており、従来の耐熱チタン合金とは一線を画す。

2016 年 7 月、英国ケンブリッジ大学で開催された ECI Conference on “Beyond Nickel-Based Superalloys II” [9]において、米国の Office of Naval Rearch の David A. Shifler 博士は講演の中で、「現在、米国が注目しているのは、Mo-Si-B 基合金、SiC/SiC 複合材料（CMC）、そして高エントロピー合金（HEAs）である。」と述べた。

Mo-Si-B 基合金が耐熱材料として世界で注目されるようになったのは、1996 年に Iowa State University の Ames 研究所が、Mo_5Si_3 金属間化合物に B を添加することで、その耐酸化性が劇的に改善されることを発表した [10]のが契機となっている。その後、米国、ドイツ、日本の研究者らによって地道な研究が続けられてきた結果、近年、徐々に開花しつつある状況である。Mo-Si-B 合金は、密度は現在のところ Ni 基超合金と同等であるが、CMC に比べて高温クリープ強度が高く、室温破壊靭性も 15MPa$(m)^{1/2}$ 以上と良好な値を示すものが提案されてきており、耐熱性が要求されるパーツでは CMC を凌ぐ次世代の耐熱材料として期待が高い [9]。耐熱温度は、現在のところ、CMC の 1300°C を超える 1350～1400°C と考えられている。

炭化ケイ素（SiC）の長繊維は 1975 年に東北大学で開発されたセラミックスファイバーである。これを同じく SiC のマトリックスで複合化したものが SiC/SiC 複合材料、いわゆる CMC である。高温における長繊維とマトリックス間の界面反応を抑えると共に、界面の適

度なせん断すべり変形などで良好な高温強度と破壊に対する抵抗を実現するため、長繊維表面にはグラファイトや窒化ホウ素（BN）などのコーティングが施されている。CMC 製の静的部品は GE と仏スネクマ社の合弁会社、CFM インターナショナルが開発した次世代旅客機エンジン「LEAP」に実用化されており、これまで受注または内定した LEAP エンジンの販売台数は 9,500 基を超えていると報道されている（2015 年 10 月現在）[11]。LEAP エンジンへの CMC の実用化（搭載）に対する最初のプレスリリース日は定かではないが、2014 年にはすでにインターネット上で報道がなされている [12]。

高エントロピー合金に関しては、現在のところ萌芽段階であるが、新しい合金群が見出されるものと期待が寄せられている。

Additive Manufacturing（AM）、いわゆる 3D プリンティングによる造形技術は、耐熱材料の分野でも注目を集めている。2016 年現在、GE や Rolls Royce、Pratt&Whitney などは皆ジェットエンジン部材の試作に乗り出しているとの報道がある [13–16]。近年の材料関連の国際会議では必ず AM 関連のシンポジウムが開催され、常に活況を呈している。経済産業省でも AM 技術に対して注視しており、対策を検討している [17]。耐熱材料の AM 技術は、良質な素材粉末の提供が大きな鍵になると考えら、粉末作製技術を含め今後大いに発展する分野と期待が集まっている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

資源エネルギー庁「先進超々臨界圧火力発電実用化技術開発」プロジェクト（2008～2016 年）は、2050 年二酸化炭素大幅削減にむけた「Cool Earth－エネルギー革新技術計画」の課題の一つで、700°C 級 A-USC の実現に向けて、耐熱材料と構造部材の安全性・信頼性評価研究が行われている。2017 年からは第 2 期研究が行われる予定である。700°C 級 A-USC 石炭火力発電については、現在、世界各国で研究が行われている。欧州の Encio プロジェクトをはじめ、米国、中国、インドで国家プロジェクトが行われている [30]。

NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム「750°C 級極限高効率石炭火力発電用耐熱材料の開発」では、A-USC ボイラ用 Ni 基合金、耐熱鋼の更なる耐用温度の向上を目指した研究が進められている。

2014 年度開始の内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」[18] では、耐熱合金、金属間化合物等がセラミックスコーティング、航空機用樹脂、FRP とともに研究開発項目として挙げられている。この中では航空機エンジン用部材としてニッケル基合金、チタン合金、Ti-Al 合金の加工技術開発など行われている。全 26 採択課題のうち、2 拠点を含む 8 課題が耐熱合金・金属間化合物等領域に属する。ただし、これらはあくまで熱間鍛造を中心とした加工技術開発が主であり、材料設計等は含まれていない。

JST 先端的低炭素化技術開発(ALCA)「耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料」（2011 年度～）[19]では、低炭素化社会の実現に向けた、主に発電・輸送機器用蒸気・ガスタービン等のための耐熱材料・コーティング技術開発が推進されてきたが、2015 年より実用技術化プロジェクト「低 CO_2 排出型次世代火力発電用新規耐熱材料の開発」[2]に衣替えをして、先進耐熱鋼や Mo-Si-B 基超高温材料の研究開発を引き継いでいる。

2014 年度には NEDO のエネルギー・環境新技術先導プログラムで、東北大学と IHI によ

る「無冷却高圧タービン動翼を実現する最先端超高温材料の研究開発」が採択され、Mo-Si-B 基合金と耐熱セラミックスとの複合化を含む研究開発が推進されている。

このような流れの中で、主要な耐熱材料である、耐熱鋼、Ni 基超合金、Ti-Al 合金、Mo-Si-B 基合金に関しては、国際的にも見ても明確な研究拠点が国内に形成されている。耐熱鋼に関しては、物質材料研究機構 NIMS（木村一弘博士）、東京工大（竹山雅夫教授）、九大（中島英治教授）の 3 大拠点である。Ni 基超合金に関しては NIMS（原田広史博士）、Ti-Al 合金に関しては東京工大（竹山雅夫教授）、Mo-Si-B 基超高温材料に関しては東北大学（吉見享祐教授）である。これらはいずれも、上記プログラムのいずれか、あるいは複数に参画している。

2015 年まで、米国では Mo-Si-B 基合金に対するコーティング技術に関するプロジェクトが、Navy や Air Force からの支援の下、University of Wisconsin-Madison の J.H. Perepezko 教授らを中心に推進されていた[20, 21]。

一方、CMC に関しては、公式発表は少ないものの国際的には大きな研究開発が急ピッチで進んでいる。たいへん残念なことは、日本カーボン社の SiC 長繊維「ハイニカロン」の実質的な技術流出である。日本カーボンと米国 GE、仏サフランの 3 社は合弁会社を設立し、米国内にて SiC 長繊維の製造に着手する[11]。米国はこれまで、NASA や GE を中心に CMC の開発を強く推進してきたが[22]、SiC 長繊維の製造に関しては我が国が先行していた。今回のハイニカロン製造技術の流出によって、米国は CMC の量産を本格化することになり、我が国にとってはそれを追従する形になる。現在、もう一つの国産 SiC 長繊維である宇部興産の「チラノ繊維」を使って、どこまで我が国の CMC 製造技術を発展させることができるかが重要な鍵となることは間違い無い。先述のように、すでに CMC 製の静的部品は CFM インターナショナルが開発した次世代旅客機エンジン LEAP に実用化されている。この LEAP エンジンは中国の民間航空機にも搭載の計画があり[16, 23]、CMC の製造技術が世界に拡散するのは時間の問題である。我が国の SiC 長繊維製造技術の先進性が将来的に低下していくことが懸念される。

EU では、2014 年から 2020 年にかけて、Horizon2020 という超大型研究イノベーションプログラム（7 年間で総額約 800 億ユーロ）を推進している[24]。このプログラムの中で、先述の AM 技術は重要な技術戦略の一つとなっている[25]。

物質・材料研究機構　構造材料研究拠点では、「グリーンプロセスを用いた高性能構造材料の創製」、「界面制御による構造材料・構造体の高信頼性化」のプロジェクトの中で、省エネルギー・低環境負荷の実現のため、輸送機器材料の軽量化・高強度化、エネルギーインフラ材料の耐熱性向上と信頼性評価技術開発に取り組んでいる[31]。

米国では、エネルギー省（DOE）の High Efficiency Engines and Turbines プログラム(2003～2015、約 1000 億円)により国家的な支援の下で、1700°C 級ガスタービンの技術開発を進めている。

材料の損傷・劣化評価技術開発については以下の 2 つのプロジェクトに含まれている．経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」（2013 年度～）は、自動車をはじめとする輸送機器の抜本的な軽量化を目的として、鉄鋼、非鉄金属（アルミ、チタン、マグネシウム）、CFRP およびこれらの接合技術の開発を行う。本プロジェクトの推進のために、「新構造材料技術研究組合」(ISMA)[32]が設立され、鋼材、アルミニウム、チタン、マグネシウムの材料・プロセス・接合技術開発に関して 19 企業、1 独法が加入した。さらにこれらの対象

材料の高温環境下の強度評価技術開発も行われている.

上述の SIP「革新的構造材料」では、耐熱合金、金属間化合物等がセラミックスコーティング、航空機用樹脂、FRP とともに研究開発項目として挙げられている。この中では航空機エンジン用部材としてニッケル基合金、チタン合金、チタンアルミの加工技術開発および強度評価技術開発などが行われている。全 26 採択課題のうち、2 拠点を含む 8 課題が耐熱合金・金属間化合物等領域に属する。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

ガスタービン入口ガス温度は、既に 1600°C が達成されているが、現在開発が進められている 1700°C 級、更には、中長期的に開発が検討される 1800°C 級に向けた耐熱材料開発が重要である。耐熱合金に関しては、合金単体での使用限界温度の改善に加え、革新的製造技術による冷却構造の複雑化や遮熱コーティングの高性能化など複数技術の組み合わせで高温化に対応する必要がある。合金そのものについても、より一層の高強度化、耐環境性向上、低密度化が不可欠である。また、将来にわたり持続可能な使用サイクルを構築することが重要である。遮熱コーティング(TBC)に関しては、メタル温度の上昇に伴い、ボンドコート、トップコートの材料・製造技術の開発が求められる。

ボイラ・蒸気タービンのさらなる高効率化には、蒸気温度の向上が必要である。現状のフェライト系耐熱鋼では高クリープ強度耐熱鋼の開発・実用化が、さらに、蒸気温度を高めた A-USC の実現には、ニッケル合金の適用が不可欠である。素材としての大径厚肉配管や大型鍛造材の成分設計および製造技術の開発に加えて、加工・溶接部の特性把握、長期実機検証試験および損傷評価技術の開発が必要となる。

材料特性の視点からボトルネックとなっているの別の課題は耐酸化性である。耐熱材料の重要な耐熱特性の一つであるが、とかく高温強度等の機械的性質を優先し、耐酸化性を後回しにする傾向がある。しかし、Mo-Si-B 基超高温材料や CMC のような極めて厳しい高温環境下においては、耐酸化性の付与と同時にコーティング等による酸化環境からの防御が不可避となっている。世界的にも大きな課題である。

材料開発、材料試験、実用化にかかる多大なコストや時間を削減するには、計算科学や材料データベースに基づく情報学（インフォマティクス）を導入することが課題となる。最先端の計算科学や計測・評価技術も、耐熱材料の開発や高温機器部材の設計には有効である。これらにより、耐熱材料の諸特性の発現機構や、時間依存の破壊機構について、ミクロからマクロに至る現象を解明し、材料開発にフィードバックすることが重要と考えられる。更に、これらのデータがデータベースに蓄積されることにより、材料開発のスピードアップが期待される。

計算科学技術は、耐熱材料の開発、高温使用中に生じる様々な現象の解明においても有益な知見を与えてくれる。第一原理計算、分子動力学法、熱力学計算、フェーズフィールド法、有限要素法などを組み合わせて、原子・分子レベルのナノスケールから、ミクロ、部材レベルのマクロスケールまでマルチスケール解析の有効性が顕在化しつつある。また、その計算には相応のデータベース、併せてそこから有用なデータを抽出するデータマイニング技術な

ども課題となる。

ただし、計算科学の重要度が増す一方で、強度や劣化に関わる計測・評価技術の進歩も重要である。進歩の方向性の一つが微細構造に向かうことは確かである。耐熱構造材料開発に長期間を要する原因は、疲労、クリープ、応力腐食割れ、水素脆化など、時間依存性の破壊現象の正確な理解不足にある。これらの現象は、その巨視的な破壊が起こるまでに何十年もかかる場合もあり、それをより短期間で把握するために、実験的研究により微視的兆候を捉えることが有効であり、かつ(3)の注目動向の項で概説したとおり、短時間の強度実験データからの長時間強度や劣化予測のための技術開発が緊要な課題である。また、もう一つの方向性としては、材料の状態を三次元で把握することが挙げられる。それは三次元アトムプローブ、FIB-SEM などのように微細構造解析に限らず、中性子線による三次元の残留応力測定、多軸応力場での力学特性評価など、より巨視的な計測・評価も含まれる。特に多軸応力場での損傷や劣化評価については、理論的に解決できる課題ではなく、実際の試験結果に基づく経験的な余寿命評価法を開発する必要がある。そのためには、多軸応力下での試験技術開発が重要となる。一方、部材の形状、荷重、拘束の条件が複雑化する状況においては、単純な機械的試験のみから部材のパフォーマンスを予測することには無理があり、計算科学の併用により解決されるべき問題である。

［今後取組むべき研究テーマ］

耐熱合金の適用部材では、三次元積層造形技術や分割製造・接合技術といった精密鋳造技術を代替または補佐できる技術開発が、中長期的に期待される。また Ni 基高性能合金では、高価なレアメタル元素の使用量が増加してきており、レアメタルフリー合金や効率的なリサイクル技術の開発も求められる。短期的には高精度な寿命予測を可能とする組織シミュレーション技術や材料劣化診断技術なども有益である。加えて、低密度や高融点金属間化合物および低線膨張・高強度のタービンディスク材料の開発も有益である。

TBC については、高い遮熱効果、並びに高温・長時間信頼性を確保するためトップコートの開発とボンドコートの開発が必要であり、ボンドコートの材質経年変化を加味した寿命評価技術の開発が必要となる。将来技術として、輻射も考慮・加味した低熱伝導化や、トランスピレーション（染み出し）冷却の開発が望まれる。

高温で使用されるボイラ・蒸気タービンの耐熱材料開発では、母材成分・組織の改善とともに、溶接部クリープ強度、クリープ延性などを改善して、材料の特性に起因するリスクの低減が求められる。オーステナイト系ステンレス鋼は、さらなる蒸気条件の向上に対応するためには、いっそうのクリープ強度の改善に加え、脆性的なクリープ破壊を防止するための改善の取り組みが求められる。A-USC ボイラ向けの合金開発のためには、ニッケル合金等新規耐熱材料開発、強度評価技術、溶解・鍛造・鋳造・溶接・加工等の製造技術及び新たな検査・寿命評価技術開発が重要になる。

我が国の耐熱材料に関する大型プロジェクトは、SIP 革新的構造材料が 2019 年 3 月末[18]で、また JST-ALCA の実用技術化プロジェクトは 2020 年 3 月[2]で終了予定である。その時点の国内外の耐熱材料開発の状況も考慮して、特に、以下の研究テーマ案に着手する、あるいは大掛かりな研究支援に乗り出すことが期待される。

- A-USC 向け耐熱鋼の開発

  耐熱温度 700°C のフェライト系耐熱鋼を 2019 年度末までに開発することを目標とする。ただし、ボイラー管などをターゲットにしているため、材料が耐熱温度をクリアーできてもそれを大口径パイプにするための加工技術、さらにはパイプ間の溶接（接合）技術が求められることは容易に想像される。しかも、数多くの合金元素が添加されているため、溶接部の弱化が大きな問題となる。そこで例えば、特殊摩擦撹拌接合による開発耐熱鋼の接合技術開発などを研究計画に含めておくべきである。耐熱性の高い合金に対する大型の摩擦撹拌接合となるため、耐熱性かつ耐摩耗性が極めて高い専用の特殊接合ツールが必要になってくる。

- Ti-Al 合金の開発（コンプレッサータービン翼，ディスク等）

  現在、β 相を含む Ti-Al-X 合金の平衡状態図に関する研究が SIP 内でも進められているが、これをさらに加速し、早期に（第一期目標は 2019 年度末）データベース化することが期待される。そして、計算機支援による合金設計体制を出来うる限り早期に確立することも望まれる。合金開発は、実用化に向けて三元系から四元系、五元系へと添加元素種が増え複雑化するが、優れたデータベースによって適切な合金設計を迅速に行うことができるようになり、それによって熱間加工プロセス開発等も促進されるはずである。

  また、今後の Ti-Al 合金の用途拡大を想定すると、フェライト系耐熱鋼と同様、溶接性あるいは接合性が問われることが容易に想像される。そこで、Ti-Al 合金に対しても摩擦撹拌接合等の接合技術開発、あるいは接合ツール開発の着手が期待される。

  Ti-Al 合金は、今後、AM 技術の導入が大いに期待される材料系である。しかしながら、Ti-Al 合金は活性金属である Ti を多量に含むこと、一方、材料特性向上の目的で重金属である Nb、Mo 等が添加されるため鋳造偏析が著しく、AM 用の良好な合金粉末の作製が難しいように考えられる。そこで、AM 用の良質な Ti-Al 粉末合成技術の開発が重要である。粉末開発に関しては、世界的にすでに動き出しているため、ここ 1、2 年内にある程度の結果を出し権利化を進めることが期待される。

- Mo-Si-B 基超高温材料の材料プロセッシング、耐酸化コーティング技術の開発
- フェライト系及びオーステナイト系耐熱鋼の高強度化、長寿命化
- より耐熱性の高い Ni 基合金、チタン合金、TiAl 金属間化合物、その他新合金の開発
- より耐熱性の高い TBC の開発、新しいプロセスによる TBC の高性能化
- マルチマテリアル化のための異種材料接合技術開発
- マルチスケール解析を利用した材料設計技術開発、高温損傷・破壊の予測技術開発
- 材料物性データベースの整備、情報学、人工知能の活用
- 多軸応力場での力学特性（クリープ疲労、機械熱疲労など）評価技術開発
- 高温機器の余寿命診断技術開発として短時間強度データからの正確な長時間強度を予測する評価アルゴリズムの構築
- 高温機器における劣化・損傷の検出・診断として溶接部における損傷やき裂の非破壊的検査技術
- 高温機器における余寿命診断技術開発として溶接部を含めた余寿命診断アルゴリズム開発

（５）政策的課題

超耐熱材料の開発をリードする画期的要素研究が文科省・NIMS や大学を中心に継続的に行われてきているが、実用化に関しては発電システムとの統合や膨大で長時間にわたる材料特性データの継続取得や周辺技術開発が必要となり政策的な支援が不可欠である。材料の開発のみでは、高効率コンバインド複合発電、汽力発電プラントの実現は難しく、開発した材料を用いたパイロット発電設備の実証試験が不可欠であり、政策的な推進が望まれる。高度な要素技術の成果を実用化する為には、要素技術を統合する高度な研究マネジメントが重要であると共に、実機での使用条件を考慮した実験/解析技術や、実部品を想定した高度な製造技術開発等、経産省や NEDO も含めた産学官連携での長期的な取り組みが求められると共に、エンジンメーカー、素材メーカーとの連携が極めて重要となる。大学、公的研究機関においては、耐熱材料を含めて金属系構造材料に取り組む研究者、特に若手研究者層の薄さも懸念される。短期的な成果が求められる中で、長期的な取り組みが必要な耐熱材料の開発や実用化には取り組みにくい状況にあると思われる。

Ni 基超合金の歴史は 70 余年に及ぶ。この間、Ni 基超合金製造技術は進化を遂げ、単結晶タービンブレードを溶解鋳造法で作製するにまで至っている。しかしながら、我が国で Ni 基超合金の単結晶タービンブレードを自作する技術を有する公的研究機関はNIMSのみである。Ti-Al 合金の融点は Ni 基超合金とほぼ同等であるが、チタンという活性な金属を扱うため、特殊でかつ大型な溶解炉が必要となる。大学をはじめ公的研究機関では対応が困難である。上記 2 種類の耐熱材料に関しては、産学連携が不可欠である。しかし、Mo-Si-B 基超高温材料にいたっては融点が 1900°C を超えているため、我が国の民間企業では対応できるところがほぼ無い。上記材料群に関しては、大学や国立研究所など公的研究機関でシーズ開発をし、それを産業界で実用化していくという図式が成立し難い。Mo-Si-B 基超高温材料に関しては成立していない。唯一現在の技術レベルで多様な対応が可能と考えられるのは、耐熱鋼のみである。そして、そういった状況であるということが、意外に理解されていない。つまり、優れたシーズ開発がなされたら、産業界は出口まで開発を進めることができると誤解されている。出口まで開発が進まなかったのはシーズに問題があった。

したがって、出口の問題は後述するが、我が国の耐熱材料分野は世界の動きに遅れを取る傾向を潜在的に持っている。CMC が最も良い例である。これを解決するためには、ポスト CMC として Mo-Si-B 基超高温材料の研究開発では、まず超高温研究開発に向けたインフラ（溶解，鋳造，鍛造，焼結，押出加工等々）の整備が大きな課題であり、実験ノウハウや技術の早期高度化、また超高温材料研究者の育成が求められる。前述の(3)で指摘した国内の研究拠点と超高温材料研究センターが連携し、集中的な超大型研究資金によって研究インフラを整備し、飛び抜けた先導的な「開発研究」を推進することで、実用化を想定した「ものづくり」技術の高度化を図ることが望まれる。公募型の研究プロジェクトを大型化してもたいした効果は得られない。なぜならば、上述のように、そもそも国内において耐熱材料を試作・開発できる公的研究機関が少ない。仮に面白いアイディアが提案されたとしても、それをものづくりに発展させていく力が弱く、ほとんどの場合「研究のための研究」に落ち込んでいく。

平成 27 年度から、防衛省が大学等に向けて競争的研究資金制度を開始した [26)]。この制度は、軍民両用のデュアル・ユースを謳っているが、これから制度の運用方法などを検討して

いく必要がある。少なくとも、これまで軍用研究が閉ざされてきた我が国において、大学や公的研究機関における機密保持の概念、あるいは機密を保持する研究環境が乏しい。

（６）キーワード

耐熱鋼、ニッケル基合金、チタン合金、Ti-Al 合金、Mo-Si-B 合金、CMC、高温強度、クリープ強度、耐酸化性、疲労、ジェットエンジン、ガスタービン、高強度化、軽量化、耐熱性、材料信頼性、計算科学、情報学、異種材料接合、損傷・劣化評価，余寿命評価

（７）国際比較

＜新材料開発技術＞

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において日本のアクティビティーは非常に高い。 ● 2011年に就航したボーイング787機（通称ドリームライナー）には、Rolls-Royce社のTrent1000エンジンとGEのGEnxエンジンが採用されている。Trent1000エンジンには、我が国の物質材料研究機構（NIMS）が開発したNi基単結晶超合金が、高圧タービン動翼として搭載されている。これに対して、GEnxエンジンには、Ti-Al合金で作られた低圧タービン動翼が最後段に搭載されている[7]。Ti-Al合金の開発は、我が国の大学、国立研究機関による基礎研究、またIHI社の開発研究の貢献が大きい。 ● Mo-Si-B基超高温材料の研究開発は、米国、ドイツ、日本の研究者らによって地道な研究が続けられてきた結果、近年、徐々に開花しつつある状況である。 ● 平成27年度から、防衛省が大学等に向けて競争的研究資金制度を開始した[26]。
	応用研究・開発	◎	→	● 高効率火力発電プラントの技術は日本が最も優れており、次世代のA-USC石炭火力や1700°Cガスタービンの開発でも世界をリードしている。 ● 2015年より実用技術化プロジェクト「低CO_2排出型次世代火力発電用新規耐熱材料の開発」[2]に衣替えをして、先進耐熱鋼やMo-Si-B基超高温材料の研究開発を引き継いでいる。 ● 2014年度にはNEDOのエネルギー・環境新技術先導プログラムで、東北大学とIHIによる「無冷却高圧タービン動翼を実現する最先端超高温材料の研究開発」が採択され、Mo-Si-B基合金と耐熱セラミックスとの複合化を含む研究開発が推進されている。 ● 我が国の耐熱材料分野は世界の動きに遅れを取る傾向を潜在的に持っている。CMCが最も良い例である。 ● 今回のハイニカロン製造技術の流出によって、米国はCMCの量産を本格化することになり、我が国にとってはそれを追従する形になる。
米国	基礎研究	△	↘	● 高温の実験はあまり行われていないが、耐熱材料や高温強度に関する計算科学の分野は進んでいる。 ● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において米国のアクティビティーはやや落ちている。 ● Mo-Si-B基超高温材料の研究開発は、米国、ドイツ、日本の研究者らによって地道な研究が続けられてきた結果、近年、徐々に開花しつつある状況である。 ● 2015年まで、米国ではMo-Si-B基合金に対するコーティング技術に関するプロジェクトが、NavyやAir Forceからの支援の下、University of Wisconsin-MadisonのJ.H. Perepezko教授らを中心に推進されていた[20,21]。
	応用研究・開発	◎	↗	● GEやEPRIなどを中心に高温強度研究が進められている。A-USC、1700°Cガスタービン、ジェットエンジンの研究を推進している。 ● 2011年に就航したボーイング787機（通称ドリームライナー）には、Rolls-Royce社のTrent1000エンジンとGEのGEnxエンジンが採用されて

				いる。 ● CMC製の静的部品はGEと仏スネクマ社の合弁会社、CFMインターナショナルが開発した次世代旅客機エンジン「LEAP」に実用化されている。 ● 米国はこれまで、NASAやGEを中心にCMCの開発を強く推進してきた[22]。 ● 日本カーボンと米国GE、仏サフランの3社は合弁会社を設立し、米国内にてSiC長繊維の製造に着手する[11]。 ● 今回のハイニカロン製造技術の流出によって、米国はCMCの量産を本格化することになる。 ● Additive Manufacturing(AD)、いわゆる3Dプリンティングによる造形技術は、耐熱材料の分野でも注目を集めている。2016年現在、GEやRolls Royce、Pratt & Whitneyなどは皆ジェットエンジン部材の試作に乗り出しているとの報道がある[13–16]。
欧州	基礎研究	○	→	● 耐熱材料と高温強度に関する研究の歴史は最も古く、維持継続されていると思われる。実験、計算両面で研究が行われている。 ● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において欧州のアクティビティーは良好である。 ● Mo-Si-B基超高温材料の研究開発は、米国、ドイツ、日本の研究者らによって地道な研究が続けられてきた結果、近年、徐々に開花しつつある状況である。 ● EUでは、2014年から2020年にかけて、Horizon2020という超大型研究イノベーションプログラム（7年間で総額約800億ユーロ）を推進している[24]。
	応用研究・開発	◎	↗	● 大学と企業が連携して耐熱鋼と高温強度の研究を進めている。高温強度に関する欧州全体の研究プロジェクトを幾つか推進している。 ● 2011年に就航したボーイング787機（通称ドリームライナー）には、Rolls-Royce社のTrent1000エンジンとGEのGEnxエンジンが採用されている。 ● CMC製の静的部品はGEと仏スネクマ社の合弁会社、CFMインターナショナルが開発した次世代旅客機エンジン「LEAP」に実用化されている。 ● 日本カーボンと米国GE、仏サフランの3社は合弁会社を設立し、米国内にてSiC長繊維の製造に着手する[11]。 ● Additive Manufacturing（AD）、いわゆる3Dプリンティングによる造形技術は、耐熱材料の分野でも注目を集めている。2016年現在、GEやRolls Royce、Pratt & Whitneyなどは皆ジェットエンジン部材の試作に乗り出しているとの報道がある[13–16]。
中国	基礎研究	△	↗	● 環境エネルギー関係の研究に力を入れており、研究レベルの向上、研究者の増加が見られる。高温強度関係の実験設備の整備に力を入れている。 ● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において中国のアクティビティーはこれからといったところである。
	応用研究・開発	△	↗	● USC石炭火力の実用化プロジェクトが推進されている。 ● LEAPエンジンは中国の民間航空機にも搭載の計画があり[16, 23]、CMCの製造技術が中国に拡散するのは時間の問題である。
韓国	基礎研究	△	↘	● 耐熱材料の開発や高温強度に関わる研究者はあまり多くない。 ● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において韓国のアクティビティーは低い。
	応用研究・開発	△	→	● 耐熱材料、高温強度の分野の研究開発はあまり推進していないと思われる。 ● 2016年に、GEは韓国の戦闘機にエンジン供給することを発表した。

＜材料損傷・劣化評価技術＞

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	「新構造材料技術研究組合（ISMA）」や内閣府戦略イノベーション創造プログラム（SIP）においても高温環境下での強度評価技術に関わる研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	日本機械学会および日本材料学会の分科委員会、日本学術振興会分科委員会等で産学官の共同研究が行われており、主たる成果はASTMやISOへの規格改定案として、世界に発信されている[19,20]。
米国	基礎研究	◎	↗	ASME（米国機械学会）では、1910年よりボイラおよび圧力容器の設計コードの作成に着手し、現在まで改定が重ねられている。現在では解析に基づく損傷評価法の開発が主として展開されている。
	応用研究・開発	○	→	EPRI（米国電力中央研究所）の主導でラウンドロビンテストを実施し[16]、既存の評価手法の実機への適用性等を検討している。実用化に向けて、ASTMやISO規格の改定を進めている。
欧州	基礎研究	◎	↗	英国では1990年にBritish Energy社が策定した高温構造に対する評価手法R5をガイドラインと位置づけ、この手法による構成材料の適用性等の研究調査が行われている。またフランスでは1977年に高速炉の設計規格であるRCC-MRを策定し、現在までこの規格の新材料に対する改定等が行われている。
	応用研究・開発	○	→	EPRI（米国電力中央研究所）の主導でラウンドロビンテストを実施し、既存の評価手法の実機への適用性等を検討している。実用化に向けて、ASTMやISO規格の改定を進めている[19,20]。
中国	基礎研究	○	↗	Hefei General Machinery Research Instituteを中心に研究が進められており、高クロム鋼のTi添加による組織への影響や強度評価などを調査している。また、Ningbo Univ.of Technologyではオーステナイト系ステンレス鋼の高温での寿命予測評価技術について研究がなされている。
	応用研究・開発	—	—	
韓国	基礎研究	○	→	Korea Univ.およびChung Ang Univ.を中心として研究体制があり、Korea Atomic Energy Research Institute等の研究所と企業が密に共同研究を実施している。
	応用研究・開発	—	—	

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 電気製鋼. “ステンレス鋼の最近の動向”第 86 巻, 1 号 (2015) 37 – 44.
2) JST 先端的低炭素化技術開発（ALCA）実用技術化プロジェクト. “低 CO_2 排出型次世代火力発電用新規耐熱材料の開発” http://www.jst.go.jp/alca/kadai/prj_03.html
3) Science & Technology Trends. “発電用ガスタービン高効率化に向けた耐熱材料の開発動向” 1 月号 (2004) 22 – 29.

4) 電気製鋼. “チタン合金の最近の研究・開発動向”第 86 巻, 1 号 (2015) 45 – 50.
5) 新日鉄住金技報. “航空機用チタンの適用状況と今後の課題”第 396 号 (2013) 23 – 28.
6) まてりあ. “航空機用チタン合金の材料特性および開発指針”Vol. 55, 8 (2016) 370 – 376.
7) IHI 技報. “GEnx エンジンの開発” Vol.48, No.3 (2008-9) 153 – 158.
8) IHI 技報. “チタンアルミ翼が実現する航空エンジンの軽量化” Vol.53, No.4 (2013) 16 – 19.
9) ECI. “Beyond Nickel-Based Superalloys II”, July 17–21 (2016), Cambridge, UK. http://www.engconf.org/past-conferences/2016-conferences/beyond-nickel-based-superalloys-ii/
10) M. Meyer, M. Kramer, and M. Akinc, “Boron-Doped Molybdenum Silicides”, Advanced Materials, 8 (1) (1996), 85 – 88.
11) GE REPORTS JAPAN. “GE、日本の技術が生きた超先端セラミック複合材料（CMC）量産へ”http://gereports.jp/post/132139569884/made-in-rocket-city
12) GE REPORTS JAPAN. “日本生まれの新素材を採用、次世代航空機エンジン「LEAP」” http://gereports.jp/post/94704456459/leap
13) GE Degital/Stories. “Advanced Manufacturing is reinventing the way we work” http://www.ge.com/stories/advanced-manufacturing
14) Rolls-Royce Media/Insights. “High powered Trent XWB-97” http://www.rolls-royce.com/media/insights/simon-burr.aspx
15) optics.org NEWSDESK/Applications. “Pratt & Whitney uses 3D printing for aero engine parts” http://optics.org/news/6/4/7
16) Wikipedia. “CFMインターナショナル LEAP” https://ja.wikipedia.org/wiki/CFMインターナショナル_LEAP
17) 金属素材競争力強化検討会技術開発小委員会資料. 経済産業省製造産業局鉄鋼課・非鉄金属課 平成 27 年 6 月 3 日.
18) 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）. http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/
19) JST 先端的低炭素化技術開発(ALCA) . http://www.jst.go.jp/alca/index.html
20) Navy, 2010-2015, High temperature oxidation resistant coatings for refractory metal systems.
21) Air Force, University of Vermont, 2011-2015, Mo-Si-B alloys and diboride systems for high-enthalpy environments: Design and evaluation.
22) J.A. DiCarlo, Advances in SiC/SiC Composites for Aero-Propulusion,NASA/TM-2013-217889 (2013).
23) cfm Engines/LEAP. “The LEAP Engine –Performance. Execution. Technology.” https://www.cfmaeroengines.com/engines/leap/
24) 駐日欧州連合代表部. “ホライズン 2020” http://www.euinjapan.jp/relations/science-research/horizon2020/
25) European Commission HORIZON 2020. “Faster, cheaper, energy-efficient manufacturing of metal parts” https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/faster-cheaper-energy-efficient-manufacturing-metal-parts
26) 防衛省・自衛隊. “安全保障技術研究推進制度（競争的資金制度）”

http://www.mod.go.jp/j/approach/kaihatsu/suishin.html
27) 原田広史，横川忠晴，川岸京子，小林敏治，小泉裕，坂本正雄，湯山道夫，高温ガスタービン用耐熱材料と実機適用，日本ガスタービン学会誌，Vol. 43, No. 5 (2015) pp.349-357.
28) 山崎泰広，第 64 期第 2 回高温強度部門委員会講演会資料，Ni 基超合金およびコーティング材に関する研究の現状と超合金 WG の活動，日本材料学会高温強度部門委員会（2015) pp. 37-41.
29) 原田広史，山崎道夫，小泉裕，713C 合金のγ-γ'結線上にある一連の Ni 基耐熱合金（高温の組織と強度)，鉄と鋼，Vol. 65, No. 6 (1979) pp.1049-1058.
30) Advances in Materials Technology for Fossile Power Plant, ed. by D. Granfy and J. Shinbledecker, EPRI (2013).
31) 国立研究開発法人物質・材料研究機構　第 4 期中長期計画
32) 新構造材料技術研究組合(ISMA) . http://isma.jp/index.html

3.31　高強度軽量材料

（1）研究開発領域の簡潔な説明

高強度軽量材料は、自動車、航空機をはじめとする輸送機器などへ適用される軽量かつ高強度の構造材料である。ここでは、繊維強化プラスチック（FRP）、炭素繊維複合材料（CFRP）、アルミ合金、チタン合金、セルロースナノファイバー（CNF）などの研究開発を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

［意義］

省エネルギー、低環境負荷（CO_2 排出量削減）という地球的課題に対して、高強度軽量材料は自動車、航空機をはじめとする輸送機器などへの適用により、その解決に直接的に貢献する。代表的な複合材料である FRP は、マトリックスとしての樹脂の中に強化材としての繊維を配置することにより、高比強度、高比剛性を達成した“軽くて強い”構造材料である。さらに、構造物にかかる荷重の分布や変形様式に合わせて強化材を配置することにより、その強度や剛性を適切に制御することが可能な材料でもある。しかしながら、加工性、生産性などの点から従前の金属材料に比べて高コストとなり、現状において、特に大型構造物や輸送機器などの分野においては、金属系構造材料を凌駕するほど普及していない。

鉄鋼系金属材料の開発がある程度成熟化しつつある状況において、高強度軽量金属系材料としては、アルミ合金、チタン合金のさらなる高強度化、軽量化の研究開発が期待されている。さらに、炭素繊維複合材料（CFRP）の技術開発、特に、プロセス技術開発は、まだ大きな伸びしろを有している。炭素繊維にはポリアクリロニトリルを出発原料とし、それを焼成することにより得られる PAN 系、また、石油精製において得られるピッチを出発原料とするピッチ系があるが、いずれも日本発の技術であり、その生産量において日本は世界のおよそ 7 割を占める。世界の需要は 2014 年には 53 千トン/年であるが、2020 年には 140 千トン/年に達するものと予想されている [1)]。この炭素繊維を用いた CFRP は今後、自動車・航空機産業に革新をもたらし、産業・社会にパラダイムシフトを引き起こす可能性が高い。ポスト CFRP 材料としては、木材から生成されるセルロースナノファイバー(CNF)が環境負荷の低減への期待から注目されており、その研究開発、将来の実用化が望まれている [11)]。

自動車に代表されるように、昨今の車体の軽量化が燃費の向上と CO_2 排出量低減へ大きく貢献することは公知の事実であり、現在のハイブリッド車から、電気自動車、燃料電池車へと走行距離を延長させる効果も含めて、ますます軽量化の効果が期待される状況になっている。

［動向（歴史）］

- FRP、CFRP

日本の FRP の出荷量は 1960 年代後半から徐々に増加し、1996 年にはピークの 0.48 百万トンに達したが、その後は減少を続け、2009 年以後 0.2 百万トン台に低迷している。一方、世界の総出荷量（2008 年）はおよそ 8.6 百万トンで、そのおよそ 4 割が米国、3 割が欧州、3 割がアジアと言われている。アジアの中で最も出荷量が多いのは中国（1.6 百万トン）で、年成長率も日本よりはるかに高い。国内生産の FRP の需要として最も大きいのは浴槽・浴室

ユニットなどの住宅機材であり、生産量全体の約半分を占め続けている。他に建設資材、輸送機器、浄化槽などがある。そのほとんどはGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）である。GFRPの成形法は、1980年代にはほぼ確立されていた。1980年にはハンドレイアップ法、スプレーアップ法が主流で、FRP成形法全体のおよそ5割を占めていたが、その後モールディングコンパウンド法の割合が増加し、現在およそ5割を占めている。前述の住宅機材にもこの成形法が使用されている[2),3)]。

CFRPは熱硬化性樹脂もしくは熱可塑性樹脂をマトリクスとし、その中に直径6～10μmの炭素繊維を強化剤として配置させた複合材料である。作成方法としては、従来のガラス繊維を用いたGFRPと同様にハンドレイアップ法やホットプレス法なども用いられるが、高い機械的性能が要求される航空宇宙分野では、もっぱらホットメルトタイプの熱硬化樹脂を用いたプリプレグという中間成形体を出発原料とし、オートクレーブ（圧力釜）を用いた加圧成形法が用いられることが多い[4)]。

熱硬化性樹脂をマトリクスに用いたCFRPでは、上記のオートクレーブ成形法が主流であり、航空宇宙用の構造材やスポーツ用具等の成形に広く利用されているが、製造にはその製品を成形できる大きさの圧力釜が必要であり、大型航空機の翼にもなると30m程度の長さを有する圧力釜を用意するしなければならない。それゆえ、非常に高コストとなる。

近年、CFRPを主要構造材として用いた大型構造物の代表例であるボーイング787の場合、機体構造重要の50%がCFRPで製造されており、その70%、つまり全機体重量の35%が国産のプリプレグにより製造されている。炭素繊維における非常に高い製造能力を背景としてCFRP製造においても日本は高い国際競争力を有してきたが、欧州がロボットを利用したプリプレグの積層技術など、次世代航空機の製造技術の研究開発を着々と進めており、日本はやや遅れをとっている状況である。複合材・カーボン繊維の製造技術は日本メーカーがリードしているが、樹脂素材や製造法、検査技術では海外が先行しており、日本メーカーが十分に活躍できていないのが現状である。また，航空機産業で複合材適用を拡大するためには、各種試験を要する材料認定や設備認定など高いハードルをクリアする必要があるが、この分野でも欧米がリードしている。

2013年11月にドイツBMW社は、世界で初めてCFRP(三菱レーヨン製)を車体の主要骨格に採用した電気自動車「i3」を一般向けに発売している。2015年にはBMW7シリーズにおいて、センターピラー、ルーフサイド、リアピラー等、15の主要部品に対してCFRP補強部品を採用し、車両全体で130kgの軽量化を達成したと報告されている[12)]。

なお、複合材料には金属、セラミックスをマトリックスとする金属基複合材料(MMC)、セラミックス基複合材料(CMC)もあり、1980年代のいわゆる新素材ブームの中で多くの研究開発がなされたが、炭素繊維は金属マトリクスとの相性が悪いこともあり、有力な商品は生まれず90年代のバブル経済崩壊とともにほとんどの企業は炭素繊維強化金属の分野から撤退した。有望な材料としてはSiC/SiCコンポジットが挙げられる。SiC/SiCコンポジットの製造方法としては室蘭工業大学の香山らにより開発されたNITE法（Nano-powder Infiltration and Transient Eutectic Process）などが用いられている。高靭性、高耐熱のSiC/SiC複合材は、Ni基超合金を超える耐熱材料として、次世代航空機エンジンのタービン翼や次世代発電システムへの適用が期待されている[13)]。

- 軽金属材料

アルミニウム、チタンなどの軽金属材料に関しては、日本は、鉄鋼ともにナノスケールでの微細組織化、ナノ材料の添加などで世界最高性能を誇る。例えば、ナノスケールの析出物を鋼中に分散させることにより強度を大幅に増加させたナノハイテンが市販されている。一方、欧米は軽金属メジャー企業を有し、航空・宇宙・防衛産業において依然として研究開発から産業化まで優位性を保っている。ロシアは航空・宇宙産業に強みがあり、アルミニウム、チタンに関する技術も保有していることから、今後の動向が注目される。中国、韓国は製品化のコスト競争で優位に立ち、さらに、自前の素材開発に注力しつつある。軽金属では、ロシアとカナダにおけるアルミニウムの生産量が米国を上回っており、固溶強化、析出強化型の東南アジア、インド、イランなどのアジア圏も追い上げ傾向にある。

アルミニウムの新地金の需要は 1970 年代から急速な消費量の増加がみられており、世界的にも増加傾向にある。日本も同様であるが、2009 年にはいったん大きく減少、その後 V 字回復を見せた。アルミ消費量の総量では 2000 年までは欧州がトップであったが、その後、中国が大きな伸びを見せ、2014 年現在では中国が 1 位、続いて、欧州、米国、日本の順となっている。国民一人あたりに換算すると、2000 年以降は日本が 1 位で、2014 年現在では日本、米国、中国、欧州となっている。日本では特に自動車や鉄道車両に代表される輸送機関関連の製品へのアルミ需要が増加傾向にあり、アルミサッシなどの住宅関連製品は 2000 年頃をピークに減少傾向にある[19]。とくに自動車のアルミ製品としては、鍛造・ダイカスト製品が 1980 年代は 9 割を占めていたが、2000 年第以降は鍛造・ダイカスト製品は 8 割、残り 2 割を圧延板材と押出材が占めるようになってきており、用途に応じた製品の適用が行われていると考えられる[20]。

- セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーは 1980 年前後に米国の Turbak らが製紙用パルプを解繊して調製したのが始まりと言われている。セルロースナノファイバーの研究開発が材料として特に発展したのは 2000 年頃からであり、2004 年頃から論文や特許数が急激に増加している。セルロースナノファイバーの研究開発の中心は北欧、北米、日本であり、最近では中国でも活発化している。特許からみると出願が多いのは、日本では、日本製紙、王子ホールディングス、凸版印刷、三菱化学、花王、フィンランドの UPM キュンメネ、ストラ・エンソ、カナダの FPINNOVATIONS、一方、大学では、日本の京都大学と中国の東華大学である[27]。

セルロースナノファイバーの製造では、多大なエネルギーを要するというコスト課題があり、製造方法について多くの方法が開発されている。低濃度で製造する技術としては、高圧ホモジナイザー、水中カウンターコリジョン法等があり、一方、高濃度では 2 軸混練機などを用いた方法もある。この方法はセルロースナノファイバーを樹脂中でナノファイバー化とナノ分散を同時に行えるため複合材料を製造するには有利である。

解繊を促進するために触媒や酵素を使う技術も開発されている。特に、TEMPO 触媒を用いることにより解繊を大きく促進する技術が確立された。この技術を開発した東大の磯貝明教授ら日本人研究者 3 人が 2015 年スウェーデンの財団から「マルクス・バーレンベリ賞」を授与されている。

セルロースナノファイバーの高強度軽量材料への応用は日本が世界をリードしており、その中でも京都大学を中心として研究開発が行われている。京都大学では 2000 年にセルロー

スナノファイバーの構造用途の研究に着手し、2001 年には世界で初めてセルロースナノファイバーを樹脂に複合化することにより高強度の材料を開発した。その後、経済産業省のプロジェクトを中心に、セルロースナノファイバーの製造方法、修飾方法、樹脂への分散方法等を検討し、高強度軽量材料として大きな研究成果を上げてきた。

「日本再興戦略」改訂 2014、同改訂 2015、及び同改訂 2016 において、セルロースナノファイバーの製品化に向けた研究開発や国際標準化等を進めることが明記され国家の成長戦略における位置づけが明確に示された。平成 28 年 5 月 13 日に閣議決定された「地球温暖化対策計画」や平成 28 年 6 月 2 日に閣議決定された「経済財政運営と改革の基本方針 2016」においてもセルロースナノファイバーの研究開発推進が記載された。

2014 年 6 月には経済産業省の主導のもと、ナノセルロースの実用化の加速のため「ナノセルロースフォーラム」が発足した。2014 年 8 月 4 日にはナノセルロースに関連する政策連携を目的として「ナノセルロース推進関係省庁連絡会議」が創設された。また、2016 年 5 月 17 日には、セルロースナノファイバー活用推進議員連盟が発足している。

（３）注目動向

［新たな技術動向］

- CFRP

前述の脱オートクレーブ成形法の一つとして、RTM 成形法(Resin Transfer Molding：樹脂含浸)が挙げられる。これは繊維のみを予め積層し、その後に樹脂を含浸させる成形法で、プリプレグが不要になることにより低コスト化が可能となる。RTM 成形法は 1970 年代に既に国内において確立されたが、近年はその発展形である VaRTM 成形法（真空樹脂含浸成形法）が開発された。VaRTM は真空ポンプを利用して、大気圧との圧力差を利用して低温で樹脂含浸を行うもので、さらなる低コスト化が可能となる。海上自衛隊のえのしま型掃海艇の製造に VaRTM が採用されている。また、三菱重工業(株)では、この VaRTM 法をさらに改良した A-VaRTM(Advanced VaRTM)を開発し、MRJ の尾翼の成形に適用した [14]。

マトリクス樹脂については、従来は主にハンドリングに優れた熱硬化性樹脂が使用されてきたが、近年のリサイクル性の流れのなかで熱可塑性樹脂が注目されつつある。ノート型パーソナルコンピューターの筐体など、民生の電気電子機器の分野において、射出成形、スタンピング成形、プレス成形等により製造された熱可塑性樹脂ベースの短繊維複合材料はすでに実用化されているが、今後は自動車用構造材等に対しても熱可塑性樹脂ベースの CFRP が普及を加速するものと考えられる。NEDO のプロジェクトとして平成 25 年度よりスタートした「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発」では、自動車用構造材料としての熱可塑性 CFRP が研究ターゲットとなっており、名古屋大学を核として、その精力的な研究開発と技術開発がすすめられている [15]。

検査技術としては、構造物に発生した損傷や内部剥離を検知するための構造ヘルスモニタリング技術が注目されている。これは光ファイバセンサなどを CFRP 複合材料製造時に埋め込み、製造時、使用時のひずみ、振動、温度変化、損傷などをリアルタイムで検知・診断するもので、航空機認証機関による認証取得の段階にまで達している [4]。

- 軽金属材料

軽さに加えて、リサイクル性がカーボン繊維や CFRP 複合材料に比較して、インフラを含めて圧倒的に優れていることから、特に自動車用部材としてはすでに実装も含めた適用がなされている。自動車用材料など人命にかかわる製品となることから、鉄鋼材料のように高強度と高信頼性を併せ持つ製品が望まれている。このような中で、1980 年代に盛んに研究されたアルミニウム - リチウム（Al-Li）系合金が再度注目されている。Li は原子番号 3 番であり、金属としては最軽量であることから、アルミニウムと合金化することでさらなる軽量化が実現する。

- セルロースナノファイバー

製造についてコストが高いことが課題である。構造用途へのセルロースナノファイバー利用に関して、最近、京都大学は企業と共同で、京都プロセスと呼ばれる新しい製造方法を開発した。一般には水を用いてセルロースナノファイバーを製造した後に化学処理して樹脂に分散するが、この方法では、パルプを化学処理したのち樹脂との溶融混練時にパルプ繊維のナノ解繊と樹脂中への均一分散を達成するもので、プロセスが大幅に短縮され大きなコストダウンにつながることが期待されている。京都大学では 2016 年に宇治キャンパス内にセルロースナノファイバー強化樹脂を試作・製造するテストプラントを設置した [28)]。

中越パルプ工業（株）では、九州大学との共同研究を通じて、水中対向衝突法（ACC 法）によるナノセルロースを開発し 2013 年にサンプル提供を開始した。2015 年にはポリオレフィンに均一分散できたことを発表している [29)]。星光 PMC（株）では、NEDO プロジェクトに参画しセルロースナノファイバーの変性と熱可塑性樹脂との複合化に関する基盤技術開発を行った。その技術を元に 2014 年にセルロースナノファイバーのパイロットプラントを建設し、変性セルロースパウダー及び変性セルロース配合樹脂のサンプル提供を開始した [30)]。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

- CFRP

経済産業省「革新炭素繊維基盤技術開発」（2011 年度～）は、炭素繊維製造時の消費エネルギー消費量・CO_2 排出量の半減及び生産性の大幅向上(大量供給)を実現する、新たな炭素繊維製造プロセスに必要な基盤技術を確立することを目的としている。

経済産業省「次世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造）」（2013 年度～）は、航空機用 CFRP 構造ヘルスモニタリング技術の実用化や製造プロセスモニタリング技術の開発を進めている [5),6)]。脱オートクレーブ化の流れが世界的に加速しつつある状況のなか、より高品質な複合材部材の製造技術基盤を確立するため、複合材製造プロセスモニタリング技術、光ファイバセンサによる航空機構造の成形モニタリング技術、高生産性・易賦形複合材の技術開発を中心とした研究開発がすすめられている。

NEDO「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」（平成 20～24 年度）では、東京大学を中心として、6 大学、6 企業の参画により、炭素繊維複合材料の易加工・高強度を実現するための基盤技術として、炭素繊維と熱可塑性樹脂による短時間成形が可能な易加工性中間基材の開発を実施した。さらにこの中間基材を用いた高速成形加工技術の開発、部材の接合技術、CFRP のリサイクル技術の開発を実施した [9)]。

経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」（2013 年度～）では、自動車を

はじめとする輸送機器の抜本的な軽量化を目的として、より広く、鉄鋼、非鉄金属（アルミ、チタン、マグネシウム）とともにCFRPおよびこれらの接合技術の開発を行う[7]。CFRPに関しては、量産車の超軽量化のための熱可塑性CFRP(CFRTP)の開発を行っており、有限長の繊維をランダムに分散させたCFRTPのプレス成形を軸にした自動車用シャーシ構造材の成形技術の開発が行われており、実生産車両への応用展開を目指して精力的に研究開発が進められている。本プロジェクトの推進のために、「新構造材料技術研究組合」(ISMA)が設立され、CFRPの研究開発グループに関しては、名古屋大学をはじめ1大学、17企業が加入した。そのほか、「革新的チタン材の開発」、「革新的アルミニウム材の開発」、「革新的マグネシウム材の開発」、「革新的鋼板の開発」に対し、延べ 13 社が参画し、精力的な研究開発を実施している[15]。

内閣府戦略的イノベーション創造プログラム「革新的構造材料」（2014年度～では、航空機用樹脂、FRPがセラミックスコーティング、耐熱合金・金属間化合物等とともに研究開発項目として挙げられている[8]。この中では国産の炭素繊維と熱可塑性樹脂を利用した航空機エンジンファンケース・ブレード向け CFRTP、航空機機体構造用の脱オートクレーブ成形技術、大型部材成形技術などが行われている。光ファイバーを利用したセルフモニタリング技術や、RTM 成形時における温度のリアルタイムモニタリングとデータ同化を用いた温度制御によってCFRP成形を最適化する技術などについて精力的に研究開発が取り組まれている[16]。全26採択課題のうち、1拠点を含む6課題が航空機用樹脂・FRP領域に属する。また、この中では航空機エンジン用部材としてチタン合金、チタンアルミの加工技術開発なども行われている。全26採択課題のうち、2拠点を含む8課題が耐熱合金・金属間化合物等領域に属する。

- 軽金属材料

米国のNational Science Foundation（NSF）の工学分野Division of Chemical, Division of Civil, Mechanical and Manufacturing Innovation（CMMI）のCyber-Enabled- Materials,Manufacturing and Smart Systems(CEMMSS)では、2012～2014年の3年間に総額585百万ドルが計上され、材料工学、情報工学、ロボット工学の融合による新規イノベーションが目指された[21),22)]。米国では既存のアルミニウム合金の研究は基礎研究に分類されており、それらよりも先鋭化した応用研究が軍事およびエネルギー関連の研究支援によって推進されている。例えば基礎研究を支援する NSF の工学系研究テーマにおいて、Aluminum AND Alloyでヒットした過去10年間程度の採択テーマは257件、研究内容は鋳造、鍛造、熱間加工、塑性変形、接合、破壊に関する研究テーマが多い。100万ドル以上が7件、50万ドル以上100万ドル未満が20件、10万ドル以上50万ドル未満が177件、10万ドル以下が53件であった。そのうち、modelingを含む研究が123件と大半を占めていた[23]。さらには医療用新規金属ガラス(Mg基合金)や、ハイエントロピー合金への研究が注目されている。中国では、2005年には約27億元、2007年には43億元と近年急激に増額されている。科学技術のイノベーションが世界レベルに到達したとして、今後はそれらを持続させる体制づくりとして、①革新の主体としての企業の地位を強化、②大衆による起業・革新と「Internet十」との相乗効果、③科学技術管理体制の改革深化を掲げている[24]。

- セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーについては、日本では関連する省庁が役割分担をし以下の主要

プロジェクトを実施している。経済産業省「高機能リグノセルロースナノファイバーの一貫製造プロセスと部材化技術開発」では、リグノセルロースナノファイバーについて一環製造プロセス及び自動車部品や建材等の部材化に関する技術開発を行っている。農林水産省「新たな木材需要創出総合プロジェクト」は、セルロースナノファイバー等のマテリアル利用の促進に向け、サポート体制の構築及び技術開発等を、同省「工学との連携による農林水産物由来の物質を用いた高機能材料等の開発」は、農産物や木材由来のセルロースナノファイバー（NC）を用いた素材開発を支援する。環境省「セルロースナノファイバー等の次世代素材活用推進事業」は、地球温暖化対策の観点よりセルロースナノファイバーやバイオプラスチック等について評価し社会実装を推進する。文部科学省「ホワイトバイオテクノロジーによる次世代化成品創出プロジェクト」では、バイオマスから化成品を製造するホワイトバイオテクノロジー等世界に先駆けた革新的技術の研究開発が推進されている。

カナダでは民間非営利研究機関である FPInnovations が中心となりナノセルロースの研究開発と実用化を推進している。2012 年には製紙会社と共同で CelluForce 社を設立し、2014 年には Kruger 社と共同で、セルロースフィラメントの実証プラントを稼動させた。トロント大学グループ、アルバータ大学グループもナノセルロースの開発を推進している。米国では Agenda2020 が製紙業と林産業の研究開発を推進するため産学官連携をサポートしており、ナノセルロースが重要テーマのひとつとなっている。研究開発は米国農務省林産研究所（FPL）が中心となり Maine 州立大学等と連携して進めている。フィンランドではフィンランド国立技術研究センター（VTT）が、Aalto 大学や大手製紙会社である UPM 社とナノセルロース技術センターを設立した（2012 年終了）。また VTT はフランスやドイツ等と連携しセルロースナノファイバーのスケールアップを目的とした大型プロジェクト（SUNPAP）の実績がある。スウェーデンでは製紙関連研究機関である Innventia グループ、スウェーデン王立工科大学（KTH）、木材科学センター（WSC）が中心となっている。

（４）科学技術的課題

［課題（ボトルネック）］

- CFRP

CFRP の強化材である PAN 系炭素繊維の製造においては、ポリアクリロニトリル繊維の焼成工程において大量のエネルギーが必要となる。製造エネルギーおよび CO_2 排出量のいずれもが鉄の約 10 倍である（1 トンの炭素繊維をつくるのに、20 トンの炭酸ガスが排出される）。自動車用材料等として、より広く社会に普及するためには原料、製造プロセスの抜本的な見直しによる製造エネルギーおよび CO_2 排出量の大幅低減が求められる。

CFRP の製造において、プリプレグ、オートクレーブを用いる方法は、生産時間が長く、大型のオートクレーブが必要となることから非常に大規模な設備投資が必要となる。さらに、曲率半径が小さいとプリプレグ積層体に層うねりやしわが発生し、さらにこれらに起因してボイドや繊維配向乱れが発生し、生産性低下や部材不良率上昇を招きやすい。オートクレーブ法自身の技術開発課題としては、冷却固化速度の高速化に対応した樹脂を用いることにより、ハイサイクルオートクレーブ [17]の技術開発が進んでいるが、いまだ発展途上であり、今後のさらなる研究展開が望まれている。一方、より高生産性かつロバストな生産技術として、

VaRTM,プレス成形など、脱オートクレーブ成形法の技術開発も課題となる。航空機体向けなどの大型部材向け生産ライン、大量生産に対応した自動化技術、検査技術においても、やや欧米に遅れをとっている状況であり、キャッチアップが求められる。

CFRP の航空機、自動車への本格的な適用はまだ始まったばかりで、その破壊および損傷特性や、耐久性、耐衝撃性などに関して未だ十分な知見が得られているわけではない。材料の健全性の評価・検査技術の開発と併せて、そのデータを蓄積、解析する必要があるが、民生航空機分野においてはボーイング 787 が順調に就航を続けており、耐雷 [18]やバードストライクに対する補修技術や構造部材の疲労特性についてデータの蓄積がなされることが期待される。

将来的には、航空機の機体、自動車用構造部材等が大幅に CFRP に置き換われば、従前の金属材料を前提とした構造設計が根本から見直されることになる。しかしながら、金属材料が全て CFRP に置き換わる状況は考えにくく、BMW の 7 シリーズにみられるように、金属部材と CFRP を接合した形でのハイブリッド材が多くの構造に採用されるものと予想される。その意味において、鉄鋼、アルミニウム、チタンなどの金属材料と CFRP との接合技術、接着技術は重要なキーテクノロジーとなる。接合技術として、接着材を使った接合法や、レーザー・超音波を利用した溶着技術が注目され、積極的な研究展開が図られている。

- 軽金属材料

いわゆる純アルミニウムの地金価格の安定化、新しい Al-Li 合金においては、製造から製品までの一貫した戦略的な取り組みによって、1980 年代と同じ展開とならないようにすべきである。さらに、現在展開されている革新的新構造材料等技術開発においても取り上げられているように、接合技術は構造物製造においては不可欠であるが、熱伝導性の良好なアルミニウム合金においては大きな入熱が必要である。これは接合前の材料中のミクロ組織を破壊して、機械的性質を著しく低下させることとなるため、摩擦撹拌接合技術などの新展開による信頼性の高い接合技術が望まれる。また、従来接合していた構造物を、接合を要しないような、大型ダイカスト技術で精密に一体成型できる技術の新規展開も課題である。これは部品点数低減の観点からも重要である。

アルミ合金は航空宇宙分野で古くから活用され、近年の低燃費化の要請から自動車にも適用が拡大しつつある。航空機用の高強度アルミ合金は Zn、Mg 添加量の増大と時効処理条件の最適化により引張耐力が 600MPa を超えるものも実用化されているが、構造部材で要求される破壊靭性、耐食性、耐疲労特性との両立が技術的な課題となる。

チタン合金は、航空機機体構造の重要部品に活用されている。機体構造用材料としては、高強度化よりも素材の低コスト化、機械加工コストの低減が課題であり、リサイクルも視野に入れたサプライチェーン構築も重要な課題である。

- セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーを高強度軽量材料用の産業用素材として利用するためには一層のコストダウンが求められている。これまでに多くの研究がなされパイロット生産段階ではあるものの、現状では複合対象の樹脂と比較して価格が高い。構造材料として求められる強度、耐熱性などの特性を保ちつつ、一層のコストダウンが求められている。天然材料である木材や農産廃棄物から、工業的に安定して高品質の製品を生産する技術の開発が重要である。

ナノセルロースは、各種前処理した植物セルロース繊維を水に分散させ、機械的解繊によ

り、セルロースミクロフィブリル間に形成されている無数で強固な水素結合を切断し、ナノサイズ幅に分散して調製される。したがって、元々極めて親水性の素材であり、調製段階では水分散液として得られる。一方、ナノセルロースを充填成分として疎水性のプラスチック基材中でナノ分散させ、ナノ複合化効果を発現して移動体（自動車、航空機）・建材用の軽量高強度材料、断熱材、高性能分離材、電子プリント基板、ガスバリアフィルム等の先端部材として利用するためには、湿度変化に対して物性を一定に維持できるだけの耐水性や、エレクトロニクス部材に求められる 300°C 程度までの熱安定性（熱分解や着色性の制御）等の特性が求められ、現状では完全な解決方法には至っていない。さらに、基材中でナノセルロースが凝集せずにナノ分散化することで、少量のナノセルロースの添加でも著しいナノ複合化効果が発現して軽量高強度部材の特性が発揮される。したがって、ナノセルロースを基材中で完全にナノ分散化する制御技術と、それを定量化・視覚化－計測する手法の構築が求められている。

また、ナノセルロースを高性能部材として利用するためには、多孔体や複合化物の高い光学透明性、導電性の制御、気体や物質の選択分離機能、断熱性の付与とそれを発現するメカニズムの解明が必要となる。加えて、多様性のある様々な起源の植物セルロース繊維から、先端部材として利用可能なナノ素材原料とするためには、常に一定のナノサイズ幅、長さ／長さ分布、さらには分子量／分子量分布に制御する方法と、その評価・測定方法を構築する必要がある。現状ではナノサイズ幅が一定となる限られたナノセルロース類のみが上記の基本特性の測定方法検討の対象となっている。一方、幅が不均一で分布があり、複雑なネットワーク構造を有しているナノセルロース類については、学術的に構造解析－制御可能な技術にまで発展させるには長期間を要すると推察され、そのハードルは極めて高い。さらに、ナノセルロースを医療・ヘルスケア分野で利用する際や、企業で量産化を進める際には、使用および生産現場における長期的な安全性の確認、環境負荷の検討とその適正な対応が求められる。

［今後取組むべき研究テーマ］

- CFRP

  CFRP に関しては、以下の研究テーマに取り組むべきと考える。

  - オートクレーブ法製造工程の短縮化

    オートクレーブの成形工程を短縮するための「ハイサイクルオートクレーブ成形技術」が開発されつつある。固化速度の速いマトリクス樹脂を開発するとともに、成形型内の適切な温度制御を実現することによって実現可能な技術として注目されている。

  - 成形品の寸法精度向上

    CFRP の熱粘弾性・熱粘塑性特性を考慮することにより、成形時の熱変形や熱残留応力を適切に評価する手法の研究開発が急がれている。予測された熱変形を補うべく金型形状を適切に守勢することによって製品の成形寸法精度が向上されるものと期待されている。また、冷却固化の温度分布を適切にモニタリング・制御することによって成形精度を改善する「データ同化手法」も提案されており、製品寸法の大幅な寸法改善に寄与するものと期待される。

- 高生産性かつロバストな脱オートクレーブ成形法の技術開発
  近年はA-VaRTMを中心として、オートクレーブを必要としない成形法が登場し、大型航空機の製造にも適用がはじまっているが、構造が大型化するほど冷却時の温度ムラや成形ムラが発生することによるクオリティの低下が顕著でとなる。今後は大型部材の製造に適したRTM成形法の開発がキーテクノロジーになると考えられるが、上述の成形寸法の改善技術が、脱オートクレーブ化に大きく寄与するものと考えられる。
- 大型部材向け生産ライン、大量生産に対応した自動化技術、検査技術開発
  自動車用構造材としてのCFRPの適用を考えると、織物や一方向材を中心とした部材の適用はBMWの7シリーズのような車両の市販価格が1000万円を超えるような製品に限られるものと思われる。廉価な車種への適用およびリサイクル性を考慮すれば、熱可塑性樹脂マトリクスによるCFRTPのプレス成形品が主流になるものと思われる。現状、国内の主要自動車メーカーにおいても、CFRTPの市販車への適用を睨んだ研究開発はさかんに行われているが、CFRTPのさらなる高強度化、さらなる高剛性化が課題である。
- CFRPの破壊過程、耐久性、耐衝撃性などに関する現象解明
  CFRPにおけるき裂進展挙動は、トランスバースクラックや繊維ブリッジングなどが複雑に関与する破壊を示すことから、き裂の進展予測、特に疲労き裂の進展予測が難しい。き裂進展メカニズムに対してさらなる知見の蓄積がなされることによって、耐久性や耐衝撃性、疲労特性の適切な評価が可能になると期待される。
- CFRPの健全性評価・検査技術開発
  光ファイバーを用いた損傷モニタリング技術は、東京大学の武田らを中心として精力的に進められており、近年特にその技術レベルの向上が望ましい。今後は実際の航空機製造過程ならびに運航機体への適用を図るとともに、ヘルスモニタリング技術の国際的な基準を確立することが重要である。
- CFRPと異種材料の接合・接着技術の開発
  先に述べたように、BMW製乗用車へのCFRP適用事例を見る限り、今後はCFRPと従来の金属構造との接合したハイブリッド材の事例が増えてくると予想される。鉄鋼を中心とした従前の金属材料とCFRPとの接合技術、接着技術の発展・展開に大きな期待が寄せられている。

• 軽金属材料

アルミ合金については、新規一体成型精密ダイカスト、およびそれに適した合金開発やナノ組織解析とナノ組織制御技術の工業へのルーチン的展開、超高強度・高靭性・高耐食性を両立可能なアルミ材料の開発、シミュレーション等を活用した組織制御による材料製造プロセスの高度化・信頼性向上技術開発、高耐熱性アルミ合金の開発などを進める必要がある。

チタン合金は、低コストチタン合金の開発、ニアネット製造技術開発（Additive Manufacturingの活用含め）が重要となる。

• セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーについては、国際標準化や製造プロセスや装置を含めたコストダウンのための基礎研究が期待される。原料である木質バイオマスの適正、材料のキャラク

タリゼーションや強度等各種特性の発現するメカニズムの解明は、安定生産、品質改良、耐久性の向上等の面から継続的に必要な研究テーマである。セルロースナノファイバーはそのサイズからナノ材料であるため、安全性に関する評価や、今後、産業的に大量に用いられることを想定すると、リサイクルの評価や LCA の評価も求められる。現状、多くの研究ではセルロースナノファイバーをフィラーとして樹脂に対して数%～数十%添加することにより母体の樹脂の特性を大きく改善している。長期的にはセルロースナノファイバーの軽量高強度特性、熱的寸法安定性をさらに生かすためセルロースナノファイバーが多い系での基礎物性や成形加工技術について基礎研究を進める必要がある。

上記から、具体的には、以下の以下の研究テーマに取り組むべきと考える。

- ナノセルロースの幅／幅分布、長さ／長さ分布の評価／測定方法－制御方法の構築
  - 目 的 ：上記により初めて先端材料としての利用が可能になる。
  - 短中期：完全ナノ分散化 CNF（現状では TEMPO 酸化 CNF とリン酸エステル化 CNF）の上記測定方法－制御方法の構築。
  - 長 期 ：機械解繊で調製される上記以外の不均一な構造の CNF の上記測定方法－制御方法の構築。
- ネットワーク型ナノセルロース類のナノ構造の定量的評価・測定方法の構築と、ISO 標準化対応
  - 目 的 ：先端材料に CNF を使用するためには、従来の高分子材料のように特性制御と定量的解析方法の構築が必要。それにより CNF の ISO 標準化戦略においても日本がリードできる。
  - 短中期：CNF 分散液のレオロジーによる研究基盤の構築。
  - 長 期 ：レオロジーと光散乱、その他の先端分析技術による複雑で不均一な CNF の構造を数値化すること。
- ナノセルロース類のナノ構造、表面構造の解析方法の構築と、効率的で環境適応型のナノセルロースの表面化学改質－高機能化方法の検討
  - 目 的 ：現状では顕微鏡画像からの視覚的な定性的評価が主体。表面のセルロース分子のコンフォメーション、結晶性等の詳細な知見の蓄積が必要。それにより表面改質による高機能化が可能になる。
  - 短中期：固体 NMR、CNF 表面の段階的剥離法等によるナノ構造解析。CNF 中の非晶領域の生成機構と構造の解析。
  - 長 期 ：セルロースの表面の構造や非晶領域の分布状態を評価する方法を構築すると共に、非晶領域の結晶化（修復）手法の構築。
- ナノセルロースの効率的、環境低負荷型の疎水性付与、耐熱性付与方法の検討
  - 目 的 ：CNF を疎水性プラスチック基材中にナノ分散化させることで、小量の CNF 添加で軽量高強度化、耐熱性向上が期待できる。しかし現実は、CNF 表面の親水性が高く、疎水性のプラスチック基材中で凝集しやすく効率的に CNF の複合化効果が発現しないので、その課題を克服する。
  - 短中期：CNF 表面に、効率的に水系媒体で疎水基（例えばアルキル鎖）を導入する方法の検討と導入位置、導入効果（疎水性、プラスチックとの複合化効果）を評価する。

長 期 ：現在汎用プラスチックとして用いられているポリエチレン、ポリプロピレン、ポリビニルアルコール、ポリ塩化ビニル、ナイロン、ポリカーボネートとのナノ複合化により、5%以下の添加量で強度（弾性率、破断強度）を 5 倍以上に向上させる。

－ ナノセルロースから高性能断熱材用の透明高強度多孔体の調製方法の検討

目 的 ：CNF を高価で脆い透明シリカゲルに代わる、新規バイオ系高性能断熱材として利用すること。

短中期：凍結乾燥あるいは風乾によって高比表面積で空気よりも断熱性の高い多孔体の調製条件を構築する

長 期 ：透明、高断熱性、高強度の 3 条件を満たした多孔体の調製方法を見出し、自動車、航空機、建材用に利用する。

－ ナノセルロース類の安全性評価方法の構築と、生産現場／使用時における対応策

目 的 ：CNF 製造および医薬品・食品として使用する際の短長期的安全性を明らかにし、カーボンナノチューブのように使用、製造における安全指針を明らかにする。

短中期：微生物、動物実験による急性毒性、発がん性を評価する。乾燥 CNF の飛散性と飛散サイズを明らかにする。

長 期 ：人間に対する中長期的安全性を評価し、食品、医療、ヘルスケア材料としての安全性の指針を作成する。

－ 国産未利用針葉樹材（主に間伐材や林地残材）の流通ルートを構築し、木材セルロース繊維に変換する製紙／化学企業に安定的に原料を供給するシステムの構築

目 的 ：CNF の先端材料としての可能性は多数報告されているが、国産針葉樹材を原料とするには、急斜面で放置されているような針葉樹林地残材、間伐材由来のチップを製造し、CNF 製造工場まで安定的に搬出するシステムを構築する必要がある。

短中期：現状で針葉樹材を製紙原料としている地域の拡大、個人所有林を、企業が代替して間伐材の伐採し、流通システムを構築する可能性を法的および技術的に検討する。

長 期 ：国産針葉樹間伐材から安定的に CNF を工場生産し、先端部材に利用するマテリアルストリームシステムを構築し、伐採－利用した分、植林を進めることで炭素の固定化、二酸化炭素削減、循環型社会基盤システムを構築する。

（５）政策的課題

高強度軽量複合材料の研究開発においては、構造物設計と材料設計が一体となって行われることが多く、それに携わる研究者は、比較的機械工学系の研究者が多い傾向にある。しかし更なる高性能化のためには繊維/樹脂界面の解析・制御や、複合材マトリクスの分子構造の制御、さらなる高強度と耐熱性を発揮する新規樹脂マトリクスの開発など、応用化学的視点からの、ナノ・ミクロスケールでのアプローチが重要であり、材料科学系および材料工学系との協働促進が課題となる。さらには、将来的な二酸化炭素排出量のさらなる削減を考えれば、セルロースナノファイバーに代表されるバイオ系素材が注目を集めることは間違いなく、

その意味においては農学系や生命科学系との連携促進も重要になろう。大学、公的研究機関、ユーザー産業、素材産業の異分野研究者の協働による共同研究と実用化を促進するとともに、さらには複数の府省も取り込んだ形での連携による施策も大切である。一方、欧州の航空機分野における研究連携をみると、欧州航空研究諮問委員会（ACARE：Advisory Council for Aeronautical Research in Europe）が中心となり、国を超えた形での企業、大学、研究機関の有機的な研究連携が実現されている[10)]。

欧米では、国家プロジェクトとして産学官が連携したコンソーシアムを形成し、技術開発及び実用化をリードしており中国でも動きが活発になっている。日本でも同様の枠組みを形成し、素材開発から適用技術開発までの総合的分野で国が積極的にバックアップして開発を加速・推進する必要がある。

- 軽金属材料

例えばアルミニウム合金の鋳造、加工基盤技術について、従来の鋳造方法や、圧延、押出、切削加工等で残されている基礎的内容を研究テーマとして技術開発を行う若手研究者、若手技術者が大変不足している。約 10 年前から問題となっているように博士課程進学率も工学系は横ばいであることから、人口減少は今後この傾向にますます拍車をかけると考えられる。昨今の研究支援や研究論文の風潮としても、ピンポイントで新素材、新技術開発が推奨されていることは疑う余地がない。もちろん新素材に興味を持つことは大変重要なことであるが、大学から金属工学科がほぼ消えたことからも明らかなように、金属素材産業にとっては、高品質な素材そのものを日本では作れない、つまり応用研究はできるが、既存の金属材料の本質を知らないために、既存の金属材料の製造、技術開発・研究開発ができないという憂うべき状況になりつつある。米国や中国のように地下資源に恵まれた国とは異なり、また人口も国土面積に対して密度の高い科学技術立国と称する日本としては、輸入した金属地金から、いかに他国と差別化できる高性能の製品を創製するかが鍵であることは明白であり、そのためには既存の材料に対する知見をビッグデータ化するような地道な基礎研究の集積と、新材料・新技術の応用研究をバランスよく行っていくことが重要であると考えられる。

また、アルミ合金、チタン合金については、欧米諸国では、産官学が連携したコンソーシアムを形成し、基礎研究から実用化まで計画的に研究開発が実行されている。日本でも同様の枠組みにより効率的な研究開発を推進する必要があると思われる。

- セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーは、まだ見出されたばかりの新規バイオ系ナノ素材であり、基礎分野としてはナノ構造解析、分散状態のシミュレーション解析－物性との関連性の検討など多くの解決すべき課題がある。現在の有機・高分子材料が汎用・高機能先端材料としての幅広く利用されている背景には、長年にわたる基礎的な高分子科学、材料科学工学およびそれらの関連科学に基づく知見・技術の蓄積がある。ナノセルロースのような新しい研究領域では、実用化－応用研究開発と共に、基盤となる多面的な学術的基礎研究の更なる継続と成果の蓄積が必要となる。世界的にナノセルロースに最適な出口－応用分野（killer application）の探索を支援する国家および EU などの国際的政策が多い中で、他国と同じ価値基準で切磋琢磨するような競争的な研究支援と共に、長期的な観点から日本が独自性と優位性を維持するような基礎研究領域も含めた両輪支援が必要となる。安全性や、ナノ構造解析法の構築等に基づく国際標準化政策については、正にオールジャパン体制で取り組むべき重要な長期的

基礎分野である。知的財産戦略も含め、日本が強みをするコア部分はクローズ化、そうでない部分をオープン化し、オープン・クローズ戦略を構築する必要もある。また、近畿、中国、四国、九州等では地域の特徴を生かしたナノセルロースの拠点が形成されている。地域経済の活性化のため、地域の資源的、産業的特長を生かした地域展開の推進も重要である。

（６）キーワード

複合材料、炭素繊維、CFRP、CFRTP、熱可塑性樹脂、高比強度、軽量化、脱オートクレーブ、低コスト化、アルミ合金、チタン合金、ナノ組織解析、ナノ組織制御、一体成型精密ダイカスト、セルロースナノファイバー（CNF)、ナノセルロース、レーザー溶着、超音波溶着、損傷モニタリング、製造プロセス最適化、トポロジー最適化、データ同化、ハイサイクル成形

（７）国際比較

繊維強化プラスチック（FRP）や炭素繊維複合材料（CFRP）

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	○	→	● 米国、欧州に比して基礎研究分野はやや立ち遅れが目立つ。
	応用研究・開発	◎	↗	● 有力な材料系メーカーと重工系・自動車系企業の存在が先進材料系の応用研究開発を強く後押ししている。
米国	基礎研究	◎	↗	● 世界各国から優秀な人材を集めており、基礎研究分野のポテンシャルは極めて高い。
	応用研究・開発	○	→	● 航空宇宙分野における応用研究開発レベルはいまなお世界トップクラスであるが、民間航空機については、他国からの技術移転も多い。
欧州	基礎研究	◎	↗	● 学術的な研究レベルは極めて高く、欧州における国境のない各国の強い連携のもとに、高い研究水準を維持している。
	応用研究・開発	◎	↗	● 航空機分野でのエアバス社、自動車分野でのBMWなど、先進技術をけん引する企業があり、それら主要企業を中心に大学・企業が有機的研究を行うためのクラウドを形成している。
中国	基礎研究	○	→	● 大学・研究機関など、海外経験を得た研究者が国内に舞い戻る傾向も出始めており、今後の伸びしろは大きいと考えられる。
	応用研究・開発	○	→	● 現状では米国、欧州、日本に比べて発展途上の段階である。
韓国	基礎研究	△	→	● 比較的日本に似た状況であるといえるが、基礎研究を担う研究者の人口が少ない点が惜しまれる。
	応用研究・開発	○	→	● 電気電子産業を中心として高い技術レベルを維持しているが、自動車産業や航空宇宙産業においては、先進主要国と比べ、未だ発展途上の段階である。

軽金属材料（アルミニウム合金）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など*
日本	基礎研究	○	↘	● 日本が米国と同様の科学技術政策をとっていること、さらに新技術製品の輸出量が低下していることから、今後日本が米国と同様の傾向、応用研究・開発が主流になることが推測される[25]。 ● 研究論文数の基礎研究比率は55%。
	応用研究・開発	○	↗	● JST「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」のように基礎研究を重視しながら出口の明確な応用研究が遂行されている。 ● 研究論文数の応用研究比率は45%。
米国	基礎研究	△	↘	● 米国の基礎研究離れが、明確となって。 ● 研究論文数の基礎研究比率は42%。
	応用研究・開発	◎	↗	● 米国は、応用研究・開発が主流になっている。 ● 研究論文数の基礎研究比率は58%。
欧州	基礎研究	△	→	● 欧州の基礎研究離れは明確である。 ● 研究論文数の基礎研究比率は42%
	応用研究・開発	◎	↗	● UK等、欧州で取り組まれた基礎研究離れに対する施策[26]が奏功した。 ● 研究論文数の応用研究比率は58%。
中国	基礎研究	○	↘	● 研究論文数の基礎研究比率は43%
	応用研究・開発	○	↗	● 中国は、「政府活動報告」[24]にあるように応用研究への展開を謳っていることから、今後本分野への拡大が予想される。 ● 研究論文数の応用研究比率は57%。
韓国	基礎研究	○	↘	● 韓国は日本の基礎研究動向と似た傾向にある。 ● 研究論文数の基礎研究比率は57%。
	応用研究・開発	○	↗	● 韓国は日本の応用研究・開発動向と似た傾向にある。 ● 研究論文数の応用研究比率は43%。

*現状評価は、主に、ScienceDirect2004-2016 年の aluminum&application の論文数を aluminum 研究論文総数で除した数値で判断した。

セルロースナノファイバー

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	● 天然高分子系ナノファーバーの論文のうちセルロースを原料とする論文が日本は208件である。天然高分子系ナノファイバーの論文が2004年頃より増加している。
	応用研究・開発	◎	↗	● 天然高分子系ナノファーバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが日本は808件と世界最多である。セルロースナノファイバー製造のパイロットプラント建設が増え、積極的にサンプル提供による用途開拓を進めている。
米国	基礎研究	◎	↗	● 天然高分子系ナノファーバーの論文のうちセルロースを原料とする論文が米国は180である。天然高分子系ナノファイバーの論文が2004年頃より増加している。結晶性ナノセルロースとセルロースナノファイバーの両方を研究している。カナダの論文数も多く40件、北米として基礎研究が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↗	● 天然高分子系ナノファーバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが米国は357件である。米国林産研究所とMaine大学はパイロットプラントを設置し、企業にサンプル供給することにより用途開拓を進めており、オープンイノベーションを推進している。
欧州	基礎研究	◎	↗	● 天然高分子系ナノファーバーの論文のうちセルロースを原料とする論文は欧州が世界で最多の521である。天然高分子系ナノファイバーの論文が2004年頃より増加している。フィンランドやスウェーデンが中心である

				が、EU内の国際連携も実施。ヴァレンベリ木材科学センター（スウェーデン）やアールト大学（フィンランド）といった大学を中心に基礎研究を継続している。
	応用研究・開発	◎	↗	● 天然高分子系ナノファーバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが欧州は802件である。フィンランド、スウェーデン等が中心となり、産官学連携等のプロジェクトを通じて積極的に応用研究と開発を継続。SUNPAP、BiMac、SustainComp等の大型研究開発プロジェクトも実施した。セルロースナノファイバーに注力するのは製紙産業の高付加価値分野への構造転換も背景にある。
中国	基礎研究	◎	↗	● 天然高分子系ナノファーバーの論文のうちセルロースを原料とする論文が中国は172件である。天然高分子系ナノファイバーの論文が2007年頃より急増している。資金が大学に投入されている。
	応用研究・開発	○	↗	● 天然高分子系ナノファーバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが中国は257件であり、増加している。
韓国	基礎研究	△	↗	● 天然高分子系ナノファーバーの論文のうちセルロースを原料とする論文が韓国は38件。天然高分子系ナノファイバーの論文がここ数年増加している。 ● 国立森林科学院が中心となり2007年より研究を行っている。
	応用研究・開発	△	↗	● 天然高分子系ナノファーバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが韓国は94件である。天然高分子系ナノファイバーの特許が増加傾向にある。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

1) 炭素繊維協会、東レ資料、http://www.carbonfiber.gr.jp/pdf/24th_seminar_PAN.pdf.
2) “新版複合材料・技術便覧”. 2011. 強化プラスチック協会、日本複合材料学会.
3) “社会インフラ材料研究の新たな展開 : 安全・安心な持続性社会の構築へ向けて”. 2012 . 物質・材料研究機構.
4) 武田展雄，水口周，伊藤悠策「先端複合材料構造の成形モデリングおよびモニタリングの最近の動向」日本機械学会論文集（A 編）78 巻 795 号（2012-11）.
5) 武田展雄、越岡康弘「航空宇宙木複合材構造の構造ヘルスモニタリング技術の進展」、「非破壊検査」（日本非破壊検査協会誌）第 60 号 3 号,2013.
6) S. Minakuchi, T. Umehara, K. Takagaki, Y. Ito, N. Takeda, Life cycle monitoring and advanced quality assurance of L-shaped composite corner part using embedded fiber-optic sensor, Composites: Part A 48 (2013) 153–161
7) 新構造材料技術研究組合(ISMA). http://isma.jp/index.html
8) JST 戦略的イノベーション創造プログラム「革新的構造材料」.http://www.jst.go.jp/sip/k03.html
9) NEDO「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」（中間評価）分科会 資料 5－1
10) 一般社団法人日本航空宇宙工業会会報、平成 28 年 5 月,第 749 号

11) 第 200 回生存圏シンポジウム・第 7 回バイオ材料プロジェクト，セルロースナノファイバーを用いた高機能で Green な研究開発,『未来の自動車は植物で作る』要旨集，平成 24 年 3 月 12 日,京都大学 生存圏研究所
12) 日経ビジネスオンライン,炭素繊維で鍛えた BMW 新型「7 シリーズ」,2015 年 12 月 8 日，http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/264450/120400015/
13) 中里直史,香山晃,幸野豊,NITE 法による SiC 成型挙動への SiC 粉末表面特性の影響,日本金属学会誌 第 76 巻第 11 号(2012),pp.634-638
14) MRJ 尾翼桁間構造適用に向けた A-VaRTM 技術開発,山下満広,坂川亨,武田文人,木俣文雄,子守康裕,三菱重工技報,Vol.45, No.4, 2008. P.2-5.
15) ISMA Report (新構造材料技術研究組合広報誌),2016 年 3 月
16) 東京理科大学理工学部機械工学科知的材料構造研究室（松崎研究室）ホームページ：http://www.rs.tus.ac.jp/rmatsuza/research.html
17) CFRP の材料、成形加工の最新技術と自動車への適用，平成 25 年度次世代自動車地域産学官フォーラム・技術開発セミナー～ものづくり技術で拓くモビリティ新産業～，発表資料，東邦テナックス(株),梅元禎孝,www.nisri.jp/jisedai/docs/lecture_20131010_umemoto.pdf
18) 平野義鎮,勝俣慎吾,岩堀豊,轟章,模擬雷撃を加えた CFRP 積層板の損傷挙動,日本複合材料学会誌,第 35 巻 4 号(2009)
19) 日本アルミニウム協会　ロードマップ 2015&2016
20) 新倉昭男:　UACJ テクニカルリポート,Vol.2, No.2, 2015, pp.32-42
21) National Science Foundation,採択研究課題　2014 公開分,http://www.nsf.org/, http://www.nsf.gov/about/budget/fy2014/pdf/34_fy2014.pdf
22) 平成 25 年版科学技術白書, http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa201301/detail/1338121.htm
23) National Science Foundation, 採択研究課題:検索結果　(Aluminum + AND + Alloy),http://www.nsf.gov/ awardsearch/ simpleSearchResult? Query Text = Aluminum + AND + Alloy
24) 第 12 期全国人民代表大会第 4 回会議「政府活動報告」2016 年 3 月 5 日
25) 文科省、http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa201301/detail/1338121.htm
26) 在英国日本国大使館・経済班,「英国の科学技術の概要」2005 年 7 月
27) 平成 27 年度　特許出願技術動向調査報告書（概要）ナノファイバー、平成 28 年 2 月特許庁.https://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/h27/27_10.pdf
28) 日本経済新聞　電子版　2016 年 4 月 4 日
29) 中越パルプ工業株式会社.http://www.chuetsu-pulp.co.jp/feature/1778
30) 星光 PMC 株式会社.http://www.seikopmc.co.jp/files/20141121_2.pdf