

3.1.3 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。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應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、電力システムのすべてのバリューチェーン（発電、送配電から電気利用まで）上に関わる研究プロジェクトが国

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

欧州連合（European Union）は、2020年の20-20-20（順にCO₂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攻撃の懸念を踏まえて、北米では、電力の供給信頼度の向上（レジリエンス向上、広域監視制御）と電力市場・運用の広域化（market to market coordination、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り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スング技術、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立てている。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、出力平滑化の為に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。

[今後取り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の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、情報セキュリティ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 ⁹⁾ 、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））
	応用研究・開発	○	→	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。
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）。
	応用研究・開発	△	→	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⁾ 。濟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。

（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.nsf.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>

3.1.4 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率は約 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/mm² 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。

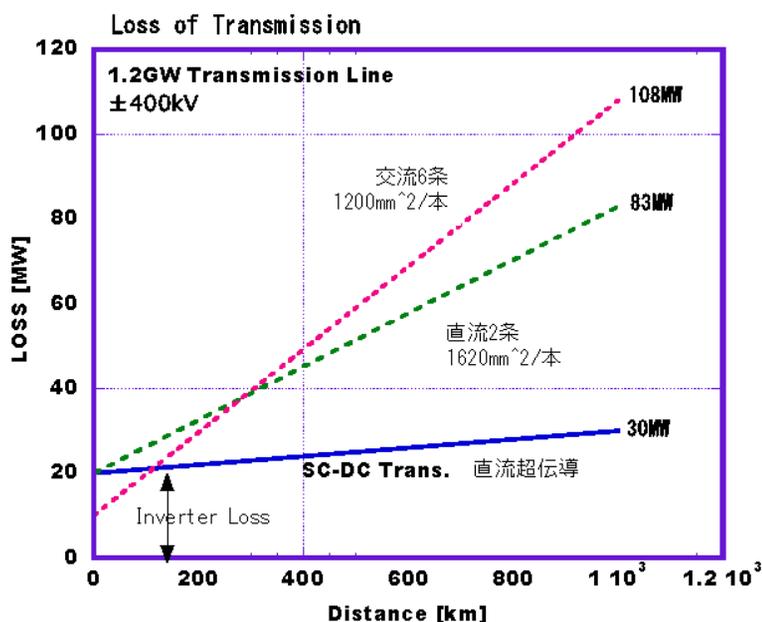


図 3-12 相交流、直流及び超伝導直流送電の損失と距離の関係

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システム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、電力システム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末端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）、鉄ニクタイト（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。

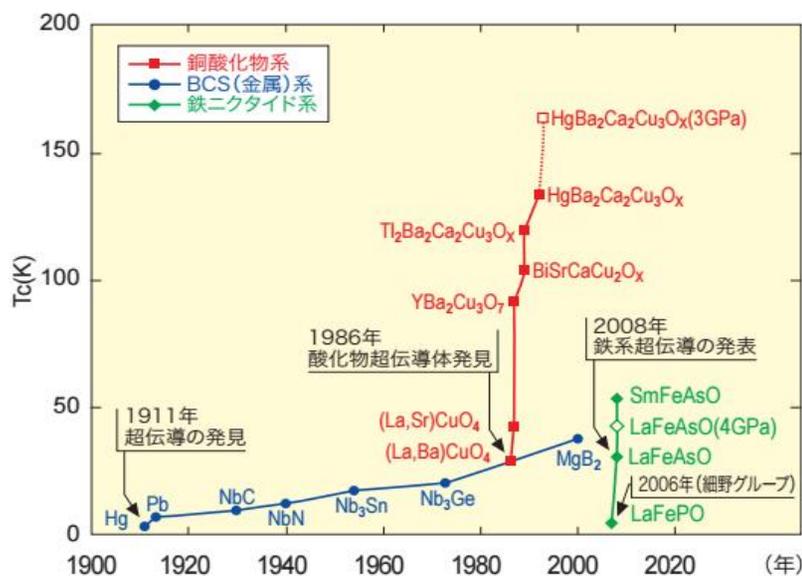


図 3-13

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	
	ニ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、水素化合物、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、熱侵入量が大きいため、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。

[今後取り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、ビスマス系超伝導線は、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 材を開発しているもので、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（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、どのよう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を期待される。

日本では ISTEK（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 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。ウエハでは米国 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 インチのウエ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。

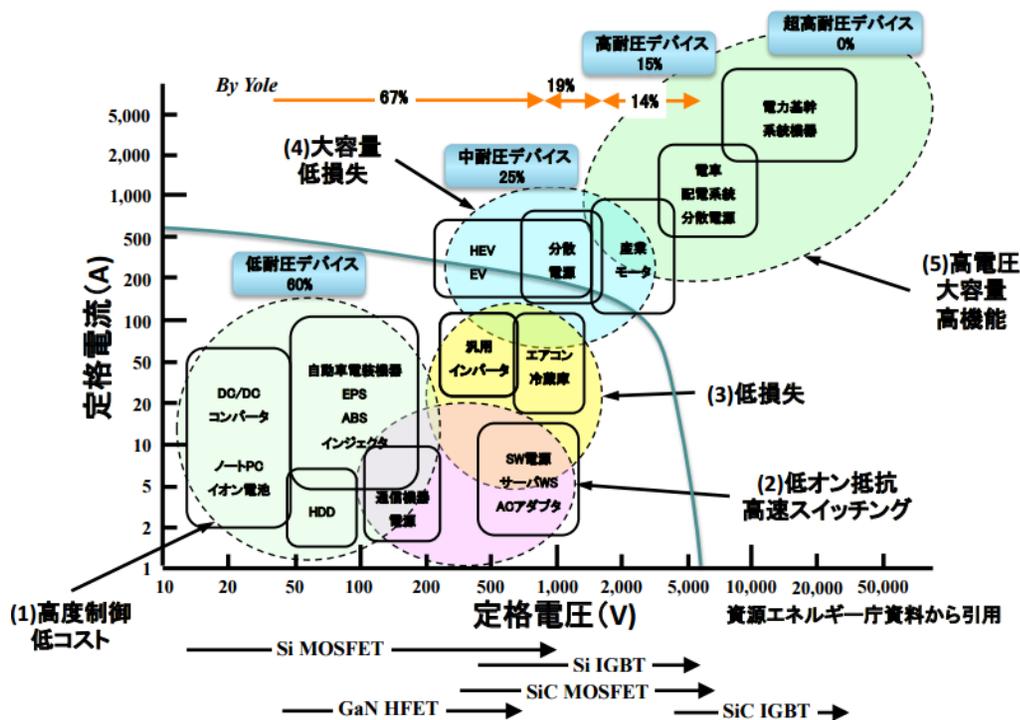


図 3-14

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ソシアムが形成され、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 Foundation) 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。同様に大学研究者に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ア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 $10\text{-}20\text{kV}/\mu\text{s}$ (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。

[今後取り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・ディスクリッ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ット半導体から装置・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、Ga₂O₃、高効率インバータ、高周波インバータ、超高压送電、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、メーカー：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 Junction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 ₂ O 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	◎	→	<p>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。</p>
	応用研究・開発	◎	→	<p>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に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。</p>
欧州	基礎研究	◎	↑	<p>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。</p>
	応用研究・開発	◎	↑	<p>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。</p>
中国	基礎研究	○	→	<p>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。</p>
	応用研究・開発	△	↑	<p>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。</p>
韓国	基礎研究	△	→	<p>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。</p>
	応用研究・開発	△	→	<p>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。</p>

- (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とときに蓄え、必要と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。

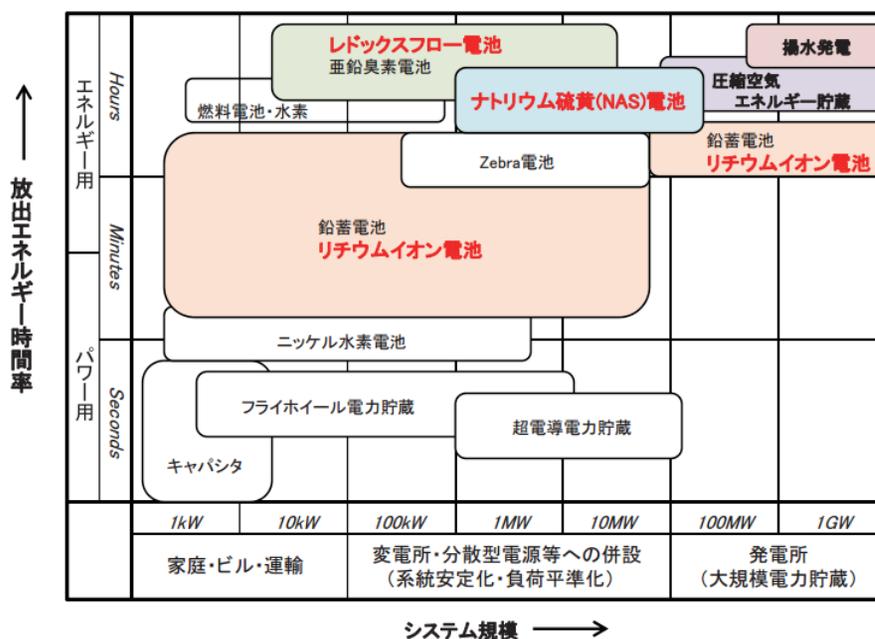


図 3-15

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り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。

従来の鉛蓄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。実用化されたり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ため、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 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ （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(+0.68V vs. 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ピング手法やプレドーピングカーボンの材料・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SiO₂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}O₄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_zO₂, 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(Li₂MnO₃-LiMO₂、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、Li₂O₂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-臭素系、チタン-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

MnO₂ 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一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。

[今後取り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 dendrite 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ている。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ア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

3.1.7 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CO₂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NO_x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NO_x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NO_x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°C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、蓄熱材として液体熔融塩（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年には熔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20MW、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、熔融塩潜熱蓄熱材（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°C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°C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、SiO₂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熔融塩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的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熔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/mK)、潜熱蓄熱システムは潜熱蓄熱材の熱伝導率速により熱入出力速度が低くなるのが課題である。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、または腐食の起さ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。

[今後取り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（ $\sim 400^{\circ}\text{C}$ ）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。中高温領域では熔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、蓄熱や熱輸送技術の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「蛇口を出した後」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から抜け落ちている。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、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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 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⁾

				<ul style="list-style-type: none"> ●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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●水合物スラリー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貫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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●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合物）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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●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れ、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。

				<ul style="list-style-type: none"> ● Gemasolar（スペイン）⁴⁸⁾ ● Gemasolarは熔融塩蓄熱システムを備えた24時間稼働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℃に達する高温の熔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の成果が徐々に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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 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段階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 樺田 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.no.e.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CO₂を削減することは必須の課題である。水素はCO₂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CO₂回収貯留(CCS: Carbon dioxide Capture and Storage)との組み合わせることで生産したCO₂フリー水素を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/Nm³/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 ₇ H 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(°C)	-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 CO₂ 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 ヲ所の水素ステーションが稼働している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CO₂フリー水素の利用により、環境負荷の極めて低い発電方法になる可能性を秘めている。すでに国内外において水素ガスタービン開発が行われているが、燃焼温度が高く、燃焼速度が速い水素を低NO_xで燃焼するため水噴射型が主流となっている。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①CO₂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、有機ヒ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、有機ヒドライドのほかに、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じた総合的なシステム最適化技術の開発がこれから必要となる。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。

[今後取り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（水素貯蔵材と高压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、CO₂フリー水素の普及シナリオの実現に向けた制度上の課題明確化と解決、安全性および社会受容性の検証、再生可能エネルギーの利用を含めたエネルギー利用システムのシナリオ検討、エネルギーキャリアの利用拡大あるいは燃料電池自動車の普及を可能とするための技術・材料のより広範囲な探索への継続的資源投入などが挙げられる。従って、中長期にわたる統合的な戦略のもと

に、系統的な研究開発の推進が重要となる。

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、有機ヒドライド、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	○	↑	アンモニアや有機ヒドライドのほかに、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、アンモニアや有機ヒ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、有機ヒ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輸送貯蔵タ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。有機ヒ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カ所追加される。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