

## 2.9 電気エネルギー利用

### （1）研究開発領域の定義

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

### （2）キーワード

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

### （3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

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

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

[研究開発の動向]

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

界共通に総括原価型電気料金が採用され、電力供給と料金の安定化に寄与した。研究開発もこの両面の観点から、規模拡大への対応、高電圧化による損失低減、設備のコンパクト化、コストダウンが中心であった。電気事業やその技術の成熟に伴い、欧米では1990年代から自由化が進められ、市場取引への移行による競争原理の導入、効率化による料金低減が追及された。現在は、第3の波が到来していると考えられている。即ち、これまでは電力システムは安定供給を前提としつつ経済原理で考えてきたが、昨今は地球環境問題への社会的要請や需要家のニーズに応えることが中心になっている。例えば、経済性の観点のみでは導入が進まない再生可能エネルギーをはじめとする低炭素技術や省エネルギー推進について、各国は政策による導入誘導を図っている。具体的には、欧州の Clean Energy For All Europeans package<sup>1)</sup>、我が国のエネルギー基本計画<sup>2)</sup> 等がある。米国ではエネルギーに関しては州毎に政策が決められ、カリフォルニア州の Integrated Energy Policy Report<sup>3)</sup> やハワイ州の Energy Policy Directives<sup>4)</sup> 等が先導している。

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

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

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

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

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

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

#### ● 住宅でのPV発電電力の自家消費促進

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

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

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

#### ● DER統合の技術的検討

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

#### ● VRGの発電量の予測、気象データ活用、精度評価と計画・運用への活用

#### ● その他

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

#### (4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

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

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

● 需要家の電力消費データの活用

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

[注目すべき国内外のプロジェクト]

<国内>

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

<国外>

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

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

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

#### (5) 科学技術的課題

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

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

- 不確実性の予測と計画および運用への適用

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

- 消費者行動分析、行動経済学的分析

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

- IoT/ ビッグデータ / 人工知能の応用

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

## (6) その他の課題

- オープンデータ整備

- 需要サイドでは、新たなデータ処理方法（data driven analytics）や制御手法の有効性検証に実データの利用が不可欠であるが、現在の国内外の実証試験は、既存技術の統合が中心で、経験的に性能向上を図っている段階である。ベンチマーキングに使えるオープンデータが整備されていないため、大量データ処理、リアルタイム情報通信制御などでの根本的な障壁があり、制御効果の確実性を確保する需要家行動など未解明である。供給側、需要側の双方の要素技術群の技術進歩、センシング技術と無線ネットワーク技術が融合したセンサネットワーク、大規模データ処理などを統合した次世代エネルギーネットワークの数理的基盤、需要家行動原理をモデル化した需要予測技術・電力市場の制度設計など、広範な研究開発領域が未実施のまま残されている。
- データを異なる事業者の壁を超えて利活用し、新たな価値を創出して社会実装にまでつなげていくのが重要である。各種事業者間の利益相反があることから、中立で公平な立ち位置である学が牽引・調整役となり、官による制度設計を踏襲しながら多種多様な企

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

- 国が関与すべき、資金投入すべき研究環境整備は、個人情報保護とユーザの受容性を確保した上で、産業振興につながるエネルギー・ビッグデータ整備支援である。またデータを集める仕組み自体も整っておらず、例えば補助事業においてはデータ提供を義務付けるなどの工夫も必要になる。
- その他
  - 開発されたエネルギーマネジメントシステムの社会実装を図る各種規制改革（交通、都市計画、税制、公共政策）の推進。
  - 実証補助事業を行う経産省、環境省等と総務省、国交省（自動車運行情報など）など省庁間の連携。
  - あわせて国際標準化の推進、電化の推進、EV の課金システム・計量への仕組み、さらには近々開設される市場への統合なども課題となっている。

(7) 国際比較

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

<p>欧州</p>	<p>基礎研究</p>	<p>◎</p>	<p>→</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EU 全体の R&amp;D は 540 件であり、資金はおおよそ 2000 億円に達する。国家プロジェクトから企業間連系と幅広く行われており、主にスマートネットワークマネジメント、需要家側のマネジメント、分散電源と蓄電システム統合の 3 つが挙げられる<sup>6)</sup>。2017 年はディマンドリスポンスのための解析ツール作成や評価・Intelligent electricity distribution network のためのパワーエレクトロニクス機器や通信セキュリティ<sup>22)</sup>、並びに送配電協調のための通信や電気・ガス統合活用に関する検討が進められている<sup>23)</sup>。</li> <li>● (英国) 欧州の中で、ドイツに次いで 2 番目に R&amp;D のプロジェクト件数が多い<sup>6)</sup>。トピックは、いずれも ICT 技術に基づいており、リアルタイム通信に基づく系統運用やスマートメーターを活用したディマンドリスポンスによる電力需要の制御、蓄電池やスマートインバーターによる配電系統の制御など多岐に渡り、活発に行われている。</li> <li>● (ドイツ) 欧州の中で、最も R&amp;D のプロジェクト件数が多い<sup>6)</sup>。英国と同様に ICT 技術を活用したリアルタイム通信に基づく系統運用や蓄電池による電力需給バランス調整に関する検討が実施される。さらに、電気自動車の普及拡大を受け、アンシラリーサービスに関する検討も盛んに行われている。</li> <li>● (フランス) フランス電力会社 (EDF) では、新しいエネルギーシステム (ヒートポンプ、デジタルシステム) の開発や、原子力発電所制御システムの安全性の向上等を優先事項として、27 の国籍からなる開発部門による研究開発が進められている<sup>29)</sup>。また、大手エネルギー事業者 Engie は電力のみではなくガスについてもあらゆる用途 (暖房・自動車等) で不可欠であると主張し、バイオメタンや合成メタン、水素などによるガスのクリーン化を優先事項としている<sup>30)</sup>。</li> </ul>
<p>欧州</p>	<p>応用研究・開発</p>	<p>◎</p>	<p>→</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EU 全体での実証試験は 410 件、資金はおおよそ 4700 億円に達する。とりわけ、フランス、ドイツ、デンマークにおいて実証が盛んに行われている。EU Horizon 2020 での取組として、分散電源と蓄電池との統合活用や商業施設用の大規模燃料電池の実証などが行われている<sup>6)</sup>。加えて、広域計測システム (WAMS) の構築や、EV・PHV の V2G やアンシラリーサービスへの活用<sup>6)</sup>、並びに電力系統での大規模蓄エネ装置の活用、系統監視システム、卸売市場に関する実証試験が進められている<sup>23)</sup>。</li> <li>● (英国) 低炭素化社会の実現に向け、ガスから電力へのシフトを促すことを目的に、ヒートポンプを用いた電力需給調整能力の実証検証が NEDO、BIS (Department for Business, Innovation and Skills, DECC (Department of Energy and Climate Change) としてマンチェスター市の共同で実施された<sup>24)</sup>。また、2018 年 4 月にブロックチェーン技術と住宅用再生可能エネルギーを用いた需要家間の電力取引を成功させるなど、需要家のエネルギーマネジメントにおける実証が行われている<sup>25)</sup>。</li> <li>● (ドイツ) Forschungscampus Mobility2Grid という実証プロジェクトでは、2016 年から 2020 年 12 月にかけて、電気自動車と電力系統の統合プラットフォームの開発を目的に、ベルリン地区における電力や暖房需要や電力品質、信頼性を考慮した充放電計画に関する実証が実施されている<sup>26,27)</sup>。また、uGrip というプロジェクト<sup>28)</sup>では、マイクログリッドにおける蓄電池が電力市場へ与える影響に関する検討が行われており、蓄電システムに着眼した実証が多い。</li> <li>● (フランス) 水素によるエネルギー貯蔵技術が注目されている。大手エネルギー事業者 Engie を中心として国内初の Power to gas 実証プロジェクト「GRHYD」を開始した<sup>31)</sup>。同プロジェクトには原子力・代替エネルギー庁 (CEA)、水素事業者 McPhy など 10 の機関が参加し、電気分解による水素製造と貯蔵およびガス配管網からの混合ガス (水素と天然ガス) 供給を試験的に実施する。</li> </ul>

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

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発 (プロトタイプの開発含む)・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」……近年 (ここ1～2年) の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 参考・引用文献

- 1) European Commission, “Clean Energy for All Europeans,”  
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-all-europeans> (2019年2月27日) .
- 2) 資源エネルギー庁「第5次エネルギー基本計画」,  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/180703.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf) (2019年2月27日) .
- 3) California Energy Commission, “Integrated Energy Policy Report 2018,”  
[http://www.energy.ca.gov/2018publications/CEC-100-2018-001/CEC-100-2018-001-V1\\_pages.pdf](http://www.energy.ca.gov/2018publications/CEC-100-2018-001/CEC-100-2018-001-V1_pages.pdf) (2019年2月27日アクセス) .
- 4) Hawaii State Energy Office, “Energy Policy,”  
<http://energy.hawaii.gov/energypolicy> (2019年2月27日アクセス) .
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「エネルギー情報局が発表した『米国蓄電池市場の

- 動向』の概要」,
- <https://nedodcweb.org/wp-content/uploads/2018/06/EIA-Battery-Storage-Trends.pdf>  
(2019年2月27日アクセス) .
- 6) Joint Research Centre (JRC), “Smart grid projects outlook 2017.”
  - 7) U.S. Department of Energy, “Smart Grid Investment Grant Program Final Report,” 2016.
  - 8) 環境共創イニシアチブ「平成30年度「需要家側エネルギーリソースを活用したバーチャルパワープラント構築実証事業費補助金」(VPP)」,  
<https://sii.or.jp/vpp30/public.html> (2019年2月27日アクセス) .
  - 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「電力系統出力変動対応技術研究開発事業（平成26年度～平成30年度）」,  
[http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100069.html](http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100069.html) (2019年2月27日アクセス) .
  - 10) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業（平成26年度～平成30年度）」,  
[http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100075.html](http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100075.html) (2019年2月27日アクセス) .
  - 11) 科学技術振興機構 未来社会創造事業「超スマート社会の実現」,  
<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/super-smart/index.html#theme01> (2019年2月27日アクセス) .
  - 12) Xiaotian Chen, ” The Impact of China's "West to East" Electricity Transmission Project on Energy Poverty” All Theses 2286, (2015):  
[https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.co.jp/&httpsredir=1&article=3291&context=all\\_theses](https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.co.jp/&httpsredir=1&article=3291&context=all_theses) (2019年2月27日アクセス) .
  - 13) Energy Research Institute of Nanyang Technological University,  
<http://erian.ntu.edu.sg/REIDS/Pages/AboutREIDS.aspx> (2019年2月27日アクセス) .
  - 14) BROOKLYN MICROGRID,  
<https://www.brooklyn.energy/> (2019年2月27日アクセス) .
  - 15) 科学技術振興機構 CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」,  
[https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/ongoing/bunyah24-1.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah24-1.html) (2019年2月27日アクセス) .
  - 16) 中部電力株式会社, トヨタ自動車株式会社「電動車用電池のリユース・リサイクル事業の実証開始について」  
<https://newsroom.toyota.co.jp/jp/corporate/20930377.html> (2019年2月27日アクセス) .
  - 17) 大東建託株式会社, 東京電力パワーグリッド株式会社, 株式会社ギガプライズ「IoTプラットフォームを活用し、業界初の「スマートライフサービス」を実現するスマート賃貸住宅の実証試験を開始」,  
[http://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/press/2018/1483167\\_8687.html](http://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/press/2018/1483167_8687.html)  
(2019年2月27日アクセス) .
  - 18) 関西電力株式会社「豪州パワーレジャージャー社とのブロックチェーン技術を活用した電力直接取引プラットフォーム事業に係る実証研究の開始について」

- [http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2018/0424\\_1j.html](http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2018/0424_1j.html)（2019年2月27日アクセス）。
- 19) U.S. DOE, "DOE Grid Modernization Laboratory Consortium (GMLC) – Awards,"  
<https://www.energy.gov/grid-modernization-initiative-0/doe-grid-modernization-laboratoryconsortium-gmlc-awards>（2019年2月27日アクセス）。
  - 20) Electric Power Research Institute, "IEEE 1547-New Interconnection Requirements for Distributed Energy Resources Fact Sheet," 2016.
  - 21) U.S. Department of Energy, "2016 Offshore Wind Technologies Market Report," 2016.
  - 22) Henrik Dam, "Towards an integrated EU energy system: LCE1 & LCE3,"  
[https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/2\\_dam\\_henrik.pdf](https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/2_dam_henrik.pdf)(2019年2月27日アクセス)。
  - 23) Rémy Dénos, "Towards an integrated EU energy system: LCE2, LCE4, LCE5,"  
[https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/3\\_denos\\_remy.pdf](https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/3_denos_remy.pdf)(2019年2月27日アクセス)。
  - 24) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 News Release「英国・マンチェスターにおけるスマートコミュニティ実証で協力協定」,  
[http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100255.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100255.html)（2019年2月27日アクセス）。
  - 25) 海外電力調査会, <https://www.jepic.or.jp/world/>（2019年2月27日アクセス）。
  - 26) Mission Innovation, "Smart Grids Innovation Challenge Country Report 2017,"  
[https://smartgrids.no/wp-content/uploads/sites/4/2018/04/MI\\_IC1\\_Country\\_Report\\_2017.pdf](https://smartgrids.no/wp-content/uploads/sites/4/2018/04/MI_IC1_Country_Report_2017.pdf)（2019年2月27日アクセス）。
  - 27) Forschungscampus Mobility2Grid,  
[http://forschungscampus-euref.com/bilder/M2G\\_OnePager\\_EN\\_161129.pdf](http://forschungscampus-euref.com/bilder/M2G_OnePager_EN_161129.pdf)（2019年2月27日アクセス）。
  - 28) uGrip, <http://ugrip.eu/>（2019年2月27日アクセス）。
  - 29) EDF France, "EDF Reserch & Development Strategy,"  
<https://www.edf.fr/en/the-edf-group/world-s-largest-power-company/activities/research-and-development/edf-research-development-strategy>（2019年2月27日アクセス）。
  - 30) 海外電力調査会, <https://www.jepic.or.jp/world/>（2019年2月27日アクセス）。
  - 31) ENGIE, "The GRHYD demonstration project,"  
<https://www.engie.com/en/businesses/gas/hydrogen/power-to-gas/the-grhyd-demonstration-project/>（2019年2月27日）。
  - 32) Mission Innovation, "Smart Grids Innovation Challenge Country Report 2017,"  
[https://smartgrids.no/wp-content/uploads/sites/4/2018/04/MI\\_IC1\\_Country\\_Report\\_2017.pdf](https://smartgrids.no/wp-content/uploads/sites/4/2018/04/MI_IC1_Country_Report_2017.pdf)（2019年2月27日アクセス）。
  - 33) China Electric Power Research Institute,  
[http://www.epri.sgcc.com.cn/html/epri/col11010000020/2014-01/06/20140106182439291532858\\_1.html](http://www.epri.sgcc.com.cn/html/epri/col11010000020/2014-01/06/20140106182439291532858_1.html)（2019年2月27日アクセス）。
  - 34) China Southern Power Grid,  
[http://www.csg.cn/xwzx/2018/gsyw/201805/t20180528\\_167827.html](http://www.csg.cn/xwzx/2018/gsyw/201805/t20180528_167827.html)（2019年2月27日アクセス）。
  - 35) National Research Foundation of Korea,  
[http://www.nrf.re.kr/eng/cms/page/main?menu\\_no=209](http://www.nrf.re.kr/eng/cms/page/main?menu_no=209)（2019年2月27日アクセス）。

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

## 2.10 熱エネルギー利用

### (1) 研究開発領域の定義

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

次の3つの柱を考える。なお、太陽熱の熱としての利用を含める。

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

### (2) キーワード

#### ■蓄熱技術

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

#### ■熱再生利用技術

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

#### ■居住空間の熱マネジメント

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

### (3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

#### ■蓄熱技術

2016年の日本の最終エネルギー消費 13.3 EJ/y（Exa=10<sup>18</sup>）における産業部門シェアは46%（6.2 EJ/y）、家庭部門は14%（1.9 EJ/y）であり、エネルギー消費の大半をしめ、日本の省エネルギー、低炭素化への影響力が大きい部門である<sup>1)</sup>。一次エネルギーは電力、熱エネルギーに変換され消費され、消費後は低品位な熱として環境に放出される。最終エネルギー消費のうち電力は26%（3.42 EJ/y）である。それ以外の74%（9.9 EJ/y）の大半は熱エネルギーとして利用され何らの熱変換プロセスを行い有効利用される、この際大量の排熱放出が伴っている。ある産業分野の排熱実態調査では利用可能な排熱量は全消費エネルギーの3.5%程度との報告がある\*<sup>2)</sup>。熱変換プロセスの排熱ポテンシャルをこの3.5%とすると0.34 EJ/y（11

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

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

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

#### ■熱再生利用技術

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

#### ■居住空間の熱マネジメント

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

[研究開発の動向]

■蓄熱技術

①産業部門の蓄熱

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

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

②不安定再エネの蓄熱

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

③電気自動車の蓄熱

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

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

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

④日本および他国の状況の概観

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

■熱再生利用技術

①エアコン<sup>4)</sup>

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

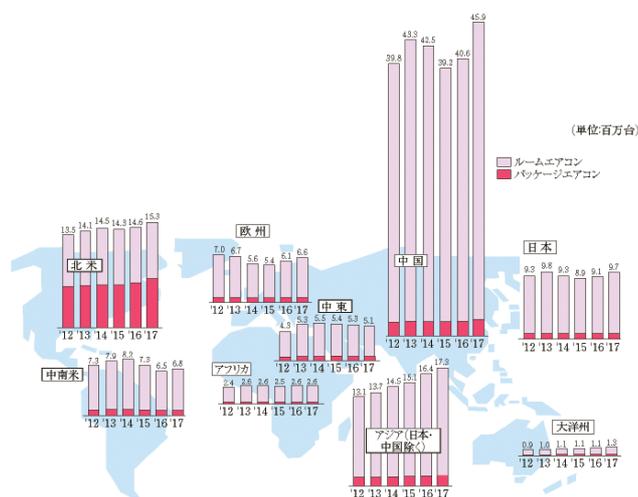


図2.10-1 世界のエアコン需要(2012~2017)

(出典：日本冷凍空調工業会 世界のエアコン需要推定<sup>5)</sup>)

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

低い冷媒として HFO1234yf の開発と商品化がなされてきた。

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

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

### ② 欧米先行主導によるセントラル空調方式

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

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

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

### ③ VRF 空調方式に必要な技術

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

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

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

#### ④次世代空調システム

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

### ■居住空間の熱マネジメント

室内外の環境品質を低下させることなく、大幅な省エネルギーを実現する ZEB（ネットゼロエネルギービル）や高い断熱性能と高効率設備による可能な限りの省エネルギー化と再生可能エネルギーの導入により、年間で一次エネルギー消費量が正味（ネット）でゼロまたは概ねゼロとなる ZEH（ネットゼロエネルギーハウス）に注目が集まっている。ZEB、ZEH は、快適性と大幅な省エネを両立して建築物のエネルギーの自立を目指しており、民生部門のエネルギー削減対策において非常に重要な位置を占めている<sup>6)・13)</sup>。

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

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

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

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

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

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

#### （4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

##### ■蓄熱技術

###### ①反応器システムの高性能化

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

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

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

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

- 3) 化学蓄熱材料の伝熱促進 東京工業大学 加藤之貴グループ<sup>17)</sup>

化学蓄熱材料の伝熱促進は装置全体の性能向上に重要である。酸化マグネシウム／水系（MgO/H<sub>2</sub>O）について、膨張化グラファイト（EG）との混合を試み、EG 混合比の向上による伝熱促進効果を示した。さらに各混合材料の反応性を調べ、所定の条件では化学蓄熱材料：EG 重量比＝8：1 程度が最適であることを示している。この混合材料を用いた充填層実験にて反応性能向上を実証している。

- 4) 伝熱面の機械的制御、東北大学 丸岡伸洋、埜上 洋グループ<sup>18)</sup>

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

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

## ②蓄熱材料開発

### 5) カプセルコンポジット、神戸大学 鈴木 洋グループ<sup>19)</sup>

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

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

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

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

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

### 8) 高温化学蓄熱 東京工業大学 加藤之貴グループ<sup>22)</sup>

次世代太陽集熱システムのための 650°C 域の化学蓄熱を検討し、オルトケイ酸リチウム ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) /CO<sub>2</sub> 系を提案し材料開発を行った。この化学蓄熱充填層とゼオライト充填層を接続し熱駆動での化学蓄熱、さらに 790°C までの昇温 (ヒートポンプ) 操作を確認している。この温度域の熱駆動化学蓄熱の実施例は世界に例がほとんど無い。

## ③新たな化学エネルギー変換

### 9) 炭素循環エネルギーシステム 東京工業大学 加藤之貴グループ<sup>23)</sup>

二酸化炭素を余剰エクセルギーにて還元し一酸化炭素に変換し、工業プロセスで再利用を行う。炭素が循環利用され、CO<sub>2</sub> 環境排出の抜本的な削減に寄与できる。固体酸化物電気分解セルにて CO<sub>2</sub> 高温電解の実証に成功している。新たな化学蓄エネルギー分野。

## ■熱再生利用技術

### ①熱交換器の性能向上

#### 1) 扁平管熱交換器

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

#### 2) 冷媒分配問題

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

### 3) 結露・着霜問題

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

#### ②低 GWP 冷媒の開発、評価<sup>24)</sup>

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

#### ③全熱交換器（Enthalpy exchanger）の開発<sup>25) -32)</sup>

全熱交換器とは、換気によって失われる空調エネルギーの全熱（顕熱＝温度と潜熱＝水分（湿度））を交換回収する省エネルギー装置のことである。国内（建築物衛生法）では特定建築物の居室内の CO 含有率を 10 ppm 以下、CO<sub>2</sub> 含有率を 1000 ppm 以下に管理する目標値が示されており、目標値達成のためには換気装置の設置が不可欠である。

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

#### ④IoT や AI 技術を活用した熱利用技術

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

### ■居住空間の熱マネジメント

#### ① ZEB、ZEH のロードマップ

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

#### ②建築物の性能指標、性能評価

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

### ③ エネルギーマネージメントシステム (EMS)

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

### ④ 高性能断熱材

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

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

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

### ⑤ 高性能窓

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

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

#### ⑥クールルーフ、クールロード

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

[注目すべき国内外のプロジェクト]

#### ■蓄熱技術

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

省エネ、CO<sub>2</sub>削減の更なる推進が必要とされる中、運輸・産業・民生の分野において一次エネルギーの半分が利用されず廃熱になっているという課題を解決するために、探索的な材料開発から、中核となる機器・システム・マネジメント技術に至るまでが検討されている。新たなクラスレートハイドレート潜熱蓄熱材（融点 10°C、0.3 MJ/kg）、化学蓄熱材料（作動温度 30°C、0.5 MJ/kg）を開発している。

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

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

##### ③日本鉄鋼協会スマート製鉄研究会 (2015-2017)

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

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

「経済性を備えたエネルギー運用と CO<sub>2</sub> 排出削減のための蓄熱」をテーマに検討が行わ

れ現行蓄熱技術の評価指標を明らかにし、核技術の相対的な価値を検討している。

#### ■熱再生利用技術

##### ① NEDO 研究プログラム

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

##### ② TherMAT 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合<sup>39)</sup>

##### ③ 米国：エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E)<sup>40)</sup>

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

##### ④ Stanford University

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

#### ■居住空間の熱マネジメント

東京オリンピック・パラリンピックへ向けての暑さ対策

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

#### (5) 科学技術的課題

#### ■蓄熱技術

##### ① 化学蓄熱装置の高性能化

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

##### ② 化学蓄熱材料、腐食防止

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

##### ③ 低温駆動ヒートポンプ

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

#### ④再生可能エネルギーシステムの熱エネルギー貯蔵

新たな市場として再エネの蓄熱利用が重要である。近年の急速な再エネ普及において再エネの不安定電力の効率的な受入れが重要な問題になりつつある。再エネ先進国のドイツでは再エネが電力供給の30%超を担っているが、二酸化炭素排出係数 [g-CO<sub>2</sub>-eq./kWh] は殆ど変化が無い<sup>3)</sup>。PVなどの再生可能エネルギーの変動は秒単位であり変化する。再エネの出力変動を補う火力発電の出力変動運転が火力発電の低効率化を導き、結果としてCO<sub>2</sub>排出を増やしている。火力発電の支援が無いと電力の質の低下を招き社会に悪影響が拡散する。このため再生可能エネルギーの大量導入に応じて出力安定化のためのエネルギー貯蔵がいよいよ重要になっている。再エネのP2H2P（電力→熱→電力）を目指しており、今後の普及が考えられる。

#### ⑤二酸化炭素の循環利用

二酸化炭素を余剰エクセルギーにて還元し一酸化炭素に変換し、工業プロセスで再利用を行う。炭素が循環利用され、CO<sub>2</sub>環境排出の抜本的な削減に寄与できる。固体酸化物電気分解セルにてCO<sub>2</sub>高温電解の実証に成功している。新たな化学蓄エネルギー分野。

### ■熱再生利用技術

地域、建物群レベルの熱供給システム技術開発においては、スタンフォード大学のBits & Wattsプロジェクトなどが参考になるであろう<sup>4)</sup>。安定した電力システムを前提とした熱利用技術ではなく、変動する電力システムなど、様々な条件における熱利用技術をIoTやAI技術と組み合わせるといテーマは、技術的意義のみならず、社会・経済的意義もあり、将来のまちづくりやエネルギー問題を考える上でも重要なテーマになる。

機械装置レベルの研究開発テーマにおいては、国内のプロジェクトは極めて現実的な熱利用技術を対象としたものに限定されている。米国では、熱交換器の技術開発においては、高温高压で動作可能なもの、宇宙空間に適応可能なものなども対象になっており（HITEMMP, ARPA-E）、一方、空調の技術開発にはウェアラブル機器なども含まれる（DELTA, ARPA-E）<sup>4)</sup>。対象を広げることにより、新しい熱利用技術の創出が期待できる。

### ■居住空間の熱マネジメント

#### ①条件の厳しい地域のZEB、ZEHの実現

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

#### ②BEMSの普及

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

#### ③先進的断熱材

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

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

## （6）その他の課題

### ■蓄熱技術

#### ①市場競争力のある化学蓄熱システム

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

#### ②排熱源、熱需要の見える化

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

### ■熱再生利用技術

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

■居住空間の熱マネジメント

①国際規格、標準

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

②認証制度、実証事業

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

(7) 国際比較

■蓄熱技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	北大、東工大、名古屋大などで蓄熱技術の基礎的な報告は一定的に報告がある。
	応用研究・開発	△	→	NEDO 北大などで、潜熱蓄熱輸送が検討。応用研究の取り組みは少ない。
米国	基礎研究	○	↗	電力網の負荷安定化、停電対応のための蓄熱検討が MIT, DOE、電力会社などで検討されている。
	応用研究・開発	○	↗	産業プロセスの高効率化のためのプロトタイプ蓄熱検討が DOE などで検討されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	電力網の負荷安定化のための Power to Gas 検討が進んでいる。水からの水素製造、再エネの蓄熱。IEA Annex で地蓄熱技術が検討されている。 【英国】 Warwick 大で化学蓄熱の検討が進められている。 【ドイツ】 DLR, で太陽熱、産業熱の化学蓄熱研究がされている。ZAE, Fraunhofer 研究所が再エネの潜熱蓄熱研究。 【フランス】 Perpignan 大などで潜熱、化学蓄熱蓄熱研究が良く進んでいる。余剰電力を用いた電気分解水素製造。 【オランダ】 TNO (旧 ECN) 自動車用吸着式蓄熱、化学式蓄熱の実証研究。 【スペイン】 Llleida 大、Barcelona 大で、再エネ、太陽熱の顕熱、潜熱研究が進められている。

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

■熱再生利用技術

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

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

■居住空間の熱マネジメント

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

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない                      ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、 →：現状維持、 ↓：下降傾向

(8) 参考・引用文献

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

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

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

## 2.11 化学エネルギー利用

### (1) 研究開発領域の定義

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

#### (エネルギーキャリア)

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

#### (Power to X)

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

### (2) キーワード

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

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

エネルギーの安全保障確保とCO<sub>2</sub>の排出量削減は、我が国にとって必須の課題である。水素は化石燃料・再生可能エネルギー等の多様な原料から製造が可能であり、使用時にCO<sub>2</sub>を排出しない特性を有するため、上記の課題に対する有効な手段となる可能性がある。

#### (エネルギーキャリア)

地球温暖化ガスの排出抑制を達成するため、再生可能エネルギー由来の電力の導入拡大が必要になる。再生可能エネルギーは、製造と使用の時間・空間的なズレが大きいことから、貯蔵・輸送して利用することが望ましい。蓄電池と比較して、特に大容量、長期間・長距離のエネルギー貯蔵・輸送・利用に有利な方法として、再生可能エネルギー電力を水素あるいは他の化合物に変換して運ぶ、「エネルギーキャリア」の技術が注目されている。この技術は、化石燃料を産出元でCO<sub>2</sub>回収貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）との組み合わせることで生産したCO<sub>2</sub>フリー水素を大規模に輸入する際にも活用できることから、我が国では国家プロジェクトにより研究開発が推進されている。

### （Power to X）

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

### 〔研究開発の動向〕

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

### （エネルギーキャリア）

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

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

エネルギーキャリア関連に特化した政策としては、2013 年度に、METI 「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」ならびに ALCA 特別重点プロジェクト「エネルギーキャリア」がスタートした。その後、前者は 2014 年度から NEDO 「水素利用等先導研究開発事業」、後者は 2014 年秋から SIP として再スタートした。前者においては、低コスト水素製造技術開発（アルカリ水電解の高効率低コスト化＝25 万円/Nm<sup>3</sup>/h の半減）や、有機ハイドライドの脱水素反応の効率化などが進められている。

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

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

も試みられている。

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

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

#### (Power to X)

再生可能エネルギーにより得られる水素は、CO<sub>2</sub>フリーである点に特徴がある。経済産業省ではこの Power to Gas (X) 技術を、再生可能エネルギーの導入拡大という短中期的課題への対処に利用しつつ、将来の CO<sub>2</sub> フリー水素の利活用に向けた足がかりにすべく、平成 28 年度に CO<sub>2</sub> フリー水素ワーキンググループを立ち上げた。この中で、CO<sub>2</sub> フリー水素の定義づけ等の議論がおこなわれつつある。

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

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

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

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

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

水素発電は、水素を安定かつ大量に活用するための手段であり CO<sub>2</sub> 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<sub>x</sub> で燃焼するため水噴射型が主流となっている。従来型の水素タービンよりも高効率かつ低コストのシステムを目指して、NEDO の「水素社会構築技術開発」の「大規模水素エネルギー利用技術開発」において、「水素エネルギー利用システム開発」として水素混焼のドライ型水素タービンの開発されている。また「水素利用等先導研究開発」において「大規模水素利用技術の研究開発」として、水素専焼の技術開発が実施されている。

ドイツでは低炭素燃料を製造するために、脱硫やハイドロクラッキングといった原油の精製プロセスに Power to X 技術によって製造された水素を活用することが検討されている。こうしたプロセスの低炭素化を図るためには、バイオディーゼル燃料やバイオエタノールといったバイオマス由来の燃料を活用する、あるいは再生可能エネルギーの持つ環境価値を証書の形で取引するといった方法が存在する。これらに加え、環境価値の高い水素を原油の精製に活用することで、主要インフラの変更を行うことなく、原油から製造される燃料そのものの低炭素を図る意図である。こうした背景には、原油の硫黄含有量の増加や軽質油の需要増加に伴い、精製に要する水素需要が増加しているといった要因がある。この水素を製鉄プロセスに利用する検討、および CO<sub>2</sub> との反応を利用して低炭素の炭化水素系の自動車燃料とするプロジェクトも稼働している。

2017 年に策定された水素基本戦略に、CO<sub>2</sub> フリー水素と CO<sub>2</sub> よりメタネーションにより合成された合成メタンは水素キャリアの一つとして位置づけられた。合成メタンは、既存のエネルギー供給インフラを活用できることから、水素エネルギーキャリアとして大きなポテンシャルを有する。また CCS で回収した CO<sub>2</sub> の有効利用技術（CCUS）として、注目されている。メタネーションの触媒開発、プロセス開発が進行中である。

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

再生可能エネルギー由来の電力から得られる CO<sub>2</sub> フリー水素を原料として、ハーバーボッシュ法によりアンモニアを合成し、アンモニアを輸送・貯蔵して利用する技術開発が SIP で進行中である。特に、ハーバーボッシュ法の新規アンモニア合成触媒の開発、およびアンモニ

アを燃料とするガスタービン発電技術の進展が期待される。

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

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

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

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

#### （4）注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

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

##### [注目すべき国内外のプロジェクト]

###### ● CertifHy Project

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

###### ● HySTRAの事業

技術研究組合CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構（川崎重工業等の4社）：豪州の褐炭から製造した水素を液体水素に変換し、輸送、貯蔵、利用するCO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーンの構築を行い、2030年頃の商用化を目指した、技術確立と実証に取り組

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

● AHEAD の事業

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

● アンモニア発電

石炭火力発電のボイラーで、補助燃料としてアンモニアを混焼させる技術が進展しており、燃料からの Fuel NOx の発生を抑える方法の開発に目処がついた。2015 年には 50 kW クラスのタービンでアンモニアの直接専焼に成功し（産業技術総合研究所）、燃焼技術の実用化にめどをつけつつある。アンモニアと天然ガスの混焼試験で、出力 2 千キロワット級ガスタービンで世界初めてとなる熱量比率 20%の混焼に成功した<sup>3)</sup>。

(Power to Gas)

● NEDO 事業

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

● ドイツのプロジェクト

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

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

● EU 石油精製での利用プロジェクト

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

Lingen 等の製油所の FS 実施を計画中である。

● HYFUTURE（オーストリア）、GrInHy プロジェクト（ドイツ）

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

(5) 科学技術的課題

(エネルギーキャリア)

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

(Power to X)

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

(その他)

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

(6) その他の課題

1) 技術面の課題

エネルギーキャリアの普及は低炭素社会に対する社会的要請の醸成、CO<sub>2</sub> フリー水素の普及シナリオの実現に向けた制度上の課題明確化と解決、安全性および社会受容性の検証、再生可能エネルギーの利用を含めたエネルギー利用システムのシナリオ検討、エネルギーキャリアの利用拡大あるいは燃料電池自動車の普及を可能とするための技術・材料のより広範囲な探索への継続的資源投入などが挙げられる。従って、中長期にわたる統合的な戦略のもとに、系統的な研究開発の推進が重要となる。

2) 制度面の取組

CO<sub>2</sub> フリー水素の利活用拡大という観点からは、J-クレジット制度などを活用した水素製造

により CO<sub>2</sub> フリー水素の量的課題の解決に取り組むとともに、CO<sub>2</sub> フリー水素の定義に係る議論、CO<sub>2</sub> フリー水素活用にインセンティブを与える制度設計（省エネ法や高度化法への組み込み）などを通じて、供給側・利用側双方において CO<sub>2</sub> フリー水素のメリットが享受され、取引が促進される仕組み作りを検討していくことが必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>■エネルギーキャリア                             <ul style="list-style-type: none"> <li>液体水素では磁気冷凍、アンモニアでは合成触媒、有機ハイドライドでは脱水素反応への膜分離技術が研究されている。ギ酸、メタノール等のキャリアとしての製造、利用に関する研究が行われている。</li> </ul> </li> <li>■ Power to X                             <ul style="list-style-type: none"> <li>水電解技術高度化のための基盤技術研究、メタネーション触媒の研究が進行している。</li> </ul> </li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>■エネルギーキャリア                             <ul style="list-style-type: none"> <li>SIP（内閣府戦略的イノベーション創造プログラム）において、アンモニアや有機ハイドライドを中心に製造・利用に関する技術開発を推進している。特にアンモニアの石炭混焼発電およびガスタービン発電が注目されている。</li> <li>NEDO 水素社会構築技術開発事業では、海外から CO<sub>2</sub> フリー水素を導入するサプライチェーンの実証事業（液体水素およびメチルシクロヘキサンを利用）が進展している。（HySTRA および AHEAD）</li> </ul> </li> <li>■ Power to X                             <ul style="list-style-type: none"> <li>NEDO 水素利用等先導研究開発事業では、電解による水素製造技術や液体水素貯蔵技術などの開発が行われており、大型機の実証も計画されている</li> <li>複数の NEDO 事業で、混焼および専焼の水素発電技術が実施されている。</li> <li>NEDO 水素社会構築技術開発事業では、国内再エネをベースとする複数の F S が実施されている。（福島県浪江町など）その他、環境省地域連携・低炭素水素技術実証事業も実施されている。</li> </ul> </li> </ul>
米国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>■エネルギーキャリア                             <ul style="list-style-type: none"> <li>磁気冷凍とボルテックス（Vortex）冷凍方式の研究を実施（DOE、NREL 再生可能エネルギー研究所）。液体水素輸送貯蔵タンクの断熱材開発と国際規格の検討がされている<sup>4)</sup>。</li> </ul> </li> <li>■ Power to X                             <ul style="list-style-type: none"> <li>DOE では、2020 年までにクリーン水素コスト 4 ドル/kg 水素以下にすべく、水電解をはじめ、太陽熱利用やバイオ水素技術等による水素製造等に関する研究開発プログラムを実施している<sup>4)</sup>。</li> </ul> </li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Power to X                             <ul style="list-style-type: none"> <li>H2@scale プロジェクトで、余剰電力で水素を製造し、エネルギー用途や化学産業等の多様な産業への利用を検討中<sup>4)</sup>。</li> <li>技術実証の初期段階。カリフォルニア州では 2030 年までに温室効果ガスを 1990 年比で 40% 削減する目標を掲げており、電力販売の 50% を再生可能エネルギーにする目標を設定している。これに基づき ZEV（Zero Emission Vehicle）規制を始めとした様々な環境対策が行われる中で、2016 年にはガス事業者 SoCalGas が、カリフォルニア大学アーバイン校に設置されている太陽光発電設備を用いて水素を製造し、都市ガス導管に混入させる米国初の Power-to-gas プロジェクトを開始している<sup>5)</sup>。</li> <li>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<sup>4)</sup></li> <li>水素ステーションは 2017 年までに 51 か所、2023 年頃までに 100 か所が整備される予定。カリフォルニア州の助成を得て設置されるステーションは、33% に相当する水素供給量を再生可能エネルギー（風力、太陽光、バイオマス等）由来とすることが定められている。（NEDO 資料）</li> </ul> </li> </ul>

欧州	基礎研究	○	↑	<p>■全体<sup>4)</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>基本思想：水素によりセクター間統合と貯蔵を行い、再生可能エネルギーの利用を促進する。</li> <li>水素・燃料電池研究開発は、HORIZON2020の燃料電池・水素の技術開発を行う官民パートナーシップ、FCH2JU (Fuel cell Hydrogen 2 Joint Undertaking) が実施。</li> <li>FCH2JUの複数年計画 (Multi - Annual Work Plan 2014 - 2020) の内容</li> <li>運輸部門：乗用車と水素ステーションに加え、フォークリフト、鉄道、船舶、航空向けの燃料電池のための高効率化、長寿命化、低コスト化のための製造技術。幅広い利用を想定。</li> <li>水素製造：再生可能エネルギーや低炭素資源からの水素製造・利用</li> <li>エネルギー貯蔵：再生可能エネルギーから製造した水素によるエネルギー貯蔵や、水素またはメタンの天然ガス導管網への混入を目的とした、水電解設備の研究開発。</li> <li>利用技術：燃料電池コジェネの研究開発、モノジェネ燃料電池、配送や安全関連研究。</li> <li>政府・民間それぞれが 8.84、8.66 億ユーロを拠出。</li> </ul> <p>■エネルギーキャリア</p> <p>熱媒体油ジベンジルトルエンの検討が報告されている。(WHTC2017)</p> <p>■ Power to X</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>従来の Power to Gas は、「再エネの余剰電力による水素製造」から、「電力グリッドとガスグリッドの柔軟性の向上、市場の柔軟性の向上という” Power to X”」の概念に発展。</li> <li>個別のビジネスケースの採算性は、制度的な支援に大きく依存。(英国)</li> </ul> <p>■全体</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2011年に、H2 Mobilityの英国版であるUK H2 Mobilityが設立された。</li> <li>UK H2 Mobilityの2011-2012年の英国の運輸部門の水素エネルギーのポテンシャル評価結果を受け、政府は産業界と共に合計1,100万ポンド (約20億円) を投じ、2015年末までに15箇所の水素ステーションを設置することを発表している。(ドイツ)</li> </ul> <p>■ Power to X<sup>6)</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>水素から他の有用化合物への転換技術 (Audi e-diesel など)</li> <li>GrInHy プロジェクト (ドイツ)：製鉄企業 Salzgitter Mannesmann Forschung 社が製鉄プロセスの高温排熱利用した高温水蒸気電解を製鉄プロセスに統合する検討 (METI/みずほ資料)</li> <li>製油所への利用 Uniper 社：Falkenhagen で PTG 検討</li> <li>Sunfire 社の Power to X 構想 (その他)</li> </ul> <p>■ Power to X</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Hyper プロジェクト (ノルウェー)：風力由来の余剰電力と天然ガスから水素を製造し、液体水素として貯蔵・輸送する技術およびスケールアップ技術の検討。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<p>■全体<sup>5)</sup></p> <p>CertifHy プロジェクト：環境価値の高い水素の利活用を促進させるため、2014年に開始した。</p> <p>■ Power to X</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ドイツを中心に再生可能エネルギーからの水素、メタン製造について実証が進行中。地域の各エネルギー供給公社 (シュタットヴェルケ) で太陽光や風力による電力供給が拡大しており、地域間融通のための電力貯蔵に関する技術開発も進む可能性がある。(英国)</li> </ul> <p>■ Power to X</p> <p>The PURE (Promoting Unst Renewable Energy) Project：再生可能エネルギーからの水素製造に関する実証。スコットランドで実施中。(ドイツ)</p> <p>■ Power to X</p> <p>20件程度の実証が進行中。(フランス)</p> <p>■ Power to X</p> <p>MYRTE プロジェクト：コルシカ島での太陽光発電と電力グリッドの統合マネジメントの研究開発。</p>

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

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準がどう変化しているかの評価を、参考にした根拠や専門的な見解等に基づき判断。

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 参考・引用文献

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

## 2.1.2 基礎化学品合成プロセス

### (1) 研究開発領域の定義

基礎化学品合成プロセスに関する科学、技術、研究開発を記述する。

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

### (2) キーワード

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

### (3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

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

[研究開発の動向]

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

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

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

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

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

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

#### (4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

##### ■ C-H 活性化反応：

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

##### ■ 炭素-炭素結合活性化反応<sup>9)</sup>：

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

##### ■ 高難度分子変換反応：

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

■ ハイブリッド触媒：

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

■ (不斉) 有機分子触媒：

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

■ 可視光酸化還元触媒反応：

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

■ 有機電解反応：

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

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■ 新学術領域「高難度物質変換反応の開発を指向した精密制御反応場の創出」：

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

■ 新学術領域「分子合成オンデマンドを実現するハイブリッド触媒系の創製」：

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

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

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

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

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

(5) 科学技術的課題

■ C-H 活性化反応：

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

■ 炭素-炭素結合活性化反応：

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

**■ 高難度分子変換反応：**

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

**■ ハイブリッド触媒：**

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

**■ （不斉）有機分子触媒：**

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

**■ 可視光触媒反応：**

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

**■ 有機電解反応：**

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

**(6) その他の課題****■ 研究開発と成果の社会実装：**

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

**■ 連携：**

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

**■ 国際競争力・資金力：**

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

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

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	反応の発見は日本であり、精力的に研究が行われている。特に C-H 活性化反応や不斉有機分子触媒に関しては新学術領域などを中心に、すでに多くの新規化学合成プロセスが開発された。ハイブリッド触媒などの新しい形の触媒開発研究も行われている。しかしその一般性展開などの点において米国を中心に遅れをとっている。さらに最近では中国などが台頭し、反応の発見の段階においても遅れを取る場合がある。可視光酸化還元触媒反応などがその例で、日本で開発されたのにも関わらず、現在の新しい潮流はほとんど米国中心である。
	応用研究・開発	△	→	応用研究に関しては実用的であると言った意味の応用はいまだ少ない。しかし、複雑生理活性物質の合成や有機材料の短段階合成、メディシナルケミストリーなどの利用は行われている。
米国	基礎研究	◎	↑	米国での反応開発は個々の優れた研究者が行っているという印象である。一方で学術団体として特に、複数の大学の C-H 活性化研究者が集まって展開しているバーチャル研究所である CCHF は大変うまく機能している印象がある。特に密接したコラボレーションを行っているわけではないが、研究を集めることにより注目研究分野が目立っている印象がある。
	応用研究・開発	○	↑	研究者が自身の技術をすぐにベンチャー企業などに転嫁して、応用研究・開発を行う土壌がある。そのため開発された反応がすぐに技術転嫁される、もしくは興味のある大企業に会社ごと買収されることもある。試薬会社なども個々の注目研究者と共同研究を密接かつ積極的に行っており、触媒が論文発表と同時に発売されるといったことも少なくない。電解反応や可視光触媒の反応機器に関しても同様で、すでに実験室レベルで簡便に反応を行うことができる機器はすでに発売されている。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 反応開発は行われているが積極的ではない。ここの有機材料をつくり評価する有機物理化学分野の方が発展しているように思われる。</li> <li>● 英国では C-H 活性化反応や C-C 活性化反応の開発で著名な研究者は少しいるが、有機合成化学が他国に比べて強いという印象はない。</li> <li>● ドイツでは欧州の中では圧倒的に、有機合成化学の分野においては研究が盛んに行われている。大きな化学企業、マックスプランクのような巨大な私立研究所もあり多くの研究者が化学反応開発を行っている。いずれにおいても革新的な反応の発見には関与していないが、それらの展開研究にはかなり強い。土壌としてヨーロッパのなかでも中国などの優秀な大学院生や研究者を受け入れており、彼らが精力的に研究を行っている感はある。</li> <li>● フランスでは C-H 活性化反応や C-C 活性化反応の開発で著名な研究者は少しいるが、有機合成化学が他国に比べて強いという印象はない。</li> <li>● イタリア・スウェーデン・オランダなどには一部反応開発研究を行っている研究者がいる。スペインは ICIQ (Institute of Chemical Research of Catalonia) という化学研究所があり、そこに所属する有機合成化学者は精力的に基礎研究を行っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↘	● 特に応用研究は積極的に行われていない。

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

## (註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) 「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 参考・引用文献

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

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