

2.5 エネルギーシステム統合化

2.5.1 エネルギーマネジメントシステム

（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消費者から自ら電気を作るプロシューマに変貌し、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、情報通信技術、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。また、世界がカーボンニュートラルに舵を切り、エネルギー利用の可能な限りの電化と水素等の新たな媒体活用への期待が高まっており、それらとの関連性を含める。地震、台風等の被害が多発する自然環境に鑑み、災害に対するレジリエンスの高い電気利用を可能とする電力エネルギーシステムの観点を取り入れる。

（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（Prosumer）、スマートメーター、エネルギーマネジメントシステム（EMS）、デマンドレスポンス（DR）、バーチャルパワープラント（VPP）、柔軟性（Flexibility）、エネルギー・データサイエンス、自動車電動化、ビークルトゥホーム（V2H）、ビークルトゥグリッド（V2G）、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）、スマートインバータ、災害に対する強靱化（レジリエンス）

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

2050年頃までのカーボンニュートラル達成が世界各国の基本目標となっている。その中軸は再生可能エネルギー等電源のカーボンフリー化と、エネルギー利用における電化を最大限にすることである。そのうえで、産業プロセスが必要とする高温や長距離の移動など、電気だけでは実現が難しい領域にはカーボンフリーで製造する水素、アンモニアなどの燃料の活用を目指す。同時に需要家には、太陽光発電（PV）のほかエネルギー利用効率向上、環境負荷低減に資する蓄電・蓄エネルギー機器、コジェネレーションシステムの導入が進み、エネルギーを消費するコンシューマから自らエネルギーを作り出すプロシューマ（Prosumer）への転換が進んでいる。

変動性の再生可能エネルギー（VRE）の拡大は、電力の供給と消費の時間的・空間的ギャップを増大し、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となる。ギャップを補償し電力システムを安定化するためには調整力（柔軟性：Flexibility）が必要となる。電力ネットワークでの対策に加え、需要家が導入する分散型エネルギー資源（DER）を活用した柔軟性創出・需給一体の仕組みが、カーボンニュートラルを支える未来の電力エネルギーシステムの不可欠な基盤になる。

その実現には、あらゆる分野で進むデジタル技術・手法を最大限に取り入れることが肝要である。電力システムの電流・電圧や設備情報、PV発電量等に関する気象データ等の活用による電力ネットワーク運用最適化システム（グリッドEMS：GEMS）を構築するとともに、需要家においても電気消費量や保有する分散型エネルギー資源の最適な運用のためにエネルギーマネジメントシステム（EMS）が不可欠となる。本領域は、分散して存在する個々のEMS最適化に加え、EMS間でデータを共有し、需給一体によるエネルギーシステム全体での効率向上、脱炭素推進、設備のスリム化・稼働率向上等の効果を創出する手法構築を目指す研究領域である。さらに、災害時にもエネルギーの利用を可能とするレジリエンスの確保や、交通システムなど他の社会インフラとの連携、人の動きと結び付けた都市レベルの多角的・包括的な最適問題など、人間活動に係る重点課題への対策検討の基礎を提供することを企図する。

〔研究開発の動向〕

成長期・成熟期の電力システムの研究開発は、発電・ネットワークにおいては規模拡大への対応、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、電気利用では電力消費の平準化が中心的課題であり、蓄熱システム・機器や蓄電池の開発が精力的に行われてきた。

近年は、カーボンニュートラルに向けて、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、各国は政策による誘導を図っている。研究開発や技術導入についてエネルギー関係の政府機関がプロジェクトや機器・システム導入に対して資金支援を行い、政策推進のドライバーとしている。その主要な分野は、再生可能エネルギー導入と関連する課題への対策、柔軟性創出と特に蓄電システム構築・設置拡大、電気自動車（EV）の普及と充電インフラの整備、水素等の製造・貯蔵・輸送技術などである。

日本では、経産省のエネルギー基本計画のもとNEDO、JST、SIPなどがそれぞれ経産省、文科省、内閣府と連携し、上記の分野に加えて街レベルでのエネルギーマネジメント、異なる領域のシステム間のデータ連携などに力点を置いている。欧州では欧州委員会が方針を定めており、2030年の目標を掲げるClean Energy For All Europeans packageに沿っているが、昨今のウクライナ情勢を受け、2022年5月にRE Power EU計画¹⁾を発表し、液化天然ガス（LNG）の輸入増、バイオガス・グリーン水素の輸入・生産増、エネルギー高効率化と電化推進などを打ち出している。米国ではエネルギー政策は州ごとに進められ、代表的にはカリフォルニア州（CPUCがまとめるIntegrated Energy Policy Report²⁾）やハワイ州（エネルギー局がまとめるHawaii Energy Facts and Figures³⁾）はいずれも2045年に再生可能エネルギー100%を目標に掲げている。米国における研究開発プロジェクトは米国エネルギー省（DOE）により主導されており、2022年にはEV用バッテリー開発促進、CO₂の捕捉・回収・貯留をはじめ、資金支援を発表している。

VREと需要家内のDER（電力メーターより需要側に設置されることからBehind-the-Meter（BTM）の資源といわれる）の拡大に伴い、以下の課題が顕在化する。

- ・ 設置が電気事業者の意図と無関係であり発電の予測・制御が難しく、需給バランス維持の困難化
- ・ 電気の流れの複雑化、系統混雑・電圧逸脱の発生、送電網と配電網の相互作用・運用の変化
- ・ 電力システムの慣性不足による故障発生に対する安定性の低下

途上国の非電化地域への電力供給や、近年頻度が増している地震、台風、集中豪雨、山火事等、災害時のエネルギー確保の必要性も高まっており、これらを踏まえた制度整備も含む研究開発の動向は、下記で示す内容に重点が置かれている。

- ・ DERと電気消費の制御を活用した柔軟性の創出（DR、VPP）、系統運用支援、市場への統合、災害時の活用によるレジリエンス向上
- ・ VRE発電と電力消費の需給一致の促進（需要家設置PVの自家消費、地産地消、セクターカップリング）
- ・ 蓄電池など蓄エネルギーシステム
- ・ VRE、DERの交直変換設備（インバーター）の高機能化（周波数・電圧調整、擬似慣性等の機能）
- ・ エネルギー消費の電化、EVの活用
- ・ クリーン水素を指向した製造・輸送・貯蔵・活用
- ・ VREの予測向上と電力システムの計画・運用への適用
- ・ データ管理、データベース間の連携、分析

■論文数・特許出願状況

本研究開発領域の論文動向および特許動向について「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」の「E5.1 エネルギーマネジメントシステム」にて報告している。分析結果のポイントを以下に述べる。

- ・ 特許ともに増加傾向にあった。災害時対応力を高める観点から分散型エネルギーシステムに対する関心

が深まり、脱炭素化やエネルギーの自立化に向けた再生可能エネルギーへの期待が理由の一つであると考えられる。

- ・論文数の国別推移、シェアは中国、米国が高かった。インドの論文数の伸びが著しく、過去3年ではイラン、韓国の増加が際立っていた。
- ・論文の国別企業共著率はドイツ、フランス、中国、日本が首位で並んだ。
- ・日本との論文共著率が最も高い国は中国、次いで米国であった。
- ・総論文数、およびTop論文数は中国、パキスタン、シンガポールなどアジア地域の大学が存在感を見せた。
- ・特許動向に関して、日本はかつて米国と共に高いレベルにあったが、中国が特許件数シェアを拡大、特許価値指標であるPatent Asset Indexも高水準にあった。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

- ・世界各地でVRE、DERを統合したflexibilityの創出、系統運用・電力市場での活用、関連研究開発
 - ・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・アグリゲーション・ビジネス（ERAB）の検討体制とVPP構築実証事業において、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・検証により、分散型エネルギー資源統合型flexibility創出を進めている。2016年から調達が始まった調整力電源のI'でDERが採択され、需給ひっ迫に際して活用されているほか、容量市場、一部が開設された需給調整市場でも落札されている。
 - ・欧米では、国・地域の制度に従って、DERの活用が進んでいる。特に、高速応答が可能な蓄電池については、米国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への対価提供を義務付ける「FERC Order 755」を發布した。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、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」を發布し、ペンシルバニア、ニュージャージー、メリーランド州地域送電機関（PJM）が周波数調整市場で優先的に調達することで導入や開発を促進した。英国において同期発電機の周波数調整より応動の速い需給調整市場メニュー（Dynamic Containment）を設定している例など、蓄電池ならではの特性を活かす施策がとられている⁴⁾。
- ・電力系統をサポートする機能を有するインバーター（太陽光発電、蓄電池などへの適用）
 - ・インバータに自律制御機能を持たせ系統運用のサポートを向上させる技術（Advanced Inverter）、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が注目されている。
 - ・カーボンニュートラルに不可欠な基盤技術として、VRE導入拡大に伴う系統慣性の低下を補う擬似慣性機能を有するインバーターの開発、試験評価が精力的に行われている。
- ・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・ツールの開発
 - ・配電系統や需要家内部に分散型エネルギー資源が増加し、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、大量の無効電力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安定性の定量的な検討が必要になる。
 - ・米国において、1700を超える電力位相計測装置（PMU）が電力系統に全域に設置され、監視制御システム（SCADA）と結合して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。日本では、2019～2021年度にNEDO実証が行われ、PMUによる系統監視の基盤開発・検証が行われた。精緻なシミュレーション実施のため、このような実電力系統における詳細なデータの取得、解析が重要になる。
- ・建物・住宅の省エネルギー化
 - ・日本でのZEB/ZEH（ネットゼロエネルギービル/住宅）、米国カリフォルニア州でのグリーンビルディング

グでは、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DRへの対応を義務付ける方向であり、ビル・エネルギーマネジメントシステム（BEMS）や機器の自動制御が求められることになる。米国暖房冷房空調学会（ASHRAE）は、電力系統と相互に作用しあうビルディングの概念を打ち出し、ガイドを示している⁵⁾。DR普及には、国際標準化機構（ISO）、送電系統運用者（TSO）/配電系統運用者（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。
- **PV導入に係る政策の変化**
 - ・米国では、PV導入促進策であるNet Metering制度が、電力系統利用の不公平感から廃止の動きが広まっており、今後は住宅設置のPVを中心に自家消費に向かうと考えられる。
 - ・日本では、住宅用10 kW以下のPV設備で、2019年から固定価格買取制度（FIT）切れの設備が大量に発生した。PVの新規導入に対しては買取価格を市場連動させるフィードインプレミアム（FIP：Feed in Premium）へ移行させつつあり、需要のシフトによる需要創出（シフトDRや上げ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。FIT後のPVは通常の発電設備と同様に計画値同時同量の義務を負うため、蓄電池など貯蔵設備併設による変動補償やより正確な計画値策定のため発電量予測などが必要となる。
- **マイクログリッドへの関心の高まり**
 - ・再生可能エネルギーや蓄電池の導入コストの著しい低下など技術の進展や、地震、台風、集中豪雨、山火事などの自然災害の頻発を背景に、マイクログリッドへの関心が高まっている。北米、アジア太平洋地域を中心に年々増加し、2024年までの10年間でおよそ6倍の7.5 GW、総資産で1650億ドルに達すると見込まれている。
 - ・日本では、2018年の胆振東部地震による北海道エリア全域停電、2019年に首都圏を襲った台風14号による長時間停電などの経験から、経産省はレジリエンス強化の方策として、地域に存在する再生可能エネルギーや未利用熱を一定規模のエリアで面的に活用する分散型エネルギーシステムの構築を推奨している。平常時は下位系統の潮流を把握し、災害等による大規模停電時には自立して電力を供給できる「地域マイクログリッド」構築の実証事業を推進している。
 - ・米国では、電力インフラの老朽化、ハリケーン・トルネード・山火事など自然災害頻発などで停電が起きやすくなっており、エネルギーの地産地消、地域レジリエンスを向上させながらインフラを再構築するソリューションとして、マイクログリッドの導入が増えている。元々は軍事施設や大学などでの導入が多かったが、近年、電力購入契約（PPA）などの新たなビジネスモデルが貢献し、商業施設への導入も増加している。
- **グリーン水素**
 - ・カーボンニュートラル実現の不可欠な要素として、再生可能エネルギーからの生成をはじめカーボンフリーな手法で製造するグリーン水素への期待が世界的に高まっている。
 - ・欧州では、風力などの再生可能エネルギーから電解によって水素を製造し、ガス管に混入して使用するなど先駆的な取り組みがあり、近年は“脱ロシア”のための代替エネルギーとしてグリーン水素を強力に後押ししている¹⁾。
 - ・米国、中国では、輸送部門の温暖化ガス排出削減を軸に水素に取り組んできている。DOEは、2000万ドルを供出し、アリゾナ州にある原子力発電所で水素を製造、6トンの貯蔵水素を需要ピーク時に約200 MWhの電力を生産するために使用するプロジェクトを実施中である。
- **需要家の電力消費データの活用**
 - ・世界的にスマートメータ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。日本では、2024年度を目途に全需要家にスマートメータが設置完了となる。

- ・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サービス創出において有用性が高い。不確実性が増大するなか需要予測、DR、DERなどへの展開時において重要性が高まる。
- ・一般企業による電力データの利用が2023年10月に解禁され、東京電力パワーグリッド株式会社の供給区域を対象とした約20社が新たなサービスに参入した⁶⁾。電力の使用状況から二酸化炭素（CO₂）排出量の可視化や電気の需給調整サービス、高齢者の見守りなどに活用する。
- ・スマートメータや電流センサデータ等の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（NILM：Non-Intrusive Load Monitoring、Disaggregationなど）の開発が進んでおり、機器故障検知、不在検知などのサービスへの活用が始まっている。

〔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実証事業が行われており、リソースの拡大とともに近い将来に制度化される需給調整市場・容量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年度より、電気自動車からのV2GをVPPリソースに加え、ダイナミックプライシングに基づく実証が行われている。2021年からは、ポストFIT時代のため、発電計画・インバランス回避に必要な太陽光・風力発電などVREとDERを組み合わせた制御技術や、VRE発電量・卸市場価格予測技術を扱う再生可能エネルギーアグリゲーション実証事業が進められている。
- ・太陽光発電大量導入に向けて、NEDO事業として次世代の配電系統計画・運用・制御やスマートインバータの活用研究などが進められてきている。また、2019年より系統の主要個所にPMUを配置し、系統慣性を評価・モニタリングする研究や、将来の慣性力不足に対応するための研究開発が行われている。日本では、風力発電・太陽光発電の技術進展を踏まえたグリッドコード構築に関する検討が行われている。
- ・内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期として2018～2022年度にかけて「IoE社会のエネルギーシステム」が実施された。ここではSociety5.0時代のエネルギーシステムであるIoE（Internet of Energy）社会の実現のため、再生可能エネルギーが主力電源となる社会の次世代エネルギー変換・マネジメントシステムの設計について検討し、エネルギー利用最適化に資するスマートシステムの構築と、その要素技術の研究開発を実施することで、社会実装を図るとしている。
- ・内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期課題『スマートエネルギーマネジメントシステムの構築』では、2050年カーボンニュートラル、エネルギー安全保障の確保、ならびにSociety5.0の実現に向けて、従来の一建物や一地域における電力マネジメントの枠を超え、クロスボーダー・セクター横断での、主に再生可能エネルギーを起源とする電気・熱・水素・合成燃料を含めた様々なエネルギーを包含する「スマートエネルギーマネジメントシステム」を構築し、次世代の社会インフラ確立を目指すとしている⁷⁾。
- ・VRE導入拡大により顕在化している系統混雑を回避し、さらに導入を進めるためにノンファーム接続の適用が進められている。一方、系統混雑を解消するためにDERの制御を活用する局所柔軟性（Local Flexibility）に関する実証が開始された。
- ・近年の集中豪雨や台風の災害に伴う局所的な停電長期化の事象を踏まえ、災害時にも再生可能エネルギーを供給力として稼働可能とする地域マイクログリッドの構築に向けた事業が開始した。また、分散型エネルギー資源を広く活用し、脱炭素化やレジリエンス強化を目指すスマートレジリエンスネットワークが創設され活動を開始している。
- ・NEDOは2016年より、CO₂フリーの水素社会構築を目指したPower to Gas（P2G）システムの実用化に向けた実証を山梨県で実施している。太陽光発電の電力の変動部分を使って電気分解によって水素を製造し、残った変動をほとんど含まない部分を電力系統に出す。水素の貯蔵・輸送、ボイラーや燃料

電池による需要家への熱・電気の供給などの実証評価を進めている。

<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（L_RES）が米国・欧州を始め各国で進められている。洋上を含む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、再生可能エネルギーの出力予測、配電事業者のデマンドマネジメント統合によるアンシラリーサービスの提供等が検討されている。
- ・欧州を起点に、PVをはじめVREの導入拡大に伴う系統混雑の回避にDERの柔軟性を活用する取組が活発化している。DERのシステムレベルの需給バランスへの活用との振り分けの仕組み、TSOとDSOの協調、市場・制度設計、DERの管理に必要なプラットフォームの設計・開発などの実証・一部実運用が始まっている。同様の取組は、日本、中国などでも広がりをみせている。
- ・EUのHorizon2020でFLEXGRIDプロジェクト⁸⁾が進められている。DERの増加とその活用の拡大において、TSOレベルの運用・市場（系統全体でのバランスング）とDSOレベルの運用・市場（局所的な混雑解消や電圧管理・制御）の連携の重要性が増大しており、同プロジェクトはこれらを一体的に処理し最適化を図るものである。DERの管理プラットフォーム、リアルタイムに近い情報授受・分析、最適化のアルゴリズムなど多くの技術課題を含み、今後の進展が注目される。
- ・世界各国で電化の推進、蓄電池・蓄エネルギーシステム導入の支援、EVの拡大と充電マネジメントの促進、水素製造・活用に関する研究開発が活発化している。特に、これらを柔軟性創出のリソースとして活用する視点が強化されてきている。

（5）科学技術的課題

・VRE/DER拡大に伴う電力系統との協調、諸課題への対応

VRE/DERが大量に導入された電力システム（基幹系統・配電系統）で起こる諸現象の解明、蓄電池普及やパワエレ機器の高度化（スマートインバータ化）による効果、EV充電器普及による負荷の面的変動対策と評価、系統故障時の過渡現象解析や安定度評価などのための送電・配電系統モデル、各種分散型エネルギー資源や需要負荷の分散型モデル、モデルの統合解析・シミュレーション手法（T-D Interface）の開発・整備が必要である。また、シミュレーション高度化・リアルタイム化のための電力系統モニタリング技術（PMU、センサ付IT開閉器、スマートメータ等による）、広域モニタリングとセンシングの時空間分解能向上も求められる。PVなどインバータ接続電源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）、スマートインバータの次世代化、更なる高機能化（擬似慣性機能など）が必要になる。

・階層型監視制御アーキテクチャ、分散システム間の情報連携・協調制御技術

電力自由化、市場化で先行する欧米型の電力システムのステークホルダーとして、系統運用者（TSO、DSO）、発電事業者、小売り事業者、アグリゲータ、電力市場、プロシューマや需要家がある。我が国の電力システムにおける分散型情報システム・運用監視制御システムのアーキテクチャ設計が必要となる。柔軟性に関する系統全体と局所の協調、デジタルトランスフォーメーション（DX）の活用、セキュリティ対策、各構成要素間のシステム連携における、データ連携、階層化、機能分担、必要なデータ種別・粒度・交換タイミング、分散処理、システム間ネゴシエーションと分散協調最適化に関する研究が必要である。

・小規模電力の需要家間取引

電力システムにおけるDERの活用、特にVPP、DRの仕組みが進展する一方で、市場を介さないプロシューマ間の電力融通・売買の仕組み（P2P取引、系統制約との整合問題等）、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。

・再生可能エネルギーとマッチした水素・アンモニアなどの製造と貯蔵・輸送と活用

カーボンニュートラルに向け、カーボンフリー水素・アンモニア等の製造・貯蔵・輸送・活用が重要となる。至近では、水電解装置の低コスト化、太陽光発電の変動補償など柔軟性創出に資する水素製造方法や、燃料電池システム、水素タービン、燃料電池自動車など、水素利用技術の開発が重要である。

・通信技術

5GやIoT通信向けの低消費電力型長距離無線（LPWA）などの最新通信技術を活用し、多数の分散型エネルギー資源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、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する分散型電源管理システム（DERMS）の研究開発・実運用が始まっている。データモデルや通信プロトコルについてはレガシーシステムとの相互接続性が課題である。IoTが進展するなか、住宅用をはじめ、低価格・低リソース化とサイバーセキュリティ確保の両立のために幅広い業界標準化が必要となる。

・不確実性の予測と計画および運用への適用

VRE導入量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などデータサイエンス手法を適用し、電力システムの最適運用に役立つ精度と要求時間内の提供を確保することが求められる。

・需要科学とエネルギー・データサイエンス

スマートメータ等のエネルギーデータとスマートフォン位置情報（GPS）、自動運転ログデータ等のビッグデータを連携活用し、エネルギー消費分析、需要家機器稼働分析、消費者行動分析、行動経済学的分析、さらに新たなサービスの提供などを実現するオープンデータベースが期待されている。他方、情報セキュリティ、プライバシー保護、トラスト管理などの課題もある。また、消費行動に基づく需要の動的挙動を考慮した電力市場価格モデル、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。さらに、IoT/ビッグデータ/人工知能技術を駆使した、膨大なエネルギーデータの高速解析技術、マルチスケールの分散型エネルギー資源アグリゲーションによる高速・高精度需給調整力の創出に関する研究も有用になる。

・分散型エネルギーシステムのレジリエンス

分散型エネルギーシステムは、系統からの電力供給喪失時にも独立したエネルギー供給が可能であり、エネルギー安全保障を確保するうえで高い関心が寄せられている。エネルギーシステムのレジリエンス強化にあたり、これのみを目的関数にとったシステムの最適化は、無尽蔵なコストの増加を招く恐れがある。経済効率性とレジリエンスのトレードオフを踏まえた最適な設備計画・運用計画の評価が重要であり、実際に発生した自然災害や予測可能性をモデルに組込むことで上記の課題に対応する新たな取組みがなされている⁹⁾。

（6）その他の課題

・制度を含めたイノベーション

・社会実装のためには、技術のみならず制度面を含めたイノベーションが必要である。米国や英国では、蓄電池の活用に向けその特性を活かした市場カテゴリー・要件の設定や、パフォーマンス評価方法の導入により、蓄電池への投資・導入のインセンティブを明確にし、産業育成も含めた対応を行っている。

・災害・疫病・地政学的リスクへの対応

・近年、世界的に頻発の気配のある大型台風、集中豪雨による河川氾濫、山火事、干ばつなどの被害、またCOVID-19の世界的パンデミック、さらにロシア・ウクライナ問題によるエネルギー資源不足の経験から、事業継続性計画（BCP）視点での電力供給システムのレジリエンス強化は重要課題となっている。これら世界の経験を共有し、人命を最優先に、環境整備、発生時の対処、事後の対応に関する検討を進めることが肝要である。

・統合的エネルギーマネジメントシステムの構築

・カーボンニュートラルの実現のためには、再エネの導入拡大を進めつつ、経済安全保障上のリスクマネ

ジメントの観点から、熱・水素・合成燃料を含めた統合的なエネルギーマネジメントシステムの構築、社会インフラへの実装が必須である。しかしながら、現状は市場形成に向けた仕掛け・仕組みづくりの検討が不十分であると考えられている。

・エネルギー・オープンデータ・プラットフォームの構築

- ・需要サイドのエネルギー実データを活用した需要科学等の様々な研究が期待されるが、オープンデータの不備が課題であり、広範な研究開発領域が未実施のまま残されている。
- ・多種多様なEMS等のシステムのデータを有機的に結びつけ、さまざまな分野への活用や相互連携、および異なる事業者の壁を超えたデータ共有・利活用で、新たなサービス価値を創出して社会実装にまでつなげていく仕組みが重要である。市民や事業者間（民・産）の利益相反に対し、学術領域（学）が中立公平な立場で牽引・調整役となり、行政（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。
- ・個人情報保護とユーザの受容性を確保した上での、産業振興につながるエネルギー・ビッグデータ整備支援、データ収集の仕組み構築、国家補助事業におけるデータ提供の義務化など、研究環境整備に向けたプラットフォーム構築に政策レベルの支援が必要である。

・国際標準化人材の育成

- ・日本の産業の強みを反映する視点を持ちながら、本分野の国際標準活動戦略的に進めていくための環境整備と人材育成が重要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	●配電系統の高度化に向けて、配電系統における想定潮流予測技術・データ分析技術の高度化や、リアルタイム情報把握・統合制御技術の開発・実証・確立が進められている ¹⁰⁾ 。また、NEDO事業において慣性力や短絡容量の低下に関する技術開発、スマートモビリティ社会の構築に向けたEV・FCVの運行管理と一体的なエネルギーマネジメントシステムの構築等が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	●再生可能エネルギーの利用拡大や系統制約の克服を目的として、DERを活用したローカルフレキシビリティ技術開発、ZEH-M、ZEBの実証、実配電網を使用した蓄電池によるマイクログリッド運用の実証など、電力会社を始めとした多くの企業・大学・研究機関・自治体が参画した実証試験が進められている ¹¹⁾ 。また、ここ数年の電力需要の増加やロシア産LNGの供給が途絶するリスクを受け、蓄電池等や水素製造装置・コジェネレーション等の分散型電源を活用した供給力の確保が検討されている ¹⁰⁾ 。加えて、エネルギーと交通分野のセクターカップリングによるエネルギーの効率的な利活用に関する検討も進められている ¹²⁾ 。
米国	基礎研究	◎	→	●DOEによる当該領域の研究開発予算は計算科学や材料科学関連が多いものの、電力と熱のセクターカップリングへの研究開発など、脱炭素・省エネルギーへの関心は高い ¹³⁾ 。また、国研である再生可能エネルギー研究所（NREL）や米国電力研究所（EPRI）でも低慣性への対策に関する研究や電力の柔軟性に関する研究など電力網への再生可能エネルギーの大量導入を踏まえた研究が実施されている ^{14)、15)} 。
	応用研究・開発	◎	↗	●バイデン政権下での2035年までの電力部門クリーンエネルギー100%への移行に向けて開発が着実に進んでいる。米国内務省が2022年5月に西海岸沖初となる洋上風力発電のリース権販売を提案するなど電源確保の側面からの開発が進められている。また、電化促進も進められており、2030年までの全米50万台の充電ステーション整備に向けた政策も活発である ¹⁶⁾ 。

欧州	基礎研究	◎	↗	【EU】 ●調整力の確保においてデジタルフレキシビリティの検討とそのビジネス応用が調査されている¹⁷⁾。インパクト評価から2030までに商用利用や市場の成熟の観点で有望な技術として、配電系統運用の自動化及び最適化、仮想発電所（VPPs）プラットフォーム、エネルギーコミュニティ、オンサイトビルのエネルギーマネジメント、産業需要家の負荷制御、家庭需要家の自動化とデマンドレスポンス、EVスマート充電、V2Gが挙げられている。また、EUの科学技術計画であるHorizon Europe（2021～2027年）にてグリーンとデジタルに適合した研究開発に大規模な投資が実施され、研究活動が促進されている。 【ドイツ】 ●連邦政府は2023年の気候変動対策基金（CTF）の特別基金の事業計画案と2026年までの財政計画案を採択した¹⁸⁾。気候変動の緩和とドイツ経済の変革のために1,775億ユーロを支出する。基金は、産業の脱炭素化とドイツ水素戦略の実施、欧州排出権取引による企業のコスト削減に向けた電力価格補償、気候変動に配慮した熱供給ネットワーク、電気自動車および燃料電池自動車の購入補助金（環境ボーナス）の改革に対して予算が確保されている。また、ドイツ連邦経済・気候保護省（BMWK）は次世代の持続可能な電池開発のためのプロジェクトLiBinfinityへ1,666万ユーロの資金提供を行い、リチウム電池のリサイクル設備を含めた電池製造プロセスの基礎研究を進めている。 【フランス】 ●ブリュノ・ル・メール経済・財務・復興相が2022年3月に「欧州共通利益に適合する重要プロジェクト（IPCEI）」の枠内で17億ユーロの助成による水素サプライチェーン構築に向けた15のプロジェクトを公表した¹⁹⁾。水電解装置の開発・製造、水素モビリティ開発、グリーン水素製造及び水素による工場の脱炭素化が挙げられている。また2030年までに10億ユーロを投資して小型モジュール炉（SMR）などの革新的な原子炉開発を促進する。このうち5億ユーロをEDFのSMR開発プロジェクトであるNUWARDへと充当する。次世代浮体式洋上風力発電などの研究開発にはエマニュエル・マクロン大統領が2021年10月に発表した投資計画であるフランス2030から10億ユーロの投資を予定している²⁰⁾。 【英国】 ●政府は2021年に英国ガス・電力市場局と共同で「スマートシステムと柔軟性の計画」および「エネルギーデジタル化戦略」を公表し、気候変動対策の解決策としてエネルギーシステムのデジタル化およびスマート化を推進している²¹⁾。その一環として、戦略的イノベーション基金にて2021年～2026年にヒートポンプやEVを始めとする蓄エネ設備の普及拡大を想定したシステム構築技術開発など、革新的なエネルギー網構築プログラムに総額4億5,000万ポンドの投資が実施される²¹⁾。 ●Distribution Network Operator（DNO）からDistribution System Operator（DSO）への移行に向けたローカルフレキシビリティマーケット（Local flexibility market; LFM）における調整力調達サービスの拡大に注力している。
----	------	---	---	--

	応用研究・開発	◎	↗	【EU】 ●REPowerEU計画にて需要家側設備であるヒートポンプの普及数を従来の2倍に拡大し、今後5年間で累積1,000万台を目指すなど、分散型リソースの普及が促進される。さらに、2022年のイノベーション基金の募集可能資金量を約30億ユーロに増加させ、産業界における革新的な電化・水素利用や燃料電池・ヒートポンプなどのクリーン技術製造、革新的なソリューションを検証・最適化するためのパイロットプロジェクトへの支援が実施される。 【ドイツ】 ●ドイツ連邦経済・気候保護省（BMWK）により、再生可能エネルギー導入拡大に向けた様々な実証試験が実施されている。 ●自動車大手のフォルクスワーゲン社は系統負荷軽減および再エネ出力抑制回避を目的としたバッテリー式電気自動車の充電実証試験を実施し、交通と電力のセクターカップリングに向けた取り組みが進んでいる²²⁾。 【フランス】 ●2020年に政府は脱炭素を目的として水素開発に70億ユーロの予算を投じることを発表した。さらに、Proton Exchange Membrane（PEM）技術をベースとした高出力燃料電池を生産する世界初の工場として、フランスの水素技術専門企業 Hydrogène de France（HDF）による1MW以上の高出力燃料電池工場の建設が進められている²³⁾。また、再エネ導入時の系統安定性や柔軟性確保の観点からPower to hydrogen（P2H₂）、P2Gの実証試験が複数進行している²³⁾。 【英国】 ●エネルギー安全保障法案を2022年7月に議会に提出した²⁴⁾。本法案は国内エネルギー供給の多様化に向けた水素や洋上風力の利用などを推進する。特に二酸化炭素の回収・利用・貯蔵（CCUS）と水素に関するビジネスモデル導入に対する長期的な収益の確実性提供、二酸化炭素輸送・貯蔵ネットワークの構築と拡大のための仕組みの確立、熱の脱炭素化における水素暖房利用の大規模実証設備の構築、電気ヒートポンプの製造と設置を拡大する市場ベースのメカニズム確立を行う。加えて、デマンドサイドレスポンス（DSR）、地域の柔軟性の取引方法、V2G、スマートメータを用いたEV充電制御などの革新的な実証試験への投資を進めている²¹⁾。
中国	基礎研究	◎	↗	●14次五カ年計画（2021～2025年）が発表され、2030年のカーボンピークアウト達成、および2060年のカーボンニュートラル達成に向けた再生可能エネルギーの導入計画が示された。これらに対応するため、送電系統と配電系統のレジリエンス向上や高度化、水素貯蔵や超電導フライホイールなどの蓄電技術、VPPやマイクログリッド、V2Gなどの系統運用に関する研究に取り組む方針が示された²⁵⁾。 ●中国国内の大学や研究機関において、再生可能エネルギーの主力電源化に伴う系統の慣性力低下への対応を目的とした疑似慣性インバータの研究²⁶⁾やマイクログリッドの系統切替に関わる技術、事故時のレジリエンス強化に主眼をおいた研究が実施されている。 ●発電抑制回避や系統設備増強回避に向けたローカルフレキシビリティに関する研究や取り組みは見られなかった。これは中国の再生可能エネルギー大量導入に対する対策が、他国と異なり、超々高圧送電（UHV）や農山村エリアの設備更新、蓄電技術開発など設備増強の実施であるためと考えられる。
	応用研究・開発	○	↗	●2022年4月に、中国国家電網が発起人となり、31の企業、大学、社会団体が構成される「新電力システム技術革新連盟」を設立し、「再生可能エネルギー」、「再生可能エネルギーの貯蔵」、「グリーン水素の生産と効率的利用」、「電力市場やプラットフォームの構築」、「デマンドレスポンス」に関する実証プロジェクトの推進を実施する。本プロジェクトへの投資総額は1,000億人民元を超えるとみられる。
	コロナウイルスによる影響			●COVID-19流行の際、「人民第一、生命第一」の原則に基づき、国民の移動制限を実施した。このため、輸送、移動に使用される石炭や石油の燃料需要が減少し、燃料価格が下落した²⁷⁾。

韓国	基礎研究	○	↗	●2022年7月に「新政権のエネルギー政策方向」が議決され、エネルギーミックスの修正が始動した。政策では実現可能で合理的なエネルギーミックスの再整備を目的に「電源ポートフォリオに占める原子力発電の割合を2030年には30%以上とする」などの原子力の比率拡大へ向けた目標が掲げられた。また、「独自のSMR（Small Modular Reactor）の開発」「水素の中核技術の自立とクリーン水素のサプライチェーン構築」「タンデム型太陽電池や風力発電の超大型タービンなど、次世代技術の早期商用化」などを通じ、エネルギー新産業の輸出産業における競争力を強化する方針が掲げられた²⁸⁾。 ●新型コロナウイルスによる経済危機を克服する対策として2020年に発表された「韓国版ニューディール政策」の追加対策が発表された（2021年7月）。2025年までの総事業費としては、これまでの160兆ウォンに60兆ウォンを追加し計220兆ウォンに拡大した²⁹⁾。
	応用研究・開発	○	↗	●現代自動車グループは2030年までに世界で323万台の電気自動車の販売を目標として、米ジョージア州にAI基盤知能型制御システムと親環境低炭素工法など多様な製造新技術を導入したスマート製造プラットフォーム（シンガポールのグローバル革新センター（HMGICS）が実証・開発）を建設することを発表した³⁰⁾。 ●韓国国土交通部は2020年からスマートシティ協力事業「K-City Network」を開始し、2021年までに19カ国21都市との協力事業を進めている。事業は「スマートシティ計画の策定事業」と「スマートソリューション海外実証事業」の2つの区分に分けられ、前者は交通、環境、エネルギーなど都市問題を解決するためのスマートソリューションの構築・運営やスマートシティ開発事業における計画策定を支援することを目的に外国政府、自治体、国際機関向けに、後者は韓国企業が開発したスマートシティ技術、製品、ソリューションなどを海外都市で実証する機会を提供することを目的に国内企業向けに実施される³¹⁾。
	コロナウイルスによる影響			●新型コロナ感染者の減少に伴う「社会的距離確保」の緩和・解除により産業分野における電力需要が大幅に回復したこと、および5月～6月の早い猛暑による電力需要増加が要因となり、韓国電力取引所における2022年上半期の電力取引量は過去最高に達した。

（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。

◎：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

参考・引用文献

- 1) European Commission, “REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy,” https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_1511, (2023年1月15日アクセス)。
- 2) California Energy Commission, “2018 Integrated Energy Policy Report Update,” <https://www.energy.ca.gov/publications/2019/2018-integrated-energy-policy-report-update>, (2024年10月31日アクセス)。
- 3) Hawaii State Energy Office, “Hawaii’s Energy Facts & Figures, 2020 Edition,” https://energy.hawaii.gov/wp-content/uploads/2020/11/HSEO_FactsAndFigures-2020.pdf, (2023年1月15日アクセス)。
- 4) 浅川博人「英国における蓄電池電力貯蔵システムへの上場投資ファンドの動向：日本での普及へ期待

- される電力取引市場・証券市場の環境整備」三井住友トラスト基礎研究所, https://www.smtri.jp/report_column/report/pdf/report_20210607.pdf, (2023年1月15日アクセス)。
- 5) Sherri Simmons, “ASHRAE Releases Smart Grid Application Guide: Integrating Facilities with the Electric Grid,” ASHRAE, <https://www.ashrae.org/about/news/2020/ashrae-releases-smart-grid-application-guide-integrating-facilities-with-the-electric-grid>, (2023年1月15日アクセス)。
 - 6) (一社)電力データ管理協会, 電力データ提供サービスの開始について https://denkankyo.jp/files/information/pressrelease_20231002_01.pdf, (2023年10月24日アクセス)。
 - 7) 科学技術振興機構 戦略的イノベーションプログラム (SiP), スマートエネルギーマネジメントシステムの構築 <https://www.jst.go.jp/sip/sems/>, (2023年10月24日アクセス)。
 - 8) FLEXGRID, “FLEXGRID project,” <https://flexgrid-project.eu/>, (2023年1月15日アクセス)。
 - 9) 西倉寛太, 小宮山涼一, 藤井康正「災害の予測可能性を考慮した近似確率動的計画モデルによる分散型エネルギーシステムのレジリエンスに関する定量的分析」, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 44, No. 2 (2023), https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjser/44/2/44_74/_article/-char/ja/, (2023年10月24日)
 - 10) 経済産業省 産業技術環境局「グリーン成長戦略・革新的環境イノベーション戦略のフォローアップについて (2022年4月)」経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/gi_008_03_00.pdf, (2023年1月15日アクセス)。
 - 11) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 住友電気工業「日米初の蓄電池による実配電網でのマイクログリッド構築・運用に成功: 電力インフラのレジリエンス (回復力) 強化を実現」NEDO, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101508.html, (2023年1月15日アクセス)。
 - 12) 浅野浩志, 塩沢文朗「研究開発項目: A IoE 社会のエネルギーシステムのデザイン」戦略的イノベーション創造プログラム (SIP), <https://www.jst.go.jp/sip/p08/team-a.html>, (2023年1月15日アクセス)。
 - 13) U.S. Department of Energy, “Advanced Manufacturing & Industrial Decarbonization: Funded Projects,” <https://www.energy.gov/eere/amo/funded-projects>, (2023年1月15日アクセス)。
 - 14) National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Renewable Electricity Futures Study,” <https://www.nrel.gov/analysis/re-futures.html>, (2023年1月15日アクセス)。
 - 15) Chris Warren, “GETTING FLEXIBLE ABOUT INTERCONNECTION,” Electric Power Research Institute (EPRI) Journal, <https://eprijournal.com/getting-flexible-about-interconnection/>, (2023年1月15日アクセス)。
 - 16) モベヤン・ジュンコ「バイデン政権がウクライナ危機で見直す、エネルギー安全保障とは?」SOLAR JOURNAL, <https://solarjournal.jp/sj-market/45490/>, (2023年1月15日アクセス)。
 - 17) Directorate-General for Energy (European Commission), et al., “Digitalisation of energy flexibility,” European Union, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c230dd32-a5a2-11ec-83e1-01aa75ed71a1/language-en>, (2023年1月15日アクセス)。
 - 18) Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), “177.5 billion Euros for climate action, energy security and help with energy costs,” <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2022/07/20220727-177.5-billion-Euros-for-climate-action-energy-security-and-help-with-energy-costs.html>, (2023年1月15日アクセス)。
 - 19) Ministre de l’Economie des Finances et de la Relance, “Discours de Bruno Le Maire -Présentation des 15 projets français sélectionnés pour le PIIEC hydrogène,” Ministre de l’Economie des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, <https://presse>.

economie.gouv.fr/08-03-2022-discours-de-bruno-le-maire-presentation-des-15-projets-francais-selectionnes-pour-le-piiec-hydrogene/, (2023年1月15日アクセス)。

- 20) ÉLYSEÉ, “Présentation du plan France 2030,” <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2021/10/12/presentation-du-plan-france-2030>, (2023年1月15日アクセス)。
- 21) 独立行政法人日本貿易振興機構 (JETRO) ロンドン事務所海外調査部「英国の地域レベルにおけるネットゼロ/スマートコミュニティ政策と企業動向 (2022年5月)」JETRO, https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/01/64ddc09ad1a614a8/20220007.pdf, (2023年1月15日アクセス)。
- 22) 高塚一「VW、電気自動車を活用した再エネ充電の実証実験を開始 (ドイツ)」独立行政法人日本貿易振興機構 (JETRO), <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/07/e7d4fa9ef88dc52a.html>, (2023年1月15日アクセス)。
- 23) Badr Eddine Lebrouhi, et al., “Energy Transition in France,” *Sustainability* 14, no. 10 (2022) : 5818., <https://doi.org/10.3390/su14105818>.
- 24) Department for Business, Energy and Industrial Strategy, “Energy Security Bill: factsheets,” GOV.UK, <https://www.gov.uk/government/publications/energy-security-bill-factsheets>, (2023年1月15日アクセス)。
- 25) 国家能源局「“十四五”現代能源体系規則」
http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf, (2023年1月15日アクセス)。
- 26) Yingqun Mao, et al., “Unit commitment of a power system considering frequency safety constraint and wind power integrated inertial control,” *Power System Protection and Control* 50, no. 11 (2022) : 61-70., <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.211723>.
- 27) 高新偉, 楊傲, 韓宇凱「新冠疫情期間能源價格走勢及其應對策略」『價格理論與實踐』11 卷 (2021) : 16-20., <https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2021.11.353>.
- 28) 当間正明「「新政権のエネルギー政策方向」を国務会議で議決、エネルギーミックス修正が本格始動 (韓国)」独立行政法人日本貿易振興機構 (JETRO), <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/07/ff58642609d08344.html>, (2023年1月15日アクセス)。
- 29) キム・ヘリン, キム・ウニョン「「韓国版ニューディール2.0」政策 25年までに21兆円投資=文大統領」KOREA.net, <https://japanese.korea.net/NewsFocus/Policies/view?articleId=200969>, (2023年1月15日アクセス)。
- 30) 中央日報「現代自動車グループ「電気自動車で勝負」: 6.3兆ウォン投資し米に電気自動車工場」
<https://japanese.joins.com/JArticle/291293>, (2023年1月15日アクセス)。
- 31) 当間正明「スマートシティ協力事業「K-City Network」の国際公募を開始 (韓国)」独立行政法人日本貿易振興機構 (JETRO), <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/04/1de83511c09e3edc.html>, (2023年1月15日アクセス)。