

2.1.14 エネルギーシステム評価

(1) 研究開発領域の定義

エネルギーシステムとは、油田などで採掘・開発された原油などの一次エネルギーを精製し、使いやすいエネルギー形態である石油製品など二次エネルギーに変換して、工場など最終需要家に供給するエネルギー需給の体系を指す。数理モデル等の解析モデルをエネルギーシステムに応用して、経済主体の経済合理性やシステムの環境適合性などを考慮に入れたエネルギー技術選択や政策の有効性や妥当性の評価を目的とした研究開発領域が対象となる。

なお本領域では評価対象となるエネルギーシステムを空間スケールで分類しており、それぞれの評価の目的や課題が異なり、評価方法もこれに対応していることから、対象とするエネルギーシステム自体の主な動向および課題等について記述する。

(2) キーワード

レジリエンス、デジタル化、リスク評価、気候変動問題、脱炭素化、再生可能エネルギー、分散型エネルギー資源、マイクログリッド、スマートエネルギーシステム、社会的受容性

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

エネルギーシステム評価の重要性は、第一次石油危機後に注目された。モータリゼーションと電力消費の爆発的拡大の中で、石炭から石油にエネルギーの中心が移行したが、同時に石油依存型社会の脆弱性が明らかとなり、化石燃料消費に伴う環境汚染が大きな社会問題となった。このような資源の有限性の中で拡大する需要に対するエネルギー供給の安定性、環境性、経済性などの同時解決を求めエネルギーシステム評価研究が始まった。その後、原子力利用など石油代替エネルギー、地球温暖化（気候変動）問題、再生可能エネルギー開発など供給面の拡大、コジェネレーションやヒートポンプ機器など利用機器の性能向上と環境熱など未利用エネルギー利用技術の再評価など需要側の技術進展によりシステム評価はさらに複雑化し、高度な分析技術やモデル解析が駆使されるようになった。また、各国でエネルギー産業の規制改革が進み、電力市場では電力量だけでなく、設備容量や需給調整力（供給電力量を増加あるいは制御電力消費量を減少させる能力）までが商品のように市場取引の対象とされ制度的にも複雑化している。

このようにエネルギーシステム評価は、単なる入力一次エネルギーに対する最終消費エネルギーの入出力変換効率だけでなく、経済性、環境負荷、さらに経済的な変動に対するリスクヘッジ、資源問題では地政学的リスクという対象の広がり、地球環境問題では超長期的視点と大きな不確実性、地域エネルギーではエネルギーの質的側面と地点別供給価値の違い、太陽光・風力発電では短周期的変動性など、単にエネルギーの量のみでは表せない諸問題が評価の鍵となっている。また、電力・エネルギーシステムのデジタル化が急速に進み、非エネルギー分野とのデータ連携による新たな社会的付加価値を生み出す分野の研究開発が国内外で活発になっている。

[研究開発の動向]

エネルギーは産業と社会を支える最も重要かつ基本的な要素である。しかし、利便性に優れる天然ガスや石油は資源が有限かつ偏在しており、供給のコストは短期的にも長期的にも変動が大きい。また、大気汚染

や地球環境問題を引き起こす。他方、太陽光のような無尽蔵と言って良い再生可能エネルギーはゼロ運用コストで、誰も恩恵を受けられるものの、一般に供給密度が低く、収集と変換にコストがかかり、出力は気候や天候で変動する。原子力は原理的には安定した供給を安価な燃料費で可能とするが、原子炉事故時の影響は甚大である。このようにエネルギー源はいずれも得失がある。他方、2016年時点で一人当たり一次エネルギー消費はOECD地域と非OECD地域で4.20石油換算トンと1.34石油換算トン、アフリカでは0.663石油換算トンと格差が大きい。また、先進国であっても国内に「エネルギー貧困」と呼ばれる格差がある。

電力やガソリンなど生活の基盤となるエネルギー源では、どのような価格で消費者に提供されるかが社会の基本的な問題であるが、ここには技術的成本だけではなく環境負荷のための社会的コストが必要であり、さらに実際の市場価格は税制など制度に依存する。

このようにエネルギーシステムの評価は決して一元的になされるものではなく、多面的な視点が不可欠である。特に、システム評価は、時代に合わせ社会からの要請に応えるため新たな方法論が開発されるなど、システム評価が拡張されてきた経緯がある。

ここでは、エネルギーシステムを空間スケールで分類し、本領域の動向と方向性を示す。

(3)-1 グローバルレベルのエネルギーシステム評価

長期・グローバルレベルのエネルギーシステムの近年の最大の課題は地球温暖化問題への対応である。1988年に政府間気候変動パネル（IPCC）が設立され、特にエネルギー利用に伴う化石燃料起源の二酸化炭素排出が主要な要因とされて以来、エネルギー、経済、環境を共存させるための定量的評価研究が世界的になされてきた。1990年代は主にエネルギー需要を所与としエネルギー技術選択と経済の相互関係を分析するボトムアップ型モデルと、主にエネルギー価格と市場メカニズムに着目して経済活動の中でエネルギー種が選択されていくというトップダウンモデルがエネルギーシステム評価の基本的な方法であった。次第にこれらは大気汚染や水汚染などの環境影響評価、土地利用や食糧需給評価、簡易全球大気循環モデル、水資源評価など範囲を広げた総合的評価システム体系に拡張された。このように多分野の評価モデル群を統合的に相互リンクさせたシステムは統合評価モデル（IAM）と呼ばれ、2013年に発表されたIPCC第5次評価報告書WG3（IPCC-AR5-WG3）¹⁾には日・欧・米から30の統合評価モデルが参加するに至った。日本からは、最も広範囲かつ大規模なモデル評価を続けている国立環境研究所のAIM²⁾、詳細なエネルギー技術評価ボトムアップモデルを特に詳細化した地球環境産業技術研究機構のDNE-21³⁾、コンパクトにエネルギー、経済、環境影響、土地利用を統合化したエネルギー総合工学研究所のGRAPE⁴⁾や東京理科大学のMARIA⁵⁾が参加している。

他方、モデルは大規模・精緻化されたとはいえ長期的な地球環境問題の不確実性は自然科学的にも人為的影響にもあまりにも大きく、これらのモデルが導く結論は決して収束しておらず評価の幅はなお広い。例えば、先のIPCC第5次評価報告書WG3¹⁾では2100年時点での2°C安定化目標と対応する430-480ppm濃度制約に対するGDP低下率は、2%-15%（中位値5%）という広い幅を与えている。モデル間に共通する知見と差異を明らかにすることは研究の方向付けにも政策提言にも重要と考えられる。このような観点から数多くのモデル比較プロジェクト（Model Inter-Comparison：MIP）が進められてきた。IPCC-AR5-WG3には9のMIPが記されているほか、2017年時点でさらに4プロジェクトが進行している。

(3)-2 国レベルのエネルギーシステム評価

(3)-1で紹介したエネルギー経済モデルの方法論は、ボトムアップアプローチ、トップダウンアプローチと

もそのまま一国あるいは地域のエネルギー・経済・環境評価に適用できる。エネルギー需給データが整備されていれば、国単位、地域単位のボトムアップアプローチの開発は比較的容易なため、世界各国での開発例は多い。この背景には、1980年に国際エネルギー機関（IEA）から発表された高い汎用性と柔軟性を持つメインフレーム計算機上で動作するMARKALモデル⁶⁾の存在が大きい。計算機環境の進歩により経済活動との統合化や不確実性評価など様々な拡張がされ、評価ツールとして普及した。

他方、経済政策評価においては、エネルギー政策と産業との相互影響、特に一次産業から二次産業、サービス産業など産業部門間の影響の波及は産業連関表を用いて分析でき、政策上重要な意味を持つ。トップダウンアプローチの中でも、産業連関表の概念を拡張した応用一般均衡モデル（CGE）は、このような多部門間の相互関連のもとで、価格と取引額の整合性を保ちつつ詳細な経済活動を導出することを可能とする⁷⁾。一般均衡分析は高度な専門的知識を要する経済学の一学問分野であるが、計算ソフトウェアの進展とデータの整備によりCGEモデル開発は容易になり、CGEは今や研究だけでなく実務的評価ツールとして世界各国で用いられている。

基本的な差として、ボトムアップアプローチは需要を外生的に与えるのに対し、CGEは価格メカニズムで変化すると想定されること、前者はエネルギー技術を明示的に扱うのに対し後者は「価格」の中に体化されているなどの方法論上の相違があるが、これらは絶対的なものではなく拡張例はある。

なお、CGEは基本的に静学モデルであり、経済のダイナミックな変化そのものを扱うものではない。そのため先のAIMでも逐次最適化によって産業部門間の相互作用を見つ動学的な技術導入シナリオを導くシステムを持つ。さらにマクロ経済モデルと組み合わせた大規模な経済評価システムが日本経済研究センター等で行われているが、エネルギーシステム評価からは外れるのでここでは省略する。

また、複数の国の間のエネルギーに関わる協力連携政策の評価にも関心が集まっている。連携には大別して、(a) OPECに始まり、環太平洋パートナーシップ協定（TPP）や二国間クレジット制度などの多岐に渡る複数国際間の社会・経済的な制度設計、(b) 国際間の長距離送電線やパイプラインなどの国際間のエネルギー輸送インフラ整備に関わるもの、などがある。対象国としては、EU、ASEAN、South Asian Association for Regional Cooperation（SAARC）、中東、東アジア、先進国と発展途上国の組合せ、などがその目的に応じて取り上げられる。モデル化の手法としては、上記の国を対象としたモデル化手法が利用されるが、近年話題となっているバイオマス、水素、電力等の国際間輸送のように、技術的な因子を無視できない国際連携も評価対象となる。

(3)-3 電源計画と電力システム評価

エネルギーシステム評価において電力需給システムはやや特徴的な性質を持つ。これは、①電力の貯蔵には制約が大きいこと、②送配電は交流でなされているので、常に需給バランスがとれ、周波数が厳格に管理されていなければならない、③電力需要は、季節・日間で大きく変動し、さらにより短時間でも変化することがある、などの需給双方の特性のためである。揚水発電は大容量であるが、貯蔵効率が約7割にとどまり、現在、運用コストの安価な原子力発電による夜間の揚水運転が限定的で経済運用が困難な状況にある。蓄電池は電源と比べて応答は速いが、容量が小さく、寿命が短く、現状では経済性に難がある。電源は需要に合わせた運転が必要だけでなく、周波数や電圧管理のための設備と運用が不可欠である。

需要変化が時間オーダーで起こり、それが事前にわかっている条件下では電源は可変費が安い順に運転を行い（メリットオーダー）、系統全体では予測されるピーク需要に適正な予備力を加えた設備を用意するのが合理的なことが自明である。ただし、太陽光発電（PV）や風力発電など変動電源が主力電源化する段階では、

電力の需給構造が大きく変化し、従来のように夏季午後あるいは冬季点灯時に最大需要が発生するとは限らず、年間を通じて供給信頼度を適切に確保する必要性が高まっている。需要家に電力を送るには、電力流通設備の容量制約を考慮することになる。このような「上流から下流へ」エネルギーが流れる単方向ネットワークフローの想定では、電源計画は先のボトムアップアプローチと基本的に同じような数理モデルで評価可能である。しかし分散型電源が需要家側に導入され、送配電系統側に逆方向のフロー（逆潮流と呼ぶ）が発生すると話は単純ではなくなる。まず既存の流通設備はそのような逆潮流を想定していない。第2にネットワークが周波数成分とフィードバックループを持つ場合、停電が急激に広範囲に拡大するようなシステムの安定性の問題が発生する。電源システムのエネルギーシステム評価では、マクロでのエネルギー需給バランスのシステム評価と、短期あるいは瞬時のシステム安定性の問題を同時に扱うことはタイムスケール上も空間スケール上も極めて困難なため、両者は独立に評価されてきた。しかし、両者にまたがる問題も近年発生してきた。再生可能エネルギー、特にPVや風力発電の急速な拡大は世界的なトレンドである。日本においても2012年のFeed in Tariff (FIT) の導入と世界的な太陽電池パネルの価格低下とによりPVが急速に拡大した。PVも風力発電も天候により短時間で出力が変化してしまい、給電指令が効かない。周波数が大きく変動してしまうので、瞬時に供給を適切に調整する必要がある。もし発電設備がタービンなど回転機で構成されていると、わずかな変化なら自動的に吸収する特性（GF）があるが、ある程度以上大きな変化が要求される場合は負荷周波数制御（LFC）による調整を必要とする。さらに変動電源は本質的に出力予測誤差があるため、従前以上の十分な予備力を確保できないと、系統全体が不安定化することになる。そこで、電源計画モデルもエネルギー量の需給バランスと総コスト最小化だけでなく視点を導入する必要性が生じた。まず地域の細分化と時間的な解像度の詳細化により変動電源出力と需要の変動を明示的に扱う拡張がなされた。これによりPVの導入拡大に対する最適な蓄電設備の導入量を合わせ評価できる。この代表的なモデルが藤井らによる研究⁹⁾であり、時間解像度は10分、地理的解像度は全国352地点、基幹送電線441本を扱う線形計画の年間運用モデルで、規模は約2億の制約条件式と約1.5億の変数から構成される。やや簡易化された方法として、変動電源の容量に対するタービン発電機の容量を一定値以上にする慣性力制約を加える方法がある。

これに対し、もともと中小規模の電気事業者が多い米国や国際的な送電ネットワークを持つヨーロッパでは、水力など余剰電力の相互融通のために市場メカニズムを利用した管理システムを構築してきた。この中には、電力供給者から積極的に価格情報を消費者に流すことで需要をある程度調整しようとする需要側管理(DSM)と呼ばれる考え方が存在する。これは電力市場の形態を「需要に応じた生産」から「需要と供給のオークション」取引に変えるものである。消費者も自ら直接、あるいは家庭エネルギー管理システム(HEMS)や建物エネルギー管理システム(BEMS)ベースの自動化デマンドレスポンス(Demand Response: DR)システムにより自動的に需要を調整する。ある程度以上需要が超過して価格が上昇すれば、予備電源の保有者も電力市場に参加して供給を増やす。この結果、電力量の直物・先物取引だけでなく、予備的設備の保有も取引の対象となる容量市場など金融市場の方法が取り入れられてきた。この場合のエネルギーシステム評価は、上記のいずれとも異なる接近法が必要となり、物理的なエネルギーシステム評価の枠を超えたオプションやボラティリティなど金融・証券市場の方法の適用と評価例が数多くみられるようになっている。日本では市場制度の整備が欧米に比べると遅れているため、実証研究よりも数理モデル研究が先行しているが、今後の電力市場制度の進展を鑑みると、日本でも検討すべき課題である。

変動電源の連系量増加によって、周波数制御や需給バランス調整のための調整力必要量が増え、従来電源以外の調整資源(蓄電池やDRなど)が必要となる可能性がある。変動電源大量連系下での需給バランス維持のために、需要側資源を経済的に活用する研究が始まっている^{9),10)}。今後、変動電源の出力予測の分布を

考慮し、需要家が保有する分散型エネルギー資源を系統と統合して、経済的に再生可能エネルギー電力を主要な供給力として使っていくための計画手法、運用制御手法の開発がより重要になる。

(3)-4 地域エネルギーシステム

分散電源の拡大とエネルギー利用機器の拡大は、ミクロな地域レベルで見るとさらに異なる様相と課題をもたらしている。国全体の一次エネルギー消費削減や温室効果ガス削減が目的となる国レベルおよび電力システムの低環境負荷・低コスト・需給安定が目的となる電力システムレベルと、省エネルギーと建物に統合された再生可能エネルギー・分散型エネルギーシステムの導入によるネット・ゼロ・エネルギー化が目的となる建物レベルの間であって、地域レベルのエネルギーシステムの目的は従来明確では無かったが、近年 Smart Community、Smart City、Community Energy Management (CEM) 等の概念が出現し、また自治体が主導する低炭素まちづくりというニーズもあって、地域エネルギーシステムとの研究開発に対するニーズは近年高まっていると言える¹¹⁾。通常、地域エネルギーシステムで取り扱われるのは、太陽エネルギー・地熱・小規模水力・バイオマスなど地域の再生可能エネルギー資源の供給、都市廃熱の活用、都市規模の熱併給発電、それらを含めて最終エネルギーを熱の形で建物に供給する地域熱供給システム(ヨーロッパや中国など寒冷地では地域暖房、日本など温暖地では地域冷暖房、シンガポール等では地域冷房も見られる)、分散型発電を含み広域の電力システムからの供給を含めて電力需給の最適化を図る地域の電力マネジメントシステム、都市ガス・石油類・近年では水素システム等を含む燃料供給システムと、建物(電気自動車への供給を含む)その他の部門の最終エネルギー消費を都市レベルにアグリゲートした都市の最終エネルギー需要である。

空間スケールがミクロになるにつれ、エネルギーシステムも個別の機器特性や需給パターンが詳細化され、さらに省エネルギーのオプションも具体的になる。例えば、農村部ではバイオマスの供給ポテンシャルが供給の時期と量、さらに質を合わせて検討されねばならない。畜産や農業廃棄物の利用システムも同様で、収集から変換まで具体的な調査と評価を必要とする。都市部では産業排熱の利用だけでなく、ヒートポンプ技術の向上により河川熱や地中熱、さらに地下鉄排熱のような未利用熱源利用の可能性も視野に入る。省エネルギーオプションもゼロエネルギービル(ZEB)やゼロエネルギーハウス(ZEH)が提案するようなダブルスキン、LEDタスクアンビエント、ライトシェルフなどの省エネルギー建築技術などの効果も検討課題となる。

廃棄物利用では、バイオマスだけでなく回収廃プラスチック再利用も重要課題であるが、ここでは燃焼によるエネルギー利用だけでなく、原料としてのマテリアルリサイクル、そのほかの化学的変換プロセスによるケミカルリサイクル、埋め立てなどエネルギー以外の処理方法の相互比較が資源、経済性、エネルギー効率、環境負荷、最終処分量など複数の視点から検討されねばならない。したがって、エネルギーシステムモデルも、単なるエネルギー変換だけでなく、マテリアルバランスやプロセスの温度、場合によっては圧力など化学工学的な評価を必要とするなど、熱利用でも特に熱輸送が含まれると温度や圧力など熱力学的側面が必要となる。このため、古くから評価はしばしばエネルギーだけでなくエクセルギーやエンタルピーからなされる。このように、ここでも単一の基準では不十分なものとなる。

地域エネルギーシステムでは、ヒートポンプや発電機などエネルギー機器の導入台数も数台単位となるため機器の運転特性も考慮されねばならない。例えば、大型エンジンを小出力で運転すると効率は大きく低下し、ある程度以下では停止してしまう。一般に、エネルギー機器は部分負荷状態では定格運転時の効率を発揮できないことが多く、地域エネルギーシステムではこの影響が大きくなる¹²⁾。しかしこのような特性はしばしば非線形かつ不連続関数となるため、数理モデル上は急激に定式化・求解とも困難さが増す。

このように地域レベルのエネルギーシステム評価は、基本的にボトムアップモデルをベースとして建築学、都市工学、化学工学、農学、機械工学、電気工学をはじめとする幅広い分野が担ってきた。特に、地理情報システム（GIS）の普及により、詳細な地理データが利用できるようになったことから日本でも東京、大阪、名古屋など大都市を対象とした詳細な分析が可能となった。反面、エネルギー利用状況の詳細なデータは、企業や個人の情報保護の観点から未公開なことが多く、システム評価のボトルネックとなっている。

次世代のエネルギーシステム要素技術として特に注目されるのが電気自動車（EV）と電力系統との連携（V2G）である¹⁰⁾。(3) -3で述べたようPV出力の変動性の吸収には蓄電池が有効であるが、駐車中のEVの蓄電池を利用できれば追加的な費用は大幅に削減できることが期待できる。ただし充電と走行の時間スケジュールに注意しなければならない。これを考慮するには、特定地域の大量の自動車の詳細な走行データとその分析が必要となる。情報技術の発展により、このようなビッグデータの収集と活用は現実のものとなりつつあるが、まだエネルギーシステム評価研究としては限定的である。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

ここでは各レベルにおけるエネルギーシステム評価を実施する際に対象となるエネルギーシステム自体の注目動向を中心に述べる。

(4)-1 グローバルレベルエネルギーシステム評価

グローバルレベルのエネルギーシステムについて、近年、いくつかの大きなインパクトがあった。まず2010年付近からの米国のシェールオイル・シェールガスの急速な開発の進展、次いで太陽電池パネル価格の急速な低下、そして2016年のパリ合意発効は世界のエネルギーシステムに大きな影響を与えている。

温暖化対策として近年注目される技術に、ジオエンジニアリング¹³⁾がある。大気中へのCO₂排出を0に近づけるだけでなく吸収により「負の排出」を実現しようとするものと、より直接的に太陽放射への介入を通じて大気温度そのものを制御しようとするものがある。前者は、さらにバイオマス燃焼と排気ガス中の炭素回収隔離を組み合わせたものでBECCSと称されるシステムと、さらに直接大気からCO₂を回収し貯留するDirect Air Capture (DAC) 技術などが提案されている。いずれも、CO₂の分離、圧縮、地下あるいは深海への圧入貯留などの要素技術は確立したものであり、現時点でのコスト、エネルギー消費などは推計値の報告例は多い。ことにBECCSは(3) -1で述べた地球温暖化対策のモデル比較では、2100年2°C目標達成のためには不可欠あるいは極めて高い優先度の技術となっている。

後者の直接的温度制御として、成層圏に硫酸などエアロゾルを散布し、直接地表へ到達する太陽光エネルギーを制御しようとする技術（Solar Radiation Management : SRM）がある。コスト試算がいくつか報告されているが、問題点はコストよりもむしろ結果の不確実性と社会的受容性にみられている。

近年のゼロエミッション低炭素エネルギーシステムの要請に応えるには、重量車、航空機、船舶、素材産業でのゼロエミッション化が大きな課題である¹⁴⁾。

(4)-2 国レベルのエネルギーシステム評価

国レベルのエネルギーシステムは社会経済の動向と政策により大きく変化する。近年では、まず、化石燃料から再生可能エネルギーへのシフトを念頭に置いた際の二次エネルギー（エネルギーキャリア）の将来に関する議論が活発である¹⁵⁾。現状では天然ガス・バイオガスに加えて、再生可能エネルギー電力と水素が

その代表格であるが、その国内・国際間輸送がエネルギー変換技術、エネルギー貯蔵技術や二酸化炭素分離貯留技術（CCS）と組み合わせられて多様なシステムが設計、評価されている。また、エネルギーと経済の相互関係における新たな要因として、情報技術の進展が大きく影響し始めている。ICTの進展に伴って、スマートグリッド、スマートエネルギー、スマートタウンなど、「スマート」と付く様々なシステムを近年目にする機会が増えた。これらは必ずしも明確に定義された学術用語ではないが、PVやコジェネレーションシステムなど分散エネルギー機器を持つ需要家と大規模事業者だけでなく中小規模の発電事業者、あるいはEVとの接続までを含むさまざまな供給者を情報技術で連携し、最も効率的な需給マネジメントを実現しようとするものである。情報技術とAIの発展は、ネットワークの運営管理だけでなく料金の瞬時的な変化（dynamic pricing）の反映や詳細な課金システムも可能とした。例えば、EVやPHVなどの充電を他人の建物で行っても、常に課金が「家の所有者」でなく「自動車の使用者」になされるなら建物の電源コンセントの開放の可能性は広がる。このような広範囲の連携は、東日本大震災後に問題となった災害時の対策にも寄与する。

「スマート」に関しては近年特に注目が集まり、情報技術の寄与の可能性は様々に論じられており期待も大きい。システム全体としての定量的評価はまだ道半ばである。個人情報扱いが難しく需要家の行動が不明なことと、EVがまだエネルギーシステムと連携するに至っていないことが大きい。データ活用の仕組みづくりと今後の研究課題となっている。

(4)-3 電源計画システム評価

原子力発電利用の再開・拡大が困難な中、電力セクターのCO₂排出削減を進める必要があるため、PV、風力など変動電源利用の拡大は今や不可避である。そのため、需給のエネルギーバランスだけでなく系統運用の安定化の課題は急速に上昇している。対応策として、技術面と制度面からの展開がある。

技術面では、蓄電システムの開発・普及がある。蓄電池は、容量-体積比（重量比）の改良を目指す大容量化（ただし寿命は5000回の充放電サイクルを基準とする蓄電池）と短周期的な充放電サイクルに強い蓄電池、さらには瞬時的応答に強いキャパシタや超電導エネルギー貯蔵装置など電池以外のシステムの寄与も次第に増加する。これらの技術進歩と価格低下により、エネルギーシステム上の制約は大きく緩和する。

近年では、特にリチウムイオン電池のコスト低減は著しいが、電力を制御するための半導体機器はなお安価とは言えず、次世代電力システムの評価への影響は大きい。

制度面では、前述の新たな需給調整市場の設立と活用や分散型エネルギー資源（DER）アグリゲーションビジネスの進展に依存するが、これらによる経済効果、環境面への寄与などは、不確実性の高さからまだシステム評価に至っていない。

近年のトピックとして、変動電源の急激な増加に対して、送電容量の不足から接続が待たされる状況が現れたことがある。送電系統はピーク需要と事故に備えた容量が必要であり、このため設備利用率が制約される。この点は世界共通である。ただし欧州では日本ほど台風や地震の災害リスクが大きくないことや国際的な多連系送電網の存在から迂回路が多くなる。日本は供給信頼度重視の思想で、地域ごとの送電系統の独立性の高さから連系線容量制約が生じやすい現状がある。欧州では、送電空き容量の利用を高めるため「コネクト&マネージ」という制度が導入されている。日本政府および一般送配電事業者は、「日本版コネクト&マネージ」の導入を進めようとしているが、どの程度の追加効果があるかまだ不明である¹⁶⁾。

(4)-4 地域レベルのエネルギーシステム評価

PV、風力発電、バイオマス等再生可能エネルギーなどは地域に分散して導入され、基幹系統に接続される

とは限られない。中小規模では 66kV の二次系統や 6.6kV の配電系統に接続されることも多いことから、電力の「地産地消」をめざす流れが生まれている。この場合、大規模電源よりも kWh あたりでの発電費用は上昇するものの、送配電損失を抑制し、ネットワーク制約を緩和できるマイクログリッド的なものが普及すれば、ある程度地域内で需給を均衡し、地域共生型再生可能エネルギー電源の割合が増えれば、地域雇用の確保につながり地域生産人口流出対策になりうる点に期待がされている。地場産業の育成を含む地方活性化の一環として期待がされているが、補助金依存にならないような施策がなければ事業としては持続可能とはならない点に注意が必要であり、レジリエンス強化など社会的メリットの定量的な可視化が住民理解促進上、重要である。

従来、都市レベルでのエネルギー供給システム評価では熱供給を中心に議論がおこなわれてきた。しかし、燃焼型の都市コージェネレーションシステムを主体とするヨーロッパ等での地域暖房システムに対し、日本に多く見られるように一般ビルの空調熱源システムを拡大した形の地域冷暖房システムでは建物側のセントラル空調システムの減少、パッケージエアコンシステムの高効率化と普及という状況下でその普及にブレーキがかかり、また、地域暖房システムに対しても高断熱型のゼロエネルギー建築の普及に伴う地域の熱需要密度の低下により熱供給システムの優位性の低下が懸念されている。それにかわって、電力需給を主体としたスマートコミュニティシステム、再生可能エネルギー出力変動を吸収するために製造された水素エネルギーシステムなどが注目されるようになってきている。近年、自治体レベルの温暖化対策評価などを目的とした、都市最終エネルギー需要のシミュレーション技術開発が世界的な潮流となっている¹⁷⁾。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

エネルギー、環境技術関連のプロジェクトは国内外に数多いが、エネルギーシステム評価におけるプロジェクトは限られる。グローバルレベルにおいては、(3) -1 で述べたモデル比較プロジェクトが進展中であり、12モデルが集まった ADVANCE (2013-2017)、バイオマス起源の無機炭素と有機炭素排出に着目するスタンフォード大学 EMF-30/33 (2013-2016) の 16 プロジェクトからなる MILES (2015-2016)、CD-LINKS (2015-2019) などがあり、いくつかは活動を継続している。国内においては、エネルギーシステム評価そのものを対象とするプロジェクトは、国立環境研究所の AIM と地球環境産業技術研究機構の ALPS-III が注目される。なお、AIM は世界だけでなく元来アジア地域を対象とする経済-環境評価プロジェクトであったことから世界各国との研究ネットワークを構築し、中国やインドネシアでは自国の評価モデルを開発している。さらに、各種のモデルの取り組みを含めて、モデルを相互比較しようとするプロジェクトも始まっている。ヨーロッパでは、ロシアや中東、北アフリカとのエネルギー相互依存ネットワークが古くから構築されており、天然ガスパイプライン、石油パイプライン、国際送電網が広範囲に各国を接続している。同時に、国際河川管理や環境管理の体制も長い歴史を持つことから、地球温暖化問題だけでなくエネルギー安全保障の視点、さらに再生可能エネルギー利活用についても欧州委員会としての政策を打ち出している。

地域エネルギーシステムに関しては、日本の次世代エネルギー・社会システム実証事業 (2010-2015) において、横浜、豊田、京阪奈、北九州の 4 都市でスマートコミュニティの実証事業が実施され、複数の後継プロジェクトがあり、ヨーロッパでは EU による CONCERTO (2005-2010)、Smart cities and communities があり、前者は省エネルギー都市のパイロットプロジェクト、後者は都市におけるエネルギー・運輸・ICT などの分野融合によるイノベーション創出を目指している。

DER を活用する新しい統合エネルギーマネジメントシステム (EMS) については、CREST 研究領域「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」(2019 年度終了) において主に理論面から次世代協調型 EMS 実現手法などが創出された。現在、内閣府戦略的イノベーション創

造プログラム (SIP)「IoT 社会のエネルギーシステム」において2022年度までにエネルギーシステムのグラウンドデザインと地域エネルギーシステムデザインのためのガイドライン策定を目指している。

(5) 科学技術的課題

- エネルギーシステム評価における技術的課題としては、以下のものが挙げられる。
 - ①検証作業 (複数のモデルを利用したレビューなど)
 - ②数理計算モデル上の技術課題 (非線形効果の導入、混合整数解の解法、モデルの定式化、求解の困難化など)
 - ③エネルギー量だけではない多面的視点からの評価方法 (政治的リスク、事故リスク、不確実性、エネルギーの質的側面、PVなどの短期周期変動性、地域におけるマテリアルバランスなど)、
 - ④電力の市場取引化による数理モデル評価 (および実証試験) などが挙げられる。

また、グローバルレベルから地域レベルを通じて、いくつかの新しい動向に対して、その影響が予測できない、あるいは分析に用いるデータがほとんど入手できないことがエネルギーシステム評価を行う上で大きな障壁となっている。主要な課題は以下の通りである。

- 需要サイドの問題：エネルギー供給技術については多くの開発課題と進展があるが、エネルギー需要に関しては基盤となるデータ、方法論とも限られている。例えば、マクロレベルでの電力消費は与えられても、時刻別・世帯別・地域別のような細分化されたデータは公開されていない。現在、スマートメーターデータの活用の仕組みが整備され始めた段階である。冷房など用途別需要がどのように変化するかはシステム評価上重要な課題であるが、利用可能な気象データは限られている。ヒートポンプ技術の向上により河川熱や地下熱など未利用エネルギー源が実用化される段階となったが、これらは広域に存在するものではなく局所性が高いので、需要の詳細なデータとのマッチングが不可欠である。輸送需要に関しても同様であり、時刻別・目的別需要などは個別調査によっている。日本においては、少子高齢化が予想されているが、これによりエネルギー消費がどちらに動くのかはなおシナリオに依存している段階である。世界的に見ても、例えば地域内交通の分析に必須のOD需要データは、国際輸送には存在しない。自動車会社などが保有する走行データなどが広く学術目的・公共目的に利用できる環境が必要である。
- 情報化の影響：先の詳細な需要データの必要性とも関係するが、情報技術の進展により個別の活動状況の収集は可能となっており、効率的なエネルギー利用が期待されている。近年注目されるシェアエコノミーにはこの情報技術インフラが不可欠であるが、この進展がどこまでエネルギーシステムに変革を起こすのかは現在、議論が緒についたばかりである。
- スマートエネルギーネットワークの可能性：需要側管理を含めた新しいエネルギー需給ネットワークシステムへの期待は特に都市部や近郊都市で大きい。前述のように EV/PHVのエネルギーネットワークへの参加はきわめて大きなインパクトを持ち、ことに自動運転が導入されれば、モビリティ需要やエネルギー需給構造とも大きな影響を受けると予想される。しかしそれがどのような形で、どのレベルのものなのかは現時点ではシナリオとしての議論にとどまっている。カーシェアリングは効率的な自動車利用をもたらすであろうが、同時に新たな需要を生むというリバウンド効果が予想されるため、全体的な影響については社会実験と実証モデルの開発と検証が必要である。
- 地産地消型エネルギーシステムの可能性：地方創生の観点からの再生可能エネルギーの拡大と「地産地消」

の方向性は、脱炭素社会の在り方の一つとしてしばしば語られる。その場合、ある程度地域内で需給が閉じていれば雇用の確保につながり人口の減少に対策になりうる点、地場産業の育成を含む地方の活性化の一環として期待がされる一方、補助金依存にならないような施策がなければ事業としては持続可能とはならない点に注意が必要であり大きな課題となっている。

(6) その他の課題

エネルギーシステム評価において、需要データやエネルギー利用状況の詳細データなどが必要となるが、それらは個人情報保護法との兼ね合いがあること、またそのデータが共有化されていないことが課題となる。また地域エネルギーのデータについては個々に調査しているものの統合化されていない課題となっている。

さらにこの研究領域はきわめて分野横断的であるだけでなく、地域の在り方と国際的な温暖化対策、ミクロレベルのエネルギー需要と国際エネルギーネットワークなど空間スケールの横断性、また地球温暖化と短期的な変動電源の関係性など時間スケールの温暖性など幅の広い視点が不可欠である。さらに制度の社会的需要なリスクの認知など、人文・社会科学的知見の必要性や情報技術の進展の影響などの分野横断性は特に必要である。しかしながら、このような分野横断的なシステム研究は一例例えばかつての科研費の重点領域のようなテーマは現状では取り上げられず、全学術分野を結集した取り組みが不可欠であるにもかかわらず、横断的視点の必要な若手人材の確保が困難となっている点が課題である。

(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	○	→	●エネルギーシステム評価は通常の技術開発とはやや性格が異なるが基礎研究に相当するのが現状調査、データ収集であるとするなら大都市を中心に様々な調査がなされている。
	応用研究・開発	○	→	●地球温暖化統合評価モデル開発は、NIESのAIM,RITEのALPS-III、エネルギー総合工学研究所のGRAPEなどが継続して情報発信している。ただし、新規の参入がやや少ない点が懸念事項である。 ●分散型エネルギー資源を統合する将来の電力システムの最適計画や運用手法に関しては、IEEEやCIGREなどの場で取り上げられ、日欧米で研究が進展している。日本独自の取組みも見られ、欧米とは異なる気象条件（高温多湿下での空調需要管理）や生活様式、電力需要が伸びている点でアジアから注目される。
米国	基礎研究	△	→	●温暖化研究は政治的影響を受けたが、大学の研究所、EPAなど政府機関の活動は継続しているように思われる。ただしエネルギーシステムの研究は維持されている。再生可能エネルギー支援では、NSFなどが大学に資金供給し、電源系統とEVの連携（Vehicle grid integration）評価など興味深いテーマも見られる。
	応用研究・開発	△	→	●温暖化研究は政治的影響を受けたが、大学の研究所、EPAなど政府機関の活動は継続しているように思われる。電力市場などの展開においては活動が継続している。 ●再生可能エネルギー統合研究では、DOE傘下の国立研究所を中心に研究が進展している。

2.1 俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●輸送部門における内燃機関車からの離脱とEVの推進など、やや方向性にぶれが生じている印象があるが、カーシェアリングなど情報技術との連携は進められているので全体としては横ばいと思われる。 ●(ドイツ) PIK (ポツダム気候変動研究研究所) は温暖化対策を念頭に置いた研究を続けている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●欧州では歴史的に国境を越えたインフラの連携がなされている。特に電源系統では、再生可能エネルギーの導入と国境・事業者をまたぐ系統運用や新たな市場の誕生とともに、新しい管理・運用形態リスクへの対応などの実証研究が進んでいる。 ●(英国) グリーンディールなど温暖化対応の低炭素エネルギー利用の社会的制度の導入などにもない、独自性のある研究報告がある。ただし、これらは国情の違いによるところが大きく、直ちに研究の開発状況の高低を意味するとは言えない。 ●(ドイツ) 再生可能エネルギーの大幅拡大によるシステム運用研究は継続している。 ●国際応用システム解析研究所 (IIASA: オーストリア) は世界のエネルギーシステムと気候変動対策、環境影響評価の研究の中核的機関の一つであり、中長期的視点から技術イノベーションをはじめ注目すべき活動を継続している。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●学術誌への投稿論文は多く、大学を中心に様々なエネルギーシステムの調査が報告されている。 ●米国の大学と共同で統合エネルギーシステムに関する研究が進行している。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●輸送部門では情報技術の進展を具体的に応用するとともに環境問題へも言及がある。ただ、大都市と地方では研究に濃淡がある印象がある。 ●電力システム分野では、国家电网等政府機関・企業がリードして、再生可能エネルギー統合、EV活用、スマートコミュニティ、デジタル化 (IoT, Big data, AI) 応用研究が進んでいる。
韓国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●政府が支援して、大学でスマートグリッド、マイクログリッド研究が行われている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●サムソンなど主要メーカーがスマートグリッド、スマートコミュニティ関連や新しい電力・エネルギーシステムに関する産学連携研究を行っている。 ●以前はエネルギーシステム評価研究はさほど盛んではなく研究論文も限られていたが、この10年の間に国際学会での発表や論文数が増加している。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1~2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・電気エネルギー利用 (エネルギーマネジメントシステム) (環境・エネ分野 2.1.8)
- ・パワー半導体材料・デバイス (ナノテク・材料分野 2.1.3)

参考・引用文献

- 1) Gabriel Blanco et al., "IPCC-AR5-WG3, IPCC Fifth Assessment Report, WG-3 Full report, Figure 6.21", https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf (2021年1月21日アクセス)
- 2) S. Fujimori, T. Masui and Y. Matsuoka, *AIM/CGE [basic] manual-Discussion paper series No.2012-01* (Center for Social and Environmental Systems Research, NIES, 2012), <https://www.gio.nies.go.jp/social/dp/pdf/2012-01.pdf> (2021年1月21日アクセス)
- 3) 地球環境産業技術研究機構(RITE), <https://www.rite.or.jp/system/research/new-earth/dne21-model-outline/> (2021年1月21日アクセス)
- 4) A. Kurosawa, "Multigas Mitigation : An Economic Analysis Using GRAPE Model," *The Energy Journal* 27, Special Issue : Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy (2006) : 275-288, <https://www.jstor.org/stable/i23297028>
- 5) Shunsuke Mori, Keisuke Miyaji and Kazuhisa Kamegai, "CCS, Nuclear Power and Biomass An Assessment of Option Triangle under Global Warming Mitigation Policy by an Integrated Assessment Model MARIA-23," *Energy Procedia* 37 (2013) : 7474-7483. DOI : org/10.1016/j.egypro.2013.06.691
- 6) International Energy Agency, *A Group Strategy for Energy Research, Development and Demonstration*, (Paris : Organization for Economic Co-operation and Development, 1980)
- 7) 川崎研一, 『応用一般均衡モデルの基礎と応用』(日本評論社, 1999), 応用一般均衡モデルの基礎と応用—経済構造改革のシミュレーション分析-川崎-研一 <https://www.amazon.co.jp//dp/453555188X> (2021年1月21日アクセス)
- 8) 杉山達彦, 小宮山涼一, 藤井康正, 「全国の電力基幹系統を考慮した最適電源構成モデルの開発と太陽光・風力発電大量導入に関する分析」『電気学会論文誌 B』136巻12号(2016) : 864-875. DOI : org/10.1541/ieejpes.136.864
- 9) 高橋雅仁, 「再生可能エネルギー電源出力の不確実性を考慮した柔軟性資源計画モデルに関する研究」『電気学会電力技術研究会資料』PE-17 (2017) : 109-112. (2021年1月21日アクセス不能)
- 10) 吉岡七海, 浅野浩志, 坂東茂, 「制御参加率を考慮した電気自動車の充放電制御による系統柔軟性確保の経済性評価」『電気学会論文誌 B』39巻12号(2019) : 713-721, DOI : 10.1541/ieejpes.139.713
- 11) Takaaki Furubayashi and Toshihiko Nakata, "Cost and CO₂ Reduction of Biomass Co-firing Using Waste Wood Biomass in Tohoku Region, Japan," *Journal of Cleaner Production* 174 (2018) : 1044-1053, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.041>
- 12) 坂東茂, 渡辺裕己, 浅野浩志, 辻田伸介, 「電力・熱負荷特性がマイクログリッドにおける電源システム機器容量設計に与える影響について」『電気学会論文誌 B』128巻1号(2008) : 67-74. DOI : org/10.1541/ieejpes.128.67

- 13) 杉山昌弘,「技術で地球は変えられるか? -気候工学(ジオエンジニアリング)-」『計測と制御』56巻 (2017), https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=201702261209654137
- 14) Steven J. Davis et al., "Net-zero Emissions Energy Systems," *Science* 360, no. 6396(2018) : eaas9793. DOI : 10.1126/science.aas9793
- 15) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 『NEDO 再生可能エネルギー技術白書』1 版 (総合エネルギー出版社 エネルギーフォーラム, 2010), https://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_2010_index.html (2021年1月21日)
- 16) 資源エネルギー庁 『系統制約の緩和に向けた対応』(2018), http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/002_02_00.pdf (2021年1月21日アクセス)
- 17) Christoph F. Reinhart and Carlos Cerezo Davila, "Urban Building Energy Modeling – A Review of a Nascent Field," *Building and Environment* 97(2016) : 196-202. DOI : org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001

2.1