

2.5.2 エネルギーシステム・技術評価

(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。

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する。それぞれの空間スケールで評価の目的や課題が異なり、評価方法もそ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

エネルギーモデル、応用一般均衡モデル、統合評価モデル、電力システム、自然変動電源、デジタル化、脱炭素化、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

(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は、電気や石油などの様々なエネルギーと多数の工学的変換プロセスで構成される複雑な物流の需給体系であるとともに、その構築には、多様な利害関係者の合意と莫大な投資を伴う公益性の高い社会インフラでもある。エネルギーに関する技術選択や政策立案は、世界的にも主要な政治的関心事となっており、科学的根拠に基づく透明性の高い評価の必要性が高まっている。日本では、エネルギー安全保障、地球規模および地域規模の環境問題、経済性、更には安全性も含めた様々な観点からのエネルギーシステム評価が必要とされている。このようなエネルギーシステムが直面する新たな課題に対応するため、最新のシステム工学に基づくエネルギー需給モデルの構築が求められるとともに、それらを活用した社会受容性の高いエネルギー環境政策立案や普遍性の高い論理や価値基準の導出も望まれる。エネルギー需給モデル構築の主な目的は、エネルギーシステムの定量的評価であるが、それ以外にモデル作成過程においてエネルギーシステムに関する理解を深められること、将来のエネルギーシステムを抽象概念として認識するための共通の枠組みや議論のたたき台を提供できることも挙げられる。

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、原子力利用などの石油代替エネルギー、地球温暖化（気候変動）への対応のため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。更に、最近ではエネルギー需要をそれを発生させる人間の行動レベルにまで分解して評価しようとする研究もある。

[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しも恩恵を受けられるものの、一般的に供給密度が低く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。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く、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、ここには技術的コスト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。

(3) -1 エネルギー需給モデル分析関連

最初の国家レベルの本格的なエネルギーモデルとして、1960年代の後半にアメリカの原子力委員会が高速増殖炉の開発に使ったモデルが挙げられる。当時としては大規模な線形計画モデルであった。線形計画法の石油産業や電気事業の設備投資・運用計画への応用はそれよりも前の1950年代に始まっている。

1970年代の二度の石油危機を経て、石油価格上昇が経済に与えるインパクトの分析や、地球規模でのエネルギー資源枯渇に備えた新供給技術の導入可能性の分析が1980年代前半頃にかけて盛んに行われるようになった。この頃、オーストリアの国際応用システム分析研究所 (IIASA) のMESSAGEモデル (世界モデル) や、国際エネルギー機関 (IEA) のMARKALモデル¹⁾ (一国モデル) といった、現在でも活用されているエネルギーモデルの原形が開発された。これらは、多数の技術導入効果を積み上げるボトムアップ型のモデルであり、システム総コストを最小とするエネルギーシステム構成を導出できる。また、エネルギーシステムと経済全体の相互作用を評価するモデルとしては、経済統計データの多変量解析を通してトップダウン的に導出される連立方程式の体系として実現される計量経済モデルが主に利用された。また、1976年にはスタンフォード大学にエネルギーモデルを比較検討の場としてエネルギーモデリングフォーラム (EMF) が設立され、その活動は現在も継続されている。

1980年代中頃からエネルギーシステムからの二酸化炭素 (CO₂) 排出量を評価するためのエネルギー経済モデルが主に米国の研究機関や大学で開発され始め、1988年の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の設立以来、CO₂を中心とする温室効果ガス (GHGs) 排出削減対策の評価研究が日米欧という先進国を中心に世界的になされるようになった。エネルギー経済モデルに関しては、前述の計量経済モデルに加えて、計算技術が進歩したことから産業連関表の概念を拡張した応用一般均衡モデルも実用的に利用されるようになった。消費者効用を最大化するエネルギー経済状況を導出でき、炭素税や排出規制の導入影響を評価できる。パーデュー大学が作成した国際貿易と産業連関に係るデータ、国際貿易分析プロジェクト (GTAP) に基づくマサチューセッツ工科大学 (MIT) による、経済予測と政策分析 (EPPA) モデルが代表例である。

エネルギー経済モデルと環境影響評価モデルなどを統合的にリンクさせたモデルは、統合評価モデル (IAM) と呼ばれる。2022年に発表されたIPCCの第3作業部会の第6次評価報告書には、世界から50を超える統合評価モデルが参加するに至った。日本からは、国立環境研究所 (NIES) のAIMモデル²⁾、地球環境産業技術研究機構 (RITE) のDNE-21+モデル³⁾、エネルギー総合工学研究所 (IAE) の地球環境統合評価 (GRAP) モデル⁴⁾が参加している。2008年に結成された中期目標検討委員会 (日本政府内閣官房の地球温暖化問題に関する懇談会の分科会) では、我が国の2020年のGHGs排出量に関する具体的な目標案の検討がなされた。そこでは、AIMモデルやDNE21+モデルなどの国内の研究所や大学などが所有

する複数のモデルが、目標案検討のための数学的な道具として政策決定の表舞台に現れ、提示された排出目標案に対して具体的な個別政策の効果などの定量的な情報を提供した。さらに、2021年10月に日本政府は2050年のカーボンニュートラル実現を念頭においた第6次エネルギー基本計画を発表した。その総合資源エネルギー調査会基本政策分科会における審議過程では、DNE21+モデルによって計算された定量的な長期エネルギー需給シナリオに基づく議論がなされ、本領域の研究成果が日本政府のエネルギー政策立案に貢献した具体例となった。

(3) -2 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こと、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、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。

需要変化が時間単位で発生し、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は自明である。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時間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いる。PVや風力発電などの再生可能エネルギーの急速な拡大は世界的なトレンドであり、日本においても2012年の固定価格買取制度(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ため、瞬時に供給を適切に調整する必要がある。発電設備がタービンなど回転機で構成されている場合、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る。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、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ようになった。この代表的なモデルが東京大学による研究⁵⁾である。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(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きている。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。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^{6), 7)}。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) -3 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、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GHGs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において、これまで地域レベルのエネルギーシステムの目的は明確では無かったが、近年地域エネルギーマネジメント(Smart Community、Smart City、Community Energy Management等)の概念が出現した。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の概念とその研究開発に対するニーズは近年高まっている⁸⁾。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、および建物(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、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。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⁹⁾。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。しかしながら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 (ビークルトゥグリッド: V2G) である⁷⁾。(3) -2 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]

(4) -1 エネルギー需給モデル分析関連

自然変動電源の大量導入の経済性評価には、火力発電など柔軟な運用、余剰電力の貯蔵や利活用、長距離送電、出力抑制、需要応答などを明示的に考慮できる電力システムモデルが必要となる。さらに、自然変動電源を用いた水電気分解による水素製造や、運輸部門などの非電力部門での水素需要、水素関連のエネルギーキャリアの長期貯蔵や長距離輸送への関心も高まっている。そのため、空間的・時間的解像度が高い電力システムモデルと、非電力部門も考慮できる長期世界エネルギーモデルとの統合の必要性が高まっている。

CO₂回収・有効利用・貯留 (CCUS) については、特にカーボンニュートラルの実現を前提とするケースでは、バイオマス利用や大気からの CO₂ 直接回収 (DAC) とともにその大規模導入を最適策とする研究例が多く、逆にその現実的な社会経済的な導入障壁や技術的制約などに係るモデル化について改めて確認することも課題といえる。また、大気から回収された CO₂ と水素から合成される炭化水素燃料の航空機や船舶などの燃料としての経済性評価も重要性が高まっている。

エネルギー経済モデルを用いた気候変動対策による国民経済のグリーン成長の可能性評価や、パリ協定下での炭素国境調整メカニズムの影響評価なども関心を集めている分野といえる。

(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、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¹⁰⁾。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 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の進展に伴い、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。「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に加え、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が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・拡大が困難な状況下において、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ニーズは急速に高まっている。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5,000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増加していく。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と考えられる。近年では、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り、欧州では日本ほど台風や地震の災害リスクが大き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分析が必要である¹¹⁾。

(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は地域に分散して導入されても基幹系統に接続されるには限られない。中小規模では66 kVの二次系統や6.6 kV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できる。地域共生型再生可能エネルギー電源の割合が増加することで地域雇用の確保につながり地域生産人口流出対策等のメリットを生む可能性がある。地域マイクログリッドは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を促進するうえで重要である。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。そこで、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¹²⁾。

(4) -5 消費行動研究

人の行動に関する研究は、経済学、経営学、心理学、社会学など多岐の分野に渡り、古くからなされてきたが、エネルギー消費に関わる行動という観点で頻りに研究されるようになったのは、比較的最近である。

米国エネルギー効率経済評議会 (ACEEE) は1980年に設立され、エネルギー効率の向上、省エネ、政策、教育など幅広く議論されてきた米国の非営利組織である。ここでは、エネルギーと行動の関係について議論されてはいたものの設立当初は少数派であった。それが行動に関する議論の高まりを受けて、この組織から2007年に行動・エネルギー&気候変動会議 (BECC) が生まれている。BECCでは研究者のみならず、自治体やNPOなどの実務者なども参加しており、人の行動変容がエネルギー消費を変え得ることや、行動変容を導くための介入方法などについて議論されてきた。

また、Energy Policy、The Energy Journal、Electricity Journalの3つのエネルギー専門誌に1999年から2013年に投稿された4,444本の研究論文の内容分析を行った結果、社会科学を専門とする著者はわずか19.6%であり、歴史、心理学、人類学、コミュニケーション学などの分野と回答した著者は0.3%未満、質的な手法を用いた論文は12.6%に過ぎない。エネルギー研究を深化・拡大するには、このような分野からの検討が必要だとして、イギリスの研究者を筆頭にEnergy Research & Social Science (ERSS) が2014年に創刊された。この論文誌では、工学系が中心のエネルギー専門誌では採択されにくい質的研究などについても積極的に掲載されている。2014年に前述したBECCの日本版として、BECC Japanが発足し、第1回カンファレンスが米国BECCの中心メンバーを迎えて開催され、その後毎年開催されている。

リチャード・セイラー氏らが2017年に行動科学に関してノーベル経済学賞を受賞すると、行動経済学の考え方を、エネルギー消費行動に適応しようという機運が日本でも一気に高まった。また、計測技術の進歩によってエネルギー消費量を計測しやすくなり、大量にデータ収集したり、データの時間解像度が上がったことも、エネルギーと消費行動の関係性を議論できるようになった要因であると考えられる。

エネルギー消費行動について研究が始まった当初と、現在の取り上げるテーマの変遷については、初期には行動変容の介入手段や介入方法、効果検証方法などについての議論が多かったが、現在では、高齢者や低所得者など、すべての対象に平等にエネルギーを、エネルギー利用がもたらす便益と費用の公平な分配をといった“エネルギー正義”という議論が加わるようになっている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

エネルギー需給モデル分析関連では、欧州委員会出資プロジェクトExploring National and Global Actions to reduce Greenhouse gas Emissions (ENGAGE) があり、2019-2023年の期間で実施されている。欧州の研究機関に加え、ブラジル、インド、中国、韓国、タイ、インドネシア、ベトナム、ロシアなど、合わせて28の研究機関が参加している。日本からはRITEとNIESなどが参加し、気候変動の回避された影響を定量化するとともに、他の持続可能な開発目標とのコベネフィットも考慮した国別および世界全体の脱炭素政策・経路等のモデル分析が行われている。また、IEAと米国エネルギー省 (DOE) エネルギー情報局 (EIA) では、それぞれエネルギー需給モデルを用いて、World Energy Outlook (WEO) やAnnual Energy Outlook (AEO) シナリオを毎年定期的に公表し、世界各国のエネルギーの政策の方向性に大きな影響を及ぼしている。国内では、NIESのAIMモデル、RITEのDNE21+、日本エネルギー経済研究所

(IEEJ) の IEEJ-NE_JAPAN モデル、IAE の GRAPE モデルを用いた研究活動などが注目される。

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年）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、後継プロジェクトも存在する。ヨーロッパでは、EUによるCONCERTO（2005–2010年）、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。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

エネルギーシステム評価における技術的課題としては、検証作業（複数のモデルを利用したレビューなど）、数値計算モデル上の技術（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）、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）、電力の市場取引化による数値モデル評価（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。

• エネルギー需給モデルの空間的・時間的解像度の高度化

エネルギー需給モデルの空間的・時間的解像度を高める必要があるが、そのために汎用計算サーバの主記憶容量上限を超える記憶領域が必要となる大規模モデルへの対応が必要となりつつある。具体的には、3点の対応策が考えられ、1つは計算アルゴリズムにおけるソフトウェア的な対応であり、大規模最適化問題の実用的な分解・並列計算手法の構築がある。2つめは対象となるエネルギーシステムの特徴を考慮した対策で、大規模モデルの効果的な縮約化手法の構築である。そして3つめは、ハードウェア的な対応で、大きな主記憶容量を有する特殊な計算サーバへの移行である。政策ニーズに応えるために、エネルギー経済モデルの高度化も課題といえる。

• エネルギーシステムにおける不確実性への対応

エネルギーシステムを取り巻く様々な不確実性を適宜考慮していくことも課題である。具体的には、自然災害に対するレジリエンスの向上施策の具体化、国際紛争等による石油や天然ガスの供給途絶に対するエネルギー安全保障施策の評価、そして技術革新や環境政策の長期的な不確実性を考慮した投資戦略の立案などが考えられる。

• 一般均衡モデルの構築方法の確立

水素やレアメタル、そしてDACなど、経済統計データがまだ存在しない非在来型の資源や新規技術も考慮できるような一般均衡モデルの構築方法はまだ確立されておらず、今後の検討課題である。

• エネルギー需要モデル

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、方法論とも現状では限られている。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

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オンデマンド需要データは、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。今後はデジタル技術の進歩によって新たに入手可能となった消費者行動データに基づく、革新的なエネルギー需要モデルの出現の可能性も考えられる。

• シェアエコノミー

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。

• 複数の経済主体間の競争を考慮した評価

エネルギーシステムは社会システムであり、特に自由市場を前提とする場合、複数の経済主体間の競争も考慮した評価が必要となる。分析テーマの例としては、電力ならびにアンシラリーサービスの市場分析、石油や天然ガスなどの国際的エネルギー取引の市場分析、そして気候変動対策の国際交渉や排出目標や炭素国境調整メカニズムなどの分析などが考えられる。現状では、ゲーム理論に基づく解析的なアプローチと、マルチエージェントシミュレーションによる数値実験的なアプローチなどが知られているが、今後実用性を高めていく必要がある。

• エネルギー需給モデルと環境研究との連携

農業や林業等による土地利用変化や今後の気候変動の影響の考慮など、エネルギー需給モデルと環境研究との連携を深めることも課題である。

(6) その他の課題

エネルギー環境政策は、多くの国で政治的な争点となっており、エネルギーシステム評価を実施する際に政治的な中立性の確保も課題となる。特定の技術に対して不利な条件が設定されていないか、競争技術が評価対象から排除されていないかなど注意が必要である。

また本研究領域は、研究成果を社会へ還元する場が現状では限られ、博士学位を有する研究者数は多くない。活躍の場も徐々に広がっているように思われるが、若い研究者のキャリアパスは、政府関係の研究機関や大学などの少数のポストにほぼ限られている。

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問題もある。

本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りスクの認知など、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、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、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。

(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"> ● NIESは近年、AIMモデルの需要サイドの技術の詳細化を実施している。既往のAIM (CGE) モデルでは、取り扱っている技術の種類の拡張を実施しており、カーボンプライシングなど環境政策の影響分析や原子力政策に関する影響分析を行っている^{13), 14)}。同じくAIM (end-use) では、日本の2050年に向けた脱炭素化の強化に伴うGDPロスを評価し、従来型の経済モデルよりもGDPロスは少ないとの評価結果が得られている¹⁵⁾。 ● 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● RITEがDNE21+モデルを用いてCO₂排出制約の影響評価を実施している。近年の研究結果では、日本の2050年カーボンニュートラル実現に向けた分析を実施している¹⁶⁾。また、IEEJもIEEJ-NE_JAPANモデルを用いて、2050年カーボンニュートラル実現を複数シナリオで分析しており、本モデルは、自然エネルギーの電力系統統合を詳細に考慮している点に特徴がある¹⁷⁾。その他にも、IAEのGRAPEモデル等が分析結果を報告している。 ● 地球温暖化統合評価モデル開発は、NIESのAIM、RITEのALPS-III、IAE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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)、University of Maryland (UMD) が開発したGCAMモデルにおいて、考慮する技術の詳細化やエネルギー以外の分野、例えば、気候・地球モデルとのリンクも考慮した統合的分析 (GCAM-fusion) を行っている¹⁸⁾。また、大気汚染物質 (SOx, NOx) の評価機能の追加等が実施され、米国の州単位レベルでの詳細な環境影響分析が行われている¹⁹⁾。 ● 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。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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● MITが開発したEPPAモデルでは、産業部門のCCSを追加して分析を行い、CCS導入量は環境政策に依存することなどの政策的示唆が得られている²⁰⁾。他にも米国の地球温暖化統合評価モデルには、スタンフォード大学/Electric Power Research Institute (EPRI) のMERGEモデルが挙げられるが、近年は、目立った研究は行われていないようである。 ● 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。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● イタリアのRFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment (EIEE) のWITCHモデルによる分析では、気温上昇による健康影響評価が行われている²¹⁾。 ● オーストリアのIIASAが開発したMESSAGEモデルでは、地域 (ウィーン市) に特化したエネルギー戦略分析が行われ、地域政策との整合性が分析されている²²⁾。また、モデルの活用機会の促進に向けたモデルのオープンソース化も行われている²³⁾。

				<ul style="list-style-type: none"> ●IEAのEnergy Technology Systems Analysis Program (ETSAP)が開発したTIAMモデルは国際的に広く活用されており、最近ではアフリカの地域情報を活用の上にて2050年に向けたアフリカの電力アクセスの展望と電力安定供給に関する分析が行われている²⁴⁾。また、新技術の普及を踏まえたコバルトのサプライチェーンを考慮したTIAMモデルの開発と分析が行われている²⁵⁾。そして、カーボンプライシングによる省エネ、化石燃料の技術選択に関して詳細な分析が行われている²⁶⁾。 ●英国University College LondonのTIAM-UCL (TIAMは元々はIEAが開発した世界モデル)では、インドの技術選択の詳細化を行い、脱炭素化実現には太陽光発電の大量普及の必要がある等との分析が報告されている²⁷⁾。 ●輸送部門では、カーシェアリングなど情報技術との連携が進められている。 ●ドイツの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"> ●ドイツのPIKのREMINDモデルでは、様々な気候変動政策等のシナリオがCO₂排出パスやエネルギー需給に与える影響に関して分析が行われている。近年では、新技術の習熟効果のテンポが、国際的な温室効果ガス排出削減コストに与える影響分析が行われている²⁸⁾。また地域別に電力負荷持続曲線を考慮に入れて自然変動電源の系統接続の詳細化を行い、再エネ導入可能性分析が行われている²⁹⁾。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。 ●ドイツは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。 ●英国は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伴い、独自性のある研究報告があるが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及できない。 ●オーストリアのIIASA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"> ●独自のエネルギー需給モデルは開発されておらず、既存のモデルの利活用が中心にある。IEA-ETSAPが元々開発したMARKALモデルやTIMESモデルを活用した分析を清華大学等が主として実施している。近年は、中国国内30地域別でのエネルギー需給の詳細化したTIMESモデル (TIMES-30P)を開発し、大幅な脱炭素化の実現可能性に関して分析が行われている³⁰⁾。また、TIMESモデルを活用することで、中国のカーボンニュートラル分析も行われている³¹⁾。そして、電力部門での水利用の関心の詳細化を行ったTIMESモデルの開発により、CO₂制約や水利用制約により、再エネが優位になるシナリオ分析などが行われている³²⁾。 ●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"> ●CGEモデルを活用して排出権取引 (ETS) が中国の石油消費産業のエネルギー需給に与える影響分析が行われている³³⁾。 ●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、ビッグデータ、AI) 応用研究が進んでいる。

韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● IEA-ETSAPが元々開発したMARKALモデルやTIMESモデルを活用した分析が行われている。水素サプライチェーンを考慮したTIMESモデルを開発し、グリーン水素による電力消費量増加の可能性等が分析されている³⁴⁾。 ● 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"> ● IAEAが開発した長期の電源計画評価モデルであるWASP (Wien Automatic System Planning) モデルを用いて、再生可能エネルギーと原子力発電の導入可能性評価を行い、脱炭素化でのこれらの電源の有効性を評価している³⁵⁾。 ● 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。 ● これまで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

関連する他の研究開発領域

- ・蓄エネルギー技術（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・地域・建物エネルギー利用（環境・エネ分野 2.3.1）
- ・エネルギーマネジメントシステム（環境・エネ分野 2.5.1）
- ・パワー半導体材料・デバイス（ナノテク・材料分野 2.4.4）

参考・引用文献

- 1) International Energy Agency (IEA), *A Group Strategy for Energy Research Development and Demonstration* (Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 1980).
- 2) Shinichiro Fujimori, Toshihiko Masui and Yuzuru Matsuoka, "AIM/CGE [basic] manual," *Discussion Paper Series no. 2012-01* (2012)., <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4932.9523>.
- 3) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）システム研究グループ「統合評価モデルDNE21の概要」 <https://www.rite.or.jp/system/research/new-earth/dne21-model-outline/>, (2023年1月16日アクセス)。
- 4) Atsushi Kurosawa, "Multigas Mitigation: An Economic Analysis Using GRAPE Model," *The Energy Journal* 27, Special Issue (2006) : 275-288., <https://www.jstor.org/stable/23297085>.
- 5) 杉山達彦, 小宮山涼一, 藤井康正「全国の電力基幹システム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 (電力・エネルギー部門誌)』136 巻 12 号 (2016) : 864-875., <https://doi.org/10.1541/ieejpes.136.864>.
- 6) 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. PSE』17 巻 9 号 (2017) : 109-112.

- 7) 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 (電力・エネルギー部門誌)』139 巻 12 号 (2019) : 713-721., <https://doi.org/10.1541/ieejpes.139.713>.
- 8) 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>.
- 9) 坂東茂他「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 (電力・エネルギー部門誌)』128 巻 1 号 (2008) : 67-74., <https://doi.org/10.1541/ieejpes.128.67>.
- 10) 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)「「NEDO再生可能エネルギー技術白書」初版」https://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_2010_index.html, (2023年1月16日アクセス) .
- 11) 経済産業省 資源エネルギー庁「系統制約の緩和に向けた対応 (2018年1月24日)」経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/002_02_00.pdf, (2023年1月16日アクセス) .
- 12) Christoph F. Reinhart and Carlos Cerezo Davila, “Urban building energy modeling - A review of a nascent field,” *Building and Environment* 97 (2016) : 196-202., <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>.
- 13) 国立研究開発法人国立環境研究所 AIMチーム「AIM/CGE [Japan] を用いたカーボンプライシングの定量化 (2021年6月21日)」アジア太平洋統合評価モデル (AIM), https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/2021_carbon_tax/20210621_masui.pdf, (2023年1月16日アクセス) .
- 14) Diego Silva Herran, Shinichiro Fujimori and Mikiko Kainuma, “Implications of Japan’s long term climate mitigation target and the relevance of uncertain nuclear policy,” *Climate Policy* 19, no. 9 (2019) : 1117-1131., <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1634507>.
- 15) Shinichiro Fujimori, et al., “Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy,” *Nature Communications* 10 (2019) : 4737., <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12730-4>.
- 16) 秋元圭吾, 佐野史典「2050年カーボンニュートラルのシナリオ分析 (中間報告) (2021年5月13日)」経済産業省 資源エネルギー庁, https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf, (2023年1月16日アクセス) .
- 17) 松尾雄司他「2050年カーボンニュートラルのモデル試算 (2021年6月30日)」経済産業省 資源エネルギー庁, https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/044/044_009.pdf, (2023年1月16日アクセス) .
- 18) Corinne Hartin, et al., “Integrated modeling of human-earth system interactions: An application of GCAM-fusion,” *Energy Economics* 103 (2021) : 105566., <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105566>.
- 19) Wenjing Shi, et al., “Projecting state-level air pollutant emissions using an integrated assessment model: GCAM-USA,” *Applied Energy* 208 (2017) : 511-521., <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.122>.
- 20) Sergey Paltsev, et al., “Hard-to-Abate Sectors: The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation,” *Applied Energy* 300 (2021) : 117322., <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117322>.

- 21) Lara Aleluia Reis, Laurent Drouet and Massimo Tavoni, “Internalising health-economic impacts of air pollution into climate policy: a global modelling study,” *Lancet Planetary Health* 6, no. 1 (2022) : E40-E48., [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00259-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00259-X).
- 22) Daniel Horak, Ali Hainoun and Hans-Martin Neumann, “Techno-economic optimisation of long-term energy supply strategy of Vienna city,” *Energy Policy* 158 (2021) : 112554., <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112554>.
- 23) Daniel Huppmann, et al., “The MESSAGE_{ix} Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp) : An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development,” *Environmental Modelling & Software* 112 (2019) : 143-156., <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.11.012>.
- 24) Francesco Dalla Longa and Bob van der Zwaan, “Heart of light: an assessment of enhanced electricity access in Africa,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 136 (2021) : 110399., <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110399>.
- 25) Gondia Sokhna Seck, Emmanuel Hache and Charlene Barnet, “Potential bottleneck in the energy transition: The case of cobalt in an accelerating electro-mobility world,” *Resources Policy* 75 (2022) : 102516., <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102516>.
- 26) Alice Didelot, et al., “Balancing Energy Efficiency and Fossil Fuel: The Role of Carbon Pricing,” *Energy Procedia* 105 (2017) : 3545-3550., <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.814>.
- 27) Rohit Gadre and Gabriel Anandarajah, “Assessing the evolution of India’s power sector to 2050 under different CO₂ emissions rights allocation schemes,” *Energy for Sustainable Development* 50 (2019) : 126-138., <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.04.001>.
- 28) Shuwei Zhang, et al., “Technology learning and diffusion at the global and local scales: A modeling exercise in the REMIND model,” *Technological Forecasting and Social Change* 151 (2020) : 119765., <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119765>.
- 29) Falko Ueckerdt, et al., “Decarbonizing global power supply under region-specific consideration of challenges and options of integrating variable renewables in the REMIND model,” *Energy Economics* 64 (2017) : 665-684., <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.05.012>.
- 30) Nan Li, Wenying Chen and Qiang Zhang, “Development of China TIMES-30P model and its application to model China’s provincial low carbon transformation,” *Energy Economics* 92 (2020) : 104955., <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104955>.
- 31) Shu Zhang and Wenying Chen, “China’s Energy Transition Pathway in a Carbon Neutral Vision,” *Engineering* 14 (2022) : 64-76., <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.09.004>.
- 32) Weilong Huang, Ding Ma and Wenying Chen, “Connecting water and energy: Assessing the impacts of carbon and water constraints on China’s power sector,” *Applied Energy* 185, part 2 (2017) : 1497-1505., <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.048>.
- 33) Hong-Dian Jiang, et al., “How will sectoral coverage in the carbon trading system affect the total oil consumption in China? A CGE-based analysis,” *Energy Economics* 110 (2022) : 105996., <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105996>.
- 34) Jaewon Choi, Dong Gu Choi and Sang Yong Park, “Analysis of effects of the hydrogen supply chain on the Korean energy system,” *International Journal of Hydrogen Energy* 47, no. 52 (2022) : 21908-21922., <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.033>.

35) Immanuel Vincent, et al., “The WASP model on the symbiotic strategy of renewable and nuclear power for the future of ‘*Renewable Energy 3020*’ policy in South Korea,” *Renewable Energy* 172 (2021) : 929-940., <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.094>.

2.5

エネルギーシステム 統合化