

# エネルギーシステムインテグレーション —エネルギーシステムの変容とOR—

萩本 和彦, 竹内 知哉

地球温暖化対策が大きな課題となっている時代の流れの中でエネルギーシステムは大きく変容している。カーボンニュートラルなど次の一定の安定状態になるまで、さまざまな変化要素の先行/遅行の中で、確保すべき安全性を前提とした3Eのうち安定性と経済性は脆弱な期間が続く。この移行過程を乗り切るためのエネルギーシステムイノベーションを支えるOR手法を活用したモデル化による解析評価が重要となる。

キーワード：エネルギー、電力、変容、3E+S、システムイノベーション、最適化、モデル化、OR

## 1. はじめに

地球温暖化対策が大きな時代の要請になる中、2020年から新型コロナウイルスの猛威が全世界の社会・経済活動に大きな打撃を与え、さらに2022年のロシアのウクライナ侵攻の長期化は、天然ガスをはじめとする化石燃料および食料の価格高騰などにより世界に甚大な影響を与えている。エネルギー分野では冬季の天然ガスの供給不足の懸念という深刻な状況を呈しており、欧州における渇水の影響は内陸発電所の運転や燃料輸送に及び、同地域の電力の供給不安に拍車をかけている。

近年の自然災害・疫病の蔓延・国際紛争を含めた不確実な環境の中で、われわれはその将来をより確実かつ安定なものにできるか、知恵を絞り努力を重ねる必要がある。

社会経済を支えるエネルギー需給においては一次エネルギー供給の大きな割合を化石燃料が占めている。これに対して、供給側では一次エネルギーを、二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーや原子力などにより供給し、需要側では化石資源の燃焼利用を削減するための電化と合成燃料化を加速させることが求められており、これらの実現に伴う諸課題の解決が急務である。欧州のREPowerEU [1]を始めとし、世界の各国はウクライナ侵攻への対応、パンデミックからの復興を組み合わせ、地球温暖化対策と経済発展の二兎を追う戦略を加速しようとしている。

本稿では、エネルギーシステムで現在進行している

変容と、3E+S、すなわち安全性(S)の前提の下でエネルギー需給の安定性・経済性・環境性(3E: Energy Security, Economy, Environment)を確保するためのシステムイノベーションとモデル化の取り組みの必要性について述べる。

## 2. エネルギーシステムの変容

### 2.1 エネルギー需要の変化

1800年代以来、電気が広く使われるようになり、家庭、業務、産業、運輸のさまざまな分野において、従来のエネルギーの代替あるいは新しい用途として電気の利用(電化)が拡大してきた。これに加え現在は、エネルギー部門の低炭素化のために、再生可能エネルギーや原子力の発電による一次エネルギー供給を有効に活用し、需要側での省エネルギーの強化と化石資源の燃焼の削減に向けた一層の電化が進められている [2]。

これから電気の利用が進展する分野としては、家庭・業務・産業におけるヒートポンプ、電磁加熱、電炉などの技術によるさまざまな温度帯での温熱供給や、運輸分野におけるバッテリー技術の発達による電気自動車を始めとする移動体の分野が挙げられる。さらに、水素や合成燃料の製造、二酸化炭素の回収・貯蔵・処理(Carbon Capture and Storage)や大気中からの直接回収(Direct Air Capture)なども新たな大規模な電力の需要となる可能性がある。エネルギーの需要全体では電化により化石燃料の需要が減少し、運輸部門や産業部門の化石燃料の利用の一部の代替として合成燃料の利用も考えられる。

### 2.2 再生可能エネルギー発電の大量導入

太陽からの放射や地球の熱や運動を起源とする再生可能エネルギーのうち、太陽光発電(PV)、風力発電(風力)は、多くの国・地域ではほぼ共通して大きな導

おぎもと かずひこ, たけうち ともや  
東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門エネルギーシステム  
インテグレーション社会連携研究部門  
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1  
ogimoto@iis.u-tokyo.ac.jp  
ttake@iis.u-tokyo.ac.jp

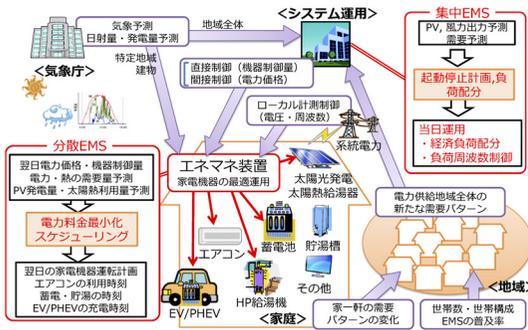


図1 分散型資源の能動化

入量が期待され、二酸化炭素を排出しない一次エネルギー源となる。しかし、出力が時間や天気により大きく変動する PV・風力の大量導入が進むと、出力の変動性と不確実性が増加し、出力を調整できる火力発電の運転容量が減少することで、これまでこれらが担ってきた電力システムの安定的で経済的な運用が難しくなるという課題の継続的な解決が必要となっている。

### 2.3 分散型資源の大量導入

発電側で導入が進む PV・風力は、数 kW の建物の屋根上の PV を始めとし、配電網あるいは低圧の送電線に接続される。従来の火力発電とは異なり、多数の小容量の設備から成る。需要側では、ヒートポンプ式の空調・給湯に加え、EV 充電器、定置式バッテリーなど、新たなニーズに対応した多様な小容量の技術が導入される。

これらの小容量で分散して配置される「分散型資源 (Distributed resources)」のうち、PV・風力は、本来可能な発電出力の範囲内で、出力を調整することができる。需要側の分散型資源は、電気の利用の時間帯をシフトし、さらには使用量を細かく調整することもできる。このような分散型資源による出力 (有効電力) に無効電力を加えたさまざまな調整機能は、発電側は発電量の一部の減少、需要側は電力の使用ニーズの一部の制限を伴うが、需給バランスの維持に加え送配電網の過負荷や電圧の逸脱回避のための調整・制御など、電力システムの運用にさまざまな付加価値を提供することができる。こうした分散型資源はエネルギーシステムにおける新たな能動的な要素となりこれを分散型資源の能動化あるいは需要の能動化と呼ぶ [3] (図 1)。

### 2.4 長期間のエネルギー貯蔵の必要性

大規模な導入が期待される二酸化炭素を排出しない一次エネルギー源は、現時点では、原子力と、再生可能エネルギーのうち PV・風力である。前者は一定出力により経済性の高い発電ができ、後者は日射や風の変

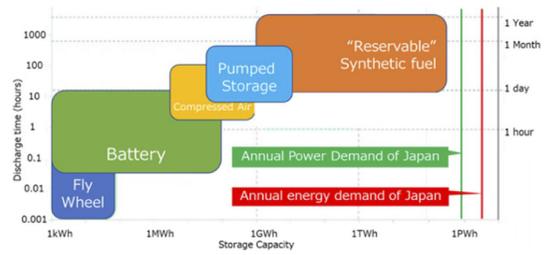


図2 エネルギー貯蔵技術の特性 (荻本研究室)

動により出力が変動する。両者に共通する特性は、従来の水力・火力発電のように必要とする需要と供給を一致させる出力調整が難しいことである。原子力発電は一定の時間をかけて出力を低下することは可能であり、PV・風力は出力を抑制する、あるいは出力が事前に抑制されていればそこから増加することは可能である。しかし、原子力は出力変化で機器が劣化し設備利用率が低下する、PV・風力は可能な出力を使い切れず経済性が低下するといった課題が生じる。

エネルギー需給全体の一次エネルギーの安定供給では、現在は大量に利用している化石燃料の供給量の調整、たとえば石油の増産/減産が大きな役割を果たしている。一次エネルギーにおける PV・風力・原子力のシェアの拡大の結果、天気の変動による需給バランス、さらには夏季や冬季の高需要と春夏の低需要と供給の需給バランスへの影響が大きくなる。他方、需要と供給のバランスのために化石燃料による調整の余地が低下する。

このため、PV・風力・原子力の割合が増加すると、ある段階までは 1 分～数日の需給バランスが課題であるのに対し、その後は月間あるいは季節間など、より長期の需給のバランスを保つために、大きな貯蔵容量をもつエネルギー貯蔵技術の導入が課題となる。貯蔵技術としては、これまでは揚水発電 (貯蔵時間約 10 時間) に対し、現在はバッテリー (貯蔵時間現在、数時間程度) の適用が有望である。しかし、季節間などのより長期・大容量のエネルギー貯蔵は、石油備蓄に匹敵する規模となり、立地性や経済性の条件から常温常圧でほぼ液体の合成燃料が有力な候補の条件と考えられる (図 2)。

### 2.5 システムのダイナミクスの質的变化

電化と二酸化炭素排出ゼロの一次エネルギー供給により、エネルギー需給全体における電力需給の割合は増加する。電力システムは、定常状態では電圧・電流が商用周波数 (50 Hz や 60 Hz) の正弦波で、「電力 (kW)」は一定の大きさの電圧のもとでその位相の差で発生す

る同期化力<sup>1</sup>で主として送られ、電源事故や負荷脱落時においては需給のアンバランスを同期機の回転慣性が吸収して周波数を一定に保つ、いわゆる「交流電力システム」である<sup>2</sup>。この交流電力システムでは、現在は、従来型の火力・原子力・水力・揚水・需要側の大型電動機などの「同期機」が周波数と電圧の維持を担っている。これに対し、PV・風力、蓄電池、需要などのインバータ連系設備が増加すると同期機の運転容量が減少する。この結果、常時の周波数が変動しやすく、事故時の周波数変動も大きくなり大停電などのリスクが増し、また、交流電圧の変動や波形の歪みの拡大や事故電流の減少などの、システムの質的变化と新たな技術的な課題が生じる。

2.2 節で述べた再生可能エネルギー発電は1分～数日の時間の課題、2.4 節の長期間のエネルギー貯蔵の必要性は数日～数か月超の時間の課題であるのに対し、同機器の運転容量の減少は10ミリ秒～1分といった短時間での対応が求められる課題であり、対応すべき領域は短時間と長時間の両方向に拡大する。

また、エネルギー部門の市場化の中で、市場価格を通じた需要と供給の反応では、人間の意思決定、行動の不確実性・予測を超えた反応なども、システムのダイナミクスの変化を引き起こしている。

### 3. システムイノベーション

エネルギーシステムの変容による移行過程では、需要と供給の構成・配置の変化、多様で無数の分散型資源の能動化、供給の変動性・不確実性の増加といったシステムのダイナミクスの変化の中で、毎日のシステムを、安定かつ効率的・効果的に運用することが求められる。設備計画・形成においては、社会環境と技術の適性に応じた需要・供給・輸送・貯蔵の設備の適正な配置とそれらを結ぶネットワークの拡充あるいは縮小が必要となる。運用においては人間と機械の、それぞれの特性を活かした分担と協業がより必要になる。機械は、定常のおよび一定の変動のもとで、事前の設

計・ルール・学習などに基づく安定な意思決定が期待される。人間は、適切な情報収集とその判断結果を適切に反映する枠組みのもとで、過去の事例の乏しい状況にも柔軟に対応することが期待される。

米国電力におけるISO (Independent system operator: 独立系統運用機関) は、市場運営とシステム運用に、混合整数非線形計画などの各種の数的手法を駆使した運用システムにより、機械と人間の高度な協業を実践している [4]。運用システムは、数千の大規模発電所と数千の送電線・変電所の運用と需要の反応を数千の地点別価格によって結びつけ、安定運用の制約のもとで社会費用が最小となる設備運用を計画し実施する。近年では、PV・風力、蓄電池、需要側の設備については、分散型設備を最大活用するという政策 [5] のもと、住宅や業務用建物のエネルギーマネジメントやEV充電管理に代表される、アグリゲータの管理・制御プラットフォームによる個別の管理・制御をISOのシステムと連携し、需給調整あるいは送配電網管理への活用する試みも始められている。Internet of Things、すなわちネットワークに接続された「実物」の大規模な世界が展開しつつある。また、米国の天然ガスネットワークは採掘地点と需要を結ぶ巨大なネットワークを形成しているが、2014年の極渦 (Polar Vortex) の際の暖房需要の増加、ネットワークの障害によりガス不足、またガス不足と凍害による発電停止が発生し [6]、その後ガスと電力のネットワークが相互に協調する運用システムが構築された [7]。

現在進行中のエネルギーシステムの変容のもとでは、従来あるいは新たに導入される需要や供給の設備の機能を活用することで、経済性と安定性を維持できるシステムイノベーションが大きく期待される。システムイノベーションの究極的な到達点の一つは、最適性とロバスト性を兼ね備えたシステムの構築である。通常時はより広い範囲のリソースを異常事態への対応を見据えつつ最適に運用することで効率性を追求する。これに対し災害発生などの異常時にはそれぞれの需要あるいは需要群がエネルギー需給を自律的に管理してロバスト性を保持し安定なエネルギー利用を維持する。分散型資源の大量導入のもと、集中/分散のシステムが災害時の対応のための冗長性を維持しつつ協調するシステム、人間と機械がそれぞれの特性を活かした協業、そしてそのシステム全体を継続的に改善できる仕組みを内包することが、長期の温暖化対策を目指すシステム変容における移行過程の必要条件と考えられる。

<sup>1</sup> 電力は、電圧の位相の差で流れる電流と電圧の積で与えられる。このため、交流の発電機や電動機が相対的に一定の位相差で回転する力が働き、その力を「同期化力」と呼ぶ。

<sup>2</sup> 直流送電、直流配電など、定常状態では電圧・電流が直流の回路方式もあり、長距離大容量あるいは長い海底ケーブル区間をもつ送電や、建物や敷地内など限られた範囲で効率のよい回路を形成する場合に使用される。しかし、変圧器により電圧を自由に交換できるなどの特性から、現時点では交流システムが電力システムの大きな割合を構成しており、現在は洋上風力に直流送電を活用し、陸上の交流システムに接続するなどの組み合わせが電力システムの方向性となっている。

## 4. モデル化の取り組み

### 4.1 モデル化の必要性

エネルギーシステムの変容による移行過程では、システムイノベーションのもとで、3E+Sを確保することが求められ、多方面の並行した取り組みが必要となる。将来の多様なリソースを日々最適に運用する手法を確立するためには、(需給)運用のモデル化とモデル解析による運用の探索・検証が効果的であり、それを通して同じ分野、あるいは異なる分野の機関・専門家が相互理解を深め、新たな発想やその実施につながる。たとえば、電力システムでは、前日・当日・リアルタイム直前までの起動停止計画(UC: Unit Commitment)を始めとする多様なOR手法を含めたモデル解析が用いられる[8]。このような時間粒度・地理的粒度やプラント特性の細かい運用モデルを一部簡略化して複数/多数年の設備計画のモデル化が行われている。これにより設備計画と運用計画を基礎として、3E+Sの評価、移行過程の脆弱性の発見と対策、それらを支える制度や規制の設計・検証が可能となる。以下、モデル化が必要となるエネルギーシステムの四つの側面について述べる。

### 4.2 戦略策定と設備計画

将来のエネルギーシステムへの移行過程は、エネルギーシステムの需給構造の変化であり3E+Sを確保できる設備形成が必要となる。このため、移行過程の戦略策定においては、エネルギー全体さらには社会経済の条件の変化を対象とする必要がある。さらに、エネルギーの需給における電力のシェアが拡大するため、エネルギーシステム全体の特性を分析・評価するために、エネルギーシステム、特に電力システムについて時間および地理的粒度の細かい解析の役割がより重要となる。

このため、エネルギー戦略の策定に必要な定量的な分析・評価では、多様な要素を包含したエネルギー全体と時間的・地理的粒度の高い分析の必要な電力分野を連携した検討[9]をバックキャストとフォアキャストの組み合わせで行うことが効果的である(図3)。

戦略に基づく設備計画では、エネルギー需給および電力需給の間の省エネルギー・電化・合成燃料の製造と利用、二酸化炭素の回収/貯蔵のための電力需要など、両者のカップリングが重要であり、エネルギー全体と電力の組み合わせで検討を実施することが望ましい。

供給「源」に着目しがちなエネルギー問題であるが、供給と需要の再配置が発生するため、電力の送配電網、

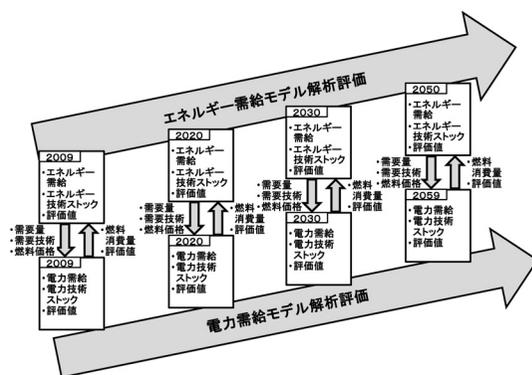


図3 エネルギーと電力の連携解析 [10]

ガスの管網などのネットワークが重要である。ネットワークを形成することで、離れた地点にある需要と供給を結び、再生可能エネルギー発電や需要の地点による変動を地理的にならすことができる。また、ネットワーク内に貯蔵設備を設置することで、異なる時間の需要と供給を結び、時間的にならすことができる。送配電網は、分散電源や新たな電化による需要を支え、それらからのさまざまなサービス(電力では調整力と呼ぶ)の提供を可能にするためのインフラであり、需要や供給の長い期間の増減や配置の変化に応じ、拡充あるいは縮小の設備計画が重要である。また、先に述べた需要を含めた分散型資源の電動化のモデル化については、次項で述べる。

さらに、戦略策定・設備計画には、従来の化石燃料の開発・投資という上流部分に加え、カーボンニュートラルを目指す現在は、下流の二酸化炭素の回収・貯留や設備形成が含まれる。また蓄電池などに不可欠なレアメタルなどの資源制約や循環利用の視点も必要となる。また、分散型資源の利用・管理・制御に不可欠な情報インフラも設備形成の対象である。

### 4.3 運用

エネルギーシステムは、毎日・毎時・瞬間の需要・供給・ネットワークの変化、たとえば、燃料の輸送状況、発電所や送配電網の事故、PV・風力の毎日あるいは希な出力変動、燃料の価格変動や供給制約、気温や社会活動の変化による需要の増減の中で3E+Sを確保した運用が求められる。この運用では、天気や燃料供給に関する長期・短期の予測から毎日のPV・風力の出力や需要の予測、リアルタイムのモニタリング情報に基づき、設備構成・補修スケジュール・燃料貯蔵量などのリソースの所与の条件のもとで、最適な運用計画とリアルタイム運用、定期的あるいは突発的な事象への対応が連続して行われる。運用の対象は、電力・ガス

の供給から需要、送配電・ガス導管などのネットワーク、さらに遠隔地からの燃料輸送と広範である。運用の解析・評価には、需給の予測や変動の要因、設備の性能・制約、3Eなどの運用の制約・目的を含めたモデル解析が行われる。

これからのエネルギーシステムでは、IoTや情報技術・インフラの発展により、無数の所有者の無数の小容量の分散型資源の活用が可能になる。電力の分散型資源は、自端で検出する電圧や周波数に基づく有効/無効電力の自律制御、電気料金や個別の需要予測に基づく個別管理、システム全体の最適化に基づく遠隔の管理・制御などにより運用され、電力を使用するとともに各種の調整力 [11] を供給することができる。このような分散型資源の調整力の積極的な活用が、図1で述べた分散型資源の電動化である。また、分散型資源としての電源は、従来の火力、原子力発電などの集中型電源のように個別の設備事故が電力システム全体の需給に大きな影響を与えないという特徴をもつ<sup>3</sup>。

しかし、ユニット数が1,000のオーダーである集中型電源よりはるかに数が多く、100万台あるいは1,000万台に上る分散型資源が導入される状況では、それらの利用が電力システムの運用に貢献し、悪い影響を与えないようにすることは、集中型の設備のみの場合と大きく異なる。新たな運用体系の確立が必要となる。これらの分散型資源も先に述べた需給の要素であり、そのモデル化にあたっては、需要や技術の種別などの個別の特性に基づく多様性と、極めて多数の要素の集合体としての統計的特性の反映が重要である。

また、分散型資源を含めた運用のモデル化は4.2節の戦略策定と設備計画を分析・評価するモデルのベースとしても使われる。

#### 4.4 移行過程の脆弱性

エネルギーシステムがカーボンニュートラルなど次の一定の安定状態に到達するまでの移行過程では、さまざまな要素が先行/遅行することで、安定供給の脆弱性に関する多様な課題が生じる [12]。たとえば電力システムでは、再生可能エネルギーなど新たな電源の立地特性は従来の火力とは大きく異なり、需要に対し遠隔地点あるいは既存送配電網のより電圧の低い部分に導入される。先に述べたように、PV・風力の導入と従

来の需給調整を担ってきた火力発電の運転容量の減少が突出すると、発電出力の変動性・不確実性の増加と従来電源の減少による系統慣性・電圧安定性などの低下、化石燃料市場の縮小がもたらす燃料の調達量の調整範囲の低下などが発生する。また、分散型資源の管理・制御の体系の確立が遅れると、無数の分散型資源の機能を活用できないことに加え管理制御ができない設備が増加し、送配電網などネットワークの混雑が発生する。さらに、エネルギー貯蔵の制約、化石資源への投資の低下に伴う燃料の価格高騰や供給不足なども加わり、システム運用は複雑化しさまざまな工夫を短時間で判断することが必要となる。

事故・災害によるエネルギーの供給途絶や悪天候や紛争にともなう恒常的な供給不足などの可能性が高まると、社会・経済への影響は大きくなる。このため、最近しばしばレジリエンスとも呼ばれるエネルギーの「安定供給」を含めた3Eの確保にあたっては、需要側の対応を含めた「安定需給」を含めた形に移行することが必要となる。エネルギーシステム全体の需給バランスに需要側が積極的な役割を果たし、停電においては需要の個別の必要性に応じて停電時の需要管理、最低限の供給手段の確保が行われると考えられる。

あらゆるものがデジタル的に管理、運営される時代になり機能は向上する。しかし、専用線を使用できる集中型電源でもハッキングなどの問題が報告されるなど、無数の分散型資源の情報と管理・制御データをさまざまな主体が共有する段階では、情報セキュリティの確保はより重要な課題となる。

さらに、社会・経済活動のインフラであるエネルギーならではの視点としては、大規模停電や供給途絶などの最悪の状態を回避するために、需給運用の継続性が重要である。システム異常時に備えた部分システムの自律的な運転機能、冗長性のある運用と設備形成など、狭い意味での最適化に陥らない頑健性の確保が必要である。

#### 4.5 制度と規制

1980年代の英国で始められた市場の自由化の流れの中、エネルギー分野においては電力・ガスの自由化が世界の多くの国で行われた。自由化された市場では、価格シグナルが、毎日の取引や運用を最適化し、さらに長期の設備投資を牽引することが期待され、市場制度は価格シグナルにより短期、長期の価値を適切に反映できることが極めて重要とされた。しかし、欧・米・日本を含め現在の世界の多くの卸電力市場では、PV・風力の大量導入により市場価格が低下しゼロあるいは

<sup>3</sup> ただし、PV・風力・蓄電池・HP給湯器などインバータで連系される機器は、電圧や周波数の変動で広い地域の多数の機器が脱落するなど、一斉脱落の可能性があるため、これを防止するため機器の性能を規定するグリッドコードの充実が必要である。

負の値も出る。一方、石炭・ガスなどの価格高騰で電力・ガスの価格の高騰も大きな社会問題になっている。また、エネルギー分野の大きな需給構造の変化の中で、市場メカニズムのみでは長期の設備形成を確保できない状況が顕在化し、さらに自由化のもとでは事業者は技術開発など長期の投資は難しい。このため、容量メカニズムなど、必要な発電能力を確保するための制度の改善が必要である。これらの市場制度の分析・再設計・毎日の運営に対する定性的・定量的な評価においてモデル化は必須のツールとなっている。

分散型資源の大量導入にあたっては、いったん設置された分散型の機器・設備を改修することはコスト面から難しいため、先に述べた一斉脱落を防止する機能を始め、将来必要となる機能はあらかじめ備えておくことが必要となる。これを実現するためのルールはグリッドコード [13] などと呼ばれ、欧米でその制定、運用が先行している。グリッドコードは、設備の導入普及と使用期間を考えると、10~20年先までの設備の運用と維持・管理に有用な内容であること求められ、この分野でもモデル化による解析・評価の深化が実践されている。

## 5. まとめ

近代のエネルギーシステムは、供給側は、産業革命における石炭の大規模利用、交流送電と遠隔地大規模電源の導入、自動車の普及と石油需要の拡大、石油への依存度低下のための原子力と石炭の利用の拡大、環境問題への対応のための再生可能エネルギーの導入と変化してきた。ネットワークも、エネルギーの産地での直接利用から、陸上/海上輸送・大陸全体を覆う送配電網電力システムへと変遷してきた。石炭・石油・ガスの化石燃料の利用は、電力システムの発電燃料あるいは民生・産業の需要として、リアルタイムに相互に関連している。エネルギーシステムは、その地理的範囲と含まれる要素の規模や多様性から世界最大のシステムの一つであり、すべての生活と社会・経済活動を支えるインフラとして新たな技術と目標のもとでこれから大きく変容する。

この変容の移行過程は、生物の脱皮と似てさまざまな脆弱性をもつ可能性があり、これまで蓄積された設備を維持運営しつつ、かつ技術、制度の両分野でこの変化を受け身ではなくリードしてゆく必要があり、そのためには、エネルギーシステムの要素にとどまらずシ

ステム全体のイノベーションが課題解決の鍵となる。コロナ禍・ウクライナ侵攻が社会・経済に与える影響を奇貨として、地球温暖化対策への長期の取り組みにおけるシステムイノベーションの実現に向け、モデル化の取り組みがさまざまな視点で進むことを期待したい。

最後に、本稿においては、モデル化自体に関して対象が余りにも広いため、具体的な参考文献などを挙げるができなかったことをお詫びさせていただく。

## 参考文献

- [1] EC, REPowerEU, [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_3131](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131) (2022年9月12日閲覧)
- [2] 荻本和彦, “電力システム・再エネインテグレーションの将来,” 電気学会全国大会講演論文集シンポジウム, H4-3, 2019.
- [3] 荻本和彦, 岩船由美子, 片岡和人, 池上貴志, 八木田克英, “電力需給調整力向上に向けた集中・分散エネルギーマネジメントの協調モデル,” 電気学会 B 部門大会, I-16, 2011.
- [4] Federal Energy Regulatory Commission, Increasing Efficiency through Improved Software, <https://www.ferc.gov/power-sales-and-markets/increasing-efficiency-through-improved-software> (2022年9月15日閲覧)
- [5] Federal Energy Regulatory Commission, FERC Order No. 2222: Fact Sheet, <https://ferc.gov/media/ferc-order-no-2222-fact-sheet> (2022年9月15日閲覧)
- [6] NERC, January 2014 Polar Vortex Review, <https://www.nerc.com/pa/rrm/Pages/January-2014-Polar-Vortex-Review.aspx> (2022年9月15日閲覧)
- [7] Federal Energy Regulatory Commission, FERC Approves Final Rule to Improve Gas-Electric Coordination, 2015, <https://www.ferc.gov/news-events/news/ferc-approves-final-rule-improve-gas-electric-coordination> (2022年9月15日閲覧)
- [8] 荻本和彦, “カーボンニュートラル時代の電力需給解析,” 電気学会全国大会シンポジウム, H6-1, 2022.
- [9] 荻本和彦, 岩船由美子, 占部千由, 瀬川周平, 東仁, 井上智弘, 黒沢厚志, 加藤悦史, 山口容平, 内田英明, 太田豊, 下田吉之, “ソフトリンクによる2050年のエネルギー需給分析その3—(3)電力システムモデルによる複数シナリオ分析—,” エネルギー・資源学会第41回研究発表会講演論文集, 16-3, 2022.
- [10] 荻本和彦, 赤井誠, 近藤康彦, 末広茂, 黒沢厚志, “電力需給計画モデルとエネルギー計画モデルの連携による長期電力需給解析,” エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, 15-4, 2009.
- [11] 経済産業省, 「需給調整市場について」, 第28回総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会制度検討作業部会資料5, 2019年1月30日, [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/seido\\_kento/pdf/028\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/028_05_00.pdf) (2022年9月15日閲覧)
- [12] 荻本和彦, 岩船由美子, “脱炭素時代のエネルギーの安定供給を考える,” エネルギー・資源学会第40回研究発表会講演論文集, 12-4, pp. 318-323, 2021.
- [13] 荻本和彦, 占部千由, “グリッドコードの意義と取り組み,” 太陽エネルギー学会学会誌, 46, pp. 7-13, 2020.