



エネルギーを巡る 新情勢と原子力の価値

東京大学 大学院工学系研究科 教授 こみやま りょういち 小宮山 涼一氏

いま国際的に気候変動問題への対策強化の気運が高まっており、脱炭素化に向けた技術開発への投資が積極的に行われています。エネルギーや電力システムについて国内外で研究を続けてきた著者は、カーボンニュートラル実現には適切な技術選択を行っていくことが重要であり、中でも原子力は国際的に重要なオプションとして再評価されていると指摘します。

原子力はどのような情勢にあるのか、どんな価値をつくり出すことができるのか、著者は一つひとつ解き明かしていきます。

2050年ネットゼロでは、 原子力発電量は約2倍に増加

脱炭素化に向けた対策が国際的に重要となり、財の調達、利用、廃棄までのサプライチェーン全体（SCOPE1）（SCOPE3）でのカーボンニュートラル実現が求められている。背景には、気候変動問題への対応がある。大気中の温室効果ガス濃度上昇が気温上昇に作用することが指摘されており、化石燃料利用に伴うCO₂などの温室効果ガス排出量の抑制が喫緊の課題となった。

国際的な気候変動対策の基本的な方向性として、世界の平均気温上昇を産業革命前から1.5℃以内に抑制する努力目標が重視され、今世紀半ば頃までに世界全体のCO₂排出量をほぼゼロまで削減し、さらに今世紀末までには排出量よりも吸収、回収や貯留量が上回る状況を実現する必要があるとされている。¹ただし現在、世界のCO₂排出量は増加傾向にあり、21世紀半ばまでの今後約30年間で世界のCO₂排出量をほぼゼロとすることは容易ではなく、省エネ、クリーンエネルギー、CCUS（CO₂回収、利用、貯留）など広範な技術の展開が重要になる。

現在の世界のエネルギー情勢をみると、先進国では全体的に経済の成熟化、省エネ技術の展開、人口成長の鈍化などによりCO₂やエネルギー消費は頭打ち、減少基調にある一方、アジアなど新興国では産業化や所得向上を背景に増加している。先進国ではCO₂削減の加速化、新興国では高効率・脱炭素技術の導入によりCO₂増加テンポの抑制、ピークアウトの実現と減少フェーズへの移行が重要になると考えられる。

脱炭素にはあらゆる技術の活用が求められるが、世界では、原子力エネルギーが再評価されると同時に、コスト低下を背景に再生可能エネルギー（以下、再エネ）導入拡大に対する期待が高まっている。UAEで2023年に開催されたCOP28では、世界の再エネ発電設備容量を2030年までに3倍へ拡大、議長国などにより原子力発電設備容量を2050年までに2020年比で3倍へ拡大する目標が共有された。²国際的に原子力は脱炭素化やエネルギー安定供給の上での重要なオプションとして再評価されていると考えられ、ウクライナ危機以降、原子力の電力比率が約7割を占めるフランスや、風力発電が約2割を占め再エネ開発を進める英国は、原子力を新設する方針を表明している。

世界の原子力発電量は、これまで増加基調で推移し、数多くの建設中、建設計画のある原子炉が存在しており、長期的に世界の旺盛な電力需要の供給源として重要な役割を担うと考えられる。国際エネルギー機関の試算によれば、2050年にCO₂排出量をゼロにするシナリオ（ネットゼロ）では、世界の発電量が2022年約30兆kWhから2050年には約80兆kWh近くまで拡大する中、原子力発電量も2022年約3兆kWhから2050年には約6兆kWhへ2倍まで増加し、太陽光や風力発電とともに世界の電力脱炭素化を支える役割を担う【図1】（6ページ）。世界

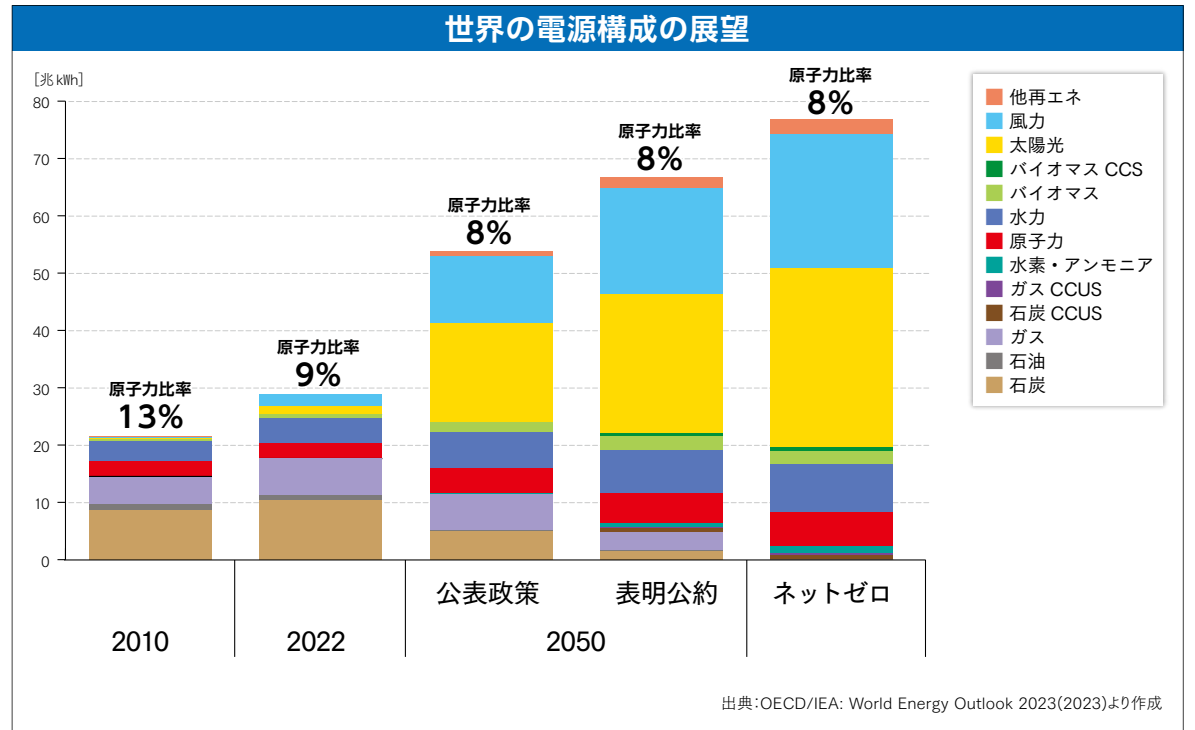
循環型社会に求められる 安価でクリーンなエネルギー確保

脱炭素化に加え、経済成長の実現には、クリーンで安定したエネルギー供給源の確保が重要であり、さまざまな社会課題の解決に貢献しうる。エネルギー供給源の確保は、エネルギー安全保障をはじめ、社会のデジタル化、製造業など幅広い産業の成長、水問題(淡水化)、食糧問題(肥料製造)など幅広い課題解決に関与しうる。また、リサイクルなど資源循環の実現には多くのエネルギーが必要であり、安価でクリーンなエネルギー確保は、サーキュラーエコノミー(循環経済)の実現にも寄与しうる。

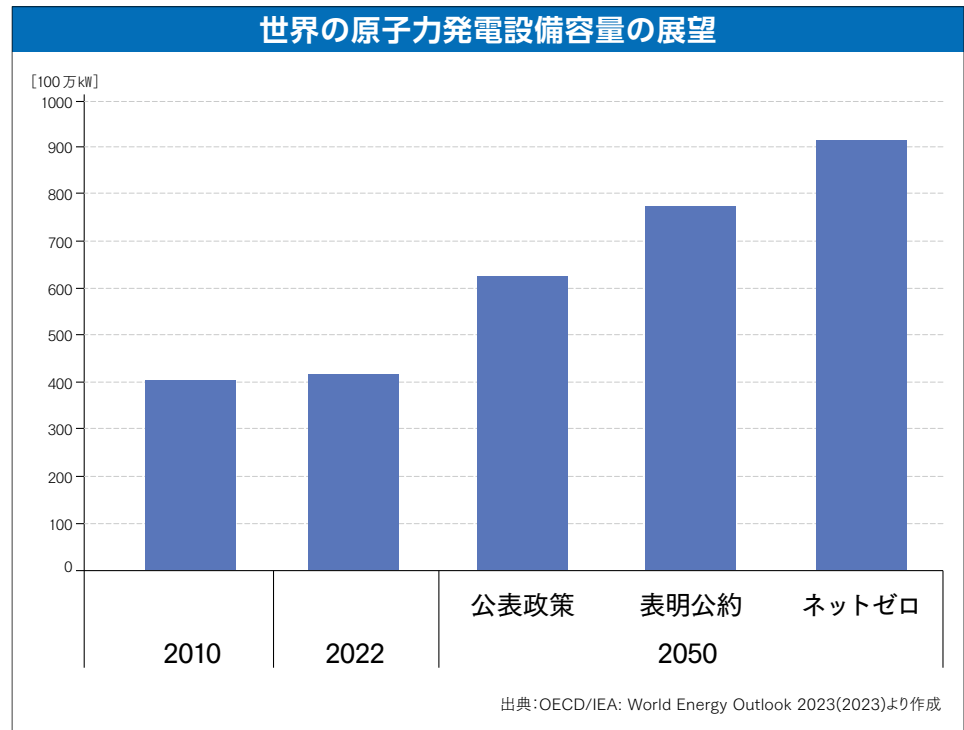
ただし、供給安定性や事業性、受容性、雇用創出などさまざまな要件を満足しうる単一の万能なクリーンエネルギー源はいまだ見いだされていないと考えられる。そのため、各技術の利点と欠点を踏まえた技術選択を行うことが大切になる。その中で原子力発電は、あらゆる電源と同様、利便性と課題を有する電源である。環境面では、運転時のCO₂排出がゼロであること、発電量あたりでみた際の建設資材の投入量が太陽光や風力発電に比べて少ないことなどが挙げられる。^[3]

また、エネルギー安定供給の面では、少量のウラン燃料で得られるエネルギー量が極めて大きく(天然ウラン1kgは石油約14t、濃縮ウラン1kgは同約60tに相当)、国内の在庫の燃料利用により長期間(数年間)の発電が可能とさ

【図1】



【図2】



の原子力設備容量は、ネットゼロシナリオにおいて、2022年約4億kWから2050年には2倍以上の約9億kWへ大幅に拡大し【図2】、脱炭素化実現には原子力の新設投資が重要になるとの示唆を与えていると考えられる。

れ、緊急時のエネルギー安定供給に資する。最近では2022年から2023年の電気料金上昇の際、原子力再稼働が行われた地域は他地域に比べて電気料金上昇が抑制された。^[4] 原子力は火力に比べ発電コストに占める燃料費の割合が小さいことから、化石燃料価格の高騰の影響も相対的に小さい。当時価格が高騰したLNGや一般炭を燃料とする火力発電への依存を原子力により抑制できたことが背景にあると考えられる。

ただし課題として、福島第一原子力発電所事故を踏まえた社会からの信頼の回復、原子力再稼働や使用済み燃料再処理工場の完成の遅延、放射性廃棄物の最終処分場の建設地点が未決定である点など、ステークホルダーを挙げての課題解決への努力を期待したい。

安全面・経済面の性能に優れた 次世代革新炉への関心高まる

その中で、安全面や経済面などでの性能を高めた次世代革新炉への関心が国際的に高まっている。世界初となる原子炉を開発し(シカゴ・パイル1号)、原子炉の原理である核分裂の連鎖反応の制御を実証した歴史的背景のある米国では、シェール革命によりエネルギー自給率が100%を上回り、物理的なエネルギー不足のリスクが相対的に低下する中でも、伝統的に原子力技術開



発に注力しており、小型軽水炉や高温ガス炉などの開発を進めている。

米国アイダホ州でプロジェクトが進められていた小型軽水炉は、再エネ出力変動に対する調整力としての機能や、工場などの所内電源、水素生産や海水淡水化に向けた利用が期待されている。しかし、建設コストの高騰などを背景に同州の建設プロジェクトはキャンセルとはなったが、建設に向けて進捗しているほかのプロジェクトも存在している。また、2023年には数十年ぶりに新設炉(ボーグル原子力発電所)が運転開始したが、長らく米国では原子炉新設が不在であり、工期遅延や建設コスト上昇に見舞われた。この中で米国政府は、革新炉の商業化に向けたロードマップを公表し、原子力開発を重視している」とみられ、革新炉開発の進展が期待される。^[5]

さまざまな機能を備えた原子炉開発が世界で進行中

次世代革新炉として多様な設計に基づく原子炉開発が国際的に計画されている【図3】。革新炉の全般的特徴として、自然災害に対する強靱化、炉心溶融などシビアアクシデントへの対策強化、調整力機能の強化(再エネ出力変動への対応)などが挙げられ^[6]、炉のタイプによりさまざまな特性の実装が計画されている。

例えば、既存の大型軽水炉の安全性をより向上した「革新軽水炉」は、既存炉の技術や規制、サプライチェーンなどの活用を通じて、商業化の面で実現性が高いといわれる。緊急時の自然冷却、放射性物質の外部放出防止、溶融燃料の放出防止(コアキャッチャー)など、多様な安全機能の導入が計画されている。

「小型炉」の技術開発も国際的に関心が高く、炉の構造がシンプルで小規模であることから自然冷却に適合した特徴があるといわれ、安全対策コストを低減できる可能性も指摘されている。また、炉構造のモジュール化により、建設工期の短期化が期待され、欧米の大型炉でみられたような審査期間の長期化や工期延長による建設コスト上昇^[7]の可能性を抑制できると考えられている。

「高温ガス炉」は、炉心に耐熱性能の高い黒鉛などセラミック材料、炉心熱の冷却材に化学的に安定性のあるヘリウムガスを採用した原子炉であり、高温熱の利用などに特徴がある。原理的に炉心の冷却機能喪失時などにおいても炉心溶融が発生しない設計が可能とされ、クリーンな高温熱(約900°C)の供給やそれを利用したクリーン水素製造、再エネ出力変動に対する出力調整が可能とされている。また、炉心の高温熱とそれによる高い熱利用効率を踏まえ、経済性の向上が期待されている。

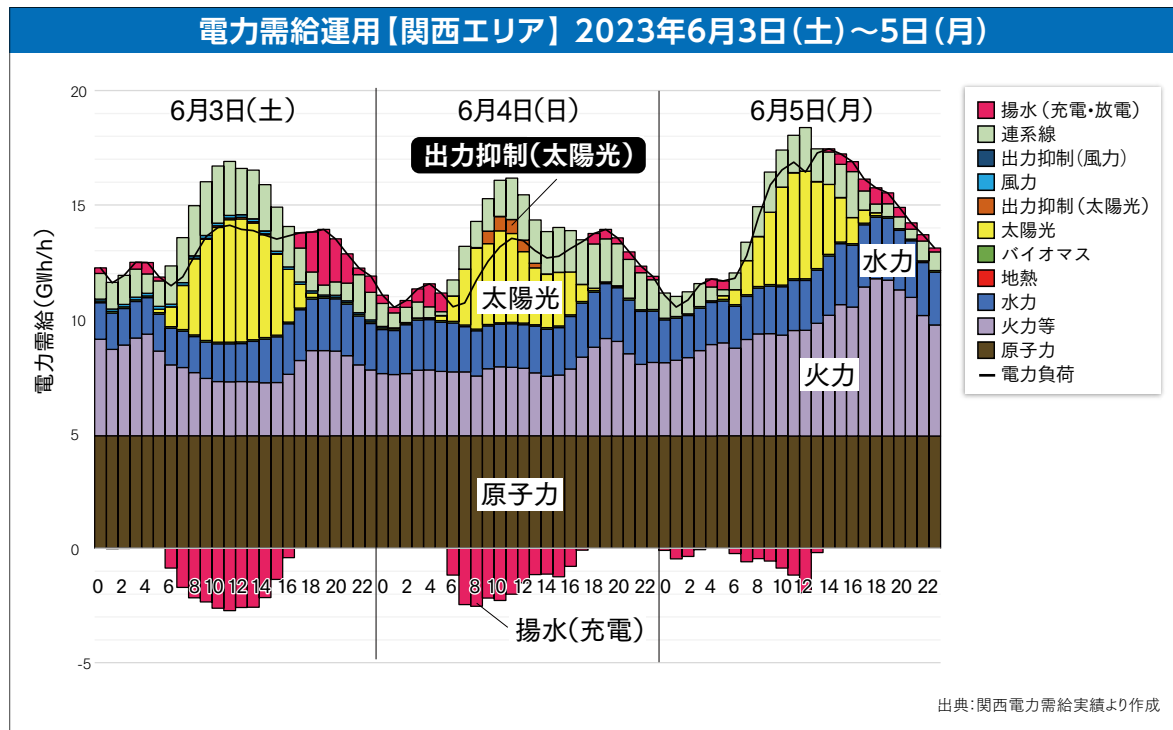
「高速炉」は、中性子が減速されにくい液体金属(Naなど)を冷却材として採用した原子炉であり、核燃料サイクル(使用済燃料からのウランやプルトニウム回収と利用など)の中において、高速中性子の利用を通じて、超長期にわたる核燃料資源の有効利用、ならびに放射性廃棄物の減容や有害度低減、バックエンドの負荷低減への貢献が期待されている。高速炉では、炉内の十分な高速中性子を利用し、消費した核燃料を上回る生産や、有害度の高い核種の燃焼が原理的に可能とされる。

ただし、革新炉はすぐに社会に展開できる技術ではなく、技術の実証、経済性の確認などのプロセスや、革新炉の安全性を反映した規制基準の検討なども必要となる。例えば、小型炉の場合、安全性の高さや装荷する燃料も大型炉に比べて少量となることから、事故時の避難計画エリアも小規模になりうるとされ、革新炉の特徴を踏まえた規制基準の策定が期待されている。^[8]

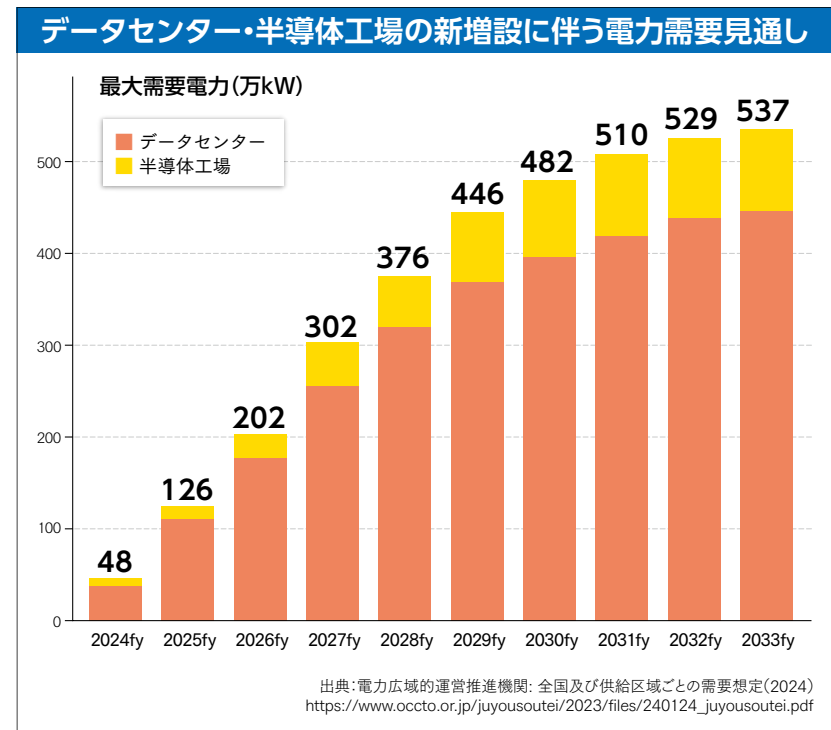
データセンターの増設に伴う新たな電力需要拡大の可能性

社会で流通するデータとその処理量の増加を背景に、内外において電力需要が今後、増加する可能性が指摘され始めている。業務支援などでのAI活用に伴う情報処理量の増加により、データセンターなどの立地とその電力消費が拡大する見通しが示されており、国内ではデータセンターや半導体工場の新増設により、今後10年間で電力消費量が約400億kWh、最大需要電力が約540万

【図5】



【図4】



kW増加するとの見方もある【図4】。AIやデータセンター活用が産業の成長に寄与することになれば、電力安定供給は経済成長の上でもいっそう重要になり、データセンターや工場の電力は昼夜ほぼ一定の電力消費になるペースロード負荷になるとみられ、電力供給面で安定した電源へのニーズがより高まる可能性もある。すでに、データセンターなどの電力需要増加に対応するため、情報分野での原

子力利用の計画も提案されており、例えば米国では、小型炉(SMR)を導入した大型データセンターも構想されている。長期的には、電気自動車や水の電気分解による水素製造などに伴い、電力需要が増加する可能性もあり、電力安定供給の確保は今後も重要になるとみられる。

このような変化を迎える電力情勢のなかで、革新炉を安定供給や脱炭素に活用するには、新增設・リプレースが大切になる。GX脱炭素電源法(2023年)により、安全性や不測の事由などが認められれば、60年超運転が可能となった。しかし、60年超運転の場合でも、運転認可期間終了後は廃止になり、今後、新設がなければ日本の原子力は将来ゼロにもなりうる。新設により、次世代への技術の継承と発展、原子炉サプライチェーンの維持、雇用の確保、関連産業の活性化にも貢献する。革新炉新設と既設炉の運転延長のバランスを踏まえた原子力のエネルギーミックスにおける位置づけ、世界の原子力ニーズへの対応など、日本の原子力の将来を総合的に考える必要があると思われる。

再エネのコスト低下は進むも電力システム全体のコストが問題

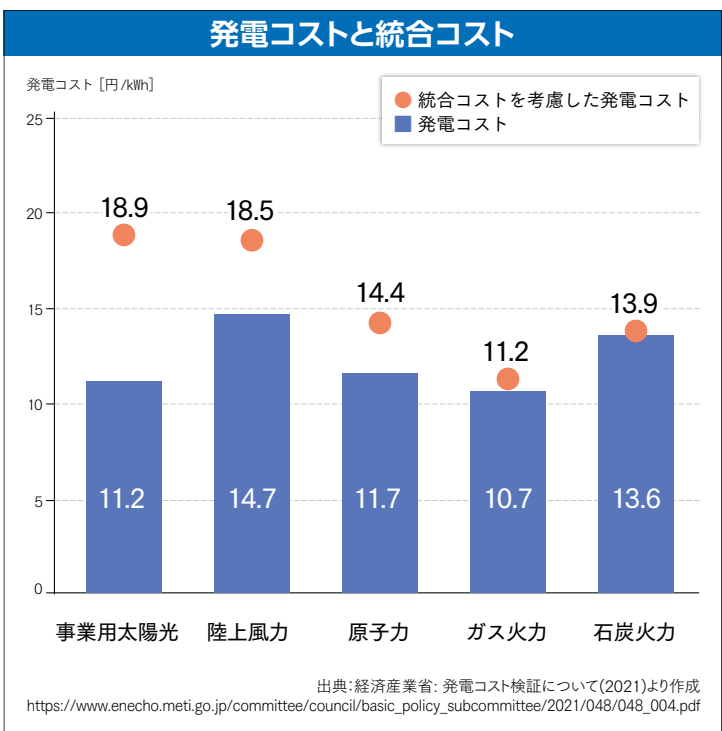
電力システムにおいては、コスト低下が進む再エネ電源の普及拡大により、再エネの出力変動に対する対策も重要

な課題となる。再エネの出力変動の対策として、調整力確保(発電機、揚水式水力や系統用蓄電池)、地域間連系線や地内線の運用・増強、再エネ出力抑制、補修計画・定期点検の最適化などが挙げられる。再エネによる電力需給運用への影響が徐々に拡大しており、日本においても電力需要の規模の大きなエリアで再エネ出力抑制が実施されるなど、影響が顕在化しつつある【図5】。そのため、フランスでは実施されているが、経済合理性が得られる場合は、再エネ大量導入により電力系統の調整力の必要量が将来増加する可能性も踏まえ、原子炉の出力調整運転や、将来に向けては高い負荷追従性能を有する革新炉導入、また、原子力発電を再エネ大量導入時に課題となる系統の慣性力確保にも活用することで、原子力と再エネの共存を実現することもありうると考えられる。

現在、コスト低下が進んだ再エネへの関心が国際的に高まっており、再エネや原子力の活用など電源選択に際しては、コスト評価を客観的に行うことが重要になる。国際的には、太陽光や風力自体の発電コストは火力や原子力と同水準まで低下した。しかし本質的には、電力のコストを考えると、発電コストに加え、送配電に要するコストなど、電力システム全体でコストを考える必要がある。発電、送配電ネットワーク、調整力のコストなど、電力システム全体のコストが電気料金に影響するため、特定の電源が導入された場合、電源自体のコストに加え、電力システム全体のコストに与える影響を考慮することが大切にな

る。太陽光発電自体の発電コストが火力や原子力に比べて安くなる場合でも再エネ大量導入時において、電力系統の統合コスト(系統接続に必要な調整力や送配電設備などのコスト)を考慮して電源のコストを評価した場合、太陽光の発電コストが火力や原子力よりも高くなりうる。この試算結果もある【図6】。再エネが電気料金に与える影響は、発電・送配電といった電力システム全体に関連するため、発電コストが安くても送配電など接続に要するコストが巨額になれば、再エネは電気料金を押し上げる可能性もありう

【図6】



して自国技術でカバーしているエネルギー供給の比率)。

例えば、日本の太陽光発電は、執筆時点で世界第3位の導入量を誇る。以前は国内生産品が大部分を占めていた時期もあるが、近年の太陽電池の国内出荷量は約8割から9割を海外生産品が占めている。^[11] 太陽光発電はエネルギー自給率向上に貢献するため重要な技術であるが、日本ではその技術自給率は必ずしも高いとはいえない状況にある。一方、原子力発電技術はほぼ国産技術とみなせる状況にあり、自国の技術で自国のエネルギー自給率の向上に貢献する。これを背景に、原子力は国内での雇用確保や世界で技術をリードできる環境をもたらし、多様な便益を期待できると考えられる。

技術の導入に際しては、便益と費用の評価が大切であり、例えば、便益ではエネルギー輸入費用の削減、費用では技術の導入コストなどが典型例として考えられるが、便益ではそのほかにも技術自給率やその向上による国内での雇用確保、世界での技術立国としての地位向上など多様な価値を考慮し、便益と費用の評価を行うことがより現実的であると考えられる。

カーボンニュートラル実現に向けては今後、脱炭素化技術が欠かせない存在になると考えられるが、各技術の便益や費用、加えて、エネルギーシステム全体の最適化の観点から、適切な技術選択を行っていくことが、脱炭素とエネルギー安定供給の実現に効果的に対応する上で大切であると考えられる。

るが、再エネ普及が実際さらに進行してみなければ、確定的な判断はまだまだ容易ではなく、今後の実証分析などが期待される。

多様な便益を生み出す国産技術 原子力発電の重要な存在価値

エネルギーは社会の血液であり、脱炭素化に加え、エネルギーセキュリティにも十分な配慮が必要になる。エネルギーセキュリティは、現在は化石燃料がエネルギー供給の大半であることを踏まえ、一般的には、化石燃料などの安定的な価格での十分な調達量の確保を指していると考えられるが、再エネなど新たな技術の普及を踏まえ、自国での脱炭素エネルギーの導入拡大や国産エネルギー開発強化、技術の製造に必要な重要鉱物資源の確保なども重視される傾向がみられるなど、エネルギーセキュリティの概念も変容しつつあるとも考えられる。

米国では、クリーンエネルギー機器の国内製造の推奨や、国内の技術サプライチェーンを強化する政策を進めるなど、国内製造を重視する姿勢も見受けられる。日本においても過去のエネルギー基本計画において^[10]、自給率に関して、資源自給率のほかに、自国でサプライチェーンのコア技術を確認し、その技術分野で世界をリードする「技術自給率」を重視することが表明されている(国内エネルギー消費に對

〈参考文献〉

- [1] IPCC: SPECIAL REPORT, Global Warming of 1.5 °C (2018)
<https://www.ipcc.ch/sr15/>
- [2] 外務省: 国連気候変動枠組条約第28回締約国会議(COP28)結果概要(2023年)
https://www.mofa.go.jp/notai/te/ch/pagew_000001_00076.html
- [3] US DOE: Quadrennial Technology Review, Table 10.4 (2015)
- [4] 経済産業省: 電気料金の改定について(2023年10月実施)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/fee/kaitai_2023/
- [5] US Department of Energy: Pathways to Commercial Lighthouses: Advanced Nuclear (2023)
<https://lighthouses.energy.gov/advanced-nuclear/>
- [6] 経済産業省: エネルギーを巡る社会動向を踏まえた革新炉開発(G価値)(2022年)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/001_06_00.pdf
- [7] Energy Technologies Institute: The ETI Cost Drivers Project Summary Report (2018)
<https://www.eti.co.uk/library/the-eti-nuclear-cost-drivers-project-summary-report>
- [8] OECD NEA: Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders (2020)
- [9] OECD/NEA/IEA: Projected Costs of Generating Electricity, 2020 Edition (2020)
- [10] 経済産業省: エネルギー基本計画(2018)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf
- [11] 経済産業省: エネルギー白書2023
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/>



東京大学 大学院工学系研究科 教授 小宮山 涼一

1998年東京大学工学部卒業、2003年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了、博士(工学)。同年日本エネルギー経済研究所入所、主任研究員、東京大学大学院工学系研究科准教授などを経て、現職。2007年、2009年米国ロレンスバークレー国立研究所客員研究員、2011年、2012年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。専門は、エネルギー・電力システムの数値シミュレーション分析。