

欧米諸国における原子力発電の利活用の展望 —脱炭素化への貢献と課題の克服に向けた取り組み—

Prospects for Nuclear Power in Europe and North America: Its Role in Decarbonization and Efforts to Overcome the Challenges

キーワード：原子力発電、脱炭素社会、投資リスク、政策的支援

服部 徹 稲村 智昌

世界的な脱炭素化の潮流の中で、原子力発電が果たしうる役割への期待が高まっている。しかし、電力需要が伸び悩む中、自由化された電力市場において、初期投資の大きい新增設を進めることは困難とされ、中長期的に一定のシェアを確保することが難しいとの見方がある。原子力発電を活用するオプションを有する諸外国では、そうした課題を克服し、脱炭素社会の実現を目指す政策に対応する新たな可能性を模索している。本総説では、諸外国の原子力発電事業が直面する課題を整理し、脱炭素社会の実現に向けた原子力発電の活用のための取り組みについて概観する。あわせて、本特集号に収録する論文の概要を紹介する。

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1. はじめに | 4.2. 脱炭素化の政策的推進を踏まえた取り組み |
| 2. 脱炭素化の潮流と原子力発電への期待 | 5. 本特集号のトピックス |
| 3. 自由化と脱炭素化を踏まえた原子力発電の社会経済的課題 | 5.1. 新增設に向けた投資の予見性と政策的支援 |
| 3.1. 自由化された電力市場における課題 | 5.2. 既設炉の活用と固定費の回収 |
| 3.2. 脱炭素化の政策的推進における課題 | 5.3. イノベーションの推進 |
| 4. 課題の克服に向けた取り組み | 5.4. 許認可に係る規制行政 |
| 4.1. 電力市場の投資リスクを踏まえた取り組み | 5.5. 政策の変遷と国民意識 |
| | 6. おわりに |

1. はじめに

世界的な脱炭素化の潮流の中で、原子力発電の役割が国内外であらためて注目されている。電力分野の脱炭素化に向けては、再生可能エネルギーが重視されているが、気象条件に左右されない原子力発電は安定的に発電することが可能であり、電力の安定供給に資する利点も大きい。放射性廃棄物の管理や安全性に対する社会からの信頼確保等、原子力発電固有の課題も存在するが、国際的には、原子力発電の役割と重要性が再認識されつつある。

しかし、原子力発電を取り巻く事業環境は国の内外を問わず厳しさを増している。欧米諸国

では、電力市場が自由化されて久しいが、電力需要の低迷や再生可能エネルギーの大量導入の影響もあって、市場価格が変動し予見性も低くなることで、原子力発電の収益性が見通しが立ちにくくなっており、特に民間の事業者による積極的な投資が行われにくい状況にある。加えて、既設炉も収益性が低下し、規制当局によって認められた運転期間制限の到達前に、早期閉鎖を余儀なくされるケースも見られる。福島第一原子力発電所の事故を契機として、わが国だけでなく諸外国でも安全性確保のための規制強化が図られ、その対応策に伴う費用の増加も収益を圧迫している。その結果、原子力発電は、脱炭素化に大いに貢献しうる電源でありな

がら、経済性の観点からは、その積極的な活用を困難にする状況が生じている。

そうした中で、原子力発電を脱炭素化のための重要な電源と位置づけている国や、少なくともそうした選択肢を残している国では、政府や事業者によって、課題の克服に向けた様々な取り組みがなされている。これら取り組み事例には、わが国においても参考になるものも少なくない。

本稿では、欧米諸国における原子力発電の活用に向けた課題を読み解きつつ、課題の克服に向けた様々な取り組みについて紹介し、今後の展望を述べる。以下、第2章では、世界的な脱炭素化の潮流における原子力発電への期待について概観する。第3章では、原子力発電の利活用に向けて欧米諸国が直面している社会経済的課題について述べ、第4章で、これら課題を克服するために模索されているいくつかの対応策について述べる。第5章では、本特集号の論稿をいくつかのトピックスに分けて紹介し、第6章で本総説のまとめを述べる。

2. 脱炭素化の潮流と原子力発電への期待

2015年のパリ協定採択以降、欧米諸国において、気候変動問題は主要な政治課題のひとつとなっている。元来、原子力発電は、エネルギーセキュリティへの貢献や経済性などのメリットから利活用が進められてきたが、気候変動問題への関心が高まるにつれ、発電時に二酸化炭素を排出しない電源としての期待が生じた。欧米諸国においては、1990年代以降に進められた電力自由化の影響により、初期投資の費用が巨額な原子力発電への積極的な投資は行われてこなかったが、近年の原子力発電に対する期待は、その活用を市場に委ねるだけでなく、政府が促すことも重要とされるほどに高まった。また、国際エネルギー機関（International Energy Agency, IEA）は、2019年に、原子力発電が直面する課題と対応策について、エネルギーシステムの脱炭素化へのインプリケーションと絡めて論じた報告書を公表したが、IEAが原子力に関する報告書を出すのは約20年ぶりのことであり、注目された（IEA, 2019）。

2018年10月に気候変動に関する政府間パネ

表1 欧米主要国における脱炭素化と原子力発電に関する近年の動向

	原子力事業者の現状など	脱炭素化に向けた原子力への政策的支援
米国	主に民間の電力会社が運転。新規の発電所は小売電力市場が自由化されていない規制州での建設のみ。自由化州では経済的な理由による既設炉の早期閉鎖も。原子力発電のシェア：20%（2020年）	州レベルでは、炭素の社会的費用に基づくゼロエミッションクレジット（ZEC）で既設炉の早期閉鎖を回避。連邦レベルでは、「超党派インフラ投資法」に基づき、既設炉の早期閉鎖の防止と先進原子炉開発に投資。
英国	1990年国営電力会社の分割民営化を経て、現在はEDF Energyが運転。2030年までに既設炉の多くが廃止予定。2016年に新規発電所の建設を開始。原子力発電のシェア：16%（2020年）	新設の原子力発電所に差額契約型固定価格買取制度（FIT-CfD）を適用。「グリーン産業革命のための10項目の計画」の10項目の一つに原子力を位置づけ、新設やSMR開発への投資等を明記。
フランス	2004年に株式会社化されたフランス電力会社EDFが運転。EDFは現在も株式の85%を政府が保有し、実質的には国営会社。原子力発電のシェア：71%（2019年）	2021年10月、国の戦略分野への投資計画「フランス2030」に小型炉への投資を含めた。2021年11月、原子力発電所の建設の再開を表明。

ル (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) が「1.5°C特別報告書」を公表して以降は、「2050年ネットゼロ排出」を長期的な目標とする国が増加した。欧米諸国の中では、2019年6月に英国が2050年ネットゼロ排出目標を決定したことを皮切りに、現在では全てのG7諸国が同様の目標を掲げている。ネットゼロ排出とは、温室効果ガスの排出と除去を平衡させることを指し、社会のあらゆるセクターでの脱炭素化が必要となる。その実現に向けて、各国政府が相次いで巨額の投資計画を発表しているが、原子力発電をその中に位置づけている国もある (表1)。

米国では、2021年1月20日に発足したバイデン政権の下で、原子力は気候変動対策の一部に位置づけられ、11月15日に成立した「超党派インフラ投資法」では、既設炉の早期閉鎖の防止のために60億ドル、先進原子炉開発に25億ドルの投資を行うことが決定した。

英国では、2020年11月、ジョンソン首相が「グリーン産業革命のための10項目の計画」を公表したが、10項目の1つが原子力発電である。この中には、大型原子炉の建設、新たなファイナンスモデルの制定、小型モジュール炉等への投資が含まれる。2021年11月に公表された「ネットゼロ戦略」においてもこの方針は踏襲されている。

フランスでは、2021年10月に公表された「フランス2030」の中で、2030年までに、小型かつ革新的な原子炉の開発に10億ユーロを投資することが発表された。さらに、同年11月9日、マクロン大統領は、2050年ネットゼロ排出目標の実現のため、原子力発電所の建設を再開することを表明した¹。

この他、カナダでは連邦政府といくつかの州政府が小型モジュール炉の開発を支援しており、またオランダでは2021年12月15日に公表された新政権の連立協定に原子炉2基の新設が含

まれた。いずれも気候変動対策の一環という位置づけである。

3. 自由化と脱炭素化を踏まえた原子力発電の社会経済的課題

脱炭素化に向けての世界的潮流の中、原子力発電の意義や役割が再認識されつつあるものの、自由化された電力市場において、その活用が困難となる状況が続いている。とりわけ、新增設に向けた経済的課題は多く、中長期的に原子力発電の割合を一定以上維持することが見通しづらくなっている。また今後、電力システムの脱炭素化を政策的に進めていくのにあたって、原子力発電がその中に位置づけられるために克服すべき課題もある。その大部分は、原子力発電が従来から直面してきた課題でもあるが、新たな課題もある。

3.1. 自由化された電力市場における課題

3.1.1. 収益性の低下および不安定化

自由化された電力市場において、原子力発電の収益性は、基本的に卸電力市場の価格に依存することになる。各時間帯の価格は、限界費用を反映した入札曲線と需要曲線の交点で決まり、限界費用の安い原子力発電所は、結果的にベースロード電源として運用され、市場価格と限界費用の差額を利益として、固定費の回収に充てることになる。

しかし、固定費を完全に回収できるかどうかは、市場全体の需要と供給のバランスで決まる市場価格の水準次第である。需要と供給の変化によって、市場価格は安くなったり高くなったりするが、長い目で見れば、需要を満たすために必要かつ効率的な電源は、市場で生き残るために必要な収入を得られるというのが市場原理の示唆するところである。ところが近年では、

料価格の高騰を踏まえた発言と思われる。

¹ マクロン大統領は、原子力発電所の建設再開の理由として、エネルギーの価格や自給にも言及している。直近の燃

固定価格買取制度などによる再生可能エネルギーの供給量が増え、それが卸電力価格を押し下げる一つの要因となっている²。原子力発電の場合、起動・停止を頻繁に行うことは困難で、市場価格が高い時を選んで稼働するといった柔軟な運転もできず、市場価格の下落は、そのまま収益を圧迫する要因となる。米国や欧州の一部の地域では、容量市場が創設され、供給力（kW）に応じた収入も得られるようになってきているが、その価格は、年による変動はあるものの、供給余剰が続く中で、低い水準にとどまっている³。

二酸化炭素を排出する火力電源に対し、排出量に応じた課金（カーボン・プライシング）がある場合、火力電源が卸電力市場において限界電源となることで、その分、卸電力価格は上昇し、排出枠を必要としない原子力発電にとっては、利益が増える。その価格が十分に高ければ、新增設を促すインセンティブになると考えられる（Joskow and Parsons, 2009）。欧州では、火力電源は排出枠を購入する必要があり、排出量取引制度（Emissions Trading System, EU-ETS）で決まる価格が発電時の追加費用となっている。しかし、その価格水準は十分に高いとは言えない状態が続いていた。

いずれにせよ、市場価格は、一時的に高い水準になることはあっても、需給の変化を受けて変動し、ベースロード電源としての原子力発電

の収入は不安定となる。このことは、投資のリスクを増大させるため、新規の投資を困難にする。需要家や小売事業者と長期契約を結んで収入を安定化させる方法もあるが、電力の小売市場が自由化されたことで、買い手となる小売事業者は長期の契約を結ぶことには消極的である。

3.1.2. 費用の増加と不確実性

海外では、建設費用の上振れリスクや遅延リスクも顕著となっている⁴。長い間隔を置いての建設であったり、新型炉の建設であったりすることが、こうした問題の要因となっている可能性がある。安全対策投資などで費用が増加していることも、原子力発電の収益を圧迫し、新規投資を抑制する要因の一つとなっている⁵。原子力発電所で生じる使用済燃料や放射性廃棄物の処理処分、すなわち「バックエンド」事業の費用にも不確実性がある。こうしたバックエンド事業は、極めて長期にわたる事業であり、多くの国で最終処分施設が決まっていない状況にある中、費用の不確実性も大きく、このことも新增設が進みにくくなる要因となりうる⁶。

収益と費用の両面において不確実性があることから、これから原子力発電への投資を考える投資家は、そのリスクに見合う収益率を要求するが、このことは資金調達費用の増加につながる⁷。

² 例えば、Cludius et al. (2014)は、ドイツにおける風力発電と太陽光発電が、2012年の卸電力価格をMWh当たり10ユーロ低下させたことを実証分析により明らかにしている。

³ ただし、ベースロード電源の原子力発電の収入の大半は卸電力の販売電力量収入であり、容量市場からの収入の割合は大きくない。

⁴ 例えば、フィンランドで建設中のOlkiluoto 3号機は、2009年の完成予定からすでに10年以上も遅延しており、建設費用も約2倍に上振れしている。

⁵ Joskow and Parsons (2012)は、福島第一原子力発電所の事故がなかったとしても、OECD諸国において、新規の原子力発電所への投資が大幅に増えていたことはなかったであろうと述べている。

⁶ 欧米諸国では、使用済燃料をめぐる政策に違いがあり、わが国と同様に、使用済燃料を再処理して利用していく政策を有する国としてフランスがあり、その他の国は直接処分を選択している。いずれの方法でも、使用済燃料や放射

性廃棄物の最終処分施設が必要であるが、実際に施設の選定が進んでいるのはフィンランドとスウェーデンのみであり、その他の国は決まっていない状況にある。

⁷ 収益や費用の変動リスクに伴う投資リスク以外にも原子力発電への投資に影響を与える要因もある。近年のサステナブルファイナンスの文脈で議論されている、サステナブルな経済活動の分類方法、いわゆる「タクソノミー」である。EUは、諸外国に先んじて独自のタクソノミーを制定しているが、本稿執筆時点において、原子力をEUタクソノミーに含めるか否かについて、結論が出ていない。大きな理由としては、EU域内には、原子力発電の活用に積極的なフランスや東欧諸国などと、脱原子力を決定しているドイツやオーストリアなどの国々が混在しており、原子力をめぐって政治的な対立があることが挙げられる。技術的には、原子力が発電時に二酸化炭素を排出しない電源であることについては異論がないものの、放射性廃棄物の処分が、循環経済の実現の観点からサステナブルとみなせるかが争点となっている。

同じく発電時に二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギー電源も、初期費用が大きく、政府の支援がなければ市場への参入は困難であるが、その発電費用は年々低下傾向にある。電源別の費用の比較においては、送配電網の増強費用も含めたシステムコストでの比較も必要との議論もあり⁸、慎重な検証が必要であるが、再生可能エネルギーと比較して原子力発電が費用面で圧倒的に有利な状況は薄れつつある。

3.2. 脱炭素化の政策的推進における課題

これまで自由化された電力市場における原子力発電の課題を述べてきたが、2050年ネットゼロ排出目標を達成するためには、あらゆる対策を政策的に推進していく必要があるとされている。脱炭素化に貢献する電源への投資も、市場原理に委ねるだけではなく、現在の再生可能エネルギーに対する政策的支援のように、政府の積極的な関与が求められるとの見方もできる。一方で、そのような政策の実行に向けては、それを後押しするような国民の理解が重要となってくる。

しかし、原子力発電を政策的に支援することについては海外でも理解が得られにくいとされている。従来から存在する廃棄物の問題や事故のリスクに対する懸念などもあって、原子力発電の活用に慎重な世論は根強く、国による違いはあるものの、原子力発電に対して、国民から無条件の支持を得られている国はほとんどない⁹。2011年に起きた福島第一原子力発電所事故以降、少なくとも一時的には原子力に慎重

な世論が高まり、例えばドイツは、2011年6月に脱原子力に舵を切ることとなった¹⁰。

また、電力システムにおける脱炭素化においては、再生可能エネルギーが大量導入され、相当の割合を占めることが見込まれる。このような電力システムにおいては、自然変動電源である再生可能エネルギーの出力変動を吸収するような柔軟性のある電源が求められる。従来それは、火力電源の役割であったが、脱炭素化を進める中でその維持が困難になる可能性もある。発電時に二酸化炭素を出さない原子力発電は、ベースロード電源として安定的に電力を供給することが期待されるものの、再生可能エネルギーが大量導入された電力システムへの適応も求められる。

4. 課題の克服に向けた取り組み

脱炭素化のために原子力発電を活用するという選択肢を有する国では、第3章で述べたような様々な課題を克服し、電力・エネルギーシステムの脱炭素化を見据えた新たな可能性に向けた取り組みも進んでいる。

4.1. 電力市場の投資リスクを踏まえた取り組み

4.1.1. 投資の予見性確保に向けた政府の役割

原子力発電の新增設を進めていくには、その経済性を高めていく必要があり、原子力業界においては建設費用の削減に向けた努力が重要

⁸ システムコストの考え方とその留意点については、永井(2020)を参照。

⁹ わが国でも、原子力発電に対して否定的な意見が多数を占める状況が続いているが、近年では、即時廃止を求める意見についてはやや減少傾向もみられる(日本原子力文化財団, 2021)。

¹⁰ その後、ドイツにおいて、脱原子力政策を見直す動きはこれまでのところほとんどない。しかし、少数ではあるが、一部の専門家は、ドイツの脱原子力政策は見直すべきであるとの見解を表明、また、そうした見解を裏付けるモデル分析の研究成果を公表している。例えば、ドイツの排出削減

目標は再生可能エネルギーだけで達成することは困難との指摘がなされている他(Murray, 2019)、原子力を全廃した状態と比較して、2017年時点での原子力発電のシェアを維持していた方が、再生可能エネルギー大量導入に伴う起動停止コストや需給調整コストは増加しても、kWhのコストがそれ以上に安くなり、低コストになることを示した実証分析もある(Teirilä, 2020)。原子力を全廃した場合、石炭火力の稼働率が高まることで、石炭火力の立地地域の大気汚染が進み、それに伴う社会的費用が、原子力を維持する費用を上回ることを示す結果もある(Jarvis et al., 2020)。

となる。加えて、資金調達費用の削減も重要となり、投資の回収をより確実にする仕組みが求められるが¹¹、これについては、政府が果たせる役割も注目されている。先に指摘したように、電力市場の価格変動リスクが資金調達費用を押し上げる要因となっており、それを抑制するには、価格を安定化させ、リスクを軽減する長期契約が必要となる。しかし、競争的な市場の中で、買い手となる小売事業者が長期の契約に応じることは難しく、また、自由な競争の進展を阻害するとの懸念もあって、長期契約の幅広い活用は必ずしも進んでこなかった。そこで、政府やそれに準ずる組織が、規制枠組みの中で事業者と長期契約を結んでリスクを軽減し、最終的に需要家も経済的な恩恵を受けられるようにする仕組みが英国で検討され、注目されてきた。2016年に建設を開始したHinkley Point C原子力発電所に適用された差額契約型固定価格買取制度（Feed-in-tariff Contract for Difference, FIT-CfD）が、その例である。

ただし、自由化された市場において、直接的な補助金ではないとしても、政府が特定の電源を支援することについては、競争政策上の問題となりうることに留意する必要がある。

4.1.2. 既設炉の活用

経済的な理由などで新增設が難しい場合でも、原子力発電の電気出力を増加・維持させる手段として、既設炉の出力向上（Uprates）や長期間運転（Long Term Operation, LTO）がある。

出力向上については、特に米国で、1990年代後半以降、積極的に実施されてきた。収益性の低下等の理由によって原子力発電所の閉鎖が続き、基数が減少しているにもかかわらず、原子力発電の最大電気出力が急減することなく、

発電電力量を維持することができた理由でもある¹²。

出力向上の具体的な手法としては、測定精度改善型（Measurement Uncertainty Recapture, MUR）、ストレッチ型（Stretch Power Uprates, SPU）および設備拡張型（Extended Power Uprates, EPU）の3つがある（大野, 2019）。MURとSPUは比較的に安価に実施しうるが、増加できる出力は小さい。他方で、EPUは出力を大きく増加させることができるものの、大幅な設備改修を伴い、費用も大きくなる。EPUは、主に沸騰水型軽水炉で採用されている。しかし、米国でも近年は出力向上の申請の件数、規模ともに減少している¹³。

既設炉の長期間運転（LTO）は、運転期間の延長によって原子力発電の出力を維持するものである。海外では原子力発電所の運転期間について明示的に制限を定めている国は必ずしも多くはなく、安全性が確認されることを前提に、当初の計画を超える運転期間を認めるケースがある（稲村, 2021）。米国では、当初の運転期間を40年としているが、ライセンスの更新により20年間の延長が可能であり、その更新回数には明確な定めがない。最近では2回目のライセンス更新を行った発電所もあり、規制当局の審査の体制も整っている。

出力向上やLTOをするかしないかに関わらず、既設炉を活用していくためには、それが着実に固定費を回収できる見通しが立っていることが必要である。米国の一部の州では、炭素の社会的費用に基づく価値を既設炉の追加的な収入として認めるゼロエミッションクレジット（Zero Emission Credit, ZEC）を導入して、既設炉を経済的に維持できるようにしている（服部, 2018）。また、フランスでもEDFの既設

¹¹ 主に欧州で導入された、原子力発電のための投資回収の仕組みについては、服部(2015)を参照。

¹² 米国における原子力発電による発電電力量の維持には、運転中保全（オンラインメンテナンス）の活用による定期検査期間の短縮や長期サイクル運転（最大24ヶ月）による、設備利用率の向上も大きく寄与している。

¹³ Lei et al. (2017)は、1991年から2012年までの、出力向上の申請に関するデータを用いて、電力の自由化が出力向上の申請の有意な増加と結び付いていることを示している。自由化された地域において、出力向上が収益性のある投資として、より積極的に活用されたとみられる。

炉を競争の促進に活用する中で、一定の収入を確保できるような仕組みを検討中である。

4.1.3. 小型モジュール炉の開発

従来の大型軽水炉への投資が難しくなる中で、小型モジュール炉（Small Modular Reactor, SMR）の開発への期待が高まっている。従来の大型炉による規模の経済性のメリットは失われるものの、小型化によって初期投資費用が抑えられ、習熟効果による費用削減効果も狙えるとの期待がある（Vujić et al., 2012）。それは、大型軽水炉への投資における資金調達費用の課題を克服するものである。加えて、工場で完成された原子炉モジュールを現地で据え付けるという工法を用いることによって、建設工期の短縮と、遅延リスクの低減が期待されている。従来の大型軽水炉の建設においても、各構成要素のモジュール化は進められているものの（田邊, 2011, pp.25-27.）、SMRではさらにこれを発展させ、原子炉そのものをモジュール化して工場で完成させることが期待されている。

4.2. 脱炭素化の政策的推進を踏まえた取り組み

4.2.1. 社会との関係構築

電力市場の課題への対応を含め、脱炭素化を政策的に推進していく中で、原子力発電がその中に明確に位置づけられるためには、国民や社会から信頼され、期待されることが望ましい¹⁴。このことは従来から重要な課題であったが、海外では、社会の要請に積極的に対応することで、社会との新たな関係を構築しようとする取り組みも見られる。それは、若手の育成や女性比率の向上など、業界内部の変革を伴う新たな取り組みでもある。

一つの取り組みとして注目されるのは、英国のNuclear Sector Dealである（HM Government,

2018）。Nuclear Sector Dealは、政府が策定する産業戦略（Industrial Strategy）において、分野別に、政府と産業界が連携して取り組む内容を取りまとめたもの（Sector Deal）の原子力分野版である。Nuclear Sector Dealで示された目標には、新設やバックエンドの費用削減に関わるものの他に、「2030年までに、原子力産業に従事する女性の比率を40%にする」という目標が含まれている。これは、原子力事業の発展によって、男性に偏った雇用を生むという結果を望むのではなく、可能な限り社会全体が裨益するように、産業界が目標を設定していることが伺える。

加えて、既設炉の運転や原子力発電所の新設等によって、立地地域に対する経済効果もたらされることも重視されている。立地地域においても、原子力事業に従事する技能を有する専門性を持った人材を育成できるように、専門家を養成する大学の開設等の動きがすでに見られている。

4.2.2. エネルギーシステムの脱炭素化への対応

4.2.2.1. 運転の柔軟性の向上

従来、原子力発電はベースロード電源として、出力の調整をせずに運用することを前提としてきた。しかし、再生可能エネルギーの自然変動電源が普及する中、電力システムとして、出力の柔軟性（フレキシビリティ）が求められるようになっており、原子力発電においても柔軟な出力変動（負荷追従運転および周波数制御）による対応が注目されている。原子力発電のシェアの高いフランスなどでは従来から負荷追従運転が行われており、EDFの58基の原子力発電所では、30分以内に20%から100%の出力変動が可能となっている。また、Primary frequency control（30秒以内での周波数制御）で±2%、Secondary frequency control（15分以内での周波

¹⁴ 国民の信頼を回復することは、投資家が原子力発電を投

資の対象として検討する上でも重要な要素になる。

数制御)で±5%の出力変動も可能となっている。こうした柔軟性の提供には、適切な設計や運転員の技能を必要とするものの、過去30年間で安全性への影響は認められず、追加的な費用もわずかであると報告されている (Morilhat et al., 2019)。

なお、先に述べたSMRは、出力の小さい炉を1つのサイトで複数運用することから、柔軟性の提供が可能とみられており、再生可能エネルギーと共存する原子力発電の一つのあり方としても注目されている。

4.2.2.2. 水素製造など発電以外の脱炭素への貢献

脱炭素社会の実現に向けては、水素利用に対する期待も高まっている。2021年12月現在において、利用されている水素の多くは、天然ガスの水蒸気改質や石炭のガス化によって製造されているが、いずれも二酸化炭素を排出する製造法である。中長期的には、製造時に二酸化炭素を排出しない方法によって水素を製造することが求められており、再生可能エネルギーを活用した電気分解による製造が期待されているが、高温水蒸気電解に適した高温ガス炉等の新型炉や、従来の軽水炉のオフピーク電力を活用した原子力発電による水素製造も注目されている。現在、海外でも実証プロジェクトが進められているが、将来的に、水素製造が原子力発電所の新たな収入源となり、既設炉の維持につながる可能性も期待されている (USDOE, 2020)。

他にも発電以外の脱炭素への貢献として、原子力発電による熱供給なども注目されている。

5. 本特集号のトピックス

本特集の論稿は、これまでに述べてきたような、原子力発電の利活用に向けた課題やその克服に向けた対応策における、様々な論点を取り上げている。以下では個別の論稿の概要を紹介

する。

5.1. 新增設に向けた投資の予見性と政策的支援

脱炭素に向けて、原子力発電を重要な電源と位置づける一方で、自由化された電力市場においては新增設を促すことができず、政府が何らかの支援の枠組みを導入することで結果的に脱炭素をより安価に実現できる可能性がある。しかし、そのような支援が市場競争に与える影響には留意する必要がある。

欧州においては、欧州委員会の国家補助規制の審査を通じて、加盟国による支援策の導入が欧州大の競争に及ぼす影響を評価することになっている。丸山(2022)の論文は、こうした国家補助規制の判断の中で、英国のHinkley Point Cを巡る欧州委員会とオーストリアの間での訴訟に着目し、政府による新增設に向けた支援策と発電市場における公正な競争環境の形成・維持等の関係について論じている。

また、原子力発電の新增設を促すのにあたっては、建設から運転期間を経て、廃棄物の処理処分まで、長期にわたる事業の費用の不確実性に対処する必要がある。FIT-CfDで収入の安定化が図られても、費用の不確実性が大きく、利益を失うリスクが大きいと、資金調達費用が嵩み、総費用を押し上げる要因になる。

服部(2022b)の論文では、英国で、FIT-CfDに代わる新設の原子力発電所の資金調達手法として2019年頃から検討されてきた規制資産ベース (Regulated Asset Base) モデルの導入に向けた議論から、投資家が負担するリスクを軽減することで、資金調達費用を削減することの意義と課題について論じている。

また、服部(2022c)の研究ノートでは、新規に建設される原子力発電所から発生する放射性廃棄物の処分に係る事業者の費用の負担について予見性を与えるため、地層処分を行う使用済燃料と放射性廃棄物の所有権を事業者から国に移転する英国の廃棄物移転価格 (Waste

Transfer Pricing) の制度を取り上げ、その際、事業者が国に支払う移転価格の設定方法の概要について紹介している。

5.2. 既設炉の活用と固定費の回収

原子力発電の新增設が困難な状況が続く間も、脱炭素化を着実に進めるためには、既設炉を最大限活用していくことが重要となる。そのためには、第4章で述べたように、既設炉が着実にその固定費を回収し、十分な収益を確保できるという見通しが立つことが必要である。しかし、実際には卸電力価格が低迷し、固定費の回収もままならず、早期閉鎖を余儀なくされるような状況も欧米諸国では見られる。すでに紹介した米国の一部の州で導入されたZECは、早期閉鎖を防ぐ役割を果たしている。

フランスでも既設炉の固定費回収に配慮した制度が検討されている。服部(2022a)の研究ノートでは、フランスの大手電力会社EDFが所有する既設の原子力発電所で発電した電力を、規制された一定の価格で新規参入者が利用できるようにした競争促進策を見直す中で、固定費の回収をより確実にする措置を盛り込んだ新たな制度の概要案を紹介している。

5.3. イノベーションの推進

大型軽水炉は十分に確立された技術である一方、初期投資が巨額であるがゆえに新規投資が困難となる状況に直面している。こうした経済的課題の克服と、脱炭素化に向けた原子力のさらなる利活用に向け、技術革新にも積極的な取り組みが見られる。第4章で紹介した小型モジュール炉(SMR)の開発が一つの例である。

堀尾(2022)の研究ノートでは、小型モジュール炉の国際的な開発動向について論じている。具体的には、民間企業が主体となり、複数のSMRが開発・検討されている米国、カナダ、英国を取り上げ、国内の状況、特に政策的な支援の実態を分析している。

5.4. 許認可に係る規制行政

原子力発電の安全性の確保は、その利活用に向けての大前提となるが、その点で重要な役割を果たすのは原子力発電の様々な許認可に係る規制の手続きである。こうした許認可は、新增設はもとより、原子力発電の維持に向けた取り組みとして第4章で紹介したような出力向上や長期間運転の許認可においても不可欠だが、今後はSMRのような新型炉の許認可でも重要な役割を果たす。

佐藤(2022)の研究ノートでは、技術的専門性に基づいた評価と法的整合性の観点からの判断という二面的な性質を有する原子力事業の許認可に対して、技術者と法律家の双方で構成されるパネルを活用した行政審判制度によって制度的補完を図っている米国の事例に着目し、当該制度の法的位置づけや審査の実例等を紹介している。

5.5. 政策の変遷と国民意識

原子力発電の利活用に関しては、従来から国民の受容性に配慮する必要があったが、福島第一原子力発電所の事故以降、世界的に原子力発電に対する見方は厳しくなっている。そうした中で、脱炭素化に向けての政策において、原子力発電の利活用を有効かつ経済的な選択肢として検討するには、そうした国民の意識にこれまで以上に配慮していく必要がある。

英国は、政府が原子力発電の推進に積極的な姿勢を示しており、その背景には国民の原子力に対する理解や支持があると考えられている。桑垣・服部(2022)の論文では、日英一般国民を対象に2020年11月に実施したインターネット調査結果に基づき、気候変動への対策として役立つのであれば、という条件付きでの原子力発電に対する消極受容(relevant acceptance)について分析している。具体的には、気候変動に対する原子力発電の貢献度、他の技術との代替可能性、安全性や公正さ、組織への印象(信頼)などに着目して、日英国民の意識の差異やその

要因を探っている。

もっとも、英国政府の姿勢は、過去において一貫して原子力に積極的だったわけではなく、否定的だった時期もあり、歴史的な背景について理解をする必要がある。稲村(2022)の論文では、2000年代中盤以降に、原子力発電の活用に向けて積極的な姿勢に再び転じた英国に着目し、原子力政策の変遷とその背景要因について論じている。

6. おわりに

欧米諸国では、2050年ネットゼロ排出（カーボンニュートラル）を目標として、再生可能エネルギーとともに原子力発電を政策的にどのように位置づけるのか、その活用を自由化された電力市場においてどう実現していくのか、また、社会に対してどのように受け入れてもらうのか、難しい舵取りが求められている。原子力発電は、エネルギーシステムの脱炭素化を進めるために、有力な選択肢の一つであり、条件を整えば、その目標をより安価に達成する可能性を有するとも考えられる。しかし、原子力発電の利活用のために克服すべき課題は多い。とりわけ、新增設を通じて原子力発電のシェアを将来にわたって一定以上に保つことは難しくなっており、有効な対策を打たなければ、貴重な選択肢を失いかねない状況になりつつある。

欧米諸国の状況を個別にみれば、原子力発電の位置づけは様々であるが、それを脱炭素化に向けた有力な手段と位置づけている国あるいは国際機関では、そうした課題に向き合って、打開策を模索している。それは、決して原子力発電を救済することを目的とするものではなく、市場環境や社会の要請に最大限対応すべく、原子力発電の担い手が新たな挑戦を通じて、自らを変えていく取り組みでもある。

本特集号は、主に社会経済分野における、そうした取り組みの一部を取り上げて、様々な専門分野の視点で意義や課題について論じた論

稿を取りまとめた。重要なトピックスのすべてを網羅したものとは言えないが、脱炭素に向けた原子力発電のあり方に関心を持つ読者にとって少しでも有益なものとなっていれば幸いである。

【参考文献】

- Cludius, J., Hermann, H., Mthhes, F.C., and Graichen, V. (2014). “The merit order effect of wind and photovoltaic electricity generation in Germany 2008-2016: Estimation and distributional implications,” *Energy Economics*, 44, 302-313.
- HM Government (2018). Nuclear Sector Deal, Industrial Strategy.
- IEA(2019). Nuclear Power in a Clean Energy System.
- Jarvis, S., Deschenes, O. and Jha, A. (2020). “The Private and External Costs of Germany’s Nuclear Phase-Out,” Energy Institute at Haas Working Papers WP 304.
- Joskow, P.L. and Parsons, J.E. (2009). “The economic future of nuclear power,” *Daedalus* 138 (4), 45-59.
- Joskow, P.L. and Parsons, J.E. (2012). “The Future of Nuclear Power After Fukushima,” CEEPR WP 2012-001, MIT Center for Energy and Environmental Policy Research.
- Lei, Z., Tsai, C-H., and Kleit, A.N. (2017). “Deregulation and Investment in Generation Capacity: Evidence from Nuclear Power Uprates in the United States,” *Energy Journal*, Vol.38, No.3, 113-139.
- Morilhat, P., Feutry, S., Le Maitre, C., and Favannec, J.M. (2019). “Nuclear Power Plant flexibility at EDF,” hal-01977209.
- Murray, L. (2019). “The need to rethink German Nuclear Power,” *Electricity Journal*, 32, 13-19.
- Teirilä, J. (2020). “The value of the nuclear power plant fleet in the German power market under the expansion of fluctuating renewables,” *Energy Policy*, 136, 111054.
- USDOE (2020). “Could Hydrogen Help Save Nuclear?” Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy. <https://www.energy.gov/ne/articles/could-hydrogen-help-save-nuclear> (アクセス日:2021年11月22日)
- Vujić, J., Bergmann, R.M., Škoda, R., and Miletić, M. (2012). “Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper?” *Energy*, 45, 288-295.
- 稲村智昌(2021).「米国及び欧州諸国の原子力発電所の長期間運転を巡る動向」電力中央研究所報告 Y20002.
- 稲村智昌(2022).「英国の原子力政策の変遷とその背

- 景要因—退潮から再興へ—」電力経済研究, No.68, 113-126.
- 桑垣玲子・服部徹(2022). 「気候変動対策としての原子力発電に対する『条件付き消極受容』の日英国民意識の分析」電力経済研究, No.68, 97-112.
- 大野薫(2019). 「米国原子力発電所の最近のパフォーマンス—既存炉を最大限に有効活用—」日本原子力学会誌, Vol.61, No.12, 47-50.
- 佐藤佳邦(2022). 「米国原子力規制委員会の行政審判制度について—原子力安全許認可審査パネル(ASLBP)の紹介—」電力経済研究, No.68, 79-93.
- 田邊朋行(2011). 『『オールジャパン』による原子力国際展開の課題—業種別国際展開戦略オプションに基づく問題点の抽出と改善提案—』電力中央研究所報告 Y10033.
- 永井雄宇(2020). 「電力システムの経済性評価手法—LCOE とシステムコストを中心とした考察—」総合資源エネルギー調査会第 6 回発電コスト検証ワーキンググループ資料 1.
- 日本原子力文化財団(2021). 「調査結果：原子力に関する世論調査(2020年度)」.
- 服部徹(2015). 「欧州における競争環境下の原子力発電の維持に資する経済的手法の有効性と課題」電力中央研究所報告 Y14007.
- 服部徹(2018). 「米国の電力市場改革と原子力発電の収益性—収益の見通しに関する総合評価—」電力中央研究所報告 Y17005.
- 服部徹(2022a). 「フランスの原子力発電への規制アクセス制度 ARENH の見直しと新たな制度的措置の概要案」電力経済研究, No.68, 57-63.
- 服部徹(2022b). 「英国における新設原子力発電所の資金調達手法「規制資産ベース(RAB)モデル」の導入をめぐる議論」電力経済研究, No.68, 31-46.
- 服部徹(2022c). 「英国の新設原子力発電所を対象とする廃棄物移転価格制度の概要—政府と民間の責任分担のアプローチ—」電力経済研究, No.68, 47-53.
- 堀尾健太(2022). 「小型モジュール炉の開発と政策的支援の動向」電力経済研究, No.68, 67-76.
- 丸山真弘(2022). 「原子力発電所の新增設に対する国の支援策と競争政策との関係—英国 Hinkley Point C 原子力発電所への支援策を巡る議論から—」電力経済研究, No.68, 15-30.

服部 徹 (はっとり とおる)
電力中央研究所 社会経済研究所
稲村 智昌 (いなむら ともあき)
電力中央研究所 社会経済研究所

