

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau National Diet Library

論題 Title	諸外国における新型原子炉開発の動向と関連施策
他言語論題 Title in other language	Trends of Development of Advanced Reactors and Relevant Policies in Foreign Countries
著者 / 所属 Author(s)	木村 謙仁 (KIMURA Kenji) / 日本エネルギー経済研究所戦略研究ユニット原子力グループ主任研究員
書名 Title of Book	脱炭素社会の技術と諸課題 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Technologies for Decarbonized Society and Related Issues)
シリーズ Series	調査資料 2021-5 (Research Materials 2021-5)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2022-03-29
ページ Pages	73-87
ISBN	978-4-87582-892-1
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	近年、大型軽水炉とは異なる設計の原子炉として、第四世代炉や小型モジュール炉 (SMR) といった新型炉が注目を集めている。諸外国における開発動向と関連する施策、課題を探る。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰 (めいせき) 性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

諸外国における新型原子炉開発の動向と関連施策

日本エネルギー経済研究所

戦略研究ユニット原子力グループ主任研究員 木村 謙仁

目 次

はじめに

I 新型炉とは何か

- 1 第四世代炉と SMR
- 2 安全性
- 3 経済性
- 4 再生可能エネルギーとの併用
- 5 エネルギー多目的利用

II 電力市場の評価

- 1 米国
- 2 英国
- 3 フランス
- 4 まとめ

III 新型炉開発動向

- 1 米国
- 2 英国
- 3 カナダ
- 4 その他

IV 事業性に関する施策

おわりに

【要 旨】

これまでに利用されてきた大型軽水炉とは異なる設計の原子炉として、第四世代炉や小型モジュール炉（SMR）といった新型炉が近年注目を集めている。米国、英国、カナダをはじめ、世界中で多くの国々が新型炉の開発を進めており、特に民間事業者が開発の主体となっているこれら三か国では、事業者にとって魅力的な環境整備や規制面での対応も行われている。

新型炉に対する期待が高まっていることは確かであるが、これまで数十年にわたって実用化に至らなかった事実も直視しなければならない。本気で実用化を目指すのであれば、開発を進める側としては、その原因を真摯に分析・反省した上で今後の導入を進めていく必要がある。また、政策を形成する側には、電力市場が自由化された地域や国を中心に、原子力事業が厳しい状況に直面していることを踏まえ、発電事業自体の環境を改善することが求められる。

はじめに

近年の原子力事業は、様々な要因から厳しい状況にある。日本においては2011年の福島第一原子力発電所の事故後に停止した既設原子炉の再稼働が進んでおらず、新設の見通しも立っていない。世界に目を向けてみても、西側諸国の多くでは新設プロジェクトに大幅な遅延が生じ、相応のコスト超過が発生しているほか、電力市場の自由化が進んだ地域では既設炉の採算性も危ぶまれている。その一方で、気候変動対策のための低炭素電源や大規模な安定電源の重要性は世界的に高まっており、多くの国々が原子力を将来にわたるオプションとして位置付けている。特に直近では日本を含め、多くの国が温室効果ガス排出量ネットゼロを始めとした野心的な目標を打ち出しており、この傾向が一層顕著に見られる。

このような状況において原子力が将来にわたり活用されるために、これまで使用されてきた炉型の原子炉建設や運転をより安全かつ効率的に行うだけでなく、それと同時に高性能な新型炉を開発する動きが世界中で見られるようになってきた。本稿ではこのような諸外国における新型炉開発の動向について概観するとともに、新型炉の実用化に係る論点を整理する。

I 新型炉とは何か

1 第四世代炉と SMR

原子炉はその開発段階に応じて、幾つかの世代に分類される。現在世界で最も多く使用されている軽水炉は第二世代であるが、一部の国では第三世代炉も実用化されており、更にその改良型として「第三世代+（プラス）」の軽水炉が建設されている。これらの炉型は軽水（普通の水）を冷却材として使用する点において共通している。その先の技術として、軽水以外のものである原子炉の開発が進められており、それらは第四世代炉と呼ばれている。第四世代炉国際フォーラム（Generation IV International Forum: GIF）によると、以下の表1に示す六つの炉型が第四世代炉として挙げられている。

こうした炉型の概念とは別に、近年では小型モジュール炉（Small Modular Reactor: SMR）と呼ばれる原子炉も注目を集めている。SMRはその名のとおり小型の原子炉で、原子炉の中心

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和4（2022）年1月20日である。

表1 第四世代炉の炉型と特徴

炉型	主な特徴
ナトリウム冷却高速炉 (SFR)	液体ナトリウムを冷却材として用いることにより、低圧で熱効率の高い運転が可能。また、ナトリウムを自然循環させることで、ポンプなどを使用せずとも炉内の冷却を維持することができる。使用済燃料由来のプルトニウムをウランと混合した MOX 燃料を使用することにより、ウラン資源の有効活用と廃棄物の減容化も可能。
ガス冷却高速炉 (GFR)	不活性なヘリウムガスを冷却材として採用。ウラン資源の長期利用や廃棄物の減容化が期待されるほか、熱供給や水素製造にも活用可能。
鉛冷却高速炉 (LFR)	化学的に活性なナトリウムの代わりに液体化した鉛を冷却材として採用。安定性及び冷却性能に優れる。熱供給や水素製造にも活用可能。
超臨界圧水冷却炉 (SCWR)	熱力学的な臨界点 (220 気圧、374℃) を超えた水を使用する。これだけの高温・高圧下では液体と気体の区別がなくなり、沸騰が発生しないため、水と蒸気分離機構が不要となって設備を小型化できる。
超高温ガス炉 (VHTR)	GFR と同様ヘリウムガスを冷却材として用いる。原子炉出口温度が 700~950℃ 以上となるため、高温の熱供給や高効率の水素製造が可能。温度帯が比較的低いものは高温ガス炉 (HTGR) と呼ばれる場合もある。
熔融塩炉 (MSR)	熔融状態としたフッ化物塩を燃料兼冷却材として循環させる。液体燃料であるため、燃料の成型加工が不要である。また、炉心に存在する燃料の量が少ないため、事故リスクも大幅に減らすことができる。

(出典) Generation IV International Forum website <<https://www.gen-4.org/gif/>> の記述などを基に筆者作成。

となるリアクターモジュール (1 基当たり 50~70MW 程度) を工場で大量に製造しておくことを想定している。このモジュールは小型である故に、完成した状態で船舶やトラックなどにより輸送可能である。こうして必要数のモジュールを、実際に発電所を建設するサイトに輸送し、現地では基本的に据付工事のみを行う。このような「モジュール工法」が SMR の特徴である。ただし、一口に SMR と言っても、その設計には世界中で様々なものが検討されており、従来と同様の軽水炉を採用する SMR もあれば、前述した第四世代炉の技術を採用するものもある。

本稿ではここまで見てきた第四世代炉や SMR を総称して「新型炉」と呼称する。

2 安全性

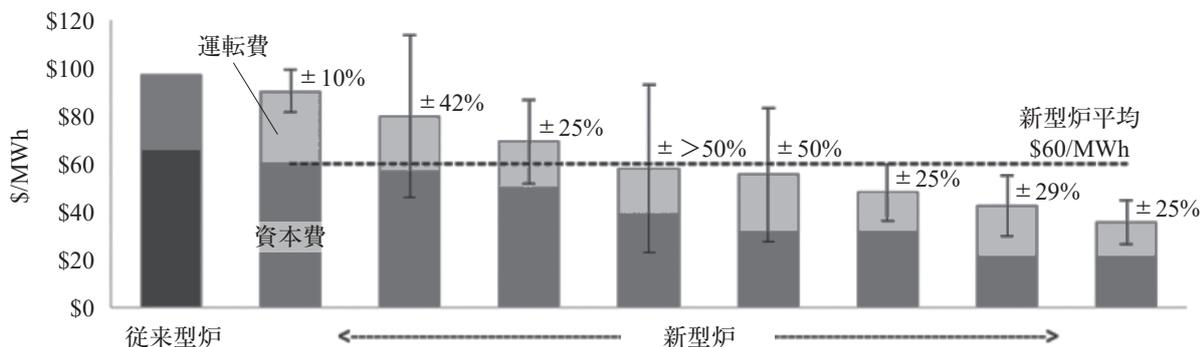
これらの新型炉は従来の軽水炉と比較して複数の優位性を持つとされている。その一つが安全性であり、表1で触れたとおり、第四世代炉ではポンプなどによらない受動的な冷却システムを取り入れる、不活性な冷却材を採用する、あるいは放射性物質の量を抑えるといった方法で、従来型炉を上回る安全性を確保する試みが進められている。また、軽水炉型の SMR についても、既存の大型軽水炉より安全性が高くなると見込まれている。例えば、数ある SMR の設計概念のうち、米国ニュースケール・パワー (NuScale Power) 社製 SMR の場合、水の自然循環を利用して原子炉を冷却するため、非常事態用の電源や追加の冷却水を必要としない。また、リアクターモジュールを地中に埋没させる設計のため、地震や航空機の衝突にも強いとされる。加えて、一般的に SMR は大型炉に比べて出力規模が小さく、施設内で取り扱う放射性物質の量も少なくなる。そのため、万が一、炉内からの漏出が発生した場合でも、その影響は比較的小さなものにとどまると考えられる。

3 経済性

前述のとおり、SMRは完成した状態のリアクターモジュールを建設サイトに輸送し、現地では基本的に据付工事のみを行うため、建設作業における工程を単純化できる。近年、米国、フランス、フィンランドなどで行われている大型軽水炉の建設プロジェクトでは大幅な遅延が生じており、原子力発電所の新設における大きなリスクとなっている。しかし、シンプルな工程のモジュール工法ではこの問題を解決し、建設コストの抑制に資することが期待されている。また、設備容量（MW）当たりのコストが従来型炉と比較して低くなるかについては議論の余地があるものの、発電所1か所当たりの設備容量が小さくなる関係上、初期費用の総額は小さくなることが想定され、投資決定に至るまでの障壁が下がることも考えられる。この特性は、現在の電力需要が比較的小規模で、資金的な余力も少ない新興国にとって、原子力技術の新たな魅力となる可能性がある。加えて、設備容量当たりのコストに関しても、将来的に市場が拡大すれば、リアクターモジュールの量産効果によるコストダウンにつながり得る。こうしたコストダウン効果が、1基当たりの設備容量縮小による効率性低下を上回るかどうか注視すべきポイントとなるであろう。第四世代炉に関しても表1のとおり、従来型炉にはない特性を用いた高効率化を目指しており、これによって経済性が向上すると期待されている。

当然のことながら、こうした新型炉の導入初期段階（First-of-a-kind: FOAK）では想定以上のコストがかかることが予測される。しかし、プロジェクト件数を重ね、ノウハウや量産体制が整った状態（Nth-of-a-kind: NOAK）では、従来型炉を上回るコスト競争力が期待される。これに関しては、米国の非営利団体である Energy Innovation Reform Project（EIRP）がNOAKを想定した新型炉のコストに関する調査を実施しており、その結果は以下の図1のとおりとなっている。この調査では、調査対象となった炉型について個別の推計結果こそ明かされていないものの、いずれの新型炉も均等化発電コスト（Levelized Cost of Electricity: LCOE）⁽¹⁾で従来型炉を下回ることが示唆された。

図1 新型炉（NOAK）のLCOE推計と従来型炉との比較



(注) 調査対象は、Elysium Industriesの溶融塩炉、General Electricのナトリウム高速炉、Moltex Energyの溶融塩炉、NuScale Powerの軽水炉SMR、Terrestrial Energyの溶融塩炉、ThorCon Powerの溶融塩炉、Transatomic Powerの溶融塩炉、X-energyの高温ガス炉。ただし、図中の棒グラフはコストが高い順に並べたものであり、この注で記載した順番とは必ずしも一致していない。また、図中の±は誤差の範囲を示す。

(出典) Energy Innovation Reform Project, *What Will Advanced Nuclear Power Plants Cost?: A Standardized Cost Analysis of Advanced Nuclear Technologies in Commercial Development*, July 2017, p.4. <<https://www.innovationreform.org/wp-content/uploads/2018/01/Advanced-Nuclear-Reactors-Cost-Study.pdf>>

4 再生可能エネルギーとの併用

近年では多くの国で、太陽光や風力発電といった変動型再生可能エネルギー（Variable Renewable Energy: VRE）の導入が急速に進んでいるが、それに伴って電力供給の安定性が課題として指摘されるようになってきている。現状では柔軟な運転が可能な天然ガス火力発電がVREの変動に対する調整電源として活用されているが、将来的にエネルギーシステムの大規模な低炭素化を進めるのであれば、火力発電はほぼ使用不可能となり、逆にVREは電力系統の中で現状より更に大きな割合を占めるようになることが想定される。

これに対して、現在開発が進められている新型炉の多くは高い負荷追従性能⁽²⁾を有するとされており、VREが大量導入された際の電力安定供給にも貢献し得る。ただし、原子力の負荷追従運転は既にフランスなどで実施されており、技術的には新型炉のみに認められる特徴とは言えない。また、現在の電力市場の設計において、原子力発電はあくまでもベースロード電源と一般的に位置付けられており、この市場設計に手が加えられない限り、負荷追従運転が普及することは考えにくい。特に、火力発電の場合はVREの変動に合わせて発電量を抑えることは燃料の消費抑制になり、経済的に一定程度のメリットが得られるのに対し、燃料費が安く、燃料交換までの期間も事前に決定されている原子力発電には、現状では出力を抑制するインセンティブが働かないことに注意が必要である。

なお、負荷追従運転を実施せずベースロード電源として用いる場合でも、原子力はVRE大量導入下で大きな価値を持ち得る。電力部門の温室効果ガスを（ほぼ）ゼロ・エミッション化するに当たり、ゼロ・エミッション火力（水素発電もしくは炭素回収・貯留（Carbon Capture and Storage: CCS）付き火力発電）あるいは原子力発電なしにVRE比率を高める場合、「需要を大幅に上回る発電設備が導入され、時期によってはその大半が抑制されるなど、非常に無駄の多い需給運転を強いられることになる」ため、「ゼロ・エミッション火力の導入可能量に制約が生じた場合には、電力単価の上昇を抑えるために原子力が大きな役割を果たし得る」との指摘が既往研究によってなされている⁽³⁾。

5 エネルギー多目的利用

原子力は熱供給や水素製造など、発電以外の用途にも用いることができる。熱供給に関しては、現行の原子炉でも周辺地域への熱供給を行っているものが存在するが、高温ガス炉を始めとした新型炉は1,000℃近い高温を化学工業などの産業部門に供給できるとされている。これを活用することで、発電部門以外の低炭素化を促進することができる。

また、近年では低炭素化における水素の役割が盛んに議論されるようになってきている。従来、水素は化石燃料改質によって製造されてきたが、原子力や再生可能エネルギー由来の電力を用いて水を電気分解することで、温室効果ガスを排出することなく水素を製造することができる。製造した水素は産業や運輸、ガス供給など様々な部門で活用でき、低炭素化を促進できるため、発電部門と他部門を結びつける働き（これを「セクターカップリング」と呼ぶ。）が可能となる。

- (1) 設備費や運転維持費、燃料費など、発電に必要なコストを想定発電量で割ったもの。発電量1kWh当たりのコストを示す指標として、広く使用されている。
- (2) 常に変動する電力の需要量と供給量を一致させ続けるため、細かく出力を調整して発電設備を運転すること。特に太陽光や風力といったVREは時間と共に発電量が変化し続けるため、導入量が増えるにつれて、その調整役として働く設備が重要となる。
- (3) 松尾雄司ほか「2050年の発電部門ゼロ・エミッション化に向けた検討」エネルギー・資源学会『第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集』2018.1, pp.519-524.

従来型炉でも水の電気分解による水素製造は可能だが、高温ガス炉の場合は水の高温熱分解（ISプロセス）という選択肢があり、日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency: JAEA）が研究開発を進めている。なお、水素製造量当たりのコストを考える場合、製造設備の設備利用率が非常に重要な要素となる。そのため、同じゼロ・エミッション水素でも、気象条件の影響を受けるVREに対して、長時間運転を継続できる原子力や大型水力を利用する場合の方が、コスト面では有利となる。

Ⅱ 電力市場の評価

前章で扱った新型炉が実際に商用規模で導入されるか否かは、事業としての採算性に大きく左右される。そこで、本章では諸外国における現在の電力市場の状況を整理する。

1 米国

米国の中でも電力市場の自由化が進んだ地域において、原子力の競争力は大きく弱体化している。米国ではシェール革命以降、非常に安価な天然ガスが供給されるようになったほか、限界発電コスト⁽⁴⁾が低い太陽光や風力発電といった再生可能エネルギーの導入が進んだことで、市場における電力価格が下落し、原子力発電事業者が得られる収益も低下したためである。例えば、ペンシルバニア州やニュージャージー州などから成る北東部のPJMエリア⁽⁵⁾では図2のとおり、いずれの既設炉も収益性を悪化させていることが分かる。2014年には復調が見られたが、これは同年に米国で発生した極渦（polar vortex）による大寒波の影響で原子力の採算性が大幅に向上したと説明されており⁽⁶⁾、むしろ原子力の収益性が外的な要因に大きな影響を受けることを示す事例だと言える。こうした状況は発電事業者の経営判断にも影響を与えており、PJMエリアではスリーマイルアイランド1号機が経済的な理由により、当初の計画を繰り上げて2019年9月に閉鎖されている。

PJMエリアでは容量市場⁽⁷⁾が導入されており、既設炉を保有する事業者にとっても収益源となっているものの、図2で示した各原子力発電所の収益は容量市場による収入を含んだものであり、困難な状況を十分に改善するには至っていないことが分かる。また、PJMエリアの容量市場価格は、新規電源が固定費を回収できる水準であるNet CONE（Net Cost of New Entry）を下回る水準が続いていることも指摘されている⁽⁸⁾。

(4) ある発電設備が追加的に1kWhを発電するために必要とするコスト。太陽光や風力発電は燃料費が発生しないため、非常に安価となる。

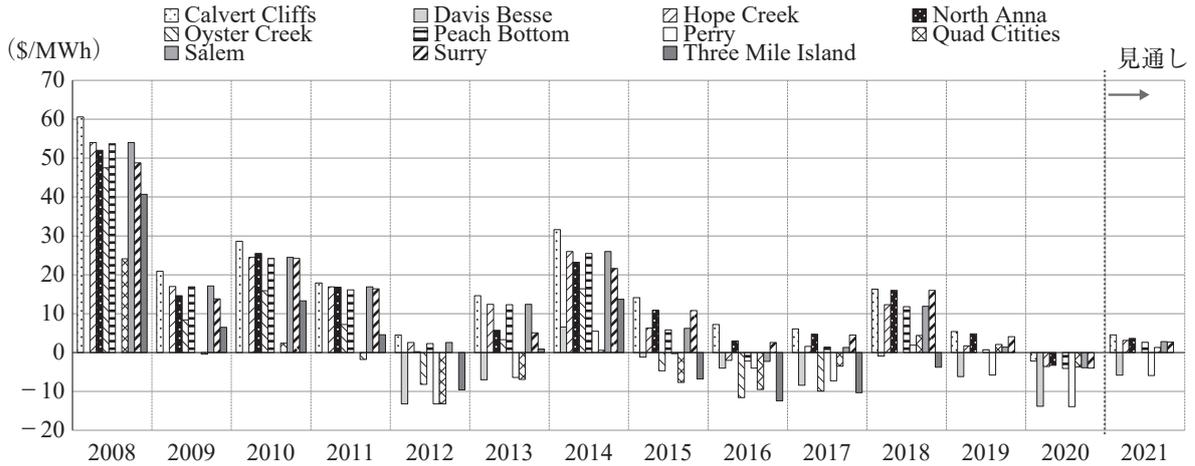
(5) PJMは米国の地域送電機関（Regional Transmission Organization: RTO）の一つであり、電力市場の管理・運営機関でもある。ここではPJMが管轄する地域をPJMエリアと呼称する。

(6) Monitoring Analytics, *2020 State of the Market Report for PJM*, Volume 2: Detailed Analysis, March 2021, p.355. <https://www.monitoringanalytics.com/reports/PJM_State_of_the_Market/2020/2020-som-pjm-vol2.pdf> 資料中で明示はされていないものの、極渦によって大寒波が発生し、暖房用途などでガス需要が急増したことにより、ガス価格が急騰したものと考えられる。

(7) 将来必要となる電力の供給力を予め確保するために設立された市場で、電力量（kWh）ではなく発電設備容量（kW）が取引の対象となる。

(8) 服部徹「容量市場の価格決定要因に関する考察—わが国の制度設計と海外の経験からの示唆—」『電力経済研究』No.66, 2019.3, pp.53-68.

図2 PJM エリアにおける原子力発電所別収益の推移



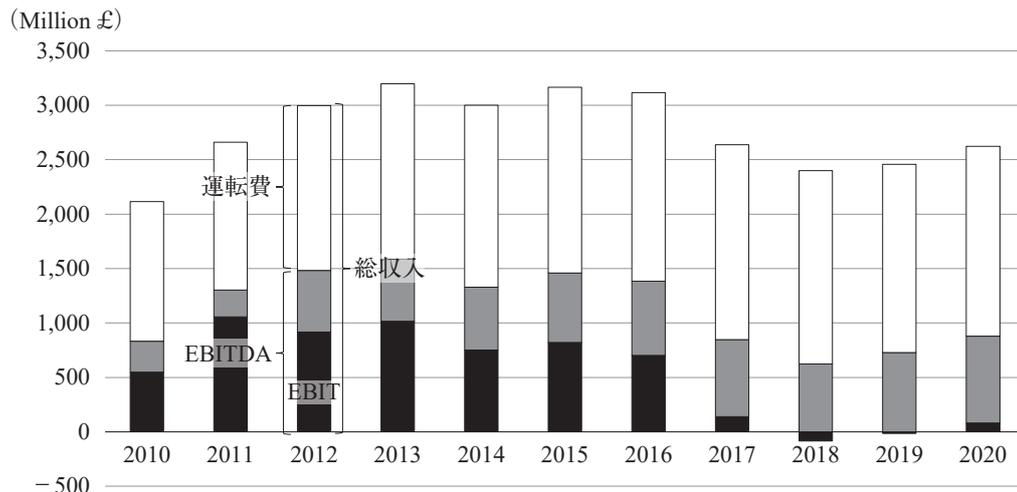
(注) 上記の数値は容量市場による収入を含む。

(出典) Monitoring Analytics, 2020 State of the Market Report for PJM, March 2021 を基に筆者作成。

2 英国

英国でも米国と同様に天然ガスが安価に産出されているほか、風力発電を中心とした再生可能エネルギーの普及が進んでいることから電力市場価格は低下傾向にあり、原子力発電事業の経済性低下が続いていた。図3は英国で原子力発電事業を実施しているEDF エナジー社の収益構造を、原子力部門に絞って図示したものである。同図より分かるとおり、総収入から運転費や減価償却費を差し引いた収益は年々低下しており、2018年及び2019年にはゼロを下回る水準となった。ただし、英国では2021年9月頃より天然ガス価格の高騰が発生しており、それに伴って電力価格も高騰していることが報じられている⁽⁹⁾。そのため、原子力発電事業の収

図3 EDF エナジー社による原子力発電事業収支の推移



(注) EBIT (Earnings Before Interest and Taxes) は支払利息や税金を差し引く前の営業利益。EBITDA (Earnings Before Interest Taxes Depreciation and Amortization) はそれらに加えて減価償却費を差し引く前の営業利益。

(出典) EDF エナジー社の財務報告書 (Consolidated Segmental Statement: CSS) を基に筆者作成。

(9) S&P Global Platts, September 13, 2021 など。

益性が改善されている可能性もあるが、前述のとおり外的要因によって収益性が左右されるという状況は、事業者にとって好ましいとは言い難い。

3 フランス

米国や英国とは異なり、フランスではフランス電力（Électricité de France: EDF）が国内の大部分の発電設備を保有しているため、電力市場はほぼ独占状態にある。また、米国や英国のように天然ガスを安く生産することもできない。これら2点が主な要因となって、フランスでは原子力が高い競争力を維持している。こうした状況に対して、EDF以外の事業者の参入を促すため、フランスでは原子力発電アクセス制度（Accès Régulé à l'Electricité Nucléaire Historique: ARENH）と呼ばれる制度が実施されている。この制度では、EDFが原子力によって発電した電力を、年間100TWh⁽¹⁰⁾を上限に42ユーロ/MWhの規制価格で他の事業者に販売する。ある事業者がこの制度によって電力を調達するということは、その事業者にとって、自前の設備で電力を発電するよりARENHの規制価格の方が安いことを意味している。これまでに、2015年の市場価格低下を受けて2016年受渡分への申込みがゼロになった⁽¹¹⁾ほか、2020年には新型コロナウイルス感染症の影響で電力需要が減少し、「不可抗力」による契約破棄が認定される⁽¹²⁾など、一定の不確実性はあるものの、基本的にEDFの原子力発電が他の事業者の電源より高い競争力を持っていることを前提として、このような制度が施行されていることが窺える。

4 まとめ

以上の米国や英国の事例から、電力市場の自由化が進んだ地域では原子力発電事業が苦境に直面していることが分かり、逆にその競争力が維持されているのはフランスのように独占的な市場が残されている地域であると言える。したがって、日本を含めて自由化を志向する国においては、何らかの対策を講じない限り、将来的に原子力発電事業に対する投資を集めることが一層困難になることが予想される。上記の事例は既存の大型軽水炉に関するものであるが、これは将来的な経済性に優れると期待される新型炉であっても同様である。むしろ、実績の薄い導入初期において、新型炉は大きな不確実性を抱えることになるため、投資を一層鈍らせることになりかねない。こうした状況を打開するためには、政策的な支援が必要となる。

Ⅲ 新型炉開発動向

前章で述べたとおり、自由化された電力市場において原子力発電事業は苦境に置かれているものの、そうした国々では依然として原子力が気候変動対策やエネルギーの安定供給に重要な役割を果たすと位置付けられており、将来の有望なオプションとして新型炉開発も積極的に進められている。本章ではそうした動向を概観する。

(10) “Le Bénéfice ARENH.” EDF website <<https://www.edf.fr/entreprises/electricite-gaz/le-benefice-arenh>> 上限を150TWhに引き上げるべきとの議論もある。

(11) 「海外電力関連トピックス情報 [フランス] エネルギー業界、原子力発電切り出し制度の改革に反対」2018.10.18. 電気事業連合会ウェブサイト <https://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1258532_4115.html>

(12) “EDF has notified three energy suppliers of the termination of their Arenh contracts,” June 2, 2020. EDF website <<https://www.edf.fr/en/the-edf-group/dedicated-sections/journalists/all-press-releases/edf-has-notified-three-energy-suppliers-of-the-termination-of-their-arenh-contracts>>

1 米国

米国ではトランプ（Donald J. Trump）政権、バイデン（Joseph R. Biden Jr.）政権ともに新型炉の開発にも力を入れ、政府として様々な支援を提供している。特に主要なものとして、エネルギー省（Department of Energy: DOE）が2015年から実施している「原子力技術革新加速ゲートウェイ（Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear: GAIN）」プログラムが挙げられる。本プログラムでは研究開発プロジェクトに資金を投入するのみではなく、国立研究機関の充実した設備や情報、そして実証炉建設のための敷地を提供するほか、新型炉開発を手掛けるベンダーに対して規制機関との議論の場を設けるなど、規制面での対応でも支援を行っている⁽¹³⁾。さらに、DOEは2020年5月、「新型炉実証プログラム（Advanced Reactor Demonstration Program: ARDP）」を新たに立ち上げた。ARDPでは完全な機能を有する実証炉を7年以内に建設することを始めとした目標を掲げている。2020年10月にはARDPによる支援対象として、GE日立ニュークリア・エナジー社（以下「GE日立」）と協力してナトリウム冷却高速炉を開発するテラパワー社と、小型の高温ガス炉である“Xe-100”を開発するX-エナジー社を選定し、それぞれ8000万ドルを拠出することがDOEより発表された⁽¹⁴⁾。

これらのほか、ニュースケール・パワー社が手掛ける軽水炉SMR、“VOYGR”の開発プロジェクトが特に注目されている。このプロジェクトでは1基当たり77MWのモジュールを複数基併設することとなっており、2030年までに全面的な運転を開始することを目標としている。建設サイトとしてはDOEのアイダホ国立研究所（Idaho National Laboratory: INL）が敷地を提供しており、完成したSMRから発電される電力は隣接するユタ州の公営共同電力事業者（Utah Associated Municipal Power Systems: UAMPS）に供給されることとなっている⁽¹⁵⁾。2020年9月には同社のSMRのうち、50MW仕様のものについて原子力規制委員会（Nuclear Regulatory Commission: NRC）から標準設計承認（Standard Design Approval: SDA）を発行されており⁽¹⁶⁾、実際の導入に向けた大きな一歩を踏み出している。

さらに米国では、連邦議会でも新型炉開発を促進するための立法活動が進められている点が特徴的である。2018年9月には原子力イノベーション能力法（Nuclear Energy Innovation Capabilities Act: NEICA, P.L.115-248）が、2019年1月には原子力イノベーション近代化法（Nuclear Energy Innovation and Modernization Act: NEIMA, P.L.115-439）が成立した。内容上の共通点としては、DOEが民間事業者を支援することのほか、NRCにも新たな技術に適応した審査体制を構築することを求め、同時にそのための予算要求なども認めていることが指摘できる。

また、2021年7月には米国原子力基盤法（American Nuclear Infrastructure Act: ANIA）の法案が上院に提出されている。ANIAには新型炉開発を進めるインセンティブとして、認証プロセスを先駆けて通過した事業者に賞金を与えることなどが含まれているほか、既設炉に対する支援として、認証を受けた原子炉に対してクレジットを付与することも認める内容となってい

(13) “Regulatory Updates.” GAIN website <<https://gain.inl.gov/SitePages/Regulatory%20Support.aspx>>

(14) “U.S. Department of Energy Announces \$160 Million in First Awards under Advanced Reactor Demonstration Program,” October 13, 2020. Office of Nuclear Energy website <<https://www.energy.gov/ne/articles/us-department-energy-announces-160-million-first-awards-under-advanced-reactor>>

(15) “The Carbon Free Power Project.” NuScale Power website <<https://www.nuscalepower.com/projects/carbon-free-power-project>>

(16) “U.S. Nuclear Regulatory Commission issues Standard Design Approval for NuScale’s SMR design,” September 14, 2020. *ibid.* <<https://newsroom.nuscalepower.com/press-releases/news-details/2020/U.S.-Nuclear-Regulatory-Commission-issues-Standard-Design-Approval-for-NuScales-SMR-design/default.aspx>>

る⁽¹⁷⁾。こうした立法活動は超党派の議員グループによって進められており、政権交代を経ても途切れることなく継続されやすいものと考えられる。

2 英国

英国では、第四世代炉などの技術を使用したSMRを先進型モジュール炉（Advanced Modular Reactor: AMR）と呼称し、明確に区別している。ビジネス・エネルギー・産業戦略省（Department for Business, Energy and Industrial Strategy: BEIS）はAMR実証プロジェクトを選定するため、2018年に2段階から成るコンペティションを開始した。第1段階で実施されたフィージビリティ・スタディの結果を受けて選出されたプロジェクトが第2段階へと進み、政府から最大で合計4000万ポンドの出資を受けて技術開発を進めることになる。2020年7月には第2段階への進出企業が発表された。選出されたのは、ウェスティングハウス社の鉛冷却高速炉、ユレンコ社を中心とするグループが開発する高温ガス炉のU-バッテリー、そしてトカマク・エナジー社によるモジュール式核融合炉となっている⁽¹⁸⁾。

こうしたAMR開発促進とは別に、ロールス・ロイス社を中心としたコンソーシアムが軽水炉型のSMRを開発している。こちらはAMRコンペティションの対象ではないが、政府傘下の研究機関である英国研究・イノベーション機構（UK Research and Innovation: UKRI）から1800万ポンドの出資を受けている⁽¹⁹⁾。2021年5月には規制機関である原子力安全局（Office for Nuclear Regulation: ONR）と環境庁（Environment Agency: EA）が実施する包括的設計審査（Generic Design Assessment: GDA）の対象に、SMR及びAMRを含めることが発表された。GDAに合格し、ONRの設計認証確認（Design Acceptance Confirmation: DAC）とEAの設計承認声明（Statement of Design Acceptability: SoDA）を得た上で、実際の建設サイトを対象とした審査に合格することにより、当該設計の炉を用いた発電所の建設が可能となるため、実際のSMR導入に当たってはこのような規制機関側の対応も不可欠である。2021年11月、ロールス・ロイスSMRコンソーシアムは、ONRに対してGDAの申請を行った⁽²⁰⁾。

3 カナダ

カナダでは、政府が保有し民間事業者が運営する原子力研究所（Canadian Nuclear Laboratories: CNL）が敷地内でのSMR建設を計画しており、建設を実施する事業者を募集している。現状では高温ガス炉を採用するU-バッテリー社、スターコア・ニュークリア社、グローバル・ファースト・パワー社のほか、溶融塩炉に高温熱供給や負荷追従性能を持たせた統合型溶融塩炉（Integral Molten Salt Reactor: IMSR）を採用するテレストリアル・エナジー社が本プロジェクトに応募している。

カナダではこうしたベンダー側のみならず、州政府や電力会社など、ユーザー側もSMRに高い関心を示しており、オンタリオ州など4州がSMR導入に向けた協力体制を構築している。

(17) S.2373 - American Nuclear Infrastructure Act of 2021, 117th Cong. (2021-2022). <<https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/2373?s=1&r=46>>

(18) “Advanced Modular Reactor (AMR) Feasibility and Development Project,” 10 July 2020. GOV.UK website <<https://www.gov.uk/government/publications/advanced-modular-reactor-amr-feasibility-and-development-project>>

(19) “Low-cost nuclear challenge,” 15 November. 2021. UKRI website <<https://www.ukri.org/our-work/our-main-funds/industrial-strategy-challenge-fund/clean-growth/low-cost-nuclear-challenge/>>

(20) “Rolls-Royce SMR milestone as first regulatory step initiated,” November 17, 2021. Rolls-Royce SMR website <<https://www.rolls-royce-smr.com/press/rolls-royce-smr-milestone-as-first-regulatory-step-initiated>>

また、政府や企業のみならず、市民団体など多様なステークホルダーから成る協議体が SMR 導入に向けたロードマップを 2018 年に、その内容を更に発展させたアクションプランを 2020 年に発表しており、各主体が取るべき行動の明確化に努めている。2021 年 12 月には GE 日立がオンタリオパワー・ジェネレーション（Ontario Power Generation: OPG）社のダーリントン原子力発電所プロジェクトのテクノロジーパートナーに選定されたことが発表された⁽²¹⁾。この協定に基づき、GE 日立は自社が手掛ける SMR の“BWRX-300”を OPG と協力してダーリントンに建設することになる。このように、カナダではユーザー側が新型炉導入に向けて具体的な動きを積極的に打ち出していることが特徴である。

カナダでは規制機関であるカナダ原子力安全委員会（Canadian Nuclear Safety Commission: CNSC）も新型炉導入を目指す企業に対して魅力的な審査体制を提供している。その一つが「事前ベンダー設計審査」と呼ばれるサービスで、実際の建設に臨む前の段階から CNSC とベンダーの間で対話を行い、将来的な審査の中で安全上の課題となり得る点や、その解決策を明らかにしていくものである。これによってベンダー側は規制審査に予見性を得ることができ、CNSC 側も新技術に関する知見を早期から蓄積することができるため、将来的な審査の効率化につながる。これに加えて、CNSC の安全規則では要求事項（requirements）が設備仕様を固定するのではなく、満たすべき性能水準を定める形となっており、事業者は独自の対策でこれを満たすことができれば良い⁽²²⁾とされているため、新技術の導入を目指す事業者は使用する機材や技術について、様々な選択肢を検討することができる。このような規制の柔軟性もまた、カナダにおいて新型炉開発を行う事業者にとっての魅力と言えるだろう。

4 その他

本章ではここまで、民間事業者が主体となって新型炉の開発を進めている国を事例として取り上げてきたが、それ以外にも多くの国々が新型炉の開発や導入検討を進めている。

フランスでは、EDF などを中心となって“Nuward”と呼ばれる SMR を開発しており、マクロン（Emmanuel J.-M. F. Macron）大統領も 2030 年までに SMR を導入することを目標に大規模投資を行う意向を示している⁽²³⁾。また、実用化は第四世代炉より先となる見通しだが、フランスは国際的な核融合炉の実験炉“ITER”も有している。

ロシアでは、ナトリウムを冷却材とする高速炉の実証炉であるベロヤルスク 3、4 号機が既に営業運転を行っているほか、2021 年 6 月には鉛冷却高速炉の実証炉である BREST-300 の建設が開始された。さらに、洋上浮体式の小型原子炉「アカデミック・ロモノソフ」を開発している。同機はサンクトペテルブルクから極東のペヴェクまで曳航された後、現地の系統に接続され、2020 年 5 月に営業運転を開始した⁽²⁴⁾。

原子力開発を近年急速に進めている中国も新型炉開発に注力しており、軽水炉型の SMR で

(21) GE 日立・ニュークリアエナジー「GE 日立・ニュークリアエナジーがオンタリオパワー・ジェネレーション社のダーリントン原子力発電所プロジェクトのテクノロジーパートナーに決定」2021.12.2. <<https://www.hitachi-hgnc.co.jp/news/2021/2021news09.html>>

(22) Canadian Nuclear Safety Commission, *Canadian National Report for the Convention on Nuclear Safety*, Eighth Report, August 2019, p.36. <https://www.iaea.org/sites/default/files/cns_8th_national_report_-_final_canada.pdf>

(23) “France to Build Small Nuclear Reactors by 2030 in Export Push,” *Bloomberg*, October 12, 2021. <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-10-12/france-to-build-small-nuclear-reactors-by-2030-in-export-push>>

(24) “ROSATOM: world’s only floating nuclear power plant enters full commercial exploitation,” May 22, 2020. Rosatom website <<https://rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-world-s-only-floating-nuclear-power-plant-enters-full-commercial-exploitation/>>

ある玲龍一号（ACP100）の実証炉が2021年7月に海南省において着工された。また、2020年12月から福建省においてナトリウム冷却高速炉の建設が進められているほか、高温ガス炉の小型実証炉である“HTR-PM”が2021年12月に電力系統への接続を果たした⁽²⁵⁾。

以上のように自国で新型炉開発に取り組んでいる国々以外にも、ウクライナ、ルーマニア、エストニア、ポーランド、ヨルダンなど多数の国がSMRをはじめとした新型炉の輸入を検討している。

Ⅳ 事業性に関する施策

ここまで各国の積極的な新型炉開発動向を見てきたが、技術開発を進めるのみでは新型炉の導入には至らないことには注意が必要である。商用炉の建設プロジェクトが実現されるためには、従来型炉の場合と同様に十分な投資が集まらなければならない。しかし、前述のとおり米国の一部州や英国のように電力市場の自由化が進んでいる国・地域では、原子力発電を取り巻く事業環境が悪化している。原子力を将来にわたって重要な技術と位置付け、新型炉の導入も検討するのであれば、こうした事業環境の整備も不可欠である。

米国のイリノイ州やニューヨーク州などでは、経営上の危機に晒されている原子力発電所が閉鎖され、温室効果ガスの排出量が増加することを避けるため、ゼロエミッションクレジット（Zero Emission Credit: ZEC）と呼ばれる制度を実施している。この制度では、原子力発電事業者に対して発電量に応じたクレジットを付与し、事業者は売電収入に加えてクレジットの販売でも収入を得られるようになる。この制度は実際に効果を発揮しており、2021年9月にはイリノイ州で新たな低炭素電源支援法が成立した⁽²⁶⁾ことにより、経済的な問題から閉鎖が予告されていたエクセロン社のバイロン1、2号機とドレスデン2、3号機が運転を継続できることとなった⁽²⁷⁾。また、英国では、洋上風力発電事業などに用いられている差額決済方式（Contracts for Difference: CfD）による固定価格買取制度が、現在建設中の軽水炉であるヒンクリーポイントCにも適用されることとなっている。CfDは予め決められた基準価格（ストライク・プライス）と市場における電力価格の差額を発電事業者に支払い、一定の収益を保証するものである。

ZECやCfDといった制度は、原子力が持つ低炭素という価値に対価を与える制度であると言える。しかし、これらの制度は売電した電力量に応じて補助金を得るという性質上、発電設備が完成して売電を開始するまでに生じるリスクには対応できない。加えてCfDに関しては、ヒンクリーポイントCプロジェクトに適用された基準価格に対して、「消費者負担とそれによって得られる価値の関係が十分に考慮されていない」⁽²⁸⁾との批判もある。こうした批判を受けて、英国政府は2021年10月、規制資産ベース（Regulated Asset Base: RAB）モデルと呼ばれる新たなスキームの導入を発表した⁽²⁹⁾。RABモデルは、設備に対する投資コストに見合っ

(25) “World’s first HTR-PM nuclear power plant connected to grid,” December 20, 2021. China National Nuclear Corporation website <https://en.cnnc.com.cn/2021-12/20/c_692103.htm>

(26) Energy Transition Act (2021 ILL. P.A. 102-662)

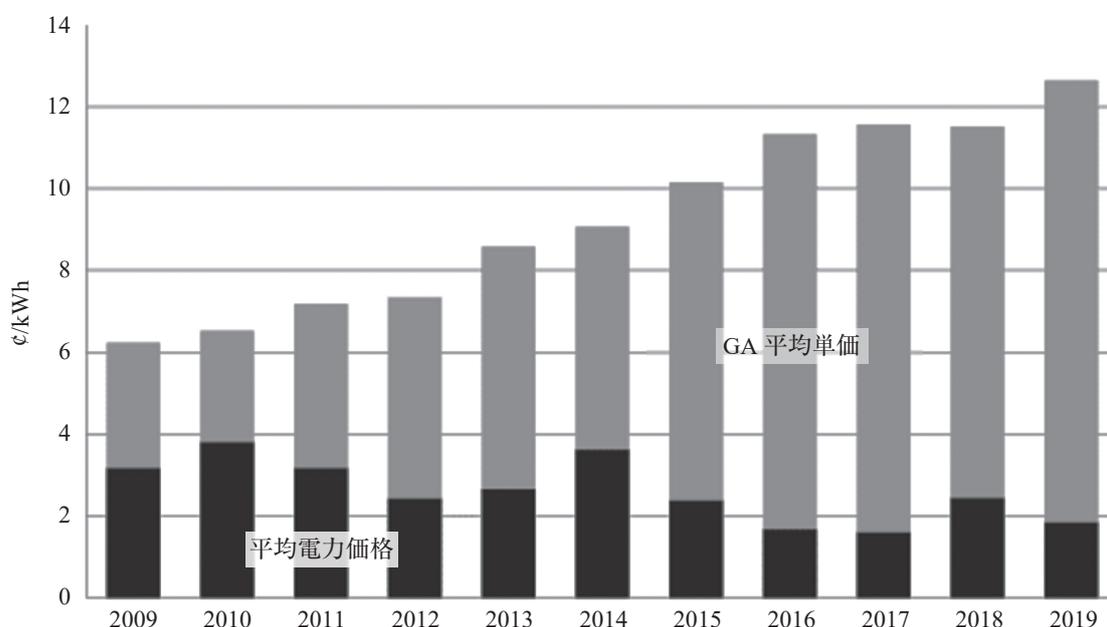
(27) “Passage of Illinois Energy Legislation Preserves Nuclear Plants and Strengthens State’s Clean Energy Leadership,” September 12, 2021. Exelon website <<https://www.exeloncorp.com/newsroom/passage-of-illinois-energy-legislation-preserves-nuclear-plants-and-strengthens-states-clean-energy-leadership>>

(28) National Audit Office Comptroller and Auditor General, “Hinkley Point C,” HC 40, Session 2017-2018, June 2017, p.8. <<https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2017/06/Hinkley-Point-C.pdf>>

た適切なリターンを規制機関が評価し、使用料を通じてそれを消費者から回収することを認める仕組みである。この仕組みでは、事業者は設備の建設段階から投資を回収できるとされているため、CFDと比較すると、発電を開始するまでは受益不可能という事業者にとっての不確実性を低減できる。また、その不確実性がCFDの基準価格を押し上げる要因の一つであったとされているため、不確実性が低減されるRABモデルでは、政策的に保証すべき収益水準を低く設定でき、最終的な消費者負担も軽くできると期待される。

これからの新設と事業化を考えなければならない新型炉にとって、カナダのオンタリオ州で実施されている、包括的調整制度（Global Adjustment: GA）も大変重要な事例と言えるだろう。GAは将来にわたって電力を安定供給するために必要となる、新規設備の建設費や既存設備の維持費を、電気料金に上乗せして徴収する制度である。具体的には、想定される必要経費と、州の電力卸売市場価格（Hourly Ontario Energy Price: HOEP）から計算される発電事業の収益予測を比較し、その差額分（必要経費の不足分）がGAとして消費者から徴収されることになる。そのようにして徴収されたGAは原子力発電や水力発電などの維持・更新費、ガス火力発電の運転費、そして再生可能エネルギー発電を対象とした固定価格買取制度（Feed-in Tariff: FIT）の運営原資など、様々な用途に充てられている。図4のとおり、オンタリオ州では2010年以降、卸電力価格は低調に推移しているが、同州ではGAの単価を増加させることによって、そうした必要なコストを確保している。換言すれば、GAのように市場原理から離れた仕組みがあることによって、新設の可能性が担保されているとも言える。

図4 卸電力価格とGA平均単価



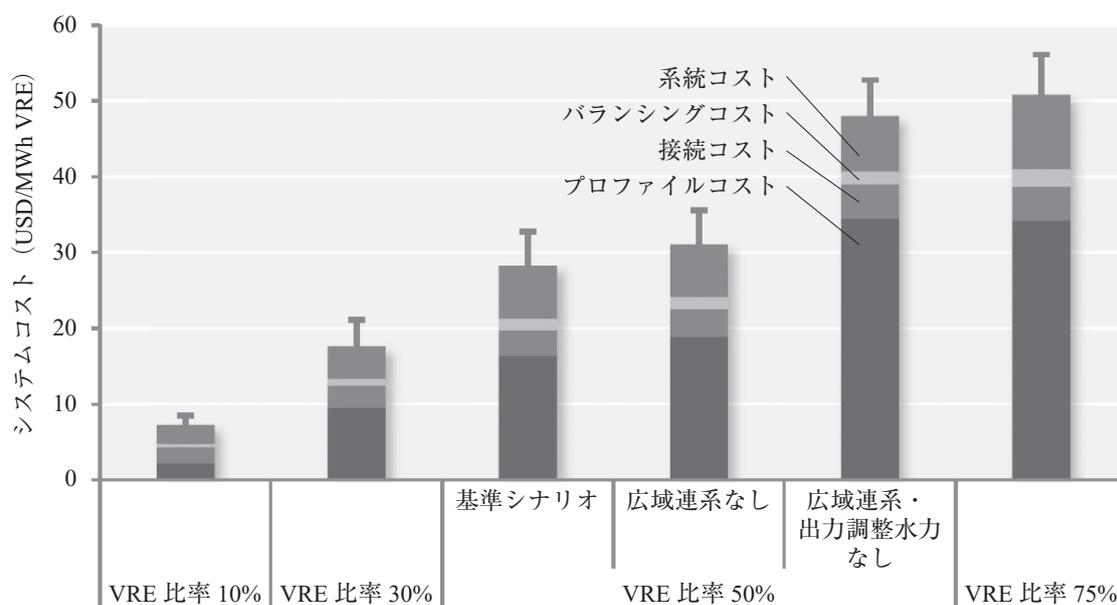
(出典) “Global Adjustment (GA).” Independent Electricity System Operator website <<https://www.ieso.ca/power-data/price-overview/global-adjustment>>

検討の対象とすべきは、原子力の低炭素価値のみではない。第I章でも述べたとおり、太陽光や風力といったVREの導入量が増えるにしたがって、原子力にはその変動性の影響を抑え

(29) Department for Business, Energy and Industrial Strategy, “Future funding for nuclear plants,” October 26, 2021. <<https://www.gov.uk/government/news/future-funding-for-nuclear-plants>>

る役割としての価値が生じ得る。経済協力開発機構の原子力機関（Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency: OECD/NEA）による推計でも、図5のとおり、電力システム中のVRE比率が増加するにつれて、（また、それに応じて原子力の割合が下がるにつれて）系統レベルで生じるコスト（システムコスト）が大きくなるとされている。従来行われてきた発電コスト評価は、各発電設備レベルでの単純なLCOEに基づくものであったが、今後はVREの大量導入時代を見据えて、系統レベルのコストを含めた評価を検討すべきであろう。そのような面での価値も認められることで、原子力の事業性をより強化する施策が可能となる。

図5 卸電力価格とGA平均単価



(注) プロファイルコスト：変動再エネ発電量が上下することに伴う、既存火力等の運用変更と発電効率低下に伴うコスト
 バランシングコスト：変動再エネ発電量が予測不可能なことに伴う、既存火力等の発電量の調整や予備力の確保に伴うコスト
 系統・接続コスト：変動再エネ適地と需要地がズレることに伴う基幹系統整備費用や基幹送電網につなぐコスト

(出典) OECD/NEA, *The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables*, NEA No.7299, January 2019, p.20. <https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15000/the-costs-of-decarbonisation-system-costs-with-high-shares-of-nuclear-and-renewables?details=true> を基に筆者作成。(注)は、荻本和彦・松尾雄司「システム統合を反映した統合コストの一部を考慮した発電コスト（仮称）の試算」（総合資源エネルギー調査会基本政策分科会（第48回会合）資料2），2021.8.4, p.4. <https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/048/048_005.pdf>

本章で扱った論点は基本的に従来型炉の利用を前提としたものであるが、原子力事業環境を改善し、リスクを低減する上で非常に重要な施策や議論と言える。導入事例が存在しない新型炉に関しては、特に初期段階における新設の投資リスクが高くなるため、これらの施策をベースとした仕組みを新たに検討し、リスクを低減することが一層重要となる。

おわりに

本稿では新型炉と呼ばれる技術について概観した後、諸外国における開発動向や、関連する

施策について扱った。特に米国、英国、カナダにおいては民間企業が新型炉開発の主体となっており、政府はそれらの企業が積極的に新技術の開発に乗り出せるよう環境を整える施策を実施している点が興味深い。また、そういった環境整備の一環として、これらの国々では規制面での対応が進んでおり、事業者にとっての予見可能性を高める取組がなされていることも重要である。日本がエネルギー基本計画に従って新型炉の技術開発を進めるといふのであれば、こうした環境整備や規制面での対応は大いに参考にする余地があろう。

ただし、これら「新型炉」の概念は、遡れば数十年前の資料⁽³⁰⁾でも既に提唱されているという事実は重要である。これは、それだけの期間を費やしてなお、商用規模での実用化に至っていないことを意味する。その原因については別途詳細な分析が必要であるが、理由の一つとしては、理論上の高性能を追求するあまり、それを実際に利用する顧客の目線が欠如していたのではないかと考えられる。特に数十年前ともなると、原子力には大規模ベースロード電源としての役割のみが期待されており、小型であることや発電以外に用いることの価値が市場において注目されていたとは考えにくい。これに対して近年では本稿で述べたとおり、新型炉に対して関心を示す具体的なユーザー候補が現れてきている。新型炉開発をめぐるのは、これまで進展しなかった理由を真摯に分析・反省した上で、ユーザー側の期待に応えられる製品やサービスを実現できるのかが注目される。また、政策を形成する側には、原子力事業を取り巻く環境が多くの国や地域で悪化していることを踏まえ、原子力の価値を再評価し、発電事業自体の環境を改善することが求められる。原子力を将来にわたって重要な低炭素安定電源と捉えるのであれば、これは従来型炉・新型炉を問わず重要な取組となるであろう。

(きむら けんじ)

⁽³⁰⁾ 例えば IAEA, *Design and Development Status of Small and Medium Reactor Systems 1995*, IAEA-TECDOC-881, May 1996.