

## 諸外国における小型炉・先進炉の研究開発動向

我が国は2020年10月、「2050年カーボンニュートラル」を目指すことを宣言した。諸外国においても、石炭火力発電の比率を下げるために原子力発電の新規導入を計画するポーランドや、安定した低炭素電源を確保するために大型炉の新設を進める英国のように、カーボンニュートラルに向けて原子力発電を推進する動きが見られる。また、特に欧州では、2021年の世界的なガス価格高騰の影響や昨今のウクライナ情勢の緊迫化から、エネルギー安全保障の観点から原子力を再評価する動きも見られる。

このような大型炉の建設を推進する動きとともに、固有の安全性を有するとされる小型モジュール炉（SMR）や、多目的利用が期待される先進炉の研究開発も活況を呈している。我が国のエネルギー基本計画においても、原子力分野における新技術の研究開発等を進めるとしている。

本稿では、エネルギー基本計画で言及されている米国、カナダ、英国に加え、フランス、ロシア、中国におけるSMR・先進炉について、各国が研究開発を進める背景、及び最近の動向について整理する。

### 【米国】

米バイデン政権は、先進炉開発を温室効果ガス排出削減、新規雇用創出、原子力部門における米国の主導的地位確保の機会と捉え、先進炉実証プログラム（ARDP）を開始した。2020年に計10機関が進める研究開発プロジェクトを採択しSMRをはじめとする先進炉の研究・開発・実証を支援している。

実用化に近いとされるニュースケール・パワー社が開発するSMR、VOYGRは、アイダホ国立研究所敷地内で建設予定のほか、テラパワー社によるナトリウム冷却高速炉もワイオミング州で建設に向けて計画を推進中だ。さらに、SMRより出力規模の小さいマイクロアクターについても米国防総省管轄の施設下において、2027年末までの導入目標を設定している。

### 【カナダ】

カナダもSMR開発を積極的に推進しており、2018年11月には、SMRによる低炭素社会の実現や国際的な開発競争における主導権の確保に向けて「SMRロードマップ」を策定した。ロードマップでは、カナダがSMR市場を先行して開拓することで、国内外の研究開発の集積や、グローバル市場におけるサプライチェーンの地域の確保が可能となる点などを強調している。

2020年12月にはロードマップを踏まえ、SMRの開発・実用化に向けた「SMRアクションプラン」を発表した。アクションプランでは3つのストリームが示されており、そのうちのストリーム1ではベンダー選定が進んでいる。2021年12月には米国GE日立社製のBWRX-300を建設することが公表されたところだ。この他にも、カナダ原子力公社（AECL）のサイト運営を受託しているカナダ原子力研究所（CNL）が、AECLサイトにおけるSMR実証施設の設置に向けて

2018年4月から建設事業者選定を進めている。CNLは2026年までに施設を完成させる計画である。

表 1 SMR アクションプランにおける3つのストリーム

| 特徴      |                          | サイト                       | 実用化の目途    |
|---------|--------------------------|---------------------------|-----------|
| ストリーム 1 | 商業運転を前提とした SMR の開発・実用化   | オンタリオ州<br>ダーリントン原子力発電所サイト | 2028 年    |
|         |                          | サスカチュワン州                  | 2032 年    |
| ストリーム 2 | CANDU 炉の使用済燃料の再利用        | ニューブランズウィック州              | 2030 年代中期 |
| ストリーム 3 | 遠隔地のディーゼル発電機を代替し、熱や電力を供給 | カナダ原子力研究所 (CNL) サイト       | 2026 年頃   |

(出典) smr action plan ウェブサイトに基づき三菱総合研究所作成

## 【英国】

英国はカーボンニュートラルの達成に向けて大型炉新設を進めるとともに、先行者利益による国際競争力の獲得、ニーズに合わせて導入規模を変えられる柔軟性、再生可能エネルギーの補完、多目的利用などの観点から、SMR と先進モジュール炉<sup>1</sup> (AMR) の開発を推進している。2020年11月には、原子力を含む10種類の脱炭素技術への投資計画を示す「グリーンリカバリー計画 (10 Point Plan)」が発表され、SMR・AMR 開発を推進するための先進原子力基金の設立が示された。

SMR については、ロールス・ロイス SMR 社が国産 SMR (UK-SMR) の開発を進めている。2030年代初期に初号機の完成を、2035年までに10基の建設を目標としている。AMR については、先進原子力基金を活用した「AMR 研究開発・実証プログラム」が実施されており、2030年代初期までに高温ガス炉初号機の建設を目指している。同プログラムでは、実現可能時期と高温熱生産に着目して高温ガス炉を選定した。

表 2 AMR 研究開発・実証プログラムの概要

| 段階             | 時期            | 実施内容等  |
|----------------|---------------|--|
| フェーズ A         | 2022 年<br>春～冬 | <ul style="list-style-type: none"> <li>フィージビリティ・スタディ、予備基本設計 (Pre-FEED) を実施し、概念設計、課題、潜在的なエンドユーザー等を明確化</li> <li>1件 30～50 万ポンド、最大 5 件 250 万ポンドを政府が支援</li> </ul> |
| Pre-FEED<br>評価 | ～2023 年<br>初期 | <ul style="list-style-type: none"> <li>フェーズ A の結果を評価</li> </ul>  |

<sup>1</sup> 英国では、第 4 世代炉技術を用いた SMR を先進モジュール炉と定義している。

|               |                    |  |
|---------------|--------------------|--|
| フェーズ B<br>(仮) | ～2025 年<br>中期 (予定) | <ul style="list-style-type: none"> <li>基本設計、詳細評価を実施し、費用、建設方法、プロジェクト実施計画等を明確化</li> <li>フェーズ A で採択されたプロジェクト以外にも申請可能</li> </ul> |
| フェーズ C<br>(仮) | ～2030 年<br>初期 (予定) | <ul style="list-style-type: none"> <li>立地サイトを考慮した詳細設計、許認可手続き、建設、実証運転等を実施 (検討中)</li> <li>フェーズ B の評価結果が良好なプロジェクトを対象</li> </ul> |

(出典) 英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省 “Advanced Modular Reactor Research, Development & Demonstration Programme”(2022)に基づき三菱総合研究所作成

### 【フランス】

フランスは 2021 年 10 月に、技術革新の促進やエコロジー転換等への対応を目的とした破壊的イノベーションへの大規模投資計画として「France 2030」を公表し、2030 年までに SMR 開発へ 10 億ユーロを投資する方針を示した。同計画では、2035 年までに SMR を普及させることを目標に掲げている。また、低炭素水素製造の観点からも、原子力発電の役割を評価している。さらに、2022 年 2 月の大統領演説では、国産 SMR (NUWARD) の原型炉を 2030 年までに建設する方針が示された。NUWARD については、原子力・代替エネルギー庁 (CEA) が中心となって官民協働で開発を推進している。さらに、マイクロ炉 (溶融塩炉) についても、2030 年までに初号機生産を目指す naarea 社が 2021 年 11 月に設立されたところだ。

### 【ロシア】

ロシアは、小型原子炉 2 基を搭載した浮揚式原子力発電所「アカデミック・ロモノソフ」を建造し、燃料装荷を完了。すでに 2020 年 5 月に極東地域で商業運転を開始している。また、極東連邦管区のサハ自治共和国に陸上設置式 SMR の導入を進めている。サイト許可取得後の 2024～2027 年に建設を始め、2028 年に営業運転の予定だ。同型炉を国内他地域に展開する計画も発表している。

さらに、ロシアは積極的に国外展開を進めている。しかし、2022 年のウクライナ侵攻により、特に欧米諸国でのロシア離れは必至。今後、SMR 含めた原子力の国外輸出も足踏みすることが予想される。

### 【中国】

中国では、2021 年～2025 年を対象とした国家戦略である「第 14 次五カ年計画」(2021 年 3 月承認)において、高温ガス炉実証炉の建設、及び SMR、60 万 kW 級商用高温ガス炉、浮揚式原子力発電プラント等の先進的な炉型の実証を進めるとしている。

2021 年 7 月には国産 SMR (PWR 型) である玲瓏 1 号の建設が開始された。同年 12 月には 2 基のモジュールで構成される高温ガス炉実証炉が 1 基のモジュールで発電を開始し、2022 年には 2 基のモジュールで商業運転を開始する予定となっている。

## **自国の状況に応じて役割を見出す各国 ～熱供給や水素製造、廃棄物削減なども～**

このように、欧米ではカーボンニュートラルに向けて大型炉をベースロード電源として活用しつつも、多目的利用や国際競争力の確保等の観点から、SMR の実用化や先進炉の実証を目指している。中露においても SMR の実証・実用が進んでいる。カーボンニュートラルに向けた SMR・先進炉開発は原子力導入国にとって国際的な潮流だといえる。

特にカーボンニュートラルに向けて野心的な目標を掲げる英国では、負荷追従性による再エネとの調和や、電化による脱炭素化が難しい熱利用分野への熱供給、低炭素水素製造の観点から原子力を重視し、SMR・AMR の開発を進めている。英国は暖房による二酸化炭素排出量が多いことから、小型でニーズに合わせた柔軟な導入が可能である点にも注目し、地域暖房網への活用も想定している。大型炉についても、既設大型炉 11 基の内 10 基が 2028 年までに閉鎖される中で、大型炉 2 基の建設及び 4 基の計画が進行中だ。既に確立されている大型炉の活用と、多目的利用等が期待される SMR・AMR の開発を並行して積極的に進めている。今後は再エネ中心の電源構成になるとしつつも、カーボンニュートラルに向けた最適なバランスを目指す姿勢は我が国の参考になるだろう。

英国政府が大規模な基金を設立して積極的に開発を支援する背景として、カーボンニュートラルに加えて、産業創出も挙げられる。英国は自国内に大型炉ベンダーが存在しないことから、SMR・AMR 開発を通じた国内サプライチェーンの再興と海外輸出を狙っており、SMR 開発を支援する意義として雇用創出や経済効果を提示している。

英国以外の各国・地域でも、それぞれの地域の特徴・ニーズを踏まえて、様々なタイプの SMR・先進炉の開発・導入計画が進められている。例えばカナダは、広大かつ寒冷な国土を持つことから、遠隔地での電熱併給を SMR の有力な用途としている。フランスでは大型炉新設計画を拡大するとともに、SMR の安全性、先進炉による放射性廃棄物削減に期待している。国内原子力基盤の維持や海外展開のポテンシャルについても、米国やカナダが SMR の開発を推進する理由に挙げており、実証が目前に迫るに伴い国際競争が激化していだろう。特に米国は、中露が大型炉の海外展開を積極的に進めている中、SMR 展開における主導権確保を狙っているとみられる。

## **新型炉は長期的には有望な選択肢の一つ 開発動向は引き続き注視が必要**

一方、SMR には課題も指摘される。小型化がスケールメリットに反することから、モジュール化による量産等によって発電コストを低減させることが必要となる。また、固有の安全性を鑑み、安全システムの最適化や EPZ<sup>2</sup>の縮小等といったことを可能とするには、SMR の特性を考慮した安全基準が新たに必要となる。これらの課題に対しても、米国及び英国企業による量産化を目指した海外輸出に向けた取組や、IAEA による安全要件の検討といった取組が進められており、注視が必要となる。

我が国のエネルギー基本計画では、米国や欧州の取組も踏まえつつ、国が長期的な開発ビジョンを掲げて戦略的柔軟性を確保して進めると示した上で、2030 年までに国際連携による SMR 技術の実証、高温ガス炉における水素製造に係る要素技術確立等を進めるとしている。課題を残しつつも諸外国の開発が加速している現状を鑑みると、長期的な視点では有望な選択肢になる可能性がある。引き続きその動向を注視しながら、我が国のカーボンニュートラル

<sup>2</sup> Emergency Planning Zone。原子力防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲。

達成、エネルギーの将来に必要なイノベーションを推進していく必要があるだろう。

## 参考文献

- 資源エネルギー庁、エネルギー基本計画、2021年10月  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/20211022\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf)
- カナダ小型モジュール炉ロードマップ策定委員会、A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors、2018年11月  
[https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap\\_EN\\_nov6\\_Web-1.pdf](https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf)
- カナダ smr action plan ウェブサイト  
<https://smractionplan.ca/>
- Ontario Power Generation 社 2021年12月2日付プレスリリース  
[https://www.opg.com/news-and-media/media-releases/media\\_release/opg-advances-clean-energy-generation-project/](https://www.opg.com/news-and-media/media-releases/media_release/opg-advances-clean-energy-generation-project/)
- 英国政府、The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution、2020年11月  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/936567/10\\_POINT\\_PLAN\\_BOOKLET.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/936567/10_POINT_PLAN_BOOKLET.pdf)
- 英国政府、Net Zero Strategy: Build Back Greener、2021年10月  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1033990/net-zero-strategy-beis.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1033990/net-zero-strategy-beis.pdf)
- ロールズ・ロイス SMR 社ウェブサイト  
<https://www.rolls-royce-smr.com/>
- 英国原子カインバージョン・研究局、Advanced Modular Reactors Technical Assessment、2021年7月  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1006752/niro-217-r-01-issue-1-technical-assessment-of-amrs.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1006752/niro-217-r-01-issue-1-technical-assessment-of-amrs.pdf)
- 英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省、Advanced Modular Reactor Research, Development & Demonstration Programme、2022年2月  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1055241/amr-demo-programme-indicative-outline.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1055241/amr-demo-programme-indicative-outline.pdf)
- 英国研究・イノベーション局ウェブサイト  
[https://www.ukri.org/what-we-offer/our-main-funds/industrial-strategy-challenge-fund/clean-growth/low-cost-nuclear-challenge/?\\_ga=2.154503291.2126804014.1647907590-1102919335.1617257594](https://www.ukri.org/what-we-offer/our-main-funds/industrial-strategy-challenge-fund/clean-growth/low-cost-nuclear-challenge/?_ga=2.154503291.2126804014.1647907590-1102919335.1617257594)

- フランス大統領府、FRANCE 2030 – plan d’investissement、2021 年 10 月  
<https://www.economie.gouv.fr/files/files/2021/France-2030.pdf?v=1641479311>
- フランス大統領府、REPRENDRE EN MAIN NOTRE DESTIN ÉNERGÉTIQUE !、2022 年 2 月  
<https://www.elysee.fr/front/pdf/elysee-module-19285-fr.pdf>
- naarea 社ウェブサイト  
<https://www.naarea.fr/>
- 全国人民代表大会、第十三届全国人民代表大会第四次会议 关于国民经济和社会发展第十四个五年规划 和 2035 年远景目标纲要的决议、2021 年 3 月  
<http://www.npc.gov.cn/npc/kgfb/202103/e02feb61d7244e158edd86bf87477073.shtml>
- 中国国务院、2030 年前碳达峰行动方案、2021 年 10 月  
[http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm#](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm#)
- 中国核电、关于海南昌江多用途模块式小型堆科技示范工程项目开工建设的公告、2021 年 7 月  
[http://www.sse.com.cn/disclosure/listedinfo/announcement/c/new/2021-07-13/601985\\_20210713\\_2\\_NXV2cyOx.pdf](http://www.sse.com.cn/disclosure/listedinfo/announcement/c/new/2021-07-13/601985_20210713_2_NXV2cyOx.pdf)
- 華能集团 2021 年 12 月 20 日付プレスリリース  
[https://www.chng.com.cn/detail\\_jtyw/-/article/ccgb60va5Gwc/v/985934.html](https://www.chng.com.cn/detail_jtyw/-/article/ccgb60va5Gwc/v/985934.html)
- 核工業集团公司 2021 年 12 月 20 日付プレスリリース  
[https://en.cnncc.com.cn/2021-12/20/c\\_692103.htm](https://en.cnncc.com.cn/2021-12/20/c_692103.htm)
- IAEA、How to Apply IAEA Design Safety Standards to SMRs、2021 年 2 月  
<https://www.iaea.org/newscenter/news/how-to-apply-iaea-design-safety-standards-to-smrs>

以上