

新型炉部会セッション

原子カイノベーションを支える最新の新型炉開発の状況

Latest trends of advanced reactor development supporting nuclear innovation

(1) 最新の国内外の新型炉開発の状況

(1) Latest trends of advanced reactor development in Japan and foreign countries

*山野 秀将¹, 稲葉 良知¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

近年、国内外において革新炉導入に向けた活発な動きが見られる。米国では、2020年に「新型炉実証プログラム (ARDP)」を開始し、高速炉、高温ガス炉、マイクロ炉、熔融塩炉、軽水型小型モジュール炉 (SMR) のプロジェクトが進められている。カナダ、英国、ロシア、中国でも同様に新型炉開発が盛んになってきている。我が国においても、経済産業省により、2019年度から「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」が開始され、民間の活力を活かした革新炉の開発に繋がる研究開発の促進に向けて事業成立性に関する調査 (フィージビリティスタディ) が進められている。新型炉開発は原子力研究・開発の将来を開拓する技術分野であり、現在、原子力業界に求められているイノベーションの実現を目標としていることから、若い世代を原子力研究・開発へと惹きつけるもっとも魅力的な分野のひとつである。本講演では、主要な開発国を対象に国外の開発動向を紹介するとともに、国内においては2050年カーボンニュートラルに向けた原子カイノベーションに係る革新炉開発の動向を主に紹介する。

2. 国外の開発動向

2-1. 米国

米国エネルギー省 (DOE) は2020年5月、「新型炉実証プログラム (ARDP)」を開始した。ARDPには、5~7年以内に実証可能な先進型原子炉、将来の実証リスク低減を目的とした技術・運転・規制課題解決、2030年代半ばに実用化が期待される革新的先進型原子炉概念の3つのカテゴリーがあり、公募により選ばれた先進型原子炉開発プロジェクトに対して資金援助を実施する。2020年10月には実証炉カテゴリーとして TerraPower 社のナトリウム冷却高速炉 (Sodium 炉) と X-Energy 社の高温ガス冷却炉 (Xe-100) が選定され、前者は2021年6月にワイオミング州、後者は2021年4月にワシントン州に建設する方向と発表された。また、2020年12月には他の2つのカテゴリーについても原子炉概念が選定された。

アメリカ航空宇宙局 (NASA) は DOE と共同で深宇宙探査用核熱推進技術の開発を進めており、2021年7月に有望な原子炉技術の詳細な設計概念と価格に関する提案募集に応じた企業の中から、BWXT Technologies (BWXT) 社、General Atomics Electromagnetic Systems (GA-EMS) 社及び Ultra Safe Nuclear Technologies (USNC-Tech) の3社を選定したと発表した。今回の3社が開発に関わる SMR は、深宇宙探査用核熱推進の重要機器であり、HALEU 燃料 (U235 の濃縮度が5~20%の低濃縮ウラン) を使用する予定である。

国防総省は遠隔地で電力を得る技術開発としてプロジェクト Pele を立ち上げ、2020年3月に Westinghouse 社、BWXT 社及び X-Energy 社に対して小型モバイル原型炉を設計する契約の締結を発表した。

その他、先行して設計承認のための安全審査を進めていた NuScale Power 社はアイダホ国立研究所 (INL) に小型 PWR の建設を計画しており、2021年4月に日揮 HD、2021年5月に IHI が出資を表明したことは記憶に新しい。INL には Oklo 社の超小型高速炉 Aurora も建設計画がある。また、GE Hitachi Nuclear Energy 社は BWRX-300 の設計承認のための先行審査を2020年1月から開始しており、2021年7月には燃料供給のた

*Hidemasa Yamano¹, Yoshitomo Inaba¹¹Japan Atomic Energy Agency

めの協力覚書を結ぶなど実用化への動きを活発化している。

以上のように、米国は、多くのプロジェクトを立ち上げ、商業原子力技術における国際的リーダーシップの再構築を狙っている。また、米国では再生可能エネルギーだけでなく、原子力が必要不可欠であるということが政府、議会、民間全ての共通認識となっている。原子力技術に関して、米国では現在建設中のヴォーグル 3,4 号機以降は大型の従来炉が建設される可能性はほぼゼロに等しく、現在、官民共同で開発が進められている SMR に移行が見込まれる。SMR は柔軟な設計が可能で、負荷追従性に優れることから再生可能エネルギーとの併用性に優れることや、熱供給や水素製造といった発電以外の用途にも活用できる利点を持つ。さらに、米国は、先進炉開発を円滑に行い、次世代炉のスタンダードを確立して世界に広めていくことは、国家安全保障とともに、核不拡散・核セキュリティの観点からも極めて重要だと考えている。

2-2. カナダ

政府は、2018 年に SMR ロードマップを策定し、2020 年 12 月には SMR アクションプランと公表し、ステークホルダーを交えて SMR 導入に向けた道筋を提示した。同プランでは、100 以上の機関が参加して、各組織の SMR 導入に向けた具体的アクション（SMR 開発、サプライチェーン構築、立地地域の合意形成、輸出支援等）が整理されている。また、電気事業者により国内建設サイト候補や想定ベンダー候補が提示され、2020 年代後半から 2030 年代中頃にかけて導入することが提案されている。

カナダでは数年前から既設炉より建設費が安く安全性が向上するだけでなく、北部の遠隔地域でのエネルギー源として、SMR の適合性がクローズアップされ、官民挙げて開発が進められている。カナダ原子力研究所（CNL）内に 2026 年までに実証炉を建設する計画で、2018 年に熔融塩炉の Terrestrial Energy 社と高温ガス炉の StarCore Nuclear 社、Global First Power 社、U-Battery カナダ社の 4 社が選定され、評価中である。2019 年に 3 州（オンタリオ州、ニュー・ブランズウィック州及びサスカチュワン州）の州政府がカナダ国内で SMR を開発・建設するための協定を締結し、2021 年 4 月に 3 州の電気事業者が共同で実施した SMR 開発の実行可能性調査結果が公表された。また、同時期にアルバータ州も、SMR 開発協力に加わった。オンタリオ州では、送電網への接続が可能な出力 30 万 kW 程度の SMR 初号機を 2028 年までに建設し、これに続くフェーズで最大 4 基の SMR の最初の一基を 2032 年までにサスカチュワン州内で完成させる。複数の地点で早急かつ効率的に SMR を建設できるよう、共通技術を 1 つに絞り込み SMR 群を一まとめに建設するアプローチを取っており、2021 年末までに採用技術と開発企業を選定する。ニュー・ブランズウィック州では、ARC 社のナトリウム冷却・プール型高速中性子炉 ARC-100 の実証炉を 2030 年までに完成させる。また、Moltex Energy 社の燃料ピン型熔融塩炉（SSR-W）と廃棄物リサイクル施設を 2030 年代初頭までに稼働可能にする。

規制機関（CNSC）においては、12 件もの事前設計審査が申請されている状況であり、米国原子力規制委員会（NRC）と Terrestrial Energy 社の一体型熔融塩炉の共同技術審査も行われている。また、2021 年 5 月には超小型ガス炉 MMR のサイト準備許可申請が技術審査に移行しており、SMR 開発が非常に活発になっている。

2-3. 英国

政府は、2018 年から先進モジュール炉（AMR）の実行可能性調査を行い、2020 年 7 月に核融合炉の Tokamak Energy 社、鉛冷却高速炉の Westinghouse UK 社、高温ガス炉の U-Battery Developments 社の 3 社を選定した。AMR にとどまらず、既存技術を活用し、より実現可能性が高いとも言える PWR 型 SMR 開発も支援する方針を採っている。Rolls-Royce 社が率いるコンソーシアムは 2030 年代初頭に初号基完成を皮切りに 2035 年までに最大 10 基の建設を目指しており、2021 年秋の設計審査に向けて設計の調整・改善を図っている。英国政府は、気候変動対策のために原子力発電を活用していくという方針を堅持している

2-4. ロシア

ナトリウム冷却高速炉については、880MWe 級の実証炉 BN800（スヴェルドロフスク州ザレーチヌイのベロヤルスク原子力発電所に設置）が 2016 年 10 月から商業運転に入り、実用炉 BN1200 が設計中であり、2030 年に建設が着工する見込みであり、ロシアが世界で最も実用段階に近い。鉛冷却高速炉については、2021 年

6月に BREST-300（トムスク州セベルスク）の建設工事に着手した。鉛ビスマス冷却高速炉については、100MWe級の小型炉 SVBR-100を開発中であり、2020までに建設予定（2013年時点）であったが、計画が遅延している。2028年までにロシア初の陸上設置式 SMR 完成に向け、ロスアトム社は設置予定のサハ共和国政府と電力売買で合意に達したと2020年12月に発表された。これは5万kWe級 SMR だが、その設計のベースは原子力砕氷船用に開発した「RITM-200」設計であり、2020年10月に就航した最新式の原子力砕氷船「アルクティカ」に搭載されている。また、同社は海上浮揚式原子力発電所用の SMR ついても開発を進めている。出力3.5万kWの小型炉「KLT-40S」を2基装備した「アカデミック・ロモノソフ号」は、2020年5月に極東チュクチ自治区内の湾岸都市ペベクで商業運転を開始した。

2-5. 中国

ナトリウム冷却高速炉については、中国高速実験炉（CEFR）が2014年12月に100%出力運転を達成し、実証炉 CFR600 が2017年12月に建設開始され2023年に完成予定である。また、実用炉 CFR1000 が設計中であり、2030年代に運転開始の見込みである。高温ガス炉については、実証炉 HTR-PM の建設が完了し、本年中に臨界の予定である。その他、熔融塩炉や鉛冷却炉の研究も進められている。

軽水炉については、2021年5月に50基目の商用炉が送電網に接続され、現時点では世界で最も早いペースで原子力発電所を建設している。また、2021年7月には、中国南端の海南省（海南島）に位置する昌江原子力発電所で、12.5万kWeの多目的一体型 SMR「玲龍一号」の実証炉建設工事を正式に開始したと発表した。

中国は主に大型原子炉を建設しているが、中国核工業集团公司（CNNC）によれば、SMR は分散型エネルギー源として海水脱塩や地域冷暖房用の熱供給に加えて、離島や鉱山地区、エネルギー多消費産業に対するエネルギー源として利用可能であり、様々なシナリオに対応できるとのことである。

3. 我が国の開発動向

2021年6月に、政府は「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を発表した。原子力産業については、以下のように記述される。

2050年カーボンニュートラル実現に向けては、原子力を含めたあらゆる選択肢を追求することが重要であり、軽水炉の更なる安全性向上はもちろん、それへの貢献も見据えた革新的技術の原子力イノベーションに向けた研究開発も進めていく必要がある。原子力は大量かつ安定的にカーボンフリーの電力を供給することが可能な上、技術自給率も高い。更なるイノベーションによって、安全性・信頼性・効率性の一層の向上、放射性廃棄物の有害度低減・減容化、資源の有効利用による資源循環性の向上を達成していく。また、再生可能エネルギーとの共存、カーボンフリーな水素製造や熱利用といった多様な社会的要請に応えることも可能である。

現行軽水炉では、中露が政府ファイナンスをバックに市場を席卷しており、米英加を始めとした先進国では小型炉、革新炉に活路を見出し、2030年前後の商用化を目指して大規模政府予算を投入して研究開発を加速している。目標として①国際連携を活用した高速炉開発の着実な推進、②2030年までに国際連携による小型モジュール炉技術の実証、③2030年までに高温ガス炉における水素製造に係る要素技術確立、④ITER 計画等の国際連携を通じた核融合研究開発の着実な推進を目指す。

2021年7月に経済産業省総合資源エネルギー調査会基本政策分科会にて発表されたエネルギー基本計画（素案）では、新計画は「2050年カーボンニュートラル（2020年10月表明）、2030年の46%削減、更に50%の高みを目指して挑戦を続ける新たな削減目標（2021年4月表明）の実現に向けたエネルギー政策の道筋を示すことが重要テーマ」と位置付けられている。2030年に向けた政策対応のポイントとして、原子力の研究開発については、「2030年までに、民間の創意工夫や知恵を活かしながら、国際連携を活用した高速炉開発の着実な推進、小型モジュール炉技術の国際連携による実証、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ともに、ITER 計画等の国際連携を通じ、核融合研究開発に取り組む」と明記された。

基本政策分科会に先んじて行われた2021年4月の総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力小委

員会では、「2050年カーボンニュートラルに向けて、一層の安全性向上、安定供給、資源循環、柔軟性などの課題を克服すべく、官民の取組により、複線的 R&D 投資で死の谷（実用化のギャップ）を越えていくことが必要」と明記され、原子力イノベーションの貢献の可能性が述べられている。原子力イノベーションの創出に向けた支援として、経済産業省及び文部科学省は、日本原子力研究開発機構と共に原子力イノベーションを加速するための環境整備の取り組みを令和元年度より開始した。経済産業省は令和元年度より「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」を開始し、民間主体の革新炉の開発に繋がる研究開発の促進に向けて事業成立性に関する調査（フィージビリティ調査）を実施してきた。令和2年度末の継続審査において、技術成熟度や市場性等の観点で9件が絞り込まれた。現在、軽水冷却 SMR では、NuScale、BWRX-300、多目的 PWR、高速炉では、PRISM、粒子型金属燃料ナトリウム冷却炉、軽水冷却高速炉、高温ガス炉では、水素製造/発電コジェネレーション高温ガス炉、蓄熱型高温ガス炉、さらに多用途モジュール式マイクロ炉の開発が進められている。

複線的 R&D 投資戦略は、原子力を安全・安定的に活用していけるよう戦略的にサプライチェーンを維持・強化するとともに、一般産業品活用や3D プリンティング技術といった調達・製造等のプロセスイノベーションを推進する。また、革新的サイクル技術による高レベル放射性廃棄物低減の追求のため、高速炉開発は国際連携・異業種連携を活用する。さらに、SMR 技術で負荷追従性を向上させ、高温ガス炉や核融合炉の超高温を活用した水素製造・熱利用を推進する。

4. おわりに

米国、カナダ、英国、ロシア、中国における最新の新型炉開発の動向を概説するとともに、我が国における2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略に係る新型炉開発に係る動向を紹介した。現在、原子力を利用している国の多くがカーボンニュートラルを表明している中、原子力は脱炭素化の有力な技術選択肢として、多くの国が原子力発電を活用していく方針を堅持している。また、欧米との国際連携を通じて原子力発電所の新規導入国（東欧・アジア等）への展開も考えれば、日本の原子力技術が世界の脱炭素化に貢献可能である。新型炉開発は若い世代を原子力研究・開発へと惹きつける魅力的な分野であるため、今後も、民間の活力を活かした革新炉開発に国が支援していき、日本の原子力の人材・技術・産業基盤の維持・強化に繋げていくことが重要である。