

調査レポート

原子力発電の最新動向

社会インフラチーム コンサルタント
結城 文香

日本で最初の商業用原発である東海発電所が 1966 年に営業運転を開始して以来、原子力は我が国の重要なエネルギー源のひとつとして利用されてきた。2011 年の福島第一原子力発電所事故の発生以降、我が国のエネルギー政策では再生可能エネルギーの拡大を図る中で可能な限り原発依存度を低減するという方針を取ってきた。しかし、電力の安定供給やカーボンニュートラル実現の観点から、再稼働の推進や運転期間の延長及び次世代原子炉の開発といった方向性が提示されている。

1 原子力を取り巻く状況

1.1 福島第一原子力発電所事故による状況の変化

福島第一原子力発電所事故（以下「1F 事故」と呼称）により、日本の原子力を取り巻く状況は大きく変化した。1F 事故以前は温暖化対策への対応と新興国の台頭による市場の拡大や、米国等での原子力の見直しと推進が進んだことにより、原子力ルネッサンスの時代と呼ばれていた。また、米国やフランス、日本、ロシア等において大規模・大出力の新型炉の開発が行われ、国外で新規原子力発電所の建設が進められていた。

ところが、1F 事故後はより一層安全性が重視されるようになり、安全性に関するコストは増加した。小規模のプラントは大規模なプラントと比べて安全性が高く、分散電源として利用しやすい、途上国等でも建設しやすい等のメリットがあるため、大規模なプラントから小規模なプラントへ開発の主軸が移りつつある。

1.2 国内の状況

1F 事故を受け、2012 年 9 月に原子力規制委員会（NRA）が設置された。NRA は原子炉等の設計を審査するための新しい基準（新規制基準¹⁾）を 2013 年に策定した。原子力発電所が再稼働するためには、新規制基準に適合していると NRA から認められなければならない。新規制基準は世界で最も厳しい基準であるため、再稼働は進んでいない状況にある。

2 次世代原子炉

2.1 原子炉の基本的な仕組み

2.1.1 火力発電と原子力発電

原子力発電は、蒸気でタービンを回して発電する点では火力発電所と同じである。火力発電所のボイラーは化石燃料を使用するが、原子力発電ではボイラーを原子炉に置き換え、ウランを燃料としている点で違いがある。火力発電と原子力発電の仕組みの違いを図 1 に示す。

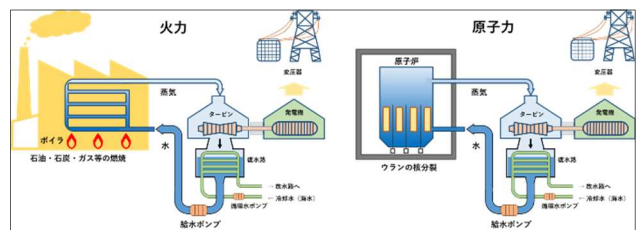


図 1 火力発電と原子力発電の違い²⁾

2.1.2 安全性の面からの特徴

原子力発電所は「原子炉を止める」、「燃料を冷やす」、「放射性物質を閉じ込める」という 3 つの考え方で安全を確保するように設計されている。制御棒を炉心に挿入することで事故が発生する前に原子炉を停止させる。停止後も崩壊熱が発生するため、非常用炉心冷却装置(ECCS)により炉内に注水して循環させることで燃料を冷却する。放射性物質を外部へ拡散させずに閉じ込めるため、原子炉を压力容器と格

納容器と呼ばれる嚴重な囲いで覆っている。

2.1.3 熱の取り出し方

原子炉は使用する「冷却材」や「減速材」の必要性によって分類される。ここで、「冷却材」とは核分裂で発生する熱エネルギーを原子炉の外に取り出す役割をするものであり、軽水やナトリウム、炭酸ガス、ヘリウムガス等が使用される。

「減速材」とは核分裂の過程でウランやプルトニウムから飛び出した中性子の速度を低下させるためのものであり、軽水や重水（重水素（²H）と酸素を化合したもの）、黒鉛等が使用される。

例えば、世界中の原子力発電所で主に使用されている「軽水炉」という形式は冷却材、減速材ともに軽水を使用している。

2.2 原子炉技術の歴史^{3,4)}

米国エネルギー省（DOE：Department of Energy）の定義によれば、原子力の技術は、その開発時期によって第1世代から第4世代まで分けることができる。

原子力の平和利用が目指されるようになった1950年代以降、原子力技術の発電への導入・実用化のための研究開発が開始された。この時期に開発された初期の原型炉を第1世代原子炉という。

1970年代から1990年代頃までに開発された初期の商業用原子炉のことを第2世代原子炉という。

1990年代以降になると、第2世代の原子炉をもとにさまざまな改良を加えた第3世代原子炉が登場した。

現在では、第3世代原子炉に続く次世代の原子炉として、2030年以降の実用化を目指して、高い経済性と安全性、放射性廃棄物発生量の抑制、核拡散抵抗性等を備えた第4世代原子炉の研究開発が行われて

いる。

2.3 研究段階の次世代原子炉

2030年代の商業導入を目指し、第4世代原子力システムの研究開発を国際的に協力・推進することを目的とした国際協力の枠組みとして、2001年7月に第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF：Generation IV International Forum）が発足した。

GIFは、2002年に研究開発対象として、ガス冷却高速炉（GFR:Gas-Cooled Fast Reactor）、鉛冷却高速炉（LFR:Lead-Cooled Fast Reactor）、熔融塩炉（MSR：Molten Salt Reactor）、超臨界圧水冷却炉（SCWR:Supercritical-Water-Cooled Reactor）、ナトリウム冷却高速炉（SFR:Sodium-Cooled Fast Reactor）、超高温ガス炉（VHTR:Very-High-Temperature Reactor）の6つのシステムを選定した。それぞれのシステムの概要を

表1に示す。

GIFには、2020年3月時点でアルゼンチン、豪州、ブラジル、カナダ、フランス、日本、中国、韓国、南アフリカ、ロシア、スイス、米国及びユートラム（欧州原子力共同体）が参加している。

2.4 近年の原子炉の開発状況

1.1節で述べたように、1F事故以降はより一層安全性が重視されるようになり、安全性を確保するためのコストが増加した。そのため、開発の主軸が大規模なプラントから小規模なプラントへ移ってきており、小型モジュール炉（SMR：Small Modular Reactor）と呼ばれる比較的小型の原子炉の開発と商業化を目指す動きが活発になっている。

表1 GIFで検討されているシステムの概要（参考文献⁵⁾をもとにMHRT作成）

システム	中性子スペクトル	冷却材	出口温度（℃）	燃料サイクル	出力（MWe）
ガス冷却高速炉（GFR）	高速中性子	ヘリウム	850	クローズド	1200
鉛冷却高速炉（LFR）	高速中性子	鉛	480～570	クローズド	20～1200
熔融塩炉（MSR）	熱中性子/高速中性子	フッ化物塩	700～800	クローズド	1000
超臨界圧水冷却炉（SCWR）	熱中性子/高速中性子	水	510～625	オープン/クローズド	300～1500
ナトリウム冷却高速炉（SFR）	高速中性子	ナトリウム	500～550	クローズド	50～1500
超高温ガス炉（VHTR）	熱中性子	ヘリウム	900～1000	オープン	250～300

SMRの利点としては、小型・モジュール化・多目的の3点が挙げられる。小型化することにより、体積当たりの表面積が増加することで冷却性が向上し、このため従来の原子炉よりも安全性が高いと言われている。

また、モジュール化することで建設コストの削減が可能となる。さらに、水素製造や熱源としての利用が可能となるように開発が進められているものもある。

SMRは、第2世代の原子炉の平均的な電気出力が800~1100MWe程度であるのに対して、300MWe以下と小型でモジュール化された原子炉の総称であり、軽水炉や高速炉、高温ガス炉等の様々な形式の炉の開発が進められている。

2.4.1 海外の状況⁶⁻¹⁰⁾

米国は93基(2022年3月末時点)の商業用原子力発電所稼働する世界第1位の原子力発電利用国となっている。SMRの開発にも積極的に取り組んでおり、DOEは軽水炉型のSMRを含む新型炉の開発・導入を支援するための新型炉実証プログラム(ARDP: The Advanced Reactor Demonstration Program)を2020年5月に開始し、民間企業が多数参画している。

また、NuScale社は独自に開発したPWR型のSMR「NuScal Power Module (NPM)」をアイダホ国立研究所(INL: Idaho National Laboratory)に建設する予定である。NPMは既にアメリカ合衆国原子力規制委員会(NRC)による設計認証の審査が完了している。NRCの設計認証審査が完了したSMRはNPMが初となっている。

他にも、GE日立ニュークリア・エナジーが設計した革新的小型ナトリウム冷却高速炉「PRISM」について、DOEがPRISMをベースとした多目的試験炉をINLに建設し、2026年には運転を開始する予定である。

フランスでは56基(2022年3月末時点)の原子炉が稼働しており、総発電量の約7割を原子力で賄っている。2022年2月にマクロン大統領は改良型の欧州加圧水型炉(EPR2)を国内に新たに6基建設し、8基の建設に向けた調査を開始すると発表した。

また、フランス電力(EDF: Électricité de France)は、原子力・代替エネルギー省(CEA: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)等と協力して、「NUWARD」というSMRの開発を進めてい

る。

英国では11基(2022年3月末時点)の原子炉が稼働している。英国政府は2008年以降一貫して原子炉新設を推進していく方針を掲げており、2013年以降はSMRや新型モジュール炉(AMR: Advanced Modular Reactor)の開発を支援することによって、革新的な原子力技術における世界的なリーダーになることを目指している。2020年11月に公表された投資計画「10-Point Plan」や2021年10月に公表された「ネットゼロ戦略」ではSMR開発のためのファンドの創設が示されている。

また、英国のロールス・ロイス社は何十年にもわたり原子力潜水艦の原子炉を設計・製造してきた経験を活かして2014年以降SMRを開発している。2031年の運転開始を目指し、コンソーシアムの立ち上げや英国内のエンジニアリング会社との設計・許認可、製造等の協力覚書の締結、SMR開発子会社の設立等を実施している。

他にも、日本原子力研究開発機構(JAEA)とイギリスの国立原子力研究所(NNL: The National Nuclear Laboratory)が参加するチームが、イギリスの高温ガス炉の開発計画(新型モジュール炉研究開発・実証プログラム)の予備調査の実施事業者として採択されている。

カナダでは19基(2022年3月末時点)の原子炉が稼働している。SMRの研究開発も積極的に実施しており、連邦政府が「SMR行動計画」を2020年12月に公表している。

また、GE日立ニュークリア・エナジー社製のSMRである「BWRX-300」が、カナダの州営電力会社であるサスクパワー社によるSMR導入計画(2030年代半ば予定)に選定されている。

ロシアでは37基(2022年3月末現在)の原子炉が稼働しており、2007年に設立された国営原子力企業であるロスアトム社を中心に原子力を推進している。

ロシアでは原子力砕氷船の原子炉をベースとしたSMRの開発が進められており、2020年5月には2基のSMRが搭載された海上浮体式原子力発電所(FNPP: Floating Nuclear Power Plant)「アカデミック・ロモノソフ」の運転を開始している。

さらに、新型SMRを搭載した新型FNPPであるOFPU(OFPU: Optimized Floating Power Unit)の導入を決定している。

中国では53基(2022年3月末現在)の原子炉が稼

働している。原子力発電の利用拡大が進められており、19基の第3世代の原子炉が建設中となっている。SMRの開発も進められており、2021年7月にはSMRである玲龍1号の実証炉の建設が開始されている。

2.4.2 日本の状況⁷⁻⁹⁾

2022年8月に開催されたグリーントランスフォーメーション(GX)実行会議¹¹⁾において、原子力政策の今後の進め方が提示された。2050年のカーボンニュートラル(CN)の実現や電力需給ひっ迫の解決及びエネルギー安全保障の確保のため、原子力発電所の再稼働の推進や運転期間延長による既設原子力発電所の最大限の活用、次世代革新炉の開発・建設、再処理・廃炉・最終処分プロセスの加速化等の検討を進めていくとの方針が打ち出されている。

原子力小委員会の革新炉ワーキンググループにおいては、次世代革新炉として革新軽水炉、小型軽水炉、高速炉、高温ガス炉、核融合といった炉型を候補として挙げており、技術成熟度や時間軸、規制対応、サプライチェーン、2050年CNを見据えた市場性、非エネルギー分野といった評価軸で比較検討が進められている。

革新炉WGの技術ロードマップ骨子案では、革新軽水炉の開発を最優先に取り組みと記載されており、革新軽水炉の特徴として、既存軽水炉の技術の延長線上にあるため技術成熟度が高く規制の予見性が高いこと、既存軽水炉のサプライチェーンが活用可能であることが挙げられている。

文部科学省では「次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤の整備に関する検討会」¹²⁾を開催し、次世代革新炉開発に必要な研究開発項目や基盤インフラ整備について検討している。

日本国内においては、JAEAや日立GEニュークリア・エナジー株式会社、三菱重工株式会社等が様々な炉型について研究・開発を実施している。JAEAでは高温ガス炉(HTR)の試験研究炉が稼働中であることに加えて、これまで常陽やもんじゅで蓄積してきた技術を基本に、ナトリウム冷却炉型の高速炉SMRの研究開発を実施している。

三菱重工業株式会社は2020年12月に既存のPWR技術を応用したSMRの概念設計が完了したと発表している。また、2022年9月に、電力会社4社(北海道電力株式会社、関西電力株式会社、四国電力株式会社、九州電力株式会社)と共同で「SRZ-1200」という革新軽水炉について、今後基本設計を進めていくこ

とを発表した¹³⁾。

株式会社東芝は高温ガス炉や超小型炉 MoveLuXTMの開発を進めていることを公表している¹⁴⁾。

日揮グループはNuScale社に出資し、米国大手エンジニアリング会社Fluor社と協業してNuScale SMRプロジェクトに参画予定であると公表している。また、IHI及びNuScaleとコンソーシアムを組み、2019年度よりNExIPイニシアチブ「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」に参画している。

原子燃料工業株式会社は、米国のX-energy社と同社が開発中のSMR(Xe-100)の燃料の製造加工工場「TRISO-X」の米国内での建設に必要な機器の供給協力に関する覚書を交わしている。また、JAEAと共同で高温ガス炉の燃料の研究開発を実施している。

3 まとめ

1966年以降、60年近くに渡って日本では原子力をエネルギー源として利用してきたが、1F事故後は原子力発電所の再稼働や新規開発が停滞した状況が続いていた。しかし、2022年8月の第2回GX実行推進会議において、電力の安定供給、エネルギー安全保障、CN等の観点から再稼働の推進や運転期間の延長、次世代革新炉の開発といった方向性が提示され、原子力発電所を取り巻く状況が変化しつつある。

また、現在の国内の商用原子力発電所は、第2世代もしくは第3世代原子炉であるが、SMRや第4世代原子炉を含む次世代原子炉の開発が進められている。

2022年12月の第5回GX実行推進会議¹⁵⁾において、GX実現に向けた基本方針(案)が取りまとめられた。GX実現に向けた基本方針(案)では、「再生可能エネルギー、原子力等エネルギー安全保障に寄与し、脱炭素効果の高い電源を最大限活用する」とされ、従来の原子力政策が転換される可能性が示された。原子力政策の今後の方向性としては、原子力の2030年電源構成比20~22%の達成に向けた着実な再稼働の促進、次世代革新炉の開発・建設、運転期間の延長等が挙げられている。

引用文献

- 1) 原子力規制委員会 新規制基準 : <https://www.nra.go.jp/activity/regulation/tekigousei.html> (2022年12月現在)
- 2) 一般財団法人日本原子力文化財団 原子力・エネルギー図面集 : <https://www.ene100.jp/zumen/5-1-1>

- (2022年9月現在)を参考にみずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社が作成
- 3) the Generation IV International Forum 第4世代原子力システム国際フォーラムについて : <https://gif.jaea.go.jp/about/index.html> (2022年9月現在)
 - 4) 資源エネルギー庁 世界の原子力技術の動向を追う : <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/nucleartechnology.html> (2022年9月現在)
 - 5) the Generation IV International Forum Technology Systems : https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40486/technology-systems (2022年9月現在)
 - 6) 内閣府 令和3年度版原子力白書 : http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2022/index_pdf01.htm
 - 7) 内閣府 原子力小委員会 : <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/index.htm> (2022年10月現在)
 - 8) 一般社団法人 日本原子力産業協会 原子力産業新聞 : <https://www.jaif.or.jp/journal/> (2022年10月現在)
 - 9) 経済産業省 革新炉ワーキンググループ : https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/index.html (2022年10月現在)
 - 10) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 : https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/ (2022年12月現在)
 - 11) 内閣官房 GX 実行会議 (第2回) : https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai2/index.html (2022年10月現在)
 - 12) 文部科学省 次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤の整備に関する検討会 : https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/025/index.html (2022年12月現在)
 - 13) 三菱重工業株式会社 革新軽水炉「SRZ-1200」について : <https://www.mhi.com/jp/news/220929.html> (2022年10月現在)
 - 14) 東芝エネルギーシステムズ株式会社 安全性に優れた次世代炉・新型炉の追求 : <https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/nuclearenergy/research/safety-reactor.html> (2022年10月現在)
 - 15) 内閣官房 GX 実行会議 (第5回) : https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai5/index.html (2022年12月現在)