



世界で見直され始めた原子力発電 —開発が進む新型原子炉の展望—

2023/7

三井物産戦略研究所
技術・イノベーション情報部 インダストリーイノベーション室
岡見篤史

Summary

- 世界で原子力発電が脱炭素電源として見直されており、原子力発電所を持つ主要国は開発支援の拡充を発表している。それに伴い、原子炉メーカーは安全性を高めた新型原子炉の開発を進め、2030年前後から運転を開始する計画を公表している。
- 新型原子炉には、①既存の軽水炉を改良したもの、②軽水炉以外の炉（第4世代炉）がある。また、炉を小型化したSMR（Small Modular Reactor）もトレンドになりつつある。ただし課題もあり、②には、運転実績の少なさに対する電力事業者の受容性、規制当局による認証プロセスが未確立な点などがあげられる。
- 当面は最新の大型軽水炉が主流になるが、SMRや第4世代炉も発電の一端を担い、ひいては水素製造や産業界の熱利用に貢献する可能性がある。

1. 昨今の原子力発電を取り巻く環境と新技術

近年、原子力発電は有望な脱炭素技術として注目が高まっている。日本では2020年より電力の脱炭素価値を取引する「非化石価値取引市場」で原子力発電の取扱いが始まり、欧州では2022年にEUタクソミー¹に原子力が加わった。また、フランスを中心に原子力発電由来の水素をクリーンな水素とみなすかどうかの議論が交わされている。原子力水素の価格は再エネ電源由来のグリーン水素よりも高いが、制度設計次第では価格競争力を持ち、既存の再エネ由来電源のプロジェクト動向にも影響が出る可能性がある。

世界の原子炉メーカーは従来の原子炉よりも安全性を高めた新型炉の開発を進めており、米国をはじめとする原子力発電所を持つ主要国は支援拡充や追加財源を発表している（図表1）。ただし、新型炉の種類は多岐にわたり、開発の進捗や展望も異なるため、同一視は出来ない。

¹ EUにおける、企業の「環境的に持続可能な経済活動」の基準を示し、グリーン投資を促す制度。

図表1 大型軽水炉と新型炉開発に関する主要国の政策支援

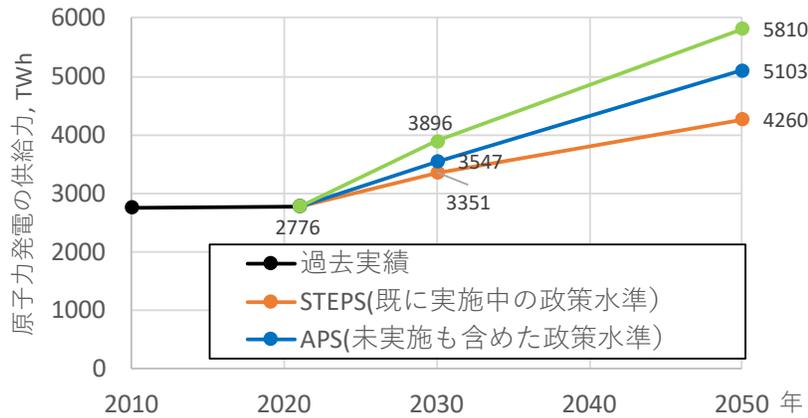
国名	大型軽水炉への支援	新型炉開発への支援（主に大型軽水炉以外）
日本	既設炉 - GX脱炭素電源法成立(2023)、福島原発事故後、運転期間は最長60年と定められたが、GX電源法では安全審査などで停止した期間分の延長を容認する。新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組む旨が明記されている。	GX移行債 - 大型軽水炉等の開発・建設の事業環境整備 - 高温ガス炉・高速炉の開発・建設を推進(3年間で891億円)
米国	既設炉 - 経済的に困難な状況にある既設炉への財政支援（クレジット付与）総額60億ドル/5年間 米国外で新設 - ポーランド・ウクライナが米ウエスティングハウス社の大型炉AP1000を採用	革新炉実証プログラム（ARDP） 総額40億ドル(2021年) ARDP 1 - TerraPower社(高速炉)：20億ドル - X-energy社(高温ガス炉)：12億ドル ARDP 2&3 - 革新炉メーカー各社等 小型モジュール炉SMRの技術開発・運営支援 - NuScale社(小型軽水炉) 研究開発：5.3億ドル 事業者支援：総額13.6億ドル
英国	新設 - 大型原子炉の新規建設支援 最大17億ポンド(2021) - サイズウェルC原発に7億ポンド支援を決定(2022) 新設計画 - 2030年までに最大8基の建設計画	革新原子カファンド(2020) - SMR開発 2.15億ポンド - 高温ガス炉開発：1.7億ポンド 未来の原子力実現基金(2021) - 新設支援：1.2億ポンド
フランス	新設 - 人材支援：1.1億ユーロ、中小企業支援：2億ユーロ - 経営不振の電力会社EDFを100%国有化 新設計画 - 6基の大型軽水炉の新設に着手し、さらに8基の新設を検討	France Relance(2020) - NUWARD(SMR・軽水炉)：0.5億ユーロ France 2030(2021) - NUWARD(SMR・軽水炉)：5億ユーロ - 廃棄物管理が容易な炉開発：5億ユーロ
カナダ	-	SMRを中心とした新型炉開発と設置 9.7億カナダドル - GE Hitachi (SMR・軽水炉) などの革新炉メーカー各社等

出所：経産省原子力小委員会革新炉ワーキンググループ資料
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/001_06_00.pdf（最終閲覧2023年7月7日）
 および各種報道から三井物産戦略研究所作

1-1. 原子力発電量の増加と関連ビジネスの活性化

国際エネルギー機関（IEA: International Energy Agency）が2022年に発表した「World Energy Outlook 2022」の中で、2050年時点の世界の原子力発電量は2021年比で、少ないケースで1.5倍、多いケースで2.1倍に伸びると予想している（図表2）。これは、大型原子炉換算で約200～400基分の増加にあたる。この増加の主要因はアジアを中心としたエネルギー需要の増加であり、この状況を受けて現在、各国で原子炉の新設計画が進んでいる。この計画の多くは中国が占める。一方で、日米欧でも老朽化が進んだ非経済的な原子力発電所の一部の施設が更新されることが見込まれる。このように新設・更新が進む中で、新たな原子力発電の関連機器・核燃料の売買や、メンテナンス需要なども増えてゆくであろう。

図表2 IEAによる世界の原子力発電量の推計



出所：IEA「World Energy Outlook 2022」から三井物産戦略研究所作成

1-2. 従来型原子炉と新型原子炉

従来型の商用原子炉は「軽水炉」と呼ばれる形式が主流で、通常の水（軽水²）を原子燃料で加熱し、発生した蒸気でタービンと発電機を回して電気を得る。

一方、新型原子炉には、①既存の軽水炉を改良した炉、②軽水炉以外の炉（「第4世代炉³」ともよばれる高速炉、熔融塩炉、高温ガス炉など）がある（図表3）。これに加え、モジュール化の発想を取り入れた小型原子炉（SMR⁴）もトレンドになりつつある。これらの炉には高い安全性と優れた経済性が期待される。

第4世代炉やSMRの技術のコンセプトは古くから存在し、過去にも開発が行われてきた経緯がある。その開発の多くは資金難や技術課題、主流となる大型軽水炉と比較した際の非経済性などにより、商業化には至らなかった。しかし、世界の脱炭素技術に対する開発意欲や過去に類を見ない額の投資により、実証炉建設が始まりつつある炉もある。日本では、経済産業省が主導する産学官連携の革新炉ワーキンググループで、新型原子炉の開発ロードマップと市場獲得戦略が2020年に示された（図表4）。この中には、2030年代の商用大型軽水炉建設と第4世代炉の実証炉建設が描かれている。また、海外の新型炉メーカーは日本より早い2030年前後での建設計画を公表しており、製作が始まっている新型炉もある（図表5）。

² 通常の水「軽水」に対して、中性子を多く含む分子量の大きい水を「重水」という。重水を使用した「重水炉」も存在するが、軽水炉が早期に経済性を確立し、主流となった。重水炉の導入はカナダなど一部の国にとどまる。

³ 第4世代原子力システム国際フォーラムが示す定義では、第1世代：原型炉、第2世代：大規模商用炉、第3世代：第2世代の改良型、第4世代：軽水炉以外の革新炉（同フォーラムの定義では次の名称で呼ばれる。超高温ガス炉、ナトリウム冷却高速炉、超臨界水冷却炉、ガス冷却高速炉、鉛冷却高速炉、熔融塩炉）となる。

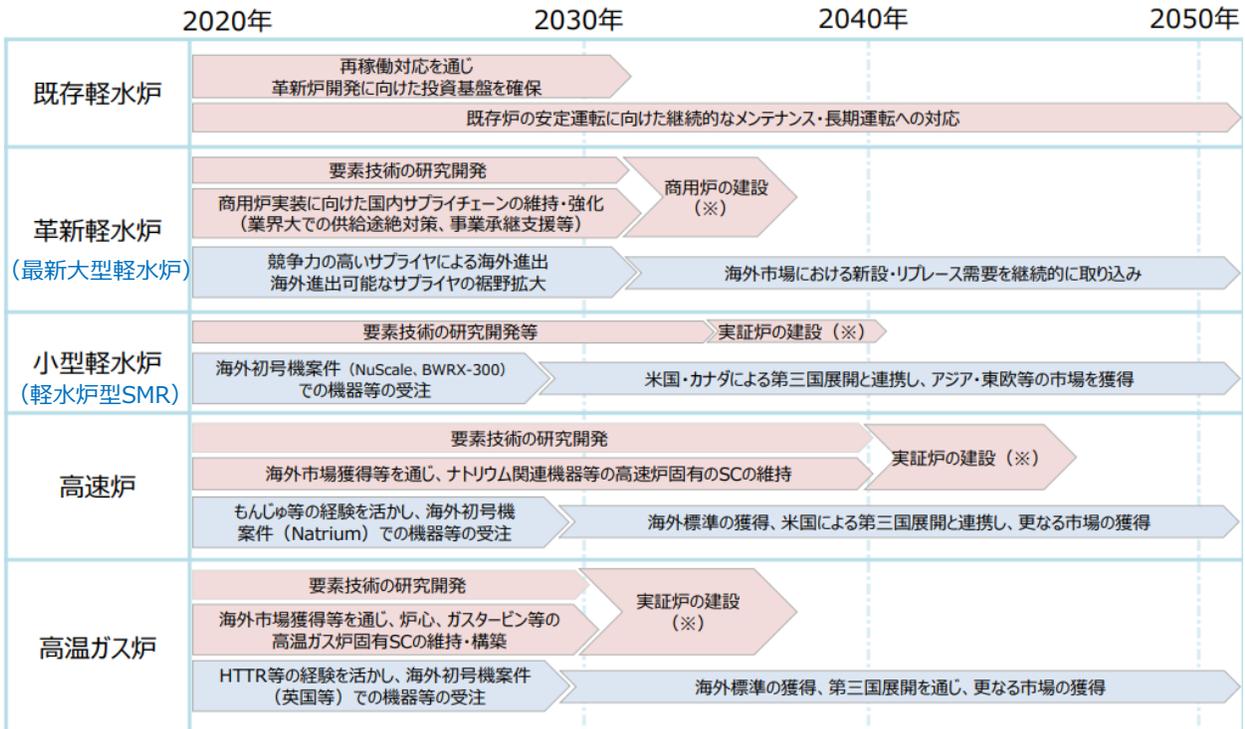
⁴ Small Modular Reactor：小型モジュール炉。主に発電出力が300MW（30万kW）以下のものを指すが、国によって定義は異なる。軽水炉および第4世代炉（非軽水炉）のSMRが開発中の状況にある。

図表3 従来型原子炉と新型原子炉の比較

形式	特徴	冷却材	運転温度	利点	課題・リスク	主なメーカー
軽水炉 (第1~3世代炉)	・現在主流の原子炉 ・新型炉も逐次発表	軽水（通常の水）	300℃ ~350℃	・実績が豊富 ・経済性が高い ・サプライチェーンが確立済み	炉心損傷	三菱重工 日立GEニュークリアエナジー 東芝エネルギーシステムズ (米) Westinghouse (仏) EDF など
高速炉 (第4世代炉)	・核分裂反応に必要な中性子を減速させない冷却材を用いる ・高速な中性子によって核反応が生じる	ナトリウム、熔融塩など	500℃ ~550℃	・燃料リサイクルに適する ・放射性廃棄物の減量化が可能 ・運転圧力が低い	・炉心損傷 ・ナトリウム対策 ・メンテナンス技術の確立 ・経済性の確立	三菱重工 日立GEニュークリアエナジー 東芝エネルギーシステムズ (米) TerraPower (米) GE Hitachi など
熔融塩炉 (第4世代炉)	常温下で固体の塩を冷却材として使用する	熔融塩（フッ化物塩、塩化物塩など）	600℃ ~800℃	・炉心損傷しない ・900℃以上の温度域の熱で水素製造が可能 ・運転圧力が低い	・高温下の耐腐食性 ・メンテナンス技術の確立	(米) TerraPower (米) Kairos Power (加) Moltex Energy など
高温ガス炉 (第4世代炉)	・高温のガスを冷却材に用いる ・電源喪失しても炉心損傷が原理的に起こり得ない	ヘリウムなど	750℃ ~1000℃	・炉心損傷しない ・900℃以上の温度域の熱で水素製造が可能	・燃料リサイクルに適さない ・経済性の確立	三菱重工 東芝エネルギーシステムズ (米) X-Energy (英) NNL (加) USNC など

出所：各種報道から三井物産戦略研究所作成

図表4 本邦企業の原子力発電産業における市場獲得戦略ロードマップ



※実際に建設を行う場合の運転開始時期等は、立地地域の理解確保を前提に、事業者の策定する計画に基づいて決定されることとなる。

国内市場 海外市場 24

出所：原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ「カーボンニュートラルやエネルギー安全保障の実現に向けた 革新炉開発の技術ロードマップ（骨子案）」P29（青字は三井物産戦略研究所追記）

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/004_03_00.pdf

（最終閲覧日2023年6月14日）

図表5 海外原子炉メーカーの主な小型軽水炉および第4世代炉建設計画

形式	メーカー	名称	出力 (MW=0.1万kW)	建設地	運転開始予定
軽水炉型SMR	GE Hitachi、 日立GEニュークリアエナジー	BWRX-300	300	カナダ オンタリオ州	商業炉2028年
軽水炉型SMR	NuScale	VOYGR	77 × 6基 (Total 462)	米国 アイダホ州	原子炉の製作開始済み 商業炉2029年
高速炉	TerraPower, GE-Hitachi	Natrium	345	米国 ワイオミング州	商業炉2030年頃
熔融塩炉	TerraPower	MCFR	N/A	実験炉を米国アイダホ州に 建設中	商業炉2030年代中頃
高温ガス炉	X-Energy	Xe-100	82.5	米国 メキシコ湾岸	商業炉2030年頃

出所：各社ウェブサイトおよび各種報道から三井物産戦略研究所作成

2. 新型炉の種類と特徴

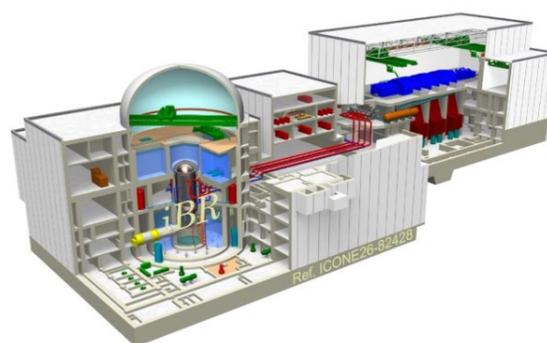
2-1. 大型軽水炉

最新の大型軽水炉は旧式のものに比べて安全性が格段に高い。日米欧で2000年以降の新設は限られていたものの、911米同時多発テロや福島原発事故などを受けて、各メーカーは設計の改善を続けてきた。東芝エネルギーシステムズ社の最新大型軽水炉の場合、福島事故などのように炉心が損傷する確率は、旧式と比べて100分の1程度とされている。国内では、2030年代から大型軽水炉の更新を開始する可能性が高い（図表6）。これまでも本邦メーカー各社は大型軽水炉のコンセプトを世界に向けて出してきたが、2020年までに海外での原子力発電プロジェクトで苦戦を強いられた経験から、現在は国内の更新の受注に注力している。海外では（仏）EDFや（米）Westinghouseをはじめ、近年、原子炉輸出に成功している中露韓のメーカーも同様に開発を続けており、当面はこれらの企業が世界各地で大型軽水炉の新設や更新に採用されるだろう。

図表6 主な新型の大型軽水炉のコンセプト図

(a) 三菱重工「SRZ-1200」

(b) 東芝エネルギーシステムズ「iBR」



出所：

(a) 三菱重工 原子力セグメント 第5回革新炉WG「三菱革新炉開発の取組み」JP2

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/005_03_00.pdf

(b) 東芝エネルギーシステムズ社ウェブサイト カーボンニュートラルとエネルギー安全保障を可能にする革新軽水炉 iBR

<https://www.global.toshiba/jp/company/energy/topics/nuclearenergy/iBR.html>

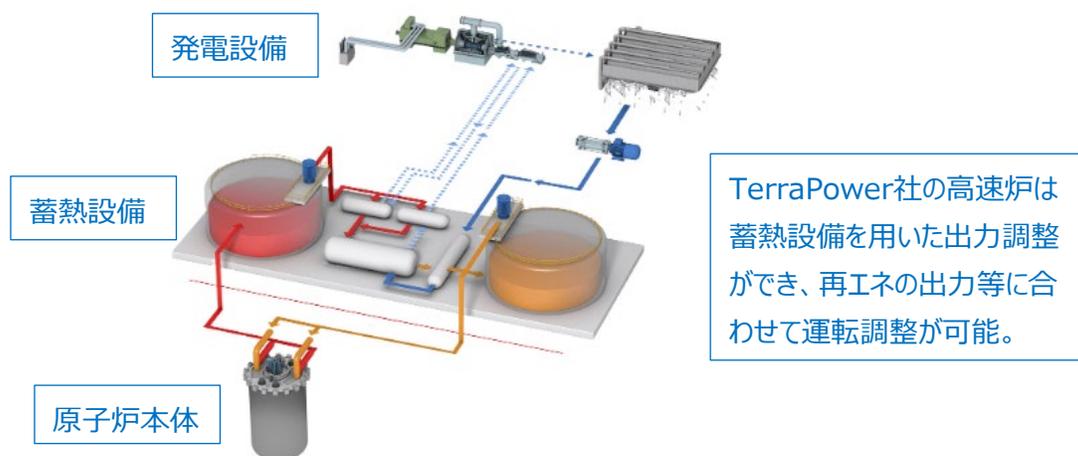
(a、bともに最終閲覧日2023年7月3日)

2-2. 第4世代：高速炉

高速炉には主に、核分裂反応に必要な中性子を減速させないナトリウムや熔融塩といった冷却材を用いる。熔融塩を利用した高速炉は熔融塩高速炉とも呼ばれる。大きな利点は、放射性廃棄物の減量化やウラン資源の有効活用ができる点だ。ただし、ナトリウムは空気や水分と化学反応を起こして発火しやすく、熔融塩は腐食性が高いなど、冷却材の取り扱いには慎重さが求められる。

ビル・ゲイツも出資する(米)TerraPower社のナトリウム冷却高速炉は(図表7)、米国エネルギー省(DOE: Department of Energy)からの総額12億ドルの支援下で開発を進め、2027年までに実証炉を建設する計画である。(米)GE Hitachi社がこの開発を支援しており、本邦高速炉メーカーが部品の設計・製作を受注する可能性もある。

図表7 TerraPower社 ナトリウム高速炉「Natrium」

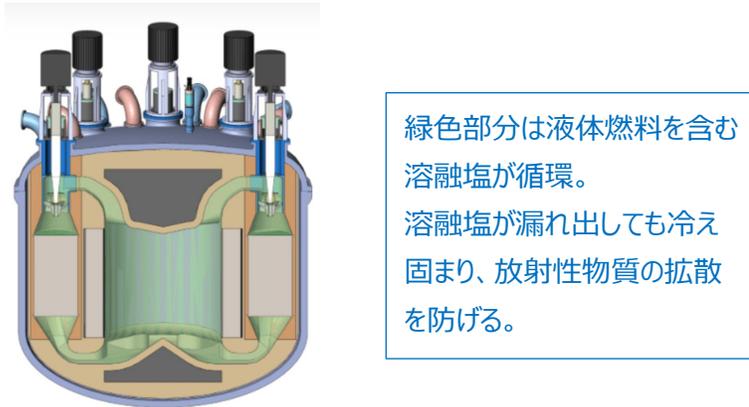


出所：TerraPower社ウェブサイト「THE NATRIUM™ TECHNOLOGY」(青字は三井物産戦略研究所追記)
<https://natriumpower.com/reactor-technology/> (最終閲覧2023年6月14日)

2-3. 第4世代：熔融塩炉

熔融塩炉は、塩化ナトリウムやフッ化物塩など常温下で固体の塩(えん)を冷却材として用いる。運転温度が高いため、軽水炉に比べエネルギー効率が高い。安全性の高さも利点で、福島原発事故のように冷却機能を失っても原理的にメルトダウンすることがない。また、熔融塩が容器の外に漏れ出しても冷え固まり、放射性物質を閉じ込めることができる(図表8)。課題は、耐食性の向上やメンテナンス手法の確立である。熔融塩炉で先行するTerraPower社はDOEの支援を受けながら課題解決を進め、2030年代に実証炉の運転を開始する計画である。

図表8 TerraPower社 溶融塩高速炉「MCFR」

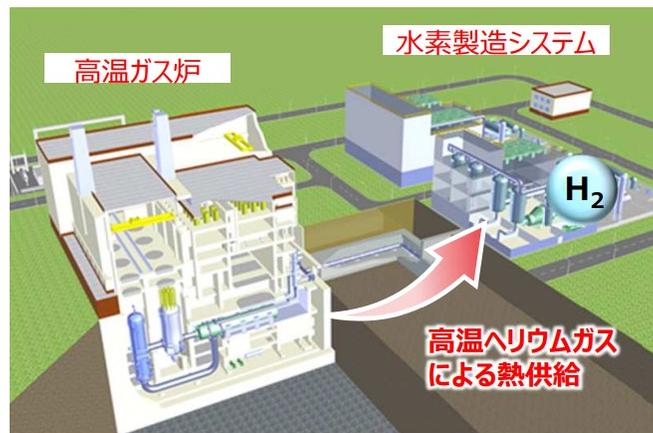


出所：TerraPower社ウェブサイト「MOLTEN CHLORIDE FAST REACTOR TECHNOLOGY」
(青字は三井物産戦略研究所追記) <https://www.terrapower.com/our-work/molten-chloride-fast-reactor-technology/> (最終閲覧日2023年6月2日)

2-4. 第4世代：高温ガス炉

高温ガス炉は、冷却材にヘリウムなどのガスを用いた炉である。運転温度が900℃以上と高く、この熱を水素製造にも利用可能である(図表9)。また、電源を喪失しても炉心損傷はせず、安全性も高い。日本では研究炉、中国では実証炉が運転中であり、米国ではX-Energy社がDOEから12億ドルの支援を受け、2020年代の運転開始を目指す。他方で、プラントの材料には高価な合金が用いられ、また原理的に同じ出力の軽水炉などと比べて炉や建屋が大きくなるため、建設費と発電単価が高額になるという欠点がある。そのため、東芝エネルギーシステムズ社のように、発電用よりも水素製造や鉄鋼などの産業界への熱供給により脱炭素化への貢献を目指すメーカーも多い。

図表9 高温ガス炉の熱を利用した水素製造システム



出所：三菱重工 原子力セグメント 第1回革新炉WG「三菱革新炉開発の取組み」P2
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/001_08_00.pdf
(最終閲覧2023年6月2日)

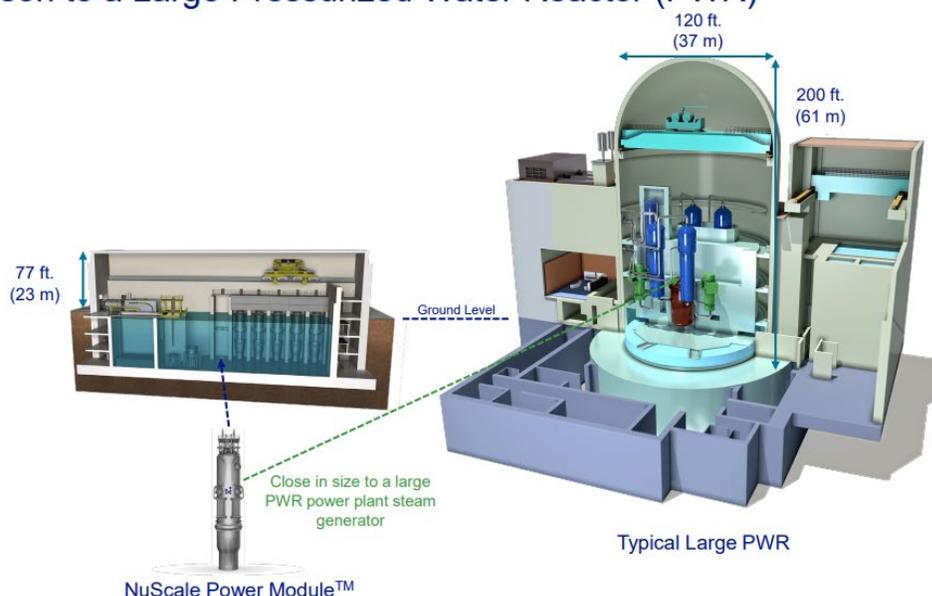
2-5. SMR (Small Modular Reactor)

原子力発電の発電単価は建設費が大きく影響する。大型炉は、テロ対策や福島原発事故後の設計項目の追加に加え、特に欧米では現場工事単価の上昇によって建設費が高騰している。大型炉は輸送上の制限から現場で部品を溶接する作業が必要になるが、SMRは工場で原子炉周りの部品を最大限組み合わせてモジュール化してから現場へ輸送するため、現場工事を減らし、建設費を抑えることが可能である。

SMRの中では現在、(米) NuScale社の加圧水型軽水炉や、日立GEニュークリア・エナジー社が共同開発を進めるGE Hitachi社の沸騰水型軽水炉⁵の計画がそれぞれ米国とカナダで先行し、2029年頃に運転を開始する予定である(図表10)。また、SMRは船舶に搭載可能なサイズのため、洋上発電所や船用の開発を進めるメーカーも少なくない。

図表10 主なSMRのコンセプト図

(a) NuScale社の加圧水型SMR「VOYGR」(左図) および大型軽水炉(右図)
Comparison to a Large Pressurized Water Reactor (PWR)

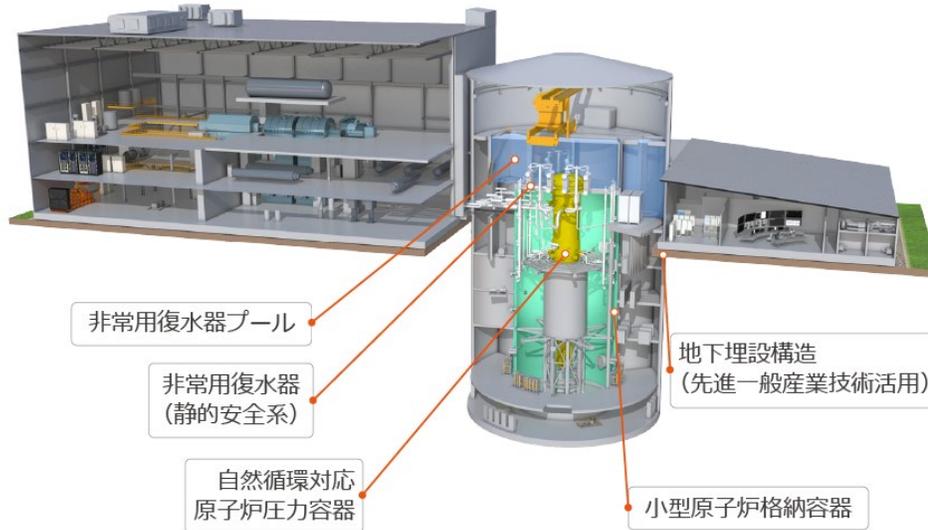


出所：NuScale社ウェブサイト「NuScale's SMR Development」

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/002_06_00.pdf (最終閲覧2023年6月2日)

⁵ 軽水炉には初期に誕生した沸騰水型と、沸騰水型の安全性を改良した加圧水型の形式がある。沸騰水型は加熱した水で直接タービンを回すのに対し、加圧水型は途中で熱交換するため、放射性物質にさらされる範囲が狭い。

(b) GE Hitachi社・日立GEニュークリア・エナジー社共同開発の沸騰水型SMR「BWRX-300」



出所：日立GEニュークリア・エナジー社 ウェブサイト 原子力事業への取り組み「研究開発・新型炉」
https://www.hitachi-hgne.co.jp/activities/advanced_reactor/index.html
(最終閲覧2023年6月14日)

3. 原子力発電の課題と今後の展望

軽水炉は新設・更新需要の増加が見込まれる一方、第4世代炉には商業実績がないという欠点がある。これまで原子炉を運用してきた電力事業者には、軽水炉以外の商業炉の経験がない。電力事業者が第4世代炉を導入するモチベーションとして、確実なメリットと運転実績が必要となる。また、従来型・新型を問わず、原子炉は放射性廃棄物が多かれ少なかれ発生するため、日本をはじめとして各国で処分場を選定しなければならないという問題もある。

第4世代炉は法規・規制面の整備も必要である。既存の軽水炉は、各国の原子力規制当局の審査プロセスが確立している。第4世代炉の中ではナトリウム高速炉の審査プロセスの策定は比較的進んでいるものの、既存軽水炉の仕組みや構造から離れるほど未確立の状況となっている。そのため、第4世代炉の商業炉建設には承認に時間がかかり、スケジュール遅延につながるリスクがある。しかし、2030年頃から始まる実証炉の運用が成功し、軽水炉に対する優位性が示されれば第4世代炉が活用され、ひいては発電にとどまらず、水素製造や産業での熱利用といった分野でも広まる可能性がある。

原子力発電は、2010年代は911米同時多発テロや福島原発事故、欧米での建設費増加により厳しい見方が世界的に広まったが、今後は有望な脱炭素電源として設備投資が増えるであろう。原子炉に限らず、プラントの関連機器や、原子力発電に関連するサービスの需要増加も期待できる。

現状は最新の大型軽水炉が主流であるが、北米・欧州では商用の小型軽水炉の建設計画が進められている。将来的には第4世代炉も原子力発電の一端を担う可能性があり、今後の開発動向が注視される。

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社および三井物産グループの統一的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社および三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。

