

# 小型モジュール炉

## — 溶融塩炉および高温ガス炉の技術動向 —

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：インダストリーイノベーション室 浅田隆利

知財分析：知的財産室 松浦由依

Biz Tech フォーカス 2025

### なぜこの技術を取り上げるのか

小型モジュール炉（SMR: Small Modular Reactor）は、既存の大型原子炉よりも小型でさまざまな利点から注目を集めている。（米）Amazonといった非電力関連企業がSMR導入を検討しており、2024年には（米）Googleが（米）Kairos PowerのSMRから電力を購入する契約を締結し、商業利用の期待が高まっている。このような動きは、SMRの技術開発と市場導入を加速させ、将来的には重要なクリーンエネルギーの選択肢の一つとして位置づけられる可能性がある。世界中でSMR開発が進む中、本稿では先進的なプロジェクトが多く進行している米国に焦点を当て、注目すべき動向と展望を詳述する。

### Summary

- 溶融塩炉ではKairos Powerの実証炉「Hermes」が2027年に運転開始を計画しており、高温ガス炉では、（米）X-energyの「Xe-100」は2026年に建設を開始する予定である。
- 世界的にSMRの数が増加する中、開発されている炉の種類は多岐にわたる。複数台建設によるコスト削減（スケールメリット）が期待できる炉は限られており、経済性に基づいて淘汰されていく可能性が高い。

## 1. 小型モジュール炉（SMR: Small Modular Reactor）とは

SMRは1,000MW以上の既存の原子炉と比較して出力の小さい350MW以下の原子炉のことを指す<sup>1</sup>。脱炭素化に向けて原子力が注目を集めており、COP28では「原子力三倍化宣言<sup>2</sup>」がなされた。各国で既存の大型炉に加え、安全性や設置場所の拡大、モジュール化による建設コスト削減の観点からSMRの開発が加速している。欧州で2024年9月に公表されたドラギレポート<sup>3</sup>では、中期的にSMRを含めた原子炉のサプライチェーン構築の必要性が述べられている<sup>4</sup>。SMRは炉心冷却材で大分類され、①既存の商用炉と同じ軽水<sup>5</sup>を用いた加圧水型炉および沸騰水型炉の軽水炉に加え、②ナトリウム等を用いた液体金属冷却炉、③塩化物溶融塩等を用いた溶融塩炉、④気体を用いた高温ガス炉とさまざまなSMRが開発されている（図表1）。

しかし、小型化することでスケラビリティがなくなり既存の原子炉よりも発電コストが増加するとい

<sup>1</sup> 英国では液体金属冷却炉、溶融塩炉、高温ガス炉はすべて大きさにかかわらず先進モジュール炉に分類される。300MW以下と定義される場合もある。

<sup>2</sup> 2023年の国連気候変動枠組条約第28回締約国会議（COP28）において、原子力発電設備容量を2050年までに2020年比で3倍化を目指す宣言がなされた。一般社団法人日本原子力産業協会の試算によると、3倍化した場合の設備容量は1,200GW強となる。2024年11月時点では31カ国が署名している。

<sup>3</sup> 正式名称は「The future of European competitiveness」であり、マリオ・ドラギ氏が執筆したレポートである。

<sup>4</sup> 「The future of European competitiveness Part B | In-depth analysis and recommendations」において先進モジュール炉とSMRを含めたnew nuclearとして定義されている。

<sup>5</sup> 通常の水、重水素を含む場合は重水と呼ばれる。

う課題が存在する<sup>6, 7</sup>。本稿では、発電コストの課題に対して高温運転により発電効率が高い③熔融塩炉と④高温ガス炉を取り上げる。さらに、これらの炉は高温の熱を直接供給することができるため、化学工業分野などの脱炭素が難しい分野への適用が可能である。以降の2-1項では、米国での先進的企業2社が進める熔融塩炉および高温ガス炉の動向を述べる。2-2項ではSMR用燃料製造の動向について、2-3項ではSMRの熱利用技術を総括する。

図表1：代表的なSMRの仕様一覧と運転開始時期

炉型	モデル名	開発メーカー	炉心冷却材	単機出力 [MWe]	炉心出口温度[℃]	熱供給温度[℃]	運転開始時期
加圧水型炉	VOYGR	(米) NuScale Power	軽水	77	321	300	2029年
沸騰水型炉	BWRX-300	(日) 日立GE ニュークリア・エナジー (米) GE Hitachi Nuclear Energy	軽水	300	288	-	2029年
液体金属冷却炉	Natrium	(米) TerraPower	ナトリウム	345	500	-	2030年
熔融塩炉	KP-FHR	(米) Kairos Power	熔融塩	75	650	-	2030年以降
高温ガス炉	Xe-100	(米) X-energy	ヘリウム	80	750	565	2030年

MWe: 電気出力

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

## 2. 注目すべき動向

### 2-1. 熔融塩炉および高温ガス炉の動向

熔融塩炉の分野で先行しているのが、Kairos Powerの開発するフッ化物塩冷却高温炉KP-FHR<sup>8</sup>である。米エネルギー省（DOE）の支援を受けた実証炉Hermesの建設が米テネシー州で2024年7月に開始され、2027年の運転開始を計画<sup>9</sup>している。熔融塩炉は、構造材の腐食などの技術課題が指摘されている。これに対処するため、過去の炉では腐食耐性の強い Hastelloy 系合金が使用<sup>10</sup>されてきたが、Hermesでは低コストの316Hステンレス鋼<sup>11</sup>が採用され、米原子力規制委員会（NRC）の建設許可を受けた。

高温ガス炉の代表的な例として、X-energyが開発するヘリウムガス冷却炉Xe-100が挙げられる。同社は化学メーカーの（米）Dowと契約<sup>12</sup>を結び、2026年に米テキサス州において商業炉の建設を開始し、2030年から低炭素の電力と蒸気を供給する計画である。高温ガス炉は950℃を超える高温運転を前提としたものが

<sup>6</sup> （米）NuScale Power社が米アイダホ州にSMR「VOYGR」を建設予定であったが、建設コストが上昇し、発電コストが想定よりも高くなってしまったため、建設を断念している。

<sup>7</sup> 一般的にSMRの発電コストは、既存の軽水炉の倍程度が想定されている。

<sup>8</sup> Kairos Power Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactorの略であり、フッ化リチウムとフッ化ベリリウムを混合した熔融塩を使用する。高純度熔融塩の製造工場建設が2024年に開始され、安定供給が可能になる見込み。

<sup>9</sup> Hermesでは発電は行わずに熱エネルギーの出力35MWを確認する計画である。

<sup>10</sup> 米オークリッジ国立研究所の熔融塩実験炉Molten-Salt Reactor Experimentでは Hastelloy-N が使用された。

<sup>11</sup> ステンレス鋼の316Hは既存の原子炉で採用実績があり、ASME Code, Section III, Division 5にて高温材料として認められている。

<sup>12</sup> DowはUCC Seadriftの工場にSMRを導入することで既存の蒸気システムの代替とするとともに電力供給を計画している。

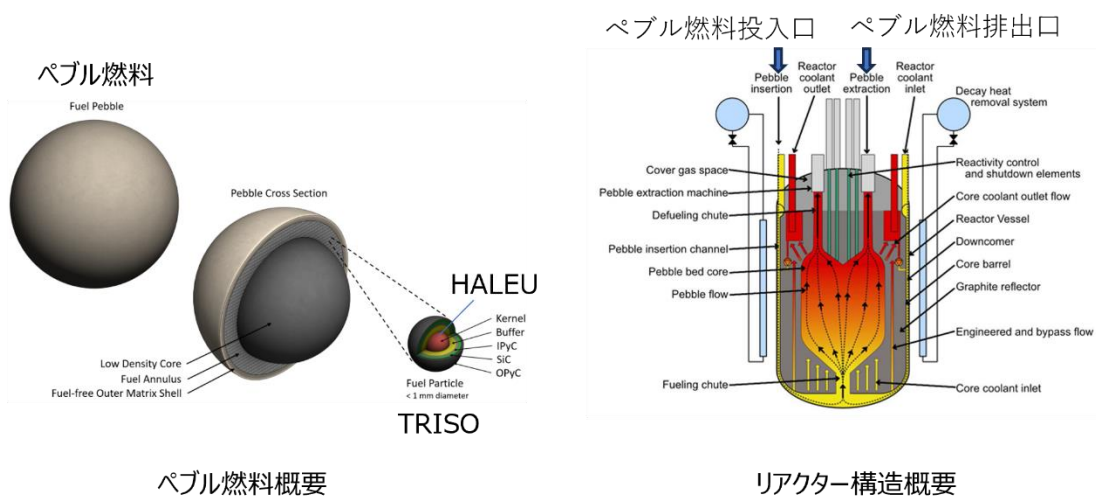
多く、構造材のコスト高につながっていた。また、燃料粒子の被膜が破損するというリスク<sup>13</sup>も存在している。これを解決するため、Xe-100では運転温度を750℃に引き下げることで、より多くの材料を使用可能にした。

## 2-2. SMR用燃料製造の動向

上記のSMRでは、運転温度が高いため、耐熱性に優れた燃料を使用することで安全性向上を図っている。一方、これらの燃料には新規の製造工場が必要となるため、この点も重要な視点として捉える必要がある。上記の2社が開発するSMRは、高純度低濃縮ウラン（HALEU<sup>14</sup>）を三重被膜した直径約1mmの燃料粒子（TRISO<sup>15</sup>）を多数埋め込んだ球状のペブル燃料を使用する。このシステムは、運転中でも新たな燃料を供給できる設計となっている（図表2）。

HALEUは他のSMRでも採用が検討されている燃料であり、SMRの需要増に伴い、その供給不足が懸念されている<sup>16</sup>。直近では（米）Centrus Energyが2023年10月にHALEUの製造を開始した。また、TRISOについては、（米）BWX Technologiesが米バージニア州で製造を開始しており、さらにX-energyは2025年にテネシー州にて製造開始を計画している。このように、各社の製造体制の拡充により、商用炉の運開時期には、安定した燃料供給が確保される見込みである。

図表2：燃料概念図、燃料供給システム図



出所：U.S.NRC資料から三井物産戦略研究所作成

<sup>13</sup> (独)のAVR reactorでは二重被膜のBISO燃料(Bi-structural Isotropic particle fuel)の高温耐久性に課題があったといわれている。

<sup>14</sup> ウラン235の濃縮度が5%から20%のHigh-Assay, Low Enriched Uraniumのこと。

<sup>15</sup> Tri-isotropicの略称。ウラン燃料を熱分解炭素で被膜(Inner Pyrolytic Carbon)した上から炭化ケイ素(Silicon Carbide)で被膜、さらに熱分解炭素(Outer Pyrolytic Carbon)で被膜している。約1600℃でも融解しない特性を持つ被膜構造により、核分裂生成物を内部に保持できるため、高い安全性を有しており、SMRの安全性をさらに向上させることが可能である。

<sup>16</sup> 2022年時には(露)Rosatom系の企業で市場供給の100%を占める状態であった。ロシアへの依存度を下げするために、HALEUの米国内サプライチェーンを構築するための支援をIRA法(Inflation Reduction Act)にて行っている。

### 2-3. SMRの熱利用技術

上記SMRは、高温の熱供給ができるため、脱炭素化が難しい化学プラントなどの産業分野への熱エネルギーの提供が可能だ。知財分析結果では、メタノール生成システム等へ熱を供給する特許が出願されていることが分かる。産業分野のプロセス温度と、それに適用可能なSMRの種類を図表3にまとめた<sup>17</sup>。前述のX-energyのSMRでは、高温の蒸気を用いた海水脱塩も想定されている。

図表3：産業分野におけるプロセス温度と適用可能なSMR

産業	プロセス温度	利用可能性
海水脱塩	70~130℃	
地域暖房	80~150℃	
アルミニウム製造(アルミナ水和)	100~300℃	
パルプおよび製紙製造	100~400℃	
化学	250~600℃	
オイルサンド(SAGD法)	約300℃	
ソーダ灰製造(ソルベイ法)	300~400℃	
石油精製	350~550℃	
アンモニア製造(アンモニア合成)	400~500℃	
オイルシール	約500℃	
石油精製(接触分解)	600~800℃	
アンモニア製造(天然ガス改質)	600~800℃	
水素製造(天然ガス改質)	約750℃	
化学(ナフサ分解)	800~900℃	
アルミニウム製造(アルミナ焼結)	800~1000℃	

出所：一般財団法人日本原子力産業協会資料から三井物産戦略研究所作成

### 3. 今後の展望

原子力エネルギーの新しい展開として注目されるSMRだが、市場の競争環境は非常に厳しいものになるだろう。DOEによれば、同一設計の原子炉を複数建設し、学習効果を活用してコストを削減するには、少なくとも5~10基が受注される必要があるとされる<sup>18</sup>。IAEA<sup>19</sup>の原子力発電導入予測によれば、「成長が期待されるケース」では、2050年までに原子力発電容量が578GW増加し、そのうちSMRは全体の24%を占めると見込まれている<sup>20</sup>。この予測を基に1基当たり350MWで換算すると、約390基のSMRが世界で導入される計算となる。

世界18カ国で80タイプのSMRが開発<sup>21</sup>されているが、NRCの許認可の取得期間が計画より長期化して開発負担に耐えられない、詳細設計時に建設コストが上昇し当初のコスト見込みを上回る、新規導入技術による

<sup>17</sup> 液体金属冷却炉の中にはより高温の動作環境を想定している場合もあるが一般的な液体金属冷却炉の温度を示す。

<sup>18</sup> U.S. Department of Energy発行の「Pathways to Commercial Liftoff: Advanced Nuclear」より。

<sup>19</sup> 国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency) を指す。

<sup>20</sup> IAEA発行の「Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050」では、2023年末の原子力発電稼働容量372GWに対し、2050年の高位ケースで950GW、低位ケースで514GWと試算されている。SMRの割合については高い割合で24%、低い割合では6%と試算されている。

<sup>21</sup> The Future of European Competitiveness part B section 1 chapter 1より。

低コスト化が想定通り進まない等で、一部の開発中SMRは市場競争力を失い淘汰される<sup>22</sup>可能性が高い。

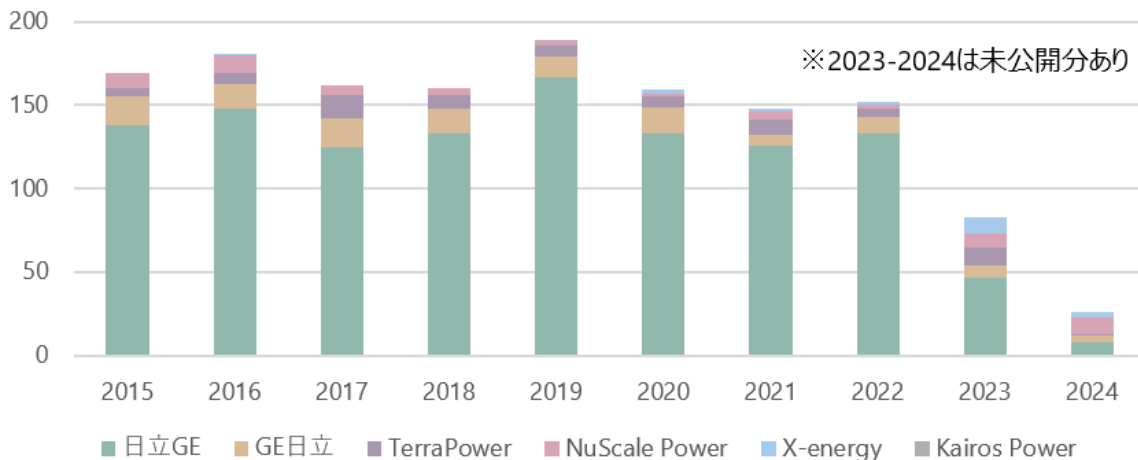
2030年にかけて初期のSMRが建設され安全性・コスト面の比較がなされていく。2030年代に入ると熔融塩炉や高温ガス炉の商用炉が稼働を開始する。その際、SMR製造企業の競争力の源泉として、①根本的な安全性確保と②低コストはもちろんのこと、③確実性の高いコスト見込み、④高温の熱供給とそれを生かすノウハウ、⑤原子力発電所の建設経験を持つ企業とのパートナーシップ（一時期の脱原発の動きにより、製造可能な企業数が減少）、⑥信頼性の高いサプライチェーンの構築などがある。

SMRには技術的、経済的な課題が存在するものの、安定した電気・熱の供給を可能とするため、脱炭素社会における重要な選択肢となる。

## 小型モジュール炉に関する知財分析

小型モジュール炉に関する知財分析として、図表1に記載の開発メーカー6社が出願する特許データを抽出し、技術をめぐる状況を分析した。分析対象は、グローバル特許検索ツールPatSnapを用いて検索した、2015年から2024年出願の1,431件（ファミリー件数）である。

図表4：開発メーカー6社による特許出願件数/年



出所：三井物産戦略研究所作成

図表4に示すように、企業により出願件数にバラつきはあるものの、技術開発は一定水準で続いている。（日）日立GEニュークリア・エナジー（以下日立GE）は全期間で最も出願数が多く（平均138件/年）、（米）GE Hitachi Nuclear Energy（以下GE日立）が平均14件/年、TerraPowerが平均8件/年、NuScale Powerが平均5件/年と続く。X-energyは2020年以降、連続して出願があり、2023年に10件/年と急増している。Kairos Powerの出願は2019年の1件のみである。

<sup>22</sup> 11月にSMRより小型のマイクロ炉を計画していた（米）Ultra Safe Nuclear Corporationが破産申請を行った。同社はアンカー投資家の確保に苦慮していたことが明らかになっている。

図表5：メーカーごとの注力分野と主な出願国（2015年～2024年）

企業名	件数	注力分野	主な出願国
(日) 日立GE	1,158	1. 原子力技術   原子炉格納容器、原子力施設の安全性 2. インフラ最適化および設備管理 3. 非破壊検査および解析技術	日本、米国、欧州
(米) GE日立	119	1. 原子力技術   冷却技術、次世代原子炉の安全性 2. センシングおよびモニタリング技術 3. AI・機械学習   データ解析に基づく高度なシステム開発	米国、欧州、日本、カナダ、メキシコ
(米) TerraPower	72	ナトリウム冷却高速炉技術	米国、中国、欧州、カナダ、日本、韓国、ロシア
(米) NuScale Power	59	1. 小型モジュール炉の核出力制御・熱サイクル管理技術 2. 原子炉システムの安全性およびモニタリング技術 3. 原子炉統合エネルギーシステム(IES)	米国、欧州、カナダ、韓国、中国、日本
(米) X-energy	20	高温ガス炉技術   核燃料の効率化・安全性向上	米国、欧州、韓国、中国、カナダ、日本、南アフリカ
(米) Kairos Power	1	熔融塩炉技術   不純物除去	米国

出所：三井物産戦略研究所作成

図表5にメーカーごとの出願件数、注力分野、主な出願国をまとめた。日立GEは、出願件数は多いが、約85%が日本国内のみへの出願であった。GE日立は、次世代原子炉の安全性や効率性向上を目指した技術開発に注力しており、これにはモジュール型の炉に向けた新しい設計が含まれる。加えて、AIを活用した故障予測や運転管理システムも今後の重要な技術分野とみられる。TerraPowerはナトリウム冷却高速炉、X-energyは高温ガス炉にそれぞれ注力している。これらの企業の出願には、小型モジュール炉（SMR）のみに限定される技術はないが、SMRに適用可能な技術は確認できる。

NuScale Powerの出願は、名称に「小型モジュール炉」を含むなど、SMRの開発に特化している。また、NuScale Powerは、環境負荷軽減や炭素排出削減を目的とする原子炉統合エネルギーシステム（Integrated Energy Systems: IES）に関連する技術を出願している点にも特徴がある。IES関連技術としては、原子炉の熱や電力を利用して二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を回収し、回収したCO<sub>2</sub>をメタノール生成に活用するシステムや、原子力発電で生成された蒸気から水素（H<sub>2</sub>）を生成し、さらに硝酸（HNO<sub>3</sub>）を生成するプラントなどが出願されている。

このように各メーカーは次世代の原子力技術の実現に向けて、個別の戦略的分野に注力していることが特許データから示されている。今後の技術動向を把握する上で、環境問題への対応や効率的なエネルギー利用の観点から原子力技術がどのように進化していくのかという観点も興味深い。

**浅田 隆利** Takatoshi Asada / シニアマネージャー

専門分野：環境・エネルギー技術

**松浦 由依** Yui Matsuura / シニアアナリスト

専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

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さ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した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。