

新型炉について 期待と求められる対応

国際機関の文書等に基づく整理

2022年10月

※2022年3月28日第25回 原子力小委員会 海外電力調査会資料より資源エネルギー庁にて作成

- 革新炉とは、安全性、廃棄物、エネルギー効率、核不拡散性等の観点から優れた技術を取り入れた先進的な原子炉。

(参考：米原子力エネルギー革新法（2017年）)

- 小型モジュール炉（SMR）の定義は、国や機関により様々であり、定まっていない。

革新炉の区分		
革新炉 <定義>	大型	小型
軽水炉	革新軽水炉	小型モジュール炉（SMR）
第4世代炉等	大型第4世代炉	

※第4世代炉：黎明期の原子炉（第1世代）、現行の軽水炉等（第2世代）、改良型軽水炉等（第3世代）に続く原子力システム概念

SMRの定義

米国		英国		OECD/NEA		IAEA		
AR	SMR	・ 軽水炉 ・ 30万kWe未滿	SMR	・ 第3世代炉 ・ 小型 ・ モジュール	SMR	・ 1~30万kWe ・ モジュール（連続生産） ・ 第3世代炉 ・ 第4世代炉	SMR	・ 30万kWeまで ・ モジュール ・ 先進的 ・ 固有の安全性 ・ 全ての炉型 - 第3世代炉 - 第4世代炉
		・ 非軽水炉（全ての炉型）	AMR	・ 第4世代炉 ・ モジュール<核融合炉>				

出典：資源エネルギー庁「エネルギーを巡る社会動向を踏まえた革新炉開発の価値」 令和4年4月20日
第1回革新炉ワーキンググループ 資料6

革新型軽水炉の安全性向上の例

大型航空機衝突への対策

航空機衝突に耐える格納容器
外部遮蔽壁の強靱化

セキュリティ高度化

最先端技術を適用した
サイバーセキュリティ

耐震性向上

地下式構造(岩盤埋込)

放射性物質放出防止

万一の事故時にも、事故影響
を発電所敷地内に限定

多重性・多様性

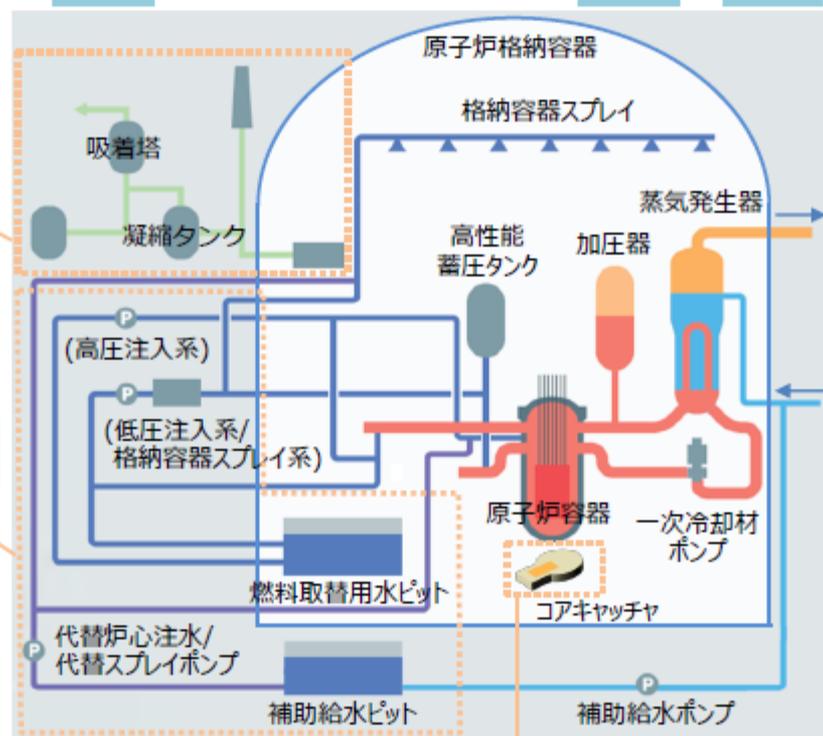
炉心冷却のための設備、電源
等の多重性・多様性を強化
(2系列 ⇒ 3系列+シビアアクシデント
(SA)専用システム)

溶融炉心対策

炉心溶融が起きてしまった
場合でも、最終障壁である
格納容器を防護

津波、その他 自然災害への耐性

津波・竜巻・台風・火
山等の自然災害への
耐性を強化



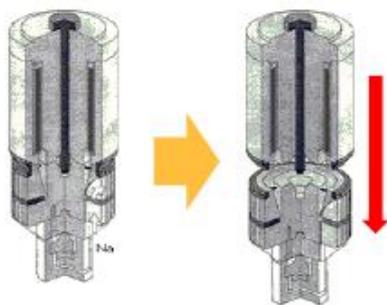
出典：資源エネルギー庁「エネルギーを巡る社会動向を踏まえた革新炉開発の価値」 令和4年4月20日
第1回革新炉ワーキンググループ 資料6を基に作成

受動的安全システム例

- 受動的安全性とは、システムの安全機能が、外部からのエネルギーあるいは信号、操作なしにそれ自体の有するメカニズムによって確保されること。
- 冷却液体の重力による注入や、自然循環による冷却といった自然法則を安全機能に採用した受動的安全炉の開発・導入が東京電力福島第一原子力発電所事故後も進む。

事故時に制御棒自動挿入

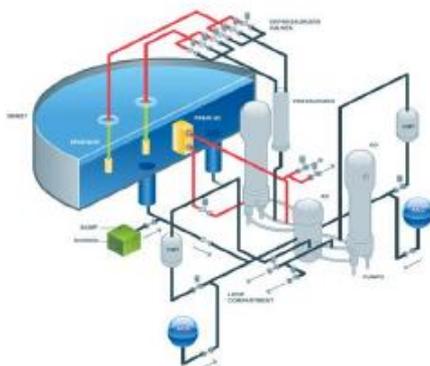
事故時の温度上昇で磁力を喪失し制御棒が重力で落下して挿入されるため、自然に反応が止まる



ナトリウム冷却高速炉
(日本原子力研究開発機構)

重力や蓄圧を使って注水

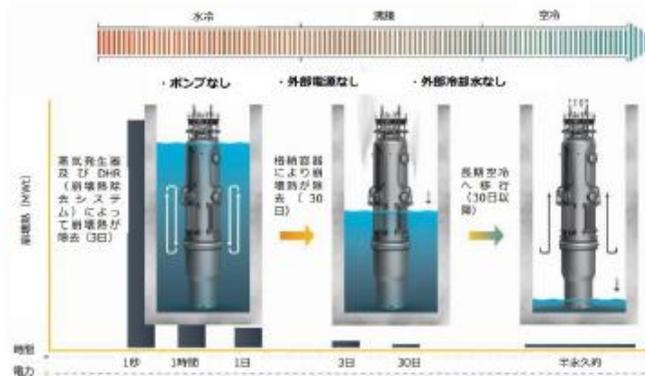
重力や蓄圧といった自然力を用いるため事故時に電源や人的対応が不要



軽水炉 AP1000
(ウェスチングハウス)

自然循環で冷却

冷却に使われる液体や空気が炉心の熱で密度差が生じて自然循環し確実な冷却



小型軽水炉 VOYGR
(NuScale)

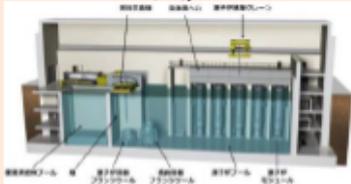
出典：資源エネルギー庁「エネルギーを巡る社会動向を踏まえた革新炉開発の価値」 令和4年4月20日
第1回革新炉ワーキンググループ 資料6

海外連携、国内開発等で推進するSMR等の開発

NuScale SMR

日揮グローバル株式会社、株式会社IHI

- PWRタイプのSMR。複数のモジュールをプール内に設置し、炉心冷却が可能。
- 1モジュールの出力は7.7万kWで、最大12個のモジュールを設置可能(最大92万kW)。
- 2029年に米国で実証炉運開を目指すNuScale社に、2021年、日揮・IHIが出資を発表。2022年、JBICも出資を発表。
- モジュール・メンテナンス機器等の課題についてについて日米協力を通じて実証を目指す。



BWRX-300

日立GEニュークリア・エナジー株式会社(日立GE)

- 出力30万kWのBWRタイプのSMR。圧力容器と一体化した隔離弁を採用した原子炉とすることで、配管破断による冷却材喪失事故を排除する設計。NRCが事前審査中。
- 米GE Hitachi社と日立GE社が共同開発し、北米での実証を目指す。
- 日立GEの実温・実圧で試験できる設備を活用し、要素技術を実証を予定。



多目的利用小型PWR

三菱重工株式会社

- PWRタイプのSMR。炉容器に蒸気発生器を内蔵することで冷却材喪失事故の排除、炉心冷却にポンプ等の動的機器を使わない受動安全性等が特徴。
- 独自IPで、出力30万kWの発電用炉と、革新的な窒化物燃料を使う出力3万kWの船舶搭載炉を開発。



マイクロリアクター

- 災害時の非常用電源、遠隔地などで多目的に利用できる出力0.05万kWのマイクロリアクターも開発。



海外連携、国内開発等で推進するSMR等の開発

小型ナトリウム冷却金属燃料高速炉(MCR-200)

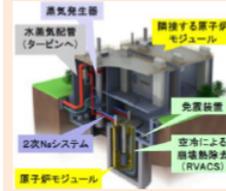
三菱重工業株式会社、三菱FBRシステムズ株式会社



- 二次系ループをモジュール型に増やして出力増が可能な小型ナトリウム冷却高速炉
- 金属燃料を粒子型とすることで、受動停止による安全性向上、ナノ粒子をナトリウム冷却材に混ぜることで、ナトリウムの化学的活性の抑制を目指す。
- 国産技術で高い技術成熟度。

小型ナトリウム冷却金属燃料高速炉(PRISM)

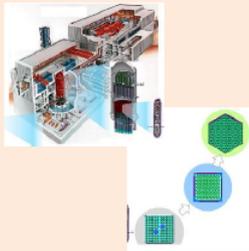
日立GEニュークリア・エナジー株式会社 (日立GE)



- 日立GEのパートナー・米GE Hitachi社開発のナトリウム冷却・金属燃料小型モジュール高速炉。
- 金属燃料による固有安全性、静的機器による受動安全、モジュール工法による工期削減等が特徴。
- 設計概念は米国のVTR、Natrium炉にも採用。

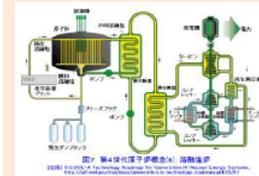
軽水冷却高速炉

日立GEニュークリア・エナジー株式会社



- MOX燃料棒を稠密に配した四角格子燃料を既設BWR・ABWRに装荷し、BWRでプルトニウムを集中的に経済効率よく燃焼することを可能とする提案。
- 現行再処理・MOX燃料技術を活用可能。

熔融塩炉

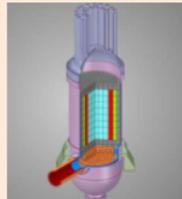


- 沸点が高く低圧で作動可能な熔融塩の液体燃料を循環させ、発電等に用いる炉型。米、加、仏等で次世代の技術として開発。

高温ガス炉コジェネプラント (水素製造・発電)

三菱重工業株式会社

- 高温ガス炉の900℃超の熱を活用し、発電と大量・安定の水素製造が可能なコジェネプラント。
- 水素の大量安定供給で製鉄等プラント等の脱炭素に貢献可能。
- HTTR設計・製作・建設、実用炉検討を通じた経験。



蓄熱型高温ガス炉

東芝エネルギーシステムズ株式会社、富士電機株式会社

- 熱出力600MWt/ユニットで、4ユニット合わせて電気出力約100万kWを達成する高温ガス炉。
- 発電用を念頭とし、熔融塩蓄熱システム併設により負荷追従が可能。
- 高温水蒸気電解との接続による水素製造オプション
- HTTR建設主要企業としての経験。



SMRに対する期待と求められる対応：まとめ

論点項目	期待	求められる対応
安全性	簡素化設計や低エネルギー密度は過酷事故につながる事象を低減し安全裕度の向上。	自然循環冷却等の受動的安全機能、過酷な故障モード等新たな技術の実証が必要。
規制	軽水炉ベースSMRは、現行の大型炉同様の運転条件等であるため、許認可プロセスが容易の可能性。	軽水炉型以外のSMRは新しい設計が多く、経験ベースがより限定的。新たな規制項目に係る検討と対策が必要。
経済性	モジュール化等による工期短縮は先行投資額、財務リスクの低減につながり参入意欲拡大の可能性。SMRが提供できる電力系統の負荷追従や非電力利用は経済性向上に寄与し得る。	スケールデメリットの点で大型炉に比べ不利。世界市場に向けた大量生産の実現が必要。そのためには、世界的な規制調和と市場の統合が必要。
サプライチェーン	研究機関や大学との連携により、SMR サプライチェーンは、熟練した労働力と研究開発インフラストラクチャの利活用を確保。	SMRプロジェクトの展開のためには、主要コンポーネントの戦略的パートナーシップが不可欠。
立地	大型原子炉と同様、雇用創出の機会等地域社会に魅力的なものとなる可能性。高い受動的安全特性等により、遮蔽要求水準の緩和(reduced shielding requirements)やEPZの縮小、エネルギー需要地域近傍への立地の可能性あり。	EPZの削減等が実施されても、安全目標を満たし、高いレベルで公衆の信頼を得ることにつながることを実証する必要あり。
燃料サイクル／廃棄物	—	一部のSMRはU235の濃縮度5～20%の低濃縮ウラン(HALEU)の使用を想定しており、この核燃料サプライチェーンと燃料サイクル全体への影響を評価する必要あり。また、SMRの使用済燃料の特殊性を踏まえた貯蔵・処分の検討も必要。

以下、参考資料

SMRの分類 (OECD/NEAによる)

分類	技術的特徴	具体例/適用
軽水炉-SMRs: 単機型 (Single-unit)	現行の成熟した軽水炉技術が基礎	SMR-160 (米)、BWRX-300 (米-日本)、UK SMR (英) 他
軽水炉-SMRs: マルチモジュール型 (Multi-module)	現行の成熟した軽水炉技術が基礎。モジュール化により中規模出力への増強が可能。	NuScale (米)、RITM-200 (ロ)、Nuward (仏) 他
移動可能型 SMRs (Mobile/transportable)	現行の成熟した軽水炉技術が基礎。海上も含め移動可能。	浮体原子力発電所 (ロシア、アカデミック・ロモノソフ52MWx2基) 等
第IV世代 (Gen IV) SMRs	革新的かつ非軽水炉技術が基礎。Gen IVとして開発が進められた技術。	高温ガス炉、高速炉、熔融塩炉
Micro modular reactors (MMRs)	10 Mwe以下の出力。移動の容易性。Gen IV技術を含め、非軽水炉型が主流。	遠隔地等グリッド接続の無い場所での使用等を念頭

出典：OECD/NEA, “Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities,” 2021.P.15~16 に基づき作成

革新炉の評価：米国と英国の例

米国 ARDP支援における評価（2020年）

※ARDP：Advanced Reactor Demonstration Program
（先進的原子炉実証プログラム）

＜評価軸＞

- ・ 技術成熟度・時間軸
- ・ 安定供給、負荷追従、電気以外の利用等の価値（既存炉と比較）
- ・ 原子炉の建設・製造能力、外注先やサプライチェーン等の体制整備
- ・ 規制当局との事前協議・調整の計画 ・価格競争力
- ・ 建設選定地の使用許可、環境、報告、規制、投資等の方策

英国 NIROによる評価（2021年）

※英国原子力研究所のシンクタンク

高温ガス炉が実証炉プロジェクトに最適との評価：

- ・ 技術成熟度・時間軸（2030年代初頭）
- ・ 出力温度が高く、水素製造など熱利用可能
- ・ 既存サプライチェーンとの親和性（ガス冷却炉の実績）

出典：資源エネルギー庁「エネルギーを巡る社会動向を踏まえた革新炉開発の価値」 令和4年4月20日
第1回革新炉ワーキンググループ 資料6

SMR 安全性【過酷事故関連】

期待	求められる対応
<p>簡素化された設計は過酷事故につながる事象を低減。小型化による熱慣性大、エネルギー密度低は緩やかな熱遷移反応による安全裕度大(The combination of higher levels of design simplification and integration results in fewer failure modes. For example, the smaller number of reactor vessel penetrations reduces possible leakage points, and the design is therefore more resistant to a loss-of-coolant accident (LOCA). The integration of control rods into the vessel also suppresses the risk of control-rod ejection accidents. Moreover, the higher thermal inertia and lower power density of the integral designs leads to a slower response in case of temperature transients, thus increasing safety margins.). (OECD/NEA 2021 [1] P.29)</p>	<p>過酷事故時を含め放射性物質の環境放出を防ぐバリアは必要 (For SMRs, a main barrier for protecting the environment from the radioactive releases is also necessary to ensure the confinement function in case of accidents including severe accidents.) (IAEA 2018 [2] P.80)</p> <p>設計の有効性は認めつつも、過酷事故を緩和する方法の明確な実証が必要 (In order to ensure the successive levels of DiD, and despite the efforts of SMR designers on DiD levels 1 and 2 reinforcement, it is important to get a clear demonstration of the effectiveness of the design safety features to mitigate PIE (level 3) and of the features to mitigate severe accidents (level 4) for all operating modes.) (IAEA 2018 [2] P.95)</p>

SMR 安全性【受動的安全性】

期待	求められる対応
<p>受動的安全性の高い信頼性は安全評価を簡略化し故障モードを減少させる可能性。自然循環による崩壊熱除去の強化を可能に。(The higher reliance on passive safety mechanisms reduces the need for active systems, potentially simplifying safety evaluations and reducing failure modes. In addition, the higher surface-to-volume ratio of small reactor cores is conducive to enhanced decay heat removal modes, such as via natural circulation that results in longer coping times.) (OECD/NEA 2021 [1] P.29)</p>	<p>軽水炉型以外のSMRは新しい設計が多く、経験ベースがより限定的。効率的な受動的安全機能、深刻な故障モードの低減、およびオフサイトの緊急時計画ゾーン (EPZ) の縮小に基づくセーフティ・ケースの実証および承認に困難が伴う。新たな燃料や冷却材の採用は、従来にない新たな規制パラダイムを要求。原子力安全規制組織内に新たな専門知識の開発や、より柔軟な規制アプローチが必要になる可能性。(However, the main difficulty with novel designs is the more limited experience base, making it challenging to demonstrate and approve their safety case based on more efficient passive safety features, fewer and less severe failure modes and reduced off-site emergency planning zones (EPZs). In addition, changes to the fuel and/or coolant will translate into greater deviations from previous regulatory paradigms and may require more flexible licensing approaches, as well as the development of a considerable amount of new expertise within nuclear safety regulatory organisations.) (OECD/NEA 2021 [1] P.10)</p>

SMR 安全性【外部事象】

期待	求められる対応
<p>地下設置を可能にし、自然災害や人為的災害からの防護を強化 (SMR features also make below-grade siting possible , which provides more protection from natural (e.g. seismic or high-wind events depending on the location) or human-made (e.g. aircraft impact) hazards.) (OECD/NEA 2021 [1] P.29)</p>	<p>立地条件がSMRの安全設計に大きく影響する。また、地下、水中、または水上浮体など、SMR の設置場所により、さまざまな DiD (防護)レベルに重要な影響を与える可能性。(Siting aspects may have important influence on SMR safety design and different DiD levels due to applicable range of suitable site for SMR installations, including underground, underwater or floating on water.) (IAEA 2018 [2] P.19)</p>

DiD: Defence in Depth

SMR 規制

期待	求められる対応
<p>提案されている軽水炉ベースSMR は、基本的に現行の大型の単一ユニットLWR同様の運転条件と燃料仕様等であるため、許認可プロセスが容易になることが期待。(For example, current licensing frameworks typically rely on the extensive experience base of large single-unit LWRs that use uranium oxide fuel with enrichment below 5%. The LWR-based SMRs being proposed have similar operating conditions and fuel arrangements, which are expected to facilitate their licensing process.) (OECD/NEA 2021 [1] P.10)</p>	<p>軽水炉型以外のSMRは新しい設計が多く、経験ベースがより限定的。効率的な受動的安全機能、深刻な故障モードの低減、およびオフサイトの緊急時計画ゾーン (EPZ) の縮小に基づくセーフティ・ケースの実証および承認に困難が伴う。新たな燃料や冷却材の採用は、従来にない新たな規制パラダイムを要求。原子力安全規制組織内に新たな専門知識の開発や、より柔軟な規制アプローチが必要になる可能性。(However, the main difficulty with novel designs is the more limited experience base, making it challenging to demonstrate and approve their safety case based on more efficient passive safety features, fewer and less severe failure modes and reduced off-site emergency planning zones (EPZs). In addition, changes to the fuel and/or coolant will translate into greater deviations from previous regulatory paradigms and may require more flexible licensing approaches, as well as the development of a considerable amount of new expertise within nuclear safety regulatory organisations.) (OECD/NEA 2021 [1] P.10)</p>

SMR 経済性【経済リスク】

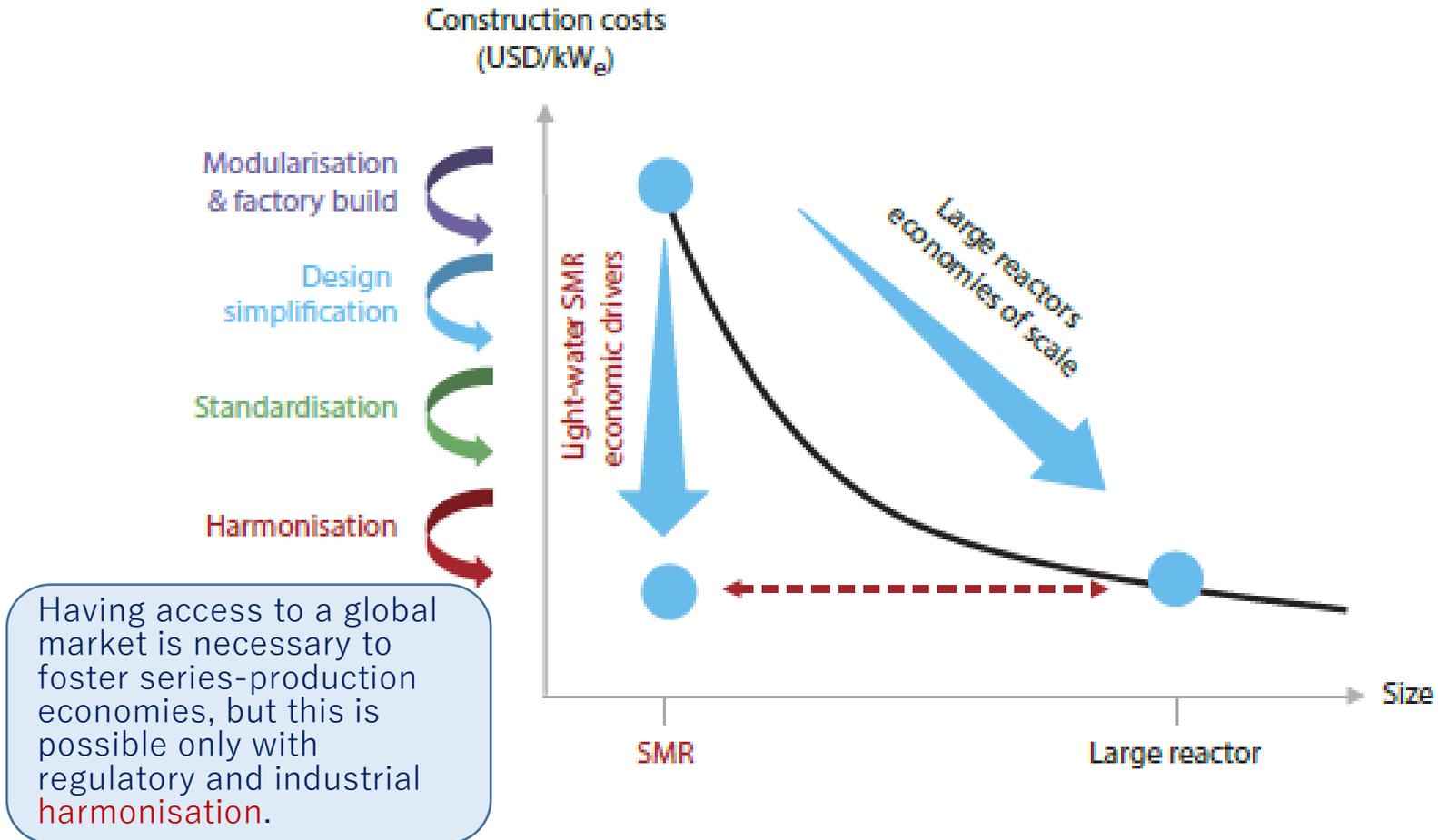
期待	求められる対応
<p>工期短縮は先行投資の必要額を低減下し、財務リスクの低減につながり参入意欲拡大の可能性 (At the same time, the smaller size and the prediction of shorter delivery times could reduce upfront investment needs for SMRs compared to larger reactors. The result is a lower financial risk for potential customers and investors, which could make SMRs a more affordable option.) (OECD/NEA 2021 [1] P.9)</p>	<p>スケールメリットの点で大型炉に比べ不利。投資意欲への影響。克服のためには、連続した建設が必要 (The smaller size of SMRs would imply that they will not benefit from economies of scale. In order to overcome this economic challenge, “series construction” will become an imperative.) (OECD/NEA 2021 [1] P.9)</p>

SMR 経済性【コストと市場】

期待	求められる対応
<p>SMRの経済的合理性の評価では、市場の問題が中心。SMR が民間航空機と同様の大量生産方式で製造された場合、経済的利益は非常に大きくなる可能性。(When assessing the economic rationale of SMRs, market issues become central. On the one hand, if SMRs are manufactured in a mass production fashion similar to commercial aircrafts, the economic benefits could be significant.) (OECD/NEA 2021 [1] P.10)</p> <p>SMRが提供できる電力システムの負荷追従、アンシラリーサービス提供、非電力利用は経済性向上に寄与し得る。The flexibility capabilities of SMRs (both enhanced load-following and non-electric applications), as well as their ability to provide ancillary services to the grid (frequency, inertia, reactive capacity, etc.) could also present some benefits from the perspective of system cost optimisation. (OECD/NEA 2021 [1] P.25)</p>	<p>単一設計あるいは共通設計の多い炉型に対するグローバルな市場が必要。(This would require, however, that the market for a single design be relatively large, which thus highlights the need for a global market and also suggests that only a small subset of the many designs under development may ultimately be able to establish such a global market.) (OECD/NEA 2021 [1] P.10)</p>

SMRの経済性

Figure 8.6: SMR economic drivers that help compensate diseconomies of scale



出典：IEA/OECD.NEA, "Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition," 2020. P.155~156に基づき作成

SMR 技術的成立性【サプライチェーン】

期待	求められる対応
<p>研究機関や大学と協定(研究開発分野の連携)により、SMR サプライチェーンは、熟練した労働力と研究開発インフラストラクチャの利活用を確保し有望な新技術の開発を促進。(Collaboration in the field of R&D will also be essential. By establishing agreements with research organisations and universities, the SMR supply chain will ensure the availability of a skilled workforce and R&D infrastructure. This collaboration will also help accelerate the deployment of promising new technologies, such as advanced and additive manufacturing and other digital applications.) (OECD/NEA 2021 [1] P.45)</p>	<p>SMRプロジェクトの展開のためには、主要コンポーネントの戦略的パートナーシップが不可欠。(Strategic partnerships for key components will thus be essential in order to share the risks associated with the first SMR projects and accelerate their deployment.)</p> <p>SMRの市場定着には、市場動向の展望と適度な競争を促進する環境に左右される。サプライチェーン管理戦略には、高度な統合による効率向上も求められる可能性。(After the delivery of several modules, the SMR supply chain may evolve towards more consolidation (i.e. fewer suppliers) in order to take advantage of the economies of scale, similar to the aircraft sector. These projections will, however, be conditional on the evolution of the market perspectives and harmonisation trends driving competition. Future supply chain management strategies may also seek efficiency gains through higher integration.) (OECD/NEA 2021 [1] P.45)</p>

SMR 立地性

期待

大型原子炉と同様に地域社会にとって魅力的なものとなる、地方および地域の雇用創出を期待。

(Building opportunities for local and regional job creation such that SMRs are as attractive to local communities as large reactors will also be crucial.) (OECD/NEA 2021 [1] P.46)

炉心の放射性核種インベントリが少なく高い受動的な安全特性により、遮蔽要求水準の緩和やEPZの縮小の可能性あり。(The benefits of smaller inventories combined with very high passive safety characteristics may lead to reduced shielding requirements and reduced offsite emergency planning zones (EPZ). With several SMR designs reaching maturity, opportunities to further reduce EPZs may arise.) (OECD/NEA 2021 [1] P.29)

高い安全性を背景として、エネルギー需要地域近傍への立地の可能性あり。

(Such benefits could mean that some SMRs may be located closer to where energy is needed.) (OECD/NEA 2021 [1] P.19)

求められる対応

固有の安全性が合理的に達成可能であるならば、設計者は、EPZの削減等が依然として安全目標を満たし、高いレベルで公衆の信頼を得ることにつながることを実証すべき。

(If the inherent safety of SMR concepts is to be considered reasonably achievable, designers should be able to demonstrate that reduced EPZs and/or a reduced number of on-site certified staff would still meet safety targets and would result in high levels of public confidence.) (OECD/NEA 2021 [1] P.30)

SMR 燃料サイクル【燃料】

期待	求められる対応
—	<p>一部のSMRは、U235の濃縮度が5～20%の低濃縮ウラン(HALEU)の使用を計画。この場合燃料サイクルの検討や新しい開発が必要。広く世界でHALEUが使用される場合、核燃料サプライチェーンと燃料サイクル全体への影響を評価する必要。また、新たな規制整備が必要。(SMRs may also require adjustments or new developments for the fuel cycle. For instance, some SMR vendors have proposed the use of high-assay low-enriched uranium (HALEU) in their designs. HALEU has enrichment levels between 5% and 19%. The impact of using HALEU in the global nuclear fuel supply chain and in the entire fuel cycle may need to be further assessed. Similarly, for countries pursuing a closed nuclear fuel cycle, the ability to use mixed oxide (MOX) fuel may also be an important attribute for some SMR designs.) (OECD/NEA 2021 [1] P.45)</p>

SMR 燃料サイクル【放射性廃棄物】

期待	求められる対応
—	<p>SMR は、地質中を移行し易く被曝線量評価の重要な寄与核種である¹²⁹I、⁹⁹Tc、および⁷⁹Seの生成を減少させない。(SMRs will not reduce the generation of geochemically mobile ¹²⁹I, ⁹⁹Tc, and ⁷⁹Se fission products, which are important dose contributors for most repository designs.)</p> <p>SMRの使用済燃料には、比較的高濃度の核分裂性核種が含まれるため、貯蔵および処分期間中の臨界を評価する必要がある。</p> <p>(In addition, SMR spent fuel will contain relatively high concentrations of fissile nuclides, which will demand novel approaches to evaluating criticality during storage and disposal.)</p> <p>SMRの廃棄物特性では、炉心の中性子漏れの影響を評価することが必要。放射性廃棄物の管理と処分という課題を深刻化する。</p> <p>(Since waste stream properties are influenced by neutron leakage, a basic physical process that is enhanced in small reactor cores, SMRs will exacerbate the challenges of nuclear waste management and disposal.)</p>

出典:Lindsay M. Kralla, , Allison M. Macfarlane, and Rodney C. Ewinga 「Nuclear waste from small modular reactors」

参 考

「期待と求められる対応」の検討にあたり参考にした資料

[1] OECD/NEA, “Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities” 2021.

[2] IAEA, “Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors” IAEA, 2018.

[3] Lindsay M. Kralla, Allison M. Macfarlane, and Rodney C. Ewing, “ Nuclear waste from small modular reactors” PNAS RESEARCH ARTICLE, 2022 Vol. 119 No. 23