

# カーボンニュートラルの実現に向けて ～小型モジュール炉 (SMR) 開発の動向～



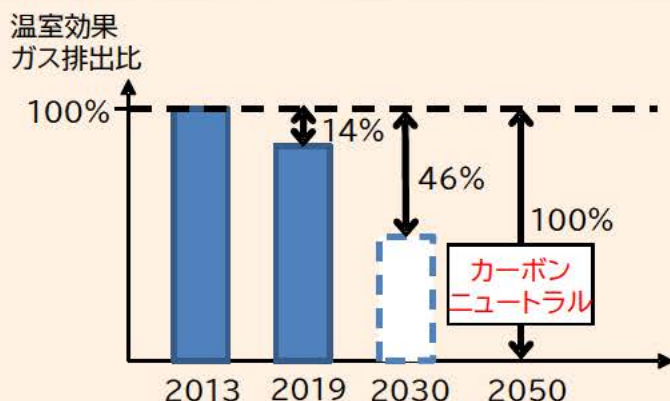
# 次世代の原子力に求められる性能

## カーボンニュートラル達成のため

- 2050年カーボンニュートラル達成と再生可能エネルギーの主力電源化が目標として示されました。
- カーボンニュートラル達成のためには、
  - 出力が変動する再生可能エネルギーを補う安定した電源が必要です。
  - 産業・運輸を支えるための水素等の新たなエネルギー源によるカーボンフリー化が求められます。
- 国の経済を支えるエネルギー源として、経済性は変わらず重要です。



原子力は安定・安価な脱炭素エネルギー源であり、カーボンニュートラル達成に貢献できます



我が国の温室効果ガス排出量(2019年確報値)と削減目標  
出典:環境省ホームページ

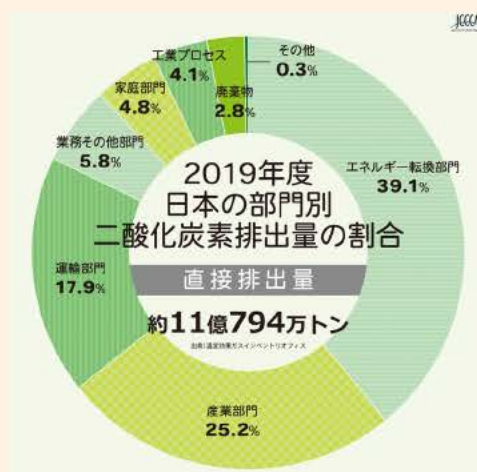
## 次世代原子力に求められる性能

これまでの軽水炉は経済性が高く、優れた脱炭素ベースロード電源ですが、それに加えて社会・環境の変化に対応した原子力エネルギーの変革も必要です。

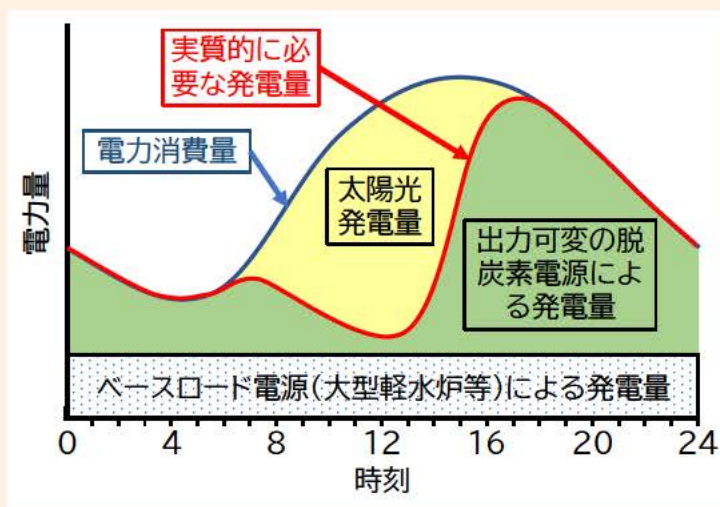
- より高い安全性を有する原子力
- 再生可能エネルギーの発電量の変動に対応できる、出力の可変性と経済性を有する原子力
- 電力に加え、産業への熱・水素等の供給を通じてカーボンニュートラルに貢献できる原子力
- プルトニウム管理や高レベル廃棄物の減容(マイナーアクチニド消費)が可能な原子力



小型モジュール炉(SMR)はそれらを満足する可能性を有する原子力エネルギーシステム



出典:温室効果ガスインベントリオフィス/全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト  
(<https://www.jccca.org/>)より



1日での実質的に必要な発電量の変動モード図  
(電力消費量及び太陽光発電量に応じて、原子力等の脱炭素電源により総発電量を調整する必要があります)

# 小型モジュール炉(SMR)の特長

## 小型モジュール炉(SMR)とは？

SMRは、従来の電気出力1,000MWを超える大型原子炉に比べ、原子炉1基ごとの電気出力が300MW以下と小さな原子炉です(\*1)。SMRの研究開発は1960年頃には始まり、(当初「SMR」は「Small and Medium (Sized) Reactor」の略でした。福島第一原発事故以降、「Small Modular Reactor」の略語として一般化しました。)、以降、これまで継続してきました。高い安全性、設計・製造・建設コスト低減及び立地の制約の大幅な緩和などが期待され、様々なタイプのSMRの開発が世界的に進められています。

SMRには次のような期待される特長と、課題があります。

### 【SMRの期待される特長】

#### ①安全性

「小型で低出力」であることを活かし、事故時に「自然に止まる」、「自然に冷える」といった固有・受動の安全性が高まることが期待されます。例えば、小型であるため、冷却材の自然循環や原子炉容器表面からの放射熱により炉心を冷却できる仕組みを取り入れることが可能です。また固有・受動の安全性を有していることに伴い安全系設備の簡素化・系統数削減が可能であり、ひいては故障や人為的ミスによるリスクの低減や建設・保守コストの削減も期待できます。

#### ②工場生産性

プレハブ住宅のように、あらかじめ工場ユニット(モジュール)を製造し、トラック等で運搬し、建設地にて据え付け・組み立てることで、品質の維持・向上、工期の短縮及び建設コストの削減が見込めます。

#### ③柔軟性

電力需要が小さい地域や送電網が未発達な地域(僻地、離島等)へ、その土地の電力需要に応じた原子炉を設置できることが期待できます。また、蓄熱設備等の熱利用設備との併設等による機動的な電気出力変化が可能であり、再生可能エネルギーの出力変動を調整する脱炭素電源や、水素製造、地域への熱供給源としても期待されます。

### 【課題】

SMRは開発途上であり、実際のSMRがこれら期待される特長を持つことについて実証されていません。今後、例えば以下のような観点についての実証が必要です。

- SMRのもつ固有・受動の安全機能が設計通り機能するか
- 受容可能な経済性であるか
- どの程度の機動性・柔軟性を有しているか

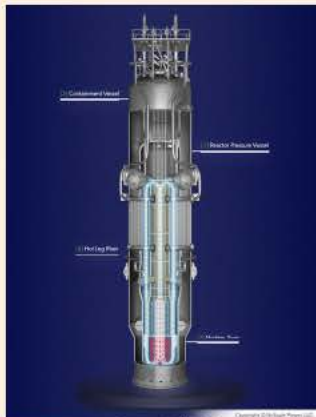


\*1: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>

# 様々な型式・技術で開発が進むSMR(1/2)

## 【軽水炉SMRの例:NuScale Power Module™(米国 NuScale Power社)】

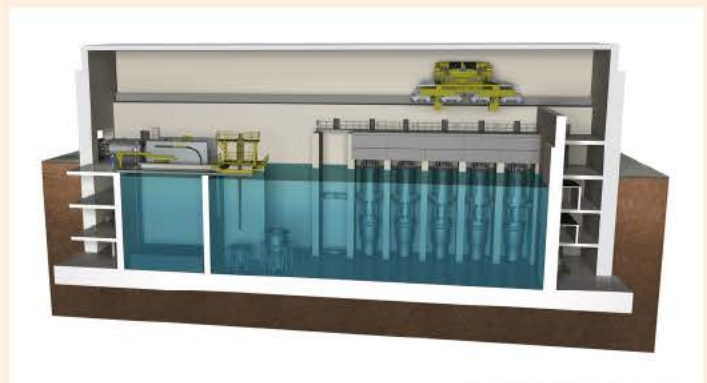
- ・炉心は自然循環により冷却
- ・格納容器を直径5m程度でモジュール化することで輸送が可能
- ・非常時の炉の停止と冷却に電源や追加的冷却水及び運転員の操作が不要
- ・格納容器ごと水プールに沈められ、水プールは事故時の受動的な除熱源として機能



Copyright © NuScale Power, LLC

### NuScale Power Module™

(電気出力 77MW;NuScale Power社提供図)



Copyright © NuScale Power, LLC

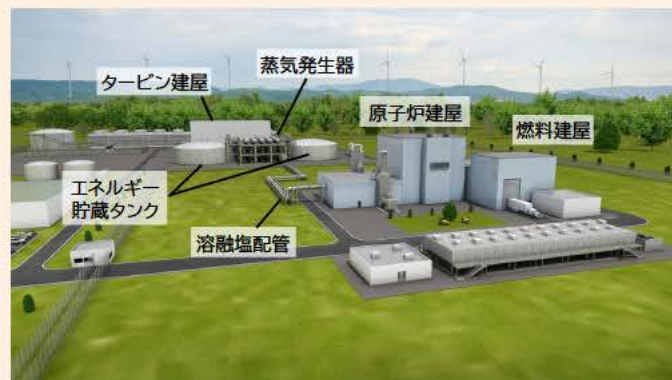
### NuScale SMRのプラント(VOYGR™)概念 (NuScale Power社提供図)

出典: <https://www.nuscalepower.com/technology/>

- その他軽水炉SMRの例:UK SMR(英国Rolls-Royce SMR社:電気出力 470MW)
- BWRX-300(米国GE Hitachi社:電気出力 300MW)
- KLT-40S(露国ROSATOM社:電気出力 35MW)
- ACP-100(玲龍一号:中国 中国核工業集团公司:電気出力 125MW)

## 【高速炉SMRの例:Natrium™(米国 TerraPower社)】

- ・小型ナトリウム冷却型高速炉に熔融塩を利用した蓄熱システムを接続
- ・電力需要が少ないときは原子炉で発生する熱を発電と蓄熱システムに振り分け、電力需要が多いときは原子炉からの熱に加えて貯めた熱を利用した発電量の増大が可能であり、電力需要に応じてフレキシブルな発電が可能



### Natrium™の原子炉とエネルギー貯蔵システムのプラント概念

(原子炉電気出力 345MW;TerraPower社提供図にJAEAが追記)

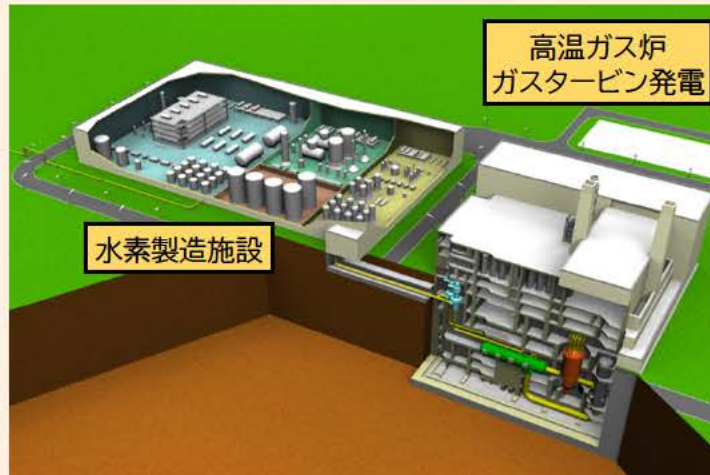
出典: <https://www.nationalacademies.org/event/05-26-2021/laying-the-foundation-for-new-and-advanced-nuclear-reactors-in-the-united-states-meeting-4>

- その他高速炉SMRの例:BREST-OD-300(露国ROSATOM社:電気出力 300MW)

## 様々な型式・技術で開発が進むSMR (2/2)

### 【高温ガス炉SMRの例:GTHTR300C(JAEA)】

- ・将来社会の多様な熱利用に対応可能(水素製造、ガスタービン発電、海水淡水化)
- ・再生可能エネルギーの変動を発電量調整又は水素製造により吸収
- ・高温で高効率及び高熱利用率、高い安全性を有し、需要地近接が可能



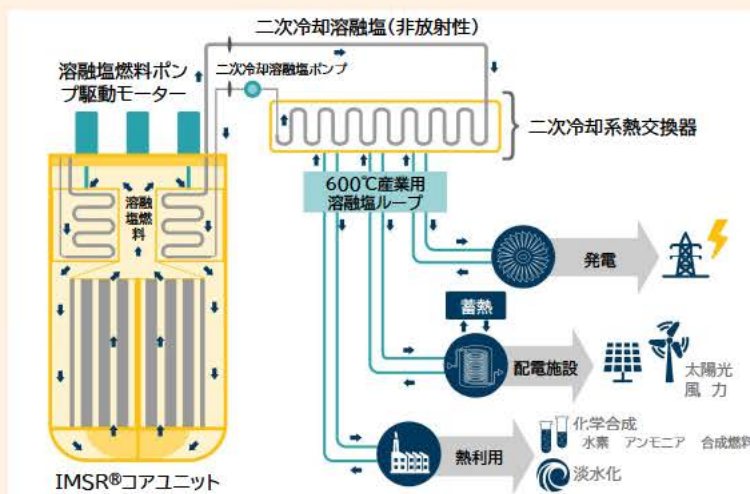
GTHTR300Cのプラント概念(電気出力 100-300MW)

○その他高温ガス炉SMRの例: Xe-100 (米国 X Energy社: 電気出力 80MW)

HTR-PM (中国 華能山東石島湾核電有限公司: 電気出力 210MW)

### 【溶融塩炉SMRの例:IMSR®(カナダ Terrestrial Energy社)】

- ・ウランのフッ化物を溶融塩に溶かした液体燃料を使用
- ・液体燃料は炉内を循環し、二次系に熱を受け渡し、電力と熱を供給
- ・溶融塩ループを使い、蓄熱技術により発電量の調整や多様な熱利用が可能



IMSR®のプラント概念(電気出力 195MW ; Terrestrial Energy社提供図にJAEAが追記)

出典: <https://www.terrestrialenergy.com/technology/molten-salt-reactor/>

○その他溶融塩炉SMRの例: Stable Salt Reactor-Wasteburner

(SSR-W: 英国 Moltex Energy社: 電気出力 300MW)

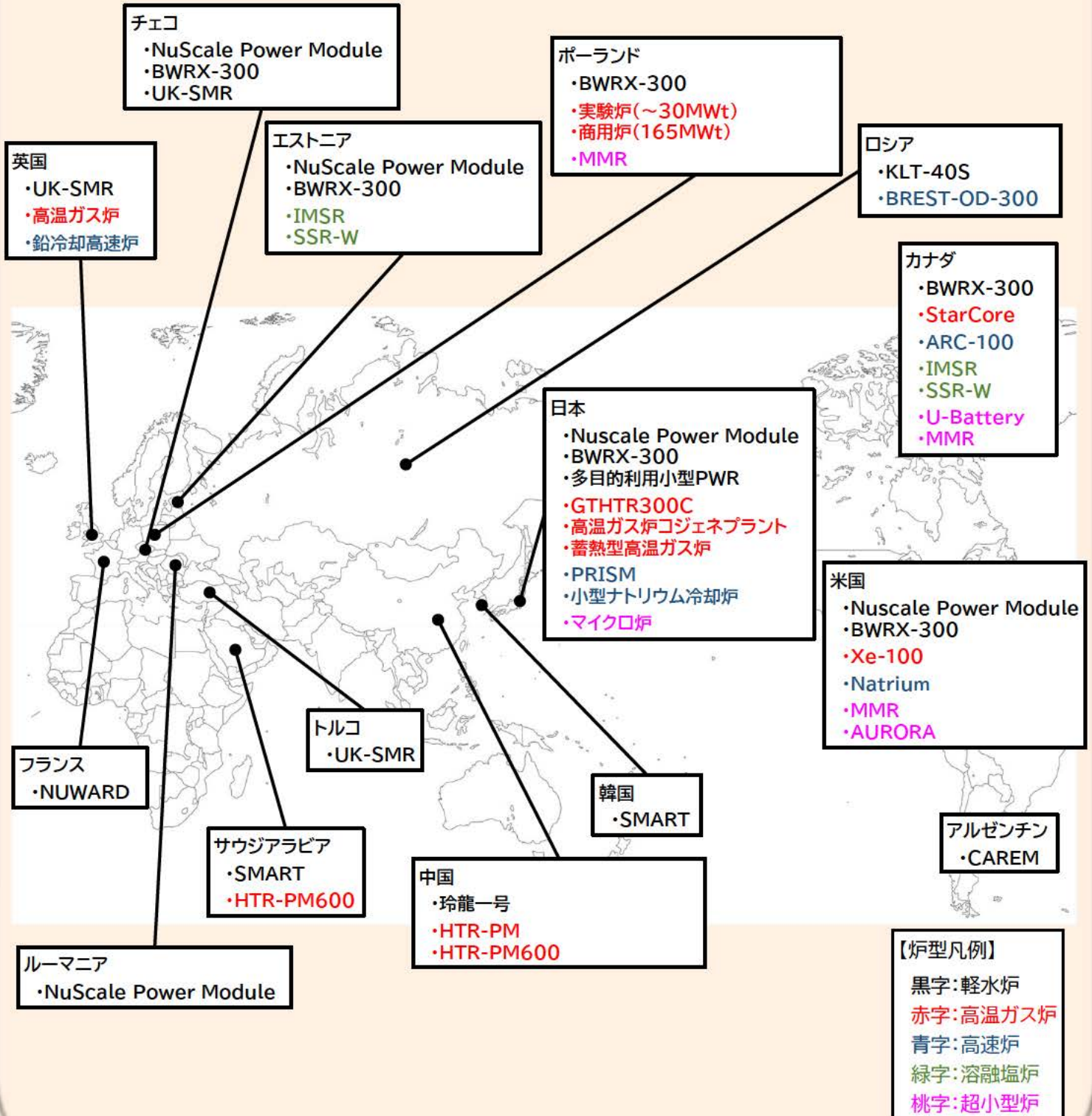
## 国レベルでのSMR開発支援

海外の複数の国において、国レベルでの支援の下、複数の小型モジュール炉 (SMR) の開発が実施されています。例えば米国及び英国では、国からの開発資金支援の下、民間企業による開発が活発に進められています。またカナダは「カナダSMR行動計画」を公表し、それに沿った複数のSMR導入プロジェクトが進められています。各国におけるSMR開発・導入に関する主な動向は下表のとおりです。

| 国名  | 計画名等   | 目標等   | 開発主体 (炉型)  |
|-----|--|---|--|
| 米国  | アイダホ国立研究所 (INL) サイトにおけるSMR建設・運転計画                                | 2029年INL敷地内で最初のプラントの運転開始  | NuScale社 (NuScale Power Module: 軽水炉)<br>【米国原子力規制委員会による標準設計承認 (SDA) 発行 (2020年9月)】   |
|     | エネルギー省 (DOE) による開発支援<br>- 新型炉実証プログラム (ARDP) -                    | 7年以内の新型炉実証 (初期投資額1億6,000万ドル)  | TerraPower社 (Natrium: 高速炉) 及び X-energy社 (Xe-100: 高温ガス炉)  |
|     |  | 将来の新型炉実証に向けたリスク削減; 10~12年先を目標 (初期投資額3,000万ドル)   | Kairos Power社 (フッ化物塩冷却高温炉)、Westinghouse Electric Company社 (eVinci: 超小型炉)、BWXT Advanced Technologies社 (BANR炉: 超小型炉)、Holtec Government Services社 (SMR-160: 軽水炉) 及び Southern Company Services社 (溶融塩化物冷却高速炉) |
|     | 新型炉概念; 2030年代半ばの商業化を目標 (初期投資額2,000万ドル)                           | Advanced Reactor Concept社 (本質的に安全なNa冷却炉)、General Atomics社 (高速モジュール炉) 及び MIT (モジュール統合型高温ガス炉) |  |
| カナダ | カナダ原子力研究所 (CNL) チョークリバー・サイトでのSMR実証炉建設・運転計画                       | 2026年までの実証プラントを建設   | Global First Power社他 (MMR: 高温ガス炉) 【フェーズ3 (土地の手配とその他の契約に関する交渉段階) 評価中】<br>Terrestrial Energy社 (IMSR: 溶融塩炉)、StarCore Nuclear社 (StarCore: 高温ガス炉) 及び U-Battery社 (U-Battery: 超小型炉) 【フェーズ1 (許認可申請前設計審査段階) 評価完了】 |
|     | Ontario Power Generation社原発敷地内へのSMR導入計画                          | 2028年完成   | GE Hitachi社 (BWRX-300: 軽水炉; 2021年12月に選定)   |
|     | NB Power社原発敷地内へのSMR導入計画  | 2030年代初頭までに稼働<br>実証炉を2030年までに完成   | Moltex Energy社 (SSR-W: 溶融塩炉)<br>ARC Clean Energy社 (ARC-100: 高速炉)   |
| 英国  | ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) による開発支援<br>- 先進モジュール炉 (AMR) 実行可能性・開発計画 - | フェーズ1 (AMR設計の実行可能性調査) に総額400万ポンド、フェーズ2 (AMR開発) に総額4,000万ポンドの資金を提供。                          | 【フェーズ1を実施した中から、フェーズ2に選定されたSMR】<br>U-Battery Developments社 (高温ガス炉) 及び Westinghouse EC UK社 (鉛冷却高速炉)  |
|     | 戦略的政策研究機関 (UKRI) による開発支援   | Rolls-Royce社に1,800万ポンドの投資資金。同社は、2030年代初頭までに、同社製SMR初号機の完成と運転開始を目指す。                          | Rolls-Royce SMR社 (UK-SMR: 軽水炉)<br>*2021年11月Rolls-Royce SMR社設立  |
|     | ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) によるマッチングファンド                             | Rolls-Royce SMR社に21,000万ポンドを提供  |  |
| 仏国  | FRANCE 2030  | SMRなど革新的な原子炉の開発に2030年までに10億ユーロを投資。2050年までに25GWの電力供給を目指す。                                    | EDF社 (NUWARD: 軽水炉; 5億ユーロ)  |
| ロシア | 浮揚式原子力発電所  |   | ROSATOM社 (KLT-40S: 軽水炉)<br>【営業運転中 (2020年5月~)】  |
|     | BREST-300建設計画  |   | ROSATOM社 (BREST-OD-300: 鉛冷却高速炉)<br>【建設開始 (2021年6月)】  |
| 中国  | 実証炉建設計画  | 2022年に全出力運転   | 華能山東石島湾核電有限公司 (HTR-PM: 高温ガス炉)<br>【2021年9月臨界達成】   |
|     | 商用炉建設計画  |   | 中国核工業建設集团公司、等 (HTR-PM600: 高温ガス炉)   |
|     | 実証炉建設計画  |   | 中国核工業集团公司 (玲龍一号: 軽水炉)<br>【建設開始 (2021年7月)】  |

# 世界の国々におけるSMRへの注目度

下図に示すように、多くの国々で複数の小型モジュール炉 (SMR) の開発・導入が検討・実施されています。開発主要国である米国、カナダ、英国、ロシア及び中国のほか、東欧・中東の国々が開発企業等との協力によりSMRを導入しようとしている状況が伺えます。



# SMR導入・建設に向けた安全規制の取組み

SMRの導入・建設にあたっては、それに対する規制の在り方も重要なテーマであり、世界的な検討が始まっています。

## 【各国の取組み】

米国原子力規制委員会 (NRC) は、リスク評価によって得られる重要度を物差しとした安全基準の構築を進めています(\*1)。

カナダ原子力安全委員会 (CNSC) は、2012年5月に、ベンダーに対する原子炉設計の事前審査 (Pre-Licensing Vendor Design Review) の提供を開始しています(\*2)。

英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) は、先進モジュール炉 (Advanced Modular Reactor: AMR) の導入を見据え、設計の許認可審査のための審査体制構築に700万ポンド、AMR開発支援のために500万ポンドの資金を英国規制当局に提供しています。

## 【国際協力】

安全規制に係る国際協力も行われており、例えば米国原子力規制委員会 (NRC) はカナダ原子力安全委員会 (CNSC) とSMR等の技術審査を共同実施し、双方の専門的知見を共有する等、原子力安全規制の実効性を高めることを目的とする協力が行われています。

国際原子力機関 (IAEA) においても安全規制の在り方や規制基準について議論が進められています。例えば、SMRの規制機関の協力の場としてSMR規制者フォーラムが2015年に設置されています(\*3)。2017年までのフェーズ1では、緊急時計画区域 (EPZ)、グレーディッドアプローチ (リスクに応じた最適な安全対策を講じていくという考え方)、多重防護等が議論されています。2020年までのフェーズ2では、ライセンス課題、設計・安全解析、製造・試運転・運転の3つのWGが設置され、議論が進められました。2021年以降のフェーズ3では、フェーズ2での3つのWGにて引き続き議論が進められ、特に設計の共同評価、他の機関が行った評価の相互承認といった課題への取組みがなされる予定です。



IAEA SMR規制者フォーラム  
フェーズ2報告書(\*3)

\*1: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/details.html#part53>

\*2: <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/index.cfm>

\*3: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors/smr-regulators-forum>



# 我が国のSMR開発の取組み

我が国では、文部科学省と経済産業省が行う原子力イノベーション促進(NEXIP)イニシアチブ事業(\*)により、小型高速炉、小型軽水炉や高温ガス炉といった革新的な原子力技術を開発する民間企業等の支援が行われています。

\*:原子力分野におけるイノベーション創出を効率的・効果的に進めるため、開発に関与する主体が有機的に連携し、基礎研究から実用化に至るまで連続的にイノベーションを促進するための一連の取組み

NEXIPの支援の下で開発が進められている主なSMRは次の通りです(\*1~5)。

## 【水冷却炉】

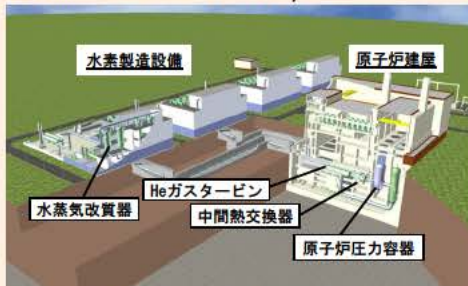
- ・NuScale(日揮グローバル社、IHI社)
- ・BWRX-300(日立GE社)
- ・多目的利用小型PWR(~300MW:三菱重工業社)



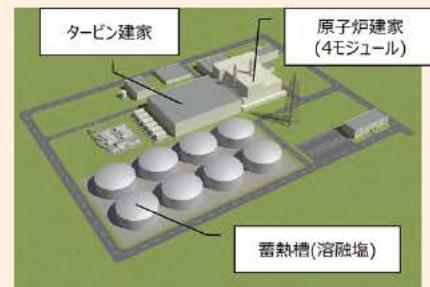
多目的利用小型PWR  
(三菱重工業社提供図)

## 【高温ガス炉】

- ・高温ガス炉コジェネプラント(水素製造/発電:三菱重工業社)
- ・蓄熱型高温ガス炉(IGW/4ユニット:東芝ESS社・富士電機社)



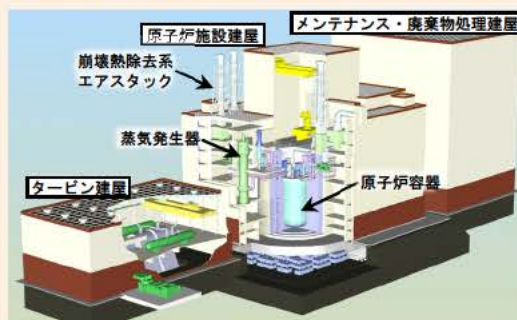
高温ガス炉コジェネプラント  
(三菱重工業社提供図)



蓄熱型高温ガス炉  
(東芝ESS社提供図)

## 【高速炉】

- ・PRISM(日立GE社)
- ・小型ナトリウム冷却炉(電気出力 200MW:三菱重工業社、MFBR社)



小型ナトリウム冷却炉(三菱重工業社提供図)

\*1: [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/genshiryoku/pdf/023\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/023_05_00.pdf)  
\*2: <https://www.jaif.or.jp/65th-iaea-gc-report>  
\*3: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574230.pdf>  
\*4: <https://www.mhi.com/jp/news/201203.html>  
\*5: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574220.pdf>

# 原子力機構におけるSMR研究開発

## ～高温ガス炉の研究開発～

SMRである高温ガス炉は構造的に安全性が高く、また900℃以上の高温の熱を取り出すことが可能で、発電以外に、水素製造、地域暖房、海水淡水化等に利用することができます。また、高温ガス炉からの高温の熱を利用して水を熱分解する熱化学法の研究を進めています。

### ✓ 安全性

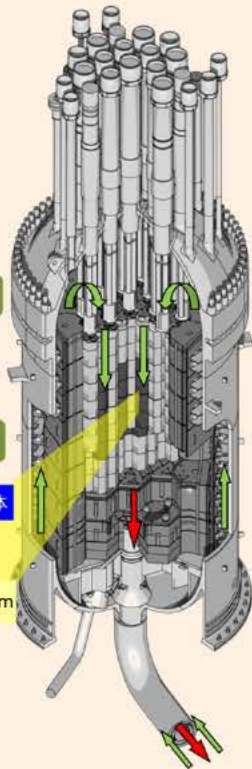
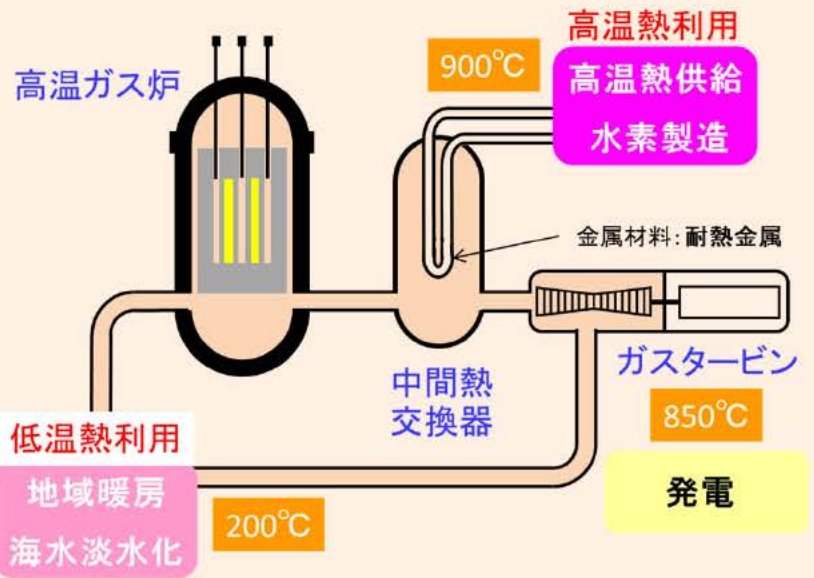
- 冷却材に不活性なヘリウムを使用
- 燃料被覆に耐熱性に優れたセラミックスを使用
- 黒鉛減速材により事故時の温度変化が緩慢

### ✓ 経済性

- ヘリウムガスタービン発電とともに熱を用いた水素製造等が可能

### ✓ 柔軟性

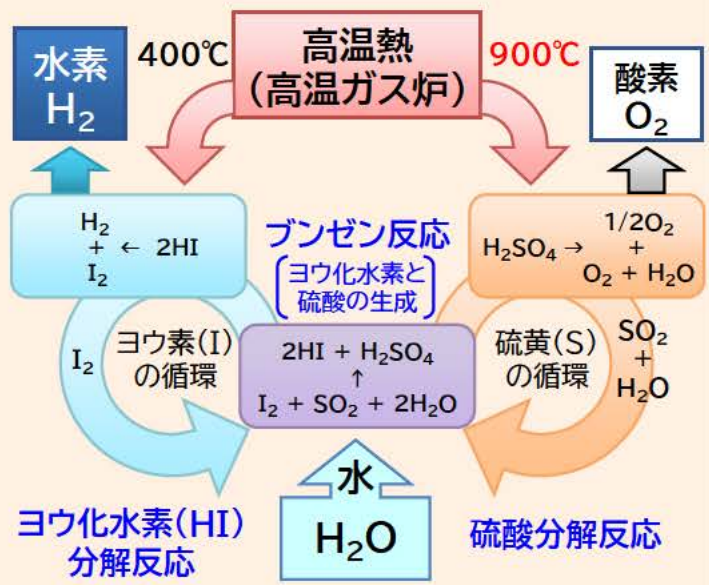
- カーボンニュートラル、脱炭素社会に向けて発電、水素製造の両面から柔軟な対応が可能



高温工学試験研究炉 (HTTR)  
 - 我が国初の高温ガス炉  
 - 熱出力30MW  
 - 冷却材出口温度950℃(世界記録)



連続水素製造試験装置



高温ガス炉の熱を用いた水の熱分解による水素製造(熱化学法ISプロセス)

# 革新炉開発を支える基盤技術(インフラ含む)

原子力機構が有する基盤技術を用いて、SMR等革新炉の開発に必要な技術開発を進めています。



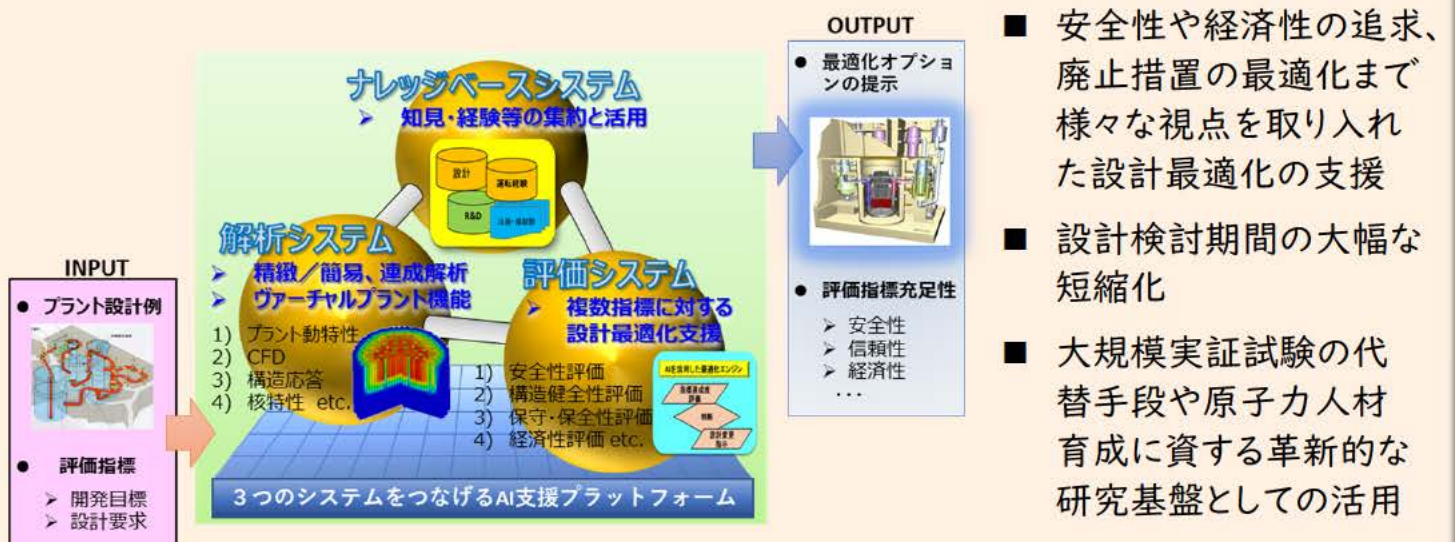
高速実験炉「常陽」

- 世界トップレベルの高速中性子束と高精度な照射量・温度評価技術
- 多様な照射ニーズに応える原子炉の運転と、照射試験装置
- 照射後試験施設が隣接  
照射途中の非破壊検査等により貴重なデータを取得可能



冷却系機器開発試験施設(AtheNa)

- 大型のナトリウム機器システムの試験が可能な施設
- 多様な技術開発にも対応できるフレキシビリティ



- 安全性や経済性の追求、廃止措置の最適化まで様々な視点を取り入れた設計最適化の支援
- 設計検討期間の大幅な短縮化
- 大規模実証試験の代替手段や原子力人材育成に資する革新的な研究基盤としての活用

AI支援型革新炉ライフサイクル最適化手法(これまでの知識と解析技術を統合・高度化したプラント設計支援ツール)

(ARKADIA: Advanced Reactor Knowledge- and AI-aided Design Integration Approach through the whole plant lifecycle)

表紙の写真は高温ガス炉を中核とする水素タウンのイメージジオラマです。高温ガス炉から発生する熱を利用して製造されたカーボンフリー水素は、パイプラインで街の各所に供給されます。



国立研究開発法人  
日本原子力研究開発機構  
高速炉・新型炉研究開発部門

(第2版:2022.Mar.)