

(参考資料) 原子力 (次世代革新炉)

次世代革新炉の種類と特徴

革新軽水炉



◆ SRZ-1200 (三菱重工業)

- 既設の軽水炉 (PWR・BWR) をベースに安全性を向上した軽水炉

<技術的特徴>

- 技術熟度が高く、規制プロセスを含め高い予見性あり
- 受動安全や外部事象対策 (半地下化) により更なる安全性向上
- シビアアクシデント対策 (コアキャッチャー、ガス捕集等) による所外影響の低減

<課題>

- ・ 初期投資の負担
- ・ 建設長期化の場合のファイナンスリスク

高速炉



◆ 実験炉：常陽 (JAEA)

- 高速中性子により、核分裂連鎖反応が維持される原子炉

<技術的特徴>

- 廃棄物の減容・有害度低減
- 資源の有効利用

<課題>

- ・ ナトリウムの安定制御等の技術的課題
- ・ 免震技術・燃料製造技術等の技術的課題

高温ガス炉



◆ 試験炉：HTTR (JAEA)

- 950℃の高温熱を取り出せる原子炉

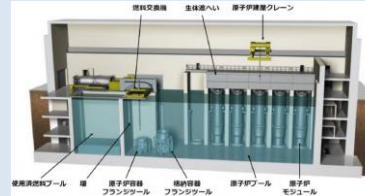
<技術的特徴>

- 高温でも安定したヘリウム冷却材 (水素爆発なし)
- 高温耐性で炉心溶融なし
- 高温の熱を利用した熱のカスケード利用が可能 (水素製造、発電など)

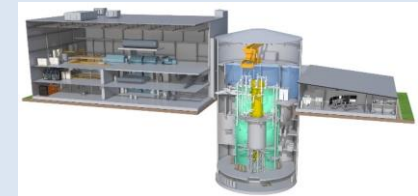
<課題>

- ・ エネルギー密度・経済性の向上
- ・ 安定した被覆燃料の再処理等の技術的課題

SMR (小型炉)



◆ VOYGR (NuScale社)



◆ BWRX-300 (日立GE)

- 電気出力が30万kW以下の原子炉

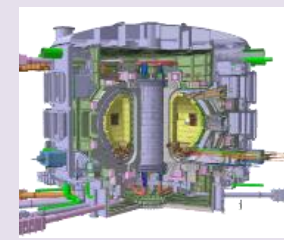
<技術的特徴>

- 炉心が小さく自然循環冷却、事故も小規模に
- 工期短縮・初期投資の抑制

<課題>

- ・ 小規模なため効率低い (規模の経済性小)
- ・ 国内外の自然条件の違い

核融合



◆ 実験炉：ITER

- 重水素と三重水素等の核融合を利用した原子炉

<技術的特徴>

- 連鎖反応が起こらず、万一の場合は反応がストップ
- 廃棄物が非常に少ない

<課題>

- ・ プラズマの維持の困難性、主要機器の開発・設計 (実用化には相応の時間)
- ・ エネルギー密度・経済性の向上

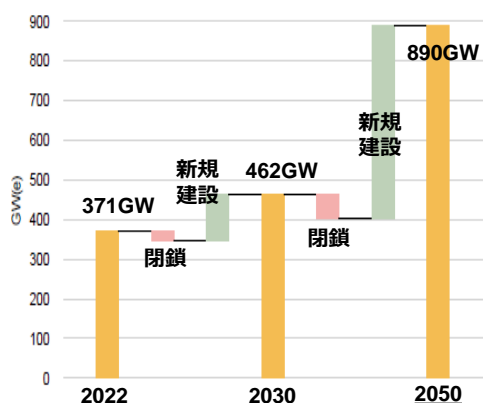
世界の原子力市場の拡大見通し

- NEI（米国原子力エネルギー協会）の分析によると、原子力の市場規模は、**2050年には最大で年間約40兆円まで拡大**。そのうち、**アジアの旺盛な需要拡大**に込める伸び（石炭からのリプレース等）が大宗を占める。
- 非従来型炉は、2050年の市場において、最大で25%を占める可能性があるとの予測。

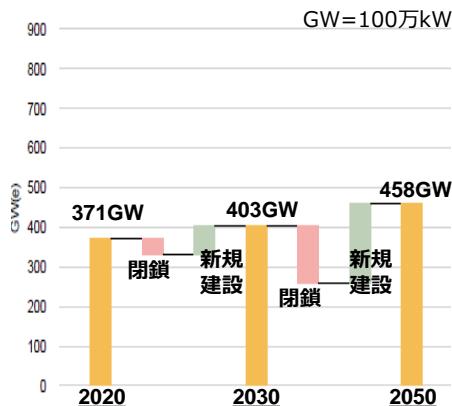
世界の原子力設備容量予測

～IAEA：国際原子力機関～

【高予測】各国で温暖化対策を拡充

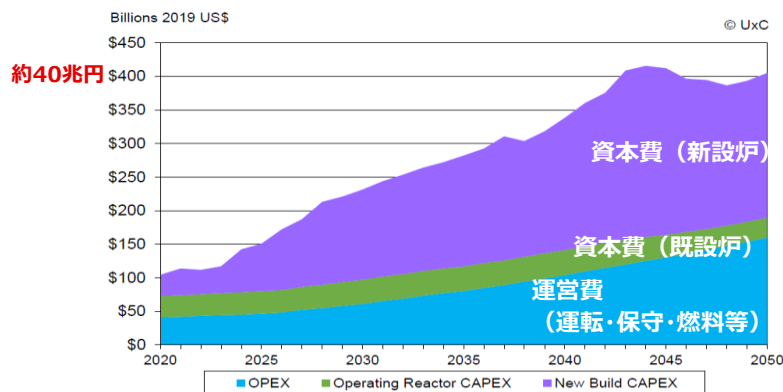


【低予測】各国で現状維持

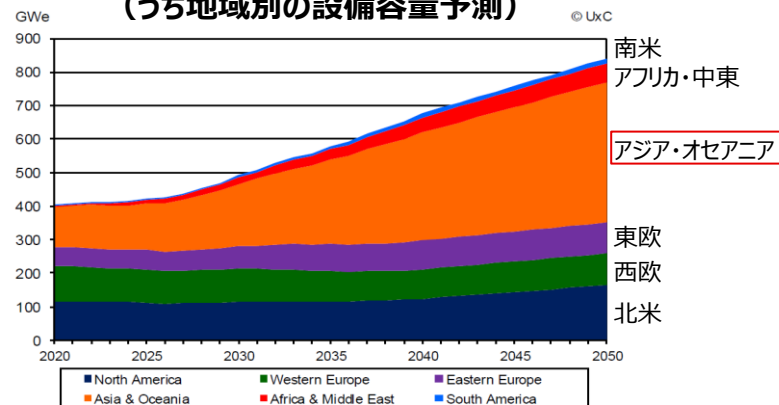


世界の原子力市場予測（IAEA「高予測」に相当）

～NEI：米国原子力エネルギー協会～



（うち地域別の設備容量予測）



非従来型炉の市場規模予測

～NEI：米国原子力エネルギー協会～

「SMR、マイクロ炉、革新炉（高温ガス炉、熔融塩炉等）が、より市場に浸透していけば、これら**非従来型の炉は、2050年の市場において、最大で25%を占める可能性**がある」

COP28における「原子力3倍宣言」

- 2023年12月2日、COP28（ドバイ）において、日本を含む22カ国が「2050年までに、2020年比で世界全体の原子力発電容量を3倍にする」旨の共同宣言を発表した。
※12月3日にアルメニアも参加し、賛同国は23か国となった。
- 我が国は、第三国への革新炉の導入支援や同志国と連携したサプライチェーンの強靱化などの取組を通じて、世界全体での原子力発電容量の増加に貢献する観点から賛同。



＜共同宣言に賛同した23カ国＞

UAE、米国、フランス、日本、英国、カナダ、韓国、フィンランド、スウェーデン、ベルギー、ルーマニア、ポーランド、ブルガリア、チェコ、ウクライナ、スロベニア、スロバキア、ガーナ、カザフスタン、モロッコ、モルドバ、オランダ、アルメニア

（参考）原子力3倍宣言（抄訳）

今世紀半ば頃までに世界全体で温室効果ガス排出のネット・ゼロ／カーボン・ニュートラルを達成し、気温上昇を1.5℃に抑えることを射程に入れ、持続可能な開発目標（SDGs）第7を達成するにあたっての、原子力の重要な役割を認識し、…

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の分析によれば、平均1.5℃シナリオでは、2020年から2050年にかけて、世界の原子力発電設備容量が約3倍に増加することを認識し、…

各参加国の異なる国内事情を認識しつつ、2050年までに2020年比で世界全体の原子力発電容量を3倍にするという野心的目標に向けた協働にコミットする。（以下略）

【参考】世界の原発利用国の状況

2023年12月時点

28カ国

・米国	[93/1]	・スウェーデン	[6/0]	・メキシコ	[2/0]
・フランス	[56/1]	・チェコ	[6/0]	・ルーマニア	[2/0]
・中国	[55/22]	・パキスタン	[6/0]	・オランダ	[1/0]
・ロシア	[37/3]	・スロバキア	[5/1]	・アルメニア	[1/0]
・韓国	[25/3]	・フィンランド	[5/0]	・イラン	[1/1]
・インド	[19/8]	・ハンガリー	[4/0]	・UAE	[3/1]
・カナダ	[19/0]	・アルゼンチン	[3/1]	・ベラルーシ	[2/0]
・ウクライナ	[15/2]	・南アフリカ	[2/0]	・スロベニア	[1/0]
・英国	[9/2]	・ブラジル	[2/1]	・日本	
		・ブルガリア	[2/0]		

凡例：[運転中の基数 / 建設中の基数]
 「運転中の基数」= IAEAにより "In Operation"と紹介されている基数
 「建設中の基数」= IAEAにより "Under Construction"と紹介されている基数

将来的に利用

16カ国

・インドネシア		・トルコ	[4]
・ウズベキスタン		・ナイジェリア	
・エジプト	[3]	・バングラディッシュ	[2]
・カザフスタン		・フィリピン	
・ガーナ		・ポーランド	
・サウジアラビア		・イタリア	
・シリア		・モロッコ	
・リトアニア		・ヨルダン	

凡例：[建設中の基数]
 「建設中の基数」= IAEAにより
 "Under Construction"と紹介されている基数

現在、原発を利用

4カ国・地域

・スペイン	[7]	(2020年政府発表 / 2035年閉鎖)
・ベルギー	[5]	(2003年法制化 / 2036年閉鎖)
・スイス	[4]	(2017年法制化 / -)
・台湾	[2]	(2019年政府発表 / -) (脱原発決定年 / 脱原発予定年)

凡例：[運転中の基数]
 「運転中の基数」= IAEAにより "In Operation"と紹介されている基数

現在、原発を利用せず

4カ国

・ドイツ	(2002年法制化 / 2023年閉鎖)
・オーストリア	(1978年法制化)
・オーストラリア	(1998年法制化)
・マレーシア	(2018年首相発言)

出所：IAEA Power Reactor Information System
 ホームページ等
 (注) 主な国・地域を記載

将来的に非利用

先進国での支援例

- 米・英は、相次いで原子力への大規模な支援策を発表。① 安全性を高めた大型軽水炉の支援等、② 革新炉の研究開発支援の二本立てであり、後者は具体的な実証・実装プロジェクトに紐付けられている。仏・韓も具体的な原子力支援を表明。国営企業が、新規建設で産業基盤を維持しつつ、将来に向けた革新炉開発も推進。



◆既設支援

- 経済的困難な状況にある既設炉への財政支援 (2022年4月):
\$60億(約6,000億円)
- 既設炉の販売電力量に応じ税控除

大型軽水炉
支援

◆研究開発

- 革新炉実証プログラム (ARDP) (2020年5月):
\$32億(約3,200億円) / 6年
実証炉2基に対する資金支援
 - TerraPower社(高速炉): 約2000億円
 - X-energy社(高温ガス炉): 約1200億円
- SMRの技術開発支援・財政支援
 - NuScale社:
R&D \$5.3億(約530億円)
運営主体支援 \$13.55億(約1355億円)/10年間

非従来型炉
研究開発
支援



◆新設支援

- 国内新規建設を支援する資金調達モデル(RABモデル)関連法が成立 (2022年3月)
- 大型原子力発電所の新規建設推進:
 - サイズウェルC建設への直接投資 £6.79億(約1,018億円)等

◆研究開発

- 「革新原子力ファンド」設立 (2020年12月):
£3.85億(約577億円)
 - SMR開発: £2.15億(約322億円)
 - AMR実証炉開発(高温ガス炉) £1.70億(約255億円)
- 「未来の原子力実現基金」設立 (2022年5月):
£1.2億(約180億円)



◆新設支援

- 2020年9月「France Relance」にて原子力産業の支援策を発表。
 - 人材支援 €約1.1億(約143億円)
 - 中小企業支援(ファンド創設) 総額€2億(約260億円)
- マクロン大統領は、2022年2月に「6基のEPR2の新設に着手し、更に8基の新設に向けた検討を開始」と宣言。

◆研究開発

- SMRを含むプロジェクトに €10億(約1,300億円) (2021年10月)
- マクロン大統領は、「2030年までに、革新的な小型原子炉をフランスに導入する」と発言。



◆海外新設支援

- 輸出推進のため「原子力輸出諮問委員会」を2021年に設置。
- 中小企業の資機材輸出のためのポータルサイトを立ち上げ。
- 国内建設 (3基建設中)
 - 政府および政府系金融機関が電力公社に50パーセント超の株式を保有し、下支え。

◆研究開発

- SMRを含むプロジェクトに 2兆7000億W (約2700億円) / (2022年から5年間)
- ※詳細な内訳は不明。

幅広い産業における原子力利用の拡大

- 近年、データセンター等の電力需要増を見込んだ海外IT企業による原子力活用や、炭素集約度の高い産業における積極的な原子力活用に向けた動きが報じられている。

IT産業における原子力活用の動き

米 : Microsoft社

- 2023年6月、米コンステレーション・エナジー社（原子力発電事業者）と、データセンター向けに原子力由来の電力を供給する契約を締結。

米 : OpenAI社

- 2023年7月、ChatGPTを開発したOpenAI社のアルトマンCEOは、米オクロ社（2015年から同氏が会長を務める革新炉開発ベンチャー）がニューヨーク証券取引所への上場を行う方針を発表。

- 上場で得られた資金は、液体金属を用いたマイクロ高速炉「Aurora」の開発に充てられ、データセンターや産業施設等を将来顧客として見込んでいる。また、同社は、NETFLIX社、Apple社、Google社等との提携を発表している。



オクロ社が開発するマイクロ高速炉「Aurora」

スウェーデン : Bahnhof（バーンホフ）社

- Bahnhof社は、ストックホルムにあるデータセンターにSMRを設置する考えを表明。
- スウェーデンメディアのSVT Nyheterは、スウェーデンのデータセンターは現在、年間3TWhの電力を消費しているが、2、3年内にはこの需要が倍増すると推計している。

製造業における原子力活用の動き

加 : Cenovus Energy社（石油・天然ガス総合企業）

- 多量の温室効果ガスを排出するオイルサンド回収事業へのSMRの適用可能性について複数年にわたる調査を実施。アルバータ州政府は2023年9月、同事業に対し700万加ドル（約7億7,000万円）を助成すると発表した。



セノバス社の幹部およびアルバータ州政府の関係閣僚ら ©Government of Alberta

米 : Nucor社（鉄鋼メーカー）

- 2023年5月、米NuScale社製のSMR「VOYGER」をベースロード電源として、製鋼所にクリーンな電力を供給する計画を進めるため、同社との協力深化に向けた覚書を締結。

米 : Dow社（化学メーカー）

- 熱電供給可能な米X-energy社製SMR「Xe-100」4基を備えた発電所の建築を目指すDow社は、2023年5月、テキサス州シードリフト市を建設予定地に選定。



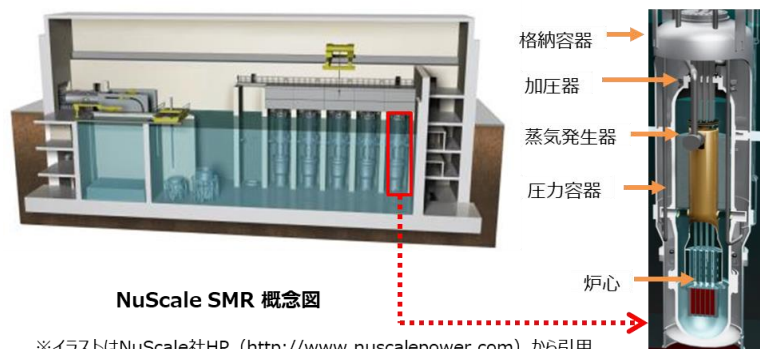
「Xe-100」発電所の完成予想図

【参考】NuScale社によるSMR関連の動向

- 2023年11月8日、NuScale社は、米国SMR初号機プロジェクトとして、2029年に運転開始を予定していた、Carbon Free Power Project (CFPP) の中止を発表。中止の理由は、プロジェクト継続の判断基準として設定していた売電先の確保目標に届かなかったため。
- 他方で、2023年10月には、米スタンダード・パワー社の新案件が発表。これにより、CFPP向けの知見は、これらのプロジェクトに活用される見込み。

Carbon Free Power Project (CFPP)

2015年にユタ州公営共同電力事業体 (UAMPS)によって立ち上げられ、NuScale社が開発するSMRの米国初号機プロジェクトとして、アイダホ国立研究所内で2029年運転開始を予定していたものの、2023年11月に中止発表。



NuScale SMR 概念図

※イラストはNuScale社HP (<http://www.nuscalepower.com>) から引用

その他のNuScale社案件

<米国>

2023年10月、米スタンダード・パワー社がオハイオ州とペンシルバニア州に立地するデータセンターへの電力源として、NuScale社のSMR技術の採用を発表。約2 GW = 24基の電力供給を想定し、2029年に初号機の運転開始を目指す。

<ルーマニア>

国営原子力発電事業社傘下のローパワー社は、ルーマニア・ドイチエシュティの石炭火力発電所の跡地に、合計6基のNuScale社のSMRを建設し、2029年の運転開始を予定 (21年11月発表)。

革新炉型毎のグローバル市場獲得ポテンシャル

- 革新軽水炉では、海外市場で一定の競争力を有するサプライヤが国内に存在。
- その他炉型についても、相手国のサプライチェーンの弱みを補完する形で初号機プロジェクトに参画し、実績を積むことで、将来市場を獲得できる可能性。

	対象国	市場規模※	機器・部材例	備考
EPR	英、仏、東欧等 (18基～)	250億円~/基	大型鍛造品、ポンプ 蒸気発生器、バルブ等	■ 仏英において、大型の革新軽水炉（EPR、EPR2）の建設の動き。 <u>日本勢による受注確度が高い機器・部材もあり、仏国内の生産能力次第では更なる市場拡大が見込める可能性。</u>
AP1000	欧州等 (数基～)	250億円~/基	タービン、格納容器 大型鍛造品、ポンプ、バルブ等	■ WECはポーランド等の欧州で受注活動展開中。 <u>米ボーグルで日本企業の供給実績あり、欧州でも市場獲得の可能性。</u>
高温ガス炉	英、ポーランド (各1基)	400億円~/基	制御棒駆動装置、バルブ、 大型鍛造品、燃料交換機、 炉内構造物・黒鉛材等	■ 英国実証炉やポーランド研究炉について、HTTRで実績をもつJAEAと連携中。 <u>自国調達目標が低く（英国は自国調達率50%を目標）、主要な構成機器・部材で受注の可能性。</u>
高速炉 Natrium	米 (1基)	200億円~/基	燃料交換機、制御棒計装 原子炉容器、バルブ等	■ <u>JAEA/もんじゅの経験を活かし、米テラパワー社と開発協力。</u> 原子炉容器・炉内構造物・ナトリウム冷却系統機器等について、受注の可能性。
VOYGR (NuScale)	米、ルーマニア等 (2基～)	100億円~/基	格納容器、伝熱管 バルブ、溶接材等	■ 先行する北米・東欧案件への機器供給を通じ、グローバル市場獲得を目指す。 <u>現地企業と連携した原子力機器供給モデルの構築を通じた市場獲得の可能性。</u>
BWRX-300	カナダ、米、欧州等 (9基～)	100億円~/基	原子炉容器部材 制御棒駆動機構 バルブ、炉内構造物等	■ <u>日立GEは実プロジェクトへの主要機器・部材供給を目標に対応中。</u> 北米に加え、欧州で候補炉型に選定され、機器・部材供給市場拡大の可能性。
SMR160+	米、欧州等 (数基～)	60億円~/基	鍛造材、バルブ 計装制御システム等	■ 閉鎖済みパリセイド原発を再稼働させ、その敷地内にSMRを建設する計画。 ■ <u>三菱電機は計装制御システムを2016年から共同開発中。</u>

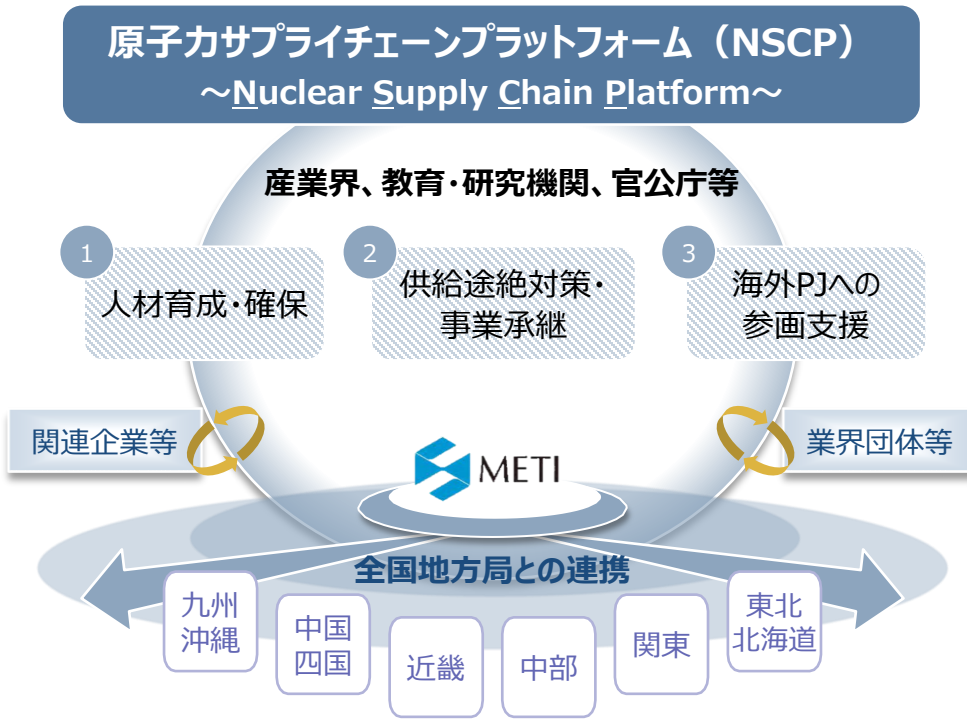
(出所) ヒアリング、各種資料等

※ ヒアリングで国内サプライヤによる市場獲得の可能性があると評価された機器・部材の想定販売額を積み上げたもの。

サプライチェーンの維持・強化に向けた取組

- 人材育成・確保支援、部品・素材の供給途絶対策、事業承継支援など、地方経済産業局等と連携し、サプライチェーン全般に対する支援態勢を構築。
- 次世代革新炉の開発・建設が進む場合にも、サプライヤが実際に製品調達・ものづくり等の機会を得るまでには相当程度の期間を要することも踏まえ、関連企業の技術・人材の維持に向け、海外市場機会の獲得を官民で支援していく。

サプライチェーン強化の枠組み



支援策の概要

① 戦略的な原子力人材の育成・確保

- 産学官の人材育成体制を拡充し、大学・高専と連携したものづくり現場のスキル習得を進め、原子力サプライヤの講座への参加を支援

② 部品・素材の供給途絶対策、事業承継

- 地方局との連携も通じ、政府が提供する補助金・税制・金融等の経営支援ツールの活用を促進

③ 海外PJへの参画支援

- 国内サプライヤの実績や技術的な強みを発信する機会・ツールを積極的に企画・開発し、日本企業による海外展開を支援

--- 革新サプライヤチャレンジ ---

海外ベンダーへの発信・輸出金融・規格取得支援等を通じ、海外PJへの参画を後押し

炉型毎のチームを「革新サプライヤコンソーシアム」認定



【参考】原子力関連分野における民間事業者の支出額（一部）

- 原子力事業者により、新規制基準に対応するための安全対策費用を含め、年間 2 兆円程度の支出が行われ、うち百億円程度が研究開発費として支出されている。

(年度)	電気事業者※の原子力関係支出高（億円）	
	(合計)	うち、研究開発費（推計値）
2010	21,420	137
2011	18,101	75.5
2012	14,986	82.4
2013	15,083	75.7
2014	17,021	107
2015	18,901	117
2016	18,695	108
2017	18,891	99.0
2018	21,188	81.7
2019	20,155	83.3
2020	21,034	106
2021	17,646	135
2022	18,392	121

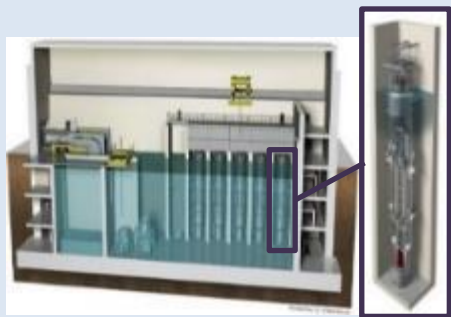
※ 原子力発電所を有する発電事業者

国際連携プロジェクトにおける貢献

- 国内の高い製造・研究開発基盤を生かして米英仏等の革新炉プロジェクトに参画し、欧米諸国の原子力産業基盤維持と世界の脱炭素に貢献。

小型軽水炉(SMR)

- 小型、受動安全 (約300℃)
 - モジュール生産、工期短縮
- ⇒固有の安全性、低資本費



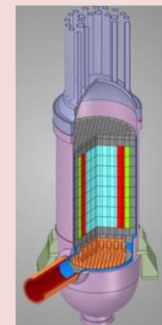
高速炉

- 高速中性子を利用した、ナトリウム冷却炉 (約550℃)
- ⇒固有の安全性、資源の有効利用、放射性廃棄物の減容化・有害度低減



高温ガス炉

- 化学的に安定したヘリウム冷却材・多重被覆燃料を使用した高温の原子炉 (約950℃)
- ⇒熱利用・水素製造、固有の安全性



アメリカ
SMR協力



米・仏
高速炉R&D協力



イギリス
高温ガス炉



国際連携



実験炉：常陽



試験設備：AtheNa



試験炉：HTTR

JAEA施設

中露における革新炉開発の動き

- 中国・ロシアは、革新炉においても、米英仏に先駆けて、開発・実証を推進中。

中国

<高速炉>

- ロシア技術の輸入により実験炉(CEFR)を運転中。
- 2017年、実証炉(CFR600)建設を開始。2023年稼働予定。
- 2030年代に商用炉(CFR1000/1200)導入予定。



CEFR外観

<高温ガス炉>

- 2000年、実験炉(HTR-10) が運転開始。
- 2021年、実証炉(HTR-PM)が初臨界。2023年12月6日、168時間の連続運転試験をクリアし、正式に商業運転を開始。



HTR-PM外観

<SMR>

- 2021年、国産PWR型SMR「玲龍1号」の実証炉を着工。2026年運転開始予定。

ロシア

<高速炉>

- 旧ソ連時代から豊富な運転経験を有する。
- 1980年、原型炉(BN-600)運転開始。
- 2015年、実証炉(BN-800)運転開始。
- 2035年頃に商用炉(BN-1200)導入予定。

<SMR>

- 2020年、世界で初めて浮体式洋上SMRであるアカデミック・ロモノソフの商業運転を開始。
- 2021年、極東サハ自治共和国内に商用陸上SMRの建設許可を発給。2028年までの完工を目指す。



BN-800外観



アカデミック・ロモノソフ外観

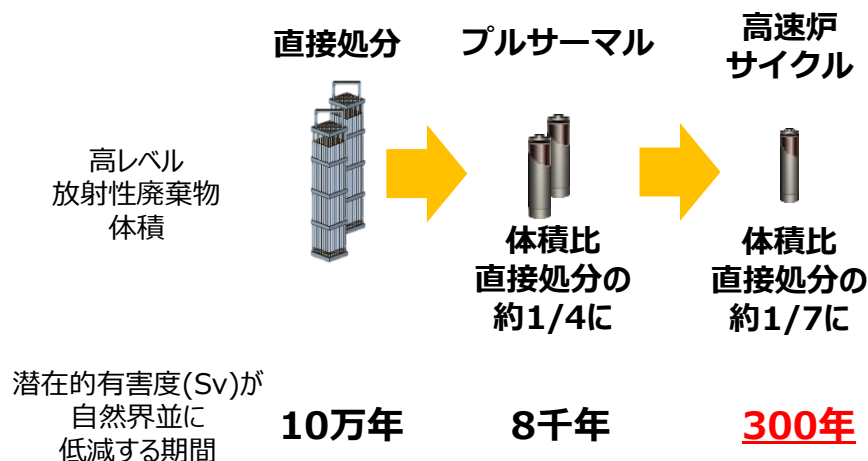
高速炉による廃棄物・資源問題解決への貢献

- 核燃料サイクルは、①高レベル放射性廃棄物の減容化、②有害度低減、③資源の有効利用等の観点から、引き続き推進することが重要。
- **高速炉**では、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度が自然界並に低減する期間が**10万年から300年に**。長期的には資源の有効利用も可能であり、エネルギーセキュリティの確保にも貢献。**核燃料サイクルの効果をより高める可能性**。

高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減

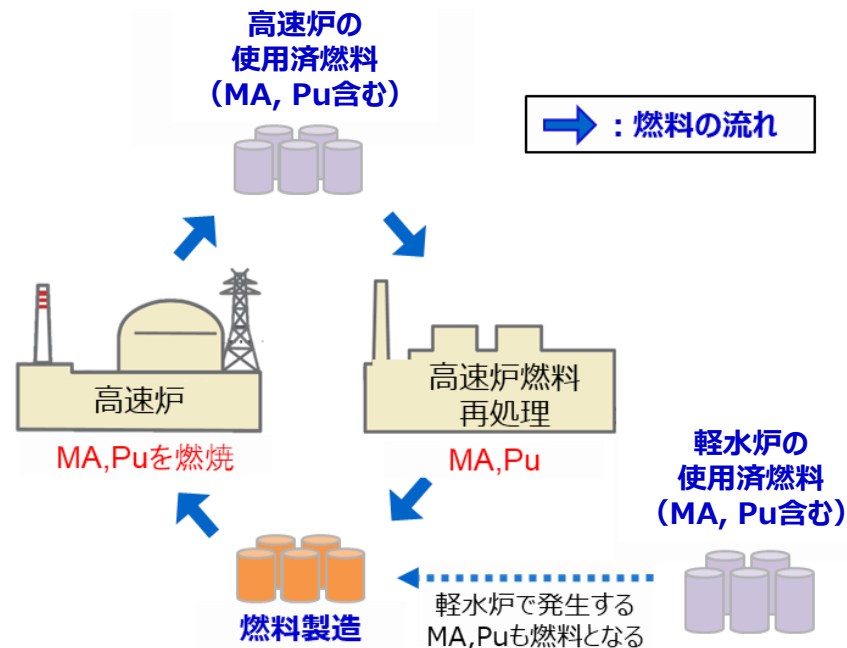
高速炉サイクル

- マイナーアクチノイド（MA）燃焼等でナトリウム冷却高速炉が米加で脚光を浴びる。



資源の有効利用

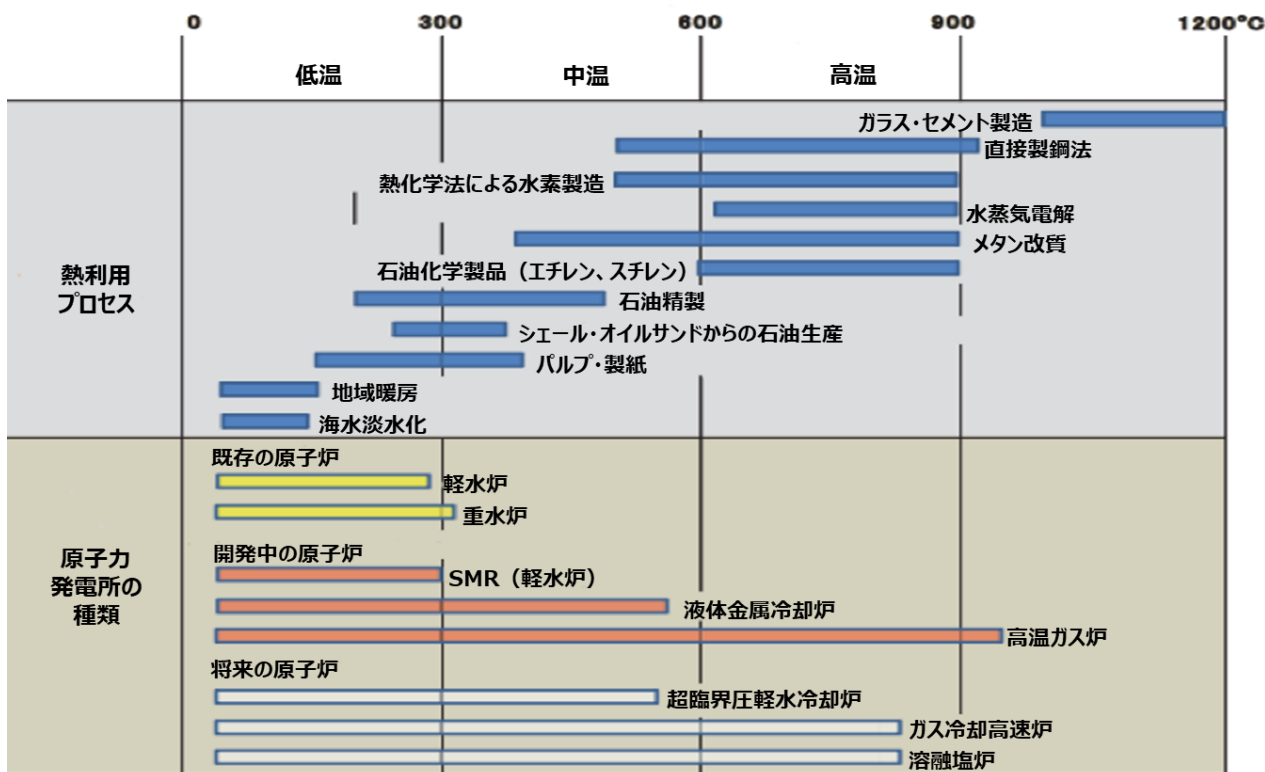
- 使用済燃料の再処理を経て製造した燃料を、軽水炉（プルサーマル）や高速炉で利用することで、資源を有効利用。



高温ガス炉による水素社会への貢献

- 将来的な水素社会において、鉄鋼・化学等における原料、輸送機器や発電における燃料としては、大規模かつ経済的な水素の安定供給が必要。
- 高温ガス炉では950℃の高温熱が取り出せることから、水素製造や発電など熱のカスケード利用が可能。

熱利用プロセスと各炉型の温度範囲



(出所) IAEA Nuclear Energy Series, Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy

水素社会での高温ガス炉活用のイメージ



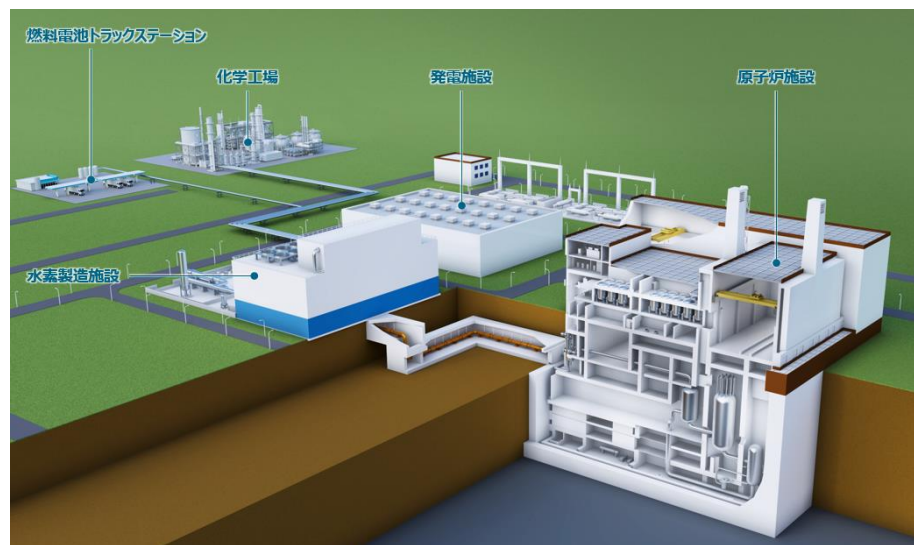
高速炉・高温ガス炉の実証炉開発

- 「GX経済移行債」による投資促進策として、高速炉・高温ガス炉の実証炉開発に関する予算を、今年度から3か年でそれぞれ460億円、431億円措置し、研究開発を加速していく。
- 高速炉については、7月12日、炉概念として三菱FBRシステムズ株式会社が提案する『ナトリウム冷却タンク型高速炉』を、中核企業として三菱重工業株式会社を選定した。
- 高温ガス炉については、7月25日、中核企業として三菱重工業株式会社を選定した。

<高速炉（イメージ）>



<高温ガス炉（イメージ）>



<高速炉実証炉 今後の開発の作業計画> 令和5年度 76億円

2023年7月：炉概念の仕様を選定【選定済】
2024年度～2028年度：実証炉の概念設計・研究開発
2028年頃：実証炉の基本設計・許認可手続きへの移行判断

<高温ガス炉実証炉 今後の開発の作業計画> 令和5年度 48億円

事業開始～2030年度：実証炉の基本設計・詳細設計
2030年度～2030年代後半：許認可の取得、建設、据付
2030年代後半：運転開始