

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 (エネルギー安全保障・廃棄物問題解決への貢献)

令和4年5月19日

資源エネルギー庁

1. カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障

1 – 1. カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障の世界潮流

1 – 2. 原子力に関するエネルギー安全保障戦略の世界潮流

1 – 3. エネルギー安全保障への革新原子力の貢献の可能性

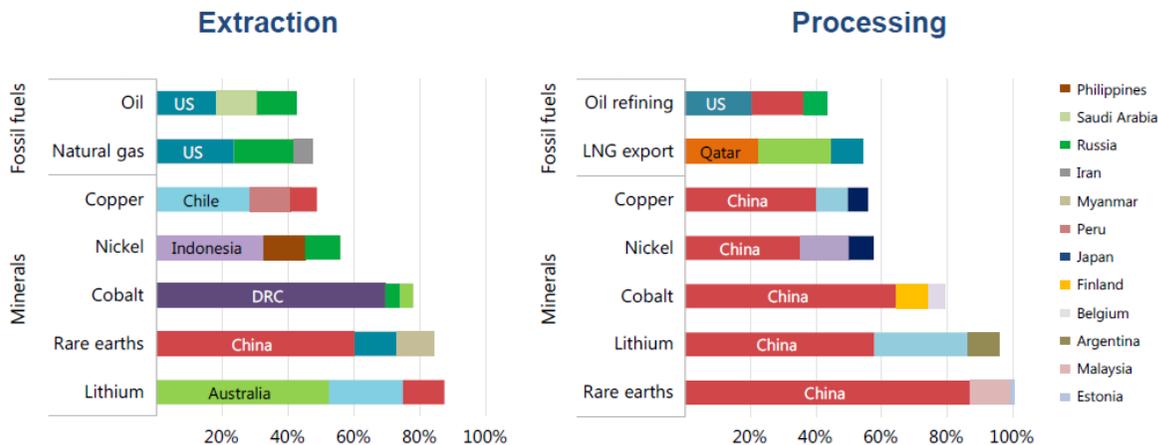
2. 廃棄物問題解決への貢献

3. 評価軸に沿った各炉型の評価

1 - 1 - 1. IEA「クリーンエネルギー・トランジションの安全保障」

- G20議長国イタリアの要請で、2021年、国際エネルギー機関（IEA）が分析・発表。
- クリーンエネルギー・トランジションの文脈において変容するエネルギー安全保障上の懸念を明確にすると同時に、G20間の国際協力を推進すべく勧告を実施。

化石燃料資源／重要鉱物資源の国別シェア
(2019年)



IEA. All rights reserved.

Note: US = United States; DRC = Democratic Republic of the Congo.
Source: IEA (2021), [The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transition](#).

(出典) IEA「クリーンエネルギー・トランジションの安全保障」(2021)

クリーンエネルギー・トランジションの安全保障

G20はエネルギー・トランジションの安全保障のため、以下の7原則に則って対策すべき：

1. 省エネの優先
2. 電力システムへの風力・太陽光の統合、既存の柔軟性電源の最大限活用、効果的なスマートグリッド活用やデジタル化を図る
3. 低炭素電源の多様性確保、技術リスクを低減
4. 安価で安定なクリーンエネルギー化のため、既存エネルギーインフラをコスト効率的に活用
5. 従来型・新たなエネルギー安全保障に係る懸念に対応するため、石油安定供給システムを近代化し、透明・オープン・競争的な市場を形成
6. エネルギー安全保障に係る新たなリスクに対応し、重要鉱物資源のグローバルサプライチェーンのレジリエンス強化、エネルギーインフラのデジタルセキュリティ・気候レジリエンスを強化
7. 人が中心となる包摂的なアプローチを推進、エネルギーアクセスを確保すると同時に貧困低減を図り、生産国経済の経済多様性を推進

1-1-2. 米国「エネルギーサプライチェーン戦略」

- 大統領令に基づき、半導体・レアアース・エネルギー等のサプライチェーンに関し政策勧告を実施。
- 2022年、米エネルギー省がエネルギーサプライチェーンの脆弱性リスク分析と政策勧告を実施：
 - クリーンエネルギーへのグローバルなシフトは、新たなサプライチェーンリスク、脆弱性、エネルギー分野における産業基盤へ新たな機会をもたらしている。
 - 燃料へのアクセスが主要なサプライチェーン課題であった化石燃料経済と異なり、クリーンエネルギー経済においては、クリーンエネルギー技術を製造するための材料や部材、デジタル部品へのアクセスが課題。

戦略的機会

- 国内の原材料供給の増強
- 国内製造能力の拡大
- グローバルな気候変動対処に向けた多様で信頼性の高い外国サプライチェーン形成に向けた投資と支援
 - サプライチェーン懸念には中国の太陽電池シリコン生産、コンゴ民主共和国のコバルト生産、中国のリチウム・コバルト精錬等含む
- クリーンエネルギーの適用と導入を増加させるための明確な市場シグナルの創出
- エネルギーに関連する廃棄物マネジメントの改善
- クリーンエネルギーに関連する熟練人材の惹きつけ、支援
- サプライチェーンに関する情報収集と意思決定

技術固有の政策的戦略

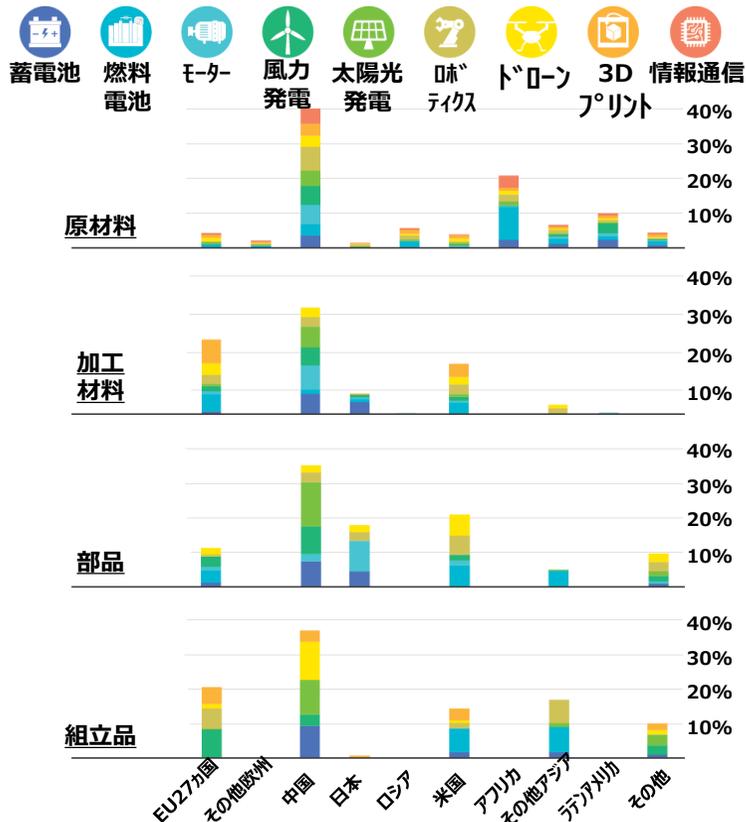
エネルギーインフラ	水素貯蔵、 <u>原子力の廃棄物処分場立地</u> 、エネルギー貯蔵等
電力グリッドと市場	エネルギー貯蔵のファイナンスモデル等
製造とイノベーション	半導体サプライチェーン、 <u>NRCと連携し革新炉の導入支援</u> 、陸上風力導入に関するモジュール化等のRD&D等
老朽インフラ	水力部材の国産化等

1-1-3. 欧州「新産業戦略」

- 欧州委は**2030年も欧州産業はグローバルリーダーであり続ける**との決意の下、**中国等の新興国台頭を念頭**に、欧州の技術・資源・市民の権利・データセキュリティを守るべく、9つの**戦略的バリューチェーンを特定**（自動運転の自動車、低炭素排出産業、水素技術・システム、蓄電池等）
- 2020年、**カーボンニュートラル、デジタルリーダーシップに向けて転換**をしていくため、欧州委は「**新産業戦略**」を公表。**欧州優位性の創出**を目指し、学術・研究機関、サプライヤー、中小企業、大企業が**一丸となり、産業アライアンスを形成中**（蓄電池、水素、重要原材料等）。

(出典) A New Industrial Strategy for Europe, 2020

9つの技術に関する原材料サプライチェーンの蓄積



21世紀の欧州産業政策に関する仏独マニフェスト（2019年）

欧州の次の数十年における経済力は、**グローバルな製造・産業拠点であり続ける**ことができるかどうかにかかっている。欧州が2030年にまだ製造パワーハウスを志すのであれば、**真の欧州の産業政策が必要**。強い産業は**持続可能・包括的な成長**から生まれる。以下を柱とすべき：

1. イノベーションへの巨額投資
2. 欧州の規制フレームワークの普及
3. 技術・企業・市場の保護

EUの「新産業戦略」（2020年）

“新しいタイプのガバナンスを通じて、カーボンニュートラルとデジタルリーダーシップを達成”



蓄電池、水素、重要原材料等の**産業アライアンス**形成

1. カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障

1 – 1. カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障の世界潮流

1 – 2. 原子力に関するエネルギー安全保障戦略の世界潮流

1 – 3. エネルギー安全保障への革新原子力の貢献の可能性

2. 廃棄物問題解決への貢献

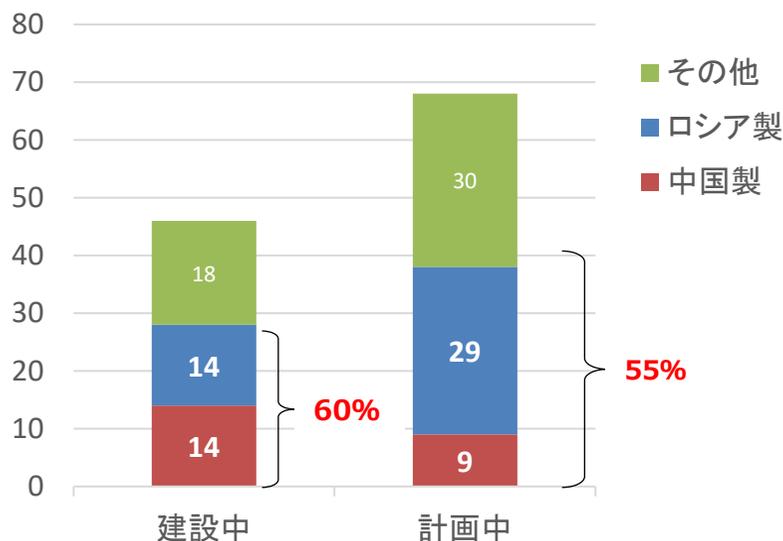
3. 評価軸に沿った各炉型の評価

1 - 2 - 1. 中露：現行炉型（軽水炉）で世界市場を席卷

- 現行の炉型（軽水炉）による新設プロジェクトは、**中国・ロシアに集中**（いずれもPWR）。
- 中国は英国・南米等、ロシアは東欧や中東等に対し、**戦略的に輸出を働きかけ**。

<中国・ロシアの原子力発電所建設シェア>

- 現在、世界で建設中・計画中のPWRのうち、建設中については約**60%**、計画中のもので約**55%**が中露の炉型。



※「その他」には、米国AP1000やフランスEPR、韓国APR1400等が含まれる
 (出所) 世界の原子力発電開発の動向2021 (2021年1月1日時点)
 を基に資源エネルギー庁作成

<両国の具体的な輸出案件>

- 中国はパキスタン、英国、アルゼンチン、ロシアは東欧・中東諸国、で具体的なプロジェクトを実施。
- 加えて、様々な国との協力覚書等も締結。

中国		ロシア	
パキスタン	建設中 (4基)	ベラルーシ	建設中 (1基)
英国	仏国と 建設中 (2基)	インド	建設中 (3基)
アルゼンチン	計画中	バングラデシュ ¹	建設中 (2基)
サウジアラビア	応札 可能性	トルコ	建設中 (3基)
		イラン	建設中 (1基)

1 - 2 - 1. 中露：革新炉でも世界に先行

- 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、実験炉を運転中。
- 現在は実証炉を建設中。2023年運転開始予定。
- 2030年代に商用炉導入予定。

<高温ガス炉>

- 2000年に研究炉が運転開始。
2021年9月、実証炉が初臨界。

<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。



HTR-PM外観

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

1-2-2. 米英：原子力技術リーダーシップ再興を目指す

- 米英では、原子力技術リーダーシップ再興を戦略として掲げ、政府主導で原子力イノベーションの促進に向け、予算・法律面での環境整備が進展。

米国

2017年 原子力エネルギー革新法(NEICA)

- 米国エネルギー省(DOE)に「国立原子炉イノベーションセンター」を創設、民間の革新炉設計概念を試験/実証することを求める法案。

2019年 原子力エネルギー革新・近代化法案(NEIMA)

- 米国規制委員会(NRC)において、2年以内に新型炉の審査プロセスの策定を義務付ける法案。これによりライセンスングプロセスの公平性・透明性を向上。

2020年 原子力エネルギーにおける米国のリーダーシップ回復戦略

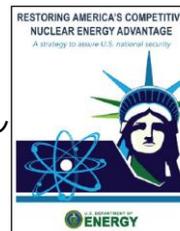
- 大統領覚書に基づき核燃料WGが作成。
- 国家安全保障の観点から、国内燃料サイクルの支援、革新炉開発の推進等を通じて、米国原子力産業の再興を勧告。

2021年11月 超党派「インフラ投資法」成立

- 革新炉の実証炉2基について、2028年の運転開始を目指し6年で総額約32億ドルの支出を承認。

2022年 既設炉の運転継続支援プログラムを公表

- DOEは2022年2月に経済的理由により運転継続が困難な既設発電所の運転継続支援プログラム(総額60億ドル)を公表し、同年4月から申請の応募を開始した。



原子力エネルギーにおける米国のリーダーシップ回復戦略

英国

2020年11月 10 Point Plan

- 「英国は原子力技術のリーダーであり続ける」と宣言。
- 2030年代初頭までに、小型モジュール炉(SMR)の開発と革新モジュール炉(AMR)実証炉の建設を目指して、約577億円の革新原子力ファンドを創設。

2020年12月 エネルギー白書

- 2050年までに電力倍増の見込みから、原子力を重視し、大型炉、SMR/AMR、核融合を支援。

2021年5月 規制の設計審査でSMR/AMR受入れ開始

- 包括的設計審査(GDA)を見直し、開発段階からメーカーが規制当局と意見交換をできるよう、SMR/AMRの審査受入れを開始。

2021年12月 高温ガス炉選定

- パブコメの結果、2030年代初頭の実証炉に高温ガス炉選定。英政府公表の技術資料において、米加日を互惠協力可能な国として記載。

2022年4月 エネルギー安全保障戦略策定

- コロナ禍からの復興及びウクライナ情勢に伴うエネルギー価格高騰を受け発表。
- 原子力は2050年までに発電割合を25%に拡大し、24GWの導入を目指す。

1 - 2 - 3. 米国「原子力エネルギーにおける米国のリーダーシップ回復戦略」(1)

- 2020年、大統領令によって設置された核燃料WGがまとめた「原子力エネルギーにおける米国のリーダーシップ回復戦略」は、ウラン採掘・生産及び核燃料サイクル産業にとどまらず、原子力産業全体で米国がリーダーシップを回復するための18の政策提言を提示。
- 米国原子力産業と国家安全保障との本質的な関連性を強調し、米国が原子力セクターにおける世界のリーダーとしての威信を失った点を指摘。その上で、政策目的として以下の4点を提示：
 - ダメージの優先順位付け：国内ウラン生産者への早急な支援の提供、核燃料サイクルのフロントエンド全体の競争力回復
 - フロントエンド及び原子力産業全体の再生・強化：国内における公平な競争確保と米国民生原子力技術によりもたらされる特性を尊重するため、不必要な規制負担の削減
 - 世界における技術・基準の主導：次世代原子力技術における米国の主導権の再確立
 - 米国の輸出競争力強化：外国競合相手との公平な競争確保、競争スペースの拡張、ライバルへの挑戦

8つの国家安全保障に関する観点

ウランは重要で特殊な重要鉱物資源

- 大統領令に基づき、重要鉱物資源指定

原子力を通じた重要インフラのレジリエンス強化

- ベースロード、脱炭素、高い信頼性でエネルギー安定供給

軍事ミッションの機能保証

- 遠隔地オペレーションを支えるマイクロリアクター

高い核不拡散・安全基準

- グローバルな核不拡散レジームにおける米国への信頼は健全な米国の民生原子力産業と米国のイノベーターとしてのリーダーシップに依拠

100年にわたる外交関係

- 購入国と100年にわたるパートナーシップ構築

防衛ニーズ

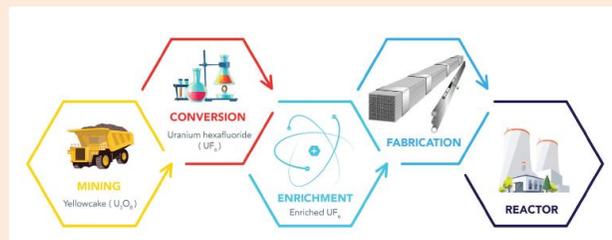
- 健全な核燃料サイクルの必要性

ウランの供給保証

- 福島事故後の需要急減と外国国有企業による市場の歪曲

人材・サプライチェーン基盤

- 防衛産業の観点のみでは規模の経済の提供が困難



1 - 2 - 3. 米国「原子力エネルギーにおける米国のリーダーシップ回復戦略」(2)

「原子力エネルギーにおける米国のリーダーシップ回復戦略」における18の勧告

I. ウラン採掘産業・転換サービスを再生・強化、外国への依存を国内ウラン生産者への早急な支援を提供し、核燃料サイクルのフロントエンド全体の競争力を回復する

1. ウラン備蓄設立によるウランの購入

II. ウラン採掘産業・転換サービスを再生・強化し、外国への依存を低減する

2. DOEが保有するウランの売却を停止し、ウランの超過在庫を再評価

3. 電力市場における全ての電源の公平な競争条件確保、卸電力市場における競争改善のためのFERCによる取組を促進

4. ウラン採掘の規制及び土地アクセスの合理化

5. 米国市場におけるウランの廉価販売を防止するため、DOCによる露からの輸入ウランに係るアンチダンピング調査停止協定延長を支援

6. NRCが国家安全保障を理由として中露で製造された核燃料の輸入を拒否することを可能にする

III. 米国の技術革新を誘発し、先進原子力への投資を促進する

7. ATF (事故耐性燃料) やHALEU(U235濃縮度5~20%の低濃縮ウラン)に係るR&Dへの財政支援、HALEU濃縮実証プログラムの完遂、ウラン採掘のための革新水処理技術への財政支援

8. 国家原子炉革新センター (NRIC) 及び多目的試験炉 (VTR) への支援

9. 米国革新炉技術のR&D・実証への財政支援

10. 連邦施設への電力供給に向けたSMR及びマイクロリアクターの利用を実証

IV. 米国の輸出競争力を強化する

11. 原子力輸出の調整・実施の主導に専念する政府高官ポストの指定

12. 防衛産業基盤に類似する原子力産業基盤の確立

13. ATFを含む、国産技術由来の商業燃料が外国技術由来の原子炉への利用のために国際市場で販売されることを促進するためのR&Dへの財政支援

14. 輸出手続の効率改善及び米国の民生原子力技術・機器・燃料輸出の新たな市場開放のための原子力協定の締結

15. 「セレクトUSA対米投資サミット」の対象に民生用原子力を追加

16. 既存のNRCによるライセンスを有する米国の原子力技術 (SMR) の外国での許認可取得を加速させるための規制枠組み整備のための技術提供・支援を含む民生原子力国際協力プログラムの拡充

17. 外国の国家ファイナンスに対抗するため、民生原子力産業を支援する米国金融機関の拡充

18. 米国原子炉ベンダーによる試験炉供給市場への再加入の促進

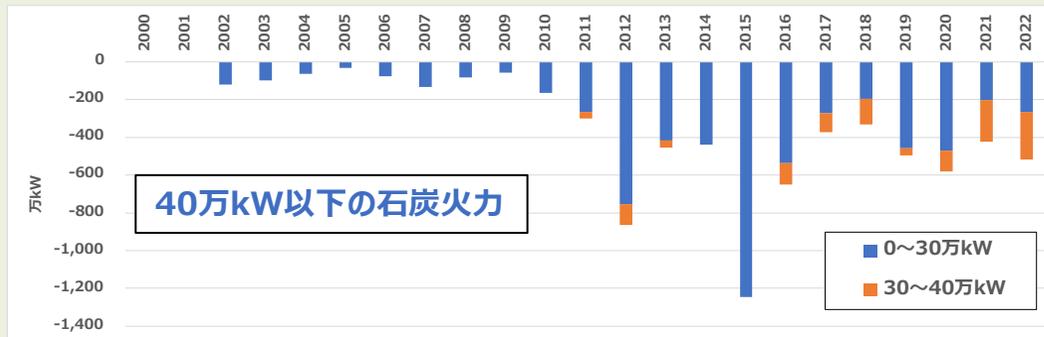
1-2-4. 米国 石炭火力の代替としてのSMRの導入

- 米国では、今後老朽石炭火力の多くが閉鎖され、石炭火力の設備容量が同規模のSMRのリプレイスにより、既存送電線の活用及び労働者の再雇用ができると分析。

(出典) US DOE, 2022 「NUCLEAR ENERGY SUPPLY CHAIN DEEP DIVE ASSESSMENT」

- 米国では、天然ガスの価格低下や地球温暖化対策の加速に伴い、石炭火力の多くが閉鎖される見通し。
- 1975年までに建設された30万kW以下の石炭火力は、6,000万kW程度あり、SMRが有効な代替電源となる。
- 同じサイトで、石炭を原子力に置き換えることができれば、既存の送電線が活用でき、送電線投資の抑制が可能。
- 石炭火力と原子力の技術専門性が類似しており、石炭火力での労働者を広く原子力発電所で再雇用できる。

石炭火力の閉鎖発電所の設備容量（米国）



石炭火力とNuScale SMRの必要な技術者の比較

石炭火力	人数	類似性	SMR	人数
運転管理者	5	低い	上級原子炉運転員	5
制御室運転員	10	低い	原子炉運転員	15
現場運転員	15	高い	補助運転員	25
化学物質管理	4	中間	化学物質管理	14
メンテナンス管理者	2	中間	メンテナンス管理者	3
機械 技術者	12	高い	機械 技術者	21
I&C 技術者	9	中間	I&C 技術者	10
電気 技術者	5	高い	電気 技術者	11
技師	11	高い	技師	13
警備員	20	高い	警備員	48
その他	14	中間	その他	72
合計	107		合計	237

(出典) US EIA, 2022
「Preliminary Monthly Electric Generator Inventory」

1 - 2 - 5. 英国「エネルギー安全保障戦略」

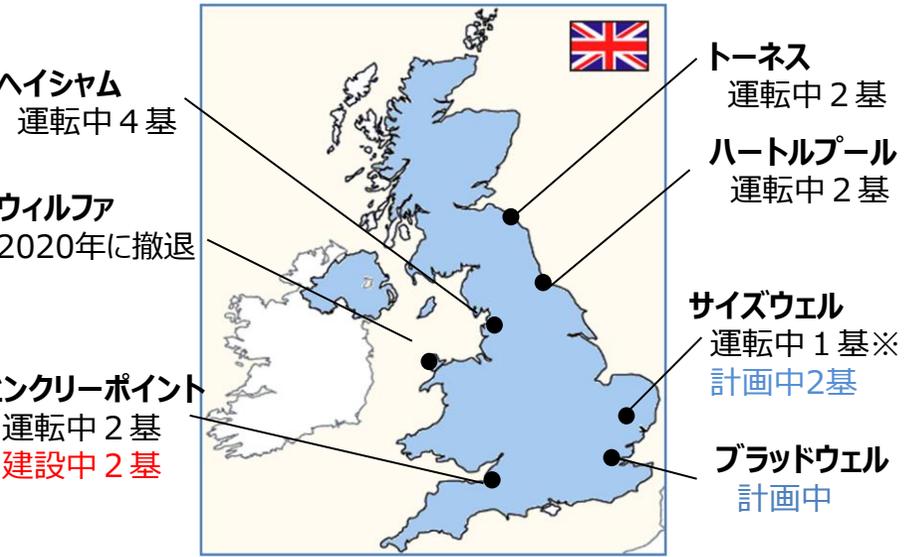
- 英国政府は本年4月、コロナ禍からの復興及びウクライナ情勢に伴うエネルギー価格高騰を受け、「エネルギー安全保障戦略」を公表。
- 原子力は唯一の信頼性の高い実証済みの低炭素電源であり、数十年にわたる過少投資を覆し、グローバルなリーダーシップを回復するため、2050年までに発電割合を25%に拡大し、24GWの導入を目指す。

<「エネルギー安全保障戦略」における原子力の扱い>

- ✓ 発電割合を現状の15%から2050年までに25%へ拡大し、現在の3倍以上となる24GWの導入を目指す。
- ✓ 2024年までの今期議会中に1件（サイズウェルC）、次期議会中にSMRを含む2件の原子力プロジェクトに最終投資決定。最大8基の建設が可能になり、これまでの10年に1基のペースから1年に1基のペースに加速。
- ✓ 新規建設を支援する政府機関として、Great British Nuclearを設立。投資決定の実現、建設資金を援助。

<英国の原子力発電所> 運転中：11基※

建設中・計画中等の原発



サイト・状況	炉型	株主構成
ヒンクリーポイントC →建設中（2026年に運開予定）	EPR	EDF（仏） 2/3 CGN（中） 1/3
サイズウェルC →今議会中に承認予定	EPR	EDF（仏） 80% CGN（中） 20%
ブラッドウェル	華龍 1号	EDF（仏） 1/3 CGN（中） 2/3
ウィルファ →2020年9月に撤退。	AB WR	ホライズン（日立）

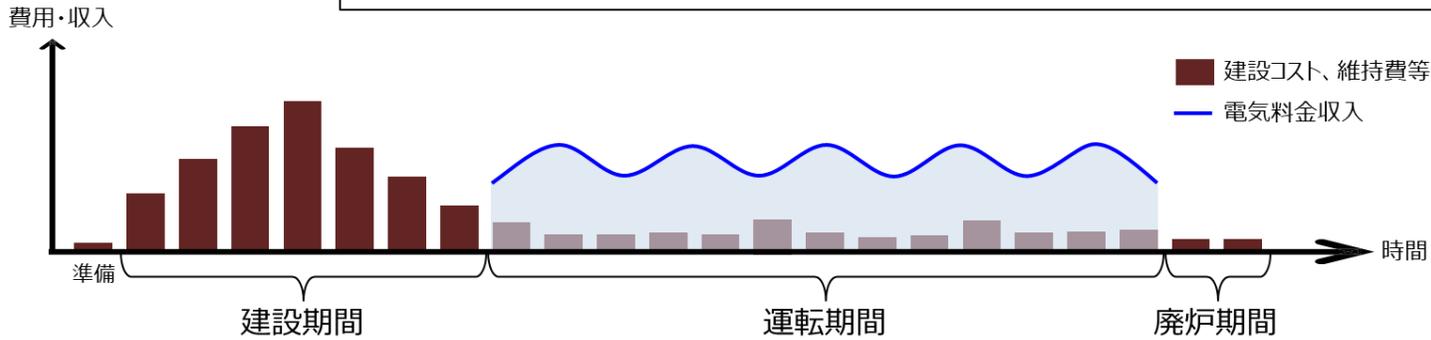
※サイズウェルB以外は2028年までにすべて廃止予定。4月6日付けのEDFエナジーの発表によれば、サイズウェルB原発については運転期間を2035年から2055年まで、20年間延長することを検討中であり、2024年までに最終決定。

（出典）British Energy Security Strategy, 2022

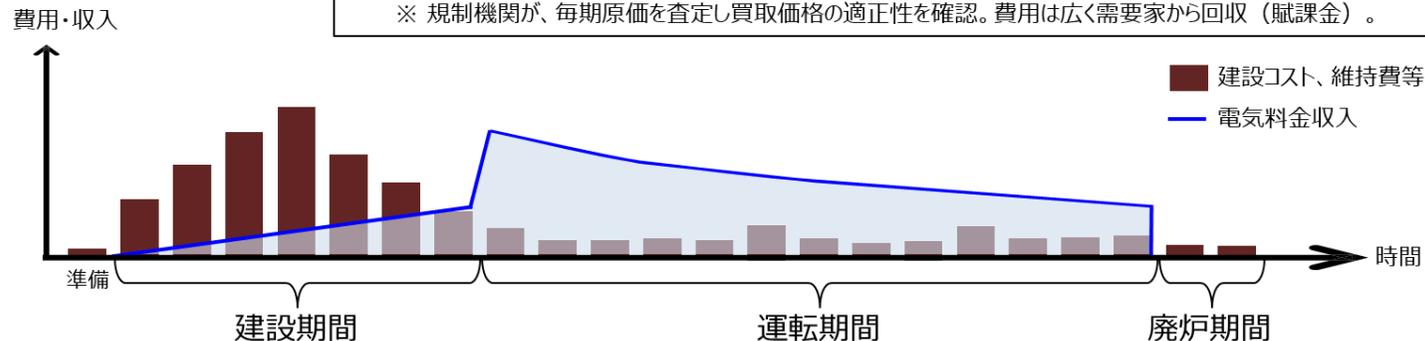
【参考】英国RAB（規制資産ベース）モデルについて

- RABモデルは、規制当局が認可した投資を、規制料金を通じて回収する仕組み。投資家のリスクに上限を定め、プロジェクト遂行困難時には、国が資金提供、又はプロジェクトを中止し補償金を支払う。建設期間においても投資回収が可能。（e.g. 英国下水道、空港ターミナル建設PJで実績あり）
- 中国が政府ファイナンスをバックに英国内建設における資本参加し、更には純国産技術で英国に原発を建設しようとしているところ、事業環境を整備し、英国内資本の参加を促すもの。

日本



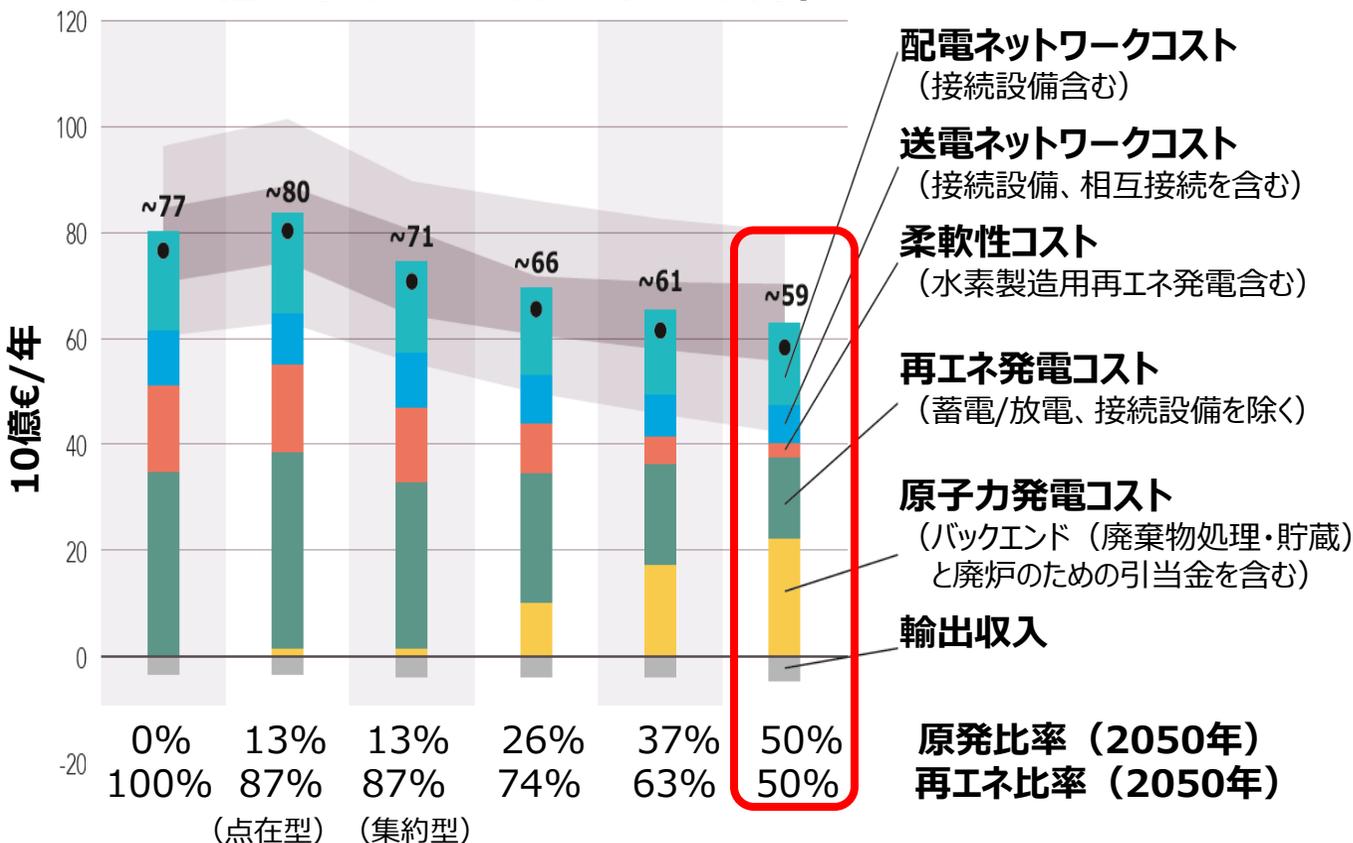
英国RABモデル



1 - 2 - 6. フランスはシナリオ分析の結果、14基の革新軽水炉を新設

- マクロン政権は仏送電系統運用会社「RTE」に対し、2050年カーボンニュートラルに向けた電源シナリオ分析を要請し、RTEは2021年10月に結果を公表。
- 既存炉の運転延長、EPR2を14基建設（23GW）、SMR導入（4GW）を組み合わせ2050年の原子力比率を50%とするシナリオが、経済面で最も優位と結論。

経済性についてシナリオ分析結果



2050年に40GW (37%) 以上
原発維持で原発新設が経済的に :

- 約40GWの原発維持で、**電気→ガス→電気に伴うコスト、大幅な送電線増強コストを避ける**ことができる。
- 但し、原発新設は初期費用が高く、競争力は**ファイナンスコスト**に依存。

再エネ : 原発 = 50 : 50で、
2050年CN未達リスクを軽減 :

- 未発達の**SMR産業**は必ずしも必要ではないが、**EPR2の建設速度を緩和**させる機会。
- **30年間で14基のEPR2**を建設するのは産業基盤に**大きな挑戦**であり、過小評価すべきではない。

【参考】フランス2030とマクロン大統領演説

- マクロン大統領は2021年10月、エコロジー転換のための300億ユーロ（約4兆円）規模の投資計画、「フランス2030」を発表。小型炉・より良い廃棄物管理が可能な革新炉の開発に10億€投資する目標を表明。
- 本年2月、マクロン大統領演説の中で、原子力低減目標を撤回し、2050年までに6基のEPR2を建設し、さらに8基のEPR2建設に向けた検討を開始する意向を表明。

【2022年2月の大統領演説にて】

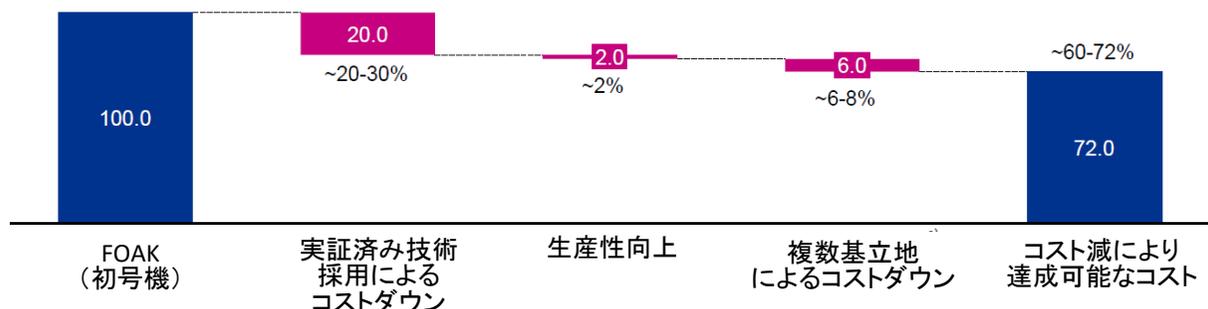
- 我々は、現在より最大6割発電を増やさなければならない。
- 最も脱炭素に貢献し、安全で、自立した方法で発電する鍵は、複数の戦略を持つこと。我々は再エネと原子力の両方を開発する。
 - ✓ 太陽光や風力のみスキーム、原子力のみスキームは、いずれも非現実的
 - ✓ RTE研究からは、再エネと原子力の2つの柱に同時に賭ける以外の選択肢はないのが現実。この選択肢が環境、経済効果の面でも最適であり、最も低コスト
- 電力需要を考慮し、既存炉も無限に運転し続けるわけではなく、リプレースを想定する必要。よって今日、新規原子炉計画を開始。



1 - 2 - 7. オランダは市場調査の結果、実証済みの大型軽水炉を選好

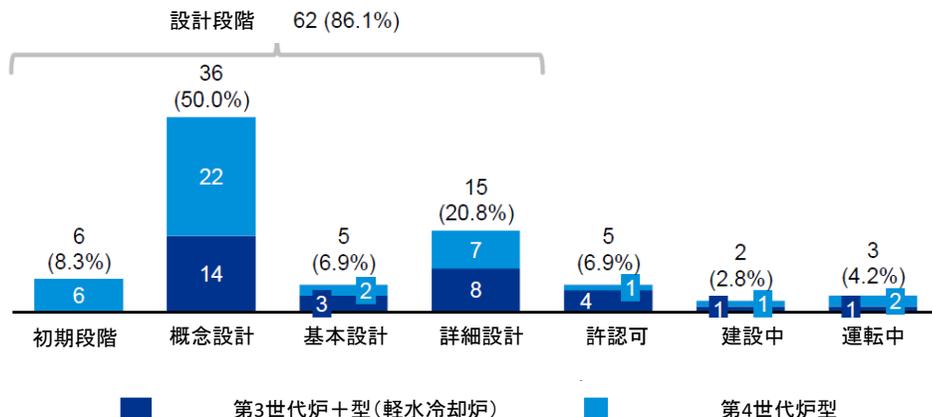
- オランダは原子力発電に市場が投資する条件を調査し、2021年に議会に報告。
- コスト超過・遅延の課題を最小化するため、実証済みで、安全かつ既に活用が進む大型軽水炉（第3世代炉+）を選択すべきとの市場関係者で幅広い合意。
- これを受けて新たに2カ所で原子力発電所建設方針。

実証済みの設計採用で28 - 40%/MWのコスト減の可能性



- オランダにおける第3世代炉+プロジェクトは実証済みの技術を採用することで他国において発生したコスト超過や遅延に必ずしも見舞われない。
- 既に実証済みの設計採用で28 - 40%/MWのコスト減の可能性。

SMRは86%が設計段階にあり、2027-2033年に運開予定



- SMRも関心高いオプションであるが、商用化されるのは2027-2033年であり、初号機 (FOAK) 建設について不確実性がある。
- SMRは大型軽水炉と同程度の出力当たりのコストを目指すのが、小型ゆえのスケールデメリットを補完するためには連続生産される必要がある。

Source: Advances in small modular reactor technology developments, IAEA (2020). KMPG analysis.

(出典) Nuclear energy market consultation (KPMG, 1 July 2021)

1 - 2 - 8. 石炭火力発電の廃止を念頭に大型軽水炉を導入する動き

- 世界のカーボンニュートラルの潮流の中、石炭火力発電を段階的に廃止する流れ。
- 近年、オランダやポーランドでは、石炭火力廃止に加え、原子力発電所の新規建設の方針を公表。

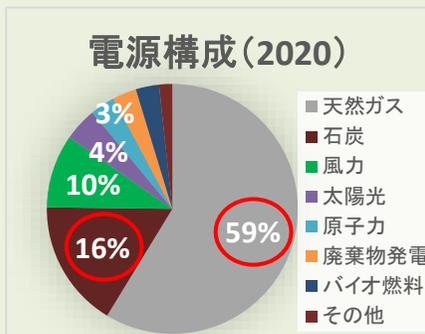
オランダ

- 2015年、石炭火力を2030年までに段階的に停止する法案を可決。
- 2021年、新政権における連立合意文書にて、稼働中のPWR1基（48万kW）の運転延長と、新たに2か所で原子力発電所の建設方針を明記。

原子力はエネルギーミックスにおいて太陽光、風力、地熱を補完ことができ、水素製造も可能。我々のガス輸入への依存も低減。



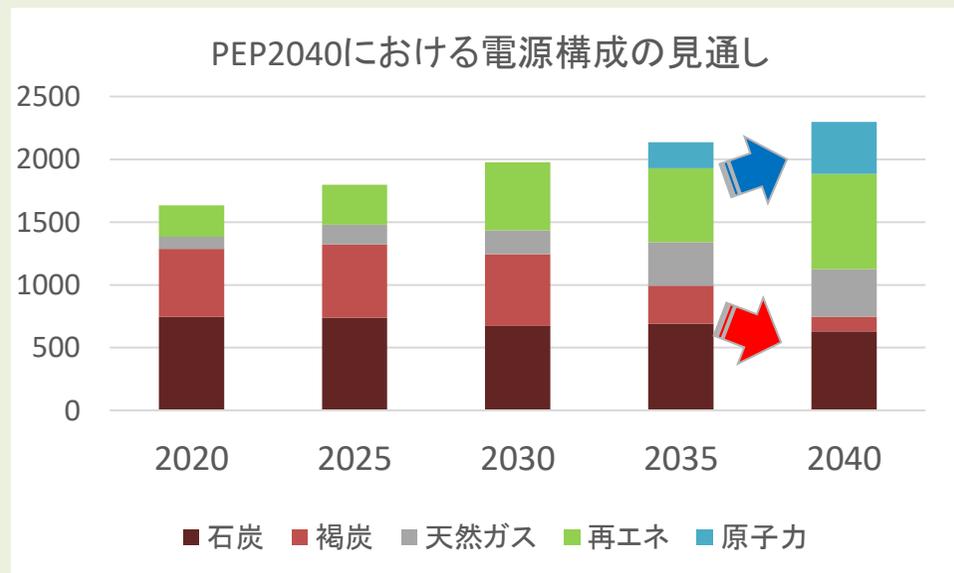
ルッテ首相率いる新連立政権



(出典)「海外諸国の電気事業第2編(2020年)」

ポーランド

- 現状、火力発電が約7割を占めているが、今後石炭火力の依存度を低減し、2040年代には廃止予定。
- 2021年、大型軽水炉を2043年までに6基導入する方針を公表(2033年に初号機の運転開始)。

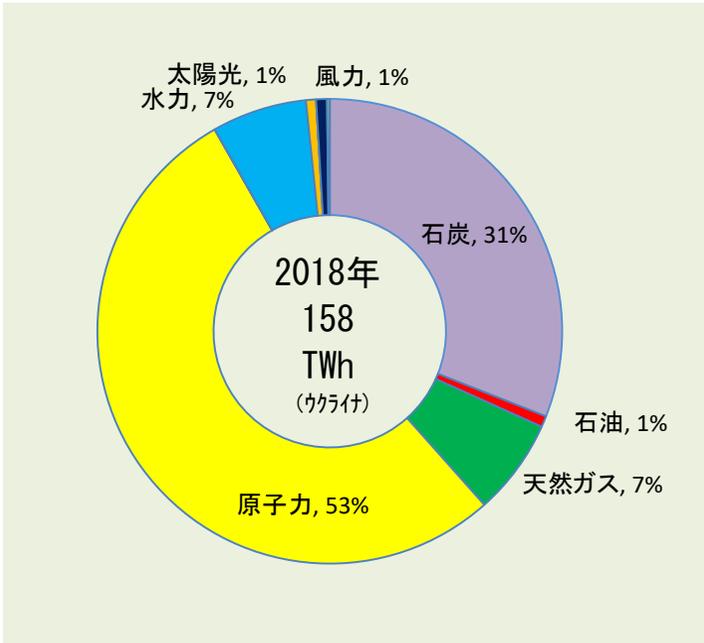


(出典)「2040年に向けたポーランドエネルギー政策 (PEP2040)」

【参考】ウクライナの原子力情勢について

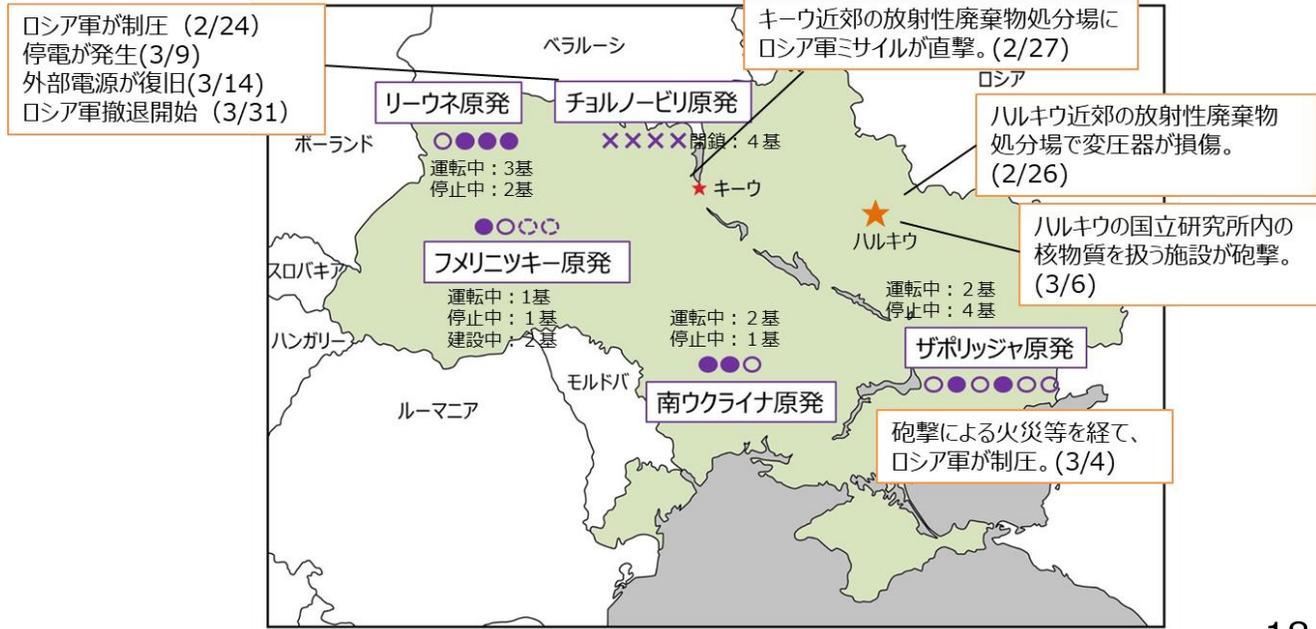
- 現在、4 原発で 8 基が稼働中であり、全てロシア製の炉。国営エネルゴアトム社が所有・運転しており、オペレーションはロシアには依存していない。
- 2014年のウクライナ東部紛争やクリミア併合問題などもあり、燃料の供給元をロシアから米ウェスチングハウス（WEC）社製に切替を加速。（現在 9 基の原発で、WEC社と契約締結。うち、3 基で同社の燃料を導入済。）
- 建設中断中のフメリニツキー3,4号機は、2016年にロシアとの契約を破棄。2020年9月には、WEC社が両機の完成に向けた支援を申し出。

ウクライナの電源構成（2018年）



ウクライナの原子力関係施設

※2022年5月18日時点



1 - 2 - 9. ウクライナ情勢を踏まえたドイツの原子力運転延長を巡る議論

- 2011年の原子力法改正で脱原子力が法制化。同法に基づき、国内では脱原子力が進められ、2021年には3基が閉鎖。
- ウクライナ情勢を受けて、既設炉の運転延長も取りざたされたが、燃料調達が困難などを理由にその後延長が否定された。2022年に、最後の3基を閉鎖し、脱原子力を完了させる予定。

ドイツ国内における原子力発電所の状況

ユニット名	設備容量	運開年	閉鎖期限
グンドレミンゲンC	143.0万kW	1985	2021
グローンデ	134.4万kW	1985	2021
ブロックドルフ	148.0万kW	1986	2021
イザール2	148.5万kW	1988	2022
エムスラント	140.6万kW	1988	2022
ネッカー2	140.0万kW	1989	2022



直近におけるドイツ国内の原子力をめぐる議論の状況

2022年2月27日 ハベック連邦経済相【運転延長を示唆】

- ・最後の3基の閉鎖繰り延べの可能性検討を排除しない
- ・ただし予備検討では閉鎖繰り延べは不相当との見解は強調

2022年3月2日 バイエルン州首相（記者会見）

- ・石炭を伸ばすなら3～5年の原子力延長のほうが好ましい

2022年3月8日 環境省・経済省 検討文書公表【延長否定】

- ・3基の閉鎖先送りによる電力供給への貢献は限定的
- ・費用に対し便益が小さく、危機の下にあっても運転延長は推奨されない（※炉型に適合する燃料の追加調達が最短で2023年夏であり、短期的に有効な手段となり得ないという事情も）

2022年3月11日 シュルツ首相（ビデオ・ステートメント）

- ・石油、ガス、石炭の輸入に代わる資源を開発することによって、この依存から少しずつ脱却していきたい
- ・同時に、化石資源の使用を段階的に減らしていく

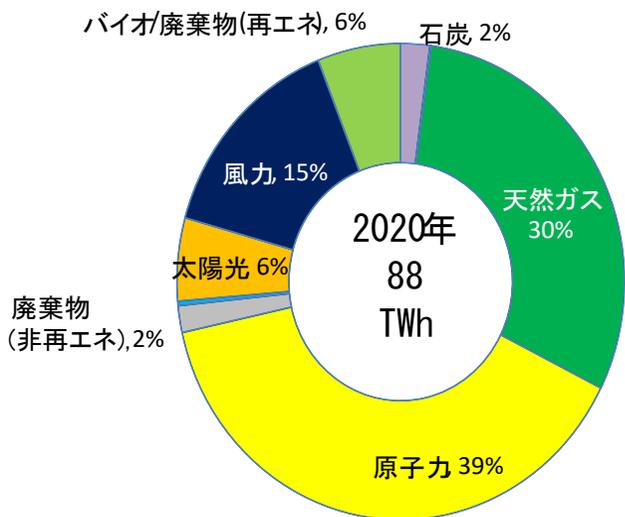
1 - 2 - 10. ウクライナ情勢を踏まえたベルギーの運転延長を巡る議論

● ベルギー政府は本年3月、現下の地政学的状況や化石燃料からの脱却を強化する観点から、**2025年に40年運転を迎える原発2基**の運転を**10年延長**する方針を決定。

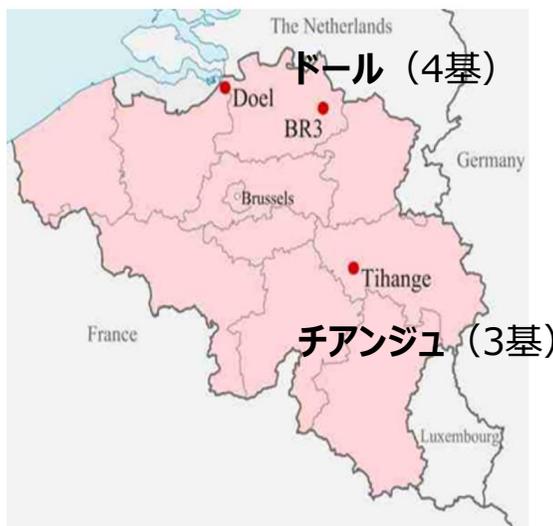
<既設炉の廃止及び長期運転の経緯>

- ✓ 2003年2月、**新設禁止**と**既存炉の運転開始から40年での閉鎖**を規定する **脱原子力法**を制定。
- ✓ 2009年10月、ベルギー政府は、CO2の削減、電力不足等を背景に、**2015年に40年運転**を迎え**閉鎖**予定であった**3基**について、**10年間の運転延長**を決定。
- ✓ 2022年3月、デクロー首相は、現下の地政学的状況や化石燃料発電からの脱却の観点から、**2025年に40年運転**を迎え**閉鎖**予定であった**2基の10年間の運転延長**を発表。

<ベルギーの電源構成> (2020年)



<ベルギーの原子力発電所>



	電気出力	運転開始	40年運転	50年運転
ドール①	46.5万 kW	1975年	2015年 →	2025年
ドール②				
ドール③	100万 kW級	1982年	2022年	-
ドール④		1985年	2025年 →	2035年
チアンジュ①		1975年	2015年 →	2025年
チアンジュ②		1983年	2023年	-
チアンジュ③	1985年	2025年 →	2035年	

1. カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障

1 – 1. カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障の世界潮流

1 – 2. 原子力に関するエネルギー安全保障戦略の世界潮流

1 – 3. エネルギー安全保障への革新原子力の貢献の可能性

2. 廃棄物問題解決への貢献

3. 評価軸に沿った各炉型の評価

1 - 3 - 1. カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障の再定義

- 世界がカーボンニュートラルを目指す中、変動電力の拡大や燃料資源から脱炭素技術へのシフトに伴い、エネルギー安全保障の定義がより広範なものへ変化してきている。

エネルギー安全保障上のリスク

従来型のリスク

- 燃料資源の供給途絶リスク (e.g. 地政学リスク)
- 燃料価格変動リスク
- 燃料資源燃料資源のチョークポイントリスク (e.g. 海上貿易ルート)



CN・電化推進に伴う新たなリスク

- 気候変動等に伴う自然災害リスク
- 変動電力の拡大に伴う電力供給途絶・価格変動リスク
- エネルギー多消費産業の空洞化リスク
- 鉱物資源の供給途絶リスク (e.g. 地政学リスク)
- 技術・部材サプライチェーンの供給途絶リスク (e.g. 地政学リスク)
- 公正なトランジションが進まないリスク
- 核拡散・核セキュリティのリスク
- デジタル化に伴うサイバーセキュリティリスク
- 政策変更等に伴う長期投資リスク

カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障リスク低減方法

- 省エネの推進
- オープンで競争的な燃料資源調達環境の整備、燃料資源の有効利用
- 自然災害へのレジリエンス強化、革新的な安全性向上
- 風力・太陽光の電力システムへの統合、柔軟性の確保
- 低炭素電源の多様性確保、R&D推進による技術リスクへの対応
- コスト効率的な既存のエネルギーインフラの活用 (e.g. 既存送電インフラ等の活用、水素・アンモニア専焼)
- 水素製造技術の多様性確保
- R&D推進による技術リスクへの対応
- 低廉で安定なベースロード電源確保
- 不可欠な鉱物資源のサプライチェーンのレジリエンス強化
- 技術・部材サプライチェーンのレジリエンス強化
- インクルーシブな脱炭素の推進
- 核拡散抵抗性・核セキュリティの強化
- デジタルセキュリティの強化
- 長期投資を可能とする市場環境の整備

※革新炉開発によって貢献できる可能性

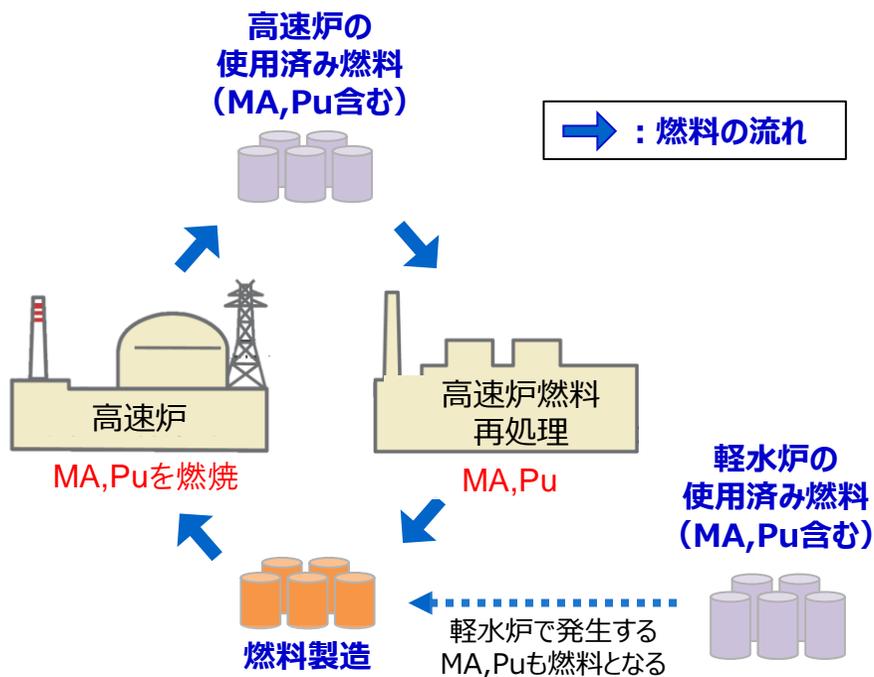
1 - 3 - 2. 燃料資源の供給途絶リスクへの対応（高速炉による資源の有効利用）

- 高速炉で生成したプルトニウムやマイナーアクチノイドを燃料とし、3000年以上のエネルギー供給が可能という試算も。
- 長期にわたり天然ウラン供給が不要となる可能性。

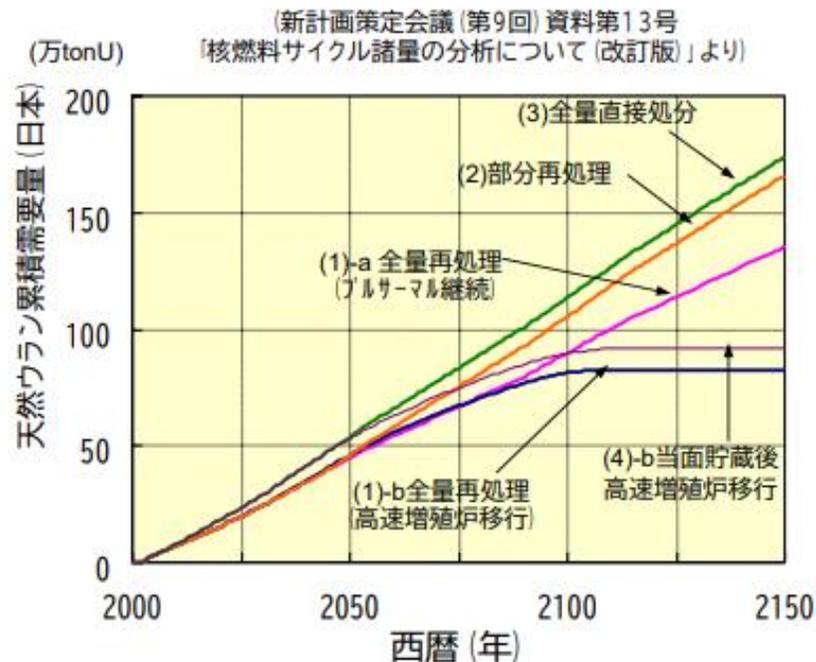
※出典：OECD/NEA Nuclear Energy Outlook2008

資源の有効利用

- ・マイナーアクチノイド(MA)やプルトニウム(Pu)を燃焼してエネルギー資源として利用



天然ウラン供給を不要にできる

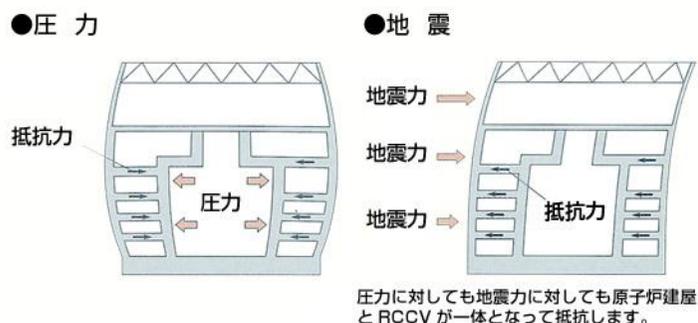


1 - 3 - 3. 炉型革新による気候変動等に伴う自然災害リスクへの対応

- 炉型革新によって、より合理的に地震や津波等の自然災害、航空機衝突といった外部ハザードへの対応強化が可能。

一体構造・低重心で高耐震

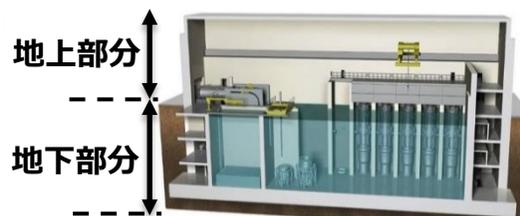
格納容器と建屋の一体構造により耐圧性、耐震性が向上。さらに重心が低くなり耐震性が向上



軽水炉 ABWR
(東芝ESS、日立GE、GE Hitachi)

半地下立地

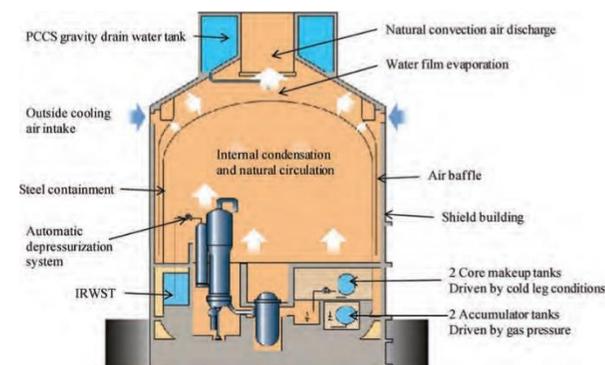
半地下立地で重要機器を地下配置により耐震・航空機衝突対策



小型軽水炉 VOYGR
(NuScale)

航空機衝突に耐える建屋

建屋外壁に鋼板・コンクリート複合モジュールと鉄筋コンクリート・モジュールを組み合わせた方式を採用し、航空機衝突に耐える設計 (※)



軽水炉 AP-1000
(ウェスチングハウス)

※2009年の規制変更で設計変更を実施。
2011年末に付則含め規則改訂了。

1 - 3 - 4 ①. 変動電力の拡大に伴う電力供給途絶・価格変動リスクへの対応（負荷追従）

- 軽水炉やSMR・高速炉等の新たな炉型においては、再エネの大量導入等との親和性も勘案し、**負荷追従可能なシステム**を持ち、**系統全体の安定化に貢献**。

<フランスの軽水炉PWR>

- ・原子力発電比率が7割以上に上るフランスでは、一部の原子力発電所は柔軟に出力を調整し、電力需要の増減に対応。
- ・通常の制御棒に加え、**中性子吸収量が小さい制御棒**を併用することで、出力50%で運転可能。

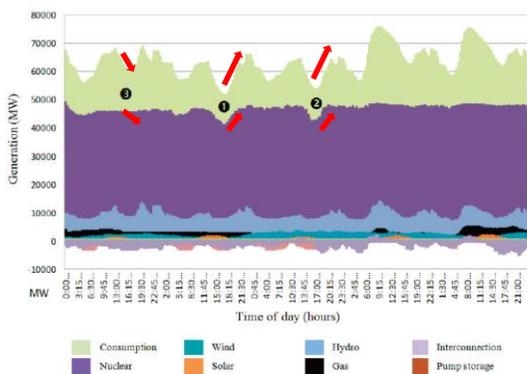


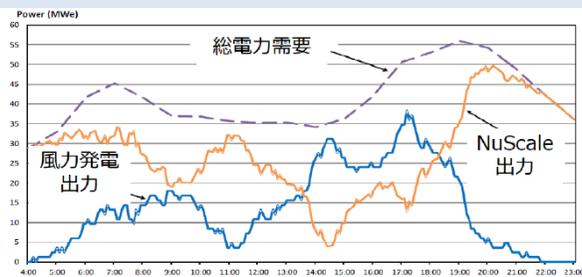
FIG. 20. Generation mix and demand in France during the Easter holiday, from 30 March to 3 April 2013 (reproduced from Ref. [23]).

(出典) Non-baseload operation in nuclear power plants: load following and frequency control modes of flexible operation, IAEA, 2018

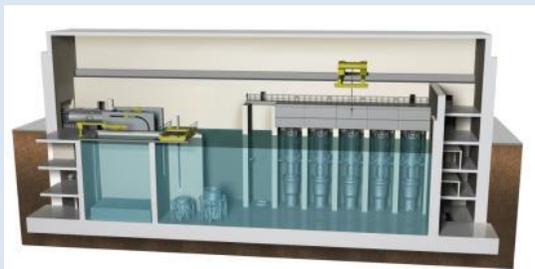
(出典) https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/12/sp_necg_1208-12.pdf

<NuScale VOYGR (SMR) >

- ・最大12基の**モジュールを個別に起動・停止、制御棒調整、タービンバイパス制御**により、**様々な時間単位での負荷追従運転が可能**。



NuScale VOYGRによる負荷追従イメージ



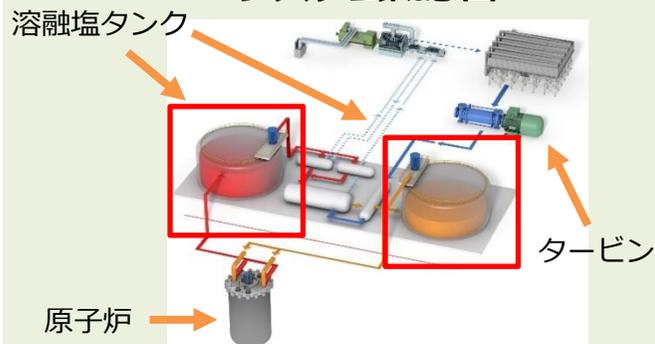
NuScale VOYGR 外観図

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

<TerraPower 高速炉 Natrium>

- ・高速炉の高温と蓄熱性能に優れた**溶融塩タンク**を組み合わせ、負荷追従が可能。
- ・蓄熱システムにより、5時間半以上にわたり、電気出力を34.5万kWから50万kWまで引き上げることが可能。
- ・**溶融塩タンクによる蓄熱システムは、出力変動する再エネの補完として既に実用化**。

システム概念図



1 - 3 - 4 ②. 変動電力の拡大に伴う電力供給途絶・価格変動リスクへの対応（分散型・可搬型電源）

- 米国等で、石炭火力に依存する僻地の脱炭素化や電力需要の分散・多様化へのニーズが存在。
- こうしたニーズを満たす手段として、小型分散型電源としてのマイクロ炉、系統分離された可搬型電源としての船舶搭載炉等に脚光。

マイクロ炉

- 極地や未開発地、さらには海洋上や宇宙領域など、過酷な環境において、長期間、燃料交換なしに、エネルギーの安定供給が可能。
- 米国国防総省を中心に遠隔地での軍事オペレーション等を支える技術として、2025年の実用化を目指し、約650億円の予算措置を実施。
- 宇宙領域においても、原子力の活用が米国等で検討されている。NASAは2030年までに小型原子炉を設置し、月面探査の電力源にすることを検討。
- 国内でも三菱重工が、災害時の非常用電源、遠隔地などで多目的に利用できるマイクロ炉を開発中。



原子力を利用した宇宙探査船

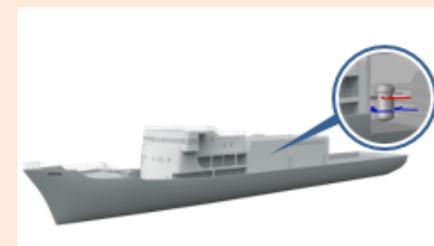
(出典)NASAのHPより引用

モバイル型SMR（船舶搭載炉）

- 長期間燃料交換不要な燃料を採用し、発電船により、離島・島嶼地域などの僻地や災害地等での電源供給が可能。ロシアで世界初の洋上原発の商業運転が2020年に開始。
- 国内でも三菱重工が、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的安全性を有した船舶搭載炉を開発中。独自IPで、陸上発電用として出力30万kWの炉、船舶搭載用として革新的な窒化物燃料を使う出力3万kWの炉を開発。



発電用炉

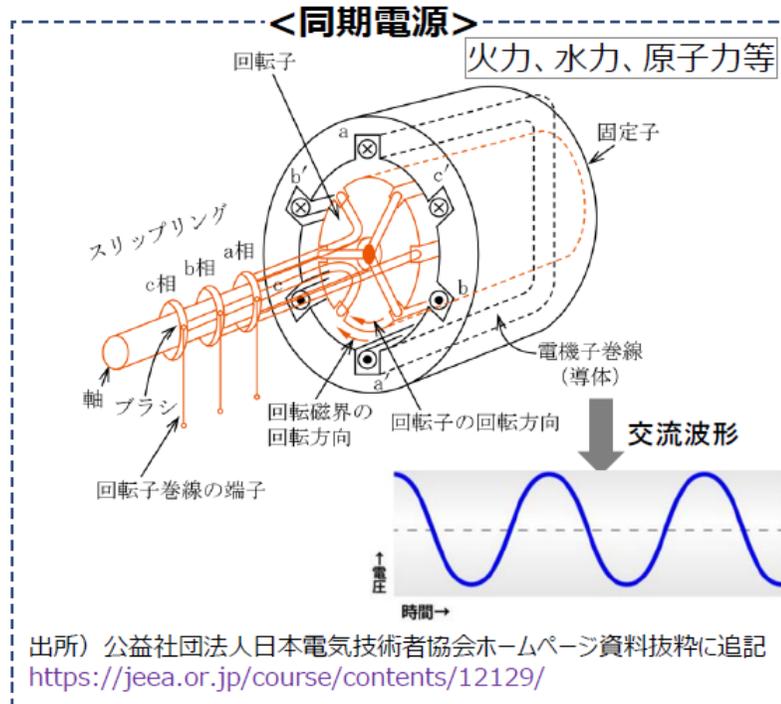


船舶搭載炉

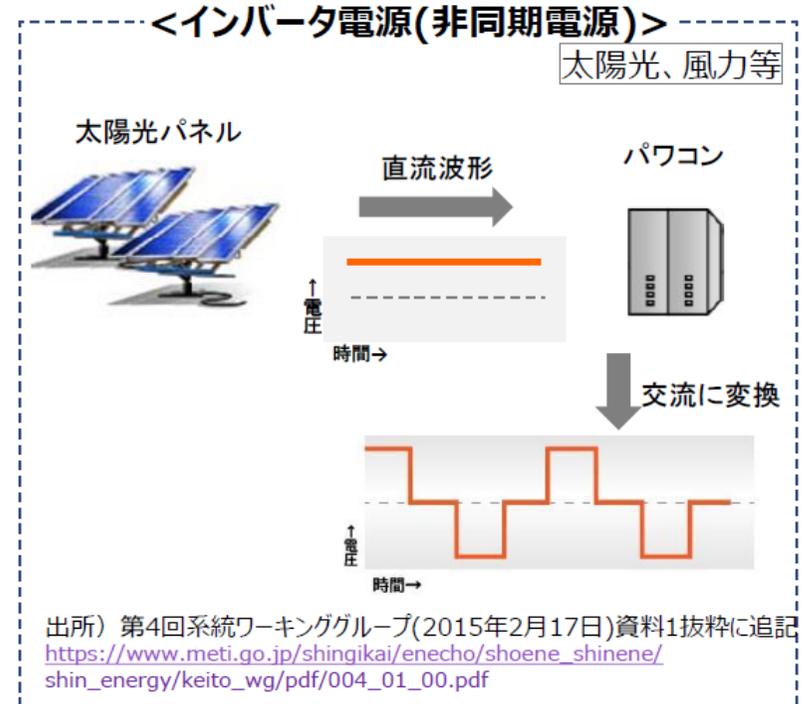
多目的利用小型PWR

1 - 3 - 4 ③. 変動電力の拡大に伴う電力供給途絶・価格変動リスクへの対応(慣性力)

- 火力、原子力、水力などの同期電源 (50Hzや60Hzの回転速度で回る電源) は、タービンの回転で発電しており、周波数や電流の急激な変化に対して、同じ周期で回転を維持する力(慣性力) が働くため、発電を継続し、周波数を維持する機能を有する。
- 電力系統内の太陽光、風力、蓄電池などの非同期電源の割合が増大し、電源脱落時のリスクが高まる中で、一定程度の慣性力を維持していくことが必要。



【回転機】
回転エネルギーあり
慣性力・同期化力あり

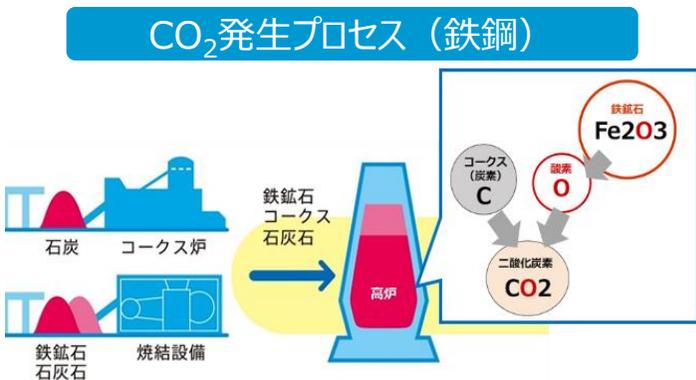


【静止器】
回転エネルギーなし
慣性力・同期化力なし

※風力発電は接続方法によっては、慣性力を提供可能な機能も存在するものの、国内においてはPCSを挟むことが一般的であるため、慣性力・同期化力を見込めない。

1 - 3 - 5. エネルギー多消費産業の空洞化リスクへの対応

- 素材産業におけるCNに向けては、水素還元製鉄や熱・電力のカーボンフリー化が必須に。
CO₂を排出しない大量・安価かつ安定的な水素・熱・電力の供給が求められる。



(出典) 一般社団法人日本鉄鋼連盟資料を基に作成



(出典) 一般社団法人セメント協会資料を基に作成

産業	現状の課題	今後の取組
鉄鋼業	・石炭による還元反応でCO ₂ が発生	・高炉を用いた 水素還元 ・ 直接水素還元・電炉 技術開発
化学工業 石油石炭製品	・ナフサクラッカーの 加熱でエネルギー消費 ・廃棄時の 燃焼 でCO ₂ が発生	・廃プラスチック・廃ゴムやCO ₂ のプラスチック原料化技術の確立 ・人工光合成によるプラスチック原料製造 ・ 熱源のカーボンフリー化
機械製造業 金属製品製造業	・製造・使用時に 電力を消費	・省エネ、 電力のカーボンフリー化
窯業・土石業	・石灰石の 燃焼 でCO ₂ が発生 ・キルンの 加熱 で エネルギー消費	・石灰石燃焼時のCO ₂ 回収、CO ₂ 吸収コンクリートの開発 ・CO ₂ を用いた廃コンの原料化 ・ 熱源のカーボンフリー化
パルプ・紙・紙加工業	・パルプの 加熱 で エネルギー消費	・ 熱源のカーボンフリー化
非鉄金属製造業	・電気分解で 電力を消費	・電力のカーボンフリー化

出典：国立研究開発法人国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ」（2019年度確報値）

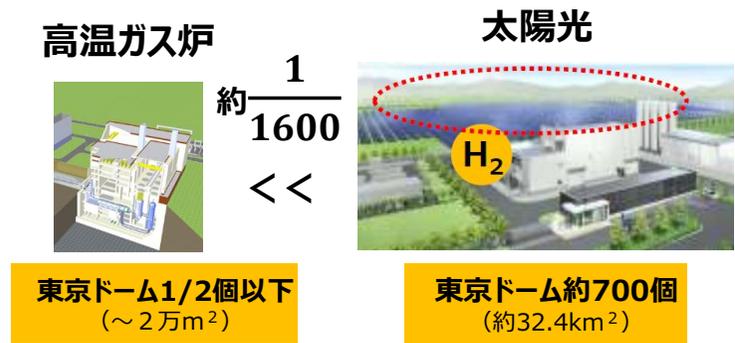
1-3-5. エネルギー多消費産業の空洞化リスクへの対応（産業部門の水素・熱利用）

- **鉄鋼等の産業部門**では、水素還元製鉄等の新たな取組が進められており、**大規模かつ経済的な熱・水素の安定供給**が必要。
- 高温ガス炉で、**少ない敷地面積**で、**天候に左右されず**、**大規模かつ安定**に熱・カーボンフリー水素の**自給自足**の可能性。鉄鋼・化学等の産業部門での脱炭素化を実現する可能性。

カーボンフリー社会での高温ガス炉活用のイメージ



製鉄用高炉 1 基に水素を供給するのに必要な敷地



高温ガス炉の活用により、カーボンフリーで大規模・安定の水素製造が可能

	コジェネシナリオ① (高温ガス炉1基当たり)	コジェネシナリオ② (高温ガス炉1基当たり)	必要量 (高炉1基 (鉄鋼400万t/年)当たり)
水素製造量	約9億 Nm ³ /年 (約12万Nm ³ /hr)	約7億 Nm ³ /年 (約9万Nm ³ /hr)	27.2億Nm ³ /年 (約31万Nm ³ /hr)
発電量	約160 MWe	約200 MWe	250 MWe

※2050年政府目標：2000億Nm³/年
 ※高温ガス炉コジェネプラント（三菱重工業）に基づくデータ

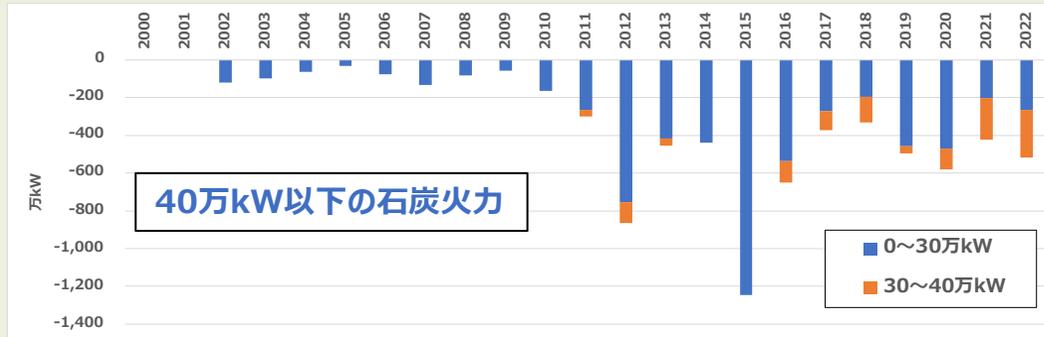
1 - 3 - 5. エネルギー多消費産業の空洞化リスクへの対応（石炭火力代替①）【再掲】

- 米国では、今後老朽石炭火力の多くが閉鎖され、石炭火力の設備容量が同規模のSMRのリプレイスにより、既存送電線の活用及び労働者の再雇用ができると分析。

(出典) US DOE, 2022 「NUCLEAR ENERGY SUPPLY CHAIN DEEP DIVE ASSESSMENT」

- 米国では、天然ガスの価格低下や地球温暖化対策の加速に伴い、石炭火力の多くが閉鎖される見通し。
- 1975年までに建設された30万kW以下の石炭火力は、6,000万kW程度あり、SMRが有効な代替電源となる。
- 同じサイトで、石炭を原子力に置き換えることができれば、既存の送電線が活用でき、送電線投資の抑制が可能。
- 石炭火力と原子力の技術専門性が類似しており、石炭火力での労働者を広く原子力発電所で再雇用できる。

石炭火力の閉鎖発電所の設備容量（米国）



石炭火力とNuScale SMRの必要な技術者の比較

石炭火力	人数	類似性	SMR	人数
運転管理者	5	低い	上級原子炉運転員	5
制御室運転員	10	低い	原子炉運転員	15
現場運転員	15	高い	補助運転員	25
化学物質管理	4	中間	化学物質管理	14
メンテナンス管理者	2	中間	メンテナンス管理者	3
機械 技術者	12	高い	機械 技術者	21
I&C 技術者	9	中間	I&C 技術者	10
電気 技術者	5	高い	電気 技術者	11
技師	11	高い	技師	13
警備員	20	高い	警備員	48
その他	14	中間	その他	72
合計	107		合計	237

(出典) US EIA, 2022
「Preliminary Monthly Electric Generator Inventory」

1 - 3 - 5. エネルギー多消費産業の空洞化リスクへの対応（石炭火力代替②）【再掲】

- 世界のカーボンニュートラルの潮流の中、石炭火力発電を段階的に廃止する流れ。
- 近年、オランダやポーランドでは、石炭火力廃止に加え、原子力発電所の新規建設の方針を公表。

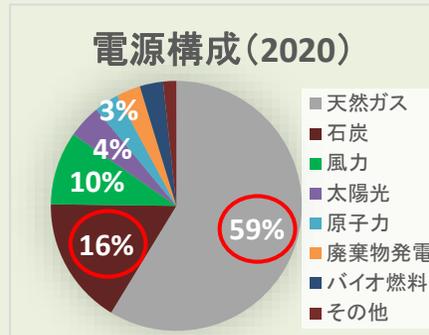
オランダ

- 2015年、石炭火力を2030年までに段階的に停止する法案を可決。
- 2021年、新政権における連立合意文書にて、稼働中のPWR1基（48万kW）の運転延長と、新たに2か所で原子力発電所の建設方針を明記。

原子力はエネルギーミックスにおいて太陽光、風力、地熱を補完ことができ、水素製造も可能。我々のガス輸入への依存も低減。



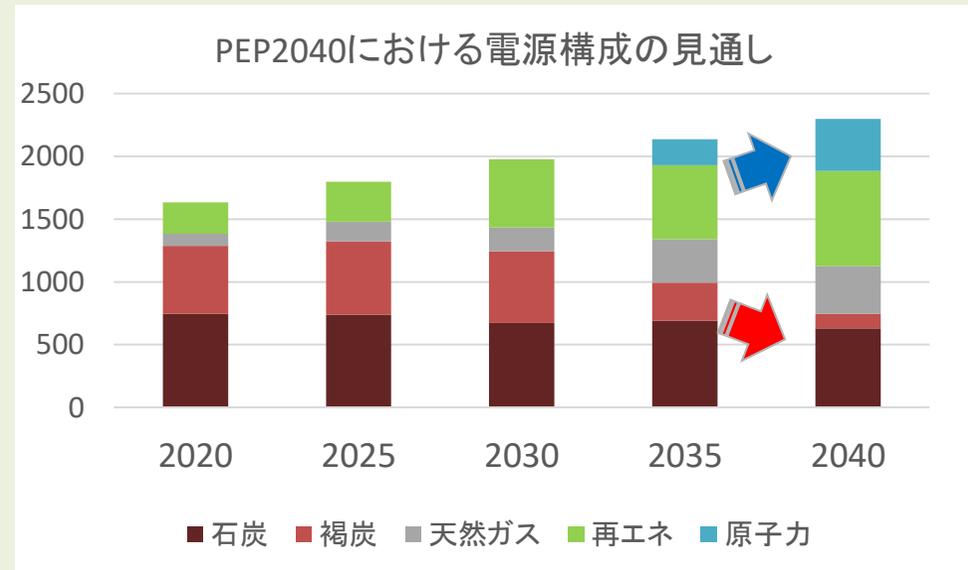
ルッテ首相率いる新連立政権



(出典)「海外諸国の電気事業第2編(2020年)」

ポーランド

- 現状、火力発電が約7割を占めているが、今後石炭火力の依存度を低減し、2040年代には廃止予定。
- 2021年、大型軽水炉を2043年までに6基導入する方針を公表(2033年に初号機の運転開始)。

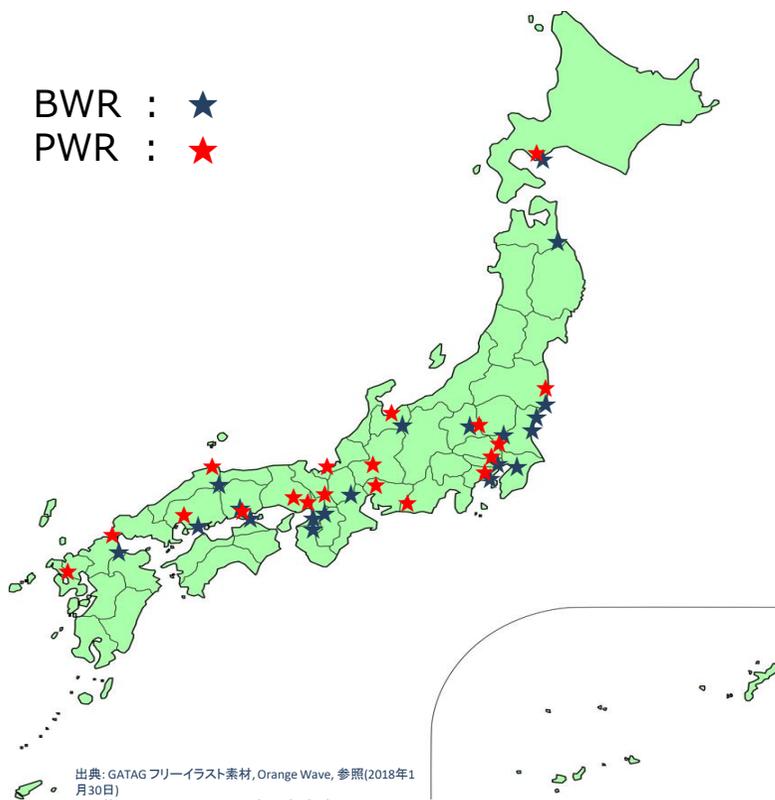


(出典)「2040年に向けたポーランドエネルギー政策(PEP2040)」

1 - 3 - 6. サプライチェーン途絶・地政学リスクへの対応（技術自給率の維持）

- 原子力の技術は、当初は海外からの機器輸入割合も高かったが、**1970年以降に営業運転を開始した原発の多くで国産化率90%を超えており、国内企業に技術が集積されている分野**である。
- 様々な産業分野でサプライチェーンの国内回帰の声もある中で、**原子力産業は、安定的に電力を供給するためのサプライチェーン（約1,000万個の部品点数）を国内に持つ強み**がある。

BWRおよびPWRの主なサプライヤマップ



原子力発電所の国産化率の推移

発電所	東海 (黒鉛炉)	美浜1号 (PWR)	高浜2号 (PWR)	美浜3号 (PWR)	柏崎刈羽5 (BWR)	柏崎刈羽7 (ABWR)
運転開始年	1966	1970	1975	1976	1990	1997
国産化率 (%)	35%	58%	90%	93%	99%	89%

廃炉決定済

(出典) 原子力発電の効率化と産業政策 国産化と改良標準 (RIETI)、電力会社HP

【参考】原子力機器の国産化率向上の歴史

- 1960年代、**エネルギー安全保障や最先端技術育成**の観点から、政府支援の下、海外企業に頼らない技術開発・建設が進められ、電力会社・機器メーカーによる原子力機器の**国産化**が進んだ。
- 原子力機器産業は**高付加価値産業であり、他産業への波及効果も大きい**として、1970年代後半以降、**改良標準化や新炉型開発等を支援**。

1960年代（初期原子力発電所建設時） ～国産化の推進～※1

1966年 海外企業が主契約となり、敦賀発電所、福島第一原子力発電所、美浜第一発電所の建設計画が確定。※2

1966年 日本開発銀行が「原子力発電機器国産化」融資制度を創設。※3

1967年 島根原子力発電所建設計画において、日立が国内事業者として初めて単独で主契約。

1974年 島根原子力発電所が運転開始。

※1:密接な共同研究を通じ、**多くの国産技術**（格納容器、圧力容器、炉内構造物、炉内機器等）を取り入れた。

※2:敦賀・福島第一はGE、美浜はWH。国内プラントメーカーが下請けとして技術を吸収しながらノウハウの吸収や人材育成を進めた。

※3:電力会社が原子力機器を購入する際に行う資金調達について、低金利・長期間の融資を可能にする制度。

1970～1980年代 ～改良標準化の推進※4～

1975～77年 第一次改良標準化

1978～80年 第二次改良標準化

（主な成果）

- 制御棒駆動機構の自動化
- 蒸気発生器検査の自動化
- 格納容器の大型化（保守点検スペースの拡大）等

1981～85年

第三次改良標準化

「機器、システムだけでなく、原子炉本体を含む自主技術を基本とした日本型軽水炉の確立を図る」として、軽水炉開発を支援。

（支援対象）

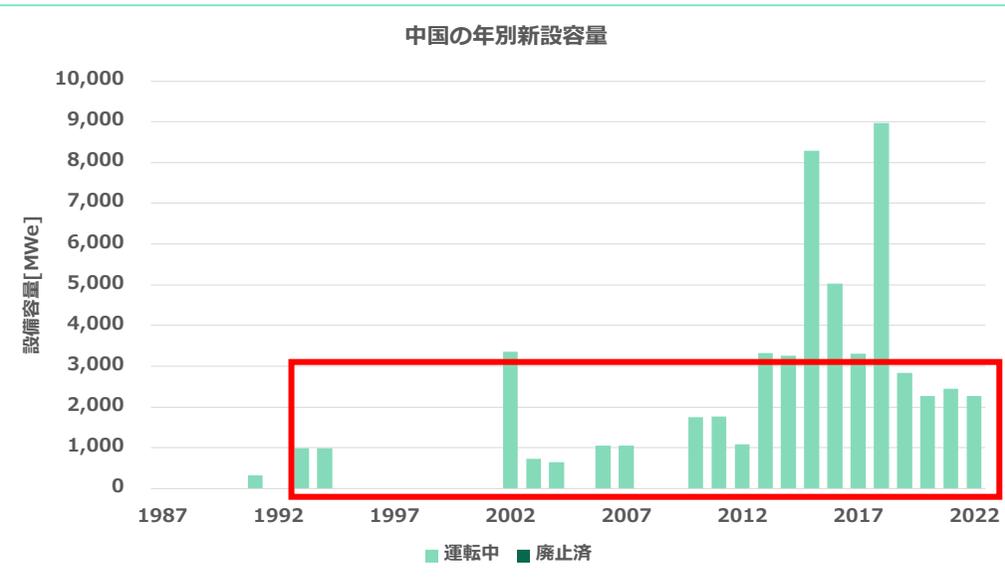
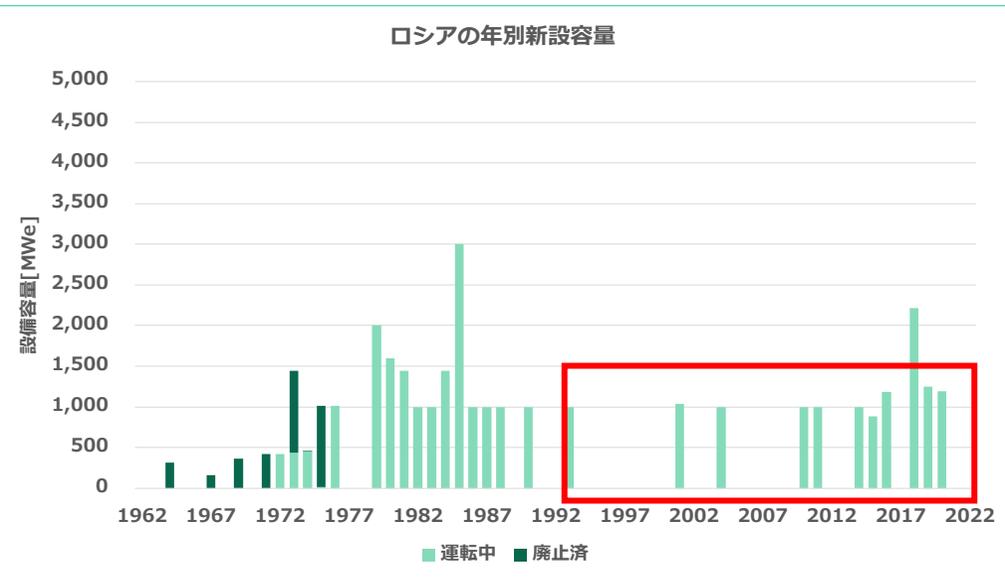
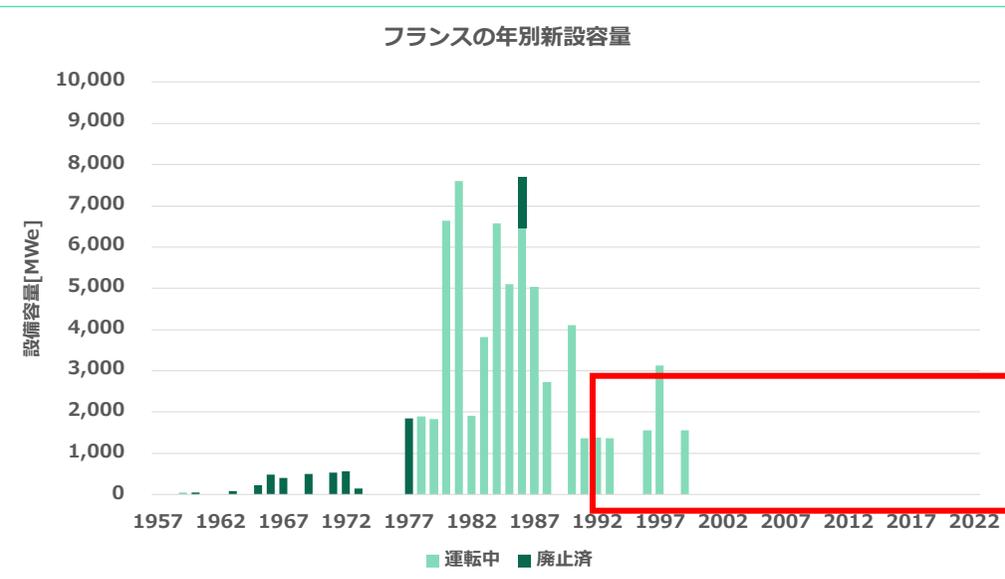
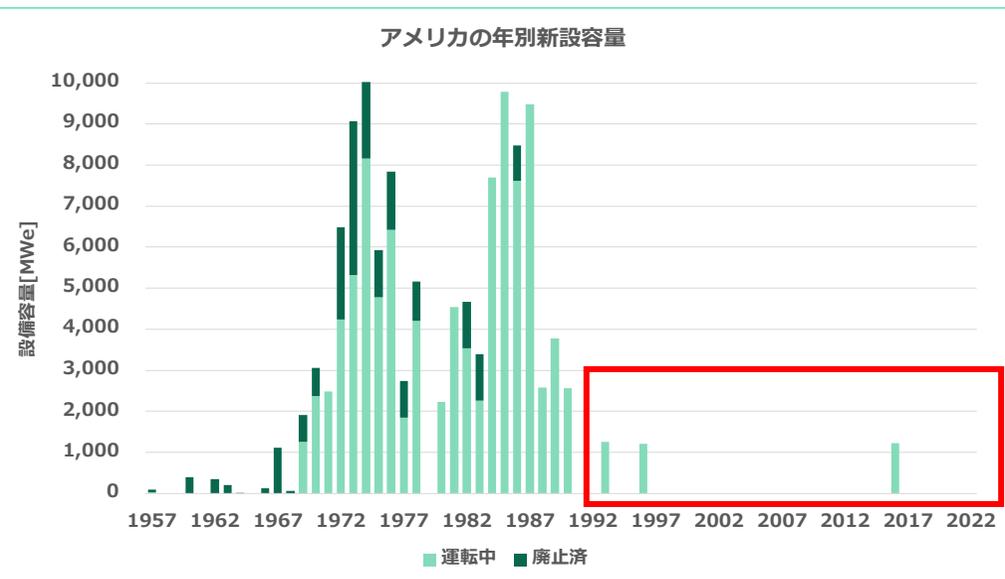
- 東芝、日立、GEによる改良型A-BWR
- 三菱重工、WHIによる改良型A-PWR

※4:改良標準化の主な目標は、**プラント稼働率の向上と被曝低減**の2つとされた。また、1980年頃に日本型標準化プラントの仕様を策定することが目標とされた。

発電所 （運転開始年）	敦賀1号機 （1970）	島根1号機 （1974）	美浜3号機 （1976）	浜岡2号機 （1978）	玄海2号機 （1981）	福島第二1号機 （1982）
国産化率	55%	94%	93%	94%	99%	98%

1-3-6. サプライチェーン途絶・地政学リスクへの対応（新規建設プロジェクト）

● 米仏では直近20年ほどはほぼ新規運転開始がない。一方、中露は継続的に新規建設を実施。



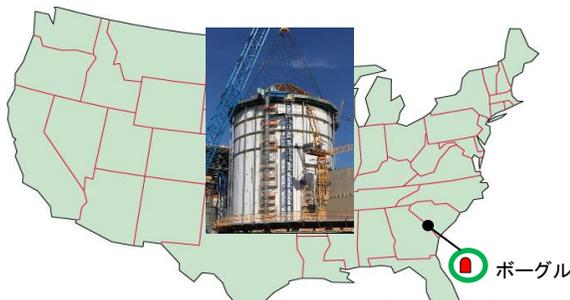
出典：IAEAのPRIS（Power Reactor Information System）のデータベースより作成

【参考】建設の空白による原子力サプライチェーンの喪失例

● 米国やフランスでは、**長期間原子力発電所の建設がなかったことで原子力サプライチェーンが弱体化**。近年の新設案件では建設遅延やコスト増加が発生し、未だ運転開始に至っていない。

米国

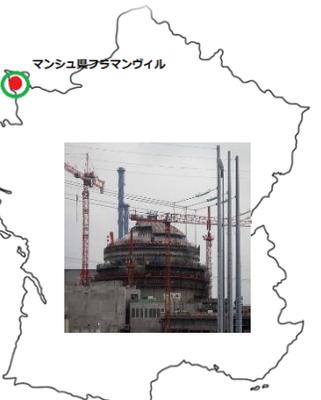
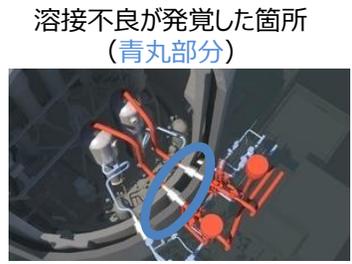
- スリーマイル原子力発電所の事故以降新設案件がなく、ボーグル原発3・4号機は、**35年ぶりの新設着工原発**として、2013年に建設開始。
- ウェスティングハウス（WEC）の新型炉AP1000の世界初の建設（FOAK炉）。
- 長期間建設がない間、**米国では原子力に関与する事業者が減少し、主要資機材を日韓等の海外から輸入**。
例）圧力容器（韓 斗山重工業）、格納容器（IHI）、タービン（東芝ESS）
- ✓ 米国機械学会が認証する原子力規格（N-Stamp）取得企業が**600社（1980年）から200社以下（2007年）に減少**。
- ✓ 米国エネルギー省は、2005年、米国企業には**第三世代原子炉の主要資機材（原子炉圧力容器、蒸気発生器等）を製造する能力はないと評価**。
- ✓ 2002年以降、**原子炉圧力容器上蓋（取り替え用）は全て海外に依存**。
- 建設ノウハウの喪失や同時多発テロを受けた規制強化等の影響で**工期6年、建設費用約160億ドル以上増加**。



炉型	PWR (WEC AP1000)
出力	110万kW×2基

フランス

- フランビル原発3号機は、1993年着工のシボー2号機以来**14年ぶりの新設着工原発**として、2007年に建設開始。
- 仏電力会社EDFより仏フラマトム社が一括受注し、新型炉EPRの仏国内初の建設。
- ほとんどの資機材をフランス国内のサプライチェーン（フラマトム、アルストム等）でまかなうも、**原子炉容器上蓋の鋼材異常や冷却系配管の溶接不良等が発覚し、工期11年以上、建設費用約95億ユーロ増加**。
- ✓ 仏規制庁長官は「**新設にかかる原子力産業界の能力に対する疑念が生じている**」とし、仏政府は元PSAフォルツ氏に原因分析を依頼。
- ✓ フォルツ報告書では、「新規着工のない15年の間にEDFの**プロジェクトマネジメント能力や部品メーカーの製造能力が低下し、特に溶接の技術や人材を喪失した**」と指摘（2019年10月）。



炉型	PWR (フラマトムEPR)
出力	163万kW

(出典) 令和元年度原子力の利用状況等に関する調査（国内外の原子力産業に関する調査）等の公表情報を資源エネルギー庁で整理

1-3-6. サプライチェーン途絶・地政学リスクへの対応（実験炉・照射炉の整備）

- 燃料、炉心・構造材料、制御材等の開発では、**照射試験**（照射後試験を含む）**により許認可に必要な炉内挙動データを取得**するとともに、**照射環境下での健全性や性能を実証することが不可欠**。
- プラント安全性向上に係る技術開発、炉心・プラント特性評価等の観点からも**実験炉における各種試験やデータ取得が不可欠**。
- **世界でも実験炉が老朽**する中、**実験炉の確保・整備**が継続的な革新炉開発を進める上でも**肝要**。

- **国内における研究炉の現状**（臨界実験装置を除く）
 - **高出力の「常陽」の運転停止、JMTRの廃炉等**により、国内での照射試験等が**困難な状況**
 - なお、新規制基準に適合して運転を再開している研究炉は、JRR-3, NSRR, HTTR（以上、原子力機構）、KUR（京大）*1、UTR-KINKI（近大）のみであり、革新炉開発の観点からは**不十分**

*1) 2026年に運転停止し、廃炉に移行

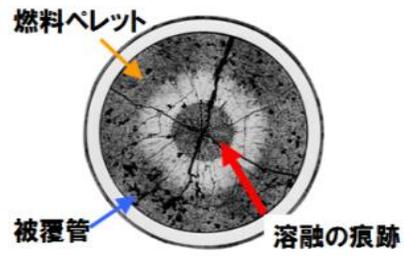
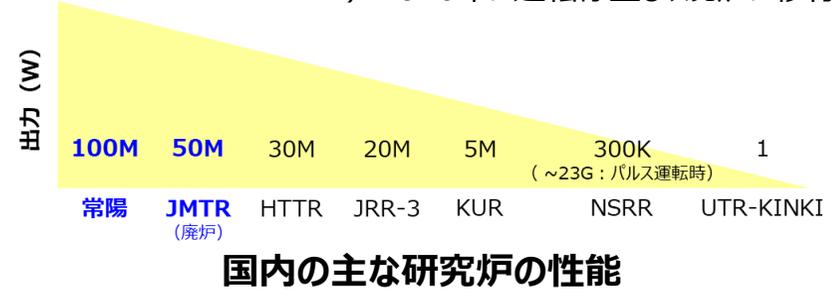
● 主な試験ニーズ

【燃料、炉心・構造材料、制御材等の開発】

- 酸化物燃料、金属燃料、炭窒化物燃料、マイナーアクチノイド（MA）含有燃料等の定常照射試験、限界性能試験（PTM*2、RTCB*3）
- 燃料被覆管等の炉心材料、構造材料の照射試験
- 中性子吸収材（B₄C等）の照射試験

【プラント試験・技術】

- 安全性向上（自己作動型炉停止機構（SASS））
- 設計基準を超える事故（BDBA）模擬、自然循環
- プラント監視（燃料破損検知、構造健全性監視技術等）



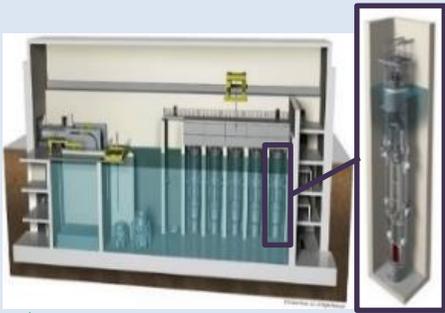
*2) 燃料溶融限界線出力試験、 *3) 燃料被覆管が破損に至るまで照射を継続する試験

1 - 3 - 6. サプライチェーン途絶・地政学リスクへの対応（国際連携）

- 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。

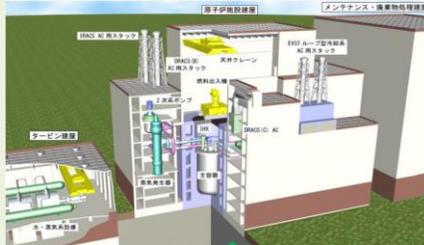
小型軽水炉(SMR)

- 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

- 化学的に安定なヘリウム冷却材・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



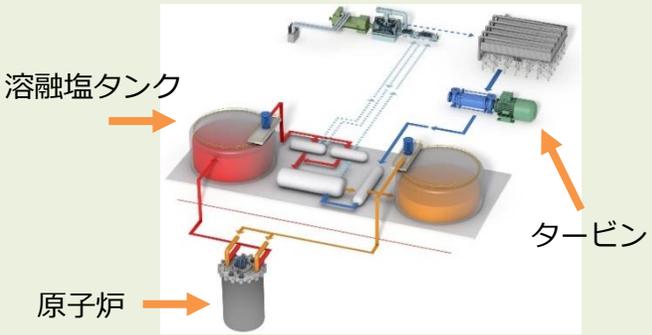
【参考】高速炉：ビル・ゲイツ氏のテラパワー社と協力覚書締結

- テラパワー社は**2028年「Natrium炉」運開**目指し、米エネルギー省補助金（最大2,000億円）獲得。
- 日本に対しては、「**常陽」「もんじゅ」の経験**等に期待。**JAEA保有の試験設備**にも関心。
- **本年1月26日にテラパワー・日本原子力開発機構（JAEA）・三菱重工業・MFBR**間で**覚書を締結**。
- 本覚書に基づき、**2022年春・夏頃の本契約**に向け、議論を継続していく。 ※MFBR：三菱FBRシステムズ株式会社

<特徴>

- ・小型ナトリウム冷却高速炉(34.5万kW)
- ・米西部ワイオミング州に立地予定。
（**石炭火力の代替**を想定）
- ・ナトリウムは熱を伝えやすく、全電源喪失時にも**自然循環で除熱**可能。
- ・蓄熱システムを組み合わせ、**負荷追従**が可能（再エネとの親和性あり）。

システム概念図



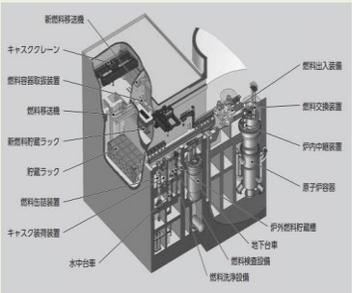
<協力の可能性のある分野>

- ・「常陽」「もんじゅ」等で、日本が保有する**高速炉のノウハウや試験設備**(※)
- (※)JAEA保有の大型ナトリウム試験設備 (AtheNa) 等
アテナ
- ・日本企業が持つ**機器設計・製造技術**



「AtheNa」

世界でも希な大型設備。
ナトリウムの挙動を評価可能。



「燃料取扱設備」

コンパクトで経済的な燃料取扱設備等、日本企業の製造技術に期待。

<ビルゲイツ氏の発言>

- ・原子力は、**気候変動対策において理想的なエネルギー**。
- ・事故のリスクは、**イノベーションによって解決可能**。
- ・テラパワーは**第4世代原子炉を開発し、安全性は非常に高い。世間の認識を変える**には劇的に違うものを出す必要。
- ・「**Natrium**」は**エネルギー産業の「ゲームチェンジャー」**になる。

※原子力エネルギー会議での講演及びワイオミング州メディアへのビデオメッセージ（2021年6月）より引用



【参考】SMR : NuScale社 (NuScale Power Module) プロジェクトへの参画を目指す

- 2007年にSMR開発を目的に設立された米国企業。米国エネルギー省 (DOE) の支援で開発を進め、**2029年に初号機**をアイダホ国立研究所内で運転開始予定。

<特徴>

- ・ PWRタイプ。1モジュールの出力は5～7.7万kWで、最大12モジュールを設置可能 (最大60～92万kW)。
- ・ 蒸気発生器と圧力容器の一体化により、小型かつシンプルな設計で安全性を向上。自然循環により、冷却ポンプ、外部電源なしで炉心を冷却可能。
- ・ モジュール工法で、工期短縮、初期投資抑制の可能性。



アイダホ国立研究所内にて建設中

<国内企業の関わり>

- ・ 2021年に**日揮・IHI**が、2022年に**JBICが出資**を発表。
日揮：40百万ドル
IHI：20百万ドル
JBIC：110百万ドル
- ・ 経産省予算にて、**日揮・IHIが、モジュール・メンテナンス機器等の課題**についての実証を目指す。

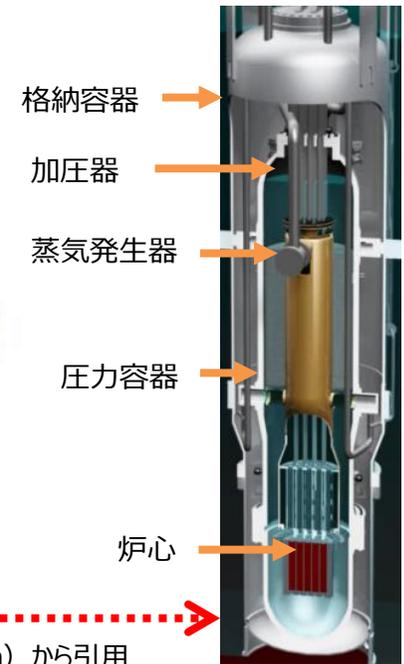


NuScale SMR 概念図

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

<米国政府の予算措置>

- ・ 2013年以降、NuScaleに対し、**530億円の開発支援**。
- ・ 2020年、**今後10年間で運営主体**に対し、**13.55億ドルの追加支援**を行うことを発表。

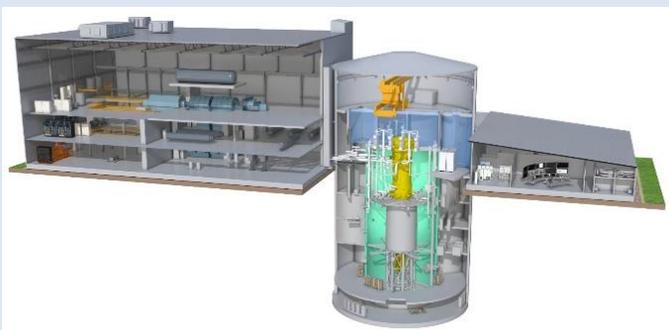


【参考】SMR：GE Hitachi社（BWRX-300）と日立GE社が共同開発

- 米GE Hitachi社と日立GE社が共同開発する電気出力30万kW級のBWR型小型モジュール炉。
- 2021年12月2日、カナダの電力会社OPG社が最速2028年運転開始を目指すプロジェクトに、米GE Hitachi社のBWRX-300を選定。
- 今後、日本国内でも、日立GE社の設備を活用した要素技術の実証を実施予定。

<特徴>

- ・ BWRタイプ。電気出力30万kW。
- ・ 自然循環の利用によりポンプを排除、受動的冷却システムにより電源・注水設備・運転員操作なしで7日間冷却可能。
- ・ 圧力容器に隔離弁を直付けすることで、冷却材喪失事故の発生確率を削減。



BWRX-300概略図

<カナダプロジェクトの概要>

- ・ オンタリオ州（人口最大州・首都オタワが位置）にて、州営オンタリオ電力がSMR建設に向け、炉型選定を実施。
- ・ 昨年12月に、米GE Hitachi社のBWR型軽水炉のSMRである「BWRX-300」が正式に採択。
- ・ 今後、2028年までの初号機建設を目指すためにサプライチェーン構築等が進められる見通し。



BWRX-300完成イメージ図

<国内企業の関わり>

- ・ 経産省予算にて、日立GEの実温・実圧で試験できる設備を活用し、要素技術の実証に向けて研究開発を実施中。

ハッスル
日立多目的蒸気源試験装置(HUSTLE)
実温・実圧にて安全性や性能を確認できる試験設備



【参考】高温ガス炉：英国、ポーランドとの国際協力を強化

● 英国は2030年代初頭の実証炉建設を目指し、日米加との国際連携を追求。

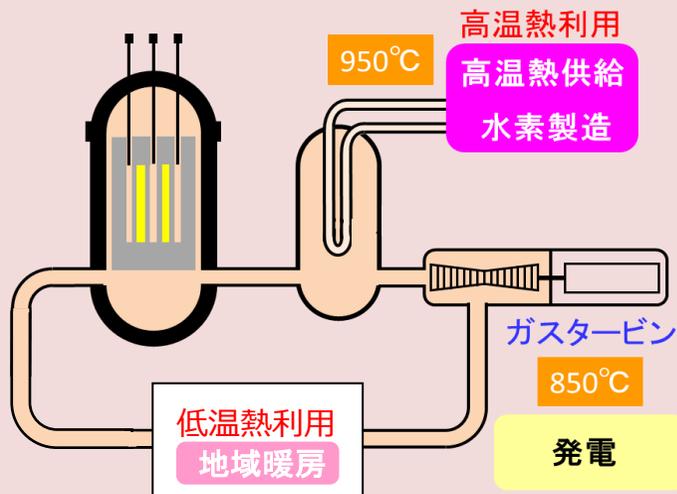
※2020年、日本原子力開発機構(JAEA)と英国国立原子力研究所(NNL)、原子力規制局(ONR)との間で、研究開発協力や情報交換のための覚書を締結。

● ポーランドでは、実験炉の建設を目指し、2021年から約18億円の予算措置。ポーランド国家原子力研究センター(NCBI)からJAEAに協力依頼。

<特徴>

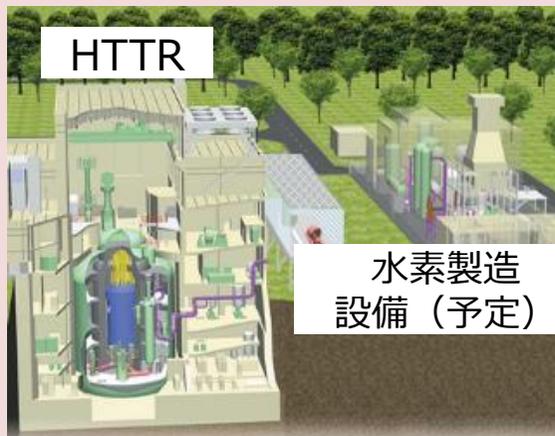
- ・ **高温**で**安定**なヘリウム冷却材
- ・ 高温耐性で**炉心溶融なし**
- ・ 950℃の熱の利用が可能(**水素製造**等)

システム概念図



<協力の可能性のある分野>

- ・ 試験研究炉「HTTR」の技術
- ※世界最高温度950℃の出口温度達成
- ・ 950℃の高温を利用した**大規模・安定のカーボンフリー水素製造技術**



<英国の動向>

革新実証炉プログラムの対象として、**高温ガス炉を選定**したことを公表できることを**嬉しく思う**。※Nuclear2021（2021年12月）での発言



ハンス ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS) エネルギー担当大臣

高温ガス炉が**高温熱、水素**等を供給することで、**脱炭素化に役立つ**可能性は非常に大きい。※WNN HPより引用



ハワース 国立原子力研究所(NNL)CEO

1-3-6. サプライチェーン途絶・地政学リスクへの対応（第三国協力）

- 気候変動対策に加え、今般のウクライナ情勢や世界的なエネルギー需給のひっ迫の観点から、**東欧や東南アジア等の地域**においても、SMR等を含めた**原子力発電所新規導入の関心**が高まっている。
- 我が国では、日米グリーンエネルギーパートナーシップ（JUCEP）の下、**米国と連携し、東南アジア等へのキャパビル活動を実施中**。なお、米国は昨年11月のCOP26にて、ルーマニアでのNuScale社製SMR建設計画を公表するなど、**積極的な第三国展開**を指向。

NuScaleの他国展開・我が国の取組

- NuScaleは、中露に追随して開発・実証・商業化を進めるべく、世界各国へのSMRの展開に着手。
- 2021年に日揮・IHI、2022年にJBICがNuScaleへの出資を発表。
 - 日揮 : 40百万ドル
 - IHI : 非公表
 - JBIC : 110百万ドル
- JBICによる、出資等を活用した案件形成やリスクテイクを通じ、NuScaleの海外展開への参画や、日本企業の海外事業展開の支援を実施。

新規導入に関心を表明している国々の例

ルーマニア

- 2021年11月、米国政府とルーマニア政府が協力してルーマニアに**NuScale社製SMRの建設計画を発表**。



ケリー特使とヨハニス大統領の会談の様子
※Energy Industry Review記事より引用。

フィリピン

- 2022年2月にドゥテルテ前大統領が**エネルギーミックスに原子力を含めるとする大統領令に署名**。
- 2022年5月の大統領選挙で、**原子力発電の導入に積極的なマルコス氏が当選**。

我が国の原子力新規導入国等支援

①原子力専門家の日本への招聘

- 国際原子力機関（IAEA）と連携した研修や原子力発電所の視察等を通じ、我が国の安全に対する取組・技術を共有。

②現地セミナー等の開催

- 日本から専門家を派遣し、現地セミナー等を通じて、原子力の地元合意や人材育成等の支援を実施。

1 - 3 - 7. 公正なトランジションが進まないリスクへの対応（経済・雇用への波及①）

- 原子力産業による経済・雇用への波及効果について、各国試算によると、年間一定の経済効果や雇用を促す効果があるとしている。

	年間当たりの 経済効果 (円換算※)	雇用数	推定年度 (年)	原子炉（基）				サイクル関連施設 (稼働中のみ)		
				運転	廃止措置	建設	合計	商用 再処理	濃縮	燃料加工 (U集合体)
米国 	400億ドル (5兆2,000億円)	7万人	2012	93	40	2	135	—	1	2
英国 	64億ポンド (1兆500億円)	6.6万人	2016	11	34	2	47	1	1	2
仏国 	490億ユーロ (6兆7,000億円)	18万人	2019	56	15	1	72	1 (2系統)	1	1
韓国 	20兆7,300億ウォン (2兆1,100億円)	3.5万人	2019	24	2	4	30	—	—	2
カナダ 	60億加ドル (6,000億円)	3万人	2017	19	6	0	25	—	—	3
日本 	2兆1,000億円	4.9万人	2020	33	27	2	62	1 (建設中)	1	3

※：1米ドル：130円、1ポンド：164円、1ユーロ：137円、1ウォン：0.102円、1加ドル：101円換算

※各国で試算された原子力産業による年間あたりの経済効果（米国・仏国・韓国・日本は売上高総計、英国・カナダは粗付加価値）。

出典：原子炉・サイクル関連施設の情報はIAEA資料を基に作成、経済効果・雇用数は各国公表情報を基に作成

1-3-7. 公正なトランジションが進まないリスクへの対応（経済・雇用への波及②）

- 諸外国においては、原子力発電の建設により、さらに数千人以上の雇用、数千億円程度の経済効果を見込むとする試算も。

AP1000

米国 ヴォーグル3・4号
(建設中：1,250MW×2)

- ✓ ピーク時**6,000名**以上の雇用が創出
- ✓ 約52億ドル（**6,800億円**程度）の経済効果

※経済効果は“代替発電と比較した顧客への価値”と表現されており、明確な算出方法等は記載されていない



EPR

英国 ヒンクリーポイントC
(建設中：1,720MW×2)

- ✓ **25,000名**の雇用が創出
- ✓ 15億ポンド（**2,400億円**程度）の経済効果



OPR1000

韓国 新ハンウル3・4号
(建設中止：1,400MW×2)

- ✓ **1,750名**/年の雇用が創出
- ✓ 18,240億ウォン（**1,860億円**程度）の経済効果

※追加的な地域雇用のみ（既存の事業者の雇用等は除く）とみられる



※1米ドル：130円、1ポンド：164円、1ウォン：0.102円

※雇用数には、直接的な雇用以外に間接的な雇用も含まれる。

※各国で試算された、発電所建設による間接効果等も含んだ経済効果。

出典：経済効果・雇用数は各国公表情報を基に作成。画像は、Georgia Power HP, EDF HP, 原子力産業新聞より抜粋。

1 - 3 - 7. 公正なトランジションが進まないリスクへの対応（経済・雇用への波及③）

- 2021年12月2日、カナダの電力会社OPG社が**最速2028年運転開始**を目指すプロジェクトに、**米GE Hitachi社のBWRX-300を選定**。
- 本プロジェクトでは、製造・建設段階（7年間）で**約1,700名／年**、運転段階（60年間）で**約200名／年**の雇用創出を見込む（サプライヤ、地元企業の雇用を含む）。
- さらに、**雇用・経済効果での貢献以外**に、技能訓練の提供、人材面でのダイバーシティ&インクルージョンの考慮、地元への原子力技術の定着といった**社会面での貢献も計画**。

BWRX-300初号機建設に伴う雇用・経済効果の試算※1,2

雇用・経済効果※3	製造・建設段階 (7年間)	運転段階 (60年間)
雇用	12,000名 ⇒1年あたり1,700名	12,000名 ⇒1年あたり200名
所得	11.3億ドル(1,470億円)	7.7億ドル(1,000億円)
GDP	12.8億ドル(1,660億円)	10億ドル(1,300億円)
税収	4.6億ドル(600億円)	3.0億ドル(390億円)

※1:オンタリオ州への貢献分は、製造・建設段階で約9割、運転段階で約8割を見込む。

※2:1ドル=130円で換算。

※3:雇用、所得、GDPは、直接的、間接的（サプライヤ等）、波及的（地元企業等）効果を含む。また、税収には国、地方自治体への税収を含む。

BWRX-300建設における社会面での貢献計画（一例）

- 現場エンジニアから幹部職員までを対象とした**広範な訓練プログラム**を用意。運転や保守の訓練では、VR技術も活用。
- 人材面での**ダイバーシティ&インクルージョンの観点**で、女性や障害者雇用を推進。また地元の歴史的な背景から、先住民の雇用も推進。
- GE Hitachi社の長年にわたるBWRの技術を地元に着せ、原子力分野での**産業振興や人材開発**を目指す。

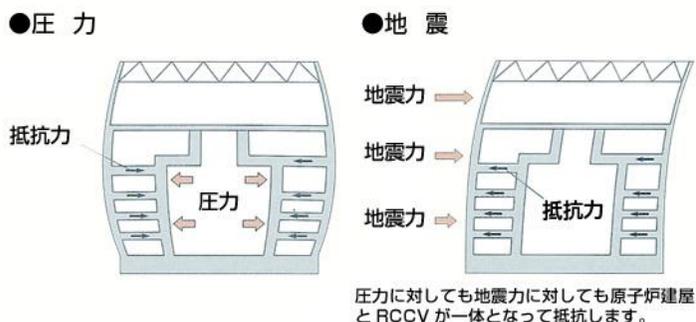
（出典） pwc「Transforming Canada's energy future:The socio-economic impact of GE Hitachi SMRs」

1 - 3 - 8. 核セキュリティリスクにも貢献する外部ハザードへの対応強化【再掲】

- 炉型革新によって、航空機衝突やテロを含む外部ハザードへの対応強化が可能。

一体構造・低重心で高耐震

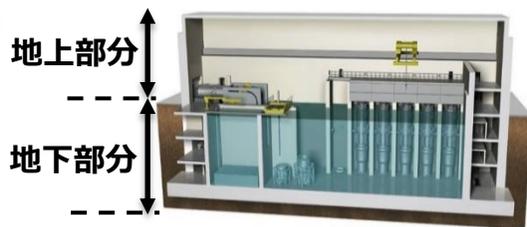
格納容器と建屋の一体構造により耐圧性、耐震性が向上。さらに重心が低くなり耐震性が向上



軽水炉 ABWR
(東芝ESS、日立GE、GE Hitachi)

半地下立地

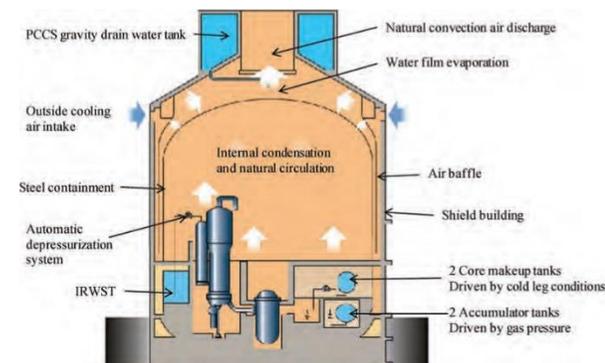
半地下立地で重要機器を地下配置により耐震・航空機衝突対策



小型軽水炉 VOYGR
(NuScale)

航空機衝突に耐える建屋

建屋外壁に鋼板・コンクリート複合モジュールと鉄筋コンクリート・モジュールを組み合わせた方式を採用し、航空機衝突に耐える設計 (※)



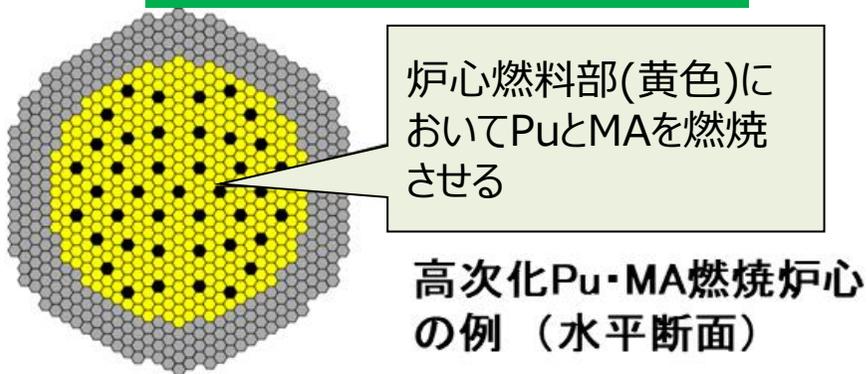
軽水炉 AP-1000
(ウェスチングハウス)

※2009年の規制変更で設計変更を実施。
2011年末に付則含め規則改訂了。

1 - 3 - 8. 核拡散リスクへの対応 (MA含有燃料等)

- **核拡散抵抗性 (PR)**^{1*} : 国家が核兵器や他の核爆発装置を獲得することを目的とした核物質の転用や未申告生産、技術の不正使用を防ぐための特性
- PRの程度は、技術的設計特性、運転形式、制度的取決め、保障措置の組合せで決まる。
- **高速炉でのMA含有燃料**といったPR向上につながる開発や第4世代原子力システムに関する国際フォーラム (GIF) における**PRの評価方法の整備**が進められている。

高速炉でのPuとMAの燃焼^{2*}



- PuにMAを含有させることでPuの分離が困難になる。
- 再処理プロセス中にPuが単体とならない手法も開発されている。

GIFの核拡散抵抗性の指標^{3*}

拡散の技術的困難性	技術の高度化や核物質取扱能力が必要であることによる固有の困難性。
拡散コスト	核拡散に対する多重障壁を突破するために必要な経済的・人的投資。
拡散時間	核拡散に対する多重障壁を突破するためにかかる最小時間。
核分裂性物質のタイプ	核爆発装置の有用性への影響の度合いに基づく核物質の分類。
検知確率	核拡散のセグメント又はパスウェイを検知する累積確率。
検知リソースの効率	NES に国際保障措置を適用するための、人、装置及び資金の利用効率。

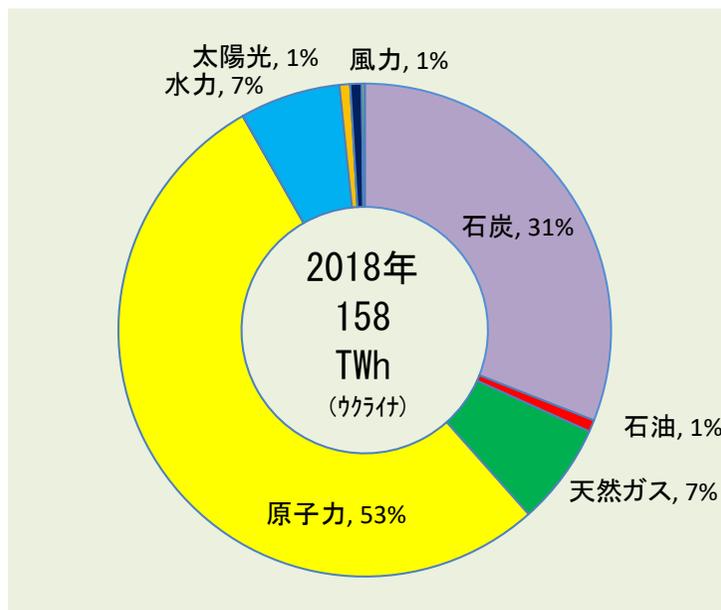
出典 :

1. JAEA 核不拡散・核セキュリティ総合支援センターHP、https://www.jaea.go.jp/04/iscn/archive/pr_is/index.html
2. JAEA 高速炉・新型炉研究開発部門HP、https://www.jaea.go.jp/04/sefard/randd/development/fc_rd/fuelcore/concept/
3. 小野 清、2018年3月、[http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/AESJ-2018S-SDG\(1\).pdf](http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/AESJ-2018S-SDG(1).pdf)

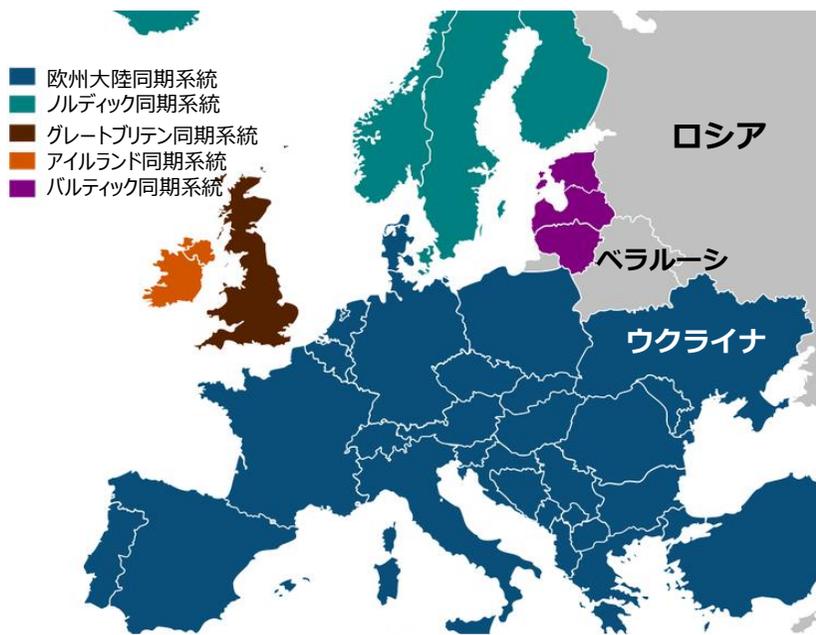
【参考】ウクライナ系統が欧州系統と同期接続を開始（3月16日）

- ウクライナの電源構成は原子力が50%を超える等ベースロード電源比率が高く、単独では周波数制御能力が不足するため、ベラルーシ・ロシア系統に依存していた（周波数制御はロシア系統側で実施）。
- 2017年、ウクライナ大手送電会社のウクレネルゴは、ロシアへのエネルギー依存低減のため、2023年にロシア系統からの分離と欧州大陸系統との同期運転に切り替える計画を策定。
- ドイツの日刊紙FAZによれば、ロシア軍による軍事作戦を受け、本年2月27日にウクレネルゴは欧州送電系統運用者ネットワークENTSO-Eに対し、ウクライナ系統の欧州大陸同期系統への緊急接続を要請。
- ウクレネルゴはツイッターで「同要請は3月11日に承認され、3月16日にウクライナ・モルドバの電力系統と欧州大陸のネットワークが完全に同期した」と述べた。

ウクライナの電源構成（2018年）

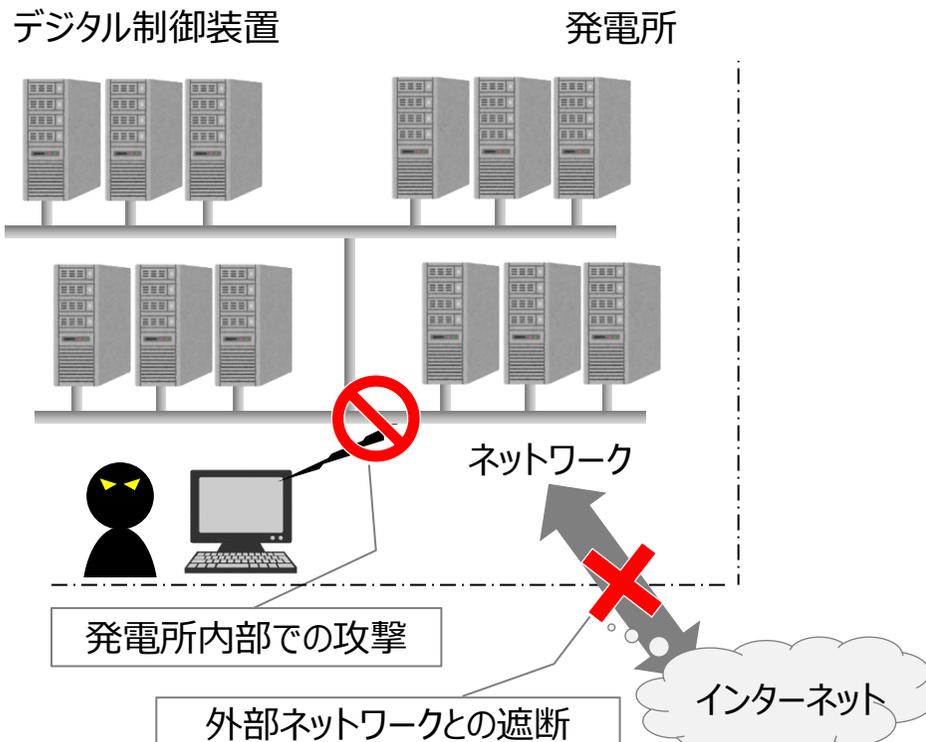


ヨーロッパ・ロシアの電力系統



【参考】サイバーセキュリティ対応

- 原子力発電所におけるサイバーセキュリティ対策を強化するため、2020年、産業大組織である**原子力エネルギー協議会（ATENA）がガイドラインを発刊**し、事業者に対し、同ガイドラインに沿った安全対策の実施を**要求**。今後、ATENAは事業者の取組状況を確認し、公表予定。



ATENAガイドによる安全対策強化

- ・設備対策
ネットワークの外部遮断の強化
アクセス管理 等
- ・マネジメント対策
体制、訓練、設備管理 等

- 原子力発電所に新たなデジタル技術の導入が進む中で、サイバー攻撃の脅威が増大していることを踏まえ、**海外の最新知見**として、原子力産業界（IAEAガイド・NEIガイド）、規制当局（米国NRC）等における取り組みを調査

- ATENA専門家およびメーカー・各事業者でWGを構成し、海外最新知見を反映した安全対策を強化。
- **2020年3月、ガイドラインを取りまとめ発刊**
<http://www.atena-j.jp/report/2020/03/atena-19me02rev0.html>
- ATENAは、サイバーセキュリティ対策の重要性に鑑みて、**2021年4月、対策の更なる促進を図るため、各事業者の安全対策実施計画の一部見直しを要求。**

- **事業者は、ガイドラインに沿った安全対策を2023年10月までに完了予定。**
- ATENAは、事業者の取り組み状況を確認し、公表。

1. カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障

1-1. カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障の世界潮流

1-2. 原子力に関するエネルギー安全保障戦略の世界潮流

1-3. エネルギー安全保障への革新原子力の貢献の可能性

2. 廃棄物問題解決への貢献

3. 評価軸に沿った各炉型の評価

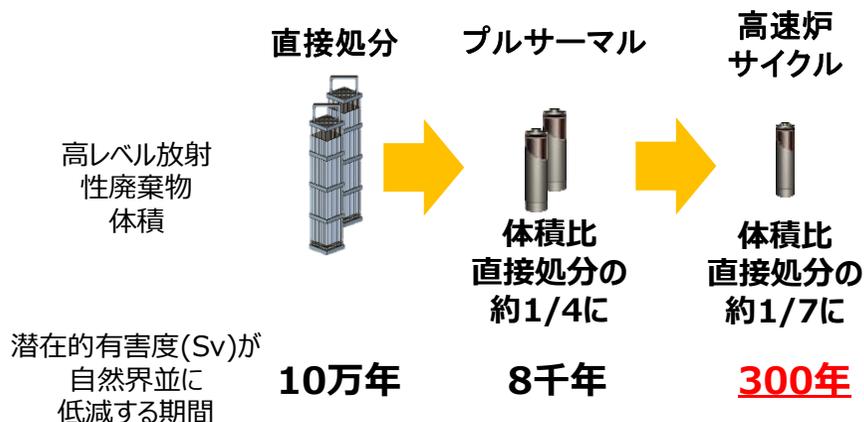
2-1. 廃棄物・資源問題解決への貢献

- 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

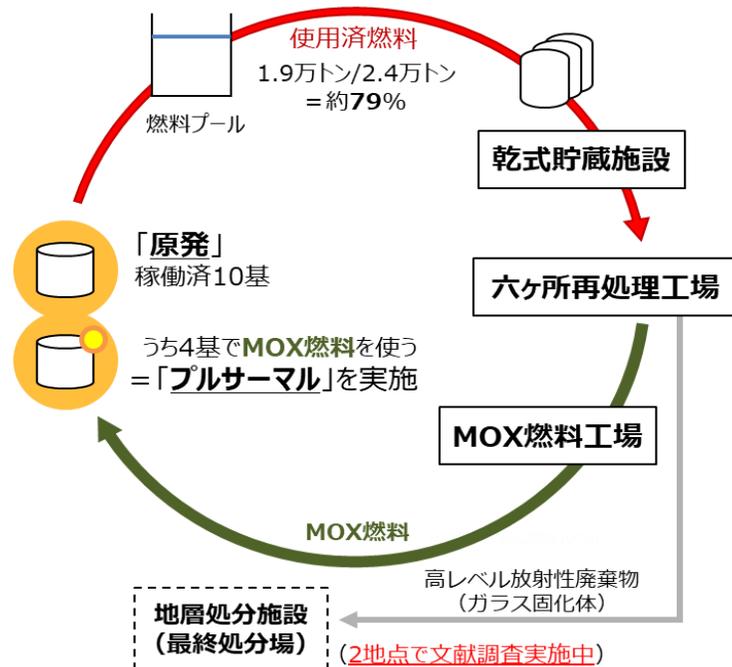
高速炉サイクル

- 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。
- 仏等では高速炉へのステップとして既存軽水炉でMA燃焼を図るマルチサイクル推進。



資源の有効利用

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

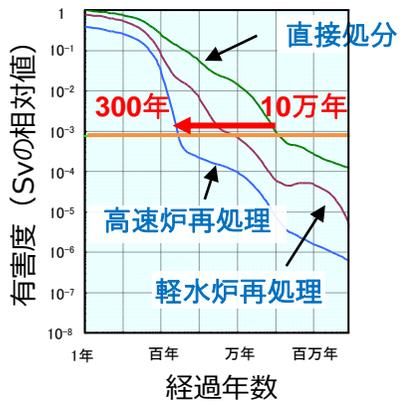


【参考】高速炉による廃棄物有害度低減・減容・処分場面積低減

● 高速炉では、有害なマイナーアクチノイド（MA）を燃焼させることにより、有害度を低減し、廃棄物を減容できるほか、処分場面積の低減にも貢献し得るとの試算も。

放射性廃棄物の有害度が低減

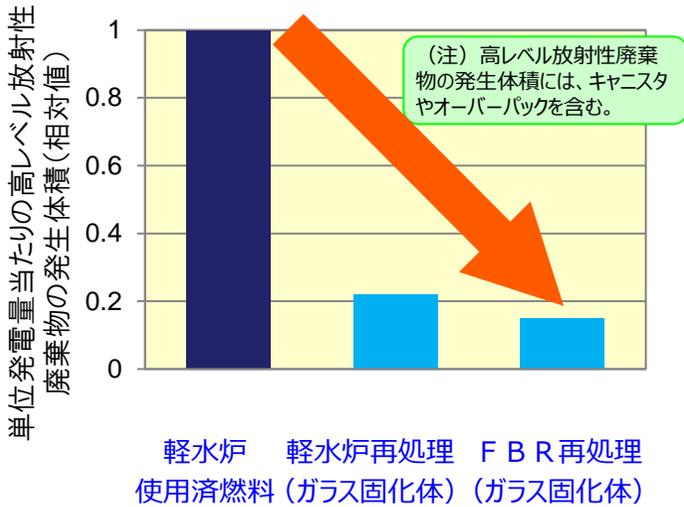
低減期間の短縮
約300年 ← 約10万年



— 1年間の軽水炉運転に必要なウランの有害度に相当

放射性廃棄物の発生量が低減

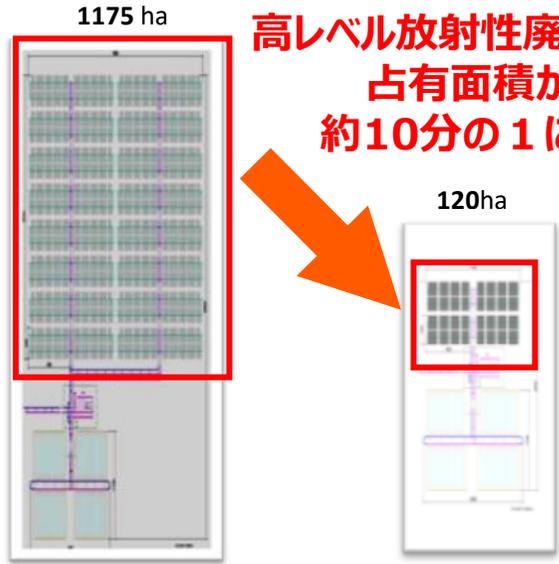
廃棄物発生量が
約7分の1に減



軽水炉 軽水炉再処理 FBR再処理
使用済燃料 (ガラス固化体) (ガラス固化体)

放射性廃棄物の処分場面積が低減

高レベル放射性廃棄物の
占有面積が
約10分の1に減



MAを含む場合 MAを含まない場合

仏CEAは、高レベル放射性廃棄物を最終処分するまでの期間を120年として、MAの核変換による処分場面積を評価※

※：出典「THE FRENCH NUCLEAR FUEL CYCLE: CURRENT STATUS AND POSSIBLE FUTURE OPTIONS」
<https://www-pub.iaea.org/iaeameetings/cn226p/Session7/INV07Boullis.pdf>

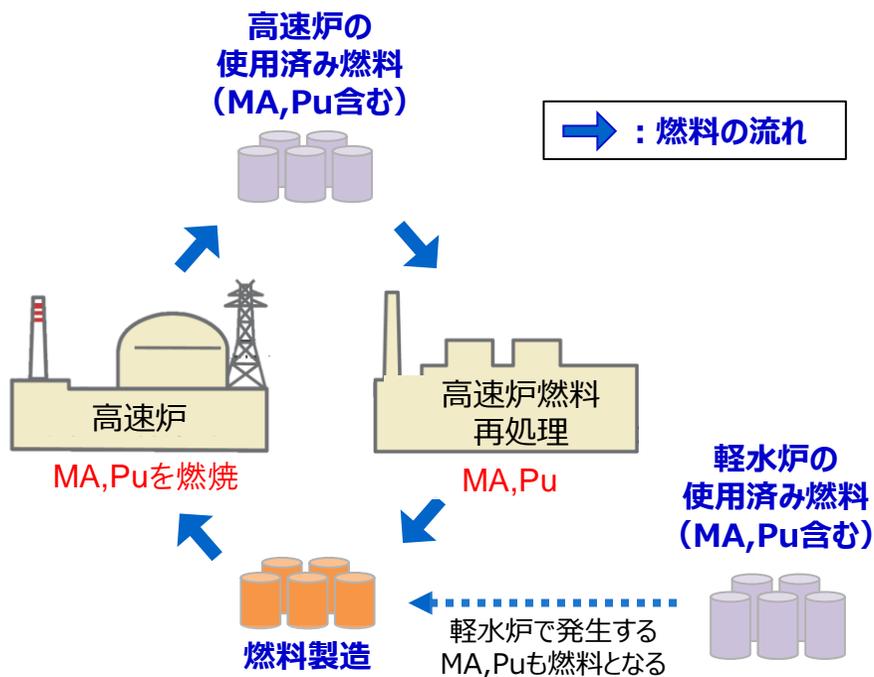
【参考】高速炉による資源の有効利用（再掲）

- 高速炉で生成したプルトニウムやマイナーアクチノイドを燃料とし、3000年以上のエネルギー供給が可能という試算も。
- 長期にわたり天然ウラン供給が不要となる可能性。

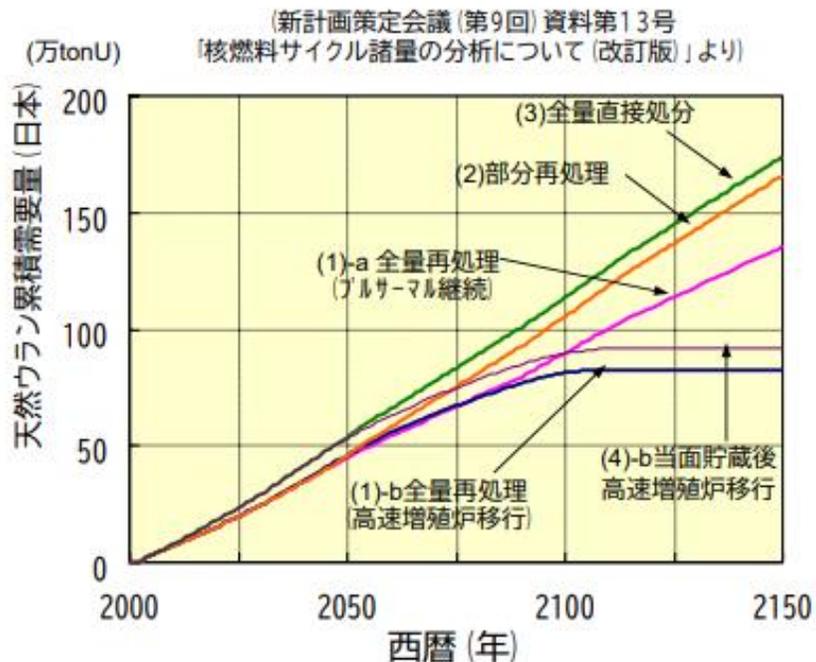
※出典：OECD/NEA Nuclear Energy Outlook2008

資源の有効利用

- ・マイナーアクチノイド(MA)やプルトニウム(Pu)を燃焼してエネルギー資源として利用



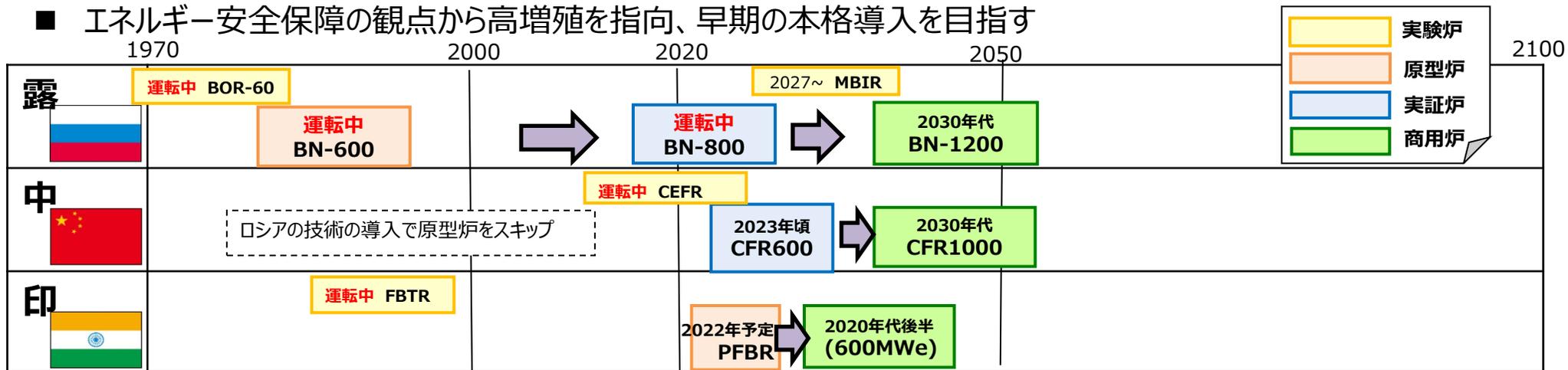
天然ウラン供給を不要にできる



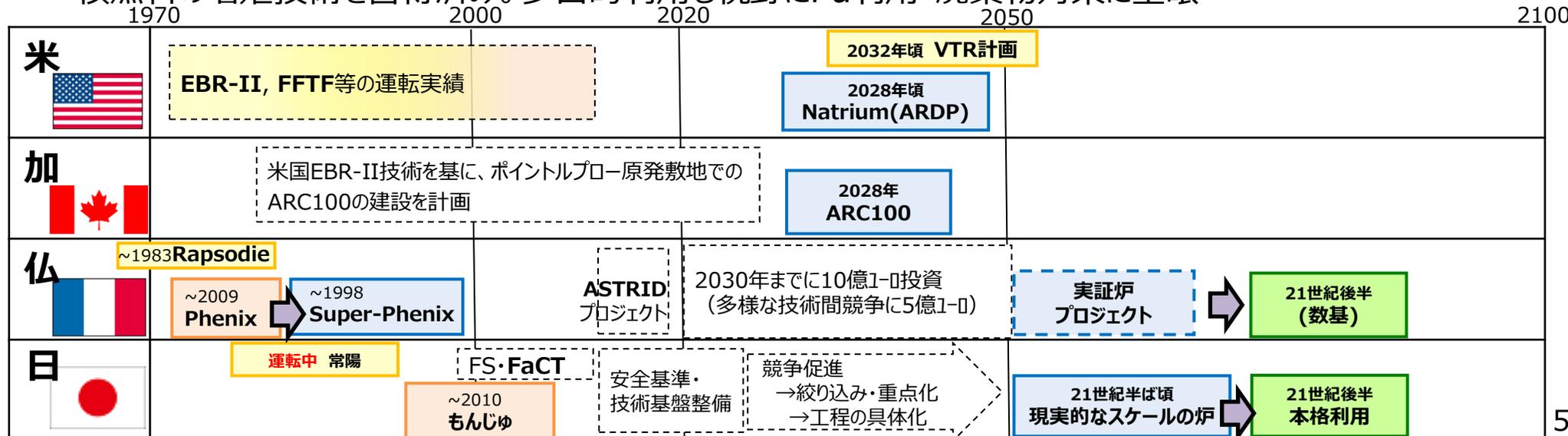
2-2. 世界の高速炉開発状況

- ロシアでは2015年に実証炉が稼働、中国では2023年に実証炉が初臨界を予定。両国とも2030年代に商用炉運開を目指す。
- 米（テラパワー社など）・加（ARC社など）は2020年代後半の実証炉運転開始を目指して官民連携で果敢な挑戦。

■ エネルギー安全保障の観点から高増殖を指向、早期の本格導入を目指す



■ 核燃料の増殖技術を習得済み。多目的利用も視野にPu利用・廃棄物対策に主眼



2-3. 日本の高速炉政策

- 高レベル放射性廃棄物の減容化、有害度低減、資源の有効利用といった核燃料サイクルの効果を高める高速炉開発を推進。
- 2016年12月、「『もんじゅ』の取り扱いに関する政府方針」とともに、高速炉開発の目標や原則を定めた「高速炉開発の方針」を決定。本方針に基づき、2018年12月、研究開発政策の在り方やプレーヤーの役割を定めた「戦略ロードマップ」を策定し、ロードマップに基づく高速炉開発を推進中。

「戦略ロードマップ」（2018年12月21日 原子力関係閣僚会議決定）

<スケジュール>

- “高速炉の本格的利用が期待されるタイミングは21世紀後半のいずれかのタイミング”
- “例えば21世紀半ばの適切なタイミングにおいて、技術成熟度、ファイナンス、運転経験等の観点から現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待”

<開発の進め方>

【ステップ1：競争の促進】

“当面5年間程度は、これまで培った技術・人材を最大限活用し、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進する。”

【ステップ2：2024年以降に採用する可能性のある技術の絞り込み・重点化】

【ステップ3：今後の開発課題及び工程についての検討】

イノベーションによる技術間競争と基盤整備の取組

- 高速炉委託事業において、多様な高速炉概念に幅広く適用できる評価ツール、基準の整備や、枢要技術の確立、試験研究施設の整備等を実施
- 2019年度より、補助事業において民間企業による多様なイノベーションを推進
- JAEAにおいて、イノベーションの基盤を整備
- ✓ 高速炉を含む10のフェジビリティスタディを支援中

✓ 革新炉の規格基準策定

国際原子力機関 (IAEA)
第4世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF)
経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)
規格基準の提案 ↑ ↓ フィードバック

JAEA

✓ 常陽（実験炉）



多様な材料への照射が可能

※地域での取組例（福井県・共創会議）

地域企業等の関係者の協力を得て原子力関連研究開発・人材育成拠点の形成に向けた検討を推進

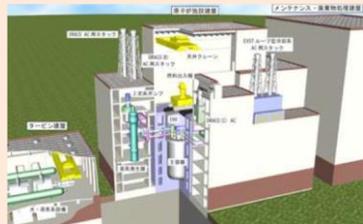
- ✓ CN実現に向けた原子力の持続的な活用
- ✓ もんじゅ廃炉データを活用した高速炉開発
- ✓ 試験研究炉を活用した原子力の用途拡大
- ✓ 原子力・エネルギー教育の推進

【参考】多様な高速炉・サイクル概念

- 「戦略ロードマップ」に基づき、多様な技術間競争を促進中。
 - － 「まず当面5年間程度は、これまで培った技術・人材を最大限活用し、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進する。」
- NEXIP補助事業のもと、令和元年度から**多様な炉型の研究開発**を支援。

小型ナトリウム冷却金属燃料高速炉(MCR-200)

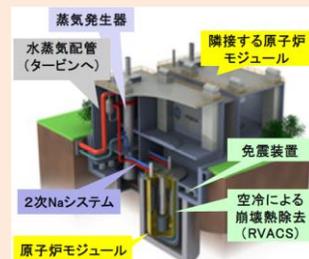
三菱重工業株式会社、三菱FBRシステムズ株式会社



- 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)

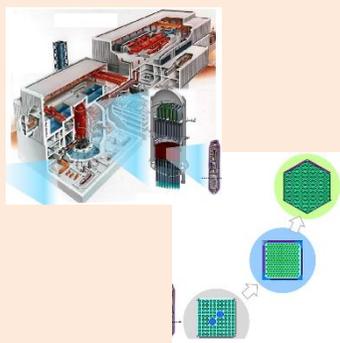
日立GEニュークリア・エナジー株式会社 (日立GE)



- 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。

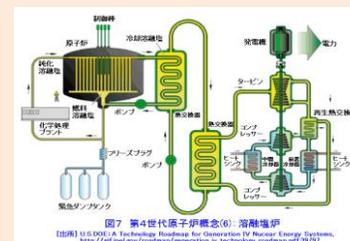
軽水冷却高速炉

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。

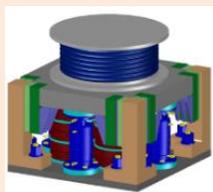
【参考】国際協力を活用した高速炉開発

- 日仏R&D協力（データ・設備共有、評価手法共同開発）の成果を活用しつつ、日本型タンク型炉を検討し、国内設置の見通しを明らかにした。日仏協力を活用しながら、多様なナトリウム冷却炉の概念について、研究開発を実施しながら比較評価。
- 日米R&D協力の下、核拡散耐性の高い金属燃料についても検討を実施。また、テラパワー社・JAEA・MHI・MFBR間の覚書に基づき、ARDPプロジェクトにおける協力について、今後協議。

日本型タンク型炉の成立性検討



日本型タンク型炉



3次元免震装置／皿ばね試験体

- 日仏R&D協力で得られた知見を用いて、日本では経験のないタンク型ナトリウム冷却炉について、耐震性、安全性、経済性等の成立性を確認し、今後の開発見通しを得た。
- 耐震性を大幅向上する3次元免震装置の概念を構築し、成立性について各要素の試験を行い見通しを得た。

日仏R&D協力(継続中)



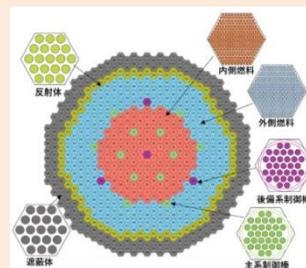
シビアアクシデント評価



PLANDTL試験装置
(共同試験実施)

- 日仏R&D協力において燃料8分野、シビアアクシデント9分野、原子炉技術11分野（計28分野）で協力、日仏間で技術を融合（データシェア、設備共同利用、評価手法共同開発）することで、効率的な開発を行った。
- 2020年からは新たに32分野の協力を開始した。

金属燃料



金属燃料炉心

- 金属燃料についてはCNWG等において日米協力により安全性、炉心設計等の個別技術の検討を進めてきた。
- 2021年度からは金属燃料概念の性能評価、課題整理、日米協力による金属燃料の日本導入の可否について検討を進める。

2 - 4. 米は革新炉・既存軽水炉向けの核燃料サイクル技術開発

- 米国は直接処分が公式方針であるが、地層処分場は決まっておらず、中間貯蔵を実施している。
- 米国は、ナトリウム冷却高速炉を含む様々な革新炉の実証を推進すると同時に、持続可能性や資源有効活用等を目指す革新炉のための燃料サイクルを2030年までに評価する予定。
 - 革新炉実証プログラム（ARDP）でTerraPower社のナトリウム冷却高速炉（Natrium炉）に対して今後7年以内の運転開始を目指した支援を実施。その他、熔融塩炉も次世代の技術として開発に取り組む。
 - 2022年3月、革新炉の燃料サイクルや廃棄物削減等の11事業の研究支援（ONWARDS）を決定。また、既存軽水炉についても燃料サイクルや廃棄物削減等の研究支援（CURIE）を公表。

ONWARDSプログラム

- 2022年3月、革新炉の廃棄物・貯蔵の課題解決のため、11事業に36億円の研究支援を表明。
 - ✓ プロセス：廃棄物量の最小化、核拡散抵抗性の改善、資源有効利用の促進
 - ✓ 保障措置：適時適切な核物質管理
 - ✓ 廃棄物形態：金属燃料の乾式再処理等

ONWARDS 採択事業（例）

- GEグローバルリサーチ：再処理工場における保障措置核物質管理システムを開発
- TerraPower：塩化物熔融塩炉開発に資する、使用済燃料からウランを回収する技術開発
- アイダホ国立研究所：金属燃料の乾式再処理プロセスの開発

2-5. 仏国開発ベンチャーによる廃棄物問題解決

- ベンチャーや民間企業が**仏国研 (CEA)のサポート**を得て、**溶融塩炉 (MSR) や高温ガス炉 (HTR) による放射性廃棄物問題の解決**に取り組んでいる。
- 2021年10月12日にマクロン大統領が発表した「**フランス2030**」の予算が**放射性廃棄物の解決にも充てられている**。

MSRによる放射性廃棄物問題の解決*1

- MSRにおける核変換の実現可能性評価を目的として、「ISACプロジェクト」を2022年～2025年に実施
- CEA、CNRS、ORANO、EDF、Framatomeが参加
- Amの核変換にMSRを活用
- AMRと燃料サイクルの開発に対する「フランス2030」の政府支援：40億ユーロ

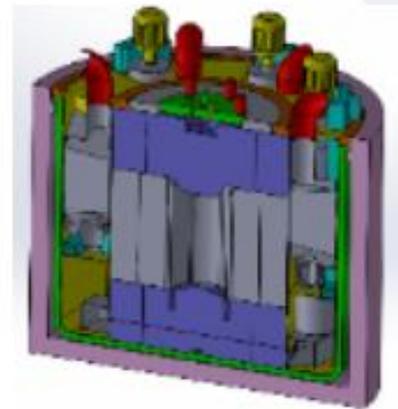
ベンチャーによる放射性廃棄物問題への取り組みの例*2

- 2021年に設立されたベンチャーであるJimmy社は既存のHTRの技術を活用
- このHTRで使用される黒鉛減速材を含む多くの材料は再利用可能であり、放射性廃棄物の排出量が非常に少ない

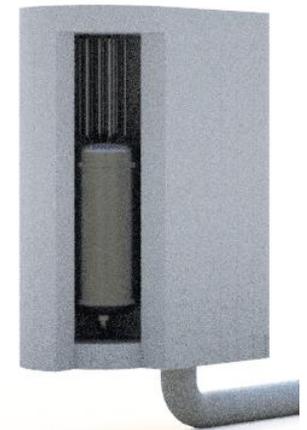
仏国の2021年設立の革新炉ベンチャー*1



ARAMIS(MSR)



Jimmy社のHTR



出典：

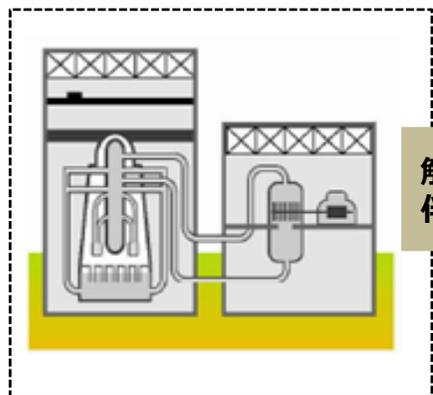
1. JEAN-CLAUDE GARNIER他、2022年4月22日、ADVANCED MODULAR REACTORS & USE CASE2

2. Jimmy社HP、<https://jimmy-energy.eu>

2-6. 円滑な廃炉に向けての技術革新

- 原子力発電に伴って生じる放射性廃棄物の発生量の削減に取り組む必要。
- 高速炉では、「もんじゅ」の廃炉経験を通じた高速炉開発に有益なデータの蓄積が進んでおり、発電量あたりの低レベル放射性廃棄物量が少なくなるとの試算も。
- 建設、運転保守から廃炉までライフサイクル全体を見据えたプラント設計の最適化も重要。

● 廃止措置に伴い発生する廃棄物の内、約2%が放射性廃棄物



約2,230万トン（電事連試算 全51基ベース※）※福島第一原発除く

放射性廃棄物ではない廃棄物 約2,190万トン

※国のチェックを経て、再利用もしくは一般廃棄物として処分可能なクリアランス物（約102万トン）を含む

低レベル放射性廃棄物 約48万トン（全体の約2%）

L 3（浅地中（トン）処分）：約40万トン [83%]

L 2（浅地中（ピット）処分）：約7.4万トン [15%]

L 1（中深度処分）：約0.8万トン [2%]

● 「もんじゅ」の廃炉経験を通じたデータの蓄積

（例）金属ナトリウム取出ししやすい機器・配管の設計構造 等

● 革新炉による低レベル放射性廃棄物削減の可能性

低レベル放射性廃棄物の発生量： 軽水炉 約 3×10^{-8} m³/kWh
高速炉 約 2×10^{-8} m³/kWh

※高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT）プロジェクトの結果より

1. **カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障**

1 – 1. **カーボンニュートラルに向けたエネルギー安全保障の世界潮流**

1 – 2. **原子力に関するエネルギー安全保障戦略の世界潮流**

1 – 3. **エネルギー安全保障への革新原子力の貢献の可能性**

2. **廃棄物問題解決への貢献**

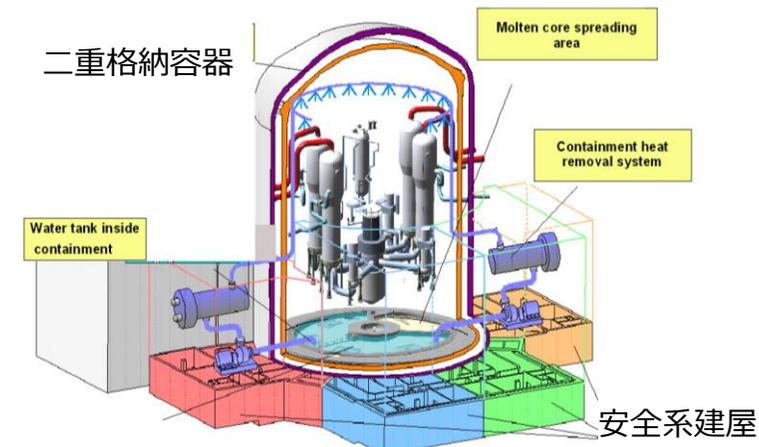
3. **評価軸に沿った各炉型の評価**

3-1. 革新軽水炉の特徴

- <定義> ● 既設の原子炉（PWR及びBWR）の設計をベースに**新技術（受動安全やデジタル技術等）**を導入した軽水炉
- <利点> ● 既存の軽水炉技術をベースに**技術熟度が高く**、規制プロセスを含め**高い予見性**
- **受動安全や航空機衝突対策を含む外部事象対策**による更なる安全性・信頼性向上、運転性・操作性の向上
- **シビアアクシデント対策**による事故時の所外影響の低減
- <課題> ● 大きな**初期投資負担**
- **建設長期化した場合の大きなファイナンスリスク**

安全性・信頼性の向上

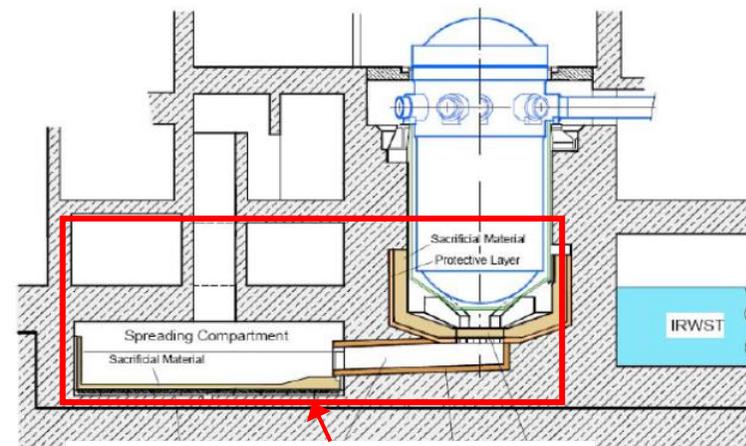
安全系4系統の完全分離、航空機衝突対策※



EPRの事例

シビアアクシデント対策

コアキャッチャーで溶融炉心を保持及び冷却



コアキャッチャー

※各種ハザード対策として4つの安全系建屋に1系統ずつ分離配置
航空機衝突対策として二重格納容器を採用（仏 EPR、露 VVER、日 iB1350）

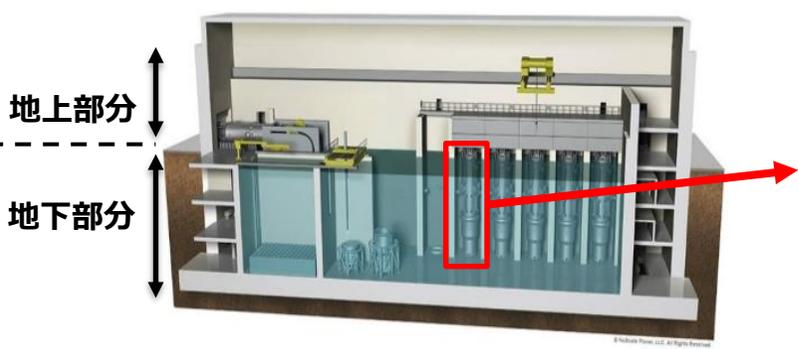
3-2. 小型モジュール炉 (SMR) の特徴

- <定義> ● 電気出力が概ね30万kW以下の小型かつモジュールで製造される新型原子炉
- <利点> ● 炉心が小さいため、自然循環で確実な冷却 (事故・避難も小規模に)
- モジュール工法で工期短縮・初期投資抑制
- <課題> ● 小型のため日本の安全規制環境下における経済性懸念
- 海外先行で、安全規制等の整備にも時間を要する

NuScale社の事例 (VOYGR)

短い工期

モジュール工法で工期短縮・初期投資抑制



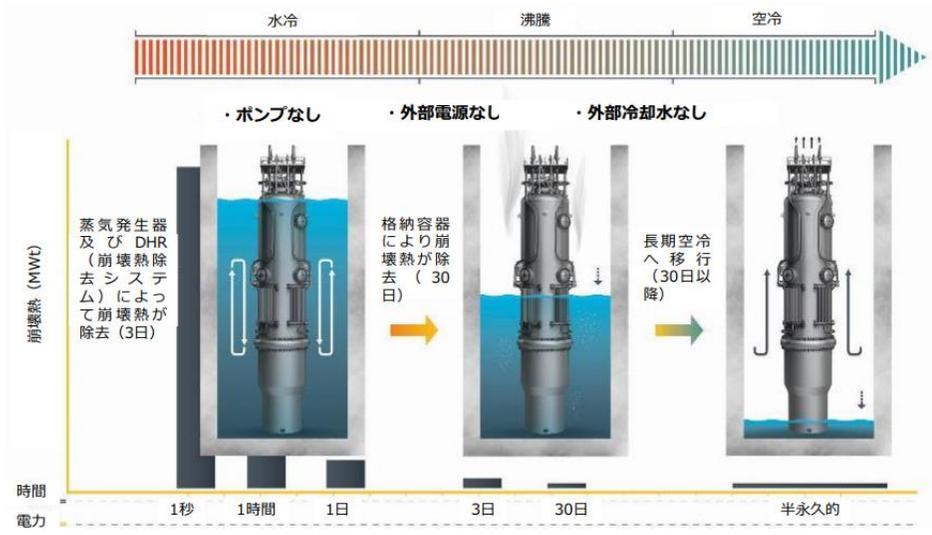
小さな炉心

事故時の影響を小規模に



自然に冷える

自然循環で確実な冷却



3-3. ナトリウム冷却高速炉の特徴

- <定義> ● **高速中性子**により、核分裂連鎖反応が維持される原子炉
- <利点> ● 優れた**安全性**（自然に止まる・冷える・確実に閉じ込める）
- **資源の有効利用**、Pu・MA*燃焼により高レベル放射性廃棄物の**減容化、有害度低減**
- 高温/低温（約500℃/約200℃）を活用した**熱利用** ※マイナーアクチノイド：半減期が長く、強い放射線を発する
- ほぼ常圧であるため、薄肉構造が可能（経済性向上）
- <課題> ● 化学的に活性な**金属ナトリウムの取扱い**
- 日本が国際安全基準の議論をリードするも、**安全規制等の整備**に時間を要する
- **実用化に向けた実証、3次元免震装置・MAを含有したMOX燃料製造技術等の開発**

熱利用

優れた安全性

資源の有効利用

廃棄物の有害度低減

熱利用システム (イメージ)

熱利用の例

低温利用	海水淡水化、地域暖房
高温利用	水素製造、熱貯蔵

**自然に止まる、自然に冷える
確実に閉じ込める**

制御棒の自然落下
冷却材の自然循環
炉心
溶けた燃料を炉内で保持
二重容器

ほぼ常圧（軽水炉は70～150気圧）
冷却材が漏れても、外側容器等（二重構造）で容易に保持可能

**長期にわたり天然ウラン供給が不要
(3000年以上**のエネルギー供給が可能)**

高速炉の使用済み燃料 (MA, Pu含む)

MA, Puを燃焼

高速炉燃料再処理

MA, Pu

軽水炉の使用済み燃料 (MA, Pu含む)

燃料製造

軽水炉で発生する MA, Puも燃料となる

**低減期間の短縮
約300年 ← 約10万年**

有害度 (Svの相対値)

経過年数

直接処分

300年

10万年

高速炉再処理

軽水炉再処理

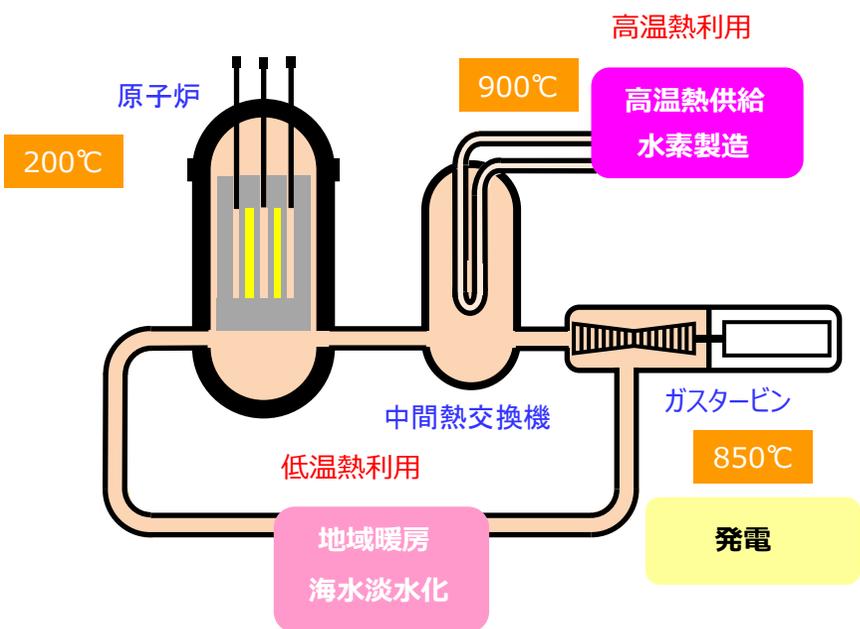
1年間の軽水炉運転に必要な天然ウランの有害度に相当

** 出典：OECD/NEA Nuclear Energy Outlook2008

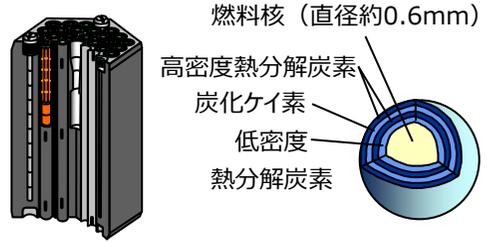
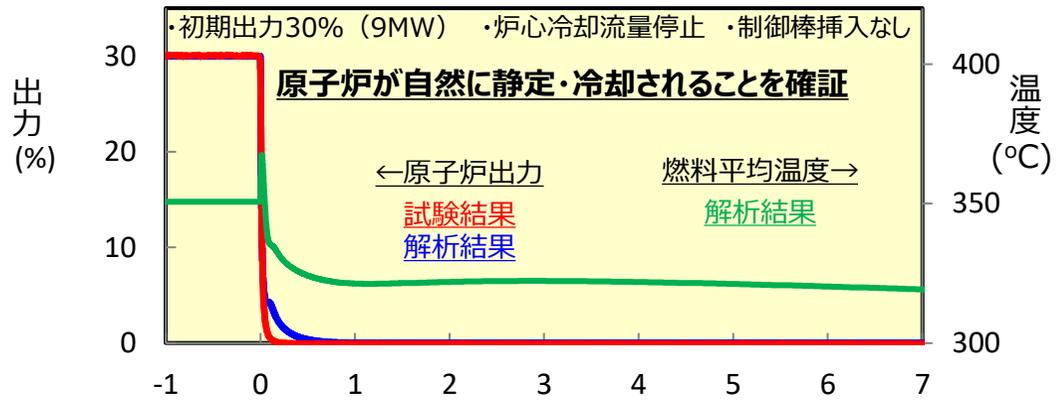
3-4. 高温ガス炉の特徴

- <定義> ● 減速材に**黒鉛**、冷却材に**ヘリウムガス**を用いて、900℃近くの熱を利用できる原子炉
- <利点> ● **高い固有の安全性**（炉心溶融、大量の放射性物質の放出なし）
- 高温で安定なヘリウム冷却材を利用**水素爆発しない**
- 高温の熱を利用し**多目的の利用が可能**（水素製造、発電、地域暖房等）
- <課題> ● 燃料を再処理する場合には、**ホット施設***での**技術の実証が必要**
*放射性物質を取り扱うことが可能な施設
- **実用化に向けた実証**、原子炉と水素製造施設の**接続技術**、**カーボンフリー水素製造技術の確立が必要**

多目的な熱利用



高い固有の安全性



燃料体 (黒鉛)

被覆燃料粒子

- 物理現象のみで、黒鉛構造材が熱を蓄熱・放熱し、**被覆燃料粒子の健全性を維持**
- 燃料を**厳重 (四重) に被覆**するので、**高い放射性物質の閉じ込め機能を有する**。

3-5. 熔融塩炉の特徴

- <定義> ● 塩化物熔融塩やフッ化物熔融塩等の液体を燃料や冷却材に使用する原子炉。
- <利点> ● 液体燃料による緊急時の冷却と停止、燃料交換の単純化
- 単純な炉心構造による低コスト化の余地
- 高速炉型ではPu・MA燃焼、熱中性子炉型ではPu・MA発生なし
- <課題> ● 高温、高放射線下での耐腐食性の構造材料の開発が必要
- 高線量被ばく対策のため、メンテナンスの遠隔化
- 腐食防止や遮蔽強化が必要、低炉心出力密度等のコスト拡大要素
- JAEAを含め、国内に設計・建設・運転・保守の経験がない

単純な炉心構造

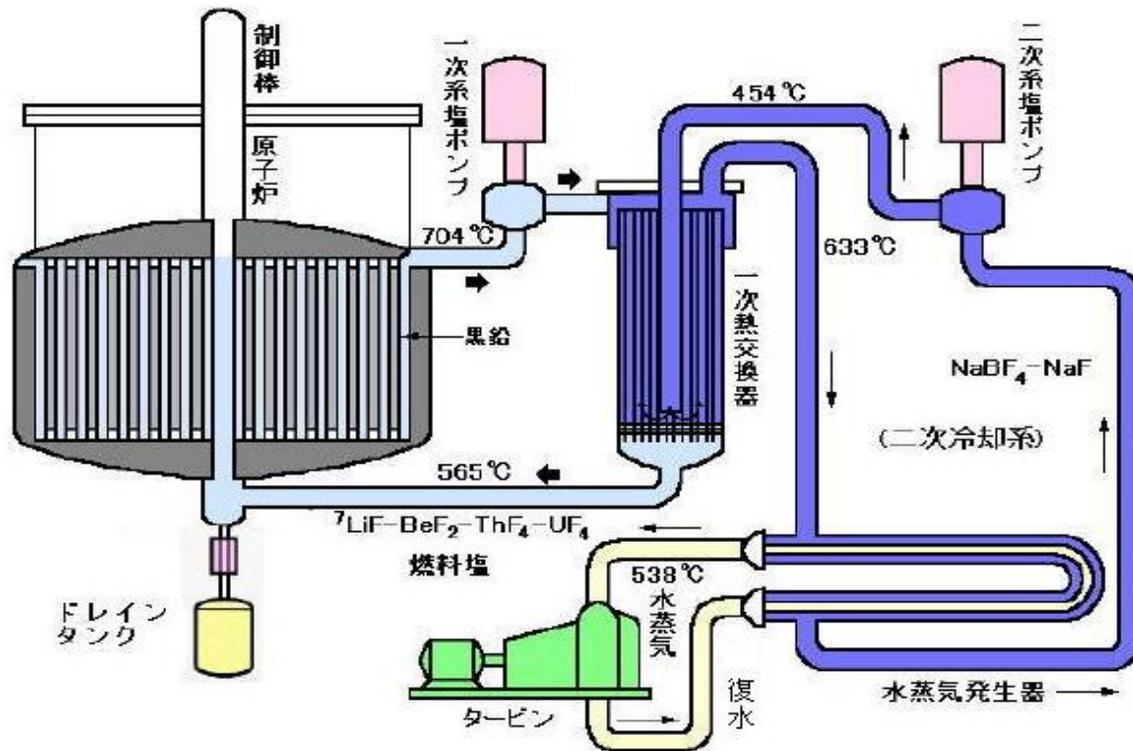
製造コストの削減

液体燃料

- 成形・加工が不要
- 定期的に不純物除去をすること、燃料補給のみで燃料交換不要

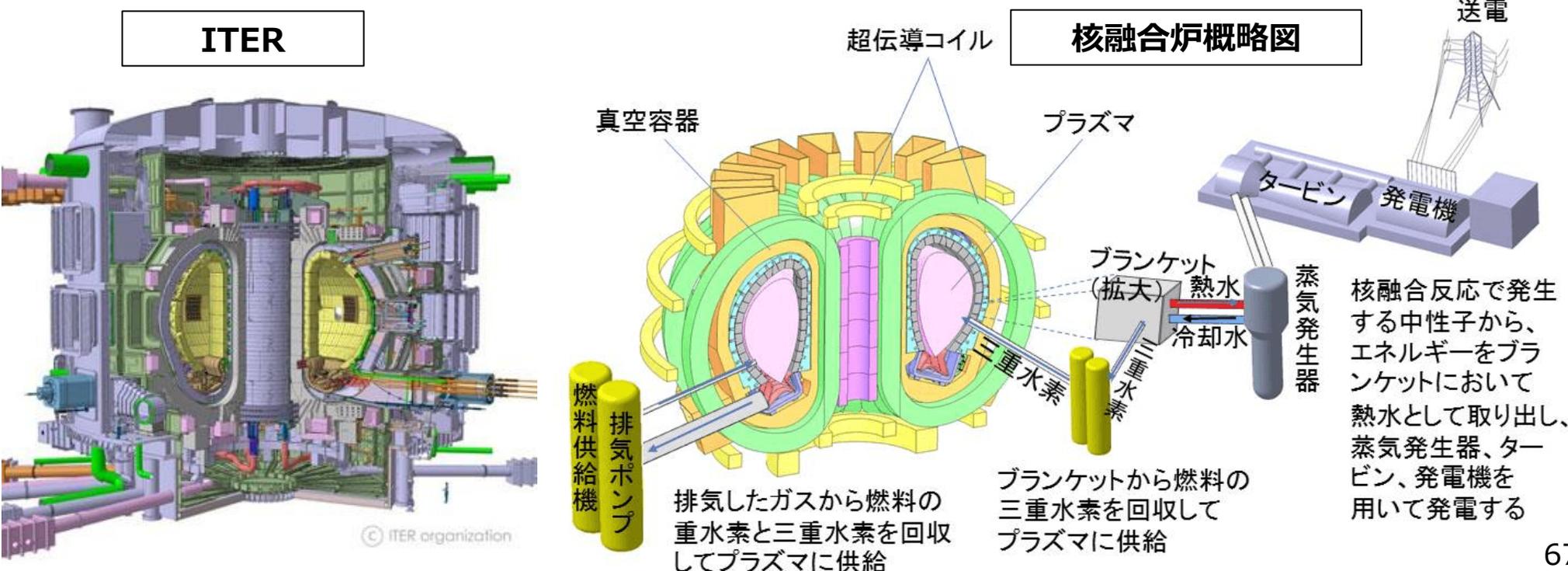
燃料のタンク格納

非常時に燃料をタンクに抜いて回収・冷却し、自動的に炉停止させることが可能。



3-6. 核融合炉の特徴

- <定義> ● 重水素とトリチウム（三重水素）等の核融合反応を利用した原子炉
- <利点> ● 核融合反応は連鎖反応ではないため、万一の場合反応が止まる（固有安全性）
- 核分裂炉と異なり、高レベル放射性廃棄物がない
- <課題> ● トリチウムの安全管理・回収
- 高圧条件下でのプラズマの保持
- エネルギー密度が低い
- プラズマに面する構造材料（プラズマ対向材料）の開発
- 世界で試験炉運転経験がなく、エネルギー取出しに向けて開発に長期間かかる



【参考】日本国内炉型技術開発における評価基準

- 日本国内でも、米国ARDPにおける評価軸を参考に、技術成熟度や市場性等を評価軸として民間の炉型開発を支援。

社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業（経産省補助事業）の審査項目

（1）技術の成熟度と必要な研究開発

- 技術成熟度の高さ **+ 時間軸**
- 必要な研究開発項目

（2）実用化された際の市場性

- 海外または国内におけるニーズを踏まえた市場性に関する分析は十分か
- 経済性に関する分析・評価が十分か
(代替・競合技術と比較した競争力分析・評価、
将来的な経済性向上に向けた見通し含む)
- 負荷追従、発電以外の多目的利用（水素製造含む）等の機動性を有するか
- 放射性廃棄物の減容・有害度低減、資源の有効利用性の点で優位性があるか

（3）具体的な開発体制の構築と国際的な連携体制

- 実用化までの開発計画・開発体制は現実的なものか
- 提案者の事業実施体制は十分か（若手の割合含む）
- 想定されるサプライヤーの体制（脆弱性・海外サプライヤーと比較した場合の優位性）は十分か
- 潜在的ユーザー・JAEAとの連携

（4）実用化する際の規制対応

- 安全確保に対する基本的な考え方、深層防護、事故シークエンス、外部ハザードに対する安全対策は十分か
- 実用化までに検討することが必要な安全設計方針・要件は十分か（安全性試験等を通じたデータ取得含む）

（5）その他

- 非エネルギー分野での貢献

3-7. 本日、議論いただきたい論点（例）

国際的な状況も踏まえて、以下の論点についてどう考えるか：

- 革新炉開発における価値軸の項目（エネルギー安全保障関連・廃棄物問題） についての 更なる明確化・深掘り

- 様々な価値軸を包含した原子力国際戦略の在り方

（多国間・二国間でのサプライチェーン・技術標準の戦略的な確保に向けた枠組み作り、官民の役割分担 等）

- 革新炉の価値・各国の戦略を踏まえ、我が国における革新炉開発の道筋を検討する上での考え方・戦略

（サプライチェーン・産業政策の戦略と、革新炉技術開発のロードマップとの並行的・統合的な策定、複数技術に対する熟度や市場性等を踏まえた比較検討 等）

等