

# カーボンニュートラル・エネルギー安定供給に貢献する 次世代革新炉

2022年11月15日

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

フランス



マクロン大統領が原子力回帰を宣言。欧州次世代加圧水型炉（EPR-2）6基2028年着工、8基建設検討と発表（2022年2月）。革新炉による放射性物質削減、核燃料サイクル確立を目指す。

イギリス



「エネルギー安全保障戦略」発表(2022年4月)。2050年までに原子力の発電割合を25%へ。2030年代初頭運開目指す高温ガス炉実証炉プロジェクト開始(2022年8月)。新規建設を支援する政府機関 Great British Nuclear を設立

ベルギー



2025年に40年運転を迎える原子力発電所2基の運転を10年延長する方針を決定(2022年3月)

ポーランド



「2040年までのエネルギー政策」（2021年2月）にて、脱炭素化を進めるため、2043年までに6基の原発を稼働させるとともに、高温ガス炉を主に産業用熱源として利用する可能性を表明

EU



欧州委員会、持続可能な経済活動の分類枠組み「EUタクソミー」に原子力を加えることを決定(2022年7月)

米国



米国エネルギー省が新型炉実証プログラム（ARDP）を開始し10件を選定（2020年10月及び12月）。TerraPower社のナトリウム冷却高速炉「Natrium」とX-エナジー社の高温ガス炉「Xe-100」建設に投資を決定。カリフォルニア州議会で閉鎖予定原発の運転延長法案可決(2022年9月)

韓国



エネルギー政策方針を発表(2022年7月)。前政権の脱原子力政策を撤回し、電源構成に占める原子力比率を2030年に30%以上と修正。UAEに140万kw級韓国型標準軽水炉4基を輸出、2基は商用運転開始済み、3基目は試運転中(2022年10月)

中国



2030年には原子力発電の発電能力を現状の2倍以上に増やして「脱炭素」を加速（107GW以上：世界第1の原子力発電大国の見通し）

## グリーン成長戦略（原子力イノベーションに関連する記載）

- 原子力は大量かつ安定的にカーボンフリーの電力を供給可能。技術自給率も高い
  - 更なるイノベーションにより、安全性・信頼性・効率性の一層の向上、放射性廃棄物の有害度低減・減容化、資源の有効利用による資源循環性の向上を達成
  - 再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請に応えることも可能
- ⇒ 高速炉、高温ガス炉、小型炉(SMR) に関する2050年までの成長戦略工程の提示  
（高速炉は2018年に原子力関係閣僚会議にて決定された「戦略ロードマップ」に基づく開発）
- ⇒ 「常陽」においては、世界的にも希少な医療用放射性同位体を、大量製造することが可能  
「常陽」の再稼働を進めていくことで、先進的ながん治療等への貢献期待

## 第6次エネルギー基本計画（原子力・新型炉に関連する記載）

【2050年カーボンニュートラル実現に向けて】

- 電力部門は、再エネや原子力などの実用段階にある脱炭素電源を活用
- 原子力は、安全性の確保を大前提に、必要な規模を持続的に活用

【2030年に向けて（原子力）】

- 研究開発の推進  
国際連携を活用した高速炉開発の着実な推進、小型モジュール炉技術の国際連携による実証、高温ガス炉における水素製造に係る要素技術確立等を推進

⇒ 高速炉は「戦略ロードマップ」に基づく開発に基づき研究開発に取り組む

# 次世代革新炉に求められる要件

一層の安全性向上を前提に、

- ✓ **安定供給**（大規模安定 + 革新的安全性 + **技術自給**・サプライチェーン）
- ✓ **資源循環性**（廃棄物問題解決への貢献 + 資源有効利用）
- ✓ **柔軟性**（負荷追従 + 水素・熱利用 + 立地の柔軟性 + 非エネルギー分野への応用）



高速実験炉「常陽」

## 安定供給

- 原子力は**安定供給に貢献する脱炭素電源**
- **革新的安全性向上**により、地域・国民の信頼獲得・安定供給へ
- 製造・調達等のプロセスイノベーションを通じ、原子力サプライチェーンを維持・強化。**技術自給**にも貢献



高温工学試験研究炉 (HTTR)

## 資源循環性

- 原子力は脱炭素エネルギー源であるが、高レベル放射性廃棄物が発生
- 技術革新により**原子力も循環型エネルギーへ**
- 資源の有限性にも解決策を

## 柔軟性

- 安価な再エネを最大限活用するために負荷追従
- 発電しない時には**水素製造、熱の形で利用・貯蔵**（実質的な負荷追従）
- 防災対策重点地域縮小・立地の柔軟性
- **医療用RI製造**による国民福祉向上への貢献

## 一層の安全性向上

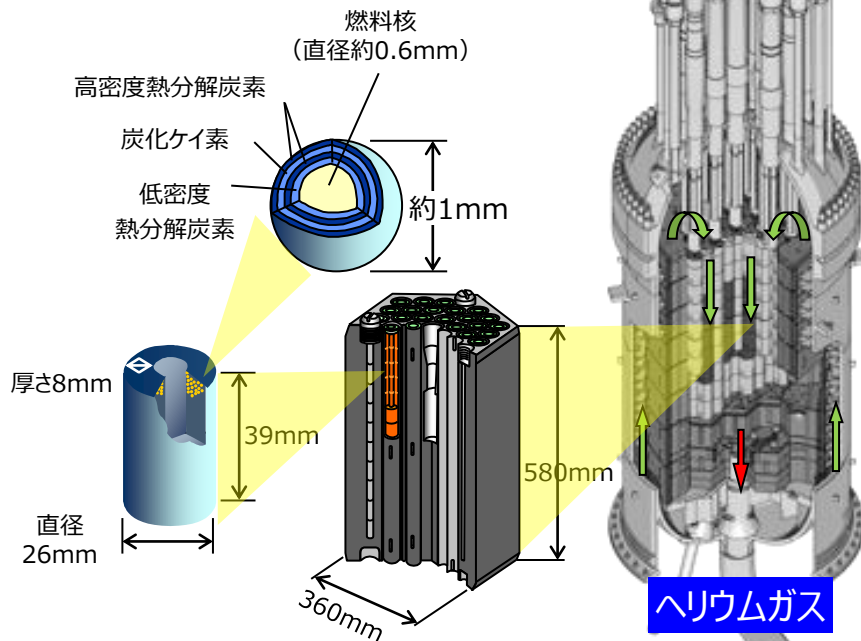
・東電福島第一原子力発電所事故を踏まえた一層の安全性向上技術開発と導入促進

## ●優れた安全性

高温ガス炉は、その高い固有の安全性により、炉心溶融が起こらない設計が可能

### 被覆燃料粒子

1600℃でも放射性物質を閉じ込める



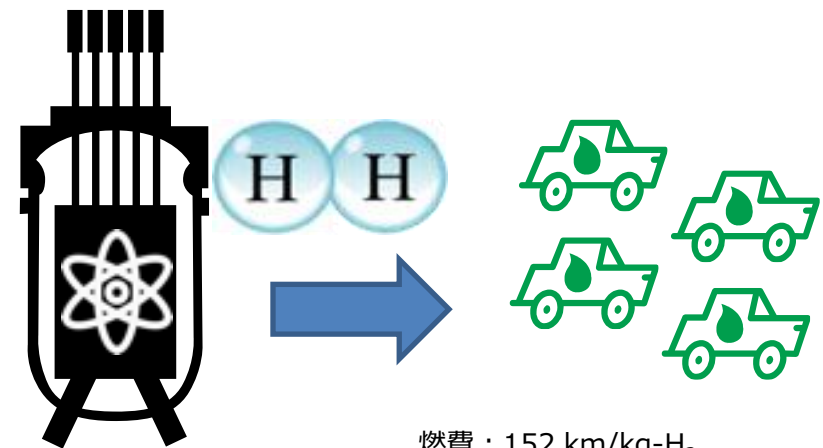
**黒鉛構造材**  
耐熱温度**2500℃**

**ヘリウムガス**

高温でも安定  
(温度制限なし、  
化学的に不活性)

## ●多様な熱利用

900℃を超える高温熱を供給可能で、水素製造、発電、海水淡水化等の幅広い熱利用が可能



**高温ガス炉**

燃費：152 km/kg-H<sub>2</sub>  
年間走行距離を10,000kmと仮定  
年間の必要水素量：約730m<sup>3</sup>/台

高温ガス炉\* (熱出力250MW) で、燃料電池車  
20万台/年分の水素製造が可能

\* 水分解による水素製造効率50%、稼働率80%を仮定

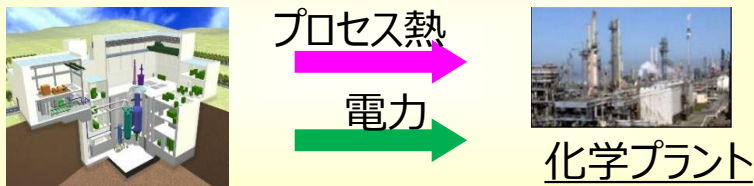
# 高温ガス炉システムの多様な利用性・機動性

## 水素製造システム



- メタンの水蒸気改質法、高温水蒸気電解法、または熱化学法による水素製造

## 工業利用として高温の熱供給／熱電供給



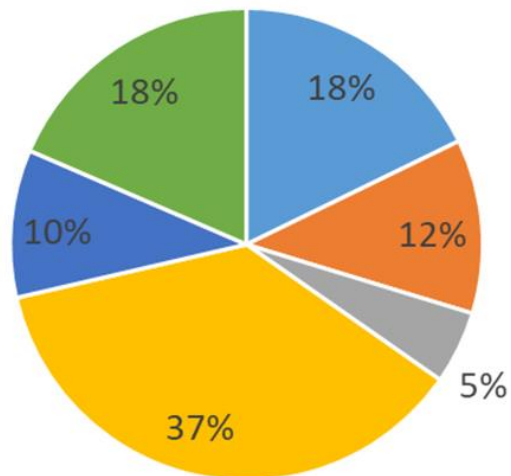
- 蒸気によるプロセス熱供給（化学プラント、石油精製プラント、等）
- 蒸気タービン発電による電力供給

## 再生可能エネルギーとのハイブリッドシステム



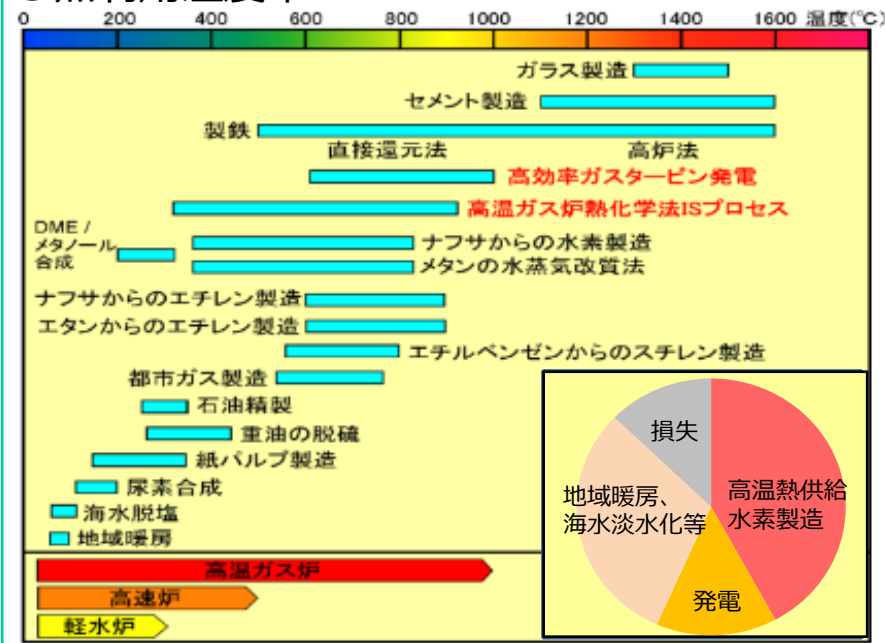
- 再生可能エネルギーの変動を発電量調整または水素製造により吸収（高発電効率維持）

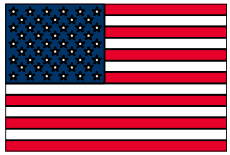


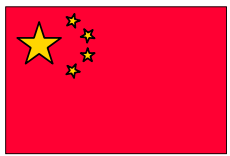
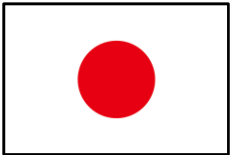
### 熱需要



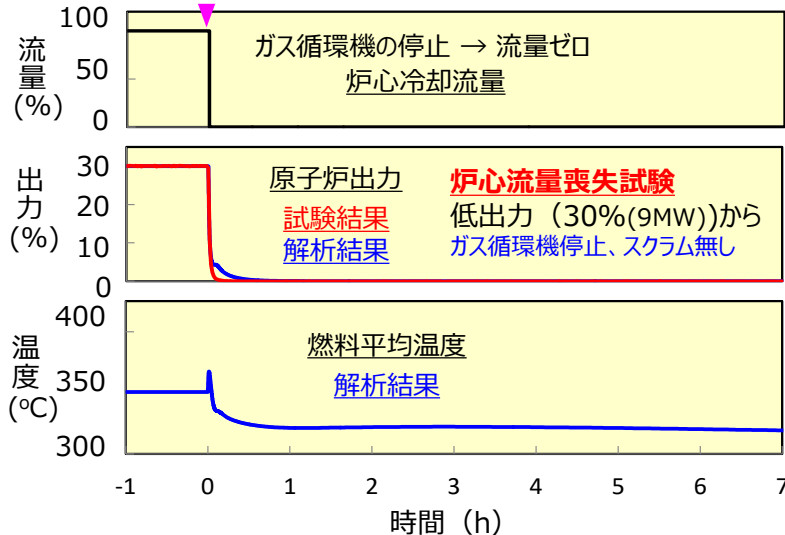
我が国のCO<sub>2</sub>ガス排出量内訳(2019年)

### ○熱利用温度帯



<p>米国</p> 	<p><b>エネルギー省 (DOE) による開発支援</b>          (新型炉実証プログラム, 2020年～)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>～2028年に稼動する革新炉原子炉の建設を支援</li> <li>X-energy社 (高温ガス炉) が選定</li> </ul>
<p>英国</p> 	<p><b>ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) による開発支援</b>          (新型モジュール炉研究開発・実証プログラム, 2022年～)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>BEISは新型モジュール炉として高温ガス炉を選定</li> <li>2030年初頭までに高温ガス炉を実証</li> <li>英国国立原子力研究所 (NNL) と原子力機構が参加するチームが、英国の新型炉開発プログラムの予備調査を行う実施事業者として採択</li> </ul>
<p>ポーランド</p> 	<p><b>ポーランド政府による高温ガス炉計画</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>国立原子力研究センター (NCBJ) は教育科学省から高温ガス炉実験炉の設計のための予算を獲得</li> <li>高温ガス炉実験炉の概念設計を開始 (2022年)</li> </ul>
<p>中国</p> 	<p><b>エネルギー技術創新“十三五”計画 (能源技術創新“十三五”規画)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>研究炉 (HTR-10) を用いた研究開発</li> <li>実証炉 (電気出力210MW) が運転中 (2021年12月送電開始、2022年全出力運転予定)</li> </ul>
<p>日本</p> 	<p><b>経済産業省及び文科省によるNEXIPイニシアチブ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>原子力機構による高温工学試験研究炉 (HTTR) を用いた研究開発</li> <li>民間企業 (東芝ESS及び三菱重工業) による商用高温ガス炉開発</li> </ul>

## 安全性実証試験



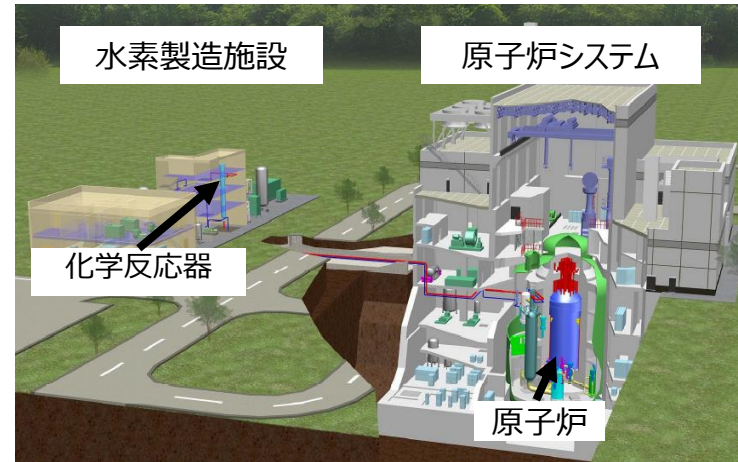
- ✓ 炉心冷却喪失試験 (OECD/NEAプロジェクト) を含む安全性実証試験、熱負荷変動試験などを実施
- ✓ 「固有の安全性」を実証

### 自己制御性に優れた固有の安全性を実証

JAEAは高温ガス炉技術について、

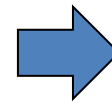
- HTTRで950°Cの出口温度 (世界記録) を達成
- HTTRの安全性実証試験で、「固有の安全性」を実証
- HTTR-熱利用試験計画で、原子力による水素製造を実証へ (熱利用にかかる安全規制を含む)

## HTTR-熱利用試験



- ✓ 2030年までにHTTRと水素製造施設 (メタンの水蒸気改質法) の接続技術を開発
- ✓ 原子炉と化学プラント接続に関する安全性確保の考え方を提案

### 高温ガス炉と水素製造施設の接続に係る安全設計を確立



高温ガス炉技術で  
世界のフロントランナー

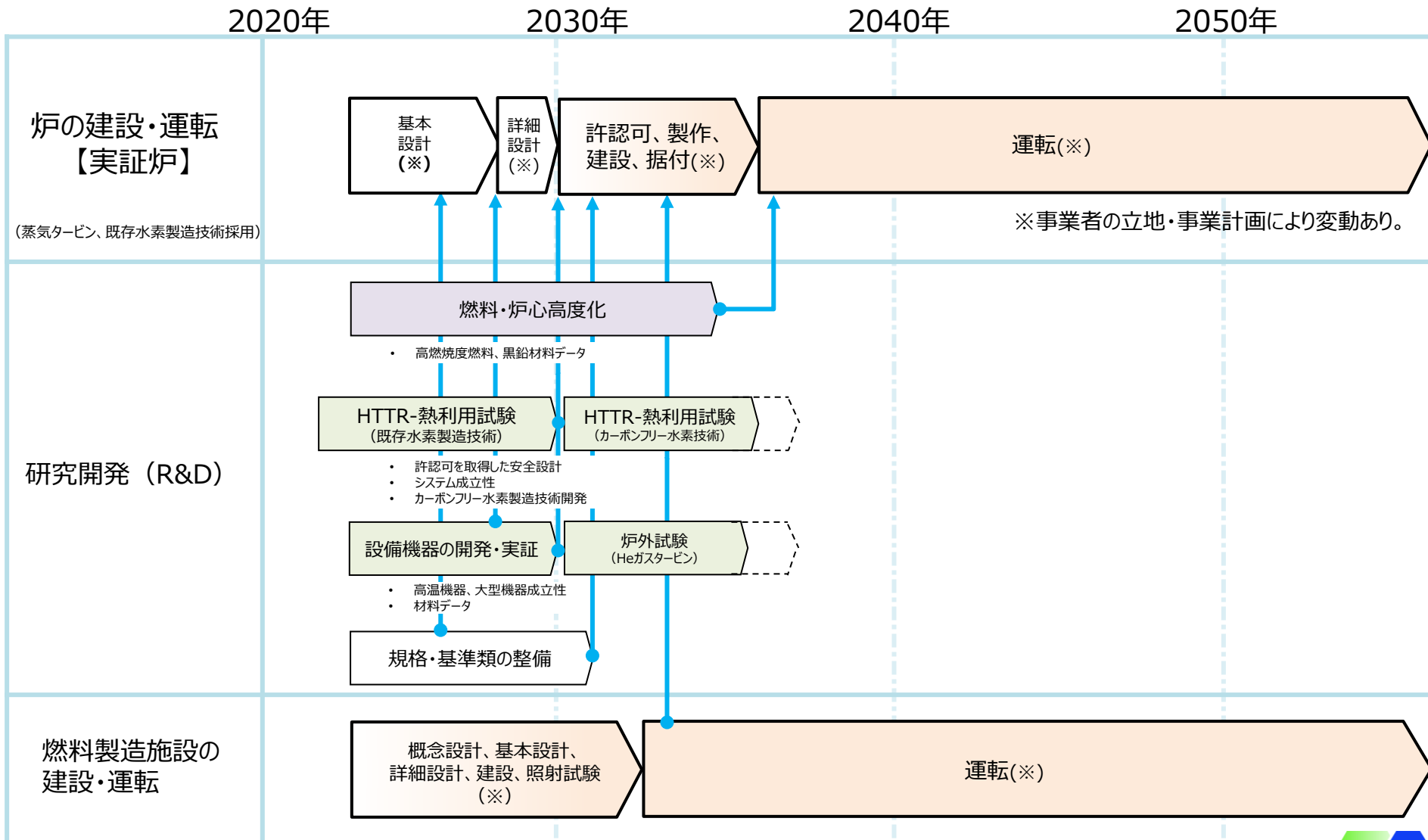
### 日本の高温ガス炉技術に対する海外からの期待

- 二国間協力：英国、ポーランド、米国等
- 多国間協力：OECD/NEA LOFCプロジェクト、GIF超高温ガス炉協力等



# 導入に向けた技術ロードマップ（高温ガス炉）

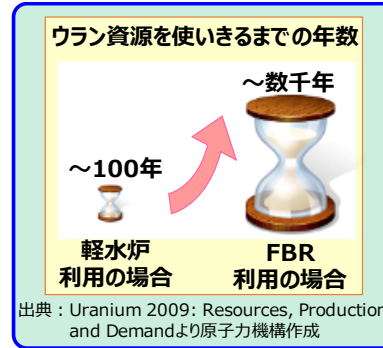
第4回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会  
 原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ  
 2022年7月29日開催より引用



# 高速炉サイクルの意義

- 軽水炉に比べ数十倍以上の**ウラン資源の有効利用**が可能
- 燃料のリサイクル（ウラン資源輸入不要）と技術自給（国産）により、**海外情勢に左右されない安定エネルギーを確保**

⇒ **有限資源の有効利用・持続性の確保  
エネルギーセキュリティの強化**

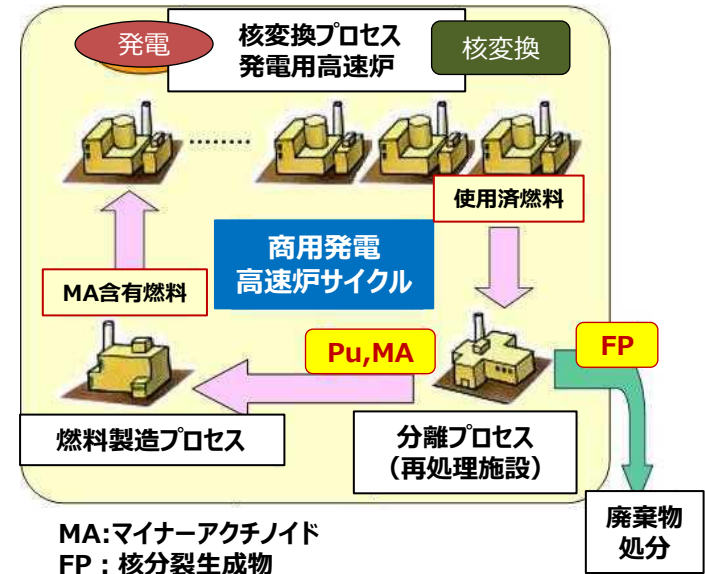


- 運転時に**CO<sub>2</sub>を排出しない**
- マイナーアクチノイド（MA）を核燃料としてリサイクルすることにより、**放射性廃棄物の量を減らし、放射能が減衰するまでの期間を大幅に短縮（10万年⇒300年）**することが可能
- エネルギー事情に応じ、**プルトニウムの生成／燃焼**が可能  
⇒ **環境への負荷を低減**

- ベースロード電源としての利用に加え、蓄熱技術との組み合わせにより電気出力を調整可能し、太陽光や風力等、**出力変動再エネを補完**  
⇒ **CO<sub>2</sub>排出せずに変動再エネと共存**

- 高い**自然循環能力**を有し、空気との熱交換が可能なることから、電源が喪失しても**長期に安定した崩壊熱除去が可能**（高速実験炉「常陽」で実証済み）  
⇒ **高い安全性**

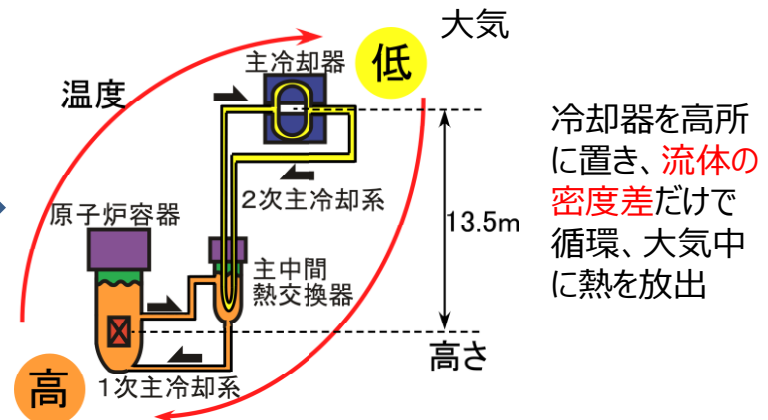
- 高速中性子を用いた**医療用RI**の製造によりがん治療などに活用  
⇒ **国民福祉向上への貢献**



MA: マイナーアクチノイド  
FP: 核分裂生成物

## 発電用高速炉利用型核変換システム

(文部科学省原子力研究開発・基盤・人材作業部会第10回資料より引用)



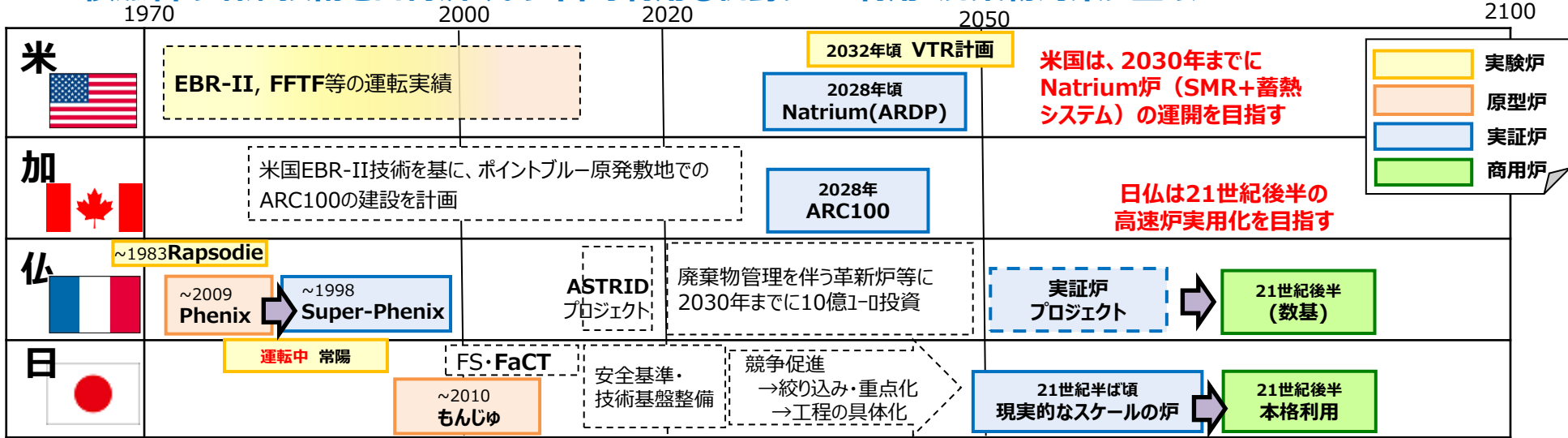
**電源を必要としない自然循環による炉心冷却  
(高速実験炉「常陽」で実証済み)**

**グリーン成長戦略で求められるイノベーションの実現**

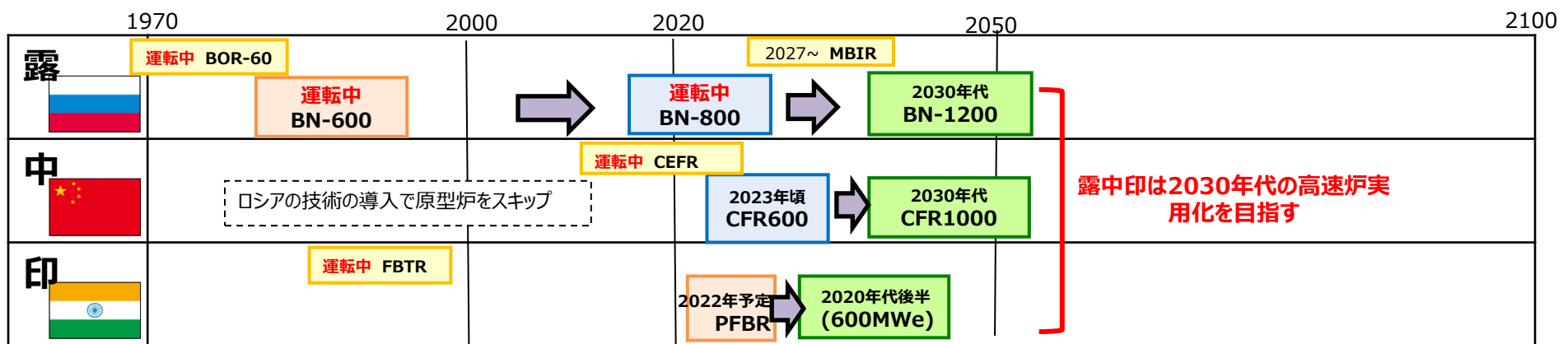
# 世界のナトリウム冷却高速炉の開発情勢

- 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して挑戦

## ■ 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

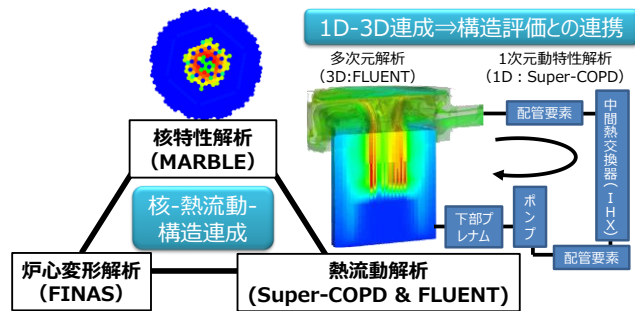


## ■ エネルギー安全保障の観点から高増殖を指向、早期の本格導入を目指す



# 高速炉サイクル実用化に向けた研究開発概要

○安全性 + 経済性：核・熱・構造の課題解決



設計・建設知見の反映  
もんじゅ知識ベース

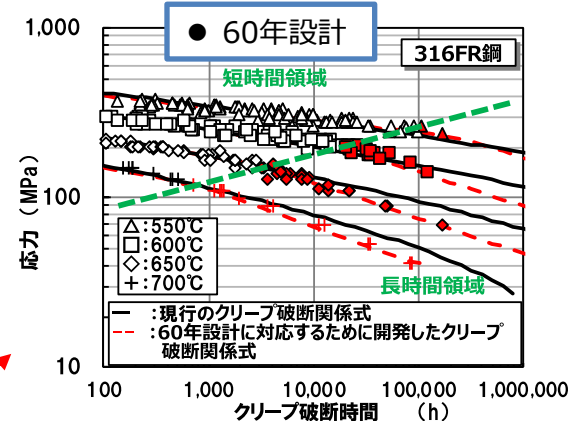
高品質の実験検証  
ナトリウム試験

○機器の性能・信頼性実証、  
設計評価手法の総合検証



冷却系機器開発試験施設 (AtheNa)

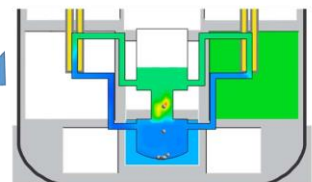
○構造・材料の規格・基準、維持規格



○シビアアクシデント評価：炉心物質移行

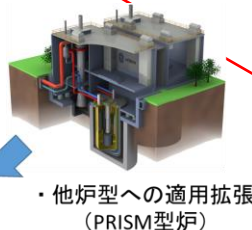


- ・モデル拡張 (炉心損傷、熱水力)
- ・ユーザー利便性向上

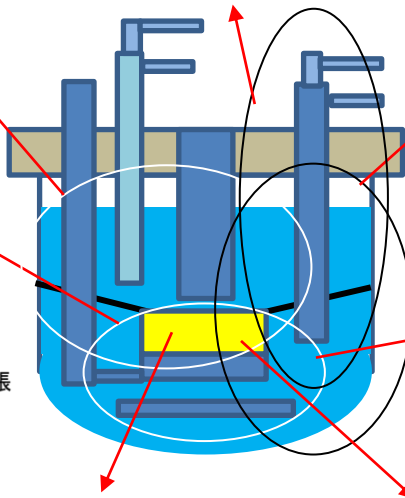


・評価精度向上  
(融体熱物性)

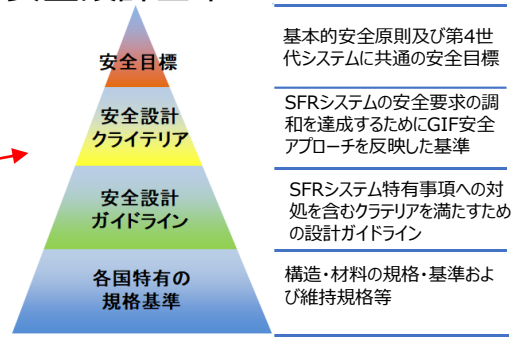
統合安全性評価シミュレーション基盤システム



・他炉型への適用拡張  
(PRISM型炉)



○安全設計基準



基本的な安全原則及び第4世代システムに共通の安全目標

SFRシステムの安全要求の調和を達成するためにGIF安全アプローチを反映した基準

SFRシステム特有事項への対応を含むクライテリアを満たすための設計ガイドライン

構造・材料の規格・基準および維持規格等

○実用炉向け燃料開発



炉心材料の許認可・照射データ

○高速炉燃料製造技術

簡素化ペレット法の要素技術



転動造粒、  
ダイ潤滑  
成型

遠隔製造・保守技術



○高速炉再処理技術

経済性・核拡散抵抗性に優れたプロセス技術



U, Pu, Np一括回収  
高効率抽出

MA分離回収技術



抽出クロマトグラフィ  
及び溶媒抽出法

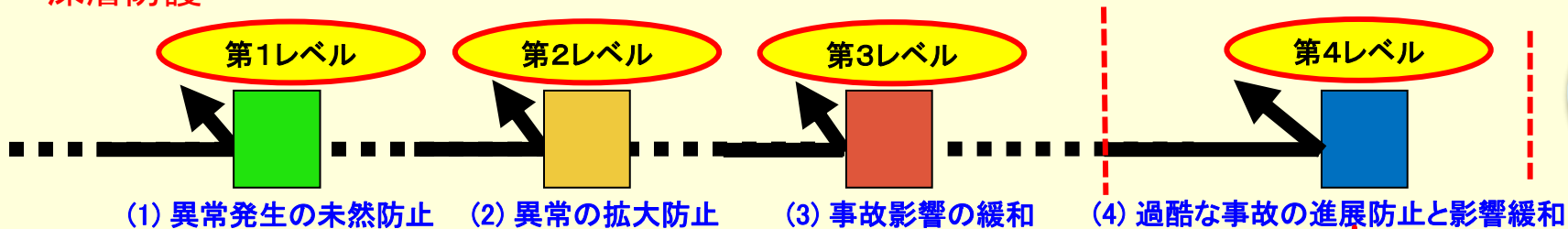
○原子力のさらなる技術革新

- ・脱炭素に向けた原子力の蓄熱・熱利用技術
- ・浮体免震技術による立地自由度向上
- ・3D-Printingによる高い自由度をもつ燃料製造  
複雑な燃料製造プロセスの一元化  
自動化、形状管理、傾斜材料……

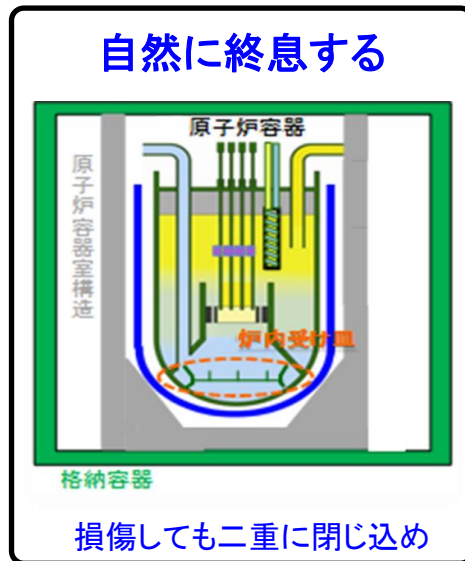
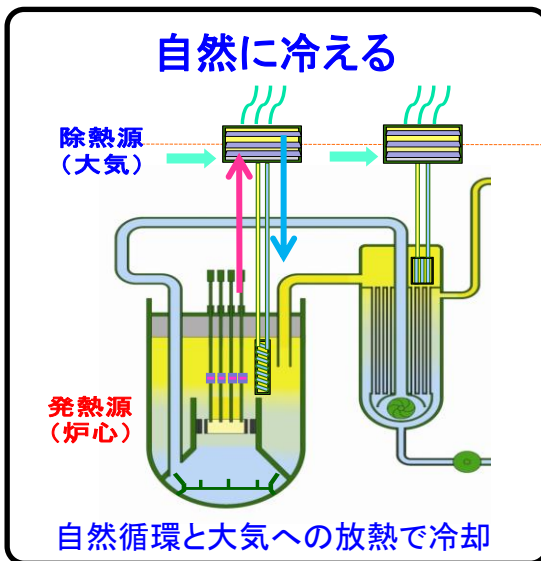
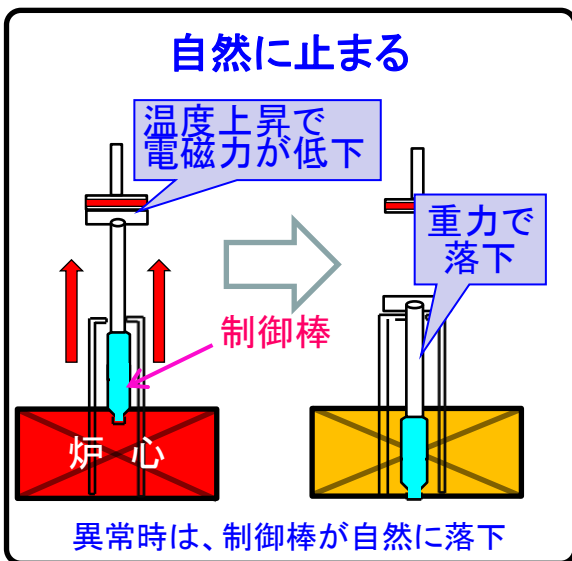
# 安全確保を堅牢とするシステム設計の考え方

- 高速炉の特徴を活かし、深層防護に基づく、受動安全を活用した堅牢なシステム
  - 「止める」に加えて、「**自然に止まる**」機能
  - 「冷やす」に加えて、「**自然に冷える**」機能
  - 「閉じ込める」に加えて、炉容器内・格納容器内で「**自然に終息する**」機能

## ■ 深層防護



敷地外緊急対応の必要性を回避



# 高速炉の高い安全性

◆ 「常陽」「もんじゅ」から得た知見・成果に加え、さらに技術革新を進めて、高水準の安全性向上技術を実現

シビアアクシデント防止・緩和対策の拡充

### 自然に止まる

#### 自己作動型炉停止機構

温度高で磁性を失う合金の物理特性⇒制御棒が落下、重力で挿入（受動的に炉停止）

### 自然に冷える

#### 自然循環除熱など 多重・多様な除熱システム

熱い流体が上昇する自然循環により、ポンプが動かなくても大気に放熱、炉心を冷却できる。

### 閉じ込める

#### 重大事故の炉内終息技術

ナトリウムを保持し易い特性を生かし、万一の炉心溶融時にも再臨界回避技術やコアキャッチャにより炉内で終息（公衆の退避不要）

ナトリウム冷却炉が本来持つ安全特性

**ほぼ常圧の冷却材**（軽水炉は70～150気圧）  
万一の容器破損時にもナトリウムが噴出せず、**ガードベッセル**で保持可能。  
**（空焚きにならない）**

外的事象対策

### 新規制基準を充足

地震、津波、火山、豪雪等

ナトリウムの化学活性対策（空気・水に触れると反応）

### 水や空気との接触を早期検知、 + 接触時の反応を抑える対策

#### 漏えい検知技術の高度化

Na中への水・蒸気の微小リークを早期に検出する

#### 漏えい時に空気との接触を限定化

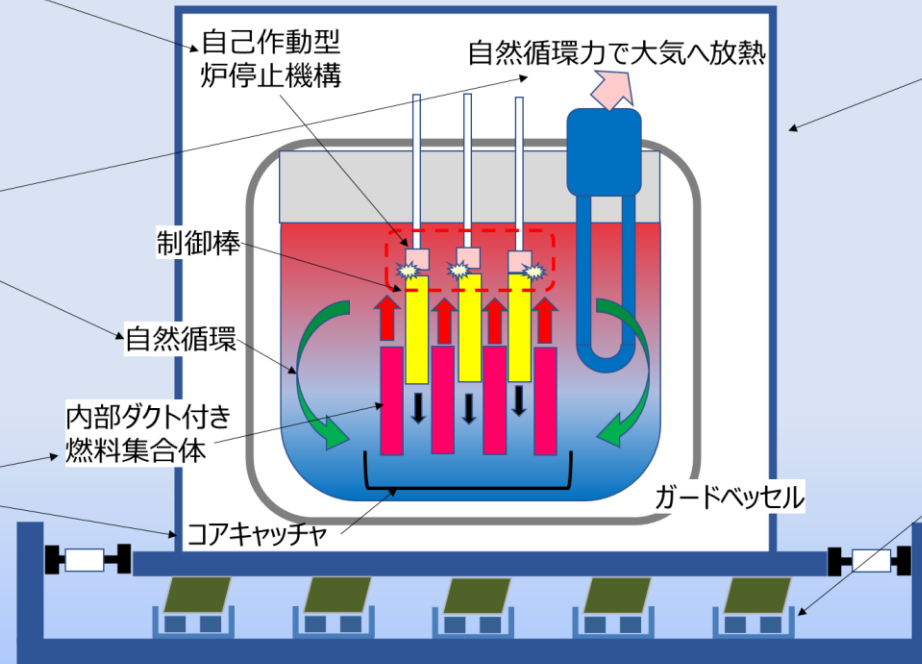
配管・機器バウンダリ**2重化**、  
区画化による影響範囲最小化

耐震性向上

### 地震の揺れを3次元で減衰

#### 3次元免震システム

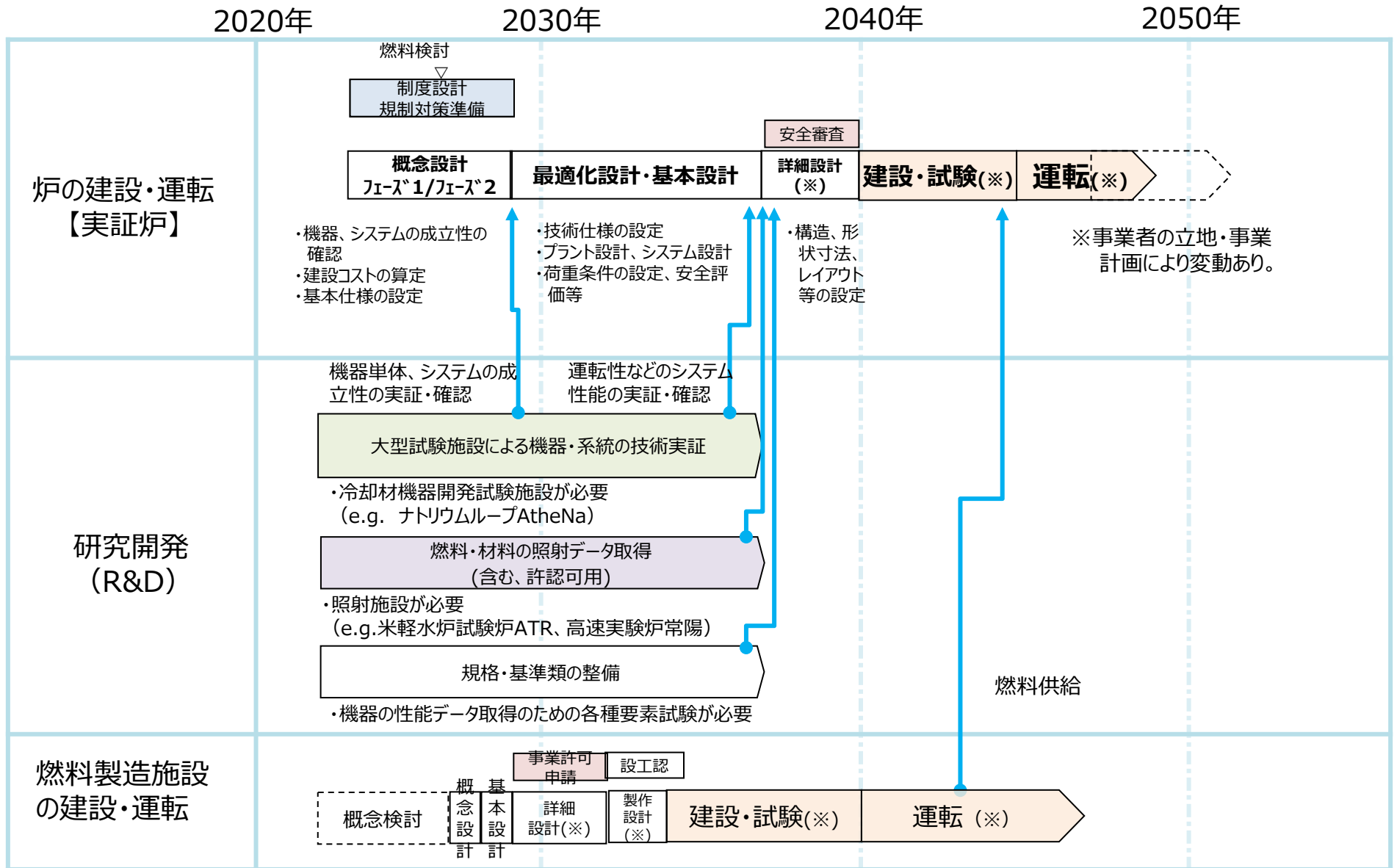
上下方向にも減衰させることでより強い地震でも耐えられる。





# 導入に向けた技術ロードマップ<sup>®</sup> (高速炉)

第4回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会  
 原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ  
 2022年7月29日開催より引用



## 原子力施設の廃止措置及び放射性廃棄物の処理処分の計画的遂行と技術開発の取組を進める

### □ 廃止措置・放射性廃棄物の処理処分に係る技術開発と成果の実装

- 1Fとの相互裨益の観点、低コスト化等を考慮した**戦略ロードマップ**の作成・技術開発、**デコミッショニング改革**のためのイノベーションの創出

### □ 放射性廃棄物の処理処分

- 低レベル放射性廃棄物の保管管理、減容及び安定化に係る処理
- 埋設事業→適宜工程等を見直し、地域活性化の検討等を含む立地対策、廃棄体受入基準整備及び埋設施設の基本設計に向けた技術検討
- 利用実態のない核燃料物質の集約管理へ貢献

### □ 原子力施設の廃止措置

- 「もんじゅ」、「ふげん」、東海再処理施設は、廃止措置計画に基づき、着実に推進
- その他の施設は、施設中長期計画に基づき、優先順位をつけて実施





- 原子炉はエネルギー利用のみならず、医療分野で利用される放射性同位体（RI）の製造に活用することが可能
- 高速実験炉「常陽」では、高速炉開発のみならず、RI製造への貢献も期待される

## 「常陽」でのRI製造のメリット

**医療用RIは全量海外に依存**

### ① 大量生産：中性子の密度が高く、加速器に比べて大量のRI製造が安価に製造可能

	製造量(μg)	コスト(円/μg)
原子炉(JRR-3) ※年間当たり	3,900	1,000
加速器 ※1照射当たり	42	33,000

原子炉と加速器でのモリブデン（Mo-99）の製造量・コスト面比較



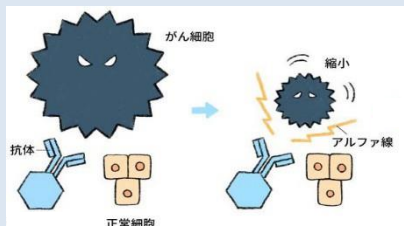
**質の高い医療に不可欠**

モリブデン（Mo-99）：核医学検査でがん転移の発見等に利用

### ② 希少なRI：高速中性子を活用して、希少なRI製造が可能

例：がん治療に使えるアクチニウム（Ac-225）の製造が可能

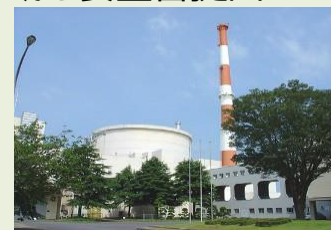
※減速材を併用することで、軽水炉と同様なRIも製造可能



アクチニウム(Ac-225等)：アルファ内用療法によるガン治療等に利用

## 医療用RI国産化への期待（JAEA試験研究炉の活用）

- 7つの医学会から要望書提出（2020.8:文科大臣, 2021.7:文科・厚労・経産・内閣府特命担当各大臣、原子力規制委員長）
- 複数がん患者会関連団体（2020.8:文科大臣）、全がん連（2021.5：文科・厚労大臣、公明党議員）から要望書提出
- 参議院・決算委員会にて医療用RI製造取組み強化質疑（2021.5）
- カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略に「常陽」への期待記載（2021.6）
- 内閣府原子力委員会 医療用等RI製造・利用専門部会設置（2021.11）
- 参議院・予算委員会にて医療用RI国産化体制整備質疑（2022.3）
- 内閣府原子力委員会 医療用等RI製造・利用専門部会 アクションプラン策定（2022.5）





# 高速炉開発にかかる人材育成・技術的知見の継承

○ 高速炉に関する人材育成や技術的知見、サプライチェーンの**維持・継承**が必要。  
具体的な方策は以下のとおり。

⇒ **国内外の実炉の開発プロジェクトへの参画**【国内が最も望ましい、海外プロジェクトも効果あり。ものづくりプロジェクトなどサプライチェーン維持施策も含む】

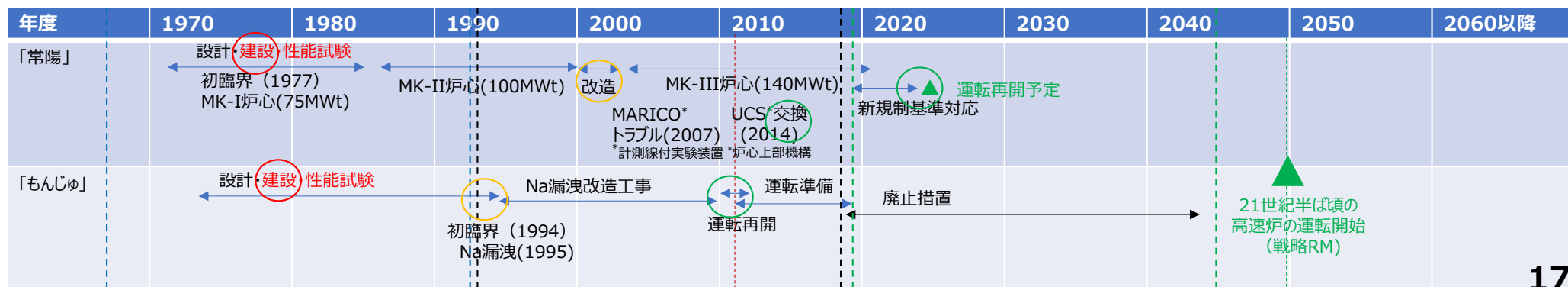
⇒ **世界に誇る研究基盤施設（「常陽」や「冷却系機器開発試験施設（AtheNa）」、DX）を活用した研究開発**【日本技術の優位を活かす】

※「人材育成の取組を進めるとともに、原子力機構と国内外の大学、民間の研究施設等との連携の強化」（高速炉開発の方針）が重要

○ 高速炉の最後の運転（常陽）は約15年弱前、建設経験（もんじゅ）は約30年前。**高速炉の建設や運転経験を有する人材の高齢化**（建設経験者は60～70代、運転経験者は40～50代）が進行



今世紀半ばの実証炉の開発を目指すためには、**実プロジェクトへの参画や、基盤研究施設を活用した研究開発の継続的な実施**により、**我が国が国が培ってきた高速炉の知的基盤、技術的基盤を維持・継承**していくことが不可欠



## まとめ

- カーボンニュートラル（CN）の達成と同時に、海外の情勢に左右されない且つ長期にわたる**エネルギーセキュリティ**を確保（安定・安価）することが重要。既に3割強（仏国では7割）の電力を賄った実績のある原子力技術は有力且つ現実的な選択肢
- 次世代炉は多目的利用にも有効：**再エネをサポート（変動成分吸収）**し、カーボンフリーで安定・安価なエネルギー供給を可能とする。電力以外に、水素製造や熱利用により**産業・輸送部門のCN化**に貢献
- 原子力を進める以上は、プルトニウムの管理、放射性廃棄物減容・有害度低減、ウラン資源の飛躍的利用効率アップを実現し、高い安全性を有する**高速炉サイクルの実用化**が不可欠。
  - すでに廃棄物減容にむけたサイクル技術は、MAの分離とペレット製造・炉内照射特性の把握など、多くの成果をあげている。
- 高温ガス炉の950°Cの運転温度、原子力による水素製造技術など、**トップランナーとして日本の技術を国内で実用化**することは、グリーン成長など「国益」にもつながる。
- 高速炉は、ロシアと中国が実用化レベルに到達しつつあり、輸出を視野に開発協力を進めている。日本も「もんじゅ」を経て実証レベルまで到達、それが国の「強み」であり、日仏協力、テラパワー社との協力など国際的にも注目されている。
- 高速炉は、がん治療で世界的に注目されるAc-225の大量製造が可能。原子力委員会で策定されたアクションプランに基づき、2026年度までに「常陽」で製造実証予定
  - **サプライチェーンの維持、技術自給率、優秀な人材の確保方策が課題**
  - ❖ 実用化に向けて**計画の早期具体化**、次世代炉に対する**安全規制・基準の構築**・予見性確保、**国内開発や国外開発参入**に対する国の支援施策が重要

# 参考資料

## ■ 日本のエネルギー情勢

- エネルギー自給率\*1：11.2%
- 電源構成\*2：火力 76.4%  
 変動ゼロエミ（太陽光、風力） 8.8%  
 安定ゼロエミ（安定再エネ、原子力） 14.9%
- CO<sub>2</sub>排出が非常に多い（CO<sub>2</sub>排出係数[gCO<sub>2</sub>/kWh]がフランスの8倍!!)
- ✓ 欧州では他国とのエネルギー連結が密、日本は島国で孤立（下表）

	日	仏	中	印	独	英	米
エネルギー-自給率	11%*1	54%*3	84%	65%	35%*3	71%*3	104%*3
主な国産資源	無し	原子力	石炭	石炭	石炭	石油 天然ガス	天然ガス 石油・石炭
太陽光 設備利用率	15%	14%	16%	18%	11%	11%	19%
風力 設備利用率	25%	29%	25%	23%	30%	31%	37%
国際パイプライン	×	○	○	×	○	○	○
国際送電線	×	○	○	○	○	○	○

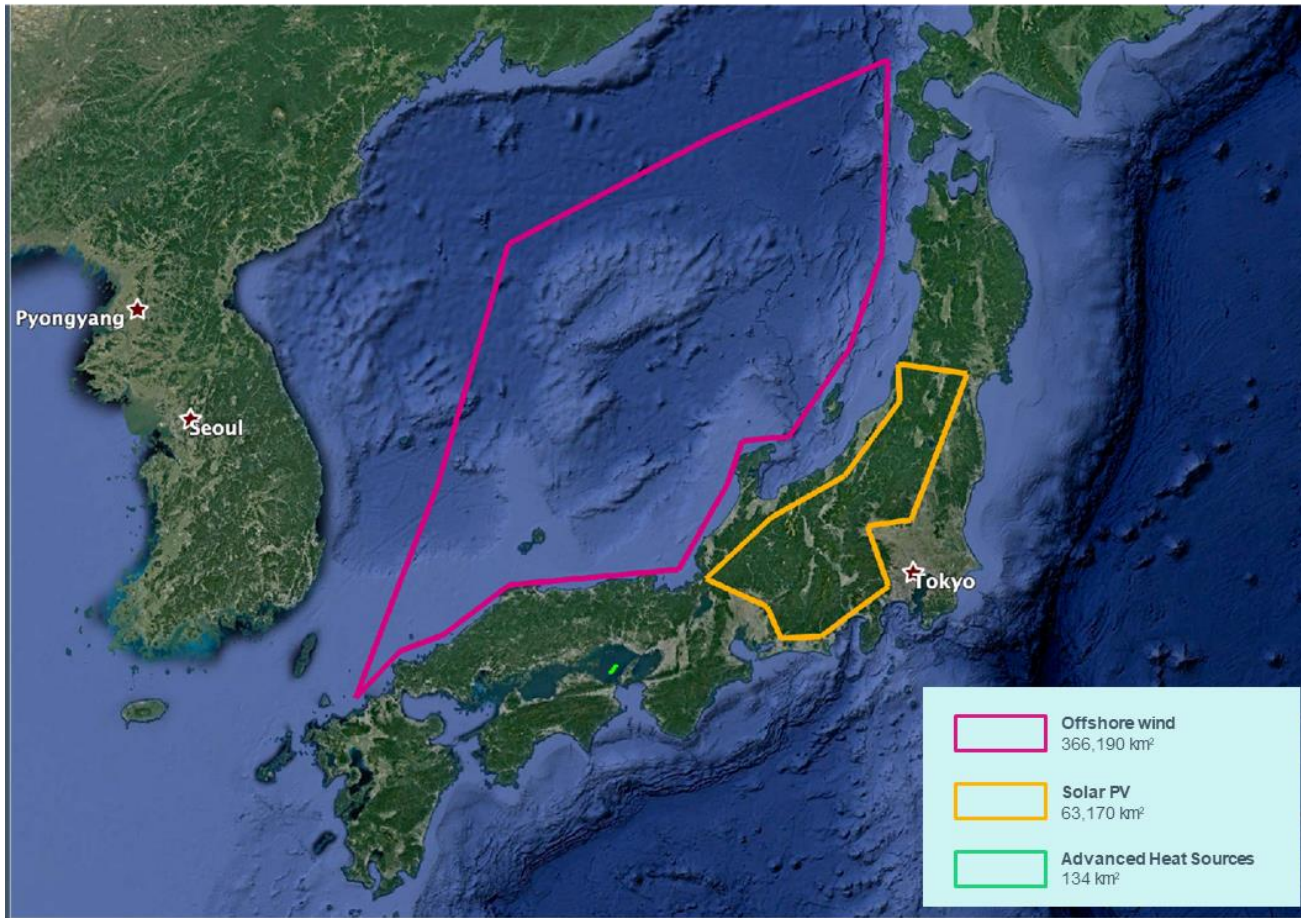
\*1 資源エネルギー庁 令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2022）

\*2 資源エネルギー庁ホームページ 集計結果又は推計結果（総合エネルギー統計）[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html#headline7](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline7)

\*3 資源エネルギー庁 日本のエネルギー2021 エネルギーの今を知る10の質問

## 参考：必要面積

- 2019年の年間石油使用量に相当する量の水素を製造するために必要な土地面積\*



\* イギリス研究機関Lucid Catalyst 2020年9月レポート、Missing Link to a Livable Climate: How Hydrogen-Enabled Synthetic Fuels Can Help Deliver the Paris Goals

# 第4世代炉とは

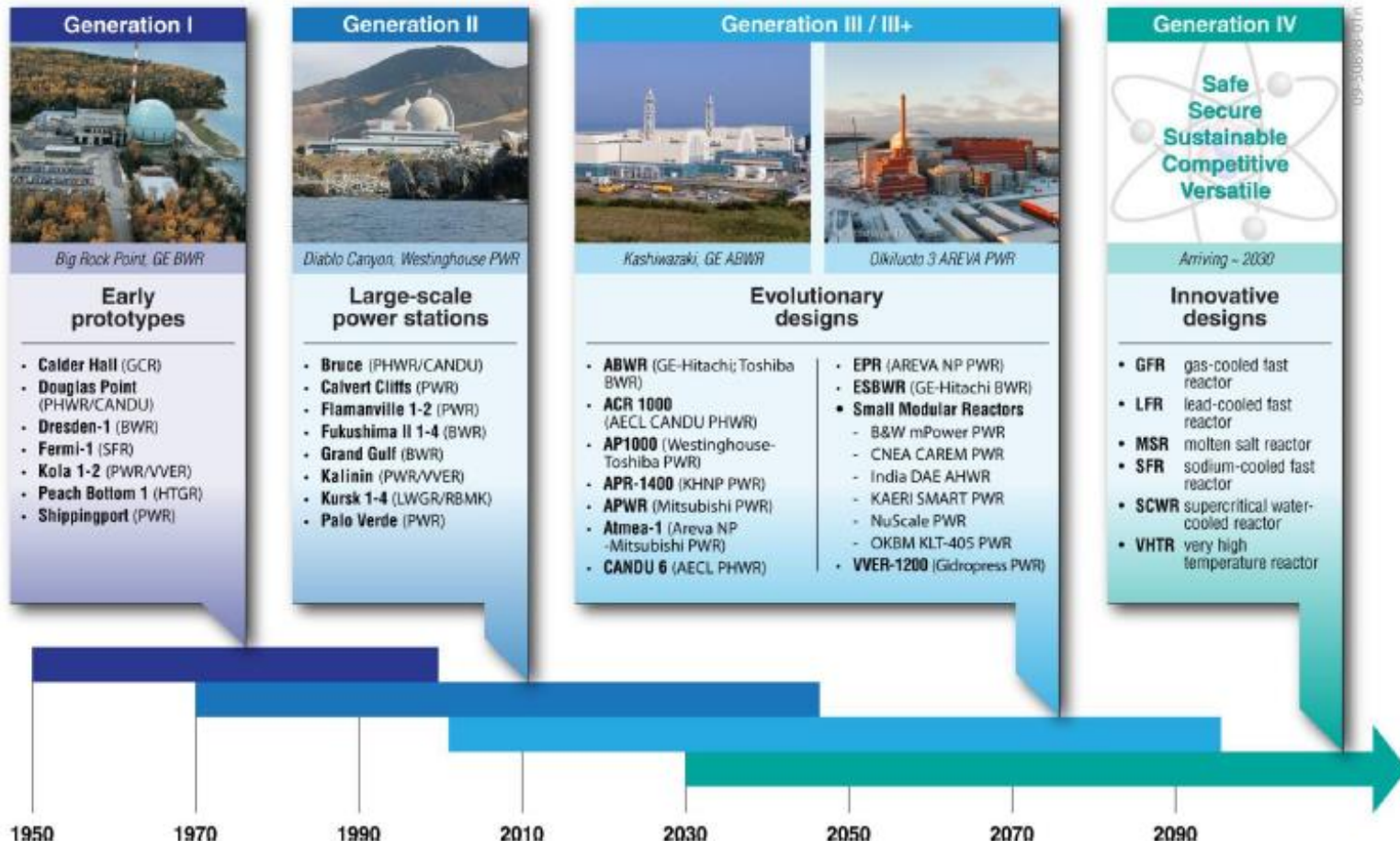
- 厳密な定義は無いが、第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)<sup>※</sup>においては、下表の開発目標を満たす原子炉システムと定義

分野	開発目標
安全性と信頼性	<b>安全性と信頼性</b> ・優れた操業時の安全性及び信頼性を有すること
	<b>炉心損傷</b> ・炉心損傷の頻度が極めて低く、その影響も極めて小さいこと
	<b>緊急時対応</b> ・事故収束をプラント敷地内で図り、プラント敷地外での緊急時対応が不要になること
持続可能性	<b>資源有効利用</b> ・大気汚染を伴わない持続可能なエネルギー供給源であること。また、世界規模のエネルギー供給において、長期にわたる安定したシステムの利用が可能であり、効率的な燃料の利用が可能であること
	<b>廃棄物の最小化と管理</b> ・放射性廃棄物の発生を最小限に抑えることで、それに伴う将来の長期的な負担を大幅に軽減すること。また、それにより、公衆の健康確保、環境保全が容易になること
核拡散抵抗性と核物質防護	<b>核拡散抵抗性と核物質防護</b> ・拡散及び盗難されにくく、並びに転用が困難であること。また、テロ行為に対する物理的防護がなされていること
経済性	<b>平均コスト</b> ・他のエネルギー源よりもライフサイクルコストで優位性をもつこと
	<b>資本のリスク</b> ・他のエネルギープロジェクトと同程度の財務リスクであること

※ 第4世代原子力システムの研究開発を多国間協力で推進することを目的に、2001年7月に発足した国際協力の枠組み。13か国1機関が参加。

# 第4世代原子炉システムとは

- 稼働中の発電用原子炉は、概ね第2～第3世代原子炉
- 今後の次世代原子炉として、**第3+世代炉**(EPR、ESBWR等)や**第4世代炉**がある。
  - **第3+世代炉**は、第3世代炉に対してより先進的な安全方策を導入
  - **第4世代炉**は、2030年頃の実用化を目標として、第4世代原子炉システム国際フォーラム(GIF: Generation IV International Forum)の場等で開発が進められている。





# 我が国の高温ガス炉技術

■ HTTR設計・建設・運転経験  
 (三菱重工、東芝/IHI、日立、富士電機、川崎重工等)

膨大な高温ガス炉技術データの蓄積

実用炉の最適設計可能

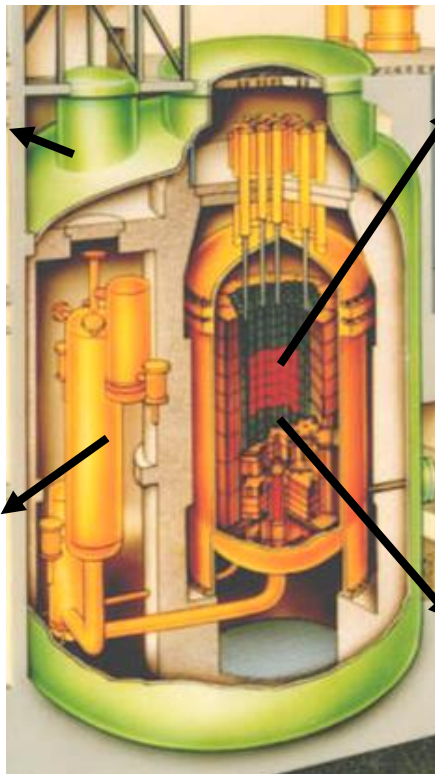
■ 高温金属材料ハステロイXR  
 (三菱マテリアルと共同開発)



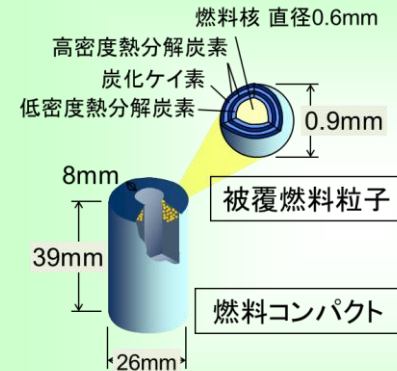
中間熱交換器

原子力用構造材として世界最高温度(950℃)で使用できる金属材料

950℃の熱を取り出し可能



■ 燃料 (原子燃料工業と共同開発)

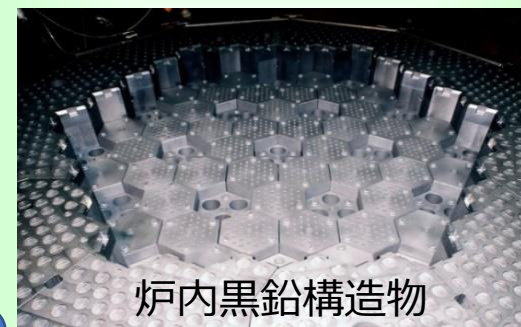


高い閉じ込め性能を有するセラミックを用いたウランの被覆

長期間(軽水炉の約3倍の燃焼度)、安定に被覆

■ 黒鉛材料IG-110  
 (東洋炭素と共同開発)

世界最高の高品位(等方性高密度)黒鉛



炉内黒鉛構造物

高強度・高熱伝導・耐照射性

高温ガス炉は、  
 国産技術のみで建設可能

	グレー水素	グリーン水素（将来的に高温ガス炉に接続する最適な水素製造法に関するFSを実施予定）		
	メタン水蒸気改質法	高温水蒸気電解法 (SOEC)	メタン熱分解法	IS法
概要	<p>触媒</p> <p><math>\text{CO}_2, 4\text{H}_2</math></p> <p><math>\text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}</math></p> <p><math>\text{I}_2</math></p>	<p><math>\text{H}_2</math></p> <p><math>\text{O}_2</math></p> <p>固体酸化物電解質</p> <p>陰極</p> <p>陽極</p> <p><math>\text{H}_2\text{O}(\text{g})</math></p>	<p>800~1200°C</p> <p><math>2\text{H}_2</math></p> <p>触媒</p> <p><math>\text{C}</math></p> <p><math>\text{CH}_4</math></p>	<p>水素 <math>\text{H}_2</math></p> <p>高温熱 (高温ガス炉)</p> <p>400°C 900°C</p> <p>酸素 <math>\text{O}_2</math></p> <p>ヨウ素 (I) の循環</p> <p>フンゼン反応 [ヨウ化水素と硫酸の生成]</p> <p>硫黄 (S) の循環</p> <p><math>\text{H}_2\text{O}</math></p>
CO <sub>2</sub> 排出	<p>（現在よりは減る）</p>	○ : CO <sub>2</sub> 排出なし	○ : CO <sub>2</sub> 排出なし	○ : CO <sub>2</sub> 排出なし
開発状況	大型のプロセスが世界中で多数稼働	米国でコストの検証中。日本では東芝ESSが開発中	米国モリス社等で開発中	JAEAが実用材料で実証中

# わが国における高速炉サイクル開発の経緯

2021年10月 **第6次エネ基** (国際連携を活用した高速炉開発の着実な推進)

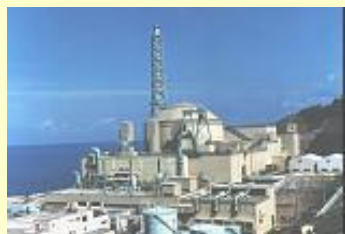
2021年6月 **グリーン成長戦略** (「戦略ロードマップ」に基づき高速炉開発を着実に推進)

2018年7月 **第5次エネ基** (核燃料サイクル開発維持)

2016年12月 **もんじゅ廃止措置決定**

2011年3月 **東日本大震災**

2005年10月 **原子力政策大綱** (2050年頃からの商用化)



1994年  
もんじゅ初臨界

1990

1977年  
常陽初臨界

1980



1970

1966年  
**動力炉開発の基本方針**

自主的な開発が必要、  
実験炉、原型炉の開発を推進

1985～1999年  
電気事業者が中心となって実証炉開発

1999～2006年  
実用化戦略調査研究 (FS)

2006～2011年 (凍結)  
FaCTプロジェクト

FaCT : 高速増殖炉サイクル実用化研究開発

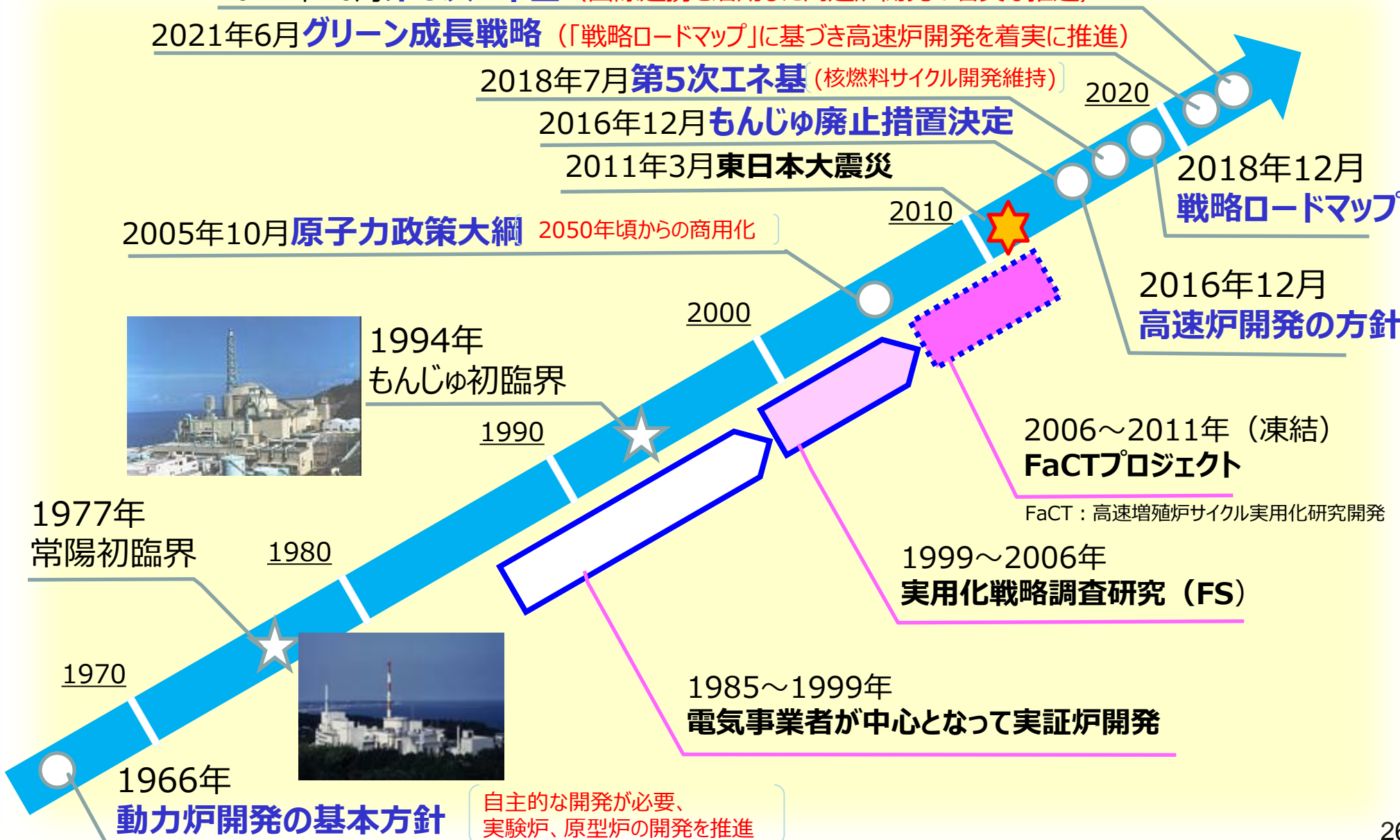
2016年12月  
高速炉開発の方針

2018年12月  
戦略ロードマップ

2020

2010

2000



## 「常陽」の使命

- 高速増殖炉の基礎・基盤技術の実証
- 燃料、材料の照射試験
- 将来炉の開発のための革新技术の検証



- 初臨界 1977年
- 積算運転時間 約71,000時間
- 試験用集合体の照射実績 約100体



## これまでの主な成果

- **増殖性能の確認**  
消費した以上の燃料が生成されることを確認
- **FBR核燃料サイクルの輪を完成**  
使用済燃料から取り出したPuを再び燃料として「常陽」に装荷
- **ナトリウムの自然循環による崩壊熱除去の実証**  
⇒後続炉の安全設計に反映
- **酸化物燃料の性能確認**  
燃料ペレット中心近傍を溶融させ、溶融限界線出力密度を確認
- **高速中性子照射場としての利用**  
利用実績（～2008年）：約4万試料、研究120件
- **自己作動型炉停止機構の開発**  
模擬制御棒を用いた機能確認試験を実施

再稼働後に期待される  
研究開発分野

放射性廃棄物減容化  
・有害度低減

高速炉開発

基礎基盤・多目的利用

原子力人材育成

## 「もんじゅ」の使命

- 発電プラントとしての信頼性の実証
- ナトリウム取扱技術の確立



- 【定格出力】 28万 kWe
- 【運転実績】
- 初臨界 1994年
- 原子炉運転時間 5300 時間
- 発電時間 883 時間
- 発電電力量 1 億kWh



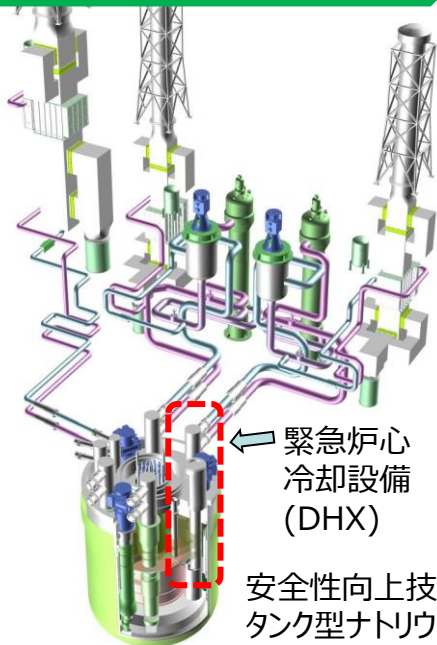
## これまでの主な成果

- **高速増殖炉の炉心の設計手法並びに機器の設計及び製造手法を確立**
- **高速増殖炉の運転・保守管理技術を蓄積**
- **我が国初の高速増殖炉システムによる発電を達成（40%出力まで）**
- **炉心の増殖性能(期待された増殖比約1.2)を確認**
- **ナトリウム機器・設備の運転、保守等の経験により取扱技術を蓄積**
- **ナトリウム漏えい対策技術を向上**
- **ナトリウム冷却高速炉に関する安全評価手法を開発**

～1992年	もんじゅ設計・建設	1995年8月～	性能試験（40%出力試験）
1993年10月～	性能試験（臨界試験）の実施	2010年5月	性能試験再開
1994年4月	初臨界	～2014年12月	運転再開を目指した準備
1995年8月	初送電	2016年12月	廃止措置へ移行

- 高速炉サイクル実用化研究開発（FaCT）およびその後の高速炉の**安全性強化**等を目指した研究開発、**日仏ASTRID協力**等を通じて、高速炉の実用化に向けた研究開発は着実に進展
- 安全性向上技術の**試験実証**と国際的な**安全設計基準**の整備を行い、それらを取り入れた**新しい高速炉の設計概念**を構築

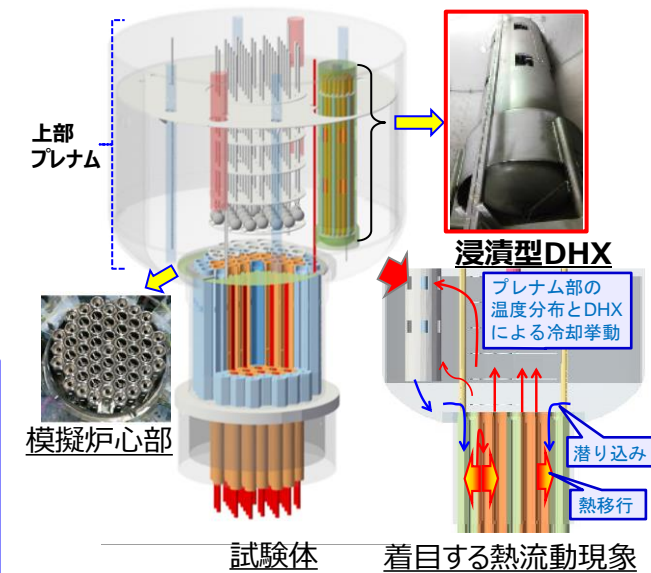
## 国際協力を活用したプラント設計技術の開発



- 日仏協力の成果によってタンク型ナトリウム冷却高速炉の設計技術を獲得
- 実証データに裏付けられた安全性向上技術と**SDC-SDG**、設計規格基準類を適用

## 安全性向上技術の開発（実証データの蓄積）

- 高速炉に適用可能な受動的炉停止機構、ナトリウムの**自然循環による除熱特性**、シビアアクシデント時の**熔融燃料流出挙動**等について、**実証性の高い試験**を実施してデータを蓄積
- データに基づき解析ツールを検証し、プラント設計に適用



## 自然循環除熱に関するPLANDTL-2試験

- 原子炉容器内の液体ナトリウムの流動挙動を詳細に計測（**日仏共同実験**として実施）

## 規格基準の整備

基本的安全原則

SDC

SDG

個別の規格・基準

SDC/SDGの位置づけ

- 実証された設計技術に裏付けられた**国際的な安全基準**を体系的に整備

SDC：安全設計  
クライテリア  
SDG：安全設計  
ガイドライン

# 核燃料サイクル技術開発の成果

- ❑ 廃棄物管理の負荷低減
- ❑ 地政学的リスクへの対応と安定供給



- 小規模マイナーアクチノイド (MA)リサイクル(**SmARTサイクル**)試験による実証
  - MA含有MOXペレット製造に向けて、**世界最高レベル2gのMA回収**を達成
- 「常陽」での**MA含有MOX燃料**の照射試験を通じて**照射挙動を把握**
- 核変換特性を向上させる**長寿命炉心材料** (ODS鋼被覆管等) を開発
- **国際協力** (米国、仏国等) を活用し、MAサイクルに係る研究開発を推進

## SmARTサイクル研究

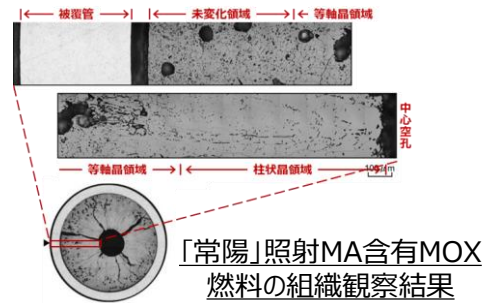


### SmARTサイクル研究

SmART : *S*mall *A*mount of *R*euse *F*uel *T*est *C*ycle

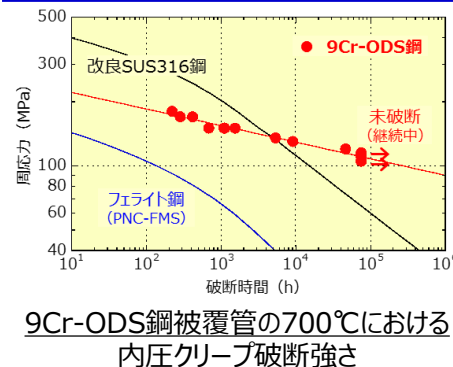
- **MAを中心とした分離変換データの取得とサイクル成立性の小規模実証**を目指す
- これまでに、ペレットレベルでの燃料製造・照射試験を可能とする**約2gのMAを回収**

## MA含有MOX燃料の照射試験



- 「常陽」短期・高線出力試験に供したMA含有MOX燃料について**Am等の再分布挙動に関する定量データ**を取得、照射挙動評価に必要な**詳細な組織変化データ**を取得
- 次期照射試験に向けて**MA含有MOX燃料設計コード開発を継続**

## 長寿命炉心材料の開発



- ODS鋼被覆管が高速炉の実用化段階の使用条件に相当する高温・長時間環境において**世界最高レベルのクリープ強度を維持**し、イオン照射後も**酸化物分散粒子を含む微細組織が安定であることを実証**
- ODS鋼被覆管の量産技術開発の一環として**大型アトライターを整備し、試作・評価試験を実施**

# 燃料再処理技術開発の概要

## 清澄

燃料溶解で発生する固体状の残渣を分離回収する技術



## コプロセッシング法

従来の溶媒抽出技術を改良したU-Pu共回収プロセス技術

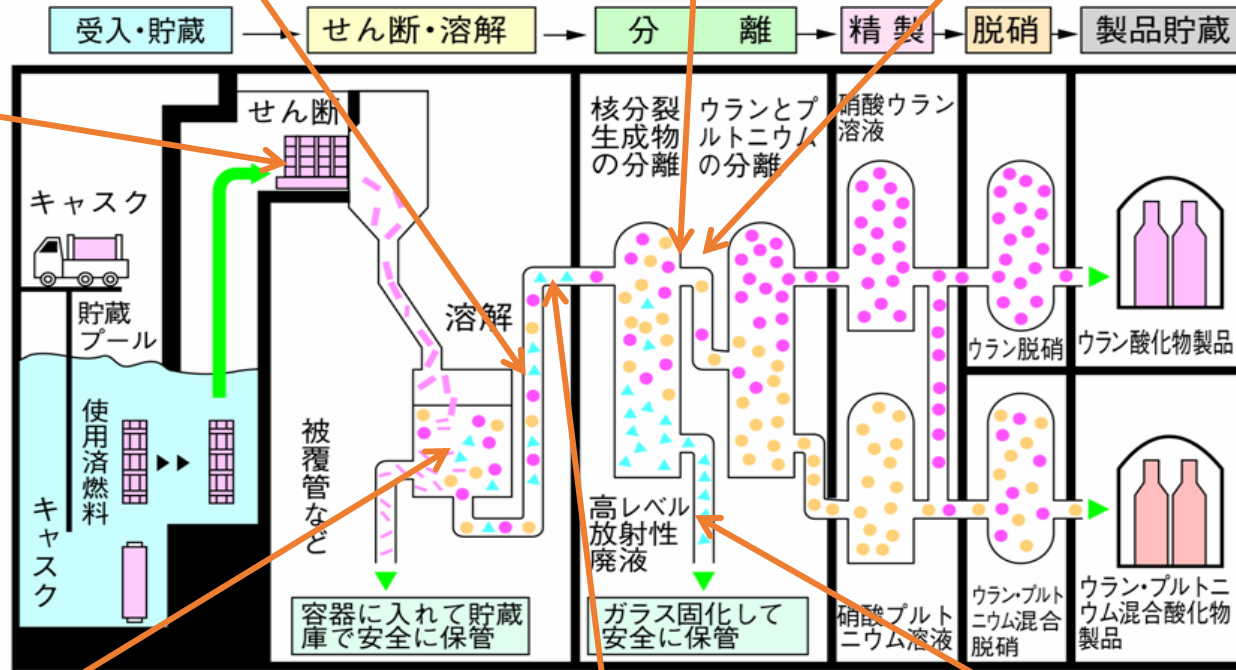
## 抽出機器

小型で高性能を有する遠心抽出器の開発



## 解体・せん断

燃料ピン束を収納するラッパ管を解体し、内部の燃料ピンをせん断するシステム技術



## 廃棄物低減化

濃縮操作により、全体の放射性廃液を極低レベルと高レベルに分ける技術

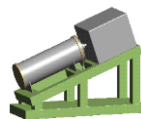
## 溶解

Pu含有量の高い高速炉燃料の溶解技術



## 晶析

冷却操作で燃料溶解液からUの大半を粗分離する技術



## MA回収

高レベル放射性廃液からマイナーアクチノイド(MA)を分離回収する技術

