



資料 2  
科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会  
原子力科学技術委員会（第35回）  
R5.12.20

# 次世代革新炉の開発の現状と課題

2023年12月20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

理事・部門長 大島 宏之

# 革新炉に関する政策等

## グリーン成長戦略（原子力に関連する記載）

- 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

⇒ 「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・革新炉に関連する記載）

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）：

- 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

## GX（グリーントランスフォーメーション）実行会議（原子力・革新炉に関連する記載）

「GX実現に向けた基本方針 ～今後10年を見据えたロードマップ～」

- 原子力はエネルギー**安全保障に寄与し脱炭素効果の高い電源**、**最大限活用**
- 2030年度電源比率20～22%の確実な達成に向け、**安全最優先**で再稼働を進める
- **次世代革新炉の開発・建設は、廃止を決定した炉の建て替えを対象に具体化を進める**

<p><b>革新 軽水炉</b></p>  <p>プラント概念*2</p>	<p>新たな安全性向上技術（コアキャッチャー等）を備えた大型の軽水炉。 <b>既存の軽水炉技術がベース</b>のため、既存の軽水炉サプライチェーンを活用可能、実現可能な時期の予測も容易</p>
<p><b>小型 軽水炉</b></p>  <p>小型モジュール炉プラント (NuScale Power社提供図)</p>	<p>電気出力300MWe以下。工場でユニット（モジュール）生産することで、工期や建設費を削減。<b>既存の軽水炉技術がベース</b>。 投資リスクの低減や分散電源等の将来ニーズを念頭に置いた オプションとして重要</p>
<p><b>高温 ガス炉</b></p>  <p>高温工学試験研究炉 (HTTR)</p>	<p>取り出せる熱の温度が高いため（900℃以上）、高効率の発電に加えて、水素製造等、多様な熱利用が可能。技術実証に向け、<b>国際連携の可能性を追求しながら、開発を推進中</b>（小型炉）</p>
<p><b>高速炉</b></p>  <p>「常陽」</p>	<p>高速中性子を利用することで、核燃料サイクル（ウラン資源の有効利用、放射性廃棄物の燃焼等）が可能。技術実証に向け、「常陽」「もんじゅ」の経験を活用し、<b>国際連携の下で開発を推進中</b>（小～大型炉）</p>

\*1 以下の資料を参考にして作成

[1] 資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 第29回原子力小委員会、革新炉開発の技術ロードマップ（骨子案）、2022年8月9日

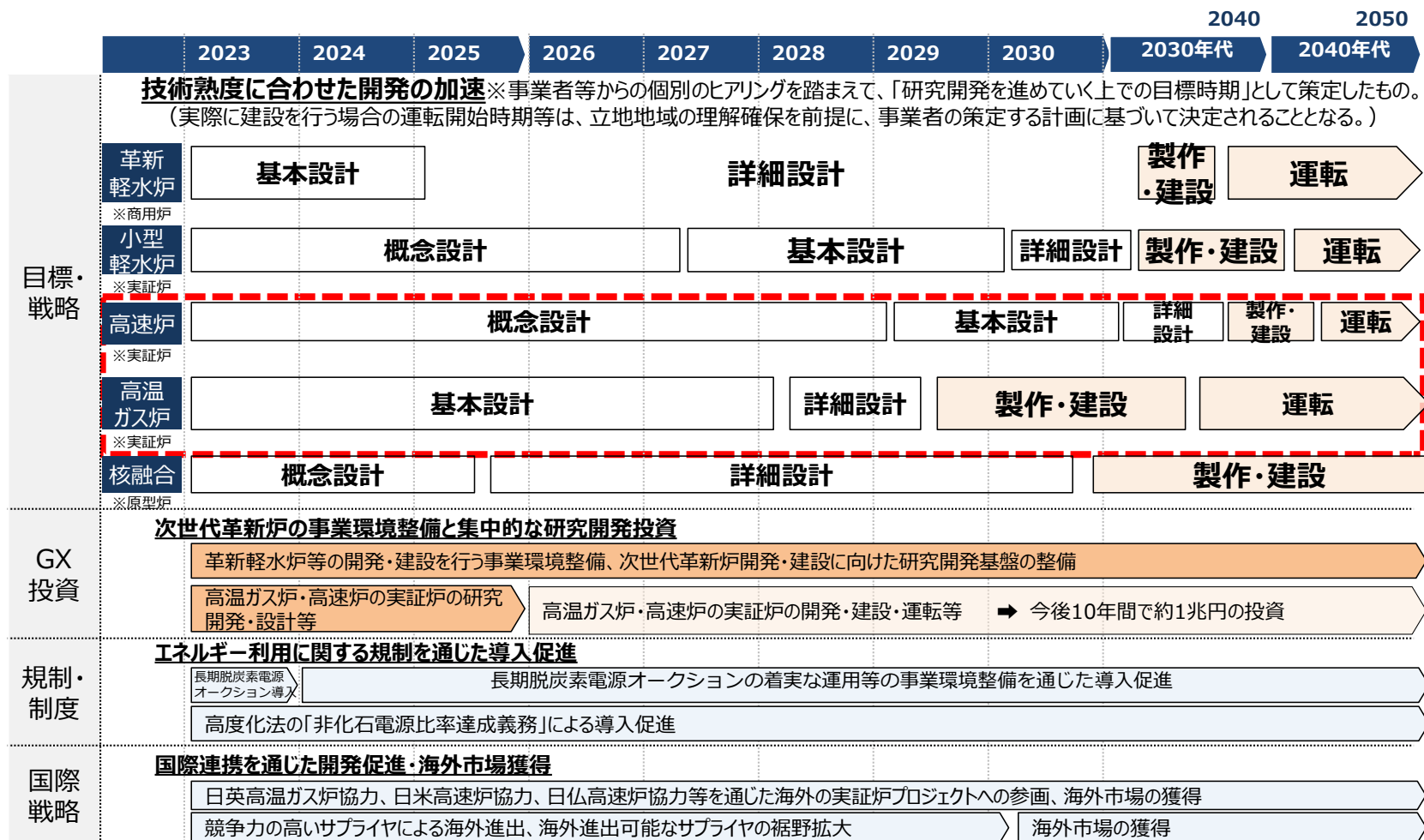
[2] 日本経済新聞、きょうのことは、次世代型原発とは 安全性向上、効率よく発電、2022年8月25日  
(<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC246DB0U2A820C2000000/>)

\*2 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 第1回革新炉ワーキンググループ、三菱革新炉開発の取組み、2022年4月20日

**GX実現に向けた基本方針**  
**<令和5年2月10日 閣議決定>**  
 参考資料から引用追記

## 【今後の道行き】 事例 16 : 次世代革新炉

- 安全性の確保を大前提として、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組む。



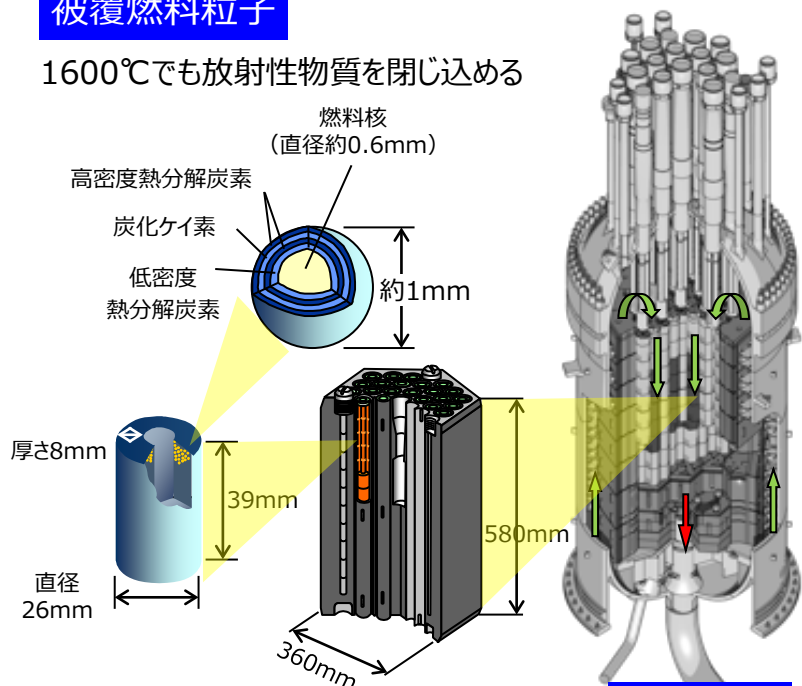
# 高温ガス炉の研究開発について

## ●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

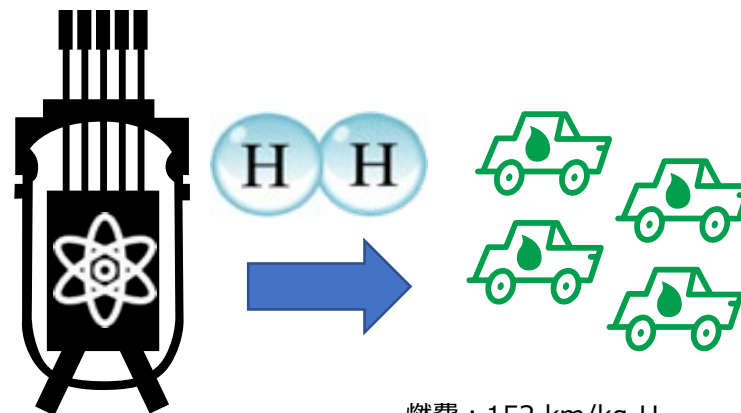
耐熱温度2500℃

### 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

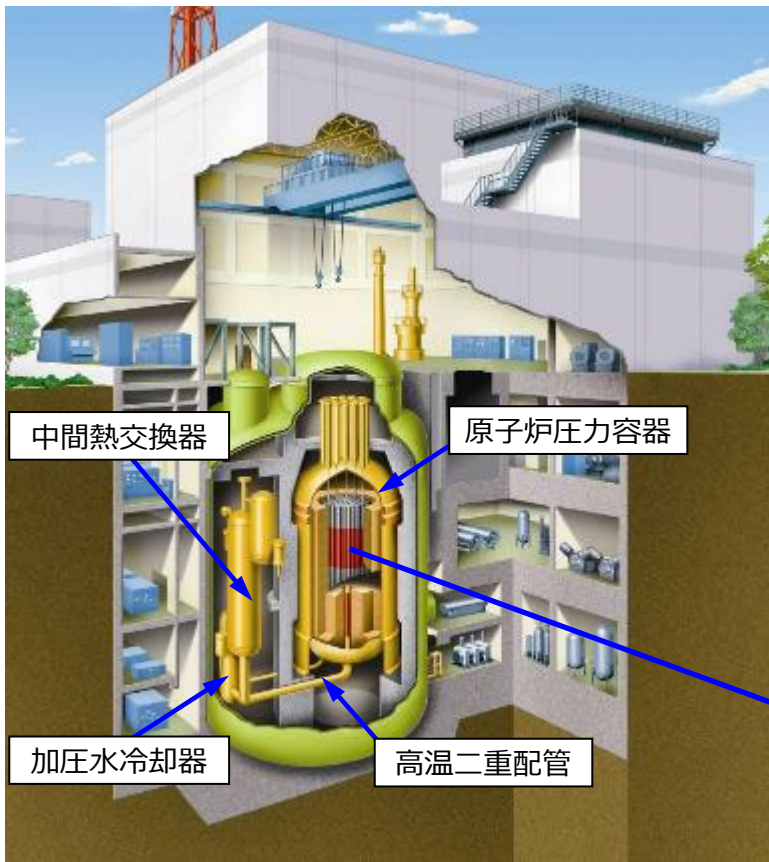
高温ガス炉\* (熱出力250MWt) で、燃料電池車  
30万台/年分の水素製造が可能

\* 水分解による水素製造効率50%、稼働率80%を仮定

<p>英国</p> 	<p><b>エネルギー安全保障・ネットゼロ省（DESNZ）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>DESNZは、新型モジュール炉として高温ガス炉を選定し、2030年代初頭までに高温ガス炉を実証する計画</li> <li>英国国立原子力研究所（NNL）とJAEAが参加するチームが、英国の高温ガス炉実証炉プログラムの基本設計を行う事業者として採択（2023年7月）</li> <li>NNLが、燃料開発プログラムの製造技術開発等を行う事業者として採択される（2023年7月）。原子力機構と連携し、英国における燃料製造技術を開発</li> <li>NNLとJAEAは、包括的な高温ガス炉技術に係る協力覚書及び英国高温ガス炉実証炉プログラムの基本設計に係る実施覚書を締結（2023年9月）</li> </ul>
<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（ARDP）、2020年～）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>～2028年に稼動する革新原子炉の建設を支援中</li> <li>DOEはARDPの助成金受給者の1つにX-energy社（高温ガス炉）を選定</li> <li>X-energy社は、2029年の運転開始を目指し、テキサス州のダウ社※の製造拠点に高温ガス炉（Xe-100：750℃、電気出力80MWe）を4基建設することを発表（2023年5月） ※世界的な化学製品メーカー</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研究炉の設計のための予算を獲得</li> <li>高温ガス炉研究炉（HTGR-POLA：750℃、原子炉熱出力30MWt）の基本設計を開始（2021年）</li> <li>原子力機構は、研究開発協力に基づき、ポーランドの高温ガス炉研究炉の基本設計に協力</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-10：700℃、原子炉熱出力10MWt）を用いた研究開発</li> <li>実証炉（HTR-PM：750℃、電気出力210MWe）が運転中          （2021年12月送電開始、2022年12月全出力運転開始、2023年12月に商用運転開始）</li> </ul>
<p>日本</p> 	<p><b>経済産業省による高温ガス炉実証炉開発事業開始（2023年）</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>超高温を利用した水素大量製造技術実証</li> <li>高温ガス炉実証炉（～900℃）の設計・建設、要素技術の開発及び燃料製造などのサプライチェーン検討</li> <li>技術評価委員会にて、三菱重工業株式会社を中核企業として選定（2023年7月）</li> </ul>



## HTTR (高温工学試験研究炉)



中間熱交換器

原子炉圧力容器

加圧水冷却器

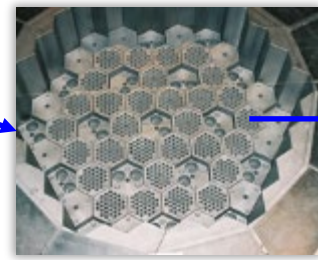
高温二重配管

### 日本初の高温ガス炉

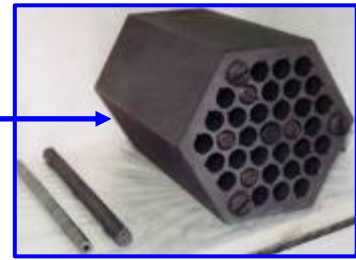
●原子炉熱出力	30MWt
●冷却材	ヘリウムガス
●原子炉入口／出口冷却材温度	395/850,950℃
●1次冷却材圧力	4MPa
●炉心構造材	黒鉛

1998年11月	初臨界
2010年 3月	950℃での連続50日運転
2010年12月	安全性実証試験*
2021年 7月	新規基準対応を経て運転再開
2022年 1月	安全性実証試験*

\*OECD/NEA国際協カプロジェクト



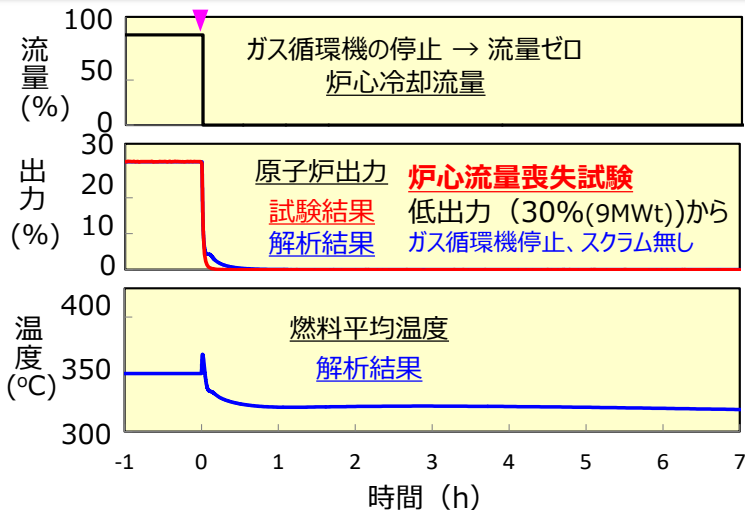
炉心の中心部



炉心の黒鉛ブロック

- 高温ガス炉HTTRは世界最高温度950℃を達成
- 高温ガス炉は国産技術のみで建設可能

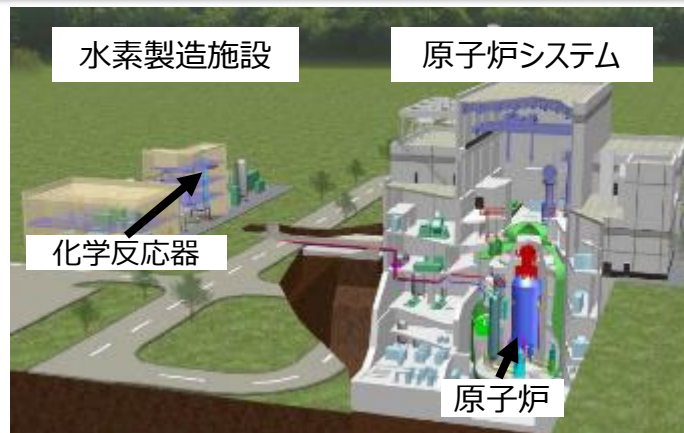
## 安全性実証試験



- ✓ 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、熱負荷変動試験等を実施
- ✓ 「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**

## HTTR-熱利用試験

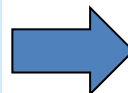


- ✓ 2030年までにHTTRと水素製造施設（メタンの水蒸気改質法）の接続技術を開発
- ✓ 原子炉と化学プラント接続に関する**安全性確保の考え方を提案**

**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**

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）

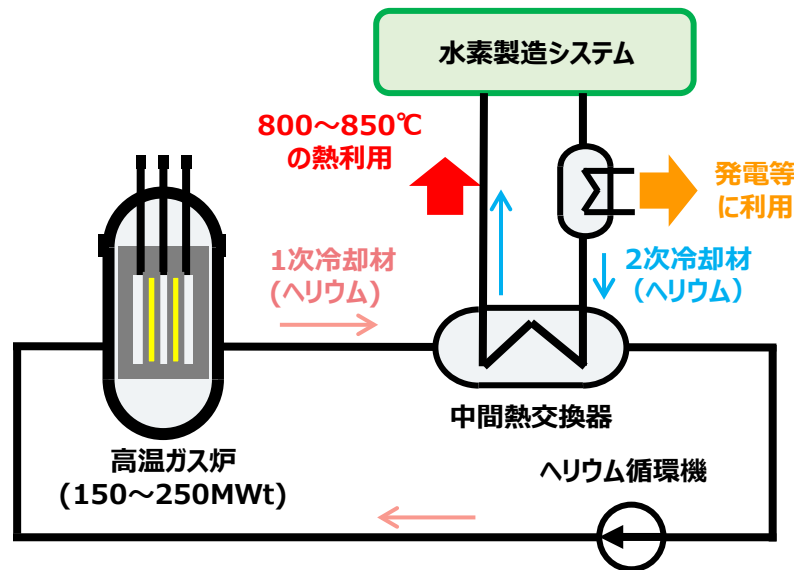


高温ガス炉技術で  
世界のフロントランナー

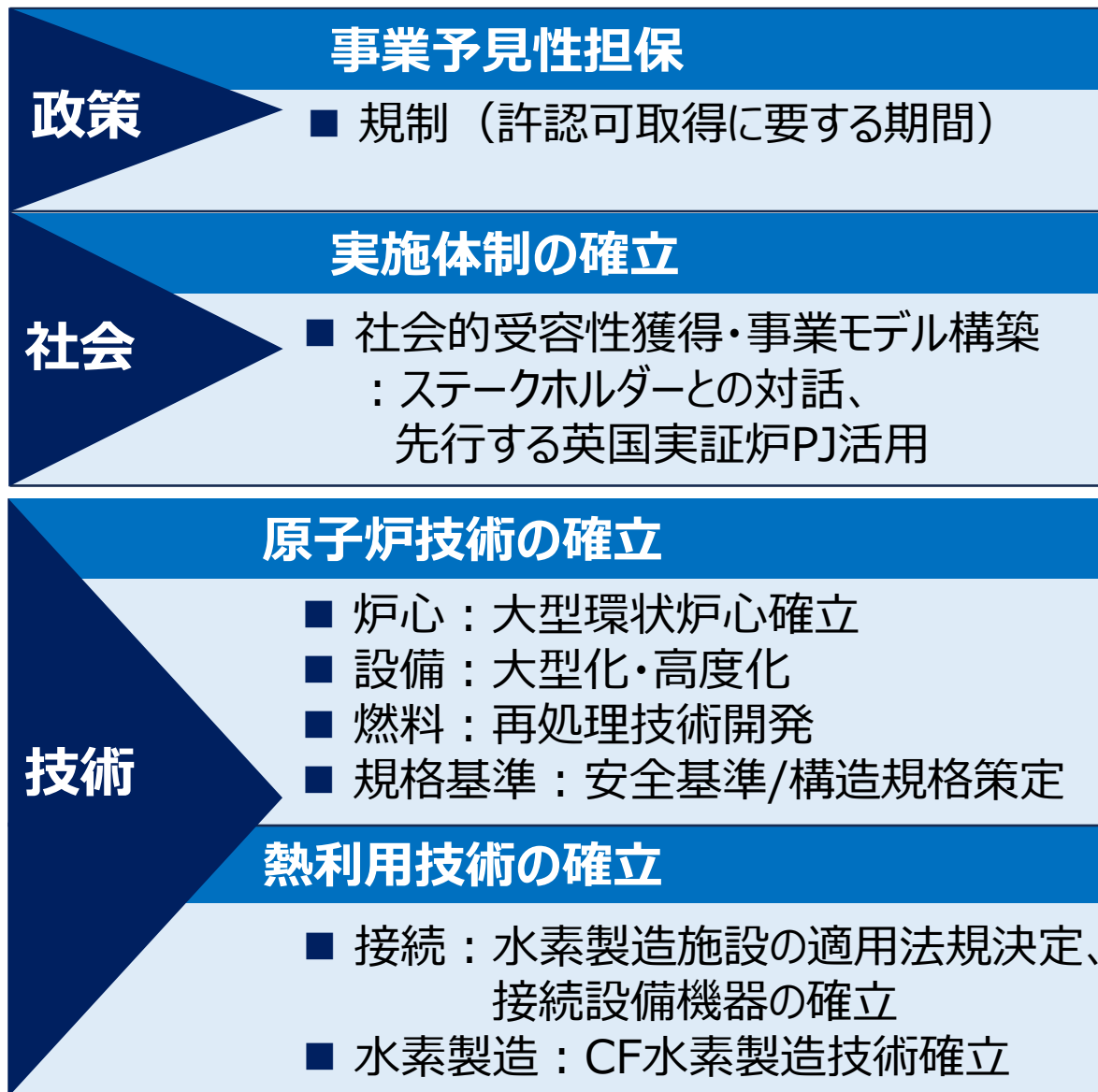
**日本の高温ガス炉技術に対する海外からの期待**

- 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

- 高温ガス炉（原子炉出口温度～900℃）を熱源として800℃を超える超高温を水素製造施設に供給
- 水素製造で使用しない熱は、発電を行い、製鉄所等で利用
- 水素製造施設には、カーボンフリー（CF）水素製造法を採用し、大量かつ安価な水素を供給
- CF水素製造技術の技術成熟度を見極め、採用する水素製造技術を選定



	メタン水蒸気改質法	高温水蒸気電解法	メタン熱分解法	IS法
概要				
	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$	$\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C(s)}$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$



# 高速炉の研究開発について

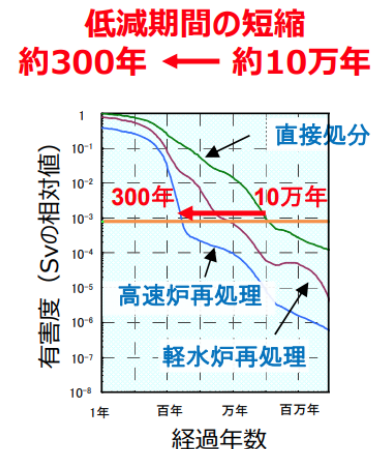
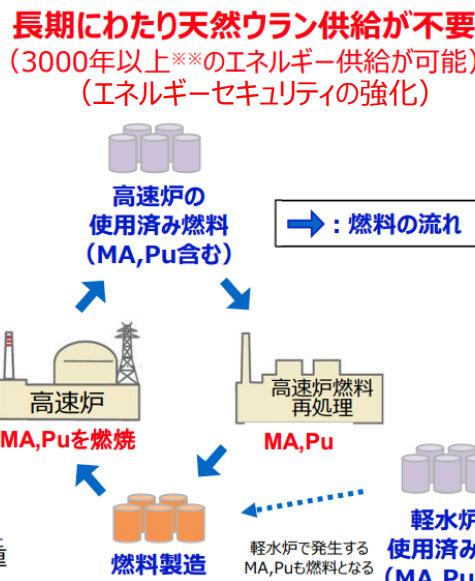
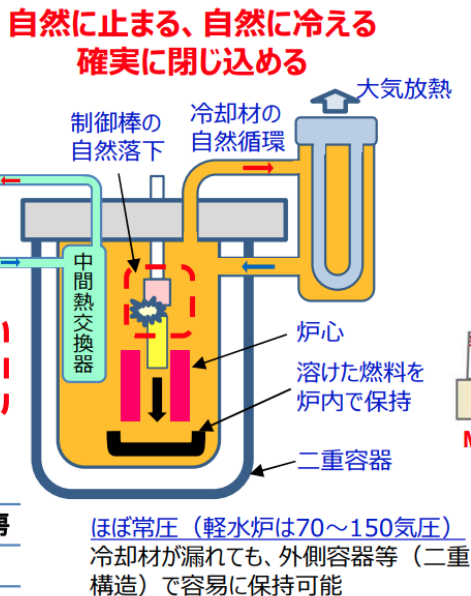
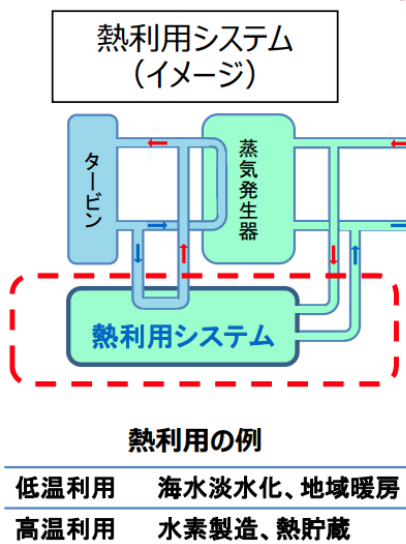
- <定義> ● **高速中性子**により、核分裂連鎖反応が維持される原子炉
- <利点> ● 優れた**安全性**（自然に止まる・冷える・確実に閉じ込める）
- **資源の有効利用**、Pu・MA※**燃焼**により高レベル放射性廃棄物の**減容化、有害度低減**
- 高温/低温（約500℃/約200℃）を活用した**熱利用** ※マイナーアクチノイド：半減期が長く、強い放射線を発する
- ほぼ常圧であるため、薄肉構造が可能かつ液位確保が容易
- <課題> ● 化学的に活性な**金属ナトリウムの取扱い**
- 日本が国際安全基準の議論をリードするも、**安全規制等の整備**に時間を要する
-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

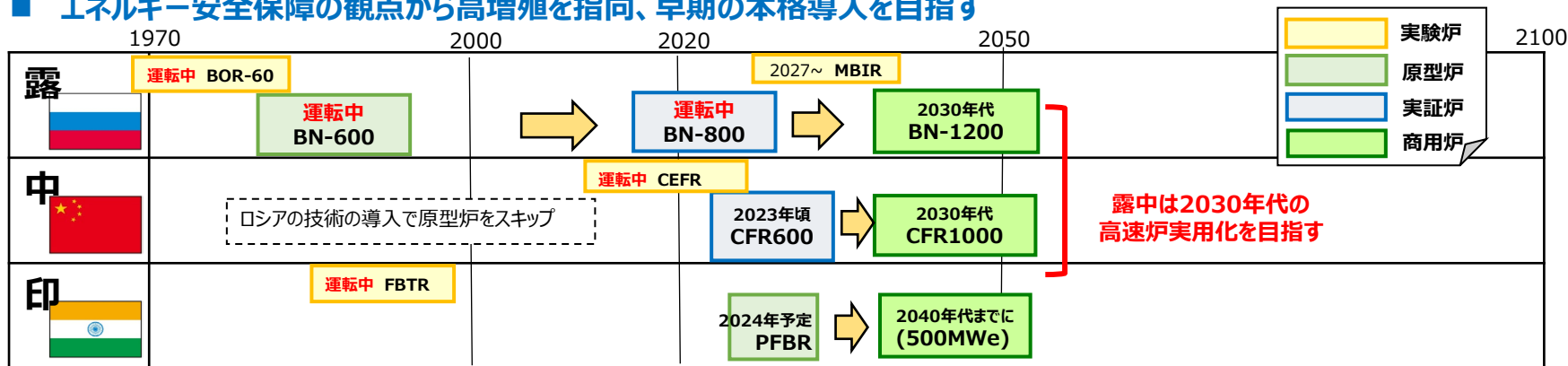


— 1年間の軽水炉運転に必要な天然ウランの有害度に相当

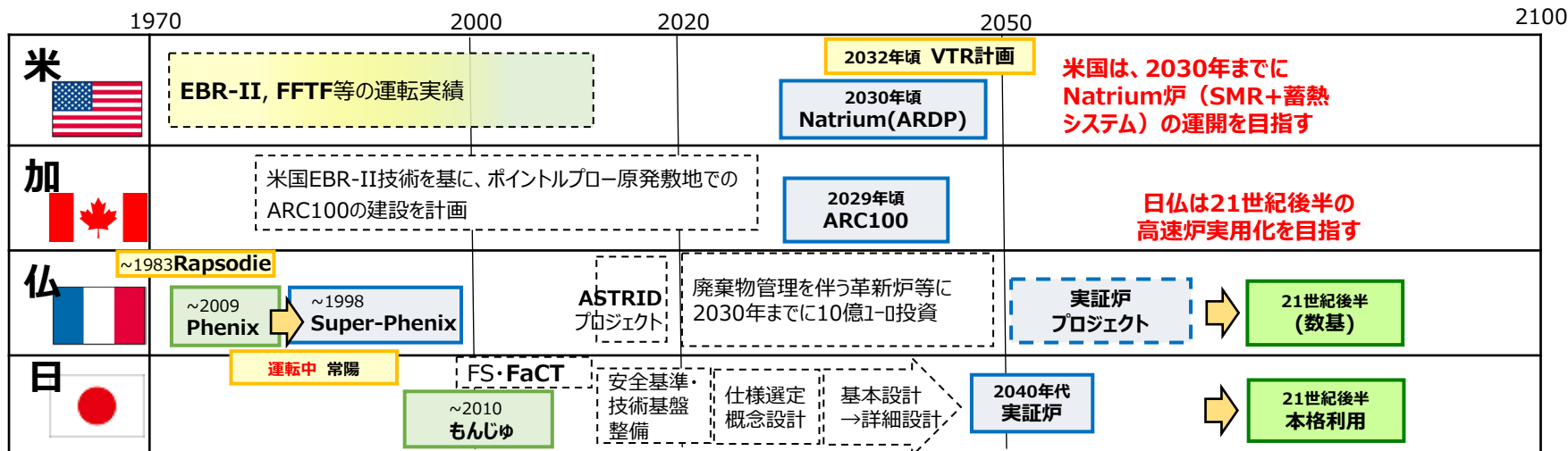
※※ 出典：OECD/NEA Nuclear Energy Outlook2008

- 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

## ■ 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



2023年2月 **GX実現に向けた基本方針** (安全性の確保を大前提として次世代革新炉の開発・建設に取り組む)

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

FaCTプロジェクト (凍結)

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

2022年12月

戦略ロードマップ改訂

2023年7月

中核企業選定

2020

2010

2000



## ～脱炭素社会を実現するイノベーションとエネルギーセキュリティの確保

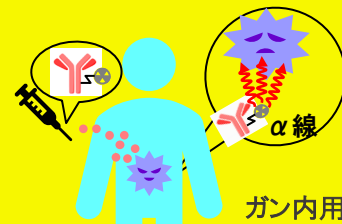
- 実証炉、次世代炉開発(NEXIP)
- 民間のイノベーション開発への支援
- 新燃料・材料開発、安全性向上
- 日米、日仏協力（開発、協働）



米国多目的  
研究炉 VTR

## ～医療・産業のイノベーション創出

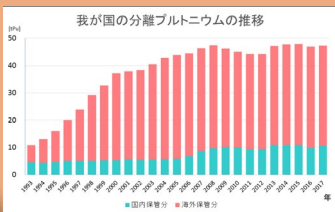
- 治療・診断用アイソトープ製造
- 工業用アイソトープ製造



ガン内用療法

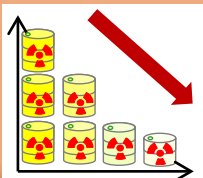
## ～核不拡散、核テロ対策への取り組み

- 分離済プルトニウムの利用・燃焼
- プルトニウム燃焼炉の開発

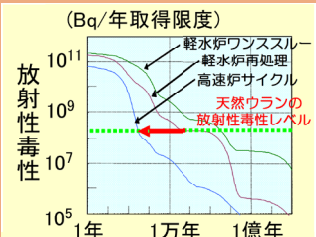


分離済プルトニウムの削減

- マイナーアクチノイドを燃料に混ぜて燃焼
- 放射性廃棄物の短寿命化

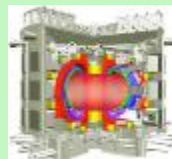


廃棄物の減容  
有害度低減



高速実験炉「常陽」

- 基礎基盤研究・多目的利用
- 大学利用、国際貢献
- 核融合炉開発（第1壁材開発など）



## ～原子力のポテンシャルの追求

- 大学・高専との連携
- 海外技術者の受け入れ



学生実習



海外研究者の  
インターンシップ研修

## ～原子力技術者の育成

## ～持続可能な原子力利用への取り組み

## ◆ 国内の次世代革新炉開発（カーボンニュートラル、原子力の持続可能性への貢献）

- ✓ 経済性に優れた燃料の照射試験\*1
  - 長期間安全に利用できる燃料の開発
- ✓ 放射性廃棄物の有害度を低減するための照射試験\*2
  - 半減期が長い放射性物質の影響を短縮するための研究開発

\*1 実証炉に向け、高度化燃料・材料（長寿命化等）の性能や健全性を実証する照射試験

\*2 マイナーアクチノイド（MA）サイクル技術の実証を目指し、大洗・東海の研究施設を用いて、使用済燃料からのMAの回収、MAを含んだ燃料の製造、「常陽」での照射を実施

## ◆ 新しい医療への貢献

- ✓ 先進がん治療のための放射性医薬品用ラジオアイソトープ（アクチニウム225）の製造\*3
  - がん細胞だけを選択的に放射線で攻撃できる医薬品の研究開発

\*3 内閣府原子力委員会にて「医療用等ラジオアイソトープ製造・利用推進 アクションプラン」を取りまとめ（令和4年5月）

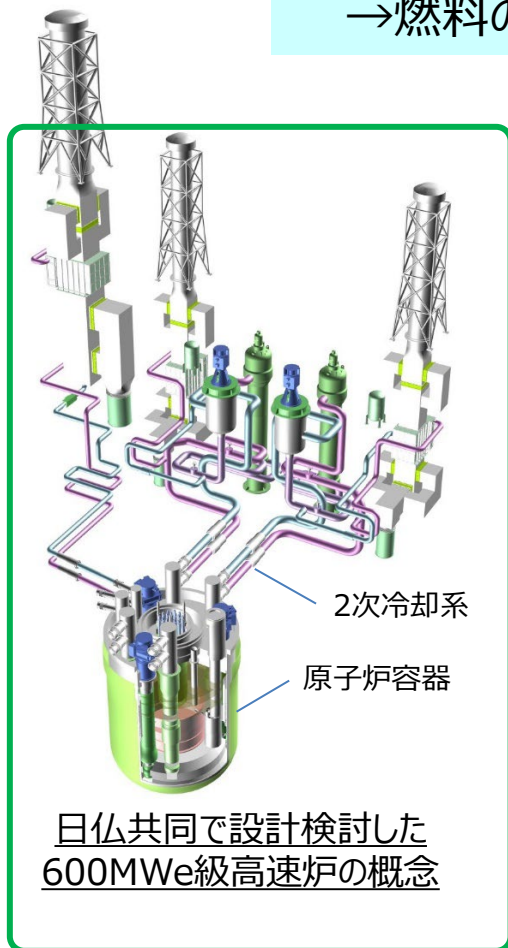
## ◆ 国際協力

- ✓ 西側諸国で唯一の高速中性子照射炉として、米国、ヨーロッパ諸国から期待されている
  - フランスとの燃料・材料照射試験協力
  - 海外のベンチャー企業からの材料照射 など

## ◆ 大学等からの受託照射（若手研究者・技術者の育成）

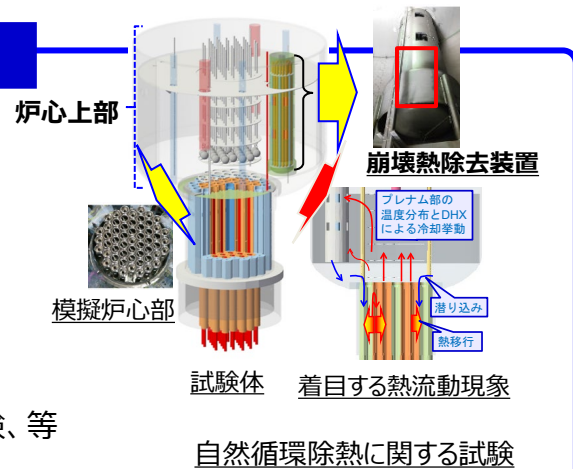
- ✓ 大学からの照射試験依頼への対応
  - 将来の我が国のエネルギーセキュリティ、原子炉の安全性向上を担う人材の育成

- 次期炉を10年程度で運転開始可能な技術蓄積は十分にある。
- 経済性を「軽水炉並」にすることが今後の課題
  - 燃料の長寿命化、プラント出力の大型化、など



## 安全性向上技術

- **「自然に止まる」**：受動的炉停止技術
  - 「常陽」での試験、等
- **「自然に冷える」**：自然循環除熱技術
  - ナトリウム試験施設（PLANDTL）（右図）での試験、等
- **「閉じ込める」**：事故の炉内収束技術
  - ナトリウム試験施設(MELT)での試験、等
  - カザフスタンでの炉内試験、等



## 経済性向上技術

- **燃料の長寿命化**：
  - 「常陽」での照射試験
- **機器の大容量化**：
  - 大型ナトリウム試験施設（AtheNa(アテナ)）でのナトリウム試験、等



AtheNa試験施設  
（世界最大のNa試験装置）

- 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

※ODS鋼 (酸化物分散強化型鋼)

## SmARTサイクル研究

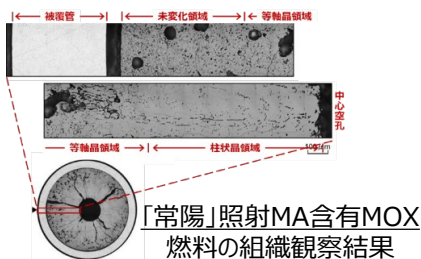


### SmARTサイクル研究

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**

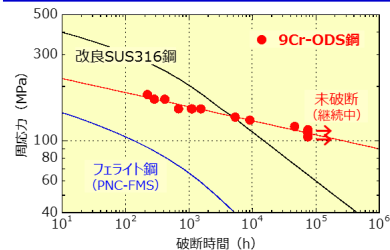
## MA含有MOX燃料の照射試験



- 「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



9Cr-ODS鋼被覆管の700°Cにおける内圧クリープ破断強さ

- 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 (混合粉碎装置) を整備し、試作・評価試験を実施**

## プロジェクトマネジメント上の課題

- 司令塔組織の具体化
- 技術ロードマップの具体化
- サプライチェーンの維持・強化
- 実証炉建設に向けた予算確保
- 民間投資を呼び込む施策

## 技術的課題※

- **設計段階での実証炉の仕様（出力、炉心等）決定**
  - 機器・システムの成立性確認（耐震性、製造性、燃料概念等）の項目と方法
- **大型試験施設による機器・システムの技術実証**
  - 実証すべき機器・系統の特定と、その実証方法
- **燃料・材料の照射データ取得**
  - 規制対応も見据えた、照射データ取得の項目と方法（MA含有燃料含む）
- **安全規制など規制・基準の整備**
  - 軽水炉との違いも見据えた、整備すべき基準や免震など規格の特定とデータ取得の項目と方法
- **燃料製造技術・再処理技術の確立**
  - 高燃焼度化のための太径中空燃料の開発、MA含有燃料に係る製造・再処理プロセスの工学規模での実証等

## 必要な基盤インフラ（用途、課題）

- **常陽及び照射後試験施設**
  - 許認可用燃料・材料照射データ取得、放射性廃棄物の減容化・有害度低減
    - 運転再開に向けた新規制基準対応工事の遅滞ない推進、燃料供給
- **燃料製造及び再処理施設**
  - MA含有燃料や高速中性子照射場用燃料製造、
    - 遠隔自動化施設（燃料製造）、施設整備の推進
- **高速中性子照射場**
  - 常陽では実施が困難な集合体規模での照射試験
    - ※燃料の安全性や経済性の高度化、MA含有燃料の照射試験
    - 今後の実証炉開発、高速炉実用化に向けた施設整備の推進
- **ナトリウム試験施設（AtheNa、安全性試験施設等）**
  - 大型ナトリウム機器の機能実証、安全性試験の実施
    - AtheNaの施設整備、安全性試験の推進

## 人材・技術伝承

- 原子力人材の確保、育成、原子力コア技術の維持

※第7回革新炉ワーキンググループ（2023/12/11）資料2、P.6「高速炉実証炉開発における技術的な検討の論点例」（経済産業省）  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/genshiryoku/kakushinro\\_wg/pdf/007\\_02\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/007_02_00.pdf)  
 を加工して作成

- 脱炭素化や長期エネルギーセキュリティの確保(安定・安価)のために、原子力は有効な手段。我が国では、既存軽水炉の再稼働や寿命延長等の対応に加え、原子力のサステナビリティ確保や多目的利用の観点から、高速炉や高温ガス炉といった次世代革新炉の開発を推進。
- 高速炉は燃料サイクル技術と合わせて、ウラン資源の有効利用と放射性廃棄物の有害度低減・減容化を通じて原子力のサステナビリティの実現に必須の技術。また、高速炉での医療用RI製造や高温ガス炉の高温熱の活用による水素製造等、原子力の多目的利用を目指す。
- 国のGX経済移行債支援策による高温ガス炉と高速炉の実証炉開発では、中核企業や炉型の選定が行われた。原子力機構は、「常陽」や「HTTR」から得られる知見、先進的な基盤技術の開発やその反映を通じて、これらの実証炉プロジェクトに貢献していく。
- 実証炉の開発体制の具体化、燃料製造も含めたサプライチェーンの維持・強化、有能な人材の確保・育成等、今後解決すべき種々の課題に対して関係省庁、民間、大学等との協力、及び国際協力の活用を通じて対応していく。



着実な技術開発により、水素・熱利用を含む脱炭素化社会の実現、1000年単位での安定・安価なエネルギー供給、国民福祉向上に貢献