
高速炉サイクル技術の現状と課題

令和8年3月24日

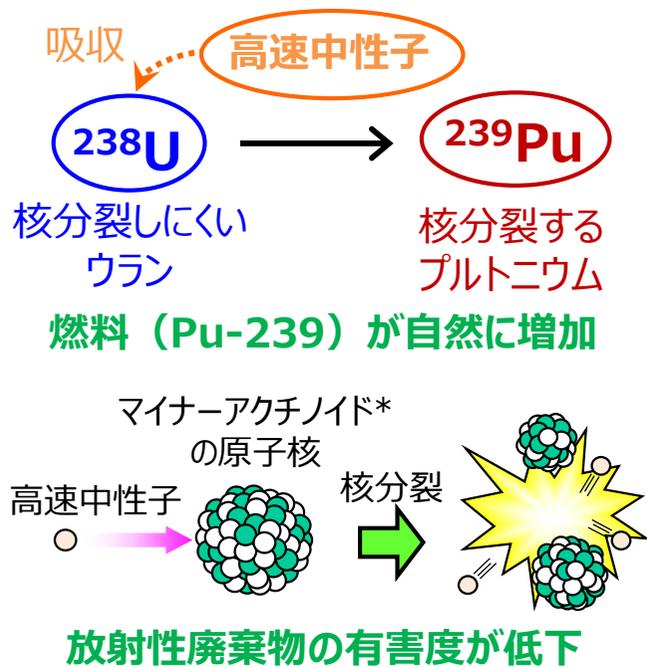
(国)日本原子力研究開発機構
エネルギー研究開発領域
高速炉サイクルプロジェクト推進室
安藤 将人

| | |
|-------------------------|--------|
| 【1】高速炉の概要 | |
| 1-1 高速炉の特徴 | P3 |
| 1-2 高速炉サイクルの意義 | P4 |
| 1-3 これまでの高速炉サイクル開発の経緯 | P5 |
| 1-4 高速炉開発の体制 | P6 |
| 1-5 高速炉サイクル開発の全体像 | P7 |
| 1-6 高速炉サイクル開発の全体工程 | P8 |
| | |
| 【2】高速炉サイクル技術の現状 | |
| 2-1 高速炉実証炉の開発状況 | P9 |
| 2-2 高速炉関連R&Dの概要 | P10 |
| 2-3 高速炉実証炉のR&D状況 | P11 |
| （参考）MOX燃料と金属燃料の主な特徴 | P12 |
| 2-4 燃料サイクル施設の設計作業の状況 | P13 |
| 2-5 MOX燃料サイクル技術の開発状況 | P14 |
| 2-6 金属燃料サイクル技術の開発状況 | P15 |
| 2-7 高速炉サイクル技術開発のための国際協力 | P16 |
| | |
| 【3】高速炉サイクルの課題 | |
| 3-1 高速炉の社会実装に向けた課題 | P17 |
| 3-2 サプライチェーン維持の取組み | P18,19 |
| 3-3 高速炉安全規制の予見性について | P20 |
| | |
| まとめ | P21 |

1-1 高速炉の特徴

- 高速中性子（エネルギーの高い中性子）を利用
- 冷却材に**液体金属（ナトリウム）**を使用
- 液体ナトリウムの**自然循環による熱の除去**が可能（**自然に冷える**）

高速中性子の利用



- 高速中性子は、軽水炉での核分裂に利用する中性子よりエネルギーが高く、様々な用途での利用が可能

液体ナトリウムの使用



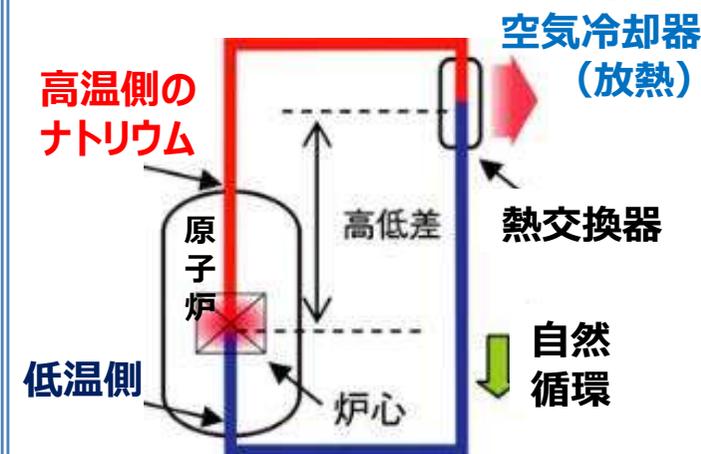
沸点:883°C
融点:98°C
比重:0.9弱

ナトリウムの液滴

- 比重、粘性は水と大きな差はなく、流れるには水とほぼ同等
- **熱伝導率は水の約100倍**。効率的な除熱が可能
- **中性子を減速しない**ため高いエネルギーの中性子が利用可能
- **沸点が高く、高温での運転が可能**（効率的に熱を取り出せる：**高い熱効率**）
- **大気圧と同程度の圧力で運転可能**

自然循環による安全性

冷却器を高所に置き、**ナトリウムの温度差によって発生する密度差**だけで循環



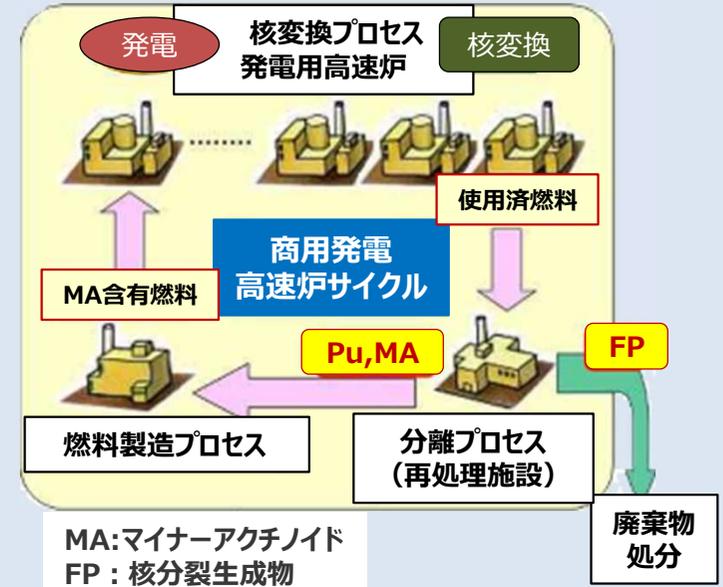
- ナトリウムは自然循環（温度差による対流）が発生し易いため、**電源が失われても原子炉の自然冷却が可能**

* 使用済燃料の中に含まれる長期間にわたって高い放射能をもつアメリシウム、ネプツニウムなどの元素

高速炉サイクルの意義

カーボンニュートラル・長期持続性確保への貢献

- 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**
- エネルギー事情に応じ、**プルトニウム**の生成／燃焼が可能
 - ⇒ **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
- 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（処分場削減規模 約1/7）、潜在的有害度の影響期間を大幅に短縮（約10万年⇒約300年）可能**
 - ⇒ **環境負荷低減**

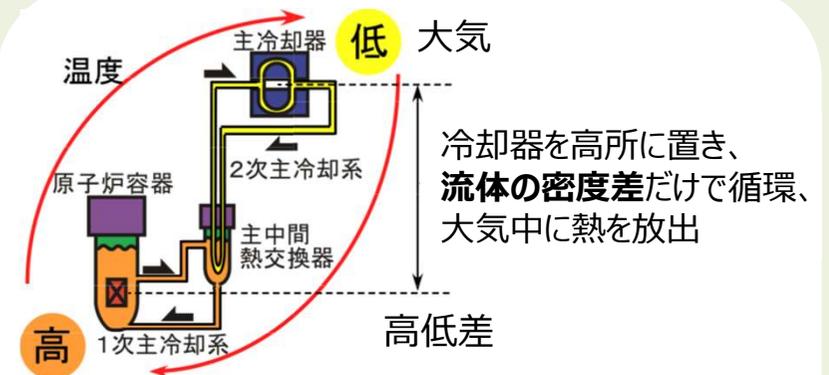


発電用高速炉利用型核変換システム

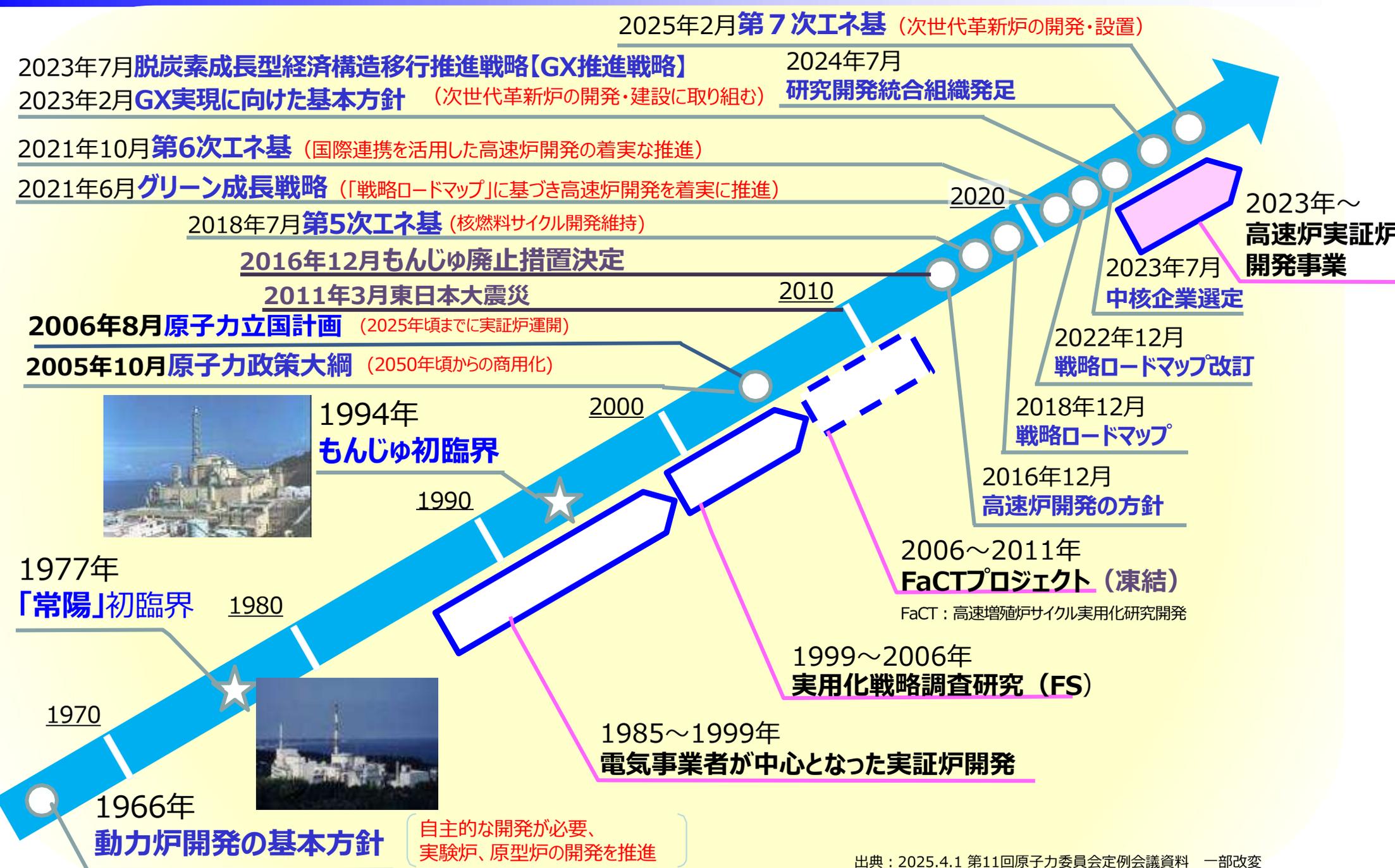
（文部科学省原子力研究開発・基盤・人材作業部会第10回資料より引用）

高速炉の優れた特性と可能性

- 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し、太陽光や風力等、**出力変動再エネを補完**
 - ⇒ **CO₂排出せず、変動再エネと共存**
- ナトリウムの高い**自然循環能力**により、電源を喪失しても**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**医療用ラジオアイソトープ**製造により、がん治療に活用
 - ⇒ **国民福祉向上への貢献**

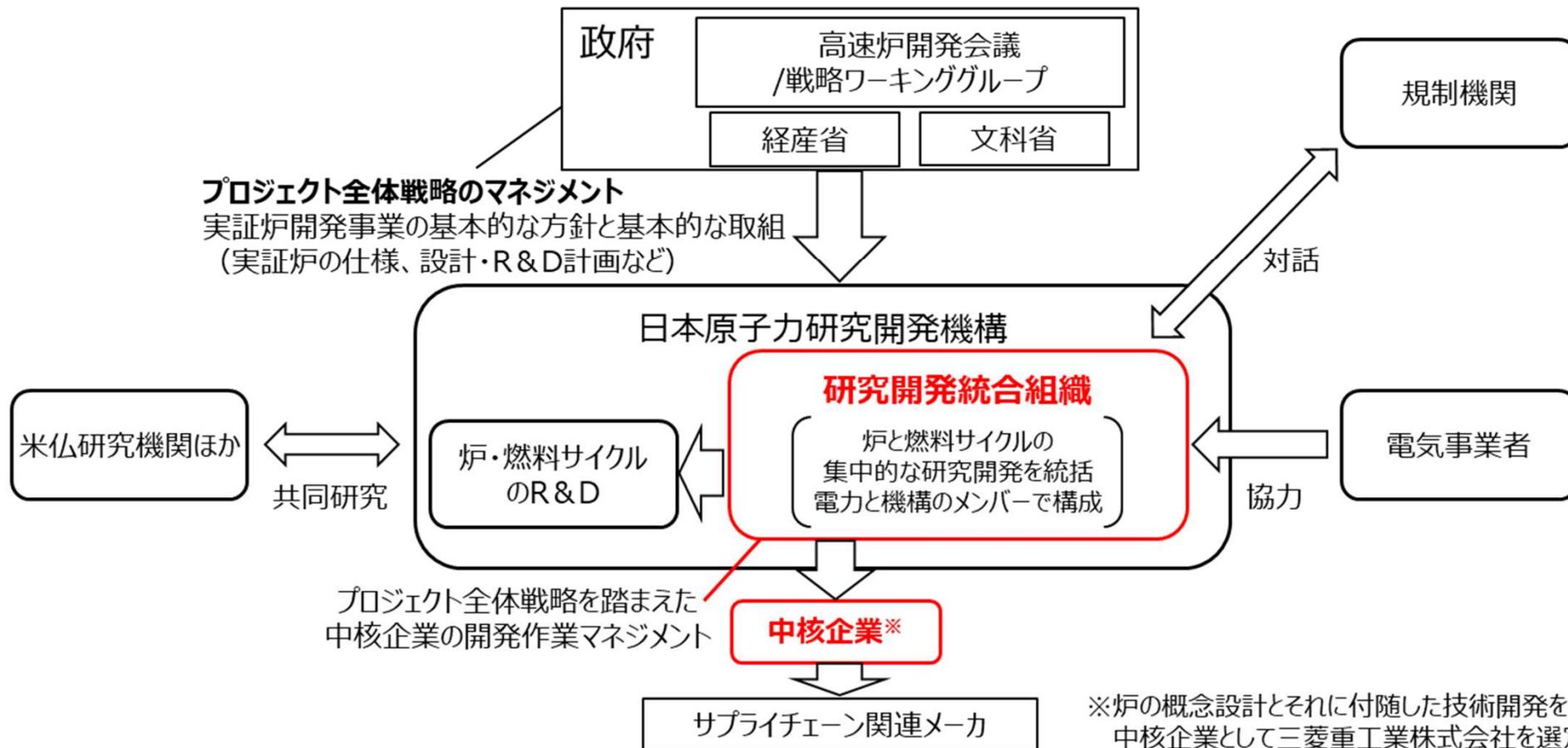


電源を必要としない自然循環による炉心冷却
（高速実験炉「常陽」で実証済み）



1-4 高速炉開発の体制

- 高速炉開発の体制は下図のとおり。
- 実施者：JAEA（研究開発統合組織）、三菱重工業株式会社（中核企業）



出典：2025.12.11 第10回革新炉ワーキンググループ 資料一部改変

原子炉設計・免震

- タンク型※炉原子炉容器の設計成立性確認 ※もんじゅはループ型
- 高速炉特有の免震システムの開発

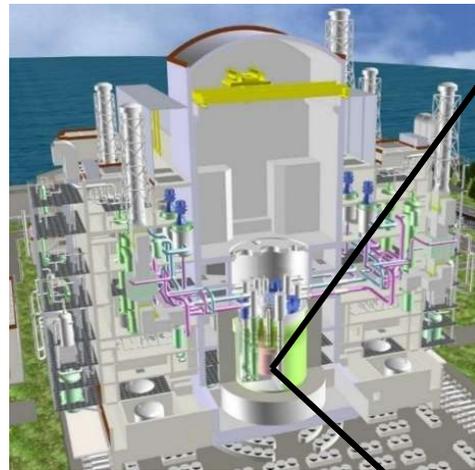
燃料の研究開発・製造・サプライチェーン

- 2026年度の燃料技術検討に向けた、MOX燃料・金属燃料の性能等評価
- 放射性廃棄物の減容化・有害度低減に向けたMA含有燃料製造・燃焼技術
- 高速炉特有の被覆管等のサプライチェーン構築

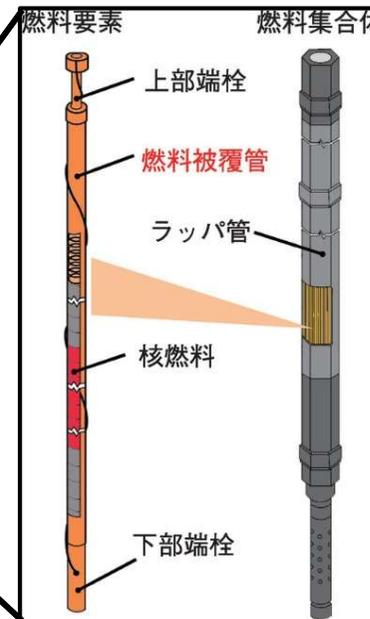
冷却系・ナトリウム技術

- 大型化・高性能化した主要機器（ポンプ、熱交換機）の実証
- ナトリウムと水の化学反応に関する評価
- 不透明のナトリウム内で炉内構造物等の状況を目視可能にするセンサ開発

原子炉



燃料



照射／照射後試験技術

- 実証炉燃料の照射
- 高速炉の効果を更に高めるため、高燃焼度化、MA含有燃料の照射



常陽・照射後試験施設

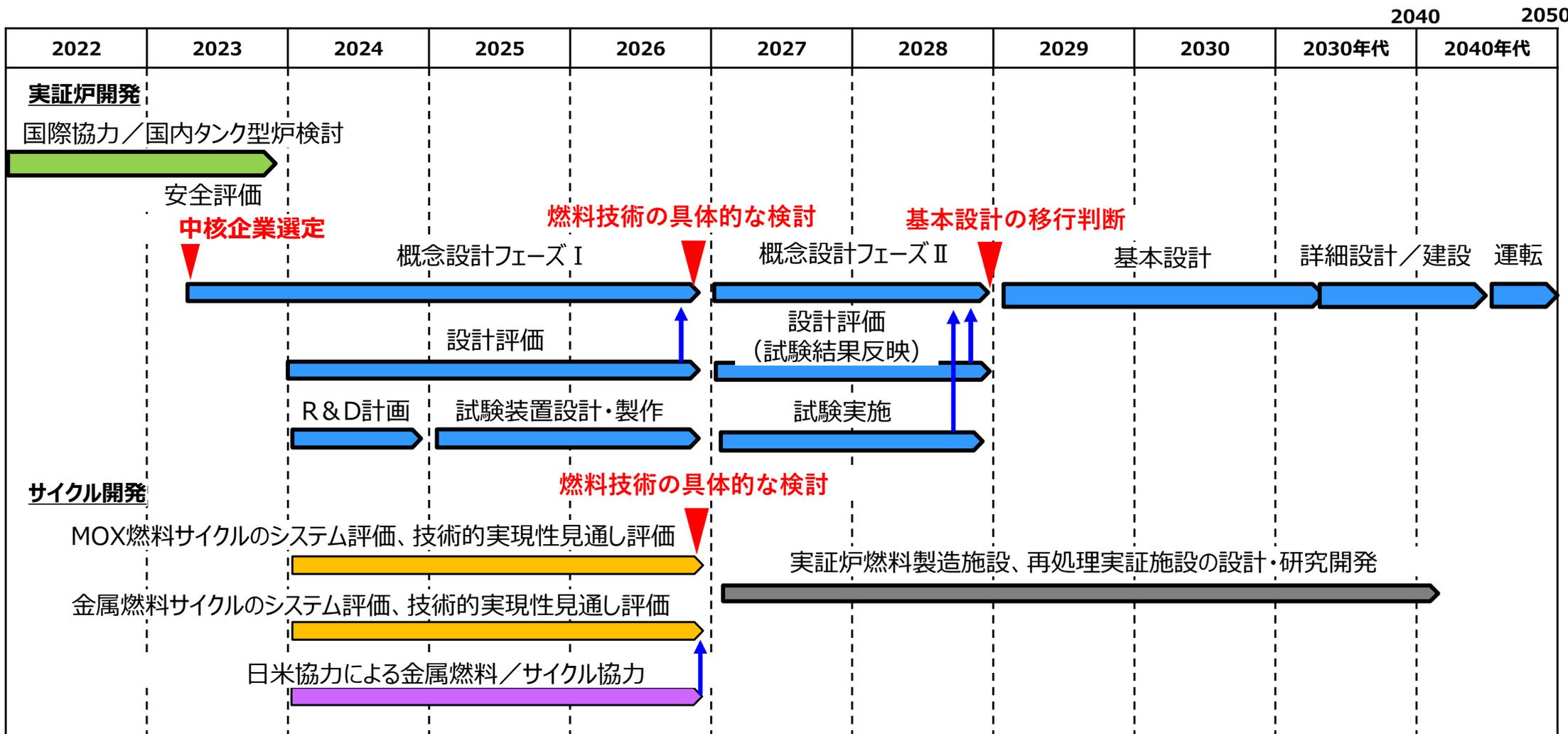
安全性向上・安全性評価技術

- 新規基準、国際的安全基準への対応に向けたデータ取得や評価技術の開発
- 動力を必要としない安全システム（受動的炉停止、自然循環崩壊熱除去）の開発
- 事故時の炉心損傷の影響緩和を考慮した設計

高速炉再処理

- Pu富化度の高い燃料の再処理、臨界管理（湿式／乾式）
- MA分離・回収技術（放射性廃棄物の減容化・有害度低減）

- 2040年代の高速炉実証炉運転開始の実現に向けて、2028年度頃を目途に、基本設計・許認可フェーズへの移行の判断に必要な概念設計・研究開発を進めていく。
- 燃料製造施設、再処理施設も含めた全体システムを検討した上で、2026年度頃を目途に燃料技術の具体的な検討を行う。



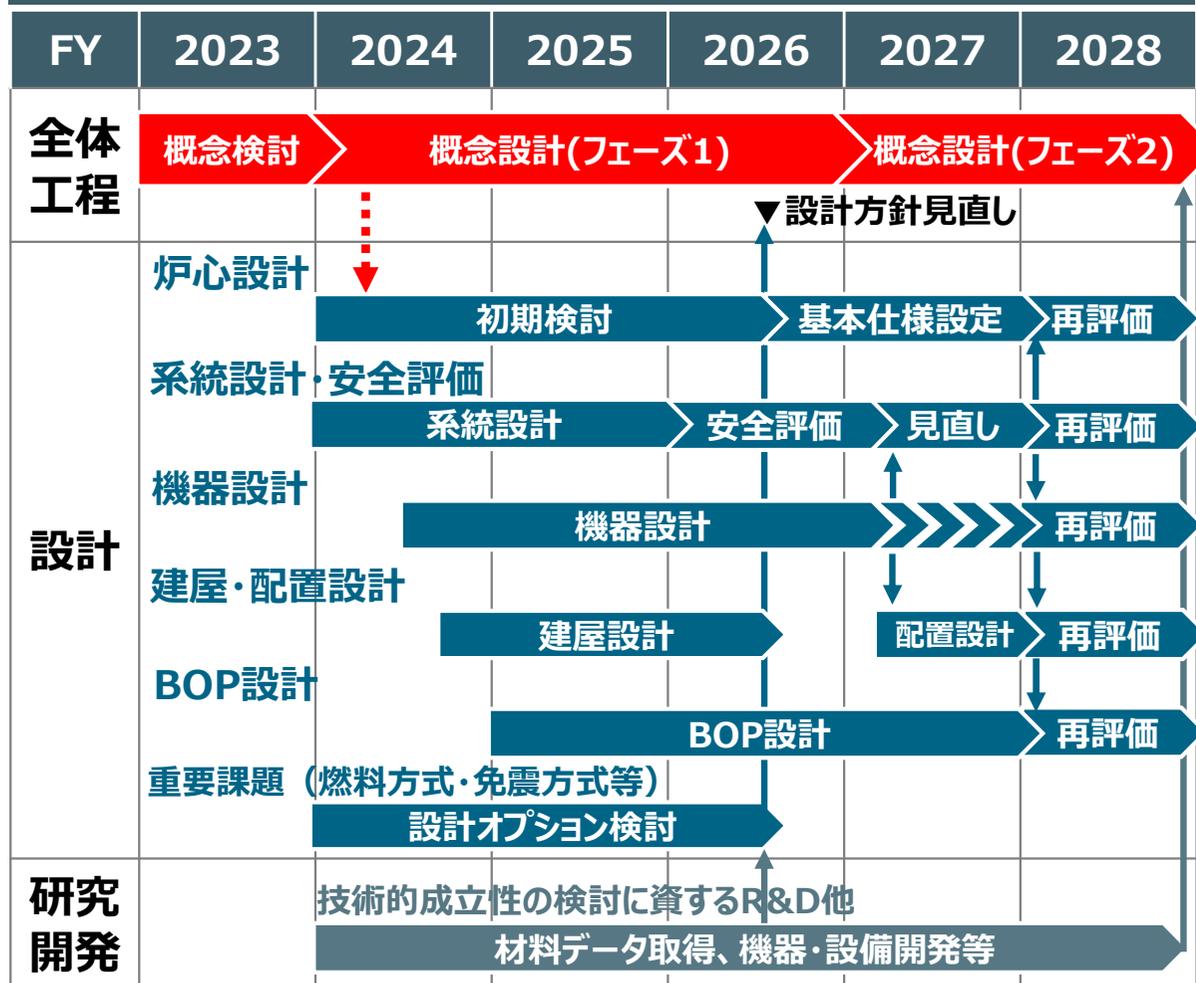
- 2040年代の実証炉運開を目標に、大型炉・小型炉への展開が可能な中型（600MWe級）のナトリウム冷却タンク型炉を対象として、設計・R&Dを推進し、計画どおりに進捗
- 実証炉の概念設計としての基本仕様をまとめ、炉心・系統・機器設計等を推進すると共に、燃料方式、免震方式等の検討を進め、2026年度に採用する設計オプションを選定予定

実証炉プラントの基本仕様

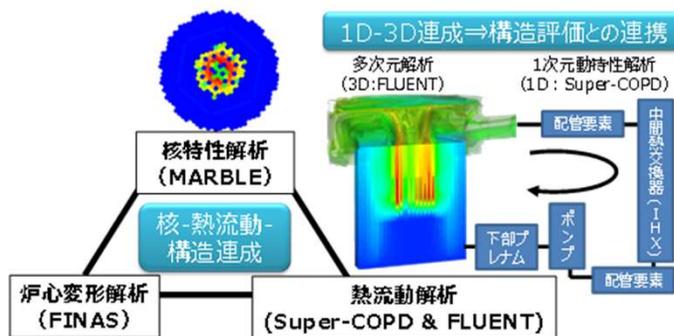


| 項目 | 仕様 |
|--------|----------------------|
| 炉型 | ナトリウム冷却タンク型高速炉 |
| 電気出力 | 600MWe級 |
| 燃料方式 | 酸化物燃料または金属燃料 |
| 炉心出口温度 | 550℃ |
| 原子炉建屋 | 3次元免震建屋 または水平免震建屋 |

開発工程



○安全性+経済性：核・熱・構造の課題解決



○実用炉向け燃料開発



炉心材料の許認可・照射データ

○機器の性能・信頼性実証、設計評価手法の総合検証

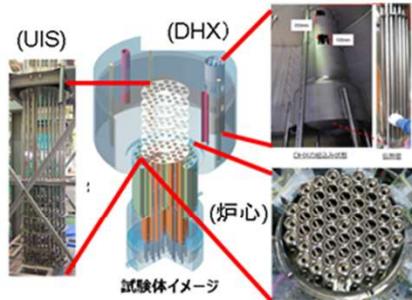


冷却系機器開発試験施設 (AtheNa)

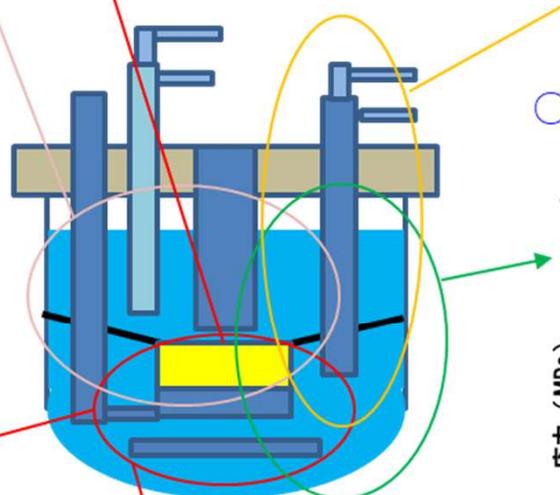
設計・建設知見の反映 高品質の実験検証



もんじゅ知識ベースポータルサイト

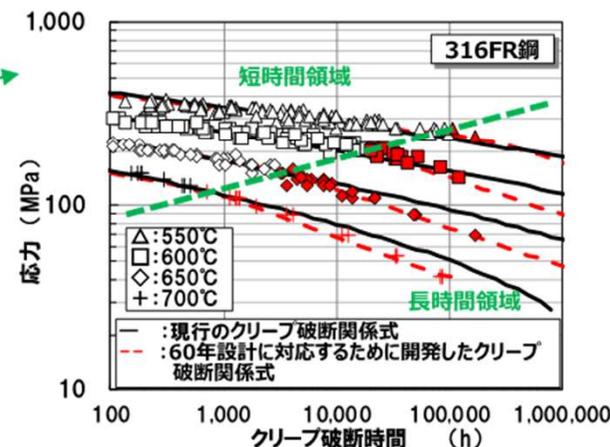


ナトリウム試験



○構造・材料の規格・基準、維持規格

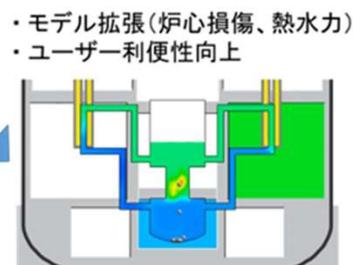
● 60年設計



○シビアアクシデント評価：炉心損傷、物質移行

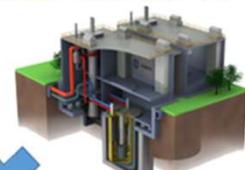


・評価精度向上 (融体熱物性)



統合安全性評価シミュレーション基盤システム

研究基盤の社会実装

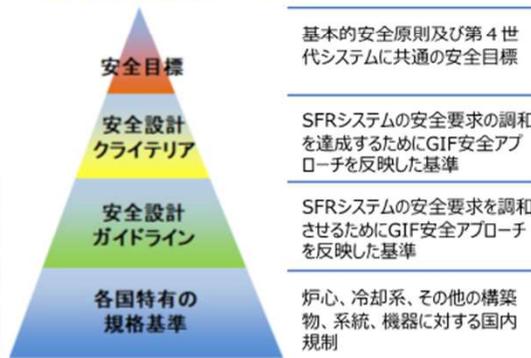


・他炉型への適用拡張 (PRISM型炉)

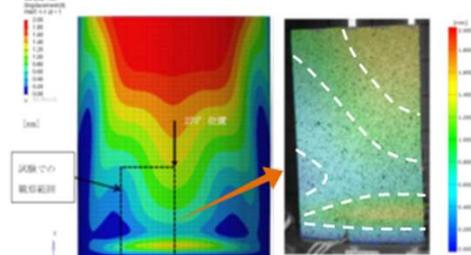


ナトリウム燃焼評価

○安全設計基準



● 大口径容器の座屈評価手法



変形量の解析と試験(右) 比較

- タンク型炉の採用に伴う原子炉構造の大型化、安全性向上や設備の信頼性向上、サプライチェーン再構築等の観点から約100項目のR&D項目を抽出
- 策定したR&D計画に従い、機器・設備開発や材料データ取得等を進めており、順調に進捗中

R&Dの例

316FR鋼材料強度試験



免震システムの開発



316FR鋼伝熱管試作

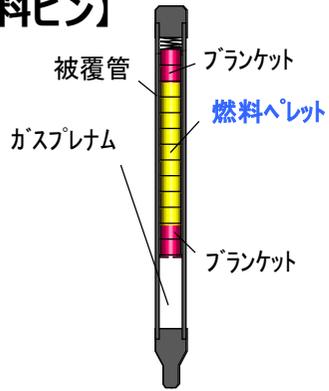


(本研究は、令和5年度高速炉実証炉開発事業（基盤整備と技術開発JPMT007143）の成果を一部含みます)

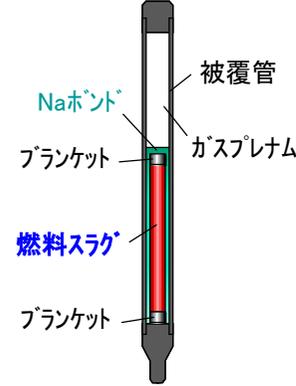
MOX燃料

金属燃料

【燃料ピン】



- 燃料はペレット状のU、Pu酸化物（セラミックス）
- セラミックスのため、熱を伝えにくい
- 融点は約2700℃



- 燃料はスラグ状のU、Pu、Zrの合金
- 合金のため、熱を伝えやすい
- 融点は約1200℃
- 燃料と被覆管が高温下で共晶反応を起こす。

【再処理】

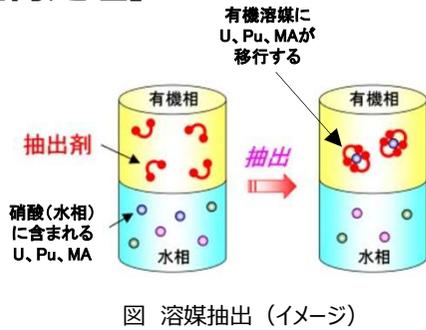


図 溶媒抽出（イメージ）

- 使用済燃料を硝酸（水相）に溶かして、U、Pu、MAを溶媒抽出する湿式再処理を採用
- 湿式再処理は国内外に実用プラントの運転実績有
- 連続処理（スケールメリット大）

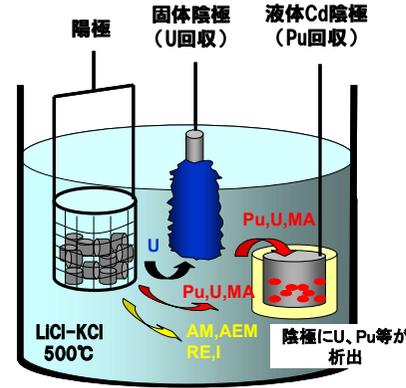


図 電解精製（イメージ）

AM:アルカリ金属 AEM:アルカリ土類金属 RE:希土類 MA:マイナーアクチノイド

- 使用済燃料を溶融塩に溶かし込み、電解精製でU、Pu、MAを回収する乾式再処理を採用
- 乾式再処理は米国に実証プラントの運転経験有
- バッチ処理（スケールメリット小）
- U、Pu、MAを同時に回収可能

【燃料製造】



図 燃料ペレット（イメージ）※

- U、Puの混合粉末をペレット形状にプレス成形して焼結
- 燃料製造の実績は豊富
- MA含有燃料の製造には、遠隔操作技術の開発が必要

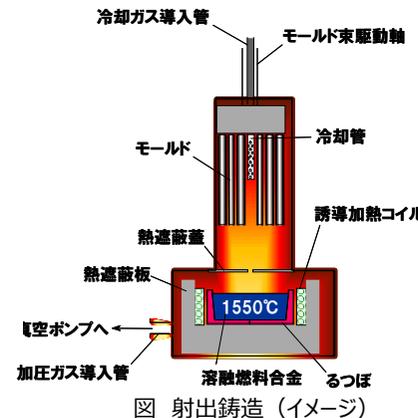


図 射出鋳造（イメージ）

- U、Pu、MA合金をるつぼで溶融し鋳型（モールド）に射出して鋳造
- 米国にて1万7000本の燃料を遠隔で製造した実績有
- 遠隔操作技術が必須

燃料サイクル施設の設計状況

- 燃料技術の具体的検討にあたり、MOX燃料及び金属燃料サイクル施設の性能について比較評価するために、燃料サイクル施設の概念検討を2024年度から実施中
- 施設の概念検討はMOX燃料及び金属燃料ともに、高速炉実証炉及び実用炉用のサイクル施設として、燃料製造施設及び再処理施設の概念を検討し、経済性、施設の設計成立性、廃棄物発生量等のプラントレベルの各種性能を評価する予定

概念検討の進捗状況

- MOX燃料サイクル施設は、実証炉用高除染MOX燃料製造施設の検討を完了し、MA含有MOX燃料製造施設（実証炉・実用炉）及び実証炉用再処理施設の検討を実施中
- 金属燃料サイクル施設は実証炉用の燃料製造、再処理施設を先行して検討し、その結果をふまえつつ、実用炉用金属燃料製造施設及び再処理施設の検討を実施中



金属燃料用乾式再処理建屋鳥観図

■ 燃料技術の具体的検討にあたり、適用技術の実用見通しを得るために必要な技術開発に限定して実施している

金属燃料製造技術開発

(乾式再処理工程より)

軽水炉使用済燃料の
湿式再処理製品

MOX粉

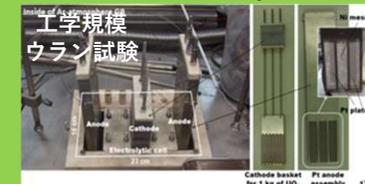
プレス成型

ペレット焼結

電解還元

陰極処理

U-Pu合金



電解還元装置

開発中の技術

国内で工学規模試験まで実施

国内で工学規模試験実績がなく、米国に試験実施例あり

使用済金属燃料の
乾式再処理製品

U-TRU合金 U金属

射出鋳造

スラグ処理・検査

燃料ピン組立

Naボンディング

燃料ピン検査

燃料集合体組立

金属燃料集合体



射出鋳造装置

T. Ogata & T. Tsukada, Global 2007, Boise, Idaho, USA, Sep. 9-13, 2007.



Naボンディング装置

乾式再処理技術開発

高速炉使用済金属
燃料集合体

解体・ピンせん断

ボンドNa蒸留

電解精製

陽極処理

金属廃棄物固化
体製造



金属廃棄物固
体化製造



電解精製装置

陰極処理(塩蒸留)

陰極処理(Cd蒸留)

還元抽出

ゼオライトカラム

セラミック廃棄物
固化体製造



陰極処理・Cd蒸留装置



還元抽出装置



ゼオライトカラム



セラミック廃棄物
固化体製造

■ 日米／日仏協力等を活用することにより高速炉実証炉の開発を合理的に行う体制を構築

日米協力：金属燃料を中心とした協力

■ 金属燃料等に関する共同研究

米国の金属燃料、サイクル技術の導入

■ シビアアクシデント試験協力

金属燃料の溶融燃料の試験の実施

■ R&D協力（CNWG協力※）

金属燃料、乾式再処理

評価手法開発、材料開発、等

※日米民生用原子力研究開発ワーキンググループ

■ テラパワー社とのMOU改定

- 大型商用炉
- 常陽照射
- 金属燃料許認可

日仏協力：タンク型炉およびMOX燃料についての協力

■ R&D取決め

MOX燃料およびタンク型炉に関連したR&Dの協力

■ 設計取決め

仏の過去の設計経験等を生かした協力



日カザフ協力

■ 試験用原子炉IGRにおけるシビアアクシデント試験

プロジェクトマネジメント上の課題

政策

- 司令塔組織の展開
- 導入ロードマップの具体化
- 民間投資を呼び込む施策
- **高速炉安全規制の予見性**
- 実証炉建設に向けた予算確保
- **サプライチェーンの維持・強化**
- サイクル実施主体の明確化／体制強化

技術的課題

技術

- 炉心安全、炉心・燃料（酸化物と金属）の技術検討と実用化への成熟
- 燃料・材料の中性子照射データ取得
- 規制要件に適合する免震・耐震技術の技術実証
- 大型試験施設による原子炉の構成機器・系統の技術実証
- 燃料サイクル技術の確立（燃料製造、再処理、廃棄物、MAの取扱い）
- 民間規格や規制組織における高速炉向け規制・基準の整備

基盤インフラ整備

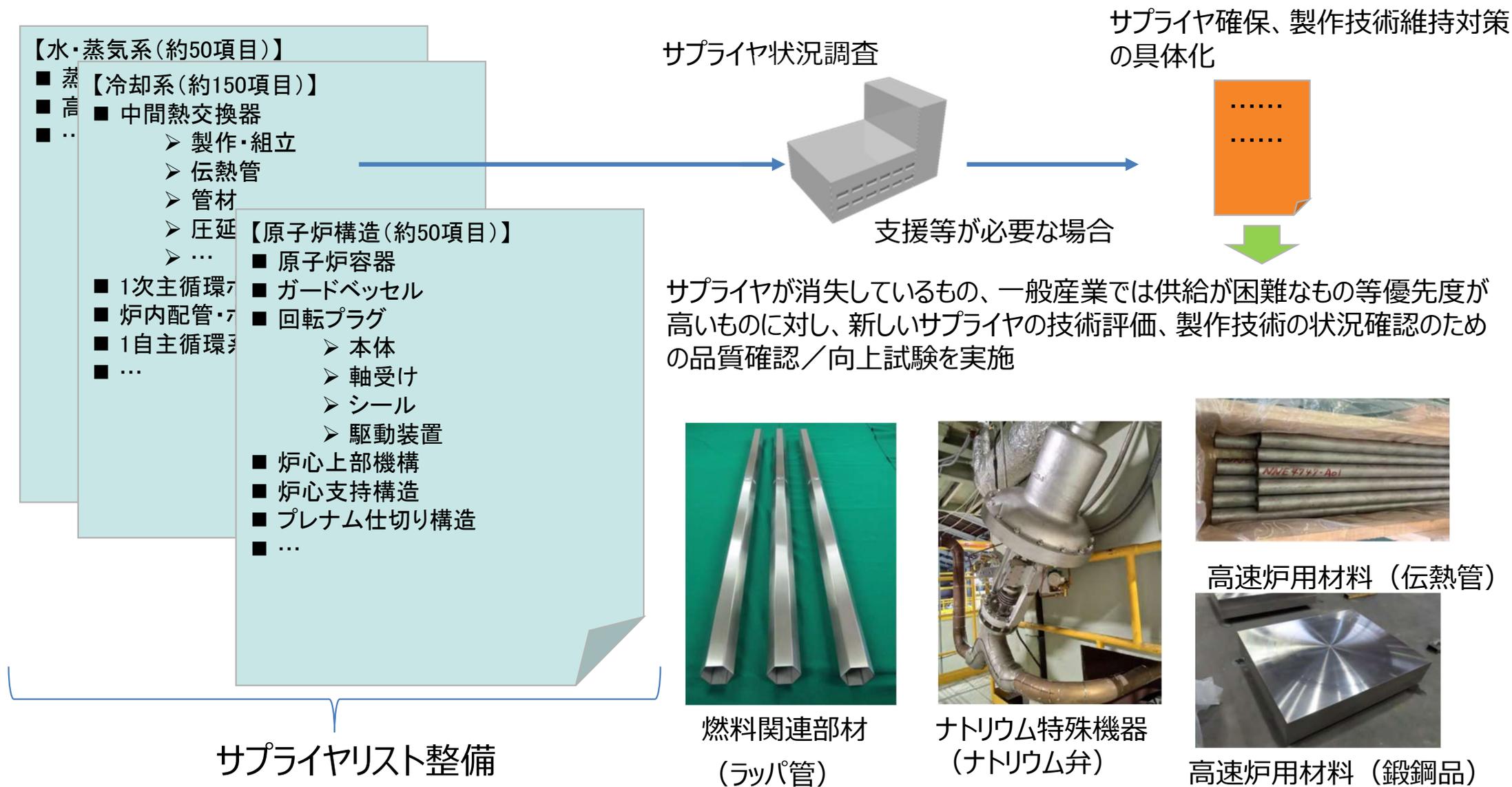
- 中性子照射場及び照射後試験施設
- 燃料製造及び再処理に係る施設
- ナトリウム試験施設（AtheNa、安全性試験施設等）

人材技術伝承

人材 技術

- 原子力人材の確保、育成、原子力コア技術の維持

- 実証炉向けサプライチェーン維持・再構築を目指し、24年度までに調達品/サプライヤリスト整備を完了
- 今後、実証炉向け製作/調達時期を見据え、計画的にサプライヤの確保、製作技術の維持を図る



- 燃料サイクル施設の実装、燃料の製造には、一般産業では適用されない特有の要件、例えば耐食性、耐放性、遠隔性、公差要求、製造履歴管理などに対応するため、特殊素材の供給、特殊機器の設計・製造に向けたサプライチェーンの確保が極めて重要。
- MOX燃料サイクルについては、原子力機構のプルトニウム燃料第三開発室 (Pu-3) の建設／操業および日本原燃の六ヶ所再処理工場、MOX燃料工場の建設を通じサプライチェーンが構築されている。ただし、時間経過により一部サプライヤの撤退が発生しているため、今後サプライヤのリストを整備し、対策を検討する。
- 金属燃料サイクルについては、国内で施設の建設に向けた経験がないため、サプライチェーンを新たに構築する必要がある。過去の国内で実施された研究開発において、加熱装置、るつぼ等の主要機器の調達に課題は見られなかったが、今後は施設全体としてサプライヤリストを整備し、対策を検討する。

- 2028年頃に予定される実証炉の基本設計・許認可手続きへの移行判断に向けて、規制の予見性を高めていくことが重要。
- 2013年6月12日の原子力規制委員会にて、研究開発段階発電用原子炉の関係規則は安全審査を行うまでに改めて検討し基準を見直す方針が示されている。
- 日本原子力学会新型炉部会「次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計評価方針検討会」において、軽水炉とは異なる安全上の特徴を踏まえた「次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計方針」を策定している（2025年2月に公開）。
- 2025年10月27日 原子力機構は、高速炉実証炉に関する研究開発のマネジメントを担うことから、原子力規制庁と以下の内容について面談を開始した。
 - 原子力学会「次世代Na冷却高速炉の安全設計評価方針検討会」にて審議された次世代高速炉における深層防護の考え方、原子炉停止設備及び崩壊熱除去設備の安全設計、原子炉格納機能の考え方の整理状況等について説明した。
 - 加えて、酸化物燃料炉心及び金属燃料炉心の採択手順、実証炉に導入予定の免震技術、熔融燃料排出管、貫通型崩壊熱除去系等の検討状況について説明した。
 - 今後も、高速炉実証炉に関する技術情報について、継続的に説明を行うことで合意した。

- 戦略ロードマップに従い、JAEA、電気事業者及び中核企業の技術者が集結する研究開発統合組織の統括の下、2040年代の運転開始に向けて高速炉実証炉の開発に着手。炉とサイクルの設計・R&Dを推進し、計画どおりに進捗している。
- 2026年度にMOX燃料サイクル・金属燃料サイクルを対象に、燃料技術の具体的な検討を行う。
- 技術課題の他、プロジェクト上の課題である、サプライチェーンの維持・強化や安全規制の予見性の向上など、各種の政策課題にも引き続き取り組む。