

高速炉実証炉開発の進め方について

2024年12月13日

戦略ワーキンググループ事務局

- 1. 実証炉の主要仕様及びR&D計画について**
2. 高速炉実証炉の開発体制について

概要

- 高速炉実証炉の概念設計を開始するにあたり、実証炉の主要仕様、実証炉技術と燃料サイクル技術の開発について、技術的な検討を実施。
- 実施する設計とR&Dの具体的なステップや、マイルストーンで求められる成果の整理に向けて、以下の事項について技術的な検討を行った。
 - ① 高速炉の実用化に必要な技術を実証するための高速炉実証炉の主要仕様
 - ② 高速炉実証炉の概念設計で実施すべき炉システムのR&D計画
 - ③ 燃料技術の具体的な検討に向けた燃料サイクルのR&D計画

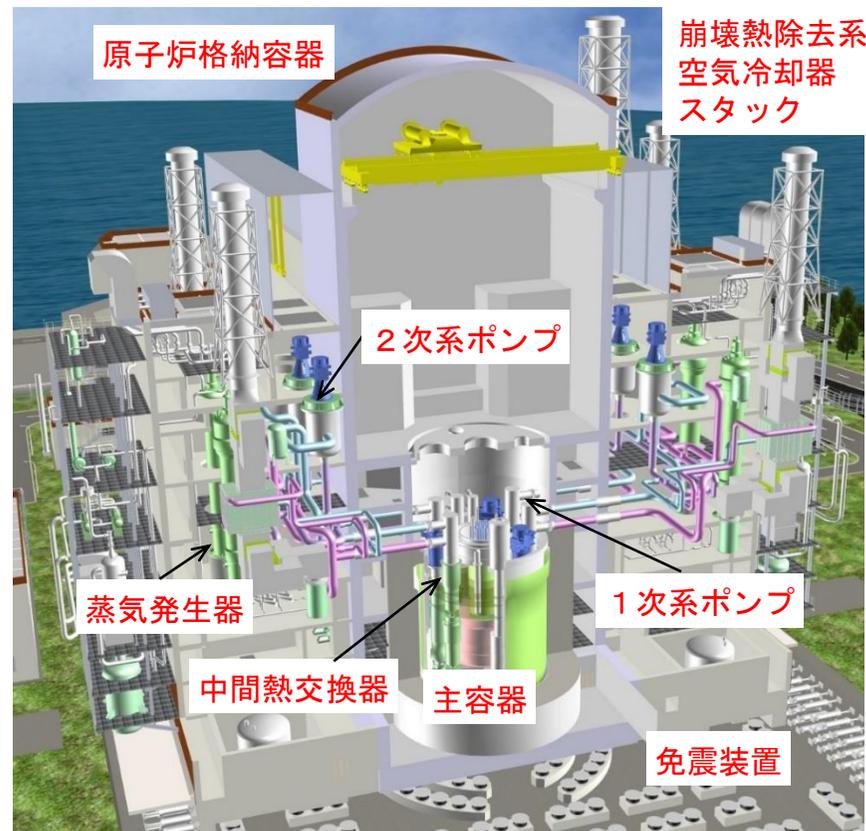
高速炉実証炉の概要

- 実証炉の概念設計の出力については、実用化へのスケールアップでの技術的連続性を確保でき、大型炉・小型炉にも展開可能な60万kWe級とする。
- 国内の既往プロジェクトの技術蓄積に加え、海外の運転経験を反映可能なタンク型炉を対象とすることにより合理的な開発を行う。
- 東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓や国際的な安全設計基準の考え方を取り入れ、安全性を向上する。

主な仕様（参考）

出力設定の考え方は次ページ

項目	仕様
出力	60万kWe級（150万kWt）
炉心出口ナトリウム温度	550℃
炉心	酸化物燃料炉心または金属燃料炉心*
原子炉停止系	独立2系統 （後備炉停止系に受動的炉停止機能を設置）
主冷却系	中間熱交換器数及び2次系ループ数：4
崩壊熱除去系	自然循環式：5系統、強制循環式：1系統
原子炉建屋	3次元免震建屋または水平免震建屋



提案概念鳥瞰図

高速炉開発の「戦略ロードマップ」（2022年12月23日）に基づく実証炉の概念設計の対象となる炉概念の仕様と中核企業の選定に係る提案公募

*：酸化物／金属燃料炉心でもプラントシステムへの影響は限定的なため（炉心出口温度の違いとそれによる熱交換器伝熱面積増加等）プラント側のR&Dは共通。炉心燃料、シビアアクシデント対策は酸化物／金属燃料炉心でそれぞれ並行して実施。

実証炉出力設定の考え方

- 実証炉の出力規模（60万kWe、50万kWe、40万kWeの3ケース）について、①技術的実現性、②技術実証性、③建設・発電コストの観点から検討した。
- ①技術的実現性に関しては、クリティカルとなる原子炉構造の耐震成立性及び工場製作性等を評価し、出力に対して有意な差はなかった。
 - 【評価の例】
 - ※いずれのケースでも、原子炉容器の直径は約16m
 - ✓ 耐震成立性：いずれのケースでも、耐震裕度は同等（水平・3次元免震の適用性にも相違無し）
 - ✓ 工場製作性：原子炉容器径が同等のため、有意な差はない
- ②技術実証性については、100万kWe級の実用炉への技術的連続性を確認する観点で、燃焼度・増殖比の実証可否、及び、プラント主要機器の耐震・流力振動の実証可否を評価し、60万kWeが優位であった。
 - ✓ 炉心燃焼度・増殖比の実証：60万kWeでは実用炉と同様の燃料集合体仕様で実証可能。他方で、40万kWeでは燃焼度と増殖比の両立は困難。
 - ✓ 主要機器の耐震・流力振動等：60万kWeでは実用炉で想定される条件に近接するため、実証可能となる見通し。他方で、50万kWe、40万kWeでは、1次冷却ポンプにおいて条件との差が大きくなる見通し。
- ③建設・発電コストについては、実用炉における経済性の見通しを得るため、実用炉に近い条件で実証する観点から評価し、60万kWeが優位であった。
- 以上より、高速炉実証炉の概念設計の出力を60万kWe級とするのが適当と考えられる。

概念設計期間の工程の考え方

<フェーズ1> (～2026年度)

- 炉システムについて、設計のための評価手法の整備を進めつつ、現状の手法を用いて設計成立性を確認するための評価を行う。また、工学規模の試験による主要機器の設計成立性確認に向けて、試験計画詳細化、試験装置の設計／整備を行う。
- 炉心設計仕様等を暫定して概念設計・研究開発を実施し、性能中間評価を行う。
- 燃料サイクルについて、MOX燃料炉心・金属燃料炉心を対象に、燃料技術の具体的な検討を行う。燃料サイクル技術については、実用システム、実証施設の検討および開発課題解決の見通しを評価し、次フェーズの概念設計に必要な情報を整理する。

<フェーズ2> (2027～2028年度)

- 炉システムについて、フェーズ1の技術的成果を反映して設計の見直しを行う。設計評価手法の検証を進めるとともに、主要機器の設計成立性に係る工学規模の試験に着手し、一部のデータを取得していく。
- そのうえで、これら検証された手法や設計成立性に係る試験データを見直された設計に反映、妥当性を確認する。最後に、安全性、経済性等の開発目標への適合性見通しを確認する（性能評価）。
- 燃料サイクルについて、燃料製造実証施設等の概念設計に着手する。

【参考】高速炉実証炉の概念設計段階で実施すべき技術開発

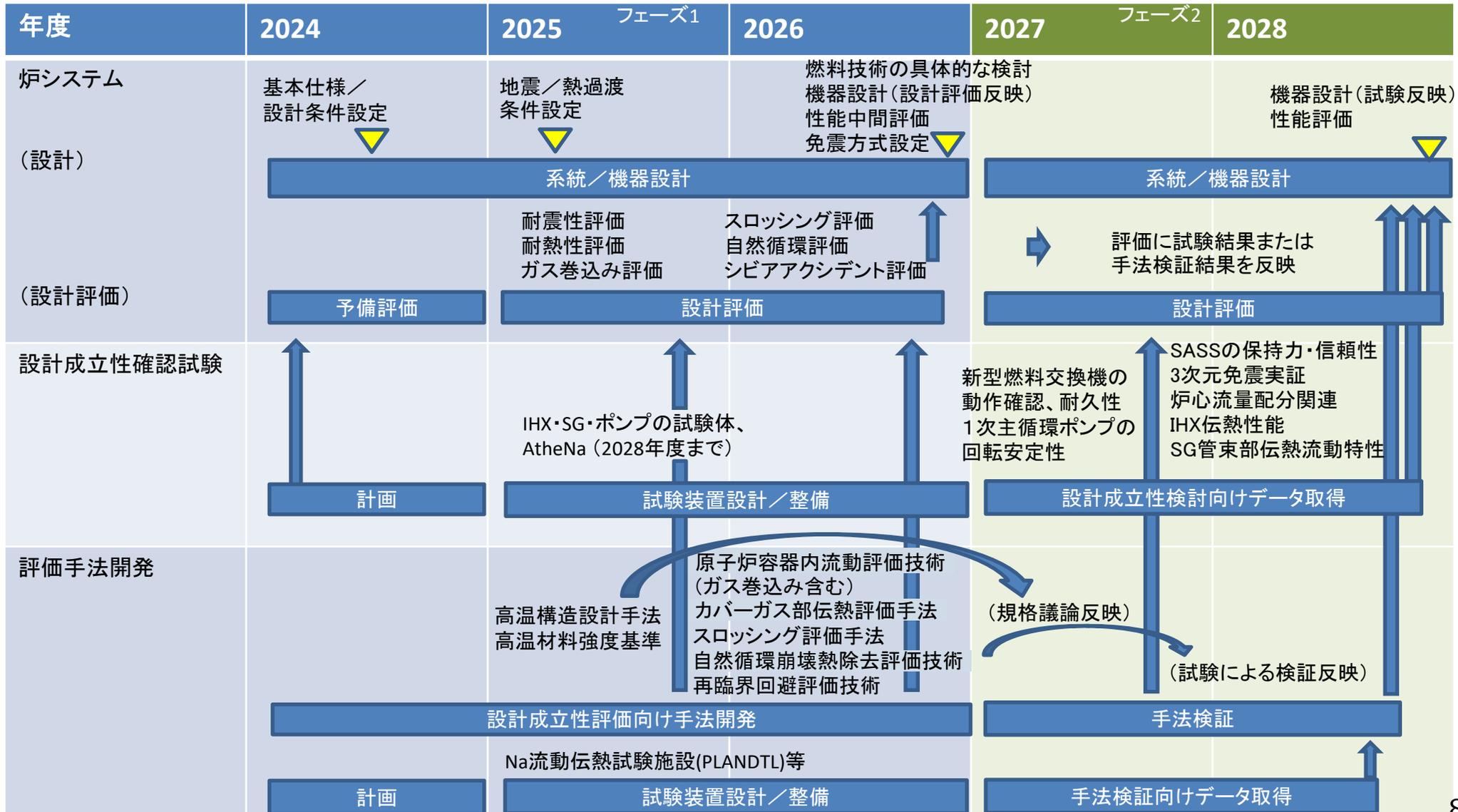
- 安全性／信頼性、経済性等の開発目標達成に向けて、プラントを構成する各設備に求められる機能要求を満たすために必要な技術課題を抽出した。
- 抽出した技術課題の各々について概念設計段階で実施すべき技術開発計画を具体化し着手した。

主要な開発項目

分野	安全性／信頼性	経済性
炉心燃料	再臨界回避評価技術【J】	
原子炉構造	自己作動型炉停止機構(SASS)の保持力・信頼性 自然循環崩壊熱除去技術【J】 設計成立性評価向け手法開発 (原子炉容器内流動評価技術【J】) タンク型原子炉構造設計技術 (カバーガス部伝熱流動評価手法) (スロッシング評価手法) 設計成立性検討向けデータ取得 (炉心流量配分関連)	設計成立性検討向けデータ取得 (新型燃料交換機)
冷却系／ 建屋等	機器設計成立性検討向けデータ取得 (1次主循環ポンプ回転安定性) 高温構造設計手法・高温材料強度基準 (改良9Cr-1Mo 鋼、316FR鋼)【J】 3次元免震システムの実証	機器設計成立性検討向けデータ取得 (中間熱交換器(IHX)伝熱性能) (蒸気発生器(SG)管束部伝熱流動特性)

主要な成果の予定（炉システム（炉心燃料以外））

- 2028年度頃を想定している、実証炉の基本設計・許認可フェーズの開始への移行判断に向けて、炉システムの設計、設計成立性確認試験、評価手法開発について工程を整理した。



主要な設計評価の考え方

- 新技術のため開発が必要となる評価手法、従来ループ型向けに開発されてきた技術をタンク型炉に適用するために改良が必要となる評価手法については、概念設計期間中に開発を進め、これらを適用した設計評価を実施する必要がある。
- これに該当する主要な評価項目は以下のとおり。
 - ✓ 耐震性評価
 - ✓ 耐熱性評価
 - ✓ ガス巻込み評価
 - ✓ スロッシング評価
 - ✓ 自然循環崩壊熱除去評価
 - ✓ シビアアクシデント評価
- フェーズ1では、現状の手法をタンク型に適用できるように改良し、その手法を用いて設計評価を行うとともに、手法検証のための試験計画を立案し、試験装置の設計・整備を行う。
- フェーズ2では、既存の試験データを用いた評価手法の検証を行い、検証された評価手法により設計評価を行い、設計成立性を確認するとともに、新たに実施する試験データ取得を進める。
- 許認可に向けては基本設計段階においても引き続き試験データを取得し、評価手法の検証整備を完了する。

主要な設計評価の計画 (1/2)

- 概念設計期間中に評価手法の開発を進め、順次設計評価に適用する。
- フェーズ1では、暫定の設計条件や設計オプションで設計評価を実施して、代表的な項目に着目して設計の成立見通しを得る。
- フェーズ2では、設計条件や設計仕様を絞り込み、より詳細な評価を実施して設計の成立確度を高める。

項目名	関連する評価手法	評価クライテリア	フェーズ1評価のポイント	フェーズ2評価のポイント
耐震性評価	高温構造設計手法	原子炉容器の座屈による破損防止	暫定的な耐震条件において、現状の評価手法により、原子炉容器等の機器の構造健全性が確保できる板厚等の 構造仕様の範囲 を明らかにする。	設計進捗を反映した耐震条件の見直し、規格基準の議論を踏まえたうえで、原子炉容器等の機器の構造健全性が確保できる板厚等の 構造仕様 を明らかにする。
耐熱性評価	高温構造設計手法 高温材料強度基準 カバーガス部伝熱評価手法	原子炉構造及び冷却系機器のクリープ疲労損傷による破損防止	原子炉構造及び冷却系機器の 代表部位を対象として耐熱性評価 を行い、プラント寿命中の健全性が確保できる 見通しを得る 。	原子炉構造及び冷却系機器の 構造を詳細化して、対象部位を増やした耐熱性評価 を行い、プラント寿命中の健全性確保の 確度を高める 。
ガス巻込み評価	ガス巻込み評価手法	自由液面からの有意なガス気泡の炉心への流入防止	現状で活用できる 最新の評価手法を用いて通常運転時のガスコアがIHX入口窓部に接続しない(ガス気泡が吸込まれない) 見通しを得る 。	ガス巻込み試験にて 検証した評価手法を用いて通常運転時のガスコアがIHX入口窓部に接続しない(ガス気泡が吸込まれない) 確度を高める 。

※赤文字はフェーズ1とフェーズ2の差異

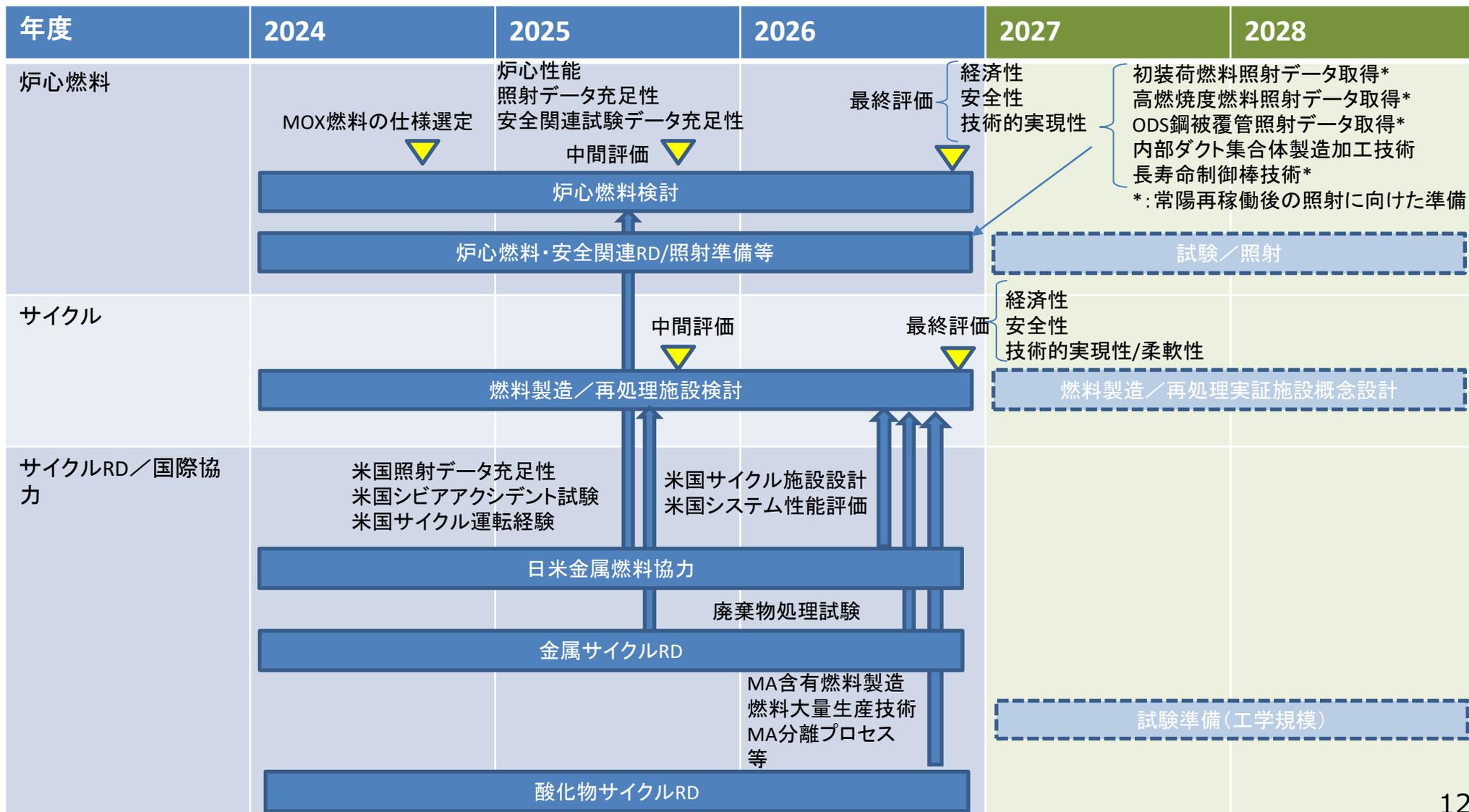
主要な設計評価の計画(2/2)

項目名	関連する評価手法	評価クライテリア	フェーズ1評価のポイント	フェーズ2評価のポイント
スロッシング評価	スロッシング評価手法	スロッシングによる機器破損防止	現状の評価手法でスロッシング波高・荷重を評価し、原子炉容器上部等機器の 構造仕様の範囲 を明らかにする。	試験結果を評価手法に反映した上で、スロッシング波高・荷重を評価し、原子炉容器上部等機器の 構造仕様 を明らかにする。
自然循環崩壊熱除去評価	自然循環崩壊熱除去評価技術	異常時の燃料破損防止	代表的な異常事象に対して、 簡易評価 によって自然循環崩壊熱除去時の燃料温度を評価し、燃料破損が防止できる 見通し を得る。	代表的な異常事象に対して、 原子炉容器内の多次元熱流動を考慮した詳細な評価手法 を適用して自然循環崩壊熱除去時の燃料温度を評価し、燃料破損が防止できる 確度 を高める。
シビアアクシデント評価	再臨界回避評価技術 コアキャッチャー評価技術	原子炉容器内事象終息の達成	酸化物燃料と金属燃料の両者について、シビアアクシデント対策を選定し、原子炉容器内事象終息の達成見通し を得る。	具体化された燃料のシビアアクシデント対策について、不確かさの影響解析を含めた有効性評価 を行い、原子炉容器内事象終息の 確度 を高める。

※赤文字はフェーズ1とフェーズ2の差異

主要な成果の詳細 (燃料サイクル)

- 燃料技術については、2026年度頃を目途に研究開発成果・国際協力を通じて得た知見を踏まえ、MOX燃料と金属燃料それぞれの燃料技術の具体的な検討に向けた工程を整理した。



MOX燃料サイクル技術

<燃料製造>

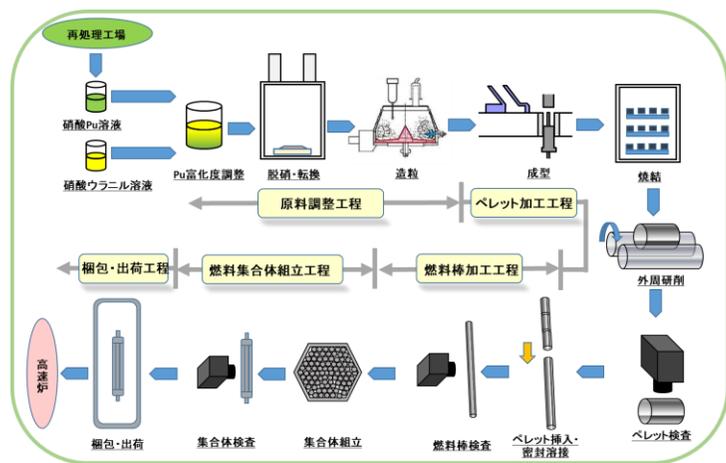
- 酸化物燃料の製造についてはPu-1、Pu-2、Pu-3で実績があり、これら成果の一部はJNFL-MOX燃料加工工場に反映されている。
- 高速炉燃料製造技術の高度化による経済性向上、MA含有燃料の取扱い等のための遠隔保守技術開発が必要になる。

<再処理>

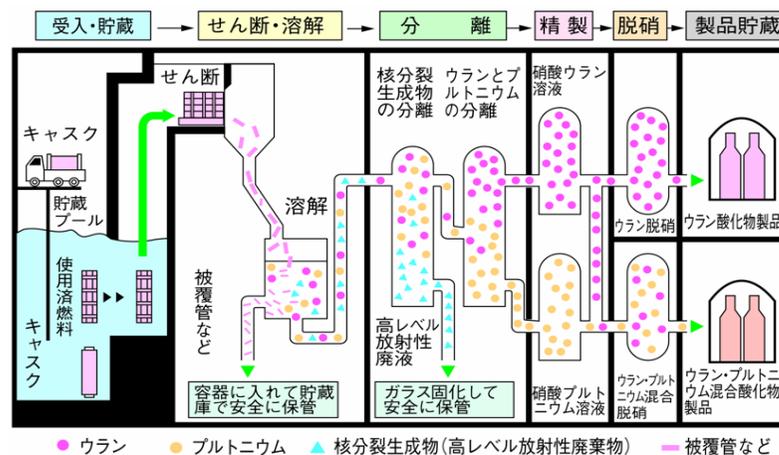
- TRPにおいて1140トンの再処理実績があり、一部の技術はJNFLの六ヶ所再処理工場に反映されている。
- 高速炉用MOX燃料の再処理に必要なプロセス開発に加え、MA分離回収技術等の技術開発が必要になる。

2026年度までの評価内容

- 安全性、経済性を含め、実用システムの性能を評価する。
- 軽水炉ウラン燃料の再処理をベースとして追加開発になる部分の技術的な見通しを評価する。
- 必要な実証炉燃料製造施設等を検討し、許認可に向け必要になる実証試験の計画を明確にする。



MOX燃料製造（ペレット法）



MOX再処理（湿式）

金属燃料サイクル技術

<燃料製造>

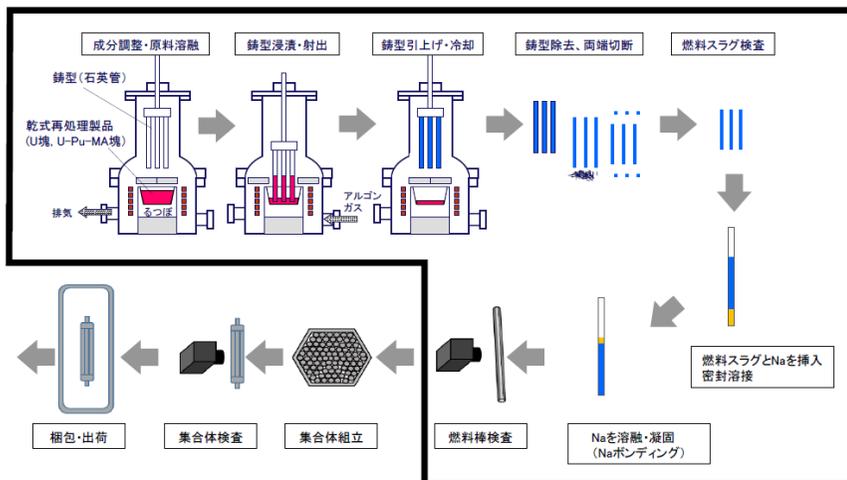
- 米国で高速実験炉EBR-IIの燃料製造の実績がある。
- ウランについては国内で工学規模まで試験を実施している（プルトニウムは未実施）。

<再処理>

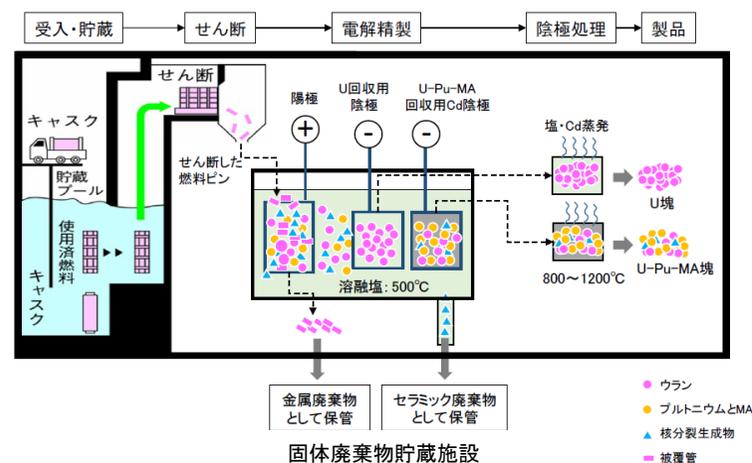
- 米国で高速実験炉EBR-IIの使用済燃料の再処理実績がある。
- ウランについては国内で工学規模まで試験を実施している（プルトニウムは未実施）。
- 廃棄物処理については米国でも実績がなく開発が必要になる。

2026年度までの評価内容

- 安全性、経済性を含め、実用システムの性能を評価する。
- 燃料製造、再処理について米国技術を導入可能であるか否かを日米共研により技術的観点から確認する。
- 技術的な見通しを廃棄物処理技術を含む国内R&Dに加え、米国データにより評価する。
- 必要な実証炉燃料製造施設等を検討し、許認可に向け必要になる実証試験の計画を明確にする。軽水炉サイクルとの共存性を考慮し、軽水炉燃料への乾式再処理適用性も評価する。



金属燃料製造（射出鑄造）



金属再処理（電解精製）

1. 実証炉の主要仕様及びR&D計画について
2. **高速炉実証炉の開発体制について**

第22回WGを踏まえた開発体制の移行について

- 戦略ロードマップ（令和4年12月23日原子力関係閣僚会議決定）では、選定されたナトリウム冷却炉概念の設計とそれに付随した技術開発、将来的には製造・建設等も担う中核企業を改めて選定し、開発体制を明確にすることが定められているところ、当該ロードマップに基づき、経済産業省において公募を行い、戦略WGの下に設置された高速炉技術評価委員会において審査した結果、中核企業として三菱重工業株式会社が選定された（令和5年7月12日）。
- 第22回戦略ワーキンググループ（令和6年6月19日）では、炉と燃料サイクルの研究開発全体を一定のレベルまで完遂するとともに、両者を統合して基本設計に繋げていく機能（研究開発統合機能）を担う研究開発統合組織を原子力機構内に設置することとされた。 ※令和6年7月1日に設置済
- 今般の開発体制の移行を踏まえ、研究開発統合組織（高速炉サイクルプロジェクト推進室）は炉と燃料サイクルの研究開発全体を統合すべく、原子力機構内での炉・燃料サイクルの研究開発に加え、経済産業省の公募で選定した中核企業においてこれまで取り組んできた研究開発の連続性、継続性の確保の観点から踏まえ、中核企業による概念設計及び関連する研究開発のマネジメントに取り組む。

