

新型炉部会 「2024年春の年会」企画セッション 次世代革新炉(高速炉と高温ガス炉)開発の最前線

(2) 高速炉開発における中核企業の取り組み

2024年3月27日
三菱重工業株式会社 原子力セグメント
先進炉技術部 碓井 志典

三菱重工原子力技術資料：クラスB

本資料は当社及び(又は)協力会社の商業機密を含んでおりますので、本提出(貸与)目的以外に使用されることはご遠慮下さい。
また、当社の同意なく本資料の全部又は一部を第三者に公開、開示されることのないように願います。

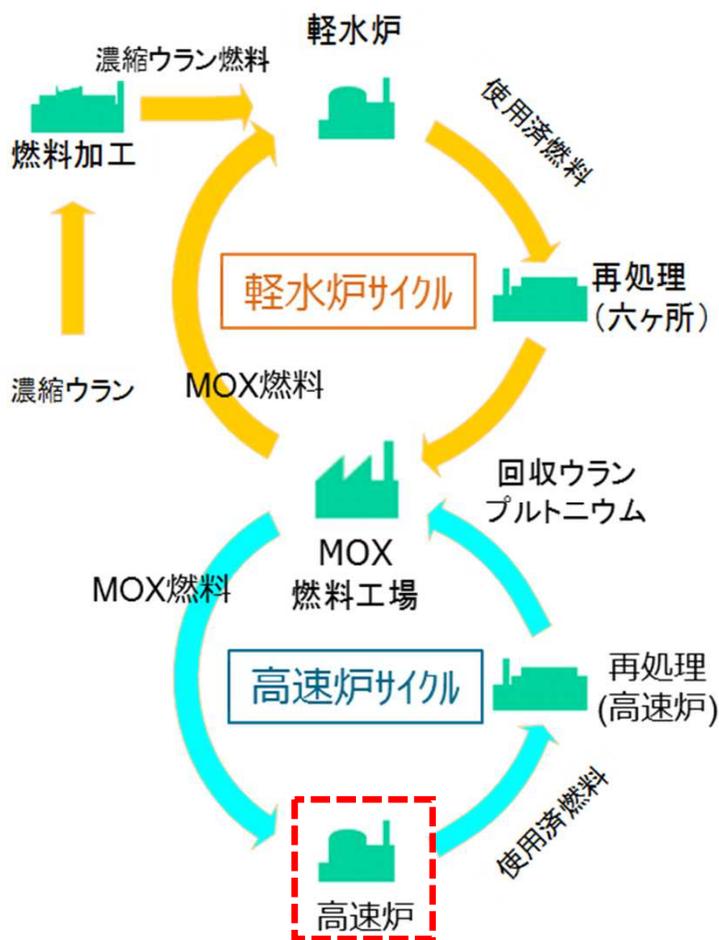
三菱重工業(株)

1. 高速炉開発の意義
2. 高速炉開発の歴史
3. 高速炉の開発体制
4. 提案概念
5. 今後の取組み
6. まとめ

本資料は、経済産業省からの委託事業である「高速炉の国際協力等に関する技術開発」及び「高速炉に係る共通基盤のための技術開発」の一環として実施した成果を含む。

1. 高速炉開発の意義

- 燃料サイクルとは、使用済燃料を再処理・加工し、燃料として再使用すること
- 燃料サイクル確立により①**資源の有効活用**、②**高レベル放射性廃棄物の減容化/有害度低減**が可能
- **資源の少ない日本ではエネルギーセキュリティの観点から、資源を有効活用できる燃料サイクル確立が必要**
- 高速炉サイクルの確立により、エネルギーの長期安定供給が可能(**軽水炉使用済MOX燃料で生成される高次化Puを再利用可能：次ページ参照**)

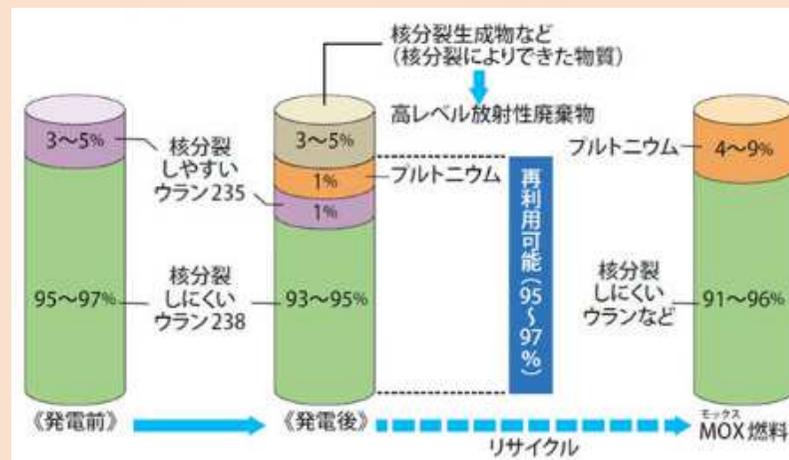


原子燃料サイクルの概要

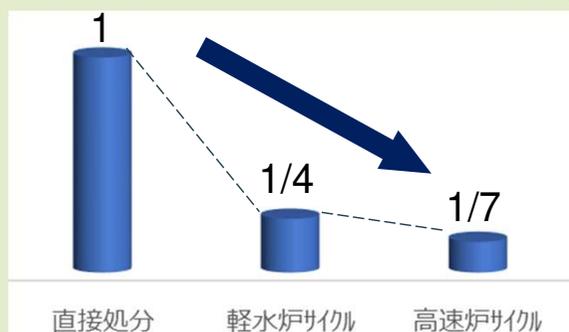
①資源の有効活用

- 使用済燃料から再利用可能なウラン・プルトニウムを回収し、MOX燃料に加工

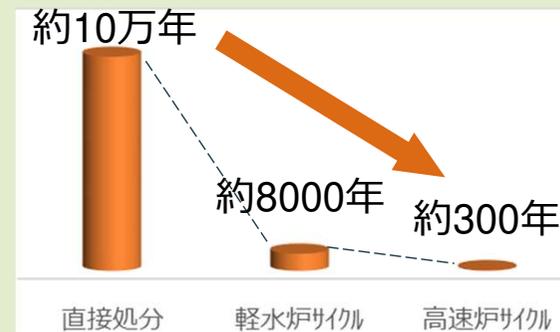
出典：電気事業連合会ホームページ



②高レベル放射性廃棄物の減容化/有害度低減



減容化の効果(直接処分時体積との比)

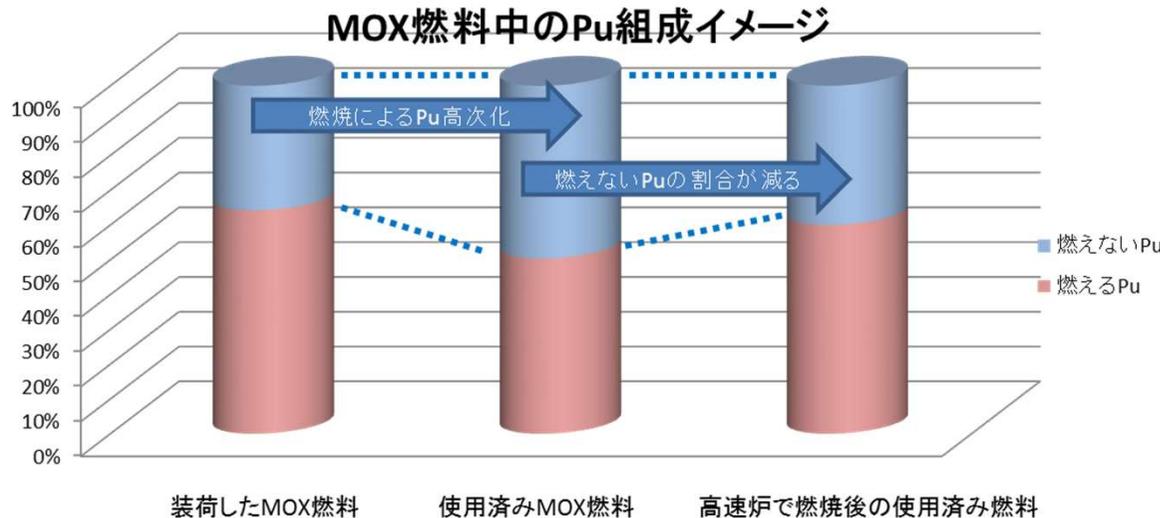


有害度低減(*)の効果

(*) 天然ウランと同水準の放射能レベルまで低減する年数、経産省資源エネルギー庁資料に基づき作成

1. 高速炉開発の意義

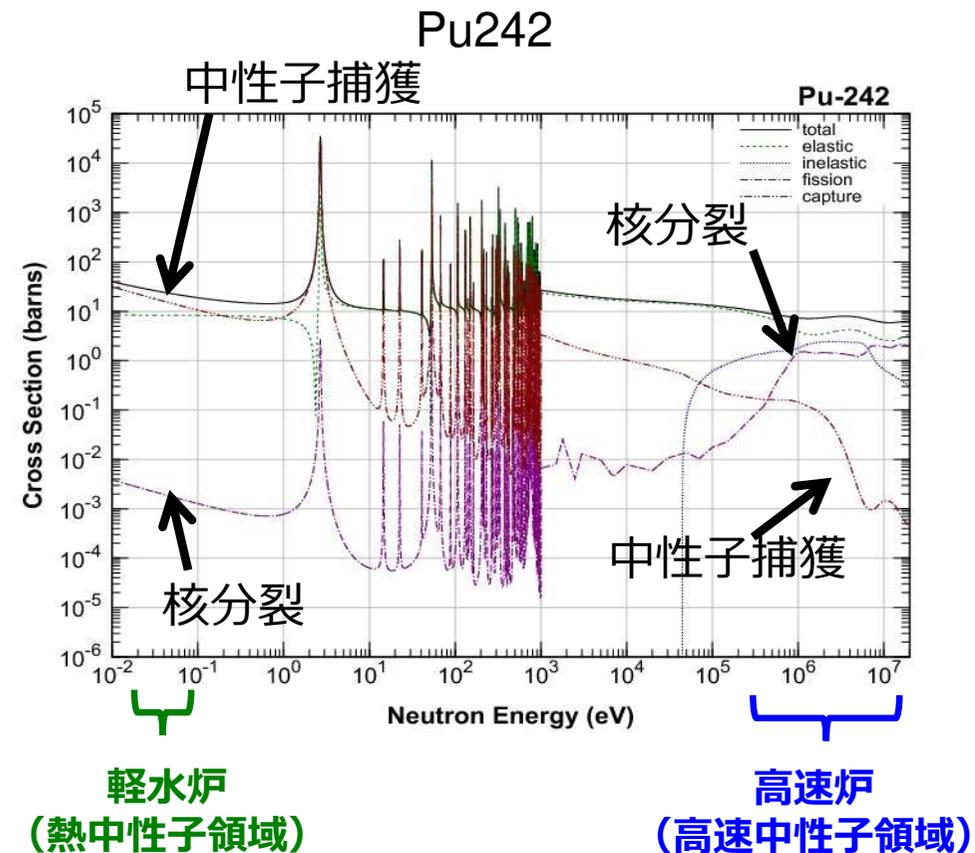
- プルサーマルの使用済みMOX燃料中には熱中性子では燃えないプルトニウム（Pu240、Pu242等偶数核種）の割合が増える。（プルトニウムの高次化）
- そのため再処理を繰り返すと臨界しにくくなり、プルトニウム全体の割合を高める必要あり。（扱えなくなる）
⇒ **プルサーマルだけのサイクルには限度あり**
- **高速炉で使用済みMOXを燃焼させる**ことで、燃えないプルトニウムの割合を減らせ、**サイクルが継続可能**



出典：三菱重工業(株) ホームページ

高速炉は捕獲断面積に対する核分裂断面積の値が大きく、偶数核種であっても、核分裂を生じる。

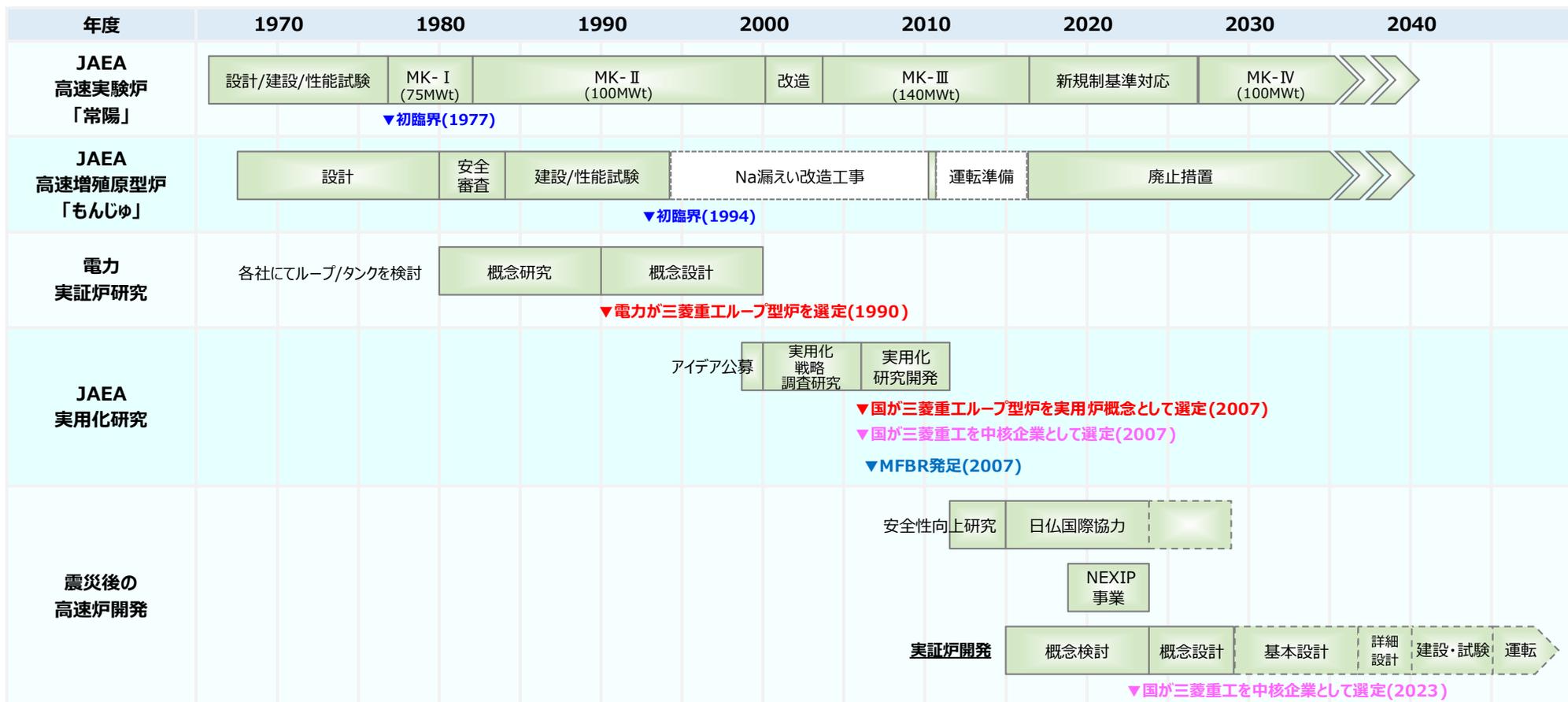
高速中性子で燃えないプルトニウム（核分裂しない偶数核種）の割合を下げる。



出典：JAEA 核データ研究グループ JENDL-4.0

2. 高速炉開発の歴史

- 三菱重工業(MHI)は**1970年代**から、**実験炉「常陽」**や**原型炉「もんじゅ」**などの開発、設計、製作を実施し、**メーカーとして主導的な役割**を担ってきた。そして、もんじゅに続く炉の開発が**三菱重工ループ型炉を基に進められた**。
- 2007年に国は中核企業 1 社に責任と権限及びエンジニアリング機能を集中することを決定し、公募の結果、**MHIが中核企業に選定**され、**三菱FBRシステムズ(MFBR)**を設立した。
- MHI及びMFBRは、我が国の高速炉開発の中核として、日仏国際協力によるタンク型炉の開発や、将来の多様化するニーズに柔軟に対応するため国のNEXIP事業も活用し、高速炉の開発に取り組んでいる。



出典：重工技報 Vol.57 No.4(2020) 高速炉開発への取組み に加筆

2. 高速炉開発の歴史 ～MHIが保有する高速炉R&D施設(Na試験)～

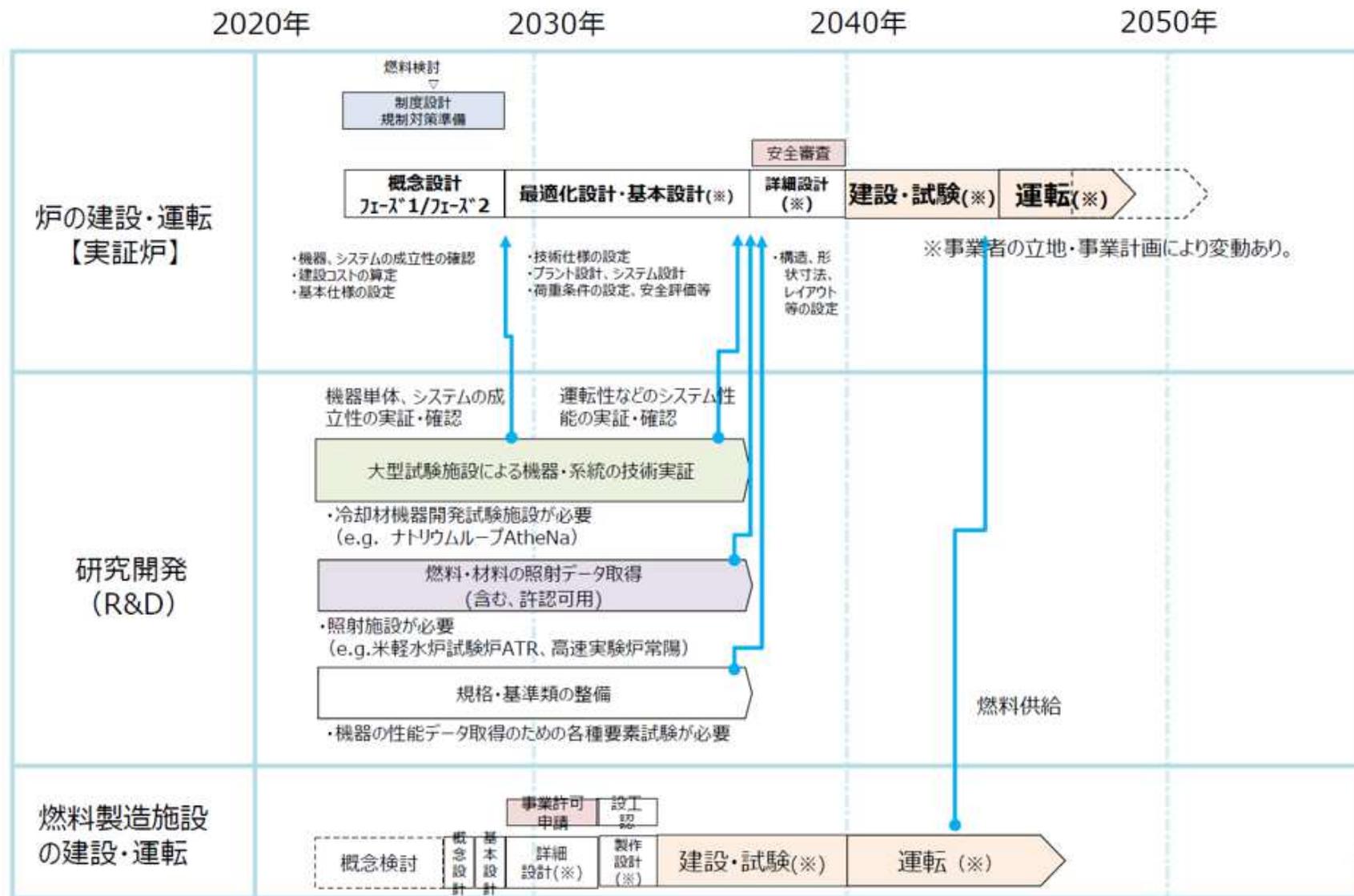
- 高速炉設計評価手法の開発やNa機器の性能確認などに資する目的で、Na試験施設を保有（1970年代から順次導入し、現在は温度、流速等の特徴が異なる3つの試験設備を保有）
- Na試験施設の運転を通じて蓄積されたNa取扱技術を高速炉の開発に反映
- 民間で唯一、3つのナトリウムループを保有する

	写真	特徴
多目的ナトリウム試験装置 (MTL-3)		<ul style="list-style-type: none"> ・<u>大口径のナトリウム試験容器を具備し、ナトリウム機器の性能特性試験（材料試験等）が可能</u> ・最高温度：550℃ ・流量：50 l/min ・運転中のNaの純度管理可能。
ナトリウム熱流動試験施設 (SGTF)		<ul style="list-style-type: none"> ・<u>大規模・大容量のナトリウム熱流動試験装置</u> ・<u>国内メーカ最大規模（流量：毎分800リッター）</u> ・最高温度：600℃ ・運転中のNaの純度管理可能。
ナトリウム熱過渡試験施設 (SASS)		<ul style="list-style-type: none"> ・<u>高温ナトリウムの高速注入による温度過渡変化の試験が可能</u> ・最高温度：750℃ ・温度変化率30℃/sec

出典：三菱重工技報 Vol.47 No.3(2010),p121-123

3. 高速炉の開発体制 ～高速炉開発工程～

➤ 2022年7月29日の原子力小委革新炉WGにて、**2040年代に高速炉実証炉を運転開始**する技術ロードマップが提示された。



出典：経済産業省 第4回 原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ (2022.7.29) 資料3「カーボンニュートラルやエネルギー安全保障の実現に向けた革新炉開発の技術ロードマップ(骨子案)」

3. 高速炉の開発体制 ～高速炉中核企業公募～

- 2022年12月に改定された戦略ロードマップでは、**2024年度から実証炉の概念設計・研究開発、2028年度に実証炉の基本設計・許認可手続きへの移行判断**の計画。
- 2024年度から開始される実証炉の概念設計対象となる炉概念仕様と、その製造・建設を担う中核企業が2023年3月に資源エネルギー庁から募集。
- 2023年7月に開催された高速炉開発会議・戦略ワーキンググループで**MHIが中核企業に選定された**。

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について

令和5年3月14日
経済産業省 資源エネルギー庁
原子力政策課

2022年12月23日に改訂された高速炉開発の「戦略ロードマップ」に基づき、2023年度夏に2024年度以降の概念設計の対象となる炉概念の仕様と中核企業を選定することとしています。経済産業省では、対象となる炉概念の仕様と中核企業を以下の要領で募集します。

出典：経済産業省 資源エネルギー庁 ホームページ

PRESS INFORMATION

日本政府が開発を推進する高速炉実証炉の設計、開発を担う中核企業に選定2040年代の運転開始に向け、ナトリウム冷却高速炉の概念設計などを推進

2023-07-12

📷 | f | 🐦 | in



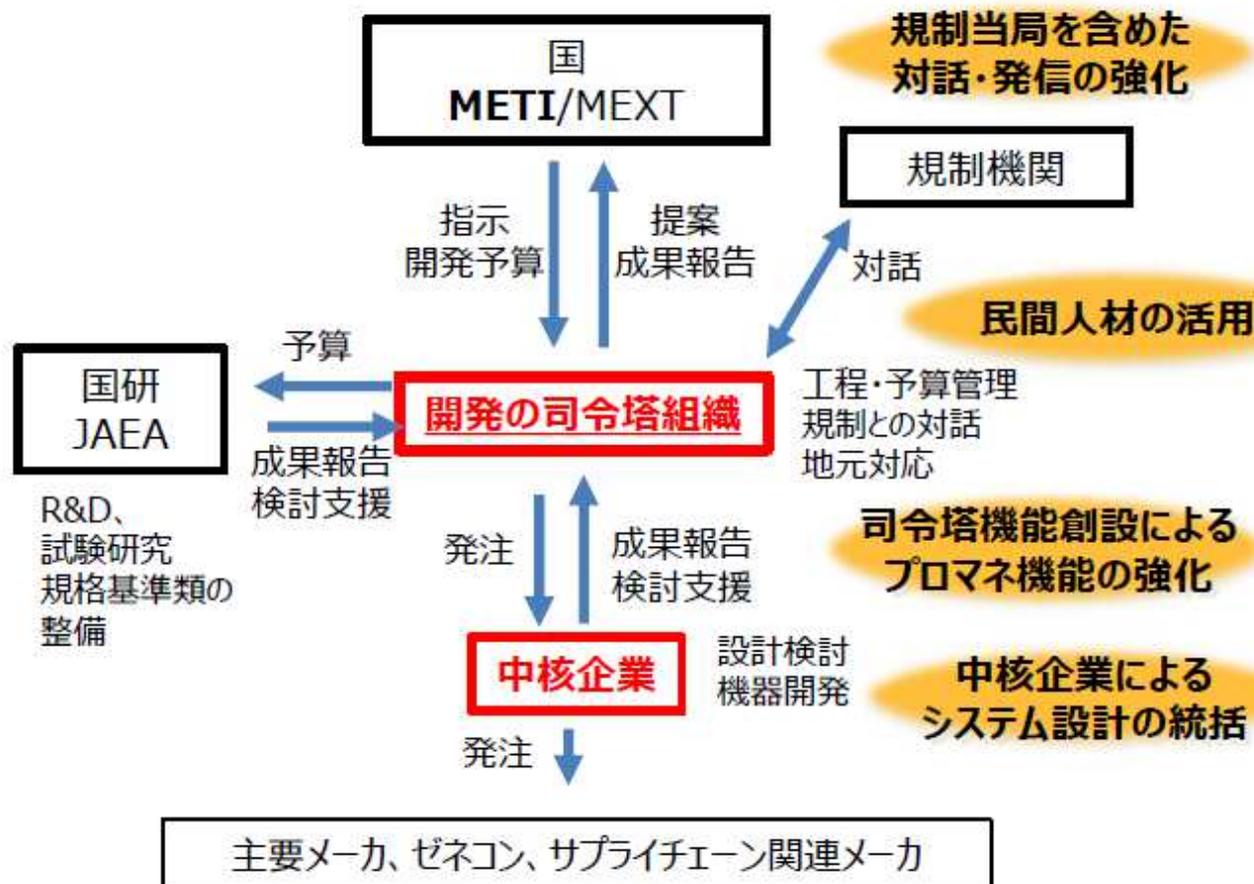
ナトリウム冷却タンク型高速炉 (経済産業省委託事業研究成果を含む)

出典：三菱重工(株) ホームページ

3. 高速炉の開発体制 ～実証炉概念設計の開発体制～

- 2024年度からの概念設計では、**開発の司令塔組織**及び、**中核企業(MHI)/エンジニアリング專業会社(MFBR)**が事業推進の主体として、プラント概念構築を進める。

<新たな開発体制の例>



出典：経済産業省 第21回 高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ (2023.7.12) 資料2「高速炉の開発体制について」

4. 提案概念 ～ナトリウム冷却タンク型高速炉～

- 高い経済性が期待できる大型炉への拡張が容易な**中型ナトリウム冷却タンク型高速炉**。
- 国内先行炉・既往プロジェクトの技術蓄積 並びに 国際協力で獲得した知見をベースに、**高い技術成熟度を実現**。
- 東電福一事故の教訓や国際的な安全設計基準※反映による**新規制基準適合を考慮した安全設計**。
※ 国際的標準であるGIF-SDC/SDG（第4世代炉国際フォーラムの安全設計クライテリア/安全設計ガイドライン）に準拠
- もんじゅからの大型化、タンク型固有の課題解決は**日仏国際協力等も活用**。
- **常陽による照射試験を行い**、経済性向上のための**高燃焼度燃料(太径中空ペレット)**を採用。

	原型炉「もんじゅ」	ナトリウム冷却高速炉
出力	280 MWe	400 ~ 650 MWe (ニーズに合わせて対応可能)
炉型	ループ	タンク (国際協力で知見獲得)
燃料 (ペレット)	MOX (中実ペレット)	MOX (太径中空ペレット)
炉心出口温度	529 °C	550 °C
原子炉容器径	約 8 m	～ 約 16.5 m
主要構造材	SUS304	316FR鋼 (高温強度を高めた高速炉用ステンレス鋼)



ナトリウム冷却タンク型高速炉
(経済産業省委託事業研究成果を含む)

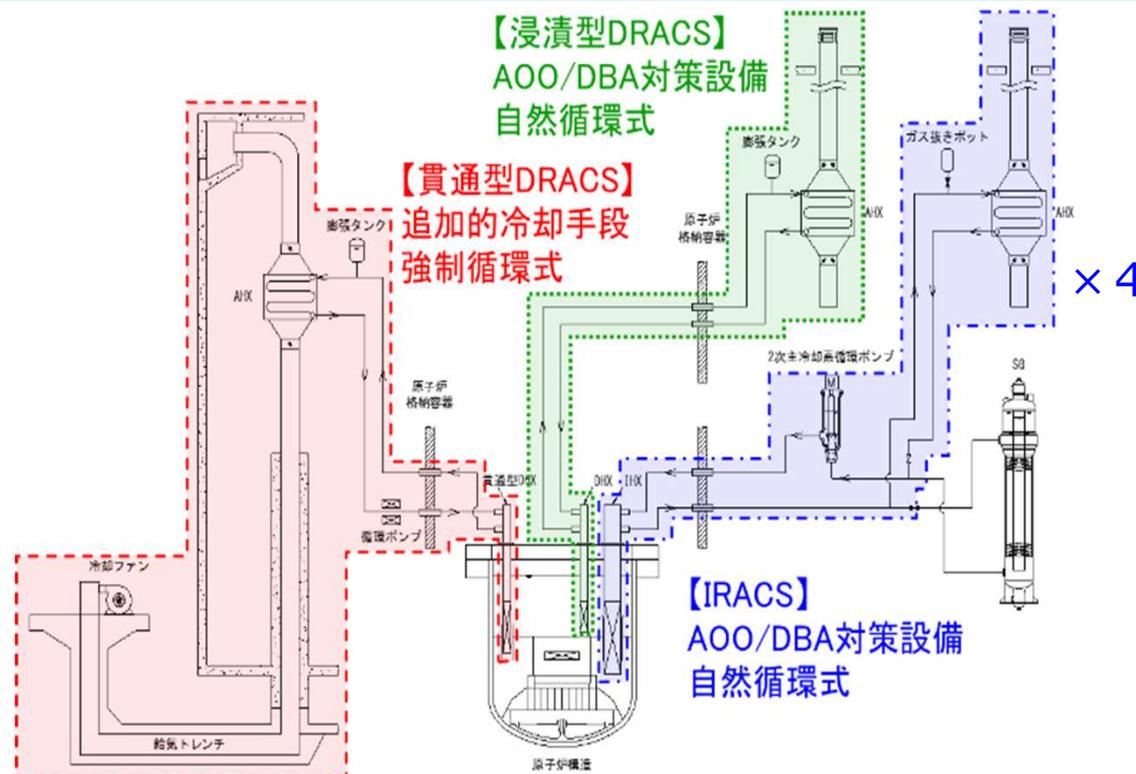
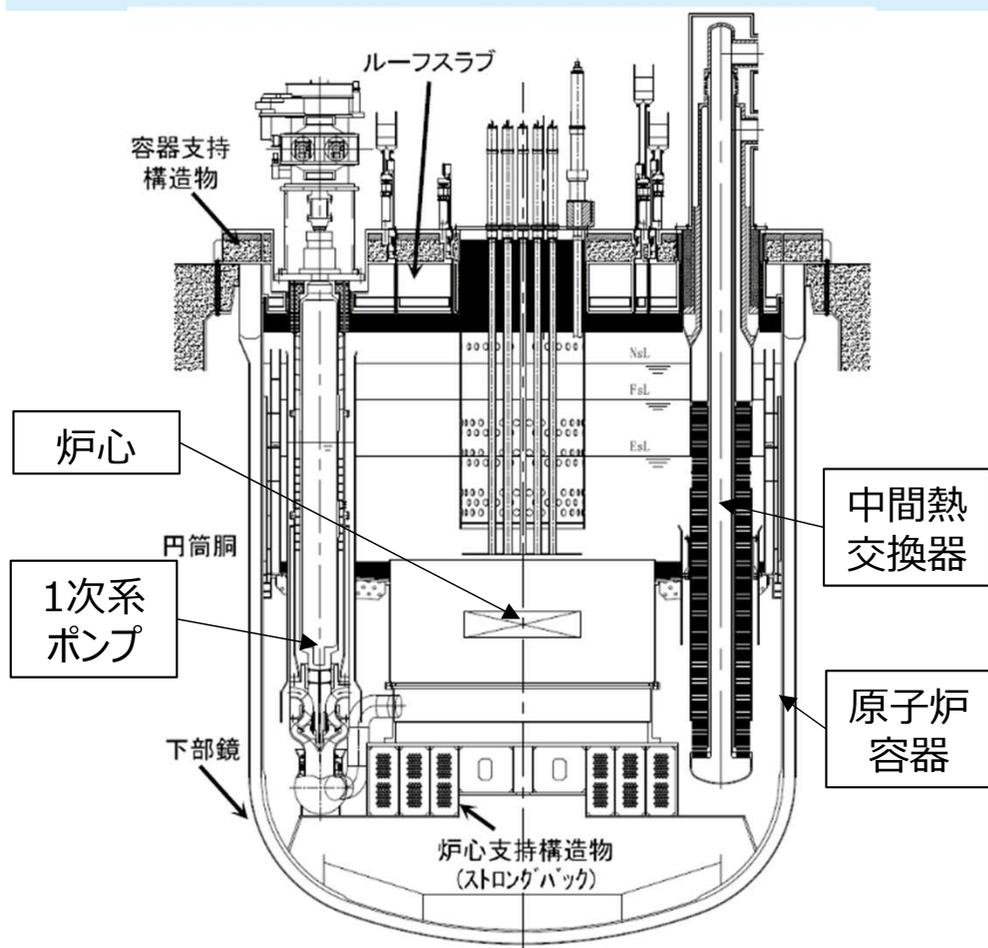
4. 提案概念 ~ナトリウム冷却タンク型高速炉~

[原子炉構造]

- 高温低圧のため、**原子炉容器の板厚は約50mm**
- 1次系Naは1次系ポンプにより**原子炉容器内を循環**
- 中間熱交換器により炉心で発生した**熱を2次系Naに伝達**

[崩壊熱除去系]

- **多様性・多重性を確保**するため、3方式、6系統の崩壊熱除去系（最終ヒートシンクは空気）を設置
- ①IRACS：**2次系Naを使って**大気に放熱。自然循環（4系統）
 - ②浸漬型DRACS：1次系Naの高温側に**熱交換器を浸漬**させて除熱し、大気に放熱。自然循環（1系統）
 - ③貫通型DRACS：1次Naの高温側から低温側に**熱交換器を貫通**させて除熱し、大気に放熱。強制循環（1系統）



本報告は、経済産業省からの受託事業である「令和2年度高速炉に係る共通基盤のための技術開発」の一環として実施した成果である。

本報告は、経済産業省からの受託事業である「令和3年度高速炉に係る共通基盤のための技術開発」の一環として実施した成果である。

4. 提案概念 ~ナトリウム冷却タンク型高速炉~

[機器配置]

- 線量が低い**2次系（2次系Na、蒸気発生器等）は格納容器外**に配置
- 高温運転時の熱膨張応力を低減するため、2次系ナトリウム配管は**エルボを用いた引き回し**を実施
- 崩壊熱をナトリウムから大気に放出するため、**建屋外にスタックを設置**
- 崩壊熱除去系の多様性・多重性を確保するため、**5本のスタック+1本のダクトを設置**
- 自然循環力による崩壊熱除去を可能とするため、**順次レベルを上げて設備を配置**

スタック出口

↑ 高温空気

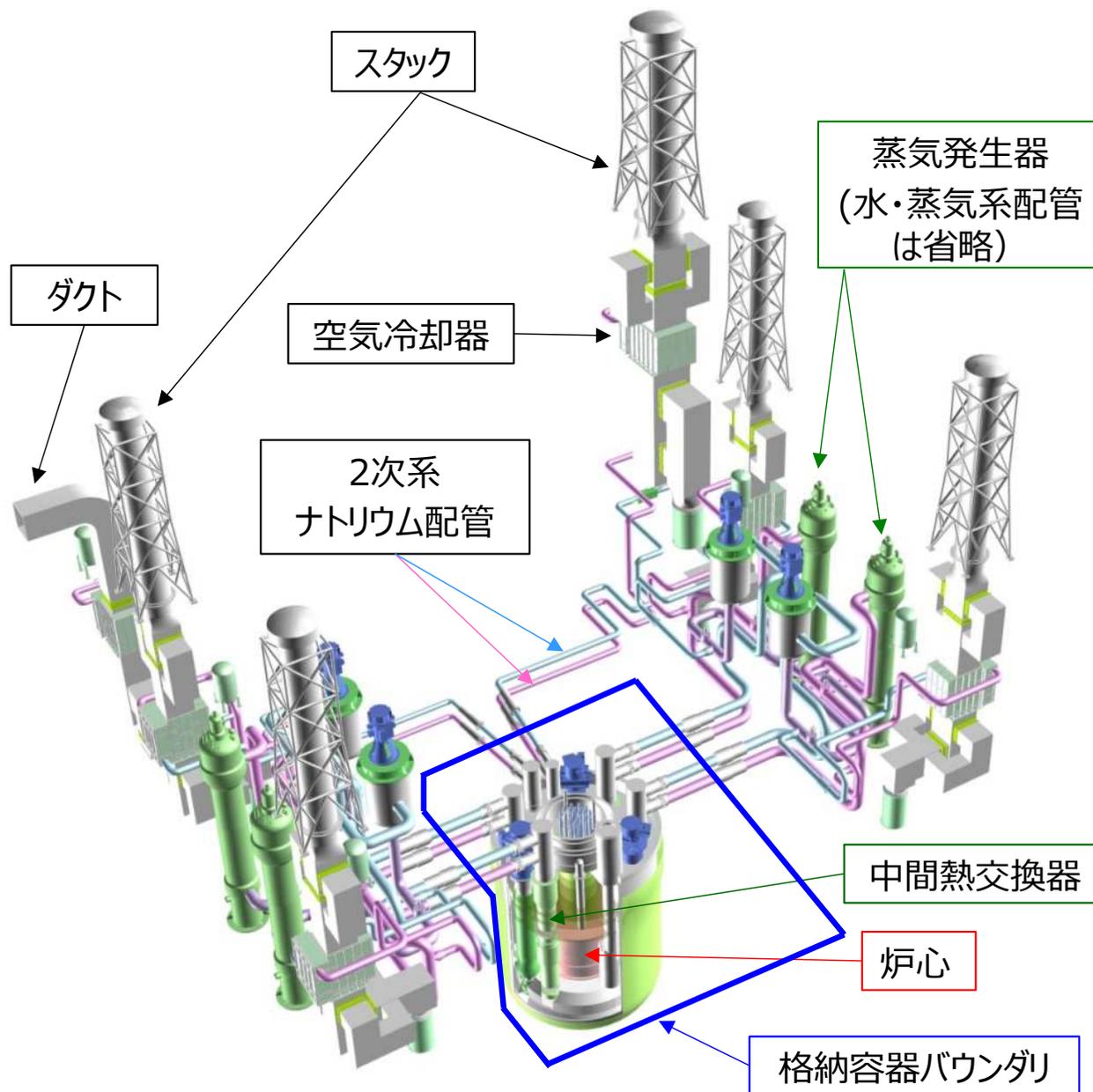
空気冷却器（Na/空気熱交換器）

↑ 高温Na ↓ 低温Na

中間熱交換器（Na/Na熱交換器）

↑ 高温Na ↓ 低温Na

炉心

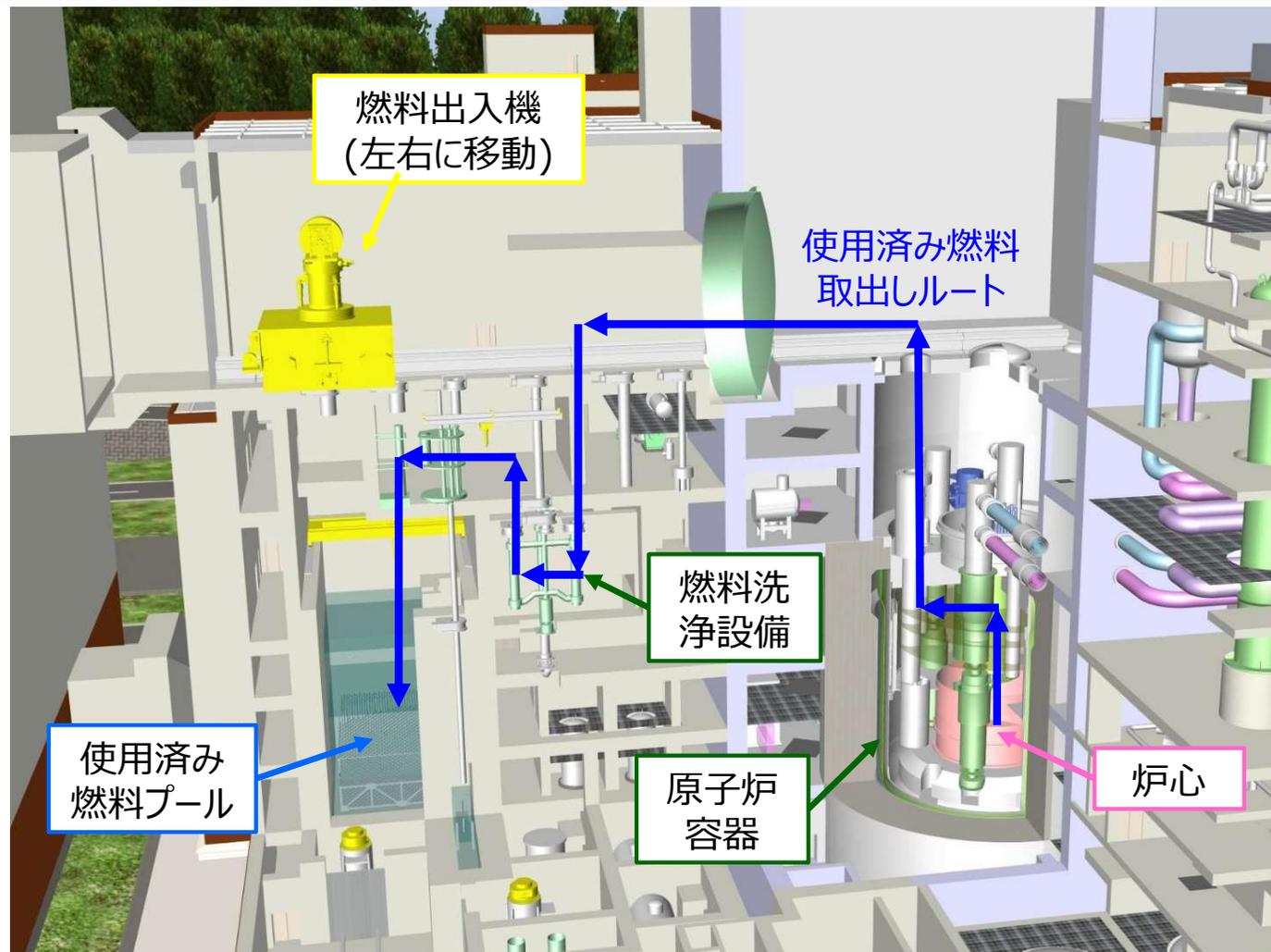


本報告は、経済産業省からの受託事業である「令和元年度高速炉の国際協力等に関する技術開発」の一環として実施した成果である。

4. 提案概念 ～ナトリウム冷却タンク型高速炉～

[燃料交換設備]

- Naは空気と反応するため、アルゴンガスにより密閉した状態を維持
 - Naが付着した使用済み燃料は、アルゴンガス空間を順次受け渡して使用済み燃料プールに取り出す
- ①原子炉容器 → ②燃料出入機 → ③燃料洗浄設備 → ④使用済み燃料プール

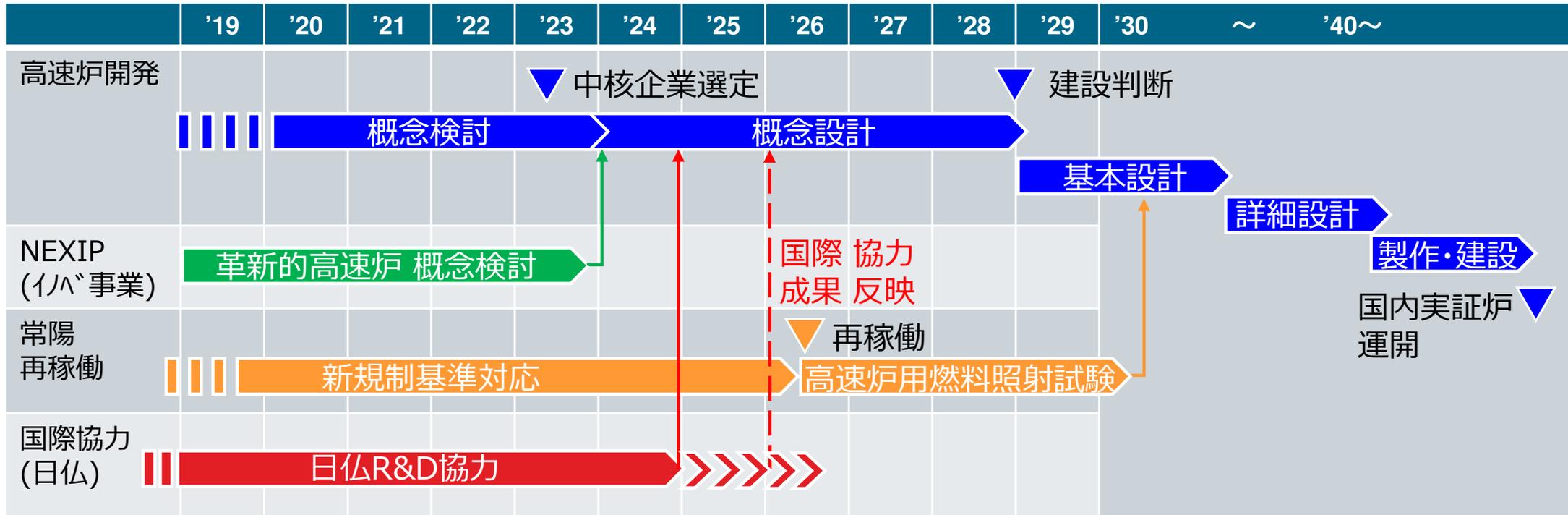


本報告は、経済産業省からの受託事業である「令和元年度高速炉の国際協力等に関する技術開発」の一環として実施した成果である。

5. 今後の取組み

- 最も実績があり、技術的に成熟した**ナトリウム冷却高速炉**(主概念)の開発に加え、**NEXIP事業**(METI事業)で開発した**革新的高速炉**の成果、**国際協力**で蓄積した知見も活用。
- **2024年度から概念設計を開始し、21世紀半ば頃の現実的なスケールの高速炉運転開始を目指す。**
- これを推進する上で、①**常陽(燃料の照射試験等、重要な役割あり)**の再稼働、②**国際協力のテーマ適正化**(国内開発への有効性)、③**技術伝承の観点からも高速実証炉の早期建設判断**が非常に重要。
- これまで東京に拠点を置いていたMFBRの設計部隊を順次、MHIの原子力プラントの設計・製造拠点である神戸造船所へ移転し、2024年度からは**MFBRとMHIとが一体で設計を開始する。**

<高速炉開発工程案>



- 高速炉の実用化に向けて、プラント概念検討と並行して、**技術課題に対する研究開発を推進する。**
- 2028年度の基本設計・許認可手続きへの移行判断に向けて、必要となる数々の研究開発を、JAEA、MHI 総合研究所を中心に実施していく。

<実施中の研究開発（例）>

	開発項目	目的
1	炉心耐震評価手法	地震時、水平時及び上下方向に変位し、相互に衝突する炉心構成要素の群振動挙動を評価可能な手法の開発
2	スロッシング評価手法	地震時のスロッシングにより、原子炉容器のナトリウム液面が原子炉容器天井へ衝突することで発生する荷重を評価可能な手法の開発
3	3次元免震システム	水平免震装置と同程度のスペースに配置が可能で、水平に加えて上下方向の地震力を低減可能な免震システムの開発
4	受動的炉停止系システム	高温で磁力を失う電磁石の特性のみにより、ナトリウムの温度上昇で制御棒の挿入が可能な炉停止システムの開発
5	高温中性子計装	原子炉容器内の高温条件で中性子を計測可能な装置の開発
6	ナトリウム中目視検査装置	超音波を用いて、不透明なナトリウム中での目視検査を可能とする検査装置の開発
7	座屈評価手法	高速炉機器の特徴である薄肉大口径容器の座屈評価手法の開発
8	高温構造材料特性の取得	500℃以上の高温で使用される構造材料の高温長時間材料特性データの取得

出典：重工技報 Vol.57 No.4(2020) 高速炉開発への取組み、
三菱FBRシステムズ(株) ホームページ

- ◆ 三菱重工業(MHI)は高速炉開発の初期から、「常陽」、「もんじゅ」の炉心設計や安全評価等のエンジニアリング、主要機器の設計、製作、現地工事、保守などを分担。各段階における技術や人材を蓄積してきた。
- ◆ 実用化研究にも参画し、2007年に中核企業として三菱FBRシステムズ(MFBR)を設立。高速炉開発技術の拡充と人材の涵養に注力。また、高速炉開発会議の下、「高速炉開発の方針」に基づき策定された「戦略ロードマップ」に則り、MOX燃料によるナトリウム冷却タンク型炉開発を念頭に、NEXIP事業の活用、日仏協力などの国際協力も活用しつつ、自国の技術として、国内高速炉開発に貢献してきた。
- ◆ 今回のエネ庁公募にて中核企業に選定。2024年度から概念設計を開始し、2028年度末の建設判断に向け、プラントの成立性を高めていく。
- ◆ 2024年度から開始される実証炉概念設計にむけ、これまで東京に拠点を置いていたMFBRの設計部を順次、MHIの原子力プラントの設計・製造拠点である神戸造船所へ移転し、2024年度からはMFBRとMHIとが一体で設計を開始する。また、MHI総合研究所では2028年度の基本設計への移行判断に向け必要となる数々の研究開発を実施する。
- ◆ 今後も、高速炉開発の中核企業として国内高速炉の実用化を推進していく。

