



日本原子力学会 2025年春の年会
新型炉部会企画セッション

次世代ナトリウム冷却高速炉の 安全設計方針

(1)高速炉開発の役割

安藤将人(JAEA)



はじめに

- 高速中性子により核分裂反応を維持する高速炉は、核燃料サイクルと組み合わせることにより、高レベル放射性廃棄物の減容化や有害度の低減、資源の有効利用を可能とする技術
- 今後の高速炉の開発の進め方を示す「戦略ロードマップ」では、高速炉の今後の開発の作業計画が提示され、現在、高速炉実証炉の概念設計と必要な研究開発が進められている
- 高速炉の開発目標、開発の経緯と今後の計画、安全設計方針の必要性について、その概要を紹介



高速炉の開発目標

(戦略ロードマップ (2022年12月23日、原子力関係閣僚会議) より引用)

① 安全性・信頼性

1F事故の教訓を踏まえ、高い安全性を追求すること。少なくとも、新規制基準に基づく安全基準を満足する軽水炉及びその核燃料サイクルのシステムと同等以上の安全性を達成すること。炉システムについては、今後の国際設計基準等で次世代炉に期待されるより高い安全性・信頼性を実現する設計上の工夫（受動安全等）を施すこと。施設の運転・保守・補修性を確保すること。

② 経済性

市場ニーズに応じた経済性を有すること。基幹電源として利用するプラントは、他の基幹電源と競合し得る経済性を有すること。小型電源や多目的用途に利用する場合には、市場ニーズに応じた経済性を有すること。なお、上記の経済性は1F事故を踏まえた安全性の強化、並びに事故リスク対応費及び政策経費を踏まえた上で実現すること。

③ 環境負荷低減性

高レベル放射性廃棄物量減容・潜在的有害度低減のため、マイナーアクチノイド (MA) を分離・回収し、燃料として利用できるようにすること。炉、燃料製造、再処理施設の建設・運転・廃止措置を通じて発生する放射性廃棄物量（高レベル放射性廃棄物を含む）を、軽水炉及びその核燃料サイクルシステムを参照して、合理的に実現可能な限り低減すること。ライフサイクルでの環境影響（土地占有、毒性、大気汚染、温室効果ガス (GHG)、酸性化、富栄養化、電離放射線、水資源利用等）が他電源と比して少ないこと。

④ 資源有効利用性

軽水炉及び軽水炉のプルサーマル利用から高速炉へ円滑に移行できること。エネルギー需給や資源の不確かさへの対処を始め、社会のニーズに合った増殖比に柔軟に対応可能であること。資源有効利用の観点から、核燃料サイクル内でウラン (U) 及びプルトニウム (Pu) の十分な回収による資源循環を図れること。

⑤ 核拡散抵抗性

核拡散抵抗性と核物質防護を担保できる高速炉サイクルとすること。

⑥ 柔軟性・その他市場性

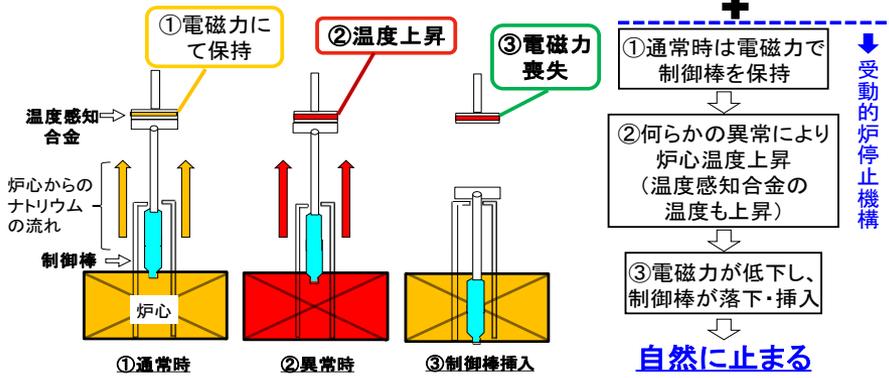
エネルギー供給システム全体の中で、再生可能エネルギーとの共存等を視野に、原子炉出力規模の選択肢や負荷追従能力等、必要な柔軟性に適切に対応できること。



① 安全性・信頼性

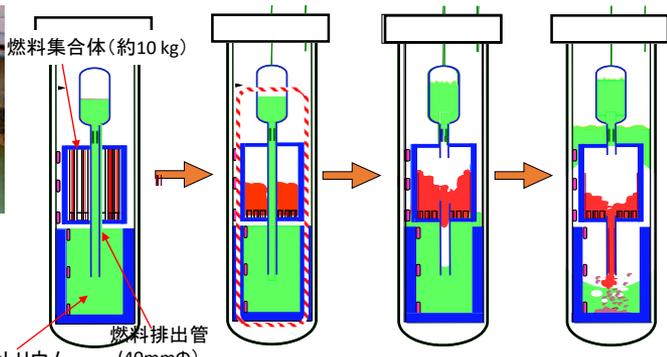
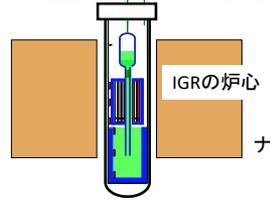
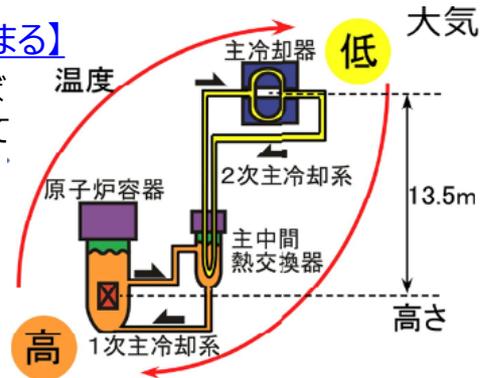
- 1F事故の教訓を踏まえ、高い安全性を追求すること。
- 少なくとも、新規制基準に基づく安全基準を満足する軽水炉及びその核燃料サイクルのシステムと同等以上の安全性を達成すること。
- 炉システムについては、今後の国際設計基準等で次世代炉に期待されるより高い安全性・信頼性を実現する設計上の工夫（受動安全等）を施すこと。施設の運転・保守・補修性を確保すること。

<受動的炉停止機構の概念>



【受動的炉停止：自然に止まる】

炉心冷却材の温度が上昇すれば制御棒が、自然に自重挿入されて原子炉を安全に停止する機構



【原子炉容器内で冷却保持される】

溶融した炉心燃料は、集合体内の燃料排出管から自然に炉心外に流出し、再臨界を回避できる構造の有効性を実証した試験：

カザフスタンNNCでのEAGLE試験

【受動的な炉心冷却：自然に冷える】

炉心燃料の崩壊熱を、空気冷却器からの放熱による自然循環力を利用して安定に冷却できる設計

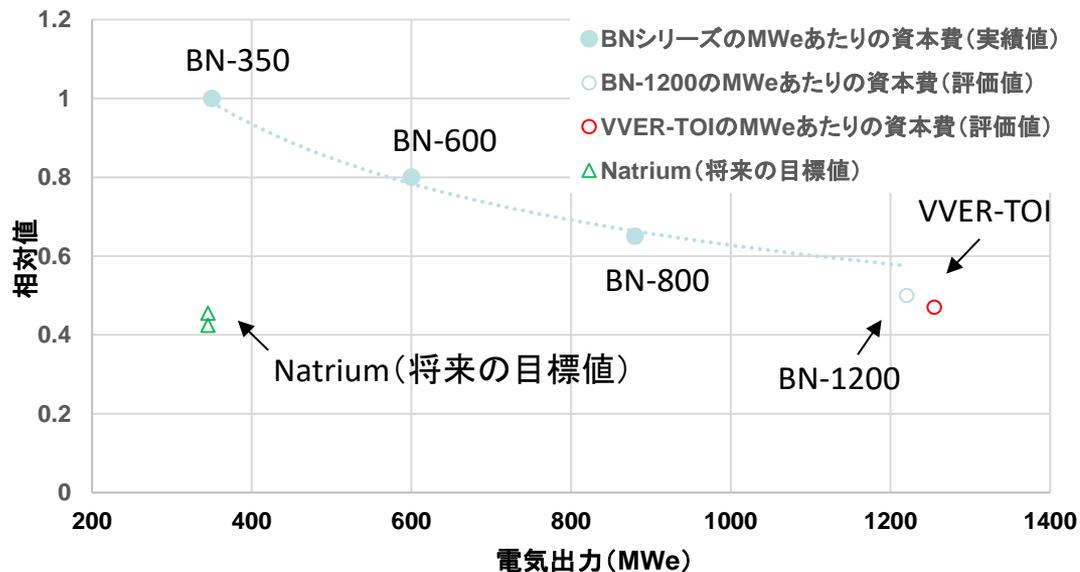


② 経済性

- 市場ニーズに応じた経済性を有すること。
- 基幹電源として利用するプラントは、他の基幹電源と競合し得る経済性を有すること。
- 小型電源や多目的用途に利用する場合には、市場ニーズに応じた経済性を有すること。
- なお、上記の経済性は1F事故を踏まえた安全性の強化、並びに事故リスク対応費及び政策経費を踏まえた上で実現すること。

【ロシア】下図のようにBN-350からBN-800の実績値はスケール則に一致。商用炉BN-1200は、原子炉容器コンパクト化、ループ数削減、蒸気発生器大型化等により、スケール効果以上の経済性向上を目指す。これにより、最新の軽水炉VVER1200-TOIと同等の**資本費**を達成できると評価。なお、VVER-TOI（ツインプラント）のオーバーナイトコストは約3100ドル/kWe。（*1）

【米国】報道では、テラパワー社Natriumプロジェクトのコストは40億ドル規模。DOEは最大20億ドルを支援予定。同社は後継炉のオーバーナイトコストを2800～3000ドル/kWeと予想。（*2,*3）



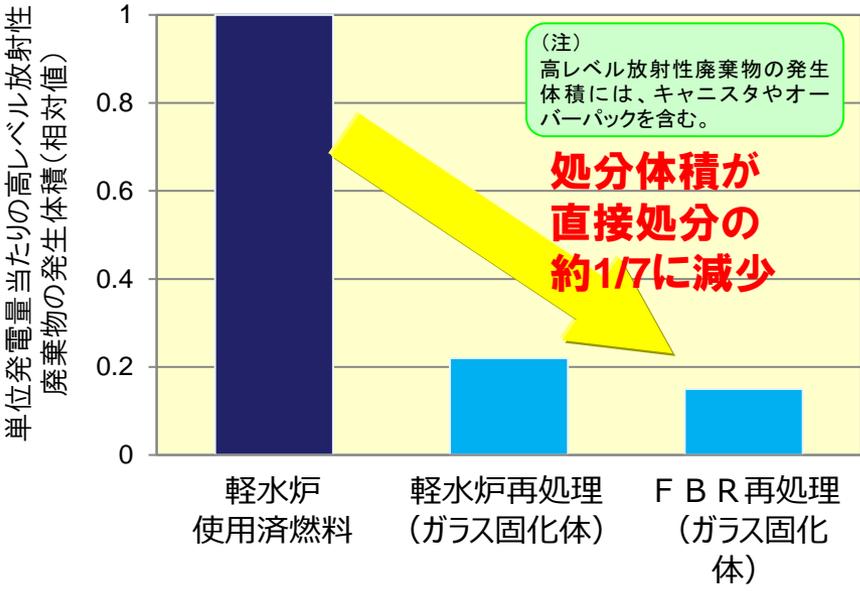
*1: Limited Scope Sustainability Assessment of Planned Nuclear Energy Systems Based on BN-1200 Fast Reactors”, IAEA-TECDOC-1959, 2021
 *2: <https://www.reuters.com/business/energy/bill-gates-4-blh-high-tech-nuclear-reactor-set-wyoming-coal-site-2021-11-17/>
 *3: <https://natriumpower.com/frequently-asked-questions/#cost-and-funding>

高速炉（BNシリーズ）とNatrium炉と軽水炉(VVER)の建設費の比較

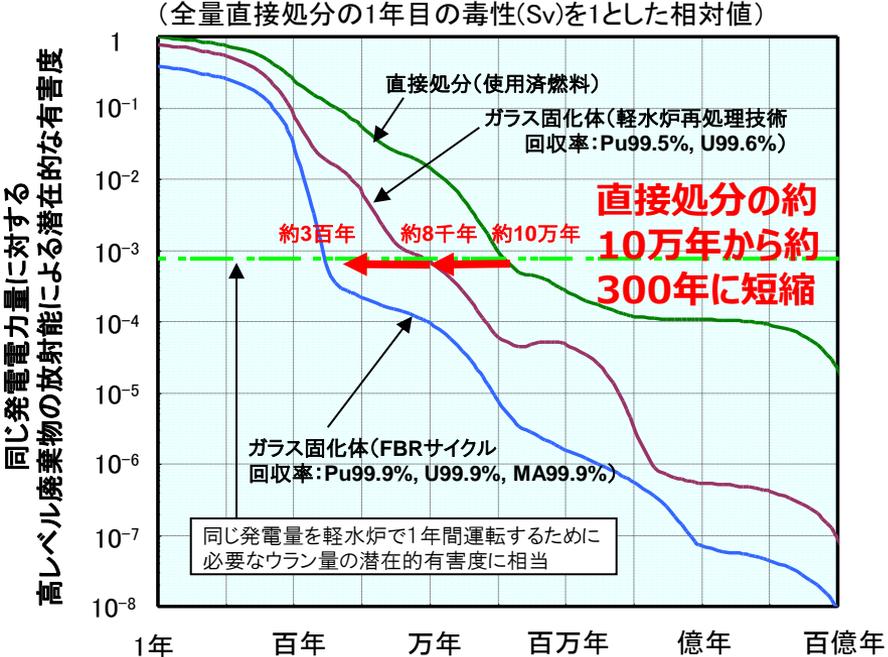


③ 環境負荷低減性

- 高レベル放射性廃棄物量減容・潜在的有害度低減のため、マイナーアクチノイド (MA) を分離・回収し、燃料として利用できるようにすること。
- 炉、燃料製造、再処理施設の建設・運転・廃止措置を通じて発生する放射性廃棄物量 (高レベル放射性廃棄物を含む) を、軽水炉及びその核燃料サイクルシステムを参照して、合理的に実現可能な限り低減すること。
- ライフサイクルでの環境影響 (土地占有、毒性、大気汚染、温室効果ガス (GHG)、酸性化、富栄養化、電離放射線、水資源利用等) が他電源と比して少ないこと。



高レベル放射性廃棄物の発生量の低減効果



高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度の低減効果

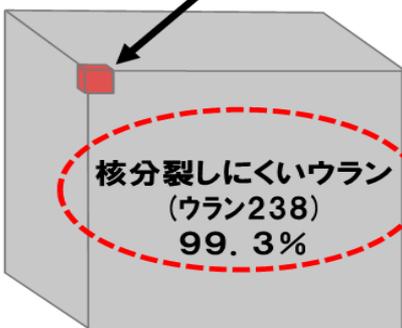


④ 資源有効利用性

- 軽水炉及び軽水炉のプルサーマル利用から高速炉へ円滑に移行できること。
- エネルギー需給や資源の不確かさへの対処を始め、社会のニーズに合った増殖比に柔軟に対応可能であること。
- 資源有効利用の観点から、核燃料サイクル内でウラン (U) 及びプルトニウム (Pu) の十分な回収による資源循環を図れること。

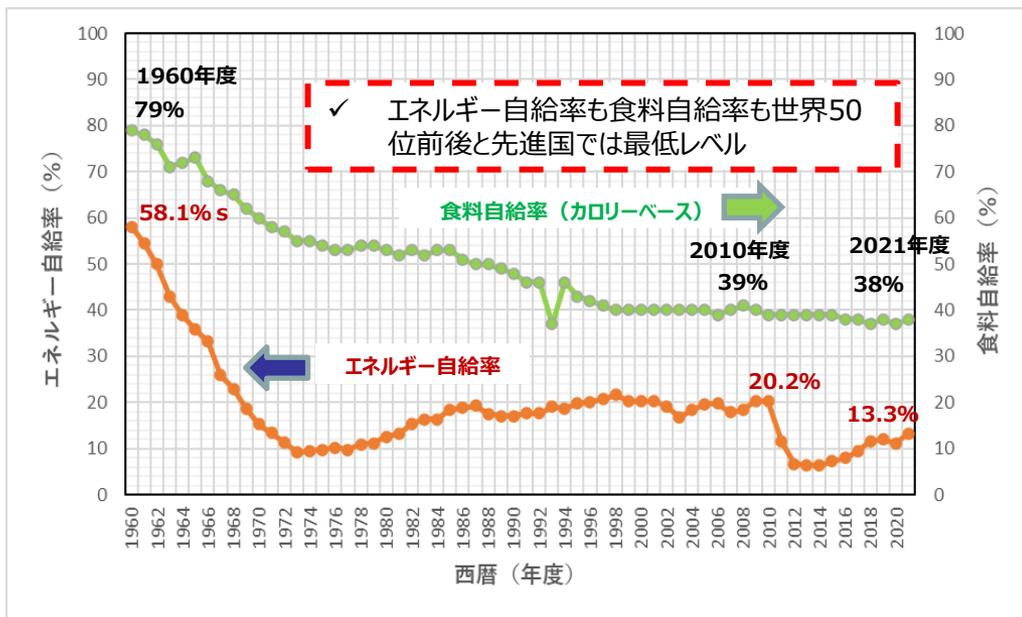
ウランとは？

核分裂するウラン (ウラン235)
わずか0.7%



ウラン
238を核
分裂する
プルトニ
ウムに変
換します。

✓ 高速炉は、ウラン238
に中性子を吸収させて
Pu239生産しつつ、プ
ルトニウム239を核分
裂させて、エネルギーを
取り出す。



⑤ 核拡散抵抗性

■ 核拡散抵抗性と核物質防護を担保できる高速炉サイクルとすること。

最近のトレンド

● 核拡散抵抗性として、燃料アクセスの困難化や燃料盗取の機会減等が考えられている。*

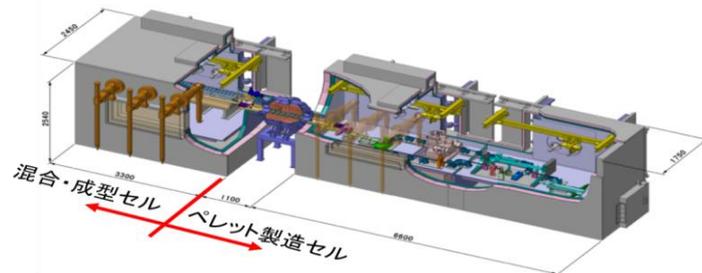
※出典：Sodium-Cooled Fast Reactor, Proliferation Resistance and Physical Protection White Paper, GIF October 2021

➢ Puを単体で分離せず、マイナーアクチニド（MA）と共抽出し、高温・高線量として燃料へのアクセスを困難にする

- ✓ MA含有MOX燃料の開発
- ✓ MA含有燃料の製造・再処理時の遠隔自動操作技術

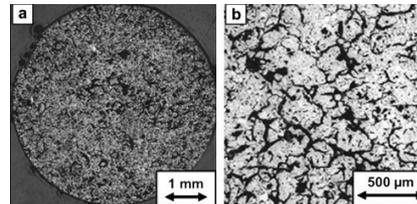
➢ 炉の運転期間を長期化し、燃料の交換頻度を下げ、燃料が盗取される機会を減らす。

- ✓ 長期運転を可能とする炉心設計
- ✓ 燃料の高燃焼度化に向けた材料開発



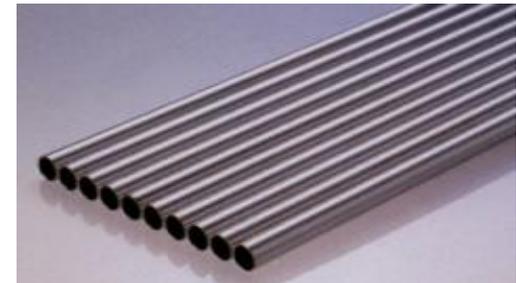
MA含有燃料を製造・再処理するための遠隔自動操作技術の概念

[出典] Y. Yamada, "A Conceptual Design of Engineering-scale Plant Applied the Simplified MA-bearing Fuel Fabrication Process", FR17, 2017



フランスにおけるMA含有MOX燃料の開発

[出典] F. Lebreton et al., J. Nucl. Mater. 438 (2013) 99

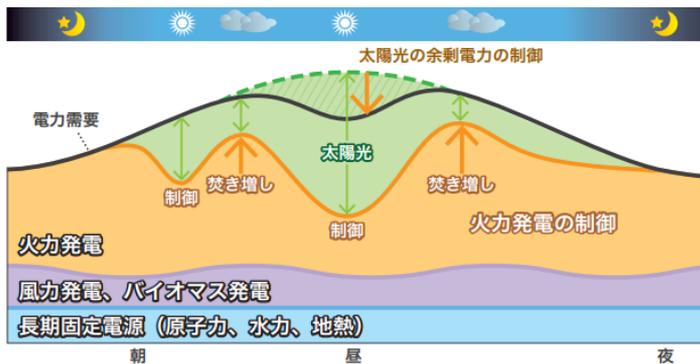


燃料の高燃焼度化に向けた材料開発の例
酸化物分散強化型（ODS）フェライト鋼被覆管の開発

⑥ 柔軟性・その他市場性

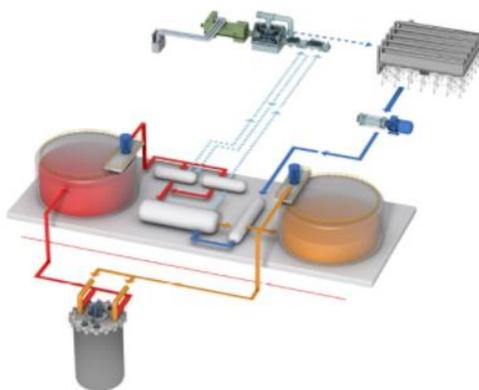
■ エネルギー供給システム全体の中で、再生可能エネルギーとの共存等を視野に、原子炉出力規模の選択肢や負荷追従能力等、必要な柔軟性に適切に対応できること。

- 各国は、様々なエネルギー利用（蓄熱、熱供給、水素製造等）を検討。
- 高温プラントである高速炉は、**負荷追従運転、蓄熱及び水素製造等、調整電源としての機能が期待**できる。
- 米国は高速炉**Natrium炉**を開発中。熱貯蔵により定格34.5万kWから最大50万kWに電気出力を増大可。（市場価格が低い時間帯に熱を貯蔵し、市場価格が高い時間帯に出力を増大させ、市場に対応する。）
- 日本では、高速炉の安全性を損なうことなく、再生エネルギーと調和する調整電源としての技術を検討中。



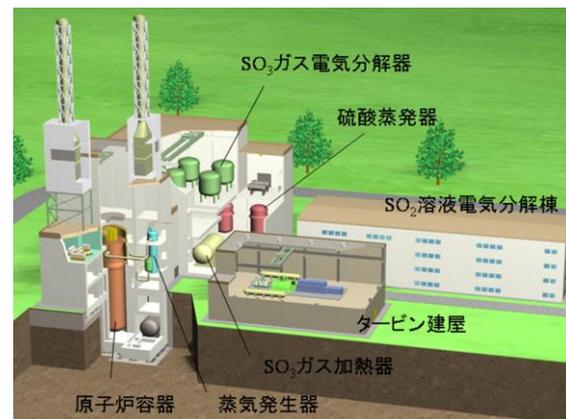
再生可能エネルギーへの対応状況

[出典]日本のエネルギー-2020 エネルギーの今を知る10の質問



蓄熱によるエネルギー貯蔵

[出典] テラパワー社ウェブサイト Natrium炉



水素製造プラントイメージ

[出典]原子力水素製造プラントのシステム設計研究—平成15年度の研究成果のまとめ— (JNC TN9400 2004-037)



高速炉の開発の経緯と今後の計画

2024年7月 **研究開発統合組織発足**

2023年7月 **脱炭素成長型経済構造移行推進戦略【GX推進戦略】** (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)
2023年2月 **GX実現に向けた基本方針**

2023年～
高速炉実証炉開発事業

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)

2020

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

2010

2006年8月原子力立国計画 (2025年頃までに実証炉運開)

2023年7月
中核企業選定

2005年10月原子力政策大綱 (2050年頃からの商用化)

2022年12月
戦略ロードマップ改訂



1994年
もんじゅ初臨界

2000

1990

2018年12月
戦略ロードマップ

2016年12月
高速炉開発の方針

1977年
「常陽」初臨界

1980

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

1970



1966年
動力炉開発の基本方針

1999～2006年
実用化戦略調査研究 (FS)

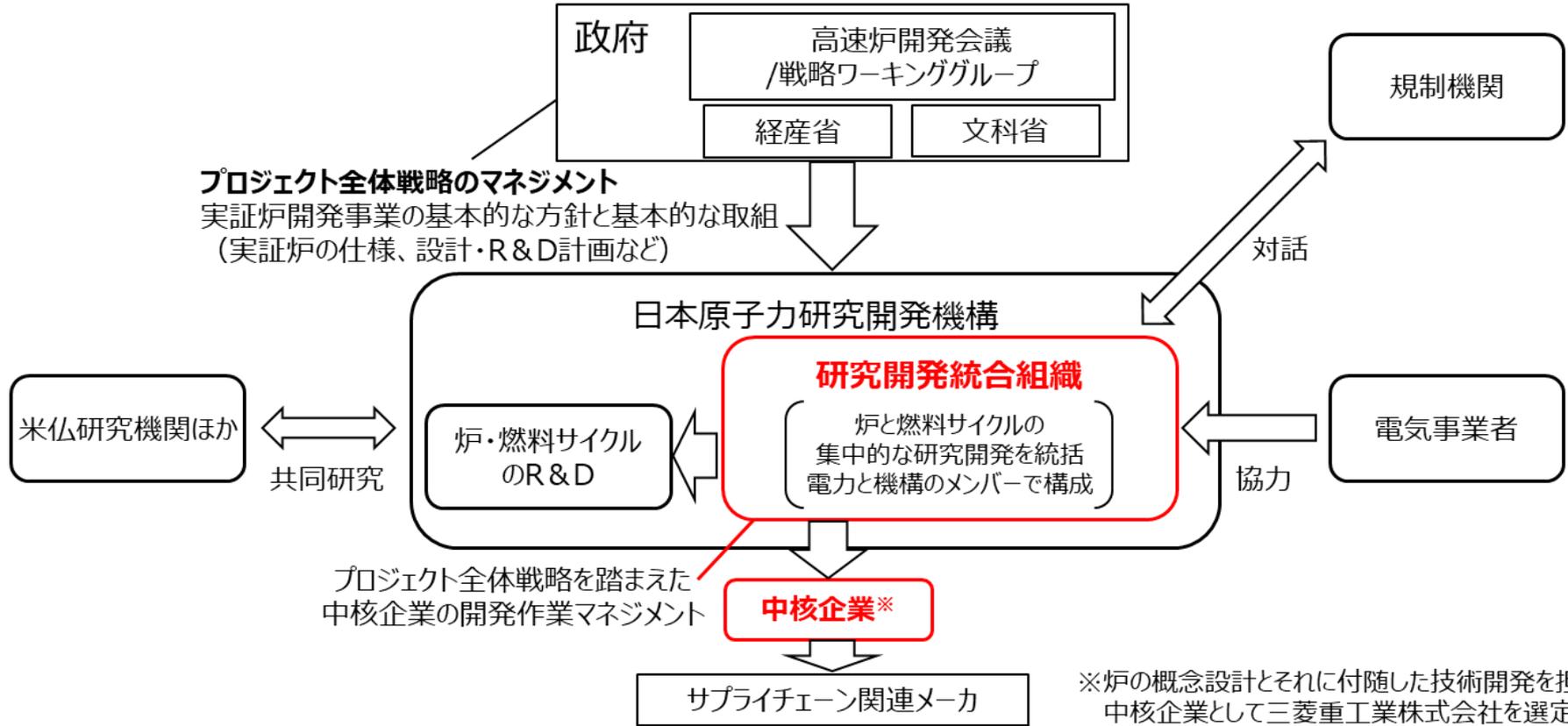
1985～1999年
電気事業者が中心となった実証炉開発

自主的な開発が必要、
実験炉、原型炉の開発を推進



高速炉の開発の経緯と今後の計画

- 戦略ロードマップ（2022年12月原子力関係閣僚会議決定）に基づき、経済産業省において公募が行われ、中核企業として三菱重工業株式会社が選定された。
- 2023年度には、資源エネルギー庁からの複数年の委託事業として、高速炉実証炉開発事業が開始している。
- プロジェクト全体戦略のマネジメント機能は引き続き政府（高速炉開発会議／戦略WG）が司令塔として担い、研究開発統合機能を担う組織を原子力機構に設置した。（高速炉サイクルプロジェクト推進室、2024年7月）

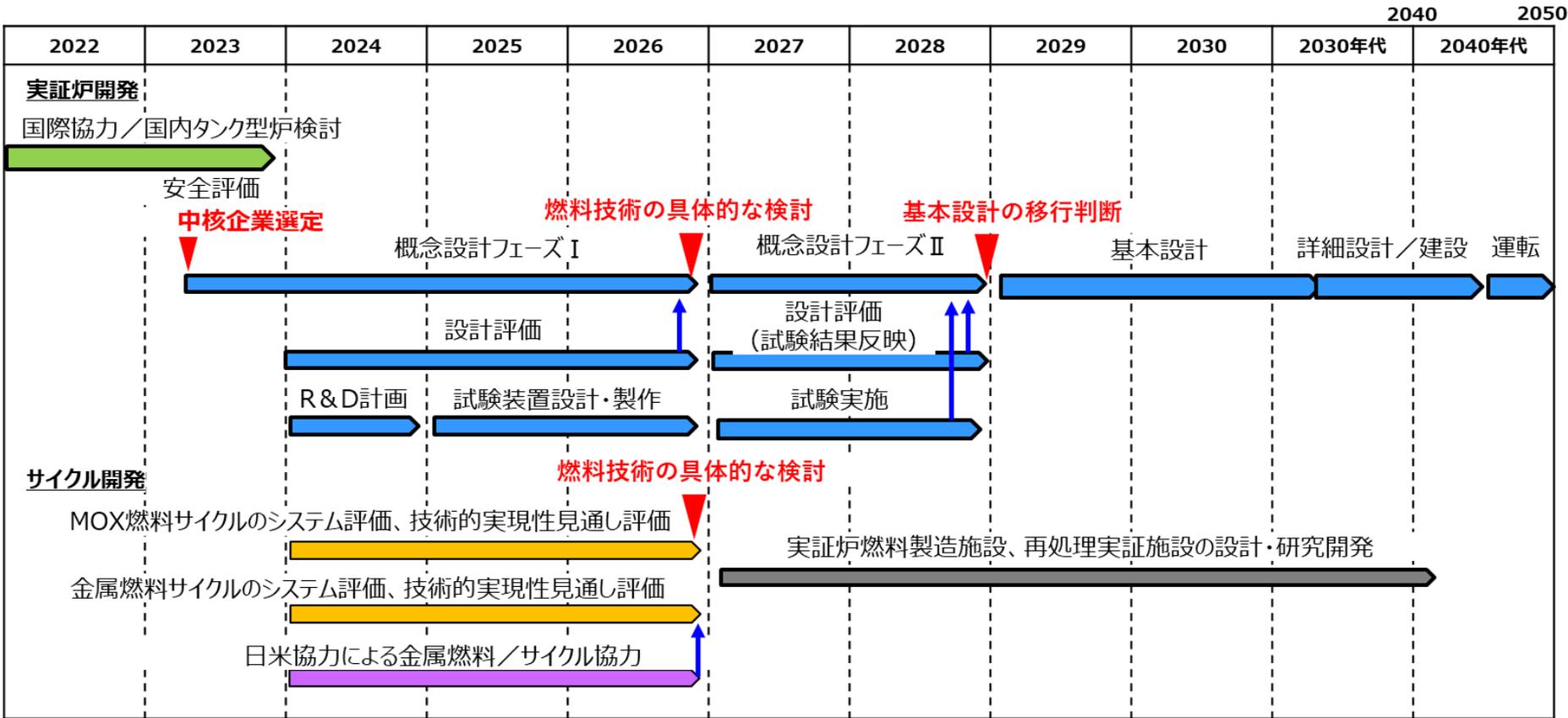


※炉の概念設計とそれに付随した技術開発を担う中核企業として三菱重工業株式会社を選定



高速炉の開発の経緯と今後の計画

- 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。





高速炉開発における安全設計方針の必要性

- 高速炉実証炉を含む次世代ナトリウム冷却高速炉（以降「次世代高速炉」と称する）は、高速中性子により核分裂を維持する炉心であること、冷却材として液体ナトリウムを採用する等のことから、軽水炉とは異なる安全上の特徴を有している
- 「常陽」「もんじゅ」の建設、運転の経験を通じて得られた知見を基に、更なる安全性の向上を図るための新技術を取り入れた設計となっている
- 今後、次世代高速炉の概念設計を進めていくに当たっては、その前提となる、安全確保の考え方と、それを実現するための安全設計方針を明確にしていくことが必要
- 高速炉を実用化するためには、規制の予見性を高めていくことが重要
- 「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」で策定された、「次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計方針」を基に、高速炉の安全規制の整備に向けた検討が深まることが期待される