

高速実験炉「常陽」の運転に向けた課題と 高速炉の燃料技術開発について （作業部会における議論の状況）

高速実験炉「常陽」に係るこれまでの審議経過

原子力科学技術委員会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会

①2024年3月7日(木) 第19回

- ・高速実験炉「常陽」の運転再開に向けた取組と運転再開後の利用方策(JAEA)
- ・高速炉の実証炉開発について(資源エネルギー庁)
- ・高速実験炉「常陽」の研究開発に関する当面の課題(文部科学省)

②2024年5月10日(金) 第21回

- ・我が国の原子力政策と高速実験炉「常陽」への期待
(公益財団法人原子力安全研究協会 山口理事)
- ・高速炉の燃料技術開発について (JAEA)

※以降の資料については上記の会合の発表資料を基に作成

高速実験炉「常陽」の概要

概要

- 高速実験炉「常陽」は**我が国初の高速炉**であり、昭和52年に初臨界。積算運転時間は約71,000時間。高速炉の炉心性能やナトリウム冷却系の特性把握、高速炉プラントの技術的経験の蓄積等の成果を創出。
- 平成19年の定期検査中に照射試験装置のトラブルにより燃料交換機能に不具合が発生したことに伴い、運転を中断。設備復旧後、運転再開に向けて、新規制基準への適合性確認のための原子炉設置変更許可取得に向けた安全審査への対応を進め、**令和5年7月に許可を取得**。現在、**新規制基準に適合するための工事対応**を推進。
- 茨城県原子力安全対策委員会(令和5年10月,12月)において新規制基準を踏まえた安全対策について説明し、概ね妥当との判断。
- 運転再開後、OECD諸国で唯一稼働中の高速中性子照射場を提供できる高速炉。実証炉の開発のための照射試験や医療用ラジオアイソトープ（アクチニウム225）の製造実証などへの活用・貢献が期待。

経緯と実績

- 昭和45年：設置許可
- 昭和52年：初臨界(Mark I炉心)
- 昭和57年：Mark II炉心 初臨界
- 平成15年：Mark III炉心 初臨界
- 平成19年：燃料交換機能の一部阻害確認
- 平成26年：燃料交換機能の復旧作業終了
- 平成29年：福島第一原子力発電所事故を踏まえた新規制基準への適合性確認の設置変更許可を申請
- 令和5年：**設置変更許可を取得**



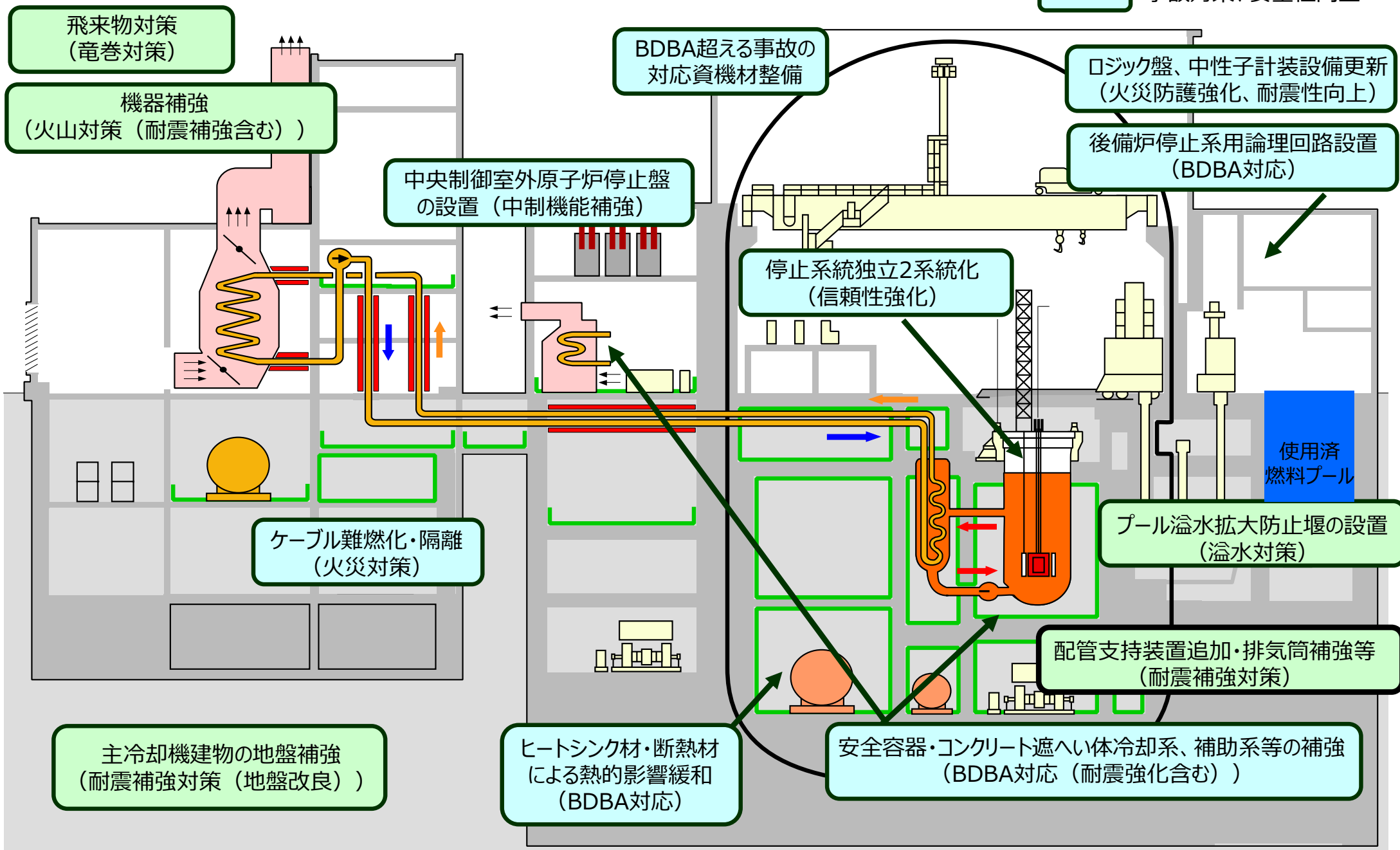
高速実験炉「常陽」

主要仕様

- 熱出力：100MW（10万kW）
（空気冷却）
- 冷却材：液体金属ナトリウム
（2ループ）
- 燃料：ウラン・プルトニウム混合
酸化物燃料（MOX燃料）
- 炉心 直径：約78cm
高さ：約50cm
- 燃料集合体数：最大79体
- 制御棒 主炉停止系：4本
後備炉停止系：2本
- 機能：多様な照射試験技術を保有

新規制基準対応に係る工事の概要

- 地震等の自然災害対策
- 事故対策、安全性向上



運転再開後の利用方策

◆ 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）

- ✓ 実証炉を含む次世代高速炉に向けた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
 - 半減期が長く、発熱が高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 高レベル放射性廃棄物に含まれるアメリシウム(Am)、ネプツニウム(Np)等のマイナーアクチノイド (MA)は、長期に放射線や熱を出し続けるため、廃棄物対策の課題となる。燃料サイクル内での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医療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薬剤の研究開発への貢献

*3 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（2022年5月）

◆ 国際協力、大学等との共同研究、若手研究者・技術者の育成

高速炉開発に係る国内の動向と「常陽」への期待

「戦略ロードマップ」(2018年12月決定、2022年12月改訂)

「高速炉開発の方針」(2016年12月)に基づき、研究開発政策の在り方やプレーヤーの役割を定めた「戦略ロードマップ」を策定し、開発を推進中。

- ① 2023年度夏 概念設計の対象とする実証炉の炉概念を選定
- ② 2024～2028年度 **実証炉の概念設計、研究開発の実施**
- ③ 2028年度頃 実証炉の基本設計・許認可フェーズ移行の判断

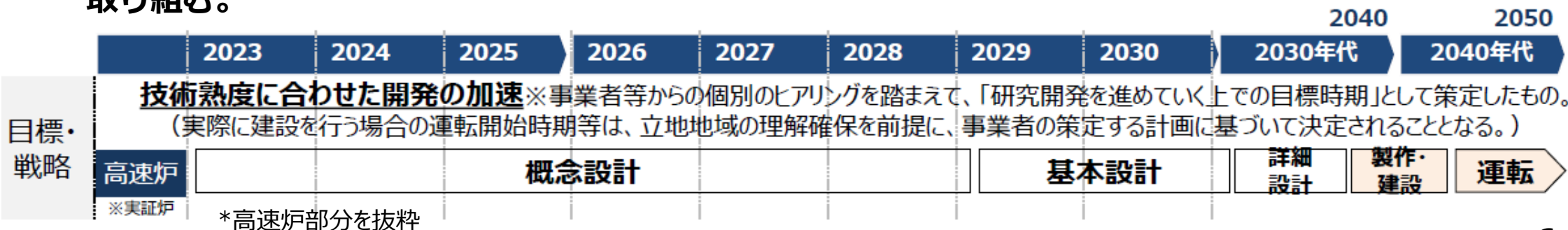
2023年7月
炉概念：ナトリウム冷却タンク型高速炉
中核企業：三菱重工(株)

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2021年6月決定)

- 2024年度以降の技術の絞り込み・重点化には、JAEAが保有する実験炉「常陽」での照射試験による検証が不可欠であり、運転再開に向けた準備を速やかに進めていく。
- 「常陽」においては、世界的にも希少な**医療用ラジオアイソトープ**を、大量製造することが可能である。「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**が期待される。

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～(2023年2月決定)

- 「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。



高速炉実証炉開発事業における常陽への期待

常陽の早期運転再開による高速炉燃料、炉心材料の研究開発の推進
(常陽及び隣接する照射後試験施設等の活用)

● 経済性向上を目的とした高速炉燃料及び炉心材料の研究開発

- 常陽での太径中空燃料及び長寿命炉心材料（ODS鋼）の照射試験及び照射後試験など、高速炉燃料の高度化に向けた研究開発を進める必要がある。

● マイナーアクチノイド（MA）含有燃料の特性や挙動に関する研究開発

- 使用済み燃料からのMA回収技術、MA含有燃料製造技術の確立及び常陽での照射試験など、MA含有燃料の研究開発を進める必要がある。



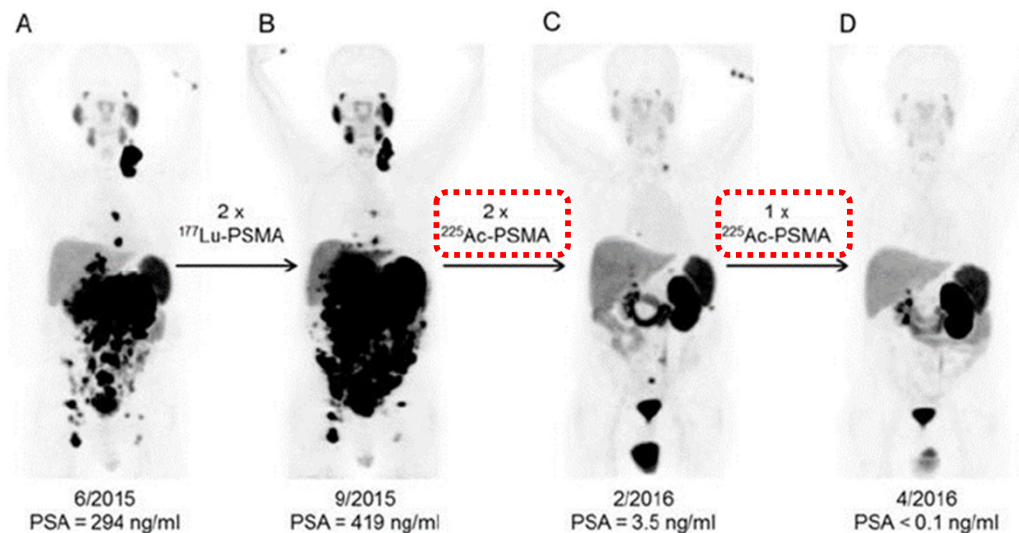
照射後試験施設

- 照射燃料集合体試験施設 (FMF)
燃料集合体の非破壊試験、燃料ピンの非破壊試験及び破壊試験施設
- 照射燃料試験施設 (AGF)
燃料における金相試験、融点測定、燃焼率測定、FP放出試験施設
- 照射材料試験施設 (MMF)
燃料被覆管、ラッパ管、構造材料及び制御材料等の照射後試験施設

医療用ラジオアイソトープ（アクチニウム（Ac-225））への期待と「常陽」を活用したAc-225の生産について

Ac-225を取り巻く動向

- 病巣の内部からα線を当てて、がん細胞を死滅させる「α線内用療法」に使用
- 多くの症例に対し短半減期α核種による治療効果確認
- 特にAc-225の治療効果は高く(壊変途中で4回α線を放出)、α線の飛程は短く遮へいも不要なため病室の入退室制限緩和 ⇒ 世界で治験・臨床研究の競争が激化する一方で Ac-225は供給不足(供給量：3,000人/年分)
- 日本は、研究に必要なAc-225の確保が十分でなく、医療への実用化に向けた治験の円滑な実施が困難

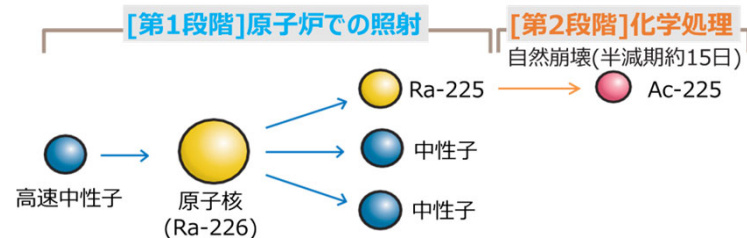


末期の転移性前立腺がんに対し、Ac-225を使用した結果全奏効CR*1

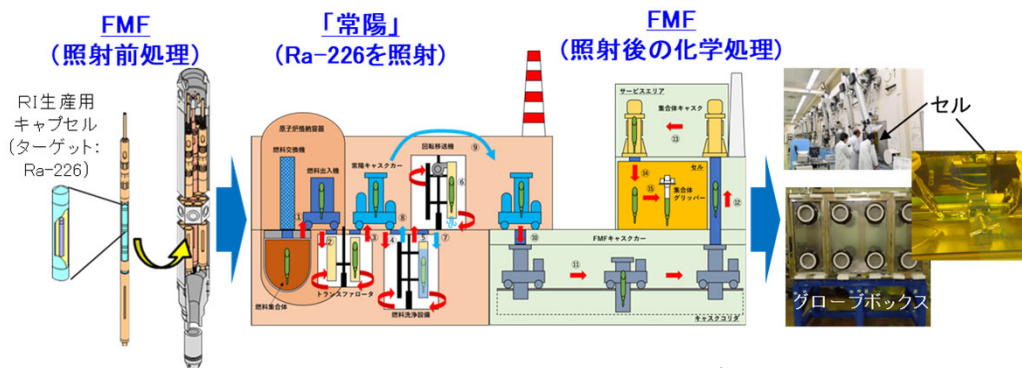
Ac-225生産に「常陽」を用いる理由

- 高速中性子(エネルギーの高い中性子)により引き起こす (n,2n) 反応を使用(閾値6.4MeV)
- 「常陽」は軽水炉の約10倍の高速中性子束を有する
- 照射後に、隣接する照射燃料集合体試験施設(FMF)にて迅速な化学処理が可能

医療用ラジオアイソトープ生産に係る原子炉設置変更許可申請（令和6年2月）を実施し、令和8年度中の製造実証（原子力委員会アクションプラン）を目指す。



「常陽」におけるAc-225の製造法



「常陽」におけるAc-225製造プロセス

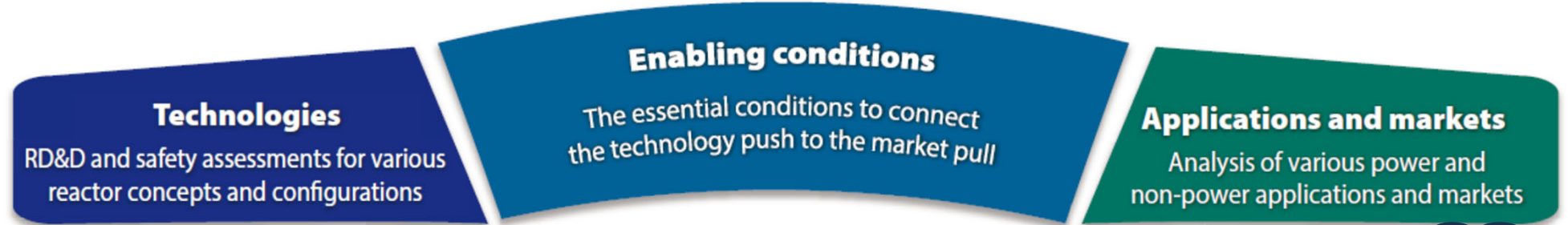
*1 Kratochwil, et al. ²²⁵Ac-PSMA-617 for PSMA-Targeted α-Radiation Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer, JNM, July 7, 2016, 57 (12), 194-1944

技術プッシュと市場プル

原子力技術

実現のための要件 (事業環境の整備)

実用化市場



原子炉の概念

高速スペクトル炉
マイクロ炉
熔融塩炉
ガス冷却炉
水冷却炉

push

原子炉設置方式

陸上
海上
可搬型
モジュール

- 政策、規制、法制、セキュリティ
- 核燃料サイクル: フロント/バックエンド
- サプライチェーン、技術基盤
- 人材供給のシステム
- パブリックエンゲージメント
- 経済性と資金確保

pull

RI製造

石炭火力代替
非電力網

産業熱利用
地域熱供給

淡水化
水素と合成燃料
商船利用

廃棄物
減容

資源有
効利用

常陽に期待すること

- 次世代革新炉の開発・建設とバックエンドプロセスは、最重要課題
- 我が国は閉じた核燃料サイクルの確立を基本方針
 - エネルギー・ソブリンティ(Energy Sovereignty)
 - 資源の有効利用(Energy Sustainability)
- そのためには高速スペクトル中性子の活用が不可欠
 - 高速中性子研究炉(つまり常陽)は日本のアドバンテージ
- 高速スペクトル中性子はさらなる付加価値を生み出す
 - 高次化プルトニウム、マイナーアクチノイドの問題を解消
- 高速中性子を活用する原子力技術開発で、常陽が実現できること
 - Enabling Conditionsを達成する
 - 高速炉の価値を生み出し(イノベーション)、社会に発信する(デモンストレーション)

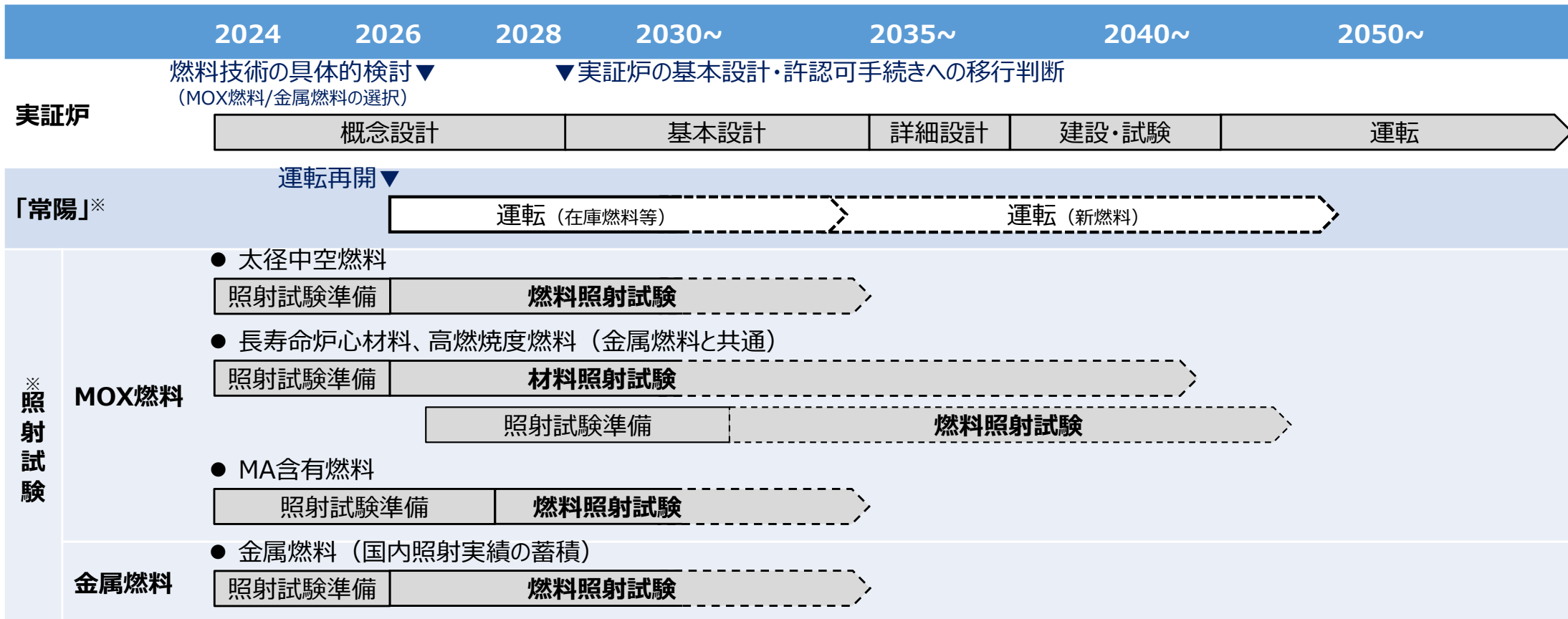
常陽の
最大限活用

高速炉の
燃料加工

高速炉の
燃料再処理

「常陽」の当面の運転は在庫燃料等で可能だが、高速炉の実用化に向けた技術実証のためには中長期的な燃料技術開発が重要であり、そのためには新燃料供給が必要な見通し

- 新燃料の調達先候補
 - 既存施設の活用、新規施設、海外調達等あらゆる可能性について検討中
- 新燃料調達に向けた課題
 - 既存施設の活用、新規施設：新規制基準への対応等
 - 海外調達：「常陽」炉心への適用性等の技術的な課題に加えて、スケジュールの整合性、国際情勢等を考慮する必要あり



※点線部は現時点で明確な時期の見通しが得られていない内容。また、照射試験には照射後試験は含んでいない

これまでの審議における常陽の運転再開・燃料供給に関する主なご意見

1. 常陽の運転再開

- ・ 照射するだけでなく、照射後の試験もセットで行う必要があることから、試験施設の整備も常陽の安全対策工事と両輪で取り組んでいく必要がある。
- ・ 新規規制基準対応において得られた知見や経験を、実証炉やそれに続く商用炉の安全性向上や審査対応に有効に活かすべき。

2. 運転再開後の計画

- ・ 現在の国際情勢の中で、OECD諸国において唯一、我が国が稼働可能な高速炉の実験炉を持っていることに極めて大きな意義があり、もっとアピールすべき。
- ・ 研究者などを引き付ける最先端の原子力研究が可能な施設であり、RIなどの新しい価値を生み出すことができることに加え、国際協力や国内の研究人材育成にも役立てていくべき。
- ・ 実証炉開発に向けて必要不可欠なデータを取得していく形の利活用が重要。このデータは実証炉開発にはもちろん、学術的にもレベルの高い価値のあるデータ。

3. 常陽への新燃料の供給

- ・ 常陽の燃料確保について、新規施設や、既存施設の活用、海外調達など様々な選択肢がある中で今後の検討を続けていくにあたり、コストの他に時間的な整合性も考慮すべき。
- ・ 燃料確保に向けた検討を行うことは、常陽の運転という側面だけでなく、サプライチェーンの観点でも効果が出てくると考えられる。

常陽の運転再開・利活用の促進－ 1

<背景・経緯>

- 高速実験炉「常陽」は、我が国における高速増殖炉開発の効率的推進を図ることを目的とした、我が国初の高速炉として建設され、昭和52年に初臨界。
- 運転開始以降、利用目的に応じて炉心の構成を変更しながら運転。これまでに高速炉の増殖性能の確認や核燃料サイクルの輪の実証といった高速炉技術の確立から「もんじゅ」や実証炉開発のための照射試験等の実績。
- 平成19年、定期検査中に燃料交換設備の不具合の発生により、運転を中断。設備の復旧後、新規規制基準に基づく運転許可の取得のため、原子力規制委員会において安全審査。昨年7月に審査が終了し、運転再開に向けた許可を取得。
- 現在は、令和8年度半ばの運転再開に向けた安全対策工事の準備等を進めているところ。
- 国際的にはロシア、中国、インドにおいて高速炉の運転が行われており、「常陽」が運転を再開すれば、OECD諸国において唯一稼働する高速炉となることから、国際的にも運転再開に対し、注目や期待が持たれており、我が国において稼働可能な高速炉が存在することの意義は大きい。
- 常陽運転再開後は、高速炉開発の「戦略ロードマップ」に基づく実証炉開発への貢献や「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」に基づく医療用RI製造実証をはじめ様々な先端研究開発への利活用が可能であり、安定した運転の確保が期待されている。

常陽の運転再開・利活用の促進－ 2

<当面の課題>

1. 常陽の運転再開

- 運転に必要な体制を確保するとともに、照射後試験施設などの関連施設を含めた高経年化対策・整備に取り組む必要。
- OECD諸国で唯一稼働可能な高速中性子照射炉として、その意義を積極的に発信するとともに、国内外の先端研究開発をはじめとした多様な利用を模索する必要。
- 運転再開の過程で得られる規制への対応などの知見・経験を、実証炉開発等における安全性向上や審査対応に有効に活かす必要。

2. 運転再開後の計画

- 高速炉の実証炉開発に向け、経済性に資する燃料の高性能化・高燃焼度化や長寿命炉心材料の開発等のための照射試験、及び環境負荷低減性に資するMA含有燃料の健全性実証試験等の実施
- 「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」等に基づく、Ac-225の製造実証、医療機関等とのラジオアイソトープを用いた薬剤の研究開発の推進に係る協力体制の構築
- OECD諸国で唯一稼働可能な高速実験炉という特長を活かした国内外の大学等との先端研究、若手研究者・技術者の育成
- 「常陽」の運転再開及び運転を通じて得られる知見・経験の利活用 等

3. 常陽への新燃料の供給

- 高速炉の実証炉開発に向け、「常陽」の活用等照射試験の継続的な実施が必要であり、常陽の安定的な運転のためには新たな燃料の確保が必要不可欠。
- 新燃料の確保方策（新規施設、既存施設の活用、海外調達等）について早急に検討を進め、見通しを得る必要。

參考資料

原子力政策における高速炉の位置づけ

エネルギー基本計画（令和3年10月22日 閣議決定） ※高速炉関係部分抜粋

5. (6) ③(b)(ア)再処理やプルサーマル等の推進

あわせて、使用済MOX燃料の処理・処分の方策については、使用済MOX燃料の発生状況とその保管状況、再処理技術の動向、関係自治体の意向などを踏まえながら、引き続き2030年代後半の技術確立を目的に研究開発に取り組みつつ、検討を進める。また、**「高速炉開発の方針」（2016年12月原子力関係閣僚会議決定）及び「戦略ロードマップ」（2018年12月原子力関係閣僚会議決定）の下、米国や仏国等と国際協力を進めつつ、高速炉等の研究開発に取り組む。**

もんじゅについては、「もんじゅの廃止措置に関する基本方針」（2017年6月「もんじゅ」廃止措置推進チーム決定）に基づき、安全の確保を最優先に、着実かつ計画的な廃止措置に責任を持って取り組む。その際、立地地域の住民や国民の理解を得るための取組を引き続き進めることとし、廃止措置と並行して、国は地元の協力を得ながら、福井県敦賀エリアを原子力・エネルギーの中核的研究開発拠点として整備していく。もんじゅにおいてこれまで培われてきた人材や様々な知見・技術に加え、廃止措置中に得られる知見・技術については、将来の高速炉研究開発において最大限有効に活用する。

高速炉開発会議 戦略ロードマップ^o（令和4年12月23日 原子力関係閣僚会議決定）

1. (4) ②高速炉開発の意義

※「高速炉開発の意義」一部抜粋

高速炉を活用することで、原子力の最重要課題の一つである放射性廃棄物の問題に対処し、原子力全体を循環型エネルギーとすることが可能である。使用済燃料に含まれる高放射性の**プルトニウムやマイナーアクチノイドを分離・回収し、高速炉で燃焼させることにより、高レベル放射性廃棄物の減容と潜在的有害度低減を実現できる。**ナトリウム冷却高速炉の場合、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度が自然界並みに低減する期間が10万年から300年に、廃棄物体積も直接処分の約1/7となる可能性が指摘されている。**中長期的には資源の有効利用も可能であり、昨今のウクライナ情勢で燃料の安定供給に係る地政学リスクが顕在化しているところ、エネルギー安全保障の確保にも貢献する。**現時点では我が国においては当面のウラン資源を確保できているものの、今後の、資源の需給バランスの不確定性は大きく、オプションを確保することが重要であり、高速炉を活用すれば国内にある劣化ウラン等を再利用することによってエネルギーの自立に大いに貢献でき、天然ウランの輸入を限定的若しくは不要にできる可能性がある。

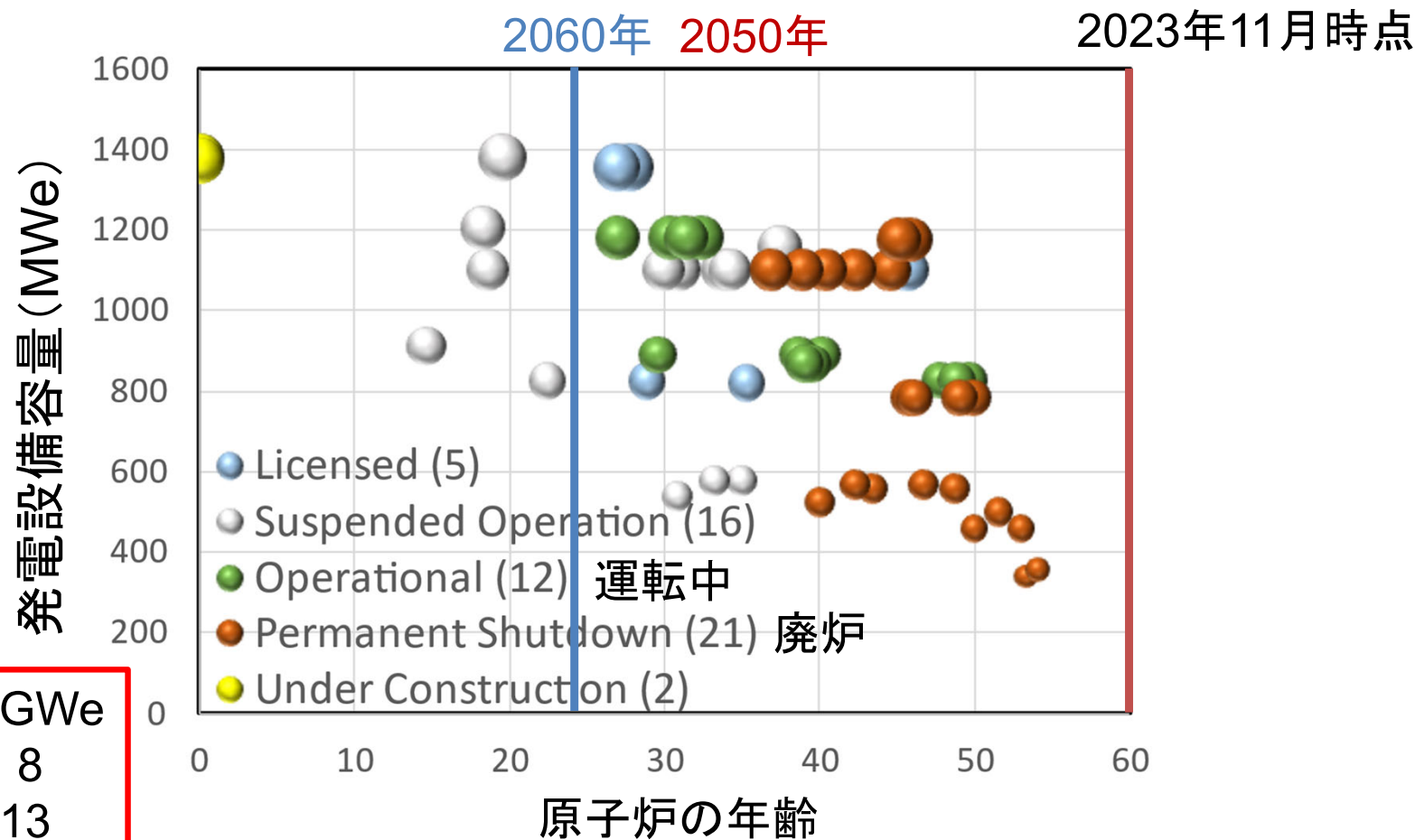
脱炭素成長型経済構造移行推進戦略（GX推進戦略）（令和5年7月28日 閣議決定）

2.(2)3) 原子力の活用

※原子力関係部分抜粋

エネルギー基本計画を踏まえて原子力を活用していくため、原子力の安全性向上を目指し、**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。**そして、**地域の理解確保を大前提に、廃炉を決定した原発の敷地内での次世代革新炉への建て替え**を対象として、六ヶ所再処理工場の竣工等のバックエンド問題の進展も踏まえつつ具体化を進めていく。

既設原子力発電所の状況（再稼働と既設炉活用）



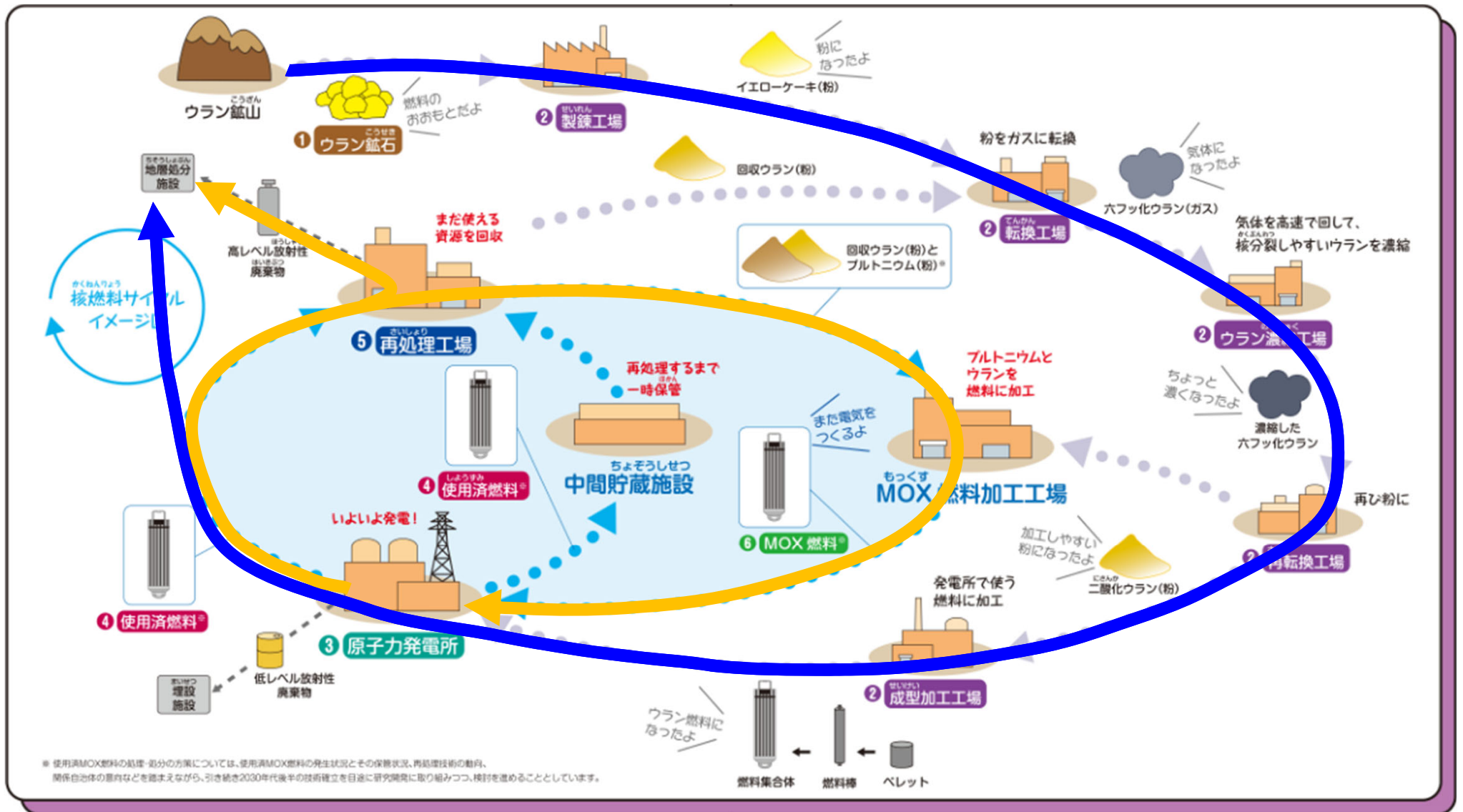
廃炉 21 16GWe
 廃炉(P) 8
 廃炉(B) 13

原子力発電所基数 (P16、B17)	33	33.1 GWe
運転可能 (P12)	12	11.6 Gwe
許認可済 (B5)	5	5.5 GWe
未申請／審査中 (P4、B12)	16	16.0 GWe

2050年代に原子力はどうなるのか？

- | 60年運転の場合（設備容量） | | | （廃止措置段階） |
|----------------|-----|---------|----------|
| ■ 2024年 | 33機 | 33.1GWe | 21機 |
| ■ 2040年 | 31機 | 33.7GWe | 23機 |
| ■ 2050年 | 20機 | 19.6GWe | 34機 |
| ■ 2060年 | 5機 | 5.4GWe | 49機 |
- 60年運転では2040年代前半に原子力比率は20%を下回る
 - さらなる運転期間延長が必要
 - さらなる運転期間延長をしても2050年には原子力比率は20%を下回る
 - 軽水炉の新設が必要
 - COP28で25カ国が2050年原子力3倍増宣言に合意
 - ウラン需給環境が厳しくなる
 - 足元のU価格は上昇（20～40ドルが90～100ドル）
 - 2050年代には30機以上の廃止措置に取り組まなければならない

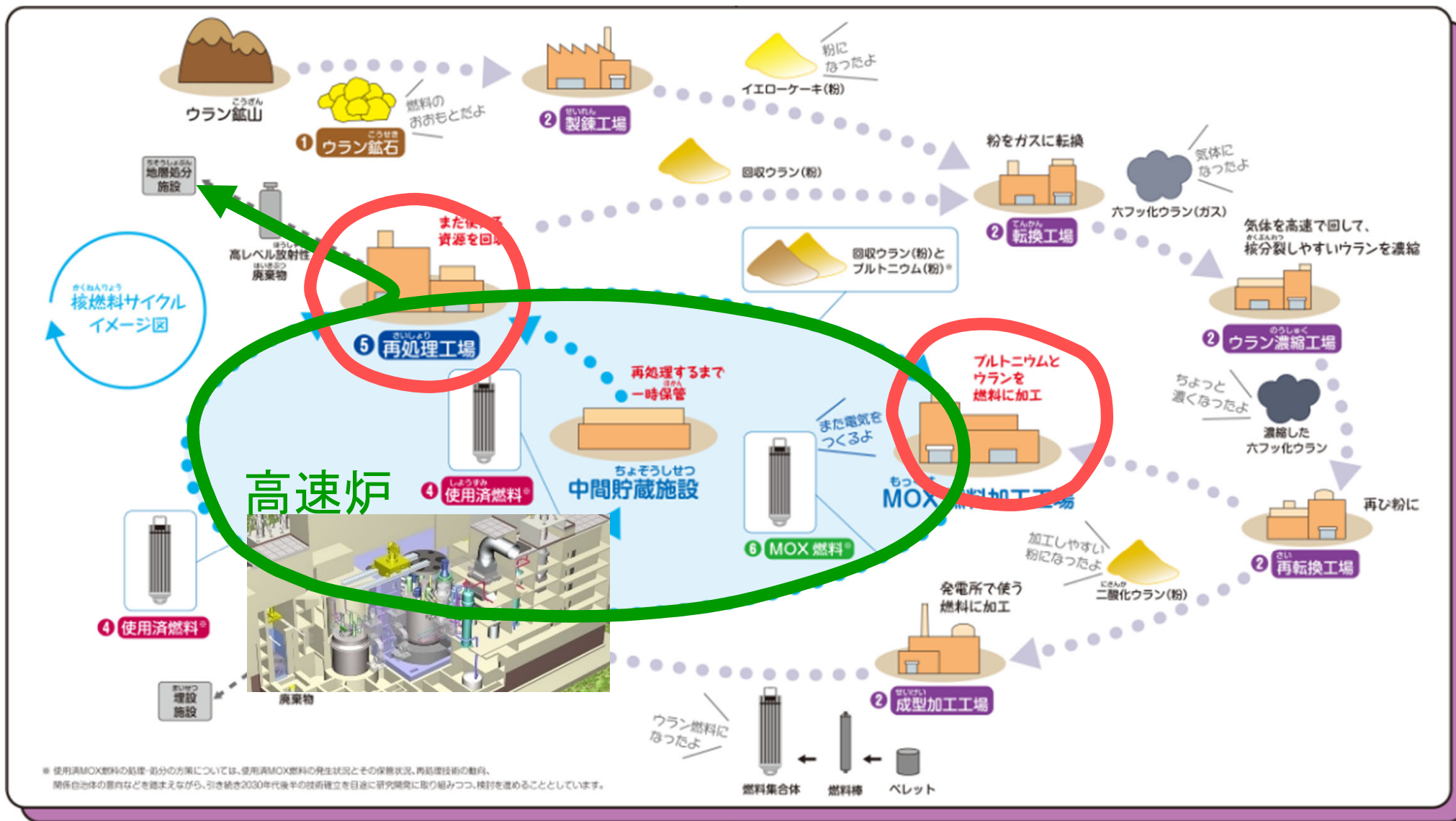
核燃料サイクル(オープンサイクルとPuサーマル)



資源エネルギー庁、核燃料サイクルのことをもっとしろう、に筆者が加筆

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pamph/manga_denki/html/009/

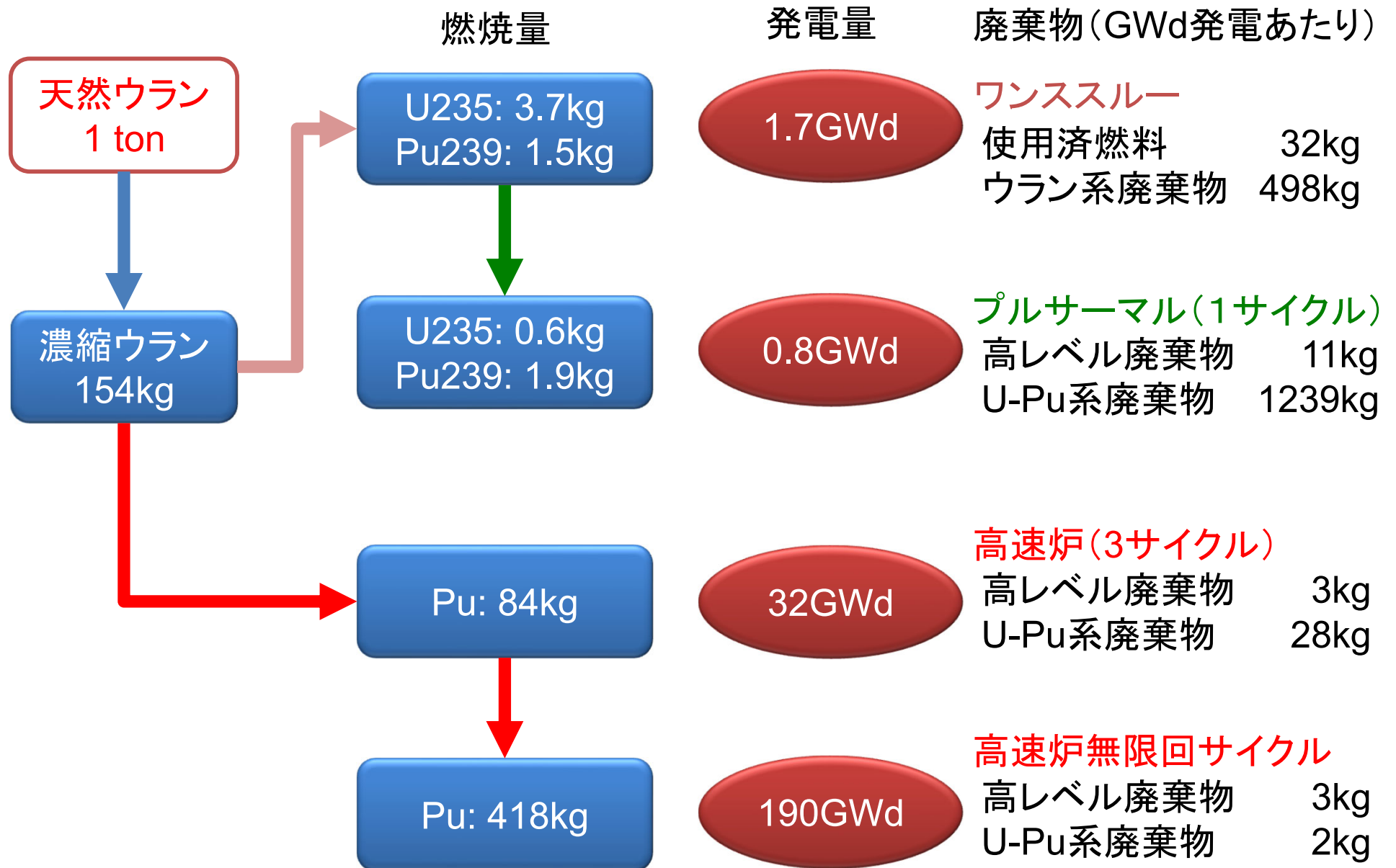
核燃料サイクル(次世代革新炉とバックエンド)



資源エネルギー庁、核燃料サイクルのことをもっとしろう、に筆者が加筆

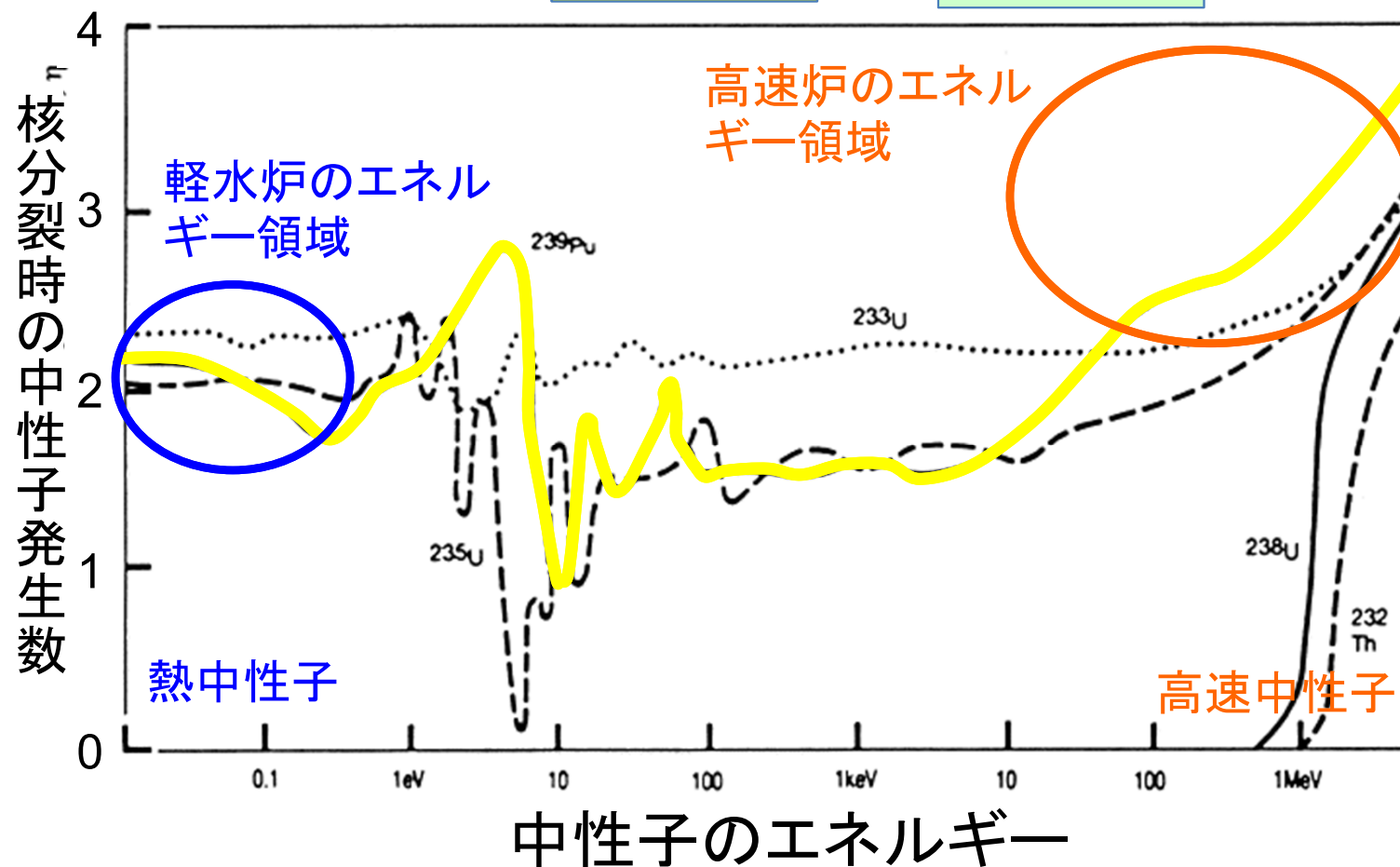
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pamph/manga_denki/html/009/

原子燃料の有効利用と廃棄物減容

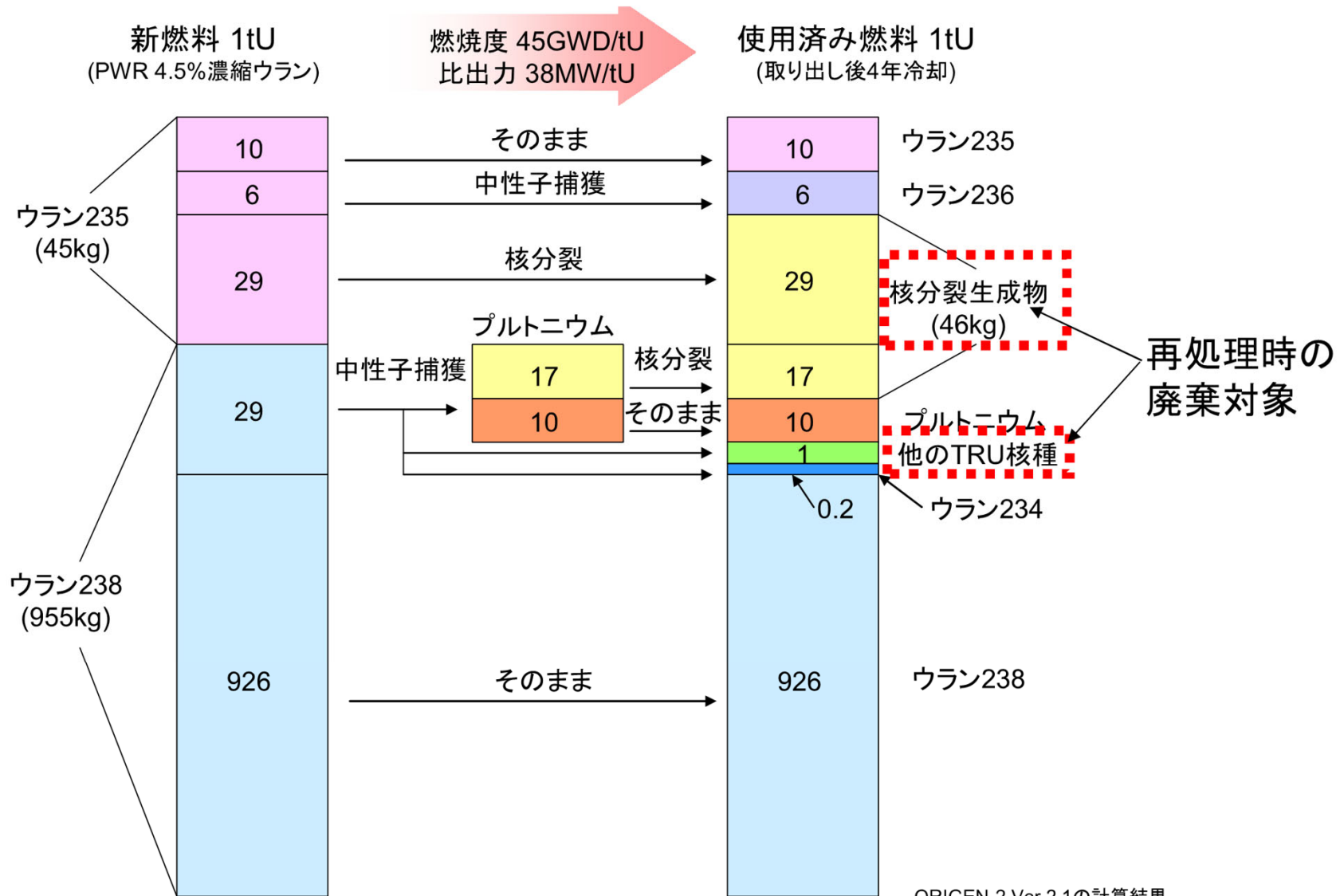


なぜ高速炉は魅力的なのか(中性子)

	プルトニウム	ウラン
軽水炉(熱中性子)	2.04	2.06
高速炉(高速中性子)	2.45	2.10



軽水炉使用済燃料の組成



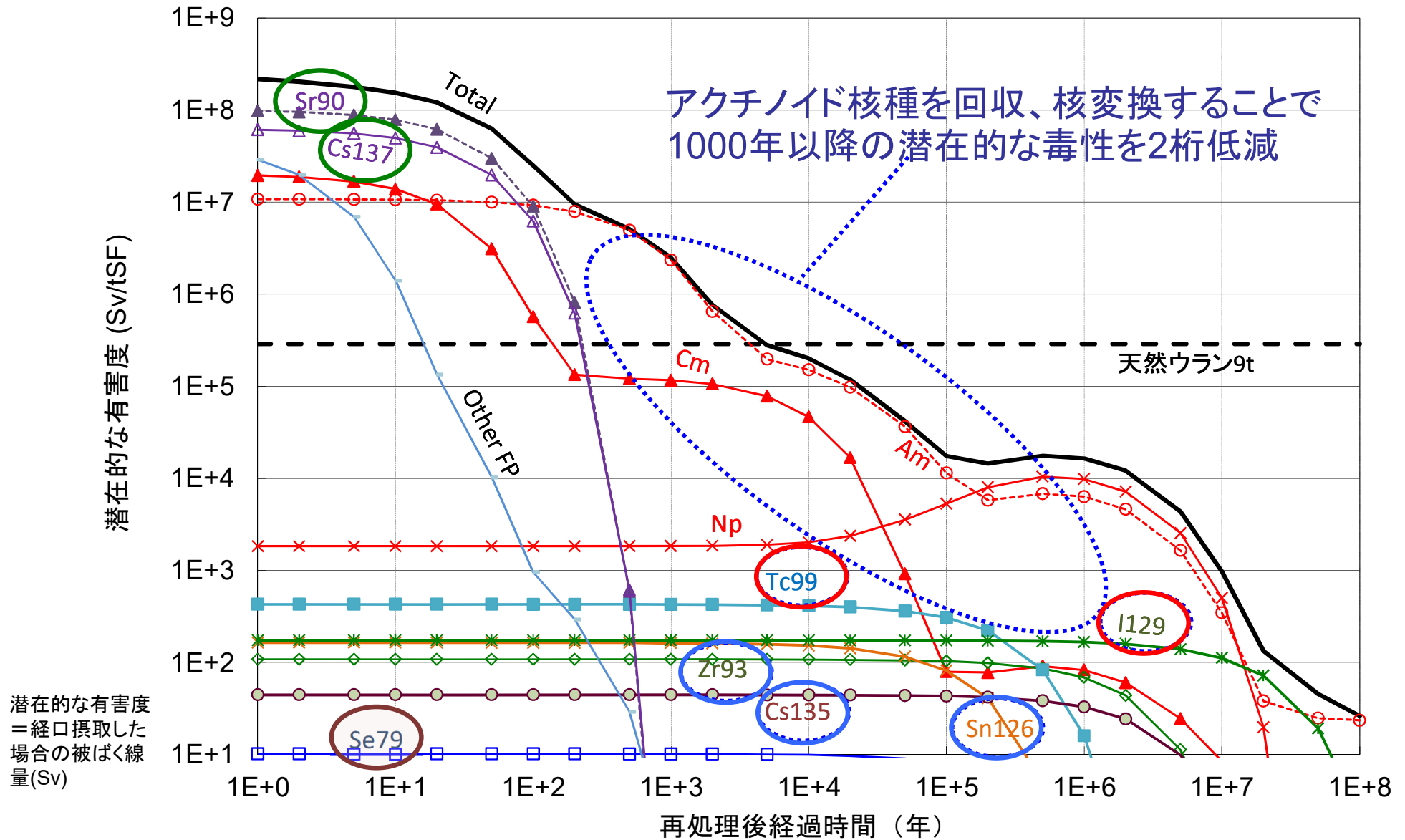
ORIGEN-2 Ver.2.1の計算結果。
棒グラフ中の数字の単位はkg。
(四捨五入の関係で合計があわない場合がある)

使用済燃料中の長寿命核種

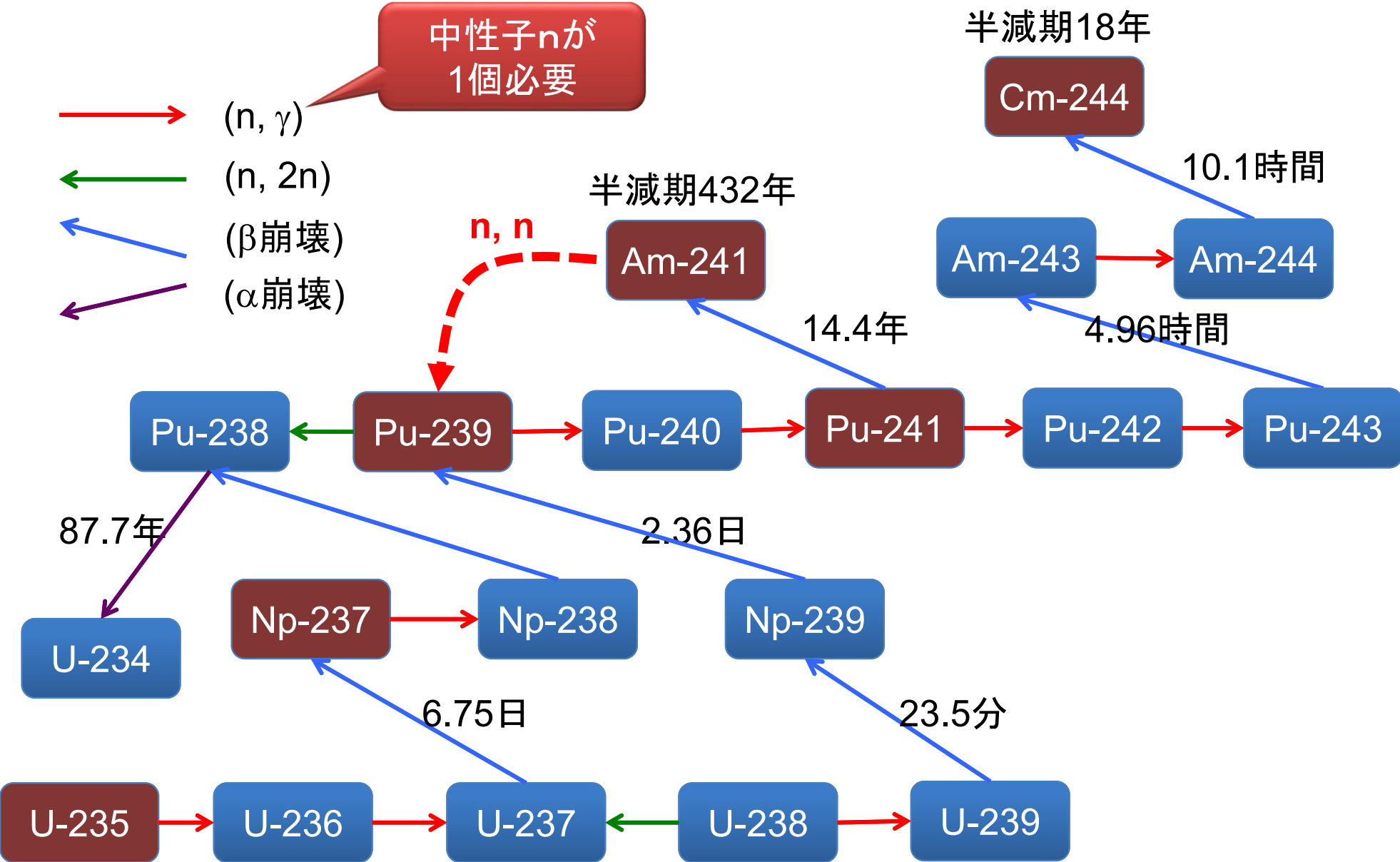
アクチノイド	超ウラン元素 (TRU)	核種	半減期	線量換算係数 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)	核分裂生成物 (FP)	核種	半減期	線量換算係数 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
		U-235	7億年	47	10kg		Se-79	29万5千年	2.9	6g
		U-238	45億年	45	930kg		Sr-90	28.8年	28	0.6kg
	マイナーアクチノイド (MA)	核種	半減期	線量換算係数 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)		Zr-93	153万年	1.1	1kg
		Pu-238	87.7年	230	0.3kg		Tc-99	21万1千年	0.64	1kg
		Pu-239	2万4千年	250	6kg		Pd-107	650万年	0.037	0.3kg
		Pu-240	6,564年	250	3kg		Sn-126	10万年	4.7	30g
		Pu-241	14.3年	4.8	1kg		I-129	1,570万年	110	0.2kg
	核種	半減期	線量換算係数 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)	Cs-135		230万年	2.0	0.5kg	
	Np-237	214万年	110	0.6kg	Cs-137		30.1年	13	1.5kg	
Am-241	432年	200	0.4kg							
Am-243	7,370年	200	0.2kg							
Cm-244	18.1年	120	60g							

線量換算係数:
放射性核種を人体に摂取した時の影響を示す指標。放射能(ベクレル)あたりの被ばく(シーベルト)で示す。

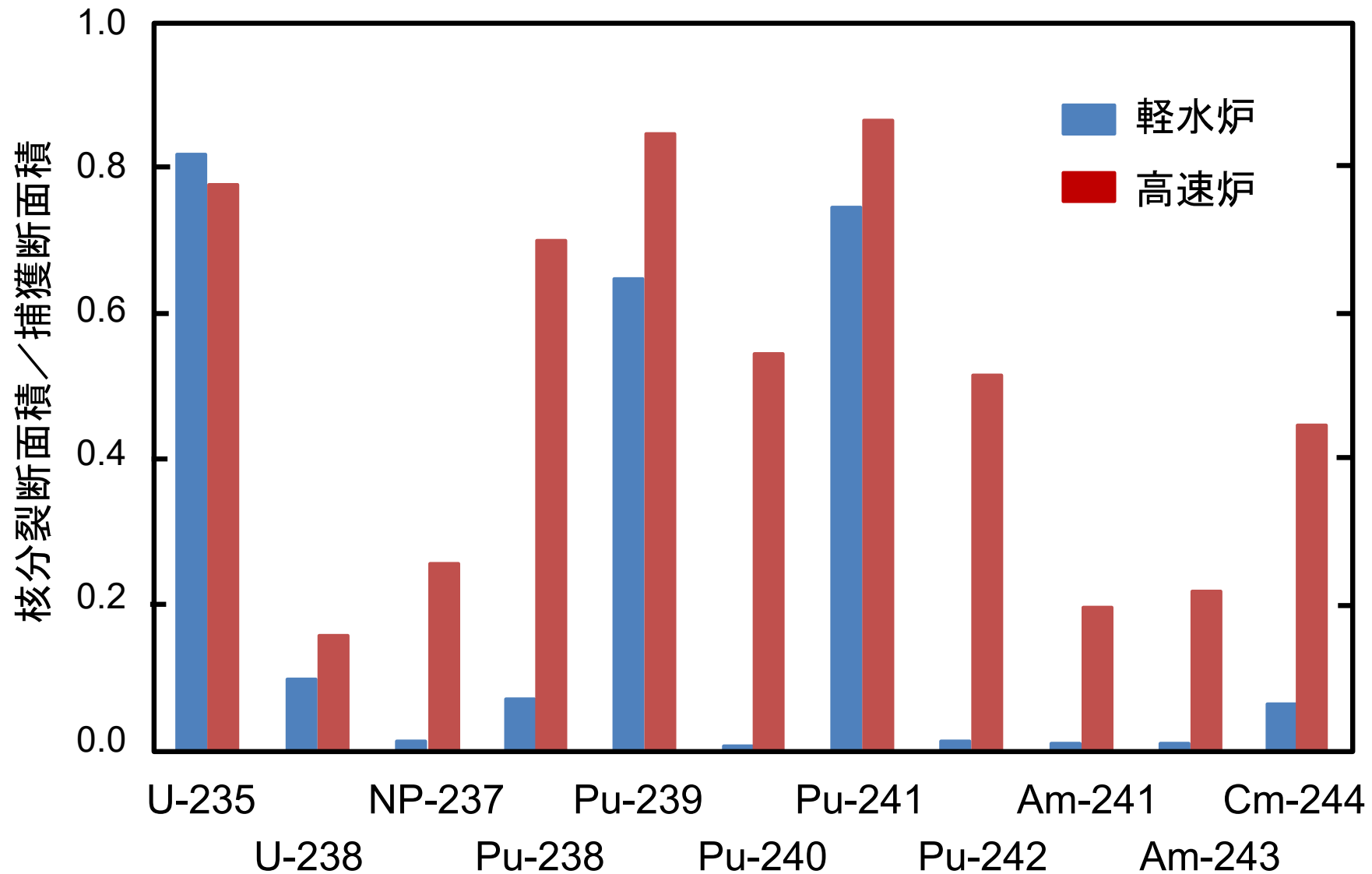
高レベル廃棄物の潜在的な有害度



超ウラン元素の反応チェーン



軽水炉と高速炉の核分裂性能



高速炉実証炉開発事業

- **「GX経済移行債」による支援策**として、**高速炉の実証炉開発に関する予算**を、23年度から**3カ年で460億円措置**（23年度76億円）。加えて、24年度から3カ年で**775億円の追加**（24年度は289億円）を目指している。
- 23年3月、炉概念の仕様と将来的にはその**製造・建設を担う事業者（中核企業）の公募**を実施、7月12日の**高速炉開発会議戦略ワーキンググループ**において、炉概念として三菱FBRシステムズ株式会社が提案する『ナトリウム冷却タンク型高速炉』を、**中核企業として三菱重工業株式会社を選定**して、**9月から事業開始**したところ。

＜ナトリウム冷却タンク型高速炉（イメージ）＞

＜高速炉実証炉開発の今後の作業計画＞

2023 年夏：炉概念の仕様を選定 【23/7/12選定済】

2024 年度～2028 年度：実証炉の概念設計・研究開発

2026 年度頃：燃料技術の具体的な検討

2028 年度頃：実証炉の基本設計・許認可手続きへの移行判断

※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)を基に作成



(出典) 三菱重工業株式会社PRESS INFORMATION (2023.07.12)
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

高速炉技術評価委員会での炉概念仕様と中核企業の評価結果（概要）

提案概要

ナトリウム冷却タンク型高速炉

提案者：三菱FBRシステムズ

中核企業：三菱重工業

- 国内の基準地震動への対応、第4世代炉の国際標準の要件について、概念設計を行う過程で考慮。
- 中型炉の出力を提案するが、小型炉・大型炉にも展開可能な設計とし、大型炉は軽水炉に競合できる建設コストを見通す。
- 酸化物燃料を主概念とし、金属燃料を副概念とし、どちらにも対応可能な炉心設計を実施。

革新的小型ナトリウム冷却高速 PRISM

提案者：日立GE

中核企業：日立GE

- 米国GE日立社により設計された小型モジュール方式のタンク型ナトリウム冷却高速炉。米国で提案されたVTR、Natriumの原子炉として採用されている。
- 金属燃料及びそのサイクル技術を用いる。

小型ナトリウム冷却炉 MCR

提案者：三菱重工業

中核企業：三菱重工業

- 炉心を偏心配置として原子炉容器内での機器配置に余裕を持たせた小型タンク型炉。中型炉・大型炉へは、同じ大きさの機器とループを増加させることでスケールアップ。
- 金属燃料とそのサイクル技術を開発するが、MOX燃料も適用可能とする。

三菱FBRシステムズ提案に対する評価内容（一部抜粋）

<炉概念仕様>

- 設計成立性と経済性について、設計の実現と開発目標達成に向けた工程を見込むことができる。
- 提案者が重要と認識している研究開発課題として、耐震性向上やシビアアクシデント対策、コスト低減、基準整備などを挙げ、必要な技術開発に対して概念設計終了時の達成目標を具体化していることから、課題に対応できる十分な計画性を有すると評価できる。等

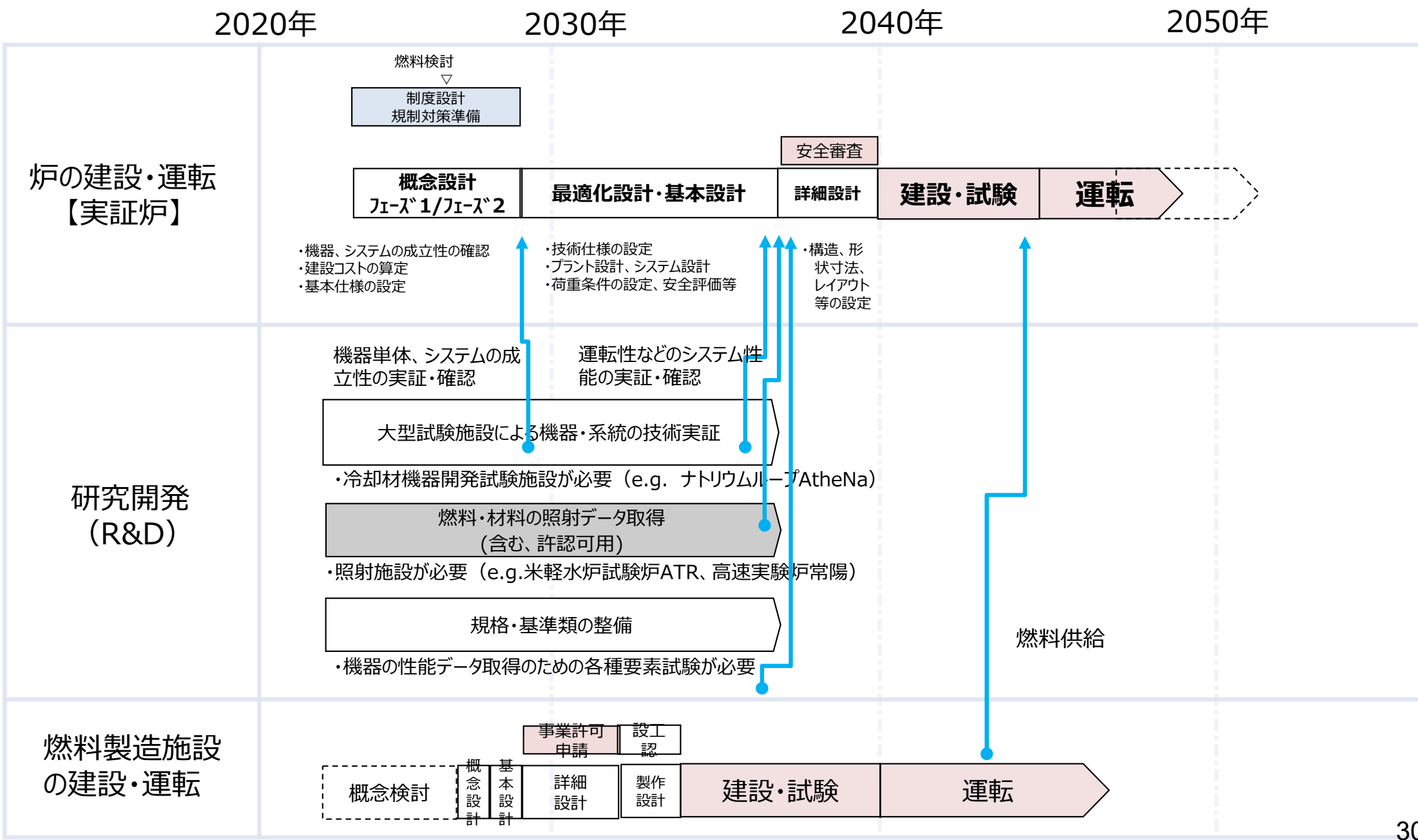
<中核企業について>

- 我が国の高速炉開発及び関連する国際協力に参画してきた豊富な実績があり、高速炉のエンジニアリング会社として三菱重工業の子会社である三菱FBRシステムズと協働して、JAEAが行う研究開発と十分に連携した概念設計が可能である。
- 高速炉に必要な材料、機器、計装等を供給する国内サプライチェーンの現状の脆弱性を具体的に整理し把握しており、その維持・拡充を図る中心となり我が国産業全体の實力涵養に貢献できる。等

導入に向けた技術ロードマップ（高速炉）

※事業者等からの個別のヒアリングを踏まえて、「研究開発を進めていく上での目標時期」として策定したもの。

（実際に建設を行う場合の運転開始時期等は、立地地域の理解確保を前提に、事業者の策定する計画に基づいて決定されることとなる。）



- 今般、高速炉と高温ガス炉の実証炉開発事業を開始し、中核企業が選定され、それぞれ具体的な炉型が決定したことなどの追加的要素を踏まえつつ、今後の実証炉開発を進めていくため、各事業に則して技術ロードマップをより具体化していく必要がある。
- そのために、中核企業やJAEAにおける要素技術開発の進捗状況や、電気事業者の知見を踏まえ、設計、機器等の実証、照射試験等の具体的なステップや、規格・基準類の整備の進め方、マイルストーンで求められる技術的成果などを関連プレイヤーの参画を得て順次整理する。

<高速炉実証炉開発における技術的な検討の論点例>

- 設計段階による実証炉の仕様（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・システムの特定と、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）
- 規格・基準の整備
 - 軽水炉との違いや規制対応も見据えた、整備すべき規格・基準の特定と、必要なデータ取得の項目と方法
- 燃料製造施設の在り方
 - MA含有燃料を含めた、燃料製造技術の検討・開発

等

高速炉燃料開発の必要性

- 高速炉と軽水炉では燃料仕様、冷却材が異なるだけでなく、高速炉燃料は高温環境で高燃焼度まで使用される。
→ 高温・高燃焼度まで使用可能な**燃料・材料を開発**し、照射試験によって**燃料健全性を実証**する必要がある。
- 高レベル放射性廃棄物の減容・潜在的有害度低減の実現に向けて、MAを燃料として使用する。
→ MA含有燃料の**製造技術を確立**し、照射試験によって**燃料として使用できることを実証**する必要がある。

		高速炉		PWR ^{*1} (17×17型の例)	BWR ^{*1} (8×8型の例)
		(MOX燃料の検討例)	(金属燃料の検討例)		
燃料仕様	材質	MOX	U-Pu-Zr	UO ₂ (MOX) ^{*2}	UO ₂ (MOX) ^{*3}
	Pu富化度	~21%	~15%	— (≦13%) ^{*2}	— (≦10%) ^{*3}
	MA含有率	最大5%程度	最大5%程度	—	—
	被覆管材料	PNC316/ODS鋼	HT-9/ODS鋼	ジルカロイ-4	ジルカロイ-2
冷却系	冷却材	ナトリウム	ナトリウム	軽水	軽水
	原子炉出口温度	約550℃	約510℃	約325℃	約287℃
使用条件	最高燃焼度	250GWd/t (ペレット) —	200GWd/t (軸方向最大) —	62GWd/t (ペレット) ^{*4} 45GWd/t (集合体)	— 40GWd/t (集合体)
	被覆管温度	700℃	600℃/650℃	<500℃	<500℃
	燃料中心温度	<約2500℃	<約1000℃	<1800℃	<1800℃

*1 原子力百科事典ATOMICAより、 *2 「伊方3号機MOX燃料の採用計画等について」より、 *3 「浜岡4号機プルサーマル設置変更申請書」より、
*4 「三菱PWR高燃焼度化ステップ2炉心におけるMOX燃料機械設計」より

(1) 経済性向上技術

- 燃料の高燃焼度化による燃料サイクルコスト低減
- 冷却材の高出口温度化による発電効率向上

● 太径中空燃料の健全性実証

燃料の溶融防止と燃料のスエリングによる被覆管との機械的な相互作用の抑制を両立し、燃料の高燃焼度化が可能な太径中空燃料の健全性を実使用環境下で実証する。

● 長寿命炉心材料の開発

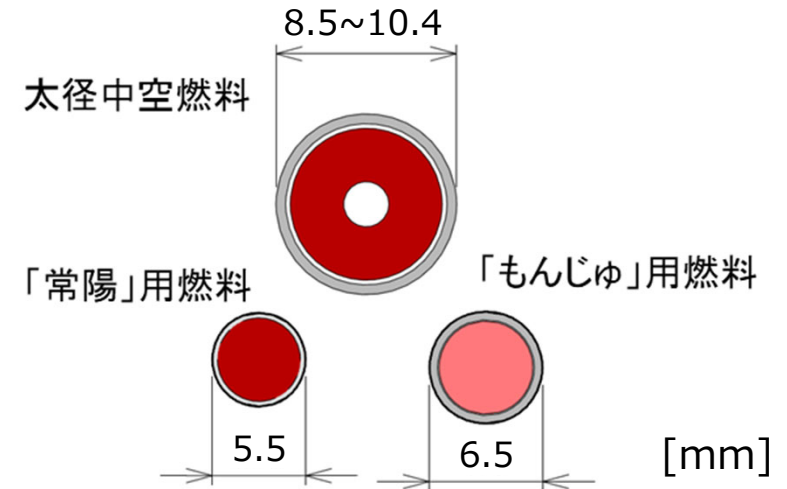
燃料の高燃焼度化（取出平均燃焼度150GWd/t）と冷却材の高出口温度化（550℃）を両立する酸化物分散強化型（ODS）鋼被覆管、フェライト鋼ラッパ管等を開発する。

(2) 環境負荷低減性

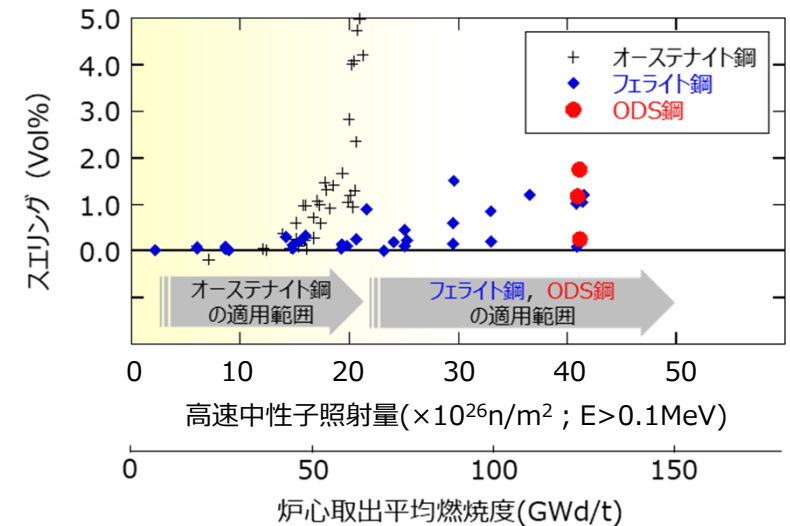
- 放射性廃棄物の減容化・有害度の低減に貢献するMA含有燃料の開発

● MA含有燃料の照射特性評価、健全性実証

MA添加が燃料の組織変化挙動、熱的挙動や被覆管との化学的な相互作用等に及ぼす影響を把握するとともに、MA含有燃料の健全性を実使用環境下で実証する。



「常陽」、「もんじゅ」燃料と太径中空燃料の断面寸法の例



炉心材料候補材のスエリング挙動
(中性子照射環境下での寸法安定性)

(1) 経済性向上技術

● 太径中空燃料の健全性実証

- 「常陽」、仏Phenix、米EBR-II、英PFR等で照射実績あり
- 実証炉の初装荷燃料からの適用を目指す技術であり、照射試験による照射挙動データ取得、健全性実証が必要

● 長寿命炉心材料の開発

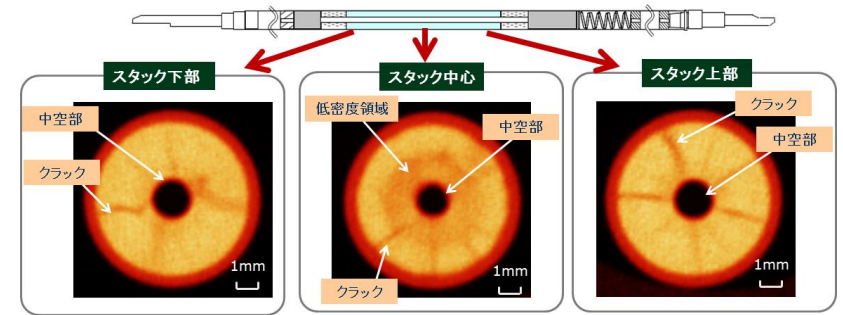
- ODS鋼被覆管の製造に成功し、世界最高レベルのクリープ強度を長時間維持することを実証。量産技術開発を実施中
- 量産技術開発、基準類整備の継続に加え、材料照射試験、燃料照射試験による照射挙動データ取得、性能実証が必要

(2) 環境負荷低減性

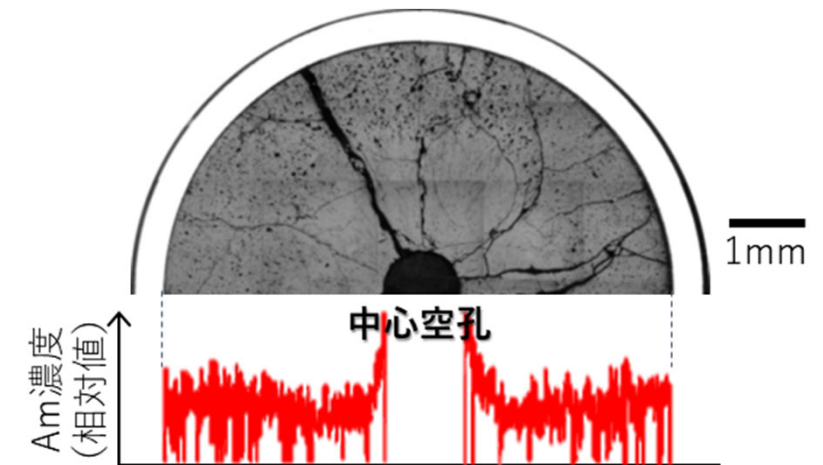
● MA含有燃料の照射特性評価、健全性実証

- MA含有燃料 (5%Am、2%Np-2%Am) を製造し、「常陽」で短期高線出力試験を実施。燃焼初期の熱的挙動、MA再分布挙動等に係るデータを取得
- 長期照射試験により、MAを燃料として利用できることを実証するとともに、照射挙動データ取得、健全性実証が必要

- 「常陽」の活用等、継続的な照射試験が必要
- 被覆管をはじめとする炉心材料のサプライチェーンの再構築が重要



「常陽」における太径中空燃料の照射挙動データの取得例
(太径中空燃料の照射後のX線CT結果)

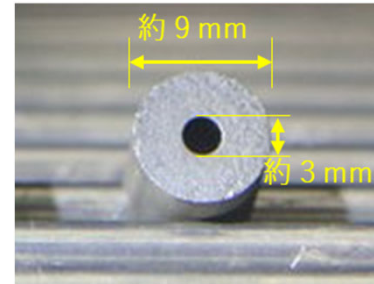


MA含有MOX燃料のAm再分布挙動
(5%Am含有MOX燃料、24時間照射)

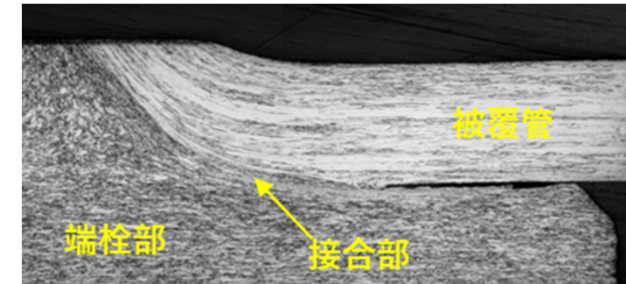
(1) 経済性向上技術

● 中空ペレット量産技術開発

- Pu-3での短期的な試験において、約40kg-MOXの処理を実施し、技術的成立性は確認済
- ➔ 品質の安定性、検査技術を含め、量産規模での技術実証が必要



Pu-3で製造したMOX中空ペレット



ODS鋼被覆管の抵抗溶接技術

● ODS鋼被覆管を適用した燃料ピン製造技術開発

- 従来のTIG溶接とは異なる加圧抵抗溶接を用いた製造技術（端栓溶接技術）を開発
- ➔ 品質検査を含め、量産規模での技術実証を進めるとともに、照射試験燃料の製造が必要

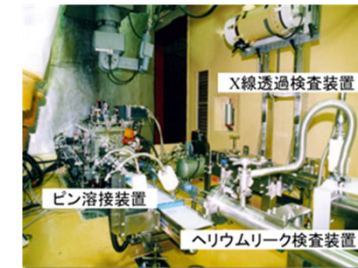
(2) 環境負荷低減性

● MA含有燃料のセル内遠隔製造技術開発

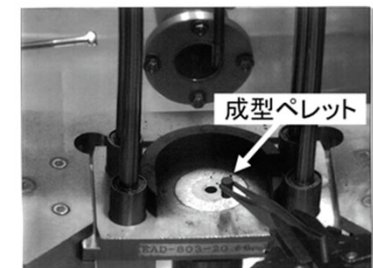
- AGFのコンクリートセル内に整備した小規模の燃料製造設備を用いた技術開発により、基本的なセル内遠隔製造技術を確立。照射試験用MA含有MOX燃料ピンを製造
- セル内遠隔製造設備のモックアップ試験を部分的に実施
- ➔ MA含有燃料ペレットを遠隔自動で低コストで製造するための技術開発と、その製造設備の遠隔保守・補修技術の実証が必要
- ➔ 再処理における低コストでのMA抽出技術の開発とその技術実証が必要



原料粉末の混合粉砕



燃料ピン溶接・検査装置



燃料ペレットの成型

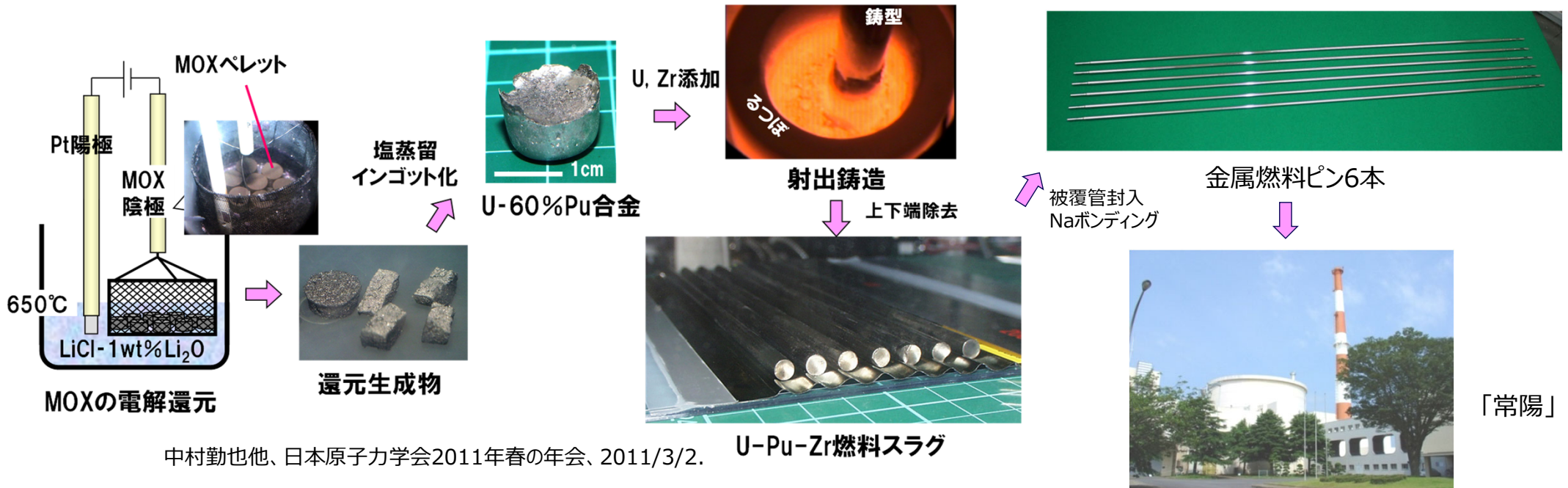
高速炉MOX燃料の実用化に向けて、インフラの維持・整備等を含めた量産規模の燃料製造技術開発が重要

MA含有MOX燃料のセル内遠隔製造 (AGF)

電力中央研究所が中心となって、これまでに燃料設計手法の確立、「常陽」での照射試験の準備、MA含有燃料の照射試験・照射後試験、Uを用いた工学規模射出鑄造実績の蓄積まで進めてきた。

国内実用化に向けた課題は以下のとおり。

- 国内照射実績の蓄積。実用炉条件（高被覆管温度かつ高燃焼度）における照射健全性の実証
- 燃料の最適化・高性能化（Zr濃度最適化、被覆管内面の防食、照射挙動のモデリングなど）
- 国内でのU-Pu-Zr燃料の量産規模製造実績の蓄積 → 次ページ



「常陽」での金属燃料ピン照射試験（JAEA-CRIEPI共同研究）

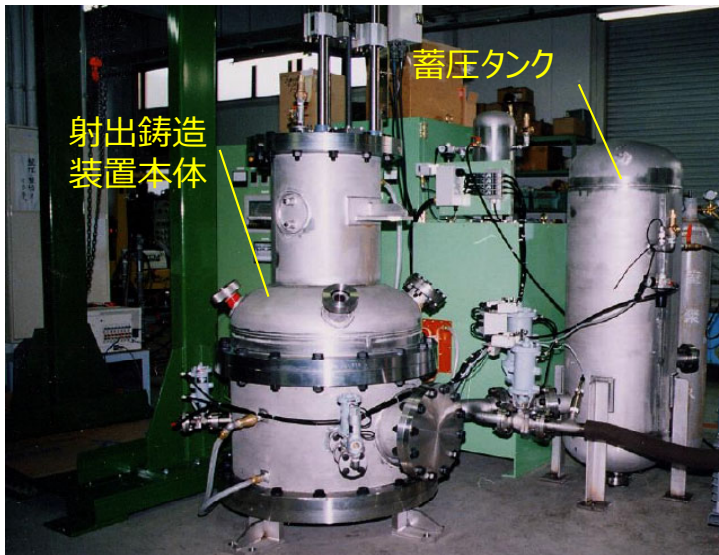
- ☛ 実用炉条件における照射健全性実証のためには「常陽」の活用等、継続的な照射試験が必要
- ☛ 被覆管をはじめとする炉心材料のサプライチェーンの再構築が重要

● 国内でのU-Pu-Zr燃料の量産規模製造実績の蓄積

- 燃料研究棟 (廃止措置施設) に整備したグローブボックスで、「常陽」での金属燃料ピン照射試験用に射出鑄造技術によるU-Pu-Zr燃料スラグの製造、小規模Naボンディング装置を用いた燃料ピン組立を実施
- U-Zr合金の工学規模の射出鑄造試験を実施 (文科省委託研究)

製品の目標仕様

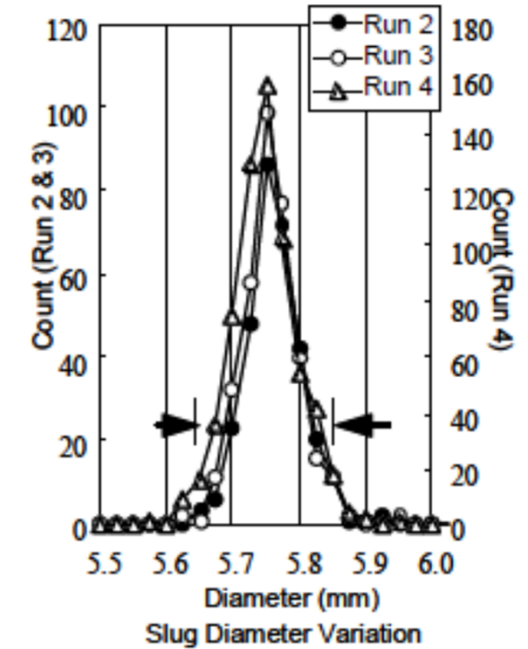
Zr content $10 \pm 1 \text{ wt. \%}$
 Impurity (O,C,Ni,Si) $< 2000 \text{ ppm}$
 Density = $15.8 \pm 0.3 \text{ g/cc}$
 Diameter = $\pm 0.05 \text{ mm (avg.)}$
 $\pm 0.10 \text{ mm (local)}$
 Slug length $> 400 \text{ mm}$
 Heel $< 30\%$ of loaded ingot



工学規模U-Zr射出鑄造試験装置
@原燃工 (東海)



工学規模試験における鑄造後の鑄型の外観とU-Zr合金スラグ



結果: U-Zrスラグ製品の直径分布

T. Ogata, T. Tsukada, Proc. Global 2007, Boise, Idaho, USA, Sep. 9-13, 2007 (2007).



文部科学省