



# 高速実験炉原子炉施設（「常陽」）

## MK-IV炉心の照射性能

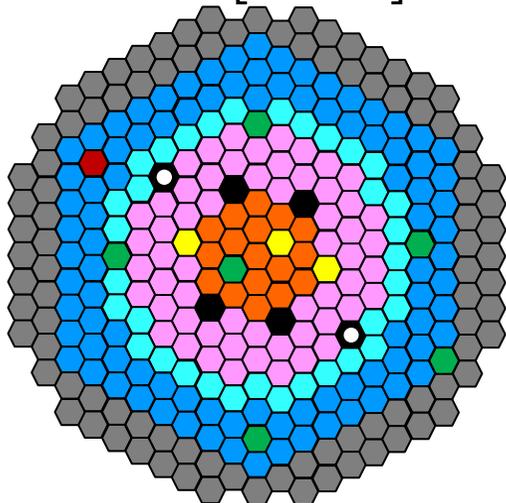
### 今後の試験計画

2021年11月12日

日本原子力研究開発機構 大洗研究所

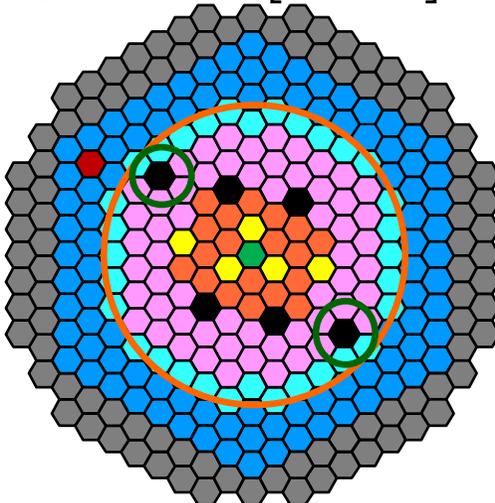
高速実験炉部

MK-IV [100MW]



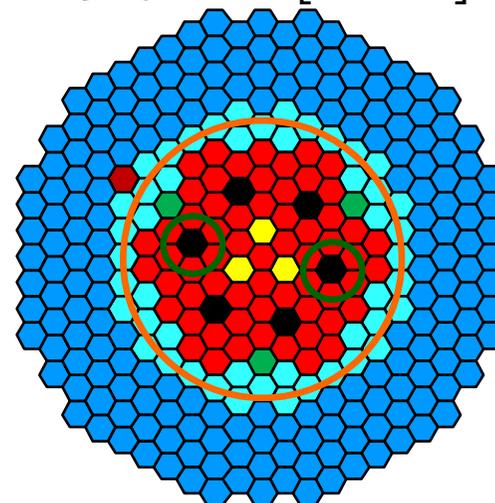
燃料の最大装荷個数: 79体  
 炉心高さ: 50cm  
 炉心等価直径: 約78cm

(参考)MK-III [140MW]



燃料の最大装荷個数: 85体  
 炉心高さ: 50cm  
 炉心等価直径: 約80cm

(参考)MK-II [100MW]



燃料の最大装荷個数: 67体  
 炉心高さ: 55cm  
 炉心等価直径: 約73cm

**MK-IV炉心では** **のMK-III炉心の照射性能の特徴を引き継ぐ。**

○MK-II炉心では2列3列が制御棒位置あるいは制御棒の隣接位置となり、ここで照射試験を行うと、運転に伴う制御棒引抜きが照射試料位置の中性子束に影響するデメリットがあった。また、オンライン照射は、炉心上部機構に貫通孔がある位置でしかできないが、MK-II炉心では3列の貫通孔すべてに制御棒駆動機構を設置していた。

○MK-III炉心では2領域化により、外側燃料領域の出力を上昇させ、集合体数の多い3~5列の燃料領域の中性子束を向上。熱出力上昇と炉心高さ削減により燃料集合体の体数を増やすことで、燃料領域を径方向に拡大。これらの結果、反射体領域の中性子束が上昇。→燃料領域拡大に伴い1体当たりの出力分担が減少し、核燃料物質装填量が少ない照射燃料集合体装荷に伴う反応度負担が軽減され、より多くの照射燃料集合体を装荷可能。

- 炉心燃料集合体
- 内側炉心燃料集合体
- 外側炉心燃料集合体

- 内側反射体
- 外側反射体

- 遮へい集合体
- 中性子源

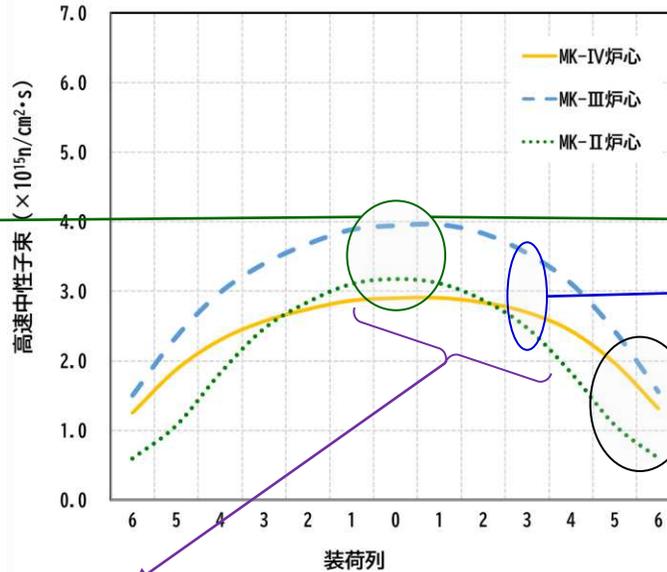
- 制御棒
- 後備炉停止制御棒

- 材料照射用反射体
- 照射用燃料集合体

## MK-IV炉心の高速中性子束は照射試験に必要なレベルを確保

単位:  $\times 10^{15} \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

・MK-III炉心と比較すると最大高速中性子束は約3割低下するものの、数多くの照射実績があるMK-II炉心とほぼ同等の中性子束、dpaを確保可能。



装荷列	MK-IV [100MW]	MK-III [140MW]	MK-II [100MW]
0,1列	2.9	4.0	3.2
3列	2.7	3.6	2.5
5列	2.0	2.4	1.1
6列	1.3	1.6	<1.0

・照射温度は、試験用集合体の冷却材流量・発熱等で調節可能。  
 ・炉内装荷位置、U濃縮度等の燃料仕様(下表)の調整により、高速炉燃料開発で要求される線出力密度や燃焼度等の要求を満足することが可能。

### [燃料領域]

・照射燃料集合体及び炉心材料用の材料照射用反射体の照射に利用、主に1列3列(計測線付は3列)

### [反射体領域]

・材料照射用反射体の照射に利用

	Pu含有率	U濃縮度	初期密度	燃料直径(外径)
Ⅲ型特殊燃料要素 Ⅲ型限界照射試験用要素	$\leq 32\text{wt}\%$	$\leq 26\text{wt}\%$	$\leq 95\% \text{TD}$	5.3~7.5mm 5.3~6.6mm
Ⅳ型特殊燃料要素 Ⅳ型限界照射試験用要素	$\leq 32\text{wt}\%$	$\leq 24\text{wt}\%$	$\leq 95\% \text{TD}$	5.18~6.18mm
先行試験用要素	—	—	$\leq 95\% \text{TD}$	4.6~7.5mm
基礎試験用要素	$\leq 32\text{wt}\%$ / $\leq 25\text{wt}\%$ / $\leq 30\text{wt}\%$ / $\leq 20\text{wt}\%$ (酸化物 / 炭化物 / 窒化物 / 金属)	—	$\leq 95\% \text{TD}$	4.6~7.5mm

## B型照射燃料集合体(先行試験用/基礎試験用)

・頑丈なキャプセル(内壁構造容器/密封構造容器)に燃料要素を装填することで限界性能試験(PTM、RTCB)における安全性を確保

＞ 酸化物燃料は最大20%の溶融を伴う試験に対応  
(先行試験用要素)

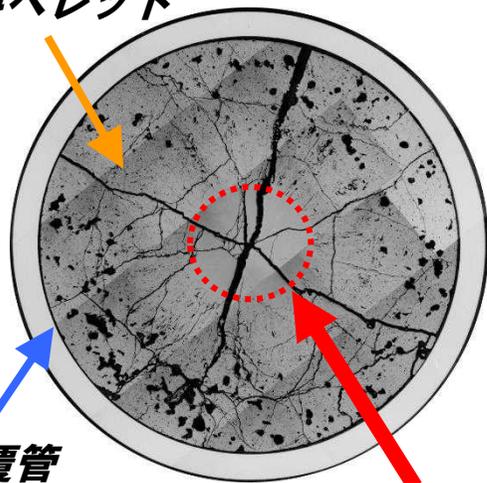
・酸化物、炭化物、窒化物、金属の燃料材に対応

※ペレットだけでなく振動充填燃料も可(先行試験用要素)

※マイナーアクチニド、核分裂生成物混入可

※ODS被覆管を採用可

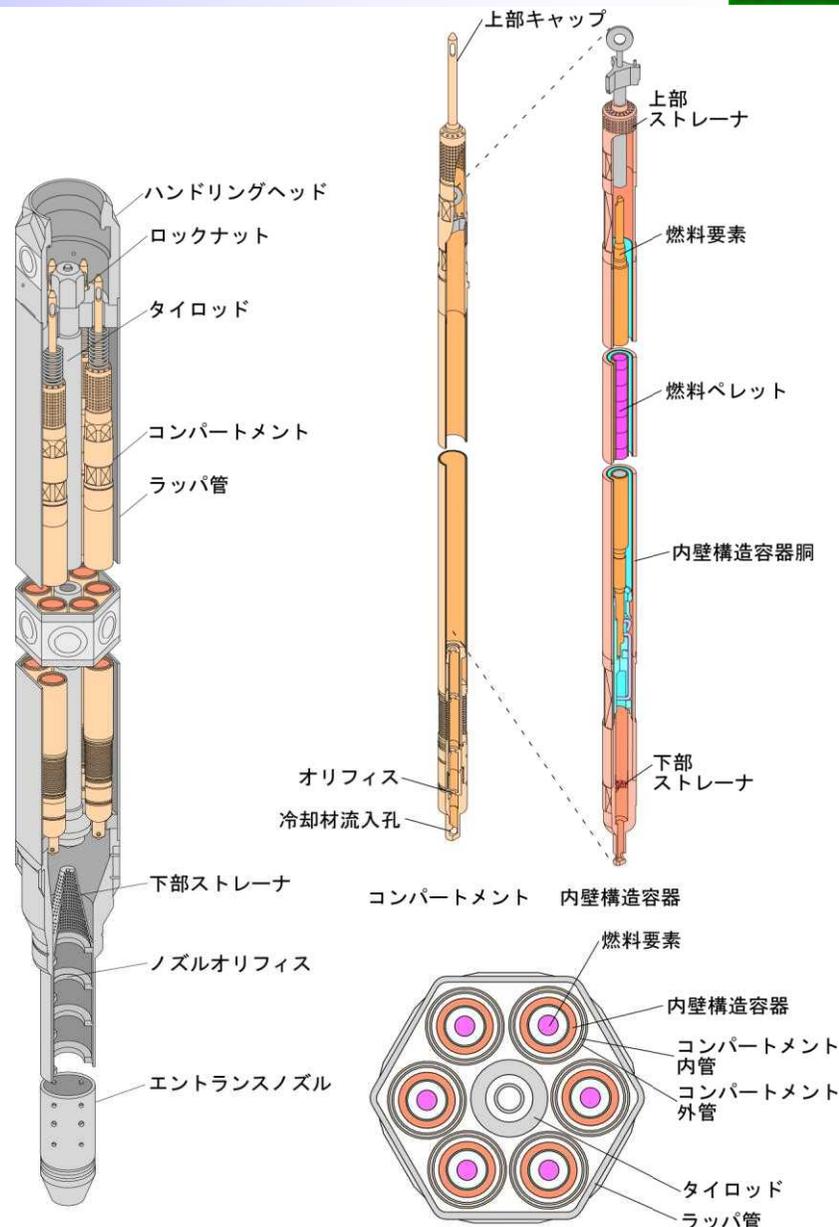
燃料ペレット



被覆管

溶融した部分

PTM試験



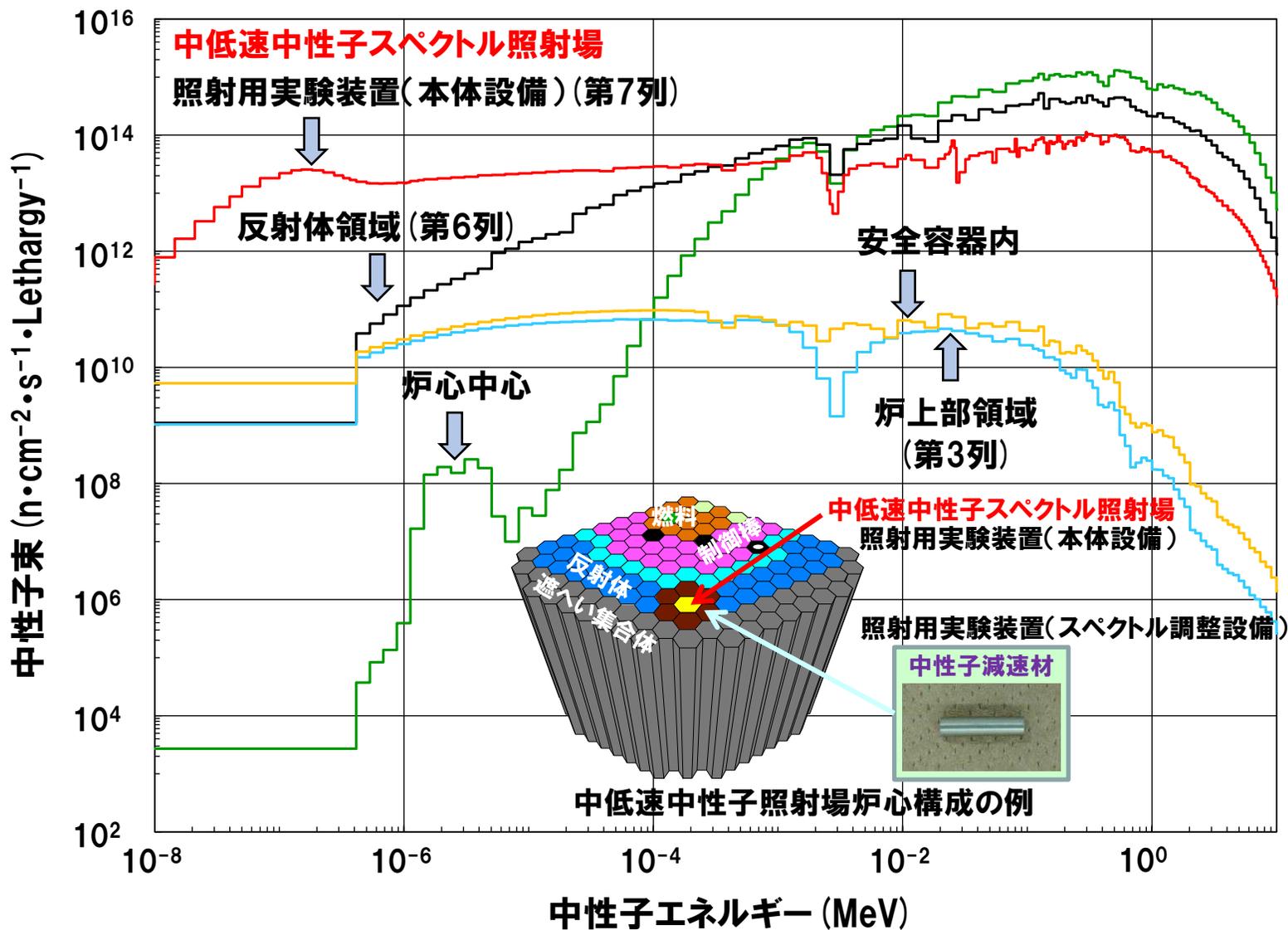
B型照射燃料集合体(先行試験用)

\* PTM: Power-to Melt

RTCB: Run-to-Cladding Breach

ODS: Oxide Dispersion Strengthened

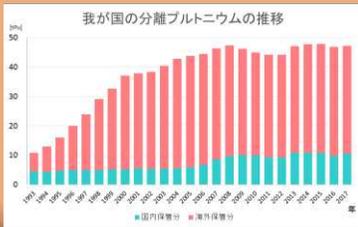
炉心特性に影響を及ぼさない範囲で反射体領域に本体設備を装荷し、スペクトル調整設備で囲むことで、軽水炉スペクトルの模擬、MAやLLFPの核変換照射場に対応



～脱炭素社会を実現するイノベーションと  
エネルギーセキュリティの確保を目指して

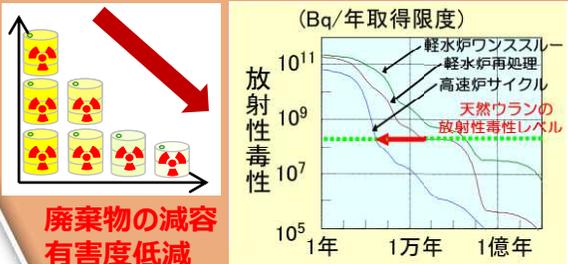
## ～プルトニウムマネジメント

- 分離済プルトニウムの利用・燃焼
- プルトニウム燃焼炉の開発



分離済プルトニウムの削減

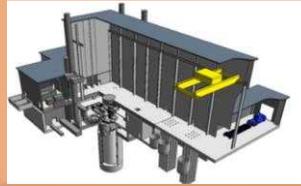
- マイナーアクチノイドを燃料に混ぜて燃焼
- 長寿命核分裂生成物の短寿命化



廃棄物の減容  
有害度低減

## ～持続可能な原子力利用へ

- SMR、次世代炉開発(NEXIP)
- 民間のイノベーション開発への支援
- 新燃料・材料開発、安全性向上
- 日米、日仏協力（開発、協働）

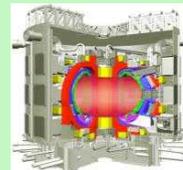


米国多目的  
研究炉 VTR



高速実験炉「常陽」

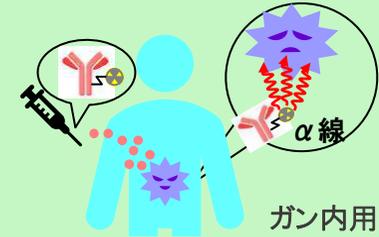
- 基礎基盤研究・多目的利用
- 大学利用、国際貢献
- 核融合炉開発（第1壁材開発など）



## ～原子力のポテンシャルの追求

## ～医療・産業のイノベーション創出

- 治療・診断用アイソトープ製造
- 工業用アイソトープ製造



ガン内用療法

- 大学・高専との連携
- 海外技術者の受け入れ



学生実習



海外研究者の  
インターンシップ研修

## ～未来を担う原子力技術者の育成

## 「常陽」運転再開後に実施を検討中の照射試験

### (1) 日本の高速炉開発

- ・太径中空燃料ピン照射試験※
  - 太径中空燃料ピンのPTM、照射挙動データの取得
- ・金属燃料照射試験
  - U-Pu-Zr燃料と被覆管との共晶反応の有無を含め、FCCI等の照射挙動を把握、電中研との共研
- ・太径燃料ピンバンドル照射試験
  - PNC-FMSラッパ管を用いた軸非均質燃料ピンバンドル集合体の高燃焼度照射挙動データの取得
- ・炉心材料照射試験
  - ODS鋼被覆管等の長寿命炉心材料の基礎的な照射データの取得
- ・長寿命制御棒照射試験
- ・NEXIP事業（高速炉）
  - 小型高速炉（金属燃料）の導入に関わる研究開発のニーズ

※別途、設置変更許可申請を実施予定  
(用語)

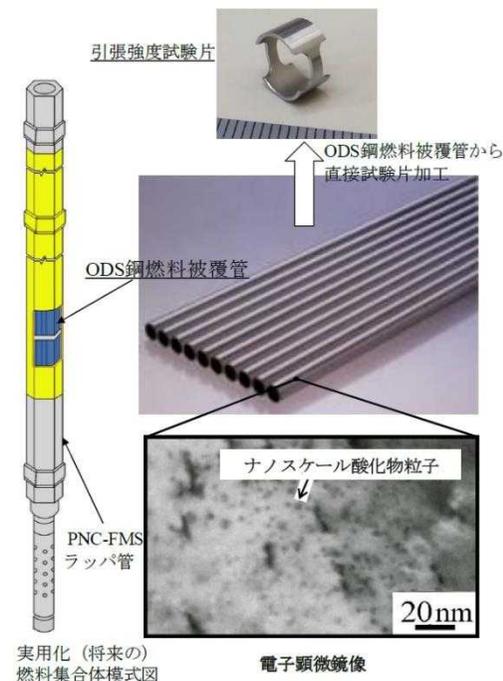
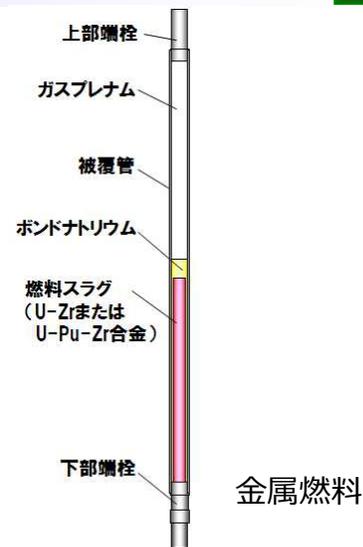
PTM：溶融限界線出力試験

FCCI：燃料-被覆管化学的相互作用

PNC-FMS鋼：高強度フェライト/マルテンサイト鋼（JAEAが高速炉の次期炉心材料候補として開発した鋼種）

ODS鋼：酸化物分散強化型フェライト鋼

NEXIP：原子力分野におけるイノベーション創出を効率的・効果的に進めるために文部科学省と経済産業省が進めている、基礎研究から実用化に至るまで連続的にイノベーションを促進するための一連の取り組み（Nuclear Energy × Innovation Promotion）



実用化（将来の）  
燃料集合体模式図

電子顕微鏡像

ODS鋼被覆管

## (2) 放射性廃棄物の減容化・有害度低減

- ・MA含有高Pu-MOX燃料の系統的照射試験
  - 高Pu富化度条件でMAを含有したMOX燃料のPTMや照射挙動データの取得
- ・SmARTサイクル照射試験
  - 「常陽」使用済燃料の再処理で得られるMAを添加したMOX燃料ピンの照射試験
- ・高次化Pu-MOX燃料照射試験
  - 軽水炉では燃焼できない高次化Puを含有したMOX燃料ピンの照射試験
- ・ADS用窒化物燃料照射試験（今後調整）
  - MA含有窒化物燃料の基礎的な照射挙動を把握するための照射試験

## (3) 外部ニーズ・国際協力

- ・日仏SFR協力「常陽」照射試験
- ・原子力材料（核融合炉等）
- ・医療用RI製造※

※ 別途、設置変更許可申請を実施予定  
(用語)

MA: マイナーアクチノイド

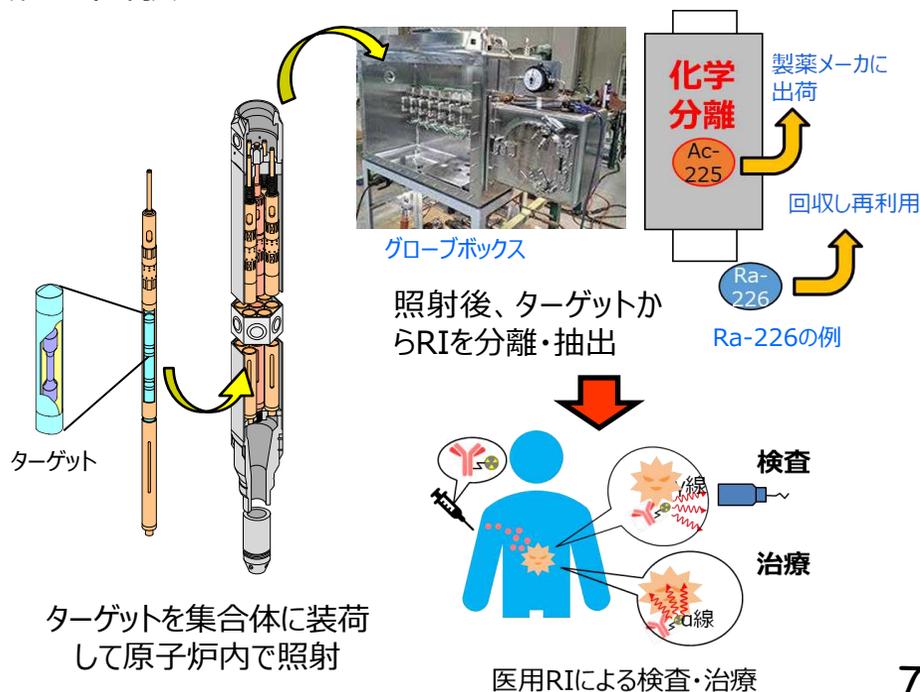
MOX: 混合酸化物燃料

PTM: 溶融限界線出力試験

SmARTサイクル: 少量核燃料物質を取り扱うフィードストック型サイクル (Small Amount of Reuse fuel Test CYCLE)

ADS: 加速器駆動核変換システム

RI: 放射性同位元素



## (1) 日本的高速炉開発

### ○ 戦略ロードマップ（H30.12.21原子力関係閣僚会議）

- 特に、高速中性子照射による炉心・材料等の健全性への影響を確認するための機能や、プルトニウムや機微技術の研究開発施設等の研究基盤は、国際競争力の観点からも維持すべきである。

また、原子力機構がこれまでに蓄積してきた高速炉開発を中心とする知見について、広く民間との共有を図るという視点の下、民間が取り組む多様な技術開発に対応ができるニーズ対応型の研究基盤を維持していくことが必要である。

### ○ 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（R3.6.18内閣官房他）

- 2018年12月に、原子力関係閣僚会議において決定した高速炉開発の「戦略ロードマップ」に基づく開発を着実に推進する。「戦略ロードマップ」では、21世紀後半の高速炉の本格的利用を視野に、例えば21世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて、技術成熟度、ファイナンス、運転経験等の観点から現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待されている。まず、当面5年間程度は、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進し（ステップ1）、国、（国研）原子力研究開発機構（JAEA）、電気事業者が、メーカーの協力を得て技術の絞り込みを行った上で（ステップ2）、一定の技術が選択される場合、工程を具体化していく（ステップ3）。なお、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。
- 高速炉開発を進めるに当たっては、JAEAが保有する「常陽」・原型炉「もんじゅ」の運転・保守経験で培われたデータや、ナトリウム実験炉「AtheNa」等の世界的にも貴重なデータ・施設を最大限活用する。

### ○ エネルギー基本計画（素案）（R3.7.21第46回総合資源エネルギー調査会基本政策分科会配付資料）

- 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。

## (2) 放射性廃棄物の減容化・有害度低減

### ○ 戦略ロードマップ（H30.12.21原子力関係閣僚会議）

- 前述の通り、現在、ウラン需給状況が変化している一方で、今後のエネルギー技術の発展の不確実性や我が国のエネルギー資源の乏しさを考えれば、高速炉開発は中長期的には資源の有効利用と我が国のエネルギーの自立に大きく寄与する可能性がある。他方、廃棄物に関する課題は継続的なものであり、**高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減に対する寄与の観点も重要**である。

### ○ 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（R3.6.18内閣官房他）

- 小型炉や高温ガス炉といった革新炉型を含め、原子力の持続的な利用のためには、放射性廃棄物の適切な処理・処分が必要であり、さらには放射性廃棄物の減容化・有害度低減、中長期的には資源の有効利用に向けた技術開発を進めることが重要である。**高速炉は、高速中性子を活用して、このような高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減、資源の有効活用という核燃料サイクルの効果をより高めるものであり、引き続き重要である。**

### ○ エネルギー基本計画（素案）（R3.7.21第46回総合資源エネルギー調査会基本政策分科会配付資料）

- このため、**放射性廃棄物を適切に処理・処分し、その減容化・有害度低減のための技術開発を推進する。**具体的には、**高速炉や、加速器を用いた核種変換など、放射性廃棄物中に長期に残留する放射線量を少なくし、放射性廃棄物の処理・処分の安全性を高める技術等の開発を国際的な人的ネットワークを活用しつつ推進する。**

## (3) 外部ニーズ・国際協力

### ○ 戦略ロードマップ（H30.12.21原子力関係閣僚会議）

- 今後の開発に当たっては、フランスや米国等との二国間及び多国間でのネットワークを活用した国際協力によって、研究基盤や規制に関する知見等を共有しつつ、実用化のための技術基盤の確立とイノベーションの促進に、国内外一体となって取り組んでいく。ただし、国際協力の活用の際には、政治的・経済的な条件が異なり、常に相手国の政策変更リスクが伴うことに留意が必要である。

### ○ 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（R3.6.18内閣官房他）

- また、「戦略ロードマップ」では、仏米等との国際協力を活用しながら高速炉開発を進めることとしている。フランスとは、2020年より新たな一般取決めに基づいて安全性・経済性向上に係る技術開発を実施しており、例えば、自然循環による冷却システムや、温度上昇に伴い自動的に制御棒が挿入される機構等の革新的技術を共同開発していく。アメリカとは、2019年に高速炉の試験炉である多目的試験炉（VTR）の開発協力について覚書を締結したところであり、これらに基づく取組を進めていく。
- また、「常陽」においては、世界的にも希少な医療用放射性同位体を、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。

### ○ エネルギー基本計画（素案）（R3.7.21第46回総合資源エネルギー調査会基本政策分科会配付資料）

- また、高速炉、小型モジュール炉、高温ガス炉等の革新的技術の研究開発を進めていくに当たっては、米・英・仏・加等の海外の実証プロジェクトと連携した日本企業の取組への積極的支援により、多様な社会的要請に応える選択肢を拡大していく。