

# 高速炉サイクルの研究開発と もんじゅ、常陽の役割

平成28年2月17日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

高速炉研究開発部門 次世代高速炉サイクル研究開発センター長

**上出 英樹**

## 報告内容

- ◆ **高速炉サイクル技術保有の今日的意義と  
研究開発における「もんじゅ」の役割**
  
- ◆ **今後の研究開発の展開**
  - **研究開発成果の実証・実用化への反映**
  - **「もんじゅ」の研究開発**
  - **高速増殖炉／高速炉の安全性強化**
  - **高速増殖炉／高速炉の実証技術開発**
  - **高速増殖炉／高速炉を利用した分離変換技術の開発状況**
  - **「常陽」の照射試験再開に向けた状況**
  
- ◆ **高速炉サイクル研究開発の向うべき方向**

## 対策を先送りせず、着実に進める取組

### ■ 使用済燃料問題

- 我が国は約17,000トンの使用済燃料を保管
- 原子力発電及び廃炉に伴って使用済燃料及び放射性廃棄物は発生し続ける

### ■ 使用済燃料問題の解決に向けた取組の抜本強化

- ① 高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた取組の抜本的強化
- ② 使用済燃料の貯蔵能力の拡大
- ③ 放射性廃棄物の減容化・有害度低減のための技術開発

### ■ 核燃料サイクル政策の推進

- ① 再処理やプルサーマル等の推進
  - 回収プルトニウム等の有効利用（核燃料サイクルの推進、高速炉等の研究開発）
  - もんじゅ：国際的研究拠点として研究成果の集約
- ② 中長期的な対応の柔軟性（不確実性への柔軟な対応）

### ■ 持続可能性と不確実性への対応

- 核燃料サイクルの推進が我が国の基本の方針
- 将来の不確実性に備えた幅広い選択肢の確保が我が国のエネルギー安全保障上からも重要

我が国のエネルギー安全保障への貢献（ウラン資源の有効活用）と高レベル放射性廃棄物発生量の低減（環境負荷低減）が可能な

**<高速炉サイクル技術の保有が重要>**

「常陽」、「もんじゅ」等を活用した段階的な研究開発が必要不可欠

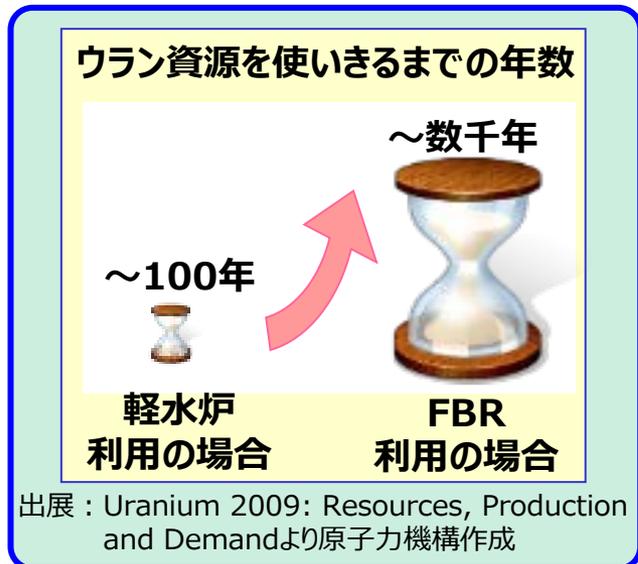
## <資源の有効利用>

- ◆ プルトニウムの利用により、ウラン資源を海外に頼らず **エネルギーの自立が可能**  
⇒ **高速増殖炉（FBR）導入で千年以上の利用**が可能
- ◆ ウラン資源埋蔵量は約**100年**程度だが、**高速炉サイクルの開発には長期間を有すること、各国の原子力発電の導入量に依存することから、着実な研究開発が必要**

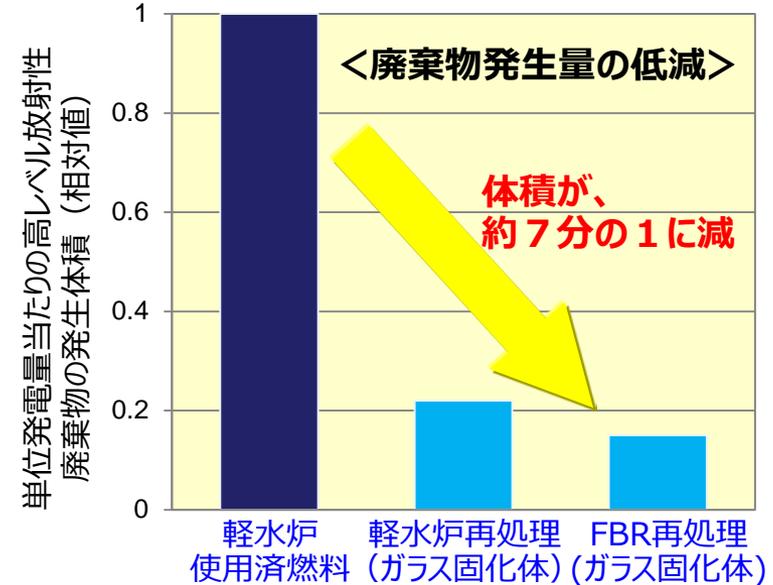
## <環境に優しい>

- ◆ 再処理しガラス固化体にする事で、**高レベル放射性廃棄物の発生量を低減**
- ◆ **高速炉サイクルへ移行**すると、高い熱効率とマイナーアクチノイド除去によるガラス固化体生成時の発熱制限の緩和などにより、**その低減効果はさらに大きくなる**

【ウラン資源の有効利用】



【環境負荷低減】



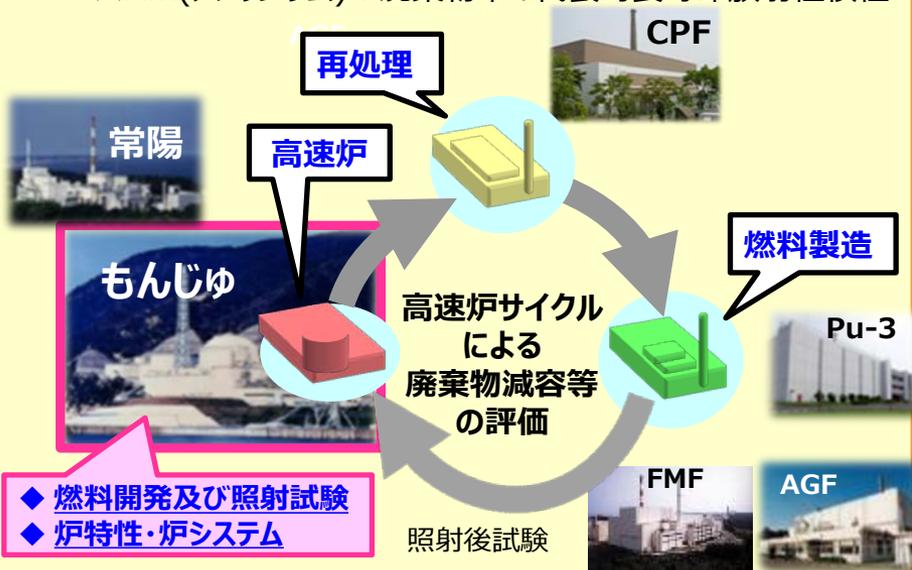
## <高速増殖炉技術の成果の取りまとめのための研究開発>

- ◆ 「もんじゅ」は大規模な高速増殖炉の発電所。我が国自前技術の集合体
- ◆ 自ら設計・製造・建設したプラントを動かして得られるノウハウが肝

## <廃棄物減容・有害度低減のための研究開発>

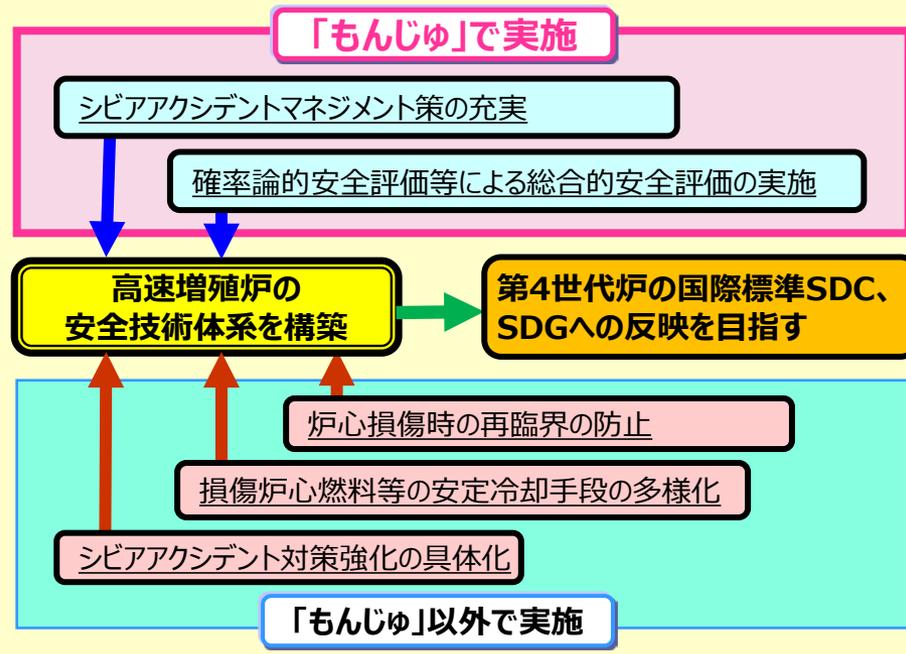
- ◆ 実際の燃料規模での試験研究が不可欠
- ◆ 燃料集合体の実規模照射試験が可能
- ◆ 炉心全体に不純物組成比以上のAm\*を含む炉心特性データの取得は「もんじゅ」が世界初

\*Am(アメリシウム)：廃棄物中の代表的長寿命放射性核種



## <安全性強化のための研究開発>

- ◆ もんじゅは実存するプラントとして、「高速増殖炉全体の安全技術体系の構築」のための研究開発の場を提供できる重要な施設



◆ 「もんじゅ研究計画」、「エネルギー基本計画」を反映した原子力機構の「第3期中長期計画」に基づき、以下の研究課題を中心に研究開発を推進

● 「高速炉の研究開発」

➢ 「もんじゅ」の研究開発

➢ 高速炉の実証技術の確立に向けた研究開発

– FBR/FRの安全性強化を目指した研究開発

– ASTRID開発協力を通じた実証技術開発

● 「核燃料サイクルに係る再処理、燃料製造及び放射性廃棄物の処理処分にに関する研究開発」

➢ 使用済燃料の再処理、燃料製造に関する技術開発

➢ 放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発



ASTRID炉

◆ 研究開発のための試験フィールドの整備

● 高速増殖原型炉「もんじゅ」 ➡ 早期の保安措置命令解除

● 高速実験炉「常陽」 ➡ 来年度の設置変更許可申請

● Pu燃料第3開発室 ➡ 加工事業化

● ホットラボ、照射後試験 (PIE) 施設 ➡ 新規制基準対応

● ナトリウム等試験施設 ➡ ナトリウム試験施設の集約化



原型炉「もんじゅ」



実験炉「常陽」



AtheNa施設

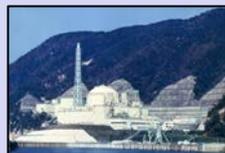
## FBR/FRの安全性強化のための研究開発

- ◆ 安全設計要件の国際的な整備
- ◆ 構造材料規格基準の国内整備と国際規格への反映
- ◆ 炉心損傷影響緩和技術開発
- ◆ 熱流動解析・評価手法開発
- ◆ ASTRID協力



## もんじゅの研究開発

- ◆ 炉心・燃料技術
- ◆ 機器・システム設計技術
- ◆ ナトリウム取扱技術
- ◆ プラント運転・保守技術
- ◆ MA含有MOX燃料照射試験
- ◆ 自然循環除熱能力実証



## 廃棄物減容・有害度低減のための研究開発

- ◆ 燃料製造
- ◆ 燃料開発及び照射試験
- ◆ 再処理（分離技術）
- ◆ 炉特性・炉システム
- ◆ 全体システム評価



## 実証技術の確立

### ◆ 安全設計要件を取り込んだ次期炉の設計に反映

- 解析コード、設計手法
- 設備設計

↳ **設計の確からしさ**  
↳ **安全余裕の確認**

### ◆ 次期炉の運転に反映

- 運用基準、運転・検査要領
- 保守・補修方法

↳ **運転・保守基本方針**  
(点検頻度 等)

### ◆ 廃棄物減容・有害度低減の技術的成立性確認

- 現行Am含有炉心での燃焼理論実証
- MA含有燃料の燃焼実証

↳ **最適システム概念**  
↳ **設計技術の確立**  
↳ **有効性の確からしさ**

## 実用化 FBRサイクル 実用炉



## 実用燃料 サイクルプラント



◎ 自ら設計・製造・建設した「もんじゅ」を活用し、高速増殖炉プラントの技術成立性を  
含む **高速増殖炉技術開発の成果の集約**と**次期炉設計への反映**

## 【高速増殖炉技術の成果の取りまとめ】

＜具体的な反映先の例＞

### ＜炉心・燃料技術＞

- 実機データに基づく **高次化Pu組成炉心特性の確認** 等

◆ 炉心設計手法及び炉心管理技術の検証・改良

### ＜機器・システム設計技術＞

- **プラントシステム設計技術の検証**
- **大型ナトリウム機器の設計技術の検証** 等

◆ ループ型炉動特性評価手法及びしゃへい評価手法等の妥当性確認  
◆ ナトリウム機器の経年特性や健全性実証

### ＜ナトリウム取扱技術＞

- 原子炉容器用 **供用期間中検査技術の開発** 等

◆ ループ型高速炉発電プラントのナトリウム管理技術の確立

### ＜プラント運転・保守技術＞

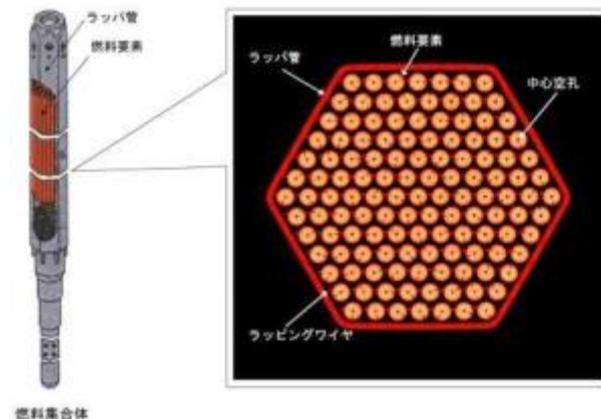
- FBR発電プラントの特徴を踏まえた **保全プログラムの構築** 等

## 【廃棄物減容・有害度低減の研究開発】

- MA含有のMOX燃料の **実規模照射試験**により、MAの核変換量の評価と照射挙動の確認 等

## 【安全性強化の研究開発】

- ナトリウム冷却炉の特徴である高い **自然循環性能による崩壊熱除去を実機で実証** 等



照射試験結果 (CT画像)

- ◎ 世界の高速炉の安全性向上に向け、**我が国主導**で**安全設計要件を構築**
- ◎ **高速炉開発国が安全規制や安全設計へ反映の意向**を示し**事実上の世界標準へ**

## ◆ 安全設計クライテリア(SDC)/ガイドライン(SDG)の位置付け・目的

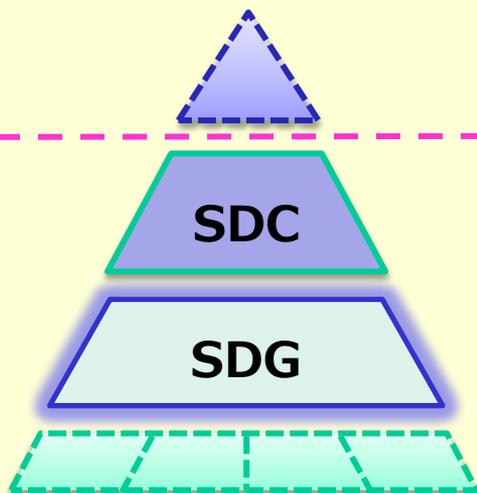
- 実用炉に向け、**安全設計の考え方**（主に設計基準事故を対象）を**国際標準化**
- **日本主導**により、**世界の高速炉の安全性向上**へ

## ◆ 主たる成果：**SDCレポート**（2013年5月GIFにて承認）

- **ロシア等の規制関連機関から反映の意向、中国・インドでも安全設計に反映の意向**
- 高速炉開発国の規制機関やIAEAによるレビューが進展
- OECD/NEA委員会で**世界の規制機関による議論本格化**

### <SDC/SDGの位置づけ>

基本的安全原則（例：深層防護、ALARAの原則等）



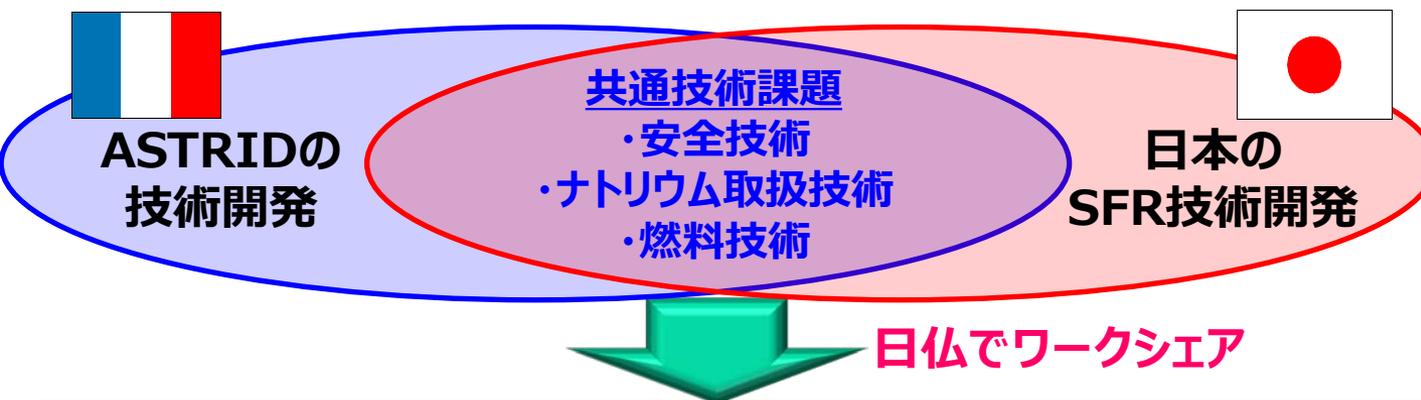
一般的安全設計クライテリア

SDCを設計に展開するためのガイド  
特定系統・機器設計の推奨事項

**国際的な共通化・調和の  
推進を目指す**

各国毎の規格・基準（ASME、JSME、民間規格等）

- ◎ **日仏首脳同士の合意**に基づきASTRID開発プロジェクトへ参加（2014年5月に政府間の取決め、2014年8月に仏CEA・AREVAと実施機関間取決めを締結）
- ◎ シビアアクシデント対策の**安全設計の考え方を日仏で共有化し、我が国の設計技術をASTRIDに活かす**とともに、その知見を**我が国の安全系統・機器設計に反映**



政府間取決め締結

## ＜これまでの成果＞

- **シビアアクシデント対策を中心とした安全性向上策の設計・R&Dを実施**
  - **設計（強制循環方式崩壊熱除去系、キュリー点電磁石方式自己作動型炉停止、免震技術）**
  - **R&D（燃料分野[7課題]、S A分野[9課題]、炉技術分野[10課題]）**
- 設計及びそれに関連する検討成果は、**我が国のSFRの崩壊熱除去系、受動的炉停止機構、免震装置の設計に直接反映可能**
- R&D協力では、**日仏双方の知見を持ち寄りデータ拡充、及び作業分担により進捗**

● **高速炉サイクルによる廃棄物減容・有害度低減の技術見通し**を得るためには、**Pu利用柔軟性向上、MA分離・変換関連サイクル技術等の確認**が必要



CPF

**再処理 :**

- MA分離プロセスの開発と性能評価
- 実現可能なプロセス概念の構築

**全体システム評価 :**

- 各分野の情報の統合と有望なシステム概念の絞り込み
- 廃棄物減容化・有害度低減の効果の確認



もんじゅ

使用済  
MOX燃料

再処理

U, Pu, MA



Pu-3

高速炉サイクル  
による廃棄物  
減容等の評価

高速炉

燃料製造

**燃料製造 :**

- MA含有MOX燃料の遠隔製造技術の開発
- 対応可能な燃料組成範囲の判断

MA含有MOX  
新燃料

**炉特性・炉システム :**

- 高速炉プラント技術の成立性確認
- MA含有炉心の特性取得



常陽

**燃料開発及び照射試験 :**

- MA含有MOX燃料、高Pu富化度MOX燃料等の系統的な照射試験



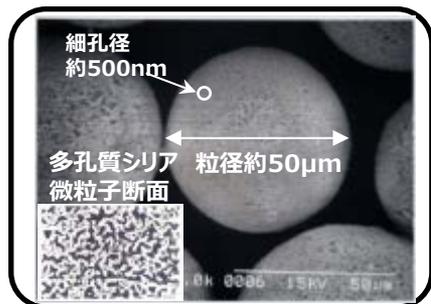
FMF



AGF

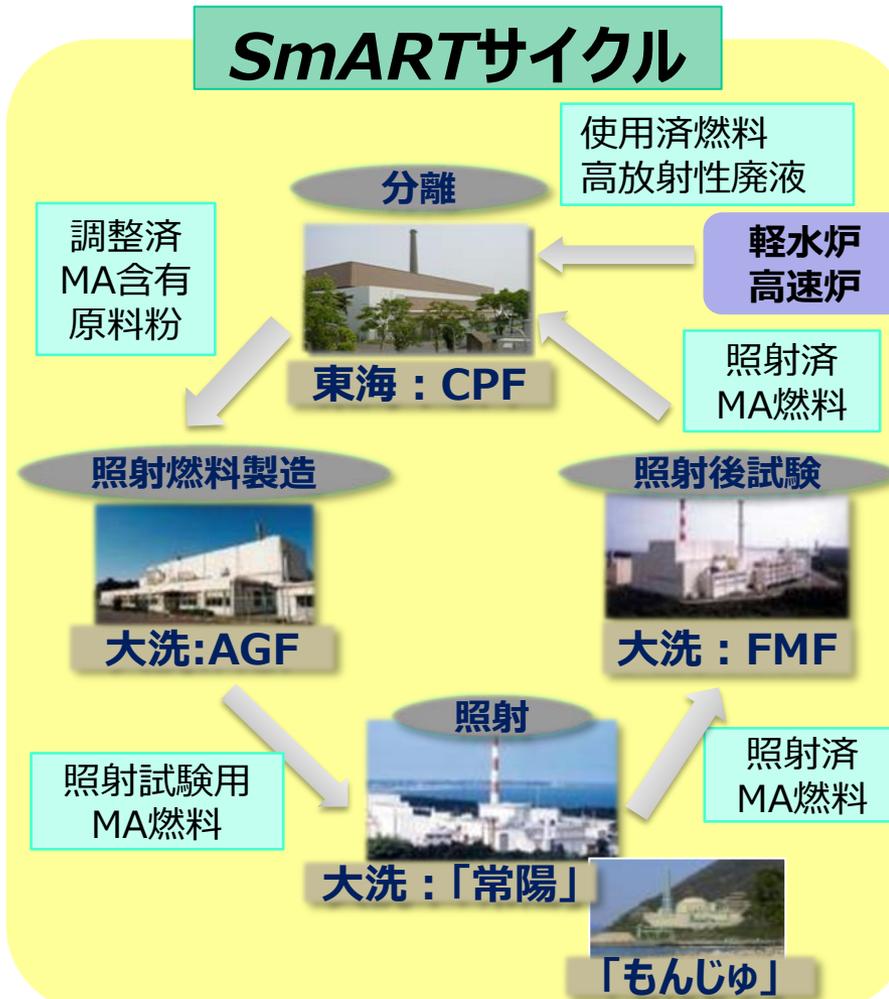
● 使用済燃料からのMAについて、分離・回収転換、燃料製造、照射、照射後試験までの一連の試験を既存施設を用いて進める

## 廃棄物となる廃液からMAを分離

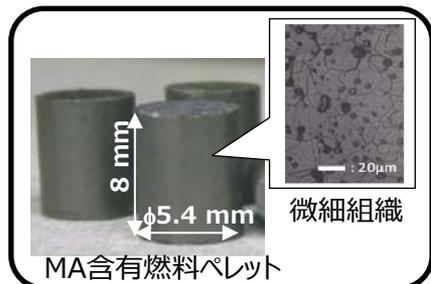


高レベル放射性廃液に含まれるMAの99.9%以上を吸着分離することに成功

## SmARTサイクル

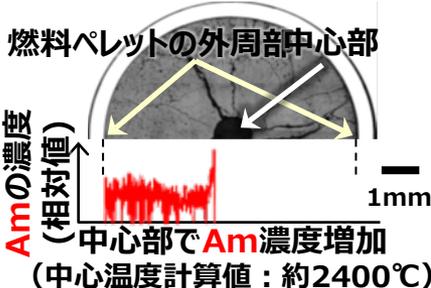


## MAを含有する燃料ペレットを製造



燃料製造技術の高度化  
 → 微細組織、酸素含有量の制御  
 → 基礎データ取得と製造条件最適化技術開発

## MA含有燃料の2000℃以上の照射試験



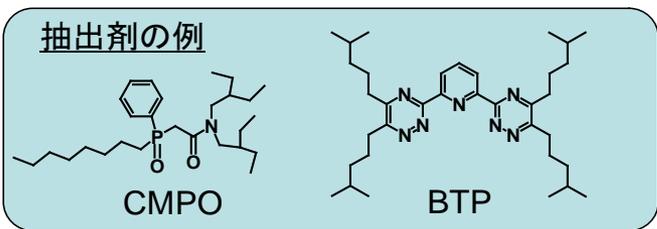
MAの燃料性能に及ぼす影響評価が不可欠  
 → 照射中のMA再分布挙動の物性(融点など)への影響を評価

(MA:マイナーアクチノイド, Am:アメリシウム, Cm:キュリウム)

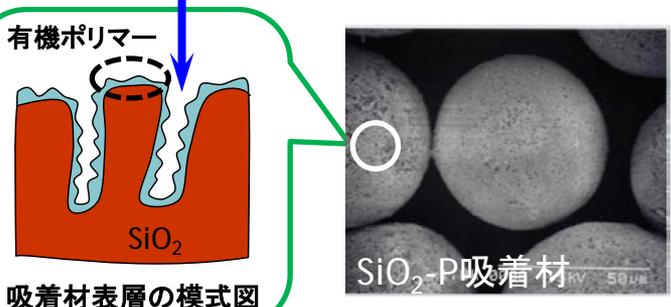
原子力機構が開発している抽出クロマトグラフィ法により、実際の高レベル放射性廃液からMAを分離回収できることを実証し、基礎的な技術見通しを得た。

## 抽出クロマトグラフィ法

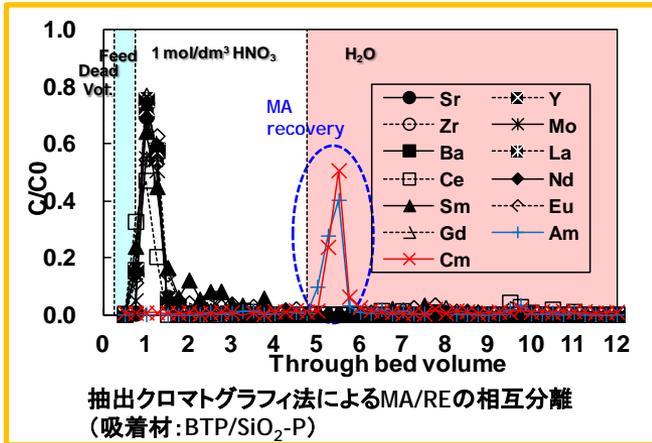
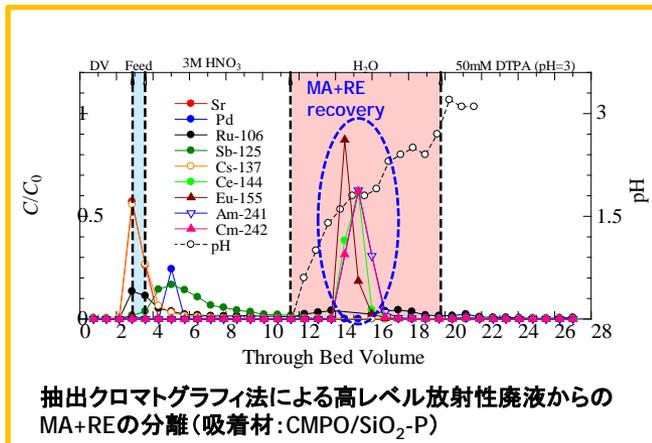
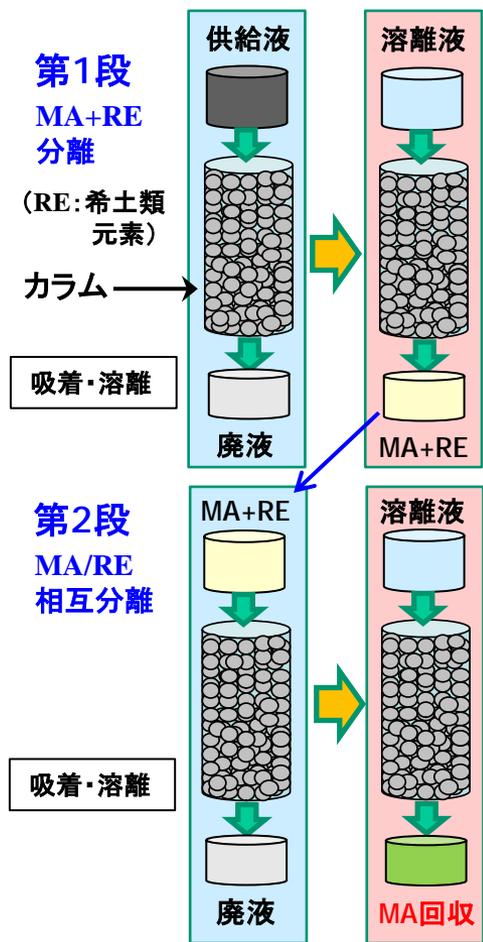
抽出剤を含浸させた吸着材(固体)を詰めたカラムにMAを含む溶液等を流し、MAを分離回収する技術  
 利点: 二次廃棄物が少ない、設備がコンパクトなど



抽出剤を含浸  
 SiO<sub>2</sub>-P吸着材: 多孔質シリカ(SiO<sub>2</sub>)に有機ポリマー(スチレンジビニルベンゼン)を被覆し、抽出剤を含浸させる。



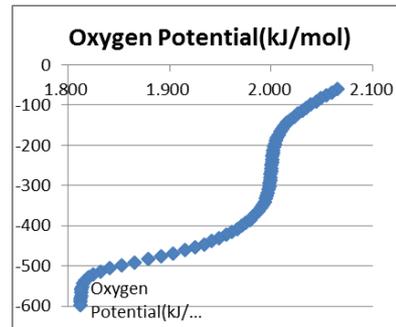
粒径40-60μm, 細孔径500-600nm



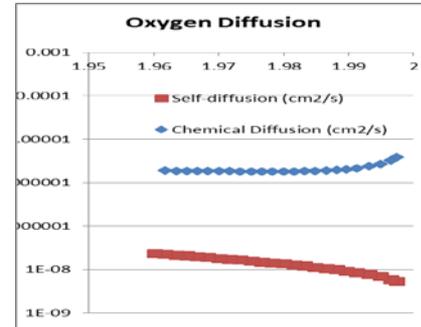
高レベル放射性廃液からのMAの分離回収結果  
 (2段階によるMA分離)

MA含有燃料の基礎物性データ取得・物性関係式作成により、MA含有燃料中の酸素量を製造過程で制御する技術について、基礎的な見通しを得ている。

- ◆ MA含有MOX燃料の物性測定及びデータベース、機構論的な物性関係式の構築により統一的物性モデルを導出
- ◆ 物性関係式を用いた製造プロセス及び照射条件下の燃料挙動モデルの開発



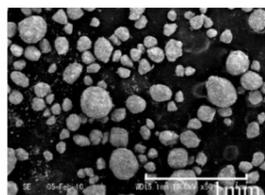
化学的安定性評価



酸素拡散係数評価

物性関係式による計算例

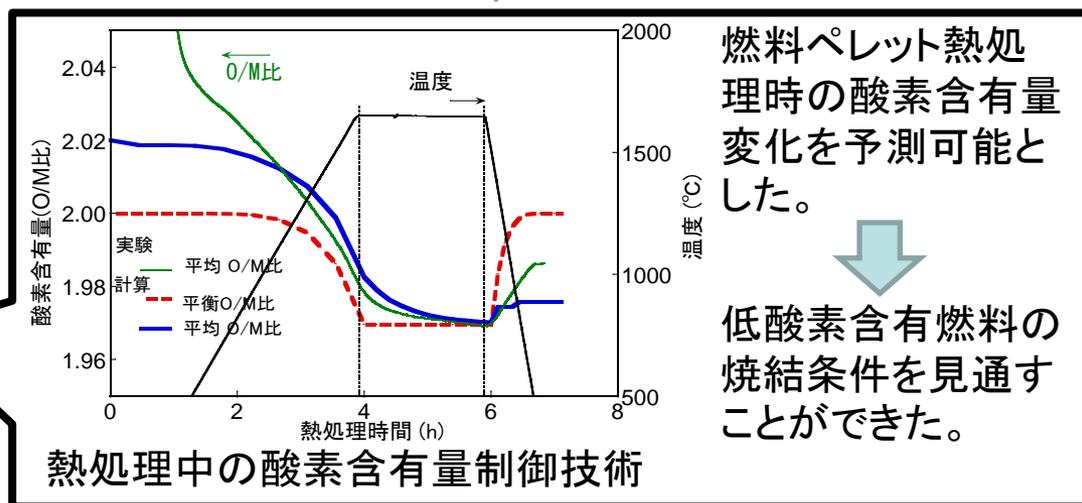
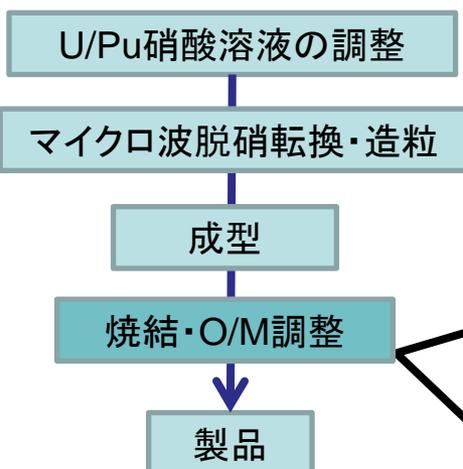
熱処理条件の評価に適用



転動造粒MOX粉



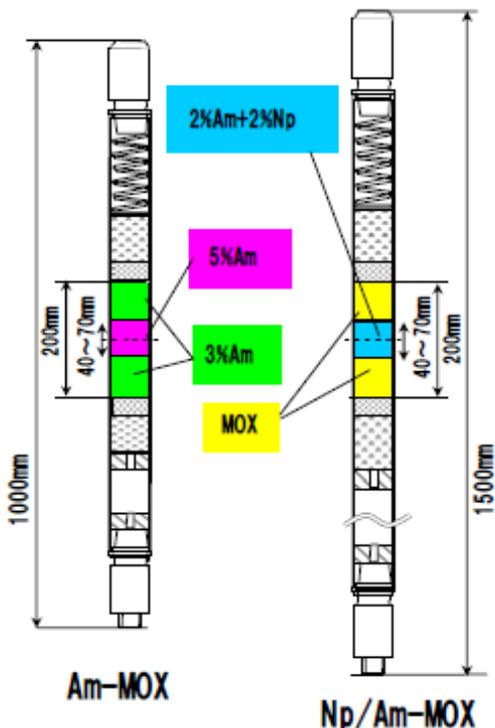
焼結MOXペレット



熱処理中の酸素含有量制御技術

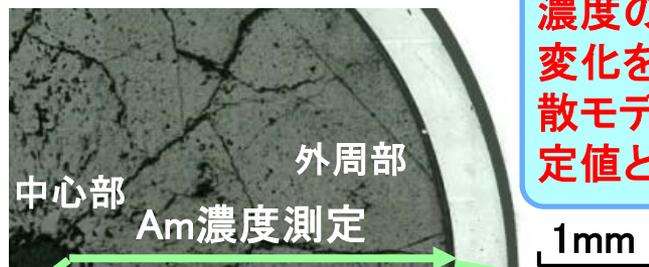
MA含有燃料の「常陽」での照射試験において照射により燃料中心部のMA(Am)濃度が少し増加するデータを取得した。この現象をコンピューターで再現する解析モデルを開発した。

## MA含有燃料の高線出力短期照射試験

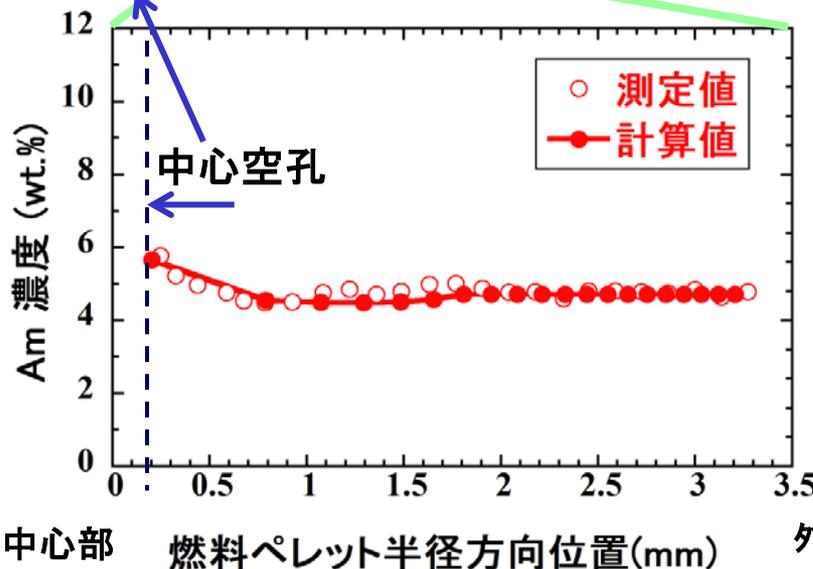


- 照射燃料のMA含有率  
Am: ~5wt% / Np: ~2wt%
- 照射条件(線出力/照射時間)  
~450W/cm / ~24hr

## 照射後燃料ペレット組織



照射による燃料内Am濃度の径方向分布の変化を気相・固相の拡散モデルで計算し、測定値と比較

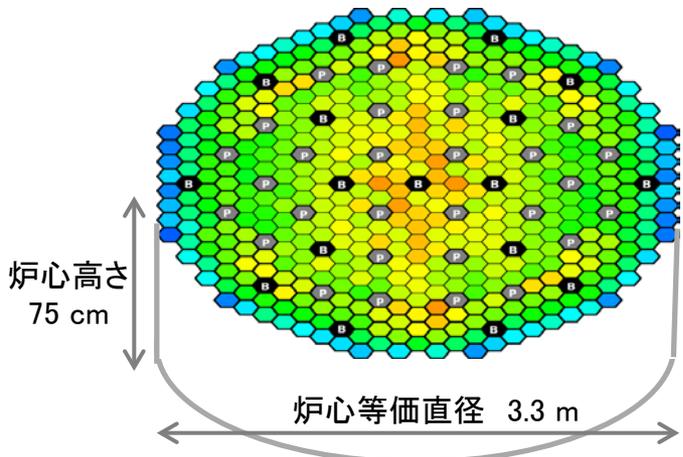
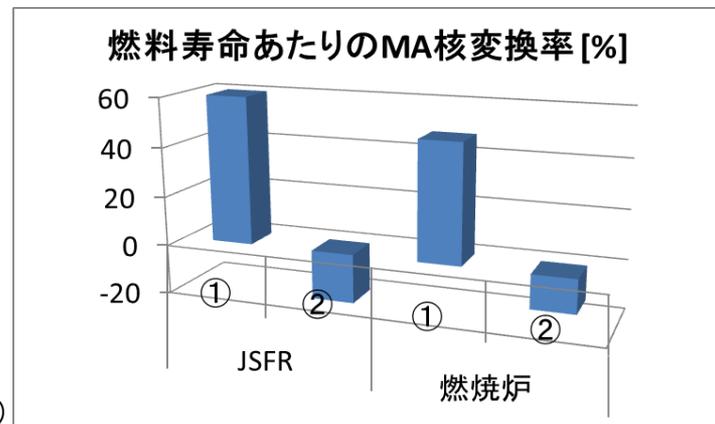
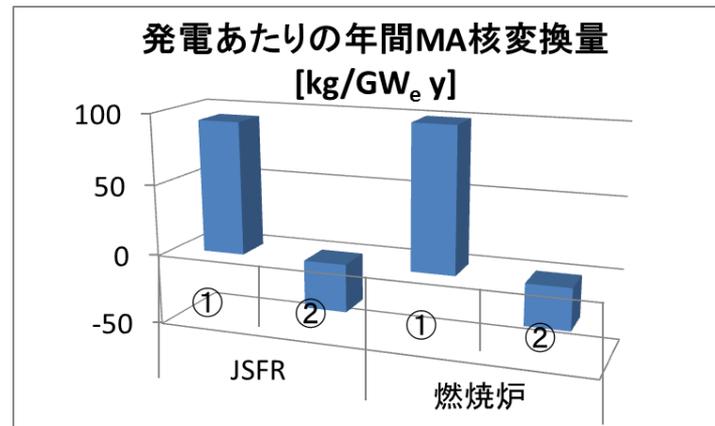


Am径方向濃度分布(測定値vs計算値)

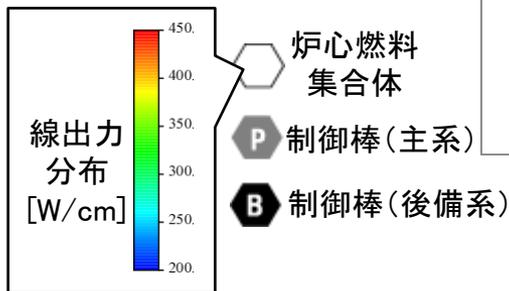
MAの核変換を行う高速炉の炉心概念を構築した。開発中の高燃焼度燃料が実現できれば、燃料製造時に含有したMAは燃料交換までに50~60%を核変換できる。

## MAの核変換を行う高速炉の基本特性

項目	JSFR (増殖炉)	Pu・MA燃焼炉 検討例
電気出力 [MWe]	1500	750
増殖比(転換比)	1.1	0.58
炉心高さ [cm]	100	75
燃料ピン径 [mm]	10.4	6.5
燃料寿命 [EFPD]	3200	1295
燃焼度 [GWd/t]	146	151
MA含有率(MA/HM) [wt%]	3.0	4.6



## Pu・MA燃焼炉の炉心配置



① 最初に装荷したMAの核変換  
② 炉内生成MA

MA変換率を現状技術の2倍にできる長寿命の燃料ピン被覆管(ODS被覆管)を開発している。品質の優れたODS被覆管を製造する技術の基本的な見通しを得ている。

## ● 酸化物分散強化型(ODS)鋼被覆管

### ✓ 優れた耐照射性(耐スエリング性等)

- 高燃焼度化によるMA燃焼の効率化/燃料費の低減

### ✓ 高温での優れた強度

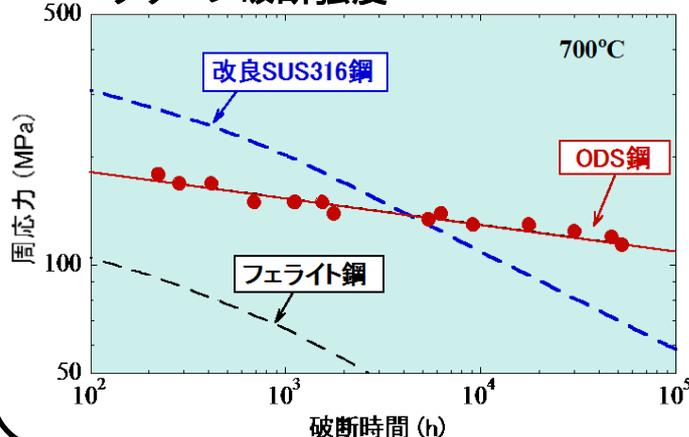
- 燃料破損耐性の向上 → 長寿命化、安全性の向上
- 冷却材の高出口温度化による発電効率の向上

⇒ 廃棄物減容・有害度の低減、安全・経済性の向上

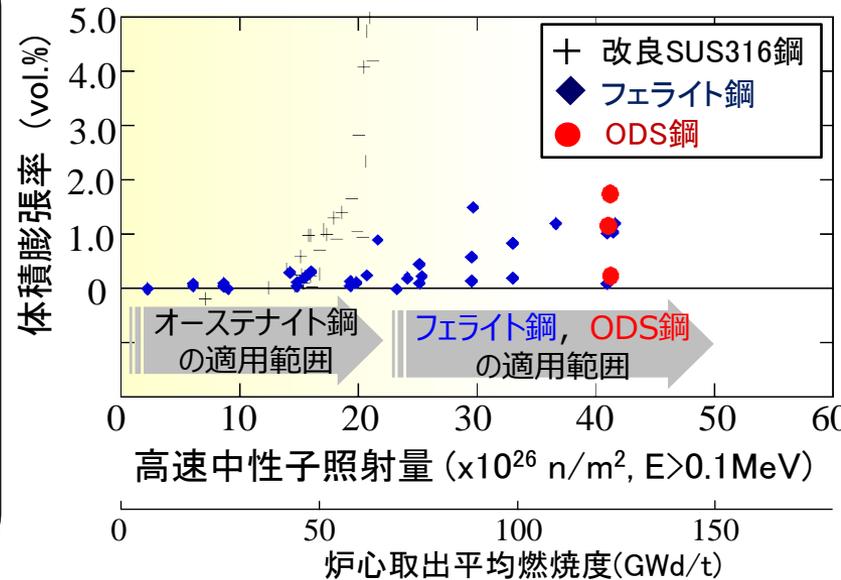
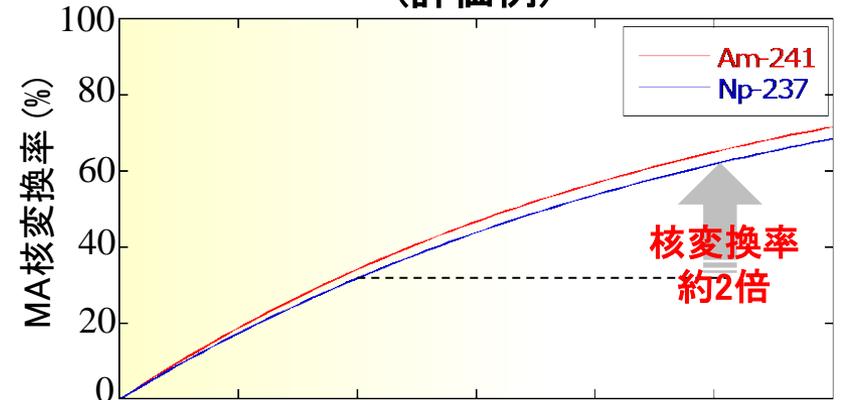
## ● 近年の成果: 品質安定化技術開発

⇒ 高強度の被覆管を安定的に製造可能な技術を確立。

### クリープ破断強度



## MA核変換率と燃焼度、照射量の関係 (評価例)



実際の照射済燃料中のMAを回収し世界で初めて「常陽」で燃焼する計画を推進中。MA量1g以上を回収するためのMA含有廃液の調製を完了した。

### 照射済燃料からの少量MAを原料としたサイクル研究

#### 【本研究の狙い】

- MAを中心とした分離変換データの取得及びサイクル成立性の小規模実証



本研究で得られる照射挙動データは世界初

### 【SmARTサイクル研究の意義】

- ・分離回収/製造プロセスへのFPの影響
- ・TRU(超ウラン元素)の燃焼核変換への同位体効果
- ・サイクルとしてのTRUバランスの評価

### 【MA取扱量】

上記の成果を得るために、**1g程度のMA**を常陽照射済燃料ピン4本から分離回収



照射済燃料からの回収量としては、現状、世界トップクラス

### 【進捗状況】

- サイクル研究は常陽照射済燃料からのMA等の分離作業の段階
- これまでに、照射済燃料からのMA分離に必要な前処理(せん断・溶解・抽出)を完了
- 今後、MAの分離回収を実施予定



照射燃料試験施設(大洗)

燃料製造



常陽(大洗)

照射



照射後試験

軽水炉、高速炉

脱硝、転換

照射済燃料

分離



高レベル放射性物質研究施設(東海)

- 実験装置のトラブルの復旧作業を終了し、**通常状態に復旧**
- **平成28年度に設置変更許可を申請予定**
- 再稼働後は、**放射性廃棄物減容化・有害度低減**、**仏国の実証炉（ASTRID）の開発協力に関する照射試験**等を予定

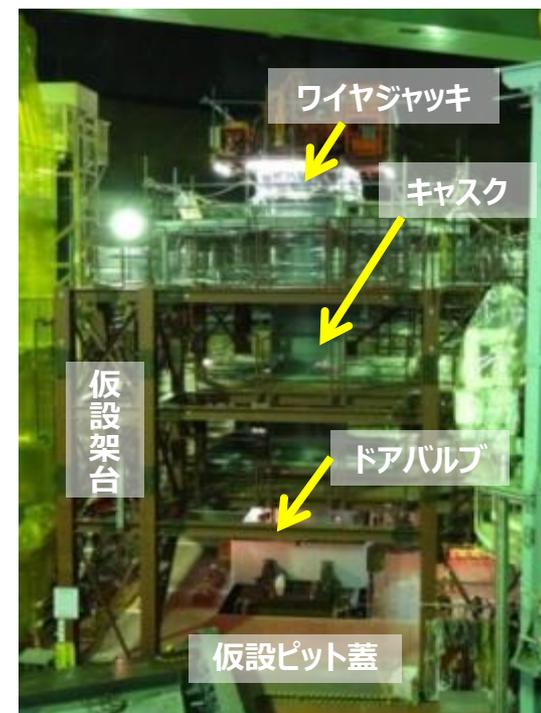
## ◆ 実験装置のトラブルの復旧作業を終了

炉容器内【高放射線（最大300Gy/h）、  
高温（約200℃）】の観察・補修技術開発

- 高耐放射線性ファイバースコープ等による炉内観察
- 大型炉内構造物（炉心上部機構約16.5 t）の交換
- 遠隔装置による実験装置の回収



- H26年5～11月：**炉心上部機構の交換、実験装置の回収を完了**
- H27年6月：作業に伴い取り外した機器の再設置を完了。**通常状態に復旧**



炉心上部機構の引抜作業

- 高速炉サイクルの実用化に向けた政策が具体化される時点で以下の成果が提示できるよう研究開発を着実に推進
  - 【研究インフラの整備】
    - 「もんじゅ」、「常陽」等の試験施設の早期整備と再稼働
    - 「もんじゅ」、「常陽」、核燃料サイクル施設等を使った高速炉サイクル技術を支える人材と技術基盤の整備・蓄積
  - 【研究開発】
    - 福島第一原発事故を踏まえた安全性強化策を反映した革新技术の技術的成立性の確認
    - 国際的な安全設計要件を取り込んだ高速炉リファレンスプラント概念の構築
    - 廃棄物減容・有害度低減の技術的成立性の見通し
    - 実用化までの道筋（技術ロードマップ）の提示 等
- 政策具体化に当たっては、ステークホルダーとの対話・情報共有を進め、研究開発の方向性に反映
- その為にも、人材育成・技術継承を具体的に実行するとともに、速やかに新規制基準対応を実施して安全を最優先して試験施設を操業