

# 高速炉サイクル確立に向けた 研究開発の現状と今後について

平成27年12月1日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
中村 博文

## 報告内容

- ◆ 震災を契機とした高速炉サイクル研究開発の変遷
- ◆ FaCTフェーズ I 成果の概要
- ◆ 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
  - 核燃料サイクルに係る再処理、燃料製造及び  
放射性廃棄物処理処分研究開発
- ◆ 高速炉サイクル研究開発の向うべき方向

## 報告内容

- ◆ 震災を契機とした高速炉サイクル研究開発の変遷
- ◆ FaCTフェーズ I 成果の概要
- ◆ 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
  - 核燃料サイクルに係る再処理、燃料製造及び  
放射性廃棄物処理処分研究開発
- ◆ 高速炉サイクル研究開発の向うべき方向

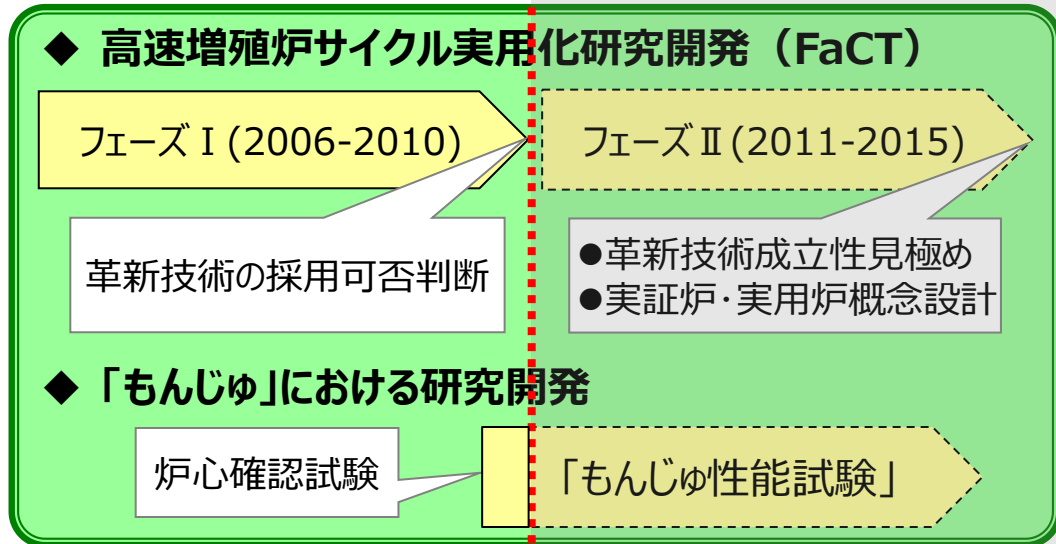
- ◆ 高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)フェーズ I 成果取りまとめ (2011年3月末)
- ◆ エネルギー・原子力政策の見直しを踏まえ、FaCTフェーズ II への移行を見送り (2011年)
- ◆ エネルギー基本計画 (2014年4月) を踏まえ、当面はもんじゅ研究計画を中心に推進

▼ 2011年3月11日 (東日本大震災)

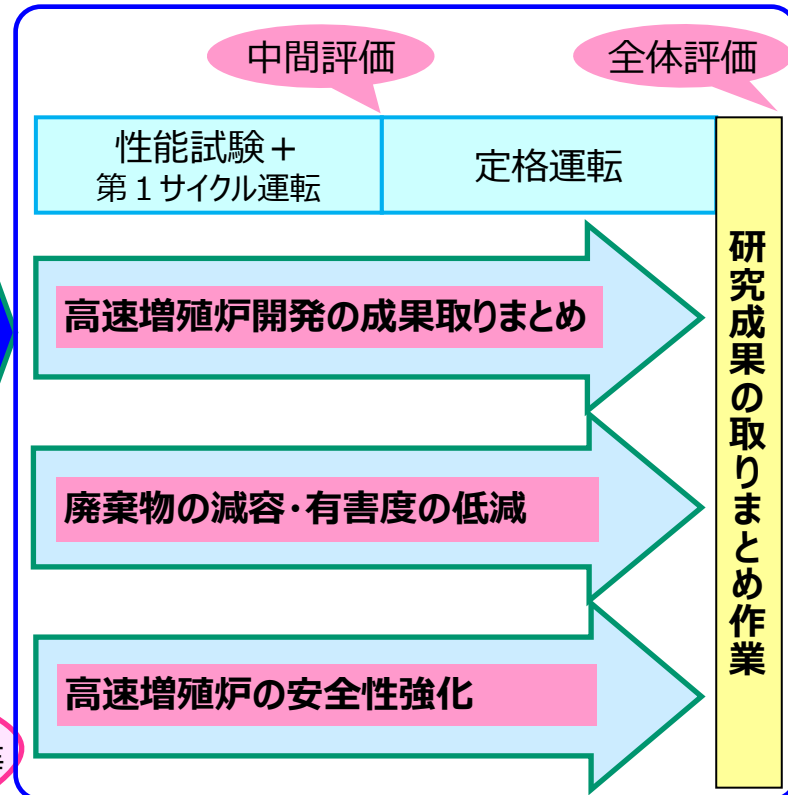


もんじゅ研究計画(2013年9月)

※ フェーズ II 移行、性能試験見送り



- ◆ 技術基盤の維持
- ◆ 安全性向上等に係る取組
- ◆ 保守管理上の不備に係る取組等



## 報告内容

- ◆ 震災を契機とした高速炉サイクル研究開発の変遷
- ◆ **FaCTフェーズ I 成果の概要**
- ◆ 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
  - 核燃料サイクルに係る再処理、燃料製造及び  
放射性廃棄物処理処分研究開発
- ◆ 高速炉サイクル研究開発の向うべき方向

## <炉システム>

- ◆ プラントに組込んだ設計成立性やシステムの機能達成の視点から**实用施設への採用を目指す革新技術（10課題）の採否可能性等を判断し、ステークホルダも合意**
- ◆ **実証炉の概念設計に移行可能な段階⇒フェーズII（5年）を経れば実証炉の基本設計段階**

## <再処理システム・燃料製造システム>

- ◆ **实用施設への採用を目指す革新技術（再処理：6課題、燃料製造：5課題）の採否可能性を判断し、ステークホルダも合意**
- ◆ **LF移行を考慮したプロセス及び工学規模装置に関する更なる基盤研究を推進する段階へ**

## <性能目標達成度評価>

- ◆ **採否判断結果を踏まえた高速増殖炉サイクルシステム概念を対象に開発目標（「安全性・信頼性」を前提とした「経済性」「持続可能性」「核不拡散性」）、設計要求に対する達成度評価を実施し、原子力委員会が示した性能目標※を概ね達成していることを確認**

※：シビアアクシデントの発生確率が十分低い、運転期間を通じた発電コストが他のエネルギー技術と競合できる、1をある程度超える増殖比の実現、Puが常にマイナーアクチニド等と混合された状態であること 等

## 報告内容

- ◆ 震災を契機とした高速炉サイクル研究開発の変遷
- ◆ FaCTフェーズ I 成果の概要
- ◆ **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
  - 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処理処分研究開発
- ◆ 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



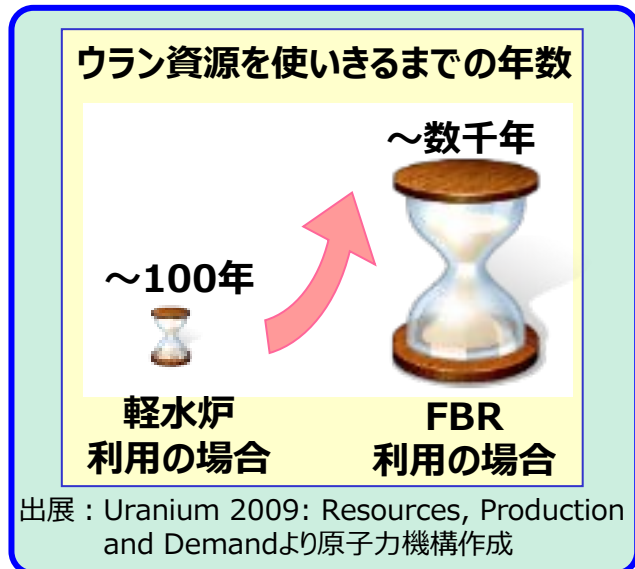
## <資源の有効利用>

- ◆ 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**

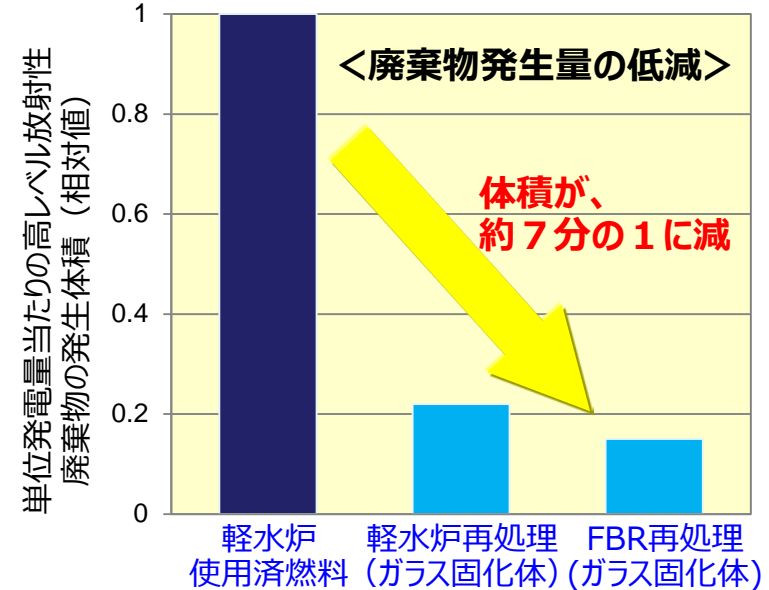
## <環境に優しい>

- ◆ 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】



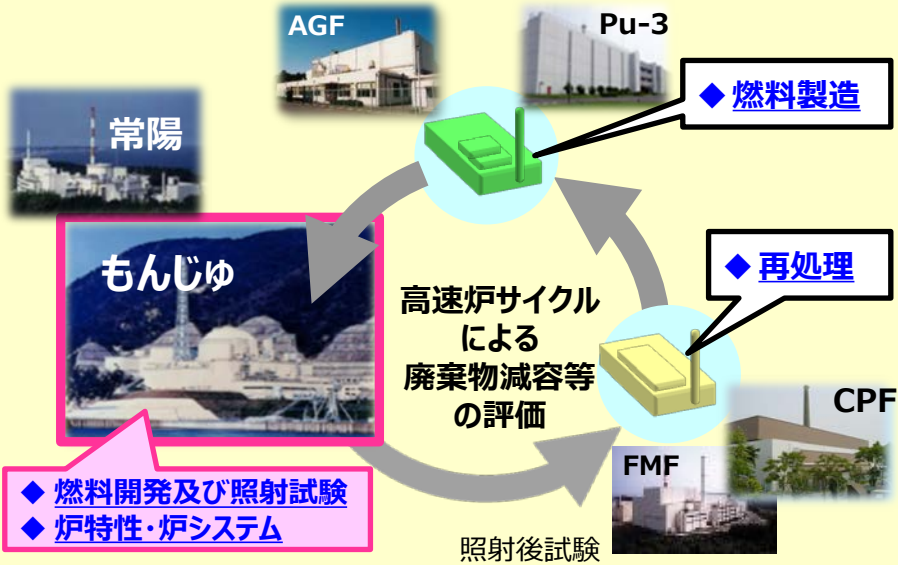
## <高速増殖炉技術の成果の取りまとめのための研究開発>

- ◆ 「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>

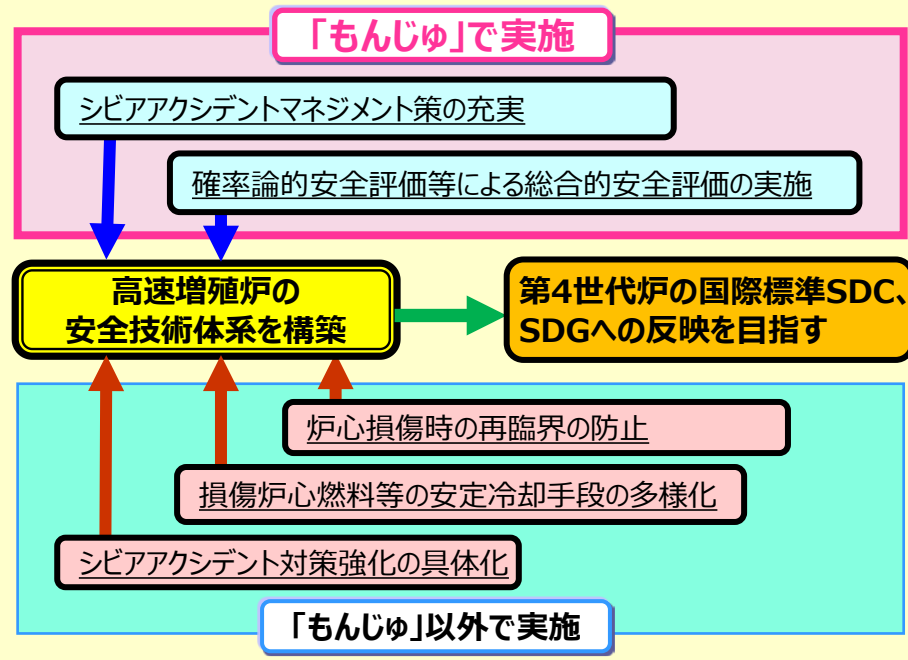
- ◆ 実際の燃料規模での試験研究が不可欠
- ◆ 燃料集合体の実規模照射試験が可能
- ◆ 炉心全体に不純物組成比以上のAm※を含む炉心特性データの取得は「もんじゅ」が世界初

※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



## 報告内容

- ◆ 震災を契機とした高速炉サイクル研究開発の変遷
- ◆ FaCTフェーズ I 成果の概要
- ◆ 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
  - 核燃料サイクルに係る再処理、燃料製造及び  
放射性廃棄物処理処分研究開発
- ◆ 高速炉サイクル研究開発の向うべき方向

◆ 「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

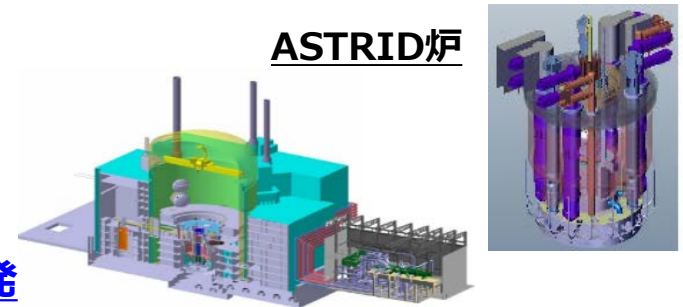
– FBR/FRの安全性強化を目指した研究開発

– 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

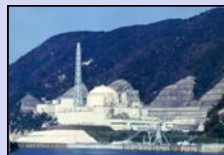
## FBR/FRの安全性強化のための研究開発

- ◆ 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＞

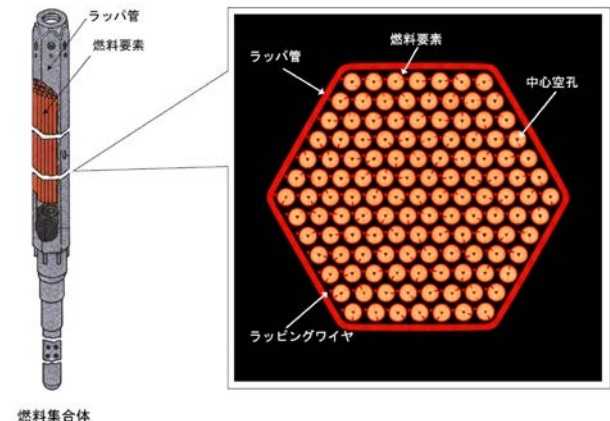
- FBR発電プラントの特徴を踏まえた **保全プログラムの構築** 等

## 【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



燃料集合体

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

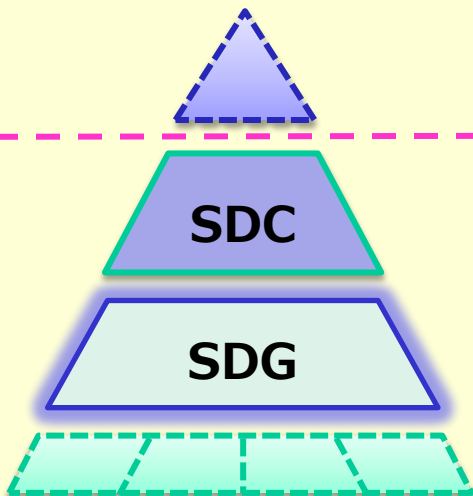
- 実用炉に向け、**安全設計の考え方**（主に設計基準事故を対象）を**国際標準化**
- **日本主導**により、**世界の高速炉の安全性向上**へ

## ◆ 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）

- ◎ プラントのライフサイクル評価に基づく合理的な設計と維持を目指した **高速炉の構造健全性をより高める規格体系を構築**
- ◎ **もんじゅの実データ**に基づく「**維持基準**」「**信頼性評価ガイドライン**」等の原案を策定
- ◎ **我が国の設計評価法が米国機械学会の規格に反映**

## <実施内容>

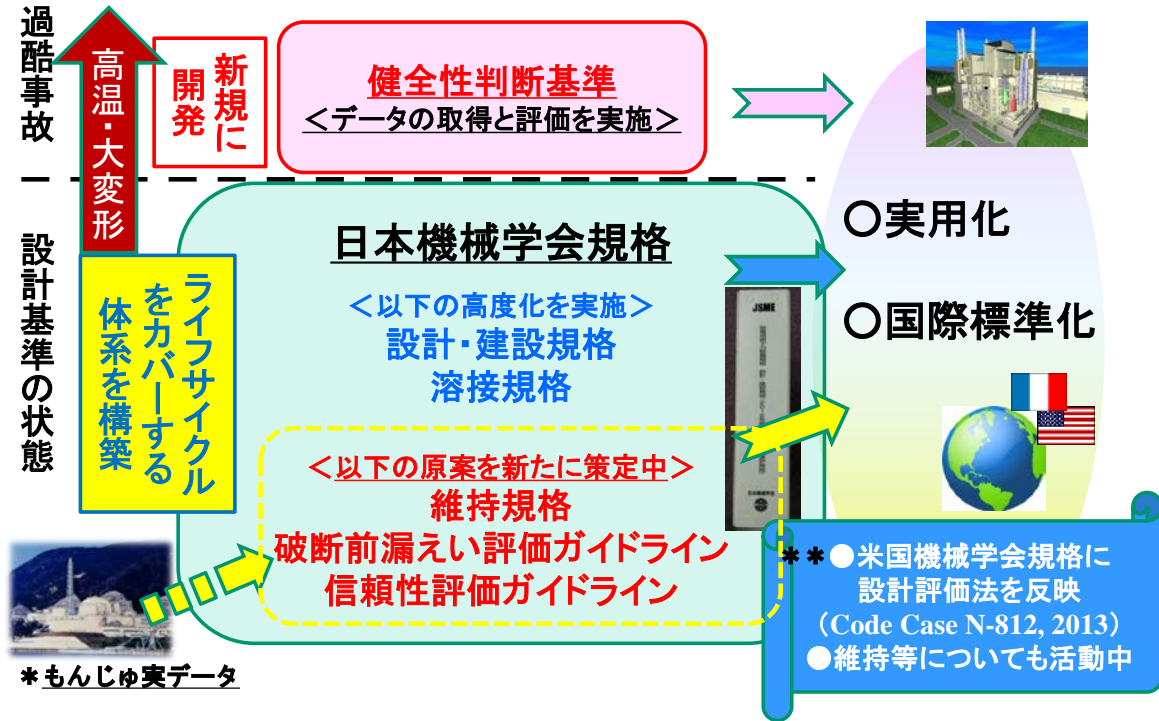
- ◆ **高速炉の規格体系を我が国独自の技術に基づき学会で整備し、その国際標準化活動を実施**

- \*もんじゅ実データに基づく高度化の推進
- \*米国規格への反映実績とさらなる活動

- ◆ **過酷事故時に想定されるより厳しい条件における健全性判断基準を開発**

## <今後の展開>

- ◆ **安全設計方針 (SDC/SDG) に整合する構造規格体系の構築**
- ◆ **ASTRID協力を踏まえた国際標準化の推進**





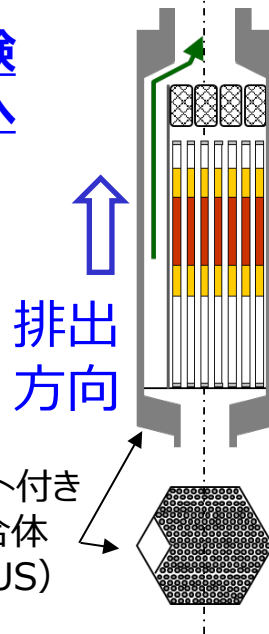
- ◎ 高速炉の過酷事故における溶融燃料の移動と冷却に係る現象解明を目的とした国際共同研究 (EAGLE試験) をカザフスタン共和国国立原子力センターと実施
- ◎ EAGLE-1,2では再臨界回避のための早期燃料排出機構を開発
- ◎ EAGLE-3では炉心損傷後の制御棒案内管からの流下に関する長期冷却性を確認

## □ これまでのEAGLE-1, 2 (2000~2011)

実燃料(UO<sub>2</sub>)による炉内溶融試験を実施し、溶融燃料を炉心領域外へ排出するメカニズムを確認



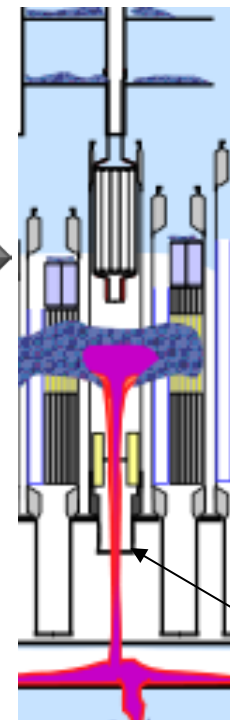
カザフスタン共和国  
IGR (Impulse  
Graphite Reactor)



日仏協力により両者で  
解析手法を検証中

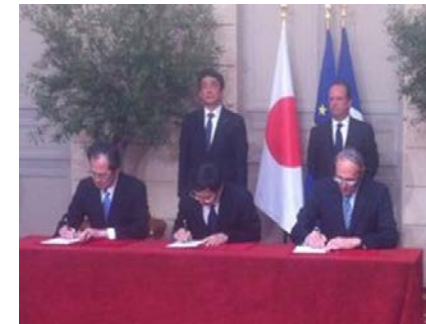
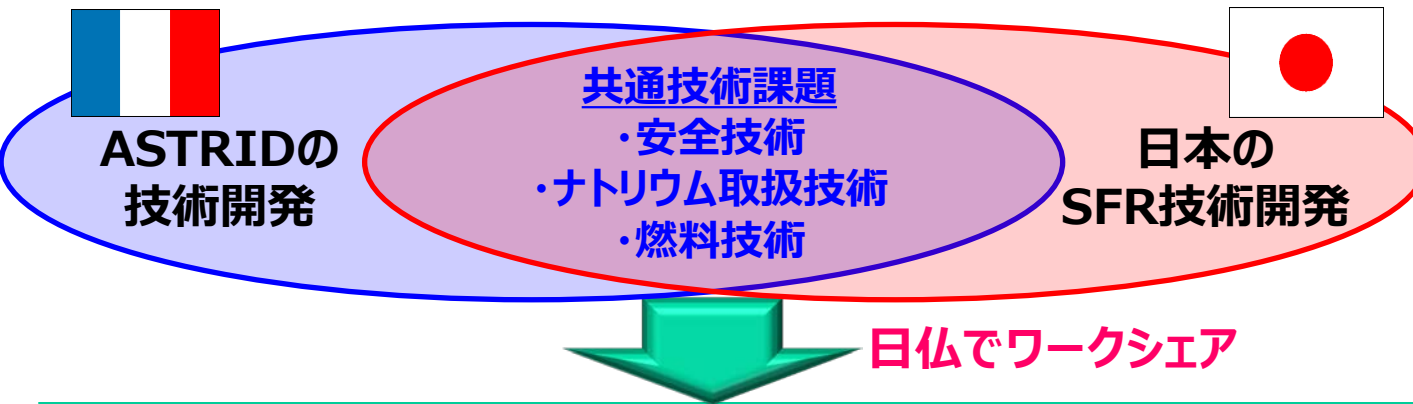
## □ EAGLE-3 (2015~)

崩壊熱による溶融燃料の制御棒案内管を通じた燃料排出挙動を確認



溶融燃料の炉容器内  
保持を確認

- ◎ **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

## 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



## 燃料製造：

- 遠隔製造技術の開発
- 対応可能な燃料組成範囲の判断



常陽



Pu富化度  
MA濃度

燃料製造

高速炉サイクル  
による  
廃棄物減容等  
の評価

高速炉

燃焼率

再処理

除染率  
回収率

## 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

## 炉特性・炉システム：

- 高速炉プラント技術の成り立ち確認
- MA含有炉心の特性取得

もんじゅ



## 全体システム評価：

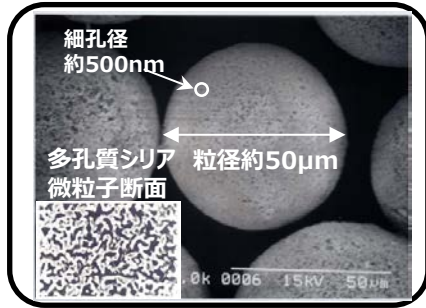
- 各分野の情報の統合と有望なシステム概念の絞り込み
- 廃棄物減容化・有害度低減の効果の確認



(MA：マイナーアクチニド)

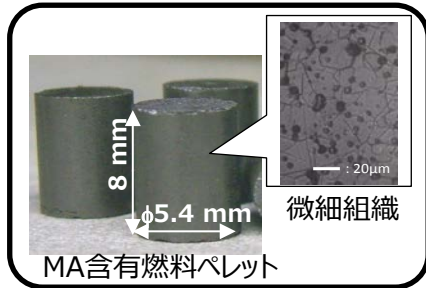
◎ **使用済燃料からのMAについて、分離・回収転換、燃料製造、照射、照射後試験までの一連の試験**を既存施設を用いて進める

## 廃棄物となる廃液からMAを分離



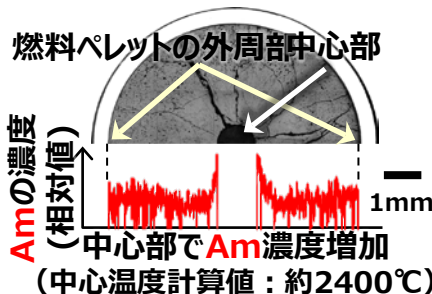
高レベル放射性廃液に含まれるMAの99.9%以上を吸着分離することに成功

## MAを含有する燃料ペレットを製造



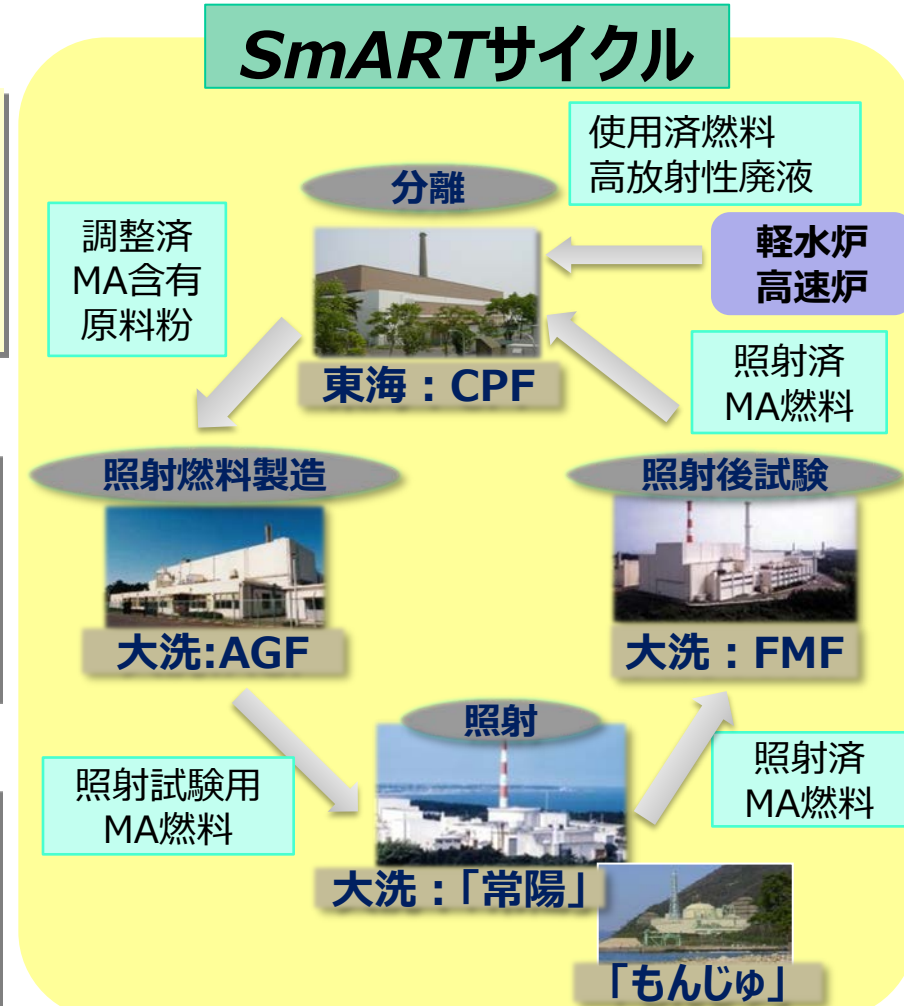
燃料製造技術の高度化  
→ 微細組織、酸素含有量の制御  
→ 基礎データ取得と製造条件最適化技術開発

## 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

## SmARTサイクル



(MA:マイナーアクチノイド, Am:アメリシウム, Cm:キュリウム)

- 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

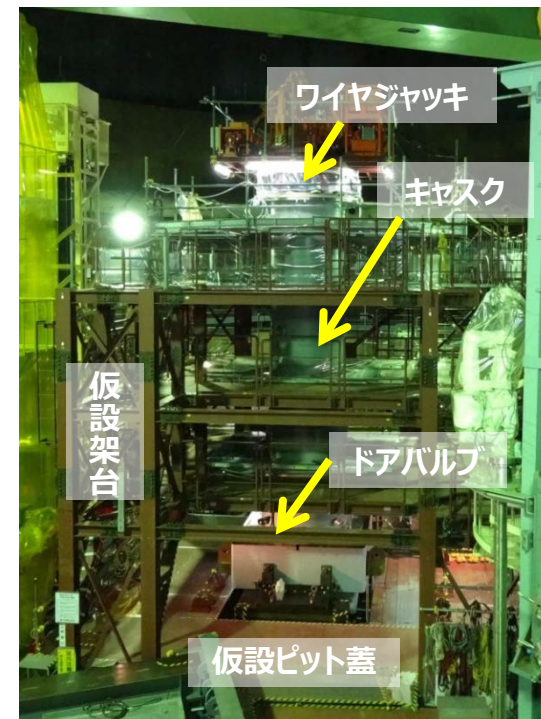
## ◆ 実験装置のトラブルの復旧作業を終了

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

## 報告内容

- ◆ 震災を契機とした高速炉サイクル研究開発の変遷
- ◆ FaCTフェーズ I 成果の概要
- ◆ 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
  - 核燃料サイクルに係る再処理、燃料製造及び  
放射性廃棄物処理処分研究開発
- ◆ 高速炉サイクル研究開発の向うべき方向

- 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