

高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減に向けた技術開発

Development of technologies for reduction in volume and toxicity of high-level radioactive wastes

(2) 高速炉サイクルにおけるチャレンジ

(2) Challenges in fast reactor cycle

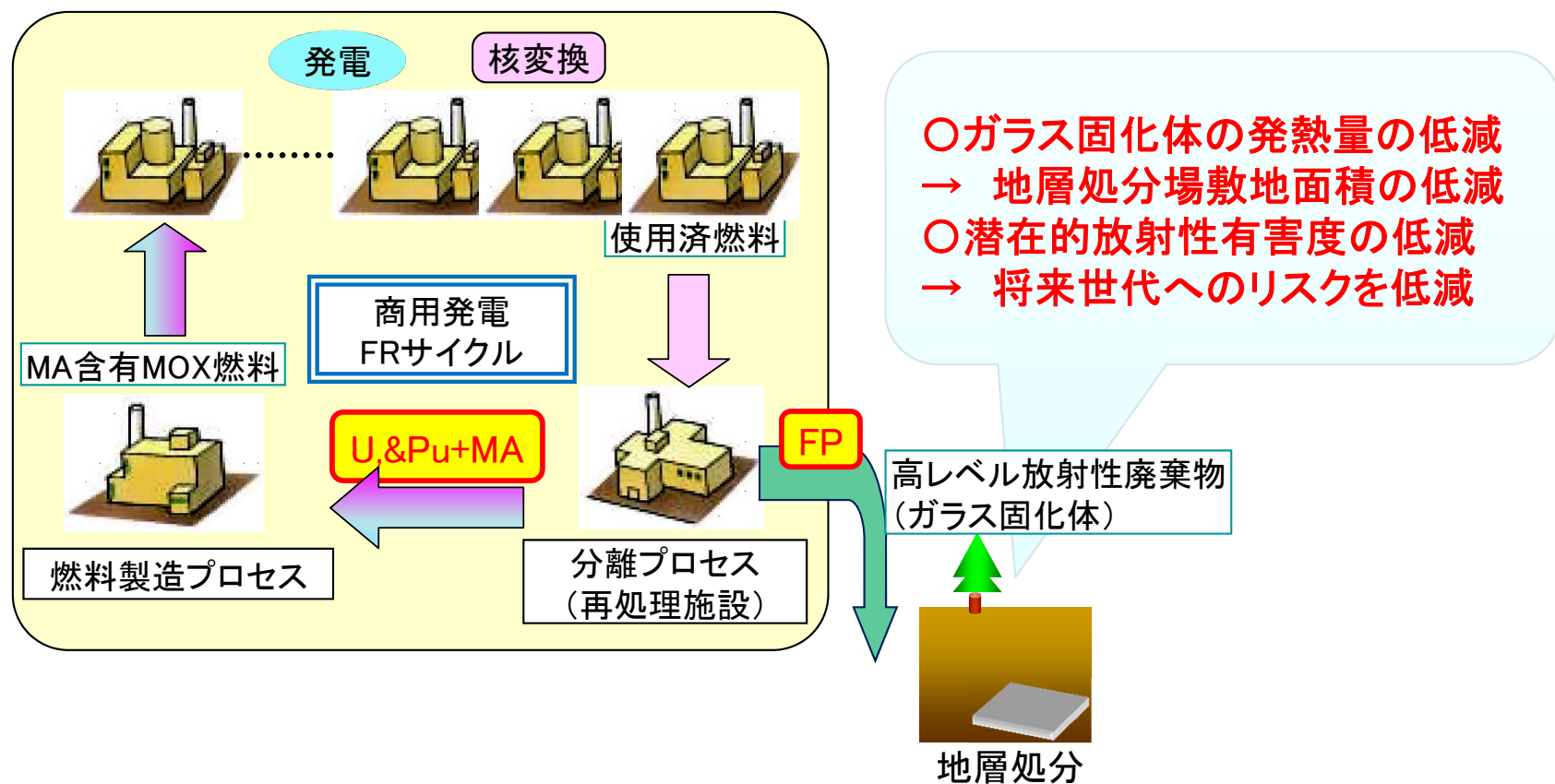
日本原子力学会 新型炉部会
企画セッション

日本原子力研究開発機構

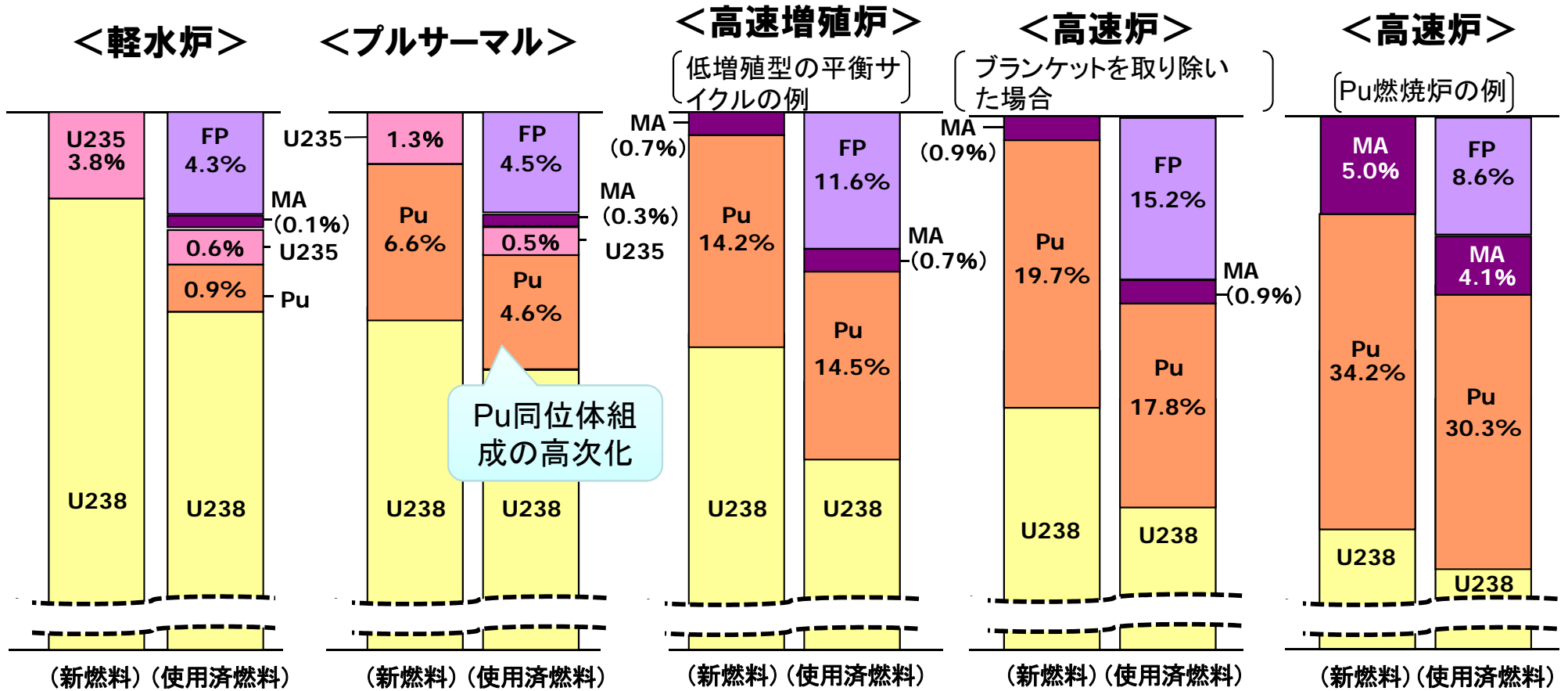
前田 誠一郎

1. はじめに: 高速炉での廃棄物減容等の特徴について
2. FaCTで構築した高速炉概念について
3. 廃棄物減容等に向けた高速炉サイクルに係るチャレンジ
 - 3.1 燃料製造技術の高度化
 - 3.2 MA含有MOX燃料の物性研究
 - 3.3 MA含有MOX燃料の照射挙動
 - 3.4 長寿命炉心材料開発
 - 3.5 MAリサイクル実証試験(SmARTサイクル)
4. 終わりに: 高速炉開発の方針等について

- **ウラン資源を究極的に利用**することを可能とする**高速炉サイクルは将来の持続可能なエネルギー源の有力な選択肢**。**ウラン及びプルトニウムのリサイクルで達成**。
- Np、Am等の**マイナーアクチノイド(MA)**を含めてリサイクルし、体系内に取り込むことで、**高レベル放射性廃棄物の発熱量、潜在的放射性有害度を低減**
- また、軽水炉サイクルから排出される高次化Pu及びMAを高濃度に装荷する場合には核変換することも可能 → **廃棄物課題の解決へ貢献**

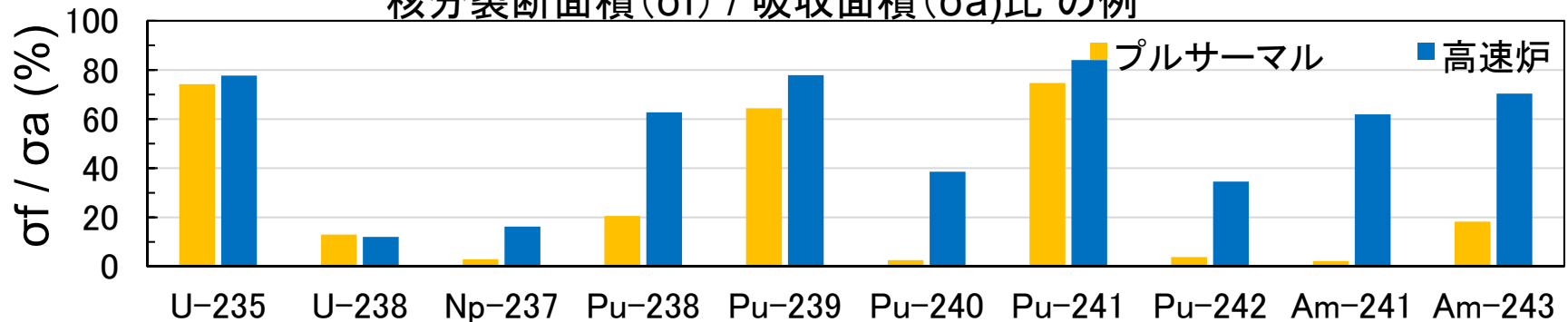


各炉型での燃料組成変化例



燃焼度: 軽水炉...45GWd/t、プルサーマル45GWd/t、高速増殖炉...115GWd/t、高速炉...150GWd/t

核分裂断面積(σ_f) / 吸収断面積(σ_a)比の例



高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT Phase 1)を通じた将来の高速炉概念の具体化



将来の基幹電源となり得る「安全性」、「経済性」、「信頼性」を有する実現可能なNa冷却型高速炉

安全性:

- 受動的な炉停止機構(制御棒の自重挿入)
- 自然循環による炉心冷却

経済性:

- 実用炉: 150万kWe級、実証炉: 75万kWe級
- 燃料の高燃焼度化: 約150GWd/t (取出平均)

環境負荷低減(高レ廃棄物減容化等):

- MA含有MOX燃料*の利用(最大MA含有率
炉心平均: 3wt%程度、局所5wt%程度)

原型炉「もんじゅ」の開発・設計・建設等を通じた成果

* ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料

- ・発電炉の炉心・燃料、機器、システムの開発及び設計技術
- ・Na機器の製作、プラント建設技術
- ・性能試験(一部)での性能検証 (Am蓄積炉心の特性確認)

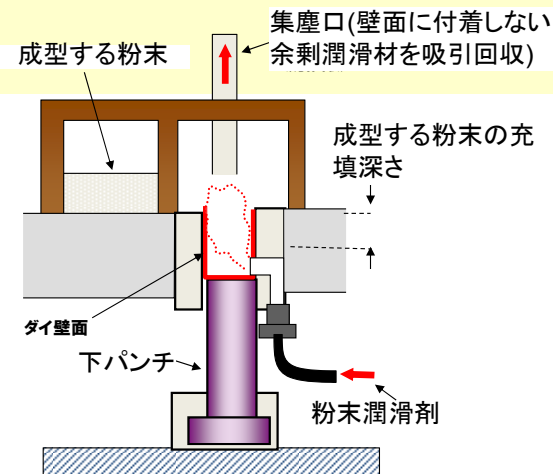
実験炉「常陽」の運転を通じた成果

- ・高速炉の炉心・燃料の基本性能の確認(増殖性、反応度特性等)
- ・Naループシステム基本性能確認(自然循環除熱等)
- ・Na機器の運転特性、保守・補修性(IHX交換、UIS交換)の確認
- ・燃料、制御棒等の照射試験を通じた開発

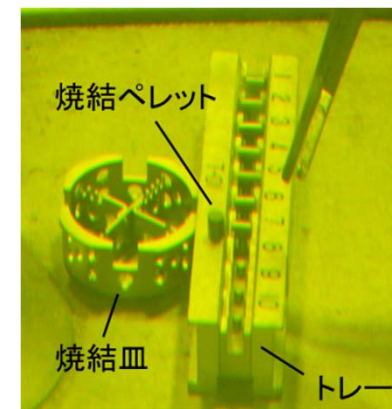


廃棄物減容化・有害度低減に向けた 高速炉サイクルに係るチャレンジ

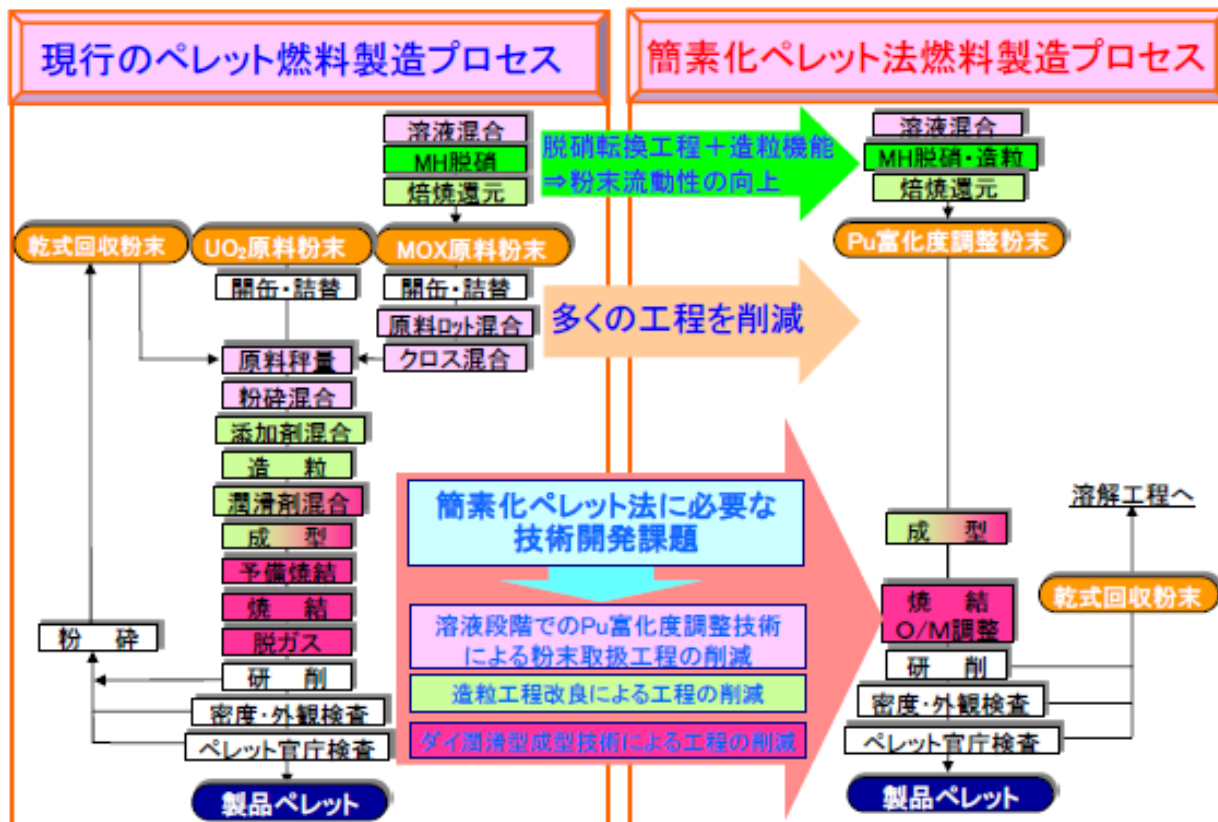
- MA含有による発熱量 & 放射線量の増加
 - ❑ 原料粉末の取り扱いを最小化した**簡素化ペレット法**の開発
 - ❑ **遠隔製造 & 保守**に係る開発
- ⇒ 可能なものから照射試験燃料製造に先行的に適用
- 並行して「常陽」の燃料製造を通じ、基盤を共有する製造技術の高度化 & 信頼性実証、量産性を確認



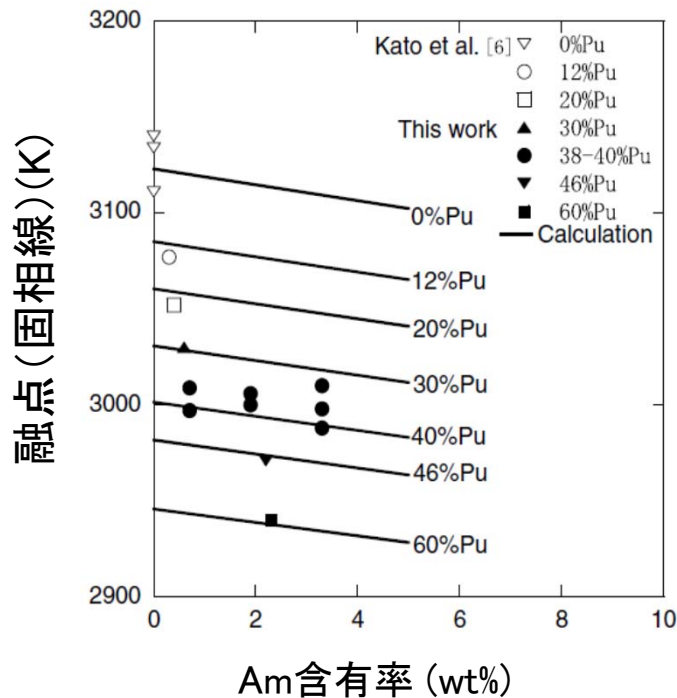
ダイ潤滑成型



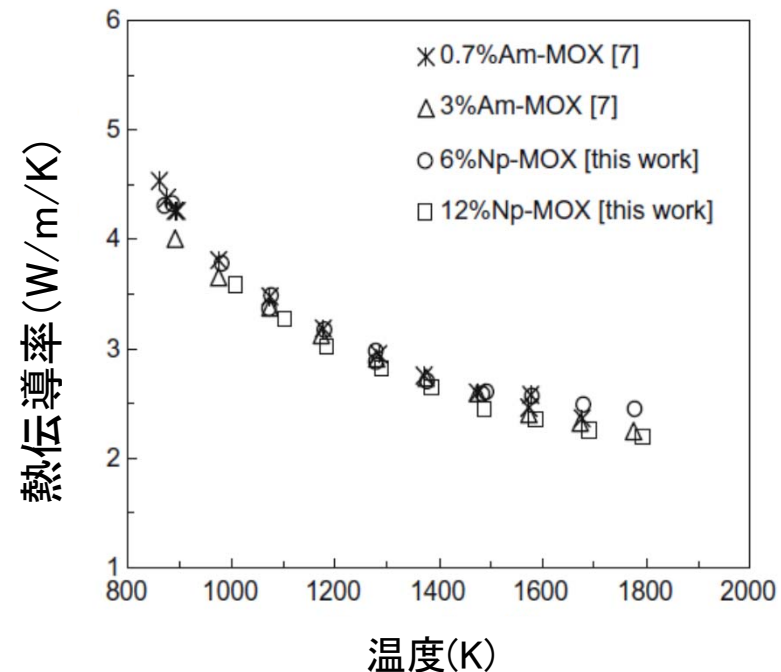
遠隔燃料製造設備を用いて試作したUO₂ペレット



- 燃料基礎物性は燃料性能に影響し、燃料の健全性評価のため不可欠な知見であり、**MA含有によるMOX燃料物性への影響を把握する必要**
- MA含有MOX燃料の基礎物性(融点、熱伝導率、酸素ポテンシャル等)を系統的に測定 ⇒ **数wt%程度のMA含有による基礎物性への影響は顕著でないことを解明**



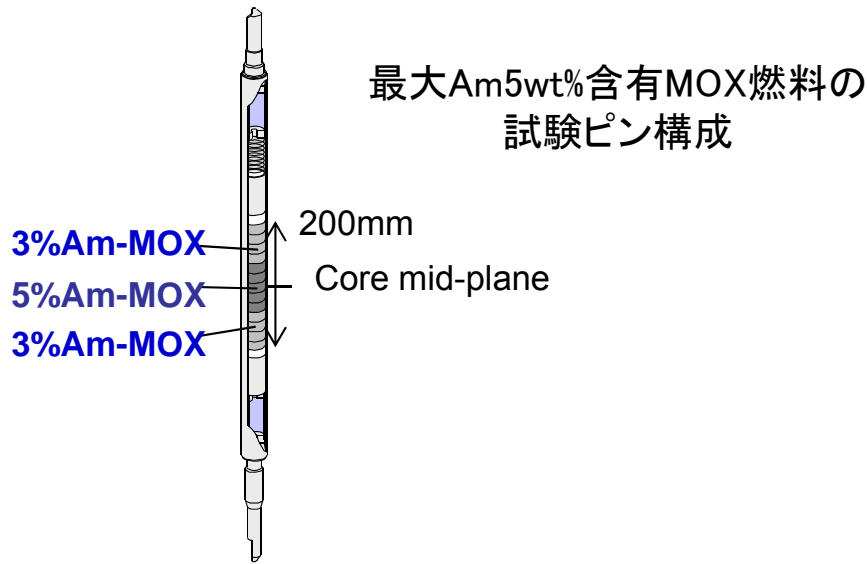
M. Kato et al. J. Nucl. Mater. 373 (2008) 237



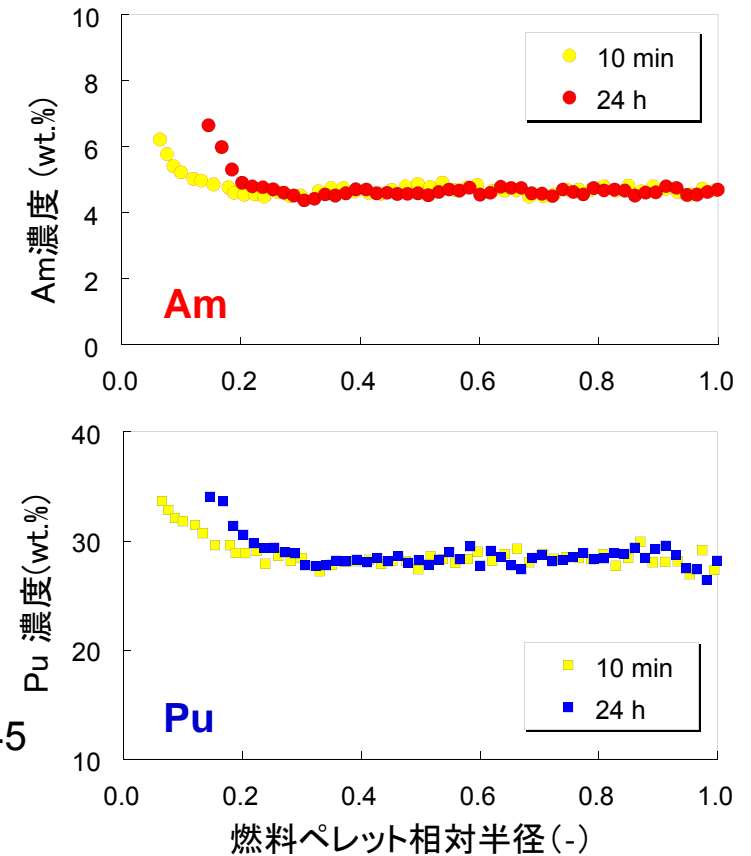
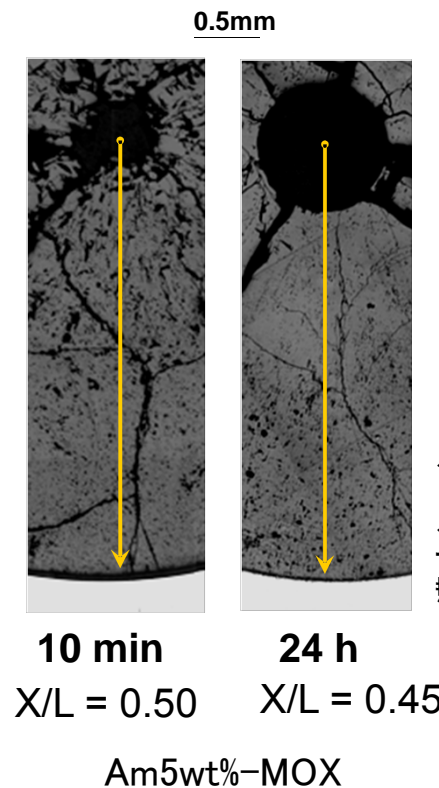
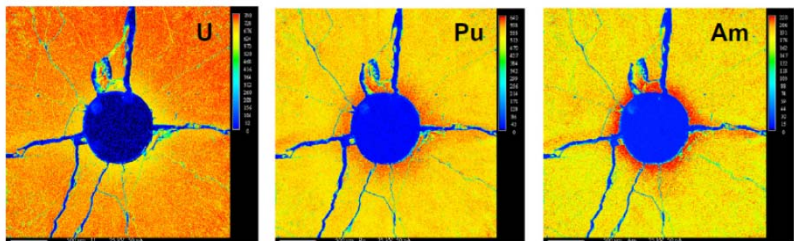
K. Morimoto et al. J. Nucl. Mater. 389 (2009) 179

- MA含有MOX燃料等について各物性値間で機構論的な関連性を持たせることによって、広範囲の燃料組成を連続的に評価可能な統一的な物性モデルの構築を目指す

- Am-1短期照射試験【 B11 】(2006年)
 - 照射燃料: Am(5wt%&3wt%)含有MOX燃料
Am(2wt%)+Np(2wt%)含有MOX燃料
 - 照射条件: LHR_{max} 430W/cm & 10min、 LHR_{max} 450W/cm & 24hr
 - 試験結果: 燃料溶融の防止を確認。典型的なペレット組織変化及びPu & Amのペレット内径方向再分布挙動を観察



EPMA分析による二次元画像 【Am:5wt%、24hr】

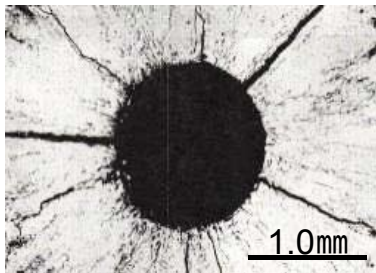


MA含有MOX燃料の照射挙動(2/2)

- Am含有MOX燃料の高線出力照射試験【 B14 】(2007年)
 - 照射燃料: Am(2.4wt%)含有低密度MOX燃料(85%TD)
O/M比(1.96~2.00), 製造時P/Cギャップ幅をパラメータ
 - 照射条件: LHR_{max} 476W/cm & 10min (48hrのプレコンディショニング)
 - 試験結果: もんじゅ設計線出力を超えても燃料溶融防止を確認
高O/M比条件、P/Cギャップ幅大で中心空孔径の拡大傾向を観察

O/M=2.00

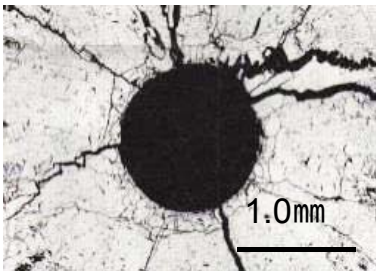
LHR=43 kW/m



直径: 1.3mm

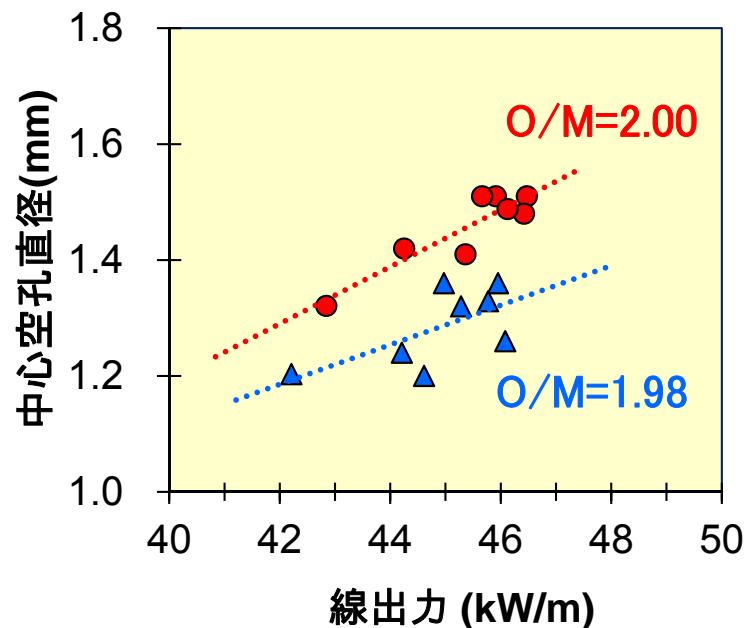
O/M=1.98

LHR=42 kW/m



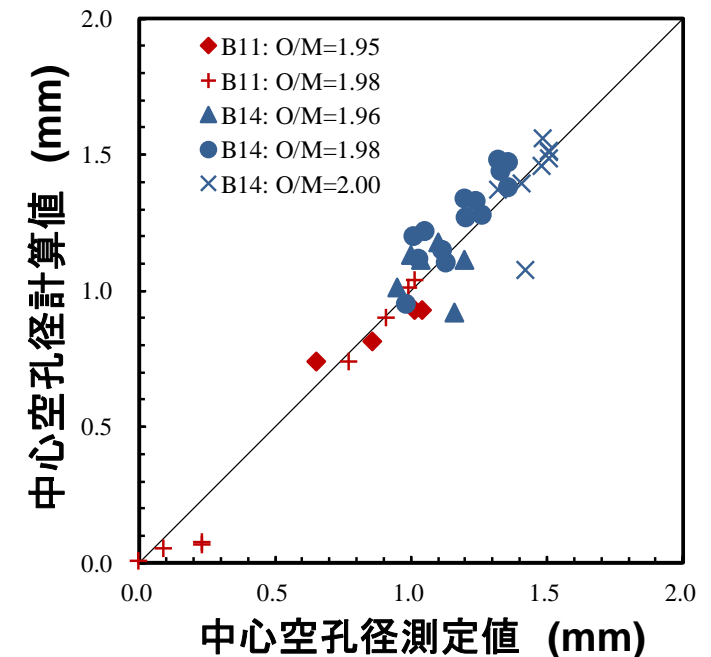
直径: 1.2mm

中心空孔近傍の金相観察



中心空孔径のO/M及び線出力依存性

K. Maeda et al., J. Nucl. Mater. 416 (2011) 158–165.

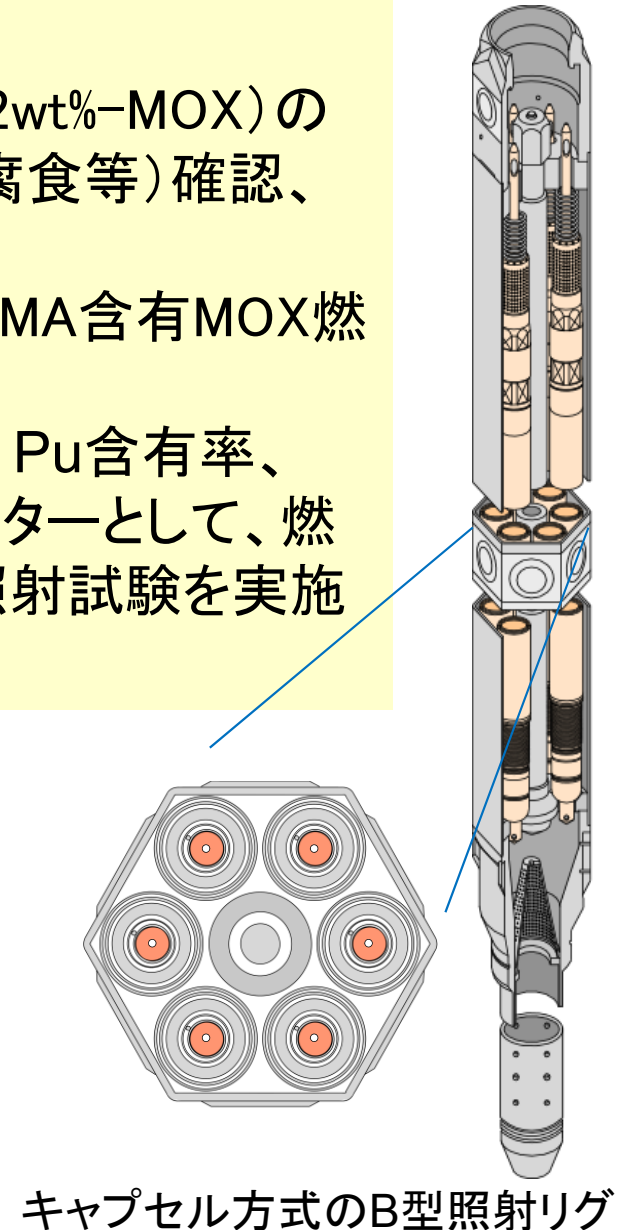


燃料挙動解析コードによる中心空孔径の予測

T. Ozawa et al., Proc. of ANS Winter Meeting(2015)

- MA含有によるHeガス生成量の増加、酸素ポテンシャルの増加等の影響を把握
 - ❑ **Am-1長期照射試験** (Am5wt%-MOX, Am2wt%&Np2wt%-MOX) の
 燃焼進展時の挙動(燃料要素内圧、被覆管内面腐食等)確認、
 核変換実証データの取得
- 高速炉利用の多様性を念頭に、高Pu富化度条件でのMA含有MOX燃料の照射挙動を系統的に把握
 - ❑ **MA含有高Pu-MOX燃料の系統的試験**: Am、Np、Pu含有率、
 O/M比、ペレット/被覆管間ギャップ幅等をパラメーターとして、燃
 焼初期溶融限界線出力試験(PTM)と長期定常照射試験を実施

⇒MA含有MOX燃料の照射挙動データベースの拡充
 燃料挙動解析コード&燃料設計コードの開発・整備
 へ反映



キャプセル方式のB型照射リグ

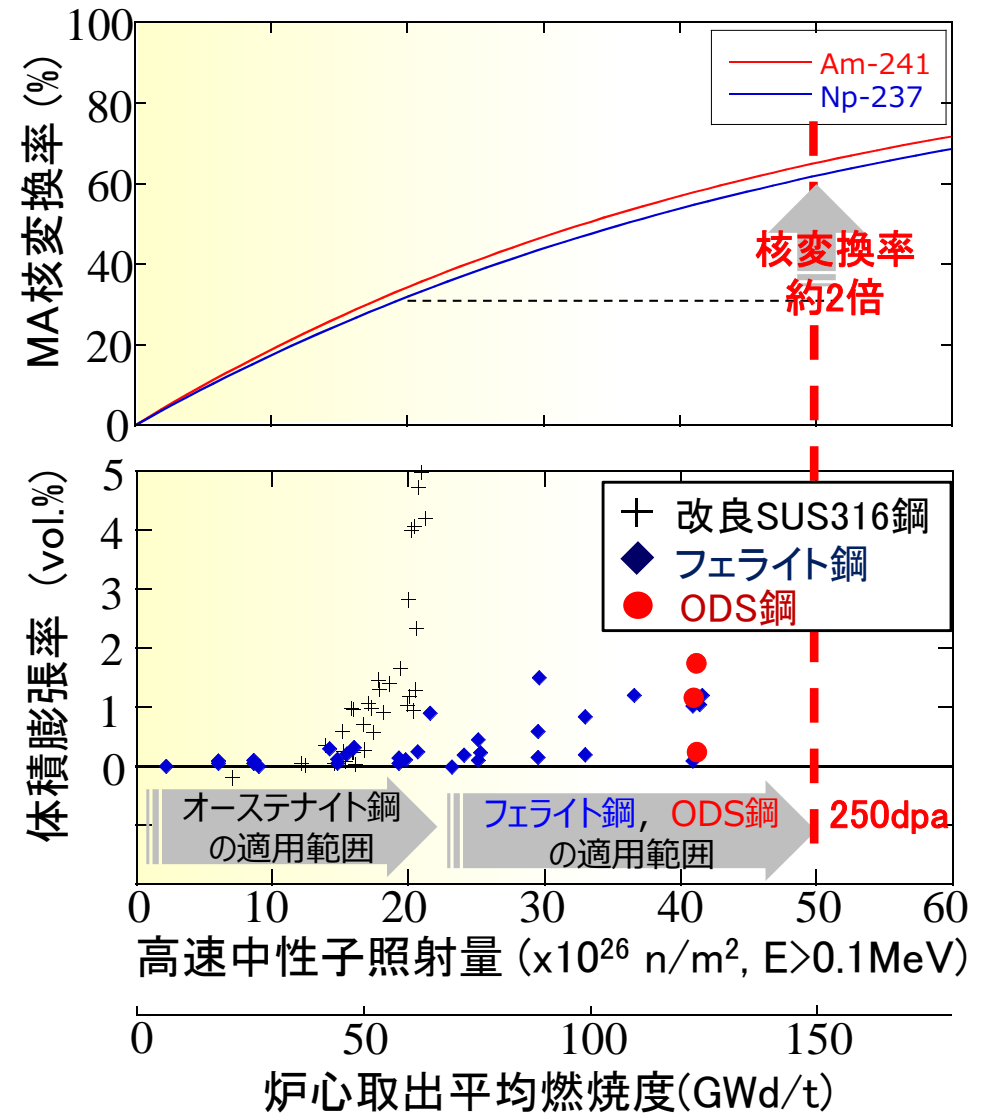
➤ 長寿命被覆管材(酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼)の開発
 □ 高速中性子照射に対する優れた耐スエリング性 & 高温強度を兼ね備える

- 高燃焼度化による燃料サイクル費の低減
- 冷却材の原子炉出口温度の高温化による発電効率の向上
⇒ 将来の高速炉サイクルの経済性向上
- 高燃焼度化は1サイクル当たりのMA変換効率の向上にも有効
- 高温環境での燃料破損耐性の向上による安全性の向上



廃棄物減容化・有害度の低減、
 経済性、安全性の向上

【MA核変換率と燃焼度、照射量の関係(評価例)】

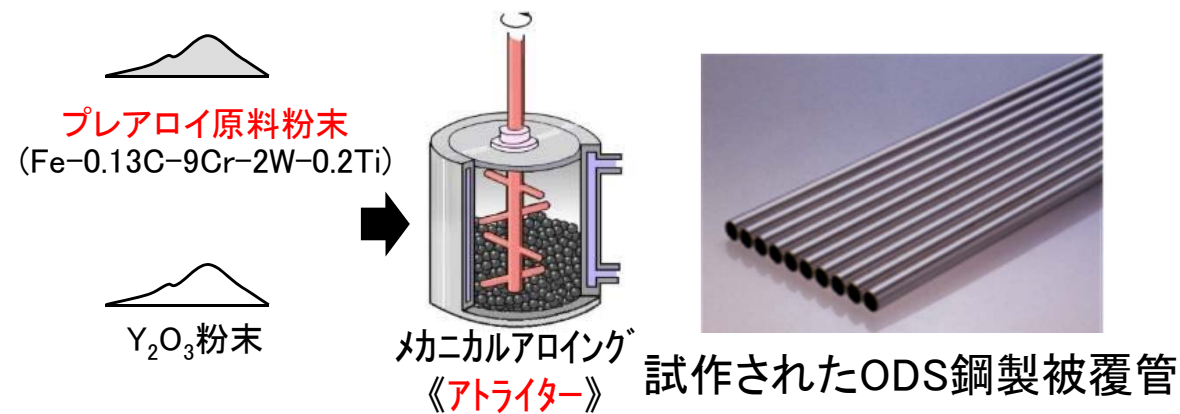


➤ ODS鋼製被覆管の製造技術の開発

□ 機械的合金化(メカニカルアロイング)手法の改良

(プレミックス⇒**プレアロイ**)

□ 量産に向けた改良(大型アトライターの適用、素管大型化等)

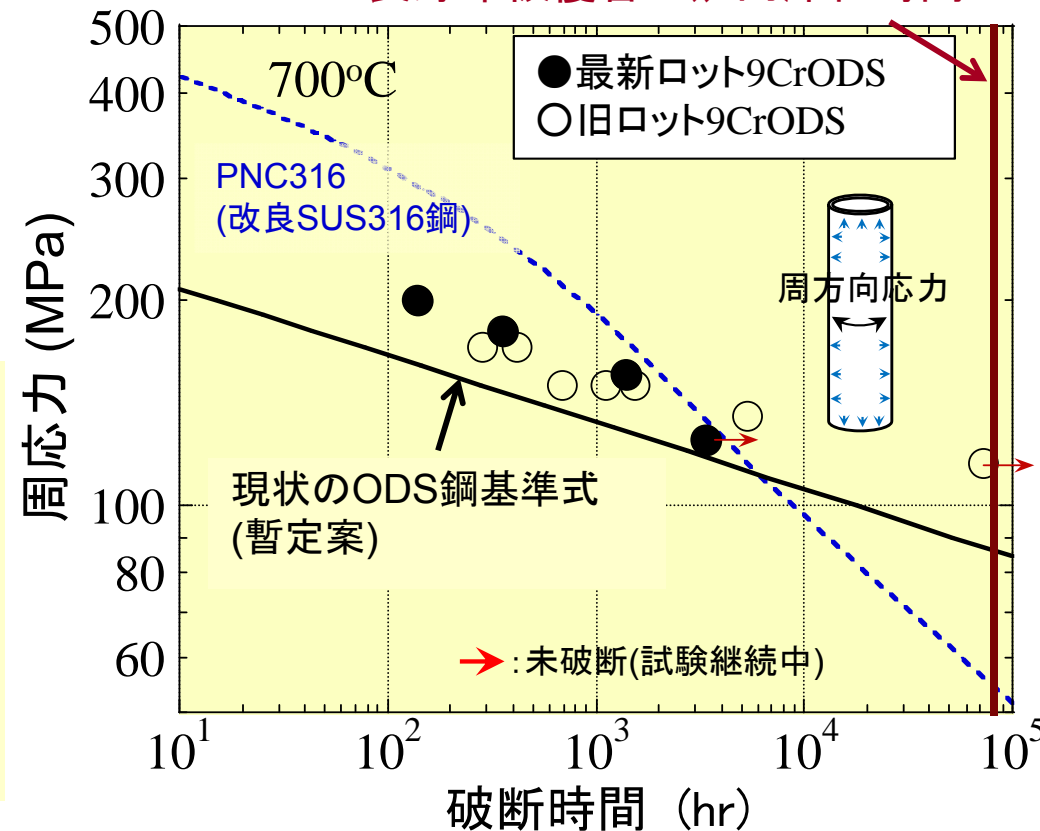


➤ ODS鋼製被覆管の材料強度データの体系的な取得 ⇒ 材料強度基準案へ反映

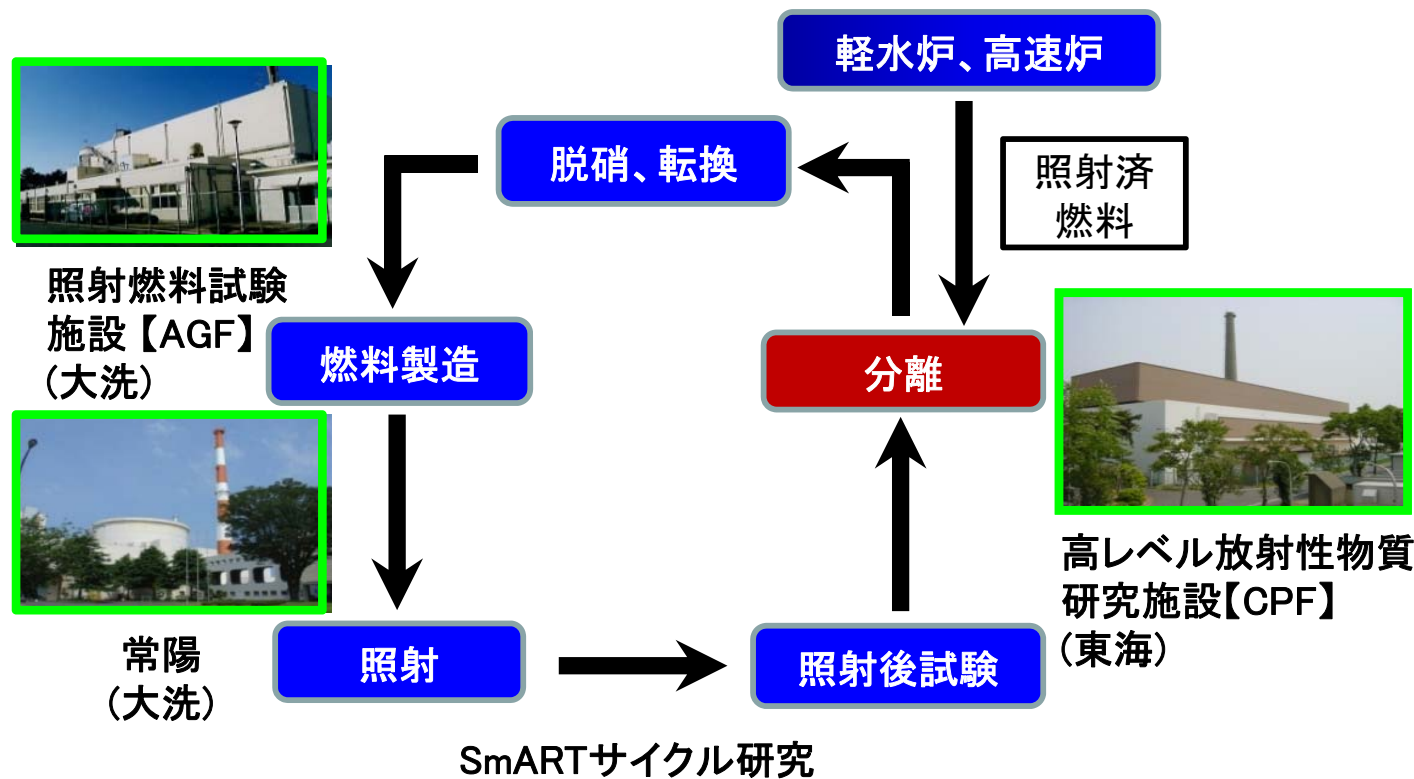
➤ 目標とする炉内滞在時間近傍までのODS鋼製被覆管の内圧クリープ破断試験を継続し、長時間側で強度低下が生じないことを示すデータの取得に成功

【ODS被覆管の内圧クリープ破断試験】

長寿命被覆管の炉内滞在時間



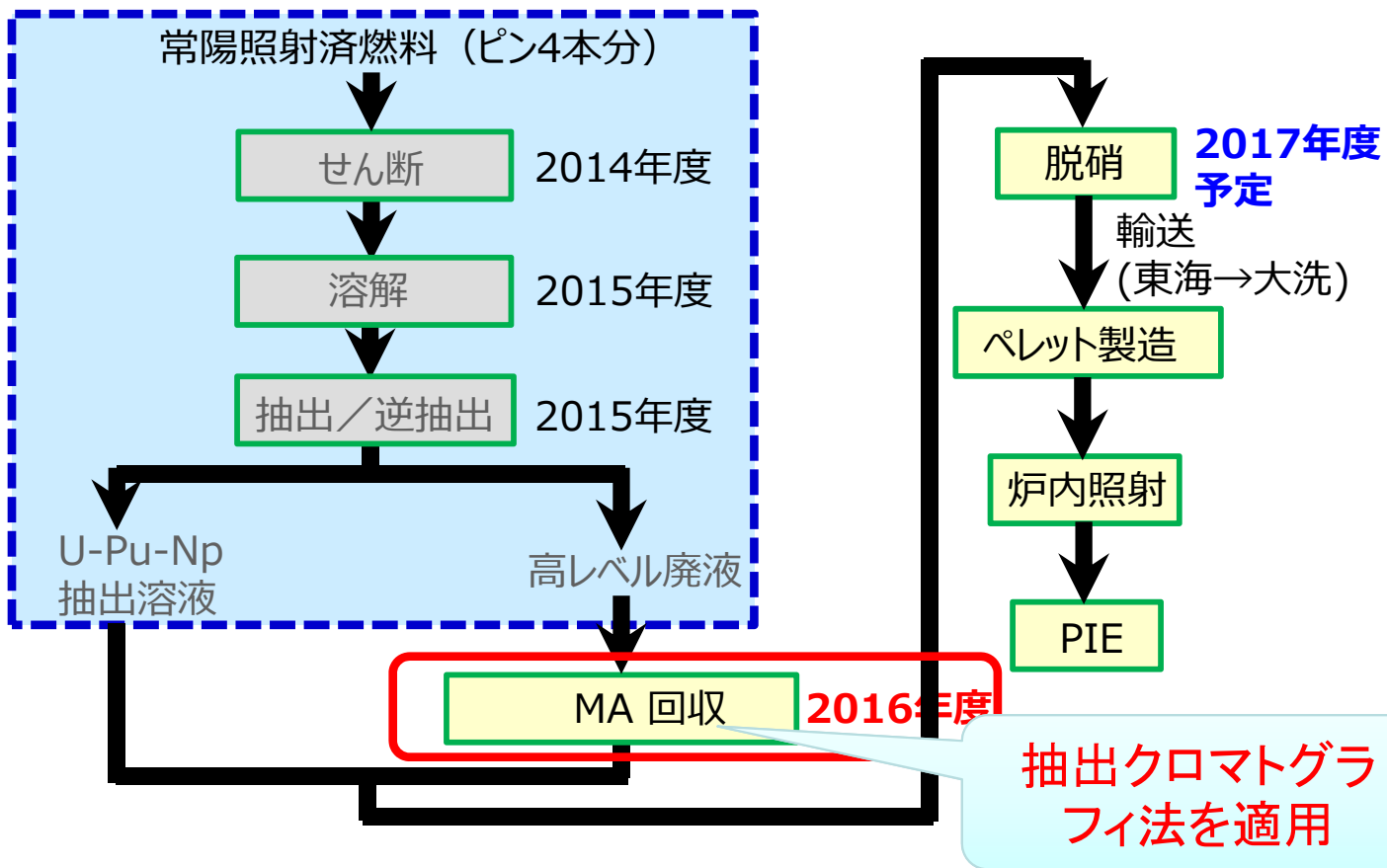
- 高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減の観点から、**MA分離変換リサイクルの小規模実証**を目的として、照射済燃料中のMAを回収し、高速実験炉「常陽」で燃焼する一連のリサイクル試験(**SmARTサイクル**)計画を推進
 - MAリサイクル成立性の小規模での実証
 - 実MA同位体組成での核変換データの取得



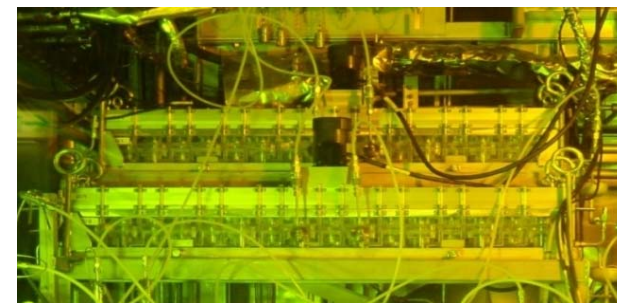
SmART: *S*mall *A*mount of *R*euse *F*uel *T*est *C*ycle

- 高速実験炉「常陽」の使用済燃料4本のせん断、溶解、抽出処理を終了(～2015年度)
- 実際の高レベル廃液からの**MA回収試験を完了**。**1g以上のMAを回収** (2016年度)
- 2017年度に抽出溶液と混合し、脱硝転換を行う予定。その後、大洗のホットセル内で遠隔でのペレット製造に挑戦

高レベル放射性物質研究施設【CPF】



ホットセル内の溶解試験状況



ホットセル内の遠心抽出器試験装置

- Np, Am等のMAを体系内に取り込むことで高速炉サイクルは高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減に対しても有効な技術となる。
- FaCT(Phase 1)を通じて、数wt%程度のMAを含有する均質リサイクルに対応する将来の高速炉概念を具体化した。
- 高速炉サイクルでの利用を念頭に、MA含有MOX燃料に対する燃料製造、物性研究、照射挙動及び長寿命炉心材料の研究開発に係るチャレンジを継続している。また、高速炉使用済み燃料を起点とする小規模のMARリサイクル実証試験(SmARTサイクル)に着手した。

- 高速炉開発の方針 他 (2016年12月21日 原子力関係閣僚会議決定)
 - 高速炉は、核燃料サイクルによって期待される**高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減、資源の有効利用の効果**をより高めるものである。
 - 我が国の高速炉開発の意義は、昨今の状況変化によっても、何ら変わるものではない。
 - 「**戦略ワーキンググループ**」を設置し、今後10年程度の開発作業を特定する「**戦略ロードマップ(仮称)**」*の策定作業を2017年初頭より開始、2018年内を目途に策定することを目指す。
 - *「もんじゅ」以降の実証炉とその関連サイクルに向けたもの
 - 「**もんじゅ**」は**廃止措置に移行**する。(「もんじゅ」の取扱いに関する政府方針)



廃棄物の減容化・有害度低減に向けた種々のチャレンジが戦略ロードマップへ反映されることを期待