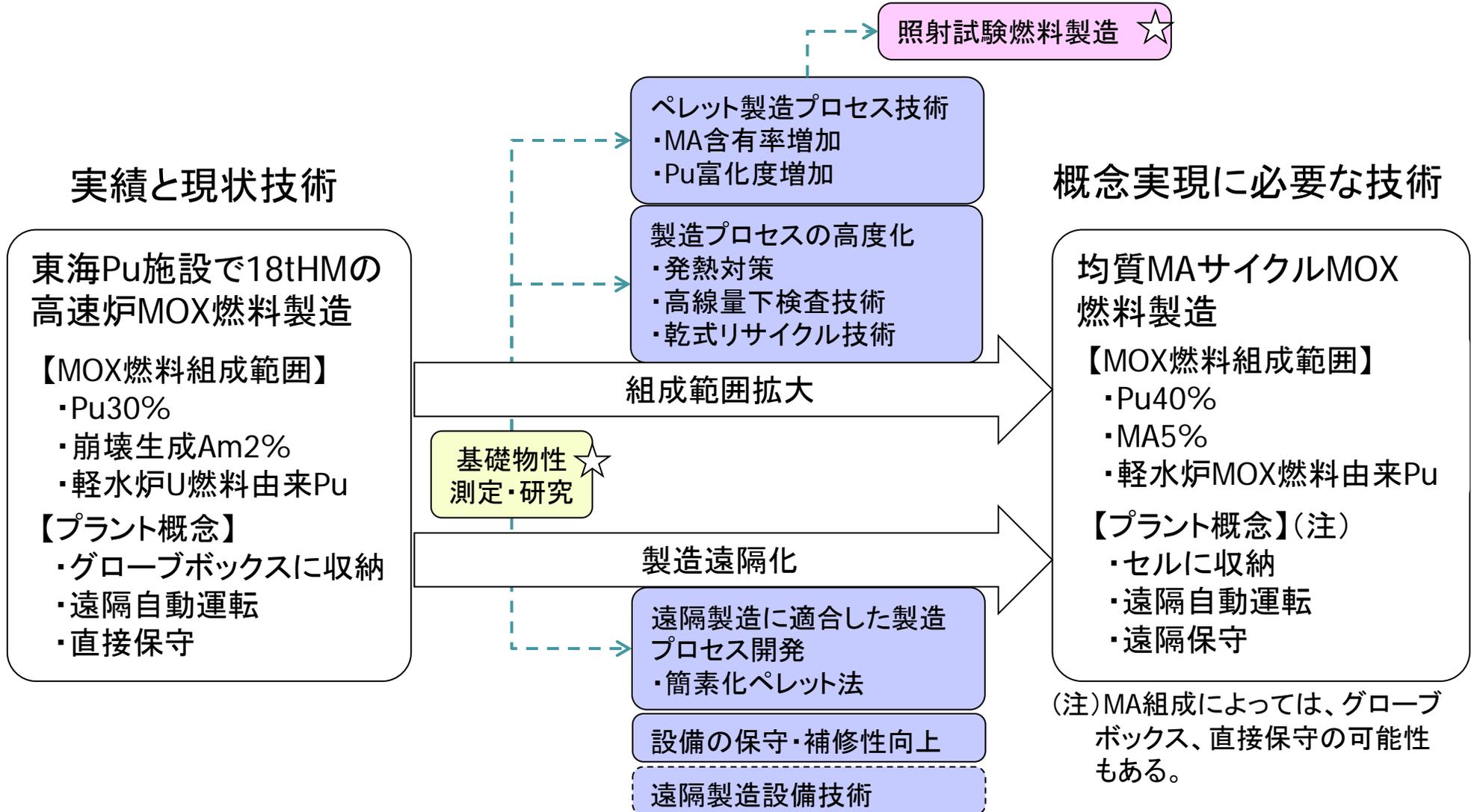


### 3. 研究開発課題 ① 燃料製造技術開発 研究開発の必要性

研究開発・基盤技術開発・基礎研究

☆ : 国際協力の可能性



# 3. 研究開発課題 ① 燃料製造技術開発 研究開発の進め方

「もんじゅ」等を活用  
した研究開発

(Pu燃料第三開発室) (Pu燃料第一開発室)

- ◎ MA含有MOX燃料、高Pu富化度MOX燃料の照射試験用燃料製造
  - ・ 燃料製造施設の許認可及び改造
  - ・ 検査装置等整備
  - ・ 照射試験燃料製造
  - ・ 照射試験燃料の詳細データ取得

試験燃料  
製造時詳細データ

照射試験

照射挙動への製造法の影響確認

システム概念実現に必要な基盤技術

(Pu転換技術開発施設) (Pu燃料第一開発室) (Pu燃料第三開発室)

- MOX燃料ペレット製造プロセス技術
  - ・ MA含有、高Pu富化度MOX燃料ペレットの製造プロセス技術
  - ・ 燃料発熱対策技術
  - ・ 乾式リサイクル技術
  - ・ 高線量下検査技術
- 簡素化ペレット法開発
  - ・ 原料粉末調整技術
  - ・ ダイ潤滑成型技術
  - ・ 焼結・O/M調整技術
- 設備の保守・補修性の向上(グローブボックス製造システム)
  - ・ 設備の保守、補修性の向上
  - ・ 自動化設備の信頼性向上
  - ・ 粉末付着防止・除染技術

基礎研究

(Pu燃料第一開発室)

- MA含有MOX燃料、高Pu富化度MOX燃料の基礎物性データ

- 現在のMOX製造システムの高度化によるMA含有MOX燃料製造システム概念と対応可能な燃料組成範囲の評価(5年程度)
- MOX燃料製造用簡素化ペレット法のシステム概念とMA含有MOX燃料製造への適用方策案(5年程度)
- 簡素化ペレット法を適用したMA含有MOX燃料製造システムの概念と対応可能な燃料組成範囲の評価(10年程度)

# 3. 研究開発課題 ① 燃料製造技術開発 製造プロセス開発の実施項目

## 目的

MA含有率やPu富化度を増加させたMOX燃料ペレットを安定した品質で製造するためのプロセス技術を開発する。また、MA添加、Pu富化度増加及びPu同位体組成の高次化による発熱率及び放射線源強度の増加への対策を検討するとともに、MOX加工施設のPuスクラップ(MA含む)の再利用のためのプロセス技術を開発する。

## 開発すべき技術

### (1) MA含有MOXペレット製造プロセス技術

すでに確立しているMOXペレット製造プロセス技術を基にして、MA添加やPu富化度増加を行った場合のペレット製造上の影響を評価し、均質サイクル用MA含有MOX燃料ペレットを安定した品質で製造するためのプロセス技術を開発する。

### (2) 燃料発熱対策技術

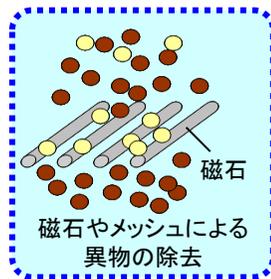
混合機・粉末容器・保管庫等を対象に温度評価を実施し、熱による燃料の品質(物性)の変化を防ぐための除熱技術を開発する。

### (3) 高線量下燃料検査技術

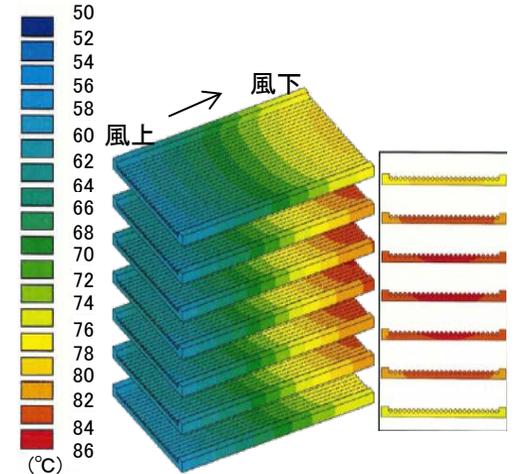
現行の自動化製造設備において、放射線強度増加による検査、測定機器の放射線劣化の程度を評価するとともに、より耐放射線性に優れた検査技術を開発する。

### (4) 乾式リサイクル技術

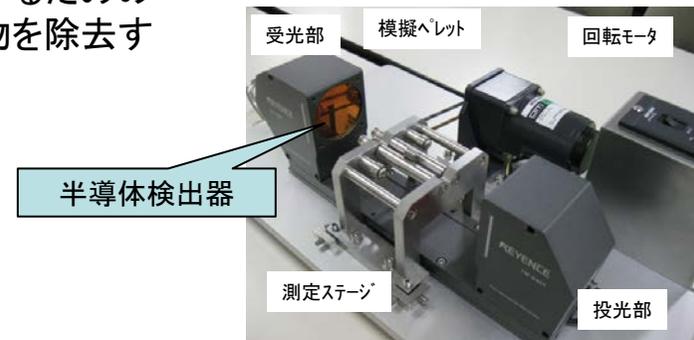
MOX燃料ペレット製造に伴い発生するスクラップを原料としてリサイクル利用するための粉碎および均一化混合の能力向上を図るとともに、スクラップから不純物や異物を除去する乾式前処理技術を開発する。



乾式リサイクル技術



ペレット貯蔵容器を強制冷却した時の温度分布評価結果例



中空ペレット内径測定装置  
(測定試験機)

# 3. 研究開発課題 ① 燃料製造技術開発 簡素化ペレット法開発の実施項目

## 目的

遠隔燃料製造に適したペレット製造法である簡素化ペレット法を開発する。

## 開発すべき技術

簡素化ペレット法の概要技術について、小規模MOX試験により、MOXペレット製造法としての確立を図るとともに、MA含有原料を用いた小規模MOX試験（小規模MA試験）により、MA含有の影響を評価する。

### (1) 原料粉末調整技術

小規模MOX試験により、造粒・整粒技術の確立を図るとともに、小規模MA試験により、粉末調整へのMAの影響を評価する。

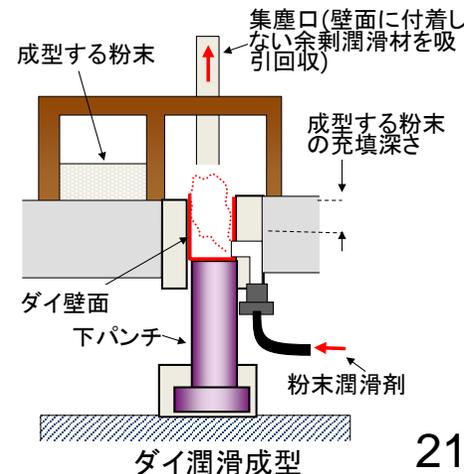
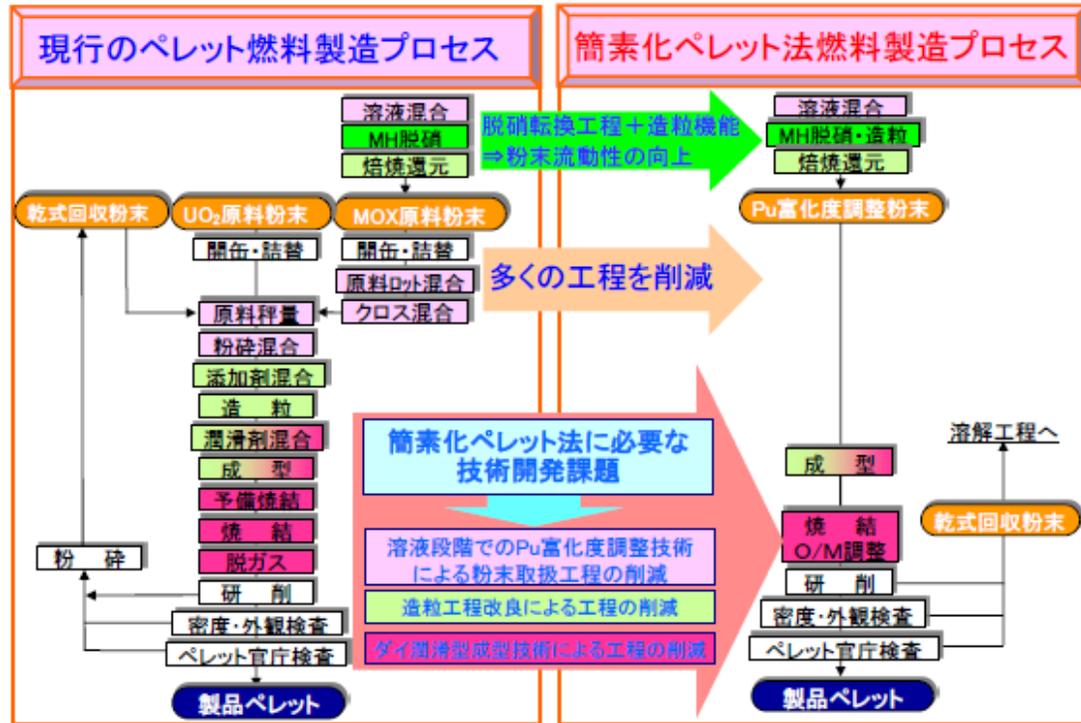
さらに、原料粉調製工程で発生するスクラップを再利用する技術として、難溶解の高Pu含有MOXを溶解するための技術を開発する。

### (2) ダイ潤滑成型技術

小規模MOX試験及び小規模MA試験で得られた造粒粉末を用いた成型試験により、粉末特性と充填・成型性の相関データを得るとともに、離散要素法によるシミュレーションと合わせて、ダイ潤滑・成型技術を開発し、設備の改良設計に反映する。

### (3) 焼結・O/M調整技術

小規模MOX試験及び小規模MA試験で得られた成型体を用いて、燃料組成、粉末特性、熱処理条件、焼結特性等の関係性を評価し、バラツキの少ない焼結密度、均一な低O/M比のMOX燃料ペレットを調製する熱処理技術を開発する。



# 3. 研究開発課題 ① 燃料製造技術開発 製造設備の保守・補修性の向上の実施項目

## 目的

遠隔自動運転、直接保守の製造システムによりMA含有MOX燃料等を製造する場合は、作業員の保守、補修時の被ばく線量の低減化のため、保守・補修作業時の作業性向上、燃料製造自動化設備の運転信頼性向上及び作業環境の空間線量率低下が必要である。

## 開発すべき技術

### (1) 保守・補修性の向上

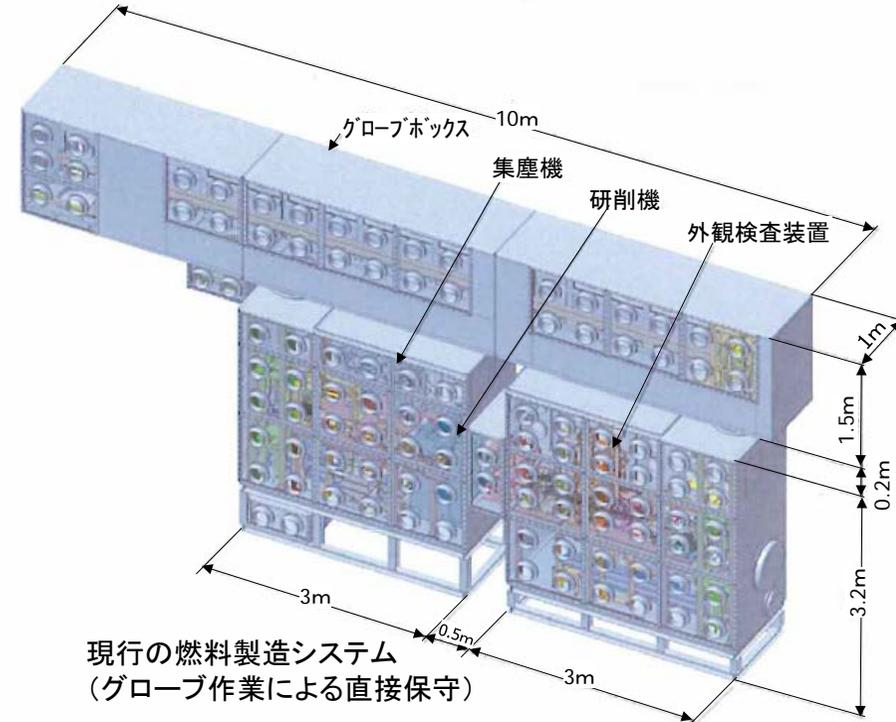
燃料製造自動化設備の保守、補修に必要な作業時間の短縮のための設備開発、保守方法の改良を行う。また、設備が重故障に進展する前の段階で、設備異常をモニタリングできる診断技術を開発する。

### (2) 設備信頼性の高度化

現行の燃料製造システムでMA含有MOX燃料等を製造する場合に、燃料製造設備の運転が極力停止しない高信頼性設備を得るために必要なペレット搬送、取扱いシステムの高度化を図る。

### (3) 粉末付着防止・除染技術

設備の保守・補修作業時等のグローブボックスの表面線量率の低減化を図るために、燃料製造設備に付着する燃料粉末を極力抑え、付着した粉末が容易に除去回収できる技術を開発する。



モリブデン皿



パーツフィーダ



研削装置



外径・重量・高さ検査装置



外観検査装置

ペレット搬送の不具合を解決することにより設備信頼性向上が期待されるペレット研削・検査工程設備内でのペレットの流れ

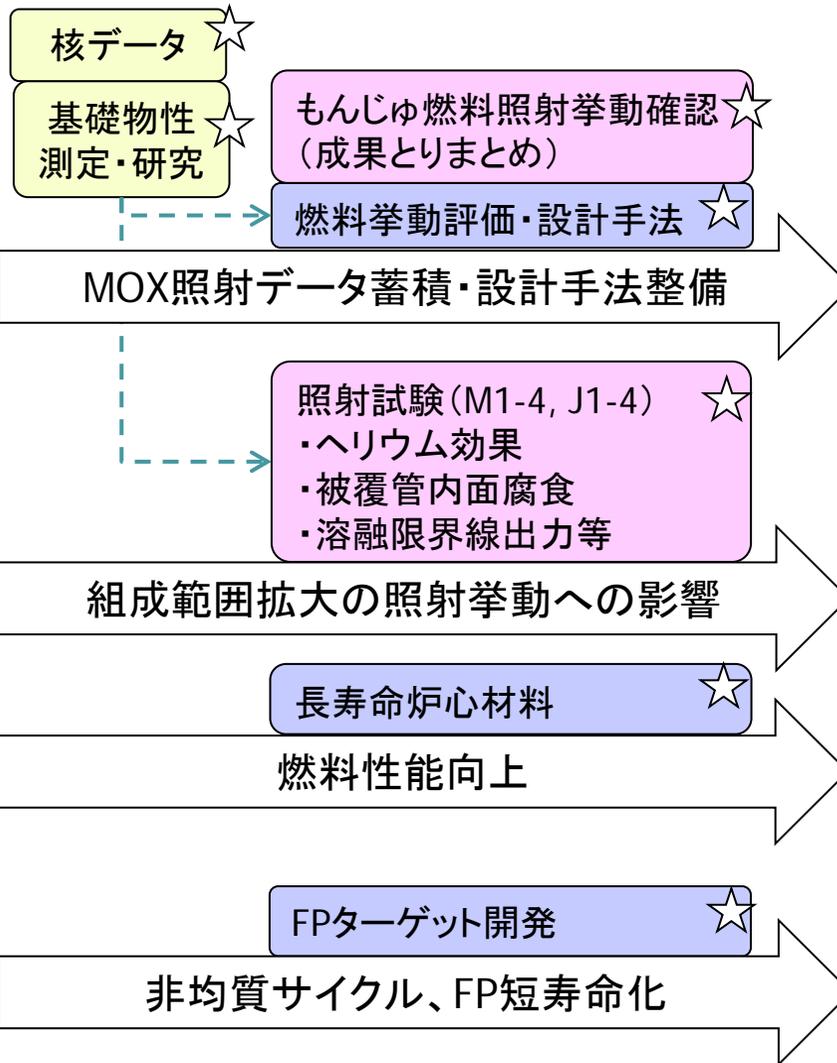
### 3. 研究開発課題 ② 燃料開発及び照射試験 研究開発の必要性

☆: 国際協力の可能性

#### 実績と現状技術

- 「常陽」614体、「もんじゅ」287体のMOX燃料装荷
  - ・約700W/cm
  - ・約144GWd/t
- 「常陽」103体、海外照射ピン49本のMOX燃料の照射後試験
- MA-MOX燃料照射
  - ・「常陽」(Am-1, B14)
  - ・仏(SUPERFACT)
  - ・米(AFC)
- 高Pu-MOX燃料照射
  - ・仏(CAPRIX1)
  - ・米(HEDL/ANL 08)
- ターゲット燃料概念検討段階

#### 研究開発・基盤技術開発・基礎研究



#### 概念実現に必要な技術

- 【均質サイクル】**
  - 実規模MOX燃料集合体の照射データに基づくMOX燃料設計手法整備
  - 上記の適用範囲を拡大 (Pu40%, MA5%, 軽水炉MOX燃料由来Pu)
  - 燃料性能向上
  - 廃棄物減容等に関する効果の見通し
- 【非均質照射】**
  - ターゲット寿命、有効性評価技術整備

# 3. 研究開発課題 ② 燃料開発及び照射試験 研究開発の進め方

## 「もんじゅ」等を活用した研究開発

- ◎「もんじゅ」・「常陽」照射試験
    - ・照射試験燃料設計、許認可
    - ・実規模MOX燃料集合体照射 (高Am蓄積、高次化Pu)
    - ・実規模ピン照射(MA含有燃料)
    - ・MA含有、高Pu富化度MOX燃料
      - 短期、長期照射
      - 定常照射、溶融限界出力試験
    - ・照射後試験(非破壊、破壊試験等)
- ⇒照射挙動データ、健全性確認、溶融限界出力データ



「もんじゅ」



「常陽」



照射リグ



照射燃料集合体試験施設



照射燃料試験施設

## システム概念実現に必要な基盤技術

- 長寿命炉心材料開発
  - ・酸化物分散強化フェライト鋼(ODS)製被覆管等の開発(製管試験、強度試験、材料照射試験等)
  - ⇒材料強度データ、強度基準
- ◇FPターゲット開発
  - ・ターゲット材選定・開発、材料照射試験
- 燃料挙動評価・設計手法開発
  - ・燃料温度評価手法開発、機械的挙動評価手法開発、設計基準等の整備
  - ⇒MA含有MOX燃料等の具体化(MA含有率等)

## 基礎研究

- 基礎物性測定
    - ・MA含有、高Pu富化度MOX燃料の物性測定(融点、熱伝導度、酸素ポテンシャル等)
    - ・燃焼燃料の物性測定(融点等)
  - シミュレーション
    - ・計算科学による燃料物性評価
- ⇒燃料物性データベース・物性モデル



プルトニウム燃料第1開発室

照射燃料試験施設

- 廃棄物減容等に向けた燃料の特性把握 (5~6年程度) (短期照射試験、溶融限界出力試験データ等を活用)
- 廃棄物減容等に向けた燃料像の具体化、有効性評価へ反映(10年程度) (長期照射試験データまで活用)



### 3. 研究開発課題 ② 燃料開発及び照射試験 照射試験の実施項目

略号	照射試験名	目的	概要
M1	MOX燃料集合体の照射試験	「もんじゅ」燃料設計妥当性確認、Am含有MOXの定常照射での挙動、He効果の確認	長期保管中にAmが蓄積したMOX集合体の照射試験。低燃焼度と中燃焼度の2体実施
M2	高次化Pu-MOX燃料の照射試験	高次化Pu-MOX燃料の照射挙動確認、He効果の確認	「ふげん」MOX燃料から回収された高次化Puを原料としたMOX燃料の照射試験
M3	GACID-1先行照射試験	MA含有MOX実規模燃料ピンの照射挙動確認	MA含有MOX燃料ピンを含む燃料集合体の照射試験
M4	GACID-1照射試験	MA含有MOX実規模燃料ピンの照射挙動確認(MA濃度、燃料仕様、燃料製造方法がM3と異なる)	米国MA原料を仏国でMOX燃料ピンに加工し、「もんじゅ」燃料集合体に組み込み、照射、照射後試験を実施
J1	Am-1長期照射試験	MA含有MOX燃料の被覆管内面腐食等の燃焼依存挙動データ取得	照射中のAm5%-MOX燃料ピン、Am2%-Np2%-MOX燃料ピンを継続照射し、燃焼度蓄積
J2	Am-1短期高出力試験	MA含有MOX燃料の燃焼初期における元素再分布、組織変化等の挙動データ取得	Am5%-MOX燃料ピン、Am2%-Np2%-MOX燃料ピンの短期高線出力試験の第2回目として、前回よりもさらに高い線出力で照射
J3	MA含有高Pu-MOX燃料の系統的試験	高Pu富化度条件で燃料組成、燃料仕様パラメタの照射挙動への影響についてのデータを系統的に取得	Am、Np、Pu含有率、O/M比、ペレット密度、ペレット/被覆管間ギャップをパラメタとして、燃焼初期熔融限界出力試験(PTM)と長期定常照射試験を実施
J4	GACID-1先行照射試験	ペレット密度の影響についてのデータ取得とM3試験との比較によりスケール効果を評価	試験パラメタのペレット密度以外は主な燃料ペレット仕様がM3と同じMA含有MOX燃料ピンの照射試験

### 3. 研究開発課題 ② 燃料開発及び照射試験 照射試験の実施項目

規模	試験名	燃焼度&照射期間		線出力		被覆管温度		O/M比		Pu富化度	
		低	高	低	高	低	高	低	高	低	高
短尺ピン	常陽Am-1(短期)	■	J1, J3, J4	■	J2 J3	■	J2 J3	■■■■■		■	J3
	常陽B14	■		■		■		■■■■■		■	
実規模ピン	仏 SUPERFACT (数本規模)	■■■■■		■	M2~M4	■■■■■		■	M1~M4		■

データ充足が必要な領域

従来知見

- ① MA変換データの取得 実機炉心でのMA各変換積分データを取得する必要。
- ② ヘリウム効果 MA含有、高Pu富化度化に伴うHeガス生成量増加による影響を確認する必要。(特に実規模ピン)
- ③ 破損防止 高燃焼度範囲、高被覆管温度で、O/M比依存性を考慮した被覆管内面腐食挙動を確認する必要。(特に実規模ピン)
- ④ 燃料溶融防止 MA含有、高Pu富化度による融点、熱伝導度の低下を考慮し、高線出力条件での挙動、溶融有無の確認が必要。Pu,MA再配分挙動、熱伝導度への感度を考慮してO/M比依存性の確認も重要。
- ⑤ サイクル技術 MA含有、高Pu富化度MOX燃料の製造技術及び再処理技術並びにMAの分離・回収プロセスについての技術成立性の評価が必要。

# 3. 研究開発課題 ② 燃料開発及び照射試験 照射後試験の実施項目

## 照射試験燃料集合体



照射燃料集合体試験施設 (FMF)

- ・非破壊試験  
X線CT  
外観検査  
寸法測定 等
- ・破壊試験  
ピンパンクチャ  
金相試験  
FE-SEM観察
- ・試料採取



照射燃料試験施設 (AGF)

- ・燃料物性試験  
融点測定  
O/M比測定  
化学分析  
EPMA分析等

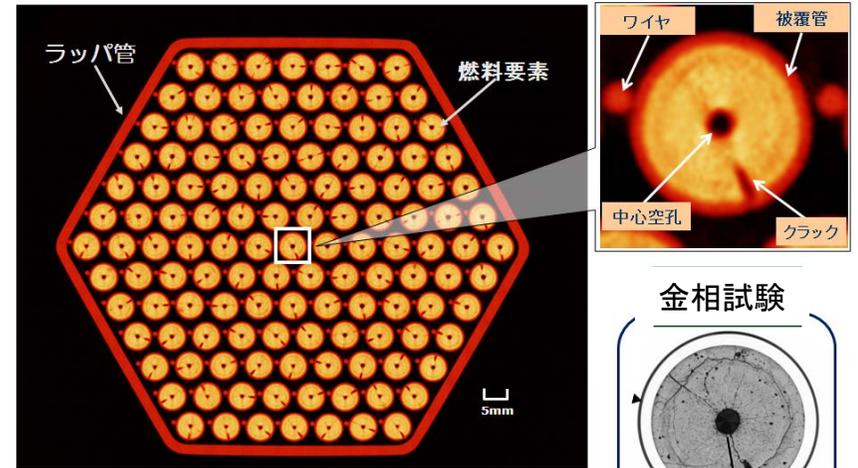


照射材料試験施設 (MMF)

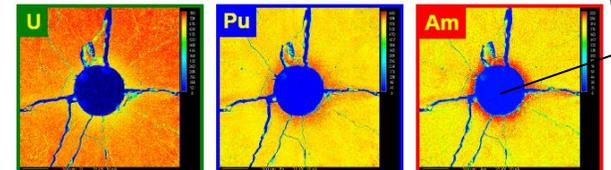
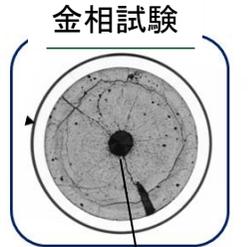
- ・材料物性試験  
強度試験  
密度測定  
組織観察 等

## 高レベル放射性物質 研究施設 (CPF)

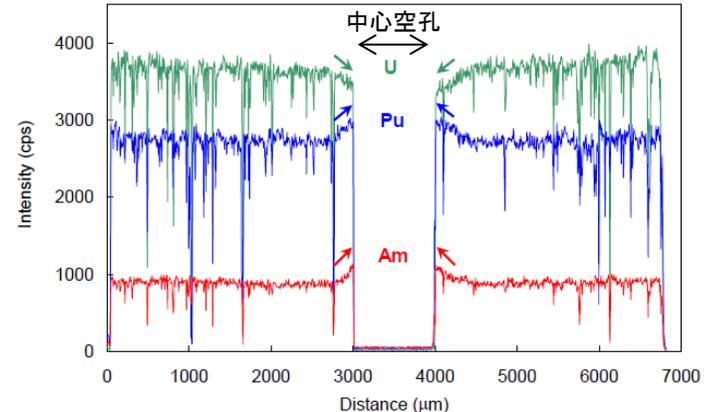
- ・再処理試験  
溶解  
抽出  
分析 等



常陽炉心燃料集合体横断面X線CT画像



中心空孔



Am-1短時間照射試験のEPMA分析結果

(注) 中心空孔は、照射中のペレット組織変化により形成される

### 3. 研究開発課題 ② 燃料開発及び照射試験 照射挙動評価の実施項目

#### 目的

MA含有MOX燃料、高Pu富化度MOX燃料等の照射試験(照射後試験を含む)によって、廃棄物減容、有害度低減に対応した燃料の照射挙動(ヘリウム生成に伴う挙動、被覆管内面腐食挙動、Pu、Am等の再分布挙動等)及び性能(燃料溶融限界出力等)を把握する。

#### 開発すべき技術

##### (1) MA含有、高Pu富化度MOX燃料の照射挙動把握及び健全性確認

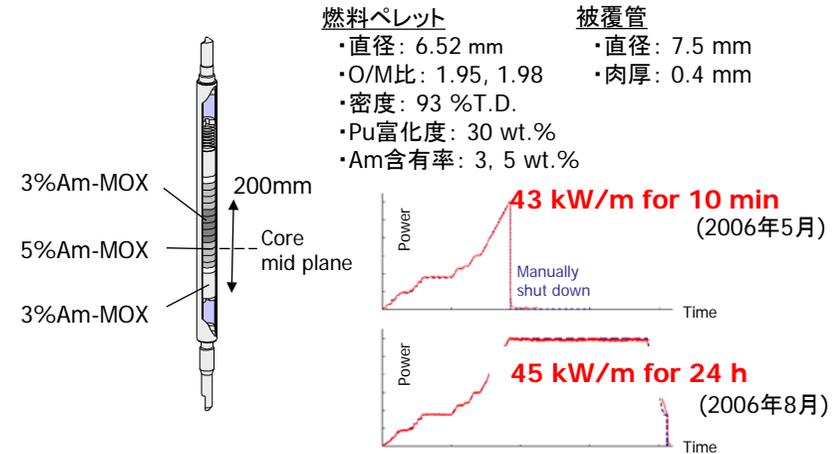
「もんじゅ」にて高Am蓄積実規模MOX燃料集合体(M1)、MA含有MOX燃料ピン(M3、M4)を、また、「常陽」にてMA含有燃料ピン(J1、J2、J4)及びO/M比、ペレット密度等をパラメータとMA含有、高Pu富化度MOX燃料短尺ピン(J3)を照射し、照射後試験を通じて照射挙動を把握すると共に健全性を確認する。M4はGACID(Global Actinide Cycle International Demonstration)日仏米3ヶ国協カプロジェクトとして実施中であり、他の試験についても協力の可能性がある。

##### (2) MA含有、高Pu富化度MOX燃料の溶融限界出力の把握

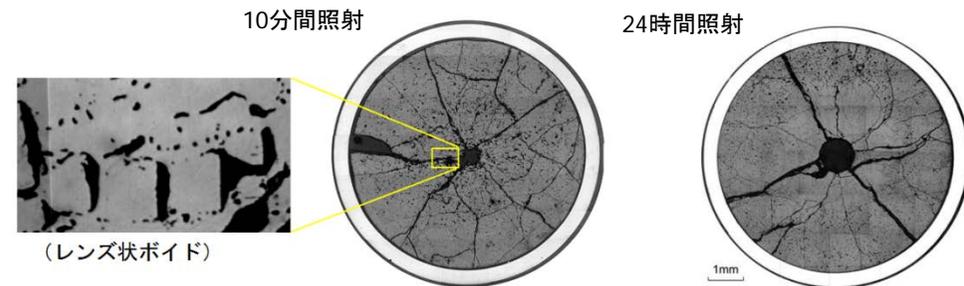
「常陽」にてMA含有、高Pu富化度MOX燃料ピン(J3)を、出力上昇を模擬して高線出力まで照射し、燃料溶融限界を把握する。

##### (3) 高次化Pu-MOX燃料の照射挙動把握及び健全性確認

「ふげん」MOX燃料から回収される高次化Puを用いた実規模MOX燃料集合体(M2)を「もんじゅ」にて照射し、照射挙動を把握すると共に健全性を確認する。また、日仏協力により、軽水炉MOX燃料由来の高次化Puを適用した照射試験の可能性がある。



Am-1短時間照射試験の設計仕様と照射条件



Am-1短時間照射試験のペレット横断面の金相写真

(注)照射が進むにつれ、ペレットの組織変化が進行し、中心空孔が拡大

# 3. 研究開発課題 ② 燃料開発及び照射試験 基礎研究及び基盤技術開発の実施項目

## 目的

燃料物性測定・物性研究、長寿命炉心材料開発、照射試験データを反映した燃料挙動評価、設計手法開発等を実施し、廃棄物減容、有害度低減の観点から必要とされる燃料概念の具体化、有効性評価に資する。

## 開発すべき技術

### (1) 燃料物性測定、物性研究

MA含有MOX燃料、高Pu富化度MOX燃料の燃料物性(融点、熱伝導度、酸素ポテンシャル、比熱等)をO/M比等をパラメータとして系統的に把握する。  
また、計算科学による燃料物性研究を通じ、より広範囲の評価を可能とする。  
さらに、融点等について、燃焼燃料の測定を行い、燃焼による影響を評価する。

### (2) 長寿命炉心材料開発

MA核変換効率の向上に有効な燃料の長寿命化のため、高中性子照射量に耐えられる炉心材料(被覆管:ODS鋼等)の開発を行う。

### (3) FPターゲット開発

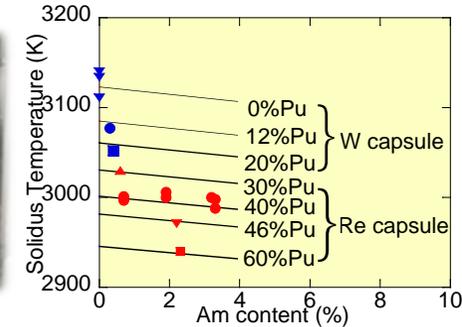
環境への長期的影響リスクがある長寿命FPを変換するため、高速炉場で適用するターゲットの開発を行う。

### (4) 燃料挙動評価・設計手法開発

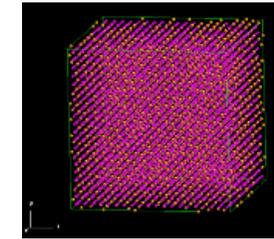
燃料物性データ、照射試験データ等に基づいてMA含有MOX燃料等の燃料物性、照射挙動モデルを整備し、MA含有MOX燃料等の挙動評価手法、設計手法を開発する。また、設計基準の整備を行う。なお、初期段階手法を照射試験燃料設計に適用する。



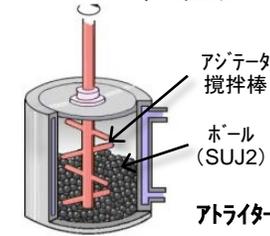
高周波加熱炉  
(融点測定)



Am-MOX燃料の  
融点測定結果



分子動力学計算  
シミュレーション



ODS鋼の製造技術開発  
(メカニカルアロイング)



ODS鋼製被覆管