



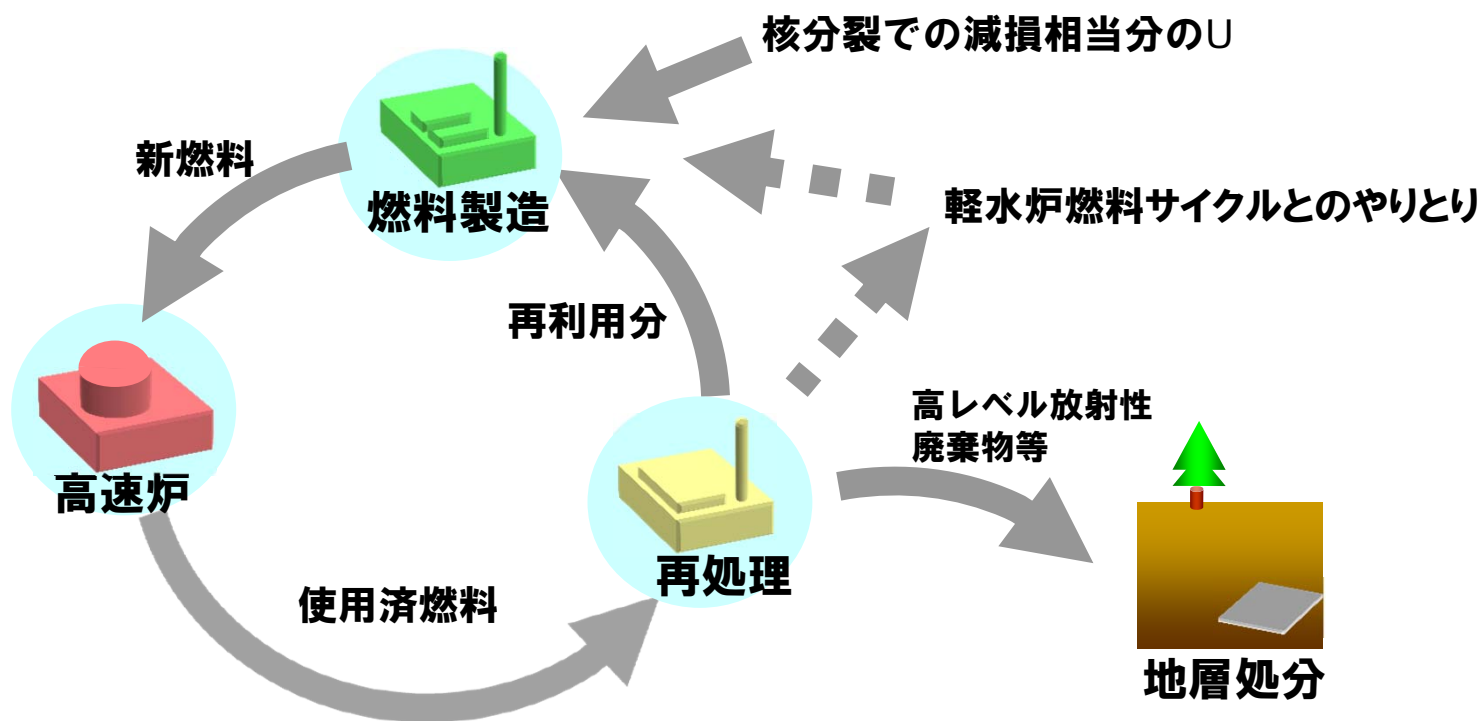
# 高速炉を用いた核変換技術

平成26年10月10日

日本原子力研究開発機構

安部智之

- Pu、MAをシステム内で柔軟にリサイクルでき、システム外に排出する放射性廃棄物に含まれるPu、MAを合理的な範囲で最小化可能
- 炉心の変更により、Puの増殖にも、Pu、MAの燃焼にも利用可能であり、システム内のPu、MAインベントリを調節可能
- 社会ニーズ、技術開発状況に応じた高速炉サイクルの意義
  - 持続モード
  - TRU管理モード(高次化Pu?、Np/Am?、全MA?)

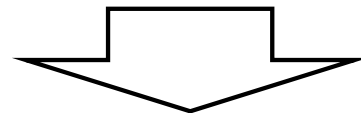


## 分離変換研究としての留意点

- 多くのオプションが提案され、オプション毎に開発すべき課題と共通的な研究開発課題がある
- 幅広い分野に多くの研究開発課題があり、長期的な研究必要
- 高速炉均質サイクルオプションは、発電用高速増殖炉サイクルの研究開発の一環として進められ、基礎研究段階を概ね終了
- 総合的な評価には、分離、燃料製造、照射、照射後試験等の一連の施設を用いた試験が必要
- MA分離についての設備が不足し、MA原料調達が一連の試験実施上のボトルネック

## 研究開発実施の観点からの留意点

- 実規模照射が可能な「もんじゅ」を最大限活用
- 「もんじゅ」で試験を安全に実施するための条件を満たし、運転計画と適合することが必要
- 常陽を用いて「もんじゅ」の補完が可能
- 関連するサイクル施設(燃料製造、照射後試験、再処理試験)でAm, Np含有MOX燃料に対応可能だが、数量的には限界
- MA原料、高次化Pu原料の調達に対する対応必要
  - Pu-241から生成されるAm-241利用
  - 国際協力による調達

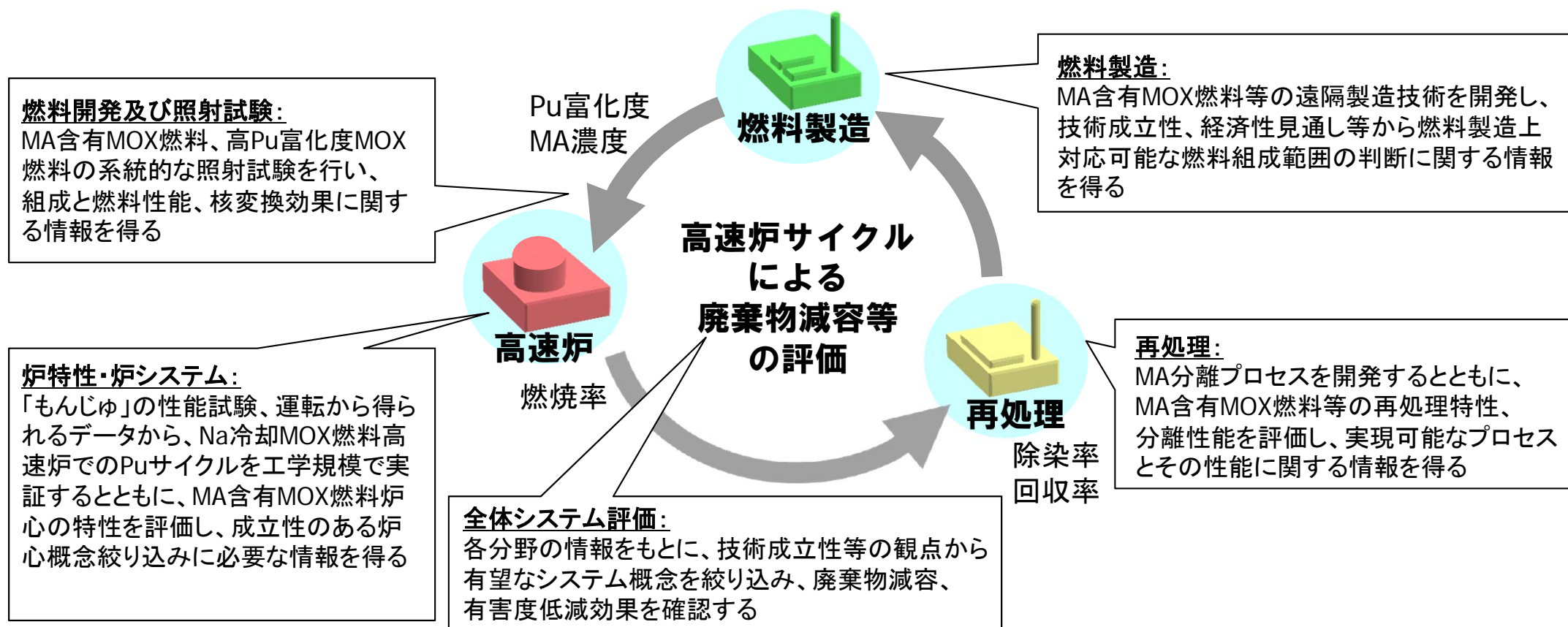


## 「もんじゅ」等で実施する廃棄物減容等のための研究開発

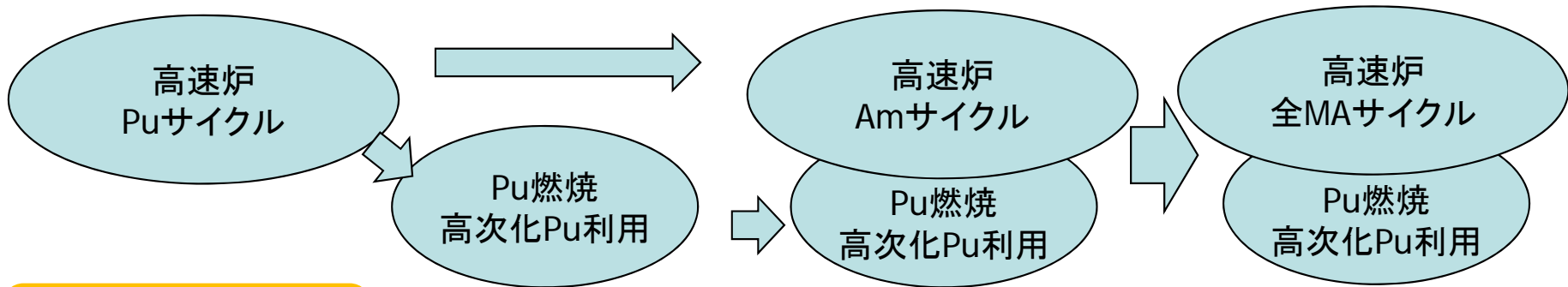
- Na冷却MOX燃料高速炉の均質Pu/MAサイクルを主たる研究対象オプション概念とし、既存施設を活用してできるだけ早期に成果を得て、準工学研究段階での本オプションの技術見通しと有効性の確認
- 「もんじゅ」での実規模照射により、照射中のMA含有燃料等の特性・挙動確認、核変換によるPu、MAの増減検証を優先的に実施し、「常陽」での特殊な条件での系統的試験により補完
- 関連するサイクル研究開発施設を用いて、MOX燃料でのAm均質サイクルまでの対応に必要なサイクル技術の見直し評価を実施
- 国際協力により、海外のMA原料、MA含有燃料、照射済燃料を活用して照射試験計画を充実させるとともに、各分野での情報交換、共同評価等を進める。

## ● 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と有効性の評価のために確認すべき事項

- 高速炉プラント概念の技術成立性 → Na冷却MOX燃料高速炉プラントでのPuリサイクルの技術成立性確認
- Pu利用柔軟性向上 → 高次化Pu利用、Pu燃焼の確認
- MAの利用、燃焼 → MA含有MOX燃料利用の確認
- MA分離・変換関連サイクル技術 → MA分離、遠隔燃料製造技術等の開発、見直し確認



## システム像

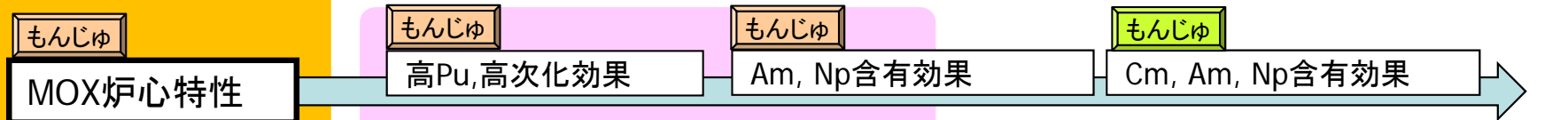


## 必要技術

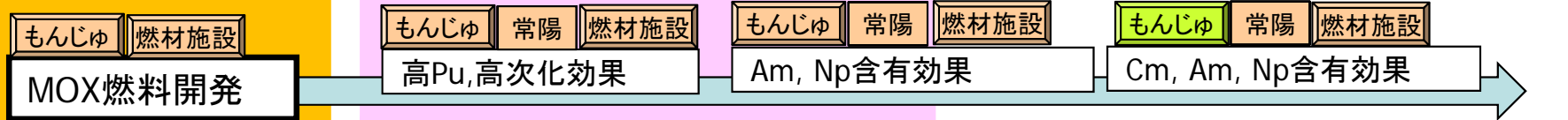
### 炉システム



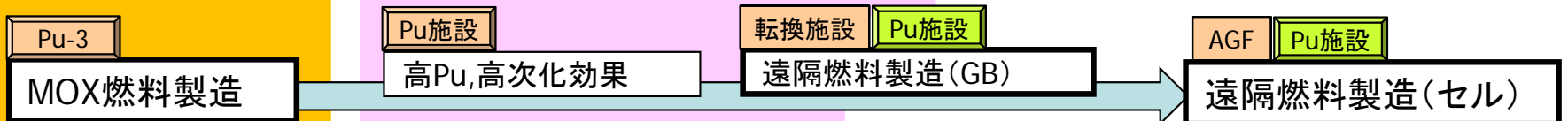
### 炉心



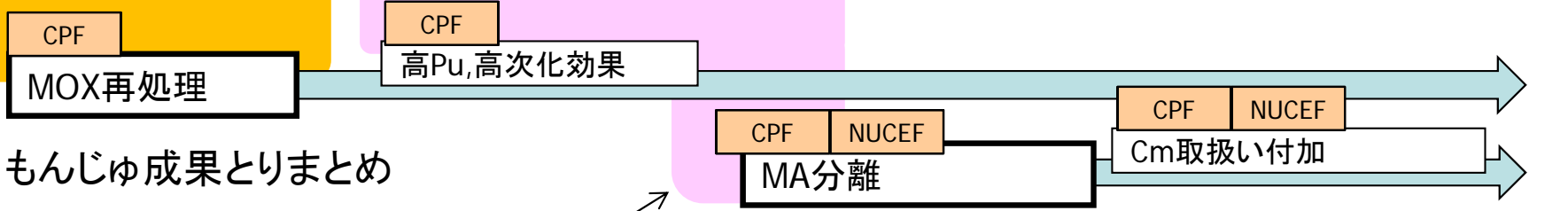
### 燃料開発



### 燃料製造



### 再処理

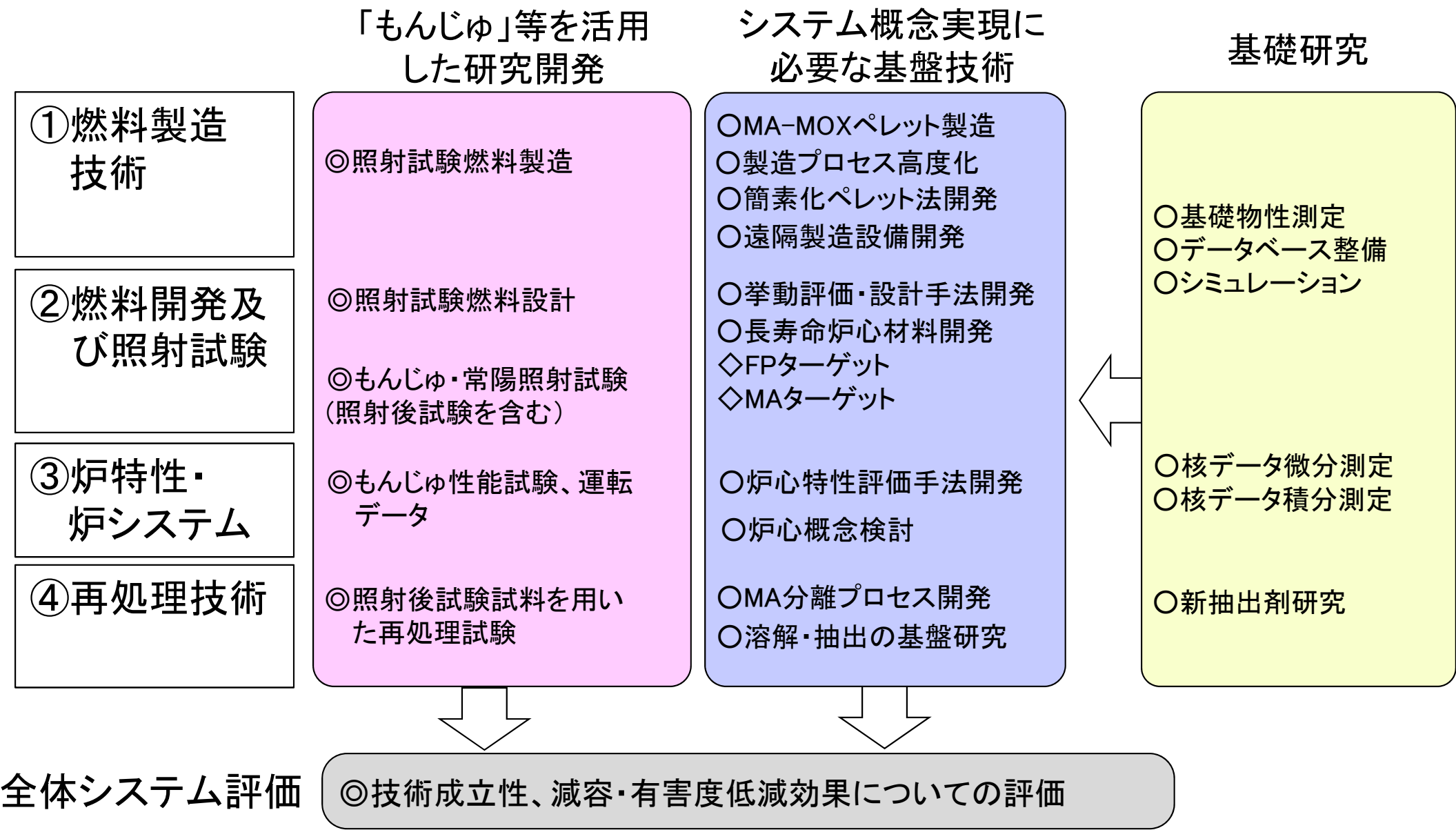


もんじゅ成果とりまとめ  
廃棄物減容等のための研究

研究開発施設  
工学規模施設 小規模施設

|       |       |
|-------|-------|
| 利用可能* | 利用可能* |
| 改造必要  | 改造必要  |

\* 試験設備整備は必要



◎、○: 均質サイクルの課題又は均質/非均質サイクル共通の課題      ◇: 非均質サイクル特有の課題



## 研究開発・基盤技術開発・基礎研究

照射試験燃料製造

### 実績と現状技術

東海Pu施設で18tHMの高速炉MOX燃料製造

**【MOX燃料組成範囲】**

- ・Pu30%
- ・崩壊生成Am2%
- ・軽水炉U燃料由来Pu

**【プラント概念】**

- ・グローブボックスに収納
- ・遠隔自動運転
- ・直接保守

ペレット製造プロセス技術  
 ・MA含有率増加  
 ・Pu富化度増加

製造プロセスの高度化  
 ・発熱対策  
 ・高線量下検査技術  
 ・乾式リサイクル技術

組成範囲拡大

基礎物性  
測定・研究

製造遠隔化

遠隔製造に適合した製造プロセス開発  
 ・簡素化ペレット法

設備の保守・補修性向上

遠隔製造設備技術

### 概念実現に必要な技術

均質MAサイクルMOX燃料製造

**【MOX燃料組成範囲】**

- ・Pu40%
- ・MA5%
- ・軽水炉MOX燃料由来Pu

**【プラント概念】(注)**

- ・セルに収納
- ・遠隔自動運転
- ・遠隔保守

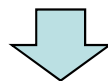
(注)MA組成によっては、グローブボックス、直接保守の可能性もある。

## 当面の技術開発

- 遠隔燃料製造に適した製造プロセス(簡素化ペレット法)の開発
- 燃料製造自動化設備の改良高度化

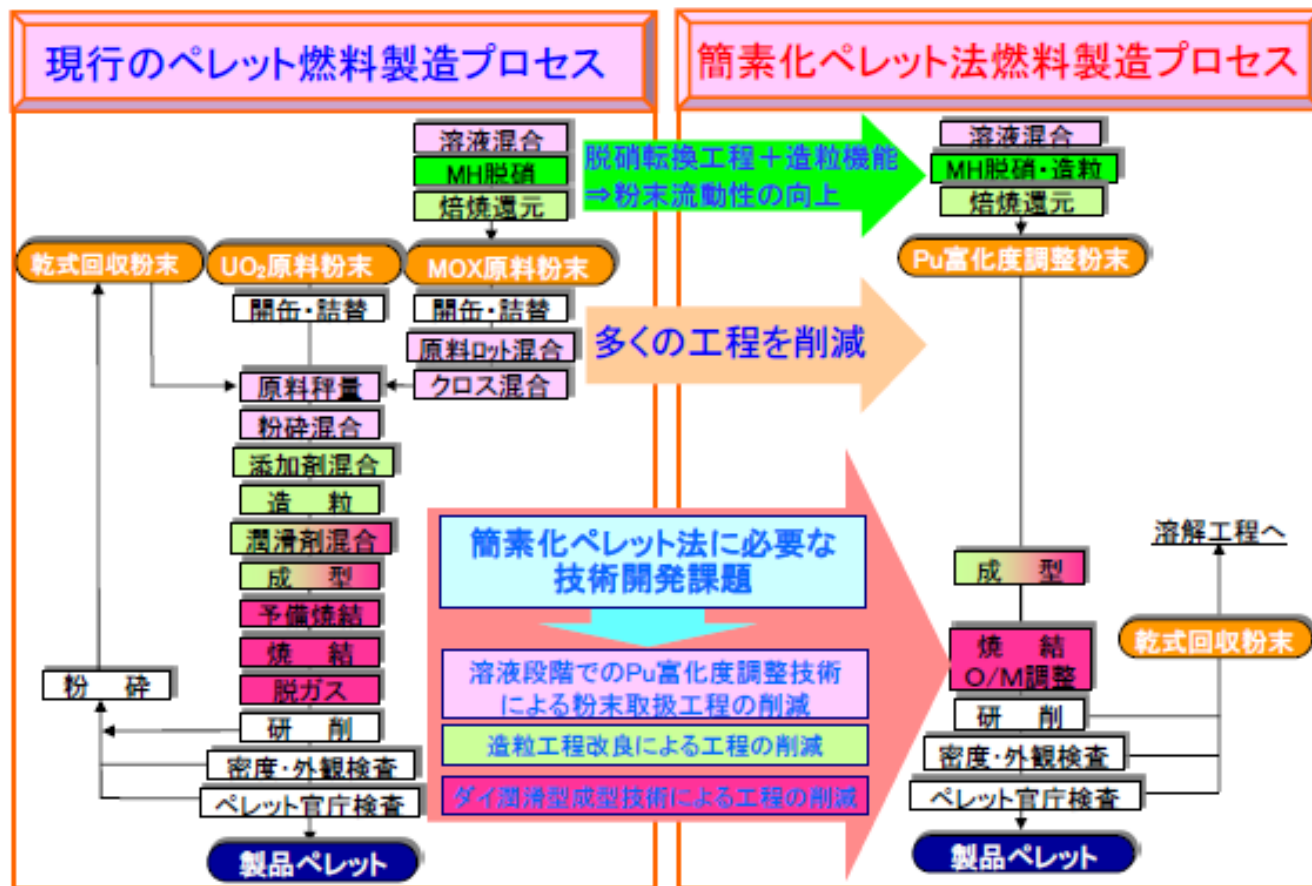


Am含有MOX燃料製造に段階的に適用



## 完全遠隔燃料製造に向けて(将来)

- 遠隔保守に対応した設備技術、プロセス技術
- Cm含有の影響確認



## 遠隔燃料製造用の燃料製造プロセス開発



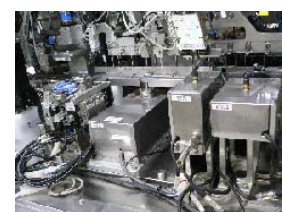
モリブデン皿



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

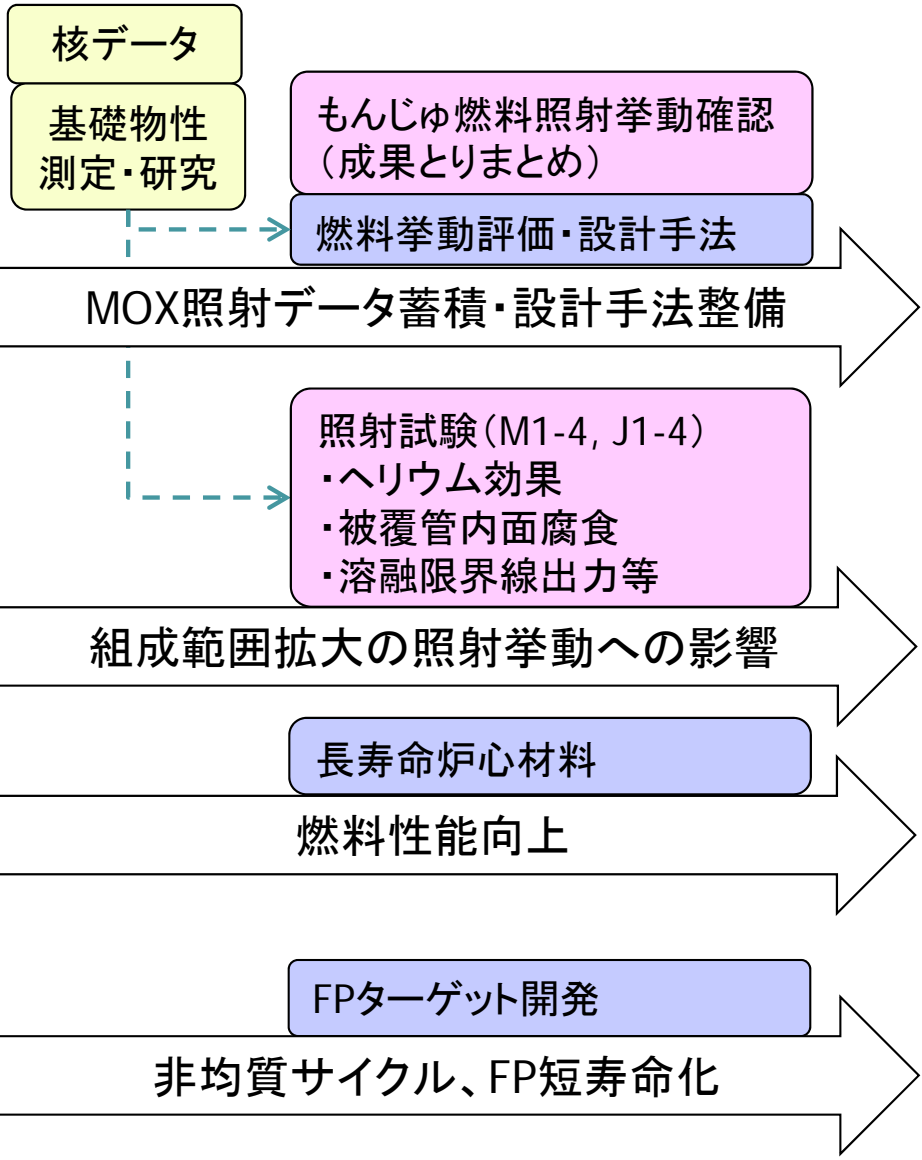
ペレット搬送の不具合を解決することにより設備信頼性向上が期待されるペレット研削・検査工程設備内でのペレットの流れ



### 研究開発・基盤技術開発・基礎研究

#### 実績と現状技術

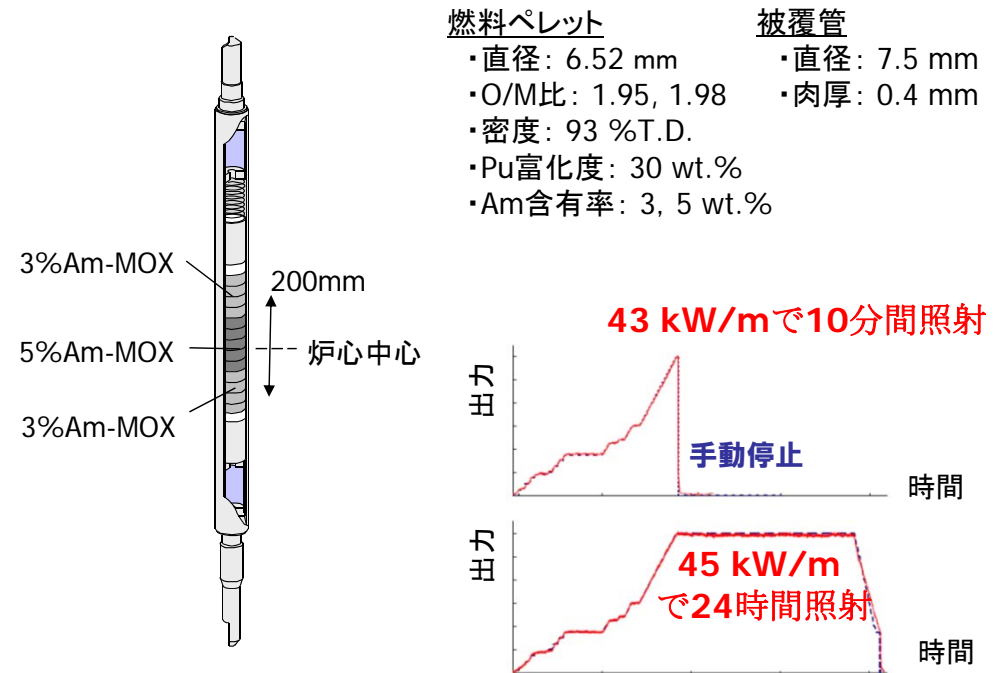
- 「常陽」614体、「もんじゅ」287体のMOX燃料装荷
  - ・約700W/cm
  - ・約144GWd/t
- 「常陽」103体、海外照射ピン49本のMOX燃料の照射後試験
- OMA-MOX燃料照射
  - ・「常陽」(Am-1, B14)
  - ・仏(SUPERFACT)
  - ・米(AFC)
- 高Pu-MOX燃料照射
  - ・仏(CAPRIX1)
  - ・米(HEDL/ANL 08)
- ターゲット燃料概念検討段階



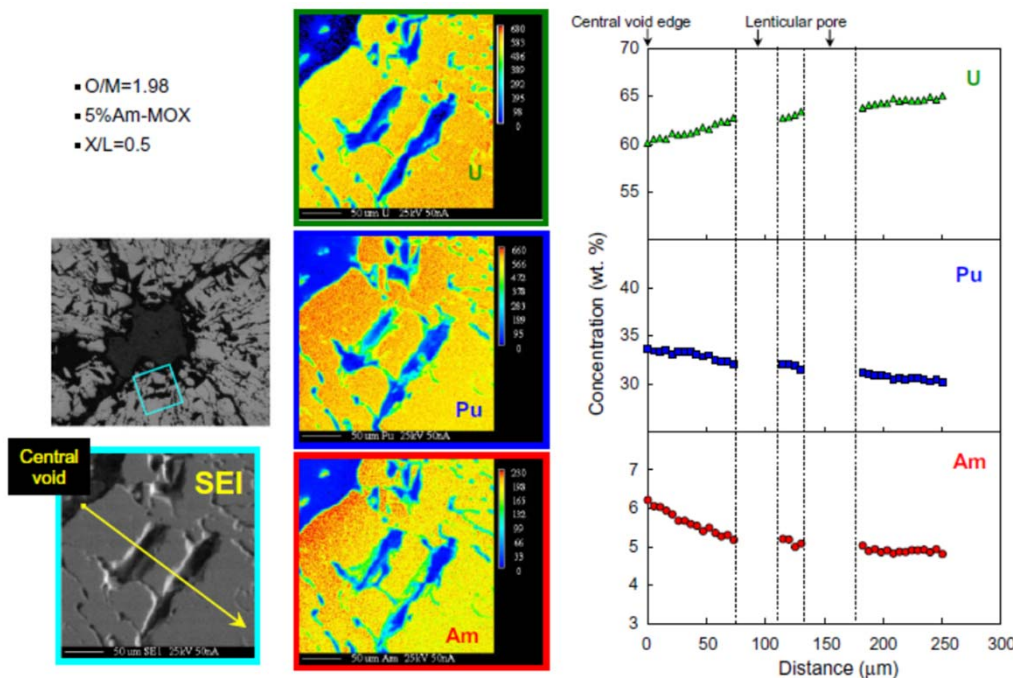
#### 概念実現に必要な技術

- 【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

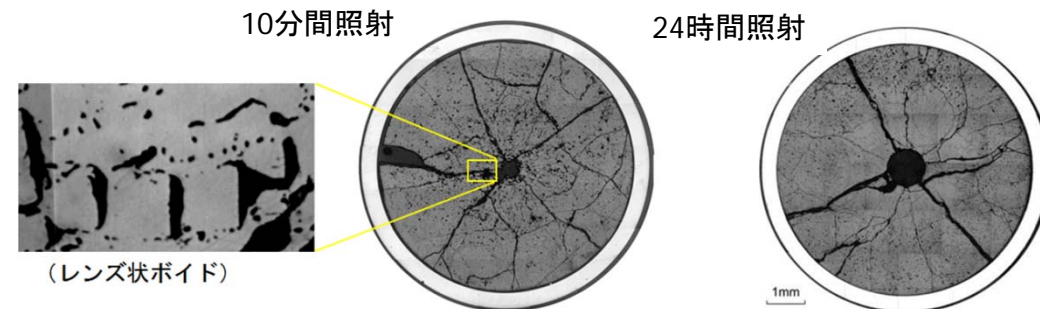
- Amを最大5%含有するMOX燃料の常陽短期照射試験により、燃焼初期のAmの挙動データを取得し、Am含有効果は小さいことを確認した。
- 今後、燃焼度、線出力等のデータ出力範囲を拡張するとともに、もんじゅでの実規模照射により、Am含有MOX燃料が炉内使用期間中を通じて問題なく使用できることを確認する。



Am-1短時間照射試験の設計仕様と照射条件



Am-1短時間照射試験後の中心空孔部周辺のU、Pu、Amの濃度分布



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

| 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、燃焼初期溶融限界出力試験(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                            |

| 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) | ■■■■■    |            | ■   | ■■■■■  |       | ■■■■■  |       | ■     | ■■■■■ |    |

データ充足が必要な領域

従来知見

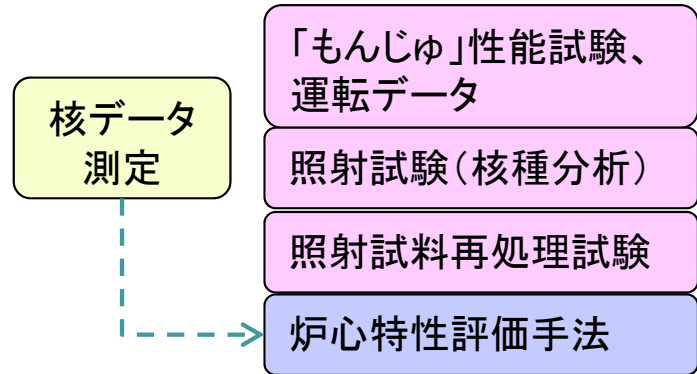
- ①MA変換データの取得 実機炉心でのMA各変換積分データを取得する必要。
- ②ヘリウム効果 MA含有、高Pu富化度化に伴うHeガス生成量増加による影響を確認する必要。(特に実規模ピン)
- ③破損防止 高燃焼度範囲、高被覆管温度で、O/M比依存性を考慮した被覆管内面腐食挙動を確認する必要。(特に実規模ピン)
- ④燃料溶融防止 MA含有、高Pu富化度による融点、熱伝導度の低下を考慮し、高線出力条件での挙動、溶融有無の確認が必要。Pu,MA再配分挙動、熱伝導度への感度を考慮してO/M比依存性の確認も重要。
- ⑤サイクル技術 MA含有、高Pu富化度MOX燃料の製造技術及び再処理技術並びにMA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



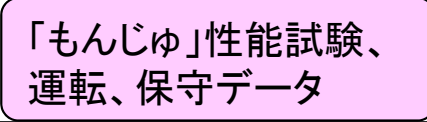
## 研究開発・基盤技術開発・基礎研究

### 実績と現状技術

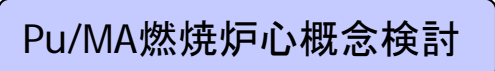
- 【MOX炉心】**
  - 「常陽」614体、「もんじゅ」287体のMOX燃料装荷
  - ・「常陽」で軽水炉使用済燃料由来のPuを利用
- 【Na冷却発電プラント】**
  - 各国で運転実績蓄積
  - FaCTでMA均質サイクル実用プラント概念研究
- 【核変換炉心概念研究】**
  - MA均質サイクル炉心の設計例多い
  - Pu燃焼炉心の設計例少ない



実機MOX炉心特性、Pu/MA燃焼特性



実機発電プラント運転経験



核変換炉心概念

### 概念実現に必要な技術

- 【MA含有MOX炉心】**
  - 均質サイクル炉心の特性、燃焼特性及び炉心安全性評価
  - 核変換積分検証
- 【Na冷却発電プラント】**
  - 「もんじゅ」での運転性能確認、運転・保守経験蓄積
- 【核変換炉心概念研究】**
  - 核変換炉心(各モード)の概念の絞り込み



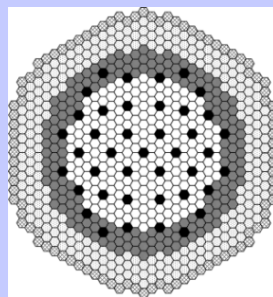
## 「もんじゅ」等を活用した研究開発



- ◎「もんじゅ」性能試験、運転データ
  - ・高次化Pu及びAmを含むMOX炉心の炉物理特性
  - ・実機でしか得られない温度特性及び燃焼特性データ
- ◎「もんじゅ」・「常陽」照射試験
  - ・高Pu富化度、高次化Pu、MA含有MOX燃料の照射後試験データ(燃料設計評価データ、核種組成変化)

## システム概念実現に必要な基盤技術

- 炉心概念検討
  - ・原子力エネルギー利用シナリオに柔軟に対応可能なPu・MA燃焼炉心概念を検討



- ・炉心安全性評価: 受動的炉停止機構の適用性やシビアアクシデントにおける事象推移を評価
- 炉システム概念検討
  - ・プラントへの影響評価
  - ・高発熱燃料の取扱い方法検討

## 基礎研究

- 核データ微分測定
  - ・高速中性子領域におけるMAの捕獲反応断面積の高精度測定
- 核データ積分測定
  - ・「常陽」を用いた高次化Pu、MAのサンプル等照射(核種組成変化)
  - ・測定データの高精度化技術開発



- Pu・MA燃焼炉心の特性把握(5年程度)
  - (「もんじゅ」性能試験、「常陽」サンプル等照射データを活用)
- Pu・MA燃焼システムの具体化(10年程度)
  - (「もんじゅ」運転・照射試験データを活用)

## 研究開発・基盤技術開発・基礎研究

### 実績と現状技術

#### 【MOX燃料再処理】

- ・「常陽」ピン72本、海外試験ピン11本のMOX燃料を対象に再処理試験を実施(MA含有量～1.5%程度)

#### 【MA分離】

- ・抽出剤の選定(TODGA, R-BTP)
- ・Am,Cm回収率(95%以上)
- ・FP除染係数(概ね100以上)

「もんじゅ」、「常陽」照射試験燃料の再処理試験

溶解・抽出の基盤研究  
 ・溶解性、残渣性状  
 ・抽出性、溶媒劣化

MA-MOX、高Pu-MOX燃料の再処理特性

新抽出剤創成研究

MA分離プロセスデータ蓄積

MA分離プロセス開発  
 ・抽出クロマトグラフィー  
 ・溶媒抽出

### 概念実現に必要な技術

#### 【MA-MOX、高Pu-MOX燃料再処理】

- ・フローシート具体化

#### 【溶解・抽出】

- ・溶解性、残渣挙動
- ・抽出性

#### 【MA分離】

- ・MA回収率
- ・除染性能(DF)
- ・廃液発生量
- ・分離フローシート

## システム概念実現に必要な基盤技術

「もんじゅ」等を活用した研究開発



「もんじゅ」 「常陽」

照射後試験の試料を用いた再処理試験

- ・MA高含有MOX燃料による分離性能確認  
(「もんじゅ」燃料処理廃液)



「常陽」 CPF(核燃料サイクル工学研究所)

基盤データの取得

- ・創成抽出剤の評価
- ・担体構造の最適化
- ・データ取得試験での改良
- ・スラッジ挙動、溶解挙動、抽出分離性能  
(コールド、常陽使用済燃料廃液)

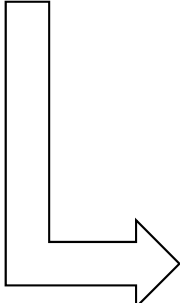
## 基礎研究



NUCEF (原子力科学研究所)

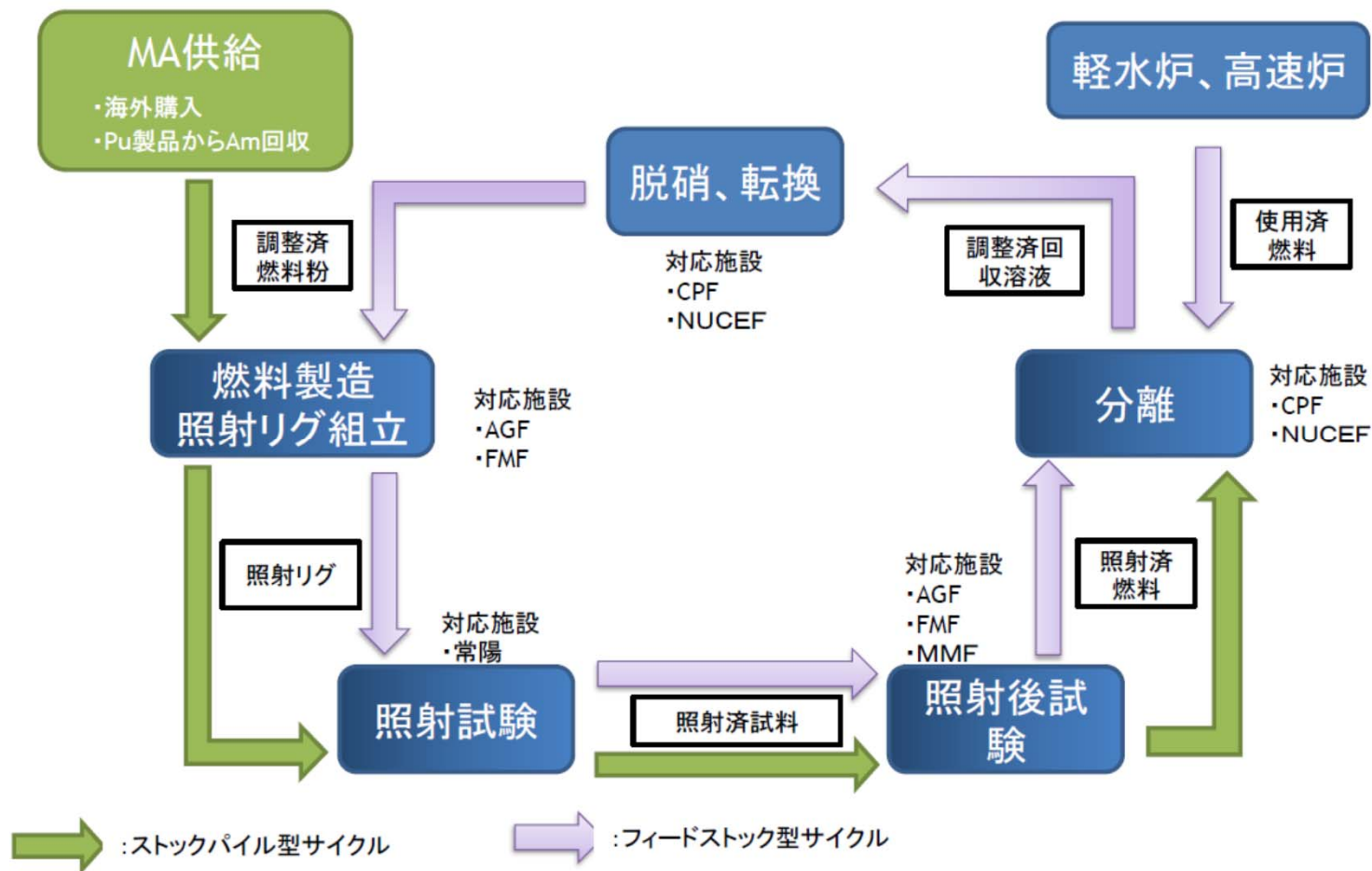
新抽出剤研究

- ・MA抽出剤の創成
  - ・MAとLnの回収剤
  - ・MAとLnの分離剤  
(コールド、トレーサRI等)



- MA分離プロセスデータ蓄積、MA-MOX・高Pu-MOX燃料の再処理特性(5~6年程度)
  - ・MA分離回収フローシートの構築
  - ・高Am含有・高Pu富化度MOX燃料の溶解・分離性能把握
  - ・シミュレーションコード反映への基礎データ取得
- 照射済燃料によるMA、高Pu-MOX燃料の再処理フローシート検証(10年程度)

- これまで実施された照射試験、もんじゅ研究計画の照射試験のMA原料は、海外から購入したNp、Am又はPu製品から回収したAmに限られ、分離から燃料製造に至る各プロセスにおける物質収支、FPの影響等の知見は得られていない。
- 少量ではあるが、既存施設を活用して、使用済燃料から分離、転換、燃料製造、照射、照射後試験の一連の処理を行う計画。(SmART: Small Amount of Reused fuel Test)



- 「もんじゅ研究計画」の高速増殖炉開発の成果の取りまとめにより、Na冷却MOX燃料高速炉での原子炉級Puのリサイクルを「もんじゅ」炉心規模で実証する。
- 「もんじゅ研究計画」の廃棄物減容・有害度低減研究として、Amを多く含むMOX炉心のデータを「もんじゅ」で取得するとともに、高次化PuやAm及びNpの均質サイクルに関する燃料製造、照射、照射後試験、再処理試験を実規模を見通せるレベルで行い、Na冷却MOX燃料高速炉サイクルシステムの廃棄物減容・有害度低減に関する有効性の確認を行う。MA分離技術については、新抽出剤の開発研究と連携しつつ、溶解・抽出フローシート構築に向けた研究を進める。
- 使用済燃料からのMA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行うことにより、サイクル施設での物質収支等の知見を得る取り組みを既存施設を用いて進める。
- もんじゅ等での照射試験、その試験燃料の製造、原料物質調達、照射後試験等を国際協力として行うとともに、MA分離技術開発、遠隔燃料製造技術開発等のADSサイクルとの共通技術や基礎基盤研究については、Na冷却MOX燃料高速炉以外の研究活動との連携を図る。