

# 廃棄物の減容・有害度の低減のために 「もんじゅ」等を活用して行うべき研究開発について

## 【第2回資料1-4からの主な変更点】

- ・原子炉運転計画と照射試験計画を追加(P14, 15)
- ・FP挙動についての参考資料追加(P32, 33)
- ・Pu同位体組成についての参考資料追加(P34)
- ・廃棄物減容、有害度低減の効果についての参考資料追加(P35-37)

平成24年11月21日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

1. 高速中性子炉の燃料開発
2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

参考資料-1 「常陽」の復旧計画

参考資料-2 MA含有燃料、高Pu富化度燃料の照射試験実績  
(酸化物燃料)

参考資料-3 MA含有燃料、高Pu富化度燃料の核分裂生成物  
(FP)の照射挙動

参考資料-4 Puの同位体組成の例と核的特性

参考資料-5 廃棄物減容、有害度低減の効果に関する補足説明



# 1. 高速中性子炉の燃料開発

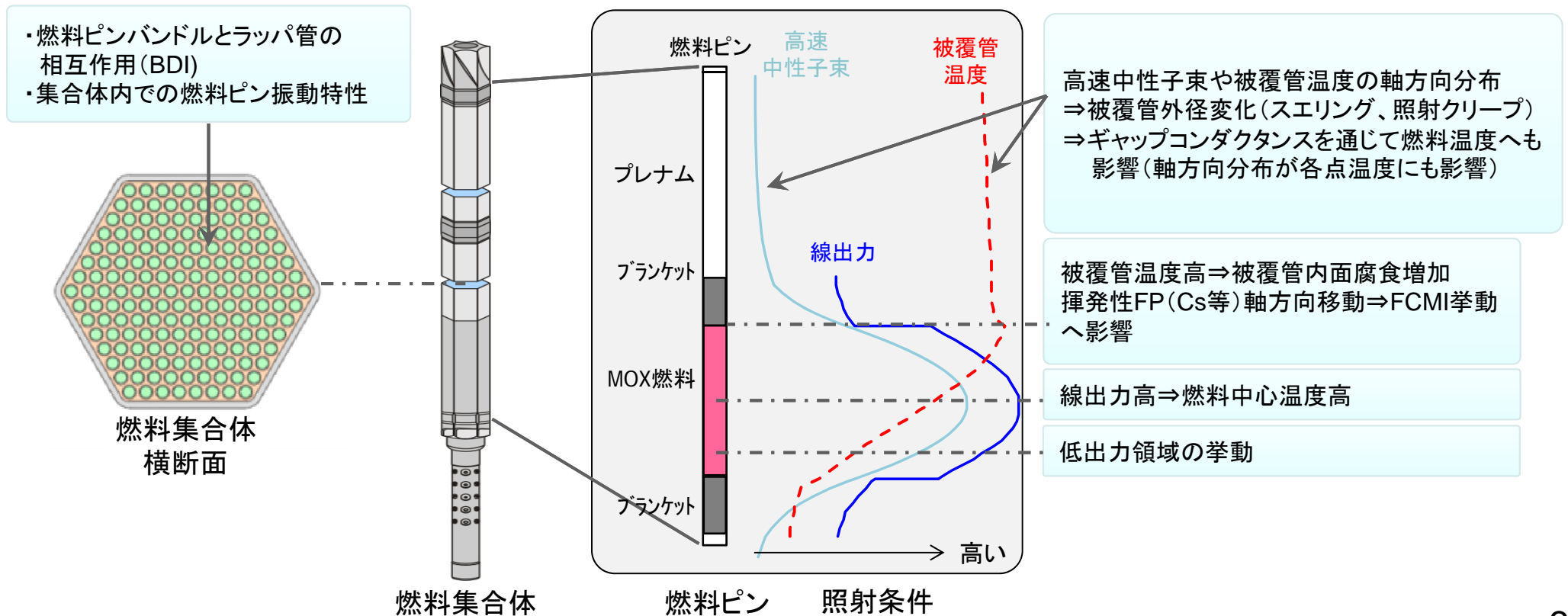
## ① 世界の主な中性子照射場の現状

第1回作業部会  
山名主査、山口委員  
指摘事項

- 世界的に高速中性子照射場は限られる
- 特に「もんじゅ」は、実規模燃料集合体の照射が可能

国	原子炉	炉種別	熱出力 (MW)	高速中性子束 ( $10^{15}n/cm^2s$ )	燃料長 (mm)	現状	照射機能の特徴	照射後試験 (PIE) 施設
日	常陽	実験炉	140	4.0	500	停止中	燃料・材料各種照射、限界照射、オンライン計測、制御照射	燃料体、燃料、材料試験施設
	もんじゅ	原型炉	714	3.7	930	停止中	実規模燃料照射	燃料検査設備
露	BOR-60	実験炉	60	2.2	450	運転中	燃料・材料各種照射、限界照射、オンライン計測、制御照射	燃料体、燃料、材料試験施設
	BN-600	原型炉	1470	4.0	1030	運転中	基本的に材料照射のみ可 解体核処分燃料照射の実績	燃料体解体・検査施設
	MBIR (BOR-60 後継炉)	研究炉	150	6.0	600	2019年 運開予定	燃料・材料各種照射、限界照射、オンライン計測、制御照射	燃料体、燃料、材料試験施設
仏	Phenix	原型炉	350	2.6	850	運転終了	実規模燃料照射、限界照射	燃料体解体・検査施設
	Astrid	実証炉	1500	不明	1100 or 800/900	2023年 臨界予定	未定	未定

- 照射中の燃料集合体では、照射条件が軸方向に大きく変化し、燃料ピン挙動に影響を与えるとともに、各種の相互作用が発生
- 「もんじゅ」は、このような燃料挙動の確認、データ取得が可能



### ● 「常陽」

#### ➤ 実施可能な照射試験

- カプセル照射、特殊容器内での照射による新概念燃料の照射特性の確認
- 限界条件での試験による燃料の限界性能の確認
- 短尺燃料の比較照射による燃料仕様(燃料組成、密度、寸法等)や照射条件(線出力、燃焼度、被覆管温度、高速中性子照射量等)と燃料挙動との相関関係を確認

#### ➤ 新概念燃料の開発、基本設計(燃料仕様や照射条件設定)に利用

### ● 「もんじゅ」

#### ➤ 実施可能な照射試験

- 実規模燃料集合体の定常条件での照射
- 試験燃料ピンを組み入れた実規模燃料集合体の定常条件での照射

#### ➤ 基本概念が確立した燃料の設計妥当性確認に利用



常陽での照射試験

もんじゅでの照射試験



# 1. 高速中性子炉の燃料開発

## ④ 燃料照射試験関連施設の現状

第1回作業部会  
山名主査指摘事項

● 照射試験は、燃料開発、照射試験燃料製造、照射、照射後試験、試験データ評価と連携して実施

### 【MOX燃料製造実績】

もんじゅ燃料集合体 366体(約11tonHM)  
うち、同上試験用燃料集合体 5体  
(中性子束分布測定用)  
常陽燃料集合体 676体(約7tonHM)  
常陽試験燃料ピン 942本(約0.1tonHM)



燃料集合体

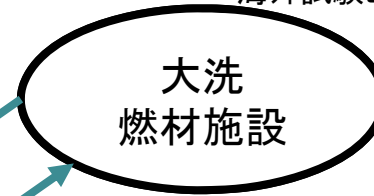


### 【MOX燃料照射実績】

燃料集合体 287体  
最高線出力 約150 W/cm  
最高燃焼度 約6 GWd/t

### 【MOX燃料試験実績】

常陽燃料集合体 103体  
うち、試験用燃料集合体 41体  
海外試験ピン 49本



試験燃料ピン

燃料集合体  
試験燃料ピン



照射済燃料集合体  
(再装荷含)

### 【MOX燃料照射実績】

燃料集合体 614体  
最高線出力 約700 W/cm  
最高燃焼度 約144 GWd/t



### 【MOX燃料再処理試験実績】

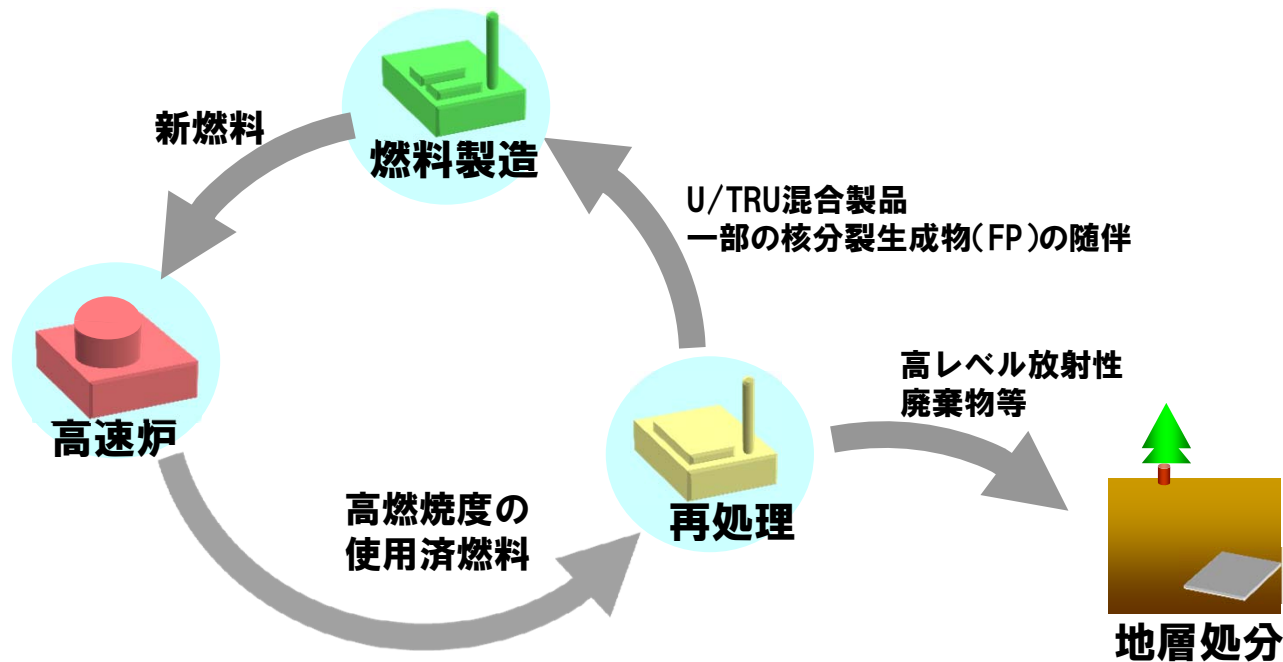
常陽燃料ピン 72本(約11kgHM\*)  
海外試験ピン 11本相当(約2 kgHM)  
(常陽燃料ピンの一部はリサイクルし再度燃料ピンに加工して「常陽」にて照射)

\* 軸方向ブランケットを含む

## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ① 廃棄物から見た高速炉サイクルシステムの特徴

- 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
- 余剰中性子を用いて長寿命FPの消滅処理の可能性
- 発電用高速炉システムは、安全性、経済性等との調和を追求



## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ② 高速炉サイクルシステムによる廃棄物減容、有害度低減

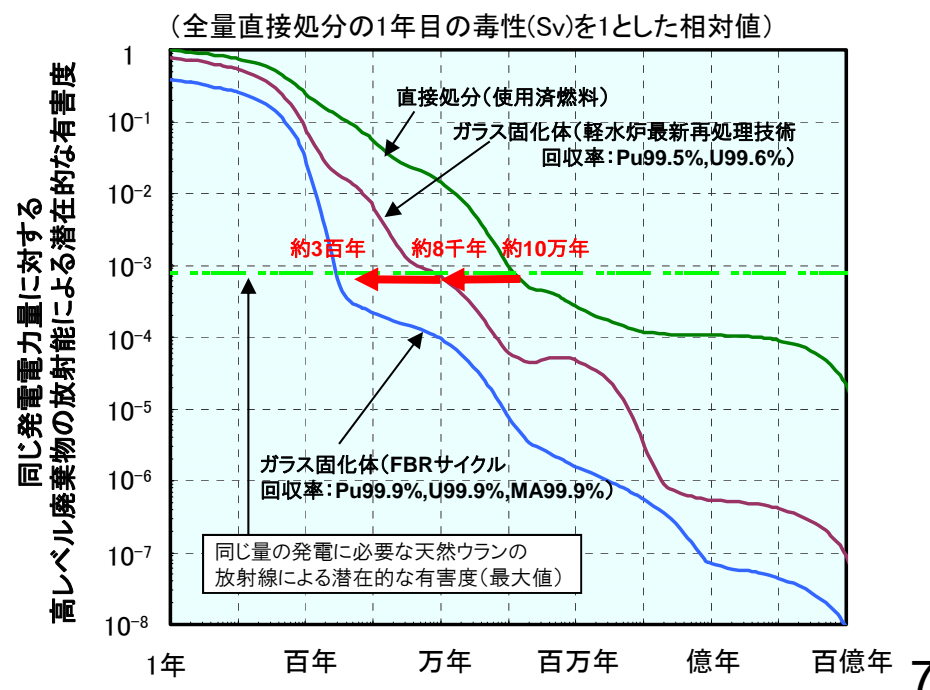
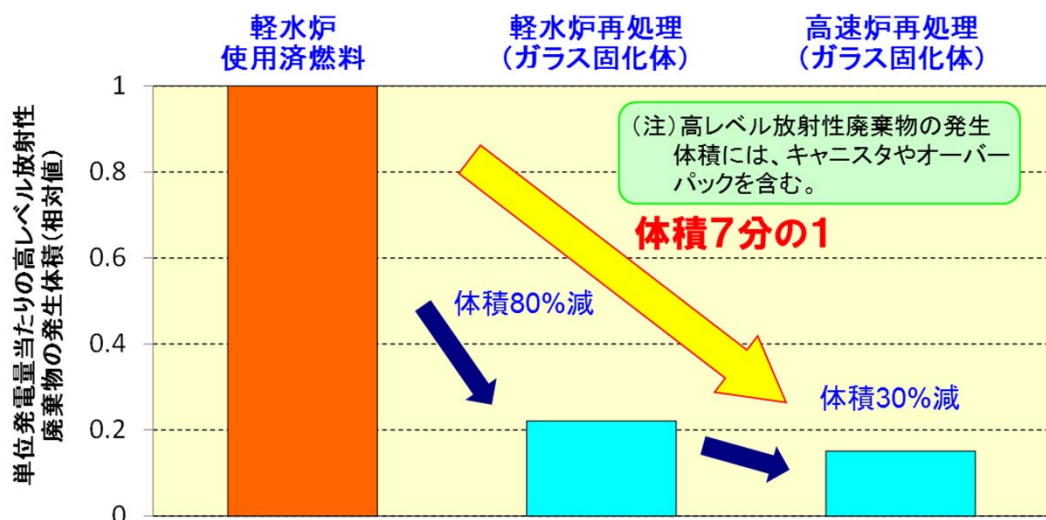
第1回作業部会  
稲田委員指摘事項

#### ● 軽水炉燃料直接処分と高速炉サイクルのガラス固化処分の比較

- 高レベル放射性廃棄物発生量低減
- 高レベル放射性廃棄物の廃棄体定置面積低減
- 高レベル放射性廃棄物の潜在的な有害度の低減

#### ● 軽水炉燃料を再処理し、高速炉サイクルで利用した場合の変化

- 使用済燃料量低減
- Puインベントリ低減 (Pu燃焼型高速炉の場合)

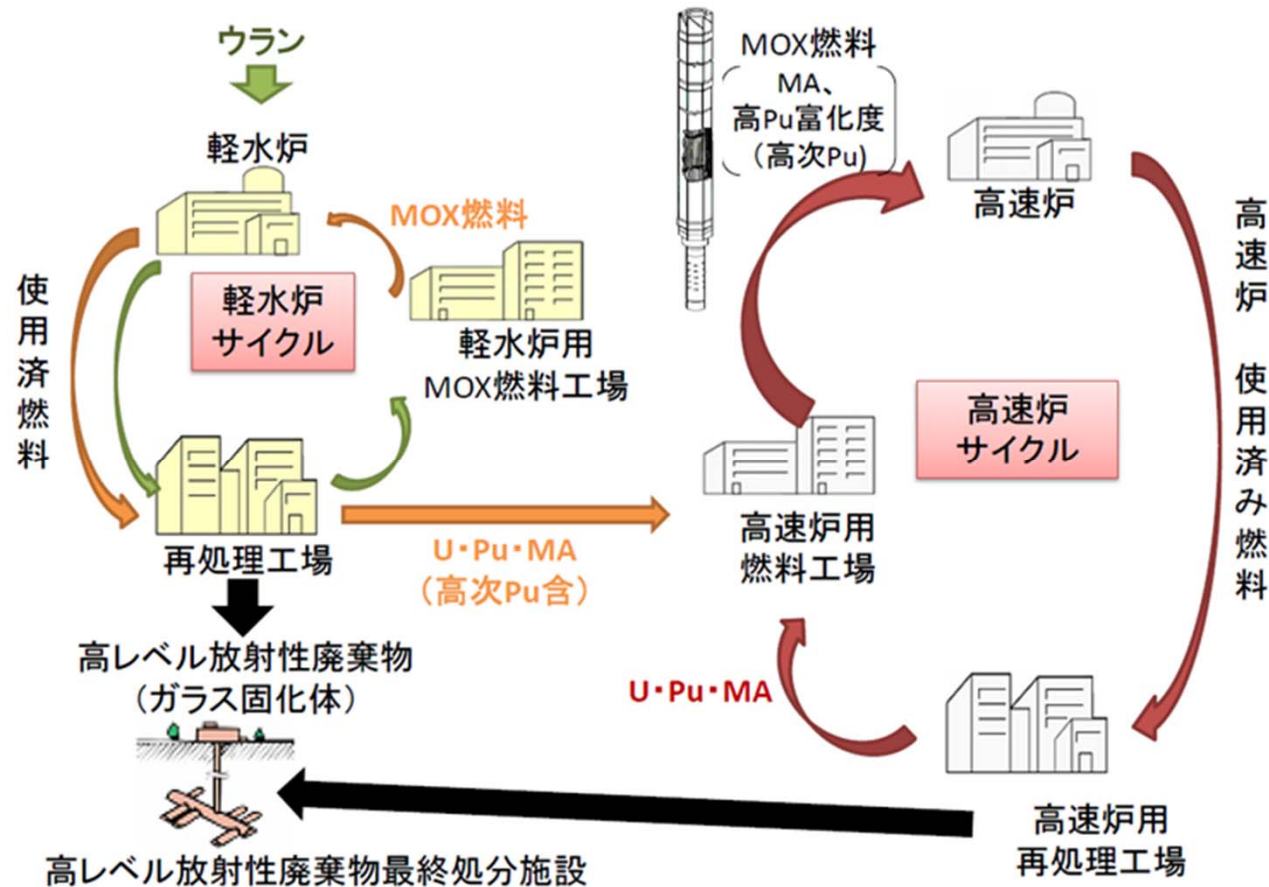




## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ③ 研究開発の対象

- 発電用高速増殖炉サイクル技術として開発中のMA均質サイクル
- 使用済軽水炉MOX燃料からの高次化Puの高速炉での利用
- 軽水炉使用済燃料の蓄積Pu量低減に有効な高Pu富化度燃料

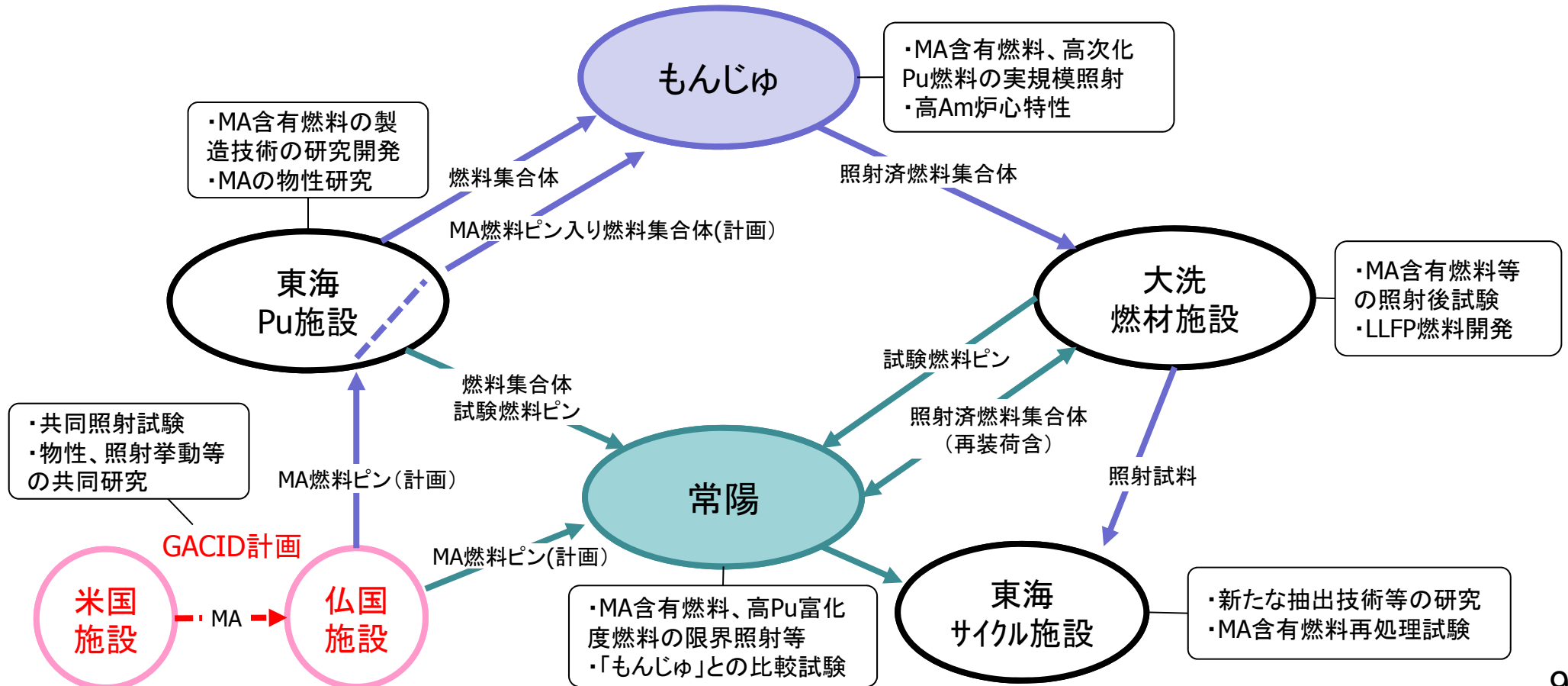




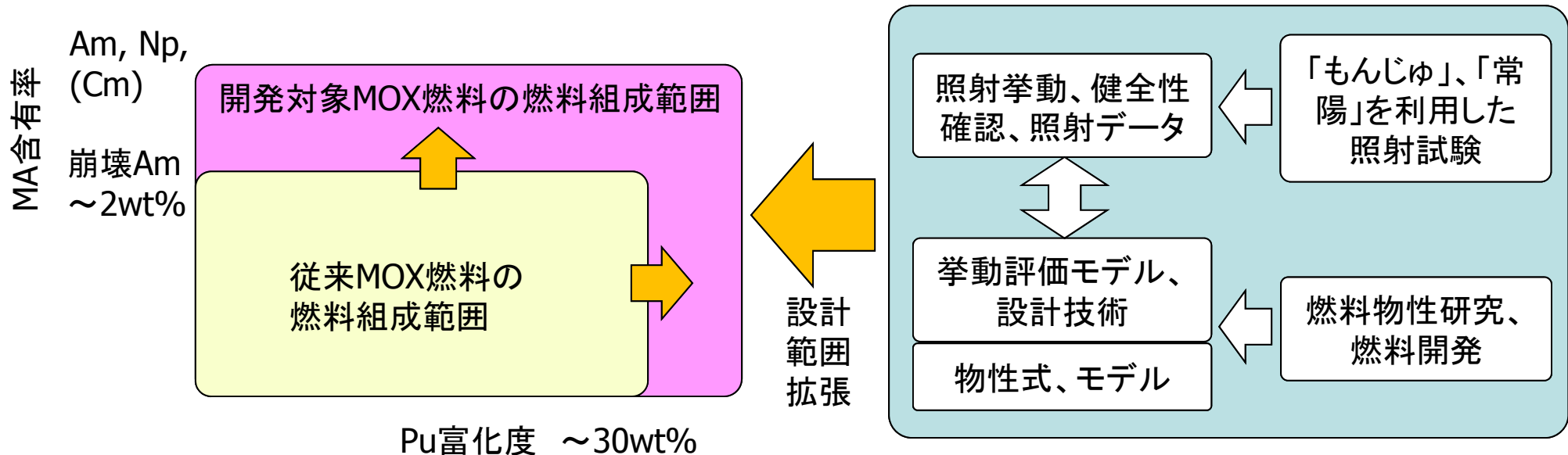
## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ④ 研究開発の全体像

- MA含有、高次化Pu利用及び高Pu富化度のMOX燃料の照射試験
- 「もんじゅ」の高Am含有MOX炉心での性能試験、定格運転
- MA均質サイクルのための分離プロセス、燃料製造技術の研究開発



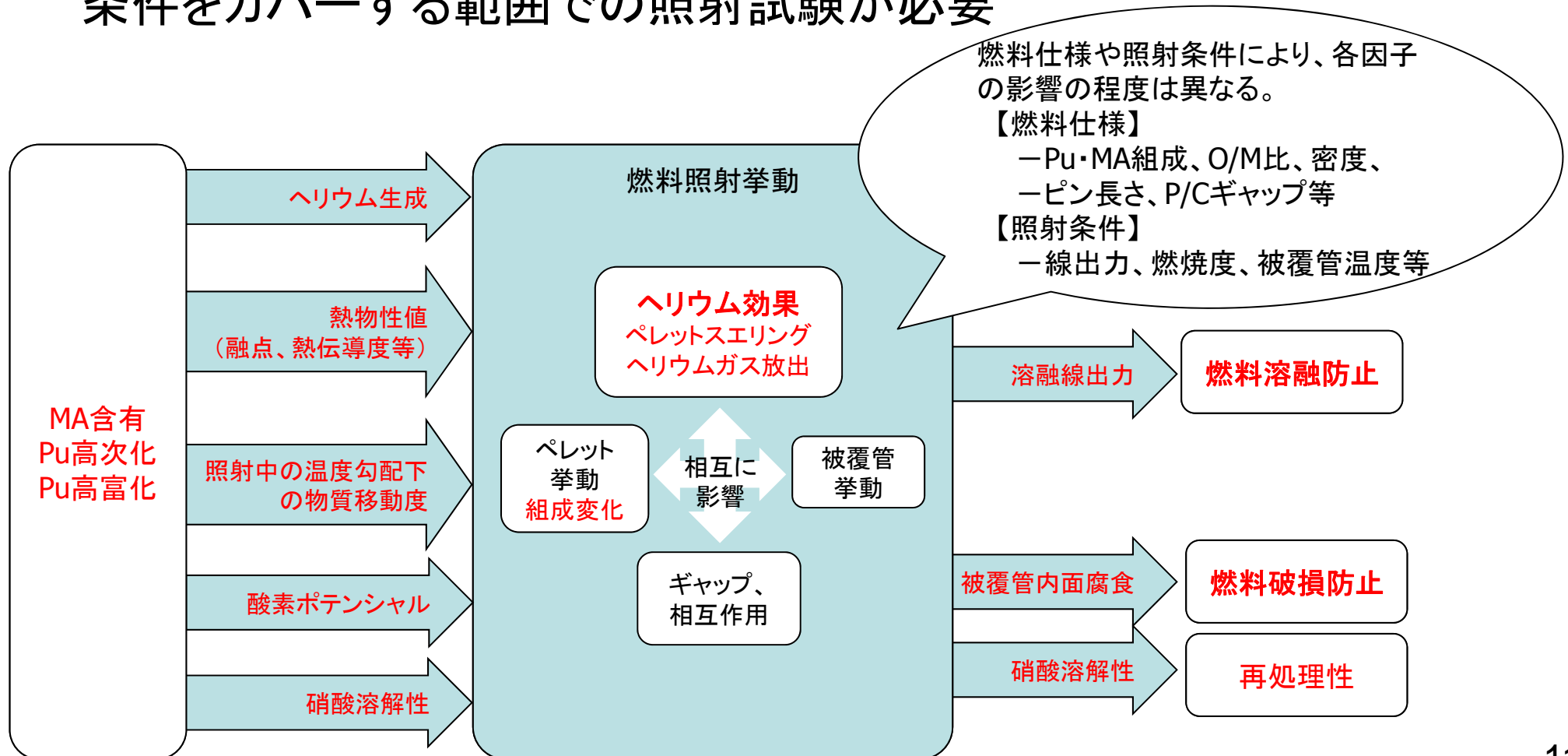
- 従来燃料と開発対象燃料の組成比較
  - 従来MOX燃料 (Pu30%以下、崩壊生成Am2%以下、軽水炉ウラン燃料由来Pu)
  - 開発対象MOX燃料 (Pu35-40%、MA5%以下、軽水炉MOX燃料由来Pu)
- 従来燃料と基本的な照射挙動は同じと考えられ、従来MOX燃料に対する知見を踏まえつつ、組成相違点による影響を調査
- 「常陽」での短尺試験ピンでの分析的な試験と「もんじゅ」での実規模長尺燃料ピン及び燃料集合体試験での総合的な試験を組合せ



## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ⑥ 開発対象燃料の着目すべき照射挙動

- MA含有、Pu組成高次化、Pu富化度増加による照射挙動への影響をもれなく調べるには、実際の燃料に想定される燃料仕様の変動、照射条件をカバーする範囲での照射試験が必要





## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ⑦ MA含有、高Pu富化度MOX燃料の照射実績

#### ● MA含有MOX燃料の照射実績

##### ➤ 常陽 Am-1、B14試験

- Am:5wt%、Np:2wt%の範囲で燃焼初期、高線出力までの照射挙動データを取得している。
- O/M比をパラメータとしたPu、MAの再分布挙動、組織変化挙動データ等を取得している。

##### ➤ 仏国 Phenix SUPERFACT試験

- Am:2wt%、Np:2wt%の実規模ピン(低O/M比)の中燃焼度までの照射実績を取得。特異の現象は認められていない。

##### ➤ その他の試験

- 米国ATR(熱中性子炉)においてAm:3wt%、Np:2wt%の短尺ピン、露国BOR-60においてNp:5wt%のバイパック燃料のデータがあり、参考データとして有用となる。

#### ● 高Pu富化度MOX燃料の海外照射実績

##### ➤ 米国EBR-II、仏国Phenix CAPRIX1試験

- Pu富化度40wt%の短尺ピン(米国EBR-II)、Pu富化度45wt%の実規模ピン(仏国Phenix炉 CAPRIX1試験)において、中燃焼度までの照射が実施され、線出力、被覆管温度は標準的条件をカバーしている。

## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ⑧ MA含有MOX燃料の従来知見と今後の課題

従来知見の範囲は限られており、以下のデータの取得が必要

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)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	常陽B14	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
実規模 ピン	仏 SUPERFACT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

データ充足が必要な領域

#### ①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。(特に長尺ピン)

#### ②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。(特に長尺ピン)

#### ③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。

#### ④硝酸溶解性

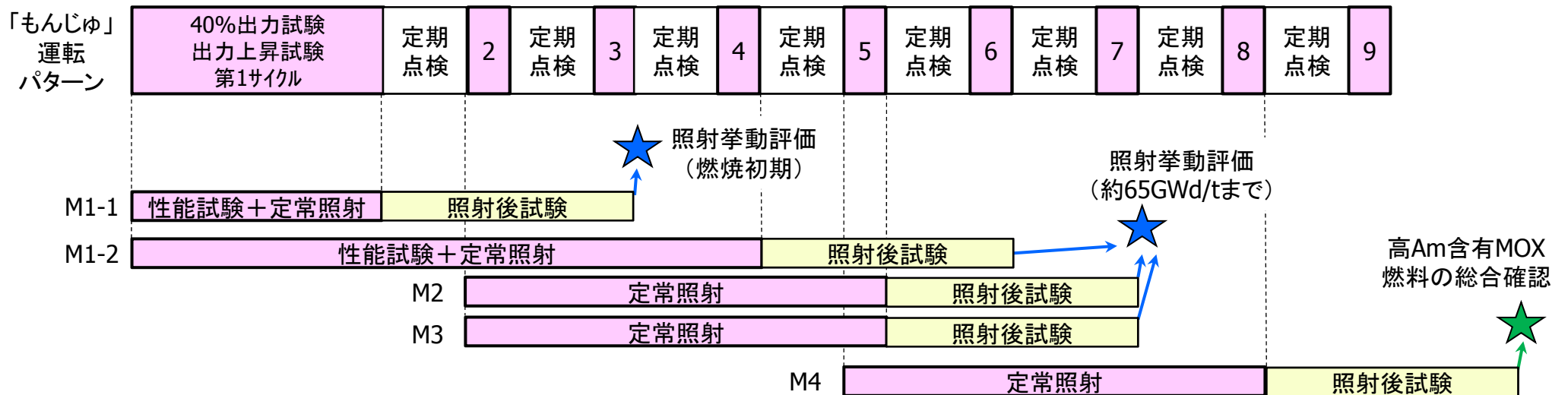
MA含有、高Pu富化度による硝酸への溶解性への影響評価が必要。



## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ⑨「もんじゅ」照射試験

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

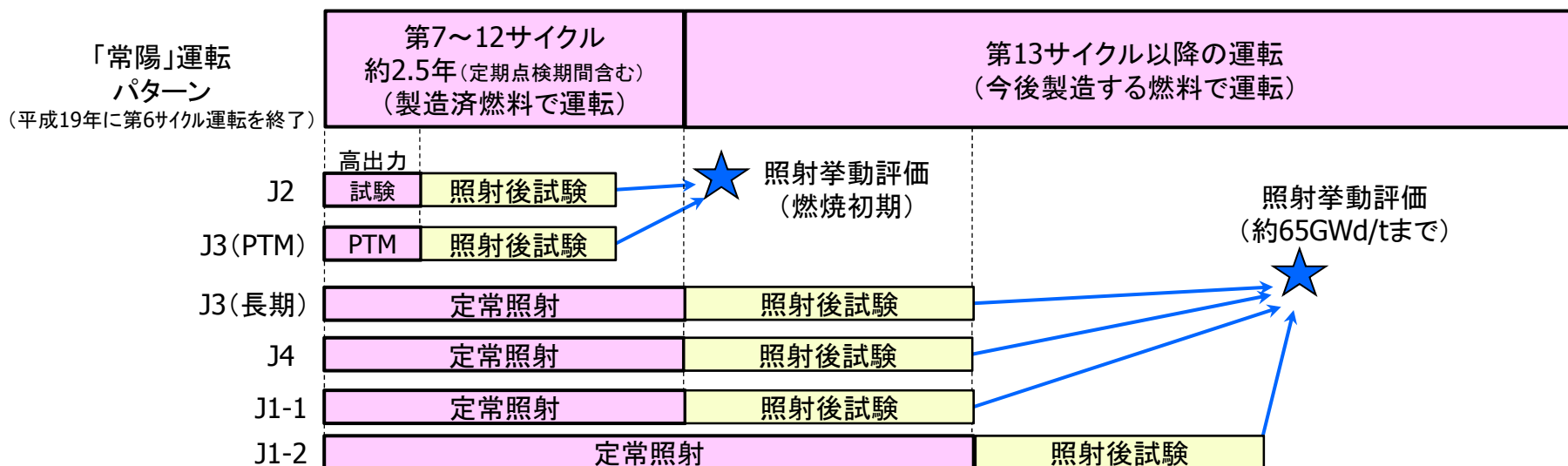




## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ⑩「常陽」照射試験

略号	照射試験名	目的	概要
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、P/Cギャップをパラメタとして、燃焼初期溶融試験 (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はM3と同じMA含有MOX燃料ピンの照射試験





## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ⑪ 照射試験で取得できるデータの反映(1/2)

#### ● ヘリウム効果

- 原型炉開発の一環として計画していた「もんじゅ」ドライバー燃料の照射後試験(M1)の対象燃料として、長期保管中に最大約2wt%Am蓄積した低燃焼度燃料集合体と中燃焼度燃料集合体を選定
- 新たに「ふげん」使用済みMOX燃料起源の高次化Puを適用したドライバー燃料の照射試験(M2)を実施
- これらの燃料の照射後試験により、実規模燃料でのHeガス生成、ペレット内挙動等による照射挙動への影響を詳細に確認

#### ● 破損防止

- 「常陽」でのO/M比、MA含有率、Pu富化度等をパラメータとした長期試験(J1、J3(長期)、J4)を実施し、被覆管内面腐食等の燃料ピン破損に影響する挙動を系統的、分析的に評価
- MA含有の「もんじゅ」実規模ピン(M3、M4)を長期に照射し、被覆管内面腐食挙動等を確認し、実機燃料への適用性を総合的に確認
- 「常陽」、「もんじゅ」で同一仕様の燃料ペレット(M3、J4)を照射し、燃料の「スケール効果」を評価



## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ⑫ 照射試験で取得できるデータの反映(2/2)

#### ● 燃料溶融防止

- 「常陽」においてO/M比、MA含有率、Pu富化度をパラメータとした高線出力短期試験(J2、J3(PTM))を実施し、溶融限界に係る直接的なデータを取得

#### ● 硝酸溶解性

- 「もんじゅ」ドライバ燃料の照射後試験の試料を用いた再処理試験を実施し、硝酸溶解性評価

#### ● MA核変換に係るデータ取得

- 「もんじゅ」燃料の照射後試験(M1、M3等)の照射後試験、再処理試験において、実機炉心でのMA核変換積分データを取得

#### ● 燃焼初期の挙動評価手法整備

- 「もんじゅ」第1サイクル後に取り出し照射後試験を行うM1試験及びJ2、J3(PTM)試験により、高Pu富化度、MA含有MOX燃料の系統的な燃焼初期挙動(Heガス関連挙動を含む)、溶融限界に係る系統的データ等を取得し、燃焼初期の照射挙動を総合的に評価し、挙動評価手法を整備

#### ● 燃焼燃料の挙動評価手法整備

- 「もんじゅ」第5サイクル後までに取り出し照射後試験を行う高Am蓄積MOX燃料、高次化Pu-MOX燃料、MA含有MOX燃料(M1～M3試験)により、燃焼度約65GWd/tまでの集合体規模での利用実証及び実規模ピンでの照射挙動データを取得
- 「常陽」で得られる燃焼度60GWd/t程度までの系統的データ(被覆管内面腐食、ペレットスエリング等)と併せて、MA含有MOX燃料、高次化Pu-MOX燃料及び高Pu富化度MOX燃料の照射挙動を総合的に評価し、挙動評価手法を整備

#### ● 全MA含有燃料の開発(長期的な計画)

- 長期的には、GACIDプロジェクトによる国際協力の下、高Am含有MOX燃料やCmを含む全MA含有MOX燃料のリサイクルを実証

### ⑭ サイクル技術に関する研究開発

#### ● MA分離、再処理

- 新抽出剤の開発、MA/Ln分離手法確立に向けた研究開発
- 抽出クロマトでのMA回収率、DF向上のための基礎基盤試験
- MA回収プロセスの比較検討
- 「もんじゅ」照射燃料を用いた再処理試験
  - 高Am含有MOXの溶解性
  - 燃料ピン規模での核種含有量分析

#### ● 燃料、燃料製造

- MA物性測定
- MA含有MOX燃料の製造技術開発
- 簡素化ペレット法の技術開発
- 高次化Pu-MOX燃料、高Pu富化度MOX燃料のための製造技術改良
- 照射試験燃料製造
- 炉心材料開発
- LLFPターゲット開発



## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ⑮ 研究開発の進め方

#### ● 「もんじゅ」

- 高Am含有MOX炉心の炉心特性及び燃焼特性に関する実機データを性能試験、定格運転を通じて取得
- 燃料照射としては、まず、運転用燃料集合体の照射後試験、現行設置許可で実施可能な照射試験により、MA含有MOX燃料、高次化Pu-MOX燃料の総合的な照射挙動を確認
- さらに開発要素の高い試験については、設置許可変更後に実施

#### ● 「常陽」

- 照射試験装置不具合の復旧工事完了後、運転を再開
- MA含有MOX燃料、高Pu富化度MOX燃料の照射試験を実施
- 長期的には非均質サイクル燃料、LLFPターゲット等の照射試験の実施を検討

#### ● サイクル施設

- 東海Pu施設、大洗燃材施設でMA物性測定、MA燃料製造技術の研究開発
- 東海Pu施設(GB設備)、大洗燃材施設(セル設備)で照射試験燃料製造
- 大洗燃材施設で照射後試験実施並びに炉心材料及びLLFPターゲットの研究開発
- 東海サイクル各試験施設を連携して、MA分離プロセス研究、再処理試験



## 2. 廃棄物減容、有害度低減のための研究開発

### ⑯ 国際協力

#### ● GACID (Global Actinide Cycle International Demonstration)

- GIF (Gen-4 International Forum) の下、日米仏3国で実施中
- 米国のMA原料を仏国でMA含有MOX燃料に加工し、「もんじゅ」で照射する計画を合意
- この枠組みをさらに拡大し、廃棄物減容、有害度低減のために実施する研究開発を含めることについて今後検討、関係国と調整

#### ● 日仏協力

- 仏国より、「もんじゅ」でのAstrid燃料の照射試験実施、Astrid用MOX燃料製造に関する共同検討を行いたいとの意向が表明されている
- Astrid協力を通じた技術開発について、我が国の開発体制維持等の効果も含め、検討する

#### ● 日米協力

- 先進湿式分離技術、海水ウラン回収技術等に関する協力(情報交換・共同開発)について検討中