

参考資料3-2-1 ①燃料製造技術 遠隔自動製造設備の高度化(1/2)

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。

(1)保守・補修性の向上

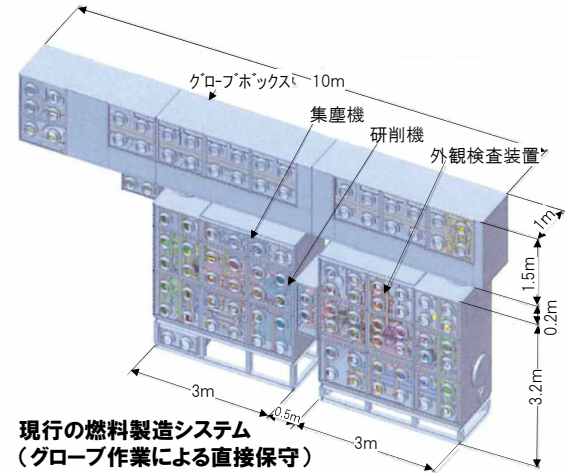
燃料製造自動化設備の保守・補修に必要な作業時間の短縮のための設備開発、保守方法の改良を行う。また、設備が重大故障に進展する前の段階で、設備異常をモニタリングできる診断技術を開発する。

(2)設備信頼性の高度化

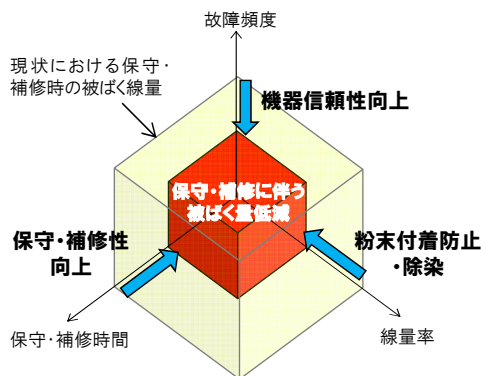
現行の燃料製造システムでMA含有MOX燃料等を製造する場合に、燃料製造設備の運転が極力停止しない高信頼性設備を得るために必要なペレット搬送、取扱システムの高度化を図る。

(3)粉末付着防止・除染技術

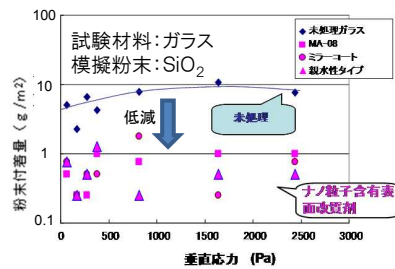
設備の保守・補修作業時等のグローブボックスの表面線量率の低減化を図るために、燃料製造設備に付着する燃料粉末を極力抑え、付着した粉末が容易に除去回収できる技術を開発する。



現行の燃料製造システム
(グローブ作業による直接保守)



保守・補修に伴う作業員の被ばく線量の低減イメージ図



ナノ粒子含有表面改質剤の塗布による
粉末付着量の低減効果

参考資料3-2-1 ①燃料製造技術 遠隔自動製造設備の高度化(2/2)

細目	5年		10年
① 保守・補修性の向上	付加する遠隔技術の抽出	試験装置の設計・製作・試験	評価
		試験装置の設計・製作・試験	評価
	設備異常モニタリング技術の調査		
② 設備信頼性の高度化	技術調査	試験装置の設計・製作・試験	評価
③ 粉末付着防止・除染技術		試験装置の設計・製作・試験	評価
	付着防止・除染技術の調査		
期待される研究開発成果	①～③ ・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 ・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		①～③ 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

参考資料3-2-2 ②照射試験及び燃料材料開発 「もんじゅ」や「常陽」等での照射試験、照射後試験等 (1/7)

○「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

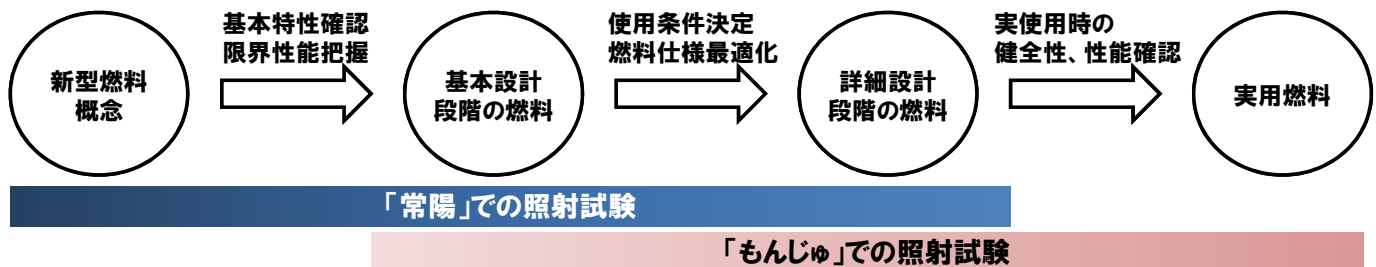
➤ 新概念燃料の開発、基本設計(燃料仕様や照射条件設定)に利用

○「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



参考資料3-2-2 ②照射試験及び燃料材料開発 「もんじゅ」や「常陽」等での照射試験、照射後試験等 (2/7)

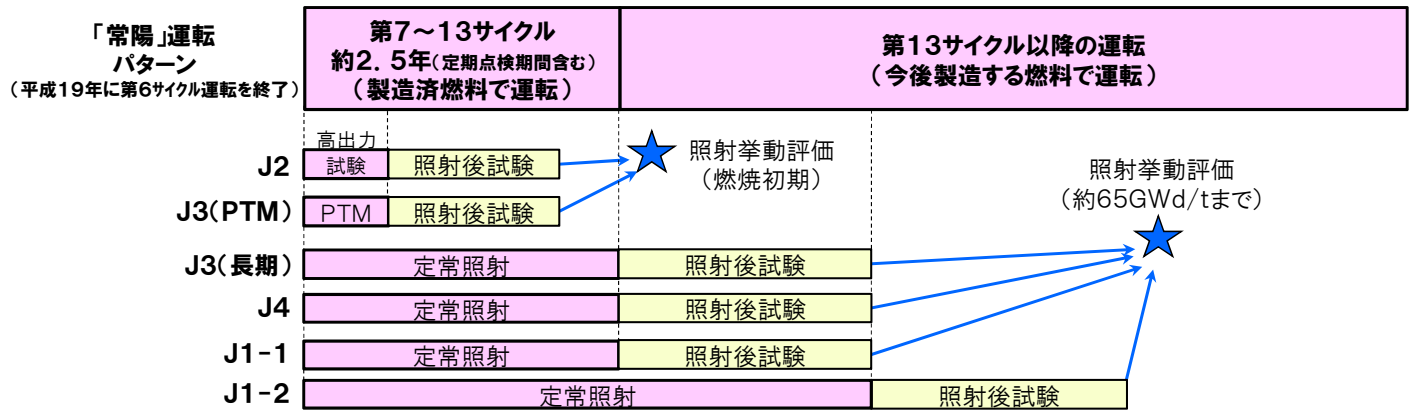
規模	試験名	燃焼度 & 照射期間		線出力		被覆管温度		O/M比		Pu富化度		
		低	高	低	高	低	高	低	高	低	高	
短尺ピン	常陽Am-1(短期)	■	J1, J3, J4	■	J2	■	J2	■	■	■	J3	データ充足が必要な領域
	常陽B14	■	M1~M4	■	J3	■	J3	■	■	■	J3	
実規模ピン	仏 SUPERFACT (数本規模)	■	M1~M4	■	J3	■	M2~M4	■	M1~M4	■	J3	従来知見

①MA変換データの取得	実機炉心でのMA核変換分析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比依存性の確認も必要。
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。

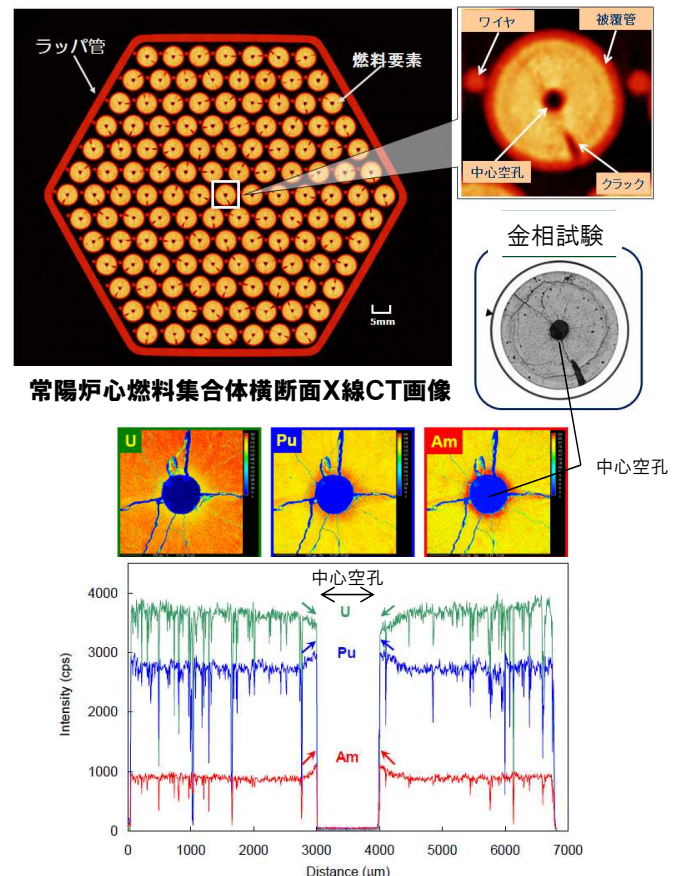
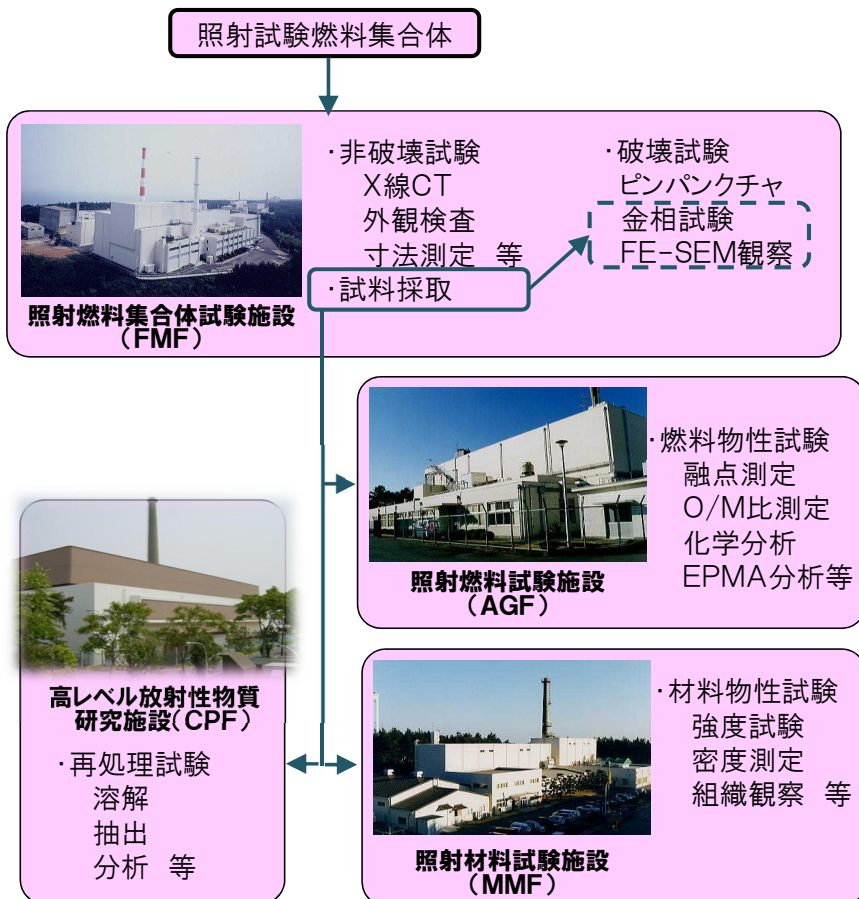
参考資料3-2-2 ②照射試験及び燃料材料開発 「もんじゅ」や「常陽」等での照射試験、照射後試験等 (3/7)

「常陽」での照射試験の概要 (「もんじゅ」での照射試験は参考資料3-1-1①参照)

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がM3と同じMA含有MOX燃料ピンの照射試験



参考資料3-2-2 ②照射試験及び燃料材料開発 「もんじゅ」や「常陽」等での照射試験、照射後試験等 (4/7)

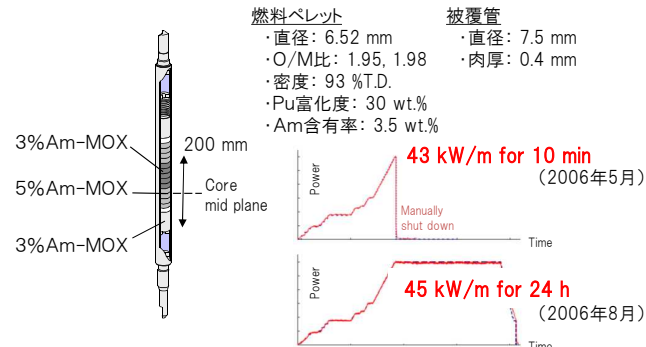


参考資料3-2-2 ②照射試験及び燃料材料開発 「もんじゅ」や「常陽」等での照射試験、照射後試験等 (5/7)

「もんじゅ」照射試験(M1~M4)、「常陽」照射試験(J1~J4)を実施し、MA含有、高Pu富化度MOX燃料の照射挙動等を把握する。

(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ヶ国協力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。

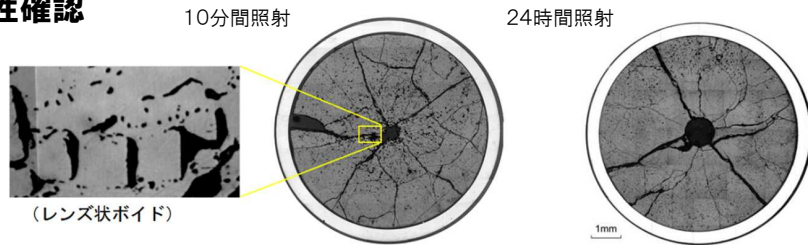


(2) MA含有、高Pu富化度MOX燃料の溶融限界出力の把握

「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。



(注)照射が進むにつれ、ペレットの組織変化が進行し、中心空洞が拡大

参考資料3-2-2 ②照射試験及び燃料材料開発 「もんじゅ」や「常陽」等での照射試験、照射後試験等 (6/7)

細目	性能試験			2Cy		3Cy		4Cy		5Cy ~9Cy					10Cy以降																														
	40%出力プラント確認試験	燃料交換	出力上昇試験第1サイクル	定期点検	第2サイクル	定期点検	第3サイクル	定期点検	第4サイクル	定期点検	第5点検	定期点検	第6点検	定期点検	第7点検	定期点検	第8点検	定期点検	第9点検	定期点検	第10点検	...																							
「もんじゅ」工程案 (検討の前提条件)																																													
「もんじゅ」照射試験	国際協力の可能性有り																																												
① 炉心燃料集合体 (低燃焼度) [M1-1]																							照射	照射	冷却貯蔵			照射後試験	試験データ評価																
炉心燃料集合体 (中燃焼度) [M1-2]																							照射	照射		照射		照射		照射	冷却貯蔵	照射後試験	試験データ評価												
② 高次化Pu-MOX燃料の照射試験 [M2]																							特性解析・設認	燃料製造・輸送	照射			照射		照射	冷却貯蔵	照射後試験	試験データ評価												
③ MA含有燃料照射試験(先行照射) [M3]	特性解析・設認	燃料製造・輸送	照射			照射		照射	冷却貯蔵	照射後試験	試験データ評価																																		
④ MA含有燃料照射試験(海外製造) [M4]	照射試験炉心の特性解析・許認可(照射試験準備)					燃料ピン製造(仏国)海上輸送					GACID/Step-1照射燃料(ピン1本)					照射後試験																													
期待される研究開発成果						①M1-1 ・短期照射試験燃料に基づく燃料の特性確認 ・He挙動、Am再分布等					①M1-2~③M3 ・長期照射試験燃料に基づく燃料像の具体化、有効性評価 ・高次化Pu-MOX燃料の照射挙動データ、及び同評価結果 ・GACID先行照射試験燃料の照射挙動データ、及び同評価結果					④M4 GACID照射試験燃料の照射挙動データ、及び同評価結果																													

注) 共同研究相手先国との調整や許認可対応次第で、所要期間の変動はあり得る。

参考資料3-2-2 ②照射試験及び燃料材料開発 「もんじゅ」や「常陽」等での照射試験、照射後試験等(7/7)

細目	5~6年	10年
「常陽」照射試験		国際協力の 可能性有り
① Am-1長期照射試験 [J1]	J1-1 照射 冷却 照射後試験 J1-2 照射 冷却 照射後試験	
② Am-1短期高出力試験 [J2]	J2 照射 冷却 照射後試験	
③ MA含有高Pu-MOX燃料の系統的試験 [J3]	J3(定常) 特性解析・設工認 製造・輸送 照射 冷却 照射後試験	
	J3(PTM) 特性解析・設工認 照射 製造・輸送 冷却 照射後試験	
④ GACID-1 先行照射試験 [J4]	J4 特性解析・設工認 製造・輸送 照射 冷却 照射後試験	
期待される研究開発成果	①J1~④J4 ・短期照射試験燃料、熔融限界線出力試験に基づく燃料特性確認 ・MA含有燃料の照射初期挙動(Am等の再分布、Heガス生成による影響、ペレット組織変化等)の把握 ・MA含有燃料の燃料溶融限界の把握	①J1、③J3、④J4 ・長期照射試験燃料に基づく燃料像の具体化、有効性評価 ・MA含有燃料の照射挙動(Heガス生成による影響、被覆管内面腐食等)の把握 ・MA含有燃料の健全性実証 ・MA核種の核変換特性の確認

* 照射試験の実施時期は「常陽」の運転計画に応じて調整予定

参考資料3-2-2 ②照射試験及び燃料材料開発 長寿命炉心燃料材料の開発等の基盤技術開発 (1/2)

(1) 燃料物性測定、物性研究

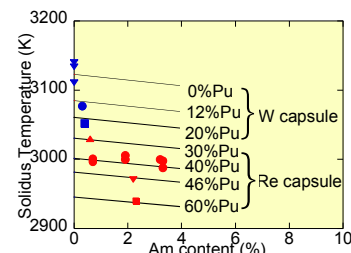
MA含有MOX燃料、高Pu富化度MOX燃料の燃料物性(融点、熱伝導度、酸素ポテンシャル、比熱等)をO/M比等をパラメータとして系統的に把握する。

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。



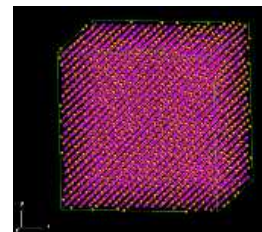
高周波加熱炉
(融点測定)



Am-MOX燃料の
融点測定結果

(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、高中性子照射に耐えられる炉心材料(被覆管:ODS鋼等)の開発を行う。



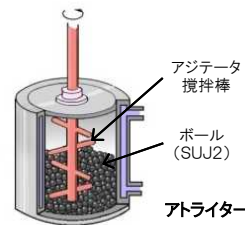
分子動力学計算シミュレーション

(3) FPターゲット開発

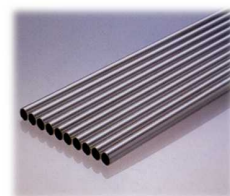
環境への長期的影響リスクがある長寿命FPを変換するため、高速炉場で適用するターゲットの開発を行う。

(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。



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

参考資料3-2-2 ②照射試験及び燃料材料開発 長寿命炉心燃料材料の開発等の基盤技術開発 (2/2)

細目	5~6年	10年
① 燃料物性測定、物性研究	基礎物性測定、物性研究	
	高温物性測定技術開発	高温物性測定、物性研究
	計算科学によるシミュレーション	
	国際協力の可能性有り	
② 長寿命炉心材料開発	被覆管製造試験	
	炉外試験	
	照射準備	照射試験、照射後試験(材料照射→燃料照射)
③ FPターゲット開発	ターゲット製造技術開発	照射、照射後試験
④ 燃料挙動評価・設計手法開発	暫定設計手法開発	設計手法、設計基準の整備(Ⅰ)
	設計手法、設計基準の整備(Ⅱ)	
期待される研究開発成果	① 廃棄物減容等に向けたMA含有MOX燃料等の特性把握 ② 長寿命被覆管材料の性能、実現見通しの1次評価 ③ FPターゲット等の見直し評価 ④ 初期照射データによるMA含有燃料設計手法の信頼度向上	①~④ 廃棄物減容等に向けたMA含有MOX燃料等の具体化、有効性評価へ反映

参考資料3-2-3 ③炉特性・炉システム設計技術 炉特性の確認及び炉心概念の検討(1/2)

(1) 核データ

高速中性子エネルギー領域における捕獲反応断面積の高精度測定手法を開発し、低中速から高速にかけてのエネルギー領域における系統的なMAの捕獲反応断面積測定を行う。

また、積分実験として高次化Pu及びMAの高純度サンプル等を「常陽」において照射し、照射後試験施設において核種組成分析を行い、高速中性子場及び減速中性子場における核変換率・量の核変換データを拡充する。ここで、核種組成分析手法の高精度化を併せて行う。

「もんじゅ」等を活用した研究開発

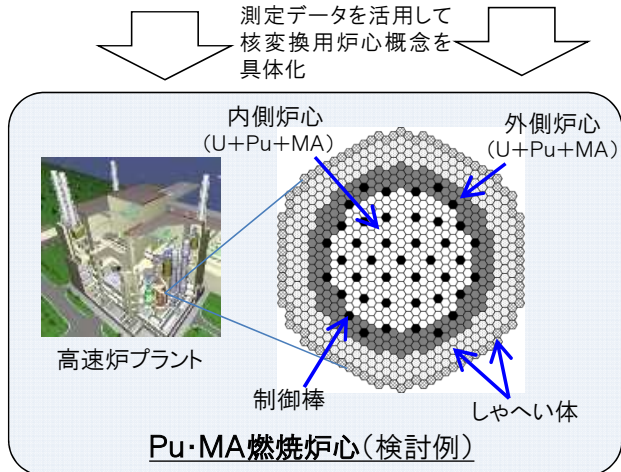
- 高次化Pu及びAmを含むMOX炉心の炉物理特性
- 温度特性及び燃焼特性
- 照射試験に基づく燃料設計手法
- 高次化Pu・MA含有燃料の照射後試験(核種組成分析)

核データ測定

- MAの捕獲反応断面積の高精度測定
- 「常陽」高次化Pu・MAサンプル等照射(核種組成分析)

(2) 炉特性(「もんじゅ」炉心での確認)

「もんじゅ」性能試験及び定格運転において、高次化Pu及びAmを含むMOX炉心における炉物理特性や、実機でしか得ることのできない温度特性及び燃焼特性データを取得する。



(3) 炉システム

Pu及びMA燃焼を行う炉心の特性を把握し、プラントを含めた炉システムへの影響を評価する。

炉心安全性や燃料製造・取扱への影響に留意しつつ、Pu及びMAの好適なリサイクル・装荷方法を明らかにする。MAの含有だけでなく、従来の増殖型炉心との違いとしてPuの高次化、Pu富化度の増加が挙げられ、これらについて、「もんじゅ」等を用いた核データ・炉特性の測定や、照射試験に基づき開発した燃料設計手法を炉心設計に反映させ、炉心及び炉システム概念を具体化する。

参考資料3-2-3 ③炉特性・炉システム設計技術 炉特性の確認及び炉心概念の検討(2/2)

細目	性能試験			2Cy		3Cy		4Cy		5Cy~9Cy					10Cy以降							
	40%出力プラント確認試験	燃料交換	出力上昇試験第1サイクル	定期点検	第2サイクル	定期点検	第3サイクル	定期点検	第4サイクル	定期点検	第5点検	定期点検	第6点検	定期点検	第7点検	定期点検	第8点検	定期点検	第9点検	第10点検	...	
「もんじゅ」工程案(検討の前提条件)																						
① 核データ											国際協力の可能性有り											
微分測定	高速中性子捕獲反応断面積の高精度測定手法の開発										MAの捕獲反応断面積の高精度測定											
積分実験による評価・検証	照射準備			「常陽」高次化Pu・MAサンプル等照射																		
	測定データの高精度化					PIE(核種組成分析)																
② 炉特性 (「もんじゅ」炉心での確認)	「もんじゅ」性能試験(臨界性、等温温度係数、出力係数等)			「もんじゅ」定格運転(燃焼係数等)										PIE(核種組成分析)								
③ 炉システム	測定データの反映(「もんじゅ」、「常陽」)										測定データの反映(「もんじゅ」、「常陽」)											
	↓										↓											
炉心概念検討	Pu・MA燃焼炉心の特性把握										Pu・MA燃焼炉心概念の具体化											
原子炉システム概念検討	炉システムへの影響評価										炉システム概念の具体化											
期待される研究開発成果											①~③ Pu・MA燃焼炉心の特性把握(「もんじゅ」性能試験、「常陽」サンプル等照射データを活用)					①~③ Pu・MA燃焼システムの具体化(「もんじゅ」運転・照射データを活用)						

参考資料3-2-4 ④再処理技術開発 MA分離プロセスの開発(1/2)

(1) 吸着剤の最適化

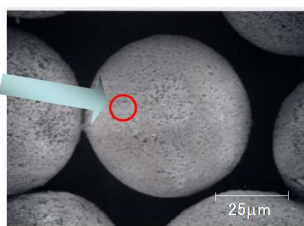
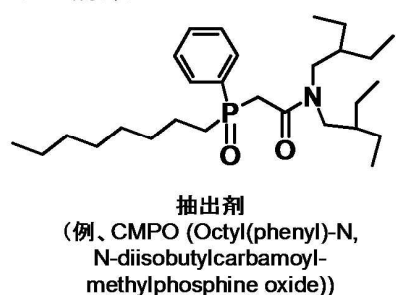
MA回収率及び分離性能の向上を図るため、吸着・溶離剤の担体構造の最適化検討(NUCEF*等での新抽出剤の実用化評価と連携)
*燃料サイクル安全工学研究施設

(2) MA回収試験

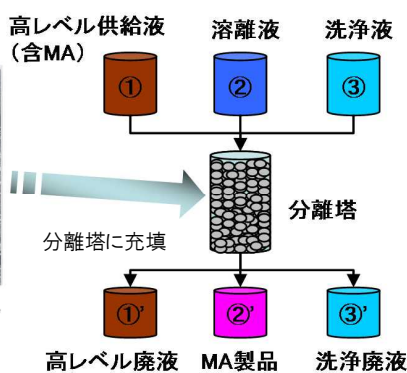
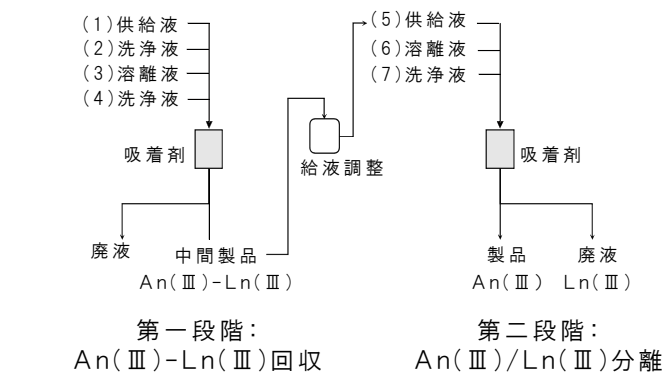
CPF**で所有する高放射性廃液等により、分離方法(液々抽出/固液抽出)の検討と、改良抽出剤のMA回収率、分離性能等に関する基礎データ取得
**高レベル放射性物質研究施設

(3) フローシートの構築

廃液発生量を低減しつつ、MAを効率的に回収可能な分離フローシートの構築



多孔質SiO₂粒子の表面にポリマー(スチレン-ジベンジルベンゼン)を被覆し、CMPOを担持した吸着材



参考資料3-2-4 ④再処理技術開発 MA分離プロセスの開発(2/2)

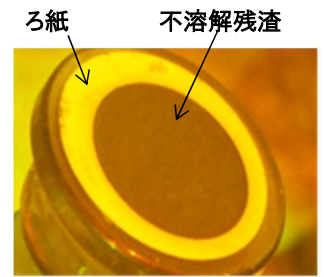
細目	5~6年	10年
① 吸着剤の最適化	<ul style="list-style-type: none"> 最適化検討 コールド試験・照射試験による性能評価 	国際協力の可能性有り
② MA回収試験	<ul style="list-style-type: none"> 装置整備 実液ホット試験(MAサイクル試験) 	MA入り燃料粉回収⇒照射試験燃料用原料に利用
③ フローシートの構築	<ul style="list-style-type: none"> フローシート検討 	<ul style="list-style-type: none"> 「もんじゅ」MA含有燃料等の再処理試験 MA含有MOX燃料等の再処理試験による検証
期待される研究開発成果	<ul style="list-style-type: none"> ①~③ MA分離プロセスデータ蓄積 MA分離フローシート構築 高Am含有・高Pu富化度燃料の溶解・分離性能把握 シミュレーション解析用データ取得 	<ul style="list-style-type: none"> ①~③ 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

参考資料3-2-4 ④再処理技術開発 MA燃料の再処理試験(1/2)

(1) 高Am含有高Pu富化度MOX燃料の溶解・抽出フローシート構築

「もんじゅ」、「常陽」の高Am燃料を対象に、溶解と抽出技術に関する基礎データを取得し、MAの分離回収を含む再処理全体のフローシート構築に資する。

高Am含有及び高Pu富化度の影響を評価する上で、再処理側で取得すべき基礎データとしては、主にスラッジ挙動、溶解シミュレーション、U/Pu/Np抽出性能等を取得する。



ろ紙上の不溶解残渣の外観
(CPFでの溶解試験液をろ過した)

(2) 核変換特性の確認

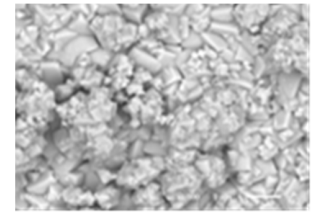
大洗(AGF)での照射後燃料微小試料の同位体等詳細分析データと、CPFでの燃料ピン単位でのマクロな元素・同位体分析データを、核変換特性評価技術の確認に資する。



高レベル放射性物質研究施設(CPF)



照射燃料試験施設(AGF)



モリブデン酸ジルコニウム
(スラッジの代表的な化合物)

参考資料3-2-4 ④再処理技術開発 MA燃料の再処理試験(2/2)

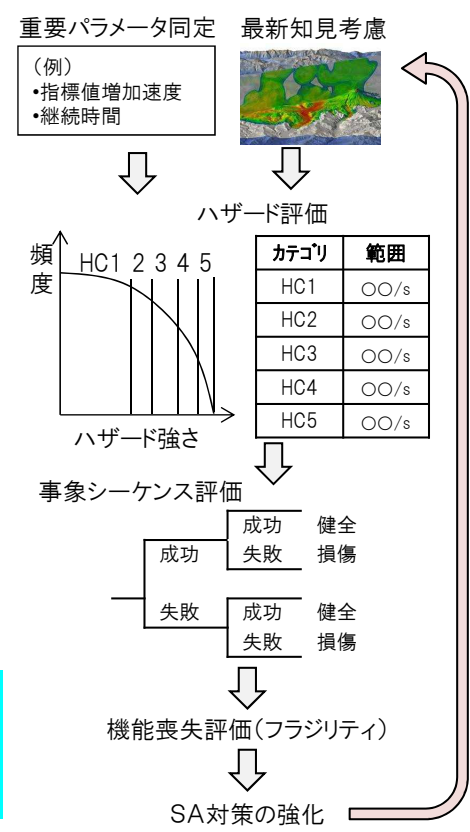
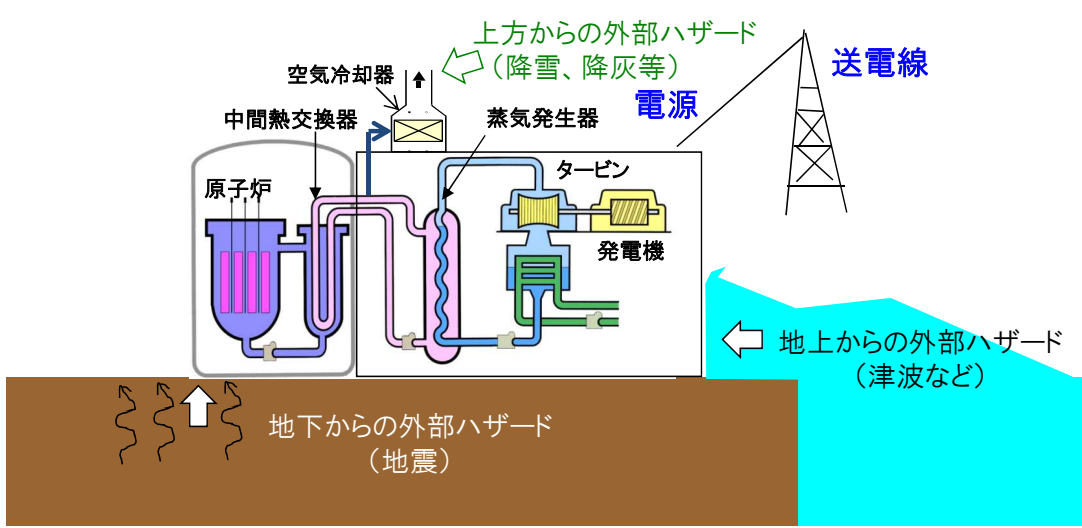
細目	5~6年	10年
① 高Am含有・高Pu富化度燃料の溶解・抽出フローシート構築	高Am燃料の搬入(想定)	国際協力の可能性有り
溶解性能への影響	溶解性評価、残渣挙動評価、溶解シミュレーション検討 等	「もんじゅ」MA含有燃料等の再処理試験 MA含有燃料等の再処理試験による検証
抽出性能への影響	U/Pu/Np一括抽出性能への影響、溶媒劣化への影響評価 等	MA含有燃料等の再処理試験による検証
② 核変換特性の確認		燃料ピン単位でのマクロな元素・同位体分析データによる検証
期待される研究開発成果	①MA-MOX、高Pu-MOX燃料の再処理特性データの取得	①~② 照射済燃料によるMA、高Pu-MOX燃料の再処理フローシート検証

参考資料3-3-1 ①SA評価技術の構築と安全性向上策の抽出

PSA等によるSA評価技術の構築と安全性向上策の抽出 (1/2)

●地震等の外部事象を含む確率論的安全評価(PSA)

地震・津波、降雪、降灰、森林火災等の幅広い外部事象を含むPSAを「もんじゅ」実機に対して実施し、リスク情報を活用して継続的に安全性向上策を抽出する。



参考資料3-3-1 ①SA評価技術の構築と安全性向上策の抽出

PSA等によるSA評価技術の構築と安全性向上策の抽出 (2/2)

細目	性能試験			2Cy		3Cy		4Cy		5Cy~9Cy					10Cy以降							
「もんじゅ」工程案 (検討の前提条件)	40%出力プラント 確認試験	燃料 交換	出力上昇試験 第1サイクル	定期点検	第2 サイクル	定期点検	第3 サイクル	定期点検	第4 サイクル	定期 点検	第5 点検	定期 点検	第6 点検	定期 点検	第7 点検	定期 点検	第8 点検	定期 点検	第9 点検	定期 点検	第10 点検	...
①地震等の外部事象 を含む確率論的安全 評価(PSA)	安全性向上評価報告										安全性向上評価報告					国際協力の 可能性有り						
	PSAによる安全性向上策の抽出とその評価										PSAによる安全性向上策の抽出とその評価											
期待される 研究開発成果	①外部事象を含むSA による評価結果										①安全性の継続的改善のための総合的 なリスク評価とシビアアクシデントマネ ジメント(SAM)策の充実											