

廃棄物の減容・有害度の低減のための システム概念と研究開発課題

平成25年7月16日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

1. 廃棄物減容・有害度低減のためのシステム概念
2. システム概念の有効性確認に必要な調査・評価
3. 研究開発課題

参考資料-1 海外の動向（フランス原子力庁の放射性物質の持続可能な管理に関する報告書）

参考資料-2 技術の達成度の評価

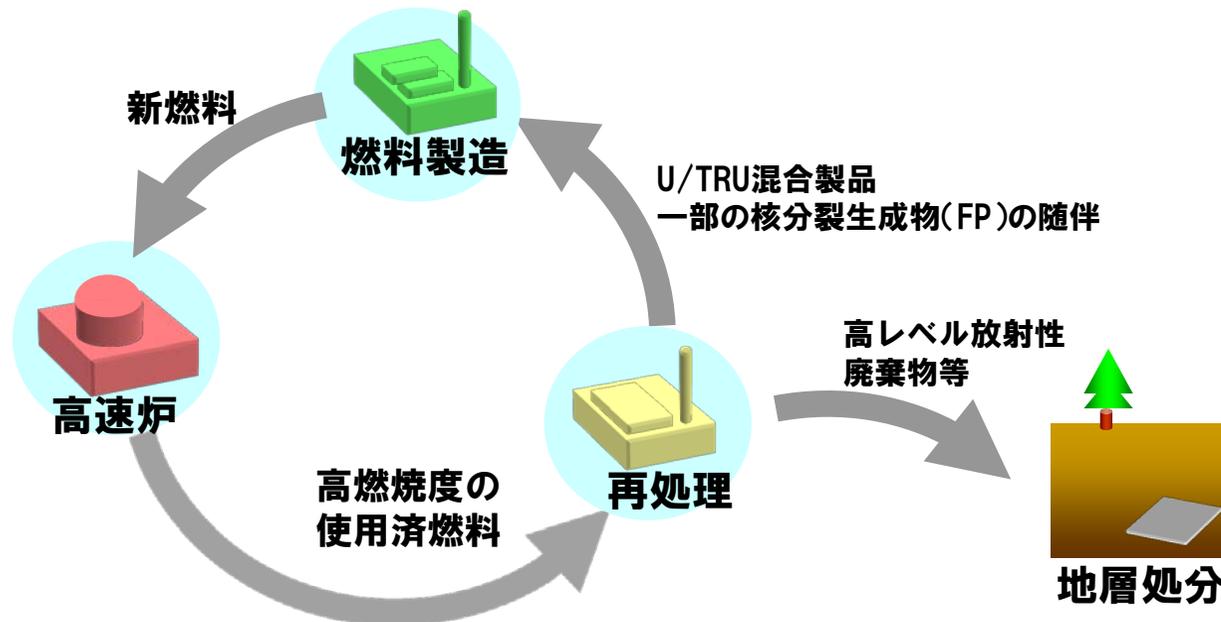
参考資料-3 研究開発に利用する施設

参考資料-4 分離変換システム研究開発の全体像

1. 廃棄物減容・有害度低減のためのシステム概念

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



1. 廃棄物減容・有害度低減のためのシステム概念

② 高速炉炉心特性

	もんじゅ設計 ¹⁾	実用炉設計例 ²⁾	燃焼炉検討例 ³⁾
原子炉出力 [MWt/MWe]	714 / 280	3530 / 1500	765 / 300
炉心高さ [cm] (炉心部のみ/ブランケット含む)	93 / 158	100 / 135	60 / -
炉心等価直径 [m] (炉心部/径方向ブランケット含む)	1.8 / 2.4	5.4 / -	2.4 / -
Pu富化度 [wt%]	22~29%	18~21%	31~35%
全炉心Pu装荷量 [トンPu]	約1.6*	14	2.3
年間Pu装荷量 [トンPu/年]	約0.5**	1.3	0.91
取出平均燃焼度 [GWd/t] (炉心部/全炉心)	80 / 23	150 / 115	84 / -
運転サイクル日数×バッチ数	148×5	800×4	185×4
増殖比・転換比	約1.2***	1.03	0.50

(注)Puの同位体組成により、Pu富化度、Pu装荷量及び増殖比・転換比の数値は変わる。

表中の数値は設計又は設計検討の段階のものであり、それぞれの炉の設計(検討)に用いられたPuの同位体組成は異なる。

* Am-241を含む。 ** Am-241を含む。設備利用率約80%、取出平均燃焼度約80GWd/tの場合。

*** 出力分布測定に基づく初期炉心評価値は、炉心部だけの転換比は0.61、全炉心の増殖比は1.18。

1) 高速増殖炉研究開発センター設置許可申請書。

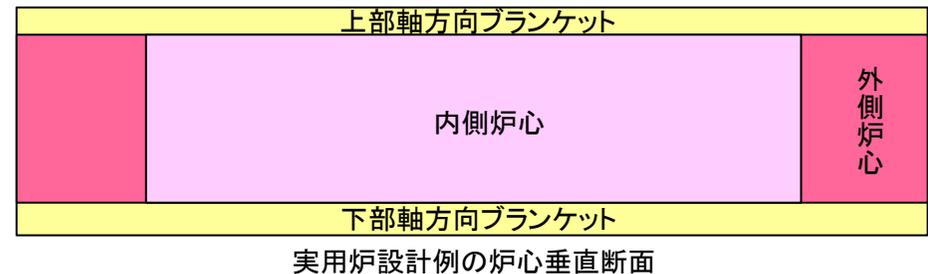
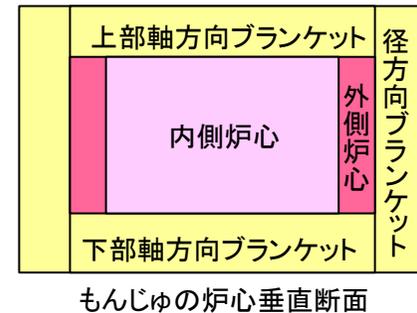
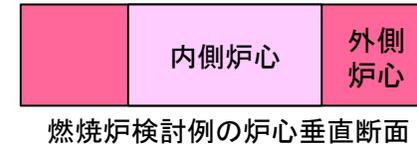
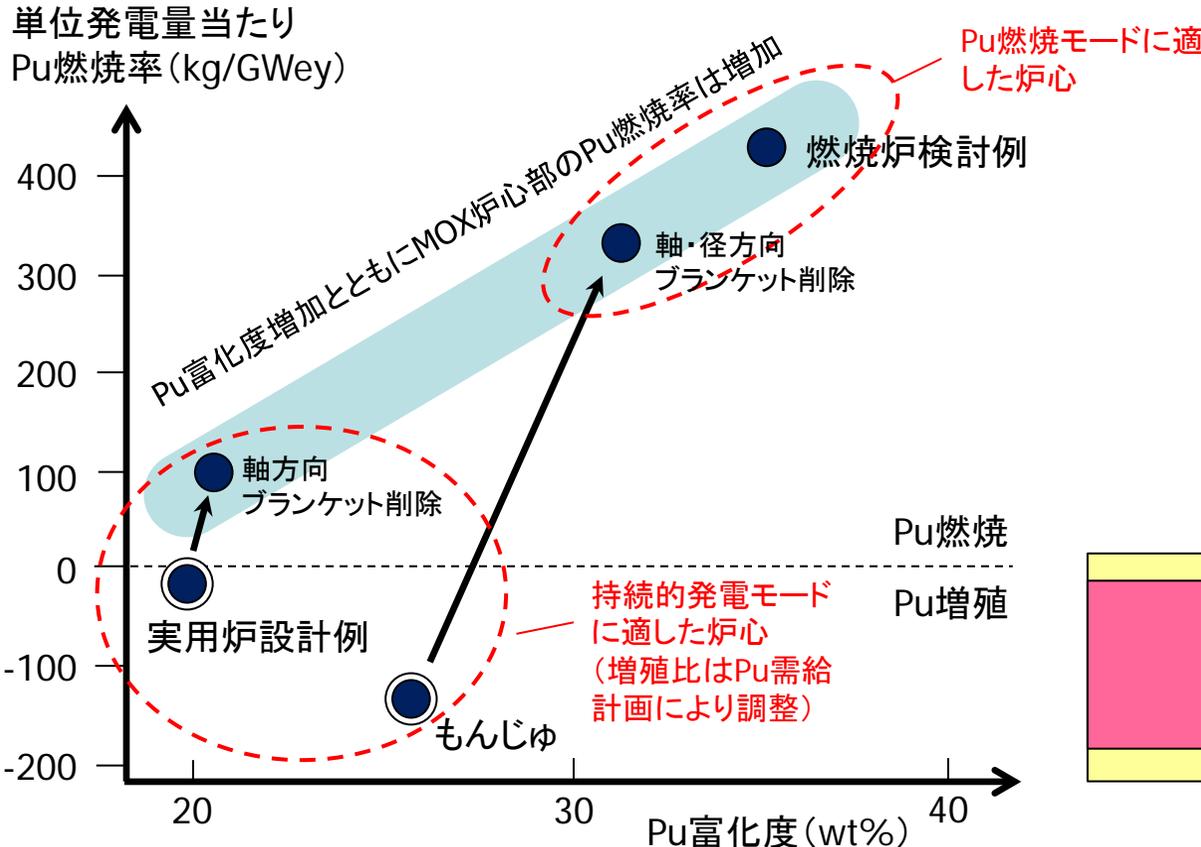
2) 実用炉設計例の炉心特性データは、「T. Okubo, S. Ohki, et al., Conceptual Design for a Large-Scale Japan Sodium-Cooled Fast Reactor (3)Core Design in JSFR, No. 11345, Proceedings of ICAPP 2011, Nice, France, May 2011」を使用。

3) 燃焼炉検討例は、日本原子力研究開発機構の解析結果。

1. 廃棄物減容・有害度低減のためのシステム概念

③ 高速炉炉心のPuの燃焼と生成

- 高速炉炉心に装荷した燃料中のPuの増減
 - Pu生成(主にUからの核変換)とPu減少(主にPuの核分裂とPuからMAへの核変換)の差
 - ブランケット(U)が少なく、初期Pu富化度が高い程、Puは減少
- 炉心変更により、Puの増殖、維持、燃焼が可能
 - ブランケット量、炉心燃料仕様(Pu富化度)の調整



1. 廃棄物減容・有害度低減のためのシステム概念

④ 高速炉炉心でのMAの燃焼と生成

- 高速炉炉心に装荷した燃料中のMAの増減
 - MA生成(主にPuからMAへの核変換、放射性崩壊)とMA減少(主に核分裂、放射性崩壊)の差
 - 初期Pu濃度が低く、初期MA濃度が高い程、MAは減少
- 初期MA濃度を調節することにより、Puと同様に利用、燃焼可能
 - MA濃度を1%程度にすれば、Puと同様にほぼ増減なし
 - MA濃度を高めれば、Puと同様に減少

<軽水炉>

BWRの例

<プルサーマル>

BWRの例

<高速増殖炉>

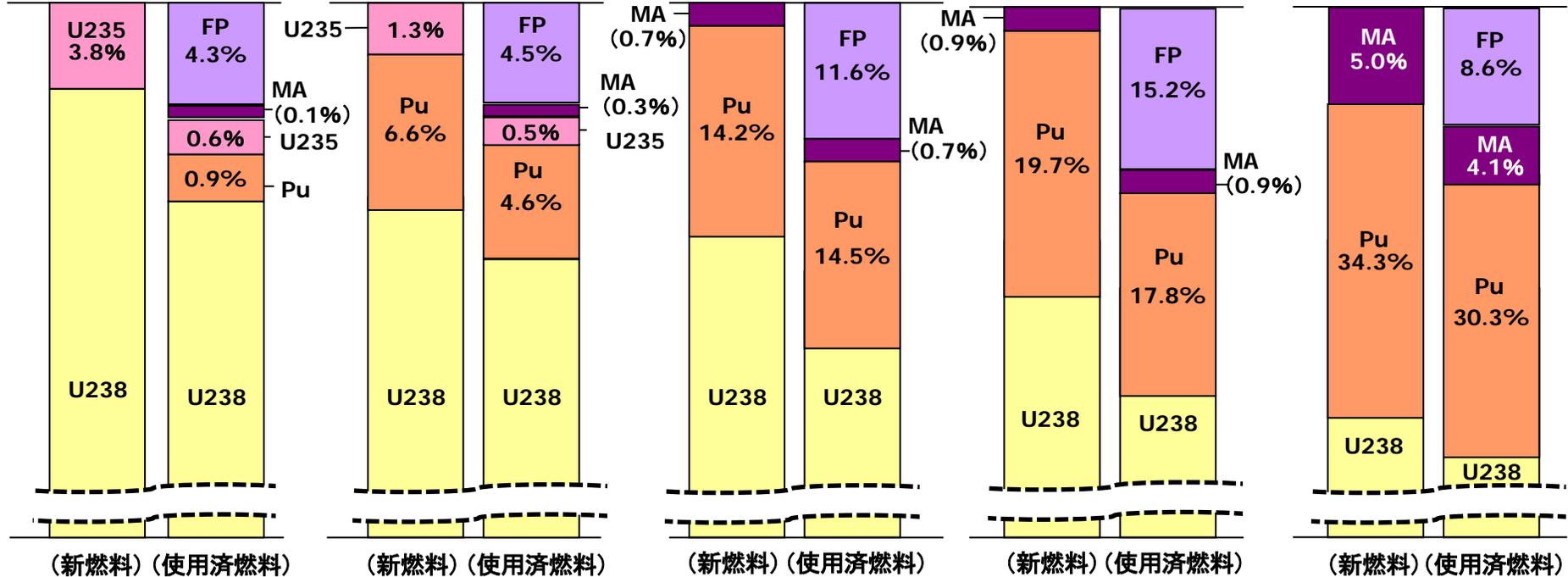
実用炉設計例
(増殖比1.03)

<高速炉>

左の炉心からブランケットを取り除いたケース

<高速炉>

Pu燃焼炉検討例
(転換比0.5)



1. 廃棄物減容・有害度低減のためのシステム概念

⑤ 原子力利用シナリオと高速炉サイクルシステムの機能

- 高速炉システムは柔軟なPu、MAリサイクルが可能であり、原子力エネルギー利用シナリオに応じた機能を果たすことが可能

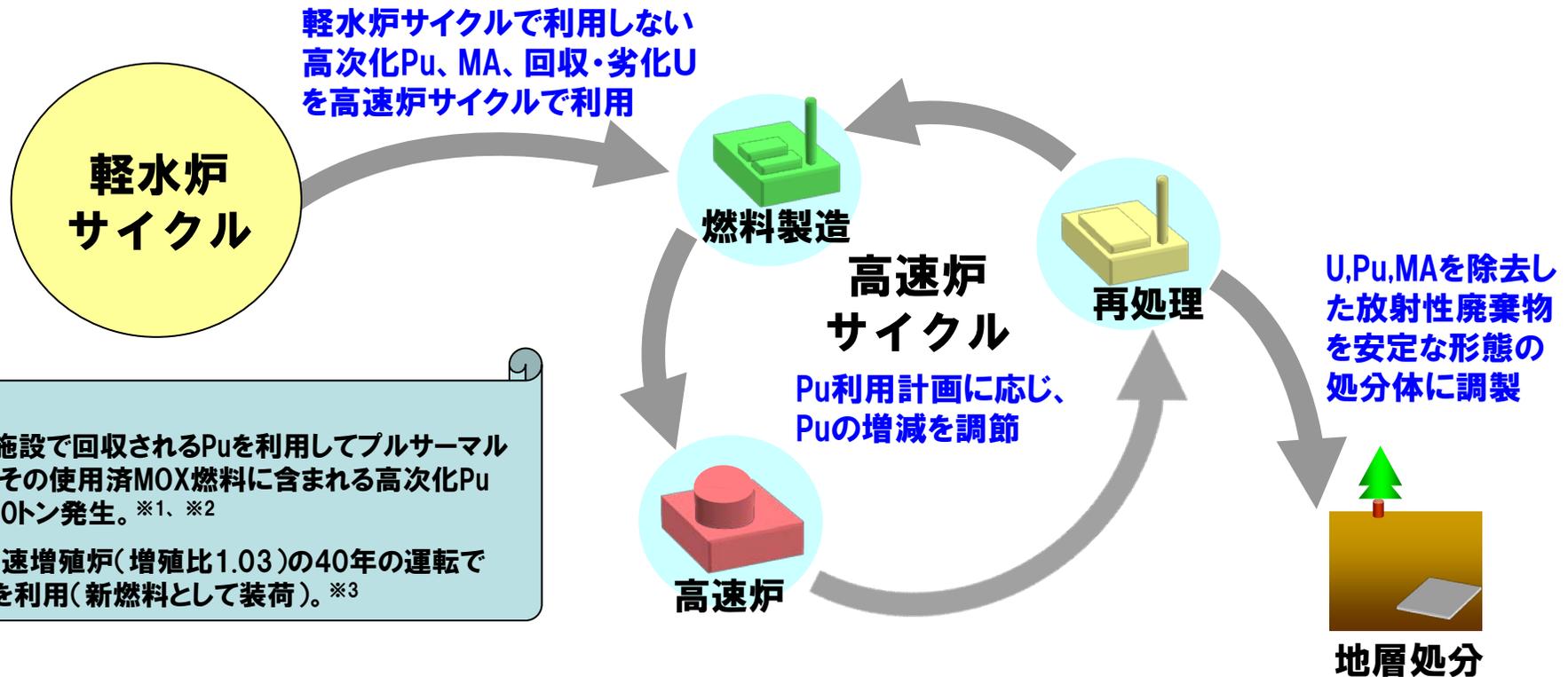
利用モード		軽水炉補完モード	持続的発電モード	Pu燃焼モード
原子力全体システム	エネルギー利用のイメージ	・軽水炉及び軽水炉燃料サイクルを継続的利用	・軽水炉から高速炉に移行し、持続的利用	・Pu存在量の低減化を指向
	システム像	・高速炉との連携利用により、軽水炉の使用済燃料、Pu管理の柔軟性確保	・高速炉により、ウラン資源利用、環境負荷低減を持続的に達成	・軽水炉から発生した使用済燃料、Pu等を安全に管理、処分
高速炉サイクルシステム	主たる機能	・軽水炉使用済MOX燃料から回収される高次化Puを高速炉で柔軟に利用	・安全性、経済性、核拡散抵抗性等の要件を満たす持続的エネルギー供給システム	・軽水炉使用済燃料中のPu等を高速炉システムで最小化
		・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		
	重要な技術要素	・高次化Pu、MA利用	・Pu/MA持続的リサイクル ・主電源としての要件具備	・Pu/MA燃焼率
	成立の可能性	・高次化Pu利用については、システム設計を見直すことにより実現可能	・Puのみ利用するシステムは、技術的に成立するが経済性に課題	・1回の装荷でのPu燃焼率は限定的であり、繰り返し処理が必要
		・MA利用の実現性については、さらなる研究開発が必要		

【注】高速炉とADSとの組合せ、長寿命FPの短寿命化のオプションの可能性も考えられる

1. 廃棄物減容・有害度低減のためのシステム概念

⑥ 高速炉サイクルの軽水炉補完モード

- 軽水炉では利用しにくい使用済MOX燃料からの高次化Pu、MAを原料として利用
- 中長期的なPu利用計画に応じて、サイクルシステム内のPu量を調節
- Pu、MAのリサイクルにより、廃棄物側への移行量を合理的な範囲で最小化



【諸量の例】

六ヶ所再処理施設で回収されるPuを利用してプルサーマルを実施すると、その使用済MOX燃料に含まれる高次化Puが合計で約250トン発生。*1、*2

150万kW級高速増殖炉(増殖比1.03)の40年の運転で約64トンのPuを利用(新燃料として装荷)。*3

*1:六ヶ所再処理施設で使用済燃料32,000トンが処理されるとして、回収されるPuをプルサーマルで利用して生じる使用済MOX燃料中のPuを想定。

なお、BWRとPWRの比率は55:45、原子力発電所の設備利用率は80%、放射性崩壊や燃料サイクルロス等は考慮せず(次々頁まで共通)。

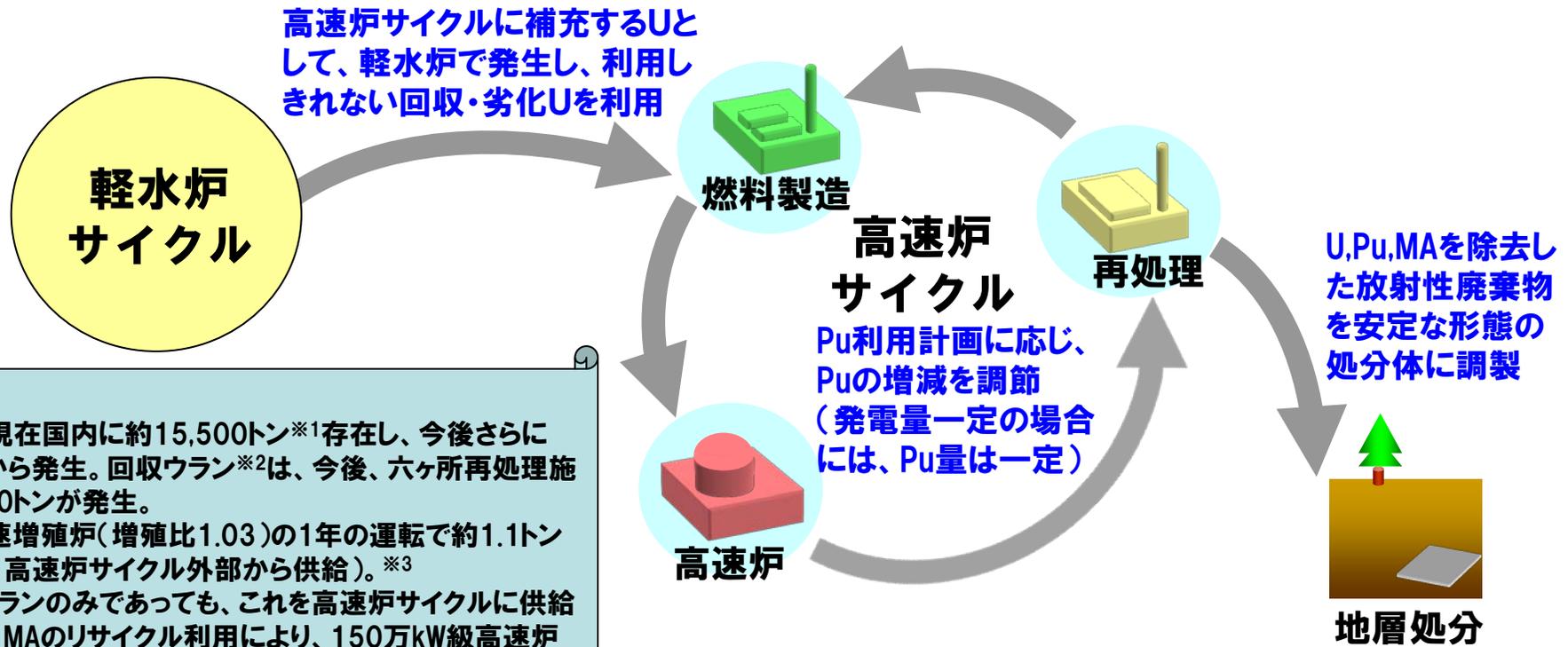
*2:軽水炉の炉心特性データは、内閣府原子力政策担当室、核燃料サイクルの諸量・経済性評価について(解説資料)、平成24年6月、http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/hatukaku/keisan/kaku_cycle.pdfを使用。

*3:本資料3ページ記載のPu装荷量より計算。高次化Pu利用の場合には、Puの核的価値低下を補償するためPu富化度を増加するが、その効果は見込んでいない。

1. 廃棄物減容・有害度低減のためのシステム概念

⑦ 高速炉サイクルの持続的発電モード

- 新たなウラン資源を用いずに、高速炉サイクルシステムで持続的に発電
- Pu, MAのリサイクルにより、廃棄物側への移行量を合理的な範囲で最小化
- 安全性、経済性、核拡散抵抗性など、システム実現に対する要求条件と調和



【諸量の例】

劣化ウランは、現在国内に約15,500トン^{※1}存在し、今後さらに国内濃縮施設から発生。回収ウラン^{※2}は、今後、六ヶ所再処理施設から約30,000トンが発生。
150万kW級高速増殖炉(増殖比1.03)の1年の運転で約1.1トンのウランを利用(高速炉サイクル外部から供給)。^{※3}
現存する劣化ウランのみであっても、これを高速炉サイクルに供給していけば、Pu、MAのリサイクル利用により、150万kW級高速炉31基を500年以上運転可能。^{※3}

※1:劣化ウランは、我が国における平成23年保障措置の実施結果等について、「別紙2:我が国における保障措置に係る核燃料物質質量一覧(2011年)」で公表された量(約15,514トン)(http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/gensi/hoshou/1324742.html)を使用。

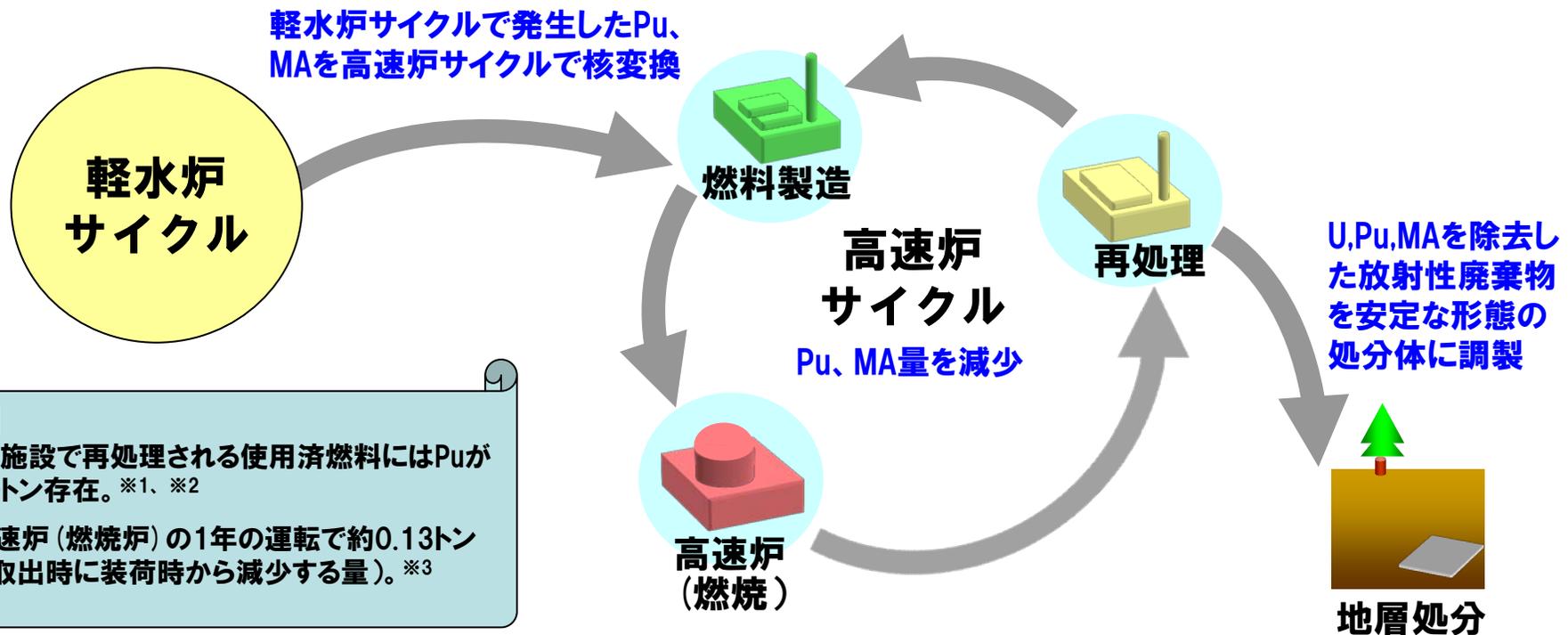
※2:回収ウランは、六ヶ所再処理施設で使用済燃料32,000トンが処理されるとして、回収される量(約30,000トン)を想定。

※3:高速増殖炉の特性データは、「高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会、核燃料サイクル分野の今後の展開について【技術的論点整理】、第28回原子力委員会資料 第1-1号参考2-2(P39)、平成21年7月」を使用。

1. 廃棄物減容・有害度低減のためのシステム概念

⑧ 高速炉サイクルのPu燃焼モード

- 高Pu富化度燃料でPu、MAを燃焼し、全サイクル内の全Pu、MAの量を減少
- 1回の高速炉装荷での燃焼率は限られるので、繰り返し燃焼が必要
- 高速炉システムでは発電による燃焼コスト低減



※1: 使用済燃料中に存在するPuは、六ヶ所再処理施設で使用済燃料32,000トンが処理されるとして、その中に存在するPuを想定。

※2: 軽水炉の炉心特性は、内閣府原子力政策担当室、核燃料サイクルの諸量・経済性評価について(解説資料)、平成24年6月、を使用。

(http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/hatukaku/keisan/kaku_cycle.pdf)

※3: 高速炉で燃焼されるPuの量は、独立行政法人日本原子力研究開発機構、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、科学技術学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会もんじゅ研究計画作業部会(第3回)資料1-1参考資料5(P37)、平成24年11月を使用。

2. システム概念の有効性確認に必要な調査・評価

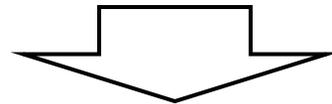
① 本研究開発のねらいと実施内容

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

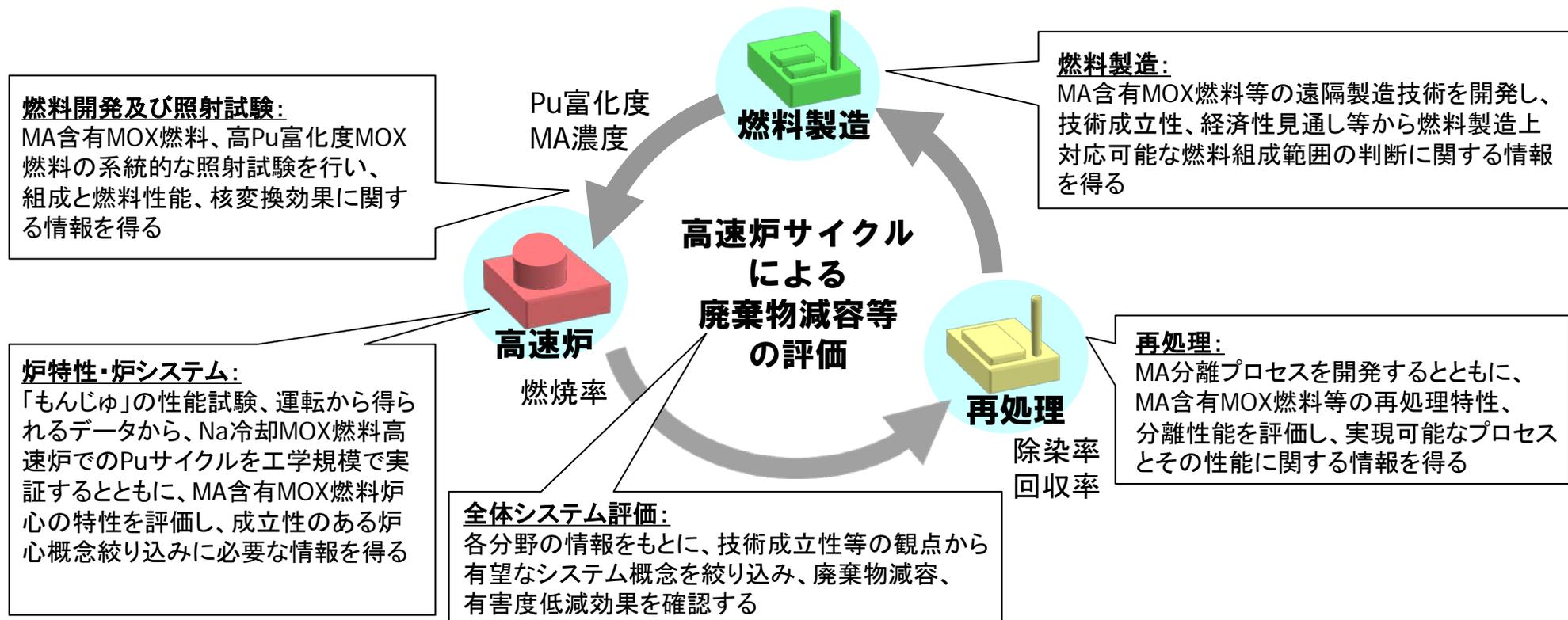
- Na冷却MOX燃料高速炉の均質Pu/MAサイクルを主たる研究対象オプション概念とし、既存施設を活用してできるだけ早期に成果を得て、準工学研究段階での本オプションの技術見通しと有効性の確認
- 「もんじゅ」での実規模照射により、照射中のMA含有燃料等の特性・挙動確認、核変換によるPu、MAの増減検証を優先的に実施し、「常陽」での特殊な条件での系統的試験により補完
- 関連するサイクル研究開発施設を用いて、MOX燃料でのAm均質サイクルまでの対応に必要なサイクル技術の見通し評価を実施
- 国際協力により、海外のMA原料、MA含有燃料、照射済燃料を活用して照射試験計画を充実させるとともに、各分野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

2. システム概念の有効性確認に必要な調査・評価

② 本研究開発で確認すべき事項

● 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



2. システム概念の有効性確認に必要な調査・評価

③ 分離変換研究全体像における本研究開発の実施範囲

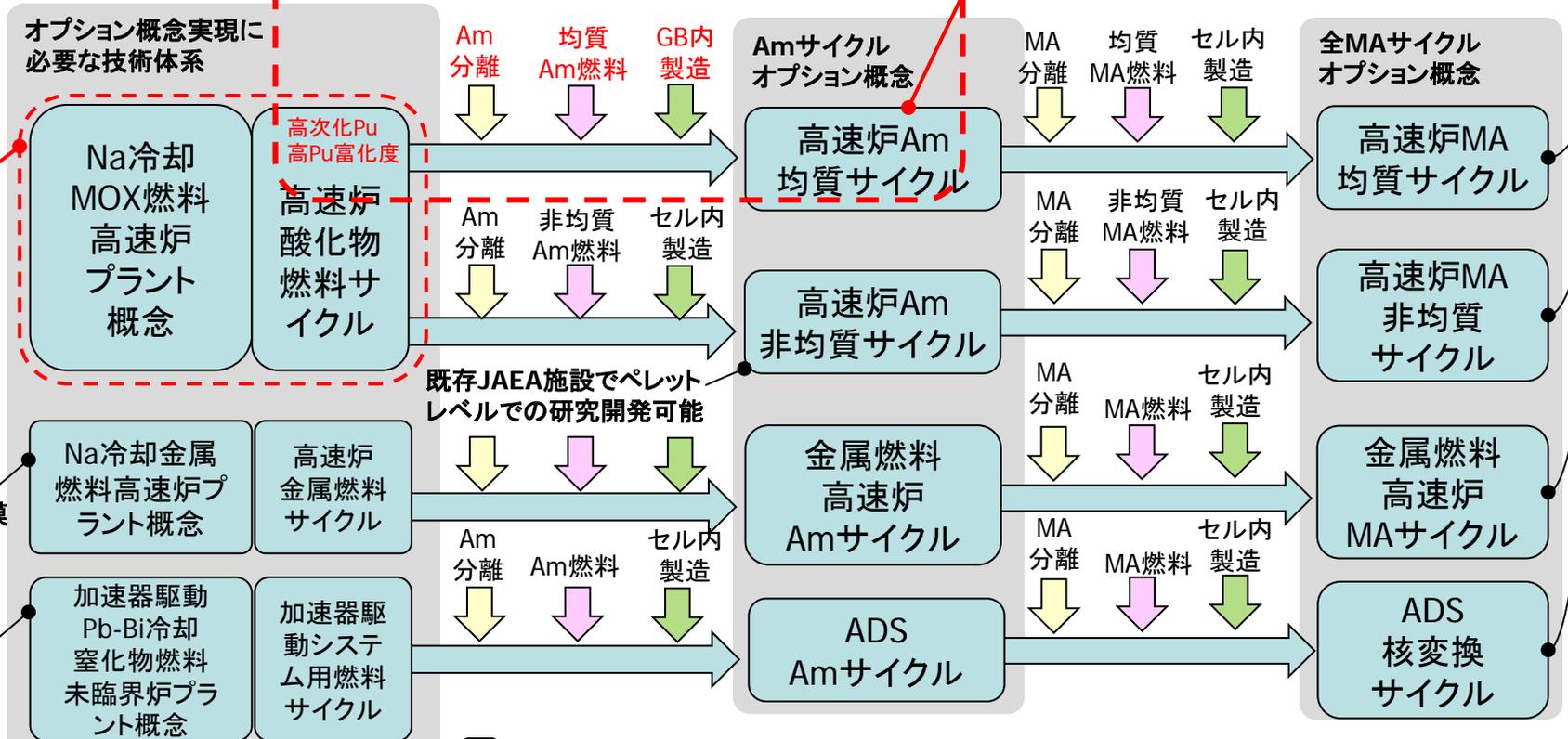
基礎研究

核反応断面積, 燃料物性等の基礎データ (Pu→Np, Am→Cm) (低濃度→高濃度) (低精度→高精度)

「もんじゅ」等での廃棄物減容等の研究の主たる対象

既存JAEA施設を使用して実規模燃料ピンレベルでの研究開発可能

海外も含め、実験室規模での要素技術の研究開発のみが可能



「もんじゅ」成果とまとめにより工学規模で技術成立性確認可能 (海外ではすでに確認済)

米国EBR-IIで工学規模で技術成立性確認

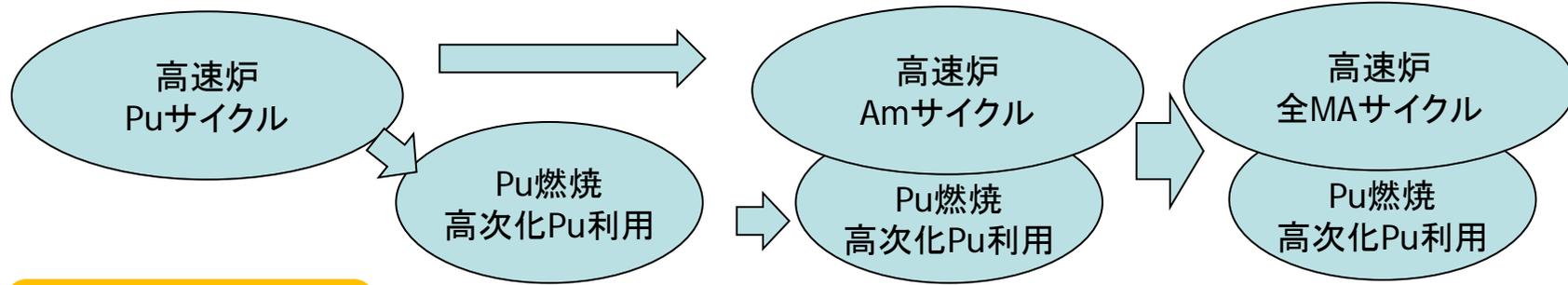
現在は基礎研究段階

- 燃料製造技術 (自動化、遠隔化: GB内製造→セル内製造)
- 燃料概念開発、炉心技術 (Pu→Np, Am→Cm) (低濃度→高濃度)
- 再処理/MA分離プロセス (燃料サイクルに応じたプロセス選定) (回収率、DFの向上)

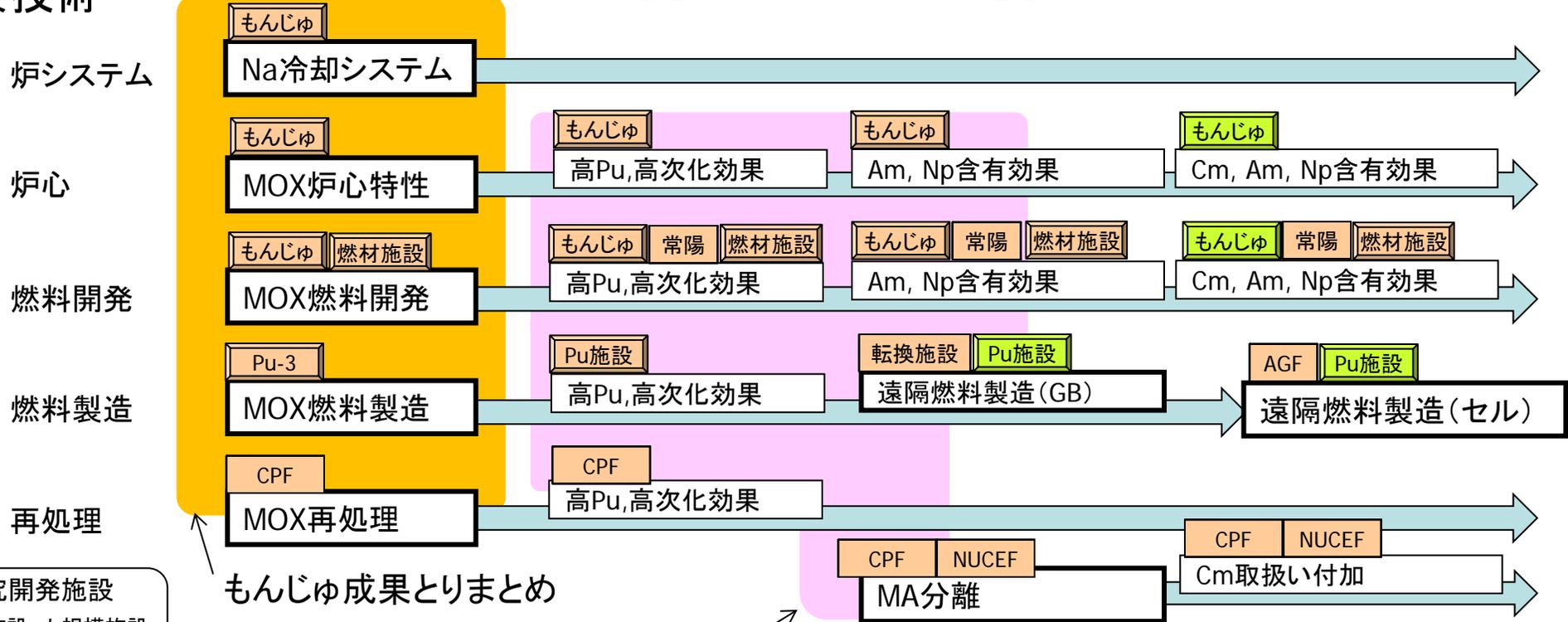
2. システム概念の有効性確認に必要な調査・評価

④ 本研究開発に利用可能な施設

システム像



必要技術



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

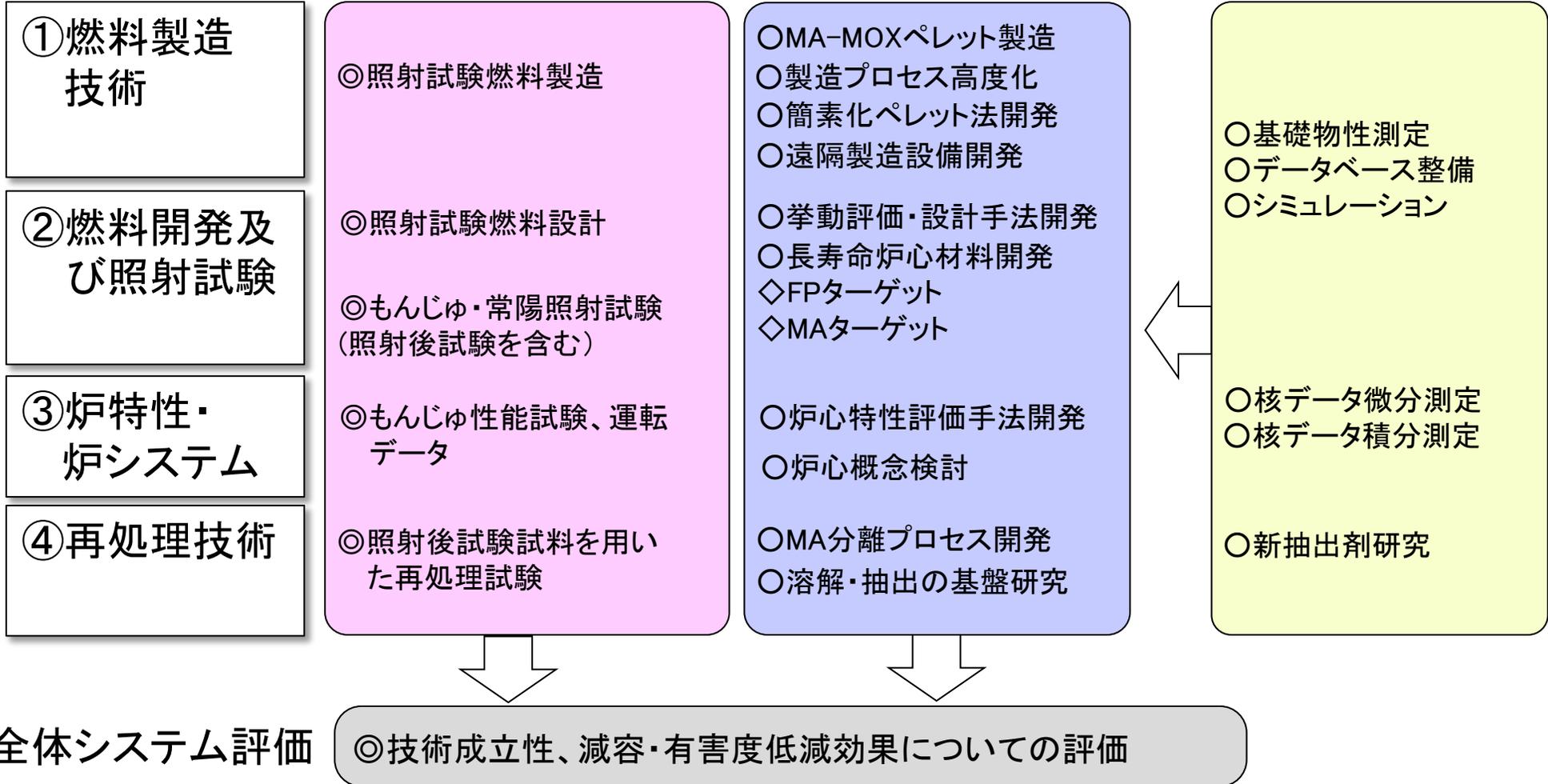
2. システム概念の有効性確認に必要な調査・評価

⑤ 研究開発の進め方

「もんじゅ」等を活用
した研究開発

システム概念実現に
必要な基盤技術

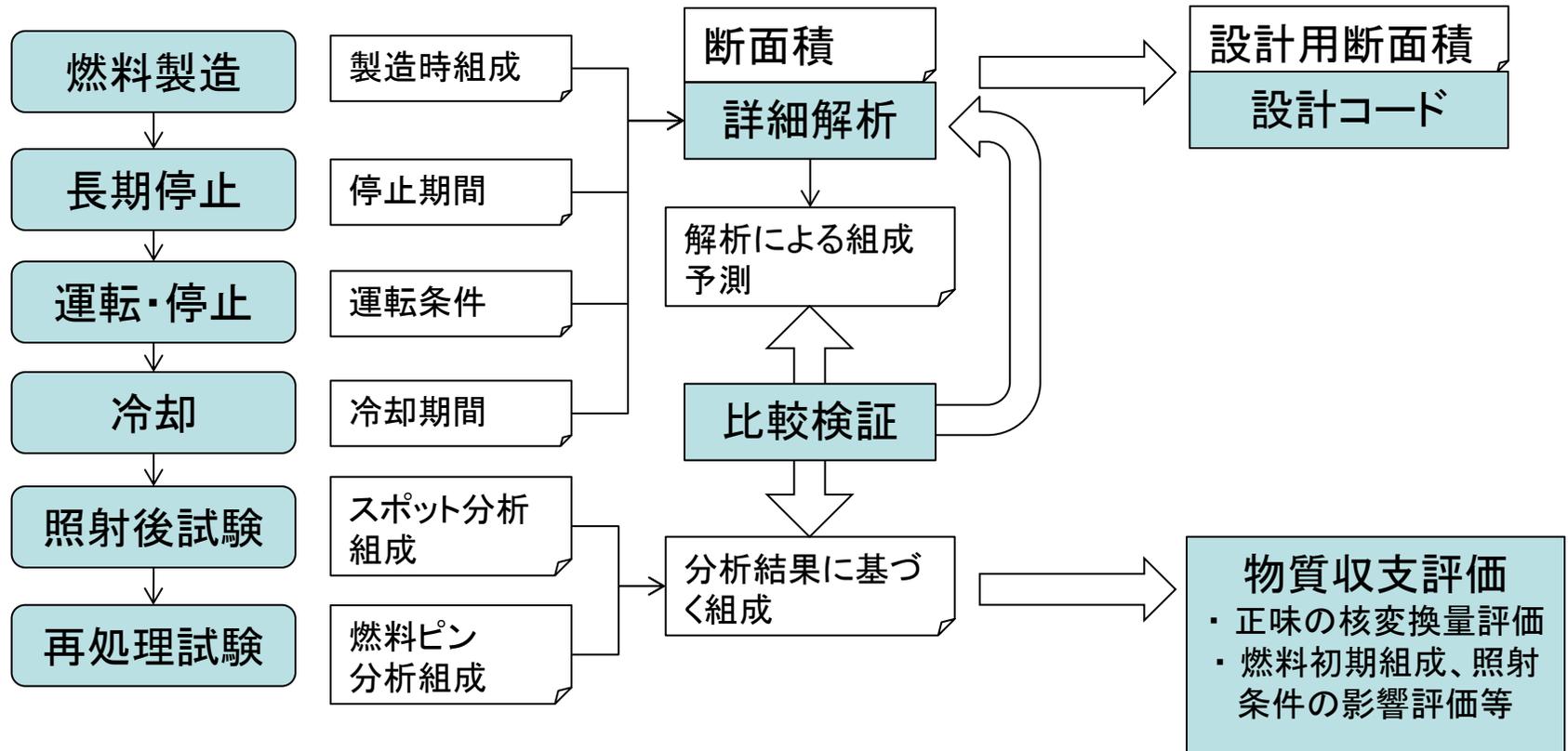
基礎研究



2. システム概念の有効性確認に必要な調査・評価

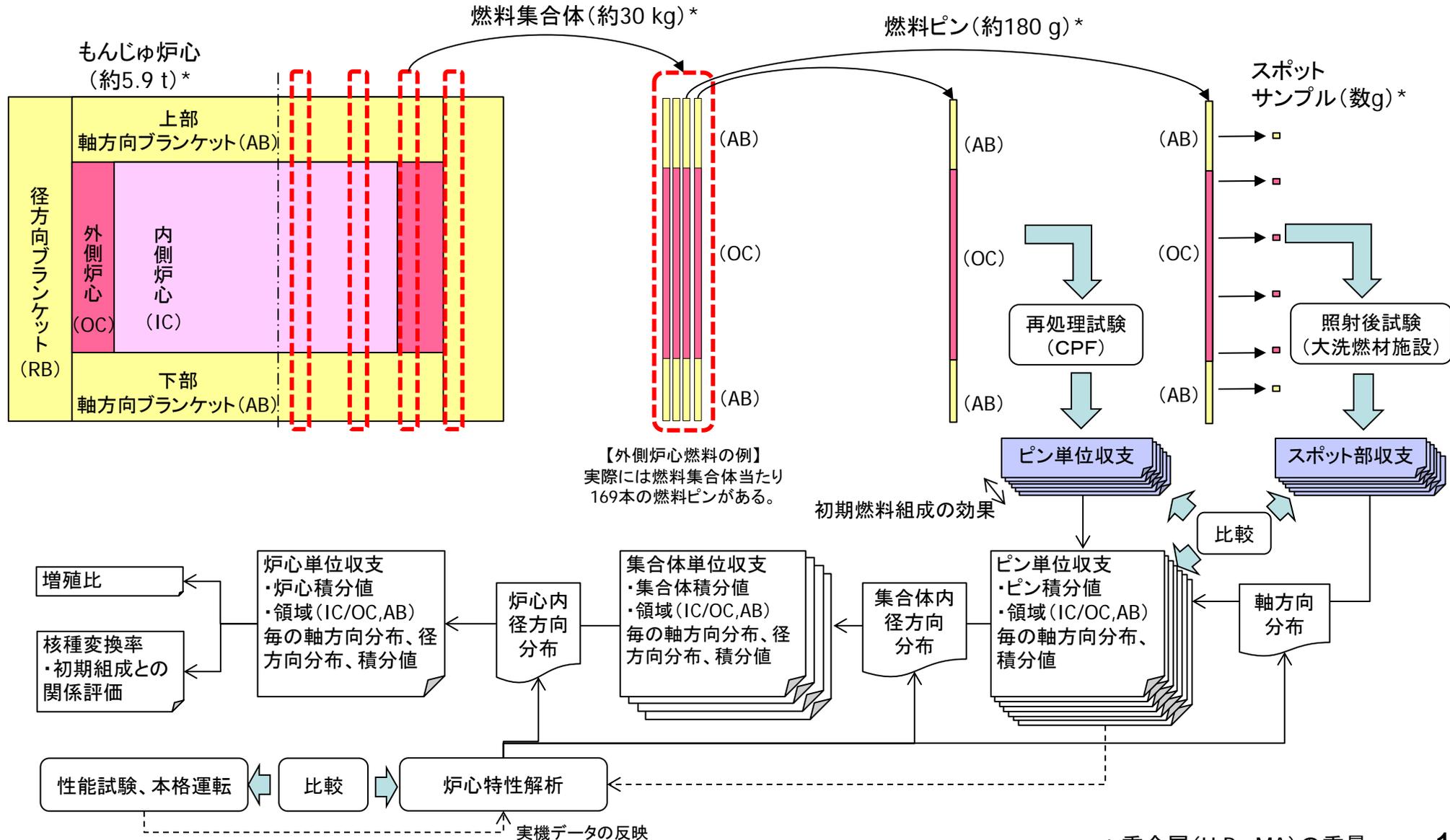
⑥ Pu, MAサイクルの検証と設計への反映(概要)

- 照射後試験、再処理試験で得られる燃料組成データをもとに、物質収支評価を行い、核変換量の確認を行うとともに、核計算手法の検証、改良に反映



2. システム概念の有効性確認に必要な調査・評価

⑦ Pu, MAサイクルの検証と設計への反映(評価方法)



2. システム概念の有効性確認に必要な調査・評価

⑧ 本研究開発による分野別の研究開発段階の進展

- Puサイクル、全Puサイクル(高次化Puや高Pu富化度)、Amサイクル、全MAサイクルの順に段階的に技術の蓄積が可能

分野	重要技術	サイクルシステムとの関係				研究開発段階の評価					
		Pu サイクル	全Pu サイクル	Am サイクル	全MA サイクル	評価 対象	フュージビリティ 研究段階	基礎 研究段階	準工学 研究段階	工学 研究段階	実用段階
炉特性・ 炉システム	MOX燃料炉心	○ → ○				Pu サイクル		もんじゅ成果とりまとめ	● →		
	MA含有MOX燃料炉心			○ → ○		Am サイクル	もんじゅAm含有炉心	● →	★		
	Na冷却プラント	○(サイクルシステムとの関係小)				共通		もんじゅ成果とりまとめ	● →		
燃料開発	MOX燃料	○ → ○				Pu サイクル		もんじゅ成果とりまとめ	● →		
	MA含有MOX燃料			○ → ○		Am サイクル	もんじゅ、常陽照射試験	● →	★		
燃料製造	MOX燃料製造	○ → ○				全Pu サイクル		高次化Pu-MOX燃料製造	● →		
	MA-MOX燃料製造(GB)			○ → ○		Am サイクル	Am-MOX製造開発	● →	★		
	MA-MOX燃料製造(セル)				○	全MA サイクル	● → 簡素化ペレット法開発				
再処理	U, Pu分離	○				Pu サイクル				六ヶ所再処理施設稼働	● →
	U, Pu, Np共抽出	○(サイクルシステム共通)				共通			抽出基盤研究	● →	
	MA分離				○	全MA サイクル		分離プロセス研究	● →	★	(抽出クロマト法) (SETFICS法)

★は、Am均質サイクルに必要な技術に関して、各分野毎に最も遅れている技術の研究開発段階を示す。なお、MA分離については、さらにAm単離のためのプロセス開発が必要。