

MOX燃料サイクルと金属燃料サイクルの比較

(独)日本原子力研究開発機構

2006年6月

設計要求への適合可能性(MOX燃料と金属燃料)

設計要求			ナトリウム炉(1,500MWe) MOX燃料		ナトリウム炉(1,500MWe) 金属燃料		備考	
			資源重視	経済性重視	資源重視	経済性重視		
安全性			受動的安全機構及び再臨界回避方策について炉外・炉内試験実施中		受動的安全機構については同左。再臨界回避方策については炉外基礎試験実施中、炉内試験は計画段階			
資源有効利用	増殖比(1.0~1.2程度)		1.10	1.03	1.11	1.03		
	初装荷炉心に必要となる核分裂性物質質量		5.7t/GWe	5.8t/GWe	4.9t/GWe	5.1t/GWe		
	高速増殖炉に全てリプレースするために必要となる期間		60年程度	—	60年程度	—		
環境負荷低減	MA燃焼		低除染条件で、軽水炉使用済み燃料条件のMA含有率5%程度まで受入可能					
	FP核変換		炉心部及び径ブランケット領域に装荷することで、自己生成分のLLFP(I-129とTc-99)を核変換できる可能性あり					
経済性	燃料費削減	燃焼度	炉心平均(15万MWd/t以上)	14.7万MWd/t	15.0万MWd/t	14.9万MWd/t*	15.3万MWd/t*	*金属燃料炉心については、炉心燃料への高速中性子照射量が候補材のODSフェライト鋼の開発目標 $5 \times 10^{23}n/cm^2$ を約70%上回っている。
			全体平均(6万MWd/t以上)	9.0万MWd/t	11.5万MWd/t	13.4万MWd/t*	15.3万MWd/t*	
	稼働率向上	連続運転期間(18ヶ月以上)		26ヶ月	26ヶ月	22ヶ月	22ヶ月	金属燃料炉心は燃焼反応度が小さく、燃料交換バッチ数の変更により、運転サイクル長さをMOX燃料炉心と同等とすることは容易である。
		稼働率(計算値)(90%以上)		95%程度		94%程度		
	熱効率向上	出口温度		550℃		550℃**		**金属燃料炉心については、燃料被覆管の内面温度制限値650℃の妥当性確認が必要。
		熱効率/所内負荷率		42.5% / 4%		42.5% / 4%		
資本費削減	建設単価(20万円/kWe以下)		相対値:90%程度		相対値:90%程度			

* 稼働率(設計値)=100 × 連続運転期間 / (連続運転期間 + 計画停止期間)

資源重視: 倍増時間を短縮し、より効率的にPuを増殖させる炉心仕様

経済性重視: 平均燃焼度向上により燃料サイクルコスト低減を図った炉心仕様

MOX燃料炉心と金属燃料炉心の比較

- ・ 金属燃料は重金属密度がMOX燃料よりも30%程度大きいことから、コンパクトな高増殖炉心を達成し易い。(様々な状況に柔軟に対応) → p4 (資料5-1, 表-I-3)
- ・ MOX燃料と同一の増殖性の条件では、ブランケットを含めた全炉心取出平均燃焼度を増加することが可能。 → p5, 6 (資料5-6)
- ・ 一方、金属燃料炉心は、炉心材料への高速中性子フルエンスがMOX燃料炉心よりも70%程度増加するので、耐スエリング材開発への要求が高く、現在のODSフェライト鋼の開発目標である $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ を炉心設計の制限とした場合には、MOX燃料と同等の全炉心取出平均燃焼度に止まる。 → p6(資料5-6)、p7(資料5-8)
- ・ 金属燃料(U-TRU-Zr合金)は、被覆管との液相形成が使用上の制限であり、被覆管内面最高温度を650°Cと設定することにより、MOX燃料と同等の原子炉出口温度を達成しているが、この温度条件での高燃焼度達成に対しては、定常照射試験および過渡時試験データの拡充による健全性確認が必要である。
- ・ 燃料照射データは、米英仏日の実績で、MOX燃料の約40万本(ピーク:約25万MWd/t)に対して、金属燃料は約1.4万本(U-Pu-Zrは600本程度、ピーク:約20万MWd/t)であり、圧倒的に実績が少ない。

表-I-3 金属燃料の利用によるナトリウム冷却炉の炉心性能の向上

増殖比		1.03(1.03)	1.11(1.10)	1.19(1.20)	1.26
初装荷炉心に必要となる核分裂性物質質量		5.1 (5.8)t/GWe	4.9 (5.7) t/GWe	3.9 (4.4)t/GWe	3.9t/GWe
燃焼度	炉心平均	15.3 (15.0) 万MWd/t	14.9 (14.7) 万MWd/t	9.5 (15.4) 万MWd/t	9.6万MWd/t
	全体平均 (ブランケットを含む)	15.3 (11.5) 万MWd/t	13.4 (9.0) 万MWd/t	6.5 (5.5) 万MWd/t	5.5万MWd/t
連続運転期間		約22 (26)ヶ月	約22 (26)ヶ月	約22 (18)ヶ月	約22ヶ月
特徴		酸化物燃料に比べ3割 平均燃焼度が高い	酸化物燃料に比べ5割 平均燃焼度が高い	酸化物燃料に比べ2割程度 平均燃焼度が高い	軽水炉と同程度の燃焼度 で高増殖が可能

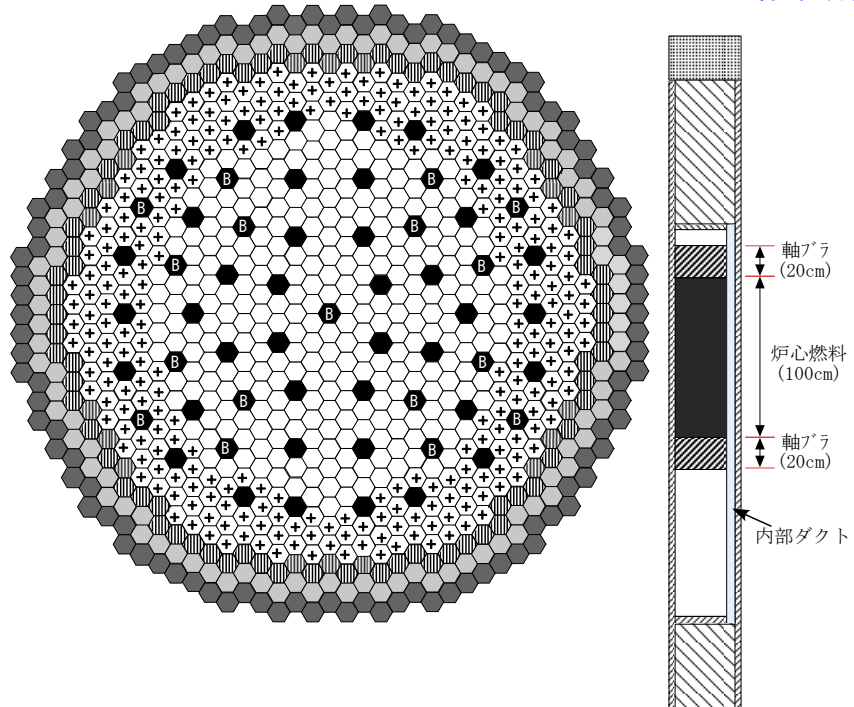
()内は酸化物燃料(原子炉出口温度550℃の設計条件)を用いた場合の値

- 金属燃料炉心(原子炉出口温度550℃、連続運転期間22ヶ月の設計条件)では、
 - ・軽水炉並みの燃焼度では最高の1.26程度の増殖比(MOX炉心では1.20程度)を達成可能
(今後、熱設計成立性の確認が必要)
 - ・増殖比1.20程度までは、酸化物燃料を用いた場合に比べ、燃焼度が20～50%向上、
初装荷核分裂性物質質量が10%以上低減可能
- FBRへの移行に関する諸量評価では、例えばFBRを2030年導入開始と仮定すると、MOX燃料(増殖比1.20)に比べ、金属燃料(増殖比1.26)では天然ウラン累積需要量を2割程度削減可能と見込まれる

ナトリウム冷却大型MOX燃料炉心（資源重視型炉心）

赤:資源有効利用性
青:経済性

主要仕様及び炉心特性



項目		設計値
炉心仕様	電気出力 (MWe) / 炉心熱出力 (MWt)	1,500 / 3,570
	原子炉出口/入口温度 (°C)	550 / 395
	炉心型式	均質2領域
	燃料形態	MOX(ペレット型)
	燃料組成	高速炉多重リサイクルTRU *1
	燃料ピン径 (mm)	10.4
	炉心高さ (cm)	100
	軸方向ブランケット厚さ [上/下] (cm)	20 / 20
炉心特性	炉心等価直径 (m)	5.4
	運転サイクル長さ(ヶ月)	26.3
	燃料交換バッチ数 [炉心/径ブランケット]	4 / 4
	Pu富化度 *2 [内側/外側] (wt%)	18.3 / 20.9
	燃焼反応度 (Δk/kk')	2.3
	増殖比	1.10
	最大線出力 (W/cm)	398
	最大高速中性子照射量[E>0.1MeV] (n/cm ²)	5.0 × 10 ²³
	取出平均燃焼度 [炉心/全炉心 *3] (GWd/t)	147 / 90
	初装荷炉心核分裂性Puインベントリ (t/GWe)	5.7
炉心部ナトリウム沸点反応度 (\$)	5.3	
炉心部ドップラ係数 (Tdk/dT)	-5.7 × 10 ⁻³	

- 内側炉心燃料集合体 288体
- ⊕ 外側炉心燃料集合体 274体
- ▨ 径方向ブランケット 96体
- ◻ SUS遮へい体(1層) 102体
- ◼ Zr-H遮へい体(1層) 108体
- 主炉停止系制御棒 40体
- ⊙ 後備炉停止系制御棒 17体
- 合計 925体

炉心配置構成

*1 MOX燃料高速炉多重リサイクル組成 (wt%)
 $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$
 = 1.1/54.1/32.1/ 4.3/ 3.9/ 0.5/ 2.0/ 1.0/ 1.0/ 0.0

*2 Pu/重金属 *3 ブランケット燃料を含めた燃焼度

MA含有率変動の影響(環境負荷低減性)

項目	高速炉多重リサイクルTRU	軽水炉使用済燃料回収TRU	
		LWR-ALWR混合	プルサーマル-LWR-ALWR混合
Pu富化度 * [内側炉心/外側炉心] (wt%)	18.3 / 20.9	17.8 / 20.9	18.0 / 21.6
MA含有率 * [炉心平均] (wt%)	1.0	4.1	5.3
増殖比	1.10	1.12	1.15
初装荷核分裂性Puインベントリ (t/GWe)	5.7	5.6	5.3
ナトリウム沸点反応度 (\$)	5.3	5.8	6.0
ドップラ係数 (Tdk/dT)	-5.7 × 10 ⁻³	-4.6 × 10 ⁻³	-4.2 × 10 ⁻³
MA燃焼率 (%/年)	-	4.8	5.0

* 重金属に対する割合

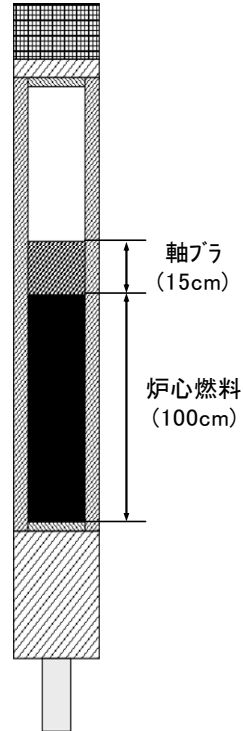
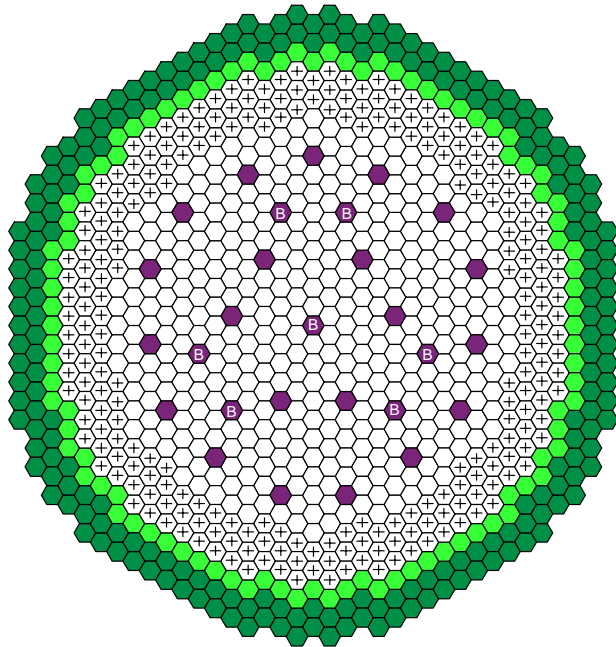
—ナトリウム冷却大型金属燃料炉心(資源重視型炉心)—

資料5-6より抜粋

赤:資源有効利用性

青:経済性

主要仕様及び炉心特性



項目		設計値
炉心仕様	電気出力 (MWe) / 炉心熱出力 (MWt)	1,500 / 3,570
	原子炉出口/入口温度 (°C)	550 / 395
	炉心型式	均質重金属密度2領域
	燃料形態	U-TRU-Zr
	燃料組成	高速炉多重リサイクルTRU * ¹
	燃料Zr含有率[内側/外側] (wt%)	10.0 / 6.0
	燃料ミア密度[内側/外側] (%TD)	70 / 75
	燃料ピン径 (mm)	8.2
	炉心高さ (cm)	100
	軸方向フランケット厚さ[上/下] (cm)	15 / -
炉心特性	炉心等価直径 (m)	5.2
	運転サイクル長さ(ヶ月)	22
	燃料交換バッチ数 [炉心/径フランケット]	6 / -
	Pu富化度 * ² [内側/外側] (wt%)	11.1 / 11.1
	燃焼反応度 (%Δk/kk')	0.1
	増殖比	1.11
	最大線出力 (W/cm)	253
	最大高速中性子照射量[E>0.1MeV] (n/cm ²)	8.5 × 10 ²³
	取出平均燃焼度[炉心/全炉心 * ³] (GWd/t)	149 / 134
	初装荷炉心核分裂性Puインベントリ (t/GWe)	4.9
炉心部ナトリウム沸点反応度 (\$)	8.1	
炉心部トッブラ係数 (Tdk/dT)	-3.9 × 10 ⁻³	

- 内側炉心燃料集合体 (399体)
- ⊕ 外側炉心燃料集合体 (246体)
- ステンレス鋼反射体 (96体)
- Zr-H遮へい体 (210体)
- 主系制御棒 (21体)
- 後備系制御棒 (7体)

炉心配置構成

*¹ 金属燃料高速炉多重リサイクル組成 (wt%)

$${}^{238}\text{Pu}/{}^{239}\text{Pu}/{}^{240}\text{Pu}/{}^{241}\text{Pu}/{}^{242}\text{Pu}/{}^{237}\text{Np}/{}^{241}\text{Am}/{}^{243}\text{Am}/{}^{244}\text{Cm}/{}^{245}\text{Cm}$$

$$= 1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1$$

*² Pu/重金属 *³ フランケット燃料を含めた燃焼度

MA含有率変動の影響(環境負荷低減性)

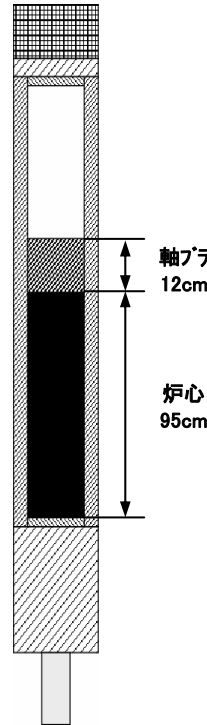
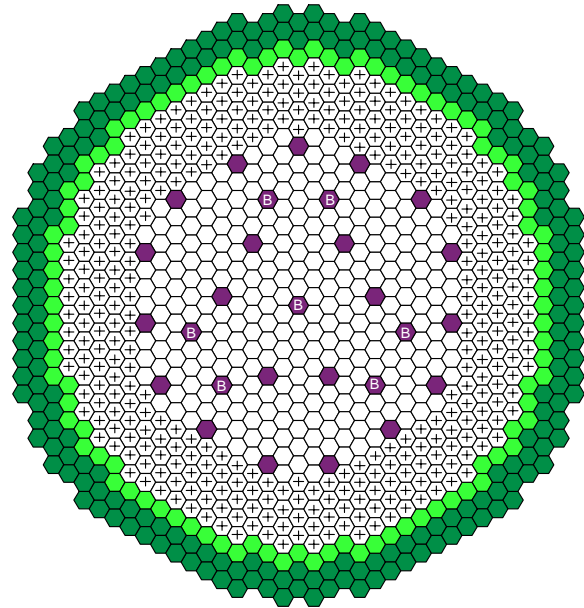
項目	高速炉多重リサイクルTRU	軽水炉使用済燃料回収TRU	
		LWR-ALWR混合	プルサーマル-LWR-ALWR混合
Pu富化度 * [内側炉心/外側炉心] (wt%)	12.1 / 12.1	13.2 / 13.2	13.8 / 13.8
MA含有率 * [炉心平均] (wt%)	0.4	2.8	3.6
増殖比	1.10	1.13	1.14
初装荷核分裂性Puインベントリ (t/GWe)	4.0	3.8	3.7
最大高速中性子照射量[E>0.1MeV] (n/cm ²)	5.4 × 10 ²³	5.4 × 10 ²³	5.4 × 10 ²³
ナトリウム沸点反応度 (\$)	8.2	9.1	9.5
トッブラ係数 (Tdk/dT)	-4.2 × 10 ⁻³	-3.2 × 10 ⁻³	-2.9 × 10 ⁻³
MA燃焼率 (%/年)	-	6.4	6.6

* 重金属に対する割合

—大型金属燃料炉心(資源重視型炉心):高速フルエンス制限条件—

赤:資源有効利用性

青:経済性



- 内側炉心燃料集合体 (297体)
- ⊕ 外側炉心燃料集合体 (348体)
- ステンレス鋼反射体 (96体)
- Zr-H遮へい体 (210体)
- 主系制御棒 (21体)
- 後備系制御棒 (7体)

炉心配置構成

主要仕様及び炉心特性

項 目		設計値
炉心仕様	電気出力 (MWe) / 炉心熱出力 (MWt)	1,500 / 3,570
	原子炉出口/入口温度 (°C)	550 / 395
	炉心型式	均質重金属密度2領域
	燃料形態	U-TRU-Zr
	燃料組成	高速炉多重リサイクルTRU * ¹
	燃料Zr含有率[内側/外側] (wt%)	10.0 / 6.0
	燃料スミア密度[内側/外側] (%TD)	70 / 75
	燃料ピッチ径 (mm)	7.2
	炉心高さ (cm)	95
	軸方向ブランケット厚さ [上/下] (cm)	12 / -
炉心等価直径 (m)	4.7	
炉心特性	運転サイクル長さ(ヶ月)	21.5
	燃料交換バッチ数 [炉心/径ブランケット]	3 / -
	Pu富化度 * ² [内側/外側] (wt%)	12.1 / 12.1
	燃焼反応度 (%Δk/k')	0.2
	増殖比	1.10
	最大線出力 (W/cm)	269
	最大高速中性子照射量[E>0.1MeV] (n/cm ²)	5.4 × 10 ²³
	取出平均燃焼度[炉心/全炉心 * ³] (GWd/t)	98 / 89
	初装荷炉心核分裂性Puインベントリ (t/GWe)	4.0
	炉心部トリウムボット反応度 (\$)	8.3
炉心部トップラ係数 (Tdk/dT)	-4.2 × 10 ⁻³	

*¹ ²³⁸Pu/²³⁹Pu/²⁴⁰Pu/²⁴¹Pu/²⁴²Pu/²³⁷Np/²⁴¹Am/²⁴³Am/²⁴⁴Am/²⁴⁵Cm

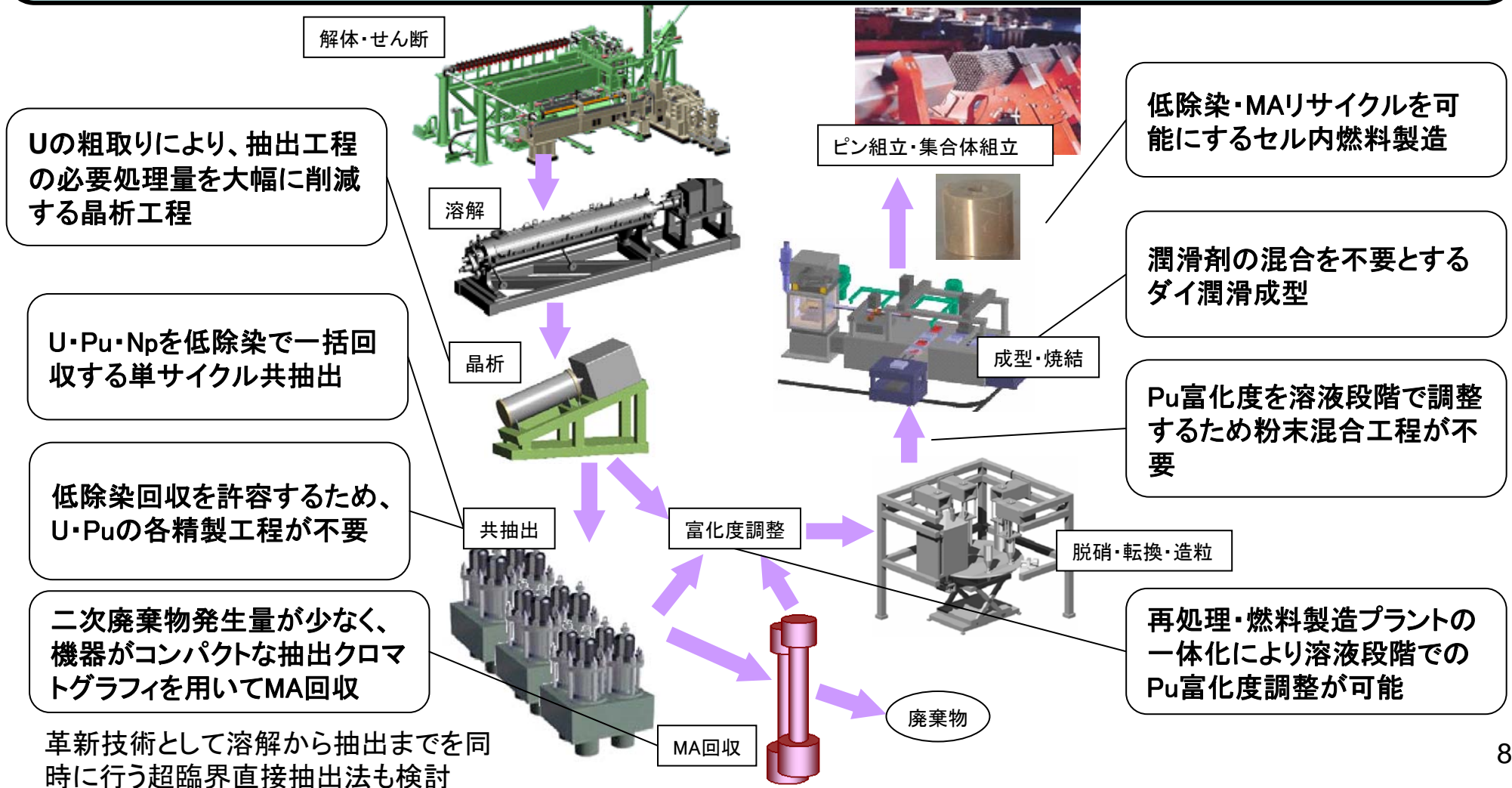
= 1.1/66.0/25.2/ 2.4/ 2.4/ 0.4/ 1.6/ 0.5/ 0.4/ 0.1 (wt%)

*² Pu/重金属 *³ ブランケット燃料を含めた燃焼度

燃料サイクルシステム 先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造

●システムの特徴

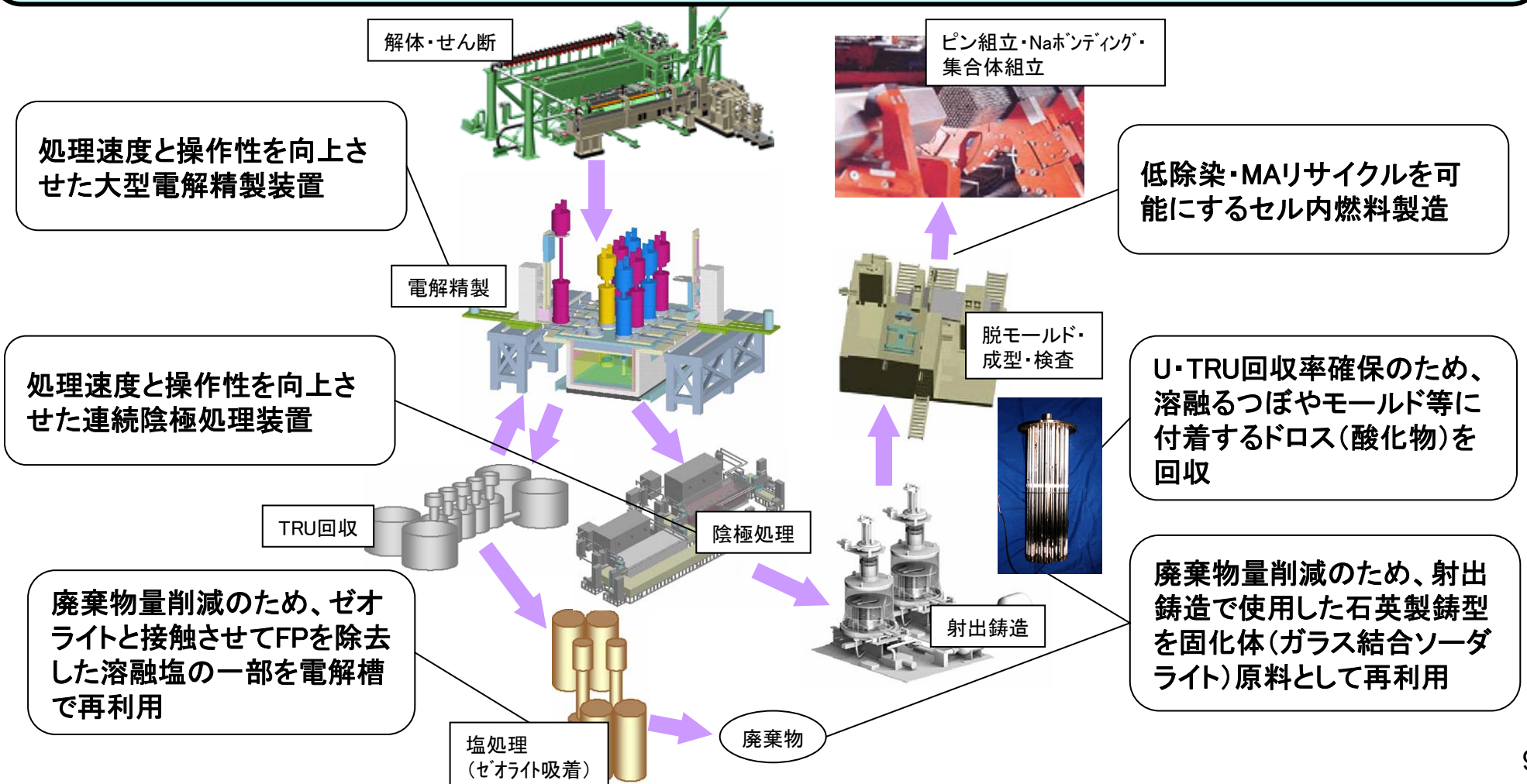
- 低除染燃料の使用が許容される高速増殖炉の特徴を生かし、回収/精製工程を合理化。
- 溶液段階でのPu富化度調整などにより、従来のペレット製造から粉末混合工程を削除。



燃料サイクルシステム 金属電解法再処理+射出鑄造法燃料製造

●システムの特徴

- 米国で開発された乾式再処理法に対して、処理速度向上等の改良。
- 米国高速実験炉EBR-IIの燃料製造に用いられた射出鑄造法の一部合理化。



設計要求への適合可能性

— 先進湿式法＋簡素化ペレット法および金属電解法＋射出鋳造法 —

設計要求		先進湿式法 ＋簡素化ペレット法		金属電解法 ＋射出鋳造法		
		資源重視	経済性重視	資源重視	経済性重視	
安全性		設計要求への適合が可能 (現行の指針等を踏襲できる) ※超臨界直接抽出法では、高压流体の取扱等を考慮した設計により設計要求への適合が可能		設計要求への適合が可能 (質量管理と化学形態管理を組み合わせた臨界管理、高温融体、活性金属等の取扱いを考慮した設計)		
経済性	再処理＋燃料造) ≤ 0.8円/kWh	大型プラント[200t/y]	約60%	約45%	約65%	約55%
		小型プラント[50t/y] (超臨界直接抽出法)	約135% (約120%)	約105% (約95%)	約80%	約75%
	輸送・貯蔵・処分費 ≤ 0.3円/kWh	大型および小型プラント (超臨界直接抽出法)	約100% (約95%)	約95% (約90%)	約145%	約140%
		燃料サイクルコスト ≤ 1.1円/kWh	大型プラント[200t/y]	約70%	約60%	約85%
小型プラント[50t/y] (超臨界直接抽出法)	約125% (約115%)		約100% (約95%)	約100%	約90%	
資源有効利用性	UおよびTRUの回収率 ≥ 99%		基礎試験データから、99%以上を回収可能なプロセスの設計が可能			
環境負荷低減性	再処理	高レベル固化体体積 ≤ 0.5L/GWh	ホウケイ酸ガラス: 約60%		人工鉱物: 約110%	
		TRU及び高βγ廃棄物量 ≤ 1.6L/GWh	約85%		約35%	
核拡散抵抗性	Puが単独で存在しない		U,Pu,Npの共回収		U,TRUの共回収	
	難接近性の確保		低除染化による難接近性の確保			

は優れた特性

設計要求への適合可能性

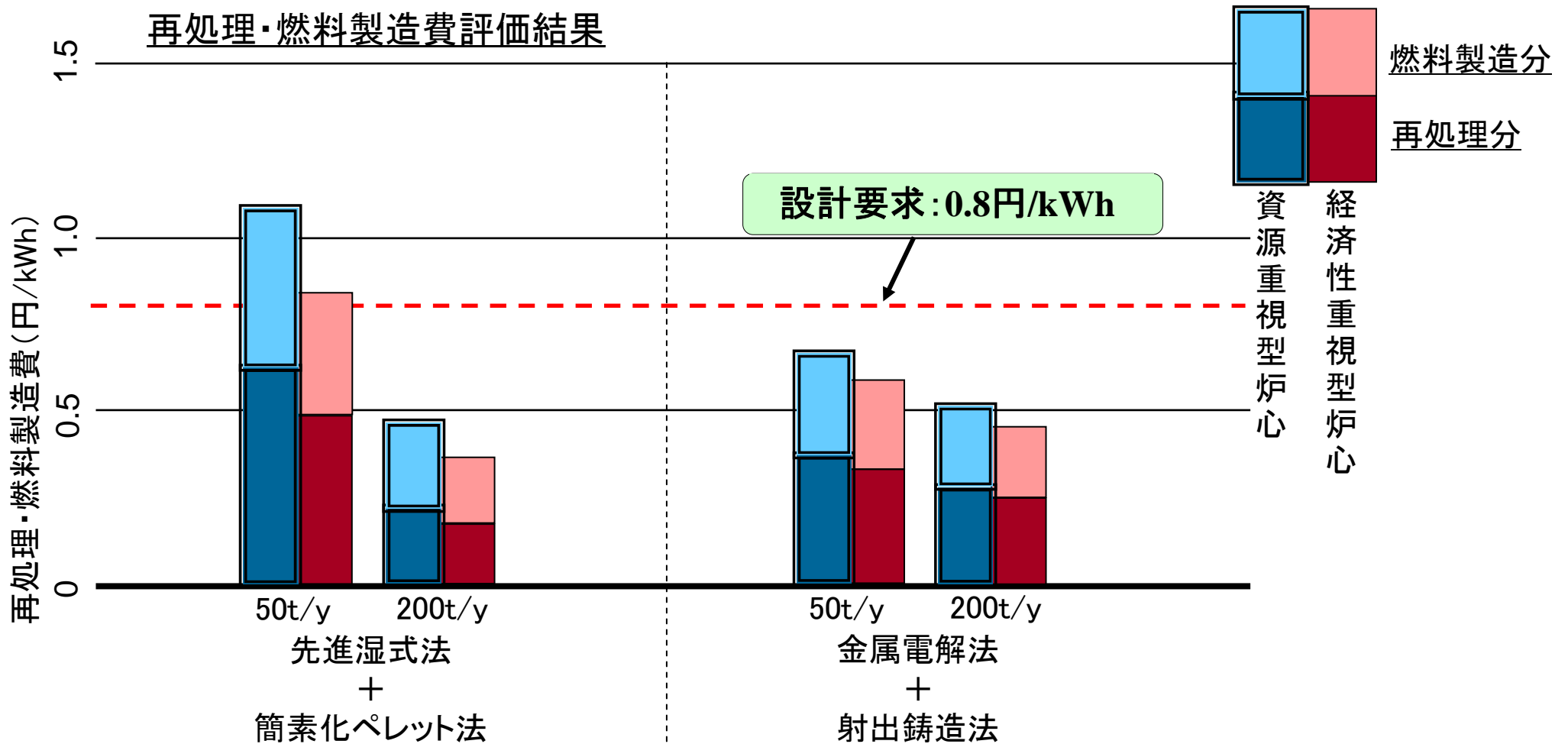
○先進湿式法＋簡素化ペレット法

- ・全ての設計要求に高いレベルで適合する可能性がある。
- ・大規模施設の経済性は最も高くなる可能性がある。

○金属電解法＋射出鋳造法

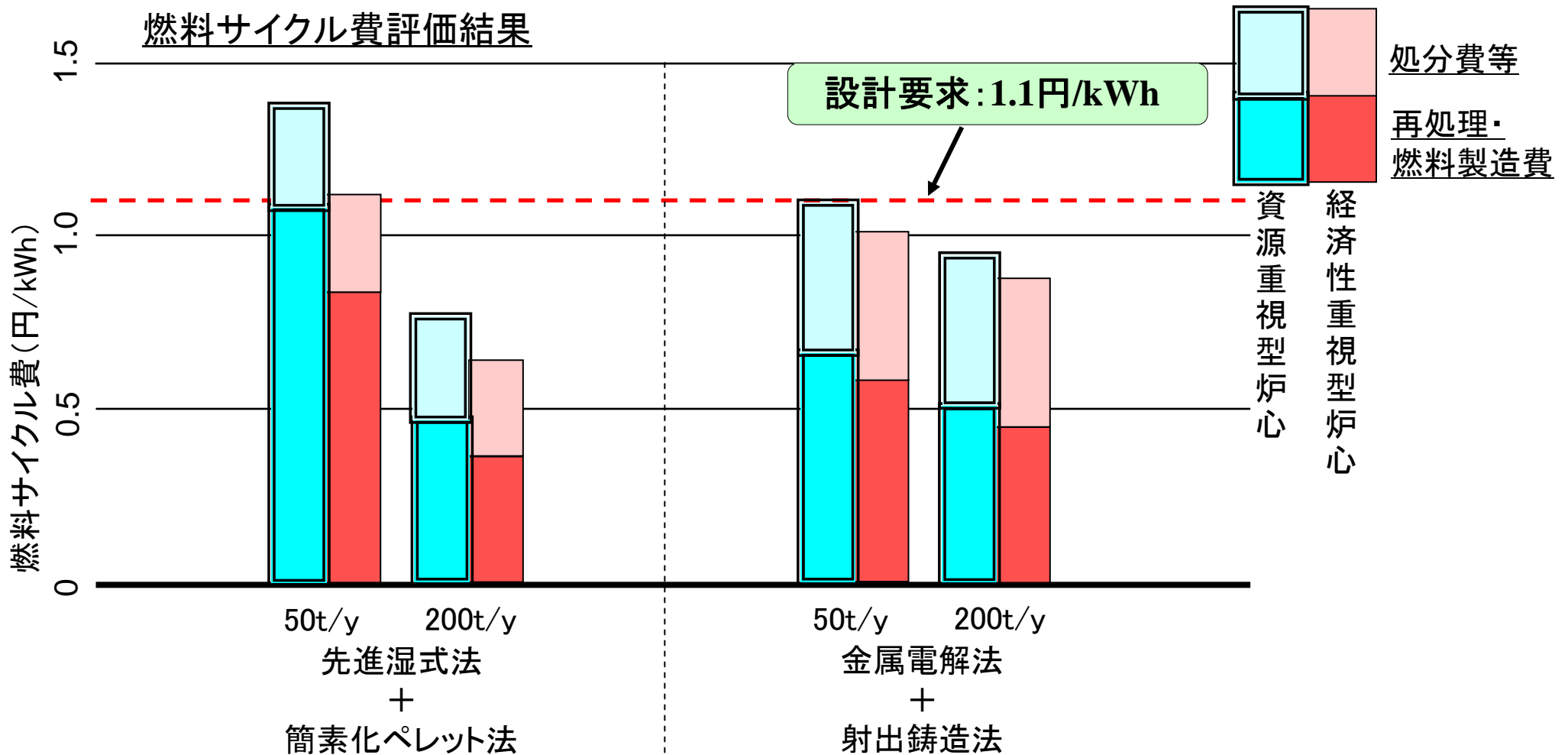
- ・全ての設計要求に適合する可能性がある。
- ・高レベル廃棄物発生量が若干多い。
- ・小型施設の経済性は先進湿式法＋簡素化ペレット法を上回る可能性がある。

システム毎の再処理・燃料製造費の比較



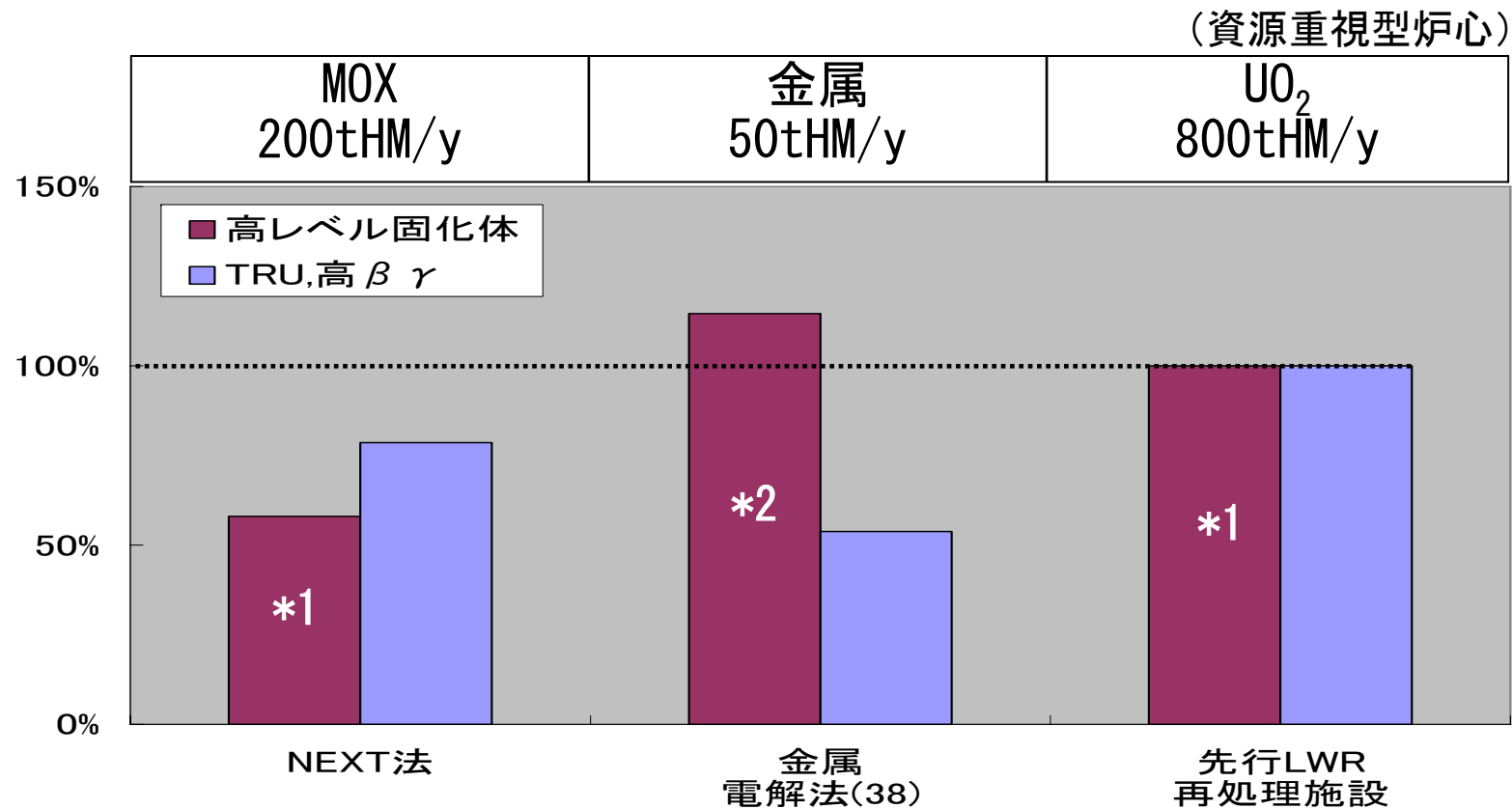
先進湿式法+簡素化ペレット法(50t/y)以外は設計要求(0.8円/kWh)を満足した。
 先進湿式法+簡素化ペレット法は大型化により経済性に最も優れる可能性がある。

システム毎の燃料サイクル費の比較



先進湿式法+簡素化ペレット法(50t/y) 以外は設計要求(1.1円/kWh)を満足した。
先進湿式法+簡素化ペレット法は大型化により経済性に最も優れる可能性がある。

単位発電量当たりの廃棄物発生量の比較



- 単位発電量当たりの発生量 = 年間発生量 / (年間処理量 × 平均燃焼度 × 発電効率)
- 高レベル固化体: *1:ホウケイ酸ガラス、*2:人工鉱物(ソーダライト結合ガラス)
- TRU、高βγ廃棄物は燃料集合体構造部材を含む。



金属電解法における高レベル廃棄物を除き、
先行LWR再処理施設からの発生量を下回る

- ・先行LWR施設の高レベル固化体発生量は、六ヶ所再処理施設事業指定申請書添付書類七に拠る。
- ・TRU、高βγ廃棄物の発生量は、総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会 コスト等検討小委員会(H15.12)資料を基に想定

MOX燃料サイクルと金属燃料サイクルの 高速増殖炉サイクル全体での開発目標への適合可能性の比較

対象概念			開発目標への適合可能性				
			安全性	経済性 (将来軽水炉の発電原価以下)	環境負荷低減性 (放射性廃棄物、潜在的有害度(1000年後)の低減、軽水炉からのMA受け入れ能力)	資源有効利用性 (LWRからFBRへの移行完了までの天然ウラン累積需要量)	核拡散抵抗性
FBRシステム	燃料サイクルシステム						
(a)	Na冷却炉 (MOX燃料)	先進湿式法 + 簡素化ペレット法	設計基準事象に対する安全性および設計基準事象を超える事象に対する安全性を確保できる見通し。	約60% ^(注1)	<ul style="list-style-type: none"> ・高レベル廃棄物発生量 1.0 (相対値)^(注2) ・低レベル廃棄物発生量 1.0 (相対値)^(注2) ・潜在的有害度(1000年後) 1.0 (相対値)^(注2) ・軽水炉からのMAの受け入れが可能 	天然ウラン在来型資源量の約5%	低除染 TRU燃料 サイクル U, Pu,Np の共回収
(b)	Na冷却炉 (金属燃料)	金属電解法 + 射出鑄造法	設計基準事象に対する安全性および設計基準事象を超える事象に対する安全性を確保できる見通し。	約70% ^(注1)	<ul style="list-style-type: none"> ・高レベル廃棄物発生量 1.7 (相対値)^(注2) ・低レベル廃棄物発生量 1.0 (相対値)^(注2) ・潜在的有害度(1000年後) 2.1 (相対値)^(注2) ・軽水炉からのMAの受け入れが可能 	天然ウラン在来型資源量の約5%	低除染 TRU燃料 サイクル U, TRU の共回収

注(1): 将来軽水炉の発電原価に対する % を示す。(資源型炉心)

注(2): (a)の廃棄物発生量及び潜在的有害度を1とした場合の相対値を示す。

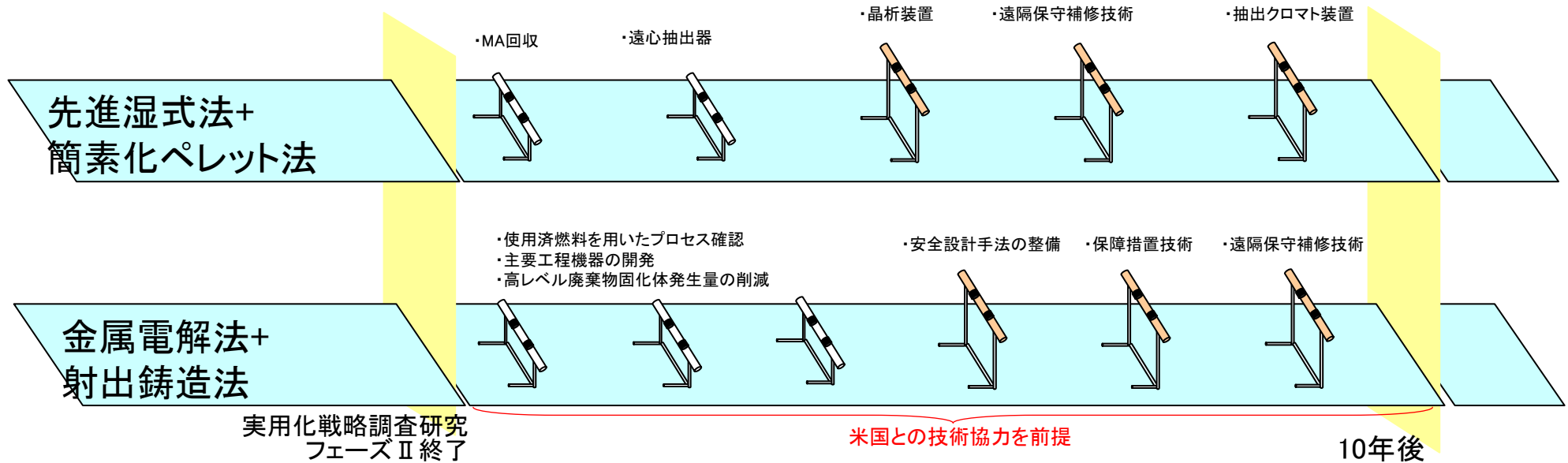
燃料サイクルシステムの技術的実現性 —先進湿式法＋簡素化ペレット法および金属電解法＋射出鑄造法—

実現可能性(難易度:ハードルの高さ)の分類

低:「開発見通しがあり、不確かさが少ない革新技術」

中:「現状知見に乏しく、開発に不確かさがある革新技術」

高:「基礎知見に乏しい燃料・材料関連の革新技術であり、不確かさが最も大きく、かつ研究開発に時間がかかる技術」



技術的実現性

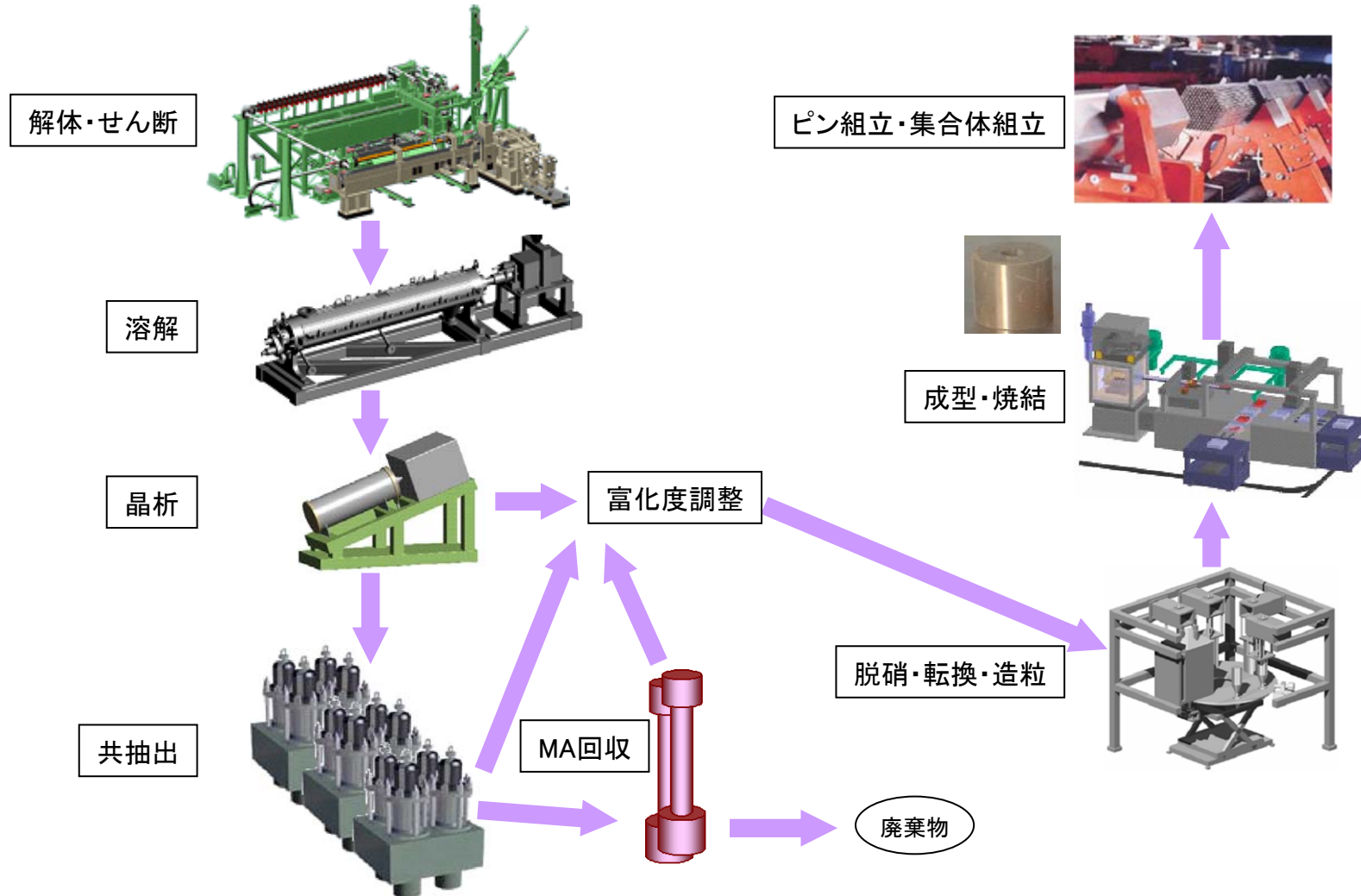
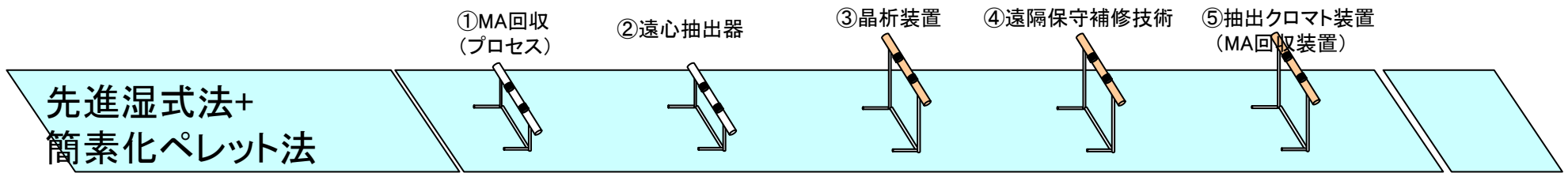
○先進湿式法＋簡素化ペレット法

- ・燃料製造設備の遠隔保守性等に課題はあるが、実現性を見通すことが可能。
- ・仏ではホット施設などによる関連研究を実施。

○金属電解法＋射出鑄造法

- ・国内における技術的知見や開発インフラが乏しく、長い開発期間が必要な見通し。
- ・米国ではホット施設などによる関連研究を実施。

先進湿式法＋簡素化ペレット法：プロセスフローと技術課題



先進湿式法＋簡素化ペレット法：主要な技術課題とR&Dの現状等

項目	技術課題	研究開発の現状		代替技術
③晶析装置	(a) 晶析条件の確立 (b) 工学規模晶析装置の開発 (c) 高濃度溶解液を得る溶解方法の確立	(a) U-模擬FP溶液、U-Pu-模擬FR溶液及び常陽照射済燃料の溶解液を用いた試験により、除染係数100程度が達成可能であること等を確認。 (b) 円環型キルン式晶析装置(10分の1規模、約0.1t/d)を試作。U試験で確認。 (c) ホット試験により、燃焼度・Pu富化度・粒径の溶解速度への影響を把握。50t HM/y規模の連続溶解槽を開発。	(a) 一般産業界(食品・医薬品分野)において、晶析法は多く利用されており、装置開発手法が参考にできる。 (b) 一般産業界では、数t～数十t/d規模であり、1t/d(200t/y)の機器は小規模。	○晶析法の代替として溶媒抽出法が利用可能。 →Puを単離しないよう操作を行う必要がある。 ○溶解は従来より検討した濃度条件により行う。
②遠心抽出器	(a) 単サイクルフローシートの確立 (b) 実用遠心抽出器の開発	(a) 照射燃料を用いた小規模試験でU、Pu及びNpの共回収を確認している。 (b) 耐久性を左右する軸受け部の改良、大処理量への対応を進めている。	○同様の機能を提供するものではないが、液体を相互に分離する遠心分離機は実用されている。	○ミキサセトラやパルスカラムが利用可能。
①MA回収 ⑤抽出クロマト装置	(a) 抽出溶媒の選定 (b) 使用済み燃料を用いた確認 (c) 分離塔の開発 (d) 吸着材の安全データの取得と安全設計	(a) CMPOとBTPを検討している。 (b) CMPOについては溶媒抽出法による使用済燃料を用いた試験で性能を確認。 (c) 未着手。 (d) 吸着材のγ線、酸、温度による分解データを取得。	○抽出クロマトグラフィは分析で多用される技術。 ○支持体の多孔質シリカは、U同位体濃縮の基本材料として旭化成が開発し、優れた濃縮性能を発揮した実績がある。	○同じ抽出剤を用いた溶媒抽出法(SETFICS法)で代替可能。 →抽出クロマトグラフィに比べ、二次廃棄物の発生量が多くなる見込み。
④遠隔保守補修技術	(a) 発熱核種を含むペレットの焼結工程の確立 (b) セル内機器設備の遠隔分解、除染、保守補修技術の確立	(a) 5%Am-MOX及び2%Am-2%Np-模擬FP-MOXのペレット製造試験により良好な焼結性を確認。 (b) 主要な設備の分解方法については机上検討を実施。	○東海再処理工場 ガラス固化技術開発施設(TVF)における遠隔保守機器の開発	○MA含有量などを見直し、重遮蔽グローブボックスにて対応。

先進湿式法＋簡素化ペレット法の課題(1/3): ③晶析装置

技術の現状

晶析方法の化学的成立性及び連続晶析装置の基本的成立性を確認

- ・実溶解液を用いた小規模ホット試験により、プルトニウムを4価に調整することで、ウランを粗分離できることを確認。
- ・U-模擬FP溶液、U-Pu-模擬FP溶液及び照射済燃料の溶解液を用いた試験により、除染係数100程度が達成可能であることを確認。FP元素によっては、条件により、異なる挙動を示すことを確認。
- ・臨界管理を形状管理とした円環型キルン式晶析装置を試作し、ウラン試験で性能に問題がないことを確認。

照射燃料などを用いた試験により晶析条件の基本的成立性の見通しが得られつつある






晶析操作条件の最適化、工学規模装置の開発が必要

結晶中のUに対するPuとFPの除染係数 (DF)

	核種	洗浄回数			
		0	1	2	3
ii-3	Am-241	12	100	250	3,000
	Cs-137	13	100	170	740
	Eu-155	11	100	240	860
ii-4	Am-241	6	58	550	1,700
	Cs-137	6	57	420	1,300
	Eu-155	6	56	530	1,400

		Pu	¹²⁵ Sb	¹³⁷ Cs	¹⁵⁵ Eu
Run1 (急冷)	洗浄前	5.6	1.6	1.2	4.2
	洗浄後	25	0.7	0.8	27
Run2 (緩冷)	洗浄前	4.6	0.8	0.9	3.5
	洗浄後	19	0.5	0.9	19

U 結晶中における Pu の存在比

	U結晶の外観	Pu 比
Run1		100 : 0.3 (U) (Pu)
Run2		100 : 5 (U) (Pu)
Run3		100 : 1.5 (U) (Pu)



連続晶析装置概念 (基礎試験装置)

Pu(IV) のみの場合には母液に付着する
Pu(VI) の場合には結晶に取り込まれる

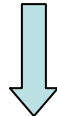
先進湿式法＋簡素化ペレット法の課題(2/3): ①MA回収、⑤抽出クロマト装置

技術の現状

抽出クロマト法のMA回収工程への適用に関し、その基本性能を確認

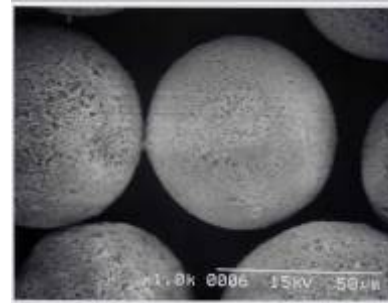
- ・CMPO/SiO₂-P及びTODGA/SiO₂-Pについて、希土類元素の吸着容量、耐熱性、対放射線性等の基礎データを収集し、高温、高硝酸濃度条件下における耐久性についてはCMPO含浸吸着材の方が良好であることを確認。
- ・吸着材からのCMPO浸出を最小化する方法を考案し、分離試験によりAm-Cm回収工程への適用に向けて基本性能に問題がないことを確認。

実験室規模での試験で分離特性を確認、CMPOとBTPの組み合わせを将来の候補技術として摘出した



分離操作条件、分離塔など主要な機器の開発が必要

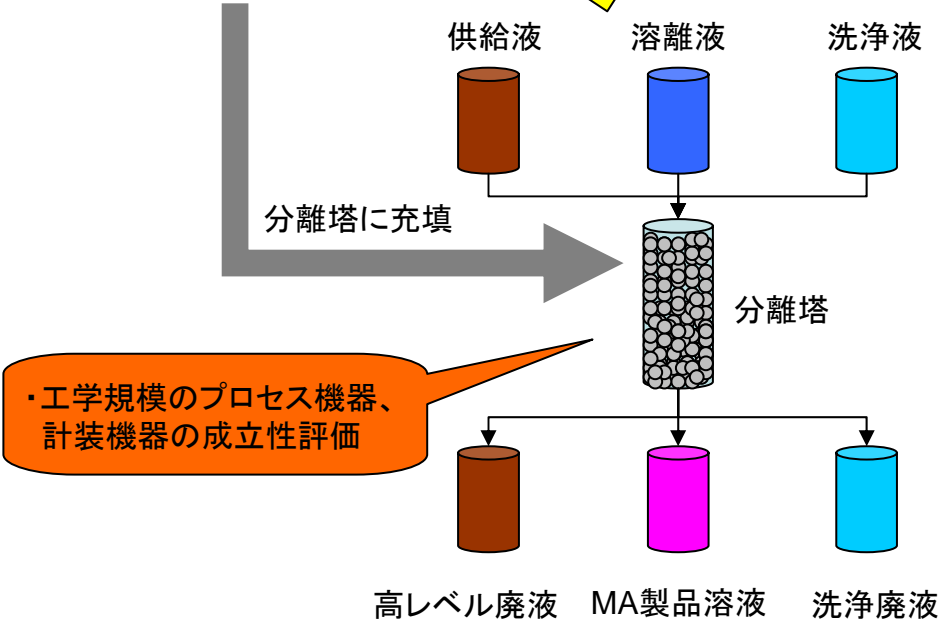
- 多孔質SiO₂ 粒子の表面にポリマー(スチレンジベニルベンゼン)を被覆(SiO₂-P)
- SiO₂-Pの表面に抽出剤(CMPO、TODGA、BTP等)を固定化



CMPO/SiO₂-P吸着材外観

抽出剤の比較・評価・選定

・フローシートの作成
・MA及びFP元素の挙動確認



・工学規模のプロセス機器、計装機器の成立性評価

先進湿式法＋簡素化ペレット法の課題(3/3):④遠隔保守補修技術

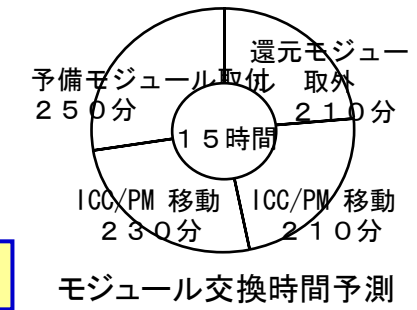
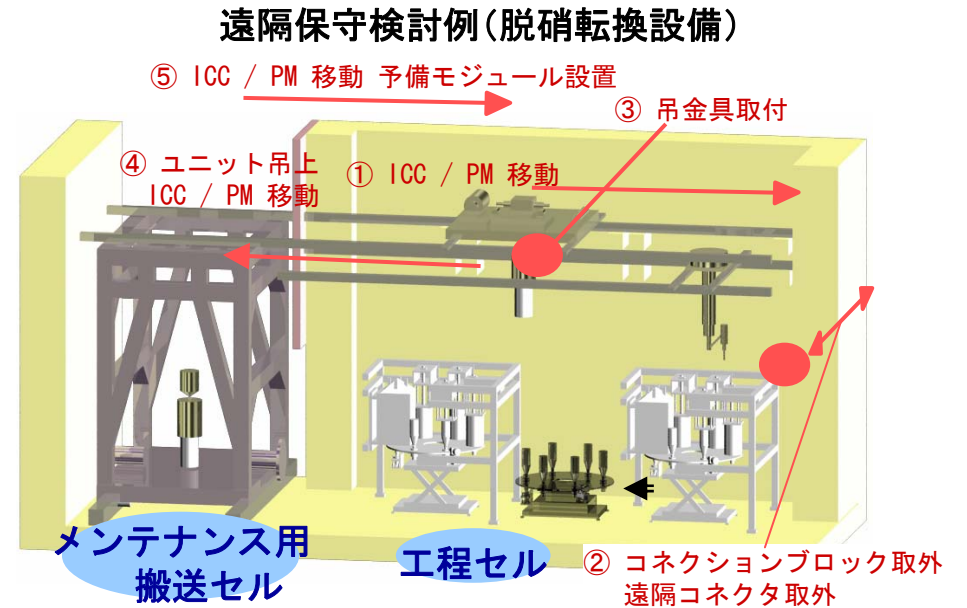
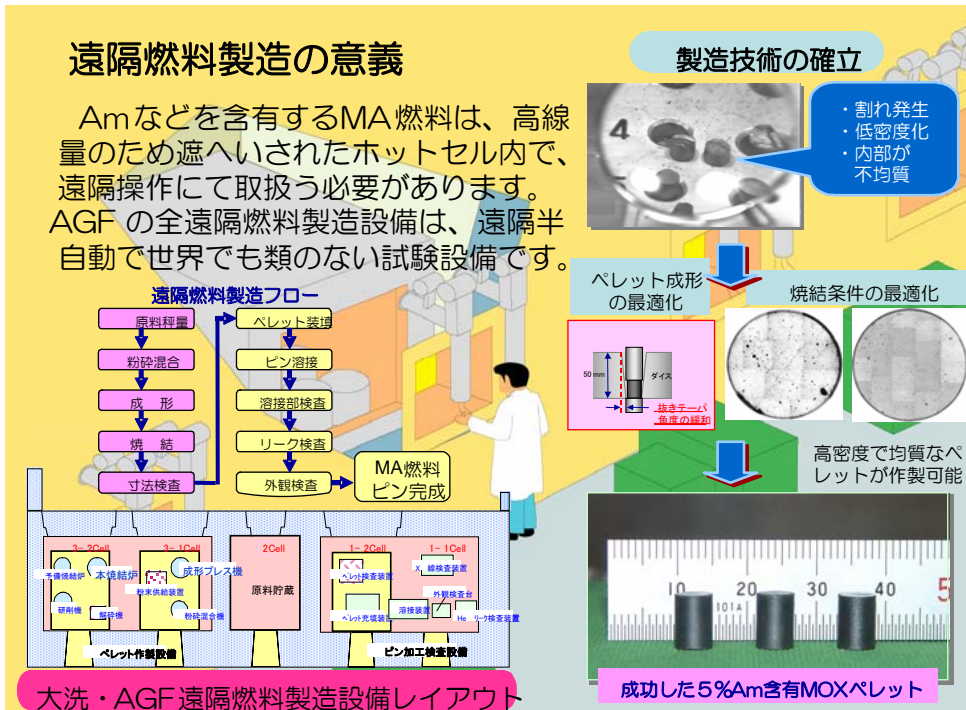
技術の現状

(1) Am-MOXペレット製造試験

- セル内に設置した実験室規模の遠隔ペレット製造設備を用い、焼結雰囲気制御、昇温・降温の速度制御条件を最適化するなどし、高密度で均質な組織を有するAm含有MOXペレット（Am含有量：3%及び5%）の試作に成功した。酸素分圧を制御することで任意のO/M比（1.92～1.98）を得る条件を把握した。

(2) セル内遠隔機器の保守作業シミュレーション（ターンテーブル脱硝転換装置の例）

- 脱硝転換装置の保守部品の分解再組み立て方法を検討し、保守方法の見通しを得た。

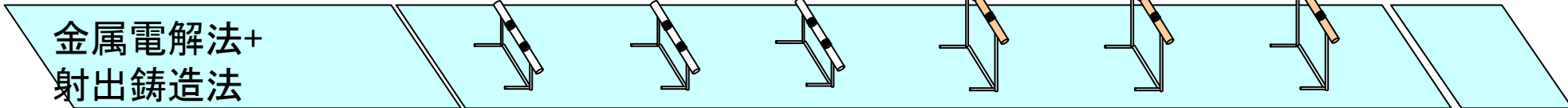


量産対応のための分析、検査技術開発が必要

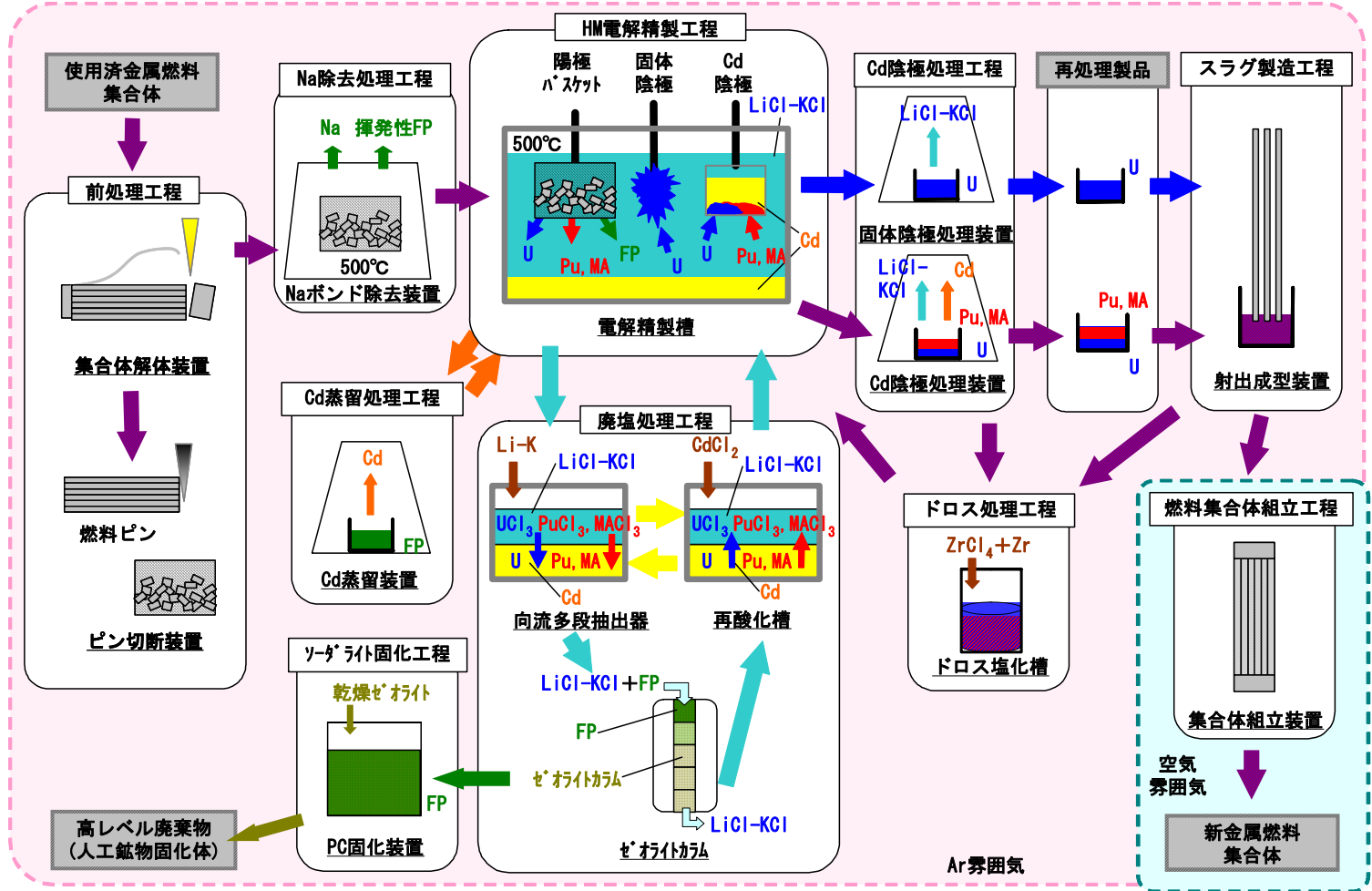
遠隔ハンドリング機器開発の実施、ホット試験施設による実証

金属電解法+射出鑄造法:プロセスフローと技術課題

- ①使用済燃料を用いたプロセス確認
- ②主要工程機器の開発
- ③高レベル廃棄物固化体発生量の削減
- ④安全設計手法の整備
- ⑤保障措置技術
- ⑥遠隔保守補修技術



米国との技術協力を前提

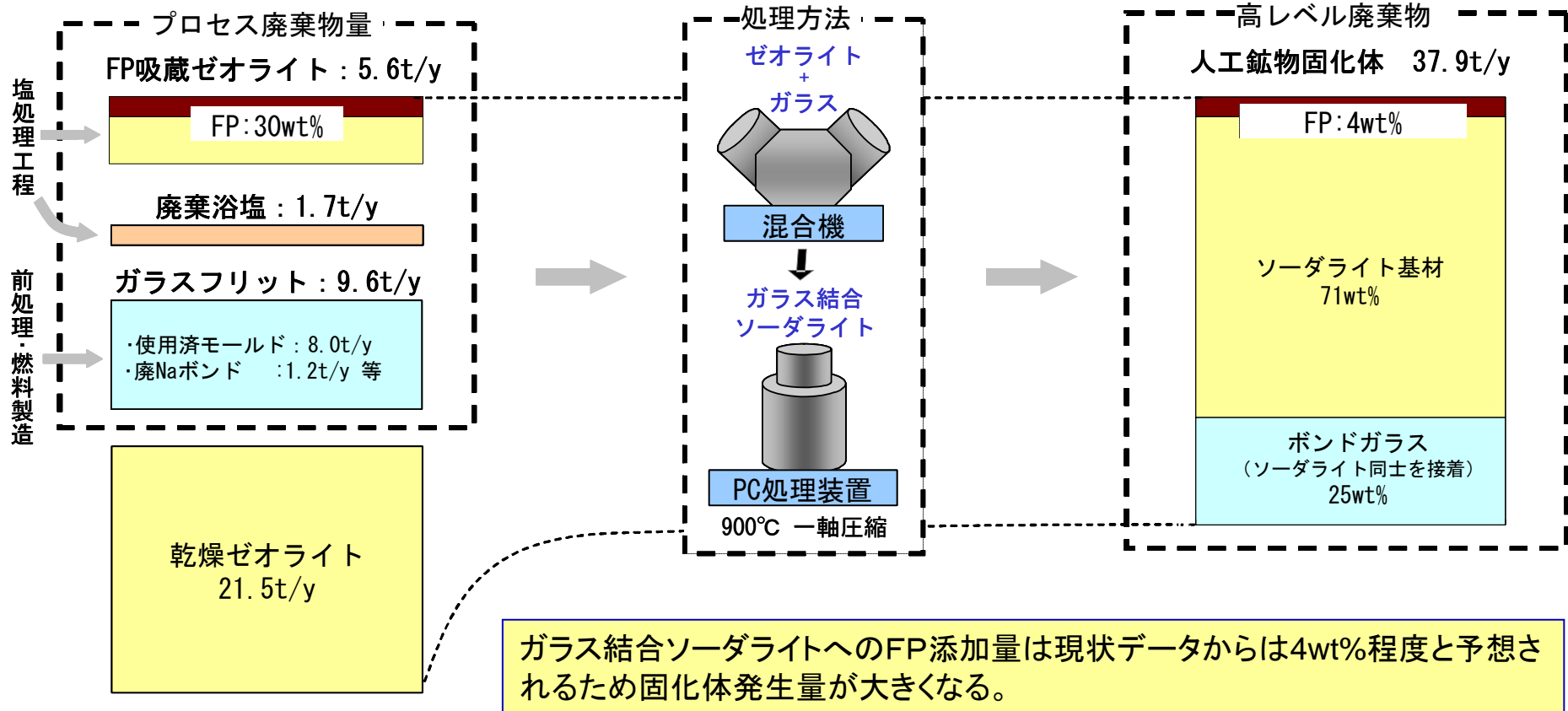
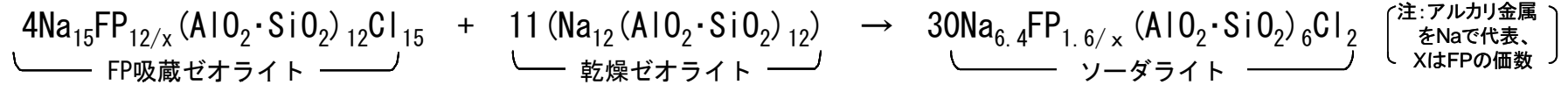


金属電解法＋射出鋳造法の主要な技術課題とR&Dの現状等

項目	技術課題	研究開発の現状		代替技術
[プロセス開発] ①使用済燃料を用いたプロセス確認 ③高レベル廃棄物固化体発生量の低減	①使用済燃料によるプロセス回収率、除染能力、FP挙動等の確認 ③高レベル廃棄物固化体へのFP添加率の向上および処分体の形状最適化	①国内では、100g程度のU,TRU、模擬FP試験を実施(電中研・原子力機構)、使用済燃料試験は未実施 ③使用済塩中FPのゼオライトによる吸着とガラス結合ソーダライト固化体の製造・浸出試験を実施中(電中研・文科省公募)	①米国ではEBR-II使用済燃料からのU回収までをFCFで実証しているが、TRU回収や廃棄物処理は未実施 ③米国では、ガラス結合ソーダライト固化体による地層処分が妥当と判断している。	③FP塩化物を転換してガラス固化体とする
「機器開発」 ②主要工程機器の開発	(a)電解装置の処理速度向上 (b)陰極処理装置のルツボ耐久性向上 (c)高温還元抽出装置の機能確認 (d)射出鋳造装置におけるモールド材料の改良	(a)国内では、高速電解槽の開発を実施中(電中研・文科省公募) (b)グラファイト内面ZrO ₂ コーティングの耐久性が不足しており、ドロスが発生する問題があるが、材料開発は未実施 (c)国内では、多段向流抽出法のコールド試験を実施中(電中研・文科省公募) (d)国内では、ガラスモールドで工学規模U試験を実施済(電中研・文科省公募)	(a)米国では高速電解槽による使用済ブランケット燃料からのU回収までをFCFで実証 (b)米国ではグラファイト内面のZrO ₂ コーティング処理を毎回実施 (c)米国ではIFRプロジェクトとして高温遠心抽出器が開発され、コールド試験に着手したが中断中	
[システム開発] ④安全設計手法の整備 ⑤保障措置技術 ⑥遠隔保守補修技術	④安全評価の基礎データの不足 ⑤計量管理の精度データの不足 ⑥モックアップ試験による確認	④閉じ込め性や臨界防止の検討が行われているが移行率や臨界量の試験データが不足している ⑤計量管理の成立性検討が行われているが、電解槽内インベントリー誤差等の試験データが不足している。 ⑥机上検討のみでモックアップ試験等は未実施	④米国ではFCFの安全性が認可されている。(許認可図書入手済) ⑤米国ではFCFの計量管理が実施されている。(詳細不明) ⑥米国ではFCFの使用済燃料処理で実証されている。(ピンせん断歯交換、電極モジュール修理、蒸留ルツボコーティング等)	

金属電解法の技術課題(1/3): ③高レベル廃棄物固化体発生量の削減

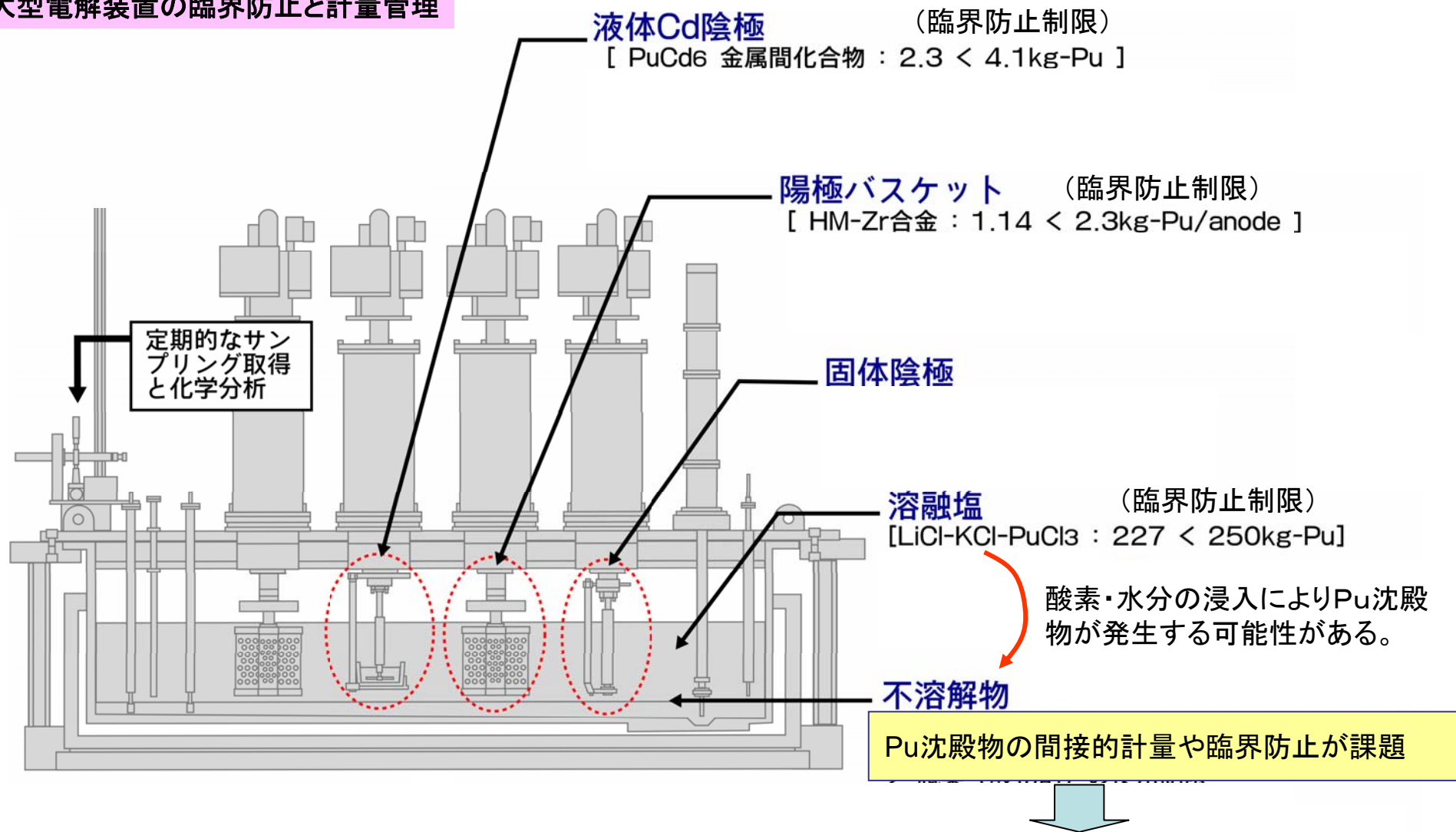
・ソーダライト固化 (Pressureless Consolidation処理)



FP添加率の向上・発熱密度が低いことを考慮した固化体の大型化・処分安全性の評価等が必要で開発には時間を要する。

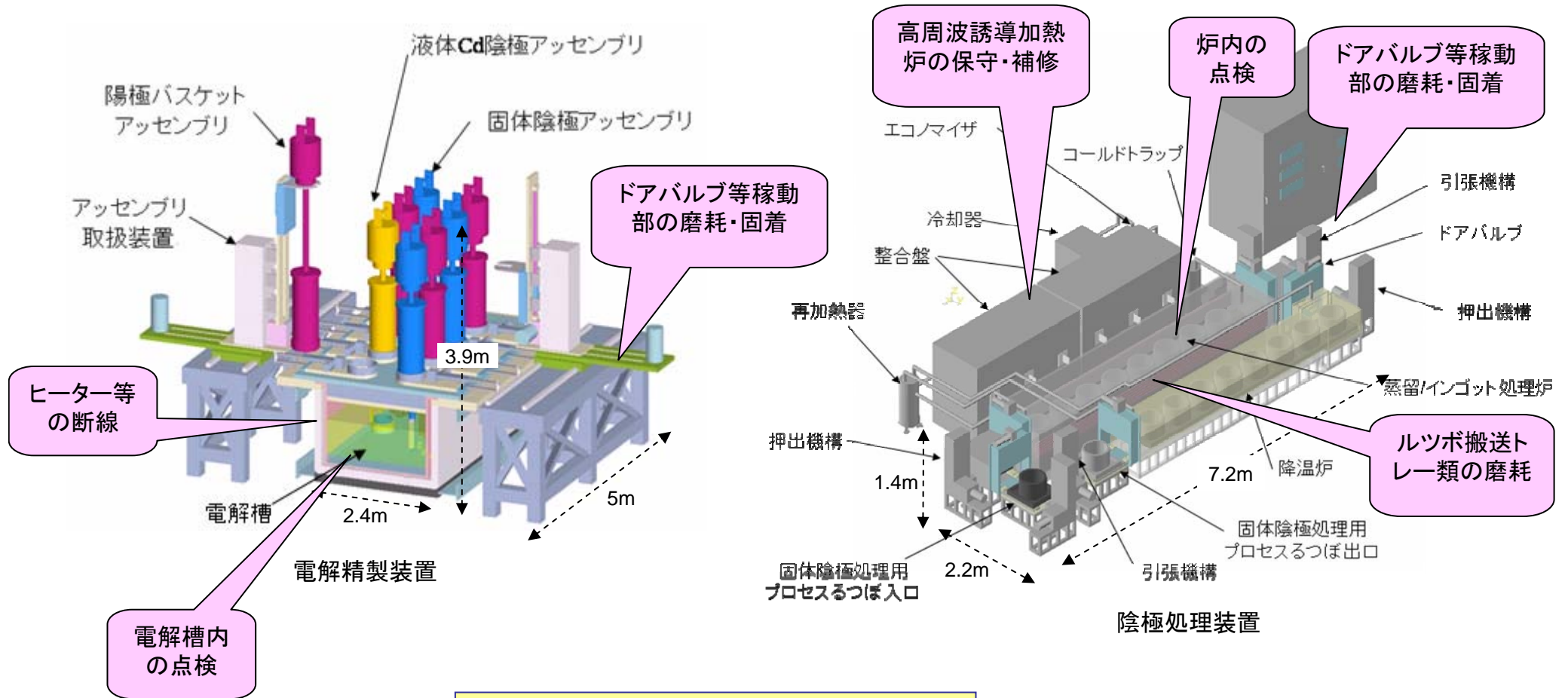
金属電解法の技術課題(2/3): ④安全設計手法の整備、⑤保障措置技術

大型電解装置の臨界防止と計量管理



熔融塩中のPu量が多いため、臨界防止や計量管理には高い測定精度が必要となり開発には時間を要する。

金属電解法の技術課題(3/3) : ⑥遠隔保守・補修技術



処理速度向上のため装置が大型・複雑化



セル内の設置場所または分割・移送しての遠隔保守・補修技術の開発には時間を要する。

MOX燃料サイクルと金属燃料サイクルの比較

(a) ナトリウム冷却炉(MOX燃料) + 先進湿式法再処理 + 簡素化ペレット法燃料製造

総合的に最も優れた概念

- 経済性、環境負荷低減性等の開発目標に高いレベルで適合する可能性がある。
- Na冷却炉、先進湿式法再処理、簡素化ペレット法燃料製造のいずれも技術的実現性を見通すことが可能。

(b) ナトリウム冷却炉(金属燃料) + 金属電解法再処理 + 射出鑄造法燃料製造

総合的な評価では(a)を超えるものではないが、(a)にはない魅力を有する概念

- 経済性、環境負荷低減性等の開発目標に適合する可能性がある。
(a)と比較すると、経済性(発電原価)、環境負荷低減性(高レベル放射性廃棄物発生量)はやや劣る見込み。
- 技術的実現性は、(a)と同等であるが、燃料サイクルの開発に比較的長期を要する見込み。
- 金属燃料の採用により高い増殖比にも対応可能など、炉心性能の向上が期待できるという魅力を有する。