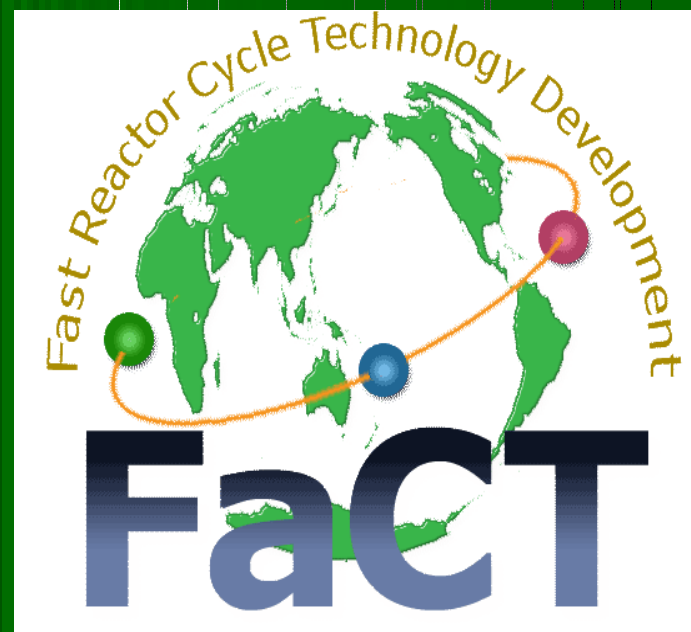


資料5-1  
第3回FaCT評価委員会  
平成23年1月18日



## 12視点から見た燃料サイクル システムの開発状況

平成23年1月18日  
日本原子力研究開発機構  
次世代原子力システム研究開発部門



## 燃料サイクルにおける革新技術の評価のための 12 視点

- ① 得られたデータの妥当性（量的・質的十分性、試験系の妥当性）をどう評価しているか。判断のエビデンスとしての必要十分性
- ② 計算、シミュレーション、解析などに関して、その妥当性をどう評価しているか（ベンチマーキングがなされているか）
- ③ 工学面でのクリティカルポイント（成立性を決めうる最も優先度の高い事項）をどのように見極めているか
- ④ 国際的な取り組み状況や海外の技術情報をどのように反映して来たか
- ⑤ 技術判断のクライテリアをどのような基準や根拠あるいは論理に基づいて設定してきたか
- ⑥ 技術的な盲点を排除するためにどのような取り組みを取ってきたか
- ⑦ 機構に蓄積されている工学的な経験や知見を、試験研究のみならず技術判断にどのように反映させてきたか。反映できているか
- ⑧ 今後の研究開発における「投資効果」を評価する手法や体制が整っているか
- ⑨ 技術的効果の潜在性を評価している技術課題（即ち、現時点で feasibility を確認出来ていないが成功のポテンシャルを感じており、今後の開発の必要性を主張して△をつけている課題）については、その根拠
- ⑩ 工学的な信頼性についての現時点での判断の内容（故障頻度の推測、寿命の評価、復旧措置の実現性、必要となるメンテナンスポリシー等）
- ⑪ 性能の振れや変動についてどのように見ているか
- ⑫ 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化にどのように取り組んできたか



1. 国内外の工学的な知見の反映の状況【←視点 4、7】

● 国外の工学的な知見の反映

- ▶ 米国（ORNL）が 1970 年代から FBR 再処理向けに開発してきた CO<sub>2</sub> レーザー解体機を参考として、集合体のハンドリング方法や基本的な解体手順（ただし一部、引き抜き操作を加えて改良中）を現在の機械式解体法に反映。なお、切断性能の向上や遠隔保守対応等については日本で独自に開発。

● 国内の工学的な知見の反映

- ▶ 切断工具の選定については、一般産業界での実績を調査した上、候補となる切断工具の性能試験を行った結果、主に耐摩耗性や振動の観点から CBN 砥石を採用。
- ▶ 高速実験炉常陽から得た知見から、実用炉燃料集合体や燃料ピンのスエリング量を評価し、工学試験条件に反映。
- ▶ せん断機は TRP で実績を有するせん断機（水平せん断方式）を基本として、せん断長さの揃え機能や防塵対策を追加し、コールド試験機の設計・製作に反映。また、TRP で実施したせん断刃材料の改良や保守方法に関する知見を実用規模せん断機のプロトタイプ設計へ反映。

2. 成果目標の設定方法【←視点 3、5、6】（別紙 1 参照）

● 目標設定に係る視点

- ▶ 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設のプロトタイプ設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

● クリティカルポイントの抽出

- ▶ 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ▶ 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ▶ 2010 年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定。

● 成果目標の設定

- ▶ 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCT フェーズ I で達成すべき具体的な開発の目標（値）を設定。

3. 得られたデータの妥当性【←視点 1、2】

- ▶ 燃料集合体の解体及び燃料ピンのせん断は機械的操作であるため、以下に示すクリティカルな項目の技術的成立性を示すためには、実機のスケールを考慮した工学性能の評価が必須。そのため、もんじゅサイズの模擬燃料集合体と工学規模機械式解体試験機・せん断試験機によりコールド条件で試験データを取得。

● 燃料ピンの破損本数（目標：1 集合体当たり数本以下）

- ▶ もんじゅサイズの模擬燃料集合体（ラップ管板厚：3 mm、ラップ管・被覆管：SUS316）を用いて、ラップ管の引抜きが困難な場合にのみ行う軸スリットカット試験を数回実施した結果から、燃料ピンの破損は 1 本（切断部直下のピン）以下であることを確認。スエリングを想定した場合でも燃料ピンの破損は数本以下と評価。

● 砥石寿命（目標：もんじゅ燃料集合体 1 体を砥石交換せずに切断）

- ▶ もんじゅサイズの模擬燃料集合体を用いて一連の解体操作の通し試験を実施し、集合体 1 体の解体で生じた切断砥石の外径変化量（初期の砥粒部：3mm）から、集合体 6 体程度の解体が可能であると評価。
- ▶ 燃料ピン束の切断時に切断片の接触による砥粒部の損傷が発生したが、燃料ピンの切断部近傍の固定を強化することで防止できることを確認。
- ▶ なお、実用炉燃料集合体については、ラップ管の一面（板厚 5mm）、及び燃料ピンの下部端栓部を模擬（φ10mm、217 本）した試験体を用いた切断試験により、1 枚の砥石で 2 体程度の解体が可能と評価。
- ▶ もんじゅサイズの解体試験結果から、切断工具への負荷を低減させた条件において解体時間は約 2 時間 20 分/集合体と目標（2 時間以内/集合体）に達していないが、保守時間を含む総解体時間と比べて余裕があるものと判断。ただし、解体時間の短縮化については今後も改善方法を検討すべきと判断。

● せん断長さ（目標：1cm±0.5cm（信頼度 95%））

- ▶ もんじゅ及び実用炉の模擬燃料ピン束（被覆管 SUS316：模擬燃料ペレット：アルミナ）を用いてマガジン幅等をパラメータとしたせん断試験（計数百カット）の結果から、マガジン幅を小さくし、燃料ピンの占有率を 80%以上にする事で目標のせん断長さが満足できることを確認。
- ▶ 常陽照射済燃料のデータ（破砕荷重、粒径分布）を参考に選定したペレット（コーージェライト）でも、目標のせん

断長さを満足することを確認。高速炉燃料で懸念されるスペーサーワイヤーのせん断不良や噛み込みもなし。

4. 工学的な信頼性の判断【←視点 10】

● メンテナンスポリシーについて

- ▶ 他の再処理機器と比較し、解体機及びせん断機は多くの機械駆動部を有するため、構造や配置上の観点から問題のない箇所については、基本的に駆動部をセル外配置とする方向で設計。
- ▶ 解体やせん断操作で発生する金属粉による駆動部への噛み込み等を防止するため、原則として飛散防止用カバーを設置し、金属粉は可能な限り発生時に回収。速やかな回収が困難な場合のみ、定期的に回収。
- ▶ 予防保全を重視し、計画的な保守対応を前提に、保守を必要とする部位を抽出し、その頻度を設定。
- ▶ 保守対象部位に関する詳細な保守要領及び手順の具体化については、次のフェーズで検討。

● 想定される機器の故障頻度と寿命について

- ▶ 最も保守・交換頻度の高い部位は機械式解体用の切断砥石とせん断刃（可動刃）であり、キャンペーン中に定常的な交換が必要。この中でせん断刃については軽水炉再処理で保守実績を有しているため、FaCT フェーズ I では切断砥石の保守・交換方法を中心に検討。
- ▶ 保守頻度の高い切断砥石の交換については、重点的に技術開発を実施。保守の容易性、迅速性、信頼性の観点から交換マグネット式の位置決め機構、油圧拡張式スリーブを利用した遠隔固定方式を選定。遠隔交換試験により、問題なく交換可能であり交換後の切断性能に影響がないことを確認。
- ▶ 解体機やせん断機内の摺動部や回転部に侵入する金属粉による故障に関して、解体時に発生する金属粉は 0.1mm 以下の微粒子であり、切断粉回収機能を具備することで発生量の約 9 割を回収可能であることを工学試験で確認。未回収分の処理方法は次のフェーズで検討予定。せん断機内の堆積に関しては、TRP の実績をもとに、集塵機による定期的な除去により防止可能と判断。

● 異常事象の設定と復旧措置の実現性について

- ▶ TRP や RETF の経験をもとに、安全審査指針に示される A.T.（運転時の異常な過渡変化）に該当する可能性のある事象を抽出した結果、解体工程での崩壊熱による燃料集合体の温度上昇を設定。
- ▶ 燃料集合体の温度上昇については通常時の被覆管表面温度上限値は 425℃以下に維持する必要があり、その冷却条件についてラップ管の有無に応じて解析的に評価し、プラント設計で対応可能な冷却条件（空気温度 15℃、流量 300m<sup>3</sup>/h）を設定。電源喪失時等においても制限温度に達するまでの十分な余裕（1 時間以上）を有することを確認。

5. 性能の振れや変動について【←視点 11】

● スエリング（照射変形）の影響

- ▶ 解体、せん断操作は受け入れる燃料集合体、燃料ピンの形状の違いによる性能への影響が大きいと、過去の常陽照射済燃料等の知見から ODS 鋼の実用炉燃料ピンの曲がり量を推定し、工学規模試験にて影響を確認。
- ▶ スエリングによるラップ管の変形に関しては、解体機にうねり計測機構を具備することで、うねりに追従した安定した解体切断が可能となることを確認。
- ▶ ラップ管の必要引抜き力に関しては、保守的にスエリング量を 8mm とした場合でも約 6kN と評価。一般産業界で用いられる機器で 10kN 程度まで対応可能であるため、ラップ管の引抜きが十分可能であると判断。

● せん断長さの変動

- ▶ もんじゅ及び実用炉の模擬燃料ピン束のせん断試験結果から、スエリングなしの条件下でせん断片長さは 1cm±0.5cm（信頼度 95%）の幅に抑えることが可能。今後、照射変形を模擬した湾曲ピンによるせん断試験を実施予定。

6. ○評価に対する技術的な判断根拠【←視点 9】

- ▶ 解体・せん断技術は機械的な処理であるため、燃料集合体や燃料ピンの形状が反映された条件で性能を評価することが技術的成立性を判断する上で最も重要であり、実規模相当の試験体による工学試験結果に基づき、設定した成果目標をほぼ満足する技術的根拠を示せており、現時点で工学的な信頼性に対する深刻な課題はないと判断。

7. 研究開発における投資効果を評価する手法及び体制【←視点 8】

- ▶ R&D と設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ▶ 外部有識者による課題評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステムを採用。

8. 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化への取り組み【←視点 12】

- ▶ 実用炉燃料集合体の構造検討を炉や燃料製造側と実施しており、解体操作の合理化や切断負荷低減の観点からの改善を提案している。



### クライテリア（成果目標）設定の方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した（表 2）。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの（次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの）を除外し、2010 年の革新技术の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定した（表 3）。

#### ○ 解体設備に関して選定された要素技術開発についての評価項目

- ・ Ds-1 切断装置 (速度・流速) 切断速度
- ・ Ds-2 切断装置 (正確度・精度) 切断正確度・精度
- ・ Ds-3 切断装置 (機械的耐久性) 切断工具耐久性
- ・ Ds-4 切断装置 (その他固有の性能) 解体方法の合理性
- ・ Ds-5 ラップ管引き抜き装置 (その他固有の性能) ラップ管引き抜き性
- ・ Ds-6 解体廃棄物減容装置 (速度・流速) レーザー切断性能 (ラップ管)
- ・ Ds-7 解体廃棄物減容装置 (耐放射線性) レーザー光学系の耐放射線性
- ・ Ds-8 システム全体 (速度・流速) 集合体・燃料ピンのハンドリング速度
- ・ Ds-9 システム全体 (その他固有の性能) 高発熱集合体・燃料ピンの除熱性能
- ・ Ds-10 システム全体 (安定動作性) 集合体・燃料ピン・解体廃棄物の取扱い性
- ・ Fm-1 切断装置 (材料の選定) 切断工具材料の選定
- ・ Fm-2 解体廃棄物減容装置 (材料の選定) レーザー装置部材の材料選定
- ・ Mn-1 システム全体 (定期交換部品の交換性) 切断工具の交換性
- ・ Mn-3 システム全体 (その他の安定運転維持のための措置) 切断屑の堆積防止・除去性
- ・ Op-1 切断装置 (運転制御・監視技術の実用性) 切断制御技術の実用性
- ・ Op-2 システム全体 (定常状態の運転性) 一連の集合体解体手順の成立性

#### ○ せん断設備に関して選定された要素技術開発についての評価項目

- ・ Ds-1 燃料ピン搬送装置 (安定動作性) 燃料ピンの移送性
- ・ Ds-2 燃料ピンマガジン (安定動作性) 燃料ピンの整列性
- ・ Ds-3 燃料ピン送り出し装置 (正確度・精度) 送り出し精度
- ・ Ds-4 せん断装置 (速度・流量) せん断速度
- ・ Ds-5 せん断装置 (正確度・精度) せん断長精度
- ・ Ds-6 せん断装置 (その他の固有の性能) せん断片の開口率
- ・ Ds-7 せん断装置 (その他の固有の性能) 燃料の粉化率
- ・ Op-1 システム全体 (定常状態の運転性) 一連のせん断手順の成立性

- (4) 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、クライテリア（成果目標）として設定した。

#### ○ 解体技術のクライテリア（成果目標）

- ・ 原型炉（もんじゅ）の模擬燃料集合体を用いた工学規模試験により、燃料ピンの破損が数本／以下になることの見通しを示す（Ds-2, Op-1）
- ・ 原型炉（もんじゅ）の模擬燃料集合体を用いた工学規模試験により、機械式切断工具を交換せずに 1 集合体以上を解体できることの見通しを示す。（Ds-3, Fm-1）
- ・ 原型炉（もんじゅ）の模擬燃料集合体を用いた工学規模試験により、1 体当たりの解体時間は 2 時間以内（保守の時間は含まない）となる見通しを示す。（Ds-1, Ds-4, Ds-8）
- ・ 工学規模試験の結果を反映して実用炉燃料集合体の解体システム概念を具体化する（保守の観点から砥石の交換方法を含む）。（Ds-1, Ds-2, Ds-3, Ds-6, Ds-7, Ds-9, Fm-2, Mn-1, Mn-3）
- ・ 原型炉（もんじゅ）の模擬燃料集合体を用いた工学規模試験により、一連の解体操作（燃料集合体の解体テーブルへの移動、ラップ管の切断、ラップ管の引抜き、燃料ピンの払い出し）が可能なことを確認する。（Ds-5, Ds-10, Op-2）

#### ○ せん断技術のクライテリア（成果目標）

- ・ 原型炉（もんじゅ）の模擬燃料ピンを用いた工学規模試験により、せん断長さの均一性（1cm±0.5cm）は信頼度 95%となることの見通しを示す。（Ds-2, Ds-3, Ds-5）
- ・ 原型炉（もんじゅ）の模擬燃料ピンを用いた工学規模試験により、使用済燃料の粉化率が 50%以上となることの見通しを示す。（Ds-6, Ds-7）
- ・ 原型炉（もんじゅ）の模擬燃料ピンを用いた工学規模試験により、1 体あたりのせん断処理時間が 2 時間（保守の時間を含まない）以内となることの見通しを示す。（Ds-4）
- ・ 工学規模試験の結果を反映して実用炉燃料ピン束のせん断機概念を具体化する。（Ds-2, Ds-3, Ds-5, Ds-6, Ds-7）
- ・ 原型炉（もんじゅ）の模擬燃料集合体を用いた工学規模試験により、解体された燃料ピン束の解体機からせん断機マガジンまでの搬送、並びにせん断までの一連の操作（燃料ピンのマガジンへの移動、燃料ピンの送り出し、燃料ピンの固定、燃料ピンのせん断）が可能なことを確認する。（Ds-1, Op-1）

表1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め
		臨界
		火災爆発
		異常放出
		耐震
	その他固有のハザード	
	プロセス設計 (Dp)	許認可性
		製品回収率
		歩留まり・収率
		製品除染性能
		ロバスト性
	その他固有の性能	
	機器・システム設計 (Ds)	速度、流速
		正確度・精度
		効率・性能
機械的耐久性		
耐食性		
耐放射線性		
強度確保		
安定動作性		
その他固有の性能		
製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)	材料の選定
	機器の製作性 (Fe)	試薬・充填剤等の消耗品の選定
運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	機器の製作性
		定期交換部品の交換性
		非定期交換部品の交換性
		共用期間中の検査への対応性
	運転性 (Op)	予防保全の対応性
		定常状態の運転性
		運転制御・監視技術の実用性
起動・停止操作の運転性		
トラブルからの回復手順の成立性		
経済性	建設コスト (Cc)	物量(系統数、装置寸法)
		経済性評価(機器製作費・設備費)
		付帯設備負荷率
	操業コスト (Rc)	定期交換部品の交換頻度
		省力性(設備の運転・補修に必要な人員)
		エネルギー負荷率
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	試薬等使用量
		分析負荷率
		発生量
	機器廃棄物 (We)	処理容易性
		処理負荷率
		発生量
核不拡散性	計量管理 (Pa)	運転時の設備・装置内インベントリ量
		設備・装置内インベントリの計量性
		払出操作の迅速性
	技術的障壁 (Pt)	Puの非単離性
		近接困難性
		不正利用困難性



表2 実用化に必要な技術項目抽出結果【解体技術開発】(抜粋)

設備区分	評価対象技術	評価の視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成績因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
解体設備	解体・せん断技術の解体機及び廃棄物取扱設備	設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	○ 解体時のピン損傷を考慮した安全設計	システム全体	せん断機マガジンに装荷完了するまでは放射性物質の閉じ込めバウンダリは燃料ピン被覆管であるが、解体時に被覆管を損傷して内部の放射性物質が放出される可能性があるため、解体設備特有のハザード源である。
					○ 高発熱集合体・燃料ピンの除熱に関する安全設計	システム全体	せん断機マガジンに装荷完了するまでは放射性物質の閉じ込めバウンダリは燃料ピン被覆管であるが、適切な冷却が行われない場合には燃料被覆管が高温化し内部圧の応力によるクリープ破断を生じて内部の放射性物質が放出される可能性があるため、解体設備特有のハザード源である。
					○ 集合体・燃料ピン取扱時の落下等に関する安全設計	システム全体	本システムでは、燃料集合体を吊り上げて搬送するなどの操作が必要であるが、その際に誤って落下させた場合に複数の燃料ピンが破損し放射性物質が放出される可能性があり、解体設備特有のハザード源である。
				臨界	○ 集合体の二重装荷・異常近接防止、減速材の排除などによる臨界防止	システム全体	本システムでの臨界安全管理方法は集合体単位での体数管理であるが、減速材が存在したり、複数体を誤って近接させたりすると臨界になる可能性があり、解体設備特有のハザード源である。
				火災・爆発	○ 切断時火花による火災発生防止	システム全体	本システムでは切断工具による集合体構造材の切断を行うが、この際に発生する火花や高温の切り屑が火災の発火源となる可能性があり、解体機特有のハザード源である。
				異常放出	無	—	本システムでは放射性物質は密封されているため、閉じ込め(燃料ピン被覆管)が健全な状態で放射性物質の異常な放出が生じることはないため、固有のハザード源は無い。
				耐震	無	—	耐震設計上考慮すべき技術的対策は先行施設等における一般的な再処理設備機器と同様であり、本システム固有のハザード源は無い。
				その他固有のハザード	無	—	閉じ込め、臨界、火災・爆発、異常放出、耐震以外の事象に関する本設備固有のハザード源は無い。
				許認可性	無	—	本システムの安全設計・評価のために特に大きなコスト・期間及び特別な試験設備を要する研究開発課題は無い。
			プロセス設計 (Dp)	製品回収率	無	—	本システムでは化学処理は実施しないため、対象項目無し。
				歩留まり・収率	無	—	
				製品除染性能	無	—	
				ロバスト性	無	—	
				その他固有の性能	無	—	
			機器・システム設計 (Ds)	速度・流量	○ 切断速度	切断装置	切断速度はシステム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。
○ 集合体・燃料ピンのハンドリング速度	システム全体	集合体・燃料ピンの取り扱い速度はシステム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。					

表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【解体技術開発】(抜粋)

設備区分	評価対象技術	評価の視点	分類	評価項目(技術要素の性能・成績)の候補		評価項目の選定と参照番号		選定した理由/選定しなかった理由
				技術要素	性能・成績	技術	設計※	
解体設備	解体・せん断技術の解体機及び解体廃棄物取扱設備	設計成立性	安全設計(Sf)	システム全体	(閉込) 解体時のピン損傷を考慮した安全設計	—	○-Sf1 [SR,WM,EP]	【技術】左記安全設計に対しては従来の安全設計の考え方に基づいて設計・評価可能であり、技術的成立性に影響をおよぼす因子ではないと判断して選定から除外した。 【設計】これらの事象は「安全性(SR-1.1、SR-1.3)」、「環境保全性(EP-1.1)」、「廃棄物管理性(WM-3.1)」、「資源有効利用性(UR-1.1)」に影響し、さらに安全性・環境保全性を満足するための設備対策等の負荷については「経済性(EP-1.1)」に影響するが、「経済性」については「建設コスト」を通じて評価されるため、ここでは「安全性」、「環境保全性」、「資源有効利用性」の観点から選定した。
					(閉込) 高発熱集合体・燃料ピンの除熱に関する安全設計	—	○-Sf2 [SR,UR]	
					(閉込) 集合体取扱時の落下等に関する安全設計	—	○-Sf3 [SR]	
					(臨界) 集合体の二重装荷・異常近接防止、減速材の排除などによる臨界防止	—	○-Sf4 [SR]	
					(火爆) 切断時火花による火災発生防止	—	○-Sf5 [SR]	
		プロセス設計(Dp)	(該当項目無し)	—	—	—	—	
		機器・システム設計(Ds)	切断装置	切断速度	○-Ds1	—Ds1 [EC]	【技術】クロープカットは燃料ピンの端栓部(鋼材中実部)をバンドル単位で切断する操作であり、スリットカットはラップ管で切断する操作である。これらの切断速度は解体時間を決定する重要な性能であることから選定した。 【設計】設計要求における「経済性(EC-1.1)」に影響するが、「建設コスト」を通して評価されるため個別の評価項目としては選定外とする。	
				保守速度(切断工具交換)	—	—Ds12 [EC]	【技術】切断工具は1集合体解体毎に遠隔で交換する必要があるが、切断ユニット毎ではなく切断工具のみの交換を採用予定であるため、保守時間内で十分対応可能であると判断して選定から除外した。 【設計】設計要求における「経済性(EC-1.1)」に影響するが、「建設コスト」を通して評価されるため個別の評価項目としては選定外とする。	
				切断位置正確度・精度	○-Ds2	—Ds2 [SR]	【技術】クロープカット時において切断位置にズレが生じると燃料ピンブレンナム部をバンドル単位で破損させてしまう。また、軸方向スリットカット時においては切断深さにズレが生じるとラップ管直下の燃料ピンを破損することから、切断位置、切断深さの制御正確度・精度確保は安全性に係わる重要な性能であるため選定した。 【設計】設計要求における「安全性(SR-1.1)」に影響するが、「安全設計」を通して評価されるため個別の評価項目としては選定外とする。	
				切断工具耐久性	○-Ds3	—Ds3 [WM,EC]	【技術】切断工具耐久性は工具交換頻度、ひいては設備処理能力・稼働率に影響する重要な性能であるため選定した。 【設計】設計要求における「経済性(EC-1.1)」及び「廃棄物管理性(WM-1.1)」に影響するが、「建設コスト」及び「機器廃棄物」を通して評価されるため個別の評価項目としては選定外とする。	
解体方法の合理性	○-Ds4			—Ds4 [EC]	【技術】実用炉集合体の構造に基づいて、切断距離及び切断深さを最小化する等、切断工具寿命及び解体時間の短縮、解体手順の確実性を確保するための合理的な解体方法の検討は、技術的成立性全体に広く影響をおよぼすために選定した。 【設計】設計要求における「経済性(EC-1.1)」に影響するが、「建設コスト」を通して評価されるため個別の評価項目としては選定外とする。			
	ラップ管引き抜き装置	ラップ管引き抜き性	○-Ds5	—	【技術】照射後のピンバンドルの変形などを考慮してもラップ管引き抜きが可能でなければならぬことから、システム成立性に寄与する性能として選定した。 【設計】技術的成立性の前提条件であるため選定外とする。			

## 1. 国内外の工学的な知見の反映の状況【←視点4、7】

### ● 国外の工学的な知見の反映

- ▶ 米国(ORNL)が1970年代からFBR再処理向けに開発してきた回転ドラム型連続溶解槽の基本概念をベースに、日本側で開発を展開。

### ● 国内の工学的な知見の反映

- ▶ 回転ドラムに使用する構造材料は、TRPの腐食に関するトラブル事例を参考に、回転ドラム型連続溶解槽に特有の擦過腐食に対して機械的強度に優れたTi-5Taを有力候補として選定。また、接液部での溶接を極力回避するドラム加工方法を採用。
- ▶ スラッジに起因する溶解槽内の閉塞防止策や解除策並びにスラッジの組成や生成条件に関するTRP知見を参照し、本研究に反映していく予定。

## 2. クライテリア（成果目標）の設定方法【←視点3、5、6】（別紙1参照）

### ● 目標設定に係る評価の視点

- ▶ 原子力委員会が求める2050年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の6つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

### ● クリティカルポイントの抽出

- ▶ 2050年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ▶ 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ▶ 2010年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定。

### ● 成果目標の設定

- ▶ 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCTフェーズIで達成すべき具体的な開発の目標（値）を設定。

## 3. 得られたデータの妥当性【←視点1、2】

### ● 高濃度溶解性（目標：溶解液重金属濃度500gHM/L以上）

- ▶ 照射済燃料を用いたCPFでのバッチ溶解試験を複数回実施し、燃料を短尺化することで中濃度溶解条件(200～400gHM/L)と同等の溶解時間(約3h)で高濃度溶解液(500gHM/L)が得られることを確認。
- ▶ Pu富化度や燃焼度の異なる種々の照射済燃料を用いたCPFでのバッチ溶解試験の蓄積データを元に、中濃度溶解条件での不溶解残渣へのPu移行量を解析した結果、不溶解残渣に含まれるPu量は微量(≦0.1w%)であることを確認。
- ▶ 500gHM/Lを超える高濃度溶解条件での不溶解残渣へのPu移行量については、目下分析中のためデータは得られていないが、溶解液中のPu量に濃度依存性が見られないことから、中濃度溶解条件と同程度と推定。
- ▶ 工学規模体系での連続溶解条件で高濃度溶解液が得られることを計算により確認。計算結果は、CPFでのバッチ溶解試験結果及び工学規模試験装置(50t/y規模、ステージ数8段)を用いたウラン試験結果との比較検証により妥当性を確認。

### ● 燃料の保持性・ハル等排出性及びドラムの動作安定性（目標：正常動作の保持）

- ▶ ORNLでのハル等の噛み込み情報を踏まえて改良した工学規模試験装置(50t/y規模、ステージ数8段)を用いて、模擬燃料(SUS粉/銅粉、ハル、ワイヤ)の連続投入試験を複数回実施し、模擬燃料がドラム内に蓄積しないこと、ハル等は正常に排出されること及び回転ドラムとシュラウドの隙間部に模擬燃料の噛み込みが生じないことを確認。
- ▶ 要素試験装置(50t/y規模、ステージ数2段)を用いて連続通水下で模擬燃料粉をバッチ投入し、浮遊粉の溶解液出口側への流出率を調べる試験を複数回実施し、未溶解燃料のステージ内保持性が確保されることを確認(溶解液側への流出率：<数w%)。なお、出口から排出される未溶解燃料(粒子径：<数十μm)は後段の気液分離槽で溶解する。

### ● 臨界安全性（目標：keff≦0.95）

- ▶ 解析モデルは、燃料が未溶解のまま硝酸と共にドラム内に充満すると仮定した最も厳しい条件で、中性子吸収材と形状管理の併用により未臨界性(keff≦0.95)を確保できることを計算により確認。

## 4. 工学的な信頼性の判断【←視点10】

装置としての潜在的な工学的信頼性を有することを確認するため、処理規模50t/yのプロトタイプ機を1986年に製作、1年半にわたるコールド試験及びウラン試験により駆動機構の機械的特性、運転の安定性、溶解性能、等の基礎データを取得。さらに工学的な信頼性の向上を図るため、目下、マルオペレーションを含む種々のプロセス溶解特性データの取得やドラムの寿命及び駆動部の耐久性等を確認するための機械的特性の把握を段階的に実施している。

### ● メンテナンスポリシーについて

- ▶ 装置は、回転ドラムに駆動モータを直結させることで故障の少ないコンパクトな構造を特徴とし、モータ等の駆動部をセル外に設置する等の構造には不向きなことから遠隔保守が前提。運転中の装置故障はプラント停止につながることから、定期的な保守や部品交換による予防保全を基本とする。

### ● 想定される機器の故障と寿命について

- ▶ 装置は過去の保守経験を踏まえて可動部分の少ない構造としているため、想定される故障部位は限定される。
- ▶ 故障が最も起こりやすい部位として、低速揺動による繰返し高荷重を受けるドラム軸受及びスラッジによる閉塞が懸念される回転ドラム(特に、各ステージ間の連通管の目詰まり)が考えられる。
- ▶ ドラム及び軸受の設計寿命は、遠隔交換頻度の低減を考慮して5年程度を目標に設定。
- ▶ 軸受は、これまで、種類の異なる複数候補について縮小スケールでの耐久性試験により、ハイブリッド玉軸受(潤滑有)が5年以上の耐久性を有する見込み。今後、実機を想定した長期耐久性試験を実施予定。
- ▶ 回転ドラムは、不溶解残渣や析出物の堆積による閉塞挙動の把握が課題であり、閉塞解除手段を含めた寿命予測のための検討が必要。(次フェーズ以降)

### ● 異常事象の想定と復旧措置の実現性について

- ▶ 異常事象として、RETFの安全審査向けに実施した異常事象の検討結果を参考に、軸受の固着による回転不良及びドラム閉塞による機能喪失を想定。
- ▶ 軸受は、ドラム軸との切り離しが可能なユニット構造として一体で遠隔交換することで復旧できる見通し。
- ▶ ドラムは、閉塞程度にもよるが、ドラムを逆回転させて堆積物を溶解液出口側に排出させる解除手段により運転に支障ない程度に復旧できる見通し。
- ▶ ドラムは、遠隔交換を想定した取替え可能構造とし、閉塞が解除できない場合は、インセルクレーンやパワーコンピュータを用いた遠隔交換により復旧できる見通し。

## 5. 性能の振れや変動について【←視点11】

- ▶ 装置は、燃料の投入変動や組成変動等に対し溶解能力としてステージ段数に十分な余裕を持たせる設計思想。
- ▶ 通常の燃料受入に対し、ステージ1段目から4、5段目までに所定の溶解率を達成させ、残り3、4段はハルの実質的な洗浄機能を担う。
- ▶ 通常運転で想定される燃料投入量の変動幅(約±10%)に対し、投入量増による溶液温度や酸濃度の低下に伴う溶解率の低下を計算した結果から、溶解液出口での未溶解燃料の増加割合は僅か(約1w%)であり、後段の気液分離槽において溶解可能であることを確認。

## 6. O評価に対する技術的な判断根拠【←視点9】

- ▶ FaCT Phase-1開始時点で、照射済燃料(Pu富化度18～30%、平均燃焼度4.4～100GWd/t)を用いたピーカースケール溶解試験により、照射済燃料の基本的な溶解挙動を把握。また、工学試験装置を用いたコールド及びウラン試験により、連続溶解槽の基本的な性能を把握し、基本構造の成立性見通しを得た。
- ▶ FaCT Phase-1では、さらに溶解技術の成立性を見定めるためにクライテリア(成果目標)を定め、前述の各種試験を通して溶解特性及び装置構造等に対する適合性を評価し、成果目標を満足していると判断。

## 7. 研究開発における「投資効果」を評価する手法及び体制【←視点8】

- ▶ R&Dと設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ▶ 外部有識者による課題評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステムを採用。

## 8. 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化への取り組み【←視点12】（別紙2参照）

- ▶ 再処理施設の設計研究の中で、R&D成果に基づく要素技術を含む工程間の取合い仕様・条件を設定し、システム全体の整合性を確認。



クライテリア (成果目標) 設定の方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、大きな分類を「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つを定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した (表 2)。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの (次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの) は除外し、革新技术の採否判断に必須で優先的に解決・確認すべき重要な因子を選定した (表 3)。

○ 溶解設備に関して選定された要素技術開発についての評価項目

- ・ Sf-1 溶解装置 (臨界) 臨界安全設計
- ・ Dp-1 溶解装置 (製品回収率) U、Pu の回収率
- ・ Dp-2 溶解装置 (固有の性能) 高濃度溶解性能
- ・ Dp-3 溶解装置 (その他固有の性能) 回転ドラム攪拌条件の提示
- ・ Dp-4 溶解装置 (その他固有の性能) 固体成分(ハル等)の排出性及び粉体燃料成分の保持性
- ・ Ds-1 溶解装置 (機械的耐久性) ドラム軸受構造の選定
- ・ Ds-2 溶解装置 (耐食性) 主要構造材の選定
- ・ Ds-3 溶解装置 (強度確保) 溶解槽概念の提示
- ・ Ds-4 溶解装置 (安定作動性) 回転ドラムの動作安定性
- ・ Fm-1 溶解装置 (材料の選定) 調達性
- ・ Fe-1 溶解装置 (機器の製作性) ドラムの製作性
- ・ Op-1 溶解装置 (定常状態の運転性) 定常状態の運転安定性

- (4) 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定された評価項目をまとめて、クライテリア (成果目標) として設定した。

○ クライテリア (成果目標)

- ・ 高濃度溶解液が得られる安定したプロセス条件を把握する。(Dp-1, Dp-2, Op-1)
- ・ 小型連続溶解槽のコールド試験により高濃度溶解液に対応した溶解槽内部構造の確立を目指す。(Sf-1, Dp-3, Dp-4, Ds-1, Ds-2, Ds-3, Ds-4, Fm-1, Fe-1)

表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

評価の視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め
		臨界
		火災爆発
		異常放出
		耐震
	プロセス設計 (Dp)	その他固有のハザード
		許認可性
		製品回収率
		歩留まり・収率
機器・システム設計 (Ds)	製品除染性能	
	ロバスト性	
	その他固有の性能	
	速度、流速	
	正確度・精度	
	効率・性能	
	機械的耐久性	
	耐食性	
	耐放射線性	
	強度確保	
安定動作性		
製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)	材料の選定
	機器の製作性 (Fe)	試薬・充填剤等の消耗品の選定
運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	機器の製作性
		定期交換部品の交換性
		非定期交換部品の交換性
	運転性 (Op)	共用期間中の検査への対応性
		予防保全の対応性
経済性	建設コスト (Cc)	定常状態の運転性
		運転制御・監視技術の実用性
	操業コスト (Rc)	起動・停止操作の運転性
		トラブルからの回復手順の成立性
		物量(系統数、装置寸法)
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	経済性評価(機器製作費・設備費)
		付帯設備負荷率
	機器廃棄物 (We)	定期交換部品の交換頻度
		省力性(設備の運転・補修に必要な人員)
核不拡散性	計量管理 (Pa)	エネルギー負荷率
		試薬等使用量
	技術的障壁 (Pt)	分析負荷率
		発生量
核不拡散性	計量管理 (Pa)	発生量
		処理容易性
	技術的障壁 (Pt)	発生量
		処理容易性
核不拡散性	計量管理 (Pa)	発生量
		処理容易性
	技術的障壁 (Pt)	発生量
		処理容易性

表2 実用化に必要な技術項目の抽出結果【溶解技術開発】(抜粋)

設備区分	評価対象技術	評価の視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点	該当事項の有無(有の場合、その性能・成績因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
溶解設備	高効率溶解技術	設計成立性	安全設計(Sf)	閉じ込め	○ 閉じ込め性能	システム全体	本システムでは放射性物質は装置内に内蔵されており、装置のパウダリはドラム回転軸貫通部及び上下シュラウド接合部のシールであるが非溶接構造であるため装置内気相部の負圧維持で確保している。このため、突沸等により装置気相部圧力の急激な上昇が生じた場合はシール部を通じて内蔵放射能がセル雰囲気中に漏洩する可能性があり、本システムのハザード源となりうる。
				臨界	○ 臨界安全設計	システム全体 溶解装置	臨界安全管理方法は全濃度安全形状管理(溶解装置は中性子吸収体との併用)に基づくが、装置性能等の観点から成立性のある形状管理構造の設定が必要である。
				火災・爆発	無	システム全体	溶解槽及び関連槽類は溶解液中に含まれる水の放射線分解による水素発生が考えられるが、オフガスを常時排気することにより気相部を爆発下限濃度に抑える設計としていること及び本システム自体は火災・爆発源となる物質を取扱わないことから、本システム固有のハザード源は無い。
				異常放出	無	システム全体	閉じ込めが健全な状態で放射性物質の異常な放出(オフガス系への放出量の異常な増加)を招く事象は想定されないため、本システム固有のハザード源はない。
				耐震	無	システム全体	耐震設計上考慮すべき技術的対策は先行施設等における一般的な再処理設備機器と同様であり、本システム固有のハザード源は無い。
				その他固有のハザード	無	システム全体	閉じ込め、臨界、火災・爆発、異常放出、耐震以外の事象に関する本設備固有のハザード源は無い。
				許認可性	無	システム全体	本システムの安全設計・評価のために特に大きなコスト・期間及び特別な試験設備を要すると考えられる許認可項目はない。
			プロセス設計(Dp)	製品回収率	○ U、Pu、MAの不溶解残渣への移行率	溶解装置	燃料溶解後の不溶解残渣に含まれるU、Pu量は、溶解による燃料の回収率に影響する因子である。
					○ U、Pu、MAのハルへの移行率	溶解装置	溶解装置から排出されるハルに同伴するU、Pu及びMAの量(未溶解の固体もしくは付着同伴する溶解液)は、溶解による燃料の回収率に影響する因子である。
					○ SOG 同伴燃料粉の移行率と回収	SOG/DOG 処理系	本システムでは溶解装置の加熱能力・気相部容積の制約上から SOG は燃料せん断片とは別系統に導いて溶解槽内に流入しない設計としている。SOG は粉塵回収槽中にはせん断時に発生した微小な燃料粉が浮遊しているため、この浮遊燃料粉を回収・溶解する必要がある。
				歩留まり・収率	無	—	上記製品回収率で判断される性能と同じと判断して選定から除外した。
				製品除染性能	無	溶解装置	本装置は除染機能を有さないことから対象項目無し。
				ロバスト性	○ ロバスト性	溶解装置	溶解システムの運転パラメータとして想定される変動要因(せん断燃料の粉化率、温度、硝酸流量、オフガス流量、気相部圧力(オフガス圧力))に対して装置仕様を満足させる必要がある。
				その他固有の性能	○ 高濃度溶解性能	溶解装置	高濃度溶解性能は本システム主要目的である高濃度溶解液調整の成立性に影響する因子である。
					○ 回転ドラム攪拌条件	溶解装置	回転ドラム攪拌条件は本システムの溶解性能に密接に影響する因子である。

表3 実用化に必要な技術に対する評価項目の選定結果【溶解技術開発】(抜粋)

設備区分	評価対象技術	評価の視点	分類	評価項目(技術要素の性能・成績)の候補		評価項目の選定と参照番号	選定した理由/選定しなかった理由
				技術要素	性能・成績		
溶解設備	高効率溶解技術	設計成立性	安全設計(Sf)	溶解装置	(閉じ込め)閉じ込め性能	—	【技術】ドラム回転部及び上下シュラウド接合部のシール性能ならびに装置内気相部の負圧維持性能は一般的な再処理機器と同様であるため、選定から除外した。
					(臨界)臨界安全設計	○Sf-1	【技術】左記安全設計に対しては従来の安全設計の考え方に基づいて設計・評価可能であり、技術成立性に影響をおよぼす因子ではないと判断される。ただしスケールアップ(20kgHM/h 基)を想定した溶解装置の臨界安全設計については未着手であり、構造寸法を設定する上で必要なことから選定した。
			プロセス設計(Pd)	溶解装置	U、Pu、MAの不溶解残渣への移行率	○Pd-1	【技術】燃料溶解後の不溶解残渣に含まれるU、Pu、MAの量は、溶解による燃料の回収率に影響することから選定した。
					U、Pu、MAのハルへの移行率	—	【技術】排出ハルに含まれるU、Pu、MAの量は、上記のPd-1項にて選定されているため除外した。
					SOG 同伴燃料粉の移行率と回収	—	【技術】SOG 同伴燃料粉の移行率は燃料回収率に影響を与えるが、設計に反映済みのため除外した。
					ロバスト性	—	【技術】溶解システムの運転パラメータとして想定される変動要因に対する対応は下記Op-1項にて選定されているため除外した。
				溶解装置	高濃度溶解性能	○Pd-2	【技術】20kgHM/h・基の処理速度で500kgHM/hの高濃度溶解液を安定的に達成するための溶解性能確保はシステム成立性の基本的な要件であることから選定した。
					回転ドラム攪拌条件	○Pd-3	【技術】回転ドラムの揺動が溶解性能に与える影響を定量的に把握することはシステム成立性の基本的な要件であることから選定した。
					固体廃棄物成分の排出性及び粉体燃料成分の保持性	○Pd-4	【技術】ドラムの回転によるドラム内燃料物質の移送性及びハル排出性はシステム成立性の基本的な要件であることから選定した。

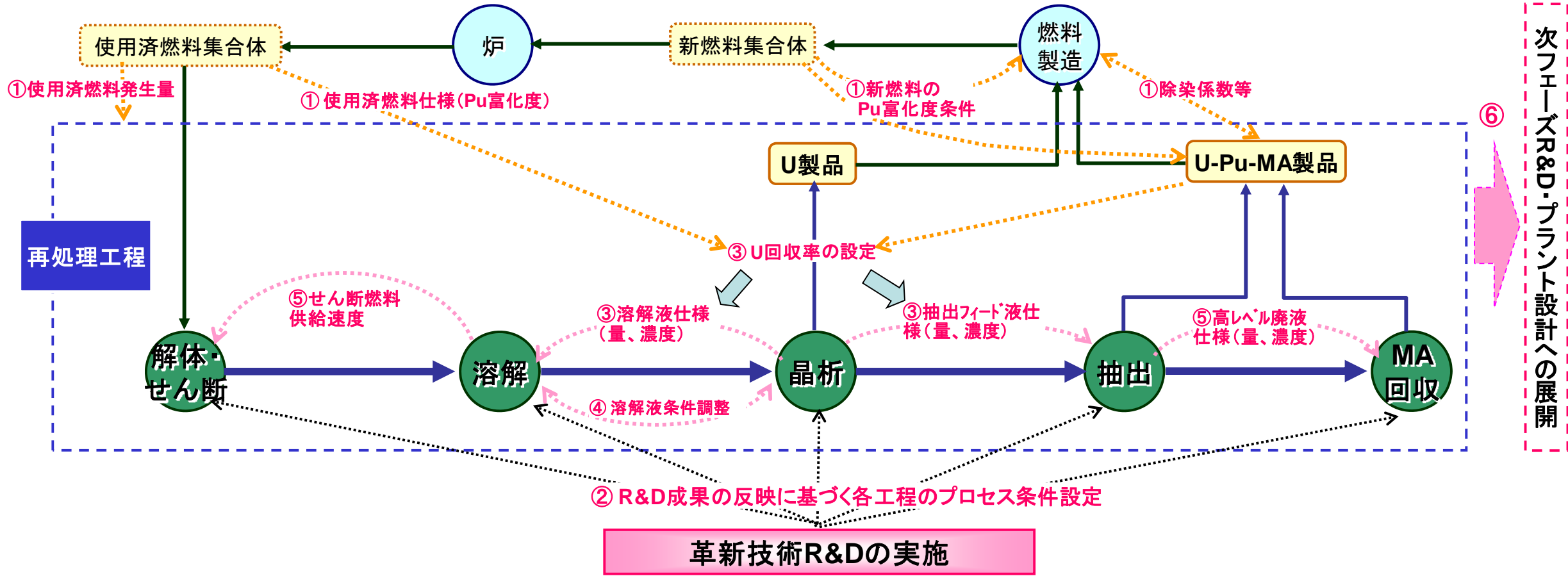




## 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化に関する取り組み ← 視点 12

■ 再処理施設の設計研究の中で、R&D成果に基づく要素技術を含む工程間の取合い仕様・条件を設定し、システム全体の整合性を確認してきている。具体的には以下の手順で段階的に実施。

- ① 炉システム、燃料製造システムとの取合: 再処理プラント設計に関わるFBRサイクル全体のシステム取合い条件を設定(炉側からの使用済燃料仕様(特にPu富化度)及びその発生量(プラント年間処理量)と新燃料側(燃料製造含む)から求められる再処理製品仕様(Pu富化度、除染係数等))。
- ② 再処理工程の基本条件設定: 次に、要素技術のR&D成果を基に、除染係数や回収率等のプロセス条件の設計値を設定。(本設計研究では、最初に先進湿式法でキーとなる晶析工程の条件を設定)
- ③ 再処理工程間の取合: 要素技術を含む工程のinput, outputを設定(濃度、流量等)。晶析工程について言えば、使用済燃料に含まれるPu富化度と燃料製造で要求されるPu富化度の差からどの程度のUを回収するかを決めた上で、下記を設定。
  - ✓ Input : 溶解工程から出てくる溶解液のU, Pu濃度、酸濃度
  - ✓ Output : 抽出工程へ供給する母液のU, Pu濃度、酸濃度等
- ④ 再処理工程間の調整: 上記のinput, output設定の際には、ある工程の条件が、他工程へ過度な負荷を与えないよう工程間相互の兼合いを考慮して適切と考えられる仕様を設定(相反する条件間の調整)。例えば、晶析と溶解の間では下記のようなことを考慮した。⇒結果は、晶析工程へ供給する溶解液仕様: 500gHM/l/3.5M、晶析温度: 通常1°C程度/燃料組成変動を考慮して-8°C程度まで冷却可能、とした。
  - 晶析工程で低温(マイナス数十度)条件下にすれば溶解液濃度は低くて済むものの、晶析工程の温度・湿度管理(セル内)が特別なものとなる。
  - 一方、晶析工程の温度を高く設定すると、溶解液濃度を更に高くする必要があり、工学的に使用されている以上の濃度の硝酸を供給する必要がある。
- ⑤ 再処理工程間の取合(更なる上流・下流側工程間): 同様に、溶解、抽出各工程のプロセス条件の設計値を設定し、そのinputを設定。(ex.溶解であれば、inputがせん断燃料の供給量、せん断速度)
- ⑥ プラントシステムの統合・評価: 以上を、再処理施設を構成する全ての設備に亘って実施し、プロセス設計を完遂させ、機器設計等へ反映。更に、今後のR&D計画へフィードバックし、システムとして最適化(フェーズII以降で実施)。



革新技术R&Dの実施  
主要要素技術間の仕様・条件の設定の考え方



1. 国内外の工学的な知見の反映の状況【←視点 4、7】

● 国外の工学的な知見の反映

- ▶ 独 KfK の精製工学的な知見の研究は不純物濃度などの溶液系が異なるものの、プロセス条件や結晶ハンドリングを検討するための参考情報として晶析操作条件の設定等に反映。
- ▶ 米 LANL は晶析技術の適用目的は類似だが、日本より後発かつ基本的な晶析原理が異なるため（日：冷却晶析、米：蒸発晶析）、技術開発の進捗を注視している状況。

● 国内の工学的な知見の反映

- ▶ 晶析設備内の機器は、再処理設備規格で定義される「再処理クラス 2 機器」と判断し、材料や構造を選定。
- ▶ TRP や RRP における高濃度 U 溶液の移送等のプラント実績から、高濃度溶液移送システムとして機械的駆動部の無いエアリフトやサイフォン装置を採用するとともに、結晶による閉塞防止及び解除策の構築に反映。
- ▶ 一般産業界の結晶精製技術の知見を反映して UNH 結晶の精製技術を構築し、Cs、Ba 等の DF 向上策に反映。

2. クライテリア（成果目標）の設定方法【←視点 3、5、6】（別紙 1 参照）

● 目標設定に係る視点

- ▶ 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

● クリティカルポイントの抽出

- ▶ 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ▶ 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ▶ 2010 年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定。

● 成果目標の設定

- ▶ 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCT フェーズ I で達成すべき具体的な開発の目標（値）を設定。

3. 得られたデータの妥当性【←視点 1、2】

● U 回収率(目標：U 回収率 70%以上)

- ▶ ビーカースケールでの複数回のホット試験から晶析率 70%以上の再現性を確認（なお、U 回収率は晶析システムで発生する結晶洗浄等によるロスを考慮して総合的に評価）。ただし、添加元素により晶析率は±10%程度変化。
- ▶ 晶析率の制御性の向上の観点から、溶解度等の基礎データの更なる蓄積と、この基礎データを基に晶析率計算式を改良し制御性を向上させることが必要と判断。
- ▶ 小型工学規模晶析装置（実機の約 1/10 スケール）における U 試験の結果、U 晶析率はビーカースケールでの溶解度データから評価した計算値とほぼ一致し、工学規模の晶析装置における U 回収率への制御性見通しを確認。

● U 製品除染性能 (DF) (目標：U 製品の DF100 以上)

- ▶ ビーカースケールでの複数回のホット試験から、特定の元素（Ba、Cs：固体不純物）以外では 100 以上の DF が得られ、その除染性の違いは、不純物の性状（液体・固体）が影響することを確認。
- ▶ 小型工学規模晶析装置及び実機の約 4.5 倍の結晶分離機（市販機の最小規模、回転数調整により遠心力は実機相当）を用いた複数回の U 試験により、母液に含まれる液体不純物に関して 100 以上の DF が得られることを確認。
- ▶ Cs（Pu-Cs 複塩）に関しては、DF 向上策として新たに検討した結晶精製装置により、粒径と密度を考慮した模擬固体不純物での複数回の試験結果から 100 程度の DF が得られる見通しを確認。
- ▶ Ba の必要 DF を炉心設計の観点から詳細に検討した結果、10 でも許容されることを確認し、ベンチスケールの結晶精製 U 試験により結晶精製装置を含む晶析システム全体で 15 程度が得られる見通しを確認。

4. 工学的な信頼性の判断【←視点 10】

- ▶ 晶析は開発期間が短く、フェーズ I では機器寿命を支配する軸受部の耐久性評価や異常時の対応等、致命的な技術課題がないことの検証に傾注している段階。そのため、得られた知見の範囲で工学的な信頼性確保の見通しを提示。
- メンテナンスポリシーについて
- ▶ 運転中の故障はプラント停止につながることから予防保全を基本とする。下部軸受については、健全性確認のためスクリュウブレードの変位（クリアランス測定）などの定期的な点検を実施。
  - ▶ UNH 結晶により固着、閉塞が懸念される部位については、定期的な洗浄や加温で対応。

- ▶ その他具体的な機器の分割構造や保守・点検方法については、今後検討が必要。（次フェーズ以降）

● 想定される機器の故障と寿命について

- ▶ 想定される機器故障の部位は、一般産業界における晶析装置の主な故障部位などを参考に、従来の再処理システムと比べて特徴的かつ環境の厳しい部位から、スラリ中で駆動する下部軸受と判断。
- ▶ 故障時にも内包液が漏洩しない構造を前提として、耐食性、耐放射線性、耐異物混入性等を考慮し、軸受タイプを選定。
- ▶ 実機スケールの軸受試験装置において UNH 結晶よりも硬い硝酸ナトリウムのスラリを用いた加速試験により 3 年間の耐久性を確認。
- ▶ なお、機器寿命の設定は機器のメンテナンスポリシー、経済性、廃棄物発生量などの観点から今後、多角的に検討する必要性あり。

● 異常事象の想定と復旧措置の実現性について

- ▶ 信頼性工学の手法の FMEA 解析法を参考に異常事象の抽出を行い、結晶の装置内堆積と結晶及び母液出口の閉塞を想定。
- ▶ 小型工学規模晶析装置及び溶液移送システム試験装置を用いたウラン試験を複数回実施し、結晶排出口や配管の閉塞挙動を把握するとともに、検知方法として軸トルクや晶析装置内の液位の監視の有効性を確認。
- ▶ 復旧措置として閉塞想定箇所に結晶溶解用の温硝酸や加熱設備を設置することで復旧可能であることを確認。

5. 性能の振れや変動について【←視点 11】

● 晶析装置の安定性

- ▶ 小型工学規模晶析装置による運転試験結果に基づき、定常状態到達後 6 時間の運転にて U 晶析率、母液濃度、製品品質（粒径、含水率）がほとんど変動しないこと（晶析率変動幅は±2%以下）、流量が半減してもこれらに影響しないことを確認。単体機器の安定性は高く、プラントのロバスト性確保は容易と判断。
- ▶ 実機の 1/4 相当の高濃度溶液移送システム試験装置を用いた U 試験では、晶析装置のフィード流量は 19±1L/h 程度で制御可能。これらの装置は規模が大きい方が安定するため実機相当も問題ないと判断。

● 燃料組成変動に対する対応

- ▶ 基準燃料組成については、増殖比 1.1 及び増殖比 1.2 の燃料を対象として、処理条件を検討。
- ▶ 上記条件において最も溶解液中 Pu 富化度が低くなる場合に晶析による U 粗分離で Pu 富化度を 30%に調整するためには U 回収率が約 77%必要。
- ▶ U 晶析率は小型工学規模試験の中で実績として 90%以上達成。実際に想定される燃料組成変動に対して十分な余裕あり。

6. Δ評価に対する技術的な潜在性の判断根拠【←視点 9】

- ▶ U 晶析率は小型工学規模試験の中で実績として 90%以上達成。ただし制御性の観点についてデータ不足。
- ▶ 除染性能について、固体不純物である Cs（DF=～1）や Ba（DF=3～5）が目標値に満たないことが判明。
- ▶ DF 向上策として結晶精製装置を導入。ベンチスケールの結晶精製試験装置を用いた U 試験により晶析システム全体で Cs は 100 程度、Ba は 15 程度（炉心性能の観点から Ba の DF は 10 でも成立することを別途確認）の DF が得られる見通しを確認。しかしながら、結晶精製時の U ロスが発生することが課題。
- ▶ 一般産業界における結晶精製装置では、多くの場合 90%以上の収率を維持しながら精製性能を発揮。精製メカニズムは発汗（部分融解）と再結晶、攪拌といった物理現象に支配されているため、他の物質と同様な性能が期待可能。そのため、晶析装置の U 回収率を 10%程度高く設定することで、結晶精製の収率が 90%の場合でも晶析システム全体のウラン回収率を 70%以上に担保可能と推定。
- ▶ 以上から、課題となる DF について改善の見通しがあると判断。晶析装置での U 回収率を向上し、結晶精製でのロスを加味した上で目標の U 回収率と DF との同時達成を示すことで、晶析プロセス条件の成立性の提示が可能。

7. 研究開発における投資効果を評価する手法及び体制【←視点 8】

- ▶ R&D と設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ▶ 外部有識者による課題評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステムを採用。

8. 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化への取り組み【←視点 12】（別紙 2 参照）

- ▶ 再処理施設の設計研究の中で、R&D 成果に基づく要素技術を含む工程間の取合い仕様・条件を設定し、システム全体の整合性を確認。



クライテリア（成果目標）設定の方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した（表 2）。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの（次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの）を除外し、2010 年の革新技术の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定した（表 3）。

○ 晶析設備に関して選定された要素技術開発についての評価項目

- ・ Sf-1 晶析装置 (閉じ込め) 漏洩を考慮した安全設計
- ・ Sf-2 晶析装置 (臨界) 臨界安全設計
- ・ Sf-3 結晶分離機 (臨界) 臨界安全設計
- ・ Dp-1 基礎研究 (製品回収率) U 回収率
- ・ Dp-2 基礎研究 (製品除染性能) U 製品除染性能
- ・ Ds-1 晶析装置 (機械的耐久性) 軸受部材の耐久性
- ・ Ds-2 晶析装置 (安定動作性) 結晶生成の安定性
- ・ Ds-3 結晶分離機 (効率・性能) 固液分離性、除染性能
- ・ Ds-4 高濃度溶液移送装置 (効率・性能) 移送能力
- ・ Ds-5 高濃度溶液移送装置 (安定動作性) 移送流量の安定性
- ・ Ds-6 冷却装置 (効率・性能) 冷却能力
- ・ Ds-7 冷却装置 (安定動作性) 温度安定性
- ・ Op-1 晶析装置 運転制御・監視技術の実用性
- ・ Op-2 晶析装置 トラブルからの回復手順の成立性
- ・ Op-3 高濃度溶液移送装置 トラブルからの回復手順の成立性

- (4) 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、クライテリア（成果目標）として設定した。

○ クライテリア（成果目標）

- ・ 小型工学規模試験装置によるウラン試験及びホット基礎試験により、U 回収率 70%、100 以上の除染係数が得られる連続晶析プロセス条件の成立性の提示 (Dp-1,Dp-2)
- ・ 小型工学規模晶析装置及び晶析システムの成立性の提示 (Sf-1,Ds-1,Ds-2,Ds-6,Ds-7,Op-1,Op-2)
- ・ 結晶分離技術及び高濃度溶解液移送技術の成立性提示 (Ds-3,Ds-4,Ds-5)
- ・ 適切な解析条件による臨界安全性評価結果の提示 (Sf-2,Sf-3)

表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め
		臨界
		火災爆発
		異常放出
		耐震
	プロセス設計 (Dp)	その他固有のハザード
		許認可性
		製品回収率
		歩留まり・収率
機器・システム設計 (Ds)	製品除染性能	
	ロバスト性	
	その他固有の性能	
	速度、流速	
	正確度・精度	
	効率・性能	
	機械的耐久性	
	耐食性	
	耐放射線性	
	強度確保	
安定動作性		
製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)	材料の選定
	機器の製作性 (Fe)	試薬・充填剤等の消耗品の選定 機器の製作性
運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	定期交換部品の交換性
		非定期交換部品の交換性
	運転性 (Op)	共用期間中の検査への対応性
		予防保全の対応性
経済性	建設コスト (Cc)	定常状態の運転性
		運転制御・監視技術の実用性
	操業コスト (Rc)	起動・停止操作の運転性
トラブルからの回復手順の成立性		
物量(系統数、装置寸法)		
経済性評価(機器製作費・設備費)		
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	付帯設備負荷率
		定期交換部品の交換頻度
	機器廃棄物 (We)	省力性(設備の運転・補修に必要な人員)
エネルギー負荷率		
核不拡散性	計量管理 (Pa)	試薬等使用量
		分析負荷率
	技術的障壁 (Pt)	発生量
		発生量
		運転時の設備・装置内インベントリ量
		設備・装置内インベントリの計量性
		払出操作の迅速性
		Pu の非単離性
		近接困難性
		不正利用困難性

表2 実用化に必要な技術項目抽出結果【晶析技術開発】(抜粋)

分類	性能・成績に係わる 因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成績 因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
安全設計 (Sf)	閉じ込め	○ 装置からの漏洩防止	システム全体	晶析装置等は、シール部、及び軸、軸受部を有しており、その構造上閉じ込めバウンダリの一部を非溶接構造によって担保する必要があるため、この部分を漏洩しがたい構造とすることは本機器固有の特徴である。
	臨界	○ 臨界安全設計	システム全体	本システムでの臨界安全管理方法は臨界形状管理であり、成立性のある形状管理構造が必要である。
	火災・爆発	無	—	火災・爆発の因子が無いため、該当なし
	異常放出	無	—	本システムでは、放射性物質は閉じ込め（シール部）が健全な状態で放射性物質の異常な放出が生じるような急激な反応はないため、固有のハザード源は無い。
	耐震	無	—	耐震設計上考慮すべき技術的特徴は先行施設等における一般的な再処理設備機器と同様であり、本システム固有のハザード源はない。
	その他固有のハザード	無	—	閉じ込め、臨界、火災・爆発、異常放出、耐震以外の事象に関する本設備固有のハザード源は無い。
	許認可性	無	—	本システムの安全設計・評価のために特に大きなコスト・期間及び特別な試験設備を要する研究開発課題は無い。
プロセス設計 (Dp)	製品回収率	○ U 回収率	システム全体	U 回収率はプロセスの成立性に影響を与える重要因子である。
	歩留まり・収率	無	—	上記製品回収率で判断される性能と同じと判断して選定から除外した。
	製品除染性能	○ U 製品除染性能	システム全体	晶析装置及び結晶分離機での FP 等の除染性能はプロセスの成立性に影響を与える重要因子である。
	ロバスト性	○ 晶析システムのロバスト性	システム全体	晶析システムのロバスト性は、プロセスの成立性に影響を与える重要な因子である。
	その他固有の性能	○ 晶析工程の温度設定	システム全体	晶析システムの温度管理は、晶析装置での U 回収率、及び高濃度 HM 溶解液移送に影響を与える重要な因子である。
機器・システム設計 (Ds)	速度、流量	○ 処理量	システム全体	処理量はシステム処理能力・系列数に影響する主要な因子である。
		○ 移送流量	高濃度溶解液移送	高濃度溶解液移送流量は、晶析装置への供給流量であり、晶析装置での結晶生成に影響を与える因子である。
	正確度・精度	○ モータ回転数の精度	結晶分離機	モータの回転数は結晶分離機の性能を決める重要な要素であるため、適正な範囲で使用する必要がある。
	効率・性能	○ 晶析装置の冷却能力	晶析装置	晶析装置の冷却能力は、晶析装置の処理能力・系列数に影響を与える主要な因子である。
		○ 固液分離性 除染性能	結晶分離機	結晶分離機の固液分離性、及び除染性能は、プロセスの成立性に影響を与える重要因子である。
	機械的耐久性	○ 駆動部の機械的耐久性	システム全体	駆動部の機械的耐久性は本システム全体の稼働率・廃棄物発生量に影響する主要な因子である。
	耐食性 (化学的耐食性)	○ 耐硝酸性	システム全体	硝酸を使用するシステムであるため、耐硝酸性が求められる。

表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【晶析技術開発】(抜粋)

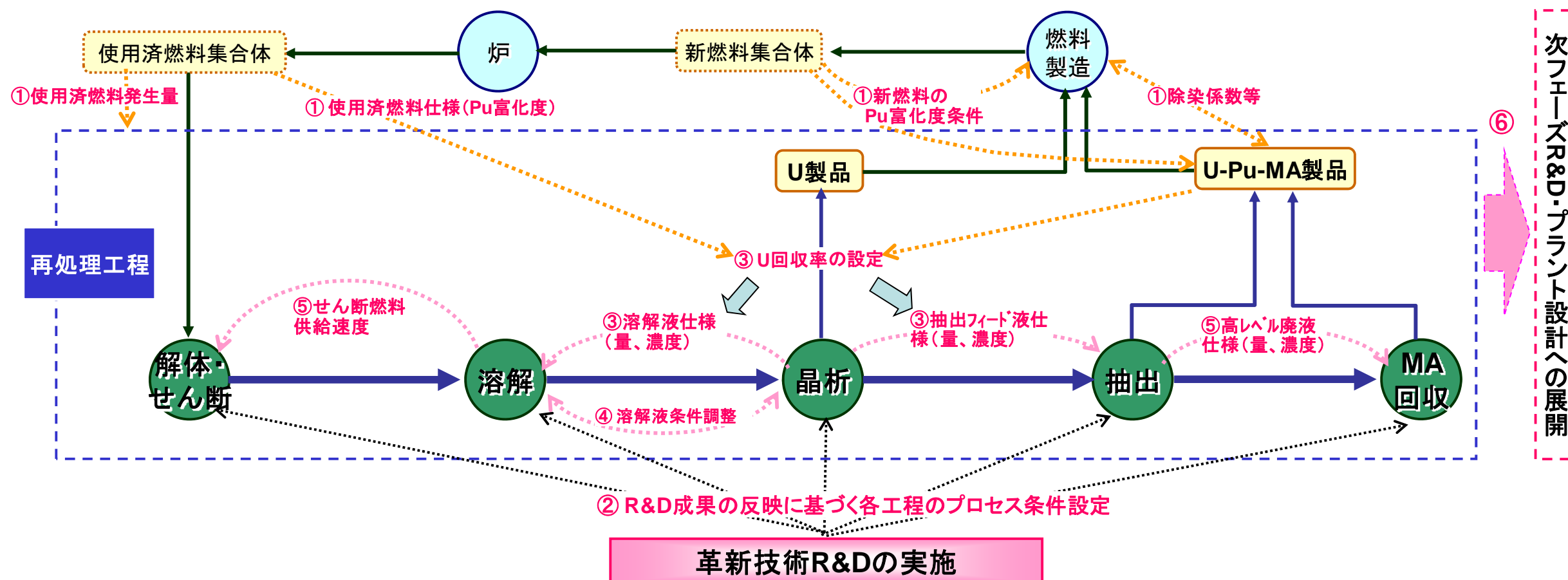
分類	評価項目（技術要素の性能・成績）の候補		評価項目の選定* と参照番号	選定した理由／選定しなかった理由
	技術要素	性能・成績		
安全設計 (Sf)	晶析装置	(閉じ込め) 漏洩を考慮した安全設計	○-Sf1	回転機器の軸受部からの漏洩防止構造の検討は、装置構造を決定する重要な開発項目であることから選定した。
		(臨界) 臨界安全設計	○-Sf2	固有の形状を有しているため、臨界安全設計の評価が重要であることから選定した。
	結晶分離機	(閉じ込め) 漏洩を考慮した安全設計	—	一般市販品のため運転実績が十分であり、既存データによる評価が可能であることから。選定から除外した。
		(臨界) 臨界安全設計	○-Sf3	結晶排出ケースは、固有の形状を有しているため、臨界安全設計の評価が重要であることから選定した。
	結晶移送装置	(閉じ込め) 漏洩を考慮した安全設計	—	従来技術及び革新的技術開発の応用により設計、評価可能であると判断し、選定から除外した。
		(臨界) 臨界安全設計	—	従来技術及び革新的技術開発の応用により設計、評価可能であると判断し、選定から除外した。
	高濃度溶液移送装置	(臨界) 臨界安全設計	—	従来技術及び革新的技術開発の応用により設計、評価可能であると判断し、選定から除外した。
システム全体	(耐震)	—	従来技術及び革新的技術開発の応用により設計、評価可能であると判断し、選定から除外した。	
プロセス設計 (Dp)	基礎研究	(製品回収率) U 回収率	○-Dp1	U 回収率の制御は、本システムのプロセス成立性の提示に関する重要な因子であることから選定した。
		(歩留まり) 歩留まり向上	—	歩留まりは、装置運転開始、停止の操作手順により影響を受けることから、装置構造、機器性能等が確定した後の評価となるため、選定から除外した。
		(製品除染性能) U 製品除染性能	○-Dp2	高除染技術の成立は、本システムのプロセス成立性の提示に関する重要な因子であることから選定した。
		(ロバスト製)	—	
機器・システム設計 (Ds)	晶析装置	(流量) 結晶排出速度	—	モータの回転精度に依存するため、既存データによる評価が可能であり、開発項目に該当しないため、選定から除外した。
		(正確度・精度) 回転数精度	—	モータの回転精度に依存するため、既存データによる評価が可能であり、開発項目に該当しないため、選定から除外した。
		(効率・性能) 処理能力	—	処理能力を含む性能評価は、システムの成立性に関する重要な因子であるが、冷却能力等に依存する性能であるため、選定から除外した。
		(機械的耐久性) 軸受部材の耐久性	○-Ds1	耐久性は、装置稼働率及び保守コストに影響を及ぼす因子であり、設計に不可欠な要件であることから選定した。
		(耐食性) 軸受部材の耐食性	—	硝酸に対する耐食性は、従来技術及び革新的技術開発の応用により設計、評価可能であると判断し、選定から除外した。
		(耐放射線性) 軸受部材の耐放射線性	—	従来技術及び革新的技術開発の応用により設計、評価可能であると判断し、選定から除外した。
		(強度確保) 駆動、加重による材料の強度確保	—	従来技術及び革新的技術開発の応用により設計、評価可能であると判断し、選定から除外した。
		(安定動作性) 結晶生成の安定性	○-Ds2	結晶生成の安定性は、システムの成立性の提示に重要な因子であることから選定した。





## 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化に関する取り組み ← 視点 12

- 再処理施設の設計研究の中で、R&D成果に基づく要素技術を含む工程間の取合い仕様・条件を設定し、システム全体の整合性を確認してきている。具体的には以下の手順で段階的に実施。
  - ① **炉システム、燃料製造システムとの取合**: 再処理プラント設計に関わるFBRサイクル全体のシステム取合い条件を設定(炉側からの使用済燃料仕様(特にPu富化度)及びその発生量(プラント年間処理量)と新燃料側(燃料製造含む)から求められる再処理製品仕様(Pu富化度、除染係数等))。
  - ② **再処理工程の基本条件設定**: 次に、要素技術のR&D成果を基に、除染係数や回収率等のプロセス条件の設計値を設定。  
(本設計研究では、最初に先進湿式法でキーとなる晶析工程の条件を設定)
  - ③ **再処理工程間の取合**: 要素技術を含む工程のinput, outputを設定(濃度、流量等)。  
晶析工程について言えば、使用済燃料に含まれるPu富化度と燃料製造で要求されるPu富化度の差からどの程度のUを回収するかを決めた上で、下記を設定。
    - ✓ Input : 溶解工程から出てくる溶解液のU,Pu濃度、酸濃度
    - ✓ Output : 抽出工程へ供給する母液のU,Pu濃度、酸濃度等
  - ④ **再処理工程間の調整**: 上記のinput, output設定の際には、ある工程の条件が、他工程へ過度な負荷を与えないよう工程間相互の兼合いを考慮して適切と考えられる仕様を設定(相反する条件間の調整)。例えば、晶析と溶解の間では下記のようなことを考慮した。⇒結果は、晶析工程へ供給する溶解液仕様: 500gHM/l/3.5M、晶析温度: 通常1°C程度/燃料組成変動を考慮して-8°C程度まで冷却可能、とした。
    - 晶析工程で低温(マイナス数十度)条件下にすれば溶解液濃度は低くて済むものの、晶析工程の温度・湿度管理(セル内)が特別なものとなる。
    - 一方、晶析工程の温度を高く設定すると、溶解液濃度を更に高くする必要があり、工学的に使用されている以上の濃度の硝酸を供給する必要がある。
  - ⑤ **再処理工程間の取合(更なる上流・下流側工程間)**: 同様に、溶解、抽出各工程のプロセス条件の設計値を設定し、そのinputを設定。  
(ex.溶解であれば、inputがせん断燃料の供給量、せん断速度)
  - ⑥ **プラントシステムの統合・評価**: 以上を、再処理施設を構成する全ての設備に亘って実施し、プロセス設計を完遂させ、機器設計等へ反映。更に、今後のR&D計画へフィードバックし、システムとして最適化(フェーズII以降で実施)。



革新技术R&Dの実施  
主要要素技術間の仕様・条件の設定の考え方



1. 国内外の工学的な知見の反映の状況【←コメント 4、7 への回答】

● 国外の工学的な知見の反映

- ▶ 先進湿式法は再処理の標準的な技術である PUREX 法をベースに核拡散抵抗性を高めるために Pu を分離しないプロセスとして開発。Pu を U 及び Np と常に共存させ、Pu 分配工程を省略して核拡散抵抗性の内在的障壁を高めている点の特徴。Tc など FP の除染はフランスからの PUREX 法の知見（公開情報）を代表として参考。
- ▶ 将来の核燃料の高燃焼度化や取り扱う Pu 量の増大に対応するため、滞留時間が短く、保持溶体量が小さい遠心抽出器を選定。遠心抽出器の開発は、米国オークリッジ国立研究所と共同で開発した基本技術を反映し、改良を継続。仏国は多段型遠心抽出器を再処理施設の一部（Pu 精製）にて使用。中国は実験室規模単段型遠心抽出器を使用。

● 国内の工学的な知見の反映

- ▶ 保守方針（機器に最適な直接／遠隔保守方式の選定）、耐放射線技術（材料の選定）などに関する東海再処理施設（TRP）等の知見を反映。

2. 成果目標の設定方法【←コメント 3、5、6 への回答】（別紙 1 参照）

● 目標設定に係る視点

- ▶ 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

● クリティカルポイントの抽出

- ▶ 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ▶ 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ▶ 2010 年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定。

● 成果目標の設定

- ▶ 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCT フェーズ I で達成すべき具体的な開発の目標（値）を設定。

3. 得られたデータの妥当性【←コメント 1、2 への回答】

● 回収率と除染係数（目標：回収率 U 及び Pu 99.9%、Np 99%、除染係数 10<sup>4</sup>）

- ▶ 廃棄物に移行するアクチノイド元素を最小化し、主として放射性毒性を抑制する観点から、回収率には U 及び Pu について 99.9%、Np について 99%の値を目標に設定。FP の除染に関しては、1 サイクルで達成しうる目標として 10<sup>4</sup>を設定（製品の品位は晶析及び MA 回収工程の除染係数で決定されるから、10<sup>4</sup>であれば十分）。除染係数はγ線放出核種群を対象（Tc、Zr 等は化学的及び炉心内での特性から他と同様の目標設定が適切でないため除外）。
- ▶ 小型遠心抽出器を用いた複数回のホット試験により回収率と除染係数を確認。計算コード（MIXSET-X）を用いて、フローシートの段数、流量及び硝酸量を最小化するように作成。Zr 除染を考慮し洗浄部にダブルスクラブを採用。
- ▶ このフローシートに基づく試験にて U と Pu の回収率>99.9%、Np の回収率>97.6%、γ線放出核種の除染係数 1.1×10<sup>5</sup>の達成を確認。Np 単独では同様のフローシートに基づく試験において>99.6%を達成した実績があり、今後達成できるものと評価。

● 処理量（目標：段効率 0.95 以上において 300 L/h）

- ▶ 抽出器の基本性能である単機の処理量について、段効率 0.95 以上の条件で 300 L/h の値を設定。流量 300 L/h は先進湿式法に基づく 200 tHM/y 規模プラントの処理量に相当。
- ▶ 臨界安全を考慮した遠心抽出器（200 tHM/y 規模）を用いたウラン試験により、O/A(有機相/水相)比が 1：1 の流量条件において 400 L/h での処理が可能であること、幅広い流量条件にて運転領域が得られることを確認。U の抽出／逆抽出時の段効率は 0.97～0.98 であり、目標を達成。

● 耐久性（目標：単機について 1 年間の連続運転）

- ▶ 抽出器単機については 1 年の間連続して稼働（200 日の運転を想定）することを目標に設定。
- ▶ 遠心抽出器（200 tHM/y 規模）を用いたコールドでの連続運転試験とγ線照射下での耐放射線性試験により評価。
- ▶ 連続運転試験では、コールド環境（硝酸溶液、TBP 溶媒を使用）で 4 機の磁気軸受型遠心抽出器を連続的に 15,000 時間（3 年相当）運転。来る 2 月に 20,000 時間（4 年相当）を達成する予定。
- ▶ 耐放射線性試験では、2 機の磁気軸受型遠心抽出器を稼働させながら放射線（γ線）を照射し、10 年に相当するγ線照射下(10<sup>9</sup> R) で磁気軸受の適用性を確認。

● 耐久性（目標：システムについて 10 年以上の安定運転）

- ▶ 遠心抽出器システムについて、年 1 回の保守を施した上で 10 年にわたり安定に稼働できることを目標に設定。
- ▶ 連続運転試験及び耐放射線性試験の結果より、3 年以上の耐用時間が見込まれる。3 年毎に適切な保守を実施することで安定稼働が可能と判断。磁気軸受けは、放射線による劣化を除けば基本的に損耗する部品はなく、より長く使用できるものと期待（寿命を制約する部品を同定すべく、放射線照射した機体を分解して検討中）。

4. 工学的な信頼性の判断【←コメント 10 への回答】

● メンテナンスポリシーについて

- ▶ 溶媒抽出設備は再処理の主要な分離工程であり、連続稼働が重要。毎年保守することによりシステムを適切に維持。
- ▶ モータとロータは故障時に交換。基本的に 1 段が停止しても運転を継続可能（溶液を排出する段を除く）。
- ▶ 保守方式については直接もしくは遠隔が選定可能。遠隔保守は、両腕型マニプレータを用いた試験により技術的成立性を確認。直接保守は、機械設計の妥当性に基つき、技術的な成立の見通しを得た。（継続して検討する予定）

● 想定される機器の故障と寿命について

- ▶ 遠心抽出器で想定される故障部位は、モータとロータ（軸受を含む）であり、モータ内は耐放射線性が高い電気部品、ロータは硝酸環境での耐食性に優れた材質、軸受け（磁気軸受け）は耐放射線性が高い電気部品と耐硝酸構造（金属シール構造）を採用。いずれも数年から 10 年の間に交換するものと想定。

● 異常事象の想定と復旧措置の実現性について

- ▶ 運転中における 1 段の遠心抽出器の停止を想定（ただし溶液の排出段を除く）。1 段停止時においても製品品質に影響しないことを遠心抽出器システム（200 tHM/y 規模、共除染 16 段、逆抽出 12 段）のウラン試験で確認。
- ▶ 遠心抽出器が停止し、モータあるいはロータを交換する場合、既往の保守技術により短時間での復旧が可能（モータとロータの取り外し及び取り付け時間はそれぞれ約 15 分、約 30 分）。

5. 性能の振れや変動について【←コメント 11 への回答】

● 装置システムの安定性

- ▶ システムの運転における安定性は、遠心抽出器の定格回転数の維持及び流量変動への対応が重要。
- ▶ ロータ回転数（φ 8.4cm で 3,500rpm）は相分離性能に影響を与える重要な因子であるが、設定回転数は相分離に必要な回転数に対して裕度をもって設定することで、通常時の変動範囲での影響はないと判断。また、連続運転試験等の運転期間中の変動幅から安定性を確認。
- ▶ 抽出工程に供給される各種流体の条件変動（流量、濃度、温度等）による影響は、変動する流体や運転時のフローシート条件によって異なる。この対応として、想定される変動を許容するフローシート及び裕度を持った装置設計（運転領域、配管設計等）で対応が可能。（機器の制御、品質への影響などを考慮し、設計にて対応する予定）。
- ▶ 遠心抽出器では、水相／有機相の流動変動に対する安定運転領域を硝酸、TBP 溶媒を用いて測定。フローシートの全流量域を網羅する事を確認。給液ポンプ等の流量変動（±5～10%を想定）の影響は無い。

● 燃料組成変動に対する対応

- ▶ Pu 富化度や燃焼度（FP 濃度）の変動は、分離性能に影響を与えないよう制御可能。フローシートは装荷溶媒が一定の装荷度を保つように運転し、Pu 富化度の影響がないように制御。燃焼度は、最高 FP 濃度条件を想定して設計。

6. ○評価に対する技術的な判断根拠【←コメント 9 への回答】

- ▶ 現時点で達成すべきクライテリア（成果目標）を満足。工学的な信頼性（耐久性、安定性）が得られるものと評価。
- ▶ 一部 FP (Tc) の除染の向上が望まれるが、PUREX 法の知見を活用したフローシートにより経済性を損なわない範囲で改善できる見込み。
- ▶ 燃料組成や運転条件の変動に強いフローシートを作成。試験により幅広い運転領域を確認。
- ▶ プラントに最適な保守構造の決定が必要であるが、遠隔保守及び直接保守の双方に対応した概念構造が構築されていることから、耐久性データ等の拡充により具体化し、コストを含む総合的評価により装置概念の絞り込みが可能。

7. 研究開発における投資効果を評価する手法及び体制【←コメント 8 への回答】

- ▶ R&D と設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ▶ 外部有識者による課題評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステムを採用。

8. 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化への取り組み【←コメント 12 への回答】（別紙 2 参照）

- ▶ 再処理施設の設計研究の中で、R&D 成果に基づく要素技術を含む工程間の取合い仕様・条件を設定し、システム全体の整合性を確認。



クライテリア（成果目標）設定の方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した（表 2）。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの（次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの）を除外し、2010 年の革新技术の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定した（表 3）。

○ 抽出設備に関して選定された要素技術開発についての評価項目

- ・ Sf-1 システム全体 (火災爆発) ドデカンによる火災防止
- ・ Sf-2 遠心抽出器 (火災爆発) 後工程への溶媒漏洩防止
- ・ Dp-1 システム全体 (製品回収率) U・Pu・Np の回収率
- ・ Dp-2 システム全体 (製品除染性能) 除染性能
- ・ Dp-3 システム全体 (ロバスト性) 抽出システムのロバスト性
- ・ Dp-4 システム全体 (その他固有の性能) 逆抽出工程の温度設定
- ・ Ds-1 遠心抽出器 (速度・流速) 処理量
- ・ Ds-2 遠心抽出器 (効率・性能) 段効率
- ・ Ds-3 遠心抽出器 (機械的耐久性) 駆動部の機械的耐久性
- ・ Ds-4 遠心抽出器 (耐放射線性) 駆動部機器・電装品の耐放射線性
- ・ Mn-1 遠心抽出器 (定期交換部品の交換性) モータ・軸受の交換性
- ・ Mn-2 遠心抽出器 (非定期交換部品の交換性) ロータの交換性
- ・ Op-1 システム全体 (定常状態の運転性) 定常状態の運転性
- ・ Cc-1 システム全体 (物量(系統数、装置寸法)) 物量 (必要段数、系列数、装置寸法)
- ・ Cc-2 システム全体 プロセス試薬使用量

- (4) 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、クライテリア（成果目標）として設定した。

○ クライテリア（成果目標）

- ・ ホット基礎試験による最適な一括回収プロセス条件の確立 (Sf-1,Dp-1,Dp-2, Dp-4,Cc-1,Cc-2)
- ・ 工学規模システム試験装置によるウラン試験により、所定の処理能力、安定運転、耐久性について成立性を提示 (Sf-2,Ds-1,Ds-2,Ds-3,Ds-4,Mn-1,Mn-2,Op-1,Dp-3)

表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

視点	分類	性能・成績に係る因子抽出における観点	
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	
		臨界	
		火災爆発	
		異常放出	
		耐震	
		その他固有のハザード	
	プロセス設計 (Dp)	許認可性	
		製品回収率	
		歩留まり・収率	
		製品除染性能	
		ロバスト性	
		その他固有の性能	
機器・システム設計 (Ds)	速度、流速		
	正確度・精度		
	効率・性能		
	機械的耐久性		
	耐食性		
	耐放射線性		
	強度確保		
	安定動作性		
	その他固有の性能		
	製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)	材料の選定
		機器の製作性 (Fe)	試薬・充填剤等の消耗品の選定 機器の製作性
	運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	定期交換部品の交換性
非定期交換部品の交換性			
共用期間中の検査への対応性			
運転性 (Op)		予防保全の対応性	
		定常状態の運転性	
		運転制御・監視技術の実用性	
経済性	建設コスト (Cc)	物量(系統数、装置寸法)	
		経済性評価(機器製作費・設備費)	
		付帯設備負荷率	
	操業コスト (Rc)	定期交換部品の交換頻度	
		省力性(設備の運転・補修に必要な人員)	
		エネルギー負荷率	
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	試薬等使用量	
		分析負荷率	
		発生量	
	機器廃棄物 (We)	発生量	
		処理容易性	
		処理負荷率	
核不拡散性	計量管理 (Pa)	運転時の設備・装置内インベントリ量	
		設備・装置内インベントリの計量性	
		払出操作の迅速性	
	技術的障壁 (Pt)	Pu の非単離性	
		近接困難性	
		不正利用困難性	

表2 実用化に必要な技術項目抽出結果【抽出技術開発】(抜粋)

分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成績因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
安全設計 (Sf)	閉じ込め	○ シール部の閉じ込め性能	遠心抽出器	ベアリングを交換するために構造上閉じ込めバウンダリの一部を非溶接構造によって担保する必要があるため、この部分を漏洩しがたい構造とすることは本機器固有の特徴である。
	臨界	○ 形状管理構造	遠心抽出器	本システムでの臨界安全管理方法は臨界形状管理であり、成立性のある形状管理構造が必要である。
		○ Pu ポリマー発生防止	システム全体	逆抽出操作においては Pu 濃度の高い溶媒と硝酸濃度の低い逆抽出液を接触させることから、Pu ポリマー発生の可能性がある。Pu ポリマーが発生した場合、臨界設計上想定した Pu 濃度以上の Pu が蓄積する可能性があるため、これを防止する対策が必要である。
	火災爆発	○ ドデカンによる火災防止	システム全体	本システムでは、抽出液として TBP をドデカンで希釈した試薬を用いるが、ドデカンの引火点は 74℃と低いために火災発生の原因となる可能性があり、抽出器特有のハザード源である。
		○ 後工程への溶媒漏洩防止	システム全体	本システムで得られた U-Pu 溶液や HAW は後工程にて濃縮処理を行うが、過剰な溶媒が U-Pu 溶液あるいは HAW に混入した場合、濃縮処理時に錯体等の急激な反応による爆発を生じる恐れがある。従って、本システムでは後工程に溶媒が漏洩しないような対策が必要である。
	異常放出	無	—	本システムでは、放射性物質は閉じ込め（シール部）が健全な状態で放射性物質の異常な放出が生じるような急激な反応はないため、固有のハザード源は無い。
	耐震	無	—	耐震設計上考慮すべき技術的特徴は先行施設等における一般的な再処理設備機器と同様であり、本システム固有のハザード源はない。
	その他固有のハザード	無	—	閉じ込め、臨界、火災・爆発、異常放出、耐震以外の事象に関する本設備固有のハザード源は無い。
許認可性	無	—	本システムの安全設計・評価のために特に大きなコスト・期間及び特別な試験設備を要する研究開発課題は無い。	
プロセス設計 (Dp)	製品回収率	○ U・Pu・Np の回収率	システム全体	U・Pu・Np の回収率は、プロセスの成立性に影響を与える重要な因子である。
	歩留まり・収率	—	—	上記製品回収率で判断される性能と同じと判断して選定から除外した。
	製品除染性能	○ 除染性能	システム全体	製品の除染性能は、プロセスの成立性に影響を与える重要な因子である。
	ロバスト性	○ 抽出システムのロバスト性	システム全体	抽出システムのロバスト性は、プロセスの成立性に影響を与える重要な因子である。
	その他固有の性能	○ 逆抽出工程の温度設定	システム全体	抽出システムの逆抽出工程の温度管理は、ウランの逆抽出効率に影響を与える重要な因子である。
機器・システム設計 (Ds)	速度、流速	○ 処理量	遠心抽出器	遠心抽出器の処理量(単位時間あたりに抽出・分離可能な液量)はシステム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。
	正確度・精度	○ モータの回転数の精度	遠心抽出器	モータの回転数は遠心抽出器の性能を決める重要な要素であるため、適正な範囲で使用する必要がある。
	効率・性能	○ 段効率	遠心抽出器	段効率はシステム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。
	機械的耐久性	○ 駆動部の機械的耐久性	遠心抽出器	駆動部の機械的耐久性は本システム全体の稼働率・廃棄物発生量に影響する主要な因子である。
	耐食性 (化学的耐久性)	○ 耐硝酸性	遠心抽出器	遠心抽出器は硝酸を使用する装置であるため、耐硝酸性が求められる。
	耐放射線性	○ 駆動部機器・電装品の耐放射線性	遠心抽出器	放射能の高い溶液を取り扱うと共に、回転用の駆動部・制御用の計装装置を使用することから、それらの耐放射線性を確保することが重要である。

表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【抽出技術開発】(抜粋)

分類	評価項目(技術要素の性能・成績)の候補		評価項目の選定* と参照番号	選定した理由/選定しなかった理由
	技術要素	性能・成績		
安全設計 (Sf)	システム全体	(閉じ込め) シール部の閉じ込め性能	—	シール部に関する技術的対策(フランジ・ガスケットによる密封構造及び負圧維持)は先行施設等における一般的な再処理機器と同様であるため、選定から除外した。
		(臨界) 形状管理構造	—	臨界安全(形状管理)を考慮した遠心抽出器は、従来知見に基づいて十分設計・評価が可能であるため、選定から除外した。
		(臨界) Puポリマー発生防止	—	海外の文献にてPuポリマー発生防止に関する知見が報告されていることから、対応可能と考えられるため、選定から除外した。
		(火災爆発) ドデカンによる火災防止	○-Sf1	火災爆発防止はシステムの成立性を評価する上で重要な項目であるため選定した。
	遠心抽出器	(火災爆発) 後工程への溶媒漏洩防止	○-Sf2	油水分離性能は、遠心抽出器の処理量を評価する上で重要な項目であるため、選定した。
プロセス設計 (Dp)	システム全体	(製品回収率) U・Pu・Npの回収率	○-Dp1	設定した要求性能を満足することはプロセスの成立性の評価に不可欠であるため、選定した。
		(製品除染性能) 除染性能	○-Dp2	設定した要求性能を満足することはプロセスの成立性の評価に不可欠であるため、選定した。
		(ロバスト性) 抽出システムのロバスト性	○-Dp3	抽出システムのロバスト性は、安定運転を考慮したプロセスの成立性を評価するために重要な因子である。
		(その他固有の性能) 逆抽出工程の温度設定	○-Dp4	抽出システムの温度設定は、逆抽出性能への影響が大きいため、逆抽出工程におけるプロセスの成立性を評価するために重要な因子である。
機器・システム設計 (Ds)	システム全体	高発熱原料による溶媒劣化の増加	—	MA—FPが大量に入っている高発熱燃料集合体の処理に当たっては、今後組成等が明らかになってから検討を行うこととしているため、選定から除外した。尚、遠心抽出器は現時点で世にある抽出器(ミキサセトラ、パルスカラム)の中で、最も溶媒劣化が少ない。
		(その他固有の性能) オーバーフロー性能	—	従来知見に基づいて十分設計可能と考えられたため、選定から除外した。
		(その他固有の性能) 振動による疲労破壊	—	振動に対する技術的対策は先行施設等における一般的な再処理機器と同様であり、十分設計可能と考えられたため、選定から除外した。
		(その他固有の性能) スラッジによる閉塞	—	スラッジによる遠心抽出器への閉塞は過去の試験によって起こりにくいという見通しを得ている。このため、確認試験は2010年以降に予定しているが、その結果を持って概念を覆す可能性は低いと判断したため選定から除外した。
	遠心抽出器	(速度・流速) 処理量	○-Ds1	処理量はプロセスの成立性を評価する上で不可欠な項目であるため、選定した。
		(正確度・精度) モータの回転数の精度	—	遠心抽出器におけるモータの回転数は、適正な運転範囲が広いいため、一般産業機器程度の精度で管理すれば問題ないため選定から除外した。
		(効率・性能) 段効率	○-Ds2	段効率はプロセスの成立性を評価する上で不可欠な項目であるため、選定した。
		(機械的耐久性) 駆動部の機械的耐久性	○-Ds3	駆動部の耐久性は、遠心抽出器の安定運転性を評価するために重要な項目であるため、選定した。
		(耐食性) 耐硝酸性	—	従来技術及び他の革新技術開発技術の応用により設計・評価可能であると判断し、選定から除外した。
		(耐放射線性) 駆動部機器・電装品の耐放射線性	○-Ds4	構成機器の耐放射線性は、システム成立性の評価上重要な項目であるため選定した。
		(強度確保) ロータ軸の強度	—	従来技術により設計・評価可能であると判断し、選定から除外した。
		(安定作動性) ロータの危険速度	—	従来技術により設計・評価可能であると判断し、選定から除外した。

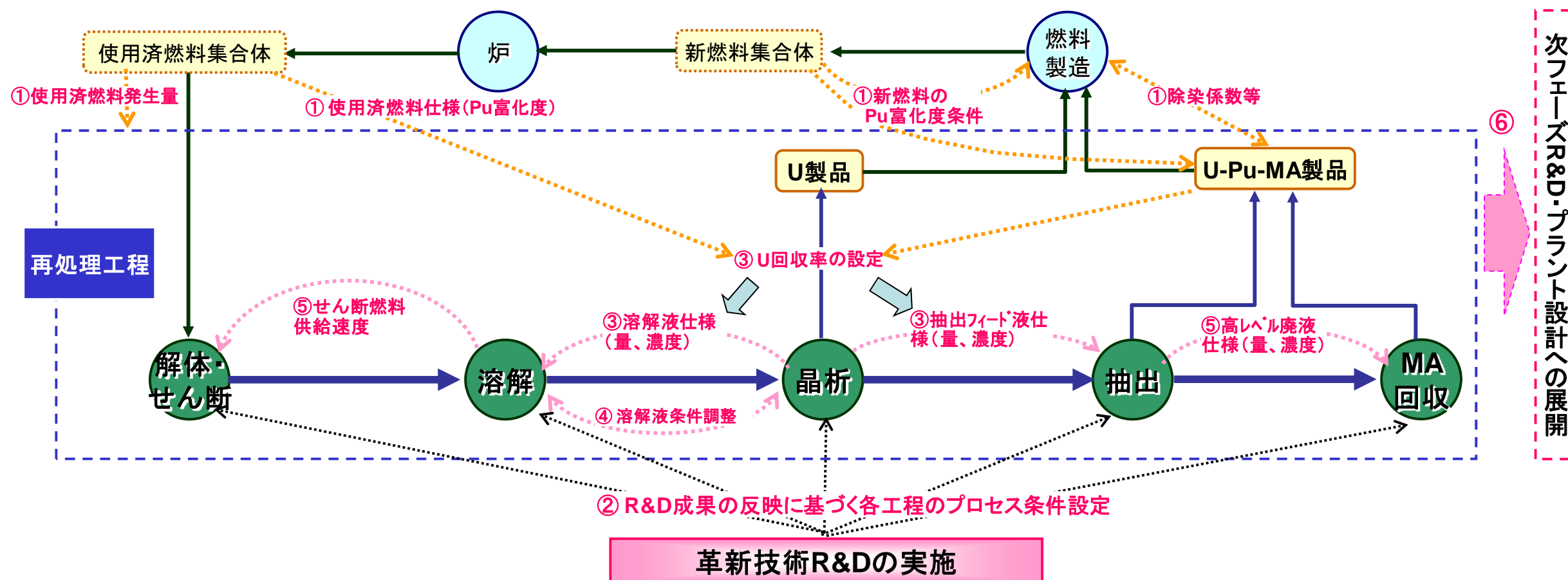




## 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化に関する取り組み ← 視点 12

■ 再処理施設の設計研究の中で、R&D成果に基づく要素技術を含む工程間の取合い仕様・条件を設定し、システム全体の整合性を確認してきている。具体的には以下の手順で段階的に実施。

- ① **炉システム、燃料製造システムとの取合**: 再処理プラント設計に関わるFBRサイクル全体のシステム取合い条件を設定(炉側からの使用済燃料仕様(特にPu富化度)及びその発生量(プラント年間処理量)と新燃料側(燃料製造含む)から求められる再処理製品仕様(Pu富化度、除染係数等))。
- ② **再処理工程の基本条件設定**: 次に、要素技術のR&D成果を基に、除染係数や回収率等のプロセス条件の設計値を設定。  
(本設計研究では、最初に先進湿式法でキーとなる晶析工程の条件を設定)
- ③ **再処理工程間の取合**: 要素技術を含む工程のinput, outputを設定(濃度、流量等)。  
晶析工程について言えば、使用済燃料に含まれるPu富化度と燃料製造で要求されるPu富化度の差からどの程度のUを回収するかを決めた上で、下記を設定。
  - ✓ Input : 溶解工程から出てくる溶解液のU,Pu濃度、酸濃度
  - ✓ Output : 抽出工程へ供給する母液のU,Pu濃度、酸濃度等
- ④ **再処理工程間の調整**: 上記のinput, output設定の際には、ある工程の条件が、他工程へ過度な負荷を与えないよう工程間相互の兼合いを考慮して適切と考えられる仕様を設定(相反する条件間の調整)。例えば、晶析と溶解の間では下記のようなことを考慮した。⇒結果は、晶析工程へ供給する溶解液仕様: 500gHM/l/3.5M、晶析温度: 通常1°C程度/燃料組成変動を考慮して-8°C程度まで冷却可能、とした。
  - 晶析工程で低温(マイナス数十度)条件下にすれば溶解液濃度は低くて済むものの、晶析工程の温度・湿度管理(セル内)が特別なものとなる。
  - 一方、晶析工程の温度を高く設定すると、溶解液濃度を更に高くする必要があり、工学的に使用されている以上の濃度の硝酸を供給する必要がある。
- ⑤ **再処理工程間の取合(更なる上流・下流側工程間)**: 同様に、溶解、抽出各工程のプロセス条件の設計値を設定し、そのinputを設定。  
(ex.溶解であれば、inputがせん断燃料の供給量、せん断速度)
- ⑥ **プラントシステムの統合・評価**: 以上を、再処理施設を構成する全ての設備に亘って実施し、プロセス設計を完遂させ、機器設計等へ反映。更に、今後のR&D計画へフィードバックし、システムとして最適化(フェーズII以降で実施)。



次フェーズR&D・プラント設計への展開

革新技术R&Dの実施  
主要素技術間の仕様・条件の設定の考え方



1. 国内外の工学的な知見の反映の状況【←視点 4、7】

● 国際的な取り組み状況や海外の技術情報の反映

- ▶ 抽出クロマトグラフィ法は我が国のみが開発対象としている独自の方式であり、各国とも溶媒抽出法によるプロセスを開発中。よってハード面（抽出クロマトグラフィ装置）において工学的な知見の反映事項はない。
- ▶ フェーズ I 開始当時、国内外で報告されている MA 抽出剤はリン酸系、窒素系、硫黄系のものが主流。硫黄系抽出剤は精製と分解に問題があったことからリン酸系と窒素系に絞り、5 つの抽出剤（「MA-Ln 回収」：CMPO（リン酸系）&TODGA（窒素系）、「MA/Ln 分離」：HDEHP（リン酸系）&R-BTP&TRPEN（窒素系））を候補に選定。

● 国内の工学的な知見の反映

- ▶ 旭化成において開発されたウラン濃縮技術を参考として産業創造研究所において再処理への適用を目的として開発された抽出クロマトグラフィ技術が基礎。
- ▶ 原子炉では冷却水の浄化システムに広く採用済（樹脂はスラリーにて遠隔で取扱い、本開発でも反映）。また、一般産業界でも食品、医薬品等の工業規模で幅広く利用されている。
- ▶ 上記で収集した吸着塔構造、運転方法等の情報を工学規模試験装置（750L/d）の具体的構造検討及び設計・製作に反映。特に本装置の主要機器である分離塔の設計・製作は国内一般メーカーが実施。

2. クライテリア（成果目標）の設定方法【←視点 3、5、6】（別紙 1 参照）

● 目標設定に係る視点

- ▶ 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

● クリティカルポイントの抽出

- ▶ 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ▶ 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ▶ 2010 年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定。

● 成果目標の設定

- ▶ 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCT フェーズ I で達成すべき具体的な開発の目標（値）を設定。

3. 得られたデータの妥当性【←視点 1、2】

● MA 分離性能（目標：回収率 99.9%、FP の除染係数 100）

- ▶ 5 種類の候補吸着材について、ピーカースケールでの複数回のコールド、RI 試験結果及び文献情報から MA 分離フローシートを作成。作成したフローシート条件にてピーカースケールでのカラム RI 試験（1 回）を実施した結果、TODGA 吸着材と R-BTP 吸着材との組み合わせによるフローシートによって MA 回収率 95%以上、主要 FP の除染係数 100 以上（ただし Tc については 60 以上）の分離性能を提示。
- ▶ 上記結果は成果目標に及ばない値であるが、工学規模へのスケールアップを考慮すると、回収率及び除染係数ともに成果目標を達成する見込み（クロマトグラフィは、分離塔高さを高くし理論段数が増えれば分離性能は良くなる）。
- ▶ 課題として、選定したフローシートでは溶離等の液量が多く、廃液発生量の点で溶媒抽出法と同等程度にとどまる。
- ▶ カラム試験は 1 回のみであるため、さらにデータを蓄積することが必要。なお、ホット試験による確認も重要であり、ピーカースケールでのカラムホット試験を実施中。

4. 工学的な信頼性の判断【←視点 10】

- ▶ 抽出クロマトグラフィ装置は開発期間が短く、フェーズ I では主要機器である分離塔の性能確認、分離塔の閉塞、熱や水素ガスの蓄積といった異常事象からの復旧、吸着材の交換等の遠隔操作性について致命的な技術課題がないことの検証に傾注している段階。そのため、得られた知見の範囲で工学的な信頼性確保の見通しを提示。

● 分離塔の性能

- ▶ 工学規模相当の分離塔を用いてほぼ均一な流れが得られること、理論段高さがピーカースケールと同等であることを確認し、ピーカースケールでの分離性能を維持して分離塔のスケールアップ可能な見通しを得た。
- ▶ 課題として、選定したプロセス条件での分離性能を工学規模で実証することが必要。また、ポンプ、切替バルブ、計装などの分離性能に影響する周辺機器に係る検討が必要（次フェーズ以降）。

● メンテナンスポリシーについて

- ▶ 分離塔は駆動部を持たない静的装置であるため、想定される故障事象はない。なお、分離塔内に充填する吸着材は必ず交換が必要となるため交換システムについては検討が必要。

- ▶ 異常事象として、分離塔の閉塞による熱や水素ガスの蓄積を想定（通常運転中は熱、ガスとも蓄積しないことをコールド試験等により確認）。閉塞原因として考えられるスラッジは、分離塔への供給前に除去することで対応。また閉塞検知については、通液流量や供給部圧力の点検により探知可能と判断。閉塞した場合、遠隔操作により復旧。

● 想定される機器の故障と寿命について

- ▶ 分離塔の想定される故障事象はない。課題として、吸着剤移送ポンプ、切り替えバルブ、分離塔出口のモニタリング装置等の周辺システムについて、閉塞等の想定される故障事象についての検討が必要（次フェーズ以降に検討）。

● 異常事象の想定と復旧措置の実現性について

- ▶ 抽出クロマトシステムを構成する主要機器について異常事象を摘出し、その復旧措置を検討。工学規模コールド試験により、機器の故障、分離塔の閉塞、吸着材交換系統の閉塞からの復旧方法が可能であることを確認。
- ▶ 通常運転状態であれば、蓄熱や放射線分解ガス（水素）の蓄積は発生しないことを確認。
- ▶ 異常事象として、MA 等が保持された状態での分離塔閉塞による分離塔内の温度昇温、水素ガス蓄積を想定。この事象に対し、非常系統からの通水による塔外への熱（源）の排除、吸着材拔出による塔外への発熱源、水素ガスの排除などの方策を提案、これらの操作が実施可能であることを工学規模コールド試験により確認。今後、吸着材劣化条件下等での有効性の確認が必要。現状では本操作以上に有効な手法がないことが課題。
- ▶ 課題として、水素ガスについては現行の再処理施設での技術対策（掃気希釈）が採用できない。

5. 性能の振れや変動について【←視点 11】

● 分離性能の安定性

- ▶ CMPO 吸着材及び HDEHP 吸着材を用いて、「吸着－洗浄－溶離」を 1 サイクルとして複数サイクル繰り返す試験を実施。CMPO 吸着材では、繰り返し使用しても安定した分離性能が得られる見通し。選定した TODGA 吸着材及び R-BTP 吸着材は、溶出量の点で CMPO と同等の安定性があるため、繰り返し使用時の分離性能は安定しているものと期待。
- ▶ 課題として、最終的なフローシート条件での繰り返し運転により、吸着材の動的な劣化状況の評価が必要。

● 燃料組成変動に対する対応

- ▶ 供給液中の元素濃度から適正量の MA 等を吸着するために必要な供給量を決定すればよく、燃料組成変動に対する特別な対応は必要ない。塔高さなどに裕度を持たせることでも対応可能と思われるが、廃液発生量の観点から供給液組成を把握して吸着量を一定とし、洗浄・溶離以降、最適な条件で安定した運転を行うべき。

6. △評価に対する技術的な潜在性の判断根拠【←視点 9】

- ▶ プロセス開発上の課題の一つは、MA 分離性能の目標値達成を実験で直接示していないことであり、スケールアップによる分離性向上に加え、一般的なクロマトグラフィの改良方策（吸着帯移動速度の制御、フローシートの改良など）を施すことによって達成は可能と判断。改良方策が性能要求に著しい影響を与えないことの確認が必要。
- ▶ また、抽出剤担持量や細孔の最適化などにより、クロマトピークを鋭くすることで廃液量の低減を想定。
- ▶ 回収率については、塔高を伸ばせば目標値達成の可能性は高いので、必要塔高やフローシート条件を精度よく実験的に評価し、経済性への影響を評価してから判断すべきと考える。
- ▶ 機器開発上の課題については、周辺システムのための分離性能に対する影響評価、選定した吸着材の繰り返し運転に対する安定性の確認が未実施（次フェーズ以降に検討）。前者について、要素機器開発は可能と考えるが、分離性能への影響は不明。後者については、ピーカースケールでの安定性に関する知見から確認が可能と期待。
- ▶ 水素ガスの蓄積について、現状では「水素の発生するおそれがある設備は、発生した水素が滞留しない構造」とされており、通常運転時に蓄積しないこと、閉塞時に排出可能なことをもって技術基準をクリアすることが必要。
- ▶ このように、機器成立性についてはデータ不足により潜在性が精度よく判断できない状況。技術基準上の水素滞留防止も含め、さらにデータを収集し適切な判断を行うべきと考える。
- ▶ MA 回収技術について、抽出クロマトグラフィ法の比較対象として溶媒抽出法があり、抽出クロマトグラフィ法の優位性に関して溶媒抽出法と比較して評価が必要。分離性能や廃棄物発生量で大きな差が認められない限り、現状のデータでは開発コストの点では溶媒抽出法が、設備コストの点では分離塔のほうが有利（安い）。

7. 研究開発における投資効果を評価する手法及び体制【←視点 8】

- ▶ R&D と設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ▶ 外部有識者による課題評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステムを採用。

8. 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化への取り組み【←視点 12】

- ▶ 抽出工程からの廃液が対象であり、取り組み事項はあまりない（MA サイクル全体の整合性検討は必要）。



クライテリア（成果目標）設定の方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した（表 2）。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの（次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの）を除外し、2010 年の革新技术の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定した（表 3）。

○ MA 回収技術に関して選定された要素技術開発についての評価項目

- ・ Sf-1 吸着分離塔 (火災爆発) 水素ガスの蓄積による火爆防止
- ・ Dp-1 抽出剤の選定 (製品回収率) MA 回収率
- ・ Dp-2 抽出剤の選定 (製品除染性能) MA 製品除染性能
- ・ Dp-3 抽出剤の選定 (その他固有の性能) 吸着材耐久性
- ・ Dp-4 抽出剤の選定 (その他固有の性能) フローシート構築
- ・ Ds-1 システム全体 (速度・流量) 処理能力
- ・ Ds-2 吸着分離塔 (正確度・精度) 運転制御の方法
- ・ Ds-3 吸着分離塔 (その他固有の性能) 除熱性能
- ・ Ds-4 抽出剤の選定 (耐食性・耐放射線性) フローシート構築
- ・ Ds-5 吸着材充填・排出システム (安定動作性) 吸着材充填・排出システムの成立性
- ・ Mn-1 システム全体 (定期交換部品の交換性) 基本構造の構築
- ・ Op-1 システム全体 (定常状態の運転性) 基本運転性能
- ・ Op-2 システム全体 (その他固有の性能) トラブルからの回復手順の成立性
- ・ Wp-1 システム全体 (発生量) 廃液、廃吸着材、廃溶媒

- (4) 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、クライテリア（成果目標）として設定した。

○ クライテリア（成果目標）

- ・ Am と Cm の回収率 99.9 %、FP の除染係数 100 を達成するフローシートの構築。吸着材、薬品、水の量といった観点による最適な抽出剤の選択（Dp-1、Dp-2、Dp-3、Dp-4、Ds-4、Wp-1）
- ・ 処理能力について、供給液量として 750 L/日を達成する見通しの提示（Ds-1）
- ・ 分離塔閉塞を想定した設計データ及び工学規模試験による安全確保方策の提示（Sf-1、Ds-3、Op-2）
- ・ 処理能力に関して、750L/日の供給液を処理する工学規模試験装置の運転の実証（Mn-1、Op-1）
- ・ 安全運転成立性に関して、遠隔操作性を考慮した吸着材の重点・排出方法の確立、抽出剤の損失や劣化に起因する吸着材交換頻度を考慮した運転制御方法の提示（Ds-2、Ds-5）

表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め
		臨界
		火災爆発
		異常放出
		耐震
	プロセス設計 (Dp)	その他固有のハザード
		許認可性
		製品回収率
		歩留まり・収率
機器・システム設計 (Ds)	製品除染性能	
	ロバスト性	
	その他固有の性能	
	速度、流速	
	正確度・精度	
	効率・性能	
	機械的耐久性	
	耐食性	
	耐放射線性	
	強度確保	
安定動作性		
製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)	材料の選定
	機器の製作性 (Fe)	試薬・充填剤等の消耗品の選定
運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	機器の製作性
		定期交換部品の交換性
		非定期交換部品の交換性
		共用期間中の検査への対応性
		予防保全の対応性
	運転性 (Op)	定常状態の運転性
		運転制御・監視技術の実用性
		起動・停止操作の運転性
		トラブルからの回復手順の成立性
経済性	建設コスト (Cc)	物量(系統数、装置寸法)
		経済性評価(機器製作費・設備費)
		付帯設備負荷率
	操業コスト (Rc)	定期交換部品の交換頻度
		省力性(設備の運転・補修に必要な人員)
		エネルギー負荷率
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	試薬等使用量
		分析負荷率
	機器廃棄物 (We)	発生量
		処理容易性
核不拡散性	計量管理 (Pa)	発生量
		処理容易性
	技術的障壁 (Pt)	処理負荷率
		運転時の設備・装置内インベントリ量
		設備・装置内インベントリの計量性
		抽出操作の迅速性
		Pu の非分離性
		近接困難性
		不正利用困難性

表2 実用化に必要な技術項目抽出結果【MA回収技術開発】(抜粋)

分類	性能・成績に係わる 因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成績 因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
安全設計 (Sf)	閉じ込め	○ 装置、配管類からの漏洩	システム全体	吸着分離塔及びこれを中心とするシステムは、バルブなどの交換部品を持つことから、開放しうる接続部を有する。また溶液の通水時はポンプによる加圧によって系統内部は常時正圧となる。そのため、接続部シールの劣化などによりシステムの閉じ込めが破れ、内部の放射性物質が放出される可能性がある。
	臨界	○ 臨界安全設計	吸着分離塔	吸着分離塔では、高レベル放射性廃液に含まれるAm、Cmを選択的に吸着して保持する工程を有する。これらの元素を集積する操作を行うことから、高レベル放射性廃液に比べて臨界上、非安全側に変化する。
	火災・爆発	○ 水素ガスの蓄積による火 爆防止	吸着分離塔	吸着分離塔は可燃性物質としての吸着材と放射線分解により発生する水素ガスを内包する。吸着分離塔は吸着材と溶液で満たされており、換気機能を有さないため、火災爆発に関する対応が必要である。
		○ 可燃性溶媒の火災防止	吸着材再生設備	吸着材の再生処理のために引火点の低い溶媒(アセトン等)を使用するため、これらによる火災・爆発の防止が必要である。
	異常放出	○ MAによる発熱の除去	—	高発熱性のMAを比較的高い濃度で取り扱うため、沸騰の防止のための対策が必要である。
	耐震	無	—	耐震設計上考慮すべき技術的対策は先行施設等における一般的な再処理設備機器と同様であり、本システム固有のハザード源は無い。
	その他固有のハザード	無	—	閉じ込め、臨界、火災・爆発、異常放出、耐震以外で、本技術固有のハザードとなる課題はない。
	許認可性	○ 水素に対する技術基準	吸着分離塔	「再処理施設の設計及び工事の方法の技術基準に関する規則」に「水素の発生するおそれがある設備は、発生した水素が滞留しない構造としなければならない」とあり、これを満足する方策を提示するか、「滞留」の定義について追記するなどの規則改正が行われる必要がある。
プロセス設計 (Dp)	製品回収率	○ MA回収率	システム全体	MAの回収率は、プロセスの成立性に影響を与える重要な因子である。
	歩留まり・収率	—	—	上記製品回収率で判断される性能と同じと判断して選定から除外した。
	製品除染性能	○ MA製品除染性能	システム全体	製品の除染性能は、プロセスの成立性に影響を与える重要な因子である。
	ロバスト性	○ 供給液組成、機器の動作変動	システム全体	照射等履歴などにより高レベル廃液組成が変化する。また、吸着分離塔への溶液供給ポンプは、設定流量に対して変動幅を有する。仕様を満足する製品を得るため、これらの変化に対応したシステムである必要がある。
	その他固有の性能	○ 吸着材耐久性	システム全体	吸着材耐久性は、吸着材交換頻度(繰り返し利用回数、廃棄物発生量)を決定する因子であり、安定運転、稼働率に影響を与える。
機器・システム設計 (Ds)	速度、流量	○ 処理能力	システム全体	溶液の線速度や充填層体積は、装置規模、貯槽・配管類の基本仕様を決定する因子である。
	正確度・精度	○ 運転制御の方法	吸着分離塔	所定の回収率と除染性を安定的に得る観点から、溶液の切替を行う制御技術は重要であり、機器・システムの設計方針を決定する重要である。
	効率・性能	○ 理論段高さ	吸着分離塔	塔の理論段高さはシステム処理能力・効率に影響する主要な性能である。
	機械的耐久性	○ システム耐圧、弁の耐久性	システム全体	吸着分離塔及び系統に圧力がかかるため、この圧力に対する耐久性が要求される。また、弁は開閉動作を繰り返し、この耐久性はシステム稼働率に影響する。
	耐食性 (化学的耐食性)	○ 使用試薬に対する耐久性	システム全体	硝酸や錯化剤等の化学試薬を使用するシステムであり、これら使用試薬に対する化学的耐久性が要求される。

表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【MA回収技術開発】(抜粋)

分類	評価項目(技術要素の性能・成績)の候補		評価項目の選定* と参照番号	選定した理由/選定しなかった理由
	技術要素	性能・成績		
安全設計 (Sf)	システム全体	(閉じ込め) 装置、配管類からの漏洩防止	—	放射性物質を内蔵する分離塔は、円筒状の容器構造であり、配管類は基本的に従来技術に基づく。その閉じ込め性能については従来知見に基づいて十分な評価・設計が可能であると判断し、選定から除外した。
		(耐震) 装置、配管類の耐震強度確保	—	特殊な装置等形状、材料を用いることはなく、従来からの安全設計の考え方に基づいて耐震設計が可能であると判断して選定から除外した。
		(許認可)	—	「再処理施設の設計及び工事の方法の技術基準に関する規則」に「水素の発生するおそれがある設備は、発生した水素が滞留しない構造としなければならない」とある。実用化までには、これを満足する方策を提示するか、「滞留」の定義について追記するなどの規則改正が行われる必要があるが、2010年以降の開発継続の判断には影響を与えないものと判断して選定から除外した。
	吸着分離塔	(臨界) MA の蓄積を考慮した 臨界安全設計	—	臨界安全設計については、Am と Cm の取り扱いに関して固有のハザードはないものと評価している。したがって、従来からの安全設計の考え方に基づいて設計・評価可能であり、技術成立性に影響を及ぼす因子ではないと判断して選定から除外した。
(火爆) 水素ガスの蓄積による火爆防止		○-Sf1	吸着分離塔に内包する、放射線分解に起因して発生する水素ガスへの対応は必要であり、革新技術の新たな装置として従来技術には無い安全方策が求められることから、安全設計上の重要な性能として選定した。	
プロセス設計 (Dp)	抽出剤の選定	MA 製品回収率	○-Dp1	抽出剤の性能は、分離・回収の効率・性能に大きな影響を与える因子であり、抽出剤の選定がプロセス設計の成立性に影響を与えると判断し選定した。
		MA 製品除染性能	○-Dp2	抽出剤の性能は、分離・回収の効率・性能に大きな影響を与える因子であり、抽出剤の選定がプロセス設計の成立性に影響を与えると判断し選定した。
		吸着材耐久性	○-Dp3	吸着材耐久性は、吸着材交換頻度(繰り返し利用回数、廃棄物発生量)を決定する因子であり、プロセス設計の成立性に影響を与えると判断し選定した。
		フローシート構築	○-Dp4	フローシート構築は、分離・回収の効率・性能に大きな影響を与える因子であり、抽出剤の選定がプロセス設計の成立性に影響を与えると判断し選定した。
機器・システム設計 (Ds)	システム全体	処理能力	○-Ds1	溶液の線速度や充填層体積は、装置規模、貯槽・配管類の基本仕様に影響する因子であり、システム設計の検討において重要であると判断して選定した。
		システム耐圧、弁の耐久性	—	吸着分離塔及び系統並びに弁に要求される耐久性は、一般工業で使用されている吸着分離塔と同等以下であると判断して選定から除外した。
	吸着分離塔	運転制御の方法	○-Ds2	所定の回収率と除染性を安定的に得る観点から運転の切替を正確に行うことは重要であり、機器・システムの設計方針に係わる事項であると判断し選定した。
		除熱性能	○-Ds3	吸着分離塔では、高レベル放射性廃液に含まれる Am、Cm を選択的に吸着して保持する工程を有する。したがって、本技術におけるこれら高発熱性 MA の取り扱い量は比較的多量といえるものと判断し選定した。
	抽出剤の選定	フローシート構築	○-Ds4	所定の回収率、除染係数を得るため必要なプロセス条件を示すものであり、最も重要な因子の一つとして決定的な影響を与える因子であり、プロセス設計の成立性に与えると判断し選定した。
		抽出剤の耐放射線性	—	抽出剤の耐放射線性は、分離・回収の効率・性能と吸着材の交換頻度に影響を与える因子であり、システムの設計検討において重要である。ただし、評価は Dp3 と同じであり選定から除外した。
	吸着材充填・拔出システム	吸着材充填・拔出システムの 成立性	○-Ds5	吸着材の吸着分離塔への充填と吸着分離塔からの拔出は、定期的に行う必要がある。充填・拔出のためには運転を停止する必要があることから、システムの稼働率に大きな影響を与えると判断し選定した。
	機器・システム設計手法の確立	設計手法	—	分離・回収の性能を確保した機器・システムを設計する上で、適切な設計手法を獲得することは重要であるが、技術の成立性を判断する直接的な因子ではなく、開発の初期段階である現時点においては、設計が合理的に可能であればよく、実用化までに達成が望まれる性能と判断して選定から除外した。





### 1. 国内外の工学的な知見の反映の状況【←視点 4、7】

廃棄物低減化技術開発では、再処理工程より排出される種々の放射性廃液を極低レベル廃液と高レベル廃液へ 2 極化することにより、中・低レベル廃液の固化処理及びこれら固体廃棄物の貯蔵に必要となる設備を削減することを目指す。廃液の 2 極化に向け、高濃縮化の妨げとなる廃液中の Na を削減するため、Na 塩を洗浄試薬として使用している溶媒洗浄工程を主な対象として Na 塩の使用を排除する技術（ソルトフリー技術）を検討している。

#### ● 国外の工学的な知見の反映

- ▶ 米国 ORNL で進められた溶媒洗浄工程へのシュウ酸ヒドラジンの適用性検討において得られた知見、及びドイツ KfK で進められた同工程への炭酸ヒドラジンの適用性検討及び使用済試薬分解への電気分解法の適用性検討において得られた知見を利用し、関連技術開発を展開。
- ▶ 仏国 UP3 では、低・中レベル廃液を高レベル廃液と共にガラス固化することにより、アスファルト固化体（低・中レベル廃液固化体）を削減している模様であるが、詳細は不明。

#### ● 国内の工学的な知見の反映

- ▶ 従来 Na 塩をヨウ素の洗浄試薬として使用していたオフガス洗浄工程については、RRP においても採用されている銀化合物によるヨウ素吸着技術（乾式法）を使用し、Na を含む洗浄廃液を削減。
- ▶ なお、溶媒洗浄工程へのソルトフリー試薬の適用に関しては国内に反映できる工学的な知見はない。

### 2. クライテリア（成果目標）の設定方法【←視点 3、5、6】（別紙 1 参照）

#### ● 目標設定に係る視点

- ▶ 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製작성」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

#### ● クリティカルポイントの抽出

- ▶ 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ▶ 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ▶ 2010 年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定。

#### ● 成果目標の設定

- ▶ 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCT フェーズ I で達成すべき具体的な開発の目標（値）を設定。

### 3. 得られたデータの妥当性【←視点 1、2】

#### ● ソルトフリー試薬（シュウ酸ヒドラジン、炭酸ヒドラジン）による洗浄性能(目標：Ru, Zr, Pu に対して炭酸ナトリウム洗浄と同等の性能)

- ▶ ビーカースケールにおける $\gamma$ 線照射劣化溶媒を対象としたバッチ洗浄試験（照射線量をパラメータとした複数回の試験）及び実劣化溶媒を対象としたバッチ洗浄試験から Ru、Zr の洗浄性能は炭酸ナトリウム洗浄とほぼ同等であることを確認（洗浄効率 99%以上）。Pu については濃度が分析下限値以下のため直接比較可能なデータは得られていないが、全体のマスバランスより洗浄性能は炭酸ナトリウム洗浄とほぼ同等と推定。なお、Pu の洗浄性能については今後直接的な確認が必要。
- ▶ 同試験において、相分離性も炭酸ナトリウムと比較して同等以上であることを確認（相分離に必要な最大静置時間 20 分程度）。

#### ● ソルトフリー試薬の電解性能（目標：分解率 99%が得られる電解条件（電流効率、電流密度等）の提示）

- ▶ ビーカースケールにおける模擬洗浄廃液（不純物として DBP, Ru, Zr を含む（廃溶媒中の不純物量（文献値）及び洗浄時の廃液中への移行量（プロセス条件に基づいた計算値）に基づいて各濃度を推定））を対象とした複数回の電解試験の結果及びその外挿による推定から分解率 99%が得られる電解条件を選定。なお、本電解条件下における実洗浄廃液の分解率の確認については、今後確認が必要。

#### ● ヒドラジン分解生成物の気相移行率（目標：移行率が低いことの確認）

- ▶ ビーカースケールにおける模擬洗浄廃液（不純物として DBP, Ru, Zr を含む）を対象とした複数回の電解試験から爆発的な反応に起因する恐れのある分解生成物であるアジ化水素やアンモニアの気相移行率を評価。気相への移行率は低い（アジ化水素 0.05%、アンモニア 0.002%程度）ものの気相に移行したこれら分解生成物の長期的な滞留挙動については今後確認が必要。

#### ● 電解槽の耐食性（目標：不純物共存下において著しい性能の低下がないこと）

- ▶ 模擬洗浄廃液中での浸漬腐食試験から不純物（DBP, Ru, Zr）の共存下においても、これらが共存しない系と同様、良好な耐食性を有することを確認（電解時の腐食速度：0.06～0.07mm/y）。

### 4. 工学的な信頼性の判断【←視点 10】

- ▶ 溶媒洗浄工程において使用する遠心抽出器に関しては共通技術である抽出技術開発の成果を踏まえ、工学的な信頼性を有するものと判断。ソルトフリー試薬電解槽に関しては工学規模の電解槽を用いて過去実施した複数回のワールド試験により基本的な安定作動性は確認しているが、信頼性の判断に向けては更なる検証が必要。以下、本開発特有となる電解槽について記載。

#### ● メンテナンスポリシーについて

- ▶ 運転中の故障はプラント停止につながることから予防保全を基本とする。具体的な機器の分割構造や保守・点検方法については、今後検討が必要。

#### ● 想定される機器の故障と寿命について

- ▶ 電解槽材料の腐食について、模擬洗浄廃液中における浸漬腐食試験に基づき、腐食速度を 0.06～0.07mm/y と評価。
- ▶ なお、機器寿命の設定は機器のメンテナンスポリシー、経済性、廃棄物発生量などの観点から今後、多角的に検討する必要性あり。

#### ● 異常事象の想定と復旧措置の実現性について

- ▶ ヒドラジン分解生成物であるアジ化水素及びアンモニアの気相移行によるオフガス系での蓄積を想定。模擬洗浄廃液の電解試験に基づき、気相移行率をアジ化水素 0.05%、アンモニア 0.002%程度と評価。
- ▶ 今後、オフガス系における長期的な滞留挙動について確認が必要。

### 5. 性能の振れや変動について【←視点 11】

#### ● ソルトフリー試薬による洗浄性能

- ▶ ビーカースケールでの $\gamma$ 線照射線量をパラメータとした複数回のバッチ洗浄試験より、照射線量の違いによる洗浄性能の変動幅を確認（変動幅 $\pm 1\%$ 以内）。 $\alpha$ 線照射の影響等、実使用環境に起因する他の要因が洗浄効率の変動に及ぼす影響については今後の確認が必要。

#### ● ソルトフリー試薬の電解性能

- ▶ 想定される最大濃度の不純物を含む模擬洗浄廃液を対象とした電解試験の結果に基づき、分解率 99%が得られる電解条件を決定。不純物が共存しない条件下においては洗浄廃液中のソルトフリー試薬の分解はより進行し易いため、本電解条件により種々の洗浄廃液に対して 99%以上の分解率を確保することが可能と判断。

### 6. Δ評価に対する技術的な潜在性の判断根拠【←視点 9】

- ▶ ソルトフリー試薬による洗浄性能については、ビーカースケールでのバッチ洗浄試験により、Ru、Zr の洗浄性能が炭酸ナトリウム洗浄とほぼ同等であることを確認しているものの、Pu に対する洗浄性能の直接確認、並びに実プロセスへの適用にあたっての遠心抽出器系での洗浄性能確認が必要と判断。
- ▶ ソルトフリー試薬の電解性能については、模擬洗浄廃液を用いたビーカースケールでの電解試験の結果及びその外挿により分解率 99%を得られる電解条件を選定したものの、実洗浄廃液を対象とした際の本電解条件下における分解性能の直接確認が必要と判断。
- ▶ ヒドラジン分解生成物の気相移行率については、模擬洗浄廃液を用いたビーカースケールでの電解試験により、アジ化水素及びアンモニアの気相移行率を取得・評価したものの、オフガス系配管内におけるこれら分解生成物の長期的な蓄積挙動の確認が必要と判断。
- ▶ ソルトフリー技術に対象を絞り開発を進めてきたが、工程内における Na 塩のマテリアルバランスを評価した上で、ヒドラジン系の洗浄試薬の採否を含めた廃棄物低減化技術に係る研究開発プログラムの再構築が必要と判断。

### 7. 研究開発における投資効果を評価する手法及び体制【←視点 8】

- ▶ R&D と設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ▶ 外部有識者による課題評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステムを採用。

### 8. 要素技術間の仕様や条件のすり合わせや最適化への取り組み【←視点 12】

- ▶ 再処理施設の設計研究の中で、R&D 成果に基づく要素技術を含む工程間の取合い仕様・条件を設定し、システム全体の整合性を確認。



クライテリア（成果目標）設定の方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した（表 2）。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの（次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの）を除外し、2010 年の革新技术の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定した（表 3）。

○ 溶媒洗浄設備及び洗浄廃液電解設備に関して選定された要素技術開発についての評価項目

- ・ Sf-1 洗浄液電解システム全体 (火爆) ヒドラジン分解物による火災・爆発
- ・ Dp-1 溶媒洗浄システム全体 (製品除染性能) 精製溶媒の除染性能
- ・ Dp-2 洗浄液電解システム全体 (その他固有の性能) 気相移行率
- ・ Ds-1 溶媒洗浄システム全体 (効率・性能) 溶媒洗浄効率
- ・ Ds-2 洗浄試薬 (効率・性能) 相分離性能
- ・ Ds-3 洗浄液電解システム全体 (効率・性能) 洗浄廃液の分解率
- ・ Ds-4 洗浄液電解システム全体 (効率・性能) 洗浄廃液の電解性能
- ・ Ds-5 洗浄液電解槽 (耐食性) 電解槽の耐食性

- (4) 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、クライテリア（成果目標）として設定した。

○ クライテリア（成果目標）

- ・ 周辺工程におけるソルトフリー化プロセスの基本的成立性の提示（Dp-1,Ds-1,Ds-2）
- ・ ソルトフリー試薬分解技術の基本的成立性の提示（分解効率、安全性確認）  
（Sf-1,Dp-2, Ds-3,Ds-4,Ds-5）

表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め
		臨界
		火災爆発
		異常放出
		耐震
		その他固有のハザード
	プロセス設計 (Dp)	許認可性
		製品回収率
		歩留まり・収率
		製品除染性能
		ロバスト性
		その他固有の性能
機器・システム設計 (Ds)	速度・流速	
	正確度・精度	
	効率・性能	
	機械的耐久性	
	耐食性	
	耐放射線性	
	強度確保	
	安定動作性	
	その他固有の性能	
	製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)
機器の製作性 (Fe)		試薬・充填剤等の消耗品の選定 機器の製作性
運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	定期交換部品の交換性
		非定期交換部品の交換性
		共用期間中の検査への対応性
	運転性 (Op)	予防保全の対応性
		定常状態の運転性
		運転制御・監視技術の実用性
経済性	建設コスト (Cc)	起動・停止操作の運転性
		トラブルからの回復手順の成立性
	操業コスト (Rc)	物量(系統数、装置寸法)
		経済性評価(機器製作費・設備費)
		付帯設備負荷率
		定期交換部品の交換頻度
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	省力性(設備の運転・補修に必要な人員)
		エネルギー負荷率
	機器廃棄物 (We)	発生量
		発生量
核不拡散性	計量管理 (Pa)	試薬等使用量
		分析負荷率
	技術的障壁 (Pt)	発生量
		発生量
		運転時の設備・装置内インベントリ量
		設備・装置内インベントリの計量性
		払出操作の迅速性
		Pu の非単離性
		近接困難性
		不正利用困難性

表2 実用化に必要な技術項目抽出結果【廃棄物低減化技術開発】(抜粋)

分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成績因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
安全設計 (Sf)	閉じ込め	無 抽出器及び電解槽内のプロセス液の閉じ込め	—	装置や槽類内における放射性プロセス液の包蔵性については、他の工程機器と同様であり、当該設備特有のハザード源ではない。
	臨界	無	—	溶媒洗浄以降の系統には、臨界事象に進展するほどのPuの異常流入は想定していない。
	火災・爆発	○	洗浄廃液電解槽及びそのオフガス系、溶媒洗浄用遠心抽出器	洗浄廃液の電解工程ではヒドラジンの分解物として、アジ化水素やアンモニア(二次生成物として硝酸アンモニウムを生成)の爆発反応に進展する可能性のある化学物質が存在する。また、溶媒洗浄では可燃性の有機溶媒を取り扱うため、当該設備特有のハザード源である。
	異常放出	無	—	溶媒洗浄や洗浄廃液の電解処理に異常放出事象はない。
	耐震	無	—	当該設備に関する耐震対応は他工程機器と同様であり、当該設備特有のハザード源ではない。
	その他固有のハザード	無	—	その他の固有のハザードはない。
	許認可性	無	—	該当なし
プロセス設計 (Dp)	製品回収率	○	—	当該設備では、洗浄溶媒の回収率が製品回収率に相当する。
	歩留まり・収率	無	—	該当なし
	製品除染性能	○	溶媒洗浄システム全体	当該設備では、廃溶媒の除染性能が製品除染性能に該当する。
	ロバスト性	無	—	該当なし
	その他固有の性能	○ 気相移行率・蓄積率	—	爆発反応に進展する可能性のあるアジ化水素やアンモニアについて、オフガス系での蓄積はプラント安全性に影響する。
機器・システム設計 (Ds)	速度・流量	○ 電解速度	洗浄廃液電解槽	洗浄廃液の電解速度は廃液処理量(スループット)を支配する重要な性能である。
	正確度・精度	○ 定量供給精度	溶媒洗浄システム全体	溶媒洗浄設備において許容濃度以上のリークのない安定した処理を行うには、洗浄液や廃溶媒の供給流量精度が必要となる。
	効率・性能	○ 洗浄効率・電解効率	溶媒洗浄用遠心抽出器及び洗浄廃液電解槽	溶媒洗浄設備や洗浄廃液電解設備の重要な性能として、溶媒洗浄効率、相分離性能及び洗浄廃液の分解率を含む電解性能が相当する。
	機械的耐久性	○ 駆動部の機械的耐久性	溶媒洗浄用遠心抽出器	遠心抽出器は駆動部を備えているため、軸受部等の機械的耐久性が必要である。
	耐食性 (化学的耐久性)	○	洗浄廃液電解槽	ソルトフリー洗浄廃液中の腐食データはほとんど得られておらず、電解槽の耐食性評価が必要である。
	耐放射線性	○ 試薬、駆動部機器・電装品の耐放射線性	洗浄試薬	本設備固有の試薬であるソルトフリー洗浄試薬には耐放射線性が必要である。
	強度確保	○ ロータ軸の強度	溶媒洗浄用遠心抽出器	回転体としての遠心抽出器の軸受部を含む機械的強度の確保が必要である。
	安定作動性	○	溶媒洗浄及び洗浄廃液電解のシステム全体	溶媒洗浄用遠心抽出器及び洗浄廃液電解槽に必要な性能として、安定作動性が求められる。

表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【廃棄物低減化技術開発】(抜粋)

分類	評価項目(技術要素の性能・成績)の候補		評価項目の選定※ と参照番号	選定した理由/選定しなかった理由
	技術要素	性能・成績		
安全設計 (Sf)	洗浄液電解システム全体	(火爆) 溶媒洗浄における遠心抽出器での可燃性有機溶媒の取扱	—	洗浄廃液中に同伴する有機溶媒は極わずかであるため、安全上の重要度は相対的に低いと判断し、選定から除外した。
	洗浄廃液電解槽	(火爆) 過電流や漏電による火災	—	洗浄廃液中に同伴する有機溶媒は極わずかであるため、安全上の重要度は相対的に低いと判断し、選定から除外した。
	洗浄液電解システム全体	(火爆) ヒドラジン分解物による火災・爆発	○-Sf-1	ヒドラジン分解物には、硝酸アンモニウム(アンモニアからの二次生成物)やアジ化水素といった、その濃度等の条件によっては爆発に進展する急激な反応を生ずる可能性のある化学物質が存在するため、安全設計上の技術的成立性を保証するという観点から選定した。
プロセス設計 (Dp)	溶媒洗浄システム全体	(製品除染性能) 精製溶媒の除染性能	○-Dp-1	ソルトフリー試薬を使用した場合の溶媒洗浄性能はシステム性能上重要であるため、プロセス設計上の技術的成立性を保証するという観点から選定した。
	洗浄液電解システム全体	(その他固有の性能) 気相移行率	○-Dp-2	上記に示すように、アンモニアやアジ化水素の気相移行率はプラントの安全性と密接に関連するため、設定した。
機器・システム設計 (Ds)	洗浄廃液電解槽	(速度) 電解分解速度	—	電解槽によるソルトフリー試薬の電解分解速度は、電極面積や通電量によって調整可能であるため、選定から除外した。
	溶媒洗浄システム全体	(精度) 溶液の供給精度	—	水相および有機相の供給流量に関する要求精度は抽出工程と同様であるため、選定から除外した。
	溶媒洗浄システム全体	(効率・性能) 溶媒洗浄効率	○-Ds-1	ソルトフリー試薬による溶媒洗浄効率はソルトフリー技術の基本的成立性を支配する重要な性能であるため、機器・システム設計上の技術的成立性を保証するという観点から選定した。
	洗浄試薬	(効率・性能) 相分離性能	○-Ds-2	相分離性能は洗浄効率を支配する重要な性能であり、溶媒洗浄用の遠心抽出器には、特有の洗浄液循環タイプを使用していることから性能確認の必要があると判断して、機器・システム設計上の技術的成立性を保証するという観点から選定した。
	洗浄液電解システム全体	(効率・性能) 洗浄廃液の分解率	○-Ds-3	洗浄廃液の分解率はソルトフリー試薬の分解性能を保証する重要な固有の性能であるため、機器・システム設計上の技術的成立性を保証するという観点から選定した。
	洗浄液電解システム全体	(効率・性能) 洗浄廃液の電解性能	○-Ds-4	洗浄廃液の電解効率はソルトフリー試薬の分解性能上、重要な固有の性能であるため、機器・システム設計上の技術的成立性を保証するという観点から選定した。
	溶媒洗浄用遠心抽出器	(機械的耐久性) 遠心抽出器の耐久性	—	遠心抽出器の耐久性は抽出工程と同様であるため、選定から除外した。
	洗浄液電解槽	(耐食性) 電解槽の耐食性	○-Ds-5	ソルトフリー試薬の分解条件での溶液の腐食性についてはデータがなく、耐食性評価が必要であるため、機器・システム設計上の技術的成立性を保証するという観点から選定した。
	溶媒洗浄システム全体	(耐放射線性) 試薬の耐放射線性	—	これまでの研究成果から、ソルトフリー試薬による溶媒洗浄性能はバッチ条件のホット試験で確認されており、放射線環境下での試薬の適用について問題はなく、選定から除外した。
	溶媒洗浄用遠心抽出器	(強度確保) 回転体としての強度確保	—	遠心抽出器の回転体としての強度については抽出工程と同様であるため、選定から除外した。
溶媒洗浄及び洗浄液電解システム全体	(安定作動性) 遠心抽出器及び電解槽の安定作動性	—	遠心抽出器システムや電解槽の基本的な安定作動性は工学規模の機器で確認しているため、選定から除外した。	



1. 機構内外の工学的な知見の反映の状況【←コメント4, 7への回答】

●脱硝・転換

- ・本開発課題は、日本のオリジナル技術であるマイクロ波加熱脱硝技術の改良（2 kgHM から 5 kgHM へのバッチサイズ拡大による処理能力向上、MA 含有低除染燃料遠隔製造への適用、造粒機能付加）。
- ・マイクロ波加熱脱硝技術は、TRP（東海再処理施設）、RRP（六ヶ所再処理工場）で採用され、TRP で運転経験蓄積。
- ・TRP、RRP での運転、開発実績（窒化ケイ素製浅皿容器の使用実績、処理後の粉末特性、電磁場解析等）に基づいて、試験計画立案、結果の評価を実施。

●造粒

- ・各国で様々な乾式造粒法が採用されているが、遠隔製造には不適。
- ・脱硝転換造粒一元化処理のため、転換工程での湿式造粒を指向。
- ・これまでの開発経験から、転動造粒法の適用性が高いと判断。
- ・造粒粉末に要求される粉末特性は、これまでの「もんじゅ」燃料製造経験より設定。

2. クライテリア（成果目標）の設定方法【←コメント3, 5, 6への回答】（別紙1参照）

●目標設定に係る視点

- ・原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

●クリティカルポイントの抽出

- ・2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ・抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ・2010 年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定。

●成果目標の設定

- ・達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCT フェーズ I で達成すべき具体的な開発の目標（値）を設定。

●クリティカルポイント及び成果目標（目安）

- ・粉末品質の目安はもんじゅ燃料製造実績、TRP 運転経験等に基づいて Carr の流動性指数 60 以上、比表面積 3~5 m<sup>2</sup>/g に設定。
- ・量産性の観点からバッチサイズ 5 kgHM、各処理時間 1hr、収率 80%以上に設定。
  - 容器形状の選定（円筒型／浅皿型）。
  - 量産規模窒化ケイ素容器の製作性。
  - 量産規模オープン内のマイクロ波強度分布の均一性。
  - 量産規模造粒装置の製作性。

3. 得られたデータの妥当性【←コメント1, 2への回答】

(1)脱硝技術

●容器形状の選定

- ・円筒型脱硝容器の安全性確認のため、約 3/4 スケールの水試験、約 1/3 スケールの硝酸ウラニル水溶液試験を行い、突沸現象が液厚／容器径の比で規定され、円筒型容器実機サイズの液厚では突沸の防止は困難なことを確認。
- ・水溶液のマイクロ波吸収は水が支配的なので、実液においても同様な沸騰挙動を示すと判断し、円筒型容器は不採用。
- ・浅皿型容器の場合、実機サイズでも液厚は現行の実績のあるものほとんど変わらず突沸は起こらないと考えられることから浅皿型容器を採用。

●量産規模窒化ケイ素容器の製作性

- ・5 kgHM/バッチ用浅皿型容器を部分試作し、焼結後の歪みを測定。
- ・歪みの程度から、仕上げ加工により十分な寸法精度が確保できると判断し、製作性有りと評価。

●量産規模オープン内のマイクロ波強度分布の均一性

- ・電磁場解析ソフトとしてマイクロ波利用の業界で広く使用されている電磁場解析コード（Ansoft 社製の HFSS）を使用し、解析に必要な物性値は文献値および原子力機構で実測したもの（硝酸ウラニル、硝酸プルトニウム等の誘電率）を使用。
- ・一般産業界での広い使用実績のあるソフトを用いて、信頼性のある物性データを用いて計算を行っていることから、妥当な結果が得られていると判断。

(2)造粒技術

- ・以下の試験を実施。
  - 数百 g/バッチで、MOX、UO<sub>2</sub>、および WO<sub>3</sub> 粉末に対して様々な条件で実施した造粒試験（予備試験）
  - 0.6~1.3kgMOX/バッチで MOX 粉末に対して実施した造粒試験（小規模 MOX 試験）
  - 5 kgHM/バッチで WO<sub>3</sub> 粉末に対して実施した造粒試験（実規模試験）
- ・予備試験の結果（水分添加率、攪拌羽根回転数と造粒挙動、造粒完了時間、粒度分布、容器への粉末付着状況、製品回収量等との関係）はどの粉末も概ね同じ傾向を示し、WO<sub>3</sub> 粉末の模擬性を確認。
- ・処理時間については、最も長い処理時間を要した実規模試験でも約 15 分で造粒が完了しており、実規模 MOX でも目標値（1 時間以内）を満足すると判断。
- ・収率については、小規模 MOX 試験では 80%以上であったこと、機器への付着量は回転羽根のクリアランス等により決まるため機器の構造設計に大きく依存すること、収率向上を図った構造設計を施した機器を用いた実規模試験では 90%以上であったことから、運転中の経年変化等を考慮しても実機において目標値（80%）を満たすものと判断。

(3)一元処理技術（量産規模造粒装置の製作性）

- ・一元処理に対応した上部アクセス方式の転動造粒装置を試作し、250gHM/バッチの UO<sub>2</sub> を使い、容器から粉末を移し換えずに、マイクロ波脱硝、焙焼・還元、粉碎、転動造粒を連続して行う試験を実施し、設備概念の成立性を確認。
- ・上部アクセス方式の量産規模（5kgHM/バッチ）の転動造粒装置（浅皿容器はステンレス製）を製作し、コールド試験で動作確認した結果、設計通りの造粒機能を果たすことを確認。
- ・実機使用においては、大型浅皿容器の寸法誤差、使用中の変形、遠隔設備による設置誤差等に起因する収率低下及び MA 低除染燃料処理に伴う温度条件変動等による造粒挙動への影響が考えられ、今後その程度を確認する必要があるが、上部アクセス方式の設備概念の成立性には影響しないと考えられることから、量産規模造粒装置の製作性はあるものと判断。

(4)粉末特性（Carr の流動性指数、比表面積）

- ・小規模 MOX 試験により、ほぼ球状の顆粒を製造できること、造粒条件により粒径を制御できること、粉末の流動性指数は成果目標（Carr の流動性指数 60 以上）を満足していることを確認。
- ・小規模 MOX 試験で得られた顆粒の比表面積に関しては 2.5~3m<sup>2</sup>/g であり、目安（3~5m<sup>2</sup>/g）の範囲を外れたが、MOX ペレットの製造実績より 3m<sup>2</sup>/g 以下の比表面積であっても、95%TD 以上の高密度を達成できていることから、ペレット製造に関する大きな課題はないと判断。
- ・顆粒の流動性、比表面積、粒度分布、硬度等の粉末特性に関しては、今後、焼結・O/M 調整までの一連の試験を通じてペレット製造に与える影響を確認し、必要に応じて原料粉末特性目標に反映予定。

4. 工学的な信頼性の判断【←コメント10への回答】

●故障頻度、保守時間について

- ・脱硝および焙焼還元に関しては、TRP および RRP で採用されている技術を単純に拡大したものであるため、故障頻度に関しては同程度であると推定するが、MA 低除染の影響について今後把握が必要。
- ・転動造粒技術に関しては一般産業分野で広く利用されている装置であり、構造も比較的単純であることから、十分な信頼性を有するものと考えられるものの、上部アクセス型の転動造粒装置は新規機構であり、使用実績も少ないため、その耐久性及び MA 低除染の影響確認が今後の課題。
- ・本格的な機器設計は実施していないが、本システムを構成する主要機器で故障や消耗対策として定期的交換が必要な部品として、脱硝オープン内のターンテーブル駆動モーター、焙焼・還元炉のヒーター、

攪拌羽根、羽根駆動用モーター等が考えられる。これらの部品のモジュール化構造を工夫することにより、交換部位が属するモジュール単位での交換を短時間で完了する設計とする。

- メンテナンスポリシーについて
  - ・セル内に配置される機器は、クレーンやBSM、パワーマニプレータ等による遠隔保守を前提。
  - ・機器はパワーマニプレータ等を用いてモジュールに分割できる構造とする。工程セルにおいては予備モジュールとの交換で速やかな復旧。故障モジュールの修理は除染後にGB等で実行。
  - ・特に定期交換が必要な部品については短時間で交換可能な構造とする。

#### 5. 性能の振れや変動について【←コメント11への回答】

- ・Pu 富化度・MA 含有率が変化することにより、溶液組成と粉末発熱量が変動し、焙焼還元粉末の比表面積に影響。粉末発熱量の変動により、造粒工程における水分添加のばらつき等が発生し、造粒粉末特性に影響するので、これらの確認が重要。
- ・これらによる一元処理粉末特性の振れ、変動の程度を今後の一元処理技術開発の中で把握の予定。
- ・一元処理粉末特性の変動によるペレット品質、ペレット製造設備処理能力への影響を今後のペレット製造試験の中で把握の予定。
- ・粉末特性変動に応じてペレット製造条件を調整することにより、ペレット品質、ペレット工程への影響を緩和する技術を確立するため、革新技術開発（燃料基礎物性研究）の成果を反映の予定。

#### 6. ○評価に対する妥当性【←コメント9への回答】

- ・脱硝転換に関しては東海再処理施設で30年以上の運転経験があるとともに、六ヶ所再処理工場にも採用されており、技術的な成熟度は高い。本課題で目指している脱硝転換は現行設備の寸法・容積を拡大したものであり、沸騰挙動の安定性やマイクロ波強度分布の均一性等の実現性見通しが得られた。
- ・造粒技術に関しては適切な構造設計、水分添加方策等の工夫を施すことにより、高収率で短時間に造粒可能な見通しが得られた。
- ・一元処理技術に関しては枢要技術である上部アクセス方式の転動造粒装置の実現性を確認するとともに、小規模試験ではあるが、全工程（マイクロ波脱硝、焙焼・還元、粉碎、転動造粒）を連続して行う試験により設備概念の成立性を確認した。
- ・粉末特性に関しては小規模MOX試験により、ペレット製造に適する流動性等を有する顆粒が得られることを確認した。
- ・今後継続する小規模MOX試験により成型、焼結工程との整合性及び得られるMOXペレットの品質を実際に確認する必要はあるが、これまでのペレット製造経験から技術成立性はあるものと判断した。
- ・今後、MA低除染燃料処理の影響を確認する必要はあるものの、本課題の成立性には重大な影響は与えないものと考え、採用可能「○」と評価した。

#### 7. 研究開発における「投資効果」【←コメント8への回答】

- ・R&Dと設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ・外部有識者による研究開発・評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステムを採用。

#### 8. 要素技術間の仕様や条件間のすり合わせや最適化への取り組み【←コメント12への回答】

(別紙2参照)

- ・今後の開発結果を反映して、原料仕様、ペレット仕様、一元処理粉末特性目標、ペレット検査方法、製造・検査設備設計の間の取合いの最適化を図る。



表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

クライテリア（成果目標）の設定の方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、大きな分類を「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つを定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した（表 2）。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの（次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの）を除外し、2010 年の革新技术の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定した（表 3）。

○脱硝・転換・造粒一元処理技術に関して選定されたクリティカルポイント

- ・粉末品質に関するもの
  - ✓ Dp-3 造粒装置（その他固有の性能） 顆粒品質（比表面積、Carr の流動性指数）
  - ✓ Dp-2 造粒装置（歩留り・収率） ペレット製造に適した粒径範囲の顆粒収率
- ・量産性に関するもの
  - ✓ Sf-1 マイクロ波脱硝装置（その他固有ハザード） 突沸による溶液噴きこぼれ防止対策の検討
  - ✓ Dp-1 造粒装置（製品回収率） 製品回収率
  - ✓ Dp-3 造粒装置（その他固有の性質） 製品品質
  - ✓ Ds-1 造粒装置（造粒速度） 造粒速度
  - ✓ Ds-2 マイクロ波脱硝装置（その他固有の性能） オープン内マイクロ波分布
  - ✓ Fe-1 マイクロ波脱硝装置（機器の製作性） 量産規模窒化ケイ素容器の製作性
  - ✓ Fe-2 造粒装置（機器の製作性） 量産規模造粒装置の製作性
- (4) 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、成果目標として設定した。

○ クライテリア（成果目標）

- ・ 溶液混合による Pu 富化度調整、マイクロ波加熱脱硝転換、転動造粒で構成する小規模 MOX 試験により、粉末流動性指数（Carr 指数）が 60 以上、比表面積 3~5m<sup>2</sup>/g の流動性改良粉末が収率 80%以上の収率で得られる脱硝・転換・造粒一元処理技術のプロセス条件の成立性の提示（Dp-1、Dp-2、Dp-3、Ds-1）：粉末流動性指数条件については「もんじゅ」用ダイスにおいて Carr の流動性指数 60 以上で十分な充填率が得られること、また、比表面積については TRP での 1:1MOX 転換の実績や簡素化法を想定した試験結果から、評価の目安としてそれぞれ設定した。
- ・ マイクロ波脱硝技術及び造粒技術の量産性見通しに関する技術根拠を提示する。（Sf-1、Dp-1、Dp-2、Dp-3、Ds-1、Ds-2、Fe-1、Fe-2）

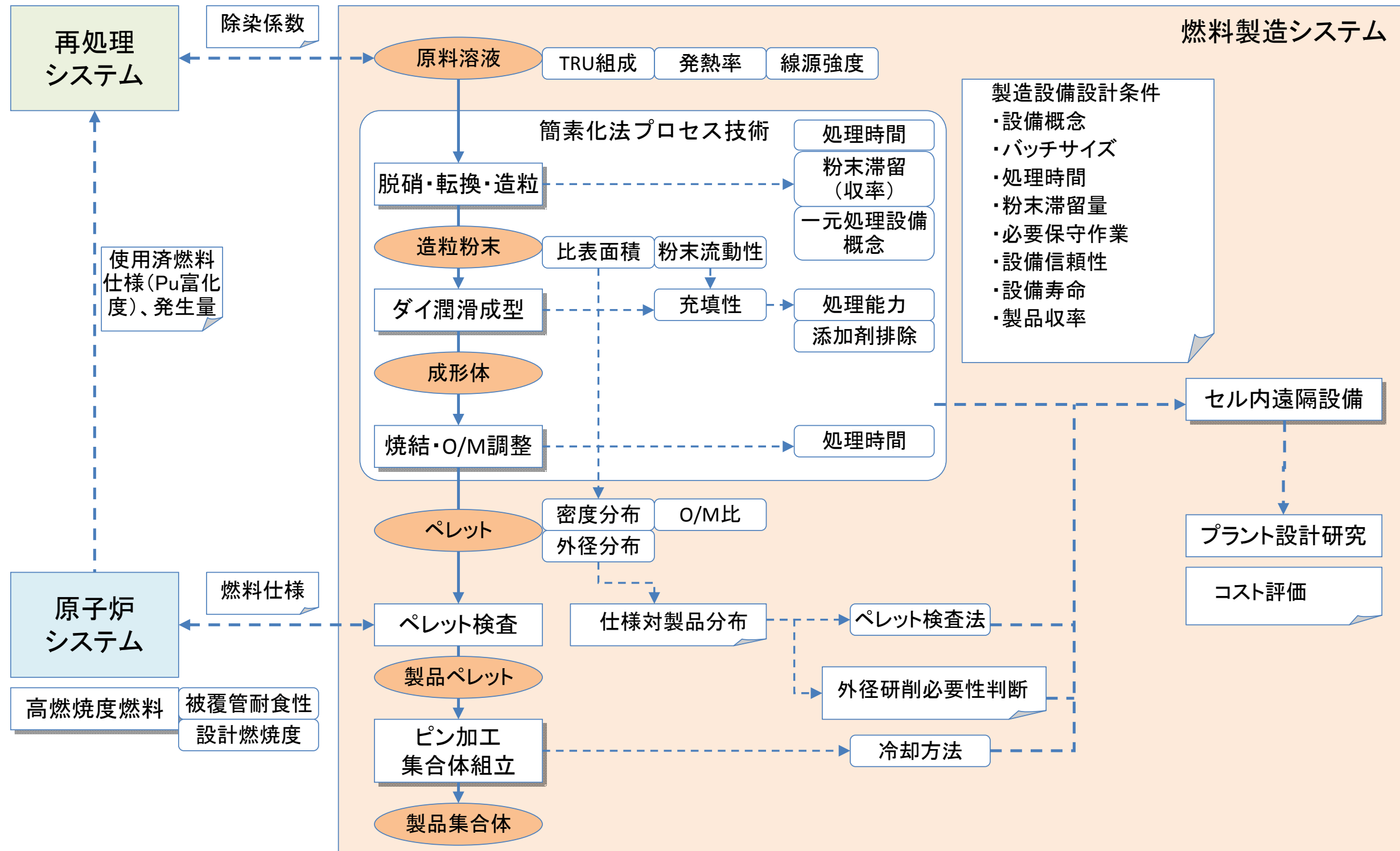
評価の視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における詳細項目	
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	
		臨界	
		火災爆発	
		異常放出	
		耐震	
		その他固有のハザード	
	プロセス設計 (Dp)	許認可性	
		製品回収率	
		歩留まり・収率	
		製品除染性能	
		ロバスト性	
		その他固有の性能	
機器・システム設計 (Ds)	速度・流速		
	正確度・精度		
	効率・性能		
	機械的耐久性		
	耐食性		
	耐放射線性		
	強度確保		
	安定動作性		
	その他固有の性能		
	製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)	材料の選定 試薬・充填剤等の消耗品の選定
		機器の製作性 (Fe)	機器の製作性
運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	定期交換部品の交換性	
		非定期交換部品の交換性	
		共用期間中の検査への対応性	
	運転性 (Op)	予防保全の対応性	
		定常状態の運転性	
		運転制御・監視技術の実用性	
経済性	建設コスト (Cc)	物量(系統数、装置寸法)	
		経済性評価(機器製作費・設備費)	
		付帯設備負荷率	
	操業コスト (Rc)	定期交換部品の交換頻度	
		省力性(設備の運転・補修に必要な人員)	
		エネルギー負荷率	
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	発生量	
		処理容易性	
		処理負荷率	
	機器廃棄物 (We)	発生量	
		処理容易性	
		処理負荷率	
核不拡散性	計量管理 (Pa)	運転時の設備・装置内インベントリ量	
		設備・装置内インベントリの計量性	
		払出操作の迅速性	
	技術的障壁 (Pt)	Pu の非単離性	
		近接困難性	
		不正利用困難性	

表2 実用化に必要な技術項目抽出結果【脱硝・転換・造粒一元処理技術】(抜粋)

視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成績因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
設計成立性	安全設計(Sf)	閉じ込め	○ 低除染・MA含有によるハザード増大に対応した安全評価	マイクロ波脱硝装置 焙焼・還元装置 造粒装置	低除染・MA含有であることから従来のMOX転換に比べて潜在的ハザードが大きくなっているため、U・TRU、FPのオフガス・凝縮液への移行を考慮する必要がある。 低除染・MA含有であることから従来の転換・燃料製造に比べて潜在的ハザードが大きくなっているため、それに応じた排気系への移行を考慮する必要がある。
		臨界	○ 非均質効果を考慮した臨界評価	造粒装置	転動造粒装置内においては、核物質が数mm程度の粒子で存在する可能性があり、臨界評価にあたっては非均質効果を考慮する必要がある。非均質効果により、核物質質量装荷量の制限値が変化するため、本措置特有の臨界評価を行う必要がある。
		火災・爆発	無	システム全体	火災・爆発の防止の観点から考慮すべき技術的対策は先行施設等における転換機器と同様であるため、本システム固有のハザード源は無い。
		異常放出	無	システム全体	異常放出に対して考慮すべき技術的対策は先行施設等における燃料製造機器と同様であるため、本システム固有のハザード源は無い。
		耐震	無	—	先行施設における燃料製造設備等と同様であるため、本システム固有のハザード源はない。
		その他固有のハザード	○ 突沸による溶液噴き零れ防止対策の検討	マイクロ波脱硝装置	マイクロ波脱硝にあたっては、照射出力や容器形状の違いにより、突沸による噴きこぼれが生じるため、本装置特有の課題になる可能性がある。このため、突沸による吹きこぼれが生じない量産のマイクロ波加熱脱硝装置に適した脱硝容器を選定する必要がある。
		許認可性	○	システム全体	低除染・MA含有によるハザードの増大に対応した安全評価が必要である。
		プロセス設計(Dp)	製品回収率	○ 製品回収率	マイクロ波脱硝装置
○ 製品回収率	焙焼・還元装置			製品回収率は排気系への移行率に係わる性能である。	
○ 製品回収率	造粒装置			製品回収率は処理能力・系列数に影響する主要な性能である。	
歩留まり・収率	○ ペレット製造に適した粒径範囲の顆粒収率		造粒装置	顆粒の大きさは、後工程であるダイ潤滑成型工程の品質や効率に影響を与える可能性があるため、制限値を設ける必要性が生じる可能性がある。	
製品除染性能	無		システム全体	本システムは燃料製造システムであるため、製品の除染を行う必要は無い。	
ロバスト性	○ 組成が脱硝挙動に与える影響		マイクロ波脱硝装置	Pu富化度の違い、MA・FP含有が脱硝過程に影響する可能性がある。	
	○ 湿度が造粒挙動に与える影響		造粒装置	簡素化ペレット法では、造粒装置の結合材(バインダー)として、水を使用するため、造粒挙動が空気中の湿度の影響を受ける可能性がある。	
その他固有の性能	○ 脱硝体品質(硬さ、剥離性、未脱硝率)		マイクロ波脱硝装置	マイクロ波脱硝装置の健全性を把握する上で主要な指標である。	
	○ 焙焼・還元体品質(O/M)		焙焼・還元装置	焙焼・還元装置の健全性を把握する上で主要な指標である。	
	○ 顆粒品質(比表面積、Carrの流動性指数)		造粒装置	造粒装置の健全性を把握する上で主要な指標であるとともに、脱硝・転換・造粒一元処理システムの最終製品の品質を示す主要な指標である。	

表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【脱硝・転換・造粒一元処理技術】(抜粋)

視点	分類	評価項目（技術要素の性能・成績）の候補		評価項目の選定と参照番号	選定した理由／選定しなかった理由
		技術要素	性能・成績		
設計成立性	安全設計 (Sf)	マイクロ波脱硝装置	(閉じ込め) 低除染・MA含有によるハザード増大に対応した安全評価	—	低除染・MA含有化にともない、U・TRU、FPのオフガス・凝縮液への移行を考慮する必要があると考えられるが、フィルターの多段化等の対策をすることにより、対応可能と考えた。また、革新技術（脱硝・転換・造粒一元処理技術）でも、従来技術でも、同様な配慮が必要となる。したがって、革新技術自体の採否判断には影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
		焙焼・還元装置 造粒装置	(閉じ込め) 低除染・MA含有によるハザード増大に対応した安全評価	—	低除染・MA含有であることから従来の転換・燃料製造に比べて潜在的ハザードが大きくなるため、それに伴った排気系への移行を考慮する必要があるが、フィルターの多段化等の対策をすることにより、対応可能と考えた。また、革新技術（脱硝・転換・造粒一元処理技術）でも、従来技術でも、同様な配慮が必要となる。したがって、革新技術自体の採否判断には影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
		造粒装置	非均質効果を考慮した臨界評価	—	転動造粒工程の概略の臨界評価を実施した。その結果、Pu富化度30%、Pu同位体組成が <sup>239</sup> Pu/ <sup>240</sup> Pu=95/5、U濃縮度が4%の条件において、非均質効果を考慮しても、水分添加量30%の場合の臨界Pu質量は約4.2kg、水分添加量が60%の場合の臨界Pu質量は約2.3kgである。実用プラントでの1バッチ当りのPu重量は最大でも1.5kgであるので、質量管理が適用できる概略見通しを得たため、革新技術の採否判断には影響を与えないものと判断して評価項目に選定しなかった。
		マイクロ波脱硝装置	(その他固有ハザード) 突沸による溶液噴きこぼれ防止対策の検討	○ Sf-1	マイクロ波脱硝にあたっては、照射出力や容器形状の違いにより、突沸による噴きこぼれが生じるため、本装置特有の課題になる可能性がある。このため、突沸による吹きこぼれが生じない、量産に適した脱硝容器の選定に影響するため、評価項目に選定した。
		システム全体	許認可性	—	低除染・MA含有によるハザードの増大に対応した安全評価に対する考慮は必要ではあるが、既存のホットセルと核燃料施設に準じた許認可を行うことにより、対応可能と考えた。また、革新技術（脱硝・転換・造粒一元処理技術）でも、従来技術でも、同様な配慮が必要と思われる。したがって、革新技術自体の採否判断には影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
		プロセス設計 (Dp)	プロセス設計 (Dp)	マイクロ波脱硝装置	製品回収率
焙焼・還元装置	製品回収率			—	焙焼・還元装置の製品回収率は、排気系への移行率に係る性能ではあるが、本技術の革新技術は、先行施設等において既に工学的に十分な運用行われている従来技術を単純にスケールアップしたものであり、製品回収率に顕著な違いは無いと考えた。したがって、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
造粒装置	製品回収率			○ Dp-1	新しく追加となる造粒装置の製品回収率は、処理能力・系列数に影響する主要な性能であるため、評価項目に選定した。
造粒装置	(歩留まり・収率) ペレット製造に適した粒径範囲の顆粒収率			○ Dp-2	新しく追加となる造粒装置で得られるペレット製造に適した顆粒収率は、処理能力・系列数に影響する主要な性能であるため、評価項目に選定した。
マイクロ波脱硝装置	(ロバスト性) 組成が脱硝挙動に与える影響			—	Pu富化度の違い、MA・FP含有が脱硝過程に影響する可能性はある。影響を与えるものとして、放射性核種からの発熱があるが、加熱自体は溶液の濃縮と脱硝反応を促進させるため、脱硝速度を向上させる因子になる可能性が高いと考えた。また、革新技術（脱硝・転換・造粒一元処理技術）でも、従来技術でも、同様な配慮が必要となる。したがって、革新技術自体の採否判断には影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
造粒装置	(ロバスト性) 湿度が造粒挙動に与える影響			—	セル内における湿度管理を行うことにより、本要因による影響は小さくできると考えたため、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
マイクロ波脱硝装置	(その他固有の性能) 脱硝体品質(硬さ、剥離性、未脱硝率)			—	本技術の革新技術は、先行施設等において既に工学的に十分な実績がある従来技術を単純にスケールアップしたものであり、脱硝体品質には顕著な違いは無いと考えた。したがって、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
焙焼・還元装置	(その他固有の性能) 焙焼・還元体品質(O/M)			—	本技術の革新技術は、先行施設等において既に工学的に十分な実績がある従来技術を単純にスケールアップしたものであり、焙焼・還元体品質には顕著な違いは無いと考えた。したがって、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
造粒装置	(その他固有の性能) 顆粒品質(比表面積、Carrの流動性指数)			○ Dp-3	脱硝・転換・造粒一元処理システムの最終製品の品質であり、次工程であるダイ潤滑成型工程や焼結・O/M調整にも影響するため、評価項目として選定した。



## 1. 機構内外の工学的な知見の反映の状況【←コメント4, 7への回答】

- ・本技術の開発対象は、レシプロ成型機を用いたダイ潤滑成型での中空ペレットの成型であり、設計では12連式成型機の採用を前提としている。
- ・原子力機構では4連式のレシプロ成型機を用い、「もんじゅ」、「常陽」のドライバー中実燃料を製造。潤滑は、成型工程の前に有機物の潤滑剤をMOX粉末に混合する方式。成果をFaCTで開発する成型機の基本構造に反映。
- ・照射燃料製造を通して中空ペレットの製造実績あり。成果を中空ペレットの成型プロセス、成型金型の設計製作に反映。
- ・フランスでは、プルサーマル燃料製造用に14連式レシプロ成型機を採用。潤滑剤の添加は混合法。量産設備の設計で検討している12連式レシプロ成型機の量産プレス機自体の製作上の課題は無いと判断。
- ・これまでダイ潤滑機構に関して、乾式と湿式法の比較試験、潤滑剤の性能比較試験、潤滑剤塗布機構の開発を実施し、潤滑性能と、潤滑機構の核燃料取り扱いへの適用性から、ステアリン酸亜鉛を潤滑剤とし、乾式法により、ダイス下部から噴霧する方式を採用。

## 2. クリティカルポイント（成果目標）の抽出【←コメント3, 5, 6への回答】（別紙1参照）

### ●目標設定に係る視点

- ・原子力委員会が求める2050年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の6つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

### ●クリティカルポイントの抽出

- ・2050年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ・抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ・2010年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項(クリティカルポイント)を選定。

### ●成果目標の設定

- ・達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCTフェーズIで達成すべき具体的な開発の目標(値)を設定。

### ●クリティカルポイント及び成果目標(目安)

- ・ダイ潤滑機構の開発 : 安定した製品を得るために、添加剤切り出し精度の確保。
- ・グリーンペレットの収率 : 欠け割れのないペレットの収率は、プロセスの開発段階であることを考慮し、90%以上(クライテリア)と設定。
- ・ペレット成型速度 : 200t/年の量産性を確保するために、レシプロ成型機の成型速度を7.5サイクル/分(7.5個/分・パンチ, クライテリア)と設定。

## 3. 得られたデータの妥当性【←コメント1, 2への回答】

### ●設備性能試験データ

- ・今回製作したダイ潤滑成型機の潤滑剤塗布状況の目視観察及びペレット抜き出し時の荷重測定から、潤滑剤が安定して均一に塗布されていることを確認するとともに、切り出し量測定により切り出し精度が十分であることを確認。今後の試験により、設備性能の経年変化についての評価が必要と認識。

### ●成型プロセス試験データ

- ・MOX粉と模擬粉を用いた成型プロセス試験を実施。MOX粉を用いた試験(1次MOX試験)は、手作業で潤滑剤を塗布、模擬粉を用いた試験(1次模擬粉末試験)は、6連式のモックアップ試験機及び2連式の小規模試験機で実施。
- ・2連式小規模試験機を用いて潤滑剤塗布量をパラメータとして抜き出し力との関係を調べ、1~12mgの塗布で従来法と同等な潤滑性能を有し、抜き出し力が一定となることを確認。
- ・1次模擬粉末試験約1600個と1次MOX試験約550個のペレット成型結果から収率を評価。両試験とも得られた成型体の品質は良好であり、欠け割れはない。成型性は粉末特性に大きく影響を受け、今回実施した試験で用いた粉末は特性範囲を全てカバーする訳ではないが、収率クライテリア(90%以上)に対し十分余裕があることから、成型プロセスとしての収率見通しはあるものと判断。

- ・今後、一元処理粉末を用いた試験で粉末特性による影響の程度を確認することが必要。
- ・1次模擬粉末試験において、6連式レシプロ成型機を用いた約1600個の成型試験により、7.5サイクル/分で連続成型できることを確認。成型速度を律速するのは、潤滑剤の塗布時間であり、各成型箇所潤滑剤を同時に塗布する構造であるため、12連式の量産機器でも7.5サイクル/分の成型速度を達成可能と判断。

## 4. 工学的な信頼性の判断【←コメント10への回答】

### ●故障頻度、保守時間について

- ・成型設備の基本構造は、従来の設備と同じであり、原子力機構は、豊富な運転実績を有しているため、故障頻度、故障箇所は、これまでの知見を反映できると判断。潤滑剤噴霧機能の故障頻度に関しては、今後の試験結果に基づき評価の予定。
- ・保守時間については、Pu-3で実施中の第3次MOX試験を通して、モジュラー化したダイセット及び潤滑噴霧機構の交換時間を確認し、今後の遠隔ハンドリング機器開発結果と合わせ評価の予定。

### ●メンテナンスポリシーについて

- ・セル内に配置される機器は、クレーンやBSM、パワーマニプレータ等による遠隔保守を前提とし、マニプレータによりモジュール分割できる構造の機器の概念設計及びモックアップ試験を実施。
- ・交換頻度の高いダイセット及び潤滑噴霧機構は、モジュール分割による一体交換とし、今後、遠隔・保守性を高めた設計を実施。

## 5. 性能の振れや変動について【←コメント11への回答】

- ・設備技術上のペレット製品のバラツキを低減するポイントとして、以下の技術を採用しており、性能の振れ、変動は十分に小さいと判断するが、必要に応じて、潤滑剤の塗布状況をモニタリングするシステム(ペレット抜き出し時の荷重、カメラによる観察等)を設置する。
  - ①ダイス下部より、円周方向への吹き付けによる均一な塗布技術。
  - ②ペレット表面の荒れを防止するために、潤滑剤噴霧と連動した余剰潤滑剤回収機構。
  - ③潤滑剤の供給量をmg単位で制御可能な潤滑剤供給装置。
- ・粉末の充填、成型挙動は、流動性、粒度分布等の粉末特性に影響を受け、また、所定の焼結体密度を得るためには粉末の焼結性、表面状態等に応じたプレス圧を設定する必要があり、粉末特性の振れ、変動に的確に対応した成型が必要。
- ・今後、革新技術開発(脱硝・転換・造粒一元処理技術)の結果得られる簡素化法造粒粉末の特性及びその変動範囲に応じた成型条件及びペレット特性(密度分布、寸法)の関係を調べる研究を実施し、最適な成型条件の決定に反映する計画。
- ・その際、革新技術開発(燃料基礎物性研究)の一環として実施する、造粒粉末の粒度分布、破壊強度、摩擦係数、せん断力などの特性測定、充填性及び成型性の評価、成型工程のシミュレーション技術の開発の成果を成型条件の最適化に反映する。

## 6. ○評価に対する妥当性【←コメント9への回答】

- ・採否判断時点においては、当初計画していた簡素化法による造粒粉末を用いた数kgバッチ規模の試験は実施できなかったが、成型設備の潤滑剤塗布の均一性、切り出し精度等設備性能は十分であること、1次MOX試験、1次模擬粉末試験の結果、広い範囲の成型条件(潤滑剤塗布量等)で問題なく成型ができ、グリーンペレット収率、成型速度のクライテリアを十分な余裕をもって満足していることから、簡素化法造粒粉末に対してもダイ潤滑成型法が適用可能と判断した。
- ・その後、Pu-1での簡素化法造粒粉末による第2次MOX試験、Pu-3での機械混合粉末を用いた第3次MOX試験に着手し、第2次MOX試験では、約50個の中空ペレットのダイ潤滑成型結果、欠け割れのないペレットの製造を確認。第3次試験では、もんじゅ仕様ペレット18000個及びFaCT仕様ペレット5000個について、欠け割れのない良好なペレットを成型。ダイ潤滑機構の安定した動作を確認。(H22年10月以降の成果)

## 7. 研究開発における「投資効果」【←コメント8への回答】

- ・R&Dと設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ・外部有識者による研究開発・評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステム

を採用。

**8. 要素技術間の仕様や条件間のすり合わせや最適化への取り組み【←コメント1 2への回答】**

(【脱硝・転換・造粒一元処理技術】の別紙2参照)

- ・今後の開発結果を反映して、原料仕様、一元処理粉末特性目標、焼結・O/M調整条件、ペレット仕様、ペレット検査方法、製造・検査設備設計の間の取合いの最適化を図る。

クリティカルポイントの抽出及び成果目標の設定方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、大きな分類を「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つを定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した (表 2)。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの (次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの) を除外し、2010 年の革新技术の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項 (クリティカルポイント) を選定した (表 3)。

○ダイ潤滑成型技術に関して選定された要素技術開発についての評価項目

- ・量産性に関するもの
- ✓ Dp-1 システム全体 歩留まり・収率
- ✓ Ds-1 システム全体 (速度) 成型速度
- ✓ Ds-2 潤滑剤供給装置 (正確度・精度) 添加剤切出し量

- (4) 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、成果目標として仮定した。

○ 成果目標

- ✓ ・簡素化ペレット法で調製した造粒粉を用い数 kgMOX/バッチ程度の試験を実施し、割れ欠けのないグリーンペレットが 90%以上の収率で得られること、及び成型速度が 7.5 個/分・パンチ以上であることによりダイ潤滑成型プロセスの工学規模における成立性見通しに関する技術根拠を提示できること。(Dp-1、Ds-1、Ds-2)

表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

評価の視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点	
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	
		臨界	
		火災爆発	
		異常放出	
		耐震	
		その他固有のハザード	
	プロセス設計 (Dp)	許認可性	
		製品回収率	
		歩留まり・収率	
		製品除染性能	
		ロバスト性	
		その他固有の性能	
機器・システム設計 (Ds)	速度、流速		
	正確度・精度		
	効率・性能		
	機械的耐久性		
	耐食性		
	耐放射線性		
	強度確保		
	安定動作性		
	その他固有の性能		
	製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)	材料の選定
		機器の製作性 (Fe)	試薬・充填剤等の消耗品の選定
	運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	機器の製作性
定期交換部品の交換性			
非定期交換部品の交換性			
供用期間中の検査への対応性			
予防保全の対応性			
定常状態の運転性			
運転性 (Op)		運転制御・監視技術の実用性	
		起動・停止操作の運転性	
		トラブルからの回復手順の成立性	
		物量(系統数、装置寸法)	
		経済性評価(機器製作費・設備費)	
		付帯設備負荷率	
経済性	建設コスト (Cc)	定期交換部品の交換頻度	
		省力性(設備の運転・補修に必要な人員)	
		エネルギー負荷率	
	操業コスト (Rc)	試薬等使用量	
		分析負荷率	
		発生量	
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	処理容易性	
		処理負荷率	
		発生量	
	機器廃棄物 (We)	処理容易性	
		処理負荷率	
		発生量	
核不拡散性	保障措置対応性	核物質防護	
		検認性	

表2 実用化に必要な技術項目抽出結果【ダイ潤滑成型技術】(抜粋)

視点	分類	性能・成績に係わる 因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成績 因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	無	—	セルの閉じ込め性能として施設設計で考慮するので対象外とする。
		臨界	無	—	先行施設における燃料製造機器と同様であるため、本システム固有のハザード源はない。
		火災・爆発	無	—	火災・爆発の防止の観点から考慮すべき技術的対策は先行施設等における燃料製造機器と同様であるため、本システム固有のハザード源は無い。
		異常放出	無	—	異常放出に対して考慮すべき技術的対策は先行施設等における燃料製造機器と同様であるため、本システム固有のハザード源は無い。
		耐震	無	—	先行施設における燃料製造機器と同様であるため、本システム固有のハザード源はない。
		発熱・遮蔽	○ 低除染MA含有燃料の発熱 に対する安全評価	システム全体	低除染・MA含有であることから従来の燃料製造に比べて、発熱の影響が大きくなっているため、それに応じた安全対策が必要となる。 また、遮へいについてはセルの遮へい性能として施設設計で考慮するので対象外とする。
		その他固有のハザード	無	—	設備固有のハザードはない。
		許認可性	○	システム全体	低除染・MA含有によるハザードの増大に対応した安全評価が必要である。
	プロセス設 計 (Dp)	製品回収率	無	—	核物質の移行は生じない。
		歩留まり・収率	○ 成型ペレットの品質	システム全体	収率はシステム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。
		製品除染性能	無	—	本システムは燃料製造システムであるため、製品の除染を行う必要は無い。
		ロバスト性	○ 潤滑剤塗布性能	潤滑剤供給装置	ダイ潤滑成型における、ダイへの添加剤の塗布は、その付着量が空気雰囲気中の湿度に影響を受ける可能性がある。
		その他固有の性能	無	—	製品回収率、歩留まり・収率、ロバスト製以外の項目に関する本設備固有の性能は特にない。
	機器・シス テム設計 (Ds)	速度	○ 成型速度	システム全体	成型速度はシステム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。
		正確度・精度	○ 添加剤切出し量	潤滑剤供給装置	ダイに塗布する添加剤を適切に供給するためには、添加剤切出し量を数 mg 単位で確保する必要がある。
		効率・性能	無	—	エネルギー交換や化学反応を伴わない工程である。
		機械的耐久性	無	—	機械的耐久性は、先行施設等における燃料製造機器と同様である。
		耐食性	無	—	耐食性は、先行施設等における燃料製造機器と同様である。
		耐放射線性	○ 電機部品、センサー類、及び 潤滑油の耐放射線性	システム全体	低除染 MA 含有燃料を製造することから、電機部品、センサー類、及び潤滑油等に耐放射線性仕様の部材を使用する必要がある。
		強度確保	無	—	強度確保は、先行施設等における燃料製造機器と同様である。
		安定作動性	無	—	安定作動性は、先行施設等における燃料製造機器と同様である。
		高発熱原料の取り扱い	○ 潤滑性能	システム全体	燃料からの発熱により、潤滑剤の潤滑性能が劣化する可能性がある。
	その他固有の性能	無	—	速度、正確度・精度、効率・性能、耐放射線性、高発熱原料の取扱い以外の項目に関する本設備固有の性能は特にない。	



表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【ダイ潤滑成型技術】(抜粋)

視点	分類	評価項目(技術要素の性能・成績)の候補		評価項目の選定※と参照番号	選定した理由/選定しなかった理由
		技術要素	性能・成績		
設計成立性	安全設計(Sf)	システム全体	(発熱・遮蔽) 低除染 MA 含有燃料の発熱に対する安全評価	—	設計で対応するので、評価項目に選定しない。
		システム全体	許認可性	—	低除染・MA 含有によるハザードの増大に対応した安全評価に対する考慮は必要ではあるが、既存のホットセルと核燃料施設に準じた許認可を行うことにより対応可能と考えた。したがって、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目に選定しない。
	プロセス設計(Dp)	システム全体	歩留まり・収率	○ Dp-1	ダイ潤滑成型設備の歩留まり・収率は、処理能力・系列数に影響する主要な性能であるため、革新技術の採否判断に影響を与えるものとして、評価項目として選定した。
		潤滑剤供給装置	(ロバスト性) 湿度による影響	—	潤滑剤供給装置から供給される潤滑剤は、金型への塗布状態がペレットへの品質に影響を及ぼす。塗布状況は、湿度による影響が考えられるが、燃料製造施設内の空調により、解決できるものであり、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
	機器・システム設計(Ds)	システム全体	(速度) 成型速度	○ Ds-1	成型速度はシステム処理能力・系列数に影響する主要な性能であるため、革新技術の採否判断に影響を与えるものとして、評価項目として選定した。
		潤滑剤供給装置	(正確度・精度) 添加剤切出し量	○ Ds2	潤滑剤供給装置から供給される潤滑剤の供給量は、ペレットの品質に影響を与えるため、革新技術の採否判断に影響を与えるものとして、評価項目として選定した。
		システム全体	(耐放射線性) 電機部品、センサー、配線及び潤滑油等の耐放射線性	—	ダイ潤滑成型設備に使用する電気部品、センサー、配線及び潤滑油等は他の原子力施設の知見を踏まえて耐放射線性仕様の部材を使用すること等の通常の設計上の配慮により対応できると考えた。したがって、革新技術自体の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目として選定しなかった。
		システム全体	(高発熱原料の取り扱い) 潤滑性能	—	ダイ潤滑成型の金型に充填されるMOX粉末は、少量であるためダイに塗布する潤滑剤の性能へは影響しないと考えた。したがって、革新技術自体の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目として選定しなかった。
製作性	材料の製作性・調達性(Fm)	—	—	—	—
	機器の製作性(Fe)	システム全体	量産規模のダイ潤滑成型設備の製作性	—	成型機の製作性に関しては、先行施設等で十分な運用実績があり、潤滑剤供給装置の製作性については、実用化戦略調査研究フェーズⅡにおいて供給部の試作を実施し、良好な結果が得られている。設備の遠隔対応は、プロセス設備全体として今後対応が必要な課題であるが、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目として選定しない。
運転・保守性	保守・補修性(Mn)	システム全体	定期交換部品の交換性	—	セル内に設置し遠隔保守が必要となる設備の保守補修技術は、「セル内遠隔技術」で扱う項目とし、本革新技術の評価項目として選定しない。
		システム全体	非定期交換部品の交換性	—	セル内に設置し遠隔保守が必要となる設備の保守補修技術は、「セル内遠隔技術」で扱う項目とし、本革新技術の評価項目として選定しない。
		システム全体	供用期間中の検査への対応性	—	セル内に設置し遠隔保守が必要となる設備の保守補修技術は、「セル内遠隔技術」で扱う項目とし、本革新技術の評価項目として選定しない。
		システム全体	(予防保全の対応性) 消耗品交換の定期的実施	—	施設の稼働率向上の観点から、非定期交換部品についても、定期部品の交換時に交換しておく等の、予防保全的な配慮に関しても検討が必要であるが、常の設計上の配慮により対応可能と考えた。したがって、革新技術自体の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目として選定しない。



1. 機構内外の工学的な知見の反映の状況【←コメント4,7への回答】

- ・本技術の開発対象は、高密度低除染 TRU 燃料ペレットの焼結及び低 O/M 比への調整。
- ・原子力機構における MOX 燃料の焼結は、1tMOX/月の連続炉及び 40kg/batch のバッチ炉で行っており、これらの運転経験から得られた知見を、焼結、O/M 調整用小規模試験設備の設計・製作に反映。
- ・「常陽」ドライバー燃料製造を通じた高密度 MOX ペレットの焼結実績、焼結条件を参考データとして反映。
- ・上記の焼結炉に関する設計、運転実績をシステム研究の設備設計、保守性、メンテナンス性の評価に反映。
- ・「常陽」における照射及び照射後試験の結果を O/M 比の設定に反映。
- ・海外のプルサーマル用焼結設備では、フランスでは加湿により、BNFL では CO<sub>2</sub> ガス添加により炉内ガス雰囲気コントロールして焼結を行う技術を採用。雰囲気コントロール概念の参考とする。
- ・低 O/M 燃料を調整する技術開発は国内外ともに未実施。

2. クライテリア（成果目標）の設定方法【←コメント3,5,6への回答】（別紙1参照）

●目標設定に係る視点

- ・原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の6つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

●クリティカルポイントの抽出

- ・2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ・抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ・2010 年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項(クリティカルポイント)を選定。

●成果目標の設定

- ・達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCT フェーズ I で達成すべき具体的な開発の目標(値)を設定。

●クリティカルポイント及び成果目標(目安)

- ・簡素化ペレット法で調製したグリーンペレットを用いて数 kgMOX/バッチ程度の試験を実施し、焼結密度が 95%以上、O/M 比が 1.97 以下の良好な外観と均質な組成を有する MOX 中空ペレットの収率を 90%以上に設定。
- ・焼結・O/M 調整設備について、量産化に適した方式選定及び量産化への見通しを提示。
  - 高密度ペレットの焼結条件評価 (実用炉燃料仕様から 93%以上と設定)
  - 低 O/M の MOX 燃料の製造技術の確立 (従来被覆管の内面酸化量から 1.97 以下と設定)
  - マイナーアクチニド元素の挙動評価
  - 製品の収率の確認 (「常陽」ドライバー燃料の製造実績収率 96%を考慮して設定)

3. 得られたデータの妥当性【←コメント1,2への回答】

●高密度ペレットの焼結条件評価

- ・焼結条件(温度、雰囲気中の水素/水分比)をパラメータとして焼結挙動評価試験を熱分析装置により実施。加湿焼結で O/M=2.00 付近で焼結することにより、安定して高密度ペレットを得られることを確認。
- ・前述の熱分析装置による焼結特性試験の結果を基に、簡素化法で得られた転動造粒を用いた中空ペレット(約 50 個、300gMOX)の焼結を実施。93-96.7%TD の焼結ペレットを得、焼結条件の妥当性を確認。

●低 O/M の MOX 燃料の製造技術の確立

- ・O/M 比調整技術の基礎データとして酸素ポテンシャル及び酸素化学拡散係数の測定を実施。熱処理時の O/M 変化を評価可能とした。
- ・前述の試験結果を基に、O/M 比をコントロールする手法を確立。O/M 比をパラメータとした照射燃料製造に採用し、O/M 比=2.00、1.98 及び 1.96 の燃料ペレットの製造を行い、手法の妥当性を確認。

●マイナーアクチニド元素の挙動

- ・焼結特性へ及ぼすマイナーアクチニドの影響は、12%Np と 5%Am までの含有率について評価。Np は

緻密化を遅くする効果を、Am は O/M 比を下げる効果を確認。蒸気圧の高い Am は熱処理中にわずかに損失する傾向。FaCT の燃料仕様の MA 含有率はトータルで 5%以下であり、燃料仕様の範囲であれば焼結・O/M 調整への影響はほとんど無いことを確認。FP は除染係数から 0.2%以下であるため、焼結・O/M 調整にはほとんど影響なしと推定。

●製品の収率

- ・対象とする試験は着手したばかりであり、データの評価は未実施。

4. 工学的な信頼性の判断【←コメント10への回答】

●故障頻度、保守時間について

- ・焼結・O/M 調整設備の基本的な構造は、従来の設備と同じであり、これまでの知見から評価可能と判断。今後、プロセス遠隔保守システム概念を具体化して、現行設備の稼働率を確保する開発を実施。

●メンテナンスポリシーについて

- ・熱処理炉の定期的な保守として、レンガなど断熱材、ヒーター、熱電対の交換などがあり、今後、遠隔・保守性を高めた設計を実施。
- ・セル内に配置される機器は、クレーンや BSM、パワーマニプレータ等による遠隔保守を前提としているが、遠隔設備の製作設計にあたっては、遠隔保守を考慮した機器の開発が必要。連続処理炉については、分割による炉体交換モジュールの実績があり、遠隔保守性向上検討を既にも実施済み。

5. 性能の振れや変動について【←コメント11への回答】

- ・製品の寸法、密度、O/M 比などのバラツキを低減するポイントとして、雰囲気、温度、昇降温速度の制御が重要であるが、熱処理雰囲気の安定性が最も重要と判断し、以下の技術を採用。
  - 雰囲気制御は、必要とする条件の範囲を安定して制御可能な水素・水分比制御による方法を採用。
  - 雰囲気のモニタリングシステムは、水素と水分の化学反応で決定される酸素分圧を安定化ジルコニア製の酸素センサーでモニターする方法を採用。センサーは炉の出口及び入口に設置し、管理。
- ・O/M 比調整手法の確立のため、O/M 比のバラツキの原因となる炉内雰囲気の空間分布について、ガス流動解析プログラムを用いた解析評価を今後実施し、量産規模の炉の設計技術開発に反映する計画。
- ・粉末特性はペレットの焼結性に大きく影響するため、安定した燃料製造技術のために、粉末特性に応じた最適な熱処理条件を評価する技術開発が必要であり、革新技術開発(燃料基礎物性研究)において、温度、雰囲気などの熱処理条件をパラメータとして、緻密化速度、O/M 変化、結晶粒成長速度、ペレット形状変化などの評価を行い、熱処理条件の最適化や、熱処理炉の設計技術の確立へ反映する。

6. △評価に対する技術的な潜在性の判断根拠【←コメント9への回答】

- ・焼結に関しては、安定して高密度 MOX ペレットが得られるプロセス技術が得られたこと、低除染 MA 含有の影響は FaCT の組成範囲であれば対応可能であること、これまでに十分な量産設備技術が蓄積されていることから、技術的成立性見通しはあると判断。
- ・O/M 調整に関しては、熱処理による O/M 調整プロセスの原理を基礎試験により確認し、照射燃料製造を通して任意の値に調整する技術として確立できているが、処理時間に規模依存性が大きく、量産規模では、プラント設計上許容できない処理時間が必要となる可能性があるため、現時点では技術的成立見通しありとの判断には至っていない。
- ・炭素添加による熱処理時間の短縮化、酸素ゲッター材等の代替技術の開発を並行して行い、O/M 仕様の最適化検討と組み合わせることにより高燃焼度燃料腐食対策の潜在的実現可能性は高いと判断し、△と評価。

7. 研究開発における「投資効果」【←コメント8への回答】

- ・R&D と設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ・外部有識者による研究開発・評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステムを採用。

**8. 要素技術間の仕様や条件間のすり合わせや最適化への取り組み【←コメント12への回答】**

（【脱硝・転換・造粒一元処理技術】の別紙2参照）

- ・今後の開発結果を反映して、原料仕様、ペレット仕様、一元処理粉末特性目標、ペレット成型条件、ペレット検査方法、製造・検査設備設計の間の取合いの最適化を図る。

クリティカルポイントの抽出及び成果目標の設定方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、大きな分類を「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つを定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した (表 2)。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの (次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの) を除外し、2010 年の革新技术の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項 (クリティカルポイント) を選定した (表 3)。

○焼結・O/M 調整技術に関して選定された要素技術開発についての評価項目

・プロセスに関するもの

- ✓ Ds-1 焼結・O/M 調整炉 (速度) O/M 調整時間
- ✓ Ds-2 焼結・O/M 調整炉 (速度) 降温速度
- ✓ Ds-3 焼結・O/M 調整炉 (効率・性能) 装荷量
- ✓ Ds-4 焼結・O/M 調整炉 (効率・性能) 炉内雰囲気
- ✓ Dp-1 システム全体 歩留まり・収率

・量産性に関するもの

- ✓ Sf-1 システム全体 (臨界) 臨界管理方法

- (4) 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、成果目標として仮定した。

○ 成果目標

- ・簡素化ペレット法で調製したグリーンペレットを用い数 kgMOX/バッチ程度の試験を実施し、焼結密度が 95% 以上、O/M 比が 1.97 以下で良好な外観と均質な組成を有する MOX 中空ペレットが 90%以上の収率で得られることにより、焼結・O/M 調整プロセスの工学規模における成立性見通しに関する技術根拠を提示できること。(Ds-1、Ds-2、Ds-3、Ds-4、Dp-1)
- ・焼結・O/M 調整設備について、量産化に適した方式選定及び量産化への見通しに関する技術的根拠を提示できること。(Sf-1、Ds-1、Ds-3)

表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

評価の視点	分類	性能・成績に係る因子抽出における観点	
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	
		臨界	
		火災爆発 異常放出 耐震 その他固有のハザード	
	プロセス設計 (Dp)	許認可性	
		製品回収率 歩留まり・収率 製品除染性能 ロバスト性 その他固有の性能	
		速度、流速 正確度・精度 効率・性能 機械的耐久性 耐食性 耐放射線性 強度確保 安定動作性 その他固有の性能	
	機器・システム設計 (Ds)	材料の選定	
		試薬・充填剤等の消耗品の選定	
	製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)	機器の製作性
機器の製作性 (Fe)			
運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	定期交換部品の交換性	
		非定期交換部品の交換性 供用期間中の検査への対応性 予防保全の対応性	
	運転性 (Op)	定常状態の運転性 運転制御・監視技術の実用性 起動・停止操作の運転性 トラブルからの回復手順の成立性	
		建設コスト (Cc)	物量(系統数、装置寸法) 経済性評価(機器製作費・設備費) 付帯設備負荷率
			操業コスト (Rc)
プロセス廃棄物 (Wp)	発生量 処理容易性 処理負荷率		
	機器廃棄物 (We)	発生量 処理容易性 処理負荷率	
核不拡散性		保障措置対応性	核物質防護 検認性

表2 実用化に必要な技術項目抽出結果【焼結・O/M調整技術】(抜粋)

視点	分類	性能・成績に係わる 因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成績 因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	無	—	セルの閉じ込め性能として施設設計で考慮するので対象外とする。
		臨界	○ 臨界管理方法	システム全体	量産性と両立する臨界管理方法を選定する必要がある。
		火災・爆発	無	—	火災・爆発の防止の観点から考慮すべき技術的対策は先行施設等における燃料製造機器と同様であるため、本システム固有のハザード源は無い。
		異常放出	無	—	異常放出に対して考慮すべき技術的対策は先行施設等における燃料製造機器と同様であるため、本システム固有のハザード源は無い。
		耐震	無	—	先行施設における燃料製造機器と同様であるため、本システム固有のハザード源はない。
		発熱・遮蔽	無	—	先行施設における燃料製造機器と同様であるため、本システム固有のハザード源はない。 また、遮へいについてはセルの遮へい性能として施設設計で考慮するので対象外とする。
		その他固有のハザード	無	—	設備固有のハザードはない。
		許認可性	○	システム全体	低除染・MA含有によるハザードの増大に対応した安全評価が必要である。
	プロセス 設計 (Dp)	製品回収率	無	—	核物質の移行は生じない。
		歩留まり・収率	○ ペレットの品質	システム全体	収率はシステム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。
		製品除染性能	無	—	本システムは燃料製造システムであるため、製品の除染を行う必要は無い。
		ロバスト性	○ 炉内雰囲気	供給ガス	O/M調整時の雰囲気中の酸素濃度は、製品のO/M比に影響を及ぼす。
		その他固有の性能	○ 揮発性元素の挙動	焼結・O/M調整炉	低除染・MA含有燃料においては、揮発性元素の挙動はオフガス処理設備に対する要求性能や保守時の被ばくに影響する。
			○ 取り出し時の温度上限	O/M調整炉	取り出し時温度は、処理時間を通して設備能力に影響する主要な性能である。
	機器・システム設計 (Ds)	速度	○ O/M調整時間	O/M調整	O/M調整時間は、システム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。
			○ 降温速度	O/M調整	降温速度は、システム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。
		正確度・精度	○ 熱処理温度	焼結・O/M調整炉	熱処理温度は、ペレット品質に影響する主要な性能である。
			○ 炉内均熱性	焼結・O/M調整炉	炉内均熱性は、ペレット品質に影響する主要な性能である。
		効率・性能	○ 装荷量	焼結・O/M調整炉	装荷量は、システム処理能力・系列数に影響する主要な性能である。
			○ 炉内雰囲気	焼結・O/M調整炉	炉内雰囲気がペレットに均一に供給されることは、ペレット品質に影響する主要な性能である。

表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【焼結・O/M調整技術】(抜粋)

視点	分類	評価項目(技術要素の性能・成績)の候補		評価項目の選定と参照番号	選定した理由/選定しなかった理由
		技術要素	性能・成績		
設計成立性	安全設計(Sf)	システム全体	(臨界) 臨界管理方法	○ Sf-1	設計で対応するものとして、技術評価項目には選定しなかった。
		システム全体	許認可性	—	低除染・MA含有によるハザードの増大に対応した安全評価に対する考慮は必要ではあるが、既存のホットセルと核燃料施設に準じた許認可を行うことにより対応可能と考えた。したがって、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
	プロセス設計(Dp)	システム全体	歩留まり・収率	○ Dp-1	焼結・O/M調整設備の歩留まり・収率は、処理能力・系列数に影響する主要な性能であるため、革新技術の採否判断に影響を与えるものとして、評価項目として選定した。
		供給ガス	(ロバスト性) 炉内雰囲気	—	炉内雰囲気中の酸素濃度は、製品のO/M比に影響するが、購入仕様において酸素濃度を規定できるため、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
		焼結・O/M調整炉	(その他固有の性能) 揮発性元素の挙動	—	ホット試験以降での確認事項であることから、評価項目に選定しなかった。
		O/M調整炉	(その他固有の性能) 取り出し時の温度上限	—	ペレット取り出し時の温度上限は再酸化防止のための重要な因子であるが、本システム固有のものではなく革新技術の選定に影響を与えないものとして、評価項目に選定しなかった。
	機器・システム設計(Ds)	焼結・O/M調整炉	(速度) O/M調整時間	○ Ds-1	O/M調整時間はシステム処理能力・系列数に影響する主要な性能であるため、革新技術の採否判断に影響を与えるものとして、評価項目として選定した。
			(速度) 降温速度	○ Ds-2	降温速度は、製品のO/M比に影響する主要な性能であるため、革新技術の採否判断に影響を与えるものとして、評価項目として選定した。
			(正確度・精度) 熱処理温度	—	熱処理温度は、ペレット品質に影響を与えるが、従来技術と同様であるため、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目として選定しなかった。
			(正確度・精度) 炉内均熱性	—	炉内均熱性は、ペレット品質に影響を与えるが、従来技術と同様であるため、革新技術の採否判断に影響を与えないものとして、評価項目として選定しなかった。





1. 機構内外の工学的な知見の反映の状況【←コメント4,7への回答】

- 本開発は、現在実用化されているグローブボックス内自動運転・直接保守設備技術をもとにして、自動運転設備をセル内に設置し、遠隔ハンドリング技術を用いて必要な設備保守を可能にするための技術開発を行う。
- 以下の機構の工学的知見を試験計画立案、試験結果の評価、採否判断に反映
  - ・Pu-3、Pu-1、PCDFのグローブボックス内自動運転設備の設計・開発・運転・保守の経験。
  - ・AGFでのセル内製造設備の設計・運転・保守の経験、遠隔ハンドリング設備の開発・運転の経験。
- 以下の機構外の開発動向を注視
  - ・仏のCOEX法等の開発動向、ATALANTEでの遠隔製造。
  - ・米国の開発動向。
  - ・韓国のDUPIC燃料遠隔製造。
  - ・ロシアのバイパック燃料遠隔製造・保守技術。
  - ・MELOX、SMP、J-MOX、MFFF等の軽水炉用MOX加工施設。

2. クライテリア（成果目標）の設定方法【←コメント3,5,6への回答】（別紙1参照）

- 目標設定に係る視点
  - ・原子力委員会が求める2050年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の6つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。
- クリティカルポイントの抽出
  - ・2050年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
  - ・抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
  - ・2010年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定。
- 成果目標の設定
  - ・達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCTフェーズIで達成すべき具体的な開発の目標（値）を設定。
- クリティカルポイント及び成果目標（目安）
  - ・遠隔保守システムの基本概念を構築し、各設備に共通する遠隔保守技術を開発。
    - モジュールの交換時間：6時間以内
    - 転倒ペレットの修復及び工程内ペレット詰まり排除時間：10分以内
  - ・個々の燃料製造設備における、共通の遠隔保守技術の適用性を評価（設備概念設計）。

3. 得られたデータの妥当性【←コメント1,2への回答】

(1)代表設備（ペレット成型設備）のモックアップ試験

- モジュール構造を採用した自動運転設備と遠隔ハンドリング技術の組合せを共通的な遠隔保守システムと位置付け、成型設備の代表的な保守作業に本システムを適用し、モックアップ試験を行い、その成立性を評価。
  - ・モックアップ試験結果
    - モジュールの交換時間：最長5時間33分
    - 転倒ペレットの修復及び工程内ペレット詰まり排除時間：約6分
- モックアップ試験対象とした保守作業の代表性
  - ・グローブボックス内成型設備の保守項目を全て摘出し、その内、運転員の細かな操作、調整を必要とするダイセット交換作業、転倒ペレットの修復等、遠隔ハンドリングでの対応が困難と思われる保守作業を試験対象に選定しており、代表性を有していると判断。
- 試験環境の模擬性
  - ・モックアップ試験においては、試験対象とした保守作業に関係する範囲の成型設備及び遠隔ハンドリング設備を実規模で試作し、運転員の操作環境も実作業を模擬するように設定しており、遠隔保守システムの成立性を判断する上では、十分な模擬性を有していると判断。

- ・実機で想定される放射線、熱、飛散粉末、経年劣化等の影響については、今後の開発の中で詳細に評価するが、グローブボックス設備の運転経験から、システムの成立性判断には影響を与えないと判断。

(2)その他設備への適用性評価

- 成型設備以外への遠隔保守システムの適用性を評価として、ペレット検査設備、分析設備のモックアップ試験及び連続焼結設備の机上検討を実施。
- これらの設備はグローブボックス設備として運転実績のあるものに遠隔保守システム概念を取り入れ、これらの運転・保守を担当している技術者自らが遠隔条件での保守性を評価しており、信頼性が高いものと判断。

4. 工学的な信頼性の判断【←コメント10への回答】

- 故障頻度、保守時間
  - ・グローブボックス内現行法設備の故障頻度、保守時間については、設備毎に運転実績に基づき評価可能。
  - ・セル内簡素化法設備ではグローブボックス内現行法設備に比べ、放射線損傷、熱影響等、故障頻度を増加させる因子と粉末飛散の減少、処理プロセス簡素化等の故障頻度を減少させる因子が考えられる。
  - ・現在は、これらの定量的な評価ができる段階ではなく、今後のプロセス技術の進展及び設備設計高度化の成果を反映して詳細化の計画。
  - ・保守時間についても、今後、遠隔保守システム概念をさらに具体化し、現行プラント並の稼働率が得られるプラント概念構築の計画。
  - ・Pu-3への設置が完了したFaCT試験設備の運転・保守実績が得られる予定。（2012年度まで実施予定）
- メンテナンスポリシー
  - ・セル内に配置される機器は、クレーンやBSM、パワーマニプレータ等による遠隔保守を前提。
  - ・機器はパワーマニプレータ等を用いてモジュールに分割できる構造とする。工程セルにおいては予備モジュールとの交換で速やかな復旧。故障モジュールの修理は除染後にGB等で実行。
  - ・特に定期交換が必要な部品については短時間で交換可能な構造とする。

5. 性能の振れや変動について【←コメント11への回答】

セル内遠隔設備の要求性能である遠隔保守技術については、方法の開発であることから該当しない。自動運転技術については、個々の設備開発に依存する。

6. △評価に対する技術的な潜在性の判断根拠【←コメント9への回答】

- 本技術は低除染TRUリサイクルには必須の技術である。
- 本技術の潜在的技術成立性
  - ・粉末取扱い設備
    - 簡素化ペレット法の適用により、遠隔保守が困難な粉末取扱い工程が大幅に削除でき、造粒、成型工程のみに限定可能。
    - 造粒方法として開発している転動造粒法は、従来法に比べ遠隔保守性が格段に向上。
    - 成型設備については、今回実施したモジュール概念のモックアップ試験により概念の適用性を確認。
  - ・ペレット検査設備
    - 線密度仕様の導入、工程管理による品質保証の適用等により、製品ペレットに対して行う検査を合理化し、現在の保守性の障害となっている複雑な設備機構の簡素化が期待できる。
    - 転倒ペレットの修復、工程内ペレット詰まり排除についての遠隔ハンドリングシステムの成立性をモックアップ試験で確認。
  - ・焼結・O/M調整設備
    - Pu-3に設置されたGB付連続焼結設備により、設備のモジュール化、グローブ作業による保守技術を確立。
    - 保守作業の内容から、グローブ作業を遠隔ハンドリングに置き換えることは可能と判断。

以上より、各設備の潜在的な技術成立性は高いと判断。

**7. 研究開発における「投資効果」**

R&D と設計間のイタレーションを行い、投資効果を設計側でチェックしつつ研究開発を推進。

**8. 要素技術間の仕様や条件間のすり合わせや最適化への取り組み【←コメント1 2への回答】**

(【脱硝・転換・造粒一元処理技術】の別紙2参照)

・今後の開発結果を反映して、原料仕様、ペレット仕様との最適化を図る。

クリティカルポイントの抽出及び成果目標の設定方法について

- 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、大きな分類を「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つを定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- 表 1 を共通的な切り口として、各革新技术課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した (表 2)。
- 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの (次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの) を除外し、2010 年の革新技术の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項 (クリティカルポイント) を選定した (表 3)。

○セル内遠隔技術に関して選定された要素技術開発についての評価項目

・設備のモジュール化に関するもの

- ✓ Ds-1 自動運転技術 (耐放射線性) 電気部品、センサー類、樹脂製品の耐放射線性
- ✓ Ds-2 遠隔保守技術 (速度、流速) モジュール交換時間
- ✓ Ds-3 遠隔保守技術 (正確度・精度) モジュール位置決め精度
- ✓ Mn-1 遠隔保守技術 (定期交換部品の交換性) 定期交換部品の交換性

・仕掛製品の対応性に関するもの

- ✓ Ds-4 遠隔保守技術 (速度、流速) 仕掛製品への対応時間
- ✓ Mn-2 遠隔保守技術 (仕掛製品への対応性) 仕掛製品の対応性

- 達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、成果目標として仮定した。

○ 成果目標

- ・ペレット成型設備を例に、モジュール構造による工程設備概念を構築。(Ds-1、Ds-2、Ds-3、Mn-1)
- ・ペレット成型設備の各モジュールを 6 時間で交換できるハンドリング設備を開発。(Ds-2)
- ・転倒ペレットの修復、工程内ペレット詰まりを排除するための小型ロボットアームを開発。(Ds-3、Ds-4、Mn-2)

表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

評価の視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における観点
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め
		臨界
		火災爆発
		異常放出
		耐震
		その他固有のハザード
	プロセス設計 (Dp)	許認可性
		製品回収率
		歩留まり・収率
		製品除染性能
		ロバスト性
		その他固有の性能
機器・システム設計 (Ds)	速度、流速	
	正確度・精度	
	効率・性能	
	機械的耐久性	
	耐食性	
	耐放射線性	
	強度確保	
	安定動作性	
	その他固有の性能	
	製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)
機器の製作性 (Fe)		試薬・充填剤等の消耗品の選定
運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	機器の製作性
		定期交換部品の交換性
		非定期交換部品の交換性
		供用期間中の検査への対応性
	運転性 (Op)	予防保全の対応性
		定常状態の運転性
		運転制御・監視技術の実用性
		起動・停止操作の運転性
経済性	建設コスト (Cc)	トラブルからの回復手順の成立性
		物量 (系統数、装置寸法)
	操業コスト (Rc)	経済性評価 (機器製作費・設備費)
		付帯設備負荷率
		定期交換部品の交換頻度
		省力性 (設備の運転・補修に必要な人員)
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	エネルギー負荷率
		発生量
	機器廃棄物 (We)	試薬等使用量
		分析負荷率
核不拡散性	保障措置対応性	発生量
		検認性

表2 実用化に必要な技術項目抽出結果【セル内遠隔技術】(抜粋)

視点	分類	性能・成績に係わる 因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成 績因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	無		現行のセル施設に比べて特殊性はない。
		臨界	○ ユニット間の干渉に配慮し た臨界設計	セル内製造技術	セル内に複数の臨界ユニットを配置するため、ユニット間干渉に配慮した臨界設計を確立する必要がある。
		火災・爆発	○ 除染試薬の選定	遠隔保守技術	モジュール除染・修理の際に有機溶剤等を使用する際は、火災・爆発に対する配慮が必要である。
		異常放出	無		燃料製造の自動運転・遠隔保守技術に固有な異常放出は想定されない。
		耐震	○ モジュールハンドリング設 備の耐震性	遠隔保守技術	遠隔ハンドリング設備によるモジュール脱着や搬送時に地震によるモジュール落下や衝突が安全性に大きな影響を及ぼさない設計とする必要がある。
		その他固有のハザード	無		自動運転・遠隔保守には該当しない。
		許認可性	○ 保守時の被ばく	遠隔保守技術	遠隔保守概念として提示しているモジュール交換・除染・モジュール修理の3ステップのうち、GBでのモジュール修理時の被ばくが従業員の被ばくの大部分を占めると考えられる。
	プロセス設計 (Dp)	製品回収率	○ 燃料粉末の飛散防止	セル内製造技術	ホールドアップの回収作業が難しくなるため、通常作業時及び保守作業時にダスト等の飛散しないプロセス・設備設計が必要
		歩留まり・収率	無		自動運転・遠隔保守には該当しない。
		製品除染性能	無		本項の「除染」に該当する操作は無い。
		ロバスト性	○ 運転制御の安定性	自動運転技術	自動運転制御によるプロセスの安定性を確認する必要がある。
		その他固有の性能	○ モジュール除染方法選定	遠隔保守技術	GBでの保守を可能とするために、様々なモジュールの汚染の様態およびレベルに対応できる適切な除染方法を選定する必要がある。
	機器・システム設計 (Ds)	速度	○ モジュール交換時間	遠隔保守技術	モジュール交換時間は工程セルの稼働率に係わる性能である。
			○ モジュール除染時間	遠隔保守技術	モジュール除染時間は除染セルおよび保守GBの占有時間および系列数に係わる性能である。
			○ モジュール補修時間	遠隔保守技術	モジュール補修時間は除染セルおよび保守GBの占有時間および系列数に係わる性能である。また、作業員の被ばくに係わる性能でもある。
			○ 仕掛製品への対応時間	遠隔保守技術	保守時において仕掛製品の排除、排出、閉じ込め等の処置が短時間に完了する必要がある。
		正確度・精度	○ 運転パラメータのコントロ ール精度	自動運転技術	運転パラメータのコントロール精度はプロセスが要求する精度を満足する必要がある。
			○ モジュール位置決め精度	遠隔保守技術	モジュール取り付け位置のばらつきは計測値の誤差の要因となり得る。
		効率・機械的耐久性・耐食 性	無		(効率)自動運転・遠隔保守には該当しない。(機械的耐久性)モジュール構造を採用することで耐久性に新たな課題を生じることはない。(耐食性)遠隔保守設備自体が腐食性環境に常時曝されることは無い。
		耐放射線性	○ 電気部品、センサー類、樹 脂製品の耐放射線性	自動運転技術	低除染MA含有燃料を製造することから、センサー類に耐放射線性仕様の部材を使用する必要がある。またパッキン等の樹脂製品の交換頻度に影響する可能性がある。
		強度確保	無		モジュール構造を採用することで強度に新たな課題を生じることはない。
安定作動性		○ 自動制御の安定性	自動運転技術	予測できない機械の動作異常や故障が設計上の施設稼働率に影響を与えうる頻度で生じないよう、高い信頼性が必要である。	
その他固有の性能	○ 保障措置に係る事項	自動運転技術	設備配置、モニタリング等		

表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【セル内遠隔技術】(抜粋)

視点	分類	評価項目(技術要素の性能・成績)の候補		評価項目の選定と参照番号	選定した理由/選定しなかった理由
		技術要素	性能・成績		
設計成立性	安全設計(Sf)	セル内製造技術	ユニット間の干渉に配慮した臨界設計	—	プラント概念設計研究の中で対応していくことから、採否判断の評価項目とはしない。
		遠隔保守技術	除染試薬の選定	—	GBでの取り扱いが不可能だとしても、保守専用セルでの修理とすることで遠隔保守システムの基本コンセプトは有効であることから、採否判断のための評価項目とはしない。
			モジュールハンドリング設備の耐震性	—	機器設計の中で適切な性能のハンドリング装置を選定していくことから、採否判断のための評価項目とはしない。
			保守時の被ばく	—	GBでの取り扱いが不可能だとしても、保守専用セルでの修理とすることで遠隔保守システムの基本コンセプトは有効であることから、採否判断のための評価項目とはしない。
	プロセス設計(Dp)	セル内製造技術	燃料粉末の飛散防止	—	通常運転時の粉末飛散防止の設備対応はFSフェーズIIで設備概念を提示している。その実効性確認にはまとまった量を処理する必要があることから、採否判断のための評価項目とはしない。保守時の仕掛製品の処置については、個々の機器設計で対応する。
		自動運転技術	運転制御の安定性	—	プロセス制御の基本的な技術は一般産業界においてほぼ確立している。燃料製造プロセスでの確認はホット工学試験以降となることから、採否判断のための評価項目とはしない。
遠隔保守技術		モジュール除染方法の選定	—	GBでの取り扱いが不可能だとしても、保守専用セルでの修理とすることで遠隔保守システムの基本コンセプトは有効であることから、採否判断のための評価項目とはしない。	
機器・システム設計(Ds)	自動運転技術	運転パラメータのコントロール精度	—	—	GB内製造の場合と同等の課題であり、採否判断のための評価項目とはしない。
		電機部品、センサー類の耐放射線性	一部○ Ds-1	基本的に機器設計の中で適切な材料を選定していくので、採否判断のための評価項目とはしない。但し、選定が設備概念に影響を与えるものについては、モジュール化設備概念設計の中に反映した。	
		自動制御の安定性	—	—	今後の機器開発において確認していく項目であり、採否判断のための評価項目とはしない。
	遠隔保守技術	モジュール交換時間	○ Ds-2	—	工程セルの停止時間を決定し施設の稼働率に影響する項目でありモジュール交換方式の成立性に係わる項目であることから、評価項目として選定した。
		モジュール除染時間	—	—	除染セルの系列数や保守要員数に影響する項目であるが、ホット工学試験等を通じてデータを取得するため、採否判断のための評価項目とはしない。
		モジュール補修時間	—	—	保守GB(またはセル)の系列数や保守要員数に影響する項目であるが、ホット工学試験を通じてデータを取得するため、採否判断のための評価項目とはしない。
		モジュール位置決め精度	○ Ds-3	—	モジュール交換方式が設備の要求性能に影響しないことが成立性自体に係わる項目であることから、評価項目に選定した。
		仕掛製品への対応時間	○ Ds-4	—	稼働率を確保する上で、いわゆるチョコ停時に仕掛製品の排除、排出処置が短時間に完了する必要がある。なお、モジュール交換時の飛散防止は、機器設計で対応する。
製作性	材料の製作性・調達性(Fm)	遠隔保守技術	除染方法の選定	—	GBでの取り扱いが不可能だとしても、保守専用セルでの修理とすることで遠隔保守システムの基本コンセプトは有効であることから、採否判断のための評価項目とはしない。
運転・保守性	保守・補修性(Mn)	遠隔保守技術	消耗品交換等定期交換部品の交換性	○ Mn-1	定期交換もモジュール交換による保守の対象とし、評価項目として選定した。



1. 機構内外の工学的な知見の反映の状況【←コメント 4, 7 への回答】

- ・原子力機構 Pu センターでの高除染 MOX 製造の原料粉末取扱工程（発熱量実績 10W/kgPu 程度）において、蓄熱による有機添加剤の分解防止のため冷却フィン付粉末取扱キャニスターを使用している。J-MOX の粉末取扱工程は不活性ガス雰囲気を採用との情報。
- ・FaCT 原料では最大発熱密度を 20W/kgHM（100W/kgPu）と想定。簡素化法ペレット法では有機添加剤を使用しないこと及び不活性雰囲気を用いることで温度制約条件が緩和できることから、原料粉末取扱工程における TRU 燃料の発熱影響対策が成立すると判断。
- ・その他の粉末、ペレット、ピン取扱い工程においても発熱源を分散し強制空冷することが除熱方法として効果的。一方、燃料集合体（特に裸のピンバンドル）ではこれが困難なので、燃料集合体組立時の除熱システムの成立性確認を革新技術開発対象と選定。
- ・FBR 再処理技術開発で実施した「もんじゅ」仕様の使用済燃料の横置き解体作業の模擬試験の結果から、ラップ管付では軸方向の空冷による冷却が可能であるが、ラップ管なしの状態ではバンドルに直交する空冷が必要との知見。

2. クライテリア（成果目標）の設定方法【←コメント 3, 5, 6 への回答】（別紙 1 参照）

●目標設定に係る視点

- ・原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つの視点を定め、開発または確認すべき技術の詳細項目をさらに分類。

●クリティカルポイントの抽出

- ・2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対して抽出。
- ・抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の知見などをもとにプラントの運転経験などを踏まえて技術的成立性への影響が小さいと判断されるものを除外。
- ・2010 年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定。

●成果目標の設定

- ・達成度評価は関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめ、FaCT フェーズ I で達成すべき具体的な開発の目標（値）を設定。

●クリティカルポイント及び成果目標（目安）

- ・集合体組立設備の除熱システムについて技術的成立性に関する根拠を提示できること。
  - ラップ管付及びラップ管なしの状態、定常冷却時及び冷却停止後 30 秒内に 300℃を超えないこと。（集合体組み立て時の不具合発生事象として、酸化による変色及びラップ管/ピンバンドルの熱膨張による相互干渉を比較評価した結果、前者の温度が低いため、300℃を取扱制限温度と設定。）
  - 計算評価ツールの整備。

3. 得られたデータの妥当性【←コメント 1, 2 への回答】

●モックアップ試験データ

- ・燃料ピン寸法、ラッピングワイヤ寸法、ピン本数について実機寸法を有した集合体発熱部の裸バンドルの模擬体（発熱部 1m、255 本ピンバンドル、20W/kgHM×0.5kgHM/ピン=10W/ピン発熱仕様）に送風機を組み合わせたモックアップ試験装置を作製し、発熱条件、送風条件をパラメータにした冷却評価試験を実施。
- ・上記の模擬体にラップ管を装着した試験装置で、発熱条件、送風条件をパラメータにした冷却評価試験を実施。
- ・上記の 2 種類の試験は実機寸法の試験であり、模擬性は十分であると判断。

●評価ツールの開発

- ・横置きラッピングワイヤ型ピンバンドルの除熱評価に特化したサブチャンネル解析コードを開発。
- ・ピンバンドル狭隙部の冷却風の流速及び温度分布の測定試験、模擬試験体燃料ピン自重によるたわみの影響を考慮した解析等による評価精度向上を図り、定常冷却状態での計算値と実測値とのずれは±5℃以内。また、非定常時でも同程度の予測精度。

4. 工学的な信頼性の判断【←コメント 10 への回答】

- ・燃料ピンバンドルの被覆管最高温度は、定常冷却状態において裸バンドル状態で制限温度の 300℃まで 200℃の余裕、ラップ管装着状態でも 100℃の余裕がある。
- ・商用電源停電時においても、温度上昇は極めて緩慢で、ラップ管付でも 5℃程度。
- ・送風機の故障により瞬時に送風量がゼロになるケースにおいても、予備機への切り替えで 1℃以内の温度上昇。

5. 性能の振れや変動について【←コメント 11 への回答】

- ・冷却風の入口部の流速を均一化するため、パンチング・ハニカム組合せ構造を採用し整流。裸のピンバンドル入り口の流速変動は、3. の評価ツールによる解析で燃料被覆管最高温度に殆ど影響を与えないことを確認。（変動 1℃以内）。

6. O評価に対する妥当性【←コメント 9 への回答】

- ・実機寸法の除熱試験により制限温度の 300℃以下に冷却できることを、定常及び非定常状態で確認。
- ・集合体内の温度分布を精度よく評価でき十分な検証データを有する評価ツールを整備。

7. 研究開発における「投資効果」【←コメント 8 への回答】

- ・R&D と設計間のイタレーションを行い、研究開発の方向性を設計側でチェックしつつ推進。
- ・外部有識者による研究開発・評価委員会を設置し、開発の意義や成果の妥当性について評価するシステムを採用。

8. 要素技術間の仕様や条件間のすり合わせや最適化への取り組み【←コメント 12 への回答】

（【脱硝・転換・造粒一元処理技術】の別紙 2 参照）

- ・今後の開発成果を反映して、集合体の構造、原料仕様及びペレット仕様、設備設計の間の取合いの最適化を図る。





クライテリア（成果目標）の設定の方法について

- (1) 原子力委員会が求める 2050 年頃の実用施設が具備すべき性能を満足する施設の概念設計を行う際に必要な技術項目について、大きな分類を「設計成立性」「製作性」「運転・保守性」「経済性」「環境負荷」「核不拡散性」の 6 つを定め、開発または確認すべき技術の詳細項目を表 1 のように分類した。
- (2) 表 1 を共通的な切り口として、各革新技術課題が 2050 年までに解決・確認が必要な技術項目の全体像を、固有の技術的特徴に対し抽出した（表 2）。
- (3) 抽出した技術項目に対し、既存の技術やデータによる評価が可能なものや一般産業界の技術などからプラント成立性への影響が小さいと判断されるもの（次フェーズ以降で着手すれば実用化に十分間に合うもの）を除外し、2010 年の革新技術の採否の判断に必須で優先的に解決・確認すべき事項（クリティカルポイント）を選定した（表 3）。

○TRU 燃料取扱い技術に関して選定されたクリティカルポイント

- ・ Dp-1 造粒装置（ロバスト性） 冷却停止時の挙動
- ・ Dp-2 造粒装置（その他固有の性能） 燃料温度

- (4) 達成度評価を関係し合う重要項目をひとまとまりとして行うため、選定されたクリティカルポイントをまとめて、成果目標として設定した。

○ クライテリア（成果目標）

- ・ 集合体組立設備の除熱システムについて技術的成立性に関する根拠を提示できること

表 1 実用化に必要な評価の技術項目の分類

評価の視点	分類	性能・成績に係わる因子抽出における詳細項目	
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	
		臨界	
		火災爆発	
		異常放出	
		耐震	
		その他固有のハザード	
	プロセス設計 (Dp)	許認可性	
		製品回収率	
		歩留まり・収率	
		製品除染性能	
		ロバスト性	
		その他固有の性能	
機器・システム設計 (Ds)	速度・流速		
	正確度・精度		
	効率・性能		
	機械的耐久性		
	耐食性		
	耐放射線性		
	強度確保		
	安定動作性		
	その他固有の性能		
	製作性	材料の製作性・調達性 (Fm)	材料の選定
		機器の製作性 (Fe)	試薬・充填剤等の消耗品の選定 機器の製作性
	運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	定期交換部品の交換性
非定期交換部品の交換性			
共用期間中の検査への対応性			
運転性 (Op)		予防保全の対応性	
		定常状態の運転性	
		運転制御・監視技術の実用性	
経済性	建設コスト (Cc)	起動・停止操作の運転性	
		トラブルからの回復手順の成立性	
		物量（系統数、装置寸法）	
	操業コスト (Rc)	経済性評価（機器製作費・設備費）	
		付帯設備負荷率	
		定期交換部品の交換頻度	
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	省力性（設備の運転・補修に必要な人員）	
		エネルギー負荷率	
		試薬等使用量	
	機器廃棄物 (We)	分析負荷率	
		発生量	
		処理容易性	
核不拡散性	計量管理 (Pa)	発生量	
		処理容易性	
		処理負荷率	
	技術的障壁 (Pt)	運転時の設備・装置内インベントリ量	
		設備・装置内インベントリの計量性	
		払出操作の迅速性	
		Pu の非単離性	
		近接困難性	
		不正利用困難性	

表 2 実用化に必要な技術項目抽出結果【TRU 取扱い技術】(抜粋)

視点	分類	性能・成績に係わる 因子抽出における観点	該当事項の有無 (有の場合、その性能・成 績因子)	対象となる技術要素	判断理由・根拠
設計成立性	安全設計 (Sf)	閉じ込め	無		本技術は閉じ込め機能に関与しない。
		臨界	○ 減速系での臨界設計	除熱技術	冷媒に水またはその他の減速材が必要となった場合、減速系での臨界設計が必要となる。
		火災・爆発	無		本技術は火災・爆発の原因となる物質を使用しない。
		異常放出	○ 冷却停止時の安全性	除熱技術	冷却機能が停止した場合に、再起動するまでの間、燃料破損や微粉化を起こすような高温に達しないように設計する必要がある。
		耐震	無		本技術は設備・施設の耐震性へ影響を与えない。
		その他固有のハザード	無		本技術は新たなハザード源をもたらすものではない。
		許認可性	○ 低除染・MA 含有によるハ ザード増大に対応した安 全評価	システム全体	低除染・MA 含有によるハザード増大に対応した安全評価が必要となる。
	プロセス設 計(Dp)	製品回収率	無		本技術は「製品回収率」の因子はないため該当しない。
		歩留まり・収率	無		本技術は「歩留まり・収率」の因子はないため該当しない。
		製品除染性能	無		本技術は「製品除染性能」の因子はないため該当しない。
		ロバスト性	○ 冷却停止時の挙動	除熱技術	冷却機能が停止し復帰するまでの間の温度上昇について確認する必要がある。
		その他固有の性能	○ 燃料温度	除熱技術	製造工程および一時保管庫において燃料の温度を制限値以下に保つ必要がある。
	機器・シス テム設計 (Ds)	速度	無		本技術は「処理速度」の因子はないため該当しない。
		正確度・精度	○ 冷却空気流量のコントロ ール	除熱技術	分岐した配管の先で必要な冷却空気風量が確保できる必要がある。
		効率	無		「効率」について冷却機(送風機)自体の開発要素はほとんどない。
		機械的耐久性	無		「機械的耐久性」の開発要素はほとんどない。
		耐食性	無		腐食環境にないため該当しない。
		耐放射線性	無		「耐放射線性」の開発要素はほとんどない。
		強度確保	無		「強度確保」の開発要素はほとんどない。
安定作動性		無		「安定動作性」の開発要素はほとんどない。	
その他固有の性能		無		本技術により新たな問題を生じることはいない。	
近接困難性		無		本技術は「近接困難性」への影響はない。	
不正利用困難性	無		不正利用によって Pu の分離に利用できる技術ではない。		

表3 2010年までの開発に必要な技術項目抽出結果【TRU 取扱い技術】(抜粋)

視点	分類	評価項目（技術要素の性能・成績）の候補		評価項目の選定と参照番号	選定した理由／選定しなかった理由
		技術要素	性能・成績		
設計成立性	安全設計 (Sf)	除熱技術	(臨界) 減速系での臨界設計	—	設計で対応するので、評価項目に選定しなかった。
		除熱技術	(異常放出) 冷却停止時の安全性	—	冷却停止時の挙動は TRU 燃料製造の成立性に影響する重要な性能であるが、プロセス設計のロバスト性 (Dp-1) で評価することから、個別の評価項目としては選定しなかった。
		システム全体	(許認可性) 低除染・MA 含有によるハザード増大に対応した安全評価	—	設計で対応するので、評価項目に選定しなかった。
	プロセス設計 (Dp)	除熱技術	(ロバスト性) 冷却停止時の挙動	○ Dp-1	冷却停止時の挙動は TRU 燃料製造の成立性に影響する重要な性能であるため、革新技術の採否判断に影響を与えるものとして、評価項目に選定した。
		除熱技術	(その他固有の性能) 燃料温度	○ Dp-2	燃料温度は TRU 燃料製造の成立性に影響する重要な性能であるため、革新技術の採否判断に影響を与えるものとして、評価項目に選定した。
機器・システム設計 (Ds)	除熱技術	(正確度・精度) 冷却空気流量のコントロール	—	設計で対応するものとして、評価項目には選定しなかった。	
製作性	材料の製作性・調達性(Fm)	(該当なし)	—	—	
	機器の製作性 (Fe)	(該当なし)	—	—	
運転・保守性	保守・補修性 (Mn)	(該当なし)	—	—	
	運転性 (Op)	(該当なし)	—	—	
経済性	建設コスト (Cc)	除熱技術	(付帯設備負荷率) 電力・ユーティリティ使用量	—	設計で対応するので、評価項目に選定しなかった。「経済性 EC-1.1」に影響する項目ではあるが、全給排気風量に対して除熱のための冷却風量は 1/10 程度であり、経済性への影響は小さいことから、評価項目としては選定しなかった。
	操業コスト (Rc)	除熱技術	(エネルギー負荷率) 電力・ユーティリティ使用量	—	設計で対応するので、評価項目に選定しなかった。「経済性 EC-1.1」に影響する項目ではあるが、全給排気風量に対して除熱のための冷却風量は 1/10 程度であり、経済性への影響は小さいことから、評価項目としては選定しない
環境負荷	プロセス廃棄物 (Wp)	除熱技術	(処理負荷率) 排熱の希釈	—	設計で対応するので、評価項目に選定しなかった。
	機器廃棄物 (We)	(該当なし)	—	—	
核不拡散性	計量管理 (Pa)	TRU 燃料の検認技術	TRU 燃料の検認性	—	長期的開発課題とし、評価項目に選定しなかった。

