

総合講演・報告 2 「放射性廃棄物の処理・処分と分離・変換技術」研究専門委員会

**分離・変換技術の廃棄物処理・処分への適用：
先進的核燃料サイクルの総合的な性能評価の試み
(3) 現行軽水炉サイクルを対象とした検討**

Application of partitioning and transmutation technology to waste management:

An attempt to assess total performance of advanced nuclear fuel cycle

(3) A trial assessment for current LWR cycle

* 中瀬正彦¹、西原健司²、長谷川聡³、山下雄生⁴、鷹尾康一郎¹、
田辺博三⁵、近藤直樹⁶、森田圭介²

¹ 東京工業大学、² 日本原子力研究開発機構、³ 日本原燃(株)、⁴ 東芝 ESS、
⁵ バックエンド部会、⁶ 三菱総合研究所

本発表では、先進的核燃料サイクルの総合的な性能評価の一部として実施している「現行の軽水炉使用済燃料の再処理」を対象とした検討の現状について述べる。

キーワード：核燃料サイクル、軽水炉使用済燃料、再処理、性能評価、PGM、Mo、資源化

1. はじめに

WG-A では、現行の核燃料サイクル（軽水炉使用済燃料再処理＋プルサーマル）で発生する HLW に対して FP 分離・MA 変換等を適用した場合の得失を明らかにするため、技術特性マトリクスの検討を開始した。シナリオの選定、シナリオの得失、特性を表現するための方法の検討、検討状況、次年度展開について報告する。

2. シナリオの選定

現行軽水炉サイクルに対する分離核変換の得失を考えるため、リファレンスとして軽水炉を用いた Pu 一回りサイクルを設定した。図 1 に WG-A で想定するシナリオを示す。左端に示したリファレンスに対して、左から二番目の再処理後に Sr、Cs、PGM(+Mo)分離を実施したシナリオ（評価対象 1: FP 分離）、MA を分離したのち一時貯蔵するシナリオ（評価対象 2: MA 分離貯蔵）、および、加速器駆動システムなどの核変換炉により分離した MA を核変換するシナリオ（評価対象 3: MA 分離変換）が考えられる。本年度は、評価対象 1: FP 分離の内、PGM、Mo を分離した場合の得失を検討することとした。PGM、Mo はガラス固化体製造時の妨害元素であり、同位体によっては長半減期であり核変換による短半減期化が望まれるもの、また資源としての有効利用が期待されるものが存在するため多数の研究が展開されてきた。こういった知見を整理することで、シナリオの得失の検討のみならず、特性マトリクスの表現の検討にも適すると思った。

まず、シナリオの得失、特性を表現するための方法の検討をおこなった。最終目標は WG-A、B、C の検討内容を総括して各核燃料サイクルシナリオにおける分離核変換の得失を“見える化”し、技術的課題や懸案事項を整理して体系的に示すことであるが、各 WG での検討対象の多様性から、各シナリオの検討結果のまとめ方も、各 WG での検討事項となる。そこで、WG-A では表 1 のように対象シナリオについてリファレンスシナリオに対する得失をシンプルに表現し、更に表 2 のように技術特性マトリクスに分離核変換導入に伴う得失などを具体的に記述し、必要に応じて参考資料（エビデンス）と紐づけることとした。表の作成に当たり、評価項目選定とその定義づけを行った。「1. 経済性」は発電単価などのコストであり、「2. 安定性」とはエネルギー供給安定性である。「3. 資源」とはウラン資源のみならず、

高付加価値な元素について回収した場合の資源工学的優位性に関するもので、「4.環境影響」とは各工程における環境負荷（液体・気体廃棄物、土地利用、水利用等）である。「5.安全性」とは工学プロセスとしての安全性、また「6.セキュリティ」とは妨害破壊行為に対する観点、「7.核不拡散性」はセーフガードの観点である。更に「8.1 技術成熟度」、「8.2 技術実現性」とは具体的に工程を実施するとした場合の工学的観点であり、また「9.柔軟性」とはその技術導入の可逆性を意味しており、廃棄体化すれば可逆性は低く、使用済核燃料のまま取りおけば柔軟性は高いといえる。

3. 技術－特性マトリクスの評価に向けての検討状況

表 1、2 には得失の検討結果を記入している。PGM 分離の導入では、リファレンス（Pu 一回リサイクル）に対して再処理までの工程は変化しないものと考えられ、得失の差がない（表 2 ではハッチングで図示）。表 1 では再処理以後の得失について、向上をプラス(+)、悪化をマイナス(-)を用いて簡易に表現している。また表 1 中の「8.1 技術成熟度」の項目においては 1＝基礎段階、2＝実証段階、3＝実用化段階、とし、「8.2 技術的实现性」については R&D 費用：1＝500 億円以下、2＝5000 億円以下、3＝5 兆円以下、R&D 期間：a＝10 年以下、b＝20 年以下、c＝50 年以下と仮定している。本技術特性マトリクスの目的は分離核変換導入の効果を見える化することであるため、一つ一つを詳細に掘り下げるよりも、広く、浅く、わかりやすく示すことを心掛けた。

また、WG-A においては WG-B、C とは異なり既存のプラントを想定することができるため、可能な限り具体的なエビデンスと紐づけることも重要と考えた。そこで、各項目を評価するうえで WG-A の各専門性を持ち合って議論を行った。主要なものを以下に箇条書きで示す。

六ヶ所再処理工場への分離工程導入について

- ・ PGM 元素は高レベル廃液の不溶解残渣にも含まれるが、一方で液相に 9 割存在すると考えられるため、まずは液相からの分離を開発対象にすることが現実的である。
- ・ 六ヶ所再処理工場に新たな工程を追加できるスペースがあるかが重要である。コンパクトな設備なら既往施設に導入可能かもしれないが、新たな建屋建設となるとハードルが高まる。また、HLLW の送液を考慮すると、PGM、Mo 分離プロセスは既往施設と近接していた方がコスト及び安全性の観点から有利であると考えられる。
- ・ 規制庁との交渉といった人的コストなどの数字に表れにくいコストも考える必要がある。

濃縮工程への影響について

- ・ HLLW の濃縮工程や貯蔵工程においては、全交流動力電源喪失時などに蒸発乾固による放射性 Ru 酸化物の飛散が懸念されている。過酷事故時の沸騰の時間余裕が伸びるようなことがあれば、放出管理目標値などの変更もあり得ると考えられる。また、ステンレス鋼の腐食を促す元素の一つとして Ru が挙げられる。これらのことが、PGM 分離導入のインセンティブとなる可能性がある。

固化工程への影響について

- ・ HLLW のガラス固化工程においては、PGM 分離により、現行のガラス溶融炉で行われる洗浄運転の頻度低減により、廃棄体本数の削減は可能と考えられる。しかし、近い将来に新型ガラス溶融炉の導入と改良されたガラス素材の導入で、現行の PGM 析出によるノズル閉塞や Mo によるイエローフェーズ形成といった懸念事項は解決される可能性がある。
- ・ 六ヶ所再処理工場で導入が予定されている新型ガラス溶融炉より先に PGM 分離が導入されることは考えにくい。従って、六ヶ所再処理工場への PGM 分離導入がガラス溶融に有益かは不明瞭である。

- ・ガラス固化体製造の観点からの Mo 分離の重要性についても、新型ガラス溶融炉とガラス素材、ガラス組成の調整具合によって下がる可能性がある。Mo 分離が必要となった場合に、イエローフェーズを防止するためにどの程度分離すればよいかという知見がない。

分離技術の技術成熟度・実現性について

- ・Pd は現状で分配比が高く抽出速度が早い抽出剤が多数報告されており、技術実現性が高い。Ru は放射線環境下では反応性の低い硝酸ニトロシルルテニウムとして存在し、抽出速度が遅いが抽出は可能と考えられる。Rh は水和水の交換半減期が大変長く、反応性が低いために抽出速度が遅い。
- ・Mo については、既往技術での分離が報告されており技術実現性が高い。
- ・分離した PGM、Mo を処分する場合、処分方法は研究例が限られており基礎研究が必要である。
- ・PGM 中の LLFP (Pd-107) 核変換については現行の六ヶ所再処理工場には間に合わないため、将来核燃料サイクルについて検討する WG-C の検討課題と考えられる。

資源化について

- ・経済性について、PGM 分離・資源化の利益の多くは高価な Rh からくる。ImPACT の検討では Pd は長半減期同位体からの分別がクリアランスの観点から必須であるため、レーザーによる同位体偶奇分離導入によるコストに対して利益が得られるか検討が必要である。
- ・ ^{107}Pd のクリアランスレベルはこれまで評価されておらず、ImPACT で様々な利用等のシナリオ評価により $10\mu\text{Sv/年}$ 相当となる最小の放射能濃度として評価された。それを達成するためには、 ^{107}Pd は三桁比放射能を下げる必要があり、レーザー偶奇分離が必要となる。偶奇分離工程には、金属(0 価)の形態で供給される必要があり、再処理プロセスの選定時にも後段処理との結節を考慮すべきである。
- ・ ^{106}Ru は比較的半減期が短く 40 年程度貯蔵すれば放射能レベルがクリアランスレベル (0.1Bq/g) 程度に到達する。使用済み燃料の冷却期間が延びることは、Ru 分離、資源化の観点からは有利に働く。
- ・ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 供給のために、再処理から Mo を供給するメリットの検証が必要である。原子炉内で生成された Mo の分離と資源化の目的は ^{98}Mo の捕獲反応や ^{100}Mo の (n,2n) 反応による ^{99}Mo 製造にあると考えられる。光核反応は収率が高くはなく、 ^{100}Mo を濃縮して (n,2n) 反応の利用が望ましい可能性がある。

以上のように幅広い議論を実施しており、今後は技術特性マトリクスにわかりやすく反映させる。検討に合わせてエビデンス資料の収集も進行中である。

3. まとめと今後の展望

分離・核変換が原子力システムに及ぼす影響、技術・シナリオ間の得失を明確化するために、WG-A では現行軽水炉再処理から発生する高レベル廃液を対象とした検討を開始した。検討に先立ち、シナリオの選定、シナリオの得失、特性を表現するための方法の検討を行い、試験検討を行った。次年度は技術特性マトリクスの詳細化、エビデンスの取りまとめ、更に FP 分離として Cs、Sr 分離と MA 分離についてもその得失を評価する。将来炉との関連が強い項目も見いだされ、WG-B や WG-C の検討結果と併せて検討をまとめる。我が国の戦略的な原子力研究開発の一助とすることを目指して分野横断的な議論を継続していく。

* Masahiko Nakase¹, Kenji Nishihara², Satoshi Hasegawa³, Yu Yamashita⁴, Koichiro Takao¹, Hiromi Tanabe⁵, Naoki Kondo⁶, Keisuke Morita²

¹Tokyo Tech, ²JAEA, ³JNFL, ⁴Toshiba ESS, ⁵NUCE-AESJ, ⁶MRI

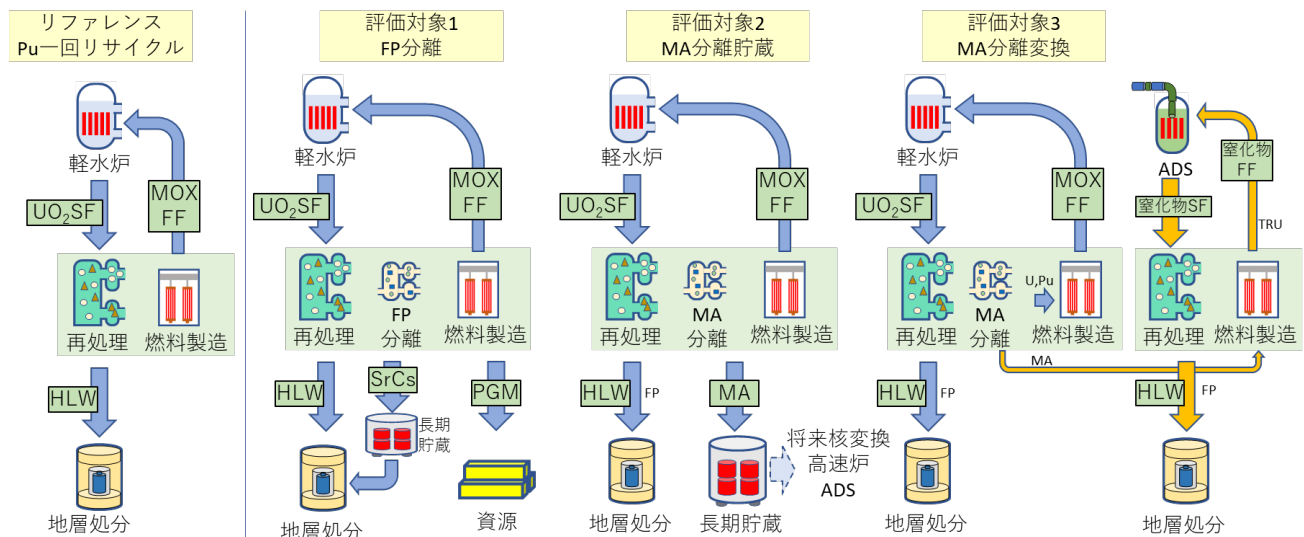


図1 WG-A（現行軽水炉サイクルを対象とした検討）で想定するシナリオ
 (MOX: Pu 混合酸化物, FF: 新燃料, SF: 使用済み燃料, FP: 核分裂生成物, MA: マイナーアクチノイド, SrCs: ストロンチウム・セシウム, PGM: 白金族元素, ADS: 加速器駆動システム, HLW: 高レベル廃棄物)

表1 現行軽水炉 HLW からの PGM/Mo 分離の得失検討の試行結果

	1. 経済性	2. 安定性	3. 資源	4. 環境影響	5. 安全性	6. セキュリティ	7. 核不拡散性	8.1 技術成熟度*1	8.2 技術実現性*2	9. 柔軟性
1～5. フロントエンド	-	-	-	-	-	-	-	-		
6.1 再処理	－大	－小	-	－小	＋大？	－小	-	1	1a	-
6.2 ガラス廃棄体化	＋小	-	-	-	＋小？	-	-	-	-	-
7.1 HLW 貯蔵	＋小	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7.2 HLW 輸送	＋小	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. 処分	？小	-	-	-	＋小？	-	-	1	1a	
9.1. PGM 資源化	？大	-	＋	－	－	-	-	精製 3, 偶奇分離 1	1a?	
9.2. Mo 資源化	？大	-	＋	－	－	-	-	1	2b?	

*1 8.1 技術成熟度；1＝基礎段階、2＝実証段階、3＝実用化段階、

*2 8.2 技術の実現性；R&D 費用：1＝500 億円以下、2＝5000 億円以下、3＝5 兆円以下、

R&D 期間：a＝10 年以下、b＝20 年以下、c＝50 年以下

表2 現行軽水炉 HLW からの PGM/Mo 分離の技術特性マトリクス

	1. 経済性	2. 安定性	3. 資源	4. 環境 影響	5. 安全性	6. セキ ュリティ	8.1 技術成熟度	8.2 技術実現 性
6.1. 再 処理	PGM/Mo 工程増加 による悪化	工程増加により、 停止の可能性が 増えるが、原子炉 の電源供給に波 及する恐れは小 さい。		PGM/M o 分離工 程 増 加 に よ り 悪化	・ PGM/Mo 分離工 程増加によるリス ク増加(HALW の面 的広がり拡大) ・ 濃縮貯蔵工程で の Ru-106 の事故時 の影響が緩和 ・ Ru 分離によるス テンレス鋼の腐食 環境緩和	PGM/M o 分離工 程追加に よる防護 対象の増 加	PGM/Mo 分離は基 礎段階。分離により 発生する廃液量な どが定量化されて いない。	・ 中～大規模 の研究開発が 必要 ・ 実現性は元 素やプロセス にも依存
6.2 廃棄 体化	・ PGM 資源化によ り廃棄体対象の FP 物量が減るため、固 化体本数が減少(～ 1 割) ・ 洗浄運転は将来 的に新型炉により 不要となる見込み。				・ ガラス熔融炉運 転性改善による安 全性向上			
7.1 HLW 貯蔵	・ 固化体本数が若 干減少							
7.2 HLW 輸送	・ 固化体本数が若 干減少							
8. 処 分 (LLW, ILW, HLW)	・ 分離プロセス廃 棄物処分により LLW, ILW 増加 ・ HLW 固化体本数 が若干減少				・ イエローフェー ズ排除などガラス 性状向上が及ぼす 影響は小さい。 ・ イエローフェー ズの課題は新型炉、 新ガラス素材によ って解決の可能性		・ プロセス廃棄物 の処分方法は未着 手	・ LLW または ILW であり大 きな開発課題 ではない。
9.1 PGM 資源化	・ 資源化処理（精 製、同位体偶奇分 離）による悪化 ・ 資源売却による 改善		国産の貴 重な資源 となり得 る。（国内 需要に対 する供給 割合、Ru 15%、Rh 7%、Pd 2%）	資 源 化 処 理（精 製、同位 体 偶 奇 分 離）に よ る 悪 化	クリアランスを下 回る必要がある。 Ru 未評価。Ru 同位 体は短寿命。Rh 未 評価、Rh 同位体は 短 寿 命 。 Pd 3300Bq/g(試算)、 99.9%の Pd107 除 去が必要。		・ 精製は一般産業 の知見が使えるた め実用化段階。Rh の分離は一般に困 難。 ・ Pd のレーザー偶 奇分離は基礎段階、 ImPACT で大きな 前進があったが、10 倍程度の効率化が 必要	・ 精製は小～ 中規模の開発 が必要。 ・ Pd のレーザ ー偶奇分離は 小～中規模の 開発がなお必 要。
9.2 Mo 資源化	・ 加速器等による Mo99 生産コスト ・ Mo99 売却		国産 Mo99 供給	Mo99 生 産 施 設 に よ る 悪化	Mo99 生産施設に よる悪化		Mo99 生産施設は 基礎段階	概念構築から、 実用化まで大 規模な R&D が 必要？