

放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術
の基盤研究事業
(使用済MOX燃料処理技術の基盤整備)
概要資料

2022年11月21日

経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部
原子力立地・核燃料サイクル産業課

(事業の目的等)

事業名	放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業 (使用済 MOX 燃料処理技術の基盤整備)		
上位施策名	エネルギー基本計画		
担当課室	資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 原子力立地・核燃料サイクル産業課		
事業の目的	<p>2020 年 1 月以降、国内の原子力発電所から約 21 トンの使用済 MOX 燃料が取り出されており、今後、プルサーマル炉 1 基当たり年間約 5 トン程度が継続的に発生する見込みとなっている。SFMOX は従来の使用済ウラン燃料と比較して Pu 含有率が高く、硝酸溶解性が低い等、SFMOX に特有の課題を有することから、これらを再処理するための技術基盤の整備は喫緊の課題となっている。</p> <p>エネルギー基本計画においては、使用済 MOX 燃料の処理の方策について、引き続き研究開発に取り組みつつ、核燃料サイクル政策を推進すること、また、核燃料サイクルの重要なプロセスとして、放射性廃棄物を適切に処理・処分し、その減容化・有害度低減のための技術開発を推進すること、特に高レベル放射性廃棄物については国が前面に立って最終処分に向けた取組を進めることとしている。</p> <p>これを踏まえ、本事業は、使用済燃料の再処理において生じる様々な種類の高レベル放射性廃棄物の最終処分等に向けた技術的課題の解決に道筋をつけることにより、核燃料サイクル政策の推進に資するものである。</p> <p>具体的には使用済 MOX 燃料は従来の使用済ウラン燃料と比較して Pu 含有率が高く、硝酸溶解性が低い等、使用済 MOX 燃料に特有の課題を有することから、本事業ではこれらの課題の解決に向けて、使用済 MOX 燃料を再処理するために必要な各種技術開発を実施し、わが国における SFMOX の再処理技術の確立に向けた基盤整備を行う。</p>		
類 型	複数課題プログラム / 研究開発課題 (プロジェクト) / 研究資金制度		
実施時期	2021 年度～2024 年度 (4 年間)	会計区分	一般会計 / エネルギー対策会計
評価時期	終了時評価：2025 年度		
実施形態	国 → 日本原燃 (株)、(国研) 日本原子力研究開発機構 (委託)		
プロジェクトリーダー	新津 好伸 日本原燃 (株) 技術管理部長 竹内 正行 (国研) 日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 核燃料サイクル設計室 室長		
執行額 (百万円)	2021 年度	総執行額	総予算額
	293	293	293

1. 本事業の政策的位置付け/背景

2020年1月以降、国内の原子力発電所から約21トンの使用済MOX燃料（以下、SFMOXという）が取り出されており、今後、プルサーマル炉1基当たり年間約5トン程度が継続的に発生する見込みとなっている。SFMOXは従来の使用済ウラン燃料（以下、SFUO₂という）と比較してPu含有率が高く、硝酸溶解性が低い等、SFMOXに特有の課題を有することから、これらを再処理するための技術基盤の整備は喫緊の課題となっている。

第6次エネルギー基本計画においても、我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としており、その上で、使用済燃料については、既に発生したものを含め、長期にわたって安全に管理しつつ、適切に処理・処分を進めることとしている。

本事業ではこの課題の解決に向けて、SFMOXを再処理するために必要な各種技術開発を実施し、わが国におけるSFMOXの再処理技術の確立に向けた基盤整備を行う。

2. 当省（国）が実施することの必要性

エネルギー基本計画において、我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としているため、核燃料サイクルの早期確立に向けて取り組む必要がある。また、全国の電力会社で発生する使用済燃料（SFMOX含む）の組成等がそれぞれの炉型等の設計や燃焼率によって変わりうるため、それらの処理・処分に必要な技術の基盤研究を一括して取り組むには国が前面に立って実施する必要がある。

3. 国内外の類似・競合する研究開発等の状況

SFMOXの再処理については、これまでに日本やフランスで少量ながら再処理を行った実績はある。我が国の東海再処理工場で実施した重水炉「ふげん」のSFMOXの再処理、フランスにおける軽水炉用SFMOXの再処理の実績は表1の通りである。

表1 国内外でのSFMOXの再処理実績

	再処理施設	処理能力	時期	再処理量 (tHM)	燃料の溶解方法	備考
日本	東海再処理工場	0.7 t/d	1986-2006	22.7	バッチ式	廃止措置中
			2007	6.5		
フランス	APM ※1		1992	2.1	バッチ式	廃止措置中
	UP2-400		1992	4.7	バッチ式	廃止措置中
			1998	4.9		
	UP2-800	1,000 t/y ※2	2004	10.6	連続式	
			2006	16.5		
			2007	31.3		
			2008	5.1		

※1 Marcoule Pilot Reprocessing Facility

※2 UP2-800とUP3を合わせた施設合計の最大処理能力は1,700 tHM/y

続いて、東海再処理工場における SFMOX 再処理の概要について示す。

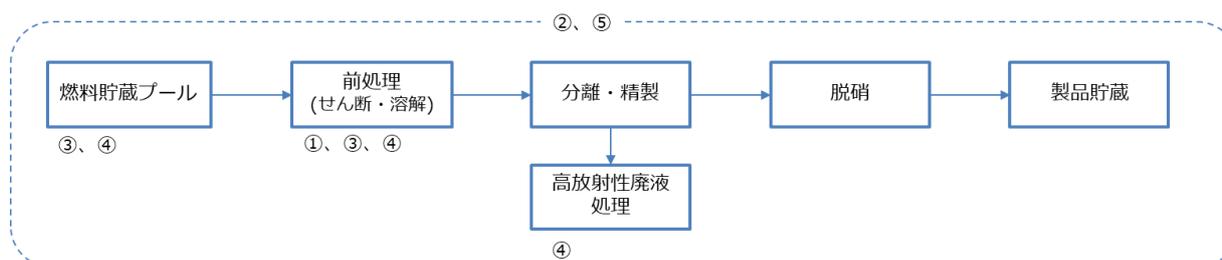
東海再処理工場においては、軽水炉用燃料と比較すると Pu 富化度および燃焼度が低いふげんの燃料を用いて 1986～2007 年の間に断続的に再処理を行った。Type A 燃料と比較して Pu 富化度、平均燃焼度の高い Type B については、Pu/U 比率を調整するために再処理の過程で回収された「回収ウラン」を混合することにより、軽水炉 UO₂ 燃料相当に調整する混合処理をして再処理を行ったのが特徴である。主な結果は表 2 に示す。また、再処理のプロセスを考慮する上で確認した項目を表 3 に示す。

表 2 東海再処理工場における使用済 MOX 燃料再処理の主な結果

	ふげんType A燃料	ふげんType B燃料	備考
期間	1986年-2006年 (断続的に実施)	2007年	
照射前Pu富化度 (wt%)	0.8	1.7	軽水炉用燃料と比較するとPu富化度は低い
平均燃焼度 (MWd/tHM)	9,300	14,600	軽水炉用燃料と比較すると燃焼度は低い
冷却期間 (y)	> 2	> 2	
再処理量 (tHM)	22.7	6.5	
混合処理	使用済TypeA燃料中のPu/U比が軽水炉UO ₂ 燃料と同等なため、混合処理は実施していない	溶解液を回収ウラン (除染ウラン) で希釈し、Pu/U比を軽水炉UO ₂ 燃料相当に調整したうえで抽出工程に供給	
結果	溶解・抽出特性はUO ₂ 燃料と同様 溶解液のろ過速度が低下する傾向	溶解・抽出特性はUO ₂ 燃料と同様 溶媒劣化の進行が観察されたが、工程運転に影響なし	

表 3 東海再処理工場で確認・変更した主な項目

	内容
① 溶解条件	ふげんのType A燃料およびType B燃料を想定した溶解試験を実施し、溶解条件を確認
② 処理量	1日あたりの処理量を従来のPu処理量以下に変更 (type B燃料の場合、0.7 tHM/dから0.43 tHM/dに変更)
③ 臨界防止	燃料貯蔵プール、濃縮ウラン溶解槽、溶解槽溶液受槽および調整槽での未臨界性を確認 使用済MOX-type B燃料については、回収ウランを用いた調整槽での希釈
④ 遮へい	線量率が遮へい設計基準を下回ることを確認 (主に中性子遮へいについて、燃料貯蔵プール、せん断機、分離工程および高放射性廃液処理工程を評価)
⑤ 環境影響	従来の軽水炉使用済UO ₂ 燃料での年間再処理量210 tHM/yの被ばく評価に使用した放出放射能を超えないことを確認



続いて、フランスの UP2-800 工場において SFMOX 再処理の概要について示す（表 4）。

東海再処理工場と比較して、Pu 富化度および燃焼度が高く、より今後発生する使用済燃料の組成に近い条件で再処理を行った実績であると考えられる。さらに UP2-800 工場では、東海再処理工場と異なり連続的に使用済燃料を溶解する方式を踏まえた「溶解速度」や、Pu 溶解性を確認する目的で異なる燃料製造方式による MOX 燃料の溶解試験を実施した実績がある。また、臨界に至らないようにする目的で、SFMOX の溶解液を回収ウランまたは SFUO₂ の溶解液で希釈した上で、下流工程（分離・精製）へ移送したことが確認されている（表 5）。

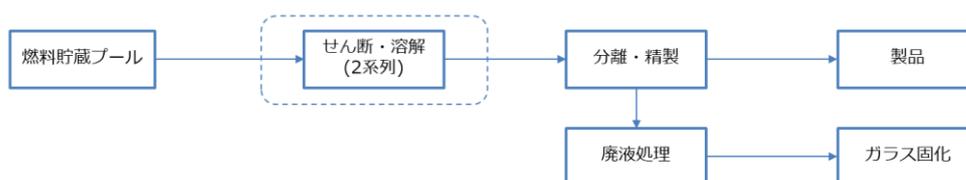
表 4 UP2-800 における軽水炉用使用済 MOX 燃料の再処理の概要

	D1	D2	D3	D4
期間	2004年11月-12月	2006年9月-11月	2007年11月-12月	2008年9月-10月
燃料製造法*	OCOM*1	OCOM	OCOM+MIMAS*2	OCOM+MIMAS
照射前Pu富化度 (wt%)	4-4.24	4-4.26	3.9-4.4	7.2
照射後Pu富化度 (wt%)	~3	~3	~3	~5
燃焼度 (MWd/tHM)	30,500-35,500	33,500-43,000	36,000-45,000	51,000-53,500
冷却期間 (y)	> 10	> 10	> 10	~6
再処理量 (tHM)	10.6	16.5	31.3	5.1
処理速度 (tHM/d)	0.97	1.6	1.75	2.3
溶解槽の酸濃度 (mol/L)	5.1	5.1	5.1	5.1
溶解槽の温度 (°C)	92	92	92	92
不溶性微粒子量 (kg/tHM)	~3.5	~4.5	~4.6	N/A
不溶性Pu/総Pu処理量 (wt%)	~0.014	~0.03	~0.02	N/A

* : OCOM (Optimized CO-Milling : 最適化共粉碎) 法
MIMAS (Micronized MASTer blend : 超微粉碎マスターブレンド) 法

表 5 UP2-800 で確認・変更した主な項目

	内容
溶解条件	<p>知見を有するバッチ式ではなく、連続溶解式を踏まえた「溶解速度」、「Pu溶解性」を確認するため、照射済MOX燃料を用いた2種類の溶解試験を実施し、溶解条件を確認</p> <p>[溶解条件]</p> <ul style="list-style-type: none"> 酸濃度 5.1 mol/L (3-3.5 mol/L) 温度 92 °C (90-92 °C) 溶解時間 約7時間 (約2時間) <p>※ 括弧書きは使用済UO₂燃料の溶解条件を示す。酸濃度・温度は、溶解槽ホイール(ステンレス鋼)の腐食防止、溶解槽底部へのMo-Zr堆積防止を考慮して設定</p> <p>[溶解液]</p> <p>U濃度~200 gU/L、Pu濃度~6 gPu/L、Pu/U ~3 wt% (1-1.5 wt%)、酸濃度5.1 mol/L (3-3.5 mol/L)</p>
臨界防止等	<p>燃料せん断片溶解時に臨界に至らないようにするために、中性子吸収材 (0.15-0.20 gGd/L) を添加 また、溶解液を回収ウラン (除染ウラン) または使用済UO₂燃料の溶解液で希釈した上で下流工程に移送</p> <p>[分離に供給した溶液]</p> <p>200 gU/L、3-4.5 gPu/L、Pu/U 1.5-2.2wt%、3-3.5 HNO₃ mol/L</p>



4. 研究開発の内容

(1) 研究開発の全体構成

研究開発項目	
①使用済燃料の処理に係るシナリオ評価及び各工程への影響評価 日本原燃（株）	(a) シナリオ評価
	(b) 各工程への影響評価
②使用済 MOX 燃料の溶解挙動評価及び不溶解残渣中のプルトニウム回収技術の開発 (国研) 日本原子力研究開発機構	(a) 未照射 MOX 燃料による溶解挙動評価
	(b) 不溶解残渣中のプルトニウム回収技術の開発

SFMOX は従来の SFUO₂ と比較して、Pu 含有量などが大きく異なることから、燃料溶解条件等が異なることが想定される。

これらの課題を踏まえて、本事業においては、使用済燃料を処理するためのシナリオ評価及び各再処理工程への影響評価と、それらの評価条件等で使用するデータを取得する使用済 MOX 燃料の溶解挙動評価および不溶解残渣中のプルトニウム回収技術の開発を実施する。前者については商業規模の再処理施設の運転実績・知見を有する日本原燃（株）、後者については核燃料物質に係る研究開発の知見を有する（国研）日本原子力研究開発機構が実施する。

(2) 各研究開発項目の内容

事業の実施に当たっては、将来にわたり実効性のある研究成果を得るために、国内の原子力発電所から発生する使用済 MOX 燃料の特性を踏まえることとする。また、研究協力機関、企業として、再処理プロセスに精通しているメーカーや大学等研究機関の協力の下で研究を行う。

① 使用済燃料の処理に係るシナリオ検討及び各工程への影響評価

(a) シナリオ評価

SFMOX を再処理施設で処理する場合、SFUO₂ と比較してプルトニウム含有量が多いことから、特に臨界に至らないようにすることに留意することが重要である。具体的には、フランスと同様、SFUO₂ の溶解液に SFMOX の溶解液を混合することで臨界に至ることがないようにしたうえで、下流工程（分離以降）へ移送するシナリオを基本とし、次の項目を検討する。

- 評価に使用する SFMOX、SFUO₂ それぞれの仕様の設定
- 混合処理に用いる SFUO₂ との混合割合の設定に関する検討・課題抽出
- プルトニウム含有量増加に伴う、再処理工程に与える影響の検討・課題抽出

その上で、「(b) 各工程への影響評価」を踏まえた再処理工程全体として最適な処理シナリオを確立することを最終目標とする。

また、本事業により整備する基盤技術を踏まえて、技術確立に向けた実証プロセスの検討を行う。

(b) 各工程への影響評価

SFMOX を再処理施設で処理する場合、SFUO₂ と比較して各工程に対してどのような差異が生じるかを定量的に評価することが重要となる。そこで、「(a) シナリオ評価」の検討結果をもとにして、

既存の再処理施設で用いた設計手法をベースに、各工程の安全設計(遮へい、崩壊熱除去、水素掃気、臨界など)への影響を評価する。

さらに、核計装設備、放射性物質の年間放出量、設計基準事故時の被ばく線量等への影響評価を実施する。

これらの影響評価の実施により、安全設計、再処理各工程・設備における課題の解決策を整理することを最終目標とする。

② 使用済 MOX 燃料の溶解挙動評価及び不溶解残渣中のプルトニウム回収技術の開発

(a) 未照射 MOX 燃料による溶解挙動評価

SFMOX は Pu 含有量が SFUO₂ よりも多いため、硝酸溶解性がより低く、不溶解性残渣への Pu の同伴に伴う回収率の低下や臨界管理への影響が懸念される。以上の点から、溶解性能を確認するため、SFMOX による溶解データが必要となる。

MOX の溶解挙動については、SFMOX と比較して未照射 MOX の硝酸溶解性が低いことが報告されており、未照射 MOX 試料を用いることで、より厳しい条件での溶解挙動評価並びに不溶解性残渣の性状評価を実施することを目的とする。

具体的には、異なる原料粉末を用いて仏国 MIMAS 法により製造した 2 種類の MOX 燃料を用いて、硝酸濃度、溶液温度、溶解時間等をパラメータとして、燃料溶解データを取得し、高 Pu 溶解率を得るための燃料溶解条件を明らかにする。

なお、溶解試験で発生した不溶解性残渣は「(b) 不溶解残渣中のプルトニウム回収技術の開発」に供する。

(b) 不溶解残渣中のプルトニウム回収技術の開発

SFMOX は SFUO₂ と比較して、硝酸溶解性が低く、不溶解性残渣への Pu 同伴量が増加する可能性が高いため、Pu 回収率の低下や臨界管理に影響を与える。これらの課題を解決するため、残渣中の Pu を溶解回収する技術を開発することを目的とする。

不溶解性残渣からの Pu の溶解回収技術については、PuO₂ は硝酸に溶解しにくいいため、技術的ハードルが高いことが課題である。仏国 GEA では Ag²⁺ の強酸化剤を利用したプロセス開発を進めているが、腐食環境が厳しい等、実用化に向けては大きな課題がある。

以上の点に加え、日本では開発実績がないことから、まずは技術調査により候補技術を絞り込み、模擬残渣を使用したコールド小規模試験により技術の適用見通しを得た上で、「(a) 未照射 MOX 燃料による溶解挙動評価」の溶解試験で得られた不溶解性残渣を利用して小規模での残渣溶解試験を実施し、残渣溶解技術の成立性を確認することを目標とする。

5. 研究開発の実施・マネジメント体制等

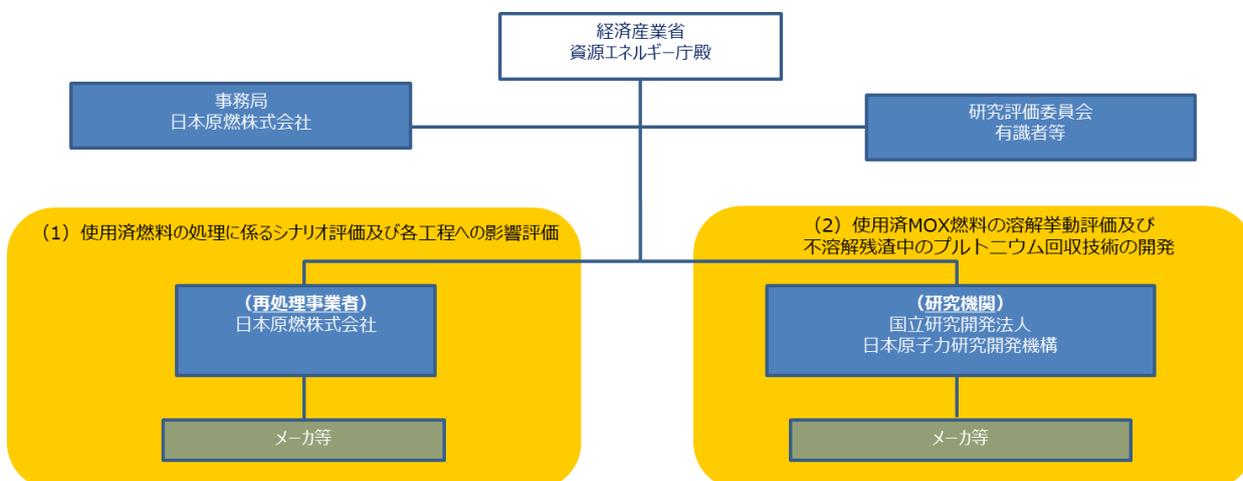
(1) 研究開発計画

	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度
(1) 使用済燃料の処理に係るシナリオ評価及び各工程への影響評価				
a. シナリオ評価	評価用燃料仕様設定	混合条件の検討		
	混合条件の検討、Puの増加による課題抽出	再処理プロセスの成立性の検討		
b. 各工程への影響評価	安全設計に関する評価方法の検討	安全設計への影響評価		
	核計装設備、ガラス固化工程における課題抽出	放出放射線量、被ばく線量への影響評価	核計装設備、ガラス固化工程への影響評価	
(2) 使用済MOX燃料の溶解挙動評価及び不溶解残渣中のプルトニウム回収技術の開発				
a. 未照射MOX燃料による溶解挙動評価	燃料製造・試溶解試験	燃料溶解試験・評価（未照射MOX）	燃料溶解条件の最適化	
		MOX燃料の多様化による影響評価		
b. 不溶解残渣中のプルトニウム回収技術の開発	基礎データ取得	残渣溶解試験（コールド、未照射MOX）		
	技術調査		ホットセル・分析装置整備	

(2) 資金配分

研究開発項目	2021FY
使用済燃料混合再処理した場合のシナリオ評価	JNFL: 25
混合再処理した場合の各工程への影響評価	JNFL: 98
残渣溶解技術開発	JAEA: 30
未照射MOX燃料による溶解挙動評価	JAEA: 140
計	JNFL: 123 JAEA: 170

(3) 研究開発の実施・マネジメント体制



本事業の実施に当たっては、着実かつ有意義な研究成果を得るため、商業規模の再処理施設の運転実績・知見を有する日本原燃（株）と核燃料物質に係る研究開発の知見を有する（国研）日本原子力研究開発機構の2者体制で研究を行うものとし、事務局を日本原燃株式会社が行う。

また、研究協力機関、企業として、再処理プロセス・技術に精通しているメーカー等の協力を得ながら実施する。

さらに、外部有識者等から構成される研究評価委員会を設置し、当該委員会等での議論を事業に反映できる実施体制を構築している。

（４）知財や研究開発データの取扱い

本開発の円滑な実施及びその成果を効率的に活用するために、必要な知的財産の取扱いについて「知的財産権及びデータの取り扱いについての合意書（知財合意書）」で定める。この知財合意書にもとづき知財運営委員会を設置し、知的財産や研究開発データの取扱いについて審議することとする。

受託者の承認を得ることなく、本開発で得られた研究開発データは第三者に開示や漏洩をしてはならないこととするが、知財運営委員会の承認が得られた研究開発データについては、広範な利活用を促進するように努める。本開発で得られた成果は、公開可能なデータであり、各事業者が有効に活用できるように、適宜、学会発表等を実施する。