

日本原子力学会
「将来世代のための再処理技術」
研究専門委員会
最終報告書

2018年12月

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会

一般社団法人 日本原子力学会



目次

第1章 緒言	1
1.1 背景および目的	1
1.2 活動内容	1
1.3 報告書の構成	2
第2章 再処理における課題 –達成できなかった研究開発項目、妨げた要因–	3
2.1 東海再処理工場	4
2.1.1 腐食トラブル	4
2.1.2 保守概念	4
2.1.3 まとめ	5
2.2 六ヶ所再処理工場	6
2.2.1 建設工事までの経緯	6
2.2.2 まとめ	6
2.3 高速炉再処理技術開発	7
2.3.1 高速炉技術開発における三つのフェーズ	7
2.3.2 高速炉サイクルの基本認識	8
2.3.3 高速炉再処理技術開発の課題	8
2.3.4 まとめ	8
2.4 技術改題	9
第3章 他分野技術および将来世代技術の動向	11
3.1 国産ロケット打上げの失敗と成功からの教訓	12
3.1.1 講演概要	12
3.1.2 質疑、討論を通じて得た教訓	13
3.2 ロボット技術の動向	15
第4章 将来世代再処理を検討する上で考慮すべき要件	17
4.1 対象燃料	18
4.1.1 燃料の特徴と再処理技術への要求事項	18
4.1.2 使用済燃料の組成	19
4.1.3 要件に関する議論の概要	19
4.2 国際的視点	20
4.2.1 国際的な相互監視体制への遵奉	20
4.2.2 核転用防止効果のある再処理技術の開発	21
4.2.3 まとめ：国際的視点から再処理に要請されること	22
4.3 回収元素、製品および廃棄物	24
4.3.1 概要	24
4.3.2 要件に関する議論の概要	25
4.4 社会的受容性と経済的見通し	27

4.5	責任の主体、受益者、実施主体、ビジネスの成立性	33
4.6	プロセス性能	34
4.6.1	はじめに	34
4.6.2	技術的要件	34
4.6.3	安全・保障措置上の要件	35
4.6.4	経済的要件	35
4.6.5	本節のまとめめ、及び主な議論の内容	36
4.7	開発速度、他分野の進捗・導入	38
4.7.1	概要	38
4.7.2	開発速度に関する考察	39
4.7.3	他分野の進捗・導入に関する検討	39
4.7.4	議論の内容	40
4.8	技術伝承	43
4.8.1	概要	43
4.8.2	技術継承に関する考察	43
4.8.3	委員会における議論	45
4.9	安全性	46
4.9.1	再処理工場の特徴	46
4.9.2	再処理の分離概念に関する安全性	46
4.9.3	議論の内容	47
第5章	将来世代再処理の具体像	48
5.1	環境負荷低減・持続的な技術向上の観点から提案する将来像	48
5.1.1	環境負荷低減	48
5.1.2	持続的な技術の向上	48
5.2	経済性・安全性の観点から提案する将来像	48
5.2.1	経済性	48
5.2.2	安全性	49
5.3	移行期の多様なニーズへの対応性の観点から提案する将来像	49
5.3.1	様々な原子炉への対応	49
5.3.2	ニーズの変化への対応	49
5.3.3	社会的受容性向上への対応	50
5.4	廃棄物低減の観点から提案する将来像	50
5.5	まとめ	51
5章	添付資料 日本原子力学会 2017 年春の年会企画セッション資料集	52
①	環境負荷低減・持続的な技術向上の観点から	53
②	経済性・安全性の観点から	57
③	移行期の多様なニーズへの対応性の観点から	61
③	廃棄物低減の観点から	64
第6章	総括	67
	謝辞	68

添付資料-1 「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会委員名簿	69
添付資料-2 「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会開催記録	70
執筆者リスト	74

第1章 緒言

将来世代のために再処理技術はどうあるべきか、これまで培ってきた再処理技術をどのように将来世代へ伝えていくかを議論するために、2013年6月「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会を設立した。2017年3月に活動を終えるまで15回の委員会を開催し、調査・研究・議論を重ねた。本報告書は、その成果をまとめたものである。

1.1 背景および目的

六ヶ所再処理工場が着工から運転開始までに20年以上を要するなど、実用化までのリードタイムが長くなる中、基盤的な再処理技術研究開発を継続するための体制と人材を維持することは容易でなく、安定操業のためのニーズと基礎研究との間の密接な技術的連携、蓄積された知識・経験の継承など、再処理技術開発を支えるために欠くことのできない活動もますます困難になると予測される。特に企業においては、技術および知識の伝承が緊急の課題として挙げられている。また、高速増殖炉を含めた燃料サイクル技術の確立も非常に見通しが悪く、将来世代を担う技術者にとって再処理技術の研究開発は魅力に乏しいものとなることが懸念される。

一方で、福島第一原子力発電所の事故で発生した破損燃料の安定化処置という従来想定されたことのない事業には多大な技術的困難が予想されるが、これまで培った再処理関連技術が非常に役立つことは言うまでもない。さらに、破損燃料の取り出しから処理・処分に至るまで、高線量下での複雑な作業が必要となることは必至で、遠隔操作技術の開発も急務となっている。

さらに、再処理技術の研究開発は、他分野と比較して実用化に至るまで長期間を要する。その間に起こる技術革新を再処理技術に適切に反映させることが重要である。また、長期間にわたる技術開発においては、少なからず社会情勢の変化に影響を受けることが考えられる。

以上を踏まえて、本研究専門委員会では、これまでの再処理技術開発の歴史を振り返り、将来世代に伝えたい知識および技術を整理するとともに、将来世代再処理の具体像を提示することを目的とした。なお、将来世代として今後100年程度先までを想定することにした。

1.2 活動内容

上記目的を実現するために、以下の活動を行った。

- (1) 再処理技術のなかで、これまで達成できなかった技術課題の抽出と解決方策に関する調査・研究
- (2) 将来世代において必要とされる再処理関連技術に関する調査・研究
- (3) 合理的な再処理プロセスの将来像と技術課題に関する調査・研究

(1)においては、一線を退いた研究者および技術者を講師とし、達成できなかった研究開発項目および、それを妨げた要因等を中心とした内容の講演を依頼した。(2)においては、他分野技術の動向を調査するため、ロケットおよびロボット技術を取り上げ、専門家に講演を依頼した。同時に将来世代技術として加速器駆動システム(ADS: Accelerator Driven System)に必要な再処理技術を取り上げ、現在の状況と将来の見通しについて調査した。(3)においては、一旦、既存の再処理の枠組みや常識から離れ、将来、必要とされる再処理への要求事項をもとに、ゼロベースから合理的な再処理プロセスのあり方を議論した。それを元に、理想的な再処理プロ

セスを提案し、その実現に向けて必要な技術開発項目を検討した。

1.3 報告書の構成

本報告書は6章で構成される。1章において、本研究委員会の設立の目的や活動内容の枠組みを紹介する。2章では、これまで行われた再処理技術の開発および研究について、達成できなかった研究開発項目ならびにそれを妨げた要因を中心に再処理における課題をまとめる。3章では、他分野技術および将来世代技術の動向を紹介する。4章では、将来世代再処理の具体像を検討する上で考慮すべき要件についてまとめる。5章において、4章で議論した要件をもとに将来世代再処理の具体像を提示する。最後の6章において本研究専門委員会の活動を総括する。なお、付録として開催した委員会の開催記録等を掲載する。

第2章 再処理における課題－達成できなかった研究開発項目、妨げた要因－

再処理技術の中で、これまで達成できなかった技術課題の摘出と解決方策に関する調査・研究を行った。まず、東海再処理工場、六ヶ所再処理工場、および高速炉再処理技術開発を取り上げ、一線を退いた研究者および技術者を講師とし、達成できなかった研究開発項目および、それを妨げた要因等を中心とした内容の講演を依頼した。講演の内容については、2.1～2.3にまとめた。2.4において、依頼した講演内容や質疑等を参考に、技術課題の摘出と解決方策をまとめた。

2.1 東海再処理工場

再処理分野での課題として、第1回委員会では山村修氏により「東海再処理工場における機器故障に対する設計上の配慮他」と題して、主に再処理施設等の保守設計に係る課題をテーマに講演いただいた。

2.1.1 腐食トラブル

東海再処理工場（以下、TRP）は1977年にホット運転を開始して以降、操業停止を余儀なくされる深刻なトラブルを経験してきた。その主な原因が装置材料の腐食である。PUREX プロセスは硝酸を塩析剤として使用し、燃料溶解や廃液処理等に多くの伝熱機器を使用するため、高温、強酸化環境に基づく過酷な腐食環境が形成される。実際に、TRPでも溶解槽、酸回収蒸発缶、高レベル放射性廃液蒸発缶などの伝熱機器について、放射性溶液の漏えいにつながる腐食損傷事象が発生しており、補修や交換等の対応のため、多大な尽力が払われた（図2.1.1及び図2.1.2）。

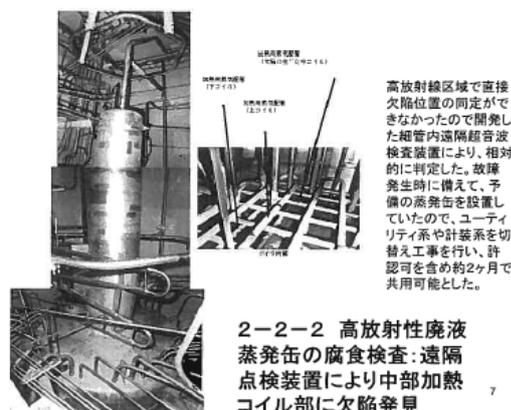


図 2.1-1 高放射性廃液蒸発缶の腐食検査

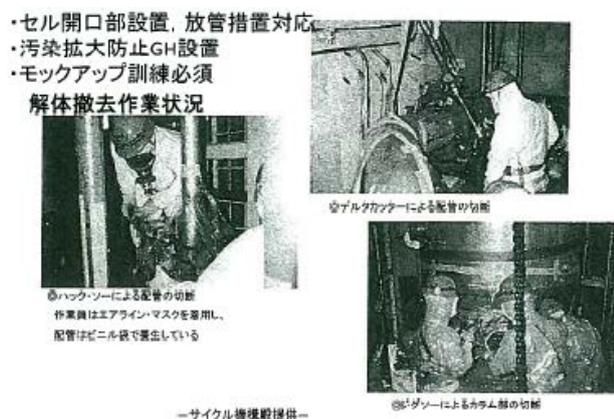


図 2.1-2 酸回収蒸発缶の解体作業

これらの腐食損傷事象に対して修復を図る度に、長期間の過酷な保守作業が強いられており、その中で技術の高度化が図られてきた。高放射線環境下での遠隔補修や近接補修の技術も実際のトラブル対応の中で向上した。このように、再処理機器の保守技術は再処理工場の運転計画や稼働率を大きく支配する重要な因子である。

2.1.2 保守概念

以上の経験が伝える主な点は、適切な腐食挙動評価と装置材料設計への反映、そして保守技術の重要性と考えられる。特に保守技術については、実績を有する再処理技術であっても、不測のトラブルは起こりうるものであり、その想定の下で保守概念を構築することが重要である。

この保守概念に関連して、本講義では米国の保守方式の変遷の紹介、並びに保守概念の構築に起因した失敗事例として、MFRP（Midwest Fuel Recovery Plant）再処理工場の運開停止について紹介いただいた（図2.1.3）。本工場は大型セルを採用し、機器異常が発生した場合、高放射性機器は遠隔交換を行う保守思想となっているが、一部の機器に遠隔保守対応が難しい工程

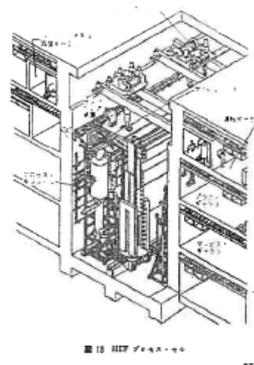
が存在することが運開停止の主な理由とされている。

以上の背景をふまえ、米国ではインセルクレーンやマニピュレータなどの汎用の保守機器を用いた「全遠隔保守方式」の概念検討が実施された（図 2.1.4）。全遠隔保守方式は、日本においても東海再処理工場のリサイクル機器試験施設（RETF:Recycle Equipment Test Facility）やガラス固化技術開発施設（TVF:Tokai Vitrification Facility）に採用され、その設計建設や運転実績を経て、六ヶ所再処理工場のガラス固化K施設にも本保守方式が採用されている。

MFRPの保守の基本方針はハンフォードのキャニオン型セル（長く深い大型セル）を採用し、高放射性機器は全てキャニオン内に納められ、天井クレーンを使って遠隔交換を行う設計としている。

1974年GEは以下の理由によりMFRPの運転開始を取り止めた。

1. 硝酸ウラン処理系は、精製系が無くその放射線レベルが高いため、遠隔操作及び遠隔保守が必要である。
2. ウラン転換精製系に核分裂生成物が蓄積されるので遠隔操作及び遠隔保守が必要である。
3. 2年間のコールド試験によって硝酸ウラン仮焼器、固体移送システム及びフッ化器等キャニオン内主要機器は遠隔操作及び遠隔保守が出来ない事が明らかになった。
4. 各単位操作及びサブシステム相互間の緩衝貯蔵容量が不十分であるため、一部の機器の故障によりプラント全体が停止し、稼働率が極めて悪くなる事が分かった。



将来の再処理の保守方式の典型でORNL遠隔監視概念（REMOTEX）として0.5tHM/日FBR再処理施設を対象に設計されたもの。プロセス機器のモジュール化に特徴があり、遠隔操作により補修、または取替え必要な全プロセス機器、ベッセル、タンク、配管、流量計等も遠隔交換可能とした。モジュール化を実施するには、標準化したラックを用意し、これにプロセス機器を組込む。HEFには100基のラックを組込むとされる。JAEAのRETF施設、JNFLのガラス固化K施設もこの方式を採用している。

図 2.1-3 GE 社 MFRP 再処理工場の失敗の教訓 図 2.1-4 米国で検討された全遠隔保守方式の概念

このように、再処理施設の保守は安定運転を支える重要基盤であり、さらに安全性の強化が必須となる将来世代の再処理施設の構築にあたって、施設設計の根幹を形成する技術と位置づけるべきである。

2.1.3 まとめ

本講演後の質疑において、設備が設計通りに機能しなかった理由、機器故障の部位的傾向、高経年化への対応、保守の在り方、仏国のプラントの関係等について積極的な議論が行われ、東海再処理工場での保守対応による課題や解決すべき方向性等について認識の共有を図ることができた。

以上に示すように、仏国の設計によって構築された東海再処理工場においても、腐食事象を中心に予期しないトラブルが発生しており、仏国側の長年の運転経験をもってしても、長期の安定運転を達成することが難しいことが理解されるとともに、それを妨げた要因についても理解が深まった。

2.2 六ヶ所再処理工場

第2回委員会にて、(株)青森原燃テクノロジーセンターの大塔容弘氏より、「六ヶ所再処理工場の建設までの道のり」というテーマで講演いただいた。講演は「プルトニウムの発見」、「マンハッタン計画」、「Atoms for Peace 講演そしてジュネーブ会議」、「日本における原子力開発黎明期」、「民間再処理工場建設の動き」、「立地及び設計仕様の決定」、「再処理事業指定」、「再処理工場の建設工事」の8章で構成され、六ヶ所再処理工場の建設工事までの経緯について説明いただいた。以下に詳細を示す。

2.2.1 建設工事までの経緯

「プルトニウムの発見」では、キュリー夫妻の実験に始まり様々な研究者による研究の経緯を年表で整理し原子力の基礎知識を説明いただいた。「マンハッタン計画」では、プルトニウムの生産と分離、再処理の開発までを説明いただいた。「Atoms for Peace 講演そしてジュネーブ会議」では、米国の改正原子力法に始まり、国内初の原子力8法および中曽根議員の原子力基本法提案理由の演説の概要を説明頂いた。「日本における原子力開発黎明期」では、原研での試験に始まり、動燃東海再処理工場の建設・試運転、日米交渉共同声明等について説明頂いた。「民間再処理工場建設の動き」では、原子力委員会の原子力長計、電気事業連合会の準備会等に始まり、通産省、科技庁、事業者の再処理工場調査の項目について説明頂いた。「立地及び設計仕様の決定」では、六ヶ所村の施設受入れまでの経緯等について、説明頂いた。

「再処理事業指定」では、基本設計の設計区分や担当会社、仏国 SGN 社との技術移転契約等について説明頂いた。「再処理工場の建設工事」では、設計及び工事の方法の認可申請・認可に始まり、工事開始までを説明頂いた。

2.2.2 まとめ

六ヶ所再処理工場の経緯に留まらず、プルトニウムの発見から始まる原子力の基本的なところから説明いただき、過去の経緯を知る貴重な機会となった。また委員からの様々な質問にも丁寧に回答いただき、六ヶ所再処理工場に関する知識を深めることができた。なお、六ヶ所再処理工場の竣工が遅れているが、この原因については現在進行中のプロジェクトであることから具体的な記述は割愛する。

2.3 高速炉再処理技術開発

第7回委員会において河田東海夫氏に「高速炉再処理技術開発の展開」と題して、原子力創始期から福島第一原子力発電所事故以降までの高速炉サイクル技術に関する歴史、高速炉サイクルの必要性・政策的／技術的課題・長期的使命について講演いただいた。ここでは、高速炉再処理技術開発に焦点をあて講演内容を要約し解説する。

2.3.1 高速炉技術開発における三つのフェーズ

河田氏は、我が国の高速炉技術開発を三つのフェーズに分類した。基礎研究からホット工学実証への飛躍を目指した“大飛躍挑戦時代”、サイクル機構の発足から福島第一原発事故までの“FS/FaCT時代”、福島第一原発事故以降の“「大きな物語」喪失の時代”の三つである。「大きな物語」とは、化石燃料枯渇後は増殖炉を中心とした原子力が担うとした長期の電力生産シナリオのことである。

大飛躍挑戦時代には、ピュレックス法をベースとしながらも高速炉燃料に対応すべく再処理機器および遠隔操作機器の高性能化を目指した研究が行われた。同時に、経済性の向上、核拡散抵抗性の強化、および廃棄物負担低減も挑戦目標としていた。高性能再処理機器としては、溶解工程においてロータリーキルン式連続溶解槽、抽出工程において遠心抽出機をそれぞれ採用し研究開発を進めた。遠隔技術としてはサーボマニピレータの研究開発を行っている。抽出工程をワンサイクル・共抽出プロセスとすることで、経済性向上と核拡散抵抗性の強化を図った。また、廃棄物負担低減を目的としてソルトフリープロセスを採用し研究開発を進めた。

大飛躍挑戦時代の研究開発は、高レベル放射性物質研究施設 CPF (Chemical Processing Facility) (1979年～) および工学機器開発のためのコールド試験施設 EDF (Engineering Demonstration Facility) (1982年～) で主に行われた。CPF や EDF で実施された研究開発を統合し、機器・プロセスのホット工学実証を行うために、リサイクル機器試験施設 RETF (Recycle Equipment Test Facility) の建設を計画し1995年1月に着工、2000年代初めの運用開始を目指していたが1997年3月の東海再処理工場のアスファルト事故により建設が中断した。RETFの建屋は完成していたので新たな利用方策も検討されてきたが、2014年に東海再処理工場の廃止が決まり再処理関連施設としての利用の道は大きく遠のいた。

FS/FaCT時代とは、1999年～2005年に実施されたFBRサイクル実用化戦略調査研究 (FS Phase-1, 2)、2006年より実施されたFBRサイクル実用化研究開発 (FaCT) の時期を指す。FaCTは、Phase-1として2006年～2010年、Phase-2として2011年～2015年までそれぞれ実施される予定であったが、2011年3月の福島第一原発事故以降、実質的に中断している。Phase-1では、燃料集合体の解体・せん断技術、高効率溶解技術、廃棄物低減化技術、U-Pu-Npを一括回収する高効率抽出システム、抽出クロマト法によるMA回収技術、晶析技術による高効率ウラン回収技術、それぞれの研究開発が実施され、これら革新技術の採否判断まで行われた。

「大きな物語」喪失時代は、FactのPhase-2に入りかけた2011年3月の福島第一原発事故から始まる。事故以来、脱原発ムードが高まり、高速炉の役割は、放射性廃棄物の減容化・有害度低減へとシフトした。一方、FBRサイクル技術の要である「もんじゅ」は、度重なるエラーと長期間の運転停止によって、その研究開発組織が疲弊した。高速炉再処理技術開発にとっては非常に厳しい時代となっている。

2.3.2 高速炉サイクルの基本認識

講演では、河田氏のFBRサイクルに関する基本認識についても紹介があった。以下に示す：

- ① FBRサイクルは、軽水炉が負の遺産として残すPuやMA、膨大な量の濃縮テイル（劣化ウラン）を時間をかけて消費することで、新たな天然ウラン資源の入手を必要とせず、半永久的に発電を行えるシステムである。
- ② MAを回収し燃焼させることで、単位発電量あたりの高レベル放射性廃棄物処分場の必要面積を半減できるシステムである。
- ③ Pu/Uは共抽出とするが、ブランケットでは兵器級Puが生まれるので「炉心・ブランケット混合溶解」によるPuの品位引き下げを義務化する必要がある。
- ④ ソルトフリー化とプロセス廃液を極力高レベル廃液側に集約することにより二次廃棄物を縮減できるシステムである。

2.3.3 高速炉再処理技術開発の課題

講演ではさらに、「これからのFBRサイクル技術開発に望むこと」と題し、高速炉再処理技術開発における課題ならびに達成していないことを列挙頂いた。まず、政策的課題としては以下の3つを挙げた：

- ① 産官学で「大きな物語」を語り継ぐ場の再構築
- ② 「大きな物語」を国の政策レベルに持ち上げるための不断の努力
- ③ 技術の継承、人材の確保

また、技術的課題としては以下の6つを挙げた：

- ④ 廃棄物発熱低減のためのMAの90%回収（→処分場必要面積半減に寄与）
- ⑤ ソルトフリー化とプロセス廃液を極力高レベル廃液側に集約することによる2次廃棄物の縮減
- ⑥ 開発された新型プロセス機器のノウハウの継承
- ⑦ 燃料製造技術と連携
- ⑧ トータルシステムアプローチ
- ⑨ 東海再処理工場を失った後の新たな開発戦略の構想づくり

2.3.4 まとめ

本講演後には質疑が行われ、活発な議論を通して講演内容の理解を深めた。高速炉再処理技術開発で成し得なかったことは、RETFでのR&DとFaCTの継続である。妨げた要因は、アスファルト施設の事故と福島第一原子力発電所の事故で、いずれも外的な要因であった。さらに、後者の事故により、化石燃料枯渇後の電力生産を増殖炉で担うとした「大きな物語」まで喪失しかけている。高速炉再処理技術開発にとって非常に厳しい現状であるが、河田氏からは具体的な課題も提案され、本講演は将来世代の再処理を検討する上で有意義な機会となった。

2.4 技術課題

東海再処理工場で起きたトラブルの主な原因はプロセス機器の腐食であった。そのため、高温・強酸性条件下でも腐食に強い材料及びそれを採用したプロセス機器の開発が行われ、長期間に渡る過酷な保守作業を通して、それらのトラブルは克服された。これらの保守作業は高放射線環境下で行われ、保守期間の短縮とそれによる稼働率の向上、並びに作業員の被ばく低減が課題であった。このトラブル対応の過程で高放射線環境下での遠隔保守による保守技術は向上し、その経験が六ヶ所再処理工場の保守技術に生かされている。遠隔保守には二つの方式がある：

① 全遠隔保守方式

クレーンやマニピュレータなどの汎用の遠隔保守機器を使用し、保守機器に対応した設計ルールを全てのプロセス機器に適用する方式。RETF の設計建設、TVF での運転実績を経て、六ヶ所再処理工場のガラス固化工程に適用された。

② 個別遠隔保守方式

個別のプロセス機器に応じた専用の遠隔保守機器を設置する方式。六ヶ所再処理工場の主体工程に適用された。

これら二つの保守方式には、それぞれ特徴、得失がある。前者が遠隔保守機器の共用によりコスト削減につながる一方、多くのプロセス機器が共通の遠隔保守機器を用いるため保守期間が長期化する傾向がある。また、後者は個々のプロセス機器に専用の遠隔保守機器を備える分、保守期間は短縮できるが、費用が増大する。したがって、保守頻度に応じて両者の適切な使い分けが有効である。プロセス機器の設置環境や保守頻度に応じた適切な遠隔保守方式の選定、保守システムの概念構築および施設設計への反映は今後の課題である。

高経年化への対応においても保守履歴管理や機器故障率把握が重要であり、六ヶ所再処理工場の運転を通してそれらデータを蓄積し、将来世代の新しい再処理プラントの設計に反映すべきである。

六ヶ所再処理工場竣工の遅れは、ガラス固化工程のトラブルおよび新規制基準への対応に起因する様々な追加試験や手続きによるものであろう。ガラス固化については、トラブル後に実施された多くの試験や解析によって原因究明が進み、2013年5月にホット試験を完了した。この間に非常に多くの知見が蓄積された。また、ガラス固化以外でも、六ヶ所再処理工場の建設からアクティブ試験に至るまで、多くの知見が蓄積されてきた。竣工後も、定常的な運転によって多くの知見が蓄積されていくと考えられる。これら蓄積された知見は、将来世代の新しい再処理プラントの設計に適切に活用することが重要であり、今後の大きな課題であるといえる。

高速炉再処理技術開発においては、PUREX法を基本とした湿式法で燃料の再処理が可能であることをCPFにおける実験で基本的には実証されている。また、FBRサイクル実用化戦略調査研究においてプロセスの実用化研究を行い、要素技術の開発まで進んでいる。しかしながら実燃料を用いた再処理工程全体の実証試験については今後の課題となっており、さらなる研究開発が必要である。湿式法を採用した場合について、特に開発が必要と考えられる項目について列挙する：

① 高Pu含有抽出フローシートの実証

Pu富化度の変化（ブランケット1%～炉心30%）への対応

- ② 溶解清澄工程での不溶解残渣対応
高速炉照射特性および高燃焼度化による不溶解残渣量の増大に対する対応性検証
- ③ ソルトフリープロセスの実証
溶媒再生工程における Na 使用の低減による廃液の低減
- ④ 高 Fissile 対応連続溶解槽の実証
小型向流接触多段式溶解槽の開発
- ⑤ 遠心抽出器の第 1 サイクルへの適用
溶媒劣化量の低減を目的に遠心抽出器を第 1 サイクルにも導入。不溶解残渣への対応
- ⑥ 高 Fissile 溶液への対応
臨界安全確保と処理量確保の両立並びに核拡散抵抗性の向上
- ⑦ 計量管理上の要求への対応
Pu 取扱量と濃度の増大、不溶解残渣量の増大に対応する分析・計量性能の向上

第3章 他分野技術及び将来世代技術の動向

再処理をはじめ原子力に関連する技術開発は、他の分野と比較して長期間にわたる。特に将来世代を見据えた技術開発を検討する場合、技術の進歩が目覚ましい他分野の技術開発の成果を導入することが必要であると考えられる。そこで、将来世代において再処理に必要とされる技術を選び、専門家に講演を依頼し、その動向について調査を行った。3-1では、ロケットの打上げ技術について取上げた。ロケット打上げは、原子力の技術開発と同様、国策で行われる大規模なプロジェクトであり、失敗の許されない技術である。技術のみならずプロジェクト遂行のノウハウが将来世代の再処理技術開発に有効であると考えられる。3-2では、ロボット技術を取り上げた。再処理技術において遠隔操作は不可欠であり、ロボット技術の発展が再処理技術開発の大きな鍵を握る可能性が高いと考えられる。なお、委員会では、加速器駆動システム（ADS : Accelerator Driven System）に必要な再処理技術も将来技術として取り上げた。これはUおよびPuの回収を目的としない再処理であり、将来世代の再処理を考える上で参考になる話題であるが、ここでの紹介は割愛した。

本報告書では、講演の内容についての概要を示すに留めたが、再処理技術に影響を及ぼす他の分野の技術開発動向については、継続的な調査が不可欠であると考えられる。

3.1 国産ロケット打上げの失敗と成功からの教訓

H-II A、B など国産ロケットは、国策（宇宙開発事業団：NASDA）によって開発が進められ、2003年度のJAXAへの改組を経て、現在、打上げ技術は民間に移転されている。しかし、その一時期（1998～2003年度）において、打上げ失敗が頻発した。改組されたJAXAは事故対策に取り組み、信頼性を向上させ、2003年度のH-II A ロケット6号機の事故を最後に2017年8月15日の現在に至るまで34回連続して打上げに成功している。第3回委員会では、有人宇宙システム株式会社の前村孝志氏により、「失敗学から成功学への転換 ―国産ロケット打上げの失敗と成功からの教訓―」と題して、打上げ失敗の原因究明と対策を経て連続成功に結びつけた経験に基づき、複雑なシステムで、かつ、失敗の許されない技術開発を成功させるための取り組みと責任者としての心構えについてご講演いただいた。

3.1.1 講演概要

講演は「ロケット概論」、「打ち上げが失敗した原因と対策、教訓」、「失敗しない方法から成功を続けるための方法への転換」、「打ち上げ執行責任者の心構え」の内容構成で行われた。

(1) ロケット概論

本項では、ロケットの歴史、仕組みと特徴、役割、開発・打上げ体制、失敗時の金銭的、社会的影響等について説明があり、以下がまとめであった。

- ・日本の基幹ロケットは世界の主要ロケット相手に商業的な競争を行っている
- ・1基100億円の金と1年半の製作期間を費やしたロケットの成否がわずか30分の打上げで判断される
- ・ロケットの成功あるいは失敗は新聞の1面を飾るほど注目度が高く、「成功を継続させる」ことが重要であり、関係者の最大の使命である

(2) 打ち上げが失敗した原因と対策、教訓

本項では、打上げに失敗したH-II ロケット5号機、8号機、及びH-II A ロケット6号機の個々の不具合原因の解説があり、それらが、技術的に知識不足、事象や製品のばらつき、並びに検査や製造の能力不足に分類された。その対策としては以下が有効であった。

- ・技術的に知識不足の事象は解明できるまで打ち上げない
- ・事象や製品のばらつきに対しては、品質評価活動の徹底に加え、現場の気付きを徹底的に吸い上げ設計に反映する
- ・検査や製造については不断の不適合防止活動により確実な作業を実施する

上記の代表的な説明として、初期に打上げ延期の主たる要因であった燃料供給バルブについて事例紹介があった。

宇宙ステーションへの補給機（HTV：H-II Transfer Vehicle）用にH-II A ロケットの1段エンジンを2基としてペイロードを増やしたH-II B ロケットの開発では、上記の教訓を取り入れたエンジニアリングプロジェクトマネジメントにより初号機から連続して打上げを成功させた事例紹介があった。

(3) 失敗しない方法から成功を続けるための方法への転換

本項では、前項のような失敗から学ぶ方法の成果は大きいと認めながらも、その方法は細心の注意と地道な作業であり、作業員への多大な負担とマンネリ化が不可避で継続が困難なこと、そして、成功が続くとやがて失敗を知らない世代の台頭を招き、いつかは失敗の

悪夢が待っているのでは、との危惧が提示された。そして、

- ・「失敗しないこと」と「成功し続けること」は違うのではないか
- ・失敗学とは失敗事例から新たな知識を学ぶ学問であり、そのアプローチの「失敗を許容できない分野」への適用には限界があるのではないか

と問題提起があった。すなわち、「失敗学を包含しつつ、成功を続けるための前向きな取り組み」を「成功学」と称して、宇宙や原子力のような失敗できない大規模システム技術では、「失敗学から成功学への転換」が必要、との主張であった。

「成功学」については、確立していないながらも、創業以来、自殺者を除き死亡事故ゼロを続ける東海道新幹線や、ロケット事故における米国(デルタⅡ、1997. 1; 死傷者ゼロ)と中国(調整 3B1 号、1996. 2; 死者 500 人以上)の差異等を例として、「成功学」へのアプローチとして、以下の提案があった。

- ・様々な視点での良いシステムを考えること
 - ーミスが起こらない仕組み(踏切がない、貨物と分離した乗客専用線)
 - ーミスが起こっても大事に至らない仕組み(制御用ブレーキの冗長化、立入禁止区域の設定と指令破壊装置による確実な飛行中断・立入禁止区域内への落下)
- ・ハザード解析やリスク評価によりポイントとなる検査項目の特定と定量化
 - ー安全文化、風土の構築(リスクヘッジの徹底: 利益損失よりも安全確保優先等)
 - ー安全神話の否定(猜疑心の塊となりチェック)
- ・猜疑心の高いチェックに耐え、突破する技術力
 - ーできない理由を考えるより、どうしたらできるかを考える
 - ー図面通り作れて検査可能な設計、過誤のない設計、技術経験の伝承
- ・「失敗しないことではなく、良い成果を出すこと」を大切にされた組織文化の醸成

(4) 打ち上げ執行責任者の心構え

本項では、前村氏ご自身がロケット打上げ責任者を務められた 6 基の H-ⅡA ロケットの打上げにおいて遭遇したトラブルについて、約束した日時での打上げを最後まであきらめず、自ら納得するまで突き詰めて、さらに常に最悪ケースを想定して対応したことの説明があった。そして、プロフェッショナルとしての責任と矜持を持って臨むことが大切であると主張された。

3.1.2 質疑、討論を通じて得た教訓

原子力はロケットと同様、複雑なシステムで、かつ、失敗の許されない技術である。講演後の質疑、討論を通し、国産ロケットの開発、製造での経験から、原子力システム開発へも生かすことのできそうな教訓として以下があった。

- ① ロケットにおける要素部品の改良、変更については、“Flight Proven” の考え方に基づき、全体システムの中で正常な動作が検証されていることが重要である。全体システムからの要求から仕方なく部品が変更されることはあっても、個々の部品自体の性能向上のみを理由として部品が変更されることはない。しかし、H-Ⅲロケットの開発のように、基幹システムそのものが新しくなる時には、要素部品レベルでの新しいアイデアを多く取り込んでいる。
- ② ロケットの製造においても、ろう付けや溶接などの基盤的な技術、技能の品質が重要な

役割を果たしている。しかし、これら製造における人、プロセス、素材は部品製造各社において頻繁に変わり得る。特に人が変わると品質に大きな影響がある。したがって、ロケット組立側ではこれらの変更を全て管理している。

- ③ H-IIA ロケットは 2007 年度に JAXA から三菱重工に民営化された。その際、国の研究機関としての JAXA の役割は「開発の責任を負う」から、「(打上げ機の) 仕様を決定して示す」ことに変化した。ロケットの運用を委託された三菱重工は、製造者としての責任を負うことが明確になった。また、このことでメーカー間の協力も円滑になり、打上げの連続成功へとつながっている。
- ④ 現状 (第 3 回委員会 : 2014 年)、次世代の H-III ロケットを開発中で、開発期間は 7 年を見込んでいる。1990 年頃に終了した H-II ロケットの開発に携わった技術者がギリギリ残っており、若手技術者に知識と技術を伝承しながら進めている。複雑なシステムで、かつ、失敗の許されない製品の開発では、現状の技術レベルをしっかりと認識したうえで、適切なレベルの開発目標を設定する必要がある。開発目標が高すぎれば、予定通りの成果や工程が達成できず、また、低すぎれば開発しても競争できない陳腐な製品となってしまう。そこの見極めが肝であり、経験を要する部分である。
- ⑤ 宇宙、特にロケットの製造や開発における大学の役割の視点からは、現状、技術開発面での大学の分担はなく、人材育成面が中心である。専門知識に加え、「チームで力が出せる協調性」や、「できないことから発想するのではなく、どうしたらできるかを考える」というマインドを持つ人材を望む。
- ⑥ 次世代ロケットの開発においては、実機 (試験機) は 1 基のみである。エンジン単体の燃焼試験では、試験機搭載用のエンジンを使用し、試験後に整備して試験機に使用する。なお、実機のエンジンも点火後に中止される場合に備えて、複数回使用できるように設計されている。ただし、飛ばしてしまったエンジンの再利用は現状考えていない。

3.2 ロボット技術の動向

日本ロボット学会会長の小平紀夫氏に「産業ロボットの過去と現在」という題目で御講演いただき、産業用ロボットの種類と基本的技術、技術構成について、また産業用ロボットの普及と技術的発展、技術革新についてお話を伺った。一般産業では産業用ロボットは既に特別なものではなく、ことさらロボットを導入しているという認識よりも、単に生産システムの一部であるという認識であり、ごく普通に使われているのが現状であり、あらゆる分野で極めて普通に生産現場に存在している。原子力産業会においても、ごく普通に使われる様になると考えるのが自然である。再処理施設等の高放射線環境下での利用について、現在のロボットには電子回路や樹脂などの放射線に比較的弱い部品が使われているが、市販されているものでも半年ぐらい持つものもあるのでないかとのことではあるが、ロボットが潰れることを考えて利用しなければならないのが現状の様である。再処理に係わる技術の高度化を目指す場合、また一般産業界で取り入れられている高度技術を導入する場合、ロボットを用いた技術やロボットを応用した技術は今後欠かせないものと考えられる。産業用ロボット技術の進展は、AIの発展などもあり目覚しく、御講演を頂いた2年前と比べると進化が著しい。しかしながら、高放射線環境下での利用のための発展は、福島第1原子力発電所の調査用ロボットの開発で進展はあるものと思われるが、長期的利用の観点からはまだまだであると感じている。高放射線環境下での利用のためには、ロボット産業界に期待するだけでなく、我々原子力分野の研究者・技術者もアイデアを出していく必要があるのではないだろうか。

ロボット技術に関しては、長岡技術科学大学の木村哲也氏にも「サービスロボットの現状と今後の課題」と題して講演いただいた。サービスロボットに関する定義は幅広く、センサーのみで稼働部がないものまで含む考え方もあり、ロボット産業界よりも広く捉えている。したがって、ロボットについて議論するには、まず定義をしてから議論する必要があるとのことであった。講演で紹介されたサービスロボットは我々が大学ロボコンや高専ロボコンで見て、イメージするものであった。ロボットになんらかの指名を与えて競争させる競技（「ロボカップ」と呼ぶ）は日本では、教育の一環としての側面が強いが、世界的には必ずしもそうではなく、米国ではロボカップが主に宇宙や軍事部門が率先して行い、技術の発展を牽引してきたとのことである。また、ロボットの標準化・規格化についても話しをされた。ロボットの標準化・規格化と言うのはロボットの多様性を減ずるために行う話ではなく、性能を評価するための基準やフィールドの作成に係わるものである。木村氏は、この分野の第一人者であり、現在は福島第一原子力発電所の廃炉に係わる性能評価標準化にも携わっている。今回の質疑応答において、木村先生はロボットの生産量とコストに関して100台の製造では安くならず、コストを下げるためには1万台の製造が必要であると言う重要な指摘をされている。つまり、このことは福島第一原子力発電所に係る特殊事象のようなコストをある程度外視できるものであれば良いが、再処理工場に採用するようなことを考えた場合は、再処理工場のみで特殊なものを作るのではなく、より広い工業分野で一般的に使われるものを利用すると言うことが望まれるのではないかとすることである。もちろん、高放射線環境下であることを考慮したカスタマイズは必要であると考えられる。

再処理に用いられる技術は、一般産業界で使われる技術よりも保守的な傾向があるが、今後、再処理の高度化を目指す場合、ロボット技術を応用したプロセス制御やプロセス管理、サービスロボット技術を活用した保守管理技術などが必要となると考えられる。そのためには、再処

理等の原子力関連で不可欠な高放射線環境下でも利用可能とするための技術や工夫を行うだけでなく、他の産業界とも連携したロボット技術の開発も必要である。

第4章 将来世代再処理を検討する上で考慮すべき要件

将来世代を今後100年程度の時間スケールとして考えると、社会情勢や技術動向の大きな変化が予想され、再処理に対する要求事項も変化する可能性が高い。そのため、将来世代の再処理の具体像を検討する上で考慮すべき要件を予め議論しておく必要がある。本研究専門委員会では、その要件の抽出と各要件において考えられる事項を整理した。表4-1に再処理の具体像を検討する上で考慮すべき要件とキーワードを示す。各要件は幹事による自由討論を経て選定された。各要件に対して担当する幹事または委員を選定し、その要件に関連する情報の調査を行った。委員会にて担当者による調査結果のプレゼンテーションを実施し、グループディスカッションを行い、さらに全体での議論を通して調査結果をまとめた。以下、4.1～4.9において各要件についての調査および検討結果を示す。

表4-1 再処理の具体像を検討する上で考慮すべき要件とキーワード

要件	キーワード
1. 対象燃料	LWR、MOX、FBR、ADS、トリウムの各燃料
2. 国際的視点	規制物質、協定、国内法、核不拡散、Pu インベントリ
3. 回収元素、製品および廃棄物	U、Pu、MA、FP、酸化物燃料、窒化物燃料、金属燃料
4. 社会的受容性と経済的見通し	技術的成立性・実現性、サイクルの経済性、廃棄物の処分
5. 責任の主体、受益者、実施主体、ビジネスの成立性	国、国民、産業界、電力会社、再処理事業者
6. プロセス性能	経済性、廃棄物発生量、分離性能、核不拡散性、安全性
7. 開発速度、他分野の進捗・導入	開発基盤、社会情勢、技術導入、既存知識活用
8. 技術伝承	技術的知識・情報、改善、生産基盤の維持
9. 安全性	漏洩、化学反応、温度、圧力、試薬の種類

4.1 対象燃料

将来世代再処理の具体像を検討する上で、再処理の対象となる燃料について将来世代の炉を想定し、極力広範囲の原子炉を検討した。対象燃料としては、トリウム燃料、MOX燃料、FBR燃料、ADS燃料、酸化物燃料以外（金属、液体）をあげた。まず、将来世代の再処理工場で処理する対象燃料を検討するため、回収製品や廃棄物として扱われる各元素の再処理の目的についてまとめた（表 4.1-1）。

表 4.1-1 回収元素の再処理の目的

製品、廃棄物	元素	再処理の目的
製品	U	燃料
	Pu	
その他	白金族元素	産業利用
	Th	燃料
	Tc	核変換
	Np	
MA		
廃棄物	Sr	焼結体
	Cs	
	放射化生成物	ガラス固化体
	その他 FP	

4.1.1 燃料の特徴と再処理技術への要求事項

本節では、対象燃料の特徴についてまとめる。トリウム燃料、MOX燃料、FBR燃料、ADS燃料について、酸化物燃料を中心に説明する。

トリウム燃料サイクルは、原料となるトリウムがウランと比較して豊富なこと、Pu や MA の生成量が小さいこと、熱中性子領域において核特性が優れること（ ^{232}Th の吸収断面積が大きい）、燃料特性が優れること（ UO_2 と比較して ThO_2 の高い化学的安定性、高い熱伝導率、低い熱膨張性、および核分裂生成物の生成量が小さい）、核不拡散性が高い、などの利点を有する^[1]。一方、高融点のためにペレット作成が困難なこと、硝酸への溶解性が劣ること、 UO_2 の使用済燃料と比較してγ線が高いこと、技術情報が少ないこと、などの課題がある。

プルサーマルを前提とした MOX 燃料は、 UO_2 の使用済燃料と比較して Pu、Am、Cm の量が増加し、再処理においては DF に代表される分離・分配性能の向上が要求される。同時に崩壊熱の除去、遮蔽性能の向上、臨界管理の増強も要求される。FBR の MOX 燃料も同様である。

核変換を目的とした ADS 燃料の対象核種は、 ^{237}Np 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 、 ^{244}Cm である。MOX 燃料と比較すると U に対してこれら核種の含有量ははるかに大きいのが特徴である。再処理に要求される事項としては、MOX 燃料と同様に分離・分配性能の向上、崩壊熱の除去、遮蔽性能の向上、臨界管理の増強である。

4.1.2 使用済燃料の組成

再処理工場への払出し条件を検討するため、使用済燃料の組成が必要である。委員会ではLWR燃料の組成についてORIGEN2.1コードを用いた計算結果が示された。計算においては、初期濃縮度、燃焼度、比出力、冷却期間をパラメータとしその範囲は、初期濃縮度：1～20[wt%]、燃焼度：10～100[GWd/t]、比出力：10～100[MW/t]、冷却期間：1～10[年]とした。各条件において、最大となる元素・各種の組成が最も厳しい条件と考え、その最大値をまとめた(表4.1-2)。

表 4.1-2 LWR 燃料における主要元素・核種の最大値

元素・核種	最大値	元素・核種	最大値	元素・核種	最大値
U	9.4×10^5 [g/tU]	Kr-85	7.4×10^{14} [Bq/tU]	自発中性子	1.0×10^{10} [n/sec/tU]
Np	1.7×10^3 [g/tU]	Zr-95	8.3×10^{10} [Bq/tU]	アクチニド合計	7.4×10^3 [W/tU]
Pu	1.1×10^5 [g/tU]	Ru-106	1.5×10^{16} [Bq/tU]	ACT [※] 合計	8.1×10^{15} [α Bq/tU]
Am	8.7×10^3 [g/tU]	I-129	1.5×10^{11} [Bq/tU]	FP 合計	2.8×10^{17} [Bq/tU]

※ACT は Pu、Np、Am、Cm を指す

4.1.3 要件に関する議論の概要

第8回専門委員会(平成27年9月12日)において、将来世代再処理の具体像を検討する上で本専門委員会では将来世代においても現行のLWRのウラン燃料を対象にするとともに、新たにプルサーマルや高速炉のMOX燃料、さらには高速炉の金属燃料も対象とすることとした。

本要件に関する議論を行った際に出された意見を以下に示す。

- ・ ADS燃料は、核変換が主目的なので燃料組成、物量、FPの量が異なるので異質なものとしてあげておき、主題とはせずに後で補足するような取り扱いでどうか。
- ・ トリウム燃料サイクルは、U-233取り出しが主目的なので、一旦議論から外してはどうか。
- ・ 熔融塩炉燃料については、一旦議論から外し、別の研究専門委員会等の情報を参考にしてはどうか。
- ・ 対象とする燃料に対して各種再処理(湿式・乾式)を選択した経緯をまとめてみてはどうか。その上で、新たなプロセス(硝酸濃度や溶剤など)が提案された場合のものについてどのように適用するかを議論してはどうか。

[1] 黒崎健, 「1-10 トリウム燃料サイクル」, 核燃料サイクル, 日本原子力学会 (2014)

4.2 国際的視点

4.2.1 国際的な相互監視体制への遵奉

再処理技術は核兵器の原料製造技術にも転用可能なため、国際的な相互監視体制を構築することにより核拡散を防ぐことが必要である。このため、施設の建設や原料・製品（規制物質＝核原料物質、核燃料物質、原子炉その他の資材または設備）の使用について、以下のような国際協定により規制を受けている。

- ・ 二国間協定（日米原子力協定等）
- ・ 多国間協定（核拡散防止条約（NPT：Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons）と IAEA への加盟）

これらの具体的な内容は後述するが、実効化するには国内法の整備が不可欠で、わが国では「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」が施行されている。

なお、近年の北朝鮮の核兵器開発のように、これまでの IAEA 中心とした国際的な相互監視体制では、国家的な意図による査察非対象施設は見抜くことが困難であることが明らかとなっている。この背景として、NPT を罰則付きの二国間で補間しているものの、その実態は陣営ごとの違い（西側 vs 東側）があったこと、さらに冷戦の終結により、一貫した対応が実施できていないことにある。なお、旧ソ連やパキスタン等の相互監視体制外の核保有国からの技術の漏洩や民生技術の進歩により、原子力先進国の協力がなくても、原子力、核兵器の開発は不可能ではないことも、このような事態を加速する原因となっている。さらに、保障措置の受け入れは莫大な経済的負担が発生するため、経済的活動としての再処理の魅力を大幅に低減していることも、純粋に平和的利用の再処理を困難にしているともいえる。

(1) 多国間原子力協定：NPT 体制

NPT は、米・英・仏・中・露の 5 国以外の核兵器保有を防止する国際条約で、1963 年国連で採択され、2010 年現在 190 ヶ国が加盟している。核兵器への転用の有／無は、第三者機関 IAEA が実施する保障措置（査察）で、摘発／証明される。罰則の伴う二国間協定や国連制裁等による補間が不可欠。兵器転用の確認の困難さ（計量管理精度など）、テロ対策等により、保障措置の経済的負担増。一方で、未加盟のインド、パキスタン、イスラエル等による核保有、脱退した北朝鮮による核実験など、NPT による拡散防止の限界が顕在化している。

(2) 二国間原子力協定

2017 年 8 月時点で、日本が締結している二国間原子力協定は、表 4.2-1 のとおり。要となる米国との二国間原子力協定は、2018 年に前回の改訂（1988 年）から有効期間の 20 年を迎えるため、改訂交渉が進められている。

なお、2017 年に NPT 非加盟の核保有国であるインドとの二国間原子力協定が発効した。インドは、(NPT、包括的核実験禁止条約に未締約で、1974 年と 1998 年に核実験を実施。

(NPT 体制外の第 6 の核保有国) 国連、IAEA、原子力供給国グループによる、インドへの核燃料輸出禁止措置で原子力発電は低迷していた。ところが、2006 年米国はインドとの二国

間協定を締結し、核保有を認めつつの原子力協力を確約。(但しインドが核実験を行った場合には協力は破棄)。インド自身で22の原子力・核関連施設を、民生用と軍用に区分し、民生用のみIAEA保障措置適用。インド政府は、フランス、ロシア、カザフスタン、イギリス、カナダなどとも相次いで協定を締結していた。

(3) その他

NPT体制の限界から、supplier国とuser国との線引きを厳格にし、再処理・MOX燃料製造はsupplier国のみが行いuser国の使用済燃料を引き受けるとの考え方が国際原子力エネルギー・パートナーシップ(GNEP: Global Nuclear Energy Partnership)で提示された。しかし、国家間のMOX燃料/使用済燃料の輸送や再処理廃棄物の引き受け/処分などの難しい問題があること、なによりも、MOX燃料とUO₂燃料のコスト差を正当化する経済的合理性がないことから、この考え方は進んでいない(仏AREVAの再処理受託量の低下により、実質的にはむしろ後退しているとも言える)。さらに、インドのように北朝鮮も核保有国として国際的な活動(ウランの輸入等)が認められるようになれば、開発したものの勝ちとなり、NPT体制は全く形骸化されており、新しい仕組みが今まさに必要とされている。

4.2.2 核転用防止効果のある再処理技術の開発

前記のような国際的な枠組みに加えて、技術的に再処理の核拡散懸念を低下させる試みがなされており、代表的なものがAdvanced Fuel Cycle Technology(先進再処理技術)の開発である。この技術は従来の再処理技術に以下の性能を付加することを特徴とする。

- ・ MA, 短半減期FPの回収・利用
- ・ 核拡散抵抗性の向上
- ・ 環境負荷低減
- ・ 経済性の向上

主な開発国は、フランス、米国、日本、韓国、インドなどで、湿式法、乾式再処理のいずれについても技術開発が進められている。Puの利用が本格化する将来は、核拡散の懸念から、より核拡散抵抗性の高い技術が求められる可能性も。MA(+FP)の回収は、以下のような理由により核拡散抵抗性の向上に寄与すると考えられている。

- ・ PuにUとMA(Np, Am, Cm)を混合
⇒Pu純度の低下(転用困難)
- ・ Puに中性子源(Cm)を混合
⇒即発臨界制御性の低下(転用困難)
- ・ Puに高放射線源(Am, Cm, Cs, Sr等)を混合
⇒検知容易・重遮蔽必要(盗取困難)

なお、このような先進再処理技術開発は、IAEAも研究開発側は革新的原子炉および燃料サイクル国際プロジェクト(INPRO: International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles)等により推進しているが、開発が成功したから国際的な相互監視が緩和

される（IAEA による保障措置要件が緩和される）というわけではなく、あくまで、核拡散防止の強化に役立つ（ベターである）とのスタンスである。開発側のモチベーションを向上させるために、核拡散抵抗性を数値化し、保障措置の緩和（ボーナス）を示していくことが望ましいと考える。

4.2.3 まとめ：国際的視点から再処理に要請されること

国際的視点からの要請されることをまとめると、再処理の目的と実施に係わる高い Accountability（説明性）を示すことにあると言えよう。言い換えれば、

- ✓ 透明性の確保（転用しようとしていない）
- ✓ 安全性の確保（自然外部事象やテロ対策）
- ✓ 経済的合理性（なぜ再処理するのか）
- ✓ 国際的協調性（孤立しない, 悪い仲間に入らない）
- ✓ 政治的安定性（いきなり核兵器を作り始めない）

となる。

表 4.2-1 我が国が批准する二国間原子力協定

	略 称	協定の現状（発効、署名、交渉等）
発 効	日加協定	1960年7月27日 発効 1980年9月2日 改正
	日英協定	1968年10月15日 発効 1998年10月12日 発効（改定協定）
	日仏協定	1972年9月22日 発効 1990年7月19日 改正
	日豪協定	1972年7月28日 発効 1982年8月17日 発効（改定協定）
	日中協定	1986年7月10日 発効
	日米協定	1968年7月10日 発効 1988年7月17日 発効（改定協定）
	日ユーラトム協定	2006年12月20日 発効
	日カザフスタン協定	2011年5月6日、発効
	日韓協定	2012年1月21日、発効
	日越協定	2012年1月21日、発効
	日ヨルダン協定	2012年2月7日、発効
	日露協定	2012年5月3日、発効
	日・UAE協定	2014年7月10日、発効
	日・トルコ協定	2014年6月29日、発効
	日・印協定	2017年7月20日、発効
	交渉中：南アフリカ、サウジアラビア、ブラジル、メキシコ、マレーシア、モンゴル、タイ	

4.3 回収元素、製品および廃棄物

4.3.1 概要

(1) 回収元素と廃棄物

将来世代の再処理で回収すべき元素種類は、原子炉における用途や廃棄物処分からのニーズにより多様化すると考えられる。このため、原子炉および廃棄物処分の観点から調査を行った。

原子炉の種類には、主に軽水炉、高速炉、長寿命放射性核種の核変換炉（加速器を含む）が存在する^[1,2]。軽水炉では主に U および Pu が核燃料物質として使用される。高速炉には U と Pu を用いて発電することを目的とするものと、発電に加えて長寿命放射性核種であるマイナーアクチノイド (MA) の核変換も目的とするものがあり、後者の場合は U と Pu に加えて MA も核燃料物質となる。核変換炉は MA の核変換が主目的であるため、U、Pu、MA が核燃料物質となる。

廃棄物処分については、再処理で回収すべき元素を検討する観点から調査した。高レベル放射性廃棄物の潜在的な有害度の低減および地層処分場の面積の低減を目的として、使用済燃料から MA を回収して核変換することが検討されている^[3]。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分場の面積をさらに低減するためには、発熱性の核分裂生成物 (FP) である Cs や Sr を分離し、長期貯蔵して放射能を減衰することが有効であると報告されている^[3]。この時、廃棄物固化体を作成する観点から、FP 群から白金族元素を分離し、廃棄体の形態を Cs と Sr については焼成体、白金族元素については合金廃棄体とすることが提案されている^[4]。以上の議論とは別に、地層処分における地下水シナリオでの実行線量率の評価では、長寿命の核分裂生成物 (LLFP) が支配核種となる場合があると指摘されている^[3]。また、全ての放射性 FP を回収して核変換することで廃棄物の放射能を大幅に低減する構想が提案されている^[5]。

原子炉の種類および廃棄物処分について調査した結果に基づき、再処理工程で回収すべき元素と廃棄物となる元素を検討した結果を図 4.3.1 にまとめた。発電を目的として軽水炉や高速炉を利用する場合には、回収元素は U と Pu であり、MA、発熱性 FP (Cs や Sr)、白金族元素、LLFP、その他 FP は廃棄物となる。高速炉や核変換炉を用いて MA を核変換する場合には、MA が回収元素に加わる。地層処分場の面積をさらに低減することをめざす場合には、発熱性 FP や白金族元素が回収元素に加わる。さらに廃棄物の放射能を低減することをめざす場合には、LLFP や上記以外の FP が回収元素に加わる。

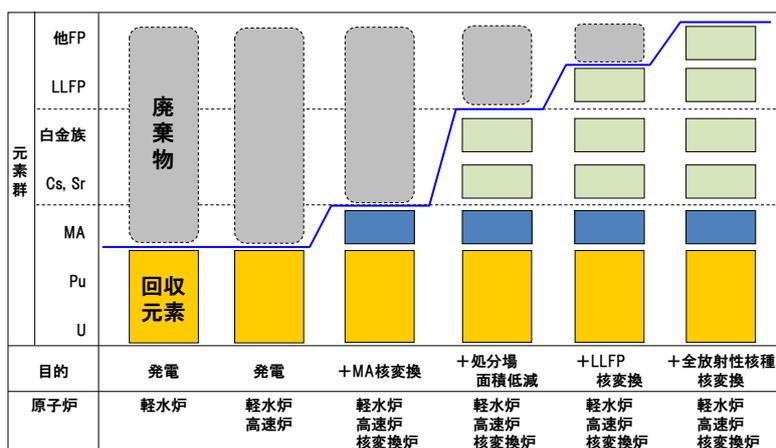


図 4.3.1 回収元素と廃棄物の種類

(2) 製品

再処理工程で回収した元素は、製品として燃料製造工程へ払い出され、燃料に加工されて再び原子炉で使用される。この観点から、再処理の製品の仕様について調査した結果を以下に示す。

原子燃料中の燃料物質の化学形態には金属、酸化物、窒化物等がある^[3,6]。燃料製造工程では燃料物質の受け入れ基準を設けており、例えば、ASTM 規格 (American Society for Testing and Materials Standards) では元素濃度、核種濃度、放射能の基準値が定められている^[6]。原子力の平和利用を推進するうえで核拡散抵抗性を高めることは重要であり、このため、国内の再処理では Pu を単独で回収しないようにし、Pu と U の混合物を製品として払い出すこととしている^[6]。以上のことから、再処理工程の製品については、化学形態、不純物濃度、放射能、核拡散抵抗性に関して配慮が必要と考える。また、近年では、将来の核変換に備えて MA を再利用しやすい形態で一時保管する構想が提案されている^[7]。このような新たな構想についても注目していくべきと考える。

4.3.2 要件に関する議論の概要

第 9 回「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会 (平成 27 年 11 月 17 日) において本要件に関する議論を行った際に出された意見を以下に示す。

- ・ 回収元素として U, Pu, MA, RE, 白金族, Cs, Sr を想定した時に、炉に供給する元素としては、U, Pu, MA までが妥当ではないか。
- ・ 燃料の定義は U, Pu までなのではないか。
- ・ エネルギー需給に関する将来予測が難しい状況の中で、あるシナリオを決めて検討するのか、多くのケースを想定して検討するのか、議論が必要ではないか。
- ・ Cm は発熱が大きいものの短寿命である点を考慮し、Am/Cm の相互分離を行い、Am のみを変換することも有効ではないか。
- ・ FBR の使用済燃料には色々な同位体が含まれるため、多重サイクルを考慮した場合は富化度調整が重要なのではないか。
- ・ 核変換においても、核種によって変換効率が異なるため、やはり同位体管理が重要なのではないか。
- ・ JAEA での MOX 燃料製造では、様々な組成の原料を用いて高速炉用の燃料製造を行っているが、その際に等価フィッサイル法に基づいて富化度調整を行っている。このように、富化度調整は燃料製造時に行っているが、再処理工程で調整することも必要ではないか。
- ・ 東海再処理工場では、MOX 燃料製造側のニーズを考慮して払い出す製品の選別を行っている。払い出す製品の組成を調整する意味で、再処理プラントは連続式ではなくバッチ式が好ましいのか、それともプラントとしてバッファーを持たせていけば連続式が好ましいのか、検討する余地があるのではないか。

[1] 日本原子力研究開発機構：「高速炉サイクル技術開発の意義」、原子力委員会新大綱策定会議 (第 9 回) 資料第 2-4 号、2013 年 11 月 30 日。

[2] 日本原子力研究開発機構：「ADS による分離変換技術の概要と高レベル廃液からの分離技

- 術の詳細と現状について」、第10回再処理・リサイクル部会セミナー、2015年1月16日。
- [3] 日本原子力研究開発機構：「高レベル放射性廃棄物処分への分離変換技術の導入意義」、原子力委員会 分離変換技術検討会、資料1-3-2号、2009年4月28日。
 - [4] 井上正，電力中央研究所：「高レベル廃棄物管理に対する分離変換技術導入効果の検討」、原子力委員会 分離変換技術検討会、資料1-3-1号、2009年4月28日。
 - [5] 藤家洋一：「自ら整合性のある原子力システム～資源確保と環境保全の同時達成～」、NPO ニュークリア・サロン、国際シンポジウム「放射性廃棄物低減に向けた現状と将来の展望」、2014年10月9日。
 - [6] 日本原子力研究開発機構：再処理プロセス・化学ハンドブック 第3版、2015年3月。
 - [7] 稲垣八穂広ら、「マイナーアクチニド分離変換技術の有効性向上のための柔軟な廃棄物管理法の研究開発(1)研究の目的と概要」、日本原子力学会「2015年秋の大会」、2015年9月9～11日（静岡大学 静岡キャンパス）。

4.4 社会的受容性と経済的見通し

将来世代再処理の具体像を検討する上での要件として、第9回委員会では社会的受容性と経済的見通しについて議論した。まず、核燃料サイクルの社会的受容性について、原子力や核燃料サイクルに反対の立場をとる人々を含む「推進側専門家以外の人」の方々の見解、主張を表4.4-1に示す形で要約して紹介し、そこから核燃料サイクルが社会的な受容性を獲得するための課題として以下(1)～(4)を抽出した。

(1) 技術的な成立性、実現性の視点

- ・ もんじゅ、RRP等、計画通りに動かせていない

(2) 核燃料サイクルの費用と採算性の視点

- ・ もんじゅ、六ヶ所再処理、プルサーマル等、費用とそれに見合う意味があることが理解されていない

(3) 高レベル廃棄物の処分の視点

- ・ 処分場が確保できていない
- ・ 無害化されるまでの期間が長く、実現性に乏しい、あるいは無責任と思われる

(4) リサイクルにおけるシナリオ、目的の曖昧さの視点

- ・ 回収Uを利用していないので、リサイクル効率が低いと見られている
- ・ 余剰Puについて核兵器転用への懸念を持たれている
- ・ FBRと軽水炉の関係について、競合する存在(なので全量置換されるもの)か、それとも、併存し補完しあうものか、原子力関係者の間でもコンセンサスがない

また、推進側が重要と考える課題や開発目標の考え方について、高速増殖炉サイクル実用化研究(FaCT研究)における開発目標^[1]を一例として取り上げ、推進側が社会的受容性獲得上の課題に対して、整合性、説得性ある答えを用意しようとしているかについて問題提起した。

さらに、核燃料サイクルの経済的見通しとして、六ヶ所再処理工場を40年間運転した際の費用として、平成16年度コスト等評価検討委員会での算定結果に基づく評価値(14.4～18.4兆円)が、処理する使用済み燃料の発電量あたりにすると1.38～1.77円/kwhであることを紹介した。これに対し、再生可能エネルギー導入における固定価格買取制度(2015年当時)^[2]では、太陽光が27～33円/kwh、風力が22～55円/kwhであること、その結果、2014年6月末の認定量ベースでは、家庭用電気料金への再生エネ賦課金が3.12円/kwhになる^[3]ことを紹介した。それらの比較をもって、核燃料サイクルと再生エネとの優劣を決めるものではないが、核燃料サイクルのコストは、その意義が社会のコンセンサスとなれば、社会通念上許容されるコストの範囲内にあることを示した。

以上の話題提供の後、委員会での討論において、燃料サイクルの社会的受容性の獲得には、再処理の意義を再認識し、明確に主張すべきという意見がある一方、エネルギーセキュリティに対する再処理の貢献に対する疑問や、むしろ廃棄物の有害度低減に対する貢献が重要ではないか、との提案があった。

一方、技術的な成立性については、感情的な側面もあるが、再処理やプルサーマルをまず動かす（動かし続ける）ことが社会的受容性の獲得に重要であるとの認識になった。また、経済性や政策に関する議論も交わされた。以下に主な意見を示す。

【再処理の意義の主張】

- ・再処理やサイクルの意義、必要性は、低炭素社会の実現やエネルギーセキュリティにある。このことをより明確に、積極的に主張すべきである。

【エネルギーセキュリティに対する疑問】

- ・再処理での Pu の回収では、回収するだけでは余剰 Pu の問題など、マイナス面が大きい。サイクル政策では、Pu の利用方法について考えることが不可欠。
- ・U 資源が豊富にある現在の状況で、燃料サイクルの必要性を資源論のみで主張することは難しい。

【廃棄物の有害度低減に対する貢献も重要】

- ・廃棄物の毒性低減は放射線リスク低減の観点で重要である。天然ウランレベルの線量までの減衰時期を 300 年まで短縮できることは大きなメリットである。
- ・高レベル放射性物質の減容化・有害度低減については、分離の導入時期もその効果に密接に影響する。

【技術的な成立性】

- ・技術的成立性の議論では、動いていないから「実現できない技術」など、感情的にとらえられている側面もある。
- ・現状では、まず六ヶ所やプルサーマルを動かしていくことが先決。
- ・理想的な再処理プロセスを考える上で、実現性を高めるために、技術を複雑にしないことも重要。

【経済性】

- ・廃棄物低減等に必要核種分離を行うため、再処理プロセスを複雑化すればコストは上昇する。費用対効果のバランスも意識すべき。
- ・サイクル政策を進める上で、その実施主体が電力であることを考えると、経済性の議論は欠かせない。発電コスト、再処理コストの内訳を勉強して、理想的な再処理プロセスの検討に反映する必要がある。
- ・現在の原子力に対する厳しい状況は、福島第一原発事故の影響が大きい。コストは高くなっても、安全性の裏付けや説明が重要である。
- ・経済性の議論では、他の電源に比べて競争力を有するかどうかの視点も重要。

- ・ FaCT では高速炉再処理のコスト目標として軽水炉再処理のコストと比較しているが、軽水炉サイクルと高速炉サイクルは本来、競争すべきものではなく、お互いに補完し合い、共生すべきものではないか。

【政策】

- ・ サイクル政策について、ドイツなどは国の立場を明確に主張しているが、日本はそれに比べて曖昧に感じる。
- ・ 他国がサイクル政策を採用している理由や逆に止めた理由についても分析が必要。
- ・ 燃料サイクルを国策とするなら、国の果たすべき役割を明確にする必要がある。
- ・ 日米原子力協定の改定の際には国としてサイクル政策に揺るぎがないことを主張すべき。
- ・ 反対派の中では処分場が決まっていないから、政策が破綻しているとの主張もある。処分場問題については、技術的な問題なのか、処分地選定の問題なのか整理が必要。
- ・ もんじゅに関しては研究炉としての位置づけを主張すべきではないか。トライ&エラーが許容される部分もあるはず。

表 4.4-1 推進側の専門家以外の人の見解の例(1/2)

発言者	考え方、根拠
<p>1. 河野太郎^[4] (自民党副幹事長) 当時</p>	<p>核燃サイクルの問題はいずればれる「うそ」だ。</p> <ul style="list-style-type: none"> ●もんじゅは長期停止中なのに毎年約 200 億の維持費はばかっている。商業的な実用化のめどはない ●プルサーマル計画もとても採算が合わない。それなのに経産省や電力会社の保身や利権でやめられない ●高レベル放射性廃棄物は、青森県から運び出し 2038 年から処分を始めると言うが絶対に間に合わない。「破られる約束」だ ・電力消費に応じて置く場所を割り当てて東京など置き場所を探すことになればどうか。引き受けられないから原子力の電気は要りませんとなるのではないか ●脱原発にすれば核燃サイクルは必要ない ●(核燃サイクルは) つじつまが合わない ●原発や核燃サイクルを止めても立地自治体には他の手当てをすればよい
<p>2. ロバート アインホーン^[4] (元米国務省特別顧問)</p>	<p>再処理拡散、世界を危険に</p> <ul style="list-style-type: none"> ●再処理は長年にわたり、繰り返し延期。しかも国民に多額の税負担を強いてきた。重要なのは日本にとって、国際社会の平和と安全にとって一番の利益になるかだ ●六ヶ所を始動させれば、分離 Pu が増えてしまう ●韓国も再処理を望んでおり、日本と比べ差別的な待遇を受けたくないという感情的な問題となっている ●日本の再処理は非常にコストがかさみ、当初の目的を達成していない ●アジアの多くの国が原発事業に乗り出そうとしている。多くの国が核燃サイクルの能力を持てば、核兵器の生産能力を保有することになる。 ●米国にとって、日本が原子力に依存することは望ましいが、Pu 保有量に関する懸念を引き起こさないようにしなければならない
<p>3. 鎌仲ひとみ^[4] (ドキュメンタリー映画監督)</p>	<p>効果薄く、破たんした政策</p> <ul style="list-style-type: none"> ●事故まで多くの人が原発リスクや再処理・プルサーマルを知らなかった ・電気を使っているのに核のゴミを六ヶ所に押し付けていることに無関心 ●村民の多くはあきらめている。村は一つの産業に取り込まれている。 ・「国がやろうとしていることに無駄な抵抗をしても仕方ない」 ・日本原燃から仕事を取らないと村で生計を立てられない ●ごみを受け入れているだけでは産業として持続可能性がない ●国は再処理を「リサイクル」と宣伝しているが、ウランの節約効果は 1%しかない ●使い道のない Pu を取り出すリスクがある ●実現のめどが立たない高速増殖炉もんじゅの維持費 ●欧州などではエネルギー政策の見直しが行われている ●原発事故後も利権構造は変わっていない ●日本も電力自由化を進め、多様なエネルギーの開発を可能にするべきだ

表 4.4-1 推進側の専門家以外の人の見解の例(2/2)

発言者	考え方、根拠
<p>4. クラウス ヤンバーグ^[4] (ドイツの核 技術コンサル タント)</p>	<p>加工費だけでウランの倍</p> <ul style="list-style-type: none"> ●電力会社は安全に電気を生産するのが仕事で再処理に興味はないが、ドイツでは政府が再処理を義務付けた。 ●核燃料サイクルは経済的に理に適っていない。直接処分に変更した。 <ul style="list-style-type: none"> ・再処理のコストには幻想がある。 ・MOX 燃料は加工費だけでU燃料の倍 ・高速増殖炉の膨大な建設費 ●処分場が選定されるまで、安全な乾式キャスクによる中間貯蔵だ。
<p>5. 澤井正子^[5] (原子力資料 情報室)</p>	<p>核燃料サイクルは本当に「リサイクル」と呼べるのか</p> <ul style="list-style-type: none"> ●利用されるのは核分裂性の Pu のみであり、使用済燃料のわずか 1 % ・回収 U (94%) は、強い放射能を持ち、燃料加工時の取扱いが困難 <ul style="list-style-type: none"> →フランスやイギリスの再処理工場では廃棄物として貯蔵 ●再処理工程で生じる 2 次廃棄物によって、廃棄物が逆に増えてしまう ・ガラス固化体は SF の半分となるが、2 次廃棄物は SF の約 15 倍 (仏の例) <ul style="list-style-type: none"> RRP では約 4 倍。再処理工場の廃止措置まで考慮すれば 180 倍 ●高レベル廃棄物の最終処分場は作る目処さえ立っていない ●原子力発電は放射性廃棄物という地球環境へ負荷をかけている
<p>6. 日本経済新 聞 社説^[6]</p>	<p>もんじゅも廃炉も視野に体制を見直せ</p> <ul style="list-style-type: none"> ●FBR で Pu を作っても、通常の前発で燃やす計画は見通しがたたない ●日本が余剰 Pu を持つことに国際社会の懸念がある ●実用化できたとしても経済性は未知数 ●前発への依存度はこれから低下する。 ●状況の変化も踏まえて FBR が本当に必要なのか、改めて議論すべき
<p>7. GEPR 編集部 (株)アゴラ研 究所^[7]</p>	<p>核燃料サイクルとは何かー期待と困難が併存、政治的問題に</p> <ul style="list-style-type: none"> ・前発問題はこれまで「SF をどのように扱うか」に批判が集まってきた ●RRP は、1989 年に建設が計画されたのに、今でも未完成 ●建設費用も 7600 億円から 2 兆 2000 億円で膨らんだ ・SF の直接処分は 10 万年の時間が必要であり、管理の先行きが見えない ●核燃料サイクルからも高レベル廃棄物が発生する。 ●経済性で全量直接処分より費用が掛かる。全量直接処分 8.1～14.8 兆円 <ul style="list-style-type: none"> ・全量再処理、再処理・直接処分併用 14.4～18.4 兆円 ●核兵器に転用されるリスクがある ●もんじゅ、RRP などで技術トラブルが続く、稼働のめどがたたない ●核物質への恐怖から関係者への合意形成がとても難しい

参考文献

- [1] 日本原子力研究開発機構、第1回 FaCT 評価委員会(2010)
- [2] 資源エネルギー庁、再生エネルギー固定価格買取制度ガイドブック(2015)
- [3] 小宮山涼一、原子力学会 ATOMΣ、Vol. 57、Nov. (2015)
- [4] もう一つの神話『核燃料サイクルの幻影』明日への提言、神戸新聞、May13~17(2014)
- [5] 澤井正子、Patagonia HP、July(2008)
- [6] 日本経済新聞、Nov. 5(2015)
- [7] Global Energy Policy Research、Oct. 9(2012)

4.5 責任の主体、受益者、実施主体、ビジネスの成立性

将来世代において再処理を行う上で、その「責任の主体」、「受益者」、「実施主体」、「ビジネスの成立性」を具体的に想定することは重要である。これらの4つは相互に関連するものである。「実施主体」は必ずしも「責任の主体」になるものではないが、責任の一角は担うべきものであり、「責任の主体」は「実施主体」と運営等で強く係わるべきである。責任を持つもの、実施するものは利益を受けるものであり、「受益者」でなければならない。責任者は利益を受けるもの、つまり「受益者」の中に存在する。受益は、必ずしもビジネスが成り立つことを意味するわけではなく、受益の種類と量による。ビジネスが成立すれば、その「実施主体」はその「受益者」の一端となる。ただ、民間が「実施主体」になる場合は、「ビジネスの成立性」が求められる。

「受益者」は誰であるのか？再処理の実施により、エネルギーセキュリティが強化され、長期的なエネルギーの持続的利用が可能となることを考えると、我が国は非常に大きな受益を受けることになる。また、言うまでもないが、日本のような民主主義国家においては、国の利益と国民の利益が一致していることが大原則なので、これは国民が最大の受益者であると考えて良い。また、長期的なエネルギーの持続的利用、すなわち、エネルギーの長期的な安定供給は、産業界全体にとっても大きな受益となるものであり、このことも国民に大きな利益をもたらすことを示している。大きな視点からみると、再処理は国家・国民の利益につながる。より狭い範囲で考えてみると、電力会社や再処理事業者は受益者であるだろうか。電力会社の場合、比較的安価に燃料が供給されれば受益を得たと言えるだろう。また、直接的な金銭的利益ではないが、再処理実施による廃棄物の環境負荷低減効果等の正のイメージをうまく使えば、再処理を実施することが大きな利益と成り得る。再処理事業がビジネスとして成り立つものにするのが再処理事業者を受益者とするためには重要であり、また、ビジネスとしての成立性は追求して行かなければいけない。さて、それでは再処理はビジネスとして成り立つのか？使用済み燃料再処理は電力会社が発注するので、利益がでるように発注すれば、再処理はビジネスとして成り立つが、電力会社にとって、利益が出るように発注することが十分に許容可能な条件を満たしているのか、あるいは十分に魅力的に感じるのかが大きな問題であり、逆の言い方をするとコスト面およびコスト面以外でも電力会社が魅力を感じる事が重要である。

海外の「実施主体」を過去に存在したものも含めて考えてみると、国が全面的に出資した組織が運営しているか、米国のウエスト・バレー再処理工場を運営していた Nuclear Fuel Services Inc. のように民間会社ではあるが国（この会社の場合は US Navy）との関係が極めて深い組織が運営している。日本の様に民間企業が実施主体となっているのは稀有な例と言える。海外の例から明らかなことは、再処理を要とする核燃料サイクルには、国のエネルギー政策と密接に関係しているので、国が主体的に関与しているということである。我が国においても、国の積極的関与が望まれる。我々の委員会でも国の積極的な関与が議論されたが、昨年（平成28年10月）に「原子力発電における使用済燃料の再処理等の実施に関する法律」に基づき発足した使用済燃料再処理機構は、国が運営に関与し、同機構が再処理実施を主体し、日本原燃に再処理を委託するものであるもので、我が国においても国が積極的に関与するようになり始めたものと歓迎している。

4.6 プロセス性能

4.6.1 はじめに

本節では、将来の再処理におけるプロセス性能について記述するが、「性能」としては主に技術的要件、安全・保障措置上の要件および経済的要件に分類できる。それぞれの要件は、互いに関連していることは容易に想像がつくが不確定要素も大きいため以下の稿ではそれぞれの視点で記述することとする。また、それらの「性能」を決める因子についても今後の原子力発電の動向に左右されるため、大枠での記述を心がけた。基本的には、2015年度に政府が示した2030年におけるエネルギー需給の予測^[1]に基づいて、原子力のエネルギーシェアは20～23%程度であるとの前提に基づいて、物量等の予想を行った。

4.6.2 技術的要件

どのようなプロセスを選択するかは、今後の核燃料サイクルの方針によって変わりうるため、ここでは、基本的な技術的要件について述べる。軽水炉の再処理プロセスにおいては現行の六ヶ所再処理工場における各プロセスおよび全体の性能が基準となる。分離工程の追加や処理核種の変更などによっても全体のプロセス性能は保持されるべきである。また、高速炉サイクルの再処理においてはFaCT等で検討された性能が基準となる^[2-6]。表4.6-1に示すような、回収性能や分離性能、廃棄物発生量がキーポイントになると考えられる。表4.6-2に以前評価された回収ウラン中の残留毒性を指標とした必要除染係数の一例^[2]を挙げるが、このような評価が必要となる。

表 4.6-1 プロセス性能に求められる要件

技術的要件	安全・保障措置上の要件	経済的要件
<ul style="list-style-type: none">・廃棄物発生量（除染係数、回収率、使用薬剤、処分区等）・成熟度（故障率等）・燃料仕様等	<ul style="list-style-type: none">・本質的安全性（臨界、発熱、火災、耐震、遮蔽等）・核不拡散性・規制・基準への適合	<ul style="list-style-type: none">・設備の複雑さ（保守、交換、製造性、裕度等）・処理能力（処理速度）・処理量（規模）

表 4.6-2 元素別必要除染係数(EADF)

種別		Rec. U 早期 基準	NUEq 基準			Rec. U 早期 基準	NUEq 基準
	PWR/3 年 冷却	8.75×10^4	1.50×10^7		PWR/20 年 冷却	8.75×10^4	1.50×10^7
遷移金属	Ru	4.21×10^6	2.46×10^4		Ru	3.53×10^1	2.08×10^{-1}
希土類等	Ce	4.56×10^6	2.66×10^4		Y	1.41×10^6	8.25×10^3
	Y	2.12×10^6	1.24×10^4		Am	4.25×10^5	2.48×10^3
	Eu	3.12×10^5	1.82×10^3		Cm	1.36×10^5	7.94×10^2
	Pm	1.54×10^5	8.97×10^2		Eu	7.68×10^4	4.48×10^2
	Am	1.13×10^5	6.58×10^2		Pm	1.78×10^3	1.04×10^1
アクチノ イド	Pu	8.22×10^5	4.79×10^3		Pu	5.81×10^5	3.39×10^3
	Np	2.40×10^2	1.40×10^0		Np	2.16×10^2	1.26×10^0
1 価、2 価元素	Sr	1.41×10^8	8.24×10^5		Sr	9.42×10^7	5.50×10^5
	Cs	7.77×10^6	4.53×10^4		Cs	2.07×10^6	1.21×10^4

※京都大学原子炉実験所「先進的再処理のリサイクルシステム評価に関する研究」、JNC TJ8400 99-002 (1999). 表-6 より抜粋

4.6.3 安全・保障措置上の要件

再処理においては工場の安全性と核不拡散に関連した保障措置上の性能も重要である。耐震性能やその他自然災害等に関する要件は原子力規制委員会の基準を達成することが求められるため、その時点における規制・基準に左右されるが、概ね現在の六ヶ所再処理工場に対する要請を基本として考慮することで良いと考えられる。一方、核不拡散に関する性能としては、IAEAの要求に基づいて対応することになると考えられる。

4.6.4 経済的要件

将来のコストを予測することははなはだ困難であるが、各プロセスの処理速度もしくは処理能力、保守点検・補修のしやすさ、耐用年数(交換頻度)などが重要な項目として考えられる。

4.6.5 本節のまとめ、及び主な議論の内容

プロセス性能は互いに関連する項目をどのように重み付けをして評価するかによってその要求水準が変わる。技術的、安全・保障措置上と経済的の各要件は相互に関係している上に、例えば技術的要件の中でも回収率・除染係数（すなわち分離回収性能）と廃棄物量は相反の関係がある上に、回収率や廃棄物量低減を追求すればコスト高につながる。安全性と経済性は相反の関係があり、安全性向上のために緻密なプロセスを構築するとメンテナンスやトラブル時の冗長性が低下するなどの副作用が顕在化し、結局経済性も落ちる。それらの因子をなるべく合理的・客観的に評価して意思決定を行うことが重要である。そのために、階層的意思決定法や多基準意思決定法などの様々な因子を数値化し、重み付けを調整しながら最適解を導き出す評価手法の開発を行っていく必要がある（図 4.6-1）。これまで様々行われてきた検討は、原子力エネルギーシェア拡大の前提の元、経済的な視点を重視して実施されてきた物が多いが、処理量や高速炉への展開など量的にも時間的にも余裕のあるうちにしっかりと議論していくことが求められているのではないかと考える。

まずは、軽水炉燃料（ UO_2 燃料及び MOX 燃料）再処理や分離・核変換などターゲットとした数百トン／年規模の再処理プロセスモデルを構築し、六ヶ所再処理工場等の基本的パラメーターを参考にして、各種パラメーターの感度解析を実施しキーパラメーターを抽出、別プロセスへの展開といった取組を検討していきたい。

上記要件に関する参加者によるグループディスカッションの主な内容を以下に示す。本議論は第 10 回委員会及び第 12 回委員会の 2 回に分けて行った。

1) 1 回目

- ・経済性と安全性、廃棄物発生量と分離回収性能など相反する因子がいくつかある。
- ・湿式再処理と乾式再処理を比較する際には、求められる処理容量も重要である。
- ・プロセス性能の定義をはっきりさせていくべきである。
- ・プロセス性能を決める項目として、上述した設計方針、設計条件、決定因子で十分か議論していく必要がある。

2) 2 回目

- ・再処理コストの総発電コストに対する割合は小さいことが予想されるので安全性や回収率、ガラス固化体への移行率、廃棄物量の低減等を追求できる余地はあるかもしれない。
- ・人工知能などの活用によるメリットの検討も必要。
- ・再処理への要求分離性能は、燃料製造で概ね決まると考えられる。
- ・安全性、環境負荷低減、継続性など、コスト以外の観点を含めてどこに重きを置くか、という考えそのものが「理想的なプロセス」としての提案内容のユニークさになるのではないか。

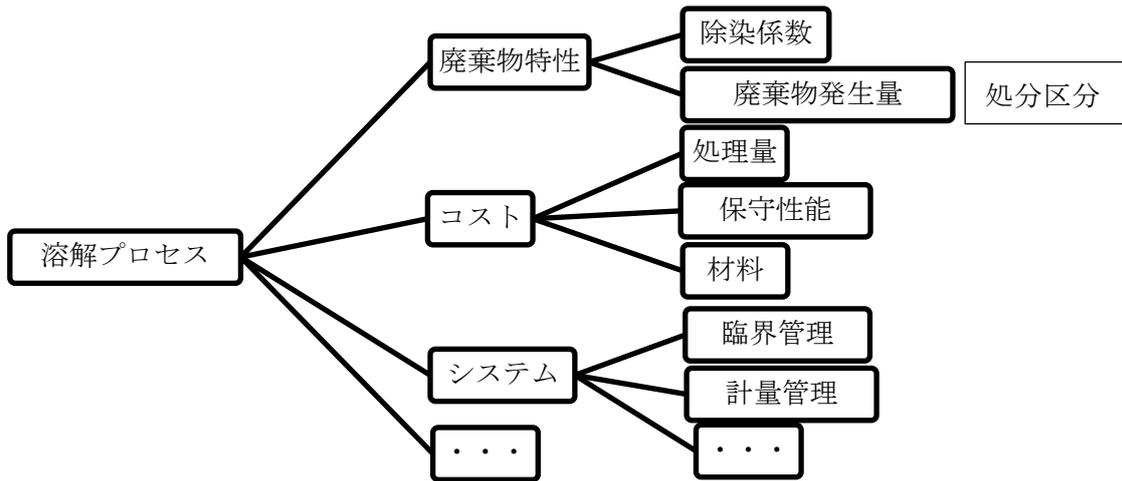


図 4. 6-1 多基準意思決定法の階層適用例

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁、「エネルギー基本計画」(2015).
- [2] 京都大学原子炉実験所「先進的再処理のリサイクルシステム評価に関する研究」、JNC TJ8400 99-002 (1999)
- [3] 核燃料サイクル開発機構「再処理システム技術検討書－実用化戦略調査研究(フェーズ I) 成果報告」、JNC TY9400 2001-014 (2001)
- [4] 動力炉・核燃料開発事業団「先進湿式プラント設計研究」、PNC TN8410 98-050 (1998)
- [5] 核燃料サイクル開発機構「再処理システム技術検討書(研究報告)」、JNC TY9400 2000-025 (2000)
- [6] 日本原子力研究開発機構「高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT プロジェクト) -フェーズ I 報告書-」、JAEA-Evaluation 2011-003 (2011)

4.7 開発速度、他分野の進捗・導入

4.7.1. 概要

将来世代再処理技術を検討する上で考慮すべき要件の一つとして、開発速度や他分野の進捗・導入の視点で検討した。

原子力技術の開発速度については、他の分野とは異なる要素があり、開発資源、技術的特徴、開発アプローチの他、政治的・社会的影響を受ける。また、特に再処理分野の開発速度を阻害している要因として、社会的受容性の欠如、放射線等による特殊な環境条件、多額な開発コスト・廃止措置の問題、原子力事故・トラブルによる不信、開発推進の仕組みやマネジメントの欠如が指摘された。

他分野の進捗・導入の面では、原子力分野への一般産業技術の応用例として、ロボット技術の事例を参考に、経緯や適用範囲等を紹介した。一方で他分野の技術参入を妨げる要因として、原子力業界特有ともいえる放射線等による特殊な環境、徹底した競争原理やコスト意識の不足、閉鎖的な業界に基づく弊害、開発主義の弊害、技術導入を促進する仕組みの欠如が指摘された。また、本報告の中では研究開発の進め方の参考として、他のメーカーで実践されている「作らずに創る」の活動を紹介した。コンピュータ技術を駆使することで、作らない部分を増やし、開発コストを削減する一方、設計資産を増やしていく斬新な発想であり、今後の研究開発の進め方にも大いに通ずる部分があると主張した。

上記の開発速度や他分野の技術進捗・導入の視点からの考察、我が国におけるガラス固化技術の開発過程の振り返りをもとにしたグループディスカッション等を行った。

全体のまとめとして、

- ・ 特に開発速度や他分野の技術導入の面を考慮した場合には、将来の再処理像として、革新性を有する独創的な再処理技術を指向するよりも、既存の技術や他の産業分野で実用実績のある技術を積極的に取り入れたプロセスを基本として改良していくアプローチが有用である。
- ・ 机上検討だけでなく、費用と手間を惜しまず工学規模のホット試験の手順を踏み、技術課題をもれなく把握して対策を講じた上で実機導入へとつなげることが重要であり、結局は開発速度をあげることにつながる場合もある。

と結論づけた。

4.7.2. 開発速度に関する考察

原子力技術の開発速度を考えてみると、元来、核の軍事利用を目的として発展してきた経緯があり、その国家的必要性から開発が著しく加速されてきた。ただ一方で、一度原子力の事故やトラブルが発生すると、社会的にブレーキがかかり、開発は急速に停滞する（図 4.7-1）。

開発速度に影響する諸因子を列挙すると、技術の必要性・緊急性、開発体制、開発基盤（予算、人材、設備等）、コスト、社会的情勢、国家政策、開発目標、他分野の技術参入等が考えられる。これらの因子をうまく分析することで、開発速度の向上につなげることが可能といえる。

また、再処理技術開発の課題として従来指摘された点として、再処理技術開発の人材の枯渇・減少と開発プロモーターの不在、国の技術開発期間のミッションの再検討、関連機関の有機的連携、中長期にわたる開発期間の技術伝承と進展、関連施設の整備（非効率的運用、老朽化）が挙げられており、これは多少にかかわらず、開発速度に影響する問題と捉えることができる。以上の点は重要な指摘であり、将来の再処理技術開発を国家プロジェクトとして推進していく局面においては、十分に意識して進めることが必要といえる。

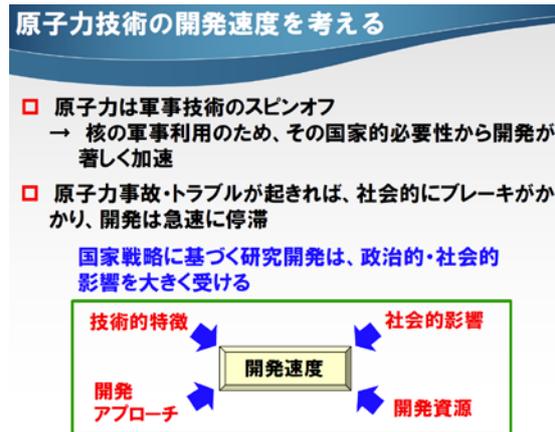


図 4.7-1 原子力技術の開発速度に与える主要因

4.7.3. 他分野の進捗・導入に関する検討

他分野の技術導入については、先述の通り、原子力分野へのロボット技術の適用事例を示した。図 4.7-2 に示すように、ロボット技術の適用は主に作業員の被ばく低減が目的であり、技術改良を加えながら、保守や遠隔操作等、幅広く適用が図られてきた。このロボット技術の導入により、人の限界を超えた極限作業への対応を可能にし、原子力分野の発展に大きな貢献をもたらした。

このような他分野の技術導入に関する好例は認められるものの、これまでの歴史を振り返ると、再処理技術の開発にあたって、全体として技術導入を積極的に促進してきたかどうかについては疑問が残る。この点については、原子力業界特有の閉鎖的な面や開発至上主義の弊害も影響しているといえる。

他分野での考え方を導入する意味で、もの作りの分野で実践されている「作らずに創る」の発想について紹介した（図 4.7-3）。これは他のメーカーで実践されている独自のものづくりプロセス改革である。目標を開発効率の向上、上流工程での技術の見極め、試作機に頼らない製品開発の3項目を掲げ、「作らずに創る」を実現する5つの軸を中心に実践されている。これらは我々が進める再処理研究の領域でも応用できる考え方であり、今後さらに開発コストの低減が重要視されることを考えると、実践する意義は大きいといえる。



図 4.7-2 原子力分野へのロボット技術の適用性



図 4.7-3 一般産業界での技術開発の支店例

ここから学ぶポイントを挙げると、

- ① 積極的な技術導入を図ることで開発コストや期間の縮減を図る
- ② 高い品質、高い信頼性を備えた技術を追求することで社会的受容性の向上を図る
- ③ シミュレーション技術を活用することで開発コストの縮減や開発の加速を図る
- ④ 設計の資産化を進めることで、汎用性の高い形でツールの整備を図る
- ⑤ 人が技術を創り上げる観点から、人材育成が重要である

本例のみならず、他分野の技術やノウハウを積極的に活用することにより、合理的な開発スキームを構築することが可能である。

4.7.4 議論の内容

上記要件に関する参加者によるグループディスカッション等の主な内容を以下に示す。

- ・ 現状の再処理開発は新しい技術よりも、いかに現状技術を維持するかにとどまっている。開発速度の面においても、再処理技術開発が良くも悪くも実例となってしまっている。
- ・ 開発の停滞に関しては、例えば軍需で開発が進むこともあるが、公開できないなどプラスに働かないケースもある。軍需の良い点としては国の推進力が重要である。再処理技術もフランスのように国策で推進することが重要で、開発速度を向上あるいは停滞を防ぐには国の推進力が重要といえる。
- ・ 実用化時期のターゲットに対して、残り 20 年を切ると、開発速度の向上を意識するが、現状ではそのターゲットも不透明であり、逆に余裕を持って検討できる状況にある。
- ・ 開発速度には目標の明確化と課題の把握とが密接に関連しており、課題への適切な対策とリソースの確保が大きく影響を与える。

六ヶ所再処理工場ガラス固化設備において、2006 年 3 月から開始されたアクティブ試験（使用前検査の JNFL 自社検査）で、2007 年 11 月に発生した熔融ガラスの流下不調等のトラブルについては、東海村に設置された実規模モックアップ試験施設 (KMOC) を用いた原因究明、対策検討、試験を通じて、実機の設備・運転方法の改善を行い、2013 年 5 月に安全運転の確認及び性能の確認を完了し、もってアクティブ試験を終了した。当初の終了予定

より4年半の遅延であった。

そのトラブルは、ガラス溶融炉の温度制御が不調となり、炉内のガラス成分の流動性が制御できず、結果として、溶融ガラスの流下不調に至った事象である。

本トラブルは、技術開発を行った JAEA の東海再処理工場のガラス固化試験施設 (TVF) での運転においてはなかった事象であり、六ヶ所再処理工場での運転において初めて経験した事象である。

ガラス固化技術が、その開発者 (JAEA) から事業者 (JNFL) に技術移転される過程において、以下については、使用条件の違いによる技術課題として明確に認識され、設計においてその対策がなされていた。

- ① 処理対象燃料の高燃焼度化に伴って増加する Mo 等がガラス溶融炉内で低粘性の流体 (イエローフェイズ) を形成し、炉内の流動性に影響を与えること
- ② 同じく高燃焼度化に伴って増加する白金族元素がガラスへの溶融性が小さく、分離して沈降しやすいこと、また、白金族が多くなるとガラスの粘性は上昇し、炉内の流動性に影響を与えること
- ③ 処理量増加に対応するため、機器のスケールアップが必要であり、温度や流動性の制御を考慮した機器設計を行う必要があること

設計において検討された上記課題への対策が施されたガラス溶融炉は、六ヶ所再処理工場に導入され、模擬廃液を用いた化学試験において、ガラス固化としての機能及び最大処理速度での性能が確認された。

その後、高燃焼度の使用済燃料を処理した実廃液によるアクティブ試験を実施したところ、設計での想定を超える以下の問題点が顕在化し、本トラブルの発生に至った。

- ① イエローフェイズが、温度制御の安定性に重要な役割を果たす仮焼層の安定的な形成に想定よりも大きく影響した。また、高レベル廃液以外に、技術移転時には想定していなかった溶媒洗浄廃液や分析廃液を合わせて処理することとなり、そこに含まれる DBP や硫黄がイエローフェイズの生成やその安定性に大きく寄与していた。結果として、これらによって安定な仮焼層の形成、ひいては炉内の温度制御が困難となった。
- ② その結果、流動性が制御できず、白金族元素の沈降・堆積が生じたことによるガラス粘性の上昇が生じた。その結果、流動性の制御がますます困難となった。
- ③ さらに堆積した白金族元素は、ガラスの導電率の上昇 (抵抗低下) を引き起こし、加熱性能を低下させた結果、炉底部の温度を高く制御することが困難となり、溶融ガラスの流下不調を起こした。また、ガラス温度の低下は、白金族元素の更なる沈降、堆積を引き起こすこととなった。
- ④ ガラス溶融炉内において、このような堆積等の物質の偏在は高燃焼度化に伴い上昇した崩壊熱の偏在に結び付き、炉内の温度制御を一層難しくすることとなった。

本トラブル発生に至る一連の経緯から、本トラブル発生の根本要因は、高燃焼度化やスケールアップに伴う技術課題について、実際の使用環境に応じたホット試験が必要な課題と認識せず、設計のみで対応可能な課題と判断したことである。実機での機能・性能を確認するための工学規模のホット試験の実施には、FBR 燃料の再処理の試験のために計画さ

れたリサイクル機器試験施設（RETF）の例をみても、1000 億円規模の高額な投資が必要となる。しかし、工学規模ホット試験への投資は、

- ・ このようなアクティブ試験というプラント竣工に向けた最終段階で発生したトラブルは、そのままプラント全体の竣工遅延へとつながること

そして、

- ・ 3 兆円規模といわれる工事費の大部分を投じた段階での 4.5 年の遅延による経済的損失が数千億レベルに上がること

を考慮すれば、十分に妥当な投資と考えられる。

さらに、ガラス固化設備のアクティブ試験の最中に発生した東日本大震災の例を見るまでもなく、このようなトラブルによる竣工の遅延そのものが、更なる遅延を引き起こすリスクとなる。そして、度重なる竣工遅延は、一般社会に対して、再処理技術への不信感をもたらし、更には再処理そのものの意義の否定にまで結び付く可能性がある。したがって、技術開発は、決められた竣工期限を遅延させぬよう、周到に計画され、必要な開発速度をもって実施されなければならない。

開発速度については、技術課題とその対応方法が、適切に、かつ明確な共通認識として把握された後は、本トラブルの克服の過程をみても、開発目標の具体化とともに開発速度も上がり、短期間で課題の解決が図れている。

以上より、再処理の技術開発においては、机上検討だけでなく、費用と手間を惜しまず、工学規模のホット試験の手順を踏み、技術課題をもれなく把握して対策を講じた上で実機導入へとつなげることが重要であり、結局は開発速度をあげることにつながる場合もある。

以 上

4.8 技術継承

4.8.1 概要

将来の再処理技術、およびこれを含む原子力関連技術を考えるときに、技術継承の観点からの問題意識と課題提起を欠くことはできない。特に、東京電力福島第一原子力発電所事故、もんじゅの廃炉決定、六ヶ所再処理工場竣工の相次ぐ延期、高レベル廃棄物処分事業の停滞など、燃料サイクルの成立が見通せない中、これまで培ってきた技術と研究開発成果、並びにこれを担っている専門家とその知識を維持・継承していくことは加速度的に困難さを増している。

このため本研究専門委員会では、将来世代の再処理を検討する上で考慮すべき要件の一つとして技術継承を採りあげ、幹事によるこの観点からの考察と課題提起のプレゼンテーション、および委員全員による議論を行い、今後の研究開発における重大な課題として認識を深めることにした。

プレゼンテーションでは、技術継承というテーマがあらゆる将来世代再処理検討上の要件と複雑に関連しているため、あえて論点を(1) (ここでの議論における)技術継承の定義、(2) 技術継承の実例と再処理技術開発との比較、(3) 技術継承に必要なもの、(4) 網羅的な継承の必要性、という4つに絞って考察と課題提起を行った。

続くディスカッションでは、技術継承が実現するための環境や条件を中心に意見が交わされた。

4.8.2 技術継承に関する考察

再処理に限らず原子力技術研究開発における技術継承についての問題点として、若手(後継者)確保の難しさ、知識や技術の公式化や言語化が不十分なことによる共有の難しさ、技術習得のための環境やインフラ維持の難しさ、現有する技術を現場に生かす機会の少なさ、などが挙げられる。これらの問題は、人材育成、研究開発インフラ、エネルギー政策、原子力利用の経済性についての考え方、世界的趨勢などのあらゆる領域と複雑に関連しているために、将来世代の再処理技術の構築という観点から考察しようとするとなかなか整理された議論になり難い。このため、議論の及ぶ範囲は限定されるが、論点を(1) 技術継承の定義、(2) 技術継承の実例と再処理技術開発との比較、(3) 技術継承に必要なもの、(4) 網羅的な継承の必要性、に絞って考察を行った。

(1) 技術継承の定義

継承すべき知識や能力は機関や立場によって異なると考えられるが(図4.8-1)、ここでは技術的な内容に絞って次のように段階別な分類ができるのではないかと考えた。

- ・従来レベルの業務、経営ができるように、現在までに得た 技術的知識を維持 すること
- ・さらに技術を 改善・革新していく能力を確保 すること
- ・必要な時期に実機操業が立ち上げられるように、生産基盤を継承 しておくこと
- ・安全性、経済性を保持しながら技術を 実用しつつ改善点を見出す能力を確保 すること

(2) 技術継承の実例と再処理技術開発との比較

科学技術の分野には古来継承の歴史があり、例えば鉄鋼や化学など基礎科学からプラント維持に至る幅広い層が積み重ねられている実例があり、原子力あるいは再処理技術開発における技術継承を考察する際に参考にすべきと考えられる。ここでは、原子力には有効活用により極めて長い期間エネルギー供給源となる潜在的可能性があること、発生する廃棄物の管理も長期間にわたって必要であることを考慮して、分野は異なるもののおよそ1300年にわたって継続されてきた伊勢神宮式年遷宮(図4.8-2)について調査した^[1]。その結果、20年毎に遷宮を行うことにより、プロジェクト内の異なる立場における経験を重ねつつ技術伝承が可能であること、最小コア技術者(30名)を神宮の常勤職員として維持し、遷宮時に各地から集められた臨時職員の指導を行うことにより地理的にも技術の広がりに寄与していることなど、技術継承や人材育成を考える上で分野を超えて参考とすべき知見を得ることができた。

(3) 技術継承に必要なもの

さまざまな技術レベルにおける技術継承の要件として、現状知見の文書化・公式化・データベース化やOn the Job Trainingによる暗黙知継承、古くなった知識や設備の整理・スクラップ、他分野との技術や生産基盤の共有化、海外プロジェクトへの参画などが挙げられるが、最も重要なのは、多様な技術レベルと外部状況を把握し、実用技術の必要性和実現時期を見据えて技術継承(=技術開発そのもの)の総合戦略を立てることと考えられる。

この観点から、技術レベルとR&D費用との関連を模式化した図4.8-3^[2]は、開発コストについて説明しているだけでなく、実用化に向けた技術の絞込みが著しいこと、基礎からパイロットプラントレベルにかけての研究開発には実用へのサクセスストーリーとは異なる時間的スケール感や柔軟性が求められることを示唆しており、知識・技術の継承や人材育成の観点からも考察の起点になるものと考えられる。

(4) 網羅的な継承の必要性

これまでに得た知識や経験、獲得した価値ある技術はできる限り次世代に受け継がれることが望ましいが、要員、インフラ、予算との兼ね合いや国内および世界的動向の変化により、取捨選択の決断は避けられない。この観点から、技術を文書や展示物など情報としてのみ残すこ

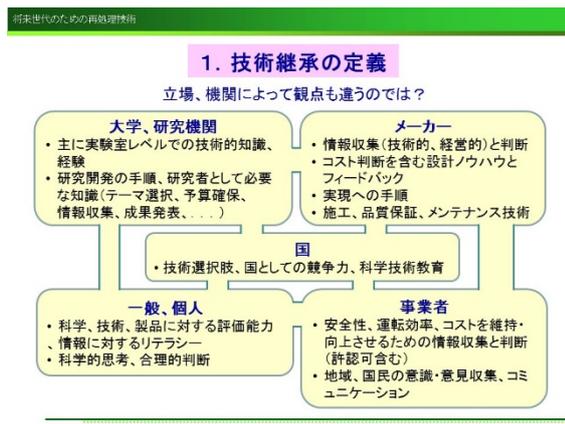


図 4.8-1 機関や立場によって異なる「技術伝承」



図 4.8-2 伊勢神宮式年遷宮

との意味、他国で継承されている技術の自国での再展開可能性、途絶えた技術を復活するためのコスト、技術継承とステップアップとの相反性、(特に原子力について) 技術保持・継承に対する軍事的需要の意味合い、などについて今後議論することが必要と考えられる。

4.8.3 委員会における議論

技術継承に関する委員会参加者によるグループディスカッションおよび全体討議の主な内容を以下に示す。

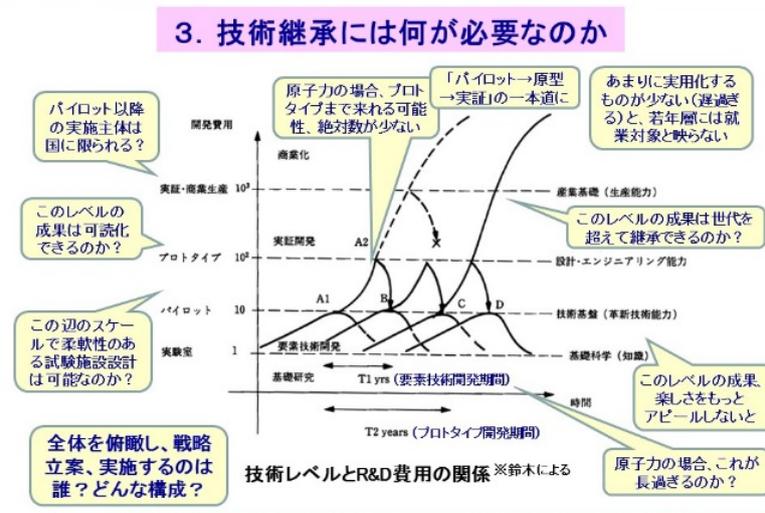


図 4.8-3 技術レベルと R&D 費用の関係^[2]

- ・技術開発の速度、技術伝承 (いったん途切れたもの) は、その必要性、緊急性並びにそれらに対する社会のコンセンサスから大きな影響を受ける。例えば、六ヶ所再処理工場のアクティブ試験におけるガラス固化工程では高燃焼度化やスケールアップに起因するトラブルが発生したが、それによって改めて技術開発の必要性和目標が明確に認識され、コンセンサスが得られた結果、国の予算化と関係者の努力により短期間に実用化にいたる成果が得られた。
- ・原子力技術のスパンは、事前の開発に 35 年、運転に 40 年、デコミショニングまで含めると人の一生に匹敵する。技術のモジュール化を行えば 10 年毎に施設のリプレイスが可能となり、技術伝承が可能になる。
- ・伊勢神宮の式年遷宮に関わる人の数に相当な増減があるのに成立しているのは、伊勢神宮がブランド化されていて、関わる人のモチベーションを高く維持できているのではないか。
- ・大学ではホット施設には学生が集まりにくい。メーカーではスペシャリストはいても、工事の受注が無ければ伝承されない。技術は人にあると考えるならば、技術継承のための再雇用も必要である。
- ・技術開発と技術伝承との間の矛盾について、「継続する」ことは「新しいことを取り入れない」ということではないと考える。「技術」にも (継承対象となるものと新たなものを求めるべきものとの) 区分が必要ではないか。

参考文献

- [1] 植村、「人口減少時代の社会資本の維持管理・更新のための技術継承と技術者確保に向けて -伊勢神宮の式年遷宮からの示唆-」、NRI パブリックマネジメントレビュー April 2011 vol. 93.
- [2] 鈴木達治郎、「巨大システム技術の継承に関する理論的考察 -高速炉開発への応用-」、電力経済研究、No. 38、p. 17-30 (1997).

4.9 安全性

4.9.1 再処理工場の特徴

安全性を議論する前に再処理工場の特徴を知る必要がある。まず、再処理工場で行われる処理の特徴として以下3点があげられる：

- ① 燃料の成分を分離するため、固定の燃料を流体に変換する必要がある。
- ② 流体に変換した後、化学反応を利用して成分の分離を行う。
- ③ 回収して再利用する成分は燃料に転換する。また、高レベル廃棄物とする成分は安定な形態に転換する必要がある。

また、原子炉と比較すると、以下のような特徴がある：

- ① 処理する放射性の物質が封じ込められておらず、流体の状態で扱われプラント内を移動する。
- ② 気体はタンク内の液面等から施設外までフィルタ等を介して通じている場合が多い。
- ③ 化学反応を積極的に利用するため、分離試薬を添加する。分離試薬は、化学的に活性なものや有機物を使用する場合がある。
- ④ 採用する分離概念によって、流体の種類、温度条件、添加試薬が多岐にわたる。

将来世代の再処理技術を検討する際には、分離概念の本質的な安全性について、これらをふまえて考察する必要がある。

4.9.2 再処理の分離概念に関する安全性

将来世代の再処理技術では、これまでとは違った分離概念を採択する可能性がある。分離概念は、適用する対象によって向き不向きがあり、本質的に再処理に向かない概念も存在すると考えられる。すなわち、概念検討の段階から安全上有利な分離技術を選定していく必要がある。また、検討する概念の本質的なリスクを十分理解しておく必要がある。その際の安全上の着眼点について、以下列挙する：

- ① 放射性物質の外部への漏洩のリスクを可能な限り低減化する。
- ② 流体の種類を把握する。
- ③ 温度や圧力などの操作条件を把握する。
- ④ 流体を扱うスケールを把握する。
- ⑤ 化学反応速度、化学反応に伴う発熱量などを把握する。
- ⑥ 使用する分離試薬の性質を把握する。
- ⑦ 分離概念の複雑さを把握する（できるだけ単純なものがよい）。

上記着眼点について、現行の再処理技術である PUREX 法にあてはめて考察する。まず、分離概念は、一般産業でも採用され実績のある溶媒抽出を基本としている。流体は、水溶液および有機溶媒を使用し共に液体である。高温流体は使用していない。プロセス内の温度は、室温から沸点の範囲内にあり、圧力は常圧に近い負圧で運転される。化学反応は著しい発熱反応ではなく、溶媒抽出に関する化学反応の速度は比較的遅い。副反応で生じた有機物による爆発、および分解生成物による分離の阻害の可能性があるため、これらを抑制する必要がある。比較的大量の流体を扱うため、プロセス内には多くのタンクが必要となる。いくつか安全上の懸念事項はあるものの、これらを克服して安全な再処理工場が実現されている。将来世代の再処理技術を

検討する際には、PUREX 法の性能を上回り、かつ安全性の高い分離技術の提案が望まれる。

4.9.3 議論の内容

理想的な再処理技術に求められる要件について、今回説明のあった安全性の観点から、グループ毎に議論を行った。以下に主な議論の内容を示す。

- ・再処理プラントと化学プラントとの違いは崩壊熱と放射線の有無である。再処理ではこの点を考慮する必要がある。
- ・再処理の各設備を小型にしておくことが安全性向上およびリスク分散の観点から有効ではないか？例えば、溶液を入れるタンクを小型化・複数化することを考えた場合、比表面積が増大するので放熱がしやすい、空冷で冷却できる可能性がある、もし漏えいしたとしても漏えい量が少ない（事故のインパクトを小さくできる）、内容物を種類ごとに分けて管理しやすい、目が届き易く管理しやすい、といったメリットがある。また、複数化すると管理の手間が増えるデメリットがあるが、センサーやロボットの活用で解決できると考えられる。
- ・化学プラントではベテランの引退に伴い、操作ミスによる事故が増えている。再処理設備の安全性向上には、人間の手が入る運転操作を減らす、運転操作を簡素にして操作者のスキルの熟練度が影響しないようにしておくことが有効と考える。
- ・安全性の概念は分離方式により異なるのではないか？例えば、階層型の ADS 窒化物サイクルに関しては、MA を小さい範囲で閉じ込めるので安全という概念である。乾式再処理に関しては、セル内の雰囲気管理が安全上重要な観点である。
- ・安全性に関する比較評価できる基準があると良い。
- ・まずはプロセスの安全性を高める技術開発が必要ではないか？ 例えば、本質的に安全な（何もしなくても事故が終息に向かう）プロセスの開発、人の手を介在させず、ハードで安全性を確保する設計など。また、他の一般化学プラントにおける安全（評価）の考え方や知見を活用する必要がある。
- ・事故が発生した時の影響を抑制することが重要。安全性とその向上の目安として、発生しうる影響（線量）の定量的評価方法を確立することが必要である。公衆の安全を確保し安心感を得るためには、敷地境界までの距離を（5km など）十分に確保し、事故が起こったとしたらこの程度の影響（線量）があると正直に示すことが重要。

5 将来世代再処理の具体像

本章では、4章で議論した将来世代の再処理の具体像を検討する上で考慮すべき要件を参考に、4件の将来像を提示する。委員会では、先入観に囚われることが無いように比較的若手の技術者を選び、自由に将来像を提示してもらった。各々の将来像は、要件を絞って議論を展開させている。5.1において、環境負荷低減・持続的な技術向上の観点から提案する将来像を、5.2において経済性・安全性の観点から提案する将来像を、5.3において移行期の多様なニーズへの対応性の観点から提案する将来像を、5.4において廃棄物低減の観点から提案する将来像をそれぞれ説明する。

5.1 環境負荷低減・持続的な技術向上の観点から提案する将来像

再処理は有用物質のリサイクルによる正の側面の最大化と、廃棄物の削減による負の側面を最小化する役割を果たすと考えるが、廃棄物に係る環境負荷の低減に対しては更なる改善の余地があると考え。また、将来世代に向けては、これまで蓄積した技術の維持と持続的な向上が必要である。以上を踏まえ、環境負荷低減と持続的な技術向上の観点から、将来世代のための再処理として目指すべき方向性と実現に向けたプロセスを検討した。

5.1.1 環境負荷低減

環境負荷低減の観点では、高レベル廃棄物に着目し、高レベル廃棄物処分に対する反対意見の調査から高レベル廃棄物に対する不安・懸念を整理し、技術的課題と再処理としての解決策を検討した。検討の結果、高レベル廃棄物の有する有害性や超長期の減衰期間のため、処分の安全性や風評被害といった不安・懸念が強く、再処理としては使用済燃料からのU/Puの分離に加え、高レベル廃棄物の有害性と減衰期間の低減が必要と考え、解決策を検討した。有害性および減衰期間低減の観点から分離対象元素としてSr、Cs、Am、Cmを選択し、その分離プロセスを追加したプロセスを提案した。

5.1.2 持続的な技術の向上

持続的な技術向上の観点では、新しい研究結果や運転経験を反映することが不可欠と考えられるが、そのためにはプラント運転期間中の定期的な工事実施を想定した構成とする必要がある。これを実現するために、設備更新を念頭においたプロセスの複数系統化や複数プラントを定期的に建設する方法を提案した。

5.2 経済性・安全性の観点から提案する将来像

将来世代まで続く再処理を構築する上で、経済性及び安全性が必須条件であり、これらについて対策を進める必要がある。経済性および安全性のそれぞれの観点から将来世代の再処理技術について検討した。

5.2.1 経済性

日本での主力電源は、水力発電から火力発電、オイルショック後、より安価な原子力や天然

ガスへと移行しており、電源のベストミックスが進められ、電力の安定供給を実現している。電源の種類が選定される要素として、発電コストは主要な項目のひとつとなっている。特に、原料コストは発電コストの重要な要素となっており、再処理の製品である回収ウランやプルトニウムを低コストで供給することで、安価な電力を提供できるようにすることが望ましい。将来世代の再処理のあるべき姿は、その時の天然ウランを用いた原子力や他の電源の発電コストに対して、再処理を実施することによる発電コストが低く魅力的なものであることが求められる。さらに、廃棄物処分までのコストを加えてもメリットが得られることも望まれる。以上の要素を検討すると、世界の再処理を集約し工場を大型することによるコストの大幅削減も選択肢の一つであると考え将来像として提案した。

5.2.2 安全性

再処理において安全性確保は非常に重要な要素であり、本学会においても再処理サイクル施設シビアアクシデント研究WGとして一層の安全性向上を目指した検討が進められている。安全性の維持向上のためには、これらの取り組みを活かしながら、技術継承による技術力の維持向上や最新技術の導入によるシステムの更新が有効であると考えられる。そのために、定期的に安全性を向上させることが可能な施設とすることが望まれる。これにより、設備更新による技術継承での人材育成と専門性に基づいた最新技術の導入を可能とする。これを実現するため、工程または系統のモジュール化を将来像として提案した。

5.3 移行期の多様なニーズへの対応性の観点から提案する将来像

軽水炉を主に利用する時代から高速炉や核変換炉を利用する時代へ移行する途中の移行期を想定し、委員会での議論を踏まえて移行期のニーズを考察し、そのニーズへの対応性の観点から理想的な再処理プロセスの具体的な構成の提案を行った。各要件についての議論の内容の一部と、それを踏まえて考察した移行期のニーズ、移行期のニーズへの対応性の観点から検討した理想的な再処理プロセスの提案の内容を表 5.3.1 に示す。

5.3.1 様々な原子炉への対応

移行期には様々な原子炉（軽水炉、高速炉、核変換炉、等）が存在すると想定され、再処理プロセスは各原子炉に対応した様々な組成の核燃料物質を燃料製造プロセスに払い出す必要があると考える。これに対し、回収した元素の溶液を混合して所望の組成の核燃料物質を得る混合調整プロセスを再処理プロセスに設けることを提案した。

5.3.2 ニーズの変化への対応

再処理工場の建設ペースは数十年に一度と想定され、一方で将来の燃料サイクルのニーズの変化に柔軟に対応する必要があると想定されるため、設計技術の伝承と新技術の導入の機会があることが望まれると考える。これに対し、定期的な設備の交換および改良を可能とするため、設備の小型ユニット化を提案した。

5.3.3 社会的受容性向上への対応

核燃料サイクルの社会的受容性を向上するため、廃棄物処分への負担の軽減および再処理プロセスの付加価値向上が望まれると考える。これに対し、放射性廃棄物を有効利用することを前提に、放射性廃棄物を再利用に適した形態に加工して払い出す機能を再処理プロセスに持たせることを提案した。

表 5.3.1 各要件の議論での検討内容の一部、移行期のニーズ、提案する理想的な再処理プロセス

要件	検討内容の一部	移行期のニーズ、提案する理想的な再処理プロセス
回収すべき元素 ・製品と廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> ・U、Pu、MA、発熱性 FP、白金族、LLFP、その他 FP が回収対象となりうる。 ・製品の化学形態は酸化物、金属、窒化物、等。 ・各元素の同位体比率も重要となる。 	①様々な炉(軽水炉、高速炉、核変換炉、等)の燃料組成に対応した製品を作製可能。 ⇒回収元素の混合調整プロセス
開発速度、他分野の進捗、導入	<ul style="list-style-type: none"> ・開発速度を向上するには、独創的な再処理技術よりも一般産業を含むすでに開発された技術をベースに改良を進めることが有効。 	②定期的な設備交換等の技術継承の機会がある。また、将来の仕様変更等に対応するための継続的な新技術導入が可能。 ⇒設備の小型ユニット化
技術継承	<ul style="list-style-type: none"> ・伊勢神宮は 20 年おきに式年遷宮を行い、技能者を維持。 ・生産基盤を継承することが技術継承には必要。 	
社会的受容性 ・経済的見通し	<ul style="list-style-type: none"> ・核燃料サイクルの費用と採算性、高レベル廃棄物の処分に関する事項が、核燃料サイクルが社会に受容されるための課題になりうる。 	③廃棄物処分への負担の軽減。プロセスの付加価値向上。 ⇒放射性廃棄物を有効利用に適した形態に加工して払い出すプロセス
責任の在所、受益者、実施主体、ビジネス	<ul style="list-style-type: none"> ・再処理事業がビジネスとして成り立つことが望ましい。 	

5.4 廃棄物低減の観点から提案する将来像

現行の商用ベースでの再処理プロセスの主流となっている湿式再処理では、ウラン及びプルトニウムを回収する能力は十分にあるものの、硝酸による機器の腐食、放射線分解による水素の発生、冷却機能喪失による溶液の沸騰、有機溶媒の火災といったリスクに対し種々の安全対策を講じており、また、多くの廃棄物が発生することから、プロセスとして必ずしも十分でない面がある。廃棄物の処理及び処分には、多くの費用と手間を要することから、将来世代の再処理においては、廃棄物の発生量が極力少ないことが重要な要素の一つであると考え、廃棄物低減の観点から、将来世代の再処理に必要な技術について検討を行った。

湿式再処理の廃棄物としては、気体廃棄物、液体廃棄物、固体廃棄物があり、この中でも液体廃棄物は漏えいによる潜在的なリスクが常に存在するとともに、自然蒸発や放射線分解により液量や液組成が変化するなど、気体や固体の廃棄物より貯蔵管理のハードルは高い。また、液体廃棄物の中でも、高放射性廃棄物は、貯蔵中においても崩壊熱を除去する冷却機能が必要であり、さらに、その処理及び処分には、ガラス固化体にして地層処分するため、多くの費用と手間を要する。このため、将来世代の再処理プロセスでは、液体廃棄物の発生量を極力少なくすることが重要と考えた。そこで、湿式法以外の再処理法を将来像として提案した。将来世代における技術革新の進展を期待し、レーザー濃縮技術の再処理への応用、ナノレベルでの粉

砕技術、光ピンセットなどによる分子レベルでの補足技術、等の応用により理想的な再処理法が構築できるものと期待される。

5.5 まとめ

4つの異なる観点より将来世代の再処理の具体像を示した。5.1～5.3は、従来技術を発展させて再処理の将来像を示したものである。社会的な状況が許せば、どれも実現性が高いと考えられる。また、5.4では野心的な将来像を提案したが、将来世代を100年後までと考えればあながち夢物語ではなく、むしろ魅力的な技術開発項目を提案する意味で本委員会の意図と合致した有意義な提案であると考えられる。ここで提案した将来世代の再処理の具体像は、どれも最適解ではないが、提案した要件を満たす一つの解として捉えて頂きたい。

なお、詳細については章末に示す2017年春の年会の企画セッションにおける予稿および発表スライドを参照いただきたい。

5 章 添付資料

日本原子力学会 2017 年春の年会企画セッション「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会報告：将来世代の再処理技術はいかにあるべきか？」

第 3 部 「将来世代の再処理技術」資料集

① 環境負荷低減・持続的な技術向上の観点から

(三菱重工業 村木 渉、黒田 順也)

- 予稿
- 講演スライド集

② 経済性・安全性の観点から

(東芝 高橋 優也)

- 予稿
- 講演スライド集

③ 移行期の多様なニーズへの対応性の観点から

(日立製作所 渡邊 大輔)

- 予稿
- 講演スライド集

④ 廃棄物低減の観点から

(日本原子力研究開発機構 長岡 真一)

- 予稿
- 講演スライド集

2017 年春の年会

総合講演

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会報告： 将来世代の再処理技術はいかにあるべきか？

(3) 将来世代の再処理技術 - ① 環境負荷低減・持続的な技術向上の観点から

(3) Reprocessing Technologies for Future Generations

① From the Viewpoint of Environmental Loading Reduction and Continual Improvement of Technology

*村木 渉, 黒田 順也

三菱重工業 (株)

1. 概要

原子力エネルギーの利用は、原子核のもつ膨大なエネルギーの利用やエネルギーセキュリティの向上が期待されるが、核分裂生成物の発生に伴う安全対策や放射性廃棄物の発生という側面も有しており、この影響を可能な限り小さくする必要がある。その中で再処理は有用物質のリサイクルによる正の側面の最大化と廃棄物に係る環境負荷の最小化の役割を担っている。日本の再処理技術は有用物質のリサイクルに焦点をあて実用化が進められてきたが、社会的に受容されるには環境負荷低減に対して更なる改善が望まれている。将来世代に向けては環境負荷の低減に取り組むとともに、今後も再処理の役割を担い続けるため蓄積した技術の持続的向上が必要である。以上を踏まえ、環境負荷低減と持続的な技術向上の観点から、将来世代のための再処理として目指すべき方向性と実現に向けたプロセスを検討した。

2. 検討内容

(1) 環境負荷低減

高レベル廃棄物処分に対する懸念等の調査から、現状の地層処分については、技術的には安全性を有するものであっても、高レベル廃棄物の有する有害性や超長期の減衰期間に起因して、国民の間には処分の安全性や風評被害といった不安、懸念が根強く存在すると考えられる。再処理は処分の上流側プロセスであり、使用済燃料からの U/Pu の分離に加え、核種分離の技術を付加することでこれら不安や懸念の低減に貢献が可能である。本検討では、将来の再処理技術の更なる改良として、高レベル廃棄物の有害性と減衰期間の低減の観点から、実用化を優先すべき分離対象核種について提案した。

(2) 技術の持続的な向上

再処理技術には、一般的な化学分離プロセスに加え、高放射性物質に対する遮へいや閉じ込めに起因する特殊かつ高度な技術が求められ、保守や設備更新の面での制約条件も多い。また、(1)の環境負荷低減への取り組みは技術的な目標達成に長期間を要すると考えられ、既存の再処理施設を活用して技術の維持・向上を図っていく必要がある。さらに、技術向上に必要な研究結果や運転経験を適切に反映するには、プラントの基本計画段階において、プラントを長期間停止することなく更新工事が可能な設備構成とする必要がある。これらを踏まえて再処理技術を持続的に向上するための技術的な方策を検討した。

*Junya Kuroda, Wataru Muraki

Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会報告：
将来世代の再処理技術はいかにあるべきか？

(3) 将来世代の再処理技術 - ① 環境負荷低減・持続的な技術向上の観点から

2017年 3月 29日

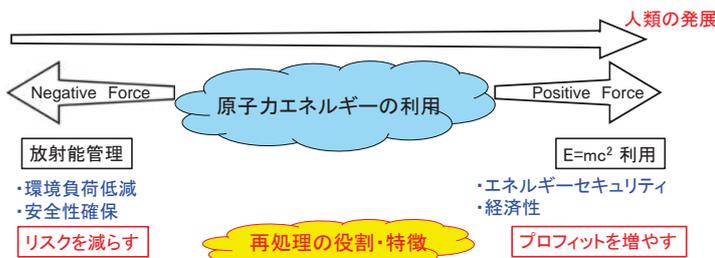
「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会
○ 村木 渉 (委員)*
黒田 順也 (委員)*
島田 隆 (幹事)*
*三菱重工工業株

1

1. 再処理の役割と理想を考える上での視点
2. 将来世代に向け再処理が目指すべき理想
 - (1) 環境負荷低減の視点から
 - (2) 持続的な技術向上の視点から
3. 理想実現に向けたプロセス
 - (1) 環境負荷の段階的な低減に向けたシナリオ
 - (2) シナリオ実現のための方法
4. まとめ

2

1. 再処理の役割と理想を考える上での視点



理想を考える上での視点		求められている状態
再処理の役割 (外的要因)	エネルギーセキュリティ	燃料輸入が途絶えた場合も「安定したエネルギー供給」が可能
	環境負荷低減	廃棄物の量、有害さ、管理期間が「社会が許容できるレベル」以下
再処理の特徴 (内的要因)	経済性	「社会の求める価値観」に見合うコスト相場より低い
	安全性確保	「社会に重大な影響を与えない」こと
	持続的な技術向上	上記の各視点での実現に向け技術が継続的に維持・向上できること

3

2. 将来世代に向け再処理が目指すべき理想

(1) 環境負荷低減の視点から

■ 課題点 (高レベル廃棄物)

- 高レベル廃棄物の処理・処分：
U・Pu回収、ガラス固化で大幅な毒性低減(10万年⇒1万年程度)
- 一般社会の不安・懸念の声：
 - ・ 高レベル廃棄物(ガラス固化体)は毒性が極めて高い。(高放射能、高発熱量、多核種を含む)¹⁾
 - ・ 日本は地下水が豊富であり地下水を介し、高レベル廃棄物中の放射性物質が人間の生活圏を汚染する可能性がある。¹⁾
 - ・ 長寿命核種を含むため超長期間の埋設が行われる。
⇒超長期間の不確実性も踏まえた安全性の実証が必要。¹⁾

※調査結果の一部。技術面のみ抜粋。

調査結果の要点 (不安・懸念の内容)	技術的課題
地震の多い日本で、本当に超長期間安全を確保できるのか？	高レベル廃棄物が、 長半減期の核種を含む
放射性物質の漏えいは起きないのか？	高レベル廃棄物が、 有害度が高い物質を含む

引用文献 1) れんげ通信「高レベル放射性廃棄物は地層処分できるか？」

2) 日本弁理士連合会「第2章 核燃料サイクルの廃止と放射性廃棄物の後始末」 他にも同様の記載文献あり

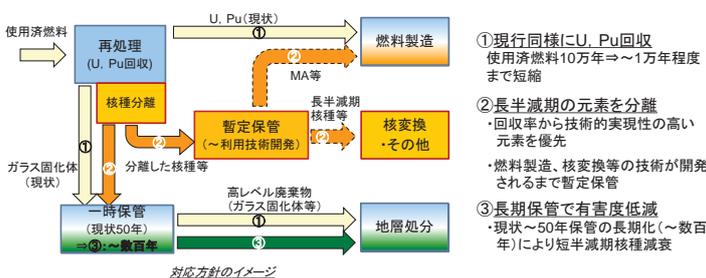
4

2. 将来世代に向け再処理が目指すべき理想

(1) 環境負荷低減の視点から

■ 課題の解決に向けた対応方針

- ① 物量低減: 使用済燃料中からのU、Puを回収 ◀ (現行の継続)
- ② 減衰期間の短縮: 長半減期の元素の分離
- ③ 放射能毒性(発熱量、有害度(Sv))低減: 長期保管による短半減期の元素減衰



5

2. 将来世代に向け再処理が目指すべき理想

(2) 持続的な技術向上の視点から

(1)の実現に向けて継続的な技術向上が必要
⇒ 現行プラントをベースに課題点を検討

■ 再処理工場の特徴

- ① 特殊なシステム・機器が要求される
 - ② 必要な処理容量が小さい
- 放射線物質の取り扱い
・閉じ込め
・高放射線(遠へい)
・臨界
・核不拡散 etc.
- 化学プラント (分離、精製etc.)
- ・人が立ち入れないセル
 - ・遠隔操作による保守
 - ・特殊機器(形状制限、保守不要な構造・システム)
 - ・計量管理 etc.
- 日本に必要な再処理量は1000tHM/年で賅ってしまう

■ 課題点

- ① 人が立ち入れないような特殊環境では、
➤メインプロセスの改良がしづらい ➡ 運転経験反映による改良が困難
- ② 必要な処理容量が小さくてすむため
➤プラント数が少なくてすむ ➡ 技術の改善、伝承の機会が減少

6

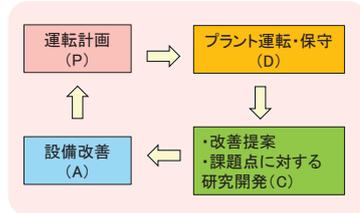
2. 将来世代に向け再処理が目指すべき理想

(2) 持続的な技術向上の視点から

■ 対応方針

- ① 設備・プロセスの更新と核種分離機能等の追加: 現行プラント
- ② 系統多重化、余裕のある配置: 新規プラント
- ③ プラント複数化による定期的な建設: 新規プラント

◆ 技術向上のPDCAによる技術方策



段階的に運転経験や研究開発結果等を反映し技術向上を図っていく

【技術向上のPDCAのための打ち手】

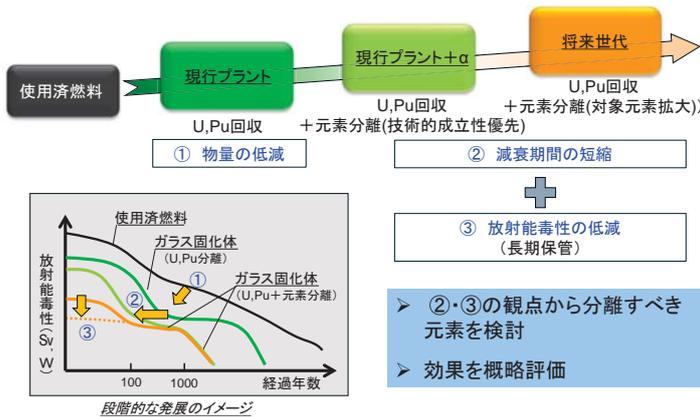
- 設備・プロセスの更新と核種分離機能等の追加
運転経験の反映による改善と技術改善・伝承機会の創出
- 系統多重化、余裕のある配置
建設時から機器・設備の取り換え更新を考慮することでプラント長期停止させずに補・改良
- プラント複数化による定期的な建設
1基あたりの処理能力の適正化と設計段階での改善内容の反映

7

3. 理想実現に向けたプロセス

(1) 環境負荷の段階的な低減に向けたシナリオ

■ 段階的な発展の優先順位

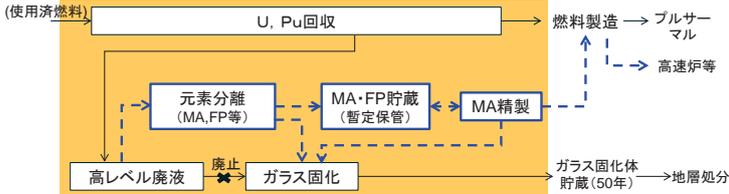


9

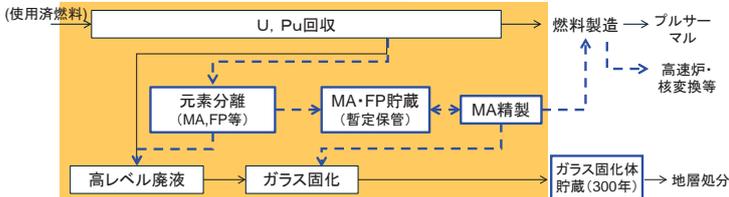
3. 理想実現に向けたプロセス

(2) シナリオ実現のための方法 ~ 元素分離の追加 ~

■ 設備対応の一例(現行プラントへの追加)



■ 設備対応の一例(新規施設として建設(湿式))



11

2. 将来世代に向け再処理が目指すべき理想

■ 各視点での検討結果

課題	対応方針
環境負荷低減 高レベル廃棄物の処分 ・超長期間の減衰期間 ・非常に高い有害度 ⇒一般社会が地層処分を受け入れにくい	現行のU, Pu分離[10万年⇒1万年]を継続しつつ、 ・長半減期の元素の分離[1万年⇒さらに短縮] ・長期保管(短半減期(高有害度)の核種を減衰)
技術的な持続的な向上 再処理技術の維持・向上 ・プラント運転経験の設備反映が容易ではない ・技術の改善、伝承の機会が少ない	・設備・プロセスの更新と核種分離機能等の追加 ・系統の多重化、余裕のある配置 ・プラント複数化による定期的な建設

■ 将来世代に向け再処理の目指すべき理想(あるべき方向性)

上記の検討結果から、
「環境負荷低減のため段階的に技術向上を図ることで、社会から受容される中での、原子力エネルギーの継続的利用に貢献する」ことと考える。

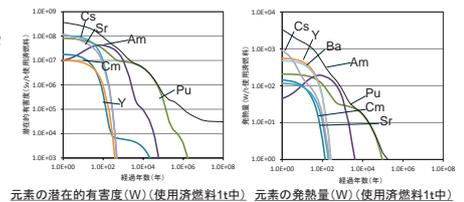
8

3. 理想実現に向けたプロセス

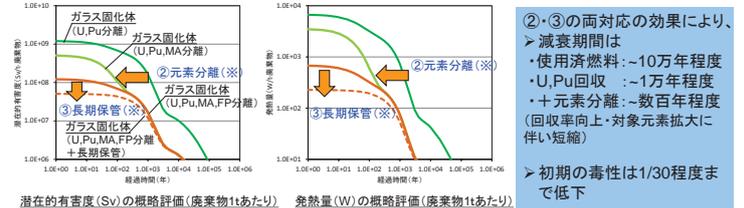
■ 分離対象元素

使用済み燃料中の元素データから毒性(有害度、発熱量)低減の点で有効な元素を選定

【分離対象】
(MA) Am, Cm
(FP) Sr, Cs



■ 効果の概略評価



②・③の両対応の効果により、
➢ 減衰期間は
・使用済燃料: ~10万年程度
・U, Pu回収: ~1万年程度
・+元素分離: ~数百年程度
(回収率向上・対象元素拡大に伴い短縮)
➢ 初期の毒性は1/30程度まで低下

*分離効率率は90%、長期貯蔵期間は300年と仮定。*潜在的有害度はICRP Publ.72の係数から算出

10

3. 理想実現に向けたプロセス

(2) シナリオ実現のための方法 ~ 持続的な技術向上への対応 ~

	系統多重化、余裕のある配置	プラント複数化による定期的な建設
イメージ	高レベル廃液 MA・FP分離工程① MA・FP分離工程② 設備更新の手順イメージ ① 運転 ② スタンバイ ③ 運転	建設イメージ 運転経験等反映 プラント③ プラント② プラント① 現行プラント
概要	・運転経験による改良を現行プラントに反映する ・片系統で運転中に他系統を除去~更新	・運転経験による改良を次のプラントに反映する ・2~3基を建設(1基/10~20年程度のペース)
設計課題	・実績のある技術がベースのため、相対的に初期不良等は少なく稼働率が高いと考えられる	・設計から変更する可能性があり、初期不良等による稼働率低下リスクが相対的に高いと考えられる
新技術	・適用が難しい(設計で想定した部分のみ)	・適用し易い(施設全体に反映可)
コスト	・相対的に低い	・相対的に高い
その他	・立地数が少なくてすみ	・立地数が増える

12

4. まとめ

■本検討での再処理の目指すべき理想

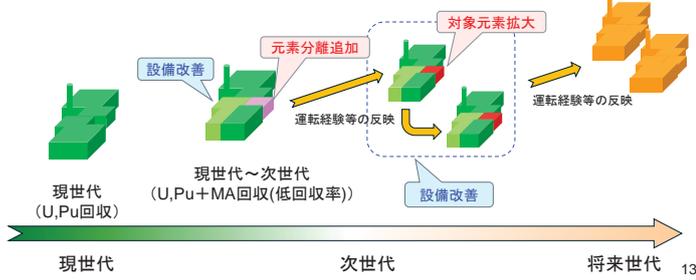
環境負荷低減のため段階的に技術向上を図ることで、
社会から受容される中での、原子力エネルギーの継続的利用に貢献する

■シナリオの一例

回収元素	2040年頃	2060年頃	2080年頃
U,Pu	99.9%	99.9%	99.9%
MA	70%	90%	99%
FP(Cs, etc.)	—	70%	90%

次世代:
(U,Pu+MA(高回収率)
+FP回収(低回収率))

将来世代:新プラント
(既存プロセス改良
/新規プロセス開発)



「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会報告：

将来世代の再処理技術はいかにあるべきか？

(3) 将来世代の再処理技術 - ② 経済性・安全性の観点から

(3) Reprocessing Technologies for Future Generations

② From the Viewpoint of Economy and Safety

*高橋 優也

(株) 東芝

1. 概要

将来世代まで続く再処理を構築する上で、経済性及び安全性が必須条件であり、これらについて対策を進める必要がある。本発表では経済性と安全性の観点から将来世代の再処理技術について検討した。

2. 検討内容

(1) 経済性の観点から

日本での主力電源は、水力発電から火力発電に移行し、さらにオイルショック後、より安価な原子力や天然ガスへと移行しており、電源のベストミックスが進められ、電力の安定供給を実現している。電源の種類が選定される要素として、発電コストは主要な項目のひとつとなっている。日本やドイツでは再生可能エネルギーに対し、固定価格買取制度やこれに基づく賦課金などを導入することで、その割合を増やしてきている。原料コストは発電コストの重要な要素となっており、再処理の製品である回収ウランやプルトニウムを低コストで供給することで、安価な電力を提供できるようにすることが望ましい。将来世代の再処理のあるべき姿は、その時の天然ウランを用いた原子力や他の電源の発電コストに対して、再処理を実施することによる発電コストが低く魅力的なものであることが求められ、このように経済の原理からの需要により、推進されるものとなることが望ましい。さらに、再処理においては廃棄物処分まで合わせた廃棄物コストでもメリットが得られることも望まれる。

(2) 安全性の観点から

原子力産業として、安全性確保は重要な要素であり、原子炉や再処理工場で安全性評価を行っている。現在も本学会において再処理サイクル施設シビアアクシデント研究WGとして一層の安全性向上を目指した検討が進められており、安全性を向上する取り組みが行われている。

安全性の維持向上のためには、これらの安全性を向上する取り組みを活かしながら、技術継承による技術力の維持向上や最新技術の導入によるシステムの更新が有効であると考えられる。そのために、定期的に安全性を向上することが可能な施設とすることが望まれる。これにより、設備更新による技術継承での人材育成と専門性に基づいた最新技術の導入を可能とする。

これらの観点からモジュール化はひとつの候補となり得る。工期短縮や稼働率の向上にも繋がるだけでなく、モジュール更新の際に技術継承や最新技術の導入が可能となり、経済性・安全性の向上をもたらすことが期待できる。

*Yuya Takahashi

Toshiba Corporation

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会報告：

将来世代の再処理技術はいかにあるべきか？
(3) 将来世代の再処理技術-② 経済性・安全性の観点から

平成29年3月29日

日本原子力学会
「将来世代のための再処理技術」研究専門委員
東芝 高橋優也

背景～専門委員会での議論と将来求められる再処理システム

● 「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会での議論
再処理技術を考えるうえで必要な要件と要点

要件	要点
対象燃料	LWR、FBR、ADSなど多様化
国際的視点	国際法、協定、規制やPuインベントリの取扱
回収元素、製品および廃棄物	U、Puに加え、MA、FPも対象
社会的受容性と経済性見直し	技術的成立性、経済性、廃棄物処分の要求
責任の主体、受益者、実施主体、ビジネス	国、国民、産業界、電力会社、再処理事業者
プロセス性能	経済性、廃棄物発生量、分離性能を考慮
開発速度、他分野の進捗・導入	技術導入、既存知識活用
技術伝承	技術的知識情報の維持・改善
安全性	放射性物質と化学プラントの側面

● 将来求められる再処理システム

- 経済性の高いシステム、安全性の高いシステム

グローバルな視野に立った
再処理の大型化・モジュール化

核燃料を回収して再利用することをベースに、
大型化、モジュール化、国際協力により再処理システムを最適化

目次

- 背景
 - 専門委員会での議論と将来求められる再処理システム
- 経済性の観点から
 - エネルギー動向
 - 可採年数と資源の確保
 - 発電コストとエネルギー選択
 - ウラン価格の上昇
 - 大型化によるコスト削減
- 安全性の観点から
 - 安全性について
 - モジュール化
 - 国際協調
- まとめ

経済性の観点から～可採年数と資源の確保

エネルギー資源の可採年数等[2]

	石油		天然ガス		原子力	
	石炭	石油	天然ガス	ウラン	プルトニウム	高速炉サイクル
可採年数	124年 ^{*)}	47年 ^{*)}	64年 ^{*)}	100年 ^{*)}	130年 ^{*)}	>3000年 ^{*)}
建設経費	6260億 ^{*)}	1817億 ^{*)}	187.5兆 ^{*)}			630万 ^{*)}
生産量	69.4億 ^{*)}	38.2億 ^{*)}	2.99兆 ^{*)}		4.4万 ^{*)}	
備考	-	-	-	海水中に含まれるウラン(総量45億t)の回収技術開発も実施中。 ^{*)} トリウムはウランの約3倍ある。 ^{*)}		

^{*)} 建設経費を現在の消費量で割った値をいう。
^{*)} BP(beyond petroleum) Statistical Review of World Energy 2010(2009年末データ)
^{*)} OECD/NEA, Nuclear Energy Outlook 2008
^{*)} Uranium-2009
^{*)} 海水ウランの採集技術, 原子力委員会 定例会 2009年 第20回, 資料第11-1号
^{*)} IAEA TECDOC-1450

市場原理による再処理技術の発展が理想

● 将来世代に向け資源の確保は重要な問題

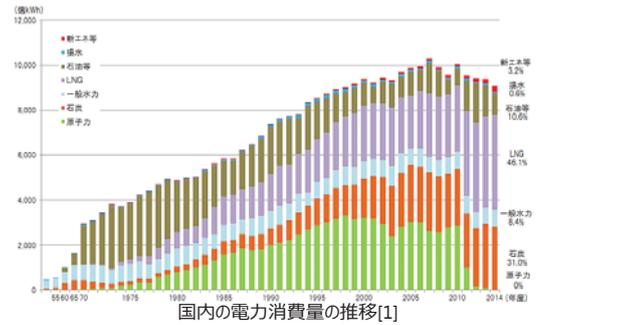
→ 資源枯渇によるリスク

- 発電コスト上昇
- エネルギー資源戦争

将来世代を考えると
資源の確保が必要

[1] 政策選択時の重要課題：エネルギー安全保障について原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会 内閣府 原子力政策担当室 平成24年2月23日

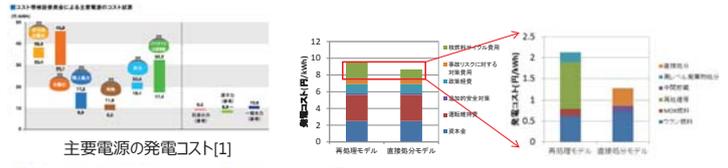
経済性の観点から～エネルギーの動向



○ エネルギー消費量及び化石燃料消費量は上昇傾向
化石燃料の枯渇へ前進、価格上昇の加速が懸念

[1] 「平成27年度エネルギーに関する年次報告」エネルギー-白書2016 (資源エネルギー庁)

経済性の観点から～発電コストとエネルギー選択



日本の再処理コストの調査[1]
再処理モデルが0.79-0.86円/kWhコスト高
再処理モデル 2.14円/kWh
(うち再処理等1.10円/kWh)
直接処分モデル 1.28-1.35円/kWh

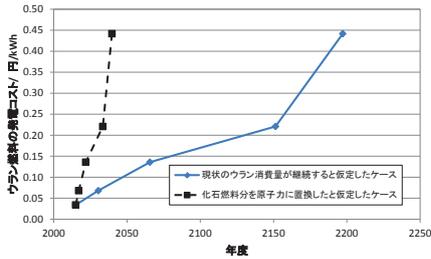
以下の2点で直接処分に対する再処理の競争力を評価

1. ウラン価格の上昇
2. 大型化によるコスト削減

[1] 再生可能エネルギー 固定価格買取制度ガイドブック 2016(平成28)年度版 (資源エネルギー庁)
 [2] 原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会資料集1 核燃料サイクルコストの試算 平成23年11月10日原子力委員会事務局編

経済性の観点から～ウラン価格の上昇

- 原子力の発電電力量2.47兆kWh(2013年) [1]
- 濃縮酸化ウラン21tonで100万kW級原子力発電所1年稼働(稼働率80%想定) [2]
- 原発稼働率80%、ウラン濃縮度4.5%、1 U Sドル= 1 0 0円と仮定

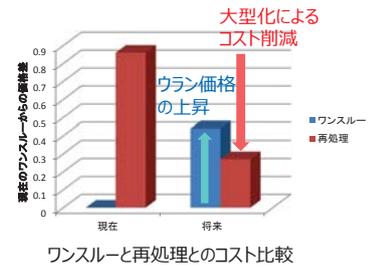
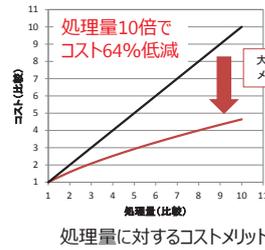


[1] IEA「World Energy Outlook 2015」
[2]原子力2011 電気事業連合会【コンセンサス】

ウランの価格は ¥ 0.44/kWhへと上昇

経済性の観点から～大型化によるコスト削減

- 世界の再処理を集約することでコストを低減効果を検出
 - 現状、世界の原発数から日本の処理量の10倍集約を想定(世界434基、日本43基)



経済的に魅力的な再処理を継続して提供

経済性の観点から～まとめ

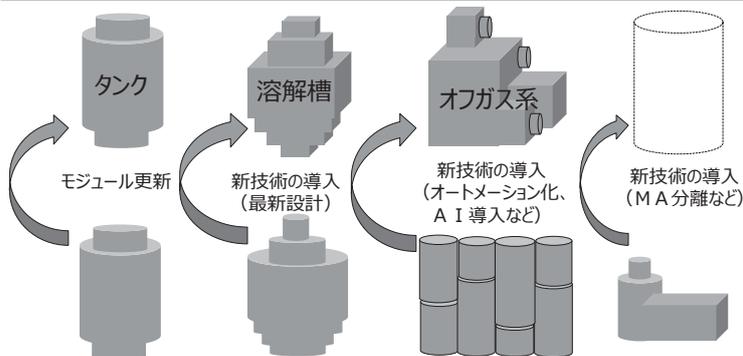
- 再処理を主体とした高速炉サイクルが資源の確保のため必要
 - 世界の電力消費量が増加
 - 資源の枯渇、コスト上昇が懸念
 - 将来のために再処理技術が必要
- 再処理技術が自律的に養われていくためには経済性が重要
 - 再処理のコスト低減
 - ウランコストと再処理コストとのトレードオフ
 - 将来世代に繋げるためには継続可能なプランが必要
- 大型化による低コスト化で資源枯渇まで再処理技術を維持発展

大型化による経済的に魅力的な再処理を継続して提供

安全性の観点から～安全性について

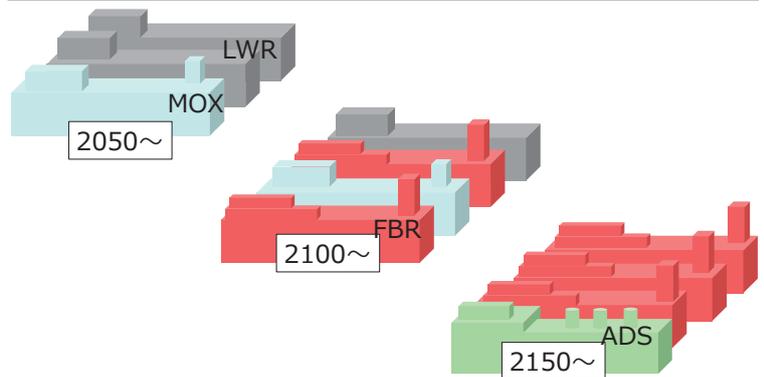
- 再処理工場は放射性物質と化学物質を取り扱う特殊な工場
 - 放射性物質取扱施設に関する知識が必要
 - 化学プラントに関する知識が必要
 - 核燃料から廃棄物まで多岐にわたる知識が必要
- 多様な知識の維持・発展が必要だが建設スパンが長い(20年～)
- 知識の未習熟による放射性物質や化学物質に関する事故のリスク
 - 新規技術の導入による被ばくやヒューマンエラーの低減
 - 技術継承に関する工夫が必要

安全性の観点から～モジュール化(工程)



更新サイクルの短縮による、技術継承の向上
新技術の導入による、安全性向上
工期短縮による、経済性も向上

安全性の観点から～モジュール化(ライン)



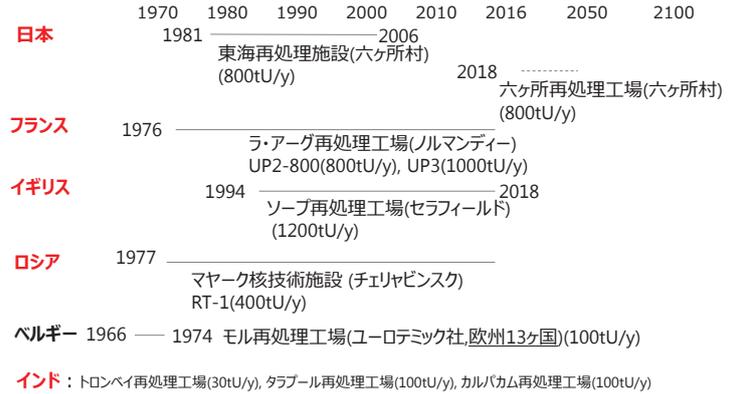
大規模化による多ライン化による、
ロバスト性向上、技術継承の向上

安全性の観点から～国際協調

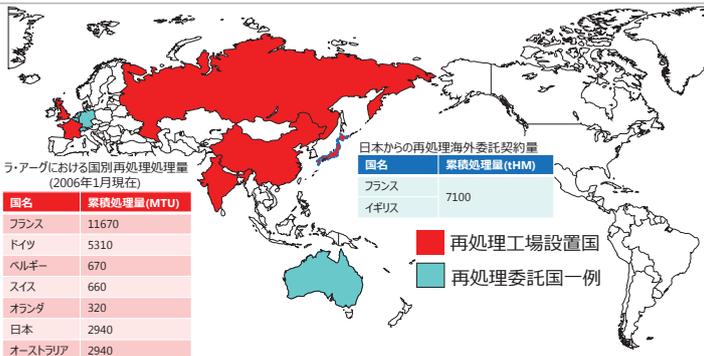
- 再処理の国際協調により安全性の向上を図ることができる。
- 技術・生産拠点の最適化
 - 技術の集約
 - 各国からの技術協力、技術力向上
 - 国際的な観点から再処理設備の最適化
 - 大型再処理工場の設置が可能
 - 一国によらない国際協力
 - 核不拡散性の向上
 - 防衛能力の強化
 - 立地の最適化
 - 自然災害の影響が少ない場所
 - 経済・治安が安定な場所
 - アクセスが良い場所

安全性の観点から～国際協調（再処理の動向）

再処理工場の市場動向



安全性の観点から～国際協調（現状とこれから）



再処理工場で各国の燃料の再処理を実施

↓
大型の国際再処理施設により、国際協調の加速
国際管理による安全性を向上

まとめ～安全性の観点から

- モジュール化により、新技術が導入を加速
 - オートメーション化により、ヒューマンエラーの低減・被曝量低減が可能
 - MA分離工程を随時追加でき、環境負荷軽減が可能
 - 随時更新することで、技術維持・技術継承が可能
- 国際協調の加速により、安全性の向上
 - 技術の集約による技術力の向上
 - 国際協調による核の脅威の排除
 - 対外的攻撃（テロ攻撃）などからの防衛

モジュール化、国際協調で技術性能・能力向上に伴う安全性向上

まとめ

グローバルな視野に立った
再処理の大型化・モジュール化

- 大型化のメリット
 - 規模の経済が働き低コスト化、技術の集約による技術の高度化、処理総量の拡大による処理燃料種類のロバスト性の向上（経済性）
 - 施設のセキュリティーの徹底が可能、ライン多数化による稼働と建設のサイクル実現による技術維持・更新（安全性）
- モジュール化のメリット
 - 建設及びメンテナンス工程の短縮による稼働率の向上
付加設備の随時導入によるシステムの最適化（経済性）
 - 新技術導入による被曝低減、人件費の削減、事故の低減
モジュール単位での更新が技術伝承の効率化（安全性）

総合講演

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会報告：
将来世代の再処理技術はいかにあるべきか？

(3) 将来世代の再処理技術 - ③ 移行期の多様なニーズへの対応性の観点から

(3) Reprocessing Technologies for Future Generation

③ From the Viewpoint of Adaptability to Various Demands in Transitional Period

*渡邊 大輔

(株) 日立製作所

1. 概要

本委員会では将来世代のための理想的な再処理プロセスに求められる要件について議論してきた。本検討では、軽水炉を主に利用する時代から高速炉や核変換炉を利用する時代へ移行する途中の移行期を想定し、委員会での議論を踏まえて移行期のニーズを考察し、そのニーズへの対応性の観点から理想的な再処理プロセスの具体的な構成の提案を行った。

2. 検討内容

各要件についての議論の内容の一部と、それを踏まえて考察した移行期のニーズ、移行期のニーズへの対応性の観点から検討した理想的な再処理プロセスの提案の内容を表1に示す。①移行期には様々な原子炉（軽水炉、高速炉、核変換炉、等）が存在すると想定され、再処理プロセスは各原子炉に対応した様々な組成の核燃料物質を燃料製造プロセスに払い出す必要があると考える。これに対し、回収した元素の溶液を混合して所望の組成の核燃料物質を得る混合調整プロセスを再処理プロセスに設けることを提案する。②再処理工場の建設ペースは数十年に一度と想定され、一方で将来の燃料サイクルのニーズの変化に柔軟に対応する必要があると想定されるため、設計技術の伝承と新技術の導入の機会があることが望まれると考える。これに対し、定期的な設備の交換および改良を可能とするため、設備の小型ユニット化を提案する。③核燃料サイクルの社会的受容性を向上するため、廃棄物処分への負担の軽減および再処理プロセスの付加価値向上が望まれると考える。これに対し、放射性廃棄物を有効利用することを前提に、放射性廃棄物を再利用に適した形態に加工して払い出す機能を再処理プロセスに持たせることを提案する。発表ではこれらの提案の詳細について紹介する。

表1 各要件の議論での検討内容の一部、移行期のニーズ、提案する理想的な再処理プロセス

要件	検討内容の一部	移行期のニーズ、提案する理想的な再処理プロセス
回収元素、製品および廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> ・U、Pu、MA、発熱性FP、白金族、LLFP、その他FPが回収対象となりうる。 ・製品の化学形態は酸化物、金属、窒化物、等。 ・各元素の同位体比率も重要となる。 	①様々な炉（軽水炉、高速炉、核変換炉、等）の燃料組成に対応した製品を作製可能。 ⇒回収元素の混合調整プロセス
開発速度、他分野の進捗・導入	<ul style="list-style-type: none"> ・開発速度を向上するには、独創的な再処理技術よりも一般産業を含むすでに開発された技術をベースに改良を進めることが有効。 	②定期的な設備交換等の技術継承の機会がある。また、将来の仕様変更等に対応するための継続的な新技術導入が可能。 ⇒設備の小型ユニット化
技術伝承	<ul style="list-style-type: none"> ・伊勢神宮は20年おきに式年遷宮を行い、技能者を維持。 ・生産基盤を継承することが技術継承には必要。 	
社会的受容性と経済的見通し	<ul style="list-style-type: none"> ・核燃料サイクルの費用と採算性、高レベル廃棄物の処分に関する事項が、核燃料サイクルが社会に受容されるための課題になりうる。 	③廃棄物処分への負担の軽減。プロセスの付加価値向上。 ⇒放射性廃棄物を有効利用に適した形態に加工して払い出すプロセス
責任の主体、受益者、実施主体、ビジネス	<ul style="list-style-type: none"> ・再処理事業がビジネスとして成り立つことが望ましい。 	

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会報告：
将来世代の再処理技術はいかにあるべきか？

(3) 将来世代の再処理技術
③ 移行期の多様なニーズへの対応性の観点から

(株)日立製作所
渡邊大輔、笹平朗

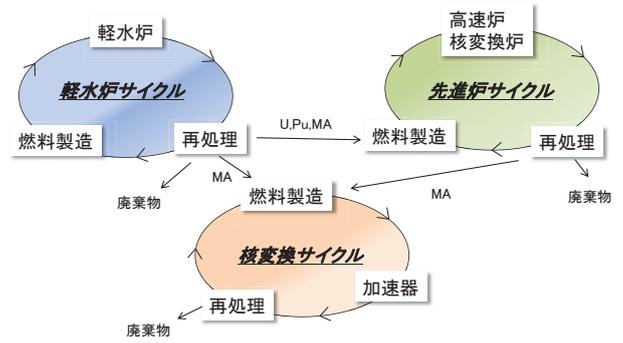
【目次】

- 1 再処理を想定する時期
- 2 理想的な再処理プロセスに求められる要件についての議論
- 3 理想的な再処理プロセスの提案

© Hitachi, Ltd. 2017. All rights reserved.

1. 再処理を想定する時期

■ 高速炉や核変換炉等¹⁾の次世代炉の導入初期(移行期)を検討対象とした。



移行期には様々な炉型および用途の原子炉が存在。

¹⁾ 日本原子力研究開発機構「ADSによる分離変換技術の概要と高レベル廃液からの分離技術の詳細と現状について」、第10回再処理・リサイクル部会セミナー、2015年1月16日。

© Hitachi, Ltd. 2017. All rights reserved.

2-1. 理想的な再処理プロセスに求められる要件についての議論
— 本委員会で議論した要件の一覧 —

理想的な再処理プロセスに求められる要件

- 対象燃料
- 国際的視点
- 社会的受容性と経済的見通し
- 回収すべき元素・製品および廃棄物
- 責任の主体、受益者、実施主体、ビジネス
- プロセス性能
- 開発速度、他分野の進捗・導入
- 技術伝承
- 安全性

本検討で特に
着目した要件

© Hitachi, Ltd. 2017. All rights reserved.

2-2. 理想的な再処理プロセスに求められる要件についての議論
— 議論した内容とその考察① —

要件	議論した内容の一部	理想的な再処理プロセスの考察
回収すべき元素・製品および廃棄物	原子炉の使用目的や廃棄物処分の観点により、回収元素・廃棄物の内容が変化。 ・U、Pu、MA、発熱性FP、白金族、LLFP、 その他のFPが回収対象となりうる。 ・製品の化学形態として酸化物、金属、 窒化物が存在する。 ・各元素の同位体比率を考慮すべき。	様々な炉の燃料組成に対応した製品を作製可能であるべき。 ↓ 回収元素の混合調整槽を提案。(スライド3-1)
開発速度、他分野の進捗・導入	開発速度を向上するには、独自の再処理技術よりも一般産業を含むすでに開発された技術をベースに改良を進めることが妥当。	定期的に設備の交換があり、技術を継承する機会と新技術を導入する機会があるべき。
技術伝承	技術継承のためには、必要な時期に実証・実用施設が立ち上げられる条件を確保しておく必要あり。(生産基盤の継承) (例)伊勢神宮は20年おきに式年遷宮を行い、技能者を維持。	↓ 設備の小型ユニット化を提案。(スライド3-2)

© Hitachi, Ltd. 2017. All rights reserved.

2-3. 理想的な再処理プロセスに求められる要件についての議論
— 議論した内容とその考察② —

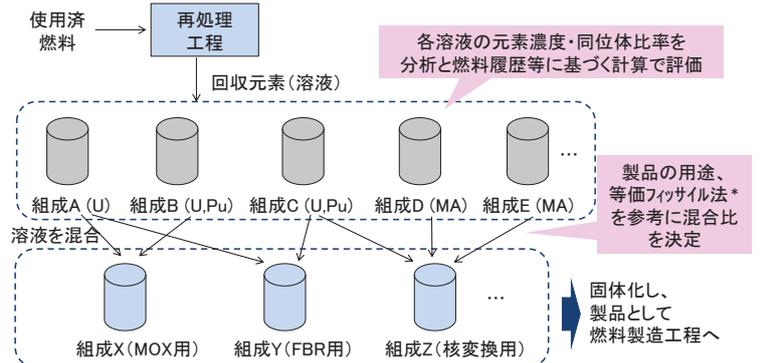
要件	議論した内容の一部	理想的な再処理プロセスの考察
社会的受容性と経済的見通し	核燃料サイクルが社会に受容されるための課題として、核燃料サイクルの費用と採算性、高レベル廃棄物の処分の実現が挙げられる。	新しいビジネス要素や新しい処理・処分の仕組みを導入すべき。 ↓ 放射性物質の有効利用を提案。(スライド3-3)
責任の主体、受益者、実施主体、ビジネス	再処理事業がビジネスとして成り立つことが民間が実施主体となる最低条件。	

© Hitachi, Ltd. 2017. All rights reserved.

3-1. 理想的な再処理プロセスの提案
— 回収元素の混合調整槽 —

※ 検討したアイディア

- 様々な組成の回収元素の溶液を混合し、所望の組成の製品を払い出す。
- 取扱いが容易な溶液の状態での製品の組成を調整。



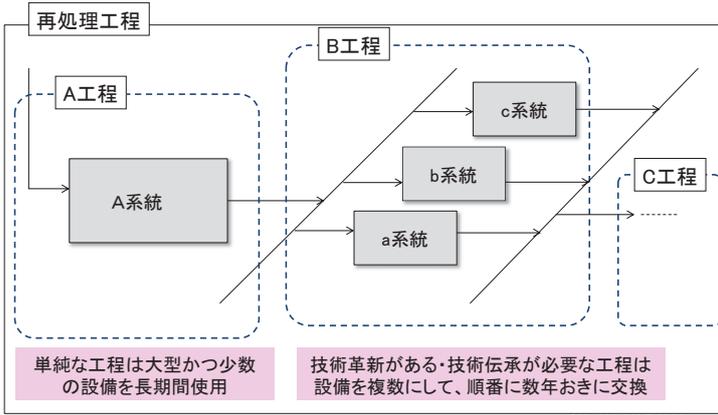
* 等価フィッソイル法
Pu239の炉心反応度に対する効果を1.0として、他のPu同位体の相対的な反応度効果を定義し、炉心反応度への全体としての効果を評価する方法。(動燃技報 No.70, 1989.)

© Hitachi, Ltd. 2017. All rights reserved.

3-2. 理想的な再処理プロセスの提案 — 設備の小型ユニット化 —

:検討したアイデア

- 必要に応じて設備を小ユニット化し、数年おきに交換。
- 技術伝承・最新技術の導入に有効。

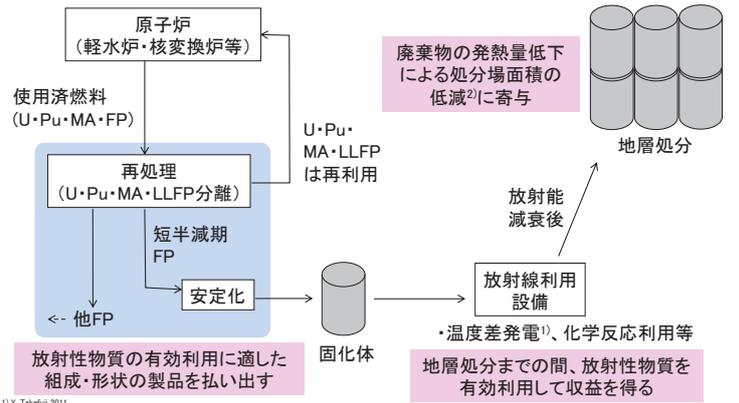


© Hitachi, Ltd. 2017. All rights reserved.

3-3. 理想的な再処理プロセスの提案 — 放射性物質の有効利用 —

:検討したアイデア

- 再処理工程からは放射性物質の有効利用に適した製品を払い出す。
- 再処理の下流工程で得た収益を再処理に還元。



1) Y. Takefuji 2011.
2) 日本原子力研究開発機構「高レベル放射性廃棄物処分への分離変換技術の導入意義」、原子力委員会 分離変換技術検討会、資料1-3-2号、2009年4月28日

© Hitachi, Ltd. 2017. All rights reserved.

まとめ

移行期再処理を対象として、研究専門委員会での議論を基に理想的な再処理プロセスを検討した。

- ・将来の様々な製品組成のニーズに対応するため、回収元素の混合調整槽を提案。
- ・技術伝承および新技術導入に資するため、設備の小型ユニット化を提案。
- ・新しいビジネス要素や新しい処理・処分の仕組みに関するアイデアとして、放射性物質の有効利用に適した製品を再処理プロセスから払い出す構想を提案。

© Hitachi, Ltd. 2017. All rights reserved.

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会報告：
将来世代の再処理技術はいかにあるべきか？
(3) 将来世代の再処理技術 - ④ 廃棄物低減の観点から

(3) Reprocessing Technologies for Future Generations

④ From the Viewpoint of Reducing Radioactive Waste

*長岡 真一

日本原子力研究開発機構

1. 概要

現行の商用ベースでの再処理プロセスの主流となっている湿式再処理では、ウラン及びプルトニウムを回収する能力は十分にあるものの、硝酸による機器の腐食、放射線分解による水素の発生、冷却機能喪失による溶液の沸騰、有機溶媒の火災といったリスクに対し種々の安全対策を講じており、また、多くの廃棄物が発生することから、プロセスとして必ずしも十分でない面がある。

廃棄物の処理及び処分には、多くの費用と手間を要することから、将来世代の再処理においては、廃棄物の発生量が極力少ないことが重要な要素の一つであると考え、廃棄物低減の観点から、将来世代の再処理に必要な技術について検討を行った。

2. 検討内容

湿式再処理の廃棄物としては、気体廃棄物、液体廃棄物、固体廃棄物があり（図1）、この中でも液体廃棄物は漏えいによる潜在的なリスクが常に存在するとともに、自然蒸発や放射線分解により液量や液組成が変化するなど、気体や固体の廃棄物より貯蔵管理のハードルは高い。また、液体廃棄物の中でも、高放射性廃棄物は、貯蔵中においても崩壊熱を除去する冷却機能が必要であり、さらに、その処理及び処分には、ガラス固化体にして地層処分するため、多くの費用と手間を要する。このため、将来世代の再処理プロセスでは、液体廃棄物の発生量を極力少なくすることが重要と考えた。これにより、地層処分に係る国民や自治体への負担が減り、原子力に関する不安材料の解消に繋がるものと思われる。

本発表では、液体廃棄物の低減に焦点をあて、将来世代の再処理プロセスを検討し、プロセス成立のために必要となる技術の候補について調査した内容について紹介する。

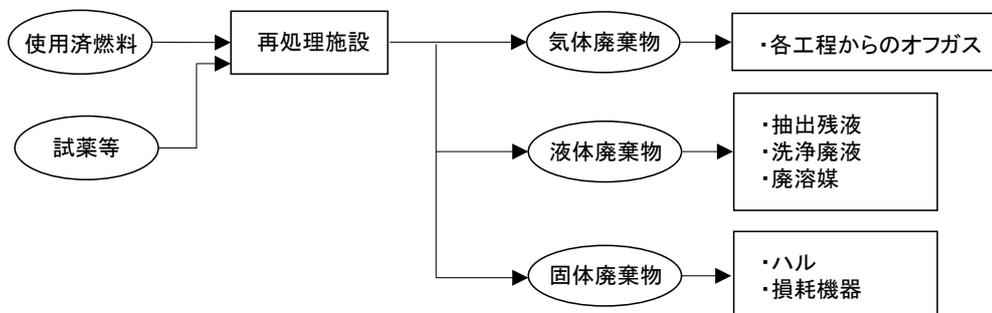


図1 再処理に伴う主要廃棄物の概要

*Shinichi Nagaoka

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会報告：
 将来世代の再処理技術はいかにあるべきか？
 (3) 将来世代の再処理技術-④廃棄物低減の観点から

日本原子力研究開発機構
 長岡 真一

将来世代(今から約100年後)における社会情勢(予測)

将来世代の社会を私が想像してみると・・・

- 日本と世界の人口とエネルギー情勢
 - ・日本の人口減少が進む一方、世界的には人口が増加。
 - ・世界のエネルギー需要は増加。世界的に化石燃料は高騰し、枯渇が近づいている。
 (ウラン資源の可採年数は99年(原子力・エネルギー図面集2015))
 - ・日本のエネルギー需要は微減。再生可能エネルギーはある程度増加するものの、買取単価の低下や設備更新の鈍化等の要因により頭打ち。
- 日本の人口分布
 - ・各都道府県で、若者人口の都市部への流入が繰り返され、人口の過密地域と過疎地域の2極化が顕著。→過密地域から30km以上離れた過疎地域に小規模の施設(炉、再処理、燃料製造、処分場)を建設すれば公衆へのリスクが低くなる可能性。
- 日常生活
 - ・一家に1台ロボット、ドローンが普及。車は自動運転。
 - ・絶対に緩まないネジ(ナット)が安く購入可。→安全性が飛躍的に向上。

将来世代の再処理技術に求められる要件の中で私が重視する要件の選定



・国土面積が狭い日本において廃棄物問題は難問
 ・如何なる再処理プロセスでも廃棄物問題は恒久的課題と認識
 重視する要件として「廃棄物」を選定

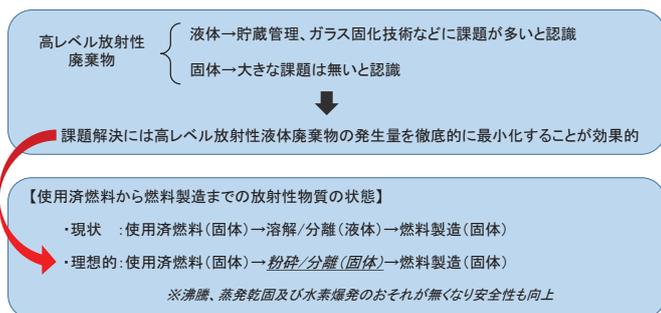
廃棄物問題に係る現状の課題

- 原子力発電を行う国々にとって、廃棄物(特に高レベル放射性廃棄物)の処理・処分が課題。
- 高レベル放射性廃棄物の地層処分が、順調に進んでいるのはフィンランドくらい。
- 日本においては、高レベル放射性廃棄物に係る処分地選定調査を受け入れる自治体を2002年から公募してきたが、処分地選定調査(文献調査)に着手できず。
- このため、国民や地域の理解を得ながら、国が前面に立って取り組む方針に転換。

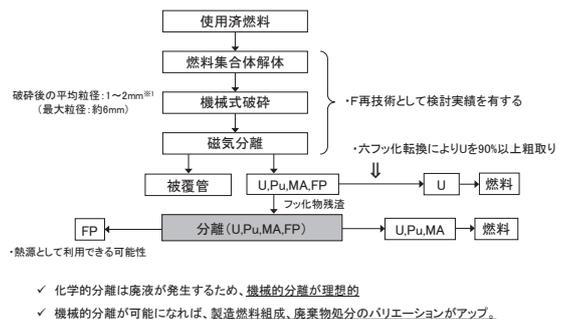


高レベル放射性廃棄物の発生量を低減することが、
 廃棄物問題の解決の一助になると考えた。

将来世代の再処理技術に求められる要件「廃棄物」への対処

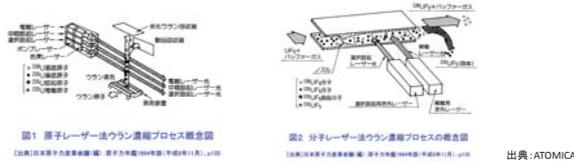


廃棄物低減の観点から検討した「溶解しない」再処理プロセス



フッ化物残渣 (U、Pu、MA、FP) の分離に利用できる可能性を秘めた技術の候補(1/3)

候補A: レーザー濃縮技術の応用

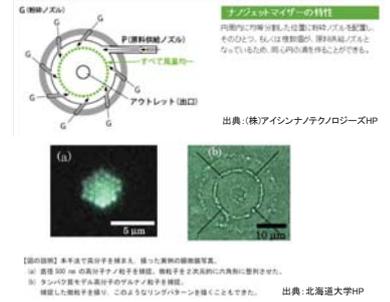


- ・レーザー濃縮(原子法、分子法)
- 原子法: 蒸発させたウランにレーザーをあてることにより、選択的にウラン235だけをイオン化し、電極に集める方法。
- 分子法: 六フッ化ウラン(気体)にレーザーをあてることにより、ウラン235が五フッ化ウラン(固体)になり分離する方法。

フッ化物残渣 (U、Pu、MA、FP) の分離に利用できる可能性を秘めた技術の候補(2/3)

候補B: 粉碎技術、捕捉技術の応用

- 粉碎技術
 - 乾式でナノレベルにまで微粉砕する技術 (e.g. 高圧ガスエネルギーで粒子を加速し、粒子間衝突させて粉砕)
- 捕捉技術
 - 高分子を非接触で捕捉する技術 (e.g. 光ピンセット: 高い強度のレーザービームを集光し、焦点に微粒子を捕捉し、操る技術。生物学において広く利用。微粒子の選別も可能。)



フッ化物残渣 (U、Pu、MA、FP) の分離に利用できる可能性を秘めた技術の候補(3/3)

候補C: 識別技術、つかむ技術の応用

➢ 識別技術

➢ つかむ技術

・ナノピンセット
アオイ電子が香川大学の技術をもとに開発。1~数十μmのサイズの物体をつかめる極小のピンセット。昆虫の触覚のように、ナノピンセットの先端をセンサー化して、物体との接触を判定。

出典: 産学官連携ジャーナル2010年12月号HP

候補D: ロボット技術の応用(今まで紹介した技術をロボットに搭載)

まとめ

- 将来世代の再処理技術に求められる要件のうち、廃棄物低減の観点から、将来世代の理想的な再処理プロセスの方向性について検討した。
- 廃棄物低減の観点からは、高レベル放射性液体廃棄物の発生量を徹底的に最小化することが重要と捉え、使用済燃料を溶解せず、固体のまま分離するプロセスが理想形だと考えた。
- 固体のまま分離するプロセスに使用する技術としては、現状の極微粒子化技術、極微粒子の識別技術及び捕捉操作技術を高度化したもの、及び、これらを搭載するロボット技術が必要になるのではないかと考えた。

第6章 総括

将来世代のために再処理技術はどうあるべきか、これまで培ってきた再処理技術をどのように将来世代へ伝えていくかを議論するために、2013年6月「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会を設立し2017年3月まで活動を行った。得られた成果を下記に示す。

- (1) 再処理技術のなかで、これまで達成できなかった技術課題の摘出と解決方策に関する調査を行った。東海再処理工場、六ヶ所再処理工場、高速炉再処理技術について技術課題と解決方策についてまとめた。
- (2) 将来世代において必要とされる再処理関連技術に関する調査を行った。ロケットおよびロボット技術、ならびに加速器駆動システムに必要な再処理技術について現在の状況と将来の見通しについてまとめた。
- (3) 合理的な再処理プロセスの将来像と技術課題に関して検討を行った。まず、将来世代にわたり考慮すべき要件を抽出し、要件ごとにその内容や論点について議論した。その後、注目する要件を選び、その要件を満足する合理的な再処理プロセスの将来像を提示した。

謝辞

今回の活動に参加、協力を頂いた多くの関係者のみなさまに感謝の意を表したい。特に、外部から講師として参加頂いた皆様には有意義で貴重な情報を頂き、その情報は本研究専門委員会の貴重な成果となった。講師の先生方にあらためて感謝申し上げる次第である。最後に、再処理・リサイクル部会前部会長・藤田玲子氏および現部会長・森田泰治氏には本会の活動に対して的確なアドバイスならびに応援を頂いたことを記して謝辞を閉じる。

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会 委員名簿

2017/3/31現在

氏名(敬称略、五十音順)		所属	
主査	本間 俊司	埼玉大学大学院理工学研究科	
幹事	浅沼 徳子	東海大学工学部	
幹事	有田 裕二	福井大学附属国際原子力工学研究所	
幹事	飯塚 政利	電力中央研究所 原子力技術研究所	
幹事	井関 忠宏	日本原燃株式会社 再処理事業部 核物質管理部	
幹事	大森 孝	東芝	平成27年度より
幹事	駒 義和	日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門	平成26年度まで
幹事	小山 正史	電力中央研究所 原子力技術研究所	
幹事	島田 隆	三菱重工業 原子力事業本部	
幹事	鈴木 達也	長岡技術科学大学 原子力安全系	
幹事	竹内 正行	日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門	平成27年度より
幹事	松村 達郎	日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門	
幹事	水口 浩司	東芝 電力・社会システム技術開発センター	平成26年度まで
幹事	渡邊 大輔	日立製作所 日立研究所	平成26年度まで委員
委員	阿部 仁	日本原子力研究開発機構 安全研究センター	
委員	池田 泰久	東京工業大学 原子炉工学研究所	
委員	宇留賀 和義	電力中央研究所 原子力技術研究所	
委員	菊野 浩	日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所	
委員	菊池 孝浩	日揮	平成27年度より
委員	黒崎 健	大阪大学大学院工学研究科	
委員	黒田 順也	三菱重工業株式会社 原子力プラント設計部	
委員	酒井 幹夫	東京大学大学院工学系研究科	
委員	笹平 朗	日立製作所 日立研究所	平成26年度まで幹事
委員	佐藤 修彰	東北大学多元物質科学研究所	
委員	澤田 佳代	名古屋大学エコトピア科学研究所	
委員	鈴木 泰博	日揮株式会社 プロジェクト第1部技術グループ	平成26年度まで
委員	染谷 浩	三菱マテリアル(株) 地下環境システム部	平成25年度まで
委員	高橋 優也	東芝 電力・社会システム技術開発センター	
委員	竹下 健二	東京工業大学 原子炉工学研究所	
委員	武田 和仁	東京電力(株)	平成26年度より
委員	塚田 毅志	電力中央研究所 原子力技術研究所	
委員	津幡 靖宏	日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門	
委員	永井 崇之	(独)日本原子力研究開発機構 再処理技術開発センター	
委員	長岡 真一	日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所	
委員	中熊 哲弘	東京電力(株) 原子燃料サイクル部	平成25年度まで
委員	永里 良彦	日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所	
委員	鍋本 豊伸	IHI 原子力セクター	
委員	野上 雅伸	近畿大学 理工学部 電気電子工学科	
委員	長谷川 秀一	東京大学大学院工学系研究科	
委員	林 博和	日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門	
委員	藤井 俊行	京都大学 原子炉実験所	
委員	村木 渉	三菱重工業 原子力システム技術部	
委員	森岡 信男	三菱マテリアル(株)	平成26年度より

「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会 開催記録

□ 第1回会合

開催日時：平成25年7月19日（金）14：00～16：45

開催場所：電中研大手町本部第1会議室

出席者：31名

主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡

2. 講演

「東海再処理工場における機器故障に対する設計上の配慮他」

山村 修氏（元 JAEA）

3. 今後の委員会の進め方に関する討論

4. その他

□ 第2回会合

開催日時：平成25年11月15日（金）14：00～16：45

開催場所：電中研大手町本部第1会議室

出席者：23名

主な議題：1. 講演

「六ヶ所再処理工場建設開始までの道のり」

大塔 容弘氏（青森原燃テクノロジーセンター）

2. 本委員会で取り扱うテーマについての討論

「デブリ処理のスキームと適用可能な再処理技術の整理について」

3. その他

□ 第3回会合

開催日時：平成26年1月31日（金）14：00～17：30

開催場所：三菱重工(株) 本社 305 会議室

出席者：28名

主な議題：1. 前回議事録の確認、事務連絡

2. 講演

「失敗学から成功学への転換ー国産ロケット打上げ成功ー」

前村 孝志氏（有人宇宙システム株式会社）

3. 情報提供

「JAEAにおける次世代再処理技術開発の現状」

竹内 正行氏（JAEA）

4. 今後の委員会の方向性、進め方、扱うテーマに関する討論

5. その他

□ 第4回会合

開催日時：平成26年5月19日（月）13：30～16：35

開催場所：電中研大手町本部第1会議室

出席者：25名

主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡

2. 講演

2.1 「ADS システムの技術的現状と今後の R&D 計画」

辻本和文氏（原子力機構）

2.2 「ADS システムへの供給のための MA 回収技術」

松村幹事

2.3 「ADS システム実現のための再処理・燃料技術」

林委員

3. ADS 技術と研究開発に関する議論
4. その他

□ 第 5 回会合

開催日時：平成 26 年 10 月 3 日（金）13：00～17：10

開催場所：電中研大手町本部第 1 会議室

出席者：22 名

- 主な議題：1. 前回議事録の確認、事務連絡
2. 講演
 - 2.1 「産業ロボットの過去と現在」
小平紀生氏（三菱電機）
 - 2.2 「サービスロボットの現状と今後の課題」
木村哲也氏（長岡技術科学大学）
 3. その他

□ 第 6 回会合

開催日時：平成 26 年 11 月 6 日（木）13：40～16：50（施設見学）

平成 26 年 11 月 7 日（金）9：00～12：00（講演など）

開催場所：日本原燃六ヶ所再処理工場、青森県三沢市三沢シティホテル会議室

出席者：21 名

- 主な議題：1. 前回議事録の確認、事務連絡
2. 講演
 - 2.1 「次世代に望む、一致団結しての「もんじゅ」再開を」
大塔容弘氏（青森原燃テクノロジーセンター）
 - 2.2 「ガラス固化技術開発施設（X14）の試験結果」
兼平憲男氏（日本原燃）
 3. その他

□ 第 7 回会合

開催日時：平成 27 年 7 月 27 日（月）13：00～16：15

開催場所：電中研大手町本部第 1 会議室

出席者：23 名

- 主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡、前回議事録確認
2. 講演
「高速炉再処理技術開発の展開」
河田東海夫氏（元原子力機構）
 3. 全体討論「理想的な再処理プロセスに求める要件」及び次回以降の議論について
 4. その他

□ 第 8 回会合

開催日時：平成 27 年 9 月 4 日（金）13：30～17：00

開催場所：電中研大手町本部第 1 会議室

出席者：25 名

- 主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡、前回議事録確認
2. 課題提起と議論（「対象燃料」に関する検討）
 3. 再処理・リサイクル部会での関連する議論の紹介
 - 3.1 課題議論 WG
鈴木幹事
 - 3.2 第 11 回再処理・リサイクル部会セミナーの案内
立花武憲氏（日本原燃）
 - 3.3 ANUP2016 開催紹介

飯塚幹事

4. 課題提起と議論（「国際的視座からの再処理」に関する検討）
5. その他

□ 第9回会合

開催日時：平成27年11月17日（金）13：00～17：00

開催場所：電中研大手町本部第1会議室

出席者：20名

- 主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡、前回議事録確認
2. 課題提起と議論（「社会的受容性と経済的見通し」に関する検討）
 3. 課題提起と議論（「回収すべき元素・製品と廃棄物」に関する検討）
 4. 国際会議 Global2015 概要報告
 5. 理想的な再処理プロセスの要件に関するグループ討議
 6. その他

□ 第10回会合

開催日時：平成28年1月14日（木）13：00～16：30

開催場所：電中研大手町本部第4会議室

出席者：20名

- 主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡、前回議事録確認
2. 課題提起と議論（「責任の在所、受益者、実施主体、ビジネス」に関する検討）
 3. 課題提起と議論（「プロセス性能」に関する検討）
 4. 理想的な再処理プロセスの要件に関するグループ討議
 5. その他

□ 第11回会合

開催日時：平成28年4月15日（金）13：30～17：15

開催場所：電中研大手町本部第1会議室

出席者：25名

- 主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡、前回議事録確認
2. 将来の再処理技術の要件検討－開発速度、技術導入からの論点－
 3. 将来の再処理技術の要件検討－技術継承の観点からの課題提起－
「高速炉再処理技術開発の展開」
河田東海夫氏（元原子力機構）
 3. 「理想的な再処理技術に求められる要件」に関するグループ討議
 4. その他

□ 第12回会合

開催日時：平成28年6月23日（木）13：30～17：30

開催場所：電中研大手町本部第4会議室

出席者：20名

- 主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡、前回議事録確認
2. 将来の再処理技術の要件検討－プロセス性能 2/2－
 3. 話題提供「廃炉に関する米国の紹介」：
小山幹事
 4. 「理想的な再処理技術に求められる要件」に関するグループ討議
 5. 「理想的な再処理プロセス」提案のためのショートプレゼンテーション
 6. その他

□ 第13回会合

開催日時：平成28年9月5日（月）13：30～17：00

開催場所：電中研大手町本部第 4 会議室

出席者：18 名

- 主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡、前回議事録確認
2. 2017 年春の年会企画セッション提案についての議論
3. 研究専門委員会活動報告書作成についての議論
4. 「理想的な再処理プロセス」提案のためのショートプレゼンテーション
5. 企画セッションの内容に関する議論
6. その他

□ 第 14 回会合

開催日時：平成 28 年 12 月 19 日（月）13：00～17：30

12 月 20 日（火）9：00～11：10

開催場所：福井大学附属国際原子力工学研究所 第一講義室

出席者：15 名

- 主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡、前回議事録確認
2. 講演「「もんじゅ」や将来世代の高速炉を用いた核変換に関する最近の研究成果」
福井大学 竹田敏一特任教授
3. 「理想的な再処理プロセス」提案のためのプレゼンテーション－1
「将来世代に向け再処理の目指すべき理想と実現へのプロセスに関する提案」：黒田委員
4. 「理想的な再処理プロセス」提案のためのプレゼンテーション－1
「理想的な再処理プロセス」の提案：渡邊幹事
5. 活動報告書目次案についての議論
6. 将来の再処理技術の要件検討－安全性の観点からの課題提起－
7. その他

□ 第 15 回会合

開催日時：平成 29 年 3 月 16 日（木）13：30～17：10

開催場所：電中研大手町本部第 733 大会議室

出席者：22 名

- 主な議題：1. 主査挨拶、事務連絡、前回議事録確認
2. 委員会報告書作成について
3. 2017 春の年会企画セッション予行演習
4. 講演「再処理・群分離の研究開発に携わってきて－これまでの仕事から－」
JAEA 森田泰治氏
5. 今後の委員会活動について
6. その他

執筆者リスト

* とりまとめ担当者

第1章 緒言

本間 俊司 埼玉大学

第2章 再処理における課題 —達成できなかった研究開発項目、妨げた要因—

2.1 東海再処理工場

竹内 正行 日本原子力研究開発機構

2.2 六ヶ所再処理工場

井関 忠宏 日本原燃(株)

2.3 高速炉再処理技術開発

本間 俊司 埼玉大学

2.4 技術課題

本間 俊司 埼玉大学

島田 隆 三菱重工業(株)

飯塚 政利 電力中央研究所

第3章 他分野技術および将来世代技術の動向

3.1 国産ロケット打上げの失敗と成功からの教訓

島田 隆 三菱重工業(株)

3.2 ロボット技術の動向

鈴木 達也 長岡技術科学大学

第4章 将来世代再処理を検討する上で考慮すべき要件

4.1 対象燃料

井関 忠宏 日本原燃(株)

4.2 国際的視点

小山 正史 電力中央研究所

4.3 回収元素、製品および廃棄物

渡邊 大輔 日立製作所

4.4 社会的受容性と経済的見通し

島田 隆 三菱重工業(株)

4.5 責任の主体、受益者、実施主体、ビジネスの成立性

鈴木 達也 長岡技術科学大学

4.6 プロセス性能

有田 裕二* 福井大学

大森 孝 (株)東芝

4.7 開発速度、他分野の進捗・導入

竹内 正行	日本原子力研究開発機構
本間 俊司	埼玉大学
島田 隆	三菱重工業(株)
飯塚 政利	電力中央研究所

4.8 技術伝承

飯塚 政利	電力中央研究所
-------	---------

4.9 安全性

松村 達郎	日本原子力研究開発機構
-------	-------------

第5章 将来世代再処理の具体像

5.1 環境負荷低減・持続的な技術向上の観点から提案する将来像

村木 渉*	三菱重工業(株)
黒田 順也	三菱重工業(株)
島田 隆	三菱重工業(株)

5.2 経済性・安全性の観点から提案する将来像

高橋 優也*	(株)東芝
大森 孝	(株)東芝

5.3 移行期の多様なニーズへの対応性の観点から提案する将来像

渡邊 大輔*	日立製作所
笹平 朗	日立製作所

5.4 廃棄物低減の観点から提案する将来像

長岡 真一*	日本原子力研究開発機構
竹内 正行	日本原子力研究開発機構

5.5 まとめ

本間 俊司	埼玉大学
-------	------

第6章 総括

本間 俊司	埼玉大学
-------	------