

付 録

付録 1	委員会委員
付録 2	委員会開催記録
付録 3	研究専門委員会における活動概要
付録 4	核燃料サイクルの性能評価の考え方
付録 5	現行軽水炉サイクルを対象とした検討
付録 6	MOX プルサーマルサイクルを対象とした検討
付録 7	高速炉サイクルを対象とした検討

付録 1 委員会委員

主査	稲垣 八穂広	九州大学
幹事	西原 健司	日本原子力研究開発機構
	朝野 英一	原子力環境整備促進・資金管理センター
委員	大和田 仁	原子力環境整備促進・資金管理センター
	斉藤 拓巳	東京大学
	山下 雄生	東芝
	牧野 仁史	日本原子力研究開発機構
	佐々 敏信	日本原子力研究開発機構
	渡部 創	日本原子力研究開発機構
	中瀬 正彦	東京工業大学
	鷹尾 康一郎	東京工業大学
	宇佐見 剛	電力中央研究所
	長谷川 聡	日本原燃株式会社
	兼平 憲男	日本原燃株式会社
	石尾 貴宏	日本原燃株式会社

付録 2 委員会開催記録

回	日	場所	議題
6	令和 2 年 7 月 14 日	原環センター 会議室/オンライン	1. 2019 年度成果報告書について 2. 2020 年度の活動について 3. 「技術・特性マトリクス」の構築作業について
7	令和 2 年 10 月 9 日	原環センター 会議室/オンライン	1. WG 評価キックオフ 2. 学会企画セッションについて
8	令和 2 年 12 月 17 日	原環センター 会議室/オンライン	1. WG 活動報告 2. 学会企画セッションについて
9	令和 3 年 3 月 10 日	原環センター 会議室/オンライン	1. WG 活動報告 2. 学会企画セッションについて

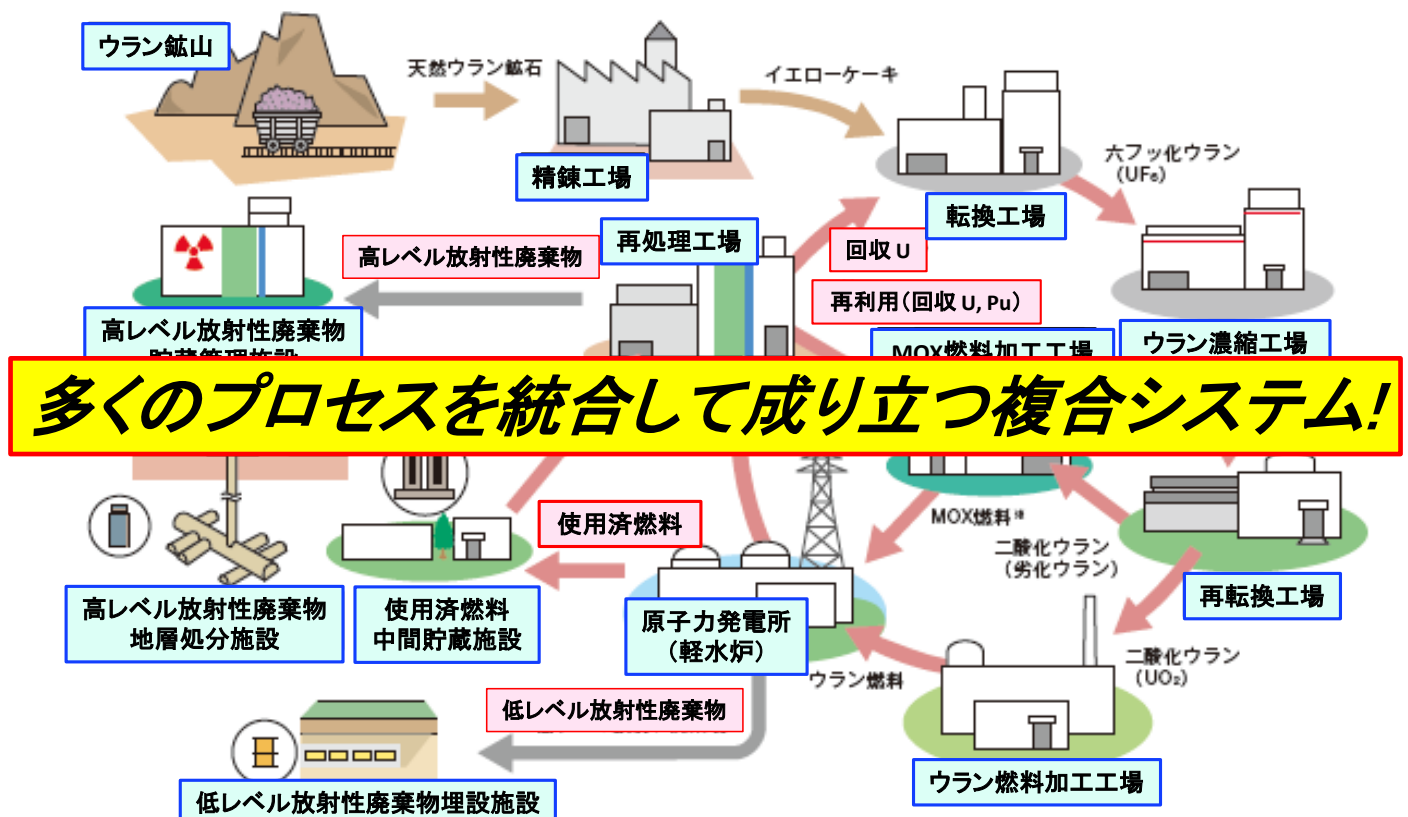
分離・変換技術の廃棄物処理・処分への適用： 先進的核燃料サイクルの総合的な性能評価の試み

(1)「放射性廃棄物の処理・処分と分離・変換技術」 研究専門委員会における活動概要

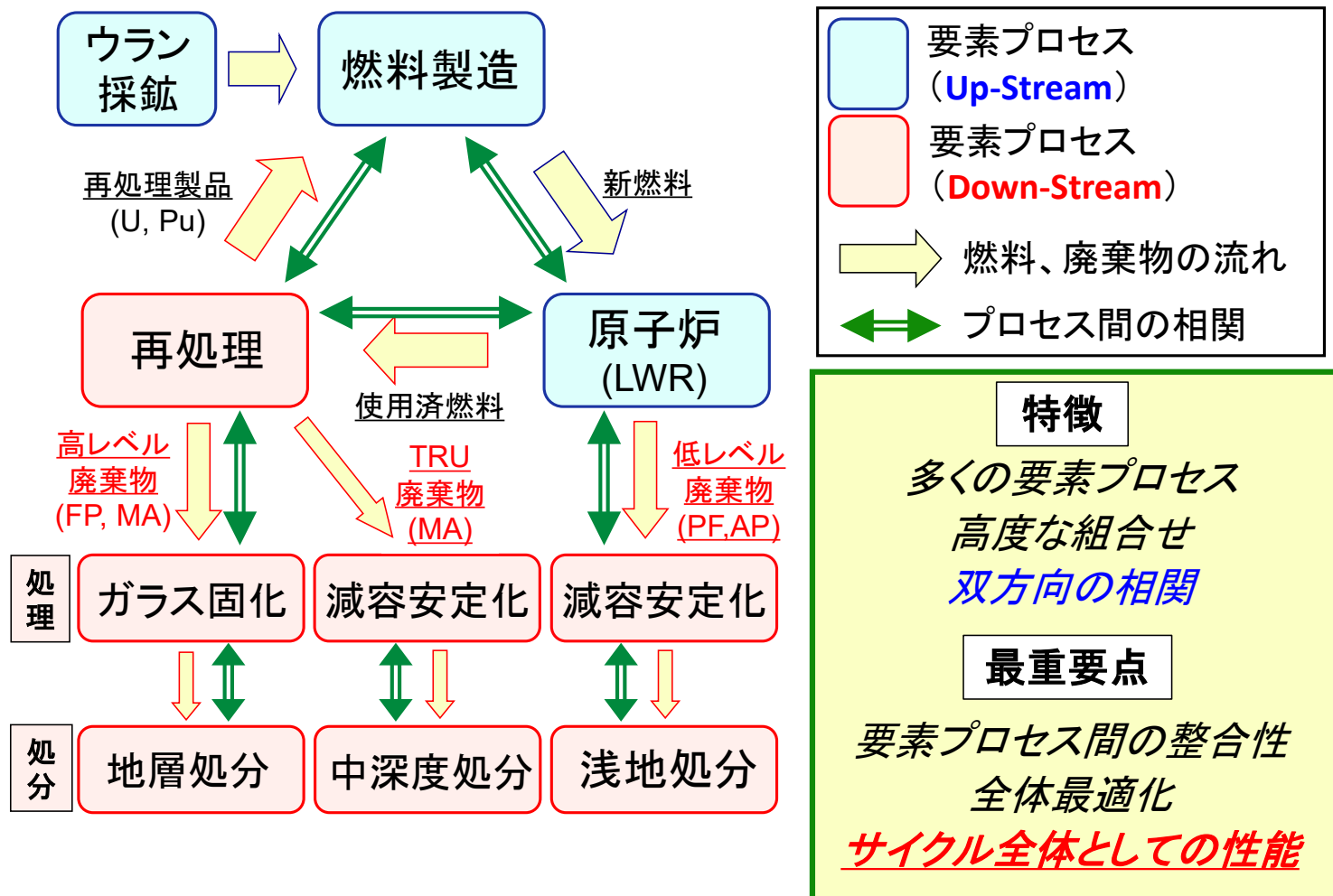
九州大学 稲垣 八穂広

核燃料サイクル：概要（軽水炉（LWR）サイクル）

2

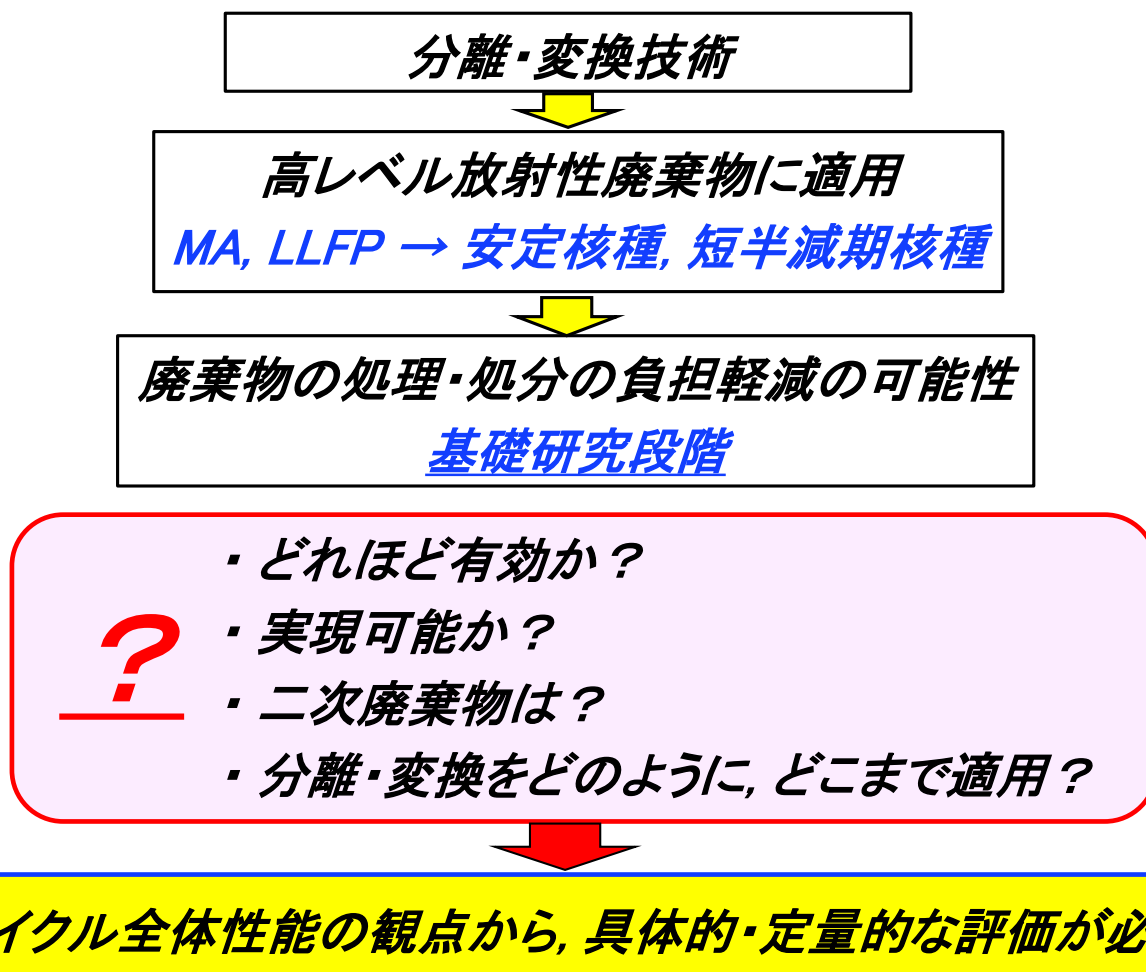


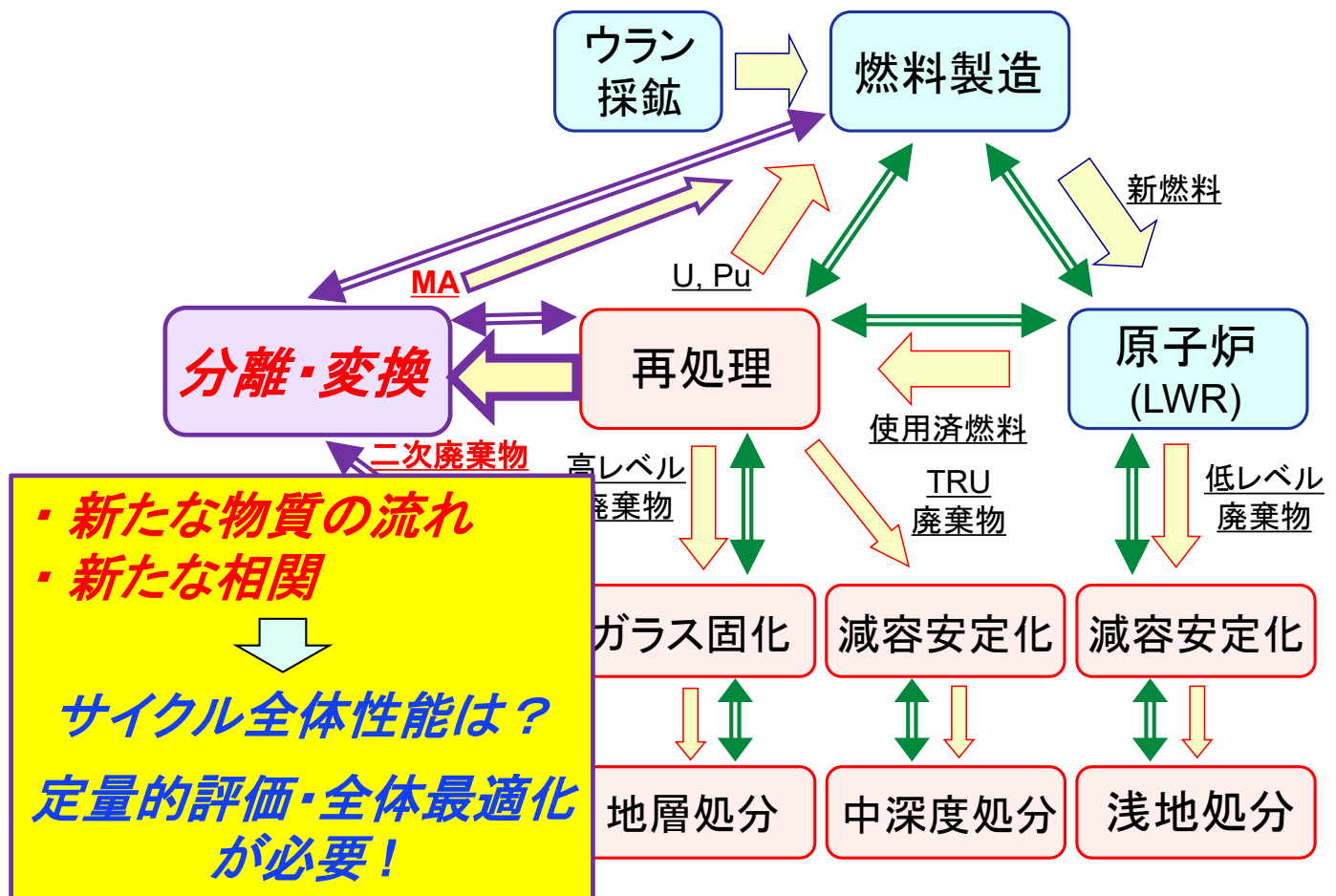
核燃料サイクル：要素プロセスのつながり(LWRサイクル)⁴



分離・変換技術の適用の可能性

6





活動の目的と手法

11

- ・ 分離・変換が高レベル廃棄物の処理・処分に及ぼす効果
- ・ サイクル全体としての総合性能に及ぼす効果
- ・ 様々な観点から可能な限り具体的・定量的に評価
- ・ その適用のあり方について現実的かつ合理的な提案

評価フレーム

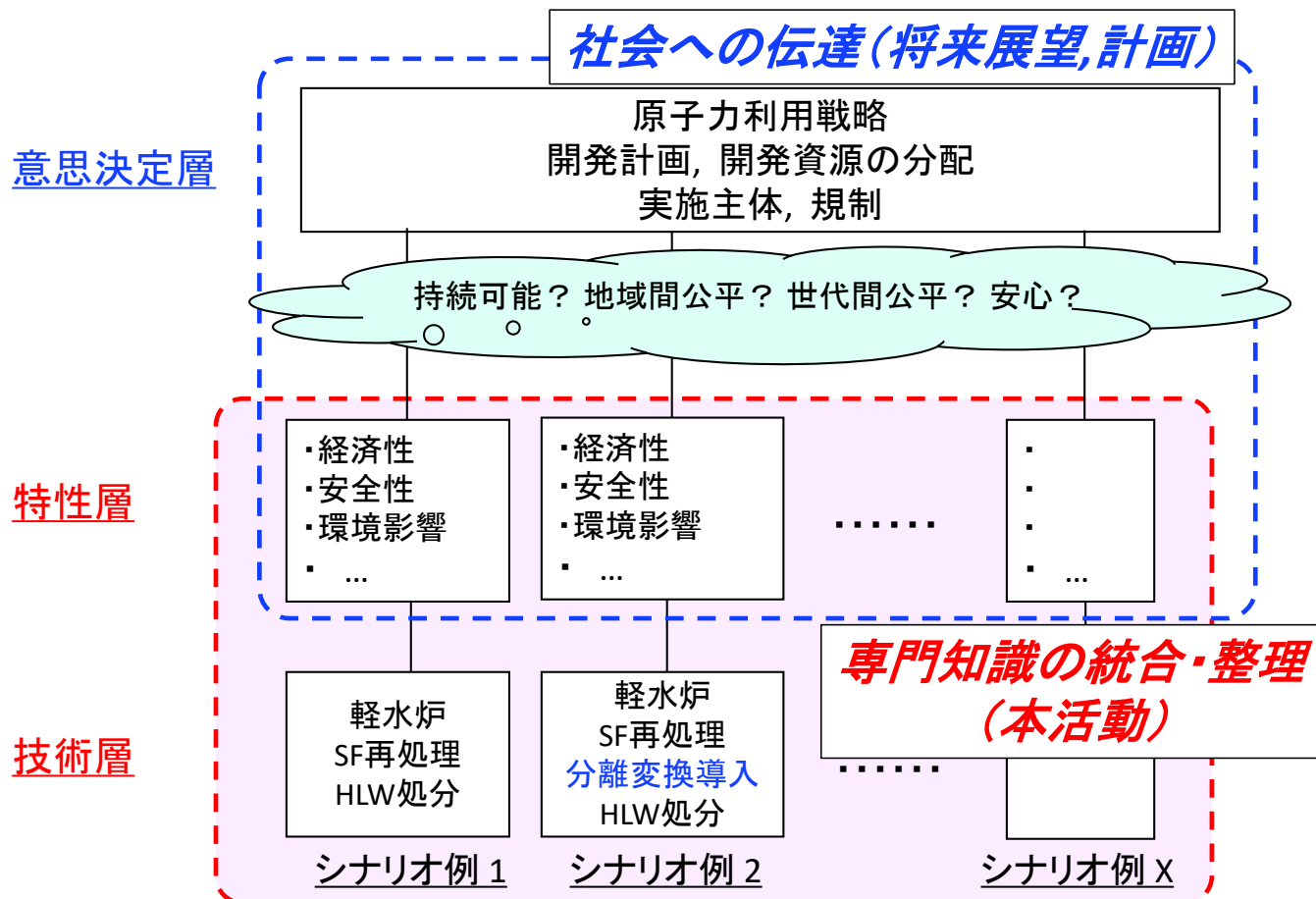
技術一特性マトリクス

評価対象とするサイクル

A: 現行軽水炉サイクル (WG-A)

B: MOXプルサーマルサイクル (WG-B)

C: 高速炉サイクル (WG-C)



委員会メンバー

委員 15名(敬称略, 五十音順)
朝野 英一(RWMC) BE, RR [幹事]
石尾 貴宏(日本原燃) RR
稲垣 八穂広(九大) BE, RR [主査]
宇佐見 剛(電中研) RR
大和田 仁(RWMC) BE
兼平 憲男(日本原燃) BE, RR
斉藤 拓巳(東大) BE, RR, RS
佐々 敏信(JAEA) RR, RP, PA
鷹尾 康一郎(東工大) BE, RR
中瀬 正彦(東工大) BE, RR
西原 健司(JAEA) RP [幹事]
長谷川 聡(日本原燃) AESJ
牧野 仁史(JAEA) BE
山下 雄生(東芝ESS) BE
渡部 創(JAEA) AESJ

オブザーバー 10名(同左)
池田 孝夫(日揮) BE
川合 康太(三菱総研) BE, RR
岸田 一隆(青山学院大) JPS, JASC
小崎 完(北大) BE
近藤 直樹(三菱総研)
島田 隆(三菱重工) BE, RR
田辺 博三(原子力学会フェロー) BE
村上 毅(電中研) RR
森田 圭介(JAEA) BE, RR
渡邊 大輔(日立GE) RR

- ・ AESJ: 原子力学会
- ・ BE: 同学会 バックエンド部会
- ・ RR: 同学会 再処理・リサイクル部会
- ・ RP: 同学会 炉物理部会
- ・ PA: 同学会 加速器・ビーム科学部会
- ・ RS: 同学会 リスク部会
- ・ JPS: 日本物理学会
- ・ JASC: 日本サイエンスコミュニケーション協会

分離・変換技術の廃棄物処理・処分への適用： 先進的核燃料サイクルの総合的な性能評価の試み

- (1) 研究専門委員会における活動概要(九州大学 稲垣 八穂広)
(発表5分+質疑応答5分)
- (2) 核燃料サイクルの性能評価の考え方(JAEA 西原 健司)
(10分+5分)
- (3) WG-A: 現行軽水炉サイクルを対象とした検討(東工大 中瀬 正彦)
(10分+5分)
- (4) WG-B: MOXプルサーマルサイクルを対象とした検討(JAEA 牧野 仁史)
(10分+5分)
- (5) WG-C: 高速炉サイクルを対象とした検討(JAEA 渡部 創)
(10分+5分)
- (6) 全体討論**(長岡技大 鈴木達也, RWMC 朝野英一)
(15分)

分離・変換技術の廃棄物処理・処分への適用： 先進的核燃料サイクルの総合的な性能評価の試み (2)核燃料サイクルの性能評価の考え方

JAEA 西原健司

1

過去の評価研究 1

「分離変換サイクル」研究専門委員会
(2003～2007、再処理・リサイクル部会)

- 軽水炉UO₂、軽水炉プルサーマル、高速炉の使用済み燃料に対し、分離変換を導入した場合の**処分場面積**を評価
- 核物質としての**魅力度**を考察

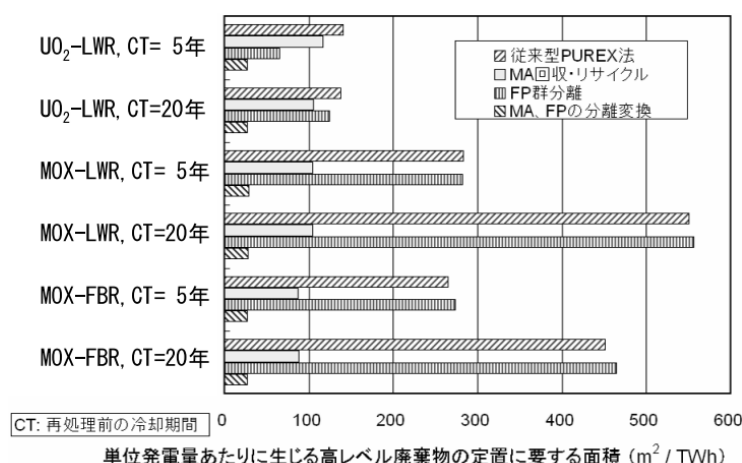


図 使用済み燃料の処分に必要な面積の評価

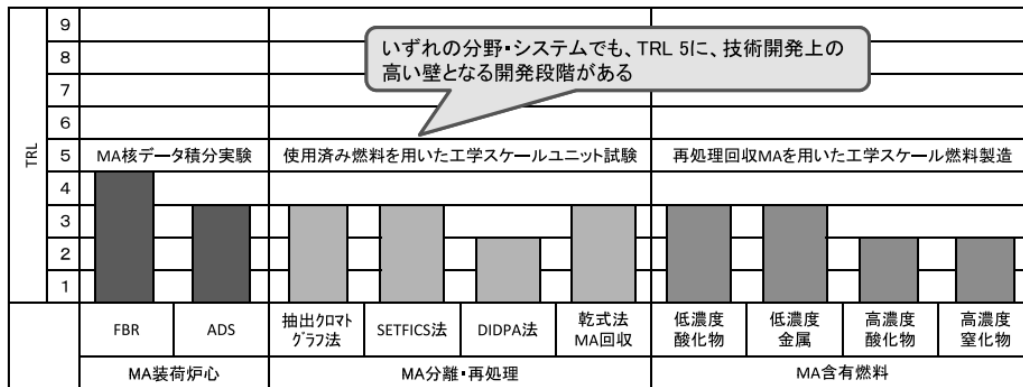
放射性廃棄物の分離変換技術にどこまで期待できるか？「分離変換サイクル」研究専門委員会活動報告に代えて、日本原子力学会誌, Vol. 50, No. 3 (2008)

2

過去の評価研究 2

「分離変換・MAリサイクル」研究専門委員会
(2007/10～2011/9、再処理・リサイクル部会)

- MAリサイクル技術成熟度を**TRL**(Technology Readiness Level)を用いて評価



第2図 わが国の分離変換技術の成熟度(TRL)と技術開発上の高い壁

図 わが国の分離変換技術の成熟度 (TRL) と技術開発上の高い壁

分離変換技術はどこまで成熟したか？技術成熟度評価に基づく現状整理と提案,
「分離変換・MA リサイクル」研究専門委員会, 日本原子力学会誌, 52(12), 2010

3

過去の評価研究 3

内閣府・原子力委員会：分離変換技術検討会（2008～2009）

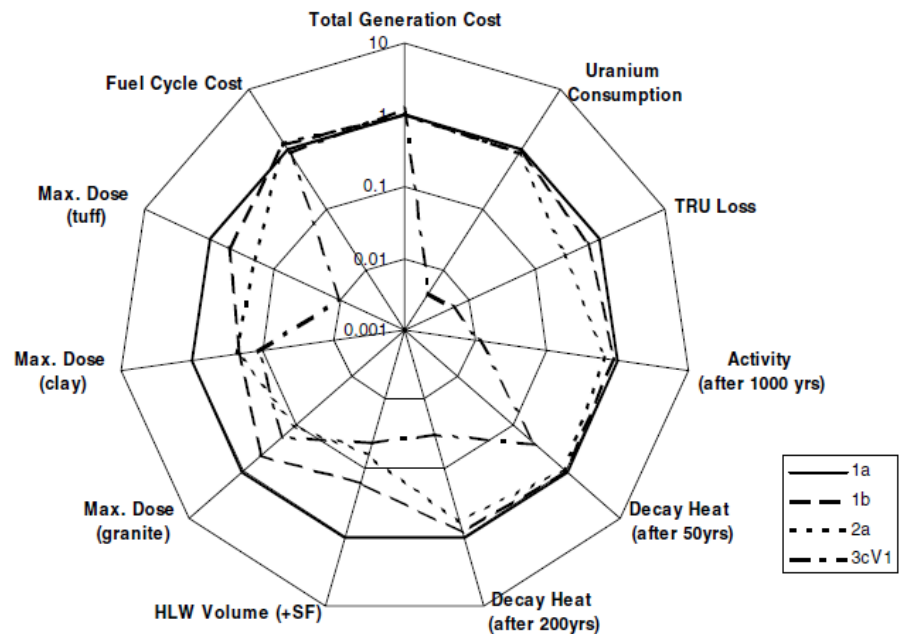
- 高速炉利用・ADS利用の分離変換の処分場に対する利益（**潜在有害度、実効線量、廃棄体発生量、処分面積**）を整理
- 国内外の現状技術、今後の研究開発を検討

4

過去の評価研究 4

Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management
(NEA No.5990, 2006)

- 経済性、ウラン資源、廃棄物（放射能、発熱、線量、体積）について評価



1a=軽水炉ワンススルー、1b=従来型再処理、2a=軽水炉Pu燃焼、3cV1=TRUリサイクル高速炉

これまでの評価研究

- 処分場への利益を中心に行われてきた。
- しかし、分離変換の導入はトレードオフである。起こりうる不利益として、
 - 導入のための費用
 - 核燃料サイクルが複雑化し、事故リスク、被ばく、環境影響が増大
 - 核監視への悪影響
 - 技術開発コスト、開発に掛かる期間、難易度
- トレードオフを把握するためには多面的評価が有効
 - NEA No.5990は経済性、ウラン資源を加えた3面の評価であり、価値が高い。

今回の評価の考え方

- 委員会では、処理処分に貢献する分離変換のあり方について明らかにしたい。
- そのため、分離変換による利益だけではなく、不利益が重要。
- 利益と不利益を「漏れなく・ダブリなく※」拾い上げたい。
- そのためには・・・

※ MECE (Mutually Exclusive, Collectively Exhaustive) と呼ばれる考え方 7

技術－特性マトリクス 「漏れなく・ダブリなく」

定量化が可能な、あるいは、科学的な見積もりが可能な指標を網羅。できるだけ、中身がダブらないように。

特性

	1. 経済性	2. 資源	3. 安定性	4. 環境影響	5. 安全性	6. セキュリティ	7. 核不拡散性	8. 技術成立性・実現性	9. 柔軟性	総合
1. U採掘										
2. 転換/濃縮										
3. 燃料製造										
4. 原子炉										
5. SF貯蔵・輸送										
6. 再処理・廃棄体化										
7. HLW貯蔵・輸送										
8. 処分										
総合										

特性の合計は困難なので範囲外（社会的観点が必要）

それぞれのマスに評価結果が入る。

定量化すれば、技術の合計が可能

技術

フロントエンドからバックエンドまで網羅。ダブらないことは比較的容易

特性の定義（随時更改）

1. 経済性	各施設の建設/運転/廃止費用。
2. 安定性	電力の安定供給。海外からの影響。
3. 資源	ウラン資源
4. 環境影響	各施設の環境影響（大気放出、水利用・排出、土地利用、土壌汚染）
5. 安全性	- 各施設のリスク評価（公衆・職業人被ばく線量、事故リスク） - 原子炉の重大事故を含む - 地層処分の公衆被ばくでは、不確実性を含む
6. セキュリティ	各施設に対するテロ・サボタージュ影響評価
7. 核不拡散性	各施設に対する転用リスク評価
8.1 技術成熟度	- 既存インフラの有無 - 技術成熟度(TRL)
8.2 技術実現性	開発にかかる費用・期間。開発時期整合
9. 柔軟性	- 各施設の可逆性の程度（再処理工程の変更しやすさ、炉心の柔軟さ） - 各施設の回収可能性の程度（ガラス固化、埋め戻しなどの不可逆性、深度影響）

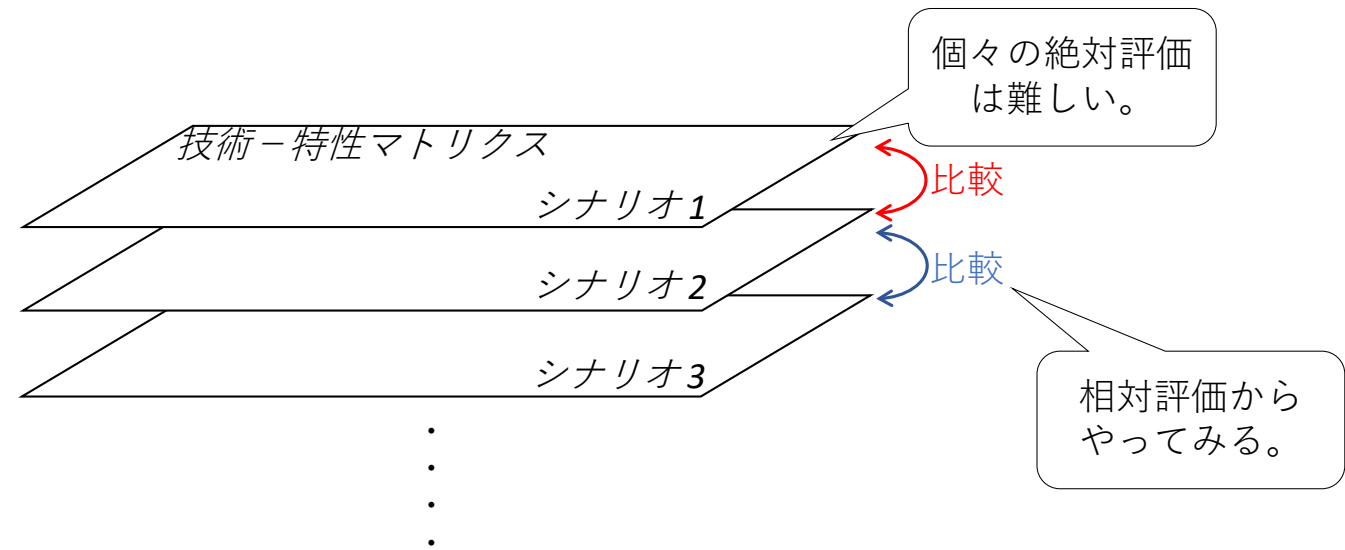
9

技術の定義（随時更改）

	シナリオ1 ワンスルー	シナリオ2 一回りサイクル+ MOXSF長期貯蔵	シナリオ3 高速炉定常（Puのみリサイクル）
1.U採掘	U 鉱石採掘	U 鉱石採掘	-
2. 転換/濃縮	遠心分離 (<5%)	遠心分離 (<5%)	-
3. 燃料製造	UO2	UO2 MOX	MOX
4. 原子炉	軽水炉	軽水炉	高速炉
5.1 SF貯蔵	- UO2-SFプール貯蔵 (~10 y) - UO2-SF乾式貯蔵 (~50 y)	- UO2-SF プール貯蔵(~10 y) - MOX-SFプール貯蔵 (~10 y) - MOX-SF 乾式貯蔵(50~100 y)	MOX-SFプール貯蔵 (~10 y)
5.2 SF輸送	- UO2-SF プールから乾式貯蔵へ - UO2-SF乾式貯蔵から処分場へ	- UO2-SFプールから再処理へ - MOX-SFプールから乾式貯蔵へ	MOX-SF プールから再処理へ
6.1. 再処理	-	UO2-SF (U, Pu回収)	MOX (U, Pu回収)
6.2 廃棄体化	-	ガラス固化	ガラス固化
7.1 HLW貯蔵	-	HLW乾式貯蔵 (~50y)	HLW乾式貯蔵 (~50y)
7.2 HLW輸送	-	HLW乾式貯蔵から処分場へ	HLW 乾式貯蔵から処分場へ
8. 処分 (LLW, ILW, HLW)	UO2-SF直接処分	HLW 地層処分	HLW地層処分

10

技術－特性マトリクスは、核燃料サイクルシナリオごと



技術－特性マトリクスの相対比較

例：従来再処理オプションに対して、廃棄体の特定元素を分離した場合の差分

	特性									総合
	1. 経済性	2. 資源	3. 安定性	4. 環境影響	5. 安全性	6. セキュリティ	7. 核不拡散性	8. 技術成立性・実現性	9. 柔軟性	
技術	1.U採掘									
	2. 転換/濃縮									
	3. 燃料製造									
	4. 原子炉									
	5. SF貯蔵・輸送									
	6. 再処理・廃棄体化									
	7.HLW 貯蔵・輸送									
	8. 処分									
	総合									

サイクル間で差がない。

差があるが、影響小

影響大だが定量的評価がなされていない。

影響大だが定量的評価がなされていない。

影響大だが、不明

今回評価の特徴

- 「漏れなく・ダブリなく」により、評価し忘れることなく、総合的な評価が可能。
- 網羅的であるため、作業量が膨大。
- 相対化することで、多くのマスを評価不要とする。
- 既往評価の流用などで、可能なマスは埋める。
- 各分野の専門家が影響の大小と、不確実性（評価の現状）を判断し、影響が大きく不確実性が大きいマスを特定する。
- シナリオ間の優劣は付けない（つけられない）。

13

比較するシナリオ

WG	A	B	C
目標	軽水炉HLWに対する分離・変換の適用	軽水炉プルサーマル使用済み燃料の管理	高速炉HLWに対する分離・変換の適用
WG リーダー・サブリーダー	◎中瀬 ○西原	◎牧野 ○朝野	◎渡部 ○佐々
観点	現行の核燃料サイクル（軽水炉使用済み燃料再処理＋プルサーマル）で発生するHLWに対して、FP分離・MA変換を適用した場合の得失を見る。	現行の核燃料サイクルから発生するプルサーマル使用済み燃料の直接処分、再処理、Puマルチリサイクル、Pu燃焼、（HLW分離・変換）の得失を見る。	高速炉から発生するHLWに対して、FP分離・MAリサイクルを適用した場合、また、ADSでMA核変換した場合、更に、LLFP分離変換を適用した場合の得失を見る。

現行の**軽水炉核燃料サイクル**と分離変換

プルサーマル使用済み燃料については、分離変換以前に、使用済み燃料をどう管理するかが、喫緊の課題

将来の**高速炉核燃料サイクル**と分離変換

14



原子力学会2021年春の年会

[2I_PL03]

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

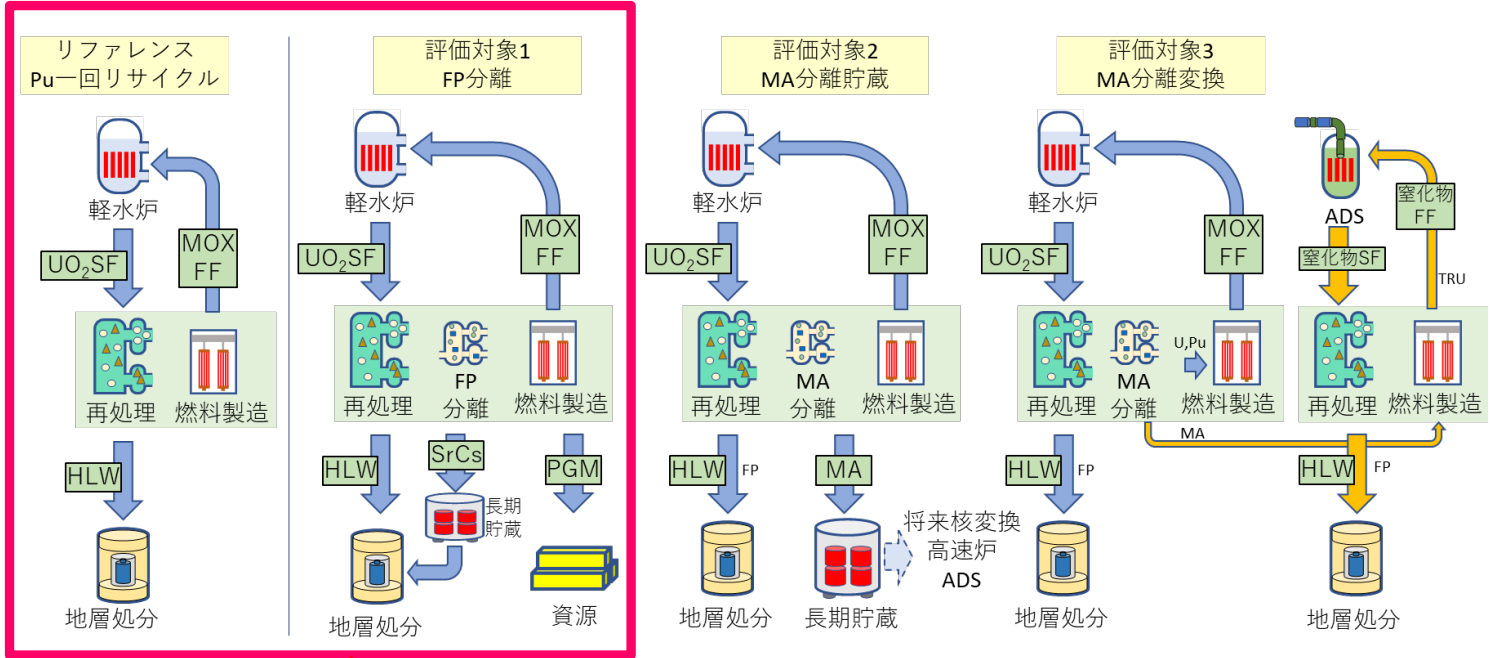
* 中瀬正彦¹、西原健司²、長谷川聡³、山下雄生⁴、鷹尾康一郎¹、⁵田辺博三、
近藤直樹⁶、森田圭介²
¹東京工業大学、²日本原子力研究開発機構、³日本原燃(株)、⁴東芝ESS、
⁵バックエンド部会、⁶三菱総合研究所

発表内容

1. シナリオ選定(WG-A)
 - シナリオの評価項目、考え方など
2. 技術特性マトリクス試行版(現行軽水炉HLWからのPGM/Mo分離を例として)
3. 技術特性マトリクス作成時の主な議論点
4. 結言

1. シナリオ選定 (WG-A)

- ・WG-Aでは、現行の核燃料サイクル(軽水炉使用済燃料再処理+プルサーマル)で発生するHLWに対してFP分離・MA変換等を適用した場合の得失を明らかにする。
- ・シナリオの選定、得失、特性を表現するための方法の検討
- ・廃棄物処理・処分の負担軽減の観点からシナリオを検討



まずはPGM, Mo分離を導入した場合を例にとって、技術マトリクスを試作

3

1. シナリオ選定(WG-A)

WG	A
目標	軽水炉HLW に対する分離・変換の適用
WG リーダー・サブリーダー	◎中瀬 ○西原
観点	現行の核燃料サイクル(軽水炉使用済み燃料再処理+プルサーマル)で発生するHLWに対して、FP分離・MA変換を適用した場合の得失を見る。

現行の軽水炉核燃料サイクルと分離変換

- 廃棄物処理・処分の負担軽減の観点からどのような意味を持つかを意識してシナリオを選定すること
- WG-Aは対象が現行軽水炉からのHLWを想定しているため、先行して技術特性マトリクスを作成し、考察を行った
- PGM, Mo分離を導入した場合の得失を検討しながら、評価項目の過不足、特性マップの表現方法等について検討
- 現行の六ヶ所再処理工場への導入を想定
使用済み核燃料 15年冷却を想定

4

2. 技術特性マトリクス試行版 (現行軽水炉HLWからのPGM/Mo分離を例として)

5

	1. 経済性	2. 安定性	3. 資源	4. 環境影響	5. 安全性	6. セキュリティ	8.1 技術成熟度	8.2 技術実現性
6.1. 再処理	・PGM/Mo工程増加による悪化	・工程増加による停止の可能性があるが、原子炉の電源供給に波及する恐れは小さい。		・PGM/Mo分離工程増加により悪化	・PGM/Mo分離工程増加によるリスク増加(HALWの面的広がり拡大) ・濃縮貯蔵工程でのRu-106の事故時の影響緩和 ・Ru分離によるステンレス鋼の腐食環境緩和	PGM/Mo分離工程追加による防護対象の増加	・PGM/Mo分離は基礎段階。分離により発生する廃液量などが定量化されていない。	・中～大規模の研究開発が必要 *実現性は元素やプロセスにも依存
6.2. 廃棄体化	・PGM資源化により廃棄体対象のFP物量が固化体本数が減少(～1割) ・洗浄運転は将来的に新型炉により不要となる見込み。				・ガラス熔融炉運転性改善による安全性向上		課題は技術成熟度、実現性に偏っている	
7.1. HLW貯蔵	・固化体本数が若干減少	←廃棄物減容化等に関する項目は経済性付近に偏っている						
7.2. HLW輸送	・固化体本数が若干減少							
8. 処分(LLW, ILW, HLW)	・分離プロセス廃棄物処分によりLLW, ILW増加 ・HLW固化体本数が若干減少				・イエローフェーズ排除などガラス性状向上が及ぼす影響は小さい。 ・イエローフェーズの課題は新型炉、新ガラス素材によって解決の可能性		・プロセス廃棄物の処分方法は未着手	・LLWまたはILWであり大きな開発課題ではない。
9.1. 資源化 - PGM	・資源化処理(精製、同位体偶奇分離)による悪化 ・資源売却による改善		国産の資源となり得る。(国内需要に対する供給割合、Ru 15%、Rh 7%、Pd 2%)	・資源化処理(精製、同位体偶奇分離)による悪化	クリアランスを下回らなければならない。Ru 未評価、Ru同位体は短寿命。Rh 未評価、Rh同位体は短寿命。Pd 3300Bq/g(試算)、99.9%のPd107除去が必要。		・精製は一般産業の知見が使えるため実用化段階。Rh分離は困難。 ・Pdのレーザー偶奇分離は基礎段階、ImPACTで大きな前進があったが10倍程度の効率化が必要	・精製は小～中規模の開発が必要。 ・Pdのレーザー偶奇分離は小～中規模の開発がなお必要。
9.2. 資源化 - Mo利用想定	・加速器等によるMo99生産コスト ・Mo99売却		国産Mo99供給	Mo99生産施設による悪化	Mo99生産施設による悪化		Mo99生産施設は基礎段階	概念構築から、実用化まで大規模なR&Dが必要?

↓個別要件

3. 技術特性マトリクス作成時の主な議論点

<六ヶ所再処理工場への分離工程導入>

新たな工程を追加できるスペースがあるかが重要。

* 主要な議論を抜粋

* エビデンスも収集、調査中

<濃縮工程への影響>

過酷事故時の蒸発乾固による放射性Ru酸化物の飛散までの時間余裕が伸びれば、放出管理目標値などの変更もあり得るため、導入のモチベーションになる。

<固化工程への影響>

ガラス熔融炉で行われる洗浄運転の頻度低減により、廃棄体本数の削減は可能

<分離技術の技術成熟度・実現性>

Pd、Mo分離は技術実現性が高い。Ru、Rhについては更なる技術開発が必要である。分離したPGM、Moを資源化せず処分する場合、処分方法は基礎研究が必要。

<資源化>

経済的利益は高価なRhからくる。レーザー偶奇分離には金属(0価)の形態で供給される必要があり、再処理と後段との結節の考慮が必要。使用済み燃料の冷却期間が延びることは、Ru分離、資源化の観点からは有利。Moは再処理から供給するメリットの検証が必要。

まずは“もれなく、ダブリなく”評価して特性の“見える化”を目指す。

各WGでのマトリクスが上がってきたら、シナリオ越えた議論で深める作業が重要

シナリオの評価項目

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

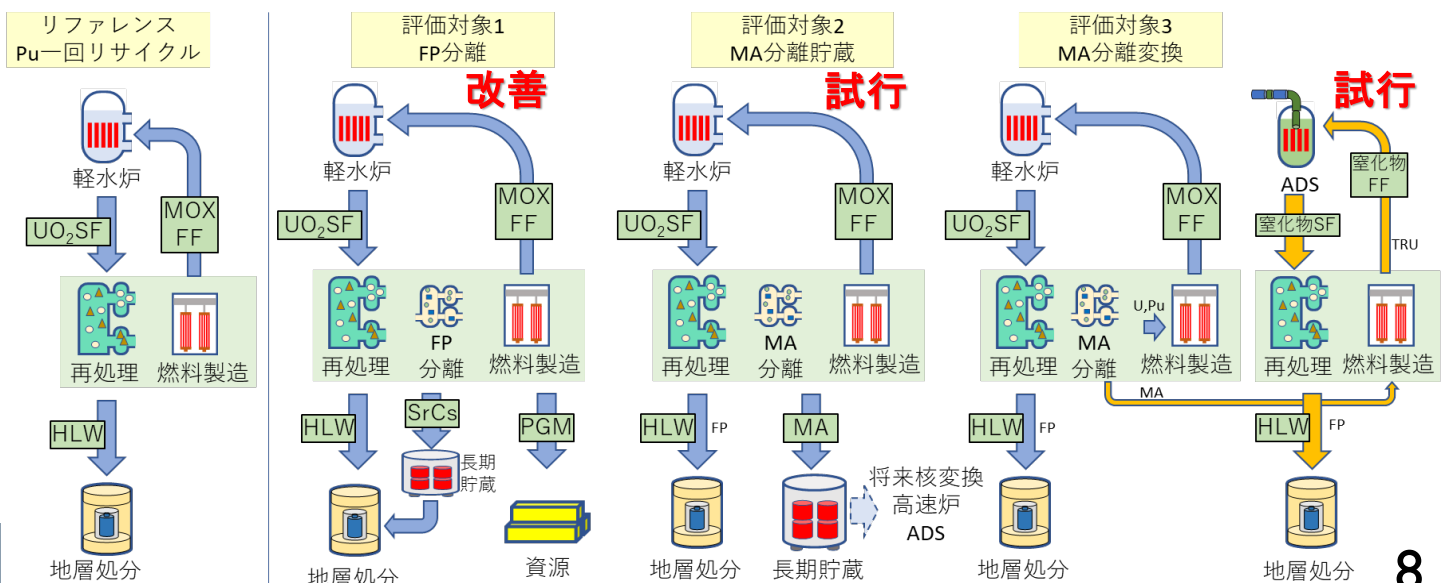
性能変化 [+] 性能向上 [-] 性能低下 [?] 不明(以降の性能変化の程度は評価しない) 性能変化の程度 ** 変化大 * 変化小 ? 不明	8.1技術成熟度 (A) 実用化段階 (B) 実証段階 (C) 基礎段階 (?) 不明	8.2技術的実現性 ・R&D期間 (A) 10年以下 (B) 10-30年 (C) R&D期間30年以上 (?) 不明(以降のR&D費用は評価しない) ・R&D費用 *** 1000億円以下 ** 1000億-1兆円 * 1兆円以上 ? 不明
---	--	--

7

4. 結言

- ・分離・核変換が原子力システムに及ぼす影響、技術・シナリオ間の得失を明確化するため、WG-Aでは現行軽水炉再処理から発生する高レベル廃液を検討対象とした。
- ・技術特性マトリクスの一例として、PGM, Mo分離による得失を検討した。
- **廃棄物処理・処分の影響は経済と安全に、技術成熟度、実現性に課題が偏在する**

- ・次年度は技術特性マトリクスの詳細化、エビデンスの取りまとめを行う。
- ・処分に最も影響のあるMA分離での検討を起点とし、Cs、Sr分離についても得失を評価する



8

5. Appendix

議論点 - 1

<六ヶ所再処理工場への分離工程導入について>

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

<濃縮工程への影響について>

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

議論点 - 2

<固化工程への影響について>

- ・HLLWのガラス固化工程においては、PGM分離により、現行のガラス溶融炉で行われる洗浄運転の頻度低減により、廃棄体本数の削減は可能と考えられる。しかし、近い将来に新型ガラス溶融炉の導入と改良されたガラス素材の導入で、現行のPGM析出によるノズル閉塞やMoによるイエローフェーズ形成といった懸念事項は解決される可能性がある。
- ・六ヶ所再処理工場で導入が予定されている新型ガラス溶融炉より先にPGM分離が導入されることは考えにくい。従って、六ヶ所再処理工場へのPGM分離導入がガラス溶融に有益かは不明瞭である。
- ・ガラス固化体製造の観点からのMo分離の重要性についても、新型ガラス溶融炉とガラス素材、ガラス組成の調整具合によって下がる可能性がある。Mo分離が必要となった場合に、イエローフェーズを防止するためにどの程度分離すればよいかといった知見がない。

議論点 - 3

<分離技術の技術成熟度・実現性について>

- ・Pdは現状で分配比が高く抽出速度が速い抽出剤が多数報告されている。Pd分離は技術実現性が高い。
- ・Ruは反応性の低い硝酸ニトロシルルテニウムとして存在し、抽出速度が遅く分離困難。Rhは水和水の交換半減期が大変長く、反応性が低いために抽出分離が困難な元素である。従ってRu, Rhについては更なる技術開発が必要である。
- ・Moについては、既往技術での分離が報告されている。Mo分離は技術実現性が高い。
- ・分離したPGM、Moを資源化せず処分する場合、処分方法は研究例が限られており、基礎研究が必要である。
- ・PGMの中のLLFP(Pd-I07)核変換については現行の六ヶ所再処理工場には間に合わないため、将来核燃料サイクルについて検討するWG-Cの検討課題と考えられる。

3. 議論点 - 4

<資源化について>

- ・経済性はPGM分離・資源化の利益の多くは高価なRhからくる。ImPACTの検討ではPdは長半減期同位体からの分別がクリアランスの観点から必須とされた。レーザーによる同位体偶奇分離導入コストに対して利益が得られるか検討が必要。
- ・ ^{107}Pd のクリアランスレベルはこれまで評価されておらず、ImPACTで様々な利用等のシナリオ評価により $10\mu\text{Sv/年}$ 相当となる最小の放射能濃度として評価された。達成するには、 ^{107}Pd は3桁比放射能を下げる必要がある。レーザー偶奇分離には金属(0価)の形態で供給される必要があり、再処理と後段との結節の考慮が必要。
- ・ ^{106}Ru は比較的半減期が短く40年程度貯蔵すれば放射能レベルがクリアランスレベル(0.1Bq/g)程度に到達する。使用済み燃料の冷却期間が延びることは、Ru分離、資源化の観点からは有利に働くと考えられる。
- ・再処理からMoを供給するメリットの検証が必要。原子炉内で生成されたMoの分離と資源化の目的は ^{98}Mo の捕獲反応や ^{100}Mo の $(n,2n)$ 反応による ^{99}Mo 製造にあると考えられる。光核反応は収率が高くはなく、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 供給のためには ^{100}Mo を濃縮して $(n,2n)$ 反応の利用が望ましい可能性がある。

まずは“**もれなく、ダブリなく**”評価をすることが目的につき、技術特性マップマップをもとにどこに技術的課題があるか、どの特性が重要かといったことの“**見える化**”を目指す。

分離・変換技術の廃棄物処理・処分への適用：
先進的核燃料サイクルの総合的な性能評価の試み
(4) MOXプルサーマルサイクルを対象とした検討

牧野仁史（日本原子力研究開発機構）

朝野英一（原子力環境整備促進・資金管理センター）

宇佐見剛（電力中央研究所）

兼平 憲男（日本原燃株式会社）

池田孝夫（日揮（株））

川合康太（株）三菱総合研究所）

渡邊大輔（日立GEニュークリア・エナジー（株））

1

目次

1. はじめに
2. シナリオの選定
3. 技術－特性マトリクス評価の検討状況
4. まとめと今後の展望

2

1. はじめに

- WG-A：現行軽水炉サイクルを対象とした検討
- **WG-B：MOXプルサーマルサイクルを対象とした検討【本報告】**
- WG-C：高速炉サイクルを対象とした検討

●WG-AおよびWG-Cでは各々の核燃料サイクルに対して**分離・変換技術を導入した場合の得失**を検討することとしている。

●一方、MOXプルサーマルサイクルについては、MOXプルサーマルの使用済燃料の再処理に分離・変換技術を適用する得失を議論する前に、その前提となる**MOXプルサーマル使用済燃料自体をどのようにマネジメントするかが喫緊の課題**である。

● WG-Bの検討範囲：

MOXプルサーマル使用済燃料のマネジメントに着目した検討から着手

3

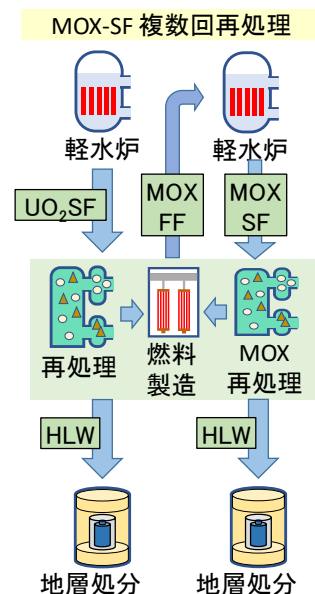
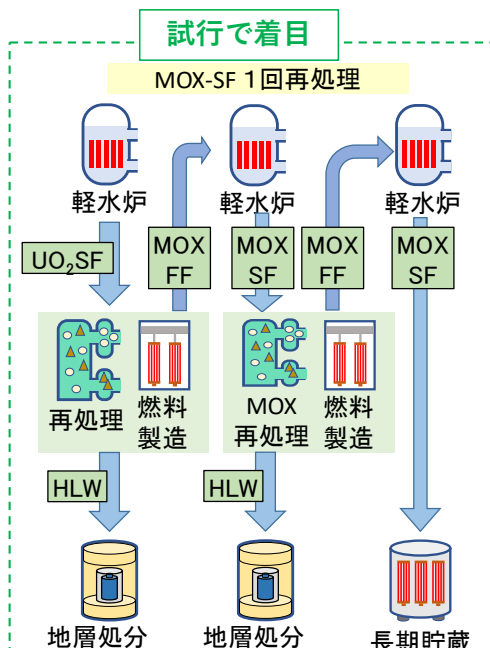
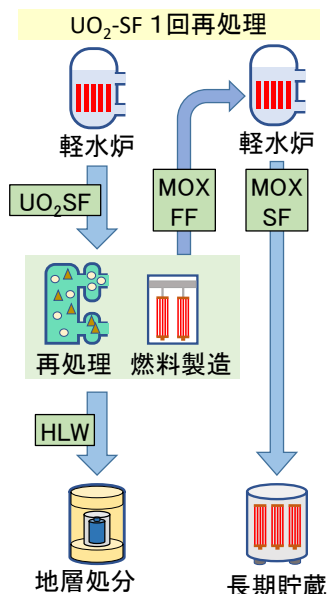
2. シナリオの選定

レファレンスシナリオ：
Pu 1回リサイクル
(UO_2 使用済燃料再処理・利用)

検討対象シナリオ：
Puマルチリサイクル
(MOX使用済燃料再処理・利用)

- ・ UO_2 -SF : 全量を再処理
- ・ MOX(UO_2 再処理)-FF : プルサーマル利用
- ・ MOX(UO_2 再処理)-SF : 長期貯蔵

- ・ MOX(UO_2 再処理)-SF : 全量を再処理
- ・ MOX(MOX再処理)-FF : プルサーマル利用
- ・ MOX(MOX再処理)-SF : 長期貯蔵



4

3. 技術－特性マトリクス評価の検討状況

●評価の進め方

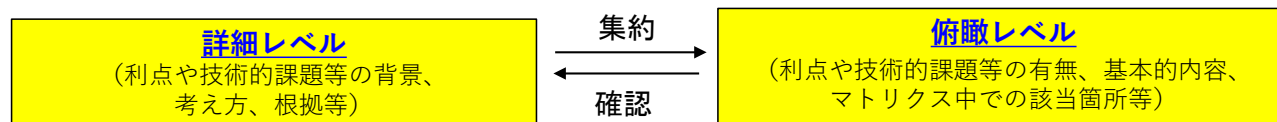
・実施手順と作業フォーマット

Step1：各シナリオの特徴と主な違いの「技術」ごとの洗い出し

Step2：主な違い⇒「特性」への影響（「利点」か「技術的課題」かの推定等）

		シナリオ			特性								
		レファレンスシナリオ： Pu一回りサイクル (UO2使用済燃料再 処理・利用)	検討対象シナリオ： Puマルチサイクル (MOX使用済燃料再 処理・利用)	シナリオ間の 各技術の主 な違いの	1. 経済性	2. 安定性	3. 資源	4. 環境影響	5. 安全性	6. セキュリティ	7. 核不拡散性	8. 技術的成立性 ・実現性	9. 柔軟性
技術	1. U採掘												
	2. 転換/濃縮												
	3. 燃料製造												
	4. 原子炉												
	5.1 SF貯蔵												
	5.2 SF輸送												
	6.1. 再処理												
	6.2 廃棄体化												
	7.1 HLW貯蔵												
	7.2 HLW輸送												
	8.1 処分 (LLW)												
	8.2 処分 (ILW)												
	8.3 処分 (HLW)												

・情報の段階的整理：



5

●情報整理の例（R3.2段階）(1/4)：

Step1：シナリオ間での各技術の主な違いの例

- 各技術項目でのオプションがシナリオ間での違いを特徴づける場合あり：
例えば：炉心が1/3かフルか（「3.燃料製造」「4.原子炉」）
- HLW貯蔵や処分では、廃棄物の特性（特に、インベントリ、発熱量等）の違いが重要。上流側プロセスの仕様に応じた設定とすることが重要。

		シナリオ		
		レファレンスシナリオ： Pu一回りサイクル (UO2使用済燃料再処理・ 利用)	検討対象シナリオ： Puマルチサイクル (MOX使用済燃料再処 理・利用)	シナリオ間での各技術の 主な違い
技術	～	～	～	～
	3. 燃料製造	・UO2燃料 ・MOX燃料	・UO2燃料 ・MOX燃料	MOX-SFの「3.燃料製造」の オプション例： OP-3-1：MOX1/3炉心 OP-3-2：MOXフル炉心
	4. 原子炉	軽水炉（プルサーマル）	軽水炉（プルサーマル）	MOX-SFの「4.原子炉」の オプション例： OP-4-1：MOX1/3炉心 OP-4-2：MOXフル炉心
	～	～	～	～

6

●情報整理の例 (R3.2段階) (2/4) :

Step2 : 「俯瞰レベル」のイメージ

➤ 各シナリオの主な違い⇒特性への影響 (着目すべき利点か技術的課題か等) : 「技術」と「特性」の特定の組み合わせで特徴的に抽出される可能性

『レファレンスシナリオ(RS) : Pu一回りサイクル』に対する

『検討対象シナリオ(TS) : MOX使用済燃料再処理 (Puマルチサイクル) 』での違い :

「+」 : 着目すべき利点、「-」 : 技術的課題、「記号なし」 : 大きな違いなし (+ 確認事項あり)

シナリオ		特性								
レファレンスシナリオ : Pu一回りサイクル (UO ₂ 使用済燃料再処理・利用)	検討対象シナリオ : Puマルチサイクル (MOX使用済燃料再処理・利用)	シナリオ間の各技術の主な違い	1. 経済性	2. 安定性	3. 資源	4. 環境影響	5. 安全性	6. 核不拡散性	7. 核不拡散性	8. 技術的成立性・実現性
1.U採掘	1.U採掘	1.U採掘	+	+	+	+				
2. 転換/濃縮	2. 転換/濃縮	2. 転換/濃縮								
3. 燃料製造	3. 燃料製造	3. 燃料製造					-			
4. 原子炉	4. 原子炉	4. 原子炉								
5.1 SF貯蔵	5.1 SF貯蔵	5.1 SF貯蔵								
5.2 SF輸送	5.2 SF輸送	5.2 SF輸送								
6.1 再処理	6.1 再処理	6.1 再処理								
6.2 商業体化	6.2 商業体化	6.2 商業体化								
7.1 HLW貯蔵	7.1 HLW貯蔵	7.1 HLW貯蔵								
7.2 HLW輸送	7.2 HLW輸送	7.2 HLW輸送								
8.1 処分 (LLW)	8.1 処分 (LLW)	8.1 処分 (LLW)								
8.2 処分 (ILW)	8.2 処分 (ILW)	8.2 処分 (ILW)								
8.3 処分 (HLW)	8.3 処分 (HLW)	8.3 処分 (HLW)								

●情報整理の例 (R3.2段階) (3/4) :

Step2 : 「俯瞰レベル」での「着目すべき利点」「技術的課題」の例

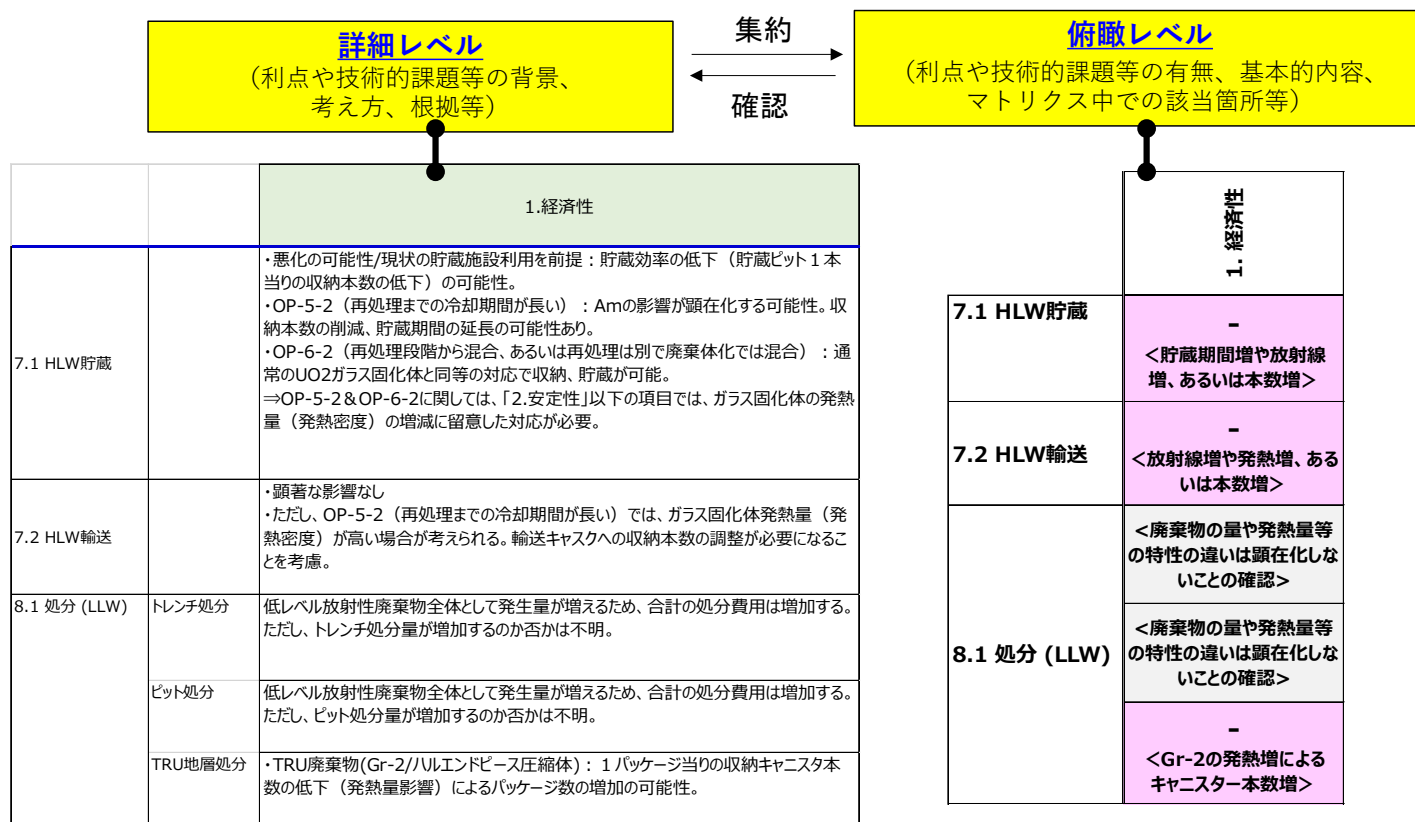
利点 : 採掘量の減⇒「1.U採掘」での経済性、安定性、資源、環境影響
Pu組成が核兵器に不向き⇒「6.1再処理」での核不拡散性

課題 : 高放射性物質を扱うための安全対策⇒「3.燃料製造」での安全性
酸濃度増加、臨界、放射線増、本数増⇒「6.1再処理」での経済性
発熱量増による面積増⇒「8.3処分」での経済性、技術的成立性・実現性

		特性			
		1. 経済性	5. 安全性	7. 核不拡散性	8. 技術的成立性・実現性
技術	1.U採掘	+			
	3. 燃料製造		-		
	6.1. 再処理	-		+	
	8.3 処分 (HLW)	-			-

●情報整理の例（R3.2段階）（4/4）：

「俯瞰レベル」 ↔ 「詳細レベル」 の情報の段階的整理の例



- 文献情報を最大限活用することを基本としつつも、実態としては、**本WGメンバーが有する各分野の専門家としての知見と経験が最も有効な情報源**となった。

9

3. 技術－特性マトリクス評価の検討状況

●評価に関する見通しや今後に反映すべき知見等（1/2）

（技術－特性マトリクス評価に関する試行を通じて得られた見通し）

- **燃料サイクル全体を対象**とした検討が可能。
- 「技術」と「特性」の組み合わせにより **ある程度の網羅性を担保**。
- 上記の包括的な検討により、検討対象シナリオにおいて **着目すべき利点や技術的課題等を効率的に検討可能**。
- 「詳細レベル」と「俯瞰レベル」での情報整理と相互参照が有効。

⇒ **本試行を通じて方法論や実施手順の妥当性を確認、及び以下の観点での有効性を確認**

- ・ **どんな懸念があるかのイメージを具体化すること**
- ・ **着目すべき利点、現段階での検討不足の領域（課題）を解きほぐし見える化すること**
- ・ **それを複数の専門家が協働して行うこと 等**

10

3. 技術－特性マトリクス評価の検討状況

●評価に関する見通しや今後に反映すべき知見等（2/2）

（今後に反映すべき知見）

➤ 個々の「技術」の横断的な影響への着目：

核燃料サイクルを構成する「ある技術」の仕様・条件の設定が「他の技術」の利点や技術的課題に影響を及ぼす場合がある。

➤ 特定の「技術」や「特性」への着目：

着目すべき利点や技術的課題は、「技術」と「特性」のすべての組み合わせで抽出されるわけではなく、特定の「技術」や「特性」、あるいはそれらの特定の組み合わせにおいて特徴的に抽出される。

➤ 個々の「技術」におけるオプションへの着目：

各シナリオ中の各「技術」において複数のオプションが考えられる場合、その選択は、着目すべき利点や技術的課題の検討の前提として大事になる。

例： - MOX-SFの1回サイクルとマルチサイクル
- 1/3MOXとフルMOX
- 使用済燃料の貯蔵期間の長短 等

⇒上記を踏まえて、MOXプルサーマルサイクルの検討を深化・拡充

11

4. まとめと今後の展望

●令和2年度のWG-Bの取組みのまとめ

- プルサーマル使用済燃料をどのようにマネジメントするかに着目
- 技術－特性マトリクス評価の具体的な実施手順と試行結果、及び評価の見通しや今後の評価に向けた期待や課題等を提示

●令和3年度のWG-Bの予定

- 着目すべき利点や技術的課題に係る検討を深化・拡充
 - ・ 分離・変換技術を導入した場合
 - ・ MOXプルサーマルサイクルで考えられる他のシナリオやオプションを想定した場合 等
- 検討における課題、留意点の例：
 - ・ 複数のシナリオや技術オプションからの検討対象の選択
 - ・ 上流側プロセスの仕様の下流側プロセスへの影響伝播の具体化
 - ・ MOXプルサーマルに特有な事項の抽出（含、他WG成果の有効活用）
 - ・ 個々の技術や特性の評価とシナリオ全体としての評価のつなぎ 等

12

分離・変換技術の廃棄物処理・処分への適用： 先進的核燃料サイクルの総合的な性能評価の試み (5) 高速炉サイクルを対象とした検討

○渡部 創, 佐々 敏信（日本原子力研究開発機構）
大和田 仁（原子力環境整備促進・資金管理センター）
斉藤 拓巳（東京大学）
石尾 貴宏（日本原燃株式会社）
村上 毅（電力中央研究所）
島田 隆（三菱重工(株)）

はじめに

WG	A	B	C
目標	軽水炉HLWに対する分離・変換の適用	軽水炉プルサーマル使用済み燃料の管理	高速炉HLWに対する分離・変換の適用
観点	現行の核燃料サイクル（軽水炉使用済み燃料再処理＋プルサーマル）で発生するHLWに対して、 FP分離・MA変換 を適用した場合の得失を見る。	現行の核燃料サイクルから発生するプルサーマル使用済み燃料の直接処分、再処理、 Puマルチリサイクル 、 Pu燃焼 、（HLW分離・変換）の得失を見る。	高速炉から発生するHLWに対して、 FP分離・MAリサイクル を適用した場合、また、 ADSでMA核変換 した場合、更に、 LLFP分離変換 を適用した場合の得失を見る。

- ・開発段階である高速炉サイクルについて、現時点でWG-A, Bと同様な評価の実施は困難。
- ・評価するシナリオを限定し、公開情報を基に調査を行う。
- ・「技術-特性マトリクス」の内、「1. 経済性」の評価が可能なシナリオの選定を優先した。
- ・シナリオ選定、情報源等について幅広くご意見を期待したい。

シナリオの選定

評価作業が発散しないよう、評価すべきシナリオの数を限定したい。

⇒ 各シナリオに用いられる技術を限定する（経済性の情報により絞り込む）。

シナリオの構成要素：

(1)炉及び核変換のタイプ

- ・ 高速炉・・・燃料タイプ
- ・ 加速器駆動型・・・運転モード

(2)燃料サイクル

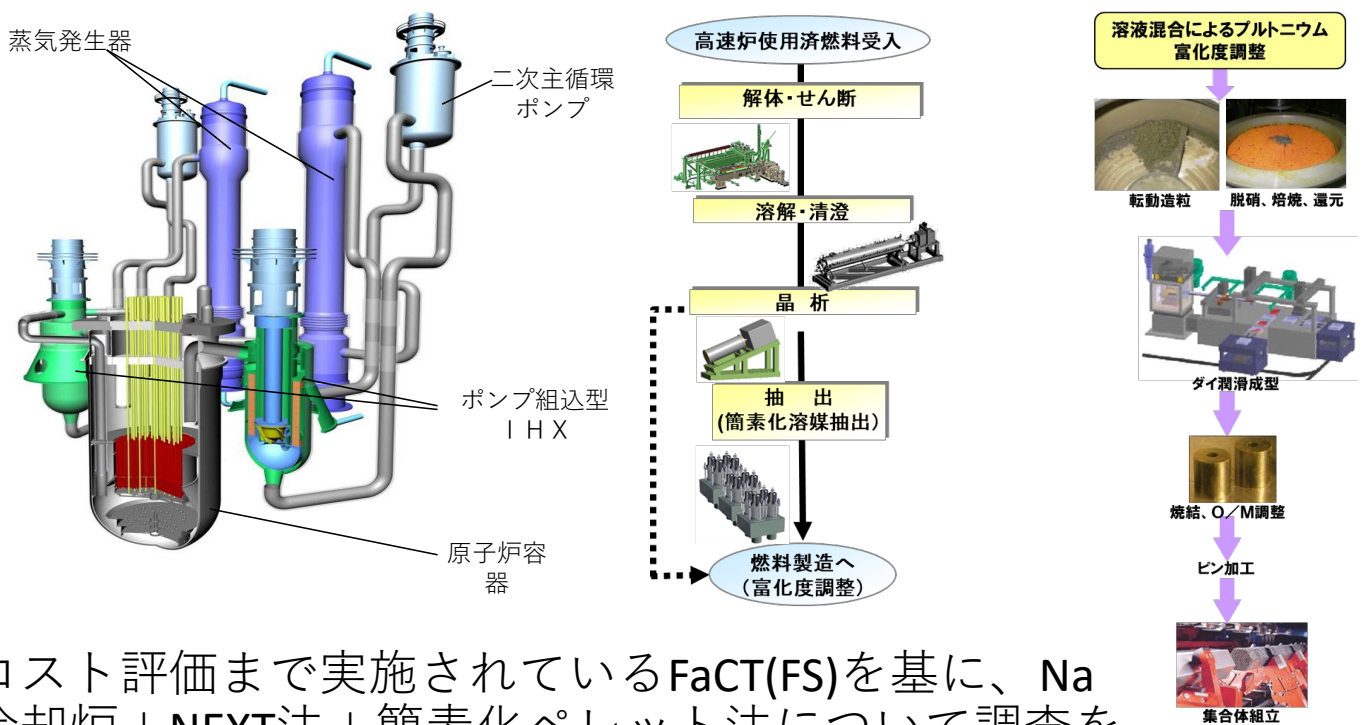
- ・ 再処理・・・湿式、乾式

MA分離、LLFP分離の有無をオプション

- ・ 燃料製造・・・再処理システムに依存

3

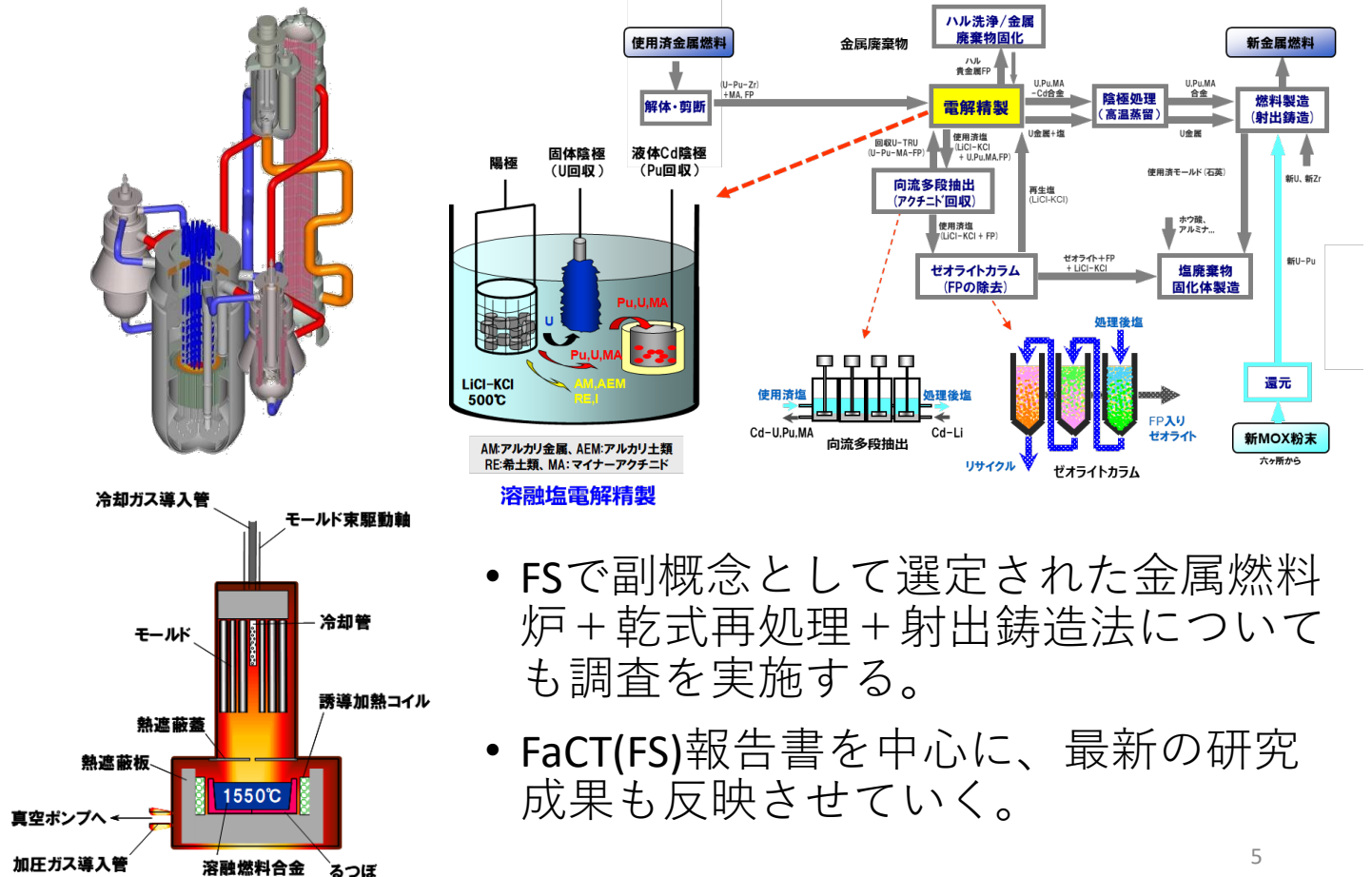
要素技術の選定：高速炉核変換(酸化物燃料)



- ・ コスト評価まで実施されているFaCT(FS)を基に、Na冷却炉＋NEXT法＋簡素化ペレット法について調査を行う。最新の研究データも反映させる。
- ・ MA回収はオプションNEXT法より削除(オプションの扱い)。

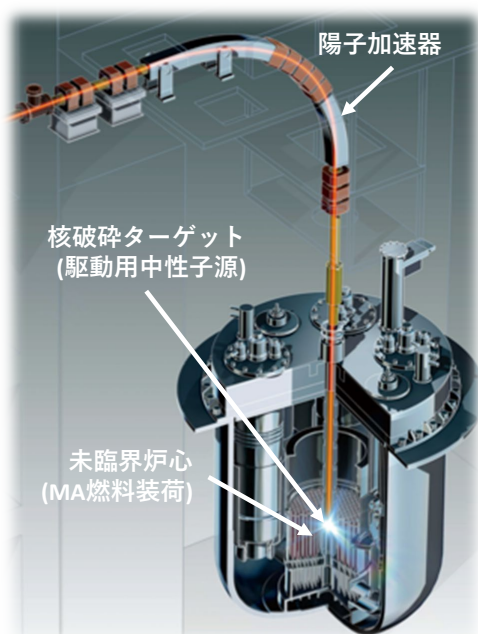
4

要素技術の選定：高速炉核変換(金属燃料)

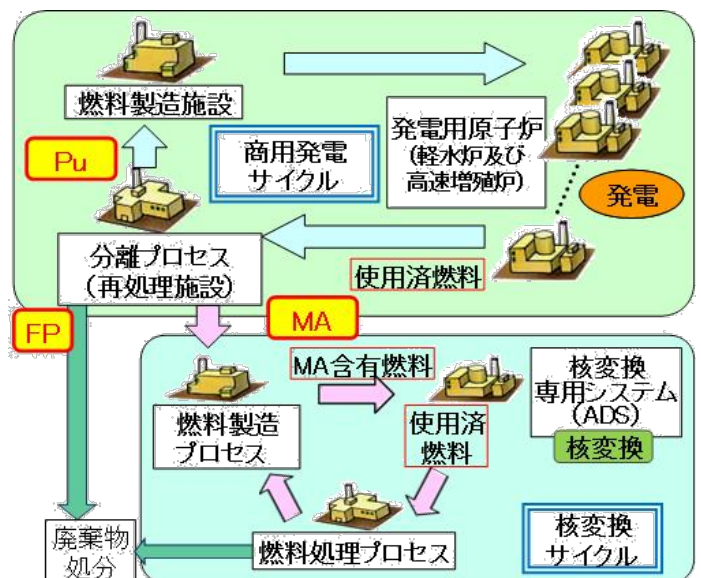


5

要素技術の選定：ADS



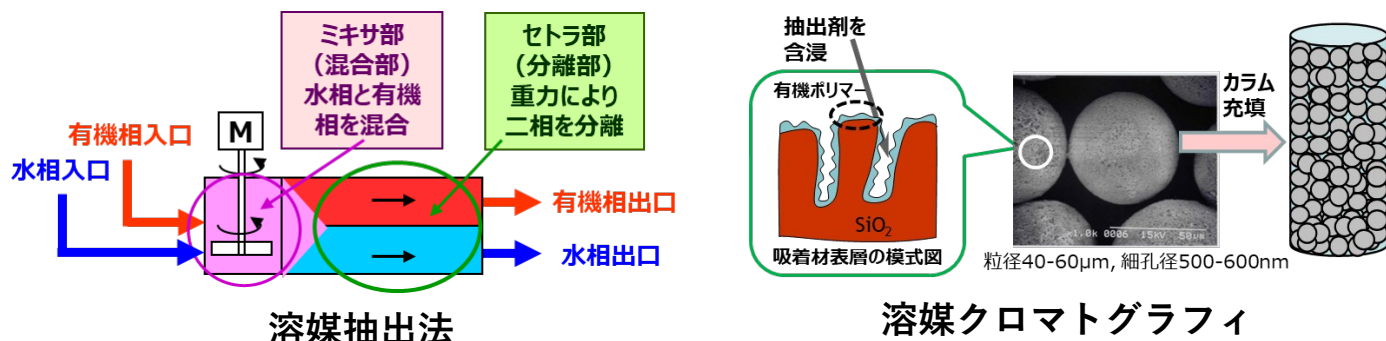
階層型サイクル



- ADSを核変換専用として用い、発電炉としてFRが合わせて利用される階層型を想定する。
- IAEAやOECD/NEAのレポート、各種設計論文を基に調査を行う。

6

技術オプション：MA分離(湿式再処理)



	原 理	利 点	課 題
溶媒抽出法	抽出剤を含有する有機相と硝酸溶液等の水相との間の分配平衡が元素により異なることを利用する分離法	・連続多量処理が容易 ・高い回収率と高い分離度 ・工業的経験が豊富	・取扱液量増大 ・装置規模拡大の可能性 ・希釈剤の選択 ・第三相形成防止
抽出クロマトグラフィー	抽出剤を適当な単体に保持し、溶媒抽出の原理の下、固液間抽出で分離する方法	・希釈剤不要 ・高い分離性能 ・装置がコンパクト (抽出剤の高密度充填)	・原子力界での工業的な経験が少ない ・遠隔操作、保守性の問題 ・溶離液量増大の可能性

- ・ 廃棄物の取扱い等を考慮し、まず溶媒抽出法を用いる。
- ・ 最終的な評価では、抽出クロマトもオプションに加える。

技術オプション：LLFP分離

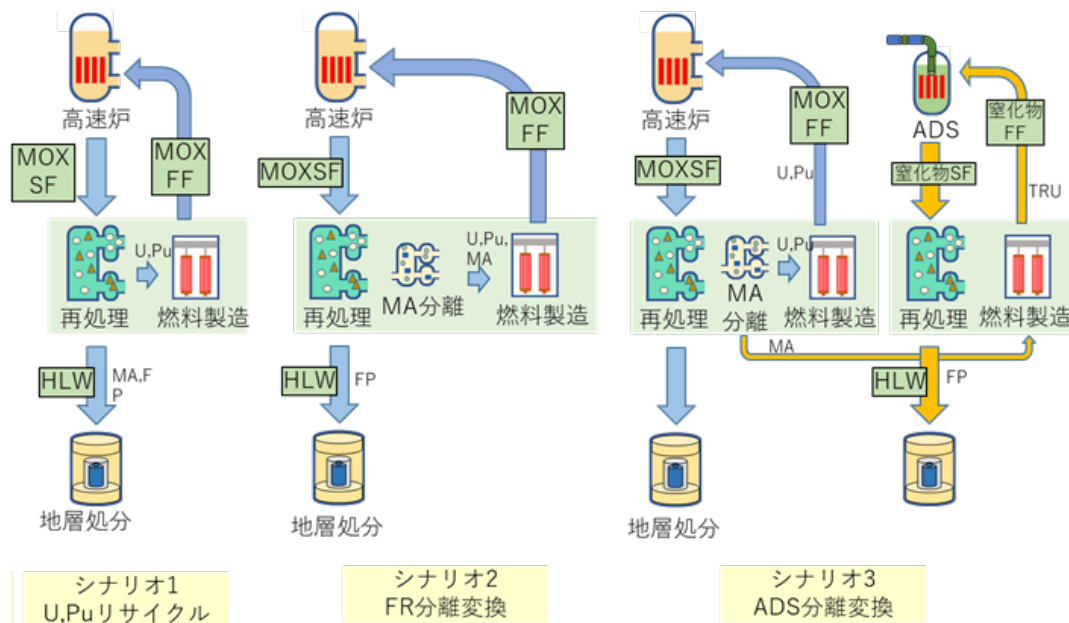
分離技術

- ・ ^{99}Tc (溶媒抽出)、 ^{129}I (吸着) の分離は確立されたものとして文献を調査する。
- ・ その他のLLFPとして、 ^{107}Pd 、 ^{79}Se 、 ^{135}Cs 、 ^{93}Zr を対象とし、ImPACTの報告書等を中心に分離技術について調査を進める(分離変換効果も考慮)。

核変換

- ・ 高速炉による核変換：原子力システム研究開発事業「高速炉を活用したLLFP核変換システム研究開発」(H28-31、代表：東京工業大学 千葉教授)を中心に調査
- ・ 加速器による核変換：ImPACTの成果を中心に調査

シナリオの選定 選定されたシナリオ



シナリオ1：U, Puリサイクル(Na冷却酸化物燃料高速炉＋先進湿式再処理(Np分離))

シナリオ2：FR分離変換(Na冷却酸化物燃料高速炉＋先進湿式再処理(MA分離含)),
(金属燃料FR＋乾式再処理)

シナリオ3：ADS分離変換(ADS核変換サイクル＋FR発電サイクル)

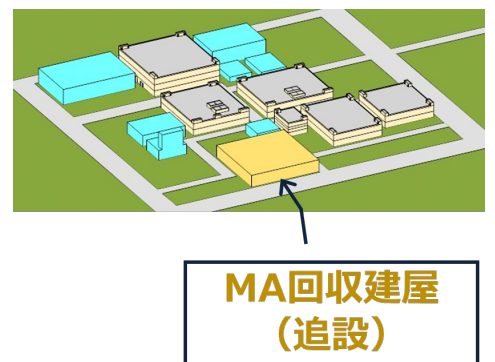
シナリオ4：LLFP分離変換(シナリオ2または3にLLFP分離核変換を追加する)

9

調査結果 高速炉システム(酸化物燃料)

炉システム

- ・発電単価は将来の軽水炉と競合可能。
 - ・安全性、環境影響、資源利用効率、核拡散抵抗性について、軽水炉と比較して優位性あり。
 - ・廃棄物発生量が軽水炉と比較して多くなる。
- ⇒マトリックス評価のため詳細な廃棄物の分類の調査が必要。



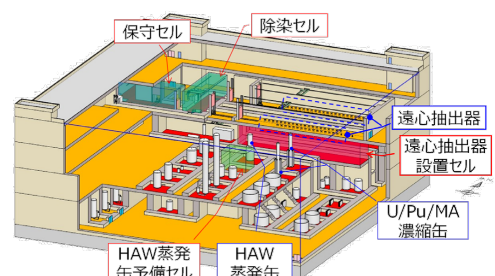
燃料サイクル施設

- ・安全性、環境影響についてより詳細な調査が必要。

- ・MA回収導入時の事業費増加：約3割

⇒現状ではプロセス追加による廃液量の増加に伴う設備費(濃縮、廃液処理)の増加が主要因

- ・炉と同様、詳細な廃棄物の調査が課題。



MA回収建屋配置図

炉システム

- ## 燃料サイクル施設

- [illegible]

11

炉システム

- ## 燃料サイクル施設

-

核変換用ADS(800MW_{th})
概念図

*ADS単体の発電コスト

12

まとめと今後の予定

- 高速炉HLWに対する分離・変換の適用による得失の評価のため、調査対象となるメインのシナリオの選定を決定した。

シナリオ	概要
1	FR U, Puリサイクル
2	FR MA分離変換
3	FR発電 + ADS核変換
4	シナリオ2, 3 + LLFP分離核変換

- FR(酸化物燃料)、FR(金属燃料)、ADS階層型について経済性を中心に調査を開始した。
- マトリックス表を用いた評価のため、放射性廃棄物の詳細な内訳の調査が必要。
- 今後、LLFP分離核変換に関する情報収集に着手する。
- 他WGの評価と横並びを取りつつ、R3年度末の評価の取りまとめを目指す。