

日本原子力学会 バックエンド部会  
バックエンド夏期セミナー  
2018年8月22-23日、仙台

## 廃棄物管理における負荷低減のための 分野横断的な原子力システムの研究

2018年8月23日

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

朝野英一

## 廃棄物管理/負荷低減/分野横断/原子力システム

1. 経緯
2. 研究例：日本原子力学会2018春の年会発表
  - ・シナリオ
  - ・燃料サイクル諸条件
  - ・環境負荷（廃棄物量&放射線影響）
  - ・評価指標
  - ・負荷低減：発電、使用済燃料、核種分離、ガラス固化、地層処分
  - ・提言
3. 今後に向けて

## 1. 経緯

### 1-1 自主調査研究/原環センター/平成26～30年度

#### 「先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念への影響検討」

- ① 原子力システム：廃棄物⇒上流側
- ② 物量評価：計算/解析
- ③ 負荷低減：廃棄物処分場面積⇒指標
- ④ 選択肢

#### 【成果】

##### (1) 研究発表

- ・日本原子力学会2018春の年会（分野：放射性廃棄物処理）

#### 「21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢：Pu利用推進と環境負荷低減型地層処分に関する研究」

(1)～(6)：シリーズ発表

##### (2) 論文

High burn-up operation and MOX burning in LWR; Effects of burn-up and extended cooling period of spent fuel on vitrification and disposal,

K.Kawai, H.Sagara, K.Takeshita, M.Kawakubo, H.Asano, Y.Inagaki, Y.Niibori, and S.Sato

J. Nucl. Sci. Technol, on line publication, 2018

## 1-2 核燃料サイクル基本問題懇談会/原子力安全研究協会（2004年～2012年）

- ①バックエンドの視点からサイクル横断的取り組み
- ②専門家：炉物理・炉工学、発電炉/運転、燃料/製造、再処理、廃棄物処理・処分
- ③高燃焼度化
- ④ガラス固化技術
- ⑤TRU廃棄物
- ⑥FBRサイクル/環境負荷低減
- ⑦国際会議

### 【成果】

#### 論文

LWR high burn-up operation and MOX introduction; Fuel cycle performance from the viewpoint of waste management,

Y.Inagaki, T.Iwasaki, S.Sato, T.Ohe, K.Kato, S.Torikai, Y.Niibori, S.Nagasaki, and K.Kitayama

J.Nucl. Sci. Technol. Vo.46, No.7, 667-689(2009).

Thermal impact on geological disposal of hull and end piece wastes resulting from high-burn-up operation of LWR and introduction of MOX fuels into LWR,

F.Hirano, S.Sato, T.Kozaki, Y.Inagaki, T.Iwasaki, T.Ohe, K.Kato, K.Kitaya, S.Torikai, Y.Niibori and S.Nagasaki

J. Nucl. Sci. Technol, Vol.26, No.5, 443-452 (2009).

Burning of MOX fuels in LWRs; fuel history effects on thermal properties of hull and end piece wastes and the repository performance,

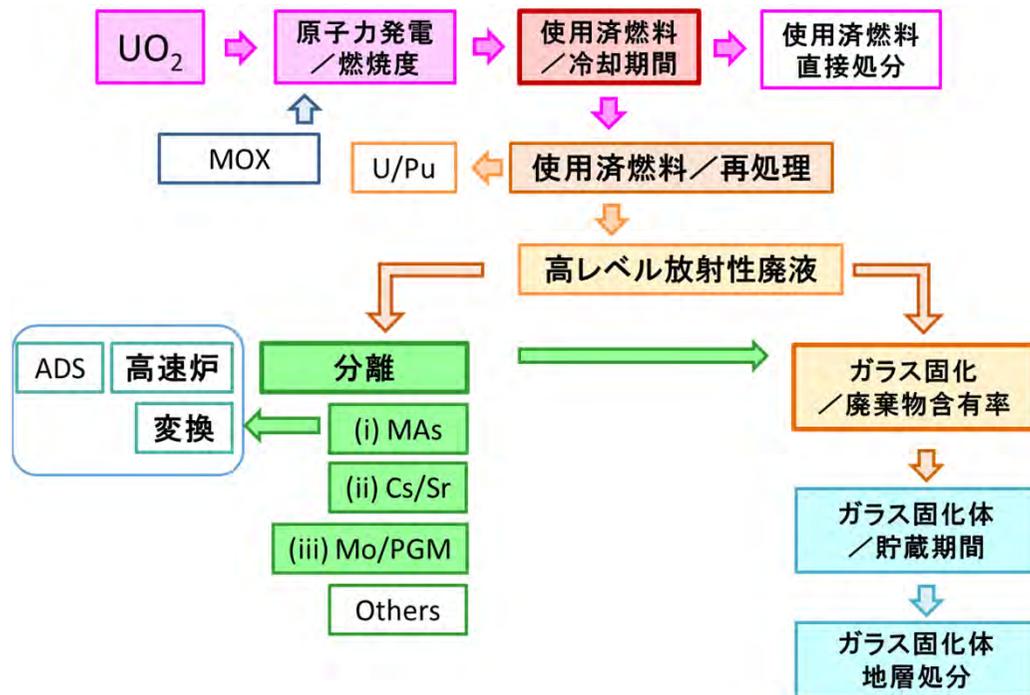
F.Hirano, S.Sato, T.Kozaki, Y.Inagaki, T.Iwasaki, T.Ohe, K.Kato, K.Kitayam, S.Nagasaki and Y.Niibori

J. Nucl. Sci. Technol., Vol.49, No.3, 310-319(2012).

## 2. 研究例【日本原子力学会2018年春の大会、放射性廃棄物処理、3011～3016】

21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢：Pu利用推進と環境負荷低減型地層処分にに関する研究\*

発表	着眼点	対象	成果
1	経緯、視点、研究展開	廃棄物管理、選択肢	留意事項、研究全体構想
2	事例調査	CEA2012年報告書	シナリオ、評価指標
3	核燃料サイクル諸条件	使用済燃料、ガラス固化体	評価指標/導入
4	廃棄体専有面積	Cs/Sr分離、高含有ガラス	分離割合(十分条件)、評価指標/有効性
5	廃棄体専有面積	MA分離、SNF/UO <sub>2</sub> 冷却期間	分離割合(十分条件)、評価指標/有効性
6	研究開発への提言	バックエンドシステム統合	—



\*佐藤正知、北海道大学名誉  
 新堀雄一、東北大学  
 稲垣八穂広、九州大学  
 千葉豪、北海道大学  
 竹下健二、東京工業大学  
 川合康太、東京工業大学(現：三菱総合研究所)  
 岡村知拓、東京工業大学  
 三成映理子、東京工業大学  
 坪能和宏、原環センター  
 川久保政洋、原環センター  
 朝野英一、原環センター

## 2.1 事例調査：フランス/エネルギー/原子力政策

年	トピックス	
1991年	放射性廃棄物管理研究法	3つの技術オプション：分離変換、長期貯蔵、地層処分
2006年	放射性廃棄物管理計画法	
2012年12月	原子力・代替エネルギー庁CEA	技術報告書（第2巻/全5巻） ・長寿命放射性核種の分離変換研究 ・高速炉、ADS利用
2013～2015年	エネルギー・気候変動総局(DGEC) 原子力安全機関(ASN)	放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画(PNGMDR)
2015年6月	原子力・代替エネルギー庁CEA	技術報告書（概要/PTとFNR利用Pu多重リサイクルに関する研究進捗）
2015年7月	グリーン成長のためのエネルギー移行法(エネルギー転換法)	・低炭素国家 ・原子力発電依存度の削減：75%⇒50%, 2025年(2030～2035年)
(2015年12月)	(パリ協定採択（2016.12発効）)	
2016～2018年	エネルギー・気候変動総局(DGEC) 原子力安全機関(ASN)	放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画(PNGMDR)

\* 日本原子力学会2018春の年会、3012「21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢：Pu利用推進と環境負荷低減型地層処分に関する研究,(2)技術報告書(CEA/フランス)に関する事例調査」発表資料より抜粋

## 2.2 事例調査：技術報告書(CEA/フランス,2012)

- (1) エネルギー戦略
- (2) 放射性廃棄物管理：インベントリー削減

第1巻 Sustainable management of radioactive materials with reactors of 4<sup>th</sup> generation/  
第4世代原子炉による放射性物質の持続可能な管理

第2巻 Separation-transmutation of long-lived radioactive elements/  
Séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue  
長寿命放射性核種分離・変換  
(第5章 分離変換の技術的経済的研究)

第3巻 Four sodium-cooled fast neutron reactors of 4<sup>th</sup> generation/  
第4世代の4つのSFR

第4巻 Fast neutron reactors of 4<sup>th</sup> generation with gas-cooled reactor/第4世代ガス冷却FR

第5巻 Synthesis and recommendation/まとめと提言

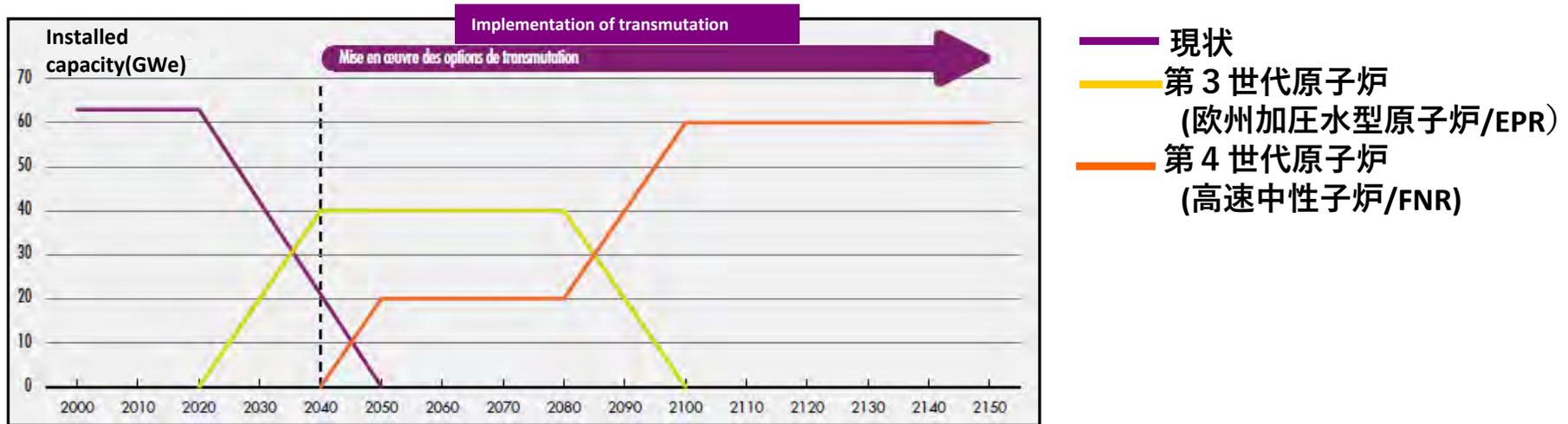
Sustainable Radioactive Waste Management Act of June 28, 2006:  
Results of research carried out on the separation and transmutation of  
long-lived radioactive elements, and on the development of a new generation  
of nuclear reactors

## 2.3 事例調査：留意事項/CEA2012技術報告書

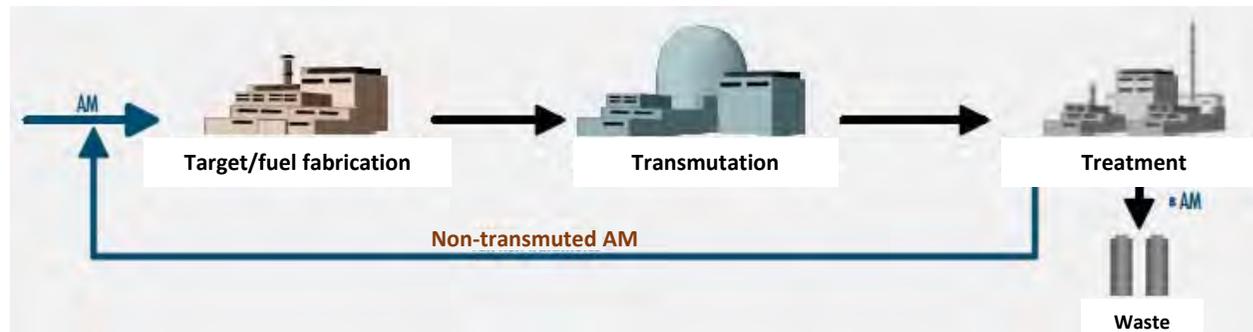
No.	項目	対象	パラメータ	単位
1	シナリオ	原子力発電設備容量	—	GWe
		Puリサイクル	—	—
		時間	現状⇒移行期⇒平衡期	年
2	ケーススタディ	核種分離	分離対象核種／Am、MA	—
			分離割合	%
		核変換方法	有／無	—
			SFR／均質炉、非均質炉	—
3	ガラス固化体	廃棄物含有量	—	Wt%/本
		α核種濃度	—	Bq/本
		発生本数	—	本
4	総インベントリー	評価対象核種	Pu、Am、MA	ton
5	放射性毒性	核変換	有／無	—
		経口摂取	—	Sv
6	処分場への影響	放射線影響	被ばく線量	Sv/y
		発熱影響	最高温度	°C
7	処分場面積	面積削減効果	HLW専有面積	ha、m <sup>2</sup>
			処分場全体面積	ha、m <sup>2</sup>

## 2.4 事例調査：シナリオ/CEA2012技術報告書

### 3 フェーズ：現状⇒移行期⇒平衡期



### Pu利用の多重サイクルにおけるマイナーアクチノイド(MA)のナトリウム冷却型高速炉における核変換



## 2.5 事例調査：ケーススタディ/CEA2012技術報告書

- 基本：Na冷却高速炉(RNR-Na)による核変換
- オプション：ガス冷却高速炉(RNR-G)
- ADS(Accelerator Driven System)を利用する階層型核変換

\*FNR-Na(RNR-Na)  
 FNR : Fast Neutron Reactor (En)  
 RNR : Rapid Neutron Reactor (Fr)  
 Na : Sodium cooled  
 G : Gas cooled

	F4	F2A	F2B	F1G	F1J	F7	F5	F28
高速炉のタイプ	RNR-Na	RNR-Na	RNR-Na	RNR-Na	RNR-Na	RNR-Na + ADS	RNR-G	RNR-Na
核変換無し	X							
核変換/均質炉		AM	Am				AM	
核変換/非均質炉 (MA炉心 & Am炉心)				AM	Am			
Am付加燃料/非均質								Am
核変換/ADS						AM		

Report on Sustainable Radioactive Waste Management, Vol. 2 Separation – transmutation of long-lived radioactive elements, CEA, France, Dec. 2012

## 2.6 事例調査/処分場への影響/CEA2012 技術報告書

### (1)放射線影響

核種移行評価：支配核種はLLFPと放射化生成核種

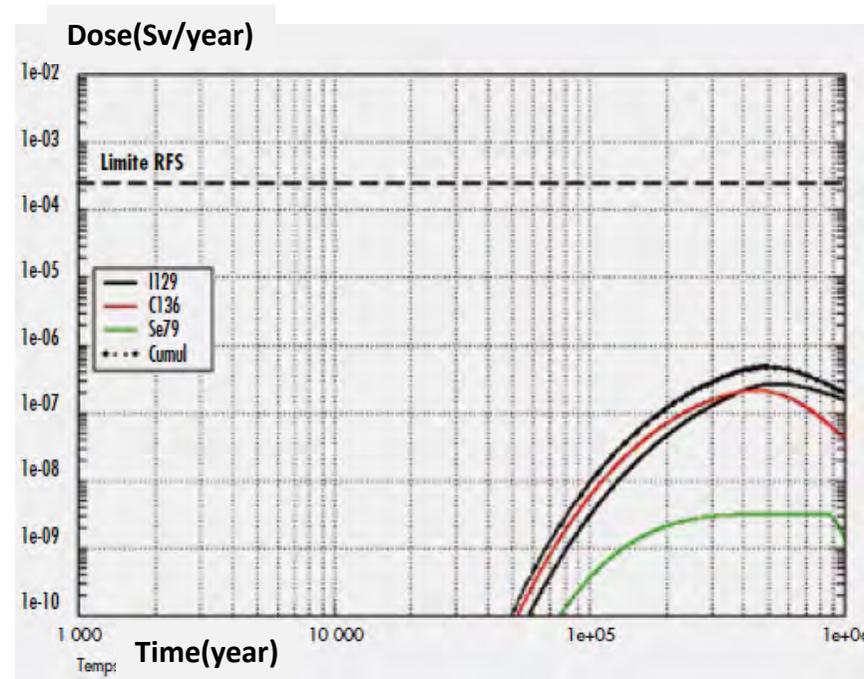
### (2)発熱影響

#### ➤ 発熱性核種

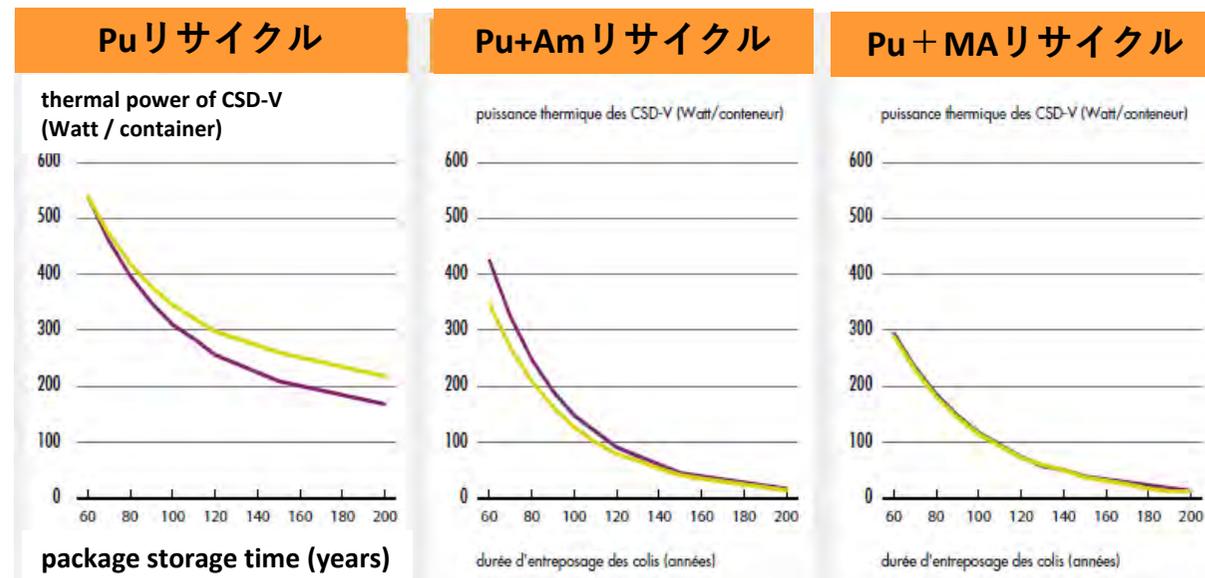
- Cs-137 & Sr-90( $T_{1/2}$ =approx.30 y)
- Cm-244( $T_{1/2}$ =approx.18 y)
- Am-241( $T_{1/2}$ =approx.433 y)

#### ➤ 支配核種：Am

粘土層出口における線量/通常シナリオ



ガラス固化体の発熱量の時間(貯蔵期間)変化



Report on Sustainable Radioactive Waste Management, Vol. 2 Separation – transmutation of long-lived radioactive elements, CEA, France, Dec. 2012

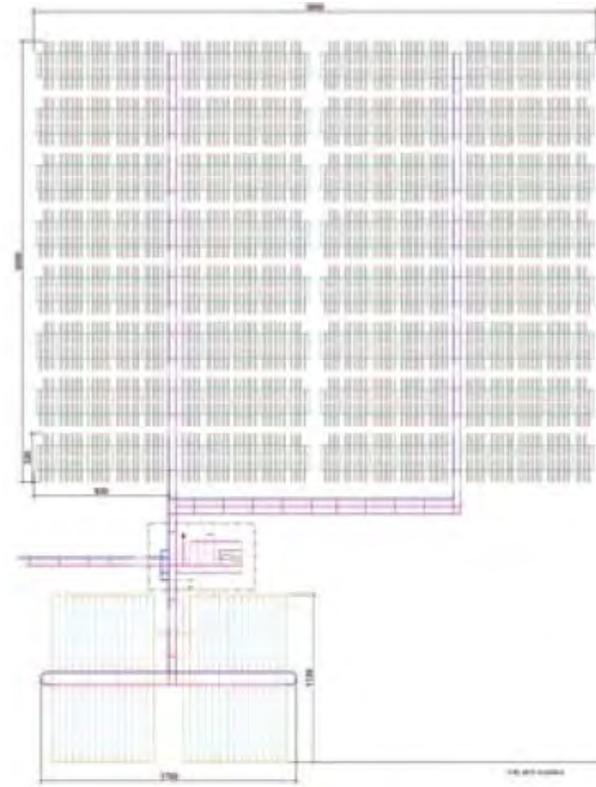
## 2.7 事例調査：処分場面積/CEA2012技術報告書

シナリオ期間中(2040～2150年)に発生する廃棄物の周密化した地層処分

### (1) MA核変換

- HLW専有面積を1/10に削減
- 総処分場面積を1/3に削減

### (2) ガラス固化体貯蔵期間：120年



核変換無し  
処分場面積

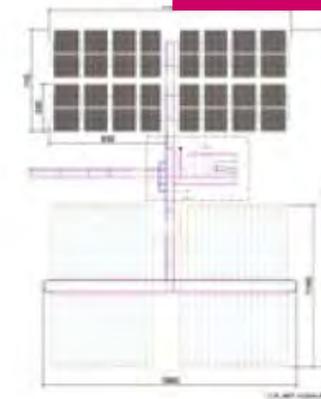
- ・HLW専有 : 1,200ha
- ・総面積 : 1,400ha
- ・掘削量 : 6.7Mm<sup>3</sup>

核変換 : Am  
処分場面積

- ・HLW専有 : 160ha
- ・総面積 : 500ha
- ・掘削量 : 3.3 Mm<sup>3</sup>

核変換 : MA  
処分場面積

- ・HLW専有 : 120ha
- ・総面積 : 430ha
- ・掘削量 : 3.3Mm<sup>3</sup>



### 地層処分場の面積と掘削量の比較

Report on Sustainable Radioactive Waste Management, Vol. 2 Separation – transmutation of long-lived radioactive elements, CEA, France, Dec. 2012

## 2.8 研究への反映事項

研究	シナリオ	評価指標	放射性廃棄物管理
CEA技術報告書、 第2巻、2012年	<ul style="list-style-type: none"> <li>基本方針</li> <li>国家的戦略</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>なし</li> <li>処分場面積(HLW専有 &amp; 処分場全体)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分離変換の効果の確認</li> <li>分離変換の妥当性の確認</li> <li>概念の強化</li> <li>今後の開発方針</li> </ul>
本研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>多様性</li> <li>柔軟性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>多様な条件、パラメータを考慮した評価のための指標の考案</li> <li>↓</li> <li>評価対象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>選択肢の提示</li> </ul>

### (1)シナリオの作成

近未来(~2030)から次未来(~2100)の原子力利用形態の記述

### (2)評価指標の導出

- 地層処分から上流側を俯瞰
- 上流側諸条件と地層処分システムの関連性、整合性
- 放射性廃棄物管理における環境負荷：廃棄物量&放射線影響

### (3)実用化/技術の絞り込み

### (4)コスト

## 2.9 廃棄体専有面積削減効果（CAERA）指標の導入

### (1) 核燃料サイクル諸条件の緩衝材温度への影響を1つの図に集約

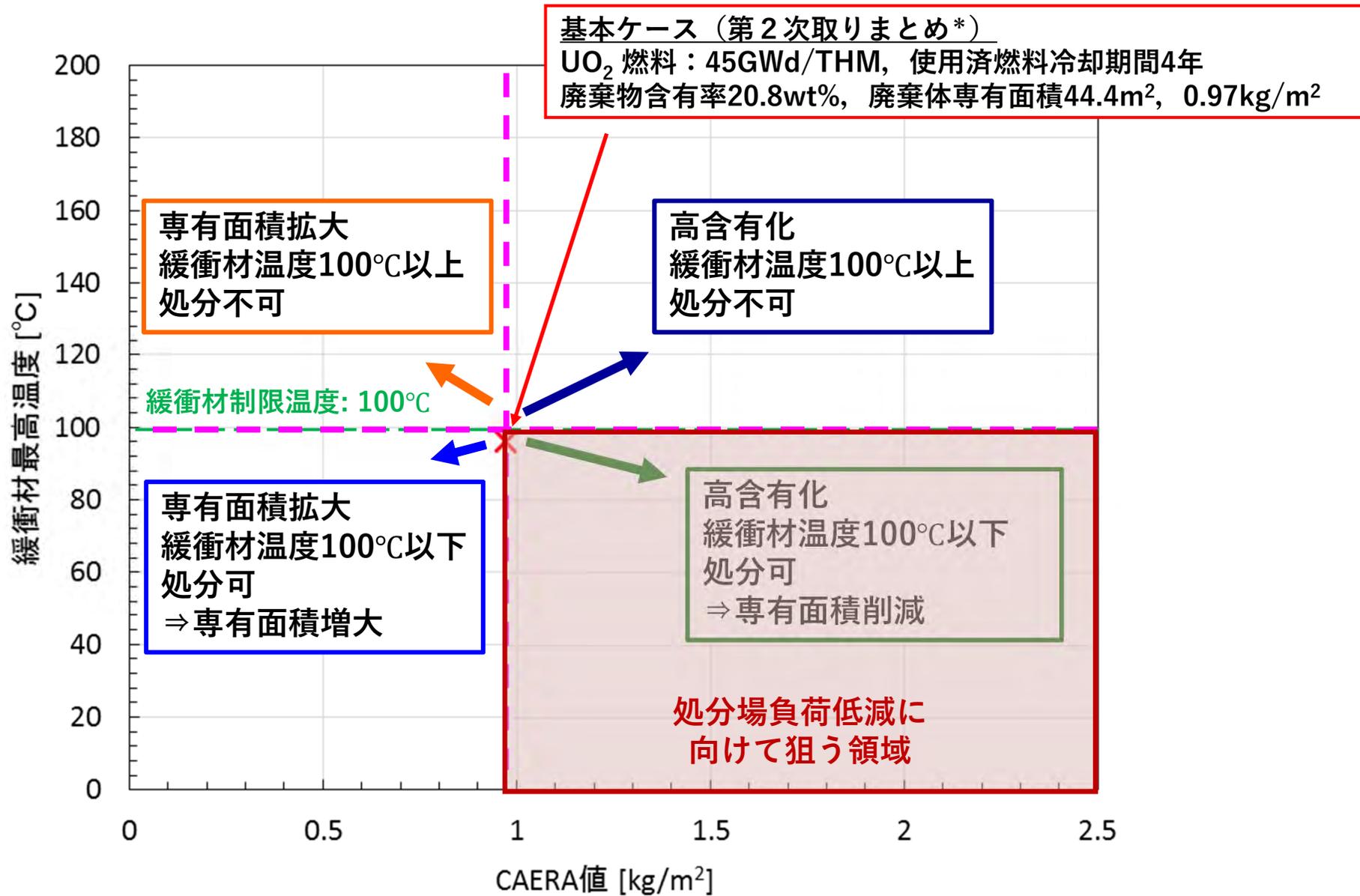
	項目	単位	パラメータ	図における表示方法
核燃料 サイクル 諸条件	1 燃料タイプ	-	UO <sub>2</sub> , MOX	UO <sub>2</sub> 用/MOX用に分けて表示
	2 燃焼度	GWd/THM	28, 33, 45, 55, 70	差異による影響は無視可能
	3 使用済燃料冷却期間	年	4, 10, 20, 30	色分け: 4(赤), 10(青), 20(橙), 30(灰)
	4 核種分離割合 (Cs/Sr)	%	0, 70, 90	シンボル: 0%(×), 70%(◇), 90%(△)
	5 廃棄物含有率	wt%/本	20, 30, 35	CAERA値
	6 廃棄体専有面積	m <sup>2</sup> /本	44 ~ 300	

**CAERA指標**：包括的な検討による廃棄体専有面積削減効果

(Comprehensive Analysis of Effects on Reduction of disposal Area)

$$\text{kg/m}^2 = \frac{\text{廃棄物含有率} [\text{wt\%/本}] - \text{Na}_2\text{O含有率} [\text{wt\%/本}]}{\text{廃棄体専有面積} [\text{m}^2/\text{本}]} \times \text{固化ガラス重量} [\text{kg}] \times \frac{1}{100}$$

## (2) CAERA指標と緩衝材温度との関係 -UO<sub>2</sub>燃料-



\*わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－

### 3. 今後に向けて

#### 3.1 燃料サイクル諸条件の考慮(例)

炉型	燃料		使用済燃料	再処理			ガラス固化			ガラス固化体	地層処分
	UO2/MOX	燃焼度		冷却期間	分離プロセス	分離効率	分離対象核種	ガラス特性/ガラスマトリックス	溶融炉/運転		
—	UO2/MOX	燃焼度	冷却期間	分離プロセス	分離効率	分離対象核種	ガラス特性/ガラスマトリックス	溶融炉/運転	廃棄物含有率	貯蔵期間	廃棄体専有面積
LWR	UO2	45GWd/THM	4年	—	—	U/Pu: 99.5%	—	—	約20 wt%	50年	44m <sup>2</sup> /本

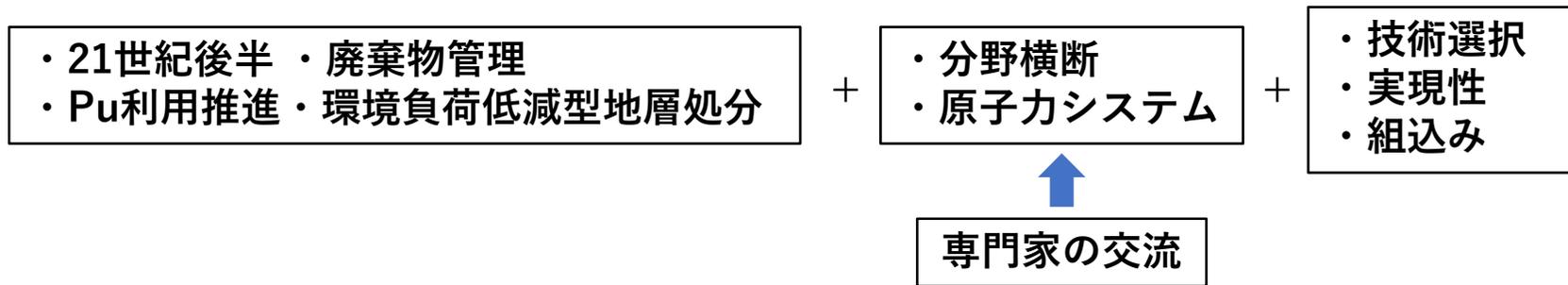


分野横断的な原子力システムの研究



LWR FR	UO2	LBU~HBU	4年以上	対象核種と分離効率に依存	地層処分からの要求値	MA:Np, Am,Cm	対策	—	高含有化	発熱	-処分場全体 -廃棄体専有面積 -廃棄体定置方法
	MOX-Pu-th					Cs/Sr	—	—		発熱	
	MOX-full					Mo	対策	YP析出		—	
						PGM:Ru, Rh, Pd	対策	沈降		—	

## 3.2 次の一歩/期待



### (1) 田辺氏/内閣府原子力政策担当室

「放射性廃棄物の処分と分離変換」

- ・ 原環センター講演会(H30.3.2)
- ・ 原環センタートピックス、2018.6.No.126
- ・ 分離変換技術の対象、処分への効果、両者比較の注意事項、期待、ロードマップ、フランスの方針と研究状況、分離変換の実用化に向けて

### (2) 高木先生/東京都市大学

「GLOBAL2017国際会議の概要報告、1.分離・核変換技術」

- ・ 日本原子力学会誌、Vol.60,No.5(2018)
- ・ 潜在的毒性、エネルギー収支、経済性、システム安全性、総合的視点、実効性、科学的フェーズ、工学実証、原子力政策への実践的な反映

### (3) 稲垣先生/九州大学

巻頭言「分野の垣根を越えた議論を」

- ・ 原子力バックエンド研究,Vol.25,No.1(2018)
- ・ 核燃料サイクル、複合システム、サイクル全体を俯瞰、部分最適化、技術や知見の統合、全体最適化、他分野への関心

**ご清聴ありがとうございました。**

**本発表の内容は原環センター自主研究「先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念への影響検討（平成26～29年度）」の成果を基にしたものである。**