

**TOSHIBA**

平成28年度採択 原子力システム研究開発事業

# 環境負荷低減型軽水炉を 使った核燃料サイクル概念構築

東芝エネルギーシステムズ(株)

2021.3.17

研究代表者：平岩 宏司

# Contents

01 研究目標

02 研究成果

03 まとめ

研究テーマ名

# 環境負荷低減型軽水炉を使った 核燃料サイクル概念構築

従来研究

再処理以降のMA・FP削減研究が主流

本研究

既設含む軽水炉でのTRU生成低減

# 研究目標

## 定量的目標

- ・有害度(TRU寄与分) : 50%減
- ・廃棄物量(MA崩壊熱) : 30%減

## 定性的目標

- ・Pu 蓄積量評価: 減少できる仕様を確立
- ・コスト評価: 発電コスト評価
- ・シナリオ: 燃料仕様選定とサイクル諸量評価

# 軽水炉でのTRU生成量の低減 スタディーとスクリーニングの結論

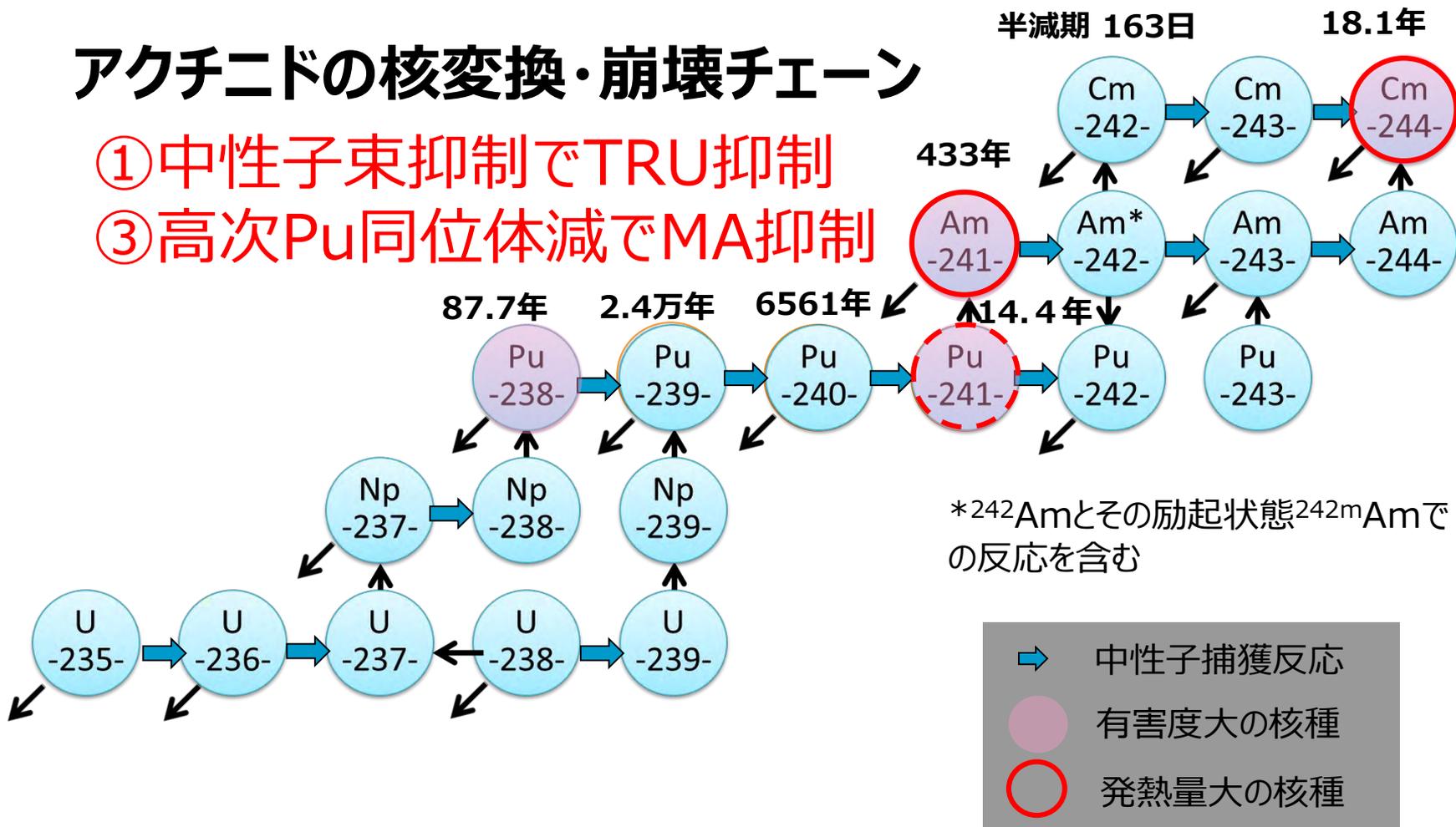
- ①  $\text{UO}_2$ 燃料: 濃縮度増 & 中性子束減でTRU抑制
- ②  $\text{UO}_2$ 燃料: 高減速化で $^{238}\text{U}$ 吸収とPu生成抑制
- ③ MOX燃料: 高次Pu同位体比を低減しMA抑制

①③の検討結果を中心に報告

# TRU生成の原理に基づく手法を考案

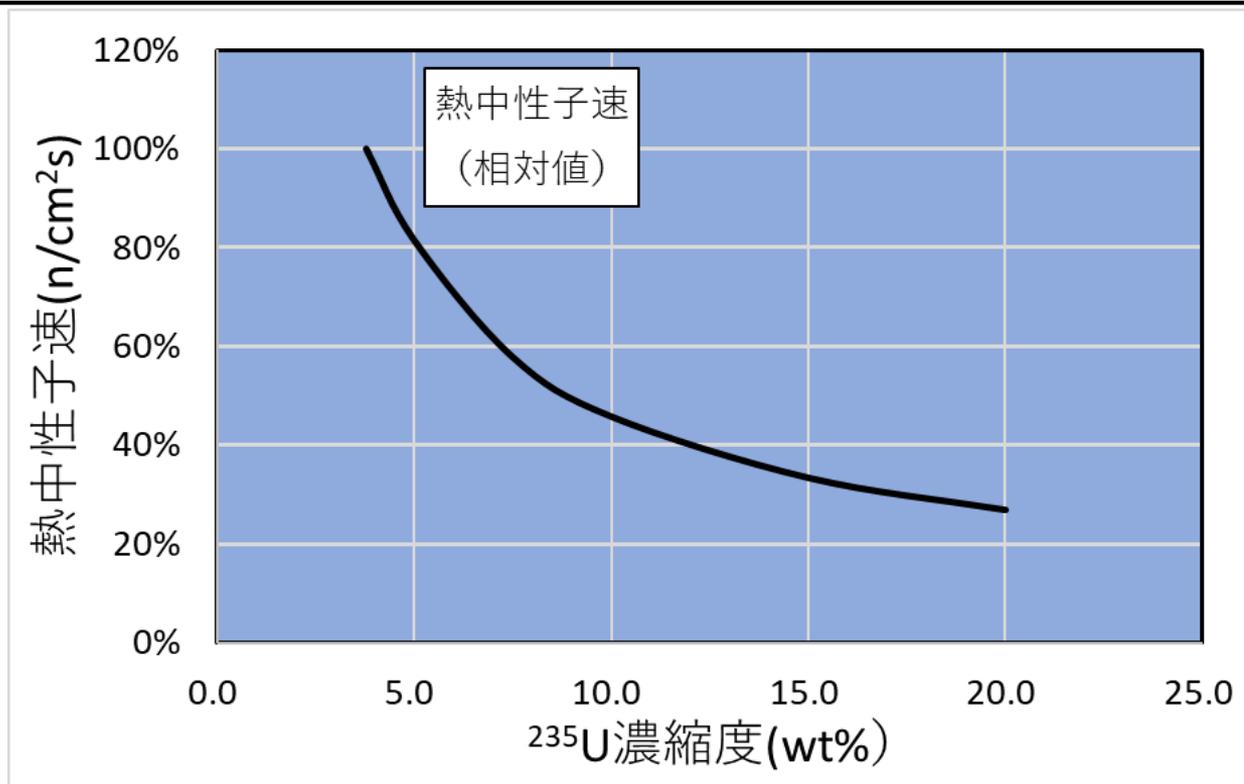
## アクチノイドの核変換・崩壊チェーン

- ① 中性子束抑制でTRU抑制
- ③ 高次Pu同位体減でMA抑制



# TRU生成の原理に基づく手法を考案

## 核分裂密度一定 $\div$ 熱中性子束 $\times$ $^{235}\text{U}$ 濃縮度



ウラン濃縮度3.8wt% $\rightarrow$ 10wt%の場合  
・熱中性子束 1/2に減少

# TRU生成の原理に基づく手法を考案

燃焼度に必要な値を越える $^{235}\text{U}$ 濃縮度を使う  
ことで中性子捕獲反応を抑制

**\*) FORSETI™**

例：燃焼度45Wd/tの燃料に10wt%を使用

FORSETI™型ウラン燃料

FORSETI™型MOX燃料

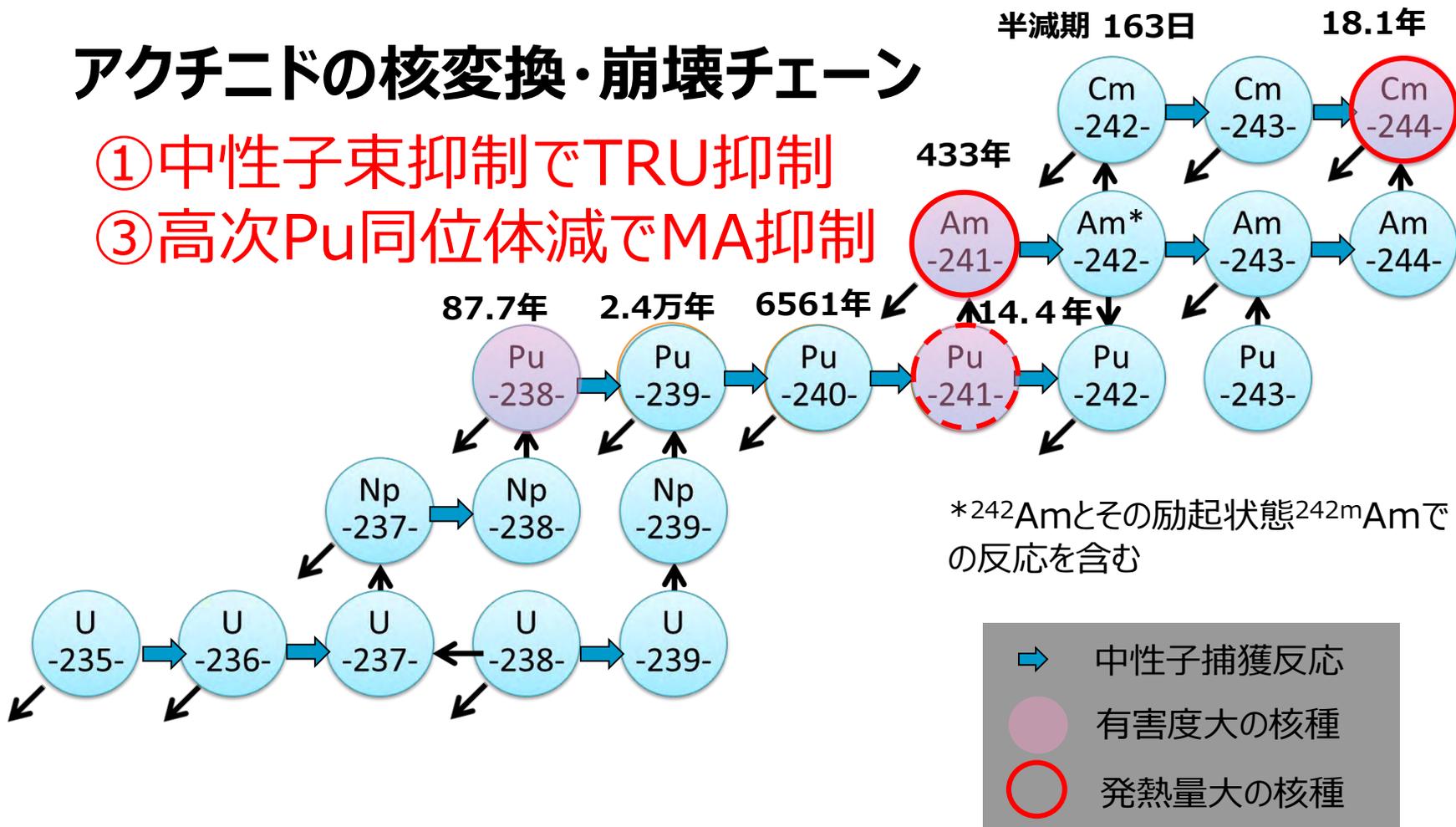
(両者でほぼ同程度のTRU低減効果が生じる)

\*) Fuel cycle of light-water-Reactor with Surplus Enriched uranium  
for TRU-production Inhibition

# TRU生成の原理に基づく手法を考案

## アクチノイドの核変換・崩壊チェーン

- ① 中性子束抑制でTRU抑制
- ③ 高次Pu同位体減でMA抑制

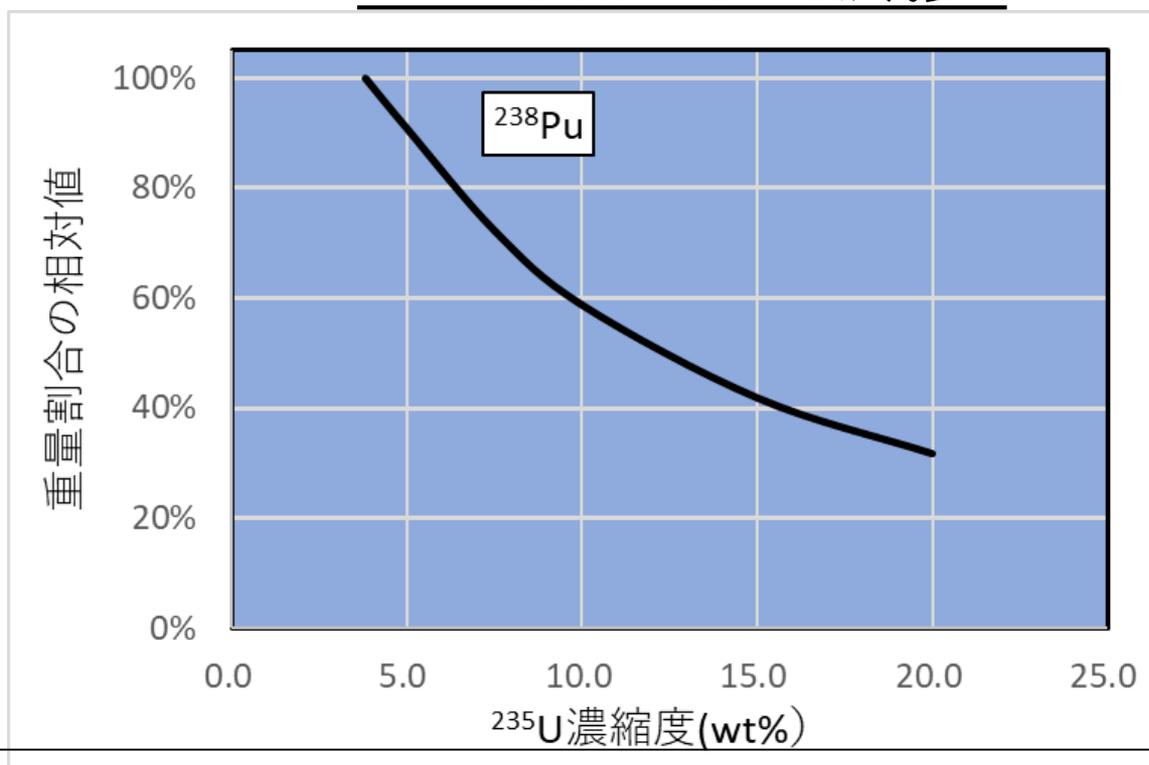


## 0 2 研究成果

### FORSETI™型ウラン燃料

# 軽水炉でのTRU生成量の低減

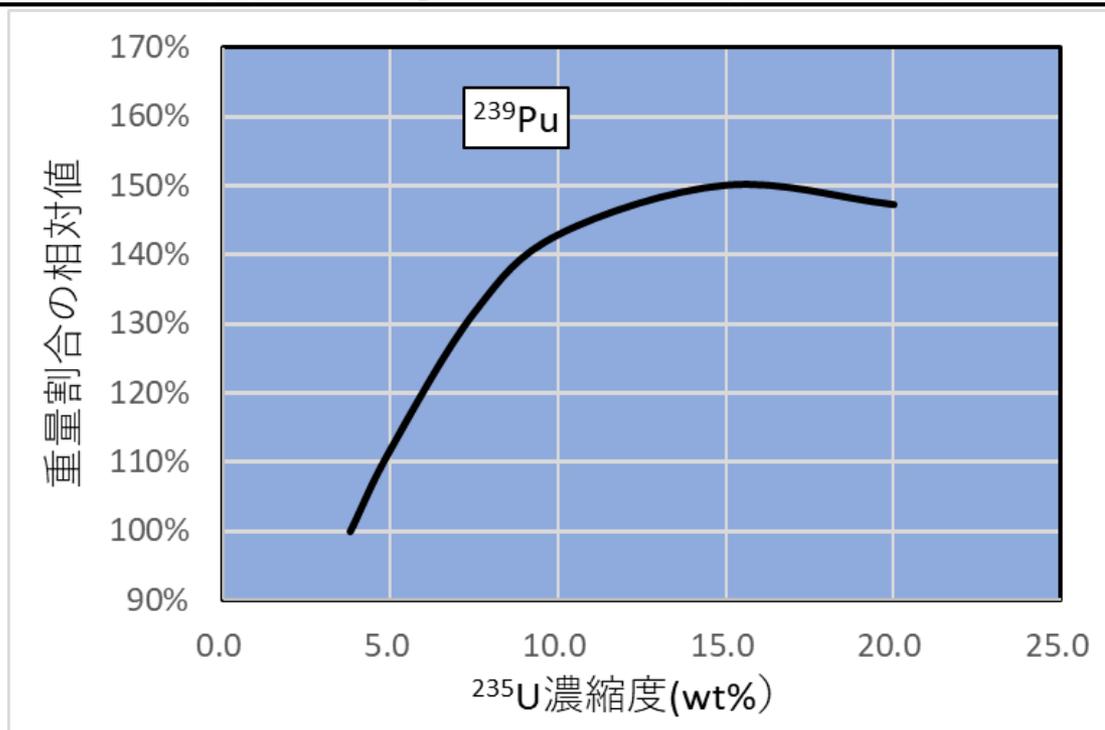
$^{238}\text{Pu}$ は40%減少



### FORSETI™型ウラン燃料

# 軽水炉でのTRU生成量の低減

$^{239}\text{Pu}$ は増加 (MOX燃料に大きなメリット)

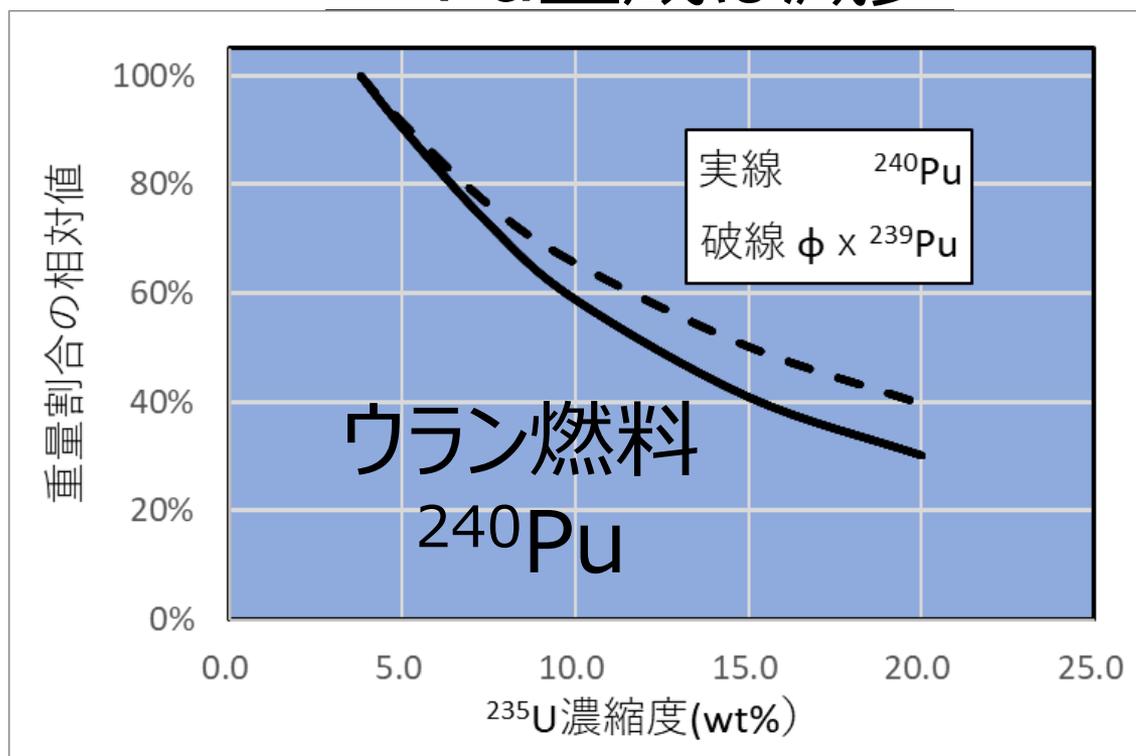


$^{238}\text{U}$  (ほぼ一定) \*  $\Phi$  (減少)  $\rightarrow$   $^{239}\text{Pu}$  (生成率が減少)  
 $^{239}\text{Pu}$  (減少) \*  $\Phi$  (減少) (減少率が低減)

### FORSETI™型ウラン燃料

# 軽水炉でのTRU生成量の低減

## 240Pu生成は減少

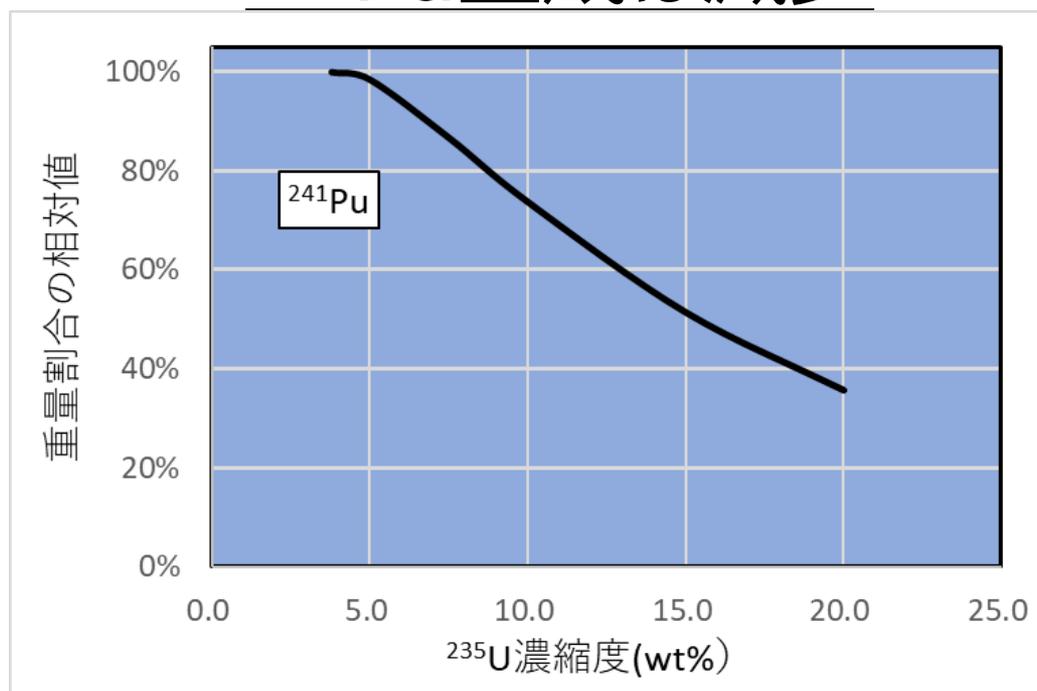


239Pu (増加) + 熱中性子(減少大) → 240Pu (減少)

### FORSETI™型ウラン燃料

# 軽水炉でのTRU生成量の低減

## 241Pu生成は減少

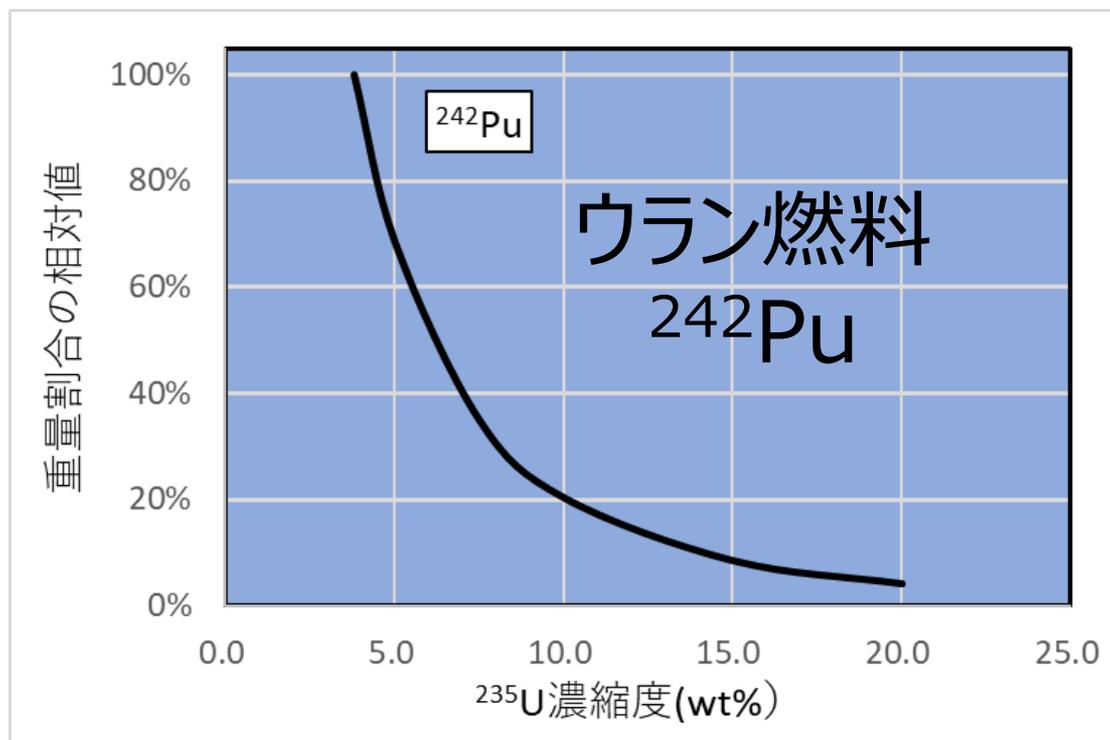


$^{240}\text{Pu}$  (減少) + 熱中性子(減少)  $\rightarrow$   $^{241}\text{Pu}$  (減少)

### FORSETI™型ウラン燃料

# 軽水炉でのTRU生成量の低減

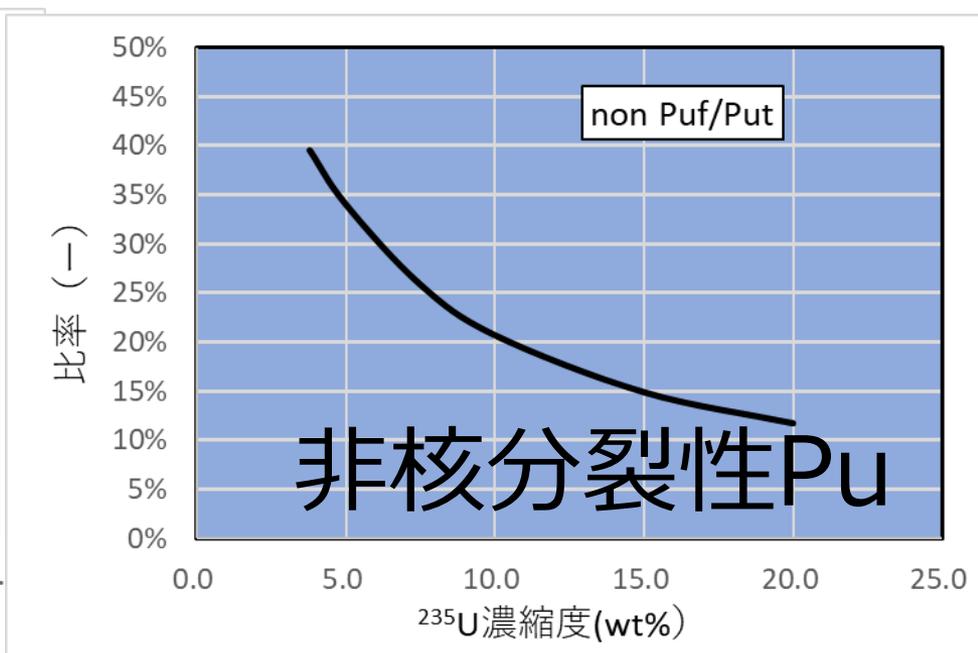
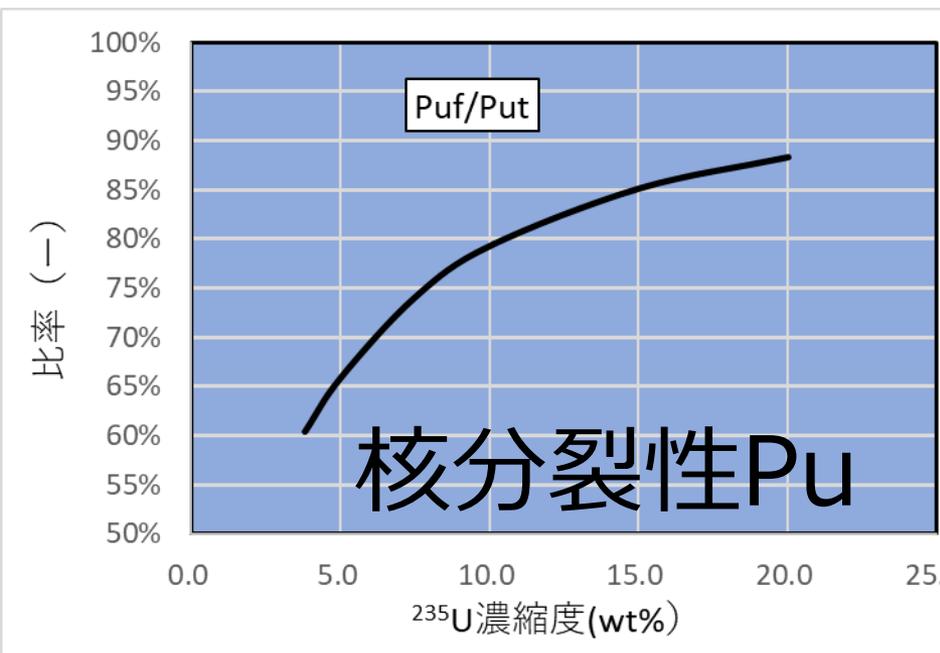
$^{242}\text{Pu}$ は減少



$^{241}\text{Pu}$  (減少) + 熱中性子(減少)  $\rightarrow$   $^{242}\text{Pu}$  (減少)

### FORSETI™型ウラン燃料

# 軽水炉でのTRU生成量の低減 非核分裂性Puが大きく減少



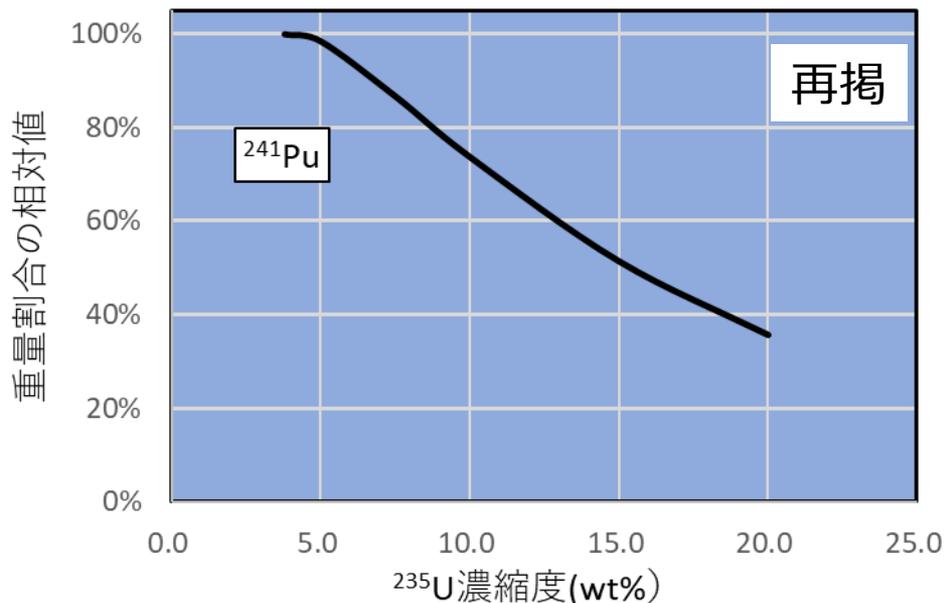
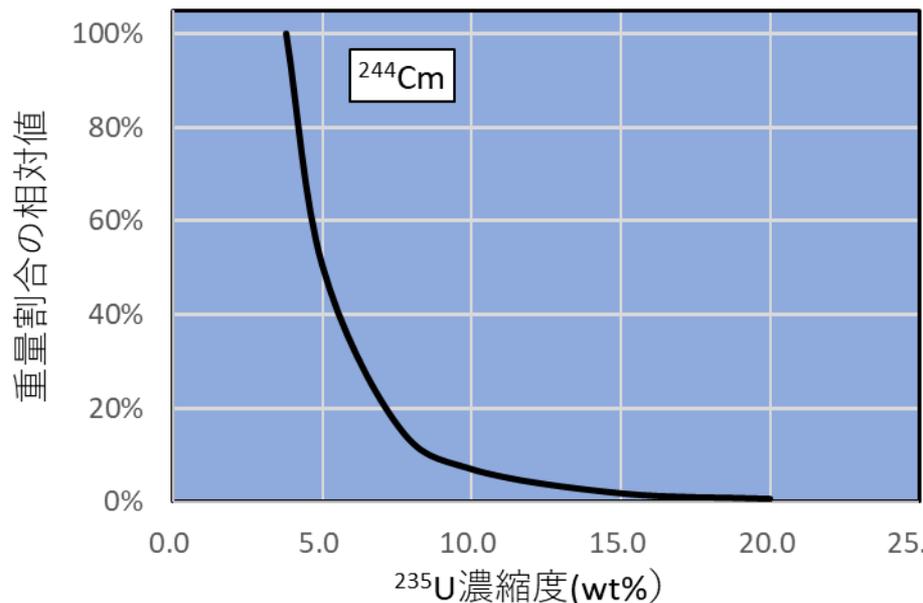
核分裂性Puは1.3倍（濃縮度3.8%→10.0%）に増加  
非核分裂性Puは0.5倍（濃縮度3.8%→10.0%）に減少

## 0 2 研究成果

### FORSETI™型ウラン燃料

# 軽水炉でのTRU生成量の低減

244Cmと241Am量 (241Puが崩壊)が大幅減少

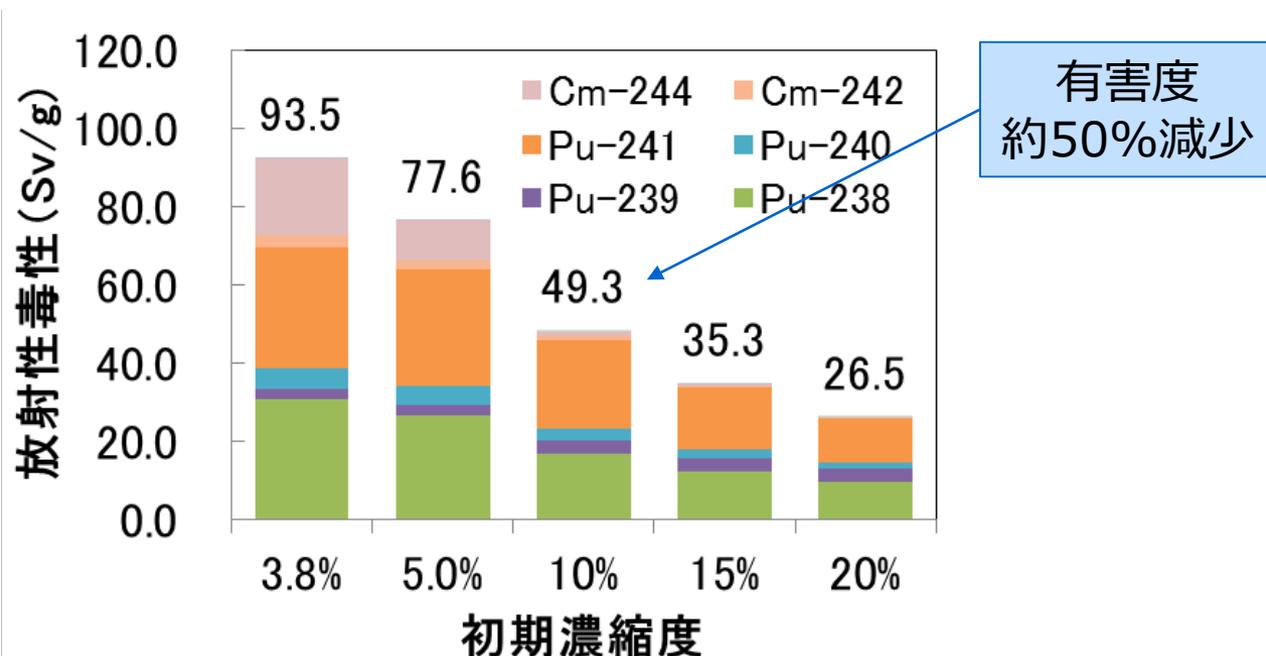


240Pu (減少) → 241Pu (減少) → 241Am (減少)  
242Pu (減少) → 243Am (減少) → 244Cm (減少)

### FORSETI™型ウラン燃料

# 有害度と廃棄物の低減

有害度： $^{244}\text{Cm}$ と $^{238}\text{Pu}$ の有害度が大幅に減少

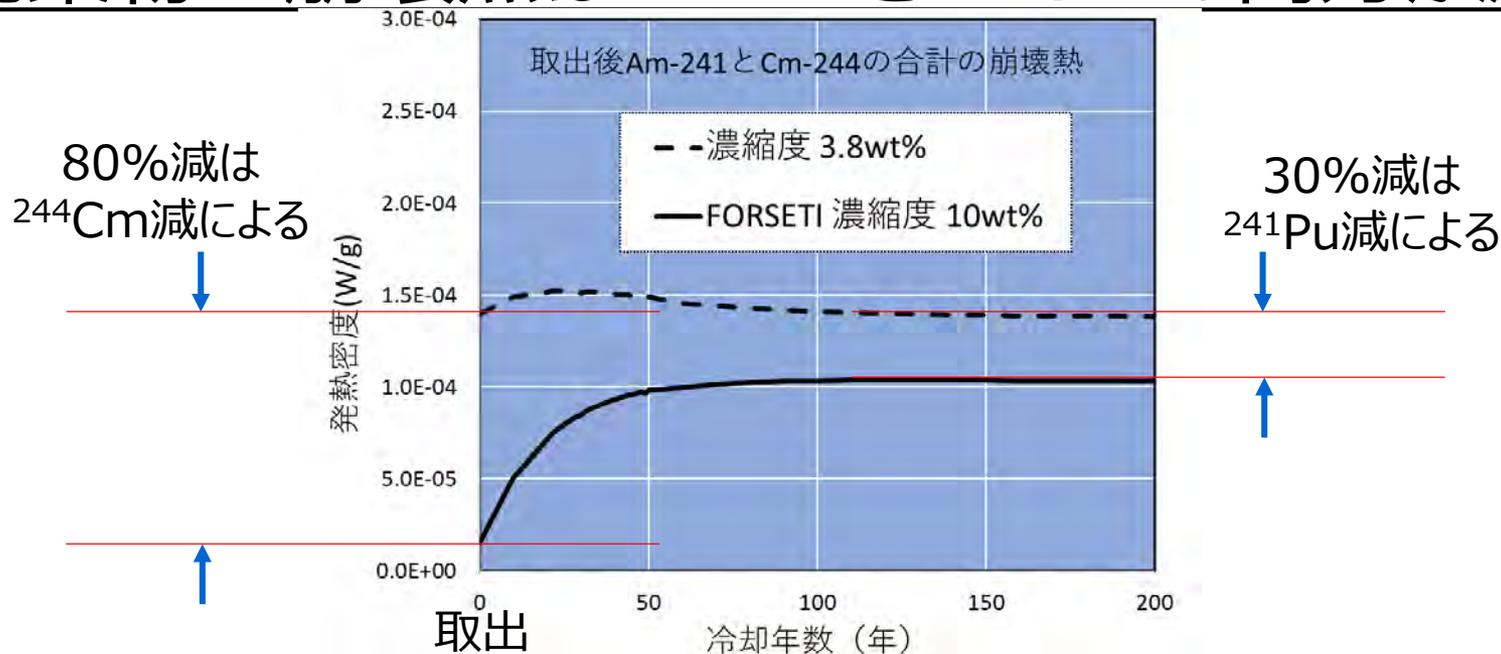


濃縮度3.8wt%→10wt%では  
TRU有害度では1/2に低下 MA有害度はさらに低下率大

### FORSETI™型ウラン燃料

# 有害度と廃棄物の低減

廃棄物：崩壊熱は $^{241}\text{Am}$ と $^{244}\text{Cm}$ の両方が減少

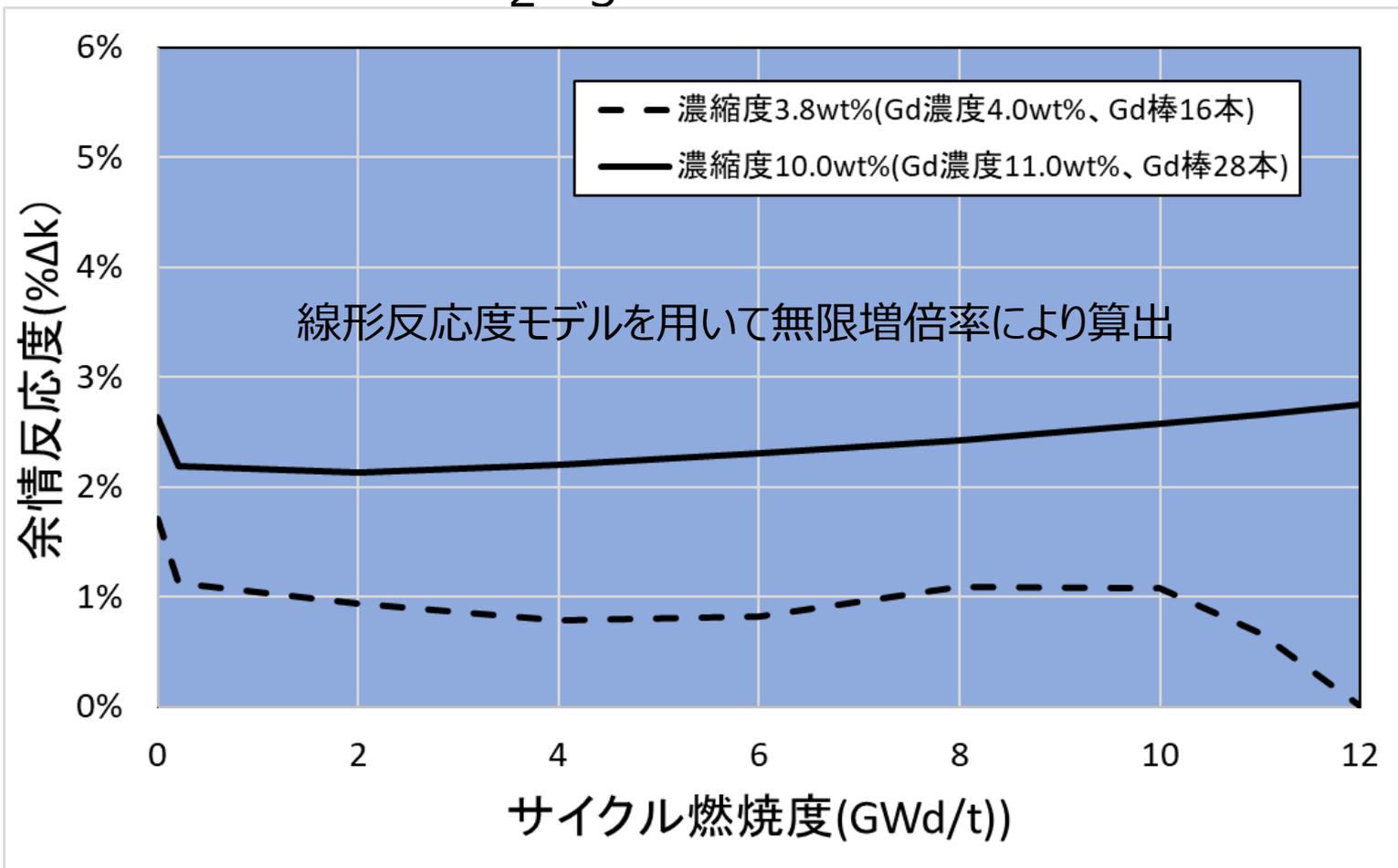


濃縮度3.8wt%→10wt%では  
8割減（取出直後）～3割減（50年以降）

### FORSETI™型ウラン燃料

# ウラン燃料における核特性

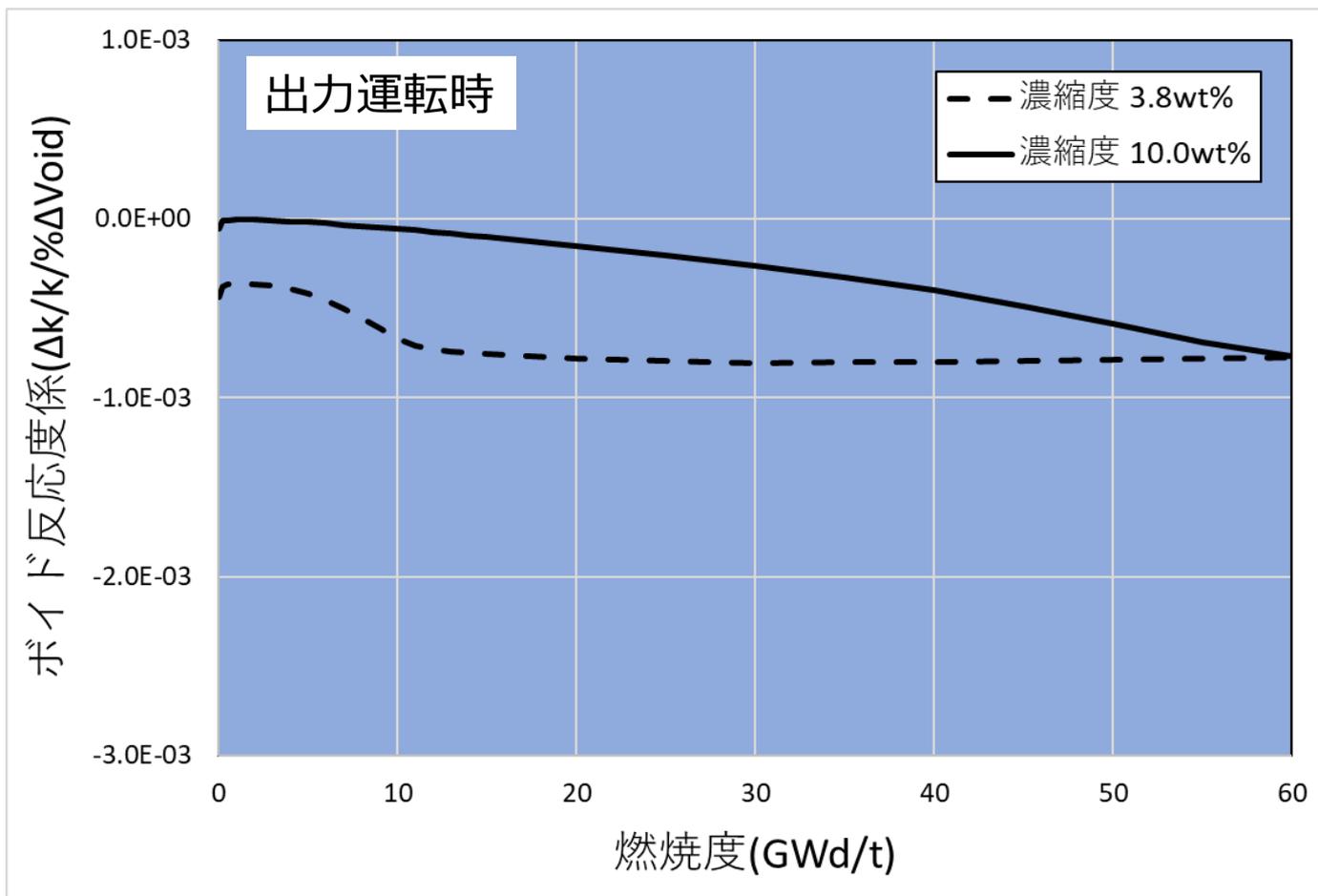
可燃性毒物 ( $Gd_2O_3$ ) により反応度平坦化が可能



### FORSETI™型ウラン燃料

# ウラン燃料における核特性

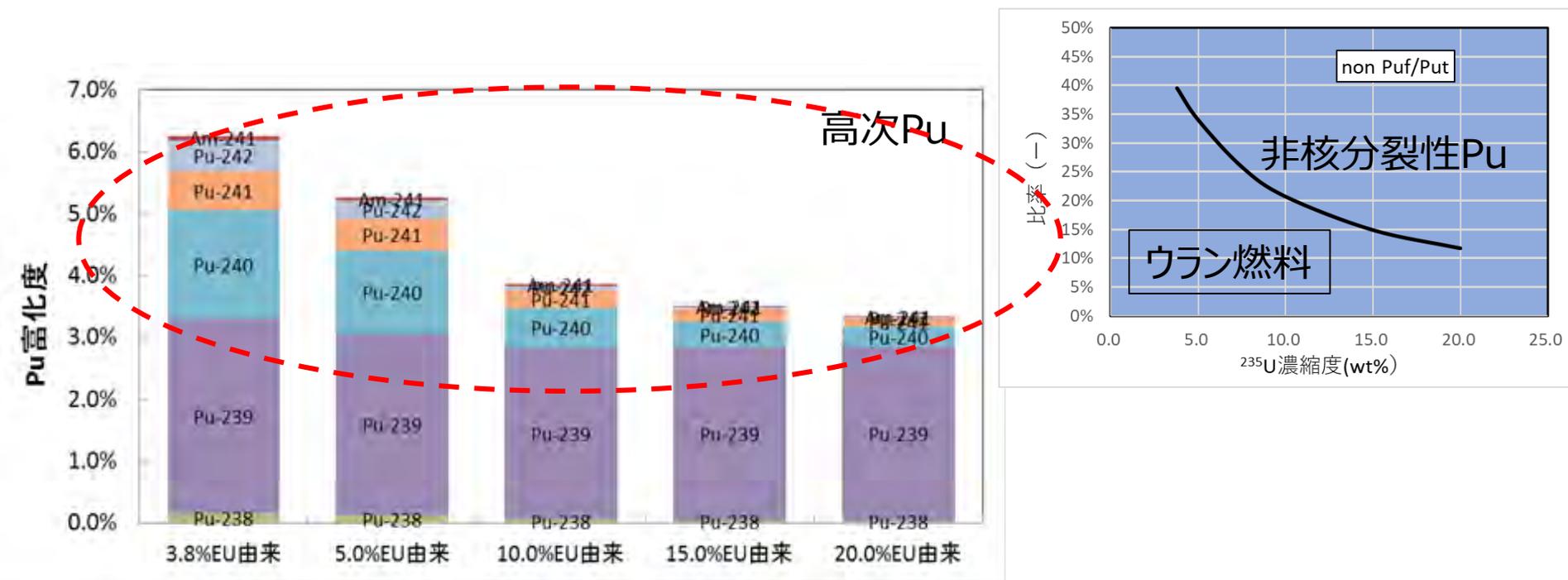
## ボイド係数は負値を維持



## 02 研究成果

### FORSETI™型MOX燃料

# 非核分裂性Puが減ることによってTRU減少

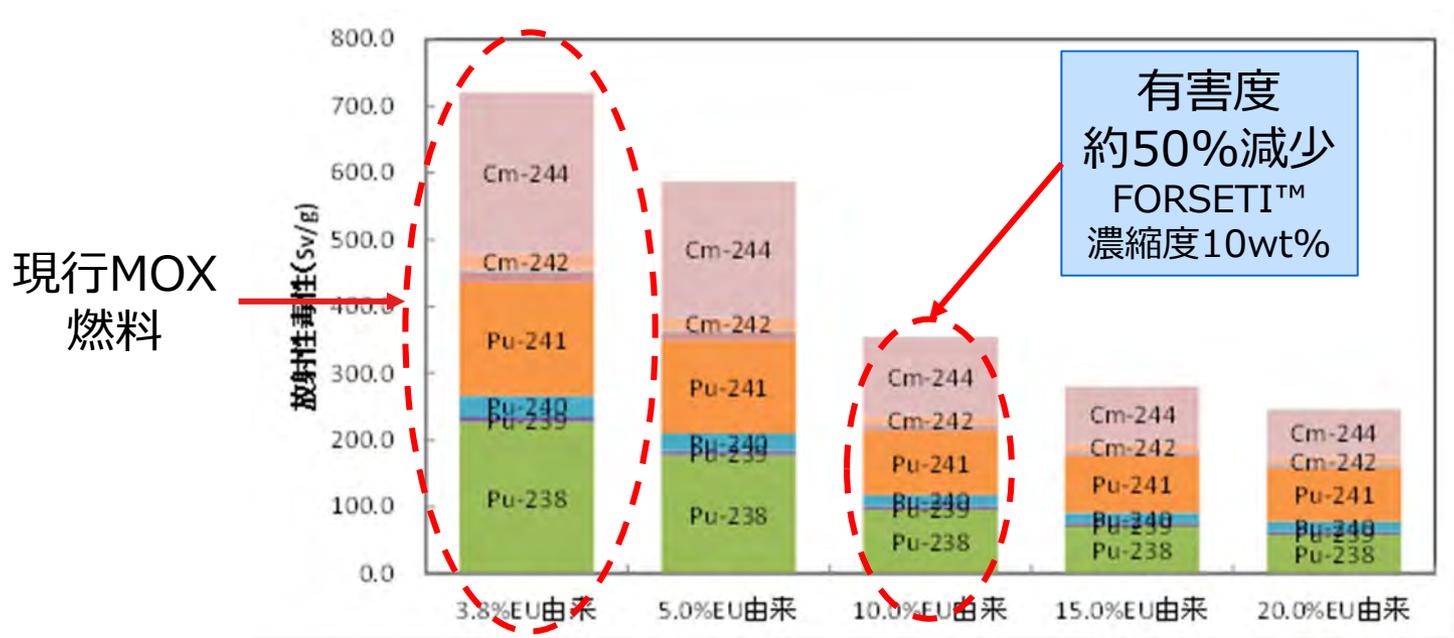


**(未燃焼時)** Pu富化度が低下  
非核分裂性Puは半減、核分裂性Puは0.8倍

## 0 2 研究成果

### FORSETI™型MOX燃料

# MOX燃料における有害度の低減 全てのTRUが均等に減少しSF有害度減少

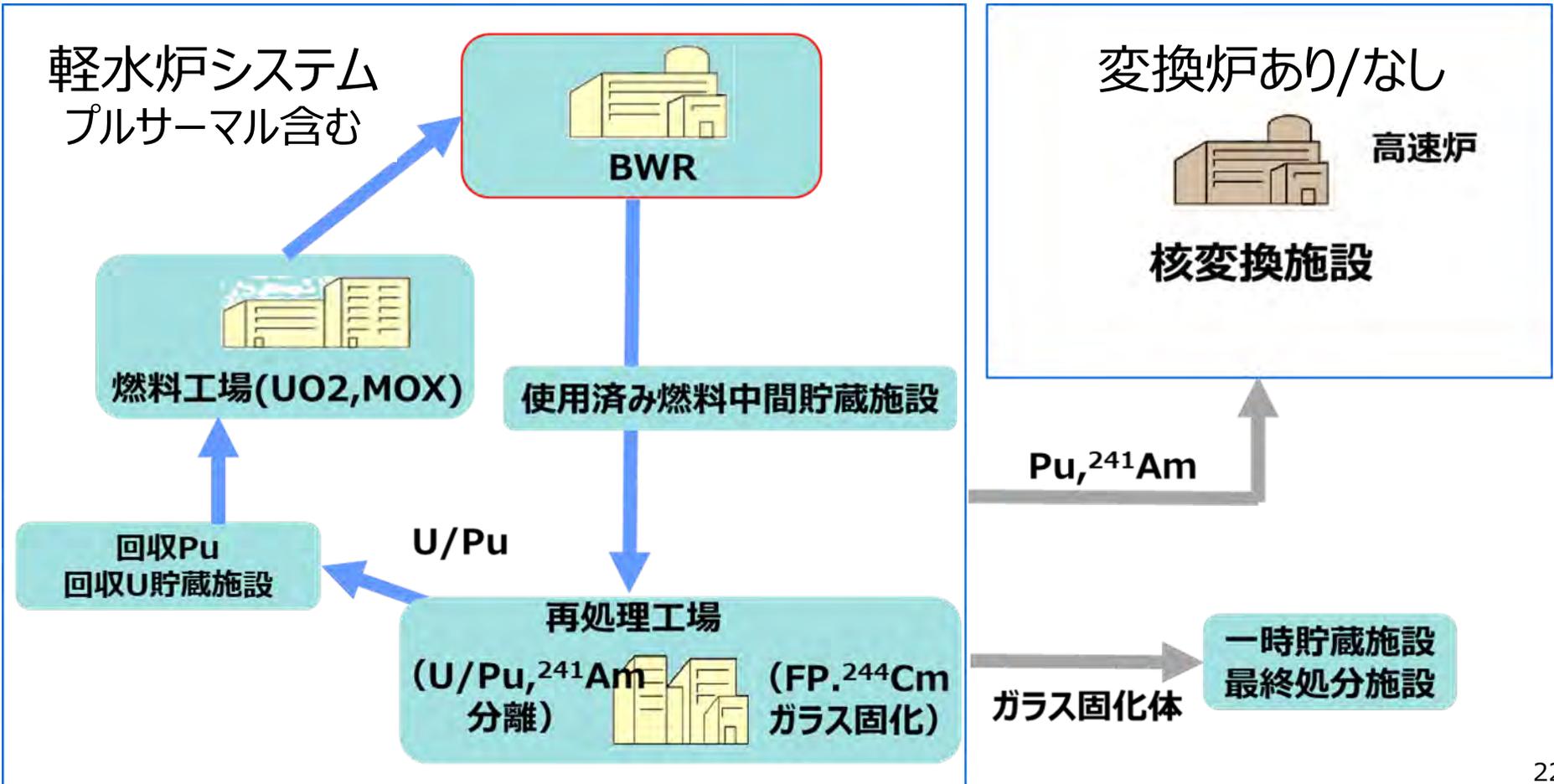


**(取出時)** TRU有害度  
では1/2に低下 MA有害度も1/2に低下

シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## 環境負荷低減型燃料サイクルのあらまし



## 燃料炉心導入シナリオの検討

シナリオ設定で考慮した条件

- ①燃料仕様の設定(ウラン燃料、MOX燃料)
- (②～④はMOX燃料仕様決定に向けた設定)
- ②再処理前冷却期間の大幅短縮
- ③Pu装荷量、Pu消費量の向上
- ④FORSETI™ウラン燃料の残留ウラン活用

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## ①燃料仕様の設定（定量的目標達成の考慮）

- 既設炉用ウラン燃料

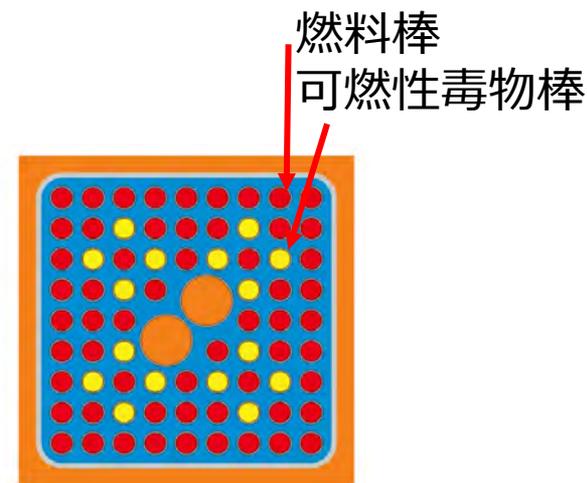
BWR 9x9ウラン燃料

**FORSETI™**型濃縮度10wt%

- 既設炉用MOX燃料

BWR 9x9燃料

**FORSETI™**型ウラン濃縮度10wt%のPu使用

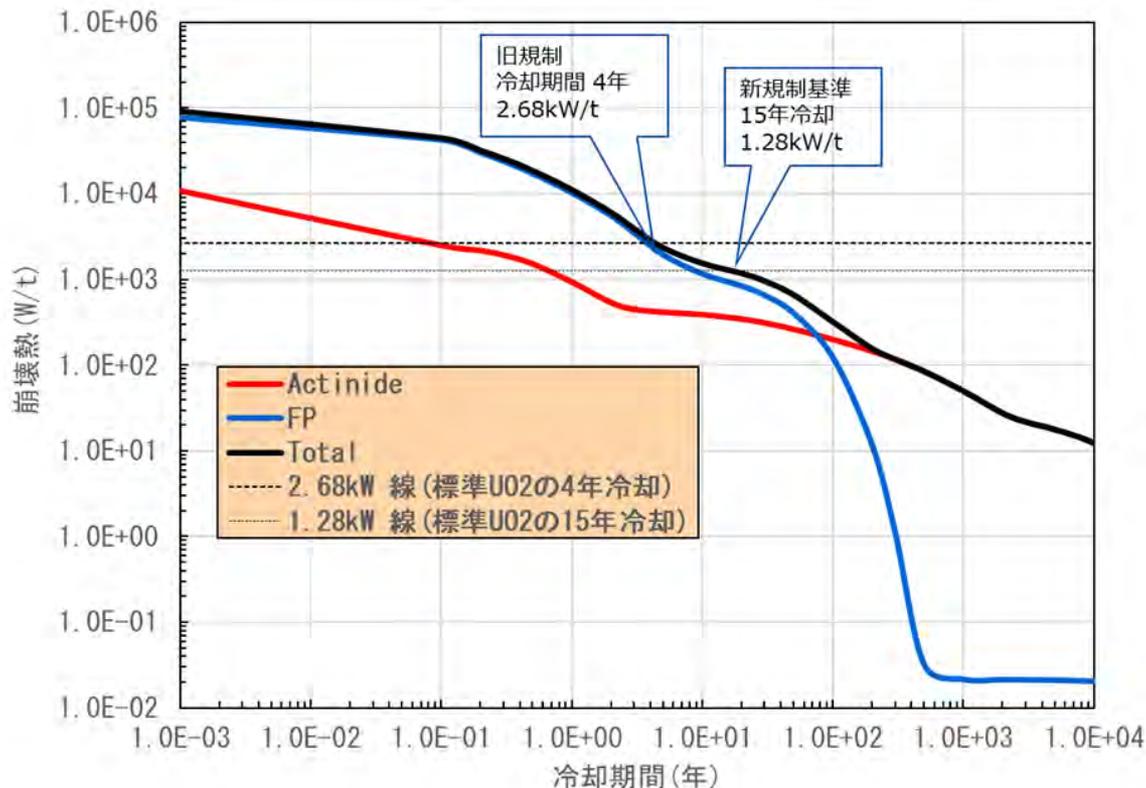


## シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## ②再処理前冷却期間の大幅短縮

<せんだん工程：4年→15年 崩壊熱は1/2>

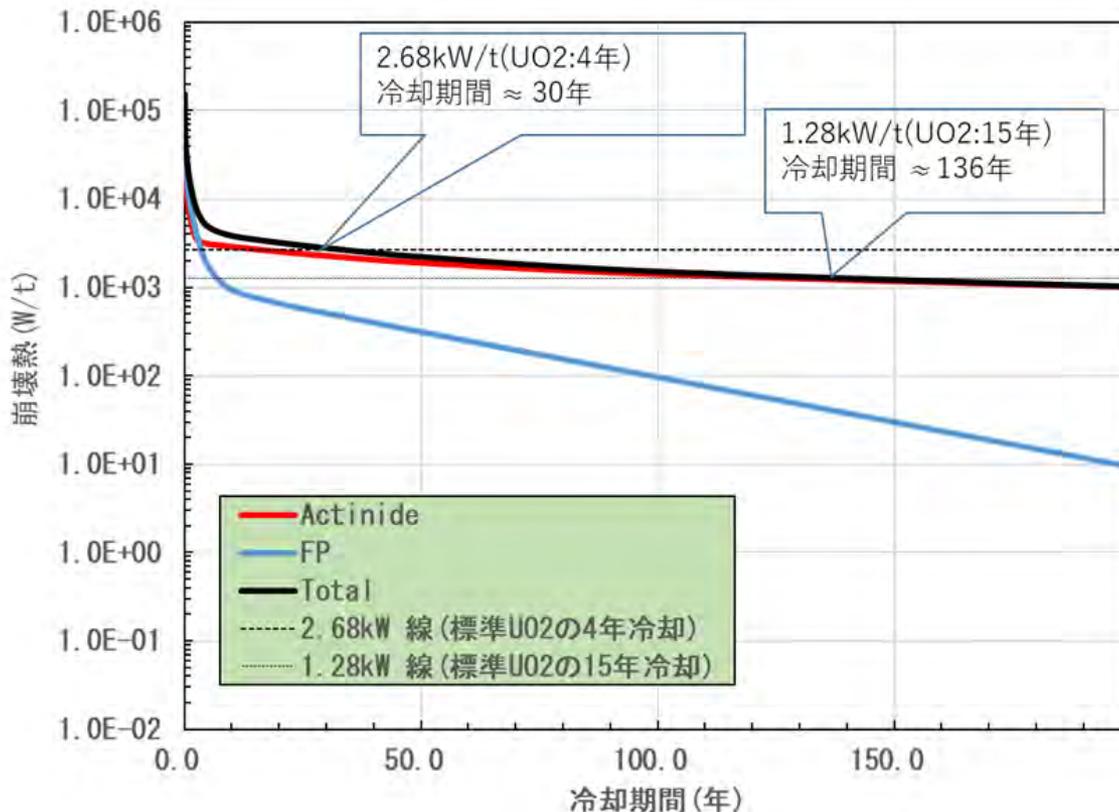


## シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## ②再処理前冷却期間の大幅短縮

<MOX燃料：冷却136年>

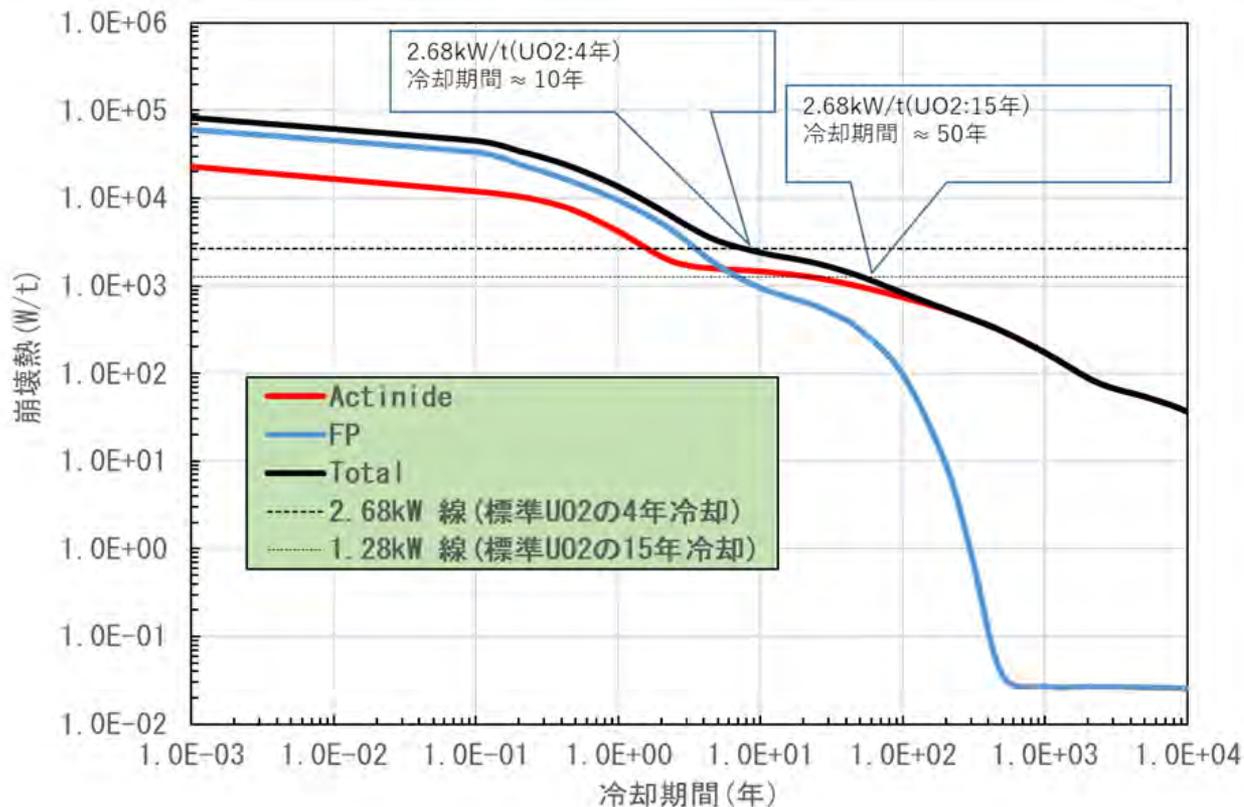


## シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## ②再処理前冷却期間の大幅短縮

### <FORSETI™MOX燃料：冷却50年>



### シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## ③Pu装荷量、Pu消費量の向上

(Pu消費特性に再処理までの時間を含めて考慮)

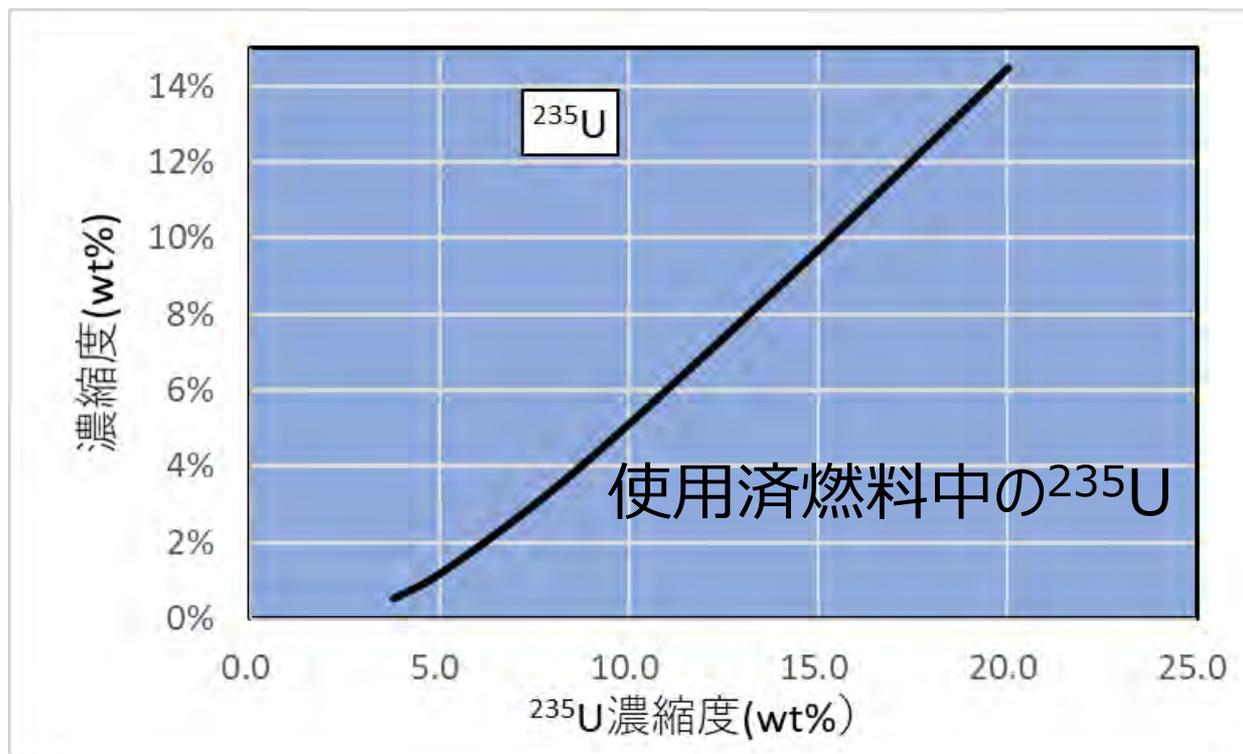
冷却が長期化する可能性の大きいMOX燃料では  
Pu消費を再処理までの冷却期間で考えるべき

- ・Pu装荷量/冷却時間
- ・Pu消費量/冷却時間
- ・Pu消費割合/冷却時間

### シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

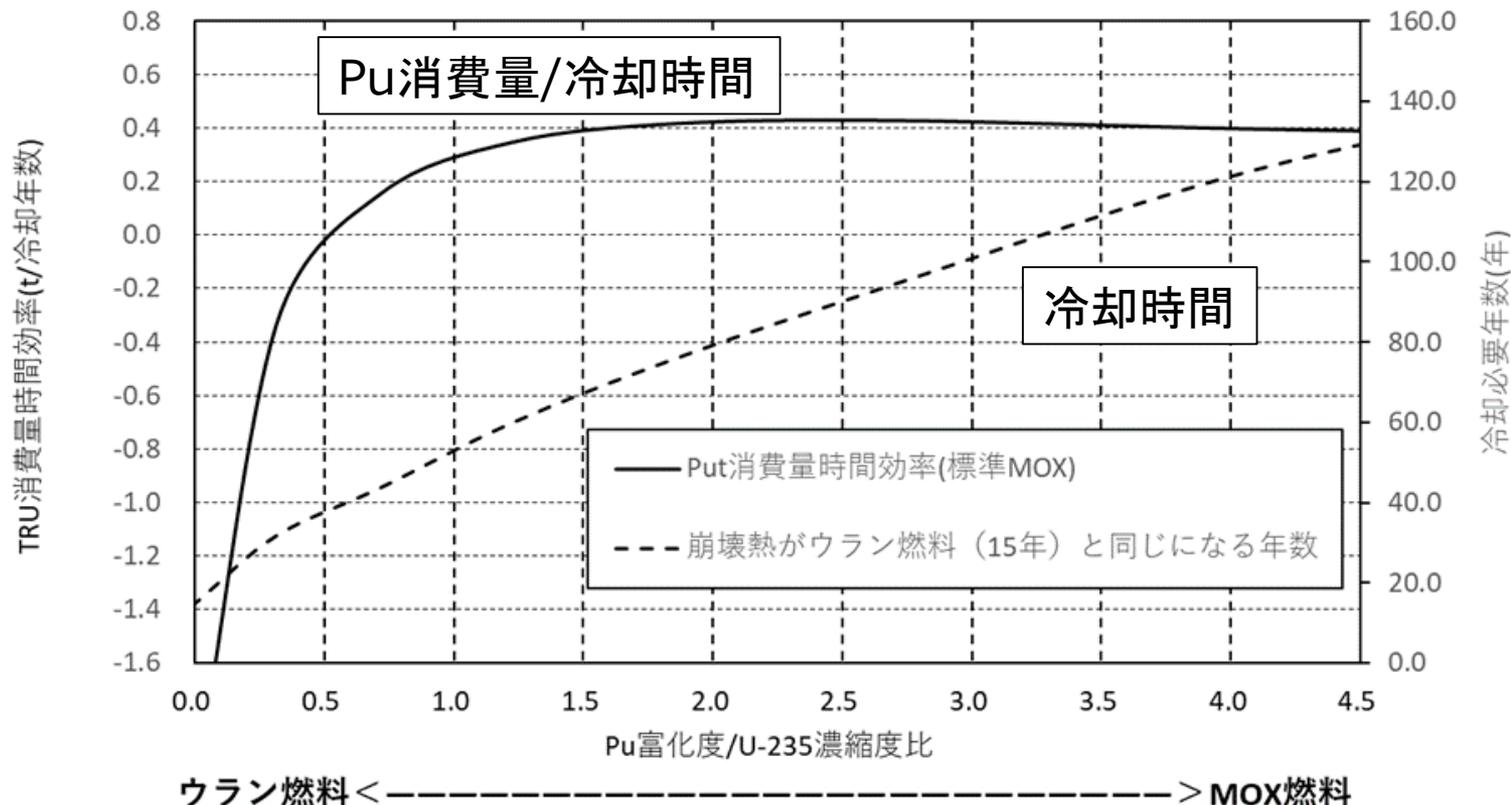
④ FORSETI™のウラン燃料の残留ウラン活用  
冷却期間短縮とFORSETI™の残留ウラン活用  
とPu装荷量・消費量の両立



シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## FORSETI™残留ウラン母材のMOXにより 残留ウラン活用と冷却短縮とPu消費を両立



## シナリオの検討

## 燃料炉心導入シナリオの検討

## ウラン濃縮度・Puf組成/富化度

	シナリオ名	ウラン炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	MOX炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	
参照サイクル (既設BWR)	参照 1	3.8wt%	Puf比 60% 富化度 6.4%	ウラン濃縮度 0.1%
	参照 2	3.8wt%	富化度 1.1%	3.4%
	参照 3	3.8wt%	-	-
環境負荷低減 型軽水炉 サイクル (BWR)	FORSETI 1	10wt%	Puf比 79% 富化度 2.6%	2.5%
	FORSETI 2	10wt%	富化度 2.6%	2.5%
	FORSETI 3	10wt%	富化度 4.0%	1.3%
	FORSETI 3-1	10wt%	富化度 4.0%	1.3%

## シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## 燃料タイプ・MOXタイプ

	シナリオ名	ウラン炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	MOX炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	ウランなし 金属燃料 高速炉
参照サイクル (既設BWR)	参照 1	基準ウラン	フルMOX	-
	参照 2	基準ウラン	劣化ウラン希釈 MOX	-
	参照 3	基準ウラン	-	ウラン炉 + 高速炉
環境負荷低減 型軽水炉 サイクル (BWR)	FORSETI 1	FORSETI™	FORSETI™高減速 残留ウラン希釈MOX	高速炉 3 サイクル
	FORSETI 2	FORSETI™	FORSETI™ 残留ウラン希釈MOX	高速炉 1 サイクル
	FORSETI 3	FORSETI™	FORSETI™ フルMOX	高速炉 1 サイクル
	FORSETI 3-1	FORSETI™	FORSETI™ フルMOX	高速炉 1 サイクル

## シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## プラント容量比

	シナリオ名	ウラン炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	MOX炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	ウランなし 金属燃料 高速炉
参照サイクル (既設BWR)	参照 1	1.00	0.13	0.0
	参照 2	1.00	0.78	0.0
	参照 3	1.00	-	0.54
環境負荷低減 型軽水炉 サイクル (BWR)	FORSETI 1	1.00	0.13	0.48
	FORSETI 2	1.00	0.33	0.10
	FORSETI 3	1.00	0.21	0.11
	FORSETI 3-1	1.00	0.21	0.12

## シナリオの検討

## 燃料炉心導入シナリオの検討

取出し～再処理までの冷却年数

	シナリオ名	ウラン炉 9x9燃料 取出燃烧度 45GWd/t	MOX炉 9x9燃料 取出燃烧度 45GWd/t	ウランなし 金属燃料 高速炉
参照サイクル (既設BWR)	参照 1	15	136	-
	参照 2	15	32	-
	参照 3	15	-	3
環境負荷低減 型軽水炉 サイクル (BWR)	FORSETI 1	15	32	3
	FORSETI 2	15	32	3
	FORSETI 3	15	50	3
	FORSETI 3-1	15	30	3

## シナリオの検討

## 燃料炉心導入シナリオの検討

TRU有害度（軽水炉燃料；冷却後） 単位 Sv/g

	シナリオ名	ウラン炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	MOX炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	ウランとMOX 荷重平均の 参照1比
参照サイクル (既設BWR)	参照1	80	246	1.00
	参照2	80	135	1.05
	参照3	80	-	0.79
環境負荷低減 型軽水炉 サイクル (BWR)	FORSETI 1	40	155	0.59
	FORSETI 2	52	155	0.78
	FORSETI 3	46	197	0.73
	FORSETI 3-1	46	239	0.80

## シナリオの検討

## 燃料炉心導入シナリオの検討

 $^{241}\text{Am}$ 重量割合(軽水炉燃料；冷却後)

	シナリオ名	ウラン炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	MOX炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	ウランとMOX 荷重平均の 参照1比
参照サイクル (既設BWR)	参照1	6.47E-4	6.16E-3	1.00
	参照2	6.47E-4	1.41E-3	0.77
	参照3	6.47E-4	-	-
環境負荷低減 型軽水炉 サイクル (BWR)	FORSETI 1	5.27E-4	1.96E-3	0.54
	FORSETI 2	5.27E-4	1.96E-3	0.69
	FORSETI 3	5.27E-4	3.63E-3	0.84
	FORSETI 3-1	5.27E-4	3.18E-3	0.77

## シナリオの検討

## 燃料炉心導入シナリオの検討

 $^{244}\text{Cm}$ 重量割合（軽水炉燃料；冷却後）

	シナリオ名	ウラン炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	MOX炉 9x9燃料 取出燃焼度 45GWd/t	ウランとMOX 荷重平均の 参照1比
参照サイクル (既設BWR)	参照1	3.38E-5	3.88E-6	1.00
	参照2	3.38E-5	9.97E-5	2.06
	参照3	3.38E-5	-	-
環境負荷低減 型軽水炉 サイクル (BWR)	FORSETI 1	2.33E-6	6.77E-5	0.32
	FORSETI 2	2.33E-6	6.77E-5	0.61
	FORSETI 3	2.33E-6	5.30E-5	0.37
	FORSETI 3-1	2.33E-6	1.14E-4	0.72

## シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## Pu消費量時間効率

	シナリオ名	Pu消費量時間効率	比
参照サイクル (既設BWR)	参照1	4.07E-3	1.00
	参照2	-2.83E-3	-4.17
	参照3	-	-
環境負荷低減 型軽水炉 サイクル (BWR)	FORSETI 1	8.82E-3	2.17
	FORSETI 2	8.82E-3	5.48
	FORSETI 3	8.82E-3	3.53
	FORSETI 3-1	1.47E-2	5.89

### シナリオの検討

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## 炉外Pu蓄積量（長期燃料サイクル諸量）

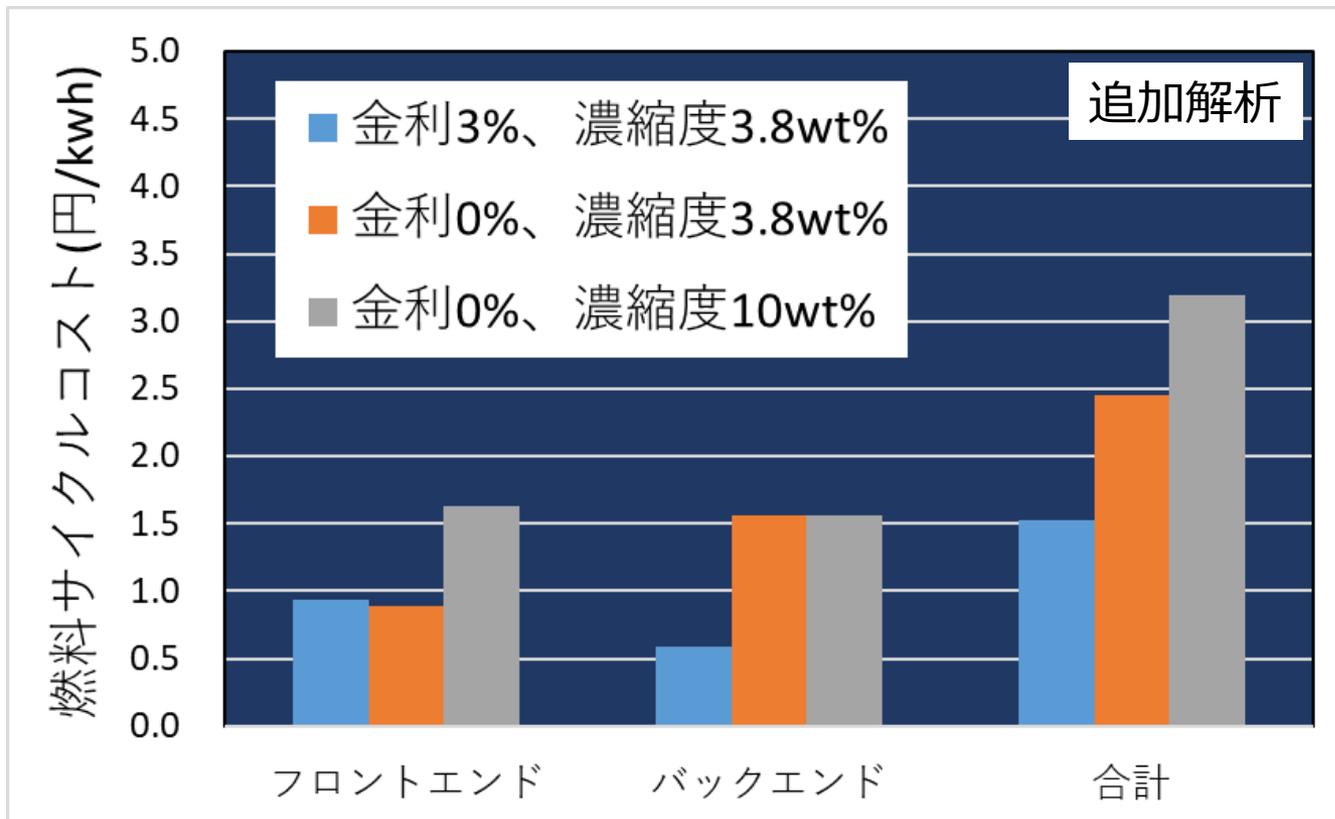
	シナリオ名	発電量で規格化した炉外Pu重量
参照サイクル (既設BWR)	参照1	1.00
	参照2	0.84
	参照3	-
環境負荷低減 型軽水炉 サイクル (BWR)	FORSETI 1	0.94
	FORSETI 2	0.55
	FORSETI 3	0.61
	FORSETI 3-1	0.61

# 燃料炉心導入シナリオの検討

## まとめ[研究目標]

- |   |            |
|---|------------|
| • MOX炉平衡容量比                                   | 20%増       |
| • MOX再処理前冷却時間                                 | 100年短縮     |
| • $^{241}\text{Am}$ (= $^{241}\text{Pu}$ )生成量 | 0.54倍      |
| • $^{244}\text{Cm}$ 生成量                       | 0.32倍      |
| • TRU潜在的放射性毒性                                 | 0.59倍[0.5] |
| • TRU発熱量(廃棄物量)                                | 0.75倍[0.7] |
| • Pu炉外蓄積量                                     | 0.55倍[減少]  |
| • 天然ウラン消費量                                    | 2.01倍      |

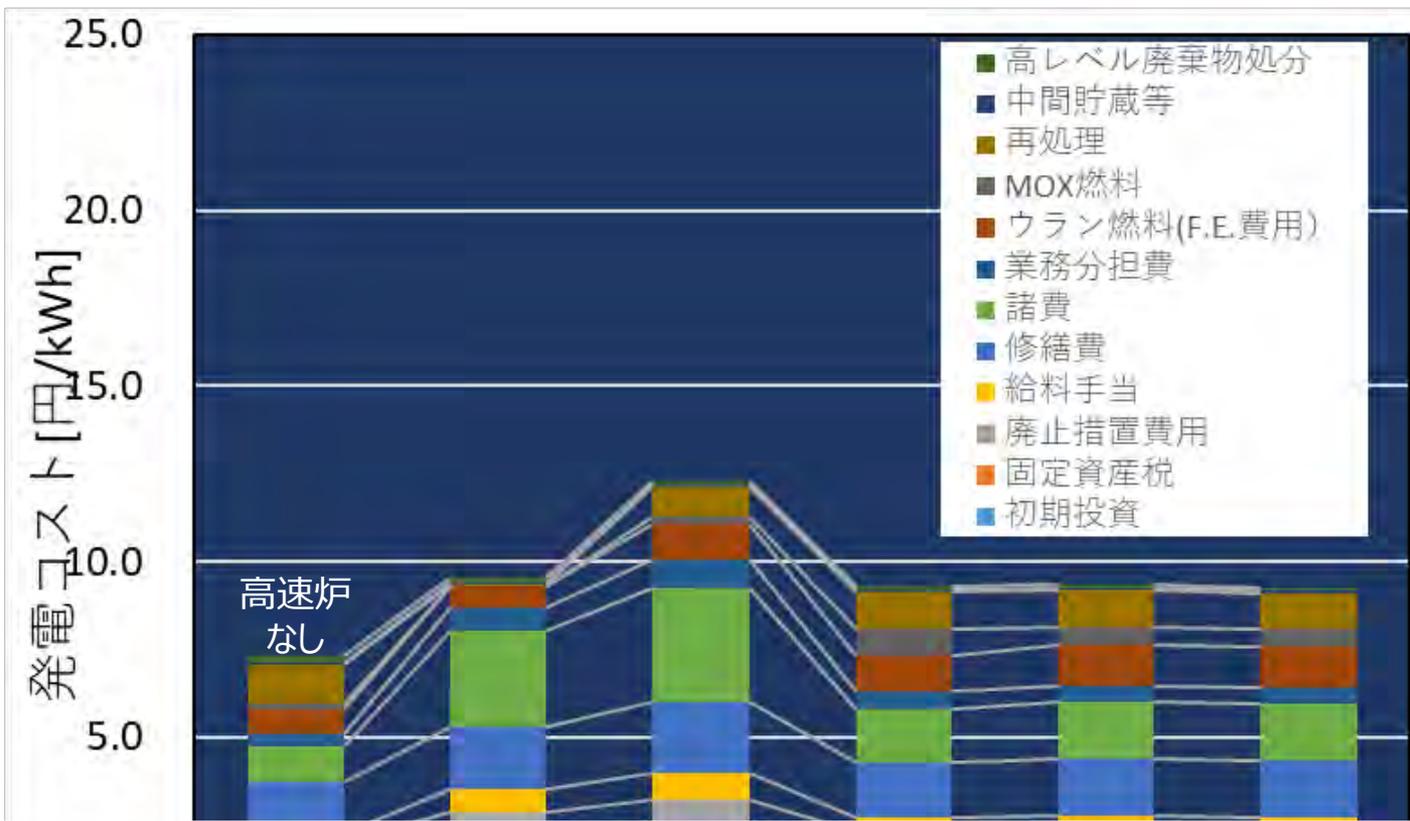
# 発電コスト(ウラン燃料単独のFCC)



**FORSETI™ウラン燃料のFCCは1.30倍(0.8円増)**

経済性評価

# 発電コスト(全成分)



**高速炉有りシナリオの発電コストは必ずしも増加しない**

参照 1    参照 3    FORSETI 1    FORSETI 2    FORSETI 3    FORSETI 3-1

## 発電コストの検討

### コスト評価条件

- 再処理：コスト変動なし( $^{241}\text{Am}$ は核種分離)
- ウラン加工：FORSETI™施設対応含まず
- MOX加工：FORSETI™施設対応含む
- 軽水炉：既設軽水炉電気出力100万kW/基
- 高速炉：建設単価軽水炉の1, 2, 5倍
- 高速炉回数：軽水炉MOXのPu組成で回数変動
- 金利：ゼロ（数10年超の評価では妥当）

## 発電コストの検討(まとめ)

- 軽水炉のTRU低減コスト +0.8円/kwh  
(潜在的放射性毒性 0.59倍)  
(TRU発熱量 0.75倍)
- 発電コストは必ずしも増加しない  
(高速炉の発電容量の影響が大きい)

## 全体のまとめ

- TRU潜在的放射性毒性 0.59倍
- TRU発熱量(廃棄物量) 0.75倍
- Pu炉外蓄積量 0.55倍
- 燃料サイクルコスト増加 最大 0.8円/kwh
- 発電コストは必ずしも増加せず

# TOSHIBA

ご清聴ありがとうございました