



# 核燃料サイクルシミュレータNMB4.0を用いた原子力利用シナリオの定量解析

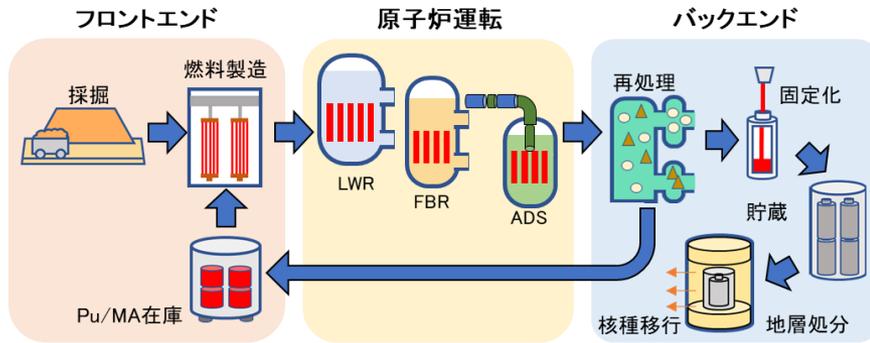
東京工業大学  
科学技術創成研究院  
竹下 健二

原子力小委員会革新炉WG  
2022年5月19日

# バックエンドを起点にした核燃料サイクルの高度化

## □ 将来の原子力利用

- 将来目標：2050年CN達成
- 現行目標：2030年20~22%
- 依存度低減/撤退を含め広く想定



核燃料サイクルの概要

## □ 核燃料サイクル

- 複数のプロセスによって成立したシステム
  - ⇔各プロセスの関係性を明確化/適切な条件設定
  - ⇔高度な原子力システム
- バックエンドプロセスの確立 ⇔ **原子力エネルギーの継続利用**
- 現状では核燃料サイクルの将来シナリオは示されていない



バックエンドプロセスを起点にした核燃料サイクルの高度化と  
将来の原子力利用シナリオの定量的な分析が必要

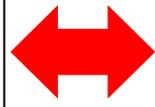
# 将来想定される原子力関連イベント



発電開始      1F事故 六ヶ所 20-22%      MOX再      FBR実用化      第2再      FBRサイクル

## 将来イベント(現在の想定)

- 六ヶ所再処理工場運転開始
- 発電比率20~22%
- ウラン需給(国際情勢)
- MOX燃料再処理の実用化
- 大量リプレース
- 高速炉実用化
- 地層処分
- 第2再処理工場
- 高速炉サイクルへ移行



## 原子力政策

- ワンスルーサイクル
- 軽水炉サイクル
- 軽水炉マルチリサイクル
- 高速炉サイクル

## R&D

- 小型炉、FBR、核種分離、ADS、
- 高含有ガラス固化、処分方式

導入時期や時間因子、複数の原子力施設の同時運転  
複合的なシナリオ解析

**静的手法では複合的なシナリオを解析できない**

# 動的核燃料サイクルシミュレーション

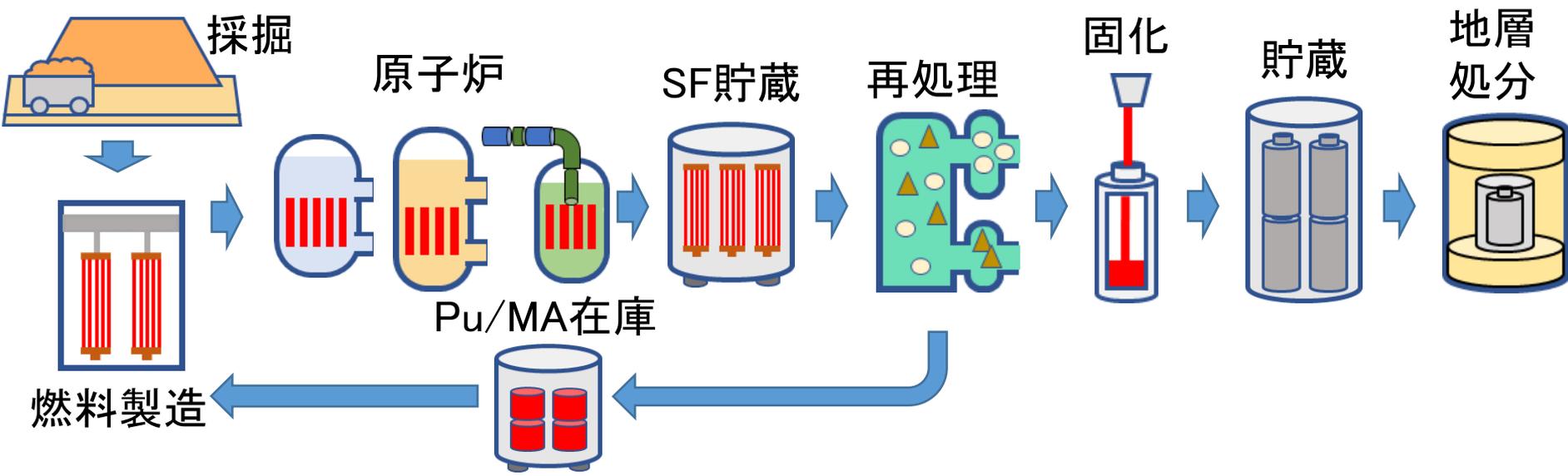
## Dynamic nuclear fuel cycle simulation

複合的なシナリオを解析する方法

Ex. FAMILY-21<sup>[1]</sup>, NFCSS<sup>[2]</sup>, COSI<sup>[3]</sup>, ANICCA<sup>[4]</sup>

- ✓ 物質の流れ(マスバランス)を評価 (例)燃料製造量、廃棄物量、処分場面積
- ✓ 時間的因子を考慮
- ✓ 複数の原子力施設を並列計算

[1] Akira OHTAKI, AESJ 2010 Autumn Meeting, (2010).  
 [2] IAEA, IAEA-TECDOC-1864, (2019).  
 [3] C. Coquelet-Pascal, et, al., Nuclear technology, 192, 91-110, (2015).  
 [4] I. Merino Rodriguez, et, al., Nuclear Engineering and Technology 52, 2274-2284, (2020).



時間因子を含む複合的なシナリオの解析が必要

# 主要パラメータの感度解析

影響因子	パラメーター	基本ケース	本研究
発生本数	廃棄物含有率 [wt%]	20.8	15 ~ 35
	SF冷却期間 [年]	4	4 ~ 50
発熱特性	MA分離 [%]	0	0 ~ 99
	Cs・Sr分離 [%]	0	0 ~ 99
専有面積	廃棄体定置方式	縦置き	縦置き /横置き
処分場面積 [ $m^2$ /TWh]		151	検討

## 検討項目

- ✓ ガラス固化体発熱特性
  - ① 廃棄物含有率
  - ② 使用済燃料冷却期間
  - ③ ガラス固化体冷却期間
  - ④ MA・Cs/Sr核種分離
- ✓ 専有面積
  - ⑤ 廃棄体定置方式

# 計算条件

## 燃烧条件/計算コード

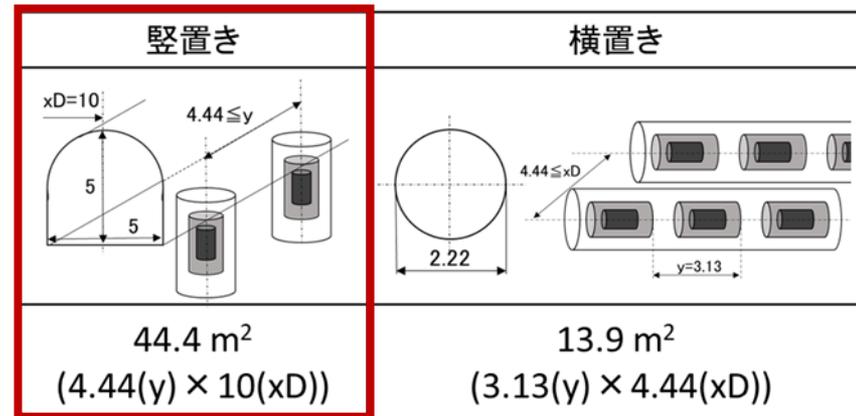
UO<sub>2</sub>燃料, 燃烧度45GWd/tHM, 熱変換効率34%  
 燃烧・崩壊計算: ORIGEN2.2-UPJ, 核データライブラリ: ORLIBJ40<sup>[1]</sup>

## 再処理条件\*<sup>1</sup>

U: 99.578%, Pu: 99.452%, 揮発性ガス(H, C, I, Cl, 希ガス  
 (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn): 100%, その他: 0%

## ガラス固化条件

- 製造時の発熱量 < 2.3kW /本
- MoO<sub>3</sub> 含有量<sup>[2]</sup> < 1.50wt%
- 白金族元素(PGM)含有量 < 1.25wt%
- Na<sub>2</sub>O含有量= 10wt% /本(粘性低減)



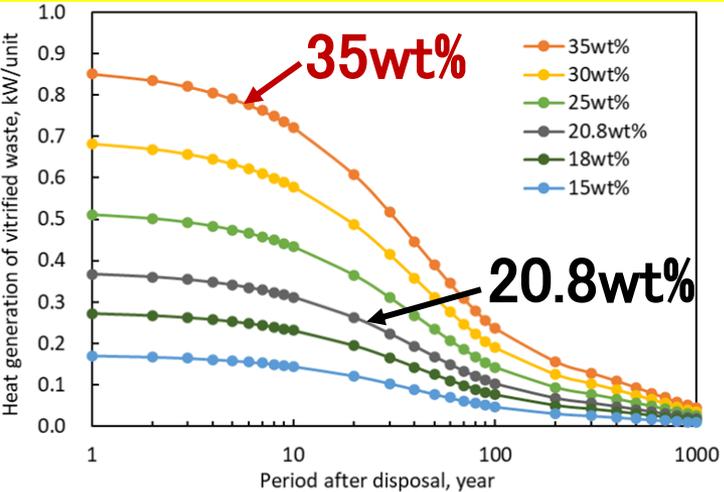
廃棄体定置方式

## 処分場の伝熱計算条件

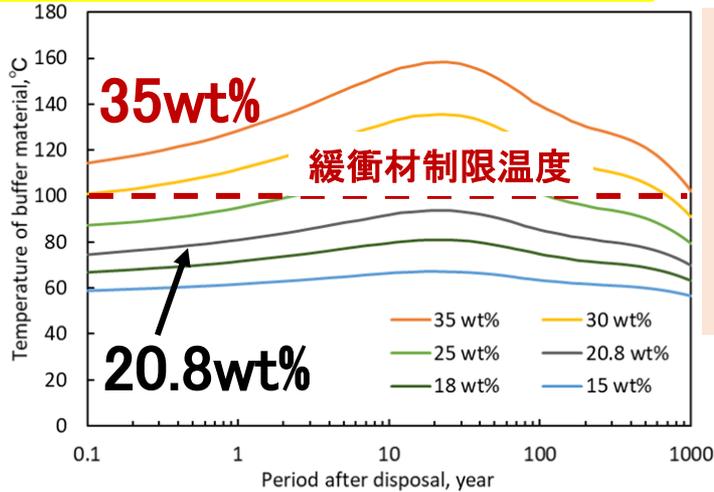
- 岩種: 硬岩系(処分深さ1000 m)
- 定置方式: 縦置き方式、横置き方式、PEM方式、MPEM方式
- 廃棄体専有面積の領域のみを対象にCOMSOL Multiphysicsで伝熱計算
- オーバーパックとの境界面を緩衝材最高温度として評価(緩衝材制限温度100°C)

# ガラス固化体の廃棄物含有率、SF冷却期間

## ガラス固化体の廃棄物含有量 (SF冷却15年、堅置き44.4m<sup>2</sup>)



廃棄物含有率とガラス固化体発熱量の関係

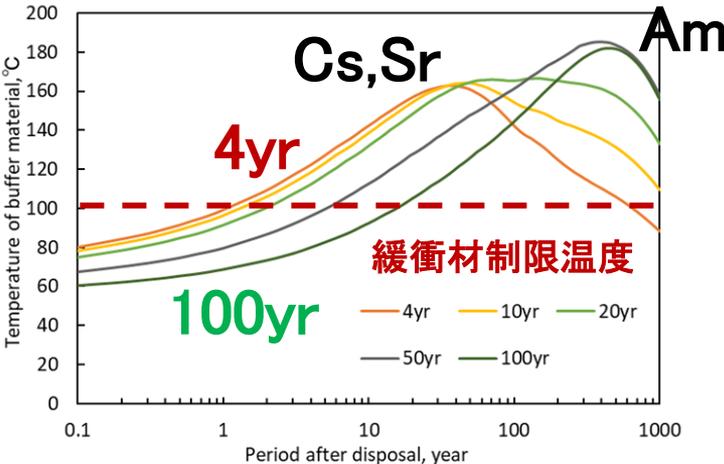


廃棄物含有率と緩衝材温度の関係

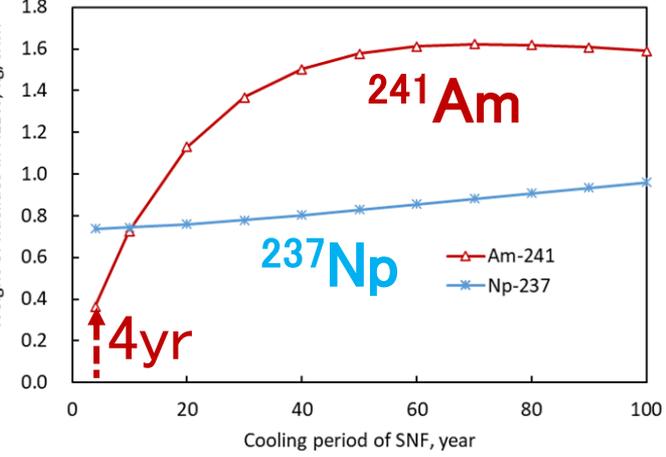
- ✓ 含有率に応じて、発熱量と緩衝材温度が増加
- ✓ 高含有率では、緩衝材温度が100°Cを上回る

廃棄物含有率によってガラス固化体発生量は低減するものの、発熱量の増加により緩衝材温度制限を超過

## SF冷却期間 (廃棄物含有量25wt%、堅置き44.4m<sup>2</sup>)



使用済燃料冷却期間と緩衝材温度の関係



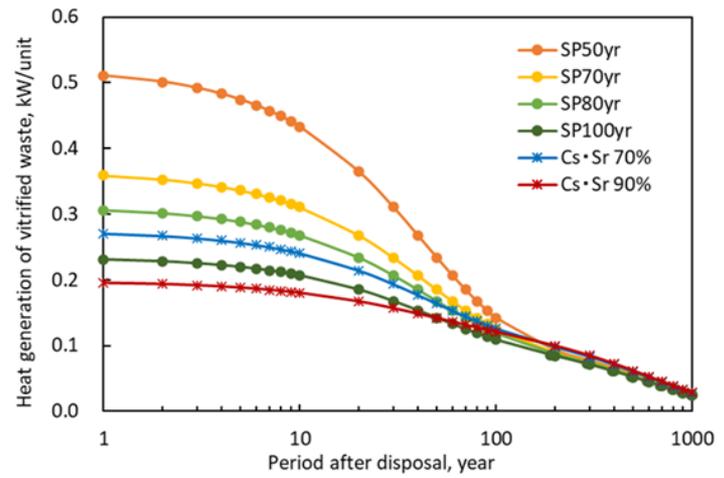
廃棄物中のNp-237/Am-241

- ✓ 緩衝材最高温度の出現が長期化
- ✓ Pu-241から生成されるAm-241が廃棄物中で増加

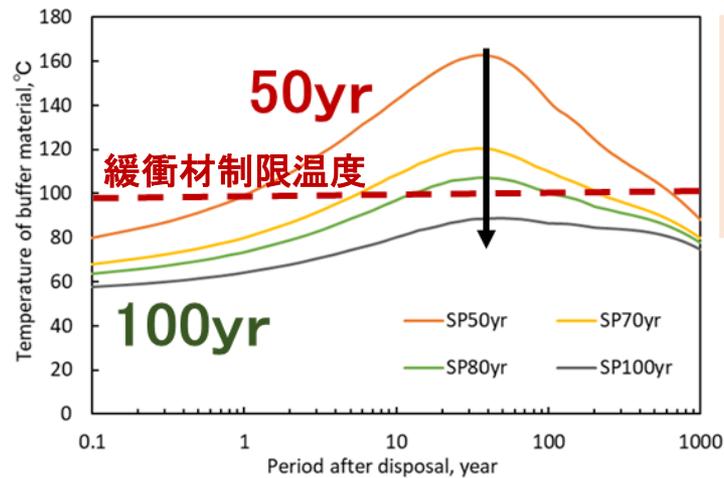
使用済燃料冷却によって廃棄物中のAm-241の量が増加し、ガラス固化体の発熱特性が変化

# ガラス固化体貯蔵期間、核種分離

ガラス固化体貯蔵期間: SF冷却期間4年、廃棄物含有率25wt%、竖置き44.4m<sup>2</sup>



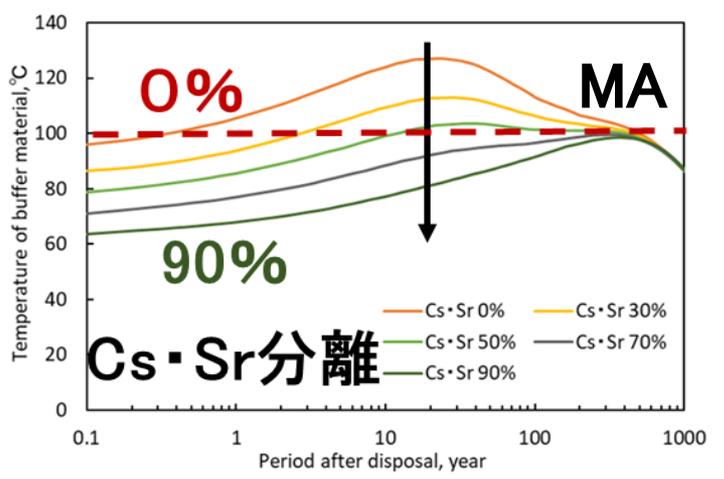
ガラス固化体貯蔵期間と発熱量の関係



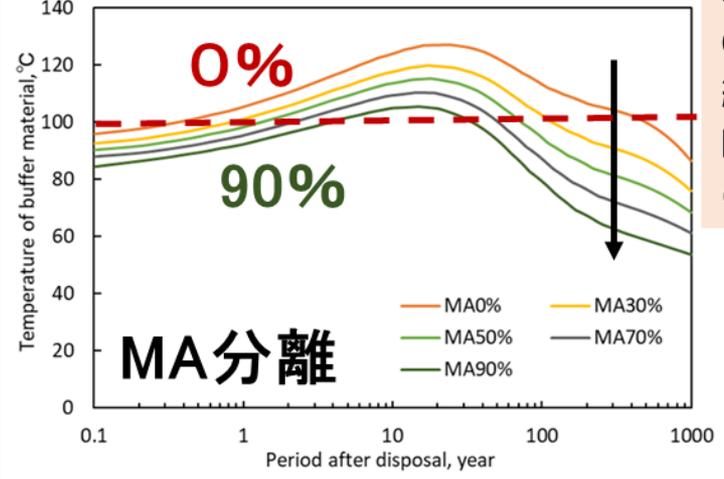
ガラス固化体貯蔵期間と緩衝材温度の関係

処分後初期の発熱量・緩衝材温度の低減に有効  
 =Cs·Sr分離と同効果  
 ガラス固化体貯蔵期間の延長は処分後CsとSrの発熱量低減に有効

核種分離: SF冷却期間15年、廃棄物含有率25wt%、竖置き44.4m<sup>2</sup>



Cs/Sr分離と緩衝材温度の関係



MA分離と緩衝材温度の関係

Cs·Sr分離は初期緩衝材温度低減に有効  
 Cs·Sr分離割合高いと緩衝材温度Amで決定  
 MA分離は処分後長期の温度低減に有効

Cs·Sr: 処分後初期  
 MA: 処分後長期

# 感度解析のまとめ

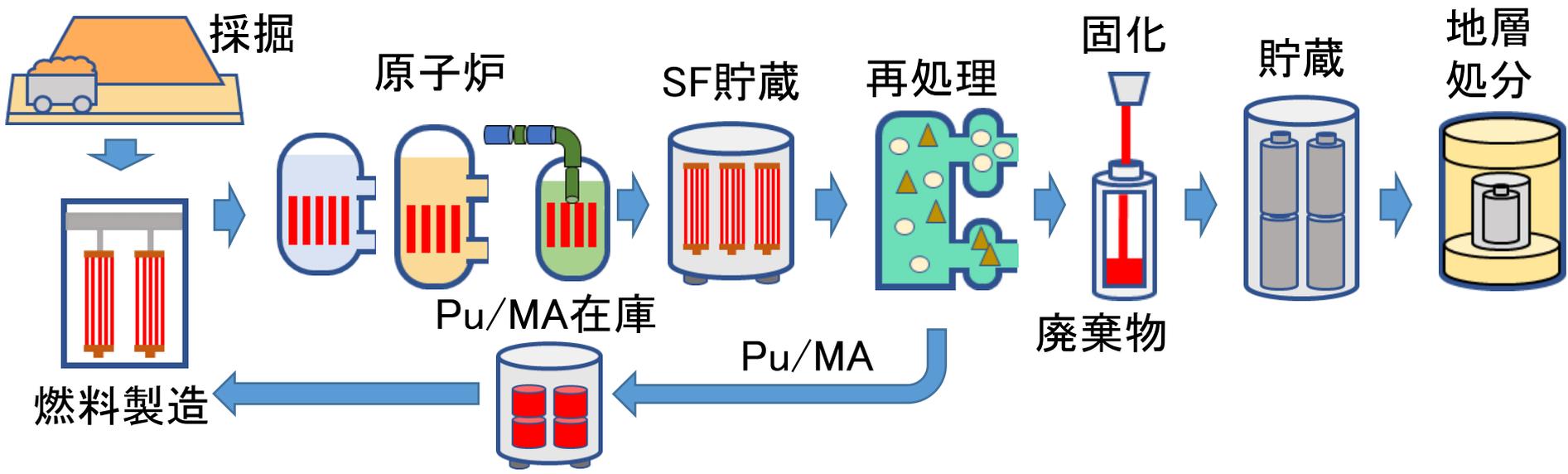
プロセス	因子	影響因子
SF冷却	時間	発熱特性(全体)
再処理	MA分離	発熱特性(処分後長期)
	Cs・Sr分離	発熱特性(固化～処分後初期)
ガラス固化	廃棄物含有率	物量/発熱特性(全体)
ガラス固化体貯蔵	時間	発熱特性(固化～処分後初期)
地層処分	廃棄体定置方式	専有面積

- ✓ パラメータが発熱特性および緩衝材温度への影響を確認
- ✓ パラメータの組合せによって処分場面積の削減効果が変化



動的核燃料サイクルシミュレーションの有効性  
**NMB4.0の開発**

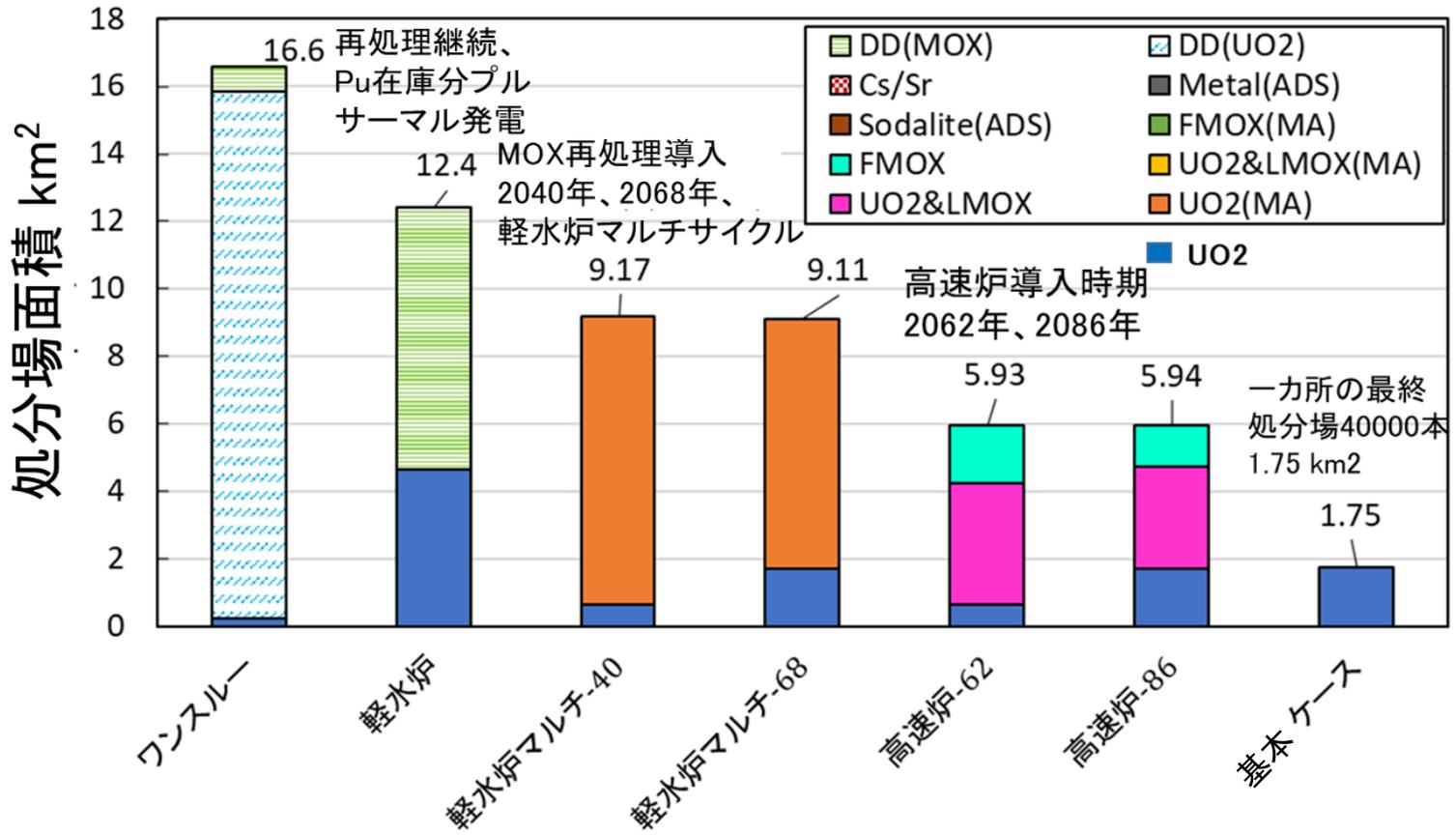
# 核燃料サイクルシミュレータ NMB4.0



- ①初期燃料組成の決定：燃料製造、天然Uの採掘、U濃縮
- ②燃焼計算：Okamura explicit method (OEM)
- ③使用済燃料の冷却：貯蔵量/組成
- ④再処理：再度燃料として使用する元素/廃棄物を分離
- ⑤固化・貯蔵・地層処分：廃棄物発生量、処分場面積、核種移行

NMB4.0コードは公開しており、広くご利用いただけます。

# 各種サイクルの適用で必要となる処分場面積

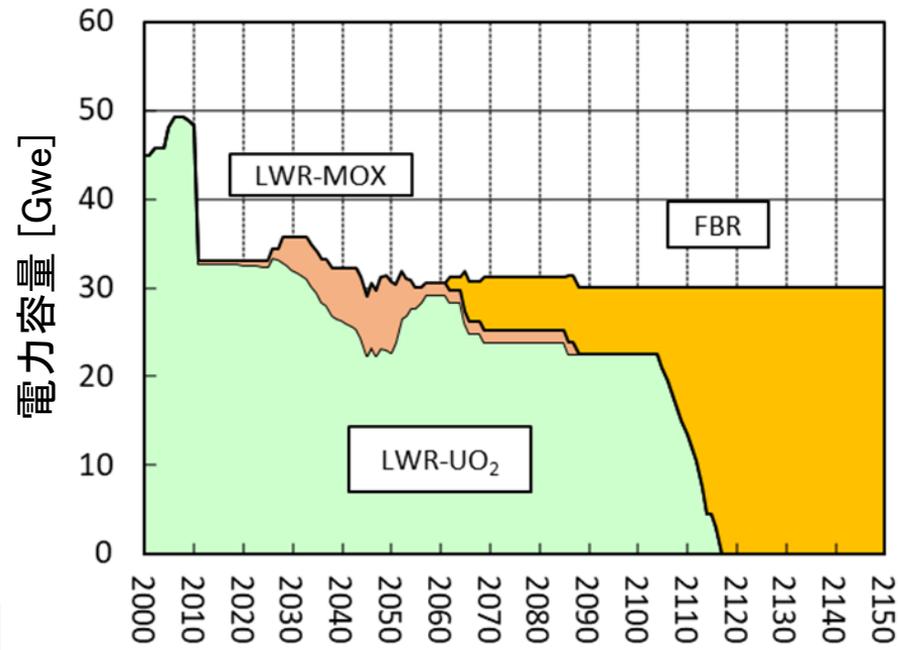
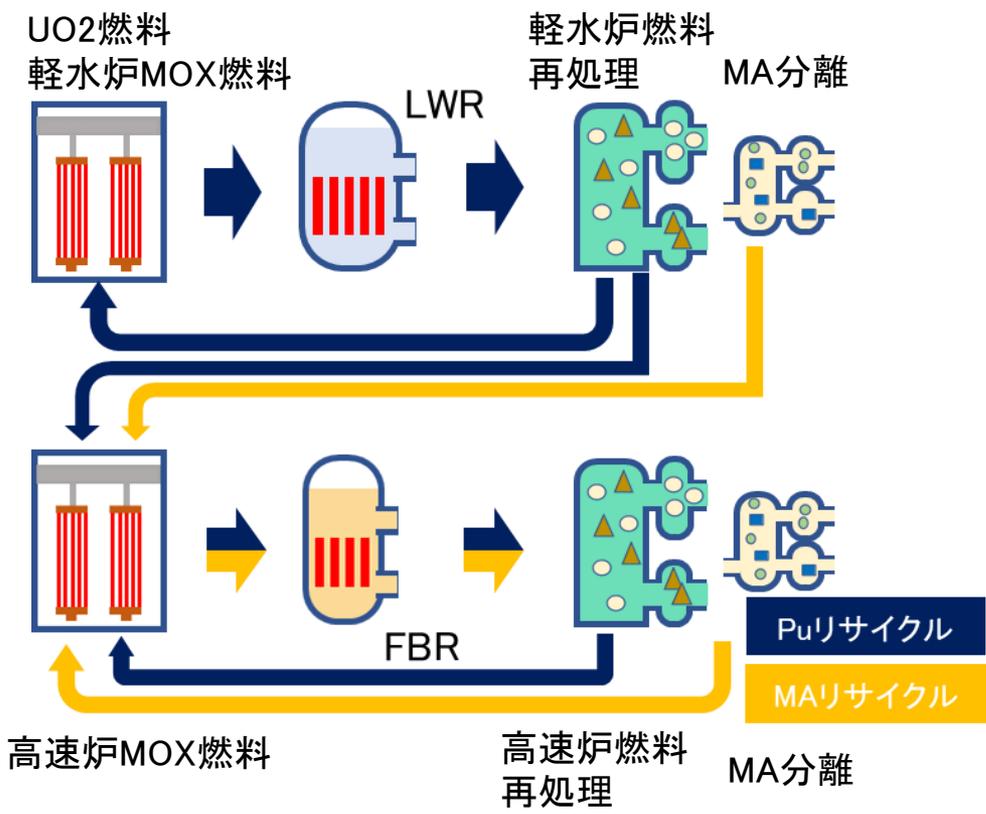


## 2150年までに発生する使用済燃料から生じる処分場面積

基本ケース: 六ヶ所再処理工場で32000tHMの使用済み燃料を再処理した時に発生する40000本のガラス固化体\*を処分するのに必要な処分場面積1.75km<sup>2</sup>(1本当たりの専有面積44.4 m<sup>2</sup>と仮定)

\* PWRでUO<sub>2</sub>燃料を45GWd/tHMで燃焼し、得られた使用済み燃料を4年間冷却後に再処理した場合に得られる高レベル廃液を含むガラス固化体

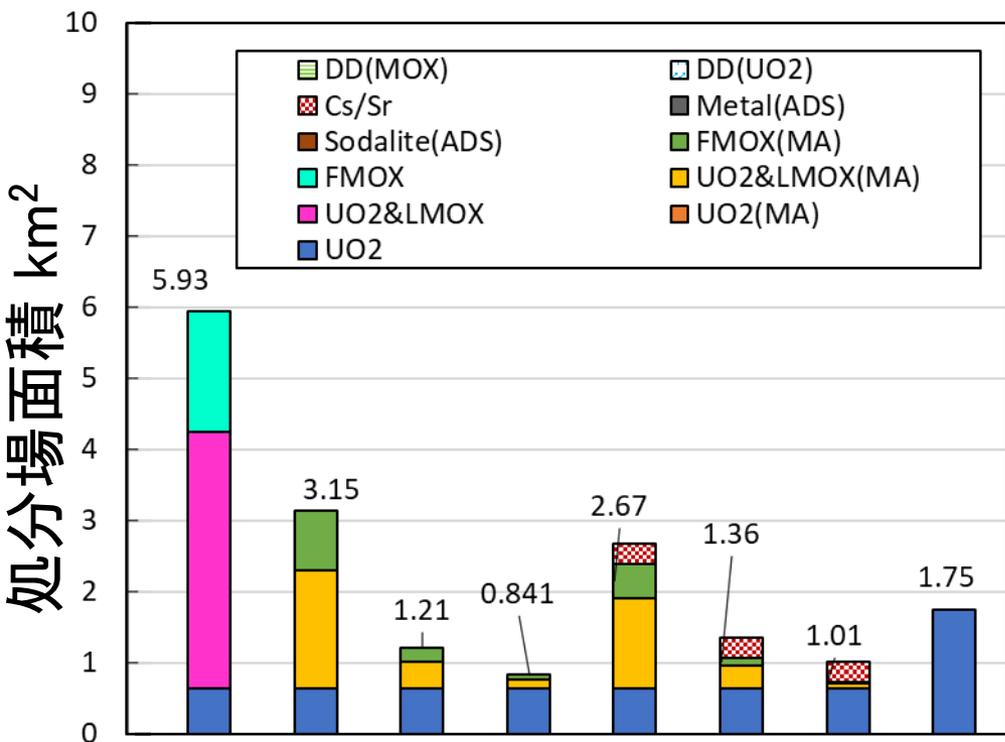
# 核燃料サイクルへの分離変換技術の導入



2062年高速炉導入  
MA分離・高速炉核変換

- ① 2062年に高速炉を導入
- ② ①+MA分離・高速炉核変換
- ③ ①+MA分離・高速炉核変換  
MA分離ガラス固化体貯蔵100年  
処分:MP3M
- ④ ①+MA分離・高速炉核変換  
MA分離ガラス固化体貯蔵150年  
処分:MP2M1
- ⑤ ①+MA分離・高速炉核変換、Cs/Sr分離
- ⑥ ①+MA分離・高速炉核変換、Cs/Sr分離  
ガラス固化体貯蔵50年  
処分:MP3M
- ⑦ ①+MA分離・高速炉核変換、Cs/Sr分離  
ガラス固化体貯蔵50年  
処分:MP2M1

# 分離変換技術導入の廃棄物処分への影響



① 2062年高速炉導入

MA分離・ガラス固化体貯蔵

② ①+MA分離・高速炉核変換

③ ①+MA分離・高速炉核変換

ガラス固化体貯蔵100年、処分:MPEM3

④ ①+MA分離・高速炉核変換

ガラス固化体貯蔵150年、処分:MPEM21

Cs/Sr/MA分離・ガラス固化体貯蔵

⑤ ①+MA分離・高速炉核変換 Cs/Sr分離

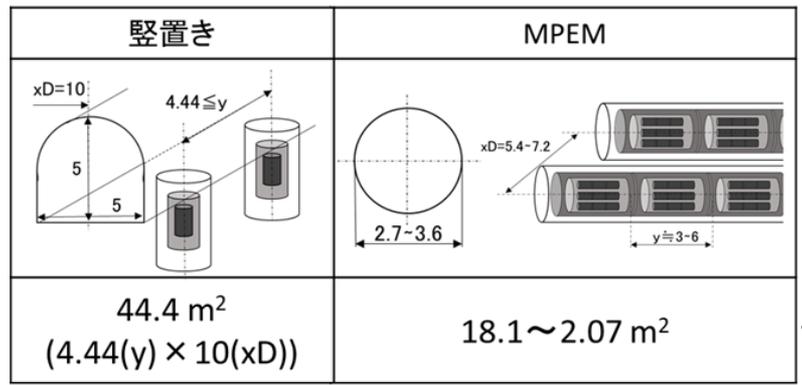
⑥ ①+MA分離・高速炉核変換、Cs/Sr分離、

ガラス固化体貯蔵50年、処分:MPEM3

⑦ ①+MA分離・高速炉核変換、Cs/Sr分離、

ガラス固化体貯蔵50年、処分:MPEM21

## 廃棄体定置方式



2150年までに発生する使用済燃料から生じる処分場面積

# 今後の研究方針

- バックエンドを起点とした動的核燃料サイクルシミュレーターNMB4.0を構築した。
- 「革新炉の廃棄物問題」はこれまで横断的に評価されておらず、革新炉WGで議論すべきである。そのためには、**革新炉の炉設計データや再処理計算コードを組み込み、精緻な動的核燃料サイクル計算ができるようにNMBの高度化を進めたい。**
- 本委員会で今後検討対象となる多様な原子力利用シナリオに対してNMBを使った総合的な核燃料サイクル評価を進めていきたい。