

# 日本における高速増殖炉サイクルの 導入シナリオ

---

平成21年10月9日（金）

次世代原子力システム研究開発部門  
プロジェクト推進室  
大滝 明

# 目次

## 1. 高速増殖炉サイクル実用化調査研究の概要

- ・高速増殖炉サイクル技術開発に係る国内政策と主なアクション
- ・高速増殖炉サイクル実用化研究(FaCTプロジェクト)の概要
- ・五者協議会合意文書(2009年7月公表)のあらまし

## 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ

- ・処理される使用済燃料の種類による主な物質収支への影響

## 3. 将来の不確実性要因の影響について

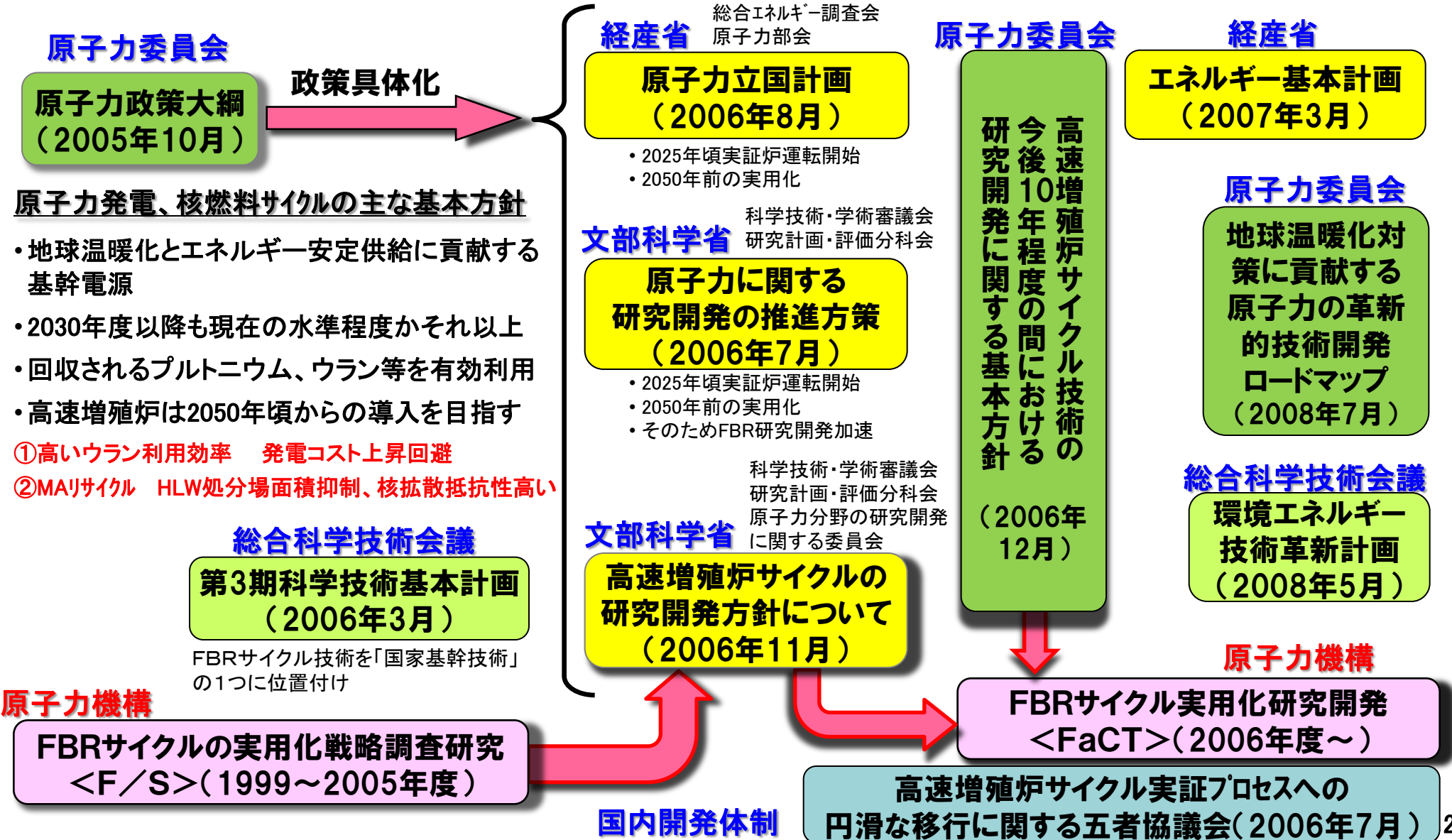
- ・将来の原子力発電設備容量、FBR導入開始時期、軽水炉との共存

## 4. 発電用FBRによるMA均質リサイクルの効果

## 5. まとめ

# 1. 高速増殖炉サイクル実用化調査研究の概要

## 1.1 高速増殖炉サイクル技術開発の国内政策と主なアクション



# 1. 高速増殖炉サイクル実用化調査研究の概要

## 1.2 高速増殖炉サイクル実用化研究 (FaCTプロジェクト) の概要

### < 研究開発計画 >

2008年度までの成果を中間取りまとめ

2005

2010

2015

(JFY)

**実用化戦略調査研究 (F/S)**  
(1999年～2005年)  
実用化候補概念の明確化

チェックアンドレビュー

国の評価・基本方針

高速実験炉「常陽」

高速増殖原型炉「もんじゅ」

**高速増殖炉サイクル実用化研究開発**  
(FaCT: **Fa**st Reactor **Cy**cle **T**echnology Development Project)

革新技術の採用可否判断(2010年)

革新技術の成立性見極め(2015年)

**革新技術の要素技術開発**

工学規模での技術確証

**実用施設及びその実証施設の概念設計**  
ナトリウム冷却FBR  
実用高速増殖炉サイクル  
先進湿式法再処理 + 簡素化ペレット法燃料製造

「もんじゅ」における  
◆ 発電プラントの運転信頼性実証  
◆ ナトリウム取扱技術確立

実証炉の基本設計・建設

2015年  
実証炉・燃料サイクル実証施設及び実用施設の概念設計、研究開発計画

照射利用など革新技術の実プラントでの実証の場

2050年より前

商業ベースでのFBRサイクル導入

経済性、信頼性の実証

2025年頃

実証炉の運転(2025～)、燃料サイクル実証施設の設計・建設・運転

# 1. 高速増殖炉サイクル実用化調査研究の概要



## 1.2 高速増殖炉サイクル実用化研究 (FaCTプロジェクト) の概要

### < 高速増殖炉システムの研究開発 >

#### 経済性に係る革新技术開発

##### ○ 建屋容積・物量の削減

① 配管短縮のための高クロム鋼の開発

② システム簡素化のための冷却系2ループ化

③ 1次冷却系簡素化のためのポンプ組込型中間熱交換器開発

④ 原子炉容器のコンパクト化

⑤ システム簡素化のための燃料取扱系の開発

⑥ 物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化

##### ○ 高燃焼度化による長期運転サイクルの実現

⑦ 高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発

#### 信頼性向上に係る革新技术開発

##### ○ ナトリウム取扱技術

⑧ 配管二重化によるナトリウム漏洩対策強化と技術開発

⑨ 直管二重伝熱管蒸気発生器の開発

⑩ 保守、補修性を考慮したプラント設計と技術開発

#### 安全性向上に係る革新技术開発

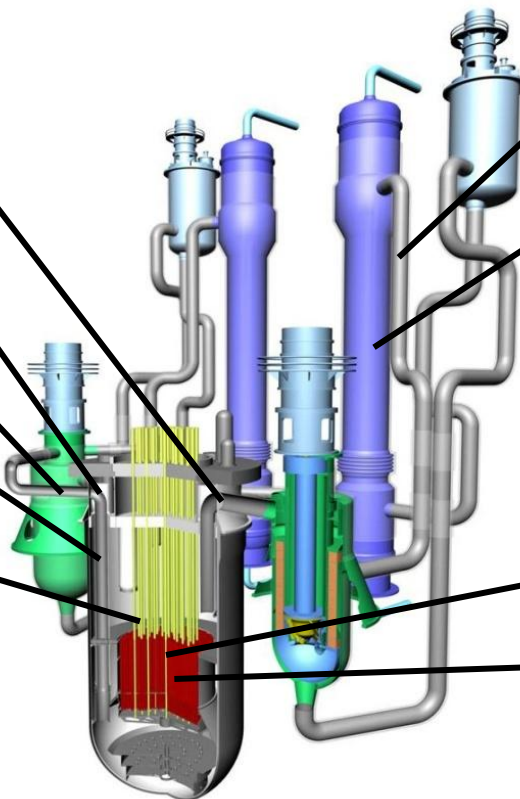
##### ○ 炉心安全性の向上

⑪ 受動的炉停止と自然循環による炉心冷却

⑫ 炉心損傷時の再臨界回避技術

##### ○ 耐震性の向上

⑬ 大型炉の炉心耐震技術



○ 機器開発試験・システム試験

○ 設計研究(実証炉、実用炉)

# 1. 高速増殖炉サイクル実用化調査研究の概要

## 1.2 高速増殖炉サイクル実用化研究 (FaCTプロジェクト) の概要

### < 燃料サイクルシステムの研究開発 >

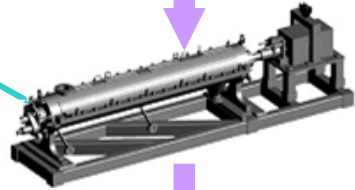
#### 先進湿式法再処理

#### 簡素化ペレット法燃料製造

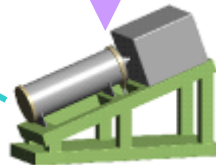
①解体・せん断技術の開発



②高効率溶解技術の開発



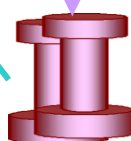
③晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発



④U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システムの開発

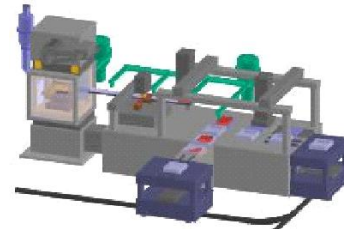
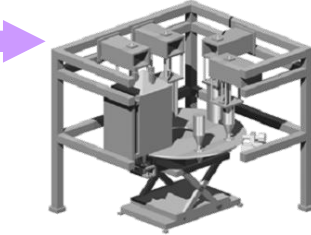


⑤抽出クロマト法によるMA回収技術の開発



⑥廃棄物低減化(廃液2極化)技術の開発

#### 簡素化ペレット法燃料製造



⑦脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発

⑧ダイ潤滑成型技術の開発

⑨焼結・O/M調整技術の開発

⑩燃料基礎物性研究

⑪セル内遠隔設備開発

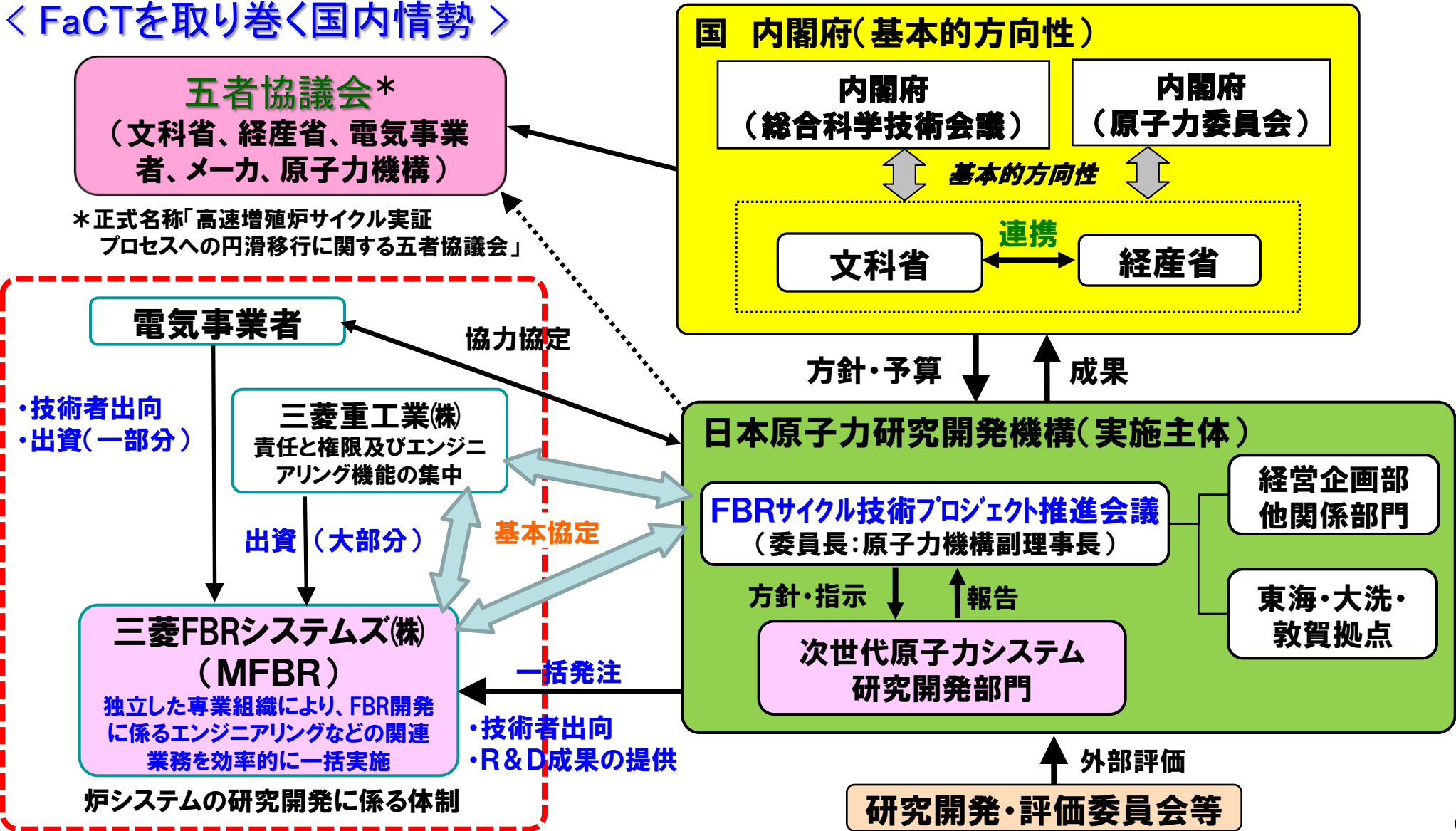
⑫TRU燃料取扱い技術

○燃料サイクルシステムの設計研究

# 1. 高速増殖炉サイクル実用化調査研究の概要

## 1.3 五者協議会合意文書(2009年7月公表)のあらまし

### < FaCTを取り巻く国内情勢 >



# 1. 高速増殖炉サイクル実用化調査研究の概要



## 1.3 五者協議会合意文書(2009年7月公表)のあらまし

### 「高速増殖炉実証炉・サイクルの研究開発の進め方について」(2009年7月)

#### ➤ 関係五者が応分の役割を果たすためのアクションプラン

##### (1) プロジェクトマネジメント体制の強化

- 原子力機構は、三菱重工／電気事業者の意見や考えを反映できる体制、高速増殖炉関連プロジェクト全体を俯瞰して戦略的にマネジメントを行う体制を整備(本年9月、来年4月の2段階)

##### (2) 高速増殖炉の技術移転

- 技術移転を円滑に行うため、適切な体制を検討し、人材を適切に移転・配置する基本的な見通しを共有(本年10月)

##### (3) 燃料サイクルの研究開発

- 軽水炉から高速炉への移行を念頭におきつつ燃料サイクル技術に係わる研究開発を進める。
- 原子力委員会の第二再処理工場の検討に必要な情報を提供する調査・検討を実施。
- 第二再処理工場実現に向けた研究開発の在り方・進め方、事業の在り方、役割分担等の検討
- 実証炉燃料製造に関わる研究開発、製造施設の整備等の進め方、関係者の役割分担の在り方等を検討を開始。

##### (4) もんじゅ

- 運転再開に向けて責任を持って準備を実施し、関係機関は引き続き支援。
- 運転再開後は、成果を速やかに高速増殖炉研究開発に反映するとともに、メーカ、電気事業者と密接に連携。



## 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ

2.1 目的と検討の概要

2.2 想定条件

2.3 解析ケース

2.4 解析結果とまとめ

2.5 考察

## 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ



### 2.1 目的

#### (1)目的

- 六ヶ所再処理工場に続く第二再処理(一つの工場とは限らない)において、三種類の使用済燃料（軽水炉ウラン燃料、プルサーマル燃料、FBR燃料）をいつ、どのくらいの再処理が見込まれるか定量的に把握する。

#### (2)検討の概要

##### ①制約条件

- FBRの導入に必要なPuを確保しつつ、所定の移行期間でFBRへ切り替わる
- 六ヶ所再処理工場のMOX貯蔵能力を考慮
- 第二再処理の全操業期間にわたる平均稼働率は80%以上

##### ②主なパラメータ

#### プルサーマル使用済燃料(LWR-MOX)、FBR使用済燃料の処理方法

を主なパラメータとし、前記①の制約条件を充足する核燃料サイクル諸量解析をFAMILY-21コードで行い、第二再処理の導入要件を評価した。

# 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ



## 2.2 核燃料サイクルシステムの主な想定条件

### 核燃料サイクルシステムの主な想定条件の概要

システム		概要
原子炉システム	軽水炉	~2029年: 燃焼度 約4万MWd/t、稼働率80% 2030年~: 燃焼度 <b>約6万MWd/t</b> 、稼働率90% プルサーマル: 2010年利用開始(導入規模、終了時期はFBR導入に応じて変更)
	FBR	高増殖型: <b>増殖比1.2</b> 、Pu需給バランスに応じて低増殖型(増殖比1.03)を導入
燃料サイクルシステム	炉外サイクル時間	軽水炉サイクル: 4年、 FBRサイクル: 5年
	ロス率	軽水炉サイクル(転換: 0.5%、加工: 0.1%、再処理: U-0.4%、Pu-0.5%、MA-0.1%) FBRサイクル (加工: 0.1%、再処理: U・Pu・Am・Cm-0.1%、Np-10%)
	その他	六ヶ所再処理運転条件: 平成19年9月18日時点の計画値 FBR再処理実証プラント: 年間処理規模 <b>20トン/年</b> 、 <b>2030年</b> 運転開始 軽水炉サイクル: 回収ウラン再濃縮利用、第二再処理以降でMA回収を想定 FBRによるMAリサイクル(FBR燃料中の <b>MA濃度上限5%</b> ) 炉寿命: 60年、再処理施設: 40年

# 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ



## 2.3.1 解析ケース

ケース No.	原子力発電 設備容量(GWe)			FBR導入開始時期 (西暦)			第二軽水炉再処理の運用				
							プルサーマル燃料		FBR燃料		
	58	80	110	2040	2050	2070	UOX燃料との混合比		FBR再処理 施設で処 理	FBR再処理 施設で処理	UOX燃料と 1:6で混合 処理
							1:1	1.5:8.5			
1	○				○		○			○	
2	○				○			●		○	
3	○				○				●	○	
4	○				○		○				●
5		●			○		○				
6			●		○		○				
7	○			●			○				
8		●		●			○				
9			●	●			○				
10	○					●	○				
11		●				●	○				
12			●			●	○				
13	○				○		○				●
備考											

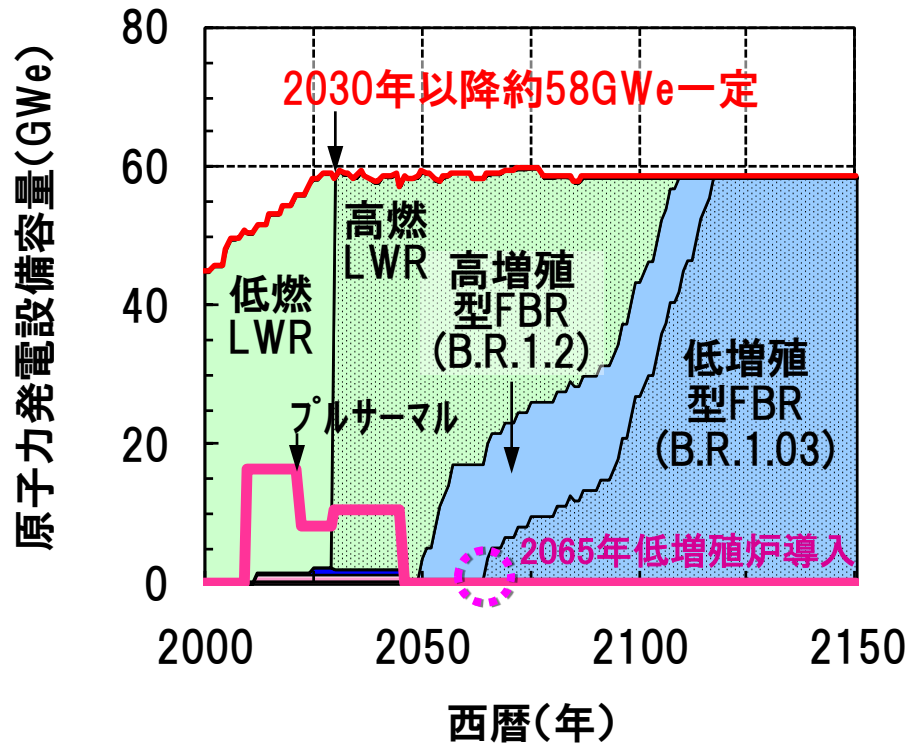
# 2.3.2 第二再処理の想定概念

ケース No.	第二軽水炉再処理			FBR再処理施設		
	処理燃料			処理状態		
	UOX	MOX	FBR	MOX	FBR	MOX
1	●	●		<p>MOX:UOX = 1:1 (6年間)</p>	●	<p>200ton/年 2060年導入</p>
2	●	●		<p>MOX:UOX = 1.5:8.5 (18年間)</p>	●	<p>200ton/年 2055年導入</p>
3	●				●	<p>200ton/年 2050年導入</p> <p>LWR-MOX</p>
4	●	●	●	<p>MOX:UOX = 1:1 (5年間)</p> <p>UOX:FBR = 1:6</p>	●	<p>100ton/年 2080年導入</p>

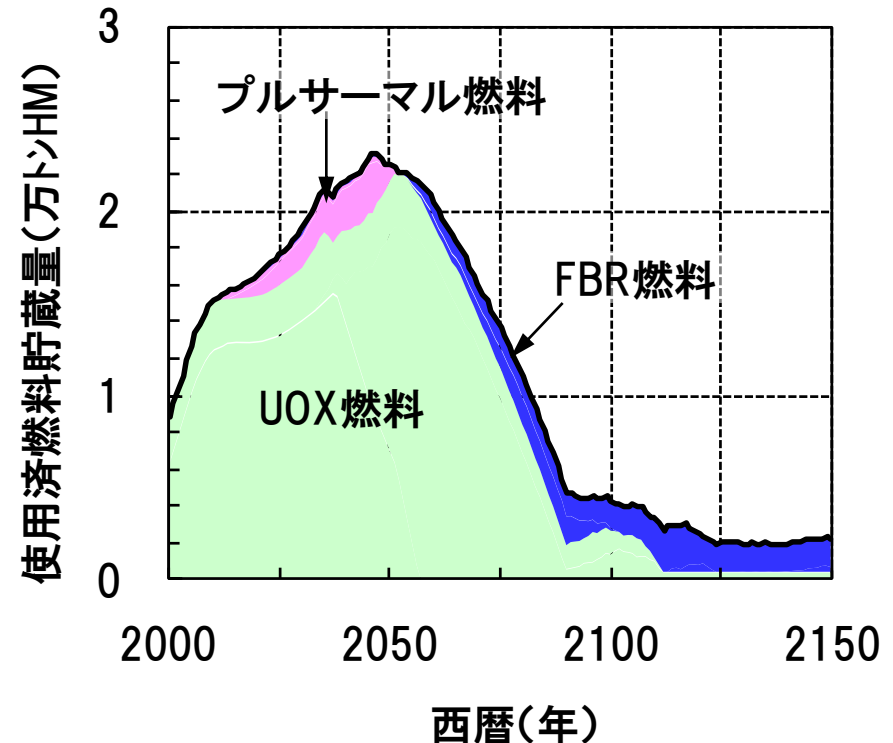
## 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ

### 2.4.1 原子力発電構成と使用済燃料貯蔵量の解析例

- 原子力発電設備容量が2030年以降約58GWe一定の場合、ケース1～ケース4の再処理条件において、移行期間60年で軽水炉からFBRに切り替わる。
- 同じく、使用済燃料最大貯蔵量は約2万3000トンと見込まれ、プルサーマル燃料とUOX燃料はFBR移行完了時期までに概ね全て再処理される。



原子力発電構成の推移(代表例ケース1)

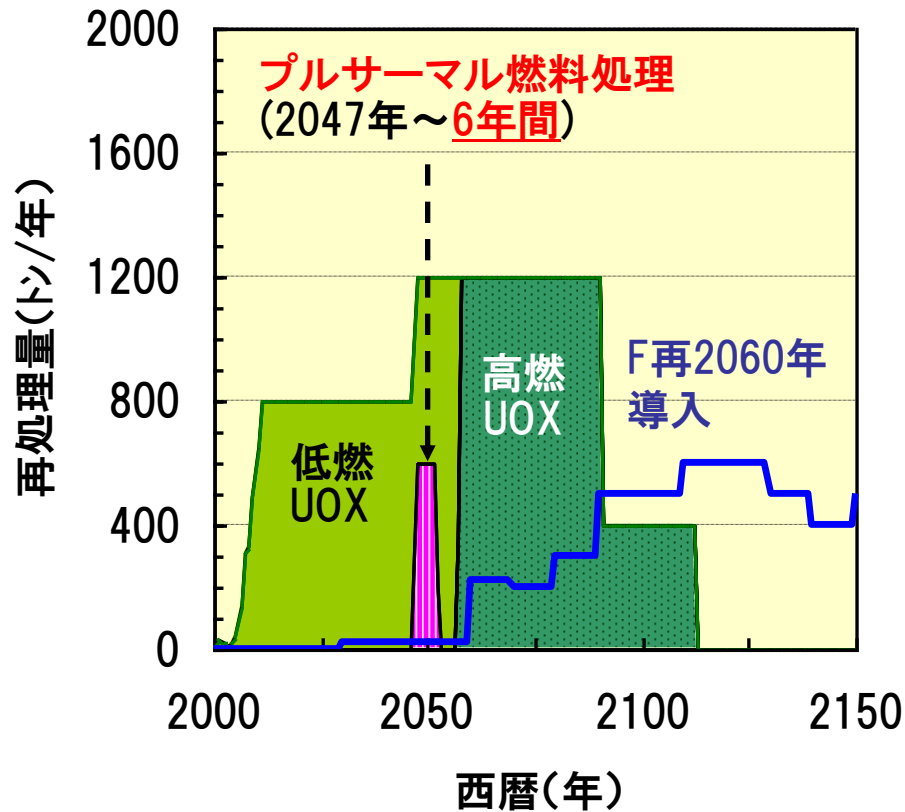


使用済燃料貯蔵量の推移(代表例ケース1)

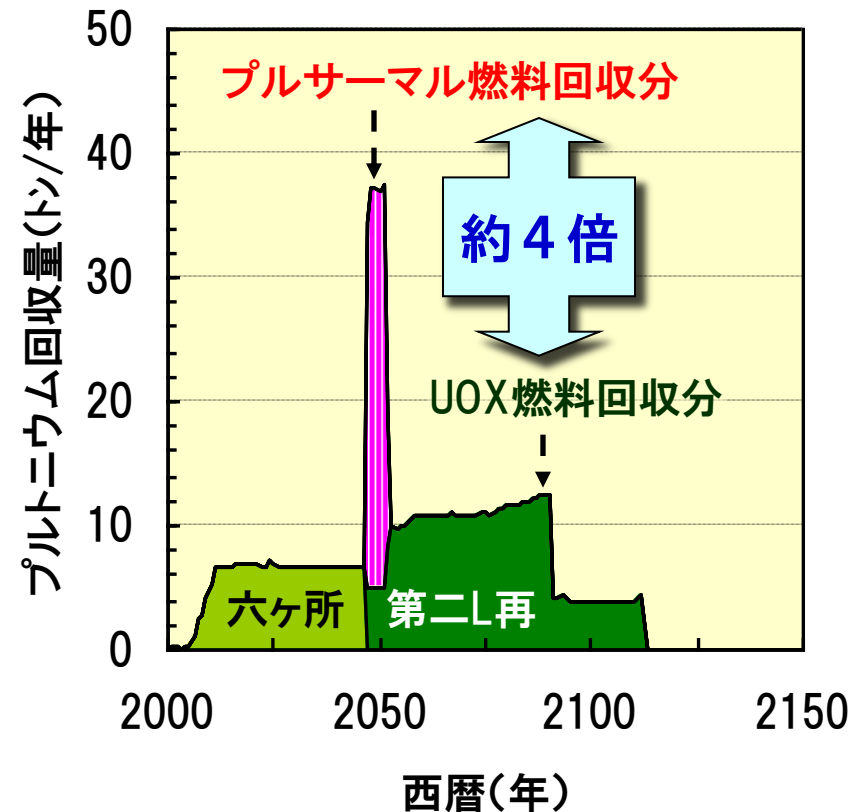
## 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ

### 2.4.2 ケース1の解析結果(プルサーマル燃料とUOX燃料を1:1の混合比で再処理)

- 第二軽水炉再処理(第二L再)でプルサーマル燃料とUOX燃料を1:1の混合比で再処理した場合、プルトニウムの年間回収量が一時的に約4倍まで変動。FBR再処理の導入は2060年。



ケース1の再処理量

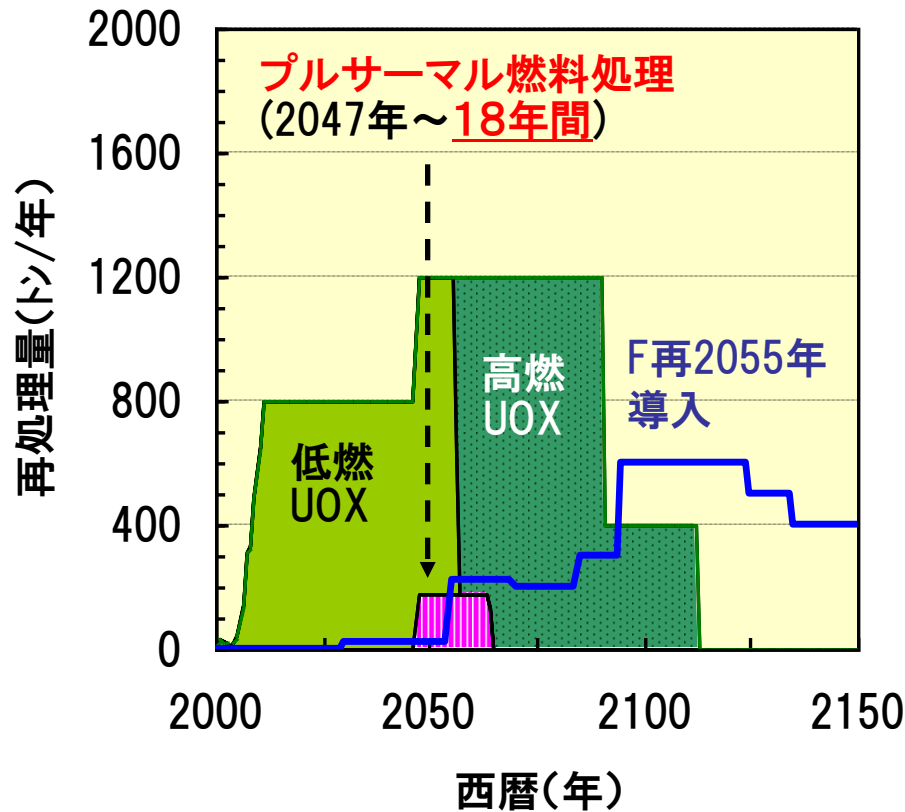


ケース1のプルトニウム回収量

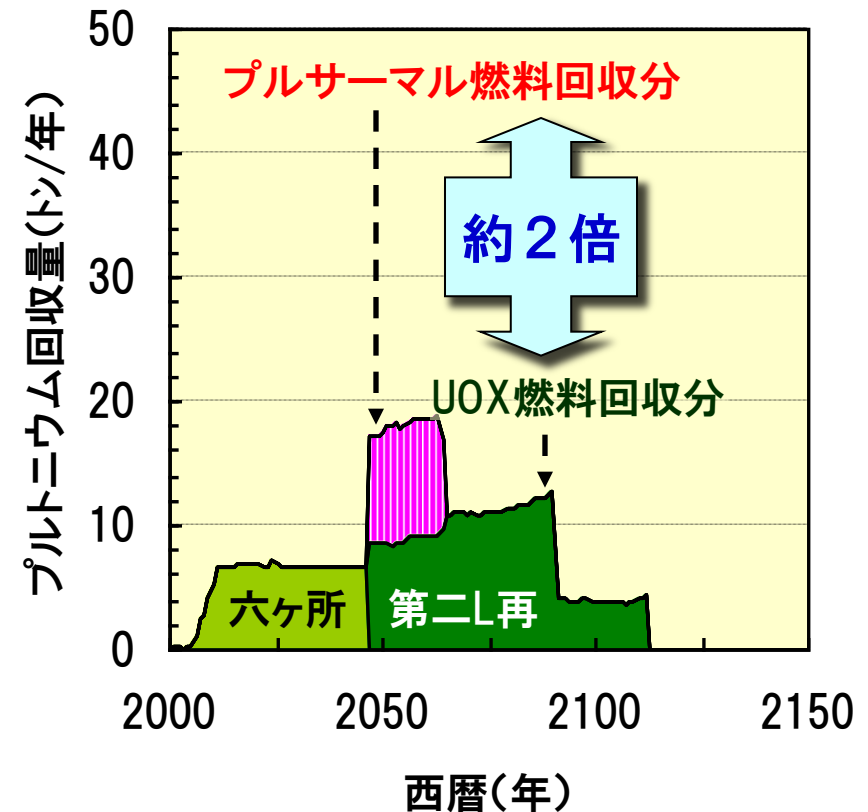
## 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ

### 2.4.3 ケース2の解析結果(プルサーマル燃料とUOX燃料を1.5:8.5の混合比で再処理)

- 第二L再でプルサーマル燃料とUOX燃料を1.5:8.5の混合比で再処理した場合、プルトニウムの年間回収量は約18年にわたり2倍程度で推移。FBR再処理の導入は2055年。



ケース2の再処理量



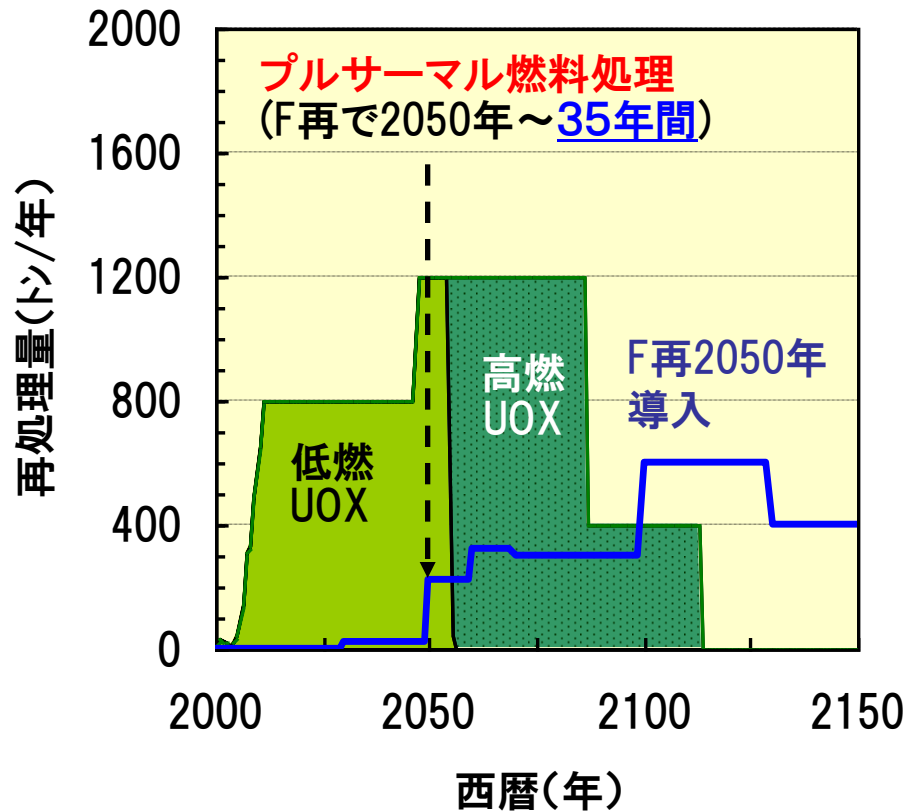
ケース2のプルトニウム回収量



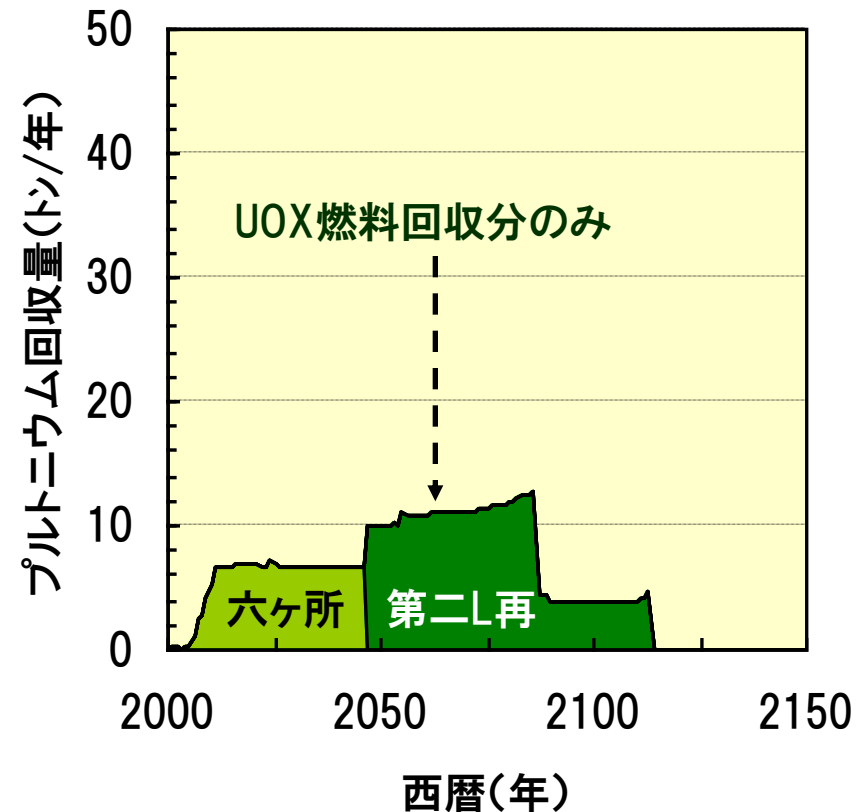
## 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ

### 2.4.4 ケース3の解析結果(プルサーマル燃料をFBR再処理で混合処理)

- プルサーマル燃料をFBR再処理した場合、第二L再のプルトニウム回収量は概ね一定で推移。FBR再処理の立ち上げは、FBRプラントの導入開始と同じ2050年頃。



ケース3の再処理量



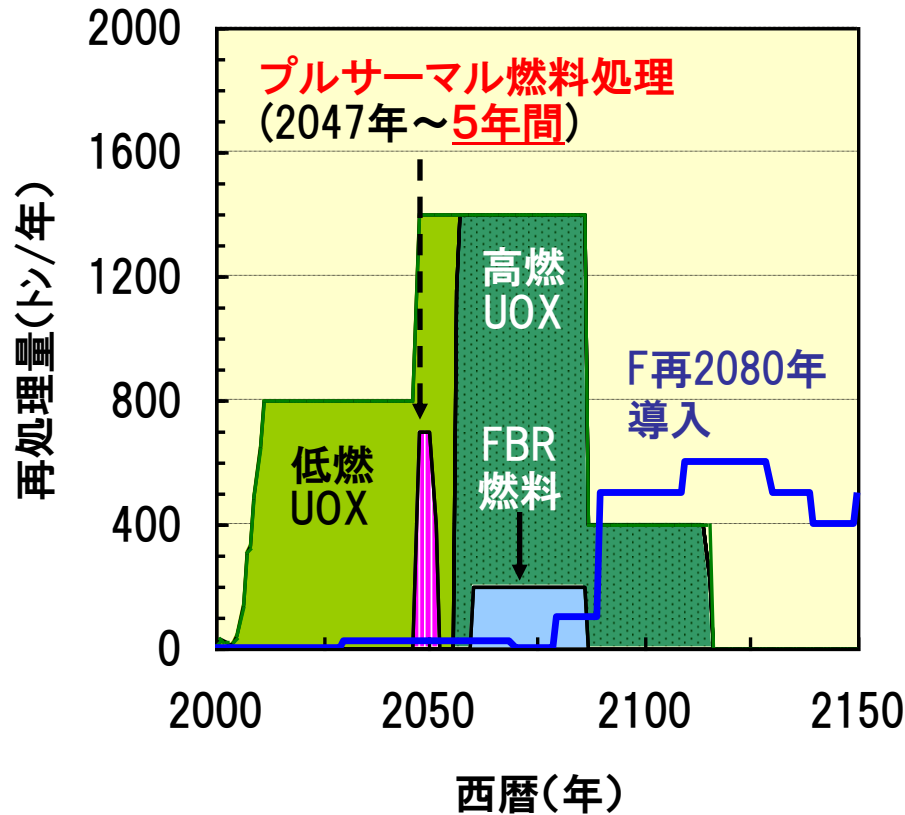
ケース3のプルトニウム回収量

# 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ

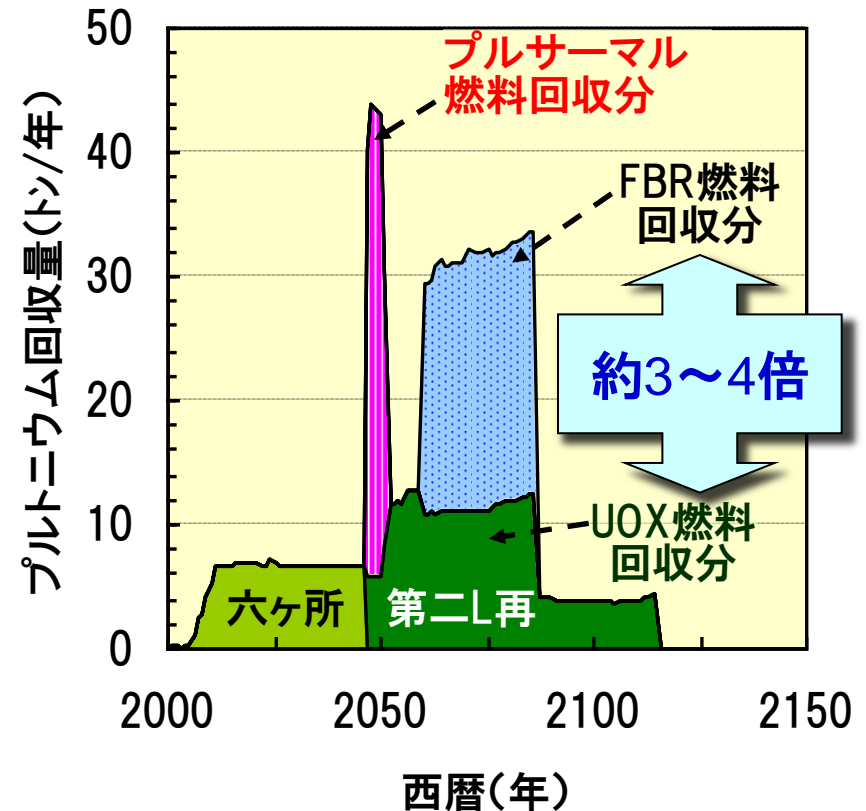


## 2.4.5 ケース4の解析結果 (LWR燃料処理とFBR燃料処理の共用化)

●LWR燃料処理とFBR燃料処理の共用化では、年間処理規模1400トン/年が見込まれ、プルトニウムの年間回収量は約3～4倍に変動。FBR再処理の導入は2080年頃。



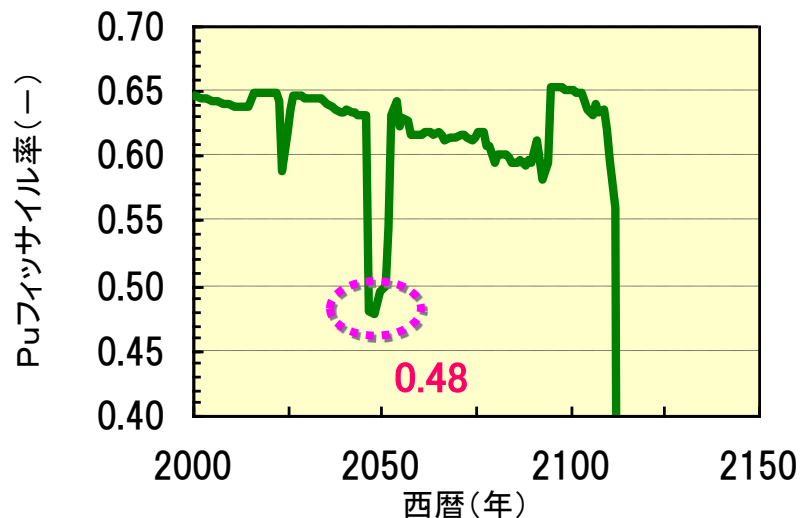
ケース4の再処理量



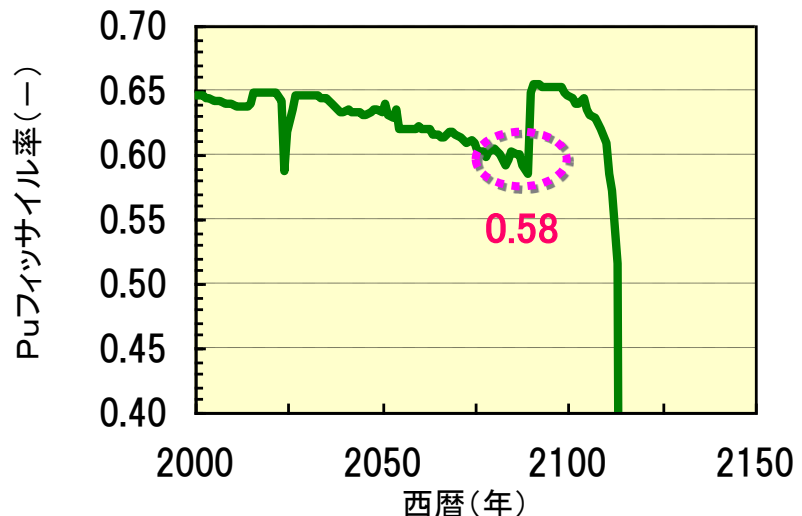
ケース4のプルトニウム回収量

## 2.4.6 軽水炉再処理における回収プルトニウムのフィッサイル率

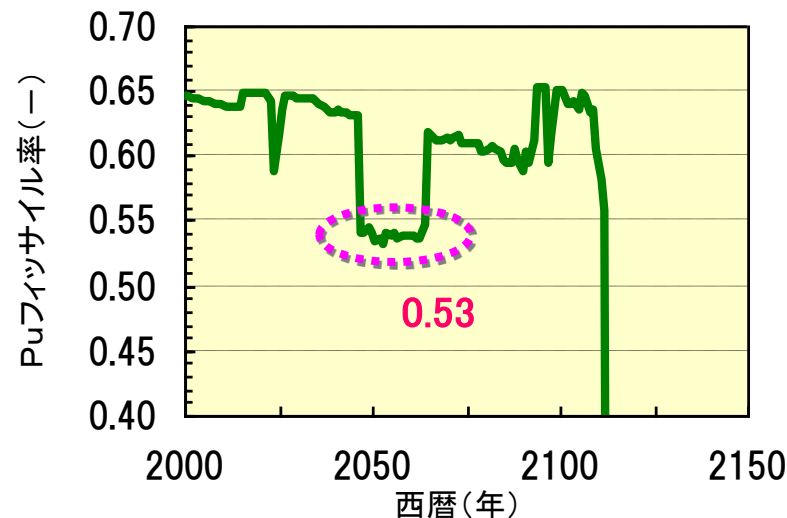
●第二L再でプルサーマル燃料とUOX燃料を1:1の混合比で再処理した場合、回収Puの平均フィッサイル率が0.48まで過渡的に低下(ケース1、ケース4)。



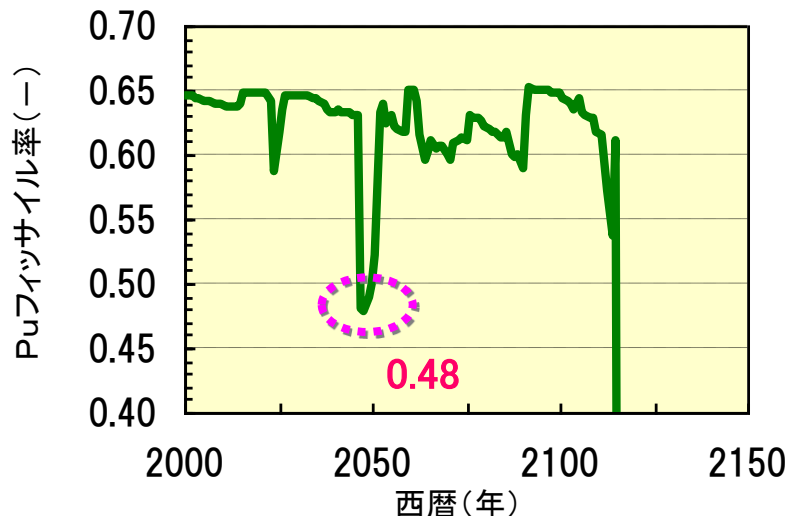
ケース1 (LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1:1で処理)



ケース3 (LWR-MOXをFBR再処理施設で処理)



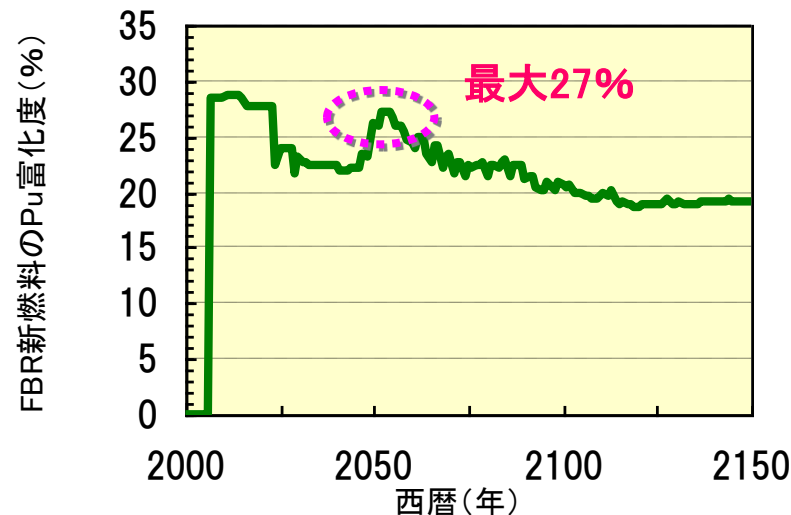
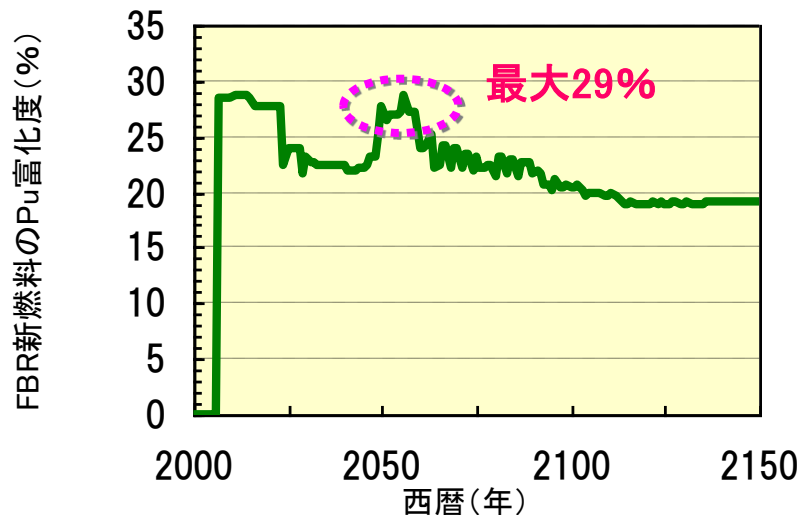
ケース2(LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1.5:8.5で処理)



ケース4(LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1:1処理+FBR燃料処理)18

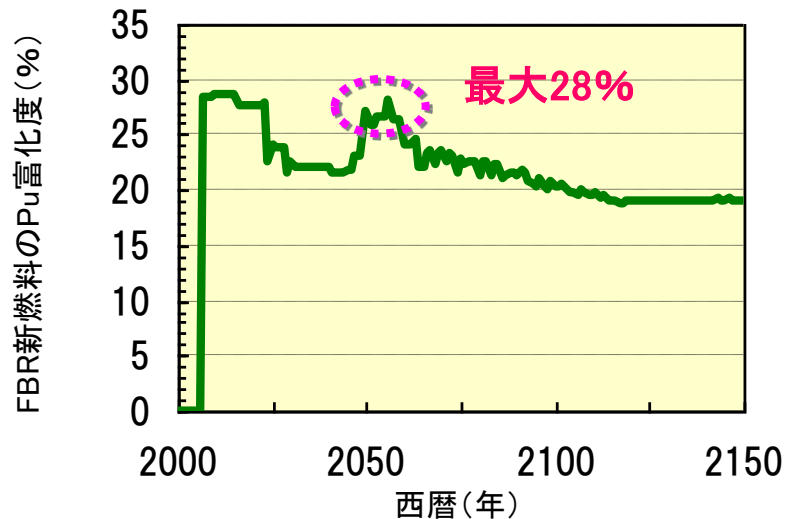
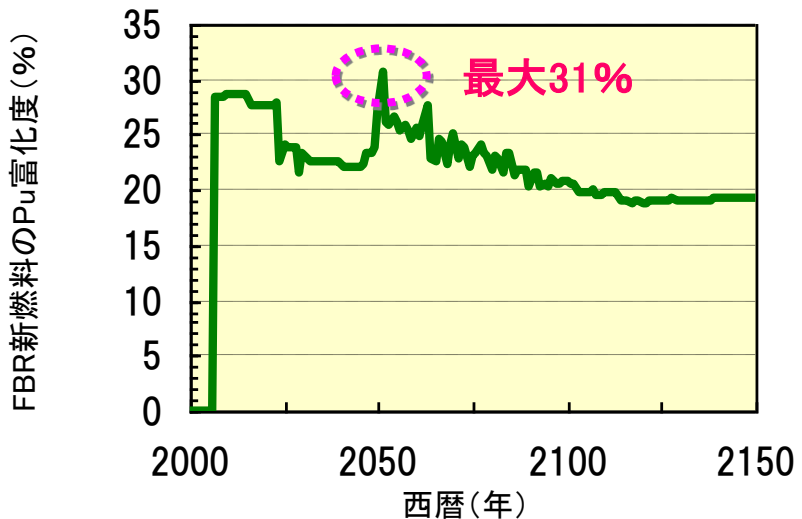
## 2.4.7 FBR新燃料中のプルトニウム富化度の推移

●第二L再でプルスール燃料とUOX燃料を混合再処理した場合のFBR新燃料中のPu富化度は最大約27~29%、FBR再処理でプルスール燃料を優先的に処理した場合のFBR新燃料中のPu富化度は最大約31%と見込まれる。



ケース1 (LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1:1で処理)

ケース2 (LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1.5:8.5で処理)

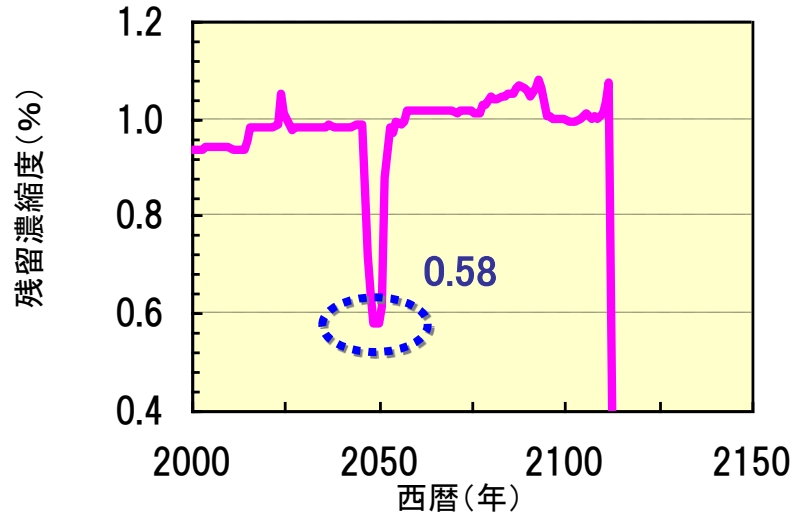


ケース3 (LWR-MOXをFBR再処理施設で処理)

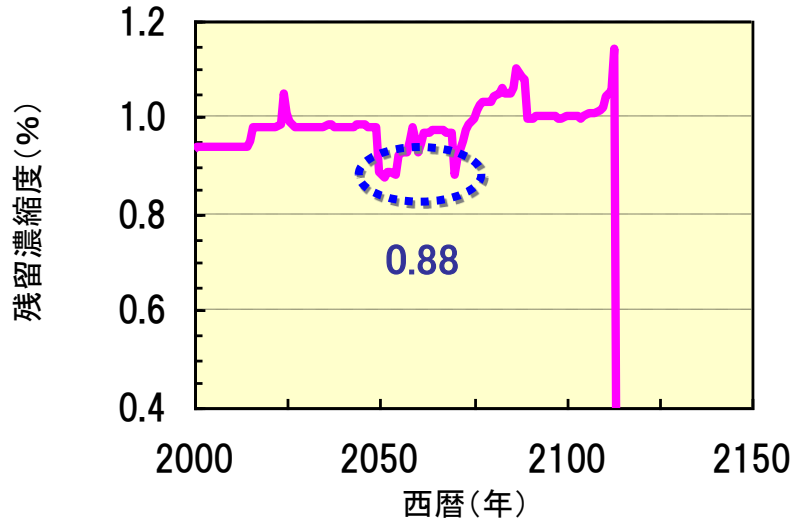
ケース4 (LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1:1処理+FBR燃料処理)19

## 2.4.8 軽水炉再処理における回収ウランの残留濃縮度

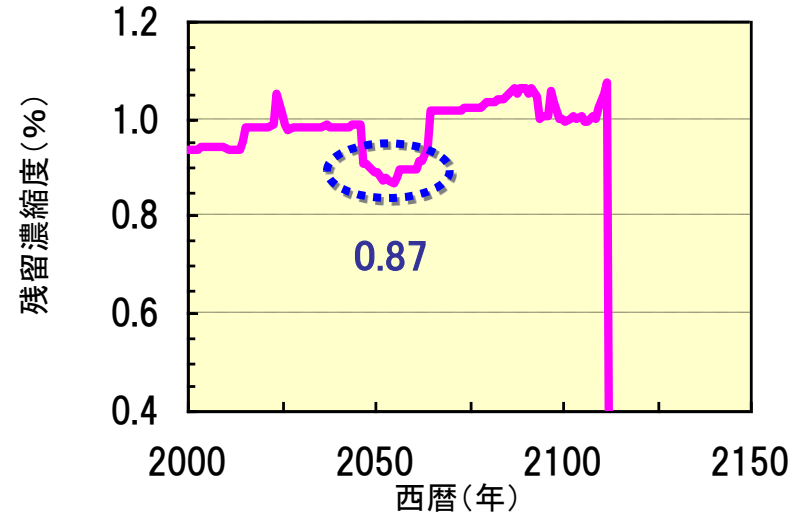
●第二L再でプルサーマル燃料とUOX燃料を1:1の混合比で再処理すると、回収ウランの残留濃縮度も天然ウラン濃度以下の0.58%程度まで一時的に低下する(ケース1、ケース4)。



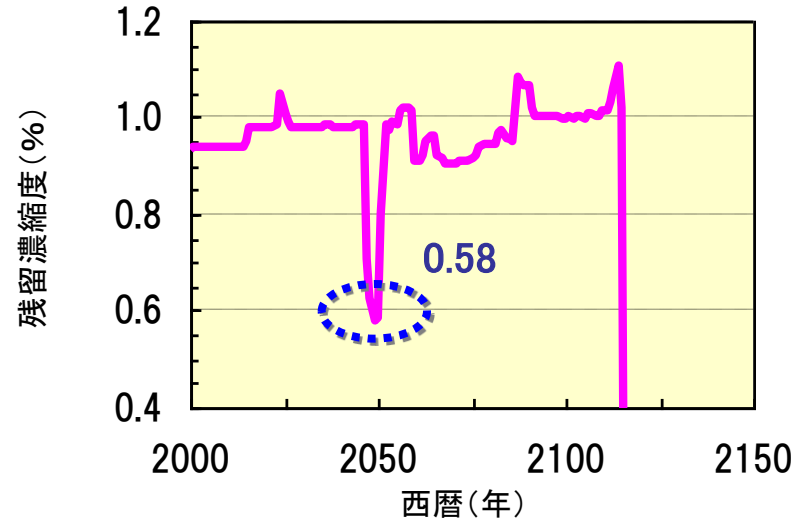
ケース1 (LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1:1で処理)



ケース3 (LWR-MOXをFBR再処理施設で処理)



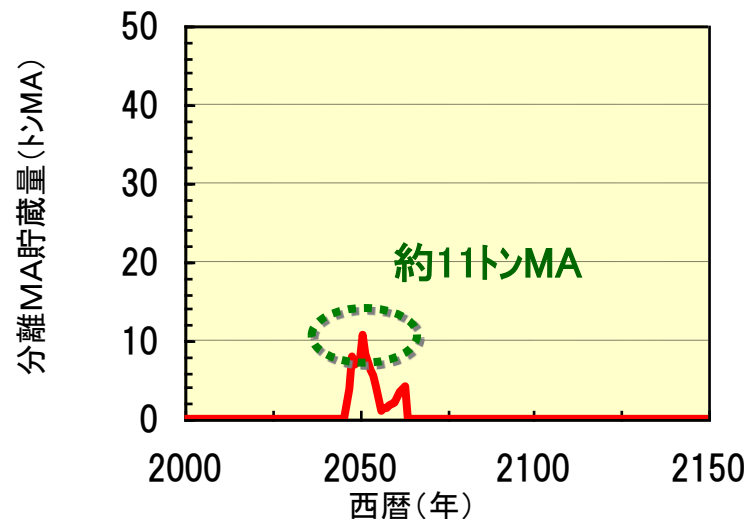
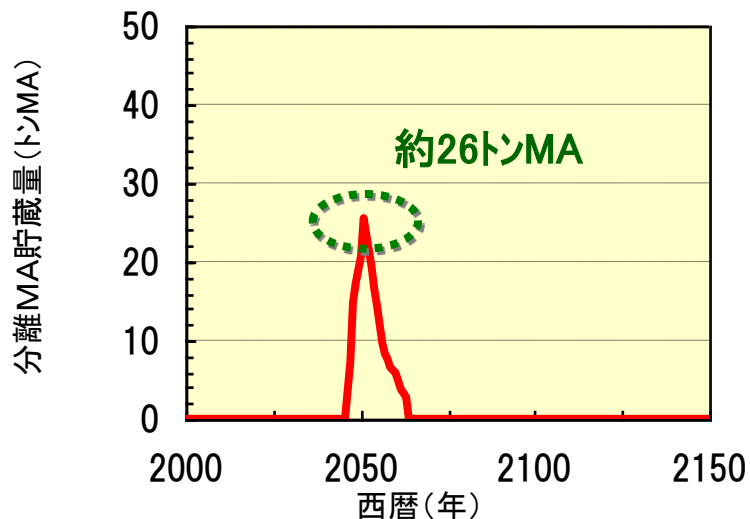
ケース2 (LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1.5:8.5で処理)



ケース4 (LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1:1処理+FBR燃料処理)20

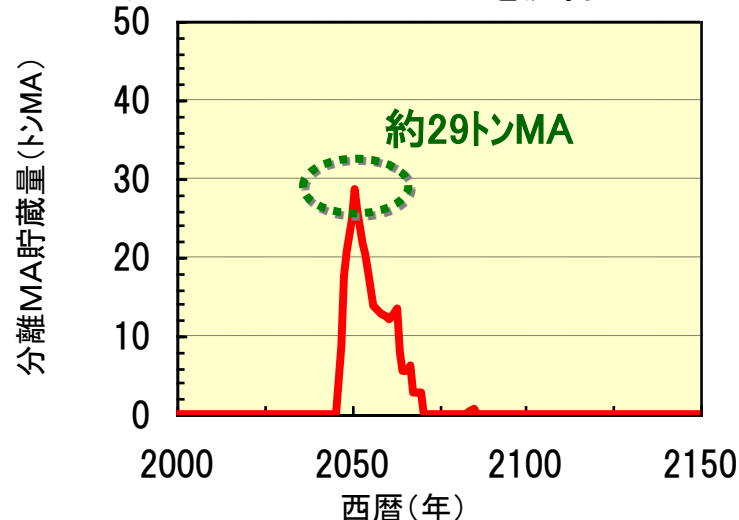
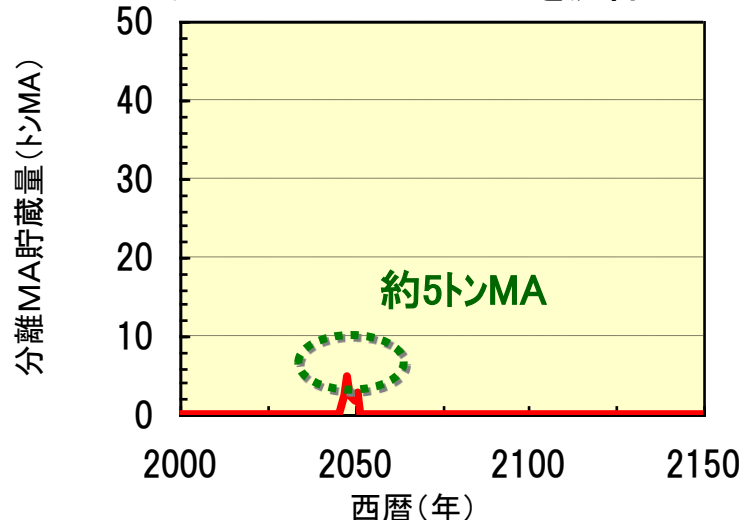
## 2.4.9 分離MA貯蔵量(FBR新燃料中のMA装荷率上限5%時)

●FBRの本格導入前に第二L再でプルサーマル燃料とUOX燃料を1:1の混合比で再処理した場合、MA回収量がFBRのMA消費量を上回るため、分離MA貯蔵量が約26～29トンMAまで増大する(ケース1、ケース4)。



ケース1 (LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1:1で処理)

ケース2(LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1.5:8.5で処理)



ケース3 (LWR-MOXをFBR再処理施設で処理)

ケース4(LWR-MOXとLWR-UOXを混合比1:1処理+FBR燃料処理)21

## 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ

### 2.4.10 FBR移行期の再処理概念に関する解析結果のまとめ

- FBR再処理でプルサーマル燃料を優先的に再処理するケース3は、FBR新燃料のPu富化度が一時的に最大31%程度まで増大する点を除けば、核燃料物質の回収量や物性が比較的安定しており、プルサーマル燃料とUOX燃料を1.5:8.5の混合比で再処理するケース2がそれに続く。

第二再処理の主なサイクル諸量計算結果の一覧

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
第二L再の年間プルトニウム回収量 (ウラン燃料再処理時の倍数)	約4倍	約2倍	1倍	約3~4倍
回収プルトニウムの 最小Puフィッサイル率(-)	0.48	0.53	0.58	0.48
FBR新燃料の最大Pu富化度(%)	約29	約27	約31	約28
回収ウランの最低残留濃縮度(%)	0.58	0.87	0.88	0.58
最低残留濃縮度での 回収ウラン濃縮役務(トンSWU)	約470	約800	約940	約550
分離MA最大貯蔵量(トンMA)	約26	約11	約5	約29

ケース1：第二L再でプルサーマル燃料とUOX燃料を1:1の混合比で再処理

ケース2：第二L再でプルサーマル燃料とUOX燃料を1.5:8.5の混合比で再処理(ケース1の代替案)

ケース3：FBR再処理でプルサーマル燃料を優先的に再処理

ケース4：第二L再でプルサーマル燃料とUOX燃料を5:5の混合比で処理し、FBR導入後はFBR燃料とUOX燃料を1:6の混合比で処理

○ 最も良好な結果、 それに次ぐ良好な結果

## 2. 第二再処理の将来像に係るケーススタディ



### 2.5 考察

#### 1) ケース1～ケース4の共通的な特徴

##### ① 制約条件の充足性

- ・FBRの導入に必要なプルトニウムが確保され、移行期間60年で全てFBRに切り替わる
- ・六ヶ所再処理工場の最大MOX貯蔵量は制限値を超えない
- ・再処理施設の全操業期間平均稼働率は80%以上が見込まれる

##### ② プラント運用状況

- ・プルサーマルの導入期間は35年程度
- ・第二再処理(第二L再) 運開時期は2047年頃、年間処理規模1200トン/年  
全操業期間平均稼働率は95%以上
- ・第二再処理(F再) 運開時期は2050～2060年頃、導入規模は200トン/年  
最大処理規模は600トン/年
- ・第二再処理(L/F共用) 年間処理規模は第二L再とF再の合計に等しい1400トン/年

#### 2) 留意事項

第二L再でプルサーマル燃料やFBR燃料の再処理を行う場合、Puの年間回収量が一時的に2～4倍程度まで大きく変動するため、工程設計の実現性や経済性について技術的検討を踏まえた評価が必要である。



### 3. 将来の不確実性要因の影響について

- 1) 将来の原子力発電設備容量 (58GWe, 80GWe, 110GWe)
- 2) FBR導入開始時期(2040年、2050年、2070年)

# 3. 将来の不確実性要因の影響について

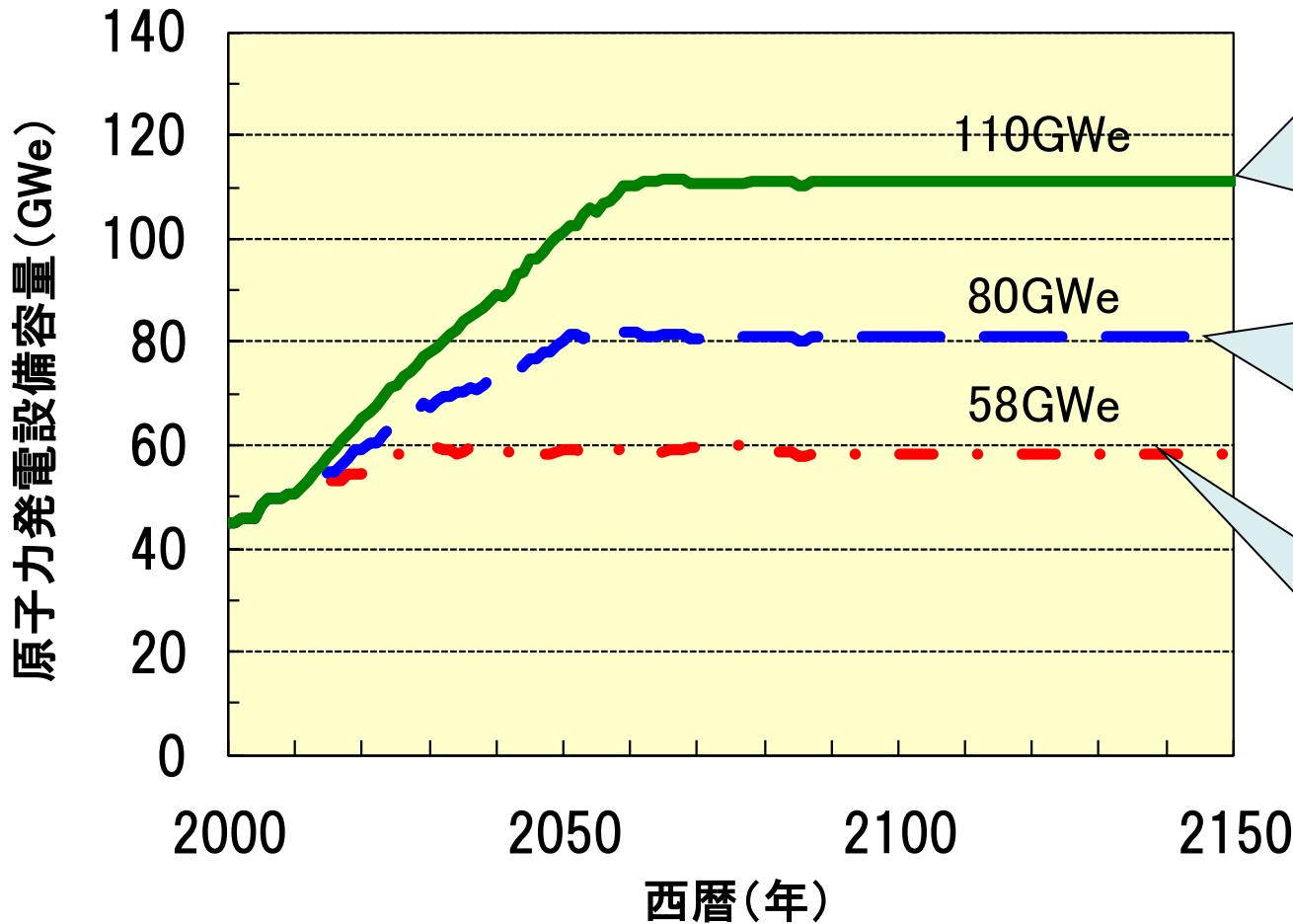


## 評価ケース一覧

ケース No.	原子力発電 設備容量(GWe)			FBR導入開始時期 (西暦)			第二軽水炉再処理の運用				
							プルサーマル燃料		FBR燃料		
	58	80	110	2040	2050	2070	UOX燃料との混合比		FBR再処 理施設で 処理	FBR再処 理施設で 処理	UOX燃料と 1:6で混合 処理
							1:1	1.5:8.5			
1	○				○		○			○	
2	○				○			●		○	
3	○				○				●	○	
4	○				○		○				●
5		●			○		○				
6			●		○		○				
7	○			●			○				
8		●		●			○				
9			●	●			○				
10	○					●	○				
11		●				●	○				
12			●			●	○				
13	○				○		○				●
備考											

# 3. 将来の不確実性要因の影響について

## 3.1.1 原子力発電設備容量の想定条件



「民生部門での大きな電力シフト」あるいは「運輸部門での水素利用とCO<sub>2</sub>制約の強化」の社会  
電気事業者のCO<sub>2</sub>排出量は2050年以降1990年の1/2で一定、運輸部門は2100年にほぼゼロ

「電力化率50%程度」あるいは「運輸部門での電気自動車、燃料電池自動車へ移行」の社会  
電気事業者のCO<sub>2</sub>排出量は1990年水準、運輸部門は2100年にほぼゼロ

「電力化率45%」の社会  
電気事業者のCO<sub>2</sub>排出量は1990年水準

原子力発電設備容量の想定条件

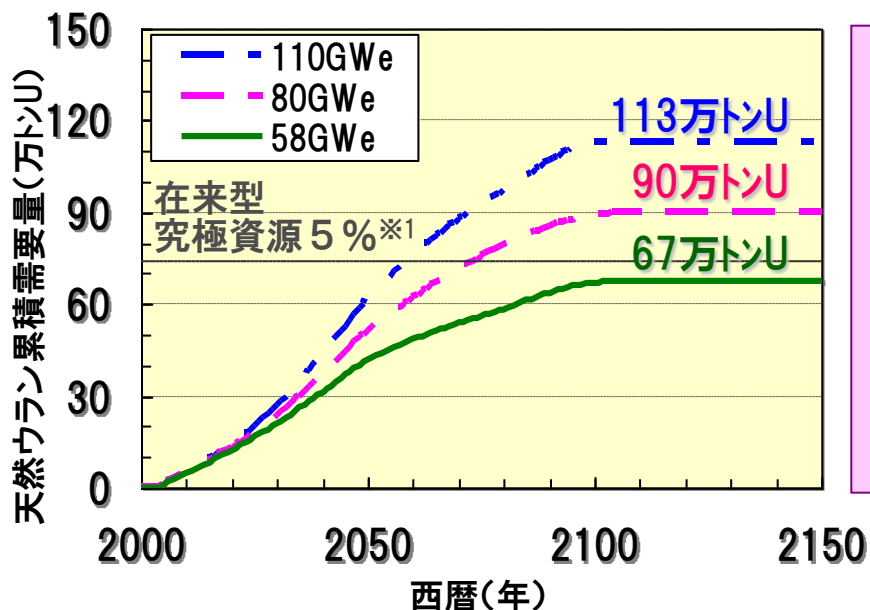
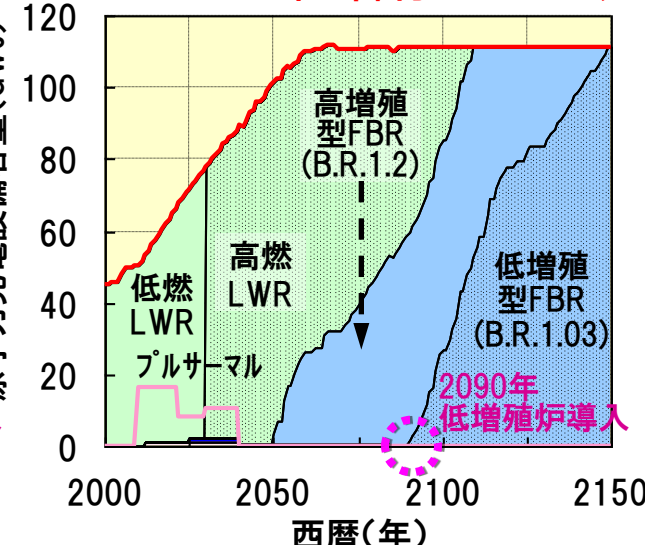
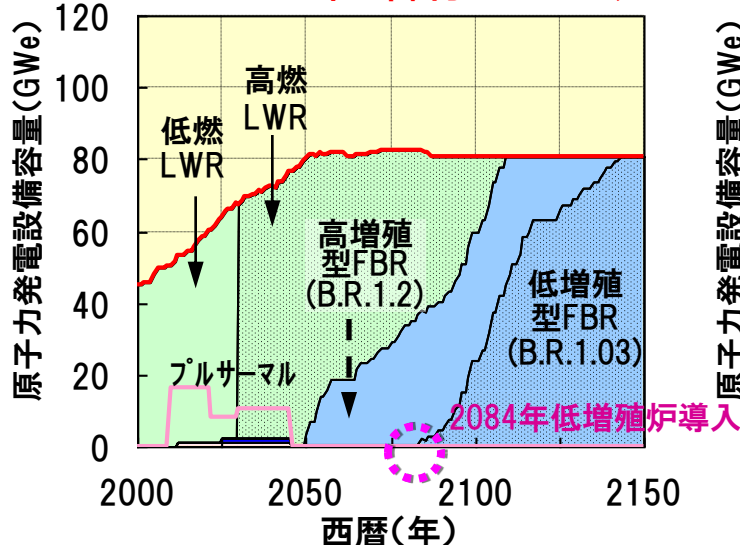
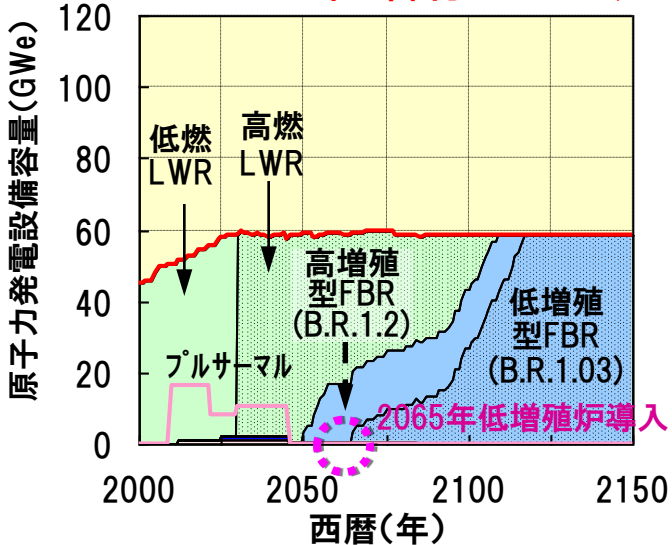
### 3.1.2 原子力発電設備容量増加に対する柔軟性(移行期間60年の成立性)



ケース1: 2030年以降約58GWe一定

ケース5: 2050年以降約80GWe一定

ケース6: 2060年以降約110GWe一定



天然ウラン累積需要量の推移

- ・FBRサイクル移行完了までの天然ウラン累積需要は、原子力発電設備容量が拡大した場合でも58GWeの約67万トンUに対し、80GWeで約90万トンU、110GWeでは約113万トンUに抑えられる。
- ・軽水炉サイクルからFBRサイクルへの移行期間の短縮は、低増殖型FBRの導入を先送りと軽水炉の強制廃止により可能。
- ・なお、原子力発電設備容量の拡大により天然ウラン需要量が大幅に増加するため、ウラン資源の確保が将来課題となる。

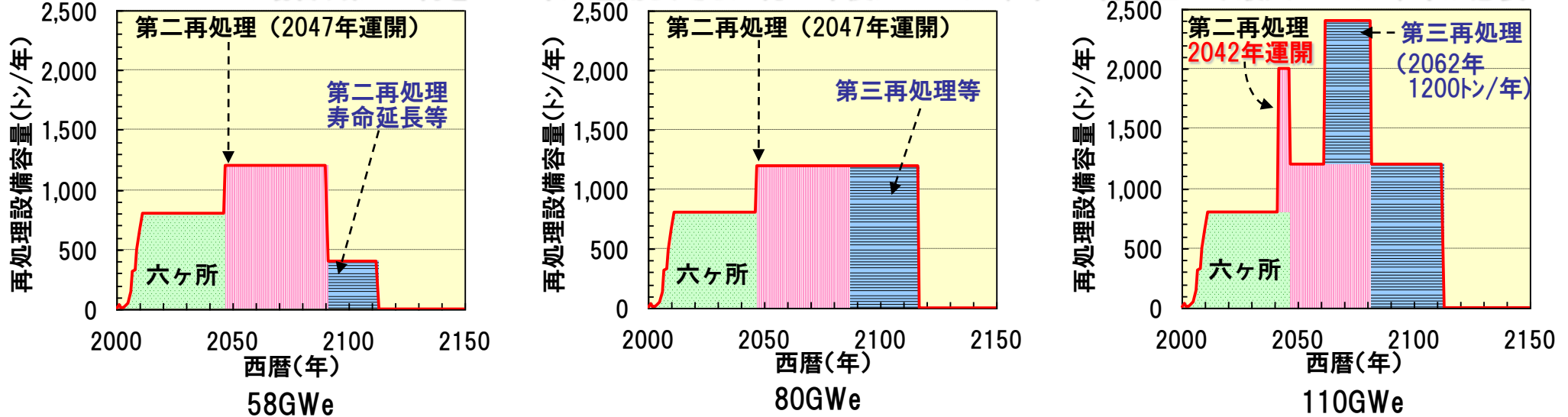
(ケース1: 第二L再でプルサーマル燃料とUOX燃料を1:1の混合比で再処理)

※1 在来型究極資源1,480万トンU (OECD/NEA-IAEA「Uranium 2005:Resources, Production and Demand」(2006)より)

### 3.1.3 原子力発電設備容量増加に対する柔軟性(再処理条件の包含性)

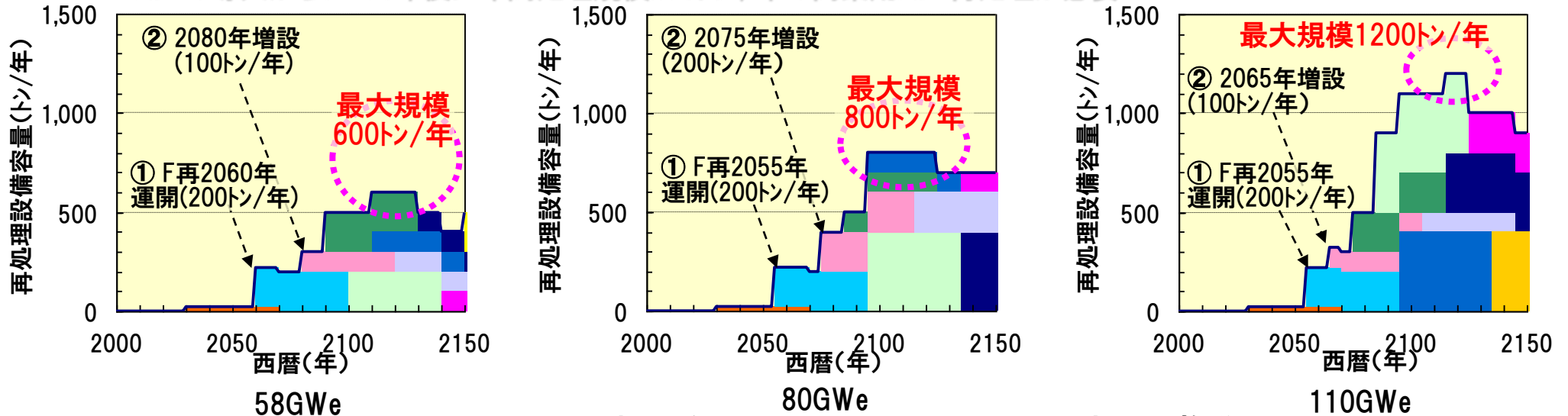


●110GWeの場合、第二L再を2042年に運開し、さらに約20年後に1200トン/年のL再を立上げ最大2400トン/年が必要



原子力発電設備容量増加に対する軽水炉再処理設備容量の推移

●FBRの導入から5~10年後に年間処理規模200トン/年の商業用FBR再処理が必要



原子力発電設備容量増加に対するFBR再処理設備容量の推移

# 3. 将来の不確実性要因の影響について

## 3.1.4 原子力発電設備容量増加に対する柔軟性

### (1) 移行期間60年の成立性

- ①環境あるいはエネルギー保障の問題解決のために、将来の原子力発電設備容量が基本条件の58GWeから80GWe、さらには110GWe程度まで増大した場合でも、増殖比1.2の高増殖型FBRと適切な再処理計画により、**移行期間60年で軽水炉からFBRに切り替え可能**である。
- ②**原子力発電設備容量の拡大**により天然ウラン需要量が大幅に増加するため、**ウラン資源の確保が将来課題**となる。

### (2) 第二軽水炉再処理(第二L再)について

- ①第二L再の年間処理規模は、原子力発電設備容量の影響をあまり受けず、**1,200トン/年で対応可能**である。
- ②軽水炉再処理の最大処理規模は、原子力発電設備容量が**58GWeおよび80GWeの場合1,200トン/年**。一方、厳しいCO<sub>2</sub>制約を想定した**110GWeでは2,400トン/年**になる。

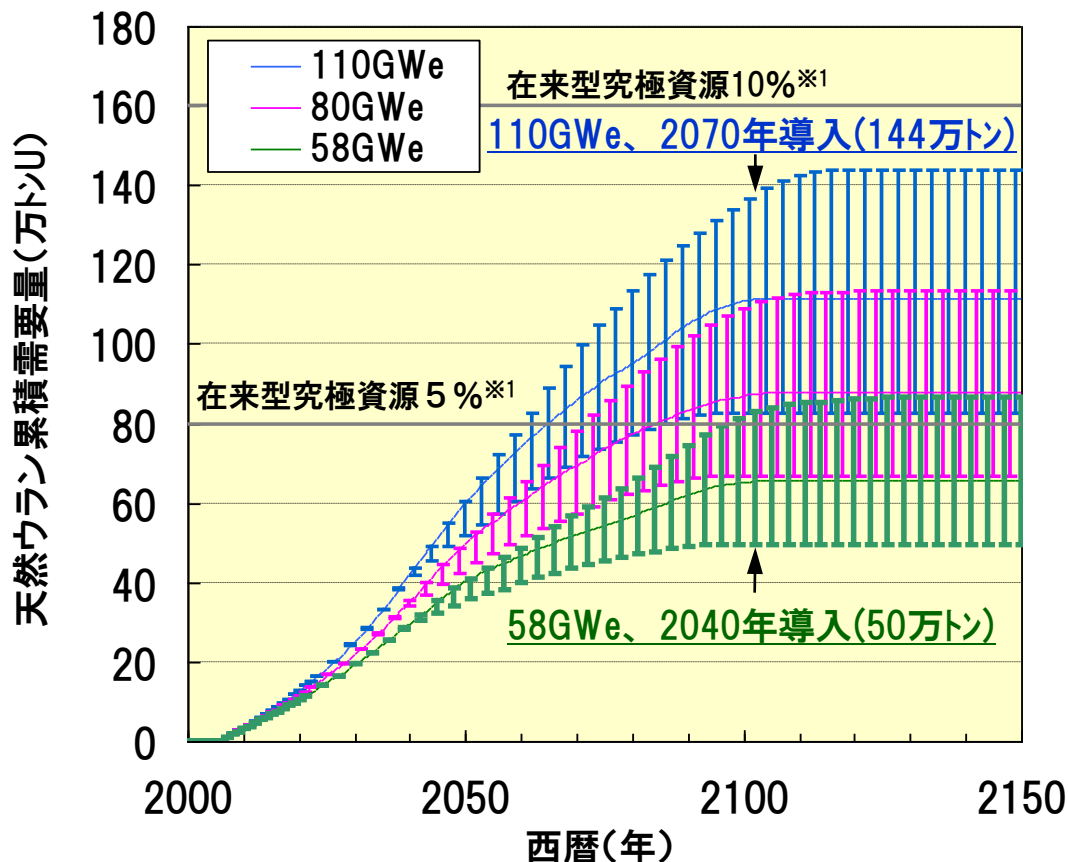
### (3) FBR再処理施設について

- ①商業用FBR再処理の導入要件として、**FBRの導入開始から5～10年後、年間処理規模200トン/年が目安**になる。
- ②最大処理規模は、58GWeの600トン/年に対して、80GWeで800トン/年、110GWeでは1200トン/年が必要となる。

### 3.2.1 FBR導入開始時期の影響(1) —天然ウラン累積需要量—



- 原子力発電設備容量58～110GWeにおいて、FBR導入開始時期が2040年～2070年で変化した場合、**天然ウラン累積需要量は58GWeの約50～86万トンUに対し、80GWeで約67～113万トンU、110GWeでは約82～144万トンUになる。**
- 原子力発電設備容量の拡大やFBR導入開始の遅れ**により天然ウラン需要量が大幅に増加するため、**ウラン資源の確保が将来課題**となる



天然ウラン累積需要量

(単位：万トンU)

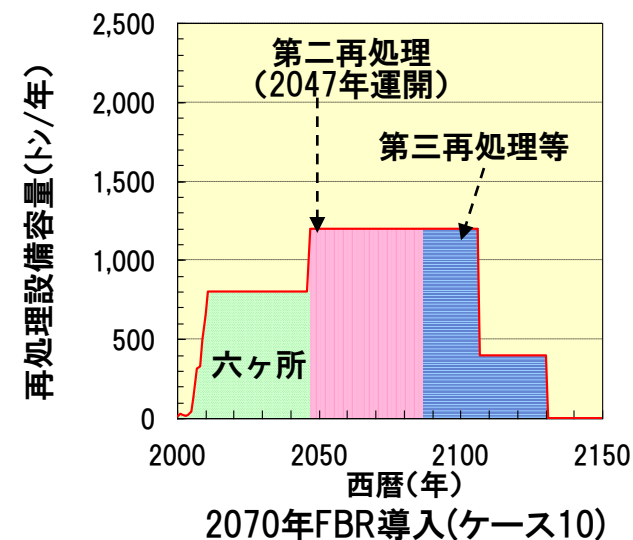
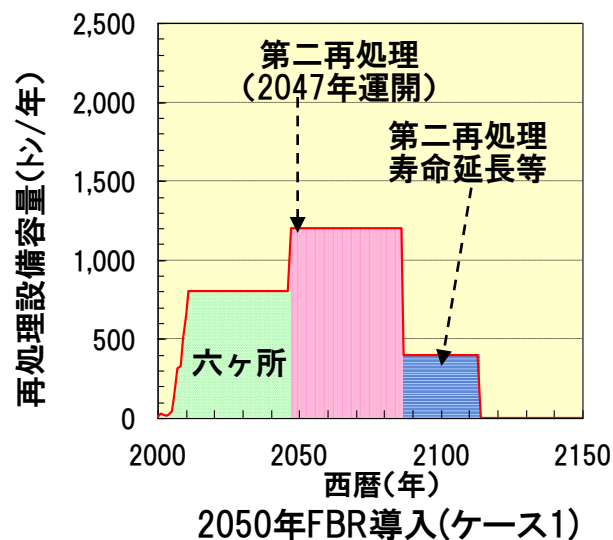
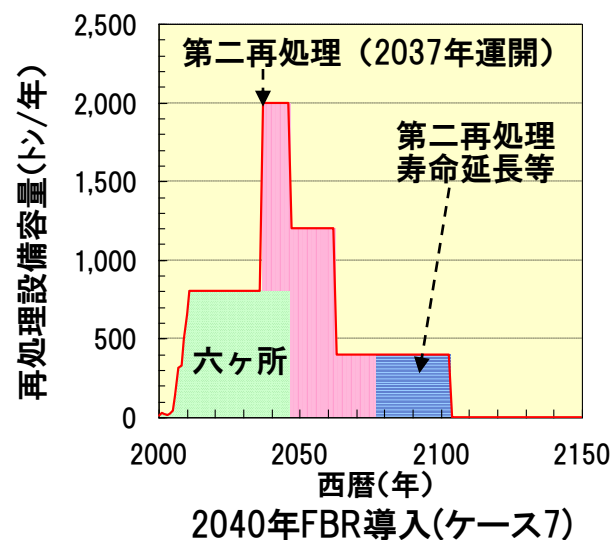
原子力 発電設 備容量	FBR導入開始時期		
	2040年	2050年	2070年
58 GWe	50 (ケース7)	66 (ケース1)	86 (ケース10)
80 GWe	67 (ケース8)	88 (ケース5)	113 (ケース11)
110 GWe	82 (ケース9)	111 (ケース6)	144 (ケース12)
備考	・ケース1、同じく5～12の解析結果 ・FBRは代表的な導入ペースで導入		

天然ウラン累積需要量に対するFBR導入開始時期の影響

※1 在来型究極資源1,601万トンU (OECD/NEA-IAEA『Uranium 2007:Resources, Production and Demand』(2008)より)

### 3.2.2 FBR導入開始時期の影響(2) —LWR再処理計画—

- **FBR導入開始が2040年に前倒しになり、且つ、移行期間60年以内で軽水炉サイクルからFBRサイクルに切り替える場合、原子力発電設備容量が2030年以降58GWe一定の条件では、年間処理規模1200トン/年の第二L再を2037年に運開し、六ヶ所再処理工場との併用で合計の年間処理規模として2000トン/年が必要**
- **FBR導入開始が2070年に遅れた場合、軽水炉サイクルの期間が長引くため第二L再~~に続く軽水炉再処理~~が必要になる。**

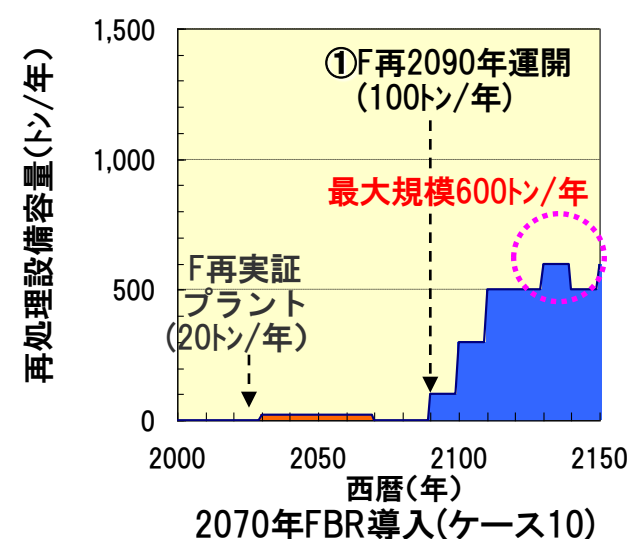
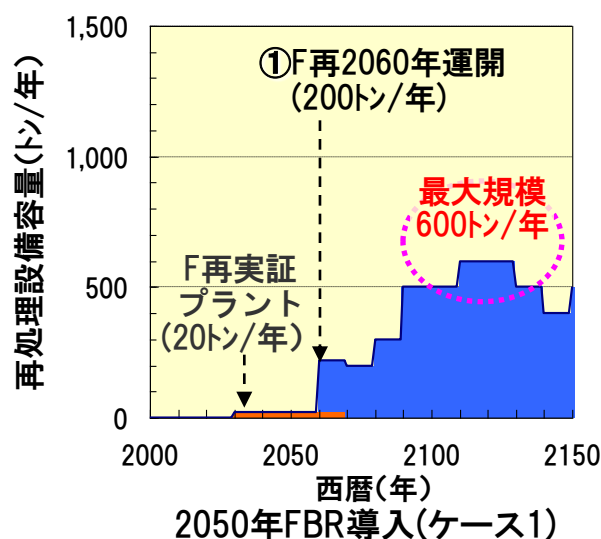
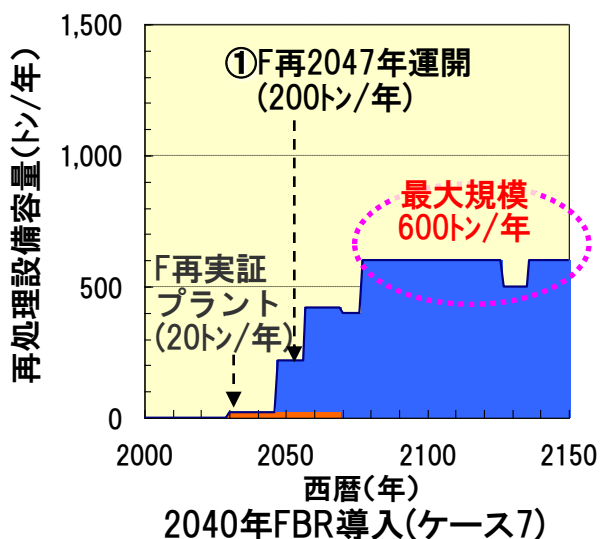


FBR導入開始時期を変えた場合の第二再処理(LWR再処理)への影響 —58GWeの場合—



### 3.2.3 FBR導入開始時期の影響(3) —FBR再処理計画—

- **FBR導入開始から約10~20年後**に年間処理規模**100~200トン/年**の商用FBR再処理が必要となる。
- 原子力発電設備容量が2030年以降**58GWe一定の場合**、FBR再処理の**最大処理規模はFBR導入開始時期の影響をあまり受けず600トン/年**で対応可能である。



FBR導入開始時期を変えた場合のFBR再処理への影響 —58GWeの場合—

# 3. 将来の不確実性要因の影響について

## 3.2.4 FBR導入開始時期の影響のまとめ

### (1) 原子力発電設備容量の拡大やFBR導入開始の遅れ

- 天然ウラン需要量が大幅に増加するため、ウラン資源の確保が将来課題となる。

### (2) 第二軽水炉再処理(第二L再)について

- ① FBR導入開始が2040年に前倒しになり、且つ、移行期間60年以内で軽水炉サイクルからFBRサイクルに切り替える場合、原子力発電設備容量が2030年以降58GWe一定の条件でも、年間処理規模 1200トン/年の第二L再を2037年に運開し、六ヶ所再処理工場との併用で合計年間処理規模として2000トン/年が必要。
- ② FBR導入開始が2070年に遅れた場合、軽水炉サイクルの期間が長引くため 第二L再に続く 軽水炉再処理が必要になる。

### (3) FBR再処理施設について

- FBR導入開始から約10～20年後に年間処理規模 100～200トン/年の商用FBR再処理が必要となる。

## 4. 発電用FBRによるMA均質リサイクルの効果

### 1) MA一括リサイクルの効果

- ・MAリサイクルにおけるHLWへのMA移行量
- ・第二再処理での使用済燃料処理とMAリサイクル燃料の発熱
- ・MA濃度上限の影響

### 2) MA部分リサイクル( $N_p$ リサイクル)の効果

### 3) MA遅延リサイクル( $A_m \cdot C_m$ の冷却年数)の効果

# 4.発電用FBRによるMA均質リサイクルの効果

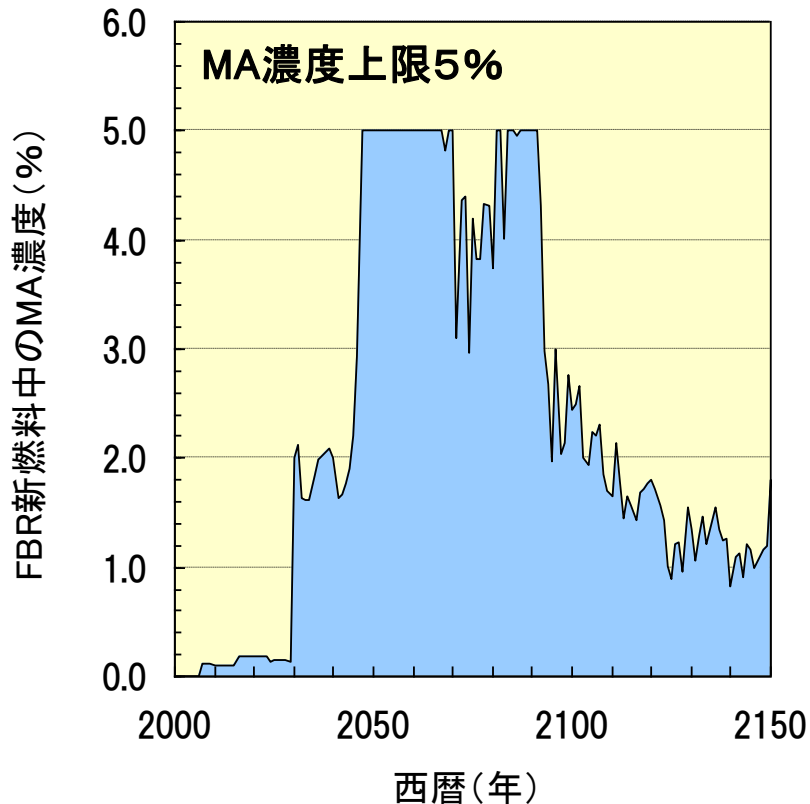


## 4.1 解析ケース

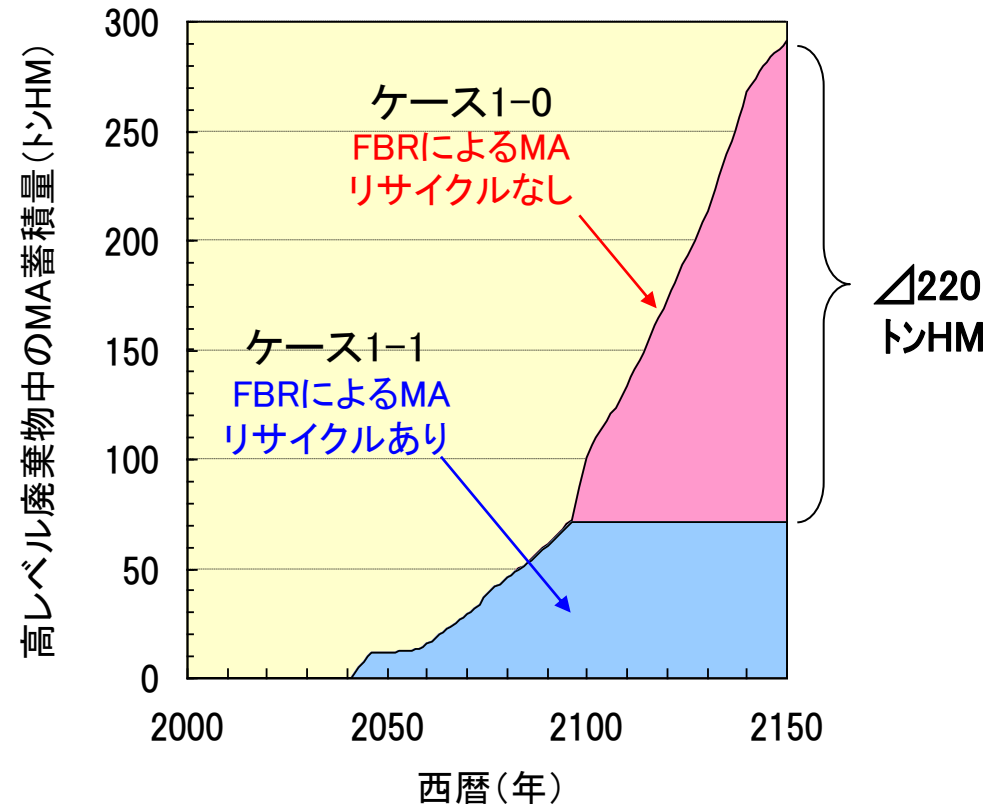
回収MAの処理方法				第二再処理での使用済燃料処理 <sup>※1</sup>			
				LWR-MOX使用済燃料			LF共用
				L再で1:1	L再で1.5:8.5	F再で処理	
HLWとして一括処分				1 - 0	—	—	—
FBRによる リサイクル	MA一括 リサイクル	MA濃度の上限	5%	1 - 1	2 - 1	3 - 1	4 - 1
			4%	1 - 2			
			3%	1 - 3			
	MA部分 リサイクル <sup>※2</sup>	Npリサイクル(Am/Cm処分)		1 - 4			
	MA遅延 リサイクル <sup>※2</sup>	L再回収MAのみ45年遅延		1 - 5			
L再回収MAとF再回収Am/Cmを30年遅延		1 - 6					
備考	<p>※1 原子力発電設備容量2030年以降約58GWe一定、2050年FBR導入開始、移行期間60年で全基FBRに更新 回収ウランの残留濃縮度が天然ウラン濃度以上の場合は再濃縮利用を行う</p> <p>※2 部分リサイクルと遅延リサイクルにおけるMA濃度の上限は5%、回収Uは再濃縮利用を想定</p>						

## 4.2 MAリサイクルによるガラス固化体へのMA移行量の軽減効果 (ケース1-0とケース1-1の比較)

- F再実証プラント及び第二L再以降の回収MAをFBRでリサイクルするケース1-1の場合、FBR炉心燃料中のMA装荷率(MA濃度)は、軽水炉からFBRへの移行過程で約5%の期間が50年程度続き、その後20年間かけて約3%から約1%に徐々に低下。
- 軽水炉およびFBRの使用済燃料から回収したMAをFBRでリサイクルした場合、ガラス固化体へ移行するMA量を大幅に軽減できる。



FBR新燃料中のMA濃度(ケース1-1)



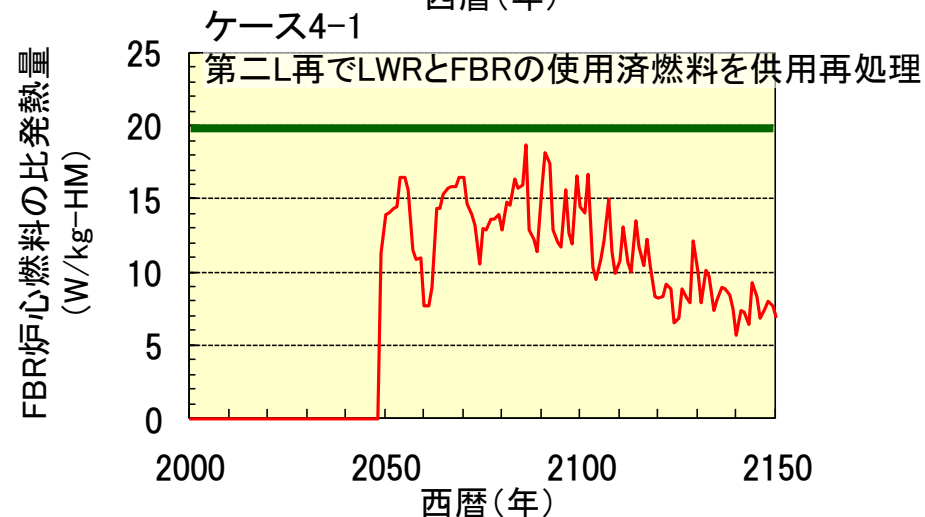
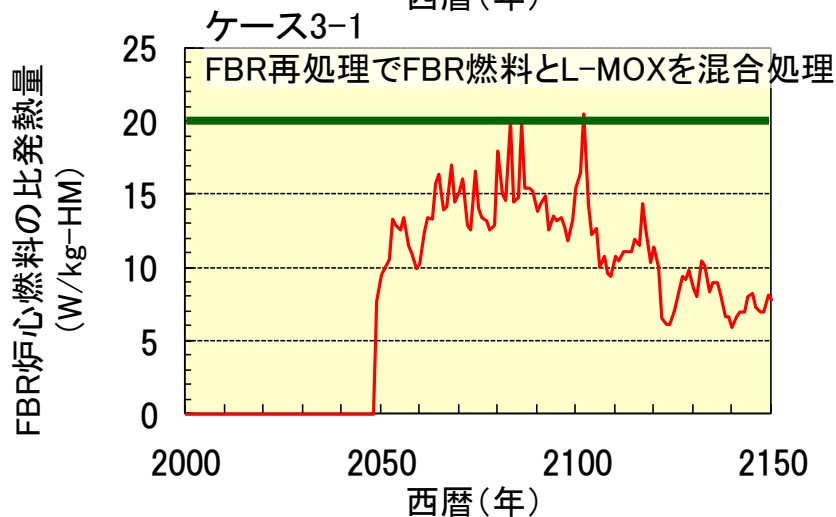
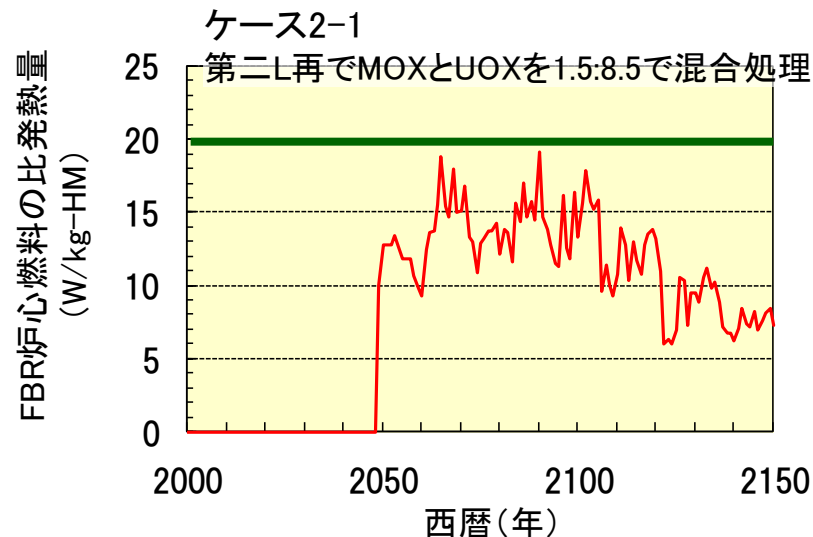
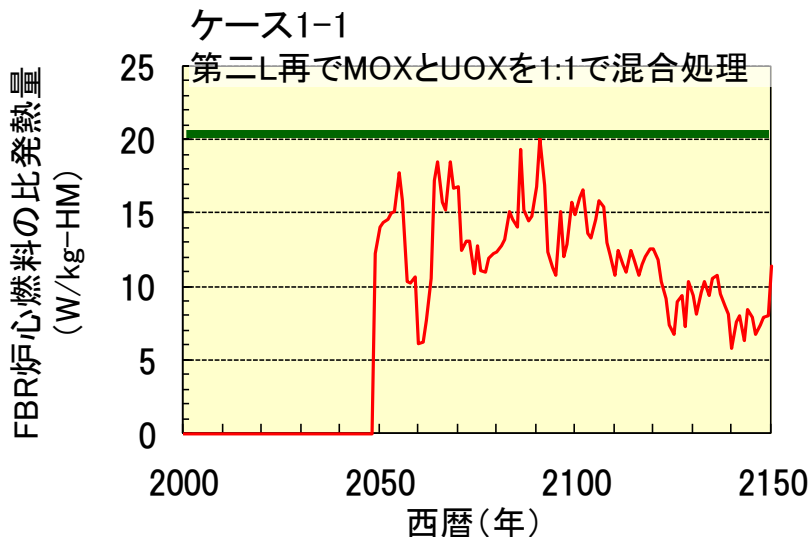
ガラス固化体中のMA蓄積量(処分時)

# 4.3 第二再処理での使用済燃料処理とTRU製品の比発熱量



(ケース1-1、2-1、3-1、4-1の比較)

●第二再処理で処理される使用済燃料の種類や混合比が異なっても、MA濃度上限5%でのTRU製品の比発熱量(単位重量あたりの発熱量)は、概ね5~20W/kgの範囲と見込まれ、燃料製造の制限値20W/kgをほぼクリアする

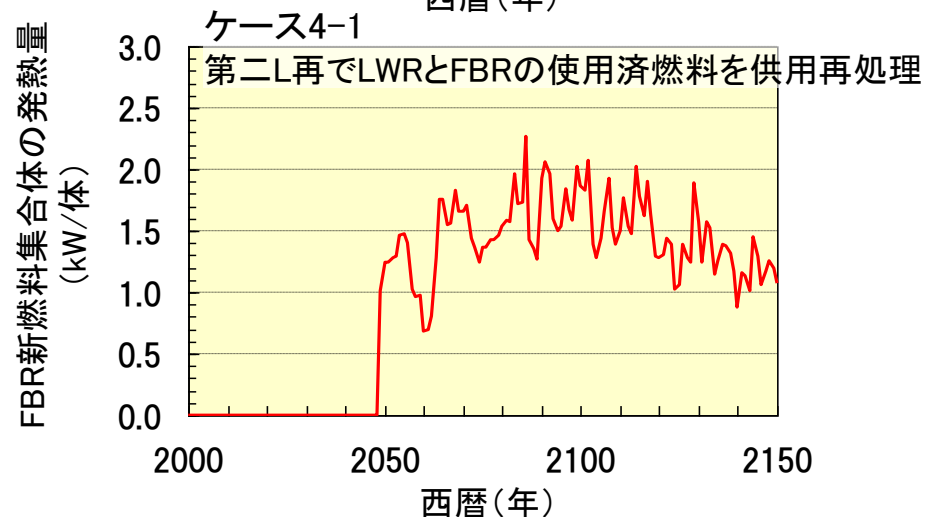
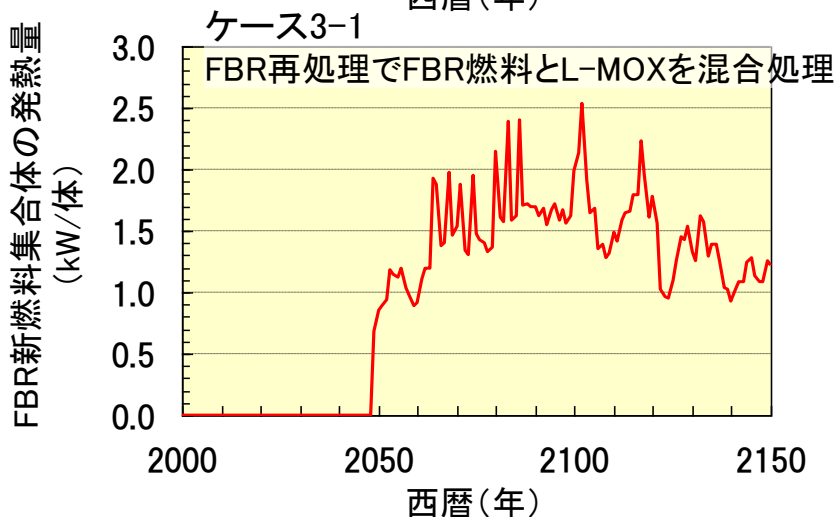
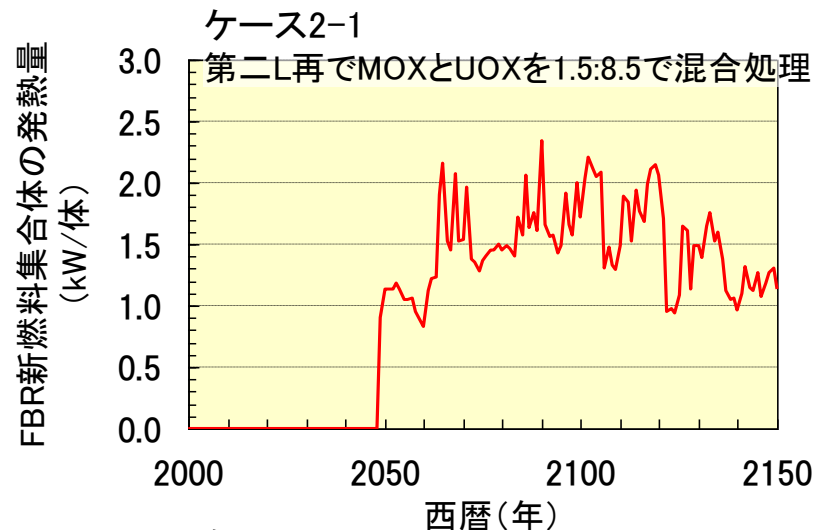
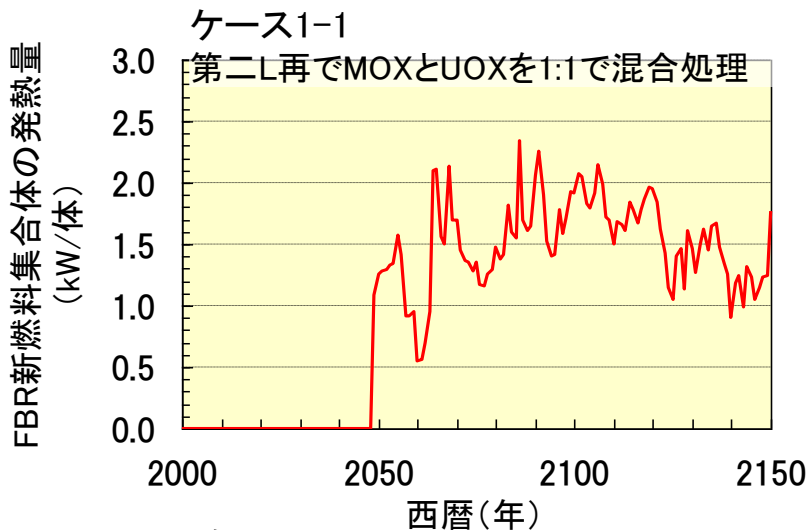


FBR炉心燃料用TRU製品の比発熱量

# 4.4 第二再処理での使用済燃料処理とFBR新燃料集合体発熱量 (ケース1-1、2-1、3-1、4-1の比較)



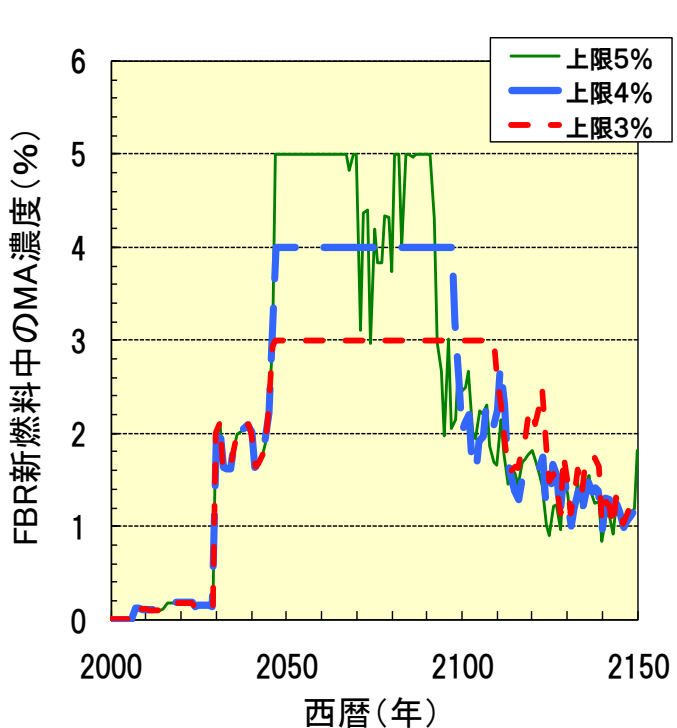
● FBR新燃料のMA濃度上限を5%とした場合、第二再処理で処理される使用済燃料の種類や混合比が異なっても、FBR新燃料集合体1体あたりの発熱量は概ね1.5~2.5kW/体。



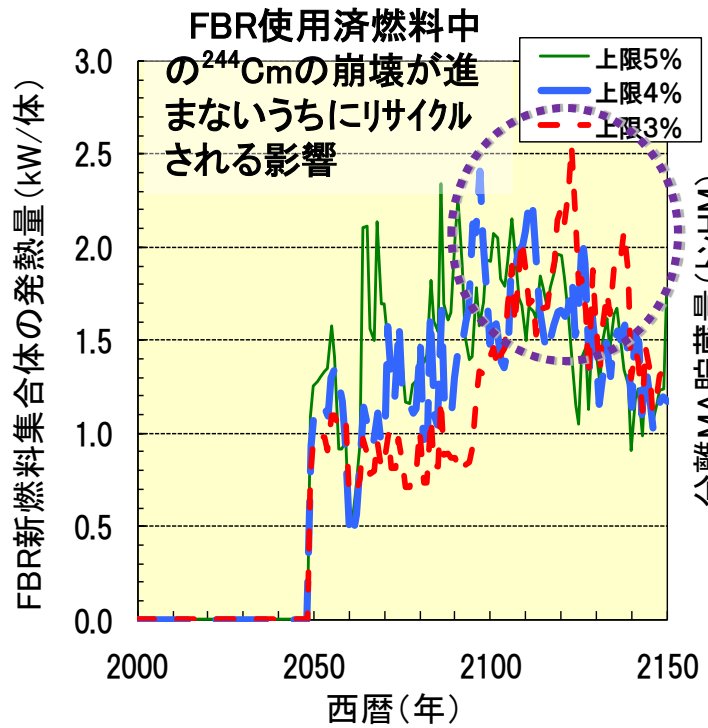
FBR新燃料集合体発熱量の推移

# 4.5 MA一括リサイクルの濃度上限を変えた場合の影響 (ケース1-1、1-2、1-3の比較)

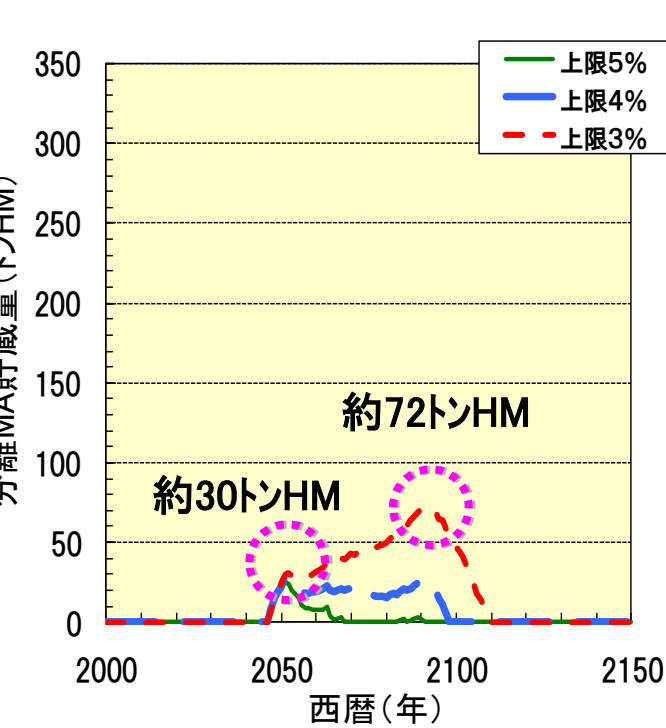
- FBR燃料中のMA装荷率の上限を5%から4%および3%に変更した場合(ケース1-1~ケース1-3)、FBR新燃料中のMA濃度が上限の5%、4%、3%で維持される期間は、それぞれ約20年、約50年、約60年と見込まれる。
- FBR燃料中のMA装荷率の上限を下げた場合、LWRからFBRへの移行期間中(2050~2100年)のFBR新燃料の発熱量は装荷率に概ね比例して低下するが、上限3%では2100年以降で $^{244}\text{Cm}$ の増加により発熱量が増大する。これは、原子炉取り出しから再処理までの冷却時間の短いFBR使用済燃料から回収されたMAが供給されるため、 $^{244}\text{Cm}$ の崩壊が進まないうちにリサイクルされることから、再処理時のFBR使用済燃料中の $^{244}\text{Cm}$ 濃度が逆に高くなることによる。
- 分離MA貯蔵量のピークは、MA装荷率の上限が5%と4%の場合は30トンHM程度、同じく3%の場合は72トンHM程度



FBR新燃料中のMA濃度



FBR新燃料集合体の発熱量



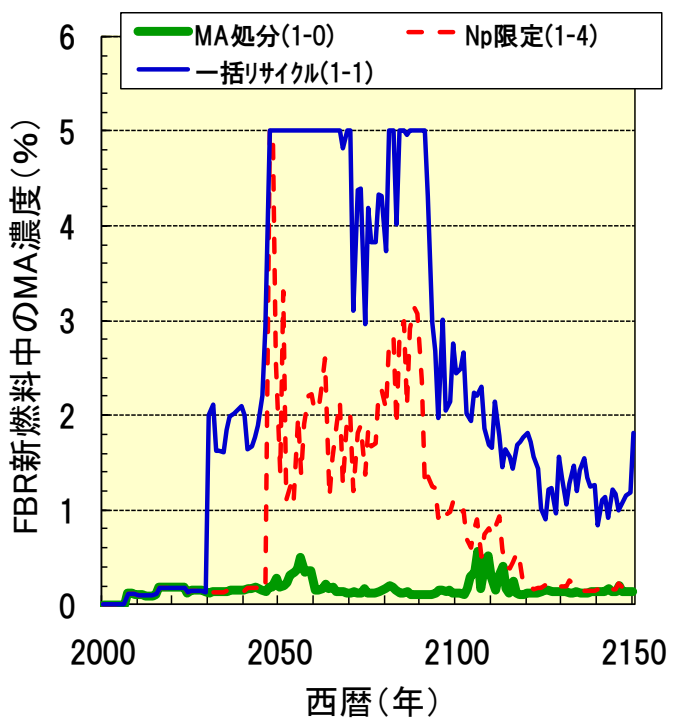
分離MA貯蔵量



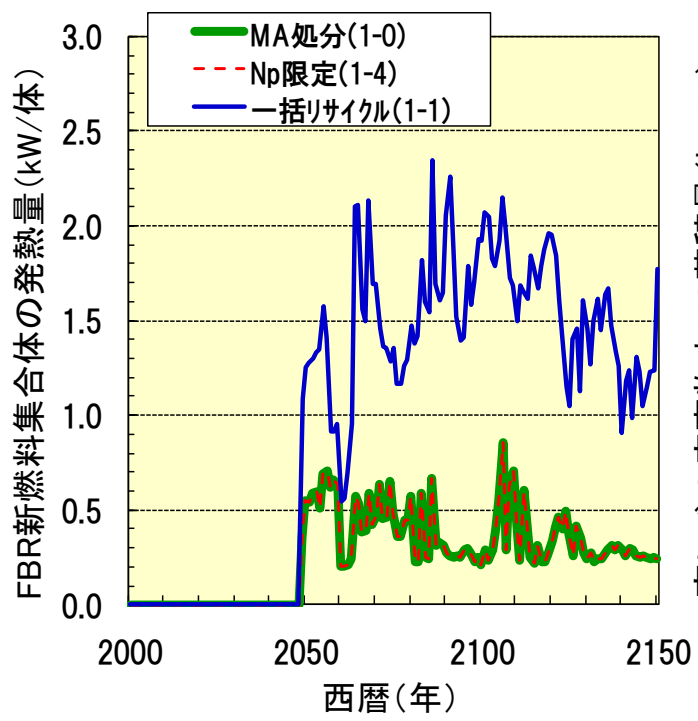
# 4.6 Np限定リサイクルの効果 (ケース1-4、1-1、1-0の比較)



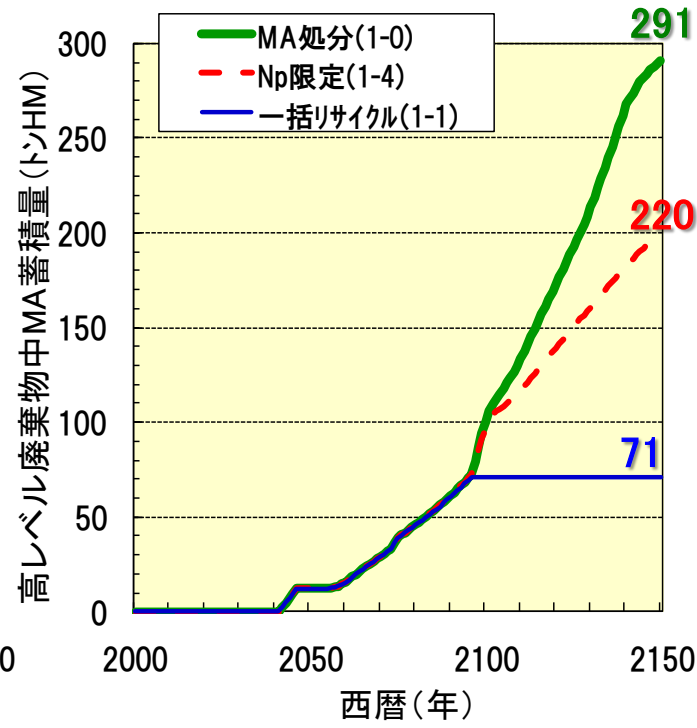
●第二L再およびFBR再処理で回収されたNpのみをFBR燃料として装荷し、AmとCmを処分する場合(ケース1-4)、新燃料集合体一体あたりの発熱量はMA処分(ケース1-0)とほぼ等しい約0.3~0.9kW/体に抑えられるが、HLW中のMA蓄積は2150年時点で220トン程度にとどまる。



FBR新燃料中のMA濃度



FBR新燃料集合体の発熱量



HLW中のMA蓄積量(処分時)<sub>40</sub>

## 4.7 MA遅延リサイクルの効果(ケース1-5、1-6の比較)

- LWR再処理から回収したMA(Am、Cm、Np)を45年後にFBR燃料として装荷するケース1-5の場合、FBR新燃料中のMA濃度が2090年頃に再び上限の5%まで上昇する。FBR新燃料の発熱量が2100年以降に上昇する原因は、冷却時間の短いFBR使用済燃料から回収されたMAが供給されるため、 $^{244}\text{Cm}$ の崩壊が進まないうちにリサイクルされることにより、FBR新燃料中のMA濃度が低くなるにもかかわらず、FBR使用済燃料中の $^{244}\text{Cm}$ 濃度が逆に高くなるためである。また、LWR燃料起源の $^{237}\text{Np}$ を親核種とする $^{238}\text{Pu}$ の濃度上昇も加わり、緩やかな上昇傾向を示す。
- LWR再処理から回収されたMAおよびFBR再処理から回収されたAmとCmを30年後にFBR燃料として装荷するケース1-6の場合、FBR新燃料中のMA濃度は一時的に上限の5%まで上昇するが、FBR新燃料集合体の発熱量は概ね1.0kW/体程度に抑えられている。
- なお、両ケースの分離MA貯蔵量のピークは約140~170トンHMになる。

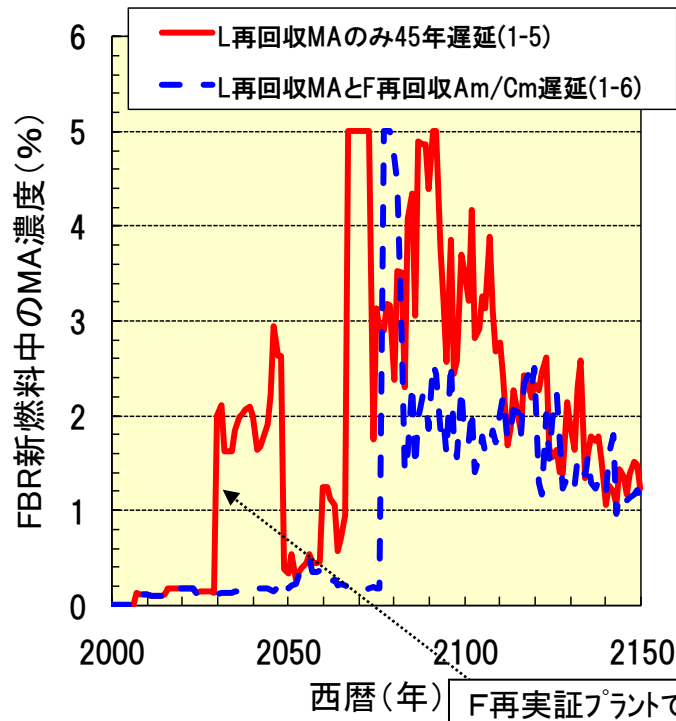


図16 FBR新燃料中のMA濃度

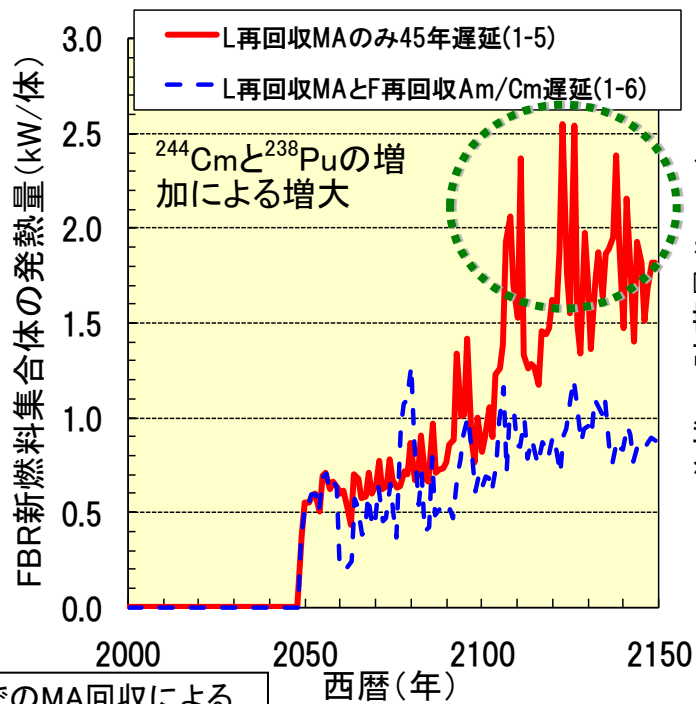


図17 FBR新燃料集合体の発熱量

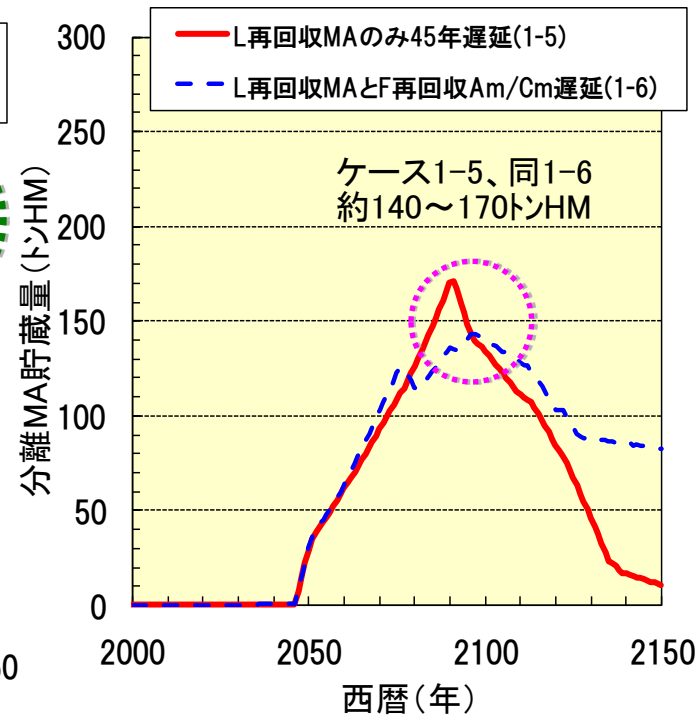
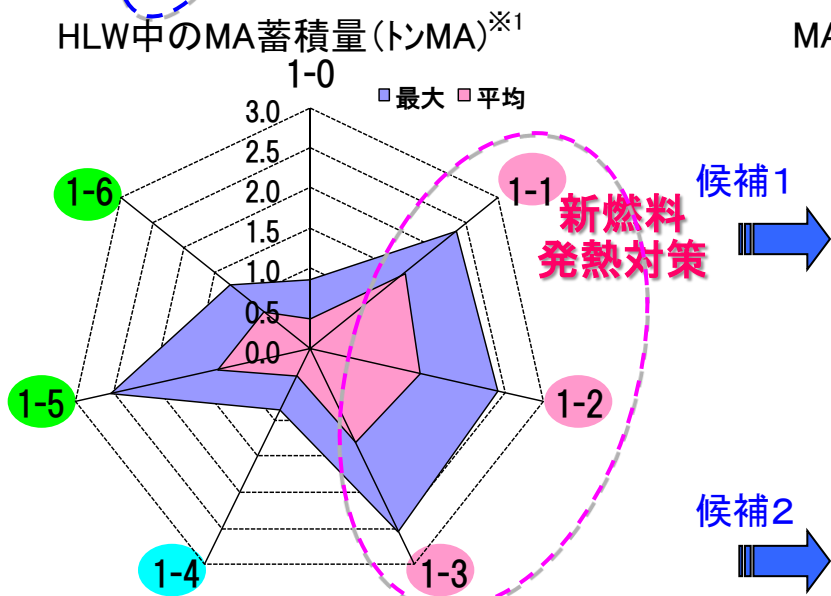
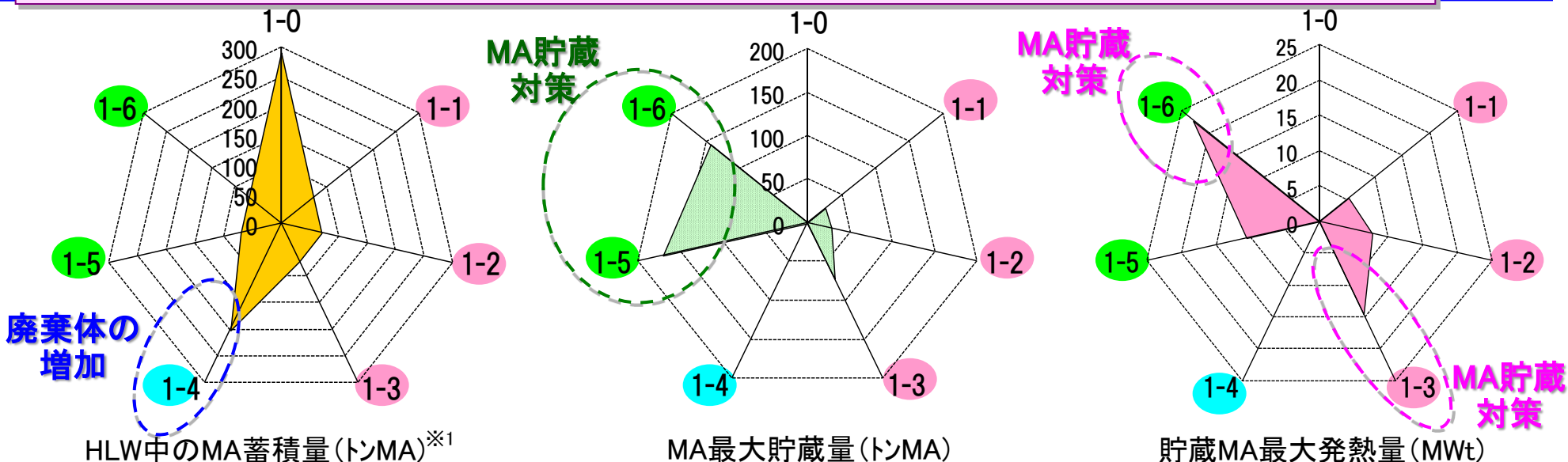


図18 分離MA貯蔵量

# 4.8 MA均質リサイクルのまとめ

●**MA濃度上限5%および4%の一括リサイクル**(ケース1-1、同1-2)は、燃料製造や燃料輸送においてFBR新燃料集合体の発熱量が許容できれば**最も可能性の高いMA均質リサイクル**と考えられる



ケースNo	MAリサイクル概念と想定される課題		
1-0	HLWとして一括処分 (廃棄体の増加)		
1-1	一括リサイクル (新燃料発熱対策) (MA貯蔵対策)	MA濃度の上限	5%
1-2			4%
1-3			3%
1-4	部分リサイクル (廃棄体の増加)	Npリサイクル(Am/Cm処分)	
1-5	遅延リサイクル	L再回収MAのみ45年遅延	
1-6	(MA貯蔵対策)	L再回収CmとF再回収Cmを30年遅延	

FBR新燃料集合体の発熱量 (kW/体)

※1 2150年時点にガラス固化体として処分されるMAの累積量

## 5. まとめ

### (1)高速増殖炉サイクル実用化調査研究について

- 研究開発の中核機関として、五者協議会ならびに国内外の研究機関等と連携を図りながら、魅力あるFBRサイクルシステムの開発を着実に進める。

### (2)第二再処理に係る検討について

- 実証プロセス研究会での検討ならびに2010年頃から原子力委員会で行われる「第二再処理工場に係る検討」を視野に入れ、軽水炉からFBRへの円滑移行を実現するための重要なプロセスとして、継続的に評価を進める。

### (3)将来の不確実性を考慮した柔軟性をもつ導入シナリオの構築

- エネルギー供給源としての本質（経済性、安全性、利便性、信頼性等）を重視しつつも、環境やエネルギー保障の問題解決に向けた導入シナリオ、ならびにFBRサイクル技術の普及につながる活用方策の構築を目指す。

### (4)評価手法の機能向上

- FAMILY-21については、OECD/NEA等を通じて海外の計算コードとのベンチマークによる検証を進めているところであるが、より汎用性を高めた機能向上を図る。