

# 真に持続性のある原子力 の実現に向けて

戦略調査セミナー

2007年2月22日

地層処分研究開発部門長

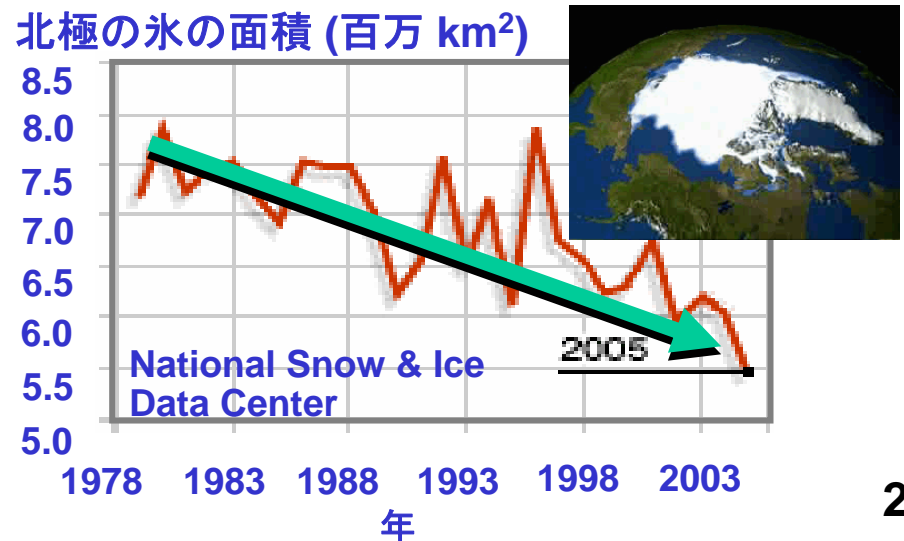
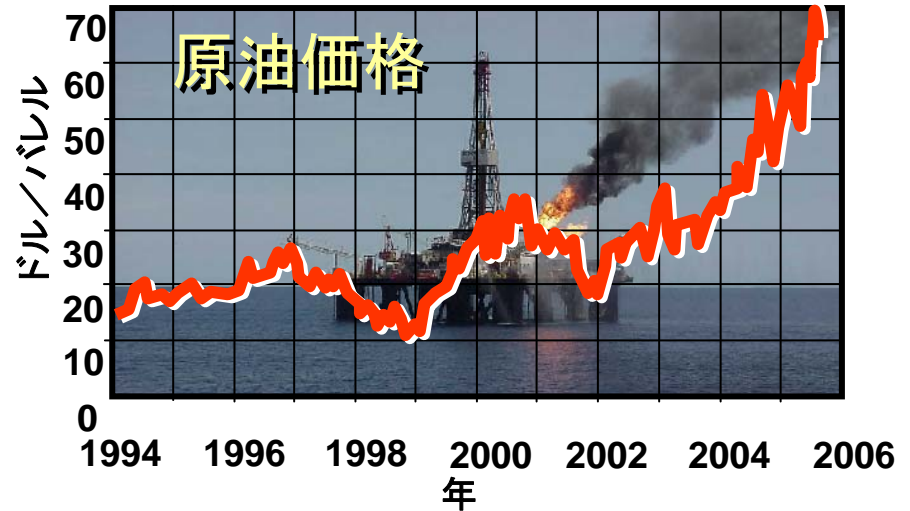
河田 東海夫

# 内容

- 第2の原子力時代の到来
- Puバランスから見たFBRサイクルへの移行問題
- 「真に持続性のある原子力」実現のための要件
  - 燃料供給的視点
  - バックエンド的視点

# 激変する国際エネルギー情勢

- ピークオイル問題
- 中・印の経済台頭
- 文明の衝突
- 資源ナショナリズム
- 地球規模気候変動



# 2006年9, 10月の石油・ガス関連新聞報道

国際石油、アザデガン油田権益が10%へ大幅低下＝操業権も失う

## 日本向けガス 中国獲得

### サハリン1

輸 達計画 影響懸念



サハリン1は、ロシア・アムール州に位置している。この油田は、天然ガスの輸出先として、日本向けに重要な役割を果たしている。中国の獲得は、日本のエネルギー安全保障に大きな影響を及ぼす可能性がある。

液化天然ガス 中電、東邦ガス  
「サハリン2」事業停止

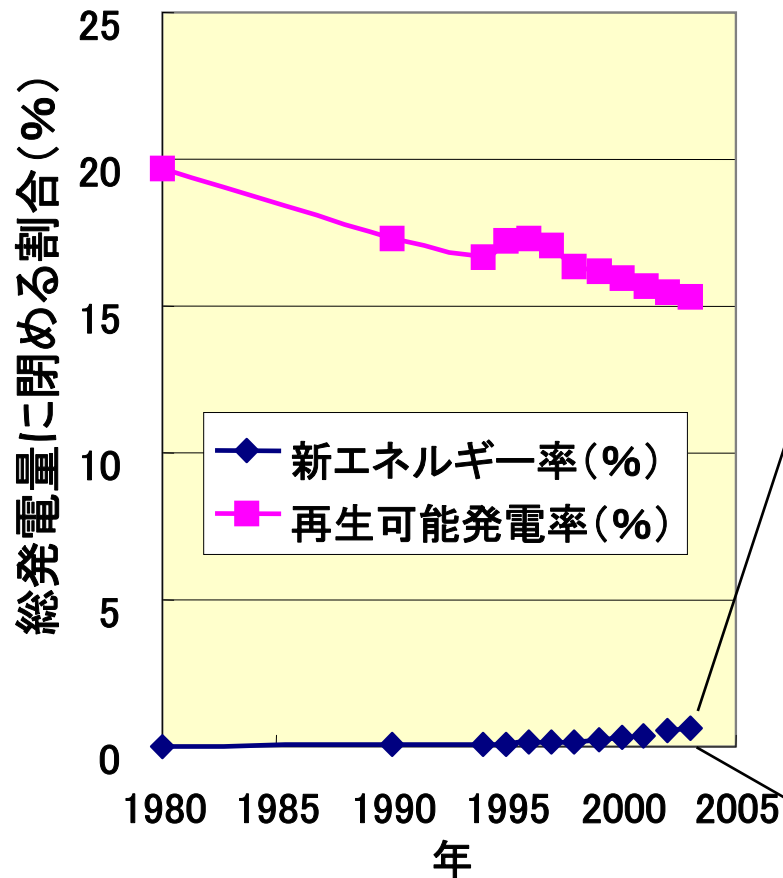
## LNG対日輸出半減

インドネシアが通告

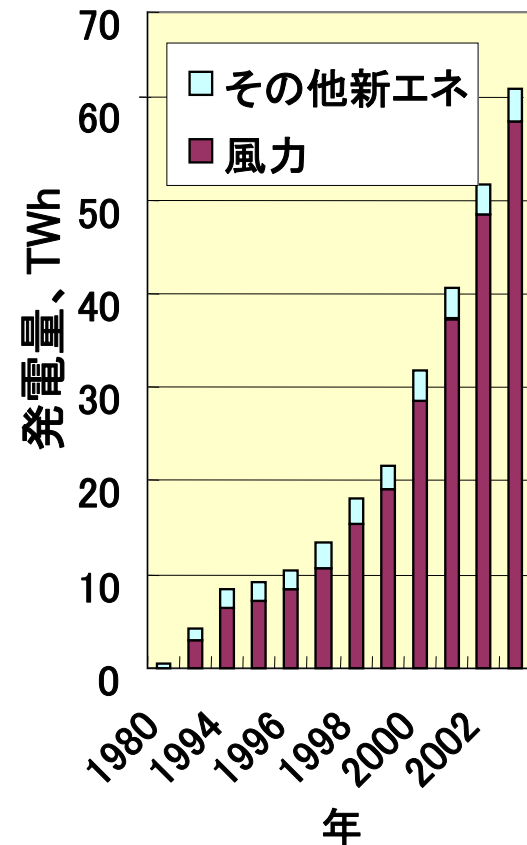
2010年にも

# OECD加盟国における 再生可能エネルギー発電率

## 再生エネルギー発電率

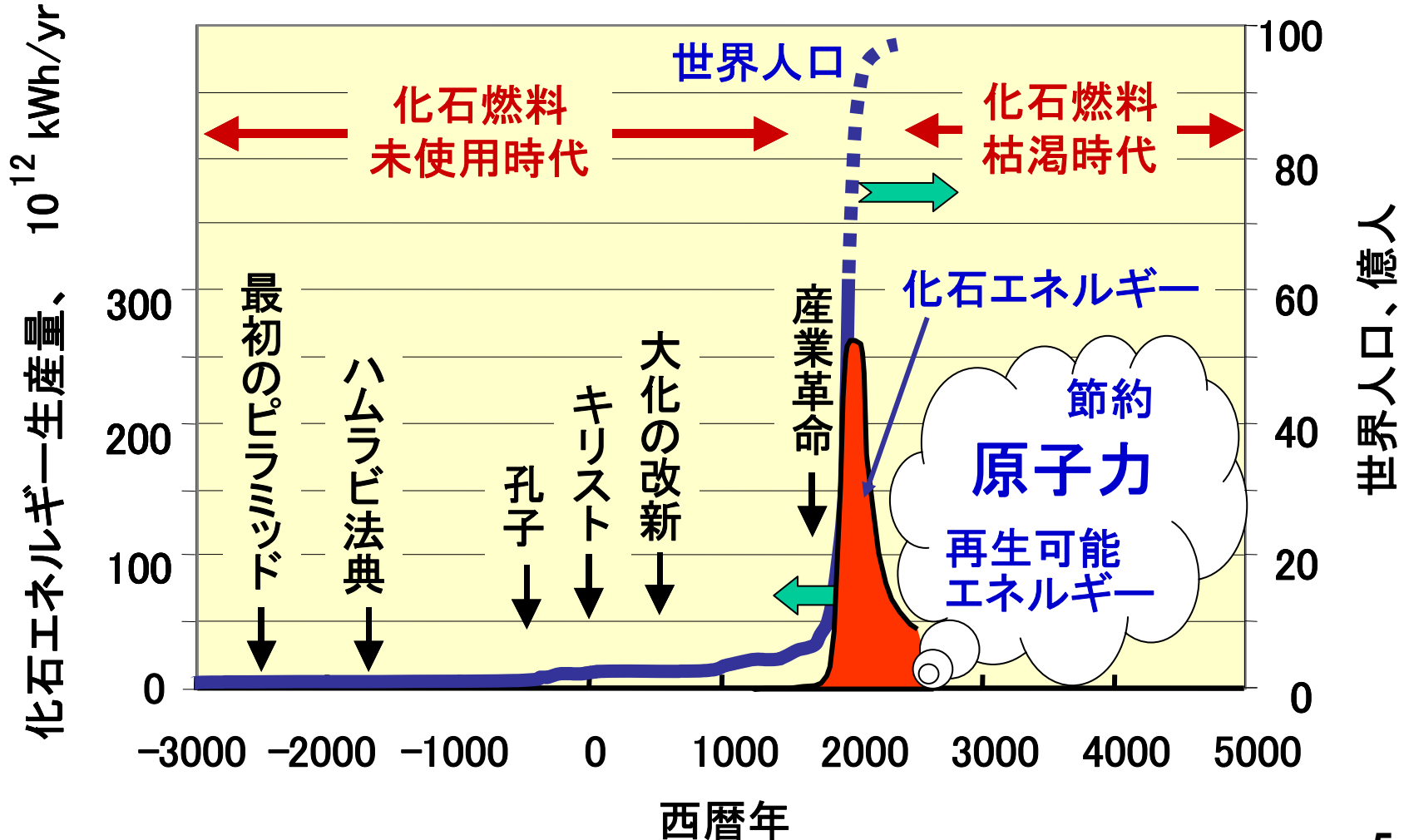


## 新エネルギー発電



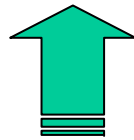
# 原子力の究極の使命

- 半恒久的な基幹エネルギー供給



# 原子力ネットワーク

- 世界的な原発建設拡大の動き
- 発電大国はリサイクルを目指す
- 将来目標としてのFBRサイクルの復権



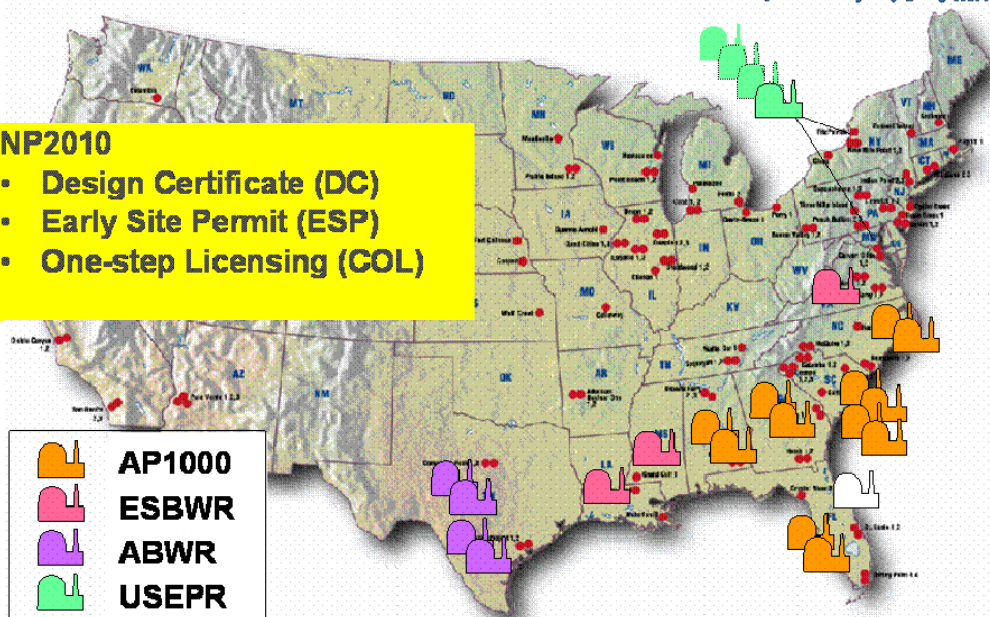
- エネルギーセキュリティの観点からの原子力の重要性
- 真の持続性への問いかけ

# 世界的な原発建設拡大の動き

## 米国における新規原発の一括認可(COL)申請準備状況 (2006年9月時点)

### NP2010

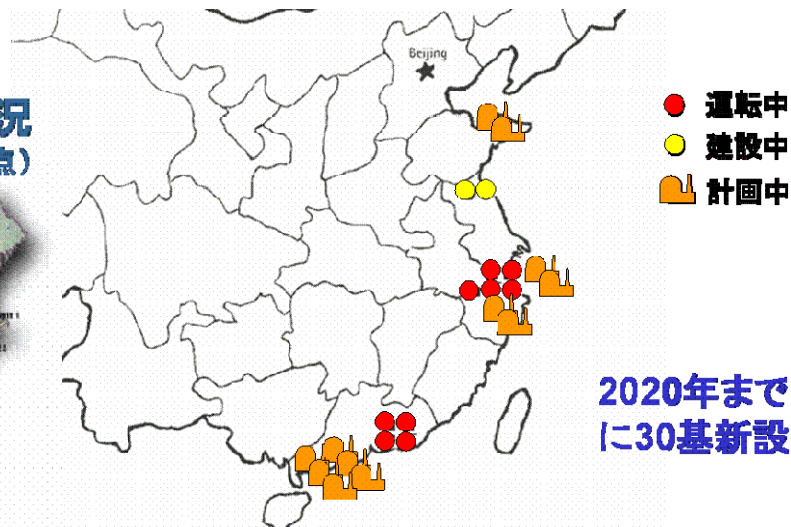
- Design Certificate (DC)
- Early Site Permit (ESP)
- One-step Licensing (COL)



	AP1000
	ESBWR
	ABWR
	USEPR
	炉型未定

赤点は現在稼働中の原発

## 中国の原子力発電所建設計画



2020年までに30基新設

## 欧州における原発新設



フィンランド  
オルキルオト3号機  
1600 MWe EPR  
2009年運開目標

フランス  
フラマンビル3号機  
1600 MWe EPR  
2012年運開目標





# 大規模発電国はリサイクル路線を目指す

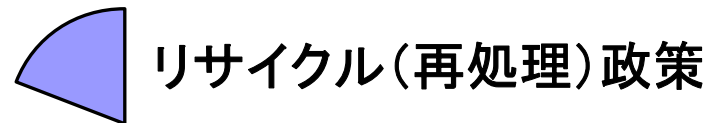
国	原発基数	設備容量(万kW)	核燃料サイクル政策
米国	103	9750	直接処分からリサイクル政策に変更
フランス	59	6310	リサイクル政策
日本	52	4570	リサイクル政策
ドイツ	19	2230	直接処分(脱原発)
ロシア	30	2220	リサイクル政策
韓国	19	1590 2610 (2015年)	態度未決
中国	9	700 4000 (2020年)	リサイクル政策
インド	14	272 2090 (2020年)	リサイクル政策

現在 2000万kW を超えている国

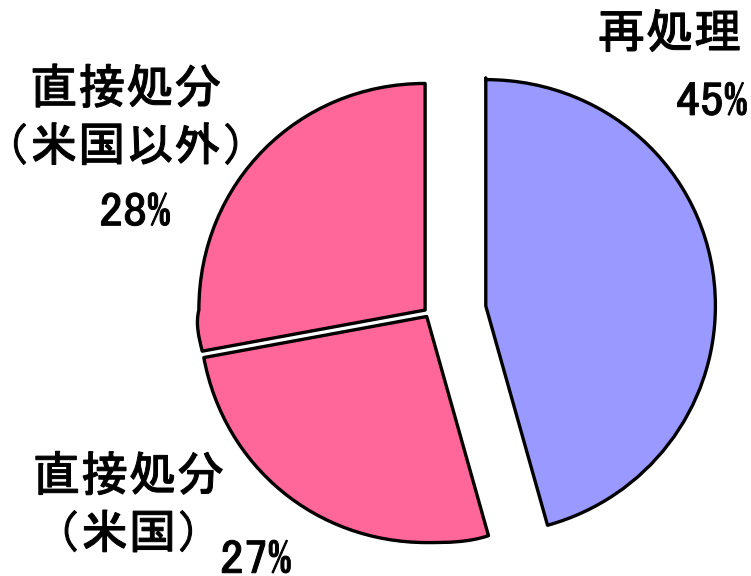
2020年までに 2000万kW を超えると予想される国

(注) 原発基数、および設備容量は  
2004年5月時点の数値

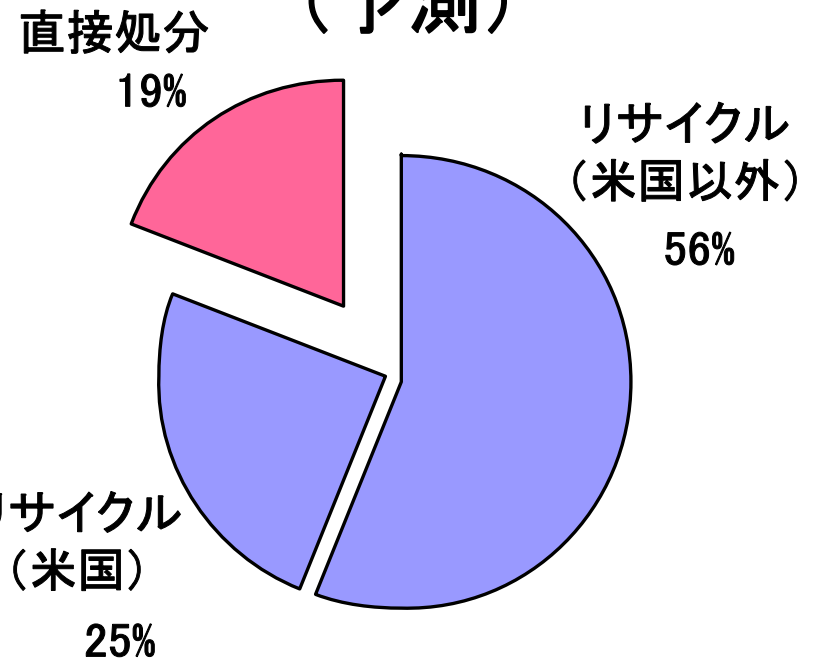
# 発電容量でみた2つのオプション



2004年



2020年  
(予測)



# 主要国の高速炉開発再活性化

## 米国

- ABR開発(GNEP)

## 日本

- もんじゅ改造
- FSからFaCTへ

## インド

- 原型炉建設中
- 2020年までに  
実用炉4基

## フランス

- Gen-IV原型炉  
2020年までに建設

## 韓国

- 高速炉設計研究中

## 中国

- 実験炉2008年臨界
- 原型炉設計中

## ロシア

- BN600寿命延長
- BN800建設再開

# 「真に持続性のある原子力」実現のための基本3要件

- 増殖炉サイクルを実現させ、ウラン資源からの無尽蔵に近いエネルギー取出しを可能とすること
- 放射性廃棄物の合理的な処分方法を確立し、かつそれが恒常的に実施可能となる道筋を確保すること
- 退役原子力施設の合理的後始末方法を確立し、原子力サイトの恒常的な再利用の道を確保すること
- 上記のほかの考慮要件
  - 経済性、安全性、核不拡散性

# 基本要件その1

増殖炉サイクルを実現させ、  
ウラン資源からの無尽蔵に近い  
エネルギー取出しを可能とすること

- 燃料供給面からの持続性確保

# 核分裂により無尽蔵に近いエネルギーを得るためのオプションと課題

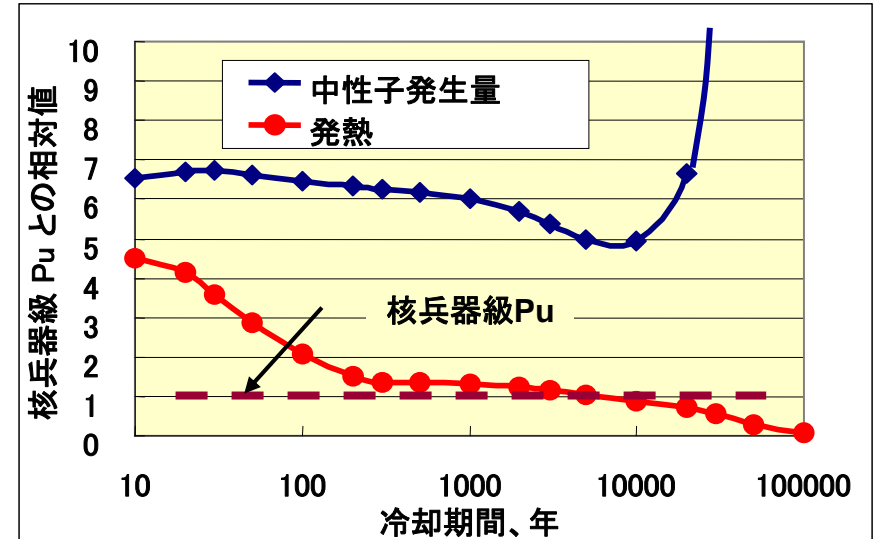
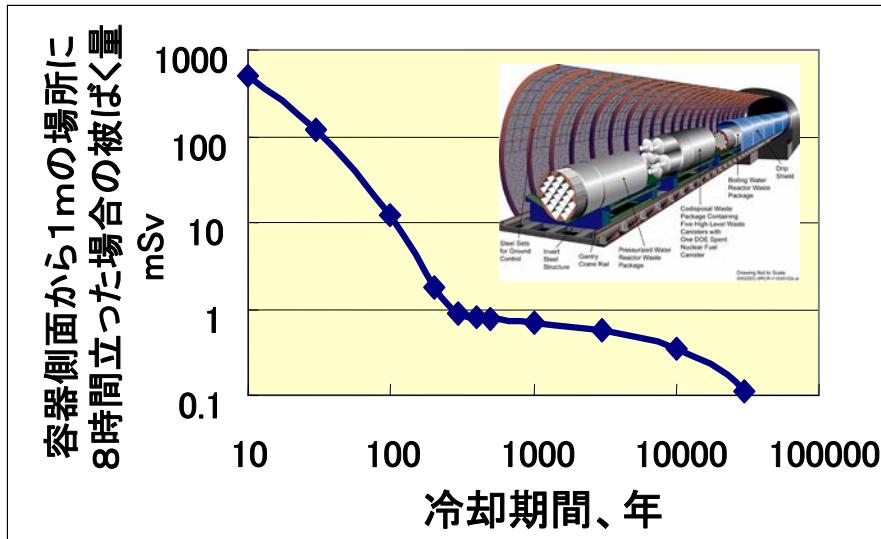
- 海水からのウラン回収による恒久的ワンス・スルー
  - テイル蓄積、処分場拡大、Pu鉍山問題
- FBRによるウランの完全リサイクル(FBRサイクル)
  - 核不拡散問題(新たな国際秩序が必要?)
  - FBRによる完全リサイクル時代に必要なウランの約3,000年分が地上で保管されている(テイルその他で150万トン)
- トリウム・サイクル
  - 技術的成熟度
  - 現行ウランサイクルとの不連続性(軽水炉時代の後始末不可)

# プルトニウム鉱山問題

- 世界中が使用済燃料を直接処分した場合の、21世紀末までのPu埋設量
  - 全世界では 8,000～10,000トン
  - 日本国内で、約1,000トン
- 300年後には、放射線レベルが十分下がり廃棄体への直接アクセスが可能になるとともに、Puの発熱も兵器級Pu並みに低下する
  - 将来のならず者国家にとって、兵器用材料としての魅力が増大
- 将来世代に、管理不能な核拡散リスクを押し付けることになる

# プルトニウム鉱山問題

- 使用済燃料収納容器側面から1mのところに8時間立った場合の被ばく線量
  - 100年後は 10 mSv
  - 300年後は 1mSv
- 300年後のPuの発熱は兵器級並み(兵器用材料としての魅力増大)





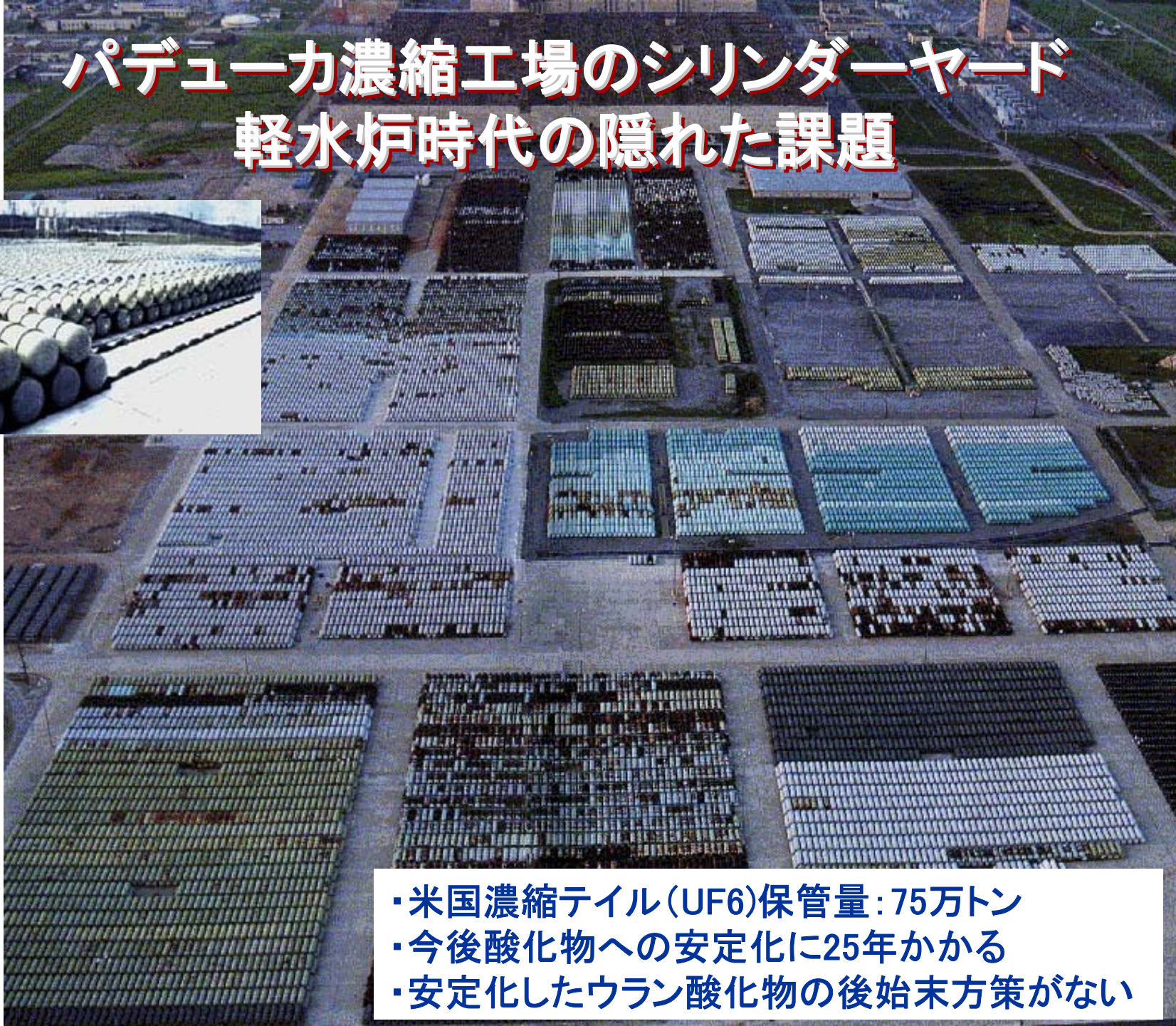
# なぜ軽水炉のままではいけないか？

- 極めて低いウラン利用効率(リサイクルを行っても1%以下)
- 果てしない濃縮テイルの蓄積(わが国では、劣化ウランそのものを廃棄するとすれば地層処分)
- プルトニウムを多重リサイクル使用すると「高次化」(核燃料としての品位低下)が起こり、使用不能なプルトニウムが累積(地層処分への負荷を増大させる)
- 以上の点から、今後100年以上にわたる軽水炉への依存は「廃棄物の後始末」を困難にするので望ましくない

## 高速増殖炉サイクル(FBRサイクル)が実現すれば:

- ウランを効率的にプルトニウムに変換でき、しかもプルトニウムの多重リサイクル使用が可能(核燃料としての品位低下が起こらない)
- 上記の結果、ウラン利用効率が極めて高くなる(実効資源量が飛躍的に増大)
- 軽水炉時代に蓄積した濃縮テイル(劣化ウラン)を消費できる
- 発熱元素であるマイナーアクチニド(プルトニウムよりさらに原子番号が大きな人工元素)を燃やすことができ、高レベル廃棄物の埋設密度向上(処分場の利用効率向上)が図れる
- 熱効率向上も図れる(軽水炉33 - 35%、FBR 38 - 42%)

# パデューカ濃縮工場のシリンダーヤード 軽水炉時代の隠れた課題

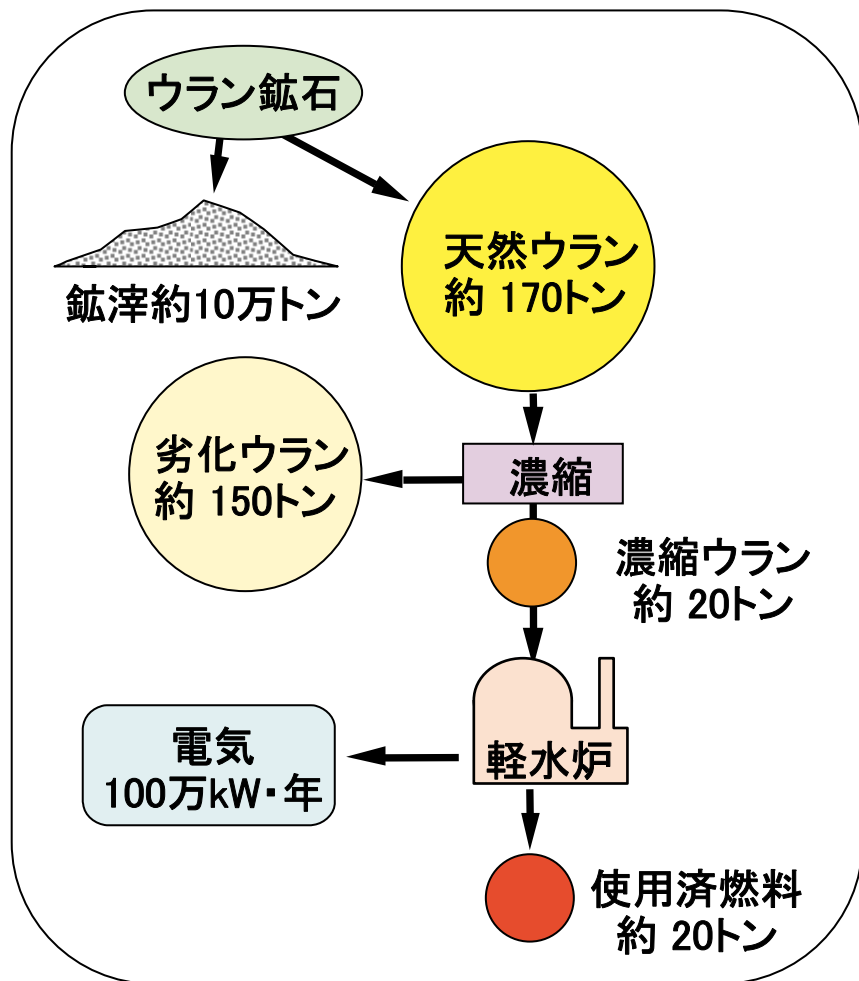


- ・米国濃縮テイル(UF6)保管量:75万トン
- ・今後酸化物への安定化に25年かかる
- ・安定化したウラン酸化物の後始末方策がない

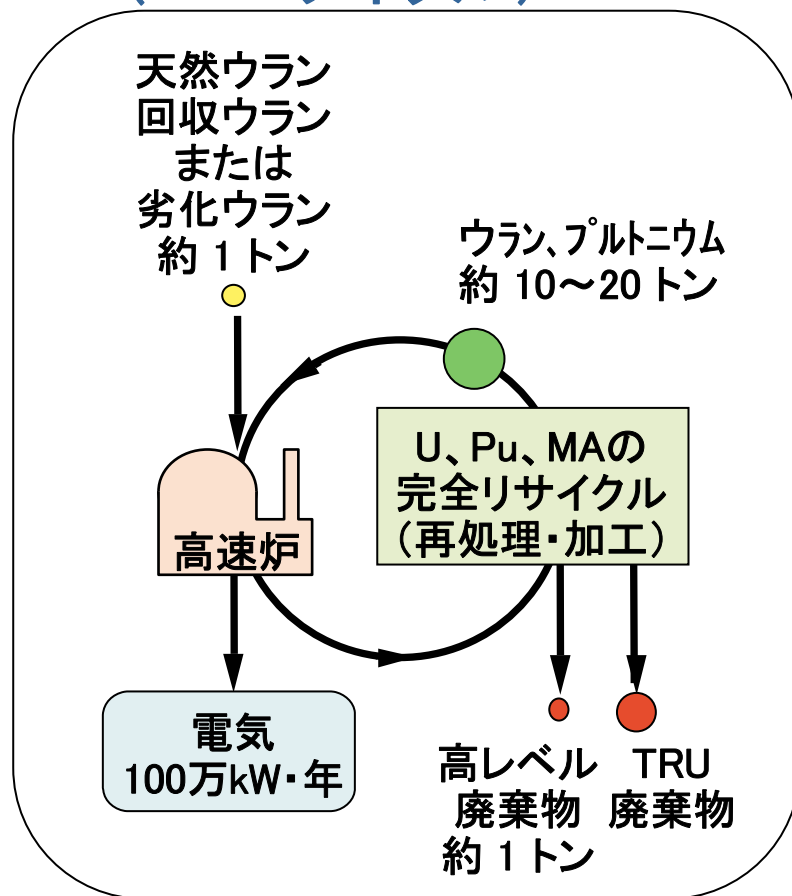
# 燃料供給面からのFBRの持続性

- FBRでの利用の観点からは、ウランは現在の地上ストックで十分すぎるほどの量（新たなウラン採掘は不要）
  - 濃縮のテイル（劣化ウラン）（NEA/IAEA Uranium2005）
    - 現在の全世界の在庫＝約150万トン
    - 毎年約6万トン増加
  - 貯蔵中の使用済燃料＝17.8万トン（全世界：2003年末）
  - 100万kW FBR1基の年間必要量＝約1トン
- Pu多重リサイクル下でのPu品質面での持続性
  - 「微増殖炉心」でも一定のPuフィッサイル率の維持が可能

# 究極のリサイクル: 高速増殖炉サイクル (FBRサイクル)



軽水炉・直接処分  
(ウラン使い捨て方式)

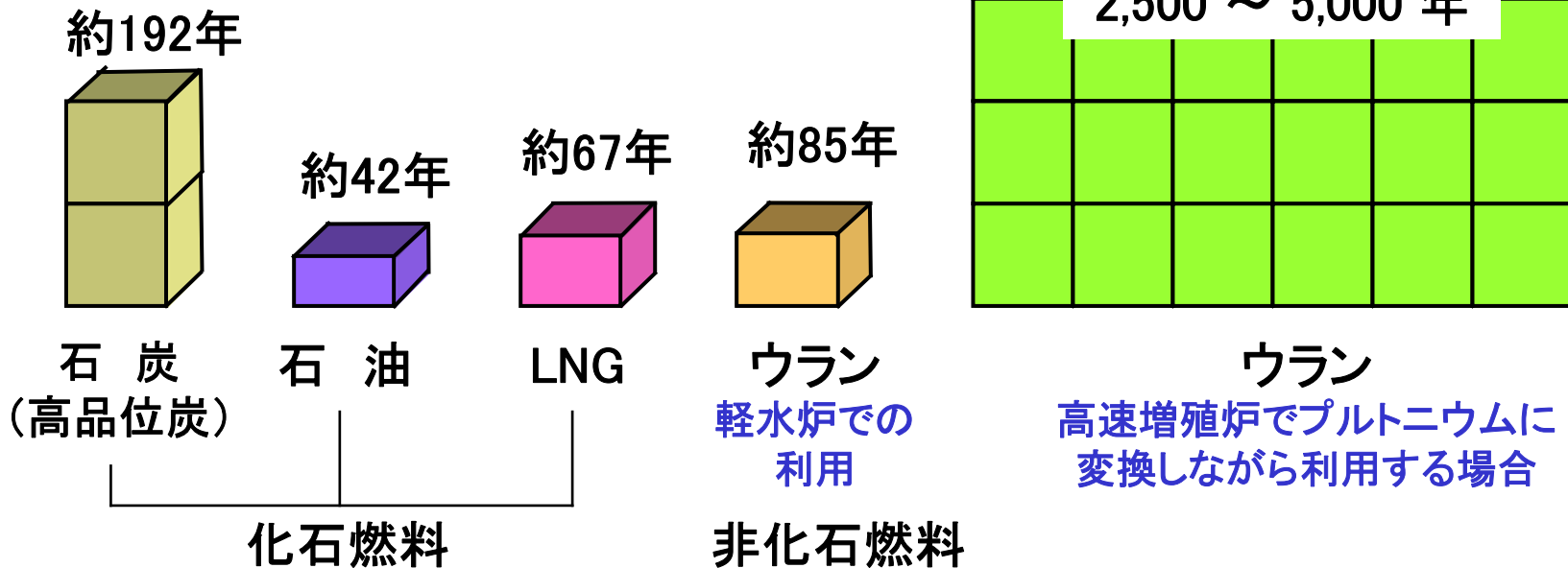


高速増殖炉サイクル  
(完全リサイクル方式)

- ウラン採掘は当分不要になる
- 濃縮も不要になる

# エネルギー資源としてのウラン

•使用済燃料を再処理し、高速増殖炉でプルトニウムを利用する場合、ウランのエネルギー資源としての価値は数十倍になる



## 世界のエネルギー資源可採年数

「Uraniun 2003: Resources, Production and Demand」より

# 高速炉での多重リサイクル

- 燃料供給面から「持続性」を保証するためには、多重リサイクル下でPuの品位が一定レベルに維持できることが必須の条件

## 微増殖平衡炉心におけるPu同位体組成 (%)

	平衡装荷 (炉心平均)	平衡取出 (炉心・ブランケット混合)
Pu238	1.2	1.4
<b>Pu239</b>	<b>56.7</b>	<b>57.3</b>
Pu240	33.6	32.6
<b>Pu241</b>	<b>4.5</b>	<b>4.8</b>
Pu242	4.1	3.9
フィッサイル率	<b>61.2</b>	<b>62.1</b>

ブランケットが少ない微増殖FBR時代でもPu品位の維持は可能

## 基本要件その2

放射性廃棄物の合理的な処分方法を確立し、かつそれが恒常的に実施可能となる道筋を確保すること

- 高レベル廃棄物
- 低レベル廃棄物

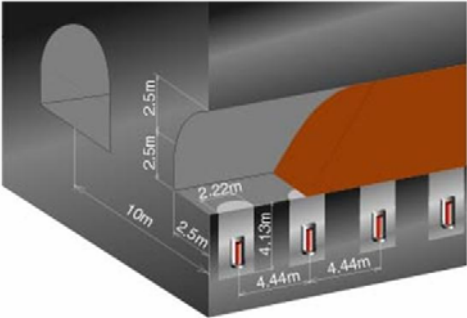
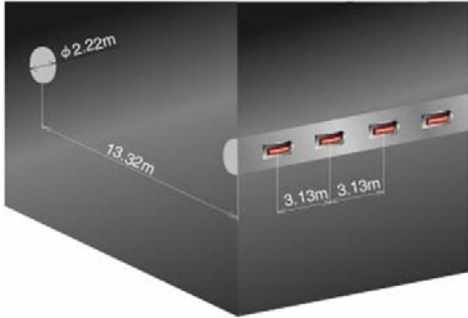
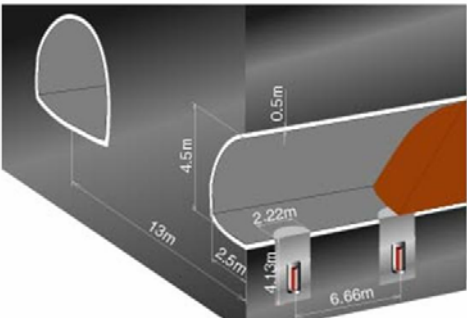

# 高レベル廃棄物処分

- 地層処分場は「貴重な社会的資産」
- 処分場の利用効率向上は、原子力の持続的利用を可能にするための重要要因



# 高レベル廃棄物の処分場の配置設計

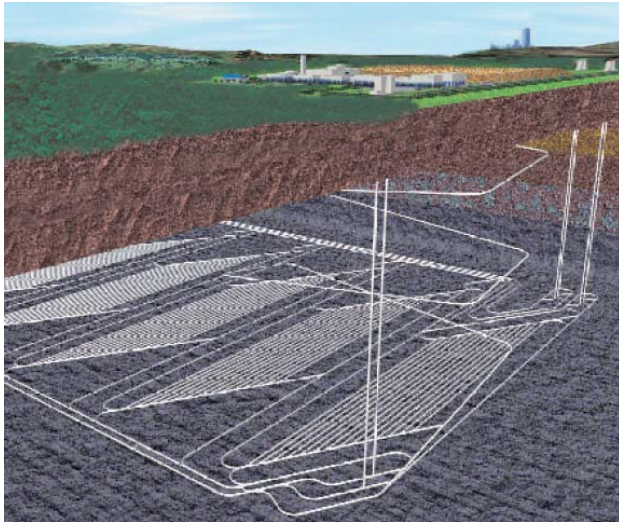
- 岩盤強度と熱的条件が主たる決定要因
- 第2次取りまとめ(H12報告)の例

	処分孔縦置き方式	処分孔横置き方式
硬岩		
軟岩		

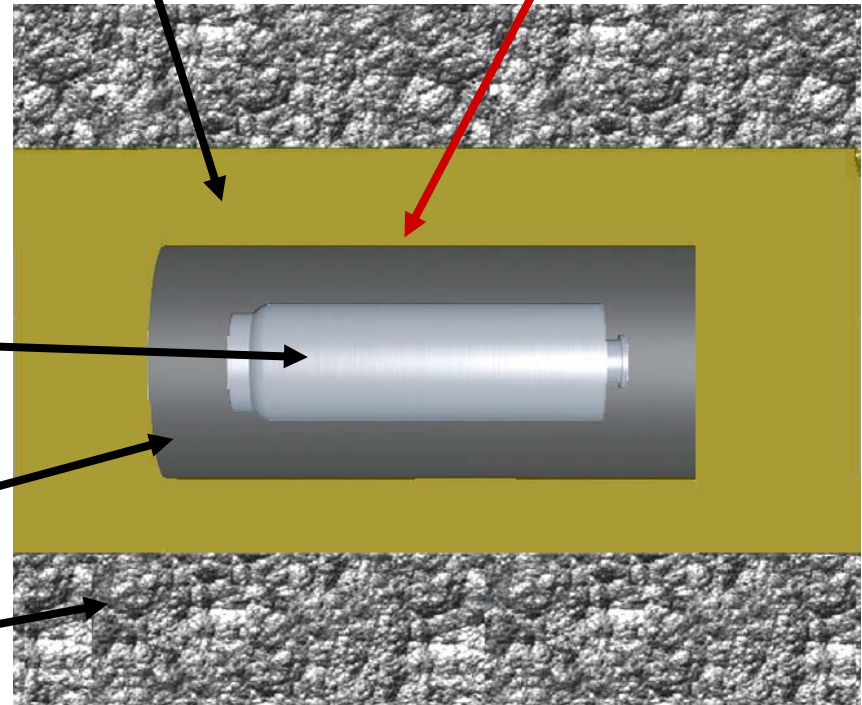
# 高レベル廃棄物の地層処分概念

(横置きの場合)

ベントナイトの性能  
(止水性、吸着性)  
維持のため、この  
部分の最高温度を  
100°C以下に制限  
(暫定基準)



緩衝材  
(ベントナイト)



ガラス固化体

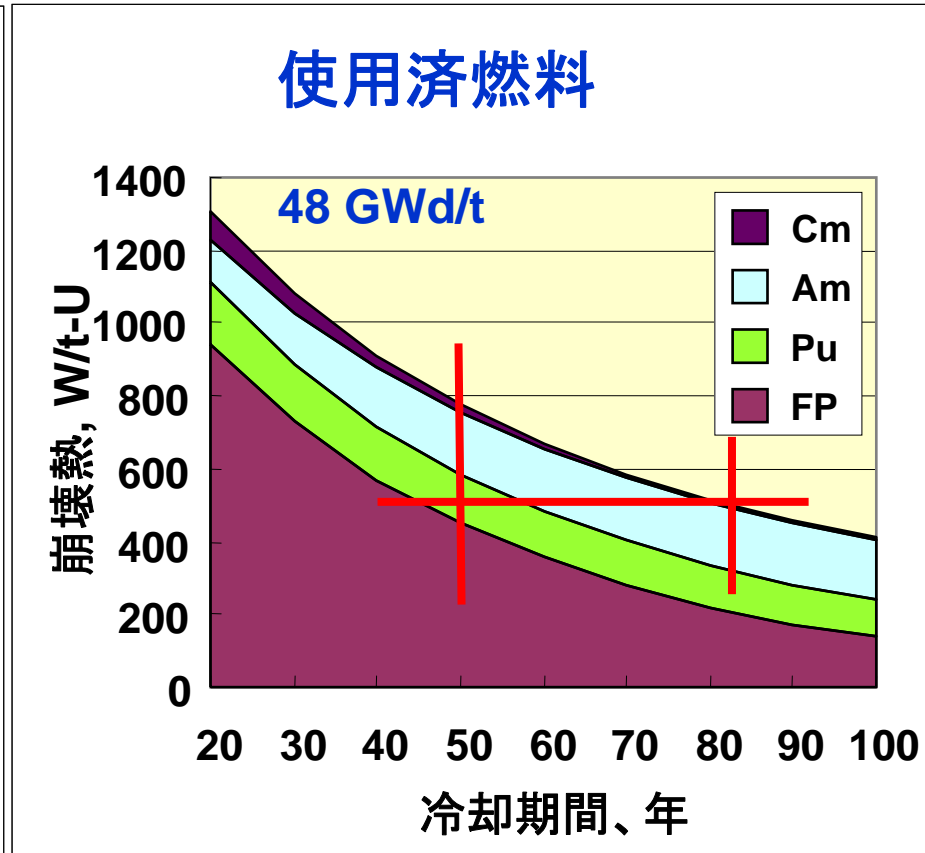
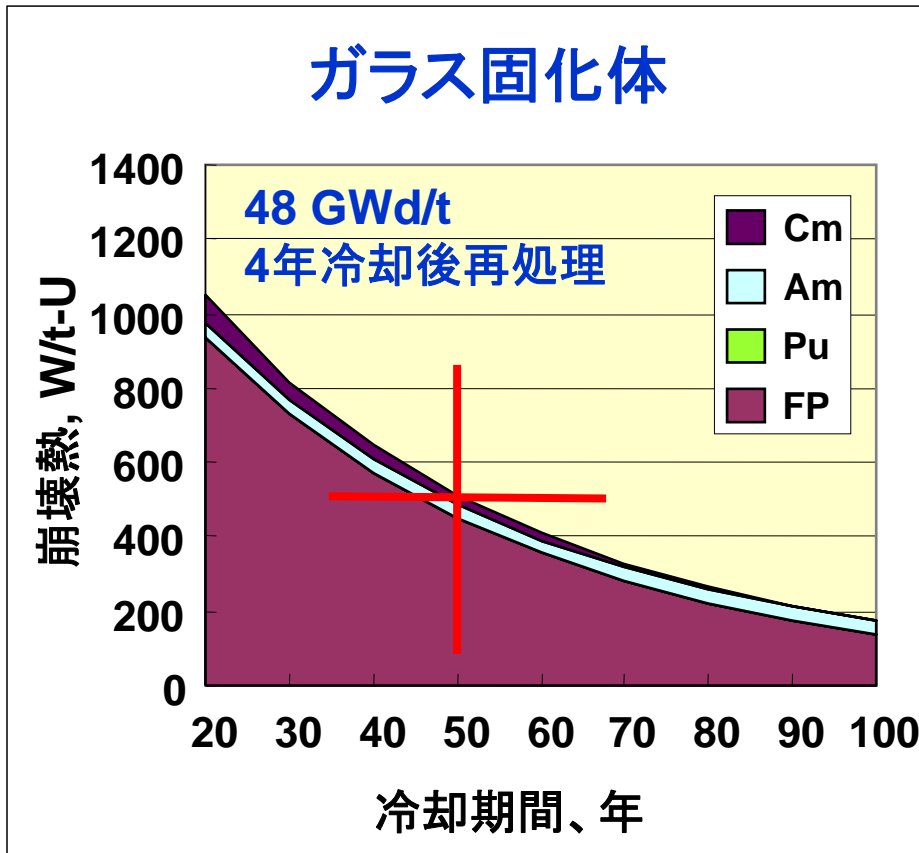
オーバーパック

岩盤

# 高レベル廃棄物の主要発熱源

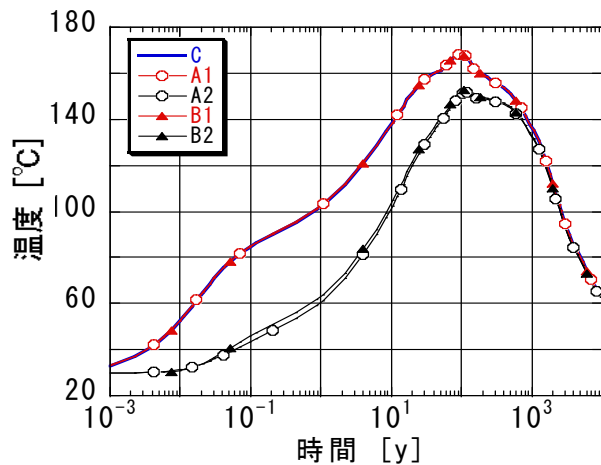
- 核分裂生成物
  - Sr-90 (28.8 年)
  - Cs-137 (30 年)
- アクチノイド元素
  - Pu 238 (87.7 年)
  - Pu 240 (6560 年)
  - Am-241 (432 年) ← Pu-241 (14.4 年)
  - Cm 244 (18.1 年)

# ガラス固化体と使用済燃料の崩壊熱 (20 ~ 100 年)

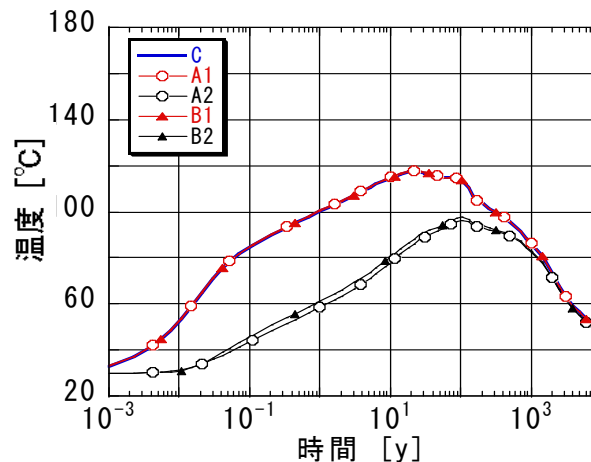


# 直接処分の熱解析例(1)

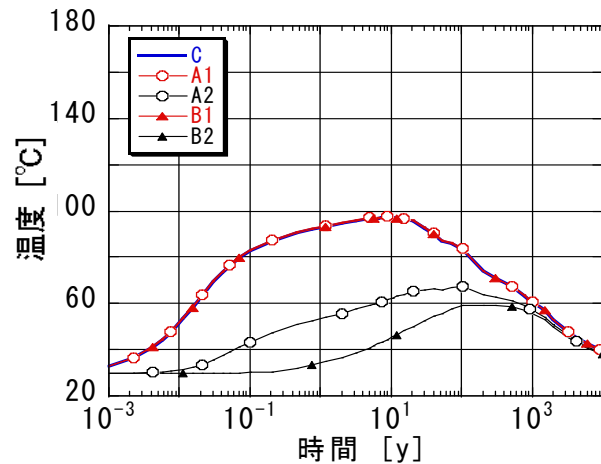
## (堆積岩、横置きケース)



熱解析結果 : Case1



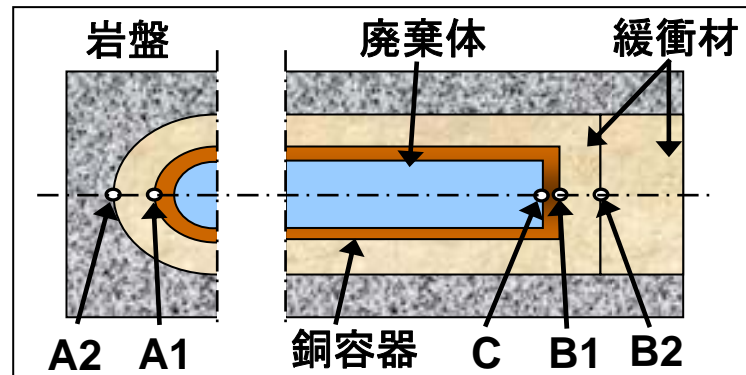
熱解析結果 : Case2



熱解析結果 : Case3

### 解析のパラメータ

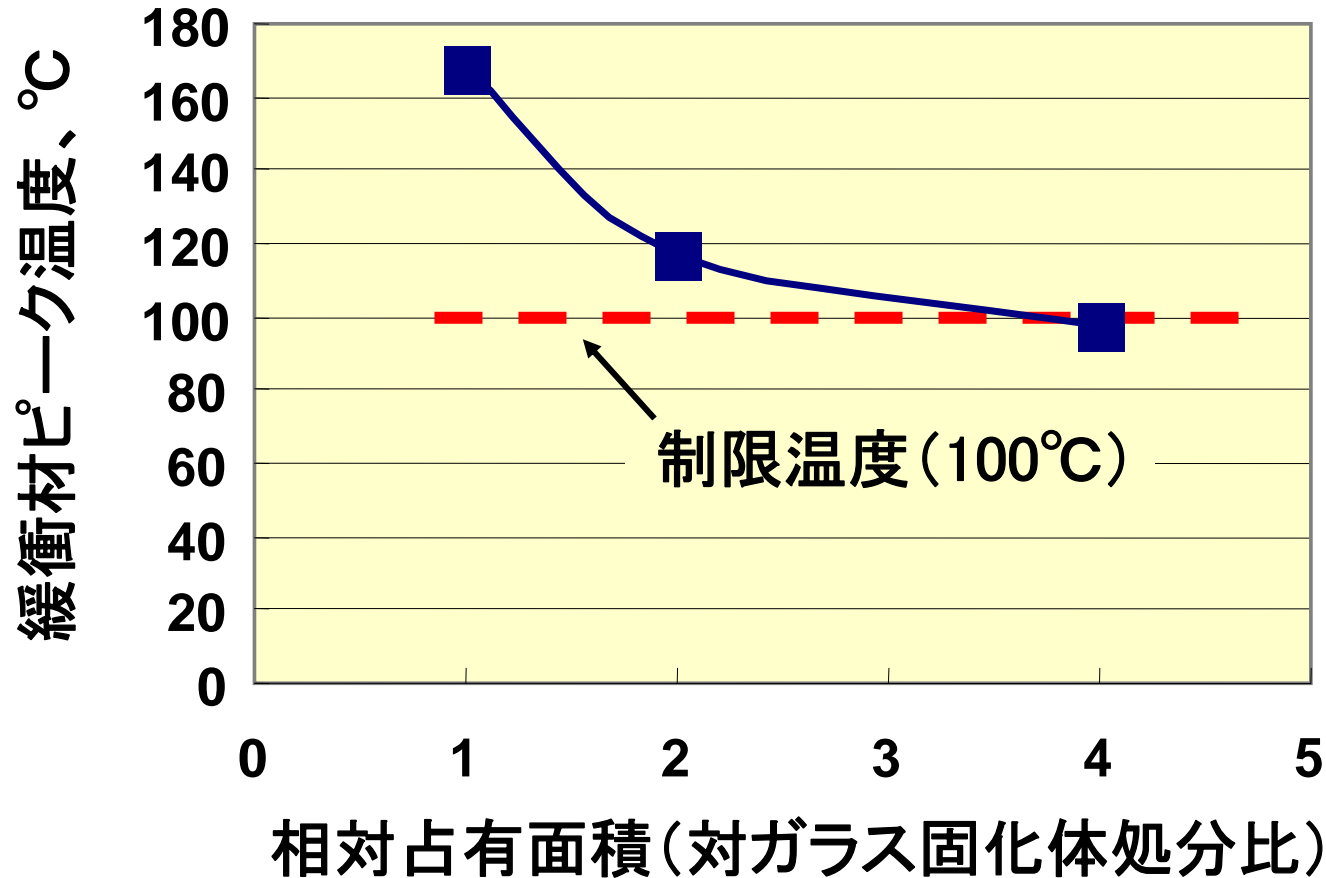
- Case1
  - 単位ウラン重量あたりの占有面積をガラス固化体処分の場合と同じに配置
- Case2
  - 上記の2倍
- Case3
  - 同 4倍



熱解析出力点

# 直接処分の熱解析例(2)

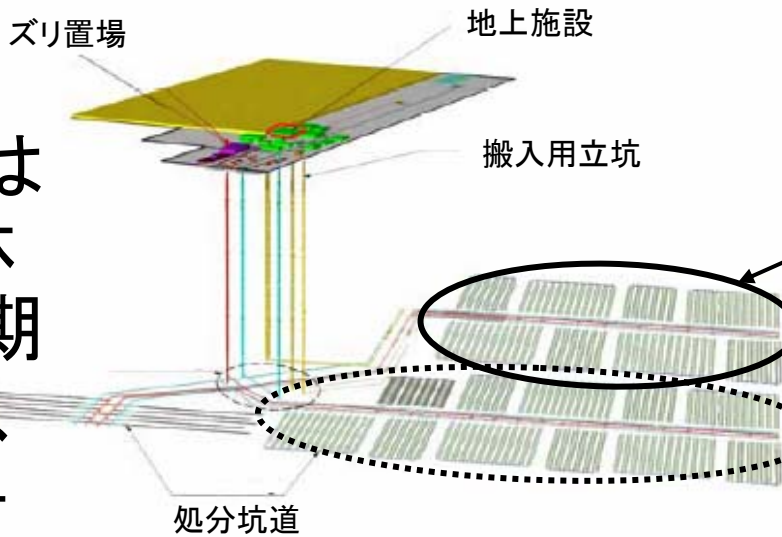
(堆積岩、横置きケース)



- 占有面積への主要発熱のほか、影響因子は、発熱のほか、岩盤強度など

# 再処理リサイクルと直接処分 - フランスの評価 -

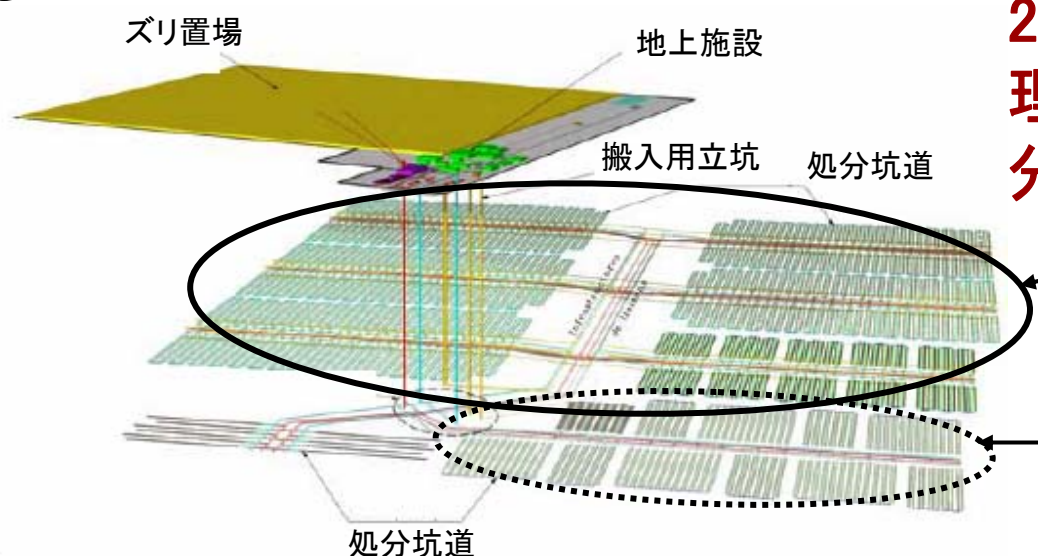
- 使用済燃料はガラス固化体の倍の冷却期間をとっても、処分面積は4倍になる



## 全量再処理の場合

2010年以降再処理分のガラス固化体の占有スペース

既再処理分のガラス固化体の占有スペース



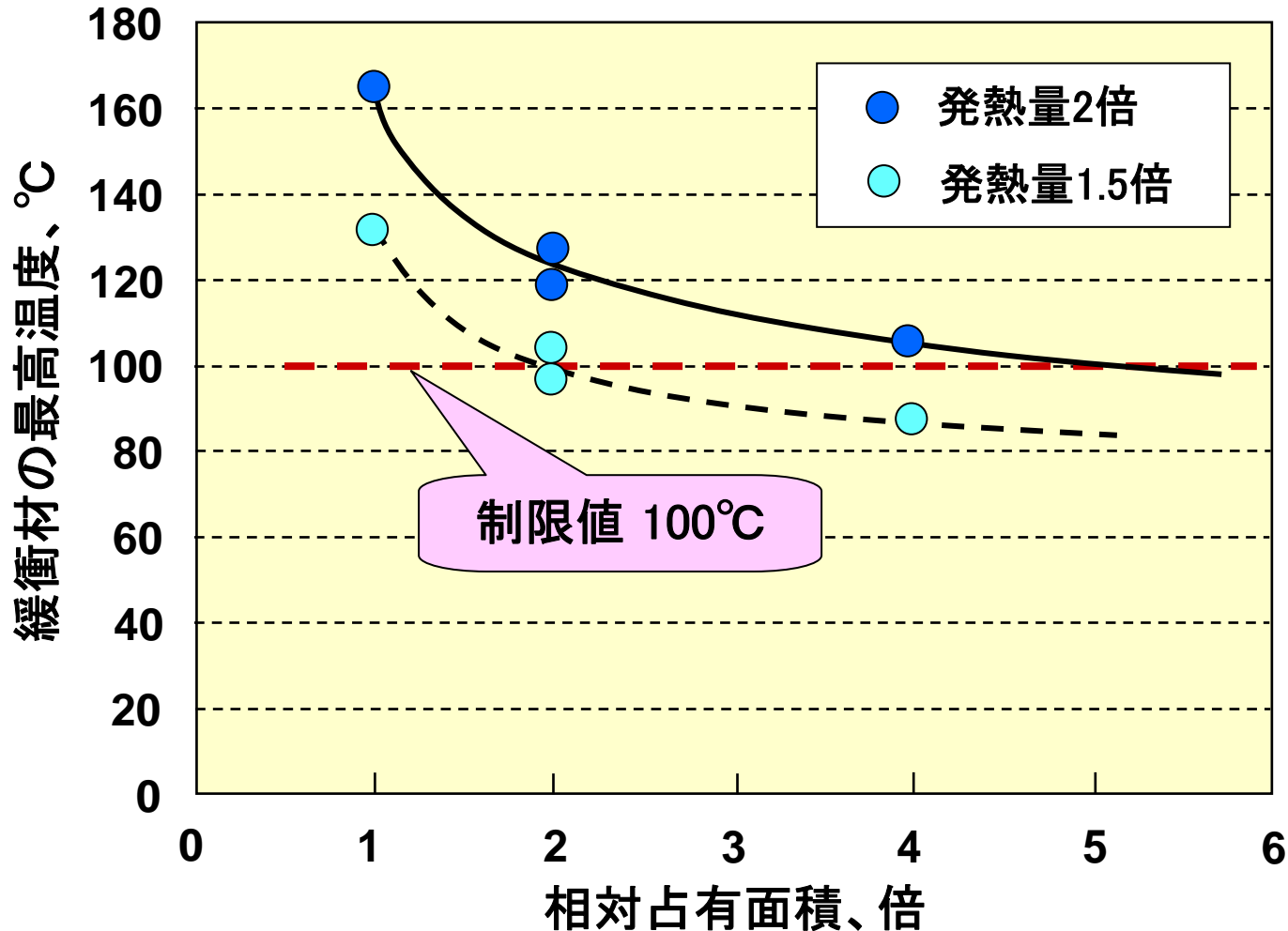
## 2010年以降、再処理を止めて直接処分とした場合

2010年以降の直接処分の占有スペース

既再処理分のガラス固化体の占有スペース

# ガラス固化体の発熱と処分場必要面積

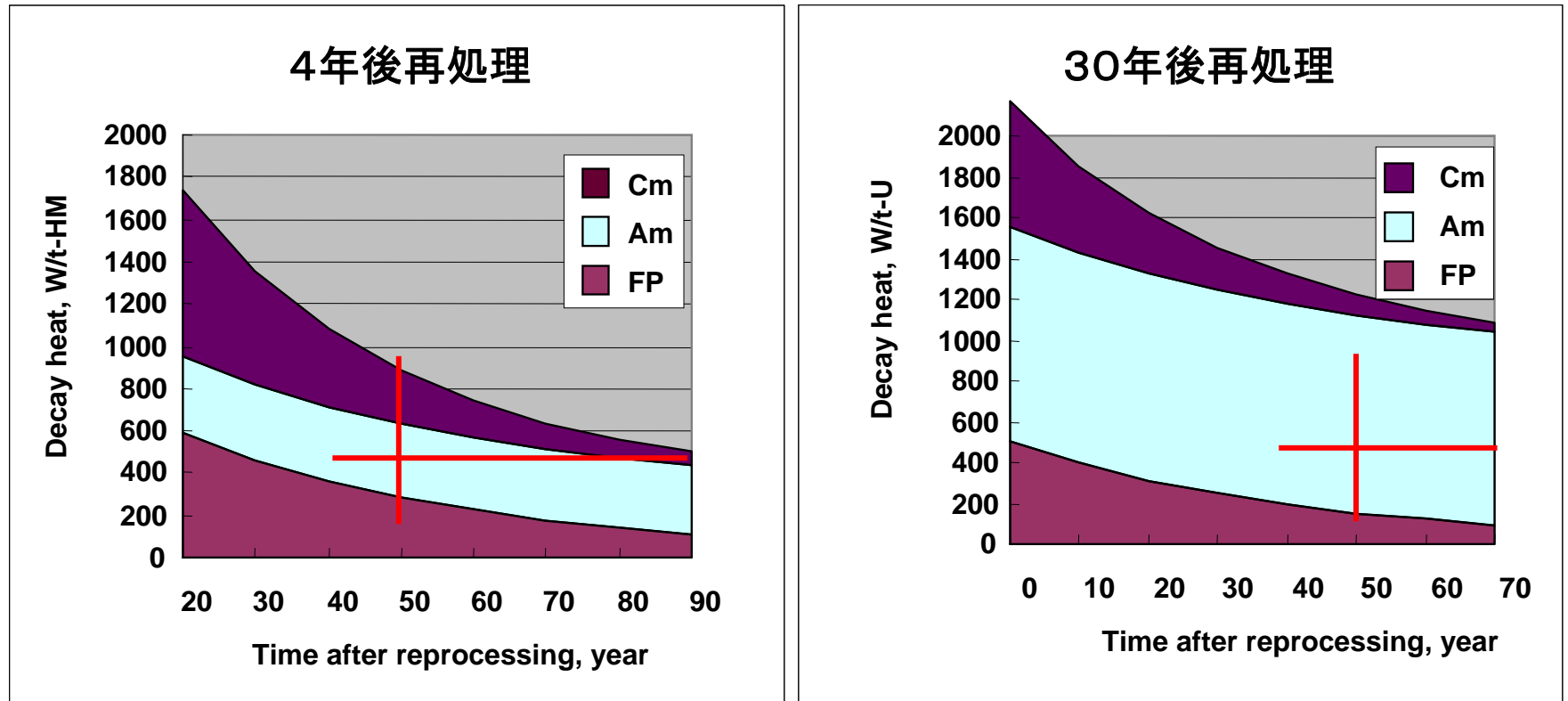
(堆積岩、横置きケースの計算例)





# プルサーマル燃料再処理廃液の発熱

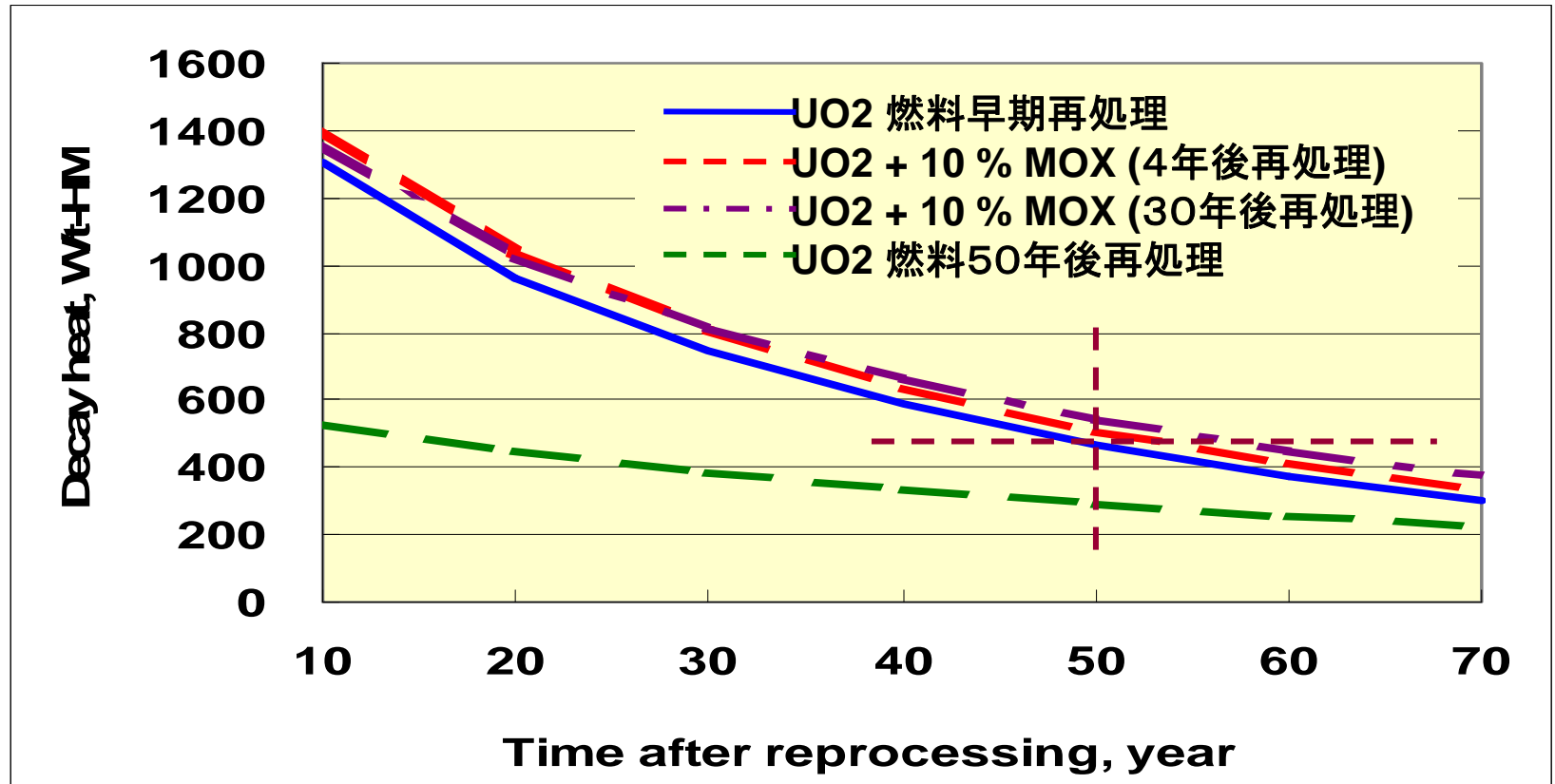
## 早期再処理と遅延再処理の場合



- 再処理が遅れるとAmが大量に蓄積し、早期再処理の場合よりも廃液の発熱が大きくなり、しかも減衰しにくくなる

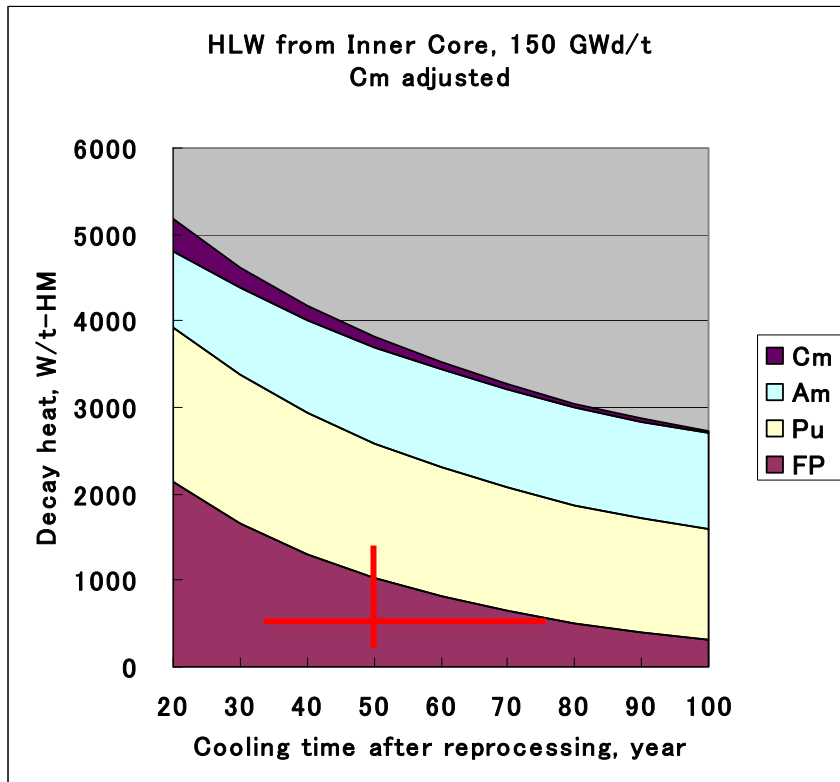
(注)六ヶ所再処理工場はプルサーマル使用済燃料再処理の許可を取っていない

# 再処理燃料中のプルサーマル燃料比率が10%の場合の崩壊熱

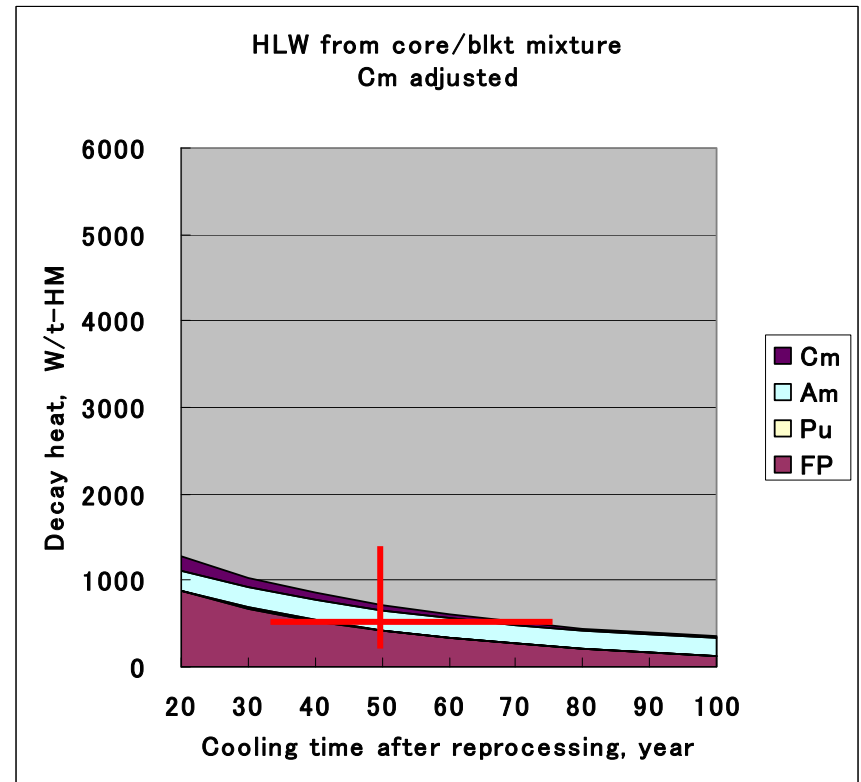


- ウラン燃料の廃液と混合することで、MOX燃料廃液の発熱問題は受け入れ可能なレベルまで緩和される

# FBR燃料の場合どうなるか？



炉心燃料(コア部分のみ)の崩壊熱  
(150,000 MWd/t)

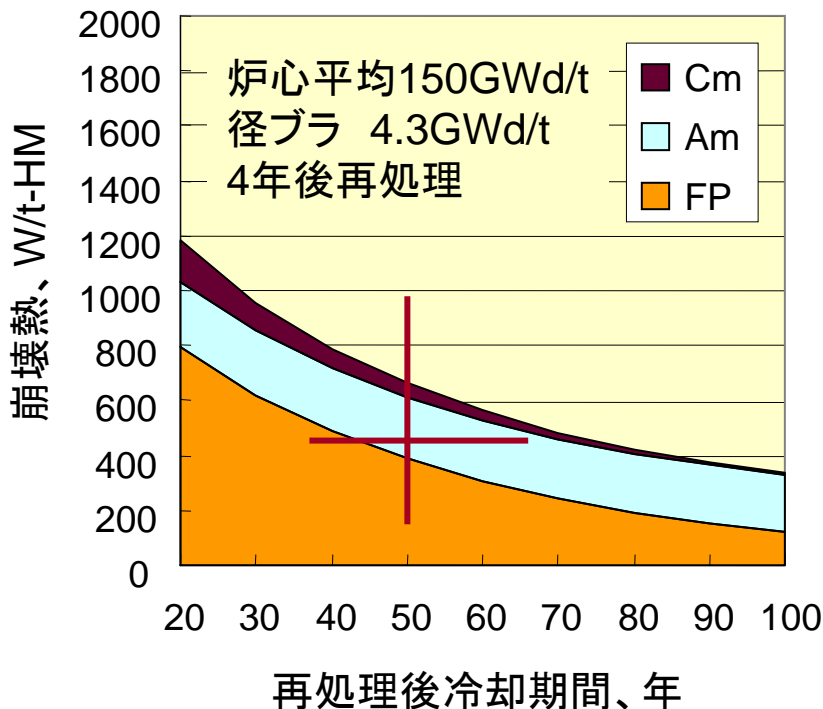


炉心・ブランケット燃料  
混合処理廃液の崩壊熱

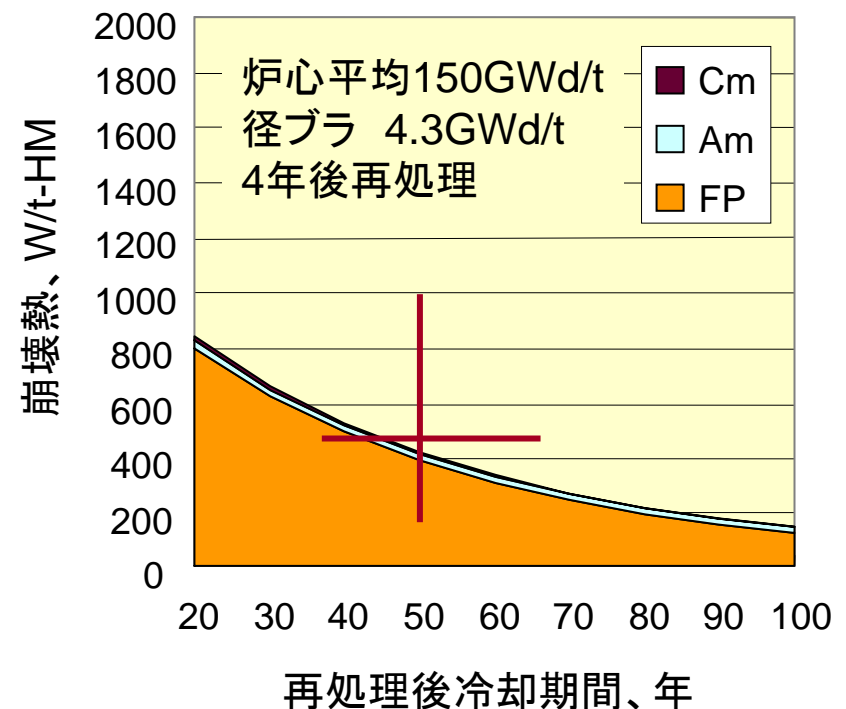
# FBR炉心・ブランケット混合再処理廃液

- 軽水炉燃料の再処理廃液にくらべ単位処理量当たりの発熱増大
- MAを90%除去すればほぼ軽水炉廃液並み

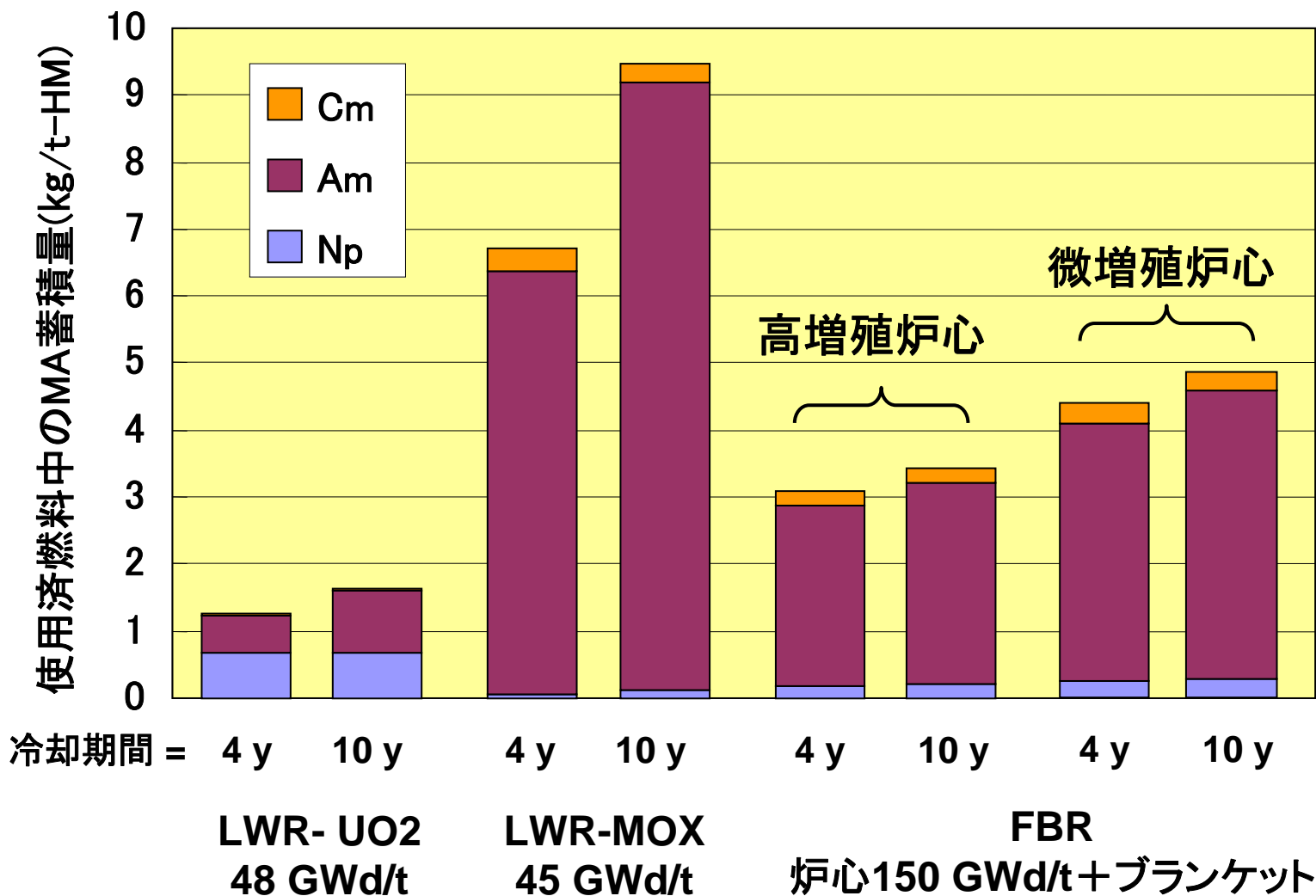
FBR燃料混合再処理廃液  
MA回収なし



FBR燃料混合再処理廃液  
MA 90% 回収



# 使用済燃料中のMA蓄積量(例)



# プルサーマル、FBRサイクルと地層処分

## • プルサーマル

- MOX燃料の再処理廃液は、発熱が大きくなる
- 遅延再処理では一層発熱が増し、崩壊しにくくなる
- MOX使用済燃料はFBR時代に再処理するのが適当  
(→ MA分離・燃焼)

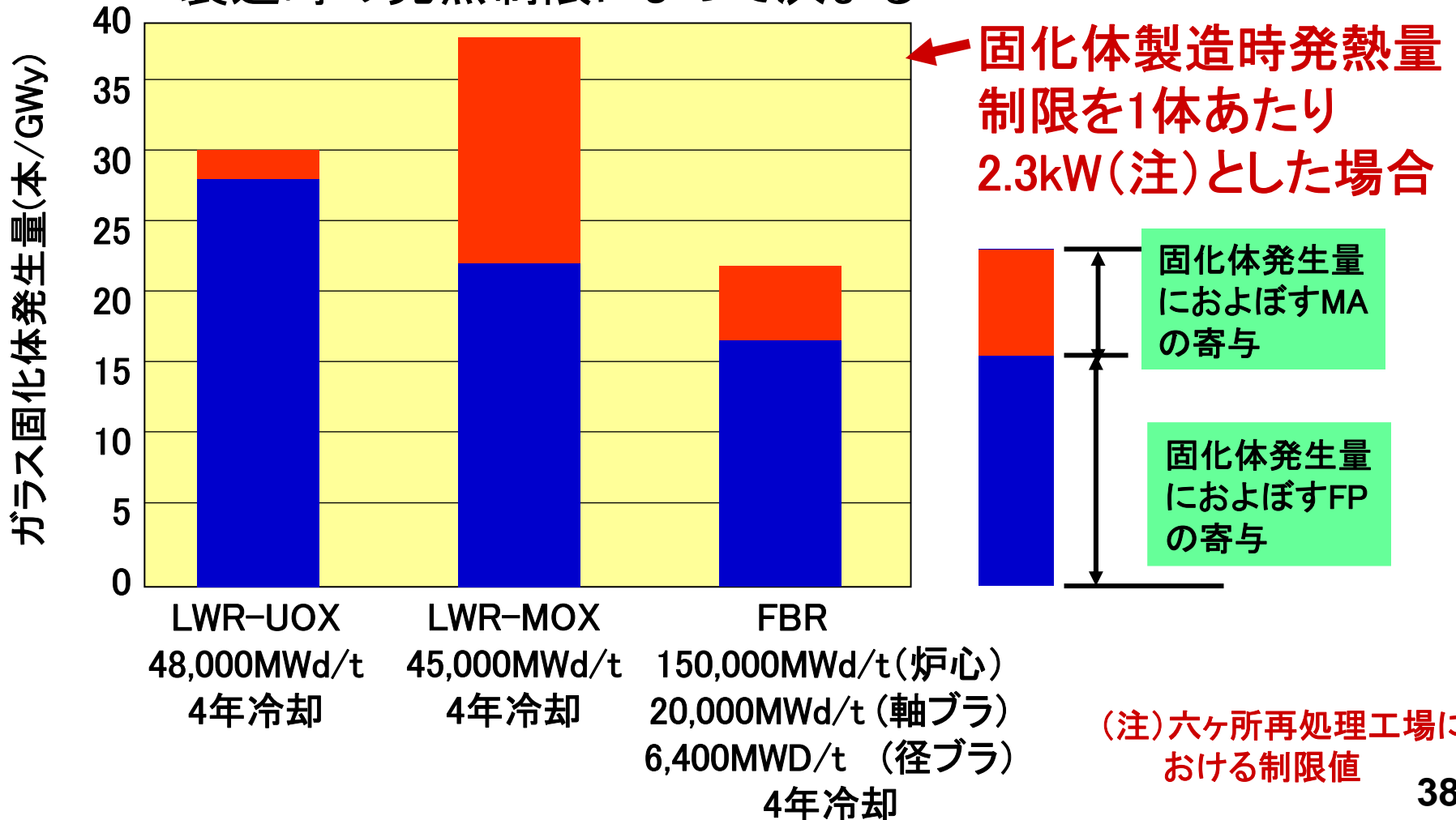
## • FBRサイクル

- 炉心燃料のみの再処理廃液の発熱はきわめて大
- 炉心燃料とブランケット燃料は「混合処理」しても、再処理廃液の発熱は軽水炉燃料の廃液に比べ増大する
- 廃液からAm, Cmを90%除去できれば発熱は軽水炉燃料廃液並になる
- 廃液からのMA除去は、「毒性低減」の観点よりも、むしろ「廃液の発熱低減による処分場の利用効率向上」の観点から重要

# ガラス固化体発生量の比較

(発電量あたりの試算)

- 単位発電量あたりのガラス固化体発生数は、固化体製造時の発熱制限によって決まる



# ガラス固化体発生数から見たプルサーマルとFBRサイクル

- 単位発電量あたりのガラス固化体発生数は固化体製造時発熱制限によって決まる
- プルサーマルおよびFBRの使用済MOX燃料から発生するガラス固化体の発熱におけるMAの寄与は相対的に大きい。したがってMA除去はガラス固化体発生数低減に寄与する
- 軽水炉のウラン使用済燃料はMA除去のメリットは少ない
- FBRサイクル時代における発電量あたりのガラス固化体発生数は、軽水炉時代に比べ2～4割程度低減できる可能性がある
- 上記実現のためには、ガラス固化体へのFP混入量を現状よりも高める技術とFBRにおけるMA燃焼技術の確立が必要
- はじめの数年間には強制冷却とすることで、固化体製造時発熱制限を緩和することも、固化体発生数低減に効果的  
(→ 高減容ガラス固化技術開発重要)



# 高レベル廃棄物処分負担軽減のオプション

- MA分離・燃焼（発熱、毒性、G固化体発生数）
- 処分前冷却期間延長（発熱）
  - MA分離あり
  - MA分離なし
- Cs、Sr除去・保管（発熱、G固化体発生数）
- 高減容ガラス固化および初期の強制冷却保管（G固化体発生数）
- . . . .

# 100年間にどれだけの高レベル廃棄物処分場を必要とするか？

- 6,000 万kW の発電容量 = 年間 1,200トンの使用済燃料発生
- 1,200トンの使用済燃料全量再処理で発生するガラス固化体の数 = 1,500 本
- 100年間に発生するガラス固化体の数 = 15万本
- 100年間に必要な処分場の数：
  - NUMOが計画中の処分場規模(4万本)の場合：4基
  - 7~8万本規模であれば2基(半世紀に1基)
- FBRサイクル時代は上記の2~4割程度削減できる可能性あり

# 固化体7~8万本規模の処分場の必要面積 = 4 km × 3 km の広さ

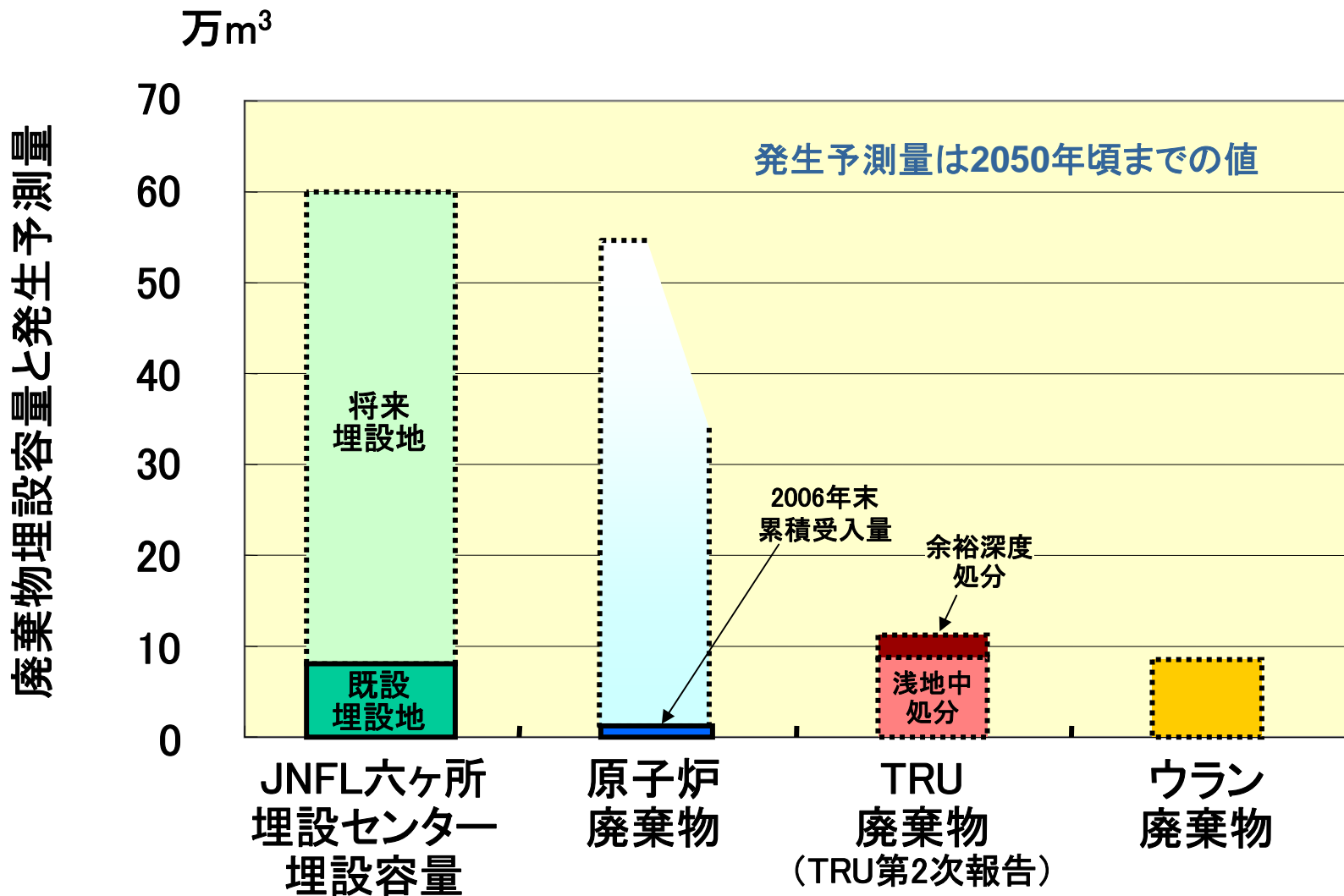


羽田空港程度の  
広さのサイトを  
半世紀毎に  
一つずつ確保で  
きれば原子力  
利用を続ける  
ことができる  
(海底でもよ  
い)

# 低レベル廃棄物処分

- 低レベル廃棄物処分場も「貴重な社会的資産」
- JNFL六ヶ所埋設センターの埋設容量は、廃棄物量低減努力がなければ、今世紀中ごろで満杯
- 廃棄物量低減に向けて取り組むべきこと(例)
  - クリアランスや処分に関する安全基準の合理的設定
  - 発生低減化
    - 再処理においては
      - ソルトフリー化の徹底
      - 高減容固化法(ガラス固化など)

# 低レベル廃棄物の処分容量と発生予測量



# プルサーマルおよびFBR燃料向けの再処理技術

- 脱ピュレックス法 (Pu非単独分離、核拡散抵抗性)
- MA回収機能必須
  - 熱負荷低減による
    - ・ ガラス固化体発生量の低減
    - ・ 処分場への効率的処分
  - 上記観点からは90%回収できればよい
  - 回収MAはFBRで燃焼
- 低レベル廃棄物発生量低減 (例: ソルトフリー化 etc.) と安定化 (例: ガラス固化)
- ヨウ素等の取り扱い

## 基本要件その3

退役原子力施設の合理的後始末方法を確立し、原子力サイトの恒常的な再利用の道を確保すること

- 原子力施設の長寿命化
  - 原子炉寿命の更なる長期化
  - 内装機器の順次交換が可能な大型遠隔セル方式再処理工場
- 合理的廃止措置技術(および制度)の確立
- 式年遷宮方式リプレースサイクルの確立

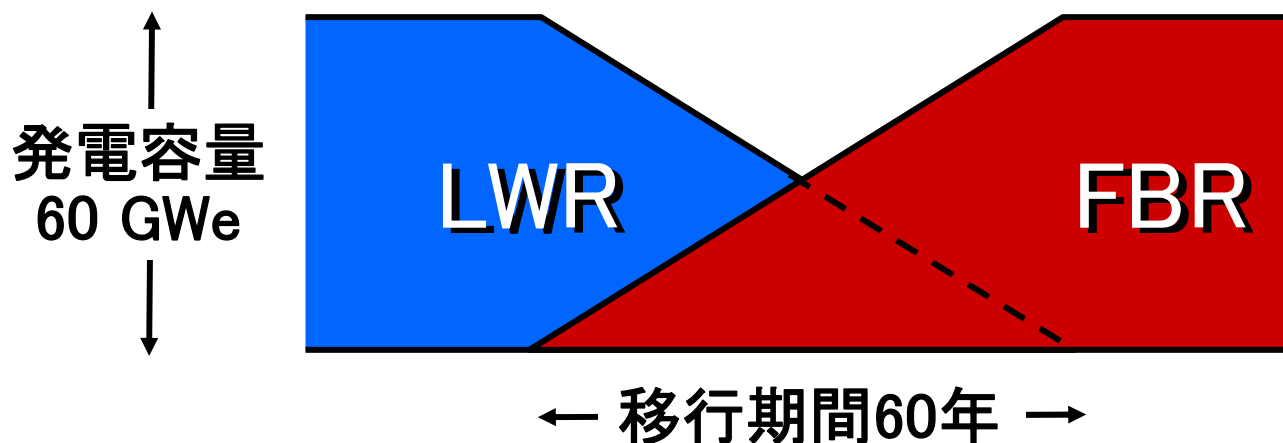
(例)六ヶ所には再処理工場2つ分の敷地が確保されており、新規施設の建設・運転と退役施設の解体・更地化を2つの敷地で交互に繰り返すことが可能



# プルトニウムバランスの観点 から見た軽水炉サイクルから FBRサイクルへの移行問題





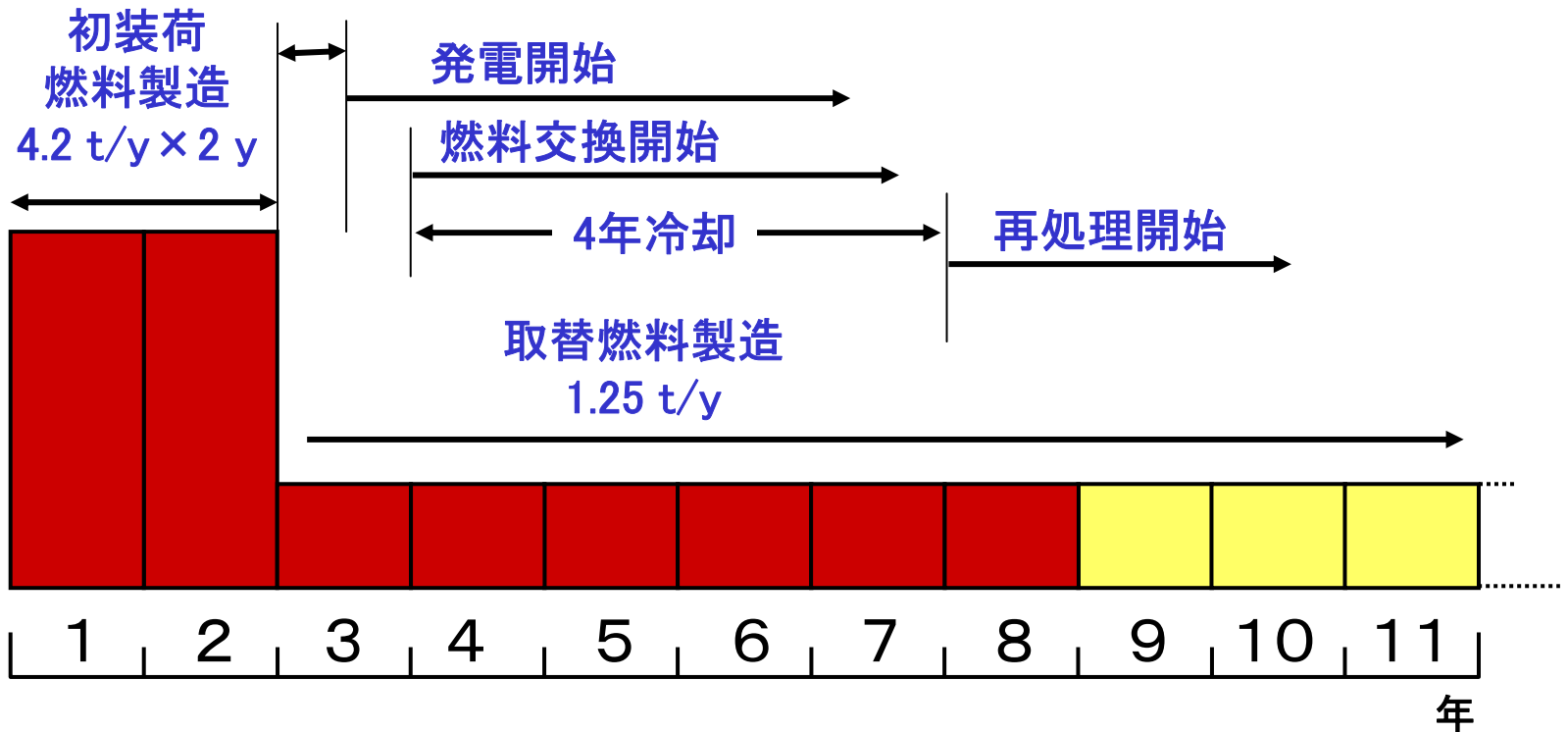
# 単純化した軽水炉からFBRへの移行モデル



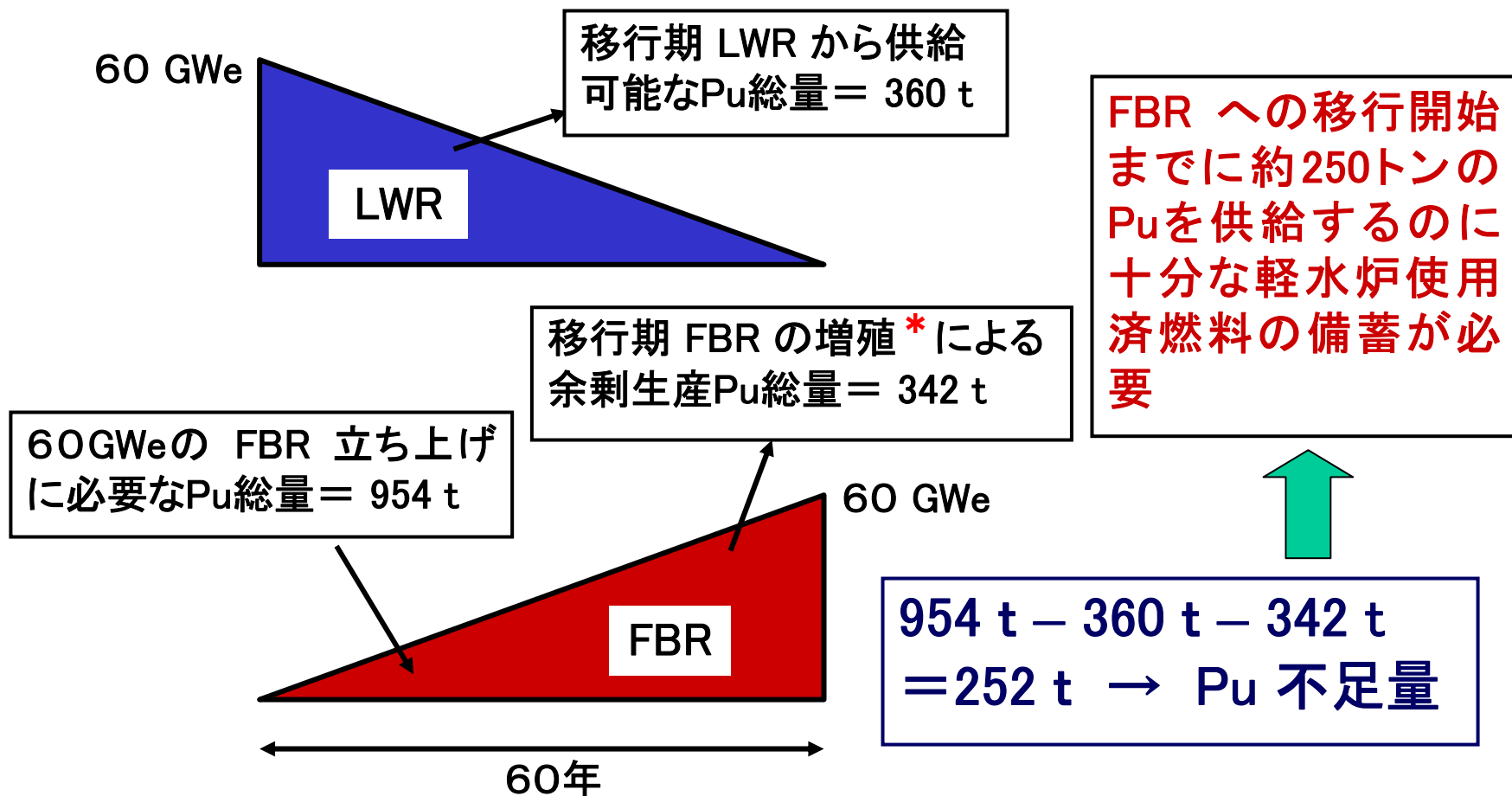
# 1 GWeのFBR立ち上げに必要なPu量

$$8.4 \text{ t} + 1.25 \text{ t/y} \times 6 \text{ y} = 15.9 \text{ t}$$

 外部から供給が必要なPu  
 自給できるPu



# FBR移行期のPuバランス(1)



\* 増殖費 = 1.12

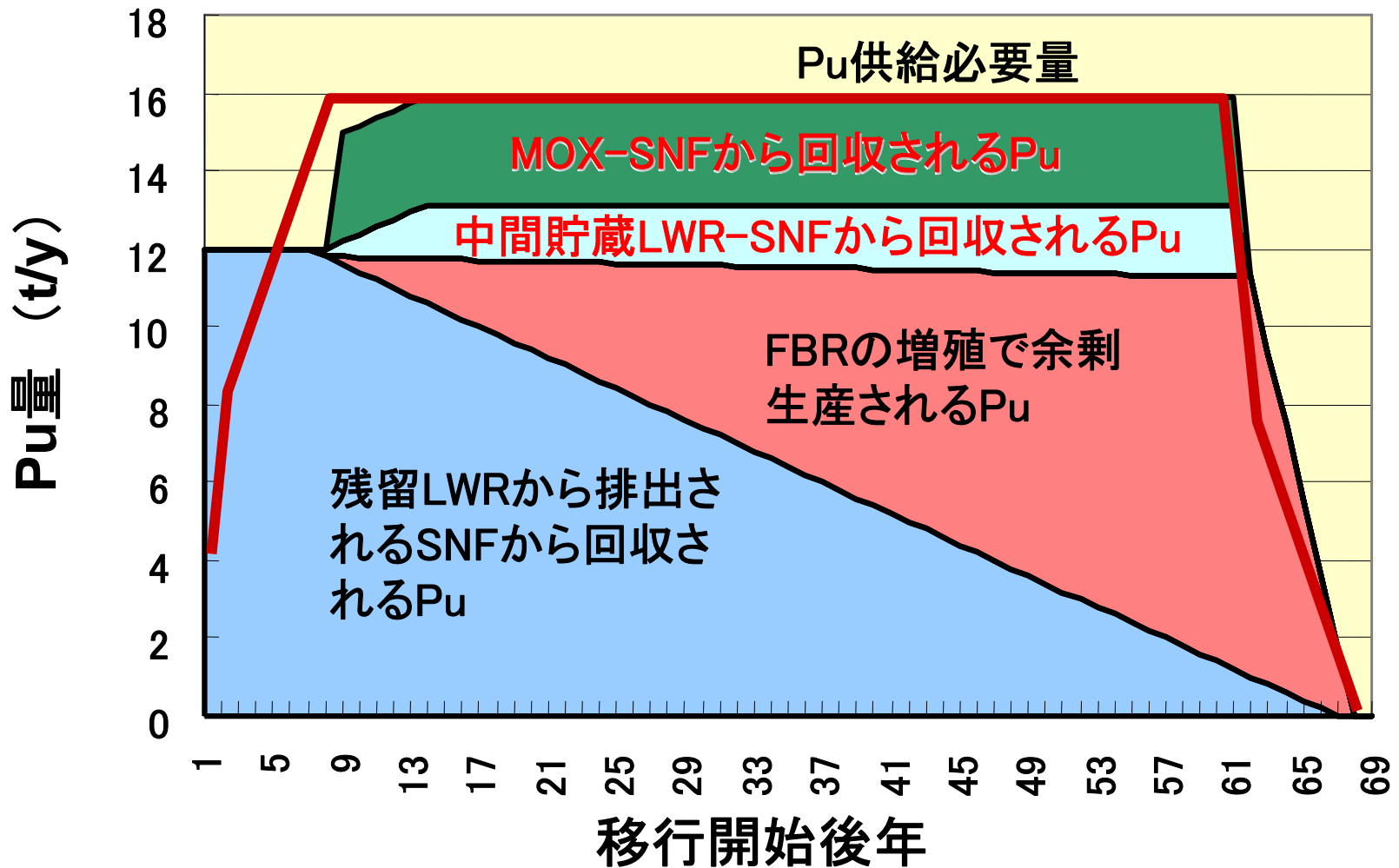
# 備蓄使用済み燃料から供給可能なPu量概算

使用済み燃料の備蓄期間 (年)		40	30	
使用済み燃料年間排出量 (t/y)		1,200		
年間再処理量 (t/y)		800	800	500
使用済み燃料の備蓄 量 (t)	ウラン燃料	11,800	9,000	19,200
	MOX燃料	4,200	3,000	1,800
	合計	16,000	12,000	21,000
使用済み燃料から回 収可能な Pu量 (t)	ウラン燃料	118	90	192
	MOX燃料	145 (*)	104 (*)	62 (*)
	合計	263	194	254

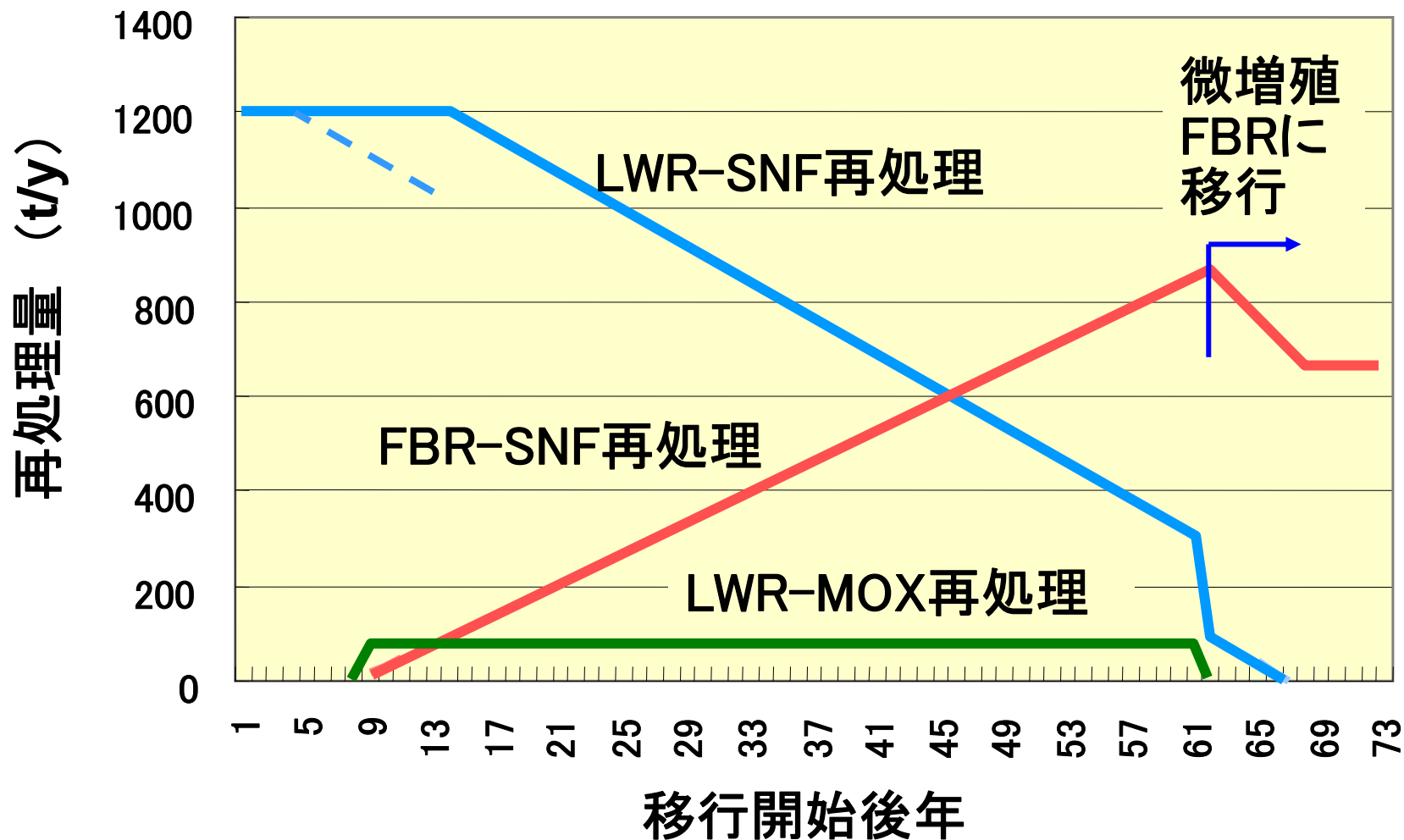
(\*) Puフィッサイル率がウラン燃料から回収されるPuに比べ約3割低いことを  
勘案した実効等量

# FBR移行期のPuバランス(2)

- 800トン再処理、残りSNF40年備蓄ケースの例

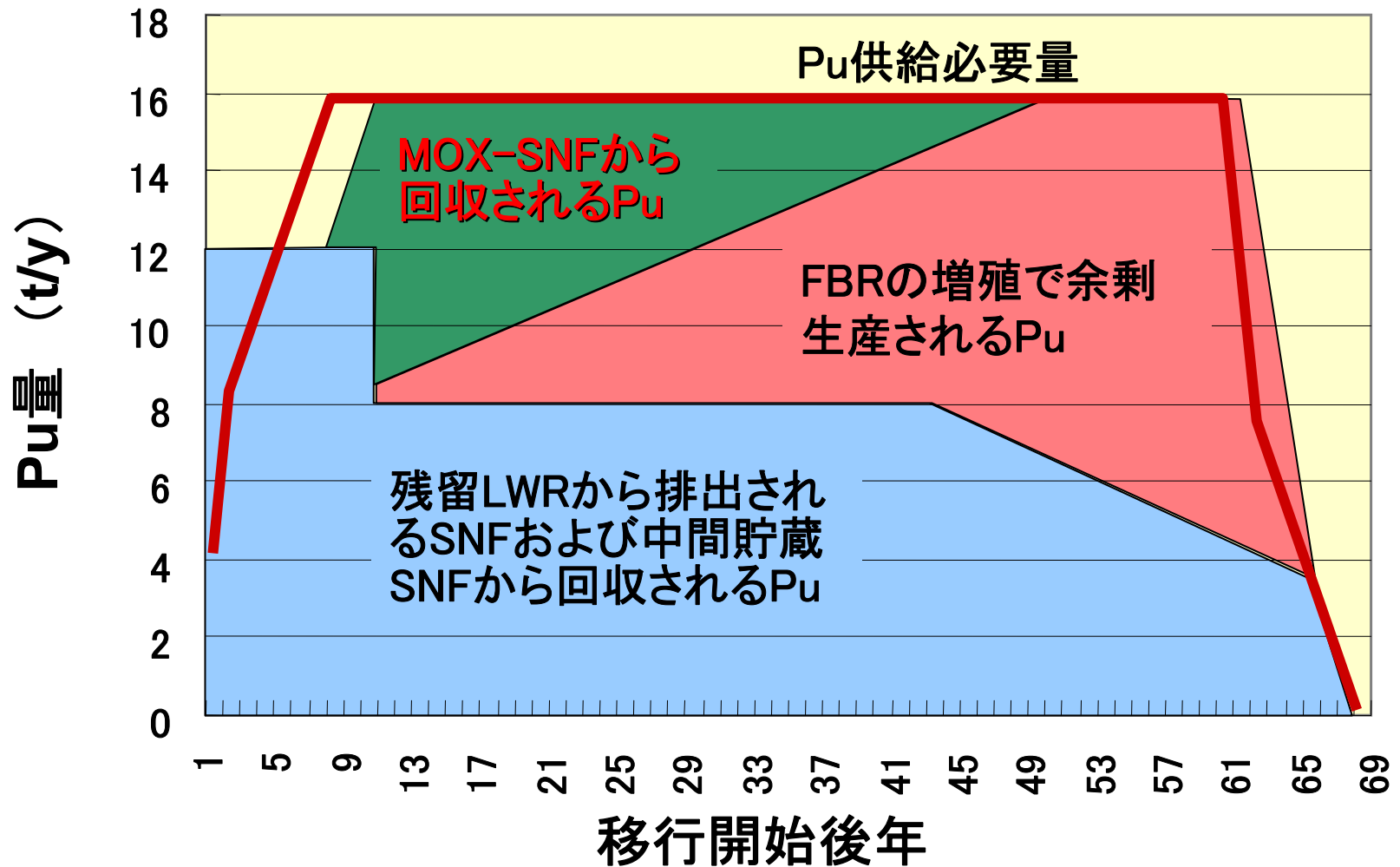


# FBR移行期に必要な再処理容量



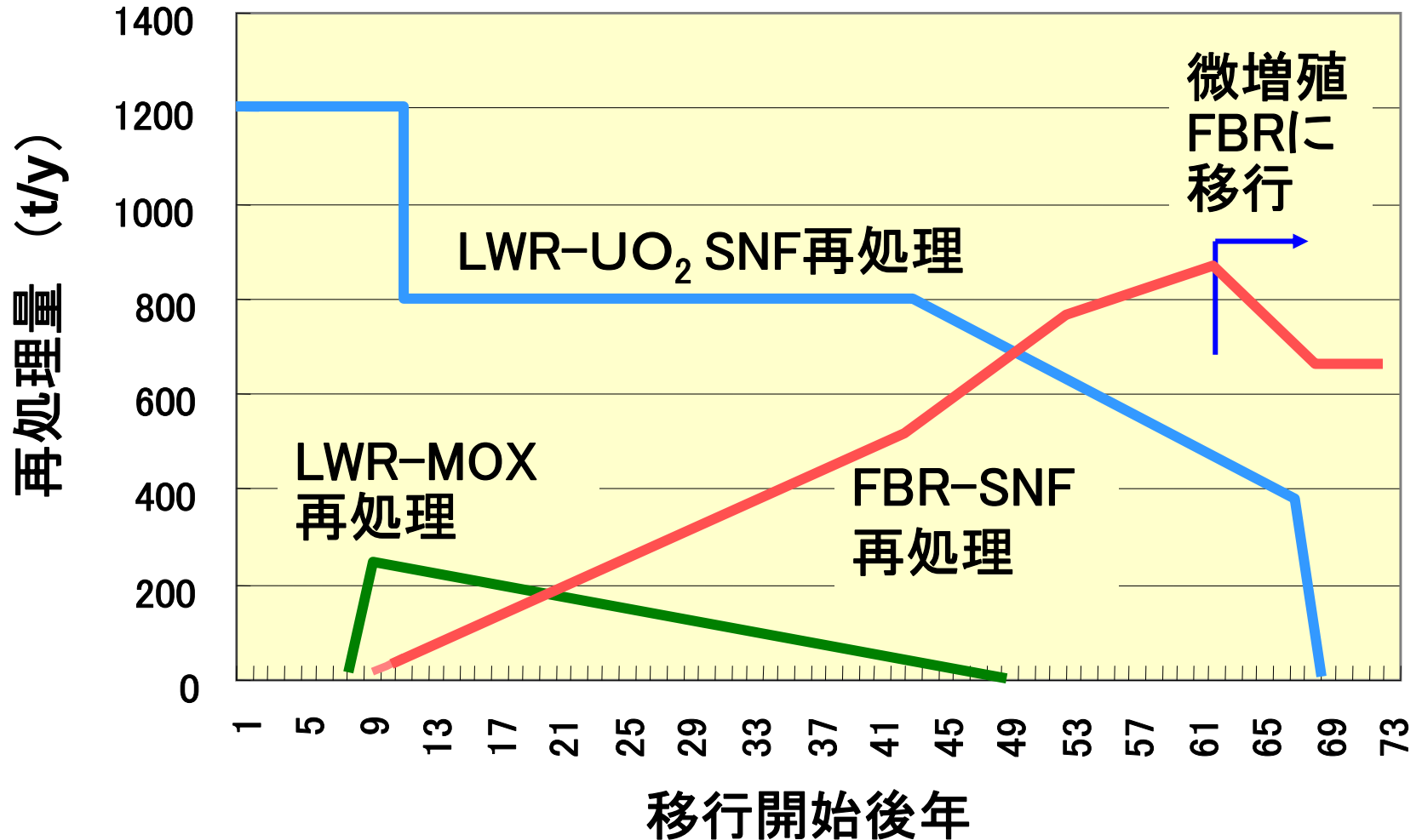
# FBR移行期のPuバランス

- 再処理分担調整ケースの例



# FBR移行期に必要な再処理容量

- 再処理分担調整ケースの例

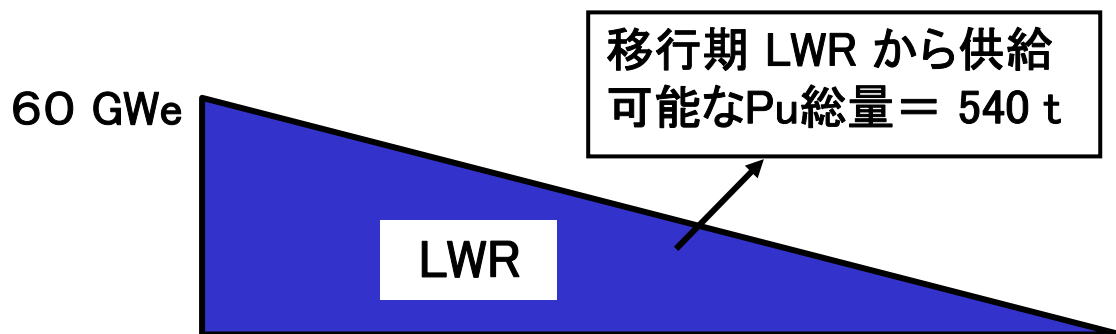




# FBR移行期のPuバランス

## 90年間で移行のケース

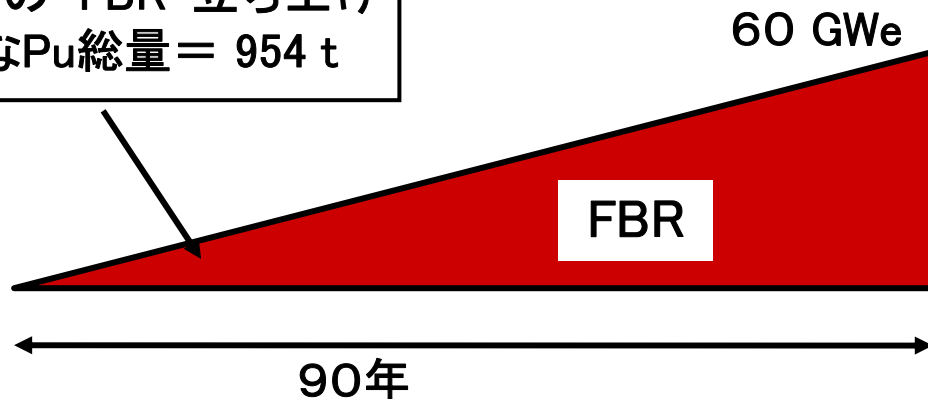
(800トン再処理、残りSNF40年備蓄ケース)



移行開始までに備蓄されるSNF (MOXを含む) から供給可能なPu総量 = 263 t

$$954\text{t} - 540\text{t} - 263\text{t} = 151\text{t}$$

60GWeの FBR 立ち上げに必要なPu総量 = 954 t



移行期 FBR に期待される増殖による余剰生産Pu総量 = 151 t

↓  
**増殖費は1.1以下でよい**

# FBR移行問題における留意点

- 第二再処理工場はFBRへのPu供給プラント
- 円滑にFBRを立ち上げるためには、Puの供給源として一定量の使用済燃料備蓄が必要
- Puサーマル使用済燃料は効率のよいPu供給源
- 「いつから、どういうペースでFBRを立ち上げるか」によってLWR使用済燃料の必要備蓄量やFBRに期待される増殖比が決まる
- 「第二再処理工場とFBR再処理プラントの機能をどう分担、または共有すべきか」、「Puサーマル燃料再処理はどちらで行うのが妥当か」は重要な検討事項
- LWRからFBRへの移行計画、第二再処理工場とFBR再処理プラント計画、Puサーマル燃料再処理、使用済燃料備蓄などの問題はそれぞれリンクしており、これら全体を総合的な視点で検討しておくべき
- 移行終了後のFBRサイクル時代は700t/y程度の再処理能力を維持すればよい



**End**

