

# 核燃料サイクルとプルサーマル

福島県エネルギー政策検討会幹事会

2009年10月16日

京都大学原子炉実験所  
山名 元

# プルサーマルの議論－1

- ◆原子力利用や核燃料サイクルは、物理的に極めて複雑な機構に基づく概念であると共に、安全性、経済性、社会的側面、資源論等の多くの要素が関係する難しい課題である(右)。
- ◆一方、事業者による不祥事や、政策に関わる説明機会の不足等もあって、本質的な議論が不足してきたことが懸念される。
- ◆このテーマでは、経済性など短期的視点が強調されがちで、「資源面」と「廃棄物管理」の二つの視点での長期的な意義が、理解されにくい。また、リサイクル路線以外の路線を選択をする事のデメリットや現実性について認識不十分なままで議論が進みがちである。
- ◆2005年に策定された原子力政策大綱では、原子力や核燃料サイクルに関わる混乱に対して、議論の仕切り直しが行われたが、世界的な原子力環境が変化しつつある現状において、原子力利用や核燃料サイクルの本来の考え方について再度冷静に見直してみる必要がある。

## 検討すべき様々な要素

1. 経済性
2. 安全性
3. 資源利用性(エネルギー安定供給)
4. 技術的な成熟と信頼性
5. 環境適合性
6. 放射性廃棄物管理最適化
7. 核不拡散性
8. 海外動向と国際協調
9. 社会的受容性
10. 選択肢の確保(柔軟性)
11. 長期にわたるリスク
12. 産業インフラ整合性
13. 技術維持人材の充足度
14. 地理的な特性
15. 地政学的リスク
16. 海外依存度の最適化
17. 地域発展と活性化

# プルサーマルの議論－2

## ◆核燃料サイクルに対する主な反対論

- ①原子力利用の是非
- ②プルサーマルによる資源利用効果と経済性
- ③プルサーマルの安全性
- ④将来の核燃料サイクル路線の展望

◆これに加えて、原子炉の耐震性などの、原子力発電所自体の安全性への懸念がプルサーマル議論の場で語られているケースも多い。

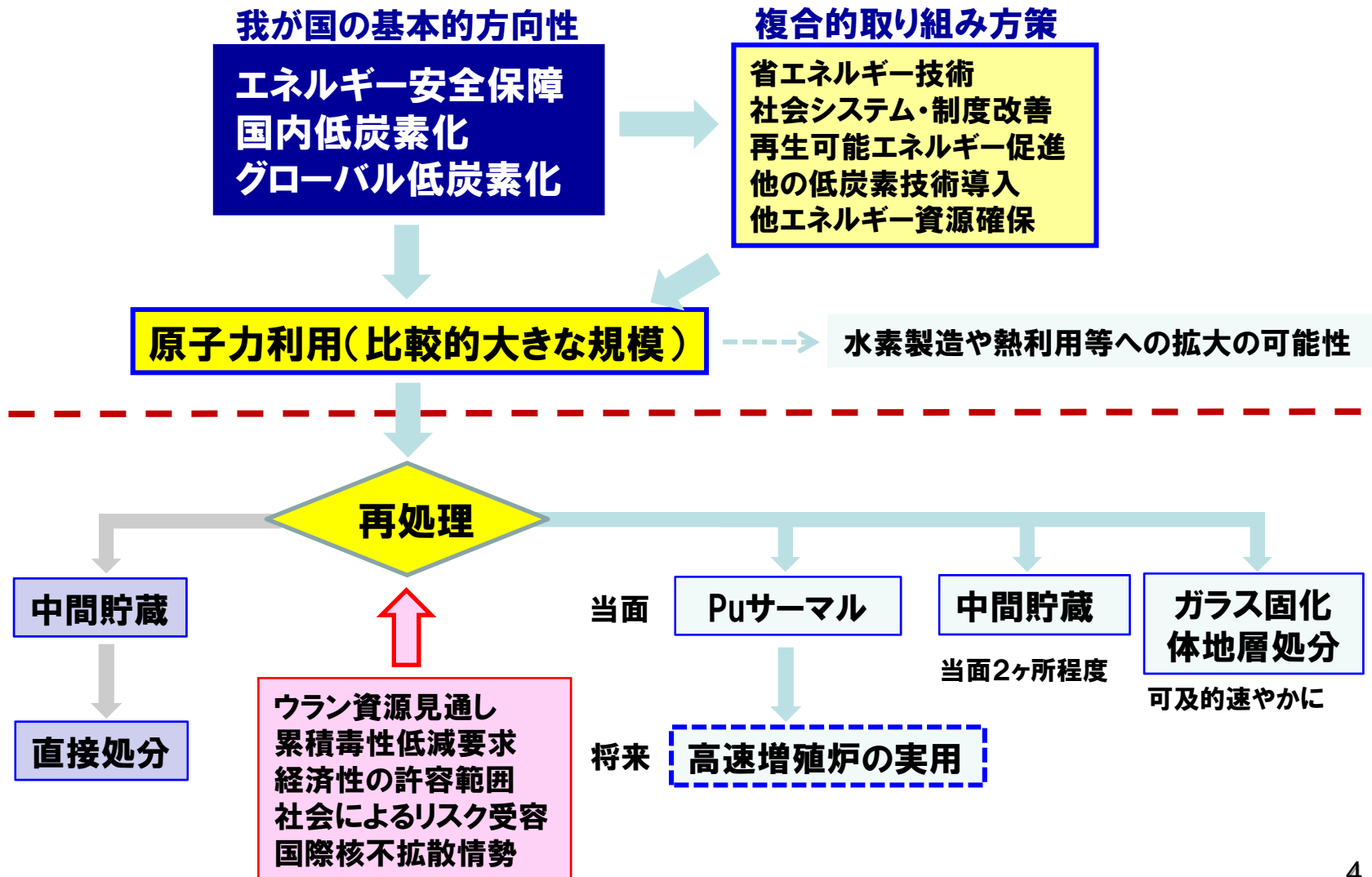
◆長期原子力利用という我が国の不可避の路線に関して、「使用済核燃料(バックエンド)をどのように運営してゆけば最もリスクが少ないか」という本質的な路線選択の問題なのであるが、印象論的・感情論的、あるいは定性的な議論に終始していることが多い。

◆対案の路線が提示されないままの反対論や、最新の情勢をフォローしきっていない反対論も存在し、この話題の複雑さを感じさせる。

## 主要な課題など

1. 核燃料サイクル政策の必要性
2. 核燃料資源の見通しと入手リスク
3. 使用済燃料直接処分や長期貯蔵の妥当性
4. 使用済MOX燃料の処置
5. プルトニウムの利用計画の妥当性と核不拡散問題
6. 回収ウランの利用計画
7. 地層処分の妥当性及び受け入れ先が見つからない件
8. 世界の原子力政策・核燃料サイクル政策
9. プルサーマルによる安全余裕の低下があるか
10. 地震に対する安全性
11. MOX燃料の取扱いの安全性
12. 制御棒価値の低下の件
13. 出力の不均等の件
14. プルトニウムスポットの影響の件
15. 各国のプルトニウム濃度との比較(日本が高い?)
16. 原子力安全委員会の指針の根拠と適用範囲
17. 反応度事故や冷却水喪失事故の判断基準
18. 使用済燃料の貯蔵量
19. MOX燃料製造の品質管理
20. MOX燃料加工事業者の技術的能力
21. プルサーマルによる電気料金への影響
22. 人的誤操作(ヒューマンエラー)の防止
23. 核物質防護についての懸念

# 低炭素社会に向けての原子力の位置づけ



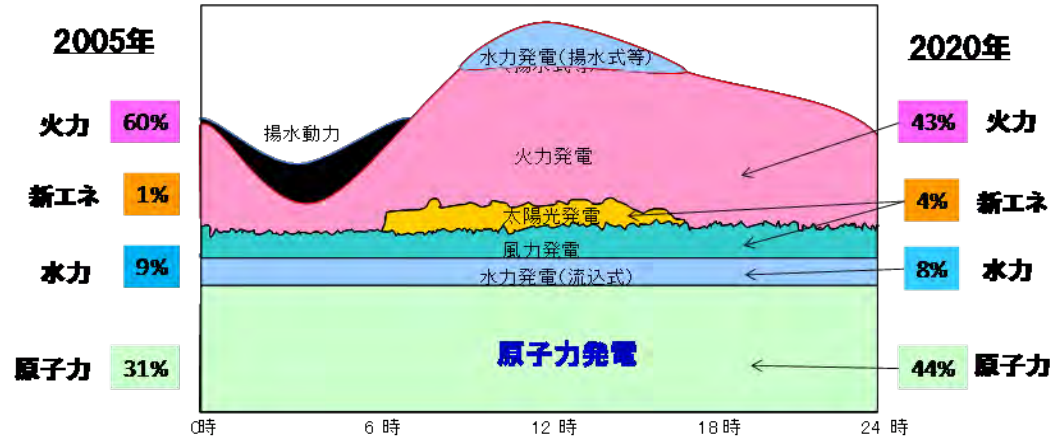
# 低炭素中期目標と原子力の役割

- ◆原子力は「ベースロード」を担う電源であり、太陽光のようなピークロード対応の電源とは異なる。
- ◆鳩山シナリオ等における太陽光発電の大量導入は、今後期待される重要な目標であるが、それを支える上で、安価で安定したゼロエミッション電源としての原子力発電は、長期的に不可欠な電源。
- ◆各エネルギー源の特性に応じて最適な「ミックス」を模索することになるが、2020年頃に、発電量の50%弱を原子力に依存する事は、極めて現実的な目標である。

## 種々の電源の特性

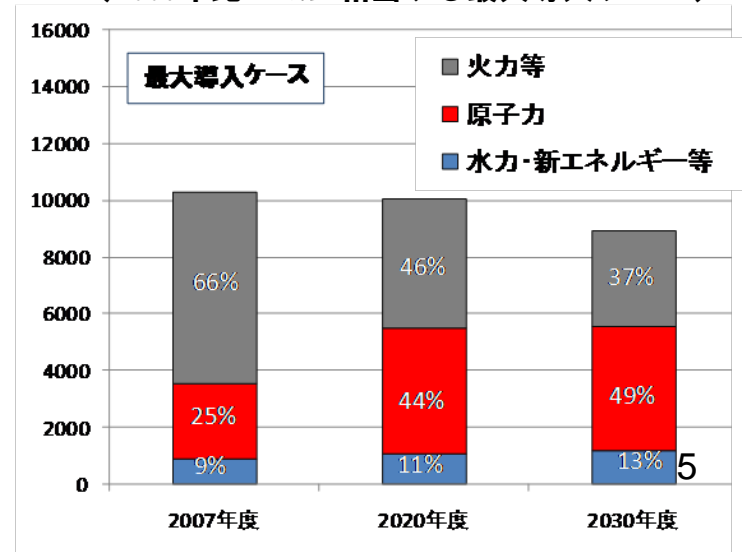
	火力	水力	原子力	再生可能
出力安定性	○	○	○	×
対外乱安定性	×	○	○	○
長期資源確保	×	○	○	○
グローバル環境	×	○	○	○
出力規模期待値	○	△	○	×
経済性	△	○	○	×
社会受容	△	△	×	○
求められる条件	炭酸ガス貯留 ローカル環境保全	環境保全	安全確保 放射性廃棄物処分	広大な面積 バックアップ電源 安定化コスト

## 日負荷変動における役割分担



## 発電構成見通し

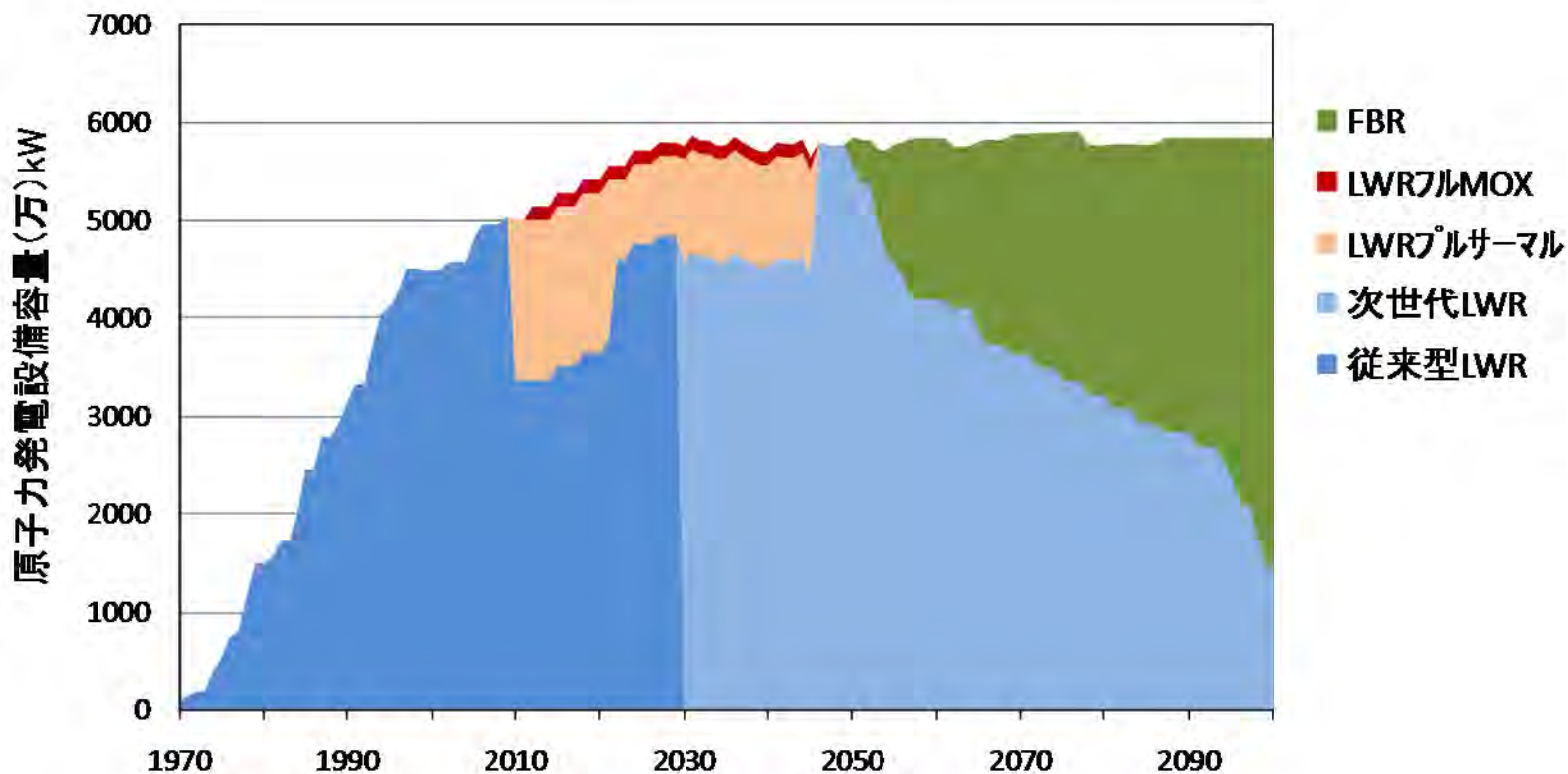
(2005年比-14%に相当する最大導入ケース)



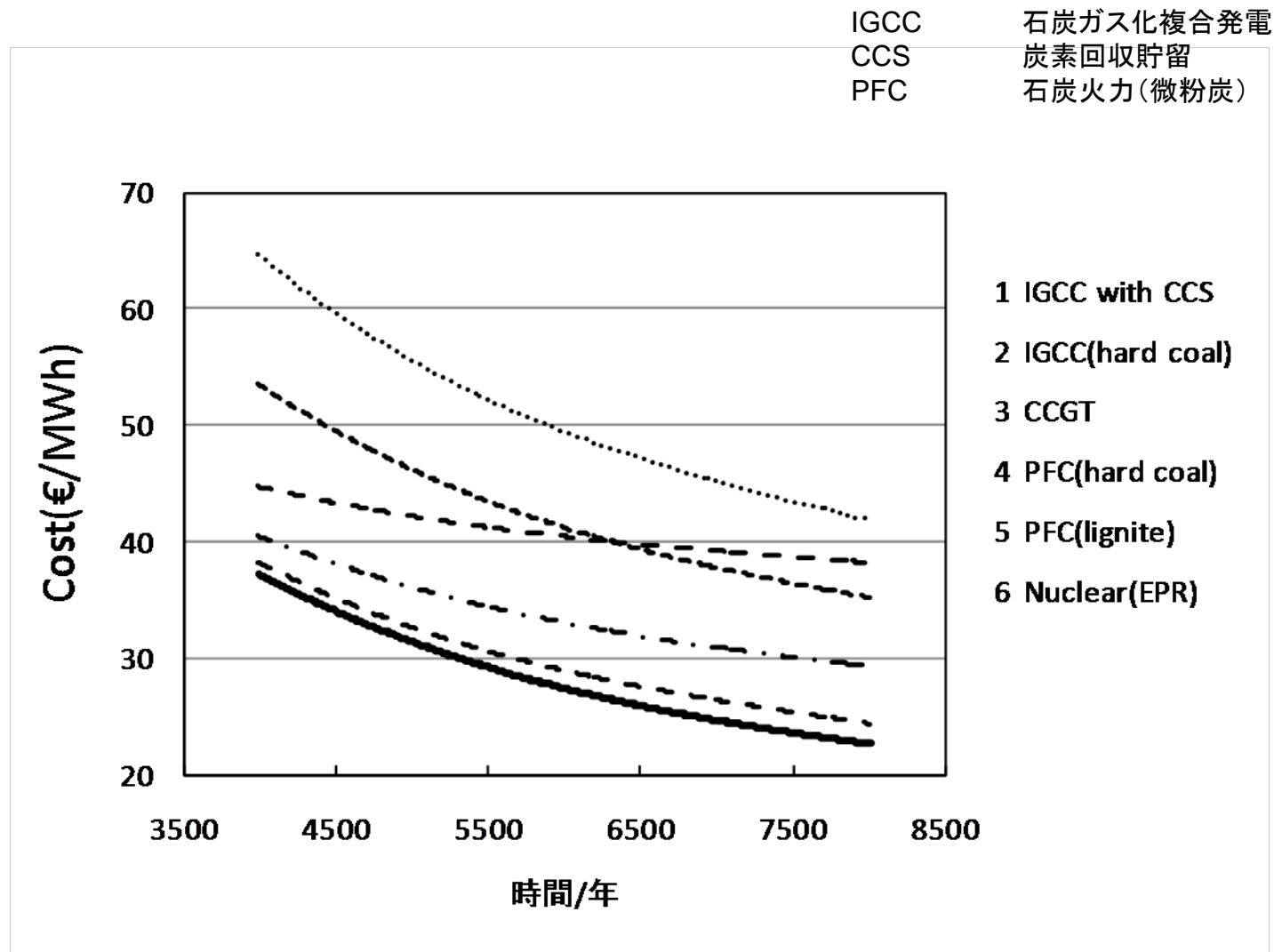
# 設備容量59GWを想定した原子力発電の予測(配付資料なし)

## 耐用年数を超えたLWRの後をFBRがゆっくりと引き継ぐケース

注) 簡単化のため、2030年以降は全てのLWRを次世代設計としている



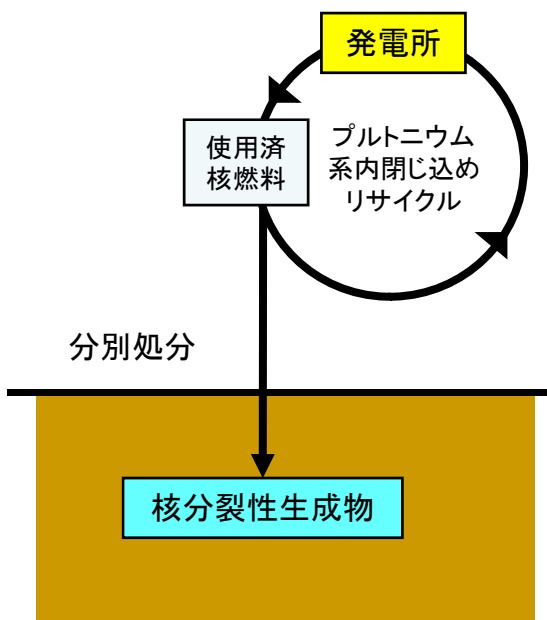
# 欧州での発電コスト比較（配布資料になし）



# 使用済燃料取扱いのオプション

## 再処理路線

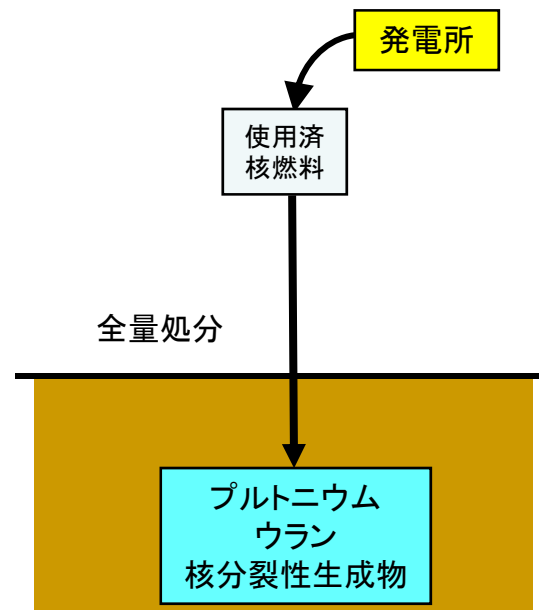
(核燃料サイクル)



- ▶ プルトニウムを地層処分せず、燃料として再利用する(プルサーマル)。
- ▶ これにより、放射性廃棄物の減容と、資源の有効利用を行う。
- ▶ フランス、日本、ロシア、中国、インドなど。将来的には韓国が指向している。

## 直接処分路線

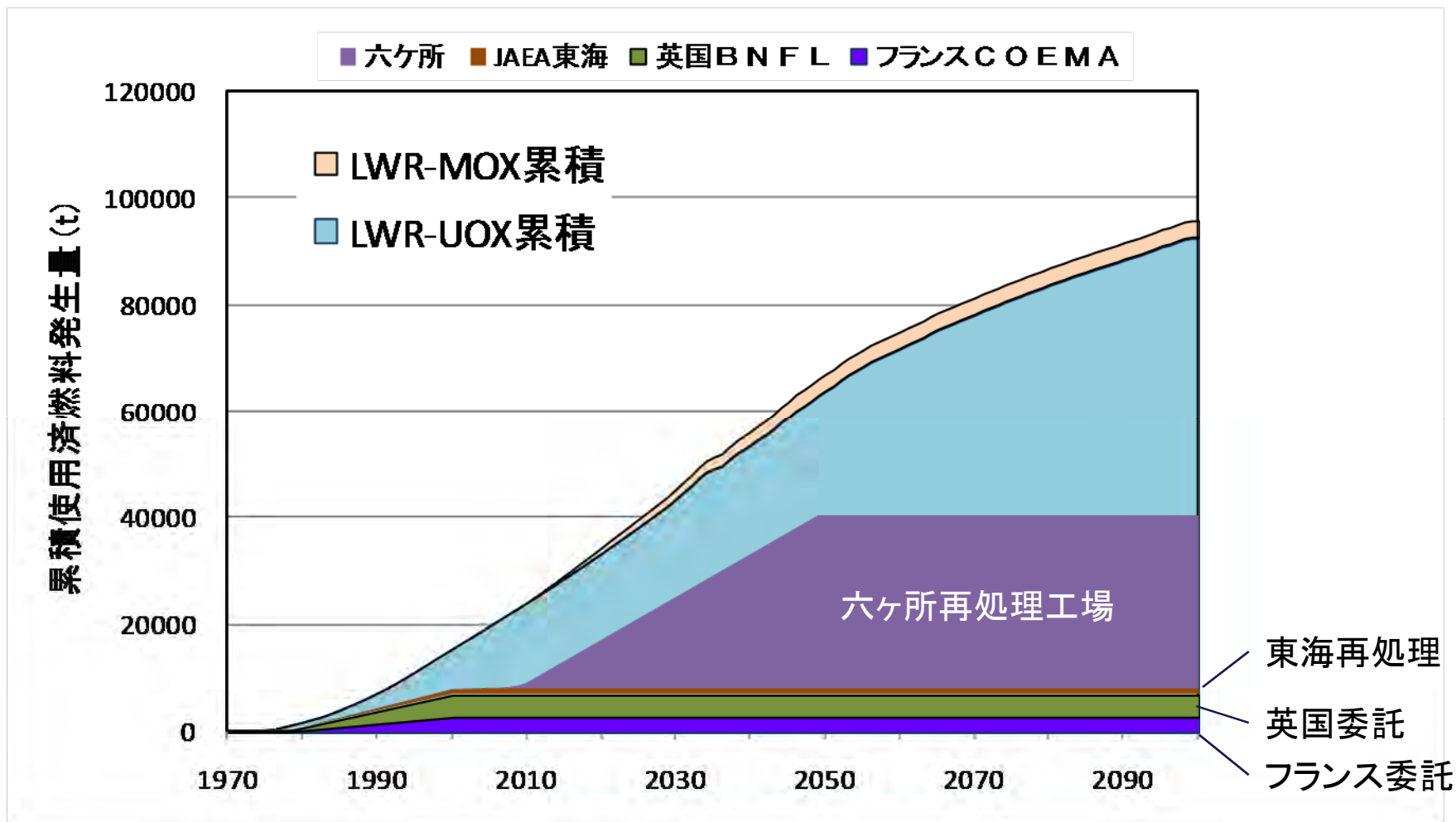
(直接処分サイクル)



- ▶ プルトニウムを含めて、使用済燃料を地層処分。
- ▶ 使用済核燃料貯蔵量(中間貯蔵)が大きくなると共に、放射性廃棄物の処分面積が大きく、毒性が長く続く。
- ▶ 原子力小規模国のフィンランドやスウェーデン、ウラン資源国のカナダが採用。原子力大国であるアメリカとドイツは、この路線を指向しながらも、実施できずにいる。



# 使用済燃料累積発生量(私的な試算)

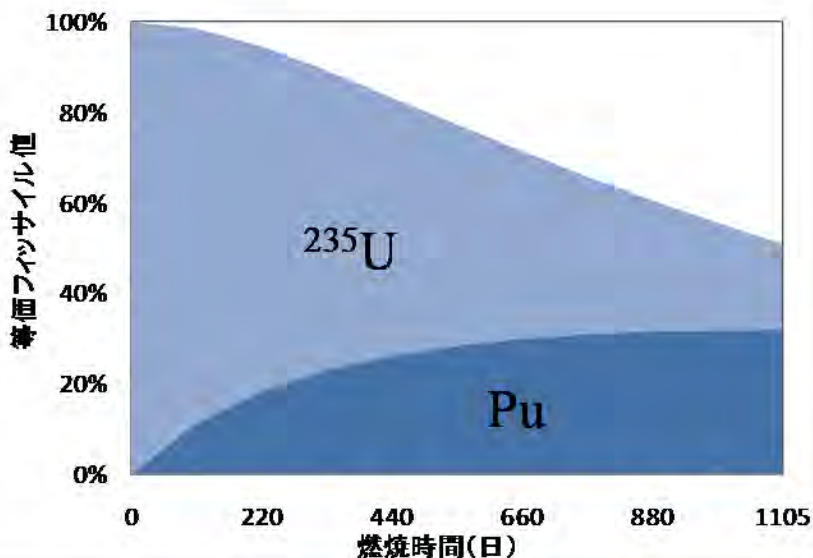


# 使用済核燃料の「燃料としての価値」

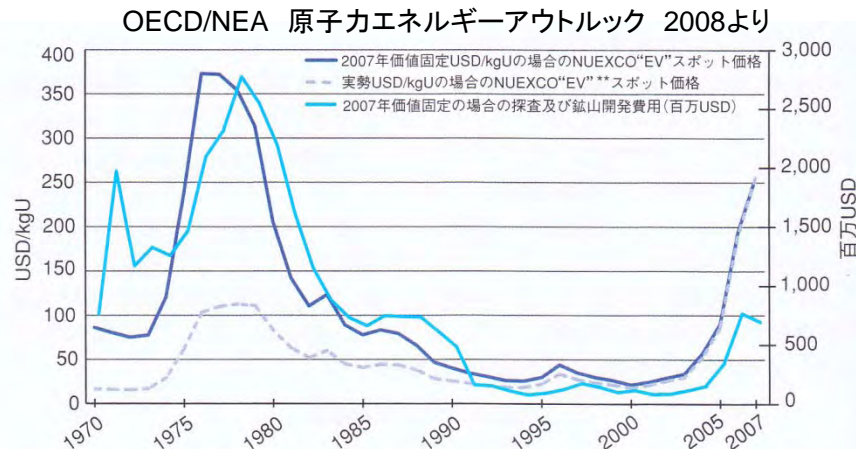
- ◆新濃縮ウラン燃料中の燃料価値(100)は、ウラン-235によるものであるが、燃焼後の使用済燃料中では、ウラン-235の残留分20、プルトニウム分30が残っている。
- ◆初期燃料の50%近い燃料価値が残留している。この残留価値をそのまま廃棄物として利用可能性をゼロとしてしまうか、利用の可能性を残すかの判断。
- ◆残留しているプルトニウムを分離して燃料として再利用するので再処理プルサーマル路線。
- ◆なお、回収ウラン中でのウラン-235についても、再濃縮操作によって、貴重な核燃料資源であることには変わりない。資源可能性物質として保管すべき。

- ◆日本は全てのウラン資源を海外から輸入している。
- ◆ウラン資源は、資源量としては、カナダ、豪、米、アフリカ、カザフスタンなどに比較的豊富に存在しているが、その入手価格は大きく変動している(下図)。
- ◆世界的な原子力発電の増大(2030年に現在の1.5倍程度に増加の可能性大)によるウラン資源獲得競争や、資源外交的側面から、ウランを安価に安定して輸入出来ない時代が来る可能性がある。
- ◆再処理リサイクル路線は、資源性物質(プルトニウム及び回収ウラン)を廃棄物とせず、利用しながら原子力を続ける道を選択。

原子炉で使用中の核燃料の燃料パワーの変化



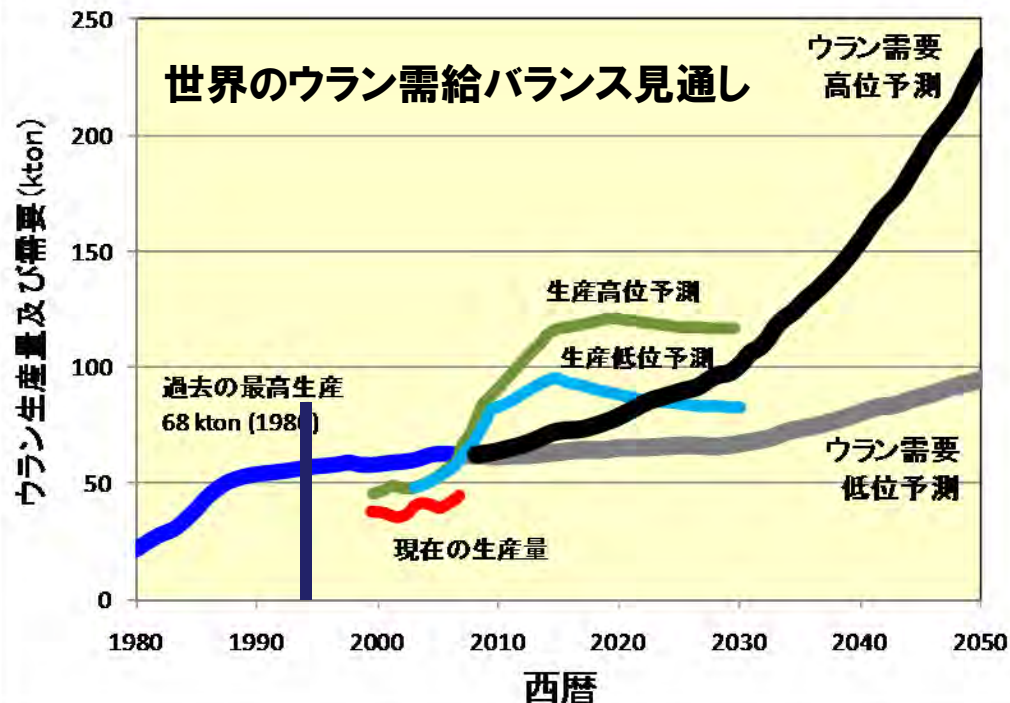
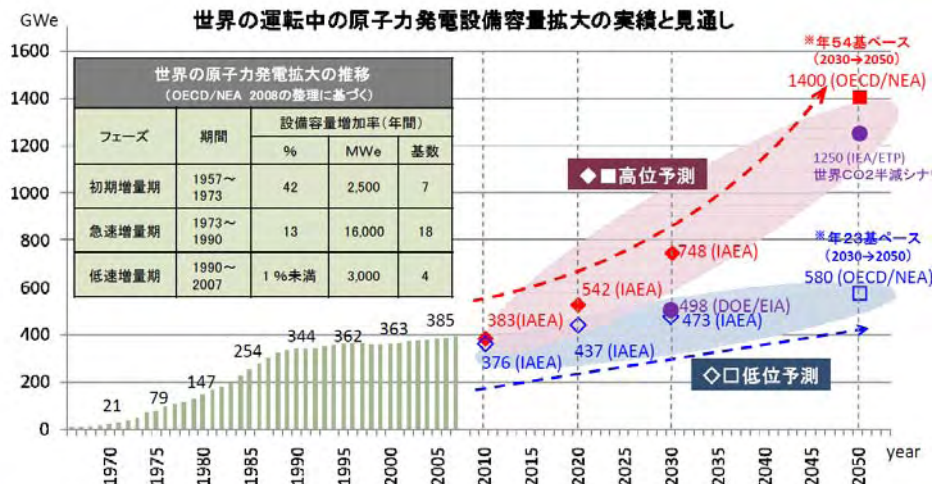
ウラン資源スポット価格の変遷



\* 2007年の探査及び鉱山開発費用は、推定値  
 \*\* NUEXCO Exchange Value("EV")のスポット価格データはTradeTech (www.uranium.info)の厚意による

# 不明確なウラン資源の将来の需給バランス

- ◆ ウラン資源の埋蔵量の観点からみると、可採量はかなり大きく、現在の世界の年間需要ベースで100年近くカバーされる。需要と生産の逆転は、直近に迫っている。
- ◆ 一方、懸案材料は、①世界的な原子力需要の急増、②ウラン生産能力が需要に追従しないケース、③投機的な原因による価格高騰、④資源ナショナリズム、⑤輸送ルートリスク、他。
- ◆ これによるウラン価格不安定、ウラン価格上昇、長期入手保証の困難化、結果的なLWR発電コストの上昇。
- ◆ 二次フィッサイルソースとしての①回収プルトニウム、②回収ウラン、③濃縮テイルウランは、2030～2050年頃にはタイムリーに利用可能な状態をしておくべきではないか(当面の措置としてプルスーマルおよび回収ウラン再濃縮)。2050年頃以降に高速増殖炉で利用する技術的可能性は排除すべきではない。
- ◆ その他、ウラン産出国における、ウラン採掘公害問題の存在など、無制限にウランを輸入する路線には、慎重たるべき。

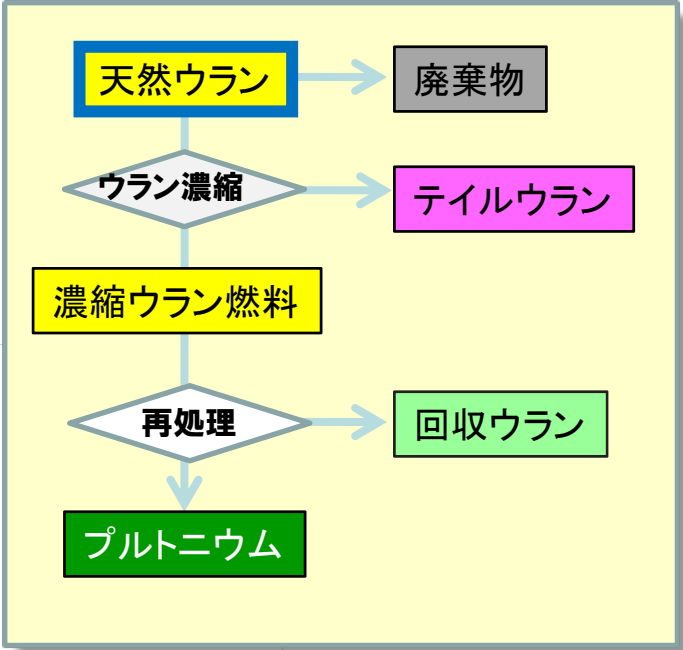
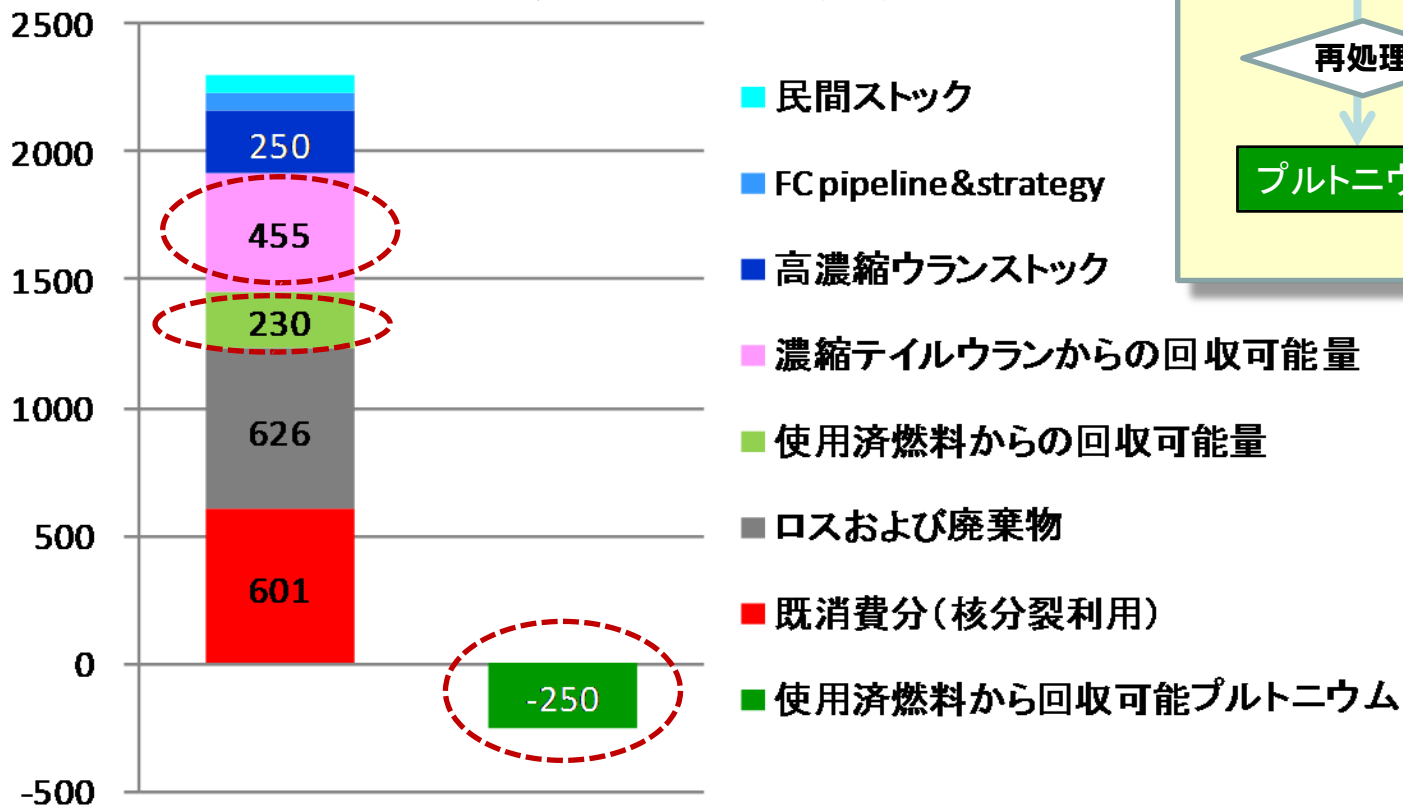


# 参考・もったいないウラン-235の利用？（配布資料になし）

U-235: 自然界にわずかに存在する貴重な核分裂性資源。どの程度有効利用されているか

核分裂性資源二次ソースの価値を考える

2000年時点累積ウラン生産量(kt)



# 高放射性廃棄物の比較

ガラス固化体の方が直接処分体よりも、軽量で小さく、発熱密度が小さい。毒性継続時間も短いのが特徴である。

	直接処分		再処理リサイクル	
廃棄体	使用済燃料		ガラス固化体	
廃棄体長さ	4.1 (PWR)		1.3 m	
廃棄体重さ	670 kg (PWR)		500 kg	
処分体サイズ	高さ: 4.76 m		高さ: 1.73 m	
(オーバパックを含む)	直径: 1.24 m		直径: 0.82 m	
処分体重さ	4体収納: 40.9 t(燃料 1tあたり 22.2 t)		6.1 t(燃料 1tあたり)	
(オーバパックを含む)	2体収納: 25.4 t(燃料 1tあたり 27.6 t)			
固化体マトリックス	照射済みの二酸化ウラン(非均質)		ガラス(均質)	
含まれる元素	U, Pu, 全ての FP, MA		FP(希ガス・ヨウ素を含まない), MA	
品質の統一性	燃料体の種類や履歴により個体差が大きい		個体差があまりない	
処分の研究開発状況	海外において進められており国内では実施せず		国内において長い研究経験を持つ	
全放射能(Bq/HMt)	50年 : 2160 Bq	10000年 : 533 Bq	50年 : 1280 Bq	10000年 : 53 Bq
α放射能(Bq/HMt)	50年 : 9440 Bq	1000年 : 2110 Bq	50年 : 1950 Bq	1000年 : 315 Bq
発熱量(W/HMt)	30年 : 998 W	50年 : 722 W	30年 : 755 W	50年 : 475 W
処分の研究開発状況	海外において進められており国内では実施せず		国内において長い研究経験を持つ	
処分面積(m <sup>2</sup> /tU)	軟岩: 173.9 m <sup>2</sup> /tU	硬岩: (326.1) m <sup>2</sup> /tU	軟岩: 112.5 m <sup>2</sup> /tU	硬岩: 58.5 m <sup>2</sup> /tU



# 高放射性廃棄物の比較

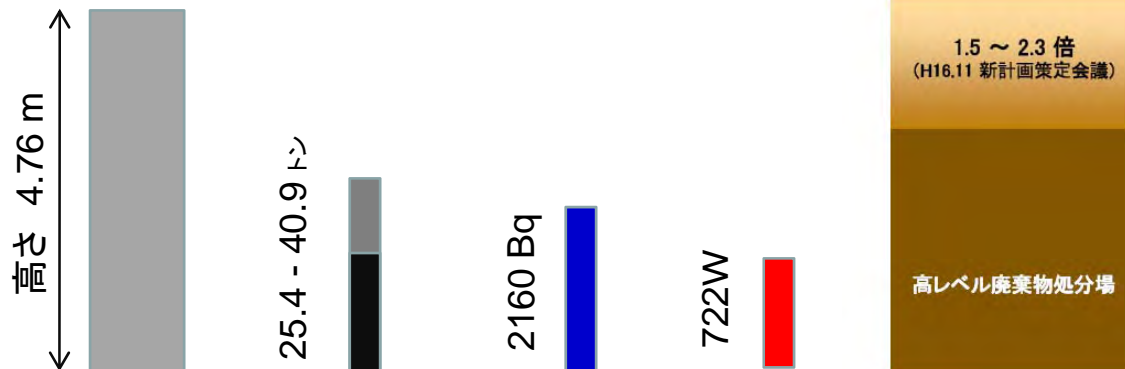
- 直接処分では「使用済燃料そのもの」が高放射性廃棄物となる。再処理リサイクル路線では、資源物質であるウランとプルトニウムは回収して使うので、「核分裂生成物だけが高放射性廃棄物」となる。

サイズ      重さ      50年後の      50年後の      地層処分  
 (1トンウラン当り)      放射能      発熱量



## 直接処分の廃棄体

内容物： ウラン・プルトニウム・核分裂生成物・放射性ヨウ素、金属部材

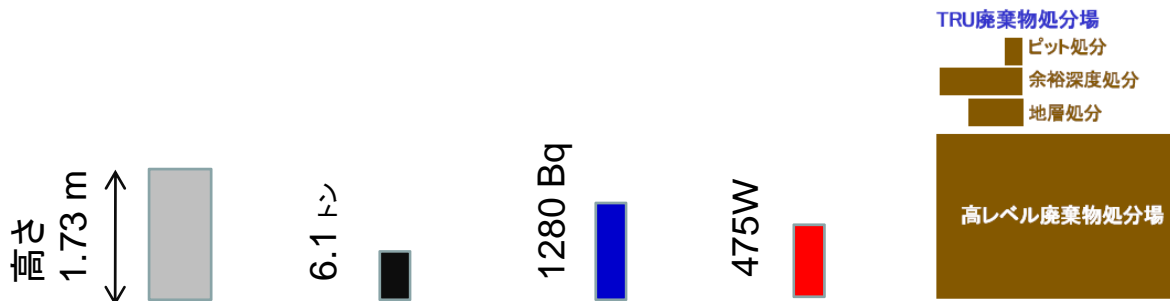


1km 河田東海夫氏作成資料より



## 再処理の廃棄体

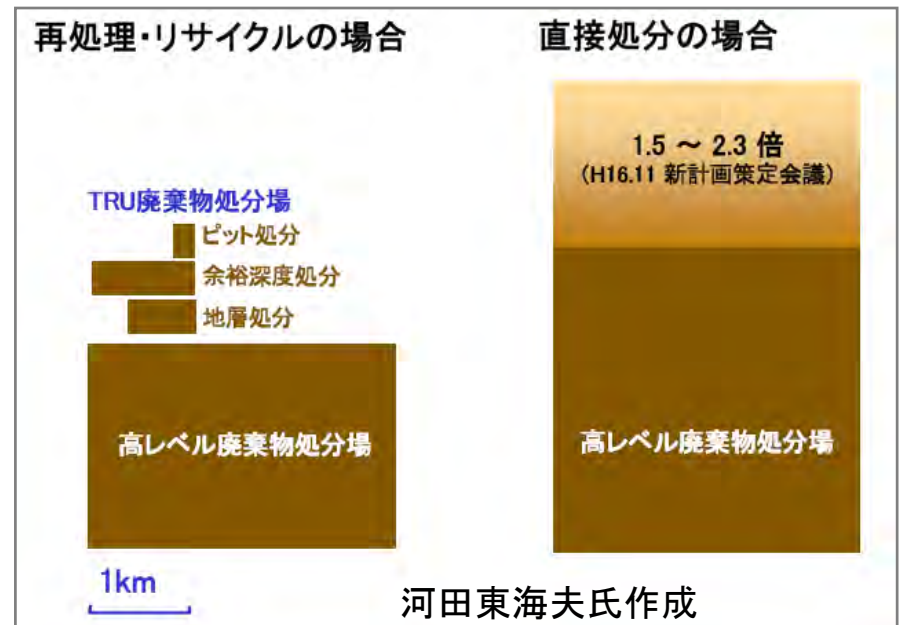
内容物： 核分裂生成物



1km 河田東海夫氏作成資料より

# 高レベル放射性廃棄物の処分比較(配布資料になし)

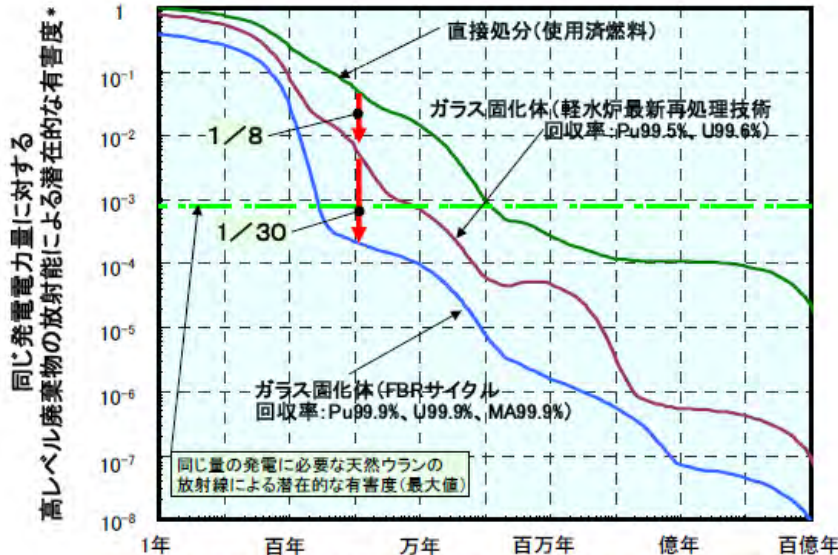
- 直接処分廃棄体の場合には、一体あたりの重量(20t~40t)が、ガラス固化体(6t)の数倍以上に上り、長さも長い。この事は、遠隔操作による埋設処分において、いくつかの制約を与えるはず。
- ①横置き設置が難しくなること、②坑道の大きさが異なること、③ハンドリング装置が大型化すること、④遮蔽への要求が大きくなること、⑤ベントナイトの布設などの技術的な難易度が上がることなどが想定される。この違いは、ガラス固化体と直接処分体の地層処分の可能・不可能を決定づけるものではなく、工学的な難易度、すなわちコストに影響するものである。
- 発熱密度の減少から、地層処分面積が、直接処分に対して最大半分になるという、政策大綱での試算は、原子力学会での評価などでも裏打ちされている。
- 直接処分に対して、「再処理路線では、高レベル放射性廃棄物の負荷は下がるが、TRU廃棄物や低レベル放射性廃棄物の量が増えることが問題だ」との指摘がある。低レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物の処分面積は、わずかでな範囲に留まる。
- 貯蔵中の貯蔵密度、地層処分実施までの必要冷却期間、輸送の規模や安全性や効率性など、その他の様々な要素について検討する必要がある。中でも、地層処分サイトが内陸に選ばれる場合には、運搬体の仕様(長さや一体の重量)が、道路の状況に制限を与える。
- 本来は、我が国においても、このような現実的な「直接処分」と「ガラス固化体」の管理の難易度の評価が精緻に行われるべきである。



# 使用済核燃料の中身と分別処理の効果

- ▶ ウラン：天然に存在する物質。残留資源価値がある。地層処分する必然性は低い。
- ▶ プルトニウム：資源物質であり、かつ、毒性が長期継続する特殊物質
- ▶ 核分裂性核種：約1000年毒性が継続する放射性物質。一部の有用利用の可能性はあるが、燃料としての資源性はない。
- ▶ プルトニウムとウランを地層処分しないことは、サイクル路線の主要な意義の一つである。

## 高放射性廃棄物の潜在的有害度



\* 高レベル放射性廃棄物と人間との間の障壁は考慮されておらず、高レベル放射性廃棄物の実際の危険性ではなく、潜在的有害度を示している。使用済燃料の1年目の潜在的有害度を1とした相対値。

(新計画策定会議(第9回)資料第13号「核燃料サイクル諸量の分析について」より)

## 使用済燃料中各成分の量と放射能

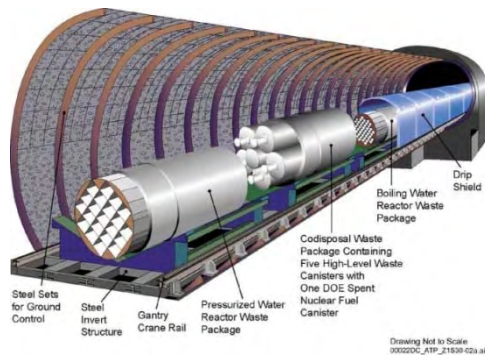
BWR(39500MWd/t)		重さ(g/t)	放射能(Bq/t)
ウラン	U-238	9.36E+05	1.47E+11
	U-235	7.16E+03	
プルトニウム	核分裂性 Pu	7.03E+03	5.09E+15
	非核分裂性 Pu	3.38E+03	
$\alpha$ 放射性核種	TRU核種	1.18E+03	1.95E+14
$\beta$ 放射性核種	核分裂生成物	4.06E+04	1.86E+16



# Yuccaマウンテン（米国）とGorleben（独）

- ◆ 米国・ドイツとも、直接処分事業は実施に至っていない。両国ともサイト内貯蔵で対処。
- ◆ ドイツは、過去の再処理分のプルサーマルを実施している。
- ◆ 米国では、解体核兵器を用いたプルサーマルの実施が進行中。

## 米国の直接処分場計画 Yucca Mountain, NEVADA, USA

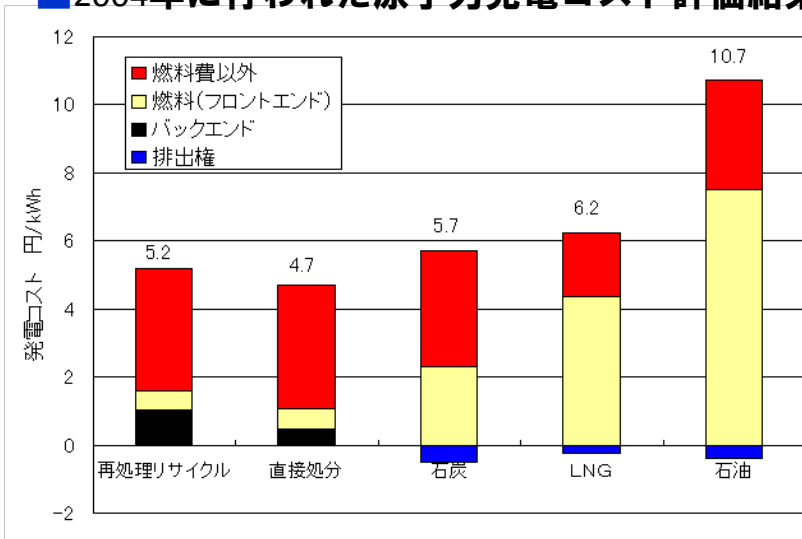


## ドイツの使用済燃料直接処分計画 Gorleben



# プルサーマルと原子力発電の経済性

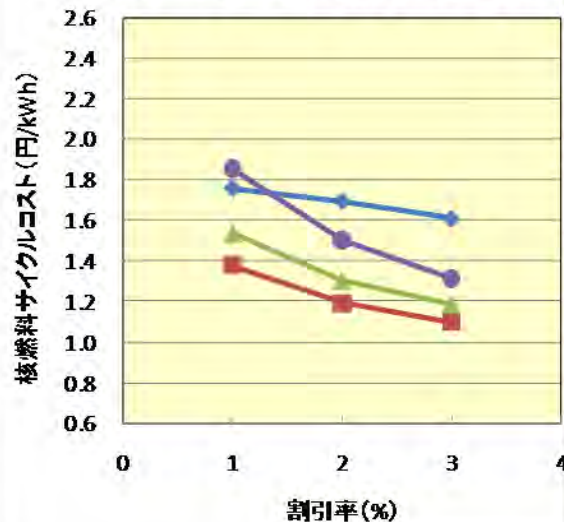
## 2004年に行われた原子力発電コスト評価結果（新計画策定会議資料）



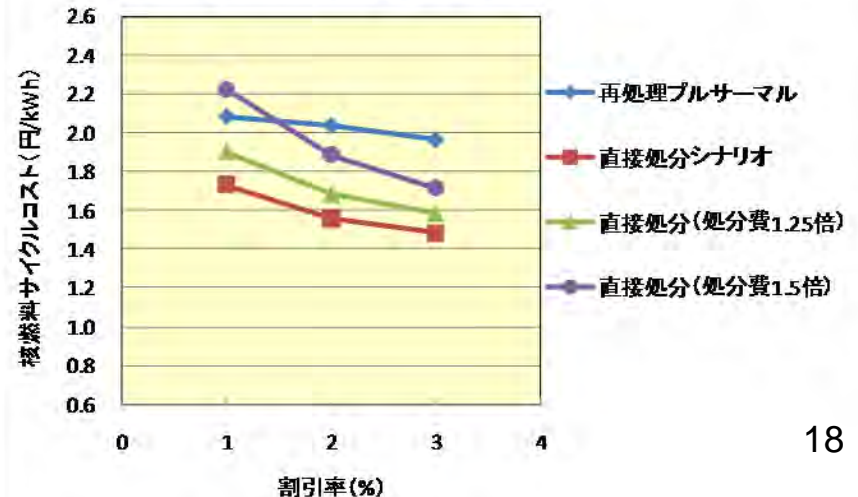
			全量再処理	全量直接処分
核燃料サイクルコスト	フロントエンド	ウラン燃料	0.57	0.61
		MOX燃料	0.07	—
	バックエンド	再処理	0.63	—
		高レベル放射性廃棄物貯蔵輸送処分	0.16	—
		TRU廃棄物処理処分	0.11	—
		中間貯蔵	0.04	0.14
		使用済燃料直接処分	—	0.19~0.32
合計			1.6	0.9~1.1
発電コスト			5.2	4.5~4.7

## フロントエンドコストと処分費割引率へのコストの依存性（山名試算）

### フロントエンドコスト1.25倍の場合



### フロントエンドコスト1.5倍の場合



# 長期貯蔵路線を選択することについての課題

1. 建物および容器の長期健全性の確保が技術的に可能か
2. 長期的な施設管理及び安全管理の保証が可能であるか
3. 安全規制対応を長期に継続できるか
4. 終焉のシナリオ抜きの長期貯蔵が可能であるか。地元了解が可能であるか。
5. 世代間責任の問題をどう克服するか
6. 長期にわたる自然災害や戦争などの異常時リスクに対処可能か
7. 将来のリトリブに際して技術的な対応（インフラを含め）が可能か
8. 貯蔵される核物質の将来的な核兵器への転用を防止できるか
  
9. 将来的なウランリスクの顕在化時に、再処理再開あるいは高速増殖炉開発再開をどの程度の時間で実施できるか。国際的な認可が得られるか。

海外では、多くの研究がなされている。我が国の国情に合わせての可能性を評価研究しておく必要がある。



# 指針・発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について

原子力安全委員会原子炉安全基準専門部会（平成七年五月）

MOX燃料は、その基本構造がウラン燃料と同一であるので、燃料被覆管と冷却材間の熱水力特性はウラン燃料と変わらない。また、MOX燃料を装荷した炉心では、その炉心の諸特性をウラン燃料炉心とほぼ同等に設計し得ること、燃料集合体最高燃焼度がウラン燃料を超えない範囲に限定していること等から、ウラン燃料との共存性については問題はない。MOX燃料の軽水炉における核的特性及びその物性、照射挙動は、ウラン燃料に比べ差があるものの、これらは把握されており、これまでに得られている経験、データ等からは、安全に係わる特段の問題は生じていない。しかし、安全設計及び安全評価に当たっては、以下に示すMOX燃料の特徴に留意する必要がある。

## 核的特性

- ① ボイド係数、減速材温度係数及びドップラ係数がより負となる。
- ② 制御材及び可燃性毒物の反応度値が相対的に低下する。
- ③ 中性子スペクトルの軟らかい所に隣接したMOX燃料は、中性子スペクトルの相互の干渉等により出力が高くなる傾向がある。
- ④ ペレット径方向出力分布において周辺部の出力分担がより高くなる。
- ⑤ 即発中性子寿命がより短く、遅発中性子割合がより小さくなる。
- ⑥ 燃焼に伴う反応度低下の割合がより小さくなる。
- ⑦ ヘリウム生成量及び核分裂収率が若干異なる。等

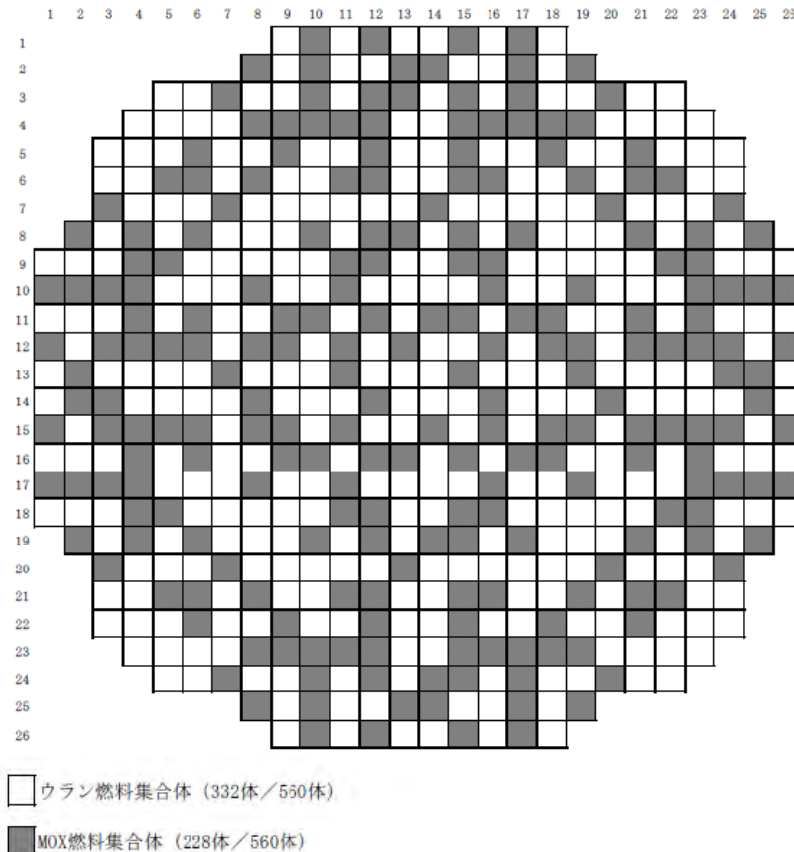
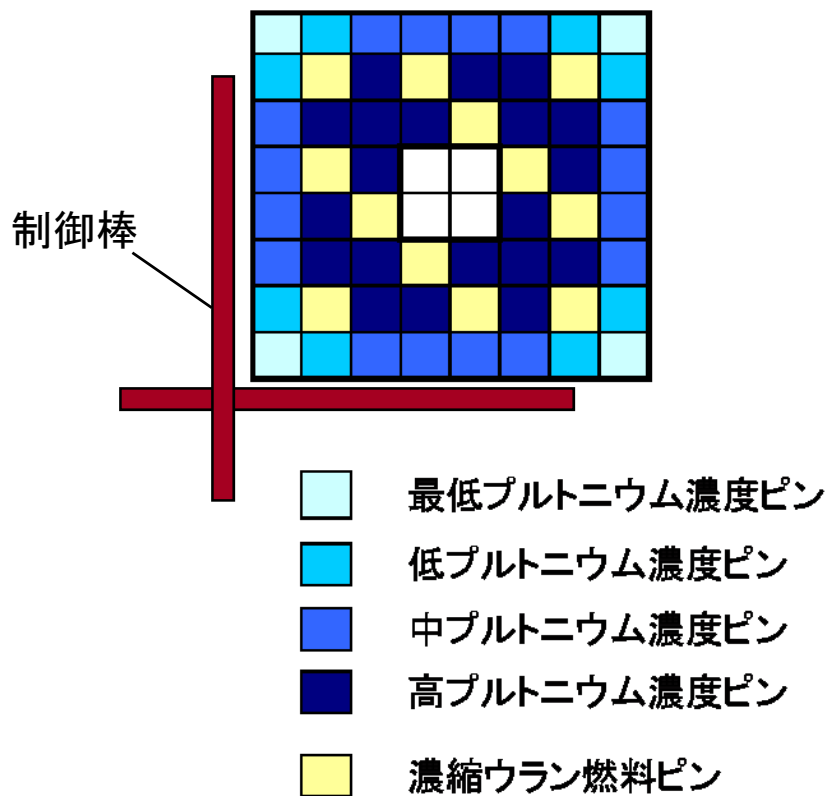
## 物性、照射挙動

- ① ペレットの融点及び熱伝導率がプルトニウム含有率の増加に伴い低下する。
- ② ペレットのクリープ速度がプルトニウム含有率の増加に伴い増加する。
- ③ 核分裂生成ガス(FPガス)放出率は現時点の知見ではウランペレットよりも若干高めである。
- ④ ペレット内のプルトニウム含有率の不均一が製造時に生じ得る可能性がある。等

# BWR(沸騰水型炉)でのプルサーマル

## BWR/MOX燃料装荷炉心構成例

MOX燃料集合体



# ブルサーマルの安全上の対策

検討課題があるから「危険」なのではなく、予見される技術課題に対していかなる安全上の措置が取られているかが重要。「課題＝安全余裕の低下」ではなく、余裕の範囲内での設計措置が取られているかが重要。

<u>制御棒停止余裕</u>	核計算を行い、停止余裕が十分あることを確認（2%Dk/k以上程度）
<u>スクラム機能</u>	ウラン燃料炉心と同等である
<u>MOXの融点降下</u>	数10度程度の融点降下は、基準値までの温度余裕で十分許容できる
<u>熱伝導度低下</u>	考慮した上で燃料中心温度を抑える設計
<u>燃料ピン内圧</u>	プレナムの体積増加などにより、MOX取り出し時にウラン燃料の内圧約6MPa程度である
<u>燃焼のムラ</u>	燃料の炉心配置を適切に行い均等化する
<u>炉心圧力上昇時</u>	出力増加によるスクラムにより停止
<u>プルトニウムスポットによる燃料破損の可能性</u>	プルトニウムスポットを実際に入れた燃料での破損実験の結果から、健全性を確認
<u>プルトニウムの毒性</u>	事故を想定しても、プルトニウムが周辺に飛散することはない。

●ブルサーマル炉心の安全性は、現状のウラン燃料炉心と同様である。

# BWRのMOX燃料利用条件（海外との比較）

- ▶ ドイツのBWRにおいて十分な実績がある。
- ▶ 富化度の設計などでも、ドイツと日本の設計に顕著な差はない。
- ▶ ペレット最大濃度・集合体平均濃度が混同して議論されることが多いので要注意。

	島根2号機 MOX燃料	柏崎刈羽 MOX燃料	原子力安全委 員会指針	グンドレミンゲン-B	グンドレミンゲン-C
MOX燃料炉心装荷割合	1/3以下	最大32%	1/3以下	実績最大: 27%(認可: 38%)	最大実績: 28%(認可: 38%)
ペレット最大プルトニウム含有率	10%	10%	13%	—	—
ペレット最大核分裂性 プルトニウム富化度	6%	6%	8%	—	—
集合体平均プルトニウム含有率	2.9-5.8%	2.9-5.8%	—	5%強程度と推測される	5%強程度と推測される
集合体平均核分裂性 プルトニウム富化度	2.3-3.6%	同上	—	3.70%	3.70%
燃料集合体最高燃焼 度(MWd/t)	40,000	40,000	45,000 濃縮ウラン燃料 程度以下	—	—
燃料集合体平均燃焼 度(MWd/t)	33,000	—	—	55,000	35,000

# PWRのMOX燃料利用条件（海外との比較）

		泊3号機 MOX燃料	原子力安全 委員会指針	フランスPWR*3	ドイツPWR*3	ベルギーPWR*3
MOX燃料炉心装荷割合		約1/4以下 (157体中40体以下)	約1/3以下	実績:31% 認可:31%	実績:33% 認可:50%	実績:20% 認可:23.5%
ペレット最大	プルトニウム含有率	13wt%以下	13wt%以下	—	—	—
	核分裂性 プルトニウム富化度	8wt%以下	8wt%以下	—	—	—
集合体平均	プルトニウム含有率	約4.1wt%濃縮 ウラン相当以下 (約11wt%以下) 代表例:約9wt%	—	実績:6.7wt% 認可:約3.25wt% 濃縮ウラン相当	実績:6.9wt% 認可:制限なし	実績:7.5wt% 認可:制限なし*4
	核分裂性 プルトニウム富化度	代表例:約6.1wt%	代表例:約6.1wt%	実績:4.5wt%	実績:4.6wt% 認可:4.65wt%	実績:4.9wt% 認可:制限なし*4
燃料集合体最高燃焼度		45,000MWd/t	45,000MWd/t	実績:42,000MWd/t 認可:3サイクル照射	実績: 50,000MWd/t 認可:制限なし	実績: 49,000MWd/t 認可: 50,000MWd/t
取替燃料集合体平均燃焼度		推定 約38,000MWd/t	—	実績:約38,000MWd/t	—	—

\*3: 海外の実績・認可については、最も高い(大きい)プラントのものを記載

\*4: 3.8wt%濃縮ウラン相当で設計



# 核分裂性物質濃度の比較について

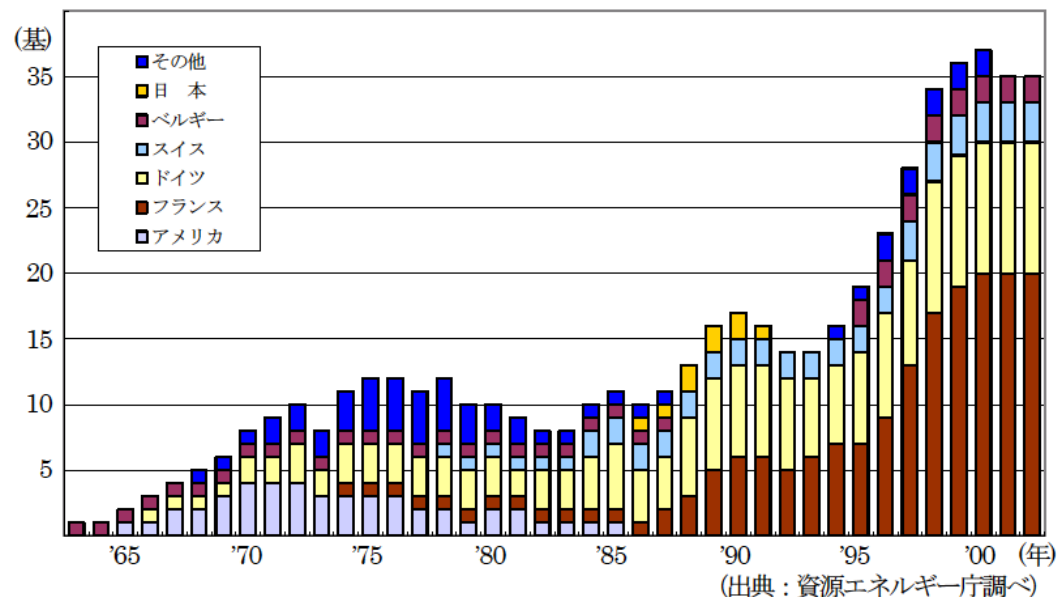
(運転パターンの違う海外との比較には注意が必要)

- ▶ フランスでは、ウラン燃料の濃縮度(U-235の濃度)も、日本より低い。フランスでの炉の運転形態は、日本と違い、低い燃料濃度でも高い燃焼度を達成できるものである。
- ▶ MOX燃料のプルトニウム濃度がフランスでやや低いのは、同じ理由によるものであって、燃料の安全性に拠るものではない。

燃料		フランス	日本
ウラン燃料	U-235濃縮度	3.7%	4.1%
	燃焼度	43,600 MWd/t	40,000 MWd/t
MOX燃料	Pu集合体平均濃度	6.70%	9.00%
	集合体燃焼度(最大)	42,000 MWd/t	45,000 MWd/t
	集合体燃焼度(平均)	38,000 MWd/t	38,000 MWd/t

# 海外でのプルサーマル実績

## 今までに装荷されたMO集合体数



国(発電所)	2004年末	2007年末	集合体/年
フランス(21基)	2,270	2,894	208
ドイツ(15基)	1,828	2,220	131
ベルギー(3基)	305	321	5
スイス(3基)	304	392	29
アメリカ(6基)	91	95	1
イタリア(2基)	70	70	0
インド(2基)	10	10	0
オランダ(1基)	7	7	0
日本(2基)	6	6	0
スウェーデン(1基)	3	3	0
<b>合計(56基)</b>	<b>4,894</b>	<b>6,018</b>	<b>375</b>

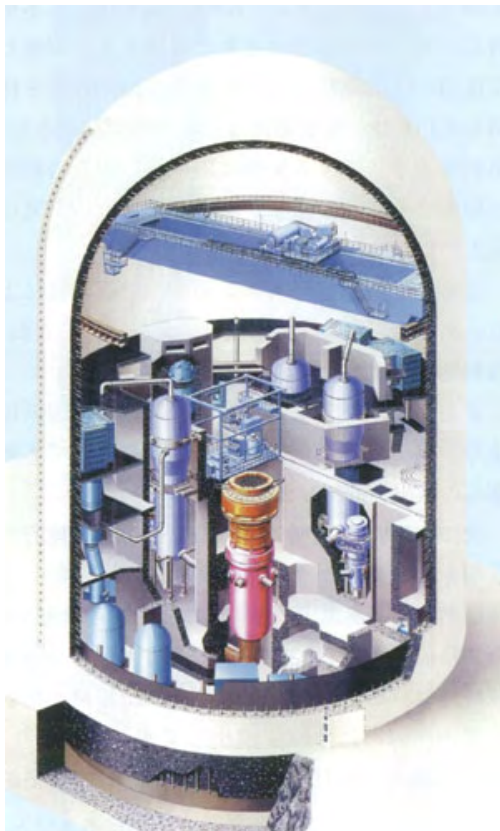
日本ふげん発電所

772

772

- ✓ フランスやドイツでは、プルサーマルについての社会的な反対活動は全くない。
- ✓ 脱原子力政策を維持しているドイツがプルサーマル利用を継続してきた事は、「安全性が根本問題ではない」ことを示している。むしろ、本質的な議論は、国情に応じた核燃料リサイクル路線の妥当性にある。
- ✓ ロシアの解体核プルトニウム34tを米国にてプルサーマルするプロジェクトが進行中。燃料集合体照射試験を実施中である。

# 原子炉の安全性について（事故時影響に現状と差はない）



- 暴露確率を下げるため、何重もの防護措置を設置
- 原子力発電所では、放射性物質を「閉じ込める」ことに最大の措置を講じている
- 原子力発電所では、異常時に、「原子炉を止める」、「原子炉を冷やす」、「放射性物質を閉じ込める」を徹底した設計としている
- 想定事故や仮想事故などの条件下でも、安全マージンを大きく取って、周辺影響が限度以下に収まるように、設計されている。

## 使用中燃料中での放射線毒性相対値

	ベータ核種	アルファ核種
H(トリチウム)	0.0000%	
I(ヨウ素)	2.0541%	
Kr(クリプトン)	0.0000%	
Xe(キセノン)	0.0112%	
Cs(セシウム)	0.0000%	
他核分裂生成物	97.8489%	
プルトニウム		0.0012%
他アルファ放射性核種		0.0846%

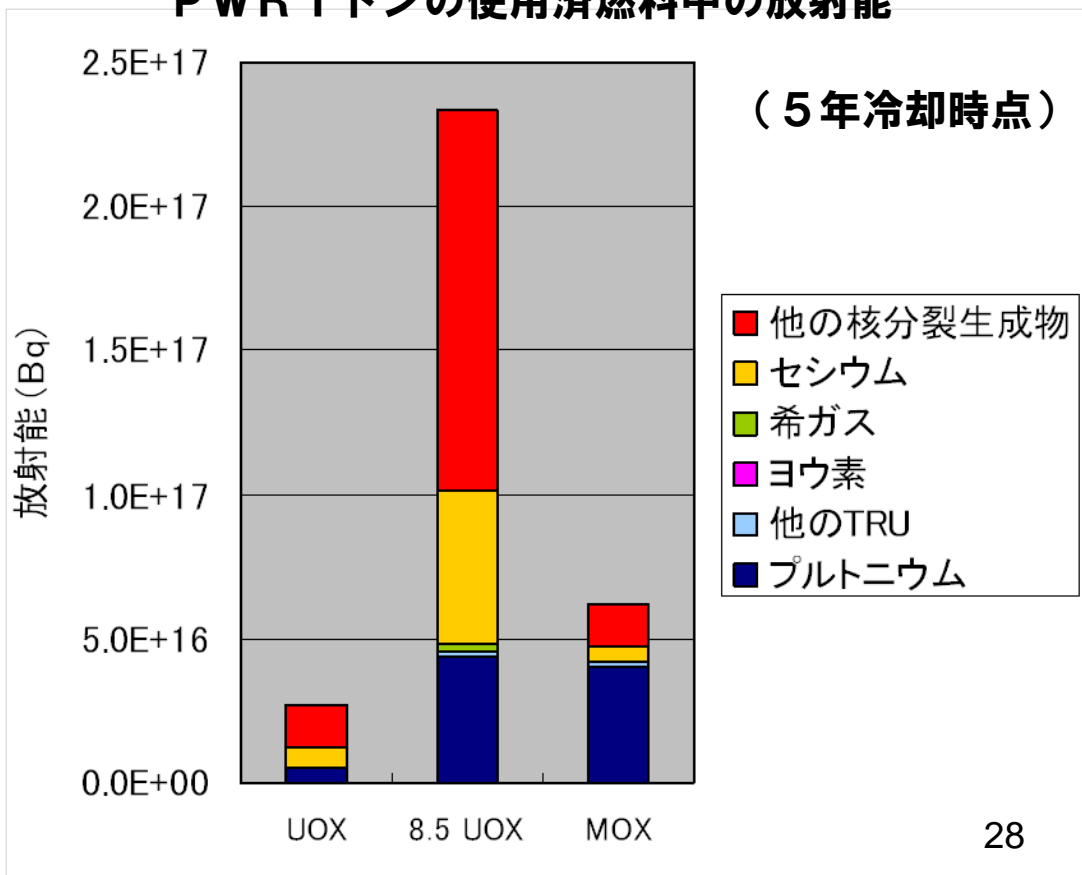
原子炉中でのプルトニウムの毒性は相対的に低く、事故時でもプルトニウムは蒸発しない。プルサーマルを行っても、原子炉のリスクは変わらない。

# 使用済燃料中の放射能比較(PWRの例)

- 使用済ウラン燃料約7体～8体を再処理し、一体のMOX燃料集合体が製造される。すなわち「再処理+プルサーマル」は、使用済燃料7体～8体を一体の使用済燃料に圧縮して保管する事に等しい。

- 使用済PWRウラン燃料8.5体を撤去して、MOX燃料1体に加工してプルサーマル利用する。
- 再処理することによって、発電所に保管される核分裂生成物(セシウム等)の放射能は1/10程度に減少する。
- MOX燃料一体が当面保管されるが、もともとのウラン燃料8.5体よりは放射能は小さい。
- 使用済MOX燃料の処置については、2010年頃から議論が行われるが、永遠に発電所に置いておかれることはあり得ない。

## PWR 1 トンの使用済燃料中の放射能



# 我が国の核物質平和利用

## 国家による転用意意思の不存在

平和利用限定の国是と理念。非核三原則。

## 対核不拡散取り組みの実績

保障措置協定、追加議定書、の締結。徹底した保障措置受け入れ。国際保障措置開発への協力の実績。核不拡散国際行動への積極的参加実績。

## 国際保障措置の受け入れ姿勢・国内保障措置体制

徹底した国際保障措置の受け入れ実績と国内保障措置体制の完備。国際的認知。

## 施設での保障措置目標の達成度？保障措置取り組みの実効性

### 原子炉での保障措置の実績

### 六ヶ所再処理工場での国際認知に基づく保障措置

六ヶ所工場における、国際的に認知された実効的な保障措置対策の実施。IAEA査察への積極的な協力。統合保障措置の適用。

- ・ 利用目的のないプルトニウムを保有しない基本方針
- ・ 海外保管プルトニウムの消費（プルサーマル）
- ・ 世界最先端の保障措置技術と透明性による再処理工場の運営
- ・ 統合保障措置下での実直な保障措置対応
  
- ・ 平和利用核燃料サイクル（濃縮・再処理・プルサーマル）の運営を国際的に認められている現状において、プルサーマルには核拡散の問題は全くない。

# プルサーマルの効果まとめ

1. 軽水炉総発電量の15%程度をMOX燃料が担う
2. 濃縮ウラン燃料の節減(最大15%程度)天然ウラン購入量の節減(最大15%程度)
3. ウラン濃縮役務量の節減効果(数百tSWU)
4. 軽水炉ウランリスクに対する「二次供給効果」(最大15%程度)
5. 過剰なプルトニウムの消費効果
6. 軽水炉取り出しPuの兵器適性を損ずる
7. 使用済燃料貯蔵量の1/7への圧縮効果
8. 高レベル放射性廃棄物の軽量化・減量・早期地層処分
9. 地層処分面積の削減(最大50%程度)
10. 高レベル放射性廃棄物の潜在毒性の低減(1/8程度)
11. 中間貯蔵施設数の削減(18施設から数施設に抑制)
12. ウランリスク増大時の高速増殖炉サイクルへの展開の可能性確保
13. バックエンド運営の自由度の確保

直接処分シナリオとの対比は、比較的明白であるが、数値的な情報の強化は、さらに補強することが望まれる。結局、論点は、これの効用に対して「経済性が許容範囲内であるかどうか」

# 現実的なオプションを考える

## 直接処分を現時点で選択することは無理・長期貯蔵も安易には無理

- ◆ドイツでの直接処分が全く進まないこと
- ◆米国オバマ政権によるヤッカマウンテン事業の廃止政策がとられたこと
- ◆英国が原子力再開に対して路線を明確にしていないこと
- ◆直接処分路線選択国が、原子力規模の小さな国及びCANDUのカナダに偏っていること
- ◆我が国において直接処分関連技術評価が行われていないこと
- ◆我が国において直接処分サイト選定に至るプロセスと制度変更の影響の大きさ、サイト候補地の選定が極めて難しいこと
- ◆使用済燃料長期貯蔵については、サイト内貯蔵であれ大規模貯蔵施設であれ、あらゆるリスクや技術評価を行い地元による受け入れの現実性を評価した上でないと、選択は出来ない。
- ◆再処理路線による「資源利用面での将来的可能性」と「高放射性廃棄物の合理化」に関する効果を、安易に放棄すべきではない。
- ◆問題はコストであるが、コストが許容範囲であれば、再処理リサイクルを進める事は可能
- ◆今後の世界的な展開（ウラン資源需給バランス、世界的なバックエンド動向）が極めて不透明で読み切れない。
- ◆今後のバックエンド技術開発（技術進展）の可能性（海外を含めて）が存在する

決定的な問題が生じない限り、六ヶ所工場とプルサーマルの稼働を中止するべきではなく、むしろ、それらが安定に動けるような状態を確保しておくことが重要。

六ヶ所再処理工場を動かしながらプルサーマルを行う体制を維持しつつ、ウランの入手可能性や世界の動向を注意深く監視し、適切なタイミングで第二再処理活動を開始する。高速増殖炉の実用時期を2050年付近に設定できるような技術的態勢を維持する。このために、即応性の高い第二再処理技術や高速増殖炉技術のレベルアップに努める。



# 原子力政策大綱での判断結果

## 原子力委員会・新計画策定会議での総合評価の結果まとめ

評価の視点	評価の結果
安全性	シナリオ間に有意な差はない
技術的成立性	技術実績が豊富な再処理に対して直接処分は技術知見が不足
資源節約及び供給安定性	2割程度のウラン節約効果と将来のFBRによるセキュリティ効果から再処理路線に優位性がある
環境適合性	潜在毒性の低減効果や処分場面積削減の面から再処理路線に優位性がある
経済性	直接処分路線に0.5～0.7円/kWhの優位性がある
核不拡散性	シナリオ間の有意な差はない
海外の動向	国内資源の乏しい国が再処理を選択し原子力規模の小さな国が直接処分を選択している
社会受容性	立地地域との信頼関係の喪失の問題や中間貯蔵及び直接処分の立地困難性等から、現行再処理路線に現実的優位性がある
政策変更に伴う課題	立地地域との信頼関係の再構築の困難さや原子力発電の停止の可能性など、政策変更に伴う課題が存在する
選択肢の確保(柔軟性)	再処理の技術的なインフラの維持や再処理への国際理解の堅持は、将来の不確実性への対応能力を高くする



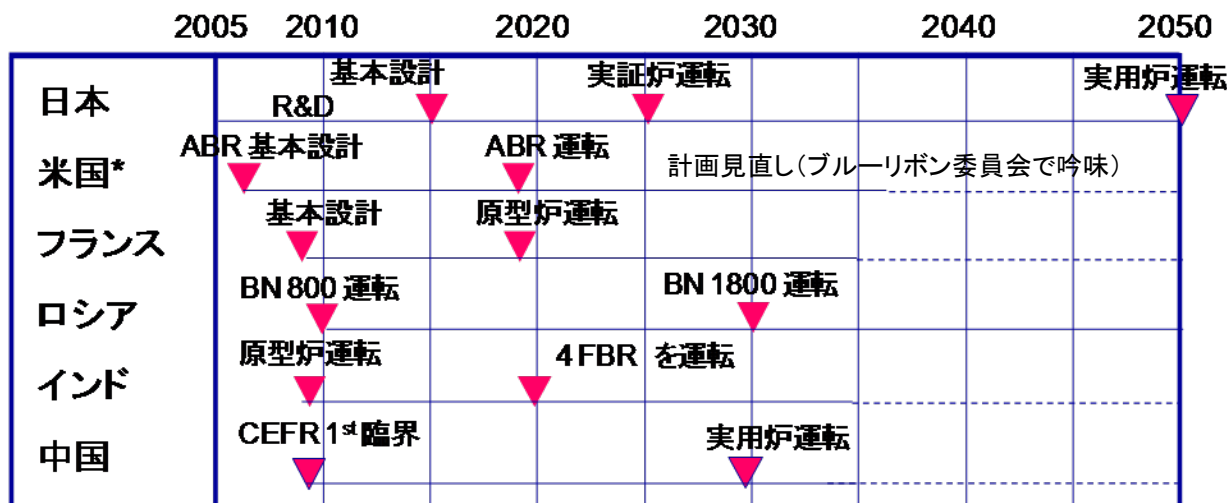
# 高速増殖炉について

- ◆高速増殖炉は、資源増殖という特性が強調されすぎて議論されているが、電力需要が増加しない状況下では、「自己維持性」と「放射性廃棄物の燃焼」の特徴がむしろ重要である。
- ◆この観点からも、各国が、「Sustainability」と「廃棄物燃焼」を重視した高速炉開発に取り組んでいる。我が国においても、国家基幹技術開発として高速増殖炉開発が進められている。

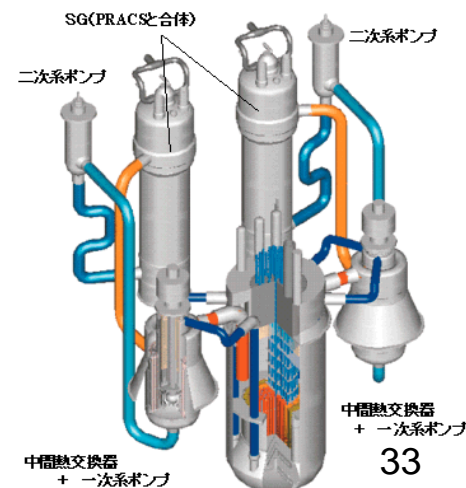
## 高速炉の特性

- 燃料を自給でき、かつ燃料を増殖できる(ウランに依存しない原子炉体系)
- 寿命の長い放射性物質を作り難い
- 寿命の長い放射性物質を燃焼して減少させる
- 高い温度を供給でき、多様性が高い
- 軽水炉取り出しプルトニウムの受け皿(利用しながら保持)の役割

## インドで建設中のPFBR

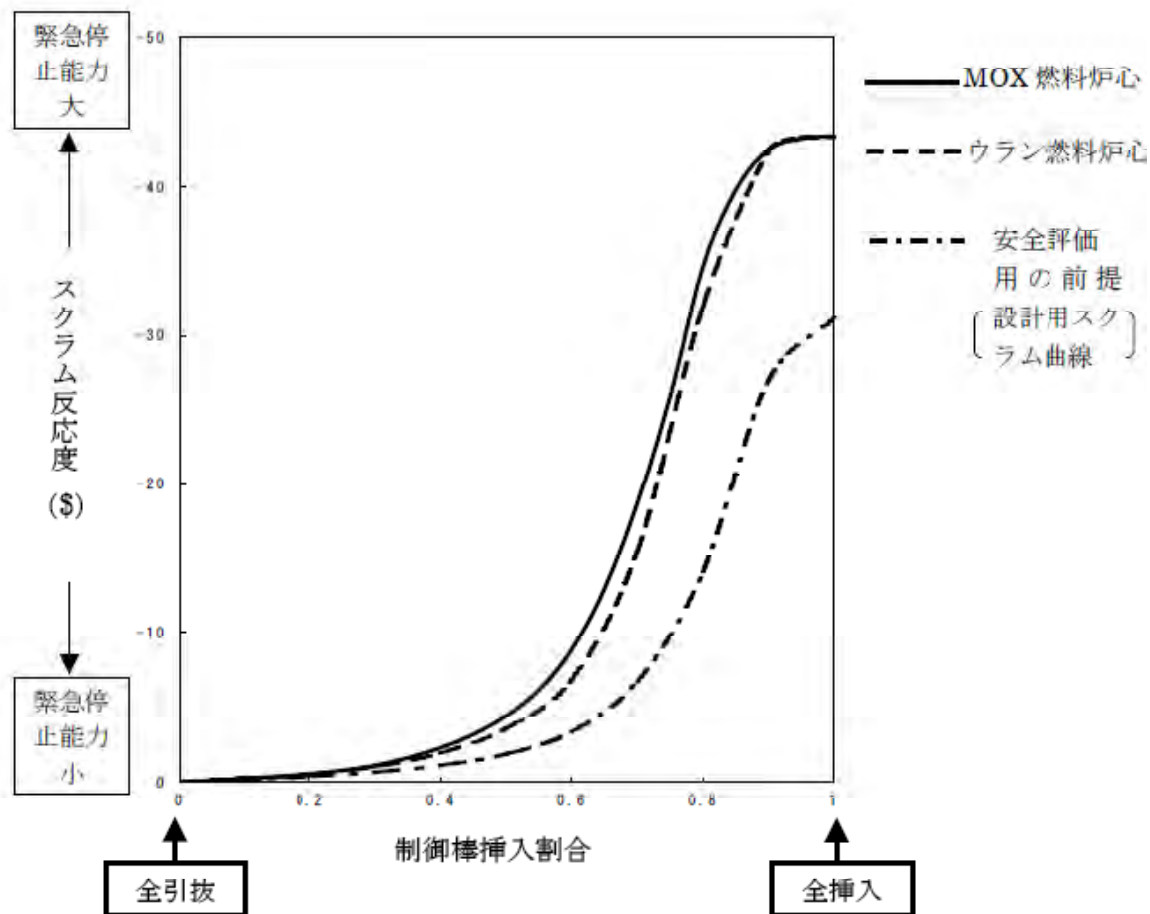


## 高度化Na冷却高速増殖炉



# 参考・スクラム機能の比較

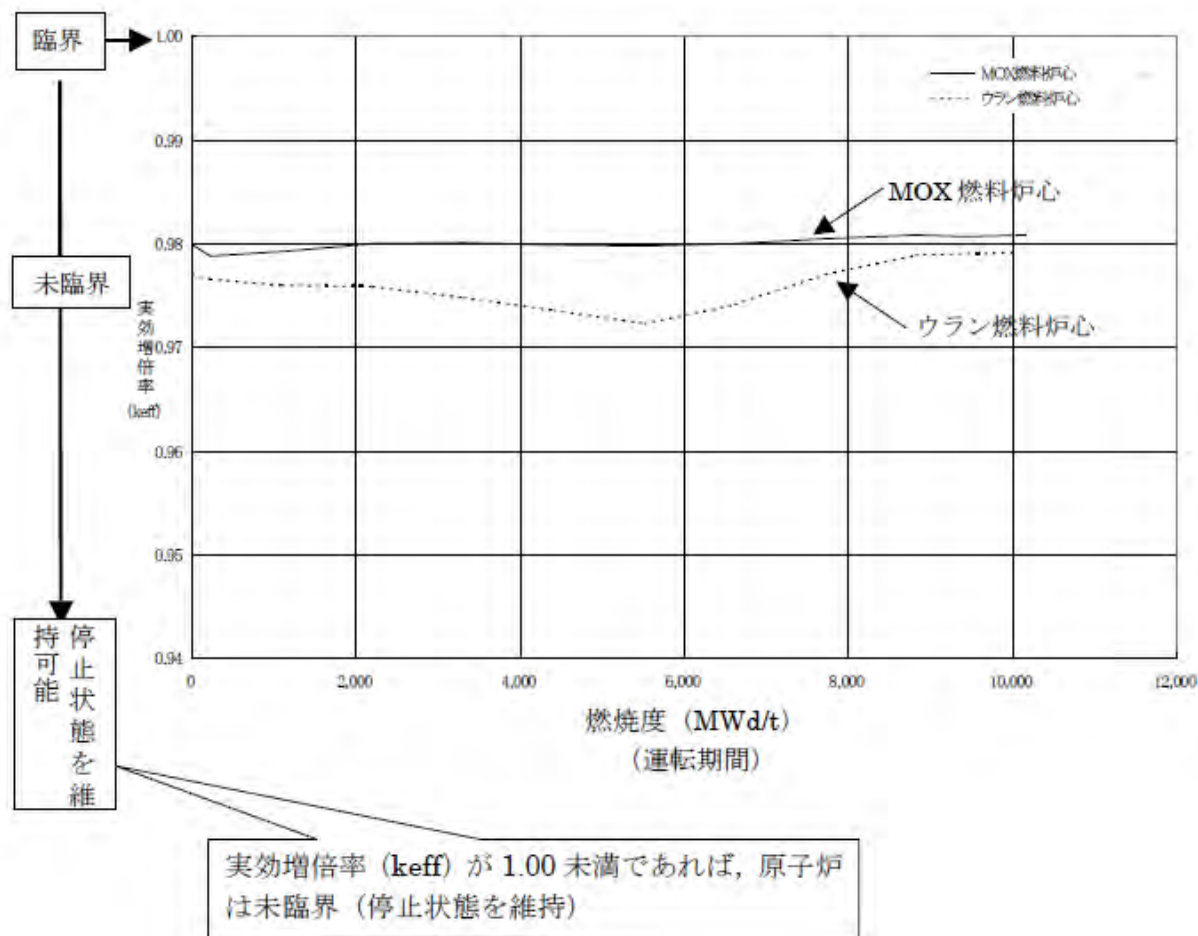
(中国電力島根発電所に関わる公開資料から)



中国電力による議会提出資料“島根原子力発電所2号機における「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の使用について」に関するご質問回答”より引用

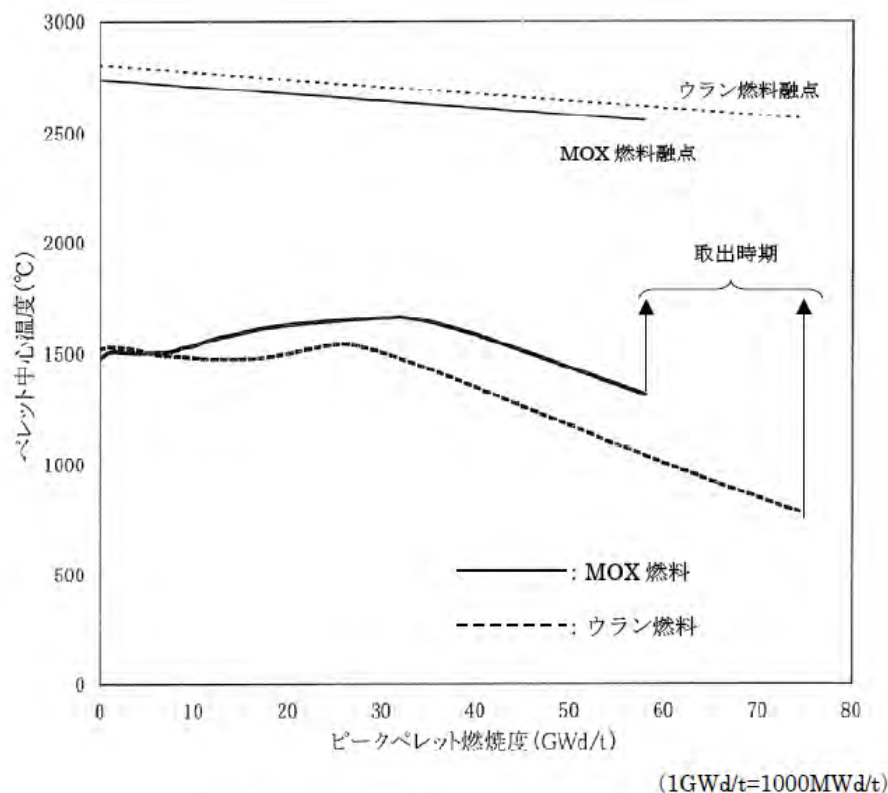
# 参考・制御棒価値の比較

(中国電力島根発電所に関する公開資料から)



# 参考・燃料融点の比較

(中国電力島根発電所に関わる公開資料から)



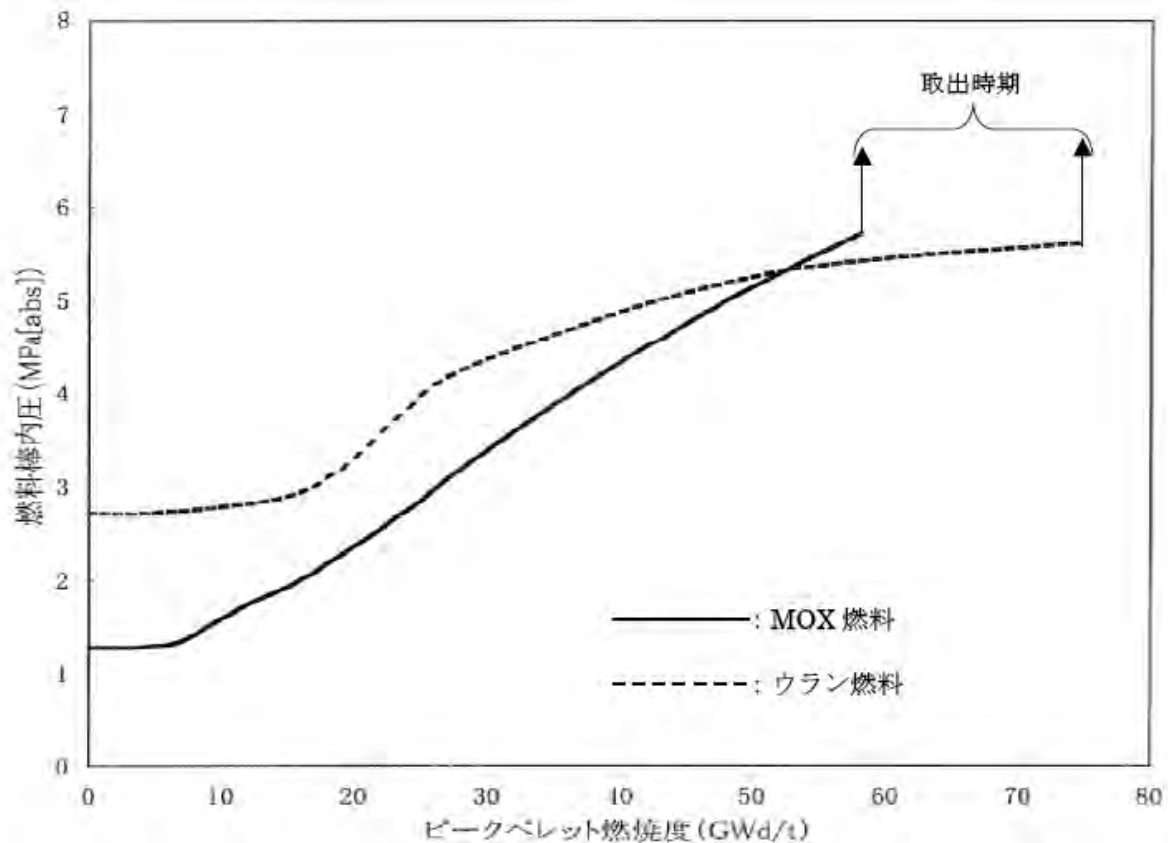
ピークペレット燃焼度：燃料集合体を構成するペレットのうち，最も燃焼の進んだものの燃焼度

各グラフの終端の燃焼度が，燃料集合体最高燃焼度（MOX燃料：40GWd/t，9×9ウラン燃料：55GWd/t）時点でのピークペレット燃焼度にあたる。

中国電力による議会提出資料“島根原子力発電所2号機における「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の使用について」に関するご質問回答”より引用

# 参考・燃料棒内圧の比較

(中国電力島根発電所に関わる公開資料から)

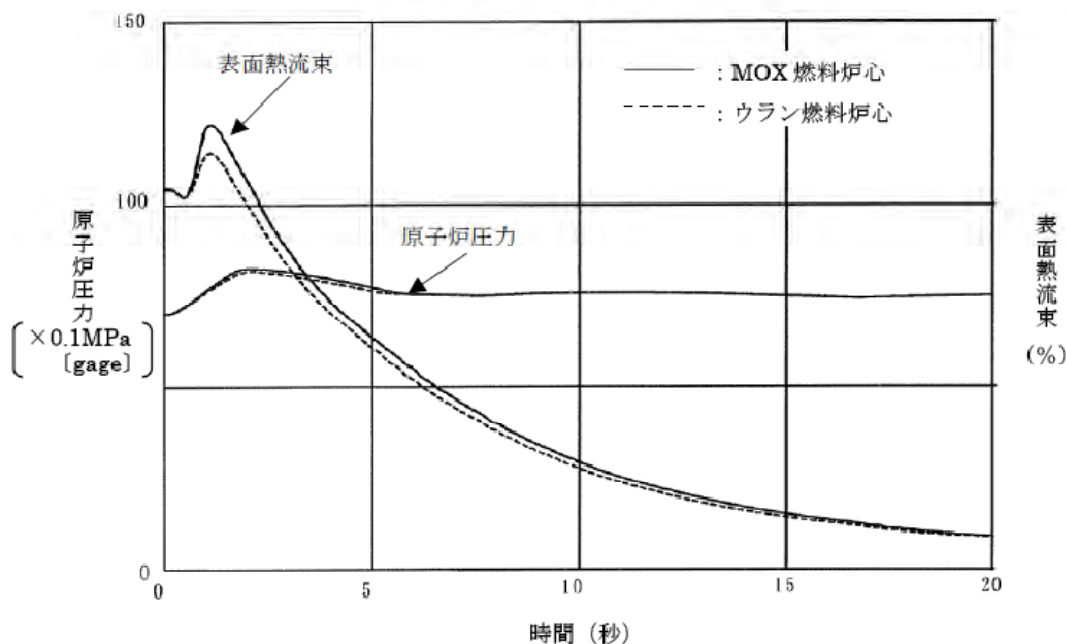


中国電力による議会提出資料“島根原子力発電所2号機における「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の使用について」に関するご質問回答”より引用

# 参考・原子炉圧力変化の比較 (中国電力島根発電所に関わる公開資料から)

原子炉圧力の上昇が最も大きくなると想定される事象（島根 2 号機の解析例）

(想定事象：発電機負荷遮断バイパス弁不作動事象)

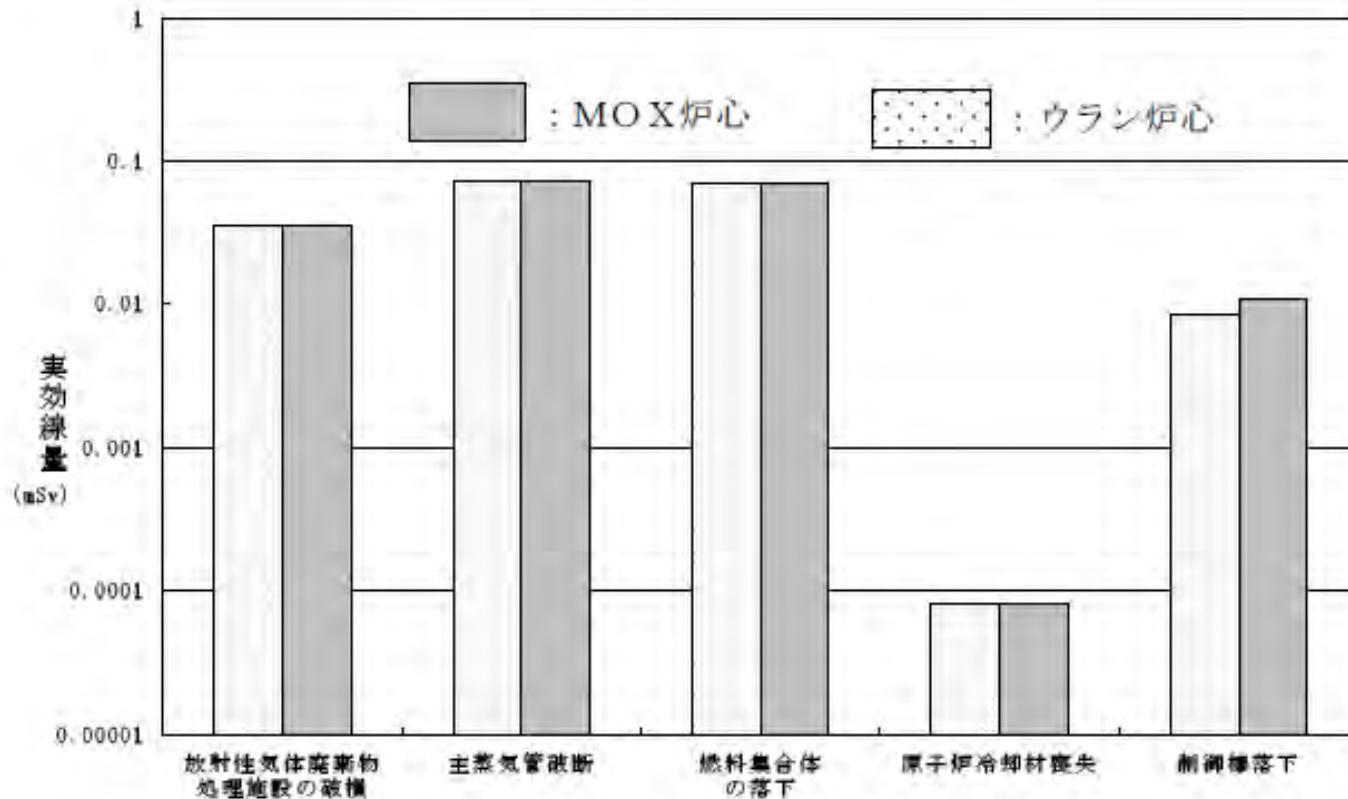


(基準値)

- ・表面熱流束：165%（燃料被覆管は、機械的に破損しないこと。すなわち燃料被覆管の円周方向の平均塑性歪が、1%以下（表面熱流束165%に相当）であること）
- ・原子炉圧力：9.48MPa [gage]（原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力は、最高使用圧力（8.62MPa [gage]）の1.1倍以下であること）



# 参考・事故時周辺影響(実効線量)の比較 (中国電力島根発電所に関わる公開資料から)

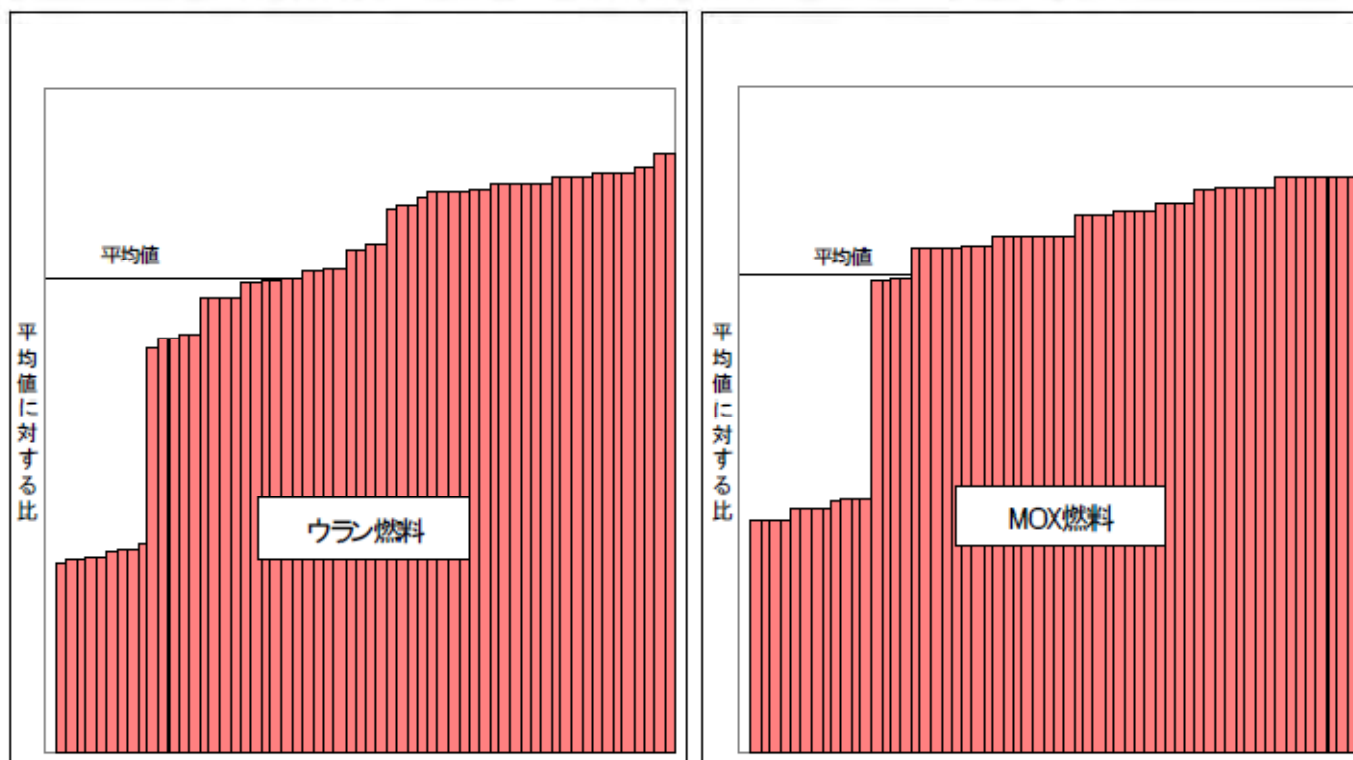


中国電力による議会提出資料“島根原子力発電所2号機における「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の使用について」に関するご質問回答”より引用

# 参考・原子炉発熱分布の比較 (中国電力島根発電所に関わる公開資料から)

燃料集合体内の発熱分布 (島根 2 号機の解析例)

燃料集合体内の 60 本の燃料棒を発熱の低い順に並べて比較

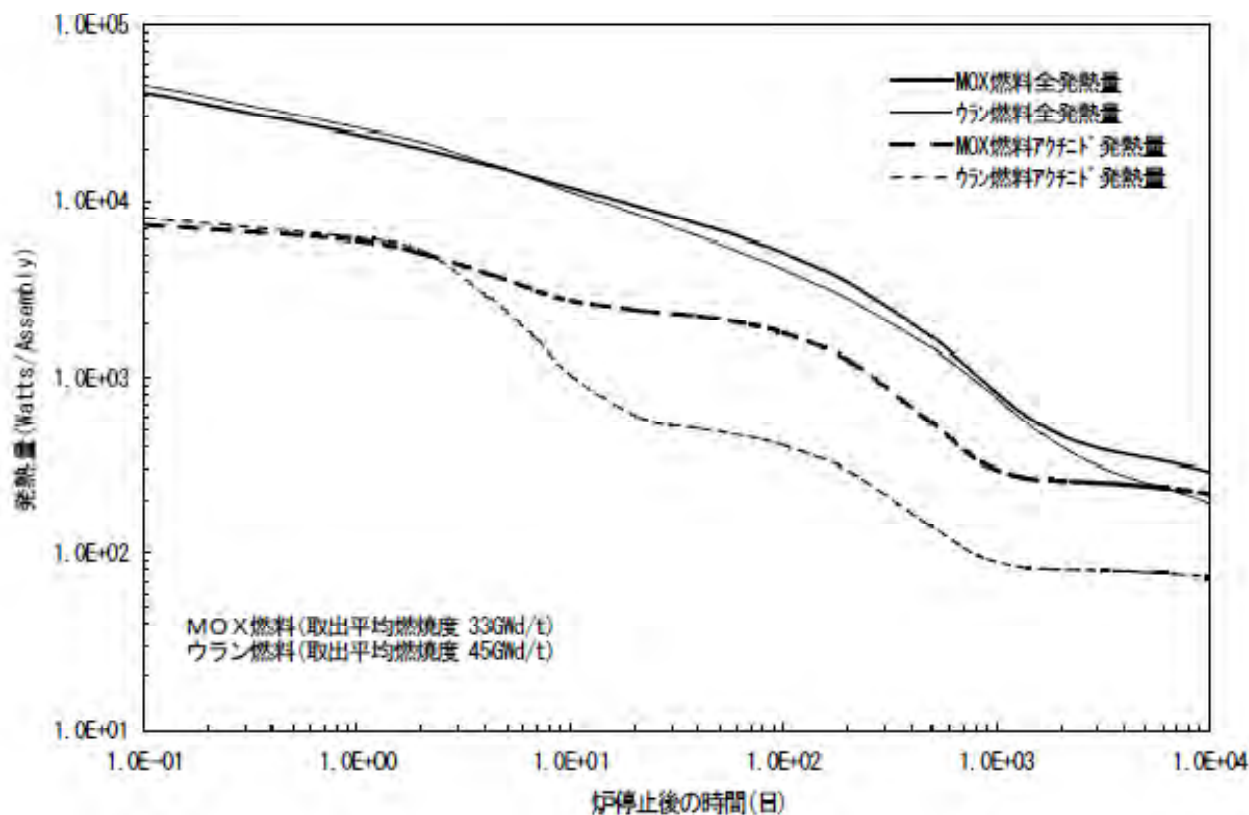


中国電力による議会提出資料「島根原子力発電所2号機における「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の使用について」に関するご質問回答」より引用

# 参考・燃料中放射線毒性の比較

(中国電力島根発電所に関する公開資料から)

使用済 MOX 燃料と使用済ウラン燃料の崩壊熱 (評価例)



中国電力による議会提出資料「島根原子力発電所2号機における「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の使用について」に関するご質問回答」より引用

# 参考・新燃料の線量率の比較

(中国電力島根発電所に関わる公開資料から)

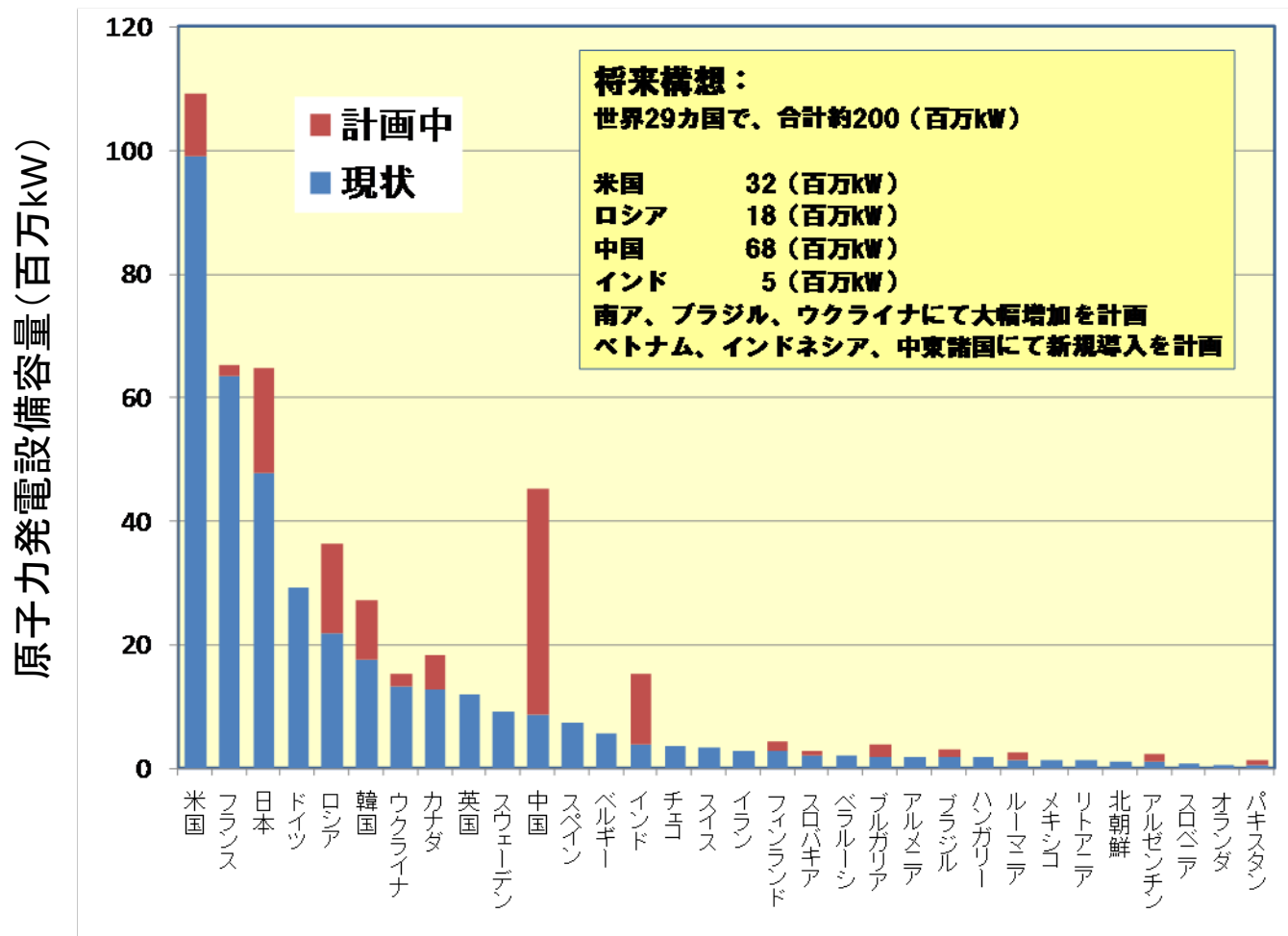
## ○MOX 新燃料の線量率

燃料型式	線量率 (mSv/h)	
	表面	表面から 1m
ウラン燃料	0.04	0.002
MOX 燃料	2.7	0.1

(出典) : 株式会社日立製作所トピカルレポート

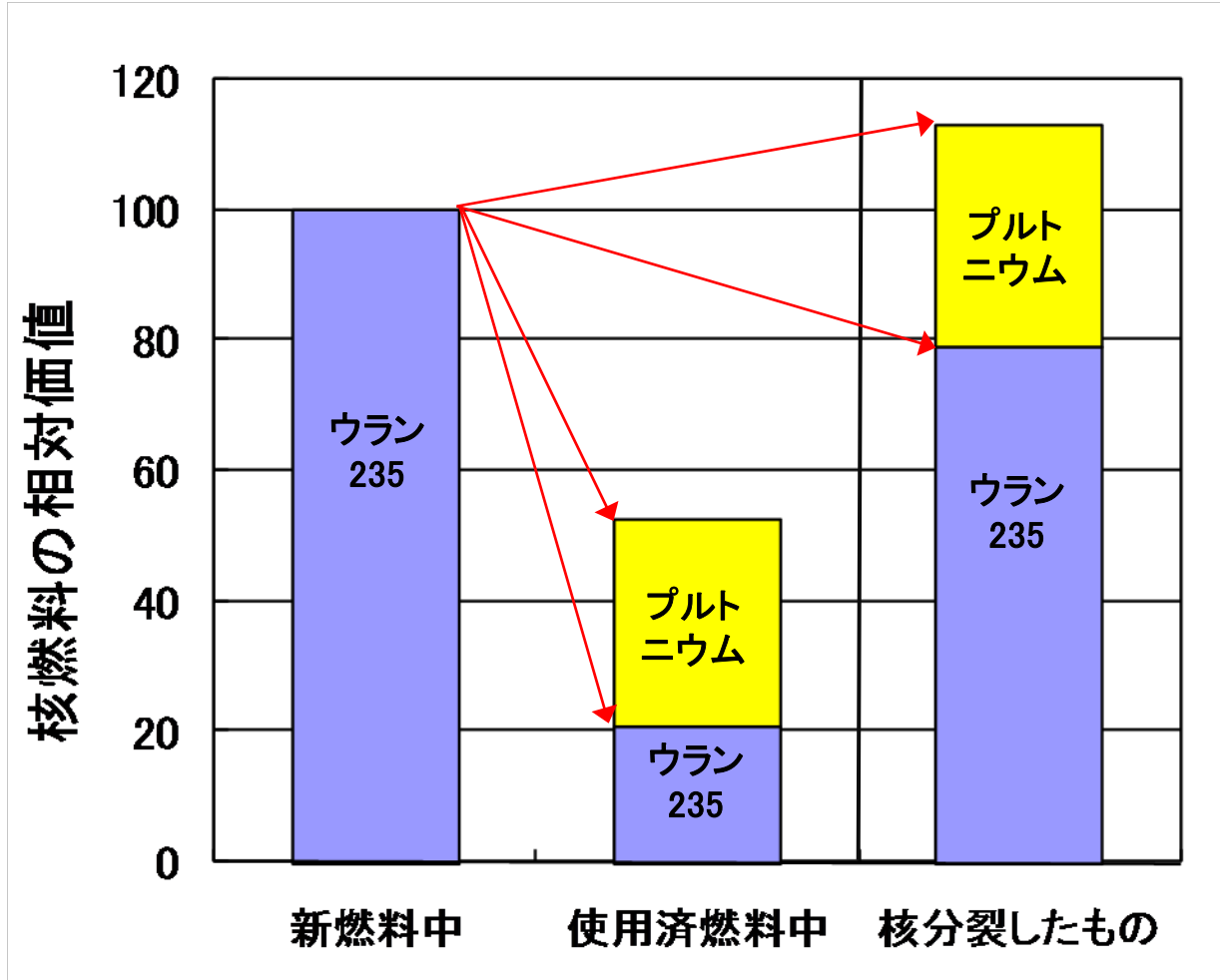
「沸騰水型原子力発電所 MOX 燃料の貯蔵について」(平成 11 年 8 月)

# 参考・世界的な原子力発電の増強傾向



## 参考・軽水炉での核燃料価値の変遷

- ▶ ウランを使うあらゆる原子力発電所は、ウラン235を核分裂させながら、プルトニウムを作りだして核分裂させ、エネルギーを取り出している。





# 参考・各国のバックエンド戦略

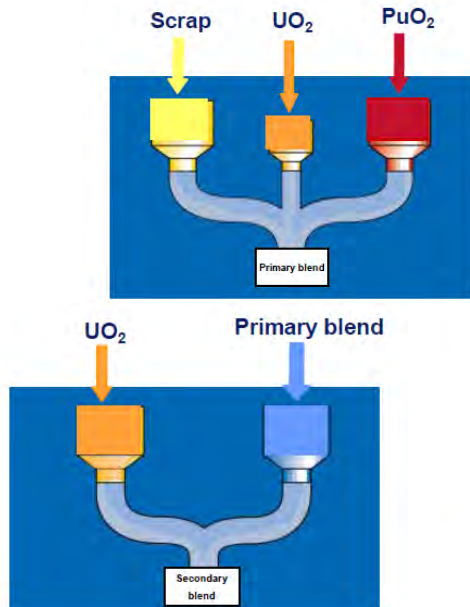
国	原子力利用方針	原子力設備容量(万kW) (2006年末)	バックエンド方策
アメリカ	継続的に利用	10,476	政府が引き取り直接処分を検討してきたが、直接処分場であるYucca Mountain計画に遅れ。 <b>Global Nuclear Energy Partnership</b> という計画によって、再処理路線を検討中。
フランス	継続的に利用	6,602	<b>再処理</b>
日本	継続的利用	4,958	<b>再処理</b>
ロシア	継続的利用	2,319	<b>再処理</b>
ドイツ	段階的廃止	2,137	直接処分(未実施)(過去分についてはフランスに委託再処理してきた)
韓国	継続的利用	1,772	使用済核燃料転換後貯蔵を検討中
カナダ	継続的に利用(重水炉)	1,343	直接処分(未実施)
イギリス	継続的に利用	1,195	<b>ガス炉燃料の再処理、海外燃料の再処理</b> を実施してきた。
スウェーデン	継続利用に転換	932	直接処分(未実施)
中国	継続的利用	700	<b>再処理</b>
ベルギー	段階的廃止	612	再処理を中止、中間貯蔵
スイス	継続利用に転換	337	新規再処理を凍結
インド	継続的利用	331	<b>再処理</b>
フィンランド	継続的利用	280	直接処分(未実施)

# 参考・フランスのMOX燃料製造工程(MIMAS)

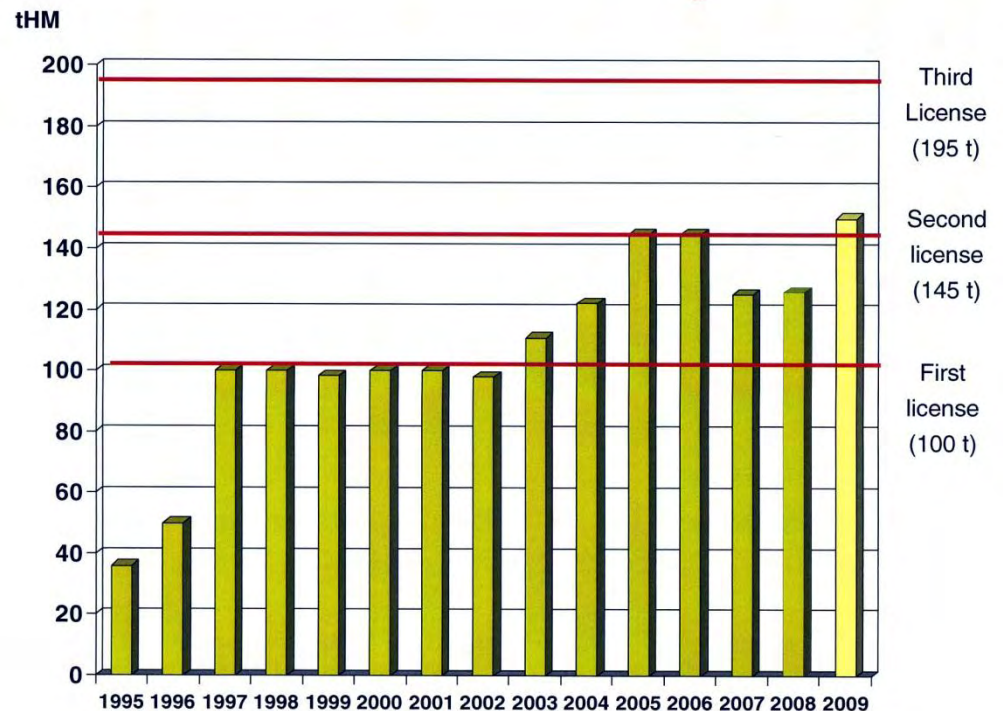
## 仏MELOX工場



## MIMAS法 (二段混合)



2008年末において、累計1426トン  
(重金属)のMOX燃料の製造実績



\* : estimates



**1,426 tHM produced**