



2. 2 軽水炉プルトニウム利用の高度化に係る燃料サイクル長期シナリオ Long-Term Fuel Cycle Scenarios for Advanced Utilization of Plutonium from LWRs

佐藤 治 立松 研二
Osamu SATO Kenji TATEMATSU

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

2. 2. 1 基本的考え方

原子力発電は超長期にわたり我が国の基幹電源として不可欠であり、軽水炉が今後半世紀以上にわたりその中核技術となる見込みである。そこで、軽水炉を利用して「柔軟」かつ「持続可能」な燃料サイクルシステムの構築が必要となる。現在のところ、プルサーマル事業の実施を目指して準備が進められており、これは核燃料技術および産業基盤の開発整備に不可欠である。また、R&Dとして、高速炉を開発して将来的な原子力システムを目指した取り組みがなされており、燃料増殖によるウラン資源消費量の低減を図ろうというものである。この状況下で軽水炉を最大限活用してプルトニウム利用シナリオをどのように描けるのかについて検討することが、本研究の目的である(OHP1)。

2. 2. 2 前提条件とシナリオの定義

計算の対象とする期間は、長計の新計画策定会議におけるシナリオ検討と同程度の2150年までとする。設備容量については2030年以降は総設備容量約5800万kWeで一定とし、2012年と2030年の間の設備容量は直線内挿で決定する。炉型の特性としては、濃縮ウラン軽水炉は段階的に高燃焼度化し、2020年以降の燃焼度を60GWd/t、プルサーマル(全MOX炉)は大間以降の追加投入分は燃焼度60GWd/tと仮定する。革新的水冷却炉(FLWR)は2020年ごろより、Puバランスに応じて新設プラントとして導入することを考え、高転換型FLWRの転換比は0.89で、平均燃焼度は45GWd/tとし、増殖型FLWRの転換比は1.04、平均燃焼度を50GWd/tと設定した。高速増殖炉(FBR)については、Na冷却炉を想定し、高増殖型では増殖比=1.16、平均燃焼度=63GWd/t、低増殖型では増殖比=1.04、平均燃焼度=110GWd/tとした(OHP2)。

また、燃料サイクルの各工程における物質のロス率ならびにリード・ラグタイムも考慮した。FBRのデータについては策定会議における検討結果と同じ値とし、FLWRのロス率についてはプルサーマルMOXの値を、リード・ラグタイムについてはFBRサイクルと同じ値を用いた(OHP3)。

シナリオは①プルサーマル長期継続シナリオ(①-1使用済MOX燃料長期貯蔵ケース、①-2使用済MOX燃料1回再処理ケース)、②革新的水冷却炉(FLWR)導入シナリオ

(②-1 2050年本格導入ケース、②-2 2030年本格導入ケース)、③高速増殖炉(FBR)移行シナリオ(③-1 FBRへの全面移行ケース、③-2 Pu利用軽水炉との共存ケース)の3シナリオ(6ケース)を考えた(OHP4)。

2. 2. 3 核燃料サイクルの長期シナリオ

上記3つのシナリオ(6ケース)について、発電設備容量・再処理量・使用済燃料貯蔵量(発電炉サイトのものも含む)に関して、2150年までの推移を計算した。

MOX使用済燃料を再処理しないケース①-1では、その貯蔵量は際限なく増大することが明らかで、2150年時点で15,000トンを超える量になった。一方、使用済MOX燃料を1回再処理(ケース①-2)すると、その貯蔵量は再処理をしない場合の半分以下(5,000トン程度)に抑制できるが、際限なく増大していくことは同じである(OHP6-7)。

革新的水冷却炉(FLWR)を2050年に本格導入するケース②-1では、2050年までは高転換型で、それ以降は増殖型で運転するものとして計算すると、使用済MOX燃料の貯蔵量はMOX燃料加工に必要な在庫水準に抑制される。2030年に本格導入するケース②-2では、第2再処理工場がほぼ同時期に稼動することを仮定するため、サイトのものを含めても、2万トン以下の水準に使用済燃料貯蔵量を抑制できる(OHP8-9)。

高速炉を全面的に導入した場合では、2100年過ぎにはすべての濃縮ウラン軽水炉がFBRに置き換わると想定されるため、ウラン資源は利用されなくなる。高増殖型FBRだけではPuが生産されすぎるため、2100年頃から低増殖型に切替える必要がある。結果として、前述のFLWRを2030年に本格導入するシナリオと比較して使用済燃料貯蔵量がわずかに大きくなる(OHP10)。

高増殖型高速炉が実用化される場合、すべての発電炉をNa冷却型炉にするのではなく、Pu利用型の水冷却炉と共存させるシナリオが採用される場合も十分考えられ、ケース③-2として検討した。濃縮ウラン軽水炉を順次FBRとFLWRで置き換えることで、2150年頃には濃縮ウラン軽水炉は不要となる。このシナリオは、不確定な部分もあり、より詳細な検討が必要ではあるものの、炉型の多様化の観点で、原子力発電システム全体全体の信頼性向上に対する重要な選択肢の一つであると考えられる(OHP11)。

次に、ウラン資源消費量についてFLWRの導入効果を比較した。2060年を過ぎるとFLWRを導入することにより、年あたりのウラン資源の消費量が低減される(OHP12)。これを累積したもので比較すると、プルサーマル長期継続シナリオではウラン消費量が増大し続けるのに対し、FBRのみの場合は有限値でウラン資源消費量を抑制できる。FLWRを導入した場合は、FBRのみの場合ほどではないが、ウラン資源消費量の増加傾向が鈍化し、将来的にはある有限値でウラン資源消費量を抑制できる。とくに、③-2のFBRとFLWRが共存するシナリオでは、FBRのみとしたものと比べてウラン消費量は1割程度の増加で済むため、この観点からも成立するシナリオであることがわかる(OHP13)。

2. 2. 4 長期シナリオ検討のまとめ

軽水炉を最大限活用したプルトニウム利用シナリオについて、発電設備容量・再処理量・使用済燃料貯蔵量およびウラン資源利用量の観点に立って検討した。

プルサーマルは、Pu リサイクルに係る技術、制度、産業基盤整備に不可欠であるものの、ウラン資源消費量および使用済 MOX 燃料貯蔵量が増大することが課題である。

FLWR により軽水炉 Pu 利用の高度化を図れば、Pu 多重リサイクルにより使用済 MOX 燃料貯蔵量の際限ない増大を抑制できるだけでなく、Na 冷却等 FBR の実用化が大幅に遅れる場合には、増殖型への移行によりウラン資源消費量の際限ない増大を抑制できる。また、Na 冷却等の高増殖型 FBR の実用化以降においても、Pu 利用軽水炉を適切な規模で共存させ発電炉型を多様化することにより、供給安定性の向上を図ることも可能であると考えられる(OHP14)。

[Q&A]

- Q. 一番最後のケースで、FBRの高増殖とFLWRは両方とも増殖するので、Puが余分にでき過ぎないか。
- A. 両方が完全にバランスした状態ではおっしゃる通りPuが余分になる。ただし、今回示した2150年までの範囲ではまだ過渡期なので、Puについては別に余剰になっているわけではない。将来的なPuストックとランニングストック、SFのストックをうまくコントロールしつつ、FBRとFLWRの両炉型の発電規模のバランスをとって平衡状態までもっていければと考えている。しかし、まだテクニカルにそこまでつめ切れていない状況である。
- C. 共存のシナリオというのは、原研内部では以前から考えていたが、今回こういう形で初めて出させていただいた。我々水炉の方からも、高性能のNa冷却炉とFLWRの二者択一という形ではなくて、共存するというのも非常に現実的な方法ではないかと思っている。
- Q. FLWRに対して明るい面を拾って並べて説明いただいたが、同時に発生しているネガティブな面の説明を、失礼な言い方をさせていただくと意図的に落とされたきらいがあったと思う。結局のところ総合判断として、どのシナリオがいいのかというのは、今回の発表内容だけではなんともいえないという感想を持った。まず、Puサーマル長期継続シナリオで、(1)と(2)のケースのいずれも使用済燃料蓄積量が際限なく単調増大していくとの指摘は確かにその通りであるが、私の立場から見れば、(2)の数千トン程度の使用済燃料蓄積量であれば少なくともこの時間範囲であればコントロールできているとみなせる。(1)のケースのように、使用済燃料の蓄積量が数万トンオーダーになるのは問題であろうが、(2)では、2150年まで1万トンで収まっている、あるいは増加率が大変小さいという意味では、問題ではないと感じる。しかも、いつまでも軽水炉で続けようとするため蓄積し続けるのであって、2050年でも2100年でも2120年でもFBRに切り替えた瞬間にこの増大は止まるわけであり、この点は問題ではないと申し述べたい。
- また、一言もおっしゃらなかったが、肝心のFLWRは実は燃焼度を軽水炉よりも低く抑えているので、使用済燃料の再処理量がFLWR導入シナリオの方が他のどのシナリオよりも大きくなっている。使用済燃料の再処理費がどの種別であってもトン当たり同額と仮定すると、再処理費は量で効くので、経済性の面ではFLWRを使うシナリオが一番不利である可能性が高いことを指摘させていただきたい。従って、優劣は判断できないといいながらも、直感的には、3.1(2)の「Puサーマル長期化使用済MOX燃料1回再処理ケース」でつないでにおいて、FLWRに拠らずにどこかでFBRに移行を始めるのが、余計なことをしなくてよいという意味で現実的かつ適切ではないかを感じる。

- A. FLWR のネガティブな面の説明を意図的に落としたということは一切ない。使用済燃料の貯蔵量について「この程度であれば大丈夫」という量的な問題ではなく、将来が不透明でいくらでも溜まり続けるところに問題がある。ウラン資源もそうであるが、何トンまでなら大丈夫という閾は一体誰が保証できるのか。いくらでも要ることが問題であり、それを有限量に抑える歯止めが必要である。その歯止めをかけることが、今、できるだけ早い時期に必要な。後は可能性の問題である。私の感想を申し上げますと、より現実的なシナリオとして、FLWR 導入シナリオのほうが可能性は高いと考えている。技術的には色々な見方があり得ると思うが。

再処理については、確かに量は多くなる。FLWR は平均燃焼度が低いのでその分再処理量は増えるが、ただし極端に多くなるわけではない。高燃焼度化を目指して、平均燃焼度が炉全体で 5 万 MWd/t ぐらいのレベルを目指している。将来的な軽水炉の 6 万 MWd/t という値も保証されている値ではなくて、このぐらいを目標としているという話であるから、FLWR で再処理量が極端に増えるわけではないと考えている。であるので、もし FLWR の 5 万 MWd/t が実現するのであれば、再処理量が将来そう問題になるわけではないであろう。私の見方からすると、多少細かいところにひっかかっておられるような気がする。むしろ燃料サイクルを長期的なスパンで見た場合に、どう持続性を確保するのか、どう柔軟性を確保するのか、そういう観点から我々自身が頭を柔軟にしていろいろな選択肢を考える必要があるのではないかというのが今のコメントに対する私の感想である。

- Q. 今のシナリオで、間に高転換炉というものはさんでいる。内川氏の発表では照射ベッドで低減速場の燃料照射をするという意図もあるとのこと、必要とみなして今のシナリオがあると思うが、燃料サイクル上あるいは技術的な開発上、高転換炉の時代を 20~30 年入れるメリットはどこにあるのか。
- A. 高転換炉を入れた理由としてはいくつかある。一つは、燃料サイクルのインフラの問題を考えている。例えば、MOX の再処理技術ができればそのままサイクルすればよいと思う。それから、JMOX での MOX 燃料製造等を考えた場合、我々が狙っているかなり高富加度の MOX 燃料の加工がそのままできれば高転換炉というステップを必ずしも炉型戦略的な意味で入れる必要はないと思う。高転換炉を含めたのは、いろいろな核燃料サイクルの環境に対応するという、たとえば FLWR のインベントリが多いということは、さきほどは言わなかったがかなり少数の高転換炉で効率よく Pu が利用できるというメリットが出てくる。その辺や、技術開発戦略も含め、今回のシナリオを作った。したがって、高転換炉がそこに必ず必要であるというシナリオはないと思う。
- A. 増殖が最初からできるのであれば、当然それでよいわけであり、あえて高転換という概念で増殖を抑えたものを先にはさみこむ考え方はシナリオ上は特に必要ない。

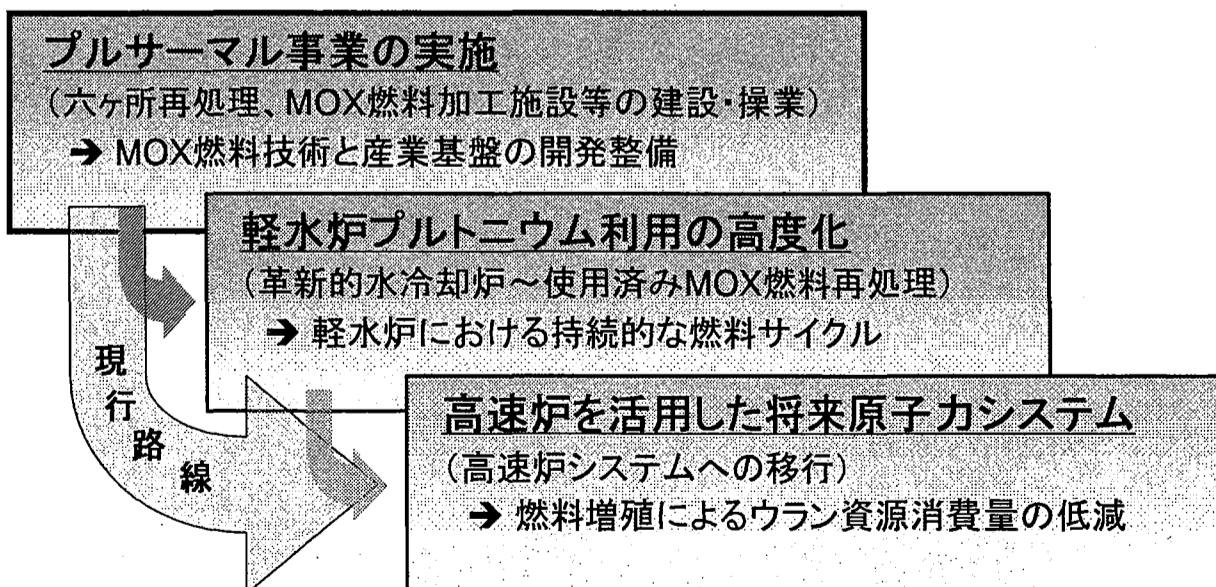
軽水炉プルトニウム利用の高度化に係る 燃料サイクル長期シナリオ

平成17年2月10日

日本原子力研究所
エネルギーシステム研究部
佐藤 治・立松研二

1. 基本的考え方

- ◆原子力発電は超長期にわたり我が国の基幹電源として不可欠
- ◆軽水炉が今後半世紀以上にわたりその中核技術となる見込み
- ◆「柔軟」かつ「持続可能」な燃料サイクルシステムの構築が必要



2. 前提条件とシナリオの定義

2.1 前提条件

1) 原子力発電設備容量

- ・現在建設中3基+大間(全MOX炉)が予定どおり運転開始
- ・2030年以降は総設備容量約5800万kWeで一定とし、2012年と2030年の間の設備容量は直線内挿で決定

2) 炉型特性等

- ・濃縮ウラン軽水炉
段階的に高燃焼度化し、2020年以降の燃焼度60GWd/t
- ・プルサーマル(全MOX炉)
大間以降の追加投入分は燃焼度60GWd/t
- ・革新的水冷却炉(FLWR)
2025年頃からPuバランスに応じて新設プラントとして導入
特性 { 高転換型: 転換比=0.89, 平均燃焼度= 45GWd/t
 増殖型 : 転換比=1.04, 平均燃焼度= 50GWd/t
- ・高速増殖炉(FBR、Na冷却炉を想定)
特性 { 高増殖型: 増殖比=1.16, 平均燃焼度= 63GWd/t
 低増殖型: 増殖比=1.04, 平均燃焼度=110GWd/t

3) 燃料サイクルの条件

各工程の物質ロス率(%)

	濃縮ウラン 燃料	プルサーマル MOX燃料	革新的水冷却炉 (FLWR)燃料	高速増殖炉 (FBR)燃料
ウラン濃縮	1.0	—	—	—
成型加工	0.5	0.1	0.1	0.1
再処理	1.0	0.5	0.5	0.1

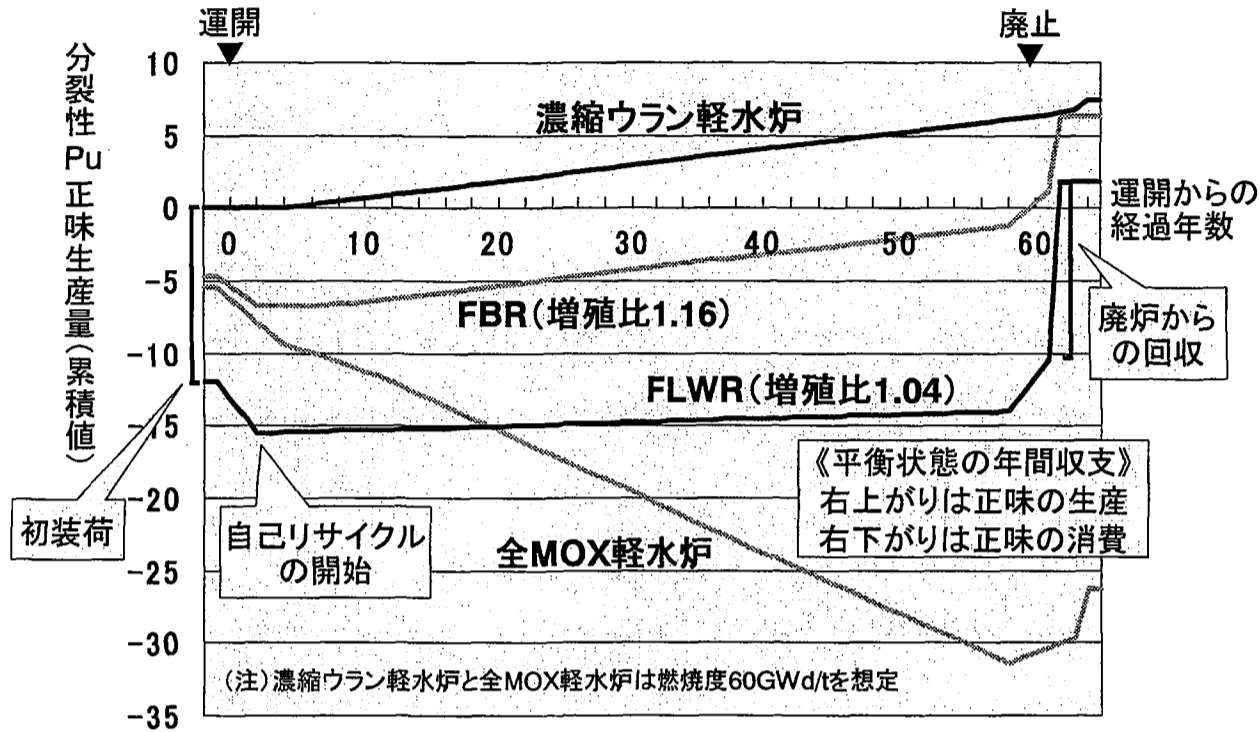
リード・ラグタイム(年)

		濃縮ウラン軽水炉 プルサーマル	革新的水冷却炉 (FLWR)及びFBR
ウラン調達→濃縮		1	—
濃縮→成型加工		1	—
成型加工→装荷	初装荷	2	2
	平衡装荷	1	1
原子炉取出→再処理		4	2
再処理→成型加工		0	0

(注)革新的水冷却炉(FLWR)の平衡サイクルにおけるPu炉外滞在時間は3年

各炉型のプルトニウム生産・消費に係る特性

- ◆100万kWeの炉を第0年に運転開始し、60年後に廃止することを想定
- ◆各炉型所定のリード・ラグタイム及びロスを考慮してPuを自己リサイクル
- ◆この時の各年の正味Pu(分裂性)生産量を積算 → 下図参照



2.2 シナリオの定義

シナリオ	プルサーマル		革新的水冷却炉の特性		高速増殖炉の新設		第2再処理
	部分MOX	全MOX炉	2049年まで	2050年以降	高増殖炉	低増殖炉	
◆プルサーマル長期継続シナリオ							
使用済MOX燃料長期貯蔵ケース	耐用期間中Pu利用	大間+追加投入	-	-	-	-	六ヶ所閉鎖後(1200トン)
使用済MOX燃料1回再処理ケース	耐用期間中Pu利用	大間+追加投入	-	-	-	-	六ヶ所閉鎖後(1200トン)
◆革新的水冷却炉(FLWR)導入シナリオ							
2050年本格導入ケース	2025年以降濃縮ウランに切り替え	大間のみ	高転換型	増殖型	-	-	六ヶ所閉鎖後(1200トン)
2030年本格導入ケース			高転換型	増殖型	-	-	2030年から(400トン)
◆高速増殖炉(FBR)移行シナリオ							
FBRへの全面移行ケース	2025年以降濃縮ウランに切り替え	大間のみ	高転換型	高転換型(新設なし)	2050年以降	Pu収支に対応	六ヶ所閉鎖後(1200トン)
Pu利用軽水炉との共存ケース			高転換型	増殖型	2050年以降	-	

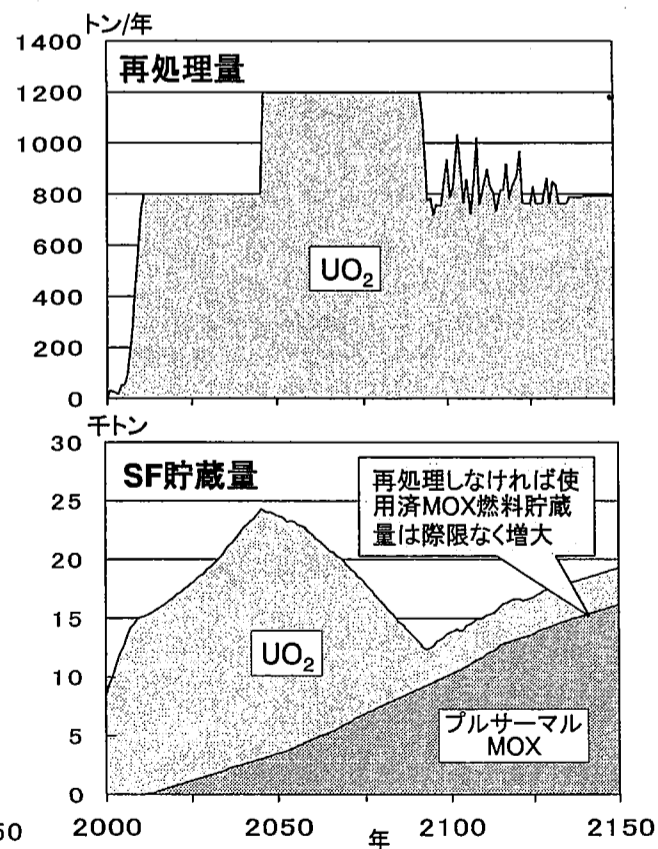
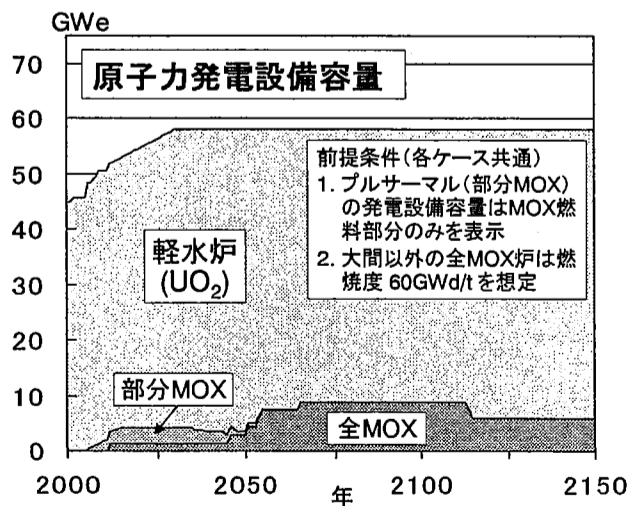
3. 核燃料サイクルの長期シナリオ

<p>3.1 プルサーマル長期継続シナリオ</p> <p>(1) 使用済MOX燃料長期貯蔵ケース</p> <p>(2) 使用済MOX燃料1回再処理ケース</p> <p>3.2 革新的水冷却炉 (FLWR) 導入シナリオ</p> <p>(1) 2050年本格導入ケース</p> <p>(2) 2030年本格導入ケース</p> <p>3.3 高速増殖炉 (FBR) 移行シナリオ</p> <p>(1) FBRへの全面移行ケース</p> <p>(2) Pu利用軽水炉との共存ケース</p> <p>3.4 ウラン資源消費量</p> <p>(1) 軽水炉Pu利用シナリオの比較</p> <p>(2) FBR移行シナリオを含めた検討</p>
--

3.1 プルサーマル長期継続シナリオ

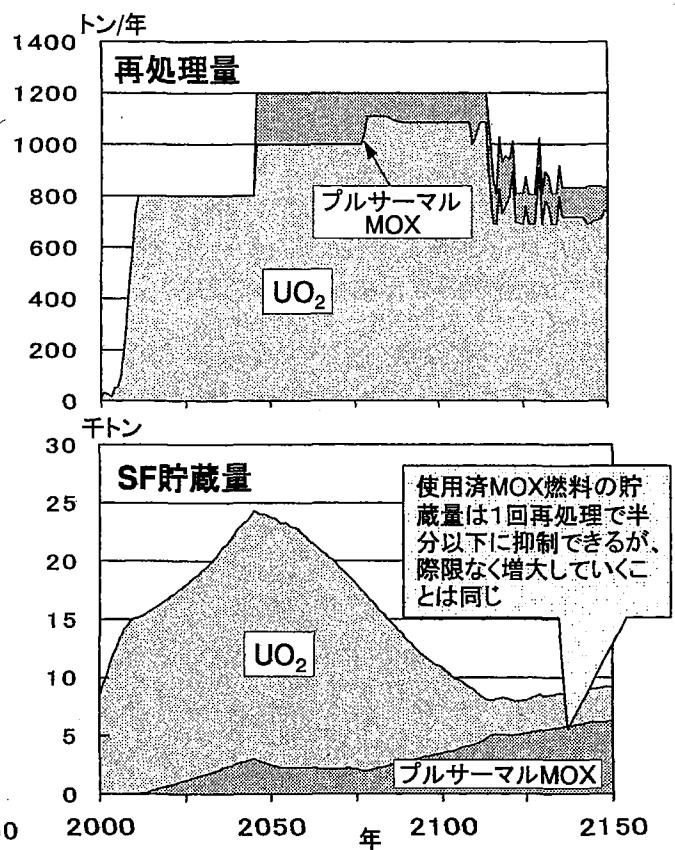
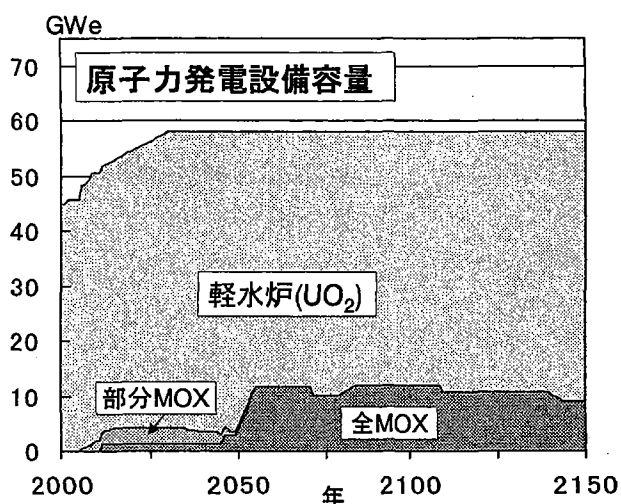
(1) 使用済MOX燃料 長期貯蔵ケース

- ◆ 第2再処理: 六ヶ所工場閉鎖後
- ◆ プルサーマル: 最大限利用
(全MOX炉を新設)
- ◆ 使用済MOX燃料: 再処理せず貯蔵



(2) 使用済MOX燃料
1回再処理ケース

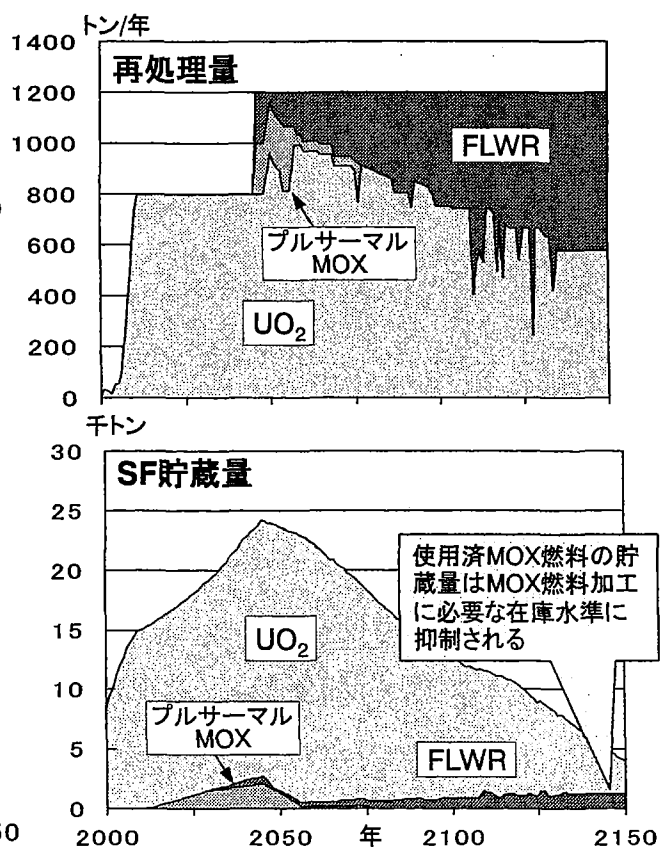
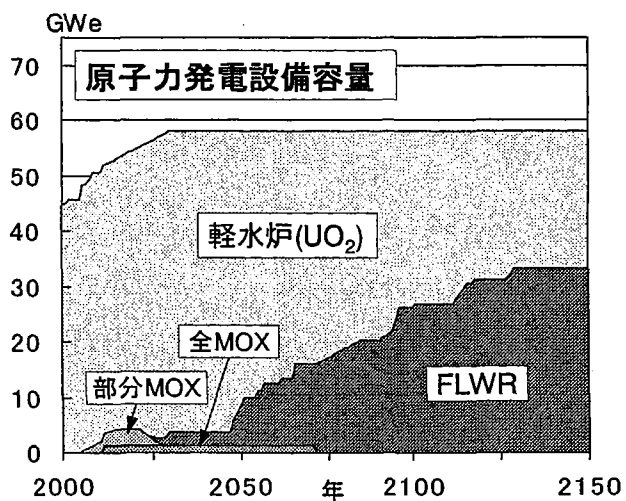
- ◆ 第2再処理: 六ヶ所工場閉鎖後
- ◆ プルサーマル: 最大限利用
(全MOX炉を新設)
- ◆ 使用済MOX燃料: 1回だけ再処理



3.2 革新的水冷却炉 (FLWR) 導入シナリオ

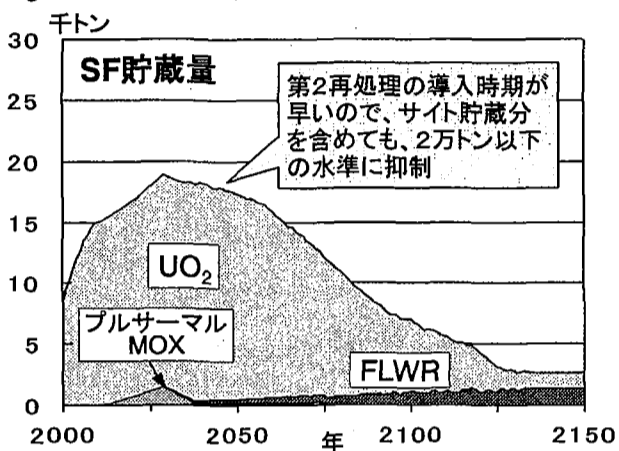
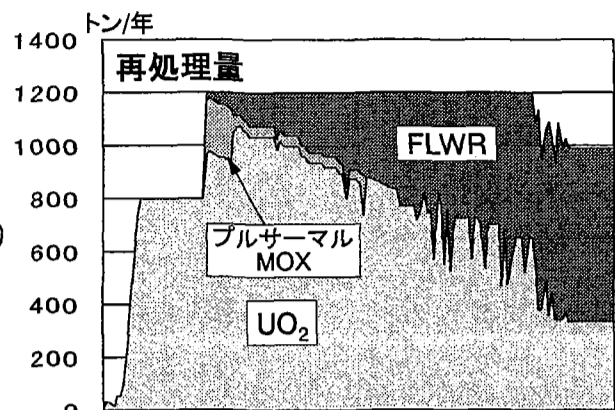
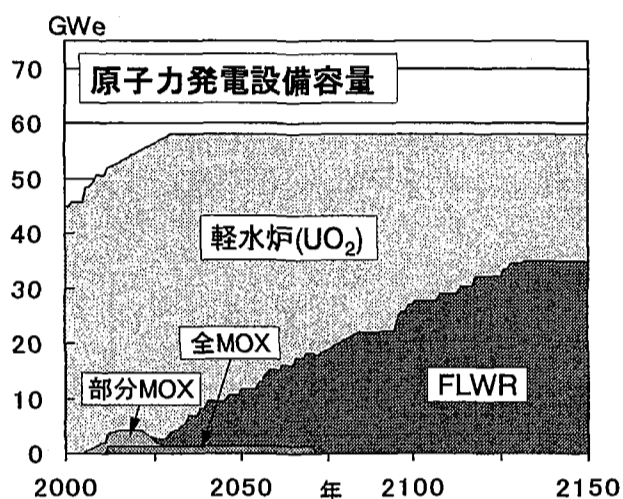
(1) 2050年本格導入
ケース

- ◆ 第2再処理: 六ヶ所工場閉鎖後
- ◆ 部分MOX炉からFLWRに移行 (2025年)
- ◆ FLWR転換比:
0.89 → 1.04 (2050年以降)



(2) 2030年本格導入 ケース

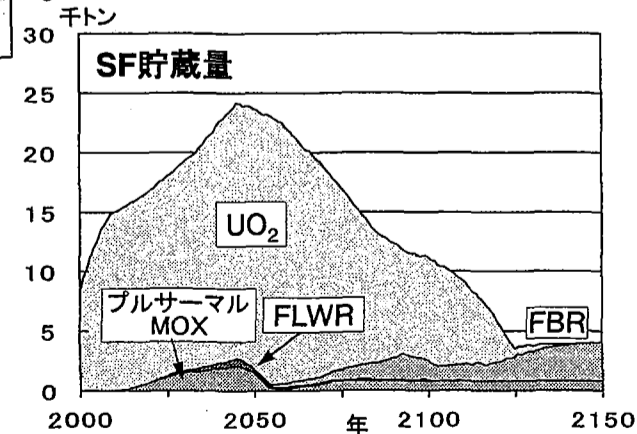
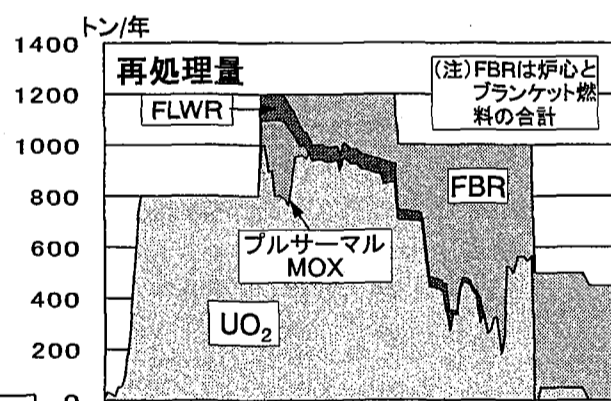
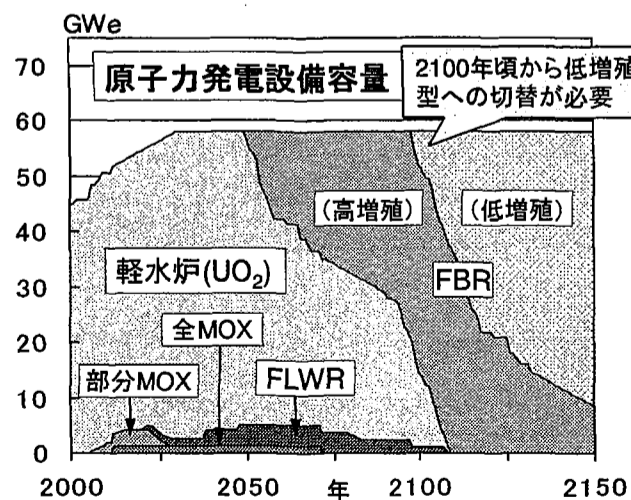
- ◆ 第2再処理: 2030年操業開始
- ◆ 部分MOX炉からFLWRに移行(2025年)
- ◆ FLWR転換比:
0.89 → 1.04 (2050年以降)



3.3 高速増殖炉(FBR)移行シナリオ

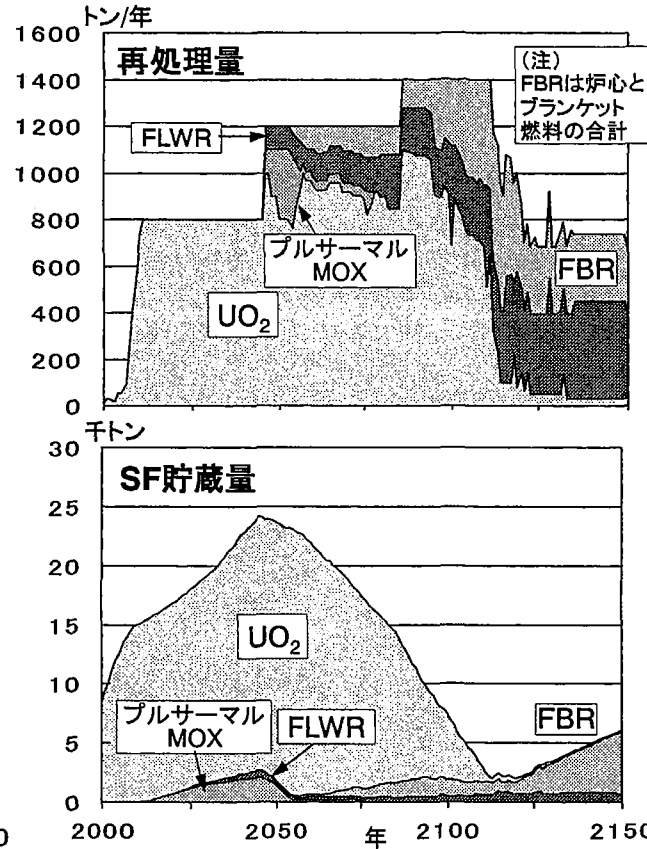
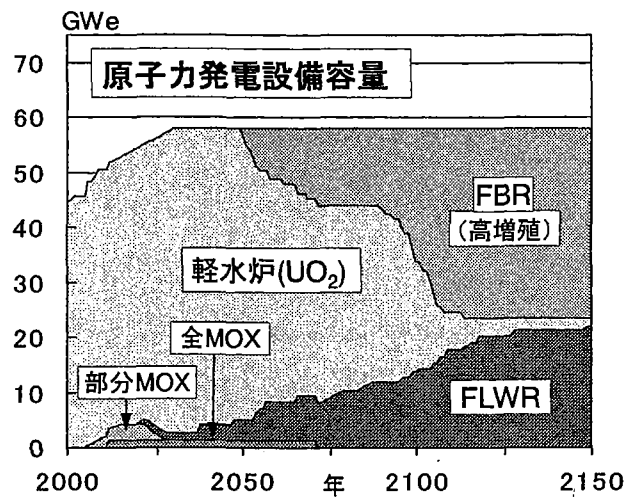
(1) FBRへの全面移行 ケース

- ◆ 第2再処理: 六ヶ所工場閉鎖後
- ◆ 部分MOX炉からFLWRに移行(2025年)
- ◆ FLWRからFBRに移行(2050年)
- ◆ FBR増殖比: 1.16から1.04へ移行



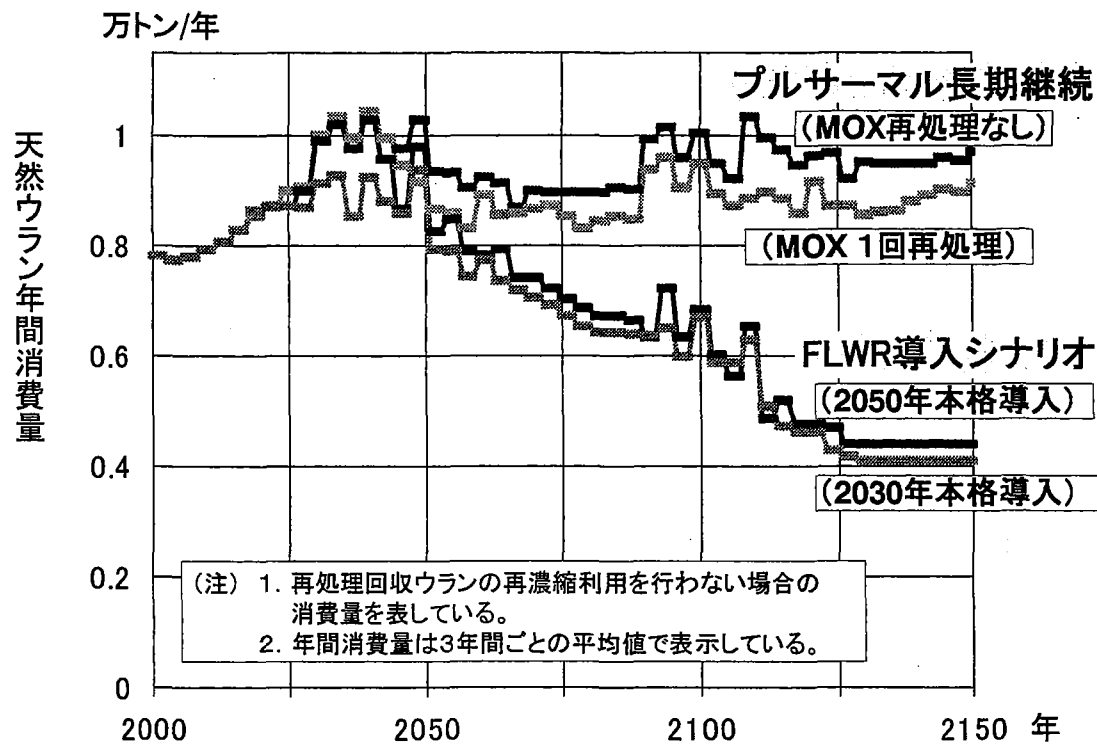
(2) Pu利用軽水炉との共存ケース

- ◆ 第2再処理: 六ヶ所工場閉鎖後
- ◆ 部分MOX炉からFLWRに移行(2025年)
- ◆ FLWR転換比:
0.89 → 1.04 (2050年以降)
- ◆ 高増殖型FBRの導入(2050年)



3.4 ウラン資源消費量

(1) 軽水炉Pu利用シナリオの比較



(注) 1. 再処理回収ウランの再濃縮利用を行わない場合の消費量を表している。
2. 年間消費量は3年間ごとの平均値で表示している。

