



高速増殖炉サイクルへの移行に関する検討

(独)日本原子力研究開発機構

2006年5月24日



1. 高速増殖炉サイクルへの移行期の燃料サイクルに関する検討

高速増殖炉サイクルへの移行に際しては、高速増殖炉へのプルトニウムの供給源として燃料サイクルが重要な要因となる。

検討に当たっては、可能な限り早期に高速増殖炉を導入するために必要なプルトニウムを供給する移行期の燃料サイクルを想定した。

<高速増殖炉サイクルへの移行期の想定>

- 寿命を迎える軽水炉のリプレースとして商業用の高速増殖炉導入が開始される2050年頃から、リプレースが完了するまでの60年程度が移行期
- 高速増殖炉導入開始までは、六ヶ所軽水炉再処理によって得られるPuはプルサーマルに利用。プルサーマル使用済燃料はPu含有割合が高く効率的燃料供給が可能なことから、その再処理によって得られるPuは高速増殖炉に利用する
- 移行期には、軽水炉、プルサーマル、高速増殖炉使用済燃料が存在し、これらの使用済燃料を再処理して高速増殖炉へ燃料を供給(高速増殖炉導入に伴いプルサーマルは終了)
(参考-1~4参照)

<移行期の燃料サイクル>

- 移行期の燃料サイクル技術に対する安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性に関する更なる性能向上(実用化戦略調査研究の研究開発目標と共通)
- 移行期の燃料サイクル、特に、再処理については、軽水炉、プルサーマル、高速増殖炉といったPu富化度やPu組成等の違う使用済燃料が存在することから、これらをPuの需要(高速増殖炉の導入)に応じて合理的に再処理することが肝要
 - ・1GWeの高速増殖炉1基に必要な初装荷燃料約90tHM(Pu約9tM)
- 移行期の燃料サイクルに関する諸量解析の想定と結果を参考5~9に示す。



2. 移行期の再処理に関する留意点

移行期の燃料サイクルの中でも高速増殖炉への燃料供給源として特に軽水炉燃料の再処理は、重要な役割を果たす。そこで、以下に将来の再処理プラント概念の検討とそこに採用する再処理技術の開発に当たって留意する事項を整理した。

＜移行期の再処理プラント及び再処理技術の開発に留意する事項＞

- － 六ヶ所工場に続く「移行期の再処理工場」については、各種使用済燃料の特徴を踏まえて合理的な処理が可能なプラントを目指すことが肝要
 - 燃焼度、使用済燃料中のPu含有量、Pu同位体組成、MA含有量など
 - 使用済燃料の発生量と貯蔵量
 - 再処理技術の実績と成熟度
- － 高速増殖炉再処理技術は、開発目標への適合可能性及び技術的実現性の観点から先進湿式法を主概念として選択
- － 軽水炉再処理技術も、同様の開発目標を満足するために、革新的な技術の開発や既存技術の改良・高度化が必要
 - 適用技術としては、実用化戦略調査研究で高速増殖炉燃料の再処理技術として評価した先進湿式法、金属電解法、フッ化物揮発法などの他に従来のPUREX法を高度化することが考えられる



3. 先進湿式再処理法の軽水炉再処理への適用に関する検討

軽水炉再処理技術として先進湿式法、金属電解法、フッ化物揮発法、従来PUREX法の改良などが挙げられるが、フェーズⅡの評価結果を参考に、先進湿式法は軽水炉再処理に対しても有力な選択肢と考えられる。

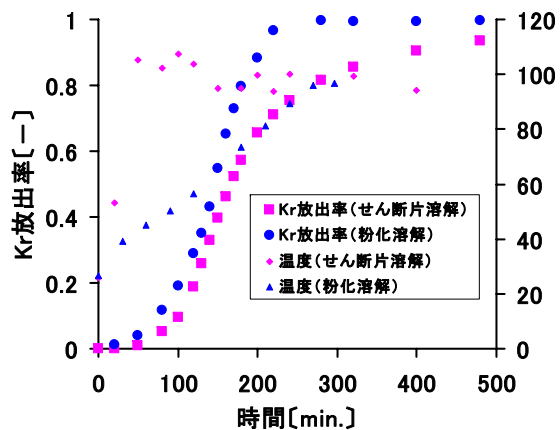
- 先進湿式再処理法は、従来の軽水炉再処理法であるせん断、溶解及び溶媒抽出に関する技術をベースに高速増殖炉燃料の特徴を考慮して効率化、高度化した技術
- 高速増殖炉への低除染燃料供給を前提として、将来の軽水炉再処理に先進湿式再処理法を適用した場合、特に経済性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性に優れたプロセスが想定可能
- 再処理工程から回収されるUの再利用方策によって技術の選択が可能
 - 高速増殖炉ブランケット燃料に利用の場合：上記プロセスで対応
 - 再濃縮する場合：複数のオプションがある
 - ✓ 上記再処理プロセスで低除染Uを回収し、濃縮の再転換工程で除染
 - ✓ 上記再処理プロセスにU精製工程を付加して高除染Uを回収
 - ✓ 上記プロセスの晶析工程の代わりにUREX法のような高除染のU粗分離技術を導入



3. 先進湿式再処理法の軽水炉再処理への適用に関する検討 (a) 先進湿式再処理法の特徴

- 先進湿式再処理法は、従来の軽水炉再処理技術をベースに高速増殖炉燃料の特徴(高Pu富化度、高燃焼度)に適合させ、経済性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性の向上を目指して革新を図った技術。以下にその特徴、効果を示す。
 - 高効率溶解(燃料の粉化等との組合せ) : 処理時間の短縮
 - 晶析(溶解液からのUの粗分離) : 以後の工程処理規模の削減及び廃棄物発生量の低減
 - 遠心抽出器 : 設備、施設の小型化、処理時間の短縮
 - 単サイクル共抽出(U/Pu/Np共回収) : 工程の短縮、Pu単体で存在しない、MA(Np)の回収
 - MA回収 : 高レベル廃棄物の発生量低減と放射能による潜在的影響の低減

4時間程度で99%以上の溶解率を達成



燃料(常陽)の粉化による溶解実証データ

ビーカースケールのホット試験(CPFで実施)によりU回収率80%を達成



U-Pu溶液から晶析法により回収したU結晶

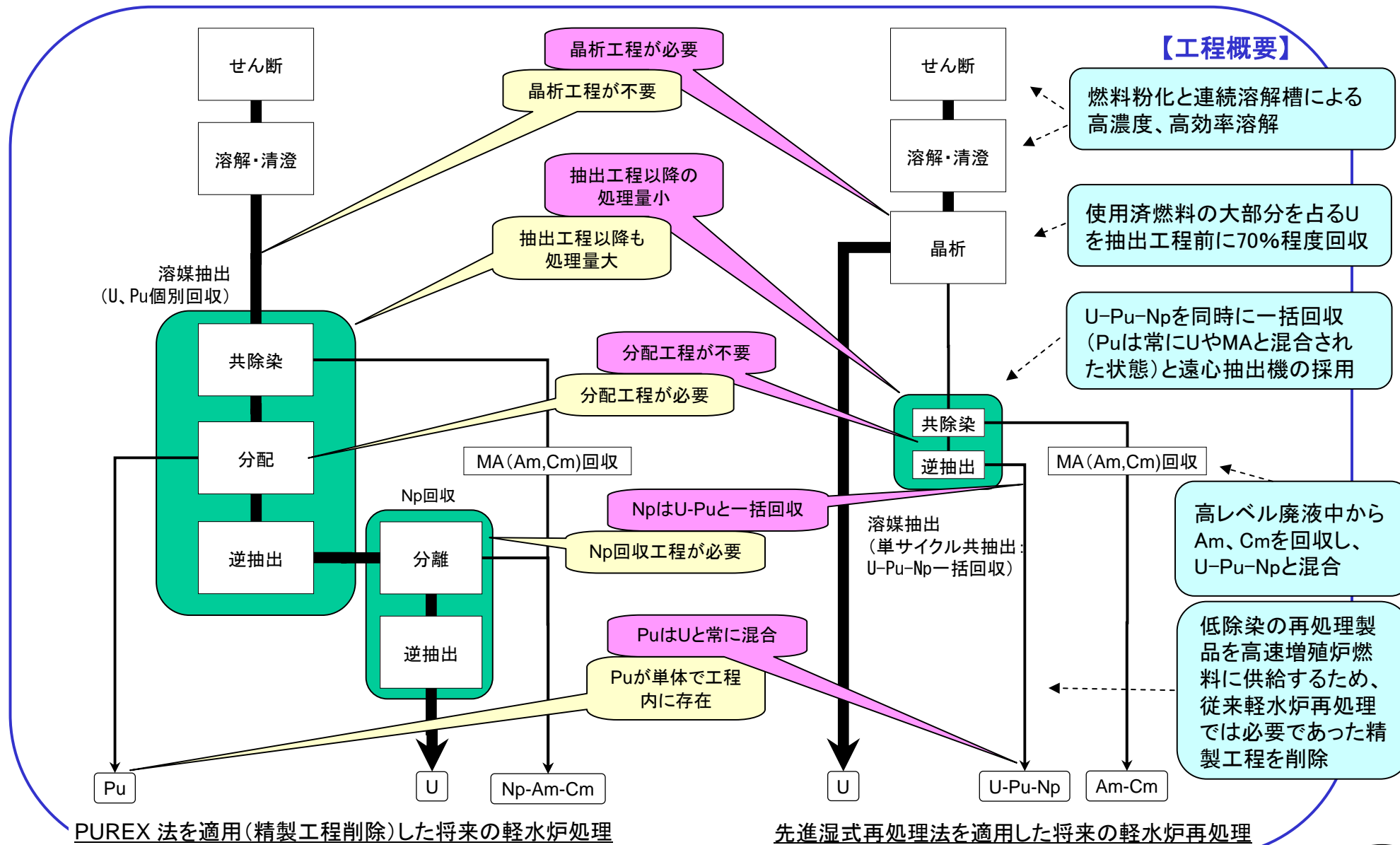
水相、有機相の分離などの基本性能や耐久性を確認



U試験中の遠心抽出器システム



3. 先進湿式再処理法の軽水炉再処理への適用に関する検討 (b) 従来型 PUREX 法の適用と先進湿式法の適用の比較





3. 先進湿式再処理法の軽水炉再処理への適用に関する検討 (c) 適用の効果

- 経済性向上
 - 連続溶解槽、遠心抽出機の採用による処理時間の短縮及び施設のコンパクト化
 - U及びPuの精製工程削除や晶析工程の導入による抽出工程の処理規模削減による、施設建設費、操業費低減
- 環境負荷低減性向上
 - 晶析工程の導入及び精製工程削除により、抽出工程以降の廃液発生量を低減可能
 - 抽出工程(単サイクル共抽出)及びMA回収工程でのMA回収、リサイクルにより高レベル廃棄物の放射能による潜在的影響の低減が可能
- 核拡散抵抗性向上
 - 単サイクル共抽出工程の導入によりPuは常にU、MAなどとの混合物として存在し、Pu単体では存在しない
 - 低除染MA入り燃料による接近の困難性向上

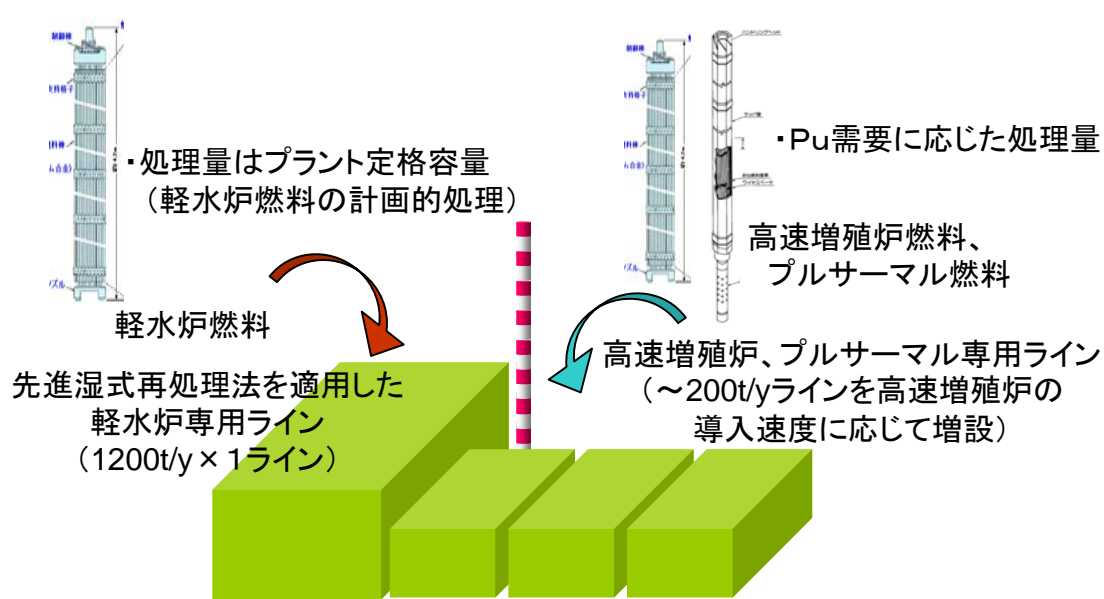
なお、先進湿式再処理技術を用いることで、従来型湿式再処理法の物量を大幅に削減可能(高速増殖炉再処理施設の場合、建設費が約1/2になると試算(参考-10参照))



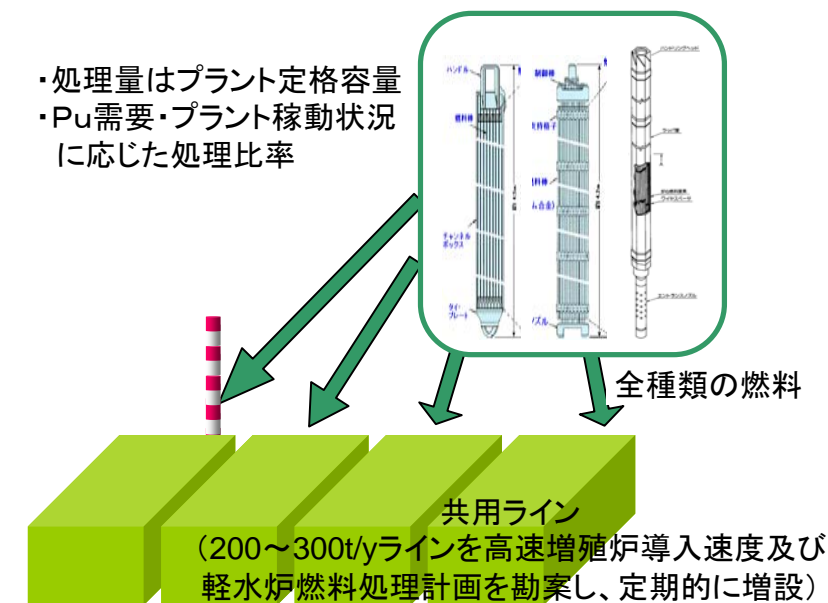
4. 先進湿式再処理法を適用した将来の再処理工場のイメージ

プルサーマルを含む軽水炉、高速増殖炉の使用済燃料を受け入れ、再処理する将来の再処理工場として、軽水炉、高速増殖炉それぞれの専用処理ラインを設ける場合と共用処理ラインを設ける場合の2つのイメージを以下に示す。

この2つの工場イメージは、移行期のPu需要の状況に応じてそれぞれの特長を生かした組み合わせにより柔軟に対応可能。



専用ラインの再処理工場イメージ図



共用ラインの再処理工場イメージ図



5. まとめ

- 経済性、核拡散抵抗性、環境負荷低減性に優れた先進湿式再処理技術を六ヶ所工場に続く将来の再処理工場に適用し、軽水炉、プルサーマル、高速増殖炉の使用済燃料を再処理することにより、燃料の計画的な安定供給を達成し、商業用の高速増殖炉を円滑に導入できる可能性がある。
- 高速増殖炉サイクルへの合理的な移行(将来の再処理工場の規模、稼働率やサイクルのPuバランスなどを考慮)を実現させるためには、以下が課題となる。
 - 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオの検討
 - シナリオに応じた最適な施設概念検討
 - 高速増殖炉再処理技術を適用した軽水炉再処理プロセス
 - 将来の再処理工場の目的に適合したライン構成(専用ライン、共用ライン)
 - 上記再処理概念に適合する高速増殖炉燃料製造施設
 - 施設概念を成立させるために必要な新たな研究開発課題と研究開発計画(例: 高速増殖炉再処理より処理規模が増大する軽水炉再処理のための大容量機器(溶解槽、晶析装置、遠心抽出器等)の開発、MAを含む新たな計量管理の構築、回収Uの扱いなど)
- 上記課題検討成果は、2010年頃から始まる国における六ヶ所再処理工場に続く再処理工場の検討に有益な材料を提供できることから、2010年に向けてより具体的に検討することが有効と考えられる。

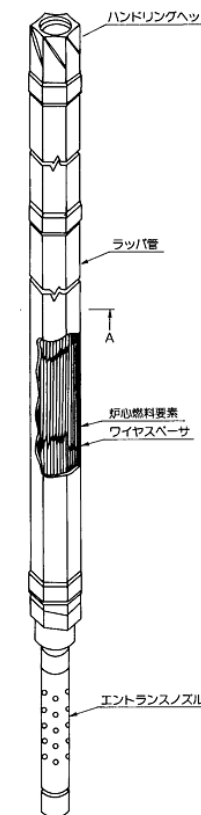


〔参考-1〕

軽水炉使用済燃料と高速増殖炉使用済燃料の主たる相違点

- 高速増殖炉特有の燃料集合体形状(ラッパ管、エントランスノズル、ワイヤスペーサ)
- Pu富化度(高速増殖炉の約10%(炉心及びブランケット燃料の平均)に対して軽水炉約1%、プルサーマル約3~5%)
- 燃焼度の違いによる核分裂生成物、マイナーアクチニドの量の違い(軽水炉<高速増殖炉)

高速増殖炉燃料
集合体形状



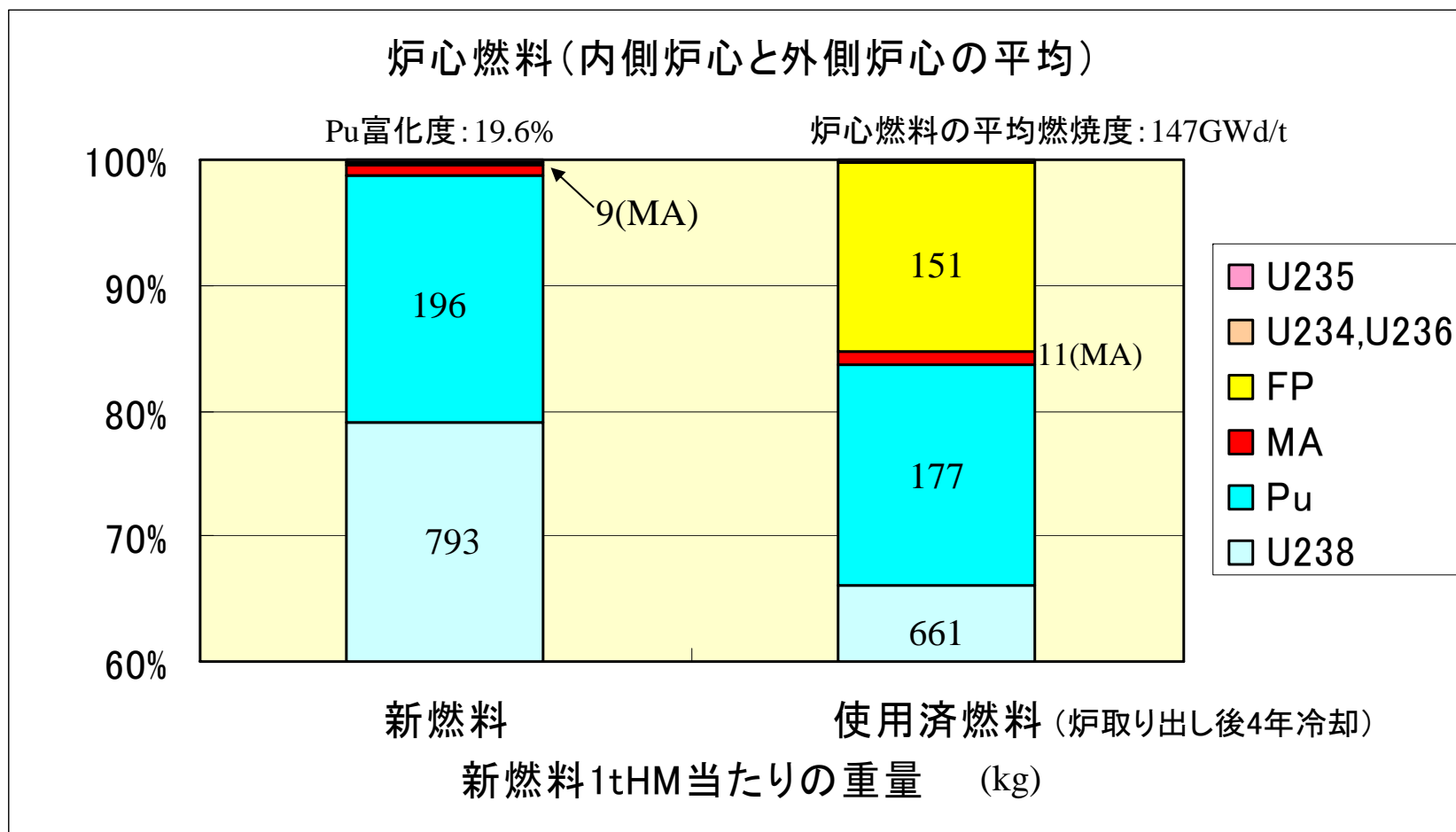
使用済燃料の組成(例)(酸化物燃料; 炉取り出し後、4年冷却; 新燃料1tHM当たりの重量)

	軽水炉		プルサーマル		高速増殖炉(増殖比1.1)	
	BWR	PWR	BWR	PWR	炉心平均	全体平均(含ブランケット)
燃焼度 (GWd/t)	45	49	45	49	147	90
核分裂生成物 (kg)	46	50	46	49	151	91
マイナーアクチニド (kg)	1	1	5	5	11	6
全アクチニド (kg)	954	950	954	951	849	911
(内、Pu重量)	(9)	(11)	(45)	(35)	(177)	(119)



[参考-2]
高速増殖炉燃料の組成(炉心)

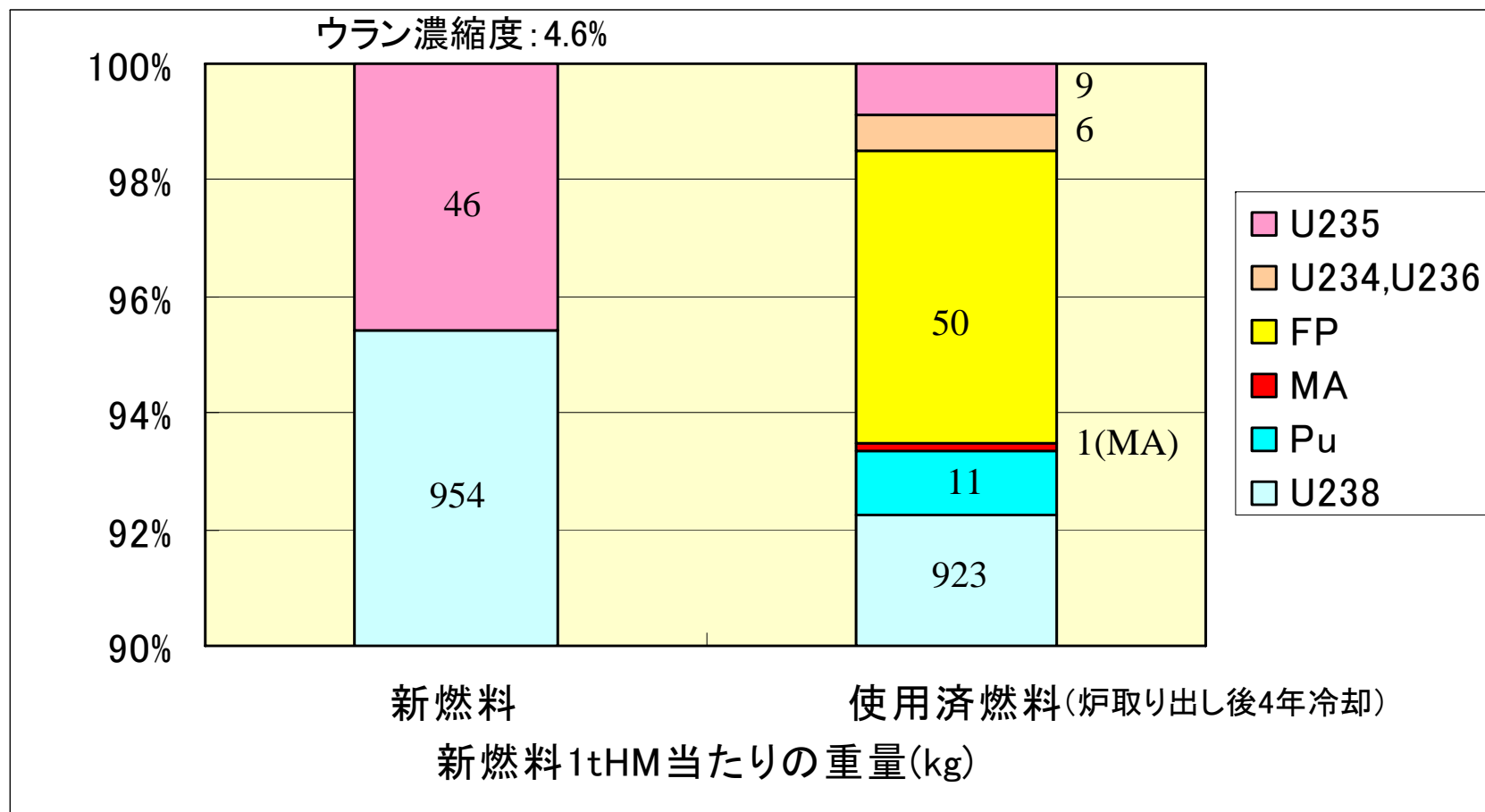
[電気出力: 1.5GWe、ナトリウム冷却、増殖比1.1]





[参考-3]
軽水炉燃料の組成(PWR)

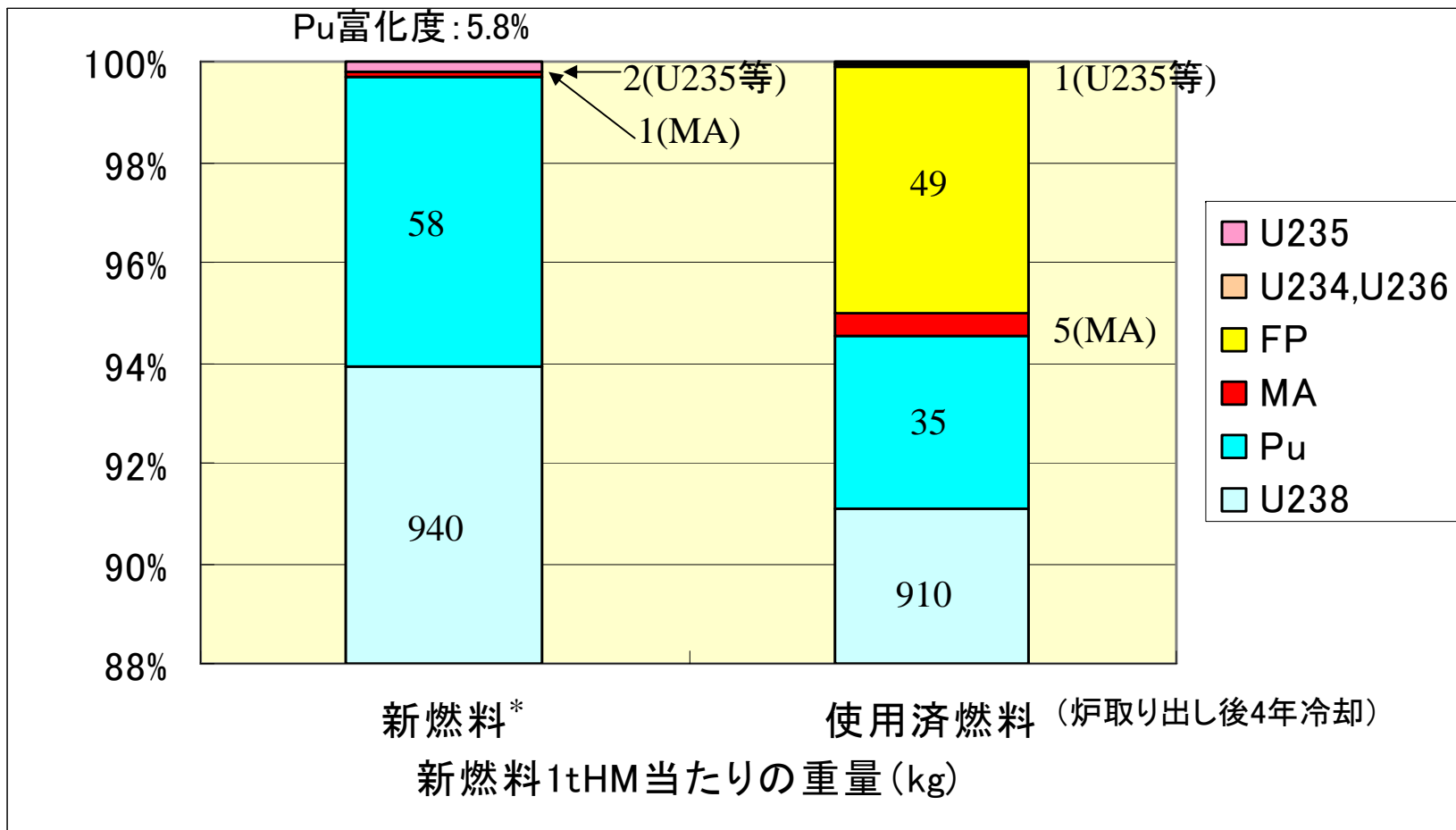
[電気出力:1GWe、PWR、平均燃焼度:49GWd/t]





[参考-4]
軽水炉プルサーマル燃料の組成(PWR)

[電気出力:1GWe、PWR、平均燃焼度:49GWd/t]



*再処理後3年経過した新燃料のためAm241が混入



[参考-5]
高速増殖炉サイクルへの移行に関する諸量解析(1/3)

軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行における燃料供給の観点から、必要再処理量や使用済燃料蓄積量などを把握することを目的に、ウラン、プルトニウムなどの核燃料物質の諸量解析を実施。

《高速増殖炉導入の諸量解析における主な想定条件》

項目	想定条件
原子力発電設備容量	2030年以降約58GWe一定※1
高速増殖炉の導入開始時期	2050年導入開始 (策定会議の議論を踏まえ)
将来の再処理設備の容量	軽水炉使用済燃料を対象に年間処理容量最大1,200トン 高速増殖炉使用済燃料については、高速増殖炉の導入に応じて適切に導入 (高速増殖炉の導入に必要なプルトニウムを確保し、使用済燃料の中間貯蔵量を削減するため)
その他	・原子炉(軽水炉と高速増殖炉)の寿命は60年。既存の軽水炉は2030年頃から順次廃止。 ・軽水炉と高速増殖炉でそれぞれ専用再処理工場を設置。六ヶ所再処理工場の操業終了以降、将来の軽水炉再処理工場は遅滞なく操業を開始 ・回収ウラン製品は再濃縮して利用
備考	※1「2030年のエネルギー需給展望(中間とりまとめ)」総合資源エネルギー調査会需給部会(2004年10月)のリファレンスケースを適用。 原子力委員会 第24回新計画策定会議(2005年4月)にて、2030年以降も原子力発電に対して発電電力量の30~40%程度の水準あるいはそれ以上の役割を期待すること適当とされている。

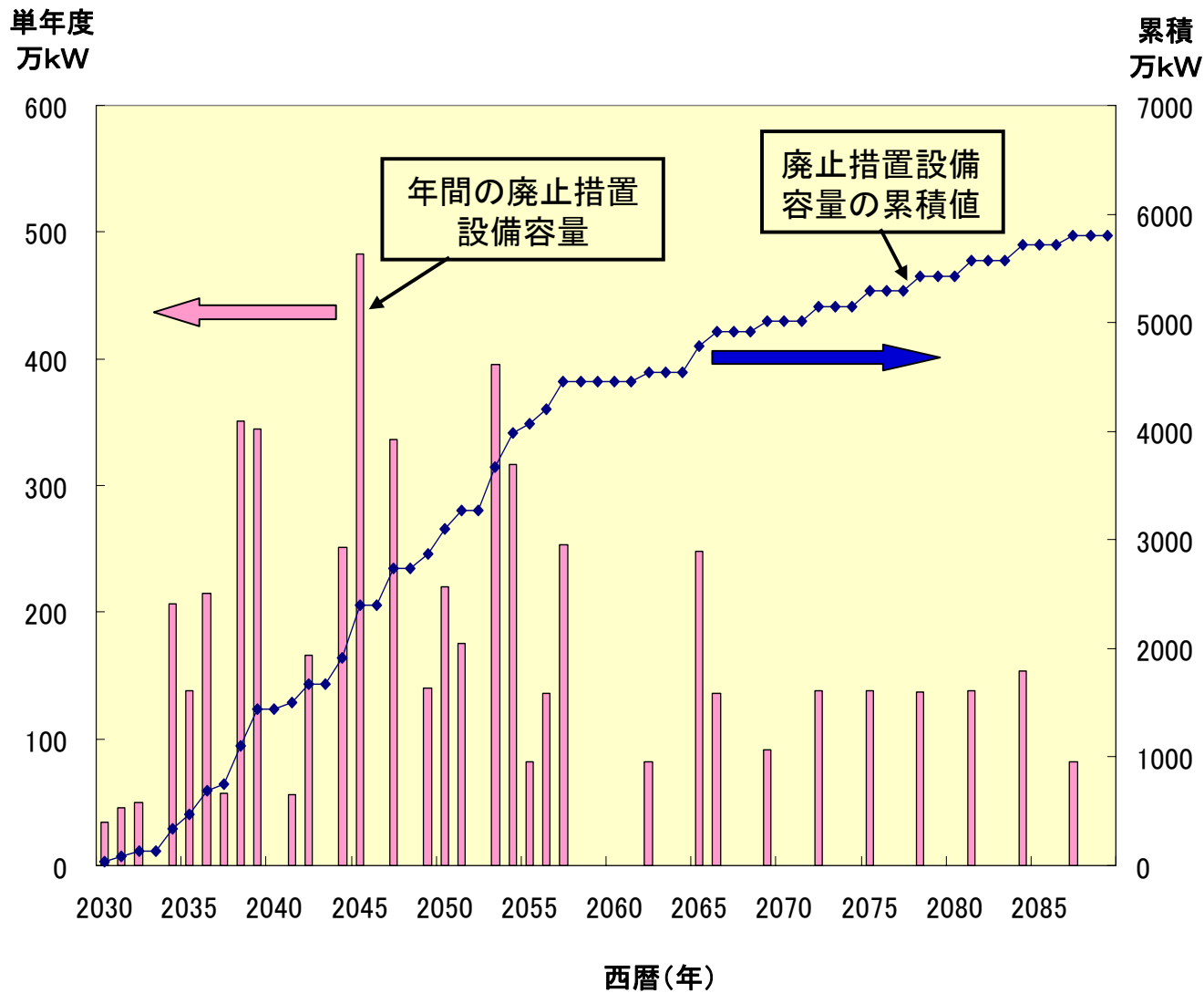


[参考-5] 高速増殖炉サイクルへの移行に関する諸量解析(2/3)

項目		想定条件
原子炉システム	軽水炉	BWR, PWR : 2019年以前の運開プラント 燃烧度 約4万MWd/t, 稼働率 80% ABWR, APWR : 2020年以降の運開プラント 燃烧度 約6万MWd/t, 稼働率 90%
	高速増殖炉	<ul style="list-style-type: none"> 炉型: ナトリウム冷却混合酸化物-簡素化ペレット燃料炉心[増殖比-移行期炉心1.10, 平衡期炉心1.03] 全炉心平均燃烧度: 約9万(移行期炉心), 約11.5万MWd/t(平衡期炉心) 稼働率: 94.6%(26.3ヶ月運転/1.5ヶ月定検) 軽水炉使用済燃料再処理廃棄物の回収マイナーアクチニドの燃烧/変換 もんじゅ(28万kWe): 2008年運転開始 革新技術実証のための原子炉(50万kWe) および実用化推進炉(100万kWe): 各々 2020年代および2030年代に運転開始 商用炉(150万kWe): 2050年以降本格導入
	炉寿命	軽水炉および高速炉とも60年
炉外サイクル時間	軽水炉	4年 (炉外冷却 3年, 再処理0.5年, 燃料加工および輸送0.5年)
	高速増殖炉	5年 (炉外冷却 4年, 再処理0.5年, 燃料加工および輸送0.5年)
再処理	軽水炉	<ul style="list-style-type: none"> 東海再処理: 2001-2005年 40 tonHM/年 六ヶ所工場: 2005-2010年 計画運転, 2011-2046年; 800 tonHM/年, 2047年廃止 (六ヶ所工場の運転計画は、平成17年3月時点の公表計画に基づく) 将来の再処理: 2047年運転開始, 1,200 tonHM/年 (再処理廃液からのマイナーアクチニド回収を想定)
	高速増殖炉	先進湿式法の場合 ・初号機施設(50tonHM/年): 2040年運転開始 ・商用施設(200tonHM/年): 2060年～
	寿命	軽水炉再処理施設および高速炉再処理施設とも40年
その他	<ul style="list-style-type: none"> 濃縮テイルウラン濃度は0.3%を想定 軽水炉使用済燃料からの回収ウランはFBR燃料母材および再濃縮/転換後に軽水炉燃料として再利用 FBR導入シナリオでは高速増殖炉再処理施設にて軽水炉MOX燃料を再処理 	



[参考-5] 高速増殖炉サイクルへの移行に関する諸量解析(3/3)



(留意事項)

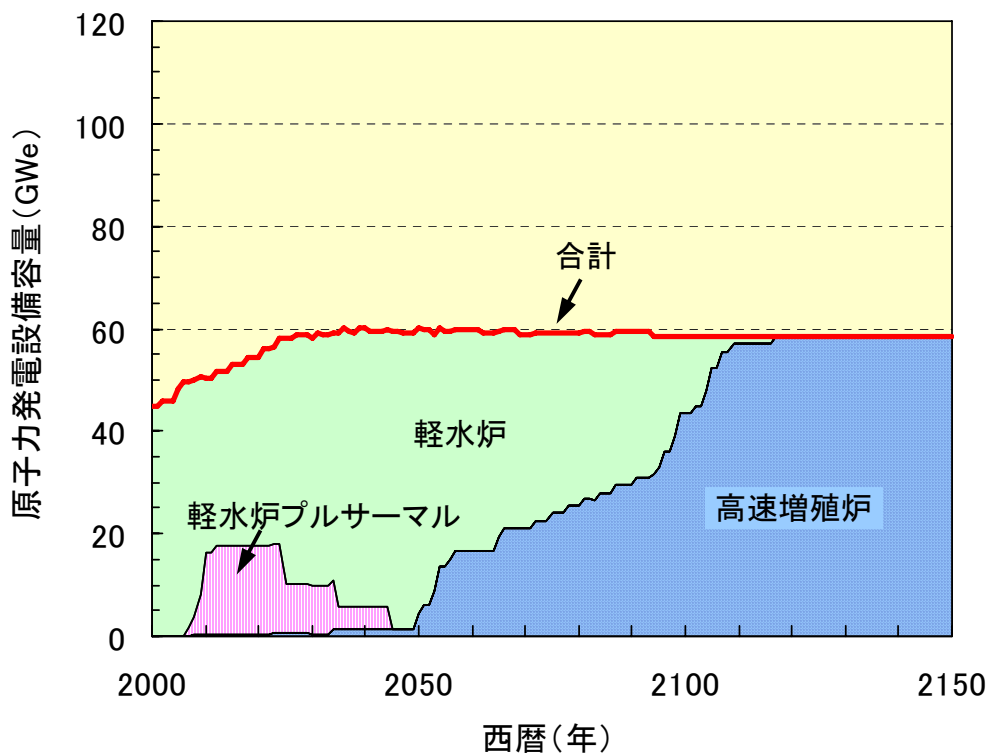
- 軽水炉の廃止措置にともない、運転停止となる時期は運開年に60年を足した年と仮定。
- 2030年～2049年については、廃止措置に伴う軽水炉の停止による設備容量の落ち込みを新規の150万kWeの軽水炉で補うと仮定し、軽水炉の設備容量のトータルがほぼ5800万kWeとなるように設定。
- 2050年以降についてはPuバランスを考慮して優先的に150万kWeのFBRを導入し、軽水炉と合わせた設備容量が5800万kWeに足りない場合に150万kWeの新規の軽水炉により補うと仮定。

軽水炉の廃止措置設備容量の推移

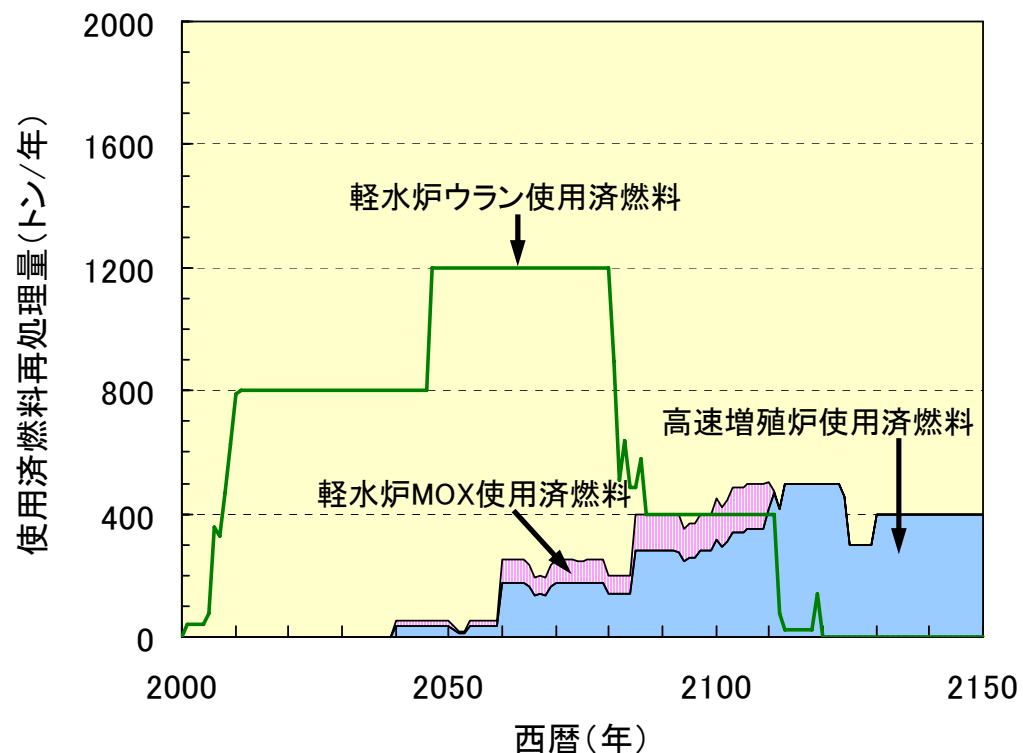


[参考-6] 高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ

- 高速増殖炉サイクルの本格導入以前は、プルサーマルの導入によりプルトニウムの需要を図る。
- 2050年に高速増殖炉を導入した場合、2100年過ぎには高速増殖炉サイクルへ完全に移行する。
- 軽水炉使用済燃料を対象とした将来の再処理施設の年間処理容量を1,200tHMとした場合は、2007年六ヶ所再処理工場操業開始から約80年間で、原子炉取出し後4年間の冷却期間を超えた軽水炉使用済燃料の再処理を完了する。
- 高速増殖炉使用済燃料を対象とした将来の再処理施設については、年間400tHM程度の処理容量が必要である。
- 両使用済燃料を対象とした将来の再処理施設の規模としては、21世紀後半に最大1,400～1,500トン程度に達する。



高速増殖炉導入シナリオの原子力発電構成

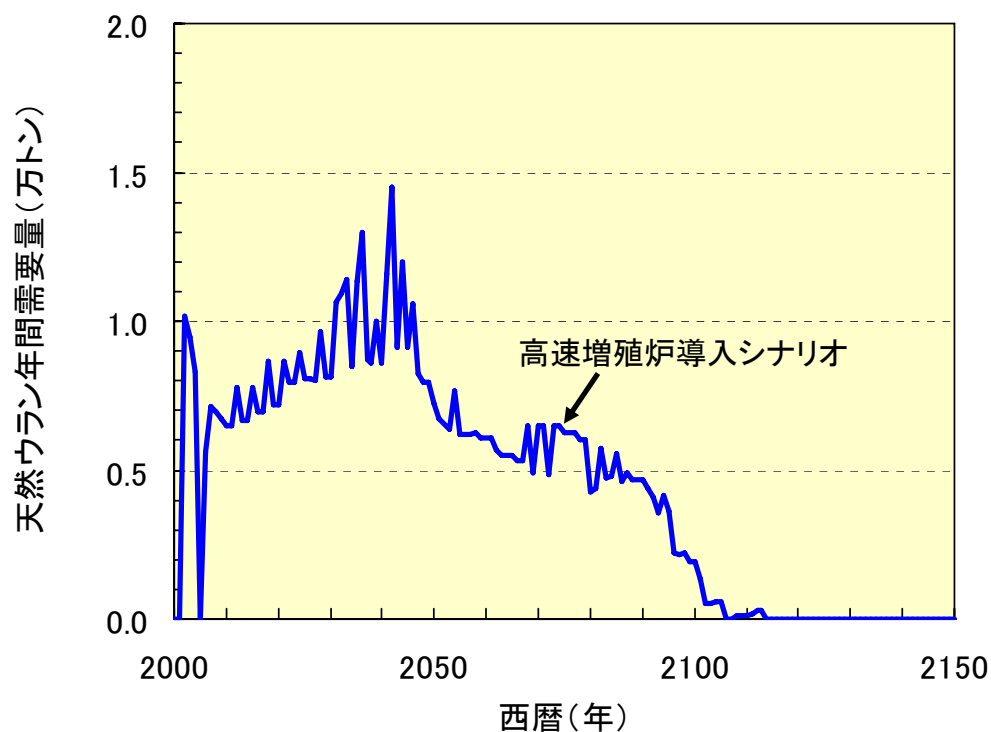


高速増殖炉導入シナリオにおける使用済燃料の再処理量

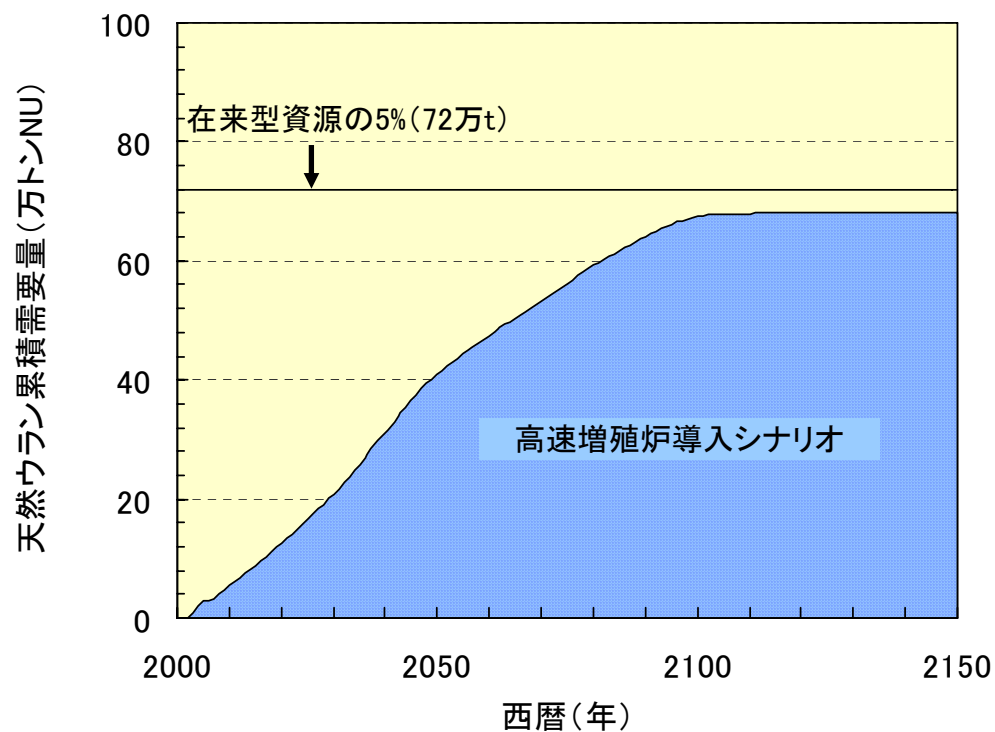


[参考-7] 天然ウランの年間需要量と累積需要量

- 2050年から高速増殖炉を導入していけば、2100年過ぎには天然ウランの需要はなくなる。
- 天然ウランの累積需要量は在来型資源の5%程度となる。



天然ウラン年間需要量



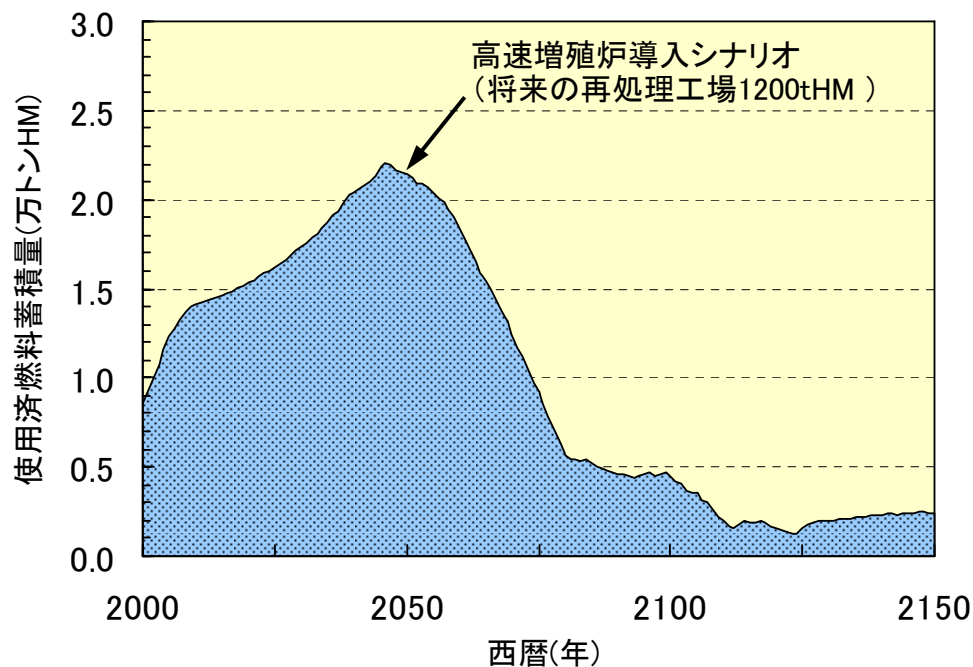
天然ウラン累積需要量



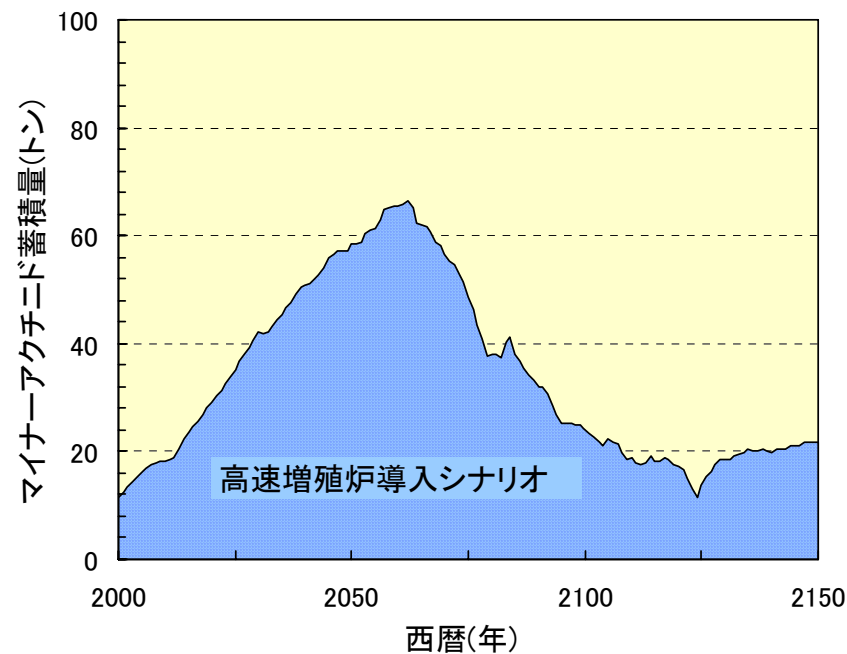
[参考-8]

使用済燃料貯蔵量と使用済燃料中のマイナーアクチノド蓄積量

- 将来の再処理工場(軽水炉使用済燃料対象)の規模が1,200トンHM/年の場合、使用済燃料の最大貯蔵量は2.2万トンHM程度となる。
- 発電所サイト内貯蔵容量(1.7万トンHM程度)を考慮すると、中間貯蔵の期間を50年以下とすることが可能である。
- 高速増殖炉導入シナリオでは、使用済燃料中に存在するマイナーアクチノド量は最大70トン程度となり、その後も30トン以下に抑えることができる。



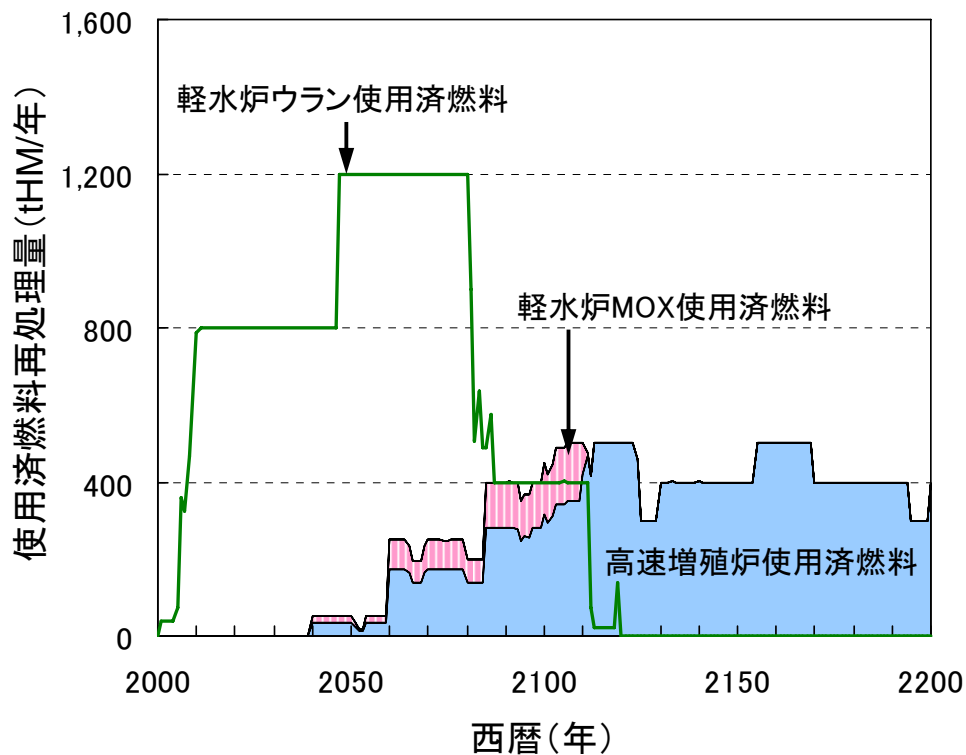
使用済燃料貯蔵量(冷却中の使用済燃料を含む)



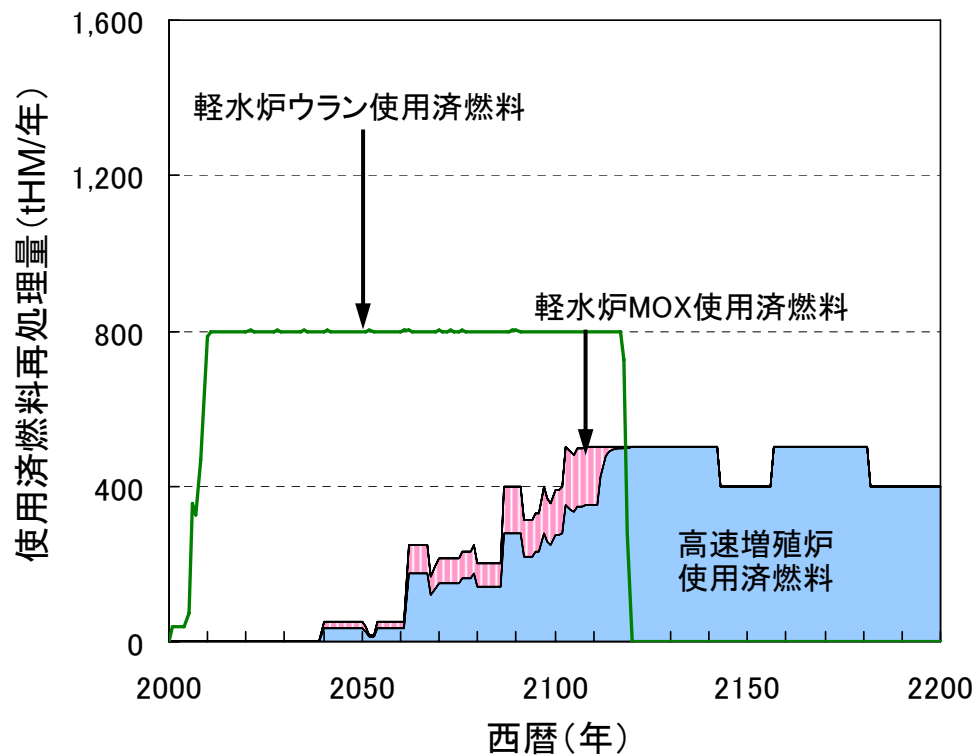
使用済燃料中のマイナーアクチノド蓄積量
(冷却中の使用済燃料を含む)



[参考-9] 軽水炉再処理能力の比較



(a) ケース1
(2047年以降の軽水炉再処理施設年間処理量1200tHM/年)



(b) ケース2
(2047年以降の軽水炉再処理施設年間処理量800tHM/年)

使用済燃料年間再処理量



[参考-10]

従来型湿式法と先進湿式法の建設費の比較

