

# 使用済燃料と高レベル放射性廃棄物問題

## 目次

「使用済み」燃料—再処理か直接処分か

使用済み燃料の組成

放射性廃棄物の区分と発生個所

高レベル放射性廃棄物の減衰と「処分」

原子力発電所における廃棄物の処理方法

高レベル放射性廃棄物の処理・処分

プルサーマル問題を考える

核種転換(消滅処理)とは何か

核種転換(消滅処理)の展望—評価—

# 使用済み燃料とは何か

「使用済み」とは部分的に使用されたという意味。

低濃縮ウラン燃料の場合：

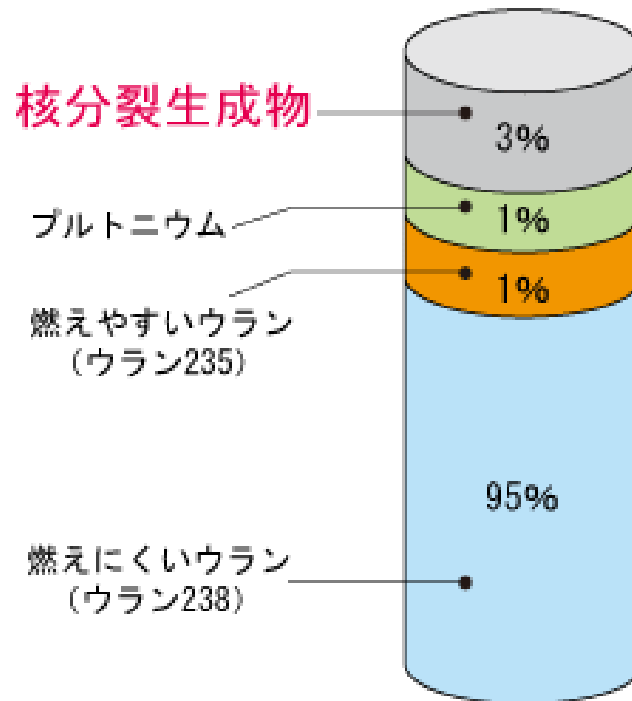
核分裂により生成される原子核の中で、Sm、Xeなどの核は中性子を吸収する割合が非常に大きい核が蓄積されるにつれて、核分裂連鎖反応の進行が妨げられる。

→約3分の2燃焼した時点で、核燃料を入れ替える。

→まだ燃焼していないウラン燃料の取り出し、

→Pu-239の抽出

## 使用済み燃料の組成



注意：実際の使用済み燃料は上図のように単純な分布になっていない。

## 容量の小さい原発では使用済燃料の貯蔵が限界に近づきつつある

原子炉で大体において3年間燃やしたあと取り出した核燃料。通常、原子炉内の燃料は1回に3分の1から4分の1くらい取り替える。取り出したときの燃料中の成分比は、最初は3～5%だった核分裂するウラン(U)235が1～0.8%に減り、核分裂生成物が約1%、プルトニウム(PU)が約1%になる。110万kW級の原子炉からは、年間約30t(ウラン重量)が出る。放射能が非常に高い。電気事業連合会の調べでは、2006年3月末で全国原発敷地内には約1万1520t(ウラン重量)の使用済み核燃料が貯蔵されている。全原発の総貯蔵容量は約1万7540tで、容量の小さな原発では限界に近づきつつある。毎年の発生量は約1000tだが、青森県六ヶ所村で試運転中の再処理工場の処理能力は年間800t。このため、電力会社は発電所内で20～30年間貯蔵する方針を打ち出した。発電所敷地以外での中間貯蔵施設の建設計画も進んでいる。  
( 渥美好司 朝日新聞記者 )

出典

<http://kotobank.jp/word/%E4%BD%BF%E7%94%A8%E6%B8%88%E3%81%BF%E6%A0%B8%E7%87%83%E6%96%99>

表1-1 PWRの使用済ウラン燃料中に含まれる元素(1/2)

	g/t	Bq/t(Ci/t)	W/t
アクチノイド			
ウラン	$9.54 \times 10^5$	$1.50 \times 10^{11}$ (4.05)	$4.18 \times 10^{-2}$
ネプツニウム	$7.49 \times 10^2$	$6.70 \times 10^{11}$ ( $1.81 \times 10^1$ )	$5.20 \times 10^{-2}$
プルトニウム	$9.03 \times 10^3$	$4.00 \times 10^{15}$ ( $1.08 \times 10^5$ )	$1.52 \times 10^2$
アメリシウム	$1.40 \times 10^2$	$6.96 \times 10^{13}$ ( $1.88 \times 10^2$ )	6.11
キュリウム	$4.70 \times 10^1$	$6.99 \times 10^{14}$ ( $1.89 \times 10^4$ )	$6.90 \times 10^2$
小 計	$9.64 \times 10^5$	$4.70 \times 10^{15}$ ( $1.27 \times 10^5$ )	$8.48 \times 10^2$
核分裂生成物			
トリチウム	$7.17 \times 10^{-2}$	$2.55 \times 10^{13}$ ( $6.90 \times 10^2$ )	$2.45 \times 10^{-2}$
セレン	$4.87 \times 10^1$	$1.47 \times 10^{10}$ ( $3.96 \times 10^{-1}$ )	$1.50 \times 10^{-4}$
臭素	$1.38 \times 10^1$	0(0)	0
クリプトン	$3.60 \times 10^2$	$4.07 \times 10^{14}$ ( $1.10 \times 10^4$ )	$6.85 \times 10^1$
ルビジウム	$3.23 \times 10^2$	$7.03 \times 10^{12}$ ( $1.90 \times 10^2$ )	0
ストロンチウム	$8.68 \times 10^2$	$6.44 \times 10^{15}$ ( $1.74 \times 10^5$ )	$4.50 \times 10^2$
イットリウム	$4.53 \times 10^2$	$8.81 \times 10^{15}$ ( $2.38 \times 10^5$ )	$1.05 \times 10^3$
ジルコニウム	$3.42 \times 10^3$	$1.02 \times 10^{16}$ ( $2.77 \times 10^5$ )	$1.45 \times 10^3$
ニオブ	$1.16 \times 10^1$	$1.93 \times 10^{16}$ ( $5.21 \times 10^5$ )	$2.50 \times 10^3$
モリブデン	$3.09 \times 10^3$	0(0)	0
テクネチウム	$7.52 \times 10^2$	$5.29 \times 10^{11}$ ( $1.43 \times 10^1$ )	$9.67 \times 10^{-3}$
ルテニウム	$1.90 \times 10^3$	$1.85 \times 10^{16}$ ( $4.99 \times 10^5$ )	$3.13 \times 10^2$
ロジウム	$3.19 \times 10^2$	$1.85 \times 10^{16}$ ( $4.99 \times 10^5$ )	$3.99 \times 10^3$
小 計	$3.09 \times 10^4$	$1.55 \times 10^{17}$ ( $4.18 \times 10^6$ )	$1.96 \times 10^4$
合 計	$9.95 \times 10^5$	$1.59 \times 10^{17}$ ( $4.31 \times 10^6$ )	$2.04 \times 10^4$

**アクチノイド (Actinoid)** とは、原子番号89から103まで、すなわちアクチニウムからローレンシウムまでの15の元素の総称である。:

核燃料中のウランに中性子が吸収されて、その後、ベータ崩壊などを経て生成される元素。

特にウランより重いネプツニウム以降の元素のことを超ウラン元素といい、ほぼ自然界には存在しない。

アクチノイドに属する超ウラン元素のうちプルトニウムを除いたものをマイナーアクチノイド (Minor actinide) もしくは マイナーアクチノイド と呼ぶ。使用済核燃料に含まれ、放射性廃棄物処理を考える上で大きな問題となる。

これらの量は原子炉に装荷された新燃料中のウラン1トン当たりのものである。全体としての平均燃焼度は33,000MWd/t、また平均出力30MW/tで、燃料取り出し後150日経過したものである。

表1-2 PWRの使用済ウラン燃料中に含まれる元素(2/2)

	g/t	Bq/t(Ci/t)	W/t
パラジウム	$8.49 \times 10^2$	0(0)	0
銀	$4.21 \times 10^1$	$1.02 \times 10^{14}(2.75 \times 10^3)$	$4.16 \times 10^1$
カドミウム	$4.75 \times 10^1$	$2.20 \times 10^{12}(5.95 \times 10^1)$	$2.13 \times 10^{-1}$
インジウム	1.09	$1.32 \times 10^{10}(3.57 \times 10^{-1})$	$1.04 \times 10^{-3}$
スズ	$3.28 \times 10^1$	$1.42 \times 10^{15}(3.85 \times 10^4)$	$1.56 \times 10^2$
アンチモン	$1.36 \times 10^1$	$2.95 \times 10^{14}(7.96 \times 10^3)$	$2.74 \times 10^1$
テルル	$4.85 \times 10^2$	$4.96 \times 10^{14}(1.34 \times 10^4)$	$1.66 \times 10^1$
ヨウ素	$2.12 \times 10^2$	$8.21 \times 10^{10}(2.22)$	$8.98 \times 10^{-3}$
キセノン	$4.87 \times 10^3$	$1.15 \times 10^{11}(3.12)$	$3.04 \times 10^{-3}$
セシウム	$2.40 \times 10^3$	$1.19 \times 10^{16}(3.21 \times 10^5)$	$2.42 \times 10^3$
バリウム	$1.20 \times 10^3$	$3.70 \times 10^{15}(1.00 \times 10^5)$	$3.93 \times 10^2$
ランタン	$1.14 \times 10^3$	$1.82 \times 10^{13}(4.92 \times 10^2)$	8.16
セリウム	$2.47 \times 10^3$	$3.06 \times 10^{16}(8.27 \times 10^5)$	$7.87 \times 10^2$
プラセオジウム	$1.09 \times 10^3$	$2.85 \times 10^{16}(7.71 \times 10^5)$	$5.73 \times 10^3$
ネオジウム	$3.51 \times 10^3$	$3.50 \times 10^{12}(9.47 \times 10^1)$	$2.65 \times 10^{-1}$
プロメチウム	$1.10 \times 10^2$	$3.70 \times 10^{15}(1.00 \times 10^5)$	$9.17 \times 10^1$
サマリウム	$6.96 \times 10^2$	$4.63 \times 10^{13}(1.25 \times 10^3)$	2.18
ユーロピウム	$1.26 \times 10^2$	$5.00 \times 10^{14}(1.35 \times 10^4)$	$7.19 \times 10^1$
ガドリニウム	$6.29 \times 10^1$	$8.58 \times 10^{11}(2.32 \times 10^1)$	$3.34 \times 10^{-2}$
テルビウム	1.25	$1.11 \times 10^{13}(3.02 \times 10^2)$	2.54
ジスプロシウム	$6.28 \times 10^{-1}$	0(0)	0
小計	$3.09 \times 10^4$	$1.55 \times 10^{17}(4.18 \times 10^6)$	$1.96 \times 10^4$
合計	$9.95 \times 10^5$	$1.59 \times 10^{17}(4.31 \times 10^6)$	$2.04 \times 10^4$

これらの量は原子炉に装荷された新燃料中のウラン1トン当たりのものである。  
 全体としての平均燃焼度は33,000MWd/t、また平均出力30MW/tで、燃料取り出し後150日経過したものである。

# 廃棄物の区分

表 1 廃棄物の区分

非放射性廃棄物	一般廃棄物	ごみ	家庭系ごみ：一般ごみ(可燃物、不燃物)、粗大ごみ 等
			事業系ごみ：オフィス、飲食店等からでるもの
		し尿	
	特別管理一般廃棄物 (※1)		
産業廃棄物	事業活動に伴って生じた廃棄物 (※2)		
	特別管理産業廃棄物 (※3)		
放射性廃棄物	低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	放射能レベルの極めて低い廃棄物
			放射能レベルの比較的低い廃棄物
			放射能レベルの比較的高い廃棄物
	ウラン廃棄物		
	TRU廃棄物(長半減期低発熱放射性廃棄物) (※4)		
高レベル放射性廃棄物			

(※1) 爆発性、毒性、感染性、その他の健康や生活環境に被害を及ぼすおそれがあるもの

(※2) 燃えがら、汚泥、廃油、金属くず、ガラスくず、コンクリートくずなど19種類と輸入廃棄物

(※3) 一般廃棄物以外の爆発性、毒性、感染性、その他の健康や生活環境に被害を及ぼすおそれがあるもの

(※4) 半減期の長いTRU核種(超ウラン元素)を含む放射性廃棄物で、再処理施設やMOX燃料加工施設から発生する。

放射能レベルに応じ浅地中処分、余裕深度処分、地層処分に分けて処分が行われる。

[出典](財)日本原子力文化振興財団:「原子力・エネルギー」図面集 2007、8-1(2007年2月)、p.177

電気事業連合会: <http://www.fepec-atomic.jp/library/zumen/pdf-data/all08.pdf>、1/17

<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/05/05010101/01.gif>



### 表3 放射性廃棄物の区分と発生

廃棄物の種類		廃棄物の例	発生源	廃棄物の量 (200ℓドラム缶換算)	
高レベル放射性廃棄物		ガラス固化体	再処理施設	ガラス固化体1,551本 <sup>(注1)</sup>	
低レベル放射性廃棄物	高↑放射能レベル	放射能レベルの比較的高い廃棄物 制御棒、炉内構造物	原子力発電所	ドラム缶約57万本 <sup>(注2)</sup> 、 その他 <sup>(注3)</sup>	
	放射能レベル	放射能レベルの比較的低い廃棄物 廃液、フィルター、廃器材、消耗品等を固形化			
	低↓放射能レベル	放射能レベルの極めて低い廃棄物 コンクリート、金属等			
	超ウラン核種を含む放射性廃棄物		燃料棒の部品、廃液、フィルター	再処理施設 MOX燃料加工施設	ドラム缶約9.1万本 <sup>(注2)</sup>
	ウラン廃棄物		消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮・燃料加工施設	ドラム缶約4.2万本 <sup>(注2)</sup> (他に研究所等約4.9万本) <sup>(注4)</sup>
RI・研究所等廃棄物		RI廃棄物 ：プラスチック、紙、フィルター、金属、密封線源等 研究所等廃棄物 ：廃液、フィルター、廃器材、消耗品、コンクリート、金属等	試験研究炉を設置、核燃料物質等の使用を行っている研究所等及び放射性同位元素等の使用施設等	日本アイソトープ協会 ：約11万本 <sup>(注2)</sup> 研究所等 <sup>(注4)</sup> ：約17.2万本 <sup>(注2)</sup>	
クリアランスレベル <sup>(注5)</sup> 以下の廃棄物		原子力発電所解体廃棄物の大部分	上に示した全ての発生源		

(注1)平成19年3月末現在

(注2)平成18年3月末現在

(注3)蒸気発生器、チャンネルボックス、制御棒等も保管されている

(注4)研究所等：日本原子力研究開発機構

(注5)発電所廃棄物についてはクリアランスレベルを制度化(平成17年5月に原子炉等規制法改正)

下記の出所をもとに作成した

[出所](1)資源エネルギー庁、放射性廃棄物のHP：放射線廃棄物の概要、区分と発生、<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/gaiyo/gaiyo01.html>

(2)原子力委員会(編)：原子力白書 平成18年版、第1部、第2章(平成19年3月)、p.92、

<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2006/2.pdf>、32/110

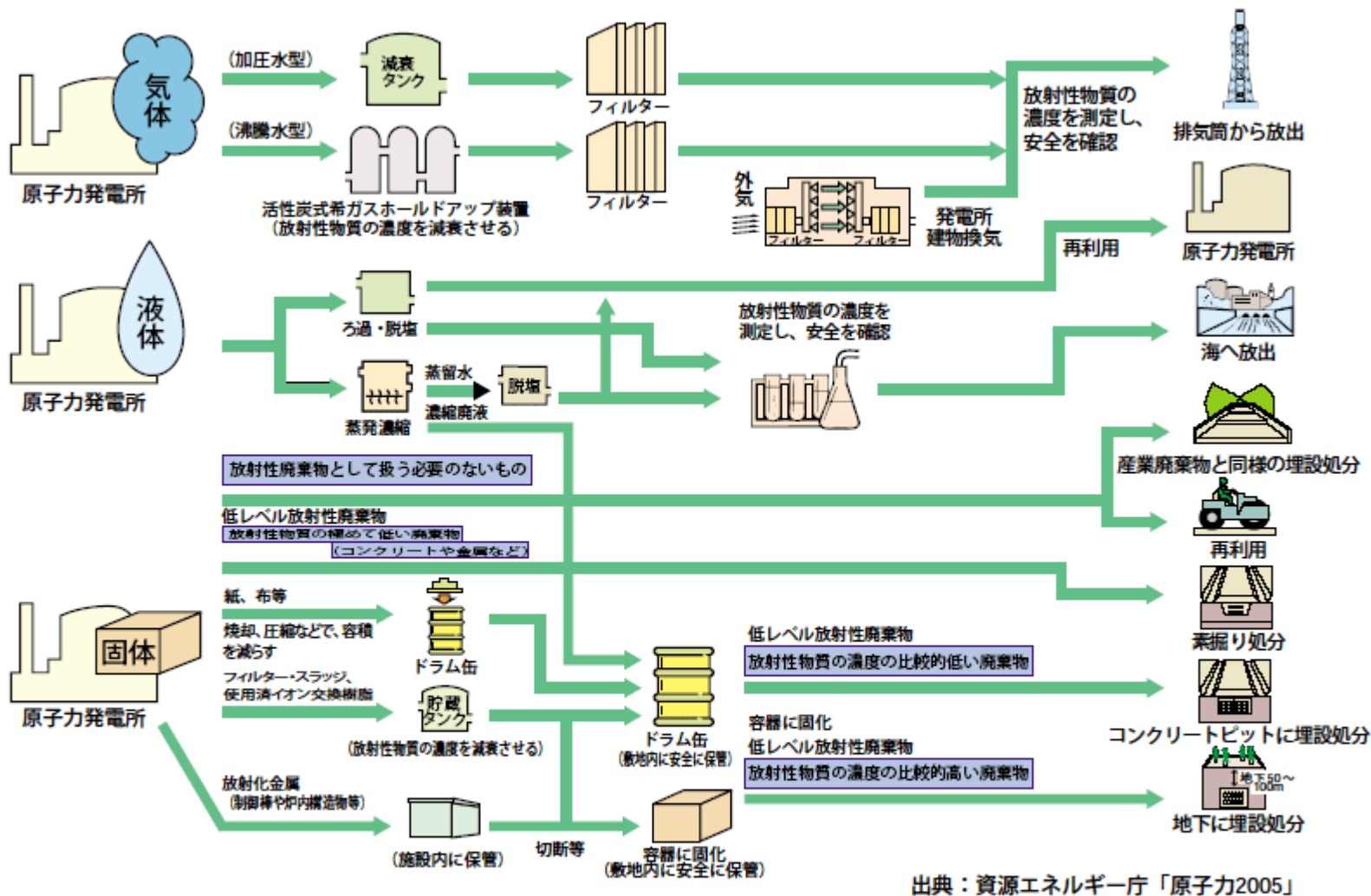


図1 原子力発電所の廃棄物処理方法

[出典](財)日本原子力文化振興財団:「原子力・エネルギー」図面集 2007、8-3(2007年2月)、p.179  
 電気事業連合会: <http://www.fepec-atomic.jp/library/zumen/pdf-data/all08.pdf>、3/17



## 使用済燃料—再処理か直接処分か

再処理：ウラン鉱石から燃料棒に加工生成することを処理という。  
使用済み燃料の処理のことを再処理という。



再処理に対する批判的見解：米政府など  
理由：Pu抽出により核拡散の危険性増加。  
再処理工程の複雑性・危険性

→使用済燃料の直接処分をすべき。

## フクシマ事故後の使用済み燃料問題

フクシマの事故の結果、原子炉と使用済み燃料の両方の安全性に焦点が当てられることになった。

我々のグループの焦点は:

- 如何に再処理が核不拡散体制の土台を揺るがすか
- 使用済み燃料に関連した安全性問題(ゴードン・トンプソンの話)

ほとんどの国は、再処理に背を向けた。乾式貯蔵と比べた場合のコストのためである。

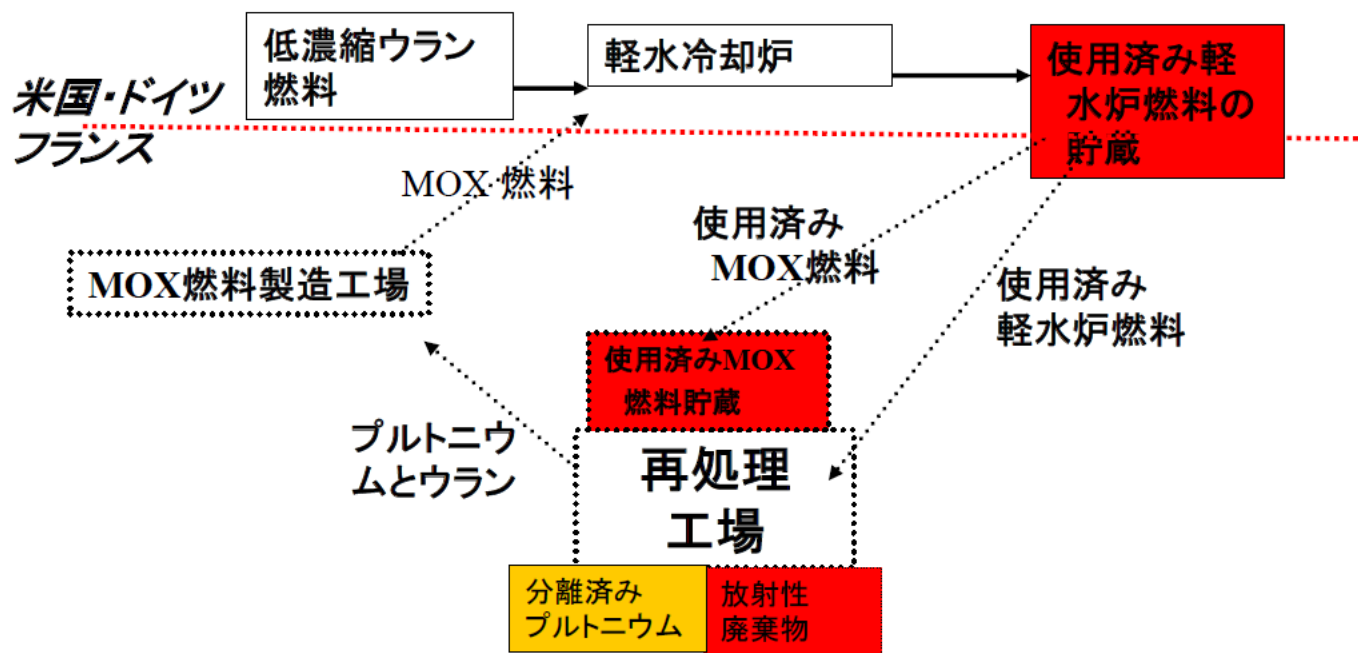
我々は、日本もそうすべきだと主張する。理由は:

- 模範(日本は、今日、再処理をしている唯一の非核兵器国)
- コスト
- 大量の放射能の放出の危険性

フランク・フォンヒッペル,  
プリンストン大学科学・世界安全保障プログラム  
国際核分裂性物質パネル(IPFM)共同議長  
東京 2012年1月

# 今日の燃料サイクル： ワンスルーとプルトニウム・リサイクル

プルトニウムとウランのリサイクルは、ウランの必要量を約25%減らす  
が、コストを上げる—再処理コストの高さのため



フランク・フォンヒツペル,  
プリンストン大学科学・世界安全保障プログラム  
国際核分裂性物質パネル(IPFM)共同議長  
東京 2012年1月

# 核燃料サイクル政策

度重なる計画延期

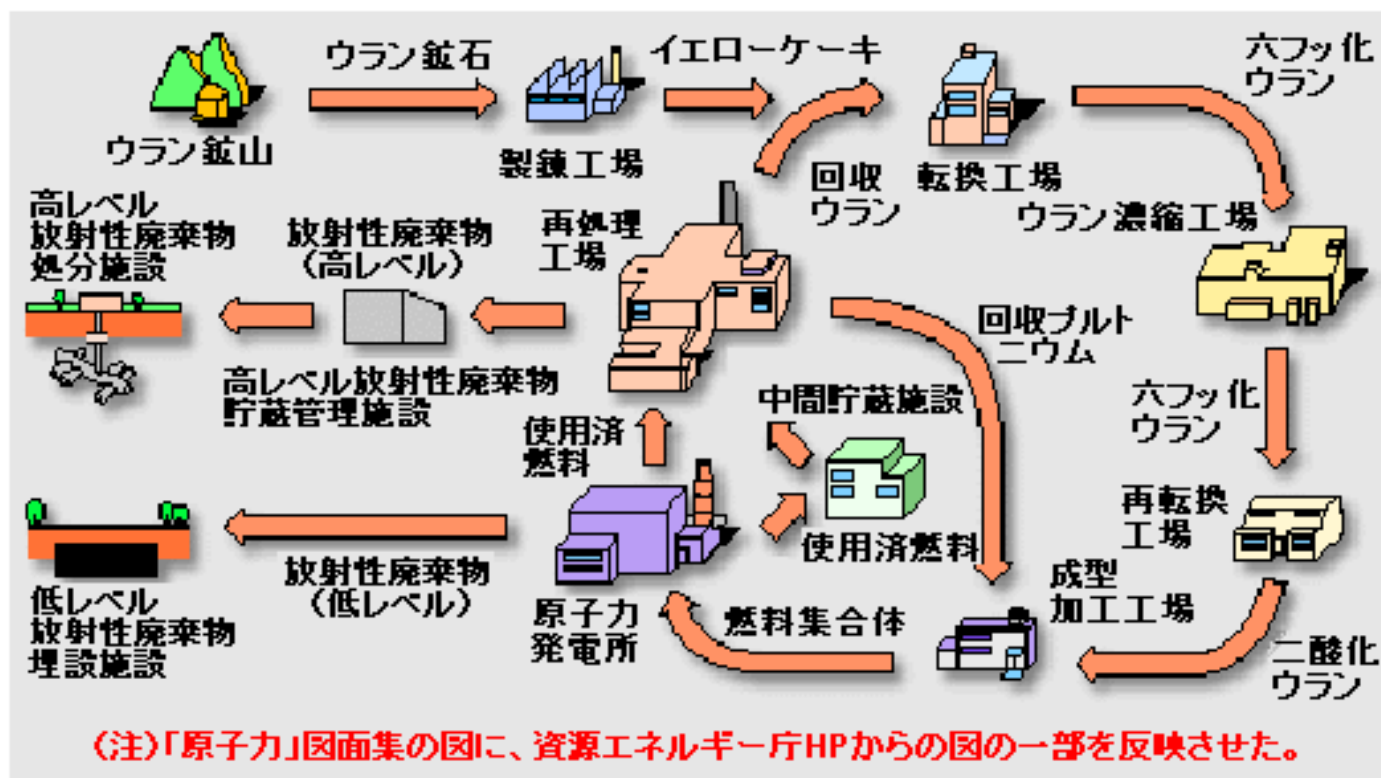
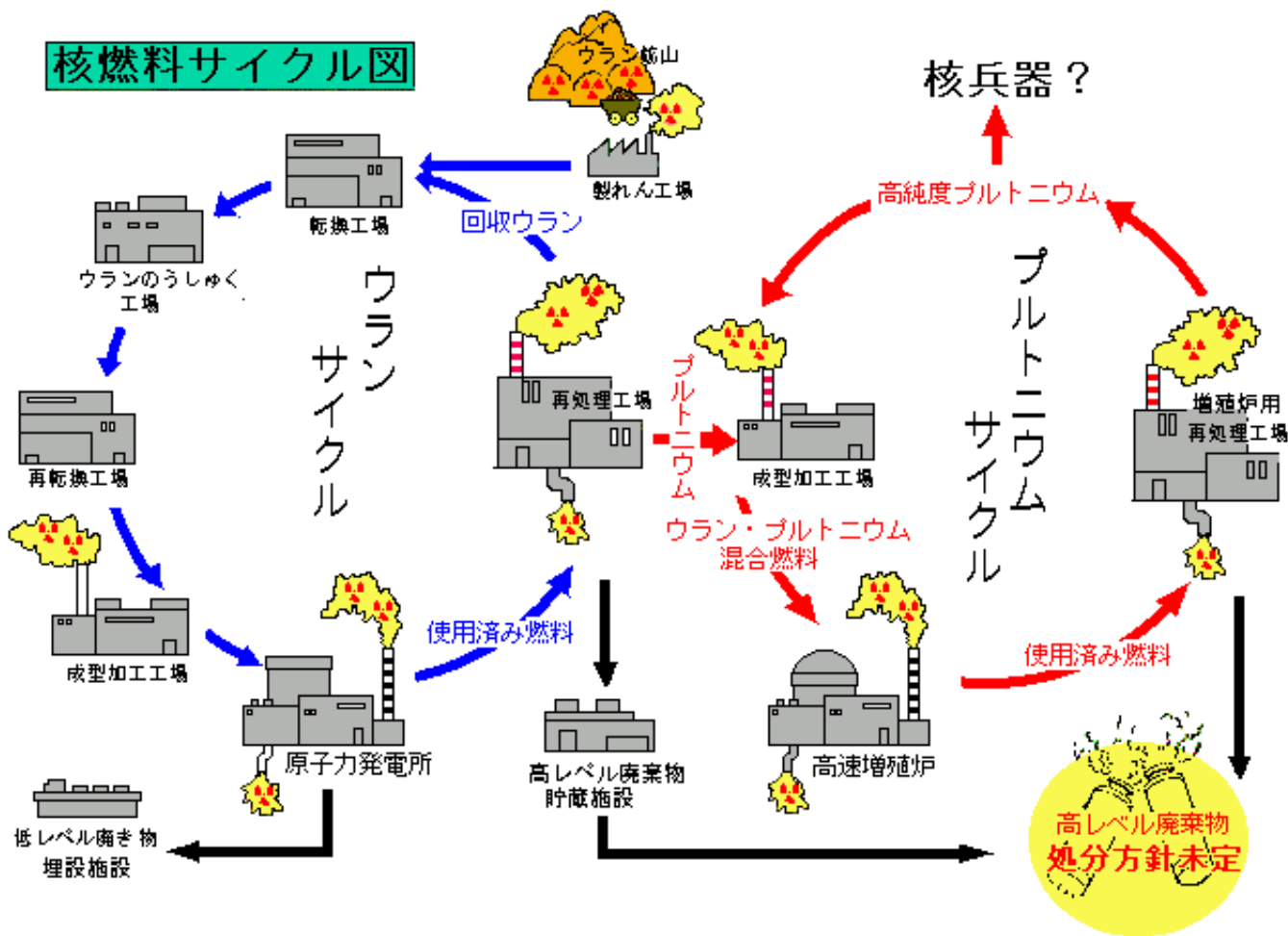


図1 核燃料リサイクル概念図

[出典]電気事業連合会:「原子力」図面集-2000年版-(2000年10月)、p.139  
および資源エネルギー庁HP(<http://www.enecho.go.jp/index02.html>)

# 核燃料サイクル政策-別の可能性-



<http://www.geocities.jp/tobosaku/kouza/cycle.html>より

# 高レベル放射性廃棄物の処理・処分

使用する予定のない高レベル核廃棄物の処理・永久処分の方法が未確立！！

廃棄物の崩壊の半減期が24,000年のように超長期にわたるものがある！  
(候補地)

深海：1950年代から試験投棄→容器の破損

砂漠地帯、

永久氷土地帯(ツンドラ)

岩塩鉱：地層としては安定 → 崩壊熱の作用により水分の集積  
→地下水への流入の可能性

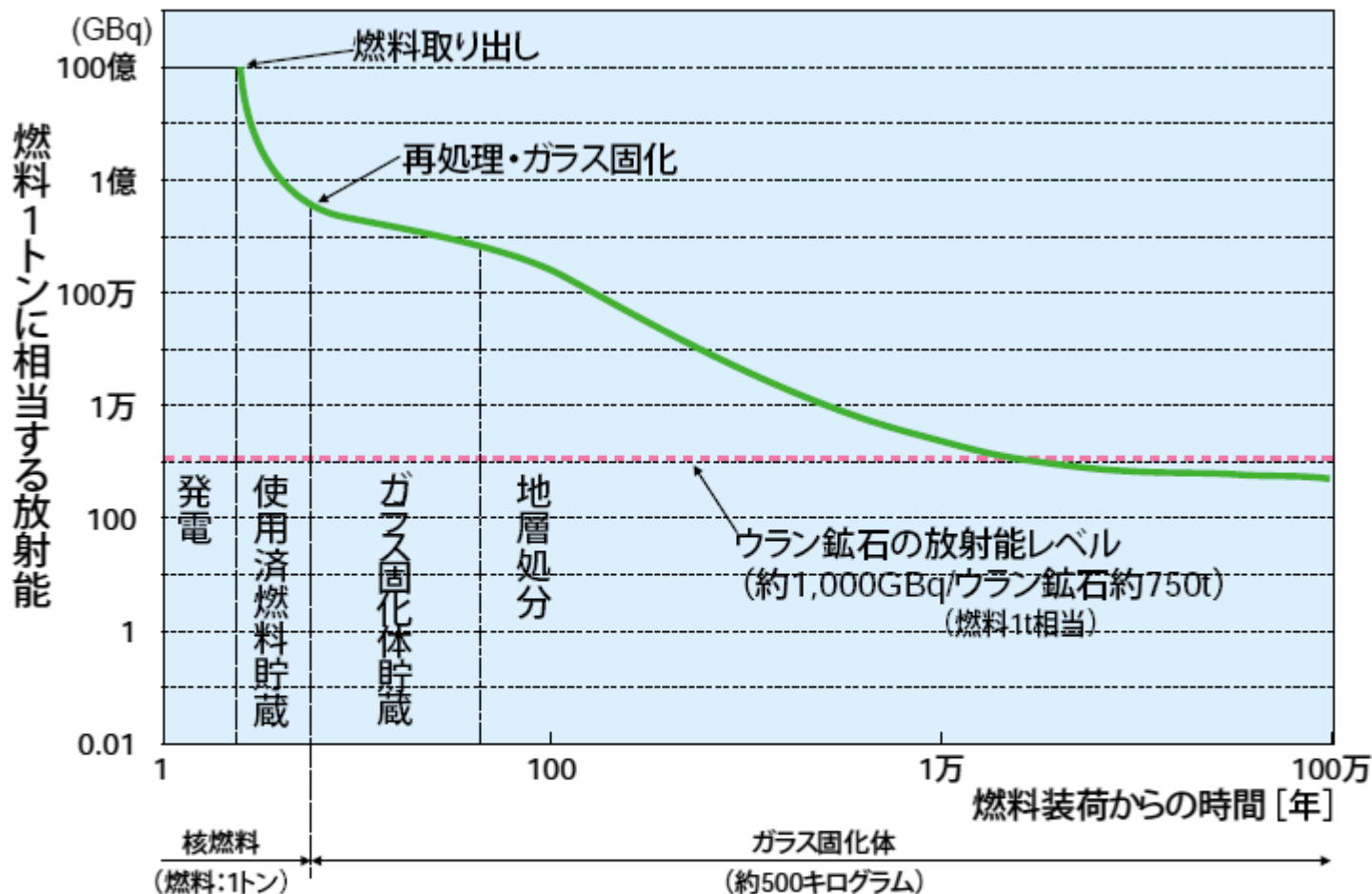
地表に放置。

⇒どうすればいいか？

原子力の最大の障壁としての高レベル放射性廃棄物問題



# 高レベル放射性廃棄物の減衰と「処分」



出典：「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」(核燃料サイクル開発機構)

図4 高レベル放射性廃棄物の放射能の減衰

[出典](財)日本原子力文化振興財団:「原子力・エネルギー」図面集 2007、8-15(2007年2月)、p.191  
 電気事業連合会: <http://www.fepc-atomic.jp/library/zumen/pdf-data/all08.pdf>、15/17

# 放射能の経時変化

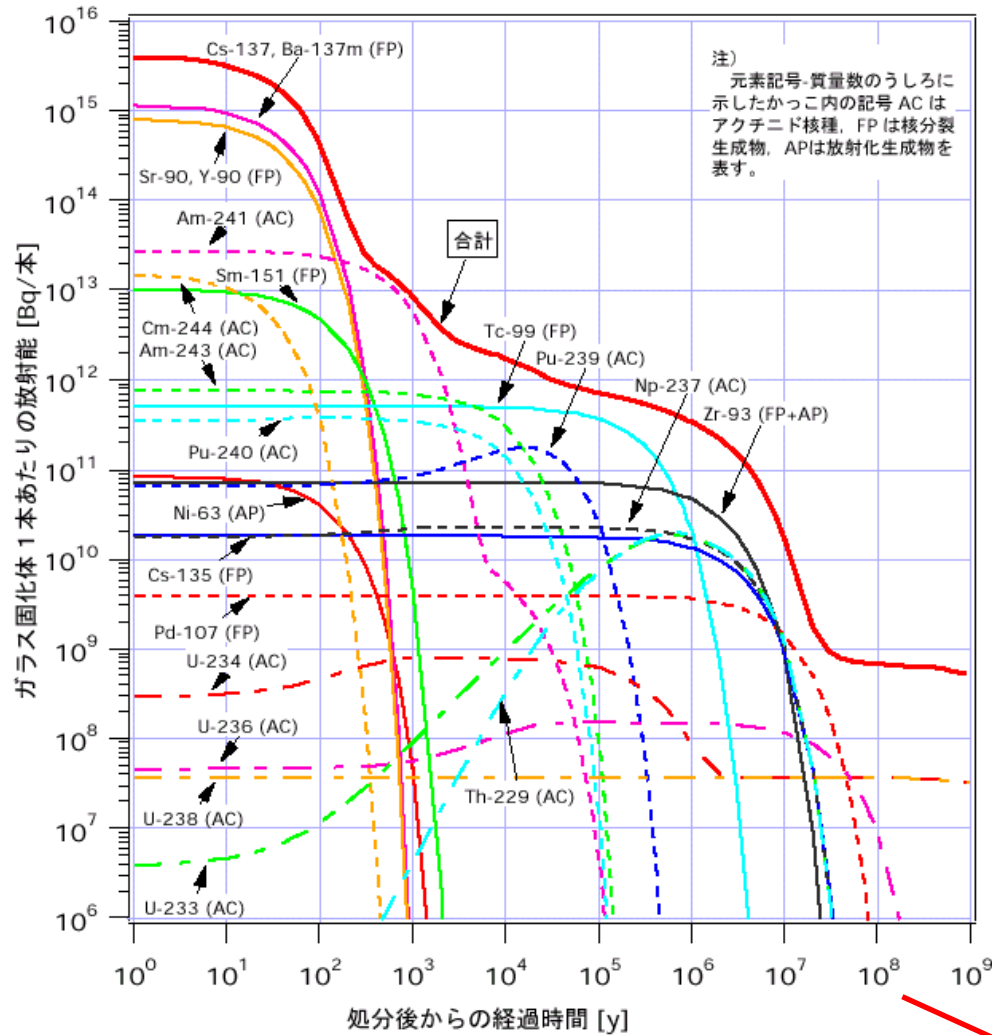


図 4 モデルガラス固化体の放射能の経時変化

[出典] 核燃料サイクル開発機構 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ ホームページ  
<http://www.jnc.go.jp/kaihatu/tisou/tisou.html>

10<sup>6</sup>=百万年  
 10<sup>7</sup>=千万年  
 10<sup>8</sup>=億年

# 高レベル放射性廃棄物の処分について

高レベル放射性廃棄物の処分について

平成24年(2012年)9月11日

日本学術会議

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-k159-1.pdf>

高レベル放射性廃棄物の総量規制

(⇔濃度規制)

高レベル放射性廃棄物の暫定貯蔵

(⇔永久貯蔵)

## プルサーマル問題を考える

- プルサーマルとは何か？
- プルサーマルを行うのはなぜか？
- プルサーマルは経済的に成り立つのか？
- プルサーマルにはどの程度に安全なのか、危険性があるのか？
- プルサーマルで事故が起きたらどうなるか？なるのか？
- プルサーマルの使用済み燃料はどうするのか？
- プルサーマルは核拡散につながらないのか？

## プルサーマルとは何か

プルトニウム(239Puなど)をウラン核燃料と混ぜて新しい核燃料(MOX燃料)をつくり、それを現在多数使われている熱中性子誘起核分裂による原子炉(サーマルリアクター、thermal-neutron-induced fission reactor)で燃やして(核分裂させて)発電するのがプルサーマルです。

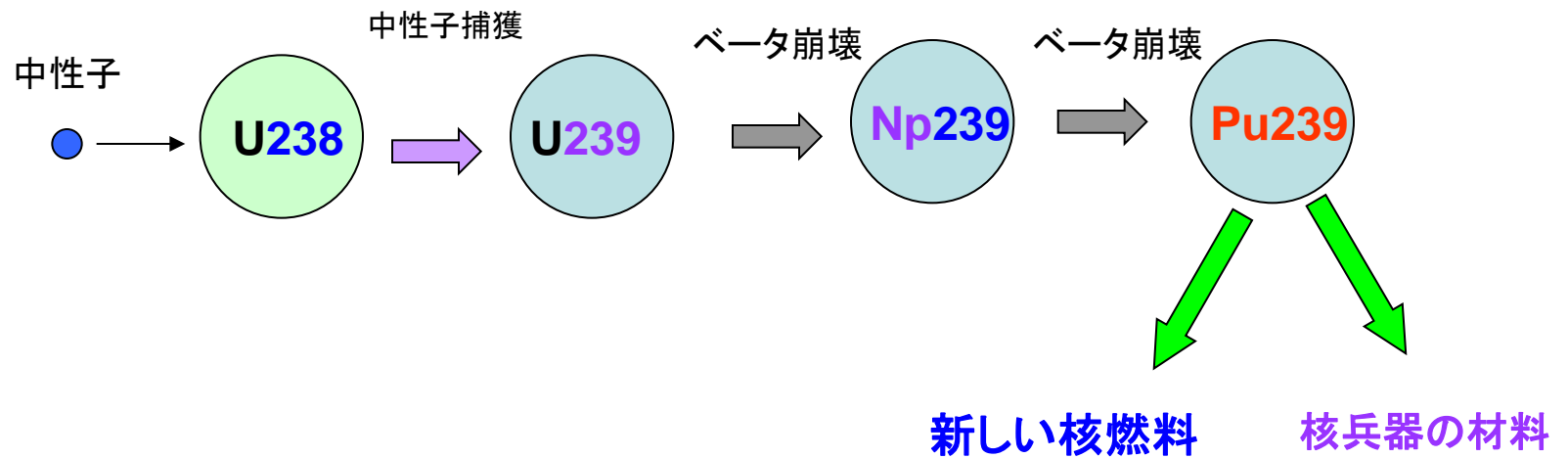
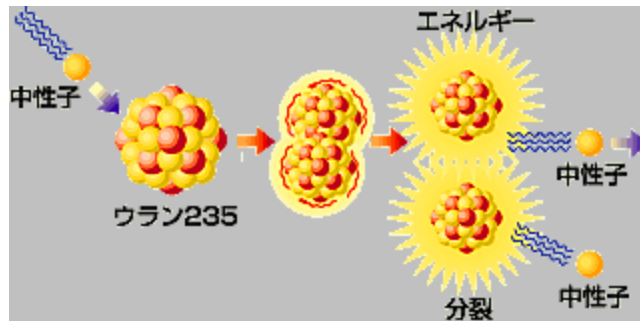
MOX=mixed oxide=混合酸化物

比較:高速増殖炉(FBR, Fast Breeder Reactor)  
高速中性子誘起核分裂による原子炉

注意:「プルサーマル」は英語ではなく、日本における造語。

# 原子炉におけるプルトニウムの生成

- 低濃縮ウラン[U238(97%) + U235(3%)]





## プルーマルを行うのはなぜか？

「有限の資源の有効利用のため」

→しかし、その緊急性の度合いはどの程度か  
2006年現在、ウラン燃料の価格は安定している

「放射性廃棄物を減らせる」

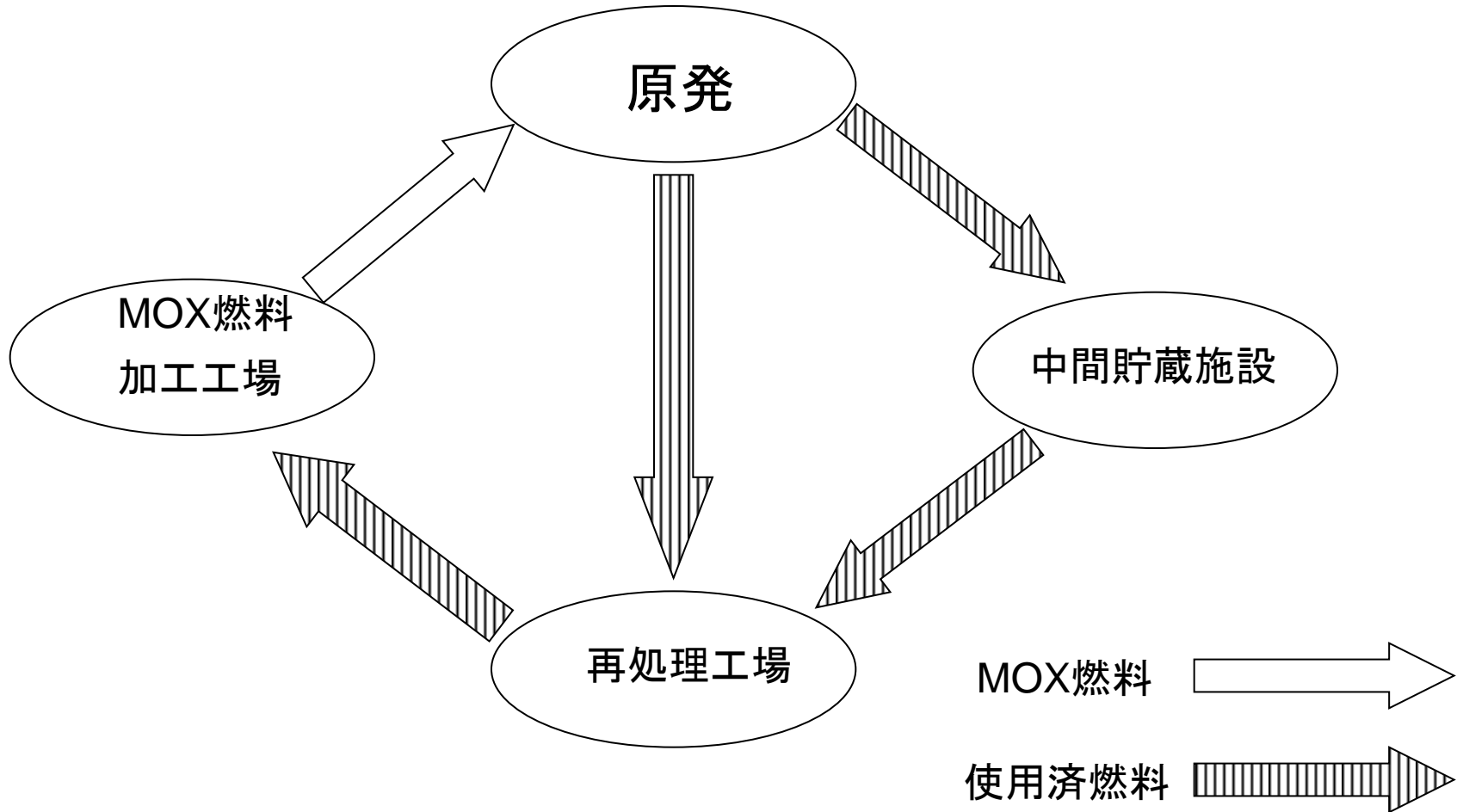
→どの程度減らせるか

「「必要」以上のプルトニウムを保有しないという国際公約」

→抽出して、蓄積する場合には、国際公約を守る必要

→使用済み核燃料からPuを抽出しない方式もある。

# プルサーマルをめぐる主な流れ



# プルサーマルにはどの程度に安全なのか、危険性があるのか？

低濃縮ウラン使用を前提して作成された燃料被服材、制御棒（・安全棒）が核的性質の少し異なるPuを核燃料として使用することに技術的な不都合はないか、どの程度にあるか

核的性質：

核分裂、散乱、吸収に対する断面積とその中性子エネルギー依存性

「欧米におけるU-Pu混合燃料の使用実績がある」

→使用実績の適合性はどうか、量的には十分か？

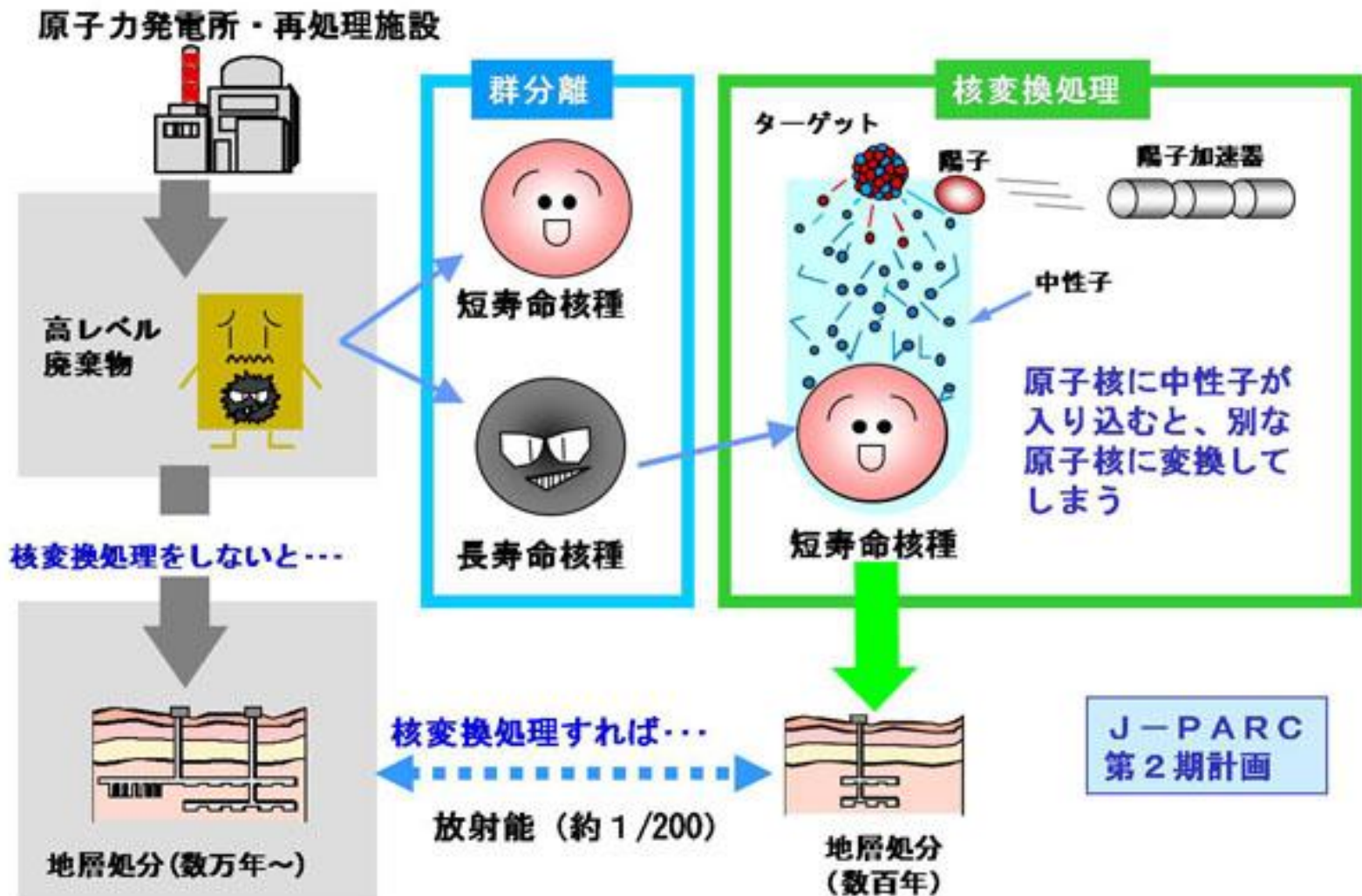
# 核種転換(消滅処理)とは何か

人工的に核種変換を起こす技術の事を核変換技術と言う。特に高エネルギーかつ長寿命の放射性核種を含む高レベル放射性廃棄物を、比較的短い時間で低レベルの放射性物質にすることを目指す研究が行われ、消滅処理とも呼ばれていた。

原子炉の使用済み核燃料からなる高レベル放射性廃棄物は様々な核種を含んでいる。その一部の核種は寿命が大変長く分離変換技術を行わない場合、天然ウランレベルの放射能まで減衰するのには数万年のオーダーの時間がかかる。それに対し、プルサーマルや核燃料サイクル行なった上で、群分離を行いマイナーアクチノイドや長寿命核分裂生成物を核変換することにより数百年のオーダーにし、処分面積を大幅に抑えることが出来ると考えて開発が進められている。

マイナーアクチノイドは高速炉では直接核分裂が可能であるが、熱中性子炉の場合中性子を捕獲させ核分裂性物質にする必要があり、発電炉の場合炉の設計、特に安全特性に影響を及ぼすため燃料として使えなかった。これに対し、高速増殖炉の核燃料サイクルの中で処理する方法や、加速器駆動未臨界炉や専焼高速炉による階層処理が考えられている。 Wikipedia より

# 核変換技術による廃棄物処理のイメージ



出典:大強度陽子加速器施設(J-PARKC)

<http://j-parc.jp/ja/P-Room/Research/Research-j0935.html>

# 核種転換(消滅処理)の展望—評価—

○基礎研究としては意義がある.

△産業的規模では技術として確立するかどうか不明.

- 1) 廃棄物の群分離が容易ではない.
- 2) 核種転換のための核反応により, 副作用として新たな放射性核を生成する,

△コストが相当に高いと考えられる.

加速器装置の建設費, 運転経費など.

現代では錬金術, すなわち金の製造も可能である.

ただし, 生成した金の価格以上の予算が必要である.

同様に, 核種転換は, 費用を度外視すれば原理的には不可能ではない.  
しかし, その総費用が生産された電力の総「価格」を下回る保証はない!