

# 使用済み燃料の処理・処分の観点からの 核燃料サイクルにおける高速炉の意義と 高速炉使用済み燃料再処理の 技術動向と課題

鈴木達也  
長岡技術科学大学

## 発表の概要

- ・核燃料サイクルにおける高速炉の意義
- ・軽水炉使用済み燃料、高速炉使用済みMOX燃料の特性比較と高速炉MOX燃料の課題
- ・MOX燃料再処理の現状
- ・我が国における高速炉MOX燃料再処理技術開発の現状
- ・高速炉燃料再処理の人材育成と技術伝承の課題

# 核燃料サイクルにおける高速炉の意義

## 再処理の目的

- ①ウラン及びプルトニウムを核燃料として再利用するため回収。
- ②上記の核燃料から核分裂生成物(FP)を除去し、発生した高レベル廃液を長期貯蔵に適した安定な形態に変換。

## 近年期待される再処理の役割

更なる廃棄物処理・処分問題の高まり

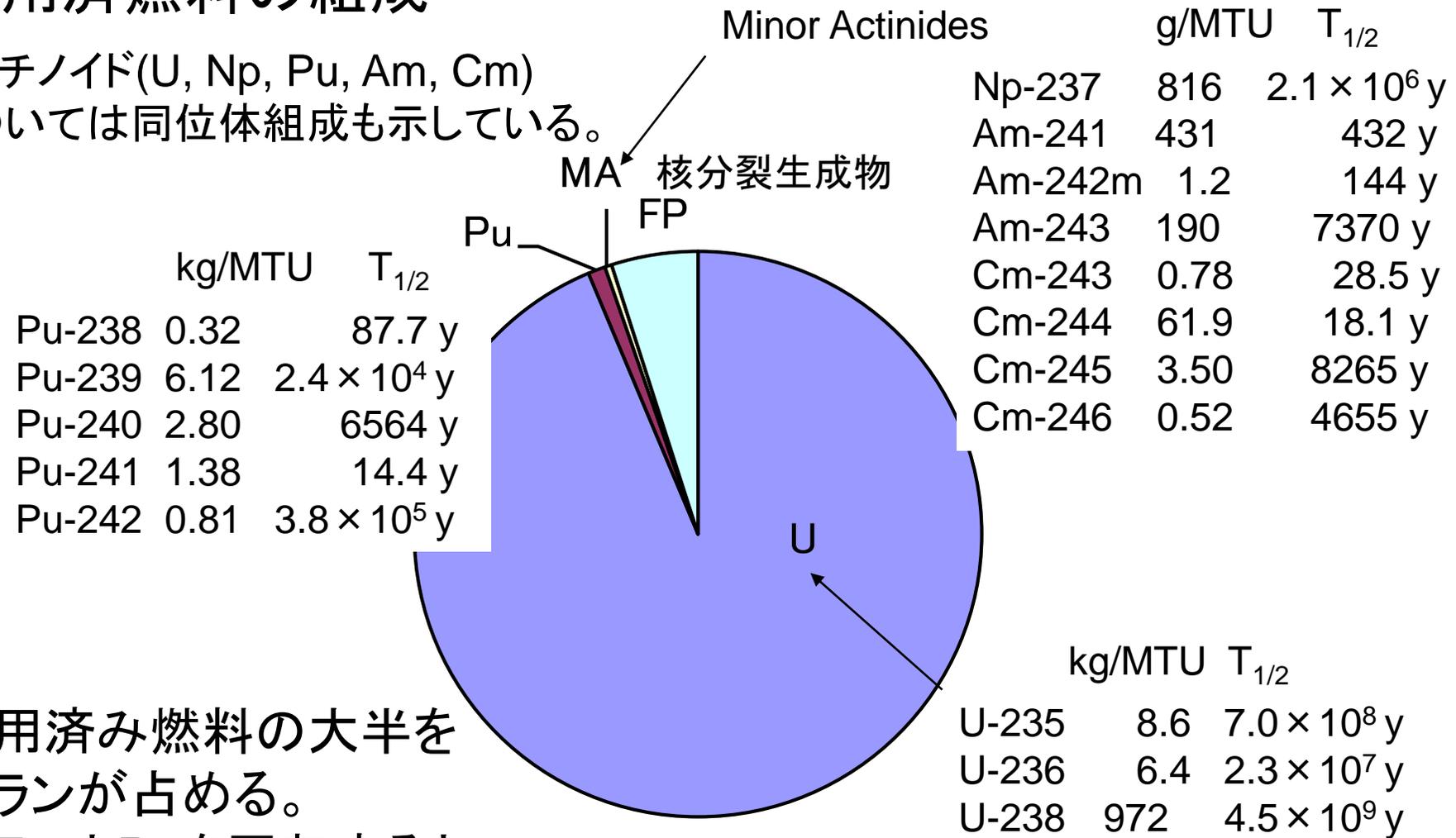
MAリサイクル、群分離、分離・変換、有用元素利用。

→ 新たな目的！ 再処理の高度化！



# 使用済燃料の組成

アクチノイド(U, Np, Pu, Am, Cm) については同位体組成も示している。

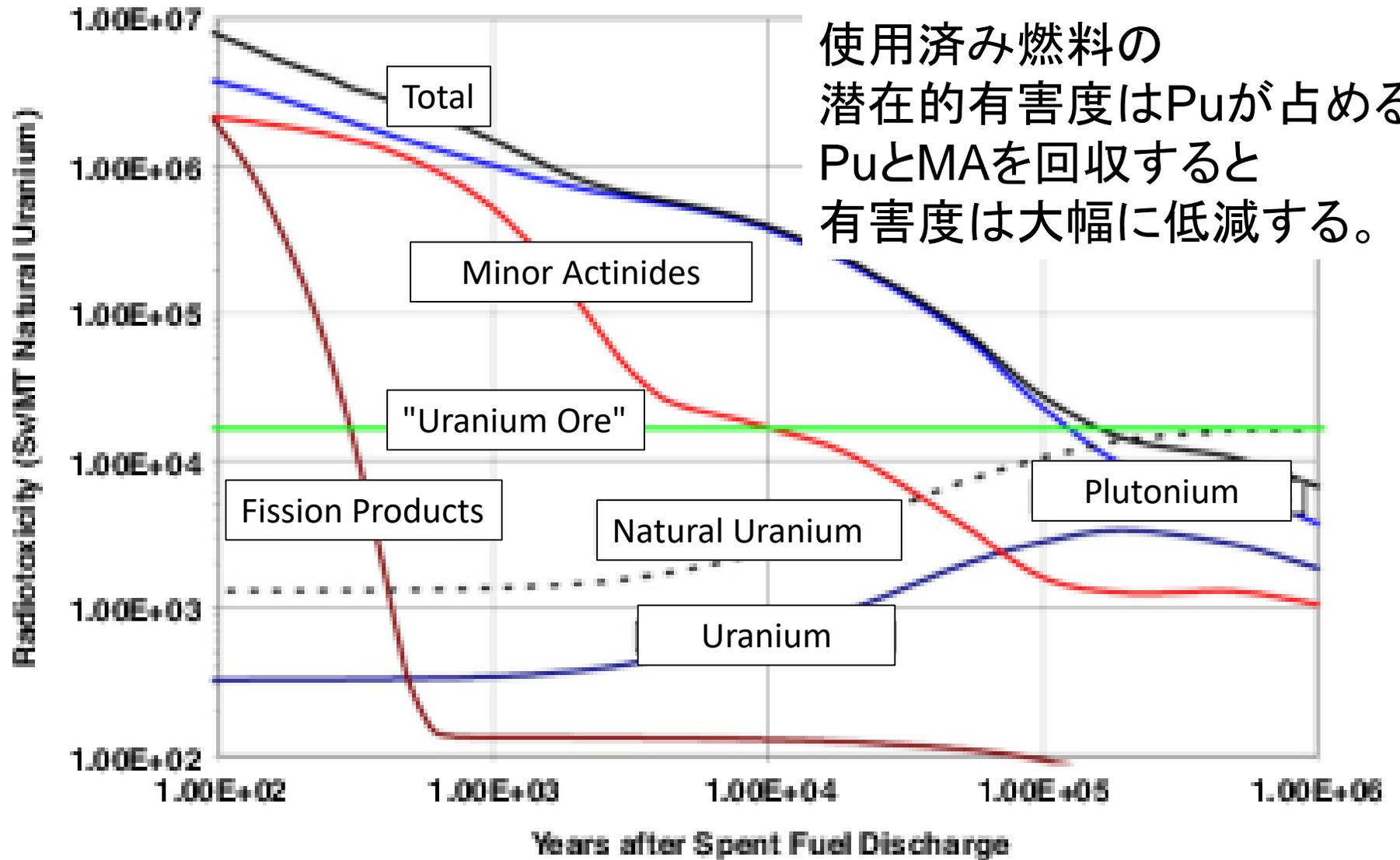


使用済み燃料の大半をウランが占める。ウランとPuを回収すると廃棄物量は大幅に低減する。また、ウランには天然にはないU-236が含まれる。

PWR 濃縮度 4.5% 燃焼度50GWd/t 5年冷却

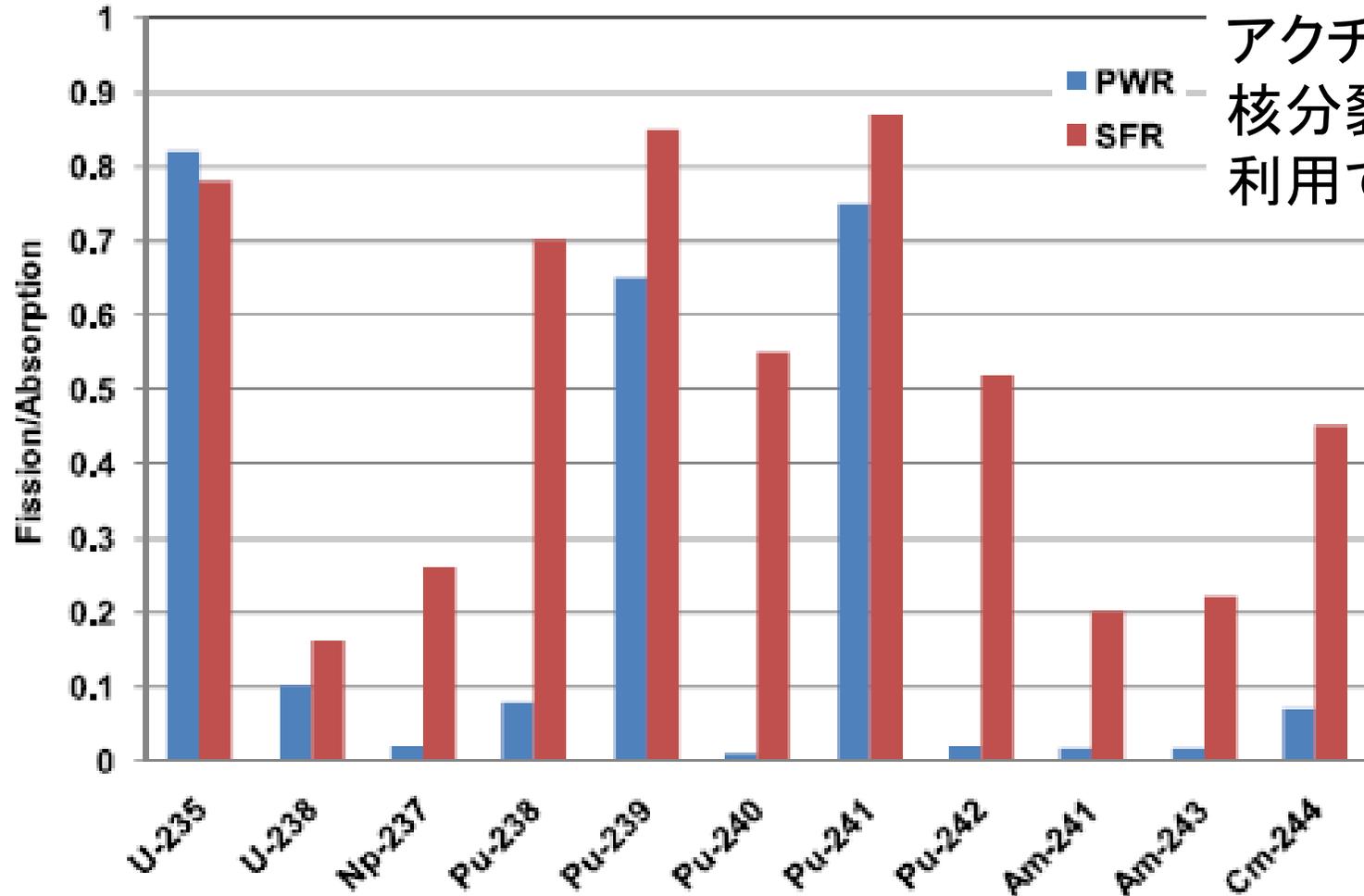
# 使用済み燃料の潜在的有害度

## Spent PWR Fuel Radiotoxicity



# 中性子吸収反応における核分裂反応の比率 PWRとSFRの比較

高速炉を導入することで  
アクチノイドの多くを  
核分裂性の物質として  
利用できるようになる。



## 使用済み燃料の処理・処分の観点からの核燃料サイクルにおける高速炉の意義のまとめ

- ・核燃料サイクルは、資源の有効利用のみならず、廃棄物の減容の観点からも重要である。
- ・高速炉を加えることによって、アクチノイドの有効利用が可能となり、更なる廃棄物の減容化や有害度低減が可能となる。

# 使用済み燃料の比較

軽水炉(LWR)と高速炉(FR)の使用済み燃料の組成を  
ORIGEN 2コードで計算。

計算の前提条件

再処理ハンドブック第2版 JAEA-Review 2008-037による。

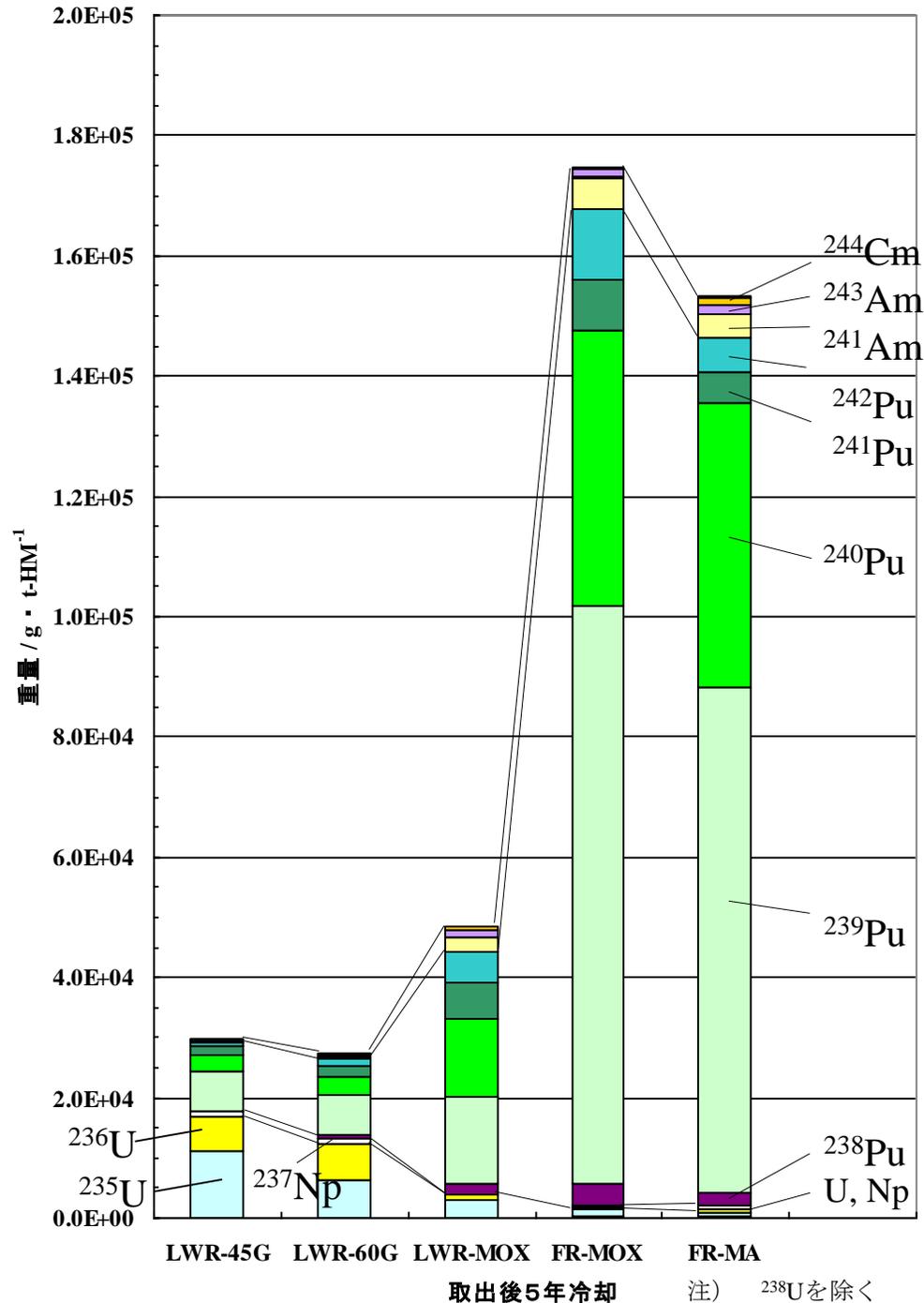
記号	原子炉／燃料	燃焼度	初期組成
LWR-45G	PWR／ $UO_2$ 燃料	45 GWd/tHM	4.5 %EU <sup>注1</sup>
LWR-60G	PWR／ $UO_2$ 燃料	60 GWd/tHM	4.5 %EU <sup>注1</sup>
LWR-MOX	PWR／MOX燃料	45 GWd/tHM	Pu/(NU+Pu) = 6.0 % <sup>注2</sup>
FR-MOX	高速炉／MOX燃料 (MOX炉心のみ)	78.8 GWd/tHM	Pu/(DU+Pu) = 17.0 %、 $^{241}Am/Pu = 1.68$ % <sup>注3</sup>
FR-MA	高速炉(炉心)／ MA添加MOX燃料	147.1 GWd/tHM	Pu/(DU+Pu) = 19.8 %、 MA/HM = 0.92 % <sup>注4</sup>
	高速炉(軸方向ブランケット)／劣化ウラン燃料	21 GWd/tHM	DU

注1) EU:濃縮ウラン 注2) NU:天然ウラン 注3) DU:劣化ウラン

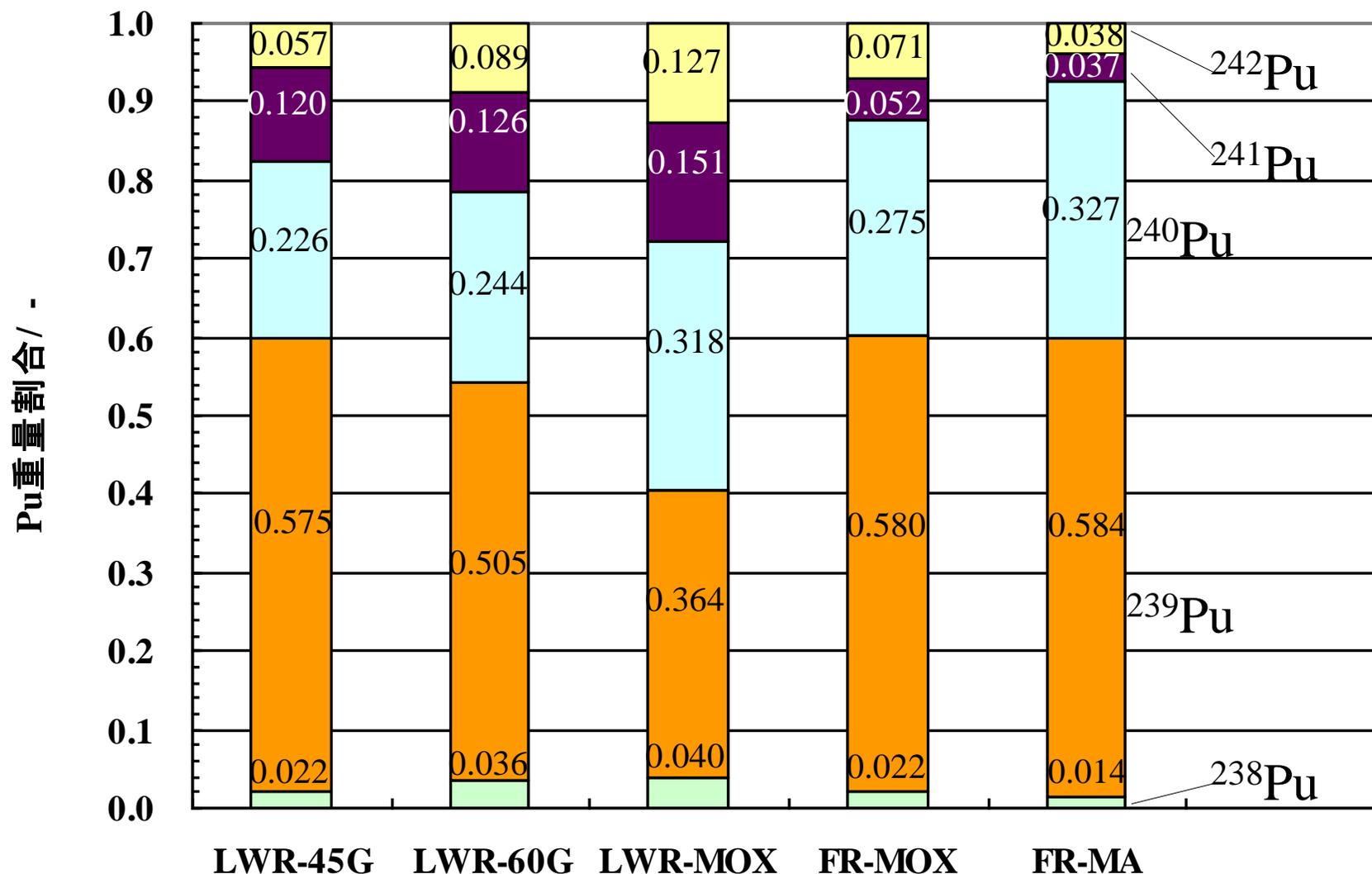
注4) MA: $^{237}Np$ 、 $^{241}Am$ 、 $^{243}Am$ 、 $^{244}Cm$

# 使用済み燃料中の アクチノイド核種の 重量組成

使用済み燃料中の  
アクチノイドの量と組成は、  
装荷燃料に大きく依存する。  
高速炉燃料は、  
Pu富化度が高いので  
PuやMA含有量が多くなる。  
高燃焼度化により、  
アクチノイド量は減少する。

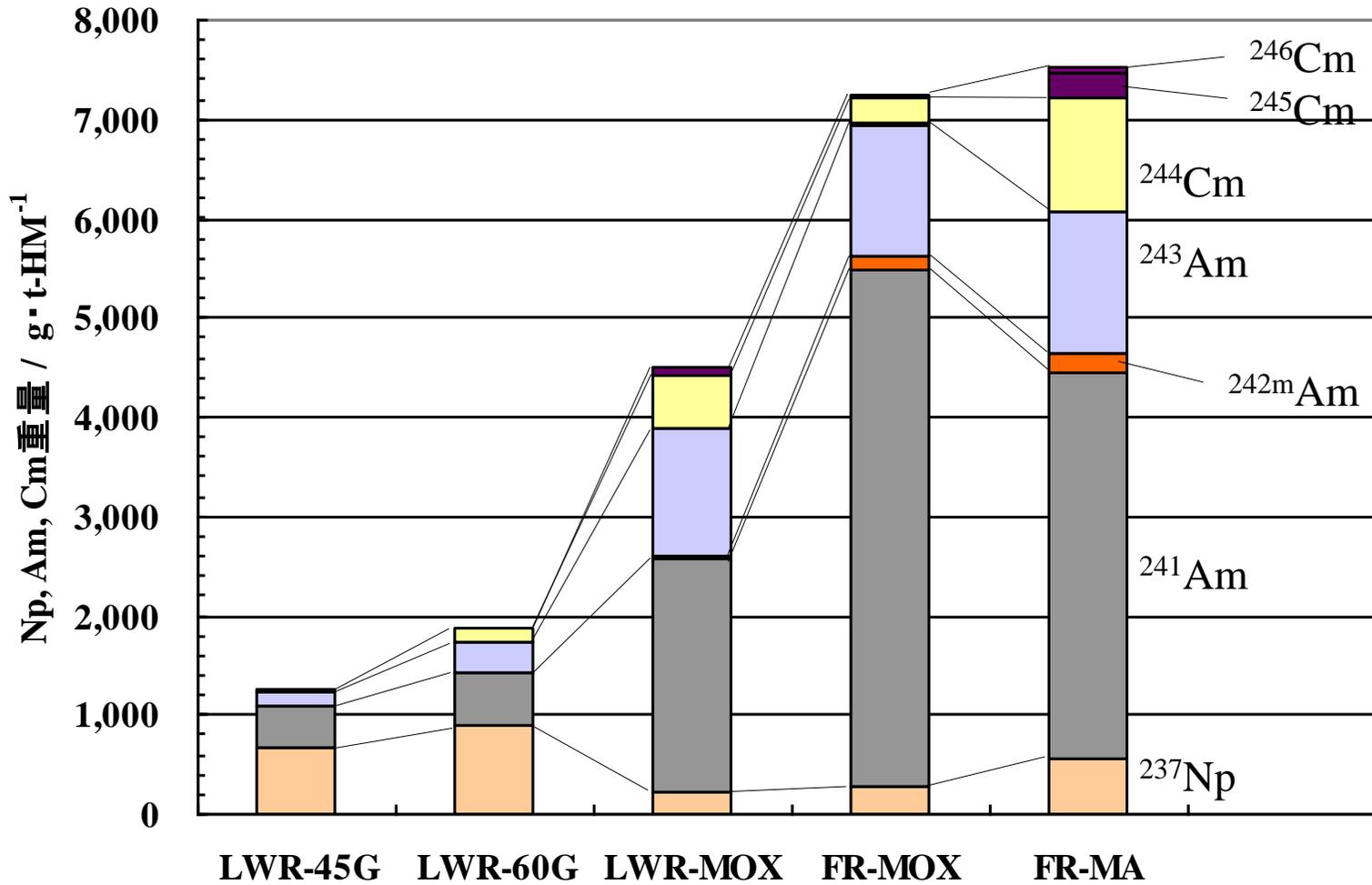


# 使用済み燃料中のプルトニウム同位体重量組成



軽水炉では、高燃焼度化および 取出後5年冷却  
 MOX使用により核分裂性Puの割合が減少する。

# 使用済み燃料中のマイナーアクチノイドの重量組成

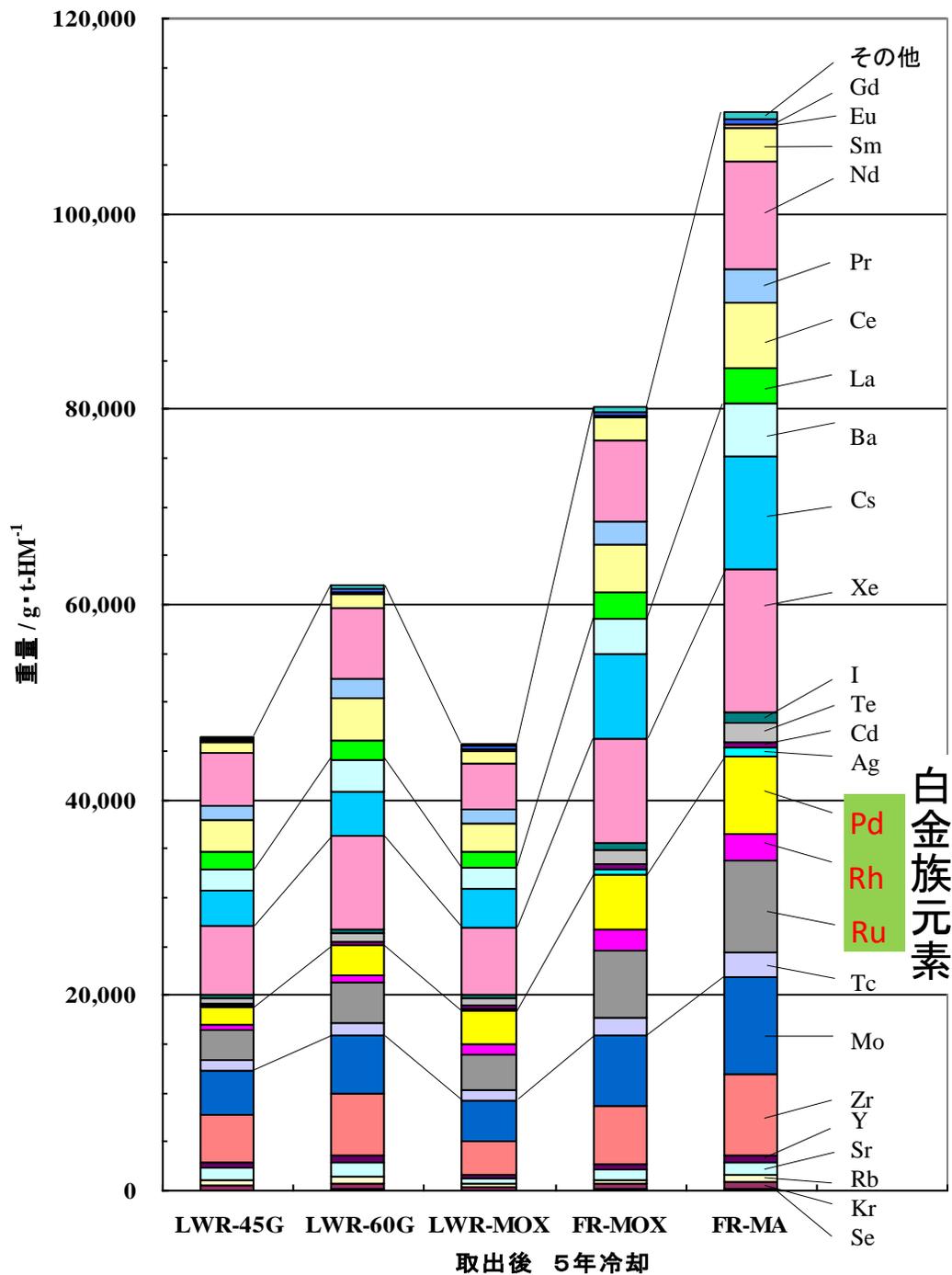


取出後5年冷却

高燃焼度、MOX燃料使用により高次化が進む(MA量は増加する) o12

# 使用済み燃料中の核分裂生成物の重量組成

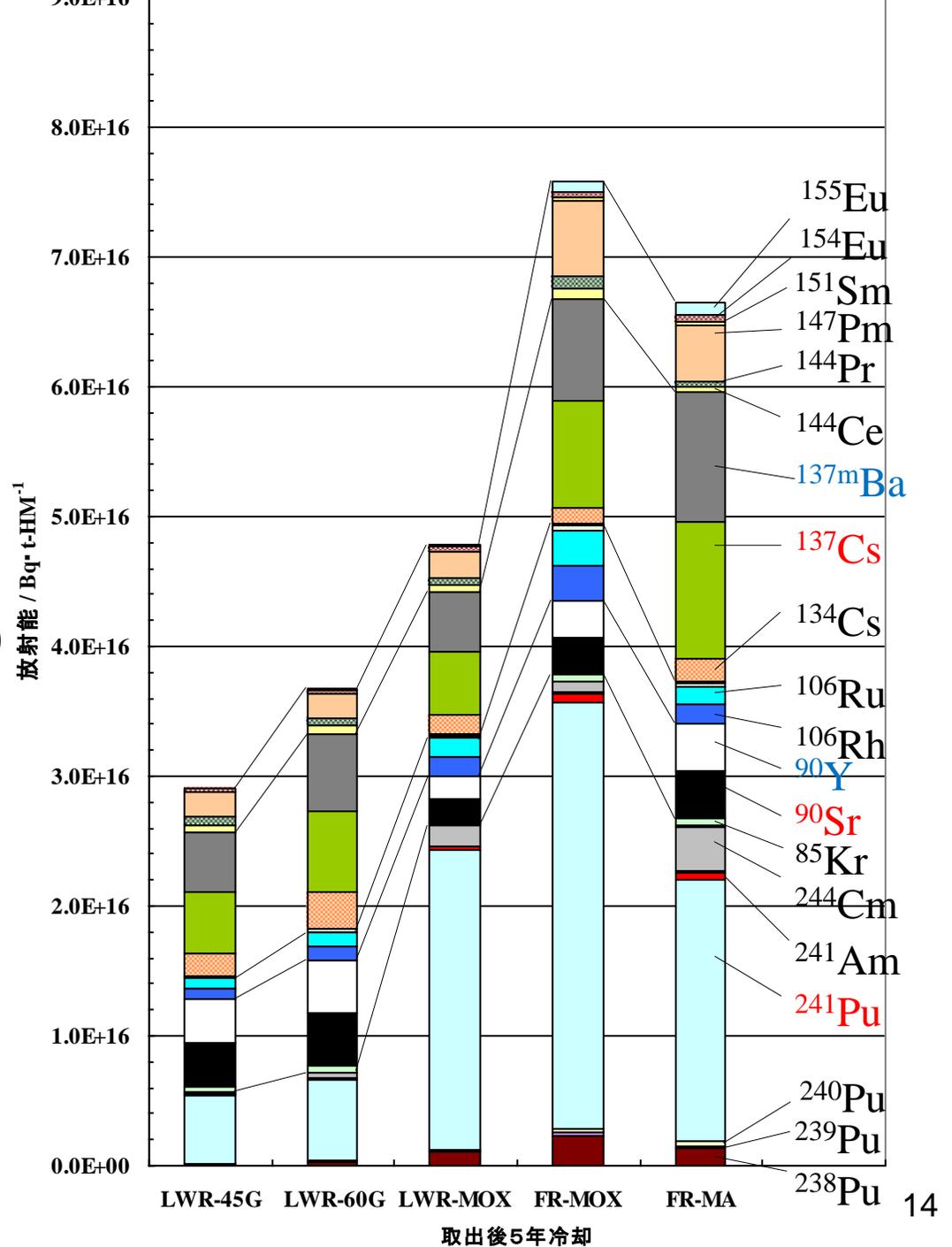
FPの総量は、  
 燃焼度に依存する。  
 MOX燃料を用いると  
 白金族元素の割合が  
 増加する。



# 使用済み燃料中の放射能組成

FPによる放射能はSr-90 (Y-90は短半減期娘核種) と Cs-137 (Ba-137mは短半減期娘核種) の影響が大きい。

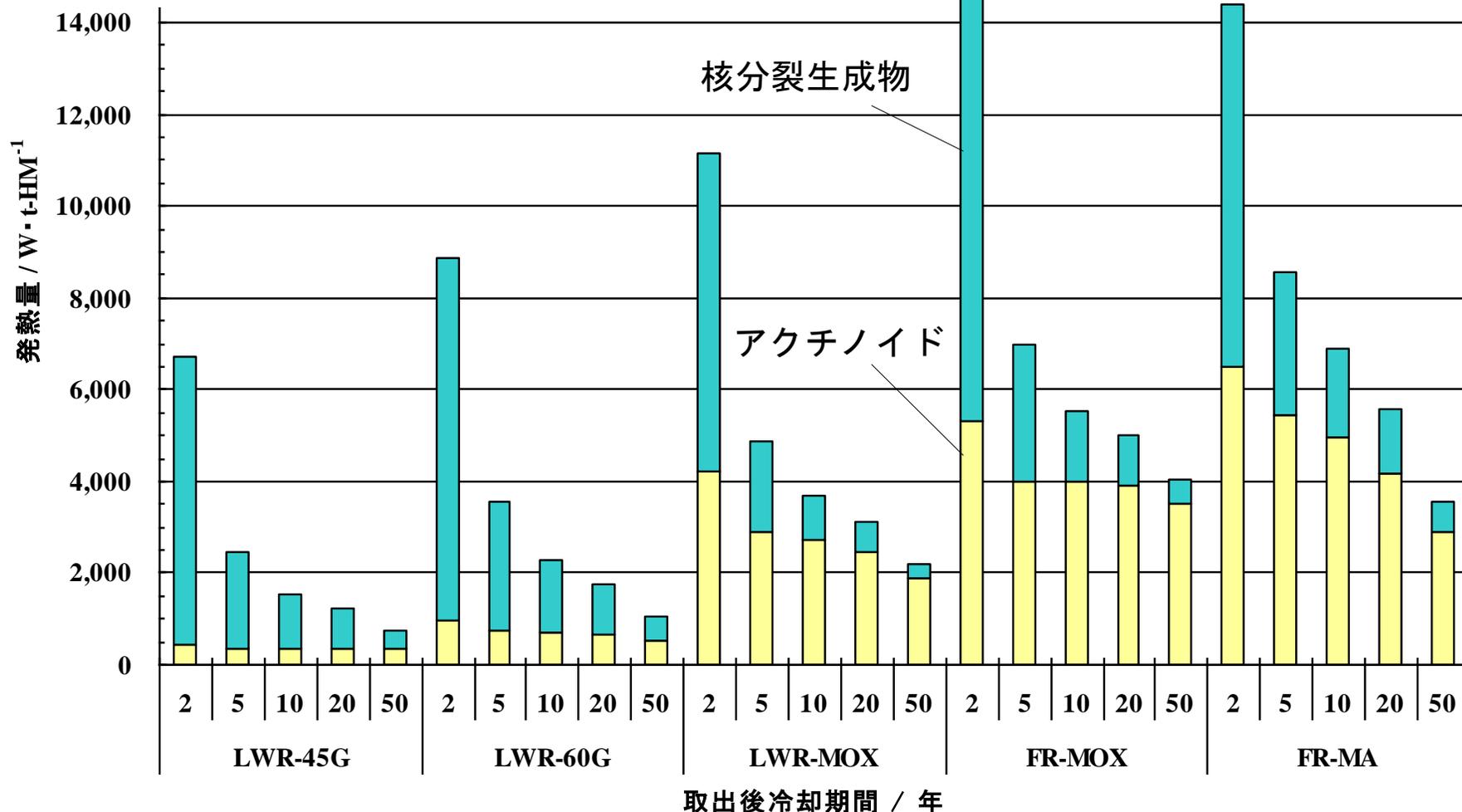
MOX燃料はアクチノイド、特にPu-241の影響が大きくなる。



# 使用済み燃料の発熱とその推移

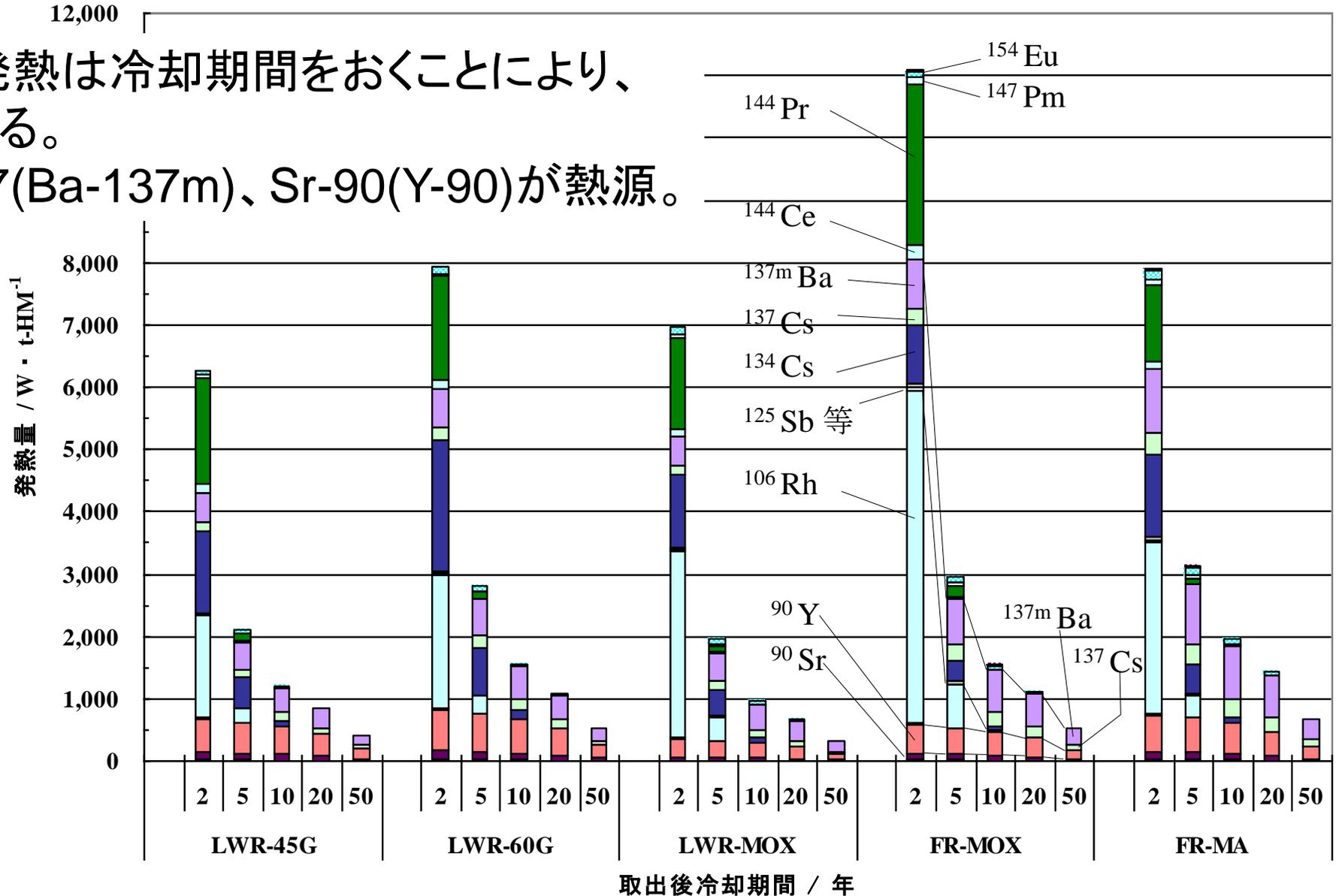
MOX燃料を用いるとアクチノイドの影響が大きくなる。

アクチノイドは冷却期間による減衰が少ない。



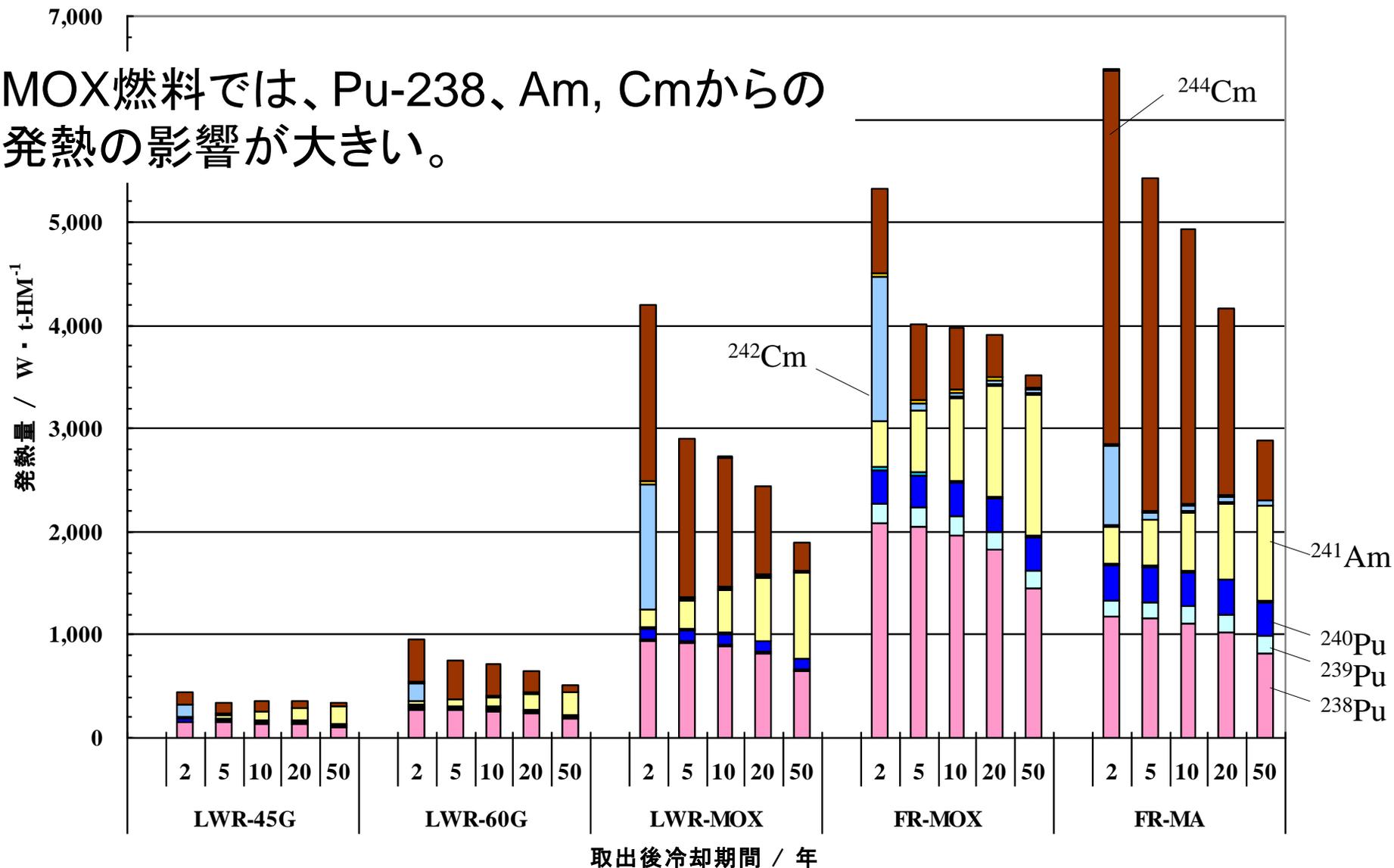
# 核分裂生成物の発熱とその推移

FPの発熱は冷却期間をおくことにより、減衰する。  
Cs-137(Ba-137m)、Sr-90(Y-90)が熱源。



# アクチノイド核種の発熱とその推移

MOX燃料では、Pu-238、Am、Cmからの発熱の影響が大きい。



# 高速炉使用済みMOX燃料再処理の課題

高速炉使用済み燃料の特徴は、  
Pu含有率の高いMOX燃料の使用と高燃焼度である。

- ・MOX燃料

Puの含有率が増えるとMAの発生量が増える。

- ・燃焼度

燃焼度が高くなると、発生する核分裂生成物、MAの量が増える。

→ 発生する放射線や熱量が増加する。

白金族元素、Mo, Zr等の増加により、

不溶解残渣が生成しやすくなる。



- ・放射線による溶媒劣化対策。

- ・不溶解残渣除去のための清澄工程の高度化・効率化

- ・線量や熱量の増加によるプロセス負荷等の対策。

- ・Pu含有量の増加や同位体組成の影響による臨界管理の強化、  
溶解性能の維持、および核拡散抵抗性の強化。

# MOX燃料再処理の現状

- ◆使用済みMOX燃料の再処理は、フランス、ドイツ、日本、ロシア及びイギリスにてプラント規模で試験的に行われた実績はあるが、MOX燃料単独で大量処理された実績はない。
  - フランスでは、段階的に処理量や燃焼度を増加させたMOX燃料再処理実績を積み重ね、その経験を多目的前処理施設TCPにつなげている。ただし、燃焼度は高々50GWd/t程度でウランによる希釈や処理量を制限しつつ運転を行っている。
  - ロシアでは、比較的高燃焼度の70～80GWd/t 使用済み高速炉MOX燃料を再処理しているが、13～20年程度冷却期間をおくと共に抽出剤濃度を下げてPuの濃度調整を行っている。

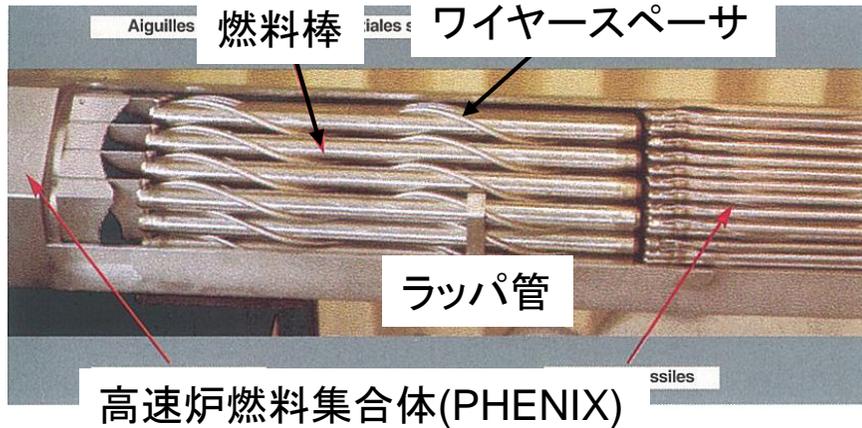
## MOX燃料再処理の現状(つづき)

- ◆これまでの軽水炉MOX燃料の再処理では、ウラン燃料との希釈処理や処理量を制限して実施しており、その範囲の運転処置において、プロセスや安全上の大きな問題は報告されていないが、商業プラントを考えると、軽水炉MOX燃料単独で大量処理を行うことが望ましく、その場合は、放射線、熱、残渣発生量の増大、臨界管理等の面で開発すべき課題を有する。
- ◆軽水炉高燃焼度MOXや高速炉MOX燃料の再処理を見据え、再処理後の高レベル放射性廃液に含まれるMAや白金族元素が増加による、ガラス固化体の地層処分負担を軽減するためのMA分離技術の開発や、ガラス固化プロセスの高度化が必要とされ、多くの国で研究開発が行われている。
- ◆一部の国では高速炉MOX燃料再処理に向けた施設計画が進められているものの、現状では軽水炉使用済MOX燃料の継続的な再処理計画は見られない。

# 我が国における高速炉MOX燃料再処理技術開発の現状

## 集合体解体・せん断

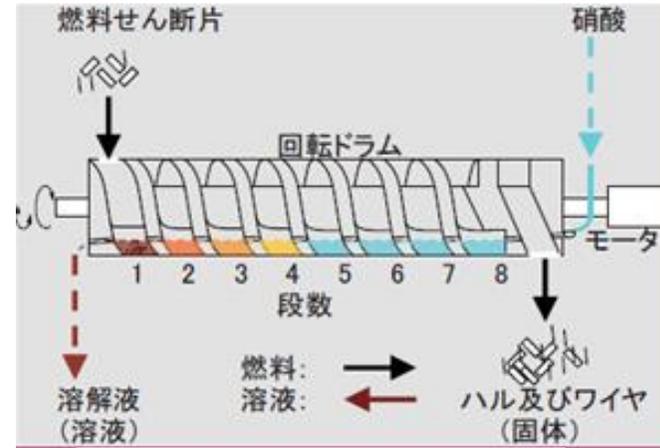
高速炉燃料は、燃料棒にワイヤを螺旋状に巻いてラッパ管の中に束ねられている。



ラッパ管の取り外し技術の開発等を実施。

## 燃料溶解

臨界管理上有効で且つ燃料の溶解性能を維持出来る装置の開発。

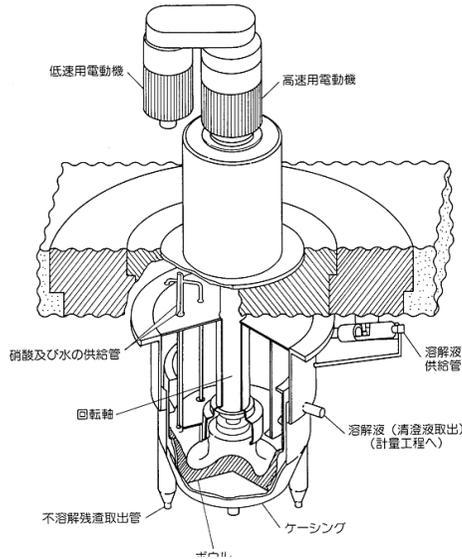


回転ドラム型連続溶解槽

上記溶解槽によるウラン試験を実施。ビーカースケールで常陽照射済燃料を用いたピン単位の溶解試験を実施済み。

# 清澄工程

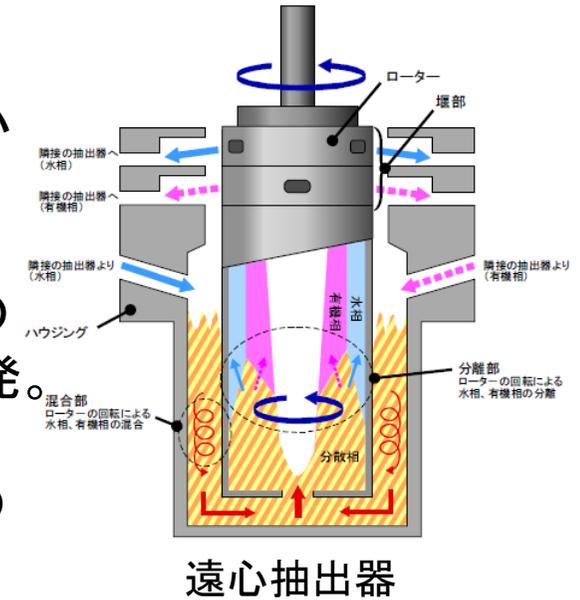
高燃焼度化によって、より多く発生する不溶解残渣を取り除くため、遠心清澄器やフィルターの高度化を実施している。



遠心清澄器

# 抽出工程

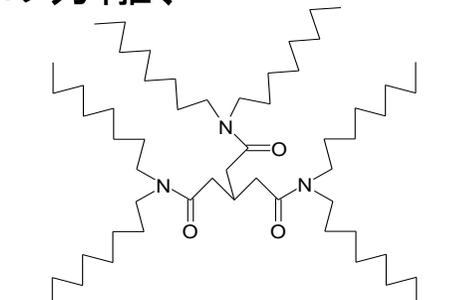
- ・溶媒と核種の接触時間を最小にし、溶媒の放射線劣化を抑える遠心抽出器の開発。
- ・核拡散抵抗性を高めるためのU/Np/Puの同時抽出法の開発。
- ・更なる効率化や2次廃棄物をおさえるための新規抽出剤の開発。
- ・その他



遠心抽出器

## MA分離

放射性廃棄物低減の観点から、高レベル放射性廃液からのMAの分離、AmとCmの相互分離などの開発が行われている。



ヘキサオクチルニトリロ三酢酸トリアミド(HONTA)

## 研究開発内容

- ・新規抽出剤の開発。
- ・分離手法の開発。  
(抽出クロマトグラフィ等) 等

# 高速炉燃料再処理の人材育成と技術伝承の課題

- ・大学に於ける核燃料使用施設の減少。

特に

+ 核燃料とMAを含むRIが同時に使用できる施設は極少数。

+ Puをマクロ量で使える大学関連の施設は皆無。

→ 個別の大学で上記施設を運営することは困難になりつつある。



大学共同利用施設の設置が必要。

- ・大学、研究機関(原子力機構)、メーカーの連携強化。

+ 3者の役割分担、共同研究、相互利用、研究者の交流。

- ・東海再処理工場で培われた技術の伝承。

(原子力機構と民間との協力強化)

- ・六ヶ所再処理工場の稼動と商業規模での再処理に係わるデータ蓄積。

## まとめ

- ・核燃料サイクルに高速炉を導入することにより、廃棄物の更なる減容化が可能となる。
- ・高速炉MOX燃料再処理では、不溶解残渣、放射線量、熱量の増加による再処理工程プロセスへの負荷が問題になり、また、Pu量の増加による臨界管理の強化も重要な課題となる。
- ・MOX燃料再処理(軽水炉、高速炉共に)は、各国でプラントレベルの試験は行っているものの、商業レベルでの運営は行われておらず、更なる開発が必要である。
- ・高速炉MOX燃料再処理に向けて、MA分離を含むアクチノイド抽出・核種分離、再処理用機器開発等が行われており、これらの技術開発では人材育成と技術伝承が重要、且つ課題である。

商業用レベルでの使用済MOXの再処理の方策や利用方法等については、六ヶ所再処理工場の稼働状況や技術的課題等も踏まえつつ、引き続き検討および研究・開発を継続していくことが重要である。