

第

14

章

金属燃料FBRによる
マイナーアクチニドの
短半減期核種への変換



第14章 金属燃料FBRによるマイナーアクチニドの短半減期核種への変換 目次

原子力システム部 上席研究員 横尾 健
原子力システム部 主任研究員 笹原 昭博
原燃サイクル部 主任研究員 倉田 正輝

14 - 1 マイナーアクチニドの変換特性109
14 - 2 マイナーアクチニド含有金属燃料の特徴と照射試験113

横尾 健 86ページに掲載
倉田 正輝 48ページに掲載



笹原 昭博（1987年入所）

これまで、FBR関係では超ウラン元素の変換解析、リサイクル時の質量バランス解析、炉心安全性パラメータ解析および超ウラン元素金属の製造を行ってきた。軽水炉関係では炉心燃焼解析、核種生成量解析評価、貯蔵時の燃料特性評価を行ってきた。今後は、照射燃料で得た実験データをより詳細に検討してゆきたい。

14 - 1 マイナーアクチニドの変換特性

原子力発電所の使用済燃料中にはマイナーアクチニド（MA：ネプツニウム(Np)、アメリシウム(Am)、キュリウム(Cm)など)が含まれており、これらのマイナーアクチニドには半減期が数百万年で、長期にわたって環境からの隔離が必要なものがある。したがって、軽水炉燃料の再処理の際にマイナーアクチニドも分離回収して、高速炉でリサイクルすることにより燃料サイクルの中へ閉じ込めることは、長期的な放射能低減および廃棄物処理や処分の負担軽減に有効となる。当研究所ではマイナーアクチニドの燃焼(変換)に有利な硬い中性子エネルギー分布をもち、乾式再処理法との整合性も良い金属燃料FBRによるマイナーアクチニドの変換特性について、当研究所開発のシステムを用いて解析を進めてきた。基本となる金属燃料の組成は上述したU-Pu-10%Zrの3元合金である。また、金属燃料に添加するマイナーアクチニド組成は表14-1-1に示すとおりである。

実証炉を念頭に設計された1000MWe級の酸化物燃料炉心の燃料を酸化物の他に金属とした場合についても解析を行った。解析では中性子と燃料・構造材質との反応データを納めたデータベースを使用する。本解析では日本原子力研究所で作成されたデータベース(JFS-3-J2)および不足している核反応データについてはブルックヘブン国立研究所(アメリカ)で作られた核反応データベース(ENDF/B-IV)を使用した。また、炉心を径方向と軸方向の2次元でモデル化を行い、中性子のエネルギー(0~10MeV)を12個のエネルギーに12群で計算を行った。炉心領域は内側炉心と外側炉心の2領域で構成されるが、内側炉心領域の解析による平均の中性子エネルギー分布を図14-1-1に示す。金属燃料では酸素による中性子の散乱がないために、高いエネルギーの中性子の割合が酸化物燃料に比べて多い分布となる。この炉心の

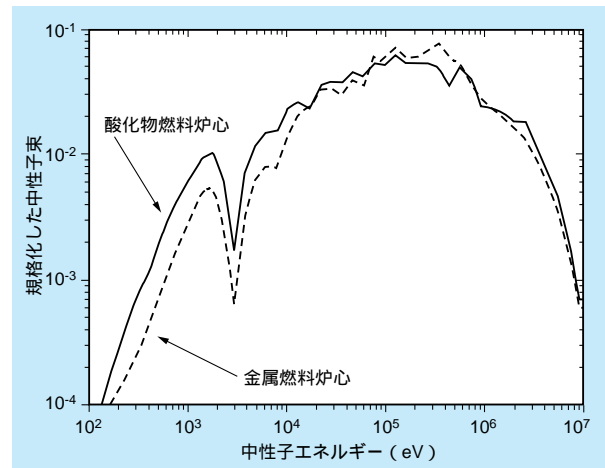


図14-1-1 金属燃料炉心と酸化物燃料炉心の中性子エネルギースペクトルに(内側炉心)

内側炉心と外側炉心にマイナーアクチニドを装荷燃料の5%、10%、15%添加した場合の変換率を図14-1-2に示す。図14-1-2には変換率の定義も合わせて示す。マイナーアクチニドは中性子エネルギーの高い領域で変換に寄与する核分裂断面積が大きくなっているために、金属燃料炉心におけるマイナーアクチニドの変換率は約14%/年、一方、酸化物燃料炉心では12%/年となり、金属燃料炉心の方がマイナーアクチニドの変換に有利であることが分かる。

軽水炉からの高レベル放射性廃棄物にはマイナーアクチニドの他に希土類元素(RE:ネオジウム、セリウム、

表14-1-1 軽水炉取り出しのマイナーアクチニドの組成(軽水炉取り出し燃料度:40Gwd/t)

核種	Np237	Am241	Am243	Cm244
重量(%)	53.6	23.1	17.4	5.93

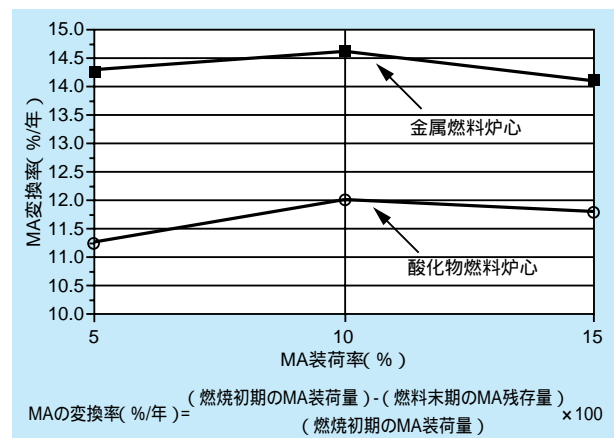


図14-1-2 金属燃料炉心と酸化物燃料炉心におけるMAの変換率

ガドリニウム、サマリウムなど)が含まれており、高レベル放射性廃棄物から乾式法でアクチノイド元素を分離する場合、マイナーアクチノイドと等量の希土類元素が同伴してくると予想される。そのため、軽水炉燃料を対象としたORIGEN 2 コードによる燃焼計算で求めた希土類元素のうち、高速炉に添加した場合に中性子の吸収によって炉心特性に与える効果が大きいと考えられるネオジウム(Nd)、サマリウム(Sm)やユーロピウム(Eu)などの14核種について核変換を考慮した。当研究所で最適化設計を行った2領域均質の1000MWe級の金属燃料炉心の内側炉心と外側炉心の金属燃料にマイナーアクチノイドとREを各々5%、10%、15%添加した場合の燃焼に伴う反応度変化を図14-1-3に示す。マイナーアクチノイドのみ装荷した場合にはNp237からPu238、Am241からAm242、Am243からCm244への核変換に伴う反応度の顕著な増加がみられる。一方、希土類元素も同時に添加した場合はマイナーアクチノイドによる反応度の増加が希土類

元素の中性子吸収でほぼ相殺される結果となった。変換率についてはマイナーアクチノイドのみ添加した場合、マイナーアクチノイドと希土類元素を同時に添加した場合ともに約14%/年となり、希土類元素がマイナーアクチノイドとともに添加されてもマイナーアクチノイド変換率に与える影響は小さいことが分かった。マイナーアクチノイドと希土類元素を各々5%燃料に添加して、取り出し燃料中のマイナーアクチノイドを再び自らの炉心にリサイクルし、一方、燃焼によって失われた分のマイナーアクチノイドは軽水炉使用済燃料の再処理によって発生する高レベル廃液中から、乾式分離で回収したマイナーアクチノイドによって補っていく、というリサイクルの中で、マイナーアクチノイドの変換をはかっていく。これを“自己リサイクル”と呼ぶが、その解析を行った。図14-1-4にリサイクル平衡時(リサイクルを繰り返すことで燃料の装荷時と取り出し時でウランやプルトニウムの量および組成が平衡に達して変化しなくなる状態)の質量バランスを示す。REが付随した場合でも軽水炉5~6基からのマイナーアクチノイドを1000MWe級の金属燃料炉心1基で受け入れることが可能である。

自己リサイクルのより詳細な解析を図14-1-5に示す燃料サイクルについて実施した。対象とした炉心は高速炉の導入初期における実用的なものとして、2領域の均質な炉心より構成される600MWe級炉心である。表14-1-2に炉心の主な仕様を示す。炉心燃料として金属燃料(U-13%Pu-10%Zr)の他にも窒化物燃料(U_N-15%Pu_N)および酸化物燃料(UO₂-15%PuO₂)についても対象とした。添加出来るマイナーアクチノイド量の上限、リサイクルの中で乾式分離や乾式再処理の際に回収率を考慮して廃棄物に移行するプルトニウムやマイナーアクチノイド等の重金属量および炉心安全性パラメータについて検討した。表14-1-3に燃料集合体の主な仕様を示す。表14-1-4にリサイクルを繰り返して平衡に達した時の炉心特性を示す。炉心高さについては、燃料の良好な熱伝導とウランからプルトニウムへの内部転換性を活用することで酸化物燃料炉心に比べて、窒化物燃料炉心では短尺化、金属燃料炉心では短尺化と軸方向ブランケットの削除を行った。いずれの燃料でもPu238およびマイナーアクチノイドの高エネルギーの中性子による核分裂の寄与で希土類の付随にかかわらず燃焼に伴う反応度の低下は減る。マイナーアクチノイド添加や自己リサイクルを行わない場合の炉

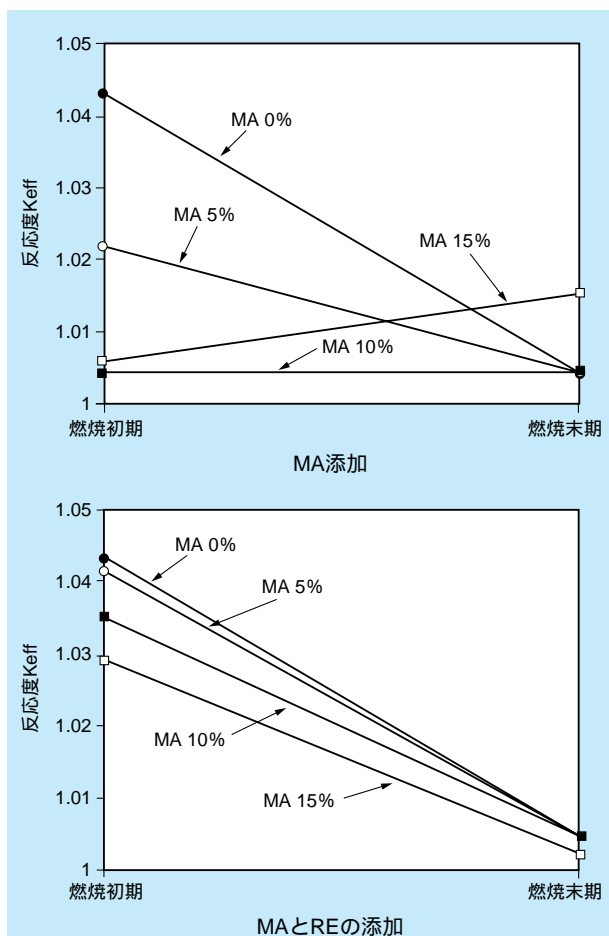


図14-1-3 MAとREを添加した場合の燃焼反応度

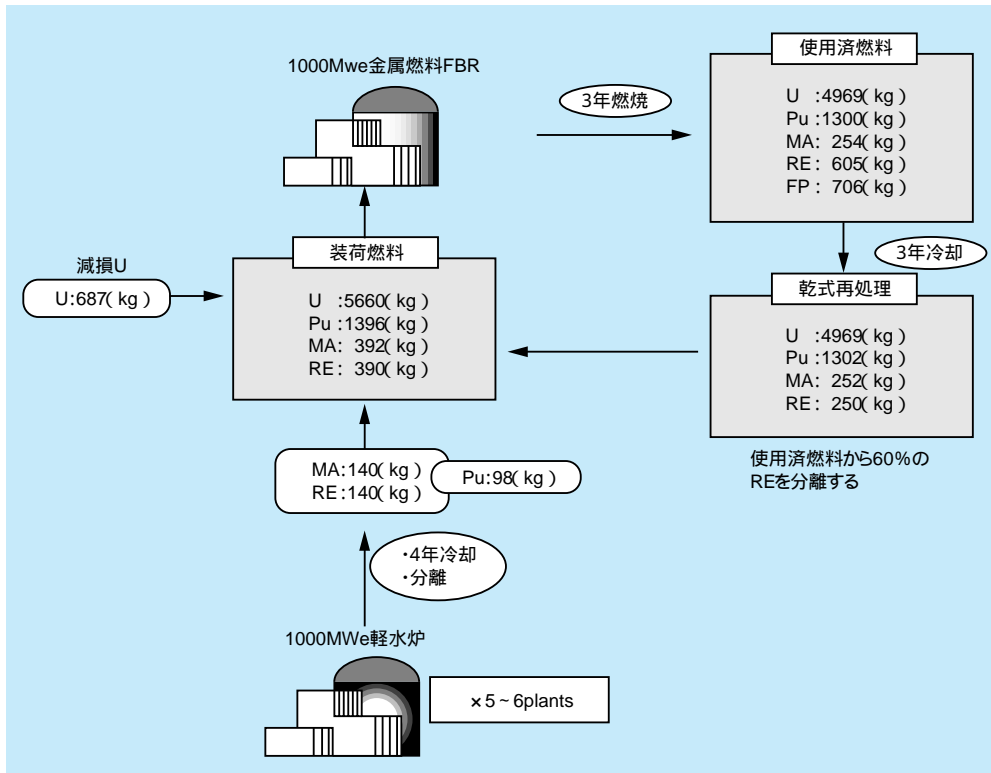


図14-1-4 金属燃料サイクルの平衡時のマスフロー(5%MA + 5%RE添加)

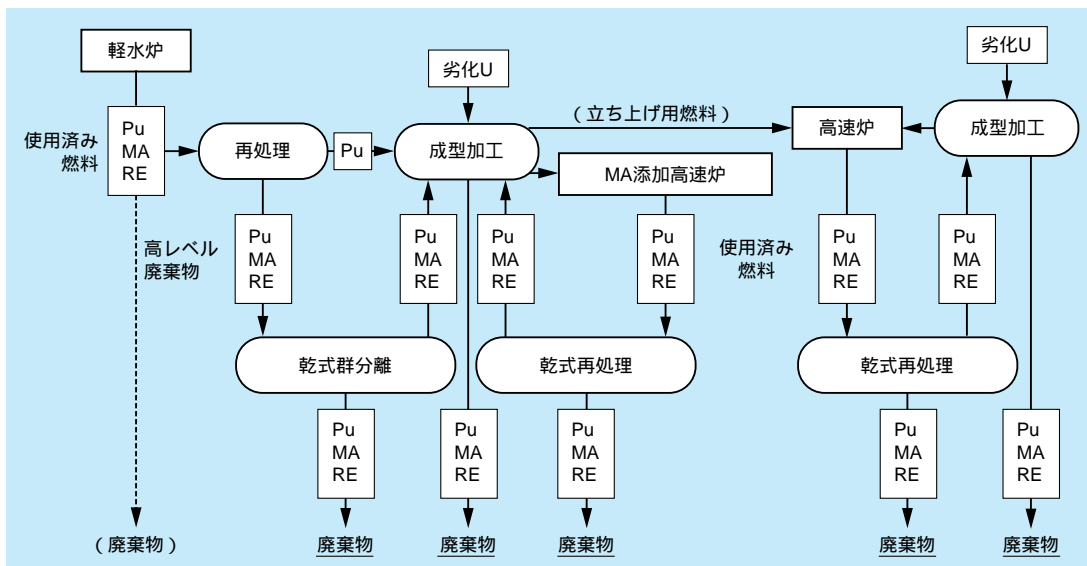


図14-1-5 軽水炉 - 高速炉サイクルによる超ウラン元素の流れ

心部ボイド係数*は、金属燃料、窒化物燃料および酸化物燃料炉心で各々5.6%、3.8%、5.6%となる。これらと比較

*炉心部の冷却材がボイド化(喪失)すると中性子エネルギースペクトルがエネルギーの高い領域に変化する。この変化によって炉心に投入される反応度をここではボイド係数と呼ぶ。マイナーアクチニドは中性子エネルギーの高い領域で各分裂反応が生じ易いため、マイナーアクチニドが燃料に添加されるとボイド係数は増加する。

して大型炉心でも同様な安全性を保つためには、マイナーアクチニドの添加量の上限を数%程度以下とする必要がある。リサイクル平衡時における重金属所要量と取り出し量について、表14-1-5の金属燃料炉心の重金属バランスから分かるように、プルトニウムの所要量のほとんどは自己リサイク

表14-1-2 解析対象とした600MWe級炉心の仕様

項目	仕様
内側炉心/外側炉心/ブランケット/遮蔽体/制御棒本数	199/96/138/354/30
集合体ピッチ	158.1
運転サイクル期間	1.5年、3バッチ
冷却材入/出口温度	395/550
最大線出力	420W/cm
取り出し平均燃焼温度	90,000MWd/t

表14-1-3 解析対象とした600MWe級炉心の燃料仕様

項目	燃料			ブランケット		
	金属	窒化物	酸化物	金属	窒化物	酸化物
ダクト肉厚 (mm)	3.9			3.9		
燃料要素数 (mm)	217			217		
燃料要素径 (mm)	8.5			11.5		
被覆管肉厚 (mm)	0.5			0.5		
ボンド材	Na	He	He	Na	He	He
燃料理論密度 (g/cm ³ , 常温)	15.8	14.3	11.0	15.8	14.3	10.9
燃料スミア密度 (%TD)	75	81	87	80	81	87
重金属密度 (g/cm ³) ¹⁾	8.0	7.7	6.3	10.4	10.2	7.23
燃料体積比 (% ²⁾)	33	42	42	43	48	48
構造材体積比 (%)	23	23	23	20	20	20
Na体積比 (%)	44	33	33	37	29	29
融点 (°C)	1120	2497	2750	1204	2597	2750
熱伝導率 (W/m・K, 定格時)	26.7	3.9	18.6	30.6	3.9	19.3

1) UとPuの燃料密度

2) 炉心体積に占める燃料の体積比、被覆材・ラッパー管などの構造材の体積比および冷却・被覆管中のNaの体積比

表14-1-4 リサイクル平衡時の炉心特性 (15ヶ月運転、平均燃焼度 ~ 90MWd/kg)

燃料物質	金属		窒化物	酸化物
炉心高さ (cm)	80	80	76	100
軸フランケット厚さ (cm)	0	0	35	35
Pu富化度 (w/o, 内/外)	14.3/24.0 [*]	13.8/23.3 [*]	16.0/25.1 [*]	17.2/27.8 [*]
MA富化度 (w/o)	2 ^{*1}	5 ^{*2}	5.3 ^{*3}	5 ^{*4}
希土富化度 (w/o)	0.5	2.0	2.0	2.0
燃焼反応度 (% k/k)	0.9	0.4	0.9	0.5
ドブラー係数 (10 ⁻³)	-2.5	-2.0	-3.2	-5.2
遅発中性子割合 (10 ⁻³)	3.4	3.2	3.3	3.1
炉心部ポイド係数 (\$)	6.4	7.5	5.8	7.7

(w/o) pu238/239/240/241/242, Np237/Am241/Am242/Am243/Cm244/Cm245

* 1 : 4/57/30/4/5, 36/22/1/20/18/3
 * 2 : 9/54/28/4/5, 43/19/1/18/16/3
 * 3 : 8/52/30/5/5, 42/20/1/18/16/3
 * 4 : 8/50/32/5/5, 10/20/1/18/17/3

ルによってまかなうことができる。他の燃料についても同様で、これは各炉心ともに内部転換性が良好なことによる。また、マイナーアクチニドについても自己リサイクル分が主要となり、所定の添加量を満たすために部分的に軽水炉からの群分離によるマイナーアクチニドが供給される。マイナーアクチニド添加量を5%とした場合、

表14-1-5 MA添加炉心のリサイクル平衡時のUやPu等の重金属の装荷・取り出し量

要素	金属燃料炉心、MA5%添加			金属燃料炉心、MA2%添加		
	装荷燃料	取出燃料	取出量	装荷燃料	取出燃料	取出量
U (kg)	LWRから 4895	リサイクル -	4450	LWRから 5133	リサイクル -	4641
w/o,U234	0	-	0.1	0	-	0.0
U235	0.2	-	0.1	0.2	-	0.1
U236	0	-	0.0	0	-	0.0
U238	99.8	-	99.8	99.8	-	99.9
Pu (kg)	LWRから 38	リサイクル 1030	1038	LWRから 68	リサイクル 1024	1050
w/o,Pu238	0	9.2	9.3	0	3.9	3.9
Pu239	58	53.9	53.6	58	56.5	56.2
Pu240	24	28.4	28.3	24	30.8	30.6
Pu241	14	3.5	3.9	14	4.0	4.4
Pu242	4	5.0	5.0	4	4.9	4.9
MA (kg)	LWRから 104	リサイクル 217	223	LWRから 35	リサイクル 94	99
w/o,Np237	53.6	38.9	37.9	53.6	30.5	29.6
Am241	23.1	18.0	17.6	23.1	21.2	20.6
Am242m	0	1.0	1.0	0	1.2	1.2
Am243	17.4	18.3	17.8	17.4	21.3	20.7
Cm244	5.9	20.0	21.0	5.9	21.6	22.6
Cm245	0	3.8	3.6	0	3.9	3.8
RE (kg)	LWRから 104	リサイクル 32	325	LWRから 35	リサイクル 25	248

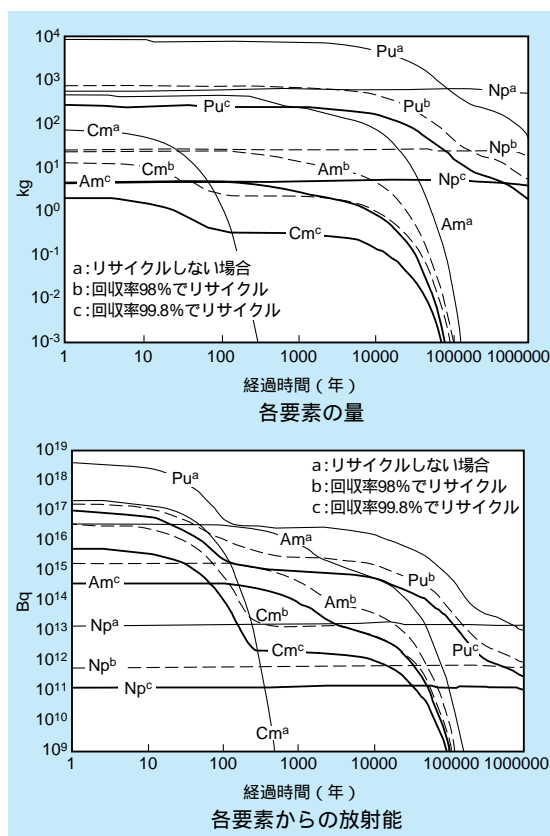


図14-1-6 金属燃料によるサイクルからの廃棄物の各要素の減衰の評価結果

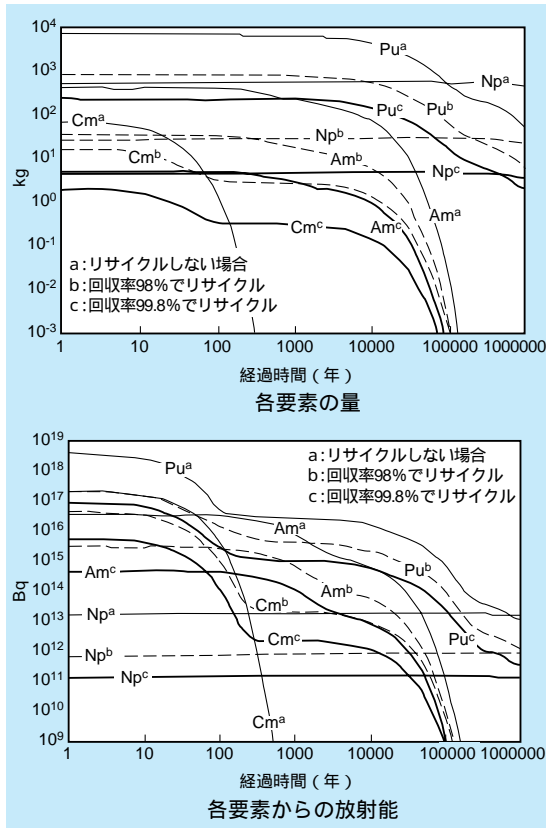


図14-1-7 窒化物燃料によるサイクルからの毎年の廃棄物の各要素の減衰の評価結果

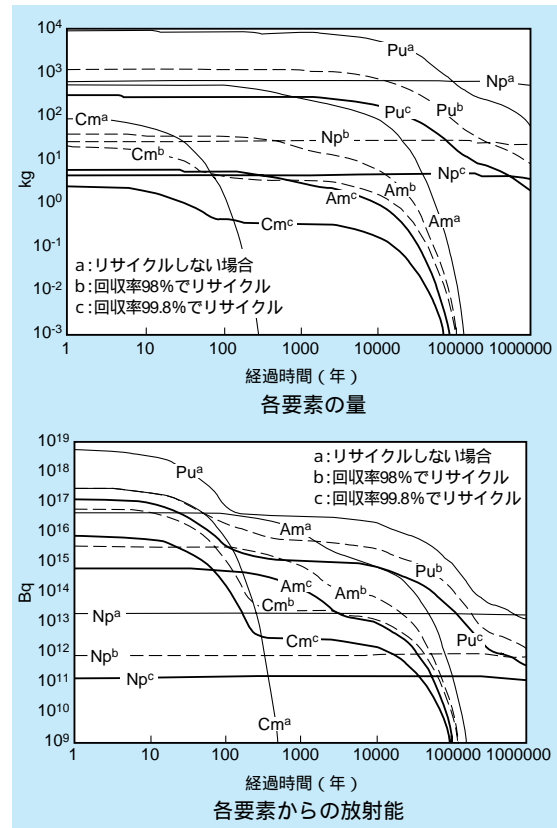


図14-1-8 酸化物燃料によるサイクルからの毎年の廃棄物の各要素の減衰の評価結果

金属燃料では他の燃料に比較してマイナーアクチニドの燃焼効率がいために供給量が約10%大きくなる。図14-1-6には金属燃料のリサイクルで各工程において発生する全重金属廃棄物を長期貯蔵した場合について、放射能の変化を評価した結果を示す。プルトニウムを回収率98%以上でリサイクルすると、廃棄物中のPu量はワンスルーの場合のNpおよびアメリシウムと同

程度以下となり、短・中期的にみた放射能もワンスルーの場合のキュリウムまたはアメリシウムよりも小さな値となる。窒化物および酸化物燃料の場合も同様な結果となる。これらから、プルトニウムのみでなくマイナーアクチニドも分離回収して高速炉へリサイクルし燃料サイクル中への閉じ込めをはかることは、廃棄物中の放射能低減の観点から必要であるといえる。

14-2 マイナーアクチニド含有金属燃料の特徴と照射試験

14-2-1 マイナーアクチニド含有金属燃料の特徴

当研究所では、まず、ウラン - プルトニウム - ジルコニウム (U-Pu-Zr) 金属燃料の母材中に、均質に添加で

きるマイナーアクチニド (MA) や希土類元素 (RE) の上限を求めるため、それぞれの金属を溶解し混合する試験を実施した。

その結果、マイナーアクチニドや希土類元素の比重は、U-Pu-Zrに比べて約2/3以下であり、それらの相互の溶解度が、それぞれ約0.5%程度と極めて小さいこと

などから、U-Pu-Zr燃料とマイナーアクチニドやREとの混合性はあまりよくないことが分かった。さらに、アーク溶解法で溶解・混合した後、鑄造する方法では、U-Pu-Zr燃料中に均質に添加できるマイナーアクチニドや希土類元素は最大でそれぞれ2%程度であった。一方、粉末鑄造法を用いた場合では、最大でそれぞれ5%程度に向上することが分かった。

当研究所では、金属燃料の製造法として射出成型法を採用することを検討しているが、その射出成型プロセスはアーク溶解して鑄造するプロセスと類似しており、射出成型法でも最大で2%のマイナーアクチニドと希土類元素を金属燃料中に均質に添加できると考えられる。

さらに、マイナーアクチニドや希土類元素の燃料への添加上限を定める試験に並行して、U-Pu-ZrにマイナーアクチニドやREを添加した場合に炉心特性に与える影響を解析的に評価した。ここでは、ポイド反応度や出力係数などのパラメーターに対するマイナーアクチニドやREの添加の効果を調べ、炉心の安定性を損なわないためにはマイナーアクチニドやREの添加量を5%以下に留めるべきであることを示した。

以上より、マイナーアクチニド消滅処理のために添加できるマイナーアクチニドと希土類元素の上限は約5%であることが分かった。そして、マイナーアクチニドを添加した金属燃料の物性を調べるために、2%マイナーアクチニドと2%希土類元素を含有するU-Pu-Zr合金、5%マイナーアクチニドと5%希土類元素を含有するU-Pu-Zr合金をそれぞれ試作し、以下の項目について測定した。

金属組織と各相の組成

熱伝導度

密度、機械的性質

温度勾配下での元素再分布

燃料 - 被覆管の両立性

マイナーアクチニドのナトリウム中の溶解度

それぞれの測定に際しては、U-Pu-Zr燃料についても同様の測定を実施し、マイナーアクチニド-希土類元素含有燃料との差を調べた。

なお以下では、2%マイナーアクチニド-2%希土類元素を含有するU-Pu-Zr燃料、5%マイナーアクチニド-5%希土類元素を含有するU-Pu-Zr燃料を、それぞれ2%燃料、5%燃料として示す。

金属組織と各相の組成

2%燃料と5%燃料を所定の温度(500~800で焼鈍した試料の金相写真^{*1})を図14-2-1と図14-2-2にそれぞれ示す。2%燃料では、数ミクロン以下の小さな析出相がほぼ均質に分散しているのに対し、5%燃料では小さな析出相の他に10ミクロン以上の大きさの析出相が分散していた。波長分散型X線分析(WDX)^{*2}を実施したところ、これらの析出相はおよそ20%Am-8%Pu-72%REの組成を持っていた。また、アメリカウムと希土類元素は、ほぼ全量が析出相中に存在していたが、プルトニウムは一部が母相中に、一部が析出相中に存在した。母相はいずれの燃料でも、600以下では2相に分れ、700以上では1相になった。U-Pu-Zr三元系状態図より、600以下の2相はそれぞれウランを主成分とする相とジルコニウムを主成分とする相に、700以上の1相は相に対応した。

それぞれの燃料の熱分析を実施し、得られた融解温度と相変態温度^{*3}を文献値と比較して表14-2-1に示す。U-Pu-Zr燃料、2%燃料、5%燃料ともに温度上昇に伴って2回相変態した。その結果、それぞれの相変態温度は組成の違いによらず580と630であった。また融点はマイナーアクチニド-希土類元素含有燃料では1207であり、U-Pu-Zr燃料より約10低かった。

マイナーアクチニド-希土類元素含有燃料には、Am-Pu-REの析出相が含まれ、U-Pu-Zr母相より約200低い融点を持つと推定されるが、熱分析ではこのような低い融解温度は測定されなかった。これは5%程度のマイナーアクチニド-希土類元素の添加では析出相の量が母相に比べて小さく、融解温度を検出できなかったためと考えられる。

熱伝導度

図14-2-3にU-Pu-Zr燃料と5%燃料の熱伝導度を比較して示す。測定した温度範囲(650以下)では両者にほとんど差はなかった。

^{*1}金相写真：金属燃料の微細組織の光学顕微鏡写真

^{*2}波長分散型X線分析：試料に電子線を投入し、発生する特性X線の強度により試料の濃度分析を行う分析法

^{*3}相変態温度：金属組織はその組成によっては、ある温度に達すると構造が変化する場合がある。これを相変態といい、相変態する温度を相変態温度という。相変態温度前後では、熱膨張係数等の物性値が異なる。

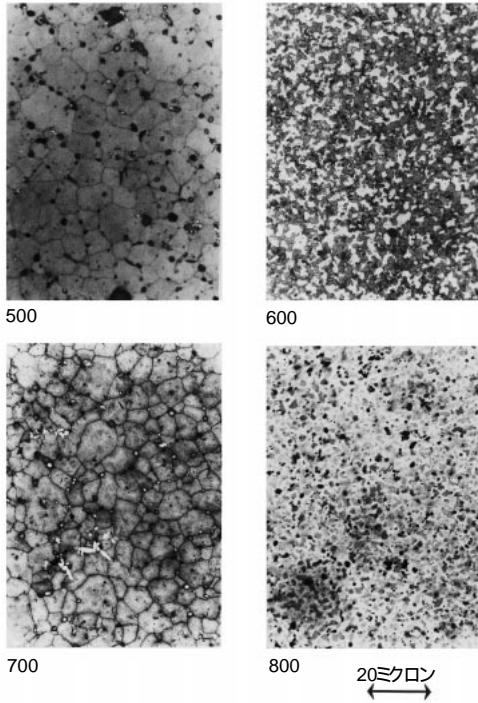


図14-2-1 2%燃料の金相写真

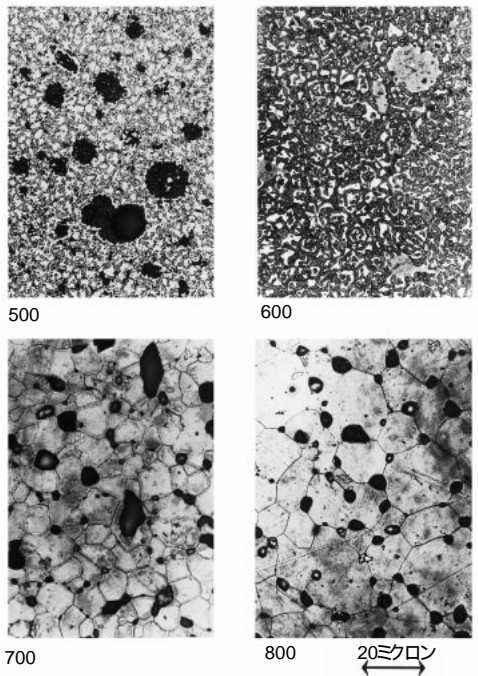


図14-2-2 5%燃料の金相写真

密度、機械的性質

U-Pu-Zr燃料と5%燃料の密度をそれぞれ測定した。U-Pu-Zr燃料では15.5g/cm³、5%燃料では14.5g/cm³であった。5%燃料ではU-Pu-Zr燃料より比重の小さいAm-Pu-REの析出相が存在するために密度が約9%小さくなった。

表14-2-1 それぞれの燃料合金の相変態温度と融解温度 ()

燃料	U-Pu-Zr (文献値)	U-Pu-Zr (実測値)	2%燃料 (実測値)	5%燃料 (実測値)
融解温度	1214	1217	1207	1207
相変態温度 +	580	580	580	580
相変態温度 +	630	630	630	630

燃料設計において重要な機械的性質であるヤング率^{*4}とポアソン比^{*5}についても測定を実施した。機械的性質は密度の影響を受けるため、5%燃料ではU-Pu-Zr燃料に比べて小さい値を示した。これは、5%燃料がU-Pu-Zr燃料に比べてもろいことに対応している。

温度勾配下での元素再分布

金属燃料に特有の燃料挙動として、照射中に燃料成分が径方向に再分布することが知られている。再分布により、融解温度の異なる領域が形成されたり、被覆管との反応機構が異なる可能性がある。そこで、マイナーアクチニド-希土類元素含有燃料とU-Pu-Zr燃料の再分布挙動を棒状試料の温度勾配下での焼鈍試験により調べた。

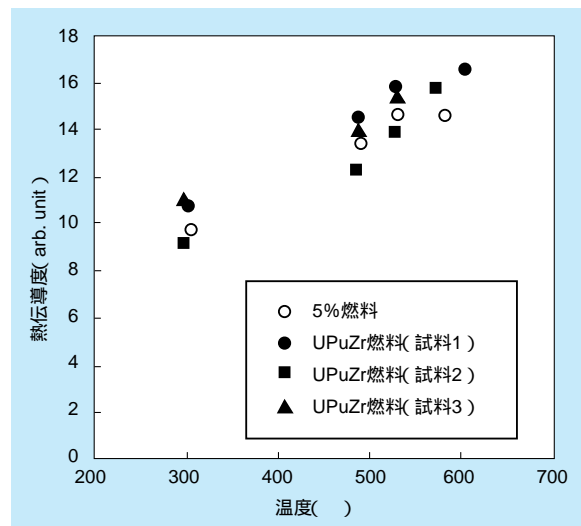


図14-2-3 U-Pu-Zr燃料と5%燃料の熱伝導度の比較

*4 ヤング率：材料の伸び変形において、かかる応力と歪みの間に比例関係が成立する場合、その比例定数をヤング率という。

*5 ポアソン比：材料をある方向に引っ張る場合、それと垂直な方向には縮む。かかる応力と変形が比例関係にある場合の伸びと縮みの比率をポアソン比という。

図14-2-4にU-Pu-Zr燃料の焼鈍後の金相写真と α -オートラジオグラフィ*6を示す。この燃料では、Puの濃度分布を示す α -オートラジオグラフィの濃淡は、ほぼ均一であった。

図14-2-5に5%燃料の焼鈍後の α -オートラジオグラフィを示す。Amを添加したこれらの試料では、 α -オートラジオグラフィの白色部位はアメリウム存在を示す。700℃以上の領域でアメリウム-プルトニウム-希土類元素の析出相の粒径が大きくなったことが観察された。

燃料 - 被覆管の両立性

金属燃料と被覆管が接触すると合金同士の相互反応により、融点の低い領域(共晶反応領域)が形成され、燃料設計に影響を与える可能性がある。これを調べるために、U-Pu-Zr燃料と5%燃料をそれぞれステンレス鋼ではさみ、熱分析を実施した。

いずれの燃料でも測定された共晶温度は燃料主成分のウランと被覆管主成分の鉄の共晶温度(725℃)とほぼ等しかった。これより5%のマイナーアクチニドを添加してもU-Pu-Zr燃料とステンレス鋼の反応に大きく影響しないことが分かる。しかし、マイナーアクチニド-希土類元素含有燃料に含まれるアメリウム-プルトニウム-希土類元素の析出相と被覆管の共晶温度は状態図などから約600℃と推定される。このため、その共晶反応については今後の詳細な検討が必要である。

また、U-Pu-Zr燃料の被覆管としては、オーステナイト系ステンレス鋼よりニッケル含有量の少ないフェライト系ステンレス鋼が適していることが知られているが、今回の試験で得られたマイナーアクチニド-RE燃料の共晶反応領域中にもニッケルが多く混入しているため、マイナーアクチニド-希土類元素含有燃料についてもフェライト系の被覆管が適している。

マイナーアクチニドのナトリウム中の溶解度

5%燃料をフェライト系およびオーステナイト系のステンレス容器に入れた液体ナトリウム中に浸し、約500℃に加熱して二日間放置した後に、ナトリウム中の

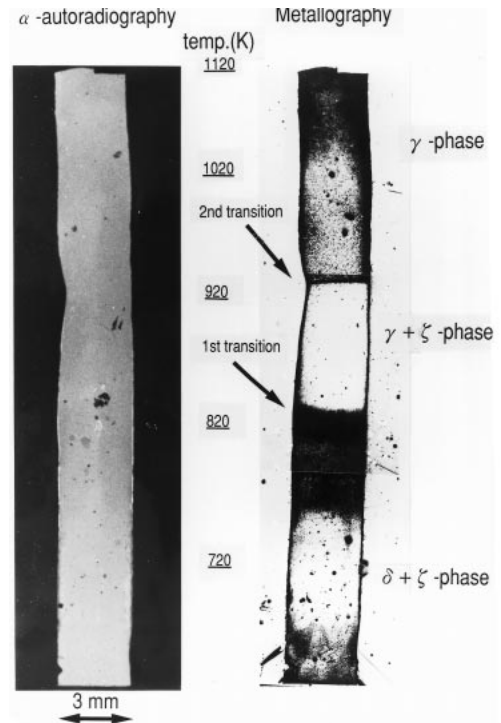


図14-2-4 U-Pu-Zr燃料と5%燃料の温度勾配焼鈍試験後の α -オートラジオグラフィ

プルトニウム、アメリシウム、キュリウム溶解度を放射能測定により求めた。ナトリウム中のアクチニド元素の溶解度はいずれも極めて小さかった。

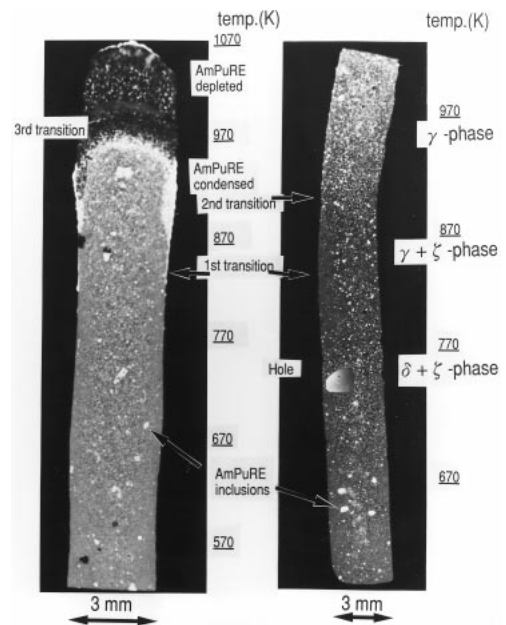


図14-2-5 U-Pu-Zr燃料棒

*6 α -オートラジオグラフィ: PuやAm等の放射線を発生する元素を感光板の上に配置すると、それらの存在部位が白く感光する。この原理を利用したのが α -オートラジオグラフィである。

14-2-2 マイナーアクチニド(マイナーアクチニド)含有金属燃料のフェニックス炉における照射試験

当研究所では、当所の開発した金属燃料炉心を用いたマイナーアクチニドの消滅率解析コードを検証し、また、マイナーアクチニド含有燃料の照射下での燃料挙動を調べるために、高速原型炉フェニックス(フランス)を用いた照射試験を計画している。燃料組成として、炉心の安定性、マイナーアクチニドの混合性、燃料特性の炉外試験などから、U-Pu-Zr燃料に影響を与えないマイナーアクチニド濃度を持つ以下の三つを選定し、照射試験用の燃料スラグを試作した。

U-Pu-Zr + 5%マイナーアクチニド + 5%RE

U-Pu-Zr + 2%マイナーアクチニド + 2%RE

U-Pu-Zr + 5%マイナーアクチニド

また、これらとの比較用にU-Pu-Zr合金を製造した。

図14-2-6 に照射試験用の燃料ピンの模式図をフェニックス炉の通常燃料ピンと比較して示す。今回入手したマイナーアクチニド量に制限があったため、マイナーアクチニド含有燃料は燃料ピンの一部に装荷した(長さ10cm)。また、上の と の試験用燃料スラグは長さを5cmずつとして1本の燃料ピン中に装荷した。燃料ピンの出力を調整するために、試験用燃料スラグの上下をU-Pu-Zr燃料でサンドイッチした。

5%燃料を装荷した燃料ピン、2%燃料を装荷した燃料ピン、及び、U-Pu-Zrのみを装荷した燃料ピンを、それぞれ3本ずつ製作し、これを16本の酸化物のドライバ燃料ピンと共に照射試験用カプセルに図14-2-6 のように装荷した。カプセルは3個用意し、それぞれ燃焼初期、中期、末期の消滅率や燃料挙動を調べるために、燃焼度1.5、6、10at.%まで燃焼させることとした。

また、マイナーアクチニド含有金属燃料をフェニックス炉で照射するために、安全性評価に関する事前解析を

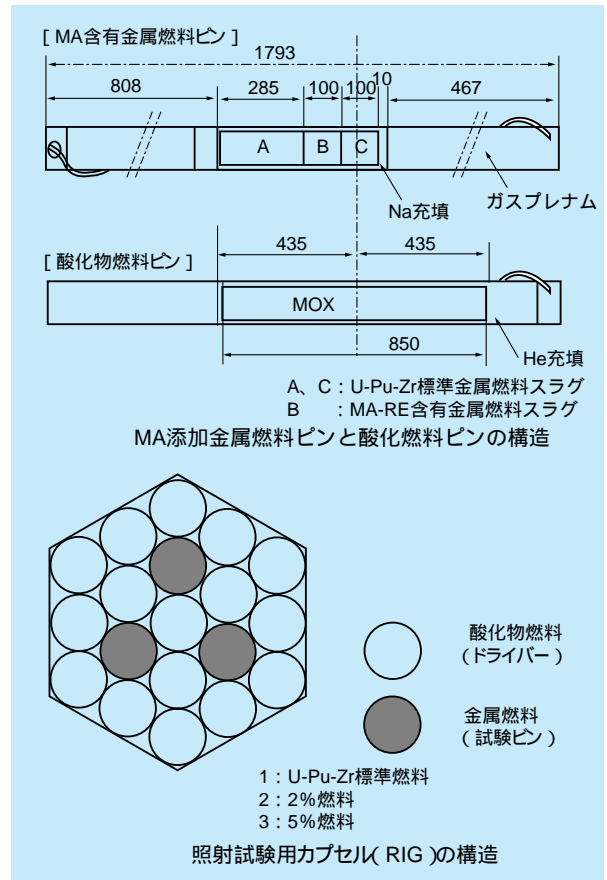


図14-2-6 照射試験用MA含有燃料棒の模式図と照射試験用リグの模式図

実施した。定格運転では、燃料棒中心温度、被覆管温度、中性子による被覆管損傷度がいずれもフェニックス炉の許容値を常に下回ることを確認している。制御棒引き抜き事故、被覆管破損事故、仮想炉心事故のを想定した三つの過渡時事象においてもマイナーアクチニド含有燃料はフェニックス炉の安全性に影響を及ぼさないことも確認している。

フェニックス炉の運転に関するフランスの事情、及び金属燃料の輸送に関するドイツの事情により照射試験は、当初平成7年より開始する予定であったが延期され、現在時点では平成12年度より照射を開始する予定である。