

プルトニウム多重リサイクルによる 同位体組成変化の解析

1997年10月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-13, Japan.

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

プルトニウム多重リサイクルによる 同位体組成変化の解析

小藤 博英*、 小野 清*

要 旨

軽水炉を利用したプルトニウムリサイクルが検討されている中、複数回のリサイクルによるプルトニウムの同位体組成の劣化が懸念されている。

一方、高速増殖炉（FBR）や高速炉（FR）の特性として、同位体組成が劣化したプルトニウムの有効利用方策としての価値が注目されている。

本報告書では、原子炉単基としてのプルトニウム同位体組成の変化に関する特徴をとらえるために幾つかのリサイクルパターンを想定して、概略的な解析を行った。

軽水炉プルサーマルのみを用いてプルトニウムの多重リサイクルを行うと、核分裂性プルトニウム割合の低下等の同位体組成の劣化が顕著であるが、FBRの炉心燃料とブランケット燃料を利用することにより同位体組成の回復傾向が示された。また、FRにおいては、軽水炉やプルサーマルとある一定の基数割合を構成することにより、定常的なプルトニウム消費を継続できることが示された。

FBRの存在意義としては天然ウラン資源の有効利用等種々のメリットが挙げられるが、その内の一つとしてプルトニウムの同位体組成の劣化への対応策としての価値が見い出されたと言える。

*大洗工学センター システム開発推進部 新型炉サイクル解析室

Transition of Plutonium isotopic composition by multi-recycling

Hirohide Kofuji*, Kiyoshi Ono*

Abstract

The degradation of Plutonium isotopic composition is suggested by the multi-recycling in the LWR. On the other hand, it is expected that FBR or FR has some advantages from the view point of the use of the degraded Plutonium. In this report, the Plutonium mass flow was calculated on some scenarios focused on the trend of the Plutonium isotopic composition through several times recycling.

As the results, the Plutonium composition was remarkably degraded in the case of LWR only recycling, however it would be recovered by using both the FBR core and the blanket fuels. In the case of FR recycling, Plutonium can be consumed steadily by using one ratio of LWR, LWR(Pu) and FR.

Though the FBR system has some merits, for example saving the natural Uranium resource, it became clear that the FBR can be used for the purpose of using degraded Plutonium.

*Advanced Reactor and Fuel Cycle Development Section, System Engineering Division, O-arai Engineering Center

目 次

	Page
1. はじめに	1
2. シナリオの設定	1
3. 解析条件と解析手法	3
3-1 炉型	3
3-2 炉特性	3
3-3 燃料サイクル	4
3-4 解析手法	4
4. 解析結果	8
4-1 シナリオ①（プルサーマル多重リサイクル）	8
4-2 シナリオ②（FBR多重リサイクル）	12
4-3 シナリオ③（プルサーマルとFBRによる交互リサイクル）	16
4-4 シナリオ④（FRにて多重リサイクル）	20
5. 考察	23
6. まとめ	24
7. 謝辞	25
8. 参考文献	26
付録1 プルサーマル及びFRの炉特性作成方法	27
付録2 FBR及びFRの物質収支について	35
付録3 リサイクル計算の概要	48

図目次

	Page
図2-1 プルサーマル多重リサイクル	1
図2-2 FBR多重リサイクル	2
図2-3 交互リサイクル	2
図2-4 FR多重リサイクル	3
図4-1 装荷燃料中のPu-f率（シナリオ①）	8
図4-2 装荷燃料のPu富化度（シナリオ①）	9
図4-3 FBR装荷燃料中のPu-f率（シナリオ②）	12
図4-4 FBR装荷燃料のPu富化度（シナリオ②）	13
図4-5 Pu-f率の変化（シナリオ③）	16
図4-6 装荷燃料のPu富化度の比較（シナリオ③）	17
図4-7 基数バランス（シナリオ③）	17
図4-8 FR装荷燃料中のPu-f率（シナリオ④）	21
図4-9 FR装荷燃料のPu富化度（シナリオ④）	21
図4-10 基数バランス（シナリオ④）	21
 図-付1 Pu-f率に対する装荷Pu富化度	 27
図-付2 Pu-239の増減率	28
図-付3 Pu-f率に対する装荷Pu富化度（PWR4.8万MWd/t）	29
図-付4 核種増減率（PWR4.8万MWd/t）	29
図-付5 Pu-f率に対する装荷Pu富化度（BWR4.5万MWd/t）	30
図-付6 核種増減率（BWR4.5万MWd/t）	30
図-付7 Pu-f率に対する装荷Pu富化度（PWR3.3万MWd/t）	31
図-付8 核種増減率（PWR3.3万MWd/t）	31
図-付9 Pu-f率に対する装荷Pu富化度（BWR3.0万MWd/t）	32
図-付10 核種増減率（BWR3.0万MWd/t）	32
図-付11 Pu-f率に対する装荷Pu富化度（FR9.0万MWd/t）	33
図-付12 核種増減率（FR9.0万MWd/t）	33
図-付13 リサイクルフロー	49

表目次

	Page
表3-1 炉特性データ	5
表4-1 PWR4.8万MWd/tのPu組成変化	10
表4-2 PWR3.3万MWd/tのPu組成変化	10
表4-3 BWR4.5万MWd/tのPu組成変化	11
表4-4 BWR3.0万MWd/tのPu組成変化	11
表4-5 FBR炉心燃料のPu組成変化1	14
表4-6 FBR炉心燃料のPu組成変化2	14
表4-7 FBR炉心燃料のPu組成変化3	15
表4-8 FBR炉心燃料のPu組成変化4	15
表4-9 LWR及びFBRのPu組成変化（炉心とブランケットを利用）	18
表4-10 LWR及びFBRのPu組成変化（炉心のみ利用）	19
表4-11 FR炉心のPu組成変化	22
表-付1 Pu富化度及び増減率設定に用いた燃焼計算結果	34

プルトニウム多重リサイクルによる同位体組成変化の解析

1.はじめに

プルサーマルによりPuを多重リサイクルする場合、燃焼に伴うPu同位体組成の劣化（Pu同位体組成の高次化に伴う核分裂性Pu割合の減少）が顕著であり、炉心の安全性や燃料サイクル施設での燃料の取扱いの観点からもたらされるリサイクル回数の限界についてしばしば議論されている。一方FBRでは、炉心燃料と核分裂性Pu割合（Pu-f率）が高いブランケット燃料を混合してリサイクルする事による「Pu組成の回復効果」が期待されている。

本報告では、Pu同位体の組成変化に着目して、プルサーマルのみで多重リサイクルを行う場合と、高速増殖炉（FBR）あるいはPu燃焼高速炉（FR）を活用する場合の諸量解析結果を述べる。

2.シナリオの設定

解析においては、軽水炉（LWR）、軽水炉プルサーマル、高速増殖炉（FBR）、高速炉（FR）の4つの炉型を考慮して、以下の4つのリサイクルシナリオを設定した。

- ①プルサーマルにて多重リサイクル
- ②FBRにて多重リサイクル
- ③プルサーマルとFBRによる交互リサイクル
- ④FRにて多重リサイクル

各シナリオにおける解析の主眼は以下の3点である。

- ・装荷及び取出燃料のPu同位体組成
- ・装荷及び取出燃料の核分裂性Pu割合（Pu-f率）
- ・装荷燃料のPu富化度

以下に各シナリオの概念を示す。

①プルサーマルにて多重リサイクル

シナリオ①の多重リサイクルモードを図2-1に示す。

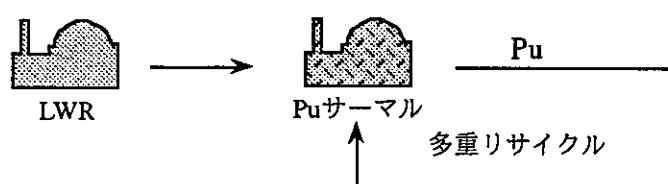


図2-1 プルサーマル多重リサイクル

LWR使用済燃料から得られたPuをプルサーマルにて多重リサイクルする。リサイクル回数の増加に伴い、Pu同位体組成は劣化（Puの高次化に伴う核分裂性Pu割合の低下）していくことが想定される。

②FBRにて多重リサイクル

シナリオ②のリサイクルモードを図2-2に示す。

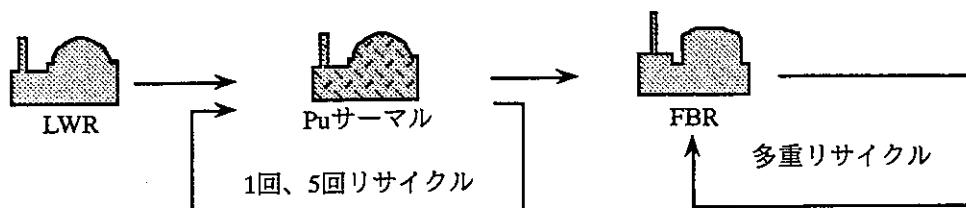


図2-2 FBR多重リサイクル

LWR使用済燃料から得られたPuはプルサーマルにて複数回リサイクルされた後、同位体組成が劣化したPuはFBRにて多重リサイクルされる。プルサーマルでのリサイクル回数は、1回と複数回の代表として5回を想定した。FBRでのリサイクルは炉心燃料のみを再処理する場合と炉心燃料とブランケット燃料を混ぜて再処理する場合を想定した。

③プルサーマルとFBRによる交互リサイクル

シナリオ③のリサイクルモードを図2-3に示す。

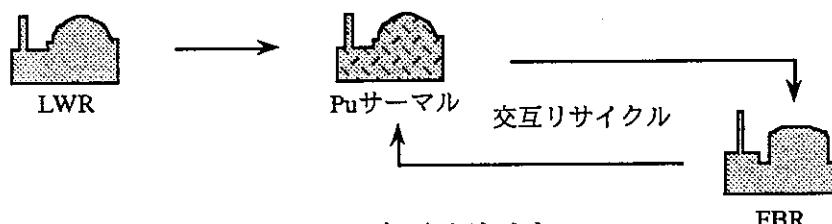


図2-3 交互リサイクル

軽水炉使用済燃料から得られたPuは、プルサーマルとFBRに交互にリサイクルされる。FBRでは炉心燃料のみを再処理する場合と炉心燃料とブランケット燃料を混ぜて再処理する場合を想定した。FBRの炉心燃料とブランケット燃料を混ぜてリサイクルを行う場合は、プルサーマルにて劣化したPuの同位体組成がFBRにて回復される事を繰り返し、数回のリサイクルの後にある一定の同位体組成となる事が期待される。

④FBRにて多重リサイクル

シナリオ④のリサイクルモードを図2-4に示す。

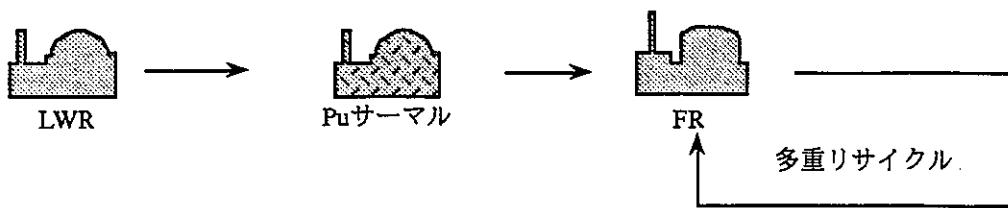


図2-4 FR多重リサイクル

LWR使用済燃料から得られたPuはプルサーマルにリサイクルされた後、FRにて多重リサイクルされる。本シナリオではプルサーマルにて同位体組成が劣化したPuを燃焼する目的でFRを導入している。

3. 解析条件と解析手法

解析においては幾つかの条件を想定している。以下に主な条件を示す。

3-1 炉型

各シナリオではそれぞれ以下の炉型を考慮した。

- シナリオ①:
 - ・ PWR (燃焼度3.3万及び4.8万MWd/t)
 - ・ BWR (燃焼度3.0万及び4.5万MWd/t)
 - ・ プルサーマルは上記のPWR及びBWRにおいて1/3MOX炉心とした。
ただし、LWRとプルサーマルの炉型及び燃焼度は同一のものを用いると仮定した。例えば、4.8万MWd/tのPWRから得られたPuは4.8万MWd/tのPWRプルサーマルへ装荷されることとなる。
- シナリオ②:
 - ・ PWR (燃焼度4.8万MWd/t)
 - ・ プルサーマル (燃焼度4.8万MWd/tのPWR、1/3MOX炉心)
 - ・ FBR (燃焼度15万MWd/tの大型実用炉タイプ)
- シナリオ③:
 - ・ PWR (燃焼度4.8万MWd/t)
 - ・ プルサーマル (燃焼度4.8万MWd/tのPWR、1/3MOX炉心)
 - ・ FBR (燃焼度15万MWd/tの大型実用炉タイプ)
- シナリオ④:
 - ・ PWR (燃焼度4.8万MWd/t)
 - ・ プルサーマル (燃焼度4.8万MWd/tのPWR、1/3MOX炉心)
 - ・ FR (燃焼度9万MWd/tの試設計による)

3-2 炉特性

- 電気出力
 - ・ 全炉型の物量は電気出力による比例換算で100万kWeに統一
- 稼働率
 - ・ 全炉型100%換算で使用

- 物質収支
- ・原子炉の平衡装荷及び平衡取出燃料量を用いた。
 - ・参考とした炉特性を表3-1に示す。
 - ・Puを多重リサイクルすることにより、リサイクル毎に原子炉に装荷するPuの組成が変化する。これにより、装荷燃料のPu富化度が変化し、また燃焼によるPu同位体毎の生成、消滅量も変化する。これらを正確に計算するには、リサイクル毎に燃焼計算を行う事が必要であるが、ここでは、Pu組成の大まかな変化の傾向を見ることが目的であるため、Pu富化度と同位体の燃焼による増減量を簡易的に算出した。算出方法の詳細は付録1に示す。
 - ・なお、FBRについては、リサイクル毎に燃焼計算を行い、装荷及び取出燃料組成を求めた。
 - ・ブルサーマルの転換比は1以下であることから、燃焼によりPuが減少し、次回の装荷燃料分のPuをまかなうことはできないが、不足分は同一組成のPuが供給されるとしてリサイクルを進めることとした。（シナリオ①、②）
- 出典
- ・軽水炉及びFBRの炉特性は、「動燃技報No.91」および、技術資料「PNC ZN9410 91-143 炉型・サイクル戦略の策定」や、動燃事業団内部計算を基に作成した。
 - ・FRの炉特性は、動燃事業団において実施したPuの燃焼効率の向上を図った試設計を基に作成した。

3-3 燃料サイクル

- 再処理
- ・再処理の時点でブルサーマルのUO₂燃料部分とMOX燃料部分は混合された。また、Puの回収率は100%、マイナーアクチニドは回収されないこととした。
- ロス率
- ・再処理及び燃料製造工程におけるロス率は考慮していない。
- 炉外時間
- ・軽水炉サイクルの炉外サイクル期間は6年（使用済燃料の冷却が4年、再処理及び燃料製造から原子炉への装荷までが2年）と仮定した。
- 核種の崩壊
- ・炉外サイクル期間中のPuの崩壊は全ての同位体について考慮した。²⁴¹Amについては、再処理の時点で除去されるが、再処理以降²⁴¹Puの崩壊により生成され、そのまま原子炉へ装荷される。

3-4 解析手法

リサイクル計算は、100万kWe相当の原子炉1基当たりの年間の装荷及び取出燃料量を基本として行った。Puの炉への装荷量と取出量は装荷するPuの組成により大きく異なることからリサイクル毎の燃焼計算が望まれるが、本評価では膨大な量の計算を

表3-1 炉特性データ (1/3)

項目	PWR	BWR	PWR	BWR
電気出力 (万kWe)	100	100	100	100
燃焼度(MWd/t)	33000	30000	48000	45000
バッチ数	3	3	3	3
稼働率 (%)	100%	100%	100%	100%
燃料領域				
平衡装荷燃料				
重金属 (トン/年)	32.5	36.4	22.4	24.3
ウラン (トン/年)	32.5	36.4	22.4	24.3
プルトニウム (トン/年)				
核分裂性プルトニウム (トン/年)				
ウラン濃縮度 (%)	3.20%	2.90%	4.35%	3.94%
平衡取出燃料				
重金属 (トン/年)	31.4	35.3	21.2	23.1
ウラン (トン/年)	31.1	35.0	21.0	22.9
プルトニウム (トン/年)	0.305	0.307	0.249	0.245
核分裂性プルトニウム (トン/年)	0.214	0.212	0.169	0.160
ウラン濃縮度 (%)	0.83%	0.74%	0.90%	0.74%

表3-1 炉特性データ (2/3)

項目	PWR-Pu※ 1/3MOX		BWR-Pu※ 1/3MOX		PWR-Pu※ 1/3MOX		BWR-Pu※ 1/3MOX	
	UO ₂	MOX						
電気出力 (万kWe)	100		100		100		100	
燃焼度(MWd/t)	33000		30000		48000		45000	
バッチ数	3		3		3		3	
稼働率 (%)	100%		100%		100%		100%	
燃料領域	UO ₂	MOX						
平衡装荷燃料								
重金属 (トシ/年)	21.7	10.8	24.3	12.1	14.9	7.5	16.2	8.1
ウラン (トシ/年)	21.7		24.3		14.9		16.2	
プルトニウム (トシ/年)		0.692		0.685		0.834		0.910
核分裂性プルトニウム (トシ/年)		0.480		0.467		0.554		0.584
ウラン濃縮度 (%)	3.20%	0.71%	2.90%	0.71%	4.35%	0.71%	3.94%	0.71%
平衡取出燃料								
重金属 (トシ/年)	20.9	10.5	23.5	11.7	14.2	7.1	15.4	7.7
ウラン (トシ/年)	20.7		23.3		14.0		15.3	
プルトニウム (トシ/年)	0.203	0.552	0.205	0.538	0.166	0.650	0.163	0.708
核分裂性プルトニウム (トシ/年)	0.143	0.337	0.141	0.314	0.112	0.386	0.107	0.399
ウラン濃縮度 (%)	0.83%		0.74%		0.90%		0.74%	

※それぞれ1回目のリサイクル時の数値である

表3-1 炉特性データ (3/3)

項目	FBR※			FR※
	炉心	軸ピラ	径ピラ	
電気出力 (万kWe)	100			100
燃焼度(MWd/t)	150000			90000
バッチ数	5 / 3			6
稼働率 (%)	100%			100%
燃料領域	炉心	軸ピラ	径ピラ	炉心
平衡装荷燃料				
重金属 (トソ/年)	5.52	4.49	3.80	10.4
ウラン (トソ/年)	4.44	4.49	3.80	6.95
プルトニウム (トソ/年)	1.073			3.414
核分裂性プルトニウム (トソ/年)	0.638			2.029
ウラン濃縮度 (%)	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%
平衡取出燃料				
重金属 (トソ/年)	5.09	4.46	3.80	9.46
ウラン (トソ/年)	4.06	4.34	3.76	6.5
プルトニウム (トソ/年)	1.008	0.118	0.040	2.898
核分裂性プルトニウム (トソ/年)	0.593	0.110	0.039	1.577
ウラン濃縮度 (%)	0.19%	0.24%	0.27%	0.19%

※PWRプルサーマル4.8万MWd/tからの取出Puを利用した場合

避けるため、軽水炉とFRに関しては、過去の燃焼計算結果を用いて、Pu-f率を基に内挿にて求めた。

炉特性データの作成と燃料サイクルフローの詳細は付録1及び付録3に、FBR及びFRの燃焼計算の基準とした炉の物質収支を付録2に示した。

4.解析結果

シナリオ毎の解析結果を以下に示す。

4-1 シナリオ①（プルサーマル多重リサイクル）

リサイクル回数の増加に伴い、装荷燃料中のPu-f率は著しく低下する。当然のことながら、燃焼度が高い方がPu-f率の低下は大きい。プルサーマル装荷燃料のPu富化度に上限がないものとしてリサイクルを続けると、図4-1に示した様にリサイクル5回目の装荷MOX燃料中のPuのPu-f率は45～55%程度となる。

Pu同位体組成の劣化に伴い、装荷燃料に必要なPu量（Pu富化度）は増加していく。図4-2に示したように、燃焼度4.8万MWd/tのPWRではリサイクル5回目の装荷燃料のPu富化度は25%程度となる。装荷燃料のPu富化度が高くなる原因は、主に、中性子吸收反応により親物質である²⁴⁰Pu及び²⁴²Puが増加するとともに、高次化に伴い²⁴¹Puが増え、その崩壊に伴い²⁴¹Amが増加することにある。

また、リサイクル回数が増えるに従って²³⁸Puが増加（3～5%）し、燃料製造上の除熱が問題となると考えられる。

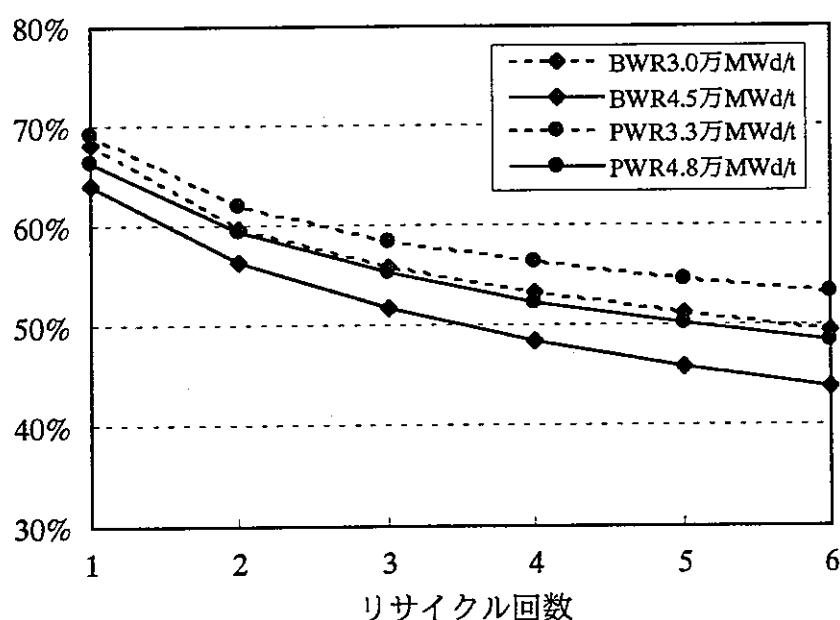


図4-1 装荷燃料中のPu-f率（シナリオ①）

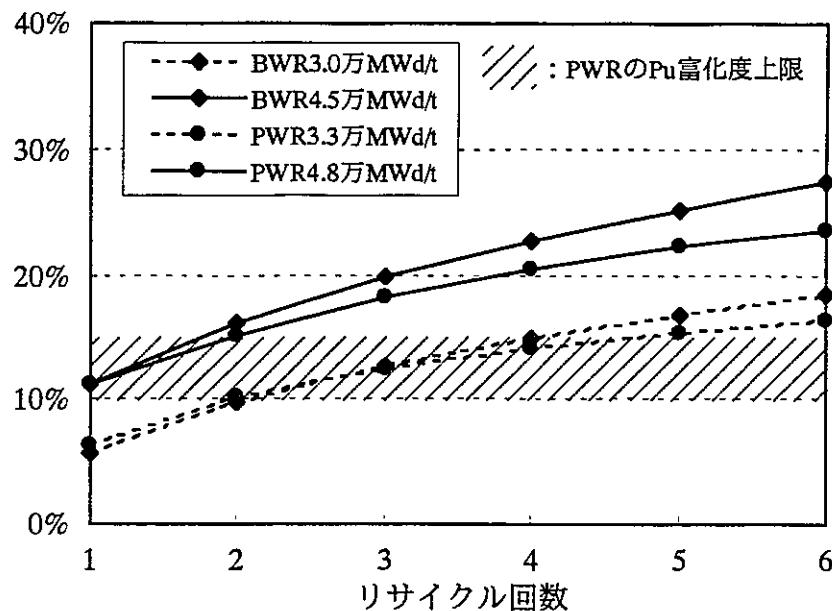


図4-2 装荷燃料のPu富化度（シナリオ①）

この様に、プルサーマル単独でプルトニウムのリサイクルを繰り返す場合、Pu-f率の低下は著しく、それに伴い、装荷燃料に必要なプルトニウム富化度は増加していく。プルサーマルの装荷MOX燃料のPu富化度の上限は主に炉心特性の観点から10～15%程度^{1) 2)}と言われており、このためリサイクル回数が1～2回に制限される結果となる。

PWRを中心としたPuリサイクルの検討^{1) 2)}では、Pu富化度の限界の原因として、以下の3点が挙げられている。

- 1) ^{238}Pu と ^{242}Pu の生成
- 2) Pu富化度を上げることによりボイド係数が正となる
- 3) Am、Cm等高次のアクチニド核種の生成

リサイクル回数毎の装荷及び取出燃料組成の変化を表4-1～4-4に示す。

表4-1 PWR4.8万MWd/tのPu組成変化

		リサイクル回数						
		0	1	2	3	4	5	6
装荷燃料								
Pu富化度		11.2%	15.2%	18.2%	20.5%	22.3%	23.7%	
Pu-f富化度		7.4%	9.0%	10.1%	10.7%	11.2%	11.5%	
Pu量 (t)		0.834	1.132	1.357	1.528	1.661	1.765	
組成 (%)	Pu-238	1.9%	3.0%	4.0%	4.7%	5.1%	5.4%	
	Pu-239	54.2%	45.3%	40.9%	38.1%	35.9%	34.1%	
	Pu-240	24.5%	29.1%	31.6%	33.4%	34.8%	35.9%	
	Pu-241	11.5%	13.3%	13.6%	13.6%	13.6%	13.8%	
	Pu-242	6.8%	7.9%	8.5%	8.9%	9.2%	9.4%	
	Am-241	1.2%	1.3%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	
Pu-f率 (%)		66.4%	59.4%	55.3%	52.4%	50.2%	48.6%	
取出燃料								
Pu量		0.249	0.650	0.928	1.139	1.303	1.432	1.535
組成 (%)	Pu-238	1.9%	3.3%	4.3%	5.0%	5.5%	5.8%	6.0%
	Pu-239	52.5%	40.9%	36.5%	33.8%	31.7%	30.0%	28.6%
	Pu-240	23.8%	28.8%	31.2%	32.8%	34.1%	35.1%	36.0%
	Pu-241	14.8%	17.5%	17.7%	17.6%	17.6%	17.7%	17.9%
	Pu-242	6.6%	7.8%	8.4%	8.8%	9.0%	9.2%	9.3%
	Am-241	0.5%	1.7%	1.9%	2.0%	2.1%	2.2%	2.2%
Pu-f率 (%)		67.7%	59.4%	55.2%	52.4%	50.3%	48.8%	47.5%

表4-2 PWR3.3万MWd/tのPu組成変化

		リサイクル回数						
		0	1	2	3	4	5	6
装荷燃料								
Pu富化度		6.4%	10.2%	12.5%	14.1%	15.4%	16.4%	
Pu-f富化度		4.4%	6.3%	7.3%	8.0%	8.4%	8.8%	
Pu量 (t)		0.692	1.107	1.351	1.531	1.671	1.783	
組成 (%)	Pu-238	0.9%	1.7%	2.4%	2.9%	3.4%	3.7%	
	Pu-239	57.9%	47.7%	43.8%	41.4%	39.7%	38.3%	
	Pu-240	24.3%	28.8%	30.8%	32.0%	33.0%	33.8%	
	Pu-241	10.6%	13.4%	14.0%	14.1%	14.2%	14.3%	
	Pu-242	5.2%	7.0%	7.7%	8.1%	8.3%	8.4%	
	Am-241	1.1%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	
Pu-f率 (%)		69.3%	62.0%	58.6%	56.3%	54.7%	53.4%	
取出燃料								
Pu量		0.305	0.552	0.934	1.166	1.339	1.477	1.588
組成 (%)	Pu-238	0.9%	2.0%	2.7%	3.3%	3.7%	4.0%	4.3%
	Pu-239	56.3%	41.9%	38.6%	36.5%	34.9%	33.7%	32.7%
	Pu-240	23.6%	29.1%	30.6%	31.7%	32.5%	33.3%	33.9%
	Pu-241	13.7%	18.5%	18.6%	18.7%	18.7%	18.7%	18.8%
	Pu-242	5.1%	7.3%	7.9%	8.2%	8.3%	8.4%	8.4%
	Am-241	0.4%	1.2%	1.6%	1.7%	1.8%	1.9%	1.9%
Pu-f率 (%)		70.3%	61.1%	58.2%	56.1%	54.6%	53.4%	52.5%

表4-3 BWR4.5万MWd/tのPu組成変化

	リサイクル回数						
	0	1	2	3	4	5	6
装荷燃料							
Pu富化度		11.2%	16.3%	19.8%	22.7%	25.3%	27.4%
Pu-f富化度		7.2%	9.2%	10.3%	11.0%	11.6%	12.0%
Pu量 (t)	0.910	1.316	1.604	1.841	2.044	2.221	
組成 (%)							
Pu-238	2.0%	3.4%	4.4%	5.1%	5.5%	5.9%	
Pu-239	52.6%	43.4%	39.0%	35.9%	33.5%	31.5%	
Pu-240	26.4%	31.4%	34.3%	36.5%	38.2%	39.6%	
Pu-241	10.9%	12.3%	12.2%	12.0%	11.9%	11.8%	
Pu-242	7.1%	8.2%	8.9%	9.4%	9.7%	10.0%	
Am-241	1.1%	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%	
Pu-f率 (%)	64.2%	56.4%	51.8%	48.5%	45.9%	43.8%	
取出燃料							
Pu量	0.245	0.708	1.084	1.356	1.585	1.785	1.960
組成 (%)							
Pu-238	2.0%	3.7%	4.7%	5.4%	5.9%	6.2%	6.4%
Pu-239	50.8%	39.2%	34.9%	32.1%	29.8%	28.0%	26.4%
Pu-240	25.5%	31.0%	33.6%	35.7%	37.3%	38.7%	39.8%
Pu-241	14.1%	16.0%	15.7%	15.3%	15.1%	15.0%	15.0%
Pu-242	6.9%	8.1%	8.7%	9.1%	9.4%	9.7%	9.9%
Am-241	0.7%	2.0%	2.4%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%
Pu-f率 (%)	65.4%	56.3%	51.8%	48.6%	46.1%	44.1%	42.5%

表4-4 BWR3.0万MWd/tのPu組成変化

	リサイクル回数						
	0	1	2	3	4	5	6
装荷燃料							
Pu富化度		5.6%	9.8%	12.6%	14.9%	16.8%	18.4%
Pu-f富化度		3.8%	5.8%	7.1%	7.9%	8.6%	9.1%
Pu量 (t)	0.685	1.190	1.533	1.810	2.042	2.237	
組成 (%)							
Pu-238	0.9%	1.8%	2.6%	3.3%	3.8%	4.1%	
Pu-239	57.3%	46.3%	42.1%	39.6%	37.9%	36.4%	
Pu-240	25.6%	30.8%	33.0%	34.6%	35.9%	37.0%	
Pu-241	10.1%	12.7%	13.1%	13.0%	12.7%	12.5%	
Pu-242	5.1%	7.2%	7.9%	8.2%	8.5%	8.6%	
Am-241	1.0%	1.3%	1.3%	1.3%	1.3%	1.3%	
Pu-f率 (%)	68.1%	59.7%	56.0%	53.3%	51.3%	49.6%	
取出燃料							
Pu量	0.307	0.538	1.001	1.327	1.595	1.822	2.017
組成 (%)							
Pu-238	0.9%	2.1%	2.9%	3.6%	4.1%	4.5%	4.7%
Pu-239	55.7%	40.0%	37.0%	35.0%	33.5%	32.3%	31.2%
Pu-240	24.9%	31.3%	32.8%	34.1%	35.3%	36.4%	37.3%
Pu-241	13.0%	17.4%	17.4%	17.0%	16.5%	16.2%	16.1%
Pu-242	5.0%	7.6%	8.0%	8.3%	8.4%	8.5%	8.6%
Am-241	0.5%	1.5%	1.9%	2.1%	2.1%	2.2%	2.2%
Pu-f率 (%)	69.1%	58.4%	55.4%	53.1%	51.1%	49.6%	48.3%

4-2 シナリオ② (FBR多重リサイクル)

燃焼度4.8万MWd/tのPWRにて1回及び同位体組成が劣化した例として5回リサイクルを行った後のPuをFBRにて多重リサイクルする場合のPu-f率の変化を図4-3に示した。ここで想定したFBRは燃焼度約15万MWd/tの大型炉心である。

FBRの炉心のみを利用してリサイクルを行う場合はリサイクル回数の増加に伴い、Pu-f率はある一定の値（～55%）に近づいてくる。

一方、炉心燃料とブランケット燃料を混合してリサイクルする場合、ブランケット燃料から得られるfissile率の高いPuとの混合によりPuの同位体組成は回復していく、約70%に近づいてくる。これは、低燃焼度の軽水炉からの取出燃料とほぼ同程度のPu-f率である。

図4-4に示した様に、FBRの装荷炉心燃料のPu富化度は、ほぼ一定の値（20%前後）で推移する。

リサイクル回数毎の装荷及び取出燃料組成の変化を表4-5～4-8に示す。

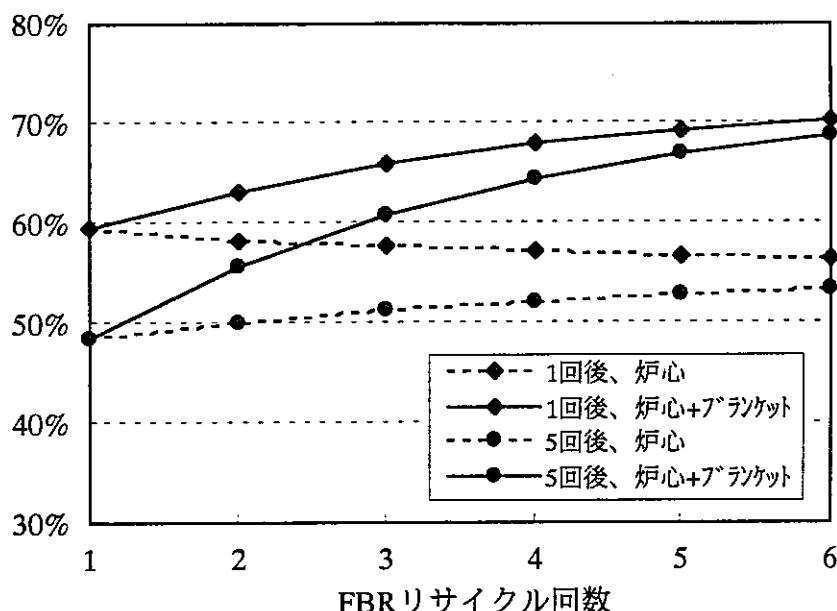


図4-3 FBR装荷燃料中のPu-f率（シナリオ②）

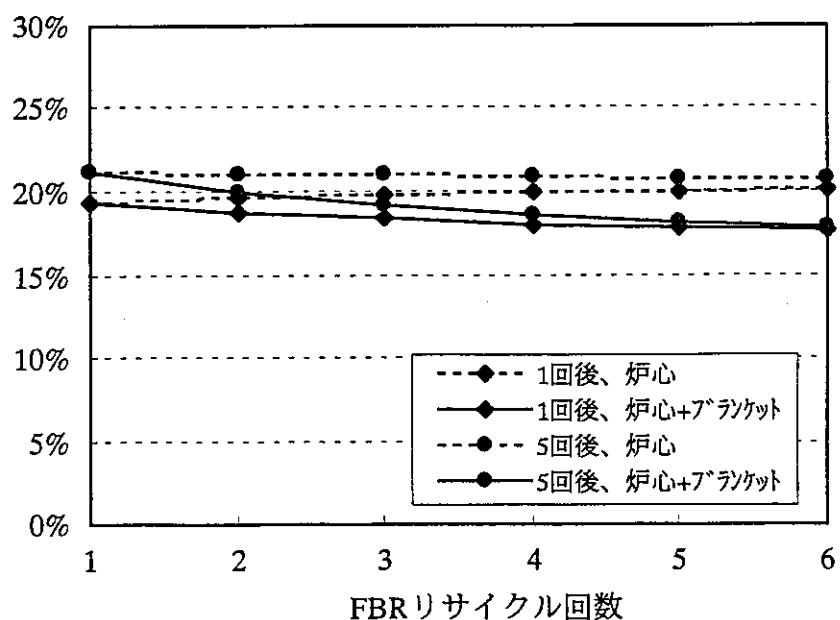


図4-4 FBR装荷燃料のPu富化度（シナリオ②）

表4-5 FBR炉心燃料のPu組成変化1

(4.8万MWd/tのPWRで1回リサイクル後、FBRの炉心のみでリサイクル)

	リサイクル回数						
	0	1	2	3	4	5	6
装荷燃料							
Pu富化度	19.4%	19.7%	19.9%	20.0%	20.1%	20.1%	
Pu-f富化度	11.5%	11.5%	11.4%	11.4%	11.4%	11.4%	
Pu量 (t)	1.073	1.088	1.099	1.105	1.110	1.112	
組成 (%)							
Pu-238	3.0%	2.1%	1.4%	1.0%	0.7%	0.4%	
Pu-239	45.3%	49.4%	51.0%	51.5%	51.6%	51.5%	
Pu-240	29.1%	31.2%	32.7%	34.0%	35.0%	35.7%	
Pu-241	13.3%	8.7%	6.4%	5.4%	4.9%	4.8%	
Pu-242	7.9%	8.2%	8.1%	7.9%	7.6%	7.3%	
Am-241	1.3%	0.4%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%	
Pu-f率 (%)	59.4%	58.3%	57.6%	57.1%	56.7%	56.4%	
取出燃料							
Pu量	0.816	1.008	1.027	1.040	1.047	1.052	1.055
組成 (%)							
Pu-238	3.1%	2.1%	1.4%	1.0%	0.7%	0.4%	0.3%
Pu-239	43.9%	48.1%	50.2%	50.9%	51.0%	50.9%	50.8%
Pu-240	28.2%	30.4%	32.2%	33.5%	34.6%	35.3%	35.9%
Pu-241	17.2%	9.8%	7.3%	6.1%	5.6%	5.4%	5.4%
Pu-242	7.6%	8.0%	8.0%	7.8%	7.5%	7.2%	7.0%
Am-241	0.0%	1.7%	0.9%	0.7%	0.6%	0.6%	0.6%
Pu-f率 (%)	61.1%	58.8%	58.0%	57.4%	57.0%	56.7%	56.5%

表4-6 FBR炉心燃料のPu組成変化2

(4.8万MWd/tのPWRで1回リサイクル後、FBRの炉心+ブランケットでリサイクル)

	リサイクル回数						
	0	1	2	3	4	5	6
装荷燃料							
Pu富化度	19.4%	18.8%	18.4%	18.1%	17.8%	17.6%	
Pu-f富化度	11.5%	11.9%	12.1%	12.3%	12.3%	12.4%	
Pu量 (t)	1.073	1.041	1.016	0.997	0.984	0.974	
組成 (%)							
Pu-238	3.0%	1.8%	1.1%	0.6%	0.3%	0.2%	
Pu-239	45.3%	55.4%	60.9%	64.0%	65.9%	67.0%	
Pu-240	29.1%	27.8%	26.9%	26.4%	26.2%	26.1%	
Pu-241	13.3%	7.5%	4.9%	3.8%	3.3%	3.1%	
Pu-242	7.9%	7.1%	6.0%	5.0%	4.2%	3.5%	
Am-241	1.3%	0.4%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	
Pu-f率 (%)	59.4%	63.2%	65.9%	67.9%	69.3%	70.2%	
取出燃料							
Pu量	0.816	1.008	0.988	0.970	0.955	0.945	0.938
組成 (%)							
Pu-238	3.1%	2.1%	1.2%	0.7%	0.4%	0.2%	0.1%
Pu-239	43.9%	48.1%	54.8%	58.5%	60.7%	62.0%	62.9%
Pu-240	28.2%	30.4%	29.8%	29.4%	29.2%	29.2%	29.1%
Pu-241	17.2%	9.8%	6.5%	5.0%	4.4%	4.1%	4.0%
Pu-242	7.6%	8.0%	6.9%	5.8%	4.8%	4.0%	3.4%
Am-241	0.0%	1.7%	0.8%	0.6%	0.5%	0.4%	0.4%
Pu-f率 (%)	61.1%	58.8%	61.7%	63.9%	65.4%	66.43%	67.16%

表4-7 FBR炉心燃料のPu組成変化3

(4.8万MWd/tのPWRで5回リサイクル後、FBRの炉心のみでリサイクル)

	リサイクル回数						
	0	1	2	3	4	5	6
装荷燃料							
Pu富化度	21.2%	21.1%	21.1%	20.9%	20.8%	20.7%	
Pu-f富化度	10.3%	10.6%	10.8%	10.9%	11.0%	11.1%	
Pu量 (t)	1.175	1.170	1.167	1.157	1.151	1.146	
組成 (%)							
Pu-238	5.4%	3.8%	2.6%	1.8%	1.2%	0.8%	
Pu-239	34.1%	40.5%	44.1%	46.2%	47.5%	48.3%	
Pu-240	35.9%	36.2%	36.4%	36.6%	36.9%	37.1%	
Pu-241	13.8%	9.3%	7.0%	5.8%	5.3%	5.0%	
Pu-242	9.4%	9.8%	9.6%	9.3%	9.0%	8.6%	
Am-241	1.4%	0.5%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	
Pu-f率 (%)	48.6%	50.0%	51.2%	52.1%	52.9%	53.4%	
取出燃料							
Pu量	1.598	1.095	1.097	1.098	1.091	1.087	1.083
組成 (%)							
Pu-238	5.5%	3.8%	2.6%	1.8%	1.2%	0.8%	0.6%
Pu-239	33.0%	39.3%	43.3%	45.5%	46.8%	47.7%	48.2%
Pu-240	34.7%	35.2%	35.8%	36.1%	36.4%	36.6%	36.8%
Pu-241	17.7%	10.4%	7.9%	6.6%	6.0%	5.7%	5.6%
Pu-242	9.1%	9.5%	9.5%	9.2%	8.8%	8.5%	8.1%
Am-241	0.0%	1.8%	0.9%	0.8%	0.7%	0.7%	0.6%
Pu-f率 (%)	50.7%	50.6%	51.7%	52.5%	53.2%	53.8%	54.2%

表4-8 FBR炉心燃料のPu組成変化4

(4.8万MWd/tのPWRで5回リサイクル後、FBRの炉心+ブランケットでリサイクル)

	リサイクル回数						
	0	1	2	3	4	5	6
装荷燃料							
Pu富化度	21.2%	20.1%	19.2%	18.6%	18.2%	17.9%	
Pu-f富化度	10.3%	11.1%	11.7%	12.0%	12.2%	12.3%	
Pu量 (t)	1.175	1.109	1.060	1.027	1.004	0.989	
組成 (%)							
Pu-238	5.4%	3.3%	2.0%	1.1%	0.7%	0.4%	
Pu-239	34.1%	47.2%	55.2%	60.1%	63.2%	65.3%	
Pu-240	35.9%	32.4%	29.9%	28.4%	27.4%	26.8%	
Pu-241	13.8%	8.1%	5.4%	4.1%	3.5%	3.2%	
Pu-242	9.4%	8.5%	7.2%	6.0%	5.0%	4.1%	
Am-241	1.4%	0.4%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	
Pu-f率 (%)	48.6%	55.6%	60.8%	64.4%	66.9%	68.6%	
取出燃料							
Pu量	1.598	1.095	1.046	1.008	0.981	0.962	0.950
組成 (%)							
Pu-238	5.5%	3.8%	2.3%	1.3%	0.8%	0.4%	0.2%
Pu-239	33.0%	39.3%	48.6%	54.2%	57.8%	60.1%	61.6%
Pu-240	34.7%	35.2%	33.1%	31.5%	30.6%	30.0%	29.6%
Pu-241	17.7%	10.4%	7.0%	5.4%	4.6%	4.3%	4.1%
Pu-242	9.1%	9.5%	8.2%	6.9%	5.7%	4.8%	4.0%
Am-241	0.0%	1.8%	0.8%	0.6%	0.5%	0.5%	0.4%
Pu-f率 (%)	50.7%	50.6%	56.1%	60.0%	62.7%	64.6%	65.9%

4-3 シナリオ③（プルサーマルとFBRによる交互リサイクル）

プルサーマルとFBRでPuを交互にリサイクルする場合において、FBRの炉心燃料部分のみを利用する場合と、FBRの炉心燃料とブランケット燃料を混合して利用する場合について、リサイクルの進展に伴うPu-f率の変化を図4-5に示す。図には、比較として4.8万MWd/tのPWRプルサーマル単独でリサイクルを行った場合（シナリオ①）のPu-f率も示した。

同様に、上記の3つのリサイクルパターンにおけるプルサーマルへの装荷MOX燃料のPu富化度を図4-6に示した。

プルサーマル単独での多重リサイクルではPu-f率は下がる一方であるが、FBRと交互にリサイクルすることにより、Pu同位体組成の劣化をさけることができる。

FBRの炉心燃料とブランケット燃料を混ぜてリサイクルに利用する場合は、プルサーマルへの装荷MOX燃料のPu-f率は5回目の装荷時点で61%となりその後も約60%で推移する。Pu-f率が61%の場合には、プルサーマルの装荷MOX燃料に必要なPu富化度は約14%であり、Pu富化度の上限値以内に収まっている。

一方、FBR炉心燃料のみを利用する場合は5回目のプルサーマル装荷燃料のPu-f率は56%であるが、それ以降も徐々に低下していく。

炉心燃料とブランケット燃料を混ぜる場合と炉心燃料のみを利用する場合の装荷MOX燃料のPu組成の変化を表4-9及び表4-10に示した。

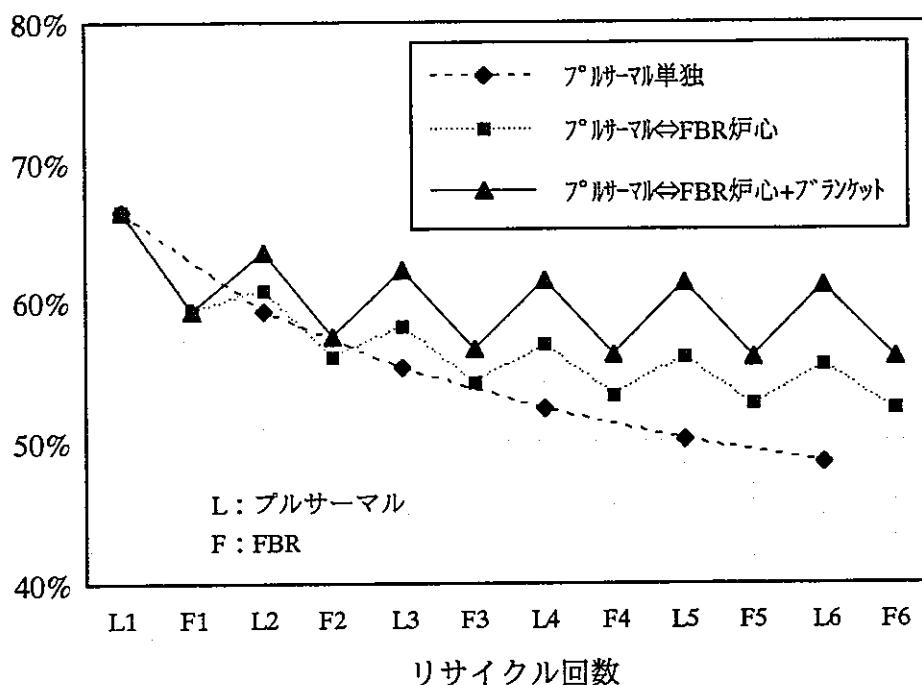


図4-5 Pu-f率の変化（シナリオ③）

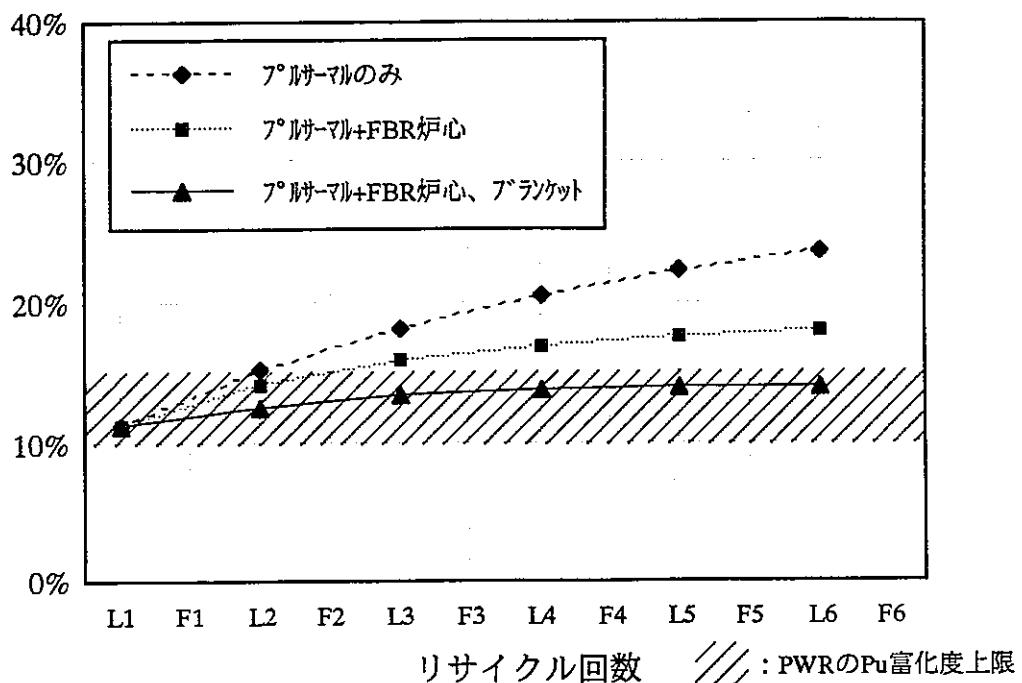


図4-6 装荷燃料のPu富化度の比較（シナリオ③）

特に、FBRの炉心燃料とブランケット燃料を混ぜて利用する場合には、5～6回のリサイクルで、Pu組成がほぼ一定の値となる。即ち、毎回の装荷Pu量がほぼ一定となることから、そのPuの収支を基に各炉型の基数バランスを求めることができる。

プルサーマル1基を中心とすると、その装荷に必要なPuは1.05トンであり、取出燃料から0.95トンのPuが得られる。これをFBRに装荷する場合のFBRの基数は0.9基となり、その取出燃料からは1.03トンのPuが得られる。従って、プルサーマルの装荷燃料に必要なPu量（1.05トン）には、0.02トン不足するため、これを通常のLWRから補給する必要がある。0.02トンのPuを供給するにはLWR0.1基が必要となる。

このように、図4-7に示す様な基数により、プルトニウムの年間収支バランスがされることとなる。即ち、FBRをプルサーマルの補完炉としてPu同位体組成の回復に活用する場合にはプルサーマルとほぼ同数基のFBRが必要となる。

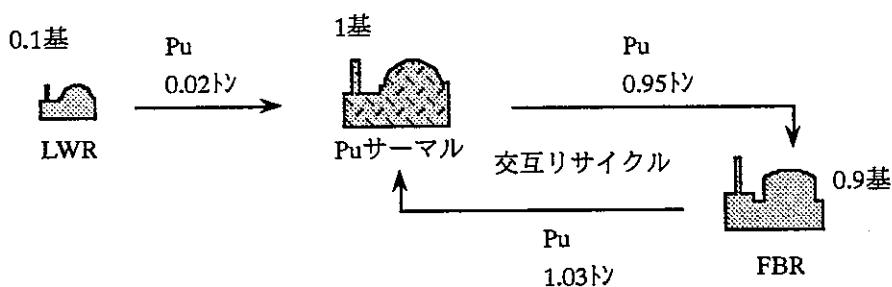


図4-7 基数バランス（シナリオ③）

表4-9 LWR及びFBRのPu組成変化
(炉心とブランケットを利用する)

LWRサイクル

	リサイクル回数						
	0	L1	L2	L3	L4	L5	L6
装荷燃料							
Pu富化度	11.2%	12.6%	13.4%	13.8%	13.9%	14.0%	
Pu-f富化度	7.4%	8.0%	8.3%	8.5%	8.6%	8.6%	
Pu量 (t)	0.834	0.943	0.998	1.025	1.039	1.047	
組成 (%)	Pu-238	1.9%	1.8%	1.7%	1.5%	1.4%	1.2%
	Pu-239	54.2%	55.3%	55.7%	55.9%	55.9%	56.0%
	Pu-240	24.5%	27.4%	29.0%	30.0%	30.6%	31.0%
	Pu-241	11.5%	8.0%	6.3%	5.5%	5.2%	5.0%
	Pu-242	6.8%	7.1%	7.0%	6.8%	6.6%	6.5%
	Am-241	1.2%	0.5%	0.4%	0.3%	0.3%	0.3%
Pu-f率 (%)	66.4%	63.5%	62.2%	61.6%	61.3%	61.2%	
取出燃料							
Pu量	0.249	0.650	0.728	0.768	0.789	0.799	0.804
組成 (%)	Pu-238	1.9%	3.3%	3.1%	2.7%	2.4%	2.2%
	Pu-239	52.5%	40.9%	44.6%	46.1%	46.7%	47.0%
	Pu-240	23.8%	28.8%	31.9%	33.5%	34.6%	35.3%
	Pu-241	14.8%	17.5%	11.7%	9.1%	8.0%	7.5%
	Pu-242	6.6%	7.8%	8.1%	8.0%	7.8%	7.6%
	Am-241	0.5%	1.7%	0.7%	0.5%	0.4%	0.4%
Pu-f率 (%)	67.7%	59.4%	56.7%	55.5%	55.0%	54.7%	54.6%

FBRサイクル

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
装荷燃料						
Pu富化度	19.4%	19.7%	19.9%	19.9%	19.9%	20.0%
Pu-f富化度	11.5%	11.3%	11.2%	11.2%	11.2%	11.2%
Pu量 (t)	1.073	1.093	1.102	1.106	1.109	1.109
組成 (%)	Pu-238	3.0%	2.8%	2.5%	2.3%	2.1%
	Pu-239	45.3%	47.5%	48.4%	48.8%	49.0%
	Pu-240	29.1%	31.3%	32.6%	33.4%	34.0%
	Pu-241	13.3%	9.5%	7.8%	7.0%	6.7%
	Pu-242	7.9%	8.1%	7.9%	7.7%	7.6%
	Am-241	1.3%	1.0%	0.8%	0.7%	0.7%
Pu-f率 (%)	59.4%	57.5%	56.6%	56.2%	56.0%	56.0%
取出燃料						
Pu量	1.008	1.030	1.041	1.046	1.048	1.050
組成 (%)	Pu-238	2.1%	1.9%	1.7%	1.6%	1.4%
	Pu-239	48.1%	49.0%	49.3%	49.4%	49.5%
	Pu-240	30.4%	32.2%	33.3%	34.0%	34.5%
	Pu-241	9.8%	7.7%	6.9%	6.5%	6.3%
	Pu-242	8.0%	7.9%	7.7%	7.5%	7.3%
	Am-241	1.7%	1.3%	1.1%	1.0%	1.0%
Pu-f率 (%)	58.8%	57.4%	56.8%	56.5%	56.4%	56.3%

表4-10 LWR及びFBRのPu組成変化
(炉心のみ利用)

LWRサイクル

	リサイクル回数						
	0	L1	L2	L3	L4	L5	L6
装荷燃料							
Pu富化度	11.2%	14.2%	15.9%	16.9%	17.6%	18.0%	
Pu-f富化度	7.4%	8.7%	9.3%	9.6%	9.9%	10.0%	
Pu量 (t)	0.834	1.060	1.187	1.263	1.310	1.341	
組成 (%)	Pu-238	1.9%	2.0%	1.9%	1.8%	1.7%	1.5%
	Pu-239	54.2%	50.9%	49.6%	48.9%	48.3%	47.9%
	Pu-240	24.5%	29.1%	31.3%	32.7%	33.6%	34.2%
	Pu-241	11.5%	9.6%	8.4%	7.8%	7.5%	7.4%
	Pu-242	6.8%	7.8%	8.2%	8.4%	8.5%	8.5%
	Am-241	1.2%	0.7%	0.6%	0.5%	0.5%	0.5%
Pu-f率 (%)		66.4%	60.9%	58.3%	56.9%	56.1%	55.5%
取出燃料							
Pu量	0.249	0.650	0.840	0.949	1.015	1.057	1.084
組成 (%)	Pu-238	1.9%	3.3%	3.1%	2.8%	2.5%	2.2%
	Pu-239	52.5%	40.9%	41.7%	41.7%	41.5%	41.3%
	Pu-240	23.8%	28.8%	32.4%	34.4%	35.6%	36.5%
	Pu-241	14.8%	17.5%	13.3%	11.4%	10.5%	10.1%
	Pu-242	6.6%	7.8%	8.6%	8.9%	9.0%	9.1%
	Am-241	0.5%	1.7%	0.9%	0.8%	0.8%	0.7%
Pu-f率 (%)		67.7%	59.4%	55.5%	53.5%	52.5%	51.8%

FBRサイクル

	F1 F2 F3 F4 F5 F6					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
装荷燃料						
Pu富化度	19.4%	19.9%	20.2%	20.4%	20.5%	20.6%
Pu-f富化度	11.5%	11.2%	11.0%	10.9%	10.8%	10.8%
Pu量 (t)	1.073	1.109	1.129	1.142	1.150	1.155
組成 (%)	Pu-238	3.0%	2.9%	2.6%	2.4%	2.1%
	Pu-239	45.3%	45.0%	44.7%	44.3%	44.0%
	Pu-240	29.1%	32.1%	33.8%	34.9%	35.7%
	Pu-241	13.3%	10.5%	9.2%	8.6%	8.3%
	Pu-242	7.9%	8.5%	8.8%	8.9%	9.0%
	Am-241	1.3%	1.1%	0.9%	0.9%	0.8%
Pu-f率 (%)		59.4%	56.1%	54.3%	53.4%	52.8%
取出燃料						
Pu量		1.008	1.042	1.062	1.074	1.081
組成 (%)	Pu-238	2.1%	2.0%	1.8%	1.6%	1.5%
	Pu-239	48.1%	47.1%	46.5%	46.1%	45.7%
	Pu-240	30.4%	32.7%	34.1%	35.0%	35.6%
	Pu-241	9.8%	8.3%	7.7%	7.5%	7.3%
	Pu-242	8.0%	8.4%	8.6%	8.7%	8.7%
	Am-241	1.7%	1.4%	1.2%	1.2%	1.2%
Pu-f率 (%)		58.8%	56.3%	54.9%	54.2%	53.7%

4-4 シナリオ④（FRにて多重リサイクル）

シナリオ④では、プルサーマルにて同位体組成が劣化したプルトニウムをFRにて燃焼することを目的としている。図2-4に示した様に、4.8万MWd/tのPWRの使用済燃料から得られたPuは4.8万MWd/tのPWRプルサーマルに1回リサイクルされ、その後FR（9万MWd/t）にて多重リサイクルされる。

図4-8にリサイクル回数の増加に伴うPu-f率の変遷を示した。FRによる燃焼を繰り返していくために、Pu-f率は低下し続けていき、約45%で一定となる。図4-9にはFRの装荷燃料に必要なPu富化度の変化を示した。Pu-f率の低下に伴い、必要なPu富化度は上昇していくが、約40%で一定値となる。このPu富化度（40%）は、現段階では詳細な検討はなされていないが、FRの炉心特性上、あるいは燃料サイクル施設における燃料の取扱い上特に問題とはならない程度と考えられている。Pu組成変化の詳細は表4-11に示した。

今回評価に用いたFRは、転換比が約0.5であり、装荷から取出までに約15%のPuを消滅することができる。従って、FRにて多重リサイクルを継続するためには、リサイクル毎に、ある量のPuをプルサーマル取出燃料からFRへ供給することとなる。また、このPuのマスフローにより各炉型の基数バランスを求めることができる。

FRにおいて十数回リサイクルを継続した時点での基数バランスとPuのマスフローを図4-10に示した。FR1基でPuのリサイクルを継続するためには、約0.8基のプルサーマルが必要であり、また、このプルサーマルを運転するためには、約2.6基のPWRが必要となる。つまり、大まかに上記の基数割合で原子力発電体系が成り立つ事を示している。

仏国原子力庁（CEA）においても同様のマスバランス評価を行っている。最新の評価によれば、年間のPu収支を基にした基数バランスは概ね、PWR : PWR (Pu) : FR=4 : 0.6 : 1となっている。当方の評価ではPWR : PWR (Pu) : FR=2.6 : 0.8 : 1であることから、CEA評価に比べて軽水炉が少なく、プルサーマルが多いことがわかる。この原因は各原子炉の特性に起因するものと考えられるが、主なものを以下に示す。

- ・ PWRの燃焼度がCEA評価の方が約1.1倍大きい。
- ・ CEAではプルサーマルは全炉心をMOX燃料としている。（当方は1/3）
- ・ FRの燃焼度がCEA評価の方が約1.5倍大きい。
- ・ FR装荷燃料のPu富化度が約1.3倍大きい。

これらの要因により、当方の設定はCEAの設定と比較して原子炉1基当たりのPu収支に以下の相違があり、このため上記の基数バランスに違いが現れる。

- | | |
|-----------------|------|
| ・ PWR取出Pu量 : | 1.3倍 |
| ・ プルサーマル装荷Pu量 : | 0.6倍 |
| ・ プルサーマル取出Pu量 : | 0.8倍 |
| ・ FR装荷Pu量 : | 1.7倍 |
| ・ FR取出Pu量 : | 1.9倍 |

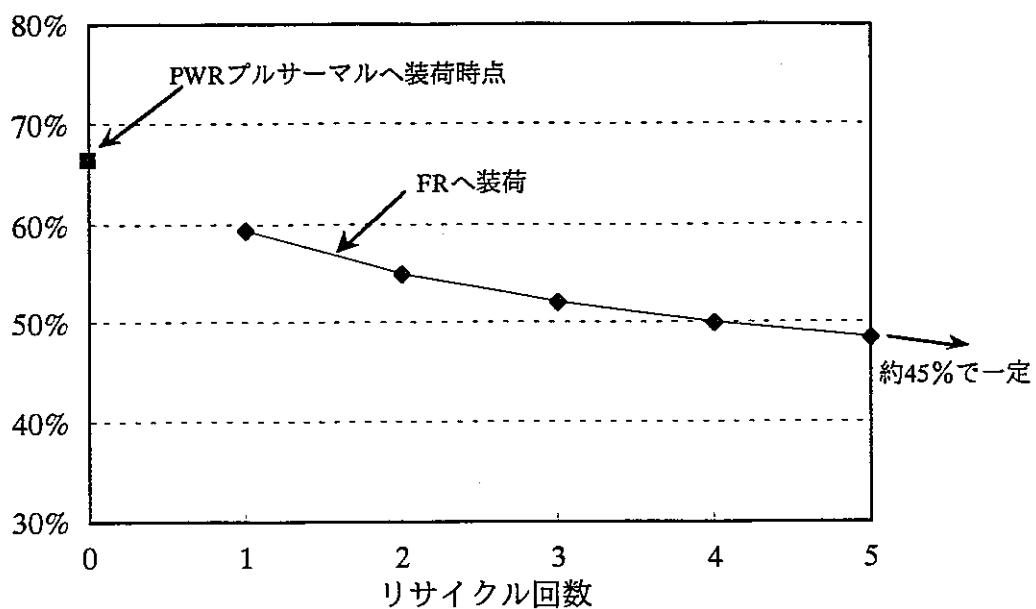


図4-8 FR装荷燃料中のPu-f率（シナリオ④）

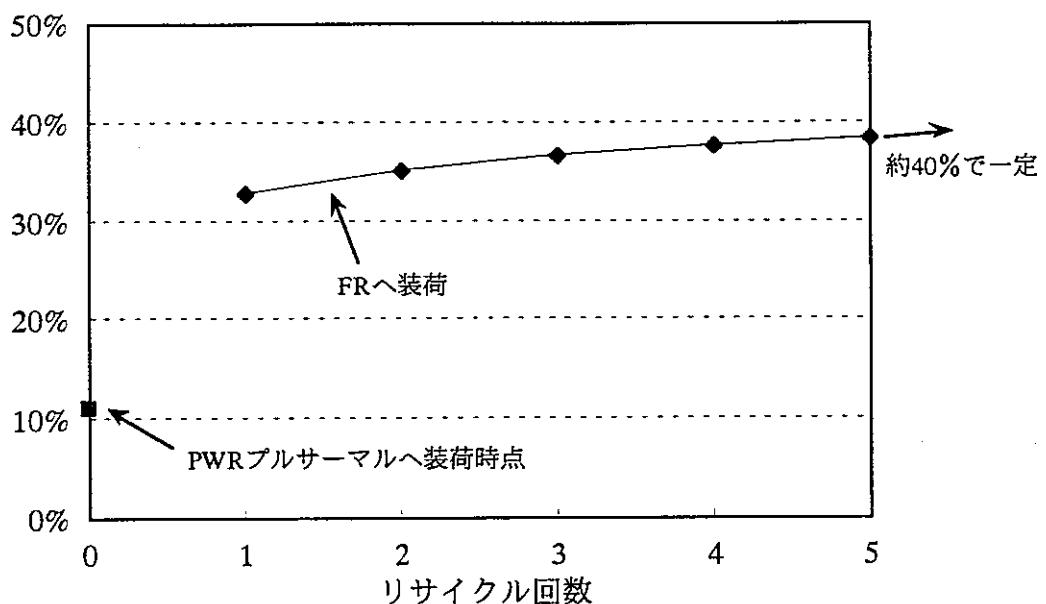


図4-9 FR装荷燃料のPu富化度（シナリオ④）

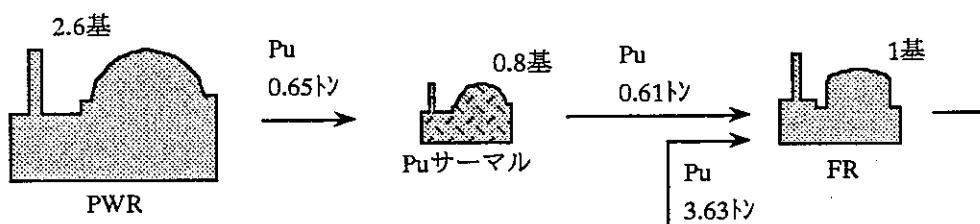


図4-10 基数バランス（シナリオ④）

なお、我が国におけるFRに関する研究開発は炉心の概念検討が進められている段階であり、今後の研究開発課題として以下の項目が挙げられている。

(炉心)

- ・高Pu富化度燃料炉心及びウラン無し燃料炉心の解析精度の向上

(安全性)

- ・再臨界性

(燃料)

- ・基礎的な物性データの取得

- ・製造性、照射試験

(再処理)

- ・ウラン無し燃料の溶解特性の把握

表4-11 FR炉心のPu組成変化

FRリサイクル

	リサイクル回数						20
	1	2	3	4	5	...	
装荷燃料							
Pu富化度	32.8%	35.0%	36.5%	37.6%	38.4%		40.7%
Pu-f富化度	19.5%	19.3%	19.0%	18.8%	18.7%		18.2%
Pu量(t)	3.414	3.640	3.797	3.911	3.996		4.237
組成(%)							
Pu-238	3.0%	2.8%	2.5%	2.3%	2.1%		1.6%
Pu-239	45.3%	44.8%	43.2%	41.5%	39.8%		31.3%
Pu-240	29.1%	32.8%	35.4%	37.3%	38.6%		41.6%
Pu-241	13.30%	9.85%	8.65%	8.38%	8.53%		12.96%
Pu-242	7.9%	9.0%	9.7%	10.1%	10.4%		11.8%
Am-241	1.3%	0.6%	0.6%	0.5%	0.5%		0.7%
Pu-f率(%)	59.4%	55.0%	52.1%	50.1%	48.6%		44.6%
取出燃料							
Pu量(t)	2.897	3.105	3.250	3.357	3.438		3.702
組成(%)							
Pu-238	2.7%	2.4%	2.1%	1.9%	1.7%		1.3%
Pu-239	43.2%	41.6%	39.6%	37.7%	36.1%		27.7%
Pu-240	32.7%	35.9%	38.1%	39.5%	40.6%		42.1%
Pu-241	9.9%	8.5%	8.2%	8.5%	9.0%		14.5%
Pu-242	9.1%	9.8%	10.3%	10.6%	10.9%		12.0%
Am-241	2.3%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%		2.4%
Pu-f率(%)	54.4%	51.0%	48.6%	47.0%	45.9%		43.2%

基数バランス(FR1基に対して)

LWR	14.66	3.37	3.14	3.01	2.92	...	2.62
Puサーマル	4.38	1.01	0.94	0.90	0.87		0.78
FR	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00

5. 考察

本報告書では幾つかのリサイクルモードによるPuの多重リサイクルに伴う、Pu組成の変化に着目して解析を行った。解析は各炉型の单基の平衡装荷及び取出燃料の物質収支を基にしている。軽水炉サイクル及びFRサイクルでは、Pu-f率を拠り所として簡易的に装荷燃料のPu富化度と燃焼によるPu同位体別の増減を設定してリサイクルを継続させ、一方、FBRサイクルでは、リサイクル毎に燃焼計算を行い、Pu同位体組成を算出した。シナリオ毎の結果を以下に示す。

- (1) プルサーマル単独でプルトニウムのリサイクルを繰り返す場合（シナリオ①）、Pu-f率の低下は著しく、それに伴い、装荷燃料に必要なプルトニウム富化度は増加していく。プルサーマルの装荷MOX燃料のPu富化度の上限は炉心特性の観点から10～15%程度^{1) 2)} と言われており、リサイクル回数が1～2回に制限される結果となる。また、リサイクル回数が増えるに従って²³⁸Puが大幅に増加し、燃料製造上の除熱が問題となる等の弊害が考えられる。
- (2) プルサーマルにより劣化したプルトニウムをFBRにてリサイクルするとプルトニウム組成が回復する（シナリオ②）。炉心燃料とブランケット燃料を混ぜて約5回リサイクルを行うと、Pu-f率は70%程度にまで回復する。これは軽水炉で低燃焼度の場合に得られるプルトニウムと同程度である。このPu-f率の回復は、ブランケット燃料から得られる高Pu-f率のPuとの混合により得られる結果であり、炉心燃料のみを用いてリサイクルを継続する場合は回復傾向はみられない。
- (3) プルサーマルとFBRでPuを交互にリサイクル（シナリオ③）することにより、プルサーマルによって劣化したプルトニウムをFBRで回復することを繰り返し、定常的にリサイクルが可能となる。この場合、プルサーマル1基に対して約0.9基のFBRと約0.1基のLWRでプルトニウムの収支バランスがとれる。
- (4) プルサーマルにて同位体組成が劣化したプルトニウムを燃焼する目的で高速炉（FR）を導入する場合（シナリオ④）、FR1基のプルトニウムの消費分をまかなうために0.8基のプルサーマルが必要となる。その場合、FRでのリサイクル回数の増加に伴い、プルトニウムの同位体組成は劣化し、装荷燃料に必要なプルトニウム富化度は約40%に上昇するが、現状では炉心特性上あるいは燃料サイクル上特に問題とはならない程度と考えられている。

6.まとめ

高速炉（FBR、FR）の実用化は、限りある天然ウラン資源の有効活用の面から大きな意義を持っているが、本報告書では現実化しつつある軽水炉-プルサーマル路線によるPu利用における課題として残る「Pu同位体組成の劣化」を補完するための機能を高速炉に期待し、その効果を概略的に定量評価した。

解析の結果、プルサーマル単独でPuリサイクルを繰り返す場合は、Pu同位体組成がリサイクル毎に劣化（Pu-f率の低下）していくため、リサイクル回数は1～2回に制限される。一方、FBRではブランケット燃料を活用することにより、劣化したPu同位体組成を回復させる機能があることから、プルサーマルから取り出されたPuをFBRで燃焼し、再びプルサーマルに利用する交互リサイクルを想定した場合、Pu同位体組成は、プルサーマルに利用可能な範囲で推移する結果が得られた。このようなりサイクルパターンでは、プルサーマルとほぼ同数基のFBRと約1/10の基数の通常の軽水炉の組み合わせでPu収支がとれた炉型構成を構築する事ができる。

また、Puの燃焼を目的としたFRを活用する場合は、FRにてリサイクル毎に燃焼されるPuをプルサーマルから供給し、またプルサーマルへ装荷するPuは軽水炉から供給することにより、Pu収支バランスがとれた炉型構成を構築することができる。この場合の炉型割合は、FR1基に対してプルサーマル0.8基、軽水炉2.6基となり、また、プルサーマルでのPuリサイクルは1回であるため、Pu同位体組成の劣化に対する配慮は不要となる。

この様に、高速炉の利用方策として、従来のような軽水炉を逐次FBRに置き換えていき、Puの増殖を図りつつ天然ウラン需要を0に近づける概念に加えて、軽水炉及びプルサーマルと共に存しながら、それらの問題点を補完する機能を高速炉に期待できることが示された。

7.謝辞

本解析を行うにあたって、適切な助言とご指導を賜りました、大洗工学センター基盤技術開発部 炉心技術開発室の若林利男室長、ならびに高速炉の燃焼計算をお願いしましたISAの関野章氏に感謝の意を表し、本紙面を借りて御礼申し上げます。

8.参考文献

- 1) OECD/NEA, Physics of Plutonium Recycling vol.1, 1995
- 2) S. Aniel et al., Evaluation of the maximum content of a MOX-fueled Pressurized Water Reactor versus isotopic composition with respect to the void coefficient, IAEA, 1995

付録1

プルサーマル及びFRの炉特性作成方法

MOX燃料の装荷時のPu富化度や燃焼による増減は、Pu同位体組成により決定されるため、リサイクル毎に炉特性データを作成する必要がある。本評価では、プルサーマル及びFRの装荷及び取出燃料の炉特性は、装荷するPuのfissile率やPu組成に応じた数種類の燃焼計算の結果を内挿することにより簡易的に求めた。具体的な求め方を以下に示す。なお、FBRの炉特性は別途リサイクル毎に燃焼計算を行って求めている。

①装荷燃料重金属量

プルサーマルは1/3MOX炉心とし、常にUO₂燃料平衡装荷重金属量の1/3で一定と仮定した。FRでは、一定の値を想定した(10.4t/年)。

②Pu-f率に対するPu富化度と同位体別の増減関数の作成

種々の組成のPuの燃焼計算結果（装荷燃料のPu富化度と装荷及び取出燃料Puの同位体別重量のデータ）を利用して、装荷するPuのPu-f率に対応した装荷燃料のPu富化度（図-付1）と燃焼による同位体毎の増減率（図-付2）の関数をそれぞれ作成する。図は燃焼度4.8万MWd/tのPWRを例としている。ここで増減率とは、装荷時の重量に対する取出時の重量の割合と定義している。

③装荷燃料Pu富化度

装荷する時点のPuのfissile率に応じて図-付1の近似関数により装荷燃料のPu富化度を決定する。例えばPu-f率55%の場合の装荷燃料のPu富化度は18%となる。

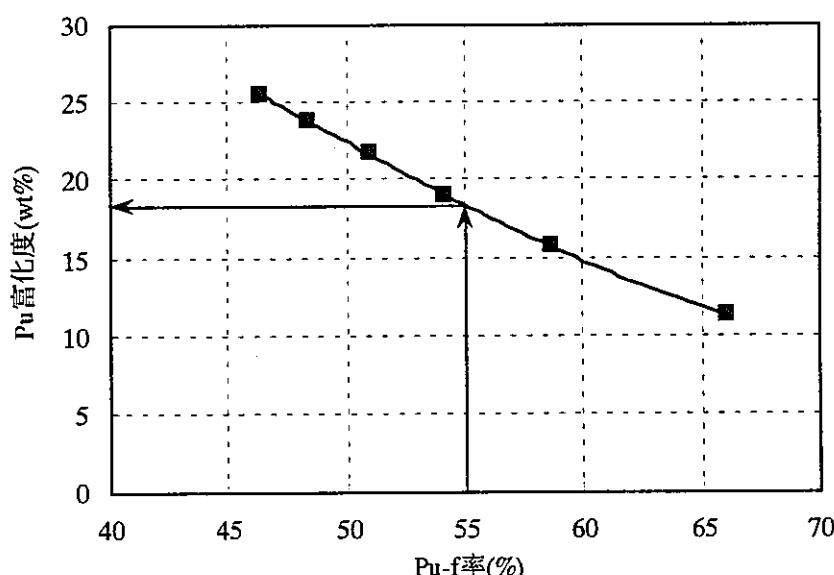


図-付1 Pu-f率に対する装荷Pu富化度

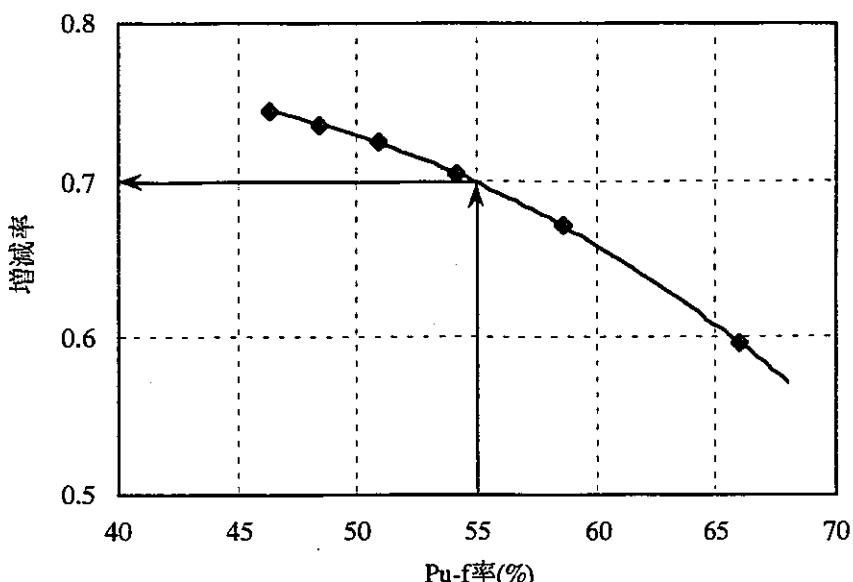


図-付2 Pu239の増減率

※他の同位体についても同様の関数を作成する

④装荷燃料のPu組成

装荷燃料中のPu同位体毎の重量は、

(①装荷燃料重金属量) × (③装荷燃料Pu富化度) × (Pu組成割合)
にて求める。

⑤核種毎の燃焼による増減

装荷燃料のPuのfissile率に応じた取出燃料の核種増減率を図-付2の近似関数により求める。図は²³⁹Puについてのみ示したが、他のPu同位体についても同様の関数を作成して、増減率を求める。例えば装荷燃料のPu-f率が55%の場合は²³⁹Puの増減率は0.7となる。この場合、²³⁹Puは燃焼により装荷重量の70%に減少することとなる。

他のPu同位体も同様にして求め、取出燃料の同位体別の重量を得る。

以上の①～⑤の概算により次の平衡装荷、平衡取出燃料のPu同位体毎の物量を得ることができる。本評価では、近似関数としては3次式で作成しており、相関係数はいずれも1に近い値となっている。

次ページ以降に各炉型のPu富化度と核種増減率の関数を示す。また、Pu富化度と増減率を設定するにあたって用いた燃焼計算結果を表-付1に示す。

【PWR-4.8万MWd/t】

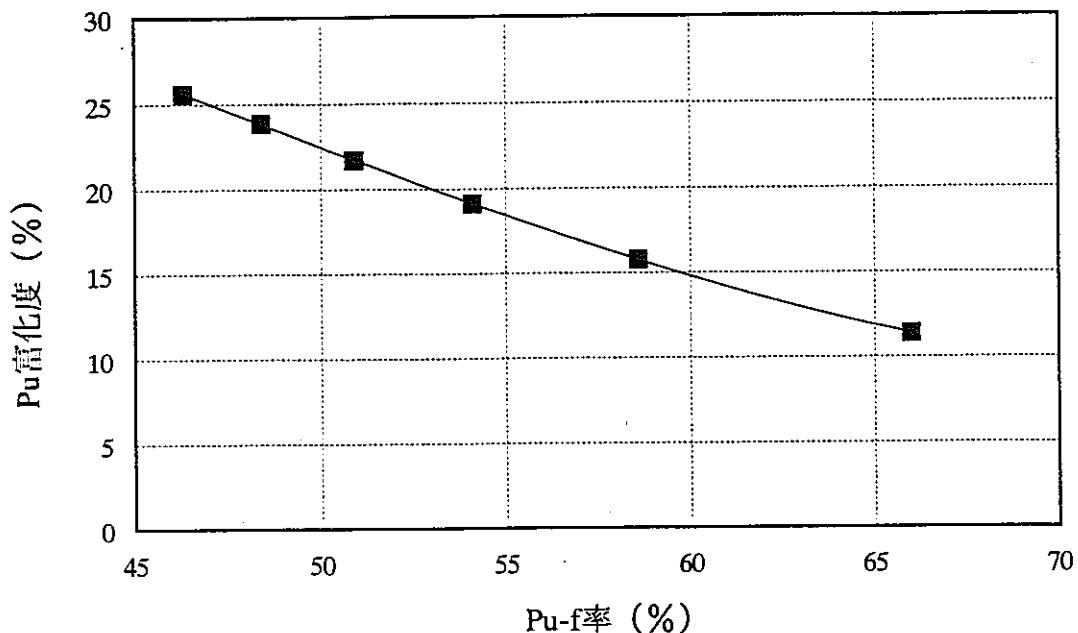
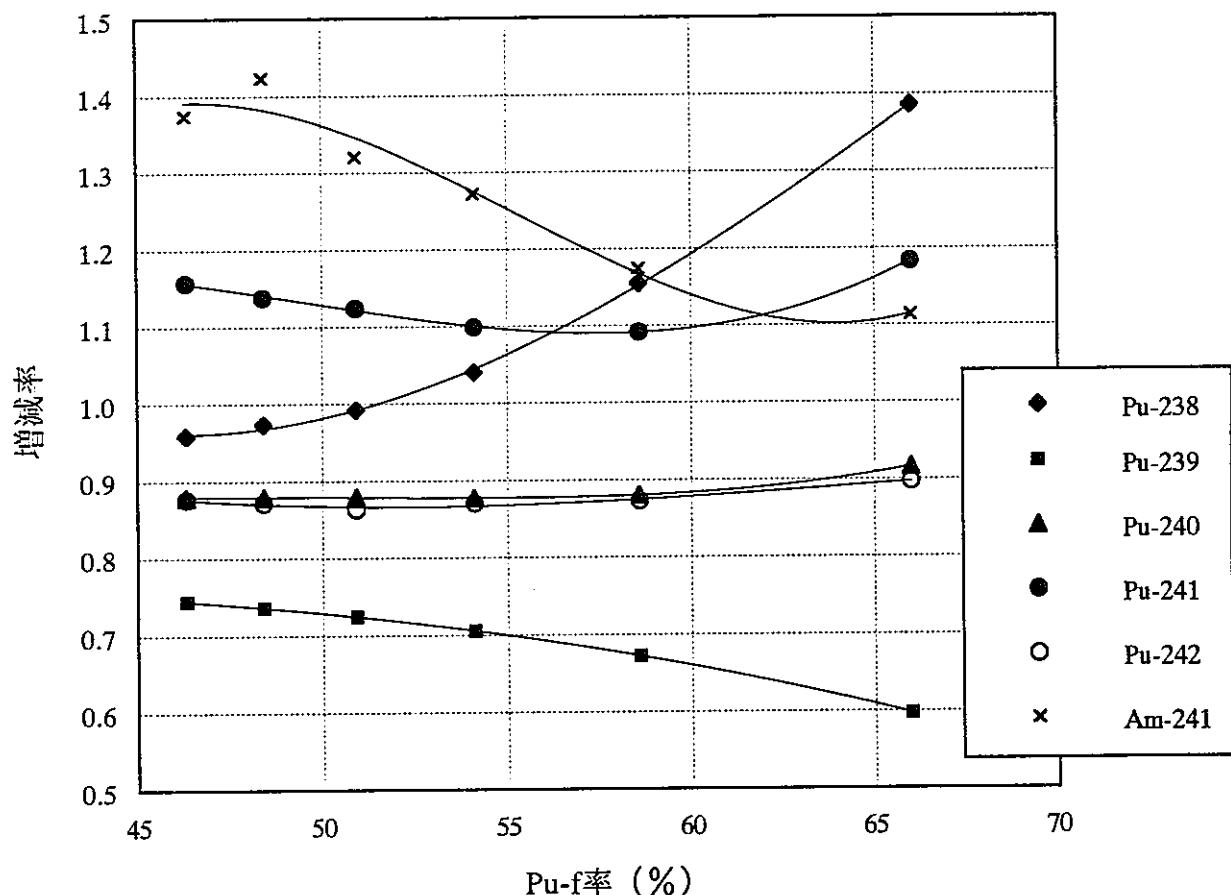
図-付3 Pu-f率に対する装荷Pu富化度
(PWR4.8万MWd/t)

図-付4 核種増減率 (PWR4.8万MWd/t)

【BWR4.5万MWd/t】

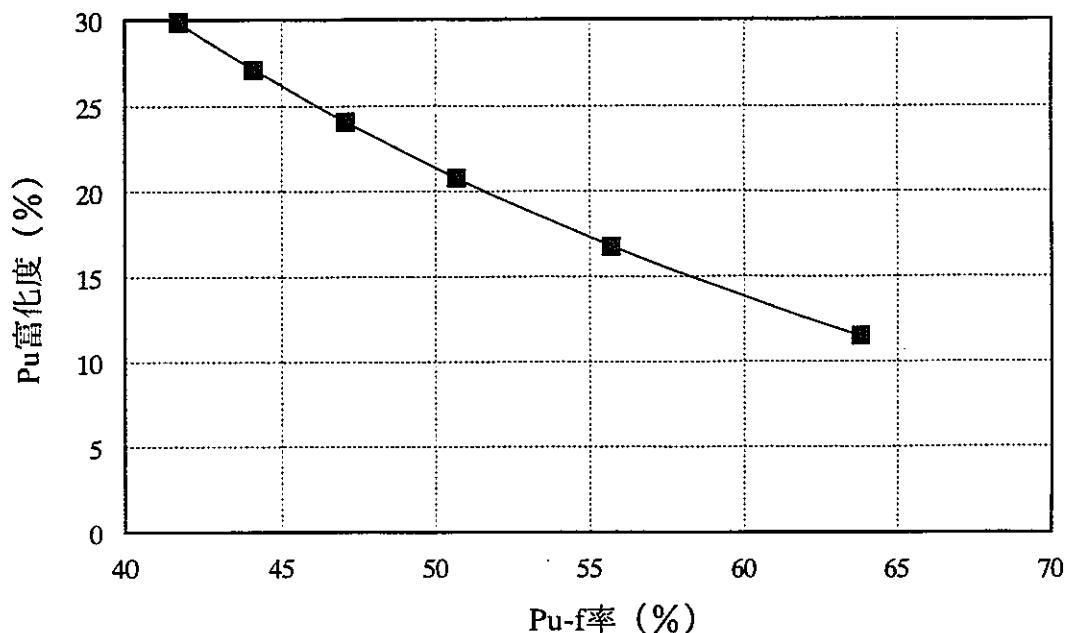
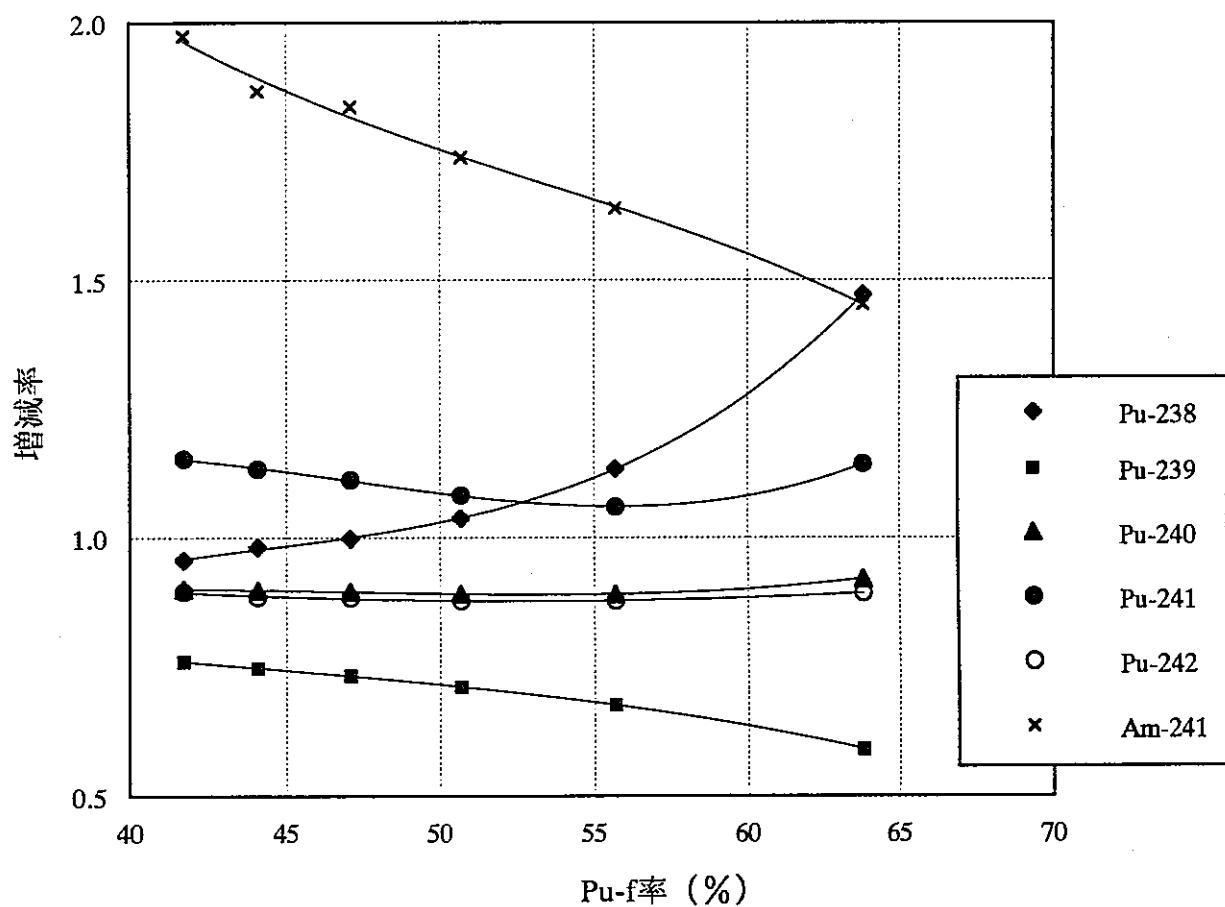
図-付5 Pu-f率に対する装荷Pu富化度
(BWR4.5万MWd/t)

図-付6 核種増減率 (BWR4.5万MWd/t)

【PWR-3.3万MWd/t】

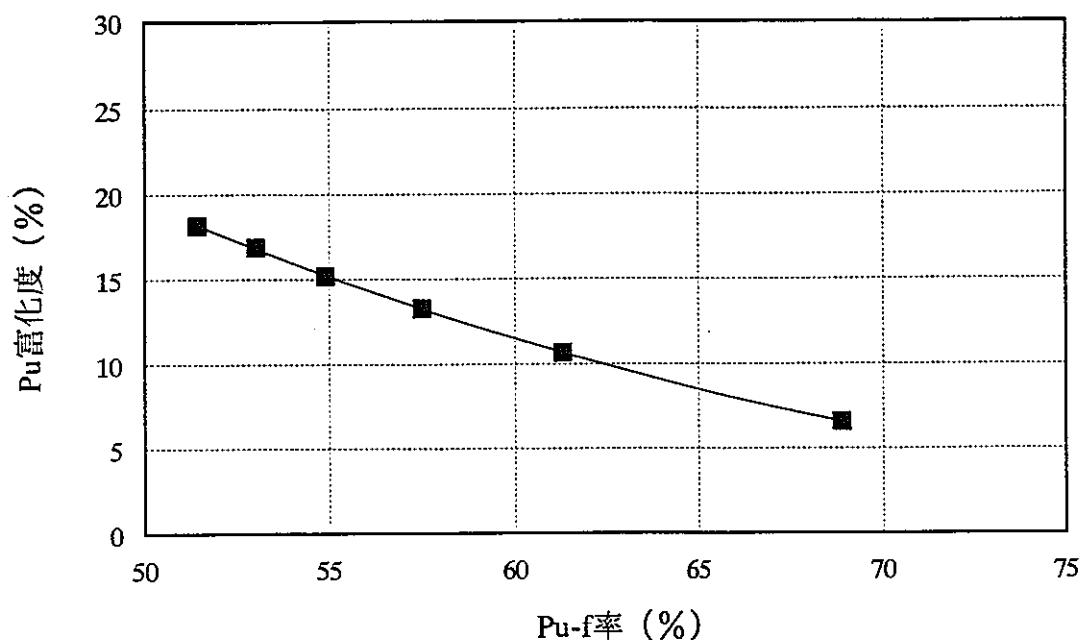
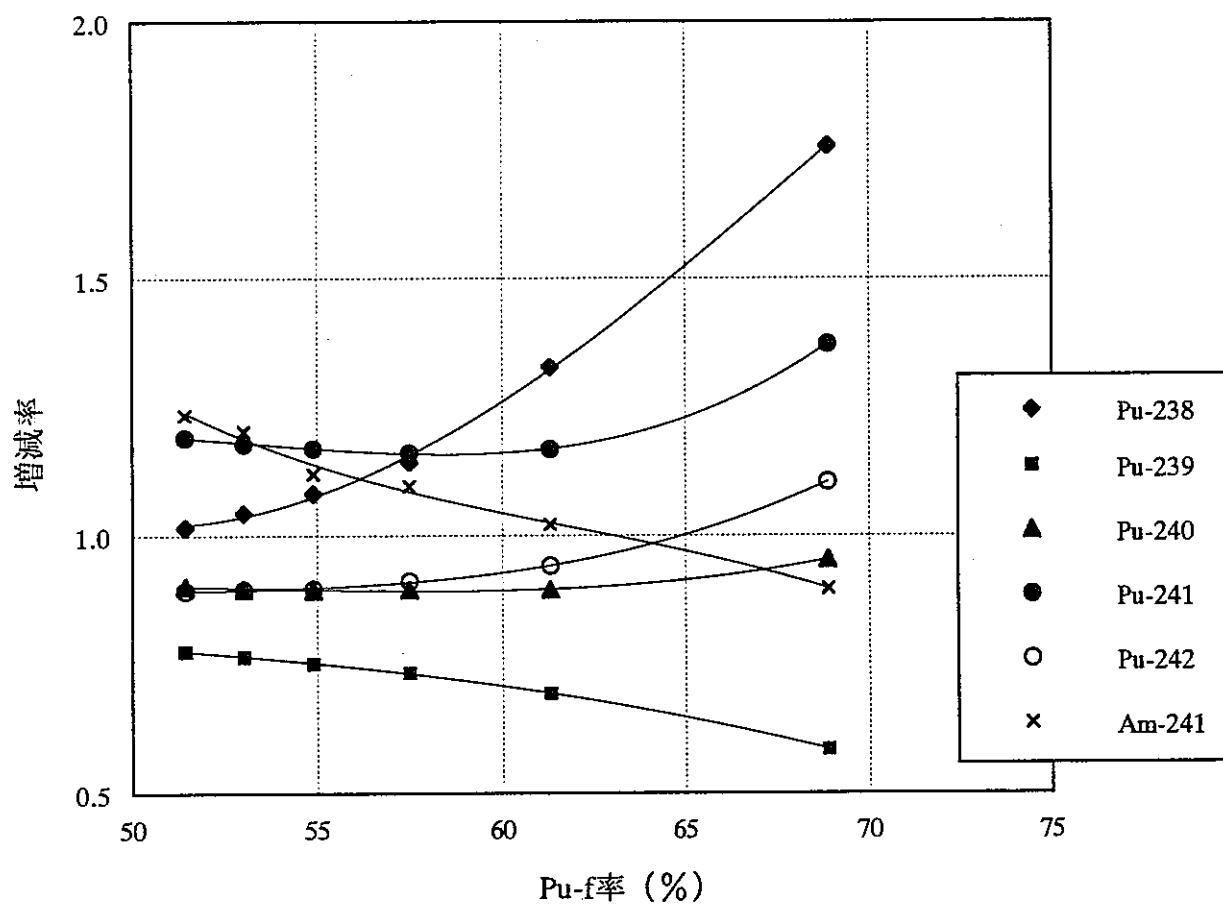
図-付7 Pu-f率に対する装荷Pu富化度
(PWR3.3万MWd/t)

図-付8 核種増減率 (PWR3.3万MWd/t)

【BWR3.0万MWd/t】

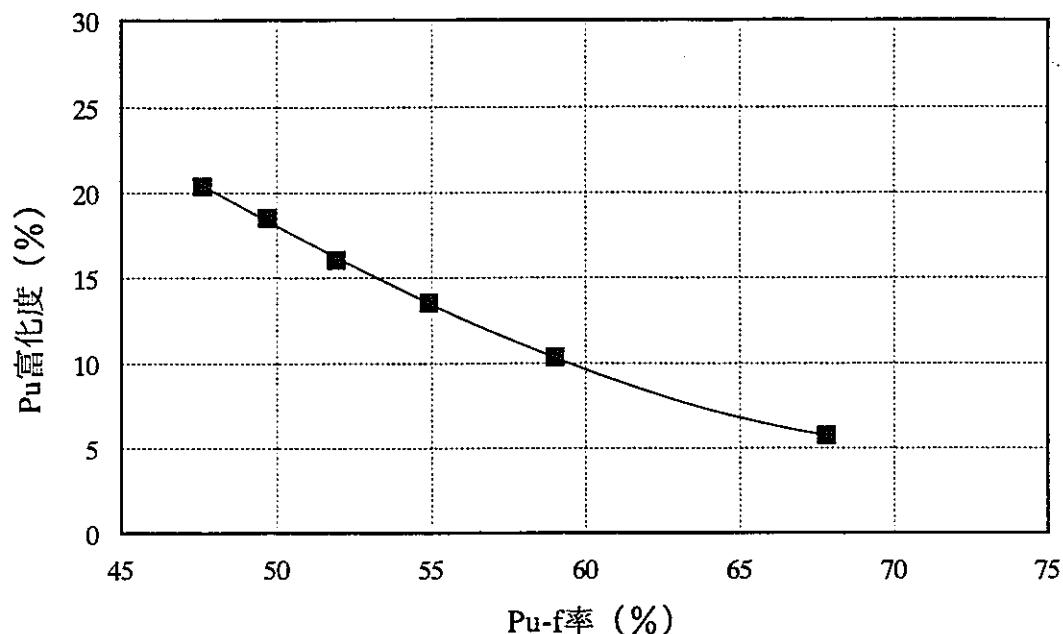
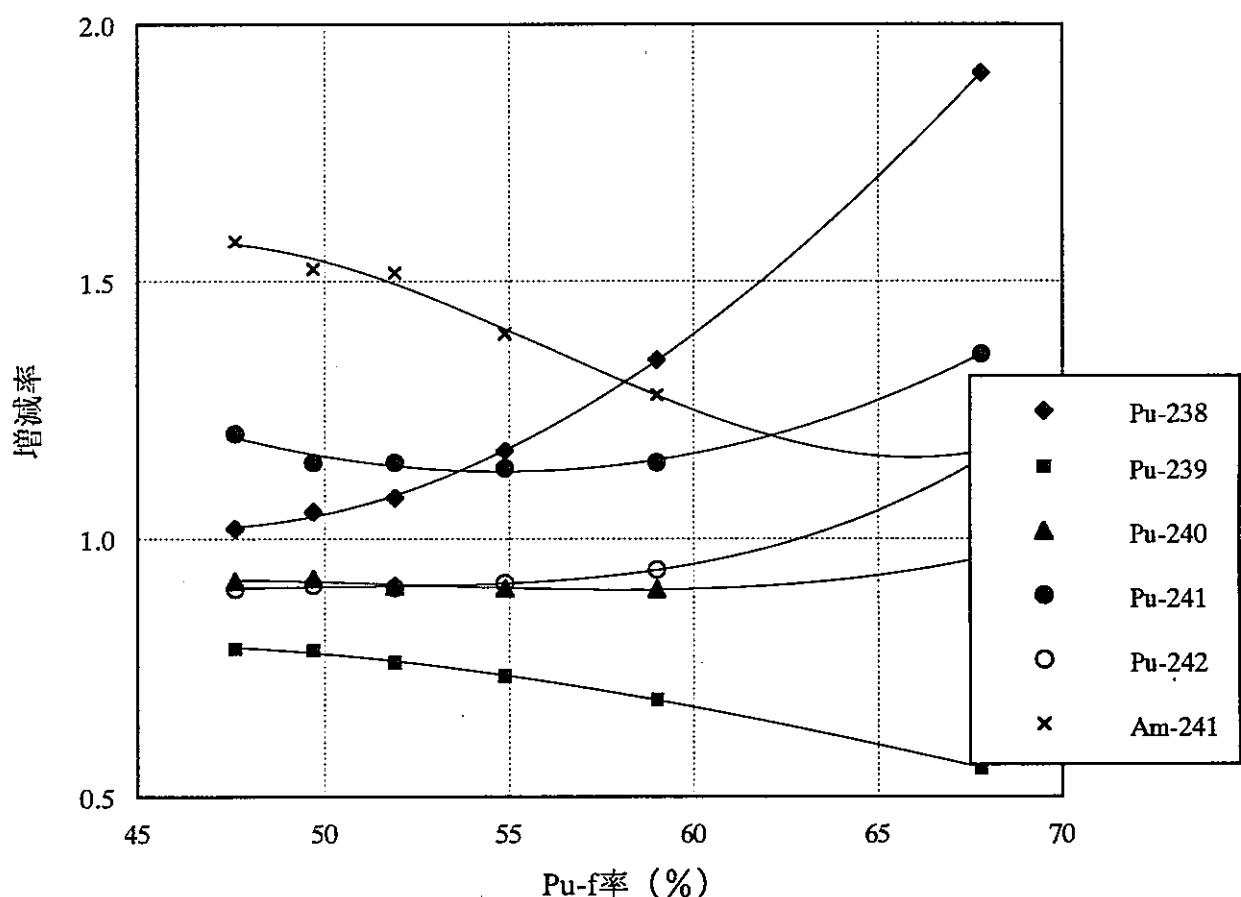
図-付9 Pu-f率に対する装荷Pu富化度
(BWR3.0万MWd/t)

図-付10 核種増減率 (BWR3.0万MWd/t)

【FR9.0万MWd/t】

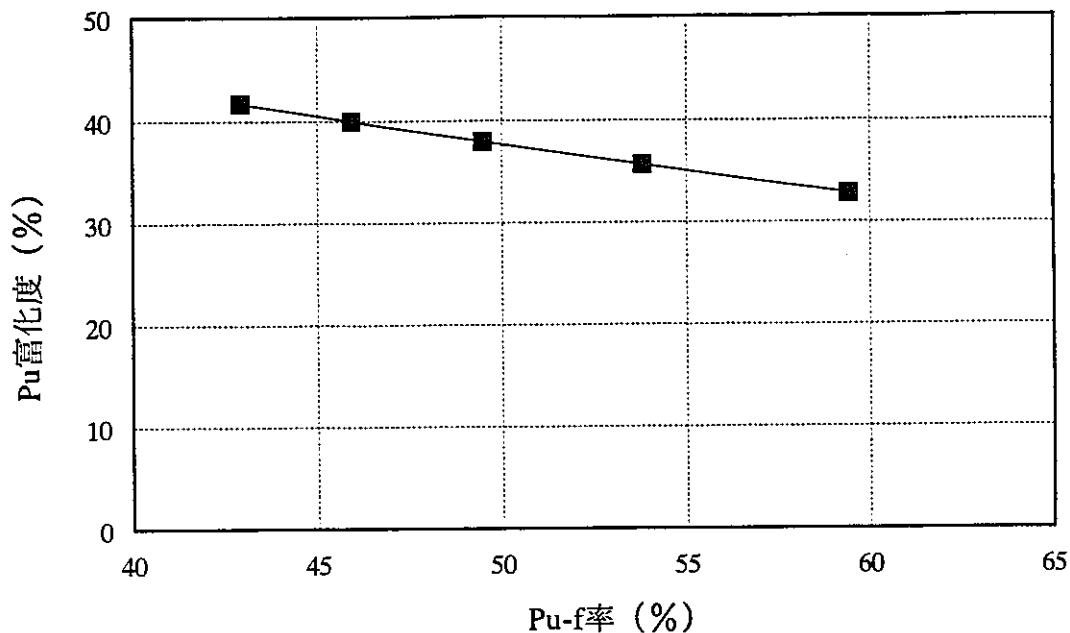
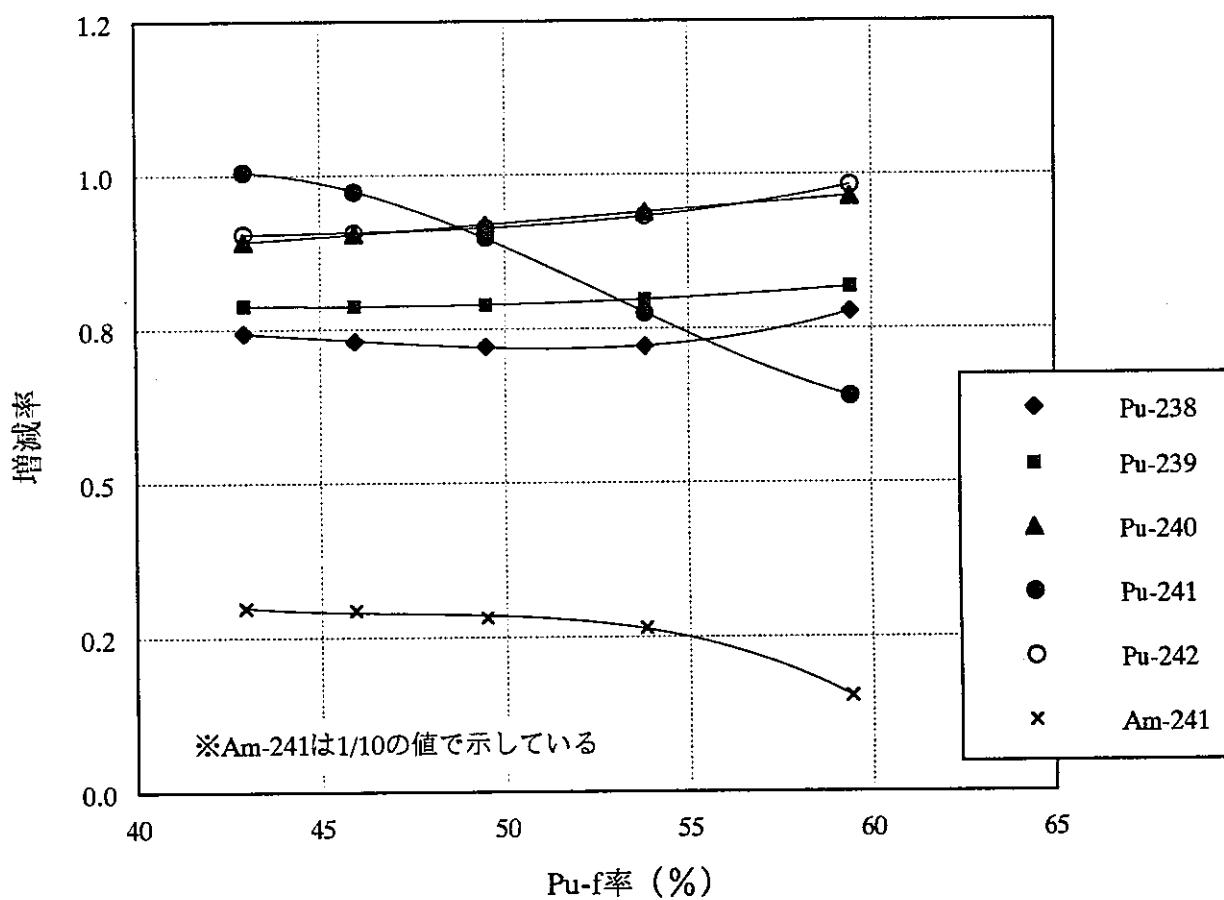
図-付11 Pu-f率に対する装荷Pu富化度
(FR9.0万MWd/t)

図-付12 核種増減率 (FR9.0万MWd/t)

表-付1 Pu富化度及び増減率設定に用いた燃焼計算結果

(注) 軽水炉はいずれも炉外時間8時間にて計算されている

PWR (4.8万MWd/t)

燃料 サイクル	装荷燃料						取り出し燃料					
	Pu-f富化度 (wt%)	Pu同位体組成比(wt%)					Pu+Am重量 (取出/装荷)	Pu同位体組成比(wt%)				
		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
初期	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94.97%	1.9	52.8	23.9	14.9	6.6
1	7.52	1.9	55.4	25.1	10.6	6.9	1.6	94.60%	3.4	42.7	29.7	16.2
2	9.23	3.1	47.2	30.1	11.4	8.1	1.8	94.47%	4.4	39.0	32.6	15.3
3	10.34	4.0	43.2	33.0	10.9	8.8	1.7	94.40%	5.0	36.6	34.8	14.4
4	11.04	4.6	40.6	35.2	10.3	9.3	1.6	94.35%	5.4	34.8	36.6	13.7
5	11.55	5.0	38.5	37.0	9.9	9.6	1.5	94.32%	5.7	33.2	38.1	13.2
6	11.85	5.2	36.8	38.5	9.5	9.9	1.5	94.29%	5.8	31.9	39.4	12.8

BWR (4.5万MWd/t)

燃料 サイクル	装荷燃料						取り出し燃料					
	Pu-f富化度 (wt%)	Pu同位体組成比(wt%)					Pu+Am重量 (取出/装荷)	Pu同位体組成比(wt%)				
		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
初期	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.29%	2.0	51.2	25.7	14.2	6.9
1	7.32	2.0	53.7	27.0	10.1	7.2	1.6	94.94%	3.8	41.0	32.1	14.9
2	9.33	3.4	45.1	32.5	10.6	8.5	1.6	94.81%	4.7	37.2	35.3	13.7
3	10.54	4.3	40.9	35.7	9.8	9.3	1.5	94.74%	5.3	34.6	37.8	12.6
4	11.34	4.9	38.0	38.2	9.1	9.8	1.4	94.70%	5.7	32.5	39.9	11.8
5	11.95	5.3	35.6	40.3	8.5	10.2	1.3	94.66%	6.0	30.7	41.7	11.1
6	12.45	5.6	33.7	42.2	8.0	10.6	1.2	94.63%	6.1	29.2	43.3	10.5

PWR (3.3万MWd/t)

燃料 サイクル	装荷燃料						取り出し燃料					
	Pu-f富化度 (wt%)	Pu同位体組成比(wt%)					Pu+Am重量 (取出/装荷)	Pu同位体組成比(wt%)				
		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
初期	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.53%	0.9	56.5	23.7	13.8	5.1
1	4.51	0.9	59.1	24.8	9.8	5.3	1.5	96.37%	2.0	43.7	29.9	17.0
2	6.52	1.7	49.7	29.8	11.6	7.2	1.8	96.24%	2.7	41.2	31.9	16.2
3	7.62	2.4	46.2	32.1	11.3	8.0	1.8	96.18%	3.2	39.5	33.5	15.3
4	8.33	2.8	44.1	33.8	10.8	8.4	1.7	96.14%	3.5	38.3	34.9	14.6
5	8.93	3.1	42.6	35.2	10.4	8.7	1.6	96.11%	3.7	37.3	36.1	14.0
6	9.33	3.3	41.4	36.4	10.0	8.9	1.5	96.10%	3.8	36.4	37.2	13.5

BWR (3.0万MWd/t)

燃料 サイクル	装荷燃料						取り出し燃料					
	Pu-f富化度 (wt%)	Pu同位体組成比(wt%)					Pu+Am重量 (取出/装荷)	Pu同位体組成比(wt%)				
		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
初期	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.85%	0.9	56.0	25.0	13.1	5.0
1	3.88	0.9	58.5	26.1	9.3	5.2	1.4	96.72%	2.2	41.7	32.2	7.7
2	6.09	1.8	48.0	31.8	11.0	7.3	1.7	96.59%	2.9	39.5	34.3	8.2
3	7.42	2.5	44.3	34.5	10.6	8.1	1.6	96.53%	3.4	37.8	36.2	8.6
4	8.33	3.0	42.0	36.5	9.9	8.5	1.5	96.50%	3.7	36.5	37.9	13.0
5	9.21	3.3	40.4	38.2	9.3	8.8	1.4	96.47%	3.9	35.6	39.6	12.0
6	9.68	3.5	39.0	39.8	8.6	9.0	1.3	96.46%	4.0	34.4	40.9	11.6

FR (9万MWd/t)

燃料 サイクル	装荷燃料						取り出し燃料					
	Pu富化度 (wt%)	Pu同位体重量(t)						Pu同位体重量(t)				
		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242		Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
11	32.79%	0.104	1.568	1.007	0.460	0.273	0.045		0.081	1.282	0.972	0.295
12	35.64%	0.102	1.667	1.263	0.332	0.349	0.016		0.074	1.329	1.187	0.257
13	37.95%	0.091	1.678	1.498	0.281	0.411	0.014		0.066	1.325	1.377	0.252
14	39.96%	0.080	1.646	1.711	0.271	0.467	0.013		0.058	1.296	1.546	0.264
15	41.71%	0.070	1.591	1.898	0.281	0.520	0.014		0.052	1.254	1.693	0.282

付録2 FBR及びFRの物質収支について

FBRは、リサイクル毎に燃焼計算を行い、その炉特性（物質収支）を算出した。基準とした炉は、15万MWd/tの大型炉（130万kWe）であり、物質収支は電気出力により100万kWe相当に比例換算して用いた。

FRについては、幾つかのPu組成を用いた場合の燃焼計算を行い、その結果を基に付録1に示した方法で簡易的に物質収支を求めた。FRの基準とした炉心は、9万MWd/t、80万kWeであり、同様に物質収支は電気出力により100万kWeに換算して用いた。FRに関しては、Puバーナーとしての検討が進められている段階であり、燃料の母材としても、UO₂の他にアルミナ等が検討されているが、ここでは最もオーソドックスなMOX炉心を基準とした。この炉心ではボイド反応度を抑えるために相当な扁平炉心となっており、このため炉心上部及び下部への中性子のリークが大きくなるため、約30%以上の高Pu富化度が求められる。

次ページ以降にFBR及びFR基準炉の主要な炉心パラメータ及び物質収支を示した。
計算はPENCIL^{※1}及びCITATION^{※2}コードにより行っている。

※1) 炉心の種々のパラメータを基にPu富化度を最適化する計算コード

※2) 決められた炉心仕様における燃焼計算を行うコード

表

酸化物燃料炉心計算

(3199 MWTH)

V5.30

炉心高さ				100 cm	集合体ピッチ				17.39 cm		
ピン径				8.5 mm	Pu富化度				(内側) 17.08 W/O		
炉心直径				cm	(外側) 20.05 W/O						
サイクル	K-EFF	燃焼反応度 (%△K/KK')	最大高速中性子束 (n/cm ² *s)	最大線出力 (W/cm)				ピーキング係数			
				(内側炉心)	(外側炉心)	(外/内)	(径方向)	(軸方向)	(炉心)		
5	BOC	1.030918	2.52	2.915E+15	406.8	358.2	0.88	1.25	1.18	1.492	
	MOC	1.017290		2.919E+15	398.2	343.0	0.86	1.26	1.17	1.488	
	EOC	1.004854		2.910E+15	388.3	329.2	0.85	1.27	1.15	1.480	
サイクル	増殖比		Fissile Pu量 (T)				原子炉倍増時間 (年)	炉心平均燃焼度 (MWD/T)	出力分担率 (%)		
	(炉心)	(全体)	(炉心)	(軸プラ)	(径プラ)	(計)	(炉心)	(軸プラ)	(径プラ)		
5	BOC	0.792	1.192	4.395	0.657	0.113	5.165	146000	91.5	7.2	1.3
	MOC	0.787	1.187	4.313	0.809	0.168	5.290		90.6	7.7	1.4
	EOC	0.767	1.181	4.236	0.955	0.221	5.411		88.1	10.1	1.9

表一 重金屬物質收支

照射日数 396 パッチ数 5 ピン径 8.5mm ワイヤ径 1.25mm

項目		初 装 荷 爐 心					
		爐 心 燃 料			軸方向ブランケット 燃 料	径方向ブランケット 燃 料	合 計
		内側炉心	外側炉心	合計			
収	本 数	216	210	426	426	78	504
	Pu + U kg	19699	19171	38870	31652	16091	86614
	Pu kg	3332	3808	7140	0	0	7140
	U kg	16367	15363	31731	31652	16091	79474
	Pu (fis) kg	2214	2530	4744	0	0	4744
	U ²³⁸ kg	49	46	95	95	48	238
	Pu 富化度 (%)	16.91	19.86	18.37	0.00	0.00	8.24
	U 濃縮度 (%)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
出	本 数	43	42	85	85	26	111
	Pu + U kg	3741	3683	7423	6315	5361	19100
	Pu kg	654	728	1382	96	23	1500
	U kg	3087	2955	6042	6219	5339	17600
	Pu (fis) kg	426	472	898	92	23	1012
	U ²³⁸ kg	7	7	14	16	15	45
	Pu 富化度 (%)	17.48	19.77	18.62	1.52	0.43	7.85
	U 濃縮度 (%)	0.23	0.24	0.23	0.26	0.28	0.26

表一 重金属物質收支

照射日数 396 パッチ数 5 ピン径 8.5mm ワイヤ径 1.25mm

項目		平衡炉心					
		炉心燃料			軸方向ブランケット 燃料	径方向ブランケット 燃料	合計
		内側炉心	外側炉心	合計			
荷	本数	43	42	85	85	26	111
	Pu + U kg	3940	3834	7774	6330	5364	19468
	Pu kg	666	762	1428	0	0	1428
	U kg	3273	3073	6346	6330	5364	18040
	Pu (fis) kg	443	506	949	0	0	949
	U ^m kg	10	9	19	19	16	54
	Pu 富化度 (%)	16.90	19.87	18.37	0.00	0.00	7.34
出	U 濃縮度 (%)	0.31	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30
	本数	43	42	85	85	26	111
	Pu + U kg	3583	3575	7158	6284	5355	18797
	Pu kg	642	709	1350	167	56	1574
	U kg	2941	2867	5808	6117	5299	17223
	Pu (fis) kg	413	454	866	155	54	1076
	U ^m kg	5	6	11	15	15	40
Pu 富化度 (%)		17.92	19.83	18.86	2.66	1.05	8.37
U 濃縮度 (%)		0.17	0.21	0.19	0.25	0.28	0.23

表一 重金屬物質収支

照射日数 396 パッチ数 5 ピン径 8.5mm ワイヤ径 1.25mm

項目		閉鎖時					
		炉心燃料			軸方向ブランケット 燃料	径方向ブランケット 燃料	合計
		内側炉心	外側炉心	合計			
荷	本数	216	210	426	426	78	504
	Pu + U kg	18397	18198	36595	31532	16075	84203
	Pu kg	3249	3597	6846	624	115	7586
	U kg	15148	14601	29749	30908	15960	76617
	Pu (fis) kg	2106	2317	4423	595	113	5131
	U ²³⁵ kg	29	32	62	78	45	185
	Pu 富化度 (%)	17.66	19.77	18.71	1.98	0.72	9.01
出	U 濃縮度 (%)	0.19	0.22	0.21	0.25	0.28	0.24
	本数	216	210	426	426	78	504
	Pu + U kg	18040	17939	35979	31486	16066	83532
	Pu kg	3224	3544	6769	792	171	7732
	U kg	14816	14395	29211	30694	15895	75800
	Pu (fis) kg	2075	2265	4340	750	167	5257
	U ²³⁵ kg	25	29	54	73	43	171
Pu 富化度 (%)		17.87	19.76	18.81	2.52	1.06	9.26
U 濃縮度 (%)		0.17	0.20	0.18	0.24	0.27	0.23

表 FBR基準炉物質収支 (3199MWth, 130万kWe, 146GWD/t)

全領域物質収支 (kg)	初装荷炉心	平衡初期	平衡末期	バランス	新燃料装荷	取出し燃料
PU238	1.344E+02	9.523E+01	8.583E+01	-9.390E+00	2.689E+01	1.749E+01
PU239	3.916E+03	4.530E+03	4.706E+03	1.757E+02	7.832E+02	9.589E+02
PU240	1.772E+03	1.880E+03	1.913E+03	3.260E+01	3.544E+02	3.870E+02
PU241	8.280E+02	6.002E+02	5.512E+02	-4.894E+01	1.656E+02	1.167E+02
PU242	4.896E+02	4.800E+02	4.758E+02	-4.200E+00	9.792E+01	9.372E+01
U235	2.384E+02	1.846E+02	1.708E+02	-1.375E+01	5.412E+01	4.037E+01
U236	0.000E+00	1.237E+01	1.540E+01	3.040E+00	0.000E+00	3.040E+00
U238	7.924E+04	7.642E+04	7.561E+04	-8.062E+02	1.799E+04	1.718E+04
AM241	8.364E+01	1.018E+02	1.047E+02	2.930E+00	1.673E+01	1.965E+01
PU..TOTAL	7139.83	7586.05	7731.78	145.72	1427.97	1573.69
PU..FISSILE	4744.04	5130.62	5257.34	126.72	948.81	1075.53
FIS.RATIO.(%)	66.44	67.63	68	0	66.44	68.34
PU..ENRICHMENT.(W/O)	8.24	9	9.24	0	7.33	8.36
U..TOTAL	79474.13	76616.69	75799.75	-816.91	18040.32	17223.41
U235	238.42	184.59	170.84	-13.75	54.12	40.37
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.3	0.24	0.23	0	0.3	0.23
HM..TOTAL	86697.56	84304.44	83636.13	-668.25	19485.02	18816.76

炉心部物質収支 (kg)	初装荷炉心	平衡初期	平衡末期	バランス	新燃料装荷	取出し燃料
PU238	1.344E+02	9.523E+01	8.583E+01	-9.390E+00	2.689E+01	1.749E+01
PU239	3.916E+03	3.824E+03	3.791E+03	-3.286E+01	7.832E+02	7.503E+02
PU240	1.772E+03	1.848E+03	1.867E+03	1.844E+01	3.544E+02	3.728E+02
PU241	8.280E+02	5.990E+02	5.494E+02	-4.964E+01	1.656E+02	1.160E+02
PU242	4.896E+02	4.800E+02	4.758E+02	-4.230E+00	9.792E+01	9.369E+01
U235	9.519E+01	6.166E+01	5.391E+01	-7.750E+00	1.904E+01	1.129E+01
U236	0.000E+00	7.120E+00	8.650E+00	1.530E+00	0.000E+00	1.530E+00
U238	3.164E+04	2.968E+04	2.915E+04	-5.323E+02	6.327E+03	5.795E+03
AM241	8.364E+01	1.017E+02	1.046E+02	2.900E+00	1.673E+01	1.963E+01
PU..TOTAL	7139.83	6846.38	6768.7	-77.68	1427.97	1350.29
PU..FISSILE	4744.04	4422.9	4340.4	-82.5	948.81	866.31
FIS.RATIO.(%)	66.44	64.6	64.12	0	66.44	64.16
PU..ENRICHMENT.(W/O)	18.33	18.66	18.76	0	18.33	18.81
U..TOTAL	31730.61	29749.02	29210.51	-538.51	6346.12	5807.6
U235	95.19	61.66	53.91	-7.75	19.04	11.29
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.3	0.21	0.18	0	0.3	0.19
HM..TOTAL	38954.09	36697.11	36083.82	-613.3	7790.81	7177.51

軸ブランケット部物質収支 (kg)	初装荷炉心	平衡初期	平衡末期	バランス	新燃料装荷	取出し燃料
PU238	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
PU239	0.000E+00	5.938E+02	7.480E+02	1.542E+02	0.000E+00	1.542E+02
PU240	0.000E+00	2.957E+01	4.201E+01	1.245E+01	0.000E+00	1.245E+01
PU241	0.000E+00	1.080E+00	1.740E+00	6.600E-01	0.000E+00	6.600E-01
PU242	0.000E+00	3.000E-02	5.000E-02	2.000E-02	0.000E+00	2.000E-02
U235	9.496E+01	7.790E+01	7.346E+01	-4.440E+00	1.899E+01	1.455E+01
U236	0.000E+00	4.400E+00	5.500E+00	1.100E+00	0.000E+00	1.100E+00
U238	3.156E+04	3.083E+04	3.062E+04	-2.100E+02	6.311E+03	6.101E+03
AM241	0.000E+00	4.000E-02	7.000E-02	3.000E-02	0.000E+00	3.000E-02
PU..TOTAL	0	624.46	791.82	167.36	0	167.36
PU..FISSILE	0	594.87	749.76	154.89	0	154.89
FIS.RATIO.(%)	0	95.26	94.69	0	0	92.55
PU..ENRICHMENT.(W/O)	0	1.98	2.51	0	0	2.66
U..TOTAL	31652.38	30907.56	30694.22	-213.33	6330.47	6117.14
U235	94.96	77.9	73.46	-4.44	18.99	14.55
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.3	0.25	0.24	0	0.3	0.24
HM..TOTAL	31652.38	31532.05	31486.11	-45.95	6330.47	6284.53

径ブランケット部物質収支	初装荷炉心	平衡初期	平衡末期	バランス	新燃料装荷	取出し燃料
PU238	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
PU239	0.000E+00	1.128E+02	1.671E+02	5.429E+01	0.000E+00	5.429E+01
PU240	0.000E+00	2.370E+00	4.080E+00	1.710E+00	0.000E+00	1.710E+00
PU241	0.000E+00	4.000E-02	9.000E-02	4.000E-02	0.000E+00	4.000E-02
PU242	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
U235	4.827E+01	4.503E+01	4.346E+01	-1.570E+00	1.609E+01	1.452E+01
U236	0.000E+00	8.500E-01	1.260E+00	4.100E-01	0.000E+00	4.100E-01
U238	1.604E+04	1.591E+04	1.585E+04	-6.390E+01	5.348E+03	5.284E+03
AM241	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
PU..TOTAL	0	115.22	171.27	56.05	0	56.05
PU..FISSILE	0	112.85	167.19	54.34	0	54.34
FIS.RATIO.(%)	0	97.94	97.62	0	0	96.95
PU..ENRICHMENT.(W/O)	0	0.72	1.07	0	0	1.05
U..TOTAL	16091.18	15960.17	15895.11	-65.06	5363.73	5298.67
U235	48.27	45.03	43.46	-1.57	16.09	14.52
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.3	0.28	0.27	0	0.3	0.27
HM..TOTAL	16091.18	16075.39	16066.38	-9.01	5363.73	5354.71

表

酸化物燃料炉心計算

(2080 MWTH)

V4.00

炉心高さ				60 cm	集合体ピッチ				18.92 cm			
ビン径				7.5 mm	Pu富化度		(内側)		28.47 W/O			
炉心直径				cm			(外側)		31.59 W/O			
サイクル		K-EFF	燃焼反応度 (%ΔK/KK ⁻¹)	最大高速中性子束 (n/cm ² *s)	最大線出力 (W/cm)			ピーピング係数				
6	BOC	1.035604	2.95	1.867E+15	259.5	236.3	0.91	1.22	1.07	1.319		
	EOC	1.004939		1.831E+15	243.5	238.4	0.98	1.15	1.07	1.237		
サイクル		増殖比		Fissile Pu量 (T)			原子炉倍増時間 (年)	炉心平均燃焼度 (MWD/T)	出力分担率 (%)			
		(炉心)	(全体)	(炉心)	(軸プラ)	(径プラ)			(炉心)	(軸プラ)	(径プラ)	
6	BOC	0.505	0.505	4.64	0.00	0.00	4.64	-17.1	91500	100.0	0.0	0.0
	EOC	0.526	0.526	4.43	0.00	0.00	4.43			100.0	0.0	0.0

表一 重金属物質収支

照射日数 182 パッチ数 6 ピン径 7.5mm ウイヤ径 0.10mm

項目	初 装 荷 炉 心					
	炉 心 燃 料			軸方向ブランケット 燃 料	径方向ブランケット 燃 料	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計			
装荷	本 数	324	326	650	650	650
	Pu + U kg	12355	12444	24799	0	24799
	Pu kg	3489	3902	7391	0	7391
	U kg	8865	8542	17407	0	17407
	Pu (fis) kg	2445	2734	5179	0	5179
	U ²³⁵ kg	27	26	52	0	52
	Pu 富化度 (%)	28.24	31.36	29.80	0.00	0.00
	U 濃縮度 (%)	0.30	0.30	0.30	0.00	0.30
取出	本 数	54	54	108	108	108
	Pu + U kg	1970	2007	3976	0	3976
	Pu kg	541	613	1154	0	1154
	U kg	1429	1393	2822	0	2822
	Pu (fis) kg	362	416	778	0	778
	U ²³⁵ kg	3	4	7	0	7
	Pu 富化度 (%)	27.46	30.54	29.02	0.00	0.00
	U 濃縮度 (%)	0.21	0.29	0.25	0.00	0.25

表一 重金屬物質收支

照射日数 182 バッチ数 6 ピン径 7.5mm ワイヤ径 0.10mm

項目		平衡炉心					
		炉心燃料			軸方向ブランケット 燃料	径方向ブランケット 燃料	合計
		内側炉心	外側炉心	合計			
販	本数	54	54	108	108	0	108
	Pu + U kg	2059	2074	4133	0	0	4133
	Pu kg	582	650	1232	0	0	1232
	U kg	1478	1424	2901	0	0	2901
	Pu (fis) kg	408	456	863	0	0	863
	U ^m kg	4	4	9	0	0	9
	Pu 富化度 (%)	28.27	31.34	29.81	0.00	0.00	29.81
	U 濃縮度 (%)	0.27	0.28	0.31	0.00	0.00	0.31
取	本数	54	54	108	108	0	108
	Pu + U kg	1838	1897	3735	0	0	3735
	Pu kg	487	558	1045	0	0	1045
	U kg	1350	1339	2690	0	0	2690
	Pu (fis) kg	304	357	661	0	0	661
	U ^m kg	2	3	5	0	0	5
	Pu 富化度 (%)	26.50	29.41	27.98	0.00	0.00	27.98
	U 濃縮度 (%)	0.15	0.22	0.19	0.00	0.00	0.19

表一 重金屬物質收支

照射日数 182 パッチ数 6 ピン径 7.5mm ワイヤ径 0.10mm

項 目	閉 鎖 時					
	炉 心 燃 料			軸方向ブランケット 燃 料	径方向ブランケット 燃 料	合 計
	内 側 炉 心	外 側 炉 心	合 計			
送 荷	本 数	324	326	650	650	650
	Pu + U kg	11782	11998	23780	0	23780
	Pu kg	3233	3661	6894	0	6894
	U kg	8549	8337	16886	0	16886
	Pu (fis) kg	2161	2475	4636	0	4636
	U ²³⁸ kg	21	22	42	0	42
	Pu 富化度 (%)	27.44	30.51	28.99	0.00	28.99
取 出	U 濃縮度 (%)	0.25	0.26	0.25	0.00	0.25
	本 数	324	326	650	650	650
	Pu + U kg	11561	11821	23382	0	23382
	Pu kg	3138	3568	6707	0	6707
	U kg	8422	8253	16675	0	16675
	Pu (fis) kg	2057	2376	4434	0	4434
	U ²³⁸ kg	18	20	38	0	38
	Pu 富化度 (%)	27.14	30.18	28.68	0.00	28.68
	U 濃縮度 (%)	0.21	0.24	0.23	0.00	0.23

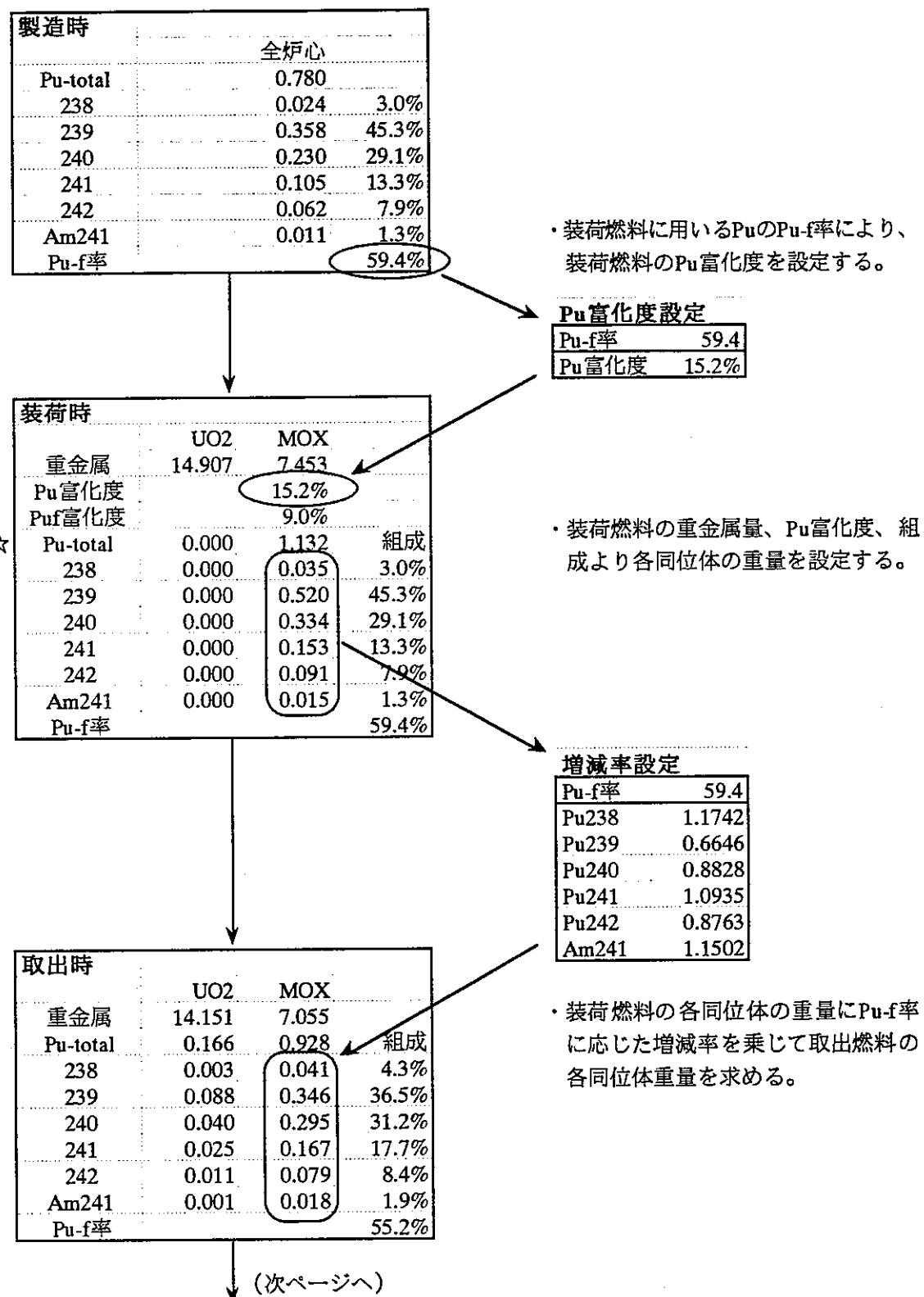
表 FR基準炉物質収支 (2080MWth, 80万kWe, 92GWD/t)

全領域物質収支 (kg)	初装荷炉心	平衡初期	平衡末期	バランス	新燃料装荷	取出し燃料
PU238	1.345E+02	1.217E+02	1.178E+02	-3.910E+00	2.242E+01	1.851E+01
PU239	4.350E+03	3.950E+03	3.799E+03	-1.515E+02	7.249E+02	5.735E+02
PU240	1.667E+03	1.721E+03	1.740E+03	1.844E+01	2.778E+02	2.962E+02
PU241	8.296E+02	6.853E+02	6.348E+02	-5.052E+01	1.383E+02	8.774E+01
PU242	4.110E+02	4.151E+02	4.156E+02	5.800E-01	6.851E+01	6.909E+01
U235	5.222E+01	4.214E+01	3.840E+01	-3.740E+00	8.700E+00	4.960E+00
U236	0.000E+00	2.280E+00	3.090E+00	8.200E-01	0.000E+00	8.200E-01
U238	1.736E+04	1.684E+04	1.663E+04	-2.086E+02	2.893E+03	2.684E+03
NP237	0.000E+00	2.340E+00	3.220E+00	8.800E-01	0.000E+00	8.800E-01
NP239	0.000E+00	2.760E+00	3.320E+00	5.500E-01	0.000E+00	5.500E-01
AM241	8.221E+01	1.056E+02	1.127E+02	7.080E+00	1.370E+01	2.078E+01
AM242	0.000E+00	2.740E+00	3.810E+00	1.070E+00	0.000E+00	1.070E+00
AM243	0.000E+00	1.613E+01	2.232E+01	6.190E+00	0.000E+00	6.190E+00
CM242	0.000E+00	4.980E+00	6.370E+00	1.390E+00	0.000E+00	1.390E+00
CM243	0.000E+00	2.000E-01	2.900E-01	1.000E-01	0.000E+00	1.000E-01
CM244	0.000E+00	1.760E+00	2.880E+00	1.130E+00	0.000E+00	1.130E+00
CM245	0.000E+00	5.000E-02	1.000E-01	5.000E-02	0.000E+00	5.000E-02
PU..TOTAL	7391.26	6893.66	6706.79	-186.87	1231.88	1045.01
PU..FISSILE	5179.12	4635.53	4433.55	-201.98	863.19	661.21
FIS.RATIO.(%)	70.07	67.24	66.11	0	70.07	63.27
PU..ENRICHMENT.(W/O)	29.71	28.82	28.5	0	29.71	27.74
U..TOTAL	17407.26	16886.45	16674.92	-211.53	2901.21	2689.68
U235	52.22	42.14	38.4	-3.74	8.7	4.96
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.3	0.25	0.23	0	0.3	0.18
TRU..TOTAL	82.21	136.56	154.99	18.43	13.7	32.13
NP..TOTAL	0	5.1	6.54	1.44	0	1.44
AM..TOTAL	82.21	124.47	138.81	14.34	13.7	28.04
CM..TOTAL	0	6.99	9.65	2.66	0	2.66
TRU.RATIO.(W/O)	0.33	0.57	0.66	0	0.33	0.85
HM..TOTAL	24880.73	23916.66	23536.7	-379.96	4146.79	3766.82

炉心部物質收支 (kg)	初装荷炉心	平衡初期	平衡末期	バランス	新燃料装荷	取出し燃料
PU238	1.345E+02	1.217E+02	1.178E+02	-3.910E+00	2.242E+01	1.851E+01
PU239	4.350E+03	3.950E+03	3.799E+03	-1.515E+02	7.249E+02	5.735E+02
PU240	1.667E+03	1.721E+03	1.740E+03	1.844E+01	2.778E+02	2.962E+02
PU241	8.296E+02	6.853E+02	6.348E+02	-5.052E+01	1.383E+02	8.774E+01
PU242	4.110E+02	4.151E+02	4.156E+02	5.800E-01	6.851E+01	6.909E+01
U235	5.222E+01	4.214E+01	3.840E+01	-3.740E+00	8.700E+00	4.960E+00
U236	0.000E+00	2.280E+00	3.090E+00	8.200E-01	0.000E+00	8.200E-01
U238	1.736E+04	1.684E+04	1.663E+04	-2.086E+02	2.893E+03	2.684E+03
NP237	0.000E+00	2.340E+00	3.220E+00	8.800E-01	0.000E+00	8.800E-01
NP239	0.000E+00	2.760E+00	3.320E+00	5.500E-01	0.000E+00	5.500E-01
AM241	8.221E+01	1.056E+02	1.127E+02	7.080E+00	1.370E+01	2.078E+01
AM242	0.000E+00	2.740E+00	3.810E+00	1.070E+00	0.000E+00	1.070E+00
AM243	0.000E+00	1.613E+01	2.232E+01	6.190E+00	0.000E+00	6.190E+00
CM242	0.000E+00	4.980E+00	6.370E+00	1.390E+00	0.000E+00	1.390E+00
CM243	0.000E+00	2.000E-01	2.900E-01	1.000E-01	0.000E+00	1.000E-01
CM244	0.000E+00	1.760E+00	2.880E+00	1.130E+00	0.000E+00	1.130E+00
CM245	0.000E+00	5.000E-02	1.000E-01	5.000E-02	0.000E+00	5.000E-02
PU..TOTAL	7391.26	6893.66	6706.79	-186.87	1231.88	1045.01
PU..FISSILE	5179.12	4635.53	4433.55	-201.98	863.19	661.21
FIS.RATIO.(%)	70.07	67.24	66.11	0	70.07	63.27
PU..ENRICHMENT.(W/O)	29.71	28.82	28.5	0	29.71	27.74
U..TOTAL	17407.26	16886.45	16674.92	-211.53	2901.21	2689.68
U235	52.22	42.14	38.4	-3.74	8.7	4.96
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.3	0.25	0.23	0	0.3	0.18
TRU..TOTAL	82.21	136.56	154.99	18.43	13.7	32.13
NP..TOTAL	0	5.1	6.54	1.44	0	1.44
AM..TOTAL	82.21	124.47	138.81	14.34	13.7	28.04
CM..TOTAL	0	6.99	9.65	2.66	0	2.66
TRU.RATIO.(W/O)	0.33	0.57	0.66	0	0.33	0.85
HM..TOTAL	24880.73	23916.66	23536.7	-379.96	4146.79	3766.82

付録3 リサイクル計算の概要

本解析に用いたリサイクルのフローを、シナリオ①のPWR（4.8万MWd/t）を例として示す。他の炉型についても基本的に同様なフローで構成される。



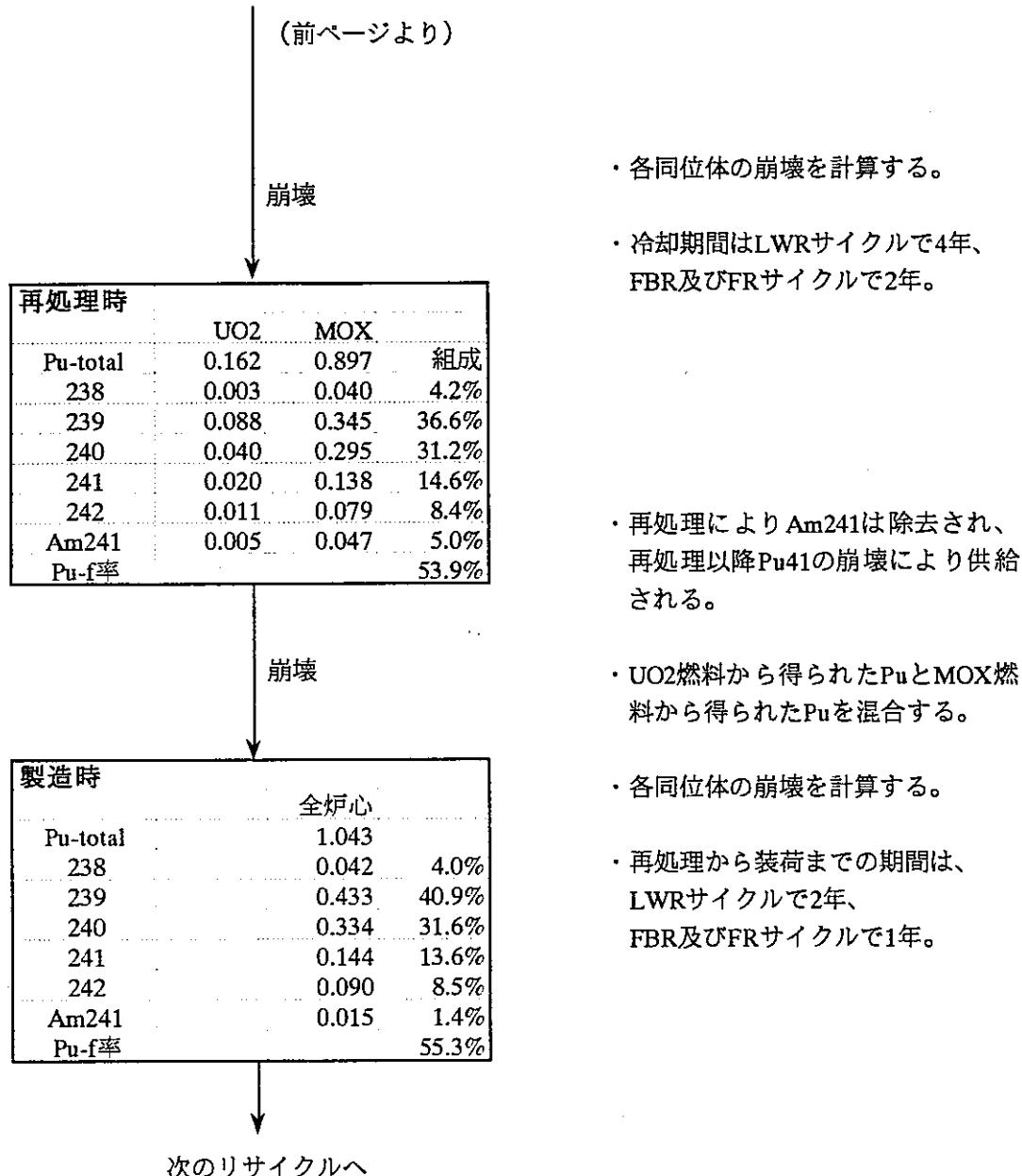


図-付13 リサイクルフロー

※シナリオ③及び④において装荷燃料のPu量（図中☆印）が不足する場合には、不足分はそれぞれLWR取出燃料及びプルサーマル取出燃料から補充され、再度Pu組成を計算し、装荷燃料組成を求ることとなる。