

分冊

MA及びLLFPのリサイクルによる
高速炉サイクルでの平衡炉心の検討(Ⅱ)
—LLFPの元素分離による炉内閉じ込めの検討—
(研究報告書)

2000年2月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

MA及びLLFPのリサイクルによる高速炉サイクルでの平衡炉心の検討（II）

—LLFPの元素分離による炉内閉じ込めの検討—

(研究報告書)

水谷昭彦*、庄野 彰*、石川 真*

要 旨

これまで高速炉を中核とする核燃料リサイクルシステムにおける、自己完結型システムの炉心概念検討を行ってきた。このシステムは、自身の炉で生成されるMA (Minor Actinide) 及びLLFP (Long-Lived Fission Product) をリサイクルし、炉内に閉じ込めてることによってそれら核種の消滅をはかるというものであり、「平衡炉心」概念と呼ばれるものである。しかしながら、前回までの検討では、LLFPは同位体分離を仮定することによって炉心にリサイクルされており、同位体分離の技術的困難さも相まって、核燃料サイクルシステムの経済性という観点からは現実的な検討にはなっていない。

本解析では、酸化物、窒化物、及び金属燃料に対して、LLFPの分離をこれまで仮定していた同位体分離から元素分離に変更して、「平衡炉心」概念の実現可能性を評価する。すなわち、これまで同位体分離を仮定して炉内に閉じ込めていた7つのLLFP核種 (^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I 及び ^{135}Cs) のうち、どれだけの核種を元素分離により炉内に閉じ込めて「平衡炉心」を成立させることができるか、核特性の観点より検討を行うものである。この報告書では、地層処分のリスク及びLLFPの炉内閉じ込め許容量、という2つの観点から、同位体分離及び元素分離を核種毎に組み合わせたさまざまなLLFP消滅の組み合わせに対して、平衡炉心の核特性評価を行う。

抵抗係数の大きさから見積もられた地層処分リスクの観点から、そのリスクを負っている順にTc, I 及びSeの3核種であれば元素分離によって、酸化物燃料炉心でも「平衡炉心」に閉じ込められる可能性がある。他方、LLFPを可能な限り炉内に閉じ込めるという観点からは、Pd及びZrを除く5核種のLLFP (Tc, I, Se, Sn 及びCs) であれば窒化物燃料炉心を用いた場合において、核特性を損なわずに元素分離によって炉心に閉じ込めた「平衡炉心」成立の可能性がある。

*) 大洗工学センター システム技術開発部 炉心技術開発Gr.

Investigation of Equilibrium Core by Recycling MA and LLFP in Fast Reactor Cycle (II)

- Investigation of LLFP Confined in Equilibrium Core with Element Separation -

Akihiko Mizutani*, Akira Shono* and Makoto Ishikawa*

Abstract

Feasibility study on a self-consistent fuel cycle system has been performed in the nuclear fuel recycle system with fast reactors. In this system, the self-generated MAs (Minor Actinides) and LLFPs (Long-Lived Fission Products) are confined and incinerated in the fast reactor, which is called the "Equilibrium Core" concept. However, as the isotope separations for selected LLFPs have been assumed in this cycle system, it seems that this assumption is far from realistic one from the viewpoint of economy with respect to the fuel cycle system.

In this study, the possibility for realization of the "Equilibrium Core" concept is evaluated for three fuel types such as oxide, nitride and metallic fuels, provided that the isotopic separation of LLFPs is changed to the element one. This study provides, that is to say, how many LLFP elements can be confined in the "Equilibrium Core" with element separation. This report examines the nuclear properties of the "Equilibrium Core" for various combinations of LLFP incineration schemes from the viewpoints of the risk of geological disposal and the limit in confinable quantity of LLFPs.

From the viewpoint of the risk of geological disposal estimated by the retardation factor, it is possible to confine with element separation for Tc, I and Se even in the oxide fueled core. From the standpoint of the limit of confinable amounts of LLFPs, on the other hand, Tc, I, Se, Sn and Cs can be confined with element separation in case that the nitride fuel is chosen.

*) Reactor Physics Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

目 次

第1章 緒言	...	1
第2章 検討内容及び条件等	...	2
2. 1 「平衡炉心」	...	2
2. 2 「平衡炉心」の炉心仕様	...	2
2. 3 核特性解析手法及び解析条件	...	3
2. 4 元素分離によるLLFP炉内閉じ込めの考え方	...	4
2. 5 核特性検討ケース	...	5
2. 6 同位体分離を仮定したLLFP炉内閉じ込めによる 核特性解析結果 (CASE 1)	...	5
第3章 解析結果及び考察	...	14
3. 1 各「平衡炉心」の核特性	...	14
3. 2 Zr及びPdの元素分離による炉内閉じ込めが困難である理由	...	16
3. 2. 1 LLFP核種の核種数密度	...	16
3. 2. 2 LLFP核種が燃料炉心に占める体積	...	17
3. 2. 3 LLFP核種の核的性質	...	18
3. 2. 4 まとめ	...	18
3. 3 CASE 10及びCASE 15に関する「その他」の炉心特性	...	18
3. 3. 1 70群中性子スペクトル	...	19
3. 3. 2 ドップラー反応度係数	...	20
3. 3. 3 Naボイド反応度	...	20
3. 3. 4 マスバランス	...	20
第4章 結言	...	46
参考文献	...	47
謝辞	...	47
付録 核特性表及び重金属物質表	...	48

図表リスト

表リスト

- | | |
|--------|--|
| 表2-1 | 「平衡炉心」炉心仕様 |
| 表2-2 | LLFP核種の一群捕獲断面積（酸化物燃料炉心） |
| 表2-3 | 核特性検討ケース |
| 表2-4 | 「平衡炉心」核特性解析結果（CASE1） |
| 表2-5 | U及びPuの核種数密度（CASE1） |
| 表3-1 | 核特性検討ケース |
| 表3-2 | 同位体分離及び元素分離による閉じ込めLLFP核種数密度 |
| 表3-3 | LLFP核種の一群捕獲断面積 |
| 表3-4 | 炉心特性解析結果（CASE1,CASE10及びCASE15） |
| 表3-5 | ドップラー反応度及び反応度係数 寄与核種別 解析結果
（CASE1,CASE10及びCASE15） |
| 表3-6 | Naボイド反応度 寄与因子別 解析結果（CASE1,CASE10及びCASE15） |
| 表3-7 | ^{238}U の燃料炉心内の物質収支 |
| 表3-8-1 | 酸化物燃料炉心のU及びPu物質収支 |
| 表3-8-2 | 窒化物燃料炉心のU及びPu物質収支 |
| 表3-8-3 | 金属燃料炉心のU及びPu物質収支 |

図リスト

- 図2-1 「平衡炉心」の設定条件
 図2-2 1600MWt MOX 燃料炉の炉心配置図例
 図2-3 炉心特性解析フロー

図3-1-1 Pu富化度
 図3-1-2 燃焼欠損反応度
 図3-1-3 最大線出力
 図3-1-4 最大高速フルエンス
 図3-1-5 増殖比 (EOC)
 図3-1-6 取り出し燃料平均燃焼度

図3-2 元素分離による閉じ込めLLFP核種数密度
 図3-3 LLFP核種が炉心燃料に占める体積割合
 図3-4-1 内側炉心Pu富化度 (体積固定)
 図3-4-2 燃焼欠損反応度 (体積固定)
 図3-4-3 増殖比 (体積固定)
 図3-5-1 内側炉心Pu富化度 (体積及び数密度固定)
 図3-5-2 燃焼欠損反応度 (体積及び数密度固定)
 図3-5-3 増殖比 (体積及び数密度固定)
 図3-6 ドップラー反応度係数 (CASE1,CASE10及びCASE15)
 図3-7-1 酸化物燃料炉心の中性子スペクトル (CASE1,CASE10及びCASE15)
 図3-7-2 窒化物燃料炉心の中性子スペクトル (CASE1,CASE10及びCASE15)
 図3-7-3 金属燃料炉心の中性子スペクトル (CASE1,CASE10及びCASE15)
 図3-7-4 酸化物燃料炉心の低エネルギー域中性子スペクトル
 (CASE1,CASE10及びCASE15)
 図3-7-5 窒化物燃料炉心の低エネルギー域中性子スペクトル
 (CASE1,CASE10及びCASE15)
 図3-7-6 金属燃料炉心の低エネルギー域中性子スペクトル
 (CASE1,CASE10及びCASE15)

第1章 緒言

高速炉を中心とする核燃料リサイクルシステムにおいて、運転期間中に自身の炉で生成されるMA (Minor Actinide) 及びLLFP (Long Life Fission Product) をリサイクルし、炉内に閉じ込めるこことによってそれら核種の消滅をはかる、自己完結型炉の炉心概念検討に資するため¹⁾、これまでに電気出力60万kW、径ブランケット無しの典型的なNa冷却酸化物燃料炉心の炉心仕様で、自己生成分のMA及びLLFPを原子炉内に閉じ込めた「平衡炉心」の核特性解析を酸化物、窒化物及び金属燃料炉心に関して行ってきた。そこで得られた結論は、炉内への閉じ込め対象となる7つのLLFP核種 (⁷⁹Se, ⁹³Zr, ⁹⁹Tc, ¹⁰⁷Pd, ¹²⁶Sn, ¹²⁹I 及び ¹³⁵Cs) に対して同位体分離を仮定すれば、酸化物燃料炉心であっても、Puを自給してMA 及びLLFPを炉内に閉じ込めた「平衡炉心」が、典型的なNa冷却MOX燃料炉心の炉心仕様に大幅な変更を加えることなしに成立する可能性がある、というものであった^{2),3)}。

しかしながら、同位体分離を仮定することによってこれらLLFPを炉心にリサイクルすることは、同位体分離自身の技術的困難さもさることながら、同位体分離技術の開発コストなどを含めた核燃料サイクルシステム全般の経済性という観点からは、現実的な検討になっているとは言はずらい。また、LLFPを同位体分離ではなく元素分離によって炉に戻すことにより、再処理により一部のFPのみをサイクル外へ廃棄するという、高速炉の特徴を最大限に生かした先進的高速炉サイクル概念の実現へ向けて一步前進をみることになる。

本解析では、酸化物、窒化物、及び金属燃料に対して、LLFPの分離をこれまで仮定していた同位体分離から元素分離に変更して、「平衡炉心」概念の実現可能性を評価する⁴⁾。すなわち、これまで同位体分離を仮定して炉内に閉じ込めていた7つの上記LLFP核種のうち、どれだけの核種を元素分離により炉内に閉じ込めて「平衡炉心」を成立させることが可能であるか、核特性の観点より検討を行うものである。この報告書では、地層処分のリスク及びLLFPの炉内閉じ込め許容量、という2つの観点から、同位体分離及び元素分離を核種毎に組み合わせたさまざまなLLFP消滅の組み合わせに対して、「平衡炉心」の核特性に関する評価を行う。

解析内容は、典型的なMOX燃料高速炉（600MWe、Na冷却）を「平衡炉心」共通の炉心仕様とし、燃料種別を変更して、Pu富化度、燃焼欠損反応度、増殖比、ドップラー係数及びNaボイド反応度などの核特性を、各LLFP消滅の組み合わせ（同位体分離と元素分離との）に対して検討するというものである。

第2章 検討内容及び条件等

本解析では、酸化物、窒化物、及び金属燃料に対して、これまで同位体分離を仮定して炉内に閉じ込めていた7つのLLFP核種 (^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I 及び ^{135}Cs) のうち、どれだけの核種を元素分離により炉内に閉じ込めて「平衡炉心」を成立させることができあるか、核特性の観点よりパラメトリックに検討を行うものである。

本章ではまず、検討対象となる「平衡炉心」の設定条件及び炉心仕様を述べ、ついで本解析に用いる手法や解析条件を述べる。そして、元素分離によるLLFPの原子炉内閉じ込めの2つの視点、1つは地層処分のリスクでありもう1つはLLFPの炉内閉じ込め許容量であるが、これらについて説明し、さらに同位体分離及び元素分離を核種毎に組み合わせたさまざまなLLFP消滅の組み合わせ、つまり核特性検討ケースを示す。最後に、これまでに検討済みである、7核種のLLFP全てに対して同位体分離を仮定して炉内に閉じ込めた場合の「平衡炉心」の核特性解析結果に関して、簡単にふれることにする。

2. 1 「平衡炉心」

図2-1に本検討における「平衡炉心」の設定条件を示す。自身の炉で生成されるMAはRE（希土類元素）と分離し、リサイクル時のロス無しに完全に回収され炉心に戻されると仮定する。ここで考慮するMAは、 ^{237}Np , ^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , ^{242}Cm , ^{243}Cm , ^{244}Cm 及び ^{245}Cm の8核種である。また、自身の炉で生成されるLLFPは同位体分離もしくは元素分離によってロス無しに回収され炉心に戻されると仮定する。炉心への閉じ込め対象となるLLFPは、 ^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I 及び ^{135}Cs の7核種である。これら7核種は、核分裂収率が大きく半減期が長い為、貯蔵施設内に蓄積する量が多い⁵⁾。そのため、アクチニドが回収漏れ無しにリサイクルされる（したがって放射性物質の漏れがないとする）と、ここで考えているサイクルシステムで問題となるのはこれら7つのLLFP核種の毒性のみとなる。このことから本研究では、上記7つのLLFP核種を炉内閉じ込め対象核種として選択することにしている。なお、MA及びLLFPは炉心に均質に装荷されるものと仮定し解析を行う。

この高速炉サイクルシステムでは、Uのみ外部から供給されるものとし、Puに関しては軸ブランケットからの供給を含めて自給を目指すものである。なお、リサイクルされるPu, MA及びLLFP以外の核種、つまりLLFP以外のFPは一時貯蔵の後、高速炉サイクル外へ廃棄されるものと仮定している。

2. 2 「平衡炉心」の炉心仕様

本解析では、LLFP核種毎に同位体分離及び元素分離による炉内閉じ込めを組み合わせたさまざまなLLFP消滅スキームに対して、さらには3種類の燃料種別に対して、「平衡炉心」の核特性をパラメトリックに比較検討するが、これら検討は共通の炉心仕様下で行

うものとする。表2-1に検討対象となる炉心仕様を、図2-2には炉心配置図例を各々示す。

解析に用いる共通炉心は、熱出力1600MWの典型的なNa冷却MOX燃料高速炉心であり、炉心上下に35cmづつの軸方向ブランケットを持ち、径方向ブランケットは装備していない。また燃料種別変更の場合も、燃料固有の物性値（理論密度など）のみを変えて解析を行う。

なお、燃料種別を変更させて各炉心のポテンシャルを比較検討するといった類の解析を行う場合、各種燃料の持つ特徴を最大限に生かし、かつ高燃焼度炉心やコンパクト炉心といった設計の意図を反映させて、炉心の最適化をはかるのが常であり、また工学的に意味のあることである。本検討では計算の簡略化を主な理由として炉心の最適化を行ってはいないが、強いてその学術的な根拠を挙げるとすれば、まずは炉心仕様を固定して、多重リサイクルの究極の姿としてPuのみならずMAやLLFPの組成も平衡になっている炉心の核特性を比較検討し、その特徴を踏まえて次のステップとして「平衡炉心」としての存在価値を根拠にその炉心の目指すべき方向性を定め、それをもとに炉心の最適化を行っていく、というのも1つの研究手法であると考えるところである。

2. 3 核特性解析手法及び解析条件

本検討において核特性比較検討のために基準ケースとして用いる、同位体分離を仮定して7核種のLLFP (^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I 及び ^{135}Cs) を炉内に閉じ込めた場合の核特性は、酸化物燃料、窒化物燃料及び金属燃料炉心に関して各々既に解析済であり²⁾、その炉心核特性解析に用いた解析フローを図2-3に示す。

「平衡炉心」の平衡Pu同位体組成比、MA及びLLFPの平衡量と平衡組成は、それぞれJENDL-3.2⁶⁾核データライブラリーを用いたORIGEN2⁷⁾コードによる繰り返し計算によって見積もる。この際、1回の計算は3年間燃焼し30日間の冷却期間を経るものとし、この燃焼計算を核種数密度（実際には重量）が収束するまで繰り返す。炉心の核特性は、計算ケース毎に各々7エネルギー群の実効ミクロ断面積を、SLAROM⁸⁾コードによりJENDL-2⁹⁾及びJENDL-3.2核データから作成し、その定数を用いてPENCILコード¹⁰⁾により評価する。また、Naボイド反応度及びドップラー反応度係数の算出には、厳密及び一次摂動計算¹¹⁾をそれぞれ用いる。

本検討では、2.5節で示す種々の検討ケース（LLFP消滅スキーム）に関してパラメトリックサーベイを行うが、その際、平衡Pu同位体組成比及びMAの平衡量と平衡組成は改めて計算せずに、近似的に上記基準ケースの燃料種別毎の値に固定して解析を行う。つまり、LLFPの平衡量と平衡組成が各検討ケース固有の値として求まる事になる。従って本検討で用いる解析フローは、前述の図2-3と基本的には同じであるが、ORIGEN2コードにより平衡量及び平衡組成を求めるのは、7つのLLFP核種に対してのみということになる。また、LLFP核種の元素分離による炉内閉じ込め解析を行う場合、計算の簡素化のために、 ^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I 及び ^{135}Cs を元素として扱い解析を行う。つまり、

Seは同位体として⁷⁹Seのみを持つと仮定することになる。この仮定は、得られる結果に少なからず影響を与えるものであることから、表2-2に本計算で平衡量及び平衡組成を見積もる為に用いるLLFP核種の一群捕獲断面積と、核種数密度を重みとして計算された各LLFP「元素」の一群捕獲断面積（本計算では用いない）を示す。ここに示したのは酸化物燃料炉心の値であり、ORIGEN2コードに於いて使用する一群核定数¹²⁾である。

2. 4 元素分離によるLLFP炉内閉じ込めの考え方

本章2.1節において、炉内閉じ込めの対象となる7核種のLLFPは、核分裂収率が大きく半減期が長い為に貯蔵施設内に蓄積する量が多く、アクチニドが回収漏れ無しにリサイクルされると、ここで考えているサイクルシステムで問題となるのはこれら7つのLLFP核種の毒性のみとなると述べた。しかしながら原子炉で生成されるこれらLLFPの毒性は全体として、これらLLFP生成のために消滅したUとその娘核種の毒性より小さいことが知られている¹³⁾。このことから、これらLLFPを原子炉で消滅させるべきか、他のFPと同様（勿論この場合崩壊を期待することは不可能であるが）にサイクルシステム外へ廃棄すべきかは意見の分かれることろである。勿論そうは言っても、Uやその娘核種とFPでは主にその化学的性質が異なることを理由に、長きにわたって毒性を有する物質であるから消滅すべきであるという考え方も存在する。本研究では考え方の1つとして、LLFP消滅処理と地層処分との整合をとる、という観点からLLFP炉内閉じ込めの検討を行うこととする。

MA及びLLFPの核変換の研究において、地層処分のリスクという観点からものをみると、つまりMA及びLLFPの消滅処理と地層処分との整合をとることは重要なことである。地層処分にとっては、ガラス固化体に含まれる放射性物質の岩石中に於ける移動速度が重要な因子となる。その移動速度を決めるパラメータ（実験によって測定）である抵抗係数¹⁴⁾（Pigford,1984）は、Uを1とするとI=0.02,Tc=0.1,Se=1,Sn=20,Cs=20,Zr=100,Pd=non-data (Np=2,Pu=4,Am=60,Cm=40)である¹⁴⁾。この場合、抵抗係数の値が小さいほど地層処分のリスクが高いことを意味し、可能であれば核変換により消滅させることが好ましいということになる。従って、「IとTc」、或いは「IとTcとSe」を消滅させること（本研究では炉内に閉じ込めてること）が地層処分時のリスク低減につながる。なお、本研究ではこれらLLFPを炉内に閉じ込めはするが、その全てを消滅させるわけでは勿論無い。「平衡炉心」では燃焼期間内において、LLFPの生成と消滅がバランスし炉内のLLFP量が一定の値（平衡量）になるだけで、このLLFPはずっと炉心内に閉じ込めると仮定している。つまり、これらLLFPを考えている高速炉サイクルシステム外へ出さないというものである。（なお、同位体分離ではなく元素分離によりこれら地層処分のリスクを担う核種を優先的に閉じ込める理由は、次に述べるもう1つの視点と同様でありここでは割愛する。）

その一方において、7核種のLLFPを出来る限り多く元素分離で炉内に閉じ込めるべきであると考えることは、分離工程の簡素化による高速炉サイクルシステム全般のコスト削減、さらには、仮に同位体分離が技術的に可能になるとしても、分離による回収漏れが地

層処分のリスクに与える影響の軽減という観点から意味のあることである。

以上より本研究の主眼は、上記2つの視点から、すなわち地層処分のリスク低減及び炉内閉じ込め可能限界量という視点から、7つのLLFP核種の元素分離による炉内閉じ込めの可能性を核的に探ることである。前章で述べたように本研究は、LLFPを同位体分離ではなく元素分離によって炉に戻すことにより、再処理により一部のFPのみをサイクル外へ廃棄するという先進的高速炉サイクル概念の実現へ向けた概念研究であり、したがって廃棄に回されるHLW (High Level Waste) を最少化し処分しやすいものとする研究である。

2. 5 核特性検討ケース

表2-3に核特性検討ケースとして、同位体分離及び元素分離を核種毎に組み合わせたさまざまなLLFP炉内閉じ込めの組み合わせを示す。これまでに、7核種のLLFP全てに対して同位体分離を仮定し炉内に閉じ込めた場合の検討は既に行われており、これをCASE1とし、様々な組み合わせに対する核特性比較検討のための基準ケースと位置付ける。なお、この表に示すCASE番号は、燃料種別の変更によらず同一番号とする。

表2-3では、上から順に⁹⁹Tc, ¹²⁹I, ……と並んでいるが、これは核種を元素分離を仮定して炉内に閉じ込めた場合に、その平衡量の各核種が占める体積が小さい順になっている。つまり平衡量で比べた場合、Tc元素の占める体積が最小であり、他方Zr元素の占める体積は最大である。CASE2～CASE8は、7つのLLFP核種のうちどれか1核種のみ元素分離を仮定し、残りの6核種は同位体分離を仮定して、これらLLFPを炉内に閉じ込めた場合の検討ケースである。また、CASE9～CASE14は、地層処分のリスク低減の視点による解析ケースであり、CASE15は炉内閉じ込め可能限界量の視点による解析ケースである。なお、CASE15に関しては、CASE2～CASE8までの核特性解析結果を予め検討して、意図的に設定した検討ケースである。

2. 6 同位体分離を仮定したLLFP炉内閉じ込めによる核特性解析結果(CASE1)

前述したように、CASE1として7核種のLLFP全てに対して同位体分離を仮定し、炉内に閉じ込めた場合の「平衡炉心」の検討は既に行われており²⁾、そこで得られた核特性の解析結果をごく簡単に述べる。表2-4にCASE1の核特性解析結果を示す。解析に用いた炉心仕様は表2-1に示した通りであり、同一炉心仕様で燃料種別のみを変更したものである。Pu同位体組成比、MA及びLLFPの装荷量と組成比は、いずれも各燃料種別に対して求められた平衡値となっている。これらMA及びLLFPは、その平衡量が均質に炉心に装荷されると仮定している。CASE1に関する解析内容の検討は既述の報告書²⁾にゆずり、ここでは2, 3特筆すべき点を挙げる。

まず、平衡量のLLFPの炉内装荷に関して本解析では、ORIGEN2コードにより求めた平衡量に相当するLLFPの炉心内で占めるべき体積を算出し、その体積分を燃料ピン内に確保して核特性計算を行っている。従ってLLFPが炉心に装荷されれば、その分実効燃料体積比は減少することになる。

また、同一炉心仕様で燃料種別のみを変更した解析にも関わらず、窒化物燃料炉心の炉心特性が金属燃料炉心に比べ勝っている。この理由は、窒化物燃料に含まれる¹⁵Nと金属燃料に含まれる10w/oのZrが、両者燃料種別間の実質的な炉内重金属量に差異をもたらし、さらには平衡Pu同位体組成比の違いや燃料種別ごとのSmear-Densityの差、あるいは装荷LLFP量の違いにより、窒化物燃料炉心の炉内インベントリーが²³⁸U, ²³⁹Pu共に金属燃料炉心より大きいことによる。なお参考までに、表2-5に実際にCASE1の「平衡炉心」に装荷されているU及びPuの核種数密度を燃料種別ごとに付す。

表2-1 「平衡炉心」炉心仕様

	項目	酸化物燃料	窒化物燃料	金属燃料
基本仕様	炉出力	1600MWt	←	←
	運転サイクル長さ	365日	←	←
	燃料型式	均質2領域	←	←
	炉心燃料交換パターン	3バッチ	←	←
	炉心直径	280cm	←	←
	炉心高さ	100cm	←	←
	冷却材	Na	←	←
	軸ブランケット	35cm x 2	←	←
	径ブランケット	なし	←	←
燃料仕様	燃料化学形	(U,Pu)O _{1.98}	(U,Pu) ¹⁵ N	U-Pu-10Zr
	理論密度	11.0g/cm ³	14.3g/cm ³	15.9g/cm ³
	ペレット密度	96.0%TD	←	100%TD
	ペレット径	7.09mm	←	6.53mm
	ピン径	8.50mm	←	←
	ピン配列ピッチ	9.85mm	←	←
	被覆管肉厚	0.48mm	←	←
	スミア密度	85.0%	←	75%
	構造材材質	改良オーステナイト鋼	MA957相当鋼	←
	実効燃料体積比	32.5%	31.2%	26.9%
集合体仕様	集合体あたりピン本数	217本	←	←
	ダクト肉厚	4.0mm	←	←
	集合体配列ピッチ	160.7mm	←	←
	燃料集合体数 (IC/OC)	108体／138体	←	←

表 2-2 LLFP核種の一群捕獲断面積（酸化物燃料炉心）

平衡量見積もり計算 で使用した7LLFP核種 の一群捕獲断面積*		核種数密度を重みとして計算した 各LLFP「元素」の一群捕獲断面積		
⁷⁹ Se	3.568E-01	Se	1.010E-01	(77,78,79,80,82)
⁹³ Zr	8.585E-02	Zr	5.212E-02	(90~96)
⁹⁹ Tc	5.764E-01	Tc	5.764E-01	(99)
¹⁰⁷ Pd	1.010E+00	Pd	5.910E-01	(104,105,106,107,108,110)
¹²⁶ Sn	8.489E-03	Sn	5.057E-02	(115~126、但し121,125を除く。)
¹²⁹ I	3.325E-01	I	4.084E-01	(127,129,131)
¹³⁵ Cs	2.075E-01	Cs	2.636E-01	(133~137)

*) ORIGEN2コードで使用した値。

() 内の数字は、核種数密度による重み付けの際に使用した同位体の質量数。

表 2-3 核特性検討ケース

CASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tc-99	X	O	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O
I-129	X	X	O	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O
Se-79	X	X	X	O	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O
Pd-107	X	X	X	X	O	X	X	X	X	O	O	O	O	X	
Sn-126	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	O	O	O	O	O
Cs-135	X	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	O	O	O	O
Zr-93	X	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	O	X	

O : Incineration of Element

X : Incineration of Isotope

表 2-4 「平衡炉心」核特性解析結果 (CASE1)

燃料型	平衡炉心		
	酸化物燃料	窒化物燃料	金属燃料
平衡Pu同位体組成比*[w/o]	1.2/48.6/38.7/6.3/5.2	1.1/62.0/30.4/4.3/2.2	1.2/60.3/31.5/4.6/2.5
Pu富化度(内側/外側)[w/o]	23.0/28.0	14.8/18.9	15.7/20.1
平衡MA装荷量[w/o]	1.18	0.549	0.648
平衡MA組成比**[w/o]	6.7/23.1/1.5/27.7/1.7/0.3/31.5/7.5	19.1/30.0/2.1/21.4/1.8/0.3/20.7/4.5	17.1/26.1/2.0/25.1/1.8/0.2/23.1/4.5
平衡LLFP装荷量[w/o]	15.1	15.0	17.1
平衡LLFP組成比***[w/o]	0.1/28.0/6.9/2.3/26.6/3.5/32.6	0.1/25.2/7.2/2.2/24.9/3.7/36.7	0.1/21.9/7.3/2.3/23.5/3.8/41.1
最大線出力 (RZ計算値) [W/cm]	419	426	417
増殖比(BOC/EOC)	1.04/1.05	1.21/1.19	1.15/1.15
燃焼欠損反応度[%Δk/kk']	3.16	1.08	1.84
取出燃料平均燃焼度 [MWD/t]	95900	72600	78200
最大高速フルエンス [10 ²³ n/cm ²]	2.91	2.87	3.42
ドップラー係数[10 ⁻³ Tdk/dT]	-4.46	-4.62	-3.26
Naボイド反応度[%Δk/kk']	2.54	2.66	3.94
実効燃料体積比[%]	32.5	31.2	26.9

*) 平衡Pu同位体組成比 : $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}$ **) 装荷平衡MA組成比 : $^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{242m}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{242}\text{Cm}/^{243}\text{Cm}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$ ***) 装荷平衡LLFP組成比 : $^{79}\text{Se}/^{93}\text{Zr}/^{99}\text{Tc}/^{107}\text{Pd}/^{126}\text{Sn}/^{129}\text{I}/^{135}\text{Cs}$

表 2-5 U 及び Pu の核種数密度 (CASE1)

		酸化物燃料	窒化物燃料	金属燃料
Inner Core	^{235}U	1.84E-05	2.71E-05	2.47E-05
	^{238}U	6.04E-03	8.89E-03	8.12E-03
	^{239}Pu	8.90E-04	9.66E-04	9.15E-04
	^{240}Pu	7.05E-04	4.71E-04	4.76E-04
	^{241}Pu	1.14E-04	6.64E-05	6.92E-05
	^{242}Pu	9.40E-05	3.38E-05	3.75E-05
Outer Core	^{235}U	1.72E-05	2.58E-05	2.34E-05
	^{238}U	5.65E-03	8.46E-03	7.69E-03
	^{239}Pu	1.09E-03	1.23E-03	1.17E-03
	^{240}Pu	8.61E-04	6.01E-04	6.11E-04
	^{241}Pu	1.40E-04	8.47E-05	8.88E-05
	^{242}Pu	1.15E-05	4.31E-05	4.81E-05

[atoms/barn/cm]

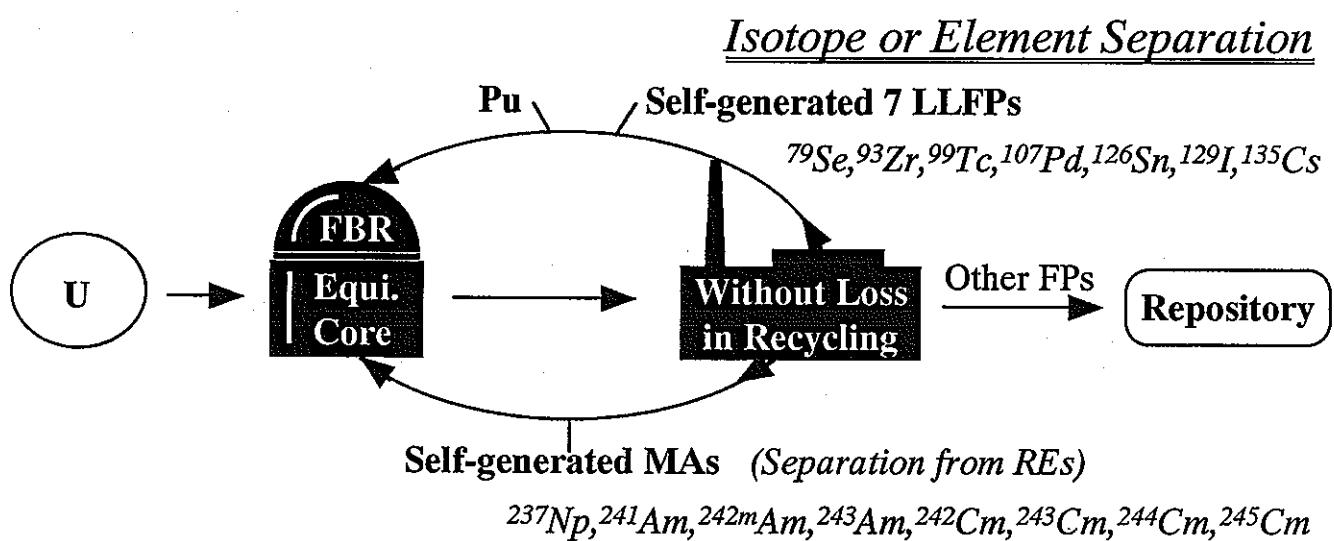
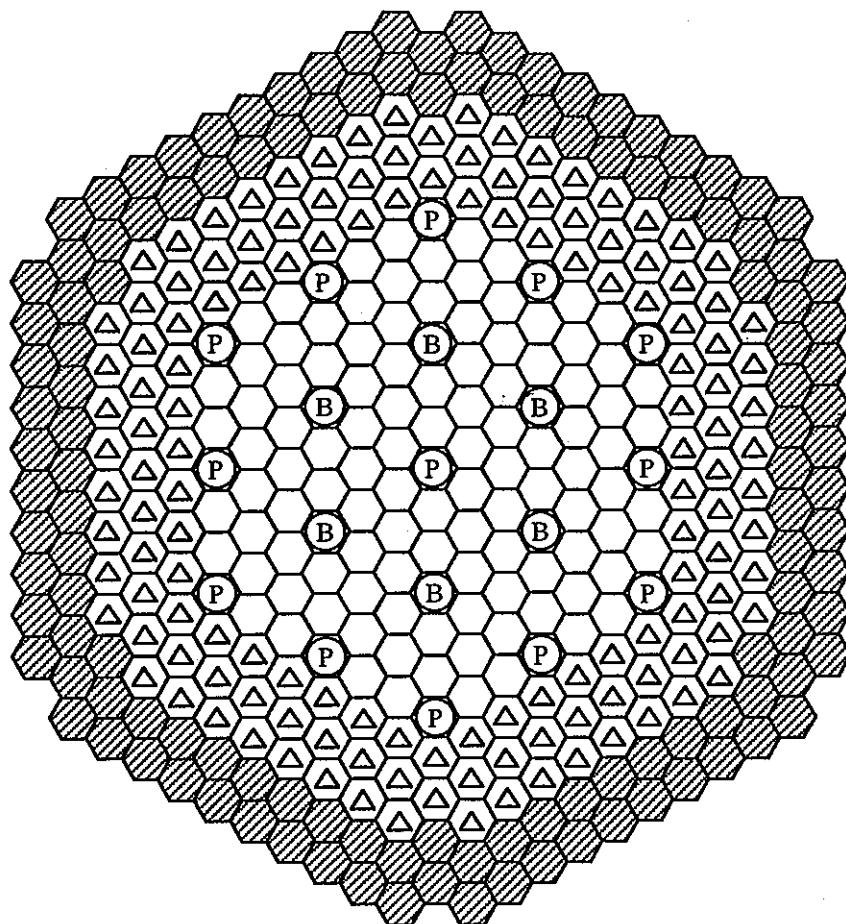


図 2 – 1 「平衡炉心」の設定条件



軸プランケット		
外側炉心	内側炉心	外側炉心
軸プランケット		
約1900		
約2750		
単位 : mm		
 内側炉心 108 体		
 外側炉心 138 体		
 SUS遮蔽体 126 体		
 主炉停止系制御棒 13 体		
 後備炉停止系制御棒 6 体		
合計 391 体		

図 2 - 2 1600Mwt MOX燃料炉の炉心配置図例

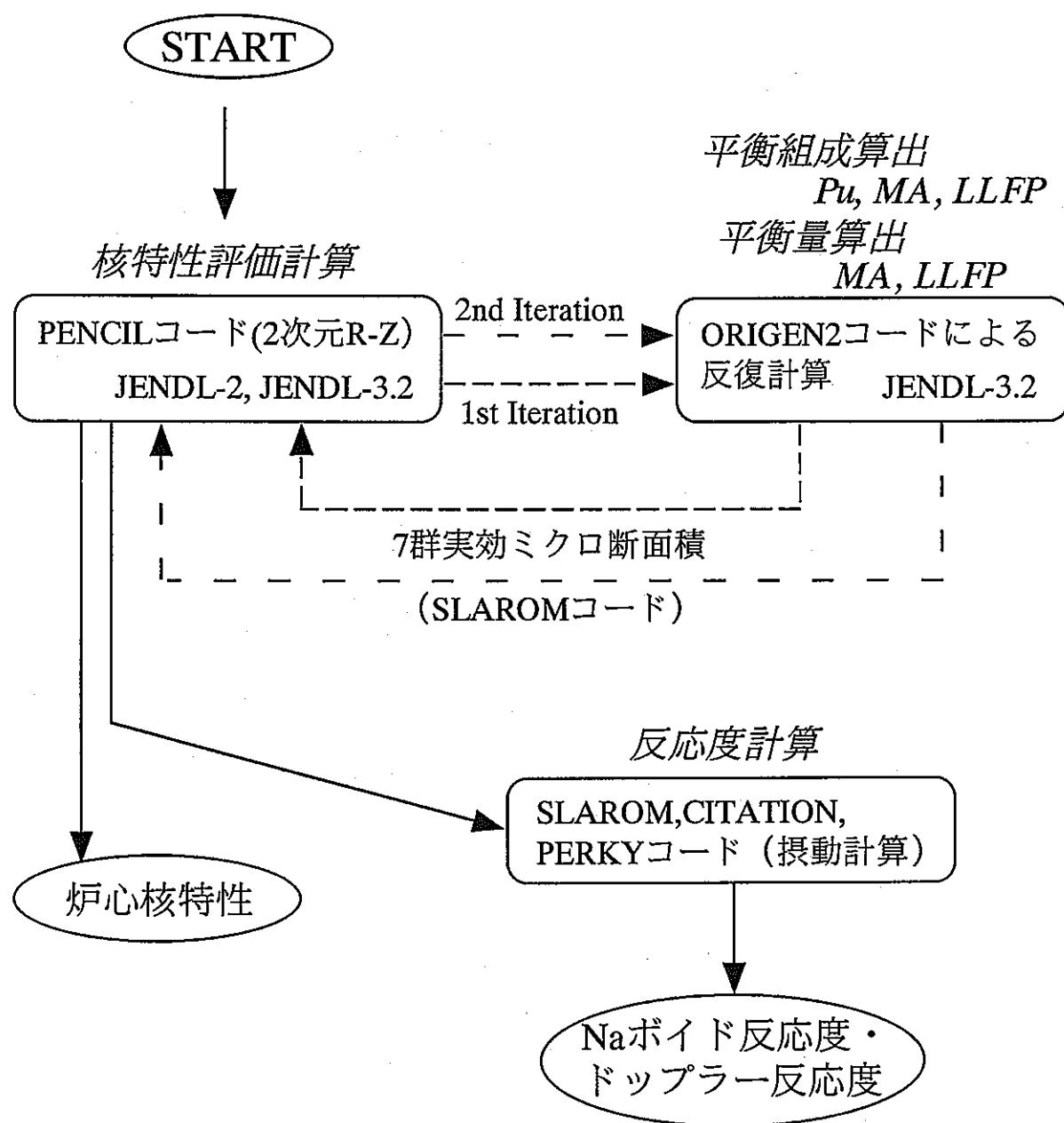


図 2-3 炉心特性解析フロー

第3章 解析結果及び考察

表3-1(表2-3と同一)に示す、同位体分離及び元素分離を核種毎に組み合わせたさまざまなLLFP消滅の組み合わせに対して、「平衡炉心」の核特性を比較検討する。酸化物、窒化物、及び金属燃料に対して、地層処分のリスク低減、及び炉内閉じ込め許容量の2つの視点から、どれだけのLLFP核種を元素分離により炉内に閉じ込めて「平衡炉心」を成立させることができるか、核特性の観点よりパラメトリックに検討を行う。なお、前章で示したCASE1(全てのLLFP核種に対して同位体分離を仮定)に関しては、酸化物燃料炉心であっても「平衡炉心」が成立する可能性があることがわかっている²⁾ため、このCASE1の結果を基準ケースと位置づけ、各ケース検討の際に参照する。

本章ではまず3.1節として、各LLFP消滅スキームに対する核特性解析結果を、Pu富化度、燃焼欠損反応度、最大線出力、最大高速フルエンス、増殖比、及び取り出し燃料平均燃焼度についてそれぞれ示す。続く3.2節において、LLFP元素それぞれの、数密度、炉心に占める体積割合、及び核的性質(捕獲反応による)に対して検討を加えることにより、Pd及びZrについて、元素分離による炉内閉じ込めが困難であることの理由を探る。最後に3.3節にて、CASE10(地層処分のリスク低減という観点から選択)及びCASE15(炉内に閉じ込め得るLLFPの許容量という観点から選択)に対して、中性子スペクトル、ドップラー係数、Naボイド反応度、マスバランスに関する炉心特性結果を、CASE1(7LLFP核種全て同位体分離を仮定)の結果と共に示し考察する。

3.1 各「平衡炉心」の核特性

表3-1の各LLFP消滅スキームに対する核特性解析結果を、Pu富化度、燃焼欠損反応度、最大線出力、最大高速フルエンス、増殖比、及び取り出し燃料平均燃焼度について、図3-1-1から図3-1-6にそれぞれ示す。これらの図で横軸に示されたCASE番号は、表3-1の番号と各々対応している。

はじめに、図3-1-1に示すPu富化度について述べる。ここに示すPu富化度は、内側炉心及び外側炉心の平均値となっている。まず、7核種のLLFPのうち1核種のみを元素分離により炉心に閉じ込めたケースである、CASE2からCASE8に関しては、CASE5(Pdのみ元素)及びCASE8(Zrのみ元素)のPu富化度が高くなっている。他の5ケースはCASE1の値と大差ない。勿論、炉心にLLFP核種を多量に装荷することは、炉心内にLLFPの装荷場所を確保するために実効燃料体積割合が減ること、さらにはLLFPの捕獲反応により炉内中性子経済が悪くなることなどの理由により、サイクルにわたって臨界を維持するのに多量のPu装荷が必要になるわけであるが、Pd及びZrの元素分離による炉内閉じ込めは、こと酸化物燃料に関して35w/oを越えており、現実的なPu富化度とはなっていない。

次に地層処分のリスク低減の観点からみたCASE9からCASE14であるが、CASE11以降は

Pdが元素分離で炉内に閉じ込められるため、Pu富化度が増大する。逆に、Pdに対して同位体分離を仮定して炉内に閉じ込めるCASE9及びCASE10のPu富化度は、CASE1の値とほとんど変わりなく、CASE10とCASE1の差は1w/o程である。また、炉内に閉じ込め可能な許容量の観点からみたCASE15では、PdとZrが同位体分離を仮定して炉内に閉じ込められるために、Pu富化度に関しては問題はない。

続いて、図3-1-2に示した燃焼欠損反応度であるが、CASE5（Pdのみ元素）、CASE7（Csのみ元素）及びCASE8（Zrのみ元素）の値が、そのPu富化度の大きさを反映して大きくなっている。なお、前章図2-2に示した通常の制御棒本数で12ヶ月連続運転を行うために、燃焼欠損反応度は3%dk/kk'近傍が制限値であると考えられ、したがってCASE10の酸化物燃料、及びCASE15に関しては酸化物及び金属燃料炉心に対して、「平衡炉心」成立は難しい。ただし、CASE10の酸化物燃料炉心については、燃焼欠損反応度は3.46%dk/kk'であり、炉心仕様のわずかな変更等により燃焼欠損反応度の改善は可能であると考えられる。

最大線出力に関して図3-1-3より、各燃料種別において許容される値はそれぞれ、～450W/cm（酸化物燃料）、～800W/cm（窒化物燃料）及び400～500W/cm（金属燃料）となっていることから、CASE5の酸化物燃料、CASE8の酸化物及び金属燃料に関して制限値を越えている。また、CASE10及びCASE15に関しては、各燃料種別とともに制限値内に収まっている。

最大高速フルエンスに関して図3-1-4より、改良オーステナイト鋼の制限値($3 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$)を基準に考えると、CASE2～CASE15までのいずれのケースも酸化物及び窒化物に関しては制限値以下である。金属燃料炉心のフルエンスが他の燃料炉心に比べ大きい理由は文献2にゆずることとし、ここでは、CASE2～CASE8の中でフルエンスの小さいCASE5について、その理由を簡単に述べる。

まず、CASE5はPu富化度が大きいために、親核、核分裂性核種を問わず燃料炉心内に存在するPuの核種数密度が他のCASEに比べて大きくなる。さらに、CASE5はPdのみ元素分離で炉内に閉じ込めたケースであり、次節で説明するがPdの中性子捕獲断面積は7つのLLFP核種の中で最大である。したがって、低エネルギー域の中性子が吸収され、さらにはそのPu量の多さにより、CASE5の中性子スペクトルは他のCASEのスペクトルに比べて硬くシフトする。これらの理由により、CASE5の燃料炉心の重核種のマクロ核分裂断面積は大きくなる。本研究におけるパラメトリックサーベイは炉心出力一定の条件下で行われており、炉心平均中性子束はこのマクロ断面積に反比例した大小関係をとる。つまり、CASE5の炉心平均中性子束は他のCASEに比べ小さく、それゆえ最大高速フルエンスも小さくなる。なお、CASE5の中性子束高速群割合は中性子スペクトルの硬化により大きくなるが、炉心平均中性子束は中性子束高速群割合の効果をうち消すほど小さい。

図3-1-5の増殖比に関しては、Pu富化度が高ければ実質的な炉内 ^{238}U 量が少なく

なり、したがって増殖比が小さくなるため、当然ケースごとの変化傾向はPu富化度の変化傾向と（変化の方向は勿論逆であるが）酷似している。「平衡炉心」の成立には増殖比が1以上であることが必須の条件であり、CASE5(Pd)、CASE7(Cs)の酸化物燃料、CASE8(Zr)、CASE11～CASE14、及びCASE15の酸化物と金属燃料炉心に関しては、「平衡炉心」成立は難しい。

最後に図3-1-6の取出燃料平均燃焼度に関してであるが、CASE2からCASE8をみると、CASE8(Zr)が最大で、以下CASE7(Cs)、CASE5(Pd)の順で燃料種別によらず大きな値となっている。燃料平均燃焼度は、初装荷重金属量が少ないほど大きな値をとる。したがって、LLFP装荷の為に炉心内に確保する体積が大きいほど、つまりLLFP元素の占める体積が大きくしたがって実効燃料体積比が小さいほど、燃焼度は増大する。炉心内でLLFP元素が占める体積割合に関しては次節（3.2）で述べるが、結果のみを示すとZr元素が最大で、以下Cs元素、Pd元素と続いている。このことから、CASE2からCASE8までは、LLFP元素の占める体積割合に追随するかたちで燃焼度の変化を得ていると考えられる。

以上、Pu富化度、燃焼欠損反応度、最大線出力、最大高速フルエンス、増殖比、及び取出燃料平均燃焼度といった炉心核特性に関する解析結果から、たとえ燃料種別を変更したとしても、Pd(CASE5)及びZr(CASE8)に関しては元素分離による炉内閉じ込めは難しいといえる。したがってまず、地層処分のリスク低減の観点(CASE9～CASE14)からは、酸化物、窒化物及び金属のいずれの燃料炉心であっても、処分のリスクを負っている順にI、Tc及びSeの3核種(CASE10)であれば、元素分離によって「平衡炉心」に閉じ込めることが可能であるといえる。ただし、酸化物燃料炉心に関してはその高い燃焼欠損反応度から、炉心仕様のわずかな変更が必要とされる。他方、LLFPの炉内閉じ込め許容量の観点(CASE2～CASE8, CASE15)からは、Pd及びZrを除く5核種のLLFP(CASE15)であれば窒化物燃料炉心を用いた場合において、元素分離によって炉心に閉じ込めた「平衡炉心」成立の可能性があると言える。CASE15の場合、酸化物及び金属燃料炉心では成立は困難である。

3.2 Pd及びZrの元素分離による炉内閉じ込めが困難である要因

ここでは、前節（3.1）に示した各LLFP消滅スキームに対して求められた核特性に寄与する、LLFP元素それぞれの、数密度、炉心に占める体積割合、及び核的性質（捕獲反応による）を検討する。この検討によって、Pd及びZrに関して、元素分離による炉内閉じ込めが困難であることの理由を探る。

3.2.1 LLFP核種の核種数密度

表3-2に、同位体分離及び元素分離を仮定して、「平衡炉心」に閉じ込められるLLFP核種の核種数密度を燃料種別ごとに示す。また、表中の元素分離を仮定した場合の

核種数密度を図3-2にも示す。図3-2より、元素分離を仮定した場合に、各LLFP元素の平衡量は、Zr元素が最大であり、次いでPd元素、Cs元素、Sn元素と続く。Zr元素の平衡量は、Pd、Cs及びSn元素の平衡量に比べ1桁大きな値となっている。また、各LLFP元素において、燃料種別間の平衡量の差は小さい。なおここに示したLLFP核種の平衡量は、基本的に各核種の核分裂収率と捕獲断面積によって決まる値であり、ORIGEN-2コードを用いて求めた各元素の平衡重量は、理科年表¹⁴⁾の核種密度値により核種数密度に換算したものである。

3. 2. 2 LLFP核種が燃料炉心に占める体積

まずLLFP核種が炉心燃料に占める体積割合に関して、図3-3に、CASE1からCASE8までのLLFP消滅スキームに対して、LLFP装荷の為に燃料内に確保する体積割合を示す。このLLFPの占める体積割合が大きいほど、その分実効燃料体積比は小さくなる。CASE8 (Zrのみ元素分離) は燃料種別によらず40%程であり、続いてCASE7 (Csのみ元素分離)、CASE5 (Pdのみ元素分離) が大きなLLFP体積比となっている。残りの4核種はCASE1(全て同位体分離)と大差ない。

先に、表3-1に示した核特性検討ケース(LLFP消滅スキーム)は、LLFPに関して元素分離を仮定して炉内に閉じ込めた場合に、その平衡量の核種が占める体積が小さい順に並んでいる、つまり図3-3でCASE2、CASE3...と体積が大きく成る順に並べていると述べた。にもかかわらず、CASE6 (Snのみ元素分離) の体積割合がCASE5 (Pdのみ元素分離) より燃料種別によらず小さな値となっている。図3-3に示している体積割合の内訳は、1核種分を元素で、残り6核種分を同位体で閉じ込めた場合にLLFPが占める体積の和であり、他方、各CASE名の順序(表3-1)は、1核種分の元素のみが占める体積となっている為に起こったことである。したがってこの場合、平衡量の¹²⁶Snの占める体積が大きく、¹²⁶Sn以外のSn同位体の占める体積がさして大きく無いことが要因で図3-3に示すCASE5とCASE6の順序が表3-1の順序と入れ替わっていると考え得る。

続いて、LLFP核種が炉心燃料に占める体積の差が核特性に与える影響を検討する。CASE2からCASE8に関して、Zrのみ元素分離を仮定した場合(CASE8)に、LLFP核種が炉心燃料に占める体積割合が最大となる。そこで窒化物燃料炉心において、CASE2からCASE7まで、閉じ込めるLLFPの核種数密度はそのままで、体積割合のみCASE8の値と同じになるように大きくとり核特性解析を行った。つまり核特性解析において、各計算スキームごとに違うはずのLLFPの占める体積を同一値に固定して、LLFPの体積が核特性に与える影響を取り扱ったパラメータサーベイである。

検討結果として図3-4-1から図3-4-3に、内側炉心のPu富化度、燃焼欠損反応度、及び増殖比をそれぞれ示す。各図において黒丸で示す値は前節(3.1)で示した通常の解析値、一方×印で示す値はLLFPの占める体積をCASE8の体積とした場合の解析結果である。これらの結果から、CASE8の体積に合わせると、Pu富化度は10w/o程増大し、燃焼欠損反応度は2~4%dk/kk'大きくなり、増殖比は0.1~0.2小さくな

るなど、LLFPが炉心燃料に占める体積割合が増大し実効燃料体積比を減少させる効果が、炉心の核特性に与える影響は大きいと考えられる。

3. 2. 3 LLFP核種の核的性質

上記3. 2. 2において行った体積の影響を取り扱った核特性パラメータサーベイを、さらにCASE2からCASE8まで、炉内に閉じ込めるべきLLFPの核種数密度もある特定の値に固定して、数密度が核特性に与える影響をも取り扱った核特性パラメータサーベイを窒化物燃料炉心に対して行った。つまり、各検討ケース（CASE2～CASE8）において、LLFPが占める体積及びLLFPの核種数密度を固定し、各検討ケースの核的な違いのみを検討するというものである。検討の際使用する核種数密度は、まずCASE1(全て同位体分離)においてLLFPの占める数密度分を炉心に閉じ込めたうえで、さらにCASE2であればTcを、CASE3であればIを、各ケースで元素分離を仮定して閉じ込めるべき核種に関して、一様に4.0E-03[atoms/barn/cm]の数密度を仮定して炉心に閉じ込めた。この4.0E-03[atoms/barn/cm]という値は、任意に選んだものであるが、CASE1の7核種のLLFPの同位体分離による炉内閉じ込め量が2.7E-03[atoms/barn/cm]であり、この値より大きくないと影響がみえづらく、また大きすぎると各LLFP核種の理論値を越えてしまうため、きりの良いこの値を選んだ。

検討結果として図3-5-1から図3-5-3に、内側炉心のPu富化度、燃焼欠損反応度、及び増殖比をそれぞれ示す。この結果から、CASE5 (Pd) が「平衡炉心」の核特性を悪化させる度合いが大きく、他方CASE8 (Zr) はPdに比べると悪化させる度合いは小さいことがわかる。両者の差は、Pu富化度で~15w/o、燃焼欠損反応度で~1%dk/kk'、増殖比で~0.4もあり、Pdは核的性質が悪いことがわかる。なお、7つのLLFP核種の核的性質は、悪い順に、Pd,Tc,I,Se,Cs,Zr,Snとなっている。

核的特性と述べたが、つまりは各LLFP核種のもつ捕獲断面積の差が現れているのであり、確認のため表3-3にCASE1 (CASE10及びCASE15も併せて記載) の7つのLLFP核種の一群ミクロ断面積を燃料種別ごとに示す。上記パラメータサーベイの結果から明らかではあるが、この表より¹⁰⁷Pdの捕獲断面積が最大で¹²⁶Snの値が最小であることがわかる。なお、¹⁰⁷Pdは、およそ1桁⁹³Zrの捕獲断面積より大きな値である。

3. 2. 4 まとめ

以上より、Zrに関しては、その平衡量の多さ及び閉じ込めに必要な体積の大きさから、またPdに関しては、Pdのもつ核的性質の悪さ（捕獲断面積が大きいこと）及び平衡量の多さから、窒化物や金属燃料を用いても元素分離によるZr及びPdの炉内閉じ込めは、少なくともここで選択した炉心仕様下では困難であると結論づけられる。

3. 3 CASE10及びCASE15に関する「その他」の炉心特性

これまでの各LLFP消滅スキームに対する核特性解析結果から、Pd及びZrに関して元素分離を仮定し「平衡炉心」に閉じ込めることは、燃料種別を変更したとしても核特性の観点から困難であることがわかった。したがって、炉内に閉じ込め得るLLFPの許容量という観点からは、このことを予め見越してPd及びZrを同位体分離で閉じ込めるように設定してあるCASE15が妥当であり、一方地層処分のリスク低減という観点からは、Pdに対して同位体分離を仮定しているCASE10が妥当であるといえる。

ここでは、これらCASE10 (Tc, I, Seのみ元素分離を仮定) 及びCASE15 (Pd, Zrのみ同位体分離を仮定) に関する、中性子スペクトル、ドップラー係数、Naボイド反応度、マスバランス等の炉心特性結果を、CASE1 (7 LLFP核種全て同位体分離を仮定) の結果と共にみていくこととする。なお、参考ケースであるCASE1に対する、ドップラー係数やNaボイド反応度値の妥当性については、文献2を参照されたい。また、ここに示すCASE1、CASE10及びCASE15の核特性解析結果、及びマスバランス解析結果の燃料種別毎の詳細を巻末に付録として示す。

表3-4に、CASE1、CASE10及びCASE15の核特性をドップラー係数及びNaボイド反応度を付してまとめる。なお、ドップラー係数に関してはその結果を図3-6にも示す。ただし、表3-4におけるドップラー係数及びNaボイド反応度以外の核特性は、3.1節の図3-1-1から図3-1-6で既に示されており、これら核特性に関してこの節で改めて説明することはしない。

また、図3-7-1から図3-7-6には、上記3ケースの中性子スペクトルをトータルで1に規格化し、レサージあたりの数値で示す。なお、図3-7-4から図3-7-6は、図3-7-1から図3-7-3の中性子スペクトル図の横軸スケールを変更したものである。

さらに、表3-5にドップラー係数の寄与核種別解析結果を、表3-6にNaボイド反応度の寄与因子別解析結果をそれぞれ示す。ここで、表3-5には値の大きい核種のみを記載したが、表内「Doppler Reactivity」欄にはこの表に示された以外の核種の寄与も合わせた合計値が記されている。

マスバランスに関して、表3-7に²³⁸Uの燃料炉心内（軸方向ブランケット燃料部を除く。）の物質収支を、また表3-8-1から表3-8-3に酸化物、窒化物、及び金属燃料炉心に対する、U及びPuの物質収支（全炉心の値。軸方向ブランケット燃料部を含む。）をそれぞれ示す。

3. 3. 1 70群中性子スペクトル

図3-7-1から図3-7-3に燃料種別ごとに示した70群中性子スペクトルをみると、LLFPの装荷量が増えるに従って、つまりCASE1、CASE10、CASE15となるにつれて、LLFP核種の中性子捕獲が原因で中性子スペクトルが硬化していくのがわかる。このスペ

クトル硬化は燃料種別によらず同じ傾向で現れており、元々中性子スペクトルの軟らかい酸化物燃料炉心において大きなスペクトル硬化がみられる。

3. 3. 2 ドップラー反応度係数

図3-6（及び表3-4）から、CASE10、CASE15と炉心内に挿荷するLLFPの量が増えるに従って、CASE1に比べドップラー反応度係数の大きさは絶対値で小さくなっている。CASE1と比べて、CASE10は $\sim 0.5 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ 、CASE15は $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ ほど絶対値で小さい。このように、LLFPの装荷によりドップラー反応度係数は絶対値で小さくなる方向へ変化する。

これに関して、図3-7-4から図3-7-6に示した、ドップラー反応度に効いてくる25keV以下のエネルギー域の中性子スペクトルをみると、燃料種別によらず炉内へのLLFP装荷が増えていくにつれて、つまりCASE1、CASE10、CASE15の順でスペクトルが硬く（1eV付近を除く）なっていっており、このことがドップラーに差異を与える要因の1つになっていると考えられる。が、これら3 CASE間の中性子スペクトルの差はさして大きくなく、ドップラーの差異をもたらす決定的な理由とはいづらい。

表3-5に示した寄与核種別解析結果から、ドップラー反応度に寄与している核種は、燃料種別によらず8割以上が²³⁸Uである。このことをふまえて、表3-7に²³⁸Uのインベントリーを示したが、同一燃料種別における各CASE間の比較から、どの燃料種別に対しても、CASE1、CASE10、CASE15の順で²³⁸Uの燃料炉心内の量が減少しているのがわかる。とりわけCASE15における²³⁸U量が小さな値となっており、この²³⁸U量の違いが図3-6に示したドップラー係数の差異をもたらす大きな要因になっていると考えられる。つまり、LLFPの装荷により燃料実効体積比が減少し従ってUインベントリーが減り、ドップラーが効かなくなると考え得る。

3. 3. 3 Naボイド反応度

表3-4から、Naボイド反応度の同一燃料種別における各CASE間の差は、～25%以下でありほとんど変化の無いことがわかる。このことは、表3-6においてNaボイド反応度に効いてくる散乱及び漏れの寄与双方ともに、同一燃料種別での各CASE間の変化量が小さいことによる。Naボイド反応度は、元来高エネルギー域での中性子の散乱及び漏れが主な寄与因子となる。したがって、主に中性子捕獲反応によって低エネルギー域に影響を与えるLLFPの装荷によっては、ボイド反応度は影響を受けづらいと考え得る。

3. 3. 4 マスバランス

表3-8-1から表3-8-3のU及びPuの物質収支から、燃料種別によらずCASE1、CASE10、CASE15となるにしたがって、つまりLLFPの炉内装荷量が増加するにつれてPuの自給自足が困難になっていくのがわかる（Pu Total 参照）。このことは、LLFPの燃料

炉心内への装荷量が増えると実効燃料体積比が減少し、臨界を維持する為にPu富化度が増加すること、つまり1サイクルあたりのPu消費量が増加することが主な要因と考えられる。なお本検討においては、1サイクルにわたって軸ブランケット燃料部で生成されるPu量に関してCASE間での差異は無い。

Pu自給自足に関する燃料種別間の比較では、他の燃料種別に比べUの炉内存在量が多い窒化物燃料炉心が優れている。また、酸化物燃料炉心のCASE10に関して表3-8-1より、平衡サイクルのPu Total量のバランスは-57.07[kg/cycle]であり、自給は出来ていない。しかしながら、この量は平衡サイクル燃焼初期のPu Total量4566.75[kg]に対して1.2%程度であり、炉心仕様のわずかな変更によって改善可能な量であると考え得る。さらに、窒化物燃料炉心のCASE15に関して表3-8-2より、Puの自給自足は各Pu同位体ごとの値も含めて達成されていると言える。

表 3 - 1 核特性検討ケース

CASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tc-99	X	O	X	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O
I-129	X	X	O	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O
Se-79	X	X	X	O	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O
Pd-107	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	O	O	O	O	X
Sn-126	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	O	O	O	O
Cs-135	X	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	O	O	O
Zr-93	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	O	X

O : Incineration of Element

X : Incineration of Isotope

表3－2 同位体分離及び元素分離による閉じ込めLLFP核種数密度

		Tc (⁹⁹ Tc)	I (¹²⁹ I)	Se (⁷⁹ Se)	Pd (¹⁰⁷ Pd)	Sn (¹²⁶ Sn)	Cs (¹³⁵ Cs)	Zr (⁹³ Zr)
Oxide	Isotope Separation	1.78E-4	6.90E-5	2.67E-6	5.39E-5	5.35E-4	6.13E-4	7.64E-4
	Element Separataion	2.44E-4	1.03E-4	2.68E-4	2.36E-3	9.91E-4	1.82E-3	2.13E-2
Nitride	Isotope Separation	2.28E-4	9.04E-5	3.68E-6	6.54E-5	6.24E-4	8.56E-4	8.53E-4
	Element Separataion	3.12E-4	1.40E-4	3.61E-4	2.98E-3	1.16E-3	2.22E-3	2.48E-2
Metal	Isotope Separation	2.48E-4	9.90E-5	4.27E06	7.08E-5	6.24E-4	1.02E-3	7.85E-4
	Element Separataion	3.42E-4	1.58E-4	3.84E-4	3.31E-3	1.22E-3	2.54E-3	2.35E-2

[atoms/barn/cm]

表3-3 LLFP核種の一群捕獲断面積

	酸化物燃料炉心			窒化物燃料炉心			金属燃料炉心		
	CASE 1	CASE 10	CASE 15	CASE 1	CASE 10	CASE 15	CASE 1	CASE 10	CASE 15
⁷⁹ Se	0.306	0.299	0.288	0.264	0.258	0.252	0.218	0.214	0.212
⁹³ Zr	0.0763	0.0746	0.0720	0.0660	0.0645	0.0630	0.0540	0.0530	0.0526
⁹⁹ Tc	0.509	0.501	0.488	0.466	0.459	0.450	0.407	0.401	0.398
¹⁰⁷ Pd	0.878	0.863	0.840	0.796	0.783	0.768	0.696	0.687	0.681
¹²⁶ Sn	0.00730	0.00725	0.00718	0.00701	0.00696	0.00691	0.00657	0.00653	0.00651
¹²⁹ I	0.321	0.315	0.306	0.289	0.283	0.278	0.248	0.245	0.243
¹³⁵ Cs	0.159	0.155	0.150	0.136	0.133	0.130	0.113	0.111	0.110

[bam]

表 3-4 炉心特性解析結果（CASE1,CASE10及びCASE15）

		CASE 1			CASE 10			CASE 15		
		Oxide	Nitride	Metal	Oxide	Nitride	Metal	Oxide	Nitride	Metal
Pu Enrichment [wt%]	Inner Core	22.96	14.80	15.65	23.97	15.64	16.57	29.01	19.03	20.63
	Outer Core	27.96	18.87	20.07	28.93	19.68	21.00	33.64	23.08	24.76
Breeding Ratio	Beginning of Cycle	1.038	1.210	1.151	1.004	1.162	1.101	0.891	1.030	0.968
	End of Cycle	1.045	1.190	1.147	1.018	1.154	1.109	0.928	1.052	1.003
Burnup Reactivity Loss [%Δk/kk']		3.16	1.08	1.84	3.46	1.54	2.31	4.91	3.12	3.96
Maximum Linear Heat Rate [W/cm]		419	426	417	419	424	414	436	413	422
Maximum Fast Neutron Fluence [10 ²³ n/cm ²]		2.91	2.87	3.42	2.87	2.83	3.36	2.99	2.96	3.48
Average Fuel Burnup [MWd/ton]		95900	72600	78200	96700	73400	79200	108900	83100	90300
Doppler Coefficient [10 ⁻³ Tdk/dT]		-4.46	-4.62	-3.26	-3.95	-4.04	-2.87	-2.97	-3.17	-2.31
Sodium Void Reactivity [%Δk/kk']		2.54	2.66	3.94	2.60	2.71	4.02	2.63	2.72	3.95

表3-5 ドップラー反応度及び反応度係数 寄与核種別 解析結果 (CASE1,CASE10及びCASE15)

		^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	Fe-nat	Doppler Reactivity	Doppler Coefficient [10^{-3}Tdk/dT]
Oxide	CASE1	-1.22E-03	7.83E-05	-6.83E-05	-1.39E-04	-1.38E-03	-4.46
	CASE10	-1.08E-03	7.40E-05	-6.27E-05	-1.29E-04	-1.23E-03	-3.95
	CASE15	-7.74E-04	6.57E-05	-6.00E-05	-1.24E-04	-9.23E-04	-2.97
Nitride	CASE1	-1.31E-03	6.30E-05	-2.35E-05	-1.54E-04	-1.44E-03	-4.62
	CASE10	-1.14E-03	5.93E-05	-2.12E-05	-1.42E-04	-1.26E-03	-4.04
	CASE15	-8.71E-04	5.46E-05	-2.08E-05	-1.41E-04	-9.85E-04	-3.17
Metal	CASE1	-1.57E-03	7.48E-05	-3.27E-05	-2.61E-04	-1.81E-03	-3.26
	CASE10	-1.38E-03	7.20E-05	-2.94E-05	-2.44E-04	-1.59E-03	-2.87
	CASE15	-1.06E-03	7.02E-05	-3.06E-05	-2.44E-04	-1.28E-03	-2.31

(ドップラー係数を除いて [dk/kk'])

表3－6 Naポイド反応度 寄与因子別 解析結果 (CASE1,CASE10及びCASE15)

- 27 -

		Oxide			Nitride			Metal		
		CASE1	CASE10	CASE15	CASE1	CASE10	CASE15	CASE1	CASE10	CASE15
I/C	Yield	-1.36E-04	-1.28E-04	-1.18E-04	-1.18E-04	-1.10E-04	-1.01E-04	-6.61E-05	-6.20E-05	-6.02E-05
	Fission	3.01E-05	2.80E-05	2.59E-05	2.43E-05	2.21E-05	2.05E-05	1.37E-05	1.26E-05	1.24E-05
	Capture	1.66E-03	1.53E-03	1.46E-03	1.56E-03	1.41E-03	1.35E-03	1.27E-03	1.18E-03	1.18E-03
	Scattering	2.00E-02	2.04E-02	2.16E-02	2.00E-02	2.03E-02	2.15E-02	3.28E-02	3.33E-02	3.40E-02
	Leakage	-3.59E-03	-3.52E-03	-3.90E-03	-3.37E-03	-3.29E-03	-3.67E-03	-5.68E-03	-5.58E-03	-6.02E-03
O/C	Yield	-1.01E-04	-9.54E-05	-8.02E-05	-1.01E-04	-9.39E-05	-7.96E-05	-6.51E-05	-5.96E-05	-5.29E-05
	Fission	2.47E-05	2.29E-05	1.94E-05	2.34E-05	2.12E-05	1.82E-05	1.59E-05	1.42E-05	1.27E-05
	Capture	1.02E-03	9.41E-04	8.35E-04	1.08E-03	9.76E-04	8.63E-04	8.75E-04	8.02E-04	7.42E-04
	Scattering	1.24E-02	1.26E-02	1.21E-02	1.37E-02	1.39E-02	1.34E-02	2.01E-02	2.01E-02	1.89E-02
	Leakage	-5.93E-03	-5.80E-03	-5.72E-03	-6.22E-03	-6.05E-03	-6.05E-03	-9.84E-03	-9.46E-03	-9.18E-03
I/C+O/C	Yield	-2.37E-04	-2.24E-04	-1.98E-04	-2.20E-04	-2.03E-04	-1.80E-04	-1.31E-04	-1.22E-04	-1.13E-04
	Fission	5.48E-05	5.09E-05	4.53E-05	4.77E-05	4.33E-05	3.88E-05	2.96E-05	2.68E-05	2.51E-05
	Capture	2.68E-03	2.47E-03	2.29E-03	2.64E-03	2.39E-03	2.21E-03	2.15E-03	1.98E-03	1.92E-03
	Scattering	3.24E-02	3.30E-02	3.38E-02	3.37E-02	3.42E-02	3.49E-02	5.29E-02	5.34E-02	5.29E-02
	Non-Leakage	3.49E-02	3.53E-02	4.04E-02	3.62E-02	3.64E-02	3.70E-02	5.50E-02	5.53E-02	5.47E-02
	Leakage	-9.52E-03	-9.32E-03	-9.62E-03	-9.59E-03	-9.34E-03	-9.72E-03	-1.55E-02	-1.50E-02	-1.52E-02
	Total	2.54E-02	2.60E-02	2.63E-02	2.66E-02	2.71E-02	2.72E-02	3.94E-02	4.02E-02	3.95E-02

[dk/kk']

表3-7 ^{238}U の燃料炉心内*の物質収支

	CASE1			CASE10			CASE15		
	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス
酸化物燃料	12250	11850	-400	12004	11622	-382	9929	9617	-312
窒化物燃料	18271	17745	-526	17933	17432	-501	15135	14713	-422
金属燃料	16651	16179	-472	16297	15849	-448	13583	13210	-373

*)内側及び外側燃料炉心合計値。軸方向ブランケット燃料部は含まず。

(単位: kg)

表3-8-1 酸化物燃料炉心のU及びPu物質収支*

	CASE1			CASE10			CASE15		
	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス
²³⁸ Pu	52.80	52.10	-0.70	54.18	53.25	-0.93	55.68	53.78	-1.90
²³⁹ Pu	2207.42	2231.71	24.29	2254.22	2261.67	7.45	2295.15	2246.38	-48.77
²⁴⁰ Pu	1683.36	1631.44	-51.92	1733.79	1678.96	-54.83	1812.32	1749.56	-62.76
²⁴¹ Pu	280.27	276.35	-3.92	288.05	283.41	-4.65	300.67	294.80	-5.87
²⁴² Pu	229.54	225.59	-3.96	236.51	232.39	-4.12	247.65	243.20	-4.45
²³⁸ U	26547.32	25982.98	-564.34	26304.75	25761.54	-543.21	24227.32	23751.98	-475.34
Pu Total	4453.38	4417.17	-36.21	4566.75	4509.68	-57.07	4711.47	4587.73	-123.75
Pu Fissile	2487.68	2508.05	20.37	2542.27	2545.08	2.81	2595.82	2541.19	-54.64
U Total	26645.96	26072.31	-573.65	26402.73	25850.50	-552.23	24316.95	23833.61	-483.34

*)内側燃料炉心、外側燃料炉心、及び軸方向ブランケット燃料部合計。

(単位: kg)

表3-8-2 窒化物燃料炉心のU及びPu物質収支*

	CASE1			CASE10			CASE15		
	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス
²³⁸ Pu	43.47	43.91	0.44	44.81	44.98	0.18	45.89	45.14	-0.75
²³⁹ Pu	2550.28	2656.53	106.25	2614.88	2697.32	82.45	2659.00	2675.66	16.66
²⁴⁰ Pu	1191.20	1190.77	-0.43	1234.17	1230.92	-3.24	1289.26	1280.51	-8.75
²⁴¹ Pu	172.02	174.57	2.55	177.88	179.93	2.05	185.85	187.43	1.57
²⁴² Pu	87.55	88.77	1.22	90.77	91.93	1.15	95.06	96.21	1.15
²³⁸ U	38145.46	37436.28	-709.19	37811.86	37131.00	-680.86	35010.13	34404.18	-605.95
Pu Total	4044.51	4154.54	110.03	4162.50	4245.08	82.58	4275.06	4284.95	9.89
Pu Fissile	2722.29	2831.10	108.80	2792.76	2877.25	84.49	2844.85	2863.09	18.24
U Total	38296.88	37575.01	-721.87	37962.23	37269.12	-693.12	35147.57	34530.64	-616.94

*)内側燃料炉心、外側燃料炉心、及び軸方向ブランケット燃料部合計。

(単位: kg)

表3-8-3 金属燃料炉心のU及びPu物質収支*

	CASE1			CASE10			CASE15		
	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス	平衡サイクル 燃焼初期	平衡サイクル 燃焼末期	平衡サイクル バランス
²³⁸ Pu	45.40	44.92	-0.49	46.92	46.16	-0.76	48.44	46.75	-1.69
²³⁹ Pu	2400.11	2479.39	79.28	2463.96	2519.28	55.32	2518.12	2507.86	-10.26
²⁴⁰ Pu	1191.67	1175.56	-16.11	1237.48	1218.79	-18.69	1302.01	1278.28	-23.73
²⁴¹ Pu	174.94	173.07	-1.87	181.43	179.07	-2.35	191.09	188.36	-2.73
²⁴² Pu	96.60	97.14	0.54	100.36	100.84	0.49	105.79	106.29	0.50
²³⁸ U	35505.99	34848.11	-657.88	35157.72	34528.01	-629.71	32442.89	31887.27	-555.62
Pu Total	3908.73	3970.08	61.35	4030.14	4064.14	34.00	4165.44	4127.54	-37.91
Pu Fissile	2575.05	2652.46	77.40	2645.39	2698.35	52.96	2709.21	2696.22	-12.99
U Total	35635.29	34983.10	-670.19	35303.85	34662.27	-641.58	32575.74	32009.60	-566.14

*)内側燃料炉心、外側燃料炉心、及び軸方向ブランケット燃料部合計。

(単位: kg)

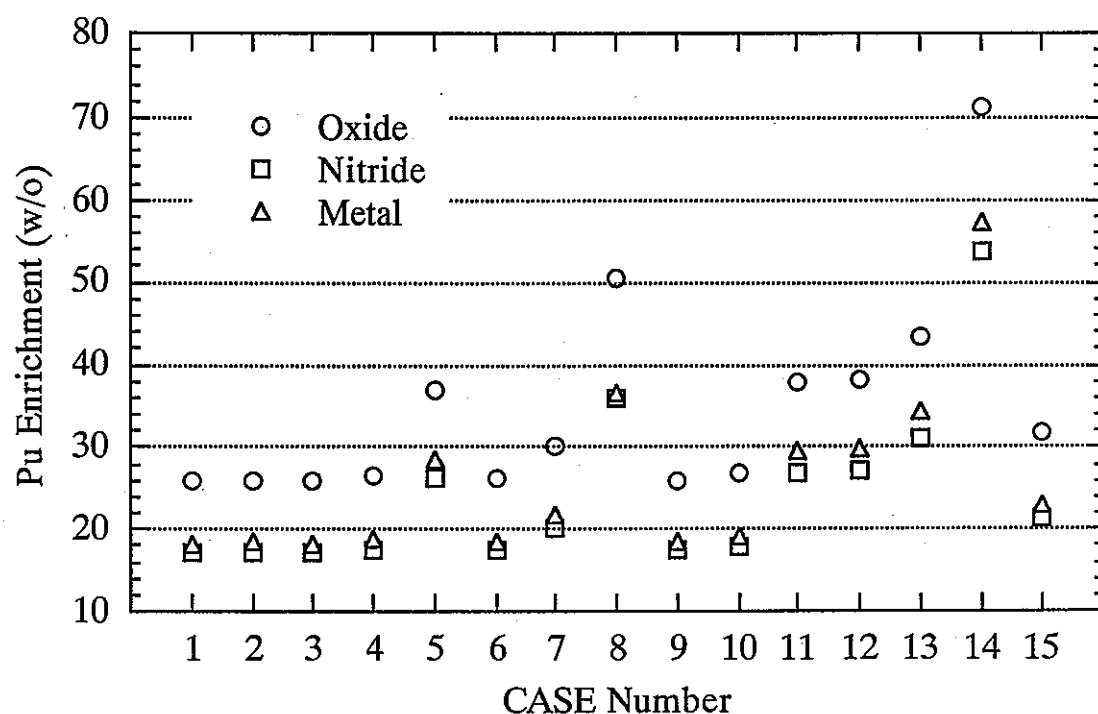


図3-1-1 Pu富化度

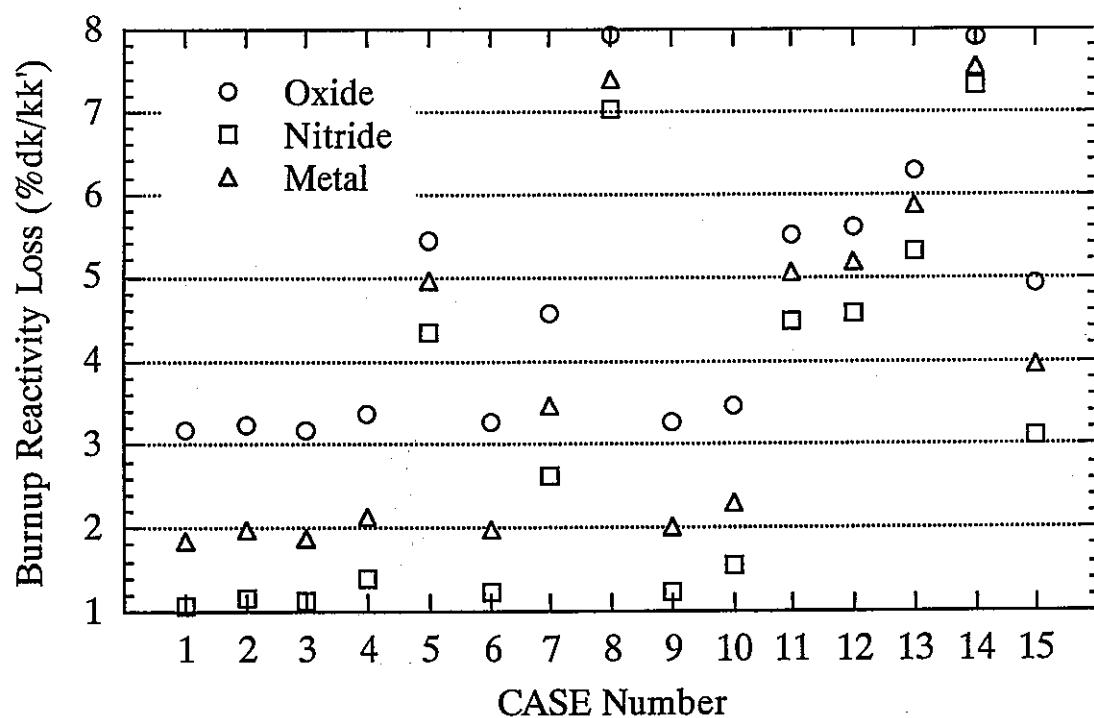


図3-1-2 燃焼欠損反応度

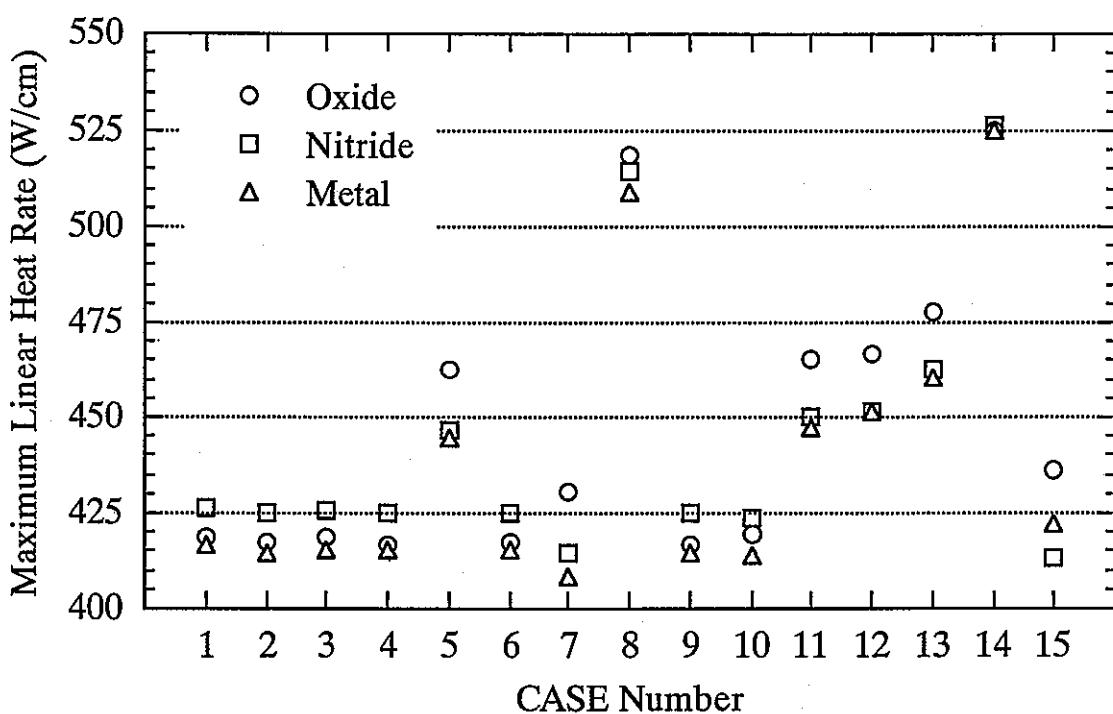


図3-1-3 最大線出力

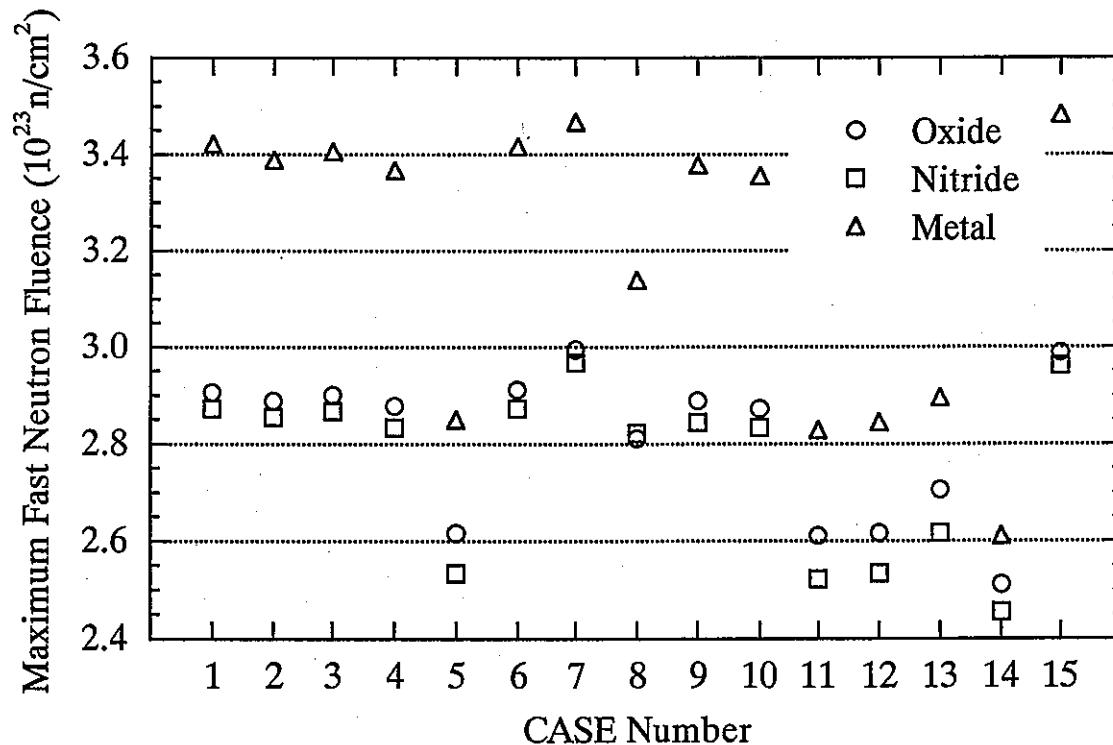


図3-1-4 最大高速フルエンス

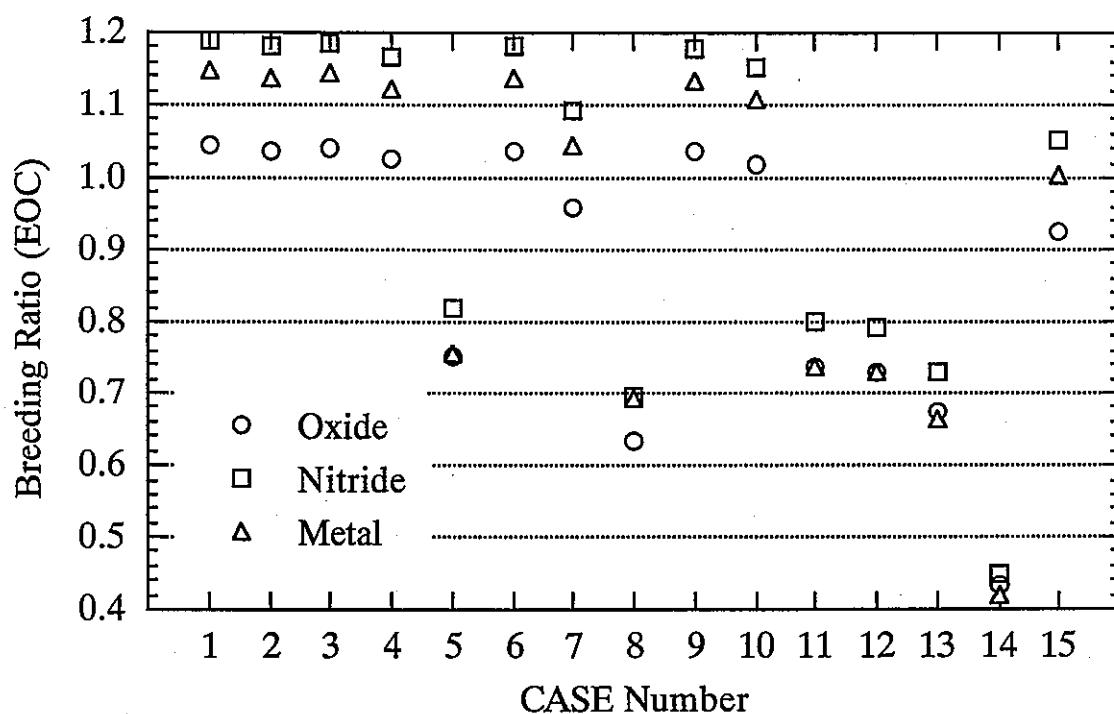


図 3 - 1 - 5 増殖比 (EOC)

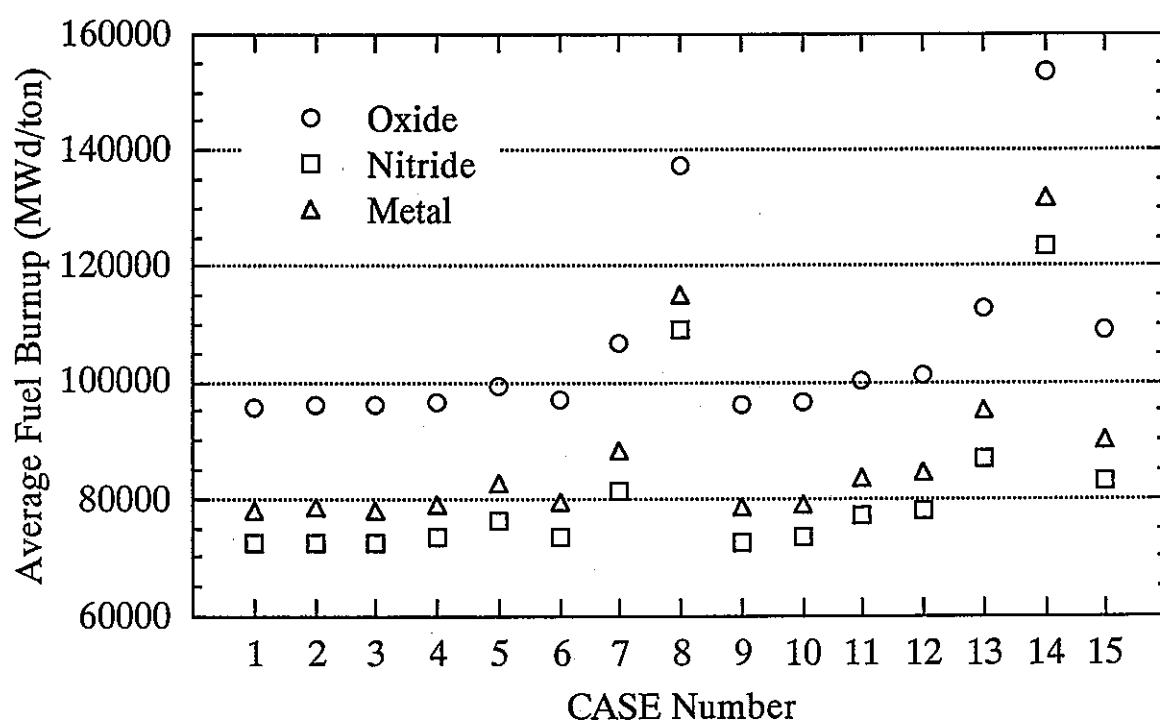


図 3 - 1 - 6 取り出し燃料平均燃焼度

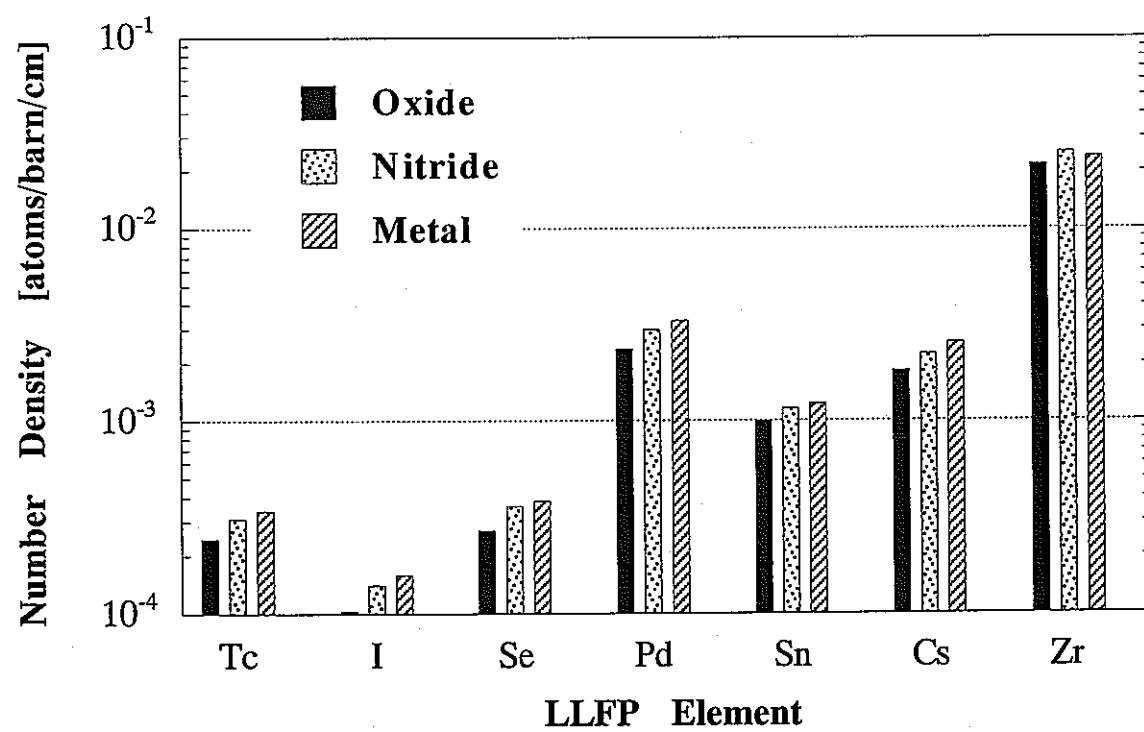


図3-2 元素分離による閉じ込めLLFP核種数密度

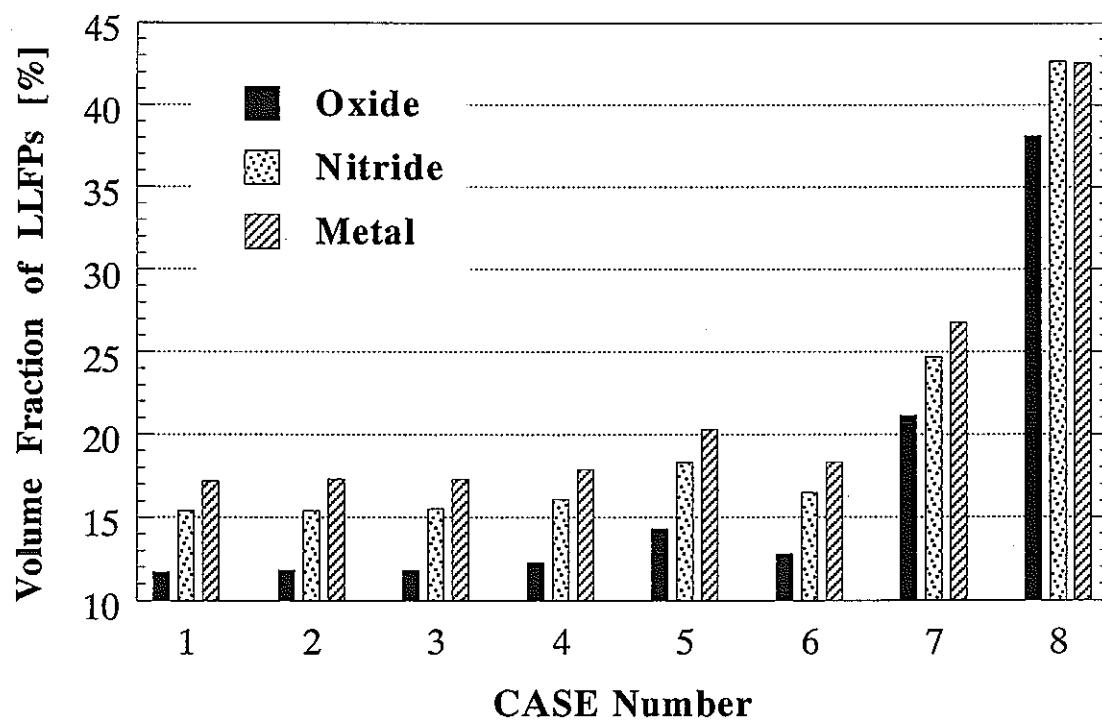


図 3 - 3 LLFP核種が炉心燃料に占める体積割合

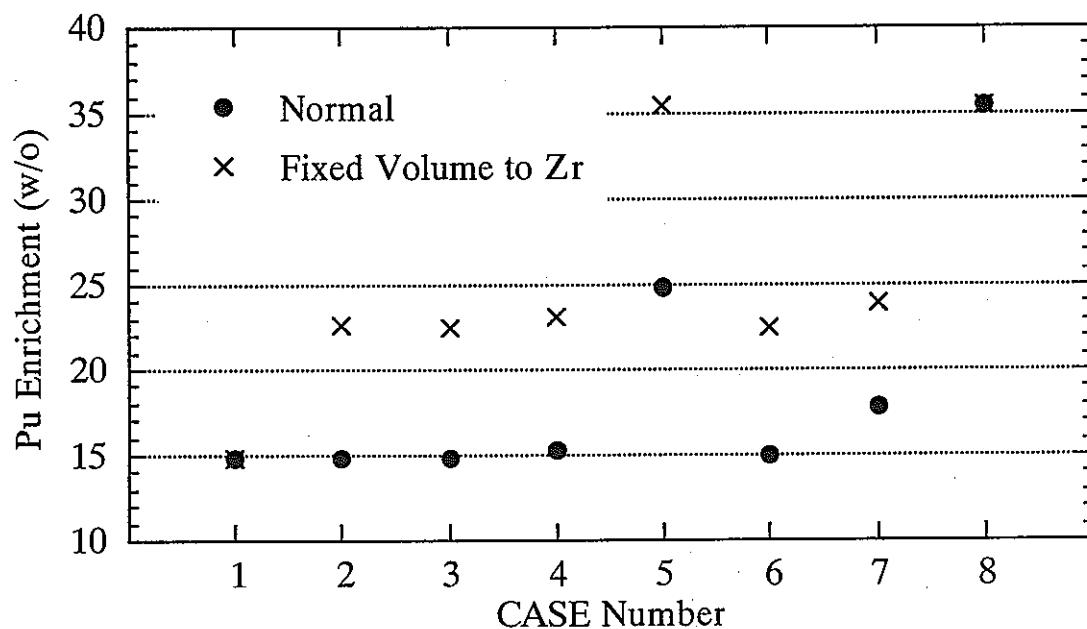


図 3-4-1 内側炉心Pu富化度（体積固定）

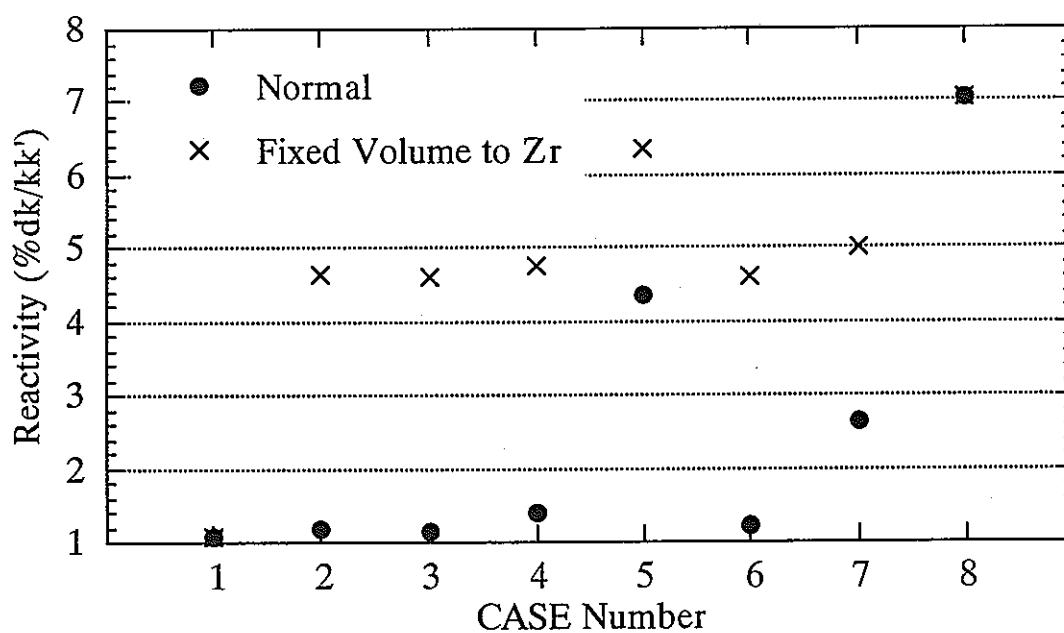


図 3-4-2 燃焼欠損反応度（体積固定）

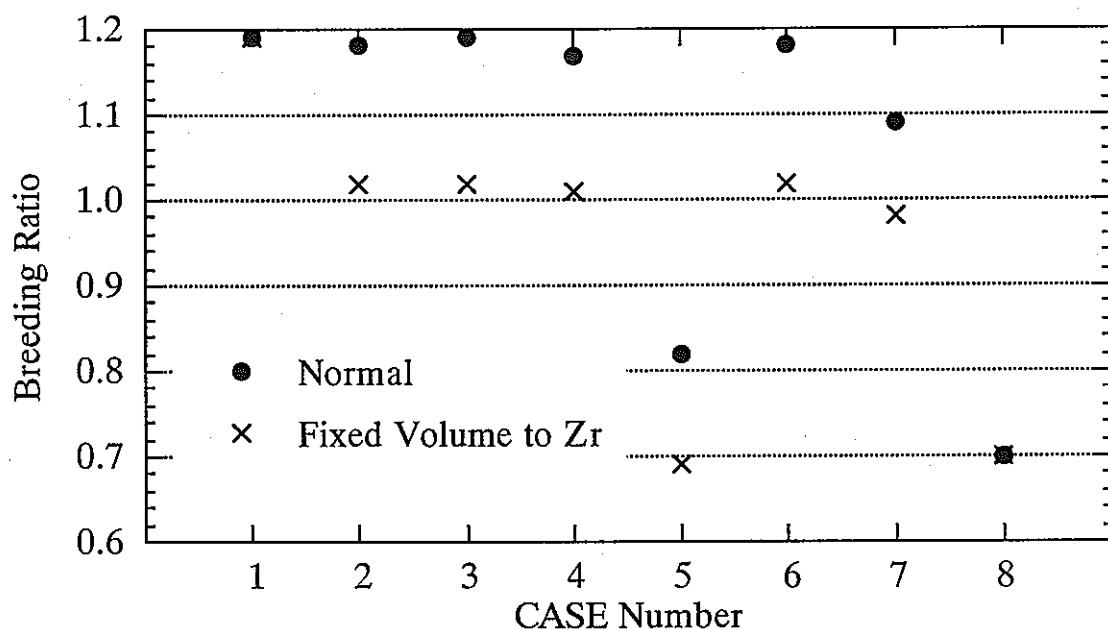


図 3-4-3 増殖比 (体積固定)

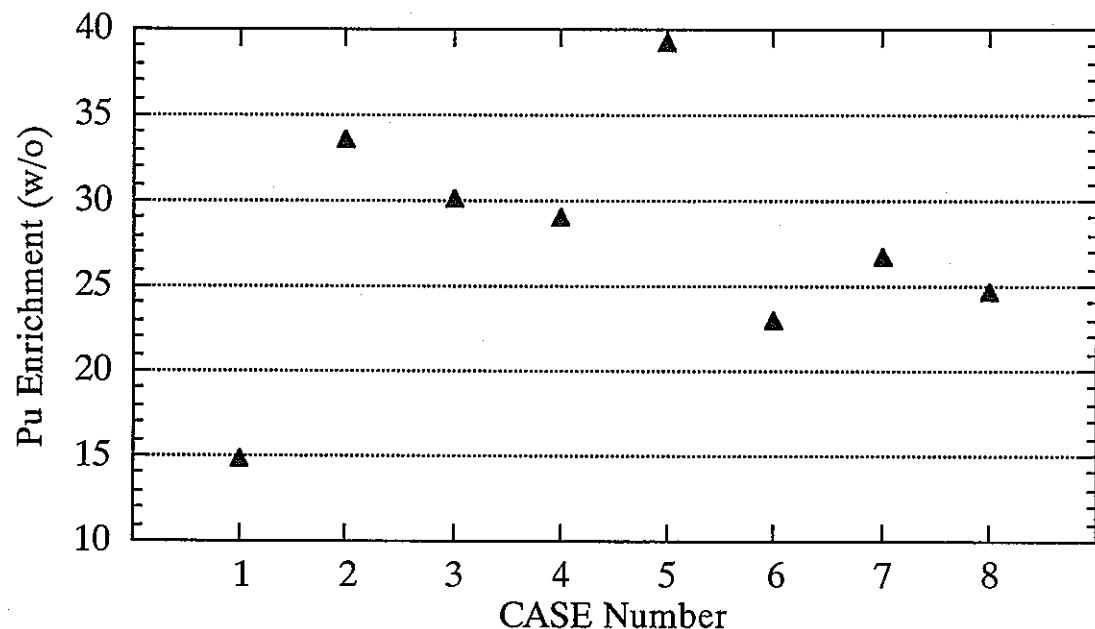


図 3-5-1 内側炉心Pu富化度（体積及び数密度固定）

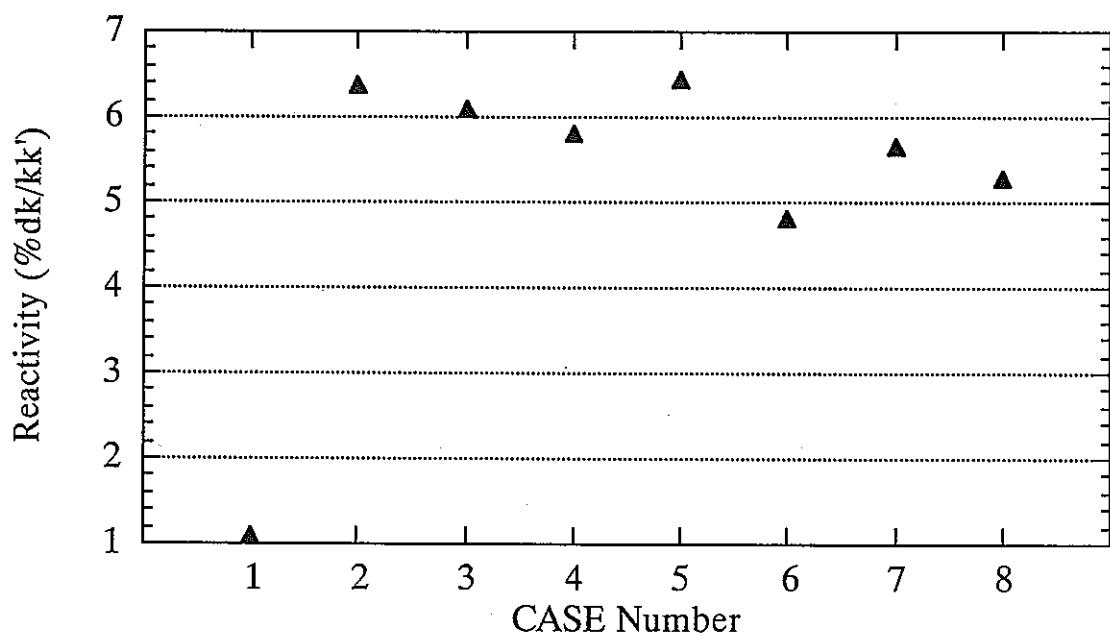


図 3-5-2 燃焼欠損反応度（体積及び数密度固定）

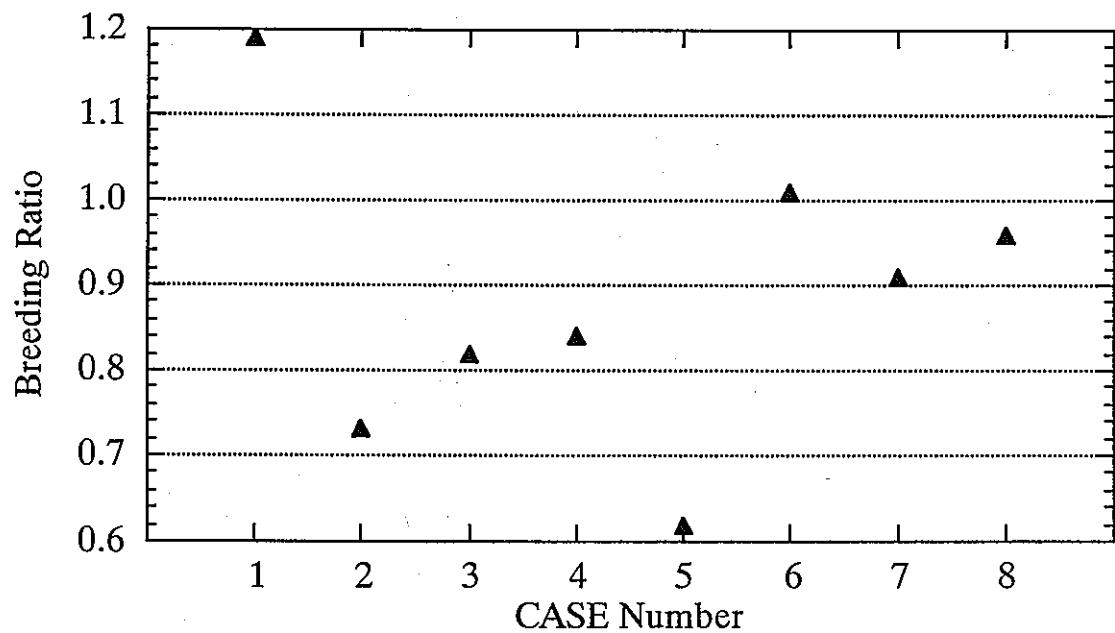


図 3 - 5 - 3 増殖比（体積及び数密度固定）

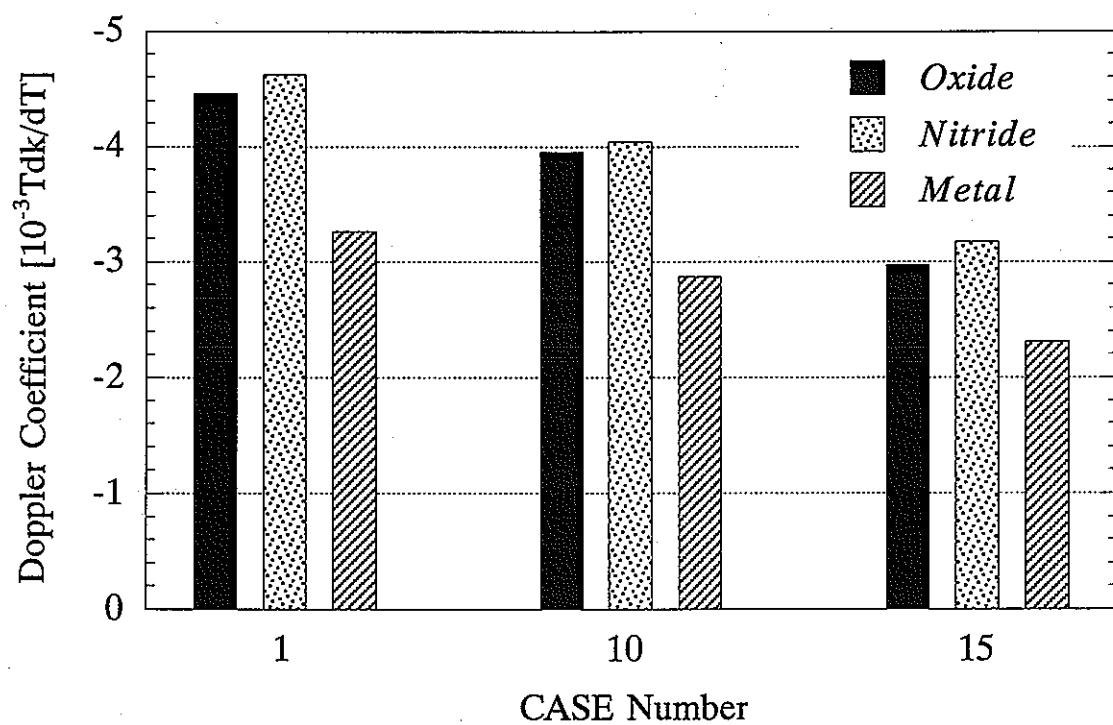


図3-6 ドップラー反応度係数 (CASE1,CASE10及びCASE15)

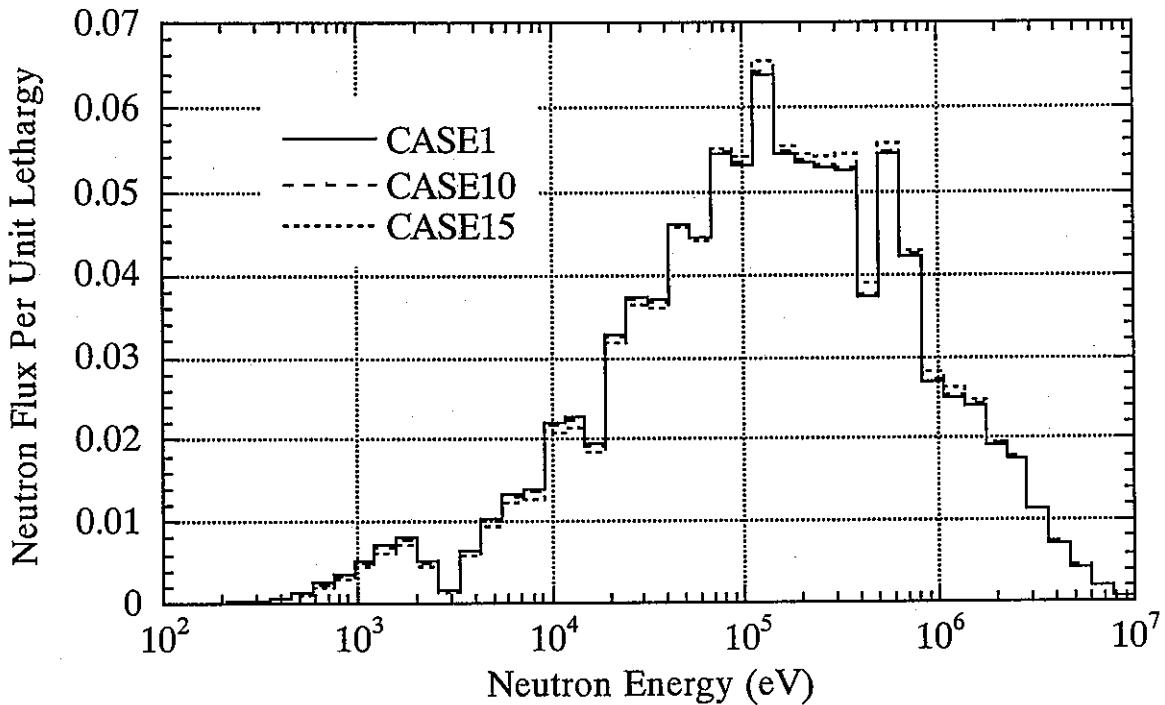


図 3-7-1 酸化物燃料炉心の中性子スペクトル
(CASE1,CASE10及びCASE15)

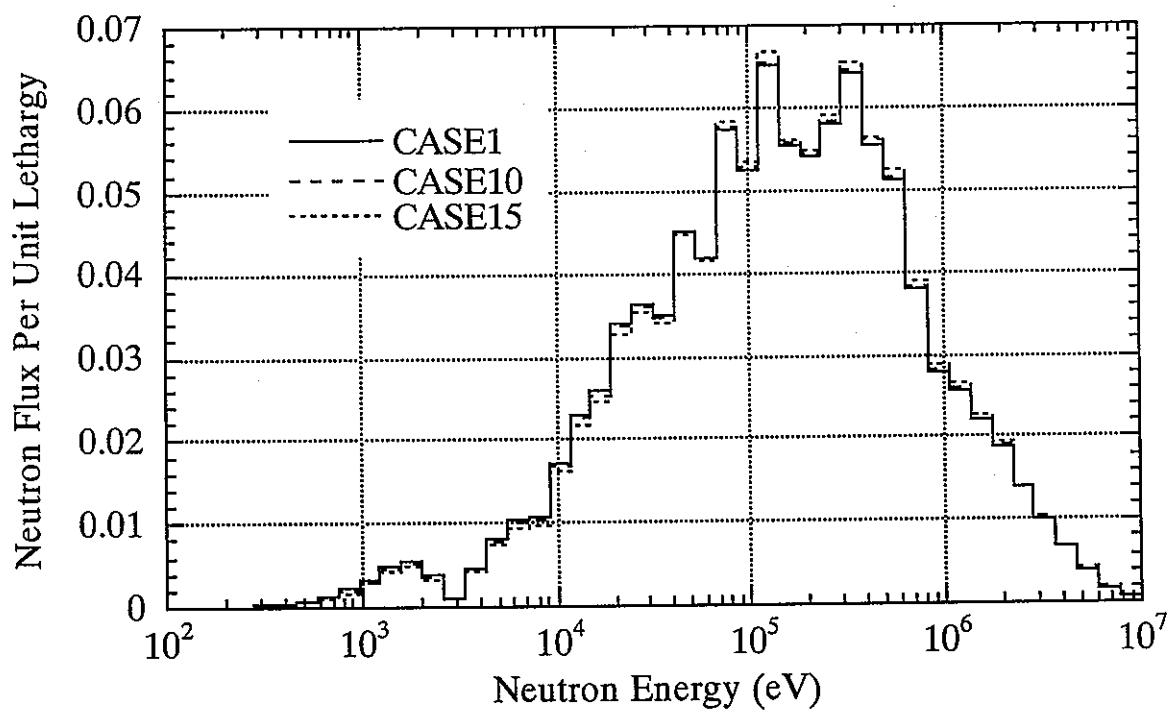


図 3-7-2 窒化物燃料炉心の中性子スペクトル
(CASE1,CASE10及びCASE15)

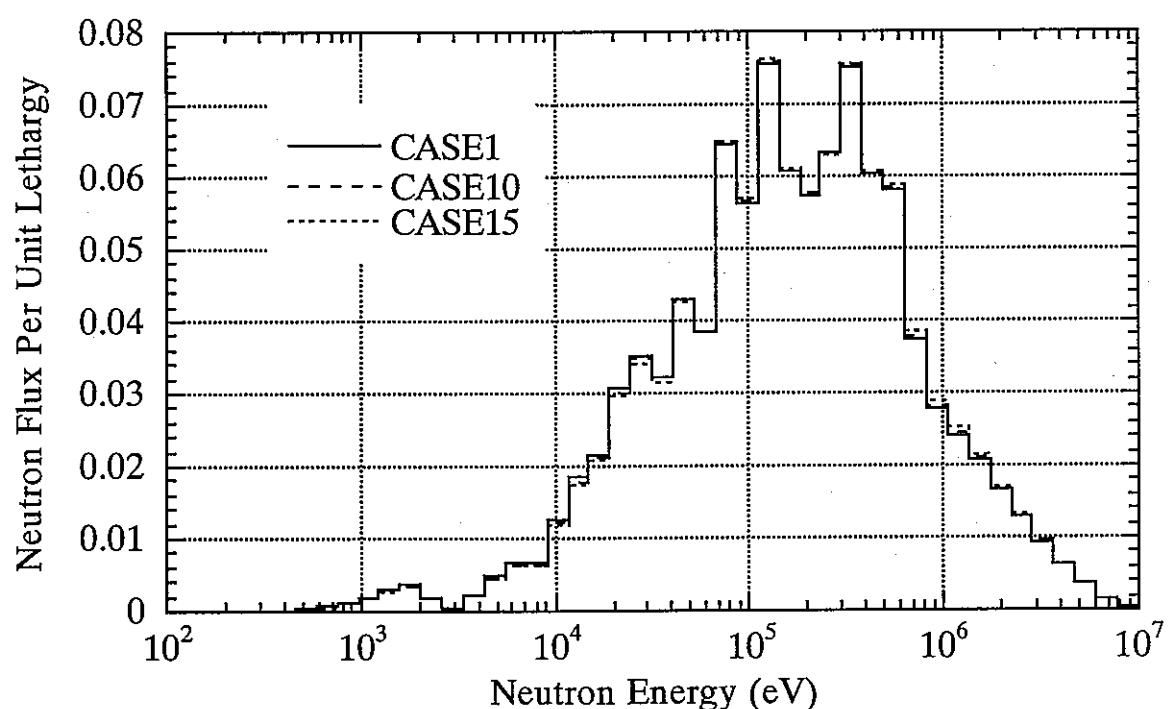


図 3 - 7 - 3 金属燃料炉心の中性子スペクトル
(CASE1,CASE10及びCASE15)

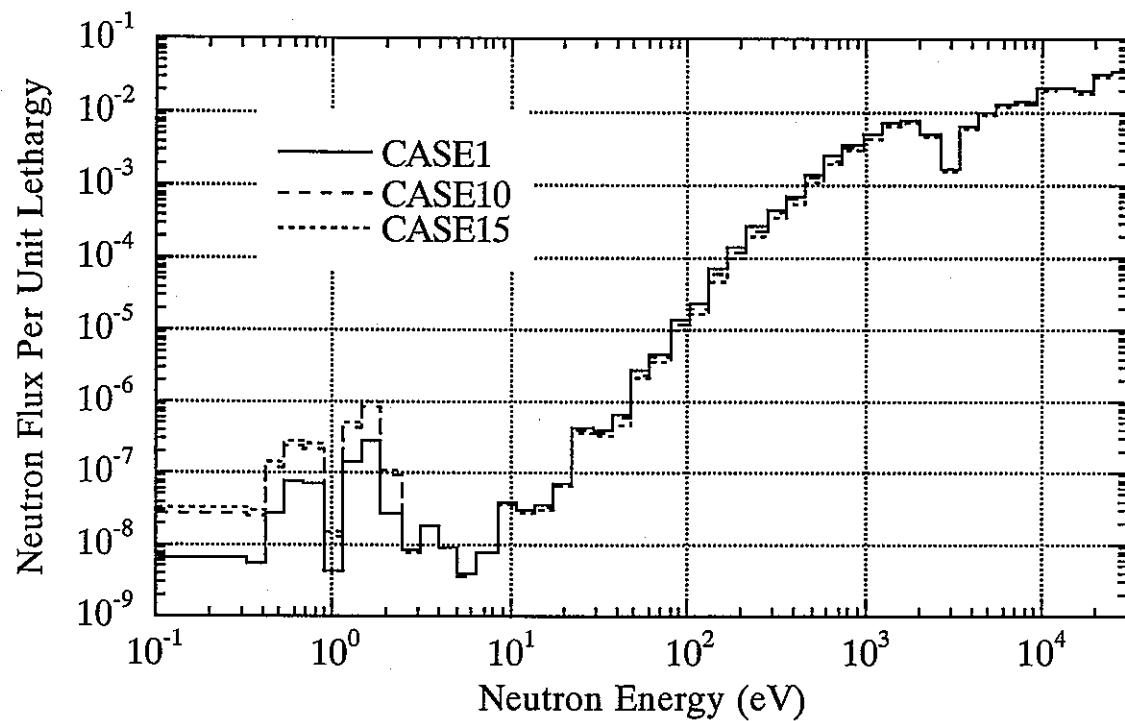


図 3-7-4 酸化物燃料炉心の低エネルギー域中性子スペクトル
(CASE1,CASE10及びCASE15)

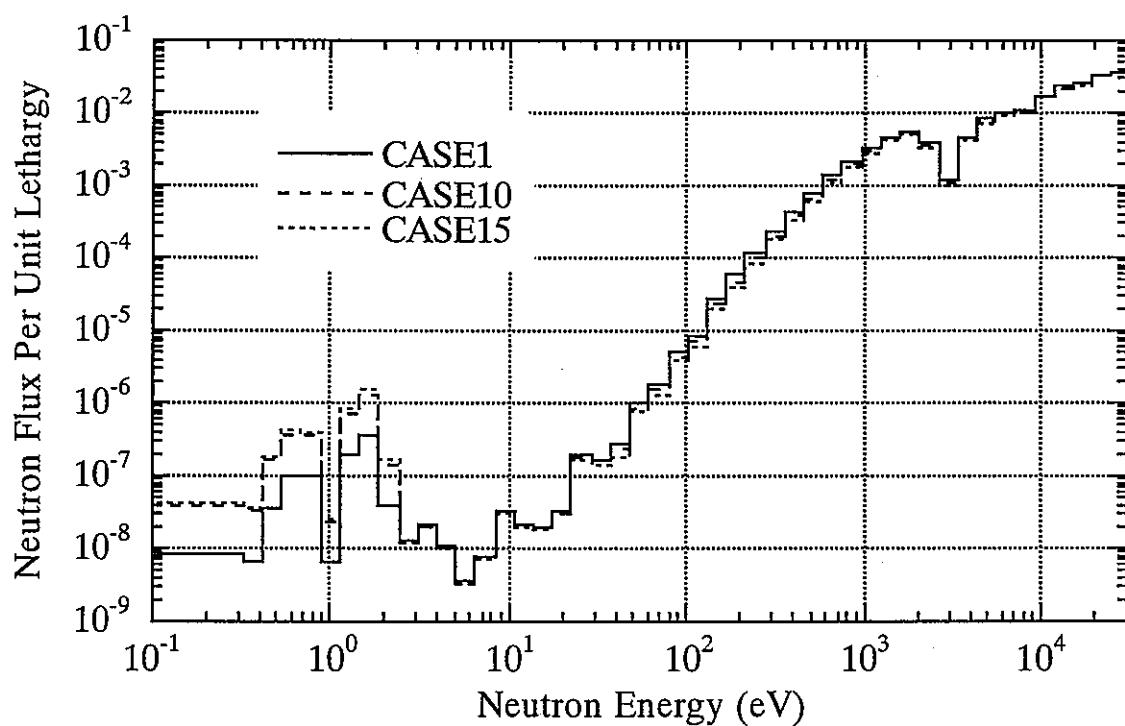


図 3-7-5 窒化物燃料炉心の低エネルギー域中性子スペクトル
(CASE1,CASE10及びCASE15)

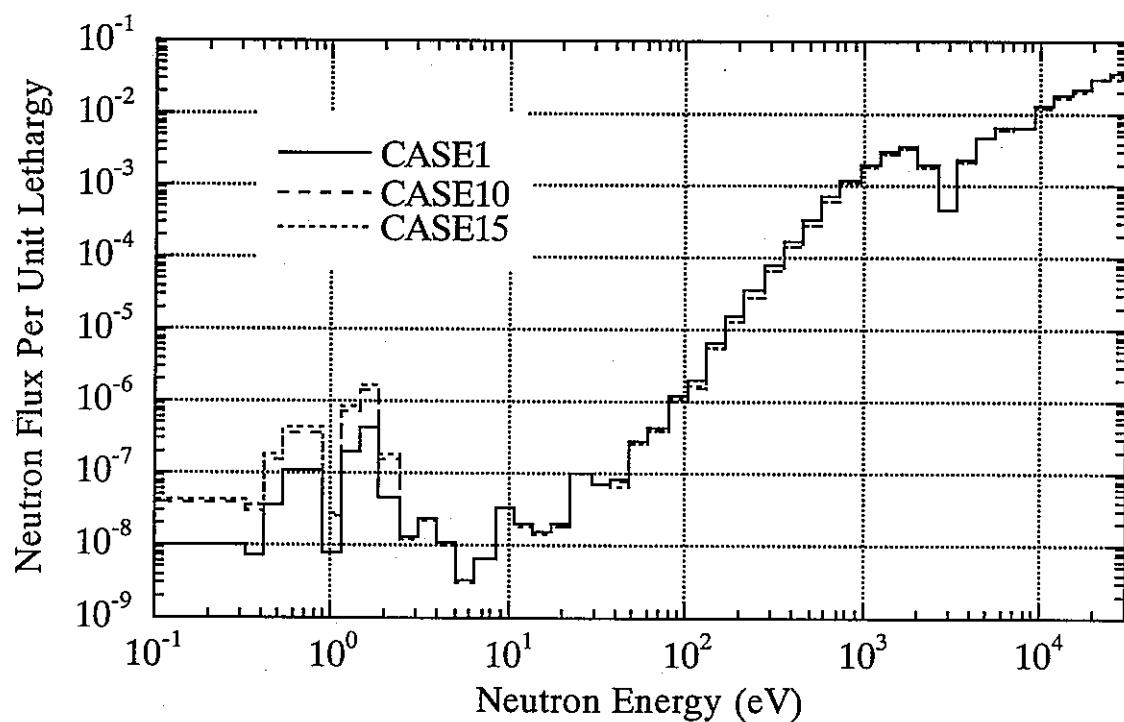


図 3－7－6 金属燃料炉心の低エネルギー域中性子スペクトル
(CASE1,CASE10及びCASE15)

第4章 結 言

自身の炉で生成されるMA及びLLFPをリサイクルし、炉内に閉じ込めそれら核種の消滅をはかる「平衡炉心」概念のもと、酸化物、窒化物、及び金属燃料に対して、LLFPの分離をこれまで仮定していた同位体分離から元素分離に変更して、「平衡炉心」概念の実現可能性に関して核特性の観点より検討を行った。

抵抗係数の大きさから見積もられた地層処分リスクの観点から、そのリスクを負っている順にTc、I 及びSeの3核種であれば元素分離によって、燃焼欠損反応度やPu自給に関して僅かな改善が施されれば、酸化物燃料でも「平衡炉心」に閉じ込めることが可能である。これら3核種を元素分離によって「平衡炉心」へ閉じ込めてことで、地層処分のリスクは十分に減じられると考えられる。

他方、LLFPを可能な限り炉内に閉じ込めるという考え方方に立つと、Pd及びZrを除く5核種のLLFP (Tc, I, Se, Sn 及び Cs) であれば窒化物燃料炉心を用いた場合において、ドップラーが効きづらい点を除けば、核特性を損なわずに元素分離によって炉心に閉じ込めた「平衡炉心」成立の可能性がある。

Zrに関しては、その平衡量の多さ及び閉じ込めに必要な体積の大きさから、またPdに関しては、Pdのもつ核的性質の悪さ及び平衡量の多さから、窒化物や金属燃料を用いても元素分離によるZr及びPdの炉内閉じ込めは、少なくともここで選択した炉心仕様下では無理である。

参考文献

- 1) H. SEKIMOTO and N. TAKAGI, "Preliminary Study on Future Society in Nuclear Quasi Equilibrium", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 28, 10 (1991).
- 2) A. MIZUTANI, A. SHONO and M. ISHIKAWA, "Investigation of Equilibrium Core by Recycling MA and LLFP in Fast Reactor Cycle (I)", *JNC Report, TN 9400 99-043* (1999).
- 3) A. MIZUTANI, "Investigation of Equilibrium Core Recycling MA and LLFP in a Fast Reactor Cycle", *ANS Transactions*, 81(1999).
- 4) H. SEKIMOTO and K. KANAI, "Trade-off between Neutron Balance and LLFP Incineration", *Ann. Nucl. Energy*, 25, 11(1998).
- 5) N. TAKAGI and H. SEKIMOTO, "Feasibility of Fast Fission System Confining Long-Lived Nuclides", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 29, 3 (1992).
- 6) T. NAKAGAWA, et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 32, 1259 (1995).
- 7) Croff A. G., "LMFBR Models for the ORIGEN2 Computer Code", *ORNL/TM-7176*(1981).
- 8) M. NAKAGAWA and K. TSUCHIHASHI, "SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", *JAERI-1294*, (1984).
- 9) T. NAKAGAWA, "Summary of JENDL-2 General Purpose File", JAERI-M 84-103, (1984).
- 10) T. B. FOWLER, et al., "Nuclear Reactor Analysis Code: CITATION", *ORNL-TM-2496, Rev.2*, (1971).
- 11) S. IIJIMA, et al., "Calculation Program for Fast Reactor Design, 2: PERKY", *JAERI-M 6993*, (1977).
- 12) Y. OHKAWACHI and M. FUKUSHIMA, "Development of the Tool for Generating ORIGEN2 Library Based on JENDL-3.2 for FBR", *JNC Report, TN 9400 99-051*(1999).
- 13) H. SEKIMOTO, H. NAKAMURA and N. TAKAGI, "Toxicity of Radioactive Waste Discharged from Nuclear Energy Center in the Future Equilibrium State", *Ann. Nucl. Energy*, 23, 8 (1996).
- 14) T. PIGFORD, "Long-Term Environment Impacts of Geological Repositories", *Proc. Int. Conf. on Radioactive Waste Management*, 4, 81(1984).
- 15) Rika Nenpyo, *Nat. Astro. Observ.*, 72(1999).

謝 辞

システム部 炉心Gr.の皆様には、本研究を進めるにあたって親身なご指導を頂くとともに、貴重なご助言を多々賜りましたこと、厚く御礼申し上げます。また、解析に必要な下地をつくって頂いた（株）アイ・エス・エーの青柳成美氏に、心より感謝致します。

付録 核特性解析結果及びマスバランス解析結果

- 付表1 酸化物燃料 CASE1 核特性
付表2 酸化物燃料 CASE10 核特性
付表3 酸化物燃料 CASE15 核特性
付表4 窒化物燃料 CASE1 核特性
付表5 窒化物燃料 CASE10 核特性
付表6 窒化物燃料 CASE15 核特性
付表7 金属燃料 CASE1 核特性
付表8 金属燃料 CASE10 核特性
付表9 金属燃料 CASE15 核特性

付表10 酸化物燃料 CASE1 マスバランス
付表11 酸化物燃料 CASE10 マスバランス
付表12 酸化物燃料 CASE15 マスバランス
付表13 窒化物燃料 CASE1 マスバランス
付表14 窒化物燃料 CASE10 マスバランス
付表15 窒化物燃料 CASE15 マスバランス
付表16 金属燃料 CASE1 マスバランス
付表17 金属燃料 CASE10 マスバランス
付表18 金属燃料 CASE15 マスバランス
(マスバランスは、内側燃料炉心、外側燃料炉心、
及び軸方向ブランケット燃料部合計値)

付表1 酸化物燃料 CASE1 核特性 (1599 MWTH)

V5.40

炉心高さ				100 cm	集合体ピッチ				16.07 cm			
ピン径				8.5 mm	Pu富化度	(内側)			22.96 W/O			
炉心直径				cm		(外側)			27.96 W/O			
サイクル		K-EFF	燃焼反応度 (%ΔK/KK')	最大高速中性子束 (n/cm ² *s)	最大線出力 (W/cm)			ピーニング係数				
4	BOC	1.032977	3.16	3.005E+15	418.5	415.5	0.99	1.18	1.23	1.448		
	EOC	1.000365		3.137E+15	417.2	386.5	0.93	1.23	1.19	1.477		
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)		
4	BOC	0.765	1.038	2.345	0.143	0.000	2.488	152.3	95900	96.4	3.6	0.0
	EOC	0.754	1.045	2.231	0.277	0.000	2.508			94.2	5.8	0.0
7群ミクロ断面積 POCOF14.HOXFP.MIC7G										備考 365DAYS CORE 3BATCH BLANKET 4BATCH		
SYSTEM DATA POCOF14.ADDDEN.DATA(HEQ10)												
CITATION DATA POCOF14.ADDCIT.DATA(HEQ10)												
TABLE DATA SYS99099.T170240.SV791.POCOF140.TBLIN												
OUTPUT FILE (FLUX)												
OUTPUT FILE (POWER)												
OUTPUT FILE (APPLE) POCOF14.ADDAPL.DATA(HEQ10)												

付表2 酸化物燃料 CASE10 核特性

(1599 MWTH)

V5.40

炉心高さ				100 cm	集合体ピッチ				16.07 cm						
ピン径				8.5 mm	Pu富化度	(内側) 23.97 W/O									
炉心直径				cm		(外側) 28.93 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)			ピーリング係数							
					(内側炉心)	(外側炉心)	(外/内)	(径方向)	(軸方向)	(炉心)					
4	BOC	1.035970	3.46	2.981E+15	419.2	415.0	0.99	1.18	1.22	1.449					
	EOC	1.000083		3.095E+15	412.9	387.0	0.94	1.22	1.19	1.460					
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)	(軸ブラ)	(径ブラ)			(炉心)	(軸ブラ)	(径ブラ)				
4	BOC	0.735	1.004	2.402	0.141	0.000	2.542	1067.4	96700	96.5	3.5	0.0			
	EOC	0.730	1.018	2.272	0.273	0.000	2.545			94.3	5.7	0.0			
7群ミクロ断面積 POCOF14.HOXFP.MIC7G								備考 365DAYS CORE 3BATCH BLANKET 4BATCH							
SYSTEM DATA POCOF14.AAADEN.DATA(HEQF2)															
CITATION DATA POCOF14.AAACIT.DATA(HEQ10)															
TABLE DATA SYS99293.T162226.SV537.POCOF14I.TBLIN															
OUTPUT FILE (FLUX)															
OUTPUT FILE (POWER)															
OUTPUT FILE (APPLE) POCOF14.AAAAPL.DATA(HEQ10)															

付表3 酸化物燃料 CASE15 核特性

(1599 MWTH)

V5.40

炉心高さ				100 cm	集合体ピッチ				16.07 cm		
ピン径				8.5 mm	Pu富化度	(内側) 29.01 W/O					
炉心直徑				cm		(外側) 33.64 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)			ピーリング係数			
					(内側炉心)	(外側炉心)	(外/内)	(径方向)	(軸方向)		
4	BOC	1.051732	4.91	3.160E+15	436.3	404.6	0.93	1.24	1.21	1.510	
	EOC	1.0000118		3.156E+15	401.1	380.8	0.95	1.20	1.17	1.422	
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)	(軸ブラ)	(径ブラ)			(炉心)	(軸ブラ)	
4	BOC	0.622	0.891	2.454	0.142	0.000	2.596	-56.0	96.4	3.6	0.0
	EOC	0.633	0.928	2.265	0.276	0.000	2.541		94.1	5.9	0.0
7群ミクロ断面積 POCOF14.HOXFP.MIC7G										備考	
SYSTEM DATA POCOF14.AAADEN.DATA(HEQ10)										365DAYS CORE 3BATCH BLANKET 4BATCH	
CITATION DATA POCOF14.AAACIT.DATA(HEQ10)											
TABLE DATA SYS99299.T164151.SV463.POCOF140.TBLIN											
OUTPUT FILE (FLUX)											
OUTPUT FILE (POWER)											
OUTPUT FILE (APPLE)		POCOF14.AAAAPL.DATA(HEQ10)									

付表4 窒化物燃料 CASE1 核特性

(1599 MWTH)

VS.40

炉心高さ			100	cm	集合体ピッチ			16.07	cm					
ピン径			8.5	mm	Pu富化度	(内側)			14.80 W/O					
炉心直径						(外側)			18.87 W/O					
サイクル		K-EFF	燃焼反応度 (%ΔK/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)			
4	BOC	1.011549			2.903E+15	395.1	424.5	1.07	1.19	1.23	1.472			
	EOC	1.000596			3.165E+15	426.3	391.5	0.92	1.24	1.22	1.511			
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)			
4	BOC	0.902	1.210	2.560	0.162	0.000	2.722	31.2	72600	96.2	3.8	0.0		
	EOC	0.870	1.190	2.515	0.316	0.000	2.831			94.1	5.9	0.0		
7群ミクロ断面積 POCOF14.HNIFP.MIC7G										備考 365DAYS CORE 3BATCH BLANKET 4BATCH				
SYSTEM DATA POCOF14.ADDDEN.DATA(HEQ1N)														
CITATION DATA POCOF14.ADDCIT.DATA(HEQ1N)														
TABLE DATA SYS99099.T172751.SV793.POCOF14N.TBLIN														
OUTPUT FILE (FLUX)														
OUTPUT FILE (POWER)														
OUTPUT FILE (APPLE) POCOF14.ADDAPL.DATA(HEQ1N)														

付表5 窒化物燃料 CASE10 核特性

(1599 MWTH)

V5.40

炉心高さ				100 cm	集合体ピッチ				16.07 cm					
ピン径				8.5 mm	Pu富化度	(内側)			15.64 W/O					
炉心直径				cm		(外側)			19.68 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)			ピーティング係数						
					(内側炉心)	(外側炉心)	(外/内)	(径方向)	(軸方向)					
4	BOC	1.015851	1.54	2.875E+15	396.1	423.9	1.07	1.19	1.23	1.468				
	EOC	1.000182		3.114E+15	421.2	392.0	0.93	1.23	1.21	1.490				
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)				
4	BOC	0.861	1.162	2.634	0.159	0.000	2.793	38.9	73400	96.3	3.7	0.0		
	EOC	0.838	1.154	2.568	0.309	0.000	2.877			94.3	5.7	0.0		
7群ミクロ断面積 POCOF14.HNIFP.MIC7G										備考 365DAYS CORE BLANKET 3BATCH 4BATCH				
SYSTEM DATA POCOF14.AAADEN.DATA(HEQ1N)														
CITATION DATA POCOF14.AAACIT.DATA(HEQ1N)														
TABLE DATA SYS99298.T111025.SV179.POCOF14I.TBLIN														
OUTPUT FILE (FLUX)														
OUTPUT FILE (POWER)														
OUTPUT FILE (APPLE) POCOF14.AAAAPL.DATA(HEQ1N)														

付表6 窒化物燃料 CASE15 核特性

(1599 MWTH)

V5.40

炉心高さ				100 cm	集合体ピッチ				16.07 cm			
ピン径				8.5 mm	Pu富化度	(内側)		19.03 W/O				
炉心直徑				cm		(外側)		23.08 W/O				
サイクル		K-EFF	燃焼反応度 (%ΔK/KK')	最大高速中性子束 (n/cm ² *s)	最大線出力 (W/cm)			ピーティング係数				
					(内側炉心)	(外側炉心)	(外/内)	(径方向)	(軸方向)			
4	BOC	1.032384	3.12	3.064E+15	412.4	413.1	1.00	1.17	1.22	1.432		
	EOC	1.000159		3.195E+15	410.0	384.2	0.94	1.22	1.19	1.456		
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)		
4	BOC	0.728	1.030	2.683	0.162	0.000	2.845	183.4	83100	96.2	3.8	0.0
	EOC	0.727	1.052	2.548	0.315	0.000	2.863			93.9	6.1	0.0
7群ミクロ断面積 POCOF14.HNIFP.MIC7G										備考 365DAYS CORE BLANKET 3BATCH 4BATCH		
SYSTEM DATA POCOF14.AAADEN.DATA(HEQ1N)												
CITATION DATA POCOF14.AAACIT.DATA(HEQ1N)												
TABLE DATA SYS99299.T164806.SV465.POCOF14N.TBLIN												
OUTPUT FILE (FLUX)												
OUTPUT FILE (POWER)												
OUTPUT FILE (APPLE) POCOF14.AAAAPL.DATA(HEQ1N)												

付表7 金属燃料 CASE1 核特性

(1599 MWTH)

V5.40

炉心高さ				100 cm	集合体ピッチ				16.07 cm			
ピン径				8.5 mm	Pu富化度	(内側)		15.65 W/O				
炉心直径				cm		(外側)		20.07 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)			ピーリング係数				
					(内側炉心)	(外側炉心)	(外/内)	(径方向)	(軸方向)			
4	BOC	1.019152	1.84	3.498E+15	399.3	414.1	1.04	1.18	1.21	1.440		
	EOC	1.000430		3.736E+15	416.7	381.8	0.92	1.24	1.19	1.486		
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)	(軸ブラ)	(径ブラ)			(炉心)	(軸ブラ)		
4	BOC	0.832	1.151	2.412	0.163	0.000	2.575	78200	95.9	4.1	0.0	
	EOC	0.812	1.147	2.335	0.318	0.000	2.652		93.5	6.5	0.0	
7群ミクロ断面積 POCOF14.HMEFP.MIC7G										備考 365DAYS CORE 3BATCH BLANKET 4BATCH		
SYSTEM DATA POCOF14.ADDDEN.DATA(HEQ1M)												
CITATION DATA POCOF14.ADDCIT.DATA(HEQ1M)												
TABLE DATA SYS99099.T173420.SV795.POCOF14M.TBLIN												
OUTPUT FILE (FLUX)												
OUTPUT FILE (POWER)												
OUTPUT FILE (APPLE) POCOF14.ADDAPL.DATA(HEQ1M)												

付表8 金属燃料 CASE10 核特性

(1599 MWTH)

V5.40

炉心高さ				100 cm	集合体ピッチ				16.07 cm				
ピン径				8.5 mm	Pu富化度	(内側)			16.57 W/O				
炉心直径				cm		(外側)			21.00 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)			ピーリング係数					
4	BOC	1.023820	2.31	3.437E+15	398.9	414.3	1.04	1.18	1.21	1.439			
	EOC	1.000186		3.657E+15	410.9	383.1	0.93	1.23	1.19	1.462			
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)		
4	BOC	0.791	1.101	2.486	0.159	0.000	2.645	58.5	79200	96.1	3.9	0.0	
	EOC	0.780	1.109	2.388	0.310	0.000	2.698			93.7	6.3	0.0	
7群ミクロ断面積 POCOF14.HMEFP.MIC7G										備考 365DAYS CORE BLANKET 3BATCH 4BATCH			
SYSTEM DATA POCOF14.AAADEN.DATA(HEQ1M)													
CITATION DATA POCOF14.AAACIT.DATA(HEQ1M)													
TABLE DATA SYS99298.T132121.SV209.POCOF14I.TBLIN													
OUTPUT FILE (FLUX)													
OUTPUT FILE (POWER)													
OUTPUT FILE (APPLE) POCOF14.AAAAPL.DATA(HEQ1M)													

付表9 金属燃料 CASE15 核特性

(1599 MWTH)

V5.40

炉心高さ				100 cm	集合体ピッチ				16.07 cm				
ピン径				8.5 mm	Pu富化度	(内側) 20.63 W/O							
炉心直徑				cm		(外側) 24.76 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)				
4	BOC	1.041096	3.96	3.636E+15	422.0	402.5	0.95	1.21	1.20	1.466			
	EOC	0.999870		3.728E+15	404.7	375.6	0.93	1.22	1.17	1.444			
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)			
4	BOC	0.663	0.968	2.549	0.160	0.000	2.709	-245.4	90300	96.0	4.0	0.0	
	EOC	0.671	1.003	2.385	0.311	0.000	2.696			93.5	6.5	0.0	
7群ミクロ断面積 POCOF14.HMEFP.MIC7G										備考 365DAYS CORE 3BATCH BLANKET 4BATCH			
SYSTEM DATA POCOF14.AAADEN.DATA(HEQ1M)													
CITATION DATA POCOF14.AAACIT.DATA(HEQ1M)													
TABLE DATA SYS99299.T165326.SV466.POCOF14L.TBLIN													
OUTPUT FILE (FLUX)													
OUTPUT FILE (POWER)													
OUTPUT FILE (APPLE) POCOF14.AAAAPL.DATA(HEQ1M)													

付表10 酸化物燃料 CASE1 マスバランス

	1CY. BOC (TOTAL)	4CY. BOC (TOTAL)	4CY. EOC (TOTAL)	4CY. BALANCE	FRESH FUEL	SPENT FUEL
PU238	53.90	52.80	52.10	-0.70	17.97	17.27
PU239	2183.11	2207.42	2231.71	24.29	727.70	751.99
PU240	1738.38	1683.36	1631.44	-51.92	579.46	527.54
PU241	282.99	280.27	276.35	-3.92	94.33	90.41
PU242	233.58	229.54	225.59	-3.96	77.86	73.90
U235	81.61	70.20	60.12	-10.08	27.20	17.12
U236	27.36	28.44	29.21	0.77	9.12	9.89
U238	27120.23	26547.32	25982.98	-564.34	9040.07	8475.73
NP237	13.80	14.51	15.13	0.62	4.60	5.22
NP239	0.00	3.10	4.59	1.48	0.00	1.48
AM241	47.70	51.19	54.24	3.05	15.90	18.95
AM242	3.04	3.50	3.92	0.42	1.01	1.43
AM243	57.29	57.98	58.51	0.53	19.10	19.63
CM242	3.51	3.89	4.17	0.29	0.23	0.52
CM243	0.70	0.68	0.66	-0.02	0.00	-0.02
CM244	65.01	66.49	67.91	1.42	21.67	23.09
CM245	15.43	15.34	15.32	-0.02	5.14	5.12
PU..TOTAL	4491.96	4453.38	4417.17	-36.21	1497.32	1461.12
PU..FISSILE	2466.10	2487.68	2508.05	20.37	822.03	842.40
FIS.RATIO.(X)	54.90	55.86	56.78	0.00	54.90	57.65
PU..ENRICHMENT.(W/O)	14.07	14.22	14.38	0.00	14.07	14.55
U..TOTAL	27229.19	26645.96	26072.31	-573.65	9076.39	8502.74
U235	81.61	70.20	60.12	-10.08	27.20	17.12
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.30	0.26	0.23	0.00	0.30	0.20
TRU..TOTAL	206.47	216.68	224.45	7.77	67.65	75.42
NP..TOTAL	13.80	17.62	19.72	2.10	4.60	6.70
AM..TOTAL	108.03	112.67	116.67	4.00	36.01	40.00
CM..TOTAL	84.65	86.39	88.06	1.67	27.05	28.71
TRU.RATIO.(W/O)	0.65	0.69	0.73	0.00	0.64	0.75
HM..TOTAL	31927.62	31316.02	30713.93	-602.09	10641.37	10039.27
RE..TOTAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FP..TOTAL	0.00	623.36	1236.11	612.75	0.00	612.75

付表11 酸化物燃料 CASE10 マスバランス

	1CY. BOC (TOTAL)	4CY. BOC (TOTAL)	4CY. EOC (TOTAL)	4CY. BALANCE	FRESH FUEL	SPENT FUEL
PU238	55.55	54.18	53.25	-0.93	18.52	17.59
PU239	2249.60	2254.22	2261.67	7.45	749.87	757.32
PU240	1791.33	1733.79	1678.96	-54.83	597.11	542.28
PU241	291.61	288.05	283.41	-4.65	97.20	92.56
PU242	240.70	236.51	232.39	-4.12	80.23	76.11
U235	80.81	69.79	60.01	-9.78	26.94	17.16
U236	27.15	28.20	28.95	0.75	9.05	9.80
U238	26855.41	26304.75	25761.54	-543.21	8951.80	8408.59
NP237	13.69	14.40	15.02	0.62	4.56	5.18
NP239	0.00	2.98	4.41	1.43	0.00	1.43
AM241	47.34	51.47	55.05	3.59	15.78	19.37
AM242	3.02	3.47	3.89	0.42	1.01	1.43
AM243	56.86	57.84	58.63	0.79	18.95	19.74
CM242	3.48	3.82	4.09	0.28	0.23	0.51
CM243	0.70	0.67	0.65	-0.02	0.00	-0.02
CM244	64.52	65.93	67.31	1.38	21.51	22.89
CM245	15.32	15.20	15.15	-0.05	5.11	5.06
PU..TOTAL	4628.77	4566.75	4509.68	-57.07	1542.93	1485.85
PU..FISSILE	2541.21	2542.27	2545.08	2.81	847.07	849.88
FIS.RATIO.(%)	54.90	55.67	56.44	0.00	54.90	57.20
PU..ENRICHMENT.(W/O)	14.56	14.64	14.75	0.00	14.56	14.86
U..TOTAL	26963.37	26402.73	25850.50	-552.23	8987.79	8435.55
U235	80.81	69.79	60.01	-9.78	26.94	17.16
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.30	0.26	0.23	0.00	0.30	0.20
TRU..TOTAL	204.92	215.77	224.21	8.44	67.15	75.58
NP..TOTAL	13.69	17.38	19.43	2.04	4.56	6.61
AM..TOTAL	107.22	112.78	117.57	4.80	35.74	40.54
CM..TOTAL	84.01	85.61	87.20	1.59	26.84	28.44
TRU.RATIO.(W/O)	0.64	0.69	0.73	0.00	0.63	0.76
HM..TOTAL	31797.06	31185.26	30584.38	-600.87	10597.85	9996.98
RE..TOTAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FP..TOTAL	0.00	625.29	1238.26	612.97	0.00	612.97

付表12 酸化物燃料 CASE15 マスバランス

	1CY. BOC (TOTAL)	4CY. BOC (TOTAL)	4CY. EOC (TOTAL)	4CY. BALANCE	FRESH FUEL	SPENT FUEL
PU238	58.19	55.68	53.78	-1.90	19.40	17.50
PU239	2356.52	2295.15	2246.38	-48.77	785.51	736.74
PU240	1876.47	1812.32	1749.56	-62.76	625.49	562.73
PU241	305.47	300.67	294.80	-5.87	101.82	95.96
PU242	252.14	247.65	243.20	-4.45	84.05	79.60
U235	74.35	64.61	55.90	-8.70	24.78	16.08
U236	24.07	25.03	25.73	0.70	8.02	8.73
U238	24707.45	24227.32	23751.98	-475.34	8235.81	7760.47
NP237	12.14	12.72	13.22	0.50	4.05	4.55
NP239	0.00	2.61	3.87	1.26	0.00	1.26
AM241	41.97	47.65	52.57	4.92	13.99	18.91
AM242	2.67	3.11	3.53	0.42	0.89	1.32
AM243	50.41	52.68	54.63	1.95	16.80	18.75
CM242	3.09	3.44	3.77	0.33	0.21	0.54
CM243	0.62	0.59	0.58	-0.01	0.00	-0.01
CM244	57.20	58.53	59.95	1.42	19.07	20.49
CM245	13.58	13.44	13.38	-0.06	4.53	4.46
PU..TOTAL	4848.78	4711.47	4587.73	-123.75	1616.26	1492.52
PU..FISSILE	2661.99	2595.82	2541.19	-54.64	887.33	832.69
FIS.RATIO.(%)	54.90	55.10	55.39	0.00	54.90	55.79
PU..ENRICHMENT.(W/O)	16.25	16.12	16.03	0.00	16.25	15.97
U..TOTAL	24805.86	24316.95	23833.61	-483.34	8268.62	7785.27
U235	74.35	64.61	55.90	-8.70	24.78	16.08
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.30	0.27	0.23	0.00	0.30	0.21
TRU..TOTAL	181.68	194.78	205.51	10.74	59.53	70.27
NP..TOTAL	12.14	15.33	17.10	1.76	4.05	5.81
AM..TOTAL	95.05	103.44	110.73	7.29	31.68	38.98
CM..TOTAL	74.48	76.00	77.68	1.68	23.80	25.48
TRU.RATIO.(W/O)	0.61	0.67	0.72	0.00	0.60	0.75
HM..TOTAL	29836.32	29223.20	28626.85	-596.35	9944.40	9348.05
RE..TOTAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FP..TOTAL	0.00	632.84	1246.71	613.87	0.00	613.87

付表13 硝化物燃料 CASE1 マスバランス

	1CY. BOC (TOTAL)	4CY. BOC (TOTAL)	4CY. EOC (TOTAL)	4CY. BALANCE	FRESH FUEL	SPENT FUEL
PU238	43.18	43.47	43.91	0.44	14.39	14.83
PU239	2433.57	2550.28	2656.53	106.25	811.19	917.44
PU240	1193.22	1191.20	1190.77	-0.43	397.74	397.31
PU241	168.78	172.02	174.57	2.55	56.26	58.81
PU242	86.35	87.55	88.77	1.22	28.78	30.00
U235	116.95	102.02	88.74	-13.28	38.98	25.70
U236	48.44	49.40	50.00	0.60	16.15	16.75
U238	38866.14	38145.46	37436.28	-709.19	12955.38	12246.19
NP237	24.05	24.68	25.21	0.53	8.02	8.55
NP239	0.00	3.88	5.74	1.86	0.00	1.86
AM241	37.81	39.19	40.55	1.36	12.60	13.96
AM242	2.79	2.96	3.12	0.16	0.93	1.09
AM243	27.01	26.57	26.22	-0.35	9.00	8.65
CM242	2.27	2.59	2.79	0.21	0.12	0.32
CM243	0.35	0.36	0.37	0.01	0.00	0.01
CM244	26.14	27.02	27.80	0.79	8.71	9.50
CM245	5.75	5.76	5.80	0.03	1.92	1.95
PU..TOTAL	3925.09	4044.51	4154.54	110.03	1308.36	1418.40
PU..FISSILE	2602.35	2722.29	2831.10	108.80	867.45	976.25
FIS.RATIO.(%)	66.30	67.31	68.14	0.00	66.30	68.83
PU..ENRICHMENT.(W/O)	9.11	9.52	9.92	0.00	9.11	10.31
U..TOTAL	39031.54	38296.88	37575.01	-721.87	13010.51	12288.64
U235	116.95	102.02	88.74	-13.28	38.98	25.70
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.30	0.27	0.24	0.00	0.30	0.21
TRU..TOTAL	126.16	133.00	137.59	4.59	41.30	45.89
NP..TOTAL	24.05	28.55	30.95	2.39	8.02	10.41
AM..TOTAL	67.61	68.72	69.88	1.16	22.54	23.70
CM..TOTAL	34.50	35.72	36.76	1.03	10.75	11.78
TRU.RATIO.(W/O)	0.29	0.31	0.33	0.00	0.29	0.33
HM..TOTAL	43082.79	42474.39	41867.14	-607.24	14360.17	13752.93
RE..TOTAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FP..TOTAL	0.00	613.32	1225.41	612.10	0.00	612.10

付表14 窒化物燃料 CASE10 マスバランス

	1CY. BOC (TOTAL)	4CY. BOC (TOTAL)	4CY. EOC (TOTAL)	4CY. BALANCE	FRESH FUEL	SPENT FUEL
PU238	44.82	44.81	44.98	0.18	14.94	15.11
PU239	2525.97	2614.88	2697.32	82.45	841.99	924.44
PU240	1238.53	1234.17	1230.92	-3.24	412.84	409.60
PU241	175.19	177.88	179.93	2.05	58.40	60.44
PU242	89.63	90.77	91.93	1.15	29.88	31.03
U235	115.86	101.47	88.63	-12.85	38.62	25.77
U236	47.99	48.91	49.49	0.59	16.00	16.58
U238	38502.77	37811.86	37131.00	-680.86	12834.25	12153.40
NP237	23.82	24.46	25.00	0.54	7.94	8.49
NP239	0.00	3.71	5.50	1.78	0.00	1.78
AM241	37.45	39.32	41.10	1.78	12.48	14.27
AM242	2.76	2.93	3.10	0.16	0.92	1.08
AM243	26.76	26.46	26.24	-0.22	8.92	8.69
CM242	2.24	2.53	2.73	0.20	0.12	0.31
CM243	0.35	0.35	0.36	0.01	0.00	0.01
CM244	25.89	26.73	27.49	0.76	8.63	9.39
CM245	5.70	5.69	5.72	0.02	1.90	1.92
PU..TOTAL	4074.13	4162.50	4245.08	82.58	1358.04	1440.62
PU..FISSILE	2701.16	2792.76	2877.25	84.49	900.39	984.88
FIS.RATIO.(%)	66.30	67.09	67.78	0.00	66.30	68.36
PU..ENRICHMENT.(W/O)	9.50	9.85	10.19	0.00	9.50	10.53
U..TOTAL	38666.61	37962.23	37269.12	-693.12	12888.87	12195.75
U235	115.86	101.47	88.63	-12.85	38.62	25.77
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.30	0.27	0.24	0.00	0.30	0.21
TRU..TOTAL	124.97	132.19	137.23	5.04	40.91	45.94
NP..TOTAL	23.82	28.17	30.50	2.33	7.94	10.27
AM..TOTAL	66.97	68.72	70.43	1.72	22.32	24.04
CM..TOTAL	34.18	35.30	36.29	0.99	10.64	11.63
TRU..RATIO.(W/O)	0.29	0.31	0.33	0.00	0.29	0.34
HM..TOTAL	42865.70	42256.92	41651.42	-605.50	14287.81	13682.31
RE..TOTAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FP..TOTAL	0.00	616.03	1228.37	612.34	0.00	612.34

付表15 窒化物燃料 CASE15 マスバランス

	1CY. BOC (TOTAL)	4CY. BOC (TOTAL)	4CY. EOC (TOTAL)	4CY. BALANCE	FRESH FUEL	SPENT FUEL
PU238	46.96	45.89	45.14	-0.75	15.65	14.91
PU239	2646.71	2659.00	2675.66	16.66	882.24	898.90
PU240	1297.73	1289.26	1280.51	-8.75	432.58	423.82
PU241	183.56	185.85	187.43	1.57	61.19	62.76
PU242	93.91	95.06	96.21	1.15	31.30	32.45
U235	107.19	94.31	82.74	-11.57	35.73	24.16
U236	42.26	43.14	43.72	0.59	14.09	14.67
U238	35623.04	35010.13	34404.18	-605.95	11874.34	11268.39
NP237	20.98	21.52	21.98	0.46	6.99	7.46
NP239	0.00	3.31	4.91	1.60	0.00	1.60
AM241	32.98	35.89	38.57	2.69	10.99	13.68
AM242	2.43	2.60	2.78	0.18	0.81	0.99
AM243	23.56	23.82	24.09	0.27	7.85	8.13
CM242	1.98	2.27	2.50	0.23	0.10	0.33
CM243	0.30	0.31	0.32	0.01	0.00	0.01
CM244	22.80	23.57	24.31	0.74	7.60	8.34
CM245	5.02	5.01	5.02	0.02	1.67	1.69
PU..TOTAL	4268.87	4275.06	4284.95	9.89	1422.96	1432.84
PU..FISSILE	2830.27	2844.85	2863.09	18.24	943.42	961.66
FIS.RATIO.(%)	66.30	66.55	66.82	0.00	66.30	67.12
PU..ENRICHMENT.(W/O)	10.63	10.81	11.00	0.00	10.63	11.21
U..TOTAL	35772.49	35147.57	34530.64	-616.94	11924.16	11307.22
U235	107.19	94.31	82.74	-11.57	35.73	24.16
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.30	0.27	0.24	0.00	0.30	0.21
TRU..TOTAL	110.06	118.29	124.48	6.19	36.03	42.21
NP..TOTAL	20.98	24.83	26.89	2.06	6.99	9.05
AM..TOTAL	58.98	62.31	65.44	3.13	19.66	22.79
CM..TOTAL	30.10	31.16	32.15	0.99	9.37	10.37
TRU.RATIO.(W/O)	0.27	0.30	0.32	0.00	0.27	0.33
HM..TOTAL	40151.41	39540.93	38940.06	-600.86	13383.14	12782.27
RE..TOTAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FP..TOTAL	0.00	624.31	1237.63	613.32	0.00	613.32

付表16 金属燃料 CASE1 マスバランス

	1CY. BOC (TOTAL)	4CY. BOC (TOTAL)	4CY. EOC (TOTAL)	4CY. BALANCE	FRESH FUEL	SPENT FUEL
PU238	46.07	45.40	44.92	-0.49	15.36	14.87
PU239	2315.26	2400.11	2479.39	79.28	771.75	851.03
PU240	1209.45	1191.67	1175.56	-16.11	403.15	387.04
PU241	176.62	174.94	173.07	-1.87	58.87	57.00
PU242	95.99	96.60	97.14	0.54	32.00	32.54
U235	108.85	94.68	82.08	-12.61	36.28	23.68
U236	52.01	52.62	52.92	0.30	17.34	17.63
U238	36173.39	35505.99	34848.11	-657.88	12057.80	11399.92
NP237	23.45	24.12	24.68	0.57	7.82	8.38
NP239	0.00	3.59	5.31	1.72	0.00	1.72
AM241	35.78	37.76	39.53	1.77	11.93	13.70
AM242	2.85	2.92	2.99	0.08	0.95	1.03
AM243	34.56	33.33	32.23	-1.10	11.52	10.43
CM242	2.45	2.54	2.62	0.09	0.13	0.21
CM243	0.38	0.37	0.36	-0.01	0.00	-0.01
CM244	31.71	32.74	33.60	0.86	10.57	11.43
CM245	6.27	6.32	6.40	0.07	2.09	2.16
PU..TOTAL	3843.39	3908.73	3970.08	61.35	1281.13	1342.48
PU..FISSILE	2491.88	2575.05	2652.46	77.40	830.63	908.03
FIS.RATIO.(%)	64.84	65.88	66.81	0.00	64.84	67.64
PU..ENRICHMENT.(W/O)	9.53	9.84	10.15	0.00	9.53	10.46
U..TOTAL	36334.25	35653.29	34983.10	-670.19	12111.41	11441.22
U235	108.85	94.68	82.08	-12.61	36.28	23.68
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.30	0.27	0.23	0.00	0.30	0.21
TRU..TOTAL	137.46	143.68	147.74	4.05	45.00	49.06
NP..TOTAL	23.45	27.70	29.99	2.29	7.82	10.11
AM..TOTAL	73.20	74.01	74.76	0.75	24.40	25.15
CM..TOTAL	40.81	41.97	42.99	1.01	12.79	13.80
TRU..RATIO.(W/O)	0.34	0.36	0.38	0.00	0.33	0.38
HM..TOTAL	40315.09	39705.70	39100.91	-604.79	13437.54	12832.75
RE..TOTAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FP..TOTAL	0.00	617.65	1230.21	612.56	0.00	612.56

付表17 金属燃料 CASE10 マスバランス

	1CY. BOC (TOTAL)	4CY. BOC (TOTAL)	4CY. EOC (TOTAL)	4CY. BALANCE	FRESH FUEL	SPENT FUEL
PU238	47.90	46.92	46.16	-0.76	15.97	15.21
PU239	2407.01	2463.96	2519.28	55.32	802.34	857.65
PU240	1257.38	1237.48	1218.79	-18.69	419.13	400.44
PU241	183.62	181.43	179.07	-2.35	61.21	58.85
PU242	99.79	100.36	100.84	0.49	33.26	33.75
U235	107.71	94.10	81.94	-12.16	35.90	23.74
U236	51.44	52.03	52.32	0.29	17.15	17.44
U238	35795.59	35157.72	34528.01	-629.71	11931.86	11302.15
NP237	23.20	23.86	24.43	0.57	7.73	8.30
NP239	0.00	3.43	5.08	1.65	0.00	1.65
AM241	35.40	37.88	40.09	2.21	11.80	14.01
AM242	2.82	2.89	2.97	0.09	0.94	1.02
AM243	34.19	33.14	32.22	-0.93	11.40	10.47
CM242	2.42	2.49	2.57	0.08	0.13	0.21
CM243	0.38	0.36	0.36	-0.01	0.00	-0.01
CM244	31.37	32.35	33.19	0.84	10.46	11.29
CM245	6.20	6.24	6.30	0.06	2.07	2.13
PU..TOTAL	3995.71	4030.14	4064.14	34.00	1331.90	1365.90
PU..FISSILE	2590.63	2645.39	2698.35	52.96	863.54	916.51
FIS.RATIO.(%)	64.84	65.64	66.39	0.00	64.84	67.10
PU..ENRICHMENT.(W/O)	9.97	10.21	10.45	0.00	9.97	10.71
U..TOTAL	35954.74	35303.85	34662.27	-641.58	11984.91	11343.33
U235	107.71	94.10	81.94	-12.16	35.90	23.74
U..ENRICHMENT.(W/O)	0.30	0.27	0.24	0.00	0.30	0.21
TRU..TOTAL	135.96	142.64	147.20	4.56	44.51	49.07
NP..TOTAL	23.20	27.29	29.50	2.22	7.73	9.95
AM..TOTAL	72.40	73.91	75.28	1.37	24.13	25.50
CM..TOTAL	40.37	41.44	42.41	0.97	12.65	13.62
TRU.RATIO.(W/O)	0.34	0.36	0.38	0.00	0.33	0.38
HM..TOTAL	40086.40	39476.63	38873.61	-603.02	13361.32	12758.30
RE..TOTAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FP..TOTAL	0.00	620.40	1233.21	612.81	0.00	612.81

付表18 金属燃料 CASE15 マスバランス

	1CY. BOC (TOTAL)	4CY. BOC (TOTAL)	4CY. EOC (TOTAL)	4CY. BALANCE	FRESH FUEL	SPENT FUEL
I PU238	50.50	48.44	46.75	-1.69	16.83	15.15
I PU239	2537.61	2518.12	2507.86	-10.26	845.87	835.61
I PU240	1325.60	1302.01	1278.28	-23.73	441.87	418.14
I PU241	193.58	191.09	188.36	-2.73	64.53	61.80
I PU242	105.21	105.79	106.29	0.50	35.07	35.57
I U235	99.31	87.26	76.42	-10.84	33.10	22.26
I U236	45.04	45.60	45.91	0.31	15.01	15.32
I U238	33003.69	32442.89	31887.27	-555.62	11001.23	10445.61
I NP237	20.31	20.84	21.31	0.46	6.77	7.23
I NP239	0.00	3.03	4.50	1.47	0.00	1.47
I AM241	30.99	34.55	37.71	3.16	10.33	13.49
I AM242	2.47	2.55	2.67	0.11	0.82	0.93
I AM243	29.93	29.61	29.33	-0.27	9.98	9.70
I CM242	2.12	2.23	2.36	0.14	0.11	0.25
I CM243	0.33	0.32	0.32	0.00	0.00	0.00
I CM244	27.46	28.37	29.19	0.83	9.15	9.98
I CM245	5.43	5.46	5.52	0.06	1.81	1.86
I PU..TOTAL	4212.50	4165.44	4127.54	-37.91	1404.17	1366.26
I PU..FISSILE	2731.19	2709.21	2696.22	-12.99	910.40	897.41
I FIS.RATIO.(%)	64.84	65.04	65.32	0.00	64.84	65.68
I PU..ENRICHMENT.(W/O)	11.24	11.30	11.38	0.00	11.24	11.49
I U..TOTAL	33148.04	32575.74	32009.60	-566.14	11049.34	10483.20
I U235	99.31	87.26	76.42	-10.84	33.10	22.26
I U..ENRICHMENT.(W/O)	0.30	0.27	0.24	0.00	0.30	0.21
I TRU..TOTAL	119.03	126.97	132.91	5.94	38.97	44.91
I NP..TOTAL	20.31	23.88	25.81	1.93	6.77	8.70
I AM..TOTAL	63.38	66.71	69.71	3.00	21.13	24.13
I CM..TOTAL	35.34	36.38	37.39	1.01	11.07	12.09
I TRU.RATIO.(W/O)	0.32	0.34	0.37	0.00	0.31	0.38
I HM..TOTAL	37479.57	36868.15	36270.04	-598.11	12492.47	11894.36
I RE..TOTAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I FP..TOTAL	0.00	628.98	1242.81	613.83	0.00	613.83