

高速実験炉「常陽」MK-I炉心燃料組成に関する  
照射後試験データ解析  
(研究報告)

2004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  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)  
2004

## 高速実験炉「常陽」MK-I 炉心燃料組成に関する

### 照射後試験データ解析

(研究報告)

横山 賢治<sup>※</sup>、神 智之<sup>※※</sup>

#### 要 旨

高速炉の開発において、炉心燃料の燃焼に伴う同位体組成変化の予測精度の検証と向上は、重要な技術開発項目のひとつである。本研究では、高速実験炉「常陽」MK-I 炉心で照射された燃料集合体に対して実施された照射後試験 (PIE: Post Irradiation Experiments) データの解析を行った。照射後試験の結果として照射後燃料の同位体組成比が測定されており、燃焼に伴う原子数密度の変化率を解析評価対象とした。原子数密度変化率は、初期組成データの誤差の影響を強く受けるため、PIE データに最小自乗法を適用して、得られる直線の傾きに基づいて原子数密度変化率を評価することにより、初期組成の依存性を排除した。

今回の解析では、現在利用可能な約 80 点のすべての炉心燃料の PIE データに対して解析を実施した。解析では核データライブラリ JENDL-3.2 に基づく 70 群 3 次元 Tri-Z 体系による拡散計算を行い、照射位置での中性子スペクトルを考慮した燃焼計算を実施した。この結果、主要な核種 (U-235、U-236、U-238、Pu-239、Pu-241) については、計算値と実験値は 2~10% の範囲で一致した。ただし、解析手法にはまだ改善の余地があるため、今後、これらの PIE データを用いて解析手法の高度化と検証を行う必要がある。

一方、核データライブラリとして JENDL-3.3 を用いた解析も実施し、ライブラリ効果を評価した。この結果、JENDL-3.3 を用いることで、U-236、Pu-241 の原子数密度変化率がともに約 5% 大きくなり、主に U-235、Pu-240 の捕獲断面積の改訂が影響していることが分かった。今後、解析精度の向上及び誤差の定量化を図ることで、これらの核データの検証や燃焼解析手法の検証に「常陽」の PIE データを適用できる可能性があることが分かった。

---

※ 大洗工学センター システム技術開発部 中性子工学グループ

※※ 株式会社 NESI

## Analysis of Post-Irradiation Experiments on the Core Fuel composition of the Fast Experimental Reactor “JOYO” MK-I

Kenji Yokoyama\*, Tomoyuki Jin\*\*

### Abstract

In the development of fast reactors, it is important to verify and improve the prediction accuracy of isotopic composition change by burnup. In this study, post irradiation experiment (PIE) data of fuel assemblies irradiated in the experimental fast reactor "JOYO" MK-I core was analyzed. As the isotopic composition after irradiation had been measured in the PIE, the authors selected to evaluate the rate of change of atomic number density (RC) by burnup. The RCs strongly depend on the error of the initial atomic number density. Therefore, the authors evaluated RCs based on the sample regression constants with the linear-square method in order to remove the dependency on the error of the initial atomic number density.

The analysis was carried out for all the available ~ 80 point PIE data on core fuel sub assemblies. In the analysis, the 70 group diffusion calculation with 3-dimensional Tri-Z geometry model was performed by using the nuclear data library JENDL-3.2, and the burnup calculation considering neutron spectrum in the irradiation position was carried out. As a result of the analysis, calculated value agreed with experimental values within 2-10% on the main nuclides, such as U-235, U-236, U-238, Pu-239 and Pu-241. However, it is necessary to upgrade and verify the analysis method by using these PIE data since there is a room for improvement of the analysis models.

On the other hand, the nuclear data library effect was also evaluated by using JENDL-3.3. It was found that JENDL-3.3 increased both RCs of U-236 and Pu-241 by ~5% due to the revisions of U-235 and Pu-240 capture cross-sections. In the future, improvement of the analysis model and quantification of the error will make it possible to apply the PIE data of “JOYO” for the verification of these nuclear data.

---

※ Reactor Physics Group, System Technology Division, OEC, JNC

※※ NESI Incorporation

## 目 次

要旨	i
Abstract	ii
目次	iii
表リスト	v
図リスト	vi
第1章 緒言	1
第2章 解析対象・手法	2
2.1 解析対象	2
2.1.1 照射後試験データ	2
2.1.2 照射前後の原子数密度の算出方法	3
2.1.3 原子数密度変化率の定義	4
2.1.4 PIE データによる原子数密度変化率の評価方法	4
2.2 解析手法	6
2.2.1 全炉心燃焼計算手法	6
2.2.2 PIE 燃焼計算手法	7
2.2.3 計算による原子数密度変化率の評価方法	7
第3章 初期組成に関する検討	17
3.1 PIE データによる初期組成の推定	17
3.2 初期組成誤差の原子数密度変化率への伝播	18
3.2.1 誤差伝播則	18
3.2.2 原子数密度変化率の誤差伝播評価式	18
3.2.3 原子数密度変化率の誤差伝播評価結果	19
第4章 解析結果と検討	29
4.1 フィッティングによる評価結果	29
4.2 C/E 値の評価結果	30
4.3 ライブラリ効果	31
第5章 結言	43
謝辞	45
参考文献	46

付録 A	原子数密度データの詳細 .....	付-A(1)
付録 B	PIE データによる初期組成の検討の詳細 .....	付-B(1)

## 表リスト

表 3.1-1	PIE データ -U ロット-	21
表 3.1-2	PIE データ -Pu ロット-	23
表 3.1-3	初期同位体組成比推定の対象とした U ロット及び Pu ロット	25
表 3.1-4	PIE データから推定した U 及び Pu の初期同位体組成比	26
票 3.2-1	原子数密度変化率の誤差評価結果 (PPJX13-530643)	28
表 4.1-1	原子数密度変化率の実験値 (全 PIE データ測定点)	32
表 4.1-2	原子数密度変化率の計算値 (全 PIE データ測定点)	34
表 4.1-3	原子数密度変化率の C/E 値 (全 PIE データ測定点)	36
表 4.2-1	原子数密度変化率の C/E 値 (炉中心: JENDL-3.2)	38
表 4.2-2	原子数密度変化率の C/E 値 (径中央: JENDL-3.2)	38
表 4.2-3	原子数密度変化率の C/E 値 (軸上端: JENDL-3.2)	38
表 4.2-4	原子数密度変化率の C/E 値 (軸下端: JENDL-3.2)	38
表 4.3-1	C/E 値のまとめ (JENDL-3.2)	39
表 4.3-2	C/E 値のまとめ (JENDL-3.3)	39
表 4.4-1	ライブラリ効果 (JENDL3.3/JENDL3.2)	39

## 図リスト

図 2.1-1	照射後試験の実施された集合体の装荷位置	9
図 2.1-2	原子数密度変化率の燃焼度依存性	10
図 2.1-3	PIE 評価位置の領域分割 (RZ 体系図)	11
図 2.2-1	PIE 解析の流れ	12
図 2.2-2	燃料集合体の格子計算モデル化	13
図 2.2-3	制御棒の計算モデル	14
図 2.2-4	燃焼チェーン	15
図 2.2-5	燃焼計算に関する諸データ	16
図 4.1-1	U-234 測定値のフィッティング (炉中心)	40
図 4.1-2	U-235 測定値のフィッティング (炉中心)	40
図 4.1-3	U-236 測定値のフィッティング (炉中心)	40
図 4.1-4	U-238 測定値のフィッティング (炉中心)	40
図 4.2-1	Pu-239 測定値のフィッティング (炉中心)	41
図 4.2-2	Pu-240 測定値のフィッティング (炉中心)	41
図 4.2-3	Pu-242 測定値のフィッティング (炉中心)	41
図 4.3-1	U-235 捕獲断面積の比較 (JENDL3.3/JENDL3.2-1)	42
図 4.3-2	Pu-240 捕獲断面積の比較 (JENDL3.3/JENDL3.2-1)	42



## 第1章 緒言

高速炉核燃料サイクルの開発において、高速炉の核設計精度を向上させることは、プラントの安全性・経済性を確保し、合理的で高性能な炉心を実現するための重要な研究課題となっている。この中でも、炉心燃料の燃焼に伴う同位体組成変化の精度良い予測は、炉心設計、核燃料サイクルシステム設計、廃棄物処分等、原子力の他の分野にも関わる重要な技術項目のひとつである。

このため、サイクル機構では、高速炉の燃焼による同位体組成変化の解析精度の検証と向上を目的とした研究開発の一環として、高速実験炉「常陽」で照射された燃料集合体の照射後試験(PIE: Post Irradiation Experiments)で測定された燃焼後の同位体組成データの解析を進めている。なお、燃焼による同位体組成変化は、核分裂反応だけでなく中性子捕獲反応による寄与もおおきく、核分裂断面積に比べて測定の難しいとされる捕獲断面積に関する核データ検証に利用できる可能性もある。このような観点から、「常陽」の照射後試験データは、高速炉開発だけに限らず核データ研究の分野でも貴重なデータとなりうる。

本報告書では、「常陽」MK-I 炉心で照射された炉心燃料集合体に対して、1979年～1986年にかけて実施された照射後試験データ<sup>(1-1)</sup>について解析評価した結果をまとめる。評価対象は、燃焼前後におけるU、Puの原子数密度の変化率とした。なお、照射後試験では燃焼後の同位体組成が測定されており、燃焼前後における原子数密度変化率を算出するためには、燃焼前の同位体組成(初期組成)は燃料製造データを用いる必要がある。このため、最初に照射後試験データと初期組成の整合性や初期組成誤差が評価対象に与える影響等を検討した。なお、従来検討においても、初期組成誤差が結果に対して大きな影響を与えるということが定性的に分かっていたが、この影響が定量化されていなかったため、解析値との比較が有意に行われているかの判断ができなかった。今回、照射後試験データから初期値を推定したり、初期組成誤差の伝播を計算したりすることによって、初期組成誤差の影響を定量化することができるようになった。この定量化の結果から、初期組成誤差を排除することが不可欠であることが分かったため、照射後試験データに最小自乗法を適用して得られる直線の傾きに基づいて原子数密度変化率を評価するという方法を採用した。この方法の採用により、照射後試験データから初期組成誤差を排除した原子数密度変化率を求められるようになり、解析値との有意な比較が可能となった。

第2章では解析対象と解析手法の概要について述べ、第3章で上で述べた初期組成に関する検討の詳細を述べる。第4章で原子数密度変化率の解析結果を示して結果について検討し、第5章で全体をまとめて結言とする。

## 第2章 解析対象・手法

本章では、照射後試験（PIE）の測定データの概要および解析対象とする原子数密度変化率の測定データからの算出方法について述べる。また、原子数密度変化率の評価に用いた解析手法についてまとめる。

### 2.1 解析対象

「常陽」MK-I 炉心燃料集合体の照射後試験は、核燃料サイクル開発機構大洗工学センターの AGF (Alpha-Gamma Facility) で実施された試験である。図 2.1-1 に照射後試験の対象となった集合体の炉心装荷位置を示す。図から分かるとおり、炉心燃料集合体だけでなくブランケット燃料集合体についても照射後試験が行われているが、ここでは炉心燃料集合体を解析対象とした。この試験過程において、U、Pu の抽出及び質量分析が実施され、燃焼度、全重核に対する Pu の原子数比、U 及び Pu の同位体組成比等が測定されている。以下では、これらの測定値から原子数密度変化率を算出する方法についてまとめる。

#### 2.1.1 照射後試験データ

PIE データとしては、以下の①～③のデータが取得されている。また、燃料製造データから④の初期原子個数は既知である。

①燃焼度[a/o]  $BU$

$$BU = \frac{(N_U^B + N_{Pu}^B + N_{MA}^B) - (N_U^A + N_{Pu}^A + N_{MA}^A)}{N_U^B + N_{Pu}^B + N_{MA}^B} \quad (2-1)$$

②全重核に対する Pu の原子数比[a/o]  $R_{U-Pu}$

$$R_{U-Pu} = \frac{N_{Pu}^A}{N_U^A + N_{Pu}^A} \quad (2-2)$$

③U 及び Pu の同位体組成比[a/o]  $V_U, V_{Pu}$

$$V_{U-i} = \frac{N_{U-i}^A}{N_U^A}, \quad V_{Pu-i} = \frac{N_{Pu-i}^A}{N_{Pu}^A} \quad (2-3)$$

④初期原子個数  $N$ 

$$N_{U-i}^B, N_{Pu-i}^B \quad (2-4)$$

ここで、 $N$ は原子数密度を表し、右肩の  $B$ 、 $A$ は燃焼前、燃焼後を表す。

以上のように、照射後試験の測定結果には、燃焼に伴うUやPuの組成変化に関する情報が含まれていることが分かる。ここでは、この燃焼に伴うUとPuの組成変化を解析対象とする。照射後試験の測定値として原子個数の絶対値が測定されているわけではないが、次節に示す方法で上記①～④のデータから燃焼後の原子数密度を求めることが可能であるので、燃焼前後の原子数密度の変化率を本解析の評価対象とした。

## 2.1.2 照射前後の原子数密度の算出方法

前節の①～④の実験データから、照射前後の原子数密度の変化率は以下のようにして求めることができる。

照射前のMAの存在量が無視できる ( $N_{MA}^B \approx 0$ ) とすると、式(2-1)より次式が得られる。

$$N_U^A + N_{Pu}^A = (1 - BU)(N_U^B + N_{Pu}^B - N_{MA}^A) \quad (2-5)$$

更に、(2-3)式と(2-5)式よりPu同位体の原子数密度は次式のように表される。

$$\begin{aligned} N_{Pu-i}^A &= V_{Pu-i} \cdot N_{Pu}^A \\ &= V_{Pu-i} \cdot R_{U-Pu} \cdot (N_U^A + N_{Pu}^A) \\ &= V_{Pu-i} \cdot R_{U-Pu} \cdot (1 - BU)(N_U^B + N_{Pu}^B - N_{MA}^A) \end{aligned} \quad (2-6)$$

同様に、U同位体についても次式のように表される。

$$\begin{aligned} N_{U-i}^A &= V_{U-i} \cdot N_U^A \\ &= V_{U-i} \cdot (1 - R_{U-Pu}) \cdot (N_U^A + N_{Pu}^A) \\ &= V_{U-i} \cdot (1 - R_{U-Pu}) \cdot (1 - BU)(N_U^B + N_{Pu}^B - N_{MA}^A) \end{aligned} \quad (2-7)$$

(2-6)式と(2-7)式において、右辺の  $N_{Pu}^B$  と  $N_{Pu}^A$  は燃料製造データから既知であり、一方、 $BU$ 、 $N_U^A$ 、 $N_{Pu}^A$ 、 $V_{U-i}$ 、 $V_{Pu-i}$ 、 $R_{U-Pu}$  はPIEデータから既知である。なお、照射後のMAの組成  $N_{MA}^B$  は照射前のUとPuの組成の合計と比較して無視できるほど小さいと仮定することができるが、次節

で述べる原子数密度変化率に対する影響は無視できない場合があるので、燃焼計算コード ORIGEN2 による結果で補正することにした。

以上のように、(2-6) 式と (2-7) 式の右辺の項はすべて既知となり、(2-6) 式と (2-7) 式により燃焼後の U、Pu の同位体の原子数密度を計算できる。

### 2.1.3 原子数密度変化率の定義

最終的な評価対象としては、前節の (2-6) 式と (2-7) 式で得られた燃焼前後の原子数密度から下式により計算される原子数密度変化率とする。

$$\text{原子数密度変化率} \equiv \frac{N^A - N^B}{N^B} \quad (2-8)$$

ここで、この評価対象について少し考察する。

簡単のため、ある核種について燃焼中の組成変化はその核種自身の中性子吸収反応が主であるとすると、以下の関係式が成り立つ。

$$\frac{dN}{dt} \simeq -\sigma_a \phi N \quad (2-9)$$

ただし、ここで  $\sigma_a$  は吸収断面積を表す。上式を変形すると原子数密度変化率は以下のように表すことができる。

$$\frac{\Delta N}{N} \simeq -\sigma_a \phi \Delta t \quad (2-10)$$

この式から、 $\sigma_a$  は原子数密度変化率に比例する量であることが分かる。このことから、原子数密度変化率は照射後試験データから核反応データの情報を得るための評価対象として適切なものであることが確認できる。

### 2.1.4 PIE データによる原子数密度変化率の評価方法

前述のように、(2-8)式で表される原子数密度変化率を評価対象とするが、次章で詳細を述べるとおり、この原子数密度変化率は、燃焼前後の組成誤差の影響を強く受ける量となる。特に、初期組成（燃料製造データ）と燃焼後組成（PIE データ）は独立した測定値であることから、両者の差を求めることで拡大される。

ここでは、初期組成の誤差の影響を極力小さくできるように、原子数密度変化率を燃焼度に対してプロットし、その直線の傾きから（燃焼度あたりの）原子数密度変化率を求めることとした。直線の傾きから原子数密度変化率を評価するので、結果的に初期組成データは使用されないことになり、初期組成誤差の影響を無視することが可能になる。

ただし、この方法を適用するには、燃焼度に対して原子数密度変化率が直線性を示す必要がある。このことを検討するために燃焼計算コード ORIGEN2 で評価した結果を図 2.1-2(1)と図 2.1-2(2)に示す。図 2.1-2(1)は燃焼履歴をできるだけ忠実に模擬した場合、図 2.1-2(2)は燃焼期間と冷却期間を分離して最初に全期間燃焼させた後に冷却させるという方法を採用した場合の結果である。

これらの図から分かるとおり、Pu-238、Pu-241 以外の核種は燃焼度に対してほぼ線形になることが確認できる。Pu-238 についてはそれ自身の半減期が短いこと（87.8 年）に加えて Am-241 からの生成において Cm-242 の半減期（163 日）による時定数が存在すること、Pu-241 については半減期が短い（14.4 年）こと等から、燃焼履歴の影響があり、燃焼度に対して線形とはならない。

なお、Pu-241 については、燃焼期間と冷却期間を分離すればほぼ線形になるが、燃焼度 1.4%付近に不連続な点があることが分かる。これは、「常陽」MK-I の定格出力が途中で 50MW から 75MW に上昇されたことが原因である。一方、Pu-238 については、燃焼期間と冷却期間を分離しても線形とはならない上に、出力上昇による不連続性も見られる。

以上の検討結果から、評価対象は以下のように設定することとした。

- ・ Pu-238、Pu-241 以外の核種（U-234、U-235、U-236、U-238、Pu-239、Pu-240、Pu-242）  
 ある炉心領域内で照射された燃料核種の原子数密度変化率を直線フィッティングして求めた燃焼度あたりの原子数密度変化率を評価対象とする。評価のための炉心領域の分割は、図 2.1-3 に示すように設定する。
- ・ Pu-238、Pu-241  
 各炉心位置で照射された燃料核種の原子数密度変化率の一点一点を評価対象とする。最終結果としては、他の核種と同様の領域での C/E 値の平均値を算出する。ただし、この方法では、初期組成の誤差の影響を無視することができない。

## 2.2 解析手法

今回の PIE データ解析では、燃料が装荷されていた位置での燃焼計算を行う必要があるため、**図 2.2-1** に示すように、

- ① 炉心全体で燃焼計算を行って注目する位置での中性子束を求めた後（全炉心燃焼計算）、
- ② その中性子束を使って PIE データ位置での燃焼計算を行う（PIE 燃焼計算）

という 2 ステップの計算を行うこととした。このように 2 ステップに分ける理由は、全炉心燃焼計算では、燃焼領域や中性子束の計算メッシュを大きくせざるを得ず（燃焼領域を集合体あたり径方向 1 メッシュ、軸方向 5cm 程度）、全炉心燃焼計算と PIE 燃焼計算を同時に行うと、PIE 燃焼計算の解析モデルが粗くなるからである。このように、2 ステップに分けておくことで、PIE 燃焼計算のモデルのみを詳細化して検討することが容易となる。

### 2.2.1 全炉心燃焼計算手法

全炉心燃焼計算については、JUPITER 標準解析手法<sup>(Ref. 2-1, 2-2, 2-3)</sup> に準ずる手法を用いて「常陽」MK-I の各サイクルの燃焼計算を行った。以下に、全炉心燃焼計算に用いた計算手法を簡単にまとめる。なお、この全炉心燃焼計算は、「常陽」MK-I の燃焼係数の評価に用いた解析手法と同様の手法<sup>(Ref. 2-4)</sup> を用いており、詳細は文献(2-4)を参照されたい。

#### (1) 実効断面積作成方法

「常陽」は六角形状の集合体にピン形状の燃料が装荷されているので、1次元プレートでモデル化することはできない。また、燃料ピンと集合体の二つの非均質性（二重非均質性）を考慮する必要もある。このため、**図 2.2-2** に示すようなリング化モデルを用いて、二重非均質性を一度に取り扱う手法（直接法一次元リングモデル）<sup>(Ref. 2-3)</sup> を用いた。また、制御棒の均質化についても、**図 2.2-3** に示すようなリング化モデルを用いて反応率割合保存法<sup>(Ref. 2-3)</sup> と呼ばれる手法を採用して計算を行った。なお、上記の実効断面積作成のための格子計算コードとしては、CASUP コード<sup>(Ref. 2-5)</sup> を用いた。

格子計算に必要な原子数密度としては文献(2-6)に記載されている 20°Cにおける各領域の平均組成を用いた。参考のため、今回の解析で使用したデータを**付録 A** にまとめた。なお、格子計算非均質モデル体系の膨張効果は小さいので、原子数密度と整合をとり 20°Cでモデル化している。ただし、燃焼時には炉心出力により燃料集合体内部に温度分布が形成されており、この温度分布によるドップラー効果は無視することができないので、集合体内部の温度分布を考慮した格子計

算を行っている（燃料ペレット領域；1250℃、その他の領域；430℃）。なお、核データとしては、評価済み核データライブラリー JENDL-3.2 に基づく 70 群高速炉用炉定数セット JFS-3-J3.2R<sup>(Ref. 2-7)</sup> 及び JENDL-3.3 に基づく JFS-3-J3.3 を使用した。

## (2) 炉心計算・燃焼計算

炉心計算は CITATION-FBR コード<sup>(Ref. 2-6, 2-8)</sup> を用いて、3次元 Tri-Z 体系 18 群拡散近似計算を行った。ここで使用する CITATION-FBR コードは、燃焼計算ルーチン部分を行列指数法に基づく燃焼計算ルーチンを組み込んだものである。なお、燃焼チェーンは図 2.2-4 に示されたものを用いている。燃焼日数及び冷却期間の履歴は図 2.2-5 に示した情報を忠実にモデル化している。

なお、燃焼計算では中性子束の絶対値を決定するために炉心熱出力による規格化が必要であるが、炉心熱出力の規格化に必要な核分裂あたりの発生エネルギーは Sher<sup>(Ref. 2-9)</sup> の論文に基づく値を用いた。詳細は文献(2-4)を参照されたい。

### 2.2.2 PIE 燃焼計算手法

前節に示した全炉心燃焼計算により求められた PIE データ測定位置での中性子束を用いて、PIE 燃焼計算を実施する。この燃焼計算には、ORIGEN2 コード<sup>(Ref. 2-10)</sup> を用いる。ORIGEN2 コードで使用する 1 群断面積ライブラリは、「高速炉用 ORIGEN2 断面積ライブラリ作成ツール」<sup>(Ref. 2-11)</sup> により作成した。本ツールの入力として、3次元 Tri-Z 体系 70 群拡散計算 (CITATION-FBR コード) により求めた 70 群中性子スペクトルと、1次元リングモデル (CASUP コード) により求められた 70 群実効断面積を与える。なお、各燃料照射位置ごとに、中性子スペクトルを与えて ORIGEN2 用断面積ライブラリを作成しているため、中性子スペクトルの炉心位置依存性を考慮した解析となっている。

なお、実効断面積作成時に取り扱っていない核種については、「高速炉用 ORIGEN2 断面積ライブラリ作成ツール」内蔵の JENDL-3.2 に基づく 73 群無限希釈断面積を同中性子スペクトルで 1 群化して 1 群断面積ライブラリを作成している。詳細については、文献(2-11)を参照されたい。

### 2.2.3 計算による原子数密度変化率の評価方法

最終的に評価する原子数密度変化率は、測定値と同様の方法を用いることとした。すなわち、Pu-238、Pu-241 以外の核種については、計算値についても炉心領域毎に解析結果を直線フィッティングして燃焼度あたりの原子数密度変化率を算出し、Pu-238、Pu-241 については、照射位置ごとの原子数密度変化率を測定値と比較する。なお、解析値を直線フィッティングする際に用いる燃焼度は、計算値を使うこととした。燃焼度は ORIGEN2 の計算結果を使って、以下の式を用いて算出した。

$$\text{燃烧度} = \frac{N_{\text{全重核}}^B - N_{\text{全重核}}^A}{N_{\text{全重核}}^B} \quad (2-11)$$



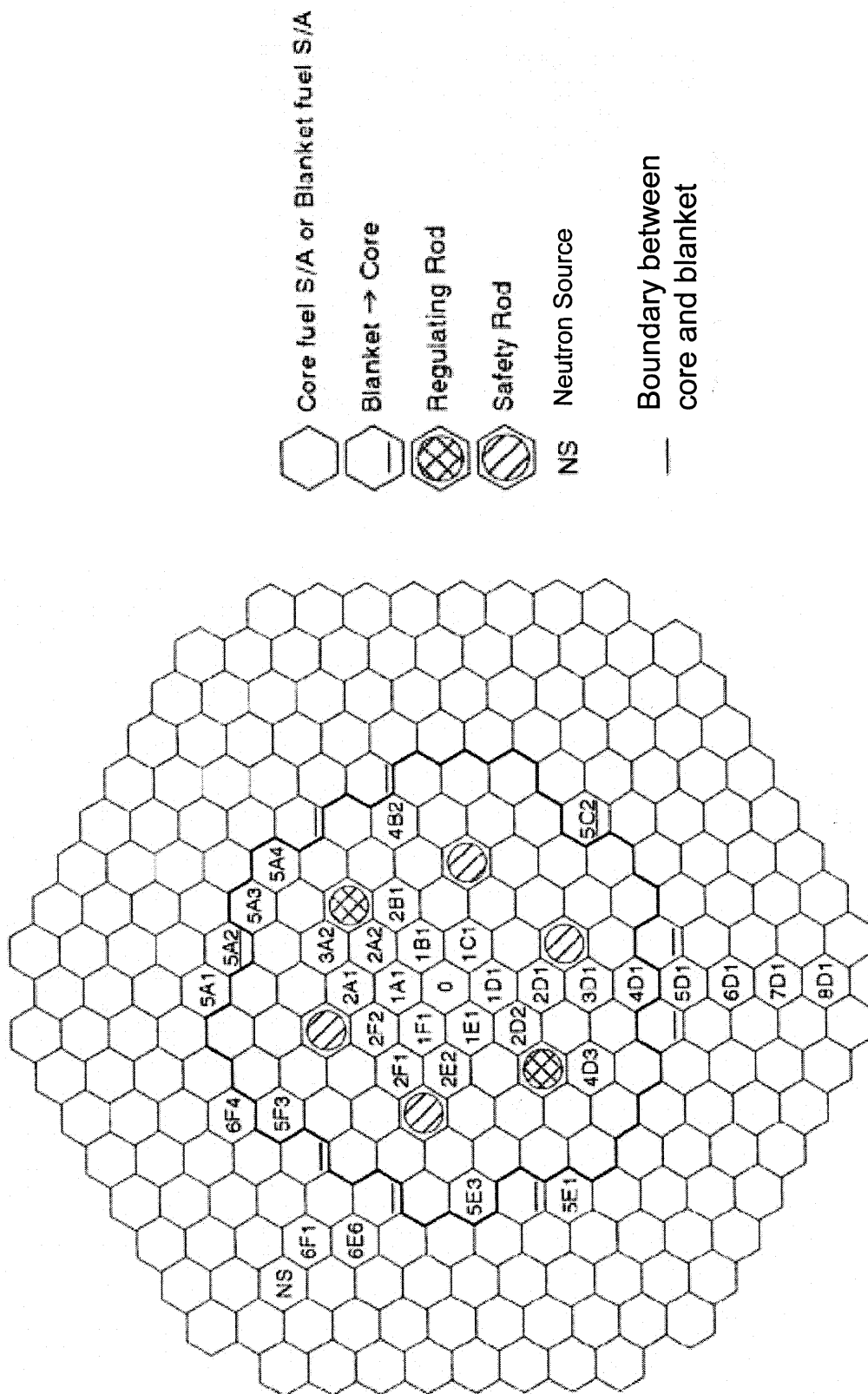


図2.1-1 照射後試験の実施された集合体の装荷位置

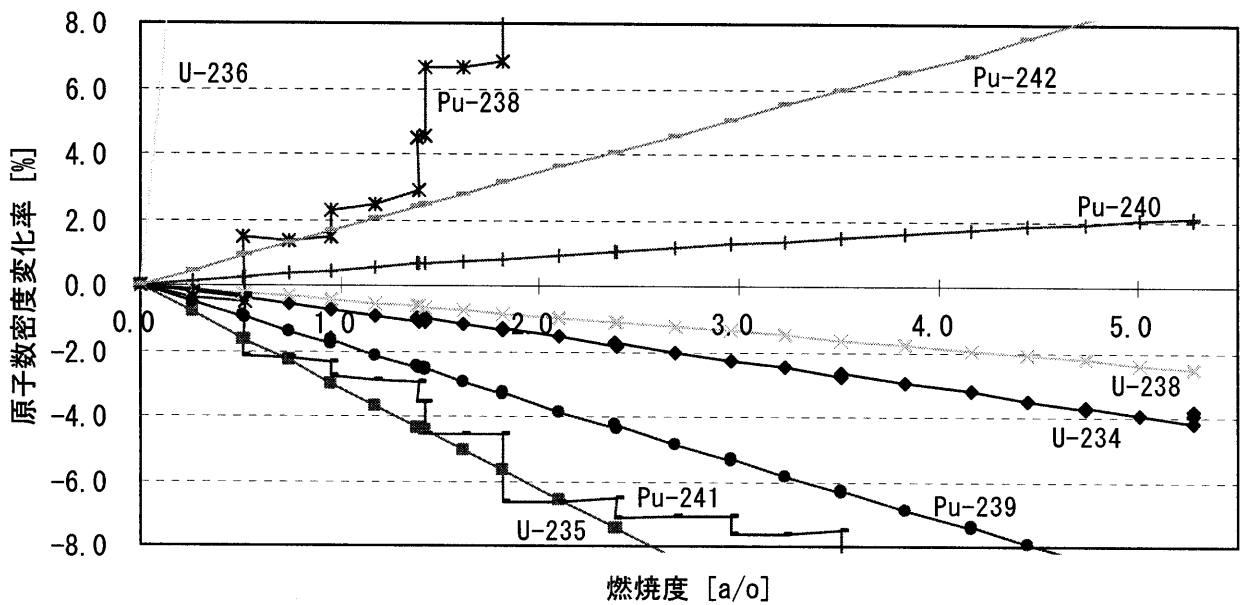


図 2.1-2(1) 原子数密度変化率の燃焼度依存性（燃焼履歴を直接模擬） [PPJX13-530643]

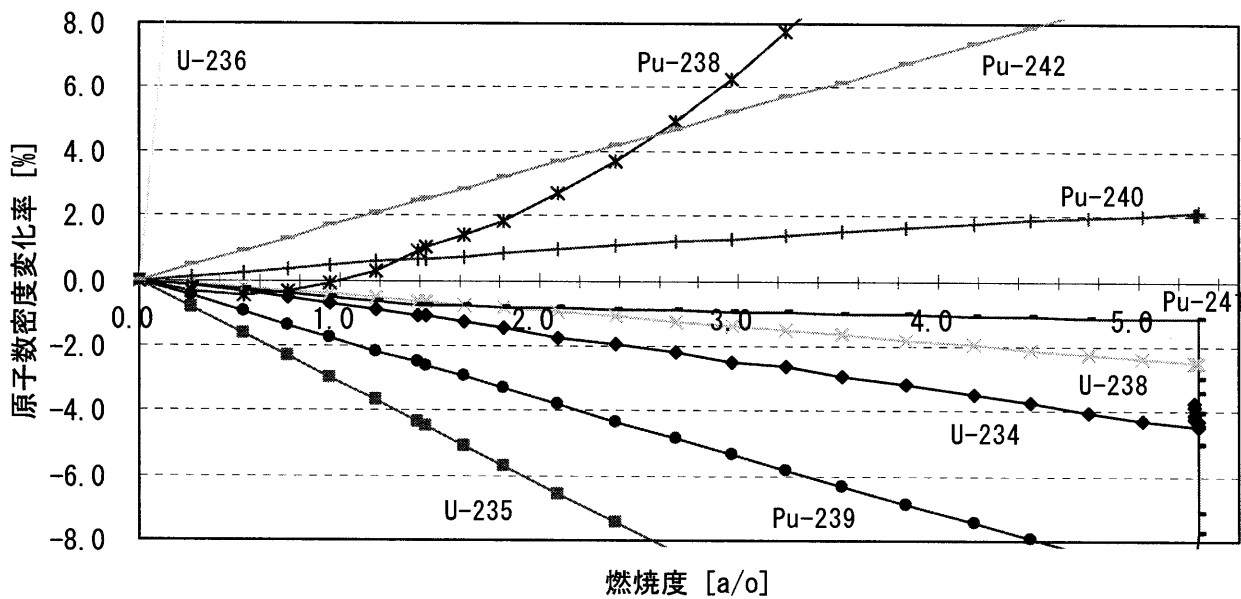


図 2.1-2(2) 原子数密度変化率の燃焼度依存性（燃焼期間と冷却期間を分離） [PPJX13-530643]

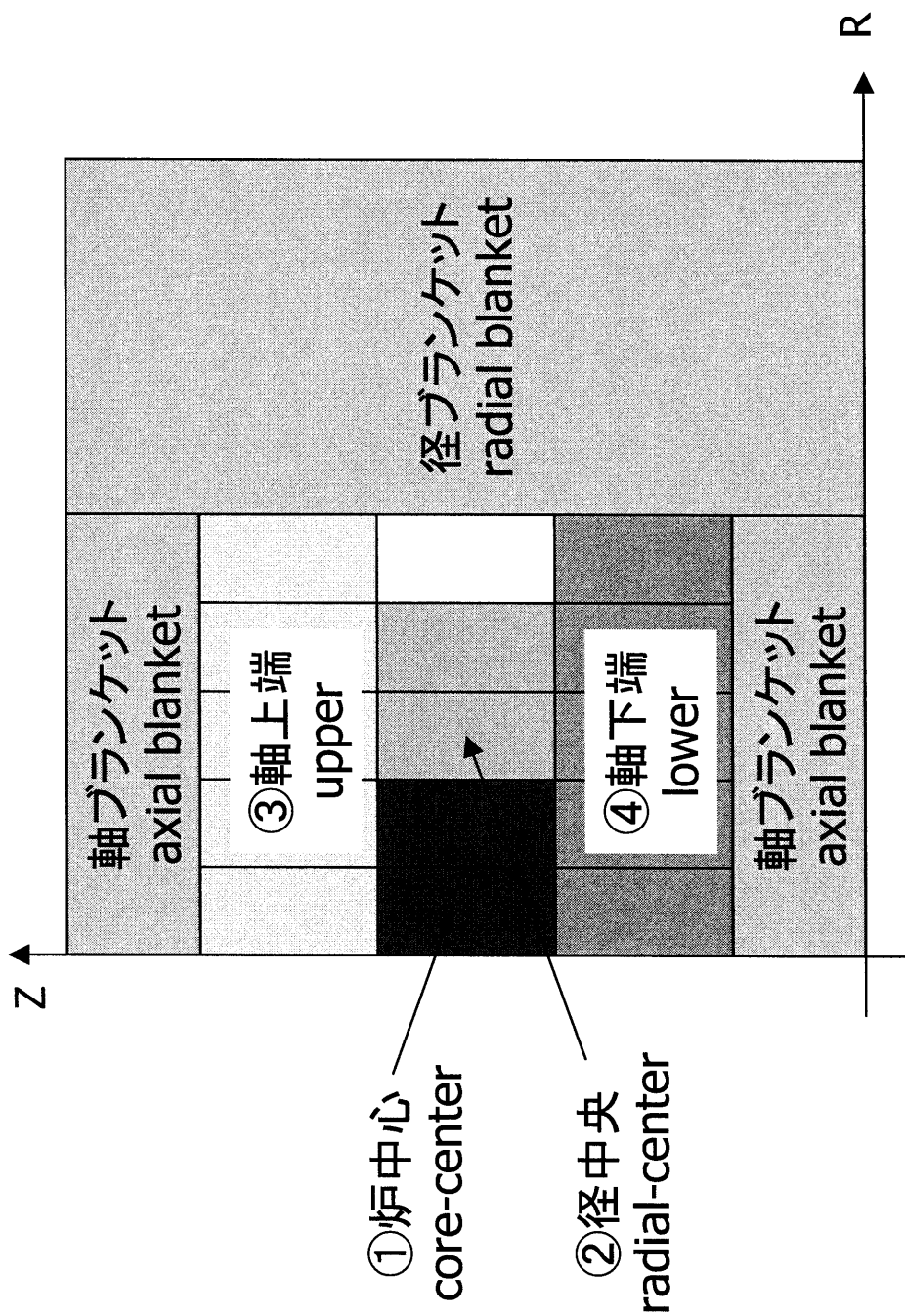


図2.1-3 PIE評価位置の領域分割(RZ体系図)

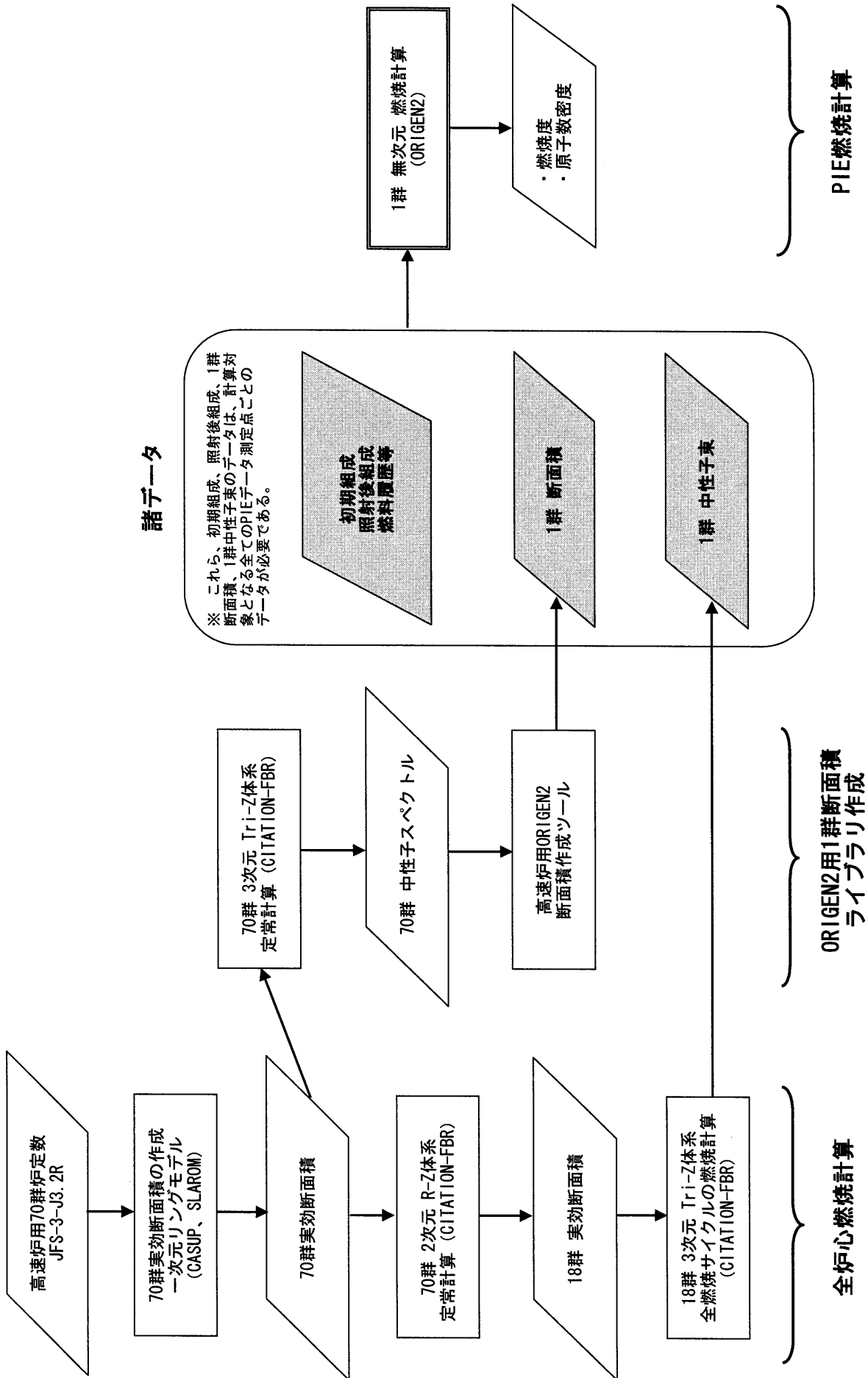
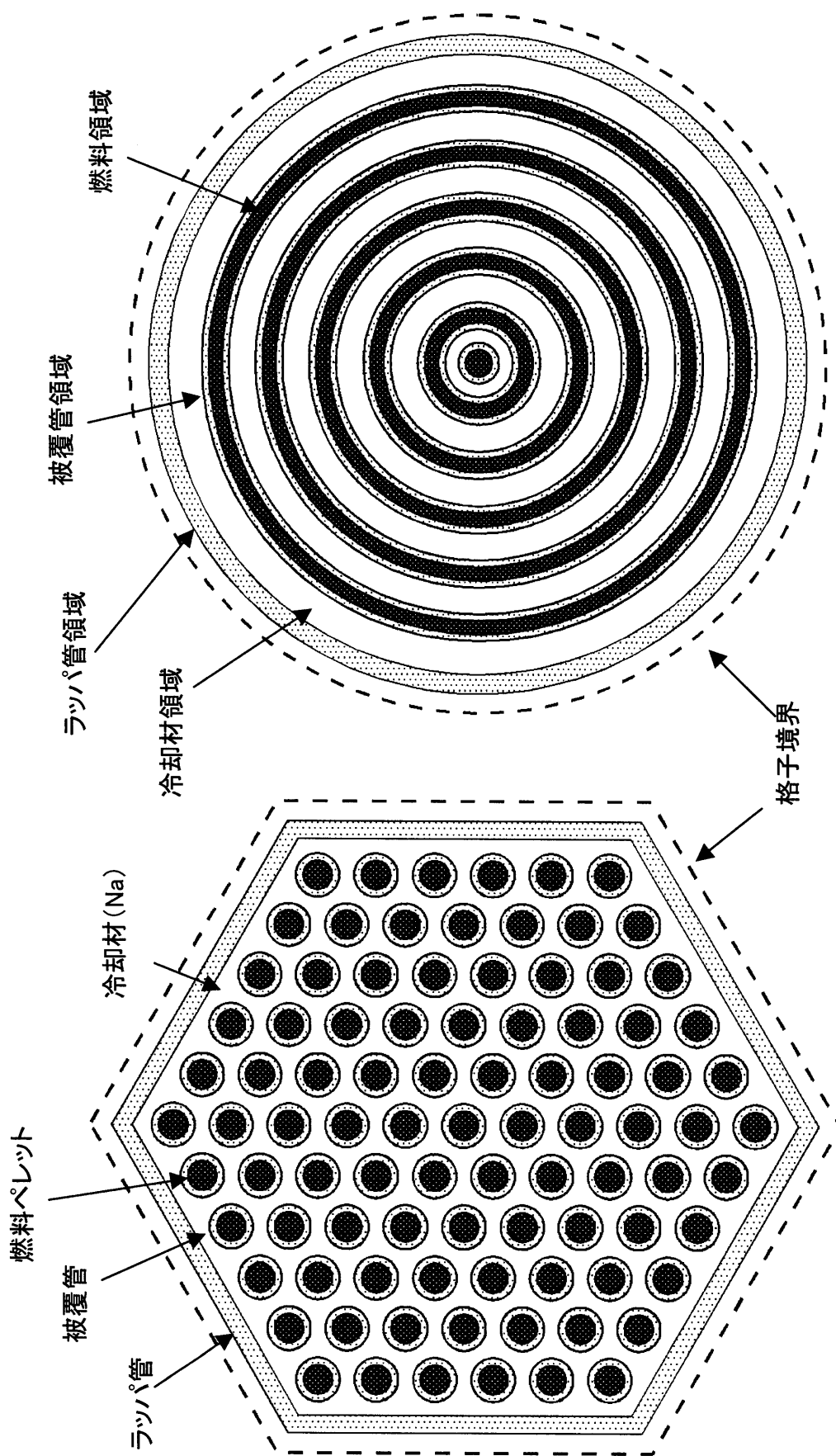


図2.2-1 PIE解析の流れ



直接法(1次元リングモデル)

実際の体系

図2.2-2 燃料集合体の格子計算モデル

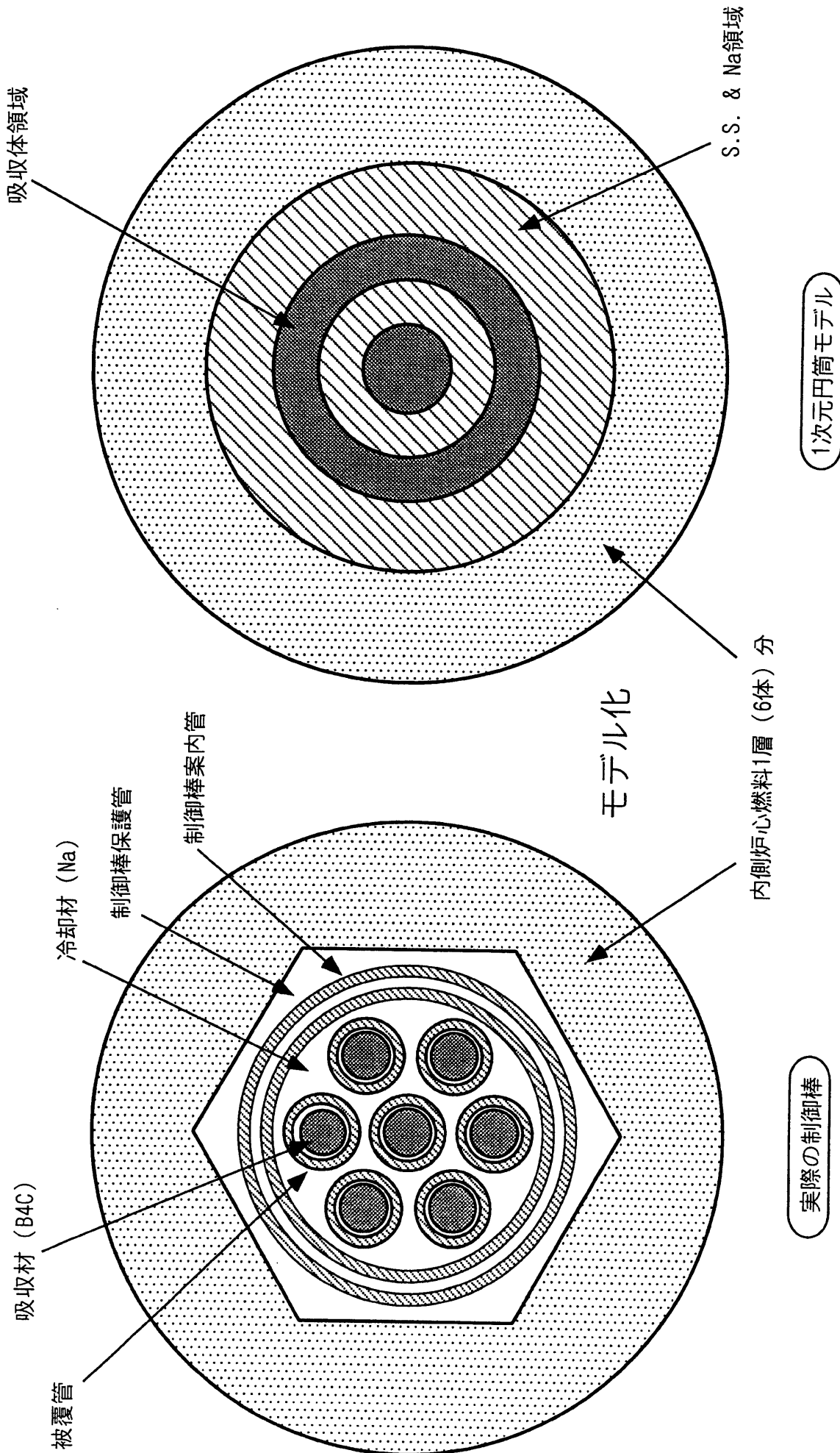


図2.2-3 制御棒の計算モデル

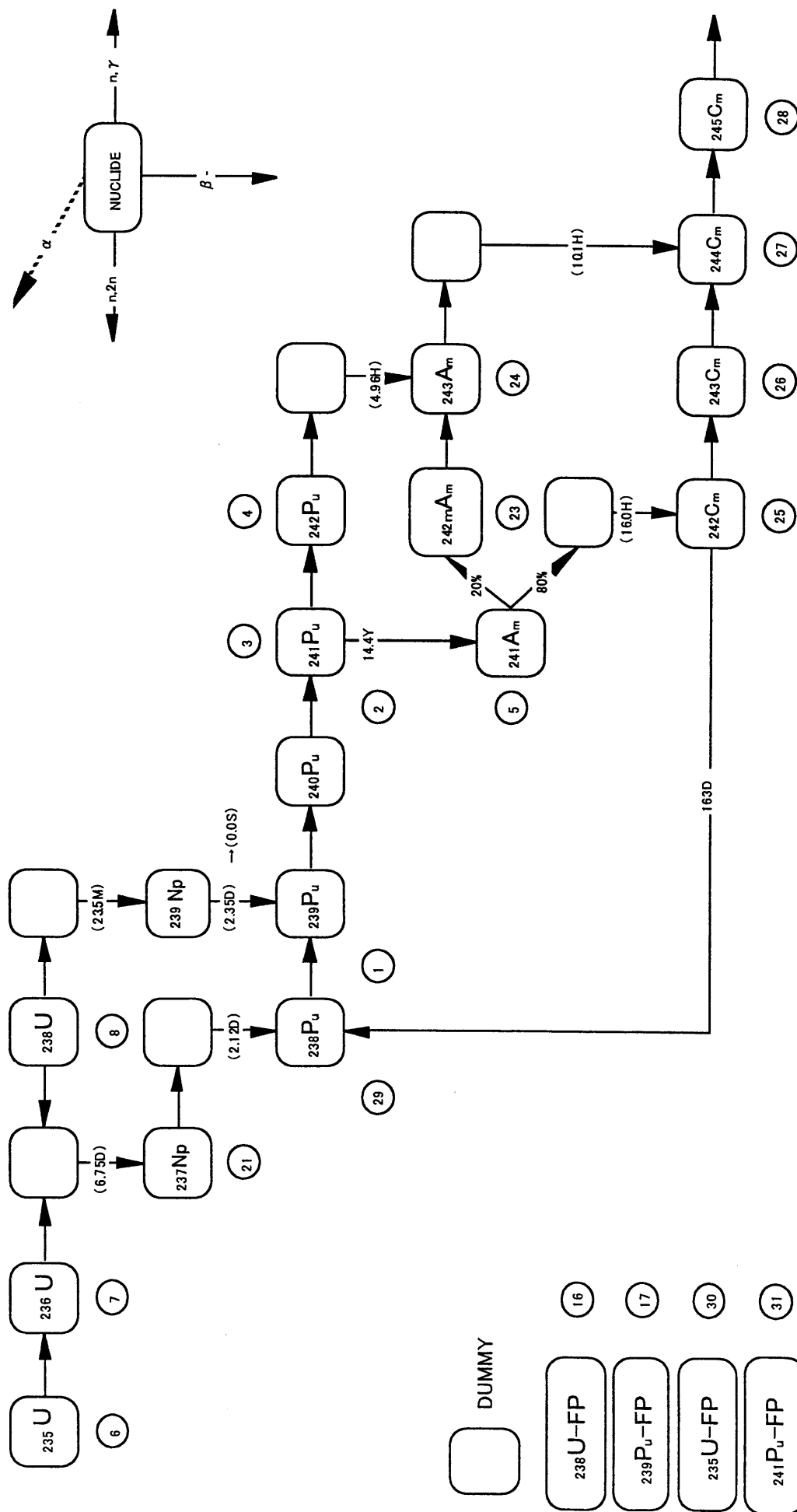


図2.2-4 燃焼子チェーン

原子炉出力 (MW)																		
サイクル名称	50MW	50MW	50MW	50MW	50MW	75MW	75MW	75MW	75MW	75MW	75MW	75MW	75MW	75MW	75MW			
	出力上昇試験 第1サイクル			出力上昇試験 第2サイクル			出力上昇試験 第3サイクル			出力上昇試験 第4サイクル			出力上昇試験 第5サイクル			出力上昇試験 第6サイクル		
炉心本数	70本	71	71	71	73	73	75	76	77	77	77	78	78	79				
積算出力	2470MW	2125	2140	155	2021	2946	3072	3019	3662	3333	3124							
燃料交換	5A5	5A5, 5E5	5B2, 5E2	5D2	5A2	5A2	5A2	5A2	5C2	5F2								
フラット → 炉心 集合体番号	58	68 78	60 75	70	55	65	88											
炉心 → 炉心 集合体番号	1C1, 5A3	2E2, 5A4	1B1, 4B2	1E1, 3A2	1A1, 1E1, 2F2,	1C1, 1E1, 2B1	1A1, 2F1	2A1, 1C1										
炉心 → 炉心 集合体番号	2 56	15 57	1 35	4 19	6 4	2 4 8	6 16	18 2										
フラット → フラット 集合体番号	5D1, 5F2	5A2	5A1	5A1	6F1	6F4	84											
	69 88	55	83	85	85	84												
実効日数	49.4日	42.5	42.8	3.1	26.95	39.28	40.96	40.25	48.83	44.44	41.65							
冷却期間	142.6日	34.5	46.2	79.9	170.05	49.72	50.04	200.75	22.17	119.56								

図2.2-5 燃焼履歴に関する諸データ



### 第3章 初期組成に関する検討

本章では、燃焼前の組成（初期組成）について検討した結果をまとめる。PIE データは燃焼後の組成データであるが、解析評価対象は前章で示したように燃焼前後の原子数密度変化率であるので、燃焼後の組成だけでなく初期組成も重要なデータとなる。特に、初期組成と PIE データの整合性が取れていない場合には、求められた原子数密度変化率は意味のないものになってしまう。このため、初期組成として利用する燃料製造データの測定値が、PIE データと整合性しているかどうか、解析に先立ち検討した。

ここでは PIE データから初期同位体組成比を推定して、燃料製造データとの整合性を検討するという方法を採用した。更に、PIE データから推定された初期同位体組成比と燃料製造データの差から初期組成誤差を推定し、初期組成誤差が原子数密度変化率に与える影響を誤差伝播則に基づき定量的に評価する。

#### 3.1 初期組成の推定

**表 3.1-1** 及び **表 3.1-2** に利用可能な全 PIE データを、それぞれ、U ロット、Pu ロットに分類してまとめた。燃料製造データは U ロット、Pu ロット毎にまとめられており、各ロットに対して PIE データ中の U 及び Pu の照射後の同位体組成比から、運転開始時（燃焼度 0.0[a/o] 時点）の同位体組成比を推定する。ここでは、各 PIE データ測定点における燃焼後の同位体組成比を燃焼度に対してプロットし、直線フィッティングによる外挿を行い、燃焼前の同位体組成比を求めた。詳細は、**付録 B** にまとめた。

評価対象は、フィッティングが可能なように PIE データが複数点あるものを選択した。**表 3.1-3** に対象としたデータをまとめた。

**表 3.1-4** に、PIE データより推定した同位体組成比と燃料製造データの同位体組成比との比較を示す。なお、燃料製造データの Pu 同位体組成比は、PIE データより推定した運転開始時の同位体組成比と比較できるように、Pu ロットの Am-241 分析日から対象集合体が炉心に装荷され、運転が開始された日までの間の Pu-241 の崩壊（半減期=14.35 年）を考慮した値となっている。

この表から分かるとおり、Pu-238、Pu-241 以外については燃料製造データと PIE データより推定した同位体組成比は良く一致しており、燃料製造データの信頼性があることがわかった。なお、前章で述べたとおり、Pu-238、Pu-241 は燃焼度に対して線形とはならないため、今回の方法では初期値を推定することができない。

## 3.2 初期組成誤差の原子数密度変化率への伝播

前述のように、初期組成に関して PIE データと燃焼製造データは整合性があることが確認できた。しかしながら、燃焼による原子数密度の変化量が小さい核種に関しては、初期組成のわずかな誤差であっても、原子数密度変化率に対しては大きな影響を与えてしまう可能性がある。例えば、初期組成誤差が1%であったとしても、原子数密度変化率が1%であれば、得られた原子数密度変化率はほとんど意味のない数値となってしまう。このため、ここでは、初期組成誤差が原子数密度変化率に対して与える影響を誤差伝播則にしたがって定量的に評価し、前節で推定した燃料製造データと PIE データの一致度が、今回の評価対象に対して十分な精度を持っているかどうかを確認する。

### 3.2.1 誤差伝播則

一般に、ある量  $u$  が独立な変数  $x, y, z, \dots$  の関数であるとき、 $u$  は以下のように表すことができる。

$$u = f(x, y, z, \dots) \quad (3-1)$$

このとき、ある量  $u$  の標準偏差  $\sigma_u$  は以下の式で求めることができる。

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots \quad (3-2)$$

以下では、上の式を用いて原子数密度変化率の誤差を評価する。

### 3.2.2 原子数密度変化率の誤差伝播評価式

原子数密度変化率を  $u$  とすると、原子数密度変化率は(2-8)式で定義されているので、 $u$  は以下のように表すことができる。

$$u = \frac{N^A - N^B}{N^B} = u(N^B, N^A) \quad (3-3)$$

なお、初期値  $N^B$  と、燃焼後の原子数密度  $N^A$  は、それぞれ、燃料製造データ、照射後試験データから

得られるものであり、 $N^B$ と $N^A$ は独立であると考えられるので、(3-2)式を適用することが可能である。

原子数密度変化率  $u$  の偏微分はそれぞれ以下のようになることから、

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial N^B} &= \left( -\frac{N^A}{(N^B)^2} \right)^2 \\ \frac{\partial u}{\partial N^A} &= \frac{1}{N^B}\end{aligned}\tag{3-4}$$

原子数密度変化率  $u$  の標準偏差（相対値）は以下の式で求めることができる。

$$\frac{\sigma_u}{u} = \sqrt{\left( -\frac{N^A}{(N^B)^2} \right)^2 \sigma_{N^B}^2 + \left( \frac{1}{N^B} \right)^2 \sigma_{N^A}^2} \bigg/ \left( \frac{N^A - N^B}{N^B} \right)\tag{3-5}$$

### 3.2.3 原子数密度変化率の誤差伝播評価結果

(3-5)式を用いて初期組成誤差が原子数密度変化率の誤差に与える影響を評価した結果を表 3.2-1 に示す。ここでは、代表的な例として炉中心で照射された燃焼度最大の PPJX13-530643 のデータを用いることとした。初期組成の誤差は、PIE による推定値と燃料製造データに基づく値との比較結果から暫定的に、U 同位体に対して一律 0.4%、Pu 同位体に対して一律 0.7%と設定した。また、ここでは初期組成の誤差があたえる影響を評価するのが目的であるので、燃焼後の原子数密度の誤差が大きな影響を与えないように、初期組成の誤差より小さく一律 0.3%と設定することにした。

評価結果の表から、燃焼に伴う原子数密度の変化が少ない核種では、誤差伝播による誤差の拡大が著しいことが分かる。例えば、U-238 では 0.4%の燃焼前の誤差（燃焼後の誤差 0.3%を含む）が、原子数密度変化率に対して約 20%にまで拡大して伝播することが分かる。また、Pu-239 についても約 13%の誤差に拡大していることがわかる。一方、原子数密度変化率の誤差が最も小さいのは U-235、Pu-238 等であるが、それでも約 2%にまで誤差が拡大していることが分かる。

以上の検討結果から、PIE データを一点ずつ取り出して原子数密度変化率を評価しようとする、初期組成及び燃焼後組成に求められる精度は非常に厳しいものとなることが分かる。例えば、U-238 に対して、原子数密度変化率の誤差を約 2%にしようとする、初期組成 0.05%、燃焼後組成 0%といった非常に小さい誤差が要求されてしまう。このように、独立したふたつの測定値（燃料製造データと PIE データ）から、原子数密度変化率を十分な精度で求めるのは非現実的であることが分かったので、ここでは、PIE データを直線でフィッティングし、傾きから原子数密度変化率を求めるという方法を採用することにした。

なお、Pu-238 と Pu-241 に関しては、直線フィッティングできないため、ここで評価した初期組成

誤差に起因する誤差はそのまま残る。しかしながら、Pu-238、Pu-241 ともに、原子数密度変化率が大きいことため初期組成誤差に起因する誤差は比較的小さく、それぞれ、2.5%、3.6%となった。このことから、Pu-238、Pu-241 については、直線フィッティングできなくても初期組成誤差の影響は許容できる範囲であると考えられる。

表3.1-1 (1/2) PIEデータ -Uロケット-

Uロケット	集合体製造番号	燃焼率 [a/o]	アドレス	同位体組成比 [a/o]			PIE番号	混合ロケット	Puロケット	軸方向位置 [mm]	
				U-234	U-235	U-236				U-238	上端
EU0002	PPJX17	1.830	5F3	0.131	22.226	0.472	77.171	FR0128	PU8243	270.3	275.7
	PPJX08	0.806	2E2	0.128	22.699	0.314	76.859	FM0104	PU8230	300.2	304.9
	PPJX08	0.775	2E2	0.126	22.714	0.302	76.858	FM0104	PU8230	150.2	154.9
	PPJX08	0.853	2E2	0.127	22.685	0.314	76.874	FM0104	PU8230	300.2	304.9
	PPJX08	0.730	2E2	0.125	22.728	0.295	76.852	FM0104	PU8230	450.2	454.9
	PPJX08	0.885	2E2	0.125	22.640	0.319	76.917	FM0104	PU8230	305.2	312.5
	PPJX13	3.390	000	0.128	21.270	0.735	77.867	FM0103	PU8230	17.6	23.5
	PPJX13	4.650	000	0.129	20.795	0.842	78.234	FM0103	PU8230	140.3	146.1
EU0004	PPJX13	5.220	000	0.129	20.547	0.907	78.417	FM0103	PU8230	272.6	278
	PPJX13	4.700	000	0.128	20.786	0.838	78.247	FM0103	PU8230	420.7	425.6
	PPJX13	3.120	000	0.128	21.488	0.678	77.706	FM0103	PU8230	575.3	580.5
	PPJX09	3.190	2B1	0.127	21.567	0.637	77.669	FM0104	PU8230	270.4	275
	PPJX09	2.080	2B1	0.128	22.045	0.531	77.297	FM0104	PU8230	19.8	24.8
	PPJX09	3.150	2B1	0.128	21.585	0.628	77.659	FM0104	PU8230	269.8	275.2
	PPJX09	1.810	2B1	0.127	22.150	0.474	77.249	FM0104	PU8230	575.3	580.3
	PPJX09	2.030	2B1	0.128	22.067	0.521	77.284	FM0103	PU8230	19.7	24.7
	PPJX09	3.050	2B1	0.128	21.614	0.617	77.642	FM0103	PU8230	270.3	274.8
	PPJX09	1.690	2B1	0.126	22.234	0.450	77.189	FM0103	PU8230	574.6	580.1
	PPJD2Y	4.450	3D1	0.114	20.974	0.802	78.111	FR0201	PU8255	269.9	275.4
	EU000A	PPJD1X	1.180	1E1	0.129	22.618	0.348	76.905	FR0180	PU8253	269
PPJD0B		3.730	1B1	0.132	21.420	0.709	77.738	FM0119	PU8232	269.9	274.7
EU0012	PPJD0B	3.870	1B1	0.133	21.289	0.734	77.845	FM0119	PU8232	269.4	274.3
	PPJD2S	5.010	2D1	0.133	20.836	0.852	78.180	FR0202	PU8255	269.7	275
	PPJD04	0.929	4B2	0.130	22.840	0.321	76.708	FM0113	PU8231	270.9	275.8
	PPJX14	1.400	1B1	0.132	22.640	0.380	76.848	FM0115	PU8231	270.3	274.3
	PPJD0M	3.890	2F1	0.132	21.311	0.723	77.834	FM0107	PU8231	270	275
	PPJX13	3.450	000	0.131	21.396	0.736	77.737	FM0106	PU8231	20.8	25.8
	PPJX13	5.260	000	0.134	20.673	0.872	78.321	FM0106	PU8231	273.1	278.7
	PPJX13	3.220	000	0.133	21.601	0.675	77.591	FM0106	PU8231	575.7	580.8
EU0013	PPJX13	3.480	000	0.132	21.429	0.737	77.703	FM0107	PU8231	20.3	25.5
	PPJX13	5.160	000	0.133	20.710	0.901	78.256	FM0107	PU8231	270.8	275.6
	PPJX13	3.100	000	0.130	21.599	0.676	77.595	FM0107	PU8231	575.6	580.7
	PPJX12	4.950	1D1	0.133	20.804	0.872	78.190	FM0105	PU8230	270	274.6
	PPJX12	3.390	1D1	0.131	21.472	0.720	77.677	FM0110	PU8231	19.8	24.8
	PPJX12	4.860	1D1	0.134	20.995	0.824	78.047	FM0110	PU8231	139.9	144.6
	PPJX12	5.150	1D1	0.134	20.742	0.887	78.237	FM0110	PU8231	269.9	274.9
	PPJX12	4.630	1D1	0.133	21.002	0.820	78.045	FM0110	PU8231	419.8	424.8
	PPJX12	3.070	1D1	0.133	21.656	0.658	77.553	FM0110	PU8231	575.1	579.5

表3.1-1 (2/2) PLEデータ -Uロケット-

Uロケット	集合体 製造番号	燃焼率 [a/o]	アドレス	同位体組成比 [a/o]				PIE番号	混合ロケット	Puロケット	軸方向位置 [mm]	
				U-234	U-235	U-236	U-238				上端	下端
EU0013	PPJX12	5.200	1D1	0.133	20.688	0.906	78.273	678622	FM0107	PU8231	269.4	274.2
	PPJX09	1.960	2B1	0.133	22.195	0.517	77.156	307122	FM0110	PU8231	20.2	24.7
	PPJX09	2.900	2B1	0.132	21.808	0.603	77.457	307142	FM0110	PU8231	270.3	275.3
	PPJX09	1.470	2B1	0.132	22.467	0.408	76.993	307162	FM0110	PU8231	575.3	580.2
	PPJX06	2.860	2B1	0.131	21.768	0.594	77.508	3091023	FM0110	PU8231	270.6	275.6
	PPJX06	1.730	1E1	0.132	22.422	0.426	77.020	1601022	FM0105	PU8230	270.2	275.2
	PPJX06	1.170	1E1	0.131	22.645	0.366	76.858	1646046	FM0110	PU8231	20.9	25.9
	PPJX06	1.600	1E1	0.130	22.474	0.401	76.994	1646064	FM0110	PU8231	139.9	145.4
	PPJX06	1.780	1E1	0.132	22.402	0.426	77.040	1646083	FM0110	PU8231	269.9	274.9
	PPJX06	1.600	1E1	0.132	22.507	0.400	76.962	1646104	FM0110	PU8231	419.9	424.9
	PPJX06	1.030	1E1	0.132	22.746	0.344	76.778	1646122	FM0110	PU8231	574.8	579.8
	PPJX11	2.278	1A1	0.131	22.127	0.498	77.244	1901022	FM0105	PU8230	270.3	275.1
PPJX11	1.479	1A1	0.132	22.505	0.421	76.942	1946046	FM0110	PU8231	21.2	25.9	
PPJX11	2.318	1A1	0.130	22.090	0.498	77.281	1946083	FM0110	PU8231	270.2	275	
PPJX11	1.346	1A1	0.130	22.563	0.395	76.912	1946123	FM0110	PU8231	576.3	580.9	
PPJD0B	2.560	1B1	0.131	21.876	0.596	77.398	484642	FM0121	PU8232	20.1	24.9	
PPJD0B	3.880	1B1	0.131	21.327	0.720	77.822	4846A3	FM0121	PU8232	270.9	275.7	
PPJD0B	2.230	1B1	0.130	22.053	0.540	77.276	4846F2	FM0121	PU8232	575.3	580.2	
PPJX14	1.310	1B1	0.130	22.625	0.370	76.874	1386023	FM0120	PU8232	269.5	274.5	
PPJX11	2.280	1A1	0.131	22.150	0.501	77.219	1991023	FM0120	PU8232	270.3	275	
PPJW1H	0.603	1F1	0.132	22.995	0.261	76.613	474623	FR0152	PU8243	269.4	273.8	
PPJD18	2.720	4D3	0.130	21.756	0.643	77.471	684122	FR0154	PU8244	19.7	24.4	
PPJD18	3.980	4D3	0.131	21.201	0.761	77.907	684143	FR0154	PU8244	270	274.8	
PPJD18	1.980	4D3	0.131	22.253	0.478	77.138	684162	FR0154	PU8244	574.9	579.6	
PPJD18	2.490	4D3	0.132	21.891	0.592	77.386	684622	FR0154	PU8244	19.6	24.4	
PPJD18	3.660	4D3	0.132	21.403	0.702	77.763	684643	FR0154	PU8244	270.8	275.4	
PPJD18	1.950	4D3	0.133	22.200	0.481	77.187	684662	FR0154	PU8244	574.7	579.6	
PPJD1J	2.500	5E3	0.129	21.893	0.618	77.360	720122	FR0164	PU8251	269.6	274.7	
PPJD1J	3.330	5E3	0.131	21.546	0.671	77.652	729122	FR0164	PU8251	269.7	274.9	
PPJD1A	0.298	5A3	0.128	23.124	0.214	76.534	0286021	FR0155	PU8251	292.5	297.3	
PPJX15	0.531	1C1	0.129	23.009	0.244	76.618	0584053	FR0158	PU8251	300.2	304.9	
PPJD1J	2.940	5E3	0.131	21.770	0.623	77.475	724623	FR0167	PU8251	270	275.1	
PPJD1W	0.563	1E1	0.131	23.035	0.247	76.588	2246063	FR0175	PU8252	269.7	274.7	
PPJD25	2.110	4D1	0.132	22.077	0.541	77.250	604664	FR0190	PU8253	19.1	24.3	
PPJD25	2.880	4D1	0.131	21.831	0.609	77.429	604682	FR0190	PU8253	140.3	145.3	
PPJD25	3.210	4D1	0.131	21.637	0.653	77.578	6046A3	FR0190	PU8253	269.3	274.8	
PPJD25	2.890	4D1	0.132	21.807	0.609	77.452	6046E2	FR0190	PU8253	420.8	425.8	
PPJD25	1.980	4D1	0.133	22.181	0.500	77.187	6046E2	FR0190	PU8253	575.3	580.3	
PPJD2B	2.670	2F2	0.132	22.005	0.541	77.322	2646106	FR0176	PU8252	269.5	275	

表3.1-2 (1/2) PIEデータ -Puロット-

Puロット	集合体 製造番号	燃焼率 [a/o]	アドレス	同位体組成比 [a/o]					PIE番号	混合ロット	Uロット	軸方向位置 [mm]	
				PU-238	PU-239	PU-240	PU-241	PU-242				上端	下端
PU8230	PPJX08	0.806	2E2	0.093	78.290	18.899	2.207	0.511	0801023	FM0104	EU0004	300.2	304.9
	PPJX08	0.775	2E2	0.087	78.327	18.874	2.201	0.511	0835063	FM0104	EU0004	150.2	154.9
	PPJX08	0.853	2E2	0.095	78.292	18.898	2.202	0.513	0835084	FM0104	EU0004	300.2	304.9
	PPJX08	0.730	2E2	0.092	78.340	18.856	2.201	0.511	0835103	FM0104	EU0004	450.2	454.9
	PPJX08	0.885	2E2	0.087	78.290	18.906	2.205	0.513	0880223	FM0104	EU0004	305.2	312.5
	PPJX13	3.390	000	0.124	77.249	20.033	2.040	0.554	534656	FM0103	EU0004	17.6	23.5
	PPJX13	4.650	000	0.094	77.010	20.282	2.054	0.561	534682	FM0103	EU0004	140.3	146.1
	PPJX13	5.220	000	0.139	76.774	20.436	2.084	0.568	534684	FM0103	EU0004	272.6	278
	PPJX13	4.700	000	0.131	76.993	20.255	2.061	0.559	5346E3	FM0103	EU0004	420.7	425.6
	PPJX13	3.120	000	0.124	77.384	19.914	2.032	0.547	5346E2	FM0103	EU0004	575.3	580.5
	PPJX12	4.950	1D1	0.155	77.030	20.399	1.846	0.570	670622	FM0105	EU0013	270	274.6
	PPJX09	3.190	2B1	0.093	77.456	19.734	2.172	0.545	3001022	FM0104	EU0004	270.4	275
	PPJX09	2.080	2B1	0.081	77.746	19.509	2.130	0.535	302122	FM0104	EU0004	19.8	24.8
	PPJX09	3.150	2B1	0.115	77.465	19.691	2.184	0.545	302142	FM0104	EU0004	269.8	275.2
	PPJX09	1.810	2B1	0.079	77.913	19.341	2.136	0.531	302162	FM0104	EU0004	575.3	580.3
	PPJX09	2.030	2B1	0.087	77.789	19.454	2.138	0.532	3046057	FM0103	EU0004	19.7	24.7
	PPJX09	3.050	2B1	0.101	77.519	19.677	2.161	0.543	3046113	FM0103	EU0004	270.3	274.8
	PPJX09	1.690	2B1	0.105	77.995	19.263	2.112	0.525	3046183	FM0103	EU0004	574.6	580.1
	PPJX06	1.730	1E1	0.108	78.040	19.196	2.134	0.523	1601022	FM0105	EU0013	270.2	275.2
	PPJX11	2.278	1A1	0.115	77.770	19.440	2.143	0.531	1901022	FM0105	EU0013	270.3	275.1
PPJD0M	3.890	2F1	0.128	77.266	19.984	2.075	0.547	390122	FM0107	EU0013	270	275	
PPJX13	3.450	000	0.139	77.183	20.056	2.072	0.550	530622	FM0106	EU0013	20.8	25.8	
PPJX13	5.260	000	0.167	76.764	20.420	2.082	0.566	530643	FM0106	EU0013	273.1	278.7	
PPJX13	3.220	000	0.140	77.387	19.868	2.062	0.544	530662	FM0106	EU0013	575.7	580.8	
PPJX13	3.480	000	0.118	77.308	19.987	2.036	0.552	538622	FM0107	EU0013	20.3	25.5	
PPJX13	5.160	000	0.139	76.803	20.477	2.004	0.577	538643	FM0107	EU0013	270.8	275.6	
PPJX13	3.100	000	0.129	77.325	19.860	2.140	0.547	538662	FM0107	EU0013	575.6	580.7	
PPJX12	3.390	1D1	0.129	77.480	20.075	1.761	0.555	674762	FM0110	EU0013	19.8	24.8	
PPJX12	4.860	1D1	0.143	77.152	20.299	1.839	0.568	674792	FM0110	EU0013	139.9	144.6	
PPJX12	5.150	1D1	0.143	77.030	20.457	1.796	0.574	6747B2	FM0110	EU0013	269.9	274.9	
PPJX12	4.630	1D1	0.153	77.168	20.272	1.839	0.568	6747E3	FM0110	EU0013	419.8	424.8	
PPJX12	3.070	1D1	0.128	77.627	19.893	1.803	0.550	674762	FM0110	EU0013	575.1	579.5	
PPJX12	5.200	1D1	0.118	77.003	20.503	1.800	0.576	678622	FM0107	EU0013	269.4	274.2	
PPJX09	1.960	2B1	0.075	77.792	19.469	2.135	0.529	307122	FM0110	EU0013	20.2	24.7	
PPJX09	2.900	2B1	0.097	77.557	19.655	2.150	0.541	307142	FM0110	EU0013	270.3	275.3	
PPJX09	1.470	2B1	0.083	78.116	19.180	2.100	0.521	307162	FM0110	EU0013	575.3	580.2	
PPJX09	2.860	2B1	0.101	77.576	19.628	2.155	0.540	3091023	FM0110	EU0013	270.6	275.6	
PPJD04	0.929	4B2	0.072	77.283	19.803	2.276	0.566	1246083	FM0113	EU0012	270.9	275.8	

表3.1-2 (2/2) PIEデータ -Puロット-

Puロット	集合体 製造番号	燃焼率 [a/o]	アドレス	同位体組成比 [a/o]					PIE番号	混合ロット	Uロット	軸方向位置 [mm]	
				PU-238	PU-239	PU-240	PU-241	PU-242				上端	下端
PUB231	PPJX14	1.400	1B1	0.078	78.187	19.080	2.136	0.519	FM0115	EU0012	270.3	274.3	
	PPJX06	1.170	1E1	0.108	78.185	19.066	2.125	0.516	FM0110	EU0013	20.9	25.9	
	PPJX06	1.600	1E1	0.117	78.093	19.142	2.127	0.521	FM0110	EU0013	139.9	145.4	
	PPJX06	1.780	1E1	0.109	78.022	19.209	2.135	0.525	FM0110	EU0013	269.9	274.9	
	PPJX06	1.600	1E1	0.093	78.104	19.149	2.132	0.523	FM0110	EU0013	419.9	424.9	
	PPJX06	1.030	1E1	0.087	78.275	19.011	2.113	0.515	FM0110	EU0013	574.8	579.8	
PUB232	PPJX11	1.479	1A1	0.104	78.036	19.216	2.120	0.524	FM0110	EU0013	21.2	25.9	
	PPJX11	2.318	1A1	0.115	77.800	19.408	2.143	0.535	FM0110	EU0013	270.2	275	
	PPJX11	1.346	1A1	0.101	78.133	19.140	2.105	0.521	FM0110	EU0013	576.3	580.9	
	PPJ00B	3.730	1B1	0.101	77.322	19.951	2.079	0.548	FM0119	EU0012	269.9	274.7	
	PPJ00B	2.560	1B1	0.093	77.646	19.680	2.043	0.539	FM0121	EU0014	20.1	24.9	
	PPJ00B	3.880	1B1	0.093	77.280	19.996	2.085	0.546	FM0121	EU0014	270.9	275.7	
PUB243	PPJ00B	2.230	1B1	0.089	77.825	19.530	2.023	0.534	FM0121	EU0014	575.3	580.2	
	PPJ00B	3.870	1B1	0.086	77.281	19.998	2.080	0.556	FM0119	EU0012	269.4	274.3	
	PPJX14	1.310	1B1	0.080	78.205	19.057	2.141	0.517	FM0120	EU0014	269.5	274.5	
	PPJX11	2.280	1A1	0.112	77.800	19.417	2.138	0.533	FM0120	EU0014	270.3	275	
	PPJXH	0.603	1F1	0.081	77.669	19.627	2.069	0.554	FR0152	EU0015	269.4	273.8	
	PPJX17	1.830	5F3	0.124	76.867	20.229	2.204	0.576	FR0128	EU0002	270.3	275.7	
PUB244	PPJD18	2.720	4D3	0.140	76.660	20.681	1.927	0.592	FR0154	EU0015	19.7	24.4	
	PPJD18	3.980	4D3	0.153	76.381	20.914	1.946	0.607	FR0154	EU0015	270	274.8	
	PPJD18	1.980	4D3	0.119	77.204	20.233	1.869	0.577	FR0154	EU0015	574.9	579.6	
	PPJD18	2.490	4D3	0.135	76.850	20.521	1.905	0.589	FR0154	EU0015	19.6	24.4	
	PPJD18	3.660	4D3	0.124	76.560	20.779	1.934	0.603	FR0154	EU0015	270.8	275.4	
	PPJD18	1.950	4D3	0.107	77.198	20.245	1.872	0.578	FR0154	EU0015	574.7	579.6	
PUB251	PPJD1A	0.298	5A3	0.149	77.368	19.535	2.394	0.556	FR0155	EU0016	292.5	297.3	
	PPJX15	0.531	1C1	0.110	77.224	19.700	2.399	0.567	FR0158	EU0016	300.2	304.9	
	PPJD1J	2.500	5E3	0.125	76.455	20.902	1.904	0.614	FR0164	EU0015	269.6	274.7	
	PPJD1J	2.940	5E3	0.128	76.456	20.903	1.897	0.617	FR0167	EU0017	270	275.1	
	PPJD1J	3.330	5E3	0.117	76.321	21.027	1.910	0.625	FR0164	EU0015	269.7	274.9	
	PPJD2B	2.670	2F2	0.088	76.283	20.678	2.339	0.612	FR0176	EU0018	269.5	275	
PUB252	PPJD1W	0.563	1E1	0.111	77.067	19.949	2.291	0.581	FR0175	EU0017	269.7	274.7	
	PPJD25	2.110	4D1	0.137	76.516	20.768	1.966	0.613	FR0190	EU0018	19.1	24.3	
	PPJD25	2.880	4D1	0.134	76.345	20.912	1.992	0.617	FR0190	EU0018	140.3	145.3	
	PPJD25	3.210	4D1	0.129	76.169	20.996	2.063	0.623	FR0190	EU0018	269.3	274.8	
	PPJD25	2.890	4D1	0.111	76.312	20.891	2.063	0.624	FR0190	EU0018	420.8	425.8	
	PPJD25	1.980	4D1	0.123	76.641	20.658	1.968	0.609	FR0190	EU0018	575.3	580.3	
PUB255	PPJD1X	1.180	1E1	0.116	76.964	20.068	2.271	0.583	FR0180	EU000B	269	274.2	
	PPJD2Y	4.450	3D1	0.134	75.900	21.308	2.010	0.649	FR0201	EU000A	269.9	275.4	
	PPJD2S	5.010	2D1	0.150	76.154	21.182	1.893	0.620	FR0202	EU0012	269.7	275	



表3.1-3 初期同位体組成比推定の対象としたUロット及びPuロット

(1) Uロット

Uロット	PIEデータ 測定点数	集合体名
EU0004	17	PPJX08、PPJX09、PPJX13
EU0012	5	PPJD04、PPJD0B、PPJD2S、PPJX14
EU0013	28	PPJD0M、PPJX06、PPJX09、PPJX11、PPJX12、PPJX13
EU0014	5	PPJD0B、PPJX11、PPJX14
EU0015	9	PPJD18、PPJD1J、PPJW1H
EU0018	6	PPJD25、PPJD2B

(2) Puロット

Puロット	PIEデータ 測定点数	集合体名
PU8230	20	PPJX06、PPJX08、PPJX09、PPJX11、PPJX12、PPJX13
PU8231	27	PPJD04、PPJD0M、PPJX06、PPJX09、 PPJX11、PPJX12、PPJX13、PPJX14
PU8232	7	PPJD0B、PPJX11、PPJX14
PU8244	6	PPJD18
PU8251	5	PPJD1A、PPJD1J、PPJX15
PU8253	6	PPJD1X、PPJD25

表3.1-4 (1/2) PIEデータから推定したU及びPuの初期同位体組成比

## (1) Uの初期同位体組成比

Uロット	核種	同位体組成比 [a/o]		PIE/製造
		製造データ	PIEデータから推定	
EU0004 データ数：17	U-234	—*	0.126	—
	U-235	23.095	23.077	0.999
	U-236	—*	0.212	—
	U-238	76.905	76.585	0.996
EU0012 データ数：5	U-234	—	0.130	—
	U-235	23.226	23.316	1.004
	U-236	—	0.199	—
	U-238	76.774	76.355	0.995
EU0013 データ数：28	U-234	—	0.130	—
	U-235	23.256	23.207	0.998
	U-236	—	0.217	—
	U-238	76.744	76.446	0.996
EU0014 データ数：5	U-234	—	0.130	—
	U-235	23.276	23.239	0.998
	U-236	—	0.214	—
	U-238	76.724	76.417	0.996
EU0015 データ数：9	U-234	—	0.132	—
	U-235	23.256	23.246	1.000
	U-236	—	0.206	—
	U-238	76.744	76.417	0.996
EU0018 データ数：6	U-234	—	0.134	—
	U-235	23.327	22.970	0.985
	U-236	—	0.286	—
	U-238	76.673	76.610	0.999

※ U-234とU-236については、製造データに初期値が記載されていない。

表3.1-4 (2/2) PIEデータから推定したU及びPuの初期同位体組成比

## (2) Puの初期同位体組成比

Puロット	核種	同位体組成比 [a/o]		PIE/製造
		製造データ	PIEデータから推定	
PU8230 データ数：20	Pu-238	0.081*	(0.079)*	(0.979)
	Pu-239	78.373	78.546	1.002
	Pu-240	18.651	18.639	0.999
	Pu-241	2.377*	(2.233)*	(0.939)
	Pu-242	0.518	0.503	0.971
PU8231 データ数：27	Pu-238	0.091	(0.075)	(0.818)
	Pu-239	78.386	78.407	1.000
	Pu-240	18.643	18.775	1.007
	Pu-241	2.372	(2.236)	(0.943)
	Pu-242	0.508	0.508	1.000
PU8232 データ数：7	Pu-238	0.091	(0.088)	(0.966)
	Pu-239	78.578	78.607	1.000
	Pu-240	18.584	18.680	1.005
	Pu-241	2.237	(2.121)	(0.948)
	Pu-242	0.509	0.504	0.991
PU8244 データ数：6	Pu-238	0.071	(0.093)	(1.304)
	Pu-239	77.328	77.868	1.007
	Pu-240	19.513	19.680	1.009
	Pu-241	2.541	(1.809)	(0.712)
	Pu-242	0.548	0.551	1.005
PU8251 データ数：5	Pu-238	0.101	(0.132)	(1.302)
	Pu-239	76.862	77.428	1.007
	Pu-240	19.796	19.429	0.981
	Pu-241	2.654	(2.459)	(0.927)
	Pu-242	0.588	0.552	0.940
PU8253 データ数：6	Pu-238	0.101	(0.118)	(1.162)
	Pu-239	76.832	77.372	1.007
	Pu-240	19.826	19.717	0.995
	Pu-241	2.654	(2.226)	(0.839)
	Pu-242	0.588	0.567	0.964

※ Pu-238とPu-241については、燃焼履歴を考慮する必要があり、直線でフィッティングして初期組成を推定することができない。

表3.2-1 原子数密度変化率の誤差評価結果 (PPJX13-530643)

	U-234	U-235	U-236	U-238	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
初期組成の誤差 (相対値) $\sigma_{NB}/N^B$	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%
燃焼後組成の誤差 (相対値) $\sigma_{NA}/N^A$	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
原子数密度変化率 $u$	-3.8%	-16.2%	316.3%	-2.5%	42.7%	-5.6%	3.7%	-17.3%	7.8%
原子数密度変化率の誤差 (相対値) $\sigma_u/u$	12.5%	2.6%	0.7%	19.4%	2.5%	13.0%	21.1%	3.6%	10.5%

## 第4章 解析結果と検討

本章では、前章で述べた方法にしたがって、PIE解析が可能な全てのPIEデータ測定点に対して解析を実施した結果を示し、結果に対する検討を行う。

### 4.1 フィッティングによる評価結果

表4.1-1に全PIEデータ点における原子数密度変化率の実験値を、表4.1-2に同じく計算値を示す。また、表4.1-3に全PIEデータ点における燃焼度あたりの原子数密度変化率のC/E値を示す。なお、上記の表には参考情報として、対象PIEサンプルを構成する混合ロット、Uロット及びPuロット名、集合体装荷位置を示す炉心アドレス、燃焼度等の情報を併せて示した。

前章までに述べたとおり、これらの各データ点での評価は、初期組成誤差に起因する誤差を含むので、Pu-238、Pu-241以外の核種については、直線フィッティングを行い直線の傾きから燃焼度あたりの原子数密度を評価する。

図4.1-1~4にUの原子数密度変化率測定値のフィッティング例（炉中心領域）を示す。これらの図から分かるとおり、U-235、U-236、U-238については、良い直線性を示し、実験値のばらつきが小さいことが分かる。なお、このフィッティングの結果からU-234はばらつきが大きいことが分かるが、表3.1-4に示したとおり、U-234の初期組成は非常に小さく、燃焼により更に減少するので、測定誤差が大きくなるのは当然と考えられる。一方、U-236も初期組成は小さいが、装荷量の多いU-235から燃焼により生成する量を測定することになるので、測定精度が確保できているものと考えられる。

続いて、図4.2-1~3にPuの原子数密度変化率測定値のフィッティング例（炉中心領域）を示す。これらの図から分かるとおり、Pu-239は良い直線性を示していることが分かる。一方、Pu-240、Pu-242については、ばらつきが大きく直線性はあまり良くない。Pu-242については、主として燃焼によりPu-241から生成することで増加する傾向にあるが、Pu-241の初期組成は約2%と小さいため、十分な測定精度が得られていない可能性が高い。一方、Pu-240については、初期組成の大きいPu-239からの生成が主であるため、ある程度の測定精度が確保できていると期待されるが、この結果から何らかの原因により測定値のばらつきが大きくなったものと考えられる。

以上のように、U-235、U-236、U-238、Pu-239については、フィッティングの結果から、測定値の直線性は良く十分な測定精度が得られていることが確認できた。

## 4.2 C/E 値の評価結果

表 4.2-1~4 に、各炉心領域における C/E 値の評価結果のまとめを示した。なお、ここに示した結果は、JENDL-3.2 に基づく解析値の結果である。また、表には、計算誤差、測定誤差として、それぞれ、フィッティングで得られた直線の傾きに対する誤差を示した。C/E 誤差として示した値は計算誤差と測定誤差の自乗和の平方根である。なお、Pu-238 と Pu-241 については、フィッティングを行っていないので、各データ点における C/E 値の領域平均値を示した。C/E 誤差としては、C/E 値のばらつきから求めた標準偏差を示した。また、Pu-238 と Pu-241 については、初期組成誤差に起因する誤差が含まれているので、別途考慮する必要がある。この誤差は燃焼度に依存するが、前章の評価（最大燃焼度）ではそれぞれ、2.5%、3.6%である（表 3.3-1 参照）。

これらの表から分かるとおり、フィッティングで良い直線性を示した主要核種 U-235、U-236、U-238、Pu-239 については、それぞれ、解析値とも比較的良い一致を示している。ただし、U-235、U-238 は測定誤差に比べると、それぞれ、過大評価傾向、過小評価傾向があると見ることができる。また、核データ点ごとに評価した Pu-241 についても、C/E 値のばらつきから評価された誤差は 2~12%であり、初期組成誤差に起因する誤差が約 4%とすれば、誤差の範囲内でほぼ一致していると見ることができる。

他の核種については、実験値のフィッティング誤差が大きいため、計算値との一致度について詳しく議論してもあまり意味がないが、測定誤差が大きいため誤差の範囲でほぼ一致していると見ることができる。なお、Pu-238 に関しては、C/E 値のばらつきが非常に大きく、C/E 値の平均値、C/E 誤差ともほとんど意味のない値となってしまっている。この原因としては、測定誤差、計算誤差の両方が影響していると考えられる。

以上の結果から、フィッティングで評価された誤差を最終的な測定誤差とすることはできないものの、主要な核種では数~10%の測定誤差であり、計算値のずれも同程度である。これらの結果から、PIE データを燃焼による原子数密度変化を計算する燃焼解析手法の検証に十分使える精度があると考えられる。

### 4.3 ライブラリ効果

ライブラリ効果を見るため、**表 4.3-1**、**表 4.3-2** にそれぞれ、JENDL-3.2、JENDL-3.3 による C/E 値評価結果をまとめて示した。なお、これらの表では誤差として、測定値のフィッティングから評価したばらつきに基づく実験誤差を示した。また、**表 4.4** には、ライブラリ効果として JENDL-3.3 による計算値と JENDL-3.2 による計算値の比を示した。

ここでは、実験誤差が比較的小さく計算値と測定値の一致度が良い核種 (U-235、U-236、U-238、Pu-239、Pu-241) に注目して議論する。なお、これらの表から分かるとおり、ライブラリ効果の炉心内の位置依存性は小さく、特に注目している核種については 1~2%と小さい。

これらの表から U-235、U-238、Pu-239 についてはライブラリ効果は約 1%と小さいことが確認できる。一方で、U-236、Pu-241 については、どちらも約 5%のライブラリ効果を持っており、JENDL-3.3 を使うことで、原子数密度変化率は大きく評価されることになる。

U-236 原子数密度変化率に対して大きな感度を持つのは U-235 の捕獲断面積であり、Pu-241 原子数密度変化率に対して大きな感度を持つのは Pu-240 捕獲断面積である。このため、**図 4.3-1** と **図 4.3-2** にそれぞれ、U-235 捕獲断面積、Pu-240 捕獲断面積のライブラリ間の比較を示した。これらの図から、両断面積とも 100eV~10keV の領域で比較的大きな改訂が行われていることが分かる。

U-236 については、今回の解析結果からは、JENDL-3.2 の方が実験値との一致が良いように見えるが、今回の解析は拡散計算ベースであり計算誤差が大きいと考えられることや中性子の規格化の誤差なども無視できないと考えられることなどから、最確評価値とはなっておらず、今回の結果だけから、U-235 捕獲断面積について、JENDL-3.2 と JENDL-3.3 のどちらが正しいかを判定することはできないと考える。また、Pu-241 についても、JENDL-3.3 の方が実験値との一致が良いように見えるが、U-236 と同様に今回の結果だけから Pu-241 捕獲断面積について判定をすることはできないと考える。

一方、測定誤差の観点からは、U-236 の測定誤差はフィッティングによる評価から 3%~9%、Pu-241 は初期組成誤差に起因する誤差が約 4%と評価されており、ライブラリの差による 5%の差の検証に使える可能性が十分にあることが確認できた。

今後、解析モデルの詳細化によって解析精度の向上とより詳細な測定誤差の評価を行うことで、照射後試験データを核データの検証に反映することができると考えられる。ただし、「常陽」MK-I の照射後試験データは約 20 年前に測定されたものであり、現時点で当時の測定誤差を再評価するのは難しい点も多い。このため、今後は、今回の検討で確立することができた評価方法を、最近の照射後試験データに適用するのが良いと考える。

表4.1-1 (1/2) 原子数密度変化率の実験値（全PIEデータ測定点、U同位体の初期組成にPIEデータからの推定値を使用）

集合体	PIE番号	炉心 アドレス	ロット		PIEサンプル位置 [cm]		燃焼度 [a/o]	原子数密度変化率 [%]										
			混合	U	Pu	下端		上端	U-234	U-235	U-236	U-238	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	
PPJD04	1246083	4B2	FM0113	EU0012	PU8231	270.9	275.8	0.929	-1.055	-3.074	59.864	-0.597	-22.489	-2.779	4.745	-5.947	9.878	
	480123	1B1	FM0119	EU0012	PU8232	269.9	274.7	3.730	-2.295	-11.528	243.592	-1.955	4.587	-6.672	1.823	-12.494	2.076	
	484642	1B1	FM0121	EU0014	PU8232	20.1	24.9	2.560	-1.889	-8.351	170.782	-1.391	-2.108	-4.605	2.233	-12.468	2.174	
	4846A3	1B1	FM0121	EU0014	PU8232	270.9	275.7	3.880	-2.874	-11.749	223.019	-2.072	-3.819	-6.918	1.839	-12.421	1.565	
PPJD0B	4846F2	1B1	FM0121	EU0014	PU8232	575.3	580.2	2.230	-2.003	-7.287	146.199	-1.206	-5.613	-4.083	1.774	-13.046	1.547	
	489123	1B1	FM0119	EU0012	PU8232	269.4	274.3	3.870	-2.076	-12.207	255.059	-1.972	-11.289	-6.819	1.951	-12.535	3.514	
	390122	2F1	FM0107	EU0013	PU8231	270.0	275.0	3.890	-2.546	-11.860	219.289	-2.276	33.825	-5.927	2.300	-16.989	2.776	
	684122	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	19.7	24.4	2.720	-4.283	-9.176	203.792	-1.616	91.635	-4.026	2.606	-26.991	4.575	
PPJD18	684143	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	270.0	274.8	3.980	-4.306	-12.460	255.357	-2.143	103.955	-6.550	1.403	-27.933	4.700	
	684162	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	574.9	579.6	1.980	-2.074	-6.187	127.905	-1.075	61.572	-3.614	0.103	-29.393	1.571	
	684622	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	19.6	24.4	2.490	-2.302	-8.277	180.404	-1.363	83.560	-4.160	1.419	-28.092	3.661	
	684643	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	270.8	275.4	3.660	-3.145	-11.365	228.862	-2.035	65.853	-5.850	1.269	-28.009	4.648	
PPJD1A	684662	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	574.7	579.6	1.950	-1.144	-6.449	129.150	-1.051	46.045	-3.267	0.533	-29.005	2.210	
	0286021	5A3	FR0155	EU0016	PU8251	292.5	297.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	720122	5E3	FR0164	EU0015	PU8251	269.6	274.7	2.500	-4.398	-8.148	193.445	-1.266	18.004	-4.818	1.037	-31.680	-0.054	
	724623	5E3	FR0167	EU0017	PU8251	270.0	275.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
PPJD1J	729122	5E3	FR0164	EU0015	PU8251	269.7	274.9	3.330	-3.488	-10.343	215.853	-1.703	9.420	-5.947	0.611	-32.155	0.788	
	2246063	1E1	FR0175	EU0017	PU8252	269.7	274.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	344663	1E1	FR0180	EU000B	PU8253	269.0	274.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	604664	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	19.1	24.3	2.110	-3.869	-6.280	84.393	-1.674	32.930	-2.277	2.787	-27.655	2.324	
PPJD25	604682	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	140.3	145.3	2.880	-5.382	-8.159	105.727	-2.333	29.201	-2.746	3.238	-26.894	2.795	
	6046A3	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	269.3	274.8	3.210	-5.489	-9.075	120.334	-2.255	22.894	-4.349	2.176	-24.637	2.286	
	6046C2	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	420.8	425.8	2.890	-4.639	-8.097	105.819	-2.131	5.829	-3.657	2.213	-24.957	2.916	
	6046E2	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	575.3	580.3	1.980	-3.580	-5.769	70.311	-1.681	19.963	-1.703	2.678	-27.279	2.120	
PPJD2B	2646106	2F2	FR0176	EU0018	PU8252	269.5	275.0	2.670	-4.640	-6.982	83.609	-2.001	-34.915	-3.347	1.348	-14.947	1.317	
	759122	2D1	FR0202	EU0012	PU8255	269.7	275.0	5.010	-2.696	-14.747	308.617	-2.320	51.148	-10.549	2.064	-29.124	5.599	
	760122	3D1	FR0201	EU000A	PU8255	269.9	275.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	474623	1F1	FR0152	EU0015	PU8243	269.4	273.8	0.603	-1.175	-2.318	25.227	-0.997	14.403	1.199	1.544	-2.846	0.088	
PPJW1H	1601022	1E1	FM0105	EU0013	PU8230	270.2	275.2	1.730	-0.579	-5.104	92.546	-1.047	29.616	-2.995	0.267	-13.095	-1.664	
	1646046	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	20.9	25.9	1.170	-1.844	-4.511	64.653	-1.617	21.178	2.081	4.669	-8.841	3.912	
	1646064	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	139.9	145.4	1.600	-1.611	-4.789	81.342	-0.981	25.114	-2.664	0.319	-12.901	0.199	
	1646083	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	269.9	274.9	1.780	-0.703	-5.166	92.551	-0.995	16.353	-3.440	-0.047	-13.172	0.100	
PPJX06	1646104	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	419.9	424.9	1.600	-0.637	-4.511	81.016	-0.879	-1.394	-3.324	-0.343	-13.306	-0.266	
	1646122	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	574.8	579.8	1.030	0.179	-3.146	56.493	-0.757	-6.166	-1.536	0.548	-12.668	-0.20	
	0801023	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	300.2	304.9	0.806	0.625	-2.573	46.591	-0.596	13.618	-1.227	0.197	-8.763	-2.463	
	0835063	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	150.2	154.9	0.775	-1.085	-2.561	40.867	-0.653	6.769	-0.737	0.514	-8.603	-2.083	
PPJX08	0835084	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	300.2	304.9	0.853	0.098	-2.687	46.464	-0.631	16.290	-1.236	0.178	-8.989	-2.074	
	0835103	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	450.2	454.9	0.730	-1.725	-2.434	37.513	-0.591	12.208	-0.790	0.349	-8.654	-2.152	
	088023	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	305.2	312.5	0.885	-1.680	-2.925	48.495	-0.621	6.195	-1.209	0.251	-8.812	-2.120	



表4.1-1 (2/2) 原子数密度変化率の実験値 (全PIEデータ測定点、U同位体の初期組成にPIEデータからの推定値を使用)

集合体	PIE番号	炉心 アドレス	ロット		PIEサンプル位置 [cm]		燃焼度 [a/o]	原子数密度変化率 [%]											
			混合	U	Pu	下端		上端	U-234	U-235	U-236	U-238	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242		
																		U	Pu
PPJX09	3001022	2B1	FM0104	EU0004	PU8230	270.4	275.0	3.190	-2.162	-9.643	190.008	-1.947	10.828	-4.879	1.842	-12.611	1.298		
	302122	2B1	FM0104	EU0004	PU8230	19.8	24.8	2.080	-0.646	-6.650	144.371	-1.371	-2.197	-3.073	2.205	-12.991	0.836		
	302142	2B1	FM0104	EU0004	PU8230	269.8	275.2	3.150	-1.685	-9.480	186.176	-1.868	36.678	-5.065	1.408	-12.298	0.976		
	302162	2B1	FM0104	EU0004	PU8230	575.3	580.3	1.810	-1.191	-6.056	118.617	-1.277	-3.915	-2.038	2.187	-11.975	1.105		
	3046057	2B1	FM0103	EU0004	PU8230	19.7	24.7	2.030	-0.467	-6.680	139.314	-1.517	5.393	-2.129	2.855	-11.851	1.324		
	3046113	2B1	FM0103	EU0004	PU8230	270.3	274.8	3.050	-1.823	-9.347	181.119	-1.872	20.582	-4.511	1.855	-12.779	1.197		
	3046183	2B1	FM0103	EU0004	PU8230	574.6	580.1	1.690	-1.221	-5.356	108.169	-0.993	25.786	-2.943	0.732	-13.866	-1.121		
	307122	2B1	FM0110	EU0013	PU8231	20.2	24.7	1.960	-0.329	-6.328	132.781	-1.148	-20.063	-3.392	1.658	-12.880	1.347		
	307142	2B1	FM0110	EU0013	PU8231	270.3	275.3	2.900	-1.823	-8.858	168.921	-1.730	3.022	-4.544	1.713	-13.043	2.644		
	307162	2B1	FM0110	EU0013	PU8231	575.3	580.2	1.470	-0.255	-4.822	84.594	-0.985	-10.346	-1.929	1.243	-13.367	0.867		
PPJX11	3091023	2B1	FM0110	EU0013	PU8231	270.6	275.6	2.860	-2.531	-8.923	165.073	-1.554	6.612	-4.811	1.266	-13.131	2.236		
	1901022	1A1	FM0105	EU0013	PU8230	270.3	275.1	2.278	-1.984	-7.043	123.101	-1.490	38.762	-3.071	1.818	-12.462	0.127		
	1946046	1A1	FM0110	EU0013	PU8231	21.2	25.9	1.479	-0.420	-4.673	90.446	-1.065	11.924	-1.996	1.471	-12.516	1.541		
	1946083	1A1	FM0110	EU0013	PU8231	270.2	275.0	2.318	-2.403	-7.097	123.656	-1.337	22.339	-3.776	0.925	-12.931	1.944		
	1946123	1A1	FM0110	EU0013	PU8231	576.3	580.9	1.346	-1.852	-4.428	78.737	-1.102	9.631	-1.115	1.851	-12.464	1.643		
	1991023	1A1	FM0120	EU0014	PU8232	270.3	275.0	2.280	-1.350	-6.977	127.875	-1.381	19.239	-3.659	1.668	-12.883	1.817		
	670622	1D1	FM0105	EU0013	PU8230	270.0	274.6	4.950	-2.759	-14.787	281.435	-2.778	78.338	-8.140	2.224	-27.852	2.913		
	674762	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	19.8	24.8	3.390	-2.966	-10.698	219.692	-1.930	35.141	-5.623	2.815	-29.530	4.176		
	674792	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	139.9	144.6	4.860	-2.018	-13.931	260.451	-2.873	46.442	-7.868	1.919	-27.837	4.580		
	6747B2	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	269.9	274.9	5.150	-2.363	-15.095	287.746	-2.783	45.292	-8.994	1.619	-30.299	4.576		
PPJX12	6747E3	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	419.8	424.8	4.630	-2.591	-13.568	260.223	-2.499	56.590	-8.277	1.312	-28.164	4.113		
	6747G2	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	575.1	579.5	3.070	-1.167	-9.642	193.062	-1.772	34.830	-5.074	2.280	-27.566	3.622		
	678622	1D1	FM0107	EU0013	PU8231	269.4	274.2	5.200	-2.898	-15.322	295.985	-2.742	19.669	-9.281	1.561	-30.344	4.664		
	530622	000	FM0106	EU0013	PU8231	20.8	25.8	3.450	-2.906	-11.095	226.365	-1.943	46.301	-5.741	2.987	-16.871	3.600		
	530643	000	FM0106	EU0013	PU8231	273.1	278.7	5.260	-2.924	-15.657	279.843	-3.000	71.443	-8.299	2.566	-18.274	4.303		
	530662	000	FM0106	EU0013	PU8231	575.7	580.8	3.220	-1.244	-10.010	200.175	-1.873	46.726	-5.351	2.169	-17.150	2.640		
	534656	000	FM0103	EU0004	PU8230	17.6	23.5	3.390	-1.946	-11.178	233.724	-2.019	47.834	-5.021	3.505	-17.822	3.017		
	534682	000	FM0103	EU0004	PU8230	140.3	146.1	4.650	-2.373	-14.343	276.776	-2.897	10.389	-6.305	3.694	-18.111	3.211		
	5346B4	000	FM0103	EU0004	PU8230	272.6	278.0	5.220	-3.189	-15.877	303.513	-3.259	62.178	-7.132	3.877	-17.383	3.969		
	5346E3	000	FM0103	EU0004	PU8230	420.7	425.6	4.700	-3.000	-14.398	275.168	-2.903	53.514	-6.509	3.357	-17.977	2.788		
PPJX13	5346G2	000	FM0103	EU0004	PU8230	575.3	580.5	3.120	-1.549	-10.256	207.573	-2.209	50.013	-3.375	4.489	-16.858	3.336		
	538622	000	FM0107	EU0013	PU8231	20.3	25.5	3.480	-2.642	-11.191	225.912	-2.242	24.623	-4.586	3.721	-17.449	5.080		
	538643	000	FM0107	EU0013	PU8231	270.8	275.6	5.160	-3.278	-15.371	293.015	-2.925	41.963	-8.395	2.693	-21.482	6.182		
	538662	000	FM0107	EU0013	PU8231	575.6	580.7	3.100	-3.127	-9.907	200.948	-1.746	35.229	-5.311	2.254	-13.893	3.333		
	1306022	1B1	FM0115	EU0012	PU8231	270.3	274.3	1.400	-0.477	-4.315	88.208	-0.823	-16.344	-2.427	0.117	-12.409	-0.217		
	1386023	1B1	FM0120	EU0014	PU8232	269.5	274.5	1.310	-1.183	-4.013	70.323	-0.822	-13.827	-2.227	0.740	-11.923	-0.177		
	0584053	1C1	FR0158	EU0016	PU8251	300.2	304.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	360622	5F3	FR0128	EU0002	PU8243	270.3	275.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

表4.1-2 (1/2) 原子数密度変化率の計算値 (全PIEデータ測定点、U同位体の初期組成にPIEデータからの推定値を使用)

集合体	PIE番号	炉心アドレス	ロット		PIEサンプル位置 [cm]		燃焼度 [a/o]	原子数密度変化率 [%]										
			混合	U	Pu	下端		上端	U-234	U-235	U-236	U-238	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	
																		FR0113
PPJD04	1246083	4B2	FR0113	EU0012	PU8231	270.9	275.8	0.928	-0.553	-3.030	69.604	-0.434	7.195	-1.624	0.739	-10.035	1.861	
	480123	1B1	FR0119	EU0012	PU8232	269.9	274.7	3.822	-2.852	-11.879	257.177	-1.791	40.195	-6.770	1.722	-10.656	6.375	
	484642	1B1	FR0121	EU0014	PU8232	20.1	24.9	2.462	-1.857	-8.355	183.472	-1.208	31.963	-4.048	2.870	-9.750	5.555	
	4846A3	1B1	FR0121	EU0014	PU8232	270.9	275.7	3.823	-2.878	-11.913	237.340	-1.796	40.245	-6.747	1.734	-10.658	6.378	
PPJD08	4846F2	1B1	FR0121	EU0014	PU8232	575.3	580.2	2.194	-1.578	-7.375	160.824	-1.088	27.178	-3.693	2.302	-10.732	4.743	
	489123	1B1	FR0119	EU0012	PU8232	269.4	274.3	3.822	-2.852	-11.879	257.177	-1.791	40.195	-6.770	1.722	-10.656	6.375	
	390122	2F1	FR0107	EU0013	PU8231	270.0	275.0	3.601	-2.590	-11.324	226.388	-1.705	36.174	-6.326	1.904	-15.810	6.481	
	684122	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	19.7	24.4	2.398	-1.555	-8.351	199.477	-1.208	43.715	-3.827	2.991	-25.027	5.835	
PPJD18	684143	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	270.0	274.8	3.642	-2.470	-11.701	254.123	-1.765	55.257	-6.209	1.994	-25.764	6.740	
	684162	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	574.9	579.6	1.913	-1.098	-6.546	152.149	-0.929	30.830	-3.177	1.852	-26.609	4.225	
	684622	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	19.6	24.4	2.398	-1.555	-8.351	199.477	-1.208	43.715	-3.827	2.991	-25.027	5.835	
	684643	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	270.8	275.4	3.642	-2.470	-11.701	254.123	-1.765	55.257	-6.209	1.994	-25.764	6.740	
PPJD1A	684662	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	574.7	579.6	1.913	-1.098	-6.546	152.149	-0.929	30.830	-3.177	1.852	-26.609	4.225	
	02866021	5A3	FR0155	EU0016	PU8251	292.5	297.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	720122	5E3	FR0164	EU0015	PU8251	269.6	274.7	2.922	-1.555	-9.897	228.165	-1.455	29.011	-4.758	2.648	-28.401	6.145	
	724623	5E3	FR0167	EU0017	PU8251	270.0	275.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
PPJD1W	729122	5E3	FR0164	EU0015	PU8251	269.7	274.9	2.922	-1.555	-9.897	228.165	-1.455	29.011	-4.758	2.648	-28.401	6.145	
	2246063	1E1	FR0175	EU0017	PU8252	269.7	274.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	344663	1E1	FR0180	EU0008	PU8253	269.0	274.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	604664	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	19.1	24.3	2.104	-1.248	-7.672	132.822	-1.090	24.777	-3.216	3.103	-24.744	5.377	
PPJD25	604682	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	140.3	145.3	2.815	-1.693	-9.642	156.942	-1.412	29.176	-4.532	2.567	-25.183	5.943	
	6046A3	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	269.3	274.8	3.198	-2.050	-10.835	173.809	-1.596	32.851	-5.190	2.680	-24.932	6.509	
	6046C2	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	420.8	425.8	2.959	-1.872	-10.057	162.039	-1.474	30.178	-4.751	2.539	-25.183	6.132	
	6046E2	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	575.3	580.3	1.932	-0.980	-6.998	121.467	-0.998	21.938	-2.924	2.736	-25.245	4.811	
PPJD2B	2646106	2F2	FR0176	EU0018	PU8252	269.5	275.0	2.597	-1.713	-8.290	123.857	-1.227	12.371	-4.492	0.936	-13.618	4.274	
	759122	2D1	FR0202	EU0012	PU8255	269.7	275.0	4.605	-2.881	-14.382	314.804	-2.184	40.765	-8.062	2.109	-28.677	7.523	
	760122	3D1	FR0201	EU000A	PU8255	269.9	275.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	474623	1F1	FR0152	EU0015	PU8243	269.4	273.8	0.576	-0.364	-1.846	38.706	-0.262	7.026	-0.998	0.225	-3.642	0.878	
PPJX06	1601022	1E1	FR0105	EU0013	PU8230	270.2	275.2	1.735	-1.198	-5.464	109.041	-0.803	16.412	-3.078	0.809	-11.729	2.964	
	1646046	1E1	FR0110	EU0013	PU8231	20.9	25.9	1.105	-0.734	-3.744	82.334	-0.538	10.507	-1.841	1.275	-11.211	2.577	
	1646064	1E1	FR0110	EU0013	PU8231	139.9	145.4	1.531	-0.917	-4.872	97.655	-0.707	12.156	-2.691	0.830	-11.742	2.760	
	1646083	1E1	FR0110	EU0013	PU8231	269.9	274.9	1.743	-1.101	-5.487	109.051	-0.799	13.745	-3.116	0.830	-11.719	3.052	
PPJX08	1646104	1E1	FR0110	EU0013	PU8231	419.9	424.9	1.595	-1.009	-5.026	100.600	-0.738	12.523	-2.833	0.771	-11.788	2.814	
	1646122	1E1	FR0110	EU0013	PU8231	574.8	579.8	0.988	-0.550	-3.333	72.519	-0.477	8.797	-1.629	1.038	-11.580	2.22	
	0801023	2E2	FR0104	EU0004	PU8230	300.2	304.9	0.840	-0.480	-2.707	55.493	-0.387	6.778	-1.511	0.452	-8.138	1.495	
	0835063	2E2	FR0104	EU0004	PU8230	150.2	154.9	0.769	-0.384	-2.489	51.380	-0.356	6.219	-1.367	0.452	-8.162	1.398	
PPJX08	0835084	2E2	FR0104	EU0004	PU8230	300.2	304.9	0.840	-0.480	-2.707	55.493	-0.387	6.778	-1.511	0.452	-8.138	1.495	
	0835103	2E2	FR0104	EU0004	PU8230	450.2	454.9	0.709	-0.384	-2.290	47.324	-0.325	5.590	-1.223	0.422	-8.209	1.280	
	088023	2E2	FR0104	EU0004	PU8230	305.2	312.5	0.840	-0.480	-2.707	55.493	-0.387	6.778	-1.511	0.452	-8.138	1.495	

表4.1-2 (2/2) 原子数密度変化率の計算値 (全PIEデータ測定点、U同位体の初期組成にPIEデータからの推定値を使用)

集合体	PIE番号	炉心 アドレス	ロット			PIEサンプリング位置 [cm]		燃焼度 [a/o]	原子数密度変化率 [%]											
			混合	U	Pu	下端	上端		U-234	U-235	U-236	U-238	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242			
																		U	U	U
PPJX09	3001022	2B1	FM0104	EU0004	PU8230	270.4	275.0	3.008	-2.207	-9.526	193.915	-1.425	32.215	-5.252	1.626	-11.763	5.280			
	302122	2B1	FM0104	EU0004	PU8230	19.8	24.8	1.954	-1.536	-6.767	151.099	-0.960	25.646	-3.165	2.499	-10.921	4.613			
	302142	2B1	FM0104	EU0004	PU8230	269.8	275.2	3.008	-2.207	-9.526	193.915	-1.425	32.215	-5.252	1.626	-11.763	5.280			
	302162	2B1	FM0104	EU0004	PU8230	575.3	580.3	1.605	-1.152	-5.414	118.817	-0.774	18.938	-2.734	1.626	-12.208	3.452			
	3046057	2B1	FM0103	EU0004	PU8230	19.7	24.7	1.959	-1.521	-6.753	151.172	-0.966	25.637	-3.191	2.493	-10.904	4.611			
	3046113	2B1	FM0103	EU0004	PU8230	270.3	274.8	3.011	-2.186	-9.536	193.973	-1.426	32.185	-5.248	1.633	-11.757	5.279			
	3046183	2B1	FM0103	EU0004	PU8230	574.6	580.1	1.614	-1.141	-5.412	118.862	-0.767	18.952	-2.695	1.603	-12.218	3.445			
	307122	2B1	FM0110	EU0013	PU8231	20.2	24.7	1.967	-1.488	-6.718	148.419	-0.968	21.808	-3.187	2.490	-10.888	4.723			
	307142	2B1	FM0110	EU0013	PU8231	270.3	275.3	3.010	-2.202	-9.538	190.458	-1.414	27.306	-5.312	1.631	-11.742	5.435			
	307162	2B1	FM0110	EU0013	PU8231	575.3	580.2	1.613	-1.101	-5.436	116.685	-0.769	16.005	-2.691	1.601	-12.203	3.537			
PPJX11	3091023	2B1	FM0110	EU0013	PU8231	270.6	275.6	3.010	-2.202	-9.538	190.458	-1.414	27.306	-5.312	1.631	-11.742	5.435			
	1901022	1A1	FM0105	EU0013	PU8230	270.3	275.1	2.280	-1.567	-7.165	141.918	-1.066	22.670	-4.009	1.049	-12.218	3.852			
	1946046	1A1	FM0110	EU0013	PU8231	21.2	25.9	1.451	-1.009	-4.923	107.977	-0.707	14.722	-2.408	1.690	-11.557	3.375			
	1946083	1A1	FM0110	EU0013	PU8231	270.2	275.0	2.285	-1.560	-7.179	141.930	-1.061	19.120	-4.037	1.067	-12.180	3.968			
	1946123	1A1	FM0110	EU0013	PU8231	576.3	580.9	1.310	-0.826	-4.410	95.856	-0.630	12.645	-2.195	1.393	-11.995	2.944			
	1991023	1A1	FM0120	EU0014	PU8232	270.3	275.0	2.282	-1.578	-7.169	144.154	-1.053	19.077	-4.060	1.079	-12.221	3.964			
	670622	1D1	FM0105	EU0013	PU8230	270.0	274.6	5.075	-3.502	-15.722	307.562	-2.425	61.613	-8.876	2.128	-25.669	8.507			
	674762	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	19.8	24.8	3.265	-2.110	-11.026	238.822	-1.614	41.051	-5.382	3.706	-24.567	7.591			
	674792	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	139.9	144.6	4.472	-2.844	-14.000	278.026	-2.137	46.854	-7.790	2.194	-25.790	7.936			
	6747B2	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	269.9	274.9	5.069	-3.394	-15.692	307.634	-2.414	52.474	-8.924	2.105	-25.629	8.691			
PPJX12	6747E3	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	419.8	424.8	4.686	-3.028	-14.564	286.532	-2.229	48.259	-8.215	2.046	-25.882	8.152			
	6747G2	1D1	FM0110	EU0013	PU8231	575.1	579.5	2.976	-1.743	-10.000	214.667	-1.460	35.675	-4.957	3.083	-25.444	6.653			
	678622	1D1	FM0107	EU0013	PU8231	269.4	274.2	5.084	-3.423	-15.719	307.642	-2.418	52.483	-8.955	2.112	-25.625	8.743			
	530622	000	FM0106	EU0013	PU8231	20.8	25.8	3.358	-2.564	-11.316	244.070	-1.657	43.420	-5.622	3.737	-17.266	7.781			
	530643	000	FM0106	EU0013	PU8231	273.1	278.7	5.281	-3.938	-16.231	316.213	-2.516	55.488	-9.346	2.060	-18.502	8.959			
	530662	000	FM0106	EU0013	PU8231	575.7	580.8	3.084	-2.198	-10.343	221.056	-1.504	38.326	-5.130	3.178	-18.159	6.871			
	534656	000	FM0103	EU0004	PU8230	17.6	23.5	3.351	-2.567	-11.340	248.716	-1.656	50.724	-5.532	3.740	-17.312	7.590			
	534682	000	FM0103	EU0004	PU8230	140.3	146.1	4.617	-3.327	-14.433	290.179	-2.209	57.960	-8.085	2.167	-18.718	7.908			
	5346B4	000	FM0103	EU0004	PU8230	272.6	278.0	5.232	-3.897	-16.186	321.317	-2.500	64.783	-9.220	2.078	-18.534	8.650			
	5346E3	000	FM0103	EU0004	PU8230	420.7	425.6	4.830	-3.517	-15.000	299.051	-2.301	59.883	-8.511	2.018	-18.811	8.014			
PPJX14	5346G2	000	FM0103	EU0004	PU8230	575.3	580.5	3.077	-2.281	-10.309	225.279	-1.503	44.866	-5.106	3.176	-18.188	6.742			
	538622	000	FM0107	EU0013	PU8231	20.3	25.5	3.360	-2.498	-11.324	244.255	-1.659	43.470	-5.615	3.749	-17.269	7.758			
	538643	000	FM0107	EU0013	PU8231	270.8	275.6	5.256	-3.978	-16.184	315.448	-2.496	55.365	-9.311	2.083	-18.495	8.959			
	538662	000	FM0107	EU0013	PU8231	575.6	580.7	3.082	-2.220	-10.341	221.220	-1.504	38.320	-5.188	3.184	-18.171	6.882			
	1306022	1B1	FM0115	EU0012	PU8231	270.3	274.3	1.355	-0.833	-4.272	94.111	-0.621	10.068	-2.434	0.629	-10.285	2.387			
	1386023	1B1	FM0120	EU0014	PU8232	269.5	274.5	1.363	-0.836	-4.281	86.915	-0.635	10.092	-2.422	0.660	-10.316	2.389			
	0584053	1C1	FR0158	EU0016	PU8251	300.2	304.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	360622	5F3	FR0128	EU0002	PU8243	270.3	275.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

表4.1-3 (1/2) 原子数密度変化率のC/E値 (全PIEデータ測定点、U同位体の初期組成にPIEデータからの推定値を使用)

集合体	PIE番号	炉心 アドレス	ロット		PIEサンプル位置 [cm]		燃焼度 [a/o]		原子数密度変化率のC/E値											燃焼度の C/E値
			混合	U	Pu	下端	上端	計算値	実験値	U-234	U-235	U-236	U-238	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242		
PPJD04	1246083	4B2	FM0113	EU0012	PU8231	270.9	275.8	0.928	0.929	0.524	0.986	1.163	0.727	-0.320	0.584	0.156	1.687	0.188	0.999	
	480123	1B1	FM0119	EU0012	PU8232	269.9	274.7	3.822	3.730	1.243	1.030	1.056	0.916	8.763	1.015	0.945	0.853	3.071	1.025	
	484642	1B1	FM0121	EU0014	PU8232	20.1	24.9	2.462	2.560	0.983	1.000	1.074	0.868	-15.163	0.879	1.285	0.782	2.555	0.962	
PPJD0B	4846A3	1B1	FM0121	EU0014	PU8232	270.9	275.7	3.823	3.880	1.001	1.014	1.064	0.867	-10.538	0.975	0.943	0.858	4.075	0.985	
	4846F2	1B1	FM0121	EU0014	PU8232	575.3	580.2	2.194	2.230	0.788	1.012	1.100	0.886	-4.842	0.904	1.298	0.823	3.066	0.984	
	489123	1B1	FM0119	EU0012	PU8232	269.4	274.3	3.822	3.870	1.374	0.973	1.008	0.908	-3.561	0.993	0.883	0.850	1.814	0.988	
PPJDM	390122	2F1	FM0107	EU0013	PU8231	270.0	275.0	3.601	3.890	1.017	0.955	1.032	0.749	1.069	1.067	0.828	0.931	2.335	0.926	
	684122	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	19.7	24.4	2.398	2.720	0.363	0.910	0.979	0.748	0.477	0.951	1.148	0.927	1.275	0.882	
	684143	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	270.0	274.8	3.642	3.980	0.574	0.939	0.995	0.824	0.532	0.948	1.421	0.922	1.434	0.915	
PPJD18	684162	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	574.9	579.6	1.913	1.980	0.529	1.058	1.190	0.864	0.501	0.879	17.981	0.905	2.689	0.966	
	684622	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	19.6	24.4	2.398	2.490	0.675	1.009	1.106	0.866	0.523	0.920	2.108	0.891	1.594	0.963	
	684643	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	270.8	275.4	3.642	3.660	0.785	1.030	1.110	0.867	0.839	1.061	1.571	0.920	1.450	0.995	
PPJD1A	684662	4D3	FR0154	EU0015	PU8244	574.7	579.6	1.913	1.950	0.960	1.015	1.178	0.884	0.670	0.972	3.475	0.917	1.912	0.981	
	0286021	5A3	FR0155	EU0016	PU8251	292.5	297.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	720122	5E3	FR0164	EU0015	PU8251	269.6	274.7	2.922	2.500	0.354	1.215	1.179	1.149	1.611	0.988	2.554	0.896	-113.796	1.169	
PPJD1J	724623	5E3	FR0167	EU0017	PU8251	270.0	275.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	729122	5E3	FR0164	EU0015	PU8251	269.7	274.9	2.922	3.330	0.446	0.957	1.057	0.854	3.080	0.800	4.334	0.883	7.798	0.877	
	2246063	1E1	FR0175	EU0017	PU8252	269.7	274.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
PPJD1W	344663	1E1	FR0180	EU0008	PU8253	269.0	274.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	604664	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	19.1	24.3	2.104	2.110	0.323	1.222	1.574	0.651	0.752	1.412	1.113	0.895	2.314	0.997	
	604682	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	140.3	145.3	2.815	2.880	0.315	1.182	1.484	0.605	0.999	1.650	0.793	0.936	2.126	0.977	
PPJD25	6046A3	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	269.3	274.8	3.198	3.210	0.373	1.194	1.444	0.708	1.435	1.193	1.232	1.012	2.847	0.996	
	6046C2	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	420.8	425.8	2.959	2.890	0.404	1.242	1.531	0.692	5.177	1.299	1.147	1.009	2.103	1.024	
	6046E2	4D1	FR0190	EU0018	PU8253	575.3	580.3	1.932	1.980	0.274	1.213	1.728	0.594	1.099	1.717	1.022	0.925	2.269	0.976	
PPJD2B	2646106	2F2	FR0176	EU0018	PU8252	269.5	275.0	2.597	2.670	0.369	1.187	1.481	0.613	-0.354	1.342	0.694	0.911	3.245	0.973	
	759122	2D1	FR0202	EU0012	PU8255	269.7	275.0	4.605	5.010	1.069	0.975	1.020	0.941	0.797	0.764	1.022	0.985	1.344	0.919	
	760122	3D1	FR0201	EU000A	PU8255	269.9	275.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
PPJWH	474623	1F1	FR0152	EU0015	PU8243	269.4	273.8	0.576	0.603	0.310	0.796	1.534	0.263	0.488	-0.832	0.146	1.280	9.977	0.955	
	1601022	1E1	FM0105	EU0013	PU8230	270.2	275.2	1.735	1.730	2.069	1.071	1.178	0.767	0.554	1.028	3.030	0.896	-1.781	1.003	
	1646046	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	20.9	25.9	1.105	1.170	0.398	0.830	1.273	0.333	0.486	-0.885	0.273	1.268	0.659	0.944	
PPJX06	1646064	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	139.9	145.4	1.531	1.600	0.569	1.017	1.201	0.721	0.484	1.010	2.602	0.910	13.869	0.957	
	1646083	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	269.9	274.9	1.743	1.780	1.566	1.062	1.178	0.803	0.841	0.906	-17.660	0.890	30.520	0.979	
	1646104	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	419.9	424.9	1.595	1.600	1.584	1.114	1.242	0.840	-8.984	0.882	-2.248	0.886	-10.579	0.997	
PPJX08	1646122	1E1	FM0110	EU0013	PU8231	574.8	579.8	0.988	1.030	-3.073	1.059	1.284	0.630	-1.427	1.061	1.894	0.914	-11.39	0.959	
	0801023	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	300.2	304.9	0.840	0.806	-0.768	1.052	1.191	0.649	1.231	2.294	0.929	-0.607	1.042		
	0835063	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	150.2	154.9	0.769	0.775	0.354	0.976	1.257	0.545	0.919	1.855	0.879	0.949	-0.671	0.992	
PPJX08	0835084	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	300.2	304.9	0.840	0.853	-4.898	1.007	1.194	0.613	0.416	1.222	2.539	0.905	-0.721	0.985	
	0835103	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	450.2	454.9	0.709	0.730	0.223	0.941	1.262	0.550	0.458	1.548	1.209	0.949	-0.595	0.971	
	088023	2E2	FM0104	EU0004	PU8230	305.2	312.5	0.840	0.885	0.286	0.925	1.144	0.623	1.094	1.250	1.801	0.924	-0.705	0.949	

表4.1-3 (2/2) 原子数密度変化率のC/E値 (全PIEデータ測定点、U同位体の初期組成にPIEデータからの推定値を使用)

集合体	PIE番号	炉心アドレス	炉心		ロット		PIEサンブル位置 [cm]		燃焼度 [g/o]		原子数密度変化率のC/E値													燃焼度のC/E値		
			アドレス	混合	U	Pu	下端	上端	計算値	実験値	U-234	U-235	U-236	U-238	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242							
PPJX09	3001022	2B1	FM0104	FM0104	EU0004	EU0004	270.4	275.0	3.008	3.190	1.021	0.988	1.021	0.988	1.021	0.988	1.021	0.988	1.021	0.988	1.076	0.883	0.933	4.068	0.943	
	302122	2B1	FM0104	FM0104	EU0004	EU0004	19.8	24.8	1.954	2.080	2.378	1.018	1.047	1.018	1.047	1.018	1.047	1.018	1.047	1.030	1.133	0.841	5.518	0.939		
	302142	2B1	FM0104	FM0104	EU0004	EU0004	289.8	275.2	3.008	3.150	1.310	1.005	1.042	1.005	1.042	1.005	1.042	1.005	1.042	1.037	1.155	0.956	5.410	0.955		
	302162	2B1	FM0104	FM0104	EU0004	EU0004	575.3	580.3	1.605	1.810	0.967	0.894	1.002	0.894	1.002	0.894	1.002	0.894	1.002	1.342	0.743	1.019	3.124	0.887		
	3046057	2B1	FM0103	FM0103	EU0004	EU0004	19.7	24.7	1.959	2.030	3.257	1.011	1.085	1.011	1.085	1.011	1.085	1.011	1.085	1.054	1.163	0.873	3.483	0.965		
	3046113	2B1	FM0103	FM0103	EU0004	EU0004	270.3	274.8	3.011	3.050	1.199	1.020	1.071	1.020	1.071	1.020	1.071	1.020	1.071	1.163	0.880	0.920	4.410	0.987		
	3046183	2B1	FM0103	FM0103	EU0004	EU0004	574.6	580.1	1.614	1.690	0.934	1.010	1.099	1.010	1.099	1.010	1.099	1.010	1.099	0.916	2.190	0.881	-3.073	0.955		
PPJX11	307122	2B1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	20.2	24.7	1.967	1.960	4.462	1.062	1.118	1.062	1.118	1.062	1.118	1.062	1.118	1.104	1.288	0.894	2.431	1.052		
	307142	2B1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	270.3	275.3	3.010	2.900	1.208	1.077	1.127	1.077	1.127	1.077	1.127	1.077	1.127	1.169	0.952	0.900	2.056	1.038		
	307162	2B1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	575.3	580.2	1.613	1.470	4.318	1.127	1.379	1.127	1.379	1.127	1.379	1.127	1.379	1.395	1.288	0.913	4.080	1.097		
	3091023	2B1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	270.6	275.6	3.010	2.860	0.870	1.069	1.154	1.069	1.154	1.069	1.154	1.069	1.154	1.104	1.288	0.894	2.431	1.052		
	1901022	1A1	FM0105	FM0105	EU0013	EU0013	270.3	275.1	2.280	2.278	2.402	1.017	1.153	1.017	1.153	1.017	1.153	1.017	1.153	1.305	0.577	0.980	30.331	1.001		
	1946046	1A1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	21.2	25.9	1.451	1.479	2.402	1.053	1.192	1.053	1.192	1.053	1.192	1.053	1.192	1.206	0.923	0.923	2.190	0.981		
	1946083	1A1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	270.2	275.0	2.285	2.318	0.649	1.012	1.148	1.012	1.148	1.012	1.148	1.012	1.148	1.069	1.154	0.942	2.041	0.986		
PPJX12	1946123	1A1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	576.3	580.9	1.310	1.346	0.446	0.996	1.217	0.996	1.217	0.996	1.217	0.996	1.217	1.969	0.753	0.962	1.792	0.973		
	1991023	1A1	FM0120	FM0120	EU0014	EU0014	270.3	275.0	2.282	2.280	1.169	1.028	1.127	1.028	1.127	1.028	1.127	1.028	1.127	1.090	0.957	0.922	2.920	1.025		
	670622	1D1	FM0105	FM0105	EU0013	EU0013	270.0	274.6	5.075	4.950	1.269	1.063	1.093	1.063	1.093	1.063	1.093	1.063	1.168	0.957	1.317	1.818	0.963			
	674762	1D1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	19.8	24.8	3.265	3.390	0.711	1.031	1.087	1.031	1.087	1.031	1.087	1.031	1.087	1.009	0.990	0.926	1.733	0.920		
	674792	1D1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	139.9	144.6	4.472	4.860	1.409	1.005	1.067	1.005	1.067	1.005	1.067	1.005	1.067	1.143	0.926	1.837	1.837	0.969		
	6747B2	1D1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	289.9	274.9	5.069	5.150	1.424	1.040	1.069	1.040	1.069	1.040	1.069	1.040	1.069	1.159	0.992	1.300	0.846	1.899	0.984	
	6747E3	1D1	FM0110	FM0110	EU0013	EU0013	419.8	424.8	4.686	4.630	1.169	1.073	1.101	1.073	1.101	1.073	1.101	1.073	1.101	0.993	1.559	0.919	1.982	1.012		
PPJX13	6747G2	1D1	FM0107	FM0107	EU0013	EU0013	575.1	579.5	2.976	3.070	1.494	1.037	1.112	1.037	1.112	1.037	1.112	1.037	1.112	0.977	1.352	0.923	1.837	1.004		
	678622	1D1	FM0107	FM0107	EU0013	EU0013	269.4	274.2	5.084	5.200	1.181	1.026	1.039	1.026	1.039	1.026	1.039	1.026	1.039	0.965	1.465	0.959	2.603	0.958		
	530622	000	FM0106	FM0106	EU0013	EU0013	20.8	25.8	3.358	3.450	0.882	1.020	1.078	1.020	1.078	1.020	1.078	1.020	1.078	1.126	0.803	1.012	2.082	1.004		
	530643	000	FM0106	FM0106	EU0013	EU0013	273.1	278.7	5.281	5.260	1.347	1.037	1.130	1.037	1.130	1.037	1.130	1.037	1.130	0.820	0.959	1.059	2.603	0.958		
	530662	000	FM0106	FM0106	EU0013	EU0013	575.7	580.8	3.084	3.220	1.767	1.033	1.104	1.033	1.104	1.033	1.104	1.033	1.104	0.820	0.959	1.059	2.603	0.958		
	534656	000	FM0103	FM0103	EU0004	EU0004	17.6	23.5	3.351	3.390	1.319	1.014	1.064	1.014	1.064	1.014	1.064	1.014	1.064	1.102	1.067	0.971	2.516	0.988		
	534682	000	FM0103	FM0103	EU0004	EU0004	140.3	146.1	4.617	4.650	1.402	1.006	1.048	1.006	1.048	1.006	1.048	1.006	1.048	1.282	0.587	1.034	2.463	0.993		
PPJX14	5346B4	000	FM0103	FM0103	EU0004	EU0004	272.6	278.0	5.232	5.220	1.222	1.019	1.059	1.019	1.059	1.019	1.059	1.019	1.059	1.042	1.293	1.066	2.179	1.002		
	5346E3	000	FM0103	FM0103	EU0004	EU0004	420.7	425.6	4.830	4.700	1.172	1.042	1.087	1.042	1.087	1.042	1.087	1.042	1.087	1.308	0.601	1.046	2.874	1.028		
	5346G2	000	FM0103	FM0103	EU0004	EU0004	575.3	580.5	3.077	3.120	1.473	1.005	1.085	1.005	1.085	1.005	1.085	1.005	1.085	1.513	0.708	1.079	2.021	0.986		
	538622	000	FM0107	FM0107	EU0013	EU0013	20.3	25.5	3.360	3.480	0.945	1.012	1.081	1.012	1.081	1.012	1.081	1.012	1.081	1.224	1.008	0.990	1.533	0.966		
	538643	000	FM0107	FM0107	EU0013	EU0013	270.8	275.6	5.256	5.160	1.214	1.053	1.077	1.053	1.077	1.053	1.077	1.053	1.077	1.109	0.773	0.861	1.449	1.019		
	538662	000	FM0107	FM0107	EU0013	EU0013	575.6	580.7	3.100	3.100	0.710	1.044	1.101	1.044	1.101	1.044	1.101	1.044	1.101	1.088	0.977	1.413	1.308	2.065	0.994	
	1306022	1B1	FM0115	FM0115	EU0012	EU0012	270.3	274.3	1.355	1.400	1.746	0.990	1.067	0.990	1.067	0.990	1.067	0.990	1.067	1.003	5.376	0.829	-11.000	0.968		
PPJX15	1386023	1B1	FM0120	FM0120	EU0014	EU0014	269.5	274.5	1.363	1.310	0.707	1.067	1.236	1.067	1.236	1.067	1.236	1.067	1.236	1.088	0.892	0.865	-13.497	1.040		
	0584053	1C1	FR0158	FR0158	EU0016	EU0016	300.2	304.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	360622	5F3	FR0128	FR0128	EU0002	EU0002	270.3	275.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

表4.2-1 原子数密度変化率のC/E値 (炉中心 : JENDL-3.2)

核種	計算値(C)			実験値(E)			C/E	計算値 誤差*	実験値 誤差**	C/E値 誤差***
	傾き	切片	R <sup>2</sup>	傾き	切片	R <sup>2</sup>				
U-234	-0.729	0.098	0.983	-0.527	-0.243	0.761	1.383	3.7%	15.5%	16.0%
U-235	-3.053	-0.175	1.000	-2.949	-0.207	0.997	1.035	0.2%	1.4%	1.4%
U-236	59.249	10.243	0.991	57.379	-0.533	0.974	1.033	2.6%	4.5%	5.2%
U-238	-0.482	0.038	1.000	-0.521	-0.127	0.985	0.925	0.4%	3.4%	3.4%
Pu-238	---	---	---	---	---	---	0.257	---	---	1473.1%
Pu-239	-1.756	-0.039	1.000	-1.692	0.001	0.979	1.037	0.3%	4.1%	4.1%
Pu-240	0.377	0.191	0.988	0.450	-0.058	0.651	0.838	3.0%	20.3%	20.5%
Pu-241	---	---	---	---	---	---	0.894	---	---	6.0%
Pu-242	1.679	0.077	0.999	1.309	-2.273	0.815	1.283	0.9%	13.2%	13.2%

表4.2-2 原子数密度変化率のC/E値 (径中央 : JENDL-3.2)

核種	計算値(C)			実験値(E)			C/E	計算値 誤差*	実験値 誤差**	C/E値 誤差***
	傾き	切片	R <sup>2</sup>	傾き	切片	R <sup>2</sup>				
U-234	-0.750	0.125	0.992	-0.942	0.594	0.705	0.797	3.1%	21.5%	21.8%
U-235	-3.169	-0.031	1.000	-3.037	-0.124	0.999	1.044	0.7%	1.2%	1.4%
U-236	66.339	-2.201	0.988	61.902	-6.606	0.989	1.072	3.6%	3.4%	5.0%
U-238	-0.483	0.023	0.999	-0.523	-0.182	0.986	0.925	0.9%	4.0%	4.1%
Pu-238	---	---	---	---	---	---	2.098	---	---	117.3%
Pu-239	-1.711	-0.088	0.999	-1.624	0.150	0.991	1.054	1.1%	3.1%	3.3%
Pu-240	0.543	-0.004	0.999	0.532	-0.170	0.789	1.020	0.9%	17.2%	17.3%
Pu-241	---	---	---	---	---	---	0.921	---	---	1.8%
Pu-242	1.824	-0.067	0.997	1.956	-3.940	0.876	0.932	1.7%	12.5%	12.6%

表4.2-3 原子数密度変化率のC/E値 (軸上端 : JENDL-3.2)

核種	計算値(C)			実験値(E)			C/E	計算値 誤差*	実験値 誤差**	C/E値 誤差***
	傾き	切片	R <sup>2</sup>	傾き	切片	R <sup>2</sup>				
U-234	-0.719	0.143	0.971	-0.506	-0.371	0.418	1.421	4.8%	32.7%	33.1%
U-235	-3.088	-0.446	0.995	-2.966	-0.381	0.993	1.041	2.0%	2.3%	3.0%
U-236	60.173	21.687	0.972	59.147	3.605	0.979	1.017	4.7%	4.0%	6.2%
U-238	-0.480	-0.002	0.999	-0.532	-0.154	0.960	0.902	0.8%	5.7%	5.7%
Pu-238	---	---	---	---	---	---	-0.871	---	---	336.5%
Pu-239	-1.760	0.132	0.998	-1.688	0.210	0.919	1.043	1.3%	8.2%	8.3%
Pu-240	0.415	0.920	0.382	0.539	0.115	0.402	0.771	35.3%	33.8%	48.9%
Pu-241	---	---	---	---	---	---	0.962	---	---	11.5%
Pu-242	1.694	0.777	0.930	1.201	-1.321	0.652	1.410	7.6%	20.3%	21.6%

表4.2-4 原子数密度変化率のC/E値 (軸下端 : JENDL-3.2)

核種	計算値(C)			実験値(E)			C/E	計算値 誤差*	実験値 誤差**	C/E値 誤差***
	傾き	切片	R <sup>2</sup>	傾き	切片	R <sup>2</sup>				
U-234	-0.718	0.058	0.951	-0.462	-0.741	0.186	1.552	6.1%	55.9%	56.2%
U-235	-3.108	-0.623	0.989	-2.985	-0.485	0.984	1.041	2.8%	3.4%	4.4%
U-236	62.655	23.313	0.936	59.810	8.635	0.898	1.048	7.0%	9.0%	11.4%
U-238	-0.482	-0.023	0.997	-0.548	-0.195	0.943	0.880	1.6%	6.6%	6.8%
Pu-238	---	---	---	---	---	---	-0.453	---	---	1143.5%
Pu-239	-1.751	0.220	0.994	-1.587	0.254	0.912	1.103	2.1%	8.3%	8.6%
Pu-240	0.486	1.350	0.275	0.607	0.661	0.435	0.800	43.4%	30.5%	53.1%
Pu-241	---	---	---	---	---	---	0.916	---	---	7.3%
Pu-242	1.768	1.090	0.870	1.349	-1.157	0.632	1.310	10.3%	20.4%	22.9%

\*: 計算値のフィッティング誤差

\*\*: 実験値のフィッティング誤差

\*\*\*: 計算値のフィッティング誤差と実験値のフィッティング誤差の自乗和の根  
Pu-238、Pu-241についてはC/E値の標準偏差

表4.3-1 C/E値のまとめ(JENDL-3.2)

	炉中心		径中央		軸上端		軸下端	
	C/E値	実験誤差*	C/E値	実験誤差*	C/E値	実験誤差*	C/E値	実験誤差*
U-234	1.38	16%	0.80	22%	1.42	33%	1.55	56%
U-235	1.04	1%	1.04	1%	1.04	2%	1.04	3%
U-236	1.03	5%	1.07	3%	1.02	4%	1.05	9%
U-238	0.93	3%	0.93	4%	0.90	6%	0.88	7%
Pu-238	0.26	---	2.10	---	-0.87	---	-0.45	---
Pu-239	1.04	4%	1.05	3%	1.04	8%	1.10	8%
Pu-240	0.84	20%	1.02	17%	0.77	34%	0.80	30%
Pu-241	0.89	---	0.92	---	0.96	---	0.92	---
Pu-242	1.28	13%	0.93	13%	1.41	20%	1.31	20%

\*: 実験値のフィッティング誤差

表4.3-2 C/E値のまとめ(JENDL-3.3)

	炉中心		径中央		軸上端		軸下端	
	C/E値	実験誤差*	C/E値	実験誤差*	C/E値	実験誤差*	C/E値	実験誤差*
U-234	1.34	16%	0.74	22%	1.35	33%	1.52	56%
U-235	1.05	1%	1.06	1%	1.05	2%	1.05	3%
U-236	1.09	5%	1.13	3%	1.07	4%	1.10	9%
U-238	0.93	3%	0.93	4%	0.91	6%	0.89	7%
Pu-238	0.28	---	2.32	---	-0.97	---	-0.48	---
Pu-239	1.03	4%	1.04	3%	1.04	8%	1.09	8%
Pu-240	0.91	20%	1.07	17%	0.83	34%	0.86	30%
Pu-241	0.94	---	0.97	---	1.00	---	0.97	---
Pu-242	1.31	13%	0.95	13%	1.44	20%	1.34	20%

\*: 実験値のフィッティング誤差

表4.4 ライブラリ効果(JENDL3.3/JENDL3.2)

	炉中心	径中央	軸上端	軸下端
U-234	0.97	0.93	0.95	0.98
U-235	1.01	1.01	1.01	1.01
U-236	1.05	1.06	1.05	1.05
U-238	1.00	1.00	1.01	1.01
Pu-238	1.10	1.11	1.12	1.07
Pu-239	0.99	0.98	1.00	0.99
Pu-240	1.09	1.05	1.08	1.07
Pu-241	1.05	1.05	1.04	1.06
Pu-242	1.02	1.02	1.02	1.02

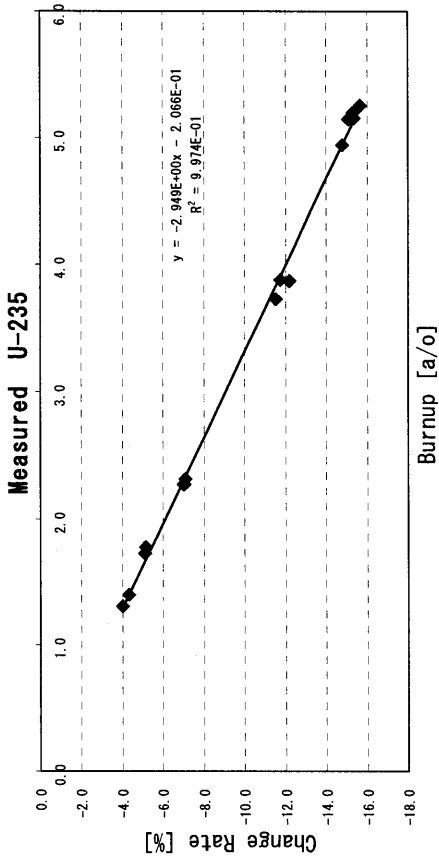


図4.1-1 U-234測定値のフィッティング(炉中心)

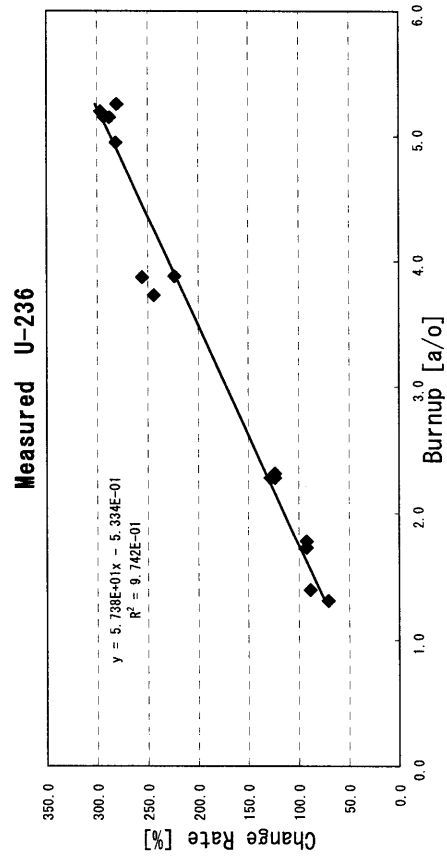


図4.1-2 U-235測定値のフィッティング(炉中心)

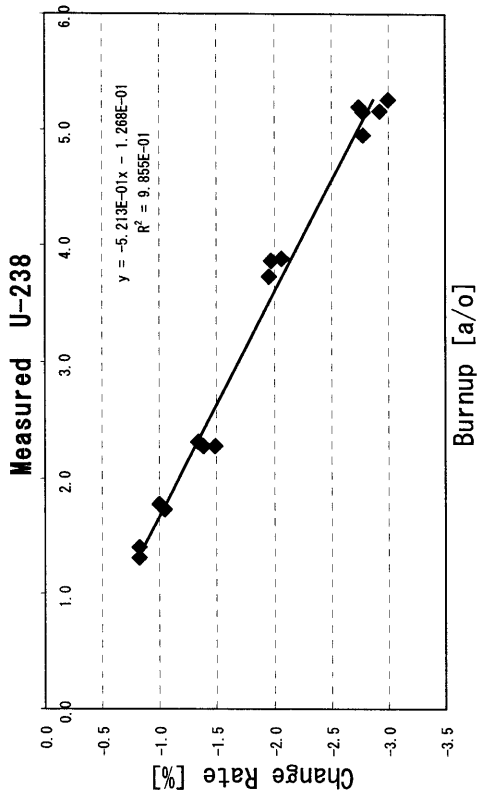


図4.1-3 U-236測定値のフィッティング(炉中心)

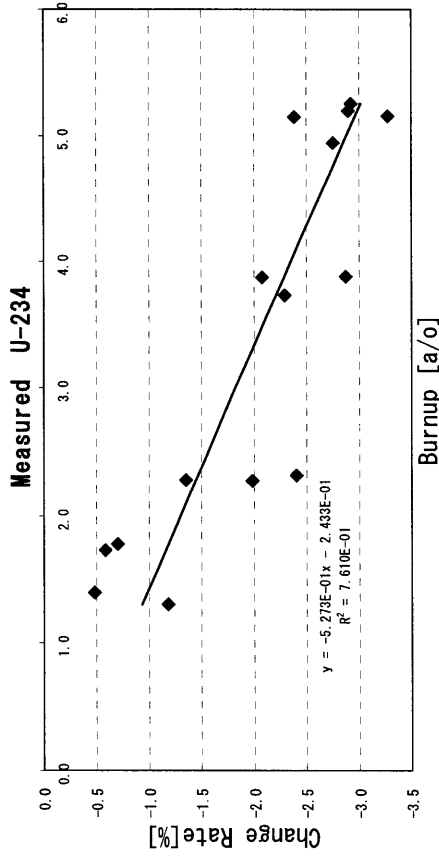


図4.1-4 U-238測定値のフィッティング(炉中心)



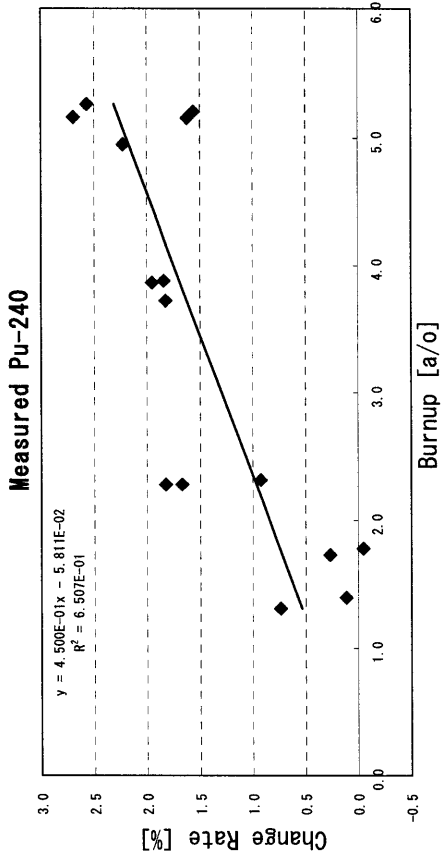


図4.2-2 Pu-240測定値のフィッティング(炉中心)

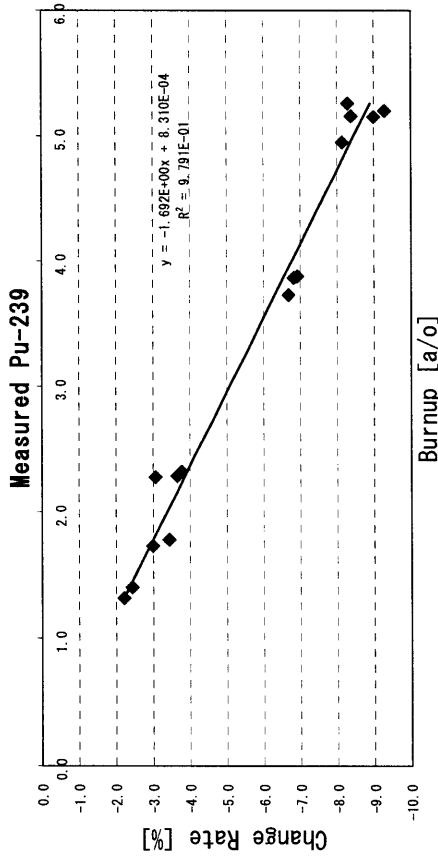


図4.2-1 Pu-239測定値のフィッティング(炉中心)

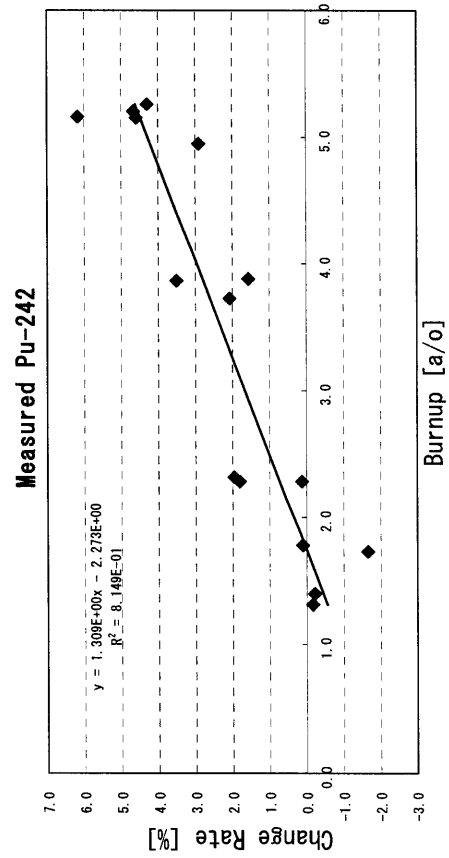


図4.2-3 Pu-242測定値のフィッティング(炉中心)

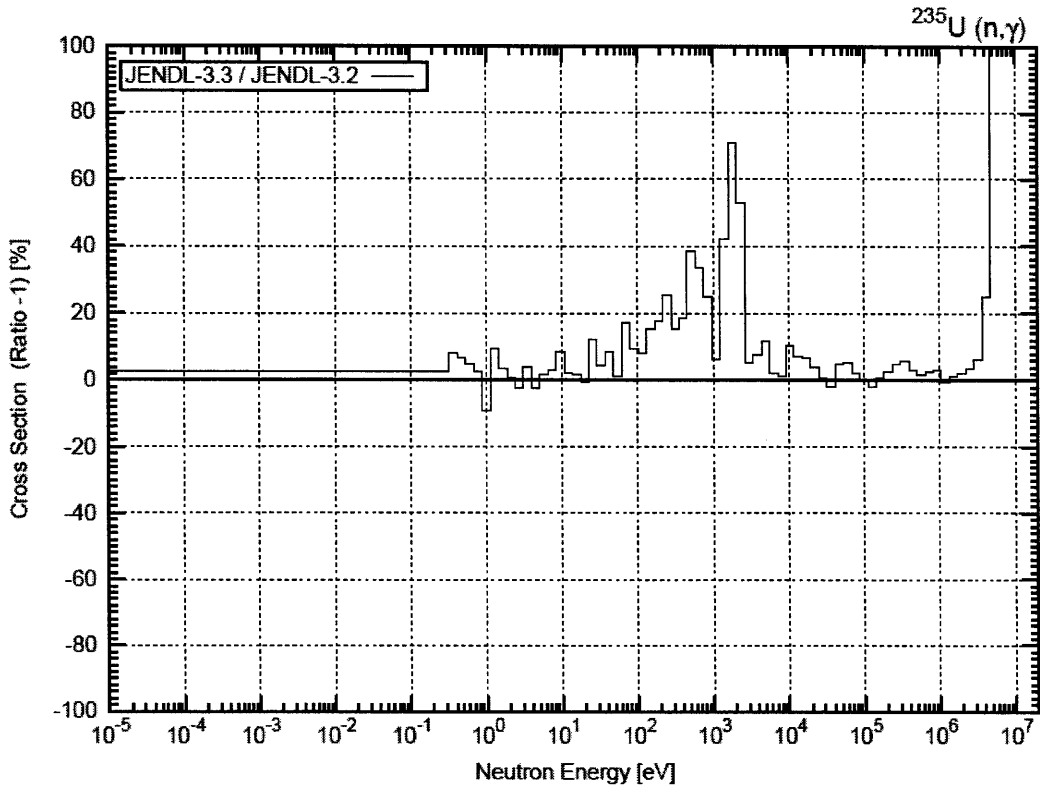


図 4.3-1 U-235 捕獲断面積の比較 (JENDL3.3/JENDL3.2-1)

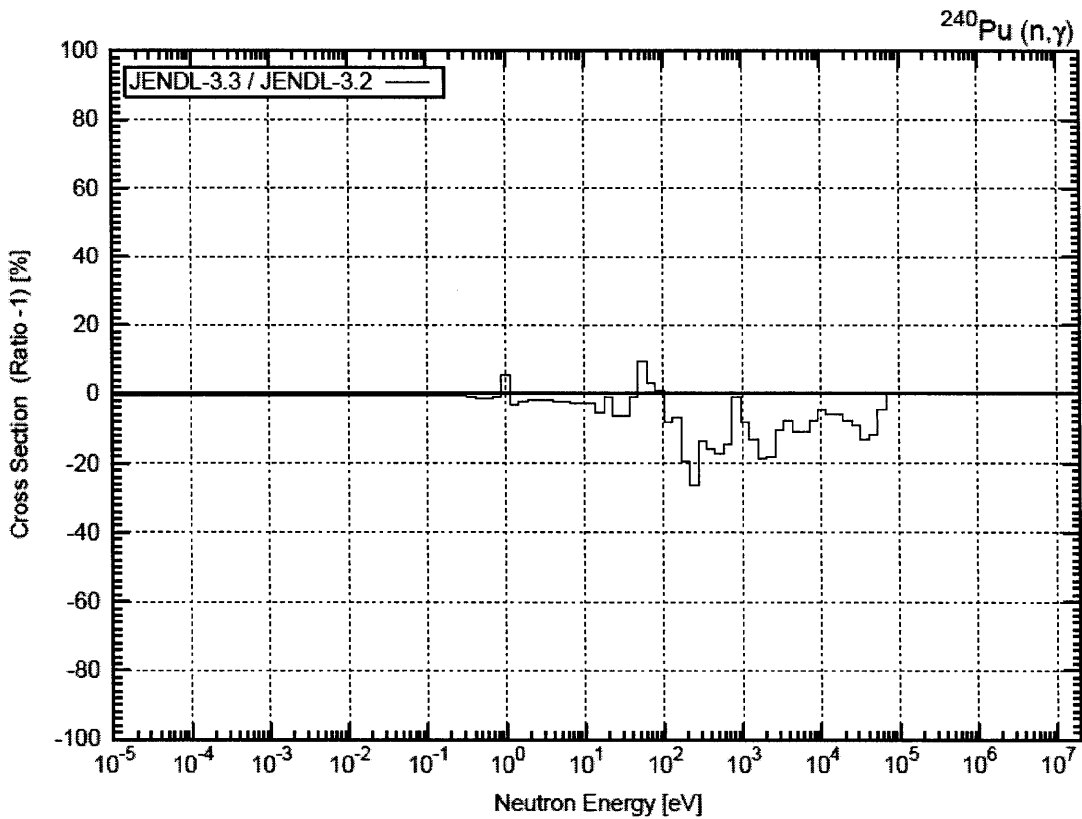


図 4.3-2 Pu-240 捕獲断面積の比較 (JENDL3.3/JENDL3.2-1)

## 第5章 結言

高速実験炉「常陽」MK-I で照射された炉心燃料集合体の照射後試験データの解析を実施した。解析対象としては、照射後試験データから算出される燃焼に伴う原子数密度変化率を採用した。本解析の実施にあたり、照射後試験データで得られている燃焼後の同位体組成比から、初期同位体組成比（燃料製造データ）を推定することで、燃料製造データと照射後試験データは、1%以下の差で良く一致することが確認できた。しかしながら、誤差伝播則に基づく誤差評価結果から、初期組成誤差は大きく拡大されて伝播するため 1%以下の差であっても不十分なことが明らかとなった。このため、照射後試験データを直線フィッティングすることで、原子数密度変化率を評価する方法を採用することとした。この方法では燃料製造データに依存せず照射後試験データのみから算出するため、初期組成誤差に依存しない原子数密度変化率の測定値を得ることができるようになった。

今回の解析では、「常陽」MK-I 炉心で照射された炉心燃料集合体に対して実施された照射後試験のすべてのデータ点（約 80 点）に対して、3次元 Tri-Z 体系 70 群拡散近似の全炉心計算により測定位置での中性子スペクトルを考慮した解析を実施した。核データライブラリとしては、JENDL-3.2 及び JENDL-3.3 を用い、両者の差（ライブラリ効果）も評価した。

解析の結果、主要な核種について C/E 値は良好であり、JENDL-3.2 に基づく C/E 値の評価結果は、以下のようになった。

U-235 : 約 1.04

U-236 : 1.02~1.07

U-238 : 0.88~0.93

Pu-239 : 1.04~1.10

Pu-241 : 0.89~0.96

U-236、Pu-239、Pu-241 については、計算値と測定値は誤差の範囲でほぼ一致することが確認できた。一方、U-235、U-238 については、フィッティングにより評価されたばらつき誤差の範囲を超えて、それぞれ過小評価、過大評価の傾向が見られることが分かった。現時点で「常陽」MK-I の照射後試験の測定誤差を再評価するのは難しく、測定誤差の評価方法に課題が残るが、今回の検討結果から、「常陽」の照射後試験データを燃焼解析手法の検証に活用できる見込みを得ることができた。

一方、JENDL-3.3 を用いることで、U-236、Pu-241 の原子数密度変化率がともに約 5%大きくなるというライブラリ効果があることが分かった。U-236、Pu-241 の原子数密度変化率に対しては、それぞれ、U-235 捕獲断面積、Pu-240 捕獲断面積が大きな感度を持っており、今後、解析精度の向上及び測定誤差の定量化を図ることで、これらの核データの検証にも「常陽」の照射後試験デー

タを用いることができる可能性があることが分かった。

今回の検討により、照射後試験データから燃焼解析手法の検証や核データの検証に利用するための情報を抽出する方法を確立できたと考える。「常陽」では、MK-I 炉心だけでなく、MK-II 炉心で照射された燃料に対しても多くの照射後試験データが取得されており、今回解析対象とした「常陽」MK-I の照射後試験の時に比べて実験分析精度が向上され、また、実験誤差の評価も精密に行われている。このため、今後は本評価方法を用いて、「常陽」MK-II の照射後試験データの解析を重点的に進めていく予定である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、核燃料サイクル開発機構の小山真一氏、逢坂正彦氏には照射後試験の実験の詳細についてご教授いただきました。また、同機構の杉野和輝氏には解析対象データの処理方法等に関する助言を、また、株式会社アイ・エス・エーの青柳成美氏には PIE 測定点での燃焼計算方法等に関する助言をいただきました。最後に、株式会社 NESI の沼田一幸氏には全炉心燃焼計算の実施等でご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1-1 原 昭浩, 他: “常陽 MK-I の燃焼解析(1)”, PNC TN9410 90-036 (1990年3月)
- 2-1 石川 眞, 他: “核設計基本データベースの整備(VIII)－JUPITER 実験解析結果の集大成－”, PNC TN9410 97-099(1997)
- 2-2 杉野 和輝, 他: “核設計基本データベースの整備(VII)－JUPITER 実験解析の高度化－”, PNC TN9410 97-098(1997)
- 2-3 杉野 和輝, 岩井 武彦: “実機高速炉核特性解析手法の高度化－二重非均質性取り扱い手法及び制御棒均質化断面積計算手法の検討－”, PNC TN9410 98-067(1998)
- 2-4 横山 賢治, 沼田 一幸: “核設計基本データベースの整備(XI)－高速実験炉「常陽」MK-I 性能試験・運転データ解析－”, JNC TN9400 2000-036(2000)
- 2-5 S. Ono, et al.: “Technol. Rep. Osaka Univ. 33, 1708, 207(1983)
- 2-6 川島 正俊, 石川 眞, 西山 征夫, 山下 芳興: “高速実験炉「常陽」性能試験解析報告書 炉心核特性の解析(その1)”, PNC TN941 79-236(1979)
- 2-7 千葉 豪, 沼田 一幸: “JENDL-3.2 に基づく高速炉用炉定数 JFS-3-J3.2R の作成”, JNC TN9400 2001-124(2002)
- 2-8 中川正幸, 他: “高速炉核特性解析コードシステム”, JAERI-M 83-006(1983)
- 2-9 R. Sher: “Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides,” NP-1771(1981)
- 2-10 A. G. Croff: “A User’ s Manual for the ORIGEN2 Computer Code”, ORNL/TM-7175 (1980)
- 2-11 大川内 靖, 他: “JNEDL-3.2 に基づく高速炉用 ORIGEN2 断面積ライブラリー作成ツールの開発”, JNC TN9400 99-051(1999)

## 付録 A 原子数密度データの詳細

表 A-1 炉心燃料領域の原子数密度

表 A-2 軸方向ブランケットの原子数密度

表 A-3 径方向ブランケットの原子数密度

表 A-4 制御棒（調整棒、安全棒）領域の原子数密度

表A-1 炉心燃料領域の原子数密度 (単位:  $10^{-24}$  個/cm<sup>3</sup>)

	均質	非均質 <sup>(1)</sup>		
		燃料 (Fuel)	構造材 (SUS)	冷却材 (Na)
0	1.67000E-02	4.28603E-02	—	—
Na	9.34840E-03	—	—	2.22996E-02
Cr	3.30430E-03	—	1.72871E-02	—
Fe	1.20310E-02	—	6.29425E-02	—
Ni	2.11730E-03	—	1.10771E-02	—
Mo	2.38070E-04	—	1.24551E-03	—
U-235	1.59560E-03	4.09508E-03	—	—
U-238	5.27710E-03	1.35436E-02	—	—
Pu-239	1.12430E-03	2.88550E-03	—	—
Pu-240	2.83440E-04	7.27444E-04	—	—
Pu-241	3.78100E-05	9.70388E-05	—	—
Pu-242	8.03950E-06	2.06332E-05	—	—

(1) : 体積比 Fuel/SUS/Na=0.390/0.191/0.419

表A-2 軸ブランク領域の原子数密度 (単位:  $10^{-24}$  個/cm<sup>3</sup>)

	均質	非均質 <sup>(1)</sup>		
		燃料 (Fuel)	構造材 (SUS)	冷却材 (Na)
0	1.65760E-02	4.25420E-02	—	—
Na	9.34840E-03	—	—	2.22996E-02
Cr	3.30430E-03	—	1.72871E-02	—
Fe	1.20310E-02	—	6.29425E-02	—
Ni	2.11730E-03	—	1.10771E-02	—
Mo	2.38040E-04	—	1.24535E-03	—
U-235	1.68180E-05	4.31631E-05	—	—
U-238	8.28630E-03	2.12667E-02	—	—

(1) : 体積比 Fuel/SUS/Na=0.390/0.191/0.419



表A-3 径ブランケット燃料領域の原子数密度 (単位:  $10^{-24}$ 個/cm<sup>3</sup>)

	非均質 <sup>(1)</sup>			
	均質	燃料 (Fuel)	構造材 (SUS)	冷却材 (Na)
	通常時			
0	2. 21940E-02	4. 49241E-02	—	—
Na	7. 54820E-03	—	—	2. 29660E-02
Cr	2. 87440E-03	—	1. 62121E-02	—
Fe	1. 04660E-02	—	5. 90301E-02	—
Ni	1. 84190E-03	—	1. 03886E-02	—
Mo	2. 07100E-04	—	1. 16808E-03	—
U-235	2. 23690E-05	4. 52784E-05	—	—
U-238	1. 10210E-02	2. 23082E-02	—	—

(1) : 体積比 Fuel/SUS/Na=0. 494/0. 177/0. 329

表A-4 制御棒 (調整棒、安全棒) の原子数密度 (単位:  $10^{-24}$ 個/cm<sup>3</sup>)

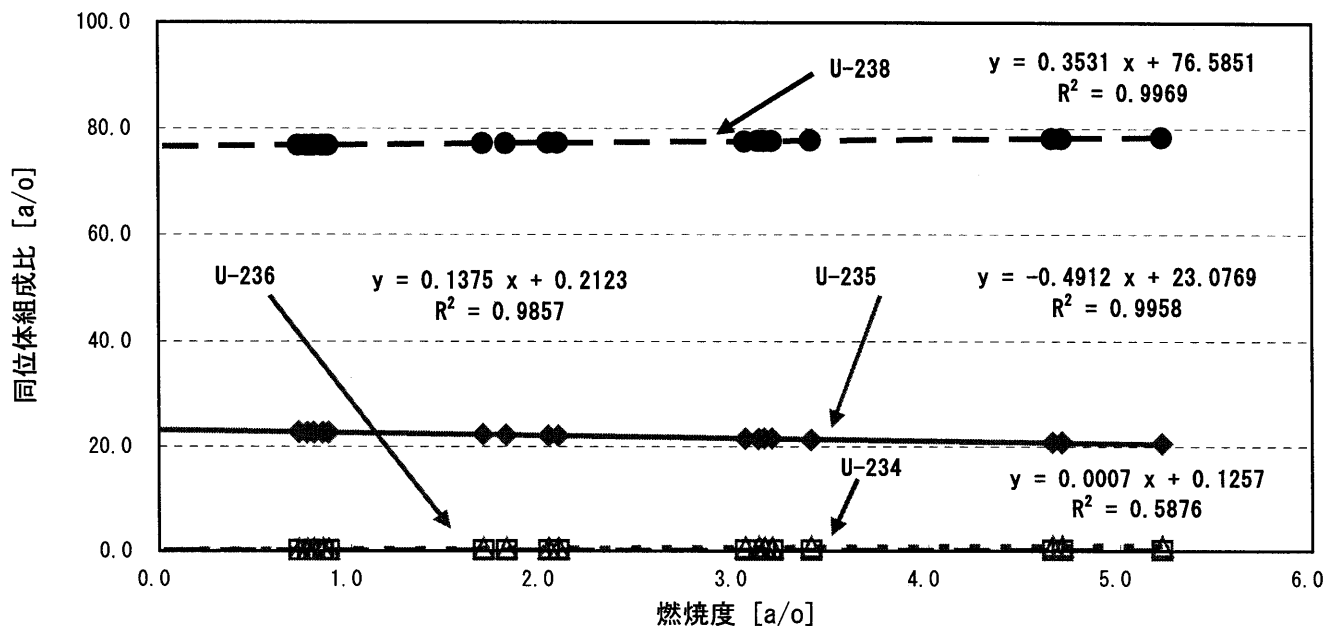
	非均質 <sup>(2)</sup>			
	均質	吸収体 (B4C)	構造材 (SUS)	SUS+Na <sup>(1)</sup>
B-10	2. 18060E-02	9. 87522E-02	—	—
B-11	1. 79510E-03	8. 12942E-03	—	—
C	5. 66640E-03	2. 56613E-02	—	—
Na	1. 30400E-02	—	—	2. 34084E-02
Cr	3. 47510E-03	—	1. 56452E-02	4. 45992E-03
Fe	1. 26530E-02	—	5. 69649E-02	1. 62388E-02
Ni	2. 22680E-03	—	1. 00252E-02	2. 85786E-03
Mo	2. 50380E-04	—	1. 12723E-03	3. 21336E-04

(1) : SUS+Naの値は構造材と冷却材を混ぜたもの (体積比 : 0. 222+0. 557=0. 779)

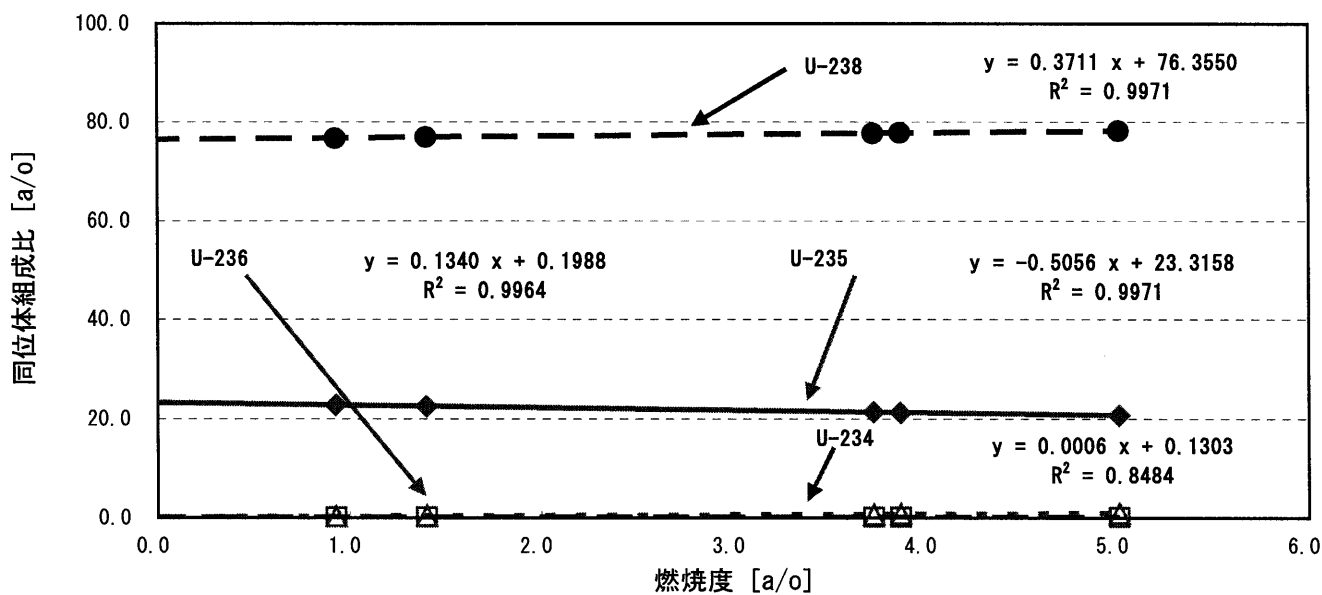
(2) : 体積比 B4C/SUS/Na=0. 221/0. 222/0. 557

## 付録 B PIE データによる初期組成の検討の詳細

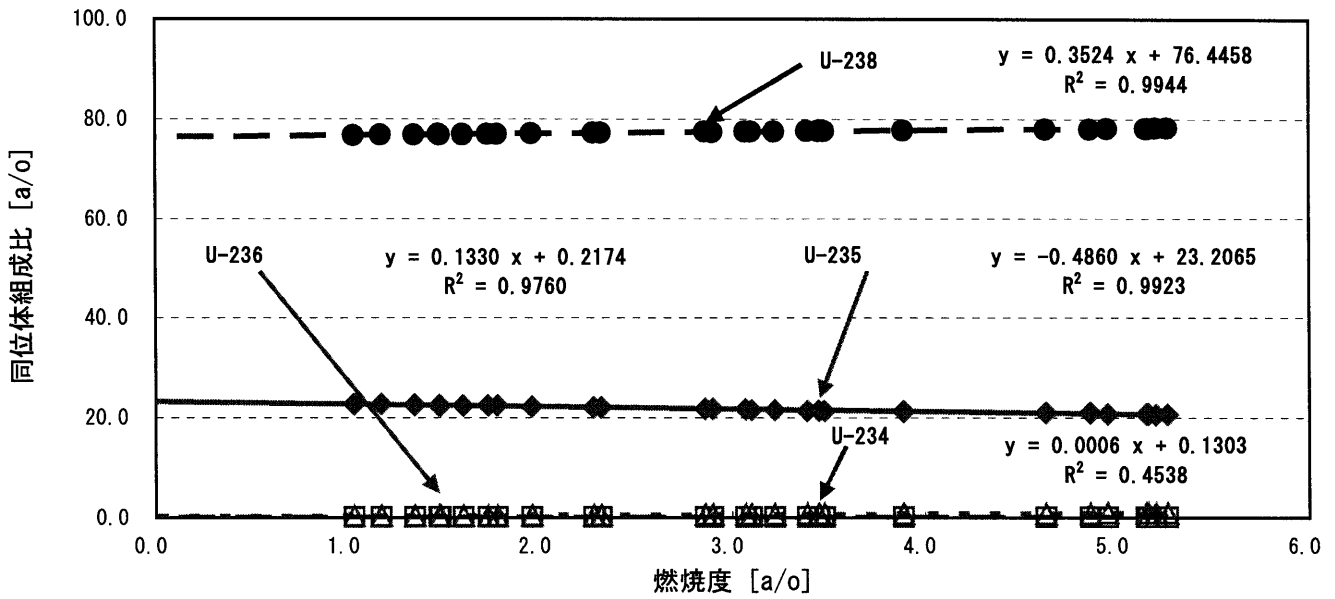
- 図 B-1 U の初期同位体組成比 (EU0004)
- 図 B-2 U の初期同位体組成比 (EU0012)
- 図 B-3 U の初期同位体組成比 (EU0013)
- 図 B-4 U の初期同位体組成比 (EU0014)
- 図 B-5 U の初期同位体組成比 (EU0015)
- 図 B-6 U の初期同位体組成比 (EU0018)
- 図 B-7 Pu の初期同位体組成比 (PU8230)
- 図 B-8 Pu の初期同位体組成比 (PU8231)
- 図 B-9 Pu の初期同位体組成比 (PU8232)
- 図 B-10 Pu の初期同位体組成比 (PU8244)
- 図 B-11 Pu の初期同位体組成比 (PU8251)
- 図 B-12 Pu の初期同位体組成比 (PU8253)



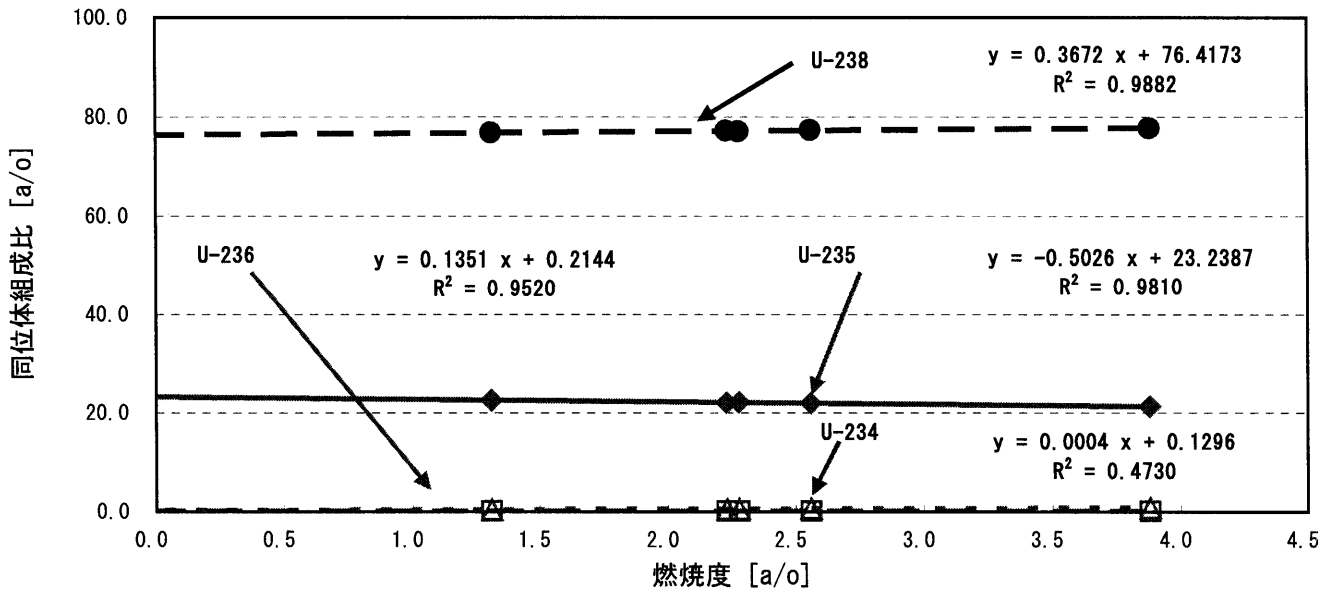
図B-1 Uの初期同位体組成比 (EU0004)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



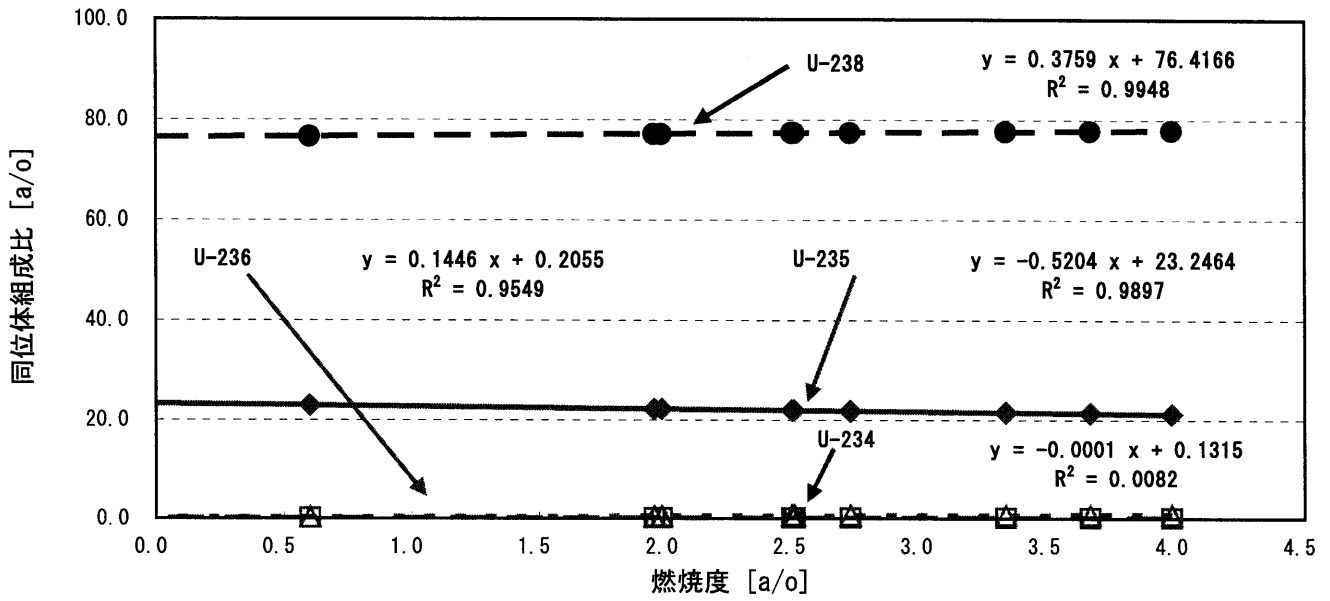
図B-2 Uの初期同位体組成比 (EU0012)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



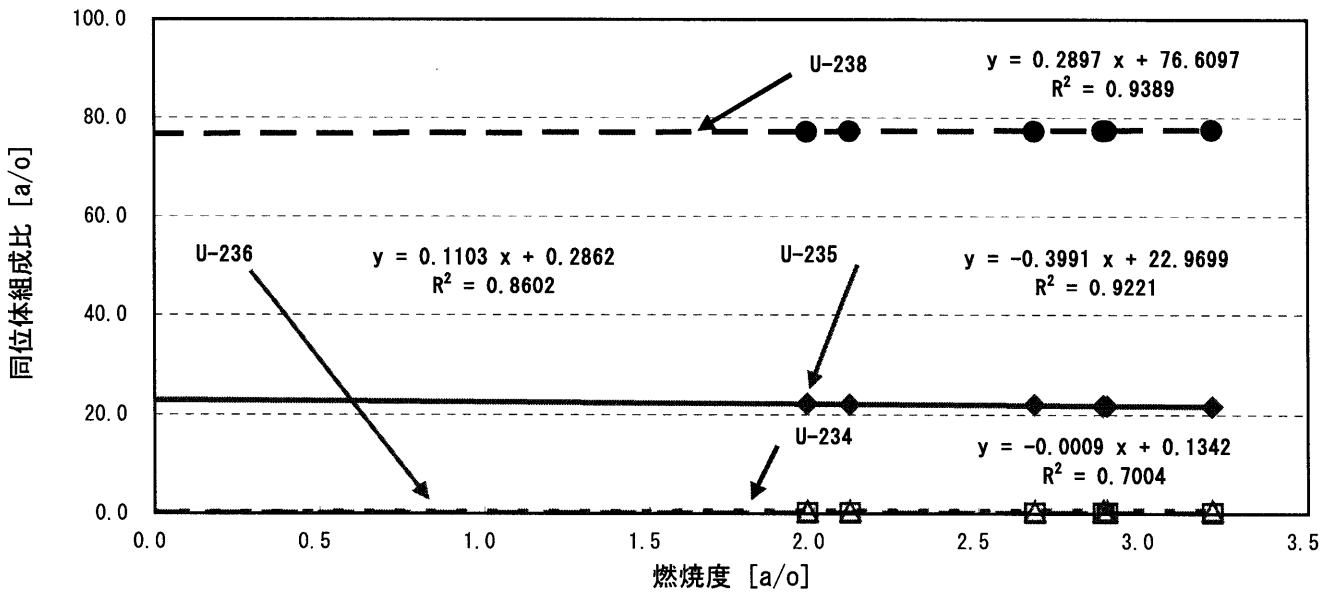
図B-3 Uの初期同位体組成比 (EU0013)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



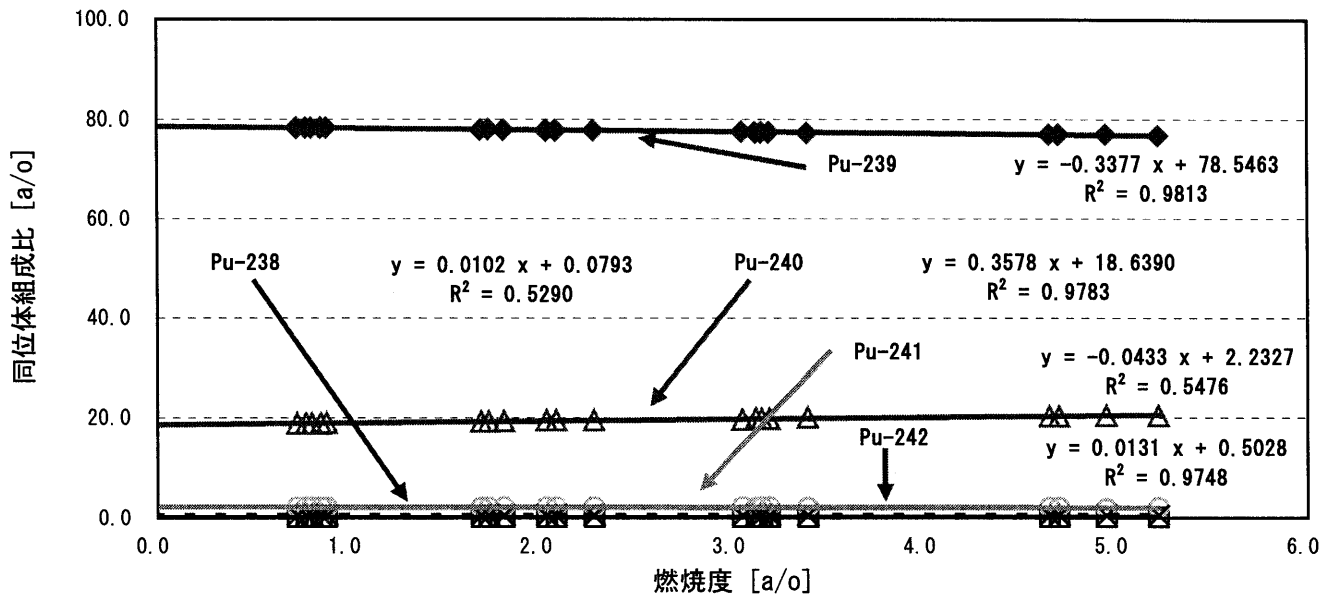
図B-4 Uの初期同位体組成比 (EU0014)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



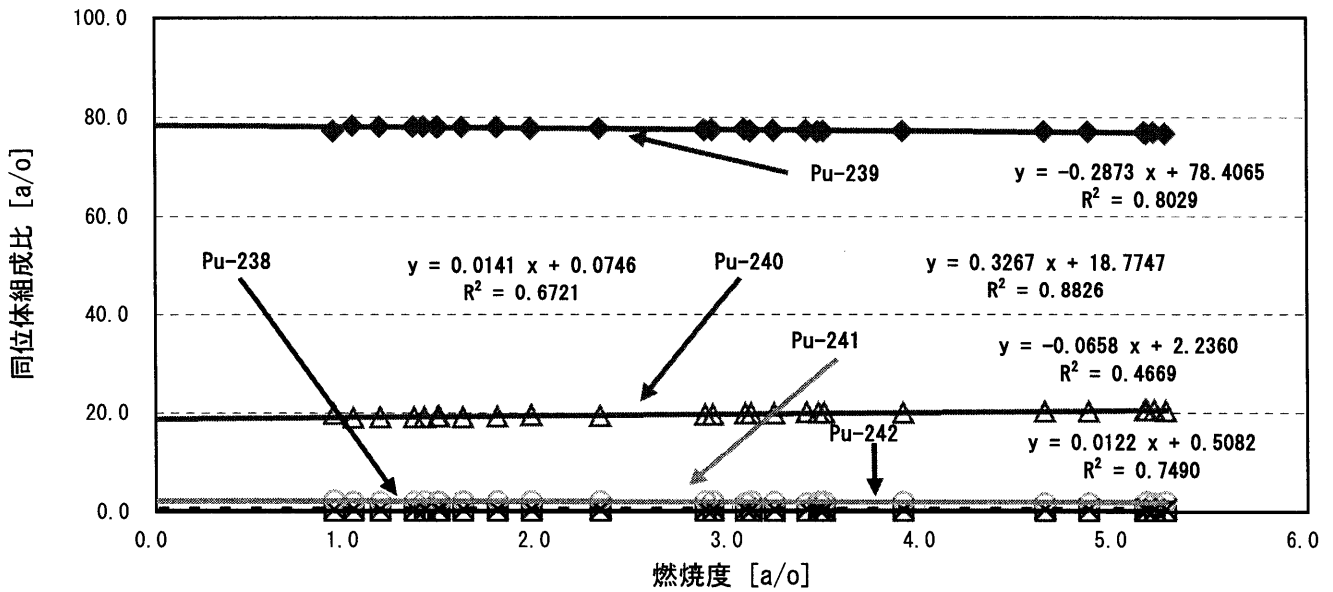
図B-5 Uの初期同位体組成比 (EU0015)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



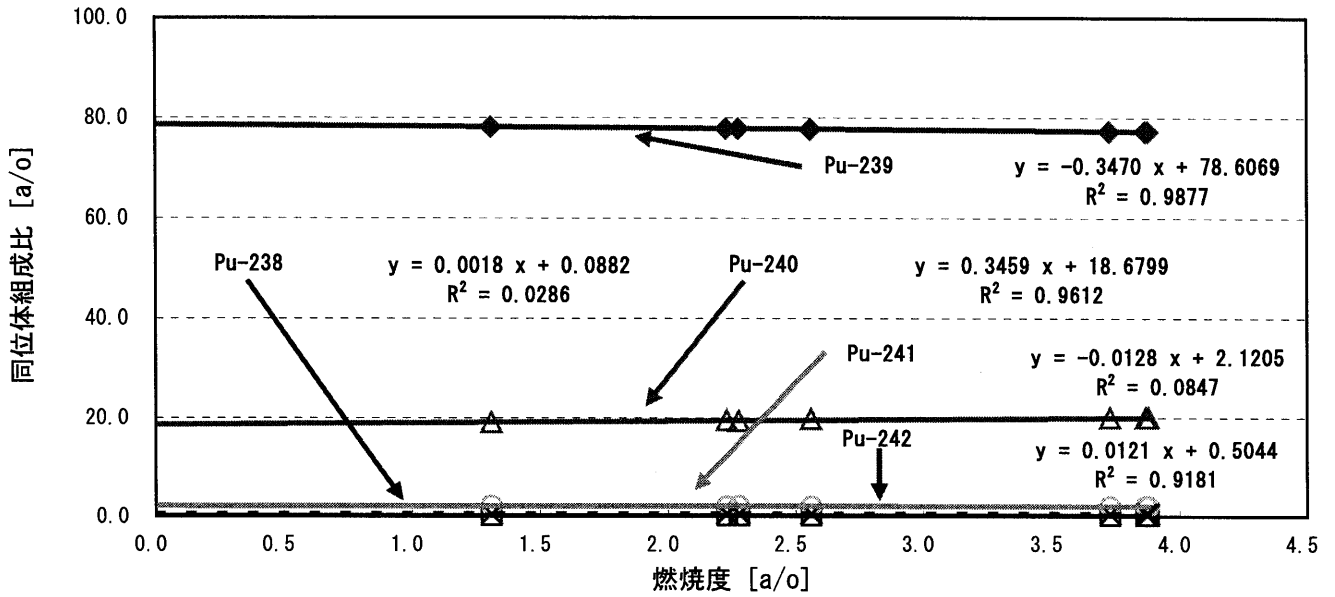
図B-6 Uの初期同位体組成比 (EU0018)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



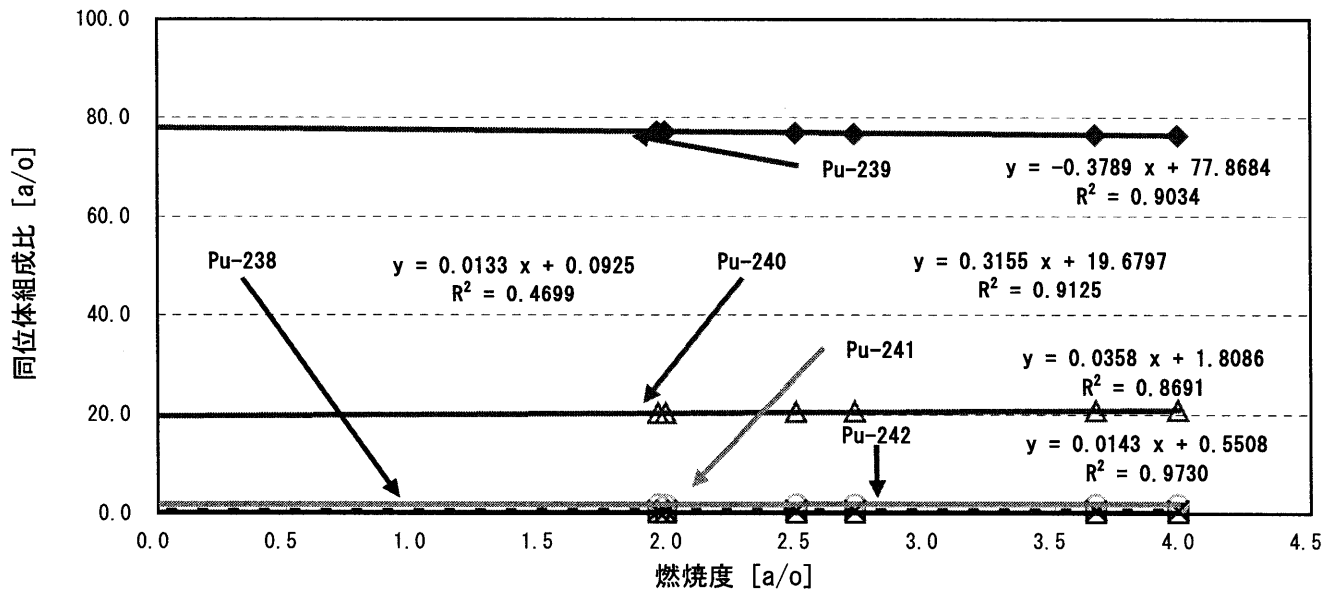
図B-7 Puの初期同位体組成比 (PU8230)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



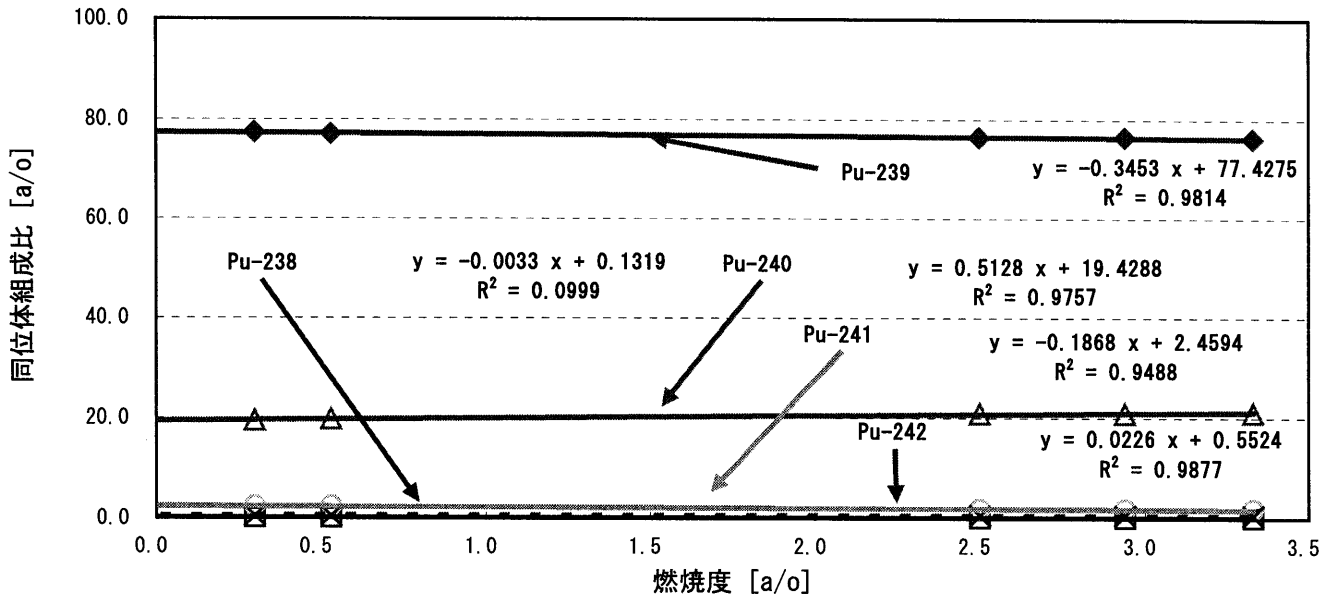
図B-8 Puの初期同位体組成比 (PU8231)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



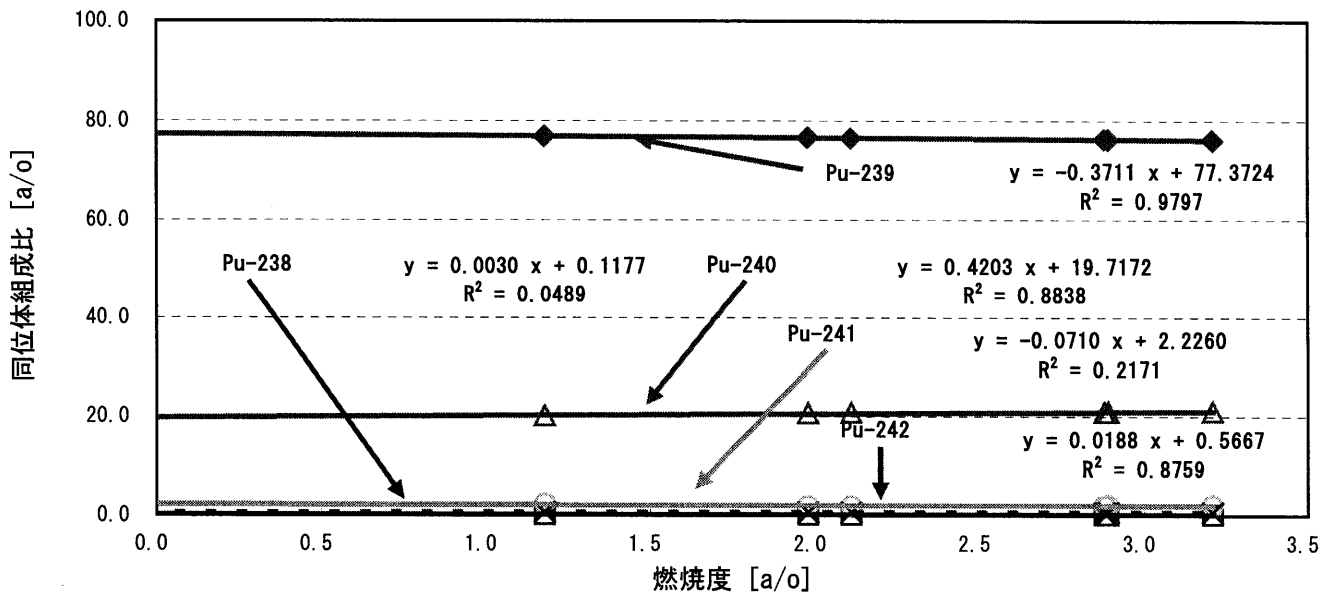
図B-9 Puの初期同位体組成比 (PU8232)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



図B-10 Puの初期同位体組成比 (PU8244)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



図B-11 Puの初期同位体組成比 (PU8251)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定



図B-12 Puの初期同位体組成比 (PU8253)  
PIEデータ (照射後の同位体組成比) による初期同位体組成比の推定