

# 使用済燃料の中性子増倍補正係数の計算

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1998年3月



株式会社 三菱総合研究所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

1998年3月

## 使用済燃料の中性子増倍補正係数の計算

### 要旨

佐藤 理\*  
高木 俊治\*

連続エネルギーモンテカルロ法中性子・ $\gamma$ 線輸送計算コードMCNP-4Aを用いて、「常陽」の使用済燃料貯蔵プールに設置された燃焼度測定装置の中性子検出器の応答計算を行った。ここでは、MAGIの燃焼計算で得られた使用済燃料組成を使用して中性子増倍を考慮した場合と、中性子増倍を考慮しない場合の、使用済燃料から放出される中性子に対する中性子検出器の応答を比較した。このとき、中性子増倍が燃焼度に依存することを考慮して、新燃料を含む5種類の燃焼度について検出器応答を計算した。

これらの計算の結果、以下のことが明らかとなった。

- ①検出器応答の燃焼度依存性は、線源が検出器の真横に有る場合の方が離れている場合よりも大きい。
- ②線源の真横に検出器がある場合の検出器応答は、線源が燃料有効部の上・下端に有る場合を除き、ほぼ中性子増倍 $1/(1-k)$ に比例する。線源が燃料有効部の上・下端に有る場合は燃焼度の影響を大きくは受けない。

上記の検討から、ある燃焼度の使用済燃料について求められた検出器応答に対して、

- ・線源と検出器が近い場合は検出器応答を、中性子増倍 $1/(1-k)$ の線形関数として補正する、
- ・線源と検出器の位置が遠い場合は、補正を行わない、

ことにより、任意の燃焼度の検出器応答が求められることがわかった。

また、ガスプレナムのモデル化の影響と燃料中のFP核種の影響を評価した。ガスプレナムの影響は系の実効増倍率を小さくして中性子増倍の寄与を減らす。ただし、検出器応答分布には大きな影響を与えないことがわかった。また、FP核種は、主にその中性子吸収により、燃焼度62,540MWd/tの使用済燃料において、約6%△kもの反応度効果があり、中性子増倍に大きな影響を及ぼすことがわかった。したがって、FP核種の検出器応答への影響については、さらに詳細な検討が必要である。

---

本報告書は、株式会社三菱総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した成果である。

契約番号：09C4777

事業団担当部課室および担当者：大洗工学センター実験炉部技術課 高松 操

\* (株) 三菱総合研究所 総合安全研究センター

PNC-TJ9222 98-002

March, 1998

## Calculation of Correction Factors for Neutron Multiplication in Spent Fuel

Osamu Sato\* and Shunji Takagi\*

### Abstract

The responses have been calculated for the burnup measurement equipment placed in the spent fuel storage facility beside JOYO by using the Monte Carlo code "MCNP-4A". These responses are influenced by the neutron multiplication depending to the burnup of the fuel to be measured. In this work, the dependence of calculated responses to the burnup of fuel was investigated using the compositions of the irradiated fuels obtained from the burnup calculation with MAGI. These responses were compared to the responses without multiplication. The following relationship between burnup and detector response became clear as the results of these calculations.

- (1) The burnup of fuel influence to the detector response from the neutron source near the detector, but does not significantly influence to the detector apart from the neutron source.
- (2) The response from the neutron source near the detector decrease with burnup, and the decrease is proportional to the multiplication;  $1/(1-k)$ , except for the case that the neutron source is at the end of fuel region. The burnup dose not significantly influence to the detector response from the neutron source at the end of fuel.

The detector responses for the neutrons from a spent fuel of arbitrary burnup can be corrected by the linear interpolation for neutron multiplication;  $1/(1-k)$ , when the detector closes to neutron source, and no corrections are required when the detector is apart from neutron source.

It was also investigated that the effect of considering the gas plenum at the top of fuel and considering fission products in irradiated fuels. The multiplication factor of fuel and detector response were decreased with the model considering gas plenum because of neutron leakage from the void in gas plenum. The axial distribution of the detector response was not influenced by this modeling. The fission products in irradiated fuel cause great negative reactivity, about  $6\% \Delta k$  for the burnup of 62,540MWd/t, and decrease neutron multiplication significantly. The detailed evaluation will be required to estimate the effect of fission products in fuel to detector responses.

---

Work performed by Mitsubishi Research Institute Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC  
Misao TAKAMATSU

\* Mitsubishi Research Institute Inc.

# 使用済燃料の中性子増倍補正係数の計算

## 成果報告書

## 目 次

1. はじめに.....	1
1. 1 本作業の目的.....	1
1. 2 作業の概要.....	1
2. 検出器応答マトリクスの計算方法.....	2
2. 1 検出器応答マトリクス.....	2
2. 2 検出器応答マトリクスの計算方法.....	2
2. 2. 1 計算モデル.....	2
2. 2. 2 計算ケース.....	3
2. 2. 3 中性子源スペクトル.....	3
2. 2. 4 モンテカルロ計算条件.....	4
2. 3 補正係数の計算.....	4
2. 4 燃焼後組成.....	4
3. 中性子増倍補正係数の計算.....	16
3. 1 燃焼度毎の応答マトリクスの計算結果.....	16
3. 2 燃焼度毎の応答マトリクスの計算結果の比較.....	16
3. 3 計数率分布の燃焼度依存性.....	16
3. 4 補正係数の計算.....	17
4. その他の検討.....	33
4. 1 ガスプレナムの影響.....	33
4. 2 F P核種の吸収の影響.....	33
5. まとめ .....	39
参考文献 .....	40

## 図表リスト

### 一表一

第2. 1表 PFD327 (燃焼度0MWd/t) の検出器応答計算に用いた燃料部原子個数密度組成 .....	6
第2. 2表 PFD327 (燃焼度 12,370MWd/t) の検出器応答計算に用いた燃料部原子個数密度組成 .....	7
第2. 3表 PFD327 (燃焼度 31,230MWd/t) の検出器応答計算に用いた燃料部原子個数密度組成 .....	8
第2. 4表 PFD327 (燃焼度 49,440MWd/t) の検出器応答計算に用いた燃料部原子個数密度組成 .....	9
第2. 5表 PFD327 (燃焼度 62,540MWd/t) の検出器応答計算に用いた燃料部原子個数密度組成 .....	10
第3. 1表 (1／5) PFD327 (燃焼度0MWd/t) の検出器応答マトリクス .....	19
第3. 1表 (2／5) PFD327(燃焼度 12,370MWd/t) の検出器応答マトリクス .....	20
第3. 1表 (3／5) PFD327(燃焼度 31,230MWd/t) の検出器応答マトリクス .....	21
第3. 1表 (4／5) PFD327(燃焼度 49,440MWd/t) の検出器応答マトリクス .....	22
第3. 1表 (5／5) PFD327(燃焼度 62,540MWd/t) の検出器応答マトリクス .....	23
第3. 2表 中性子増倍を無視した場合と燃焼度毎に考慮した場合の検出器応答の比較 .....	24
第3. 3表 中性子増倍を無視した場合と燃焼度毎に考慮した場合との計数率との比 (補正係数) の計算結果 .....	25
第4. 1表 ガスプレナムの影響 .....	35
第4. 2表 ORIGEN2計算に用いたPFD327の照射履歴 .....	36
第4. 3表 PFD327燃料集合体 (燃焼度62,540MWd/t) 中でのFP核種の中性子吸収への寄与割合 .....	37

## 図表リスト

### —図—

第2. 1図 軸方向ノード分割 (MAGIノード分割) .....	11
第2. 2図 燃料集合体と缶詰缶のモデル (水平断面図) .....	12
第2. 3図 中性子検出器応答計算モデル (水平断面図) .....	13
第2. 4図 中性子検出器応答計算モデル (垂直断面図) .....	14
第2. 5図 中性子検出器の計算モデル .....	15
第3. 1図 PFD327燃料集合体1体を缶詰缶内 (水中) に置いた場合の実効増倍率 の燃焼度依存性 .....	26
第3. 2図 増倍を無視した場合の計数率に対する増倍を考慮した計数率の比と燃 焼度との関係(各線源ノードの側方のノードに検出器が有る場合の上方 ノードでの計数率) .....	27
第3. 3図 増倍を無視した場合の計数率に対する増倍を考慮した計数率の比と燃 焼度との関係(各線源ノードの側方のノードに検出器が有る場合の下方 ノードでの計数率) .....	28
第3. 4図 燃焼度毎の線源の側方位置での計数率分布 .....	29
第3. 5図 増倍を無視した場合の計数率に対する増倍を考慮した計数率の比と燃 焼度との関係 (ノードに10に線源が有る場合の各ノードでの計数率) .....	30
第3. 6図 線源からの距離と計数率との関係の燃焼度依存性 (中心高さノードに 単位強度の線源が有る場合の上方各ノード位置での計数率) .....	31
第3. 7図 中性子増倍と補正係数との関係 .....	32
第4. 1図 検出器応答分布へのガスプレナムのモデル化の影響 .....	38

## 1. はじめに

### 1. 1 本作業の目的

高速実験炉「常陽」の使用済燃料貯蔵プールに設置された燃焼度測定用中性子検出器を用いて、使用済燃料の軸方向中性子放出率分布の測定が行われている。前年度は、使用済燃料の軸方向に沿った中性子検出器の応答分布から、使用済燃料内の軸方向中性子源（自発核分裂中性子源および $(\alpha, n)$  中性子源）強度分布を求めるための、検出器応答マトリクスを連続エネルギーモンテカルロ法により計算した。ただし、この応答マトリクスは特定の使用済燃料（PFD327）に関するものであり、検出器応答は使用済燃料による中性子増倍の影響を受けることを考えると、初期燃料組成や燃焼度などの燃焼条件が異なる集合体には適用できない。また、応答マトリクスの計算には多大な計算時間を要するため、考えられる全ての使用済燃料に対して、これをあらかじめ計算することは現実的でない。

そこで、本作業では、燃焼後組成が与えられた使用済燃料を缶詰缶に収めた体系について、中性子増倍が無い場合の応答マトリクスと中性子増倍を考慮した応答マトリクスとを比較して求めた補正係数と燃焼度との関係を求める。

### 1. 2 作業の概要

本作業では、以下の2つの計算を行って、燃焼度と検出器応答マトリクスとの関係を調べる。

- (1) 増倍を無視した場合の検出器応答マトリクスの計算（すでに計算済）
- (2) 同一使用済燃料の異なる燃焼度での中性子増倍を考慮した応答マトリクスの計算

上記の計算は、連続エネルギーモンテカルロコードMCNP-4A[1]を用いて行う。（2）の燃焼度依存の計算は、使用済燃料としてMk-II燃料PFD327を対象とし、下記の燃焼度について行う。

$$\text{集合体平均燃焼度} = 0, 12370, 31230, 49440, 62540 \text{ MWd/t}$$

なお、実際の使用済Mk-II燃料PFD327の集合体平均燃焼度は、62540 MWd/tであり、増倍を無視した計算は、この燃焼後組成について行われた。

## 2. 検出器応答マトリクスの計算方法

### 2. 1 検出器応答マトリクス

検出器応答マトリクス  $M$  (要素  $m_{ij}$ ) は、第 2. 1 図に示すように使用済燃料を軸方向にノード分割し、各ノード( $i$ )に単位強度の中性子源を与えた場合の軸方向位置( $j$ )における中性子検出器の応答（計数率）である。各ノードの中性子源強度分布を  $S$  (要素  $S_i$ ) とすれば、軸方向検出器応答分布  $R$  (要素  $R_j$ ) は次式で求められる。

$$R = M \cdot S \quad (2.1)$$

すなわち、

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_j \\ \vdots \\ R_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & \dots & m_{1i} & \dots & m_{1,13} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{j1} & \dots & m_{ji} & \dots & m_{j,13} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{13,1} & \dots & m_{13i} & \dots & m_{13,13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_i \\ \vdots \\ S_{13} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

逆に、 $M$  の逆マトリクス  $M^{-1}$  が求まれば、

$$S = M^{-1} \cdot R \quad (2.3)$$

すなわち、

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_i \\ \vdots \\ S_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & \dots & m_{1i} & \dots & m_{1,13} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{j1} & \dots & m_{ji} & \dots & m_{j,13} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{13,1} & \dots & m_{13i} & \dots & m_{13,13} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_j \\ \vdots \\ R_{13} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

として、計測された検出器応答分布  $R$  から中性子源分布  $S$  を知ることができる。

### 2. 2 検出器応答マトリクスの計算方法

#### 2. 2. 1 計算モデル

検出器応答マトリクスの要素  $m_{ij}$  は、各ノードに単位強度の中性子源を与えた時の検出器応答分布を計算することによって得られる。この計算は、第 2. 2 図～第 2. 4 図に示すモデルを用いて、連続エネルギーモンテカルロコード MCNP-4A を用いて行う。

燃料集合体のラッパ管より内側は、燃料ピンと水を均質化して表す。均質化組成はMAGIで計算された各燃焼度における集合体平均組成から、ラッパ管(SUS316)の寄与を差し引き、Naを水に置き換えて計算する。

軸方向の燃焼後組成分布を考慮するために、燃料部を高さ5cmのノード（計11ノード）で表す。燃料部上下のインシュレータペレットは、上部軸方向反射体および下部空間部と混合して、やはり高さ5cmのノードで表す。燃料部およびインシュレータペレットの上部には30cm厚の上部軸方向反射体と66.9cm厚のガスプレナム、下部には15cm厚の下部空間および30cm厚の下部軸方向反射体を考えて燃料集合体モデルとする。燃料集合体の上下および缶詰缶の外側は十分な厚さ（50cm）の水で囲まれているものとする。実際の施設でも、缶詰缶は50cm以上の厚さの水で取り囲まれている。

中性子検出器は2"φB-10比例計数管（感度5.83cps/nv）を持つ検出器である。中性子検出器のモデルを第2.5図に示す。検出器の位置は各線源ノードの中心高さとする。

## 2. 2. 2 計算ケース

線源位置と検出器位置は前年度に検討した対照性を考えて、以下の組み合わせについてのみ計算を行う。

- (1) 各ノードの中性子源 — 同一高さでの検出器応答
- (2) 燃料中心高さの中性子源 — これから6ノード離れた位置までの検出器応答
- (1) はインシュレータペレットを含めて13ケース、(2) は6点の検出器位置で6ケース、合計19ケースのモンテカルロ計算を各燃焼度について行う。

## 2. 2. 3 中性子源スペクトル

前年度のPFD327を対象とした計算で、自発核分裂中性子スペクトルと $(\alpha, n)$ 中性子スペクトルの違いが検出器応答に与える影響は、各検出器応答の統計誤差（約1%）に比べて無視できることが判っている。PFD327に関してORIGEN2[2]を用いた計算によると、中性子源としての寄与が最も大きいのはCm-244の自発核分裂による中性子源であり、したがって、これを中性子源スペクトルとして用いる。具体的には、以下のWattの式に、

$$f(E)=C \cdot \exp(-E/a) \cdot \sinh(bE)^{1/2} \quad (2.5)$$

MCNP-4Aの使用説明書Appendix Gに記されたCm-244自発核分裂中性子スペクトルのパラメータ、

$$a=0.906, b=3.848$$

を与えて計算を行う。

## 2. 2. 4 モンテカルロ計算条件

MCNP-4Aを用いたモンテカルロ計算条件を以下に示す。

中性子のカットオフエネルギー	$10^{-5}$ eV (断面積が与えられている下限)
ヒストリー数	5,000,000 (固定中性子源計算の場合)
	1,000ヒストリー×500バッチ (固有値計算の場合)
中性子断面積	FSXLIB-J3R2[3] (JENDL-3.2)
熱中性子散乱の取り扱い	温度300Kの水の散乱則S ( $\alpha, \beta$ ) を使用

## 2. 3 補正係数の計算

燃焼度Bにおける補正係数を次式で定義する。

$$m_{ij}(B) = f_{ij}(B) \cdot m_{ij}^{no-fission} \quad (2.6)$$

ここで、

$m_{ij}(B)$  : 燃焼度Bの燃料集合体の中性子増倍を考慮してMCNPで計算した応答マトリクス

$m_{ij}^{no-fission}$  : 中性子増倍を無視してMCNPで計算した応答マトリクス

$f_{ij}(B)$  : 燃焼度Bでの補正係数。

燃焼度と補正係数との関係の検討では、固有値計算を別途実施して、缶詰缶内の燃料の実効増倍率と燃焼度との関係も求め、応答マトリクスの燃焼度依存性と、実効増倍率から得られる中性子増倍との相関を調べる。

## 2. 4 燃焼後組成

計算に使用する使用済燃料集合体の燃焼後組成は、PFD327燃料集合体についてMAGIで計算された下記の燃焼度における値を使用した。

燃焼度 =	0 MWd/t	(初期組成)
	12,370 MWd/t	(燃料取り出しサイクル1 8)
	31,230 MWd/t	(燃料取り出しサイクル2 0)
	49,440 MWd/t	(燃料取り出しサイクル2 2)
	62,540 MWd/t	(燃料取り出しサイクル2 4' = PFD327の実燃料)

上記の燃焼度毎に、MCNP-4Aによるモンテカルロ計算に用いた燃料部の領域組成を、第2. 1表～第2. 5表に示す。モンテカルロ計算に用いた燃料組成は、MAGIの燃焼計算で

得られた炉心中での燃料組成に以下の補正を行ったものである。

- ・ラッパ管 (SUS316)の成分を除く (ラッパ管は独立にモデル化する)。
- ・Naはすべて水に置き換える。
- ・ラッパ管を独立な領域としてモデル化するため、燃料の密度を体積の減少分、すなわち、集合体ピッチ (7.85cm) からラッパ管内面管距離(7.47cm)の違いの分だけ増やす。

第2. 1表 PFD327 (燃焼度0MWd/t) の検出器応答計算に用いた  
燃料部原子個数密度組成

核種	上部 インシレータ	燃料部	下部 インシレータ
	ノード4	ノード5~15	ノード16
U-235	4.526E-06	1.187E-03	4.517E-06
U-238	2.230E-03	5.136E-03	2.225E-03
Pu-238		1.591E-05	
Pu-239		1.685E-03	
Pu-240		5.291E-04	
Pu-241		1.479E-04	
Pu-242		6.204E-05	
Cr	6.988E-03	2.327E-03	2.504E-03
Mn-55	6.808E-04	2.268E-04	2.440E-04
Fe	2.497E-02	8.316E-03	8.946E-03
Ni	4.914E-03	1.637E-03	1.761E-03
Mo	5.568E-04	1.855E-04	1.996E-04
H	2.502E-02	2.502E-02	4.468E-02
O	1.737E-02	3.157E-02	2.719E-02

第2. 2表 PFD327 (燃焼度 12,370MWd/t) の検出器応答計算に用いた  
燃料部原子個数密度組成

核種	燃料部						
	上部 インシュレータ	ノード4	ノード5	ノード6	ノード7	ノード8	ノード9
U-235	4.408E-06	1.156E-03	1.150E-03	1.143E-03	1.137E-03	1.135E-03	1.133E-03
U-236	2.802E-08	6.322E-06	7.371E-06	8.527E-06	9.561E-06	1.026E-05	1.061E-05
U-238	2.222E-03	5.117E-03	5.113E-03	5.109E-03	5.106E-03	5.104E-03	5.103E-03
Np-237	1.003E-10	3.080E-08	3.745E-08	4.621E-08	5.509E-08	6.168E-08	6.521E-08
Pu-238	4.738E-13	1.537E-05	1.529E-05	1.521E-05	1.515E-05	1.511E-05	1.509E-05
Pu-239	5.955E-06	1.654E-03	1.647E-03	1.640E-03	1.634E-03	1.631E-03	1.629E-03
Pu-240	1.988E-08	5.303E-04	5.297E-04	5.296E-04	5.297E-04	5.297E-04	5.297E-04
Pu-241	7.050E-11	1.359E-04	1.354E-04	1.349E-04	1.346E-04	1.344E-04	1.343E-04
Pu-242	9.565E-14	6.216E-05	6.215E-05	6.215E-05	6.216E-05	6.217E-05	6.218E-05
Am-241	1.565E-13	9.888E-06	9.838E-06	9.790E-06	9.751E-06	9.724E-06	9.711E-06
Am-242	9.944E-17	2.687E-08	3.146E-08	3.643E-08	4.074E-08	4.363E-08	4.509E-08
Am-242m	3.632E-17	2.102E-09	2.464E-09	2.859E-09	3.203E-09	3.432E-09	3.549E-09
Am-243	1.210E-16	2.645E-07	3.032E-07	3.510E-07	3.944E-07	4.238E-07	4.390E-07
Cm-242	3.971E-16	9.905E-08	1.163E-07	1.349E-07	1.513E-07	1.622E-07	1.677E-07
Cm-243	4.607E-19	2.553E-10	3.431E-10	4.602E-10	5.794E-10	6.676E-10	7.151E-10
Cm-244	3.489E-19	1.913E-09	2.545E-09	3.420E-09	4.322E-09	4.993E-09	5.357E-09
Cr	6.988E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03
Mn-55	6.808E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04
Fe	2.497E-02	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03
Ni	4.914E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03
Mo	5.568E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04
H	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02
O	1.737E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02

核種	燃料部					下部 インシュレータ
	ノード11	ノード12	ノード13	ノード14	ノード15	
U-235	1.133E-03	1.135E-03	1.137E-03	1.142E-03	1.145E-03	4.326E-06
U-236	1.062E-05	1.031E-05	9.726E-06	9.239E-06	9.040E-06	5.010E-08
U-238	5.103E-03	5.104E-03	5.106E-03	5.109E-03	5.112E-03	2.213E-03
Np-237	6.529E-08	6.218E-08	5.657E-08	5.211E-08	5.102E-08	3.356E-10
Pu-238	1.509E-05	1.511E-05	1.515E-05	1.521E-05	1.528E-05	2.905E-12
Pu-239	1.629E-03	1.631E-03	1.636E-03	1.640E-03	1.645E-03	9.930E-06
Pu-240	5.299E-04	5.300E-04	5.301E-04	5.309E-04	5.322E-04	6.657E-08
Pu-241	1.343E-04	1.344E-04	1.347E-04	1.351E-04	1.357E-04	5.424E-10
Pu-242	6.218E-05	6.218E-05	6.218E-05	6.221E-05	6.227E-05	1.320E-12
Am-241	9.711E-06	9.725E-06	9.750E-06	9.780E-06	9.809E-06	1.204E-12
Am-242	4.511E-08	4.381E-08	4.134E-08	3.898E-08	3.764E-08	1.333E-15
Am-242m	3.550E-09	3.446E-09	3.248E-09	3.060E-09	2.952E-09	4.877E-16
Am-243	4.399E-07	4.277E-07	4.047E-07	3.878E-07	3.937E-07	3.400E-15
Cm-242	1.679E-07	1.629E-07	1.535E-07	1.444E-07	1.394E-07	5.333E-15
Cm-243	7.167E-10	6.761E-10	6.026E-10	5.456E-10	5.359E-10	1.205E-17
Cm-244	5.374E-09	5.075E-09	4.531E-09	4.130E-09	4.157E-09	1.830E-17
Cr	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.504E-03
Mn-55	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.440E-04
Fe	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.946E-03
Ni	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.761E-03
Mo	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.996E-04
H	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	4.468E-02
O	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	2.719E-02

第2.3表 PFD327(燃焼度 31, 230MWd/t)の検出器応答計算に用いた  
燃料部原子個数密度組成

核種	上部 インシュレータ	燃料部					
		ノード4	ノード5	ノード6	ノード7	ノード8	ノード9
U-235	4.230E-06	1.110E-03	1.090E-03	1.080E-03	1.070E-03	1.060E-03	1.050E-03
U-236	7.030E-08	1.600E-05	1.850E-05	2.130E-05	2.380E-05	2.540E-05	2.619E-05
U-238	2.210E-03	5.090E-03	5.080E-03	5.070E-03	5.060E-03	5.050E-03	5.050E-03
Np-237	5.881E-10	1.320E-07	1.710E-07	2.210E-07	2.720E-07	3.100E-07	3.300E-07
Pu-238	8.300E-12	1.490E-05	1.470E-05	1.450E-05	1.430E-05	1.430E-05	1.420E-05
Pu-239	1.550E-05	1.610E-03	1.590E-03	1.570E-03	1.560E-03	1.550E-03	1.550E-03
Pu-240	1.330E-07	5.320E-04	5.310E-04	5.300E-04	5.300E-04	5.300E-04	5.300E-04
Pu-241	1.040E-09	1.300E-04	1.290E-04	1.280E-04	1.270E-04	1.270E-04	1.270E-04
Pu-242	3.980E-12	6.230E-05	6.230E-05	6.230E-05	6.230E-05	6.230E-05	6.230E-05
Am-241	8.890E-12	1.240E-05	1.220E-05	1.210E-05	1.200E-05	1.190E-05	1.181E-05
Am-242	1.620E-14	7.640E-08	8.860E-08	1.010E-07	1.120E-07	1.200E-07	1.230E-07
Am-242m	2.060E-15	2.720E-09	3.171E-09	3.620E-09	4.010E-09	4.260E-09	4.380E-09
Am-243	1.240E-14	6.770E-07	7.740E-07	8.910E-07	1.000E-06	1.070E-06	1.110E-06
Cm-242	5.920E-14	2.150E-07	2.500E-07	2.880E-07	3.210E-07	3.430E-07	3.540E-07
Cm-243	1.660E-16	1.450E-09	1.940E-09	2.560E-09	3.210E-09	3.680E-09	3.930E-09
Cm-244	9.380E-17	1.260E-08	1.680E-08	2.240E-08	2.820E-08	3.250E-08	3.490E-08
Cr	6.988E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03
Mn-55	6.808E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04
Fe	2.497E-02	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03
Ni	4.914E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03
Mo	5.568E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04
H	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02
O	1.737E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02

核種	燃料部					下部 インシュレータ
	ノード11	ノード12	ノード13	ノード14	ノード15	
U-235	1.050E-03	1.060E-03	1.070E-03	1.070E-03	1.080E-03	4.040E-06
U-236	2.619E-05	2.550E-05	2.410E-05	2.300E-05	2.259E-05	1.230E-07
U-238	5.050E-03	5.050E-03	5.060E-03	5.070E-03	5.070E-03	2.190E-03
Np-237	3.300E-07	3.120E-07	2.799E-07	2.550E-07	2.490E-07	1.910E-09
Pu-238	1.420E-05	1.430E-05	1.440E-05	1.450E-05	1.470E-05	4.940E-11
Pu-239	1.550E-03	1.550E-03	1.560E-03	1.570E-03	1.590E-03	2.540E-05
Pu-240	5.310E-04	5.310E-04	5.310E-04	5.329E-04	5.370E-04	4.330E-07
Pu-241	1.270E-04	1.270E-04	1.280E-04	1.290E-04	1.300E-04	7.480E-09
Pu-242	6.230E-05	6.239E-05	6.239E-05	6.239E-05	6.260E-05	5.240E-11
Am-241	1.181E-05	1.190E-05	1.200E-05	1.210E-05	1.220E-05	6.700E-11
Am-242	1.230E-07	1.200E-07	1.140E-07	1.080E-07	1.050E-07	2.070E-13
Am-242m	4.380E-09	4.249E-09	4.010E-09	3.800E-09	3.660E-09	2.580E-14
Am-243	1.110E-06	1.080E-06	1.030E-06	9.850E-07	1.000E-06	3.240E-13
Cm-242	3.540E-07	3.440E-07	3.250E-07	3.070E-07	2.970E-07	7.610E-13
Cm-243	3.930E-09	3.720E-09	3.330E-09	3.040E-09	3.000E-09	4.040E-15
Cm-244	3.500E-08	3.300E-08	2.950E-08	2.700E-08	2.720E-08	4.530E-15
Cr	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.504E-03
Mn-55	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.440E-04
Fe	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.946E-03
Ni	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.761E-03
Mo	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.996E-04
H	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	4.468E-02
O	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	2.719E-02

第2. 4表 PFD327 (燃焼度 49, 440MWd/t) の検出器応答計算に用いた  
燃料部原子個数密度組成

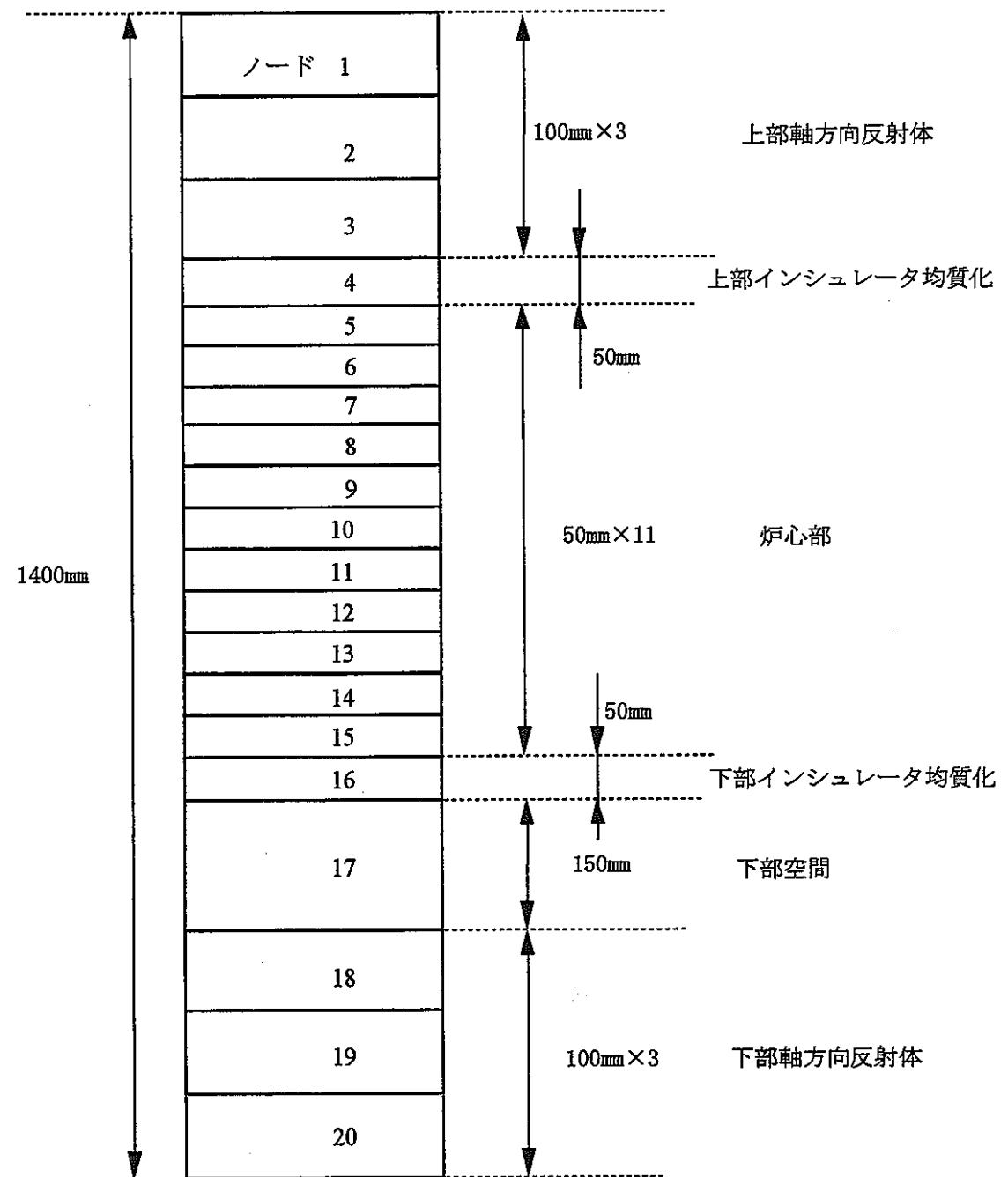
核種	燃料部						
	上部 インシレータ	ノード4	ノード5	ノード6	ノード7	ノード8	ノード9
U-235	4.039E-06	1.062E-03	1.038E-03	1.014E-03	9.939E-04	9.808E-04	9.743E-04
U-236	1.187E-07	2.572E-05	2.938E-05	3.372E-05	3.754E-05	4.007E-05	4.132E-05
U-238	2.197E-03	5.060E-03	5.043E-03	5.026E-03	5.013E-03	5.003E-03	4.999E-03
Np-237	1.729E-09	3.418E-07	4.323E-07	5.610E-07	6.913E-07	7.860E-07	8.360E-07
Pu-238	4.392E-11	1.446E-05	1.420E-05	1.396E-05	1.378E-05	1.366E-05	1.361E-05
Pu-239	2.602E-05	1.562E-03	1.535E-03	1.510E-03	1.489E-03	1.476E-03	1.470E-03
Pu-240	4.105E-07	5.344E-04	5.320E-04	5.311E-04	5.312E-04	5.313E-04	5.314E-04
Pu-241	7.038E-09	1.215E-04	1.196E-04	1.181E-04	1.171E-04	1.164E-04	1.161E-04
Pu-242	3.995E-11	6.250E-05	6.242E-05	6.239E-05	6.243E-05	6.245E-05	6.246E-05
Am-241	1.215E-10	1.865E-05	1.830E-05	1.796E-05	1.768E-05	1.750E-05	1.742E-05
Am-242	4.327E-13	1.542E-07	1.749E-07	1.996E-07	2.204E-07	2.339E-07	2.405E-07
Am-242m	2.515E-14	3.192E-09	3.593E-09	4.152E-09	4.644E-09	4.968E-09	5.132E-09
Am-243	2.295E-13	1.114E-06	1.255E-06	1.447E-06	1.623E-06	1.740E-06	1.799E-06
Cm-242	1.375E-12	2.862E-07	3.241E-07	3.747E-07	4.180E-07	4.463E-07	4.605E-07
Cm-243	7.467E-15	2.935E-09	3.770E-09	5.002E-09	6.238E-09	7.133E-09	7.606E-09
Cm-244	2.858E-15	3.385E-08	4.370E-08	5.868E-08	7.414E-08	8.553E-08	9.164E-08
Cr	6.988E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03
Mn-55	6.808E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04
Fe	2.497E-02	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03
Ni	4.914E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03
Mo	5.568E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04
H	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02
O	1.737E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02

核種	燃料部					下部 インシレータ
	ノード11	ノード12	ノード13	ノード14	ノード15	
U-235	9.743E-04	9.808E-04	9.926E-04	1.007E-03	1.019E-03	3.741E-06
U-236	4.137E-05	4.032E-05	3.835E-05	3.661E-05	3.631E-05	2.013E-07
U-238	4.999E-03	5.003E-03	5.013E-03	5.022E-03	5.035E-03	2.173E-03
Np-237	8.380E-07	7.957E-07	7.194E-07	6.558E-07	6.540E-07	5.342E-09
Pu-238	1.361E-05	1.368E-05	1.380E-05	1.398E-05	1.421E-05	2.486E-10
Pu-239	1.471E-03	1.478E-03	1.491E-03	1.509E-03	1.526E-03	4.174E-05
Pu-240	5.317E-04	5.321E-04	5.329E-04	5.358E-04	5.417E-04	1.258E-06
Pu-241	1.162E-04	1.166E-04	1.174E-04	1.188E-04	1.209E-04	4.447E-08
Pu-242	6.247E-05	6.249E-05	6.252E-05	6.264E-05	6.292E-05	4.602E-10
Am-241	1.742E-05	1.751E-05	1.768E-05	1.791E-05	1.814E-05	8.095E-10
Am-242	2.409E-07	2.354E-07	2.250E-07	2.146E-07	2.119E-07	5.052E-12
Am-242m	5.149E-09	5.034E-09	4.814E-09	4.568E-09	4.552E-09	2.889E-13
Am-243	1.804E-06	1.758E-06	1.673E-06	1.606E-06	1.651E-06	5.173E-12
Cm-242	4.616E-07	4.506E-07	4.301E-07	4.079E-07	4.051E-07	1.619E-11
Cm-243	7.633E-09	7.252E-09	6.565E-09	5.997E-09	6.087E-09	1.622E-13
Cm-244	9.202E-08	8.718E-08	7.850E-08	7.168E-08	7.372E-08	1.189E-13
Cr	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.504E-03
Mn-55	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.440E-04
Fe	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.946E-03
Ni	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.761E-03
Mo	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.996E-04
H	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	4.468E-02
O	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	2.719E-02

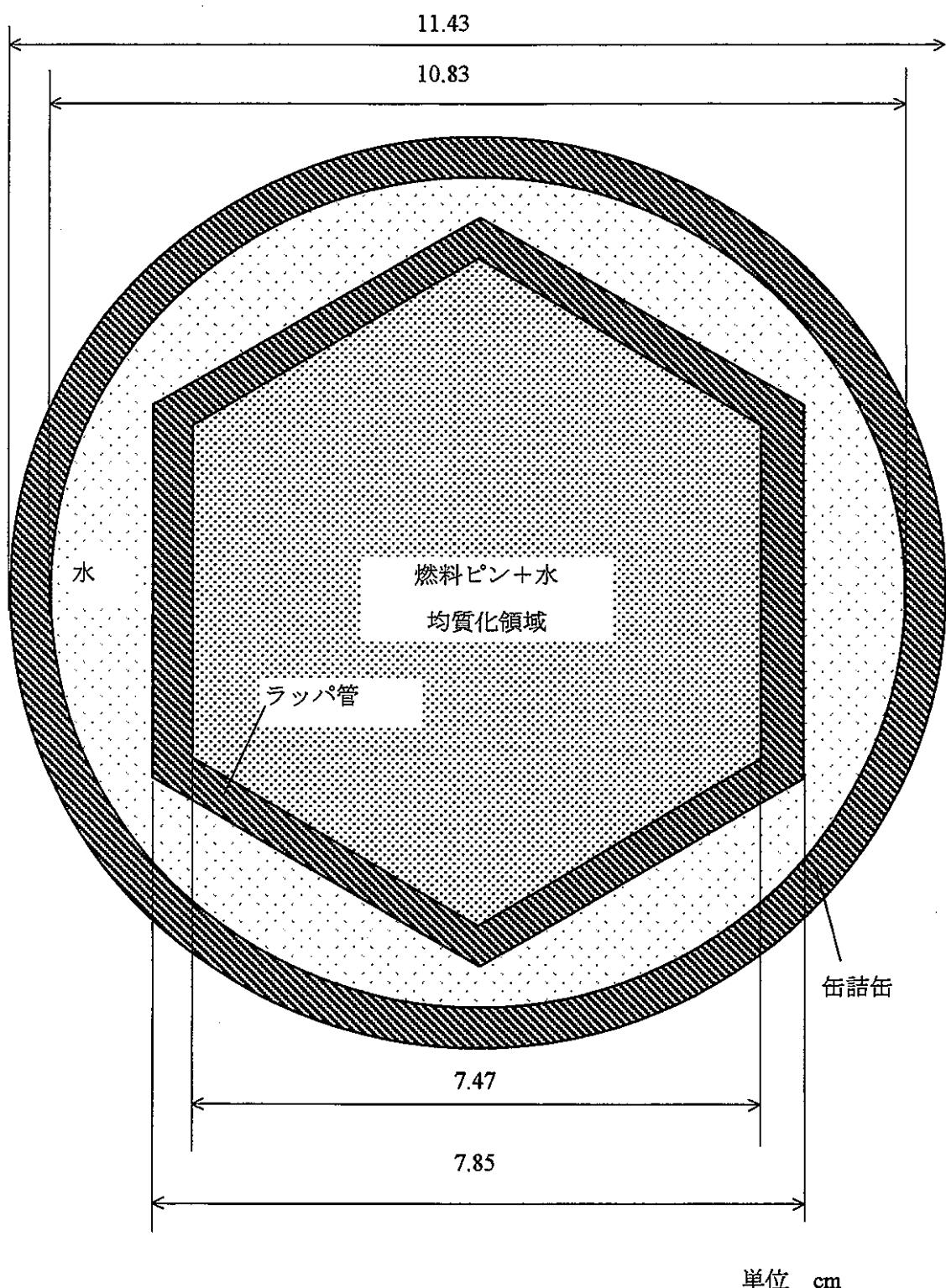
第2. 5表 PFD327 (燃焼度 62, 540MWd/t) の検出器応答計算に用いた  
燃料部原子個数密度組成

核種	上部 インシュレータ	燃料部					
		ノード4	ノード5	ノード6	ノード7	ノード8	ノード9
U-235	3.891E-06	1.025E-03	9.969E-04	9.672E-04	9.427E-04	9.266E-04	9.187E-04
U-236	1.555E-07	3.351E-05	3.786E-05	4.310E-05	4.773E-05	5.077E-05	5.229E-05
U-238	2.187E-03	5.038E-03	5.016E-03	4.995E-03	4.977E-03	4.966E-03	4.960E-03
Np-237	3.020E-09	6.133E-07	7.568E-07	9.623E-07	1.171E-06	1.322E-06	1.402E-06
Pu-238	1.092E-10	1.438E-05	1.410E-05	1.388E-05	1.372E-05	1.362E-05	1.357E-05
Pu-239	3.411E-05	1.528E-03	1.495E-03	1.464E-03	1.440E-03	1.423E-03	1.416E-03
Pu-240	7.260E-07	5.370E-04	5.337E-04	5.326E-04	5.325E-04	5.327E-04	5.328E-04
Pu-241	1.583E-08	1.114E-04	1.094E-04	1.078E-04	1.067E-04	1.060E-04	1.057E-04
Pu-242	1.349E-10	6.267E-05	6.253E-05	6.250E-05	6.252E-05	6.254E-05	6.256E-05
Am-241	1.058E-09	2.692E-05	2.632E-05	2.575E-05	2.530E-05	2.501E-05	2.487E-05
Am-242	2.523E-12	2.328E-07	2.601E-07	2.926E-07	3.206E-07	3.386E-07	3.476E-07
Am-242m	4.026E-14	1.069E-09	1.107E-09	1.132E-09	1.151E-09	1.164E-09	1.169E-09
Am-243	1.042E-12	1.479E-06	1.650E-06	1.890E-06	2.111E-06	2.259E-06	2.335E-06
Cm-242	4.327E-12	1.556E-07	1.698E-07	1.878E-07	2.052E-07	2.168E-07	2.229E-07
Cm-243	3.169E-14	4.299E-09	5.413E-09	7.086E-09	8.758E-09	9.965E-09	1.060E-08
Cm-244	1.745E-14	5.756E-08	7.304E-08	9.687E-08	1.216E-07	1.399E-07	1.497E-07
Cr	6.988E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03
Mn-55	6.808E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04
Fe	2.497E-02	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03
Ni	4.914E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03
Mo	5.568E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04
H	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02
O	1.737E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02

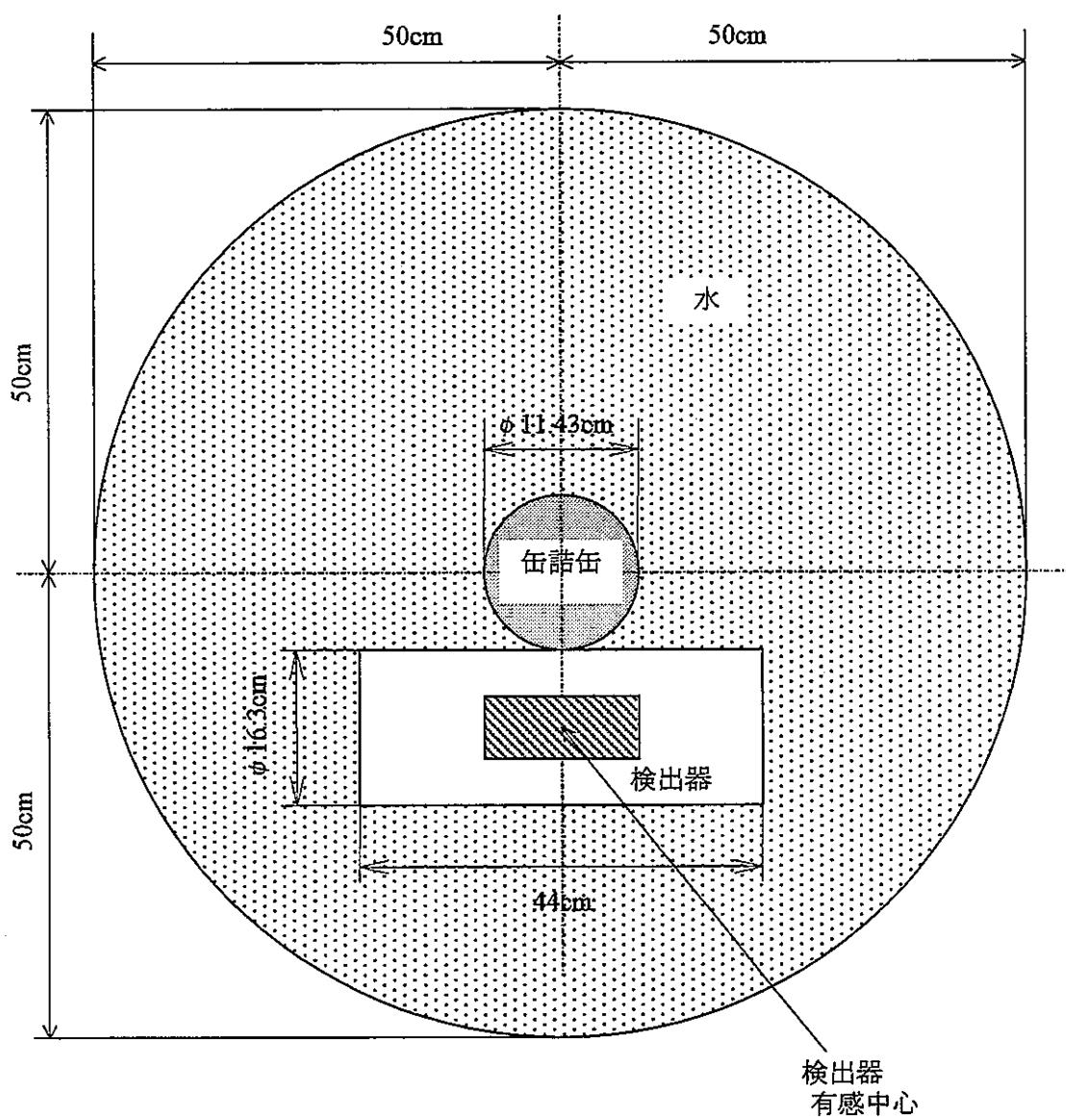
核種	燃料部					下部 インシュレータ
	ノード11	ノード12	ノード13	ノード14	ノード15	
U-235	9.188E-04	9.263E-04	9.406E-04	9.577E-04	9.719E-04	3.529E-06
U-236	5.237E-05	5.115E-05	4.883E-05	4.674E-05	4.656E-05	2.557E-07
U-238	4.960E-03	4.966E-03	4.976E-03	4.990E-03	5.005E-03	2.158E-03
Np-237	1.406E-06	1.340E-06	1.221E-06	1.119E-06	1.122E-06	8.853E-09
Pu-238	1.358E-05	1.364E-05	1.376E-05	1.395E-05	1.422E-05	6.040E-10
Pu-239	1.417E-03	1.425E-03	1.441E-03	1.462E-03	1.483E-03	5.350E-05
Pu-240	5.331E-04	5.337E-04	5.349E-04	5.384E-04	5.459E-04	2.111E-06
Pu-241	1.058E-04	1.062E-04	1.071E-04	1.086E-04	1.110E-04	9.325E-08
Pu-242	6.257E-05	6.260E-05	6.265E-05	6.281E-05	6.317E-05	1.400E-09
Am-241	2.488E-05	2.504E-05	2.531E-05	2.572E-05	2.617E-05	6.427E-09
Am-242	3.482E-07	3.413E-07	3.281E-07	3.148E-07	3.129E-07	2.515E-11
Am-242m	1.168E-09	1.160E-09	1.145E-09	1.123E-09	1.090E-09	2.585E-13
Am-243	2.340E-06	2.284E-06	2.179E-06	2.096E-06	2.159E-06	2.061E-11
Cm-242	2.238E-07	2.200E-07	2.125E-07	2.041E-07	2.026E-07	3.905E-11
Cm-243	1.064E-08	1.014E-08	9.243E-09	8.474E-09	8.692E-09	5.951E-13
Cm-244	1.504E-07	1.428E-07	1.292E-07	1.182E-07	1.222E-07	6.193E-13
Cr	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.327E-03	2.504E-03
Mn-55	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.268E-04	2.440E-04
Fe	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.316E-03	8.946E-03
Ni	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.637E-03	1.761E-03
Mo	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.855E-04	1.996E-04
H	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	2.502E-02	4.468E-02
O	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	3.157E-02	2.719E-02



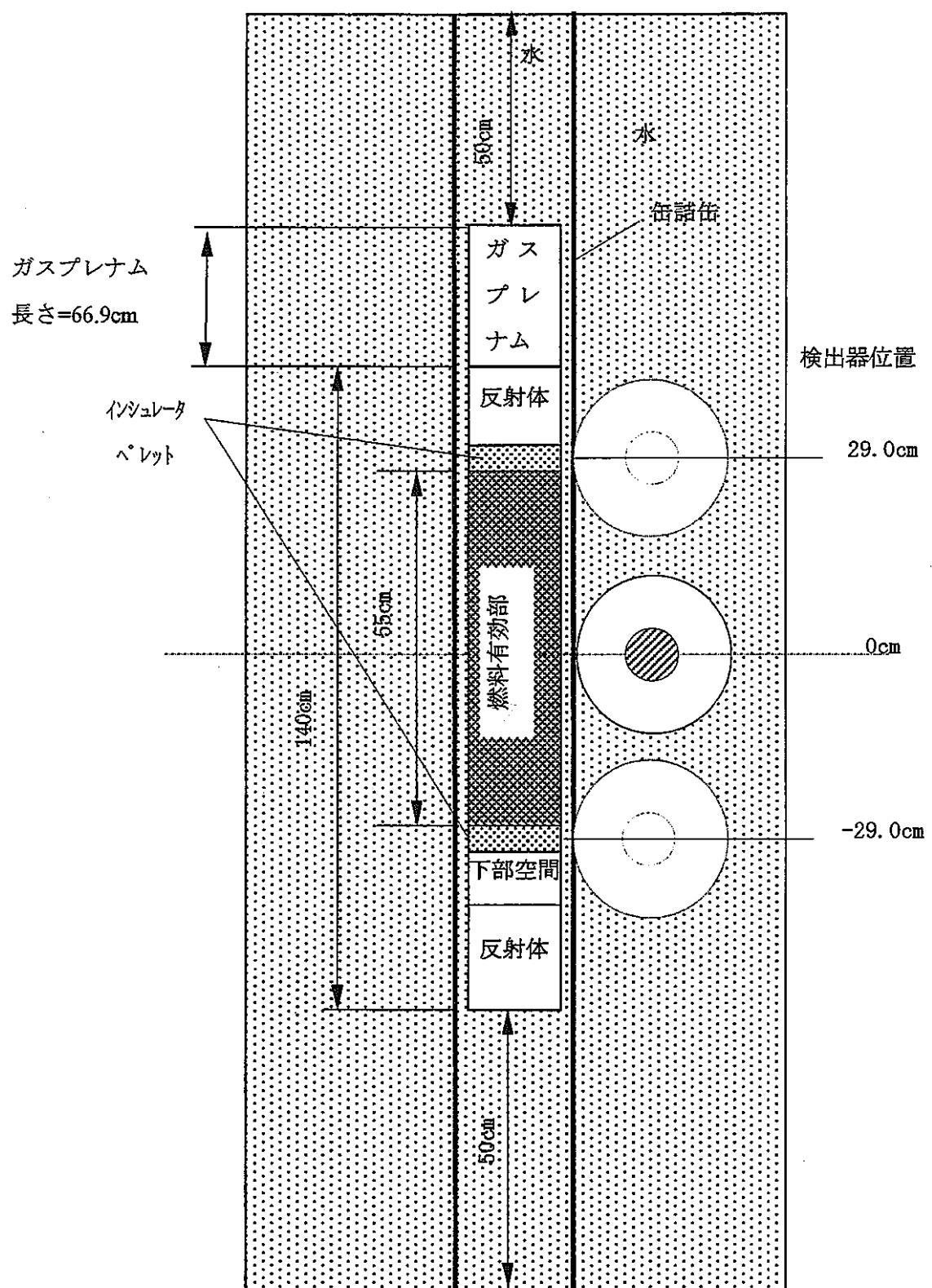
第2. 1図 軸方向ノード分割(MAGIノード分割)



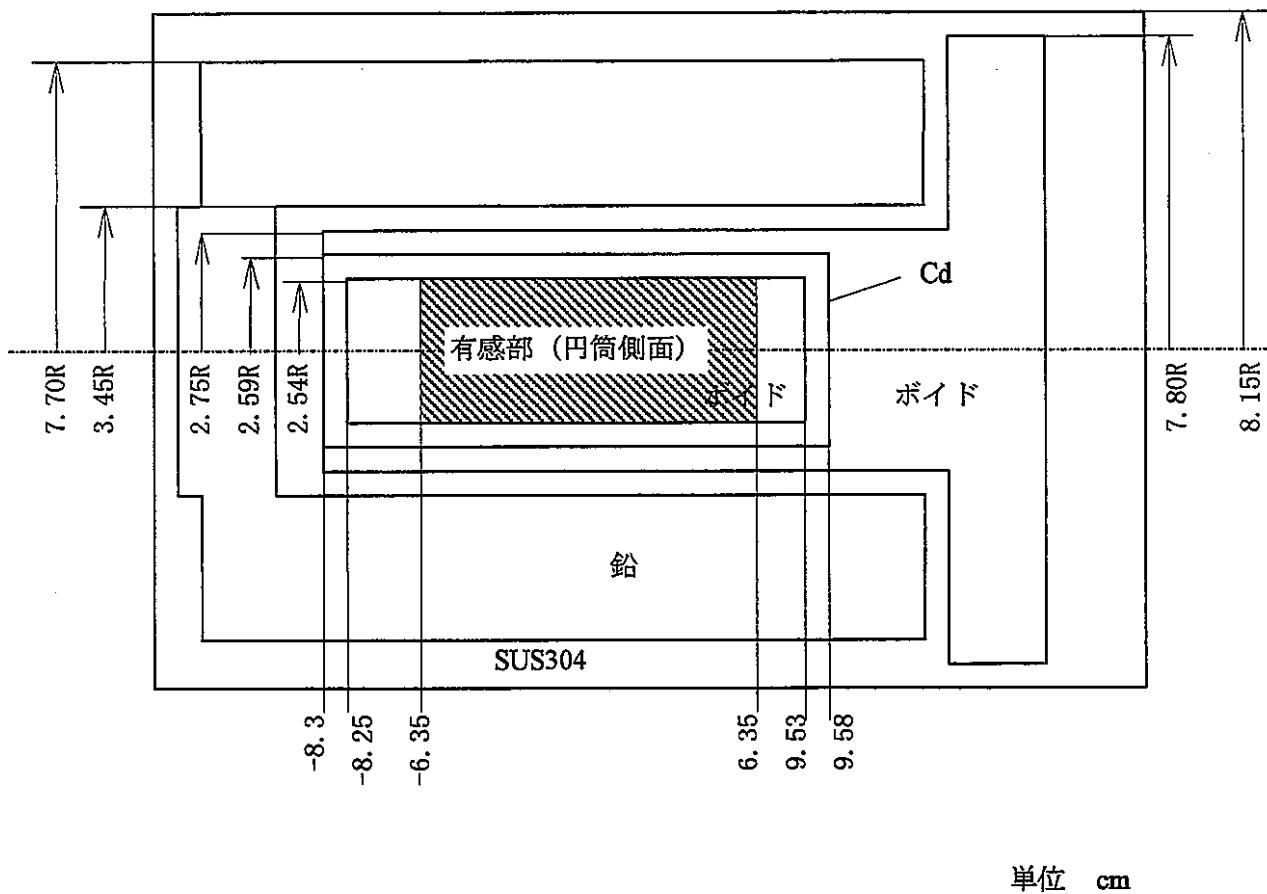
第2.2図 燃料集合体と缶詰缶のモデル（水平断面図）



第2.3図 中性子検出器応答計算モデル（水平断面図）



第2.4図 中性子検出器応答計算モデル（垂直断面図）



第2. 5図 中性子検出器の計算モデル

### 3. 中性子増倍補正係数の計算

#### 3. 1 燃焼度毎の応答マトリクスの計算結果

(2. 6) 式の左辺の燃焼度依存応答マトリクス  $m_{ij}(B)$  を中性子増倍の無い場合と比較して、第3. 1表に示す。

#### 3. 2 燃焼度毎の応答マトリクスの計算結果の比較

下記の燃焼度での応答マトリクスを計算し、その要素の  $m_{ij}^{no-fission}$  に対する比を求めた。

サイクル	燃焼度 (MWd/t)
初期	0
18	12,370
20	31,230
22	49,440
24'	62,540

上記の燃焼度における燃焼後組成のPFD327集合体を貯蔵プール内の軽水中（缶詰缶内）に置いた場合の実効増倍率の変化を第3. 1図に示す。また、炉心中心高さノードに線源を置いた場合の各ノードでの検出器応答（計数率）分布および線源の真横に検出器が有る場合の計数率分布を、増倍の無い場合と比較して第3. 2表に示す。また、増倍の無い場合の計数率とこれらの計数率との比、すなわち、(2. 6)式の補正係数を第3. 3表に示す。

#### 3. 3 計数率分布の燃焼度依存性

第3. 2図および第3. 3図には、増倍を無視した場合の計数率に対する増倍を考慮した場合の燃焼度との比を、線源の側方（つまり、同一ノード）に検出器が有る場合について、燃焼度を横軸として図示した。第3. 3図は中心ノードより上のノード、第3. 4図は下のノードを示す。燃料有効部の上端・下端付近のノードを除けば、ほぼ中性子増倍  $1/(1-k)$  に比例して計数率は変化する。上端・下端付近のノード付近では、燃焼度への依存性がほ

とんどみられなくなる。すなわち、燃焼度が高いほど相対的に燃料有効部上端・下端での計数率は大きくなり、計数率分布が平坦になる傾向が見られる。この様子を検出器ノードを横軸として、燃焼度毎の計数率分布として図示したのが第3. 4図である。ここでも、燃焼度が高くなると計数率分布は平坦化することがわかる。

第3. 5図に、中心ノードに線源が有る場合の各検出器位置ノードにおける計数率の、増倍の有無による比を、燃焼度を横軸に図示した。線源に近いノードでは、ほぼ中性子増倍 $=1/(1-k)$  ( $k$ は実効増倍率) にしたがって燃焼とともに計数率は小さくなる。これは線源の真横に検出器がある場合と同様である。線源から検出器が離れている場合は、5,000,000ヒストリーの計算を行っても数%の統計誤差があり、燃焼度による変動はこの統計誤差に隠れてしまう。ただし、これらの検出器から遠く離れた線源からの寄与が計数率に占める割合は小さいため、この統計誤差は計数率には大きな影響を与えない。したがって、線源と検出器の位置が近い場合と同様であると仮定しても問題はない。線源から検出器までの距離を横軸に計数率をプロットしたのが第3. 6図である。1ノードに線源が有る場合の計数率分布はほとんど燃焼度の影響を受けていないのがわかる。すなわち、線源－検出器間の距離と計数率との関係は、燃焼度によらず一定とすることができる。

以上をまとめると、以下の2点の結論が導かれる。

①検出器応答の燃焼度依存性は、線源が検出器の真横に有る場合の方が離れている場合よりも大きい。

②線源の真横に検出器がある場合の検出器応答は、線源が燃料有効部の上・下端に有る場合を除き、ほぼ中性子増倍 $1/(1-k)$ に比例する。線源が燃料有効部の上・下端に有る場合は燃焼度の影響を大きく受けない。

したがって、測定する燃料集合体の実効増倍率を知ることができれば、次節に示すように、検出器応答分布の燃焼度依存性の補正は可能である。

また、線源が下部インシュレータ位置（ノード16）にある時は、燃焼度が大きくなると逆に検出器応答が大きくなる。これは、インシュレータが劣化ウランであり、燃焼とともにプルトニウムが蓄積して中性子増倍が大きくなるためと考えられる。

### 3. 4 補正係数の計算

上記の燃焼度と検出器応答との関係から、次のように補正係数を求めた。

① 線源と検出器が同ノードにある場合の補正係数  $f_{ii}$

線源が燃料部両端にある場合を除き、線源の真横にある検出器の応答に関しては、次式

のように、中性子増倍 $1/(1-k)$ と比例するものとして補正係数を求める。

$$f_{ii}(B) = a \cdot M(B) + b \quad (i = ノード6,7,\dots,13,14) \quad (3.1)$$

ここで、

$M(B)$  : 燃焼度  $B$  での中性子増倍 $1/(1-k)$

$a, b$  : 比例係数と切片。PFD327に関しては、ノード6～14を最小自乗フィットして、以下の値が得られた（第3.7図）。

$$\begin{cases} a = 0.7165 \\ b = 0.345 \end{cases} \quad (\text{PFD327燃料、線源ノード6～14})$$

線源が上部インシュレータあるいは燃料両端（ノード4,5および15）に有る場合は一定値として、次の全燃焼度での平均値を用いる。

$$\begin{aligned} f_{ii}(B) &\equiv 1.115 && (\text{PFD327燃料、線源ノード4 : 上部インシュレータ}) \\ &1.302 && (\text{PFD327燃料、線源ノード5 : 燃料上端}) \\ &1.310 && (\text{PFD327燃料、線源ノード15 : 燃料下端}) \end{aligned}$$

線源が下部インシュレータペレットに有る場合は、(3.1)式の係数  $a, b$  として、最小自乗フィットにより得られた以下の値を使用する（第3.7図）。

$$\begin{cases} a = -0.6356 \\ b = 2.073 \end{cases} \quad (\text{PFD327燃料、線源ノード16 : 下部インシュレータ})$$

## ② 線源と検出器ノードが異なる場合

線源一検出器間の距離と検出器応答との関係が、ほとんど燃焼度の影響を受けないことがあり、次式により、ある燃焼度 ( $B_0$ ) での補正係数と線源の真横に検出器がある場合の補正係数  $f_{ii}$  を用いて、任意の燃焼度の補正係数を計算する。

$$f_{ij}(B) = f_{ii}(B) \frac{f_{ij}(B_0)}{f_{ii}(B_0)} \quad (3.2)$$

第3. 1表 (1/5) PFD327 (燃焼度0MWd/t)の検出器応答マトリクス

応答マトリクス [counts/sec/source neutron]

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4	7.476E-05	7.208E-05	4.779E-05	2.340E-05	1.016E-05	3.730E-06							
5	6.584E-05	8.185E-05	7.600E-05	4.828E-05	2.343E-05	1.017E-05	3.736E-06						
6	4.140E-05	7.208E-05	8.630E-05	7.677E-05	4.834E-05	2.345E-05	1.018E-05	3.737E-06					
7	2.007E-05	4.532E-05	7.600E-05	8.718E-05	7.687E-05	4.838E-05	2.349E-05	1.018E-05	3.740E-06				
8	8.699E-06	2.197E-05	4.779E-05	7.677E-05	8.729E-05	7.694E-05	4.846E-05	2.349E-05	1.019E-05	3.735E-06			
9	3.192E-06	9.523E-06	2.317E-05	4.828E-05	7.687E-05	8.737E-05	7.707E-05	4.847E-05	2.351E-05	1.018E-05	3.656E-06		
10		3.494E-06	1.004E-05	2.340E-05	4.834E-05	7.694E-05	8.751E-05	7.707E-05	4.851E-05	2.348E-05	9.964E-06	3.478E-06	
11			3.685E-06	1.014E-05	2.343E-05	4.838E-05	7.707E-05	8.752E-05	7.713E-05	4.844E-05	2.299E-05	9.479E-06	3.089E-06
12				3.722E-06	1.016E-05	2.345E-05	4.846E-05	7.707E-05	8.759E-05	7.703E-05	4.742E-05	2.187E-05	8.420E-06
13					3.727E-06	1.017E-05	2.349E-05	4.847E-05	7.713E-05	8.747E-05	7.541E-05	4.511E-05	1.942E-05
14						3.730E-06	1.018E-05	2.349E-05	4.851E-05	7.703E-05	8.564E-05	7.174E-05	4.007E-05
15							3.736E-06	1.018E-05	2.351E-05	4.844E-05	7.541E-05	8.146E-05	6.372E-05
16								3.737E-06	1.019E-05	2.348E-05	4.742E-05	7.174E-05	7.236E-05

増倍を無視した場合との比

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4	1.117	1.339	1.497	1.657	1.856	2.045							
5	1.143	1.307	1.413	1.519	1.654	1.856	2.055						
6	1.211	1.339	1.380	1.434	1.517	1.654	1.865	2.046					
7	1.321	1.418	1.413	1.400	1.432	1.516	1.662	1.857	2.040				
8	1.483	1.547	1.497	1.434	1.398	1.431	1.523	1.655	1.851	2.035			
9	1.634	1.736	1.633	1.519	1.432	1.398	1.438	1.517	1.650	1.847	2.017		
10		1.912	1.832	1.657	1.517	1.431	1.405	1.432	1.513	1.646	1.831	1.914	
11			2.019	1.859	1.654	1.516	1.438	1.399	1.428	1.509	1.632	1.737	1.661
12				2.048	1.856	1.654	1.523	1.432	1.395	1.424	1.496	1.549	1.507
13					2.045	1.856	1.662	1.517	1.428	1.391	1.412	1.420	1.343
14						2.045	1.865	1.655	1.513	1.424	1.379	1.340	1.231
15							2.055	1.857	1.650	1.509	1.412	1.309	1.162
16								2.046	1.851	1.646	1.496	1.340	1.135

第3. 1表 (2/5) PFD327 (燃焼度12,370MWd/t)の検出器応答マトリクス

応答マトリクス [counts/sec/source neutron]

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
4	7.461E-05	7.141E-05	4.722E-05	2.315E-05	1.003E-05	3.700E-06								
5	6.530E-05	8.159E-05	7.511E-05	4.779E-05	2.309E-05	1.004E-05	3.713E-06							
6	4.105E-05	7.141E-05	8.582E-05	7.603E-05	4.767E-05	2.311E-05	1.007E-05	3.708E-06						
7	1.988E-05	4.489E-05	7.511E-05	8.687E-05	7.583E-05	4.772E-05	2.319E-05	1.006E-05	3.716E-06					
8	8.633E-06	2.174E-05	4.722E-05	7.603E-05	8.664E-05	7.591E-05	4.789E-05	2.316E-05	1.008E-05	3.696E-06				
9	3.183E-06	9.441E-06	2.287E-05	4.779E-05	7.583E-05	8.674E-05	7.618E-05	4.782E-05	2.321E-05	1.003E-05	3.654E-06			
10		3.480E-06	9.931E-06	2.315E-05	4.767E-05	7.591E-05	8.705E-05	7.607E-05	4.793E-05	2.309E-05	9.912E-06	3.485E-06		
11			3.661E-06	1.005E-05	2.309E-05	4.772E-05	7.618E-05	8.691E-05	7.625E-05	4.768E-05	2.282E-05	9.453E-06	3.132E-06	
12				3.706E-06	1.003E-05	2.311E-05	4.789E-05	7.607E-05	8.712E-05	7.584E-05	4.713E-05	2.177E-05	8.496E-06	
13					3.696E-06	1.004E-05	2.319E-05	4.782E-05	7.625E-05	8.666E-05	7.497E-05	4.495E-05	1.956E-05	
14						3.700E-06	1.007E-05	2.316E-05	4.793E-05	7.584E-05	8.566E-05	7.150E-05	4.039E-05	
15							3.713E-06	1.006E-05	2.321E-05	4.768E-05	7.497E-05	8.169E-05	6.425E-05	
16								3.708E-06	1.008E-05	2.309E-05	4.713E-05	7.150E-05	7.342E-05	

増倍を無視した場合との比

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
4	1.114	1.326	1.479	1.639	1.832	2.028								
5	1.134	1.303	1.396	1.504	1.630	1.832	2.042							
6	1.201	1.326	1.372	1.420	1.496	1.630	1.844	2.030						
7	1.309	1.404	1.396	1.395	1.412	1.496	1.641	1.834	2.027					
8	1.471	1.531	1.479	1.420	1.388	1.412	1.506	1.631	1.831	2.014				
9	1.629	1.721	1.612	1.504	1.412	1.388	1.422	1.497	1.629	1.820	2.016			
10		1.905	1.812	1.639	1.496	1.412	1.397	1.413	1.495	1.619	1.821	1.918		
11			2.006	1.842	1.630	1.496	1.422	1.389	1.411	1.485	1.620	1.733	1.683	
12				2.039	1.832	1.630	1.506	1.413	1.387	1.402	1.486	1.541	1.521	
13					2.028	1.832	1.641	1.497	1.411	1.378	1.404	1.414	1.353	
14						2.028	1.844	1.631	1.495	1.402	1.379	1.335	1.241	
15							2.042	1.834	1.629	1.485	1.404	1.312	1.172	
16								2.030	1.831	1.619	1.486	1.335	1.152	

第3. 1表 (3/5) PFD327 (燃焼度31, 230MWd/t)の検出器応答マトリクス

応答マトリクス [counts/sec/source neutron]

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
4	7.446E-05	7.148E-05	4.651E-05	2.312E-05	9.861E-06	3.623E-06								
5	6.515E-05	8.169E-05	7.489E-05	4.718E-05	2.310E-05	9.826E-06	3.631E-06							
6	4.046E-05	7.148E-05	8.559E-05	7.598E-05	4.713E-05	2.302E-05	9.849E-06	3.631E-06						
7	1.983E-05	4.439E-05	7.489E-05	8.683E-05	7.590E-05	4.697E-05	2.307E-05	9.850E-06	3.623E-06					
8	8.465E-06	2.175E-05	4.651E-05	7.598E-05	8.674E-05	7.563E-05	4.707E-05	2.307E-05	9.827E-06	3.638E-06				
9	3.121E-06	9.286E-06	2.279E-05	4.718E-05	7.590E-05	8.644E-05	7.581E-05	4.708E-05	2.302E-05	9.868E-06	3.579E-06			
10		3.424E-06	9.730E-06	2.312E-05	4.713E-05	7.563E-05	8.664E-05	7.581E-05	4.697E-05	2.312E-05	9.709E-06	3.428E-06		
11			3.587E-06	9.870E-06	2.310E-05	4.697E-05	7.581E-05	8.664E-05	7.564E-05	4.717E-05	2.274E-05	9.298E-06	3.101E-06	
12				3.639E-06	9.861E-06	2.302E-05	4.707E-05	7.581E-05	8.644E-05	7.596E-05	4.641E-05	2.178E-05	8.411E-06	
13					3.635E-06	9.826E-06	2.307E-05	4.708E-05	7.564E-05	8.681E-05	7.473E-05	4.444E-05	1.970E-05	
14						3.623E-06	9.849E-06	2.307E-05	4.697E-05	7.596E-05	8.541E-05	7.157E-05	4.020E-05	
15							3.631E-06	9.850E-06	2.302E-05	4.717E-05	7.473E-05	8.179E-05	6.474E-05	
16								3.631E-06	9.827E-06	2.312E-05	4.641E-05	7.157E-05	7.399E-05	

増倍を無視した場合との比

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
4	1.112	1.327	1.456	1.637	1.802	1.986								
5	1.132	1.305	1.392	1.484	1.631	1.794	1.997							
6	1.184	1.327	1.369	1.419	1.479	1.623	1.803	1.988						
7	1.305	1.389	1.392	1.395	1.414	1.472	1.632	1.796	1.976					
8	1.443	1.531	1.456	1.419	1.389	1.407	1.480	1.625	1.785	1.983				
9	1.597	1.692	1.606	1.484	1.414	1.383	1.415	1.474	1.615	1.791	1.975			
10		1.874	1.775	1.637	1.479	1.407	1.390	1.409	1.465	1.620	1.784	1.887		
11			1.965	1.809	1.631	1.472	1.415	1.385	1.400	1.469	1.614	1.704	1.667	
12				2.003	1.802	1.623	1.480	1.409	1.376	1.405	1.464	1.542	1.506	
13					1.995	1.794	1.632	1.474	1.400	1.381	1.399	1.398	1.362	
14						1.986	1.803	1.625	1.465	1.405	1.375	1.337	1.235	
15							1.997	1.796	1.615	1.469	1.399	1.314	1.181	
16								1.988	1.785	1.620	1.464	1.337	1.161	

第3. 1表 (4/5) PFD327 (燃焼度49,440MWd/t)の検出器応答マトリクス

応答マトリクス [counts/sec/source neutron]

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
4	7.458E-05	7.196E-05	4.681E-05	2.290E-05	9.987E-06	3.848E-06								
5	6.603E-05	8.128E-05	7.509E-05	4.740E-05	2.282E-05	1.002E-05	3.847E-06							
6	4.117E-05	7.196E-05	8.482E-05	7.602E-05	4.722E-05	2.288E-05	1.001E-05	3.849E-06						
7	1.989E-05	4.486E-05	7.509E-05	8.587E-05	7.574E-05	4.736E-05	2.287E-05	1.002E-05	3.855E-06					
8	8.706E-06	2.168E-05	4.681E-05	7.602E-05	8.555E-05	7.596E-05	4.734E-05	2.289E-05	1.003E-05	3.860E-06				
9	3.345E-06	9.489E-06	2.262E-05	4.740E-05	7.574E-05	8.580E-05	7.593E-05	4.737E-05	2.292E-05	1.005E-05	3.780E-06			
10		3.646E-06	9.901E-06	2.290E-05	4.722E-05	7.596E-05	8.576E-05	7.597E-05	4.744E-05	2.295E-05	9.839E-06	3.653E-06		
11			3.804E-06	1.002E-05	2.282E-05	4.736E-05	7.593E-05	8.581E-05	7.609E-05	4.751E-05	2.248E-05	9.508E-06	3.344E-06	
12				3.851E-06	9.987E-06	2.288E-05	4.734E-05	7.597E-05	8.595E-05	7.619E-05	4.652E-05	2.172E-05	8.702E-06	
13					3.837E-06	1.002E-05	2.287E-05	4.737E-05	7.609E-05	8.607E-05	7.462E-05	4.495E-05	1.988E-05	
14						3.848E-06	1.001E-05	2.289E-05	4.744E-05	7.619E-05	8.429E-05	7.210E-05	4.115E-05	
15							3.847E-06	1.002E-05	2.292E-05	4.751E-05	7.462E-05	8.144E-05	6.600E-05	
16								3.849E-06	1.003E-05	2.295E-05	4.652E-05	7.210E-05	7.455E-05	

増倍を無視した場合との比

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
4	1.114	1.336	1.466	1.621	1.825	2.109								
5	1.147	1.298	1.396	1.491	1.611	1.828	2.115							
6	1.204	1.336	1.356	1.420	1.481	1.614	1.833	2.107						
7	1.310	1.404	1.396	1.379	1.410	1.484	1.618	1.827	2.103					
8	1.484	1.526	1.466	1.420	1.370	1.413	1.488	1.612	1.823	2.103				
9	1.712	1.729	1.594	1.491	1.410	1.373	1.417	1.483	1.609	1.823	2.086			
10		1.995	1.806	1.621	1.481	1.413	1.376	1.412	1.479	1.609	1.808	2.011		
11			2.084	1.837	1.611	1.484	1.417	1.371	1.409	1.480	1.595	1.743	1.797	
12				2.119	1.825	1.614	1.488	1.412	1.368	1.409	1.467	1.538	1.558	
13					2.106	1.828	1.618	1.483	1.409	1.369	1.397	1.415	1.375	
14						2.109	1.833	1.612	1.479	1.409	1.357	1.347	1.264	
15							2.115	1.827	1.609	1.480	1.397	1.308	1.204	
16								2.107	1.823	1.609	1.467	1.347	1.170	

第3. 1表 (5/5) PFD327 (燃焼度62, 540MWd/t)の検出器応答マトリクス

応答マトリクス [counts/sec/source neutron]

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
4	7.489E-05	7.171E-05	4.639E-05	2.237E-05	1.005E-05	3.850E-06								
5	6.607E-05	8.129E-05	7.447E-05	4.702E-05	2.199E-05	1.007E-05	3.864E-06							
6	4.116E-05	7.171E-05	8.442E-05	7.548E-05	4.621E-05	2.201E-05	1.010E-05	3.852E-06						
7	1.958E-05	4.467E-05	7.447E-05	8.556E-05	7.419E-05	4.626E-05	2.210E-05	1.007E-05	3.819E-06					
8	8.955E-06	2.126E-05	4.639E-05	7.548E-05	8.410E-05	7.427E-05	4.644E-05	2.203E-05	9.985E-06	3.868E-06				
9	3.425E-06	9.719E-06	2.207E-05	4.702E-05	7.419E-05	8.419E-05	7.455E-05	4.629E-05	2.184E-05	1.011E-05	3.826E-06			
10		3.717E-06	1.009E-05	2.237E-05	4.621E-05	7.427E-05	8.450E-05	7.432E-05	4.589E-05	2.212E-05	1.000E-05	3.722E-06		
11			3.860E-06	1.023E-05	2.199E-05	4.626E-05	7.455E-05	8.424E-05	7.367E-05	4.648E-05	2.188E-05	9.733E-06	3.416E-06	
12				3.912E-06	1.005E-05	2.201E-05	4.644E-05	7.432E-05	8.351E-05	7.462E-05	4.598E-05	2.129E-05	8.931E-06	
13					3.845E-06	1.007E-05	2.210E-05	4.629E-05	7.367E-05	8.459E-05	7.381E-05	4.473E-05	1.953E-05	
14						3.850E-06	1.010E-05	2.203E-05	4.589E-05	7.462E-05	8.367E-05	7.181E-05	4.105E-05	
15							3.864E-06	1.007E-05	2.184E-05	4.648E-05	7.381E-05	8.140E-05	6.590E-05	
16								3.852E-06	9.985E-06	2.212E-05	4.598E-05	7.181E-05	7.470E-05	

増倍を無視した場合との比

検出器位置 [ノード]	線源位置 [ノード]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
4	1.119	1.332	1.453	1.584	1.837	2.110								
5	1.147	1.298	1.384	1.479	1.553	1.838	2.125							
6	1.204	1.332	1.350	1.410	1.450	1.553	1.850	2.109						
7	1.289	1.397	1.384	1.374	1.382	1.450	1.563	1.837	2.083					
8	1.526	1.496	1.453	1.410	1.347	1.382	1.460	1.552	1.814	2.108				
9	1.753	1.771	1.556	1.479	1.382	1.347	1.391	1.449	1.532	1.835	2.111			
10		2.034	1.841	1.584	1.450	1.382	1.356	1.381	1.431	1.551	1.838	2.049		
11			2.115	1.875	1.553	1.450	1.391	1.346	1.364	1.448	1.553	1.784	1.836	
12				2.153	1.837	1.553	1.460	1.381	1.330	1.380	1.450	1.507	1.599	
13					2.110	1.838	1.563	1.449	1.364	1.345	1.382	1.408	1.351	
14						2.110	1.850	1.552	1.431	1.380	1.347	1.341	1.261	
15							2.125	1.837	1.532	1.448	1.382	1.308	1.202	
16								2.109	1.814	1.551	1.450	1.341	1.172	

第3. 2表 中性子増倍を無視した場合と燃焼度毎に考慮した場合の検出器応答の比較

線源 ノード*	検出器 ノード*	検出器応答 : 計数率(/source neutron)							備考
		初期	サイクル18	サイクル20	サイクル22	サイクル24*	増倍なし		
10	10	5.12E-02 ± 0.9%	5.09E-02 ± 0.9%	5.07E-02 ± 0.9%	5.02E-02 ± 0.9%	4.94E-02 ± 0.9%	3.64E-02 ± 1.1%	燃料中心高さ	
10	11	4.51E-02 ± 1.0%	4.46E-02 ± 1.0%	4.43E-02 ± 1.0%	4.44E-02 ± 1.0%	4.36E-02 ± 1.0%	3.13E-02 ± 1.2%		
10	12	2.83E-02 ± 1.2%	2.80E-02 ± 1.2%	2.75E-02 ± 1.2%	2.77E-02 ± 1.2%	2.72E-02 ± 1.2%	1.86E-02 ± 1.5%		
10	13	1.37E-02 ± 1.8%	1.36E-02 ± 1.8%	1.35E-02 ± 1.8%	1.34E-02 ± 1.8%	1.29E-02 ± 1.9%	8.27E-03 ± 2.4%		
10	14	5.96E-03 ± 2.8%	5.89E-03 ± 2.8%	5.76E-03 ± 2.8%	5.86E-03 ± 2.8%	5.91E-03 ± 2.8%	3.19E-03 ± 4.2%		
10	15	2.19E-03 ± 4.4%	2.17E-03 ± 4.6%	2.12E-03 ± 4.2%	2.25E-03 ± 4.2%	2.26E-03 ± 4.3%	1.06E-03 ± 7.9%	燃料下端	
4	4	4.37E-02 ± 1.0%	4.36E-02 ± 1.0%	4.36E-02 ± 1.0%	4.36E-02 ± 1.0%	4.38E-02 ± 1.0%	3.92E-02 ± 1.1%	上部インシレータ	
5	5	4.79E-02 ± 0.9%	4.77E-02 ± 0.9%	4.78E-02 ± 0.9%	4.75E-02 ± 0.9%	4.75E-02 ± 1.0%	3.66E-02 ± 1.1%	燃料上端	
6	6	5.05E-02 ± 0.9%	5.02E-02 ± 0.9%	5.01E-02 ± 0.9%	4.96E-02 ± 0.9%	4.94E-02 ± 0.9%	3.66E-02 ± 1.1%		
7	7	5.10E-02 ± 0.9%	5.08E-02 ± 0.9%	5.08E-02 ± 0.9%	5.02E-02 ± 0.9%	5.00E-02 ± 0.9%	3.64E-02 ± 1.1%		
8	8	5.11E-02 ± 0.9%	5.07E-02 ± 0.9%	5.07E-02 ± 0.9%	5.00E-02 ± 0.9%	4.92E-02 ± 0.9%	3.65E-02 ± 1.1%		
9	9	5.11E-02 ± 0.9%	5.07E-02 ± 0.9%	5.06E-02 ± 0.9%	5.02E-02 ± 0.9%	4.92E-02 ± 0.9%	3.66E-02 ± 1.1%		
10	10	5.12E-02 ± 0.9%	5.09E-02 ± 0.9%	5.07E-02 ± 0.9%	5.02E-02 ± 0.9%	4.94E-02 ± 0.9%	3.64E-02 ± 1.1%	燃料中心高さ	
11	11	5.12E-02 ± 0.9%	5.08E-02 ± 0.9%	5.07E-02 ± 0.9%	5.02E-02 ± 0.9%	4.93E-02 ± 0.9%	3.66E-02 ± 1.1%		
12	12	5.12E-02 ± 0.9%	5.10E-02 ± 0.9%	5.06E-02 ± 0.9%	5.03E-02 ± 0.9%	4.88E-02 ± 0.9%	3.67E-02 ± 1.1%		
13	13	5.12E-02 ± 0.9%	5.07E-02 ± 0.9%	5.08E-02 ± 0.9%	5.03E-02 ± 0.9%	4.95E-02 ± 0.9%	3.68E-02 ± 1.1%		
14	14	5.01E-02 ± 0.9%	5.01E-02 ± 0.9%	5.00E-02 ± 0.9%	4.93E-02 ± 0.9%	4.89E-02 ± 0.9%	3.63E-02 ± 1.1%		
15	15	4.76E-02 ± 1.0%	4.78E-02 ± 1.0%	4.78E-02 ± 1.0%	4.76E-02 ± 1.0%	4.76E-02 ± 0.9%	3.64E-02 ± 1.1%	燃料下端	
16	16	4.23E-02 ± 1.0%	4.29E-02 ± 1.0%	4.33E-02 ± 1.0%	4.36E-02 ± 1.0%	4.37E-02 ± 1.0%	3.73E-02 ± 1.1%	下部インシレータ	

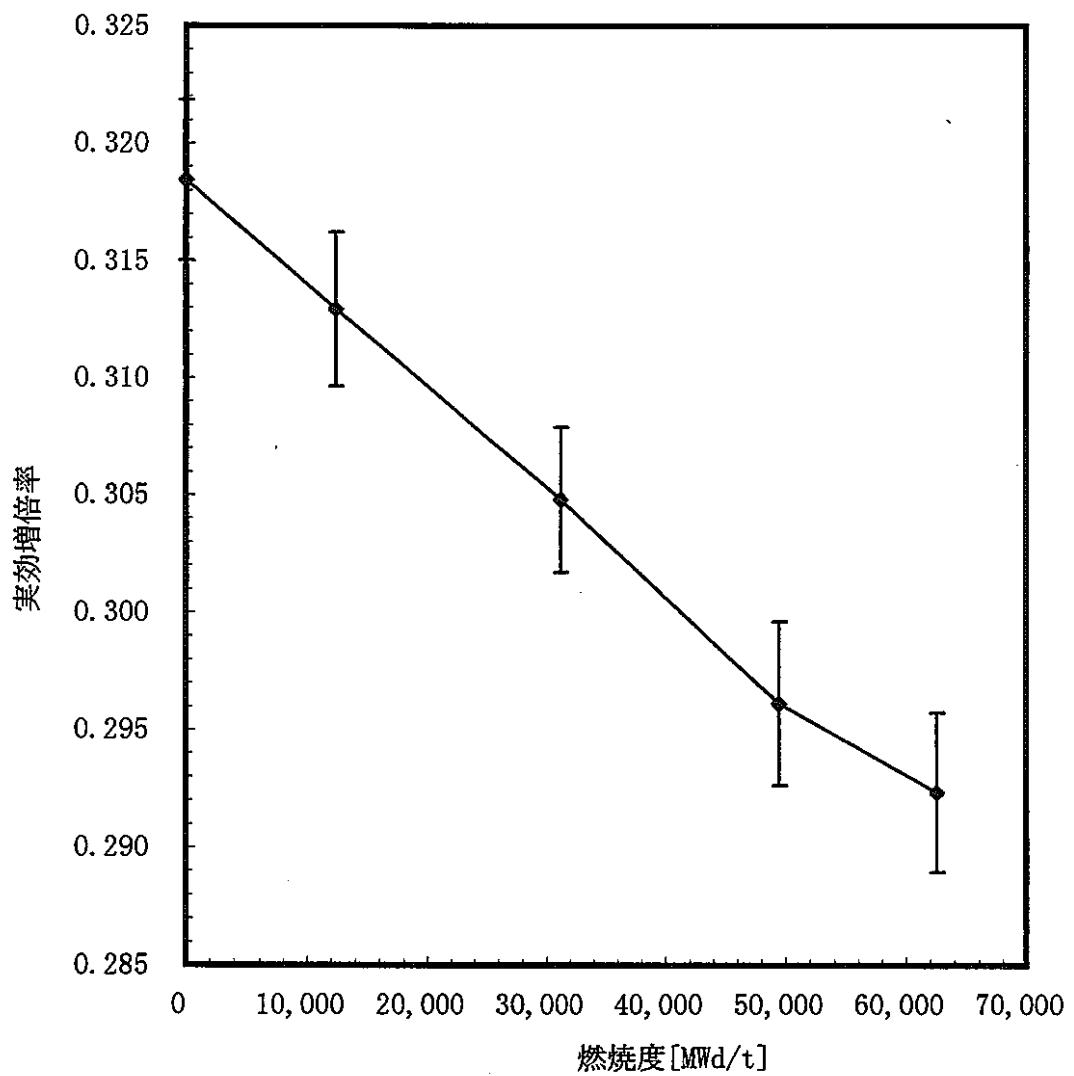
\* 第2. 1図参照

第3. 3表 中性子増倍を無視した場合と燃焼度毎に増倍を考慮した場合との計数率の比（補正係数）の計算結果

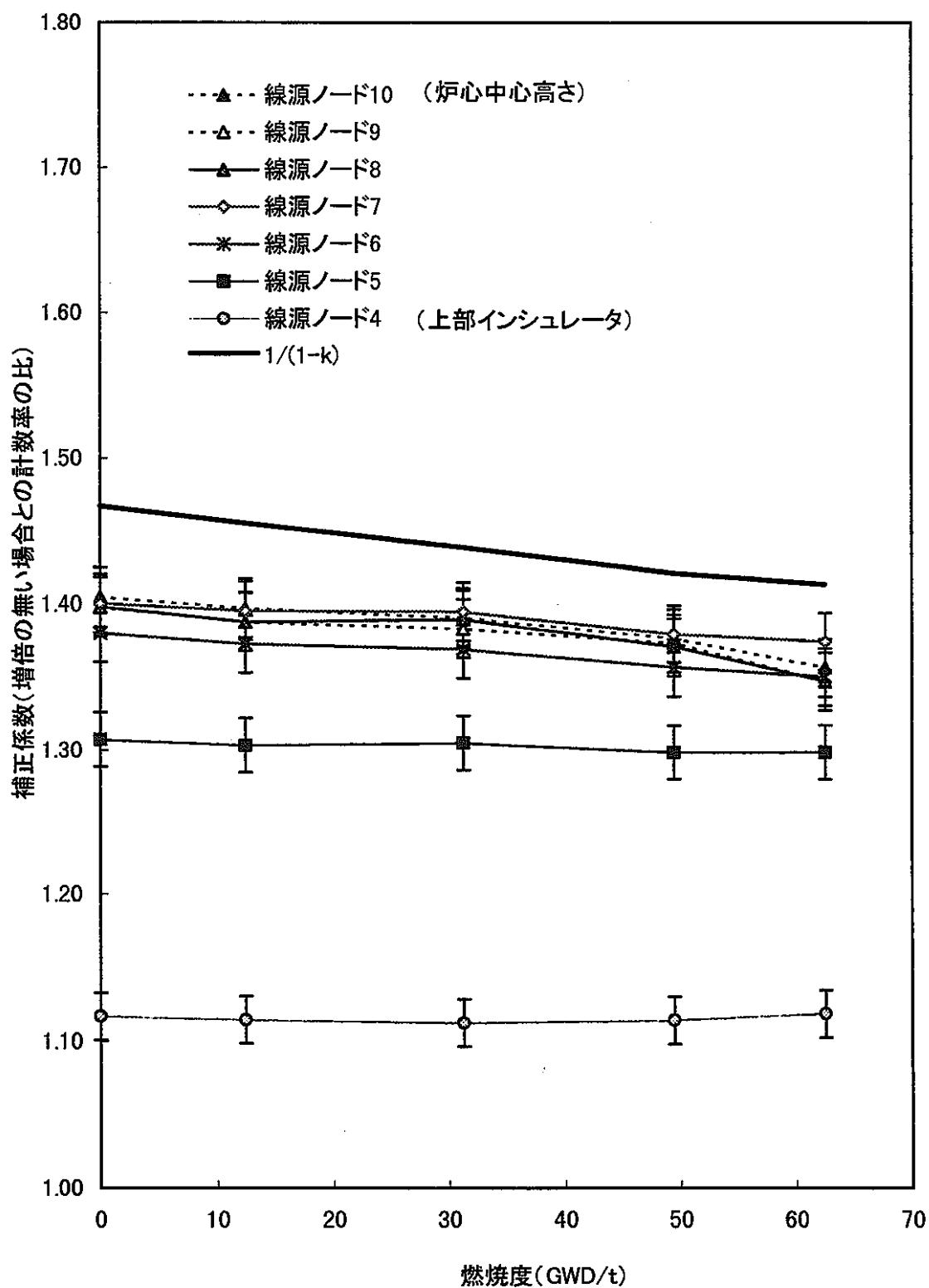
線源 ノード*	検出器 ノード*	初期	増倍なしとの比（補正係数）						備考
			サイクル18	サイクル20	サイクル22	サイクル24'			
10	10	1.40 ± 1.4%	1.40 ± 1.4%	1.39 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.36 ± 1.4%			
10	11	1.44 ± 1.5%	1.42 ± 1.5%	1.41 ± 1.5%	1.42 ± 1.6%	1.39 ± 1.5%			
10	12	1.52 ± 2.0%	1.51 ± 2.0%	1.48 ± 2.0%	1.49 ± 2.0%	1.46 ± 2.0%			燃料中心高さの線源
10	13	1.66 ± 3.0%	1.64 ± 3.0%	1.63 ± 3.0%	1.62 ± 3.0%	1.56 ± 3.1%			からの検出器応答
10	14	1.86 ± 5.0%	1.84 ± 5.0%	1.80 ± 5.0%	1.83 ± 5.0%	1.85 ± 5.0%			
10	15	2.05 ± 9.1%	2.04 ± 9.2%	2.00 ± 9.0%	2.12 ± 9.0%	2.12 ± 9.0%			
4	4	1.12 ± 1.5%	1.11 ± 1.5%	1.11 ± 1.5%	1.11 ± 1.5%	1.12 ± 1.5%			上部インシュレータ
5	5	1.31 ± 1.4%	1.30 ± 1.4%	1.30 ± 1.4%	1.30 ± 1.4%	1.30 ± 1.5%			燃料上端
6	6	1.38 ± 1.4%	1.37 ± 1.4%	1.37 ± 1.4%	1.36 ± 1.4%	1.35 ± 1.4%			
7	7	1.40 ± 1.4%	1.40 ± 1.4%	1.39 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.37 ± 1.4%			
8	8	1.40 ± 1.4%	1.39 ± 1.4%	1.39 ± 1.4%	1.37 ± 1.4%	1.35 ± 1.4%			
9	9	1.40 ± 1.4%	1.39 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.37 ± 1.4%	1.35 ± 1.4%			
10	10	1.40 ± 1.4%	1.40 ± 1.4%	1.39 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.36 ± 1.4%			燃料中心高さ
11	11	1.40 ± 1.4%	1.39 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.37 ± 1.4%	1.35 ± 1.4%			
12	12	1.39 ± 1.4%	1.39 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.37 ± 1.4%	1.33 ± 1.4%			
13	13	1.39 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.37 ± 1.5%	1.35 ± 1.4%			
14	14	1.38 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.38 ± 1.4%	1.36 ± 1.4%	1.35 ± 1.4%			
15	15	1.31 ± 1.5%	1.31 ± 1.5%	1.31 ± 1.5%	1.31 ± 1.5%	1.31 ± 1.5%			燃料下端
16	16	1.14 ± 1.5%	1.15 ± 1.5%	1.16 ± 1.5%	1.17 ± 1.5%	1.17 ± 1.5%			下部インシュレータ

\* 第2. 1図参照

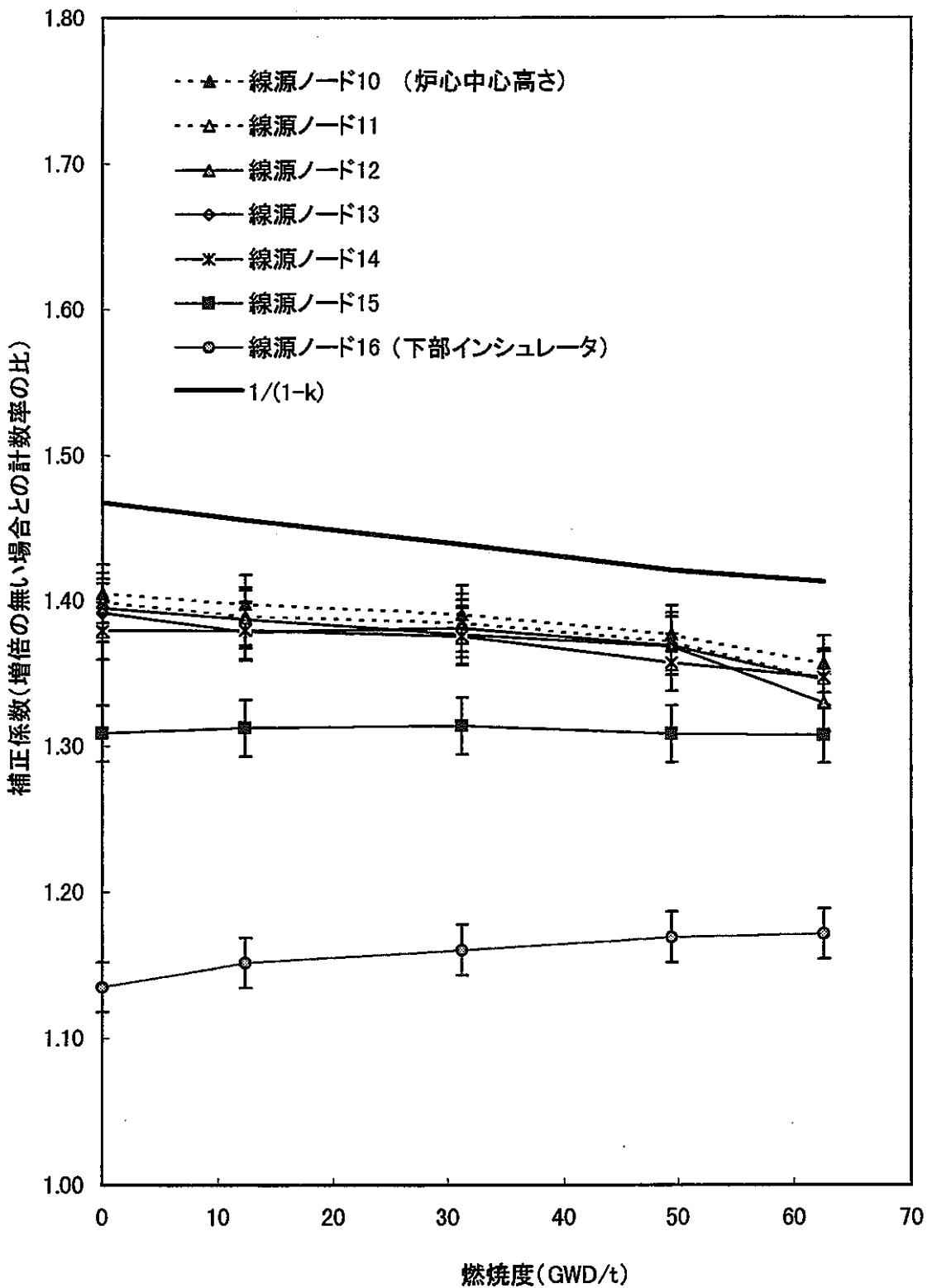
サイクル	燃焼度 (MWd/t)	実効増倍率±1 $\sigma$	中性子増倍 1/(1-k)
初期	0	0.3184 ± 0.003	1.467
18	12,370	0.3129 ± 0.003	1.455
20	31,230	0.3048 ± 0.003	1.438
22	49,440	0.2961 ± 0.004	1.421
30	62,540	0.2923 ± 0.003	1.413



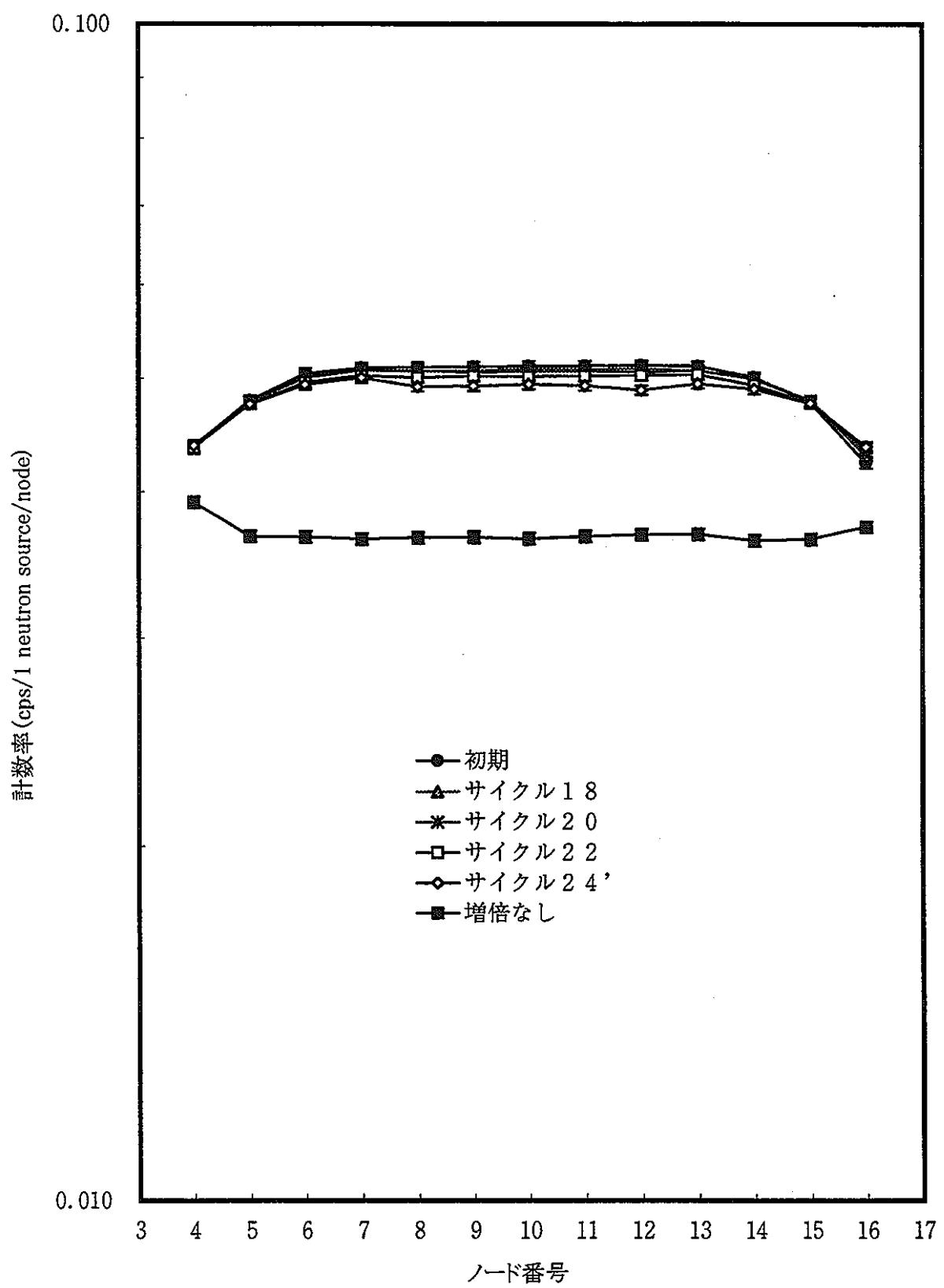
第3.1図 PFD327燃料集合体1体を缶詰缶内（水中）に置いた場合の実効増倍率の燃焼度依存性



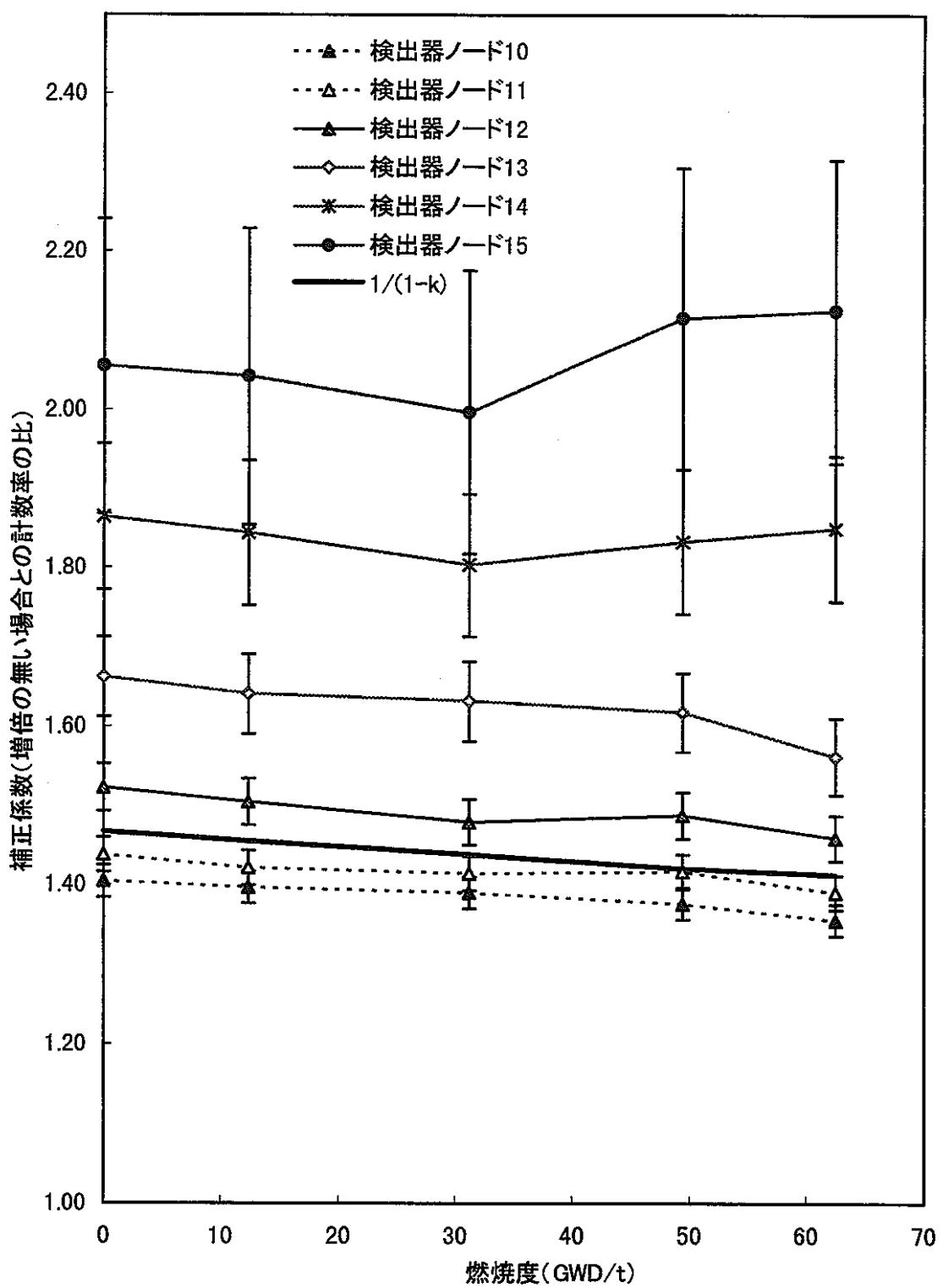
第3.2図 増倍を無視した場合の計数率に対する増倍を考慮した計数率の比と燃焼度との関係  
(各線源ノードの側方のノードに検出器が有る場合の上方ノードでの計数率)



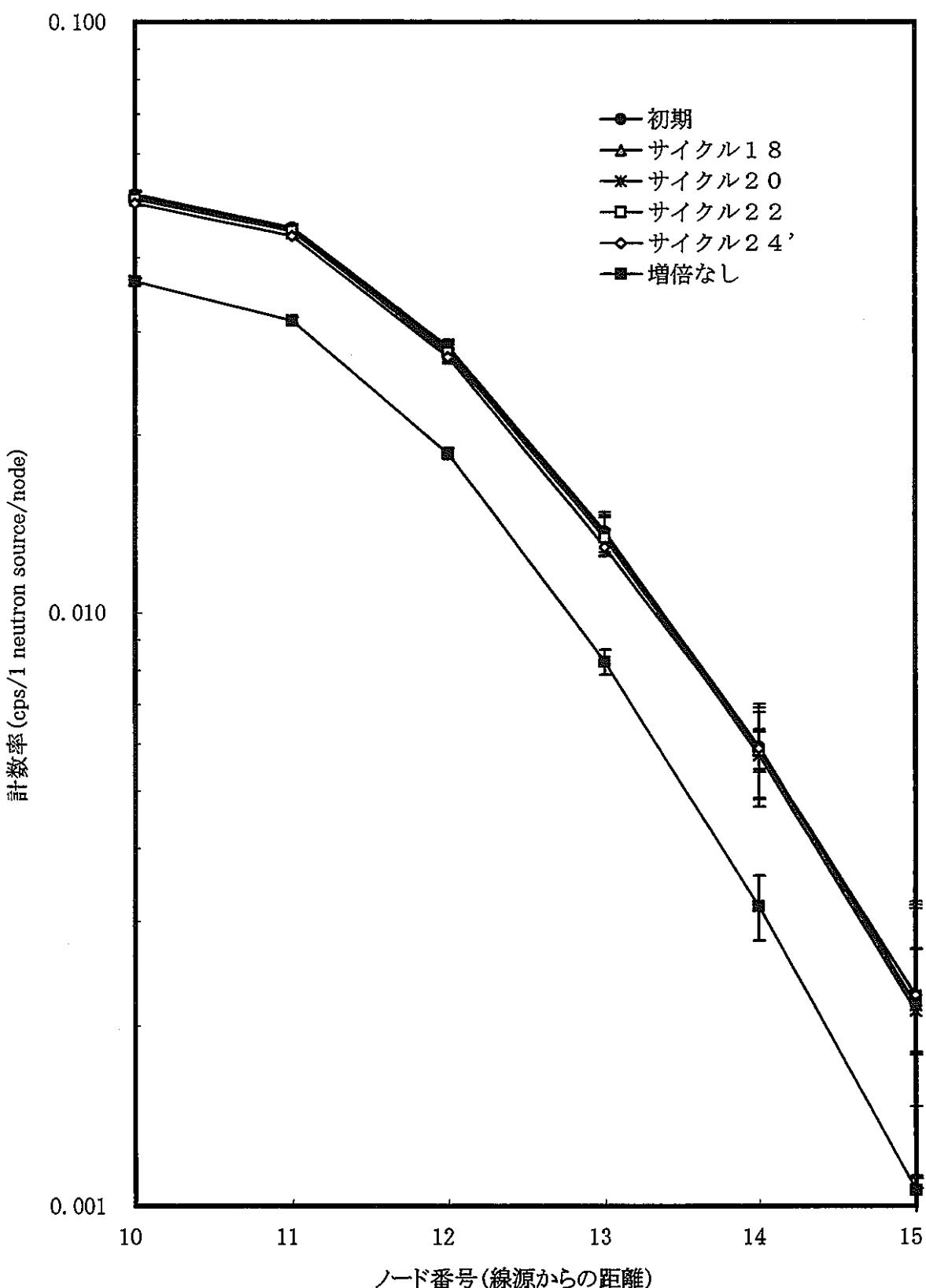
第3.3図 増倍を無視した場合の計数率に対する増倍を考慮した計数率の比と燃焼度との関係  
(各線源ノードの側方のノードに検出器が有る場合の下方ノードでの計数率)



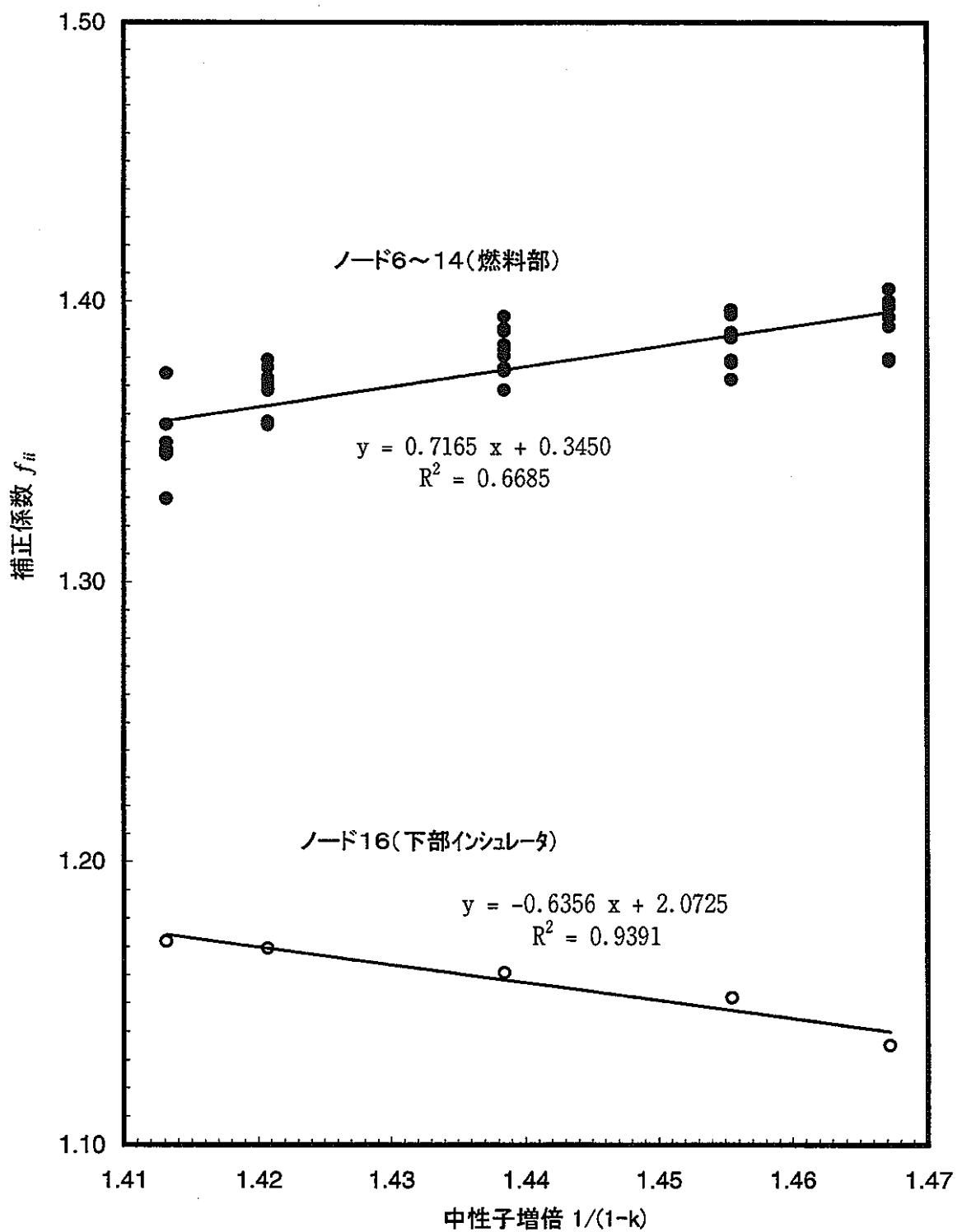
第3、4図 燃焼度毎の線源の側方位置での計数率分布



第3.5図 増倍を無視した場合の計数率に対する増倍を考慮した計数率の比と燃焼度との関係  
(ノードに10に線源が有る場合の各ノードでの計数率)



第3.6図 線源からの距離と計数率との関係の燃焼度依存性  
(中心高さノードに単位強度の線源が有る場合の上方各ノード位置での計数率)



第3. 7図 中性子増倍と補正係数との関係

## 4. その他の検討

応答マトリクスの計算に関して、ガスプレナムのモデル化およびF P核種の考慮の有無の影響を調べた。

### 4. 1 ガスプレナムの影響

前年度の計算では、第2. 4図の燃料集合体上部のガスプレナムは無視して計算を行っていた。このとき、ガスプレナム部分は水に置き換えられるが、実際にはガスプレナム内部はガスが充填されており、ほとんどボイドと見なせるため、ここからの中性子の漏れを過小評価している可能性がある。この点を確認するために、前年度にPFD327について計算を行った結果と、これに第2. 4図に示したガスプレナムを加えた場合との比較行った。

第4. 1図および第4. 1表に、燃料中心高さのノードに線源を置いた場合の検出器応答分布を比較して示す。ガスプレナムを考慮したモデルでは、線源から下方および上方（ガスプレナムの存在する方向）の分布を計算し、その違いを調べた。その結果、以下のことがわかった。

① ガスプレナムを考慮したモデルでも、ガスプレナムを無視したモデルと同様に、検出器応答分布は線源に対して上下対称である。

② ガスプレナムを考慮することにより検出器応答（計数率）の絶対値は小さくなるが、相対値（計数率分布）は影響を受けない。

③は、ガスプレナムからの中性子漏洩により実効増倍率が小さくなり、中性子増倍成分が減少したことによる。この結果、計数率は減るもの、その影響は燃料全体での中性子増倍に影響を与えるため、計数率分布は大きく変化しない。すなわち、ガスプレナムの有無は、計数率の絶対値には影響するが、その軸方向分布には影響しないこととなる。

### 4. 2 F P核種の吸収の影響

応答マトリクスの計算ではMAGIで扱われているランプ化F Pを全く無視している。これは、適当なMCNP用のランプ化F P断面積が存在しないためであるが、F P核種の中性子吸収の影響は実効増倍率、すなわち、中性子増倍の変化により検出器応答に大きく影響する可能性がある。そこで、次の手順で、F P核種の影響を調べることとした。

①高速炉（ここではFFTF用1群断面積を使用）中の1群断面積を使用してORIGEN2で計算されたPFD327の燃焼後組成と、ORIGEN2の熱中性子1群断面積を乗じることにより、熱中性子吸収に対する各F P核種の寄与を求める。

②寄与の大きいF P核種のうち、MCNP用断面積(FSXLIB-J3R2)に含まれる核種を、①でORIGEN2で計算された組成で燃料に含めて、実効増倍率に与える影響を調べる。

ORIGEN 2によるPFD327の燃焼計算は第 4. 2 表に示す燃焼履歴で行った。この結果、第 4. 3 表に示す 20 核種（熱中性子吸収への寄与 0.05% 以上）で約 99.5% を占めることが判った。このうち、FSXLIB-J3R2 ライブラリーに含まれない 4 核種を除いてもその寄与は約 98.3% を占める。そこで、冷却年数 2 年でのこれらの原子個数の割合を MAGI で計算されたランプ化 F P の個数密度に乘じて集合体各ノードでのこれら 16 核種の組成を求めた。これを使用済燃料に混ぜ合わせた場合の計算を行った結果、以下のとおり、約 6%  $\Delta k$  も実効増倍率が小さくなった。

F P核種を無視 :  $0.2923 \pm 0.0034$  :  $1/(1-k)=1.41$

16核種のF Pを考慮 :  $0.2361 \pm 0.0030$  :  $1/(1-k)=1.31$

これは中性子増倍:  $1/(1-k)$  が、F P核種を考慮することにより、約 8 % 程度小さくなることを示す。今後、検出器応答に対する F P核種の影響を燃焼度毎に調べて、第 3 章で述べた F P核種を無視して求めた燃焼度補正係数について再検討しなければならない。

第4. 1表 ガスプレナムの影響

計数率 (counts/source neutron)			
中心ノード からの距離 (cm)	ガスプレナム無し (下方向)	ガスプレナム有り (下方向)	ガスプレナム有り (上方向)
0	5.60E-02 ± 0.850%	5.02E-02 ± 0.920%	5.02E-02 ± 0.920%
5	4.95E-02 ± 0.910%	4.44E-02 ± 1.000%	4.32E-02 ± 0.980%
10	3.17E-02 ± 1.120%	2.75E-02 ± 1.220%	2.70E-02 ± 1.280%
15	1.62E-02 ± 1.550%	1.32E-02 ± 1.830%	1.35E-02 ± 1.820%
20	7.65E-03 ± 2.320%	5.48E-03 ± 2.780%	5.63E-03 ± 2.800%
25	3.29E-03 ± 3.640%	2.15E-03 ± 4.620%	2.10E-03 ± 4.900%

ガスプレナム無しの場合との比		
中心ノード からの距離 (cm)	ガスプレナム有り (下方向)	ガスプレナム有り (上方向)
0	0.896	0.896
5	0.897	0.872
10	0.868	0.852
15	0.817	0.837
20	0.716	0.736
25	0.655	0.640

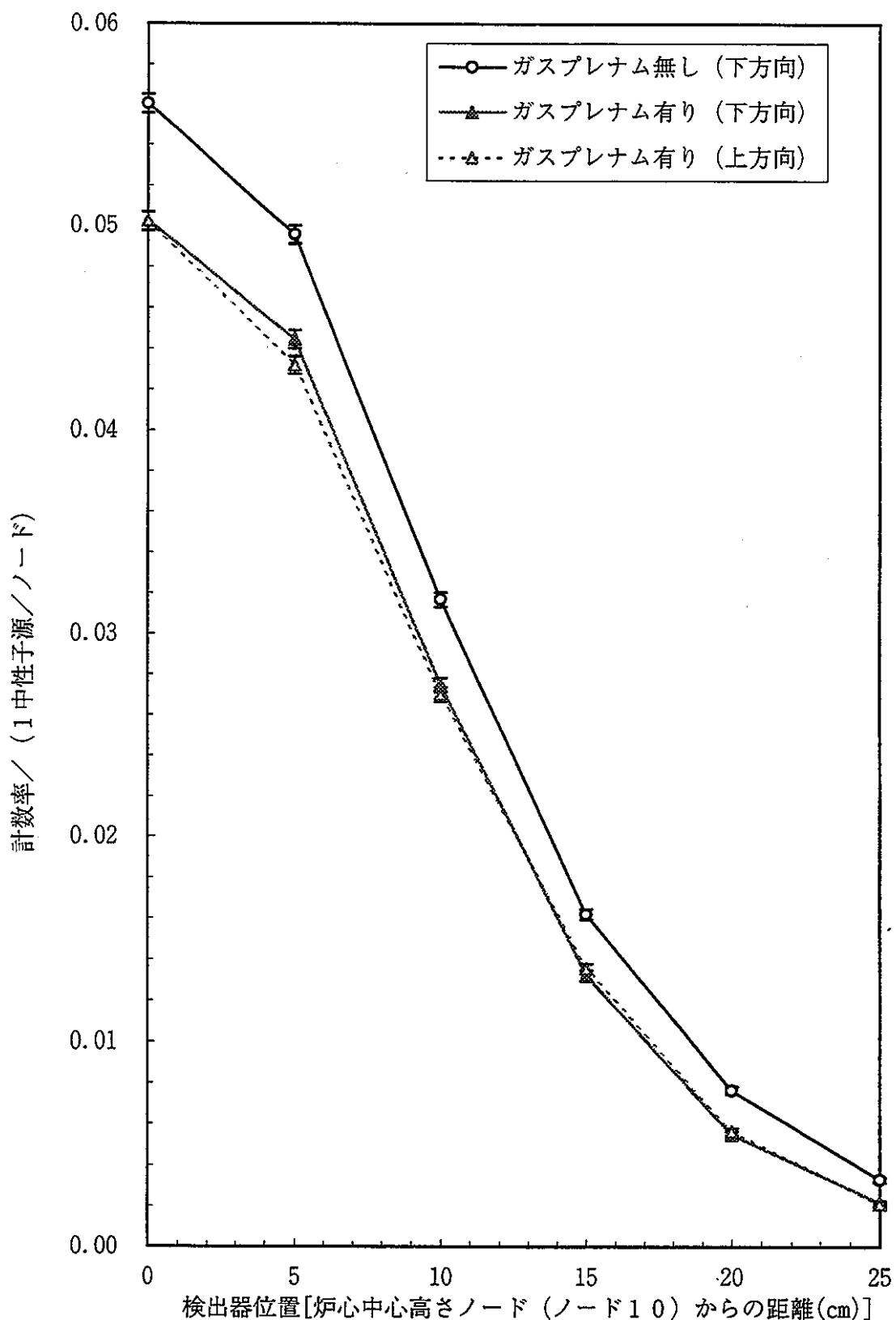
第4.2表 ORIGEN2燃焼計算に用いたPFD327の照射履歴

サイクル	期間(日)	積算日	照射中性子束 (n/cm <sup>2</sup> /sec.)	備考
18	68.4	68.4	3.321E+15	
	27.0	95.4	0	炉停止
19	68.7	164.1	3.286E+15	
	27.0	191.1	0	炉停止
20	40.0	231.0	3.346E+15	
	13.0	244.0	0	炉停止
20'	3.7	247.7	1.643E+20	
	227.0	474.7	0	炉停止
21	68.8	543.6	2.543E+15	
	34.0	577.6	0	炉停止
22	68.7	646.3	2.523E+15	
	33.0	679.3	0	炉停止
23	52.8	732.1	2.557E+15	
	86.2	818.4	0	炉停止
23'''	7.2	825.6	2.579E+15	
	186.0	1011.6	0	炉停止
24	41.5	1053.1	2.412E+15	

第4. 3表 PFD327燃料集合体(燃焼度62, 540MWd/t)中のF P核種の中性子吸収への寄与割合

核種	冷却年数					FSXLIB-J3R2
	0 days	1-year	2-years	5-years	10-years	
GD157	78.95%	79.14%	79.16%	79.10%	78.92%	○
SM149	10.80%	10.71%	10.62%	10.48%	10.40%	○
CD113	4.93%	4.97%	5.02%	5.19%	5.43%	○
SM151	0.74%	0.73%	0.72%	0.69%	0.66%	○
DY161	0.62%	0.62%	0.63%	0.63%	0.63%	×
EU153	0.61%	0.62%	0.63%	0.65%	0.68%	○
IN115	0.46%	0.46%	0.46%	0.45%	0.44%	○
PM147	0.37%	0.37%	0.37%	0.37%	0.37%	○
EU155	0.41%	0.37%	0.32%	0.22%	0.11%	○
RH103	0.28%	0.28%	0.28%	0.28%	0.28%	○
GD155	0.18%	0.26%	0.32%	0.46%	0.60%	○
TM169	0.24%	0.25%	0.25%	0.26%	0.26%	×
AG109	0.20%	0.20%	0.20%	0.21%	0.21%	○
EU154	0.16%	0.15%	0.14%	0.11%	0.08%	○
H0165	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	×
SM152	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%	○
TB159	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%	○
ER166	0.05%	0.05%	0.05%	0.06%	0.06%	×
SM150	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	○
計	99.3%	99.5%	99.5%	99.4%	99.4%	
FSXLIB-J3R2に含まれる核種の計	98.3%	98.4%	98.4%	98.4%	98.3%	○：あり ×：なし

核種	冷却年数				
	0 days	1-year	2-years	5-years	10-years
GD157	9.535E-03	9.948E-03	9.935E-03	9.894E-03	9.850E-03
SM149	3.005E-03	3.100E-03	3.072E-03	3.019E-03	2.990E-03
CD113	2.372E-03	2.490E-03	2.511E-03	2.584E-03	2.699E-03
SM151	1.138E-03	1.165E-03	1.145E-03	1.099E-03	1.048E-03
DY161					
EU153	2.541E-02	2.697E-02	2.734E-02	2.824E-02	2.926E-02
IN115	2.203E-02	2.286E-02	2.269E-02	2.224E-02	2.166E-02
PM147	2.837E-02	2.997E-02	2.999E-02	2.998E-02	2.994E-02
EU155	2.089E-03	1.928E-03	1.699E-03	1.155E-03	5.951E-04
RH103	2.010E-02	2.103E-02	2.104E-02	2.104E-02	2.104E-02
GD155	9.359E-05	1.352E-04	1.677E-04	2.412E-04	3.116E-04
TM169					
AG109	2.076E-02	2.205E-02	2.219E-02	2.226E-02	2.226E-02
EU154	2.369E-03	2.321E-03	2.170E-03	1.761E-03	1.219E-03
H0165					
SM152	4.547E-03	4.690E-03	4.646E-03	4.566E-03	4.523E-03
TB159	3.079E-02	3.245E-02	3.246E-02	3.247E-02	3.247E-02
ER166					
SM150	8.674E-03	8.945E-03	8.861E-03	8.711E-03	8.628E-03
total	1.813E-01	1.901E-01	1.899E-01	1.893E-01	1.885E-01



第4. 1図 検出器応答分布へのガスプレナムのモデル化の影響  
 下方：ノード10からノード11、12、13、14、15への方向  
 上方：ノード10からノード9、8、7、6、5への方向

## 5. まとめ

燃料貯蔵プール内に設置された中性子検出器の応答が、測定される燃料による中性子増倍から受ける影響を、燃料の燃焼度をパラメータとした計算により評価した。

これらの計算の結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 検出器応答の燃焼度依存性は、線源が検出器の真横に有る場合の方が離れている場合よりも大きい。
- ② 線源の真横に検出器がある場合の検出器応答は、線源が燃料有効部の上・下端に有る場合を除き、ほぼ中性子増倍 $1/(1-k)$ に比例する。線源が燃料有効部の上・下端に有る場合は燃焼度の影響を大きくは受けない。

上記の検討から、ある燃焼度の使用済燃料について求められた検出器応答に対して、

- ・線源と検出器が近い場合は検出器応答を、中性子増倍 $1/(1-k)$ の線形関数として補正する、
- ・線源と検出器の位置が遠い場合は、補正を行わない、

ことにより、任意の燃焼度の検出器応答が求められることがわかった。

また、ガスプレナムのモデル化の影響と燃料中のFP核種の影響を評価した。ガスプレナムの影響は系の実効増倍率を小さくして中性子増倍の寄与を減らす。ただし、検出器応答分布には大きな影響を与えないことがわかった。また、FP核種は、主にその中性子吸収により、燃焼度62,540MWd/tの使用済燃料において、約6%△kもの反応度効果があり、中性子増倍に大きな影響を及ぼすことがわかった。したがって、FP核種の検出器応答への影響については、さらに詳細な検討が必要である。

## 参考文献

- [1] J.F.Briesmeister Ed., "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A," LA-12625-M, (1993)
- [2] A.G.Croff, "A Users Manual for the ORIGEN2 Computer Code," ORNL/TM-7175,(1980)
- [3] 小迫和明、他、「JENDL3.2に基づいたMCNP用連続エネルギー断面積ライブラリ」  
JAERI-DATA-CODE-94-20,(1994)