

JAERI-Research

95-003



FCA XVII-1炉心における B_4C 及び
Pu反応度値の軸方向空間分布の解析

1995年1月

長家康展・大野秋男・大杉俊隆

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

F C A XVII-1 炉心における B_4C 及びPu反応度値の
軸方向空間分布の解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

長家 康展・大野 秋男・大杉 俊隆

(1995年1月5日受理)

高速炉における物質反応度値の予測精度向上を目的として、高速炉臨界実験装置（F C A）を用いて B_4C 及びPu反応度値の軸方向空間分布を測定し、その解析を行った。測定に用いられた炉心はXVII-1 炉心で、典型的な酸化物燃料炉心である。

実験ではこの炉心の中心軸方向にサンプルを挿入して余剰反応度を測定し、サンプルを挿入していないときの余剰反応度との差から反応度値を求めた。解析はいくつかの計算モデルを用いて行い、その結果を比較した。更に DUO_2 燃料板のコーティング剤に含まれている水素の影響、炉心間ギャップの影響、輸送効果及びメッシュ効果を調べ、それらの影響を補正した計算値を実験値と比較した。

B_4C 及びPuの場合とも、炉心領域ではよい精度で計算値は実験値と一致するが、ブランケット領域では測定方法及び計算精度改善について検討する必要があることが明らかになった。

Analysis of Axial Distribution of B₄C and Pu Sample Worths in FCA Assembly XVII-1

Yasunobu NAGAYA, Akio OHNO and Toshitaka OSUGI

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1995)

In order to improve the material sample worth analysis the spatial dependence of B₄C and Pu sample worths was investigated in FCA assembly XVII-1 which was a typical MOX-fueled core.

In the experiment the sample worths were obtained from the differences between reactivities with and without the samples. The analysis was carried out using several calculation models and their results were compared. Furthermore, the effect of hydrogen involved in the coating of DUO₂ plates, the effect of the gap between cores, transport effect and mesh size effect were estimated. Then the calculated values were compared with the measured ones.

In both cases of B₄C and Pu the estimated values were in reasonably good agreement with the measured ones in the core region. However, agreement was not so good in the blanket region.

Keywords: Material Sample Worth, FCA, MOX-fueled Core, Perturbation Calculation, Hydrogen Effect, Gap Effect, Transport Effect, Mesh Size Effect

目 次

1. はじめに	1
2. 反応度値測定実験	2
2.1 実験体系	2
2.2 測定原理	2
3. 反応度値計算	7
3.1 計算手順	7
3.2 セル計算モデル	8
3.3 炉心計算モデル	10
3.4 反応度値計算モデル	11
4. 実験結果	12
4.1 B ₄ C及びPu反応度値	12
4.2 測定誤差	12
5. 実験解析	18
5.1 基準計算	18
5.2 DUO ₂ 燃料板のコーティング剤に含まれている水素の影響	23
5.3 反応度値に対する輸送効果	25
5.4 反応度値に対する炉心ギャップの影響	29
5.5 反応度値に対するメッシュ効果	32
5.6 実験値と計算値の比較	34
6. まとめ	39
謝 辞	40
参考文献	40

Contents

1. Introduction	1
2. Measurements of Sample Worths	2
2.1 Reactor Configuration	2
2.2 Principle of Measurements	2
3. Calculation of Sample Worths	7
3.1 Procedure of Calculation	7
3.2 Model of Cell Calculation	8
3.3 Model of Core Calculation	10
3.4 Model of Perturbation Calculation	11
4. Experimental Results	12
4.1 B ₄ C and Pu Sample Worths	12
4.2 Error in Measurements	12
5. Analysis of Experiment	18
5.1 Reference Calculation	18
5.2 Effect of Hydrogen Involved in DUO ₂ Plates	23
5.3 Transport Effect	25
5.4 Gap Effect	29
5.5 Mesh Effect	32
5.6 Comparison between Experiment and Calculation	34
6. Summary	39
Acknowledgments	40
References	40

1. はじめに

高速炉において B_4C やPuの反応度値が重要であることは言うまでもない。 B_4C は原子炉でよく用いられている中性子吸収体で、制御棒に用いられており、制御棒の位置によって、制御棒を動かした距離は等しくても炉に与える反応度は異なる。また、高速炉において ^{239}Pu は ^{238}U より生成され、それが炉に与える影響も位置によって異なる。従って、それらの反応度値の空間依存性を実験により精度良く測定し、また、計算によって精度良く実験値を再現できることが望ましい。

本研究の目的は高速炉臨界実験装置(FCA)を用いて B_4C 及びPuの反応度値の空間依存性を測定し、計算によってどれくらいの精度で実験値を再現できるか調べることである。今回、実験に用いた炉心はXVII-1炉心¹⁾で、これは金属燃料炉心と酸化物燃料炉心とを比較するために組まれた炉心である。

これまでにも、これとは異なる炉心において B_4C やPuの反応度値は測定されたが、ブランケット領域の反応度値は測定されてはいない。今回はブランケット領域の反応度値も測定し、計算値と比較して、どれくらいの精度でそれを見積もることができるのかも調べた。また、計算モデルの違いが計算値に与える影響、及び DUO_2 燃料板のコーティング剤に含まれている水素が計算結果に与える影響を調べた。

第2章では実験体系及び実験手順について述べ、第3章では計算手順と計算モデルについて述べる。第4章で B_4C 及びPuの反応度値の実験結果と計算結果を示し、それらを比較し、第5章で結論を述べる。

2. 反応度値測定実験

2.1 実験体系

FCAは水平2分割炉心で固定側と移動側に分かれている。この炉心の径方向断面図はFig.1の通りである。Fig.1において、1つのマトリックスの大きさは5.52cm×5.52cmで、この大きさはステンレス格子の厚みを含んでいる。また、各ドロワーの数と組成はそれぞれTable 1とFig.2のようになっている。Fig.1とTable 1において、T2はTest region、SBはSoft Blanket、NUBはNatural Uranium Blanket、SCRはSafty Control Rod、DUBはDepleted Uranium Blanket、MTRはempty MaTRixを示す。各組成のセルパターンはFig.3のようになっている。

今回の実験で用いた炉心体系はXVII-1炉心で、金属燃料炉心と混合酸化物燃料炉心を比較するために組まれたである。本実験では、 B_4C とPuの反応度値を測定するために固定側炉心の中心ドロワー(Fig.1のマトリックスにおける(F126-26)の位置)のT2セルの中央にある DUO_2 板を炉心中央から軸方向ブランケット上端までAl板(厚さ1/8" 2枚)にすべて置き換えた。従って、炉心の固定側と移動側で非対称になっている。

また、反応度値を測定する際には、Alを1パック(2inch=5.08cm)ずつ B_4C 又はPuに置き換え、それらの反応度値を測定した。 B_4C 反応度値の測定では1/8"Al板を2枚とも1/8" B_4C (90%)に置き換えたが、Pu反応度値の測定ではPuの反応度が大きいために1/8"Al板1枚を1/16"Pu板と1/16" Al_2O_3 板に置き換えて実験を行った。

2.2 測定原理

サンプルを挿入した体系と挿入しない体系での余剰反応度の差より反応度値を見積もる。すなわち、次式に従ってサンプルの反応度は計算される。

$$\Delta\rho = \rho_{\alpha} - \rho_{\alpha}^{ref} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\rho$ はサンプルの反応度値、 ρ_{α} はサンプルを挿入した体系の余剰反応度、 ρ_{α}^{ref} はサンプルを挿入しない基準体系の余剰反応度である。以下、上付き文字refはサンプルを挿入しないときの値を表す。

更に、 ρ_{α} や ρ_{α}^{ref} は制御棒の反応度値 ρ_c 、基準温度20℃からのずれによる反応度値 ρ_T 、炉心密着面の基準位置からのずれによる反応度値 ρ_G より次のように計算される。

$$\rho_{\alpha} = \rho_c - \rho_T - \rho_G \quad (2)$$

$$\rho_{\alpha}^{ref} = \rho_c^{ref} - \rho_T^{ref} - \rho_G^{ref} \quad (3)$$

ρ_c は制御棒校正曲線より制御棒の位置の関数として求められる。 i 番目の制御棒の位置を x_i とすると、 i 番目の制御棒によって加えられる反応度 $\rho_i(x)$ は制御棒校正実験より次のような3次式で表される。

$$\rho_i(x_i) = (a_{0,i} + a_{1,i}x_i + a_{2,i}x_i^2 + a_{3,i}x_i^3)\rho_0 \quad (4)$$

ここで、 ρ_0 はFCA XVII-1炉心に対する反応度の単位で $1\rho_0 = 6.03 \times 10^{-4} \Delta k/k$ である。(4)式を用いると、全制御棒と全安全棒により加えられる反応度 ρ_c は

$$\rho_c = \sum_i \rho_i(x_i) \quad (5)$$

$\rho_T(T)$ は炉心の平均温度を $T(^{\circ}\text{C})$ とすると次式で表される。

$$\rho_T(T) = f_T \rho_0 (T - 20) \quad (6)$$

この炉心体系での f_T の値は-0.0552である。

ρ_G は炉心密着面の基準位置からのずれを $y(\text{mm})$ とし、 ρ_G を $\rho_G(y)$ と書き改めると

$$\rho_G(y) = f_G \rho_0 y \quad (7)$$

と表される。この炉心体系での f_G の値は-0.993である。

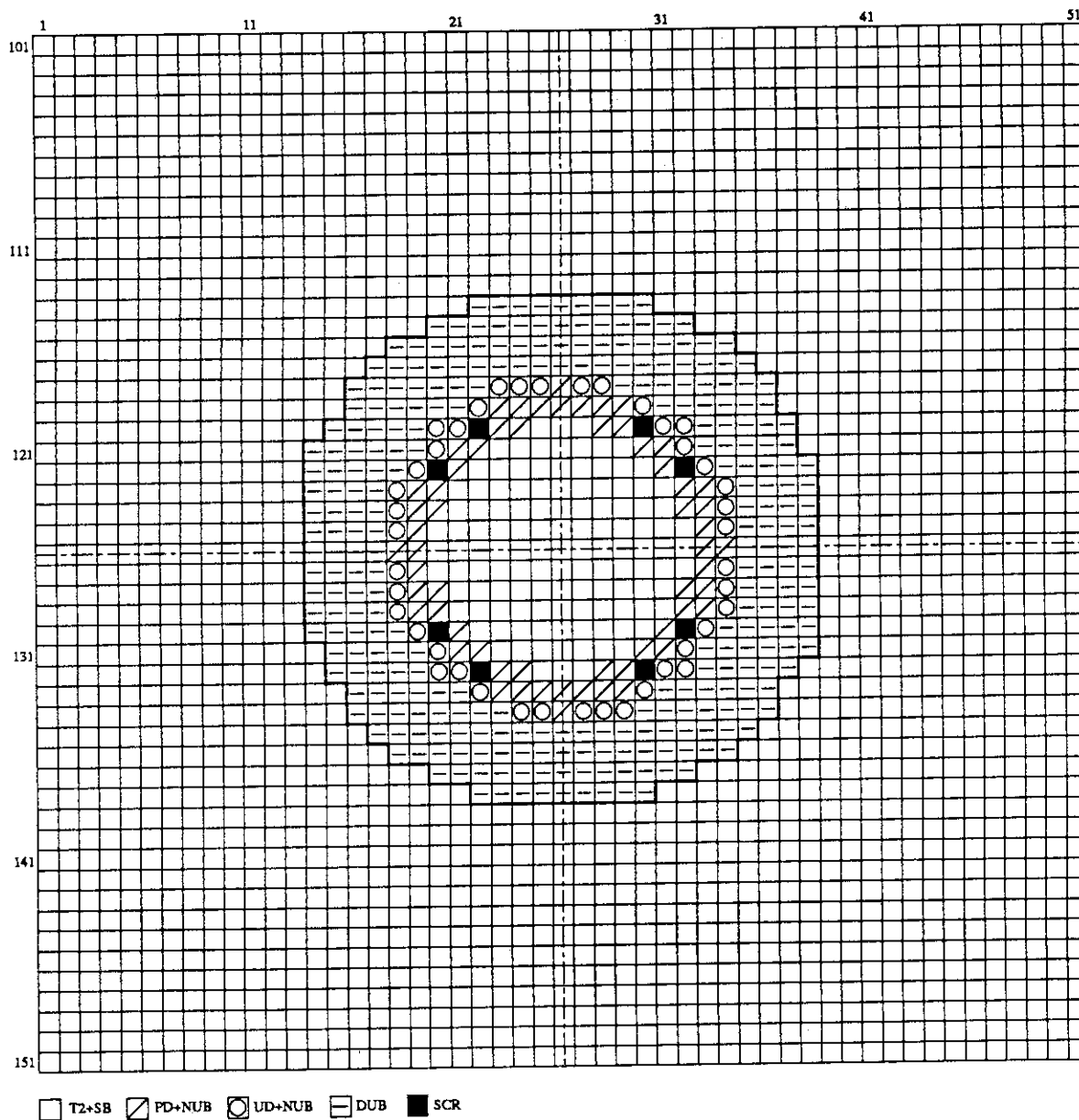


Fig.1 Radial cross section of FCA XVII-1 core

Table 1 Number of each drawer

	Cells in each drawer	Number of each drawer
□	T2+SB	121
▨	PD+NUB	60
⊙	UD+NUB	42
■	SCR+NUB	8
▬	DUB	288
Total		519

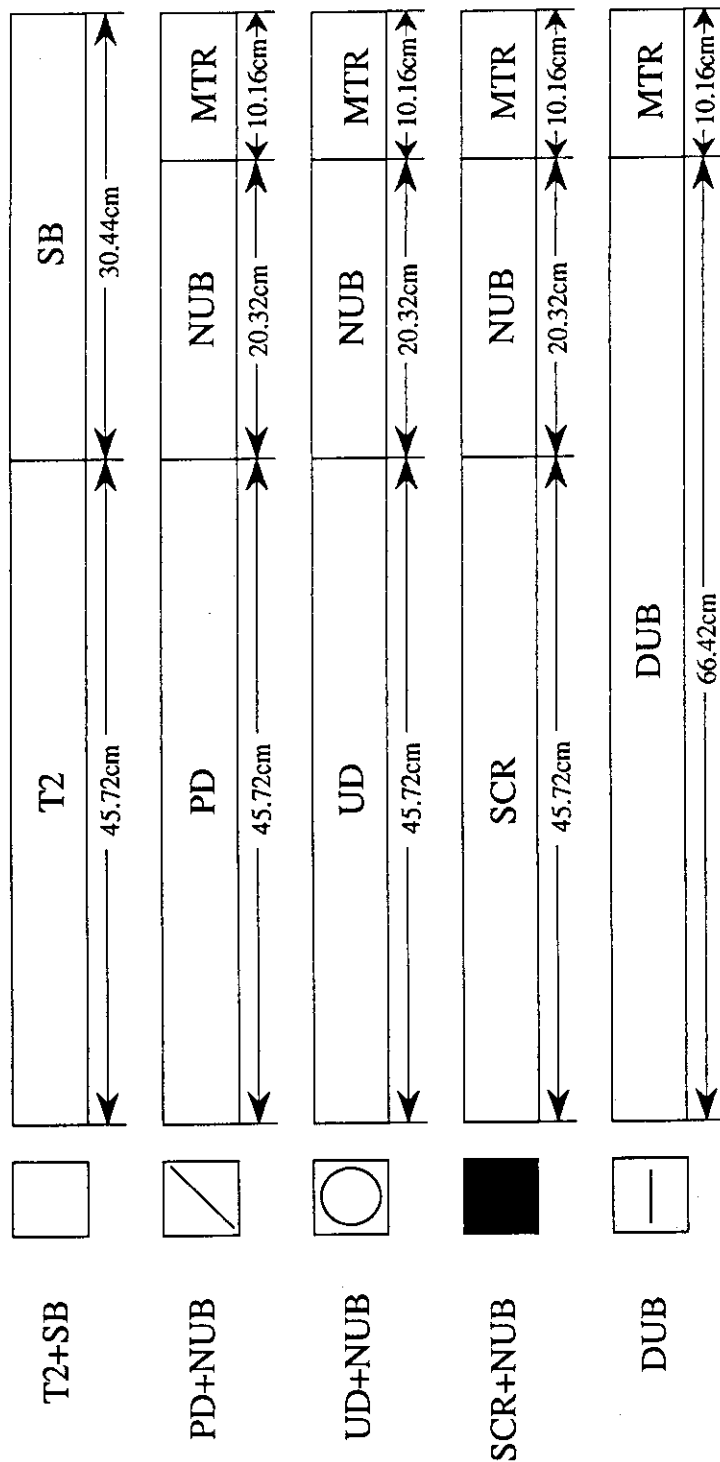
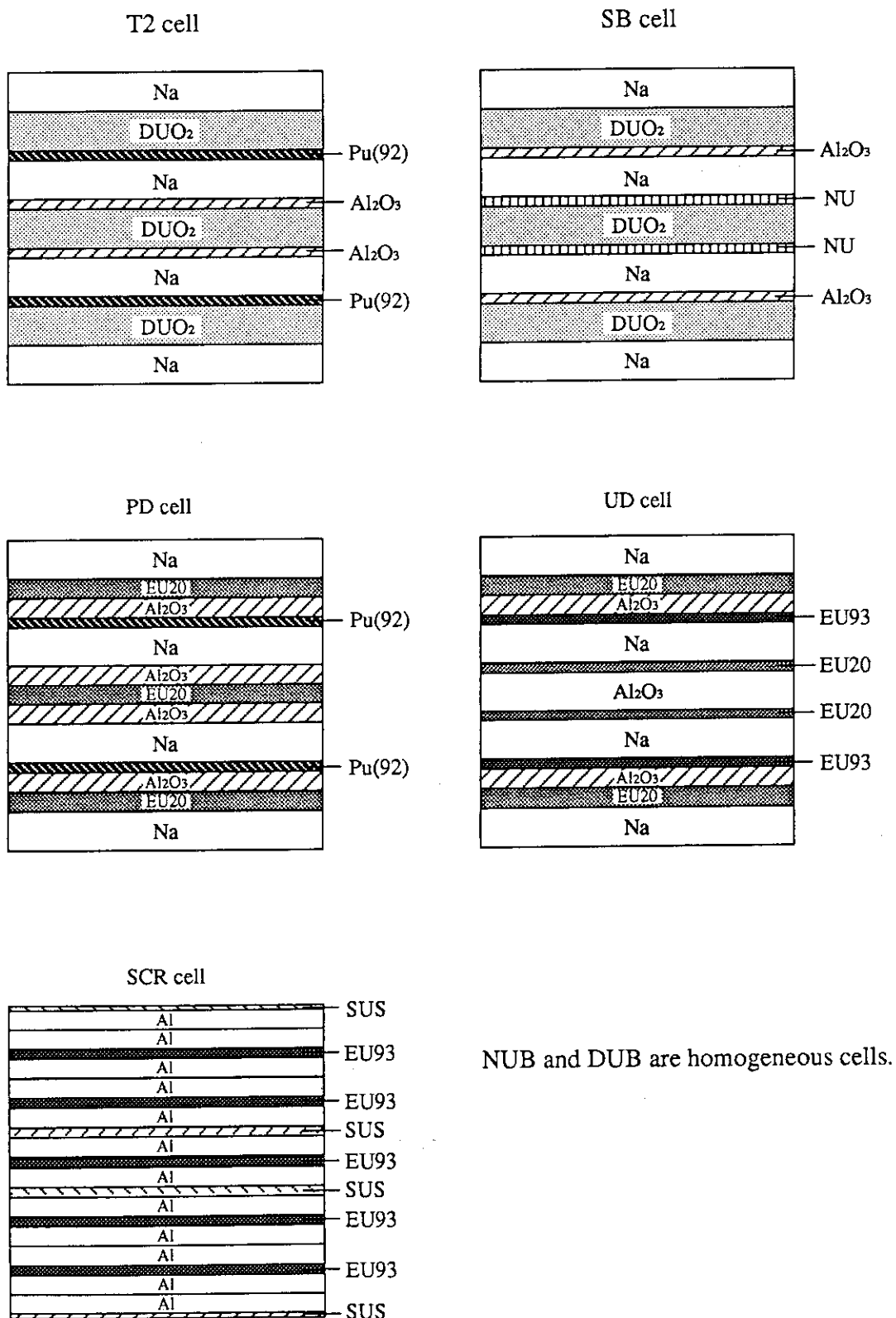


Fig.2 Composition of each drawer



NUB and DUB are homogeneous cells.

Fig.3 Composition of each cell

3. 反応度価値計算

3.1 計算手順

反応度価値の計算はFig.4に示すような手順で行った。まず、SLAROMコード²⁾を用いて各セルの70群断面積を作成した。このとき、核データライブラリはJENDL3.1³⁾に基づくJFS3J3⁴⁾を用い、各セルは1次元無限平板状体系として計算を行った。SLAROMによって得られた70群断面積とJOINTコード⁵⁾から得られたCITATION-FBRコード⁶⁾の入力をCITATION-FBRコードに入力し、軸方向1/2炉心または全炉心、70群、R-Z体系で計算を行った。CITATION-FBRコードで得られた中性子束と随伴中性子束、及びSLAROMコードで得られた70群断面積をCIPERコード⁷⁾に入力し、反応度価値を計算した。

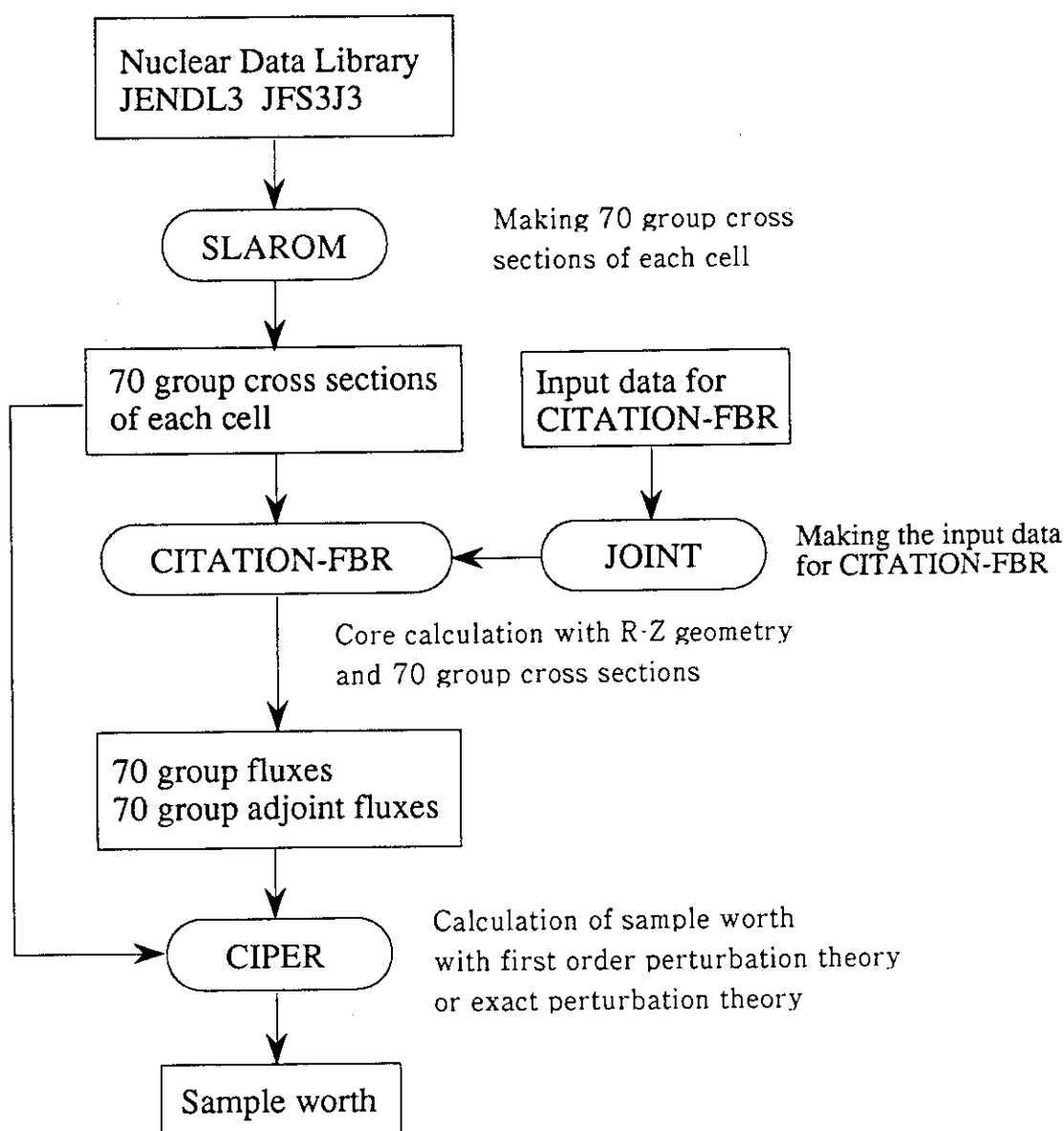


Fig.4 Flowchart of the calculation

3.2 セル計算モデル

FCAのセルはFig.3に示すような非均質構造を持ったセルである。この非均質なセル中における中性子束の空間分布を正確に求めるには拡散方程式ではなく、輸送方程式を解く必要がある。更に、このセル計算によって得られた断面積を用いて炉心計算を行うので十分な精度が必要である。一般的に微分方程式よりも積分方程式を解く方が簡便なので、セル計算では積分型輸送方程式を解く衝突確率法がよく用いられている。そこで、セル計算は核データライブラリJENDL3.1のJFS3J3と衝突確率法に基づく計算コードSLAROMを用いて行った。また、拡散係数の定義にはBenoistモデル⁸⁾による非等方拡散係数を用い、中性子拡散の非等方性を考慮した。

標準セルの計算はFig.3に示す各セルを1次元無限平板状体系として扱い、境界条件は等方境界条件として行った。格子管及びドロワーの成分(SUS)も考慮するために、Fig.3の各セルの上部と下部に0.22cmのステンレス鋼の領域を加え、左右の格子管及びドロワーのステンレス鋼を核分裂性物質のない領域に均質に混入した。

このようにしてセルを1次元格子として計算すると、2次元格子として計算した結果とほとんど差が見られなかったと報告されている。炉物理的な観点から見ると、例えば、Benoistモデルで計算したT2セルの拡散係数は1.51cmである。よって、平均輸送自由行路は4.53cmとなり、ドロワーと炉心格子のステンレス鋼の厚み0.22cmに比べて非常に大きいのでほとんど影響はないことが分かる。

DUO₂板をAl板で置き換えられたセル、B₄Cの入ったサンプルセル及びPuの入ったサンプルセルはスーパーセル計算によって計算した。Fig.5はT2セルの中心にあるDUO₂をAlで置き換えたT2ALセルのスーパーセルモデルを示している。すなわち、T2セルの中央にあるDUO₂板をAl板に変更し、標準セルと同様に上部と下部に0.22cmのステンレス鋼の層を加え、核分裂性物質のない領域にステンレス鋼の成分を均質に混入する。そして更に、ステンレス鋼の層の上部と下部にT2セルをスミヤーした層を加えてスーパーセル計算を行った。軸方向のブランケットのSBセルについても同様の計算を行った。

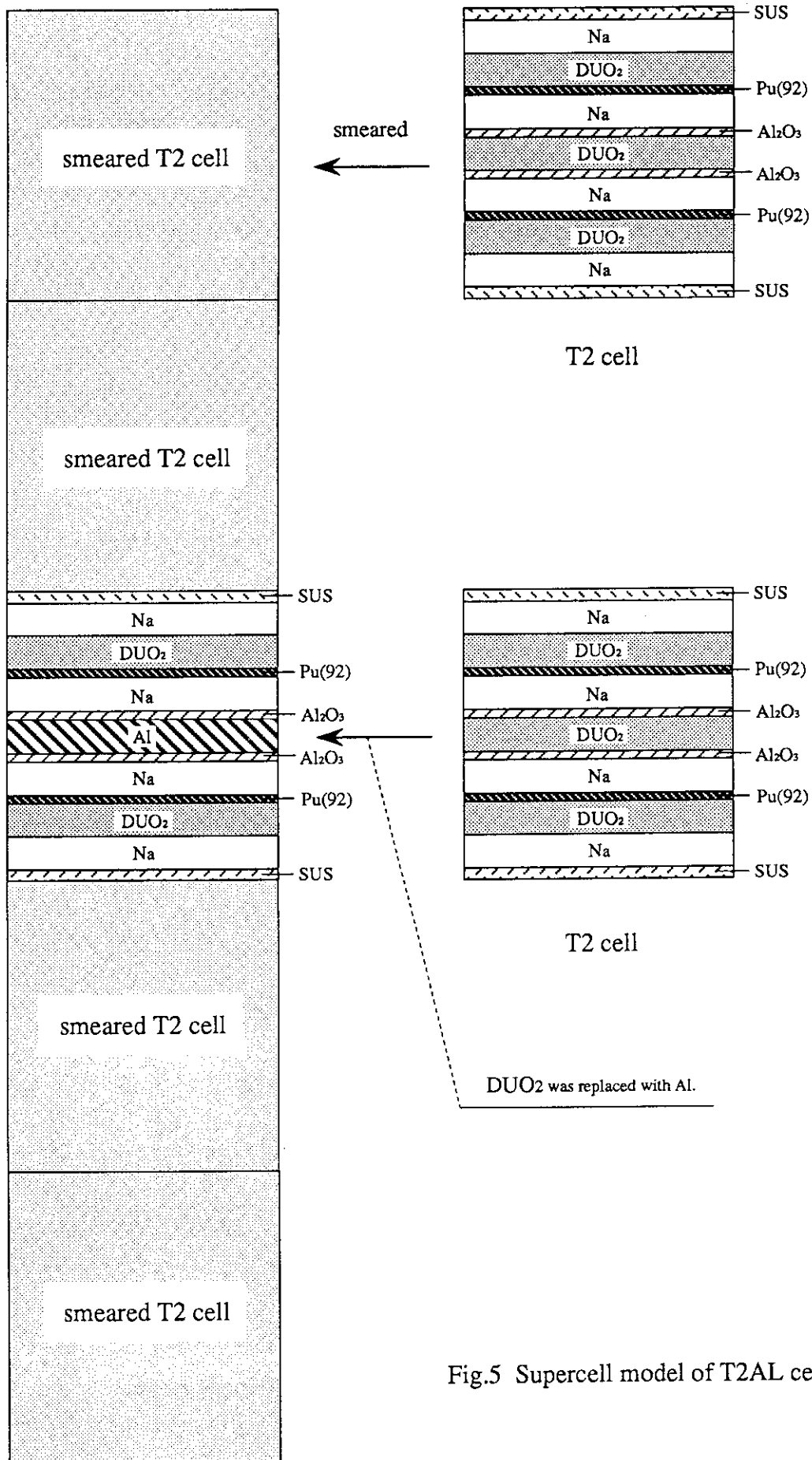


Fig.5 Supercell model of T2AL cell

3.3 炉心計算モデル

炉心計算は計算コードCITATION-FBRを用いて行った。各領域の実効群定数はSLAROMで計算された70群のものをそのまま縮約せずに用いた。また、CITATION-FBRでは、Benoistモデルに基づきSLAROMで計算された非等方拡散係数を用いて計算を行った。

炉心形状はFCA XVII-1炉心を円柱で模擬し、2次元RZ体系として計算を行った。Fig.6にCITATION-FBRコードで用いたFCA XVII-1 炉心モデルの軸方向断面図を示す。Fig.6は、FCA XVII-1 炉心全体の中央を原点にとったとき、その半分の固定側1/2集合体を示している。

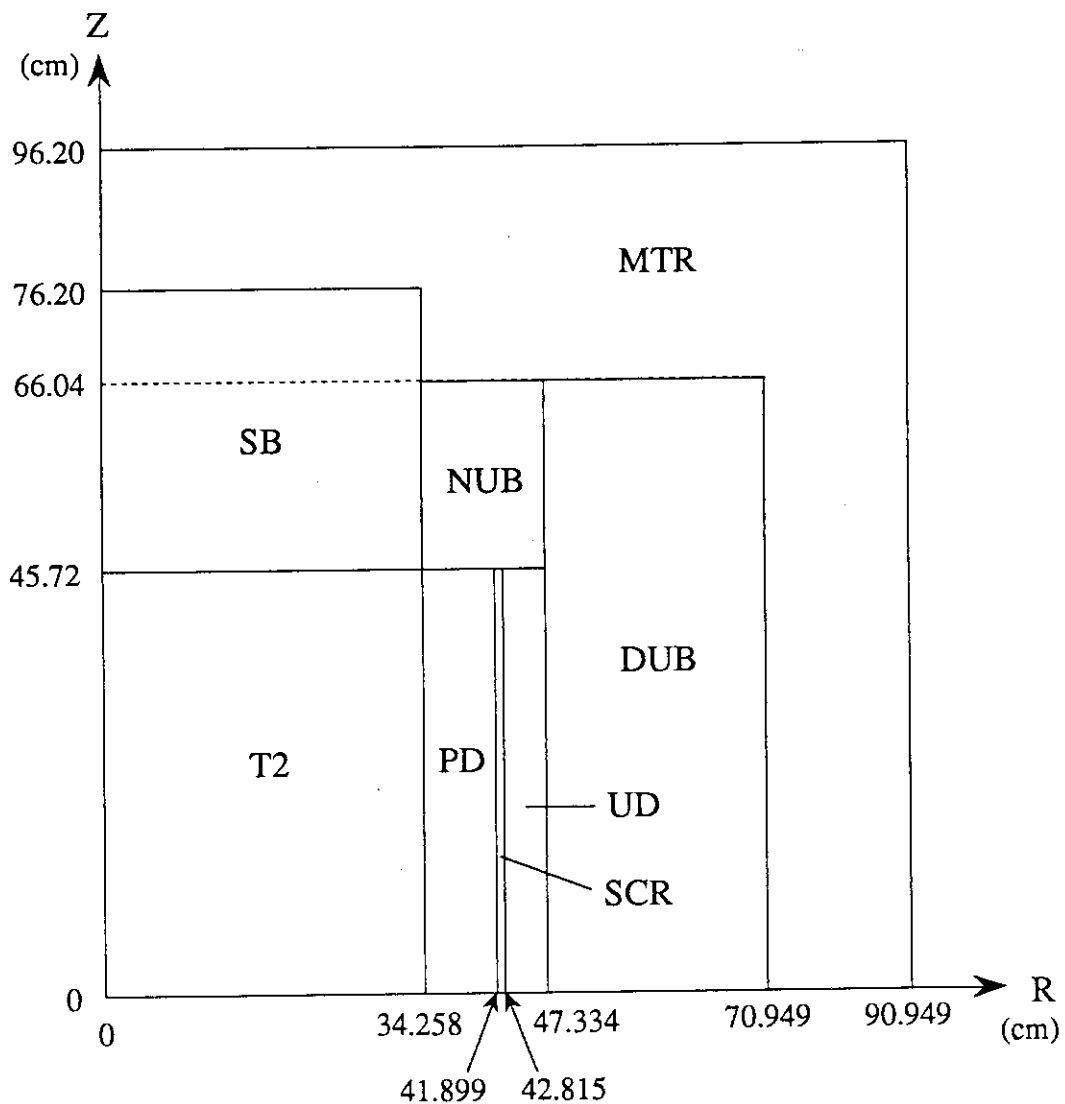


Fig.6 Axial cross section of FCA XVII-1 core model

3.4 反応度価値計算モデル

PuやB₄Cの反応度価値は炉心内のある1つのセルにサンプルを入れて測定するので、非常に小さな値となる。最近では計算機の進歩によりモンテカルロ法が実用的な時間で実行できるようになってきたが、反応度価値のように非常に小さな値を精度良く求めることは未だに困難である。このような小さな値を求めるには従来より良く用いられてきた摂動理論を用いる方法が有効である。

ここでは、反応度価値を計算するために拡散摂動計算コードCIPERを用いた。このコードでは1次摂動計算と厳密摂動計算をすることができ、厳密摂動計算では摂動理論により次式に基づいて反応度価値が計算される。

$$\Delta\rho = \frac{1}{\left\langle \phi_g^* \chi_g \sum_{g'} v \Sigma_{fg'} \phi_{g'} \right\rangle} \left\{ \left\langle \phi_g^* \nabla \delta D_g \nabla \phi_g \right\rangle - \left\langle \phi_g^* \delta \Sigma_{\alpha g} \phi_g \right\rangle + \left\langle (\phi_g^* - \phi_{g'}^*) \sum_{g'} \delta \Sigma_{s, g \leftarrow g'} \phi_{g'} \right\rangle + \frac{1}{k'} \left\langle \phi_g^* \chi_g \sum_{g'} \delta v \Sigma_{fg'} \phi_{g'} \right\rangle \right\} \quad (8)$$

$\Delta\rho$: 反応度価値

ϕ_g, ϕ_g^* : それぞれ摂動が加えられる前の第g群の中性子束、随伴中性子束

ϕ_g : 摂動が加えられた後の第g群の中性子束

k_0, k' : それぞれ摂動が加えられる前後の実効増倍率

$v \Sigma_{fg}$: 第g群の核分裂断面積に1回の核分裂で放出される中性子数をかけたもの

χ_g : 第g群の核分裂スペクトル

δD_g : 第g群の拡散係数の摂動による変化量

$\delta \Sigma_{\alpha g}$: 第g群の全断面積の摂動による変化量

$\delta \Sigma_{s, g \leftarrow g'}$: 第g'群から第g群への散乱断面積の摂動による変化量

$\delta v \Sigma_{fg}$: 第g群の核分裂断面積に1回の核分裂で放出される中性子数をかけたものの摂動による変化量

ブラケット記号はgについての和と炉心全体についての積分を表す。

また、1次摂動計算では次式に基づいて計算され、1次摂動は厳密摂動において摂動与えた後の中性子束に摂動与える前の中性子束に置き換えたものである。

$$\Delta\rho = \frac{1}{\left\langle \phi_g^* \chi_g \sum_{g'} v \Sigma_{fg'} \phi_{g'} \right\rangle} \left\{ \left\langle \phi_g^* \nabla \delta D_g \nabla \phi_g \right\rangle - \left\langle \phi_g^* \delta \Sigma_{\alpha g} \phi_g \right\rangle + \left\langle (\phi_g^* - \phi_{g'}^*) \sum_{g'} \delta \Sigma_{s, g \leftarrow g'} \phi_{g'} \right\rangle + \frac{1}{k_0} \left\langle \phi_g^* \chi_g \sum_{g'} \delta v \Sigma_{fg'} \phi_{g'} \right\rangle \right\} \quad (9)$$

本研究では1次摂動計算と厳密摂動計算の2通りの方法で計算を行い、その結果を比較した。

摂動計算に用いた炉心体系はCITATION-FBRコードに用いたものと同じ2次元RZ体系であり、CITATION-FBRコードより得られた随伴中性子束と中性子束及びSLAROMコードより得られた70群断面積を用いて計算を実行した。

4. 実験結果

4.1 B₄C及びPu反応度値

B₄C反応度値軸方向分布の実験値をFig.7とTable 2に示す。Table 2から分かるようにブランケット領域の14Zと15Zは実験誤差に埋もれてしまい、正確に評価するのは困難であるのが分かる。

B₄C反応度値と同様にして得られたPu反応度値軸方向分布の実験値をFig.8とTable 3に示す。Table 3から分かるようにブランケット領域では実験誤差が実験値の10%以上になり、正確に反応度値を測定することは困難である。

4.2 測定誤差

2.2節で示されたように、反応度値は余剰反応度の差から評価され、余剰反応度は制御棒の位置、炉心温度、炉心密着面のギャップを測定して求める。それら測定値には誤差が付随しており、その誤差が反応度値の誤差となる。また、温度補正するときに用いる温度補正係数とギャップ補正するときに用いるギャップ補正係数は別の実験より求められ、これにも誤差がある。従って、制御棒の位置、炉心温度、炉心密着面のギャップの測定誤差、温度補正係数、ギャップ補正係数より反応度値の誤差を評価する。ここで注意しておかなければならないことは実効遅発中性子割合や制御棒反応度値の誤差はこの炉心で用いられる反応度の単位 ρ_0 に含まれており、この実験で評価される誤差の中には含まれていないことである。

さて、反応度値の誤差を評価するために、(2)式、(3)式を(1)式に代入し、(4)式から(7)式を使って反応度値の計算式を求めると

$$\Delta\rho = \sum_i \{h_i(x_i) - h_i(x_i^{ref})\} \rho_0 + f_T \rho_0 \Delta T + f_G \rho_0 \Delta y \quad (10)$$

となる。ここで $h_i(x_i)$ は(4)式における ρ_0 の係数であり、次式で定義される。

$$h_i(x_i) = a_{0,i} + a_{1,i} x_i + a_{2,i} x_i^2 + a_{3,i} x_i^3 \quad (11)$$

また、 ΔT と Δy はそれぞれ次のように定義される。

$$\Delta T = T - T^{ref} \quad (12)$$

$$\Delta y = y - y^{ref} \quad (13)$$

(10)式より反応度値の誤差 $\sigma_{\Delta\rho}$ は

$$\sigma_{\Delta\rho}^2 = \sum_i (a_{1,i} + 2a_{2,i} \bar{x}_i + 3a_{3,i} \bar{x}_i^2)^2 \rho_0^2 \sigma_{\Delta x_i}^2 + (\sigma_{f_T} \rho_0 \overline{\Delta T})^2 + (\overline{f_T} \rho_0 \sigma_{\Delta T})^2 + (\sigma_{f_G} \rho_0 \overline{\Delta y})^2 + (\overline{f_G} \rho_0 \sigma_{\Delta y})^2 \quad (14)$$

と表すことができる。ここで、 \bar{x}_i はサンプルを挿入したときの i 番目の制御棒位置の測定値を表し、 $\overline{\Delta T}$ 、 $\overline{\Delta y}$ はそれぞれサンプルを挿入した炉心と基準炉心の温度差、炉心密着面のギャップの測定値、 $\overline{f_T}$ 、 $\overline{f_G}$ はそれぞれ温度補正係数、ギャップ補正係数の測定値を表す。また、 $\sigma_{\Delta x_i}$ 、 $\sigma_{\Delta T}$ 、 $\sigma_{\Delta y}$ 、 σ_{f_T} 、 σ_{f_G} はそれぞれサンプルを挿入した炉心と基準炉心の間での i 番目の制御棒位置の差の誤差、炉心温度差の誤差、炉心密着面のギャップの誤差、

温度補正係数の誤差、ギャップ補正係数の誤差を表している。(14)式を導く際に、基準炉心における制御棒位置には誤差を生じず、サンプルの入った炉心の制御棒位置のみ誤差を生じるものと仮定した。これは基準炉心とサンプルの入った炉心それぞれの制御棒位置に誤差があるとしたのではなく、制御棒位置の差に誤差があるとして評価するのと、制御棒校正曲線が3次式で表されるために制御棒位置の差から求められる反応度値を Δx_i を用いて表せないからである。

次に具体的な誤差の値を述べる。まず、制御棒位置の差の誤差であるが、2対ある制御棒はどれも大体同じであるとして、1対当たり $\pm 0.05\text{mm}$ の誤差を生じる。6対ある安全棒は全部全挿入されているので、制御棒よりも誤差は小さく、1対当たり $\pm 0.01\text{mm}$ の誤差を生じる。即ち、

$$\sigma_{\Delta x_i}(\text{control rod}) = 0.05(\text{mm}) \quad (15)$$

$$\sigma_{\Delta x_i}(\text{safty rod}) = 0.01(\text{mm}) \quad (16)$$

である。また、炉心温度差の誤差は ± 0.01 度、即ち、

$$\sigma_{\Delta T} = 0.01(\text{deg}) \quad (17)$$

炉心密着面のギャップの誤差は $\pm 0.001\text{mm}$ 、即ち、

$$\sigma_{\Delta y} = 0.001(\text{mm}) \quad (18)$$

であるとして評価した。更に、温度補正係数の誤差は $\pm 0.0023\text{deg}^{-1}$ 、即ち、

$$\sigma_{f_r} = 0.0023(\text{deg}^{-1}) \quad (19)$$

ギャップ補正係数の誤差は $\pm 0.019\text{mm}^{-1}$ 、即ち、

$$\sigma_{f_g} = 0.019(\text{mm}^{-1}) \quad (20)$$

であるとした。

以上のようにして得られた B_4C 及びPu反応度値の誤差をそれぞれTable 4及びTable 5に示す。Table 4とTable 5において誤差の各要素を求める際には、大きめに誤差を評価するために有効数字が1桁であるとして2桁目以降を切り上げて計算している。これらの図から分かるように B_4C 反応度値の誤差もPu反応度値の誤差も位置に依存せず、 $0.004\rho_0$ の誤差がある。

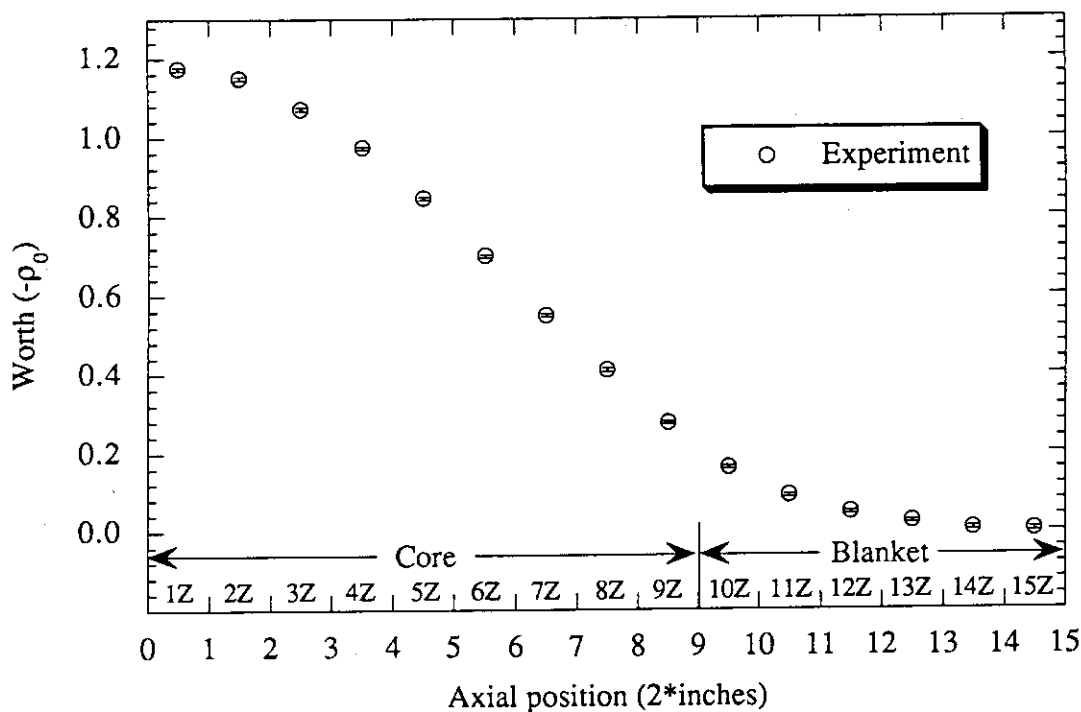


Fig.7 B₄C(90%) sample worths in FCA XVII-1 core

Table 2 Axial distribution of B₄C(90%) sample worths in FCA XVII-1 core

Position	Distance(cm) ^{a)}	Worth(ρ_0)
1Z	2.54	-1.174±0.004
2Z	7.62	-1.149±0.004
3Z	12.70	-1.072±0.004
4Z	17.78	-0.974±0.004
5Z	22.86	-0.846±0.004
6Z	27.94	-0.700±0.004
7Z	33.02	-0.550±0.004
8Z	38.10	-0.410±0.004
9Z	43.18	-0.275±0.004
10Z	48.26	-0.161±0.004
11Z	53.34	-0.089±0.004
12Z	58.42	-0.046±0.004
13Z	63.50	-0.023±0.004
14Z	68.58	-0.004±0.004
15Z	73.66	-0.001±0.004

a) distance from the core center to the middle point of the cell

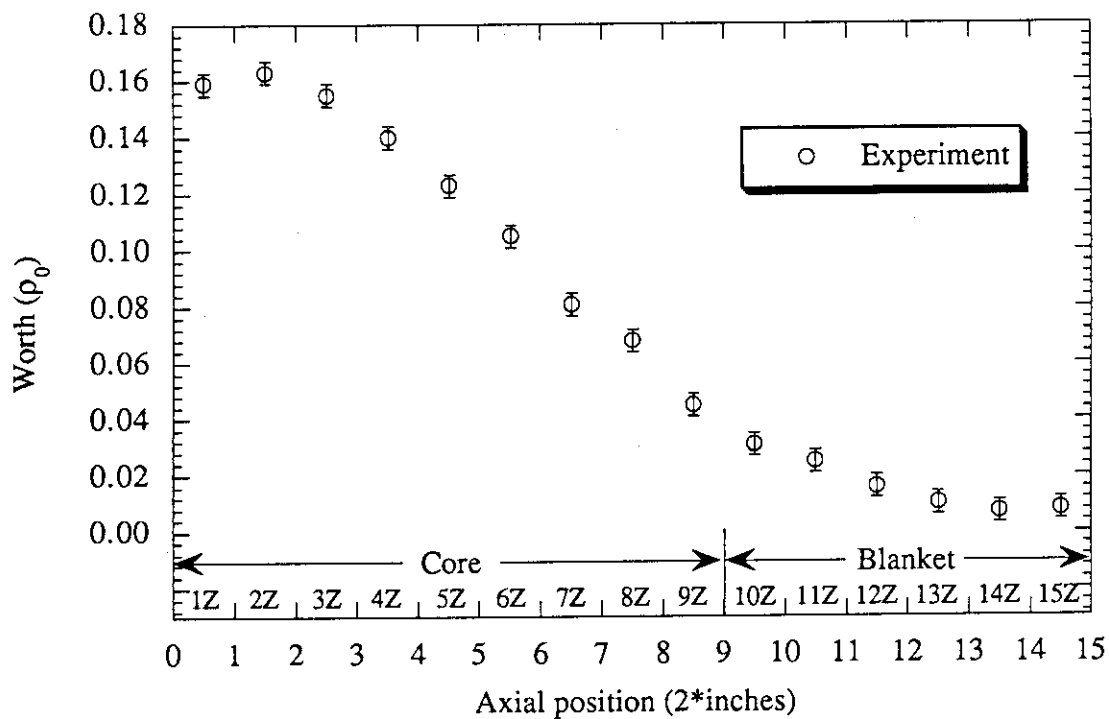


Fig.8 Pu sample worths in FCA XVII-1 core

Table 3 Axial distribution of Pu sample worths in FCA XVII-1 core

Position	Distance(cm) ^{a)}	Worth(ρ_0)
1Z	2.54	0.159 ± 0.004
2Z	7.62	0.163 ± 0.004
3Z	12.70	0.155 ± 0.004
4Z	17.78	0.140 ± 0.004
5Z	22.86	0.123 ± 0.004
6Z	27.94	0.105 ± 0.004
7Z	33.02	0.081 ± 0.004
8Z	38.10	0.068 ± 0.004
9Z	43.18	0.045 ± 0.004
10Z	48.26	0.031 ± 0.004
11Z	53.34	0.025 ± 0.004
12Z	58.42	0.016 ± 0.004
13Z	63.50	0.010 ± 0.004
14Z	68.58	0.007 ± 0.004
15Z	73.66	0.008 ± 0.004

a) distance from the core center to the middle point of the cell

Table 4 Error in $B_4C(90\%)$ sample worths in FCA XVII-1 core

Position	Element of the error (unit: ρ_0)						Total error
	control rods (one pair)	safty rods (one pair)	Difference of the temperature	Difference of the gap	Temperature coefficient	Gap coefficient	
1Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0006	0.0001	4×10^{-3}
2Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0004	0.0001	4×10^{-3}
3Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0004	0.0001	4×10^{-3}
4Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0002	0.0001	4×10^{-3}
5Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}
6Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0002	0.0001	4×10^{-3}
7Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	4×10^{-3}
8Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	4×10^{-3}
9Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0002	0.0001	4×10^{-3}
10Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	4×10^{-3}
11Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}
12Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	4×10^{-3}
13Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}
14Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0002	0.0001	4×10^{-3}
15Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}

Table 5 Error in Pu sample worths in FCA XVII-1 core

Position	Element of the error (unit: ρ_0)						Total error
	control rods (one pair)	safty rods (one pair)	Difference of the temperature	Difference of the gap	Temperature coefficient	Gap coefficient	
1Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	4×10^{-3}
2Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}
3Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0006	0.0001	4×10^{-3}
4Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	4×10^{-3}
5Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0004	0.0001	4×10^{-3}
6Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}
7Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}
8Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}
9Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	4×10^{-3}
10Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	4×10^{-3}
11Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}
12Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003	0.0001	4×10^{-3}
13Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0000	0.0001	4×10^{-3}
14Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0002	0.0001	4×10^{-3}
15Z	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	4×10^{-3}

5. 実験解析

5.1 基準計算

ここでは第3章で述べられたような方法で得られた B_4C とPuの反応度価値の実験結果を解析する。計算モデルの違いが反応度価値の値に及ぼす影響を調べるために次の3つの異なる計算モデルで計算を行った。

- ・ 1次摂動、軸方向1/2炉心計算
- ・ 厳密摂動、軸方向1/2炉心計算
- ・ 厳密摂動、全炉心計算

全炉心計算は、炉心半分について中心軸をAIの入ったセルで置き換え、もう半分については置き換えない体系で行った。

以上3つのモデルを用いて反応度価値の空間分布を計算し、厳密摂動、全炉心計算の結果を基準として他の計算モデルによって得られた結果と比較した。 B_4C 反応度価値についての計算結果をFig.9、Fig.10及びTable 6に示す。また、Table 7には1次摂動、軸方向1/2炉心計算と厳密摂動、軸方向1/2炉心計算によって得られた反応度価値の厳密摂動、全炉心計算によって得られたものに対する比をまとめている。参考までにTable 6には全炉心計算で得られた実効増倍率を示しておく。なお、サンプルを挿入していない基準体系での実効増倍率は0.99800であった。

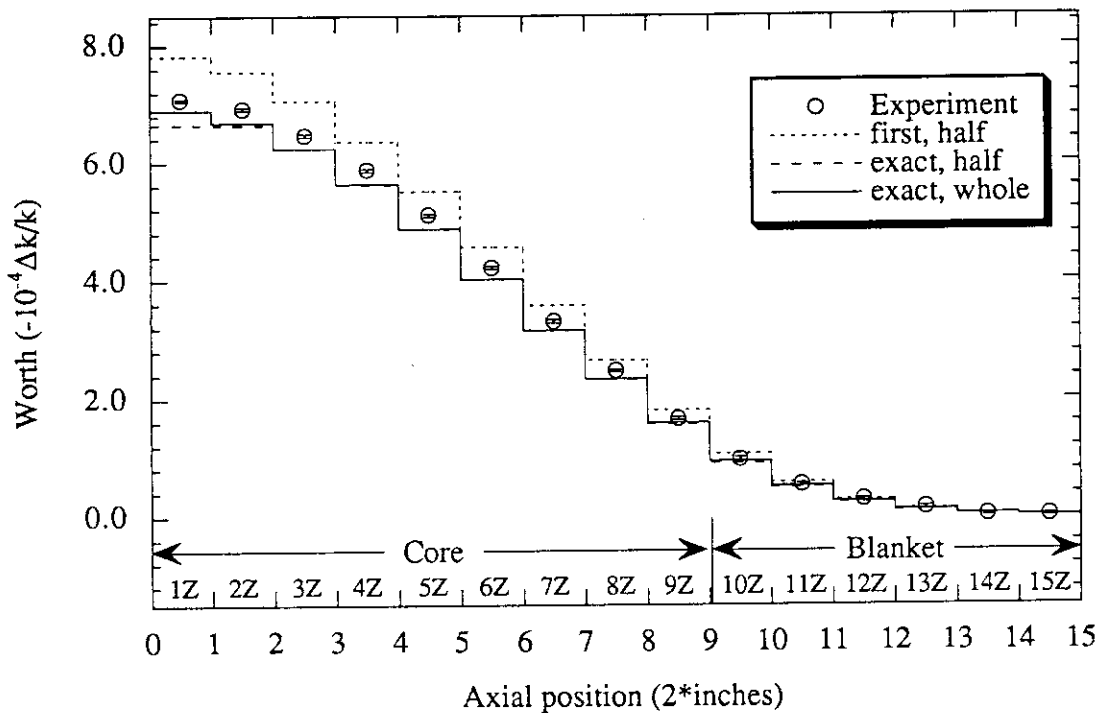


Fig.9 Comparison of B_4C sample worths with the different models of the calculation

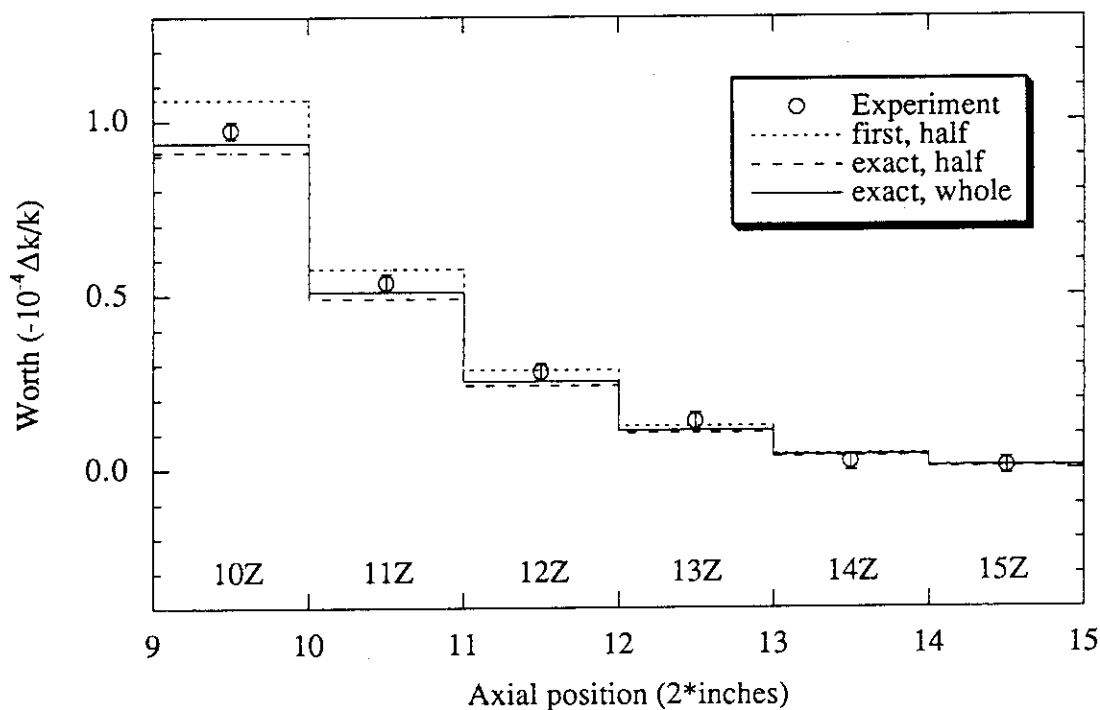


Fig.10 Comparison of B₄C sample worths in the blanket region with the different models of the calculation

Table 6 Comparison of B₄C(90%) sample worths with the different models of the calculation

Position	First, half	Exact, half	Exact, whole	Experiment	k _{eff}
1Z	-7.82×10^{-4}	-6.66×10^{-4}	-6.90×10^{-4}	-7.08×10^{-4}	0.99731
2Z	-7.56×10^{-4}	-6.65×10^{-4}	-6.69×10^{-4}	-6.93×10^{-4}	0.99733
3Z	-7.06×10^{-4}	-6.24×10^{-4}	-6.25×10^{-4}	-6.47×10^{-4}	0.99738
4Z	-6.36×10^{-4}	-5.63×10^{-4}	-5.63×10^{-4}	-5.87×10^{-4}	0.99744
5Z	-5.51×10^{-4}	-4.87×10^{-4}	-4.87×10^{-4}	-5.10×10^{-4}	0.99752
6Z	-4.56×10^{-4}	-4.02×10^{-4}	-4.03×10^{-4}	-4.22×10^{-4}	0.99760
7Z	-3.58×10^{-4}	-3.16×10^{-4}	-3.16×10^{-4}	-3.31×10^{-4}	0.99769
8Z	-2.65×10^{-4}	-2.33×10^{-4}	-2.33×10^{-4}	-2.47×10^{-4}	0.99777
9Z	-1.81×10^{-4}	-1.58×10^{-4}	-1.59×10^{-4}	-1.66×10^{-4}	0.99784
10Z	-1.06×10^{-4}	-9.09×10^{-5}	-9.37×10^{-5}	-9.73×10^{-5}	0.99791
11Z	-5.76×10^{-5}	-4.91×10^{-5}	-5.11×10^{-5}	-5.36×10^{-5}	0.99795
12Z	-2.85×10^{-5}	-2.42×10^{-5}	-2.54×10^{-5}	-2.80×10^{-5}	0.99798
13Z	-1.25×10^{-5}	-1.06×10^{-5}	-1.13×10^{-5}	-1.39×10^{-5}	0.99799
14Z	-4.45×10^{-6}	-3.72×10^{-6}	-4.15×10^{-6}	-2.17×10^{-6}	0.99800
15Z	-7.78×10^{-7}	-6.29×10^{-7}	-9.02×10^{-7}	-7.80×10^{-7}	0.99800

Table 7 Ratio of B_4C sample worths obtained from the half core calculation to the ones from the whole core calculation

Position	First, half	Exact, half
1Z	1.133	0.965
2Z	1.131	0.994
3Z	1.130	0.998
4Z	1.130	0.999
5Z	1.131	1.000
6Z	1.131	0.999
7Z	1.133	0.998
8Z	1.135	0.996
9Z	1.141	0.993
10Z	1.131	0.970
11Z	1.129	0.962
12Z	1.122	0.952
13Z	1.109	0.937
14Z	1.074	0.897
15Z	0.863	0.697

Fig.9とTable 6を見れば1次摂動、軸方向1/2炉心計算では全体的に計算値が実験値を上回っているのが分かる。Table 7を見ると1次摂動、軸方向1/2炉心計算によって得られた反応度値は厳密摂動、全炉心計算に比べて、炉心領域で約13%大きくなっている。これは1次摂動計算を行ったために、サンプルの入った部分の局所的な中性子束の歪を考慮していないためである。

一方、厳密摂動では、軸方向1/2炉心計算の結果は全炉心計算の結果とほとんど変わらず、1次摂動、軸方向1/2炉心計算の結果よりも実験値に近い結果が得られた。これらの結果より、厳密摂動計算によってサンプルの入った部分の中性子束の歪を考慮したことにより計算値が実験値に近づいたのが分かる。しかし、1Zにおいて厳密摂動、軸方向1/2炉心計算の結果と厳密摂動、全炉心計算の結果は大きく異なっている。これは、軸方向1/2炉心で計算することにより、中性子束の歪を過大評価するからであると考えられる。従って、1Zでは全炉心計算をしなければならないがそれ以外では軸方向1/2炉心計算で充分である。

B_4C 反応度値と同様にPu反応度値の計算結果をFig.11、Fig.12及びTable 8に示す。

また、Table 9には1次摂動、軸方向1/2炉心計算と厳密摂動、軸方向1/2炉心計算によって得られた反応度値の厳密摂動、全炉心計算によって得られたものに対する比をまとめている。

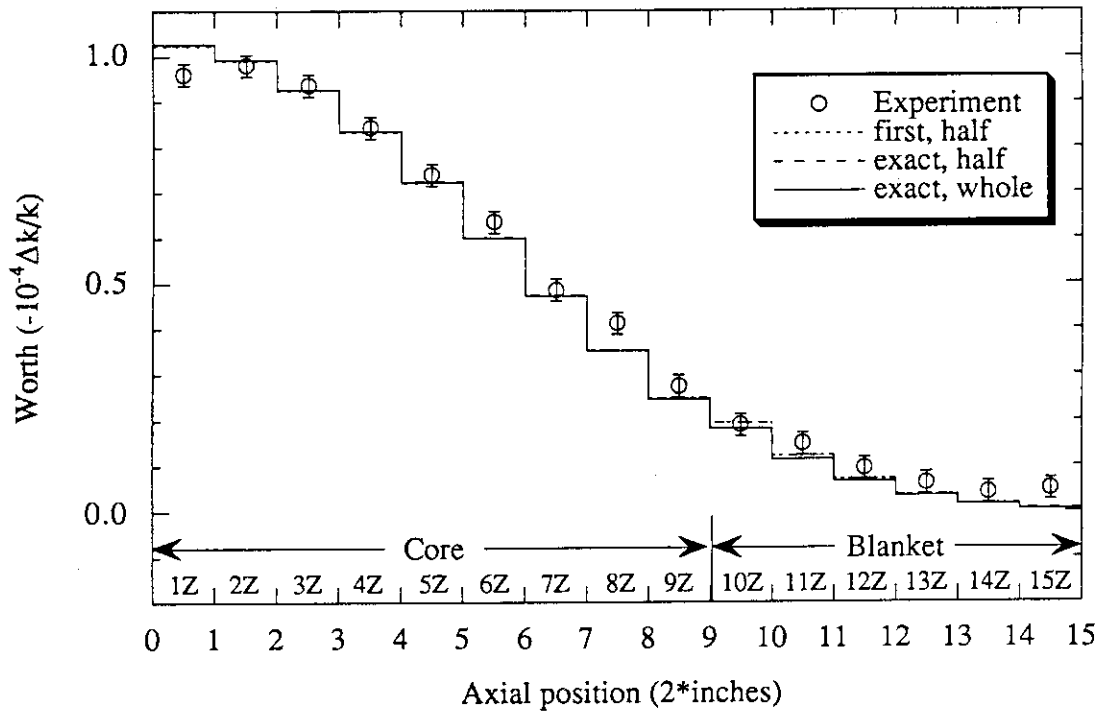


Fig.11 Comparison of Pu sample worths with the different models of the calculation

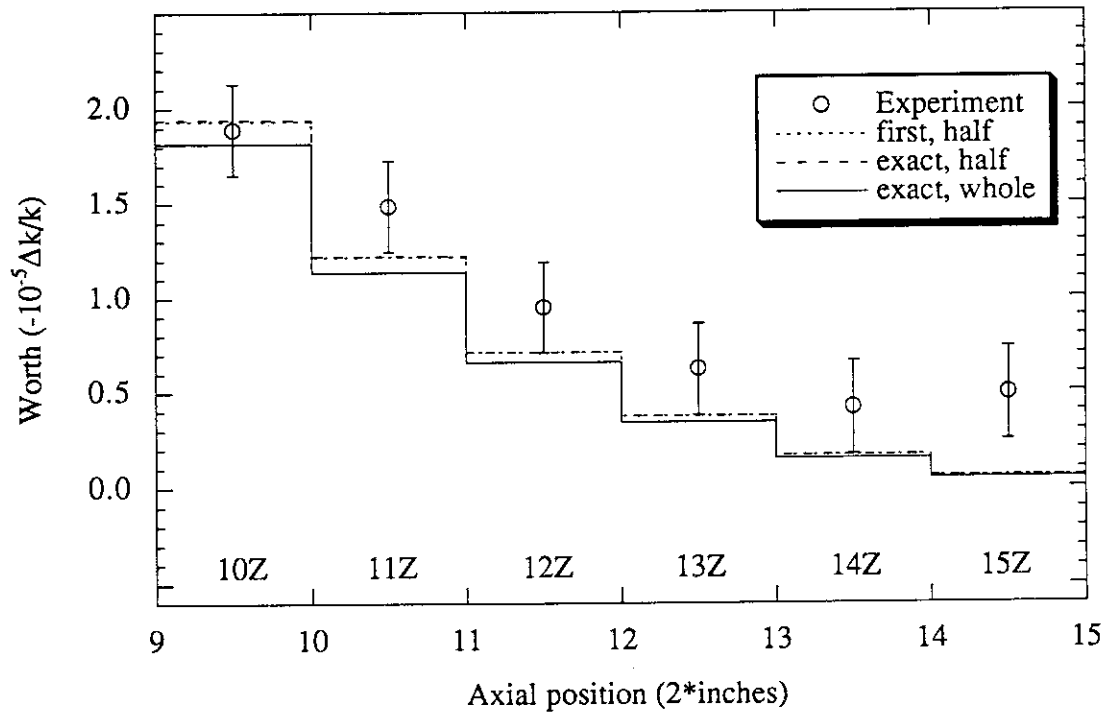


Fig.12 Comparison of Pu sample worths in the blanket region with the different models of the calculation

Table 8 Comparison of Pu sample worths with the different models of the calculation

Position	First, half	Exact, half	Exact, whole	Experiment	k_{eff}
1Z	1.02×10^{-4}	1.03×10^{-4}	1.03×10^{-4}	9.60×10^{-5}	0.99810
2Z	9.90×10^{-5}	9.92×10^{-5}	9.92×10^{-5}	9.80×10^{-5}	0.99810
3Z	9.25×10^{-5}	9.27×10^{-5}	9.27×10^{-5}	9.36×10^{-5}	0.99809
4Z	8.33×10^{-5}	8.35×10^{-5}	8.35×10^{-5}	8.44×10^{-5}	0.99809
5Z	7.22×10^{-5}	7.24×10^{-5}	7.23×10^{-5}	7.40×10^{-5}	0.99807
6Z	5.99×10^{-5}	6.00×10^{-5}	5.99×10^{-5}	6.35×10^{-5}	0.99806
7Z	4.73×10^{-5}	4.74×10^{-5}	4.72×10^{-5}	4.86×10^{-5}	0.99805
8Z	3.53×10^{-5}	3.54×10^{-5}	3.52×10^{-5}	4.12×10^{-5}	0.99804
9Z	2.49×10^{-5}	2.49×10^{-5}	2.46×10^{-5}	2.74×10^{-5}	0.99803
10Z	1.93×10^{-5}	1.94×10^{-5}	1.82×10^{-5}	1.89×10^{-5}	0.99802
11Z	1.22×10^{-5}	1.22×10^{-5}	1.14×10^{-5}	1.48×10^{-5}	0.99801
12Z	7.10×10^{-6}	7.10×10^{-6}	6.58×10^{-6}	9.49×10^{-6}	0.99801
13Z	3.74×10^{-6}	3.74×10^{-6}	3.43×10^{-6}	6.21×10^{-6}	0.99801
14Z	1.70×10^{-6}	1.70×10^{-6}	1.52×10^{-6}	4.18×10^{-6}	0.99800
15Z	6.12×10^{-7}	6.18×10^{-7}	4.94×10^{-7}	4.90×10^{-6}	0.99800

Fig.11とTable 9に見られるように、1次摂動、軸方向1/2炉心計算で得られたPuの反応度値も、厳密摂動、軸方向1/2炉心計算によって得られた値も、厳密摂動、全炉心計算によって得られたそれもほとんど差がなく、どの計算結果も測定誤差の範囲内で実験値と一致しているのが分かる。これはPuのサンプルが B_4C のサンプルのような強い中性子吸収体ではないために、中性子束分布に隆起が発生しないからであると考えられる。また、今回の実験で挿入したPuのサンプルはあまり大きくなかったため、どの計算モデルで計算しても差が現れなかったように思われる。

しかしながら、1Zにおける計算値は実験値を大きく過大評価している。この原因として考えられるのは、この全炉心計算ではFCAの密着面のギャップとステンレス鋼を考慮していないことが考えられる。この点については5.3節で考察する。

Table 9 Ratio of Pu sample worths obtained from the half core calculation to the ones from the whole core calculation

Position	First, half	Exact, half
1Z	0.998	1.001
2Z	0.998	1.000
3Z	0.998	1.000
4Z	0.998	1.000
5Z	0.999	1.001
6Z	1.000	1.002
7Z	1.001	1.003
8Z	1.004	1.006
9Z	1.009	1.010
10Z	1.065	1.069
11Z	1.073	1.075
12Z	1.080	1.079
13Z	1.091	1.089
14Z	1.122	1.122
15Z	1.240	1.252

5.2 DUO₂燃料板のコーティング剤に含まれている水素の影響

DUO₂燃料板(2-2-1/4")のコーティング剤重量は1枚当たり110mgであり、コーティング剤中の水素の重量比は3.2wt%である。従って、水素はDUO₂燃料板1枚当たり 2.120×10^{21} 個の原子を含むことになる。この水素をセル計算においてDUO₂燃料板に一様に混入ことにすると、DUO₂燃料板の水素の数密度は 6.46852×10^{19} atoms/cm³になる。このようにDUO₂セルに水素を混入して反応度値を計算し、水素を混入しない場合と比較することによってDUO₂燃料板のコーティング剤に含まれている水素の影響を調べた。なお、前節で述べたように全炉心計算と軸方向1/2炉心計算では1Z以外はあまり差が見られなかったので、厳密摂動、軸方向1/2炉心計算で反応度値を求めた。

B₄C反応度値の場合について、DUO₂燃料板のコーティング剤中の水素を考慮した場合としなかった場合の計算結果を比較したものをTable 10に示す。この結果から分かるように、水素を考慮した計算値は考慮しなかった値と比べると、1Zから10Zにおいてだいたい0.2%から0.4%ほど大きくなり、11Zから15Zでは0.2%から0.4%程度小さくなった。しかしながら、B₄Cの反応度値に対する水素の影響は1Zから7Zではだいたい実験誤差の30%程度であり、それ以外では実験誤差の30%以下の変化となり、ほとんど影響はない。従って、水素の混入によるスペクトル変化の影響は考慮しなくてもよいことが分かった。

Table 10 Comparison of B_4C sample worths with and without hydrogen in DUO_2 plates

Position	Worth ($\Delta k/k$) (Exact perturbation, half core calculation)		Ratio
	without hydrogen	with hydrogen	
1Z	-6.66×10^{-4}	-6.69×10^{-4}	1.004
2Z	-6.65×10^{-4}	-6.67×10^{-4}	1.004
3Z	-6.24×10^{-4}	-6.26×10^{-4}	1.004
4Z	-5.63×10^{-4}	-5.65×10^{-4}	1.004
5Z	-4.87×10^{-4}	-4.89×10^{-4}	1.003
6Z	-4.02×10^{-4}	-4.04×10^{-4}	1.003
7Z	-3.16×10^{-4}	-3.17×10^{-4}	1.003
8Z	-2.33×10^{-4}	-2.33×10^{-4}	1.003
9Z	-1.58×10^{-4}	-1.58×10^{-4}	1.002
10Z	-9.09×10^{-5}	-9.10×10^{-5}	1.002
11Z	-4.91×10^{-5}	-4.91×10^{-5}	1.000
12Z	-2.42×10^{-5}	-2.41×10^{-5}	0.998
13Z	-1.06×10^{-5}	-1.05×10^{-5}	0.996
14Z	-3.72×10^{-6}	-3.70×10^{-6}	0.995
15Z	-6.29×10^{-7}	-6.27×10^{-7}	0.996

B_4C 反応度値の場合と同様に、 DUO_2 燃料板のコーティング剤に含まれている水素がPu反応度値に及ぼす影響を調べた。Table 11は DUO_2 を含むセルに水素を混入し、厳密摂動、軸方向1/2炉心で計算したときの結果である。Table 11を見ると、 DUO_2 燃料板のコーティング剤に含まれている水素を考慮した計算と考慮しなかった計算ではほとんど差のない。従って、 B_4C 反応度値の場合と同様に、Pu反応度値でもコーティング剤に含まれている水素を考慮する必要がないことが分かった。

Table 11 Comparison of Pu sample worths with and without hydrogen in DUO₂ plates

Position	Worth ($\Delta k/k$) (Exact perturbation, half core calculation)		Ratio
	without hydrogen	with hydrogen	
1Z	1.03×10^{-4}	1.03×10^{-4}	0.999
2Z	9.92×10^{-5}	9.91×10^{-5}	0.999
3Z	9.27×10^{-5}	9.26×10^{-5}	0.999
4Z	8.35×10^{-5}	8.34×10^{-5}	0.999
5Z	7.24×10^{-5}	7.23×10^{-5}	0.999
6Z	6.00×10^{-5}	5.99×10^{-5}	0.999
7Z	4.74×10^{-5}	4.73×10^{-5}	0.998
8Z	3.54×10^{-5}	3.53×10^{-5}	0.998
9Z	2.49×10^{-5}	2.49×10^{-5}	0.998
10Z	1.94×10^{-5}	1.95×10^{-5}	1.002
11Z	1.22×10^{-5}	1.23×10^{-5}	1.004
12Z	7.10×10^{-6}	7.14×10^{-6}	1.006
13Z	3.74×10^{-6}	3.76×10^{-6}	1.006
14Z	1.70×10^{-6}	1.71×10^{-6}	1.005
15Z	6.18×10^{-7}	6.19×10^{-7}	1.002

5.3 反応度値に対する輸送効果

反応度値に対する輸送効果を求めるために、2次元輸送計算コードTWOTRAN-II⁹⁾を用いて角度中性子束分布を求め、角度依存摂動計算コードSNPERT-II¹⁰⁾を用いて摂動計算を行った。2次元RZ体系の48×35メッシュを70群で計算するのは非常に多くのCPU時間を必要とするので、25群に縮約して輸送計算を行った。この計算過程を示したものがFig.13である。

まず、CITATION-FBRを用いて70群の中性子束を求め、これを領域毎に積分する。このとき、Fig.14のようにT2領域とT2A1領域を3つの領域に分割し、それぞれについて積分中性子束を求める。求められた積分中性子束を用いて、それぞれの領域毎に断面積を25群に縮約する。こうして25群に縮約された断面積は拡散計算と輸送計算で用いられる。輸送計算の場合、2次元輸送計算コードTWOTRAN-IIにより、円柱体系、軸方向1/2炉心モデルを用い、S8計算で角度依存随伴中性子束および角度中性子束を求める。それらを角度依存摂動計算コードSNPERT-IIに入力し、厳密摂動計算によって反応度値を求める。また、拡散計算の場合、多次元拡散計算コードCITATION-FBRにより、輸送計算の場合と同じモデルで随伴中性子束および中性子束を求める。それらを拡散摂動計算コードPERKY¹¹⁾に入力し、厳密摂動計算によって反応度値を求める。

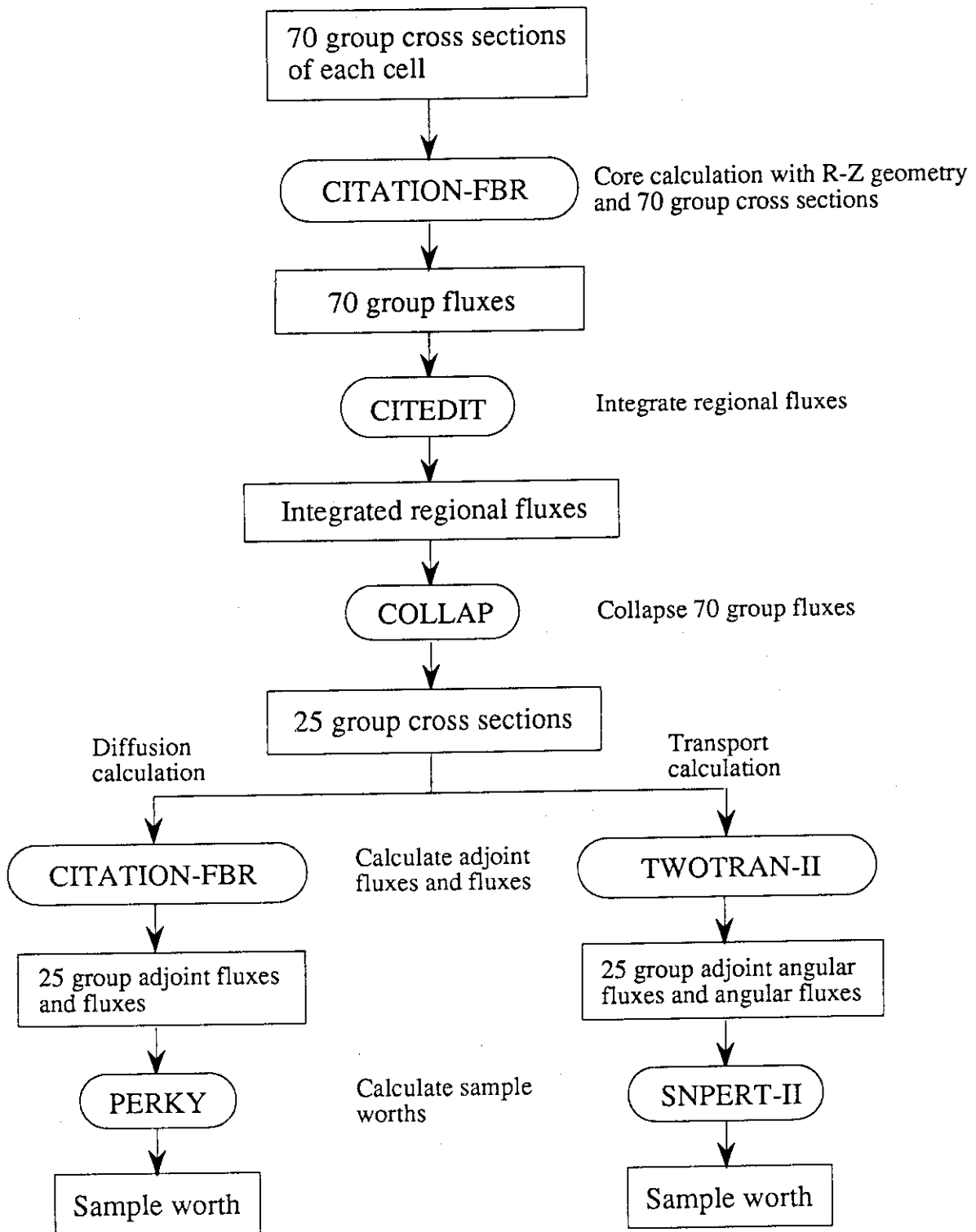


Fig. 13 Flowchart of the 25 group calculation

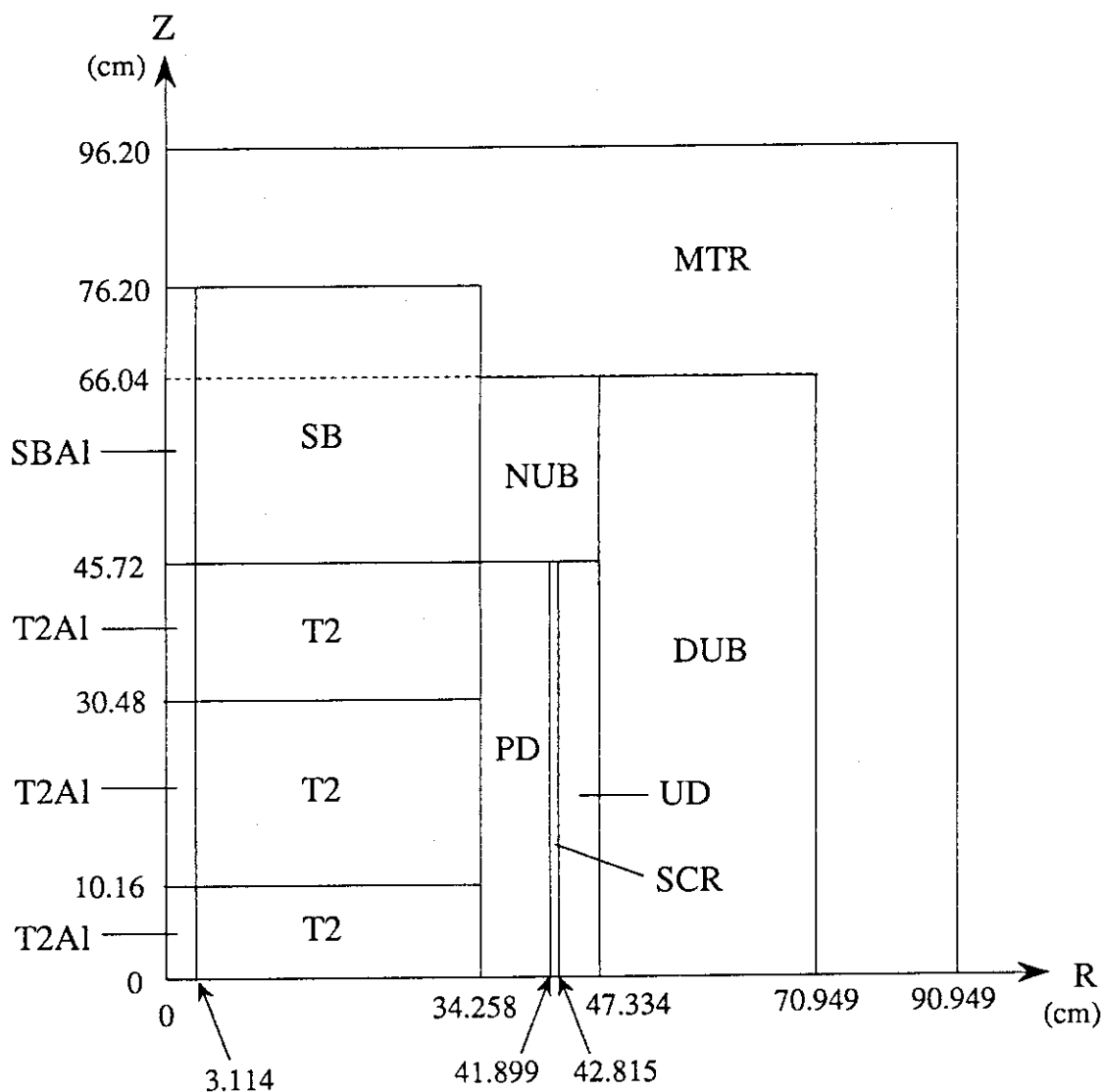


Fig. 14 Regions to integrate the fluxes

この計算過程において、縮約のために用いる中性子束を求めるために行った70群拡散計算と反応度値を求めるために行った25群拡散計算では拡散係数に $1/(3\Sigma_{tr})$ を用いた。なぜなら、TWOTRAN-IIでは中性子の異方性拡散を考慮することができないからである。こうして拡散計算で得られた反応度値と輸送計算で得られたものを比較し、輸送効果を見積もった。

このようにして得られた B_4C 反応度値を拡散計算と輸送計算で比較したものがTable 12である。比は拡散計算で得られた反応度値に対する輸送計算で得られた反応度値の値である。Table 12を見ると1Zから9Zの炉心領域では約3%から4%の輸送効果があり、10Zから15Zのブランケット領域では上端へ向かうほど拡散計算に対する輸送計算の比が大きくなっているのが分かる。これはブランケットの端では中性子の漏れが大きいため、輸送計算による反応度値が大きくなったからだと考えられる。

Table 12 Comparison of B_4C sample worths calculated with the diffusion model and with the transport model

Position	Worth ($\Delta k/k$) (Exact perturbation, half core calculation)		Ratio
	diffusion	transport	
1Z	-6.76E-4	-6.47E-4	0.958
2Z	-6.75E-4	-6.50E-4	0.962
3Z	-6.33E-4	-6.10E-4	0.963
4Z	-5.70E-4	-5.49E-4	0.963
5Z	-4.92E-4	-4.74E-4	0.964
6Z	-4.06E-4	-3.92E-4	0.965
7Z	-3.17E-4	-3.06E-4	0.965
8Z	-2.33E-4	-2.25E-4	0.966
9Z	-1.57E-4	-1.51E-4	0.965
10Z	-8.97E-5	-8.63E-5	0.962
11Z	-4.79E-5	-4.62E-5	0.964
12Z	-2.34E-5	-2.28E-5	0.974
13Z	-1.02E-5	-1.01E-5	0.997
14Z	-3.60E-6	-3.81E-6	1.058
15Z	-6.65E-7	-8.90E-7	1.339

同様にPu反応度値を拡散計算と輸送計算で比較したものをTable 13に示す。Pu反応度値の場合は炉心領域で約2%から3%の輸送効果があり、ブランケット領域では端に向かうほど、拡散計算に対する輸送計算の比が大きくなっている。 B_4C と同様にブランケットの端の位置では輸送効果が顕著に現れており、中性子の漏れによる影響がある。また、Puの場合には炉心とブランケットの境界において、輸送効果が5%と少し大きくなることが分かった。

Table 13 Comparison of Pu sample worths calculated with the diffusion model and with the transport model

Position	Worth ($\Delta k/k$) (Exact perturbation, half core calculation)		Ratio
	diffusion	transport	
1Z	1.04E-4	1.01E-4	0.973
2Z	1.00E-4	9.74E-5	0.972
3Z	9.35E-5	9.10E-5	0.973
4Z	8.41E-5	8.19E-5	0.973
5Z	7.28E-5	7.09E-5	0.974
6Z	6.02E-5	5.87E-5	0.975
7Z	4.74E-5	4.63E-5	0.977
8Z	3.52E-5	3.45E-5	0.979
9Z	2.47E-5	2.41E-5	0.976
10Z	1.90E-5	1.80E-5	0.949
11Z	1.18E-5	1.12E-5	0.948
12Z	6.80E-6	6.56E-6	0.964
13Z	3.53E-6	3.51E-6	0.994
14Z	1.58E-6	1.65E-6	1.049
15Z	5.50E-7	6.16E-7	1.120

5.4 反応度値に対する炉心ギャップの影響

この節ではFCAの密着面のギャップとステンレス鋼が反応度値に及ぼす影響について調べる。FCAは水平2分割炉心で固定側炉心と移動側炉心に分かれており、その間にギャップを生じる。Fig. 15はFCA密着面の様子を表しており、計算では0.5mmのギャップがあるものとしてモデル化した。更に、ドロワーと炉心格子のステンレス鋼が0.8mmの厚さで固定側炉心と移動側炉心それぞれに存在するとした。

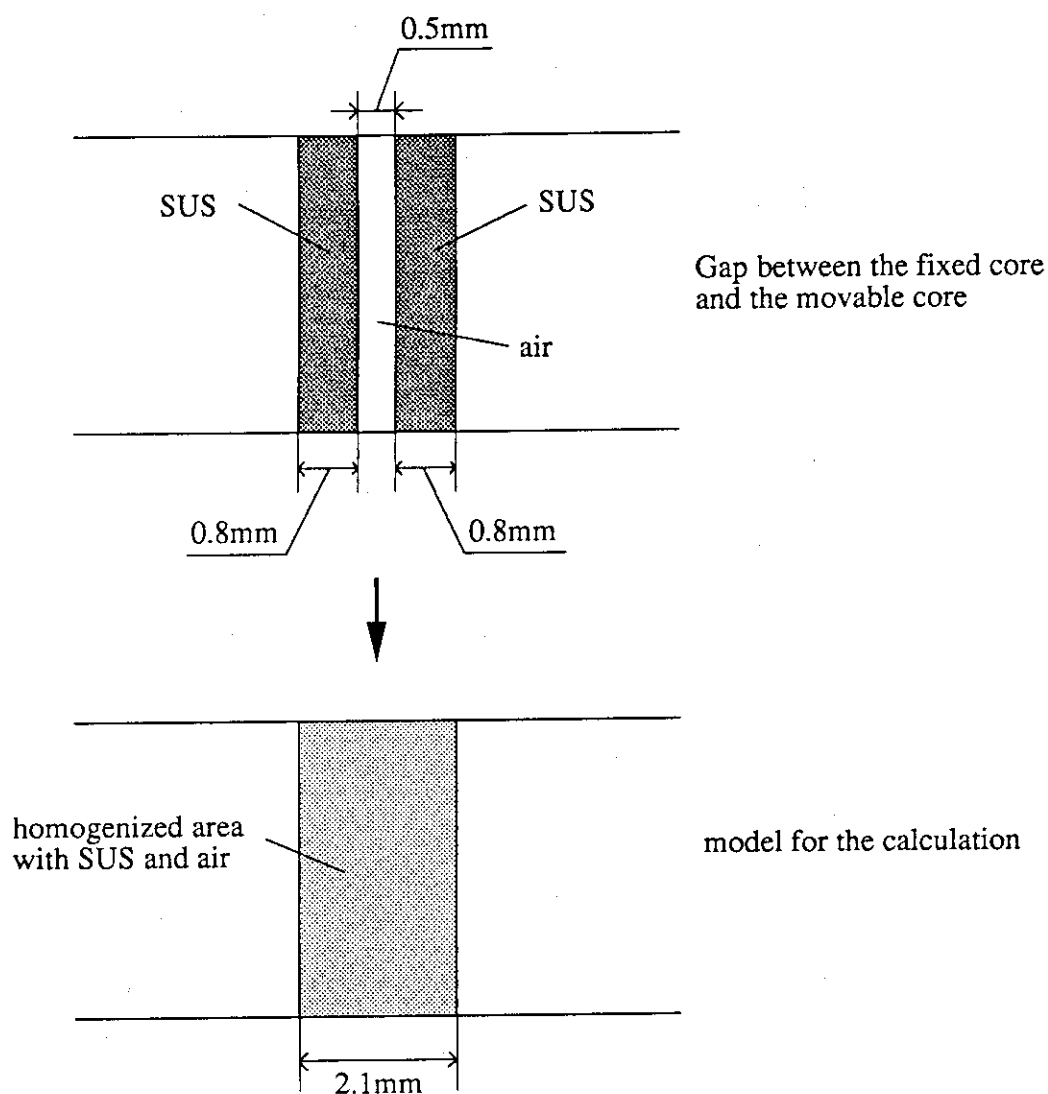


Fig.15 Gap between the fixed core and the movable core

拡散計算では空気のみが存在するギャップ領域があると正確な解が得られないので、ステンレス鋼の領域とギャップの領域を均質化することによって炉心計算を行った。均質化する際に、ギャップの領域は20℃、1atmの空気が存在するとして計算した。また、空気は80%の ^{14}N 、20%の ^{16}O で構成されているとした。

まず、 B_4C の反応度値について炉心間ギャップが反応度値に及ぼす影響を調べた。Table 14は炉心間のギャップを考慮したときとそうでないときの B_4C の反応度値を比較したものである。表から分かるように、 B_4C の場合では炉心間のギャップとステンレス鋼は反応度値にほとんど影響を及ぼさない。

Table 14 Comparison of B_4C sample worths calculated with the gap and without the gap at 1Z with diffusion calculation

Experiment	Calculation (without the gap)	Calculation (with the gap)	Gap effect
-7.079E-4	-6.902E-4	-6.898E-4	0.9994

同様にPuの反応度値について、炉心間ギャップが反応度値に及ぼす影響を調べたものがTable 15である。Puの場合でも、炉心間のギャップとステンレス鋼を考慮しても反応度値は0.2%しか変わらず、ほとんど影響がない。

Table 15 Comparison of Pu sample worths calculated with the gap and without the gap at 1Z with diffusion calculation

Experiment	Calculation (without the gap)	Calculation (with the gap)	Gap effect
9.597E-5	1.026E-4	1.024E-4	0.9981

更に炉心間ギャップを正確に模擬するために輸送計算を行い、炉心間ギャップとステンレス鋼が反応度値に及ぼす影響を調べた。輸送計算は4.3節で述べた計算過程と同様にして行い、計算時間を短縮するために炉心を軸方向1/2炉心として扱った。Table 16は B_4C 反応度値に炉心間ギャップとステンレス鋼を考慮した場合とそうでない場合を比較したものである。拡散計算の場合と同様に炉心間ギャップとステンレス鋼がある場合でもない場合とほとんど値が変わらない。従って、 B_4C 反応度値の場合、炉心間ギャップとステンレス鋼を考慮しなくてもよいことが分かった。

Table 16 Comparison of B_4C sample worths calculated with the gap and without the gap at 1Z with transport calculation

Experiment	Calculation (without the gap)	Calculation (with the gap)	Gap effect
-7.079E-4	-6.474E-4	-6.478E-4	1.0006

同様にPu反応度値について比較したものがTable 17である。Pu反応度値についても、炉心間ギャップとステンレス鋼の影響は約0.3%程度しかなく、それらの影響は無視できることが分かった。

Table 17 Comparison of Pu sample worths calculated with the gap and without the gap at 1Z with transport calculation

Experiment	Calculation (without the gap)	Calculation (with the gap)	Gap effect
9.597E-5	1.009E-4	1.006E-4	0.9966

5.5 反応度値に対するメッシュ効果

ここでは拡散計算で得られた反応度値に対するメッシュ効果について調べる。 B_4C 及びPuの反応度値それぞれについてその影響を調べた。

B_4C 及びPuともに、径方向、軸方向のメッシュ数を変えて、5Zの位置における反応度値を厳密摂動、軸方向1/2炉心で計算した。この際、 DUO_2 燃料板のコーティング剤に含まれている水素も考慮したが、結果にほとんど影響がないことは既に述べた。

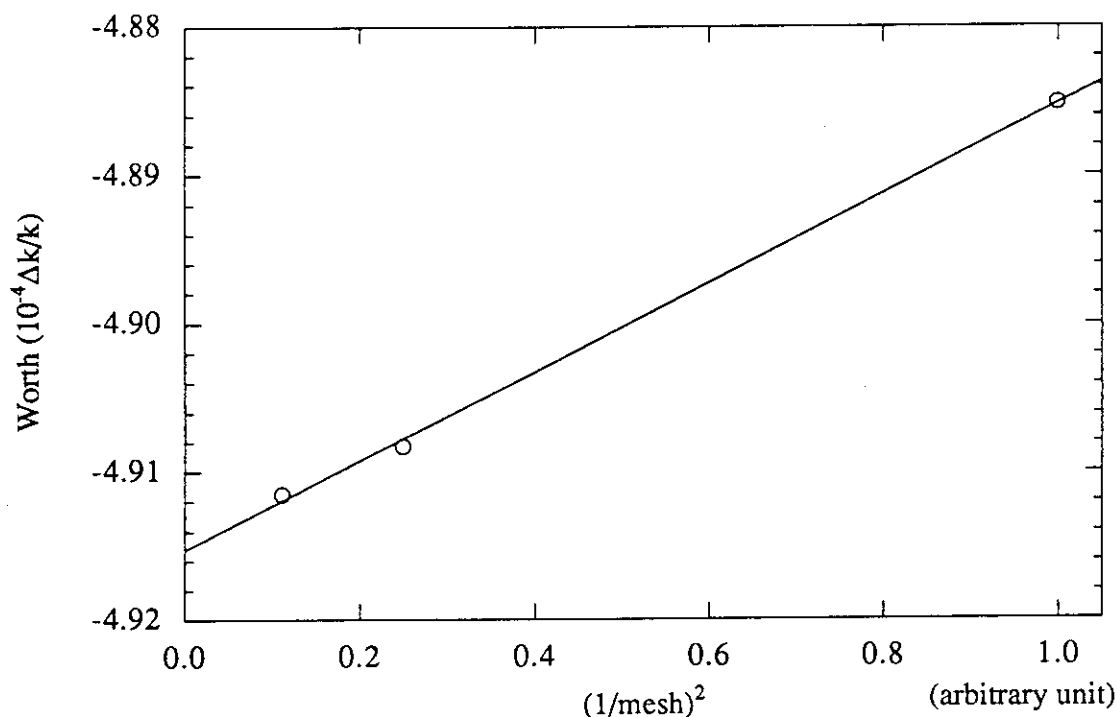


Fig.16 Mesh effect of radial direction on B_4C sample worths at 5Z

Fig.16は径方向のメッシュ数を48、96、144と変化させたときの B_4C 反応度値の変化を表している。この3点を外挿した点、即ちメッシュ数を無限大にしたときの反応度値は反応度値は $-4.92 \times 10^{-4} \Delta k/k$ である。径方向のメッシュ数が48のときの反応度値は $-4.89 \times 10^{-4} \Delta k/k$ であったので、径方向のメッシュ効果は0.61%あることが分かった。

Fig.17は軸方向のメッシュ数を35、54、70を変化させたときの B_4C 反応度値の変化を表している。径方向の場合と同様に、メッシュ数を無限大にしたときの反応度値は $-4.92 \times 10^{-4} \Delta k/k$ である。従って、軸方向のメッシュ効果は0.79%あることになる。以上の結果より、径方向及び軸方向のメッシュ効果を考慮すると B_4C 反応度値は絶対値で1.41%大きくなることが分かった。

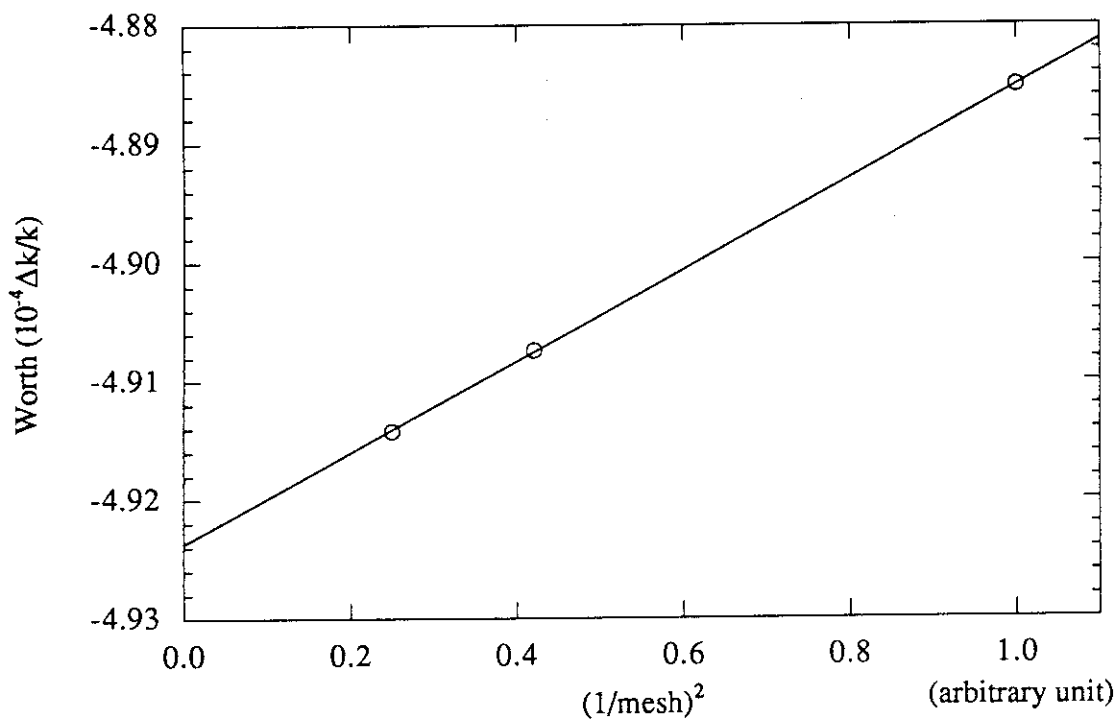


Fig.17 Mesh effect of axial direction on B_4C sample worths at 5Z

B_4C 反応度値と同様にしてPu反応度値に対するメッシュ効果も調べた。Fig.18は径方向のメッシュ数を48、96、144と変化させたときのPu反応度値の変化を表している。 B_4C 反応度値の場合と違い、径方向のメッシュ効果はほとんどないことが分かる。

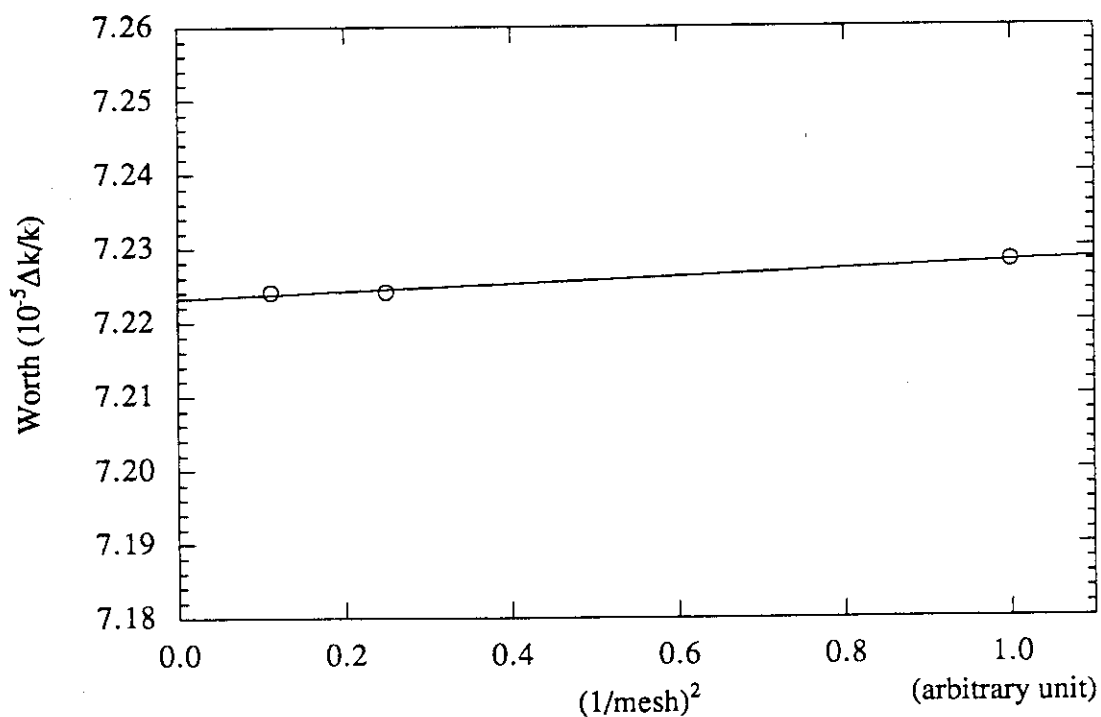


Fig.18 Mesh effect of radial direction on Pu sample worths at 5Z

次に軸方向のメッシュ効果であるが、Fig.19は軸方向のメッシュ数を35、54、70を変化させたときのPu反応度値の変化を表している。この場合も、ほとんどメッシュ効果はないことが分かる。従って、Pu反応度値の計算ではメッシュ効果は考慮する必要がない。

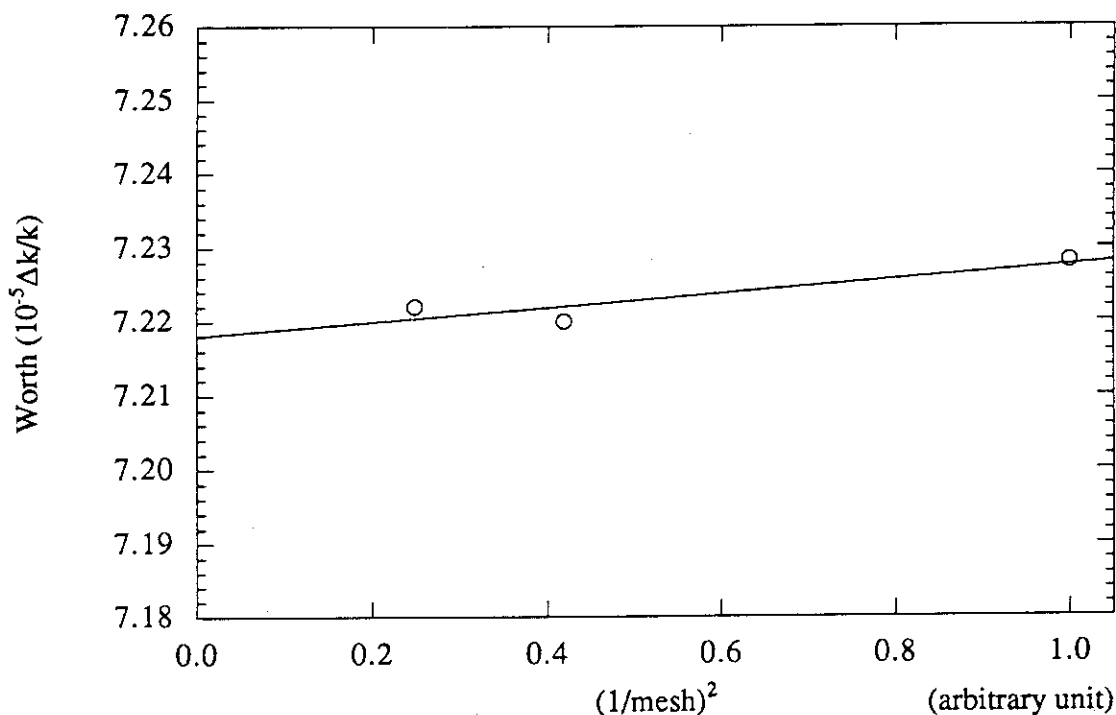


Fig.19 Mesh effect of axial direction on Pu sample worths at 5Z

5.6 実験値と計算値の比較

今までの節でサンプルの反応度値に対する様々な影響を調べてきた。ここでは、これらの影響を考慮し、最も正確であると思われる計算値を推定し、実験値と比較する。Table 18とTable 19はそれぞれ中性子拡散の異方性を考慮した、全炉心、厳密摂動計算を基準として、DUO₂燃料板のコーティング剤に含まれている水素の効果、輸送効果、炉心間ギャップの効果、メッシュ効果を補正したときのB₄CとPu反応度値を表したものである。ここで、B₄C及びPu反応度値とも炉心間ギャップとステンレス鋼は2Z以降の反応度値に影響を及ぼさないものとした。また、Pu反応度値ではメッシュ効果はないものとした。

これらの図から分かるようにB₄C反応度値では輸送効果とメッシュ効果だけを補正し、Pu反応度値では輸送効果だけを補正すれば十分であることが分かる。

Table 18 Corrected B₄C sample worths

Position	Worth($\Delta k/k$) Exact, whole core	Correction for each effect				Corrected worth
		Hydrogen	Transport	Gap	Mesh	
1Z	-6.90×10^{-4}	0.999	0.973	1.0006	1.014	-6.73×10^{-4}
2Z	-6.69×10^{-4}	0.999	0.972	— ^{a)}	1.014	-6.55×10^{-4}
3Z	-6.25×10^{-4}	0.999	0.973	—	1.014	-6.13×10^{-4}
4Z	-5.63×10^{-4}	0.999	0.973	—	1.014	-5.52×10^{-4}
5Z	-4.87×10^{-4}	0.999	0.974	—	1.014	-4.77×10^{-4}
6Z	-4.03×10^{-4}	0.999	0.975	—	1.014	-3.96×10^{-4}
7Z	-3.16×10^{-4}	0.998	0.977	—	1.014	-3.10×10^{-4}
8Z	-2.33×10^{-4}	0.998	0.979	—	1.014	-2.29×10^{-4}
9Z	-1.59×10^{-4}	0.998	0.976	—	1.014	-1.56×10^{-4}
10Z	-9.37×10^{-5}	1.002	0.949	—	1.014	-9.16×10^{-5}
11Z	-5.11×10^{-5}	1.004	0.948	—	1.014	-5.00×10^{-5}
12Z	-2.54×10^{-5}	1.006	0.964	—	1.014	-2.50×10^{-5}
13Z	-1.13×10^{-5}	1.006	0.994	—	1.014	-1.14×10^{-5}
14Z	-4.15×10^{-6}	1.005	1.049	—	1.014	-4.43×10^{-6}
15Z	-9.02×10^{-7}	1.002	1.120	—	1.014	-1.22×10^{-6}

a) not considered

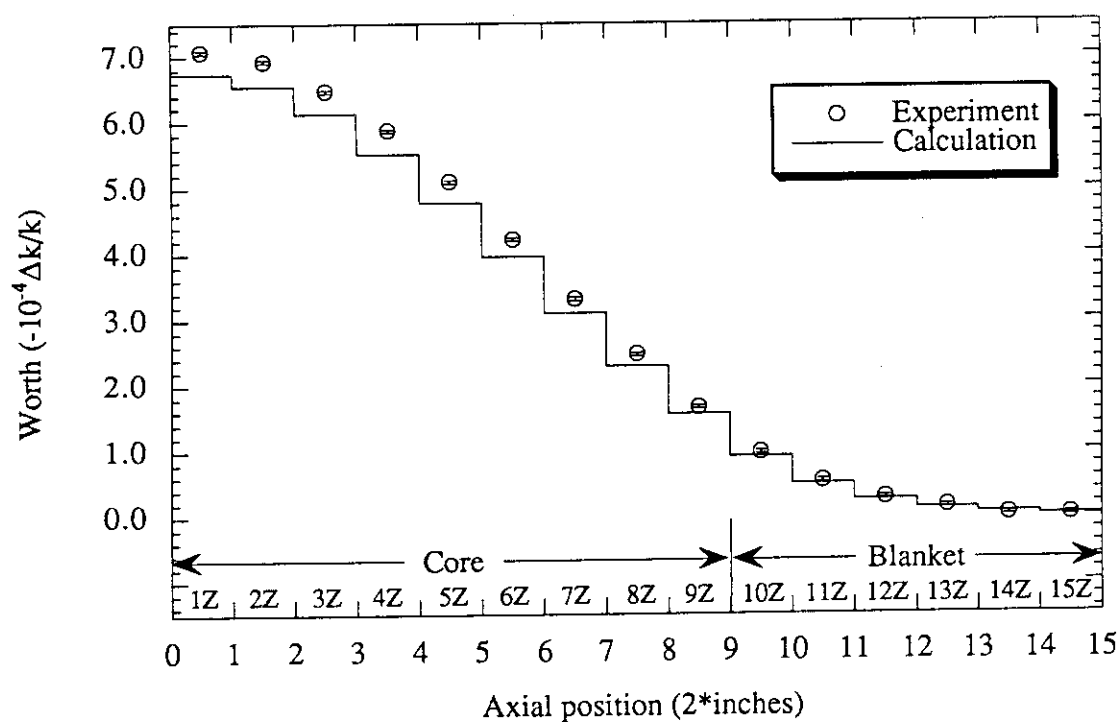
次に、これら補正された値と実験値とを比較した。B₄C反応度価値の場合について、補正された計算値と実験値とを比較したものがFig.20とTable 20である。1Zから9Zの炉心領域では計算値と実験値の間に約5%から7%の差を生じ、炉心端に向かうにつれてその割合は大きくなる傾向がある。炉心に近い10Z、11Zのブランケット領域では6%、7%の差で実験値を再現するが、それよりも端の領域では差が10%以上になる。これら差はこの実験で用いられた単位 ρ_0 に付随する誤差、実験データの不確かさ、炉心体系を円柱で模擬したときの誤差、セルを均質化したときの誤差等が含まれると考えられるが、これらを定量的に取り扱うのは非常に困難であるのでここでは考慮しない。また、14Zや15Zでは実験値よりも実験誤差の方が大きくなってしまい、測定する意味がない。従って、B₄C反応度価値の場合、今のサンプルの大きさでは1Zから11Zまでは実験によって測定可能であり、12Z以降ではもっと大きなサンプルを用いなければ、精度よく測定するのは困難であることが分かった。

Table 19 Corrected Pu sample worths

Position	Worth($\Delta k/k$) Exact, whole core	Correction for each effect				Corrected worth
		Hydrogen	Transport	Gap	Mesh	
1Z	1.03×10^{-4}	1.004	0.958	0.9966	—	9.94×10^{-5}
2Z	9.92×10^{-5}	1.004	0.962	— ^{a)}	—	9.63×10^{-5}
3Z	9.27×10^{-5}	1.004	0.963	—	—	9.01×10^{-5}
4Z	8.35×10^{-5}	1.004	0.963	—	—	8.12×10^{-5}
5Z	7.23×10^{-5}	1.003	0.964	—	—	7.04×10^{-5}
6Z	5.99×10^{-5}	1.003	0.965	—	—	5.84×10^{-5}
7Z	4.72×10^{-5}	1.003	0.965	—	—	4.61×10^{-5}
8Z	3.52×10^{-5}	1.003	0.966	—	—	3.44×10^{-5}
9Z	2.46×10^{-5}	1.002	0.965	—	—	2.40×10^{-5}
10Z	1.82×10^{-5}	1.002	0.962	—	—	1.73×10^{-5}
11Z	1.14×10^{-5}	1.000	0.964	—	—	1.08×10^{-5}
12Z	6.58×10^{-6}	0.998	0.974	—	—	6.38×10^{-6}
13Z	3.43×10^{-6}	0.996	0.997	—	—	3.43×10^{-6}
14Z	1.52×10^{-6}	0.995	1.058	—	—	1.60×10^{-6}
15Z	4.94×10^{-7}	0.996	1.339	—	—	5.54×10^{-7}

a) not considered

同様にPu反応度価値の場合について、補正された計算値と実験値とを比較したものがFig.21とTable 21である。1Zから5Zの炉心領域では計算値は実験値の5%以内に収まるが、6Zから9Zの炉心領域では10%から15%の差を生じる。ブランケット領域でも10%以上の差を生じ、あまり計算値と実験値は一致しない。これら一致しない原因として、 B_4C 反応度価値の場合と同様、この実験で用いられた単位 ρ_0 に付随する誤差、実験データの不確かさ、炉心体系を円柱で模擬したときの誤差、セルを均質化したときの誤差等が考えられるが、Puのワースが非常に小さいため実験値と計算値の差の割合が大きくなっているとみなすことができる。また、14Zや15Zでは実験値と実験誤差がだいたい同じぐらいになり、測定する意味がない。従って、Pu反応度価値の場合も、今のサンプルの大きさでは1Zから11Zまでは実験によって測定可能であり、12Z以降ではもっと大きなサンプルを用いなければ、精度よく測定するのは困難である。

Fig.20 B₄C sample worths in FCA XVII-1 coreTable 20 Comparison of B₄C(90%) sample worths in FCA XVII-1 core between the experiment and the calculation

Position	Experiment	Calculation	C/E
1Z	$(-7.08 \pm 0.024) \times 10^{-4}$	-6.73×10^{-4}	0.951
2Z	$(-6.93 \pm 0.024) \times 10^{-4}$	-6.55×10^{-4}	0.945
3Z	$(-6.47 \pm 0.024) \times 10^{-4}$	-6.13×10^{-4}	0.947
4Z	$(-5.87 \pm 0.024) \times 10^{-4}$	-5.52×10^{-4}	0.940
5Z	$(-5.10 \pm 0.024) \times 10^{-4}$	-4.77×10^{-4}	0.936
6Z	$(-4.22 \pm 0.024) \times 10^{-4}$	-3.96×10^{-4}	0.937
7Z	$(-3.31 \pm 0.024) \times 10^{-4}$	-3.10×10^{-4}	0.936
8Z	$(-2.47 \pm 0.024) \times 10^{-4}$	-2.29×10^{-4}	0.926
9Z	$(-1.66 \pm 0.024) \times 10^{-4}$	-1.56×10^{-4}	0.941
10Z	$(-9.73 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	-9.16×10^{-5}	0.941
11Z	$(-5.36 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	-5.00×10^{-5}	0.932
12Z	$(-2.80 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	-2.50×10^{-5}	0.894
13Z	$(-1.39 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	-1.14×10^{-5}	0.821
14Z	$(-2.17 \pm 2.412) \times 10^{-6}$	-4.43×10^{-6}	2.042
15Z	$(-7.80 \pm 24.12) \times 10^{-7}$	-1.22×10^{-6}	1.565

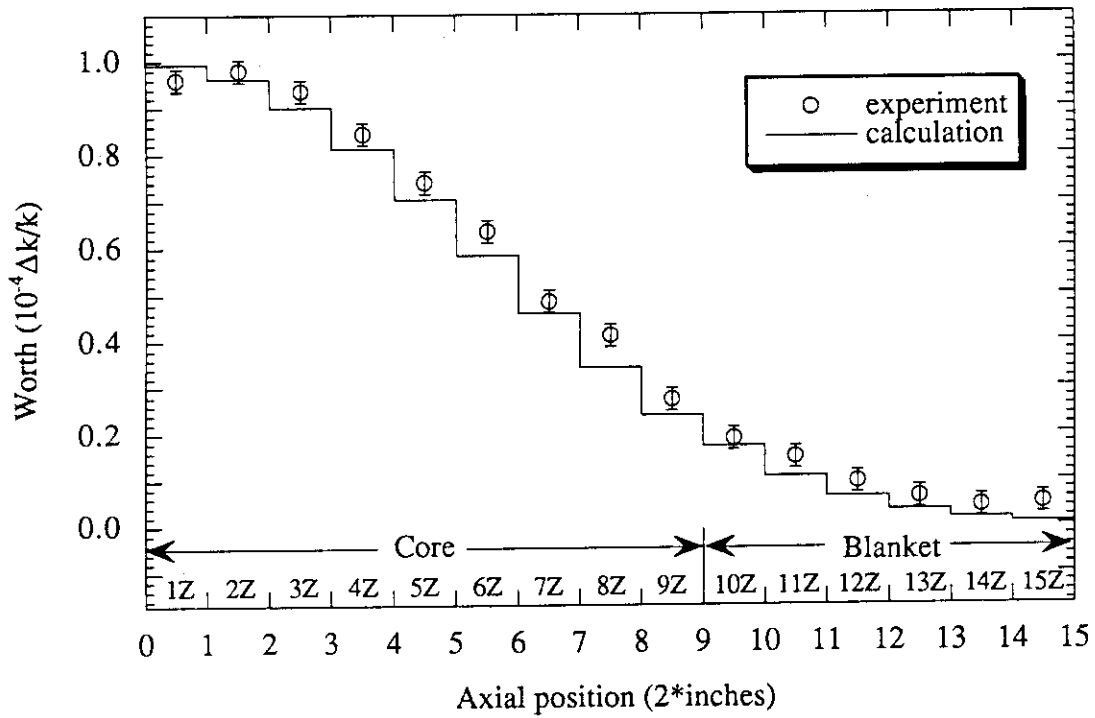


Fig.21 Pu sample worths in FCA XVII-1 core

Table 21 Comparison of Pu sample worths in FCA XVII-1 core between the experiment and the calculation

Position	Experiment	Calculation	C/E
1Z	$(9.60 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	9.94×10^{-5}	1.035
2Z	$(9.80 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	9.63×10^{-5}	0.983
3Z	$(9.36 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	9.01×10^{-5}	0.963
4Z	$(8.44 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	8.12×10^{-5}	0.962
5Z	$(7.40 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	7.04×10^{-5}	0.951
6Z	$(6.35 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	5.84×10^{-5}	0.919
7Z	$(4.86 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	4.61×10^{-5}	0.949
8Z	$(4.12 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	3.44×10^{-5}	0.835
9Z	$(2.74 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	2.40×10^{-5}	0.876
10Z	$(1.89 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	1.73×10^{-5}	0.914
11Z	$(1.48 \pm 0.241) \times 10^{-5}$	1.08×10^{-5}	0.729
12Z	$(9.49 \pm 2.412) \times 10^{-6}$	6.38×10^{-6}	0.673
13Z	$(6.21 \pm 2.412) \times 10^{-6}$	3.43×10^{-6}	0.553
14Z	$(4.18 \pm 2.412) \times 10^{-6}$	1.60×10^{-6}	0.382
15Z	$(4.90 \pm 2.412) \times 10^{-6}$	5.54×10^{-7}	0.113

6. まとめ

FCA XVII-1炉心において B_4C 及びPuの反応度値を測定し、様々な計算モデルを用いた計算値との比較を行い、以下のような結果が得られた。

- ・ B_4C の反応度値を1次摂動で計算すると、サンプルの入った部分の、局所的な中性子束の歪を考慮していないために過大評価した。
- ・炉心中央部分の1Zと2Zでは、 B_4C の反応度値の場合、厳密摂動、軸方向1/2炉心で計算した値は厳密摂動、全炉心計算で計算した値よりも小さくなる。Puの場合、軸方向1/2炉心で計算しても、全炉心計算との差はほとんど見られなかった。これは、 B_4C の場合はサンプル領域での中性子束の落ち込みが大きい、Puの場合はサンプル領域において中性子束はあまり隆起しないと考えられる。
- ・ DUO_2 燃料板のコーティング剤に含まれている水素を考慮して計算しても、 B_4C やPuの反応度値では、実験誤差以下の影響しかなく、 DUO_2 燃料板のコーティング剤に含まれている水素は考慮しなくてもよい。
- ・輸送計算の結果は、 B_4C 反応度値の場合、炉心領域では約3%から4%ほど拡散計算の値を下回り、Pu反応度値の場合、約2%から3%ほど下回ることが分かった。また、ブランケットの端の領域では漏れによる輸送効果が大きく現れることが分かった。
- ・炉心間ギャップとステンレス鋼は B_4C 及びPu反応度値にはほとんど影響を及ぼさず、炉心間ギャップとステンレス鋼は考慮しなくてもよい。
- ・メッシュ効果について調べた結果、 B_4C の反応度値では絶対値で約1.41%ほど過小評価するが、Puの反応度値ではメッシュ効果はほとんど現れなかった。
- ・ブランケット領域の反応度値については、炉心よりの10Zと11Zは比較的精度良く測定できたが、ブランケットの端の領域では反応度値の絶対値が非常に小さくなり、実験値が実験誤差に埋もれてしまった。

今後、解析で考慮しなければならない点は、核データの不確かさ、計算モデルの簡略化の影響、セルを均質化したときの誤差等を量的に見積もることである。核データの不確かさを評価するにはいくつかの核データを用いてその差を比較してみたり、核データに付随する誤差を考慮する方法があるが、後者の方法はまだ実用的ではない。計算モデルの簡略化の影響、セルを均質化したときの誤差を評価する方法についてはモンテカルロ計算によって炉心体系を厳密に模擬し、直接反応度を計算する等の方法が考えられるが、今のところ不可能である。

謝辞

本実験の解析にあたり、多くの有益な助言を頂いた土橋敬一郎氏（原子炉システム研究室室長）、コードの使用について御協力下さった中川正幸氏（原子炉システム研究室）、飯島進氏（高速炉物理研究室）、大井川宏之氏（高速炉物理研究室）に深く感謝致します。また、実験を支えてくれたFCAのスタッフに感謝いたします。

参考文献

- 1) 飯島進, 他: "FCA XVII-1 集合体", 公刊予定
- 2) Nakagawa M. and Tsuchihashi K.: "SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", JAERI 1294 (1984)
- 3) Shibata K., et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3", JAERI 1319 (1990)
- 4) 高野秀機: 私信, (1994)
- 5) 中川正幸, 他: "高速炉の核特性解析コードシステム", JAERI-M 83-066 (1983)
- 6) 飯島進: "EXPARAM", 公刊予定
- 7) 中川正幸, 徳野幸男: "CIPER: 2・3次元拡散摂動計算コード", JAERI-M 6722 (1976)
- 8) Benoist P.: CEA-R-2278 (1964)
- 9) Lathrop K, Brinkley F.: "TWOTRAN-II", LA-4848-MS (1973)
- 10) 角田弘和: 私信, (1994)
- 11) 飯島進: "PERKY", JAERI-M 6993 (1977)

謝辞

本実験の解析にあたり、多くの有益な助言を頂いた土橋敬一郎氏（原子炉システム研究室室長）、コードの使用について御協力下さった中川正幸氏（原子炉システム研究室）、飯島進氏（高速炉物理研究室）、大井川宏之氏（高速炉物理研究室）に深く感謝致します。また、実験を支えてくれたFCAのスタッフに感謝いたします。

参考文献

- 1) 飯島進, 他: "FCA XVII-1 集合体", 公刊予定
- 2) Nakagawa M. and Tsuchihashi K.: "SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", JAERI 1294 (1984)
- 3) Shibata K., et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3", JAERI 1319 (1990)
- 4) 高野秀機: 私信, (1994)
- 5) 中川正幸, 他: "高速炉の核特性解析コードシステム", JAERI-M 83-066 (1983)
- 6) 飯島進: "EXPARAM", 公刊予定
- 7) 中川正幸, 徳野幸男: "CIPER: 2・3次元拡散摂動計算コード", JAERI-M 6722 (1976)
- 8) Benoist P.: CEA-R-2278 (1964)
- 9) Lathrop K, Brinkley F.: "TWOTRAN-II", LA-4848-MS (1973)
- 10) 角田弘和: 私信, (1994)
- 11) 飯島進: "PERKY", JAERI-M 6993 (1977)