

JAERI - M  
84-230

SRACコードシステムによるIAEA研究炉  
ベンチマークの解析のための計算方法の検討

1984年12月

森 正明\*・土橋 敬一郎

JAERI-M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、お申しこしてください。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。

JAERI-M reports are 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, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷(株)

SRACコードシステムによるIAEA研究炉ベンチマーク  
の解析のための計算方法の検討

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

森 正明<sup>\*</sup>・土橋 敬一郎

(1984年11月30日受理)

研究炉の核的解析を行うにあたり、先ず、当面する問題は、燃料板を単位とする周期配列と、これを束ねた燃料要素の配列から生ずる二重非均質性の取扱いであり、更に少数群定数の縮約に伴う取扱いである。IAEAの研究・試験炉の濃縮度低減化のためのガイドブックに掲載してあるベンチマーク炉心に更にガイドプレート中に可燃性毒物板を挿入したものを対象として、SRACコードシステムを用いて、いろいろの計算方法を試みた。多群非均質輸送計算を基準として比べると、拡散計算の場合は、アルミのような透明な物質でできているガイドプレートを非均質に取扱うよりも、その近傍の水と均質化したうえで、炉心計算を行うと、 $k_{eff}$  や可燃性毒物効果は基準値と良好な一致を見ることが結論された。

---

\* 京都大学

Study of Calculation Methods for the Analysis of the IAEA  
Research Reactor Benchmark Using the SRAC Code System

Masaaki MORI\* and Keiichiro TSUCHIHASHI

Department of Reactor Engineering  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 30, 1984)

In the neutronic analysis of research reactor, we encounter the problems how to solve the double heterogeneity induced by the periodic array of fuel plates in a fuel elements, and induced by the array of the elements, and how to compose the few group constants for the core calculation. A variety of calculation methods were examined for the research reactor benchmark with additional burnable poison in the guide plates, which is specified in the IAEA guidebook for the Reduced Enrichment of Research and Test Reactors, using the SRAC code system.

It is concluded that the core calculation by the diffusion theory gives better agreement with the multi-group transport theory code in the  $k_{eff}$  and the burnable poison reactivity worth if a homogeneous mixture of aluminum guide plate which is optically transparent, with the surrounding water is supposed than the treatment that the exact geometry of the guide plate is considered.

Keywords: SRAC Code System, Research Reactor, Analysis, Cell Calculation, Core Calculation, Benchmark, Burnable Poison

---

\* Kyoto University

## 目 次

1. 序 .....	1
2. 計算対象炉心 .....	2
3. 解析方法 .....	6
3.1 一次格子計算 .....	6
3.2 標準燃料要素の二次格子計算 .....	6
a) TWOTRANを用いた二次格子計算 .....	6
b) 衝突確率法を用いた二次格子計算 .....	7
3.3 制御燃料要素の二次格子計算 .....	7
3.4 縮約群定数を用いた炉心計算 .....	7
3.5 二次格子計算を用いない炉心非均質計算 .....	7
3.6 アルミ領域（燃料側板及びflux trap）の取扱い .....	8
4. 計算結果及び考察 .....	22
4.1 炉心非均質計算 .....	22
4.2 CITATIONのメッシュ効果とアルミのボイド効果 .....	22
4.3 標準燃料要素の二次格子計算にTWOTRANを用いた計算 .....	23
4.4 標準燃料要素の二次格子計算に衝突確率法を用いた計算 .....	23
5. 結 論 .....	28
参考文献 .....	28
付録A 制御棒反応度効果 .....	29

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Specifications of the Benchmark Reactor Core .....	2
3. Calculation Methods .....	6
3.1 Primary Cell Calculation .....	6
3.2 Secondary cell calculation for the standard fuel element .....	6
a) Secondary cell calculation by TWOTRAN .....	6
b) Secondary cell calculation by the collision pro- bability method .....	7
3.3 Secondary cell calculation for the control fuel element .....	7
3.4 Core calculation by few group constants .....	7
3.5 Heterogeneous core calculation without secondary calculation .....	7
3.6 Treatment of Aluminum region (side plate and flux trap) .....	8
4. Results and Discussions .....	22
4.1 Heterogeneous core calculation .....	22
4.2 Mesh effect and void effect due to Aluminum region in using CITATION .....	22
4.3 Calculation using TWOTRAN in the secondary cell calculation for the standard fuel element .....	23
4.4 Calculation using the collision probability method in the secondary cell calculation for the standard fuel element .....	23
5. Conclusion .....	28
References .....	28
Appendix A Reactivity worths of control rods .....	29

## 1. 序

原研では研究・試験炉の濃縮度低減化のための炉心変換や改造が行われているが、京都大学原子炉実験所でもKURやKUHFR(新設予定の高中性束炉)の低濃縮化が準備されており、臨界集合体を用いた模擬炉心の実験が進められている。原研及び京大炉実験所では、核的設計や実験解析には原研熱中性子炉標準体系核設計コードシステム、SRAC<sup>1)</sup>が利用されている。

SRACコード・システムは汎用性があり、目的に応じて種々の計算方法を利用者が選択できるが、その反面、炉物理の裏付けのない計算方法の組合せを行ったために予想に反する結果を得ることがある。

一般の研究炉は板状燃料を用いるが、これらを解析するうえで、二重非均質性を考慮する必要がある。即ち一枚の燃料板を単位とする周期構造があり、更に約20枚の燃料板がガイドプレートに固定されて燃料要素を形成するので、要素の配列による巨視的な周期構造が存在する。幸いに研究炉では炉内に配置される燃料要素の数が20～40と比較的少ないので、後者の非均質性は直接炉心計算の中で考慮することも可能である。

更に次の問題として研究炉の炉心燃焼計算は計算時間を要する三次元拡散ルーチンを繰り返し使用するために、少数群計算が行われるが、KUHFRを模擬した京大臨界集合体二分割炉心では、その幾何形状の複雑さのためにやはり少数群計算が行われる。従って正確な多群計算と同様な結果を与える少数群定数を導出することは、研究炉の設計、解析に共通な問題である。

本解析の対象としては、精度の高い多群輸送計算が可能な幾何形状のものを選び、そこでいろいろの計算方法を用いて、精度のよい均質化の方法や少数群定数の作成方法を検討することにした。そこで、IAEAの炉心変換のためのガイドブック<sup>2)</sup>に掲載されている仮想的な研究炉の中濃縮燃料初装荷炉心(燃焼度0)について、燃料側板に可燃性毒物(boron burnable poison, 以下BPと略す)を入れた場合及び入れない場合について多群非均質輸送計算とSRACの様々なオプションを使った少数群拡散計算を行い、両者の結果を比較したものである。

更に上記ガイドブックの続編として出版を予定されている安全と許認可事項のためのガイドブック<sup>3)</sup>に準備されている、フォーク型制御板の反応度の解析も、同じ実習期間中に行ったので付録として掲載する。

---

昭和59年度夏季実習生として、京都大学工学研究科原子核工学専攻修士課程在学中の森正明が炉物理実験研究室に約40日滞在して、この目的のために、本解析を主として行った。

## 2. 計算対象炉心

計算の対象としたMEU(濃縮度45%)炉心に関するデータをTable 2.1に示し、燃料板のミート部とAl被覆の厚み、及び燃料板ピッチをFig. 2.1に、標準燃料要素と制御燃料要素のX-Y平面図をFig. 2.2及び2.3に、炉心構成図をFig. 2.4に示す。標準燃料要素は23枚の同一燃料板から成っている。今回の計算では、燃料側板にBPが入ったときの解析方法を検討する目的で、標準燃料要素の外側から1.5mmの所に厚さ1mmのBPの層を入れた場合の計算を行った。BPが入らない場合にはこの層はAlで置き換えられる。

制御燃料要素は4枚のAl板と17枚の燃料板から成っており、外側とそれに続くAl板の間には制御板を入れるために燃料板1枚分の間隔があげられている。異なった計算方法間の条件を同じにするため、この制御燃料要素にはBPを入れず、すべての計算で同じ取り扱いとした(無限平板衝突確率法)。



Table 2.1 Specifications of IAEA Benchmark Problem

Aims: Comparison of the different calculation methods and cross-section data sets used in different laboratories, limited conclusions for real conversion problems.

Specifications for the Methodical Benchmark-Problem

data and Specifications Agreed Upon:

Active Core Height 600 mm  
 Extrapolation Length 80 mm (in 80 mm distance from the core, the cosine-shaped flux goes to zero)  
 X-Y Calculations only

Space at the grid plate per fuel element 77 mm x 81 mm

Fuel element cross-section  
 76 mm x 80.5 mm including support plate  
 76 mm x 80.0 mm without support plate

Meat dimensions  
 63 mm x 0.51 mm x 600 mm

Aluminum-canning with  $\rho_{Al} = 2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Thickness of support plate 4.75 mm;  $\rho_{Al} = 2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Number of fuel plates per fuel element:  
 23 identical plates, each 1.27 mm thick

Number of fuel plates per control element:  
 17 identical plates, each 1.27 mm thick

Identification of the remaining plate positions of the control element:  
 4 plates of pure aluminum  $\rho_{Al} = 1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , each 1.27 mm thick  
 in the position of the first, the third, the twenty-first, and the  
 twenty-third standard plate position; water gaps between the two sets  
 of aluminum plates.

- MEU:
- Enrichment 45 w/o U-235
  - 320 g U-235 per fuel element (23 plates)
  - 40 w/o of uranium in the  $UAl_x$ -Al
  - only U-235 and U-238 in the fresh fuel

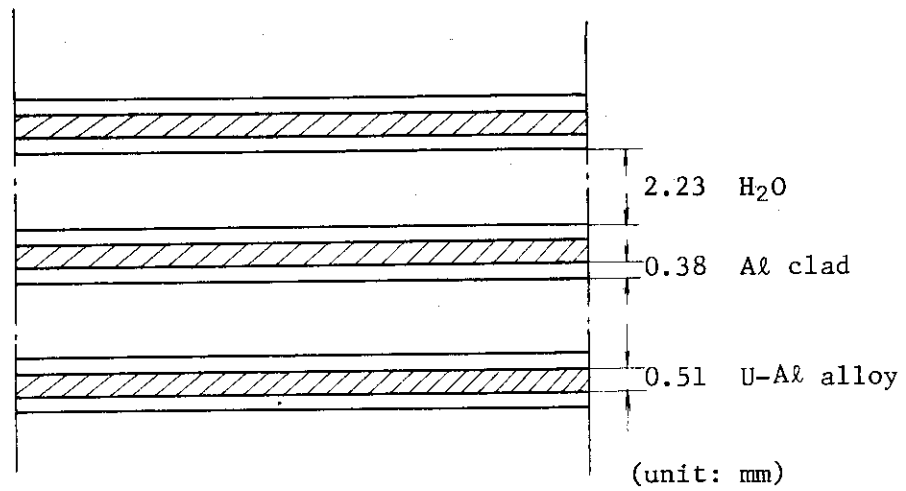


Fig. 2.1 Fuel Plates

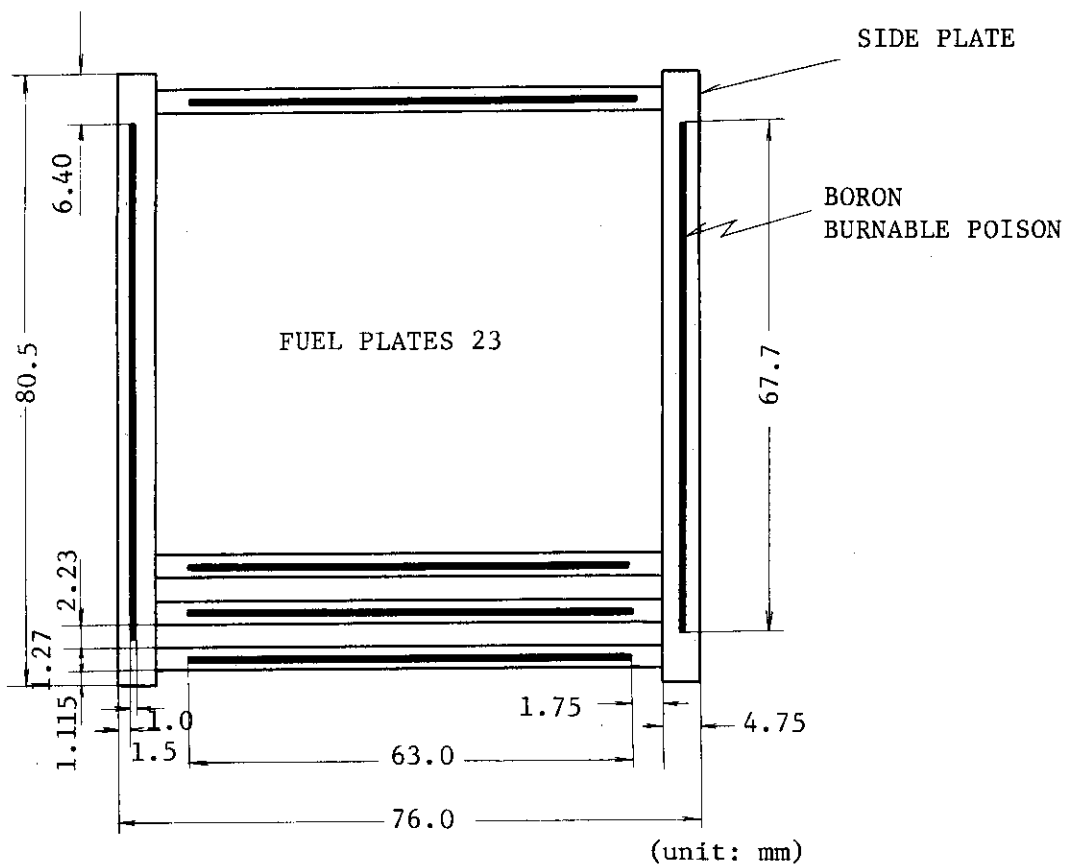


Fig. 2.2 Standard Fuel Element

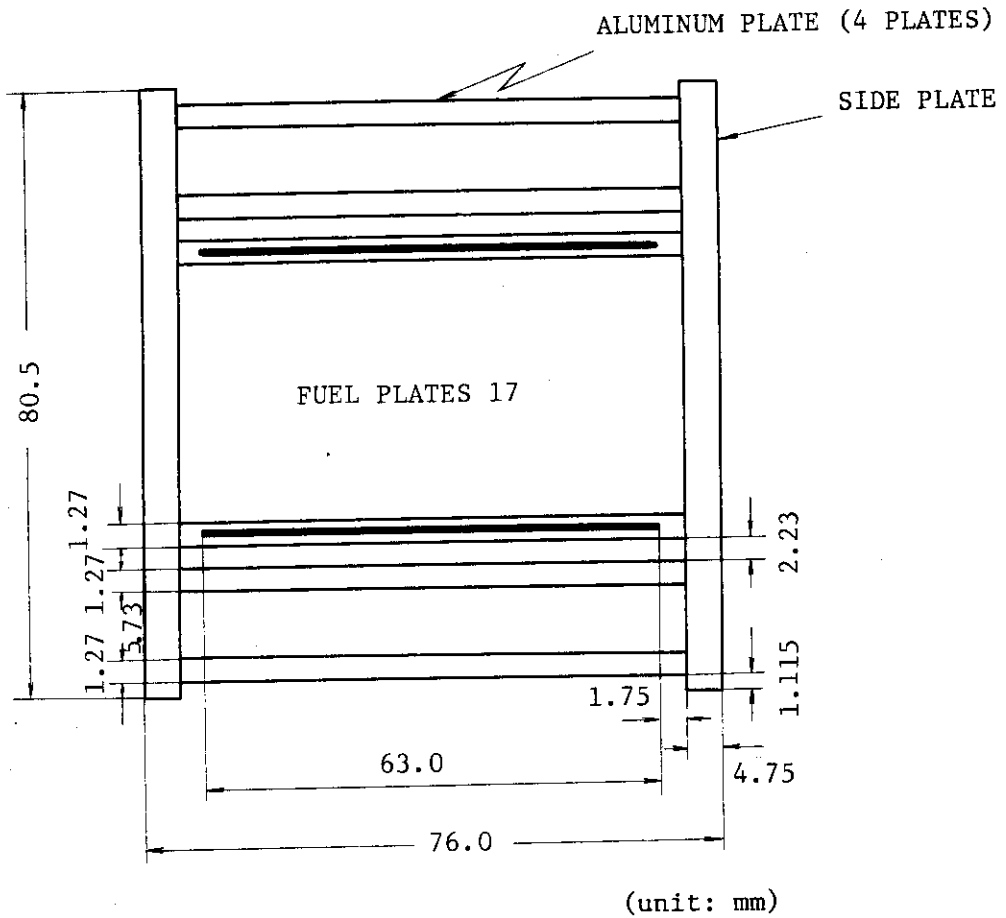


Fig. 2.3 Control Fuel Element

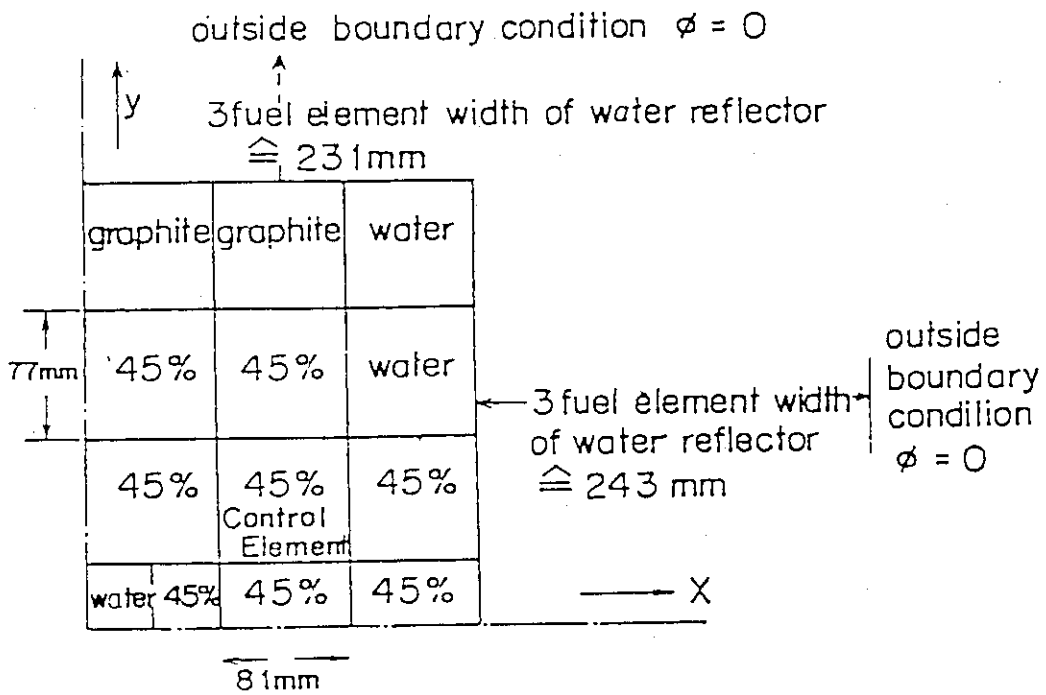


Fig. 2.4 Core Configuration

### 3. 解析方法

Table 3.1 に計算に用いた群構造を示す。格子計算は 50 群、炉心計算は 4 群及び 19 群で行った。本解析に用いた炉心は仮想的なものであり、計算値を実験値と比較することができない。そこで、二次格子計算を通さずに炉心を非均質で 19 群 2-D SN 計算 (TWOTRAN) を行ったものを基準とすることにした。また、比較の為に同じ体系同じ群数で 2-D 拡散計算 (CITATION) も行った。

二次格子計算を通した少数群拡散計算では、二次格子計算に TWOTRAN を用いた場合と衝突確率法を用いた場合について計算を行った。

#### 3.1 一次格子計算 (CASE ID = MP11)

燃料基本格子の均質化断面積を得るために無限平板の衝突確率法を用いて 50 群 (高速 23 群, 熱群 27 群) の固定中性子源計算を行った。計算形状を Fig. 3.1 に示す。

$P_0$  輸送計算に用いる輸送断面積は  $B_1$  近似によって ( $IC16 = 1$ )、拡散係数は  $D = 1 / (3\Sigma_{tr})$  から得た。燃料物質の共鳴吸収は、 $E > 0.68256 \text{ eV}$  (thermal cut off) の領域は 4600 群の超多群の衝突確率法で計算した ( $IC5 = 2$ )。また縮約用スペクトルは  $B_1$  近似による  $P_0$  スペクトルを用いた ( $IC9 = -2$ )。

なお、使用バックリングは二次格子計算に衝突確率法を用いる計算では 0.0012, 0.008, 二次格子計算の  $B_1$  近似  $k_{eff}$  が炉心計算の  $k_{eff}$  に近くなる値), 0.015 (一次格子計算の  $B_1$  近似  $k_{eff}$  が 1.0 となる値), 及び 0.020 のそれぞれの値を用いて計算し、他のケースについては  $B^2 = 0.008 \text{ cm}^{-2}$  とした。

#### 3.2 標準燃料要素の二次格子計算 (CASE ID = MT10)

標準燃料の二次格子計算は、TWOTRAN 又は衝突確率法を用いて、側板に BP を入れた場合と入れない場合についてそれぞれ計算を行った。この格子計算に用いた核種及び原子密度、対応する物質の番号を Table 3.2 に示す。

##### a) TWOTRAN を用いた二次格子計算

燃料基本格子の均質化断面積を用い、 $P_0S_0$  2-D SN 計算 (TWOTRAN) で標準燃料要素格子の 50 群固有値計算を行い、燃料側板に BP を含む場合と含まない場合についてそれぞれ 4 群及び 19 群の縮約群定数を作成した。計算形状を Fig. 3.2 に示す。この際、X-region の分け方として、燃料要素全体を均質化して一つの X-region として取り出す場合 (均質, Fig. 3.3(a)), 燃料部分と側板部分を別々に取り出す場合 (非均質, Fig. 3.3(b)), 及び側板に接する燃料部分の一部と側板部分を均質化し、燃料のみの部分とに分けて取り出す場合 (準非均質, Fig. 3.3(c)) の 3 通りについて定数を作成し、炉心計算に用いた。

二次格子計算を通さない炉心非均質輸送計算との比較を容易にするために燃料要素間の水ギャップは無視し、アルミニウムで置き換えた。また軸方向のバックリング長は、外挿距離を含めた炉心高 76.0 cm (BHGT = -76.0) の値を用い、境界条件は四方向とも完全反射とした。

#### b) 衝突確率法を用いた二次格子計算

標準燃料要素の二次格子計算に無限平板衝突確率法を用いた場合は、単位の燃料要素格子に含まれる BP の量が TWOTRAN を用いた場合と同じになるように BP の厚みを決めた (Fig.3.4)。均質化スペクトルに  $B_1$  近似による  $P_0$  スペクトルを用いるため、燃料要素全体を均質化して 1 つの X-region として取り出した。使用バックリングは 0.0012, 0.008, 0.015, 0.020 の 4 通りを考えた。この際、他の格子計算に用いるバックリングの値も同じ値で統一した。

### 3.3 制御燃料要素の二次格子計算

異なった計算法によって制御燃料要素の扱いが変わることを避けるため、この領域は常に同じ計算法 (無限平板衝突確率法) を用いた。

制御燃料要素の制御領域 (CASE ID = MC00) の計算形状を Fig.3.5 に示し、制御燃料要素の燃料領域 (CASE ID = MS10) の計算形状を Fig.3.6 に示す。

### 3.4 縮約群定数を用いた炉心計算

TWOTRAN あるいは衝突確率法を用いて作成した燃料要素格子の縮約群定数を用いて、CITATION による炉心計算を行った。軸方向バックリングは外挿距離を含めた炉心高 76.0 cm から得られた値 0.00171 を用い、炉心の対称性を利用し 1/4 炉心で計算した。

この際、二次格子計算に TWOTRAN を用いた場合は、燃料と側板を均質にした場合 (均質計算, Fig.3.7)、燃料部分と側板部分を分ける場合 (非均質計算, Fig.3.8)、及び燃料の一部と側板を均質化する場合 (準非均質計算, Fig.3.9) のそれぞれについて 4 群及び 19 群の固有値計算を行った。二次格子計算に衝突確率法を用いた場合には均質計算のみを行った。

また、CITATION と TWOTRAN を比較する為、二次格子計算に TWOTRAN を用いた場合に限り、均質と非均質の 2 つの場合につき炉心計算に TWOTRAN を用いても行った。

なお、4 群で TWOTRAN による非均質計算用の断面積を作成するとき、側板に BP が入っている場合には、側板の少数群輸送断面積を作成する際、多群輸送断面積を縮約する方法 ( $IC17 = -1$ ) 及び少数群拡散係数の逆数をとる方法 ( $\Sigma_{tr} = 1/(3D)$ ,  $IC17 = 1$ ) の 2 通りを試みた。

### 3.5 二次格子計算を用いない炉心非均質計算

本解析に用いた炉心は仮想的なものであり、計算値の比較対象とすべき実験値がない。そこで、比較の基準として二次格子計算を通さない非均質炉心計算を行った。

計算形状を Fig.3.10 に示す。この際、燃料側板中の BP を、Aℓ 側板と均質化して取扱う場合 (coarse mesh  $8 \times 16$ , fine mesh  $36 \times 45$ , Fig.3.11) と、非均質で取扱う場合 (coarse mesh

18 × 33, fine mesh 64 × 75, Fig. 3.12) の2通りで行った。群数はどちらも19群である。比較の為に、前者のメッシュの切り方 (coarse 8 × 16, fine 36 × 45) で、同じ群数でCITATIONを用いた計算も行った。軸方向バックリングは、TWOTRANについてはBGHT = -76.0, CITATIONについては $B_z^2 = 0.00171$ を用いた。

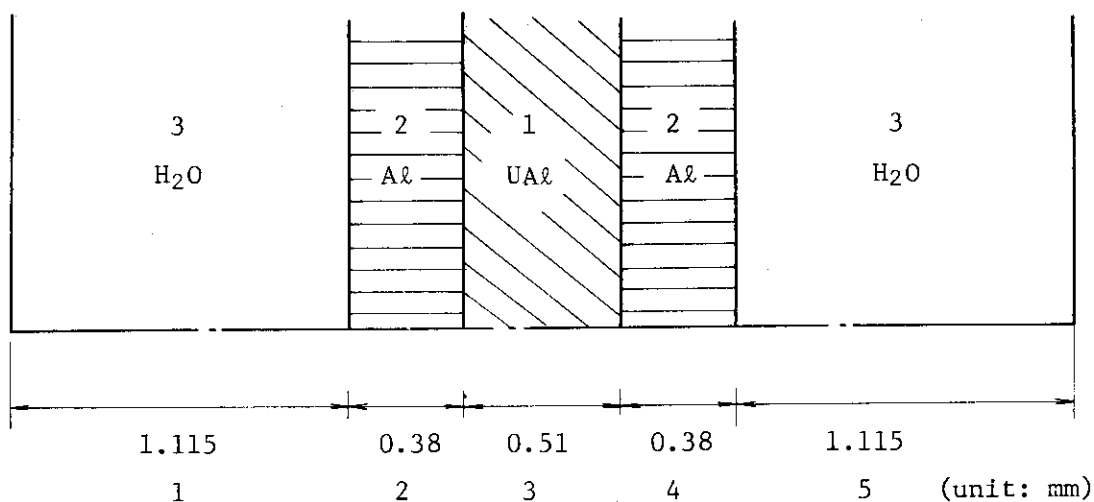
### 3.6 アルミ領域 (燃料側板及び flux trap) の取扱い

CITATIONのメッシュ効果を調べる為に、二次格子計算を用いない炉心計算 (coarse mesh 8 × 16) において Al側板領域 (厚さ5.25 mm) のfine meshを1, 2, 4, 8と変化させて (Fig. 3.13) 計算を行った。側板領域のfine meshが1及び8の場合については、比較の為にTWOTRANを用いた計算も行った。

また、二次元計算を行う際に問題となるAlのボイド効果を調べる為に、Al側板領域を、ミート部のない燃料板領域 (Alと軽水の均質化領域) と均質化して炉心計算を行い、上述の計算結果と比較した (Fig. 3.14)。また、炉心中央部に存在する、厚いAl板領域に囲まれた軽水領域 (flux trap) の取扱いについては、軽水領域の一部とAl領域を均質化した場合 (Semi-Homogeneous, Fig. 3.15(b)) と軽水領域とAl領域をすべて均質化した場合 (Homogeneous, Fig. 3.15(c)) について計算を行い、均質化しない場合 (Heterogeneous, Fig. 3.15(a)) と比較した。

Table 3.1 Energy Group Structure

Fast Energy			Thermal Energy		
Fine	Coarse	(eV)	Fine	Coarse	(eV)
1	1	0.10000E+8	24	11	0.68256E+0
2		0.47237E+7	25		0.41399E+0
3	2	0.22313E+7	26		0.34206E+0
4		0.10540E+7	27	12	0.29792E+0
5	3	0.49787E+6	28		0.25683E+0
6		0.23518E+6	29		0.21878E+0
7	4	0.11109E+6	30	13	0.18378E+0
8		0.52475E+5	31		0.15183E+0
9	5	0.24788E+5	32		0.13700E+0
10		0.11709E+5	33	14	0.12293E+0
11	6	0.55308E+4	34		0.10963E+0
12		0.26126E+4	35		0.97080E-1
13	7	0.12341E+4	36	15	0.85397E-1
14		0.58295E+3	37		0.74276E-1
15	8	0.27536E+3	38		0.64017E-1
16		0.13007E+3	39	16	0.54520E-1
17		0.61442E+2	40		0.45785E-1
18	9	0.29023E+2	41		0.37813E-1
19		0.13710E+2	42	17	0.30602E-1
20		0.64760E+1	43		0.24154E-1
21	10	0.30590E+1	44		0.18467E-1
22		0.18554E+1	45	18	0.13543E-1
23		0.11253E+1	46		0.93805E-2
		0.68256E+0	47		0.59804E-2
			48	19	0.33423E-2
			49		0.14663E-2
			50		0.35238E-3
					0.10000E-4



Sub region	1	2	3	4	5
T - region	3	2	1	2	3
R - region	3	2	1	2	3
X - region	1	1	1	1	1
Material No.	3	2	1	2	3

Material No.	Material Name	Number Density ( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )	
1	Fuel Meat (U-Al alloy)	Al	0.053665
		<sup>235</sup> U	$1.84972 \times 10^{-3}$
		<sup>238</sup> U	$2.23227 \times 10^{-3}$
2	Al Clad	Al	0.06023
3	H <sub>2</sub> O Moderator	H	0.06692
		O	0.03346

Fig. 3.1 Primary Cell Model for Collision Probability Method



Table 3.2 Number Density for Secondary Cell  
(for Standard Fuel Element with BP)

Material No.	Material Name	Number Density ( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )	
1	Fuel Plate Region with U-Al alloy (Primary Cell Macro)		
2	Fuel Plate Region without U-Al alloy	Al	0.02186
		H	0.04262
		O	0.02131
3	Side Plate	Al	0.06023
4	Boron Burnable Poison	$^{10}\text{B}$	$2.0126 \times 10^{-4}$
		$^{11}\text{B}$	$8.1787 \times 10^{-4}$
		Al	0.060038

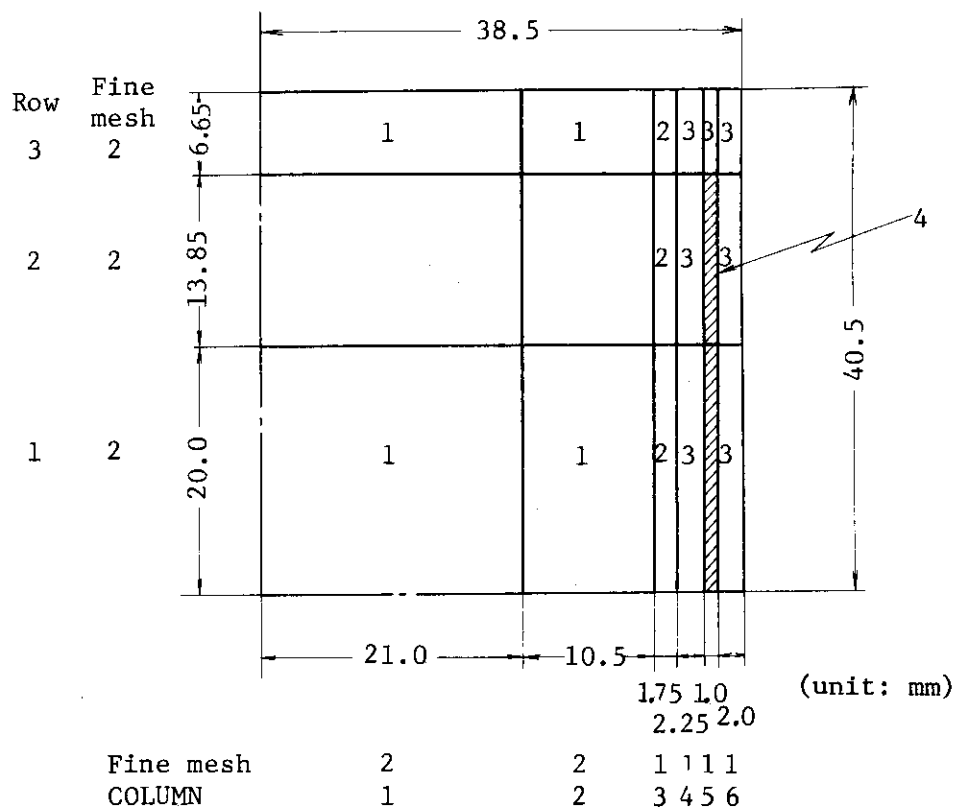
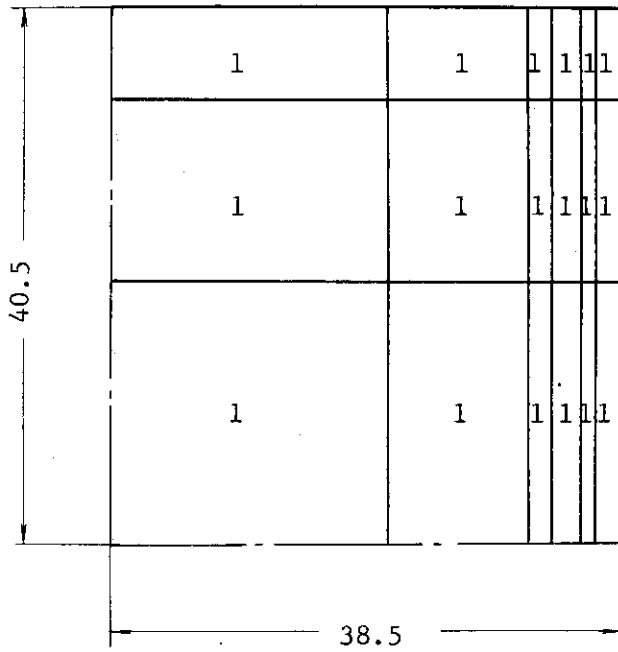
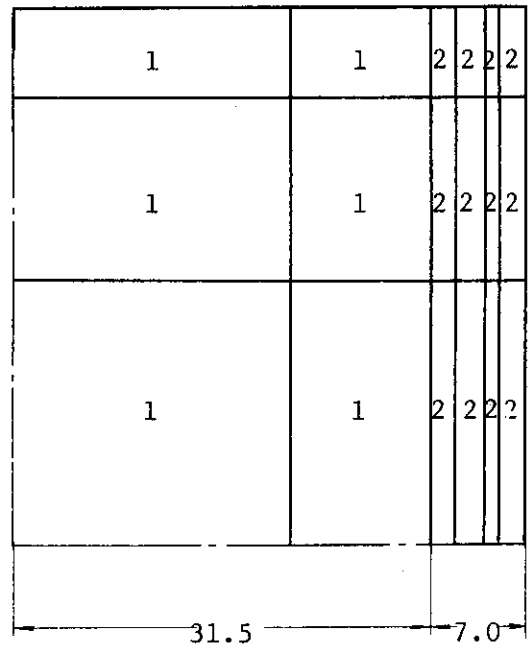


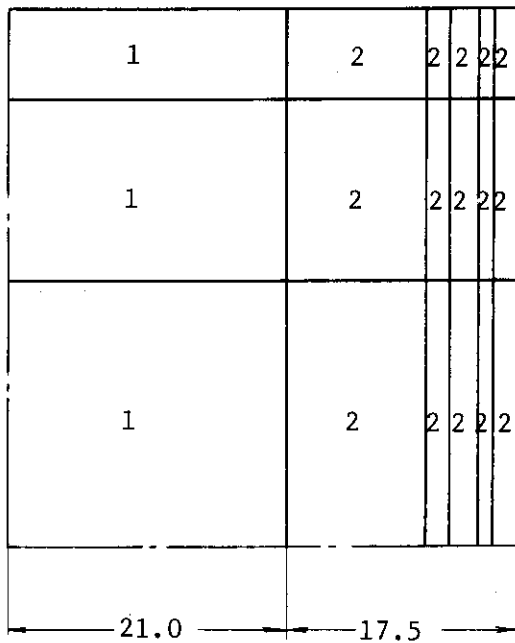
Fig. 3.2 Secondary Cell Model for TWOTRAN  
(for Standard Fuel Element with BP)



(a) Homogeneous



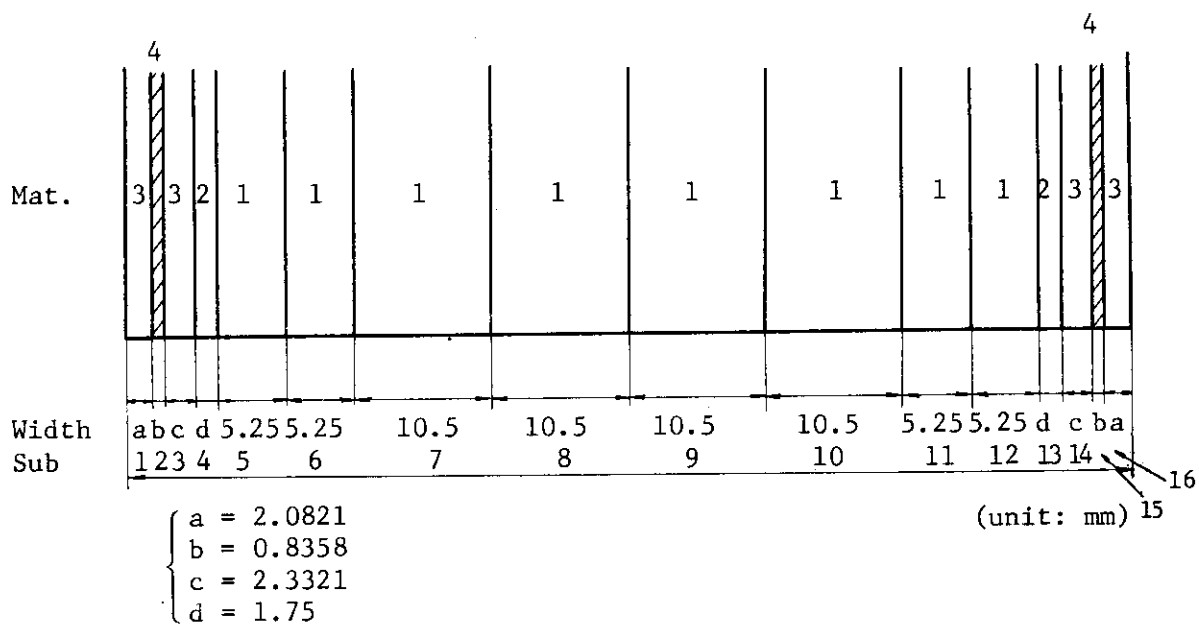
(b) Heterogeneous



(c) Semi-Hetero

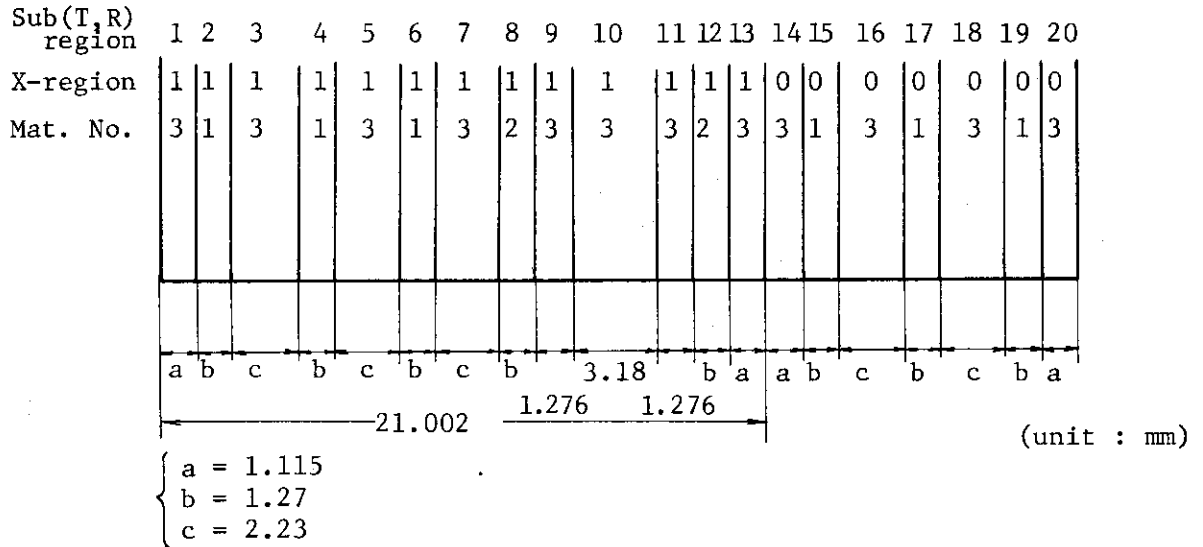
Fig. 3.3 X-region Map for Standard Fuel Element

(unit: mm)



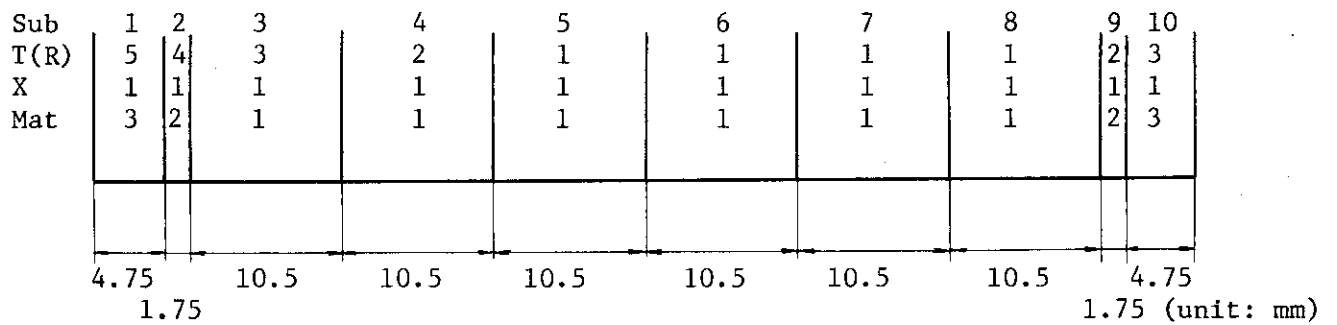
Sub region	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
T - region	8	7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	8
R - region	8	7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	8
X - region	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Material No.	3	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	3

Fig. 3.4 Secondary Cell Model for Collision Probability Method (for Standard Fuel Element with BP)



Material No.	Material Name	Number Density ( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )	
1	Fuel Meat + Clad (Homogenized)	A $\ell$	0.05785
		$^{235}\text{U}$	$0.67106 \times 10^{-3}$
		$^{238}\text{U}$	$0.80985 \times 10^{-3}$
2	A $\ell$ Plate	A $\ell$	0.06023
3	H $_2$ O Moderator	H	0.06692
		O	0.03346

Fig. 3.5 Secondary Cell Model for Control Element (Control region)



Material No.	Material Name	Number Density ( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )	
1	Fuel Plate Region with U-A $\ell$ alloy (Primary Cell Macro)		
2	Fuel Plate Region without U-A $\ell$ alloy	A $\ell$	0.02186
		H	0.04262
		O	0.02131
3	Side Plate	A $\ell$	0.06023

Fig. 3.6 Secondary Cell Model for Control Element (fuel region)

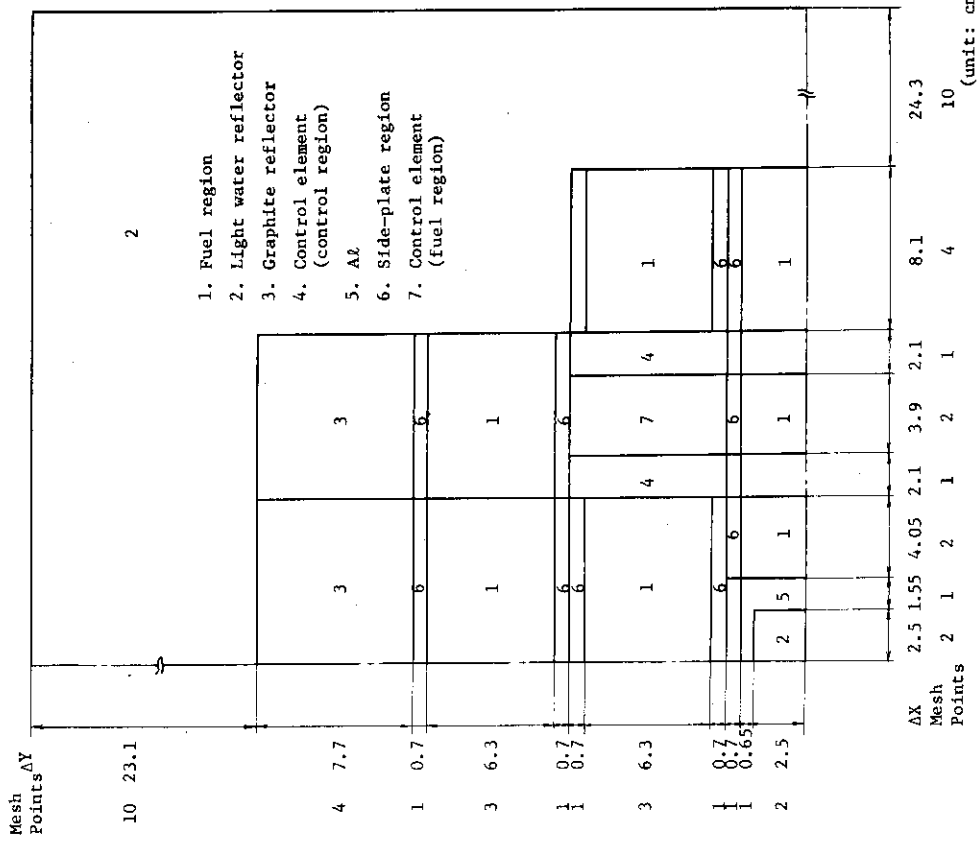


Fig. 3.7 Core Calculation Model for Homogeneous Method

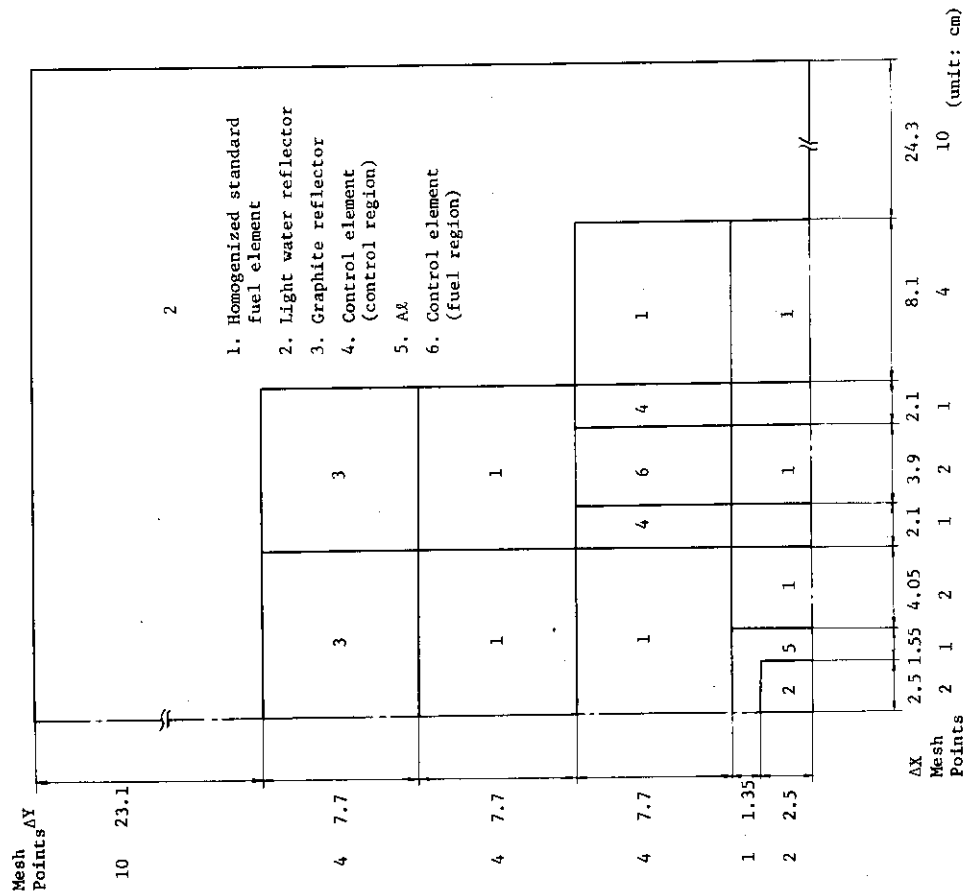


Fig. 3.8 Core Calculation Model for Heterogeneous Method

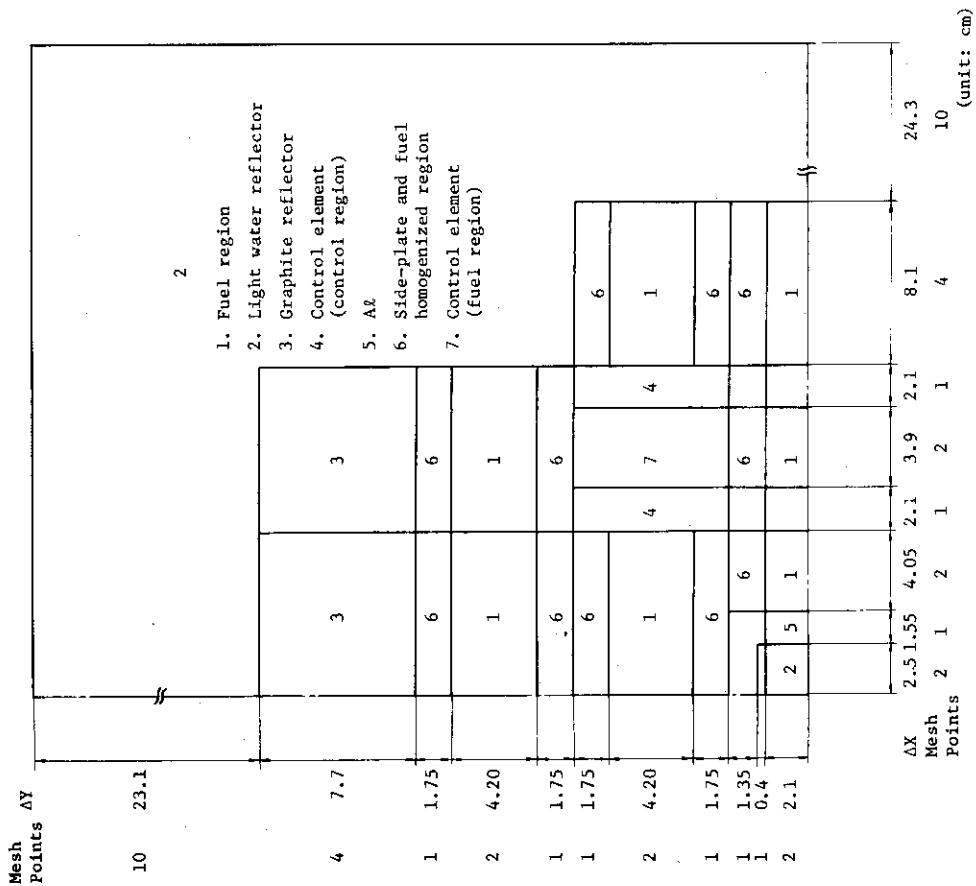


Fig. 3.9 Core Calculation Model for Semi-Hetero Method

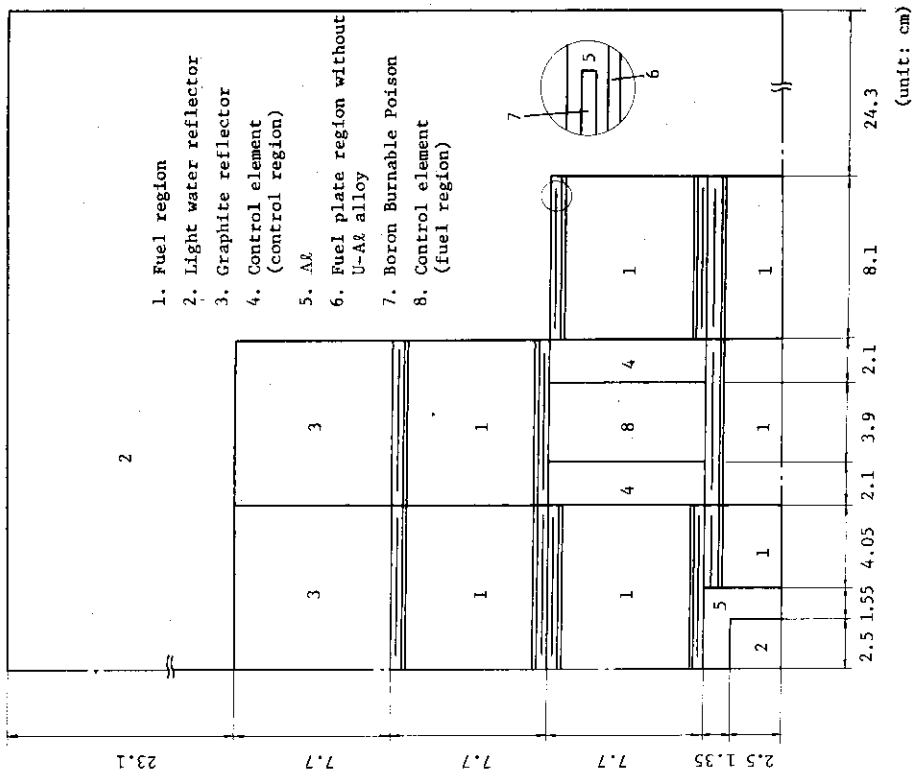


Fig. 3.10 Core Calculation Model for Heterogeneous Calculation by TWOTRAN without Secondary Cell Step

\*\*\*\*\*REBALANCE MAP\*\*\*\*\*

Y	M	MATERIALS BY BROAD ZONE, ORIGIN AT LOWER LEFT.								
ROW	M	M IS NUMBER OF FINE INTERVALS/BROAD ROW(COLUMN).								
50.0500		1	0	0	0	0	0	0	0	
16	10	1	2	2	2	2	2	2	2	
26.9500		1	*	*	*	*	*	*	0	
15	8	1	3	3	3	3	3	2	2	
19.2500		1	*	*	*	*	*	*	0	
14	1	1	8	8	8	8	8	2	2	
18.7250		1	*	*	*	*	*	*	0	
13	1	1	6	6	6	6	6	2	2	
18.5500		1	*	*	*	*	*	*	0	
12	6	1	1	1	1	1	1	2	2	
12.2500		1	*	*	*	*	*	*	0	
11	1	1	6	6	6	6	6	2	2	
12.0750		1	*	*	*	*	*	*	0	
10	1	1	8	8	8	8	8	2	2	
11.5500		1	*	*	*	*	*	*	0	
9	1	1	8	8	8	4	7	4	8	
11.0250		1	*	*	*	*	*	*	0	
8	1	1	6	6	6	4	7	4	6	
10.8500		1	*	*	*	*	*	*	0	
7	6	1	1	1	1	4	7	4	1	
4.5500		1	*	*	*	*	*	*	0	
6	1	1	6	6	6	4	7	4	6	
4.3750		1	*	*	*	*	*	*	0	
5	1	1	8	8	8	4	7	4	8	
3.8500		1	*	*	*	*	*	*	0	
4	1	1	5	5	8	8	8	8	2	
3.3250		1	*	*	*	*	*	*	0	
3	1	1	5	5	6	6	6	6	2	
3.1500		1	*	*	*	*	*	*	0	
2	1	1	5	5	1	1	1	1	2	
2.5000		1	*	*	*	*	*	*	0	
1	4	1	2	5	1	1	1	1	2	
0.0		1	*	*	*	*	*	*	0	
X		0.	2.	4.	8.	10.	14.	16.	24.	48.
		0	5000	499	999	1999	999	1999	2999	5999
M		4	2	4	2	4	2	8	10	
COLUMN		1	2	3	4	5	6	7	8	

1 Fuel region

2 Light water reflector

3 Graphite reflector

4 Control element

(Control region)

5 A $\ell$

6 Fuel plate region

without U-A $\ell$  alloy

7 Control element

(fuel region)

8 Side plate region

(A $\ell$ +BP homogenized)

Fig. 3.11 Region Map for TWOTRAN  
Coarse Mesh 8x16  
Fine Mesh 36x45

\*\*\*\*\*BALANCE MAP\*\*\*\*\*

MATERIALS BY GROUP ZONE, ORIGIN AT LOWER LEFT.  
 M IS NUMBER OF FINE INTERVALS/GROUP REV(COLUMN).

NO. Y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
50.0499	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
33.10	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
31.9499	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
37.10	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
26.9499	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31.3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
25.0499	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30.4	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
21.0499	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29.3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
19.2499	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24.1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
19.0499	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27.1	1	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
18.9500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26.1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
18.7250	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.1	1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
18.5500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
17.4000	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
13.4000	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
12.2500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21.1	1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
12.0750	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20.1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
11.8500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19.1	1	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
11.7500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18.1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
11.5500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
11.3500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16.1	1	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
11.2500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15.1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
11.0250	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14.1	1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
10.8500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
9.7000	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
9.7000	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4.3500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10.1	1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
4.3750	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
4.1500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.1	1	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
4.0500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7.1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
3.4500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6.1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
3.4500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.1	1	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
3.3500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
3.3250	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.1	1	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
3.1500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.1	1	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2.5000	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.4	1	7	7	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0.0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	2	4	6	7	8	8	10	14	15	16	16	18	22	23	24	29	44
D	0449	5000	499	499	4349	999	7649	1099	999	5349	1999	8649	7499	7499	6349	7999	2999	5999	
H	7	4	3	2	3	2	2	3	4	3	2	2	3	4	3	2	10	10	
COLONE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	

Fig. 3.12  
 Region Map for  
 TWOTRAN  
 Coarse Mesh 18x33  
 Fine Mesh 64x75



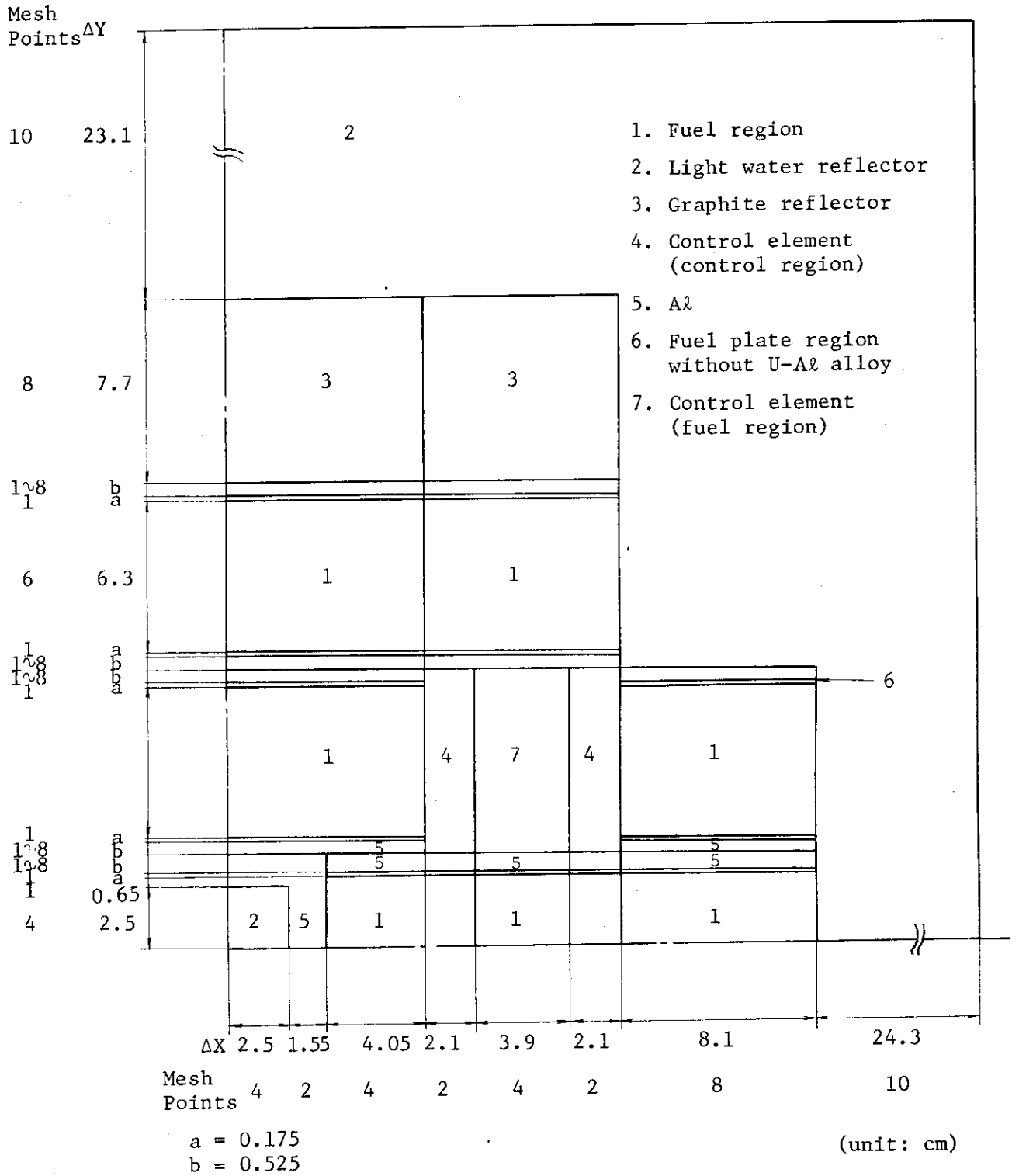
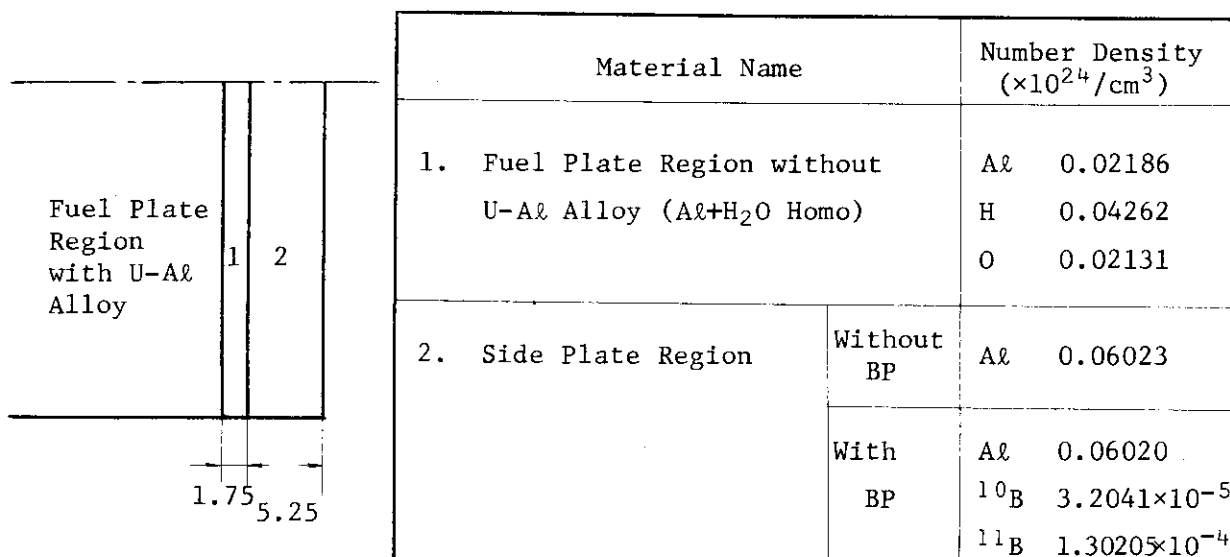
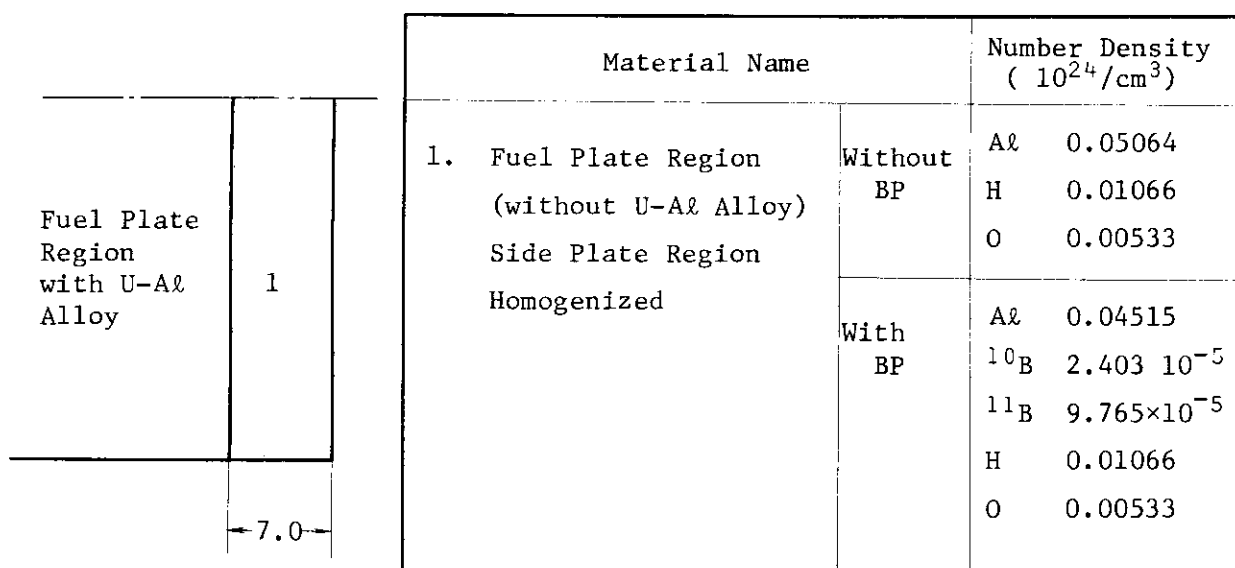


Fig. 3-13 Core Calculation Model for Mesh Effect



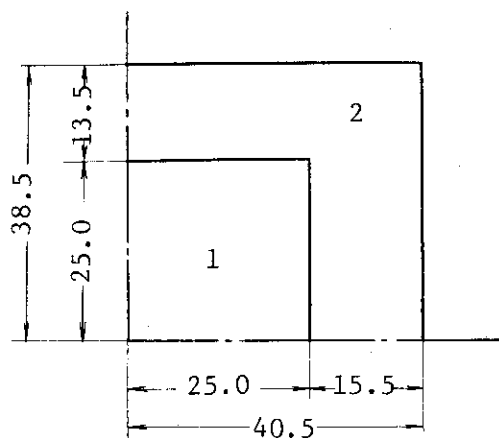
(a) Heterogeneous



(b) Homogeneous

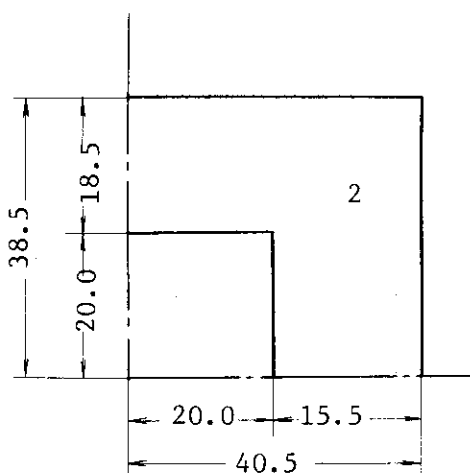
(unit: mm)

Fig. 3.14 Treatment of Side Plate Region



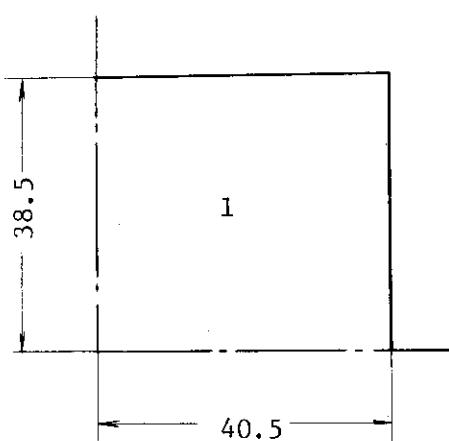
Material Name	Number Density ( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )	
1. Light Water Region	H	0.06692
	O	0.03346
2. Al Region	Al	0.06023

(a) Heterogeneous



Material Name	Number Density ( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )	
1. Light Water Region	H	0.06692
	O	0.03346
2. Al+H <sub>2</sub> O Homogenized Region	Al	0.04854
	H	0.012988
	O	0.006494

(b) Semi-Homogeneous



Material Name	Number Density ( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )	
1. Al+H <sub>2</sub> O Homogenized Region	Al	0.03609
	H	0.013412
	O	0.026824

(c) Homogeneous

(unit: mm)

Fig. 3.15 Treatment of Flux Trap

## 4. 計算結果及び考察

### 4.1 炉心非均質計算

Table 4.1 に、二次格子計算を通さずに行った非均質炉心計算の結果を示す。CITATIONを用いた場合、固有値がTWOTRANよりも約2%程度小さ目になることがわかる。TWOTRANを用いた場合では、BPと側板を均質で扱っても、非均質で扱っても固有値はほとんど変化しない。以後、側板領域を非均質で扱った (coarse mesh  $18 \times 33$ , fine mesh  $64 \times 75$ ) TWOTRANの計算結果 (BPを含まない場合の  $k_{eff} = 1.18768311$ , BPを含む場合の  $k_{eff} = 1.10983276$ , BPの反応度効果  $\Delta \rho = 5.906\%$ ) を基準値として用い、それぞれ  $k_{STD}$ ,  $k_{STD}(BP)$ ,  $\Delta \rho_{STD}$  で表し、他の計算結果はこれらの値に対する比をとることによって評価することにする。

### 4.2 CITATIONのメッシュ効果とアルミのボイド効果

Table 4.2 に  $A\ell$  側板領域を非均質及び非均質に取り扱った場合のメッシュ効果と  $A\ell$  ボイド効果、及び中央 flux trap を非均質及び均質に取り扱った場合の  $A\ell$  ボイド効果を示す。

CITATIONを用いた場合、側板領域を非均質に取り扱った場合、均質に取り扱った場合共に側板領域の fine mesh を細かく切るに従って  $k_{eff}$  が小さくなっており、メッシュ効果が顕著に現れていることがわかる。ただし、側板領域を非均質に取り扱った場合には、側板領域の fine mesh が4の場合にすでに大きなメッシュ効果が現れるのに対し、均質の場合には比較的小さくなっており、特に断面積の小さな領域でメッシュ効果が顕著であることがわかる。TWOTRANを用いて同じ計算を行った場合ではメッシュの切り方によって  $k_{eff}$  はほとんど変化しておらず、メッシュ効果はみられない。

側板領域を非均質で扱った場合と均質で扱った場合とを比較してみると、CITATION, TWOTRAN共に非均質で扱った場合の方が  $k_{eff}$  が小さくなっていることがわかる。これは、2次元計算で  $A\ell$  を均質化せずにそのまま計算に用いると、その領域では拡散係数  $D$  が大きくなり、縦方向のもれを表す仮想的な吸収項  $DB_2^2$  が大きくなる為である。同様の理由から、flux trap を均質化した場合には  $k_{eff}$  は大きくなっている。この際、軽水領域の一部と  $A\ell$  領域を均質化した場合と軽水領域と  $A\ell$  領域をすべて均質化した場合でほとんど差がみられないことから、 $A\ell$  の領域にわずかに軽水が混じることによってボイド効果がなくなることがわかる。

CITATIONのメッシュ効果の原因は不明であるが、断面積の小さな領域でメッシュを細かくとりすぎたため、差分式の分母が0に近くなったのではないかとと思われる。TWOTRANで燃料要素のセル計算をするときに、隣接する燃料要素の間のごく狭い水ギャップを、 $A\ell$  側板と均質化せずに取り扱うと iteration の途中で分母が0となることがある。これも同じような理由なのではないかと思う。いずれにしても、ごくせまい領域を忠実に非均質で取り扱うことは解の安定性の点から見ても計算時間の点から見てもあまり賢明な方法とは言えないようである。

特に、 $A\ell$ を他の物質と均質化しないでそのまま計算に用いると、その計算では輸送断面積を $B_1$ 近似で求めることができなくなるし、ポイド効果により仮想的な吸収の項 $DB^2$ が大きくなって、 $A\ell$ が吸収物質の様にふるまうことになるので、むしろできるだけ水などと均質化して取り扱った方が良いように思われる。

#### 4.3 標準燃料要素の二次格子計算にTWOTRANを用いた計算

二次格子計算にTWOTRANを用いた計算結果をTable 4.3に示す。表中のa), b), c)は前節で述べた基準値である。d), e)は、側板領域の少数群輸送断面積を求める際にそれぞれ $IC17 = -1$  (多群輸送断面積を平均化)及び $IC17 = 1$  (少数群拡散係数の逆数)としたものである。

均質で炉心拡散計算をした場合は、側板にBPがない場合には $k_{eff}$ が基準値に近いが、BPが入った場合には $k_{eff}$ が高めになり、結果としてBPの反応度効果を約10%小さ目に評価していることがわかる。逆に非均質で拡散計算を行った場合は側板にBPがない場合には基準値よりも低めだがBPの反応度効果はほぼ近い値か、やや大き目の値となっている。準非均質で行った場合には $k_{eff}$ 、BPの反応度効果共に基準値に比較的近い値が得られている。しかし、TWOTRANを用いて炉心計算を行うとCITATIONに比べ2%程度 $k_{eff}$ が高目になることを考えると、二次格子の計算法によって $k_{eff}$ が高目になる効果とCITATIONで $k_{eff}$ が低目になる効果(あるいはTWOTRANで $k_{eff}$ が高目になる効果)とが互いに打ち消し合っているという見方もできる。特に、CITATIONで非均質計算を行った場合は前節で述べたメッシュ効果から $k_{eff}$ が小さくなっている可能性が大きい。このことは、側板にBPが入らない場合の19群計算において均質・非均質の差がTWOTRANを用いた場合よりもCITATIONを用いた場合に大きく表われていることからもうかがわれる。

TWOTRANで非均質計算を行った場合で、側板にBPがない場合には19群と4群の計算結果にさほど大きな差が見られないのに対し、BPがある場合には1.6%程度の差が現れている。これは強い吸収物質が存在する領域の少数群輸送断面積を作る際の誤差と見られる。多群輸送断面積を平均化しても( $IC17 = -1$ )、少数群拡散係数の逆数をとっても( $IC17 = 1$ )あまり変わらない。すなわち、強い吸収物質が存在する場合には少数群輸送計算は有効でない(輸送計算そのものが悪いのではなく、少数群の輸送断面積の定義が困難である)ということができる。したがってこの場合のBPの反応度効果が基準値に近くても意味がないといえる。

#### 4.4 標準燃料要素の二次格子計算に衝突確率法を用いた計算

標準燃料要素の二次格子計算に無限平板衝突確率法を用いて使用バックリングの値を変化させた場合のCITATIONによる炉心計算の結果をTable 4.4(a)に、一次格子と標準燃料要素の二次格子の $B_1$ 近似スペクトル計算の $k_{eff}$ と $k_{\infty}$ をTable 4.4(b)に示す。各々の格子計算に用いたバックリングは同じ値で統一した。使用バックリングのうち、 $B^2 = 0.015$ は一次格子の $B_1$ 近似スペクトル計算の $k_{eff}$ が1.0に近くなる値であり、 $B^2 = 0.008$ は標準燃料要素の二次格子の $B_1$ 近似スペクトル計算の $k_{eff}$ がCITATIONによる炉心計算で得られる $k_{eff}$ (BPを含まない時で1.18程度、

BPを含む時で1.1程度)に近い値となるようなものである。

炉心計算を4群で行った場合(すなわち $B_1$ 近似スペクトルで4群の縮約群定数を作った場合)は $B^2$ の値が大きくなるにつれて $k_{eff}$ が小さくなることがわかる。これは $B^2$ の値が大きくなるともれが大きくなり(仮想的な吸収項 $DB^2$ が大きくなり)、スペクトルが硬化することにより高エネルギー領域の少数群拡散係数が大きくなる為である。したがってある程度群数の細かい19群の場合にはこの傾向は見られない。

BPのない場合の19群の $k_{eff}$ は1.184程度であり、4群の場合 $B^2 = 0.008$ で $k_{eff} = 1.185835$ ,  $B^2 = 0.015$ で $k_{eff} = 1.182129$ であるから最適の $B^2$ (すなわち、粗い群数に縮約した際に多群計算の結果との差が最小となる場合の $B^2$ )はこれらの値の間に存在するといえる。BPのある場合についても同じような傾向が見られるが、BPの反応度効果は $B^2 = 0.015$ とした場合の方が19群による値に近い結果が得られている。

Table 4.1 Heterogeneous Core Calculation Without Secondary Cell Step

Burnable Poison	Core Calculation	Coarse Mesh	Fine Mesh	$k_{eff}$	Reactivity Effect of BP ( $\Delta\rho\%$ ) <sup>a)</sup>
Without BP	CITATION	8×16	36×45	1.159964	—
	TWOTRAN	8×16	36×45	1.18617058	—
	TWOTRAN	18×33	64×75	1.18768311	—
With BP	CITATION	8×16	36×45	1.080753	6.319
	TWOTRAN	8×16	36×45	1.10869694	5.891
	TWOTRAN	18×33	64×75	1.10983276	5.906

$$a) \Delta\rho \equiv \frac{k_{eff} - k_{eff}(BP)}{k_{eff} \times k_{eff}(BP)} \times 100(\%)$$

Note. All core calculations are performed in 19 groups

Table 4.2 Mesh Effect and  $A\lambda$  Void Effect

Burnable Poison	$A\lambda$ Side-Plate Region		A $\lambda$ Flux trap and Center H <sub>2</sub> O region	Number of Groups	$k_{eff}$		$k_{CIT}/k_{TWOT}$ f)	
	treatment	mesh			CITATION	TWOTRAN		
Without BP	Heterogeneous <sup>a)</sup>	1	Heterogeneous <sup>c)</sup>	19	1.159964	1.18617058	0.9779	
		2			1.145006			
		4			1.069637			
		8			0.9400239	1.18693066	0.7920	
	Homogeneous <sup>b)</sup>	1			1.163064	1.18465519	0.9818	
		8			0.9403822	1.18465996	0.7938	
		1			1.183848	1.20260811	0.9844	
		2			1.179937			
With BP	Homogeneous <sup>b)</sup>	4	Heterogeneous <sup>c)</sup>	19	1.165271			
		8			0.9651316	1.20257187	0.8026	
		1			1.197280	1.21526432	0.9852	
		1			1.199867	1.21774769	0.9853	
	Heterogeneous	1				1.080753	1.10869694	0.9748
		1				1.094875	1.11360550	0.9832

Note: 1) Temporary buckling for 4 group calculation BSQ = 0.008  
 2) a), b) correspond to Fig. 3-14 a), b), respectively.  
 3) c), d), e) correspond to Fig. 3-15 a), b), c), respectively.  
 4) f) means  $k_{eff}$  (by CITATION) /  $k_{eff}$  (by TWOTRAN)

Table 4.3 Calculated  $k_{eff}$  through Various Calculation Methods (The secondary cell solved by TWOTRAN)

Calculation Method	Core Calc. Routine	Core Calc. Number of Groups	$k_{eff}$ without BP	$k_{eff}/k_{STD}$ a)	$k_{eff}$ with BP	$k_{eff}/k_{STD}(BP)$ b)	Reactivity Effect of BP ( $\Delta\rho, \%$ )	$\Delta\rho/\Delta\rho_{STD}$ c)
Homogeneous	CITATION	4	1.188382	1.0006	1.118014	1.0074	5.296	0.897
		19	1.184301	0.9972	1.114370	1.0041	5.299	0.897
	TWOTRAN	4	1.20897865	1.0179	1.13731003	1.0248	5.212	0.882
		19	1.20618248	1.0150	1.13530350	1.0230	5.176	0.876
Heterogeneous	CITATION	4	1.183047	0.9961	1.103107	0.9939	6.126	1.037
		19	1.176619	0.9907	1.095276	0.9869	6.312	1.069
	TWOTRAN	4 d)	1.20543575	1.0150	1.12499905	1.0137	5.931	1.004
		19 e)	1.20138645	1.0115	1.11744690	1.0069	6.253	1.059
Semi-Hetero	CITATION	4	1.187815	1.0001	1.113344	1.0032	5.631	0.953
		19	1.183597	0.9966	1.109144	0.9994	5.671	0.960

Note: a), b), c) Heterogeneous core calculation by TWOTRAN without secondary cell step (Coarse mesh 18x33, Fine mesh 64x75, See Table 4.1

a)  $k_{eff}$  without BP,  $k_{STD}=1.18768311$

b)  $k_{eff}$  with BP,  $k_{STD}(BP)=1.0983276$

c) Reactivity effect of BP,  $\Delta\rho_{STD}=5.906$

d), e) Transport cross sections for side-plate region by

d) Average of multi-group transport cross sections  $\Sigma_{tr,G} = \Sigma_{g \rightarrow G} \Sigma_{tr} \varphi_g / \Sigma_{g \rightarrow G} \varphi_g$ ,  $IC17 = -1$

e) Inverse of few-group diffusion coefficients  $D_G = \Sigma_{g \rightarrow G} D_g \varphi_g / \Sigma_{g \rightarrow G} \varphi_g$  and  $\Sigma_G = 1/(3D_G)$ ,  $IC17 = 1$

In all cases the 50-group constants were collapsed into the 4- or the 19-group constants using the  $B_1$  spectrum with  $B^2=0.008cm^2$ .



Table 4.4(a) Calculated  $k_{eff}$  under Various Geometrical Buckling  
(The secondary cell is solved by collision probability method)

Core Calc. Number of Groups	$B^2$	$k_{eff}$ without BP	$k_{eff}/k_{STD}$	$k_{eff}$ with BP	$k_{eff}/k_{STD}(BP)$	Reactivity Effect of BP( $\Delta\rho, \%$ )	$\Delta\rho/\Delta\rho_{STD}$
4	0.0012	1.188383	1.0006	1.115204	1.0048	5.522	0.935
	0.0080	1.185835	0.9984	1.112922	1.0028	5.525	0.935
	0.0150	1.182129	0.9953	1.109544	0.9997	5.534	0.937
	0.0200	1.179265	0.9929	1.106975	0.9974	5.538	0.938
19	0.0012	1.183489	0.9965	1.110693	1.0008	5.538	0.938
	0.0080	1.183999	0.9969	1.111203	1.0012	5.533	0.937
	0.0150	1.184021	0.9969	1.111236	1.0013	5.532	0.937
	0.0200	1.183879	0.9968	1.111088	1.0011	5.534	0.937

\*) All-core calculations are performed by CITATION

Table 4.4(b)  $k_{eff}$  and  $k_{\infty}$  by  $B_1$  Approximation

CASE ID	No. of groups	$B^2$		$k_{eff}$	$k_{\infty}$	$k_{eff}$	$k_{\infty}$	$k_{eff}$	$k_{\infty}$
		$k_{eff}$	$k_{\infty}$						
MP11 a)	50	$k_{eff}$	0.0012	0.0080	0.015	0.020			
		$k_{\infty}$	1.63499	1.26509	1.01251	0.87800			
MT10 b) without BP	50	$k_{eff}$	1.72112	1.71825	1.71521	1.71301			
		$k_{\infty}$	1.59371	1.17796	0.90686	0.76741			
MT10 with BP	50	$k_{eff}$	1.69335	1.68965	1.68573	1.68289			
		$k_{\infty}$	1.47106	1.09009	0.84131	0.71316			
			1.56238	1.55942	1.55631	1.55406			

a) Primary cell

b) Secondary cell for standard fuel element

## 5. 結 論

二次元計算において、アルミのような中性子からみて透明な物質からなる領域に対しては、垂直方向の洩れを評価するため  $DB_2^2$  が吸収項に加えられるが、厚みが薄いと過大評価を与える。近傍にある軽水との混合物から成る領域を考えることが望ましい。

拡散近似による炉心計算で、燃料要素の外周部の扱いについて次のことが言える。

- a) 二次格子計算を行って燃料要素全体の均質化を行うと、BP板の反応度価置を約10%低く見積るのに対し、燃料領域の一部のみを側板と均質化するとTWOTRAN同様のBP反応度価置を得る。
- b) 二次格子計算を行わないで、サイドプレート及び水とアルミの混合領域の幾何形状をそのまま炉心計算で考慮すると、アルミのボイド効果のため低い増倍係数を得る。
- c) サイドプレート及び水とアルミの混合領域を均質化した計算を行うと、アルミのボイド効果は見られなくなり、TWOTRANの場合は、空間メッシュ巾を変えても増倍係数は影響をうけないが、CITATIONを用いた拡散計算の場合は、細かなメッシュを採るより低い増倍係数を得る傾向がある。粗いメッシュを採ったときも常にTWOTRANより約2%低い増倍係数を得た。

$B_1$  近似のスペクトルを用いて、少数群に縮約するときバックリングの値によって増倍係数は影響をうける。

二次格子の  $k_{eff}$  を炉心計算の  $k_{eff}$  と同程度の値にするバックリング値 ( $B^2=0.008\text{cm}^2$ ) と、一次格子の  $k_{eff}$  を 1.0 にする値 ( $B^2=0.015\text{cm}^2$ ) との間に適当な値が存在する。

輸送理論による少数群炉心計算では、多群計算と一致した解は得られない。輸送断面積の縮約法の改良が望まれる。

- 1) Tsuchihashi K., Takano H., Horikami K., Ishiguro Y., Kaneko K. and Hara T. : "SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis", JAERI-1285 (1983)
- 2) Physics section IAEA Ed. : "RESEARCH REACTOR CORE CONVERSION FROM THE USE OF HIGHLY ENRICHED URANIUM TO THE USE OF LOW ENRICHED URANIUM FUELS GUIDEBOOK", IAEA-TECDOC-233 (1980)
- 3) Physics section IAEA Ed. : "Research Reactor Core Conversion from HEU to LEU Fuels, Safety and Licensing Issues, Guidebook, Vol.1, Licensing and Analysis, to be published.

## 5. 結 論

二次元計算において、アルミのような中性子からみて透明な物質からなる領域に対しては、垂直方向の洩れを評価するため  $DB_2^2$  が吸収項に加えられるが、厚みが薄いと過大評価を与える。近傍にある軽水との混合物から成る領域を考えることが望ましい。

拡散近似による炉心計算で、燃料要素の外周部の扱いについて次のことが言える。

- a) 二次格子計算を行って燃料要素全体の均質化を行うと、BP板の反応度価置を約10%低く見積るのに対し、燃料領域の一部のみを側板と均質化するとTWOTRAN同様のBP反応度価置を得る。
- b) 二次格子計算を行わないで、サイドプレート及び水とアルミの混合領域の幾何形状をそのまま炉心計算で考慮すると、アルミのボイド効果のため低い増倍係数を得る。
- c) サイドプレート及び水とアルミの混合領域を均質化した計算を行うと、アルミのボイド効果は見られなくなり、TWOTRANの場合は、空間メッシュ巾を変えても増倍係数は影響をうけないが、CITATIONを用いた拡散計算の場合は、細かなメッシュを採るより低い増倍係数を得る傾向がある。粗いメッシュを採ったときも常にTWOTRANより約2%低い増倍係数を得た。

$B_1$  近似のスペクトルを用いて、少数群に縮約するときバックリングの値によって増倍係数は影響をうける。

二次格子の  $k_{eff}$  を炉心計算の  $k_{eff}$  と同程度の値にするバックリング値 ( $B^2=0.008\text{cm}^{-2}$ ) と、一次格子の  $k_{eff}$  を 1.0 にする値 ( $B^2=0.015\text{cm}^{-2}$ ) との間に適当な値が存在する。

輸送理論による少数群炉心計算では、多群計算と一致した解は得られない。輸送断面積の縮約法の改良が望まれる。

- 1) Tsuchihashi K., Takano H., Horikami K., Ishiguro Y., Kaneko K. and Hara T. : "SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis", JAERI-1285 (1983)
- 2) Physics section IAEA Ed. : "RESEARCH REACTOR CORE CONVERSION FROM THE USE OF HIGHLY ENRICHED URANIUM TO THE USE OF LOW ENRICHED URANIUM FUELS GUIDEBOOK", IAEA-TECDOC-233 (1980)
- 3) Physics section IAEA Ed. : "Research Reactor Core Conversion from HEU to LEU Fuels, Safety and Licensing Issues, Guidebook, Vol.1, Licensing and Analysis, to be published.

## 付録A 制御棒反応度効果

IAEAベンチマーク炉心<sup>3)</sup>における制御棒反応度抑制効果の計算を、LEU, MEU, HEUの各炉心について行った。一次格子計算のミート部に用いた、各濃縮度に対応する原子密度をTable A.1に示す。二次セル計算にはTWOTRANを用いた。標準燃料要素の二次セルの計算形状及び原子密度をそれぞれFig.A.1及びTable A.2に、制御燃料要素の二次格子の計算形状及び原子密度をそれぞれFig.A.2及びTable A.3に示す。一次格子計算、二次格子計算は共に50群で行った。

炉心計算は、二次格子計算によって得られた4群の縮約定数を用い、CITATIONによって行った。この際、制御棒領域に隣接する燃料領域（すなわち、制御燃料要素の燃料部分と制御燃料要素に隣接する標準燃料要素、Fig.A.2参照）を考慮に入れて炉心計算を行った場合（すなわち、これらの隣接している燃料領域を、制御燃料要素の二次格子計算からX-regionとして取り出す場合、Fig.A.3参照）の他に、隣接燃料の効果を考慮に入れず、すべての燃料領域に標準燃料要素の均質化断面積を用いた場合（Fig.A.4）の計算も行った。

計算結果をTable A.4に示す。表中の $k_{\text{eff}}/k_{\text{effMC}}$ 及び $\Delta\rho/\Delta\rho_{\text{MC}}$ は、ANLで行われたVIMコードを用いた3次元モンテ・カルロ計算の結果に対する比である。HEU, LEU炉心における制御棒反応度効果は、共にB, C制御棒に比べ、Ag/In/Cd制御棒及びHf制御棒の場合、モンテ・カルロ計算の値から離れている。これは、Ag/In/Cd制御棒及びHf制御棒の共鳴吸収の効果が小さ目に評価されているためと思われる。HEU炉心において、Ag/In/Cd制御棒の共鳴領域の巨視的断面積を衝突確率法を用いた微細共鳴積分計算（PEACO routine）によって作成し、それを制御燃料要素の二次セル計算に用いると、 $\Delta\rho/\Delta\rho_{\text{MC}}=0.904$ となり、3%程度モンテ・カルロ計算の結果に近くなった。

隣接燃料を考慮しない場合には制御棒反応度効果を小さ目に見積っている。これは、制御棒の熱中性子吸収により隣接燃料のスペクトルが硬化することを考慮していない為であると思われる。

LEU炉心に比べHEU炉心における制御棒反応度効果が小さ目に見積られているが、これは、HEU炉心の方がLEU炉心に比べスペクトルが軟かく、従って制御棒の熱中性子吸収による中性子束のひずみが大きくなり、拡散近似が悪くなる為であろう。それでも、制御棒反応度効果の計算結果は、モンテ・カルロ計算による値との差が5~10%程度であり、対数微分条件を用いずに拡散計算を行ったものとしては良い値が得られているものと言えよう。

Table A.1 Number Density for Fuel Meat

Enrichment	Number Density ( $\times 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ )	
HEU 93 w/o (weight %) U-235	Al	0.057011
	U-235	$1.61790 \times 10^{-3}$
	U-238	$1.20050 \times 10^{-4}$
MEU 45 w/o U-235	Al	0.053665
	U-235	$1.84972 \times 10^{-3}$
	U-238	$2.23227 \times 10^{-3}$
LEU 20 w/o U-235	Al	0.038152
	U-235	$2.25434 \times 10^{-3}$
	U-238	$8.89037 \times 10^{-3}$

Table A.2 Number Density for Standard Fuel Element

Material No.	Material Name	Number Density ( $\times 10^{24} / \text{cm}^3$ )	
1	Fuel Plate Region with U-Al alloy (Primary Cell Macro)		
2	Fuel Plate Region without U-Al alloy	Al	0.02186
		H	0.04262
		O	0.02131
3	Side Plate	Al	0.06023
4	Light Water	H	0.06692
		O	0.03346

Table A.3 Number Density for Control Fuel Element

Material No.	Material Name	Number Density ( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )	
1	Fuel Plate Region with U-Al alloy (Primary Cell Macro)		
2	Fuel Plate Region without U-Al alloy	Al	0.02186
		H	0.04262
		O	0.02131
3	Al Plate and Light water homogenized	Al	0.02067
		H	0.04395
		O	0.02198
4	Side Plate	Al	0.06023
5	Light Water	H	0.06692
		O	0.03346
6	Control Rod (Ag-In-Cd alloy)	$^{107}\text{Ag}$	0.0215
		$^{109}\text{Ag}$	0.0204
		$^{103}\text{In}$	0.00030
		$^{105}\text{In}$	0.00683
		Cd (natural)	0.00247
7	Control Rod ( $\text{B}_4\text{C}$ )	$^{10}\text{B}$	0.0215
		$^{11}\text{B}$	0.0883
		$^{12}\text{C}$	0.0275
8	Control Rod (Hf)	Hf (natural)	0.0449

Table A.4 Reactivity Worths for Fully Inserted Rods

	Enrichment	Absorber	$k_{eff}$	$\frac{k_{eff}}{k_{effMC}}$	$-\Delta\rho, \%$	$\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_{MC}}$
Monte Carlo (by ANL, VIM code)	HEU	None	1.20165±0.00315	—	—	—
		Ag-In-Cd	1.03462±0.00331	—	13.43±0.38	—
		B <sub>4</sub> C	0.99957±0.00308	—	16.82±0.38	—
		Hf	1.04260±0.0031	—	12.70±0.36	—
SRAC Adjacent fuel considered	HEU Using PEACO →	None	1.204843	1.0027	—	—
		Ag-In-Cd	1.055995	1.0207	11.6990	0.871
		Ag-In-Cd	1.051113	1.0159	12.1388	0.904
		B <sub>4</sub> C	1.010600	1.0110	15.9527	0.948
		Hf	1.056295	1.0131	11.6721	0.919
SRAC Adj. fuel not considered	HEU	None	1.204521	1.0024	—	—
		Ag-In-Cd	1.060159	1.0247	11.3049	0.842
		B <sub>4</sub> C	1.018730	1.0192	15.1408	0.900
Monte Carlo (by ANL, VIM code)	LEU	None	1.17404±0.00314	—	—	—
		Ag-In-Cd	1.03720±0.00328	—	11.24±0.38	—
		B <sub>4</sub> C	0.99873±0.00329	—	14.95±0.40	—
		Hf	1.03900±0.00305	—	11.07±0.36	—
SRAC Adj. fuel considered	LEU	None	1.180793	1.0058	—	—
		Ag-In-Cd	1.049865	1.0122	10.5615	0.940
		B <sub>4</sub> C	1.005907	1.0072	14.7240	0.985
		Hf	1.049632	1.0102	10.5827	0.956
	MEU	None	1.193157	—	—	—
		Ag-In-Cd	1.051741	—	11.2691	—
		B <sub>4</sub> C	1.006970	—	15.4965	—
		Hf	1.051831	—	11.2610	—

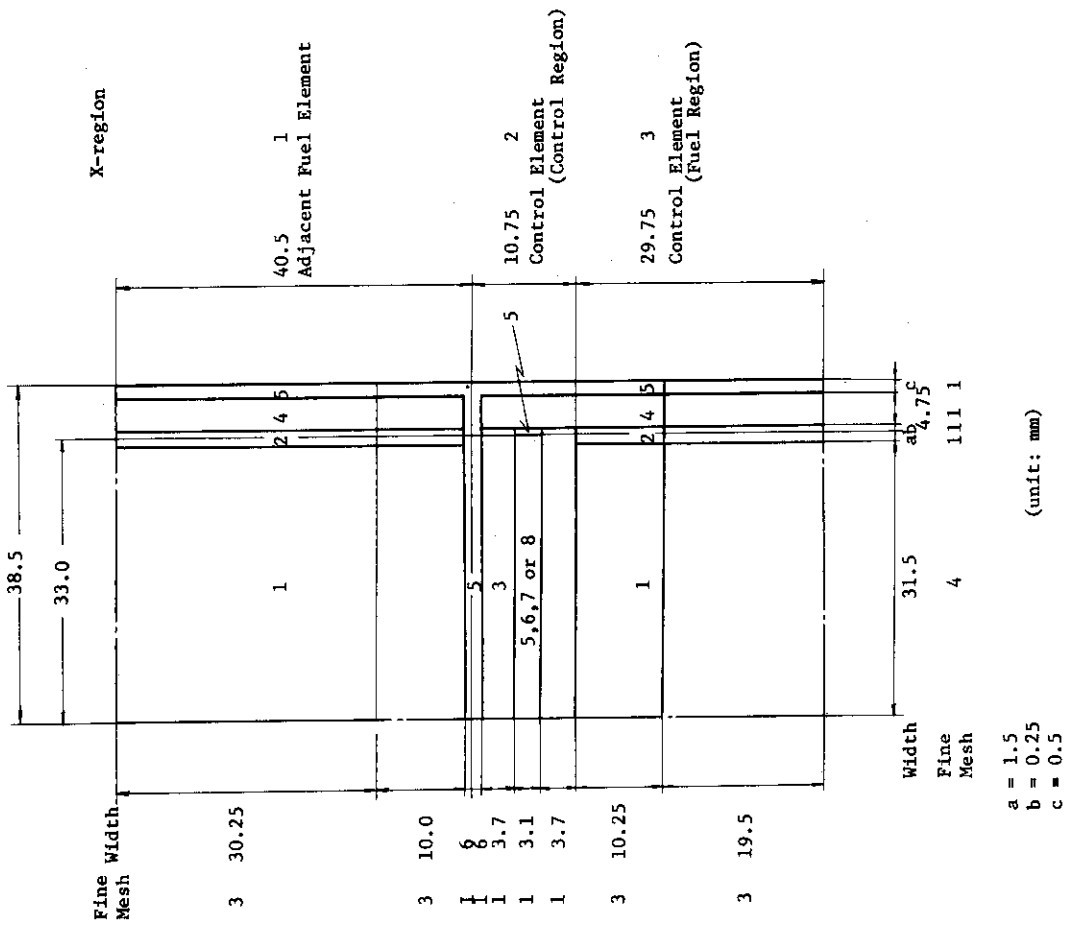


Fig. A.1 Cell Model for Standard Fuel Element

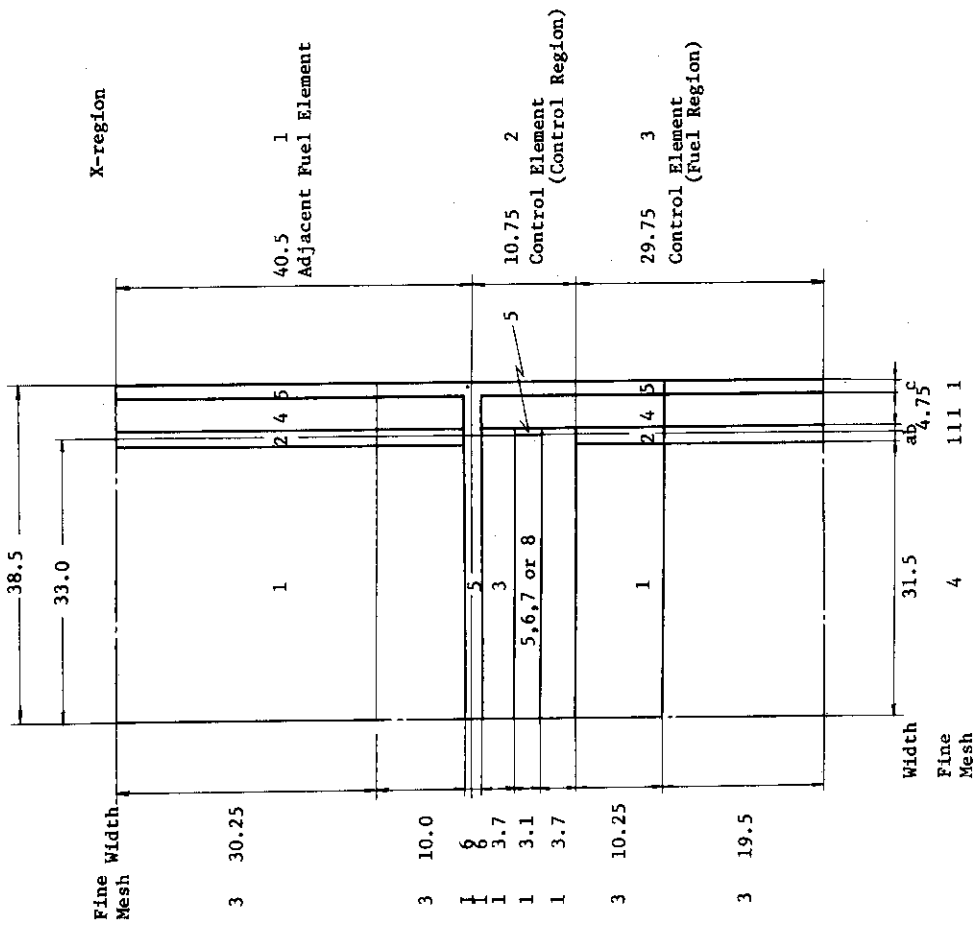


Fig. A.2 Cell Model for Control Fuel Element

a = 1.5  
 b = 0.25  
 c = 0.5  
 (unit: mm)



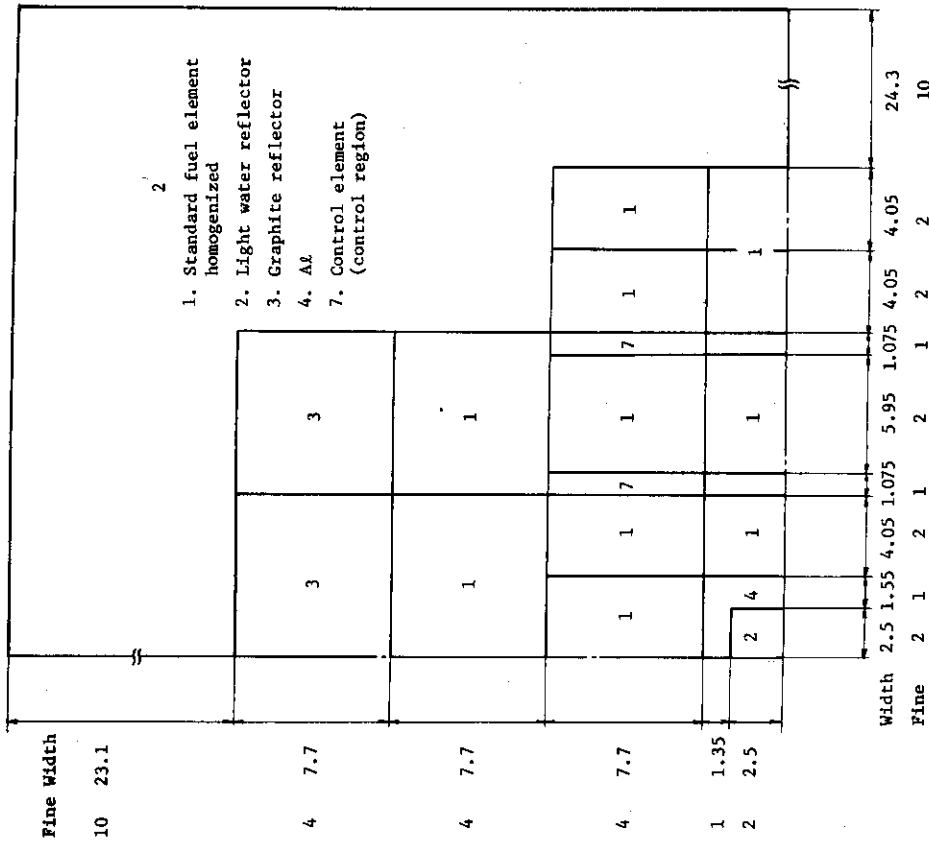


Fig. A-3 Core Model Considering the Adjacent Fuel Elements

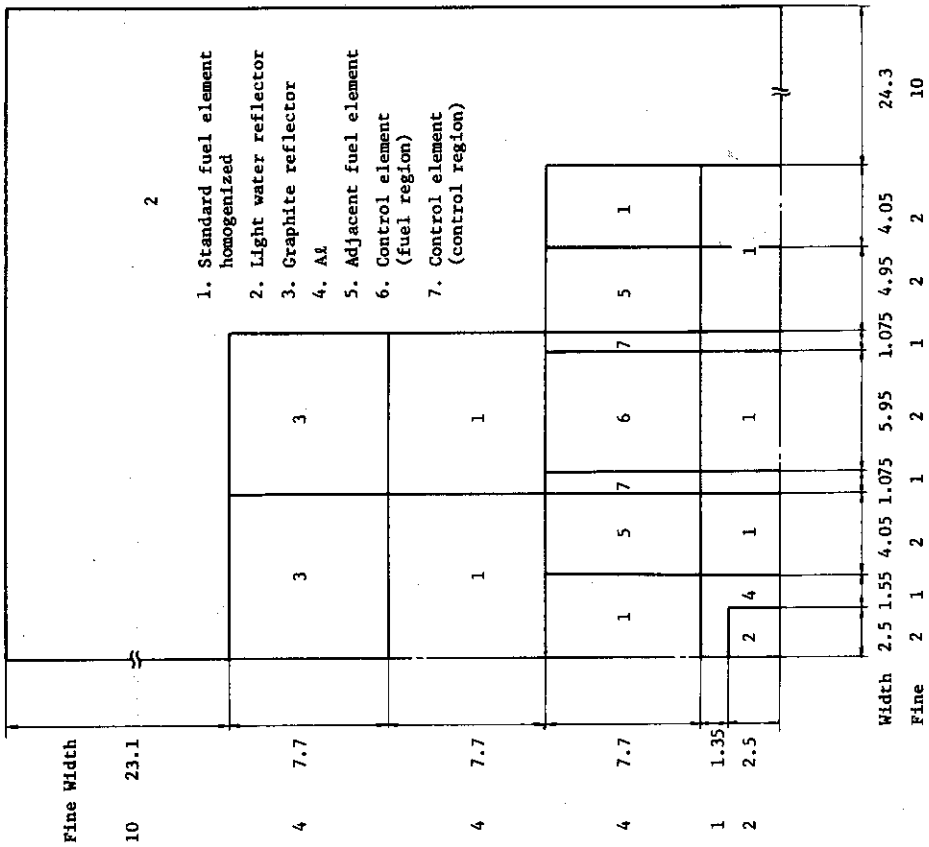


Fig. A-4 Core Model without Considering the Adjacent Fuel Elements