

本資料は2001年7月31日付けて
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

JUPITER 実験解析における中性子ストリーミング効果(Ⅱ)

1982年3月



動力炉・核燃料開発事業団
高速増殖炉開発本部

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

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



配布限定
PNC BN241 82-05
1982年3月

JUPITER実験解析における中性子ストリーミング効果(II)*

竹田敏一**
谷本浩一**
和地永嗣**
山本敏久**
白方敬章
金城勝哉

要旨

大型臨界集合体での日米共同実験計画 JUPITER Phase 1 で行なわれた実験の一部を対象として中性子ストリーミング効果を取り入れた計算方式を用いて実験データの解析を行なった。

アルベド衝突確率を用い格子計算に中性子もれを取り入れ、中性子もれの効果が反応率分布にどの程度影響するかを調べた。ZPPR-9炉心のXおよびY方向の各種反応率分布について検討した。

制御棒ドロワーのような特異ドロワーの格子定数を、スーパーセルにおける反応率を保存するように決める方法を用い、ZPPR-10Aのピンロッドの制御棒価値を計算し、ドロワー内の非均質性に基づくスミアリング効果並びに輸送効果を求めた。ドロワー内の非均質性を直接炉心計算に取り入れた基準計算結果と比較し、実効格子断面積の有効性について検討した。

また、ZPPR-10Cの希釈物質の反応度価値を輸送および拡散計算で求め測定値と比較した。拡散計算で Benoist の拡散係数および統一拡散係数を用いた場合の結果を比較検討した。

* 本報告書は大阪大学工学部が動力炉・核燃料開発事業団の委託で行なった研究の成果のうち JUPITER 実験解析に関する部分をとりまとめたものである。

** 大阪大学工学部原子力工学科



Not for Publication

PNC SN241 82-05

March, 1982

Nuetron Streaming Effect in Analysis of JUPITER Experiment (II)*

Toshikazu Takeda**

Koichi Tanimoto**

Eiji Wachi**

Toshihisa Yamamoto**

Keisho Shirakata and

Katsuya Kinjo

Abstract

Detailed analysis of a part of JUPITER Phase I experiments has been performed by taking into account the neutron streaming effect.

The effect of neutron leakage in cell calculations was estimated in terms of the albedo collision probability method, and the several reaction rate distributions in x and y directions in ZPPR-9 assembly were analysed.

Using the effective group constants preserving reaction rates in a super-cell, we calculated the control-rod worth of pin rods used in ZPPR-10A, and estimated the smearing and transport effects. Direct core calculations were performed by taking into account the heterogeneity in the pin rod drawers and the results were compared with those obtained by using the effective group constants.

Further reactivity worths of diluent materials measured in ZPPR-10C were analysed by using transport and diffusion calculations. In the diffusion calculation, the Benoist and the unified diffusion coefficients were used.

* Work performed under contracts between Power Reactor and
Nuclear Fuel Development Corp. and Osaka University

** Osaka University, Nuclear Engineering

目 次

1. 序 論	1
2. 中性子洩れを取り入れた格子計算によるZPPR-9の反応率分布の解析 ...	3
2.1 群定数およびアルベドとバックリングの作成	3
2.2 格子計算法	4
2.3 計算体系	5
2.4 計算結果	5
2.5 結 論	6
3. ZPPR-10A のピンロッド制御棒価値解析	16
3.1 制御棒チャンネルの実効均質断面積	17
3.2 計算体系	19
3.3 計算結果	19
3.4 結 論	22
4. ZPPR-10C の希釈物質の反応度価値	45
4.1 実験の概要	45
4.2 群定数作成	45
4.3 拡散係数に対する中性子ストリーミング干渉効果	47
4.4 計算体系	48
4.5 計算結果	48
4.6 結 論	50
5. 結 論	70
謝 辞	71
参考文献	72
付 錄 70群制御棒平均断面積の比較	73

List of Tables

Chapter 2

- Table 2.1 Energy Group Structure for 16 Groups
Table 2.2 Bucklings ($B_y^2 + B_z^2$) in Each Drawer
Table 2.3 Albedos in Each Drawer
Table 2.4 Cell Averaged U^{235} Fission Micro Cross Sections
Table 2.5 Reaction Rate C/E Distribution
Table 2.6 Reaction Rate Ratio C/E Distribution

Chapter 3

- Table 3.1 Control Rod Patterns for Rod Worth Measurement in ZPPR-10A
Table 3.2 Comparison of k_{∞} Obtained from Super-Cell Calculation Consisting of CR-02 and Fuel Drawers
Table 3.3 Flux Weighted Absorption Cross Section for Super-Cell Calculations
Table 3.4 Effective Transport Cross Sections of Control Rod Drawers with 92% Enriched B_4C
Table 3.5 Effective Absorption Cross Sections of Control Rod Drawers with (^{10}B Mass: 7.82kg: CR-02)
Table 3.6 Effective Transport Cross Sections of Control Rod Drawers with Natural B_4C
Table 3.7 Effective Absorption Cross Sections of Control Rod Drawers with (^{10}B Mass: 1.58kg: CR-03)
Table 3.8 Pin-Rod Worths Obtained from 18 Group RZ Calculation

Chapter 4

- Table 4.1 Diluent Compositions for ZPPR-10C Streaming Experiments
- Table 4.2 Name of Member Corresponding to Each Cell in ZPPR-10C
- Table 4.3 Weight Factors of Core Subregion in ZPPR-10C
- Table 4.4 Interference Effect Between Sodium Filled CRP and Inner Core Fuel Region I
- Table 4.5 Interference Effect Between Sodium Voided CRP and Inner Core Fuel Region I
- Table 4.6 Interference Effect Between Empty Matrix and Inner Core Fuel Region I
- Table 4.7 Interference Effect Between Steel Block and Inner Core Fuel Region I
- Table 4.8 Interference Effect Between Lower Radial Blanket Drawer and Inner Core Fuel Region I
- Table 4.9 Interference Effect Between Aluminium and Inner Core Fuel Region I
- Table 4.10 Interference Effect Between Sodium/Steel and Inner Core Fuel Region I
- Table 4.11 Results of Calculations for the Worth of Several Materials Relative to the Central CRP in ZPPR-10C
- Table 4.12 Component of the Worth of Several Materials Relative to the Central CRP Calculated by Transport Perturbation Calculation
- Table 4.13 Component of the Worth of Several Materials Relative to the Central CRP Calculated by Diffusion Perturbation Calculation Applying Conventional D to the Materials
- Table 4.14 Component of the Worth of Several Materials Relative to the Central CRP Calculated by Diffusion Perturbation Calculation Applying Unified D to the Materials and the Surrounding Fuel Region

List of Figures

Chapter 2

- Fig. 2.1 One-Dimensional Model Used in Energy Collapse Calculation
- Fig. 2.2 ZPPR-9 Reference Configuration
- Fig. 2.3 One-Dimensional Model Used in 16 Group Cell Calculation

Chapter 3

- Fig. 3.1 Super-Cell Model Used in Cell Calculation
- Fig. 3.2 Flow Diagram for Calculating Group Constants
- Fig. 3.3 Control Rod Positions in ZPPR-10A
- Fig. 3.4 Rod Designs for ZPPR-10A
- Fig. 3.5 1D Cylinder Super-Cell Model
- Fig. 3.6 Diffusion Calculation Model in ZPPR-10A
- Fig. 3.7 Transport Calculation Model in ZPPR-10A
- Fig. 3.8 Convergence of Effective Absorption Cross Section for CR-02
- Fig. 3.9 Convergence of Effective Absorption Cross Section for CR-03
- Fig. 3.10 1st Group Flux Distribution for CR-02
- Fig. 3.11 5th Group Flux Distribution for CR-02
- Fig. 3.12 10th Group Flux Distribution for CR-02
- Fig. 3.13 1st Group Flux Distribution for CR-03 (Hexagonal 1.58kg $^{10}_B$)
- Fig. 3.14 5th Group Flux Distribution for CR-03
- Fig. 3.15 10th Group Flux Distribution for CR-03

Chapter 4

- Fig. 4.1 ZPPR-10C Reference Configuration**
- Fig. 4.2 Streaming-Drawer Types Used in ZPPR-10C**
- Fig. 4.3 ZPPR-10C Quarter-Core Interface Diagram**
- Fig. 4.4 Two-Dimensional RZ Model for Transport and Diffusion Calculations**
- Fig. 4.5 Super-Cell Model for Calculating Unified Diffusion Coefficient**

1. 序 論

大型高速増殖炉の核特性データを得るために日米共同研究による臨界実験が 1978 年 4 月から 1979 年 8 月にわたり ANL の ZPPR-9、-10 集合体で行なわれた。この研究計画は JUPITER Phase 1 と呼ばれており炉心容量 4600～6200l 級の 2 領域均質炉心のベンチマーク実験であり、日米それぞれ独立に実験解析を行ない、用いた核断面積セットおよび計算法の精度評価並びに改良を行なう事を目的としたものである。国内における主な解析は FBEC、東芝、日立、三菱、富士の 5 社により実施され、大阪大学、日本原子力研究所は計算手法上並びに核断面積上開発すべき点に重点を置き、JUPITER 解析に参加している。

本報告では、大阪大学工学部が動力炉・核燃料開発事業団との契約に基づき JUPITER Phase 1 実験解析に用いられる手法を評価改良することを目的として研究した成果を述べる。内容は ZPPR-9 集合体を対象とした格子計算法に関する研究、ZPPR-10A 集合体のピンロッド制御棒反応度価値を計算するまでの均質化に関する研究、ZPPR-10C 集合体で測定された希釈物質反応度価値の解析研究より構成されており、計算手法の改良を目指したものであるので断面積セットとしては上記 5 社と同じく JENDL-2B-70 群断面積セットを用い、⁽¹⁾ 核定数による解析結果の違いをなくした。

ZPPR-9 および 10 集合体の日米の反応率分布に対する解析結果より^{(2),(3),(4)}、U-238 fission 反応分布の C/E 値はプランケット最内層で 1.1 程度にもなり反射体に向うにつれて急激に減少し、また U-235 fission, U-238 capture, Pu-239 fission の反応率分布は Pu プレートを 1 枚含む single column fuel drawer と、2 枚含む double column fuel drawer (spiked fuel) で C/E 値が振動し、数 % の違いが見出された。この現象の原因の 1 つとして格子計算に中性子もれの効果が取り入れなかつた事が考えられる。大阪大学では格子計算に中性子もれを取り入れる方法としてアルベド衝突確率法⁽⁵⁾を導出したので、この方法を用い ZPPR-9 集合体の反応率分布の計算結果に与える影響(補正)について検討する。詳細な結果は第 2 章に示す。

ZPPR-10A 集合体では炉中心に 3 行 3 列にピン形状の制御棒ドロワーが用いられ、その反応度価値が測定されている。3 行 3 列の中心は吸収剤(10B)と Na の混合領域であるが、その回りは Na, SUS の混合領域であり非均質な構造になっている。制御棒価値を計算する際、この非均質効果により中性子束が吸収剤領域に落ち込む影響(今後

この効果を flux-depression effect と呼ぶ)を考えねばならないが、さらに制御棒ドロワーの均質断面積を求める際にはスミアリング効果(smearing effect)をも考慮しなければならない。本報告では、制御棒ドロワーの各エネルギー群ごとの反応率を保存するような実効断面積を用いてこのスミアリングを評価し、さらにドロワー内の非均質性を直接取り入れた輸送並びに拡散計算による制御棒価値と比較し実効断面積の有効性を確かめる。計算方法および計算結果の詳細は第3章で示す。

ZPPR-10C 集合体では、中性子ストリーミング効果の計算手法を検証するためのデータを得るため、希釈物質からなるドロワーを用いその反応度が測定された。輸送計算および拡散計算により反応度を解析し測定データとの比較を行なう。拡散理論で中性子ストリーミング効果を取り扱うため統一拡散係数⁽⁶⁾を使用し、Benoist の拡散係数⁽⁷⁾および $1/3 \Sigma tr$ の拡散係数を用いた場合の反応度と比較検討する。第4章に実験の概要、計算結果、測定値との比較について示す。

2. 中性子洩れを取り入れた格子計算によるZPPR-9の反応率分布の解析

セル平均の群定数を作成する場合、通常無限セルモデルが用いられ周囲からの中性子洩れを考慮に入れていない。こうして作られた群定数は、洩れのない体系に用いられれば反応率を正しく再現するが、実際の体系、特に高速炉では中性子洩れが大きく、その適用に疑問がある。洩れの効果を格子計算に入れてセル定数を改善する試みは種々なされており、主として疑似吸収法が用いられているが、この手法では、セル内での中性子束の傾きを再現できず、洩れによるセル内での詳細な影響まで取り扱うことは不可能である。この従来の手法の欠点を補なう新しい格子計算手法としてアルベド衝突確率法があげられる。本研究ではZPPR-9炉心を対象として、洩れの効果の大きい外側炉心およびプランケットの格子計算にアルベド衝突確率法を適用し、反応率分布に対する効果を検討する。

2.1 群定数及びアルベドとバックリングの作成

格子計算を行なうため70群ミクロ断面積セットJENDL-2B-70をEXPANDAコード⁽⁸⁾によって16群に縮約した。その群構造をTable 2.1に示す。群縮約計算は、体系をFig. 2.1のように一次元円柱モデル化し、内側炉心、外側炉心、プランケット、反射体、マトリクスの各領域を均質に取り扱った。

吸収断面積については、(n, 2n)反応を以下の式により考慮した。

$$\sigma_{a, ij}^g = \sigma_{aij}^g - \sigma_{(n, 2n)ij}^g \quad (2.1)$$

σ_{aij}^g : 領域 i における核種 j の 16 群の吸収ミクロ断面積

$\sigma_{a, ij}^g$: (n, 2n) 反応を考慮を入れた領域 i における核種 j の 16 群吸収ミクロ断面積

$\sigma_{(n, 2n)ij}^g$: 領域 i における核種 j の 16 群 (n, 2n) 反応ミクロ断面積

各ドロワーの境界面におけるアルベドとプレート平行方向(y, z)のバックリング($B_y^2 + B_z^2$)は無限格子計算による断面積を用いて得られた体系の中性子束分布から

計算した。Z 方向の炉心平均バックリングは 16 群 RZ 計算による炉心ープランケットの境界での中性子流の値より求めた。また、16G XY 2 次元拡散計算により、アルベド及び y 方向のバックリングを求めた。この際、ドロワーの境界面での部分中性子流は次式を用いて求めた。

$$J_g^+ = \phi_s^g / 4 + J_g^{\text{net}} / 2 \quad (2.2)$$

$$J_g^- = \phi_s^g / 4 - J_g^{\text{net}} / 2 \quad (2.3)$$

J_g^+ : ドロワーの境界面から流出する g 群の部分中性子流

J_g^- : ドロワーの境界面から流入する g 群の部分中性子流

ϕ_s^g : ドロワーの境界面における g 群の中性子束

J_g^{net} : ドロワーの境界面から流出する g 群の正味の中性子流

2.2 格子計算法

本研究では、格子計算を行なう場合、X 方向をアルベドで、Y および Z 方向は疑似吸収で、洩れの効果を取り扱った。アルベド及びバックリングの値を Table 2.2 ~ 2.3 に示す。アルベド衝突確率法に基づき、16 群のスラブモデルで格子計算を行ない、格子平均のミクロ断面積を次式により求めた。

$$\bar{\sigma}_{xj}^g = \sum_{i \in N(j)} \sigma_{xij}^g \phi_i^g V_i / \sum_{i \in N} \phi_i^g V_i \quad (2.4)$$

ただし、

$\bar{\sigma}_{xj}^g$: 格子平均の核種 j の反応 x に対するミクロ断面積

ϕ_i^g : 格子内の領域(プレート) i における平均中性子束

V_i : 領域 i の体積

σ_{xij}^g : 領域 i での核種 j の反応 x に対するミクロ断面積

$\sum_{i \in N(j)}$ は核種 i を含むすべての領域についての和を示し、 $\sum_{i \in N}$ は、ドロワー内すべての領域 N についての和を示す。

反応率分布は無限格子計算で求めた体系の中性子束と新しく得られた格子平均ミクロ断面積より計算した。中性子洩れの反応分布率への効果を検討するため、同一のドロワーで $\rho_g = 1.0$, $B_y^2 + B_z^2 = 0$ とおいた従来の格子計算も行なった。Table 2.4 に得られた格子平均のミクロ断面積のうち $U^{235}(n, f)$ の傾向を Region A および B について示す。

2.3 計算体系

本研究では、ZPPR-9 の外側炉心及び径方向ブランケットのドロワーについて、アルベド衝突確率法に基づく格子計算を行ない、反応率分布を計算した。Fig. 2.2 は ZPPR-9 の XY 断面積で、X 方向については Region A, X 方向については Region B の各ドロワーについて格子計算が行なわれた。各ドロワーのスラブモデルは Fig. 2.3 に示すように、通常 JUPITER 計画で用いられている格子定数の計算モデルと同じものである。各プレートの数密度も同じ値を使用している。

2.4 計算結果

Table 2.5 ~ 2.6 に各種反応率の C/E に対する補正係数と補正後の C/E の値を示す。補正係数はアルベドとバックリングによって中性子洩れを取り入れた格子定数を用いて計算された反応率と、アルベドを 1.0、バックリングを 0 に固定した場合の格子定数によって得られた反応率との比から求められた。

中性子洩れを考慮に入れて格子計算を行なう効果は、 $U^{238}(n, f)$ で最大 1.1 % 程度であり、他核種についてはさらに小さくなつた。 $U^{238}(n, f)$ は Region A において single fuel column drawer と double fuel column drawer の C/E 差を小さくする方向に動き、反応率分布に対して consistency が見られるようになつた。また、ブランケットでも 1 % 程度の改善が見られた。 $Pu^{239}(n, f)$ では全体として外側炉心の

異種ドロワー間の C/E 差が小さくなつたが、特に Region B の外側炉心とブランケット境界では逆に C/E 差は大きくなり、改善は見られなかつた。 $U^{235}(n,f)$ 及び $U^{238}(n,r)$ では改善は見られない。

2.5 結論

アルベド衝突確率法によつて洩れの効果を考慮した格子計算法を ZPPR-9 のドロワーに適用した結果、主に外側炉心及びブランケットにおける $U^{238}(n,f)$ 反応率分布において効果が見られた。すなわち、ブランケットでの反応率は 1 % 下がり、外側炉心では single fuel column drawer と double fuel column drawer 間の C/E 差を小さくする傾向が見られた。ブランケットでは、補正值は (C/E - 1) 値の 1/10 程度と小さいことと、外側炉心とブランケットの境界面の洩れの効果の大きい場所で期待されていた局部的な補正が見られなかつたため、ドロワーにおける均質化効果をより詳細に検討する必要がある。

Table 2.1 Energy Group Structure for 16 Groups

Group	Corresponding group in 70 groups of JENDL-28	Energy range
1	1 ~ 2	1.05 ~ 6.5 MeV
2	3 ~ 4	6.5 ~ 4.0
3	5 ~ 6	4.0 ~ 2.5
4	7 ~ 8	2.5 ~ 1.4
5	9 ~ 10	1.4 ~ 0.8
6	11 ~ 13	0.8 ~ 0.4
7	14 ~ 16	0.4 ~ 0.2
8	17 ~ 19	0.2 ~ 0.1
9	20 ~ 22	1.00 ~ 4.65 keV
10	23 ~ 25	4.65 ~ 2.15
11	26 ~ 28	2.15 ~ 1.00
12	29 ~ 31	1.00 ~ 4.65
13	32 ~ 34	4.65 ~ 2.15
14	35 ~ 37	2.15 ~ 1.00
15	38 ~ 40	1.00 ~ 4.65
16	41 ~ 70	4.65 ~ thermal

Table 2.2 Bucklings ($B_y^2 + B_z^2$) in Each Drawer (cm $^{-2}$)

Energy Group	Outer Core (first row)		Outer Core (second row)		Radial Blanket (first row)	
	Single Fuel Column	Region A*	Double Fuel Column	Region A	Region B	Region A
1	-2.431-3	2.663-3	4.471-3	4.199-3	-1.648-3	-1.508-2
2	-2.059-3	2.560-3	4.115-3	3.964-3	-1.281-3	-1.258-2
3	-1.989-3	2.554-3	4.035-3	3.934-3	-1.336-3	-1.305-2
4	-1.638-3	2.443-3	3.656-3	3.712-3	-1.262-3	-1.292-2
5	-9.830-4	2.267-3	2.918-3	3.238-3	-1.039-3	-1.091-2
6	1.729-4	1.820-3	1.659-3	2.318-3	-8.139-5	-4.545-3
7	7.030-4	1.529-3	9.732-4	1.703-3	2.465-4	-2.750-3
8	8.530-4	1.151-3	6.343-4	1.221-3	5.539-4	-6.271-4
9	1.002-3	8.862-4	3.202-4	7.897-4	7.285-4	5.152-4
10	8.964-4	5.460-4	2.440-4	4.556-4	8.569-4	1.660-3
11	1.366-3	4.511-4	-3.238-4	-5.920-6	9.110-4	1.285-3
12	1.387-3	2.002-5	-5.616-4	-3.656-4	1.061-3	2.831-3
13	2.735-3	-1.580-4	-2.316-3	-1.288-3	1.313-3	4.674-3
14	1.980-3	-3.422-4	-1.575-3	-1.280-3	9.682-4	-1.372-4
15	2.694-3	-1.359-3	-3.175-3	-2.705-3	-2.516-3	3.318-3
16	3.589-3	-4.700-3	-7.718-3	-6.899-3	1.691-3	5.658-3

* See Fig. 2.2

Table 2.3 Albedos in Each Drawer

Energy Group	Outer Core (first row) Single Fuel Column				Outer Core (second row) Double Fuel Column				Radial Blanket (first row)			
	Region A		Region B		Region A		Region B		Region A		Region B	
	left	right	left	right	left	right	left	right	left	right	left	right
1	0.9073	1.037	1.124	1.124*	0.9641	0.6594	0.9136	0.9136*	20.71	0.0654	0.9780	0.9780*
	0.9302	1.014	1.099		0.9858	0.6939	0.9289		7.880	0.1373	0.9822	
	0.9388	1.011	1.083		0.9895	0.7300	0.9392		5.259	0.2023	0.9835	
	0.9535	0.9963	1.065		1.004	0.7575	0.9505		4.079	0.2572	0.9838	
	0.9795	0.9762	1.036		1.024	0.8191	0.9705		2.313	0.4341	0.9901	
	1.018	0.9404	1.010		1.063	0.8542	0.9386		1.737	0.5427	0.9939	
	1.037	0.9286	1.001		1.077	0.8810	0.9966		1.444	0.6585	0.9950	
	1.053	0.9242	0.9968		1.082	0.8964	0.9992		1.288	0.7303	0.9965	
	1.060	0.9234	0.9946		1.083	0.9106	1.001		1.190	0.7935	0.9972	
	1.068	0.9237	0.9949		1.083	0.9172	1.001		1.119	0.8379	0.9982	
	1.068	0.9200	0.9907		1.087	0.9285	1.004		1.110	0.8621	0.9968	
	1.057	0.9393	0.9922		1.065	0.9499	1.004		1.040	0.9063	0.9986	
	1.038	0.9519	0.9887		1.051	0.9749	1.008		0.9901	0.9412	0.9995	
	1.078	0.9145	0.9843		1.094	0.9461	1.009		1.097	0.9144	0.9940	
	1.110	0.8880	0.9739		1.126	0.9501	1.017		0.9797	0.9496	0.9971	
	1.135	0.8679	0.9942		1.152	0.9784	1.028		0.8152	1.058	0.9978	

* Same as left : because of symmetric region

Table 2.4 Cell Averaged U^{235} Fission Micro Cross Sections (barn)

Energy Group	Outer Core (first row) Single Fuel Column			Outer Core (second row) Double Fuel Column			Radial Blanket (first row)		
	Conventional		Corrected	Conventional		Corrected	Conventional		Corrected
	A	B		A	B		A	B	
1	6.492-1	-0.3*	0.3*	5.199-1	1.5	1.1	1.144	-1.9	0.0
2	4.390-1	-0.2	0.3	3.502-1	1.3	0.9	7.757-1	-1.5	-0.8
3	4.826-1	-0.2	0.2	3.824-1	1.1	0.8	8.545-1	-1.2	-0.7
4	5.017-1	-0.1	0.1	3.952-1	0.8	0.6	8.862-1	-0.9	-0.5
5	4.787-1	-0.1	0.1	3.724-1	0.5	0.3	8.388-1	-0.9	-0.4
6	4.616-1	0.0	0.1	3.573-1	0.2	0.1	8.060-1	-0.2	0.0
7	5.115-1	0.1	0.1	3.917-1	0.1	0.0	8.934-1	-0.1	0.1
8	5.929-1	0.1	0.0	4.530-1	0.1	0.0	1.035	-0.1	0.0
9	6.989-1	0.2	0.0	5.307-1	0.0	0.0	1.218	0.3	0.2
10	8.282-1	0.2	0.0	6.278-1	0.1	0.0	1.440	0.3	0.1
11	9.775-1	0.2	0.0	7.389-1	0.0	0.0	1.704	0.6	0.3
12	1.295	0.2	0.0	9.631-1	-0.2	-0.2	2.246	1.1	0.5
13	1.888	0.2	-0.1	1.372	-0.7	-0.7	3.219	2.6	1.1
14	2.624	0.2	0.1	1.959	0.1	0.0	4.610	-0.2	-0.7
15	4.012	0.3	0.0	2.962	0.2	0.1	7.227	-0.4	0.0
16	6.266	0.3	0.2	4.513	0.4	0.4	1.438	0.1	0.1

* Percent difference from Conventional

Table 2.5 Reaction Rate C/E Distribution

$U^{235}(n, f)$							
Cell No.	Region A			Region B			
	Conventional		Corrected	Conventional		Corrected	
	C/E	factor	C/E	C/E	factor	C/E	
Outer Core	1	1.018	+0.002	1.020	1.042	+0.002	1.044
	2	1.014	+0.001	1.015	1.035	+0.005	1.040
	3	1.009	+0.002	1.011	1.044	+0.005	1.049
	4	1.011	+0.001	1.012	1.023	+0.005	1.028
	5	1.017	+0.004	1.021	1.038	+0.006	1.044
Radial Blanket	6	1.016	+0.002	1.018	1.034	+0.001	1.035
	7	0.994	-0.001	0.993	1.013	+0.001	1.014
	8	1.016	-0.002	1.014	1.022	+0.002	1.024
	9	0.995	-0.001	0.994	1.009	+0.001	1.010

$U^{238}(n, f)$							
Cell No.	Region A			Region B			
	Conventional		Corrected	Conventional		Corrected	
	C/E	factor	C/E	C/E	factor	C/E	
Outer Core	1	1.016	-0.002	1.014	1.094	+0.002	1.096
	2	0.987	+0.009	0.996	1.083	+0.007	1.090
	3	1.023	+0.003	1.026	1.057	+0.001	1.058
	4	1.000	+0.010	1.010	1.045	+0.007	1.052
	5	0.996	+0.008	1.004	1.008	+0.002	1.010
Radial Blanket	6	1.110	-0.011	1.099	1.203	-0.006	1.197
	7	1.062	-0.011	1.051	1.070	-0.006	1.064
	8	0.920	-0.010	0.910	0.982	-0.006	0.976
	9	1.087	-0.010	1.077	0.960	-0.006	0.954

Continued

$U^{238}(n, r)$

Cell No.	Region A			Region B		
	Conventional C/E	Correction factor	Corrected C/E	Conventional C/E	Correction factor	Corrected C/E
Outer Core	1	1.012	+0.002	1.014	1.059	+0.000
	2	1.048	+0.000	1.048	1.072	+0.000
	3	1.023	+0.002	1.025	1.036	+0.000
	4	1.040	+0.000	1.040	1.067	+0.000
	5	0.997	+0.003	1.000	1.026	+0.000
Radial Blanket	6	1.008	+0.002	1.010	1.029	+0.001
	7	0.979	-0.002	0.977	1.003	+0.001
	8	0.961	-0.002	0.959	0.986	+0.002
	9	0.939	-0.002	0.937	0.957	+0.001

$Pu^{239}(n, f)$

Cell No.	Region A			Region B		
	Conventional C/E	Correction factor	Corrected C/E	Conventional C/E	Correction factor	Corrected C/E
Outer Core	1	1.027	-0.001	1.026	1.044	+0.002
	2	1.006	+0.004	1.010	1.006	+0.004
	3	1.010	-0.001	1.009	1.021	+0.001
	4	1.000	+0.004	1.014	1.033	+0.004
	5	0.992	+0.000	0.992	1.017	+0.001
Radial Blanket	6	*****	*****	*****	*****	*****
	7	*****	"	"	"	"
	8	*****	"	"	"	"
	9	*****	"	"	"	"

Table 2.6 Reaction Rate Ratio C/E Distribution (X direction)

Cell No.	$U^{238}(n,f)/U^{235}(n,f)$			$U^{238}(n,r)/U^{235}(n,f)$			$Pu^{239}(n,f)/U^{235}(n,f)$			
	Region A			Region A			Region A			
	Conventional C/E	Correction factor	Corrected C/E	Conventional C/E	Correction factor	Corrected C/E	Conventional C/E	Correction factor	Corrected C/E	
Outer Core	1	1.028	-0.003	1.025	0.962	+0.000	0.962	0.984	-0.003	0.981
	2	1.069	+0.009	1.078	0.939	-0.001	0.938	0.970	+0.004	0.974
	3	1.054	+0.001	1.055	0.971	+0.000	0.971	0.983	-0.003	0.980
	4	1.061	+0.009	1.070	0.951	-0.001	0.950	0.963	+0.003	0.966
	5	1.022	+0.005	1.027	0.919	+0.000	0.919	0.950	-0.004	0.946
Radial Blanket	6	1.025	-0.014	1.011	1.048	+0.000	1.048	****	****	****
	7	1.018	-0.010	1.008	1.029	+0.000	1.029	****	"	"
	8	0.975	-0.009	0.966	0.871	+0.000	0.871	****	"	"
	9	0.972	-0.009	0.963	1.051	-0.001	1.050	****	"	"

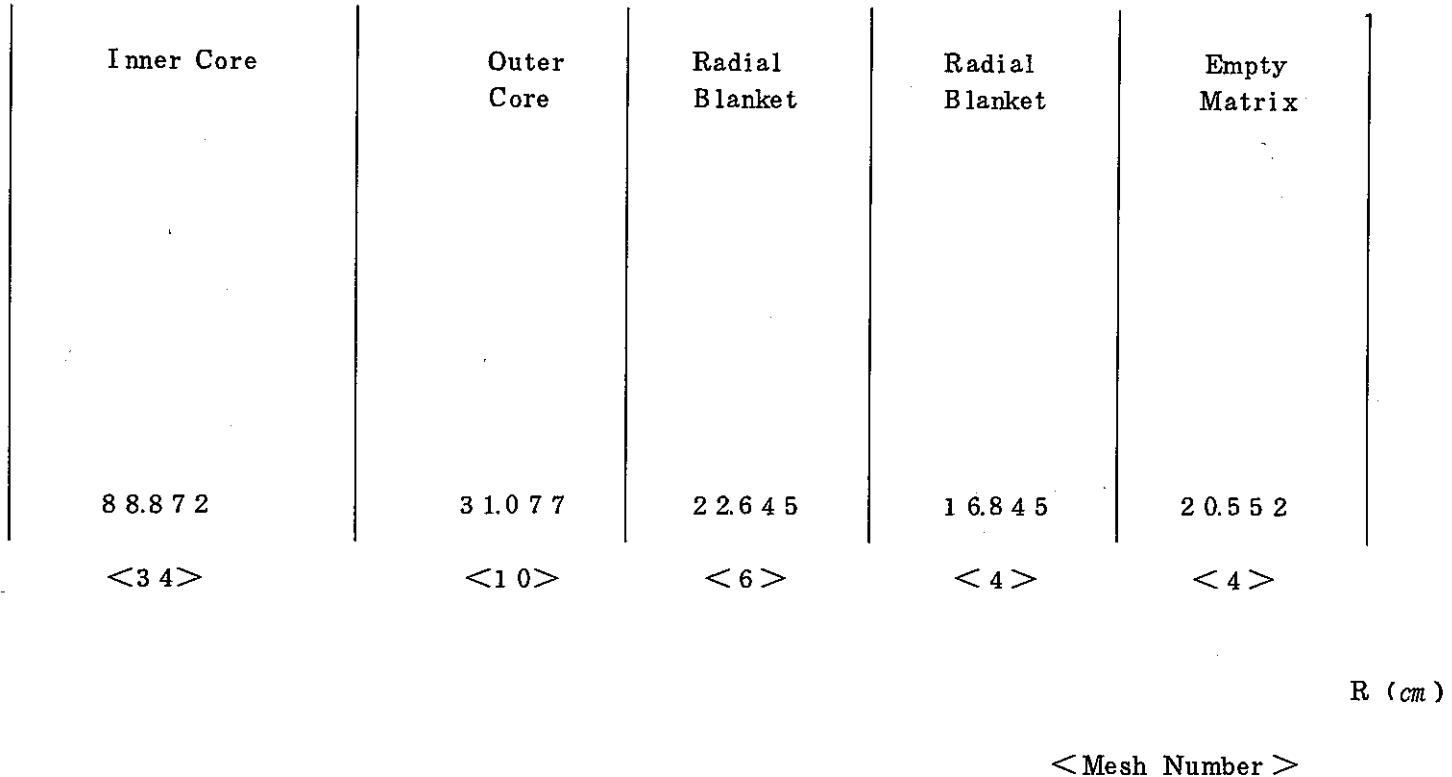


Fig. 2.1 One-dimensional R Model Used in Energy Collapse Calculation

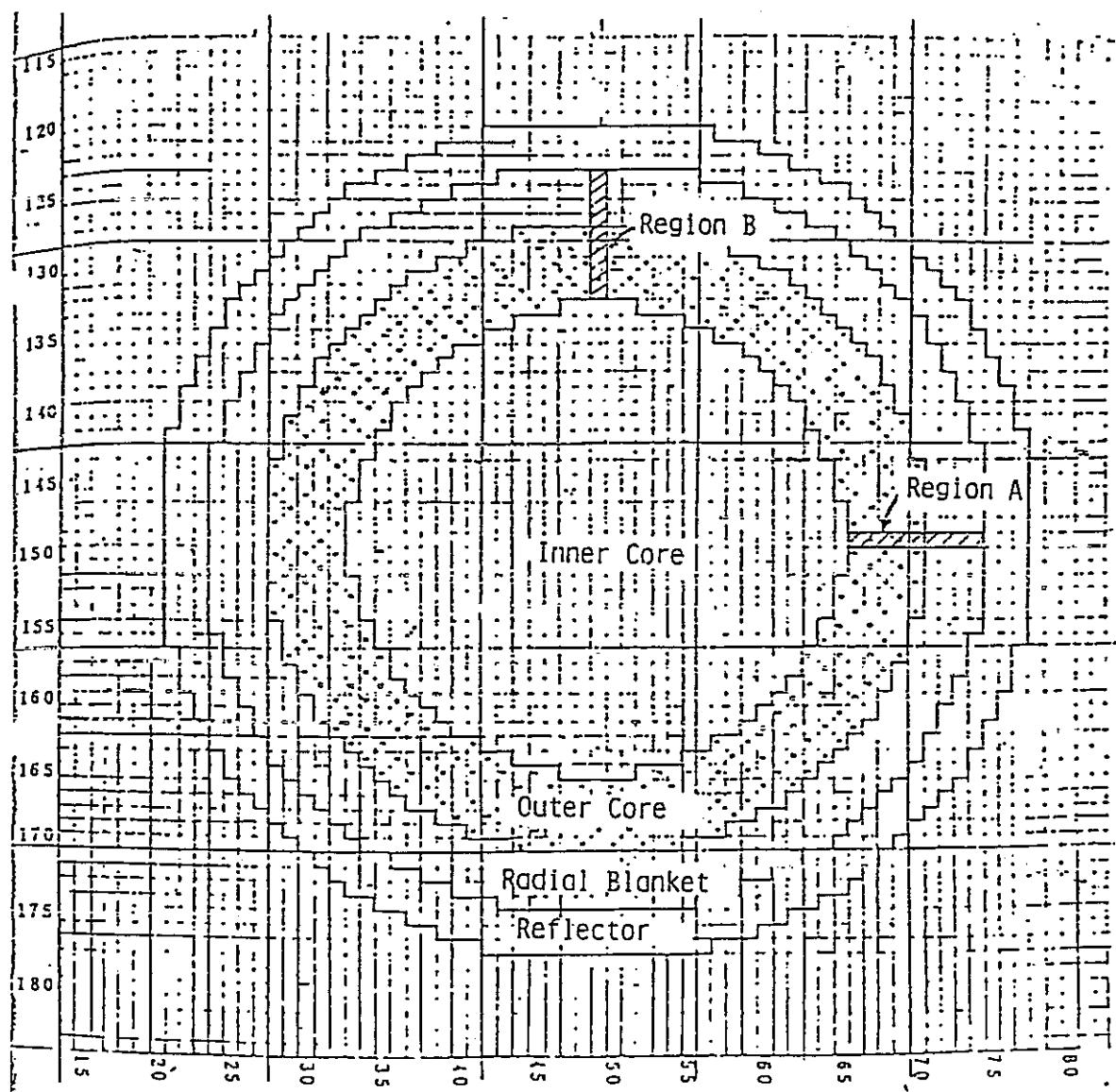


Fig. 2.2 ZPPR-9 Reference Configuration

• Double Column Fuel Drawer

Radial Blanket	0.22225	Matrix	0.26194	Matrix	0.24209	Matrix	
	1.27000	U_3O_8	0.27781	Fe_2O_3	0.63500	U_3O_8	
	0.31750	U^{238}	0.03810	ZPPR FUEL	0.31750	U^{238}	
	0.03810		0.07620		0.03810		
	1.19380	Na	1.19380	Na	1.19380	Na	
	0.03810		0.03810		0.07620		
	1.27000	U_3O_8	0.63500	U_3O_8	0.55880	ZPPR FUEL	
	0.31750	U^{238}	0.03810	Na_2CO_3	0.07620		
	0.63500	U_3O_8	0.07620	Na	0.55880	Na	
	0.22225	Matrix	0.26194	Matrix	0.24209	Matrix	
cm			cm			cm	

Fig. 2.3 One-dimensional Models Used in 16 Group Cell Calculations

3. ZPPR-10A のピンロッド制御棒価値解析

制御棒チャンネルの均質断面積は、制御棒チャンネルとそれを取り囲む燃料領域からなるスーパーセルを考え、このスーパーセルで多群の中性子束分布を計算し、求まった中性子束で制御棒チャンネル内各領域の断面積を平均して計算されている。しかし、この均質断面積を用いて同じスーパーセルで格子計算を実行しても制御棒チャンネル内の反応率（吸収率）は保存されない。もちろん制御棒反応度価値も異なった値となる。

これは、制御棒チャンネルを燃料で取りかこんだスーパーセルの外部境界では正味の中性子流を0としているが、制御棒チャンネルに流入する中性子流はゼロでなく、均質断面積を用いるとこの正味の流入中性子流が異なり、チャンネル平均の中性子束も異なってしまうのである。

このように従来の制御棒チャンネルの均質化は欠点があるので、Rowlands⁽⁹⁾は摂動理論を用いて制御棒チャンネルの均質断面積の計算法を開発した。Rowlandsの方法は非均質な（摂動前と考える）スーパーセル（一般的にはどのような体系であってもよい）と摂動後の均質化されたスーパーセル体系の k_{∞} の差を摂動理論により求め、各成分がすべてゼロになるように均質断面積を求めるものである。この方法を用いると当然スーパーセルにおける制御棒反応度価値は保存されるが、各群のチャンネル平均の反応率は保存されない。さらに、Rowlandsの方法では随伴中性子束の計算が必要になる。

本報告書では各群のチャンネル平均の反応率を保存するチャンネル平均の実効断面積を導出する。この方法はスーパーセルでチャンネル平均の断面積を用いて格子計算を行ない、得られた中性子束により非均質スーパーセル計算の反応率を規格化する方法であり、スーパーセル計算を実効断面積が収束するまでくり返す。

1978年に Lugano で開催された専門家会議 "A Specialist's Meeting on Homogenization Methods in Reactor Physics" では、Rowlandsの方法の他に、制御棒チャンネルの均質化に有効と思われる論文が K. Koebke⁽¹⁰⁾により発表されている。この方法では、従来の中性子束で重み平均した均質断面積 (Flux weighed constant) を用いるが、体系計算の際にチャンネル表面で中性子束の不連続性を導入し、反応率の平均値を保存させる。それ故、singularityの表面における heterogeneity factor $f = \phi_G^{het} / \phi_G^{homo}$ をまず、応答行列法等で計算しておいて均質体系計算で均質中性子束の不連続性を許す。この方法は拡散理論で導出されているが、輸送計算に適用すること

とも可能であり、今後注目する必要がある。

導出した均質化手法により ZPPR-10A のピンロッドを含む制御棒ドロワーの均質断面積を求め、制御棒反応度価値を計算し、通常の FWC の値を用いた場合の結果と比較し、スミアリング効果につき検討する。

3.1 制御棒チャンネルの実効均質断面積

制御棒チャンネルの均質断面積は通常 Fig. 3.1 に示されるようなスーパーセル体系で計算される。燃料領域は炉内の CR チャンネルの本数と燃料ドロワーの本数の比がほぼ等しいように取られる。

格子平均断面積は通常、均質化する領域の中性子束と体積を重みとして次式により計算される。

$$\bar{\Sigma}\alpha = \frac{\sum_i \Sigma\alpha^g_i v_i \phi_i^g}{\sum_i v_i \phi_i^g} \quad (3.1)$$

ここで $\bar{\Sigma}\alpha^g$: 反応 α (吸収、分裂、散乱) に対する格子平均の g 群の断面積
 $\Sigma\alpha^g i$: 領域 i における反応 α の g 群断面積

v_i : 領域 i の体積

ϕ_i^g : 領域 i の g 群の中性子束

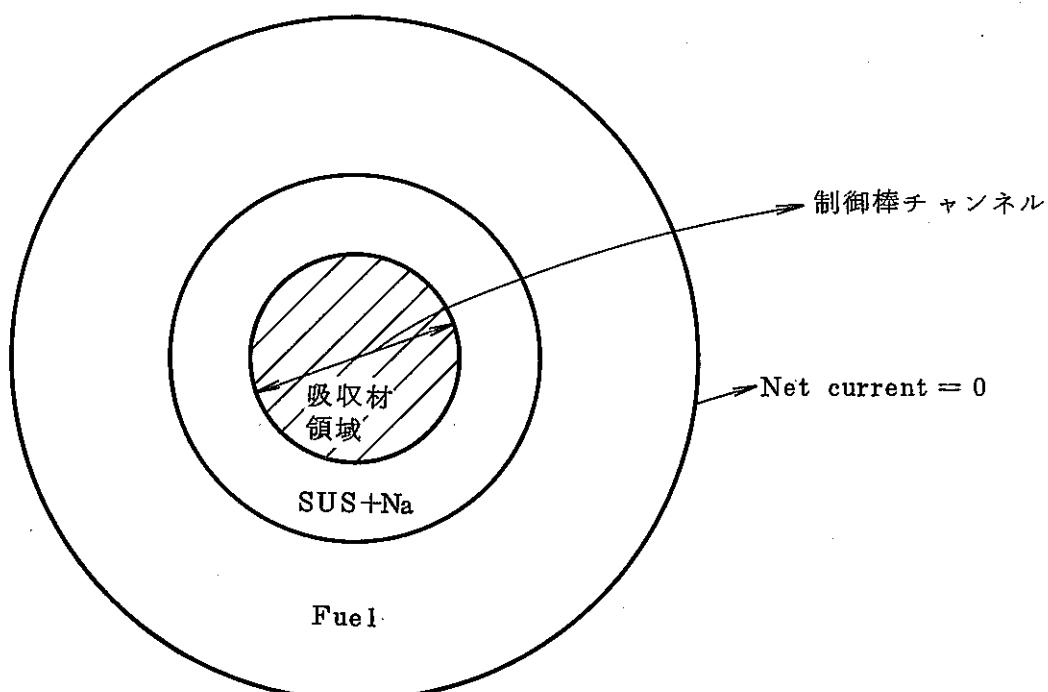


Fig. 3.1 スーパーセルモデル

(3.1)式にあらわれる中性子束分布は通常、制御棒チャンネルとその周囲の燃料から構成されるスーパーセル体系で輸送計算を行ない求められる。(3.1)式の分子は制御棒チャンネル内の反応率を示しているが、 $\bar{\Sigma}\alpha^g$ を用いた均質輸送(あるいは拡散)計算でその反応率が保存されているという保証はない。これは均質計算で得られる制御棒チャンネルの平均中性子束が $\sum_i V_i \phi_i^g / \sum_i V_i$ とは異なるためである。スーパーセル計算による制御棒チャンネルの反応率を保存させる方法として、均質計算をくり返し行ない反応率が等しくなるまで均質断面積を修正する方法を開発した。すなわち、均質断面積を

$$\bar{\Sigma}\alpha^{g(n)} = \sum_i \bar{\Sigma}\alpha^g V_i \phi_i^g / V \bar{\phi}^{g(n-1)} \quad (3.2)$$

但し $V = \sum_i V_i$
によって計算する。ここで、 $\bar{\phi}^{g(n-1)}$ は格子平均断面積 $\bar{\Sigma}\alpha^{g(n-1)}$ を用いた均質計算によって得られた制御棒チャンネルでの平均中性子束である。また、 $\bar{\phi}^{g(n-1)}$ を計算する際、スーパーセルの核分裂ソースを1に規格化する。上の方程式により $\bar{\Sigma}\alpha^{g(n)}$ を次の収束条件が満たされるまでくり返し計算する。

$$\text{Max}_g \left| \frac{\bar{\phi}^{g(n)} - \bar{\phi}^{g(n-1)}}{\bar{\phi}^{g(n)}} \right| \leq \epsilon \quad (3.3)$$

このようにして求まった均質断面積は(3.1)式に基づく通常の断面積と異なっている。この事を説明するため、(3.2)式を次のように変形する。

$$\bar{\Sigma}\alpha^{g(n)} = \bar{\Sigma}\alpha^g \times \frac{\sum_i V_i \phi_i^g}{V \bar{\phi}^{g(n-1)}} \quad (3.4)$$

上式からわかるように $\sum_i V_i \phi_i^g / V \bar{\phi}^{g(n-1)}$ が均質断面積に対する補正因子であり、この因子はスーパーセルにおける実際の中性子束のディップが均質計算では再現できない事を補償している。

(3.2)式による方式は輸送理論および拡散理論に基づく均質断面積を作成する場合に使用できる。輸送均質断面積を作成する場合には、均質計算を輸送理論に基づき実行すればよく、拡散均質断面積を作成する場合には拡散理論に基づく均質計算を実行すればよい。(Fig. 3.2 参照)

3.2 計算体系

ZPPR-10A 集合体の 3×3 ドロワーからなる制御棒チャンネルの CRP に対する反応度価値を計算する。10A集合体は Fig. 3.3 に示されるように 19 本の CRP チャンネルを含み、Table 3.1 に示される 18 パターンに対して制御棒反応度価値が測定されている。

中心のチャンネルに対しては Fig. 3.4 に示されるロッドタイプの制御棒も用いられており、プレートタイプの制御棒価値と比較する事ができる。本報告書では、このロッドタイプの制御棒価値を計算する際のスミアリング効果に注目して、この効果が制御棒価値の C/E 値にどれ程影響するかにつき検討する。

制御棒チャンネルの均質断面積は Fig. 3.5 に示すような 3 領域からなるスーパーセル体系を用いて求められる。中心の吸収材領域は B_4C ピンとそのまわりの Na、SUS を体積平均した領域であり、そのまわりは SUS と Na の均質化された領域である。円筒化する際には、各領域の体積を保存するようにした。

制御棒反応度価値は 18 群の RZ 輸送および拡散計算により求められた。用いられた RZ 体系およびメッシュ数を Fig. 3.6、3.7 に示す。

拡散計算は CITATION コード⁽¹¹⁾、輸送計算は TWOTRAN-II⁽¹²⁾ コード ($S_6 P_0$) により実行した。

3.3 計算結果

3.3.1 セル平均群定数

Fig. 3.5 に示すスーパーセルでの 70 群格子計算を CASUP⁽¹³⁾ コードで実行した。CASUP コードは衝突確率法に基づく積分型輸送コードであり、吸収材、Na+SUS、Fuel 領域を各々 1 領域に分割した場合と、5、2、5 領域に分割した場合に対し平均断面積がどの程度変化するかを調べた。Table 3.2 には Hexagon #1 (7.82 kg B^{10} : CR-02) に対するスーパーセル計算の k_{∞} を SLAROM コード⁽¹⁴⁾ による結果と比較した。CASUP で 5.2.5 領域に分割する際、等体積に各領域をわけた場合と、等メッシュに分けた場合を考えた。

k_{∞} の差は 4×10^{-3} あるが平均断面積は 1 % 以内で一致した。また、CASUP と SLAROM はほぼ同じ結果を与えた。Table 3.3 には、CASUP コードで 3 領域および 12 領域に分割した場合の Hexagon #1 (7.82 kg B^{10} : CR-02) のドロワー

平均の吸収断面積を比較する。低エネルギー群になる程両者の差は大きくなるが、この3および12領域分割による制御棒ワースはそれぞれ $8.114 \times 10^{-3} \Delta k/k$ 、 $8.033 \times 10^{-3} \Delta k/k$ であり、その差は1%であり小さい。

Table 3.4、3.5には12領域に分割した場合の Hexagon #1 ($7.82 \text{ kg }^{10}\text{B}$: CR-02) のドロワー平均の Transport および吸収断面積を示す。 $\bar{\Sigma}_{tr}$ に対しては輸送計算用の実効断面積は FWC にくらべ 1~10群で 5~10% 程度小さくなっている。

拡散計算用の実効断面積は Flux weighted constant と同じにしている。吸収断面積を比較すると輸送計算用の実効断面積は $\bar{\Sigma}_{tr}$ と同じだけ FWC の結果からずれている。拡散計算用の実効断面積は FWC より 1~10群で 20~5% 程度小さくなっている。エネルギー群に対する変化の様子は輸送計算用の実効断面積とくらべ反対の傾向を示している。

Table 3.6、3.7には Hexagon #1 ($1.58 \text{ kg }^{10}\text{B}$: CR-03) のドロワー平均の Transport および吸収断面積の値を示す。領域は12領域に分割した。輸送計算用の実効断面積の FWCとの差は1~10群で5%以下であり、 $7.82 \text{ kg }^{10}\text{B}$ の場合にくらべるとその差は小さくなっている。しかし、拡散計算用の実効断面積の FCWとの差は $7.82 \text{ kg }^{10}\text{B}$ の場合と同一程度である。

Fig. 3.8、3.9には、Hexagon #1 の $7.82 \text{ kg }^{10}\text{B}$ (CR-02) のドロア及び $1.58 \text{ kg }^{10}\text{B}$ (CR-03) のドロワーの実効輸送と実効拡散吸収断面積の収束状態をそれぞれ示してある。横軸は繰り返し回数を示している。

3.3.2 RZ 体系計算結果

計算は、Fig. 3.6、3.7に示す二次元 RZ 体系で行なわれ、この体系の中心3行3列ドロワー領域(等価半径 $r = 9.3506 \text{ cm}$)がナトリウムフォロワー(CRP)または制御棒(CR)によって置換される。18群の通常の断面積及び実効断面積を使って CRPに対する制御棒反応度価値が計算された。基準計算としては、制御棒内の非均質性(二領域:吸収物質 + SUS & ナトリウム)を考慮した輸送計算を採用した。この基準結果と以下に示す種々の手法による計算結果とを比較する。

即ち、制御棒領域に対して

- 1) スーパーセル計算によって得られた通常の断面積を用いた輸送計算
- 2) 先程述べた実効断面積を用いた輸送計算
- 3) 制御棒内の非均質性を考慮した二領域モデルによる拡散計算

4) 通常の断面積を用いた拡散計算

5) 実効断面積を用いた拡散計算

である。ただし、CR領域で実効断面積を用いる際に、炉心の制御棒チャンネル内にのみ実効断面積を用い、軸方向ブランケット内の制御棒チャンネルについては、この部分の制御棒反応度価値に及ぼす影響が小さいため、通常の断面積を用いた。

Tabl. 3.8 には、各手法によって得られた実効倍増率と制御棒反応度価値が示されている。ここでスミアリング補正值は、先程述べた二領域モデルによって得られたワースと通常の断面積を用いて得られたワースとの差より定義される。こうして計算されたスミアリング補正值は、CR-02、CR-03の場合とも約4%で、 B^{10} の濃縮度依存性はない。実効断面積を用いた輸送計算結果は、基準計算結果と比較すると、1.5%以内で一致しており、スミアリング効果が取り入れられていることがわかる。制御棒領域内の非均質性を取り入れた拡散計算は、CR-02の場合で5.9% CR-03の場合3.1%と、CRワースを過大評価している。この値は、輸送効果に相当するものであり、 B^{10} の濃縮度依存性が見られ、制御棒領域内の中性子束の落ち込みに関係している。実効断面積を用いた拡散計算は、CRワースを8~5%過大評価している。この事は、全体の輸送効果を拡散定数を修正しただけでは考慮することができない事を示している。通常の断面積を用いた拡散計算結果は、CRワースを11~7%過大評価しているが、これは、スミアリング効果及び輸送効果によるものである。また拡散計算により得られたスミアリング補正值(二領域モデルを用いて拡散計算により得られたワースと通常の断面積を用いて拡散計算により得られたワースの差)は、先程の輸送計算によるスミアリング補正值とほぼ等しい。従って、スミアリング効果は拡散計算でも予測することができる。

次に、種々の断面積を用いた場合の中心面($Z=0$)での径方向中性子束分布をFig. 3.10 ~ 3.15 に示す。Fig. 3.10 ~ 3.12までは CR-02($7.82 \text{ kg } B^{10}$)に対応する1、5、10群の中性子束分布、Fig. 3.13 ~ 3.15までは、CR-03($1.58 \text{ kg } B^{10}$)に対する1、5、10群の中性子束分布を示している。実効断面積を用いた計算による中性子束は、基準計算結果と比較するとかなり異なっており、今後の検討が必要となる。

3.4 結論

以上の計算より以下の事がわかった。

- 1) ZPPR-10A のピンロッドに対しても、スミアリング効果は約 4 %あり、10B 濃縮度によらない。
- 2) 実効断面積を用いた輸送計算では基準計算に基づく CR ワースを 1.5 %以内の精度で再現する。
- 3) スミアリング効果は拡散計算により予測する事ができる。（中心 CR の場合）

Table 3.1 Control Rod Patterns for Rod Worth Measurements in ZPPR-10A

Position Pattern No.	Cont- rol Rod	1st Ring							2nd Ring											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	★	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	★	○	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3		○	●	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	★	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
5		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11	★	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12		●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13		●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
14		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
15		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
16	★	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
17		○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
18		○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Note: Position No., see Fig. 3.5-1. ○ CRP. ● CR

★ Cases required to take into account correction factors

Table 3.2 Comparison of K_{∞} Obtained from Super-Cell Calculation Consisting of CR-02 and Fuel Drawers

No. of Divisions in a Region			F BEC (SLAROM)	CASUP
CR	Na	Fuel		
1	1	1	0.8535	0.8501
3	1	1	0.8569	—
5	1	1	0.8582	—
5	2	4	0.8865	—
5	2	5	—	{ 0.8804 equi-mesh 0.8761 equi-volume

	Σa in 10 th group	Σa in 25 th group
F BEC (524)	3.678 - 3	4.219 - 2
Osaka (525)	3.674 - 3	4.208 - 2

Table 3.3 Flux Weighted Absorption Cross Section for supercell calculations with 3 regions and 12 regions

Energy group	$\Sigma a (cm^{-1})$ 3 region calculation	$\Sigma a (cm^{-1})$ 12 region calculation	Percent difference $\left(\frac{\Sigma a_{,3} - \Sigma a_{,12}}{\Sigma a_{,12}} \times 100 \right)$
1	7.3 1 8 -3	7.3 3 0 -3	-0.2
2	7.1 3 9 -3	7.1 5 5 -3	-0.2
3	5.4 7 2 -3	5.4 7 8 -3	-0.1
4	6.5 3 3 -3	6.5 3 1 -3	0.0
5	3.5 6 5 -3	3.5 5 9 -3	0.2
6	9.4 8 6 -3	9.4 0 6 -3	0.9
7	1.6 5 4 -2	1.6 3 4 -2	1.2
8	2.5 2 2 -2	2.4 8 2 -2	1.6
9	3.2 7 6 -2	3.2 1 2 -2	2.0
10	4.2 9 6 -2	4.1 8 7 -2	2.6
11	5.5 4 4 -2	5.2 9 6 -2	4.7
12	6.6 7 6 -2	6.0 7 8 -2	9.8
13	7.7 2 8 -2	6.5 8 7 -2	17.3
14	8.8 0 6 -2	8.0 0 8 -2	10.0
15	9.5 7 3 -2	8.8 1 3 -2	8.6
16	1.0 1 4 -1	9.0 9 8 -2	11.5
17	1.0 4 4 -1	9.5 9 1 -2	8.9
18	1.1 0 0 -1	1.0 1 8 -1	8.1
k ω	0.8 5 0 1	0.8 8 0 4	

Table 3.4 Effective Transport Cross Section of Control Rod Drawers With 92% enriched B_4C
 $(^{10}B$ Mass : 7.82kg : CR-02)

Energy groupe	$\Sigma tr (cm^{-1})$ FWC	Percent difference from FWC	
		Effective transport	Effective * diffusion
1	8.368-2	- 4.8	0.0
2	9.595-2	- 5.2	
3	1.151-1	- 5.9	
4	1.210-1	- 5.9	
5	1.382-1	- 7.2	
6	1.813-1	- 9.7	
7	2.043-1	- 10.0	
8	2.434-1	- 10.7	
9	2.711-1	- 11.4	
10	3.147-1	- 11.7	
11	3.693-1	- 17.1	
12	6.414-1	- 25.4	
13	9.900-1	- 34.6	
14	4.957-1	- 29.2	
15	4.900-1	- 23.0	
16	6.887-1	- 26.8	
17	5.701-1	- 26.6	
18	5.950-1	- 34.9	

* D is fined to $1/3 \bar{\Sigma} tr$

Table 3.5 Effective Absorption Cross Sections of Control Rod Drawers With 92% enriched B_4C (^{10}B Mass : 7.82kg : CR-02)

Energy group	$\Sigma a (cm^{-1})$ FWC	Percent difference from FWC	
		Effective transport constant	Effective diffusion constant
1	7.3 3 0 -3	- 4.9	- 2 0.2
2	7.1 5 5 -3	- 5.2	- 1 8.1
3	5.4 7 8 -3	- 5.9	- 1 4.2
4	6.5 3 1 -3	- 5.9	- 9.0
5	3.5 5 9 -3	- 7.2	- 7.3
6	9.4 0 6 -3	- 9.5	- 8.3
7	1.6 3 4 -2	- 1 0.0	- 7.8
8	2.4 8 2 -2	- 1 0.6	- 6.4
9	3.2 1 2 -2	- 1 1.3	- 4.1
10	4.1 8 7 -2	- 1 3.1	- 0.0
11	5.2 9 6 -2	- 1 6.7	- 0.9
12	6.0 7 8 -2	- 2 5.1	1 0.7
13	6.5 8 7 -2	- 3 4.0	2 4.7
14	8.0 0 8 -2	- 2 8.7	9.7
15	8.8 1 3 -2	- 2 3.0	3.4
16	9.0 9 8 -2	- 2 6.0	7.3
17	9.5 9 1 -2	- 2 6.6	- 1.2
18	1.0 1 8 -1	- 3 4.9	- 2 3.6

Table 3.6 Effective Transport Cross Sections of Control Rod Drawers With Natural B₄C
 (¹⁰B Mass : 1.58 kg : CR-03)

Energy group	$\Sigma_{tr} (cm^{-1})$ FWC	Percent difference from FWC	
		Effective transport	Effective diffusion
1	8.1 7 2 -2	- 0.5	0.0 *
2	9.4 2 7 -2	- 0.3	
3	1.0 9 4 -1	- 1.1	
4	1.1 9 5 -1	- 1.9	
5	1.3 4 8 -1	- 2.9	
6	1.7 1 0 -1	- 5.1	
7	1.8 5 9 -1	- 3.7	
8	2.3 0 7 -1	- 4.2	
9	2.6 2 2 -1	- 2.8	
10	2.9 8 6 -1	1.4	
11	3.4 4 4 -1	- 2.0	
12	5.5 5 8 -1	- 1.9	
13	9.0 6 8 -1	- 8.9	
14	4.4 1 7 -1	- 6.1	
15	4.3 4 0 -1	- 1 5.1	
16	6.0 9 4 -1	- 1 2.8	
17	5.2 7 7 -1	- 2 8.4	
18	5.7 1 8 -1	- 3 7.6	

* D is fixed to $1/3 \bar{\Sigma}_{tr}$

Table 3.7 Effective Absorption Cross Section of Control Rod Drawers With Natural B₄C(¹⁰B Mass : 1.58 kg : CR-03)

Energy group	$\Sigma a (cm^{-1})$	Percent difference from FWC	
		Effective transport constant	Effective diffusion constant
	FWC		
1	3.742-3	- 0.6	- 19.9
2	2.232-3	- 0.3	- 16.9
3	1.462-3	- 1.0	- 12.7
4	1.469-3	- 1.9	- 7.5
5	8.363-3	- 3.0	- 4.9
6	2.107-3	- 5.1	- 5.9
7	3.721-3	- 3.7	- 3.9
8	5.724-3	- 4.0	- 3.0
9	7.773-3	- 2.7	- 0.9
10	1.111-2	- 0.5	2.7
11	1.601-2	- 2.1	1.5
12	2.371-2	- 2.0	6.0
13	3.319-2	- 9.0	- 0.2
14	4.328-2	- 15.8	- 7.1
15	5.601-2	- 15.1	- 4.1
16	7.351-2	- 22.4	- 7.1
17	8.485-2	- 28.4	- 14.6
18	1.046-1	- 37.8	- 31.3

Table 3.8 Pin-Rod Worths Obtained from 18-Group RZ Calculation

Method		CR-02 (7.82 kg B ¹⁰)		CR-03 (1.58 kg B ¹⁰)	
		Keff	Worth [*] ($\times 10^{-2} \Delta k/kk'$)	Keff	Worth [*] ($\times 10^{-3} \Delta k/kk'$)
Transport	Two-Region (Reference)	1.019583	7.242	1.022348	4.590
	Effective Σ	1.019509	7.310 (-0.9) **	1.022275	4.660 (1.5)
	Conventional Σ	1.019281	7.533 (-4.0)	1.022131	4.797 (4.5)
Diffusion	Two-Region	1.013626	7.671 (-5.9)	1.016654	4.732 (3.1)
	Effective Σ	1.013447	7.845 (-8.3)	1.016570	4.814 (4.9)
	Conventional Σ	1.013254	8.033 (10.9)	1.016472	4.909 (6.9)

* relative to CRP***

** Percent Difference of the Control Rod Worths from the Reference Calculation

*** Keff (CRP) = 1.027168 (Transport)

1.021569 (Diffusion)

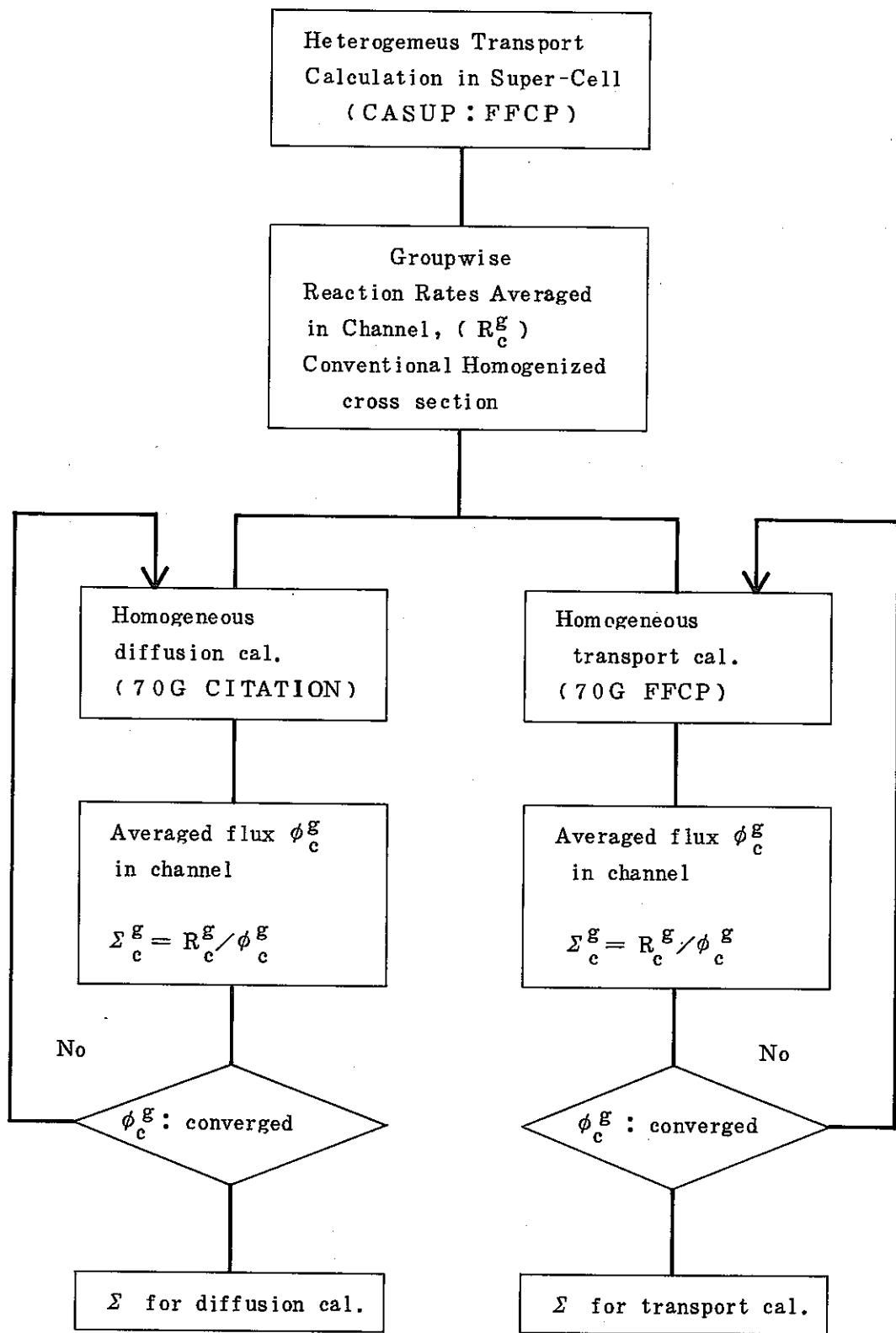


Fig 3.2 Flow Diagram for Calculating Group Constants

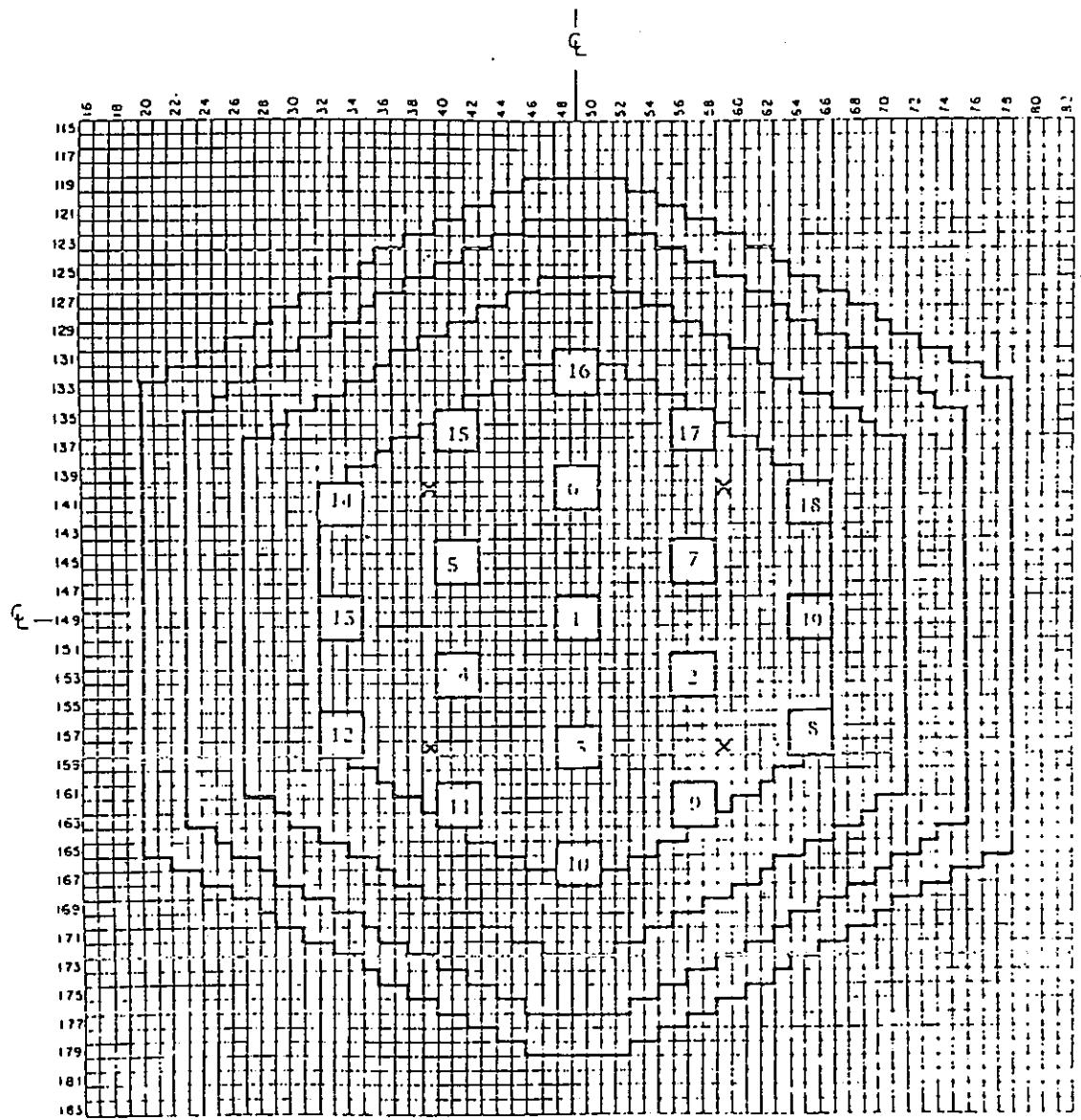
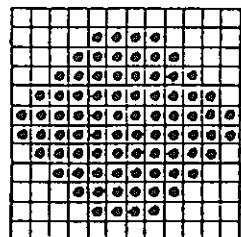
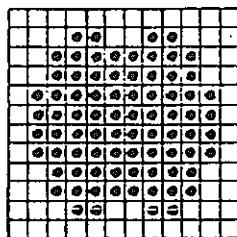


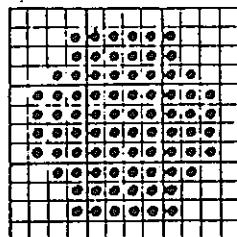
Fig. 3.3 Control Rod Positions in EPPR-10A



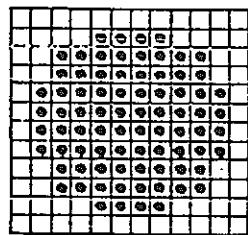
Hexagon #1
7.82 kg ^{10}B (enriched)
1.58 kg ^{10}B (natural)



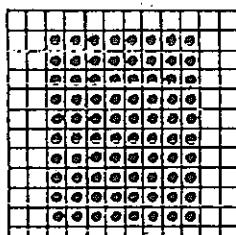
Secondary Design
7.82 kg ^{10}B (enriched)



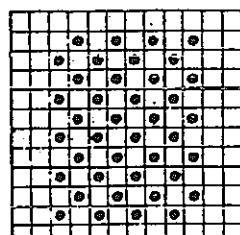
Hexagon #2
7.82 kg ^{10}B (enriched)



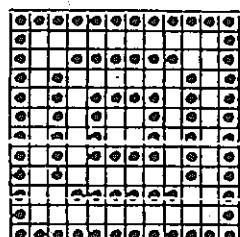
Cylinder
7.82 kg ^{10}B (enriched)
1.58 kg ^{10}B (natural)



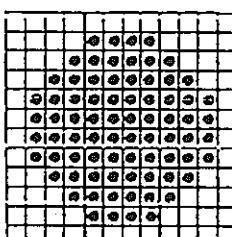
Rectangle
7.82 kg ^{10}B (enriched)
1.58 kg ^{10}B (natural)



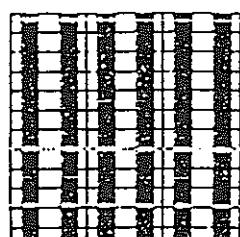
Half Density
3.91 kg ^{10}B (enriched)



Dilute Rectangle
7.82 kg ^{10}B (enriched)
Absorber surrounded by Na
Steel surrounded by Na



Octagon
11.25 kg Ta



50/50 Plate Rod
5.61 kg ^{10}B (natural)

▀ Absorber surrounded by sodium and steel.

□ Sodium and steel.

Fig. 3.4 Rod Designs for ZPPR-10A

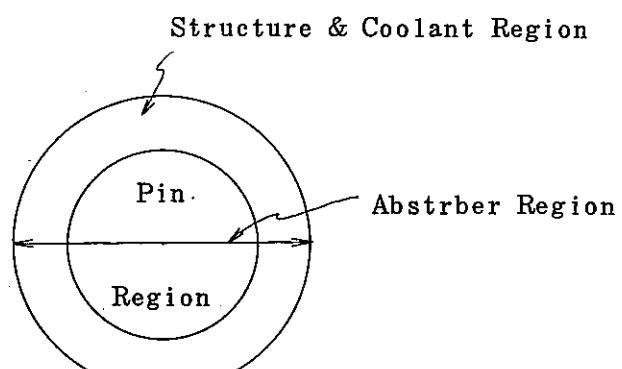
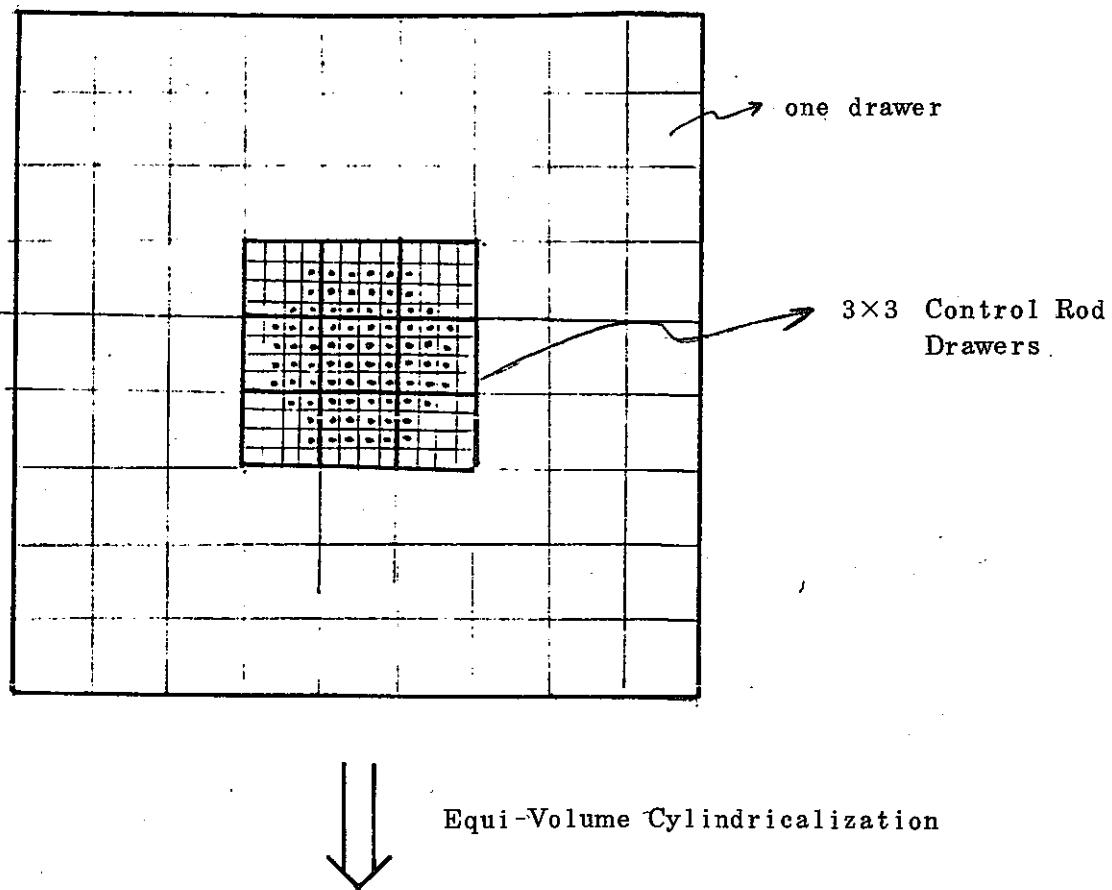


Fig.3.5 1D Cylinder Super-Cell Model

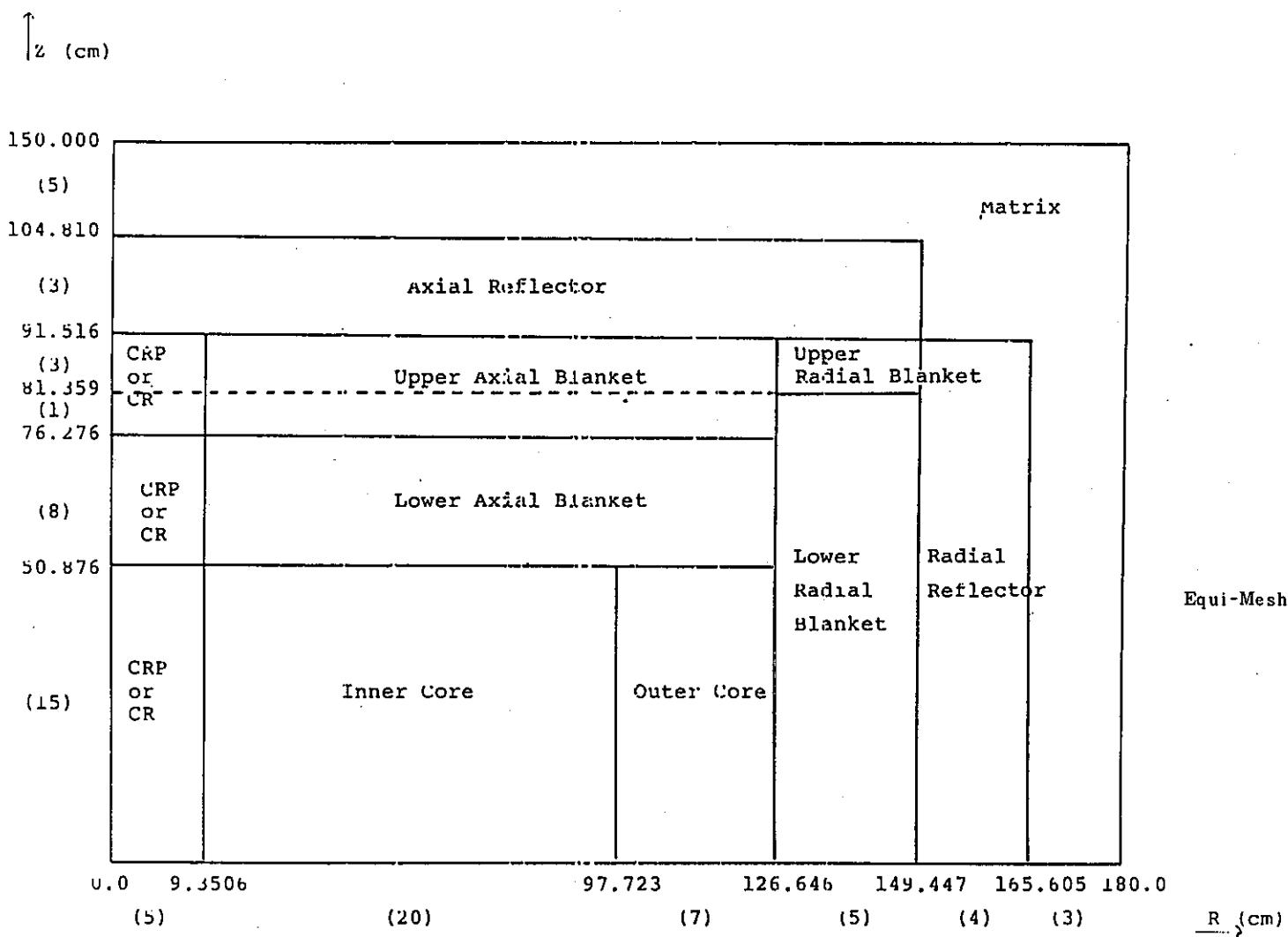


Fig. 3.6 Diffusion Calculation Model in ZPPR-10A

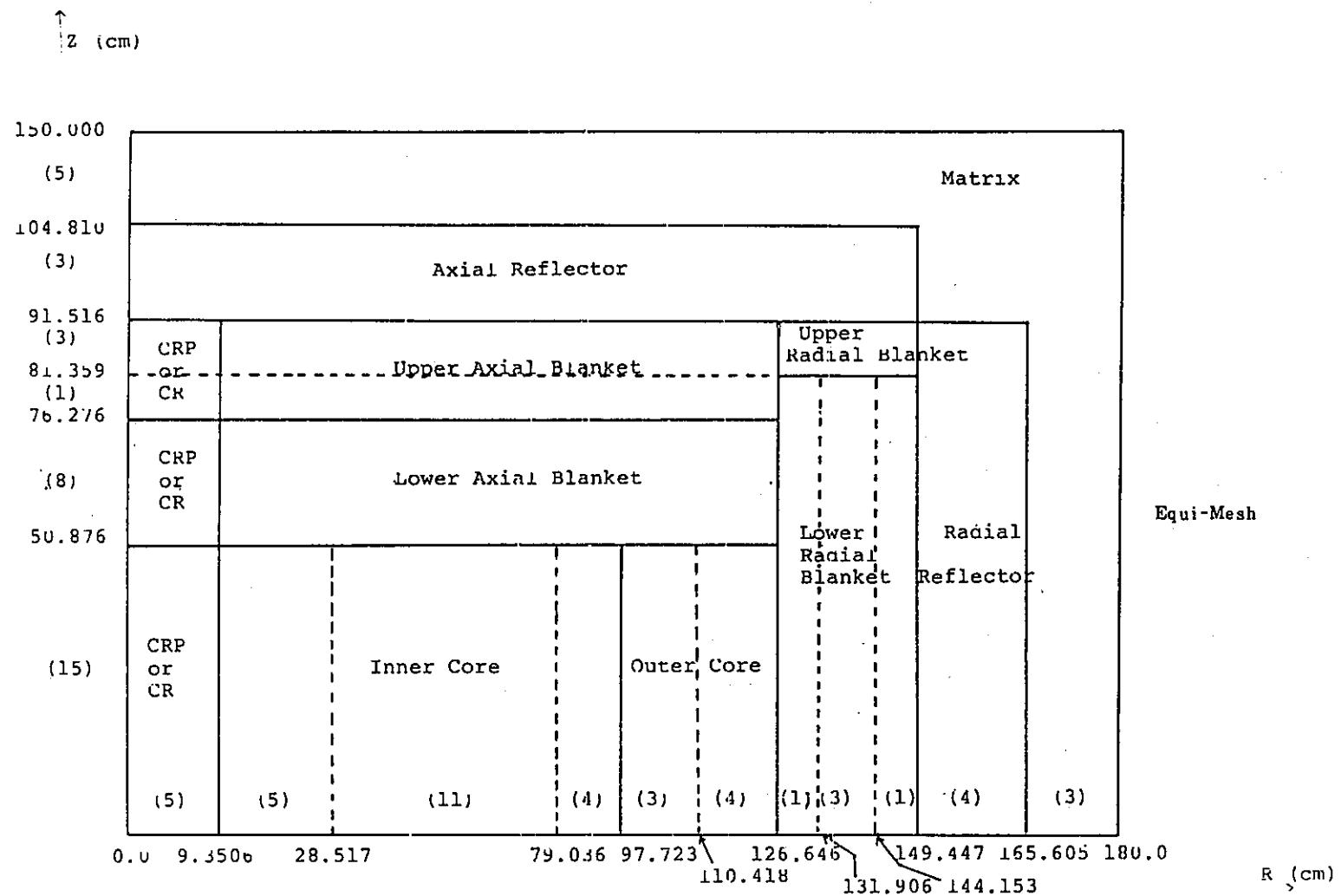


Fig. 3.7 Transport Calculation Model in ZPPR-10A

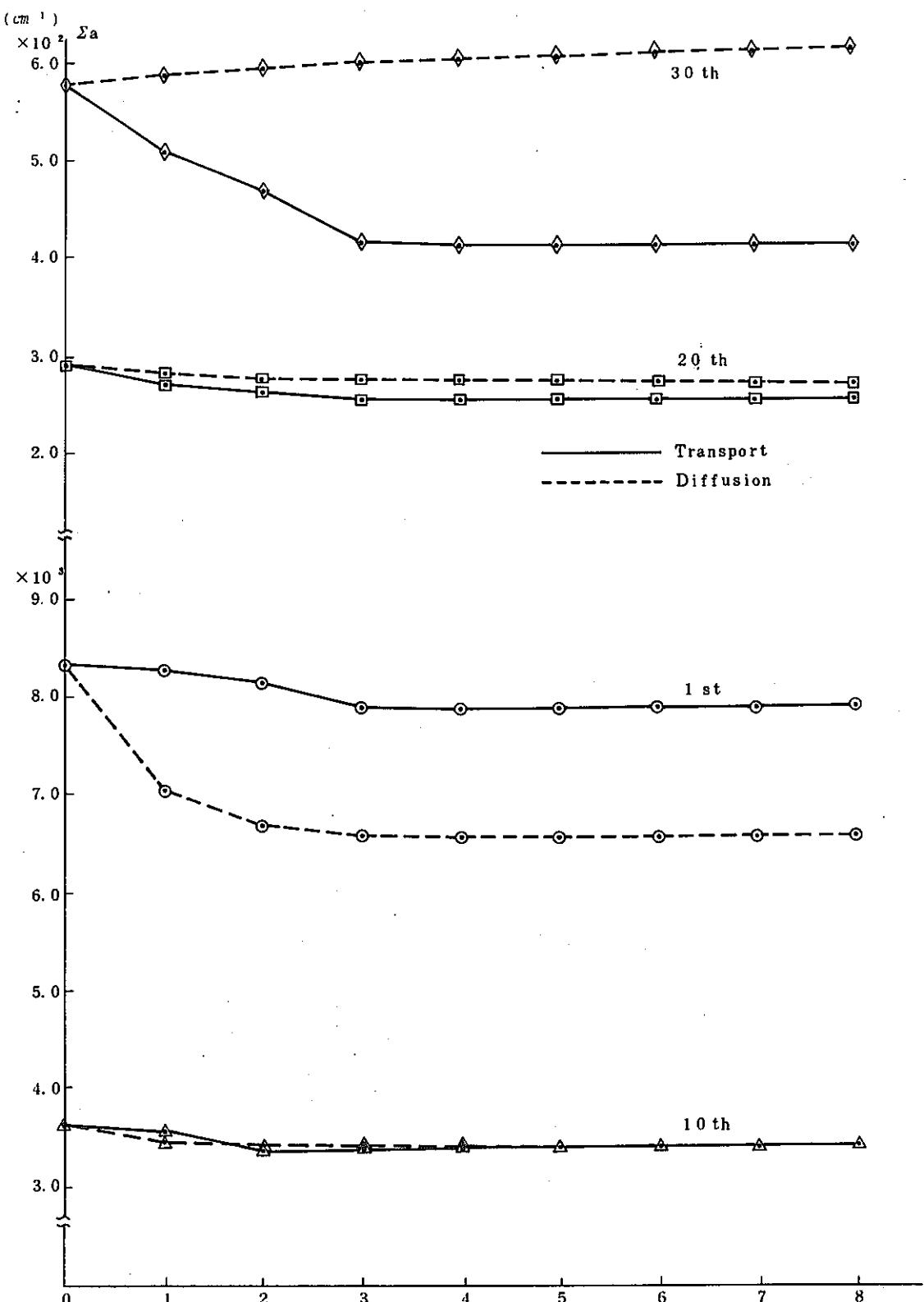


Fig 3.8 Convergence of Effective Absorption Cross Sections for CR-02

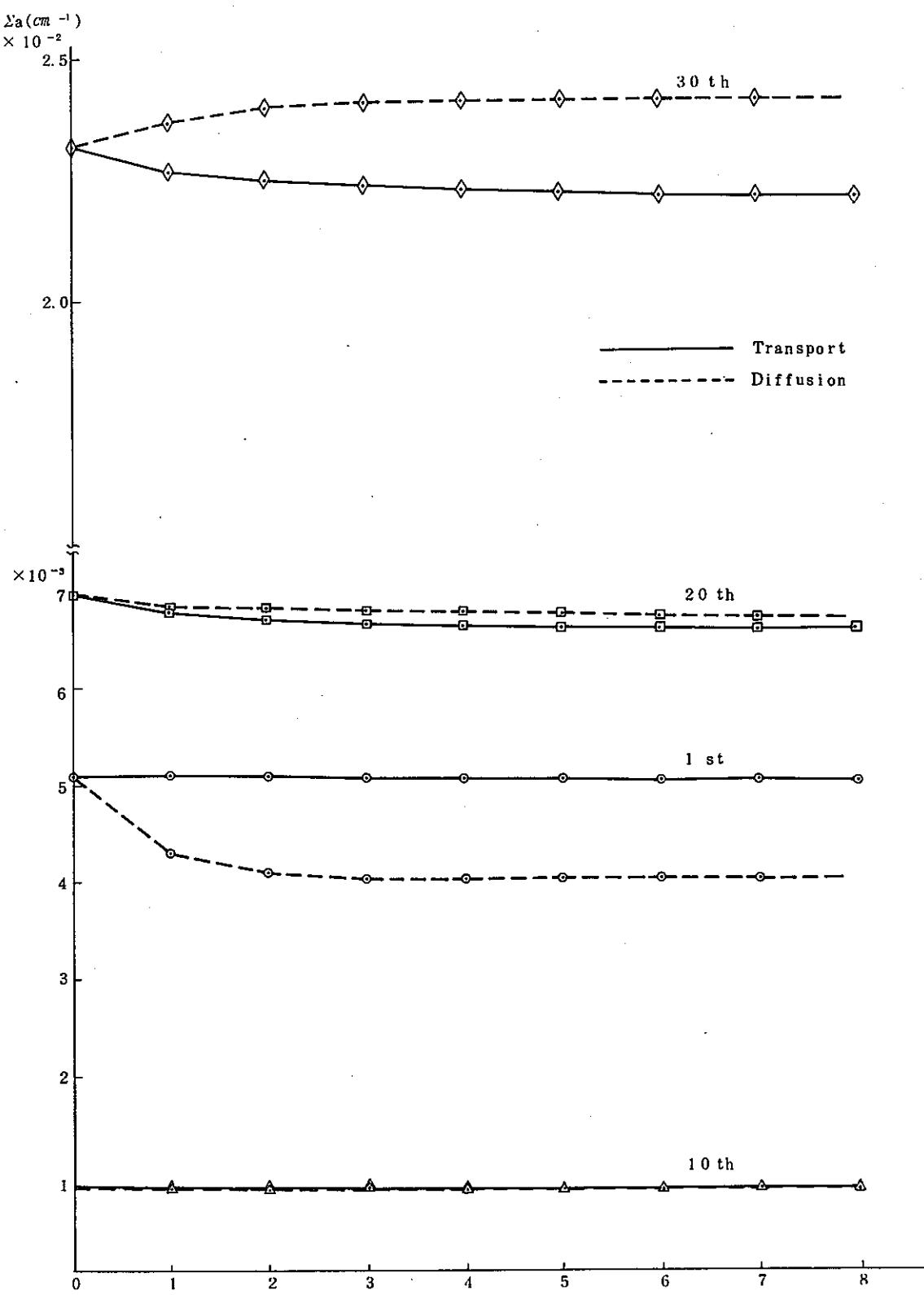


Fig 3.9 Convergence of Effective Absorption Cross Sections for CR-03

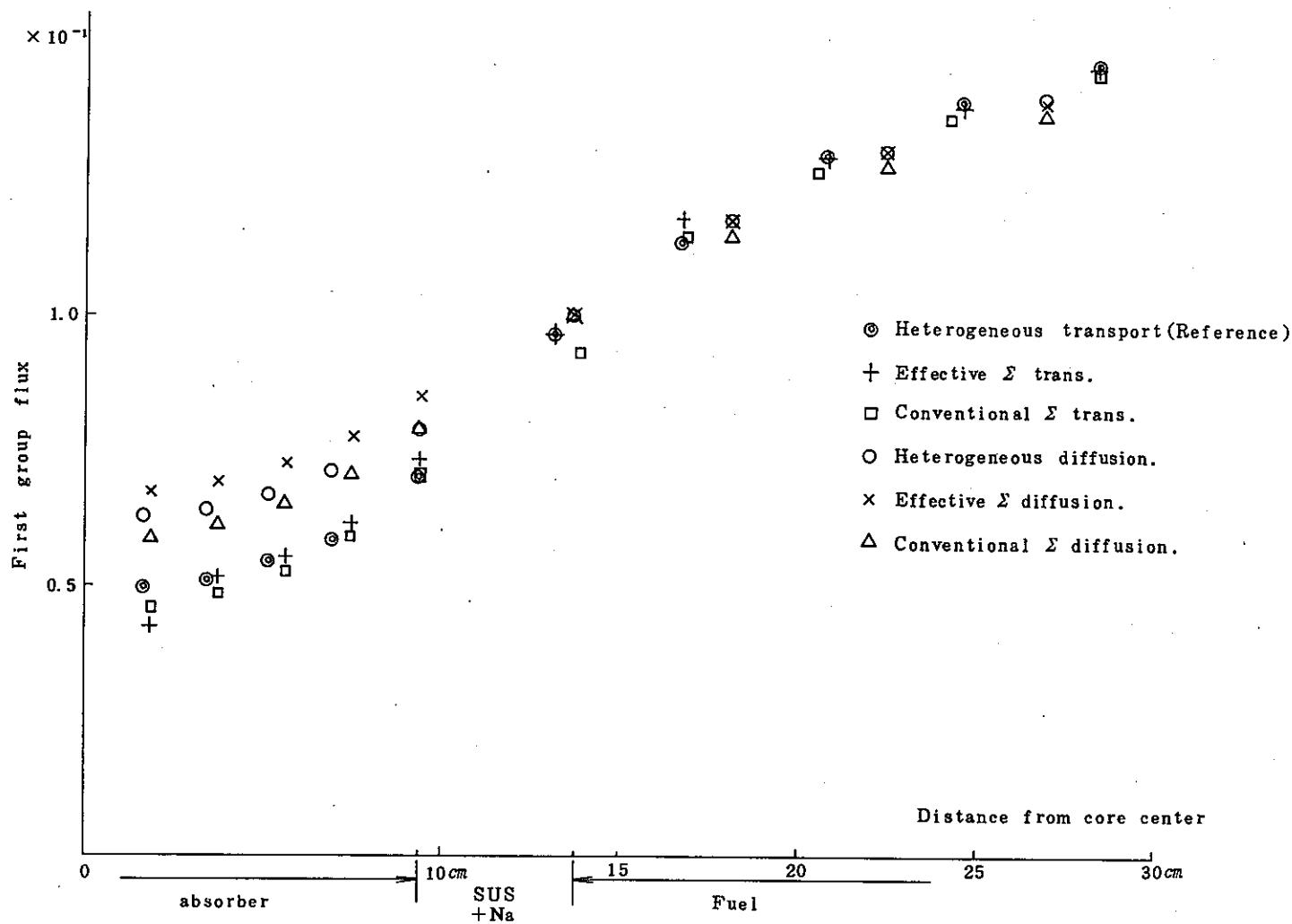


Fig 3.10 1st Group Flux Distribution for CR-02

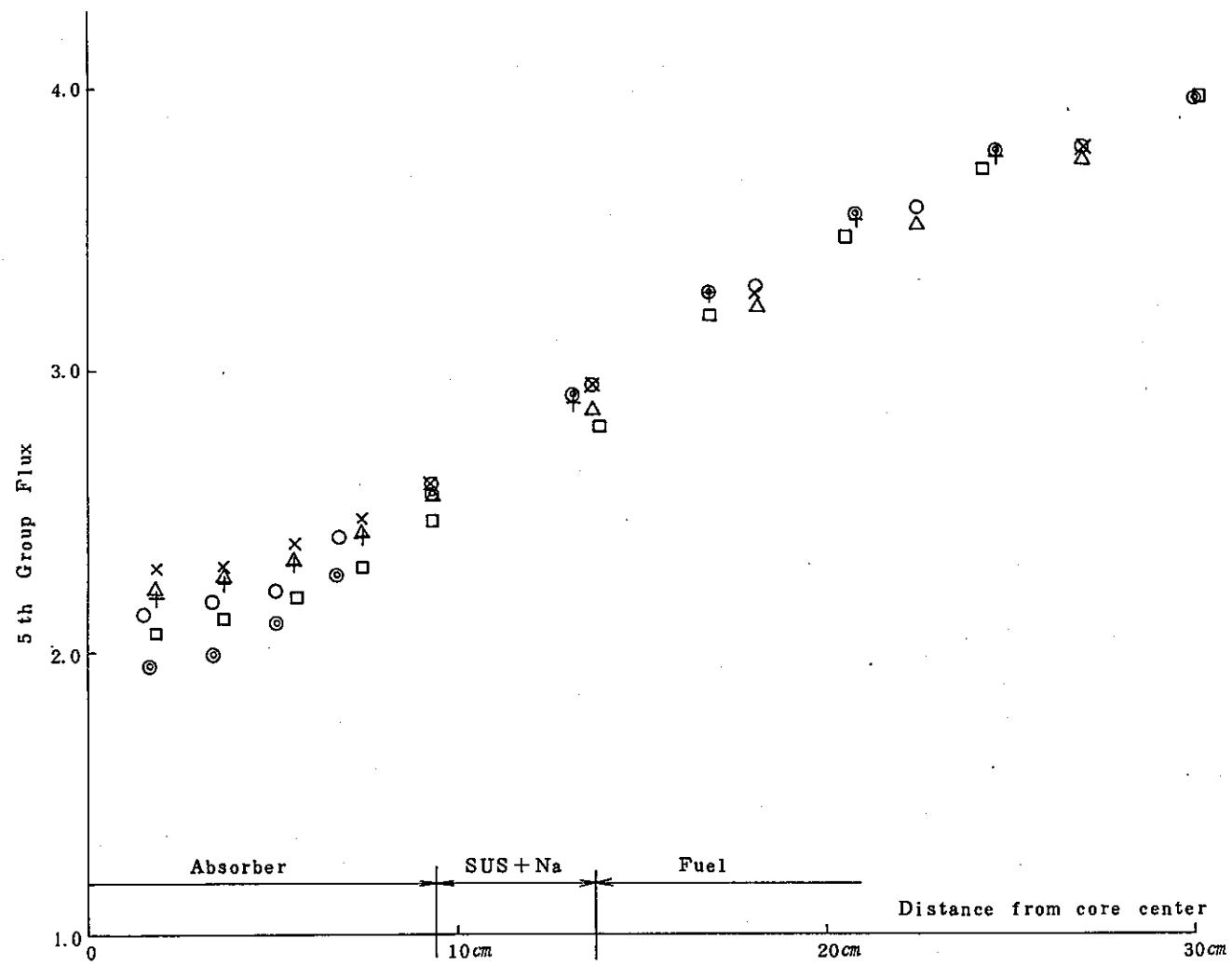


Fig 3.11 5 th Group Flux Distribution for CR-02

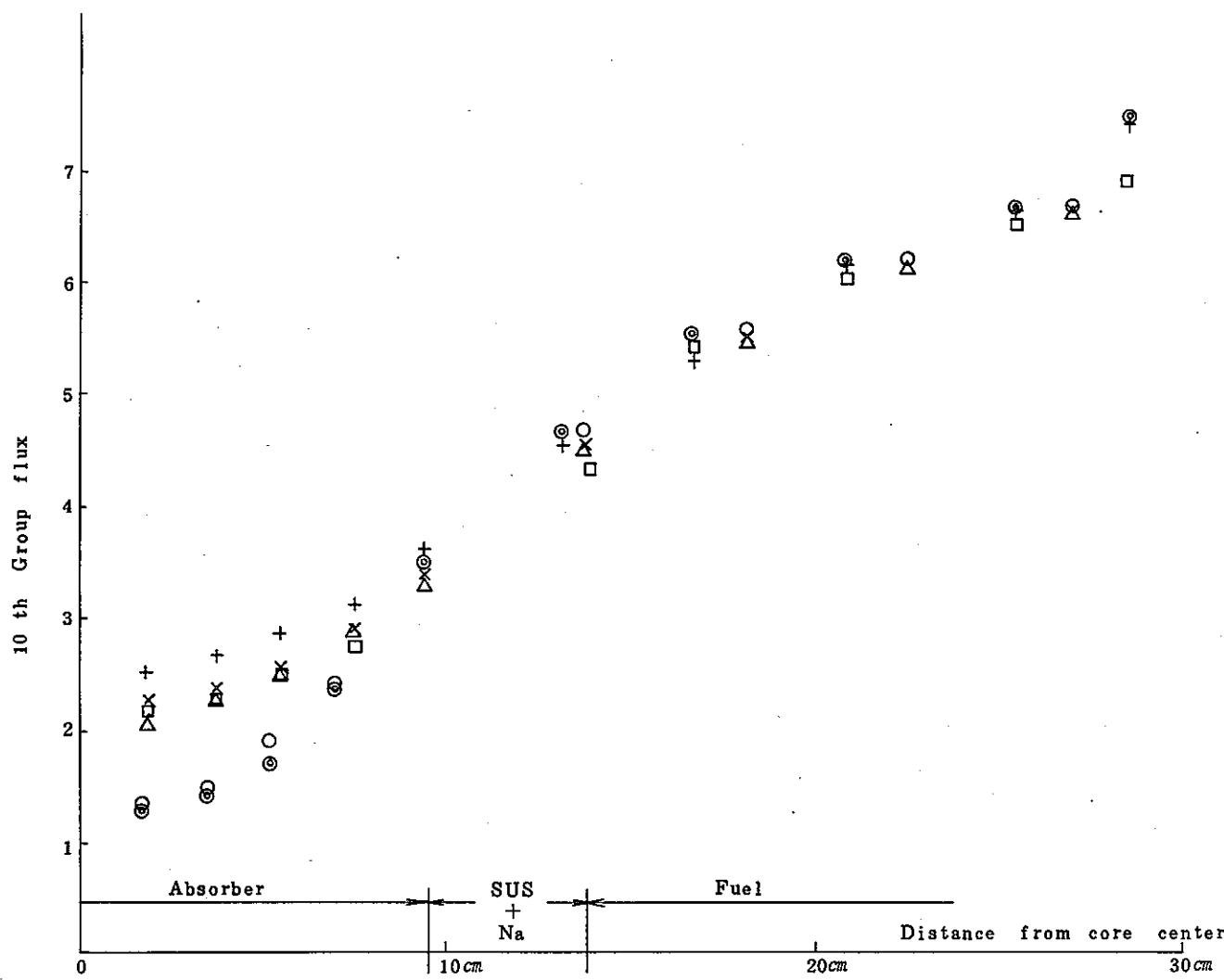


Fig 3.12 10th Group Flux Distribution for CR-02

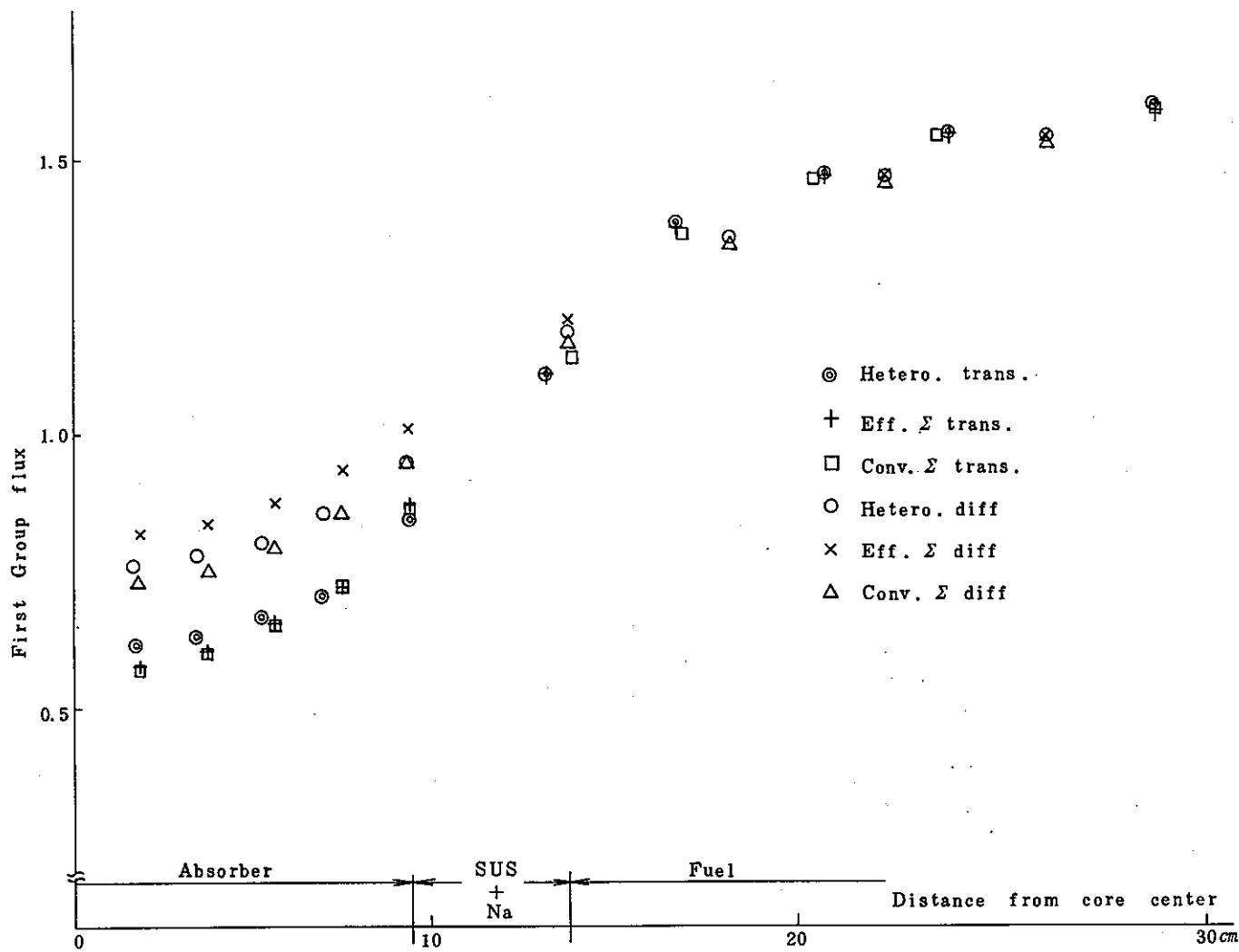


Fig 3.13 1st Group Flux Distribution for CR-03
(Hexagonal #1 1.58 kg ^{10}B)

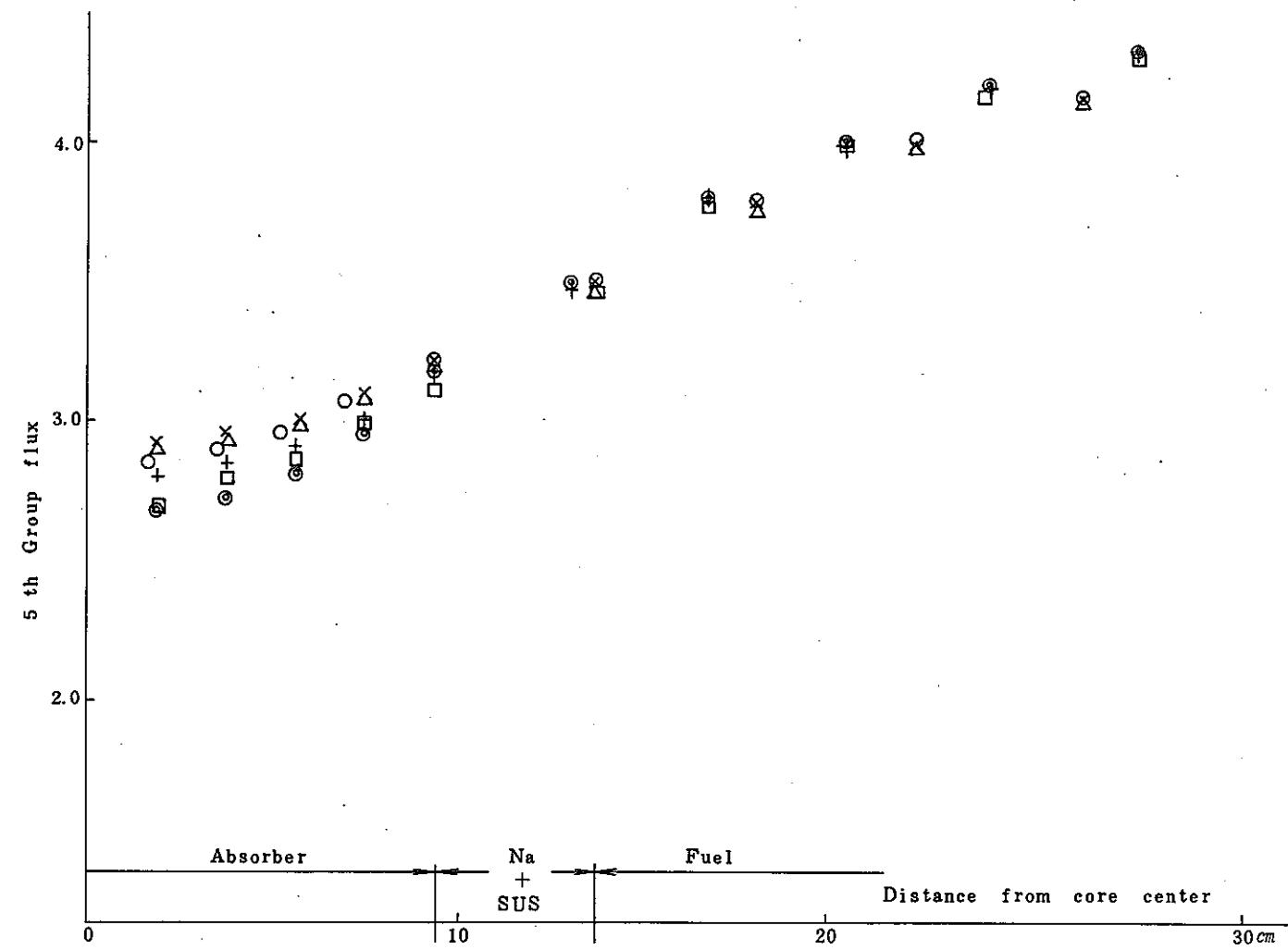


Fig 3.14 5 th Group Flux Distribution for CR-03

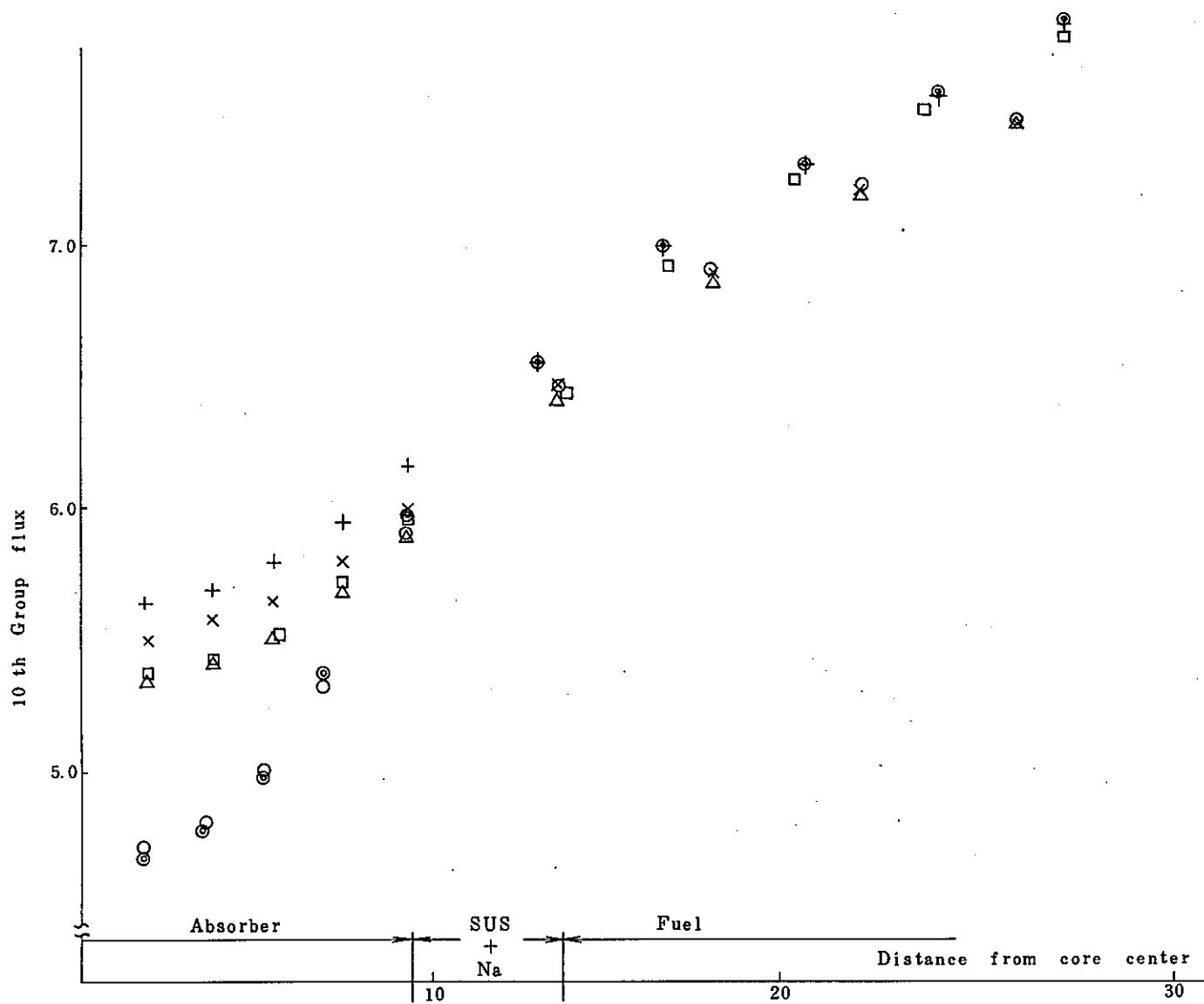


Fig 3.15 10 th Group Flux Distribution for CR-03

4. ZPPR-10C の希釈物質の反応度値

4.1 実験の概要

ZPPR-10C 炉心において、サブアッセンブリー・サイズの領域での中性子ストリーミング効果の計算手法を検証するためのデータを得るために、希釈物質の反応度値が測定された。

ZPPR-10C の基準炉心の炉心体積は、約 6200 ℥で、F.g. 4.1 に示すように 19 本の CRP チャンネルをもつ、六角形状の 900 MWe 級 EOC 模擬炉心である。基本的には、ZPPR-10A の拡大炉心であるが、ZPPR fuel プレートの不足を補うため、代わりに Pu-Al プレートを用いた Double Column Fuel Drawer が、また Na_2CO_3 プレートの不足を補うため、代わりに Na プレートを用いた Single Column Fuel Drawer が用いられている。

希釈物質の反応度の測定は炉心中心 3 行 3 列の CRP チャンネルを、炉中心面より ± 36 インチまでの全パックを以下に示す計 6 ケースの各希釈物質で置換して行なわれた。

Sodium Voided CRP

Empty Matrix

Steel Block

Radial Blanket Drawers

Aluminium

Sodium/Steel

ただし、Empty Matrix ケースのみ炉心中心 3 行 3 列の axial reflector 領域には、何も装荷されておらず、Empty Matrix となっている。その他のケースでは iron block axial reflector が装荷されている。

4.2 群定数作成

ZPPR-10C 炉心での希釈物質の反応度実験に用いられた、Sodium Voided CRP, Steel Block, Aluminium および Sodium/Steel の計 4 ドロワーに対して JENDL-2B-70 群ライブラリーを用いて、自己遮蔽された 70 群格子平均群定数を作成した。また、各ドロワーの格子構造を Fig. 4.2 に示す。Table 4.1 に用いた格子平均数密度を示す。Sodium/Steel のみ非均質構造であるが、均質と

して取り扱った。次に、得られた70群定数をF B E Cで計算された一次元円筒体系のCentral Channel領域、一次元平板体系のLower Axial Blanket領域およびUpper Axial Blanket領域の各領域平均の70群中性子スペクトルを重みとして縮約し、領域依存性を考慮した18群格子平均群定数を作成した。

その他のドロワーに対しては、F B E Cによって作成された群定数を適用したので、ここでは概要を述べる。JENDL-2B核ライブラリーから作成された、ABBN型70群定数セットを用いて、セル計算コードSLAROMにより格子平均実効断面積を求め、これを一次元体系計算により縮約を行ない、18群格子平均実効断面積が作成された。各ドロワーに適用した18群マクロ実効群定数のメンバー名をTable 4.2に示す。

次にFig 4.3に炉心平面上の燃料装荷パターンを示す。数種類の異なるタイプのセルが装荷されている内側炉心および外側炉心領域では、それぞれ3つの小領域に分割し、(Fig. 4.4) 小領域毎に18群縮約定数の体積加重平均計算を行なった。各小領域に対する加重因子をTable 4.3に示す。

輸送計算に適用する格子平均輸送断面積 $\bar{\Sigma}_{tr}$ としては、燃料ドロワーに対して、セル内の中性子ストリーミング効果を考慮するため、Benoistの等方拡散係数を用いて

$$\bar{\Sigma}_{tr} = \frac{1}{3 D_{iso}^g} \quad (4.1)$$

を適用する。

無限セル計算によって得られた群定数は、通常の燃料ドロワーと、ストリーミング実験で炉心中心のORPと置換される6種類の希釈物質間の、中性子ストリーミング干渉効果が取り入れられていないので、これらの干渉効果を考慮するため、一次元円筒体系のスーパーセルモデルを用い、CASUPコードにより18群セル計算を行ない統一拡散係数を計算した。均質化された異種の領域から成るスーパーセルで、領域j、k方向、g群の統一拡散係数は次式で定義される。

$$D_{j,k}^g = \frac{\sum_{i \in \text{super-cell}} \phi_i^g V_i P_{i,j,k}^g / 3 \bar{\Sigma}_{trj}^g}{\phi_j^g V_j} \quad (4.2)$$

(k = ⊥ or //)

ϕ_j^g は領域 j , g 群の中性子束, V_j は j 領域の体積、 $P_{ij,k}^g$ は k 方向の衝突確率、

$\Sigma_{tr,j}^g$ は j 領域、 g 群の輸送断面積である。燃料ドロワーに対しても、セル内の中性子ストリーミング効果を考慮するため、(4.1)式によって得られる格子平均輸送断面積を適用した。

統一拡散係数の計算に用いたスーパーセルモデルを Fig. 4.5 に示す。中心 3×3 ドロワーが CRP または 6 種類の希釈物質（均質）から成り、その周囲の 8 倍の体積の領域を、中性子ストリーミング干渉効果の空間依存性を考慮するため 4 領域に分割した。

4.3 拡散係数に対する中性子ストリーミング干渉効果

スーパーセル計算で得られた統一拡散係数と、従来の拡散係数 Σ_{tr} との比で、中性子ストリーミング干渉効果を定義する。すなわち、領域 j , k 方向の拡散係数に対する中性子ストリーミング干渉効果は

$$f_{k,j}^g = \frac{D_{j,k}^g}{\Sigma_{tr,j}^g} \quad (4.3)$$

($k = \perp \text{ or } \parallel$)

である。

次に、一例として、名希釈物質と、Inner Core Region I の燃料ドロワから成るスーパーセルモデルで計算された中性子ストリーミング干渉効果を、Table 4.4～Table 4.10 に示す。

Sodium filled CRP, Sodium Voided CRP 及び Empty Matrix に対する値 (Table 4.4～4.6) は、いずれも 1 以下となっている。逆に、それらの周囲の燃料ドロワーに対する値は、1 以上の値となっている。特に、Empty Matrix の場合 1 からのずれが大きくストリーミング干渉効果が大きいことが分かる。また、干渉効果の空間依存性が見られ、最も外側の燃料に対する値は、ほとんど 1 に近い値となっている。

Steel Block の場合 (Table 4.7)、7 群 ($0.4 \sim 0.2$ Mev) を除いて、1 よりも大きくなっているが、5 群から 10 群までは、1 に近い値となっている。Lower

Radial Blanket Drawer に對しては (Table 4.8)、1群から11群までが1より大きく、12群以下では、1以下の値となっているが全体として1に近く、干渉効果が少ないことが分かる。Aluminium に對しては (Table 4.9)、11群で最も小さな値となり、10群以下の群で、1からのずれが大きく、干渉効果が大きい。Sodium/Steel に對しては、1群から4群、11群から18群までが1より大きく、5群から10群までは1より小さいが、いずれも1に近い。これらの希釈物質の周囲の燃料ドロワーに対する値は、いずれも1に近く、干渉効果が小さいことが分かった。

4.4 計算体系

希釈物質反応度価値の計算は、18群群定数を用いて、Fig. 4.4 に示す2次元R-Z体系で、輸送および拡散理論に基づく厳密摂動計算により行なった。空間メッシュ分割は、輸送計算、拡散計算ともに、径方向に51点、軸方向に41点とした。19本のCRPチャネルは、炉心中心1本、オ1リングとして6本、オ2リングとして12本を、それぞれ体積を保存して、円筒及び円環状にモデル化した。また、内側炉心及び外側炉心領域は、4.2節で述べたように、それぞれ3つの小領域に分割しスペクトルの違いを考慮した。

輸送計算では、TWOTRAN-IIコードによる $S_6 Po$ 計算及び TRAPERT⁽¹⁹⁾ による2次元輸送摂動計算により反応度価値を求めた。

拡散計算では、CITATIONコードにより、反応度価値を求めた。拡散係数としては、

- (1) 炉心中心CRPチャネルに装荷される希釈物質に対して、従来の $\frac{1}{3} \sum r$ 、燃料ドロワーに對しては、Benoistの非等方拡散係数、ただし、希釈物質としての Lower Radial Blanket に對しては、Benoistの等方拡散係数
- (2) 炉心中心CRPチャネルに装荷される希釈物質及びそれに隣接している通常の燃料ドロワーに對して、統一拡散係数、その他の燃料ドロワーに對しては、Benoistの非等方拡散係数、を適用した。

4.5 計算結果

Table 4.11に、希釈物質の反応度価値の測定値と輸送及び拡散摂動計算による計算値及び計算値と実験値の差 (C-E) 値を示す。各希釈物質の反応度価値の (C-E)

値には、かなりのばらつきが見られる。希釈物質に従来の $\frac{1}{2}\bar{\Sigma}_{tr}$ を用いた場合、特に希釈な、Sodium Voided CRP, Empty Matrix に対しては、(C-E) 値の絶対値がそれぞれ 0.17 及び 0.806 と過大評価される。

一方、輸送計算及び統一拡散係数を用いた場合は、大幅な改善がみられる。Steel Block, Blanket Drawers に対しては、輸送計算によつても、(C-E) 値が、ほぼ -0.06 となり、測定値との差が大きい。

Aluminium, Sodium/Steel に対しては、反応度価値自体が小さく、いずれの計算においても (C-E) 値は小さなものとなっている。従来の $\frac{1}{2}\bar{\Sigma}_{tr}$ を用いた場合 Steel Block, Blanket, Sodium/Steel の各希釈物質に対して、(C-E) 値の絶対値は、輸送計算の結果と較べるとかえつて減少している。(C-E) 値の符号は、輸送計算の結果と統一拡散係数を用いた場合の結果とで一致したものとなっている。

次に、輸送計算及び従来の $\frac{1}{2}\bar{\Sigma}_{tr}$ と統一拡散係数を用いた場合の摂動計算の希釈物質反応度価値の各成分を Table 4.12, 4.13, 4.14 にそれぞれ示す。

希釈物質に対して、従来の $\frac{1}{2}\bar{\Sigma}_{tr}$ を用いた拡散計算では、輸送計算の結果に較べて、漏洩成分の絶対値が常に過大評価されている。特に、漏洩成分が支配的な Sodium Voided CRP 及び Empty Matrix に対しては、漏洩成分が輸送計算に較べて 2~3 倍まで負の方向へ過大評価されている。また、Steel Block, Blanket, Sodium / Steel に対しては、従来の $\frac{1}{2}\bar{\Sigma}_{tr}$ を用いた場合、輸送計算と較べて、30% 程度、正の方向へ漏洩成分を過大評価している。しかし非漏洩成分が負の値であるため誤差のキャンセルが生じ全体のワースとしては、Table 4.11 に見られるように、測定値に近づく方向となる。Aluminium については、輸送計算に較べ、40% 程度も正の方向の漏洩成分を過大評価し、全体として、測定値より小さくなる。

希釈物質及びそれに隣接している通常の燃料ドロワーに対して、統一拡散係数を適用した場合、特に Sodium Voided CRP 及び Empty Matrix に対する漏洩成分は従来の $\frac{1}{2}\bar{\Sigma}_{tr}$ を適用した場合と較べ、輸送計算の結果に近づき、著しい改善が見られる。他の希釈物質に対しても、漏洩成分は、輸送計算の結果に近づくが、全体としては、非漏洩成分が支配的であるので、統一拡散係数の適用だけでは、限界がある。より詳細に評価を行なうには、輸送計算が望まれる。

4.6 結論

輸送摂動計算では、十分測定値を再現している。しかし、Steel Block 及び Radial Blanket Drawers に対しては、(C-E) 値が、 -0.06 \$ 程度あり、断面積データの検討が必要であろう。

希釈物質に対して、従来の $\frac{1}{2}\bar{\Sigma}_{tr}$ を拡散係数として適用した場合、中性子漏洩成分の支配的な、 Sodium Voided CRP 及び Empty Matrix に対しては、漏洩成分が過大評価され、測定値と計算値は大きく異なる。他の希釈物質に対しては、漏洩成分と非漏洩成分の符号が異なり、全体として、見かけ上、測定値に近い値となる場合も見られた。

希釈物質及びそれに隣接した燃料ドロワーに対して、統一拡散係数を適用した場合 Sodium Voided CRP 及び Empty Matrix に対して、中性子ストリーミング干渉効果が十分取り入れられ、 $\frac{1}{2}\bar{\Sigma}_{tr}$ を用いた場合に較べて著しい改善が見られた。

Table 4.1 Diluent Compositions for ZPPR-10C Streaming Experiments (10^{22} atoms/cm 3)

	Sodium Voided CRP	Steel Block	Aluminium	Sodium/Steel
C	0.00388	0.02245	0.00291	0.00346
O				0.00007
Na				0.93474
Al	0.00057		4.89833	0.00028
Si	0.01822	0.09054	0.01111	0.01454
Cr	0.29627	1.56723	0.18228	0.93630
Mn	0.02467	0.15793	0.01616	0.07623
Fe	1.05000	5.53507	0.65409	3.35002
Ni	0.13435	0.69388	0.07593	0.39170
Cu	0.00494	0.01129	0.00379	0.00459
Mo	0.00152	0.00146	0.00146	0.00149

Table 4.2 Name of Member Corresponding to Each Cell in ZPPR-10C

Cell Name	Name of Member
Single Fuel Column	C801 MACR
Double Fuel Column	C802 "
LL Type	C803 "
HL Type	C804 "
Single Fuel Column	C805 "
Double Fuel Column	C806 "
Pu-Al Fuel Spike	C807 "
Single Fuel Column w/o Na ₃ CO ₃	C808 "
Lower Radial Blanket	C809 "
Upper Radial Blanket	C810 "
Lower Axial Blanket	C841 "
Upper Axial Blanket	C844 "
Radial Reflector	C811 "
Axial Reflector	C847 "
Empty Matrix	C812 "
CRP (Core Section)	C862 "
CRP (Lower Axial Section)	C842 "
CRP (Upper Axial Section)	C845 "

Table 4.3 Weight Factors for Core Subregion in ZPPR-10C

Subregion	Name of Number	Weight Factor
Inner Core Region I	C801 MACR	0.90172
	C802 MACR	0.07371
	C803 MACR	0.01966
	C804 MACR	0.00491
Inner Core Region II	C801 MACR	0.92754
	C802 MACR	0.07246
Inner Core Region III	C801 MACR	0.90826
	C802 MACR	0.07339
	C803 MACR	0.01468
	C804 MACR	0.00367
Outer Core Region I	C805 MACR	0.05941
	C806 MACR	0.15347
	C807 MACR	0.11386
	C808 MACR	0.67327
Outer Core Region II	C805 MACR	0.06098
	C806 MACR	0.16260
	C807 MACR	0.12195
	C808 MACR	0.65447
Outer Core Region III	C805 MACR	0.06027
	C806 MACR	0.15848
	C807 MACR	0.11830
	C808 MACR	0.66295

Table 4.4 Interference Effect Between Sodium Filled CRP and Inner Core Fuel Region I

Group	Central Diluent Material		Outer Diluent Material		Inner Fuel Region		Outer Fuel Region	
	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥
1	0.816	0.751	0.772	0.719	1.043	1.049	1.009	1.017
2	0.840	0.776	0.793	0.741	1.039	1.046	1.007	1.014
3	0.843	0.774	0.790	0.734	1.041	1.049	1.006	1.012
4	0.868	0.803	0.814	0.760	1.037	1.045	1.004	1.009
5	0.879	0.809	0.814	0.755	1.038	1.049	1.002	1.006
6	0.921	0.866	0.860	0.812	1.029	1.038	1.001	1.003
7	0.897	0.826	0.821	0.759	1.037	1.050	1.001	1.003
8	0.925	0.866	0.851	0.796	1.031	1.043	1.001	1.002
9	0.945	0.896	0.873	0.824	1.027	1.037	1.000	1.001
10	0.951	0.905	0.879	0.830	1.026	1.036	1.000	1.001
11	0.973	0.942	0.913	0.876	1.019	1.027	1.000	1.001
12	0.997	0.991	0.969	0.954	1.007	1.011	1.000	1.000
13	1.000	1.000	1.013	1.019	0.998	0.997	1.000	1.000
14	0.986	0.968	0.936	0.907	1.014	1.020	1.000	1.000
15	0.969	0.935	0.901	0.860	1.021	1.030	1.000	1.000
16	0.987	0.969	0.932	0.901	1.015	1.021	1.000	1.000
17	0.974	0.942	0.903	0.861	1.021	1.030	1.000	1.000
18	0.980	0.954	0.917	0.880	1.018	1.026	1.000	1.000

Table 4.5 Interference Effect Between Sodium Voided ORP and Inner Core Fuel Region I

Group	Central Diluent Material		Outer Diluent Material		Inner Fuel Region		Outer Fuel Region	
	//	±	//	±	//	±	//	±
1	0.528	0.489	0.532	0.459	1.090	1.095	1.019	1.033
2	0.568	0.513	0.556	0.479	1.087	1.094	1.016	1.028
3	0.605	0.519	0.562	0.482	1.088	1.098	1.012	1.024
4	0.596	0.507	0.552	0.468	1.092	1.102	1.010	1.021
5	0.516	0.434	0.484	0.392	1.110	1.124	1.007	1.015
6	0.551	0.447	0.497	0.402	1.108	1.125	1.005	1.011
7	0.568	0.455	0.505	0.406	1.108	1.127	1.003	1.007
8	0.690	0.569	0.604	0.505	1.086	1.107	1.001	1.004
9	0.717	0.594	0.624	0.523	1.082	1.104	1.001	1.002
10	0.738	0.616	0.641	0.541	1.078	1.100	1.001	1.002
11	0.854	0.758	0.754	0.670	1.053	1.072	1.001	1.001
12	0.964	0.924	0.881	0.831	1.025	1.037	1.000	1.000
13	0.949	0.893	0.840	0.773	1.034	1.049	1.000	1.000
14	0.905	0.827	0.804	0.730	1.042	1.059	1.000	1.001
15	0.916	0.846	0.822	0.754	1.038	1.053	1.000	1.001
16	0.965	0.926	0.884	0.835	1.025	1.036	1.000	1.000
17	0.936	0.875	0.841	0.777	1.034	1.048	1.000	1.000
18	0.948	0.896	0.860	0.803	1.030	1.043	1.000	1.000

Table 4.6 Interference Effect Between Empty Matrix and Inner Core Fuel Region I

Group	Central Diluent Material		Outer Diluent Material		Inner Fuel Region		Outer Fuel Region	
	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥
1	0.235	0.226	0.181	0.211	1.153	1.139	1.037	1.048
2	0.249	0.240	0.208	0.223	1.152	1.141	1.032	1.042
3	0.256	0.247	0.224	0.228	1.153	1.145	1.026	1.035
4	0.249	0.239	0.216	0.220	1.157	1.150	1.023	1.031
5	0.211	0.201	0.166	0.182	1.172	1.168	1.018	1.020
6	0.219	0.209	0.184	0.188	1.171	1.170	1.014	1.015
7	0.221	0.211	0.198	0.189	1.171	1.174	1.011	1.010
8	0.328	0.285	0.311	0.252	1.150	1.163	1.006	1.006
9	0.333	0.298	0.355	0.262	1.144	1.162	1.003	1.004
10	0.316	0.273	0.29 ₁₀	0.240	1.154	1.168	1.005	1.003
11	0.543	0.421	0.475	0.368	1.116	1.140	1.001	1.002
12	0.760	0.633	0.650	0.543	1.076	1.101	1.000	1.000
13	0.698	0.556	0.585	0.468	1.091	1.118	1.000	1.000
14	0.638	0.506	0.547	0.436	1.100	1.125	1.001	1.001
15	0.656	0.525	0.565	0.455	1.096	1.121	1.001	1.001
16	0.769	0.644	0.659	0.554	1.074	1.099	1.000	1.001
17	0.698	0.564	0.596	0.486	1.089	1.114	1.000	1.001
18	0.712	0.581	0.610	0.501	1.086	1.111	1.000	1.001

Table 4.7 Interference Effect Between Steel Block and Inner Core Fuel Region I

Group	Central Diluent Material		Outer Diluent Material		Inner Fuel Region		Outer Fuel Region	
	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥
1	1.078	1.147	1.177	1.245	0.968	0.959	0.993	0.986
2	1.066	1.131	1.171	1.239	0.969	0.959	0.994	0.987
3	1.049	1.100	1.142	1.200	0.974	0.965	0.996	0.991
4	1.037	1.077	1.112	1.159	0.979	0.971	0.997	0.994
5	1.005	1.010	1.013	1.018	0.997	0.996	1.000	1.000
6	1.002	1.003	1.005	1.006	0.999	0.999	1.000	1.000
7	0.996	0.992	0.988	0.982	1.003	1.004	1.000	1.000
8	1.004	1.011	1.030	1.043	0.994	0.992	1.000	1.000
9	1.003	1.007	1.023	1.034	0.996	0.994	1.000	1.000
10	1.002	1.006	1.023	1.034	0.996	0.994	1.000	1.000
11	1.002	1.005	1.056	1.083	0.990	0.985	1.000	0.999
12	1.001	1.001	1.058	1.087	0.989	0.984	1.000	1.000
13	1.000	1.000	1.023	1.034	0.996	0.994	1.000	1.000
14	1.001	1.002	1.054	1.081	0.990	0.985	1.000	1.000
15	1.001	1.002	1.066	1.098	0.988	0.982	1.000	0.999
16	1.001	1.001	1.063	1.094	0.988	0.983	1.000	1.000
17	1.001	1.001	1.056	1.084	0.990	0.985	1.000	1.000
18	1.001	1.001	1.062	1.093	0.989	0.983	1.000	1.000

Table 4.8 Interference Effect Between Lower Radial Blanket Drawer and Inner Core Fuel Region I

Group	Central Diluent Material		Outer Diluent Material		Inner Fuel Region		Outer Fuel Region	
	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥
1	1.011	1.017	1.017	1.023	0.997	0.996	0.999	0.999
2	1.006	1.010	1.011	1.014	0.998	0.998	1.000	0.999
3	1.006	1.011	1.012	1.016	0.998	0.997	1.000	0.999
4	1.007	1.013	1.015	1.020	0.997	0.996	1.000	0.999
5	1.010	1.022	1.031	1.044	0.994	0.991	1.000	0.999
6	1.005	1.011	1.017	1.024	0.997	0.995	1.000	1.000
7	1.006	1.013	1.027	1.038	0.995	0.993	1.000	1.000
8	1.003	1.008	1.020	1.028	0.997	0.995	1.000	1.000
9	1.002	1.005	1.016	1.023	0.998	0.996	1.000	1.000
10	1.001	1.004	1.013	1.019	0.998	0.997	1.000	1.000
11	1.001	1.002	1.008	1.011	1.000	0.999	1.000	1.000
12	1.000	0.999	0.993	0.989	1.002	1.003	1.000	1.000
13	0.999	0.998	0.982	0.973	1.004	1.006	1.000	1.000
14	1.000	0.999	0.997	0.996	1.002	1.002	1.000	1.000
15	1.000	1.000	1.000	0.999	1.001	1.001	1.000	1.000
16	1.000	0.999	0.996	0.994	1.002	1.002	1.000	1.000
17	1.000	1.000	0.998	0.997	1.001	1.002	1.000	1.000
18	0.999	0.998	0.990	0.985	1.003	1.004	1.000	1.000

Table 4.9 Interference Effect Between Aluminium and Inner Core Fuel Region I

Group	Central Diluent Material		Outer Diluent Material		Inner Fuel Region		Outer Fuel Region	
	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥
1	0.998	0.997	0.998	0.997	1.000	1.001	1.000	1.000
2	1.005	1.008	1.008	1.011	0.998	0.998	1.000	0.999
3	1.006	1.010	1.011	1.015	0.998	0.997	1.000	0.999
4	1.003	1.005	1.005	1.007	0.999	0.999	1.000	1.000
5	0.990	0.981	0.977	0.968	1.005	1.006	1.000	1.001
6	1.006	1.012	1.019	1.028	0.996	0.995	1.000	0.999
7	0.992	0.984	0.976	0.966	1.005	1.007	1.000	1.000
8	1.002	1.004	1.010	1.013	0.999	0.998	1.000	1.000
9	0.980	0.958	0.936	0.909	1.014	1.019	1.000	1.001
10	0.897	0.820	0.806	0.735	1.042	1.057	1.001	1.001
11	0.876	0.788	0.778	0.700	1.048	1.065	1.001	1.001
12	0.961	0.917	0.875	0.823	1.027	1.038	1.000	1.000
13	0.950	0.894	0.841	0.774	1.034	1.048	1.000	1.000
14	0.935	0.875	0.844	0.781	1.034	1.047	1.000	1.001
15	0.940	0.884	0.854	0.796	1.031	1.044	1.000	1.001
16	0.968	0.930	0.889	0.841	1.024	1.034	1.000	1.000
17	0.947	0.893	0.857	0.798	1.031	1.044	1.000	1.000
18	0.955	0.907	0.869	0.815	1.028	1.040	1.000	1.000

Table 4.10 Interference Effect Between Sodium/Steel and Inner Core Fuel Region I

Group	Central Diluent Material		Outer Diluent Material		Inner Fuel Region		Outer Fuel Region	
	//	±	//	±	//	±	//	±
1	1.024	1.039	1.040	1.053	0.993	0.991	0.998	0.997
2	1.026	1.044	1.046	1.062	0.991	0.989	0.998	0.997
3	1.014	1.025	1.028	1.038	0.995	0.993	0.999	0.998
4	1.006	1.010	1.011	1.016	0.998	0.997	1.000	0.999
5	0.969	0.944	0.937	0.914	1.013	1.017	1.001	1.002
6	0.980	0.961	0.952	0.934	1.010	1.013	1.000	1.001
7	0.969	0.939	0.925	0.895	1.015	1.022	1.000	1.001
8	0.992	0.982	0.971	0.958	1.006	1.008	1.000	1.000
9	0.994	0.986	0.974	0.963	1.006	1.008	1.000	1.000
10	0.995	0.988	0.974	0.963	1.006	1.008	1.000	1.000
11	1.001	1.003	1.013	1.018	0.999	0.997	1.000	1.000
12	1.001	1.001	1.036	1.054	0.994	0.991	1.000	1.000
13	1.000	1.000	1.021	1.032	0.996	0.995	1.000	1.000
14	1.001	1.003	1.022	1.032	0.997	0.995	1.000	1.000
15	1.001	1.004	1.028	1.041	0.995	0.993	1.000	1.000
16	1.001	1.002	1.035	1.051	0.994	0.991	1.000	1.000
17	1.001	1.002	1.023	1.034	0.996	0.994	1.000	1.000
18	1.001	1.002	1.032	1.047	0.995	0.992	1.000	1.000

Table 4.11 Results of Calculations for the Worth of Several Materials
Relative to the Central CRP in ZPPR-10C

Material	Measured Worth, \$	Calculated Worth ^a , \$					
		Transport	C-E		Diffusion		
			$\frac{1}{S} \bar{\Sigma}_{tr}$	C-E	Unified D	C-E	C-E
Sodium Voided CRP	-0.0746 ± 0.0017	-0.045	0.030 (0.039)*	-0.245	-0.170	-0.059	0.014
Empty Matrix	-0.1294 ± 0.0018	-0.111	0.018 (0.025)	-0.935	-0.806	-0.083	0.046
Steel Block	-0.2333 ± 0.0006	-0.294	-0.061 (-0.098)	-0.290	-0.057	-0.308	-0.075
Blanket	-0.7839 ± 0.0012	-0.842	-0.058 (-0.015)	-0.830 ^b	-0.046	-0.851	-0.067
Aluminium	-0.0973 ± 0.0002	-0.102	-0.005 (+0.017)	-0.090	0.007	-0.100	-0.003
Sodium / Steel	-0.1147 ± 0.0012	-0.122	-0.007 (-0.030)	-0.112	0.003	-0.130	-0.015

a All worths were calculated on the RZ model in 18 groups, $B_{eff}=0.003406$

b Benoist's isotropic D for the lower radial blanket drawers loaded in the central 3×3 drawers

* Results of S4RZ9G Calculations by Shirakata with use of ENDF/B-V

Table 4.12 Component of the Worth of Several Materials Relative to the Central CRP
Calculated by Transport Perturbation Calculation

($10^{-4} \Delta k / k k'$)

Material	Total	Leakage	Non-Leakage	Absorption	Spectrum	Fission
Sodium Voided CRP	-1.430	-6.042	4.612	0.617	3.995	0.0
Empty Matrix	-3.702	-11.201	7.499	1.826	5.673	0.0
Steel Block	-9.932	4.514	-14.446	-11.267	-3.179	0.0
Blanket	-28.670	3.740	-32.410	-38.546	-7.359	13.495
Aluminium	-3.411	2.057	-5.468	-0.022	-5.490	0.0
Sodium/Steel	-4.188	3.004	-7.192	-5.186	-2.006	0.0

Table 4.13 Component of the Worth of Several Materials Relative to the Central CRP
 Calculated by Diffusion Perturbation Calculation Applying Conventional D to
 the Materials

$(10^{-4} \Delta k / kk')$

Material	Total	Leakage	Non-Leakage	Absorption	Spectrum	Fission
Sodium Voided CRP	-8.341	-13.240	4.899	0.616	4.283	0.0
Empty Matrix	-31.854	-39.009	7.155	1.667	5.488	0.0
Steel Block	-9.888	5.669	-15.557	-11.535	-4.022	0.0
Blanket *	-28.258	4.873	-33.131	-40.080	-8.326	15.275
Aluminium	-3.063	2.897	-5.960	-0.002	-5.958	0.0
Sodium / Steel	-3.822	3.989	-7.811	-5.295	-2.516	0.0

* Benoist's isotropic D for the lower radial Blanket loaded in the central 3×3 drawers

Table 4.14 Component of the Worth of Several Materials Relative to the Central CRP
 Calculated by Diffusion Perturbation Calculation Applying Unified D to the
 Materials and the Surrounding Fuel Region

($10^{-4} \Delta k/kk'$)

Material	Total	Leakage	Lon-Leakage	Absorption	Spectrum	Fission
Sodium Voided CRP	-1.997	-7.083	5.086	0.637	4.449	0.0
Empty Matrix	-2.841	-11.144	8.303	1.902	6.401	0.0
Steel Block	-10.486	5.148	-15.634	-11.497	-4.137	0.0
Blanket	-28.979	4.367	-33.347	-40.352	-8.390	15.396
Aluminium	-34.06	2.606	-6.012	-0.003	-6.009	0.0
Sodium/Steel	-4.415	3.423	-7.838	-5.303	-2.535	0.0

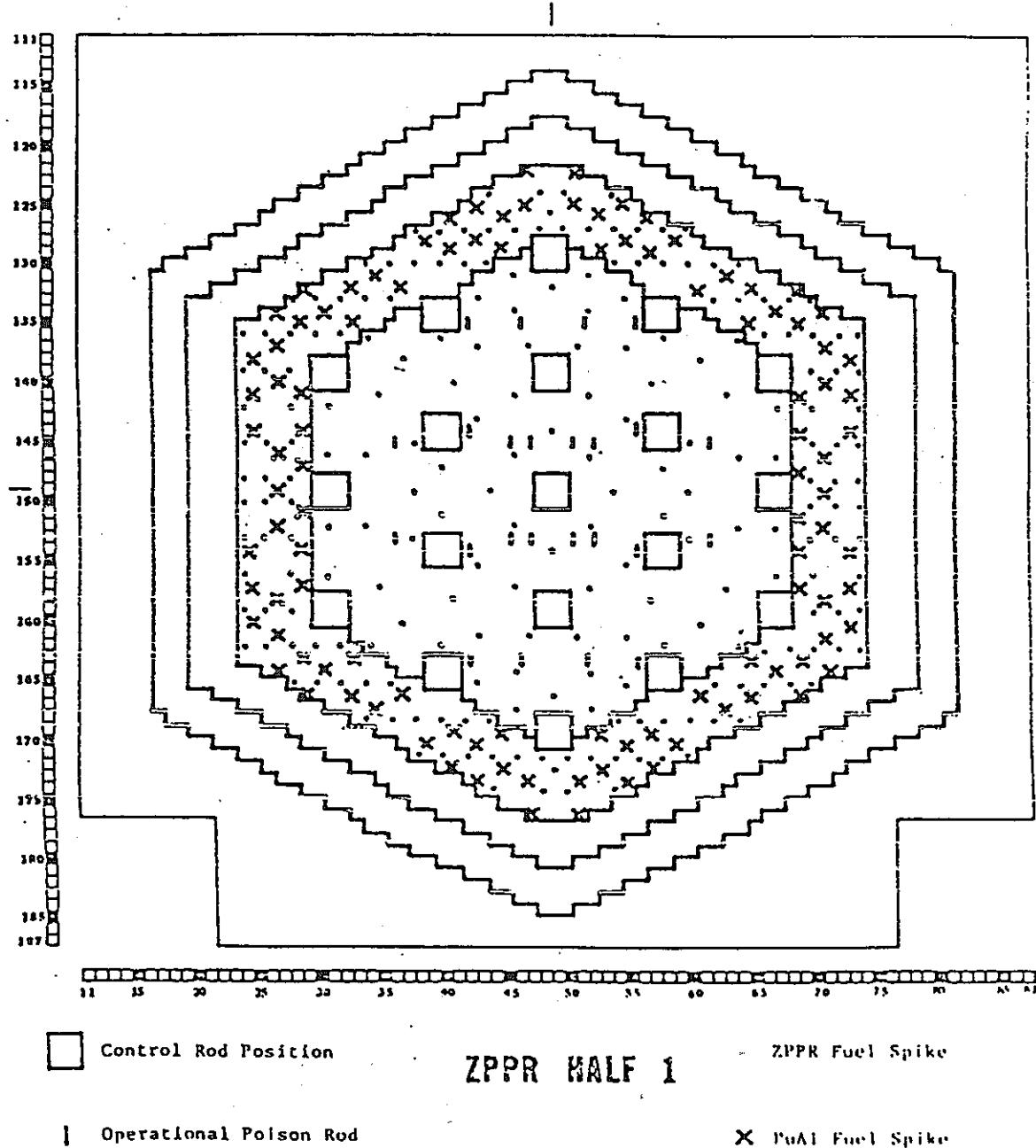
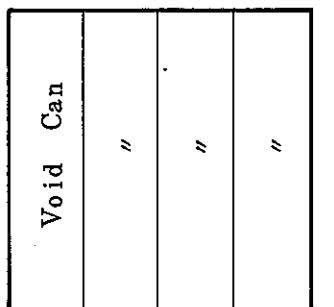
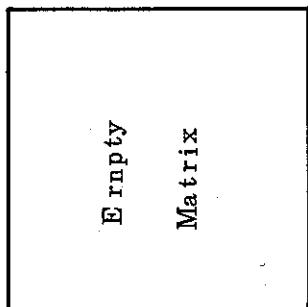


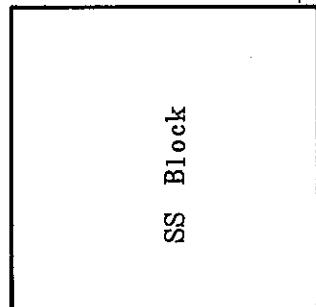
Fig. 4.1 ZPPR-10C Reference Configuration



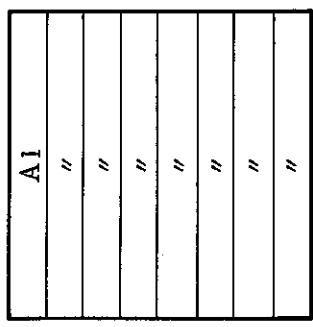
Sodium Voided CRP



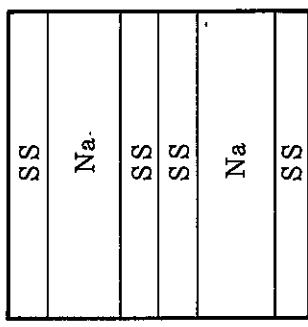
Empty Matrix



Steel Block



Aluminium



Sodium/Steel

Fig 4.2 Straming - Drawer Types Used in ZPPR-10 C

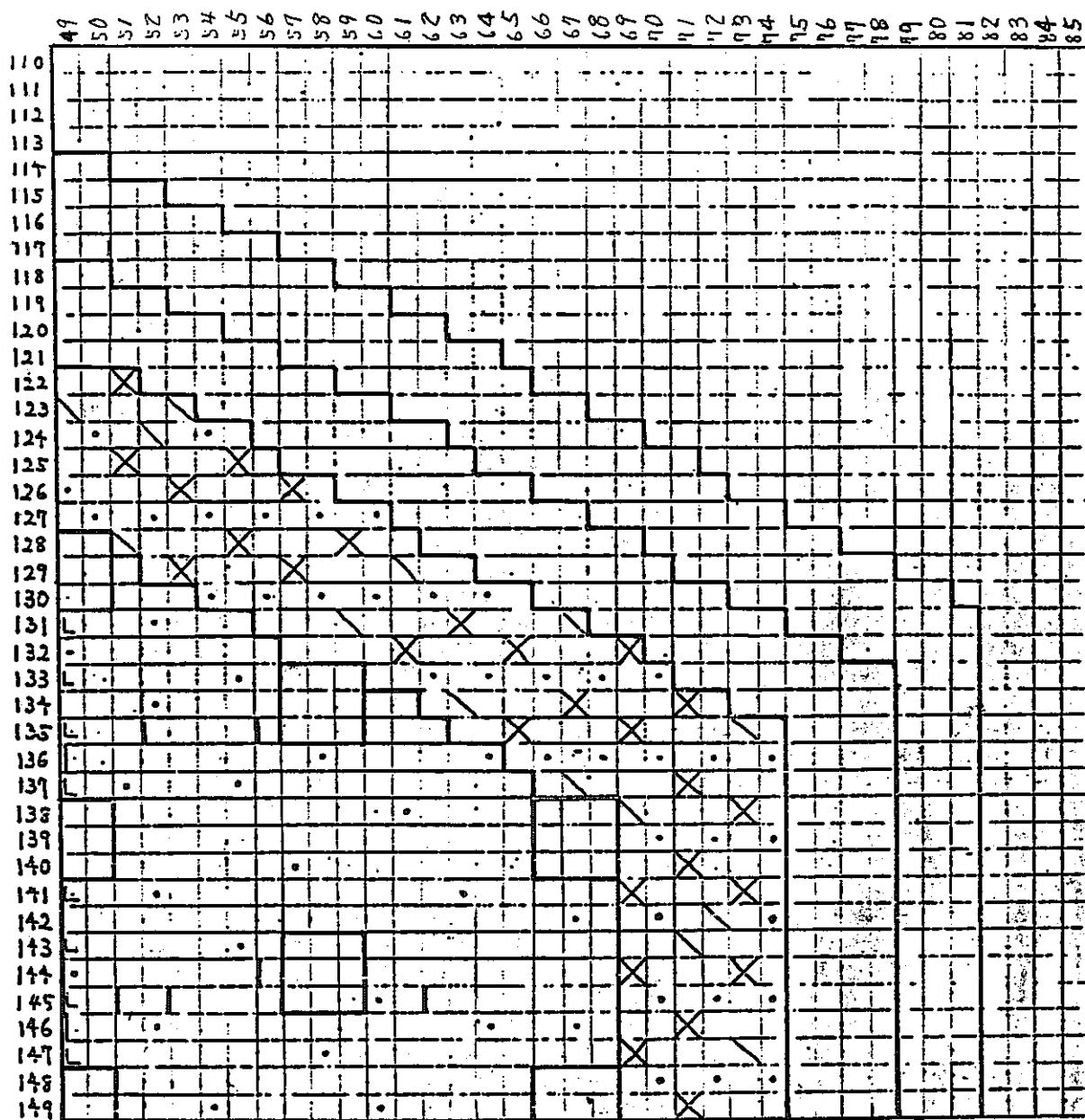


Fig. 4.3 ZPPR-10C Quarter-Core Interface Diagram

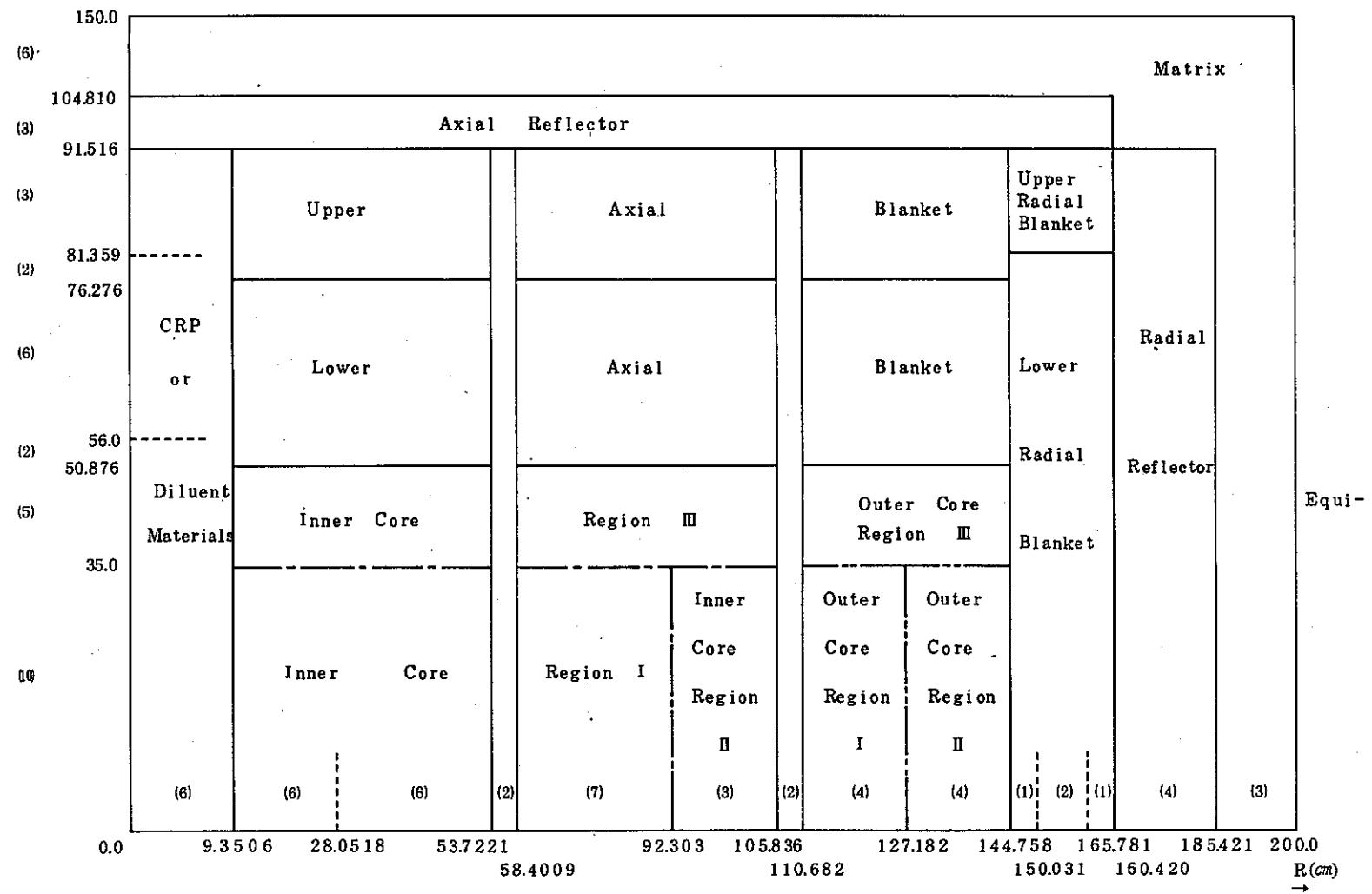
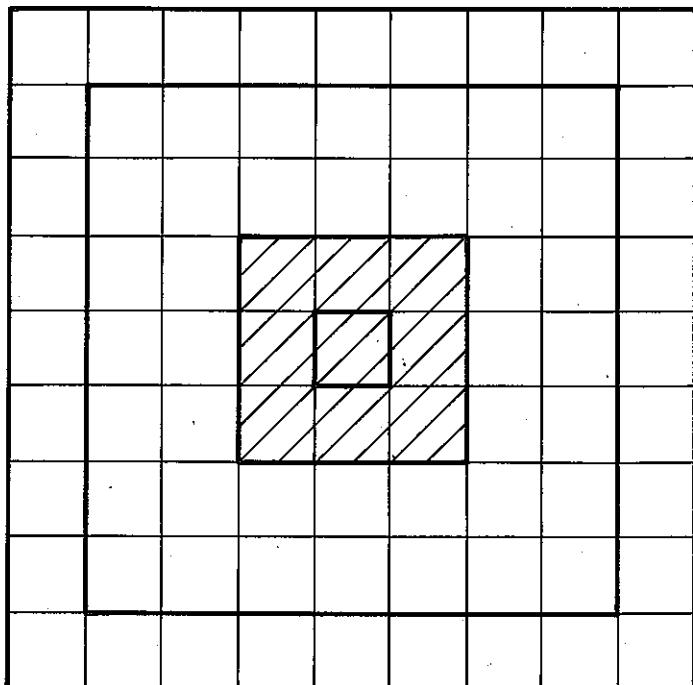


Fig 4.4 Two-Dimensional RZ Model for Transport and Diffusion Calculations in ZPPR-10 C



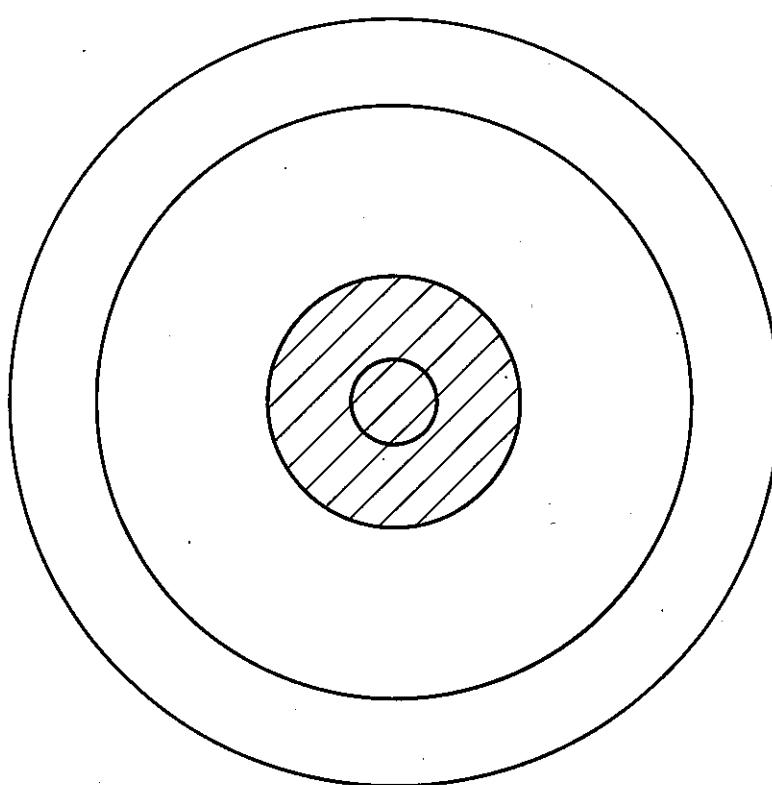
As Built



Diluent Material



Normal Fuel Drawer



Cylindricalized
Model

Fig 4.5 Super-Cell Model for Calculating Unified Diffusion Coefficient

5. 結論

中性子洩れを取り入れた格子計算によるZPPR-9の反応率分布の解析により、次のことことが明らかにされた。

アルベド衝突確率法を格子計算に適用することにより

1) 外側炉心において、 $U^{238}(n, f)$ 反応率及び $Pu^{239}(n, f)$ 反応率の Single fuel column drawer と double fuel column drawer 間の C/E 差が小さくなり、改善が見られた。

2) ブランケットおよび外側炉心とブランケットの境界面では、反応率分布に対する改善は小さかった。

また、ZPPR-10Aのピンロッド制御棒価値解析では、次の事が明らかにされた。

1) ZPPR-10Aのピンロッドに対してはスミアリング効果は約4%あり、 ^{10}B 濃縮度によらない。

2) 実効断面積を用いた輸送計算では基準計算に基づく CR ワースを 1.5 % 以内の精度で再現する。

3) スミアリング効果は拡散計算により予測する事ができる。

(中心 CR の場合)

また、ZPPR-10Cの希釈物質の反応度価値の解析では、次の事が明らかにされた。

1) 輸送摂動計算では、十分測定値を再現するが、Steel Block 及び Radial Blanket Drawers に対しては (C-E) 値が大きく、断面積データの検討が必要である。

2) 希釈物質に対して、従来の $\frac{1}{N} \bar{\Sigma}_{t_1}$ を拡散係数として適用した場合、Sodium Voided CRP 及び Empty Matrix に対しては、漏洩成分を大幅に過大評価する。他の希釈物質に対しては、漏洩成分と非漏洩成分との間で誤差のキャンセルが生じ、(C-E) 値が減少する場合も見られた。

3) 希釈物質及びそれに隣接した燃料ドロワーに対して、統一拡散係数を適用した場合、Sodium Voided CRP 及び Empty Matrix に対して、 $\frac{1}{N} \bar{\Sigma}_{t_1}$ を用いた場合に較べて著しい改善が見られた。

謝 辞

本作業を進めるに当り、高速炉エンジニアリング株の山本正昭氏より有益な御助言を頂いた。深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- (1) Y. Kikuchi, T. Narita and H. Takano, J. Nucl. Sci. Technol., 17, 567 (1980).
- (2) PNC Report, SJ201 80-26 (1980).
- (3) PNC Report, SN241 81-22 (1981).
- (4) PNC Report, SA385 81-04 (1981): The JUPITER Program: ANL Analysis of ZPPR-10.
- (5) M. Yamaoka and T. Takeda: Effect of Neutron Leakage in Cell Calculation of Fast Critical Assembly: J. Nucl. Sci. Technol., 18, 645 (1981).
- (6) T. Takeda et al., J. Nucl. Sci. Technol., 18, 93 (1981).
- (7) P. Benoist, CEA-R-2278 (1964).
- (8) A. Hasegawa et al.,: JAERI-M-4953 (1972).
- (9) J. Rowlands and C. Eaton: The Spatial Averaging of Cross-Sections for Use in Transport Theory Reactor Calculations: Paper to the NEA-IAEA Tech. Comm. Mtg. on Homogenization Methods in Reactor Physics, Lugano (1978).
- (10) K. Koehke: A New Approach to Homogenization and Group Condensation: Proceedings of a Specialist's Meeting on Homogenization Method in Reactor Physics, IAEA-TECDOC-231 (1980).
- (11) T. B. Fowler et al., ORNL-TM-2496 (1971).
- (12) K. D. Lathrop et al., LA-4848-MS (1973).
- (13) T. Takeda et al., PNC Report, J265 81-01 (1981).
- (14) 中川正章他, : SLAROM 高速炉の非均質系炉心解析コード: JAERI-M-5916 (1974).
See also PNC Report, SJ278 79-20 (1979).
- (15) I. Otake et al., PNC Report, N241 80-03 (1980).

付 錄 1

70群 制御棒平均断面積の比較 (CR-02)

Table 1. 3領域スーパーセル計算によるFWC

Table 2. 12領域(等メッシュ巾)スーパーセル計算によるFWC

Table 3. 12領域(等体積巾)スーパーセル計算によるFWC

Table 4. 12領域(等メッシュ巾)スーパーセル計算の
輸送計算用の実効断面積

Table 5. //

拡散計算用の実効断面積

Table 1. 3領域スーパーセル計算によるFWC

GRP	SIGTR	SIGAB	SIGPR	B
1	7.89437E-02	8.30451E-03	0.	4.22242E+00
2	8.52275E-02	7.00125E-03	0.	3.91110E+00
3	9.07947E-02	7.55525E-03	0.	3.67129E+00
4	9.89465E-02	6.29232E-03	0.	3.36332E+00
5	1.08335E-01	5.16490E-03	0.	3.07689E+00
6	1.20036E-01	5.69528E-03	0.	2.77695E+00
7	1.21191E-01	6.70463E-03	0.	2.75047E+00
8	1.20936E-01	6.41172E-03	0.	2.75627E+00
9	1.30154E-01	3.39090E-03	0.	2.56106E+00
10	1.43714E-01	3.68119E-03	0.	2.31941E+00
11	1.75994E-01	5.83265E-03	0.	1.89400E+00
12	1.63975E-01	9.55306E-03	0.	1.97253E+00
13	2.03868E-01	1.31757E-02	0.	1.63504E+00
14	1.96667E-01	1.39569E-02	0.	1.69491E+00
15	1.82471E-01	1.64038E-02	0.	1.82677E+00
16	2.38727E-01	1.96308E-02	0.	1.39630E+00
17	2.41493E-01	2.27331E-02	0.	1.38030E+00
18	2.60121E-01	2.57620E-02	0.	1.23144E+00
19	2.26727E-01	2.85604E-02	0.	1.47019E+00
20	2.64299E-01	2.97692E-02	0.	1.26120E+00
21	2.50442E-01	3.32347E-02	0.	1.33098E+00
22	3.09792E-01	3.64315E-02	0.	1.07599E+00
23	2.77415E-01	3.95593E-02	0.	1.20157E+00
24	5.20409E-01	5.03158E-02	0.	6.40522E-01
25	2.76432E-01	4.31238E-02	0.	1.20584E+00
26	2.97229E-01	5.24292E-02	0.	1.12122E+00
27	4.39438E-01	5.55223E-02	0.	7.55545E-01
28	3.94307E-01	5.89370E-02	0.	8.45364E-01
29	6.12152E-01	6.84221E-02	0.	5.42527E-01
30	6.88275E-01	6.39578E-02	0.	4.84303E-01
31	6.08542E-01	6.77488E-02	0.	5.47758E-01
32	7.40670E-01	7.38373E-02	0.	4.50043E-01
33	1.49919E+00	8.44253E-02	0.	2.22342E-01
34	1.15453E+00	7.88221E-02	0.	2.38717E-01
35	5.38713E-01	8.00774E-02	0.	6.18758E-01
36	4.59022E-01	8.74725E-02	0.	7.26182E-01
37	5.05272E-01	9.84536E-02	0.	6.59711E-01
38	4.79826E-01	9.31538E-02	0.	6.94697E-01
39	4.97288E-01	9.55301E-02	0.	6.70302E-01
40	5.22444E-01	9.86372E-02	0.	6.33027E-01
41	5.92570E-01	9.94490E-02	0.	5.62522E-01
42	9.19035E-01	1.02398E-01	0.	3.62699E-01
43	5.74243E-01	1.01114E-01	0.	5.80469E-01
44	5.71413E-01	1.02778E-01	0.	5.87347E-01
45	5.79024E-01	1.04214E-01	0.	5.75622E-01
46	5.86008E-01	1.05582E-01	0.	5.68320E-01
47	5.93112E-01	1.07353E-01	0.	5.62008E-01
48	5.99716E-01	1.09433E-01	0.	5.55818E-01
49	2.04393E-01	1.10149E-01	0.	5.51518E-01
50	6.11233E-01	1.13039E-01	0.	5.45301E-01
51	6.08130E-01	1.07738E-01	0.	5.48128E-01
52	6.11302E-01	1.08633E-01	0.	5.45284E-01
53	6.17098E-01	1.12671E-01	0.	5.40163E-01
54	6.19593E-01	1.13538E-01	0.	5.37938E-01
55	6.22304E-01	1.14936E-01	0.	5.35644E-01
56	6.22418E-01	1.13371E-01	0.	5.35546E-01
57	6.20518E-01	1.17072E-01	0.	5.32041E-01
58	6.25067E-01	1.14549E-01	0.	5.33276E-01
59	6.24352E-01	1.12372E-01	0.	5.33557E-01
60	6.25040E-01	1.12798E-01	0.	5.33299E-01
61	6.27002E-01	1.14159E-01	0.	5.31630E-01
62	6.29657E-01	1.16314E-01	0.	5.29389E-01
63	6.33475E-01	1.19725E-01	0.	5.26128E-01
64	6.42982E-01	1.28326E-01	0.	5.18418E-01
65	6.47439E-01	1.32056E-01	0.	5.14349E-01
66	6.50249E-01	1.33993E-01	0.	5.12073E-01
67	6.55953E-01	1.37787E-01	0.	5.08168E-01
68	6.62660E-01	1.43556E-01	0.	5.03023E-01
69	6.69153E-01	1.49315E-01	0.	4.98120E-01
70	6.49633E-01	1.54934E-01	0.	5.13071E-01

Table 2. 12領域(等メッシュ巾)スーパーセル計算によるFWC

GRP	SIGTR	SIGAB	SIGPR	D
1	7.39102E-02	8.31920E-03	0.	7.22421E+00
2	8.451899E-02	7.01701E-03	0.	3.91283E+00
3	9.07563E-02	7.57718E-03	0.	3.67284E+00
4	9.89221E-02	6.91243E-03	0.	3.36966E+00
5	1.08326E-01	5.17668E-03	0.	3.07713E+00
6	1.20037E-01	5.69861E-03	0.	2.77692E+00
7	1.21192E-01	6.70346E-03	0.	2.75046E+00
8	1.20936E-01	6.40998E-03	0.	2.75627E+00
9	1.30147E-01	3.38779E-03	0.	2.56122E+00
10	1.43681E-01	3.67415E-03	0.	2.31995E+00
11	1.75857E-01	5.80264E-03	0.	1.89537E+00
12	1.68698E-01	9.47931E-03	0.	1.97592E+00
13	2.03600E-01	1.30594E-02	0.	1.63719E+00
14	1.96290E-01	1.38294E-02	0.	1.69817E+00
15	1.81938E-01	1.62345E-02	0.	1.83212E+00
16	2.38369E-01	1.94303E-02	0.	1.39839E+00
17	2.41167E-01	2.24531E-02	0.	1.38217E+00
18	2.59844E-01	2.53712E-02	0.	1.28282E+00
19	2.26211E-01	2.82685E-02	0.	1.47355E+00
20	2.64006E-01	2.92795E-02	0.	1.26260E+00
21	2.49979E-01	3.27528E-02	0.	1.33345E+00
22	3.09507E-01	3.57640E-02	0.	1.07698E+00
23	2.76979E-01	3.88386E-02	0.	1.20346E+00
24	5.22390E-01	4.93212E-02	0.	6.38093E-01
25	2.75609E-01	4.20761E-02	0.	1.20944E+00
26	2.96089E-01	5.07437E-02	0.	1.12579E+00
27	4.39791E-01	5.30135E-02	0.	7.57935E-01
28	5.93472E-01	5.66472E-02	0.	8.47159E-01
29	6.15176E-01	6.37549E-02	0.	5.41850E-01
30	6.92134E-01	5.79331E-02	0.	4.81602E-01
31	6.08666E-01	6.03775E-02	0.	5.47648E-01
32	7.40223E-01	6.49271E-02	0.	4.50315E-01
33	-1.49344E+00	7.21550E-02	0.	2.23199E-01
34	1.14983E+00	5.51013E-02	0.	2.89898E-01
35	5.33147E-01	7.12457E-02	0.	6.25218E-01
36	4.54223E-01	8.07930E-02	0.	7.33854E-01
37	5.00365E-01	9.13096E-02	0.	6.66180E-01
38	4.74721E-01	8.62908E-02	0.	7.02167E-01
39	4.91925E-01	8.84607E-02	0.	6.77610E-01
40	5.16377E-01	9.11342E-02	0.	6.45149E-01
41	5.86126E-01	9.12264E-02	0.	5.68706E-01
42	9.11724E-01	8.97233E-02	0.	3.65608E-01
43	5.67014E-01	9.22541E-02	0.	5.82875E-01
44	5.64662E-01	9.47497E-02	0.	5.90323E-01
45	5.72312E-01	9.63913E-02	0.	5.82433E-01
46	5.79254E-01	9.78472E-02	0.	5.75452E-01
47	5.86231E-01	9.95944E-02	0.	5.62604E-01
48	5.92774E-01	1.01716E-01	0.	5.62328E-01
49	5.97515E-01	1.02601E-01	0.	5.57863E-01
50	6.04397E-01	1.05560E-01	0.	5.51514E-01
51	6.01524E-01	1.00536E-01	0.	5.54148E-01
52	6.04520E-01	1.01405E-01	0.	5.51401E-01
53	6.10380E-01	1.05567E-01	0.	5.46108E-01
54	6.13152E-01	1.06772E-01	0.	5.43639E-01
55	6.15894E-01	1.08243E-01	0.	5.41218E-01
56	6.15964E-01	1.07166E-01	0.	5.41157E-01
57	6.20240E-01	1.10581E-01	0.	5.37426E-01
58	6.18776E-01	1.03070E-01	0.	5.38698E-01
59	6.17548E-01	1.05339E-01	0.	5.39759E-01
60	6.17827E-01	1.05418E-01	0.	5.39526E-01
61	6.19476E-01	1.06480E-01	0.	5.38089E-01
62	6.21926E-01	1.03445E-01	0.	5.35970E-01
63	6.25638E-01	1.11756E-01	0.	5.32790E-01
64	6.35825E-01	1.21570E-01	0.	5.24253E-01
65	6.42267E-01	1.26821E-01	0.	5.18995E-01
66	6.45335E-01	1.28924E-01	0.	5.16123E-01
67	6.50994E-01	1.32781E-01	0.	5.12038E-01
68	6.59342E-01	1.40211E-01	0.	5.05555E-01
69	6.68350E-01	1.48477E-01	0.	4.98741E-01
70	6.50454E-01	1.55711E-01	0.	5.12462E-01

SCATTERING TRANSFER

Table 3. 12領域(等体積巾)スーパーセル計算によるFWC

GRP	SIGTR	SIGAB	SIGPR	D
1	7.89060E-02	8.32102E-03	0.	4.22443E+00
2	8.51900E-02	7.01696E-03	0.	3.91282E+00
3	9.07611E-02	7.57445E-03	0.	3.67265E+00
4	9.89294E-02	6.90659E-03	0.	3.36941E+00
5	1.08331E-01	5.16945E-03	0.	3.07698E+00
6	1.20034E-01	5.69031E-03	0.	2.77700E+00
7	1.21196E-01	6.69307E-03	0.	2.75038E+00
8	1.20937E-01	6.40036E-03	0.	2.75625E+00
9	1.30133E-01	3.38256E-03	0.	2.56148E+00
10	1.43650E-01	3.66757E-03	0.	2.32046E+00
11	1.75820E-01	5.79148E-03	0.	1.89588E+00
12	1.68629E-01	9.46080E-03	0.	1.97673E+00
13	2.03611E-01	1.30738E-02	0.	1.63710E+00
14	1.96309E-01	1.38350E-02	0.	1.69800E+00
15	1.81914E-01	1.62270E-02	0.	1.83236E+00
16	2.38360E-01	1.94251E-02	0.	1.39845E+00
17	2.41181E-01	2.24651E-02	0.	1.38209E+00
18	2.59864E-01	2.54004E-02	0.	1.28272E+00
19	2.26216E-01	2.82724E-02	0.	1.47352E+00
20	2.64026E-01	2.93130E-02	0.	1.26250E+00
21	2.49983E-01	3.27574E-02	0.	1.33342E+00
22	3.09504E-01	3.57574E-02	0.	1.07699E+00
23	2.76974E-01	3.38236E-02	0.	1.20348E+00
24	5.22837E-01	4.90968E-02	0.	6.37547E-01
25	2.75661E-01	4.21472E-02	0.	1.20921E+00
26	2.96063E-01	5.07120E-02	0.	1.12589E+00
27	4.39794E-01	5.29950E-02	0.	7.57931E-01
28	3.93482E-01	5.60860E-02	0.	8.47137E-01
29	3.15286E-01	6.55858E-02	0.	5.41753E-01
30	6.92052E-01	5.81110E-02	0.	4.81660E-01
31	6.08660E-01	6.10999E-02	0.	5.47651E-01
32	7.40229E-01	6.50486E-02	0.	4.50311E-01
33	1.49328E+00	7.18257E-02	0.	2.23222E-01
34	1.14971E+00	6.47415E-02	0.	2.89929E-01
35	5.33320E-01	7.15197E-02	0.	6.25016E-01
36	4.54508E-01	8.11289E-02	0.	7.33395E-01
37	5.00657E-01	9.17349E-02	0.	6.65792E-01
38	4.75165E-01	8.68372E-02	0.	7.01511E-01
39	4.92477E-01	8.91872E-02	0.	6.76851E-01
40	5.17327E-01	9.20302E-02	0.	6.44338E-01
41	5.86839E-01	9.21811E-02	0.	5.68014E-01
42	9.12433E-01	9.09515E-02	0.	3.65324E-01
43	5.68144E-01	9.36384E-02	0.	5.86705E-01
44	5.65849E-01	9.61600E-02	0.	5.89086E-01
45	5.73602E-01	9.78949E-02	0.	5.81123E-01
46	5.80628E-01	9.94203E-02	0.	5.74091E-01
47	5.87722E-01	1.01276E-01	0.	5.67162E-01
48	5.94754E-01	1.03472E-01	0.	5.60833E-01
49	5.99221E-01	1.04471E-01	0.	5.56277E-01
50	6.06190E-01	1.07508E-01	0.	5.49882E-01
51	6.03487E-01	1.02746E-01	0.	5.52345E-01
52	6.06511E-01	1.03527E-01	0.	5.49591E-01
53	6.12418E-01	1.07722E-01	0.	5.44290E-01
54	6.15353E-01	1.09039E-01	0.	5.41691E-01
55	6.18190E-01	1.10640E-01	0.	5.39209E-01
56	6.18304E-01	1.09597E-01	0.	5.39109E-01
57	6.22558E-01	1.12978E-01	0.	5.35425E-01
58	6.21152E-01	1.10517E-01	0.	5.36638E-01
59	6.19909E-01	1.08312E-01	0.	5.37713E-01
60	6.20299E-01	1.07947E-01	0.	5.37376E-01
61	6.22077E-01	1.09134E-01	0.	5.35839E-01
62	6.24620E-01	1.11187E-01	0.	5.33658E-01
63	6.28331E-01	1.14501E-01	0.	5.30506E-01
64	6.38222E-01	1.24000E-01	0.	5.22234E-01
65	6.44942E-01	1.29529E-01	0.	5.16842E-01
66	6.48722E-01	1.31742E-01	0.	5.13831E-01
67	6.53879E-01	1.35693E-01	0.	5.09778E-01
68	6.62172E-01	1.43065E-01	0.	5.03394E-01
69	6.71152E-01	1.51300E-01	0.	4.96658E-01
70	6.53244E-01	1.58519E-01	0.	5.10274E-01

Table 4. 12領域(等メッシュ巾)スーパーセル計算の輸送計算用の実効断面積

CELL NUMBER (1)

GRP	SIGTR	SIGAB	SIGPR
1	7.50106E-02	7.90505E-03	0.
2	8.10335E-02	6.67390E-03	0.
3	8.62031E-02	7.19715E-03	0.
4	9.36523E-02	6.54418E-03	0.
5	1.02704E-01	4.90795E-03	0.
6	1.12343E-01	5.33335E-03	0.
7	1.14201E-01	6.31666E-03	0.
8	1.13757E-01	6.02941E-03	0.
9	1.20973E-01	3.14393E-03	0.
10	1.33173E-01	3.40543E-03	0.
11	1.57278E-01	5.18930E-03	0.
12	1.50608E-01	8.46254E-03	0.
13	1.37543E-01	1.26337E-02	0.
14	1.74871E-01	1.23208E-02	0.
15	1.62744E-01	1.45221E-02	0.
16	2.17492E-01	1.77236E-02	0.
17	2.15082E-01	2.00240E-02	0.
18	2.29143E-01	2.23747E-02	0.
19	2.06519E-01	2.52059E-02	0.
20	2.30261E-01	2.55375E-02	0.
21	2.25243E-01	2.95123E-02	0.
22	2.75019E-01	3.17782E-02	0.
23	2.45435E-01	3.44148E-02	0.
24	5.23516E-01	4.94278E-02	0.
25	2.19756E-01	3.35525E-02	0.
26	2.59245E-01	4.44327E-02	0.
27	3.55517E-01	4.29735E-02	0.
28	3.15048E-01	4.43788E-02	0.
29	5.06258E-01	5.24671E-02	0.
30	4.94601E-01	4.14349E-02	0.
31	4.26463E-01	4.26539E-02	0.
32	5.08628E-01	4.46139E-02	0.
33	9.97684E-01	4.82029E-02	0.
34	7.13902E-01	4.04201E-02	0.
35	3.52442E-01	4.70971E-02	0.
36	3.32966E-01	5.92239E-02	0.
37	3.73049E-01	6.80772E-02	0.
38	3.64184E-01	6.61934E-02	0.
39	3.81359E-01	6.85732E-02	0.
40	3.97084E-01	7.00772E-02	0.
41	4.57996E-01	7.12840E-02	0.
42	6.31527E-01	6.21552E-02	0.
43	4.13440E-01	6.72687E-02	0.
44	4.17341E-01	7.00317E-02	0.
45	4.23100E-01	7.12621E-02	0.
46	4.14511E-01	7.00187E-02	0.
47	4.00489E-01	6.80383E-02	0.
48	3.75906E-01	6.44992E-02	0.
49	3.66730E-01	6.29713E-02	0.
50	3.42391E-01	5.97999E-02	0.
51	4.16043E-01	6.96073E-02	0.
52	4.12028E-01	6.91187E-02	0.
53	3.48375E-01	6.02532E-02	0.
54	3.36979E-01	5.86220E-02	0.
55	3.22630E-01	5.67025E-02	0.
56	3.43311E-01	5.97302E-02	0.
57	3.05949E-01	5.45459E-02	0.
58	3.52177E-01	6.15083E-02	0.
59	4.31948E-01	7.40644E-02	0.
60	5.35662E-01	9.15694E-02	0.
61	6.31586E-01	1.08563E-01	0.
62	6.94204E-01	1.21050E-01	0.
63	6.40072E-01	1.14344E-01	0.
64	3.61439E-01	6.91039E-02	0.
65	3.03778E-01	5.97843E-02	0.
66	2.94508E-01	5.87437E-02	0.
67	2.76494E-01	5.63959E-02	0.
68	2.49577E-01	5.30738E-02	0.
69	2.35791E-01	5.26027E-02	0.
70	2.27793E-01	5.45317E-02	0.

Table 5. 12領域(等メッシュ巾)スーパーセル計算の拡散計算用の実効断面積

GROUP CONSTANTS		NUSIGF	D
GRP	SIGA		
1	6.57653E-03	0.	4.22421E+00
2	5.61896E-03	0.	3.91283E+00
3	6.12763E-03	0.	3.67284E+00
4	5.71230E-03	0.	3.36966E+00
5	4.47277E-03	0.	3.07713E+00
6	4.86551E-03	0.	2.77692E+00
7	6.00112E-03	0.	2.75046E+00
8	5.89928E-03	0.	2.75627E+00
9	3.12649E-03	0.	2.56122E+00
10	3.41698E-03	0.	2.31995E+00
11	5.21287E-03	0.	1.89537E+00
12	8.41400E-03	0.	1.97592E+00
13	1.24701E-02	0.	1.63719E+00
14	1.26153E-02	0.	1.69817E+00
15	1.46985E-02	0.	1.83212E+00
16	1.83614E-02	0.	-1.39839E+00
17	2.08748E-02	0.	1.38217E+00
18	2.35809E-02	0.	1.28282E+00
19	2.69161E-02	0.	1.47355E+00
20	2.72590E-02	0.	1.26260E+00
21	3.15289E-02	0.	1.33345E+00
22	3.53995E-02	0.	1.07698E+00
23	3.80868E-02	0.	1.20346E+00
24	6.26260E-02	0.	6.38093E-01
25	3.e79733E-02	0.	1.20944E+00
26	5.01179E-02	0.	1.12579E+00
27	5.30336E-02	0.	7.57935E-01
28	5.52542E-02	0.	8.47159E-01
29	7.57685E-02	0.	5.41850E-01
30	6.25585E-02	0.	4.81602E-01
31	6.34719E-02	0.	5.47648E-01
32	7.24356E-02	0.	4.50315E-01
33	9.07814E-02	0.	2.23199E-01
34	9.17191E-02	0.	2.89898E-01
35	7.93920E-02	0.	6.25218E-01
36	8.75555E-02	0.	7.33834E-01
37	1.00195E-01	0.	6.66180E-01
38	9.07153E-02	0.	7.02167E-01
39	9.09327E-02	0.	6.77610E-01
40	9.21146E-02	0.	6.45149E-01
41	9.66659E-02	0.	5.68706E-01
42	1.01238E-01	0.	3.65608E-01
43	9.44830E-02	0.	5.67873E-01
44	9.67489E-02	0.	5.90323E-01
45	9.28099E-02	0.	5.82433E-01
46	9.29200E-02	0.	5.75452E-01
47	8.42642E-02	0.	5.68604E-01
48	7.71804E-02	0.	5.62328E-01
49	7.20036E-02	0.	5.57863E-01
50	6.37664E-02	0.	5.51514E-01
51	7.39301E-02	0.	5.54148E-01
52	7.93073E-02	0.	5.51401E-01
53	6.35122E-02	0.	5.46108E-01
54	5.86388E-02	0.	5.43639E-01
55	5.34413E-02	0.	5.41218E-01
56	5.82973E-02	0.	5.41157E-01
57	4.73389E-02	0.	5.37426E-01
58	5.95211E-02	0.	5.38698E-01
59	7.89477E-02	0.	5.39769E-01
60	1.01889E-01	0.	5.39526E-01
61	1.21677E-01	0.	5.38039E-01
62	1.36342E-01	0.	5.35970E-01
63	1.36498E-01	0.	5.32790E-01
64	6.39401E-02	0.	5.24253E-01
65	4.90189E-02	0.	5.18995E-01
66	4.58994E-02	0.	5.16128E-01
67	3.92804E-02	0.	5.12038E-01
68	2.67810E-02	0.	5.05555E-01
69	1.24830E-02	0.	4.98741E-01
70	1.65201E-02	0.	5.12462E-01