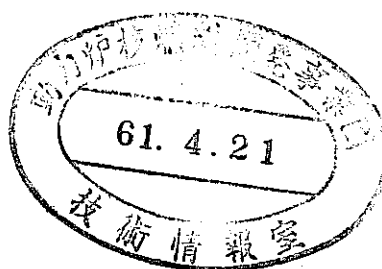


PNCT J2605 86-001

# 大型炉特性解析法の研究 (Ⅱ)

(受託研究)

1986年3月



大阪大学工学部

1986年3月

大型炉特性解析法の研究(Ⅱ)\*

竹田 敏一\*

辻本 恵一\*

佐々木 良明\*

宇根崎 博信\*

要旨

本報告書は次の四部から構成されている。

第一部：平板格子計算における2次元効果

第二部：格子均質化に対する統一理論

第三部：CADENZA炉心の臨界性詳細解析

第四部：高速臨界集合体核特性に対する

3次元輸送補正

第一部では高速臨界集合体ZPPR炉心の格子平均断面積を計算する際における、格子の二次元効果について検討した。3種類の1次元格子モデルと二次元格子モデルによる格子平均断面積並びに異方性拡散係数を比べ、一次元モデルの適用性を調べた。格子定数をすべて精度よく評価できる単一の一次元モデルはなく、炉心詳細解析には2次元あるいは3次元格子計算が必要となることが示される。

第二部では格子均質化法に関する統一理論を導く。炉内の任意の場所にある格子の平均断面積及び異方性拡散係数に対する一般的な表示式を求め、無限格子系

及び異なった格子から構成される非均質格子系へ適用し、具体的な計算式を導出した。無限格子系では拡散係数はBenoistの式に、断面積は中性子束重みの通常用いられている式になる。非均質格子系では、断面積はRowlandsの式になり、拡散係数は新しい式となる。

第三部では、第一部に示した2次元格子計算を用い、Zebra CADENZ A炉心の臨界性の詳細解析を行う。一次元平板格子モデルを用いた場合、プレート体系（Zebra 22炉心）とピン体系（Zebra 23炉心）の $k_{eff}$ のC/E値の差は0.3~0.5%あるのに対し、2次元平板格子モデルを用いると差は0.2%に縮まった。このように、プレート炉心で核特性のバイアスを計算するには、多次元モデルの使用が望ましいことがわかった。

第四部では高速臨界錐集合体の $k_{eff}$ 、制御棒価値、出力分布、中性子スペクトルの計算の輸送補正量を3次元輸送コードTRITACを用いて評価し、2次元輸送計算から予測した輸送補正と比較・検討する。2次元輸送計算としてはRZモデル及びXY, RZ, Rモデルの結合を考えた。結合2次元モデルを用いると、輸送補正が精度良く求められることが示された。

・ 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により実施した研究成果である。

・ 大阪大学工学部 原子力工学科

March 1985

Study on Analysis Method for Large FBR Cores (II)\*

Toshikazu Takeda \*\*

Keiichi Tsujimoto \*\*

Yoshiaki Sasaki \*\*

Hironobu Unezaki \*\*

Abstract

This report is composed of the following four parts.

- (I) Two-dimensional effect in cell calculation
- (II) Uniformed theory in cell homogenization
- (III) Detailed analysis of criticality in CADENZA core
- (IV) Three-dimensional transport correction to core performances in fast critical assemblies

Part I

Two-dimensional (2-D) effects have been investigated on the cell averaged cross sections in analyzing the fast critical assembly ZPPR. We compared the cell-averaged cross sections and diffusion coefficients calculated from three 1-D cell models and a 2-D cell model, and assessed the accuracy of the 1-D models. Any 1-D model cannot predict in good accuracy both of the cross

sections and the diffusion coefficients. Thus the use of 2-D or 3-D cell models is required for detailed core analysis.

## Part II

A unified theory for homogenizing a cell has been established. A general formula for cell-averaged cross sections and anisotropic diffusion coefficients is derived, which can be applied to any cell in a core. For infinite uniform lattices, the anisotropic diffusion coefficient is reduced to Benoist's one, and the cross section is reduced to the commonly used flux-weighted one. For heterogeneous lattices, the anisotropic diffusion coefficient is reduced to a new one, and the cross section is reduced to Rowland's one.

## Part III

A detailed analysis of criticality in the Zebra CADENZA core has been carried out using a 2-D cell model. The C/E discrepancy between plate and pin cores observed when using 1-D cell models was  $0.3 \sim 0.5 \% \delta k$ . This discrepancy was reduced to  $0.2 \%$  when using a 2-D model. Thus, in calculating bias from plate-type critical assemblies, it is required to utilize 2-D or 3-D cell models.

## Part VI

The transport corrections to  $k_{\text{eff}}$ , control rod worth, power distribution and neutron spectrum in fast critical assemblies have been evaluated using the 3-D  $S_N$  code TRITAC. The results

are compared with those from 2-D transport calculations. An RZ model and a combination of XY, RZ and R models are considered as 2-D models. The combination model predict the transport corrections in good accuracy.

\* This work was carried out under construction between the Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation and Osaka University.

\*\* Faculty of Engineering, Department of Nuclear Engineering,  
Osaka University

## 第 I 部

# 平板格子計算における 2 次元効果

## 目次

1. 序論
2. 1次元及び2次元格子モデル
3. 格子計算結果
  - a) 拡散係数
  - b) 格子平均断面積
  - c) 格子内中性子束分布
4. 結論



## List of Tables

- Table 1 Energy Group Structure of 70 Groups
- Table 2 Comparison of Diffusion Coefficient
- Table 3 Cell-averaged Microscopic Cross Section
- Table 4 Cell-averaged Macroscopic Cross Section
- Table 5 Intra-cell Flux Distribution
- Table 6 1st Group Plate-wise Macroscopic Cross Section

## List of Figures

Fig. 1 2D Calculation Model of ZPPR-9 Inner Core Single Fuel Drawer

Fig. 2 Intra-cell Flux Distribution of 2D Model

## 1. 序論

高速臨界集合体は高速増殖炉実機の組成を模擬して作られているが、ドロワーには通常平板燃料を使用している。プレート型燃料格子の非均質効果はピン型燃料格子の非均質効果に比べると非常に大きいため、高速臨界集合体の実験解析にあたってはプレート型燃料格子の非均質効果を精度良く評価する事が必要となる。

本研究ではZPPR-9の内側炉心に使用されている代表的なプレート燃料格子を対象にして70群格子計算を種々の1次元モデル (Simple 1D model, Modified 1D model, Center-line 1D model) と格子の非均質効果をより厳密に取り扱える2次元モデルを用いて行い、得られた格子パラメーターを比較して格子均質化の際の2次元効果を評価する。

## 2. 1次元及び2次元格子モデル

ZPPR-9 Inner Core Single Fuel Drawerを対象にして3種の1次元モデルと2次元モデルについて70群格子計算を行い、得られた格子平均マイクロ及びマクロ断面積、格子平均拡散係数、格子内中性子束分布を比較した。

用いた格子モデルを次に示す。

1. Simple 1Dモデル Simple 1D modelでは燃料プレートのミートを格子ピッチに拡張して、燃料ミートの横側にあるシースと燃料プレートのカンが各領域にスミアされる。

2. Modified 1Dモデル 燃料ミートの横側のカンとマトリックスとドロワーを非燃料プレートに均一にスミアし、燃料ミートを格子ピッチ(2.175")まで広げてスミアした。

3. Center-line 1Dモデル 2次元モデルの格子の中心軸上のプレート配置をそのまま扱ったモデル。格子計算より得られた70群格子平均マイクロ断面積と格子平均数密度をかけて格子平均マクロ断面積を求める。拡散係数はCenter-line 1D modelのプレート毎のマイクロ断面積を用いたSimple 1D modelより求めた。

4. 2Dモデル ZPPR-9 Inner Core Single Column Drawerの2次元モデルをFig.1に示す。このモデルでは燃料ミートはドロワー高さにstretchされていない。コの字型のドロワーによるTop clearanceが正確に扱われており、燃料ミートとカンとのギャブが考慮されているが、両側のドロワーとマトリックスを1領域にスミアしたためSide clearanceは扱っていない。

解析にはJFS-3-J2ライブラリー<sup>(1)</sup>(old version)を用いた。実効マイクロ断面積及び格子内中性子束分布の計算はFFCP法に基づくCASUP code<sup>(2)</sup>の2次元versionにより行った。格子計算には臨界バックリングを取り入れ、 $D = 1 / 3 \Sigma t r$ を擬似吸収項の拡散係数に用いた。

以上の4モデル共にregion-wise実効マイクロ断面積はToneの方法<sup>(3)</sup>により求めた。又、非燃料核種の実効マイクロ断面積は均質格子の実効マイクロ断面積を用いた。70群構造をTable 1に示す。

### 3. 格子計算結果

#### a) 拡散係数

Simple 1D modelとMod.1D model(Modified 1D model)より得られたBenoistの等方拡散係数<sup>(4)</sup>

$$D_{av} = (2D_{\parallel} + D_{\perp}) / 3 \quad (1)$$

と拡散係数の異方性  $(D_{av} / D(1/3 \sum tr) - 1) \times 100$  を2Dモデルと比較した結果をTable 2に示す。

Table 2より1-10群までの高速群ではSimple 1D modelはDの異方性を良く再現しているが、Mod.1D modelは2次元モデルと大きくずれる。20群以下のエネルギー群では2Dモデルの $D_{av}$ は非常に大きくなるため、Simple 1D modelとMod.1D modelは共に異方性を過小評価している。

#### b) 格子平均断面積

Table 3に各モデルより得られた格子平均マイクロ断面積を示す。3種類の反応共に30-50群ではCenter-line 1D modelが最も2D modelに近く、次いでMod.1D model, Simple 1D modelの順番となっている。U-238 captureの40群では、Center-line 1D modelは2D modelを5.3%過大評価しているが、Mod.1D modelとSimple 1D modelはこの2倍程度の誤差をもっている。

しかし高速群(特に1群)ではCenter-line 1D modelが2D modelと最も誤差が大きく、Table 3のように1群のU-238 captureを0.5%過小評価しており、Pu-239 fissionを2.2%過小評価している。これに対してMod.1D modelの

U-238 capture の過小評価は 0.3% であり、Pu-239 fission の過小評価は 0.7% となっている。

Table 4 に各モデルより得られた格子平均マクロ断面積を示す。格子平均マイクロ断面積と同様の傾向が格子平均マクロ断面積についても現れている。高速群では 3 種の 1 次元モデル共に  $\Sigma a$ ,  $\nu \Sigma f$  を過小評価しており、Center-line 1D model が 2D model と最も誤差が大きい。しかし最も 2D model と誤差が小さい Mod.1D model でも  $\Sigma a$  を 0.2%、 $\nu \Sigma f$  を 0.4% を過小評価している。

又 Table 4 より、共鳴エネルギー群では Center-line 1D model が 2D model と最も誤差が小さいことがわかる。共鳴エネルギー群でも格子平均マイクロ断面積と同様の傾向が現れている。

### c) 格子内中性子束分布

各モデルの 1 群の格子内中性子束分布を Table 5、Fig. 2 に示す。3 種類の 1 次元モデルのなかでは Mod.1D model が最もピークが高く、次いで Simple 1D model、Center-line 1D model の順番となっている。各 1 次元モデルのプレートごとのマクロ断面積を Table 6 に示す。Table 6 より Center-line 1D model のピークより Simple 1D model のピークの方が高く、Simple 1D model のピークより Mod.1D model のピークの方が高い理由は次のように考えられる。

(1) 燃料プレートでは Mod.1D model と Simple 1D model の  $\nu \Sigma f$  は一致しているのに対して  $\Sigma a$  は Mod.1D model の方が小さくなっている。(structure material が非燃料プレートにスミアされたため) この  $\Sigma a$  の減少の割合は Table 5 の ( ) 内に示されているように Pu-ミートで最も大きくなっており、Pu-ミートで 1.2%、U-238 で 2% となっている。又、Mod.1D model では非燃料プレートの  $\Sigma a$  が Simple 1D model に比べて増加している。このために Pu-ミートでのピークは Mod.1D model の方が Simple 1D model より高くなっていると考えられる。

(2) Simple 1D model ni に対する Center-line 1D model のプレートごとのマクロ断面積の % 差は Table 6 に示されており、これから燃料プレートでの  $\Sigma a$ 、 $\nu \Sigma f$  の 2 モデル間での % 差は、

	$\Sigma a$	$\nu \Sigma f$	差
Pu-ミート	10.9	12.5	1.6
U-238	7.1	8.8	1.7
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	5.0	8.8	3.8

となる。 $\Sigma a$ と $\nu \Sigma f$ の2モデル間の%差の違いはPu-ミートで最も小さいためCenter-line 1D modelの格子内中性子束分布がフラットになると考えられる。

またCenter-line 1D modelではstructure materialが除去されるためNa-プレートにおける $\Sigma a$ がSimple 1D modelより小さくなり、これも格子内中性子束分布をフラットにさせている一因と考えられる。

#### 4. 結論

ZPPR-9 炉心のシングル燃料ドロワーについて70群格子計算を3種の1次元モデル (Simple 1D model, Modified 1D model, Center-line 1D model) と2次元モデルを用いて行い、得られた格子平均断面積と異方性拡散係数を比較した。この結果単一の1次元モデルでは格子パラメーターをすべて精度よく評価できない事がわかった。



-- 参考文献 --

- (1) T. Takano and Y. Ishiguro : JAERI-M82-135 (1982)
- (2) S. Ono, E. Wachi, T. Takeda and T. Sekiya : Technol.  
Rep. of Osaka University, 33, 207 (1983).
- (3) T. Tone : J. Nucl. Sci. Technol., 12[8], 467 (1975).
- (4) P. Benoist : Rapport CEA-R-2278 (1964).

Table 1 Energy Group Structure of 70 Groups

Group	Upper energy	Lower energy	lethargy width	Fission Spectra*
7	18	70		
1	1	10.0 (MeV)	7.7000 (MeV)	0.250 0.3400 E-3
	2	7.7000	6.0653	0.250 2.2710 E-2
1	3	6.0653	4.7237	0.250 4.5069 E-2
	4	4.7237	3.6700	0.250 7.3294 E-2
3	5	3.6700	2.0650	0.250 9.7420 E-2
	6	2.0650	2.2313	0.250 1.1210 E-1
2	7	2.2313	1.7377	0.250 1.1520 E-1
	8	1.7377	1.3534	0.250 1.0037 E-1
5	9	1.3534	1.0540	0.250 9.5137 E-2
	10	1.0540	0.82005	0.250 7.9137 E-2
6	11	0.82005	0.63920	0.250 6.3134 E-2
	12	0.63920	0.49707	0.250 4.0710 E-2
	13	0.49707	0.38774	0.250 3.6643 E-2
3	14	0.38774	0.30197	0.250 2.7021 E-2
	15	0.30197	0.23510	0.250 1.9610 E-2
	16	0.23510	0.18316	0.250 1.4072 E-2
8	17	0.18316	0.14264	0.250 9.9907 E-3
	18	0.14264	0.11109	0.250 7.0524 E-3
	19	0.11109 (MeV)	0.086517 (MeV)	0.250 4.9459 E-3
9	20	06.517 (KeV)	67.379 (KeV)	0.250 3.4531 E-3
	21	67.379	52.475	0.250 2.4025 E-3
	22	52.475	40.060	0.250 1.6671 E-3
4	23	40.060	31.070	0.250 1.1543 E-3
	24	31.070	24.700	0.250 7.9794 E-4
	25	24.700	19.305	0.250 5.5009 E-4
11	26	19.305	15.034	0.250 3.7995 E-4
	27	15.034	11.709	0.250 2.6105 E-4
	28	11.709	9.1100	0.250 1.8035 E-4
12	29	9.1100	7.1017	0.250 1.2416 E-4
	30	7.1017	5.5300	0.250 0.5444 E-5
	31	5.5300	4.3074	0.250 5.0704 E-5
5	32	4.3074	3.3546	0.250 4.0433 E-5
	33	3.3546	2.6126	0.250 2.7006 E-5
	34	2.6126	2.0347	0.250 1.9120 E-5

239 Pu

Group	Upper energy	Lower energy	lethargy width	Fission Spectra*	
5	14	35	2.0347	1.5046	0.250 1.3146 E-5
	36	1.5046	1.2341	0.250 9.0376 E-6	
	37	1.2341 (KeV)	0.96112 (KeV)	0.250 5.3750 E-6	
15	38	961.12 (eV)	740.52 (eV)	0.250 0.0	
	39	740.52	502.95	0.250 0.0	
	40	502.95	454.00	0.250 0.0	
6	16	41	454.00	353.50	0.250 0.0
	42	353.50	275.36	0.250 0.0	
	43	275.36	214.45	0.250 0.0	
17	44	214.45	167.02	0.250 0.0	
	45	167.02	130.07	0.250 0.0	
	46	130.07	101.30	0.250 0.0	
7	47	101.30	70.093	0.250 0.0	
	48	70.093	61.442	0.250 0.0	
	49	61.442	47.051	0.250 0.0	
	50	47.051	37.267	0.250 0.0	
	51	37.267	29.023	0.250 0.0	
	52	29.023	22.603	0.250 0.0	
	53	22.603	17.603	0.250 0.0	
	54	17.603	13.710	0.250 0.0	
	55	13.710	10.677	0.250 0.0	
	56	10.677	8.3153	0.250 0.0	
	57	8.3153	6.4760	0.250 0.0	
	58	6.4760	5.0435	0.250 0.0	
	59	5.0435	3.9279	0.250 0.0	
	60	3.9279	3.0590	0.250 0.0	
	61	3.0590	2.3924	0.250 0.0	
	62	2.3924	1.8554	0.250 0.0	
	63	1.8554	1.4450	0.250 0.0	
	64	1.4450	1.1254	0.250 0.0	
	65	1.1254	0.87643	0.250 0.0	
66	0.87642	0.68256	0.250 0.0		
67	0.68256	0.53150	0.250 0.0		
68	0.53150	0.41399	0.250 0.0		
69	0.41399	0.32242	0.250 0.0		
70	0.32242 (eV)	10 <sup>-5</sup> (eV)	10.65	0.0	

Table 2 Comparison of Diffusion Coefficient

a) Benoist Isotropic Diffusion Coefficient

Group	Mod. 1D	Simple 1D	2D
1	3.8128 (-0.30)	3.8198 (-0.12)	3.8243
10	1.9458 (-0.71)	1.9504 (-0.48)	1.9567
20	1.2674 (-2.17)	1.2733 (-1.71)	1.2955
30	7.2134-1 (-3.17)	7.2205-1 (-3.07)	7.4493-1
40	8.8322-1 (-4.35)	8.8908-1 (-3.72)	9.2341-1
50	6.8330-1 (-6.05)	6.8967-1 (-5.18)	9.2341-1
60	9.0250-1 (-3.56)	9.0700-1 (-3.03)	9.3537-1
70	6.4132-1 (-4.15)	6.4154-1 (-4.11)	6.6906-1

\* Percent difference from the 2D model

Table 2 Continued

b) Anisotropy of Diffusion Coefficient

Group	Mod.1D	Simple 1D	2D
1	0.586	0.772	0.888
10	2.328	2.570	3.061
20	1.902	2.375	4.159
30	1.484	1.649	4.769
40	2.594	2.365	5.998
50	7.402	8.628	11.808
60	2.239	2.800	6.013

Table 3 Cell-averaged Microscopic Cross Section

a) U-238 capture

Group	Percent difference from 2D model			2D model (barn)
	Mod. 1D	Simple 1D	Center-line	
1	-0.33	-0.59	-0.48	4.76118-3
10	-0.15	-0.16	0.00	1.27064-1
20	0.03	0.08	0.03	2.37337-1
30	0.24	0.85	-0.87	6.57927-1
40	10.29	11.67	5.31	9.46183-1
50	3.57	4.88	-1.25	1.27779
60	-0.00	-0.10	-0.29	6.03124-1
70	1.79	0.18	-2.09	7.12005-1

Table 3 Continued

b) Pu-239 capture

Group	Percent difference from 2D model			2D model (barn)
	Mod. 1D	Simple 1D	Center-line	
1	-0.58	-1.42	-2.14	3.81370-6
10	-0.32	-0.54	-0.12	7.57722-2
20	0.09	0.12	-2.74	3.32526-1
30	0.61	0.87	0.13	1.57042
40	11.12	11.95	9.46	5.94345
50	26.12	28.40	20.78	1.41451+1
60	0.02	0.46	0.06	1.12861
70	4.31	6.55	-2.57	5.16554+1

Table 3 Continued

c) Pu-239 fission

Group	Percent difference from 2D model			2D model (barn)
	Mod. 1D	Simple 1D	Center-line	
1	-0.66	-1.49	-2.20	2.84077
10	-0.32	-0.54	-0.12	1.89976
20	0.09	0.11	-0.03	1.61996
30	0.65	0.92	0.16	2.06297
40	9.17	9.97	7.63	1.05704+1
50	13.75	15.26	10.61	7.43174
60	0.02	0.45	0.06	9.92708
70	3.98	6.19	-2.85	7.91128+1

Table 4 Cell-averaged Macroscopic Cross Section

a)  $\Sigma a$

Group	Percent difference from 2D model			2D model
	Mod. 1D	Simple 1D	Center-line	
1	-0.21	-0.45	-0.69	1.62992-2
10	-0.24	-0.38	-0.08	3.26429-3
20	0.05	0.08	0.00	4.02456-3
30	0.34	0.78	-0.44	9.61812-3
40	8.99	9.91	6.52	2.52223-2
50	11.66	12.29	7.26	5.06084-2
60	0.12	0.24	0.09	2.20983-2
70	3.66	5.07	-1.82	1.48623-1



Table 4 Continued

b)  $\nu \Sigma f$

Group	Percent difference from 2D model			2D model
	Mod. 1D	Simple 1D	Center-line	
1	-0.43	-0.85	-0.96	4.35654-2
10	-0.31	-0.52	-0.11	6.05004-3
20	0.09	0.11	-0.03	4.34484-3
30	0.62	0.88	0.14	5.60959-3
40	8.77	9.54	7.28	2.82445-2
50	7.16	8.47	4.40	2.25501-2
60	0.01	0.41	0.03	2.83757-2
70	3.88	5.97	-2.86	2.11333-1

Table 4 Continued

c)  $\Sigma t r$

Group	Percent difference from 2D model			2D model
	Mod. 1D	Simple 1D	Center-line	
1	0.03	0.01	-0.42	8.78148-2
10	-0.02	-0.02	-0.16	1.73802-1
20	-0.00	0.00	0.04	2.67999-1
30	-0.07	-0.02	0.02	4.70430-1
40	1.12	1.20	1.12	3.81969-1
50	1.68	1.86	1.50	4.96945-1
60	0.28	0.10	0.36	3.78465-1
70	2.36	1.85	1.41	5.15447-1

Table 5 Intra Cell Flux Distribution

a) 1st group

Region	Mod.1D	Simple 1D	Center-line	2D
1. matrix+ drawer	0.887	0.885	0.886	0.881
2. U308	0.913	0.912	0.913	0.908
3. U238	0.955	0.957	0.961	0.953
4. Na	1.039	1.041	1.043	1.043
5. Pu-meat	1.274	1.263	1.254	1.275
6. Na	1.066	1.065	1.063	1.070
7. Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.952	0.956	0.957	0.952
8. Fe203	0.906	0.910	0.911	0.906
9. U308	0.894	0.894	0.895	0.889
10. matrix+ drawer	0.882	0.882	0.882	0.877

Table 5 Continued

a) 2nd group

Region	Mod.1D	Simple 1D	Center-line	2D
1. matrix+ drawer	0.899	0.898	0.899	0.894
2. U308	0.923	0.922	0.924	0.918
3. U238	0.955	0.957	0.961	0.953
4. Na	1.030	1.032	1.033	1.034
5. Pu-meat	1.249	1.239	1.230	1.250
6. Na	1.059	1.058	1.056	1.063
7. Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.959	0.963	0.965	0.960
8. Fe203	0.920	0.924	0.925	0.920
9. U308	0.908	0.909	0.910	0.905
10. matrix+ drawer	0.895	0.895	0.896	0.891

Table 6 1st Group Plate-wise Macro Cross Section

Region	Cross Section	Cell Model			$\{\Sigma(CL)/\Sigma(S.1D)-1\}$ x100
		Simple 1D	Mod.1D	C.L.	
matrix+ drawer	$\Sigma tr$	1.1893-1	1.2384-1	1.2092-1	1.68
	$\Sigma a$	1.0150-2	1.0569-2	1.0321-2	1.67
	$\nu \Sigma f$	--	--	--	
	$\Sigma s1 \rightarrow 1$	1.9349-2	2.0148-2	1.9673-3	1.67
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	$\Sigma tr$	9.4879-2	8.7142-2	9.4766-2	-0.12
	$\Sigma a$	1.9271-2	1.8612-2 (-3.42)*	2.0240-2	5.03
	$\nu \Sigma f$	5.2928-2	5.2928-2	5.7559-2	8.75
	$\Sigma s1 \rightarrow 1$	1.9425-2	1.8167-2	1.9756-2	1.67
U238	$\Sigma tr$	1.4869-1	1.4095-1	1.5328-1	3.09
	$\Sigma a$	4.3252-2	4.2592-2 (-1.53)	4.6319-2	7.09
	$\nu \Sigma f$	1.5463-1	1.5463-1	1.6816-1	8.75
	$\Sigma s1 \rightarrow 1$	2.6614-2	2.5355-3	2.7573-2	3.60
Na+can	$\Sigma tr$	4.7392-2	5.2307-2	4.2568-2	10.18
	$\Sigma a$	3.7876-3	4.2067-3	3.3522-2	-11.50
	$\nu \Sigma f$	---	---	---	
	$\Sigma s1 \rightarrow 1$	6.2664-4	7.0662-3	5.3545-3	-14.55
Pu-meat	$\Sigma tr$	1.3552-1	1.2679-1	1.4259-1	5.21
	$\Sigma a$	4.8324-2	4.2765-2 (-11.5)	5.3604-2	10.93
	$\nu \Sigma f$	1.8549-1	1.8549-1	2.0861-1	12.46
	$\Sigma s1 \rightarrow 1$	2.7408-2	2.6149-2	2.9407-2	7.29

\*  $\{\Sigma(Mod.1D)/\Sigma(S.1D)-1\}$  x100

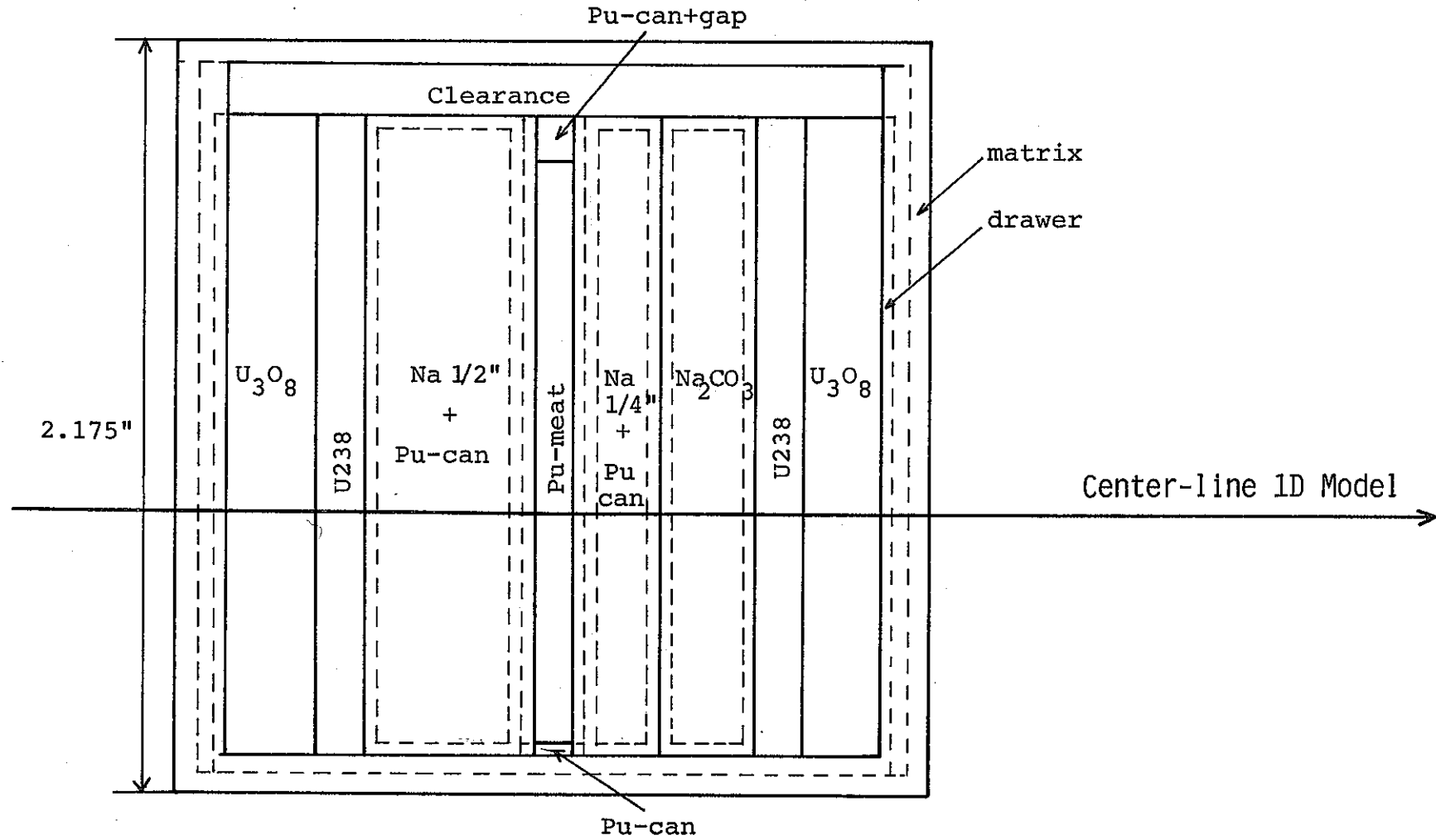


Fig. 1 2-D Calculation Model of ZPPR-9 Inner Core Single Fuel Drawer

0.897	0.911	0.952	0.994	1.007	0.995	0.950	0.918	0.895	0.894
0.889	0.915	0.954	0.999	1.019	1.003	0.949	0.917	0.899	0.885
0.886	0.913	0.952	1.006	1.064 cangap	1.015	0.945	0.911	0.896	0.882
0.886	0.913	0.958	1.049	1.282 Pumeat	1.076	0.957	0.910	0.894	0.882
0.872	0.894 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0.938 U238	1.001 Na	1.101 Pucan	1.013 Na	0.936 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.896 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.878 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0.868
0.871	0.887	0.928	0.990	1.054	1.003	0.929	0.890	0.871	0.868

Fig. 2 Intra-cell Flux Distribution of 2D Model  
a) 1st group

0.897	0.911	0.952	0.994	1.007	0.995	0.950	0.918	0.895	0.894
0.889	0.915	0.954	0.999	1.019	1.003	0.949	0.917	0.899	0.885
0.886	0.913	0.952	1.006	1.064 cangap	1.015	0.945	0.911	0.896	0.882
0.886	0.913	0.958	1.049	1.282 Pumeat	1.076	0.957	0.910	0.894	0.882
0.872	0.894 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0.938 U238	1.001 Na	1.101 Pucan	1.013 Na	0.936 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.896 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.878 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0.868
0.871	0.887	0.928	0.990	1.054	1.003	0.929	0.890	0.871	0.868

Fig. 2 Intra-cell Flux Distribution of 2D Model  
b) 2nd group



## 第II部

# 格子均質化に対する統一理論

## 第二部 格子均質化に対する統一理論

### はじめに

輸送摂動論に基づき格子の反応度を保存する中性子漏洩、吸収、散乱及び核分裂断面積を導出した。この方式は、中性子漏れのない格子、中性子漏れが顕著な炉周辺部の格子、さらには制御棒等のsingularityを含む格子に対しても応用できる。炉中心近傍の格子に対しては、中性子束の巨視的分布は $\exp(i\vec{B}\cdot\vec{r})$ と表され、このような場合には方向依存輸送断面積の逆数の1/3で表される方向依存拡散係数は、Benoistの異方性拡散係数<sup>(1)</sup>と一致し、他の断面積は格子内の中性子束分布を重みとして均質化する従来よく用いられる均質断面積と一致する。制御棒等のsingularityと燃料から構成されるスーパーセルでは、軸方向（プレートの場合はプレート平行方向）拡散係数は統一拡散係数<sup>(2)</sup>とよく似た形式となり、径方向（プレート垂直方向）拡散係数は中性子束及び随伴中性子束のP1成分を含む新形式となる。又、均質断面積はRowland<sup>(3)</sup>のものと一致する。

## 目次

1. 序論
2. 新しい方向依存拡散係数の基礎理論
3. 格子平均定数に対する近似式
  - 3.1 無限体系
  - 3.2 スーパーセル計算
    - 3.2.1 プレート（ピン）平行方向の拡散係数
    - 3.2.2 プレート（ピン）垂直方向の拡散係数
    - 3.2.3 格子平均断面積
4. まとめ並びに今後の研究課題

List of Figures

Fig. 3.2.1                      Super-cell Model

## 1. 序論

炉心計算は、通常、格子の均質断面積を用いて行われる。格子の均質パラメータとしては、各種断面積の他に中性子ストリーミングを考慮するための方向依存拡散係数が必要となる。これらの格子パラメータは、通常、無限格子計算より得られた中性子束分布を重みとして計算され、方向依存拡散係数はBenoistの式に基づき計算される。Benoistの方向依存拡散係数は元来、輸送理論により得られた中性子漏れを拡散理論で再現する為に導出されたものである。このため、Benoistの拡散係数を使用した場合、拡散計算にある程度の輸送効果が含まれることになる。これは、スーパーセルにBenoistの式を拡張した統一拡散係数の場合にみられ、統一拡散係数を用いると局所的な輸送効果が取り入れられることが示された。しかしながら、一般にBenoistの拡散係数は中性子ストリーミング効果を評価する為にのみ使用され、輸送補正はこれとは別に行われる。つまり、輸送補正が2重に行われる可能性がある。

上の問題に加えて、制御棒や制御棒フォロワー等のsingularityを含む格子及び炉周辺の格子に対して無限格子モデルを適用することには多少の疑問が生ずる。このような場合、格子パラメータは、異種の格子よりなるスーパーセルで計算された中性子束分布を重みとして計算されるが、各格子内での反応率が必ずしも保存されないという問題が生ずる。特に制御棒に対してこのような方法を適用した場合、制御棒ワースが正しく評価されないことが指摘されている。このような非均質格子を均質化するために種々の方法が提案されている。統一拡散係数は、中性子ストリーミングの評価に異種格子間の干渉効果を取り入れるために、TakedaによりBenoistの方法に基づき導出されたものであるが、導出の際に、他の格子平均断面積との統一性は考えられていなかった。又、Benoistの方式は巨視的中性子束分布が $\exp(i\vec{B}\cdot\vec{r})$ で表される炉中心近傍の格子に対しては適用できるが、今問題とする領域の格子に対する適用性には疑問がある。

以上の様な背景を考え、本章では輸送摂動論に基づき、統一された格子平均断面積及び方向依存拡散係数を導出する。輸送理論に基づくので、輸送効果は取り入れられることになり、中性子ストリーミング効果のみを方向依存拡散係数によ

って評価できることになる。格子の均質化を摂動とみなし、格子内の非均質性を考慮した状態を摂動前、均質化した後の状態を摂動後とする。均質断面積は、摂動前後の各格子の反応度の中性子漏洩成分、吸収成分、散乱成分及び核分裂成分を保存させることにより求められる。中性子漏洩成分の各方向成分を考えることにより、方向依存輸送断面積が得られ、この逆数の1/3を方向依存拡散係数とする。

導出された格子平均断面積及び方向依存拡散係数は、炉内の任意の格子に対して統一して適用可能である。第3節では、第2節で導出された理論に対する近似式を求める。第3.1節では、本方式を無限格子に適用し、通常使用されている、中性子束分布を重みとした格子平均断面積及びBenoistの拡散係数との関係を調べる。第3.2節では、本方式をスーパーセルに適用し、Rowlandの断面積及びTakedaの統一拡散係数との関係を調べる。

## 2 新しい方向依存拡散係数の基礎理論

本節では、輸送摂動論に基づき、格子平均断面積並びに方向依存拡散係数を導出する。

プレートごとの非均質性を取り扱う体系を摂動前、均質化した後の状態を摂動後とする。

摂動前（非均質体系）の多群輸送方程式は

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \text{grad} \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_t^g(\vec{r}) \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ &= \sum_g \int \Sigma_s^{g \rightarrow g'}(\vec{r}, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi^{g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \sum_{g'} \frac{\chi^{g'}}{4\pi k_{\text{eff}}^*} \nu \Sigma_f^{g'}(\vec{r}) \int \phi^{g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \end{aligned} \quad (1)$$

摂動後（均質体系）の多群随伴輸送方程式は

$$\begin{aligned} & -\vec{\Omega} \cdot \text{grad} \psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_t^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ &= \sum_g \int \Sigma_s^{*g \rightarrow g'}(\vec{r}, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \psi^{*g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \sum_{g'} \frac{\chi^{g'}}{4\pi k_{\text{eff}}^*} \nu \Sigma_f^{*g'}(\vec{r}) \int \psi^{*g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、摂動後は、断面積は各格子内で一定となり、その断面積を

$$\Sigma_x^{*g} \quad (x = t, s, f)$$

で表す。又、 $\psi^{*g}$ 、 $k_{\text{eff}}^*$  は摂動後の随伴中性子束、中性子実効増倍率である。

(1)式に  $\psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  を乗じ、(2)式に  $\phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega})$  を乗じて、得られた式を差し引き、方向  $\vec{\Omega}$  及び空間  $\vec{r}$  について積分すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\delta k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}} k_{\text{eff}}^*} = & \frac{1}{N} \left( - \sum_g \int \delta \Sigma_t^g(\vec{r}) \psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{r} d\vec{\Omega} \right. \\ & + \sum_{g, g'} \int \delta \Sigma_s^{g \rightarrow g'}(\vec{r}, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \psi^{*g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{r} d\vec{\Omega} d\vec{\Omega}' \\ & \left. + \sum_{g, g'} \frac{\chi^{g'}}{4\pi k_{\text{eff}}^*} \int \delta \nu \Sigma_f^{g'}(\vec{r}) \psi^{*g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{r} d\vec{\Omega} d\vec{\Omega}' \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{但し } N = \sum_{g,g'} \frac{\chi^{g'}}{4\pi} \int v \Sigma_F^g(\vec{r}) \Psi^{*g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \Phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{r} d\vec{\Omega} d\vec{\Omega}' \quad (4)$$

$$\delta \Sigma_x^g = \Sigma_x^{*g} - \Sigma_x^g \quad (x = t, s, f) \quad (5)$$

(3)式において、散乱が等方的であると仮定する。

$$\Sigma_s^{g \rightarrow g'}(\vec{r}, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') = \frac{1}{4\pi} \Sigma_s^{g \rightarrow g'}(\vec{r}) \quad (6)$$

この近似は、高速炉の解析では妥当なものであることが確かめられており、通常、全断面積  $\Sigma_t^g$  を輸送断面積  $\Sigma_{tr}^g$  に置き換えて、散乱の  $P_1$  成分を考慮している。

(6)式を用いると(3)式は次式になる。

$$\begin{aligned} \frac{\delta k_{eff}}{k_{eff}^*} &= \frac{1}{N_0} \left[ - \sum_g \int \delta \Sigma_{tr}^g(\vec{r}) \Psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \{ 4\pi \Phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) - \Phi^g(\vec{r}) \} d\vec{r} d\vec{\Omega} \right. \\ &\quad - \sum_g \int \delta \Sigma_a^g(\vec{r}) \Psi_0^{*g}(\vec{r}) \Phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} \\ &\quad + \sum_{g,g'} \int \delta \Sigma_s^{g \rightarrow g'}(\vec{r}) \{ \Psi_0^{*g'}(\vec{r}) - \Psi_0^{*g}(\vec{r}) \} \Phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} \\ &\quad \left. + \sum_{g,g'} \frac{\chi^{g'}}{k_{eff}^*} \int \delta v \Sigma_F^g(\vec{r}) \Psi_0^{*g'}(\vec{r}) \Phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

但し

$$N_0 = \sum_{g,g'} \chi^{g'} \int \delta v \Sigma_F^g(\vec{r}) \Psi_0^{*g'}(\vec{r}) \Phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} \quad (8)$$

$$\Phi_0^g(\vec{r}) = \int \Phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} \quad (9)$$

$$\Psi_0^{*g}(\vec{r}) = \int \Psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} \quad (10)$$

(7)式右辺の第1項～第4項が、摂動前後における反応度変化の中性子漏洩成分、吸収成分、減速成分、核分裂成分である。格子の均質化を行う場合、反応度を保存させる必要があるので、 $\delta k_{eff} = 0$  とし、さらに各成分を零にしなければならない。すなわち、(7)式より、各格子に対して



$$\int_{\text{cell}} \delta \Sigma_{\text{tr}}^g(\vec{r}) \Psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \{4\pi \Phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) - \Phi_0^g(\vec{r})\} d\vec{r} d\vec{\Omega} = 0 \quad (11)$$

$$\int_{\text{cell}} \delta \Sigma_a^g(\vec{r}) \Psi_0^{*g}(\vec{r}) \Phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} = 0 \quad (12)$$

$$\int_{\text{cell}} \delta \Sigma_s^{g \rightarrow g'}(\vec{r}) \{ \Psi_0^{*g'}(\vec{r}) - \Psi_0^{*g}(\vec{r}) \} \Phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} = 0 \quad (13)$$

$$\int_{\text{cell}} \delta \nu \Sigma_f^g(\vec{r}) \Phi_0^g(\vec{r}) \sum_{g'} \chi^{g'} \Psi_0^{*g'}(\vec{r}) d\vec{r} = 0 \quad (14)$$

(11) 式は、 $\Phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega})$  及び  $\Psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  に対する  $P_1$  近似

$$\Phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{1}{4\pi} \{ \Phi_0^g(\vec{r}) + 3\vec{\Omega} \cdot \Phi_1^g(\vec{r}) \} \quad (15)$$

$$\Psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{1}{4\pi} \{ \Psi_0^{*g}(\vec{r}) + 3\vec{\Omega} \cdot \Psi_1^{*g}(\vec{r}) \} \quad (16)$$

を用いると、 $P_0$  成分が  $\vec{\Omega}$  に関する積分のため消えて、次式になる。

$$\int_{\text{cell}} \delta \Sigma_{\text{tr}}^g(\vec{r}) \overline{\Psi_1^{*g}}(\vec{r}) \overline{\Phi_1^g}(\vec{r}) d\vec{r} = 0 \quad (17)$$

ここで、 $\overline{\Psi_1^{*g}}(\vec{r})$ 、 $\overline{\Phi_1^g}(\vec{r})$  は、各方向の中性子もれの合計を示している。

今、各方向毎に中性子漏洩成分が零とすると、均質化した後の輸送断面積  $\Sigma_{\text{tr}}^{*g}$  も方向依存となり、 $k$  方向輸送断面積  $\Sigma_{\text{tr},k}^{*g}$  は

$$\Sigma_{\text{tr},k}^{*g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_{\text{tr}}^g(\vec{r}) \Psi_{1k}^{*g}(\vec{r}) \Phi_{1k}^g(\vec{r}) d\vec{r} / \int_{\text{cell}} \Psi_{1k}^{*g}(\vec{r}) \Phi_{1k}^g(\vec{r}) d\vec{r} \quad (18)$$

で与えられる。

吸収断面積、散乱断面積及び核分裂断面積は、(12)~(14)式より、

$$\Sigma_a^{*g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_a^g(\vec{r}) \Phi_0^g(\vec{r}) \Psi_0^{*g}(\vec{r}) d\vec{r} \quad / \quad \int_{\text{cell}} \Phi_0^g(\vec{r}) \Psi_0^{*g}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (19)$$

$$\Sigma_s^{*g \rightarrow g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_s^{g \rightarrow g'}(\vec{r}) \Phi_0^g(\vec{r}) \{ \Psi_0^{*g'}(\vec{r}) - \Psi_0^{*g}(\vec{r}) \} d\vec{r} \quad / \quad \int_{\text{cell}} \Phi_0^g(\vec{r}) \{ \Psi_0^{*g'}(\vec{r}) - \Psi_0^{*g}(\vec{r}) \} d\vec{r} \quad (20)$$

$$\nu \Sigma_f^{*g} = \int_{\text{cell}} \nu \Sigma_f^g(\vec{r}) \Phi_0^g(\vec{r}) \sum_{g'} \chi^{g'} \Psi_0^{*g'}(\vec{r}) d\vec{r} \quad / \quad \int_{\text{cell}} \Phi_0^g(\vec{r}) \sum_{g'} \chi^{g'} \Psi_0^{*g'}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (21)$$

で与えられる。

### 3 格子平均定数に対する近似式

#### 3.1 無限体系

同一の格子からなる無限格子モデルや、炉中心付近では均質輸送計算による随伴中性子束  $\Psi_0^{*g}(\vec{r})$  及び  $\Psi_{1k}^{*g}(\vec{r})$  はフラットとなり、格子内での空間依存性がなくなる。このとき、(18)-(21)式は以下のようなになる。

$$\Sigma_{tr,k}^{*g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_{tr}^g(\vec{r}) \phi_{1k}^g(\vec{r}) d\vec{r} / \int_{\text{cell}} \phi_{1k}^g(\vec{r}) d\vec{r} \quad (22)$$

$$\Sigma_a^{*g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_a^g(\vec{r}) \phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} / \int_{\text{cell}} \phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} \quad (23)$$

$$\Sigma_s^{*g \rightarrow g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_s^{g \rightarrow g}(\vec{r}) \phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} / \int_{\text{cell}} \phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} \quad (24)$$

$$v\Sigma_f^{*g} = \int_{\text{cell}} v\Sigma_f^g(\vec{r}) \phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} / \int_{\text{cell}} \phi_0^g(\vec{r}) d\vec{r} \quad (25)$$

今、摂動前の中性子束  $\phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega})$  及び摂動後の随伴中性子束  $\Psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  を、macroscopic flux  $\exp(i\vec{B} \cdot \vec{r})$  と microscopic flux  $\phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega})$  及び  $\psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  で表す。すなわち、

$$\phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \exp(i\vec{B} \cdot \vec{r}) \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (26)$$

$$\Psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \exp(i\vec{B} \cdot \vec{r}) \psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (27)$$

と仮定する。(26)及び(27)式をそれぞれ(1)及び(2)式に代入し、それぞれ両辺を  $\exp(i\vec{B} \cdot \vec{r})$  で割ると、次式を得る。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \text{grad} \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \left\{ \Sigma_t^g(\vec{r}) + i\vec{B} \cdot \vec{\Omega} \right\} \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ &= \sum_{g'} \int \Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\vec{r}, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \sum_{g'} \frac{\chi^g}{4\pi k_{\text{eff}}} v\Sigma_f^{g'}(\vec{r}) \int \phi^{g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \quad (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\vec{\Omega} \cdot \text{grad} \psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \left\{ \Sigma_{\vec{t}}^{*g}(\vec{r}) - i\vec{B} \cdot \vec{\Omega} \right\} \psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\
& = \sum_{g'} \int \Sigma_{\vec{s}}^{*g+g'}(\vec{r}, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \psi^{*g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \sum_{g'} \frac{\chi^{g'}}{4\pi k_{\text{eff}}^*} \nu \Sigma_{\vec{f}}^{*g}(\vec{r}) \int \psi^{*g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}'
\end{aligned} \quad (29)$$

(28)式において、

$$\phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + i\vec{B} \cdot \overline{\phi^{Ig}}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (30)$$

とおく。ここで、 $\overline{\phi^{Ig}}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  はk方向成分として $\phi^{Ik, g}(\vec{r}, \vec{\Omega})$ をもつベクトルである。このとき、(28)式の実部及び虚部に対して、次式が成立する。

$$\begin{aligned}
& \vec{\Omega} \cdot \text{grad} \phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_{\vec{t}}^g(\vec{r}) \phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) - (\vec{B} \cdot \vec{\Omega}) (\vec{B} \cdot \overline{\phi^{Ig}}(\vec{r}, \vec{\Omega})) \\
& = \sum_{g'} \int \Sigma_{\vec{s}}^{g'+g}(\vec{r}, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi^{Rg'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \sum_{g'} \frac{\chi^g}{4\pi k_{\text{eff}}} \nu \Sigma_{\vec{f}}^g(\vec{r}) \int \phi^{Rg'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}'
\end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
& -\vec{\Omega} \cdot \text{grad} \phi^{Ik, g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_{\vec{t}}^g(\vec{r}) \phi^{Ik, g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Omega_x \phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\
& = \sum_{g'} \int \Sigma_{\vec{s}}^{g'+g}(\vec{r}, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi^{Ik, g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \sum_{g'} \frac{\chi^g}{4\pi k_{\text{eff}}^*} \nu \Sigma_{\vec{f}}^g(\vec{r}) \int \phi^{Ik, g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}'
\end{aligned} \quad (32)$$

今、

$$\phi_{1k}^g(\vec{r}) = \exp(i\vec{B} \cdot \vec{r}) \left\{ \phi_{1k}^{Rg}(\vec{r}) + i \sum_{\xi} B_{\xi} \phi_{1k}^{I\xi, g}(\vec{r}) \right\} \quad (33)$$

とおくと、(22)式は

$$\Sigma_{\text{tr}, k}^{*g} = \frac{\int_{\text{cell}} \Sigma_{\text{tr}}^g(\vec{r}) \exp(i\vec{B} \cdot \vec{r}) \left\{ \phi_{1k}^{Rg}(\vec{r}) + i \sum_{\xi} B_{\xi} \phi_{1k}^{I\xi, g}(\vec{r}) \right\} d\vec{r}}{\int_{\text{cell}} \exp(i\vec{B} \cdot \vec{r}) \left\{ \phi_{1k}^{Rg}(\vec{r}) + i \sum_{\xi} B_{\xi} \phi_{1k}^{I\xi, g}(\vec{r}) \right\} d\vec{r}} \quad (34)$$

となる。ここで、 $\exp(i\vec{B} \cdot \vec{r})$ の格子内の変化を無視すると、対称格子では $\phi_{1k}^{Rg}(\vec{r})$

を含む積分が0となる。又、

$$\int \phi_{1k}^{I\xi, g}(\vec{r}) d\vec{r} = 0 \quad \text{for } \xi \neq k \quad (35)$$

これに対して、(32)式で、ソース項として  $-\Omega_k \phi_i^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  が含まれることより、 $\phi_{1k}^{Ik, g}(\vec{r})$  を含む項の積分は0にならない。ゆえに(34)式は

$$\Sigma_{tr, k}^{*g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_{tr}^g(\vec{r}) \phi_{1k}^{Ik, g}(\vec{r}) d\vec{r} \Big/ \int_{\text{cell}} \phi_{1k}^{Ik, g}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (36)$$

となる。

$\phi_{1k}^{Ik, g}(\vec{r})$  を求めるため、(32)式を積分型に変換する。(32)式の両辺に  $\Omega_k$  をかけて、領域j内で位置 $\vec{r}$ 及び全立体角について積分すると、

$$\begin{aligned} & \int_{V_j} d\vec{r} \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \Omega_k \phi^{Ik, g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ &= \int_{V_j} d\vec{r} \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \Omega_k \left\{ \int_0^\infty d\ell e^{-\widetilde{\Sigma}\ell} \left\{ -\Omega_k \phi_i^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \sum_{g'} \frac{1}{4\pi} \Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\vec{r}) \phi_0^{Ik, g'}(\vec{r}) + \sum_{g'} \frac{\chi^g}{4\pi k_{eff}} \nu \Sigma_f^{g'}(\vec{r}) \phi_0^{Ik, g'}(\vec{r}) \right\} \right\} \quad (37) \end{aligned}$$

$$\phi_{1k, j}^{Ik, g} = \frac{1}{V_j} \int_{V_j} d\vec{r} \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \Omega_k \phi^{Ik, g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad \text{とおくと}$$

$$\begin{aligned} \Sigma_j^g V_j \phi_{1k, j}^{Ik, g} &= \sum_i \int_{V_j} d\vec{r} \frac{1}{V_i} \int_{V_i} d\vec{r}' \frac{e^{-\widetilde{\Sigma}R}}{4\pi R^2} \Omega_k \left\{ -\Omega_k \phi_i^{Rg}(\vec{r}', \vec{\Omega}) + \sum_{g'} \frac{1}{4\pi} \Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\vec{r}') \phi_{0i}^{Ik, g'} \right. \\ & \quad \left. + \sum_{g'} \frac{\chi^g}{4\pi k_{eff}} \nu \Sigma_f^{g'}(\vec{r}') \phi_{0i}^{Ik, g'} \right\} \quad (38) \end{aligned}$$

(38)式は、衝突確率を用いて

$$\begin{aligned} \sum_j^g V_j \phi_{1k,j}^{Ik,g} = & \sum_i \left( -P_{ij,k}^g \phi_{0i}^{Rg} V_i / 3 + P_{ij,k}^{ig} \sum_{g'} \phi_{0i}^{Ik,g'} \sum_{s_i}^{g'+g} V_i / 3 \right. \\ & \left. + P_{ij,k}^{ig} \chi^g \sum_{g'} \phi_{0i}^{Ik,g'} \sum_{f_i}^{g'+g} V_i / 3 \right) \quad (39) \end{aligned}$$

但し

$$P_{ij,k}^g = \frac{\Sigma_j^g}{V_i} \int_{v_i} d\mathbf{r} \int_{v_j} d\mathbf{r}' \frac{e^{-\Sigma \mathbf{R}'}}{4\pi R'^2} 3\Omega_k^2 \quad (40)$$

$$P_{ij,k}^{ig} = \frac{\Sigma_j^g}{V_i} \int_{v_i} d\mathbf{r} \int_{v_j} d\mathbf{r}' \frac{e^{-\Sigma \mathbf{R}'}}{4\pi R'^2} 3\Omega_k \quad (41)$$

$P_{ij,k}^g$  及び  $P_{ij,k}^{ig}$  は、次の保存則を満たす。

$$\sum_j P_{ij,k}^g = 1 \quad (42)$$

$$\sum_j P_{ij,k}^{ig} = 0 \quad (43)$$

ゆえに、全体積について和をとった場合、(39)式で  $P_{ij,k}^{ig}$  を含む項は  $P_{ij,k}^g$  を含む項に対して無視できると考えると、次式を得る。

$$\sum_j^g V_j \phi_{1k,j}^{Ik,g} = \sum_i -P_{ij,k}^g \phi_{0i}^{Rg} V_i / 3 \quad (44)$$

$$\text{ゆえに、} \int_{\text{cell}} d\vec{r} \phi_{1k}^{Ik,g}(\vec{r}) \approx - \sum_j \left( \sum_i \frac{1}{3\Sigma_j^g} P_{ijk}^g \phi_{0i}^{Rg} V_i \right) \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \int_{\text{cell}} d\vec{r} \Sigma^g(\vec{r}) \phi_{1k}^{Ik,g}(\vec{r}) & \approx - \sum_j \left( \sum_i \frac{1}{3} P_{ijk}^g \phi_{0i}^{Rg} V_i \right) \\ & = - \sum_i \frac{1}{3} \phi_{0i}^{Rg} V_i \quad (46) \end{aligned}$$

よって、(36)式より

$$\Sigma_{tr,k}^{*g} = \frac{\sum_i \phi_{0i}^{Rg} V_i}{\sum_i \sum_j \frac{1}{\Sigma_j^g} P_{ijk}^g \phi_{0i}^{Rg} V_i} \quad (47)$$

方向依存拡散係数は

$$D_k^{*g} = \frac{1}{3\Sigma_{tr,k}^{*g}} = \frac{\sum_i \sum_j \frac{1}{3\Sigma_j^g} p_{ij,k}^g \phi_{0i}^{Rg} V_i}{\sum_i \phi_{0i}^{Rg} V_i} \quad (48)$$

となり、通常用いられているBenoist拡散係数と一致する。

格子平均断面積は、

$$\Sigma_x^{*g} = \frac{\sum_i \Sigma_{xi}^g \phi_{0i}^{Rg} V_i}{\sum_i \phi_{0i}^{Rg} V_i} \quad x = a, s, f \quad (49)$$

により与えられる。

### 3.2 スーパーセル計算

CR及びCRPと隣接する燃料炉心格子、また炉周辺の炉心格子とブランケット格子の干渉を考慮する為には、異種の格子から構成されるスーパーセルを用いる必要がある。後者の場合は、さらに中性子流の流れ込みを考える必要があるので、スーパーセル表面での境界条件を考えねばならない。本節では、第2節で導出した理論をプレート格子より構成されるスーパーセルに適用する。

#### 3.2.1 プレート（ピン）平行方向の拡散係数

プレート（ピン）平行方向をz方向とする。

$$\Sigma_{tr,z}^{*g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_{tr}^g(\vec{r}) \phi_{1z}^g(\vec{r}) \psi_{1z}^{*g}(\vec{r}) d\vec{r} \Big/ \int_{\text{cell}} \phi_{1z}^g(\vec{r}) \psi_{1z}^{*g}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (50)$$

ここで、

$$\phi_z^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \exp(iB_z z) \left\{ \phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + iB_z \phi^{Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \right\} \quad (51)$$

とおくと、 $\phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega})$   $\phi^{Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  は(31),(32)式を満たす。

(32)式で、 $\phi^{Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  に対するソースに  $-\Omega_z \phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  が含まれているので、無限セルの場合と同様にして、

$$\phi_{1z}^{Iz,g}(\vec{r}) = \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \Omega_z \phi^{Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = 0 \quad (52)$$

$\phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  に対しても、対称性より

$$\phi_{1z}^{Rz}(\vec{r}) = \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \Omega_z \phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = 0 \quad (53)$$

同様に



$$\psi_{1z}^{*Iz,g}(\vec{r}) \neq 0 \quad (54)$$

$$\psi_{1z}^{*Rg}(\vec{r}) = 0 \quad (55)$$

となるので、(50)式は

$$\Sigma_{tr,z}^{*g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_{tr}^g(\vec{r}) \phi_{1z}^{Iz,g}(\vec{r}) \psi_{1z}^{*Iz,g}(\vec{r}) d\vec{r} / \int_{\text{cell}} \phi_{1z}^{Iz,g}(\vec{r}) \psi_{1z}^{*Iz,g}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (56)$$

となる。(56)式を計算するためには、格子内の  $\phi_{1z}^{Iz,g}$ 、 $\psi_{1z}^{*Iz,g}$  の分布を計算すればよい。

(32)式を積分型に変換して、

$$\phi^{Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \phi^{Iz,g}(\vec{r}_s, \vec{\Omega}) e^{-\widetilde{\Sigma}R} + \int_0^R dR' e^{-\widetilde{\Sigma}R'} Q^g(\vec{r}', \vec{\Omega}) \quad (57)$$

但し、R は表面Sから領域jまでの距離であり、

$$Q^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) = -\Omega_z \phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \sum_{g'} \frac{1}{4\pi} \Sigma_s^{g'+g}(\vec{r}) \phi_0^{Iz,g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \sum_{g'} \frac{\chi^{g'}}{4\pi k_{eff}} \nu \Sigma_f^{g'}(\vec{r}) \phi_0^{Iz,g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (58)$$

$P_1$ 成分を求めるために、 $\int_{4\pi} d\vec{\Omega} \cdot \Omega_z$  を作用させると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \phi_{1z}^{Iz,g}(\vec{r}) &= \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \Omega_z \phi^{Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ &= \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \Omega_z \phi^{Iz,g}(\vec{r}_s, \vec{\Omega}) e^{-\widetilde{\Sigma}R} + \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \int_0^R dR' e^{-\widetilde{\Sigma}R'} Q^g(\vec{r}', \vec{\Omega}) \quad (59) \end{aligned}$$

領域j内の  $\phi_{1z}^{Iz,g}(\vec{r})$  の平均値を  $\phi_{1z,j}^{Iz,g}$  とすると

$$\begin{aligned} \Sigma_j^g V_j \phi_{1z,j}^{Iz,g} &= \int_{V_j} d\vec{r} \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \Omega_z \phi^{Iz,g}(\vec{r}_s, \vec{\Omega}) e^{-\widetilde{\Sigma}_R \Sigma_j^g} \\ &+ \int_{V_j} d\vec{r} \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \int_0^R dR' \Omega_z e^{-\widetilde{\Sigma}_R Q^g(\vec{r}, \vec{\Omega})} \Sigma_j^g \end{aligned} \quad (60)$$

第1項は  $d\vec{\Omega} = (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}_s) ds/R^2$ 、 $d\vec{r} = R^2 dR d\vec{\Omega}$  を用いて

$$\text{第1項} = \int ds \int d\vec{\Omega}_s (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}_s) \Omega_z \phi^{Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \left( \int dR e^{-\widetilde{\Sigma}_R \Sigma_j^g} \right) \quad (61)$$

ここで、 $\phi_{1z,in,sk}^{Iz,g}$  及び  $P_{skj,z}^g$  を次式で定義する。

$$\phi_{1z,in,sk}^{Iz,g} = \int_{2\pi\Theta} d\vec{\Omega}_{s_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}_{s_k}) \Omega_z \phi^{Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (62)$$

$$P_{skj,z}^g = \frac{\int_{S_k} ds \int d\vec{\Omega}_{s_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}_{s_k}) \Omega_z^2 \int dR e^{-\widetilde{\Sigma}_R \Sigma_j^g}}{\int_{S_k} ds \int d\vec{\Omega}_{s_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}_{s_k}) \Omega_z^2} \quad (63)$$

このとき、第1項は

$$\text{第1項} = \sum_{S_k} S_k \phi_{1z,in,sk}^{Iz,g} P_{skj,z}^g \quad S_k = S_0 \text{ or } S_1 \quad (64)$$

となる。

第2項は、無限体系の場合と同様にして

第2項

$$\begin{aligned}
 &= \int_{V_j} d\vec{r} \int_{V_i} \frac{d\vec{r}'}{R'^2} e^{-\widetilde{\Sigma}R'} \Sigma_j^g \Omega_z \left( -\Omega_z \phi^{Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \sum_{g'} \frac{1}{4\pi} \left\{ \Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\vec{r}) \phi_0^{Iz, g'}(\vec{r}) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{\chi^g}{k_{eff}} \nu \Sigma_f^{g'}(\vec{r}) \phi_0^{Iz, g'}(\vec{r}) \right\} \right) \\
 &= - \int_{V_j} d\vec{r} \int_{V_i} \frac{d\vec{r}'}{4\pi R'^2} e^{-\widetilde{\Sigma}R'} \Sigma_j^g \Omega_z^2 \phi_0^{Rg}(\vec{r}) \tag{65}
 \end{aligned}$$

領域*i*内での  $\phi_0^{Rg}(\vec{r})$  の平均値を  $\phi_{0i}^{Rg}$  とすると

第2項

$$\begin{aligned}
 &= - \sum_i V_i \phi_{0i}^{Rg} \frac{1}{3} \left( \frac{1}{V_i} \int_{V_j} d\vec{r} \int_{V_i} \frac{d\vec{r}'}{4\pi R'^2} e^{-\widetilde{\Sigma}R'} \Sigma_j^g 3\Omega_z^2 \right) \\
 &= - \sum_i \frac{1}{3} V_i \phi_{0i}^{Rg} P_{ij,z}^g \tag{66}
 \end{aligned}$$

但し

$$P_{ij,z}^g = \frac{1}{V_i} \int_{V_j} d\vec{r} \int_{V_i} \frac{d\vec{r}'}{4\pi R'^2} e^{-\widetilde{\Sigma}R'} \Sigma_j^g 3\Omega_z^2 \tag{67}$$

故に

$$\Sigma_j^g V_j \phi_{Iz,j}^{Iz,g} = \sum_{S_k} S_k \phi_{Iz,in,S_k}^{Iz,g} P_{S_k j,z}^g - \sum_i \frac{1}{3} V_i \phi_{0i}^{Rg} P_{ij,z}^g \tag{68}$$

次に流出カレント  $\phi_{Iz,out,S_k}^{Iz,g}$  をもとめる。

$$S_k \phi_{1z, \text{out}, Sk}^{Iz, g} = \int_{S_k} ds \int_{2\pi\Theta} d\vec{\Omega}_{S_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}) \Omega_z \phi^{Iz, g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (69)$$

と定義すると、(32)式より

$$S_k \phi_{1z, \text{out}, Sk}^{Iz, g} = \int_{S_k} ds \int_{2\pi\Theta} d\vec{\Omega}_{S_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}) \Omega_z \phi^{Iz, g}(\vec{r}_s, \vec{\Omega}) e^{-\widetilde{\Sigma}R} \\ + \int_{S_k} ds \int_{2\pi\Theta} d\vec{\Omega}_{S_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}) \Omega_z \int_0^R dR' e^{-\widetilde{\Sigma}R'} Q^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (70)$$

但し、 $Q^g(\vec{r}, \vec{\Omega})$  は(58)式で定義されたものである。

(70)式の右辺第1項は、次式で定義される  $P_{S1Sk, z}^g$

$$P_{S1Sk, z}^g = \frac{\int_{S_k} ds \int_{2\pi\Theta} d\vec{\Omega}_{S_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}) \Omega_z^2 e^{-\widetilde{\Sigma}R}}{\int_{S_k} ds \int_{2\pi\Theta} d\vec{\Omega}_{S_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}) \Omega_z^2} \quad (71)$$

を用いれば、次式になる。

$$\text{第1項} = S_1 \phi_{1z, \text{in}, S1}^{Iz, g} P_{S1Sk, z}^g \quad (72)$$

また、第2項は、

$$\text{第2項} = \int_{V_i} d\vec{r}' \int d\vec{\Omega} e^{-\widetilde{\Sigma}R'} Q^g(\vec{r}', \vec{\Omega}) \Omega_z \\ = - \int_{V_i} d\vec{r}' \int d\vec{\Omega} \frac{e^{-\widetilde{\Sigma}R'}}{4\pi} \Omega_z^2 \phi_0^{Rg}(\vec{r}') \\ = - \sum_i \frac{1}{3} V_i \phi_{0i}^{Rg} P_{iSk, z}^g \quad (73)$$

但し、

$$P_{iSk,z}^g = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} d\vec{r}' \left[ d\vec{\Omega} \frac{e^{-\widetilde{\Sigma}R'}}{4\pi} 3\Omega_z^2 \right] \quad (74)$$

故に

$$S_k \phi_{1z,out,Sk}^{Iz,g} = S_1 \phi_{1z,in,S1}^{Iz,g} P_{S1Sk,z}^g - \sum_i \frac{1}{3} V_i \phi_{0i}^{Rg} P_{iSk,z}^g \quad (75)$$

ここで、net current  $\phi_{1z,net,Sk}^{Iz,g}$  を次式で定義する。

$$\phi_{1z,net,Sk}^{Iz,g} = \phi_{1z,in,Sk}^{Iz,g} - \phi_{1z,out,Sk}^{Iz,g} \quad (76)$$

(75)式及び(76)式より、(68)式は  $\phi_{1z,net,Sk}^{Iz,g}$  で表されて、

$$\begin{aligned} \sum_j V_j \phi_{1z,j}^{Iz,g} = & - \sum_i \frac{1}{3} V_i \phi_{0i}^{Rg} \widetilde{P}_{ij,k}^g + \frac{1}{1 - P_{S0S1,z}^g P_{S1S0,z}^g} \\ & \times \left( S_0 \phi_{1z,net,S0}^{Iz,g} P_{S0j,z}^g + S_1 \phi_{1z,net,S1}^{Iz,g} P_{S1S0,z}^g P_{S0j,z}^g \right. \\ & \left. + S_1 \phi_{1z,net,S1}^{Iz,g} P_{S1j,z}^g + S_0 \phi_{1z,net,S0}^{Iz,g} P_{S0S1,z}^g P_{S1j,z}^g \right) \end{aligned} \quad (77)$$

但し、

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_{ij,z}^g = & P_{ij,z}^g + \frac{1}{1 - P_{S0S1,z}^g P_{S1S0,z}^g} \\ & \times \left( P_{iS0,z}^g P_{S0j,z}^g + P_{iS0,z}^g P_{S0S1,z}^g P_{S1j,z}^g \right. \\ & \left. + P_{iS1,z}^g P_{S1j,z}^g + P_{iS1,z}^g P_{S1S0,z}^g P_{S0j,z}^g \right) \end{aligned} \quad (78)$$

次に  $\psi_{1z}^{*Iz,g}(\vec{r})$  を計算する。(2)式で

$$\psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \exp(-i\vec{B} \cdot \vec{r}) \left\{ \psi^{*Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + i\vec{B} \cdot \psi^{*Ig}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \right\} \quad (79)$$

とおくと、 $\psi^{*Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  に対して

$$\begin{aligned} & -\vec{\Omega} \cdot \text{grad} \psi^{*Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_t^{*g}(\vec{r}) \psi^{*Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Omega_z \psi^{*Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ & = \sum_{g'} \frac{1}{4\pi} \left[ \Sigma_s^{*g \rightarrow g'}(\vec{r}) \int d\vec{\Omega}' \psi^{*Iz,g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') + \frac{v\Sigma_f^{*g}(\vec{r})}{k_{\text{eff}}} \chi^{g'} \int d\vec{\Omega}' \psi^{*Iz,g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') \right] \end{aligned} \quad (80)$$

積分型に変換すると、

$$\psi^{*Iz,g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = e^{-\widetilde{\Sigma R}} \psi^{*Iz,g}(\vec{r}_s, \vec{\Omega}) + \int_0^R dR' e^{-\widetilde{\Sigma R}'} Q^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (81)$$

但し

$$\begin{aligned} Q^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = & -\Omega_z \psi^{*Rg}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \sum_{g'} \frac{1}{4\pi} \left[ \Sigma_s^{*g \rightarrow g'}(\vec{r}) \psi_0^{*Iz,g'}(\vec{r}) \right. \\ & \left. + \frac{v\Sigma_f^{*g}(\vec{r})}{k_{\text{eff}}} \chi^{g'} \psi_0^{*Iz,g'}(\vec{r}) \right] \end{aligned} \quad (82)$$

P1成分を求めるため、 $\int_{V_j} d\vec{r} \int d\vec{\Omega} \Omega_z$  を操作すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \Sigma_i^g V_i \psi_{1z,j}^{*Iz,g} & = S_0 \psi_{1z,\text{out},S_0}^{*Iz,g} P_{S_0}^{*g} S_{0j,z} + S_1 \psi_{1z,\text{out},S_1}^{*Iz,g} P_{S_1}^{*g} S_{1j,z} \\ & - \frac{1}{3} \sum_i V_i \psi_{0i}^{*Rg} P_{ij,z}^{*g} \end{aligned} \quad (83)$$

但し

$$\psi_{1z,\text{out},S_k}^{*Iz,g} = \int_{2\pi\Theta} d\vec{\Omega}_{S_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}_{S_k}) \Omega_z \psi^{*Iz,g}(\vec{r}_{S_k}, \vec{\Omega}) \quad (84)$$

次に随伴中性子束に対する流入カレント  $\psi_{1z,\text{in},S_k}^{*Iz,g}$  を

$$\psi_{1z,\text{in},S_k}^{*Iz,g} = \int_{2\pi\Theta} d\vec{\Omega}_{S_k} (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}_{S_k}) \Omega_z \psi^{*Iz,g}(\vec{r}_{S_k}, \vec{\Omega}) \quad (85)$$

と定義すると、(81)式より

$$S_k \psi_{1z, in, Sk}^{*Iz, g} = S_1 P_{Sk, 1, z}^g \psi_{1z, out, S1}^{*Iz, g} - \frac{1}{3} \sum_i V_i \psi_{0i}^{*Rg} / \Sigma_i^g \quad (86)$$

(86)式及び次式で定義されるnet current  $\psi_{1z, net, Sk}^{*Iz, g}$  を用いると、

$$\psi_{1z, net, Sk}^{*Iz, g} = \psi_{1z, in, Sk}^{*Iz, g} - \psi_{1z, out, Sk}^{*Iz, g} \quad (87)$$

(83)式は、

$$\begin{aligned} \Sigma_j^g V_j \psi_{1z, j}^{*Iz, g} = & - \sum_i \frac{1}{3} V_i \psi_{0i}^{*Rg} \widetilde{P_{ij, z}^g} + \frac{1}{1 - P_{S0S1, z}^g P_{S1S0, z}^g} \\ & \times \left[ -S_0 \psi_{1z, net, S0}^{*Iz, g} P_{S0j, z}^g - S_1 \psi_{1z, net, S1}^{*Iz, g} P_{S1S0, z}^g P_{S0j, z}^g \right. \\ & \left. - S_1 \psi_{1z, net, S1}^{*Iz, g} P_{S1j, z}^g - S_0 \psi_{1z, net, S0}^{*Iz, g} P_{S0S1, z}^g P_{S1j, z}^g \right] \quad (88) \end{aligned}$$

但し  $\widetilde{P_{ij, z}^g}$  は(78)式で定義される。(88)式に  $\psi_{1z, net, Sk}^{*Iz, g}$  を与えることにより、 $\psi_{1z, j}^{*Iz, g}$  が計算できる。

### 3. 2. 2 プレート垂直方向

プレート垂直方向をX軸とすると、 $\Sigma_{tr,k}^{*g}$  は

$$\Sigma_{tr,x}^{*g} = \int_{\text{cell}} \Sigma_{tr}^g(\vec{r}) \Phi_{1x}^g(\vec{r}) \Psi_{1x}^{*g}(\vec{r}) d\vec{r} / \int_{\text{cell}} \Phi_{1x}^g(\vec{r}) \Psi_{1x}^{*g}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (89)$$

で与えられる。すなわち、中性子束  $\Phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega})$  と、随伴中性子束  $\Psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega})$  のX方向カレントを求める必要がある。

まず、 $\Phi_{1x}^g(\vec{r})$  は、表面  $S_0$  及び  $S_1$  の流入カレント  $J_{S_0}^{g-}$ 、 $J_{S_1}^{g-}$  及び流入カレント  $J_{S_0}^{g+}$ 、 $J_{S_1}^{g+}$  をつかって

$$\Sigma_j^{g\phi} \Phi_{1x,j}^g V_j = \sum_i P_{ij}^{01,g} Q_i^g V_i + J_{S_0}^{g-} P_{S_0,j}^{01,g} + J_{S_1}^{g-} P_{S_1,j}^{01,g} \quad (90)$$

但し

$$\Phi_{1x,j}^g = \frac{1}{V_j} \int_{V_j} d\vec{r} \Phi_{1x}^g(\vec{r}) \quad (91)$$

$$P_{ij}^{01,g} = \frac{\Sigma_j^g}{V_i} \int_{V_i} d\vec{r} \int_{V_j} d\vec{r}' \frac{e^{-\Sigma R'}}{4\pi R'^2} \Omega_x \quad (92)$$

一方、

$$J_{S_k}^{g+} = J_{S_1}^{g-} P_{S_1 S_k}^g + \sum_i P_{i S_k}^g Q_i^g V_i \quad (93)$$

$$J_{S_k}^{g,net} = J_{S_k}^{g+} - J_{S_k}^{g-} \quad (94)$$

であるので、(90) 式を  $J_{S_k}^{g,net}$  で表すと



$$\Sigma_{j'lx,j}^g \Phi_{j'}^g V_j = \sum_i \widetilde{P}_{ij}^{01,g} Q_i^g V_i + \frac{i}{1 - P_{SOS1}^g P_{S1SO}^g} \left( \begin{aligned} & -J_{SO}^{g,net} P_{SOj}^g - J_{S1}^{g,net} P_{S1SO}^g P_{SOj}^{01,g} \\ & -J_{S1}^{g,net} P_{S1j}^{01,g} - J_{SO}^{g,net} P_{SOS1}^g P_{S1j}^{01,g} \end{aligned} \right) \quad (95)$$

但し

$$\widetilde{P}_{ij}^{01,g} = P_{ij}^{01,g} + \frac{1}{1 - P_{SOS1}^g P_{S1SO}^g} \times \left( P_{ISO}^g P_{SOj}^{01,g} + P_{IS1}^g P_{S1j}^{01,g} + P_{ISO}^g P_{SOS1}^g P_{S1j}^{01,g} + P_{IS1}^g P_{S1SO}^g P_{SOj}^{01,g} \right) \quad (96)$$

(95)式中の  $Q_i^g$  は(58)式で計算される。

$\Psi_{ix}^{*g}(\bar{x})$  は、同様に

$$\Psi_{ix,j}^{*g} = \sum_i \widetilde{P}_{ji}^{10,g} Q_i^{*g} / \Sigma_i^{*g} + \frac{1}{1 - P_{SOS1}^g P_{S1SO}^g} \left( \begin{aligned} & P_{jSO}^{10,g} J_{SO}^{g,net} + P_{jSO}^{10,g} P_{SOS1}^g J_{S1}^{g,net} \\ & + P_{jS1}^{10,g} J_{S1}^{g,net} + P_{jS1}^{10,g} P_{S1SO}^g J_{SO}^{g,net} \end{aligned} \right) \quad (97)$$

但し

$$\widetilde{P}_{ji}^{10,g} = P_{ji}^{10,g} + \frac{1}{1 - P_{S0S1}^g P_{S1S0}^g}$$

$$\times \left( P_{jS0}^{10,g} P_{S0i}^g + P_{jS0}^{10,g} P_{S0S1}^g P_{S1i}^g + P_{jS1}^{10,g} P_{S1i}^g + P_{jS1}^{10,g} P_{S1S0}^g P_{S0i}^g \right), \quad (98)$$

$$Q_i^{*g} = \sum_{s'} \left\{ \Sigma_{si}^{*g \rightarrow s'} \Psi_{0i}^{*g'} + \frac{v \Sigma_{ii}^{*g}}{k_{eff}} \chi_{\Psi_{0i}^{*g'}} \right\} \quad (99)$$

(99)式中に現れる随伴中性子束  $\Psi_{0i}^{*g}$  は

$$\begin{aligned} \Psi_{0j}^{*g} = & \sum_i \widetilde{P}_{ji}^{00,g} Q_i^{*g} / \Sigma_i^{*g} \\ & + \frac{4}{1 - P_{S0S1}^g P_{S1S0}^g} \left( P_{jS0}^{00,g} J_{S0}^{g,net} + P_{jS0}^{00,g} P_{S0S1}^g J_{S1}^{g,net} \right. \\ & \left. + P_{jS1}^{00,g} J_{S1}^{g,net} + P_{jS1}^{00,g} P_{S1S0}^g J_{S0}^{g,net} \right) \end{aligned} \quad (100)$$

及び(99)式より求められる。

### 3. 2. 3 格子平均断面積

(19),(20),(21)式は、格子内各領域で中性子束及び随伴中性子束がフラットであり、断面積が一定であるとする、

$$\Sigma_a^{*g} = \frac{\sum_{i \in \text{cell}} \Sigma_{ai}^g \phi_{0i}^g \psi_{0i}^{*g} V_i}{\sum_{i \in \text{cell}} \phi_{0i}^g \psi_{0i}^{*g} V_i} \quad (101)$$

$$\Sigma_s^{*g \rightarrow g'} = \frac{\sum_{i \in \text{cell}} \Sigma_s^{g \rightarrow g'} \phi_{0i}^g \{ \psi_{0i}^{*g'} - \psi_{0i}^{*g} \} V_i}{\sum_{i \in \text{cell}} \phi_{0i}^g \{ \psi_{0i}^{*g'} - \psi_{0i}^{*g} \} V_i} \quad (102)$$

$$v \Sigma_f^{*g} = \frac{\sum_{i \in \text{cell}} v \Sigma_{fi}^g \phi_{0i}^g \left\{ \sum_{g'} \chi_{g'}^{g'} \psi_{0i}^{*g'} \right\} V_i}{\sum_{i \in \text{cell}} \phi_{0i}^g \left\{ \sum_{g'} \chi_{g'}^{g'} \psi_{0i}^{*g'} \right\} V_i} \quad (103)$$

となる。(101)~(103)式を計算するためには、中性子束  $\phi_{0i}^g$  及び随伴中性子束  $\psi_{0i}^{*g}$  の格子内分布を求めればよい。

中性子束  $\phi_{0i}^g$  は、表面  $S_0$  及び  $S_1$  での流入カレント  $J_{S_0}^{g-}$ 、 $J_{S_1}^{g-}$  及び流出カレント  $J_{S_0}^{g+}$ 、 $J_{S_1}^{g+}$  を使って

$$\sum_j \Sigma_j^g \phi_{0j}^g V_j = \sum_i P_{ij}^{00,g} Q_i^g V_i + J_{S_0}^{g-} P_{S_0}^{g-} + J_{S_1}^{g-} P_{S_1}^{g-} \quad (104)$$

とかける。一方、流出入カレント及びnet current  $J_{S_k}^{g,net}$  ( $S_k = S_0$  or  $S_1$ ) に対して、

$$J_{S_k}^{g+} = J_{S_1}^{g-} P_{S_1}^{g-} + \sum_i P_{isk}^g Q_i^g V_i \quad (105)$$

$$J_{S_k}^{g,net} = J_{S_k}^{g+} - J_{S_k}^{g-} \quad (106)$$

が成立するので、(104)式で流入カレントをnet currentで表すと、次式を得る。

$$\Sigma_j^g \Phi_{0j}^g V_j = \sum \widetilde{P}_{ij}^{00,g} Q_i^g V_i + \frac{1}{1 - P_{SOS1}^g P_{S1SO}^g} \left( \begin{aligned} & -J_{SO}^{g,net} P_{SOj}^g - J_{S1}^{g,net} P_{S1SO}^g P_{SOj}^g \\ & - J_{S1}^{g,net} P_{S1j}^g - J_{SO}^{g,net} P_{SOS1}^g P_{S1j}^g \end{aligned} \right) \quad (107)$$

但し

$$\widetilde{P}_{ij}^{00,g} = P_{ij}^{00,g} + \frac{1}{1 - P_{SOS1}^g P_{S1SO}^g} \times \left( P_{iso}^g P_{SOj}^g + P_{is1}^g P_{S1j}^g + P_{iso}^g P_{SOS1}^g P_{S1j}^g + P_{is1}^g P_{S1SO}^g P_{SOj}^g \right) \quad (108)$$

(107) 式で、net currentを与えると、中性子束分布  $\Phi_{0i}^g$  が求められる。

次に随伴中性子束  $\Psi_{0i}^{*g}$  の計算法について考える。(2)式を積分型に変換すると、

$$\Psi_{0j}^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = e^{-\widetilde{\Sigma}_s} \Psi_{0j}^{*g}(\vec{r}_s, \vec{\Omega}) + \int_0^s ds' e^{-\widetilde{\Sigma}_s'} Q_{0j}^{*g}(\vec{r}', \vec{\Omega}) \quad (109)$$

ここで  $\Psi_{0j}^{*g}(\vec{r}_s, \vec{\Omega})$  はスーパーセル表面  $\vec{r}_s$  での随伴中性子束、 $\widetilde{\Sigma}_s$  と  $s$  はそれぞれ  $\vec{r}$  と  $\vec{r}_s$  間の光学距離及び距離である。また

$$Q_{0j}^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{1}{4\pi} \sum_{g'} \left( \Sigma_s^{*g \rightarrow g'}(\vec{r}) \int \Psi_{0j}^{*g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \frac{\chi^{g'}}{k_{eff}} \nu \Sigma_f(\vec{r}) \int \Psi_{0j}^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \right) \quad (110)$$

(109) 式を全立体角及び領域  $j$  内で積分すると、

$$\Psi_{0j}^{*g} = 4P_{js}^g J_s^{*g+} + \sum_i P_{ji}^g Q_i^{*g} / \Sigma_i^{*g} \quad (111)$$

但し

$$P_{js}^g = \frac{1}{V_j} \int_{V_j} d\vec{r} \int \frac{d\vec{\Omega}}{4\pi} e^{-\widetilde{\Sigma}R} \quad (112)$$

中性子束の場合と同様に、随伴中性子束流出入カレントとnet currentに対して

$$J_{s1}^{*g-} = P_{s1sk}^g J_{sk}^{*g} + \sum_i \frac{1}{4} P_{s1i}^g Q_i^{*g} / \Sigma_i^{*g} \quad (113)$$

$$J_{s1}^{*g,net} = J_{s1}^{*g+} - J_{s1}^{*g-} \quad (114)$$

が成り立つので、(111)式はnet currentをつかって

$$\begin{aligned} w_{0j}^{*g} = & \sum_i \widetilde{P}_{ji}^g Q_i^{*g} / \Sigma_i^{*g} + \frac{4}{1 - P_{s0s1}^g P_{s1s0}^g} \times \left( P_{js0}^g J_{s0}^{*g,net} \right. \\ & \left. + P_{js1}^g J_{s1}^{*g,net} + P_{js0}^g P_{s0s1}^g J_{s1}^{*g,net} + P_{js1}^g P_{s1s0}^g J_{s0}^{*g,net} \right) \end{aligned} \quad (115)$$

但し、 $\widetilde{P}_{ji}^g$  は(108)式より求められる。

#### 4. まとめ並びに今後の研究課題

今回導出した格子の均質化に対する統一理論は、炉内の任意の位置にある格子に対して適用が可能であり、また実験解析や設計で問題となる輸送補正及びストリーミング補正が明確に区別できるという点に特色がある。また異方性拡散係数と他の格子平均断面積との間に密接なconsistencyが存在することも長所であるといえよう。

今後の研究課題としては、簡単な体系を使用した数値実験による理論の検証、並びにJUPITER実験解析等に対する応用があげられる。同時に、従来用いられてきたBenoistの方法の検証をも行う予定である。

## REFERENCES

- (1) P. Benoist, CEA-R 2278 (1964)
- (2) T. Takeda et al., J. Nucl. Sci. Technol., 18[2], 93 (1981)
- (3) Rowlands et al., Nuc. Sci. Eng., 76, 263 (1980)

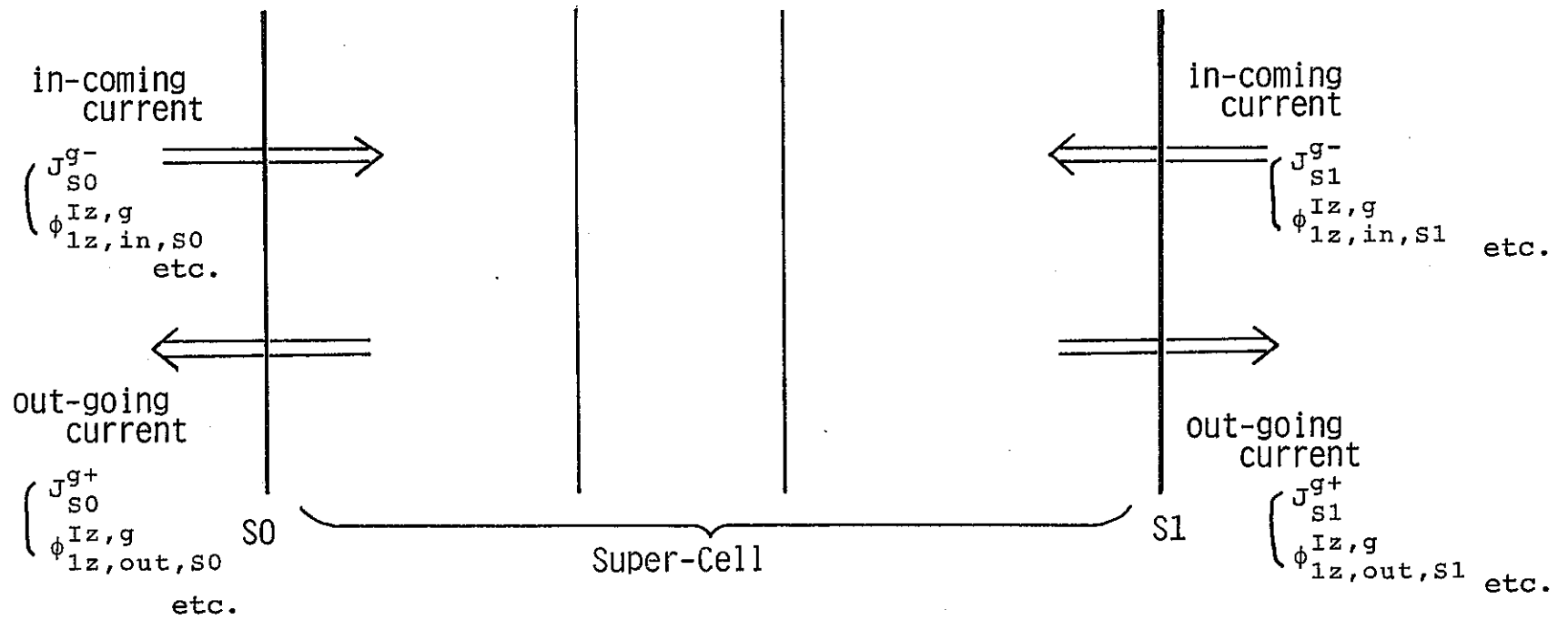


Fig. 3.2.1 Super-cell Model



## 第Ⅲ部

# CADENZA炉心の臨界性の詳細解析

## 目次

1. 序論
2. 格子計算
  2. 1 格子モデル
  2. 2 バックリングを取り入れない格子モデルの比較
    2. 2 a) プレートごとのマイクロ断面積
    2. 2 b) 格子平均マイクロ断面積
    2. 2 c) 格子平均マクロ断面積
    2. 2 d) 拡散係数
  2. 3 臨界バックリングを取り入れた格子モデルの比較
    2. 3 a) 格子平均マイクロ断面積
    2. 3 b) 格子平均マクロ断面積
    2. 3 c) 拡散係数
    2. 4 d) 格子計算より得られた非均質効果
3. 格子内反応率分布
4. 炉心計算
  4. 1 計算手法と計算モデル
  4. 2 RZ計算より得られた非均質効果
  4. 3 ピンプレート炉心の $k_{eff}$ のC/E差
5. 結論

## List of Tables

- Table 1 Energy Group Structure of 70 Groups
- Table 2 Percent Difference of Plate-wise Effective Micro Cross Section of 1-D Models from 2D Model
- Table 3 Percent Difference of Cell-averaged Micro Cross Section of 1-D Models from 2D Model ( $B^2=0$ )
- Table 4 Percent Difference of Cell-averaged Macro Cross Section of 1-D Models from 2D Model ( $B^2=0$ )
- Table 5 Comparison of  $k$  Calculated from Approximate 1-D and 2-D Model ( $B^2=0$ )
- Table 6 Comparison of Benoist Isotropic Diffusion Coefficient ( $B^2=0$ )
- Table 7 Comparison of Cell-averaged Micro Cross Section from Cell Calculation with Critical Buckling
- Table 8 Comparison of Cell-averaged Macro Cross Section from Cell Calculation with Critical Buckling
- Table 9 Comparison of Benoist Isotropic Diffusion Coefficient from Cell Calculation with Critical Buckling
- Table 10 Heterogeneity and Streaming Effect obtained from Cell Calculation
- Table 11 Reaction Rate Distribution in Cell 1
- Table 12 Heterogeneity and Streaming Effect obtained from RZ Diffusion Calculation
- Table 13 Comparison of Streaming Effect obtained from Cell Calculation and RZ Diffusion Calculation with Corrected Collapsing Method for Diffusion Coefficient
- Table 14 C/E Value of Cores for Various Cell Model

## List of Figures

- Fig. 1 Cell Models used in Calculation
- Fig. 2 Comparison of Intra-cell Flux Distribution in 1st Group  
( $B^2=0$ )
- Fig. 3 Comparison of Intra-cell Flux Distribution in 1st Group  
with Critical Buckling
- Fig. 4 2-D RZ Computational Model for Cores 22 and 23E

## 1. 序論

高速臨界集合体の核特性解析にあたってはプレート型燃料格子の非均質効果を精度良く評価することが重要となる。これはプレート型燃料格子の非均質効果がピン型燃料格子の非均質効果に比べると非常に大きいためである。Zebra CADENZA集合体はプレート型及びピン型の燃料格子より成る炉心でありプレート型格子とピン型格子の非均質効果の差を研究する目的の一連の実験が行われたが、ピン-プレート炉心の $k_{eff}$ のC/E値に大きな差が存在することが報告され国際ベンチマーク問題に指定された。

本研究ではまずプレート格子の格子パラメータについて、種々の1次元モデル(Simple 1D model, Modified 1D model, Center-line 1D model)を2次元モデルと比較し格子の1次元化による均質化誤差を評価する。次にCADENZA集合体のピン-プレート炉心の $k_{eff}$ のC/E差に対する各種1次元モデル及び2次元モデルの影響を調べ、各格子モデルの非均質効果の解析精度を評価する。

又前回解析ではプレート格子の格子内反応率分布を計算する際にdetector断面積として格子平均マイクロ断面積を使用していたので、plate-wiseマイクロ断面積を使用して格子内反応率分布を再計算する。

## 2. 格子計算

### 2.1 格子モデル

Zebra CADENZA 集合体で用いられている代表的なプレート型燃料格子である core plate cell (cell 1)の2次元格子モデルをFig. 1 に示す。格子を1次元にモデル化する方式により、Simple 1D model, Modified 1D model (Mod.1D model), Center-line 1D model の3種の1次元格子モデルを考える。

Simple 1D modelでは燃料プレートのmeatを格子ピッチに拡張して、燃料meatの横側にあるsheathと燃料プレートのcanは各領域にスミアされる。(Fig. 1参照) Mod.1D model はSimple 1D model と似ているがsheathと燃料プレートのcanのような構造材は非燃料プレートにスミアされる点が異なっている。(Fig. 1 参照) Center-line 1D modelは格子の中心軸上の組成を1次元モデルとして扱うモデルである。(Fig.1参照)

格子平均マクロ定数を求める際には原子数密度をモデル化の前後で保存することが必要である。最初の2つのモデルは格子平均原子数密度を保存するが、Center-line 1D modelは保存しない。よってこのモデルは実効マイクロ断面積を求めるためにのみ用いられ、格子平均マクロ断面積は格子平均マイクロ断面積に格子平均数密度をかけて求められる。

格子計算は70群断面積セットJFS-3-J2<sup>(1)</sup> (old version)を用いてCASUP<sup>(2)</sup>コードを用いて行った。このCASUPコードはshielding factor methodに基づいており燃料核種の実効マイクロ断面積はTone<sup>(3)</sup>の方法により求め、非燃料核種の実効マイクロ断面積は格子均質組成より求める。また格子内中性子束分布は衝突確率法により求める。格子計算には臨界バックリング $B^2 = 0.002 \text{ cm}^{-2}$ を取り入れBenoistの等方拡散係数を擬似吸収項に用いた。70群構造をTable 1 に示す。

## 2. 2 バックリングを取り入れない各格子モデルの比較

本章では中性子束分布計算の際に擬似吸収項にバックリングを取り入れない70群格子計算より得られた格子パラメーターを各1次元及び2次元モデルについて比較する。

### 2. 2 a) プレートごとのマイクロ断面積

3種の1次元モデル及び2次元モデルによる実効マイクロ断面積をU-238 capture、Pu-239 capture、Pu-239 fissionの各反応について比較した結果をTable 2に示す。U-238 captureマイクロ断面積についてはCenter-line 1D modelは2D modelと数%内で一致しているのに対して Mod.1D modelと Simple 1D modelでは共鳴群で最大15%の誤差が生じている。Pu-239 captureとPu-239 fission反応についても同様の傾向が現れている。このように Mod.1D model とSimple 1D modelでは燃料meatを格子ピッチにまで拡張しているため燃料核種の自己遮蔽効果が十分に評価されていない事がわかる。

### 2. 2 b) 格子平均マイクロ断面積

プレートごとのマイクロ断面積の場合と同様に各1次元モデルの格子平均マイクロ断面積をU-238 capture、Pu-239 capture、Pu-239 fissionの各反応について2次元モデルと比較した結果をTable 3に示す。

共鳴群ではCenter-line model は2D modelと数%内で一致しているのに対して Mod.1D model とSimple 1D modelは共鳴群で最大15%の誤差が生じている。このように共鳴群ではプレートごとのマイクロ断面積と同様の傾向が表れている。

これに対して高速群ではPu-239 fission反応に対して異なった傾向が現れている。Mod.1D modelは2D modelと0.2%内で一致しているのに対してcenter-line 1D model とSimple 1D modelでは約2%の誤差が生じている。この原因については後で述べる。

## 2. 2 c) 格子平均マクロ断面積と $k_{\infty}$

各1次元モデルの格子平均マクロ断面積(flux volume weighted)を2次元モデルと比較した結果を Table 4 に示す。

高速群では Mod.1D modelが 2D modelと10分の数%内で一致しているのに対して Center-line modelと Simple 1D modelは 2D modelと差が最大約1%開いている。この原因を調べるために高速群での格子内中性子束分布を Fig. 2 に示す。Fig. 2よりP u-プレートでの高エネルギー群中性子束のピークはMod.1D modelでは良く評価されているが、Simple 1D modelと Center-line 1D modelでは過小評価されており、このため格子平均断面積が過小評価されていると考えられる。

一方共鳴群に対しては、Center-line 1D modelの断面積が 2D modelと最も差が小さい。Center-line 1D modelが 2D modelと10%内で一致しているのに対して Mod.1D modelとSimple 1D modelでは2D modelとの差が最大1.7%に達している。以上の断面積が格子の  $k_{\infty}$  に与える影響を調べるため、各格子モデルの  $k_{\infty}$  を Table 5に示す。Simple 1D modelと Mod.1D modelは  $k_{\infty}$  を2D modelに比べ各々0.27%dk/k'、0.21%dk/k'過小評価している。Center-line 1D modelは格子内物質組成を保存しないため格子計算で得られる  $k_{\infty}$  には意味が無いので  $k_{\infty}$  の値は示されていない。



## 2. 2 d) 拡散係数

格子平均拡散係数はBenoistの公式により計算された。異方性拡散効果を調べるため、次式で表される Benoist の等方拡散係数<sup>(4)</sup>：

$$D_{iso} = (2D_{\parallel} + D_{\perp}) / 3 \quad (1)$$

ここで  $D_{\parallel}$  は平行方向拡散係数  
 $D_{\perp}$  は垂直方向拡散係数 である。

と  $D = 1/3 \sum_{tr} (\text{volume weighted } \Sigma_{tr})$  の差をとって拡散係数の異方性とした。

Mod.1D model とSimple 1D modelより得られたBenoistの等方拡散係数と拡散係数異方性を Table 6 に示す。これよりSimple 1D modelと2D modelの拡散係数の異方性の差は高速群（1～10群）において小さいがMod.1D modelでは差が非常に大きくなっている事がわかる。

Mod.1D modelでは構造材が非燃料領域のみにスミアされるために中性子ストリーミング効果に対して大きな影響を及ぼすNaプレートの密度が増加し、このため中性子の拡散の異方性が弱まったと考えられる。

## 2.3 臨界バックリングを取り入れた格子モデルの比較

前章ではバックリングを考慮していないモデルについて格子パラメーターを比較したが、本章では各1次元及び2次元モデル共に臨界バックリング  $B^2=0.002 \text{ cm}^{-2}$  を擬似吸収項に取り入れて70群格子計算を行い、得られた格子パラメーターを比較した。バックリングを取り入れる擬似吸収項には Benoist の等方拡散係数を用いた。

### a) 格子平均ミクロ断面積

各1次元モデルの格子平均ミクロ断面積をバックリングを取り入れない場合と同じく2次元モデルと比較した結果を Table 7 に示した。U-238 capture 反応についてはバックリングを取り入れていないモデルと同じく、共鳴群では Center-line 1D model の断面積が 2D model と数%内で一致しているのに対して Mod. 1D model と Simple 1D model ではその差が最大15%に達している。

Pu-239 capture, fission 反応についても バックリング無のモデルと同じく共鳴群では Center-line 1D model、高速群では Mod. 1D model の断面積が 2D model の断面積と最も差が小さい。ただし高速群では Center-line 1D model の方が Simple 1D model より 2D model に近くなっており、バックリング無のモデルと逆の傾向が現れている。

### b) 格子平均マクロ断面積

各種1次元モデルより得られた格子平均マクロ断面積 (flux-volume weighted) を 2D model と比較した結果を Table 8 に示す。これより高速群では Mod. 1D model の断面積が 2D model に最も近くなっており、これはバックリング無のモデルと同じ傾向である。Simple 1D model 及び Center-line 1D model では誤差が大きく吸収断面積で約0.5%、核分裂断面積で約1.0%の誤差を生じている。Center-line 1D model の方が 1D model よりも誤差が少なくなっているのは、バックリングを取り入れていない場合と逆の傾向である。

1群の格子内中性子束分布をFig. 3 に示す。これより Pu-プレートでの中性子束のピークは Mod.1D model でよく再現されているが、 Simple 1D model と Center-line 1D modelでは過少評価されている事がわかる。

c) 拡散係数

各モデルの Benoistの等方拡散係数と拡散係数の異方性を、バックリングを取り入れていないモデルと同様に Table 9 に示した。これよりバックリングを取り入れた場合でも Simple 1D modelが高速群で特に精度よく拡散係数の異方性を評価している事がわかる。

d) 格子計算より得られた非均質効果

各種1次元モデルと2次元モデルについて格子計算より求めた非均質効果とストリーミング効果を、格子の  $k_{\infty}$  値と共に Table 10 に示した。これより全非均質効果はMod.1D modelが2D modelに最も近い事が示される。2D modelの非均質効果(ストリーミング効果を含まない)は未計算である。

### 3. 格子内反応率分布

CADENZA core plate cell (Cell 1) の臨界バックリングを取り入れた Simple 1D model と Mod.1D model について格子内反応率分布を求めた結果を Table 11 に示す。前回解析では detector 断面積として 格子平均マイクロ断面積を用いて反応率分布を計算した。結果は Table 11 に示されている。今回解析では detector 断面積に plate-wise マイクロ断面積を用いて反応率分布を計算した。該当する核種が存在しない領域の detector 断面積には無限希釈断面積を用いた。

格子平均マイクロと plate-wise マイクロ断面積を detector 断面積に用いた反応率分布を比較すると、両者は U-238( $n, \gamma$ ) 反応で最も異なっている。U-238 capture 断面積の共鳴群での自己遮蔽効果のため plate-wise マイクロ断面積を用いた反応率分布は UO<sub>2</sub> plate で最小値を取っている。この傾向は格子平均マイクロ断面積を用いた反応率分布では現れておらず、detector 断面積に plate-wise マイクロ断面積を用いる方が望ましいと考えられる。

## 4. 炉心計算

### 4. 1 計算手法と計算モデル

70群セル計算より得られた格子平均群定数をRZ modelより得られたスペクトルを用いて縮約して16群格子平均定数を得た。前回計算では70群から16群に縮約した $\Sigma_{tr}$ より $D=1/3\Sigma_{tr}$ の関係を用いて16群のDを作成したため、Dの縮約誤差が大きくなったと考えられる。よって今回解析ではDを式(2)

$$D^G = \frac{\sum_{g \in G} \phi^g D^g}{\sum_{g \in G} \phi^g} \quad (2)$$

ここで

$$D^g = 1/3\Sigma^g_{tr}$$

のように縮約した。縮約誤差が減少したためRZ拡散計算より得られるストリーミング効果に変化すると考えられる。

得られた16群定数を用いて 二次元RZ modelによる16群拡散計算を行い、Core 22、23Eの $k_{eff}$ を求めた。炉心計算に用いたCore 22のRZ modelでは End plate cell (Cell 2)は無視してCore plate cellに置き換えた。

前回解析結果の内、輸送補正・空間メッシュ補正の値が $k_{eff}$ のC/E値を求めるために用いられた。Core 22、23EのRZモデルをFig.4に示す。

### 4. 2 RZ計算により得られた非均質効果

各種一次元及び二次元モデルを用いたRZ拡散計算により得られたストリーミング効果及び非均質効果を Table12 に示す。Center-line 1D modelのBenoistの拡散係数には Simple 1D modelの拡散係数を用いた。3種の一次元モデルの中では Mod.1D modelの全非均質効果(ストリーミング効果を含む)が2D modelの値に最も近く差は0.8%  $\delta(1/k)$ である。これは主に Mod.1D modelが非均質効果(ストリーミング効果を含まない)とストリーミング効果を 2D modelより同程度過少評価し

ているためcancellationが生じたためである。

Simple 1D modelはストリーミング効果を精度良く評価しているが 非均質効果を 0.3%  $\delta(1/k)$ 過少評価しているため 全非均質効果は 0.32%  $\delta(1/k)$ の過少評価となり、Mod.1D modelより全非均質効果は 0.20%  $\delta(1/k)$ 小さくなっている。Center-line 1D modelの非均質効果は Mod.1D modelとほぼ同じであるがストリーミング効果は Simple 1D modelと同じ値であるので全非均質効果はMod.1D modelより 0.1%  $\delta(1/k)$ 過少評価している。

格子計算とRZ拡散計算より得られたストリーミング効果の比を Table 13に示した。このようにDの縮約法を修正する事により RZ計算より得られたストリーミング効果と 格子計算より得られたストリーミング効果の比 ( RZ/Cellの項 )は、CADENZA解析参加の他機関の解析結果の0.4に近くなった。

#### 4.3 ピンプレート炉心の $k_{eff}$ のC/E差

CADENZAプレート炉心とピン炉心(Core 22、23E)の3次元XYZ体系より得られた $k_{eff}$ のC/E値を各1次元及び2次元格子モデルについてRZ拡散計算結果より推定した値をTable 14に示す。このように $k_{eff}$ に対するピンプレートC/E値の差は2次元モデルに対しては0.2%であり全モデル中最小となるが、1次元モデルについてはその値は0.3%(Mod.1D model)から 0.5%(Simple 1D model)と変化し、いかなる1次元モデルもピンプレートC/E値の差を解消できない事がわかる。

## 5. 結論

CADENZAピンプレート炉心(Na充填)の $k_{eff}$ に対するC/E値の差に与える3種の1次元モデル(Simple 1D model、Modified 1D model、Center-line 1D model)と2次元モデルの影響を評価した。

1次元モデルを用いた場合の大きなC/E値の不一致(Simple 1D modelに対しては0.5%)は2次元モデルを用いると0.2%に減少した。これより1次元モデルでは非均質効果とストリーミング効果のどちらをも正確に評価することはできない事がわかった。

以上より高速臨界集合体の詳細解析には2次元又は3次元プレート格子モデルの使用が必要である事が分かった。

Table 1 Energy Group Structure of 70 Groups

Group	Upper energy	Lower energy	lethargy width	Fission Spectra <sup>a</sup>
1	10.0 (MeV)	7.7000 (MeV)	0.250	0.3490 E-3
2	7.7000	6.0653	0.250	2.2710 E-2
3	6.0653	4.7237	0.250	4.5069 E-2
4	4.7237	3.6700	0.250	7.3294 E-2
5	3.6700	2.0650	0.250	9.7420 E-2
6	2.0650	2.2313	0.250	1.1210 E-1
7	2.2313	1.7377	0.250	1.1520 E-1
8	1.7377	1.3534	0.250	1.0037 E-1
9	1.3534	1.0540	0.250	9.5137 E-2
10	1.0540	0.82005	0.250	7.9137 E-2
11	0.82005	0.63920	0.250	6.3114 E-2
12	0.63920	0.49707	0.250	4.0710 E-2
13	0.49707	0.301774	0.250	3.6643 E-2
14	0.301774	0.20197	0.250	2.7021 E-2
15	0.20197	0.23510	0.250	1.9610 E-2
16	0.23510	0.18316	0.250	1.4072 E-2
17	0.18316	0.14264	0.250	9.9907 E-3
18	0.14264	0.11109	0.250	7.0524 E-3
19	0.11109 (MeV)	0.086517 (MeV)	0.250	4.9459 E-3
20	0.086517 (KeV)	67.379 (KeV)	0.250	3.4531 E-3
21	67.379	52.475	0.250	2.4025 E-3
22	52.475	40.060	0.250	1.6671 E-3
23	40.060	31.020	0.250	1.1543 E-3
24	31.020	24.700	0.250	7.9794 E-4
25	24.700	19.305	0.250	5.5089 E-4
26	19.305	15.034	0.250	3.7995 E-4
27	15.034	11.709	0.250	2.6105 E-4
28	11.709	9.1100	0.250	1.8035 E-4
29	9.1100	7.1017	0.250	1.2416 E-4
30	7.1017	5.5300	0.250	8.5444 E-5
31	5.5300	4.3074	0.250	5.0704 E-5
32	4.3074	3.3546	0.250	4.0433 E-5
33	3.3546	2.6126	0.250	2.7006 E-5
34	2.6126	2.0347	0.250	1.9120 E-5

<sup>239</sup>Pu

Group	Upper energy	Lower energy	lethargy width	Fission Spectra <sup>a</sup>
35	2.0347	1.5046	0.250	1.3146 E-5
36	1.5046	1.2341	0.250	9.0376 E-6
37	1.2341 (KeV)	0.96112 (KeV)	0.250	5.3750 E-6
38	961.12 (eV)	740.52 (eV)	0.250	0.0
39	740.52	502.95	0.250	0.0
40	502.95	454.00	0.250	0.0
41	454.00	353.50	0.250	0.0
42	353.50	275.36	0.250	0.0
43	275.36	214.45	0.250	0.0
44	214.45	167.02	0.250	0.0
45	167.02	130.07	0.250	0.0
46	130.07	101.30	0.250	0.0
47	101.30	70.093	0.250	0.0
48	70.093	61.442	0.250	0.0
49	61.442	47.051	0.250	0.0
50	47.051	37.267	0.250	0.0
51	37.267	29.023	0.250	0.0
52	29.023	22.603	0.250	0.0
53	22.603	17.603	0.250	0.0
54	17.603	13.710	0.250	0.0
55	13.710	10.677	0.250	0.0
56	10.677	8.3153	0.250	0.0
57	8.3153	6.4760	0.250	0.0
58	6.4760	5.0435	0.250	0.0
59	5.0435	3.9279	0.250	0.0
60	3.9279	3.0590	0.250	0.0
61	3.0590	2.3924	0.250	0.0
62	2.3924	1.8554	0.250	0.0
63	1.8554	1.4450	0.250	0.0
64	1.4450	1.1254	0.250	0.0
65	1.1254	0.87642	0.250	0.0
66	0.87642	0.68256	0.250	0.0
67	0.68256	0.53150	0.250	0.0
68	0.53150	0.41399	0.250	0.0
69	0.41399	0.32242	0.250	0.0
70	0.32242 (eV)	10 <sup>-5</sup> (eV)	10.65	0.0



— 参考文献 —

- (1) T. Takano and Y. Ishiguro : JAERI-M82-135 (1982)
- (2) S.Ono, E. Wachi, T. Takeda and T. Sekiya : Technol.  
Rep. of Osaka University, 33, 207 (1983).
- (3) T. Tone : J. Nucl. Sci. Technol., 12[8], 467 (1975).
- (4) P. Benoist : Rapport CEA-R-2278 (1964).

TABLE 2 PERCENT DIFFERENCE OF PLATE-WISE EFFECTIVE MICRO CROSS SECTION\* OF 1-D MODELS FROM 2D MODEL

A) U238 CAPTURE

GROUP	MODIFIED 1D	1D	CENTER-LINE
1	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0
20	0.01	0.01	0.01**
30	1.28	1.96	0.07
40	11.75	14.18	5.95
50	12.67	15.15	7.62
60	-0.02	-0.02	-0.00
70	-0.07	-0.07	-0.08

\* EFFECTIVE MICRO CROSS SECTION OF UO<sub>2</sub> PLATE BETWEEN NA PLATES

\*\* PERCENT DIFFERENCE FROM 2D MODEL

B) PU239 CAPTURE

GROUP	MODIFIED 1D	1D	CENTER-LINE
1	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0
30	-1.24	-0.98	-1.56
40	3.92	4.67	2.52
50	19.81	22.79	14.06
60	0.01	0.01	-0.00
70	2.66	2.84	2.32

TABLE 2 CONTINUED

## c) PU239 FISSION

GROUP	MODIFIED 1D	1D	CENTER-LINE
1	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0
30	-1.09	-0.86	-1.37
40	3.69	4.42	2.34
50	13.55	15.49	9.78
60	0.01	0.01	-0.00
70	2.40	2.56	2.09

TABLE 3 PERCENT DIFFERENCE OF CELL-AVERAGED MICRO  
CROSS SECTION OF 1-D MODELS FROM 2D MODEL ( $B^2=0$ )

A) U238 CAPTURE

GROUP	MODIFIED 1D	1D	CENTER-LINE
1	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0
20	0.05	0.10	0.10*
30	1.15	2.05	0.05
40	10.55	12.94	4.96
50	11.72	14.34	6.78
60	0.14	0.12	0.20
70	2.26	2.20	2.39

\* PERCENT DIFFERENCE FROM 2D MODEL

B) PU239 CAPTURE

GROUP	MODIFIED 1D	1D	CENTER-LINE
1	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0
20	0.10	0.19	0.00
30	-1.07	-0.51	-1.58
40	3.92	5.08	1.88
50	17.71	21.20	12.65
60	0.48	0.89	0.36
70	9.32	11.97	2.25

TABLE 3 CONTINUED

## c) Pu239 FISSION

GROUP	MODIFIED 1D	1D	CENTER-LINE
1	-0.21	-1.73	-1.98
10	-0.11	-0.42	-0.12
20	0.10	0.20	0.00
30	-0.91	-0.38	-1.39
40	3.72	4.87	1.74
50	11.85	14.29	8.65
60	0.48	0.89	0.36
70	9.04	11.66	2.02

TABLE 4 PERCENT DIFFERENCE OF CELL-AVERAGED MACRO CROSS SECTION OF 1-D MODELS FROM 2-D MODEL ( $B^2=0$ )

GROUP	ABSORPTION			PRODUCTION		
	MODIFIED 1D	1D	CENTER- LINE	MODIFIED 1D	1D	CENTER- LINE
1	-0.08	-0.43	-0.52	-0.22	-0.96	-1.04
10	-0.09	-0.23	-0.10	-0.11	-0.30	-0.12
20	0.08	0.07	0.02	0.10	0.10	0.00
30	-0.10	0.51	-0.77	-0.82	-0.31	-1.26
40	4.42	5.35	1.92	3.49	4.58	1.63
50	13.69	16.46	9.57	9.61	11.65	7.05
60	0.31	0.53	0.21	0.45	0.82	0.35
70	7.58	9.48	1.55	8.59	11.06	1.99

TABLE 5 COMPARISON OF  $K_{\infty}$  CALCULATED FROM APPROXIMATE  
1-D AND 2-D MODEL ( $B^2=0$ )

MODEL	$K_{\infty}$	$\Delta K/KK'$
REFERENCE 2-D MODEL	1.56067	
1-D MODEL	1.55403	(-0.27)*
MODIFIED 1-D MODEL	1.55553	(-0.21)

\* PERCENT DIFFERENCE FROM THE REFERENCE

Table6 Comparison of Benoist Isotropic Diffusion Coefficient ( $B^2=0$ )

a)  $D_{av}$

Group	Mod.1D	Simple 1D	Reference 2D model
1	4.28235 (-0.30)**	4.29318 (-0.05)	4.2954
10	2.28532 (-0.53)	2.29582 (-0.08)	2.2976
20	1.47290 (-0.89)	1.48557 (-0.04)	1.4861
30	7.87494 -1 (-1.14)	7.90915 -1 (-0.71)	7.9655 -1
40	9.24272 -1 (-2.30)	9.38910 -1 (-0.75)	9.4604 -1
50	7.55301 -1 (-3.69)	7.71153 -1 (-1.66)	7.8420 -1
60	9.21191 -1 (-2.02)	9.30484 -1 (1.03)	9.4017 -1
70	6.37192 -1 (-4.20)	6.51814 -1 (-2.00)	6.6515 -1

\* Micro cross section of center-line model are used

\*\* Percent difference from reference.



Table 6 Continued

## b) Anisotropy of D

Group	Mod. 1D	Simple 1D	2D model
1	0.11	0.36	0.41
10	1.05	1.52	1.60
20	1.09	1.96	2.00
30	0.30	0.74	1.52
40	2.13	3.75	4.15
50	3.64	5.82	5.51
60	1.21	2.23	3.29

Table 7 Comparison of Cell-averaged Micro Cross Section  
from Cell Calculation with Critical Buckling

a) U-238 capture

Group	Mod. 1D	Simple 1D	C.L.	2D
1	4.46437 -3 (-0.26)	4.46634 -3 (-0.22)	4.46835 -3 (-0.18)	4.47623 -3
10	1.24254 -1 (-0.0)	1.24373 -1 (0.1)	1.24239 -1 (-0.0)	1.24265 -1
20	2.38058 -1 (0.0)	2.38209 -1 (0.1)	2.38242 -1 (0.11)	2.37987 -1
30	6.88461 -1 (1.14)	6.94707 -1 (2.06)	6.81071 -1 (0.05)	6.80705 -1
40	1.23403 (10.54)	1.26095 (12.95)	1.17190 (4.97)	1.11641
50	1.53827 (11.70)	1.57468 (14.35)	1.47048 (6.78)	1.37709
60	6.26309 -1 (0.13)	6.26276 -1 (0.12)	6.26767 -1 (0.20)	6.25502 -1
70	1.07220 (2.25)	1.07180 (2.21)	1.07375 (2.40)	1.04863

\* Percent difference from the reference

Table 7 Continued

b) Pu-239 capture

Group	Mod. 1D	Simple 1D	C.L.	2D
1	3.74252 -6 (-0.52)	3.68624 -6 (-2.02)	3.69247 -6 (-1.85)	3.76211 -6
10	7.42247 -2 (-0.19)	7.39678 -2 (-0.54)	7.43828 -2 (0.02)	7.43687 -2
20	3.32518 -1 (0.08)	3.32886 -1 (0.19)	3.32277 -1 (0.00)	3.32263 -1
30	1.58627 (-1.07)	1.59540 (-0.50)	1.57811 (-1.58)	1.60342
40	6.27827 (3.91)	6.34936 (5.09)	6.15615 (1.89)	6.04182
50	1.54776 +1 (17.68)	1.59367 +1 (21.17)	1.48189 +1 (12.67)	1.31524 +1
60	1.14678 (0.47)	1.15154 (0.89)	1.14574 (0.38)	1.14141
70	5.84697 +1 (9.30)	5.98950 +1 (11.96)	5.47251 +1 (2.30)	5.34964 +1

Table 7 Continued

c) Pu-239 fission

Group	Mod. 1D	Simple 1D	C.L.	2D
1	2.78773 (-0.46)	2.74569 (-1.96)	2.75120 (-1.76)	2.80052
10	1.86101 (-0.19)	1.85457 (-0.53)	1.86499 (0.02)	1.86453
20	1.61993 (0.08)	1.62172 (0.19)	1.61876 (0.01)	1.61866
30	2.09976 (-0.91)	2.11117 (-0.38)	2.08987 (-1.38)	2.11912
40	1.09074 +1 (3.72)	1.10297 +1 (4.88)	1.07007 +1 (1.75)	1.05167 +1
50	7.64022 (11.83)	7.80697 (14.27)	7.42485 (8.67)	6.83223
60	1.00869 +1 (0.47)	1.01287 +1 (0.89)	1.00779 +1 (0.38)	1.00397 +1
70	8.91658 +1 (9.02)	9.13245 +1 (11.66)	8.34816 +1 (2.07)	8.17901 +1

Table 8 Comparison of Cell-averaged Macro Cross Section  
from Cell Calculation with Critical Buckling

a)  $\Sigma_a$

Group	Mod. 1D	Simple 1D	C.L.	2D
1	1.46781 -2 (-0.18)*	1.46296 -2 (-0.51)	1.46330 -2 (-0.49)	1.47044 -2
10	4.14275 -3 (-0.16)	4.13250 -3 (-0.40)	4.14981 -3 (0.01)	4.14921 -3
20	4.49578 -3 (0.05)	4.49975 -3 (0.14)	4.49463 -3 (0.03)	4.49332 -3
30	8.99939 -2 (-12.26)	1.03100 -2 (0.52)	1.01785 -2 (-0.76)	1.02567 -2
40	3.68667 -2 (4.41)	3.72005 -2 (5.35)	3.59880 -2 (1.92)	3.53097 -2
50	6.10922 -2 (13.68)	6.25782 -2 (16.44)	5.88961 -2 (9.59)	5.37417 -2
60	3.07098 -2 (0.30)	3.07814 -2 (0.53)	3.06867 -2 (0.22)	3.06180 -2
70	2.45137 -1 (7.55)	2.49508 -1 (9.47)	2.31532 -1 (1.58)	2.27931 -1

\* Percent difference from the reference

Table 8 Continued

b)  $\nu \Sigma_r$ 

Group	Mod. 1D	Simple 1D	C.L.	2D
1	3.97312 -2 (-0.37)	3.94361 -2 (-1.11)	3.94854 -2 (-0.98)	3.98777 -2
10	9.58464 -3 (-0.19)	9.55279 -3 (-0.52)	9.60443 -3 (0.02)	9.60268 -3
20	6.79096 -3 (0.08)	6.79838 -3 (0.19)	6.78633 -3 (0.01)	6.78573 -3
30	8.99939 -3 (-0.82)	9.04616 -3 (-0.30)	8.96004 -3 (-1.25)	9.07378 -3
40	4.53966 -3 (3.49)	4.58788 -2 (4.59)	4.45862 -2 (1.64)	4.38674 -2
50	3.63224 -2 (9.59)	3.69994 -2 (11.64)	3.54885 -2 (7.08)	3.31428 -2
60	4.69162 -2 (0.44)	4.70948 -2 (0.82)	4.68841 -2 (0.37)	4.67108 -2
70	3.75154 -1 (8.57)	3.83728 -1 (11.05)	3.52577 -1 (2.04)	3.45531 -1

Table 8 Continued

c)  $\Sigma_{tr}$ 

Group	Mod. 1D	Simple 1D	C.L.	2D
1	7.85273 -2 (0.05)	7.87470 -2 (0.33)	7.86173 -2 (0.17)	7.84858 -2
10	1.47102 -1 (-0.03)	1.47211 -1 (0.04)	1.47170 -1 (0.02)	1.47145 -1
20	2.28672 -1 (-0.01)	2.28690 -1 (-0.01)	2.28689 -1 (-0.01)	2.28704 -1
30	4.24965 -1 (-0.07)	4.25065 -1 (-0.05)	4.24335 -1 (-0.22)	4.25274 -1
40	3.64742 -1 (0.70)	3.64620 -1 (0.67)	3.62735 -1 (0.15)	3.62202 -1
50	4.50821 -1 (2.43)	4.51868 -1 (2.66)	4.46421 -1 (1.43)	4.40140 -1
60	3.64124 -1 (-0.05)	3.63742 -1 (-0.16)	3.63804 -1 (-0.14)	3.64322 -1
70	5.70275 -1 (2.53)	5.67413 -1 (2.02)	5.54228 -1 (-0.35)	5.56193 -1

Table 9 Comparison of Benoist Isotropic Diffusion Coefficient  
from cell calculation with critical buckling

a)  $D_{av}$

Group	Mod. 1D	Simple 1D	2D
1	4.28211 (-0.30)*	4.29284 (-0.05)	4.2951
10	2.28528 (-0.53)	2.29573 (-0.08)	2.2975
20	1.47288 (-0.88)	1.48552 (-0.03)	1.4860
30	7.86471 -1 (-1.26)	7.89390 -1 (-0.90)	7.9654 -1
40	9.21220 -1 (-2.68)	9.34617 -1 (-1.27)	9.4602 -1
50	7.49604 -1 (-4.41)	7.62884 -1 (-2.71)	7.8415 -1
60	9.21173 -1 (-2.02)	9.30452 -1 (-1.03)	9.4014 -1
70	6.37197 -1 (-4.20)	6.51815 -1 (-2.00)	6.6513 -1

\* Percent difference from the reference



Table 9 Continued

b) Anisotropy

Group	Mod. 1D	Simple 1D	2D
1	0.11	0.36	0.41
10	1.05	1.51	1.59
20	1.09	1.96	1.99
30	0.30	0.74	1.52
40	2.17	3.83	4.14
50	3.88	6.25	5.50
60	1.20	2.22	5.50

Table 10 Heterogeneity and Streaming Effect obtained from Cell Calculation

a) Plate Cell Model

Cell Model	$k_{\infty}$		$\delta (1/k) (\%)$		
	Homo	Hetero Homo D    Benoist D	Hetero No Streaming	Streaming	Total Hetero
Mod. 1D		1.0155    1.0128	1.62	-0.25	1.37
1D	0.9990	1.0141    1.0094	1.49	-0.46	1.03
2D		---    1.0130	---	---	1.39

b) Pin Cell Model

Cell Model	$k_{\infty}$		$\delta (1/k) (\%)$		
	Homo	Hetero Homo D    Benoist D	Hetero No Streaming	Streaming	Total Hetero
1D	1.0110	1.0157    1.0105	0.46	-0.50	-0.05

TABLE 11A) Reaction Rate Distribution in Cell 1\*

Region	U235(n,f)		U238(n,f)		Pu239(n,f)	
	Mod.1D	1D	Mod.1D	1D	Mod.1D	1D
Na+Steel	-0.03	-0.04	-5.05	-4.92	-0.73	-0.74
UO <sub>2</sub>	-0.06	-0.05	-3.07	-2.82	-0.43	-0.38
Na+Steel	0.09	0.09	3.42	3.62	0.48	0.50
Pu	0.30	0.30	15.76	14.64	2.19	2.04
Steel	0.06	0.07	5.27	5.22	0.79	0.79
UO <sub>2</sub>	-0.10	-0.07	-1.35	-1.40	-0.17	-0.15
Na+Steel	-0.08	-0.09	-3.77	-3.86	-0.56	-0.58

Region	Pu240(n,f)		U238(n, $\gamma$ )	
	Mod.1D	1D	Mod.1D	1D
Na+Steel	-3.04	-3.00	0.40	0.38
UO <sub>2</sub>	-1.87	-1.71	0.23	0.23
Na+Steel	2.04	2.14	-0.22	-0.25
Pu	9.09	8.47	-1.05	-0.97
Steel	3.31	3.29	-0.41	-0.41
UO <sub>2</sub>	-0.75	-0.74	0.05	0.07
Na+Steel	-2.22	-2.29	0.23	0.23

\* Percent difference from the cell averaged (region width weighted) reaction rate ,  $B^2=0.002 \text{ cm}^{-2}$ ,  $D=D_{\text{ave}}$

\*\* CELL-AVERAGED MICRO

TABLE 11B) Reaction Rate Distribution in Cell 1\*

Region	U235(n,f)		U238(n,f)		Pu239(n,f)	
	Mod.1D	1D	Mod.1D	1D	Mod.1D	1D
Na+Steel	-0.01	-0.03	-5.05	-4.92	-0.47	-0.49
UO <sub>2</sub>	-0.10	-0.09	-3.07	-2.83	-0.29	-0.26
Na+Steel	0.12	0.12	3.42	3.63	0.46	0.47
Pu	0.27	0.27	15.76	14.65	0.67	0.63
Steel	0.09	0.09	5.27	5.23	0.69	0.69
UO <sub>2</sub>	-0.14	-0.12	-1.36	-1.40	-0.10	-0.08
Na+Steel	-0.06	-0.08	-3.77	-3.86	-0.35	-0.37

Region	Pu240(n,f)		U238(n, $\sigma$ )	
	Mod.1D	1D	Mod.1D	1D
Na+Steel	-2.87	-2.84	6.34	6.15
UO <sub>2</sub>	-1.77	-1.61	-12.29	-11.95
Na+Steel	1.95	2.05	4.99	4.79
Pu	8.39	7.85	2.91	2.91
Steel	3.16	3.16	4.52	4.36
UO <sub>2</sub>	-0.70	-0.69	-12.79	-12.36
Na+Steel	-2.09	-2.16	5.98	5.83

\* Percent difference from the cell averaged (region width weighted) reaction rate ,  $B^2=0.002 \text{ cm}^{-2}$ ,  $D=D_{av}$

\*\* plate-wise micro cross sections are used

Table 12 Heterogeneity and Streaming Effect obtained  
from RZ Diffusion Calculation

Cell Model		$k_{\infty}$		$\delta(1/k)$ (%)			
		Homo	Hetro		Hetro		Total Hetero
			Homo D	Benoist D	No Streaming	Streaming	
Plate	Mod.1D	0.9910	1.0051	1.0039	1.41	-0.12	1.29
	1D		1.0039	1.0018	1.29	-0.20	1.09
	Center-line		1.0050	1.0029	1.40	-0.20	1.20
	2D		1.0069	1.0047	1.59	-0.22	1.37
Pin	1D	1.0059	1.0042	1.0019	0.36	-0.23	0.13

Table 13 Comparison of Streaming Effect obtained from Cell Calculation and RZ Diffusion Calculation with corrected collapsing method for Diffusion Coefficient

Cell Model	Streaming Effect		
	RZ	Cell	RZ/Cell
Cell 1	-0.14	-0.26	0.54
Cell 3A	-0.23	-0.50	0.46
Cell 1*	-0.12	-0.25	0.48

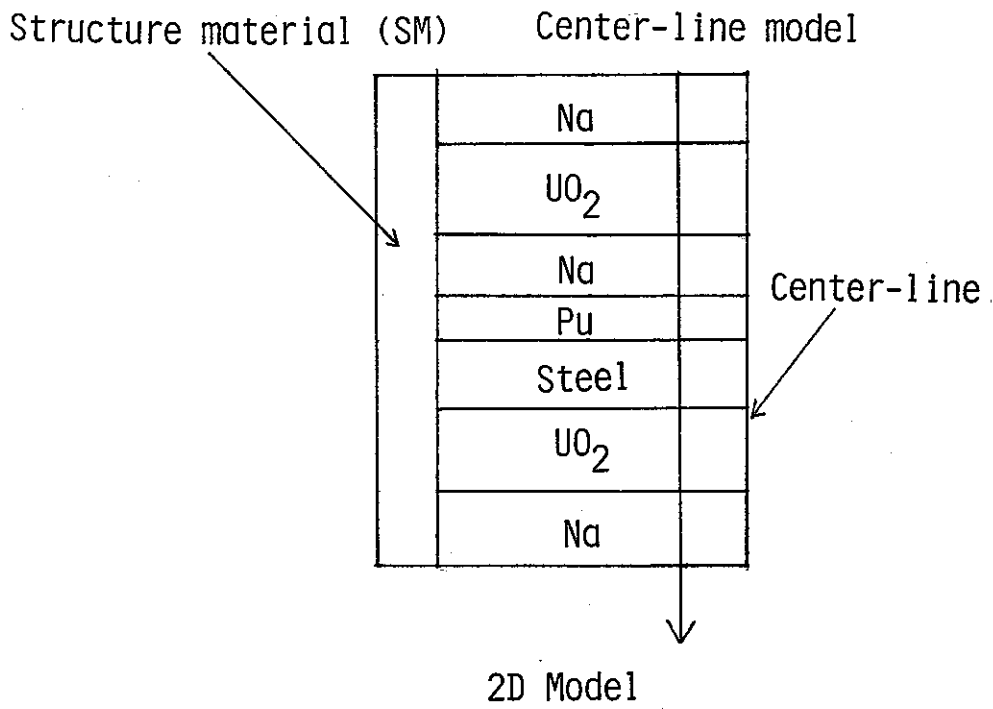
\* effective micro obtained by Tone's method

\*\* Cell 1 Mod.1D model

Table 14 C/E value of Cores for Various Cell Model

Core	Cell Model	$k_{eff}$ of 3D XYZ Diffusion	Corrected $k_{eff}$	C/E
22	Mod.1D	1.00544	1.00493	1.0029
	1D	1.00339	1.00288	1.0009
	Center-line	1.00448	1.00397	1.0020
	2D	1.00623	1.00572	1.0037
23E	1D*	1.00700	1.00610	1.0057

\* 2D cell correction obtained in 16 group is considered



Na+SM
UO <sub>2</sub>
Na+SM
Pu
Steel+SM
UO <sub>2</sub>
Na+SM

Modified 1D model

Na+SM
UO <sub>2</sub> +SM
Na+SM
Pu+SM
Steel+SM
UO <sub>2</sub> +SM
Na+SM

Simple 1D model

Fig.1 Cell models used in calculation



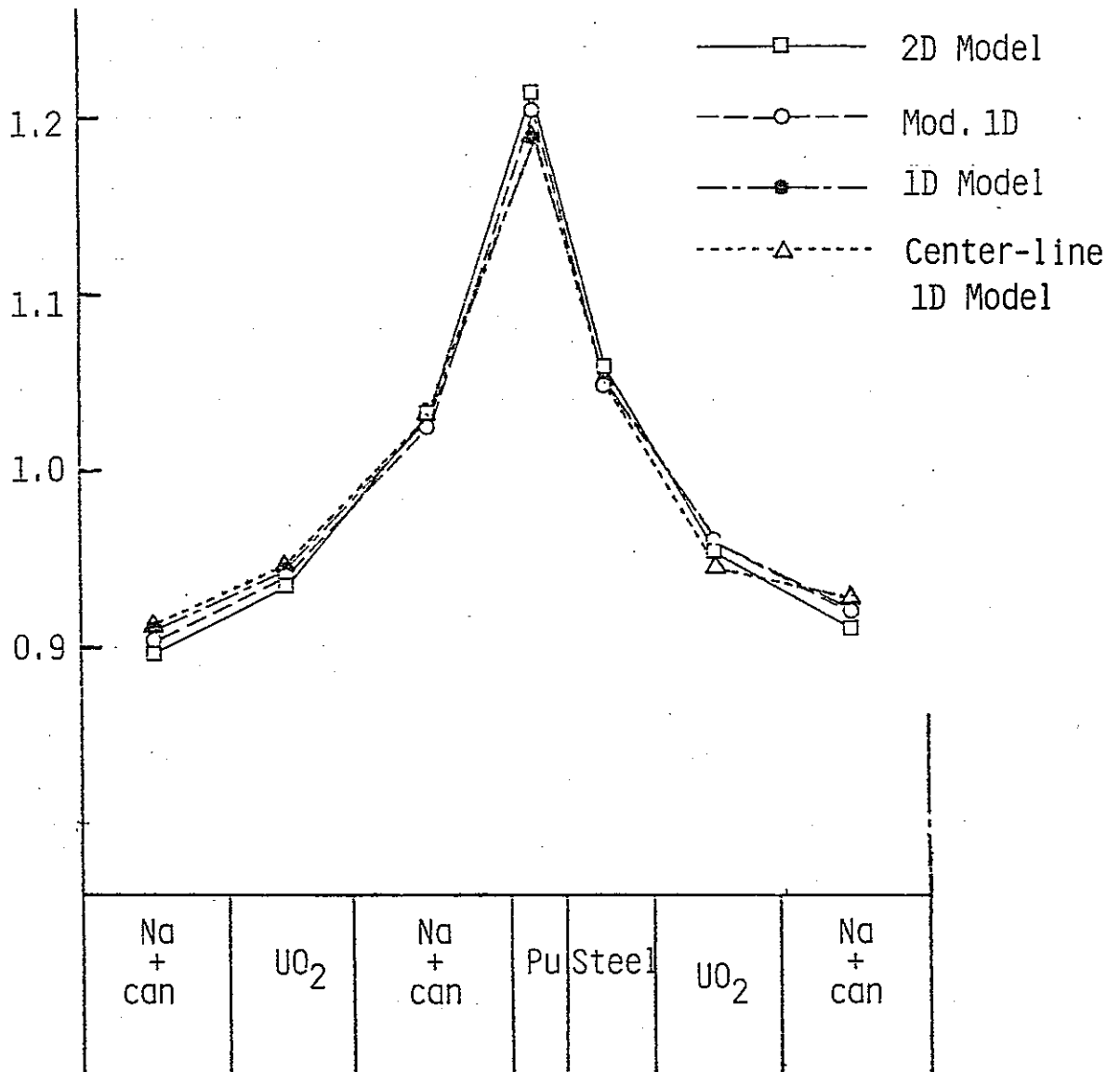


Fig.2 Comparison of intra-cell flux distribution in 1st group (CADENZA plate cell)

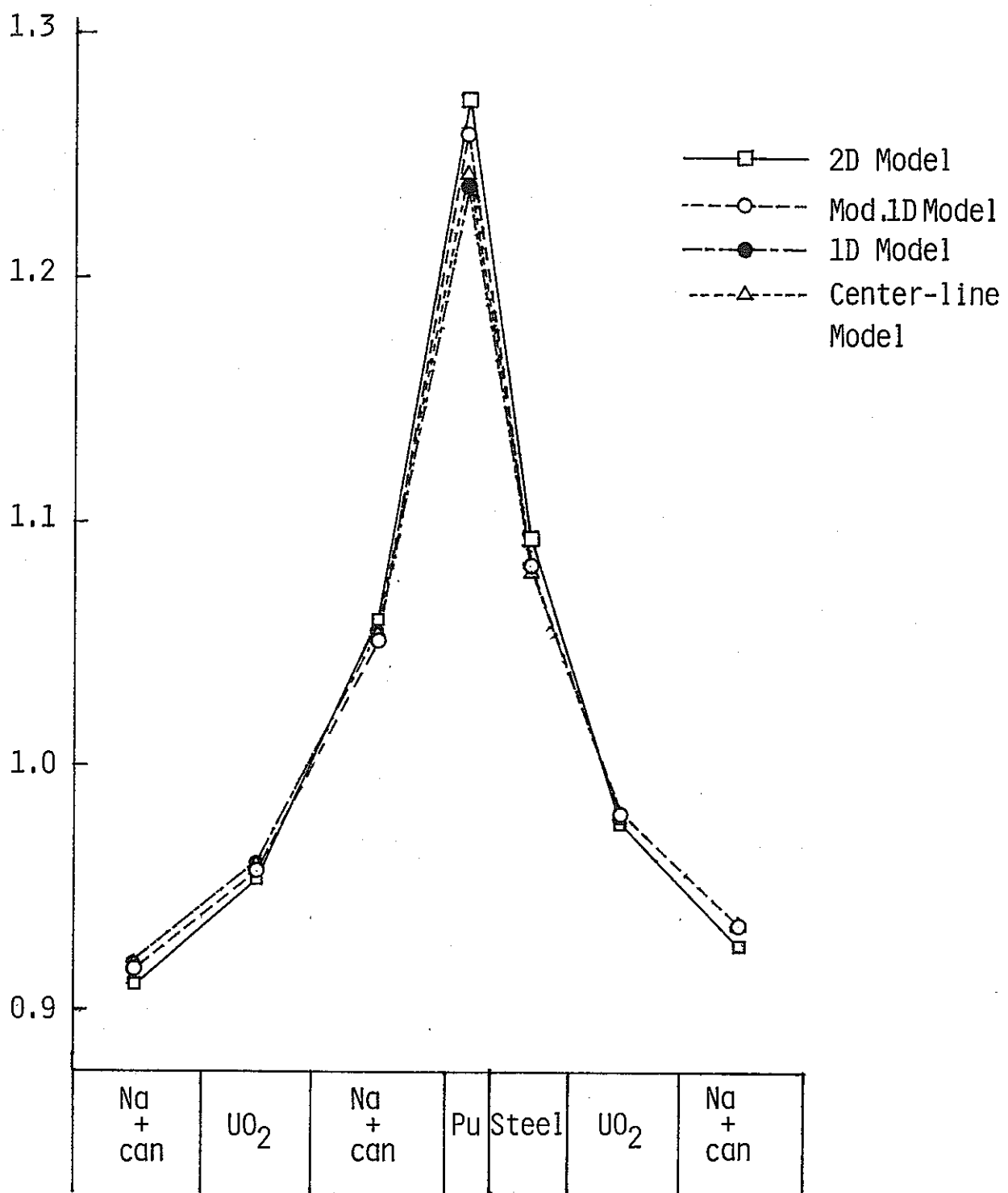
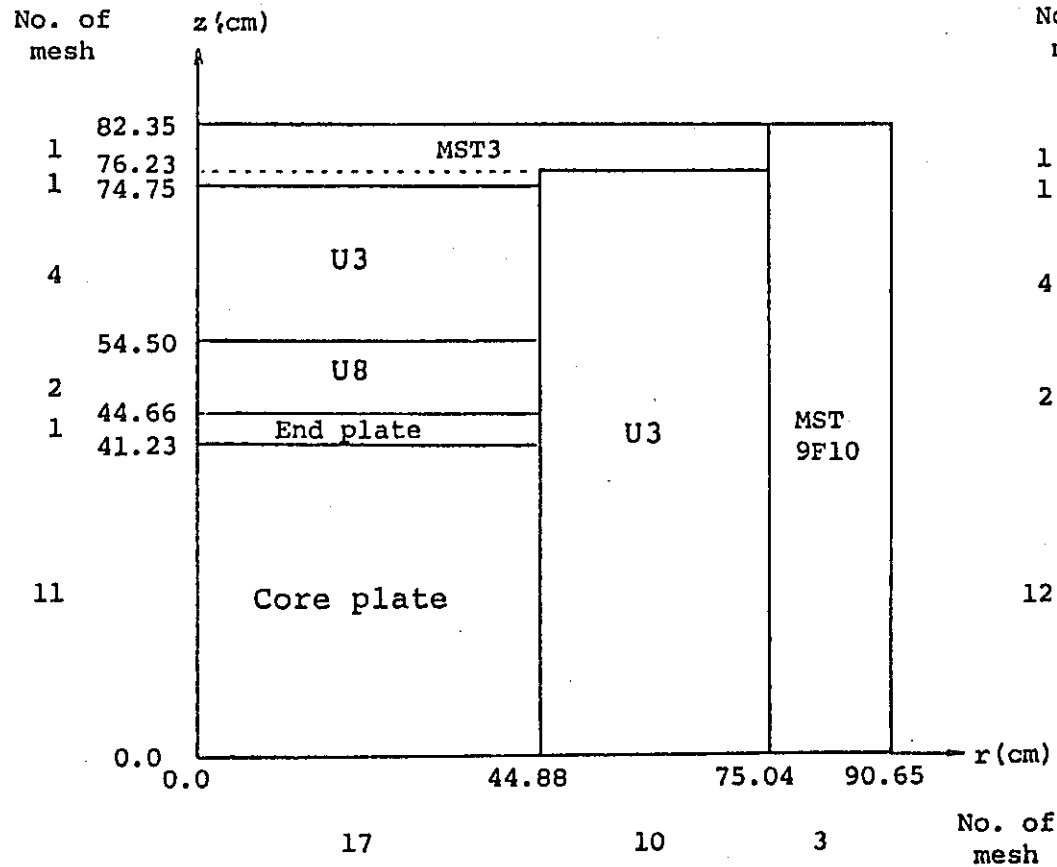
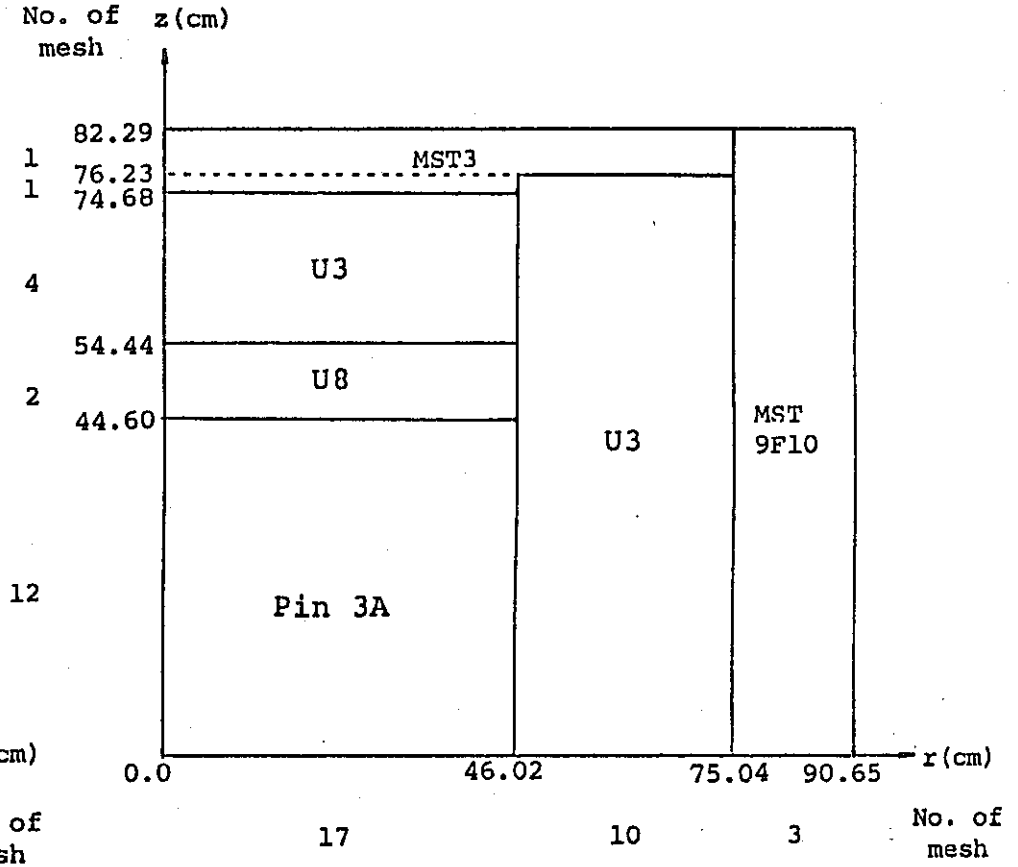


Fig.3 Comparison of intra-cell flux distribution in 1st group with critical buckling (CADENZA plate cell)



a) Core 22



b) Core 23 Ext.

Fig. 4 2-D RZ Calculational Model of Core 22,23 Ext.

## 第IV部

# 高 速 臨 界 集 合 体 核 特 性 に 対 す る 三 次 元 輸 送 効 果

# 目次

## 第一章 序論

## 第二章 輸送補正の計算法

## 第三章 計算体系とそのモデル

## 第四章 計算結果

### 4. 1 $k_{eff}$

### 4. 2 制御棒価値

### 4. 3 中性子スペクトル

### 4. 4 出力分布

### 4. 5 ナトリウムボイド反応度

## 第五章 結論

### 参考文献

## List of Tables

Table 2.1	Group Collapse Effect in Transport and Diffusion Calculation
Table 3.1	Main Reactor Parameters for ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1 and 13C
Table 3.2	Sequence of Zone Voiding in ZPPR-13A
Table 3.3	Energy Group Structure of 7 Groups
Table 3.4	Number of Mesh Points
Table 4.1.1	$k_{\text{eff}}$ for Critical References ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1 and 13C
Table 4.1.2	$k_{\text{eff}}$ Calculated by 3-D Model for the Cases with CRs and CRPs in ZPPR-13B/1
Table 4.1.3	$k_{\text{eff}}$ Calculated by 2-D Models Based on Transport Theory for the Cases with CRs and CRPs in ZPPR-13B/1
Table 4.1.4	$k_{\text{eff}}$ Calculated by 2-D Models Based on Diffusion Theory for the Cases with CRs and CRPs in ZPPR-13B/1
Table 4.1.5	Comparison of Transport Correction to $k_{\text{eff}}$ for ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1 and 13C
Table 4.2.1	CR and CRP Worths Relative to Fuel Calculated by 3-D Model
Table 4.2.2	CR and CRP Worths Relative to Fuel Calculated by 2-D Models Based on Transport Theory in ZPPR-13B/1
Table 4.2.3	CR and CRP Worths Relative to Fuel Calculated by 2-D Models Based on Diffusion Theory in ZPPR-13B/1
Table 4.2.4	Comparison of Transport Correction to CR and CRP Worths Relative to Fuel in ZPPR-13B/1
Table 4.3.1	Transport Correction on Region Averaged Flux

Spectra in Homogeneous Cores

- Table 4.3.2 Transport Correction on Region Averaged Flux Spectra in Heterogeneous Cores
- Table 4.3.3 Transport Correction on Point Flux Spectra in ZPPR-13B/1 Subcritical Reference (Center of FR1)
- Table 4.4.1 Calculated Radial Power Distribution in ZPPR-9
- Table 4.4.2 Calculated Axial Power Distribution in ZPPR-9
- Table 4.4.3 Calculated Radial Power Distribution Based on Transport Theory in ZPPR-13A
- Table 4.4.4 Calculated Radial Power Distribution Based on Diffusion Theory in ZPPR-13A
- Table 4.4.5 Calculated Axial Power Distribution in ZPPR-13A
- Table 4.4.6 Mesh Point in XYZ and RZ Model
- Table 4.4.7 Power Distribution Calculated by 3-D XYZ Model in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )
- Table 4.4.8 Power Distribution Calculated by 2-D XY Model Based on Transport Theory in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )
- Table 4.4.9 Power Distribution Calculated by 2-D XY Model Based on Diffusion Theory in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )
- Table 4.4.10 Power Distribution Calculated by 2-D RZ Model Based on Transport Theory in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )
- Table 4.4.11 Power Distribution Calculated by 2-D RZ Model Based on Diffusion Theory in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )
- Table 4.4.12 Power Distribution Calculated by 1-D R Model Based on Transport Theory in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )

Table 4.4.13 Power Distribution Calculated by 1-D R Model  
Based on Diffusion Theory in ZPPR-13B/1  
( Ring 2 CR Y-direction )

Table 4.4.14 Transport Correction to Radial Power Distribution  
in ZPPR-13B/1 before Correction  
( Ring 2 CR Y-direction )

Table 4.4.15 Transport Correction to Radial Power Distribution  
in ZPPR-13B/1  
( Ring 2 CR Y-direction )

Table 4.5.1 Transport Correction to  $k_{eff}$  for the Case with  
Na Void Region in ZPPR-13A

Table 4.5.2 Transport Correction to Na Void Worth in ZPPR-13A



## Figure Captions

- Fig. 2.1 2-D Modeling of 3-D Core to Estimate Transport Correction
- Fig. 3.1 Cross Sectional Views of ZPPR Assemblies 9, 10 and 13
- Fig. 3.2 Test Control Rod Patterns in ZPPR-13B/1
- Fig. 3.3 Interface Diagram Showing the Reference Configuration for the Sodium Voiding Experiments and Showing the Voiding Zones in ZPPR-13A
- Fig. 3.4 RZ Model for ZPPR-9 Critical Reference
- Fig. 3.5 RZ Model for ZPPR-10A Critical Reference
- Fig. 3.6 RZ Model for ZPPR-13A Critical Reference
- Fig. 3.7 RZ Model for ZPPR-13B/1 Critical Reference
- Fig. 3.8 RZ Model for ZPPR-13C Critical Reference
- Fig. 3.9 RZ Model for CR and CRP Worths Calculations in ZPPR-13B/1
- Fig. 3.10 RZ Model for Sodium Void Reactivity Calculations in ZPPR-13A
- Fig. 4.4.1 Transport Correction Factors to Radial Power Distribution in ZPPR-9
- Fig. 4.4.2 Transport Correction Factors to Axial Power Distribution in ZPPR-9
- Fig. 4.4.3 Transport Correction Factors to Radial Power Distribution in ZPPR-13A Predicted by the Three Models
- Fig. 4.4.4 Transport Correction Factors to Axial Power Distribution in ZPPR-13A

## 第一章 序論

大型高速増殖炉の核特性を調べるために日米共同による J U P I T E R (Japanese-United States Program of Integral tests and Experiment Researches) 計画のもとで高速臨界集合体による臨界実験が行われた。その Phase 1 として 700 ~ 900 MWe 級 2 領域炉心 (均質炉心) のベンチマーク実験が行われ、1982 年からは Phase 2 として径方向非均質炉心のベンチマーク実験が行われた。径方向非均質炉心とはいくつかのブランケット領域を炉心燃料領域内に含み、これによって増殖比の増加、ナトリウムボイド反応度の低減、出力分布の平坦化等の効果を狙ったものである。

これらの高速臨界集合体における核特性を解析する際に、これまでは拡散理論に基づく基準計算値に各種補正を施して計算結果を求めている。この補正の中で、輸送補正は非常に大きな効果を持つため精度の良い解析値を得るためにはこれを正確に評価する必要がある。ところが、これまでは計算時間の点から二次元体系でしか輸送補正を求められなかった。そのため、CR (制御棒) や CRP 等がオフセンターに存在する場合には二次元体系へのモデル化が困難であり、補正値を計算してもそれが実際の三次元体系での輸送効果を表しているかどうかわからなかった。特に、Phase 2 における非均質炉心では輸送補正値も大きく、問題であった。

そこで最近になって拡散合成加速法を用いた三次元輸送計算コード TRITAC<sup>(1)</sup>が開発され、比較的短時間で三次元輸送計算が出来るようになったことから、本研究ではこれを用いて実際の三次元体系から直接的に各種核特性に対する輸送補正を評価する。そしてこれをこれまでの二次元モデルから得られる輸送補正と比較し、二次元モデルの有効性についても併せて検討する。

第二章では、輸送補正の計算手法について述べる。また、今回三次元モデルとの比較に用いた 2 種類の二次元モデル、RZ モデルと XY・RZ/R モデルについても説明する。

第三章では、輸送補正の計算対象とした炉心、ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1, 13C について、それぞれの炉の特徴及び計算モデルについて示す。

第四章では、 $k_{eff}$ 、制御棒価値、中性子スペクトル、出力分布、ナトリウムボ

イド反応度に対して三次元モデルから得られた輸送補正と二次元モデルから得られたものを比較し、二次元モデルの適用性を検討する。

## 第二章 輸送補正の計算法

一般に輸送補正は、輸送理論に基づいて得られた核特性の計算値と拡散理論にとる計算値との比によって定義される。ここで輸送計算値とは、基準計算値に群縮約補正とメッシュ補正を加えたものである。しかし、輸送計算において、体系、核特性毎に群縮約補正を求めることはコストの面で困難である。そこで断面積の縮約法を工夫することで対応する。それぞれの計算に必要な断面積は、輸送計算では diagonal transport approximation を用いれば輸送断面積  $\Sigma_{tr}$ 、拡散計算では拡散係数  $D$  であるが、これらは通常次式に従い縮約される。

$$\Sigma_{tr}^g = \frac{\sum_{G \in g} \Sigma_{tr}^G \Phi^G}{\sum_{G \in g} \Phi^G} \quad (2.1)$$

$$D^g = \frac{\sum_{G \in g} D^G \Phi^G}{\sum_{G \in g} \Phi^G} \quad (2.2)$$

ここで  $\Phi$  は領域平均中性子スペクトルを表し、式中の summation は縮約後の  $g$  群に相当する縮約前のエネルギー範囲での和を表す。したがって縮約後には

$$D^g = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^g} \quad (2.3)$$

の関係式は成り立たず、これが輸送計算と拡散計算の群縮約補正の違いになっている。そこで本研究では、拡散計算で使用する拡散係数  $D$  は次の式に従って縮約した。

$$\frac{1}{D^g} = \frac{\sum_{G \in g} (1/D^G) \Phi^G}{\sum_{G \in g} \Phi^G} \quad (2.4)$$

この拡散係数  $D$  を用いた時の拡散計算の群縮約補正と、輸送計算での群縮約補正を Table 2.1 に示す。計算は ZPPR-9 の臨界体系を二次元 RZ モデル化したもので行い、輸送、拡散計算共に粗メッシュで輸送計算は  $S_4P_0$  近似とした。Table 2.1 より、 $D^g$  を用いた場合には輸送計算と拡散計算とで群縮約補正に 0.37% の差

が生じているが、 $D^{\circ}$ を用いれば0.04%の差しか生じないことがわかる。従って拡散計算において $D^{\circ}$ を用いれば、群縮約補正を考えずにすみ、結局、少数群計算だけで輸送補正が求められる事になる。

三次元輸送補正は、三次元モデルを用いて輸送計算と拡散計算を行い、それらの比から求める。これと比較するための二次元モデルとしては2種類のモデルを考えた。その一つはR Zモデルであり、体系から輸送補正を求める。このモデルは簡単ではあるが、炉のオフセンター部にCRやCRPが存在する場合にはこれらをリング化しなければならない。( Fig. 2.1 Model 1 参照)これに対するもう一つの手法は、XY, R Z, Rモデルを組み合わせるものであり、各々の体系で輸送計算と拡散計算との比から求めた輸送補正を $f(XY)$ ,  $f(RZ)$ ,  $f(R)$ とすれば、三次元相当の輸送補正 $f(XY \cdot Z)$ は、

$$f(XY \cdot Z) = f(XY) \cdot f(RZ) / f(R) \quad (2.5)$$

で定義される。つまり、輸送補正を径方向と軸方向の二つの成分に分けて考え、径方向についてはモデルの詳細なXY体系によって $f(XY)$ で評価し、軸方向については $f(RZ) / f(R)$ によって評価するものである。このモデルは複雑であるが、オフセンターのCRやCRPに対してもXYモデルで正確に取り扱うことが可能である( Fig. 2.1 Model 2 参照)。以後、このモデルをXY・R Z/Rモデルと呼ぶことにする。

### 第三章 計算体系とそのモデル

輸送補正の計算対象とした炉心は、高速臨界集合体 ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1, 13C であり、これらの X Y 断面図を Fig. 3.1 に、主な炉心パラメーターを Table 3.1 に示す。ZPPR-9 は均質炉心の炉物理ベンチマークであり、炉心内に CR や CRP を含まず、各領域がリング状になっている。したがって、この炉心は二次元モデル化が容易であり、二次元モデルの検証に適している。これに対して ZPPR-10A は均質炉心の工学ベンチマークであり、炉中心と 2 層のバンク状に合計 19 本の CRP を含み、各領域は実機を模擬した六角形状となっている。したがって ZPPR-9 での輸送補正と比較することにより、CRP が三次元輸送補正に及ぼす影響を評価することができる。ZPPR-13 シリーズは径方向非均質炉心であり、いずれも炉心内に中心ブランケット領域と 2 つの内部ブランケット領域を持ち、炉心燃料部が 3 つの領域に分けられている。ZPPR-13A は内部ブランケット領域が連続したリング状になっている炉物理ベンチマークであり、炉心燃料領域が内部ブランケット領域により完全に独立した 3 つの領域に分けられているため、炉心燃料領域同士のカップリングが非常に弱い典型的な非均質炉心である。これに対して ZPPR-13B/1 は、ZPPR-13A の 2 層の内部ブランケットリングの一部を切断して炉心燃料領域のカップリングを強めたものである。ZPPR-13C は内部ブランケット領域をスノーフレイク状にして炉心燃料領域のカップリングを強くした炉心である。これらの炉心の三次元輸送補正を調べる事により、内部ブランケット領域が輸送補正に及ぼす影響を評価することができる。

さらに CR や CRP の存在が三次元輸送補正に及ぼす影響を調べるために、これらを含む体系として ZPPR-13B/1 の未臨界集合体についても取り上げた。この炉心は Fig. 3.2 に示すように CR 又は CRP が 6 本ずつ 3 層に分けて挿入されるようになっている。ロッドの挿入位置は炉心燃料中のものとブランケットに接するものがあり、CR に対するブランケットの効果を見ることができる。

また、ナトリウムボイド反応度に対する三次元輸送補正を調べるために ZPPR-13A のナトリウムボイド反応度実験用の未臨界集合体を取り上げた。ナトリウムボイド反応度の実験は、第 1～第 3 燃料リング及び第 1、第 2 ブランケットリングがボイドになったケースで行われた。それぞれのボイドゾーンを Fig. 3.3 に

示す。また、実験の行われた順序を Table 3.2 に示す。Table 3.2 内の数字はボイドゾーンの、集合体中心面からの高さを表している。Fig. 3.3 からわかるようにボイドゾーンは x 軸方向に添って延びた形状になっており、2次元へのモデル化が難しかった。ナトリウムボイド領域は中性子ストリーミングが大きいが、輸送補正を求める際に XY 体系では軸方向のストリーミングを評価できず、RZ 体系を用いる場合にもボイド領域をリング化せねばならず径方向のストリーミングを正確に評価できないわけである。したがって、この体系が最も三次元効果が大きいと思われる。

ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1, 13C の臨界体系及び 13B/1 の制御棒価値解析用、13A のナトリウムボイド反応度解析用の二次元 RZ モデルをそれぞれ Fig. 3.4 ~ 3.10 に示す。RZ モデル化に際しては、それぞれの領域の体積を保存するようにリング化した。ZPPR-10A, 13B/1 における CR (CRP) のリング化も体積が保存するようにし、径方向位置は、各ロッドの原点からの距離の平均値がリングの体積中心になるようにとっている。Fig. 3.6~3.8 からわかるように、ZPPR-13A, 13B/1, 13C は XY 断面では非常に異なっているが、RZ モデル化した場合には、同じような体系になっている。

輸送計算は、三次元体系には TRITAC、二次元 XY, RZ, R 体系には WOTRAN-II<sup>(2)</sup> を使用した。また、拡散計算には CITATION<sup>(3)</sup> を使用した。断面積は JENDL-2 ライブラリー<sup>(4)</sup> に基づく 7 群定数を使用した。このエネルギー群構造を Table 3.3 に示す。また、計算に用いた体系のメッシュ数は、基準計算ではそれぞれの方向で約 5 cm に 1 メッシュとなるようにした。これは XY 平面では、1 ドロワ当たり 1 メッシュに相当する (ドロワとは臨界集合体を構成する最小単位で、一辺 5.52450 cm の正方形をしている)。メッシュ補正を行う際の詳細メッシュ計算では、メッシュ数が粗メッシュの 2 倍となるようにとった。それぞれの体系に対するメッシュ点の数を Table 3.4 に示す。輸送計算は  $S_4P_0$  近似で行い、 $S_N$  オーダー補正は、 $S_0P_0$  近似計算で行った。

また、XY, R 計算では、輸送計算、拡散計算共に、二次元 RZ 拡散計算から得られたバックリングを使用した。

## 第四章 計算結果

### 4.1 keff

ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1, 13C の各臨界体系に対して、三次元及び二次元の輸送計算と拡散計算から得られた $k_{eff}$ を Table 4.1.1 に示す。また、ZPPR-13B/1 の未臨界基準体系、Ring 1~3 のそれぞれにCR又はCRPが挿入された体系について、三次元計算から得られた $k_{eff}$ の値を Table 4.1.2 に、二次元体系での輸送計算によるものをTable 4.1.3 に、二次元体系での拡散計算によるものをTable 4.1.4 に、それぞれ補正係数とともに示す。拡散計算に対するメッシュ補正は無限メッシュに外挿した $k_{eff}$ から求め、輸送計算におけるメッシュ補正、 $S_N$ オーダー補正はそれぞれ詳細メッシュ、 $S_8$ 近似計算から求めた。また、三次元計算に対する補正は $XY \cdot RZ/R$ モデルのものを用いた。

Table 4.1.4 より、拡散計算におけるメッシュ補正は非均質炉心で大きく、CRを含まない体系に対しては  $-0.2 \sim 0.3 \% \Delta k$  であり、CRを含む体系に対しては  $-0.5 \% \Delta k$  にもなる。これに対して輸送計算でのメッシュ補正はCRを含む体系に対しても  $0.1 \sim 0.2 \% \Delta k$  と小さい。 $S_N$ オーダー補正についても  $0.1 \% \Delta k$  程度と小さく、メッシュ補正とほとんど打ち消し合う。このために輸送計算のメッシュ補正と $S_N$ オーダー補正を合わせた補正量は、CRを含む体系では  $0.1 \% \Delta k$  程度となるが、それ以外の未臨界基準体系やCRPを含む体系では  $0.05 \% \Delta k$  以内と小さい。このことから、ZPPR-9, 10A, 13A, 13C の臨界体系に対しては、CRを含まない体系であるので、輸送計算に対する補正はしていない。

Table 4.1.1 を見ると、各領域がリング状になっている ZPPR-13A では、三次元モデルによる $k_{eff}$ とRZモデルによるものがよく一致しているが、ZPPR-13A 以外の体系では輸送計算においても拡散計算においてもRZモデルから得られる $k_{eff}$ は、三次元モデルのものと  $0.1 \sim 0.9 \% \Delta k$  程度異なっている。特に内部ブランケットの形状が複雑な ZPPR-13B/1 と 13C で差が大きい。CRやCRPを含む ZPPR-13B/1 の各体系については、RZモデルではモデル化の手法上、 $k_{eff}$  は  $0.3 \% \Delta k$  程低くなっているが、それでもCRPを含んだ体系では三次元モデ



ルによる $k_{eff}$ との差は最大で 0.2 % $\Delta k$ 程度あり、CRを含んだ体系に対してはその差は最大で 2 % $\Delta k$ にものぼる。これに対してXY・RZ/Rモデルを用いた場合には、CRを含まない体系はもちろん、CRを含む体系に対しても 0.1 % $\Delta k$ の誤差の範囲内で三次元モデルによる $k_{eff}$ と一致するようになる。

ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1, 13C の各体系に対して、Table 4.1.1~4 に示した $k_{eff}$ から求めた三次元及び二次元体系での輸送補正を Table 4.1.5 に示す。各体系間で三次元輸送補正を比較すると典型的な均質炉心 ZPPR-9 と非均質炉心 ZPPR-13A では、13A のほうが 0.5 % $\Delta k$ 以上も輸送補正は大きくなっている。これは、ZPPR-13A が、炉心内に内部ブランケットを持つために中性子束分布の歪みが大きくなったためである。同じ非均質炉心であっても ZPPR-13B/1 のようにブランケットリングを切断すれば、炉心全体でみたとき中性子束分布は平坦化され、輸送補正も ZPPR-13A に比べ 0.15 % $\Delta k$ 小さくなる。ZPPR-13C の場合でも、ZPPR-13A より 0.07 % $\Delta k$ 小さくなることがわかる。

また、ZPPR-10A における輸送補正は ZPPR-9 のものより 0.23 % $\Delta k$ も大きくなっている。これは ZPPR-10A が 19本の3×3型CRPを含むためである。

ZPPR-13B/1 についても、未臨界基準体系に対して6本の2×3型CRPが挿入された場合には挿入位置にかかわらず輸送補正は 0.06 %増加する。これは単位ドロワ当たりでは ZPPR-9 と ZPPR-10A との輸送補正の差にほぼ等しい。CRを含む体系については、ZPPR-13B/1 で6本の2×3型CRPが挿入された場合、ブランケット近辺よりも燃料領域で挿入されたほうが輸送補正は大きくなっている。しかし平均すれば未臨界基準体系に対する輸送補正の増加量はだいたい 0.2 %となる。この数値をもとに ZPPR-10A のような体系を想定して19本のCRPが挿入された場合を考えれば輸送補正は 0.7 % $\Delta k$ 程度も増加することが予想される。

Table 4.1.5 より、二次元RZモデルから求めた輸送補正は三次元モデルから求めたものに比べ過大評価の傾向にあるが、どの体系についても 0.1 % $\Delta k$ 以内の誤差で両者は一致している。つまり、均質炉心、非均質炉心にかかわらず、またCRPの有無には関係なく、RZモデルで十分精度よく三次元輸送補正を予測できるわけである。ただしCRを含む体系については、挿入位置により 0.03 ~ 0.13 % $\Delta k$ だけ過大評価し、ZPPR-13C のように内部ブランケットの形状が複雑になれば三次元モデルとRZモデルとの差は大きくなる傾向を示す。

ZPPR-9, 13A はそれぞれ各領域がリング状になっているが、燃料領域はSCFドロワ (Pu plate を一枚だけ含む) とDCFドロワ (Pu plate を二枚含む) の二種類からできており、ドロワ内の出力も両者で 50 %程度異なる。RZモデル化の際にはこれらを均質として扱わねばならず、このような局所的な非均質性を取り扱うことはできない。このような非均質性は $k_{eff}$ に対しては ZPPR-9 で 0.1 %程度になるが (外側炉心を均質として三次元拡散計算を行った結果、 $k_{eff}$ として 1.00267 が得られた)、三次元モデルとRZモデルとの輸送補正が一致するため、このような非均質性は輸送補正にはほとんどきかないことがわかる。これは中性子束分布がなだらかに変化していて、SCFとDCFとで中性子束レベルはあまり変わらないからである。

計算モデルを詳細化してXY・RZ/Rモデルを用いた場合には、Table 4.1 .5 より全ての体系で、すなわちCRを含む体系に対しても 0.03 % $\Delta k$ の誤差の範囲内で三次元輸送補正を評価できることがわかる。また、輸送補正を各方向の成分に分けた場合、軸方向の輸送補正 (RZ/R) は、CRPを含む体系では若干大きくなるが、0.2 % $\Delta k$ 程度の値でほぼ一定となることがわかる。

## 4. 2 制御棒価値

制御棒価値 (CRワース) は、ZPPR-13B/1 体系において Ring 1~3のそれぞれに6本の2×3型CR又はCRPが挿入された場合を考えた。これらの燃料に対する反応度価値を、三次元体系で計算したものを Table 4.2.1 に、二次元輸送計算から求めたものを Table 4.2.2 に、二次元拡散計算から求めたものを Table 4.2.3 にそれぞれ補正係数とともに示す。反応度価値を計算する際に用いた $k_{eff}$ は Table 4.1.2~4 に示したものである。Table 4.2.2, 3 より、RZモデルでは輸送計算においても拡散計算においてもCRワースを過大評価している、三次元モデルの結果に比べて30~50%大きくなっている。これはRZモデル化の際にCRを幅の狭いリング状にしたためにCR内の中性子束の落込みを過小評価していることによる。これに対してXY・RZ/RモデルではCRの挿入位置によらず、1%程度の誤差内でCRワースを予測できることがわかる。CRPワースについてもRZモデルでは輸送計算、拡散計算共に最大10%過小評価するが、XY・RZ/Rモデルでは2%以内の誤差で三次元モデルの結果と一致する。

Table 4.2.1 ~ 3 に示したCR, CRPワースから計算した、これらに対する輸送補正を Table 4.2.4 に示す。この Table より、CRPワースに対してはRZ, XY・RZ/Rモデルとも輸送補正を過小評価している。三次元モデルによる輸送補正との差は、RZモデルでは最大2.0%となり、XY・RZ/Rモデルでは1.2%に小さくなっている。ただしRZモデルに関しては、三次元モデルによる輸送補正との差はCRの挿入位置に大きく依存しているため、体系をRZにモデル化する際の手法上の問題と考えられる。

CRワースに対してはRZモデルで十分に正確に三次元輸送補正を評価でき、三次元モデルとの差は最大で0.9%である。これは、更にXY・RZ/Rモデルを用いれば0.3%にまで小さくできる。CRワースに対する輸送補正で特徴的なことは軸方向(RZ/R)の寄与がほとんどなく、径方向が支配的になっていることである。

以上のことからRZモデルではCRPワースに対する輸送補正をあまり精度良く予測できないがXY・RZ/RモデルではCR, CRPワースともに正確に予測でき、その結果、輸送補正も精度良く求められることがわかる。

### 4.3 中性子スペクトル

三次元及び二次元モデルにおける領域平均中性子スペクトルに対する輸送補正を Table 4.3.1, 2 に示す。Table 4.3.1 は均質炉心に対するもので Table 4.3.2 は非均質炉心に対するものである。また輸送補正は本来、輸送計算、拡散計算のそれぞれにメッシュや $S_N$ オーダーの補正をしなければならないが、ここではこれらの値は、三次元体系と二次元体系とで等しいと仮定し、補正は施さずにそれぞれの基準計算値から求めている。

Table 4.3.1, 2 より、RZモデルから求めた輸送補正は、ZPPR-9, 13A, 13B/1, 13C のCRPを含まない体系に対しては、三次元モデルによるものとほとんど等しくなることがわかる。内部ブランケットがスノーフレイク状で、RZモデル化が困難な ZPPR-13C でも、スペクトルに対する輸送補正は、RZモデルで十分精度良く評価できるわけである。ところが ZPPR-10A に対してはRZモデルと三次元モデルで特にCRP領域で大きな差がみられる。RZモデルの方がスペクトルがハードになっていることから、これはCRPがリング化によって幅の狭い領域になったためと考えられる。しかし、XY・RZ/Rモデルを用いた場合には、CRP領域に対しても、スペクトルに対する輸送補正を正確に評価できるようになる。

また、中性子スペクトルに対する輸送及び拡散計算での補正係数について、ZPPR-13B/1 未臨界基準体系の第1燃料リング中心のポイントスペクトルを例にして Table 4.3.3 に記しておく。計算体系は1次元のR体系である。輸送と拡散で相殺はするものの、輸送補正を求める際には無視できない。

#### 4.4 出力分布

ZPPR-9 における、集合体中心面での  $x$  軸に沿った出力分布について、三次元モデル及び二次元 R Z モデルでの基準計算結果を Table 4.4.1 に、また、炉中心での  $z$  軸方向の出力分布の計算結果を Table 4.4.2 に示す。出力の値は、炉心全体で 1 になるように規格化している。Table 4.4.1, 2 における輸送計算と拡散計算の結果から求めた出力分布に対する輸送補正を、径方向、軸方向それぞれについて Fig. 4.4.1, 2 に示す。輸送補正は、輸送計算、拡散計算とも、補正を施していない基準計算の結果から求めている。また、ここでは輸送補正を輸送計算値と拡散計算値との % 差で表している。Fig. 4.4.1, 2 より、径方向、軸方向のどちらの方向に対しても R Z モデルによる輸送補正は、三次元モデルによるものとよく一致することがわかる。

ZPPR-13A において、 $x$  軸に沿った出力分布の計算結果を、輸送計算によるものを Table 4.4.3 に、拡散計算によるものを Table 4.4.4 に示す。また、 $z$  軸に沿った出力分布の計算結果を Table 4.4.5 に示す。これらの結果から求めた出力分布に対する輸送補正を三次元モデルと二次元モデルで比較したものを、径方向、軸方向についてそれぞれ Fig. 4.4.3, 4 に示す。R Z モデルでは、径方向について各ブランケット領域、特に中心ブランケット領域で、三次元モデルのものとの違いが見られるが、全体的にはよく一致している。軸方向分布についても絶対値は異なっているもののシェイプはよく一致している。XY・R Z/R モデルを用いた場合には、さらによく三次元輸送補正を評価できるようになり、中心ブランケット領域内においても、三次元モデルとよく一致するようになる。

つぎに ZPPR-13B/1 において Ring 2 に CR が挿入された体系において、 $y$  軸に沿った出力分布を、XYZ、XY、R Z、R の各モデルで輸送及び拡散計算を行った結果を、それぞれの補正係数と共に Table 4.4.6~13 に示す。Table 4.4.6 は XYZ 体系の  $Y$  軸方向と R Z 体系での  $R$  軸方向のメッシュ点を示したものである。Table 4.4.9, 11, 13 より拡散計算におけるメッシュ補正は燃料ブランケットの領域で大きく、最大で 4 % になる。ただしメッシュ効果はブランケット領域で大きく、炉心燃料部では小さい。また、メッシュ効果は CR に接する領域でも大きく、XY 体系では -4 % にもなるが、R Z 体系では -1.3 % と小さい。

これはR Z体系ではCRが薄いリング状になっているために中性子束の変化が比較的小さくなったからである。また、R Z体系とR体系ではメッシュ補正はほとんど等しい。

Table 4.4.8, 10, 12 において輸送計算に対する補正のうち、メッシュ補正は、炉中心と燃料-ブランケット境界で最大 2 %程度であり、径ブランケットでは 5 %にもなる。ただし、拡散計算の場合と同様に、補正はブランケット領域にしかかかない。CRの隣接部でもメッシュ補正は 1.5 %程度になる。S<sub>N</sub>オーダー補正も燃料-ブランケット領域で大きいのが、境界面より領域内側で大きくなる。メッシュ補正とS<sub>N</sub>オーダー補正をあわせた補正は、燃料領域では小さいもののブランケット領域で 4~5 %、最大では 10 %にも達する。

Table 4.4.7~13 に示した結果から計算した各体系での出力分布に対する輸送補正を、基準計算によるものを Table 4.4.14 に、補正後のものを Table 4.4.15 に示す。Table 4.4.15 より、出力分布に対する輸送補正は、ブランケット領域で -3 ~ 8 %と大きく、炉心燃料部では最大 1.8 %程度であまり大きくならない。CRに隣接する燃料部では -1.6 %になっている。また同じ Table から、R Zモデルの輸送補正は、径トラバースにブランケットを含むため、三次元モデルのものとは大きく異なっている。しかし、R体系でもR Z体系と同様の輸送効果があるので、結局、軸方向成分のR Z/Rは、領域にあまりかかわらず 0.5 %程度と小さく、XY・R Z/Rモデルを用いれば三次元モデルによる結果とよく一致するようになる。

#### 4.5 ナトリウムボイド反応度

実験でナトリウムボイド反応度の測定が行われたボイドステップのうち、軸方向中性子もれの効果に比べて径方向中性子もれの効果が支配的な、ZONE 1 ~ 5 の燃料領域のすべてがボイドになった Step 6 (Table 3.2 参照) について輸送補正の計算を行った。また、これと比較するために軸方向のもれの寄与が大きい体系として、実験にはないが、第2燃料リングの ZONE 3 が、炉心高さ (± 18 inch) までボイドになった場合 (ここでは Step A と呼ぶことにする) についても計算を行った。ナトリウムボイド反応度はすべて直接計算によるものとした。

三次元及び二次元体系において輸送計算と拡散計算によって得られた  $k_{eff}$  及びこれに対する輸送補正を Table 4.5.1 に示す。輸送補正は本来、輸送、拡散計算のそれぞれでメッシュや  $S_N$  オーダーの補正をしなければならないが、これらの値は三次元体系と二次元体系とで等しいと仮定し、ここでは補正は施していない。

Table 4.5.1 より、各モデルで  $k_{eff}$  に対する輸送補正は、ボイド領域の有無にはあまり影響を受けないが、三次元モデルから得られたものと比較して XY モデルでは過小評価、RZ, R モデルでは過大評価の傾向が見られる。特にこの傾向は RZ モデルで強くなっている。これに対して、XY・RZ/R モデルを用いた場合には、どちらの体系に対しても  $k_{eff}$  に対する輸送補正はほぼ正確に評価できることが分かる。

Table 4.5.1 に示した  $k_{eff}$  により計算した各ステップにおけるナトリウムボイド反応度を Table 4.5.2 に示す。この Table より、ナトリウムボイド反応度に対する輸送補正は、三次元体系で計算すればボイドパターンによらず、同じような値になることがわかる。三次元モデルと二次元モデルとを比較した場合には、ボイドによる径方向中性子もれの効果が支配的である Step 6 については、XY モデルでも、RZ モデルであっても輸送補正を正確に予測できることがわかる。これに対して、ボイドによる軸方向中性子もれの効果の大きい Step A については、XY モデルでは、バックリングによって軸方向もれを抑えるので輸送補正を正確に評価する事はできず、RZ モデルであっても、モデル化の際にボイド領域を薄いリング状にしてしまうので、軸方向もれの効果を正確に取り入れられず、輸送補正を正しく評価できない。また、XY・RZ/R モデルを用いても、径方

向、軸方向の各成分が正しく評価できていないので、三次元モデルによる輸送補正とは一致しない。



## 第五章 結論

本研究では高速臨界集合体 ZPPR シリーズのうち、均質炉心として ZPPR-9, 10A, 径方向非均質炉心として ZPPR-13A, 13B/1, 13C に関して輸送補正を直接的に三次元モデルを用いて計算し、二次元モデルから求めたものと比較した。対象とした核特性は  $k_{eff}$ , 制御棒価値、中性子スペクトル、出力分布、ナトリウムボイド反応度である。三次元輸送計算には拡散合成加速法を用いた  $S_N$  コード TRI TAC を使用し、断面積は JENDL-2 より計算した 7 群定数を使用した。比較する際の二次元モデルとしては、RZ モデルと XY・RZ/Z モデルの 2 種類を考えた。XY・RZ/R モデルとは、輸送補正の径方向成分を XY 体系で、軸方向成分を RZ と R 体系から評価するものである。比較の結果、各核特性に対して次のようなことがわかった。

1)  $k_{eff}$ : RZ モデルで得られる  $k_{eff}$  は、CR や CRP を含む体系に対しては三次元モデルによるものと一致しない。このため、CR を含む体系に対しては、RZ モデルでは輸送補正を過大評価する。これに対して、XY・RZ/R モデルでは  $k_{eff}$  を正確に求めることができ、輸送補正も正確に求められる。

2) 制御棒価値: RZ モデルでは CR ワースを 30 ~ 50 % 過大評価し、CRP ワースに対しては 3 ~ 10 % 過小評価する。これは、オフセンターのロッドを幅の狭いリング状にしたために、ロッド内の中性子束分布を正確に取り扱えなかったことによる。CR ワースに対する輸送補正は、RZ モデルで十分精度は良いが、CRP ワースに対しては精度が悪くなる。しかし、XY・RZ/R モデルを用いればワースを正確に求められ、輸送補正值も精度良く求められる。

3) 中性子スペクトル: 燃料領域とブランケット領域のスペクトルについては、ZPPR-13C のような複雑な形状を持つものに対しても RZ モデルで十分精度良く輸送補正を評価できる。CRP 領域に対しては RZ モデルでは誤差は大きくなるが、XY・RZ/R モデルを用いれば精度よく三次元輸送効果を求めることができる。

4) 出力分布： 径方向・軸方向分布のいずれに対しても、R Zモデルでは精度良く三次元輸送補正を予測できない場合が生じるが、XY・R Z/Rモデルを使用すれば十分な精度で予測できるようになる。これはCRを含む体系についても当てはまる。

5) ナトリウムボイド反応度： 軸方向もれの効果に比べて径方向もれの効果が大きなボイドパターンでは、R Zモデルではワースを正確に求められないものの、輸送補正は正確に予測できる。XY・R Z/Rモデルでは、ワースも、輸送補正も精度よく求めることができる。しかし、軸方向もれの効果の大きなボイドパターンでは、R Zモデル、XY・R Z/Rモデル共、ワースを正確に求められず、輸送補正も正確に評価できない。

## REFERENCES

- (1) M. Bando, T. Yamamoto, Y. Saito and T. Takeda "Three-Dimensional Transport Calculation Method for Eigenvalue Problems Using Diffusion Synthetic Acceleration", To be published in J. Nucl. Sci. Technol.
- (2) K. Lathlop and F. Brinkley : LA-4848-MS(1973).
- (3) T.B. Fowler, D.R. Vondy, G.W. Cunningham : Nuclear reactor code analysis code; CITATION, ORNL-TM-2496, Rev. 2, (1971).
- (4) Y. Kikuchi et al. : J. Nucl. Sci. Technol., 22, 593(1985).

Table 2.1 Group Collapse Effect in Transport and Diffusion Calculation

No. of Group	Transport(T)	Diffusion(D)	
		$D_g$	$D'_g$
70	1.00003	0.99905 (1.0010)*	—
7	1.00459	0.99993 (1.0047)*	1.00329 (1.0013)*
Correction Factor	1.0046	1.0009	1.0042

\* Transport Correction ( T/D )

Table 3.1 Main Reactor Parameters for ZPPR-9, 10A, 13A, 13B, 13C

	ZPPR-9	ZPPR-10A	ZPPR-13A	ZPPR-13B	ZPPR-13C
Core Volume(l)	4592	4589*	5725**	5725**	5882**
Fissile Pu(kg)	1955	2071	2460	2392	2470
Core Height(m)	1.018	1.018	0.916	0.916	0.916
Core Radius(m)	1.20	1.20*	1.41**	1.41**	1.43**

\* Excluding CRPs.

\*\* Fuel plus Internal Blanket Zones.

Table 3.2 Sequence of Zone Voiding in ZPPR-13A

	Void Zone						
	1st F.R.		2nd F.R.	3rd F.R.		2nd B.R.	1st B.R.
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7
Step 1	$\pm 8$ In						
2	$\pm 12$ In						
3	↓	$\pm 12$ In					
4	↓	↓	$\pm 12$ In				
5	↓	↓	↓	$\pm 12$ In			
6	↓	↓	↓	↓	$\pm 12$ In		
7	↓	↓	↓	↓	↓	$\pm 8$ In	
8	↓	↓	↓	↓	↓	↓	$\pm 8$ In
(9)	$\pm 8 \sim \pm 12$ In	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Table 3.3 Energy Group Structure of 7 Groups

Group	Energy Range ( eV )	
1	1.00 E 7	- 3.6788 E 6
2	3.6788 E 6	- 1.3534 E 6
3	1.3534 E 6	- 8.6517 E 4
4	8.6517 E 4	- 9.1188 E 3
5	9.1188 E 3	- 9.6112 E 2
6	9.6112 E 2	- 1.0130 E 2
7	1.0130 E 2	- 1. E-5

Table 3.4 Number of Mesh Points

Assemblies		3-D	2-D		
		XYZ	XY	RZ	R
ZPPR-9	coarse	29 x 29 x 22	29 x 29	34 x 22	34
	fine	_____	_____	68 x 44	_____
ZPPR-10A	coarse	30 x 31 x 22	30 x 31	37 x 22	37
	fine	_____	60 x 62	74 x 44	74
ZPPR-13A	coarse	34 x 34 x 22	34 x 34	37 x 22	37
	fine	_____	68 x 68	74 x 44	74
ZPPR-13B/1	coarse	34 x 34 x 22	34 x 34	39 x 22	39
	fine	_____	68 x 68	78 x 44	78
ZPPR-13C	coarse	35 x 34 x 22	35 x 34	38 x 22	38
	fine	_____	_____	76 x 44	_____

Table 4.1.1  $k_{eff}$  for Critical References ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1 and 13C

Assemblies	3 - D				2 - D				
	Transport Coarse, $S_4$	Diffusion			Transport Coarse, $S_4$	Diffusion			
		Coarse	Corrected			Coarse	Fine	Correction	Corrected $k_{eff}$
ZPPR-9	1.00324	1.00170	1.00060	RZ	1.00459	1.00329	1.00246	0.9989	1.00218
ZPPR-10A	0.99355	0.99011	0.98868	XY	0.99202	0.99019	0.98945	0.9990	0.98920
				RZ	0.99472	0.99117	0.99017	0.9986	0.98983
				R	0.99273	0.99114	0.99046	0.9991	0.99023
				XY·RZ/R	0.99401	0.99023	0.98916	0.9986	0.98881
ZPPR-13A	0.99429	0.98912	0.98631	XY	0.99675	0.99260	0.99114	0.9980	0.99065
				RZ	0.99482	0.98920	0.98711	0.9972	0.98641
				R	0.99712	0.99254	0.99110	0.9981	0.99062
				XY·RZ/R	0.99444	0.98925	0.98715	0.9972	0.98645
ZPPR-13B/1	1.00765	1.00355	1.00109	XY	1.00664	1.00345	1.00223	0.9984	1.00182
				RZ	1.00522	1.00068	0.99891	0.9976	0.99832
				R	1.00420	1.00061	0.99946	0.9985	0.99908
				XY·RZ/R	1.00766	1.00353	1.00168	0.9975	1.00107
ZPPR-13C	1.00670	1.00210	0.99936	RZ	0.99801	0.99269	0.99065	0.9973	0.98997



Table 4.1.2  $k_{eff}$  Calculated by 3-D Model for the  
Cases with CRs and CRPs in ZPPR-13B/1

Assemblies	Transport		Diffusion	
	Coarse, $S_4$	Corrected	Coarse	Corrected
Subcritical Reference	1.00701	1.00737	1.00290	1.00045
Ring 1 CRP	0.99332	0.99346	0.98872	0.98610
Ring 1 CR	0.96639	0.96702	0.96358	0.95863
Ring 2 CRP	0.99104	0.99136	0.98659	0.98398
Ring 2 CR	0.95116	0.95202	0.94947	0.94327
Ring 3 CRP	0.99397	0.99422	0.98941	0.98683
Ring 3 CR	0.96305	0.96372	0.96083	0.95543

Table 4.1.3  $k_{eff}$  Calculated by 2-D Models Based on Transport Theory for the Cases with CRs and CRPs in ZPPR-13B/1

Assemblies		Calculated $k_{eff}$			Correction Factors			Corrected $k_{eff}$
		Coarse, $S_4$	Fine, $S_4$	Coarse, $S_8$	Mesh	$S_N$	Total	
Subcritical Reference	XY	1.00004	1.00094	0.99960	1.0009	0.9996	1.0005	1.00050
	RZ	1.00177	1.00283	1.00065	1.0011	0.9989	0.9999	1.00170
	R	0.99554	0.99644	0.99466	1.0009	0.9991	1.0000	0.99557
	XY·RZ/R	1.00630	1.00735	1.00562	1.0010	0.9993	1.0004	1.00666
Ring 1 CRP	XY	0.98617	0.98701	0.98568	1.0009	0.9995	1.0004	0.98653
	RZ	0.98870	0.98972	0.98748	1.0010	0.9988	0.9998	0.98850
	R	0.98203	0.98299	0.98110	1.0010	0.9991	1.0000	0.98206
	XY·RZ/R	0.99286	0.99377	0.99209	1.0009	0.9992	1.0001	0.99300
Ring 1 CR	XY	0.95997	0.96107	0.95943	1.0011	0.9994	1.0006	0.96053
	RZ	0.94844	0.95026	0.94707	1.0019	0.9985	1.0005	0.94888
	R	0.94276	0.94440	0.94150	1.0017	0.9987	1.0004	0.94314
	XY·RZ/R	0.96575	0.96704	0.96511	1.0013	0.9993	1.0007	0.96638
Ring 2 CRP	XY	0.98379	0.98470	0.98334	1.0009	0.9995	1.0005	0.98424
	RZ	0.98752	0.98860	0.98646	1.0011	0.9989	1.0000	0.98753
	R	0.98073	0.98168	0.97994	1.0010	0.9992	1.0002	0.98088
	XY·RZ/R	0.99060	0.99164	0.98989	1.0011	0.9993	1.0003	0.99092
Ring 2 CR	XY	0.94479	0.94623	0.94416	1.0015	0.9993	1.0009	0.94560
	RZ	0.93164	0.93359	0.93042	1.0021	0.9987	1.0008	0.93236
	R	0.92596	0.92776	0.92485	1.0020	0.9988	1.0007	0.92665
	XY·RZ/R	0.95058	0.95217	0.94984	1.0017	0.9992	1.0009	0.95143
Ring 3 CRP	XY	0.98676	0.98765	0.98629	1.0009	0.9995	1.0004	0.98718
	RZ	0.98980	0.99087	0.98859	1.0011	0.9988	0.9999	0.98966
	R	0.98307	0.98402	0.98215	1.0010	0.9991	1.0000	0.98310
	XY·RZ/R	0.99351	0.99453	0.99276	1.0010	0.9992	1.0003	0.99376
Ring 3 CR	XY	0.95649	0.95785	0.95588	1.0014	0.9994	1.0008	0.95724
	RZ	0.94001	0.94187	0.93856	1.0020	0.9984	1.0004	0.94041
	R	0.93351	0.93527	0.93225	1.0019	0.9986	1.0005	0.93400
	XY·RZ/R	0.96314	0.96461	0.96235	1.0015	0.9992	1.0007	0.96382

Table 4.1.4  $k_{eff}$  Calculated by 2-D Models Based on Diffusion Theory  
for the Cases with CRs and CRPs in ZPPR-13B/1

Assemblies		Calculated $k_{eff}$		Mesh Correction	Corrected $k_{eff}$
		Coarse	Fine		
Subcritical Reference	XY	0.99677	0.99558	0.9984	0.99518
	RZ	0.99711	0.99537	0.9977	0.99479
	R	0.99181	0.99070	0.9985	0.99033
	XY·RZ/R	1.00210	1.00027	0.9976	0.99966
Ring 1 CRP	XY	0.98259	0.98126	0.9982	0.98081
	RZ	0.98343	0.98157	0.9975	0.98095
	R	0.97799	0.97676	0.9983	0.97635
	XY·RZ/R	0.98805	0.98609	0.9973	0.98543
Ring 1 CR	XY	0.95791	0.95484	0.9957	0.95382
	RZ	0.94440	0.94118	0.9954	0.94010
	R	0.93942	0.93682	0.9963	0.93596
	XY·RZ/R	0.96299	0.95928	0.9949	0.95804
Ring 2 CRP	XY	0.98041	0.97909	0.9982	0.97865
	RZ	0.98267	0.98082	0.9975	0.98020
	R	0.97717	0.97594	0.9983	0.97553
	XY·RZ/R	0.98593	0.98398	0.9974	0.98333
Ring 2 CR	XY	0.94388	0.93987	0.9943	0.93853
	RZ	0.92815	0.92471	0.9951	0.92357
	R	0.92320	0.92038	0.9959	0.91944
	XY·RZ/R	0.94894	0.94430	0.9935	0.94275
Ring 3 CRP	XY	0.98324	0.98194	0.9982	0.98151
	RZ	0.98447	0.98266	0.9975	0.98205
	R	0.97902	0.97783	0.9984	0.97744
	XY·RZ/R	0.98872	0.98679	0.9974	0.98615
Ring 3 CR	XY	0.95503	0.95159	0.9952	0.95044
	RZ	0.93516	0.93211	0.9956	0.93109
	R	0.92960	0.92714	0.9965	0.92632
	XY·RZ/R	0.96074	0.95669	0.9944	0.95534

Table 4.1.5 Comparison of Transport Correction to  $k_{eff}$  for ZPPR-9, 10A, 13A, 13B/1 and 13C

Assemblies	3-D		2-D			
	XYZ	XY	RZ	R	RZ/R	XY·RZ/R
Critical Reference						
ZPPR-9	1.0026	—	1.0024	—	—	—
ZPPR-10A	1.0049	1.0029	1.0049	1.0025	1.0024	1.0053
ZPPR-13A	1.0081	1.0062	1.0085	1.0066	1.0020	1.0081
ZPPR-13B/1	1.0066	1.0048	1.0069	1.0051	1.0018	1.0066
ZPPR-13C	1.0074	—	1.0081	—	—	—
ZPPR-13B/1						
Subcritical Reference	1.0069	1.0054	1.0070	1.0053	1.0017	1.0070
Ring 1 CRP	1.0075	1.0058	1.0077	1.0059	1.0018	1.0077
Ring 1 CR	1.0088	1.0070	1.0093	1.0077	1.0017	1.0087
Ring 2 CRP	1.0075	1.0057	1.0075	1.0055	1.0020	1.0077
Ring 2 CR	1.0093	1.0075	1.0095	1.0078	1.0017	1.0092
Ring 3 CRP	1.0075	1.0058	1.0078	1.0058	1.0019	1.0077
Ring 3 CR	1.0087	1.0072	1.0100	1.0083	1.0017	1.0089

Table 4.2.1 CR and CRP Worths Relative to Fuel  
 Calculated by 3-D Model  
 ( %  $\Delta(1/k)$  )

Assemblies	Transport		Diffusion	
	Coarse, $S_4$	Corrected	Coarse	Corrected
Ring 1 CRP	1.369	1.391	1.430	1.455
Ring 1 CR	4.174	4.143	4.069	4.361
Ring 2 CRP	1.600	1.604	1.648	1.673
Ring 2 CR	5.831	5.772	5.611	6.059
Ring 3 CRP	1.303	1.313	1.360	1.380
Ring 3 CR	4.533	4.496	4.365	4.710

Table 4.2.2 CR and CRP Worths Relative to Fuel Calculated by 2-D Models  
 Based on Transport Theory in ZPPR-13B/1 ( %  $\Delta(1/k)$  )

Assemblies	Calculated CR and CRP Worth			Correction Factors			Corrected CR,CRP Worth	
	Coarse, S <sub>4</sub>	Fine, S <sub>4</sub>	Coarse, S <sub>8</sub>	Mesh	S <sub>N</sub>	Total		
Ring 1 CRP	XY	1.407	1.410	1.413	1.002	1.004	1.006	1.416
	RZ	1.320	1.321	1.333	1.001	1.010	1.010	1.333
	R	1.382	1.374	1.389	0.994	1.005	0.999	1.381
	XY·RZ/R	1.344	1.355	1.355	1.009	1.008	1.017	1.367
Ring 1 CR	XY	4.174	4.145	4.189	0.993	1.004	0.996	4.159
	RZ	5.613	5.516	5.654	0.983	1.007	0.990	5.556
	R	5.623	5.531	5.677	0.983	1.010	0.993	5.583
	XY·RZ/R	4.166	4.134	4.171	0.992	1.001	0.993	4.139
Ring 2 CRP	XY	1.652	1.648	1.654	0.998	1.002	0.999	1.651
	RZ	1.440	1.435	1.438	0.996	0.998	0.994	1.433
	R	1.516	1.510	1.511	0.996	0.996	0.992	1.504
	XY·RZ/R	1.569	1.567	1.574	0.999	1.003	1.002	1.572
Ring 2 CR	XY	5.848	5.776	5.875	0.988	1.005	0.992	5.803
	RZ	7.515	7.396	7.543	0.984	1.004	0.988	7.424
	R	7.548	7.429	7.589	0.984	1.006	0.990	7.470
	XY·RZ/R	5.823	5.750	5.840	0.988	1.003	0.990	5.767
Ring 3 CRP	XY	1.346	1.344	1.350	0.999	1.003	1.002	1.348
	RZ	1.208	1.203	1.219	0.996	1.009	1.006	1.215
	R	1.274	1.267	1.280	0.995	1.005	1.000	1.274
	XY·RZ/R	1.276	1.276	1.286	1.000	1.008	1.008	1.286
Ring 3 CR	XY	4.553	4.494	4.576	0.987	1.005	0.992	4.517
	RZ	6.559	6.454	6.612	0.984	1.008	0.992	6.506
	R	6.674	6.564	6.731	0.983	1.009	0.992	6.620
	XY·RZ/R	4.475	4.419	4.495	0.987	1.005	0.992	4.439

Table 4.2.3 CR and CRP Worths Relative to Fuel Calculated by 2-D Models  
Based on Diffusion Theory in ZPPR-13B/1 ( %  $\Delta(1/k)$  )

Assemblies		Calculated CR,CRP Worth		Mesh Correction	Corrected CR,CRP Worth
		Coarse	Fine		
Ring 1 CRP	XY	1.448	1.466	1.017	1.472
	RZ	1.396	1.413	1.017	1.419
	R	1.424	1.441	1.015	1.446
	XY•RZ/R	1.418	1.437	1.018	1.444
Ring 1 CR	XY	4.070	4.285	1.071	4.357
	RZ	5.598	5.785	1.045	5.848
	R	5.623	5.805	1.043	5.866
	XY•RZ/R	4.052	4.270	1.072	4.344
Ring 2 CRP	XY	1.674	1.691	1.014	1.697
	RZ	1.474	1.491	1.016	1.497
	R	1.510	1.526	1.014	1.532
	XY•RZ/R	1.633	1.652	1.015	1.659
Ring 2 CR	XY	5.622	5.954	1.079	6.065
	RZ	7.452	7.677	1.040	7.752
	R	7.493	7.713	1.039	7.786
	XY•RZ/R	5.591	5.926	1.080	6.038
Ring 3 CRP	XY	1.381	1.395	1.013	1.399
	RZ	1.288	1.300	1.013	1.304
	R	1.317	1.329	1.011	1.332
	XY•RZ/R	1.350	1.365	1.015	1.370
Ring 3 CR	XY	4.385	4.643	1.079	4.730
	RZ	6.644	6.819	1.035	6.878
	R	6.747	6.920	1.034	6.978
	XY•RZ/R	4.318	4.575	1.080	4.662

Table 4.2.4 Comparison of Transport Correction to CR and CRP Worths  
Relative to Fuel in ZPPR-13B/1

Assemblies	3-D	2-D				
	XYZ	XY	RZ	R	RZ/R	XY·RZ/R
Ring 1 CRP	0.956	0.962	0.940	0.955	0.984	0.947
Ring 1 CR	0.950	0.954	0.950	0.952	0.998	0.953
Ring 2 CRP	0.959	0.972	0.957	0.982	0.975	0.948
Ring 2 CR	0.953	0.957	0.958	0.959	0.998	0.955
Ring 3 CRP	0.951	0.964	0.931	0.956	0.974	0.939
Ring 3 CR	0.955	0.955	0.946	0.949	0.997	0.952



Table 4.3.1 Transport Correction on Region Averaged Flux Spectra in Homogeneous Cores

Group	ZPPR-9		ZPPR-10A			
	RZ	XYZ	RZ	XY·RZ/R	XYZ	
Central CRP	1		0.9471	0.9073	0.9101	
	2		0.9866	0.9595	0.9624	
	3		1.0125	1.0037	1.0048	
	4	—	1.0133	1.0107	1.0100	
	5		0.9799	0.9953	0.9917	
	6		0.9391	1.0007	0.9814	
	7		0.8466	0.9576	0.9471	
Inner Core	1	0.9996	0.9991	1.0044	1.0061	1.0064
	2	0.9996	0.9992	1.0008	1.0015	1.0018
	3	1.0000	1.0000	1.0000	0.9997	0.9999
	4	1.0001	1.0001	0.9999	0.9996	0.9996
	5	1.0001	1.0001	1.0004	1.0015	1.0013
	6	1.0003	1.0001	0.9988	1.0002	1.0002
	7	1.0059	1.0055	0.9950	0.9904	0.9907
CRP Ring 1	1		0.9350	0.9111	0.9141	
	2		0.9694	0.9621	0.9643	
	3		0.9997	1.0063	1.0059	
	4	—	1.0061	1.0107	1.0105	
	5		0.9996	0.9869	0.9892	
	6		1.0067	0.9617	0.9762	
	7		1.0089	0.9325	0.9333	
CRP Ring 2	1		0.9374	0.9135	0.9160	
	2		0.9708	0.9638	0.9656	
	3		1.0008	1.0071	1.0067	
	4		1.0064	1.0106	1.0105	
	5	—	0.9972	0.9848	0.9871	
	6		1.0031	0.9580	0.9724	
	7		0.9997	0.9226	0.9243	
Outer Core	1	1.0102	1.0106	1.0151	1.0157	1.0157
	2	1.0071	1.0073	1.0086	1.0089	1.0090
	3	0.9991	0.9996	0.9990	0.9993	0.9993
	4	0.9990	0.9987	0.9984	0.9984	0.9984
	5	1.0004	0.9991	1.0009	1.0001	1.0001
	6	1.0041	0.9984	1.0029	0.9988	0.9994
	7	1.0244	1.0087	1.0074	0.9932	0.9941
Radial Blanket	1	0.9404	0.9426	0.9338	0.9336	0.9337
	2	0.9642	0.9632	0.9622	0.9597	0.9597
	3	1.0023	1.0013	1.0025	1.0011	1.0010
	4	1.0005	1.0014	1.0011	1.0021	1.0019
	5	1.0022	1.0030	1.0026	1.0042	1.0041
	6	1.0025	1.0024	1.0080	1.0093	1.0093
	7	1.0111	1.0099	0.9910	0.9927	0.9936

Table 4.3.2 Transport Correction on Region Averaged Flux Spectra in Heterogeneous Cores

Group	ZPPR-13A		ZPPR-13B/1		ZPPR-13C		
	RZ	XYZ	RZ	XYZ	RZ	XYZ	
	1	0.9350	0.9260	0.9526	0.9556	0.9424	0.9583
	2	0.9618	0.9553	0.9659	0.9684	0.9574	0.9693
(Inner)	3	1.0012	1.0002	0.9935	0.9959	0.9920	0.9955
Central	4	1.0036	1.0046	1.0045	1.0036	1.0057	1.0038
Blanket	5	1.0021	1.0038	1.0075	1.0051	1.0087	1.0054
	6	0.9960	0.9986	1.0085	1.0048	1.0119	1.0053
	7	0.9758	0.9851	1.0020	0.9989	1.0070	1.0001
	1			0.9436	0.9274	0.9384	0.9269
	2			0.9659	0.9556	0.9632	0.9553
Outer	3			1.0055	1.0043	1.0046	1.0039
Central	4			1.0017	1.0035	1.0025	1.0036
Blanket	5			0.9963	0.9994	0.9978	0.9998
	6			0.9605	0.9881	0.9847	0.9896
	7			0.9432	0.9653	0.9535	0.9685
	1	1.0319	1.0335	1.0257	1.0253	1.0287	1.0292
	2	1.0236	1.0247	1.0222	1.0196	1.0230	1.0227
Fuel	3	0.9984	0.9981	0.9989	0.9981	0.9984	0.9977
Ring 1	4	0.9958	0.9962	0.9958	0.9975	0.9959	0.9970
	5	0.9976	0.9977	0.9971	0.9986	0.9977	0.9989
	6	1.0020	0.9994	1.0007	0.9994	1.0017	1.0008
	7	1.0253	1.0154	1.0227	1.0123	1.0255	1.0174
	1	0.9192	0.9205	0.9211	0.9274	0.9224	0.9321
	2	0.9524	0.9533	0.9482	0.9556	0.9513	0.9595
Blanket	3	1.0050	1.0039	1.0043	1.0043	1.0047	1.0055
Ring 1	4	1.0040	1.0046	1.0052	1.0035	1.0042	1.0028
	5	0.9994	1.0006	1.0001	0.9994	0.9989	0.9963
	6	0.9826	0.9850	0.9848	0.9881	0.9831	0.9783
	7	0.9362	0.9422	0.9296	0.9653	0.9380	0.9264
	1	1.0299	1.0297	1.0234	1.0206	1.0276	1.0276
	2	1.0224	1.0216	1.0194	1.0157	1.0223	1.0213
Fuel	3	0.9982	0.9981	0.9984	0.9980	0.9979	0.9975
Ring 2	4	0.9962	0.9968	0.9968	0.9985	0.9965	0.9976
	5	0.9984	0.9981	0.9990	0.9997	0.9991	0.9997
	6	1.0036	0.9999	1.0035	1.0000	1.0039	1.0014
	7	1.0278	1.0143	1.0287	1.0104	1.0298	1.0175
	1	0.9201	0.9210	0.9241	0.9317	0.9267	0.9295
	2	0.9520	0.9539	0.9503	0.9589	0.9543	0.9575
Blanket	3	1.0047	1.0046	1.0044	1.0057	1.0050	1.0053
Ring 2	4	1.0044	1.0041	1.0047	1.0028	1.0036	1.0032
	5	0.9997	0.9997	0.9994	0.9963	0.9975	0.9968
	6	0.9829	0.9836	0.9834	0.9773	0.9808	0.9796
	7	0.9319	0.9370	0.9250	0.9201	0.9296	0.9258
	1	1.0184	1.0200	1.0161	1.0160	1.0161	1.0163
	2	1.0130	1.0143	1.0128	1.0123	1.0126	1.0125
Fuel	3	0.9985	0.9993	0.9984	0.9988	0.9986	0.9989
Ring 3	4	0.9979	0.9972	0.9982	0.9984	0.9979	0.9980
	5	0.9999	0.9974	1.0006	0.9990	1.0001	0.9986
	6	1.0046	0.9976	1.0057	0.9987	1.0047	0.9983
	7	1.0319	1.0109	1.0360	1.0109	1.0355	1.0118
	1	0.9232	0.9247	0.9310	0.9336	0.9235	0.9326
	2	0.9550	0.9555	0.9576	0.9585	0.9504	0.9582
Inner	3	1.0045	1.0033	1.0049	1.0032	1.0033	1.0034
Radial	4	1.0026	1.0032	1.0017	1.0029	1.0038	1.0031
Blanket	5	0.9992	1.0008	0.9980	1.0001	1.0006	0.9997
	6	0.9927	0.9948	0.9919	0.9940	0.9953	0.9928
	7	0.9892	0.9848	0.9860	0.9824	0.9863	0.9772
	1	0.9437	0.9596	0.9544	0.9724	0.9549	0.9458
	2	0.9664	0.9743	0.9698	0.9790	0.9734	0.9614
Outer	3	0.9846	0.9927	0.9864	0.9932	0.9903	0.9949
Radial	4	1.0004	0.9996	0.9992	0.9986	1.0007	1.0013
Blanket	5	1.0127	1.0065	1.0181	1.0106	1.0123	1.0083
	6	1.0300	1.0174	1.0324	1.0191	1.0252	1.0157
	7	1.0693	1.0506	1.0556	1.0410	1.0493	1.0367

Table 4.3.3 Transport Correction on Point Flux Spectra  
in ZPPR-13B/1 Subcritical Reference (Center of FR1)

a) Transport ( T )

	Calculated Flux Spectra			Correction Factors(%)			Corrected Flux Spectra
	Coarse, S <sub>4</sub>	Fine, S <sub>4</sub>	Coarse, S <sub>8</sub>	Mesh	S <sub>N</sub>	Total	
1	1.813 -2	1.788 -2	1.806 -2	-1.4	-0.4	-1.8	1.781 -2
2	8.275 -2	8.192 -2	8.242 -2	-1.0	-0.4	-1.4	8.160 -2
3	5.176 -1	5.177 -1	5.172 -1	0.0	-0.1	-0.1	5.173 -1
4	2.916 -1	2.922 -1	2.921 -1	0.2	0.2	0.4	2.928 -1
5	7.585 -2	7.608 -2	7.607 -2	0.3	0.3	0.6	7.630 -2
6	1.388 -2	1.403 -2	1.394 -2	1.1	0.4	1.5	1.409 -2
7	1.743 -4	2.005 -4	1.758 -4	15.0	0.8	16.0	2.022 -4

b) Diffusion ( D )

	Calculated Flux Spectra		Mesh Correction (%)
	Coarse	Fine	
1	1.747 -2	1.740 -2	-0.4
2	8.018 -2	7.974 -2	-0.6
3	5.174 -1	5.162 -1	-0.2
4	2.939 -1	2.951 -1	0.4
5	7.666 -2	7.713 -2	0.6
6	1.415 -2	1.428 -2	0.9
7	2.052 -4	2.059 -4	0.4

c) Transport Correction ( T/D-1 % )

	Correction Factor (%)
1	3.8
2	3.2
3	0.0
4	-0.8
5	-1.1
6	-1.9
7	-15.1

Table 4.4.1 Calculated Radial Power Distribution in ZPPR-9

	Distance ( cm )	XYZ		Distance ( cm )	RZ			
		Transport	Diffusion		Transport	Diffusion		
Inner Core	1	1.38	2.9584 E-1	2.9755 E-1	1	2.20	2.9164 E-1	2.9370 E-1
	2	5.52	2.9579 E-1	2.9743 E-1	2	5.40	2.9152 E-1	2.9360 E-1
	3	11.05	2.9521 E-1	2.9695 E-1	3	8.25	2.9134 E-1	2.9342 E-1
	4	16.57	2.9452 E-1	2.9615 E-1	4	11.52	2.9104 E-1	2.9313 E-1
	5	22.10	2.9337 E-1	2.9503 E-1	5	14.95	2.9063 E-1	2.9270 E-1
	6	27.62	2.9199 E-1	2.9358 E-1	6	17.72	2.9023 E-1	2.9228 E-1
	7	33.15	2.9030 E-1	2.9181 E-1	7	21.37	2.8959 E-1	2.9163 E-1
	8	38.67	2.8815 E-1	2.8971 E-1	8	25.51	2.8872 E-1	2.9072 E-1
	9	44.20	2.8589 E-1	2.8728 E-1	9	29.07	2.8786 E-1	2.8981 E-1
	10	49.72	2.8327 E-1	2.8450 E-1	10	35.10	2.8614 E-1	2.8809 E-1
	11	55.24	2.7988 E-1	2.8135 E-1	11	42.57	2.8357 E-1	2.8538 E-1
	12	60.77	2.7671 E-1	2.7780 E-1	12	48.90	2.8099 E-1	2.8267 E-1
	13	66.29	2.7264 E-1	2.7379 E-1	13	54.51	2.7839 E-1	2.7995 E-1
	14	71.82	2.6838 E-1	2.6924 E-1	14	59.59	2.7576 E-1	2.7719 E-1
	15	77.34	2.6294 E-1	2.6403 E-1	15	64.27	2.7305 E-1	2.7439 E-1
	16	82.87	2.5720 E-1	2.5796 E-1	16	68.63	2.7024 E-1	2.7152 E-1
	17	88.39	2.5020 E-1	2.5075 E-1	17	72.73	2.6728 E-1	2.6853 E-1
				18	76.61	2.6414 E-1	2.6540 E-1	
				19	80.31	2.6080 E-1	2.6208 E-1	
				20	83.84	2.5746 E-1	2.5850 E-1	
				21	87.23	2.5467 E-1	2.5461 E-1	
Outer Core	18	93.92	2.4305 E-1	2.4207 E-1	22	91.86	3.2849 E-1	3.2806 E-1
	19	99.44	3.9620 E-1	3.9245 E-1	23	97.57	3.0935 E-1	3.0739 E-1
	20	104.97	2.0559 E-1	2.0330 E-1	24	102.97	2.8191 E-1	2.7980 E-1
	21	110.49	3.0586 E-1	3.0348 E-1	25	108.09	2.4959 E-1	2.4724 E-1
	22	116.01	1.4148 E-1	1.4139 E-1	26	112.98	2.1403 E-1	2.1172 E-1
					27	117.67	1.7583 E-1	1.7534 E-1
Radial Blanket	23	121.54	2.2986 E-2	2.2914 E-2	28	123.01	2.07281 E-2	2.0512 E-2
	24	127.06	1.1576 E-2	1.2932 E-2	29	128.91	9.8632 E-3	1.1102 E-2
	25	132.59	7.2159 E-3	7.5133 E-3	30	134.55	6.0026 E-3	6.3975 E-3
	26	138.11	4.4906 E-3	4.5963 E-3	31	139.96	3.9026 E-3	3.9853 E-3

Table 4.4.2 Calculated Axial Power Distribution in ZPPR-9

	Distance (cm)	XYZ		RZ		
		Transport	Diffusion	Transport	Diffusion	
	1	2.54	2.9584 E-1	2.9755 E-1	2.9164 E-1	2.9370 E-1
	2	7.62	2.9177 E-1	2.9343 E-1	2.8762 E-1	2.8963 E-1
	3	12.70	2.9367 E-1	2.8526 E-1	2.7965 E-1	2.8156 E-1
	4	17.78	2.7170 E-1	2.7316 E-1	2.6785 E-1	2.6963 E-1
Inner	5	22.86	2.5605 E-1	2.5734 E-1	2.5242 E-1	2.5402 E-1
	6	27.94	2.3702 E-1	2.3808 E-1	2.3367 E-1	2.3501 E-1
Core	7	33.02	2.1498 E-1	2.1576 E-1	2.1195 E-1	2.1298 E-1
	8	38.10	1.9056 E-1	1.9089 E-1	1.8788 E-1	1.8844 E-1
	9	43.20	1.6413 E-1	1.6411 E-1	1.6183 E-1	1.6202 E-1
	10	48.32	1.3610 E-1	1.3662 E-1	1.3422 E-1	1.3490 E-1
	11	53.10	1.4414 E-2	1.4707 E-2	1.4213 E-2	1.4508 E-2
Lower	12	57.55	8.9357 E-3	9.7524 E-3	8.8150 E-3	9.6222 E-3
Axial	13	61.99	6.0914 E-3	6.5703 E-3	6.0078 E-3	6.4839 E-3
Blanket	14	66.44	4.3114 E-3	4.4924 E-3	4.2519 E-3	4.4342 E-3
	15	70.57	3.1544 E-3	3.2092 E-3	3.1130 E-3	3.1683 E-3
	16	74.38	2.3829 E-3	2.3648 E-3	2.3547 E-3	2.3351 E-3
Upper	17	78.82	1.7424 E-3	1.6648 E-3	1.7196 E-3	1.6443 E-3
Axial	18	83.90	1.2449 E-3	1.1662 E-3	1.2264 E-3	1.1521 E-3
Blanket	19	88.98	9.0865 E-3	8.4217 E-3	8.9844 E-4	8.3225 E-4

Table 4.4.3 Calculated Radial Power Distribution  
Based on Transport Theory in ZPPR-13A

		Distance (cm)	XYZ	XY	Distance (cm)	RZ	R		
		1	2.76	8.4510 -3	6.2089 -1	1	6.97	8.7107 -3	6.4310 -1
		2	8.29	9.9028 -3	7.2571 -1	2	12.07	1.0571 -2	7.7941 -1
Central		3	13.81	1.1649 -2	8.5162 -1	3	15.58	1.2434 -2	9.1551 -1
Blanket		4	19.34	1.6261 -2	1.1885 +0	4	18.44	1.4547 -2	1.0720 +0
		5	24.86	2.2985 -2	1.6759 +0	5	22.90	1.9436 -2	1.4327 +0
		6	30.38	3.8317 -2	2.7874 +0	6	28.22	3.2765 -2	2.4124 +0
		7	35.91	3.1146 -1	2.3189 +1	7	33.63	2.5449 -1	1.9141 +1
Fuel		8	41.43	3.3200 -1	2.4722 +1	8	39.08	2.7775 -1	2.0860 +1
Ring 1		9	46.96	3.3559 -1	2.5044 +1	9	43.86	2.8623 -1	2.1497 +1
		10	52.48	3.2843 -1	2.4585 +1	10	48.17	2.8636 -1	2.1526 +1
						11	52.12	2.7907 -1	2.1011 +1
Blanket		11	58.01	3.7939 -2	2.7855 +0	12	56.91	3.7234 -2	2.7416 +0
Ring 1		12	63.53	3.1007 -2	2.2767 +0	13	62.34	3.0363 -2	2.2395 +0
		13	69.06	4.5278 -2	3.3205 +0	14	67.33	4.2392 -2	3.1217 +0
		14	74.58	3.7366 -1	2.8036 +1	15	72.51	3.1324 -1	2.3564 +1
Fuel		15	80.11	3.9210 -1	2.9413 +1	16	77.83	3.3129 -1	2.4883 +1
Ring 2		16	85.63	3.8723 -1	2.9099 +1	17	82.82	3.3435 -1	2.5105 +1
		17	91.15	3.6648 -1	2.7622 +1	18	87.52	3.2709 -1	2.4577 +1
						19	91.98	3.0989 -1	2.3323 +1
Blanket		18	96.68	4.2801 -2	3.1584 +0	20	96.77	4.1602 -2	3.0635 +0
Ring 2		19	102.20	3.1091 -2	2.3023 +0	21	101.86	3.1937 -2	2.3560 +0
		20	107.73	4.1950 -2	3.1043 +0	22	106.70	4.0961 -2	3.0164 +0
		21	113.25	3.4426 -1	2.6029 +1	23	112.06	2.9221 -1	2.1981 +1
		22	118.78	3.5151 -1	2.6536 +1	24	117.87	2.9796 -1	2.2367 +1
Fuel		23	124.30	3.3843 -1	2.5548 +1	25	123.40	2.8797 -1	2.1596 +1
Ring 3		24	129.83	3.1086 -1	2.3486 +1	26	128.69	2.6735 -1	2.0047 +1
		25	135.35	2.7201 -1	2.0581 +1	27	133.77	2.3832 -1	1.7882 +1
		26	140.87	2.2428 -1	1.7010 +1	28	138.67	2.0197 -1	1.5178 +1
		27	146.40	2.1932 -2	1.6287 +0	29	143.89	2.3621 -2	1.7375 +0
Radial		28	151.92	1.0035 -2	7.4711 -1	30	149.41	1.1423 -2	8.4290 -1
Blanket		29	157.45	6.3687 -3	4.7201 -1	31	154.74	7.0050 -3	5.1666 -1
		30	162.97	4.1017 -3	3.0546 -1	32	159.66	4.5375 -3	3.3506 -1
						33	164.22	3.2961 -3	2.4439 -1

Table 4.4.4 Calculated Radial Power Distribution  
Based on Diffusion Theory in ZPPR-13A

		Distance (cm)	XYZ	XY	Distance (cm)	RZ	R	
	1	2.76	8.4602 -3	6.3045 -1	1	6.97	8.9215 -3	6.6525 -1
	2	8.29	9.6513 -3	7.1759 -1	2	12.07	1.1009 -2	8.1816 -1
Central	3	13.81	1.2326 -2	9.1317 -1	3	15.58	1.3365 -2	9.9056 -1
Blanket	4	19.34	1.7164 -2	1.2668 +0	4	18.44	1.6066 -2	1.1881 +0
	5	24.86	2.5390 -2	1.8677 +0	5	22.90	2.1658 -2	1.5969 +0
	6	30.38	3.8858 -2	2.8557 +0	6	28.22	3.3858 -2	2.4928 +0
	7	35.91	3.0712 -1	2.3078 +1	7	33.63	2.5593 -1	1.9271 +0
Fuel	8	41.43	3.2485 -1	2.4393 +1	8	39.08	2.7453 -1	2.0648 +1
Ring 1	9	46.96	3.3044 -1	2.4828 +1	9	43.86	2.8195 -1	2.1209 +1
	10	52.48	3.2614 -1	2.4556 +1	10	48.17	2.8220 -1	2.1248 +1
					11	52.12	2.7851 -1	2.0998 +1
Blanket	11	58.01	3.8794 -2	2.8529 +0	12	56.91	3.7759 -2	2.7800 +0
Ring 1	12	63.53	3.6478 -2	2.6812 +0	13	62.34	3.5407 -2	2.6051 +0
	13	69.06	4.6519 -2	3.4190 +0	14	67.33	4.4034 -2	3.2393 +0
	14	74.58	3.7377 -1	2.8083 +1	15	72.51	3.1455 -1	2.3674 +1
Fuel	15	80.11	3.8629 -1	2.8997 +1	16	77.83	3.2796 -1	2.4649 +1
Ring 2	16	85.63	3.8412 -1	2.8839 +1	17	82.82	3.3025 -1	2.4815 +1
	17	91.15	3.6772 -1	2.7657 +1	18	87.52	3.2338 -1	2.4314 +1
					19	91.98	3.1030 -1	2.3361 +1
Blanket	18	96.68	4.3510 -2	3.1977 +0	20	96.77	4.2673 -1	3.1381 +0
Ring 2	19	102.20	3.6881 -2	2.7091 +0	21	101.86	3.7121 -2	2.7279 +0
	20	107.73	4.3460 -2	3.1916 +0	22	106.70	4.2634 -2	3.1323 +0
	21	113.25	3.4722 -1	2.6071 +1	23	112.06	2.9454 -1	2.2140 +1
	22	118.78	3.4948 -1	2.6192 +1	24	117.87	2.9634 -1	2.2227 +1
Fuel	23	124.30	3.3798 -1	2.5301 +1	25	123.40	2.8626 -1	2.1447 +1
Ring 3	24	129.83	3.1123 -1	2.3302 +1	26	128.69	2.6550 -1	1.9889 +1
	25	135.35	2.7268 -1	2.0436 +1	27	133.77	2.3651 -1	1.7731 +1
	26	140.87	2.2562 -1	1.9652 +1	28	138.67	2.0236 -1	1.5197 +1
	27	146.40	2.2205 -2	1.6323 +0	29	143.89	2.3734 -2	1.7435 +0
Radial	28	151.92	1.2033 -2	8.8658 -1	30	149.41	1.3164 -2	9.6868 -1
Blanket	29	157.45	6.7191 -3	4.9790 -1	31	154.74	7.6829 -3	5.6736 -1
	30	162.97	4.1529 -3	3.0986 -1	32	159.66	4.7976 -3	3.5639 -1
					33	164.22	3.3602 -3	2.5113 -1

Table 4.4.5 Calculated Axial Power Distribution in ZPPR-13A

	Distance (cm)	XYZ		RZ		
		Transport	Diffusion	Transport	Diffusion	
	1	2.55	8.4510 E-3	8.4602 E-3	8.7107 E-3	8.9215 E-3
	2	7.65	8.3491 E-3	8.3223 E-3	8.5864 E-3	8.7762 E-3
	3	12.75	8.0385 E-3	8.0491 E-3	8.2841 E-3	8.4888 E-3
	4	17.85	7.6675 E-3	7.6456 E-3	7.8857 E-3	8.0617 E-3
	5	22.94	7.2005 E-3	7.1204 E-3	7.3910 E-3	7.5063 E-3
	6	28.02	6.5278 E-3	6.4867 E-3	6.7028 E-3	6.8350 E-3
Central	7	33.10	5.7002 E-3	5.7623 E-3	5.8582 E-3	6.0653 E-3
Blanket	8	38.18	4.9018 E-3	4.9751 E-3	5.0177 E-3	5.2262 E-3
	9	43.26	4.1571 E-3	4.1651 E-3	4.2233 E-3	4.3606 E-3
	10	48.34	3.4315 E-3	3.3619 E-3	3.4496 E-3	3.5019 E-3
	11	53.42	2.7678 E-3	2.6495 E-3	2.7228 E-3	2.7446 E-3
	12	58.50	2.1022 E-3	2.0328 E-3	2.0554 E-3	2.0942 E-3
	13	63.58	1.4906 E-3	1.5226 E-3	1.4472 E-3	1.5611 E-3
	14	68.66	1.0520 E-3	1.1118 E-3	1.0202 E-3	1.1355 E-3
Upper	15	73.10	1.3927 E-3	1.3469 E-3	1.3323 E-3	1.3714 E-3
Central	16	76.91	1.1138 E-3	1.0604 E-3	1.0760 E-3	1.0763 E-3
Blanket						



Table 4.4.6 Mesh Point in XYZ and RZ Model

Y-direction			R-direction		
Material	Mesh No.	Distance (cm)	Material	Mesh No.	Distance (cm)
	1	2.762		1	6.970
	2	8.287		2	12.072
Blanket	3	13.811	Blanket	3	15.584
	4	19.336		4	18.440
	5	24.860		5	22.904
	6	30.385		6	28.224
	7	35.909		7	34.030
Fuel	8	41.434		8	40.110
	9	46.958	Fuel	9	45.382
	10	52.483		10	50.103
	11	58.007		11	54.416
Fuel	12	63.532	Blanket	12	58.699
	13	69.056		13	62.958
	14	74.581		14	66.946
	15	80.105	Fuel	15	70.112
CR	16	85.630		16	74.195
	17	91.154		17	79.583
	18	96.679	CR	18	83.202
Fuel	19	102.203		19	86.710
	20	107.728	Fuel	20	91.439
	21	113.252		21	94.642
	22	118.777	Blanket	22	97.838
	23	124.301		23	102.241
Fuel	24	129.826		24	106.461
	25	135.350		25	111.585
	26	140.875		26	117.494
	27	146.399		27	123.119
Blanket	28	151.924	Fuel	28	128.499
	29	157.448		29	133.662
	30	162.973		30	138.633
				31	143.894
				32	149.414
			Blanket	33	154.738
				34	159.661
				35	164.221

Table 4.4.7 Power Distribution Calculated by 3-D XYZ  
 Model in ZPPR-13B/1  
 ( Ring 2 CR Y-direction )

	Transport	Diffusion
1	9.387 -3	9.334 -3
2	1.086 -2	1.063 -2
3	1.291 -2	1.353 -2
4	1.761 -2	1.875 -2
5	2.539 -2	2.782 -2
6	4.178 -2	4.256 -2
7	3.393 -1	3.355 -1
8	3.567 -1	3.516 -1
9	1.968 -1	1.964 -1
10	3.461 -1	3.443 -1
11	3.294 -1	3.290 -1
12	1.687 -1	1.712 -1
13	2.864 -1	2.911 -1
14	1.334 -1	1.420 -1
15	0.	0.
16	0.	0.
17	0.	0.
18	2.360 -1	2.501 -1
19	1.610 -1	1.623 -1
20	3.317 -1	3.324 -1
21	3.625 -1	3.596 -1
22	2.091 -1	2.064 -1
23	3.667 -1	3.616 -1
24	1.918 -1	1.885 -1
25	3.029 -1	2.983 -1
26	2.522 -1	2.474 -1
27	2.438 -2	2.428 -2
28	1.141 -2	1.313 -2
29	7.088 -3	7.367 -3
30	4.610 -3	4.525 -3

Table 4.4.8 Power Distribution Calculated by 2-D XY Model Based on  
Transport Theory in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )

	Calculated Power			Correction Factors(%)			Corrected Power
	Coarse, S <sub>4</sub>	Fine, S <sub>4</sub>	Coarse, S <sub>8</sub>	Mesh	S <sub>N</sub>	Total	
1	2.781 +0	2.819 +0	2.797 +0	1.3	0.6	1.9	2.835 +0
2	3.206 +0	3.130 +0	3.123 +0	-2.4	-2.6	-4.9	3.049 +0
3	3.796 +0	3.881 +0	3.816 +0	2.3	0.5	2.8	3.902 +0
4	5.182 +0	5.143 +0	5.242 +0	-0.7	1.2	0.4	5.203 +0
5	7.449 +0	7.632 +0	7.511 +0	2.5	0.8	3.3	7.696 +0
6	1.223 +1	1.211 +1	1.220 +1	-1.0	-0.2	-1.2	1.208 +1
7	1.009 +2	1.009 +2	1.006 +2	0.0	-0.2	-0.2	1.007 +2
8	1.060 +2	1.059 +2	1.059 +2	-0.1	-0.2	-0.2	1.057 +2
9	5.846 +1	5.831 +1	5.869 +1	-0.3	0.4	0.2	5.855 +1
10	1.030 +2	1.029 +2	1.035 +2	-0.1	0.5	0.4	1.034 +2
11	9.809 +1	9.736 +1	9.841 +1	-0.7	0.3	-0.4	9.769 +1
12	5.018 +1	5.004 +1	5.040 +1	-0.3	0.5	0.2	5.026 +1
13	8.517 +1	8.503 +1	8.527 +1	-0.2	0.1	-0.0	8.514 +1
14	3.948 +1	4.005 +1	3.940 +1	1.4	-0.2	1.2	3.996 +1
15	0.	0.	0.	-	-	-	0.
16	0.	0.	0.	-	-	-	0.
17	0.	0.	0.	-	-	-	0.
18	7.071 +1	7.131 +1	7.098 +1	0.9	0.4	1.2	7.157 +1
19	4.831 +1	4.742 +1	4.836 +1	-1.8	0.1	-0.7	4.747 +1
20	9.976 +1	9.963 +1	1.000 +2	-0.1	0.2	0.1	9.987 +1
21	1.090 +2	1.088 +2	1.087 +2	-0.2	-0.2	-0.4	1.086 +2
22	6.273 +1	6.256 +1	6.231 +1	-0.3	-0.7	-0.9	6.214 +1
23	1.103 +2	1.101 +2	1.096 +2	-0.2	-0.6	-0.8	1.094 +2
24	5.766 +1	5.721 +1	5.740 +1	-0.8	-0.5	-1.3	5.694 +1
25	9.134 +1	9.103 +1	9.133 +1	-0.3	-0.0	-0.4	9.102 +1
26	7.616 +1	7.547 +1	7.608 +1	-0.9	-0.1	-1.0	7.539 +1
27	7.271 +0	6.920 +0	7.296 +0	-4.8	0.4	-4.5	6.945 +0
28	3.403 +0	3.551 +0	3.572 +0	4.4	5.0	9.6	3.728 +0
29	2.106 +0	2.117 +0	2.112 +0	0.5	0.3	0.8	2.123 +0
30	1.375 +0	1.370 +0	1.333 +0	-0.3	-3.0	-3.4	1.329 +0

Table 4.4.9 Power Distribution Calculated by 2-D XY Model  
 Based on Diffusion Theory in ZPPR-13B/1  
 ( Ring 2 CR Y-direction )

	Calculated Power		Mesh Correction(%)
	Coarse	Fine	
1	2.787 +0	2.825 +0	1.4
2	3.167 +0	3.216 +0	1.5
3	4.017 +0	4.093 +0	1.9
4	5.548 +0	5.685 +0	2.5
5	8.204 +0	8.472 +0	3.3
6	1.254 +1	1.289 +1	2.8
7	1.003 +2	9.955 +1	-0.8
8	1.050 +2	1.043 +2	-0.7
9	5.859 +1	5.831 +1	-0.5
10	1.029 +2	1.021 +2	-0.8
11	9.839 +1	9.744 +1	-1.0
12	5.116 +1	5.052 +1	-1.3
13	8.700 +1	8.493 +1	-2.4
14	4.235 +1	4.071 +1	-3.9
15	0.	0.	-
16	0.	0.	-
17	0.	0.	-
18	7.497 +1	7.259 +1	-3.2
19	4.867 +1	4.812 +1	-1.1
20	9.973 +1	9.906 +1	-0.7
21	1.078 +2	1.073 +2	-0.5
22	6.178 +1	6.182 +1	0.1
23	1.084 +2	1.083 +2	-0.1
24	5.645 +1	5.669 +1	0.4
25	8.956 +1	8.964 +1	0.1
26	7.441 +1	7.468 +1	0.4
27	7.203 +0	7.518 +0	4.4
28	3.903 +0	4.026 +0	3.1
29	2.201 +0	2.247 +0	2.1
30	1.360 +0	1.379 +0	1.4

Table 4.4.10 Power Distribution Calculated by 2-D RZ Model Based on  
Transport Theory in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )

	Calculated Power			Correction Factors(%)			Corrected Power
	Coarse, S <sub>4</sub>	Fine, S <sub>4</sub>	Coarse, S <sub>8</sub>	Mesh	S <sub>N</sub>	Total	
1	1.858 -2	1.897 -2	1.879 -2	2.1	1.1	3.2	1.918 -2
2	2.255 -2	2.283 -2	2.261 -2	1.3	0.3	1.5	2.289 -2
3	2.650 -2	2.690 -2	2.653 -2	1.5	0.1	1.6	2.693 -2
4	3.100 -2	3.141 -2	3.171 -2	1.3	2.3	3.6	3.213 -2
5	4.172 -2	4.264 -2	4.256 -2	2.2	2.0	4.3	4.350 -2
6	6.997 -2	6.911 -2	7.037 -2	-1.2	0.6	-0.7	6.950 -2
7	5.015 -1	5.086 -1	5.026 -1	1.4	0.2	1.7	5.098 -1
8	5.461 -1	5.499 -1	5.455 -1	0.7	-0.1	0.6	5.493 -1
9	5.506 -1	5.540 -1	5.490 -1	0.6	-0.3	0.3	5.524 -1
10	5.341 -1	5.366 -1	5.342 -1	0.5	0.0	0.5	5.367 -1
11	4.990 -1	5.016 -1	5.005 -1	0.5	0.3	0.8	5.030 -1
12	7.494 -2	7.363 -2	7.568 -2	-1.8	1.0	-0.8	7.436 -2
13	5.887 -2	5.993 -2	5.991 -2	1.8	1.8	3.6	6.100 -2
14	6.844 -2	6.804 -2	6.916 -2	-0.6	1.1	0.5	6.875 -2
15	4.166 -1	4.198 -1	4.177 -1	0.8	0.3	1.0	4.209 -1
16	4.134 -1	4.162 -1	4.145 -1	0.7	0.3	0.9	4.173 -1
17	3.771 -1	3.833 -1	3.782 -1	1.6	0.3	1.9	3.844 -1
18	0.	0.	0.	-	-	-	0.
19	3.953 -1	4.008 -1	3.967 -1	1.4	0.4	1.8	4.023 -1
20	4.468 -1	4.477 -1	4.485 -1	0.2	0.4	0.6	4.494 -1
21	4.606 -1	4.610 -1	4.620 -1	0.1	0.3	0.4	4.624 -1
22	7.467 -2	7.345 -2	7.552 -2	-1.6	1.1	-0.5	7.428 -2
23	6.975 -2	7.046 -2	7.088 -2	1.0	1.6	2.7	7.161 -2
24	9.532 -2	9.348 -2	9.618 -2	-1.9	0.9	-1.1	9.432 -2
25	6.411 -1	6.417 -1	6.423 -1	0.1	0.2	0.3	6.429 -1
26	6.899 -1	6.879 -1	6.883 -1	-0.3	-0.2	-0.5	6.863 -1
27	6.884 -1	6.866 -1	6.857 -1	-0.3	-0.4	-0.8	6.835 -1
28	6.521 -1	6.494 -1	6.494 -1	-0.4	-0.4	-0.8	6.467 -1
29	5.872 -1	5.838 -1	5.857 -1	-0.6	-0.3	-0.8	5.823 -1
30	4.975 -1	4.946 -1	4.976 -1	-0.6	0.0	-0.6	4.947 -1
31	6.202 -2	5.935 -2	6.200 -2	-4.3	-0.0	-4.4	5.932 -2
32	3.004 -2	3.068 -2	3.074 -2	2.1	2.3	4.5	3.139 -2
33	1.839 -2	1.850 -2	1.912 -2	0.6	4.0	4.6	1.924 -2
34	1.197 -2	1.204 -2	1.188 -2	0.6	-0.7	-0.2	1.195 -2
35	8.607 -3	8.659 -3	8.501 -3	0.6	-1.2	-0.6	8.553 -3

Table 4.4.11 Power Distribution Calculated by 2-D RZ Model  
 Based on Diffusion Theory in ZPPR-13B/1  
 ( Ring 2 CR Y-direction )

	Calculated Power		Mesh Correction(%)
	Coarse	Fine	
1	1.896 -2	1.933 -2	2.0
2	2.337 -2	2.375 -2	1.6
3	2.834 -2	2.878 -2	1.6
4	3.401 -2	3.455 -2	1.6
5	4.609 -2	4.809 -2	4.3
6	7.190 -2	7.489 -2	4.2
7	5.082 -1	5.065 -1	-0.3
8	5.423 -1	5.417 -1	-0.1
9	5.450 -1	5.452 -1	0.0
10	5.284 -1	5.289 -1	0.1
11	5.005 -1	5.011 -1	0.1
12	7.791 -2	8.026 -2	3.0
13	6.805 -2	6.963 -2	2.3
14	7.262 -2	7.416 -2	2.1
15	4.236 -1	4.227 -1	-0.2
16	4.178 -1	4.140 -1	-0.9
17	3.918 -1	3.866 -1	-1.3
18	0.	0.	-
19	4.095 -1	4.045 -1	-1.2
20	4.494 -1	4.468 -1	-0.6
21	4.663 -1	4.662 -1	-0.0
22	7.795 -2	8.026 -2	3.0
23	7.977 -2	8.211 -2	2.9
24	9.879 -2	1.020 -1	3.3
25	6.428 -1	6.416 -1	-0.2
26	6.801 -1	6.793 -1	-0.1
27	6.773 -1	6.770 -1	-0.1
28	6.396 -1	6.397 -1	0.0
29	5.748 -1	5.752 -1	0.1
30	4.917 -1	4.925 -1	0.2
31	6.130 -2	6.392 -2	4.3
32	3.404 -2	3.512 -2	3.2
33	1.987 -2	2.033 -2	2.3
34	1.249 -2	1.261 -2	0.9
35	8.698 -3	8.724 -3	0.3

Table 4.4.12 Power Distribution Calculated by 1-D R Model Based on  
Transport Theory in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )

	Calculated Power			Correction Factors(%)			Corrected Power
	Coarse, S <sub>4</sub>	Fine, S <sub>4</sub>	Coarse, S <sub>8</sub>	Mesh	S <sub>N</sub>	Total	
1	6.763 -1	6.888 -1	6.944 -1	1.9	2.7	4.6	7.072 -1
2	8.194 -1	8.281 -1	8.331 -1	1.1	1.7	2.7	8.418 -1
3	9.622 -1	9.752 -1	9.739 -1	1.4	1.2	2.6	9.871 -1
4	1.126 +0	1.138 +0	1.160 +0	1.1	3.0	4.1	1.172 +0
5	1.517 +0	1.546 +0	1.552 +0	1.9	2.3	4.3	1.581 +0
6	2.541 +0	2.505 +0	2.559 +0	-1.4	0.7	-0.7	2.523 +0
7	1.848 +1	1.870 +1	1.857 +1	1.2	0.5	1.7	1.879 +1
8	2.010 +1	2.020 +1	2.012 +1	0.5	0.1	0.6	2.022 +1
9	2.026 +1	2.035 +1	2.025 +1	0.4	-0.0	0.4	2.034 +1
10	1.967 +1	1.973 +1	1.972 +1	0.3	0.3	0.6	1.978 +1
11	1.839 +1	1.846 +1	1.849 +1	0.4	0.5	0.9	1.856 +1
12	2.722 +0	2.671 +0	2.753 +0	-1.9	1.1	-0.7	2.702 +0
13	2.143 +0	2.179 +0	2.181 +0	1.7	1.8	3.5	2.218 +0
14	2.487 +0	2.472 +0	2.520 +0	-0.6	1.3	0.7	2.505 +0
15	1.539 +1	1.550 +1	1.547 +1	0.7	0.6	1.3	1.559 +1
16	1.525 +1	1.536 +1	1.535 +1	0.7	0.6	1.3	1.545 +1
17	1.391 +1	1.414 +1	1.399 +1	1.7	0.6	2.3	1.423 +1
18	0.	0.	0.	-	-	-	0.
19	1.467 +1	1.488 +1	1.475 +1	1.5	0.6	2.1	1.497 +1
20	1.666 +1	1.670 +1	1.676 +1	0.2	0.6	0.8	1.680 +1
21	1.723 +1	1.726 +1	1.730 +1	0.1	0.4	0.5	1.733 +1
22	2.753 +0	2.709 +0	2.786 +0	-1.6	1.2	-0.5	2.741 +0
23	2.586 +0	2.613 +0	2.622 +0	1.0	1.4	2.4	2.649 +0
24	3.538 +0	3.471 +0	3.561 +0	-1.9	0.7	-1.3	3.493 +0
25	2.416 +1	2.418 +1	2.417 +1	0.1	0.0	0.1	2.419 +1
26	2.599 +1	2.592 +1	2.589 +1	-0.3	-0.4	-0.7	2.582 +1
27	2.596 +1	2.589 +1	2.579 +1	-0.3	-0.6	-0.9	2.572 +1
28	2.460 +1	2.450 +1	2.445 +1	-0.4	-0.6	-1.0	2.436 +1
29	2.217 +1	2.205 +1	2.208 +1	-0.6	-0.4	-1.0	2.195 +1
30	1.881 +1	1.871 +1	1.878 +1	-0.6	-0.2	-0.7	1.868 +1
31	2.312 +0	2.214 +0	2.305 +0	-4.3	-0.3	-4.5	2.207 +0
32	1.123 +0	1.146 +0	1.146 +0	2.1	2.1	4.2	1.170 +0
33	6.871 -1	6.907 -1	7.155 -1	0.5	4.1	4.7	7.192 -1
34	4.471 -1	4.503 -1	4.476 -1	0.7	0.1	0.8	4.507 -1
35	3.229 -1	3.249 -1	3.225 -1	0.6	-0.2	0.5	3.244 -1

Table 4.4.13 Power Distribution Calculated by 1-D R Model  
Based on Diffusion Theory in ZPPR-13B/1  
( Ring 2 CR Y-direction )

	Calculated Power		Mesh Correction(%)
	Coarse	Fine	
1	7.008 -1	7.148 -1	2.0
2	8.611 -1	8.752 -1	1.6
3	1.041 +0	1.058 +0	1.6
4	1.247 +0	1.267 +0	1.6
5	1.685 +0	1.758 +0	4.3
6	2.624 +0	2.735 +0	4.2
7	1.884 +1	1.879 +1	-0.3
8	2.008 +1	2.006 +1	-0.1
9	2.018 +1	2.019 +1	0.1
10	1.958 +1	1.960 +1	0.1
11	1.857 +1	1.860 +1	0.1
12	2.845 +0	2.931 +0	3.0
13	2.486 +0	2.543 +0	2.3
14	2.655 +0	2.710 +0	2.1
15	1.574 +1	1.571 +1	-0.2
16	1.552 +1	1.538 +1	-0.9
17	1.455 +1	1.435 +1	-1.4
18	0.	0.	-
19	1.527 +1	1.507 +1	-1.3
20	1.681 +1	1.671 +1	-0.6
21	1.748 +1	1.748 +1	-0.0
22	2.876 +0	2.960 +0	3.0
23	2.948 +0	3.033 +0	2.9
24	3.656 +0	3.774 +0	3.2
25	2.418 +1	2.413 +1	-0.2
26	2.557 +1	2.553 +1	-0.2
27	2.546 +1	2.545 +1	-0.1
28	2.406 +1	2.406 +1	-0.0
29	2.164 +1	2.166 +1	0.1
30	1.855 +1	1.858 +1	0.1
31	2.278 +0	2.375 +0	4.3
32	1.267 +0	1.307 +0	3.2
33	7.422 -1	7.591 -1	2.3
34	4.688 -1	4.732 -1	0.9
35	3.282 -1	3.292 -1	0.3



Table 4.4.14 Transport Correction to Radial Power Distribution  
in ZPPR-13B/1 before Correction  
( Ring 2 CR Y-direction )

(%)

Mesh NO.	XYZ	XY	RZ	R	RZ/R	XY·RZ/R
1	0.6	-0.2	-2.0	-3.5	1.5	1.4
2	2.2	1.2	-3.5	-4.8	1.4	2.8
3	-4.5	-5.5	-6.5	-7.6	1.2	-4.3
4	-6.1	-6.6	-8.9	-9.7	0.9	-5.7
5	-8.8	-9.2	-9.5	-10.0	0.6	-8.7
6	-1.8	-2.5	-2.7	-3.2	0.5	-2.0
7	1.1	0.6	-1.3	-1.9	0.6	1.2
8	1.5	1.0	0.7	0.1	0.6	1.6
9	0.2	-0.2	1.0	0.4	0.7	0.4
10	0.5	0.1	1.1	0.4	0.6	0.8
11	0.1	-0.3	-0.3	-1.0	0.7	0.2
12	-1.5	-1.9	-3.8	-4.3	0.5	-1.4
13	-1.6	-2.1	-13.5	-13.8	0.4	-1.5
14	-6.1	-6.8	-5.8	-6.3	0.6	-6.1
15	-	-	-1.7	-2.3	0.6	-
16	-	-	-1.1	-1.7	0.7	-
17	-	-	-3.7	-4.4	0.7	-
18	-5.6	-5.7	-	-	-	-5.3
19	-0.9	-0.8	-3.5	-4.0	0.5	-0.6
20	-0.2	0.0	-0.6	-0.9	0.3	-0.3
21	0.8	1.1	-1.2	-1.4	0.2	0.9
22	1.3	1.5	-4.2	-4.3	0.1	1.3
23	1.4	1.7	-12.6	-12.3	-0.3	1.5
24	1.8	2.2	-3.5	-3.2	-0.3	1.9
25	1.6	2.0	-0.3	-0.1	-0.2	1.7
26	1.9	2.4	1.4	1.7	-0.2	2.1
27	0.4	0.9	1.7	1.9	-0.3	0.6
28	-13.1	-12.8	2.0	2.2	-0.3	-13.0
29	-3.8	-4.3	2.2	2.5	-0.3	-4.1
30	1.9	1.1	1.2	1.4	-0.2	1.7
31	-	-	1.2	1.5	-0.3	-
32	-	-	-11.8	-11.4	-0.4	-
33	-	-	-7.4	-7.4	-0.0	-
34	-	-	-4.2	-4.6	0.5	-
35	-	-	-1.0	-1.6	0.6	-

Table 4.4.15 Transport Correction to Radial Power Distribution  
in ZPPR-13B/1 ( Ring 2 CR Y-direction )

(%)

	XYZ	XY	RZ	R	RZ/R	XY•RZ/R
1	-0.2	0.4	-0.8	-1.1	0.3	0.7
2	-5.5	-5.2	-3.6	-3.8	0.2	-4.9
3	-4.7	-4.7	-6.4	-6.7	0.3	-4.4
4	-8.4	-8.5	-7.0	-7.5	0.5	-8.0
5	-8.7	-9.2	-9.5	-10.1	0.6	-8.6
6	-5.6	-6.3	-7.2	-7.8	0.6	-5.7
7	1.8	1.2	0.7	0.0	0.7	1.8
8	1.8	1.3	1.4	0.8	0.6	2.0
9	0.8	0.4	1.3	0.7	0.6	1.0
10	1.6	1.3	1.5	0.9	0.5	1.9
11	0.6	0.3	0.4	-0.2	0.6	0.8
12	-0.2	-0.5	-7.4	-7.8	0.5	-0.1
13	0.5	0.3	-12.4	-12.8	0.5	0.6
14	-1.5	-1.8	-7.3	-7.6	0.3	-1.5
15	-	-	-0.4	-0.8	0.3	-
16	-	-	0.8	0.5	0.3	-
17	-	-	-0.6	-0.8	0.3	-
18	-1.7	-1.4	-	-	-	-1.3
19	-1.6	-1.4	-0.5	-0.7	0.1	-1.4
20	0.7	0.8	0.6	0.5	0.0	0.7
21	1.1	1.2	-0.8	-0.9	0.0	1.2
22	0.4	0.5	-7.5	-7.4	-0.1	0.4
23	0.8	1.0	-12.8	-12.7	-0.2	0.9
24	0.2	0.4	-7.5	-7.5	-0.1	0.3
25	1.3	1.5	0.2	0.3	-0.1	1.4
26	0.7	1.0	1.0	1.1	-0.1	0.9
27	-8.0	-7.6	1.0	1.1	-0.1	-7.8
28	-7.6	-7.4	1.1	1.3	-0.2	-7.5
29	-5.5	-5.5	1.2	1.3	-0.1	-5.8
30	-3.9	-3.6	0.5	0.5	-0.1	-4.1
31	-	-	-7.2	-7.1	-0.1	-
32	-	-	-10.6	-10.5	-0.2	-
33	-	-	-5.4	-5.3	-0.1	-
34	-	-	-5.2	-4.8	-0.5	-
35	-	-	-2.0	-1.5	-0.5	-

Table 4.5.1 Transport Correction to  $k_{eff}$  for the Case with Na Void Region in ZPPR-13A

Assemblies	3-D			2-D			
	Transport	Diffusion	Transport Correction	Transport	Diffusion	Transport Correction	
Subcritical Reference	0.99141	0.98629	1.0052	XY	0.99066	0.98634	1.0044
				RZ	0.99226	0.98599	1.0064
				R	0.99142	0.98599	1.0055
				RZ/R	-	-	1.0009
				XY•RZ/R	0.99150	0.98634	1.0052
Step 6	0.99353	0.98790	1.0052	XY	0.99274	0.98791	1.0049
				RZ	0.99462	0.98782	1.0069
				R	0.99371	0.98776	1.0060
				RZ/R	-	-	1.0009
				XY•RZ/R	0.99365	0.98797	1.0058
Step A	0.99187	0.98663	1.0053	XY	0.99102	0.98673	1.0043
				RZ	0.99293	0.98635	1.0067
				R	0.99179	0.98633	1.0055
				RZ/R	-	-	1.0011
				XY•RZ/R	0.99216	0.98675	1.0055

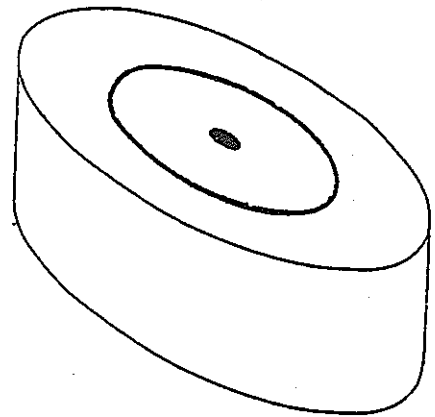
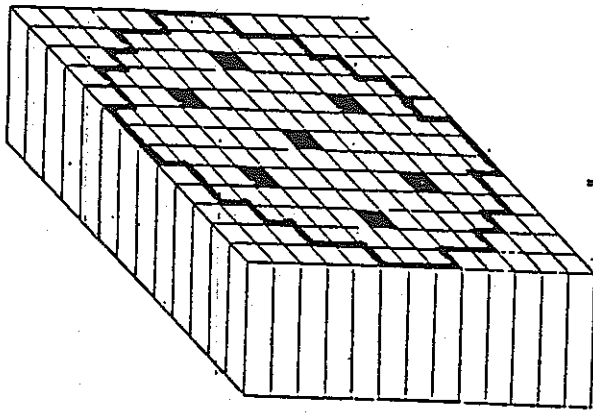
Table 4.5.2 Transport Correction to Na Void Worth in ZPPR-13A

(% $\Delta k/kk'$ )

Pattern	3-D			2-D			
	Transport	Diffusion	Transport Correction	Transport	Diffusion	Transport Correction	
Step 6	0.215	0.166	1.30	XY	0.212	0.162	1.31
				RZ	0.239	0.188	1.28
				R	0.232	0.182	1.28
				RZ/R	-	-	1.00
				XY·RZ/R	0.218	0.167	1.31
Step A	0.047	0.035	1.33	XY	0.037	0.041	0.90
				RZ	0.068	0.036	1.87
				R	0.038	0.034	1.10
				RZ/R	-	-	1.71
				XY·RZ/R	0.066	0.043	1.53

3-D XYZ

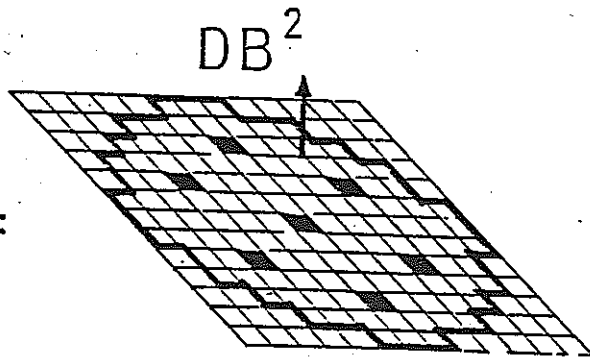
MODEL 1 : RZ



TRA(XYZ) / DIF(XYZ)

TRA(RZ) / DIF(RZ)

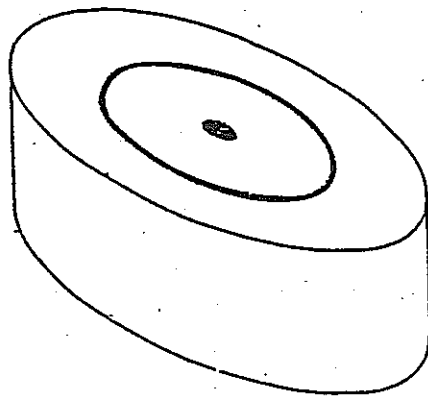
XY =



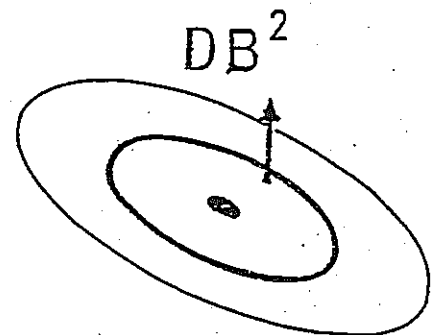
MODEL 2 : XY · RZ/R

TRA(XY) / DIF(XY)

Z =



÷



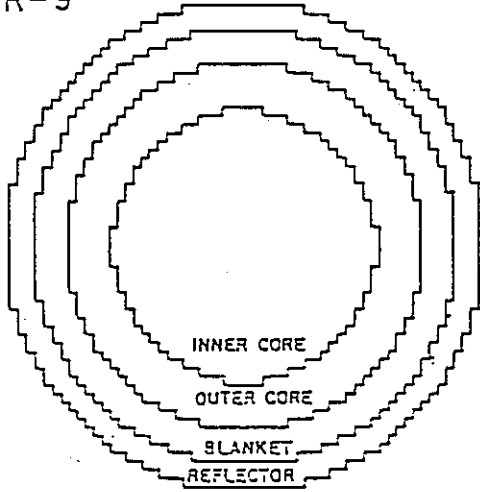
TRA(RZ) / DIF(RZ)

TRA(R) / DIF(R)

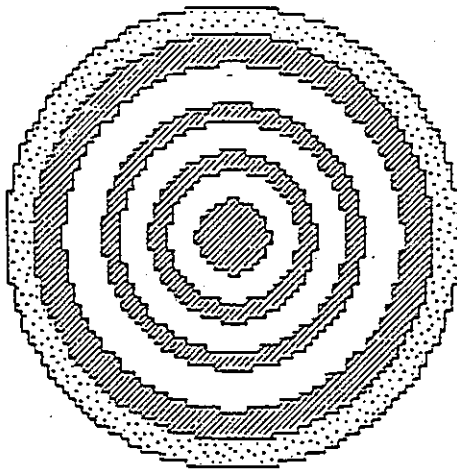
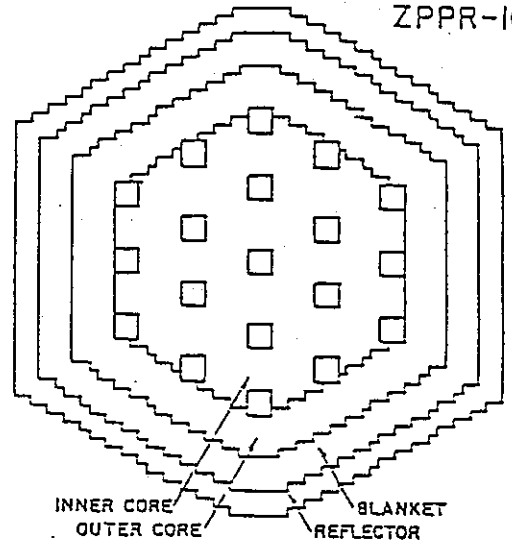
XYZ = XY · Z

Fig. 2.1 2-D Modeling of 3-D core to estimate transport correction

ZPPR-9

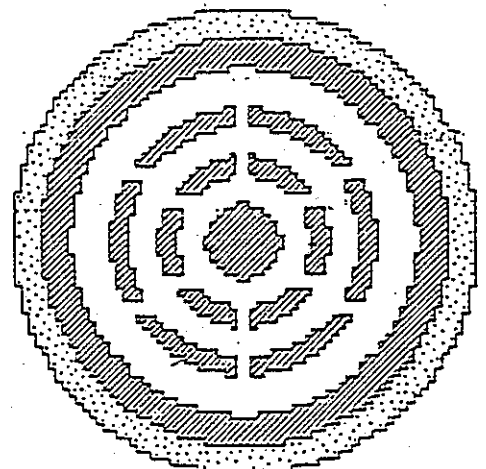


ZPPR-10



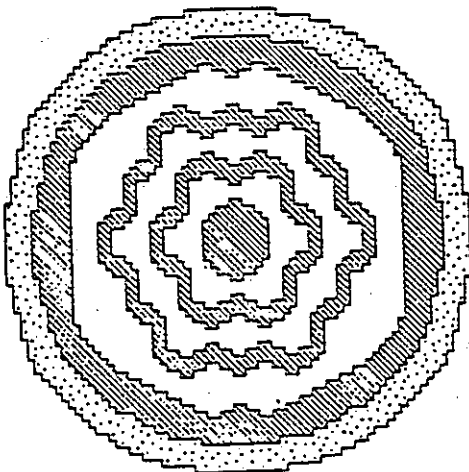
BLANKET REFLECTOR

ZPPR-13 A



BLANKET REFLECTOR

ZPPR-13 B/I



BLANKET REFLECTOR

ZPPR-13 C

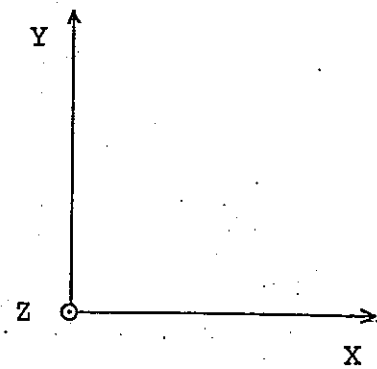


Fig. 3.1 Cross Sectional Views of ZPPR Assemblies 9, 10 and 13

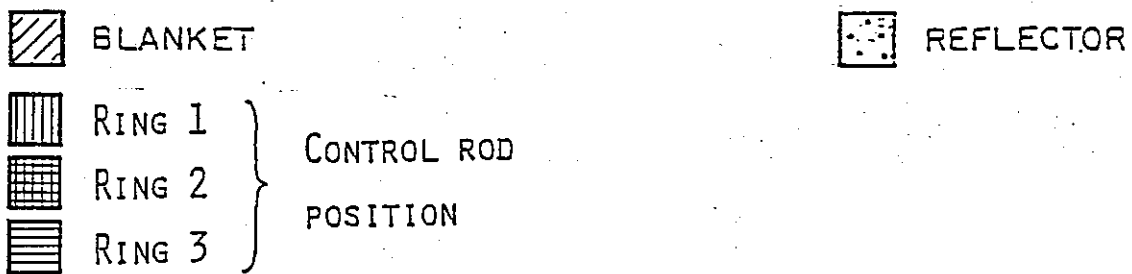
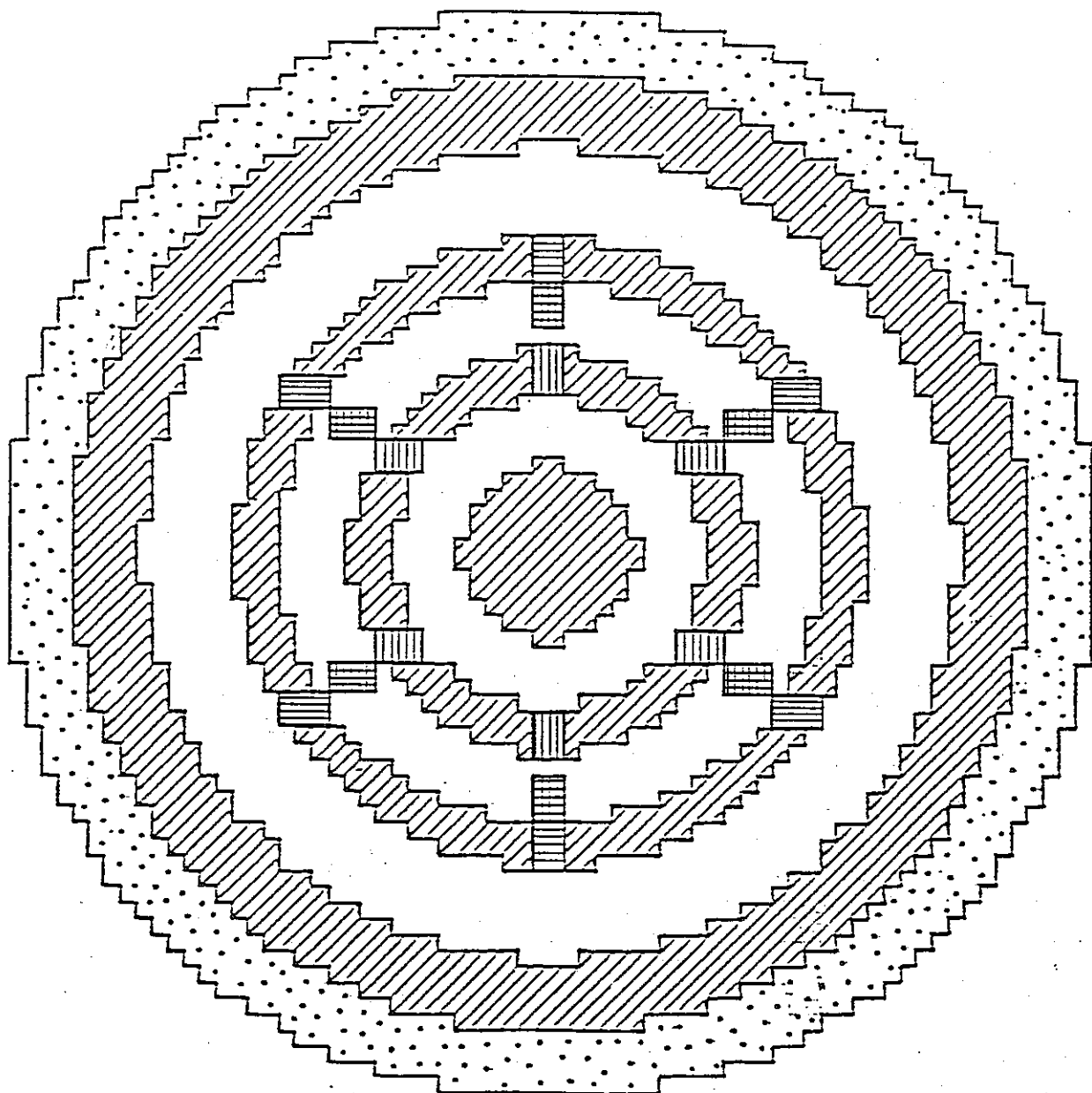
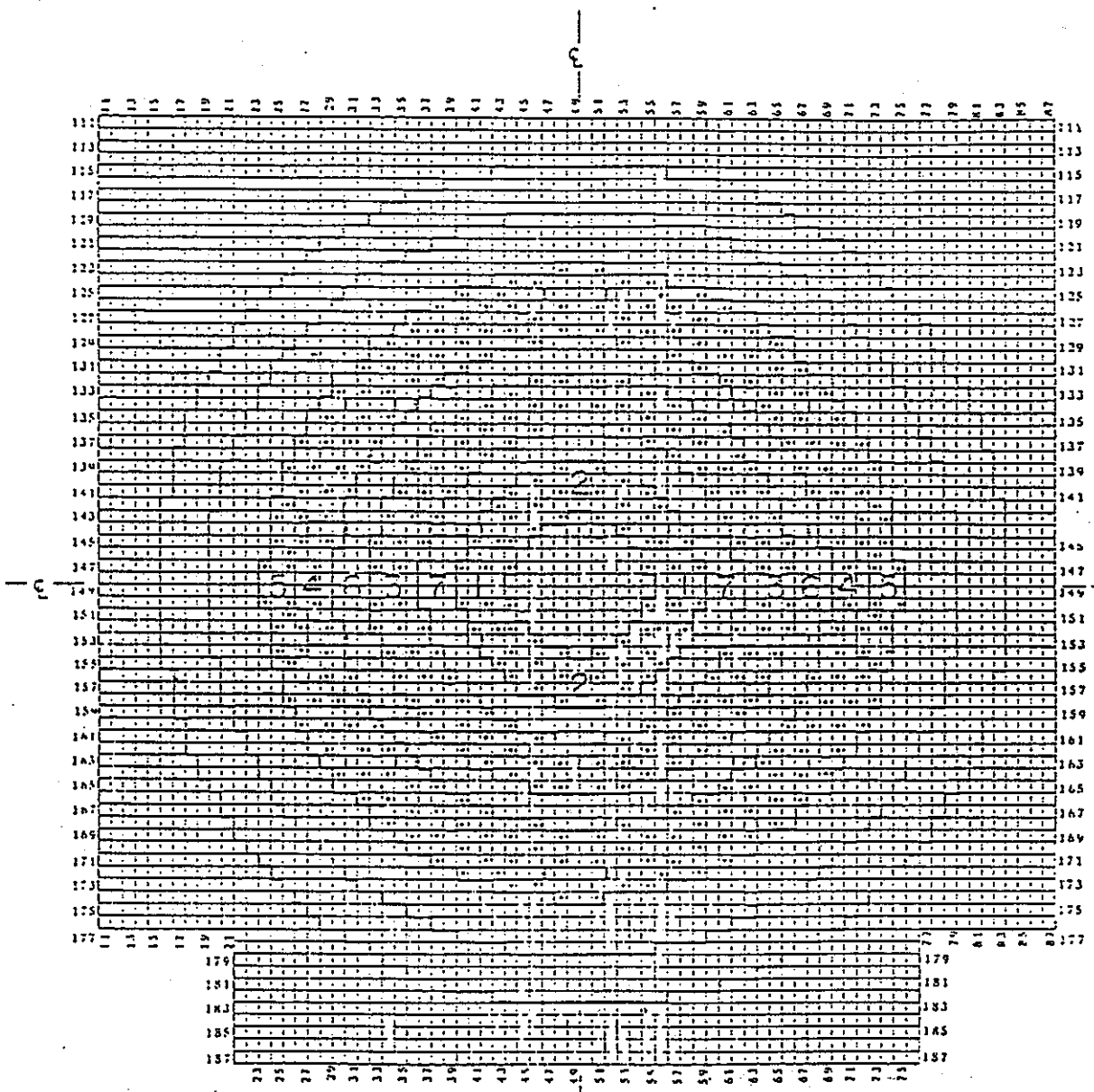


Fig. 3.2 Test Control Rod Patterns in ZPPR-13B/1



- | PSR
- DETECTOR
- SINGLE COLUMN FUEL

Fig. 3.3 Interface diagram showing the reference configuration for the sodium voiding experiments and showing the voiding zones in ZPPR-13A.



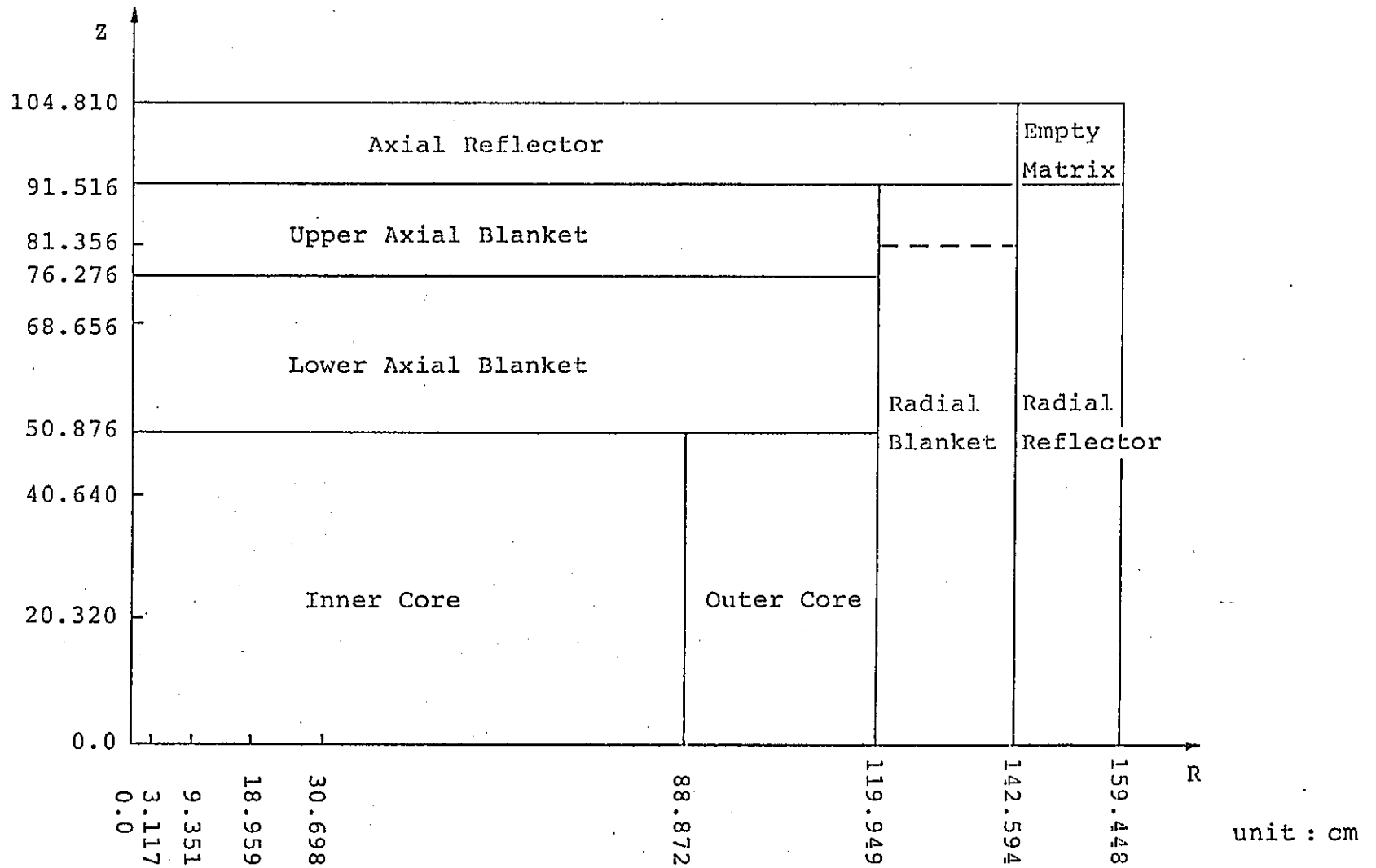


Fig. 3.4 RZ Model for ZPPR-9 Critical Reference

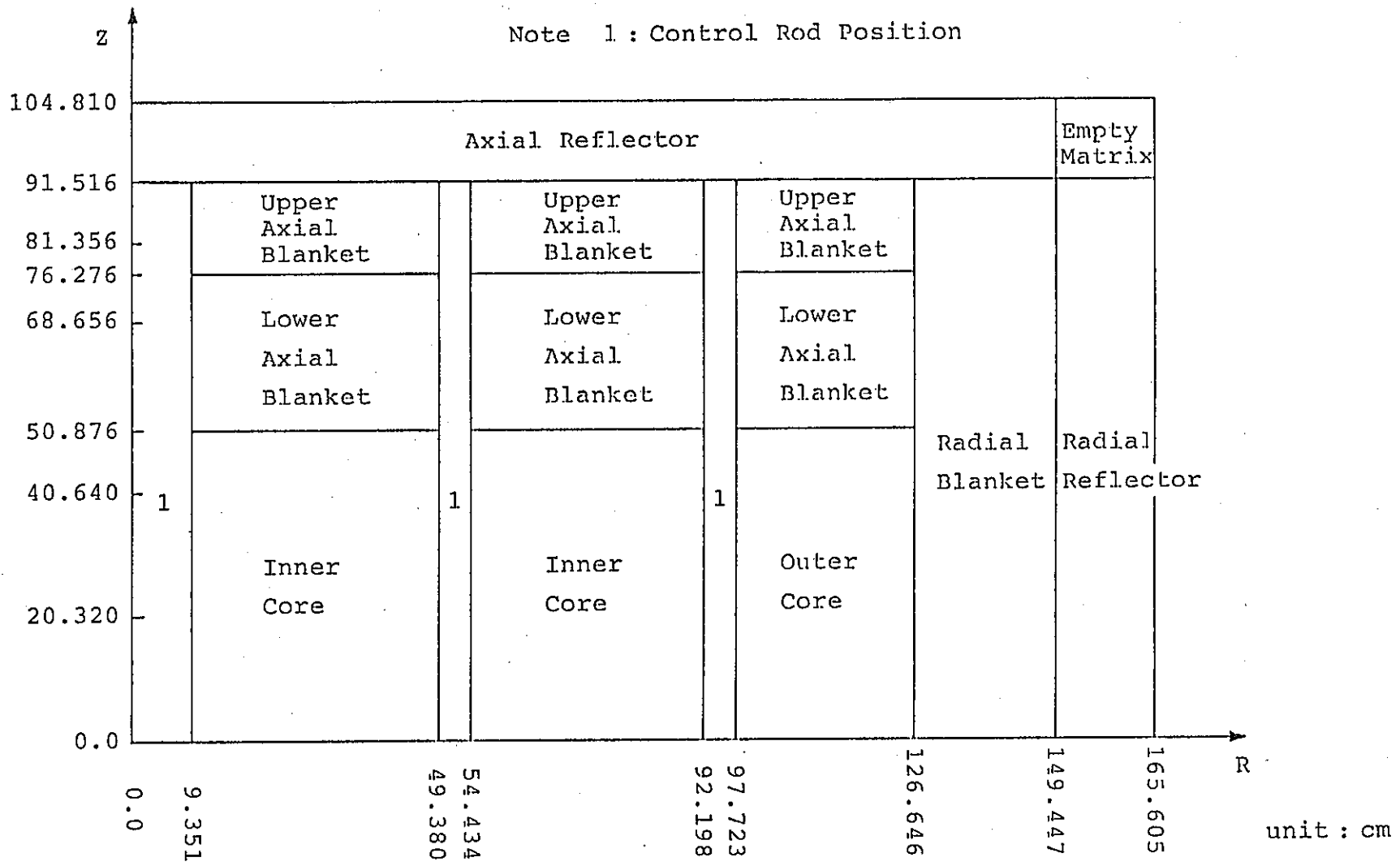


Fig. 3.5 RZ Model for ZPPR-10A Critical Reference

Note 1 : Upper Blanket  
 2 : Upper Axial Blanket  
 3 : Outer Radial Blanket  
 4 : Upper Outer Radial Blanket

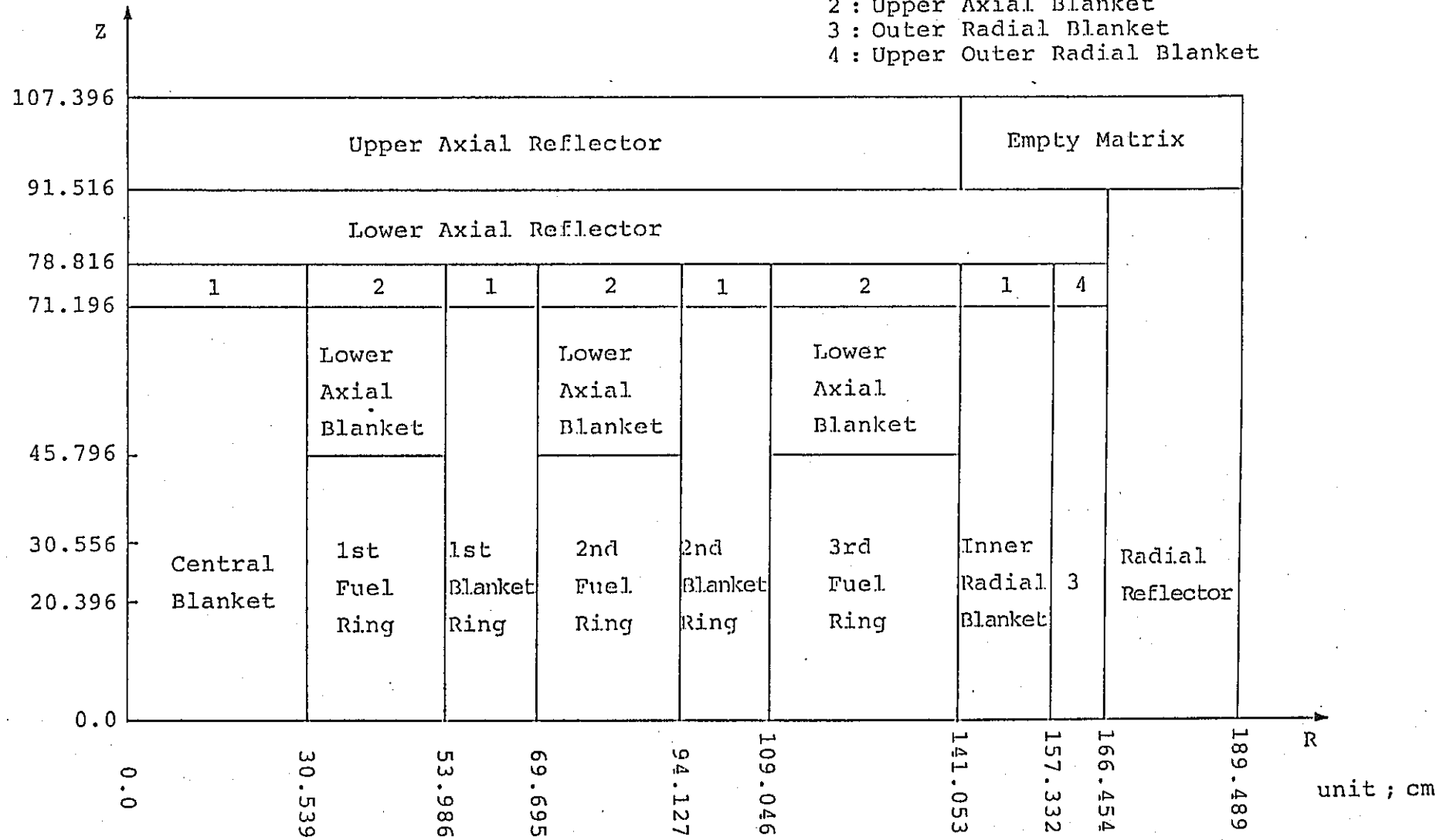


Fig. 3.6 RZ Model for ZPPR-13A Critical Reference

Note 1 : Upper Blanket  
 2 : Upper Axial Blanket  
 3 : Outer Radial Blanket  
 4 : Upper Outer Radial Blanket

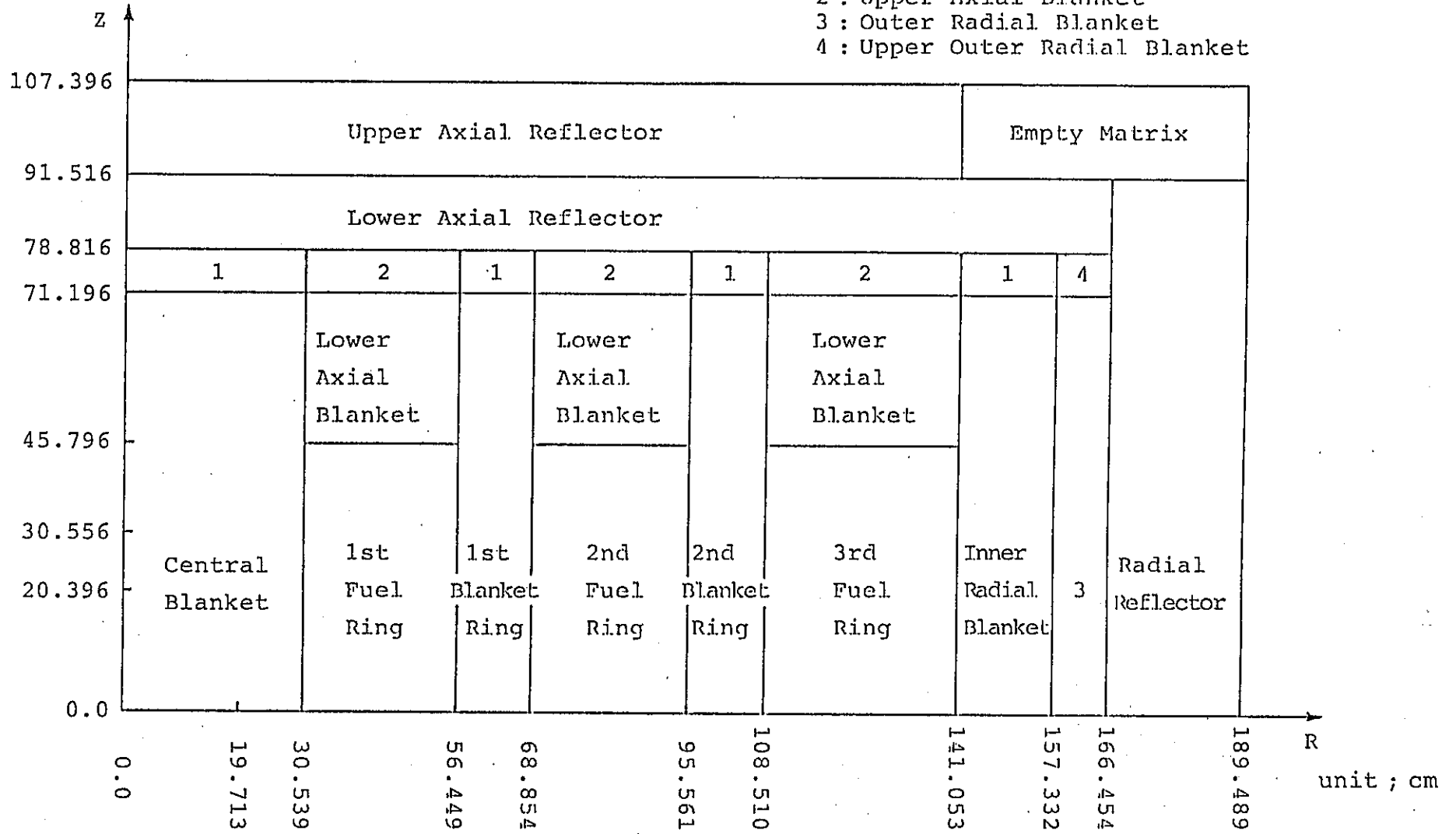


Fig. 3.7 RZ Model for ZPPR-13B/1 Critical Reference

Note 1 : Upper Blanket  
 2 : Upper Axial Blanket  
 3 : Outer Radial Blanket  
 4 : Upper Outer Radial Blanket

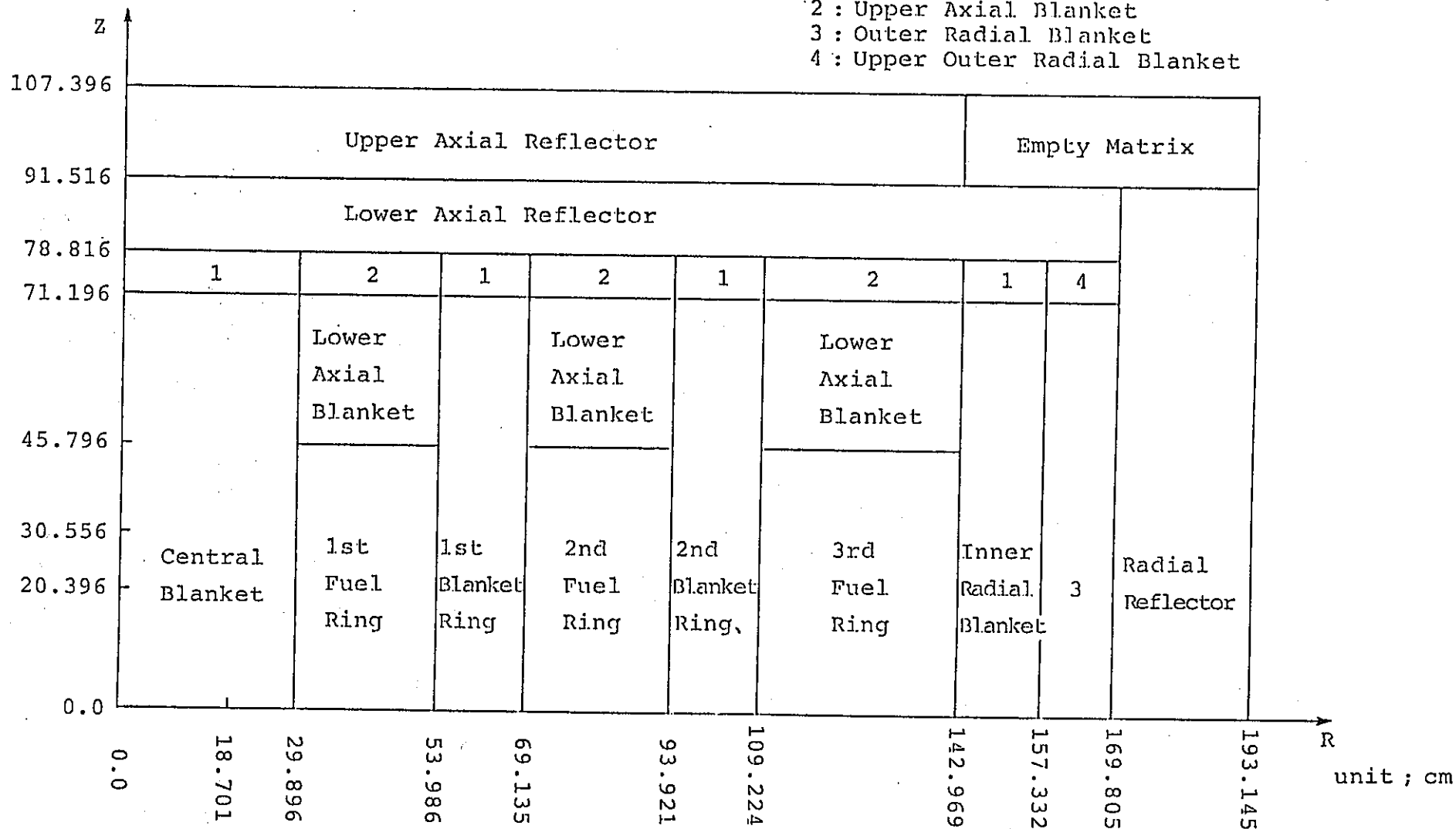


Fig. 3.8 RZ Model for ZPPR-13C Critical Reference

Note 1 : Upper Blanket  
 2 : Upper Axial Blanket  
 3 : Lower Axial Blanket  
 4 : Outer Radial Blanket  
 5 : Upper Outer Radial Blanket  
 6 : Control Rod or Control Rod Position

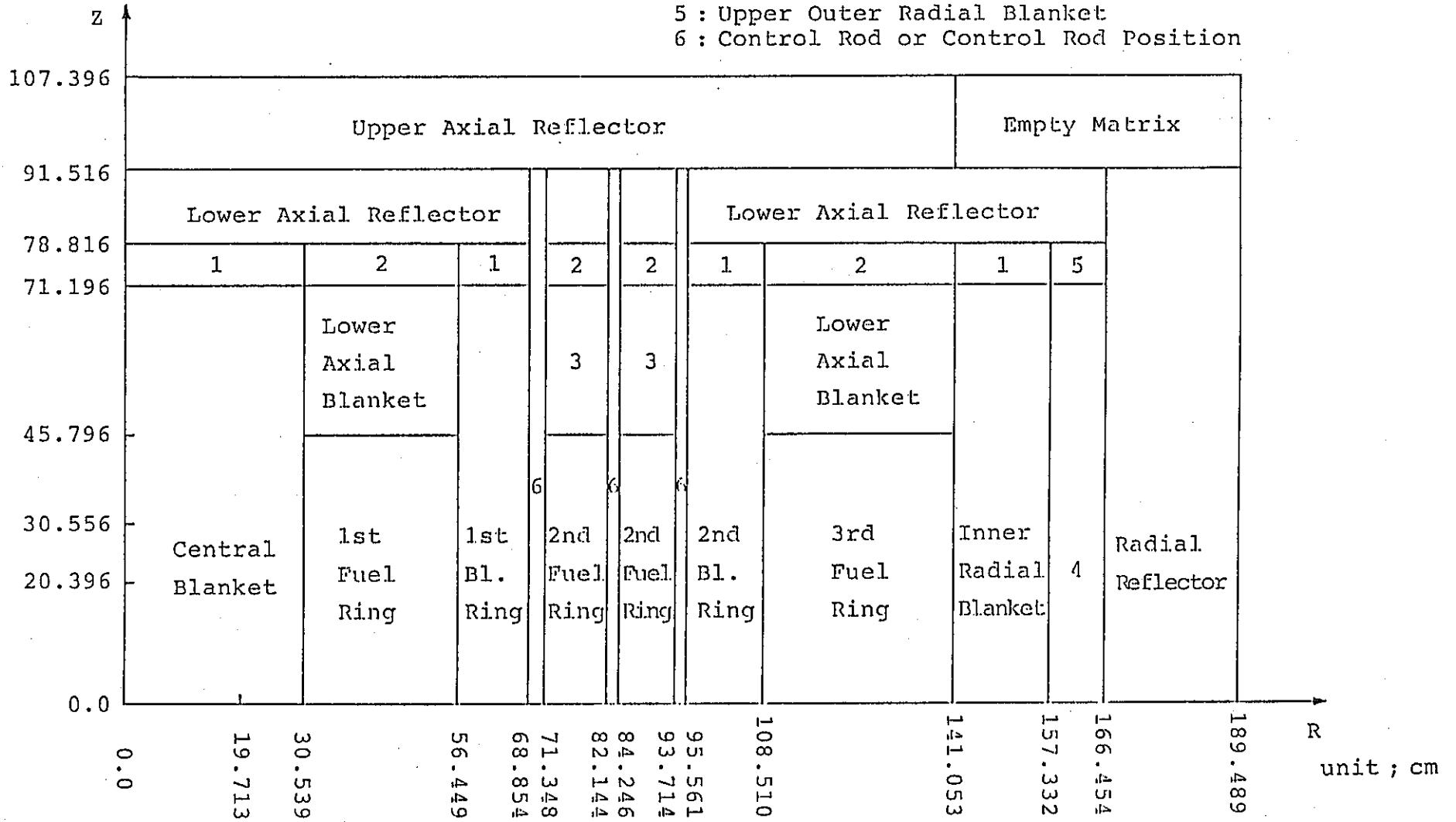


Fig. 3.9 RZ Model for CR and CRP Worths Calculations in ZPPR-13B/1

Note 1~7 : Na Void Zone  
 8 : Upper Blanket  
 9 : Upper Axial Blanket  
 10 : Outer Radial Blanket  
 11 : Upper Outer Radial Blanket

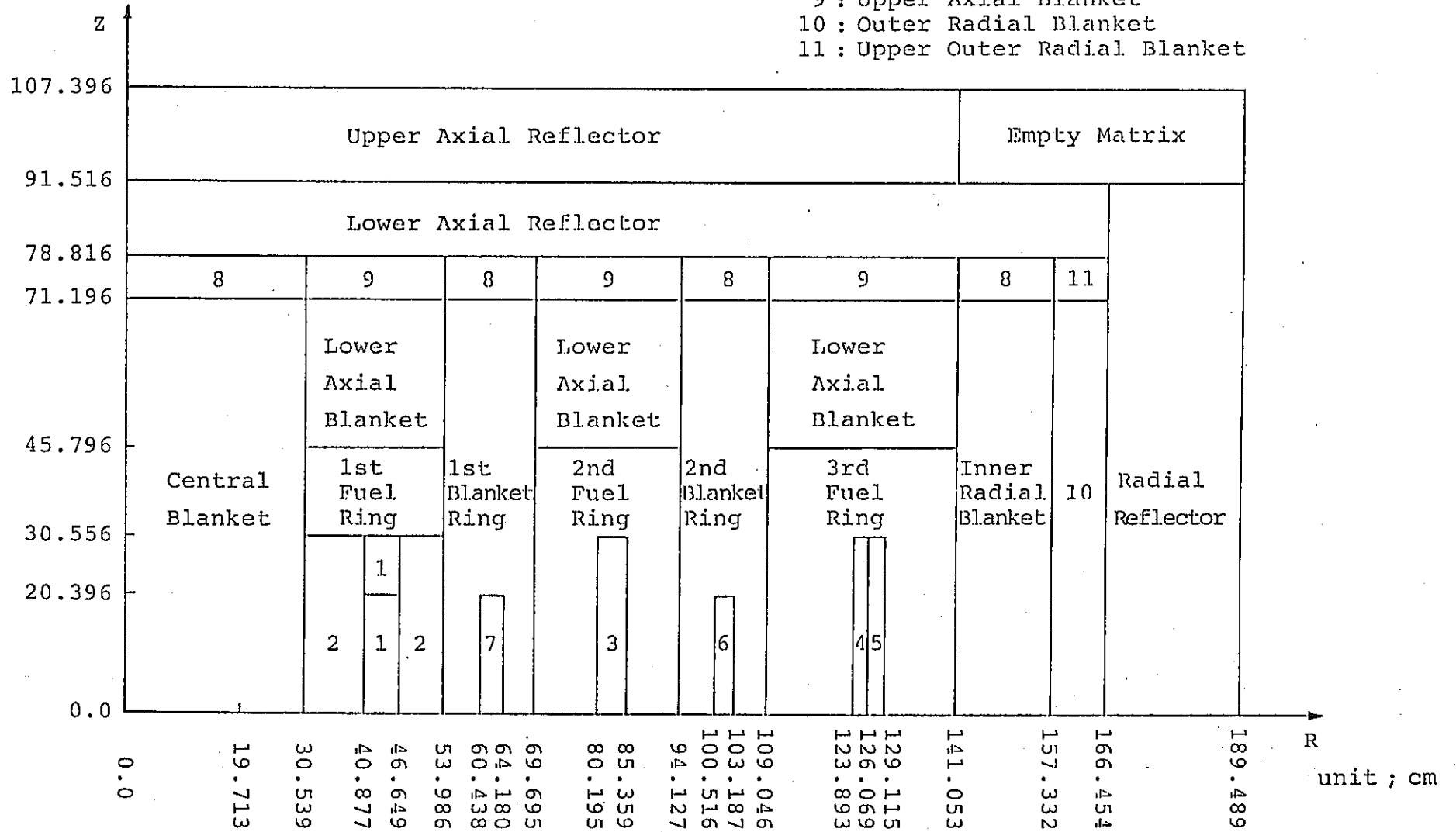


Fig. 3.10 RZ Model for Sodium Void Reactivity Calculations in ZPPR-13A

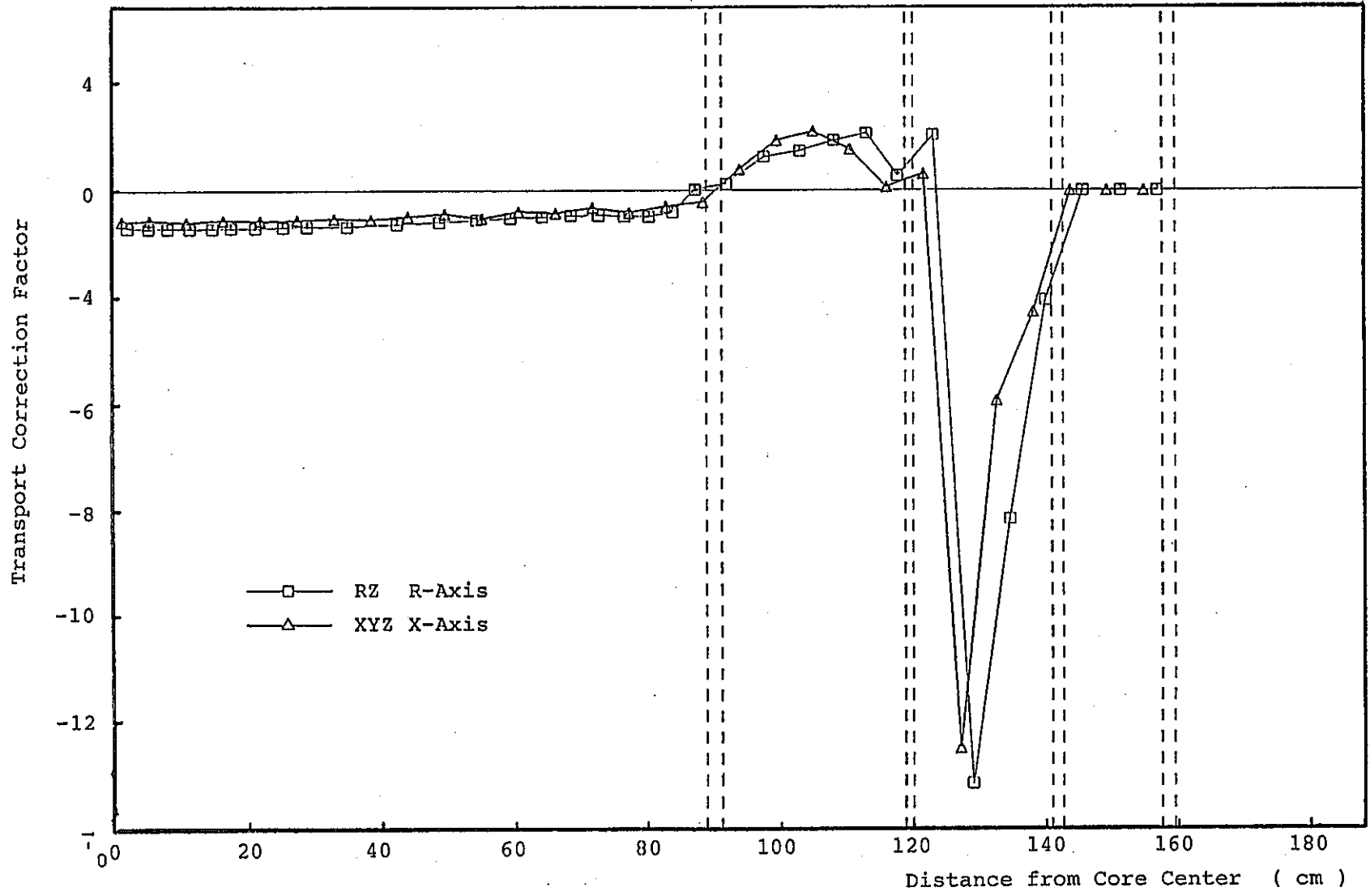


Fig. 4.4.1 Transport Correction Factors to Radial Power Distribution in ZPPR-9



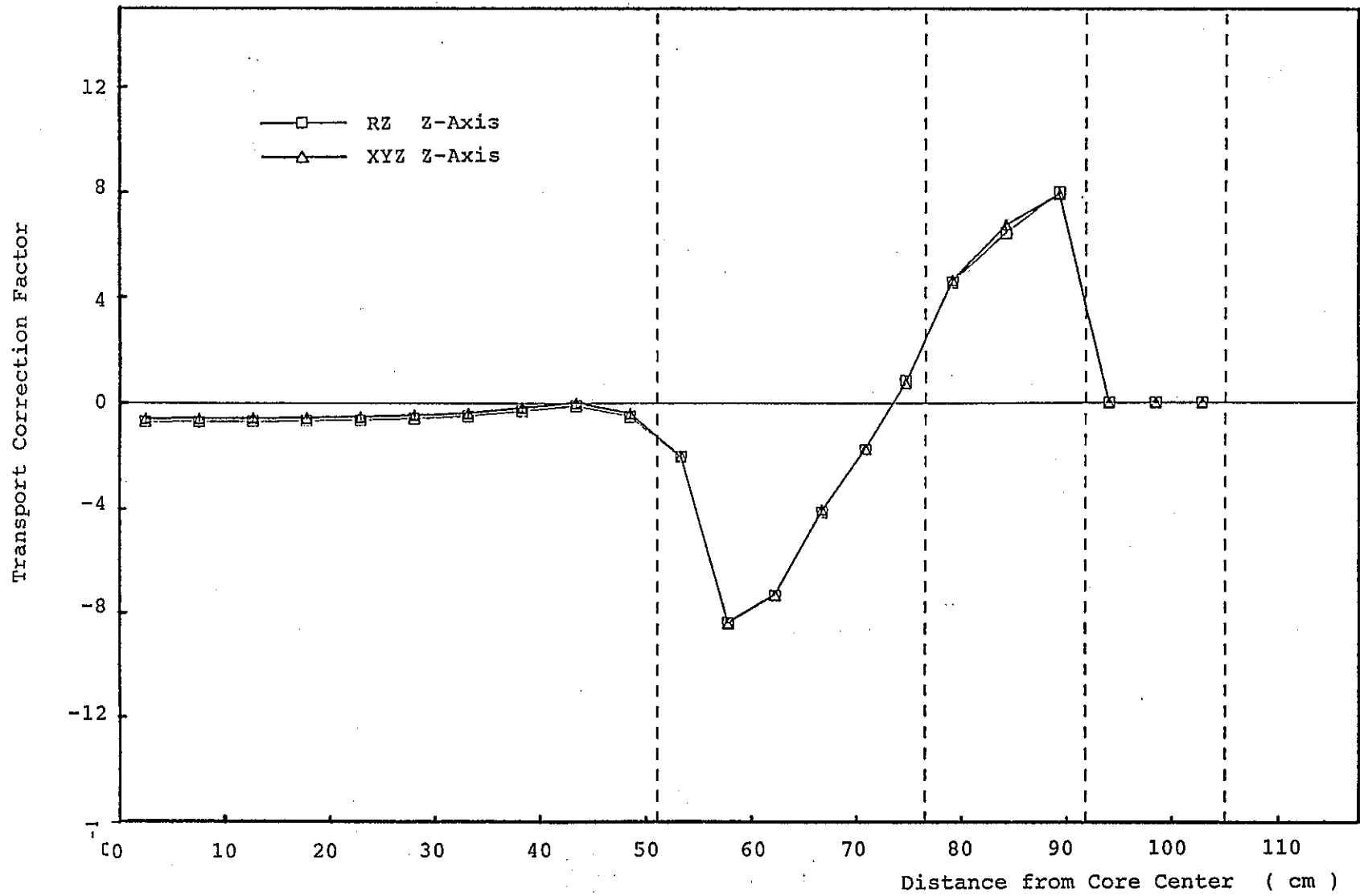


Fig. 4.4.2 Transport Correction Factors to Axial Power Distribution in ZPPR-9

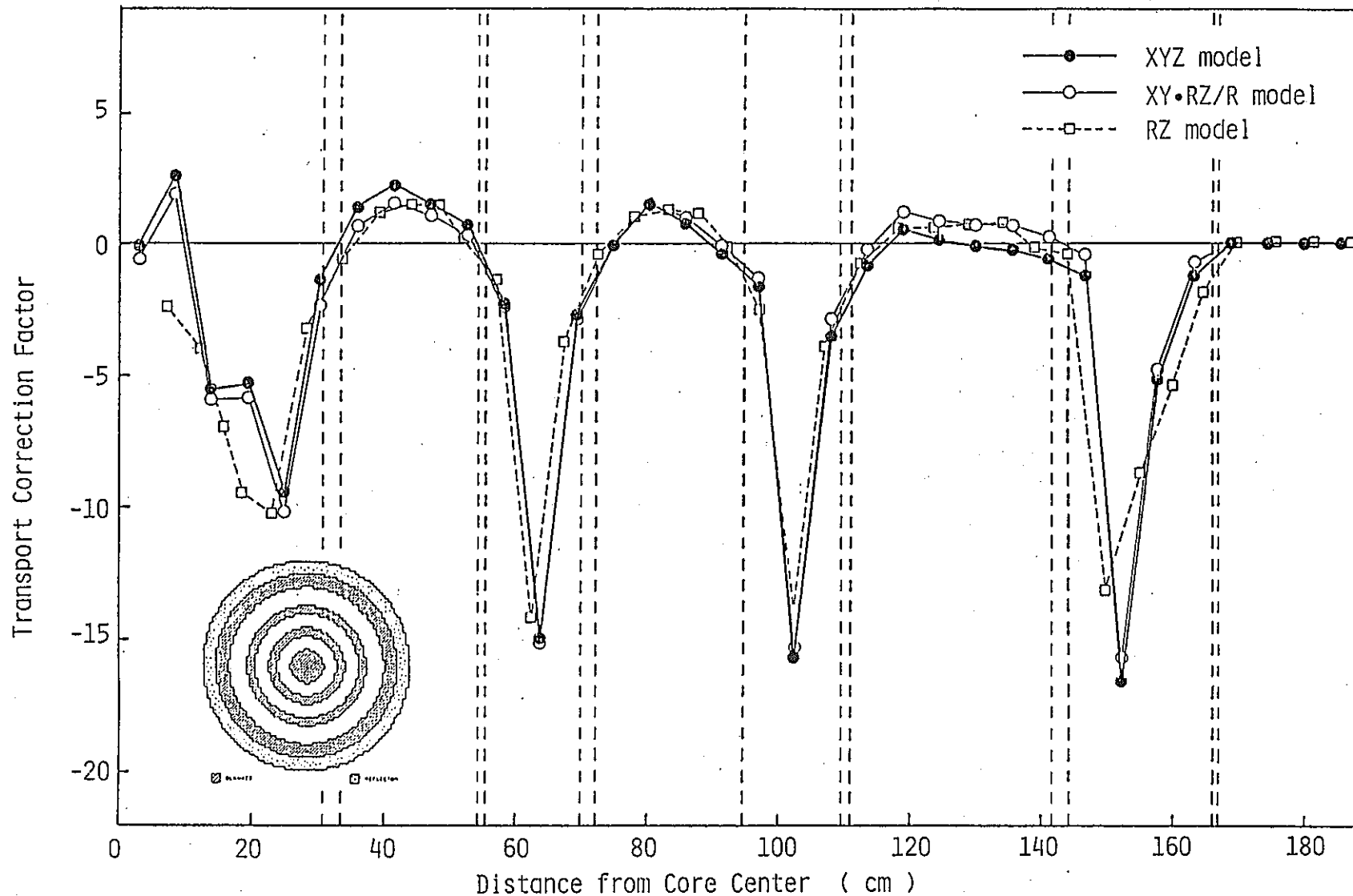


Fig.4.4.3 Transport correction factors to radial power distribution in ZPPR-13A predicted by the three models

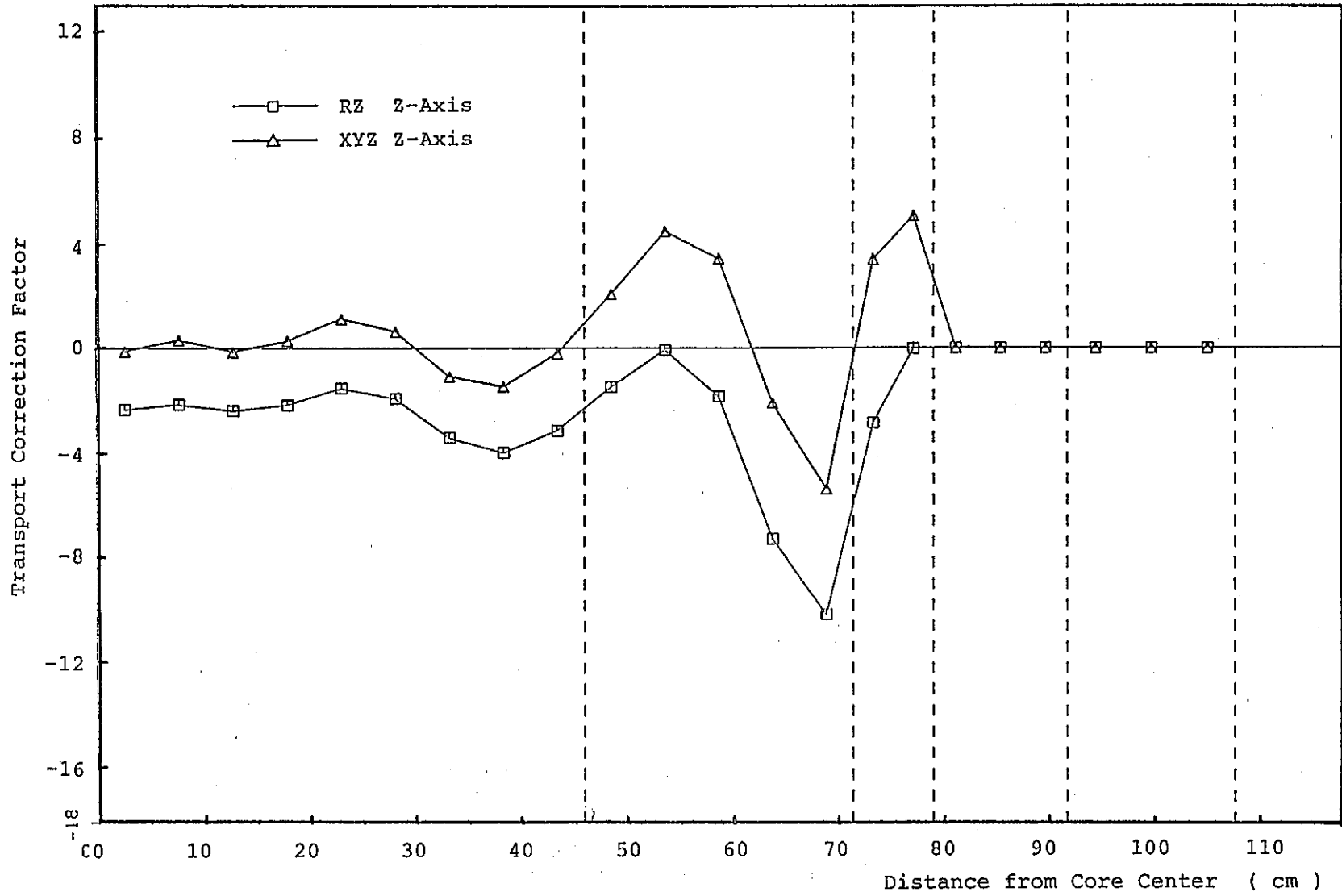


Fig. 4.4.4 Transport Correction Factors to Axial Power Distribution in ZPPR-13A

謝

辞

本研究を進めるに当り、有益な情報を提供され、御助言を頂いた動力炉・核燃料開発事業  
団高速増殖炉開発本部の白方・大谷・山本の各氏に深く感謝の意を表する次第である。