

本資料は 01 年 7 月 31 日付けで登録区分、
変更する。

[技術情報室]

分置

高速炉反射体付炉心模擬実験の解析(II)

1984年6月

三菱原子力工業株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

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

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

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

なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

配布限定

PNC ISJ 206 84-02

1984年6月30日



高速炉反射体付炉心模擬実験の解析(II)*

佐々木 誠**, 手塚 広子**

要 旨

高速実験炉「常陽」照射用炉心(MK-II)の模擬集合体である、FCA X-2集合体で測定された γ 発熱分布及び、FCA X-3集合体で測定された臨界性、反応率分布、制御棒価値、サンプル・ドップラー反応度を解析した。又、これ等の解析結果と、これ迄に実施した反射体付炉心の実験(FCA V-2R, FCA X-2集合体等)解析結果を基に、高速炉反射体付炉心模擬実験の解析上の問題点を検討した。最後に、「常陽」照射用炉心設計手法の評価・検討を、以上の結果に基づいて実施した。

本報告書の主要な結果を、以下に示す。

[FCA X-3 炉心解析]

- (1) FCA X-3集合体実効増倍率のC/E値は1.003と成り、FCA X-2集合体と同等な結果を得た。
- (2) 反応率分布解析結果から、炉心最外層位置での出力分布計算のC/E値を推定したところ、0.974と成り、これ迄の解析に比べ、約3%改善された。
- (3) 制御棒価値に関するC/E値は0.97~1.02であり、これ迄のFCA V-2R, X-2集合体解析に比べ、いくぶん改善された値を得た。
- (4) NUO₂ サンプルドップラー反応度解析のC/E値は0.8~0.9であり、これ迄の解析と同程度の結果を得た。

[FCA X-2 集合体解析]

- (5) γ 発熱分布解析では、実測値の γ 発熱分布を実験誤差範囲内で再現できた。

* 本報告書は、三菱原子力工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

** 三菱原子力工業株式会社 新型炉開発部

〔反射体付炉心による総合評価〕

- (6) 反射体付炉心と、ブランケット付炉心の解析結果を比較した結果、反射体付炉心の解析上の問題点を明らかにできた。
- (7) これ迄の設計計算値を見直した。MK-II 炉心をよく模擬した FCA X シリーズ集合体の解析を使用すると、設計計算精度が向上することが明らかになった。

NOT FOR PUBLICATION

PNC SJ 206 84-02

30 June, 1984



Experimental Analyses of Reflected Fast Reactor
Mockup Assembly (II)*

Makoto Sasaki**, Hiroko Tezuka**

Abstract

Experimental analyses have been performed on the FCA assemblies X-3 and X-2 which were built to simulate the MK-II core of "JOYO". The data analyzed were the criticality, the reaction rate distributions, the control rod worths and the sample Doppler worths on the FCA assembly X-3, and the γ -absorption dose rate distribution on assembly X-2.

The problems on the analyses of the assemblies with reflector were discussed. The re-evaluation of the MK-II core design data was also discussed.

* Work performed under the contract between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation and Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

** Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc., Advanced Reactors Engineering Department

The main results are as follows:

[The analysis on the FCA assembly X-3]

- (1) The C/E value of the criticality is 1.003. This value is agreed with the assembly X-2.
- (2) The estimated C/E value of the power distribution near the core boundary in the MK-II core is 0.974. This result is improved about 3%, compared with the one obtained from the analyses on the FCA assemblies V-2R and X-2.
- (3) The C/E values of the control rod worths are distributed 0.97 to 1.02, and improved, comparing with the ones of the above 2 assemblies.
- (4) The C/E values of the sample doppler worths are 0.8 to 0.9, and consistent with the results of the previous analyses performed for the MK-II core design.

[The analysis on the FCA assembly X-2]

- (5) The result of the γ -heating analysis is agreed with the experimental values within the experimental error.

[The totally discussion on the analysis]

- (6) The problems on the analyses of the mock-up assembly with the reflector are made clear.
- (7) The design values are re-evaluated. These data are improved, using the C/E values of the exact mock-up assemblies for the "JOYO" MK-II core. (e.g, FCA assemblies X-2 and X-3).

目 次

	頁
要 旨	i
Abstract	iii
List of Tables	vii
List of Figures	xii
1. 概 要	1
2. FCA X-2 集合体 r 発熱分布解析	3
2.1 はじめに	3
2.2 実験の概要	3
2.3 解析手法	3
2.4 解析結果	4
2.5 まとめと検討	5
3. FCA X-3 集合体の実験解析	17
3.1 FCA X-3 集合体の概要	17
3.2 解析コードの概要	18
3.3 臨界性の解析	18
3.4 中心反応率比及び反応率分布	21
3.5 制御棒反応度価値	26
3.6 サンプル・ドブラー実験解析	31
3.7 まとめ	34
4. 反射体付炉心解析の検討	117
4.1 はじめに	117
4.2 反射体付炉心実験解析のまとめ	117
4.3 反射体付炉心の解析上の問題点	118
4.4 まとめ	119

5. 「常陽」MK-II 炉心設計手法の評価・検討	121
5.1 目 的	121
5.2 設計手法と解析手法の比較・検討	121
5.3 設計手法と解析手法の問題点と検討	124
5.4 設計値の見直し	125
5.5 ま と め	128
6. あとがき	143
7. 謝 辞	145
8. 参考文献	147

List of Tables

- Table 2.1 Experimental Absorbed Dose and Correction Factor of γ -source Calculation
- Table 2.2 Comparison of γ -heating Distribution between Uncorrected Calculational and Experimental Values
- Table 2.3 Result of γ -heating Distribution Analysis
- Table 3.1 Number Densities of Plates of the Drawer
- Table 3.2 Homogenized Number Densities of FCA X-3 Assembly
- Table 3.3 Criticality for FCA Assembly X-3
- Table 3.4 Energy Group Structure
- Table 3.5 Fission Neutron Spectra
- Table 3.6 Results of Criticality Calculation
- Table 3.7 Results of Central Fission Rate Ratio Calculation
- Table 3.8 Correction Factors for Pu^{239} Radial Fission Rate Calculation in FCA X-3 Reference
- Table 3.9 Correction Factors for U^{238} Radial Fission Rate Calculation in FCA X-3 Reference
- Table 3.10 Correction Factors for U^{235} Radial Fission Rate Calculation in FCA X-3 Reference
- Table 3.11 Correction Factors for Pu^{239} Radial Fission Rate Calculation in FCA X-3 with Central Na Channel

- Table 3.12 Correction Factors for U^{238} Radial Fission Rate Calculation in FCA X-3 with Central Na Channel
- Table 3.13 Correction Factors for U^{235} Radial Fission Rate Calculation in FCA X-3 with Central Na Channel
- Table 3.14 Radial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 Reference
- Table 3.15 Radial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 Reference
- Table 3.16 Radial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 Reference
- Table 3.17 Radial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 with Central Na Channel
- Table 3.18 Radial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 with Central Na Channel
- Table 3.19 Radial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 with Central Na Channel
- Table 3.20 Correction Factors for Pu^{239} Axial Fission Rate Calculation in FCA X-3 Reference
- Table 3.21 Correction Factors for U^{238} Axial Fission Rate Calculation in FCA X-3 Reference
- Table 3.22 Correction Factors for U^{235} Axial Fission Rate Calculation in FCA X-3 Reference

- Table 3.23 Correction Factors for Pu^{239} Axial Fission Rate Calculation in FCA X-3 with B_4C Channel
- Table 3.24 Correction Factors for U^{238} Axial Fission Rate Calculation in FCA X-3 with B_4C Channel
- Table 3.25 Correction Factors for U^{235} Axial Fission Rate Calculation in FCA X-3 with B_4C Channel
- Table 3.26 Axial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 Reference
- Table 3.27 Axial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 Reference
- Table 3.28 Axial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 Reference
- Table 3.29 Axial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 with B_4C Channel
- Table 3.30 Axial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 with B_4C Channel
- Table 3.31 Axial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 with B_4C Channel
- Table 3.32 Results of Radial Fission Rate Calculation in the Core Outermost Drawer Center
- Table 3.33 Correction Factors of Control Rod Worth
- Table 3.34 Results of Control Rod Worth Calculation
- Table 3.35 Comparison of Control Rod Worth between Method 1 and 2
- Table 3.36 Atomic Compositions of Doppler Samples and Capsules

Table 3.37	Comparison of Sample Doppler Reactivity Worth between Experimental and Computational Values
Table 4.1	Comparison of C/E Values among Several Cores with Reflector
Table 5.1	Design Method and Estimation of Minimum Criticality
Table 5.2	Method of Correction Calculation for Criticality
Table 5.3	Result of Criticality Analysis for MK-II Core Design
Table 5.4	Comparison of Power Calculation between Design and Analysis
Table 5.5	Error Estimation of Power Distribution in Design
Table 5.6	Comparison of Control Rod Worth Calculation Method between Design and Analysis
Table 5.7	Correction for Control Rod Worth in Design
Table 5.8	Error Estimation of Power Design Calculation in Movable Reflector
Table 5.9	Results of Control Rod Worth Calculation on FCA V-2R and X-2 Core
Table 5.10	Comparison of γ -source and γ -heating Distribution
Table 5.11	Estimation of Minimum Criticality on MK-II Core

Table 5.12 Comparison of Control Rod Worth between
Design and Measurement

List of Figures

- Fig. 2.1 Vertical Cross Section of FCA Assembly X-2
- Fig. 2.2 TLD Setting Position in the Drawer
- Fig. 2.3 Gamma Ray Heating Distribution in FCA X-2
- Fig. 2.4 Flow of γ -heating Analysis
- Fig. 2.5 γ -heating Distribution Calculation Model
- Fig. 2.6 Result of Reference Analysis
- Fig. 2.7 Result of γ -heating Analysis
-
- Fig. 3.1 Plate Pattern of Core Fuel Drawer
- Fig. 3.2 Plate Pattern of Control Drawer
- Fig. 3.3 Drawer Pattern of Radial Reflector
- Fig. 3.4 Drawer Pattern of SUS Block
- Fig. 3.5 Na Drawer Pattern
- Fig. 3.6 Vertical Cross Section of FCA Assembly X-3
- Fig. 3.7 Flow Diagram of Criticality Calculation
- Fig. 3.8 Flow Diagram of S_N Effect Calculation
- Fig. 3.9 Flow Diagram of Fe-Resonance Effect Calculation
-
- Fig. 3.10 Cell Calculation Model of Core Drawer
- Fig. 3.11 $\frac{1}{2}$ RZ Model of FCA X-3
- Fig. 3.12 $\frac{1}{2}$ RZ Model of FCA X-3 for HANYO Code
- Fig. 3.13 Position of Fission Chamber Insertion for Radial Fission Rate Measurement
- Fig. 3.14 Loading Pattern for Axial Fission Rate Measurement

- Fig. 3.15 Flow Diagram of Effective Cross-Section Generation (for B_4C Case)
- Fig. 3.16 Flow Diagram of Fission Rate Calculation
- Fig. 3.17 Flow Diagram of Group Reduction and S_N Effect Calculation
- Fig. 3.18 Flow Diagram of Fe-Resonance Effect Calculation
- Fig. 3.19 $\frac{1}{4}$ XY Model of FCA X-3 (for Radial Fission Rate Calculation)
- Fig. 3.20 RZ Model of FCA X-3 with B_4C Channel (for Axial Fission Rate Calculation)
- Fig. 3.21 1-D Model for Correction Calculations
- Fig. 3.22 Radial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 Reference
- Fig. 3.23 Radial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 Reference
- Fig. 3.24 Radial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 Reference
- Fig. 3.25 Radial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 with Central Na Channel
- Fig. 3.26 Radial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 with Central Na Channel
- Fig. 3.27 Radial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 with Central Na Channel
- Fig. 3.28 Axial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 Reference

- Fig. 3.29 Axial Fission Rate Distribution of U^{238} in
FCA X-3 Reference
- Fig. 3.30 Axial Fission Rate Distribution of U^{235} in
FCA X-3 Reference
- Fig. 3.31 Axial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in
FCA X-3 with B_4C Channel
- Fig. 3.32 Axial Fission Rate Distribution of U^{238} in
FCA X-3 with B_4C Channel
- Fig. 3.33 Axial Fission Rate Distribution of U^{235} in
FCA X-3 with B_4C Channel
- Fig. 3.34 B_4C Drawer for FCA Assembly X-3
- Fig. 3.35 Flow Diagram of Macro. Cross-Section Genera-
tion
- Fig. 3.36 Flow Diagram of Buckling Generation
- Fig. 3.37 Flow Diagram of Eigen Value Calculation
- Fig. 3.38 XY Model of Base Calculation
- Fig. 3.39 $\frac{1}{4}$ XY Model of FCA X-3 for Mesh Effect Calcula-
tion
- Fig. 3.40 Heterogeneous B_4C Drawer Model
- Fig. 3.41 $\frac{1}{4}$ XY Model of FCA X-3 for Lumping Effect of
 B_4C Drawer and Transport Effect
- Fig. 3.42 Vertical Cross Sections of FCA Assembly X-3
for Doppler Experiment
- Fig. 3.43 Cell Calculation Model of Doppler Sample
- Fig. 3.44 Flow of Doppler Reactivity Calculation

Fig. 3.45 $\frac{1}{2}$ RZ Model of 7gr Reference Calculation

Fig. 5.1 Estimation of Minimum Criticality of MK-II
Core

1. 概 要

1. 概 要

高速実験炉「常陽」照射用炉心（100MWt, MK-II 炉心とも略す）の模擬集合体である FCA X 炉心シリーズで測定された、炉内 r 線発熱分布（FCA X-2 集合体）と臨界性、反応率分布、制御棒価値、サンプル・ドブラー反応度（以上、FCA X-3 集合体）の解析を行なった。

これ等の実験解析は、MK-II 炉心の設計手法及びこれ迄に実施した反射体付炉心（例、FCA V-2R, FCA X-2 集合体）の解析手法に準じた解析手法と、共通の断面積セット（弊社作成、ABB N 型 26 群群定数セット MICS 5.3）を用いて実施した。尚、解析の対象は、MK-II 炉心の設計手法の評価・検討を最終的に実施するため、設計で対象としているようなケースのみに限定した。

本実験解析の結果を第 2, 3 章に示した。MK-II 炉心のフル・モックアップ炉心として、6本の制御棒位置（CRP）を持った FCA X-3 集合体の核持性量評価精度は、制御棒位置を持たぬ FCA X-2 集合体のそれと、ほぼ同程度であった。

第 4 章では、本実験解析及び、これ迄の同様の反射体付炉心模擬実験解析から、ブラケットのない反射体付炉心固有の解析上の問題点を検討した。

第 5 章では、第 4 章の検討結果等を基に、MK-II 炉心の設計手法の評価・検討を行なった。

2. FCA・X-2 集合体 r 発熱分布解析

2. FCA X-2 集合体 r 発熱分布解析

2.1 はじめに

FCA X-2 炉心で測定された、 r 発熱分布実験^{<4>}の解析を実施した。

MK-II 炉心のための炉内 r 発熱分布実験及び実験解析は、これ迄実施されたことがなく、今回のものが唯一のものである。

従って、本解析結果により、MK-II 実機炉心の反射体領域発熱設計計算の妥当性を初めて確認することになる。

2.2 実験の概要

炉内の r 発熱分布測定は、Fig.2.1 に示す、反射体付炉心である FCA X-2 集合体で行なわれた。 r 発熱分布は、Fig.2.2 に示す直径 20 mm、厚さ 6.35 mm のステンレス・カプセルに納められた TLD によって、吸収線量値として、測定されている。TLD を納めたステンレス・キャプセルは、FCA 燃料 1 パック中に 1 ケの割合で、炉心領域では Na プレート位置に、反射体領域では SUS プレート位置に置かれた。

r 線測定位置は、Fig.2.1 に示すように、径方向 (X-軸) に、炉心内において、1 つおきのマトリックス位置 (0, 1, 3, 5)、反射体及び、SUS ブロック内では全マトリックス位置 (6~10) の計 10 点である。

r 線発熱量は、実効原子番号の異なる 3 種の TLD による吸収線量測定値から、内挿法により、FCA X-2 集合体媒質に対し求めている。

得られている r 発熱量を Table 2.1, Fig.2.3 に示した。尚、同表に示されているように、測定値の誤差は、反射体、SUS ブロック領域に比べ、炉内では 2~3 倍大きくなっていることに注目されたい。

2.3 解析手法の説明

これ迄の MK-II 炉心の r 発熱分布設計計算の手法^{<1>, <5>, <6>}に準じて、基準の r 発熱計算を実施した。その後、 r 線輸送計算における S_N の N 次オーダーの効果の検討、 r 線軸方向バックリングの効果等を検討した。

1) 基準解析

基準解析計算の流れを Fig.2.4 に示した。 r 発熱計算のために求める r 線源分布は、既報告書^{<3>}で報告した炉内反応率分布解析で実施した中性子束布計算と同一の条件で行なった。

(a) 中性子束分布計算

- 7 群拡散計算

- 2D (1/4 XY) モデル Fig.2.5
- メッシュ 2×2/drawer : 炉心, 径方向反射体領域
- 1×1/drawer : SUSブロック, FCAマトリックス領域

(b) r 線束分布計算

- r 線源計算 : 16群 r 線ライブラリー GASCRO-16
- 2D (1/4 XY) モデル 16群 S_6 輸送計算
メッシュは(1)と同じ。
- r 線用軸方向バックリング (B_z^{r2}) : zero

2) 解析手法の検討解析

初めての炉内 r 発熱解析であり, 設計計算手法に準じた基準計算手法の妥当性確認, 補正のために実施した。

(a) r 線輸送計算の S_N N次オーダーの検討

- 1D(R)モデル S_6 と S_8 計算による r 発熱分布の比較
メッシュ, r 線源等の他の計算条件は, 基準計算と同じ。
径方向計算の体系, 寸法はFig.2.5のX軸上の値を使った。

(b) r 線輸送計算における軸方向バックリング (B_z^{r2}) の検討

- 基準計算と同じ計算条件で, r 線軸方向バックリングを使い, r 発熱分布の比較を行なう。

$$B_z^{r2} = 85.121 \text{ cm}^{-2} \text{ (一群, 形状バックリング)}$$

2D (1/4 XY) 16群 S_6 r 輸送計算

(c) 中性子束計算のエネルギー群数効果の検討

- 1D(R)モデル, 26群と7群中性子束拡散計算により, r 線源計算に用いる中性子束群数縮約の効果を検討する。
- r 線束 1D(R) 16群 S_6 輸送計算

(d) r 線源分布の補正検討

- 中性子反応率分布実験解析によると, 実験値と解析値は完全に一致していない。従って r 線源分布もそれに応じ, 十分な精度で求められていないと考え, r 線源分布計算値を反応率分布解析結果のE/C値で補正し, 本効果を検討する。

計算条計は, 基準解析に同じとする。 r 線源分布補正因子を, Table 2.1に示す。

2.4 解析結果

1) 基準解析

2D (1/4 XY) モデルによる、 r 発熱分布基準解析結果を、測定値と比較し、Table 2.2, Fig. 2.6 に示した。同表においては、解析値を炉中心位置で、測定値に規格化した。

解析値は、炉心の最外層 (測定点 5) で測定誤差を上回って、測定値を過小評価している。又、反射体以降では、最外点を除き、解析値は測定値を 25 ~ 40 % 過大評価している。

しかし、炉心中心位置の規格化点で、測定値が ± 30 % の測定誤差を示しているので、炉心最外層を除き、ほぼ解析値は実測値の分布形を再現できていると考える。

2) 検討解析

(a) r 線輸送計算の S_N N 次オーダーの効果

S_6 と S_8 r 線輸送計算による r 発熱分布には差が無かった。両者の差は、SUS ブロック最外層点で高さ 0.3 % であり、基準計算の S_6 分点の使用の妥当性が確認できた。

(b) r 線軸方向バックリングの群数効果

Table 2.3 に r 線輸送計算に軸方向バックリングを考慮した場合に対する、しない場合の r 発熱分布計算値の比を示した。同表から判かるように、炉心領域での $B_z^{r^2}$ の効果は無いが、反射体領域ではいくぶん効果が見られた。即ち、径方向反射体領域で 1 %、SUS ブロック領域で 0.7 ~ 1.2 % であった。

(c) 中性子束のエネルギー群数効果

Table 2.3 に示すように、炉心最外層において、26 群計算の方が、7 群計算に比べ、0.5 % 程 r 発熱分布を過小評価する。逆に、径方向反射体内側では、26 群計算の方が 5 % 過大評価しているが、SUS ブロック外層に向って、その傾向が逆転する。

本効果は、反射体部において無視し得ない効果を示す。

(d) r 線源分布の補正効果

Table 2.3 に示すように、本効果は r 発熱分布に対し、炉心最外層内側で 5 %、外側で 10 % あった。この値は r 線源の補正值にほぼ等しく、本補正を施していない、反射体領域へも有意な効果を与えている。

2.5 まとめと検討

これ迄の設計計算手法に準じた r 発熱分布解析の結果を、Table 2.2 と Fig. 2.6 示した。2.4.1) 項に示したように、炉中心で解析値を測定値に規格化すると、解析値は炉心最外層を除き、測定値と測定誤差巾内で分布形が一致している。又、反射体領

域以降では、最外層を除き、25～40%程、解析値が測定値を過大評価している。しかし、炉中心での測定値の誤差が30%あることから考えると、炉心最外層を除き、ほぼ解析値は実測値の分布形を再現していると考えられる。尚、MK-II炉心の設計では、反射体領域における径方向出力分布核設計誤差として、±15%、軸方向出力分布核設計誤差として、±25%（第1種）、±15%（第2、第3種）が考慮されている。

従って、本解析一例のみの結果からではあるが、これ迄の r 発熱設計計算の妥当性が確認できたと考える。

上記設計手法に準じた r 発熱解析の精度を向上させる検討を行ない、2.4.2)項に示したような結果を得た。設計手法は妥当な計算手法であることが、上記の様に確認できた。更に、 r 線源値の反応率分布解析結果のE/Cによる補正等が、 r 発熱分布解析値に有効であることが判かった。

この補正後の解析値の炉中心位置での規格化を、測定値の誤差範囲内である15%小さな値に対して行なうと、炉心最外層を除き、全実測点において、解析値は測定値と誤差範囲内で一致する。(Fig.2.7)

尚、炉心最外層での解析値と測定値の不一致原因は今の処不明であるが、 r 発熱分布が問題と成る反射体内での両者の一致の良さから考え、解析上特に重要な問題とは考えていない。

Table 2.1 Experimental Absorbed Dose and Correction Factor of γ -source Calculation

	Position	Exp.-3 (Jcm ⁻³ /Np)	Correction Factor of* γ -source Calculation
Core	Pos. 0	3.34 +10 (±30%)	0.99
	Pos. 1	3.72 +10 (+50%) (-40%)	0.99
	Pos. 2	—	0.99
	Pos. 3	3.25 +10 (+47%) (-32%)	1.00
	Pos. 4	—	1.01
Rd. Ref.	Pos. 5	3.38 +10 (+45%) (-29%)	1.05** 1.10**
	Pos. 6	2.56 +9 (±17%)	1.0
	Pos. 7	1.30 +9 (±17%)	1.0
	Pos. 8	8.27 +8 (±17%)	1.0
	Pos. 9	7.41 +8 (±17%)	1.0
SUS Ref.	Pos.10	4.75 +8 (±17%)	1.0
	Pos.11	2.71 +8 (±17%)	1.0

* E/C values of FCA X-2 power distribution analysis

** upper value : value at inner position of drawer.

lower value : value at outer position of drawer.

Table 2.2 Comparison of γ -heating Distribution between
Uncorrected Calculational and Experimental Values

Position	Exp.(E)	Calcu.(C)	C / E
0 \uparrow	1.0 ($\pm 30\%$) [*]	1.0	1.0
1 \uparrow	1.114 ($+50\%$ -40%)	0.992 ₅	0.891 ₀
2 Core	—	0.921 ₅	—
3 \downarrow	0.973 ₀ ($+47\%$ -32%)	0.809 ₁	0.831 ₆
4 \downarrow	—	0.670 ₇	—
5 \downarrow	1.012 ($+47\%$ -29%)	0.508 ₄	0.502 ₁
6 \uparrow	0.0766 ₅ ($\pm 17\%$)	0.107 ₄	1.40 ₁
7 Rd. Ref. \uparrow	0.0389 ₂ ($\pm 17\%$)	0.0487 ₅	1.25 ₃
8 \downarrow	0.0247 ₆ ($\pm 17\%$)	0.0321 ₁	1.29 ₇
9 \uparrow	0.0221 ₉ ($\pm 17\%$)	0.0292 ₇	1.31 ₉
10 SUS Ref. \uparrow	0.0142 ₂ ($\pm 17\%$)	0.0175 ₁	1.23 ₁
11 \downarrow	0.00811 ₄ ($\pm 17\%$)	0.00935 ₀	1.15 ₂

* The Experimental Value at the Core Center is $3.34 \times 10^{10} \text{ Jcm}^{-3}$

2D(1/4XY) Calcu.

Table 2.3 Result of γ -Heating Distribution Analysis

Position	Experiment (E)	Base Calculation (C) *	Correction Factor			Corrected (C') Calculation	C' / E
			Neutron Energy	Bz ²	γ Source Correction		
0	\uparrow Jcm ⁻³ 3.34 ⁺¹⁰ ± 30%	3.34 ⁺¹⁰	1.0	1.0	1.0	3.34 ⁺¹⁰	1.0
1	\uparrow 3.72 ⁺¹⁰ $\begin{matrix} +50 \\ -40 \end{matrix}$ %	3.31 ₅ ⁺¹⁰	0.999 ₅	1.004 ₂	1.005 ₃	3.34 ₅ ⁺¹⁰	0.899 ₂
2	Core —	3.07 ₈ ⁺¹⁰	0.999 ₀	1.000 ₂	1.006 ₇	3.09 ₆ ⁺¹⁰	—
3	\downarrow 3.25 ⁺¹⁰ $\begin{matrix} +47 \\ -32 \end{matrix}$ %	2.70 ₂ ⁺¹⁰	0.998 ₁	1.000 ₁	1.013 ₅	2.73 ₄ ⁺¹⁰	0.841 ₁
4	\downarrow —	2.24 ₀ ⁺¹⁰	0.996 ₁	1.000 ₃	1.031 ₅	2.30 ₂ ⁺¹⁰	—
5	\downarrow 3.38 ⁺¹⁰ $\begin{matrix} +45 \\ -29 \end{matrix}$ %	1.69 ₈ ⁺¹⁰	0.995 ₁	1.000 ₆	1.082 ₂	1.83 ₀ ⁺¹⁰	0.541 ₃
6	 2.56 ⁺⁹ ± 17%	3.58 ₆ ⁺⁹	1.047 ₇	0.993 ₅	1.068 ₉	3.99 ₀ ⁺⁹	1.55 ₉
7	Rad. Ref. 1.30 ⁺⁹ ± 17%	1.62 ₈ ⁺⁹	1.013 ₅	0.990 ₂	1.031 ₆	1.68 ₅ ⁺⁹	1.29 ₆
8	 8.27 ⁺⁸ ± 17%	1.07 ₂ ⁺⁹	0.980 ₂	0.990 ₃	1.023 ₀	1.06 ₃ ⁺⁹	1.28 ₅
9	\uparrow 7.41 ⁺⁸ ± 17%	9.77 ₆ ⁺⁸	0.944 ₉	0.993 ₅	1.019 ₅	9.35 ₆ ⁺⁸	1.26 ₃
10	SUS Ref. \uparrow 4.75 ⁺⁸ ± 17%	5.84 ₈ ⁺⁸	0.926 ₂	0.996 ₆	1.014 ₃	5.47 ₄ ⁺⁸	1.15 ₂
11	\downarrow 2.71 ⁺⁸ ± 17%	3.12 ₃ ⁺⁸	0.924 ₅	0.988 ₁	1.021 ₀	2.91 ₃ ⁺⁸	1.07 ₅

* Normalized to Experimental Value at Core Center

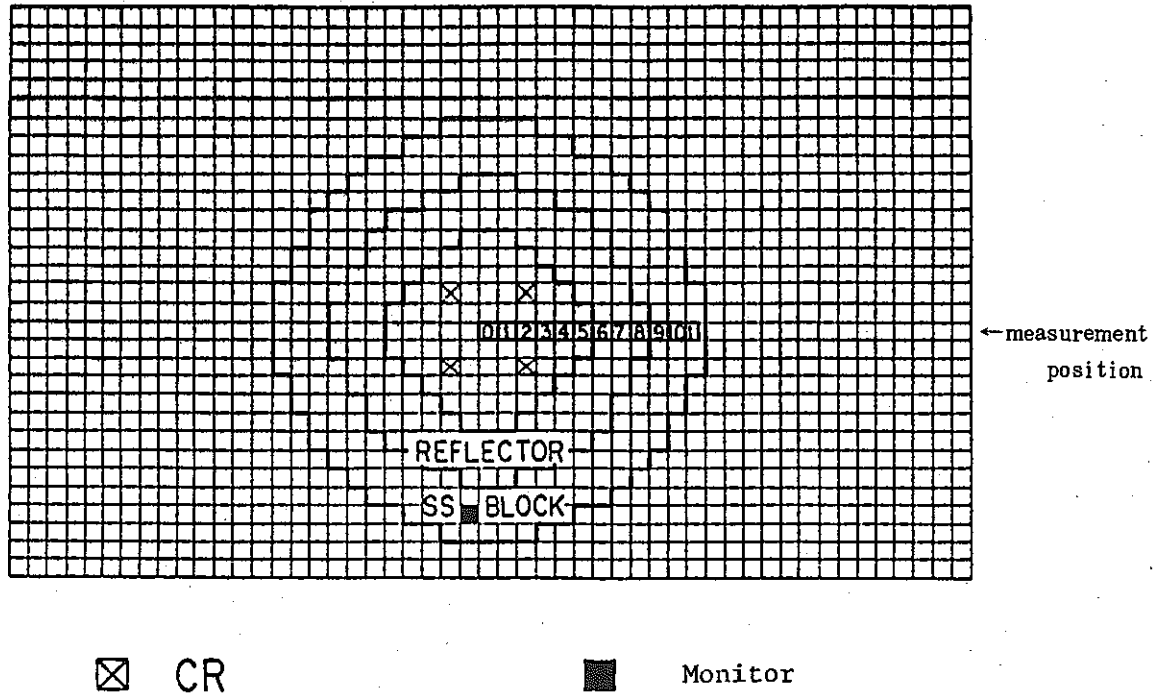
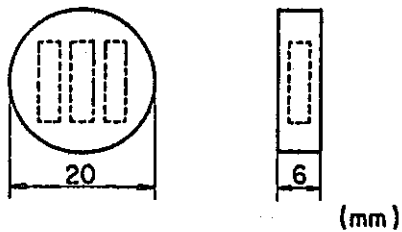
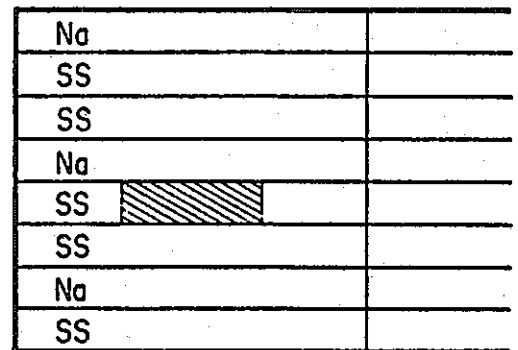


Fig. 2.1 Vertical Cross Section of FCA Assembly X-2

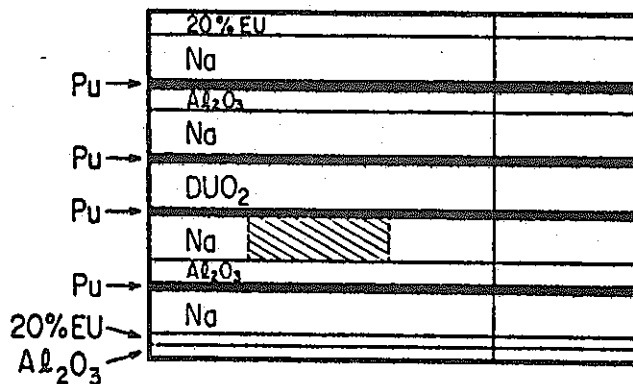
Stainless Steel Capsul for TLD



Reflector drawer



Core drawer



SS Block drawer

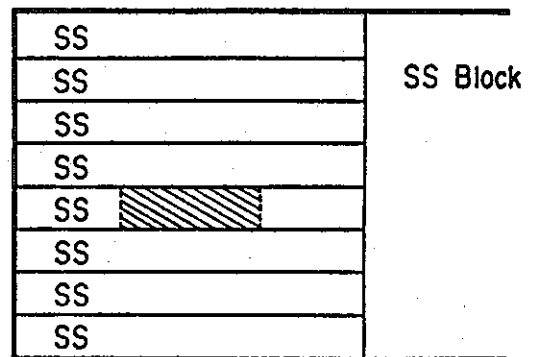


Fig. 2.2 TLD Setting Position in the Drawer

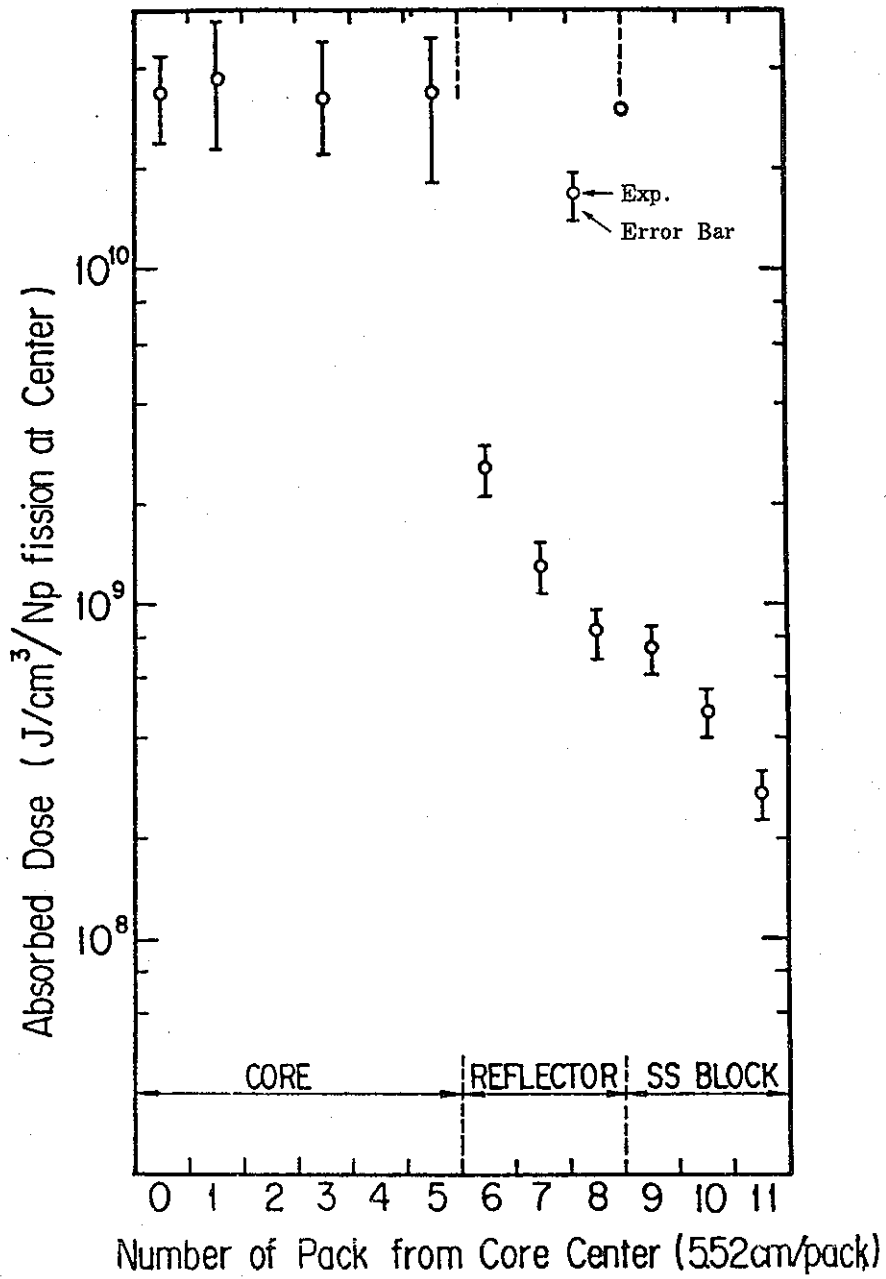


Fig. 2.3 Gamma Ray Heating Distribution in FCA X-2

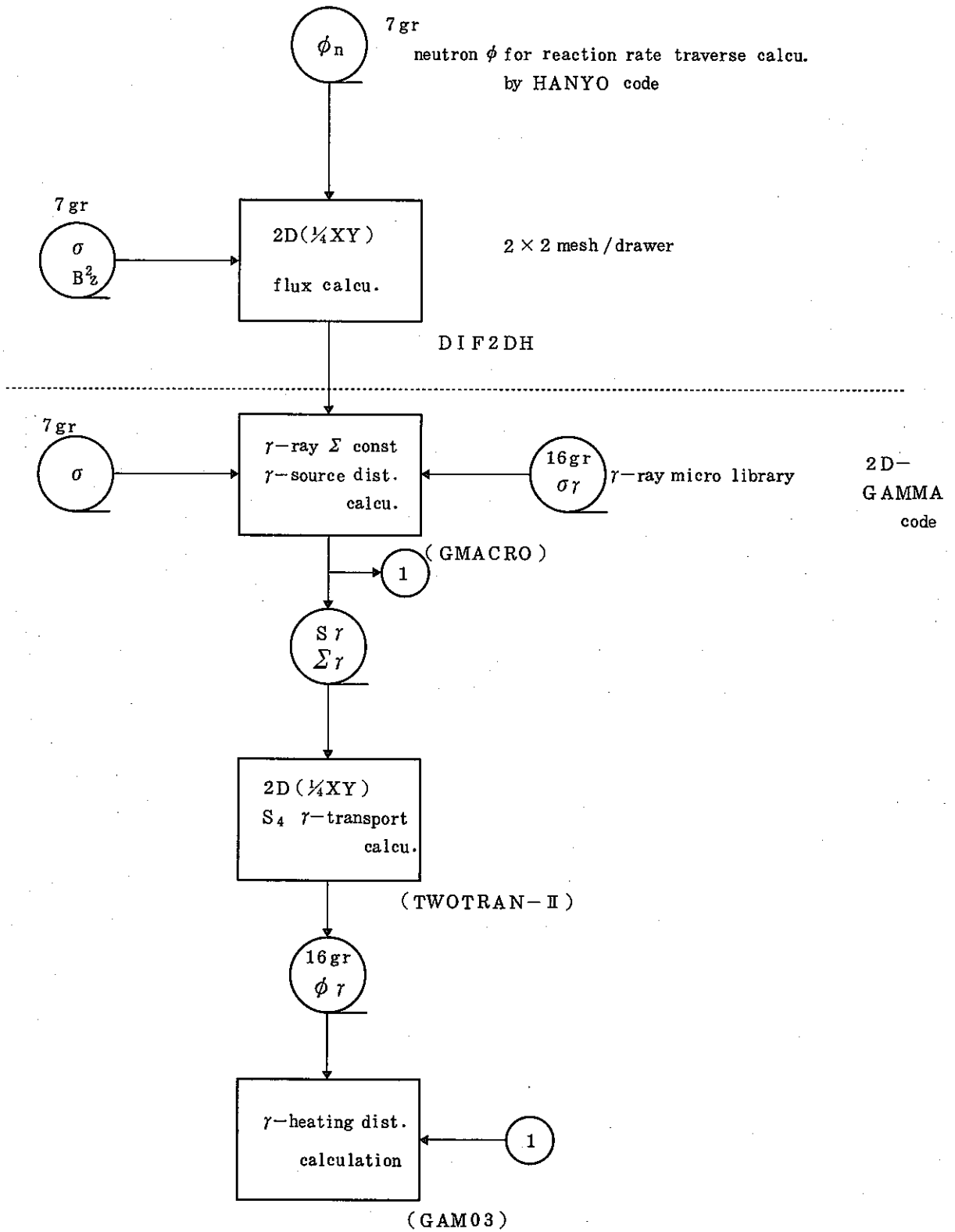
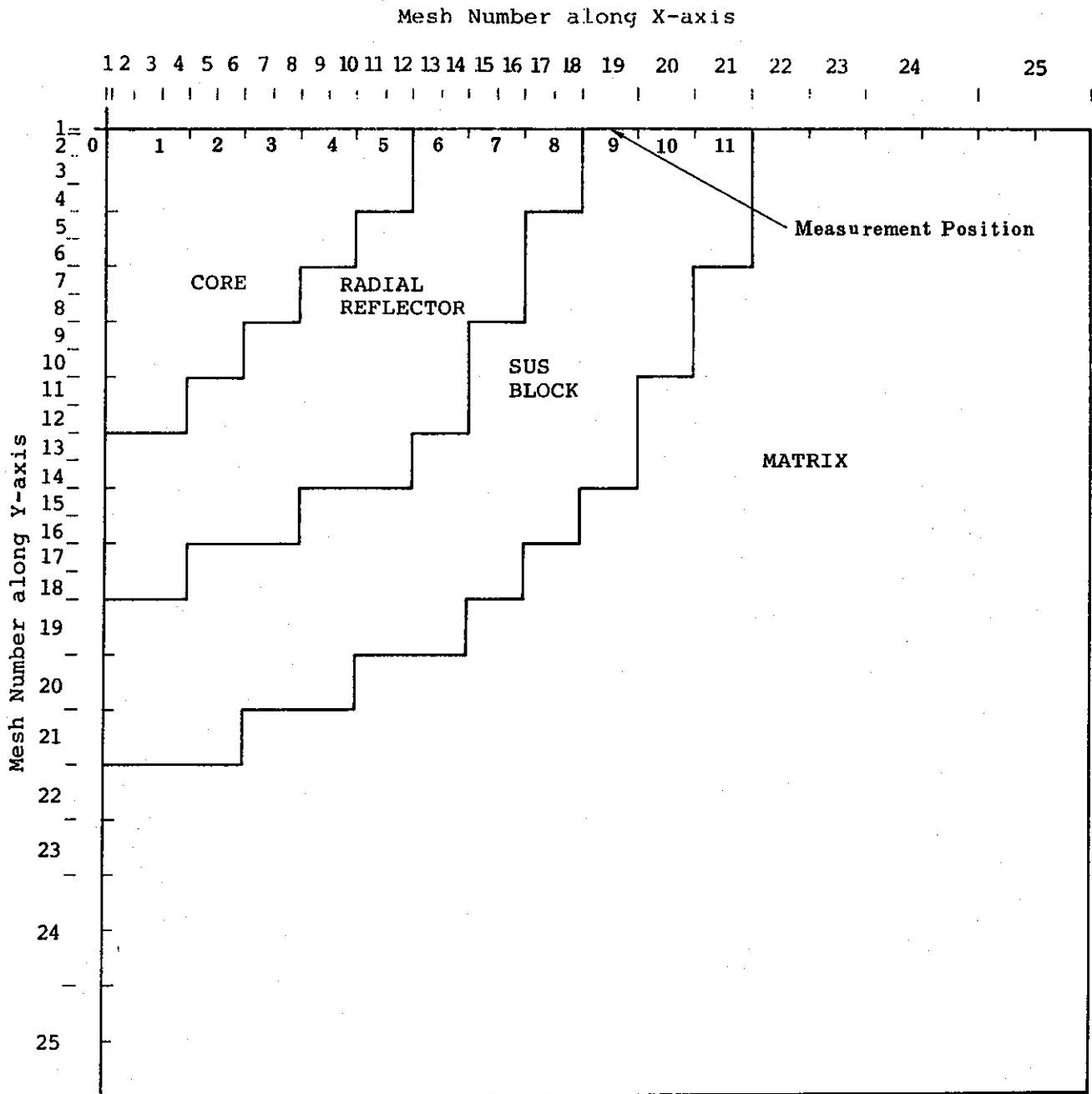
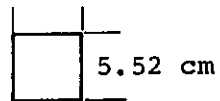


Fig. 2.4 Flow of γ -heating Analysis



5.52 cm



$$\Delta S = 30.4704 \text{ cm}^2$$

Fig. 2.5 γ -heating Distribution Calculation Model

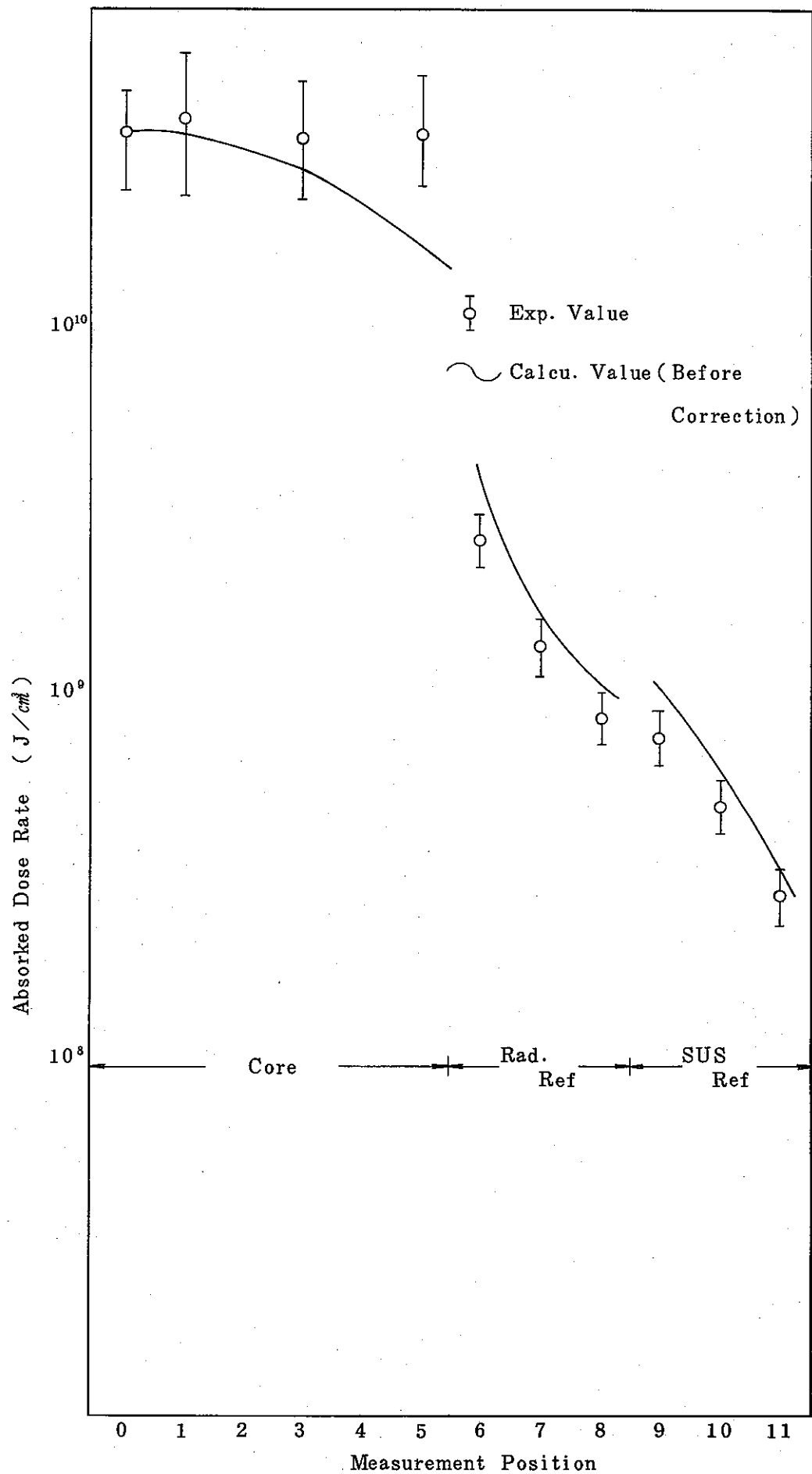


Fig. 2.6 Result of Reference Analysis

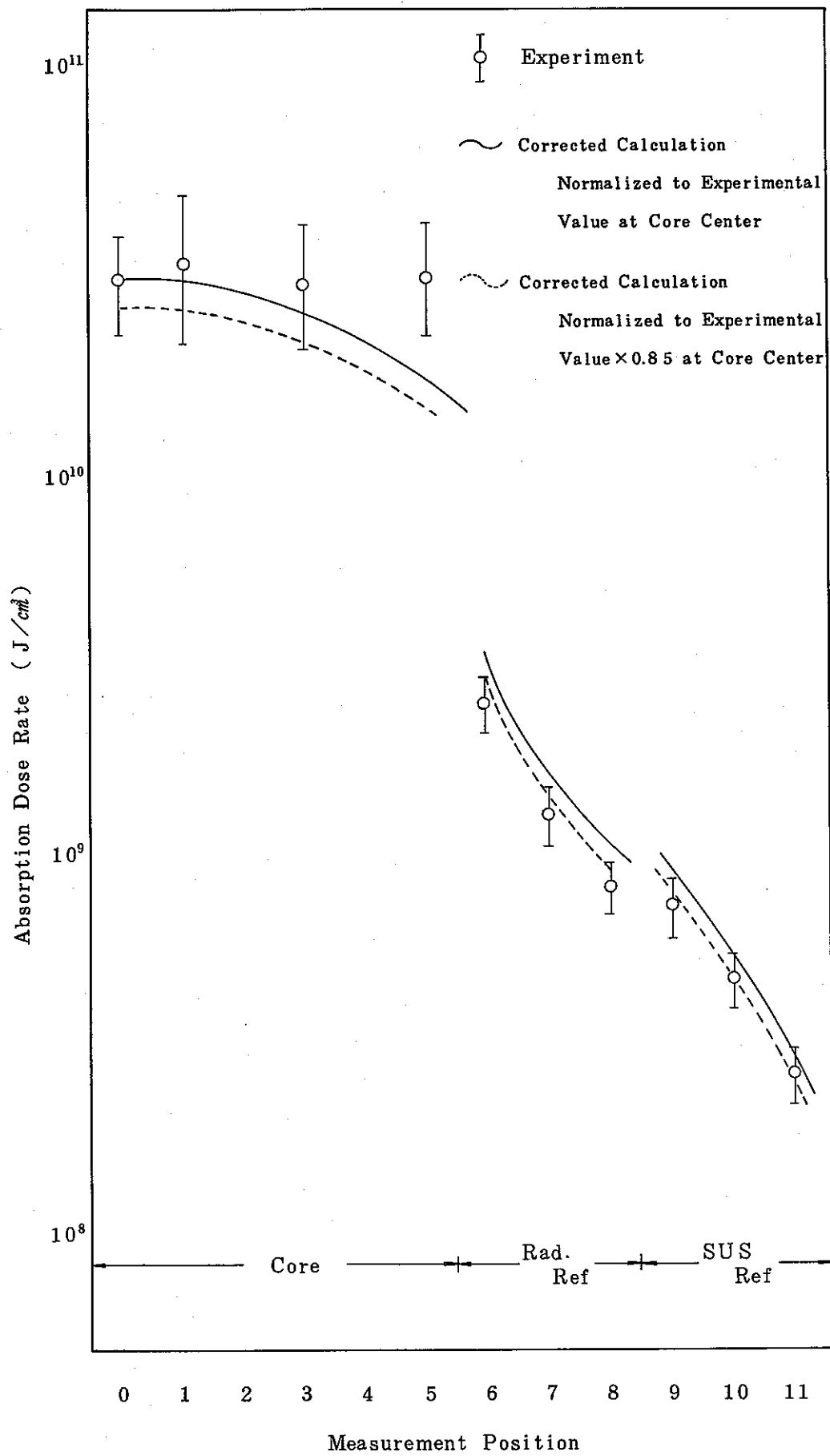


Fig. 2.7 Results of γ -Heating Analysis

3. FAC・X-3 集合体の実験解析

3. FCA X-3 集合体の実験解析

FCA X-3 集合体は、「常陽」MK-II 炉心の組成を模擬した炉心と反射体から成り、炉心内に 6ヶ所の制御棒領域を持つ工学的模擬実験を目的とした体系である。

制御棒領域は、FCA 格子管(ドロワー) 1本を 1制御棒としたため、「常陽」MK-II 炉心の制御棒に比べ約半分の領域である。制御棒領域のサイズの効果については、制御棒反応度値実験で測定されている。

FCA X-3 集合体の実験は、^{<7>,<8>}「常陽」MK-II 炉心の運転等に有益なデータを得ることを目的として行われた。測定項目は以下の通り。

- ① 臨界性
- ② 反応率分布, 中心反応率比
- ③ 制御棒反応度値
- ④ ドップラー反応度値

本章では、上記項目の解析手法及び解析結果について、順次述べる。

3.1 FCA X-3 集合体の概要

1) プレート構成

FCA X-3 の基準炉心には、以下の 5種類のドロワーが装荷される。

各ドロワーの構成図を、Fig. 3.1 ~ Fig. 3.5 に示す。

- | | |
|----------------|----------|
| ① 炉心燃料ドロワー | Fig. 3.1 |
| ② FCA 用制御棒ドロワー | Fig. 3.2 |
| ③ 半径方向反射体ドロワー | Fig. 3.3 |
| ④ SUS ブロックドロワー | Fig. 3.4 |
| ⑤ Na ドロワー | Fig. 3.5 |

なお、今回の実験解析においては、FCA 用制御棒ドロワー 4体を炉心燃料ドロワーに置換して計算を行なっている。

また、炉心燃料ドロワーは、プレートの非均質性を考慮し、その他のドロワーは全て均質として扱っている。

2) 炉心構成

FCA X-3 の基準炉心の構成を、Fig. 3.6 に示す。

臨界性の測定は、Fig. 3.6 に示す体系で行われた。

3) 原子数密度

(a) 炉心燃料ドロワー構成用プレートの原子数密度

炉心燃料ドロワー内の構成プレート毎の原子数密度を Table 3.1 に示す。

(b) 炉心均質原子数密度

FCA X-3 炉心の各領域の均質の原子数密度を、Table 3.2 に示す。

3.2 解析コードの概要

以下に、今回の解析に使用した主なコードの概要を示す。

- | | |
|----------------------|---|
| ① ODD | 1次元拡散計算コード。ABBN型ライブラリを使用して実効断面積の作成も行なう。(拡散計算用) |
| ② PLATINA
(PILOT) | MICSセットを用いた板状(円筒)非均質セル計算コード。衝突確率を用い積分輸送方程式を解き中性子束分布を求め、これを重みにしてセル平均断面積を作成する。Benoist流の非等方拡散係数も計算できる。 |
| ③ SNGC | ODDで作成された実効断面積を、輸送計算コード用の断面積に変換する。 |
| ④ HANYO-DIF | 2次元の拡散計算コード。 |
| ⑤ HANYO-EDIT | バックリング計算コード。 |
| ⑥ HANYO-REDUCTH | 断面積の縮約計算コード。 |
| ⑦ TWOTRAN-II | 2次元の輸送計算コード。 |
| ⑧ RRTCAL | 反応率計算コード。 |

3.3 臨界性の解析

- 1) 臨界性の実験は、Fig.3.6の体系で制御棒挿入位置(CRP)にNaドロワーを装着して行われた。

実験値をTable 3.3に示す。

臨界性実験における実効増倍率(測定値)は、 $1.0045 \pm 0.0005 \Delta k/k$ となった。

- 2) 解析手法

解析手法は、FCA V-2R炉心実験解析、FCA X-2炉心実験解析及び設計手法に準じた。計算の流れ図を、Fig.3.7, Fig.3.8, Fig.3.9に示す。

基準計算は、エネルギー群数7群の2次元RZ拡散計算とする。

基準計算の補正には、以下の4項目を考慮する。

- ① 群縮約補正

本補正值は、Feの散乱断面積に対する共鳴効果が大きいABBN型第10群のエネルギー群領域を約90領域に分割して113群の断面積を作成し、エネルギー群113群と26群の拡散計算における実効増倍率の差として求める。

FCA X-3炉心では、FCA X-2炉心と組成が同じであるので、FCA X-2炉心での補正值^{<3>}を使用した。

3) 計算結果

基準計算の結果、エネルギー群数7群の2次元RZ拡散計算の実効増倍率は、0.9795となった。この値を臨界性の基準計算値とする。

基準計算結果及び各種補正係数、補正後の最終計算値をTable 3.6に示す。

Table 3.6より、FCA X-3炉心の実効増倍率の計算値は1.0078、C/E値は、1.0033である。

4) 実効増倍率の誤差評価

FCA X-2炉心の解析と同様の手法^{<3>}で誤差評価を行なった。

誤差評価を付加した実効増倍率を、Table 3.6に示した。

Table 3.6より、補正後の実効増倍率は、 1.0078 ± 0.0034 である。一方、実験値は 1.0045 ± 0.0005 であり、実験解析のC/E値は 1.0033 ± 0.0039 となった。

(a) 基準計算の誤差 $\pm 0.0013 \Delta k$

基準計算の誤差は、主にプレート非均質計算の誤差であると考え、非均質効果の30%を誤差とする。

FCA X-3の炉心燃料プレートは、FCA X-2と同一仕様であるので、非均質効果もFCA X-2と同一として、 $0.0043 \Delta k$ を使用した。

(b) 群縮約補正誤差 $\pm 0.0001 \Delta k$

本誤差は、実効増倍率計算精度から生ずると考え、最大0.01% Δk と仮定した。

(c) メッシュサイズ補正誤差 $\pm 0.0002 \Delta k$

基準計算値は、無限メッシュへ外挿した値を使用している。そこで、本誤差は実効増倍率外挿の直線性と、収束計算の精度から、0.02% Δk とした。

(d) 輸送補正誤差 $\pm 0.0026 \Delta k$

拡散計算値と輸送計算値の差の10%を誤差とした。

(e) Feの共鳴補正誤差 $\pm 0.0017 \Delta k$

補正量の約30%を誤差とした。

5) 検討評価

FCAで行なわれた反射体付炉心のC/E値は以下の様である。

FCA V-2R	0.997 ± 0.0044
FCA X-2	1.003 ± 0.0037
FCA X-3	1.003 ± 0.0039

* 第5.4節の見直しによる値

上記の結果より、FCA V-2RとFCA X-2、FCA X-3のC/E値には有意な差があるが、FCA X-2とFCA X-3のC/E値には差がない。FCA X-2、FCA X-3の解析は細かなモデルの違いがあるにもかかわらず、上記の様にC/E値が良く一致しており、妥当な結果であると判断する。

3.4 中心反応率比及び反応率分布

1) 反応率分布測定実験

反応率分布測定実験は径方向、軸方向について以下の体系で行われた。反応は全て核分裂である。

測定核種は、 P_u^{239} 、 U^{238} 、 N_p^{237} 、 U^{235} である。

径方向反応率分布 …… 基準体系、Na体系

軸方向反応率分布 …… 基準体系、B₄C体系

基準体系図を、Fig.3.6に示す。

Na体系は、基準体系の中心の燃料ドロワーをNaドロワーに置換した体系、B₄C体系は基準体系のNaドロワーの一部をB₄Cドロワーに置換した体系である。

Na体系図をFig.3.13に、B₄C体系図をFig.3.14に示す。

2) 解析手法

解析手法は、FCA V-2R炉心、FCA X-2炉心の解析に準じた。

計算の流れ図をFig.3.15、Fig.3.16、Fig.3.17、Fig.3.18に示す。

基準計算は、燃料プレートの非均質を考慮したエネルギー群数7群の2次元拡散計算とする。

基準計算値の補正には、以下の3項目を考慮する。

- ① 群縮約補正
- ② 輸送理論補正
- ③ Feの共鳴効果補正

なお、メッシュサイズ補正については、計算メッシュサイズから判断して補正係

数は小さいと考えられるので考慮しない。

(a) ライブラリー、原子数密度

ライブラリーは、M I C S 5.3を使用した。原子数密度はTable 3.1及びTable 3.2に示す。

(b) 基準計算

基準計算は、燃料プレートの非均質性を考慮したBenoistの異方性拡散係数を用い、エネルギー群数7群の2次元拡散計算とする。

径方向反応率分布 …… 2次元XY拡散計算

軸方向反応率分布 …… 2次元RZ拡散計算

基準体系及びNa体系のXY計算モデル図をFig.3.19に示す。また、Fig.3.12に基準体系のRZ計算モデル図をFig.3.20にB₄C体系のRZ計算モデル図を示す。

中心反応率比は、基準体系における2次元RZ拡散計算より求める。

(c) 補正計算

中心反応率比に対する補正は、補正効果が十分小さいと考えられるので考慮しない。

反応率分布の補正計算は全て1次元で行なり。(但し、B₄C体系の群縮約効果のみは、1/1炉心で2次元RZ計算を行なっている。Fig.3.20の体系を使用。)1次元のモデル図をFig.3.21に示す。径方向計算は1次元円柱体系で軸方向計算は1次元平板体系で行なった。1次元計算における軸方向バックリングは、2次元XY計算時と同様に領域依存とエネルギー依存を考慮した。径方向バックリングは、形状から算出したコンスタントバックリングを採用した。

補正項目は、次の3項目である。

① 群縮約補正

エネルギー群数26群と7群の反応率計算値の比較から補正値を得る。

② 輸送理論補正

エネルギー群数7群の拡散計算と輸送計算(S₈)を行ない、両者の反応率計算値の比較から補正値を得る。

③ Feの共鳴効果補正

Feの共鳴の大きいABBN型第10群のエネルギー領域を約90領域に分割して113群の断面積を作成し、エネルギー群数113群と26群の拡散計算を行なり。補正値は、両者の反応率計算値の比較から得る。本FCA X-3炉心は

FCA X-2 炉心と組成が同一なので、FCA X-2 炉心の解析値^③を使用する。

3) 計算結果

実験解析は、 P_u^{239} 、 U^{238} 、 U^{235} の 3 核種について行なった。

(a) 中心反応率比

炉中心における U^{235} の核分裂に対する P_u^{239} 及び U^{238} の核分裂比の計算結果を Table 3.7 に示す。

(b) 径方向反応率分布

径方向反応率分布の基準計算に対する各種補正係数を、以下の表に示す。

Fe の共鳴効果に対する補正は、基準体系において効果が小さいことが判ったので、Na 体系では補正を施さなかった。

(補正係数)

体系 \ 核種	P_u^{239}	U^{238}	U^{235}
基準体系	Table 3.8	Table 3.9	Table 3.10
Na 体系	Table 3.11	Table 3.12	Table 3.13

また、径方向反応率分布の測定値、基準計算値、補正後の計算値、C/E 値を以下の表に、測定値と補正後の計算値の比較を、以下の図に示す。

(測定値と計算値の比較)

体系 \ 核種	P_u^{239}	U^{238}	U^{235}
基準体系	Table 3.14 Fig. 3.22	Table 3.15 Fig. 3.23	Table 3.16 Fig. 3.24
Na 体系	Table 3.17 Fig. 3.25	Table 3.18 Fig. 3.26	Table 3.19 Fig. 3.27

なお、補正係数及び反応率分布は、炉中心の値が 1.0 となる様に規格化した。

(c) 軸方向反応率分布

軸方向反応率分布の基準計算に対する各種補正係数を、以下の表に示す。

Fe の共鳴効果に対する軸方向の補正係数は、十分小さいので補正を施さない。

(補正係数)

体系 \ 核種	P_u^{239}	U^{238}	U^{235}
基準体系	Table 3.20	Table 3.21	Table 3.22
B ₄ C体系	Table 3.23	Table 3.24	Table 3.25

また、軸方向反応率分布の測定値、基準計算値、補正後の計算値、C/E値を以下の表に、測定値と補正後の計算値の比較を、以下の図に示す。

(測定値と計算値の比較)

体系 \ 核種	P_u^{239}	U^{238}	U^{235}
基準体系	Table 3.26	Table 3.27	Table 3.28
	Fig. 3.28	Fig. 3.29	Fig. 3.30
B ₄ C体系	Table 3.29	Table 3.30	Table 3.31
	Fig. 3.31	Fig. 3.32	Fig. 3.33

なお、補正係数及び反応率分布は、炉心中心の値が1.0となる様に規格化した。

4) 検討評価

(a) 中心反応率比

Table 3.7 に示すように、炉中心における U^{235} の核分裂率に対する P_u^{239} の核分裂率化 (F^{49}/F^{25})、及び U^{235} の核分裂率に対する U^{238} の核分裂率比 (F^{28}/F^{25}) の C/E 値は、以下の通り。

$$C/E (F^{49}/F^{25}) = 1.0030$$

$$C/E (F^{28}/F^{25}) = 1.0315$$

すなわち、 F^{49}/F^{25} の計算値は実験値と良く一致し、 F^{28}/F^{25} の計算値は実験値を約3%上回る。

FCA X-2 炉心解析における中心反応率比の C/E 値は、 F^{49}/F^{25} が 1.01、 F^{28}/F^{25} が 1.05^{<3>} であった。

今回の解析結果は、FCA X-2 炉心の解析結果と同様の傾向を示しており、妥当な結果であると判断する。

(b) 径方向反応率分布

Table 3.14 ~ Table 3.19 及び Fig. 3.22 ~ Fig. 3.27 より、炉心内反応率分布の C/E 値は 0.96 から 1.03 の間に分布している。

また、体系毎に炉心内反応率分布をみると、基準体系での計算値は実験値と良く一致しているのに比べ、Na 体系では、計算値と実験値に ±3% 程の差がある。

Na 体系における内側の燃料ドロワーの C/E 値は、最内層の燃料ドロワーの反応率を 1.0 に再規格することで約 1.03 → 約 1.01 に改善され、基準体系と同程度の解析結果が得られる。ただし、この場合、中心の Na ドロワーの反応率の C/E 値は約 1.0 → 約 0.97 となるが、特に問題はない。

次に、FCA V-2R 炉心、FCA X-2 炉心の実験解析との比較を行うために、炉心の最外層のドロワーにおける核分裂率の C/E を検討する。

Table 3.32 に、炉心の最外層ドロワーの中心位置における核分裂率の C/E 値を示す。

FCA X-2 炉心の実験解析と同様に、 P_u^{239} 、 U^{238} 、 U^{235} の核分裂率の C/E 値を、「常陽」照射用炉心の反応率割合を重みにして平均し、核種毎の中心反応率比も考慮して出力分布に対する C/E 値を算出すると、基準体系で、 $0.974 \pm 0.5\%$ Na 体系で $0.992 \pm 0.6\%$ となった。

FCA V-2R 炉心の解析結果では、C/E 値は 0.945^* 、FCA X-2 炉心の解析結果では $0.938 \pm 0.5\%$ であった。これらの結果に比べ、今回の C/E 値は 3~4% 程良くなっている。

これは、今回の解析では基準計算体系において、FCA V-2R 炉心、FCA X-2 炉心の解析時よりも SUS ブロック及びエンブティマトリックス領域のメッシュ幅を小さくした (FCA X-2 炉心解析の $1/2 \sim 1/4$ のメッシュサイズとなっている) ために、計算精度が向上したことが主な原因であると考えられる。

(c) 軸方向反応率分布

Table 3.26 ~ Table 3.31 及び Fig. 3.28 ~ Fig. 3.33 より、炉心内反応率分布の C/E 値は、基準体系で 0.96 ~ 1.01、 B_4C 体系で 0.90 ~ 1.01 の間に分布している。

基準体系における反応率分布の C/E 値を FCA X-2 炉心の解析値と比較すると、①炉心部分は両者同様の傾向であるが、②軸方向反射体部分は、今回の解析値の方が実験値と良く一致している。

* 評価に用いた中心反応率比の C/E 値は FCA X-2 集合体のものを代用した。

①の結果より、今回の解析値は妥当であると判断する。

②の原因は、今回の基準計算体系において、軸方向反射体領域のメッシュ幅を小さくし、エンブティマトリックス領域を追加したことによる計算精度の向上と考える。

一方、 B_4C 体系における反応率分布のC/E値は、基準体系に比べて悪い。

P_u^{239} 、 U^{235} の反応率分布は B_4C ドロワーの影響が大きく、分布は炉心上下で非対称となり、両核種共に、 B_4C 挿入側では解析値が実験値を下回り、反対側では逆に解析値が実験値を上回る。すなわち、Fig 3.31, Fig.3.33より、解析では B_4C の効果を実験よりも大きく見積っていることが判る。

これは、中性子束を計算する際の2次元RZ計算において、炉心内に散在している4本の B_4C ドロワーをリング状にモデル化した影響と考えられる。

今回の解析は、「常陽」照射用炉心の設計手法に準じて全て2次元で行なっているが、今後3次元の解析を行なう事によりC/E値は改善されると予想する。

3.5 制御棒反応度値

1) 制御棒反応度値実験

FCA X-3炉心には、炉心内に制御棒領域が6ヶ所設けられている。基準体系では、制御棒領域にナトリウムドロワーを装荷し、反応度値は、制御棒領域にボロンピンを装填したドロワーを装荷して測定した。

(a) 実験体系

炉心断面図を、Fig.3.6に示す。

模擬制御棒（以下 B_4C ドロワー又は制御棒と呼ぶ）のパターンをFig.3.34に示す。

(b) 実験ケース

制御棒反応度値は、以下のケースについて測定された。

- ① 制御棒 1本 全挿入
- ② 制御棒 複数本 全挿入
- ③ 制御棒 1本 中途挿入
- ④ 制御棒 複数本 中途挿入
- ⑤ 制御棒領域のサイズの効果

実験解析は、上記のケースのうち、②、③、④について行なった。

2) 解析手法及びライブラリーは、FCA V-2R実験解析、FCA X-2実験解析及び「常陽」照射用炉心の設計と同等である。

(a) ライブラリー，原子数密度

- 基本ライブラリー；MICS 5.3 (ABBN型26群定数セット)
- 原子数密度；Table 3.1, Table 3.2

(b) 基準計算

エネルギー群数7群の2次元XY拡散計算を基準計算とする。軸方向バックリングは、炉心中心面のものを使用する。

バックリング及びマクロ断面積の適用法を第3.3.2). (e)節に述べる。

(c) 補正計算

基準計算に対して，以下の補正を考慮する。

- ① エネルギー群縮約補正
- ② メッシュサイズ補正
- ③ 輸送論補正 及び

B₄Cドロワーのランピング補正

補正計算は，全てB₄Cドロワー6本全挿入の体系で計算し，全てのケースにこの補正値を適用する。

(d) 制御棒反応度値計算の流れ

少数群断面積作成の流れ図をFig.3.35に，軸方向バックリング作成の流れをFig.3.36に，基準計算，補正計算の流れをFig.3.37に示す。

① 少数群断面積の作成

少数群断面積は，MICS 5.3ライブラリから得られる26群の断面積を7群に縮約して求める。

26群中性子束拡散計算のモデル図を，Fig.3.12に示す。

② バックリングの作成

XY計算用の軸方向バックリングは，Fig.3.12の炉中心から約5cmの領域で求める。

③ 基準計算

エネルギー群数7群の2次元XY拡散計算を基準計算とする。計算のモデル図を，Fig.3.38に示す。

④ 補正計算

◎ エネルギー群縮約補正

2次元XY拡散計算を，26群と7群で実施し，各々の群数の制御棒反応度値の比を補正値とする。

計算モデルは，Fig.3.39のスタンダードメッシュを使用した。

◎ メッシュサイズ補正

基準計算体系のメッシュを， X, Y 方向共に 2 倍にして制御棒反応度値を求める。

メッシュサイズ補正值は，上記の値を無限メッシュに外挿した時の値と，基準計算値との比とする。

計算のモデル図を， Fig. 3.39 に示す。

◎ 輸送理論及び B₄C ドロワーのランピング補正

従来の FCA 実験解析では，頭記の効果を分けて評価していた。本 FCA X-3 炉心解析では，以下の 2 種類の計算を実施し，両者の制御棒反応度値の比を頭記の総合的な効果とする。

- 2次元XY拡散計算 …………… B₄C ドロワー内均質。
- 2次元XY輸送計算 (S₄) …… B₄C ドロワー内を Fig. 3.40 の様に領域分割。

計算のモデル図を， Fig. 3.41 に示す。

(e) バックリング，マクロ断面積の適用法

本解析では，XY計算に使用する軸方向バックリング，マクロ断面積を，以下の様に適用している。

- ① 制御棒領域 …………… B_{CR}² , Σ_{CR}
- ② Na ドロワー領域 …………… B_{Na}² , Σ_{Na}
- ③ 制御棒に隣接する燃料ドロワー領域 …………… B_{CRF}² , Σ_{CRF}
- ④ Na ドロワーに隣接する燃料ドロワー領域 …………… B_{NaF}² , Σ_{NaF}
- ⑤ 上記① ② ③ ④ 以外の領域 …………… B_{out}² , Σ_{out}

記号の意味は，以下の通りである。

B_{CR}² , Σ_{CR} : B₄C ドロワー 6 本挿入体系での B₄C ドロワー位置におけるバックリング，マクロ断面積。

B_{Na}² , Σ_{Na} : Na フォロワー体系での Na ドロワー位置におけるバックリング，マクロ断面積。

B_{CRF}² , Σ_{CRF} : B₄C ドロワー 6 本挿入体系での B₄C ドロワーに隣接する燃料ドロワーのバックリング，マクロ断面積。

B_{NaF}² , Σ_{NaF} : Na フォロワー体系での Na ドロワーに隣接する燃料ドロワーのバックリング，マクロ断面積。

B_{out}² , Σ_{out} : Na フォロワー体系での B_{Na}² , B_{NaF}² , Σ_{Na} , Σ_{NaF} 以外のバックリング，マクロ断面積。

なお、制御棒領域のサイズ効果の解析は、Fig.3.34の Rectangle Rod II について行なった。制御棒領域に使用するマクロ断面積は、Fig.3.34より B₄C ピンとNaプレートの偏在効果は小さいと仮定して、B₄CドロワーとNaドロワーのマクロ断面積を混ぜ合わせて作成した。バックリングはB_{CR}²を使用した。制御棒領域以外のマクロ断面積、バックリングは、上述の適用法に従った。

3) 計算結果

補正計算の結果を、Table 3.33に示す。

基準計算値、基準計算値の補正後の値、実験値及びC/E値をTable 3.34に示す。

尚、表中におけるケース番号は、以下の様に挿入されているB₄Cドロワーの数と位置を同時に表わしている。

CRC-X₁X₂X₃X₄X₅X₆

X_i = 0 Naドロワー挿入

X_i ≠ 0 Fig.3.6のCRP番号iの位置にB₄Cドロワーが挿入されている。

また、CRP-000011'のケースは、制御棒領域のサイズ検討用で、B₄Cドロワーは、Fig.3.34のRectangle Rod IIを挿入した。

4) 検討

(a) 基準計算

Table 3.34及びTable 3.35をもとに、以下の項目について検討した。

① 制御棒の干渉効果

FCA X-3炉心の制御棒挿入位置は、中心に対して番号1-4, 2-3-5-6が対称の位置にあり、位置2は、位置1よりも若干炉中心寄りである。

(Fig.3.6参照。)この為、制御棒価置も、炉中心に近いCRP-000002のケースがCRP-000001のケースより、約20%大きくなっている。

制御棒が2本挿入されたケースでの制御棒価置は、1本毎の価置の重ね合わせにほぼ等しい。

制御棒が3本以上挿入されると、干渉効果が顕著に現われ、1体当りの制御棒価置は、単体挿入時よりも増加している。

② 制御棒領域のサイズの効果

CRP-000011'は、制御棒領域のサイズの効果をみるためにCRP-000001の制御棒領域の炉中心側に隣接するドロワーにもB₄Cを挿入したケ

ースで、ボロンの重量は、CRP-000001と同一である。

制御棒値は、CRP-000001より約20%大きくなる。

これは、制御棒領域が拡大したと同時に、ボロンが相対的に炉中心へ移動した結果である。

③ バックリング，マクロ断面積の適用法

従来のFCA炉心実験体系と、本FCA X-3炉心実験体系では、制御棒チャンネルの位置と数に関して以下の違いがある。すなわち、従来の実験体系では制御棒チャンネルは炉中心に1ヶ所又はオフセンターに1～2ヶ所であった。今回は、オフセンターに6ヶ所の制御棒チャンネルがあり、制御棒の相互干渉効果を検討するために制御棒挿入本数を1本～6本に変化させて実験が行われている。

そこで、本解析では、FCA X-3炉心の解析に適切な手法を検討し、従来のFCA実験解析におけるバックリング(以下 B^2)，マクロ断面積(以下 Σ)の適用法を第3.3.2). (e)節の様に変更した。第3.3.2). (e)節の手法は設計手法に準じている。

本節では今回の手法(Method 1)と従来の手法(Method 2)の違いによる効果を検討した。

Method 1及びMethod 2における B^2 ， Σ の適用法は以下の通り。

バックリング，マクロ断面積適用領域	Method 1	Method 2
(a) 制御棒領域	B_{CR}^2, Σ_{CR}	同 左
(b) Naドロワー領域	B_{Na}^2, Σ_{Na}	同 左
(c) 制御棒に隣接する 燃料ドロワー領域	B_{CRF}^2, Σ_{CRF}	同 左
(d) Naドロワーに隣接する 燃料ドロワー領域	B_{NaF}^2, Σ_{NaF}	同 左
(e) 上記(a)(b)(c)(d)以外の領域	$\left\{ \begin{array}{l} B_4C \text{ 体系} \\ Na \text{ フォロワー体系} \end{array} \right.$ B_{out}^2, Σ_{out}	B_{in}^2, Σ_{in} 同 左

今回の適用法(Method 1)及び従来の適用法(Method 2)を用いた場合の制御棒反応度値を、Table 3.35に示す。

Table 3.35より、制御棒、Naドロワー周辺以外の領域に制御棒全挿入状態に対応する B^2 ， Σ を使用した場合(Method 2を使用)には、制御棒反応度値

値を大きく見積る傾向がある。

また、Table 3.35では今回の方法(Method 1)によるC/E値が制御棒の本数に依らずほぼ安定しているのに比べ、Method 2では、制御棒本数の減少と共にC/E値が増大してゆく。この原因としては、以下の事が考えられる。

すなわち、 B^2 および少数群 Σ を求める為に行なわれた2次元RZ拡散計算では、制御棒6本がリング状に取り扱われるために、①制御棒の離散の効果が扱えない。このため、制御棒が B^2 、 Σ に及ぼす影響は制御棒に隣接した燃料ドロワーばかりでなく、炉心全体に及んでいる。②制御棒少数本に対する本数の効果が扱えない。このため、制御棒周辺の燃料ドロワーには、現実よりも大きな効果が与えられる。

従って、少数本の制御棒挿入ケースに、制御棒6本全挿入で求めた B_{in}^2 、 Σ_{in} を使用するのは不相当であり、Method 1が妥当と考える。

なお、制御棒が炉中心にある場合は、Method 1とMethod 2は物理的に同一となる。

(b) 補正計算

補正計算は全て制御棒6体全挿入を対象として行なった。

Table 3.33より、群縮約効果は0.988、メッシュサイズ効果は1.050、輸送及びランピング効果は0.954である。

これらの補正効果は従来の設計値、実験解析値と比較して妥当であると考えられる。

(c) 実験結果との比較

補正後の解析値と実験値の比較をTable 3.34に示した。C/E値は0.97～1.02となった。

3.6 サンプル・ドップラー実験解析

1) はじめに

MK-II炉心設計のためのドップラー実験は、これ迄実施されていなかった。MK-II炉心設計のために利用したドップラー実験解析は、SEFOR炉による全炉心ドップラー及び反射体付炉心であるZPR-9/26集合体によるサンプル・ドップラーのみであった。^②

今回、FCA X-3炉心において、MK-II炉心のモックアップ実験の一環として実施されたサンプル・ドップラー実験の解析を実施することにより、これ迄の設計計算手法と、その精度の確認が十分に成されることと成った。

尚、MK-II炉心の設計定数である弊社ABB N型26群定数MICS 5.3では、

燃料物質のドップラー効果のみ取扱うように成っている。このため、本実験解析においても、これ迄通り、燃料物質サンプル(20 mm ϕ , 25 mm ϕ UO₂)のみを解析の対象とした。

2) 実験の概要

サンプル・ドップラー実験は、FCA X-3集合体で実施された。^{<8>}本集合体には、6ヶ所のMK-II 炉心模擬制御棒位置(CRP)が設けられている。固定側 $\frac{1}{2}$ 集合体では4ヶ所のFCA制御棒が基準炉心の位置より、約16 cm外側へ移動されている。又、微少反応度測定のために、固定側 $\frac{1}{2}$ 集合体のSUSブロック中に、EUから構成されるFCA微調整棒が取付けられた。このサンプル・ドップラー実験用炉心体系図をFig. 3.42に示した。

サンプル・ドップラー反応度は、Fig. 3.43に示す構造のSUS 304製のキャプセル中心にサンプルを装荷し、炉中心ドロワーを引抜き/挿入することにより、測定されている。

測定されたサンプルは、寸法が20 mm ϕ , 25 mm ϕ \times 150 mm LのNUO₂ (天然ウラン組成)と、寸法が約26 mm ϕ \times 約158 mm LのFe, Ni, SUSサンプルであった。各サンプル共、基準温度は293 Kであり、ヒーター加熱による823 Kと1073 K迄のドップラー反応度が測定されている。

3) 解析手法

MK-II 炉心における炉心全体のドップラー反応度は値が大きいため、反応度を直接計算により求めている。^{<1>}しかしながら、臨界集合体によるサンプル・ドップラー反応度は、その値が小さいため、摂動計算によって評価せざるを得ない。今回の解析においてもZPR-9/26 炉心解析^{<2>}同様に一次近似の摂動計算(FOP)により、解析を実施した。以下に詳細な解析手順を示す。(Fig. 3.44)

(1) 炉心燃料セル非均質断面積の作成

3.3節の臨界性の解析のために作成した26群プレート非均質断面積を使用した。拡散係数も同様のBenoist 異方性拡散係数を使用した。

(2) サンプル用セル非均質断面積の作成

Fig. 3.43に示した一次元円筒モデルとTable 3.36に示した組成により、26群衝突確率計算から、サンプルとバッファ領域及び炉心燃料領域との中性子相互遮蔽効果を考慮した、非均質断面積^{<10>}を作成した。^{<11>}本断面積は弊社開発の積分輸送型一次元セル計算コード・PILOTにより作成した。異なるサンプル温度毎に、サンプル用セル非均質断面積を用意した。

(3) 基準中性子束計算

Fig. 3.45に示した2D(RZ)モデル26群粗メッシュ拡散計算により得た基準サンプル温度(293K)炉心の中性子束により、炉心各領域の断面積を7群(3.3.2節参照)に縮約した。この7群断面積縮約に於ては、同図にて判かるように、ドップラー・サンプル、バッファ領域共、陽に取扱っている。

この様にして得た7群断面積を用い、上記2D(RZ)モデル詳細メッシュ拡散計算にて、サンプル温度293Kの基準炉心の中性子束、随伴中性子束を求めた。但し、FCA集合体の安全棒(S/R)、微調整棒(F/R)は共に、モデル上無視してもさしつかえないと考え、考慮しなかつた。^{<12>}

(4) FOP計算

(3)で述べた26群基準サンプル温度(293K)の中性子束を使い、823K、1073Kサンプルとバッファの断面積を7群に縮約した。このサンプル断面積と、基準温度サンプル断面積の差に、(3)で得た基準炉心の中性子束及び随伴中性子束を使用し、サンプル・ドップラー反応度を、FOP計算にて求めた。

4) 解析結果

7群FOP計算により得た、20mmφと25mmφ、UO₂サンプルのドップラー反応度値と、測定値の比較を、Table 3.37に示した。尚、ドップラー反応度解析値は、サンプル領域のみの温度変化により得られた値である。

同表に示されているように、20mmφのUO₂サンプルに対するC/E値は、293Kから823K実験に対し、0.816であり、293Kから1073K実験に対しては、0.833であった。又、25mmφのUO₂サンプルでは、それぞれの温度範囲において、0.864と0.893であった。

ドップラー温度が高く成る程、サンプル径が太い程C/E値がいくぶん改善される傾向が示されている。この事は、原研(FCA)での解析でも、示されている。^{<8>}

5) まとめと検討

前節に示したように、今回のサンプル・ドップラー解析において、天然ウラン組成のUO₂サンプルに対する293Kから1073K温度範囲でのC/E値は、0.81~0.89と成った。

これ迄唯一のMK-II炉心設計のために実施したZPR-9/26炉心の天然ウラン組成のUO₂サンプル(25.4mmφ×64.5mmL、ドップラー温度範囲300K-800K)に対し得ている解析結果は、C/E=0.804±0.003である。^{<2>}サンプルが今回のサンプルに比べ約半分の長さである事、炉心燃料プレートの非均質性の取扱い法^{*}

* ZPR-9/26炉心では、炉心板状燃料を均質モデルで取扱っている。FCA X-3炉心同様、非均質を取扱いをすることにより、C/E値が約10%改善され、約0.90に成ることが評価されている。

を除き、解析手法も同じであるので、この値と、今回の解析結果は一貫性があると結論される。

従って、これ迄のMK-II炉心設計のドブラー反応度設計値及びその精度の妥当性が確認されたと考える。

3.7 ま と め

FCA X-3 炉心の解析結果を以下に示す。

- ① FCA X-3 炉心の実効増倍率のC/E値は1.003となり、FCA X-2 炉心と同等な結果を得た。
- ② 反応率分布のC/E値はこれまでの解析結果と比較して、反射体部分で5~10%改善された。
また、反応率分布の解析結果から炉心最外層位置での出力分布計算のC/E値を推定したところ0.974となり、これまでの解析値に比べ約3%改善された。
- ③ 制御棒価値のC/E値は0.97~1.02となり、これまでの解析値に比べ、いくぶん改善された値を得た。
- ④ NUO₂ サンプルドブラー反応度のC/E値は、0.8~0.9となり、これまでの解析と同程度の結果を得た。

Table 3.1 Number Densities of Plates of the Core Drawer

[$\times 10^{+24}$ n/cm³]

ELEMENT	92% Pu (2-2-1/16)	20% EU (2-2-1/8)	DUO ₂ (2-2-1/4)	Al ₂ O ₃ (2-2-1/8)	Al ₂ O ₃ (2-2-1/16)	Na (2-2-1/4)	SUS (2-2-1/4)
PU239	1.82040E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PU240	1.59780E-03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PU241	8.98260E-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U235	0.0	8.51980E-03	4.03990E-05	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	0.0	3.38140E-02	1.99040E-02	0.0	0.0	0.0	0.0
O	0.0	0.0	3.98890E-02	5.69420E-02	5.86740E-02	0.0	0.0
NA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.66390E-02	0.0
AL	2.60750E-03	0.0	0.0	3.77120E-02	3.91150E-02	0.0	0.0
CR	5.45360E-03	8.38390E-04	8.38390E-04	8.38390E-04	8.38390E-04	3.67940E-03	1.61450E-02
FE	2.09150E-02	3.05240E-03	3.05240E-03	3.05240E-03	3.05240E-03	1.35960E-02	5.71270E-02
NI	2.67440E-03	3.65470E-04	3.65470E-04	3.65470E-04	3.65470E-04	1.72100E-03	7.06170E-03
B10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

ELEMENT	Wall
PU239	0.0
PU240	0.0
PU241	0.0
U235	0.0
U238	0.0
O	0.0
NA	0.0
AL	0.0
CR	1.32450E-02
FE	4.82230E-02
NI	5.77390E-03
B10	0.0
B11	0.0
C	0.0

Note : Numbers in parenthesis are dimensions of the plates in inch.

Table 3.2 Homogenized Number Densities of FCA X-3 Assembly (1/2)

($\times 10^{24}$ n/cm³)

Region Element	Core Fuel	Axial Reflector	Radial Reflector	SUS Block	Empty Matrix
P _u ²³⁹	2.0941×10^{-3}	0.0	0.0	0.0	0.0
P _u ²⁴⁰	1.8380×10^{-4}	0.0	0.0	0.0	0.0
P _u ²⁴¹	1.0333×10^{-5}	0.0	0.0	0.0	0.0
U ²³⁵	7.3971×10^{-4}	0.0	0.0	0.0	0.0
U ²³⁸	5.2070×10^{-3}	0.0	0.0	0.0	0.0
O	1.2827×10^{-2}	0.0	0.0	0.0	0.0
N _a	7.6564×10^{-3}	7.6564×10^{-3}	5.7423×10^{-3}	0.0	0.0
Al	5.7631×10^{-3}	0.0	0.0	0.0	0.0
Cr	3.6655×10^{-3}	1.0143×10^{-2}	1.1612×10^{-2}	1.6012×10^{-2}	1.8270×10^{-3}
Fe	1.3559×10^{-2}	3.6431×10^{-2}	4.1393×10^{-2}	5.8295×10^{-2}	6.6520×10^{-3}
Ni	1.6859×10^{-3}	4.4619×10^{-3}	5.1158×10^{-3}	6.9798×10^{-3}	7.9640×10^{-4}
B ¹⁰	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B ¹¹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 3.2 Homogenized Number Densities of FCA-X3 Assembly (2/2)

($\times 10^{24} \text{ n/cm}^3$)

Region Element	Na Drawer	B ₄ C Drawer	B ₄ C * Region 1	B ₄ C * Region 2	B ₄ C * Region 3
P _u ²³⁹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P _u ²⁴⁰	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P _u ²⁴¹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U ²³⁵	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U ²³⁸	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Na	1.5313×10^{-2}	0.0	0.0	0.0	0.0
Al	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cr	0.4386×10^{-2}	4.1459×10^{-3}	3.4649×10^{-3}	3.4649×10^{-3}	1.2207×10^{-2}
Fe	1.6152×10^{-2}	1.5152×10^{-2}	1.2677×10^{-2}	1.2677×10^{-2}	4.4444×10^{-2}
Ni	0.2020×10^{-2}	1.7391×10^{-3}	1.4365×10^{-3}	1.4365×10^{-3}	5.3211×10^{-3}
B ¹⁰	0.0	2.9381×10^{-2}	1.1184×10^{-2}	5.2543×10^{-2}	0.0
B ¹¹	0.0	2.3530×10^{-2}	4.5301×10^{-2}	5.7345×10^{-3}	0.0
C	0.0	1.2535×10^{-2}	1.3837×10^{-2}	1.3351×10^{-2}	0.0
Mn	0.0	1.4989×10^{-4}	1.6255×10^{-4}	1.6255×10^{-4}	0.0

* see Fig.3.4 0

Table 3.3 Criticality for FCA Assembly X-3
(Unit ; ρ_0)

<u>Excess Reactivity</u>	3.76± 0.03
<u>Correction</u>	
Gap Effect	6.11±0.93
SS Effect at Midplane	-1.39±0.46
CR/SR Singularity	1.87±0.16
<hr/>	
Corrected Reactivity (ρ)	10.35±1.05 (0.45±0.05% $\Delta k/k$ ^(a))

(a) $\rho_0 = 0.0444\% \Delta k/k$

Table 3.4 Energy Group Structure

26 Group		7 Group
Group	Energy	
1	10.5MeV ~ 6.5MeV	1
2	6.5MeV ~ 4.0MeV	
3	4.0MeV ~ 2.5MeV	
4	2.5MeV ~ 1.4MeV	
5	1.4MeV ~ 0.8MeV	2
6	0.8MeV ~ 0.4MeV	
7	0.4MeV ~ 0.2MeV	3
8	0.2MeV ~ 0.1MeV	
9	100keV ~ 46.5keV	4
10	46.5keV ~ 21.5keV	
11	21.5keV ~ 10keV	
12	10keV ~ 4.65keV	5
13	4.65keV ~ 2.15keV	
14	2.15keV ~ 1keV	
15	1keV ~ 465 eV	6
16	465 eV ~ 215 eV	
17	215 eV ~ 100 eV	
18	100 eV ~ 46.5 eV	7
19	46.5 eV ~ 21.5 eV	
20	21.5 eV ~ 10 eV	
21	10 eV ~ 4.65 eV	
22	4.65 eV ~ 2.15 eV	
23	2.15 eV ~ 1 eV	
24	1 eV ~ 0.465eV	
25	0.465eV ~ 0.215eV	
26	0.0252eV	

Table 3.5 Fission Neutron Spectra

26 Group Structure			7 Group Structure	
Group	Energy (Mev)	Spectra	Group	Spectra
1	10.5 ~ 6.5	0.017	1	0.565
2	6.5 ~ 4.0	0.092		
3	4.0 ~ 2.5	0.186		
4	2.5 ~ 1.4	0.270		
5	1.4 ~ 0.8	0.200	2	0.339
6	0.8 ~ 0.4	0.139		
7	0.4 ~ 0.2	0.060	3	0.083
8	0.2 ~ 0.1	0.023		
9	0.1 ~ 0.0465	0.009	4	0.013
10	0.0465 ~ 0.0215	0.003		
11	0.0215 ~ 0.01	0.001		

Spectra are none below these energy.

Table 3.6 Results of Criticality Calculation

Calculation		
Diffusion Calculation	keff	0.9795 ± 0.0013
Corrections		
<div style="display: inline-block; vertical-align: middle; font-size: 3em; margin-right: 0.5em;">{</div> Group Reduction Mesh Size Transport Fine Calc. of Fe Resonance		-0.0009 ± 0.0001
		-0.0025 ± 0.0002
		0.0261 ± 0.0026
		0.0056 ^{<3>} ± 0.0017
Corrected	keff	1.0078 ± 0.0034
Experiment	keff	1.0045 ± 0.0005
C/E		1.0033 ± 0.0039

Table 3.7 Results of Central Fission Rate Ratio Calculation

	Calculation*	Experiment $\langle 7 \rangle$	C / E
F^{49**} / F^{25**}	1.1013	1.098	1.00
F^{28**} / F^{25}	0.05144	0.04987	1.03

* Based on Diffusion Calculation (No corrections are included.)

** F^{49} : Core Central Fission Rate of Pu^{239}

F^{25} : Core Central Fission Rate of U^{235}

F^{28} : Core Central Fission Rate of U^{238}

Table 3.8 Correction Factors for Pu²³⁹ Radial Fission
Rate Calculation in FCA X-3 Reference Core

Region	drawer	Distance from Center (cm)	Correction factor			
			F _{Gr} [*]	F _{SN} ^{**}	F _{Fe} ^{***}	Total
Core	1	0.0	1.0	1.000	1.0	1.000
		1.38	1.0	1.000	1.0	1.000
		2.76	1.0	0.999	1.0	0.999
	2	5.52	1.000	0.996	1.000	0.996
		8.28	1.000	0.997	1.000	0.997
	3	11.04	1.000	0.997	1.001	0.998
		13.80	0.999	0.997	1.001	0.997
	4	16.56	0.999	0.997	1.002	0.998
		19.32	0.999	0.997	1.002	0.998
	5	22.08	0.998	0.997	1.003	0.998
		24.84	0.999	0.996	1.003	0.998
	6	27.60	0.998	0.992	1.004	0.994
		30.36	0.996	0.967	1.002	0.965
	Radial Reflector	7	33.12	0.988	0.934	0.996
35.88			0.985	0.939	0.992	0.918
8		38.64	0.980	0.942	0.989	0.913
		41.40	0.983	0.948	0.985	0.918
9	44.16	0.979	0.952	0.984	0.917	
SUS Block	10	49.68	0.986	0.962	0.983	0.932

* Group Reduction Effect

** S_N Effect

*** Fe Resonance Effect

Table 3.9 Correction Factors for U^{238} Radial Fission Rate
 Calculation in FCA X-3 Reference Core

Region	drawer	Distance from Center (cm)	Correction factor			
			F_{Gr}	F_{SN}	F_{Fe}	Total
core	1	0.0	1.0	1.000	—	1.000
		1.38	1.0	0.999	—	0.999
		2.76	1.0	0.998	—	0.998
	2	5.52	1.0	0.995	—	0.995
		8.28	1.000	0.996	—	0.996
	3	11.04	1.0	0.997	—	0.997
		13.80	1.0	0.998	—	0.998
		16.56	1.000	1.000	—	1.000
	4	19.32	1.000	1.004	—	1.004
		22.08	1.001	1.010	—	1.011
5	24.84	1.000	1.019	—	1.019	
	27.60	1.000	1.019	—	1.019	
6	30.36	1.001	0.981	—	0.982	
	33.12	1.007	0.916	—	0.922	
	35.88	0.999	0.858	—	0.857	
Radial Reflector	8	38.64	1.006	0.886	—	0.891
		41.40	1.0	0.893	—	0.893
	9	44.16	1.009	0.910	—	0.918
SUS Block	10	49.68	1.005	0.984	—	0.989

Table 3.10 Correction Factors for U²³⁵ Radial Fission Rate
 Calculation in FCA X-3 Reference Core

Region	drawer	Distance from Center (cm)	Correction factor			
			F _{Gr}	F _{SN}	F _{Pe}	Total
Core	1	0.0	1.0	1.000	1.0	1.000
		1.38	1.0	1.000	1.0	1.000
		2.76	1.0	0.999	1.0	0.999
	2	5.52	1.000	0.997	1.000	0.997
		8.28	1.000	0.997	1.001	0.998
	3	11.04	0.999	0.997	1.001	0.997
		13.80	0.999	0.997	1.001	0.997
	4	16.56	0.998	0.997	1.002	0.997
		19.32	0.998	0.996	1.003	0.997
	5	22.08	0.997	0.995	1.003	0.995
		24.84	0.998	0.993	1.004	0.995
	6	27.60	0.998	0.989	1.005	0.992
		30.36	0.997	0.971	1.002	0.970
	Radial Reflector	7	33.12	0.992	0.942	0.996
25.88			0.993	0.947	0.992	0.933
8		38.64	0.990	0.948	0.987	0.926
		41.40	0.992	0.952	0.984	0.929
SUS Block	9	44.16	0.991	0.955	0.982	0.929
		10	49.68	0.996	0.964	0.982

Table 3.1.1 Correction Factors for Pu²³⁹ Radial Fission
 Rate Calculation in FCA X-3 with Central Na
 Channel

Region	Drawer	Distance from Center (cm)	Correction factor			
			F _{Gr}	F _{SN}	F _{Fe}	Total
Na Channel	1	0.0	1.001	0.998	—	0.999
		1.38	1.002	1.004	—	1.006
		2.76	1.008	1.010	—	1.018
Core	2	5.52	1.024	1.023	—	1.048
		8.28	1.024	1.025	—	1.050
	3	11.04	1.025	1.025	—	1.051
	4	16.56	1.025	1.026	—	1.052
	5	22.08	1.025	1.025	—	1.051
	6	27.60	1.025	1.019	—	1.044
Radial Reflector	7	33.12	1.016	0.955	—	0.970
		38.64	1.007	0.961	—	0.968
		44.16	1.007	0.969	—	0.976
SUS Block	10	49.68	1.014	0.977	—	0.991
	11	55.20	1.013	0.984	—	0.977

Table 3.1 2 Correction Factors for U²³⁸ Radial Fission
Rate Calculation in FCA X-3 with Central
Na Channel

Region	Drawer	Distance from Center (cm)	Correction factor			
			F _{Gr}	F _{SN}	F _{Fe}	Total
Na Channel	1	0.0	1.001	0.993	—	0.994
		1.38	0.996	1.010	—	1.006
		2.76	0.987	1.024	—	1.011
Core	2	5.52	0.969	1.044	—	1.012
		8.28	0.967	1.053	—	1.018
	3	11.04	0.965	1.047	—	1.010
	4	16.56	0.964	1.049	—	1.011
	5	22.08	0.964	1.057	—	1.019
	6	27.60	0.963	1.067	—	1.028
Radial Reflector	7	30.36	0.964	1.026	—	0.989
		33.12	0.969	0.957	—	0.927
		38.64	0.968	0.924	—	0.894
SUS Block	8	44.16	0.971	0.950	—	0.922
		49.68	0.968	1.028	—	0.995
		55.20	0.974	1.128	—	1.099
	10					
	11					

Table 3.1 3 Correction Factors for U²³⁵ Radial Fission
Rate Calculation in FCA X-3 with Central
Na Channel

Region	Drawer	Distance from Center (cm)	Correction factor			
			F _{Gr}	F _{SN}	F _{Fe}	Total
Na Channel	1	0.0	1.001	0.998	—	0.999
		1.38	1.002	1.003	—	1.005
		2.76	1.011	1.009	—	1.020
Core	2	5.52	1.031	1.020	—	1.052
		8.28	1.031	1.022	—	1.054
	3	11.04	1.031	1.022	—	1.054
	4	16.56	1.031	1.022	—	1.054
	5	22.08	1.031	1.021	—	1.053
	6	27.60	1.032	1.013	—	1.045
Radial Reflector	7	30.36	1.032	0.993	—	1.025
		33.12	1.027	0.962	—	0.988
		38.64	1.025	0.965	—	0.989
SUS Block	8	44.16	1.027	0.971	—	0.997
		49.68	1.032	0.977	—	1.008
		55.20	1.033	0.982	—	1.014

Table 3.1 4 Radial Fission Rate Distribution of Pu²³⁹ in FCA X-3 Reference Core

Region	Drawer	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C/E
Core	1	0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		1.38	0.999	0.999	1.000	0.999	1.000
		2.76	0.994	0.995	0.999	0.994	1.000
	2	5.52	0.981	0.980	0.996	0.976	0.995
		8.28	0.955	0.954	0.997	0.951	0.996
	3	11.04	0.918	0.918	0.998	0.915	0.997
		13.80	0.879	0.875	0.997	0.872	0.992
	4	16.56	0.824	0.826	0.998	0.824	1.000
		19.32	0.782	0.773	0.998	0.771	0.987
	5	22.08	0.724	0.719	0.998	0.718	0.991
24.84		0.672	0.661	0.998	0.660	0.982	
6	27.60	0.634	0.613	0.994	0.609	0.961	
	30.36	0.639	0.640	0.965	0.618	0.967	
Radial Reflector	7	33.12	0.683	0.755	0.919	0.693	1.016
		35.88	0.718	0.793	0.918	0.728	1.014
	8	38.64	0.732	0.823	0.913	0.751	1.027
		41.40	0.729	0.818	0.918	0.751	1.030
9	44.16	0.704	0.791	0.917	0.725	1.030	
	49.68	0.595	0.658	0.932	0.613	1.031	
SUS Block	10						

Table 3.15 Radial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 Reference Core

Region	Drawer	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C/E
Core	1	0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		1.38	1.002	0.998	0.999	0.997	0.995
		2.76	0.990	0.994	0.998	0.992	1.002
	2	5.52	0.979	0.977	0.995	0.972	0.993
		8.28	0.939	0.946	0.996	0.942	1.003
	3	11.04	0.904	0.905	0.997	0.902	0.998
		13.80	0.845	0.853	0.998	0.851	1.007
	4	16.56	0.797	0.795	1.000	0.795	0.997
		19.32	0.735	0.732	1.004	0.735	1.000
	5	22.08	0.664	0.663	1.011	0.671	1.011
24.84		0.590	0.582	1.019	0.593	1.005	
6	27.60	0.490	0.487	1.019	0.497	1.014	
	30.36	0.362	0.367	0.982	0.361	0.997	
Radial Reflector	7	33.12	0.232	0.245	0.922	0.226	0.974
		35.88	0.152	0.167	0.857	0.143	0.941
	8	38.64	0.103	0.113	0.891	0.101	0.981
		41.40	0.067	0.077	0.893	0.069	1.030
SUS Block	9	44.16	0.046	0.052	0.918	0.048	1.043
		49.68	0.021	0.022	0.989	0.022	1.048

Table 3.1 6 Radial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 Reference Core

Region	Drawer	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C / E
Core	1	0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		1.38	0.995	0.999	1.000	0.999	1.004
		2.76	0.987	0.995	0.999	0.994	1.007
	2	5.52	0.973	0.981	0.997	0.978	1.005
		8.28	0.946	0.957	0.998	0.955	1.010
	3	11.04	0.914	0.924	0.997	0.921	1.008
		13.80	0.880	0.884	0.997	0.881	1.002
	4	16.56	0.831	0.839	0.997	0.836	1.007
		19.32	0.787	0.791	0.997	0.789	1.002
	5	22.08	0.738	0.743	0.995	0.739	1.002
24.84		0.699	0.695	0.995	0.691	0.989	
6	27.60	0.669	0.665	0.992	0.660	0.986	
	30.36	0.684	0.696	0.970	0.675	0.987	
Radial Reflector	7	33.12	0.737	0.773	0.931	0.720	0.976
		35.88	0.775	0.804	0.933	0.750	0.968
	8	38.64	0.788	0.819	0.926	0.758	0.962
		41.40	0.779	0.802	0.929	0.745	0.956
9	44.16	0.741	0.763	0.929	0.709	0.957	
	49.68	0.620	0.619	0.943	0.583	0.941	
SUS Block	10						

Table 3.1 7 Radial Fission Rate Distribution of Pu²³⁹ in FCA X-3 with Central Na Channel

Region	Drawer	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C / E
Na Channel	1	0.0	1.000	0.998	0.999	0.997	0.997
		1.38	1.011	1.001	1.006	1.007	0.996
		2.76	1.009	0.998	1.018	1.016	1.007
Core	2	5.52	1.007	0.983	1.048	1.030	1.023
		8.28	0.982	0.965	1.050	1.013	1.032
	3	11.04	0.953	0.934	1.051	0.982	1.030
	4	16.56	0.868	0.847	1.052	0.891	1.026
	5	22.08	0.764	0.741	1.051	0.779	1.020
	6	27.60	0.670	0.634	1.044	0.662	0.988
Radial Reflector	7	30.36	0.678	0.664	1.015	0.674	0.994
		33.12	0.729	0.785	0.970	0.761	1.044
		38.64	0.780	0.859	0.968	0.832	1.067
SUS Block	9	44.16	0.746	0.829	0.976	0.809	1.084
		49.68	0.631	0.692	0.991	0.686	1.087
SUS Block	10	55.20	0.458	0.487	0.997	0.486	1.061
		11					

Table 3.18 Radial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 with Central Na Channel

Region	Drawer	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C/E
Na Channel	1	0.0	1.000	1.000	0.994	0.994	0.994
		1.38	1.021	1.004	1.006	1.010	0.989
		2.76	1.056	1.015	1.011	1.026	0.972
Core	2	5.52	1.082	1.041	1.012	1.053	0.973
		8.28	1.076	1.029	1.018	1.048	0.974
	3	11.04	1.033	0.995	1.010	1.005	0.973
	4	16.56	0.924	0.887	1.011	0.897	0.971
	5	22.08	0.787	0.746	1.019	0.760	0.966
	6	27.60	0.578	0.550	1.028	0.565	0.978
Radial Reflector	7	33.12	0.272	0.278	0.927	0.258	0.949
		38.64	0.117	0.129	0.894	0.115	0.983
		44.16	0.049	0.059	0.922	0.054	1.102
SUS Block	10	49.68	0.019	0.025	0.995	0.025	1.316
	11	55.20	—	0.010	1.099	0.011	—

Table 3.19 Radial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 with Central Na Channel

Region	Drawer	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C / E
Na Channel	1	0.0	1.000	0.998	0.999	0.997	0.997
		1.38	1.006	1.000	1.005	1.005	0.999
		2.76	1.006	0.995	1.020	1.015	1.009
Core	2	5.52	0.999	0.975	1.052	1.026	1.027
		8.28	0.975	0.956	1.054	1.008	1.034
	3	11.04	0.950	0.926	1.054	0.976	1.027
	4	16.56	0.868	0.847	1.054	0.893	1.029
	5	22.08	0.778	0.753	1.053	0.793	1.019
	6	27.60	0.707	0.676	1.045	0.706	0.999
Radial Reflector	7	30.36	0.720	0.709	1.025	0.727	1.010
		33.12	0.777	0.790	0.988	0.781	1.005
		38.64	0.828	0.840	0.989	0.831	1.004
SUS Block	9	44.16	0.785	0.785	0.997	0.783	0.997
		49.68	0.653	0.640	1.008	0.645	0.988
SUS Block	10	55.20	—	0.442	1.014	0.448	—
		11	—	—	—	—	—

Table 3.2 0. Correction Factors for Pu²³⁹ Axial Fission Rate
Calculation in FCA X-3 Reference Core

Region	Distance from Center (cm)	Correction factor			
		F _{Gr}	F _{SN}	F _{Fe}	Total
Core	0.0	1.0	1.0	—	1.000
	1.38	1.000	1.000	—	1.000
	2.65	1.0	1.0	—	1.000
	5.19	1.0	1.000	—	1.000
	10.27	1.000	1.001	—	1.001
	15.35	1.001	1.002	—	1.003
	20.43	1.002	1.003	—	1.005
	22.97	1.002	1.0	—	1.002
Axial Reflector	25.51	0.981	0.987	—	0.968
	28.05	0.943	0.972	—	0.917
	30.59	0.937	0.976	—	0.915
	35.67	0.941	0.984	—	0.926
	40.75	0.957	0.993	—	0.950
	44.96	0.971	1.000	—	0.971

Table 3.2 1 Correction Factors for U^{238} Axial Fission Rate
Calculation in FCA X-3 Reference Core

Region	Distance from Center (cm)	Correction factor			
		F_{Gr}	F_{SN}	F_{Fe}	Total
Core	0.0	1.0	1.0	—	1.000
	1.38	1.0	1.000	—	1.000
	2.65	1.0	1.000	—	1.000
	5.19	1.0	1.001	—	1.001
	10.27	1.000	1.003	—	1.003
	15.35	1.000	1.009	—	1.009
	20.43	1.000	1.020	—	1.020
	22.97	0.999	1.013	—	1.012
Axial Reflector	25.51	1.005	0.971	—	0.976
	28.05	1.019	0.908	—	0.925
	30.59	1.008	0.857	—	0.864
	35.67	0.996	0.880	—	0.876
	40.75	0.982	0.914	—	0.898
	44.96	0.969	0.950	—	0.921

Table 3.2 2 Correction Factors for U^{235} Axial Fission Rate
 Calculation in FCA X-3 Reference Core

Region	Distance from Center (cm)	Correctin factor			
		F_{Gr}	G_{SN}	F_{Fe}	Total
Core	0.0	1.0	1.0	—	1.000
	1.38	1.0	1.0	—	1.000
	2.65	1.000	1.000	—	1.000
	5.19	1.000	1.000	—	1.000
	10.27	1.001	1.001	—	1.002
	15.35	1.002	1.002	—	1.004
	20.43	1.004	1.001	—	1.005
	22.97	1.005	0.999	—	1.004
Axial Reflector	25.51	0.987	0.990	—	0.977
	28.05	0.956	0.976	—	0.933
	30.59	0.958	0.980	—	0.939
	35.67	0.966	0.986	—	0.952
	40.75	0.978	0.993	—	0.971
	44.96	0.987	1.001	—	0.988

Table 3.2.3 Correction Factors for Pu²³⁹ Axial Fission Rate Calculation in FCA X-3 with B₄C Channel

Region	Distance from Center (cm)	Correction Factor		
		F _{Gr}	F _{SN}	Total
Axial Reflector	-4 0.7 5	1.0 0 4	0.9 9 3	0.9 9 7
	-3 5.6 7	0.9 8 1	0.9 8 4	0.9 6 5
	-3 0.5 9	0.9 6 4	0.9 7 6	0.9 4 0
	-2 8.0 5	0.9 6 0	0.9 7 5	0.9 3 6
	-2 5.5 1	0.9 7 5	0.9 8 1	0.9 5 6
Core	-2 2.9 7	1.0 1 2	1.0 0 1	1.0 1 3
	-2 0.4 3	1.0 0 1	1.0 0 3	1.0 0 4
	-1 5.3 5	1.0 0 1	1.0 0 2	1.0 0 3
	-1 2.8 1	1.0 0 1	1.0 0 2	1.0 0 3
	-1 0.2 7	1.0 0 1	1.0 0 1	1.0 0 2
	- 7.7 3	1.0 0 0	1.0 0 1	1.0 0 2
	- 5.1 9	1.0 0 0	1.0 0 1	1.0 0 2
	- 2.6 5	0.9 9 9	1.0 0 0	0.9 9 9
	- 1.3 8	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0
	0.0 0	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0
	1.3 8	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0
	2.6 5	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0
	5.1 9	1.0 0 1	1.0 0 1	1.0 0 2
	1 0.2 7	1.0 0 1	1.0 0 1	1.0 0 2
1 5.3 5	1.0 0 1	1.0 0 2	1.0 0 3	
2 0.4 3	1.0 0 2	1.0 0 3	1.0 0 5	
2 2.9 7	1.0 0 4	1.0 0 0	1.0 0 4	
Axial Reflector	2 5.5 1	0.9 9 0	0.9 8 7	0.9 7 7
	2 8.0 5	0.9 6 4	0.9 7 4	0.9 3 9
	3 0.5 9	0.9 6 4	0.9 7 6	0.9 4 1
	3 5.6 7	0.9 7 8	0.9 8 4	0.9 6 2
	4 0.7 5	1.0 0 3	0.9 9 3	0.9 9 6
	4 4.8 1	1.0 2 4	1.0 0 0	1.0 2 4

Table 3.24 Correction Factors for U^{238} Axial Fission Rate Calculation in FCA X-3 with B_4C Channel

Region	Distance from Center (cm)	Correction Factor		
		F_{Gr}	F_{SN}	Total
Axial Reflector	-40.75	0.985	0.917	0.903
	-35.67	0.992	0.876	0.869
	-30.59	1.009	0.871	0.879
	-28.05	1.016	0.903	0.917
	-25.51	1.011	0.970	0.981
Core	-22.97	0.998	1.008	1.006
	-20.43	1.001	1.024	1.025
	-15.35	1.000	1.009	1.009
	-12.81	1.001	1.006	1.007
	-10.27	1.000	1.003	1.003
	-7.73	1.000	1.001	1.001
	-5.19	1.000	1.000	1.000
	-2.65	1.000	1.000	1.000
	-1.38	1.000	1.001	1.001
	0.00	1.000	1.000	1.000
	1.38	1.000	1.000	1.000
	2.65	1.000	1.000	1.000
	5.19	1.000	1.000	1.000
	10.27	1.001	1.002	1.003
15.35	1.000	1.009	1.009	
20.43	1.000	1.019	1.019	
22.97	1.000	1.011	1.011	
Axial Reflector	25.51	1.005	0.970	0.975
	28.05	1.015	0.905	0.919
	30.59	1.005	0.856	0.860
	35.67	0.990	0.884	0.875
	40.75	0.981	0.917	0.900
44.81	0.969	0.972	0.942	

Table 3.25 Correction Factors for U^{235} Axial Fission Rate Calculation in FCA X-3 with B_4C Channel

Region	Distance from Center (cm)	Correction Factor		
		F_{Gr}	F_{SN}	Total
Axial Reflector	-40.75	1.008	0.993	1.001
	-35.67	0.994	0.985	0.979
	-30.59	0.979	0.981	0.960
	-28.05	0.975	0.979	0.955
	-25.51	0.984	0.985	0.969
Core	-22.97	1.016	1.001	1.017
	-20.43	1.006	1.000	1.006
	-15.35	1.003	1.002	1.005
	-12.81	1.002	1.001	1.003
	-10.27	1.000	1.001	1.001
	-7.73	1.000	1.001	1.001
	-5.19	0.999	1.000	0.999
	-2.65	0.999	1.000	0.999
	-1.38	0.999	1.000	0.999
	0.00	1.000	1.000	1.000
	1.38	1.001	1.000	1.001
	2.65	1.001	1.000	1.001
	5.19	1.002	1.001	1.003
	10.27	1.002	1.001	1.003
15.35	1.003	1.001	1.004	
20.43	1.005	1.000	1.006	
22.97	1.007	1.000	1.008	
Axial Reflector	25.51	0.996	0.991	0.987
	28.05	0.977	0.977	0.955
	30.59	0.983	0.980	0.963
	35.67	1.000	0.986	0.986
	40.75	1.020	0.993	1.013
	44.81	1.037	1.000	1.037

Table 3.2 6 Axial Fission Rate Distribution of Pu²³⁹ in FCA X-3 Reference Core

Region	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C / E
Core	-10.27	0.935	0.929	1.001	0.930	0.995
	-7.73	0.964	-	-	-	-
	-5.19	0.984	0.984	1.000	0.984	1.000
	-2.65	0.997	0.998	1.000	0.998	1.001
	-1.38	0.997	1.001	1.000	1.001	1.004
	0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	1.38	1.001	1.001	1.000	1.001	1.000
	2.65	0.999	0.998	1.000	0.998	0.999
	5.19	0.990	0.984	1.000	0.984	0.994
	10.27	0.940	0.929	1.001	0.930	0.989
	15.35	0.858	0.841	1.003	0.844	0.984
	20.43	0.748	0.728	1.005	0.732	0.979
	22.97	0.700	0.672	1.002	0.673	0.961
	Axial Reflector	25.51	0.689	0.688	0.968	0.666
28.05		0.733	0.800	0.917	0.734	1.001
30.59		0.756	0.846	0.915	0.774	1.024
35.67		0.772	0.871	0.926	0.807	1.045
40.75		0.732	0.814	0.950	0.773	1.056
44.96		0.669	0.723	0.971	0.702	1.049

Table 3.27 Axial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 Reference Core

Region	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C/E
Core	-10.27	0.955	0.923	1.003	0.926	0.970
	-7.73	0.994	-	-	-	-
	-5.19	1.007	0.985	1.001	0.986	0.979
	-2.65	1.034	0.999	1.000	0.999	0.966
	-1.38	1.018	1.002	1.000	1.002	0.984
	0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	1.38	1.020	1.002	1.000	1.002	0.982
	2.65	1.034	0.999	1.000	0.999	0.966
	5.19	1.015	0.985	1.001	0.986	0.971
	10.27	0.955	0.923	1.003	0.926	0.970
	15.35	0.851	0.817	1.009	0.824	0.968
	20.43	0.699	0.660	1.020	0.673	0.963
	22.97	0.600	0.558	1.012	0.565	0.942
Axial Reflector	25.51	0.443	0.431	0.976	0.421	0.950
	28.05	0.288	0.302	0.925	0.279	0.969
	30.59	0.204	0.221	0.864	0.191	0.936
	35.67	0.102	0.118	0.876	0.103	1.010
	40.75	0.057	0.063	0.898	0.057	1.000
	44.96	0.033	0.038	0.921	0.035	1.061

Table 3.2 8 Axial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 Reference Core

Region	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C/E
Core	-1 0.27	0.935	0.932	1.002	0.934	0.999
	- 7.73	0.965	-	-	-	-
	- 5.19	0.978	0.984	1.000	0.984	1.006
	- 2.65	0.994	0.998	1.000	0.998	1.004
	- 1.38	0.998	1.000	1.000	1.000	1.002
	0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	1.38	0.999	1.000	1.000	1.000	1.001
	2.65	0.995	0.998	1.000	0.998	1.003
	5.19	0.983	0.984	1.000	0.984	1.001
	1 0.27	0.935	0.932	1.002	0.934	0.999
	1 5.35	0.860	0.851	1.004	0.854	0.993
	2 0.43	0.780	0.755	1.005	0.759	0.973
	2 2.97	0.745	0.715	1.004	0.718	0.964
	Axial Reflector	2 5.51	0.754	0.737	0.977	0.720
2 8.05		0.798	0.825	0.933	0.770	0.965
3 0.59		0.827	0.863	0.939	0.810	0.979
3 5.67		0.838	0.866	0.952	0.824	0.983
4 0.75		0.791	0.794	0.971	0.771	0.975
4 4.96		0.711	0.697	0.988	0.689	0.969

Table 3.29 Axial Fission Rate Distribution of Pu²³⁹ in
FCA X-3 with B₄C Channel

Region	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C/E
Axial Ref.	-4.075	0.765	0.849	0.997	0.846	1.106
	-3.567	0.802	0.907	0.965	0.875	1.091
	-3.059	0.785	0.881	0.940	0.828	1.055
	-2.805	0.761	0.831	0.936	0.778	1.022
	-2.551	0.729	0.746	0.956	0.713	0.978
Core	-2.297	0.726	0.681	1.013	0.690	0.950
	-2.043	0.772	0.758	1.004	0.761	0.986
	-1.535	0.874	0.870	1.003	0.873	0.999
	-1.281	0.917	0.916	1.003	0.919	1.002
	-1.027	0.956	0.953	1.002	0.955	0.999
	- 7.73	0.986	0.981	1.002	0.983	0.997
	- 5.19	1.002	0.998	1.002	1.000	0.998
	- 2.65	1.013	1.005	0.999	1.004	0.991
	- 1.38	1.004	1.004	1.000	1.004	1.000
	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	1.38	0.998	0.993	1.000	0.993	0.995
	2.65	0.997	0.984	1.000	0.984	0.987
	5.19	0.977	0.958	1.002	0.960	0.983
	10.27	0.911	0.879	1.002	0.881	0.967
	15.35	0.810	0.767	1.003	0.769	0.949
20.43	0.692	0.633	1.005	0.636	0.919	
22.97	0.631	0.563	1.004	0.565	0.895	
Axial Ref.	2.551	0.602	0.523	0.977	0.511	0.849
	2.805	0.587	0.524	0.939	0.492	0.838
	3.059	0.577	0.504	0.941	0.474	0.821
	3.567	0.551	0.451	0.962	0.434	0.788
	4.075	0.505	0.389	0.996	0.387	0.766
	4.481	0.458	0.337	1.024	0.345	0.753

Table 3.3 0 Axial Fission Rate Distribution of U²³⁸ in
FCA X-3 with B₄C Channel

Region	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C/E
Axial Ref.	-4 0.7 5	—	0.0 6 6	0.9 0 3	0.0 6 0	—
	-3 5.6 7	—	0.1 2 4	0.8 6 9	0.1 0 8	—
	-3 0.5 9	—	0.2 3 1	0.8 7 9	0.2 0 3	—
	-2 8.0 5	—	0.3 1 7	0.9 1 7	0.2 9 1	—
	-2 5.5 1	—	0.4 3 7	0.9 8 1	0.4 2 9	—
Core	-2 2.9 7	—	0.5 8 1	1.0 0 6	0.5 8 4	—
	-2 0.4 3	—	0.6 8 3	1.0 2 5	0.7 0 0	—
	-1 5.3 5	—	0.8 4 1	1.0 0 9	0.8 4 9	—
	-1 2.8 1	0.9 2 4	0.8 9 8	1.0 0 7	0.9 0 4	0.9 7 8
	-1 0.2 7	0.9 6 3	0.9 4 3	1.0 0 3	0.9 4 6	0.9 8 2
	- 7.7 3	1.0 0 2	0.9 7 5	1.0 0 1	0.9 7 6	0.9 7 4
	- 5.1 9	1.0 0 7	0.9 9 5	1.0 0 0	0.9 9 5	0.9 8 8
	- 2.6 5	1.0 3 1	1.0 0 4	1.0 0 0	1.0 0 4	0.9 7 4
	- 1.3 8	1.0 1 9	1.0 0 4	1.0 0 1	1.0 0 5	0.9 8 6
	0.0 0	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0
	1.3 8	1.0 1 4	0.9 9 3	1.0 0 0	0.9 9 3	0.9 7 9
	2.6 5	1.0 1 2	0.9 8 4	1.0 0 0	0.9 8 4	0.9 7 2
	5.1 9	0.9 8 6	0.9 5 8	1.0 0 0	0.9 5 8	0.9 7 2
	10.2 7	0.9 1 7	0.8 7 3	1.0 0 3	0.8 7 6	0.9 5 5
	1 5.3 5	0.8 0 6	0.7 4 9	1.0 0 9	0.7 5 6	0.9 3 8
20.4 3	0.6 4 9	0.5 8 6	1.0 1 9	0.5 9 7	0.9 2 0	
2 2.9 7	0.5 4 5	0.4 8 8	1.0 1 1	0.4 9 3	0.9 0 5	
Axial Ref.	2 2.5 1	0.3 9 5	0.3 7 3	0.9 7 5	0.3 6 4	0.9 2 2
	2 8.0 5	0.2 6 7	0.2 6 1	0.9 1 9	0.2 4 0	0.8 9 9
	3 0.5 9	0.1 8 7	0.1 9 0	0.8 6 0	0.1 6 3	0.8 7 2
	3 5.6 7	0.0 9 7	0.1 0 0	0.8 7 5	0.0 8 8	0.9 0 7
	4 0.7 5	0.0 5 1	0.0 5 3	0.9 0 0	0.0 4 8	0.9 4 1
	4 4.8 1	0.0 3 1	0.0 3 2	0.9 4 2	0.0 3 0	0.9 6 8

Table 3.3 1 Axial Fission Rate Distribution of U^{235} in
FCA X-3 with B_4C Channel

Region	Distance from Center (cm)	Experiment	Diffusion Calculation	Correction Factor	Corrected Fission Rate	C/E
Axial Ref.	-4 0.7 5	—	0.8 3 3	1.0 0 1	0.8 3 4	—
	-3 5.6 7	—	0.9 0 7	0.9 7 9	0.8 8 8	—
	-3 0.5 9	—	0.9 0 3	0.9 6 0	0.8 6 7	—
	-2 8.0 5	—	0.8 6 3	0.9 5 5	0.8 2 4	—
	-2 5.5 1	—	0.7 9 2	0.9 6 9	0.7 6 7	—
Core	-2 2.9 7	—	0.7 3 5	1.0 1 7	0.7 4 7	—
	-2 0.4 3	—	0.7 8 7	1.0 0 6	0.7 9 2	—
	-1 5.3 5	—	0.8 8 2	1.0 0 5	0.8 8 6	—
	-1 2.8 1	0.9 2 2	0.9 2 4	1.0 0 3	0.9 2 7	1.0 0 5
	-1 0.2 7	0.9 5 4	0.9 5 9	1.0 0 1	0.9 6 0	1.0 0 6
	- 7.7 3	0.9 8 2	0.9 8 4	1.0 0 1	0.9 8 5	1.0 0 3
	- 5.1 9	0.9 9 7	1.0 0 0	0.9 9 9	0.9 9 9	1.0 0 2
	- 2.6 5	1.0 0 0	1.0 0 6	0.9 9 9	1.0 0 5	1.0 0 5
	- 1.3 8	1.0 0 6	1.0 0 5	0.9 9 9	1.0 0 4	0.9 9 8
	0.0 0	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0	1.0 0 0
	1.3 8	0.9 9 8	0.9 9 2	1.0 0 1	0.9 9 3	0.9 9 5
	2.6 5	0.9 8 7	0.9 8 3	1.0 0 1	0.9 8 4	0.9 9 7
	5.1 9	0.9 7 3	0.9 5 7	1.0 0 3	0.9 6 0	0.9 8 7
	1 0.2 7	0.9 0 9	0.8 7 9	1.0 0 3	0.8 8 2	0.9 7 0
	1 5.3 5	0.8 1 7	0.7 7 1	1.0 0 4	0.7 7 4	0.9 4 7
2 0.4 3	0.7 0 8	0.6 4 9	1.0 0 6	0.6 5 3	0.9 2 2	
2 2.9 7	0.6 5 9	0.5 8 7	1.0 0 8	0.5 9 2	0.8 9 8	
Axial Ref.	2 5.5 1	0.6 4 1	0.5 5 5	0.9 8 7	0.5 4 8	0.8 5 5
	2 8.0 5	0.6 3 8	0.5 5 6	0.9 5 5	0.5 3 1	0.8 3 2
	3 0.5 9	0.6 3 8	0.5 3 7	0.9 6 3	0.5 1 7	0.8 1 0
	3 5.6 7	0.6 0 9	0.4 7 9	0.9 8 6	0.4 7 2	0.7 7 5
	4 0.7 5	0.5 6 2	0.4 1 0	1.0 1 3	0.4 1 5	0.7 3 8
	4 4.8 1	0.4 9 9	0.3 5 2	1.0 3 7	0.3 6 5	0.7 3 1

Table 3.3 2 Results of Radial Fission Rate Calculation
in the Core Outermost Drawer Center

C/E Value of reaction Rate Case	Pu ²³⁹	U ²³⁸	U ²³⁵	Average ^{**}
Reference	0.961	1.014	0.986	0.974
Na	0.988	0.978	0.999	0.992
Reaction Rate Fraction*	0.60	0.07	0.33	

* Elementwise Reaction Rate Fraction in the 'JOYO'
MK-II Core.

** Average C/E Value for Power Distribution

Table 3.3 3 Correction Factors of Control Rod Worth

Items	Control Rod Worth ($\% \Delta k/k'$)		Correction Factor
Group Reduction Effect	26 Group	7 Group	0.988
	13.777	13.942	
Mesh Size Effect	Standard Mesh	Infinite Mesh	1.050
	13.942	14.646	
S_N and Lumping Effect	Diffusion Calcu. Homog.	S_4 Calcu. Hetero.	0.954
	14.646	13.973	
Total Correction Factor			0.990

Table 3.3 4 Results of Control Rod Worth Calculation

CASE	Calculated Rod Worth* (% $\Delta k/kk'$)	Correction Factor	Rod Worth (% $\Delta k/kk'$)		C/E
			Calculated**	Experiment	
CRP-123456	1 2 8 6 1	1.0 3 9	1 2 7 3 2	1 3 1 4 7	0.9 6 8
CRP-012356	1 0 8 7 4		1 0 7 6 5	1 1 1 3 1	0.9 6 7
CRP-002356	9 0 7 2		8 9 8 1	9 0 4 4	0.9 9 3
CRP-000135	6 3 9 8		6 3 3 4	6 4 2 0	0.9 8 7
CRP-000014	3 6 5 7		3 6 2 0	3 7 1 6	0.9 7 4
CRP-000013	3 9 8 3		3 9 4 3	4 0 4 9	0.9 7 4
CRP-000012	3 7 2 1		3 6 8 4	3 8 4 1	0.9 5 9
CRP-000002	2 0 9 7		2 0 7 6	2 0 3 8	1.0 1 9
CRP-000001	1 7 4 5		1 7 2 8	1 7 1 4	1.0 0 8
CRP-000011'	2 1 3 5		2 1 1 4	2 1 3 6	0.9 9 0

* uncorrected

** after correction

Table 3.3 5 Comparison of Control Rod Worth between
Method 1* and 2*

CASE	Rod Worth**($\% \Delta k/kk'$)		C**/E	
	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2
CR-1 2 3 4 5 6	1 2.8 6 1	*** 1 3.9 4 2	0.9 7 8	*** 1.0 6 1
CR-0 1 2 3 5 6	1 0.8 7 4	1 1.9 5 1	0.9 7 7	1.0 7 4
CR-0 0 2 3 5 6	9.0 7 2	1 0.1 4 4	1.0 0 3	1.1 2 2
CR-0 0 0 1 3 5	6.3 9 8	7.4 6 3	0.9 9 7	1.1 6 2
CR-0 0 0 0 1 4	3.6 5 7	4.7 1 5	0.9 8 4	1.2 6 9
CR-0 0 0 0 1 3	3.9 8 3	5.0 4 1	0.9 8 4	1.2 4 5
CR-0 0 0 0 1 2	3.7 2 1	4.7 7 9	0.9 6 9	1.2 4 4
CR-0 0 0 0 0 2	2.0 9 7	3.1 4 8	1.0 2 9	1.5 4 5
CR-0 0 0 0 0 1	1.7 4 5	2.7 9 7	1.0 1 9	1.6 3 2

* refer 4.1.(3)

** Uncorrected Value

*** available application of method 2

Table 3.3 6 Atomic Compositions of Doppler Samples
and Capsules.

10^{24} atoms/cm³

	NUO ₂ -25 φ	NUO ₂ -20 φ	Capsule 25 φ	Capsule 20 φ
U-235	1.503-4	1.463-4		
U-238	2.063-2	2.008-2		
O	4.157-2	4.045-2		
Fe			1.888-2	1.794-2
Cr			5.185-3	4.929-3
Ni			3.496-3	4.198-3

Ref. : <8>

Table 3.3 7 Comparison of Sample Doppler Reactivity Worth
between Experimental and Calculational Values

Sample	Temperature range	Experiment*	Calculation*	C/E
20 ϕ UO ₂	823K-293K	-4.56 \pm 0.15	-3.71 ₉	0.816 \pm 0.03
	1073K-293K	-5.78 \pm 0.15	-4.81 ₄	0.833 \pm 0.02
25 ϕ UO ₂	823K-293K	-7.02 \pm 0.13	-6.06 ₅	0.864 \pm 0.02
	1073K-293K	-8.57 \pm 0.13	-7.65 ₆	0.893 \pm 0.01

* in unit of $10^{-6} \Delta k / k k'$

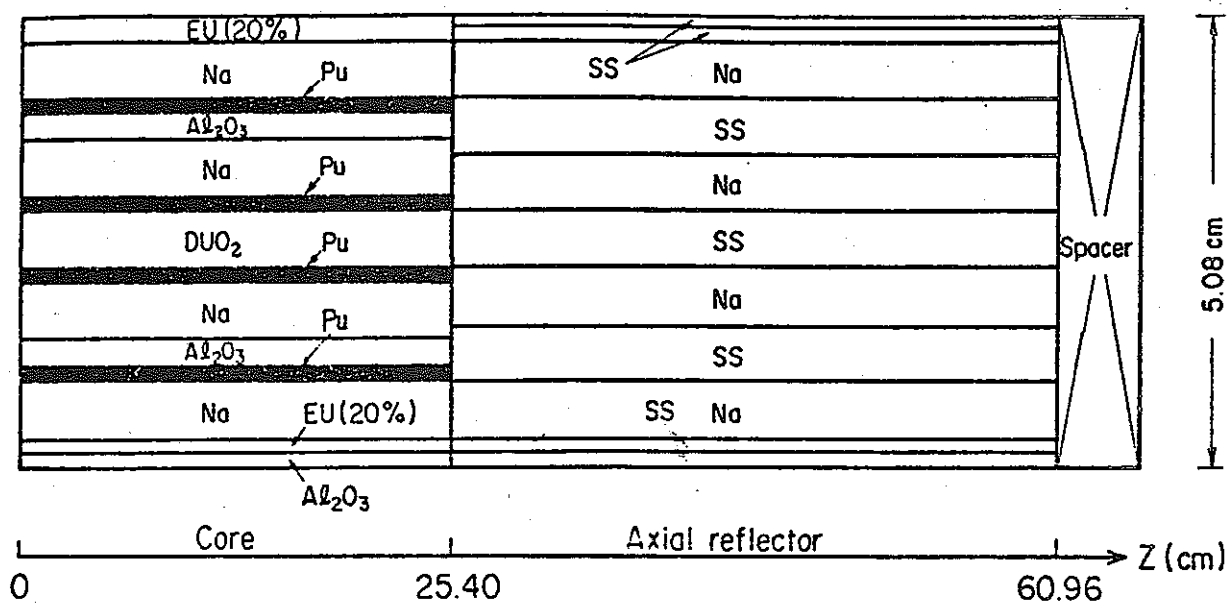


Fig.3.1 Plate Pattern of Core Fuel Drawer

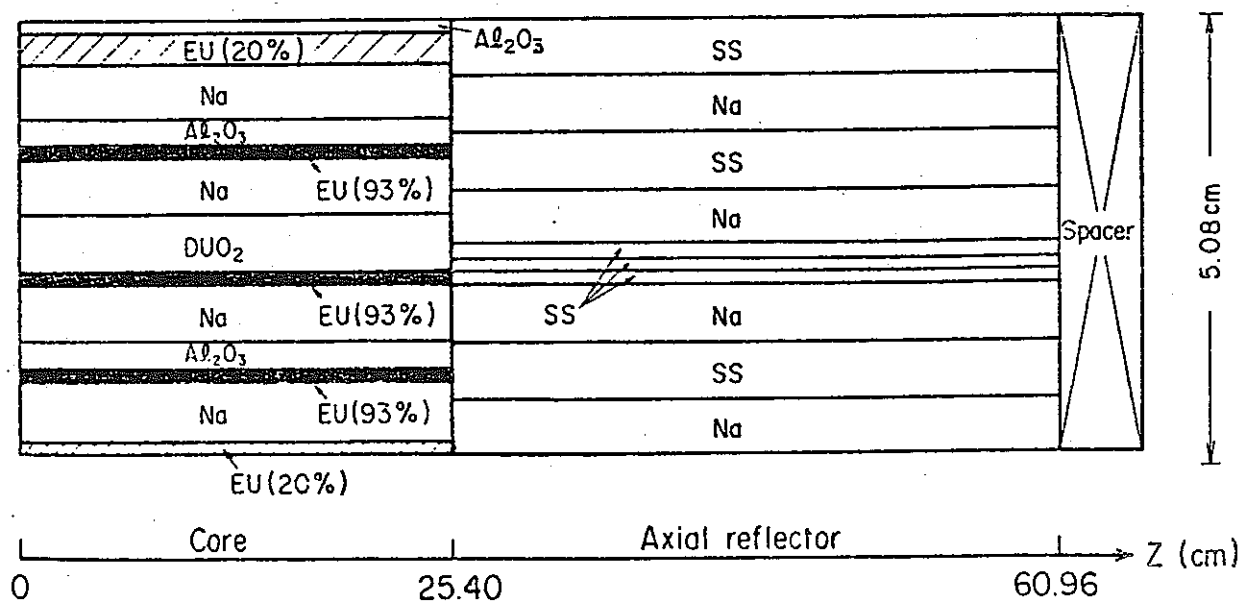


Fig.3.2 Plate Pattern of Control Drawer

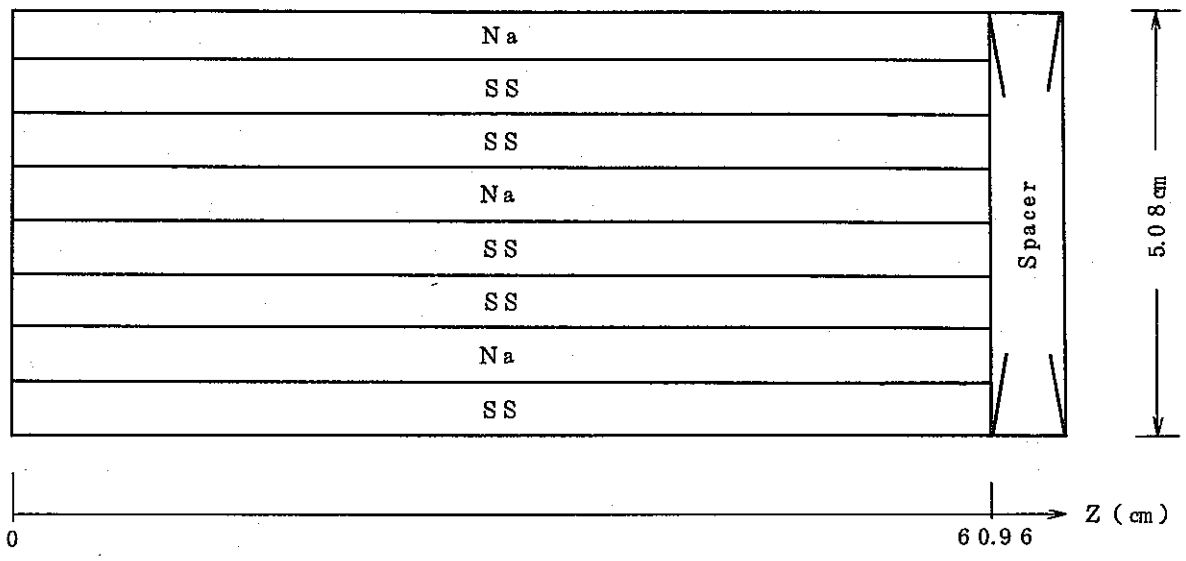


Fig.3.3 Drawer Pattern of Radial Reflector

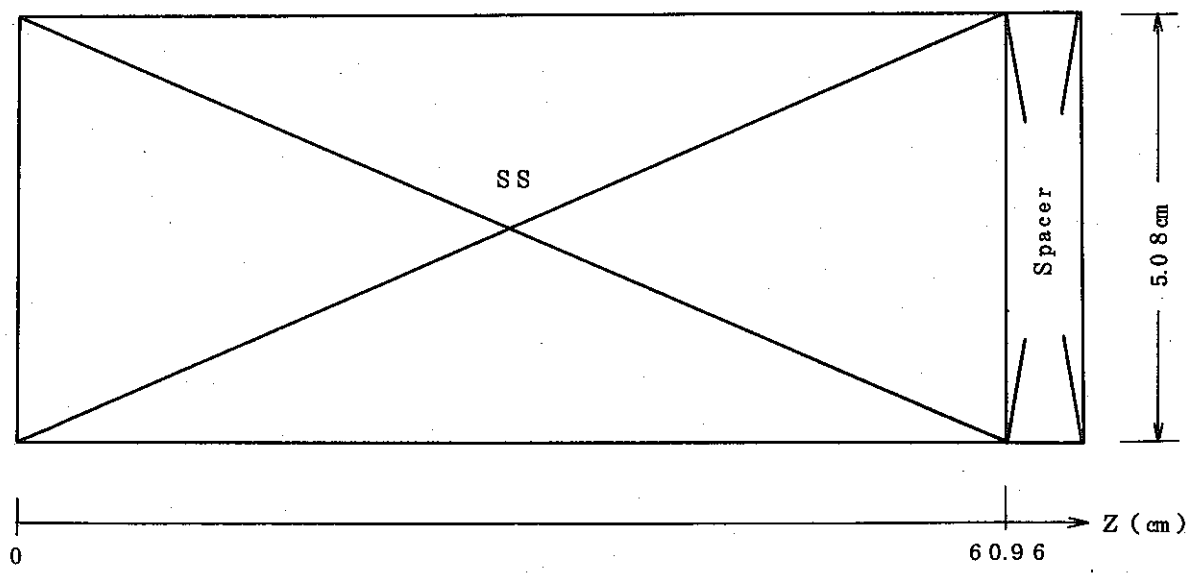


Fig.3.4 Drawer Pattern of SUS Block

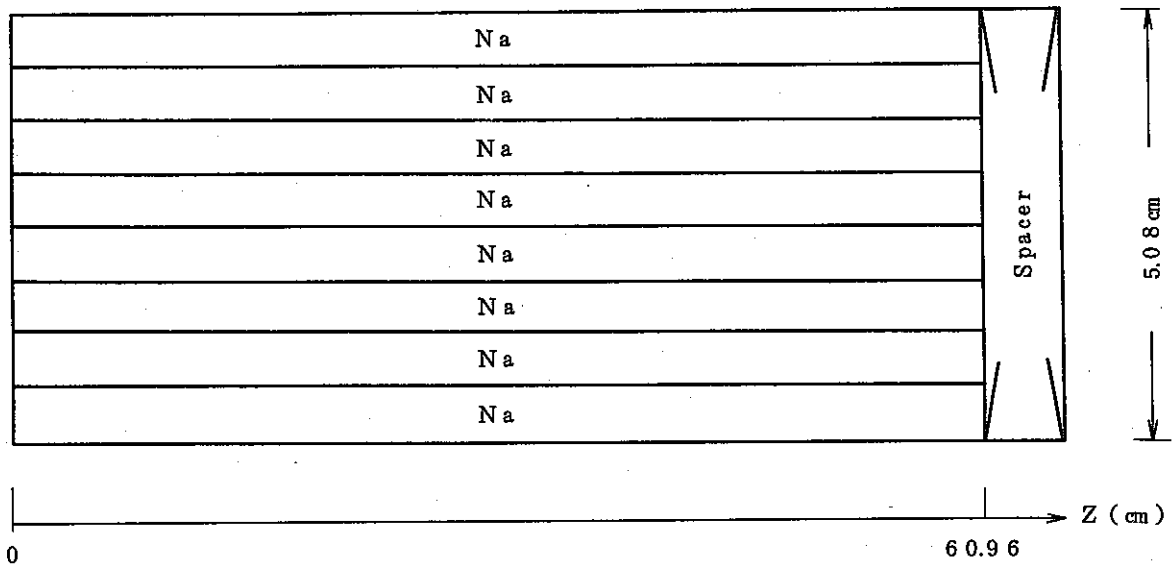
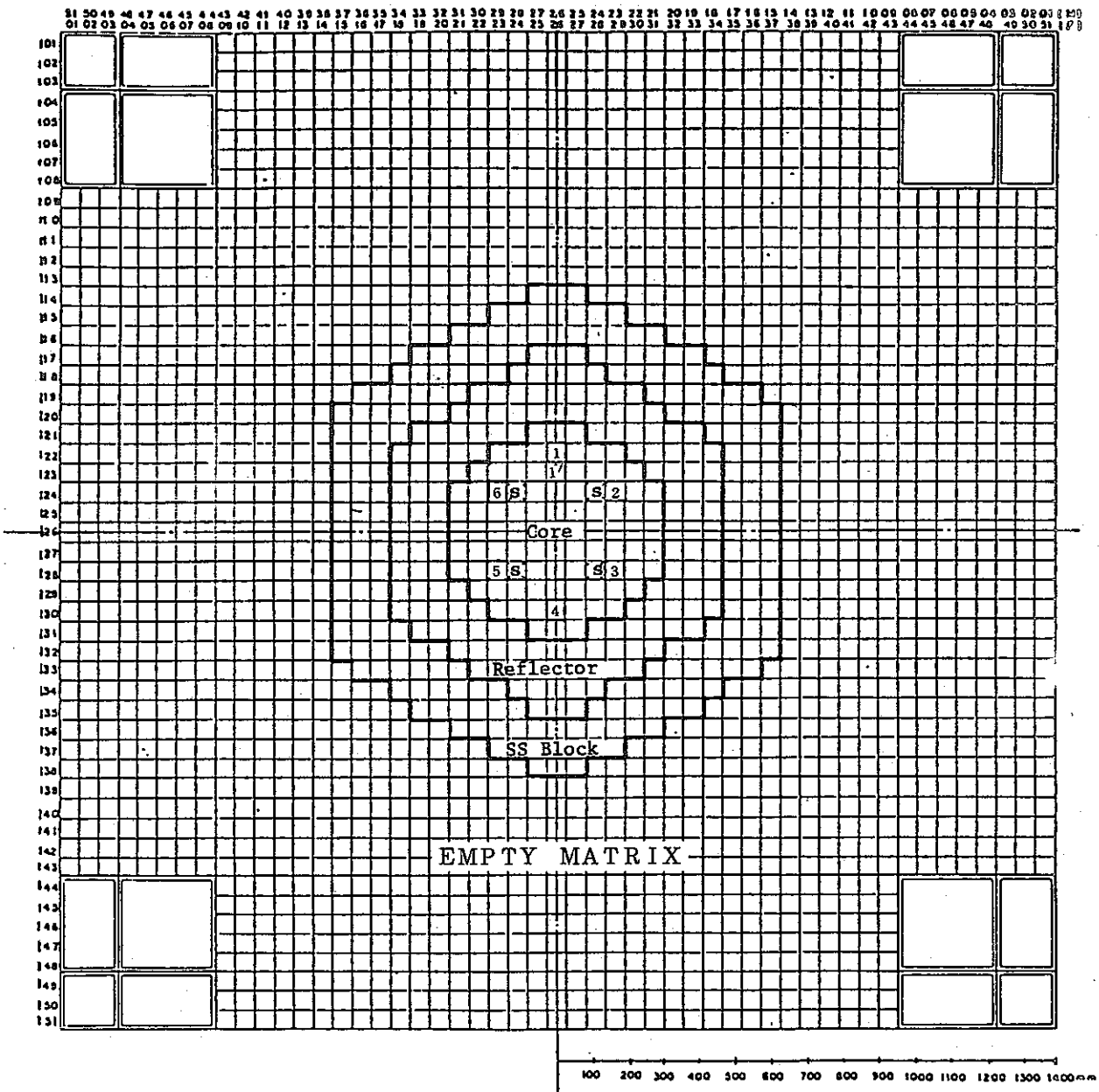


Fig.3.5 Na Drawer Pattern



- C FCA Control Rod
- S FCA Safety Rod
- N Control Rod Position (CRP)
n = 1, 2, ..., 6

Fig.3.6 Vertical Cross Section of FCA Assembly X-3

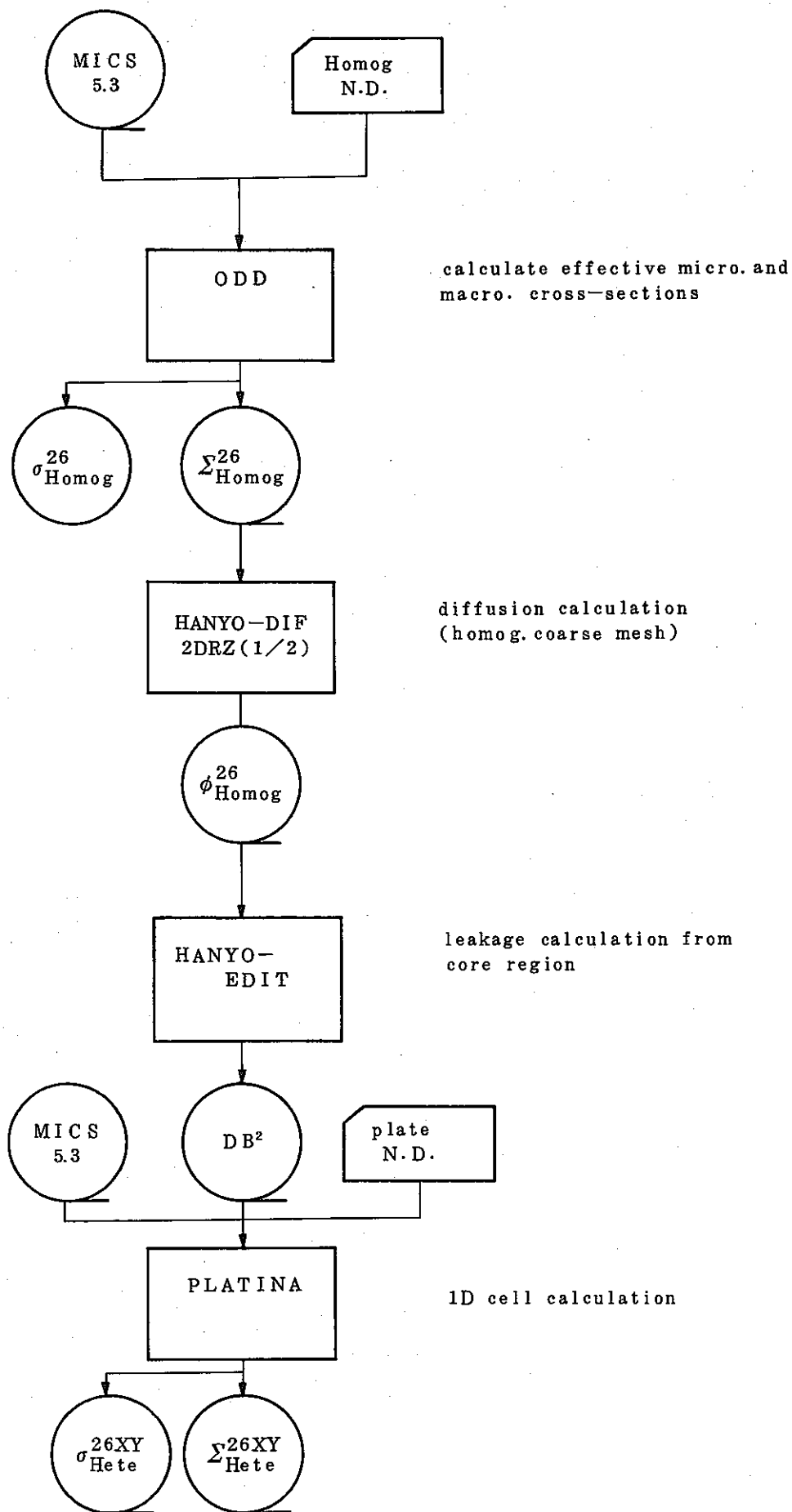


Fig. 3.7 Flow Diagram of Criticality Calculation ($\frac{1}{2}$)

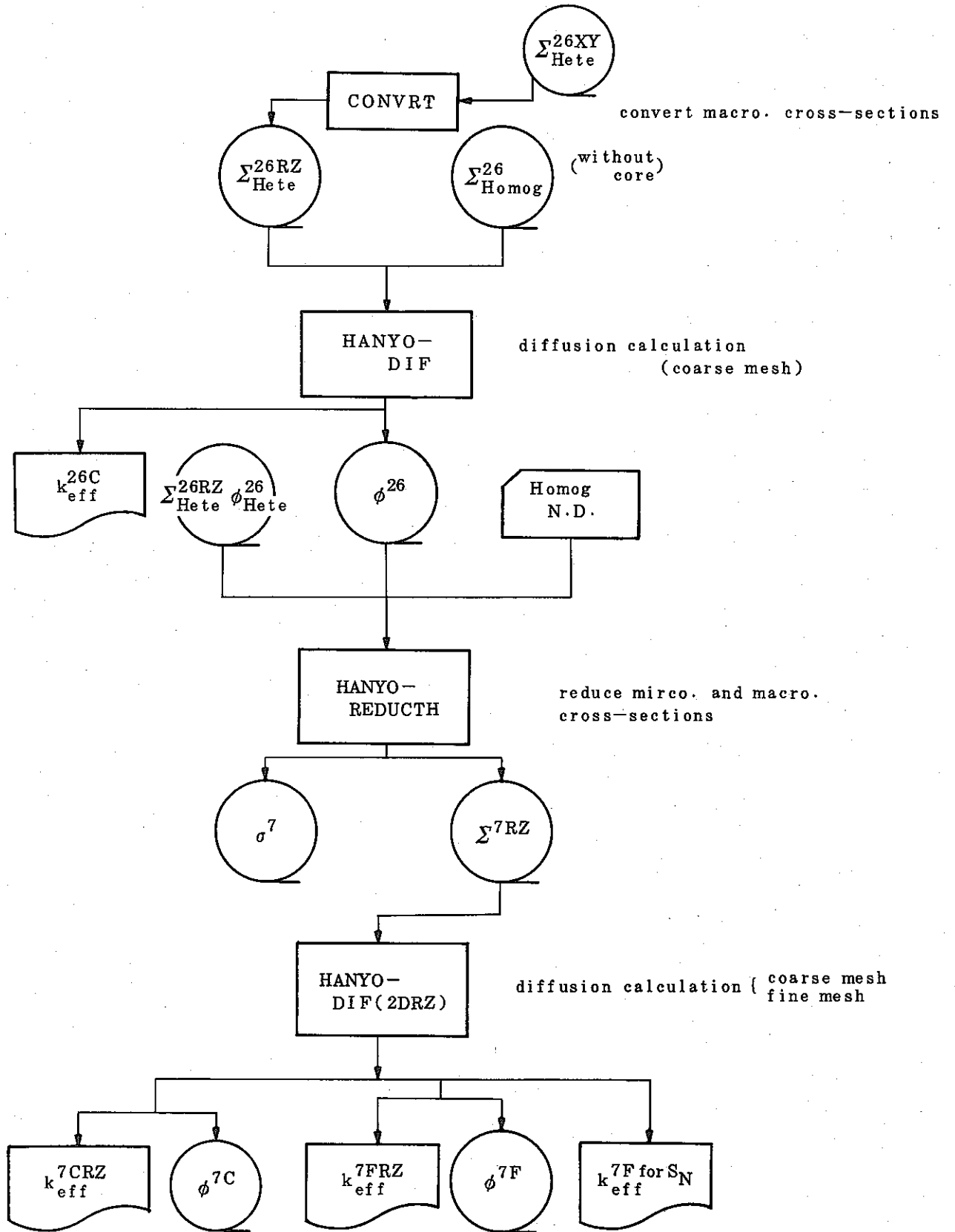


Fig.3.7 Flow Diagram of Criticality Calculation ($\frac{2}{2}$)

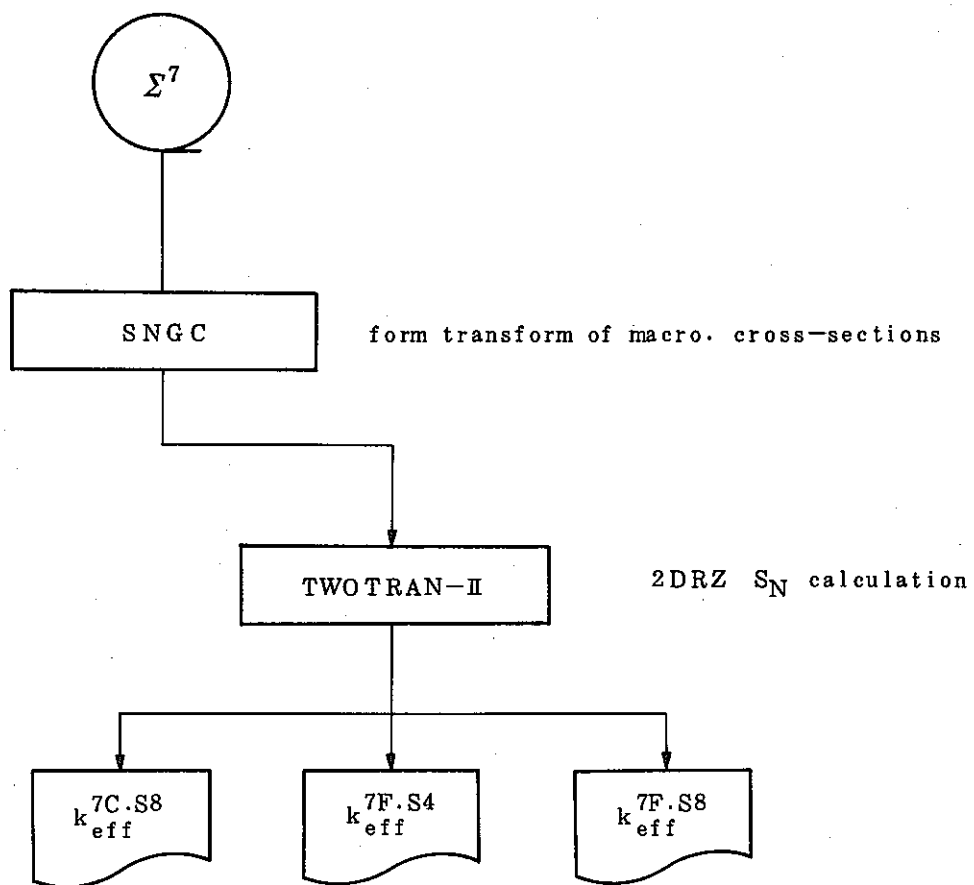


Fig.3.8 Flow Diagram of S_N Effect Calculation

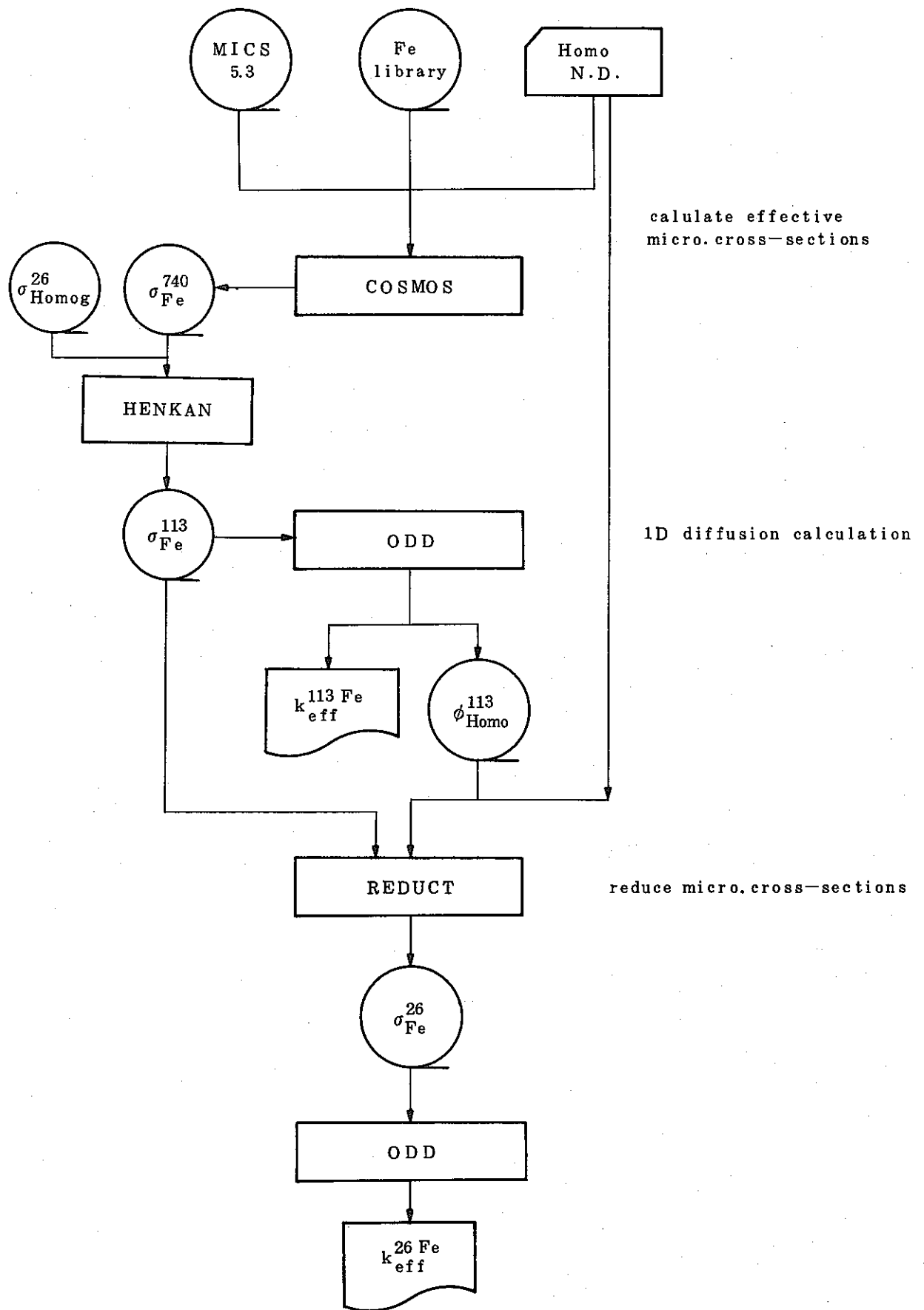


Fig. 3.9 Flow Diagram of Fe-Resonance Effect Calculation

	Reg. No.	Comp. No.	Region Width [cm]
Wall	1	8	0.22
20%EU	2	2	0.3175
Na	3	6	0.635
Pu	4	1	0.15875
Al ₂ O ₃	5	4	0.3175
Na	6	6	0.635
Pu	7	1	0.15875
DUO ₂	8	3	0.635
Pu	9	1	0.15875
Na	10	6	0.635
Al ₂ O ₃	11	4	0.3175
Pu	12	1	0.15875
Na	13	6	0.635
20%EU	14	2	0.15875
Al ₂ O ₃	15	5	0.15875
Wall	16	8	0.22

Fig.3.1 0 Cell Calculation Model of Core Drawer

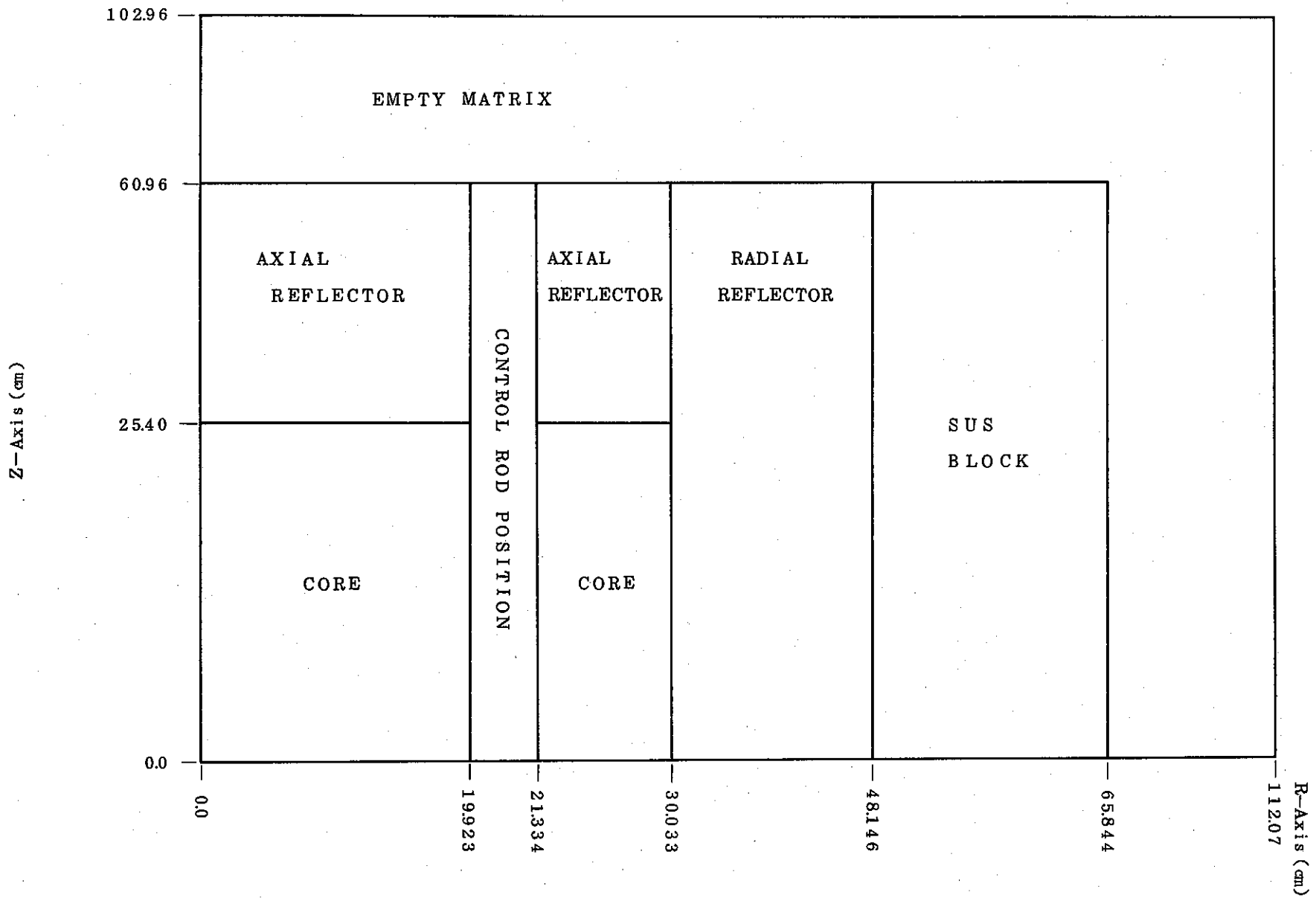


Fig.3.1 1 $\frac{1}{2}$ RZ Model of FCAX-3

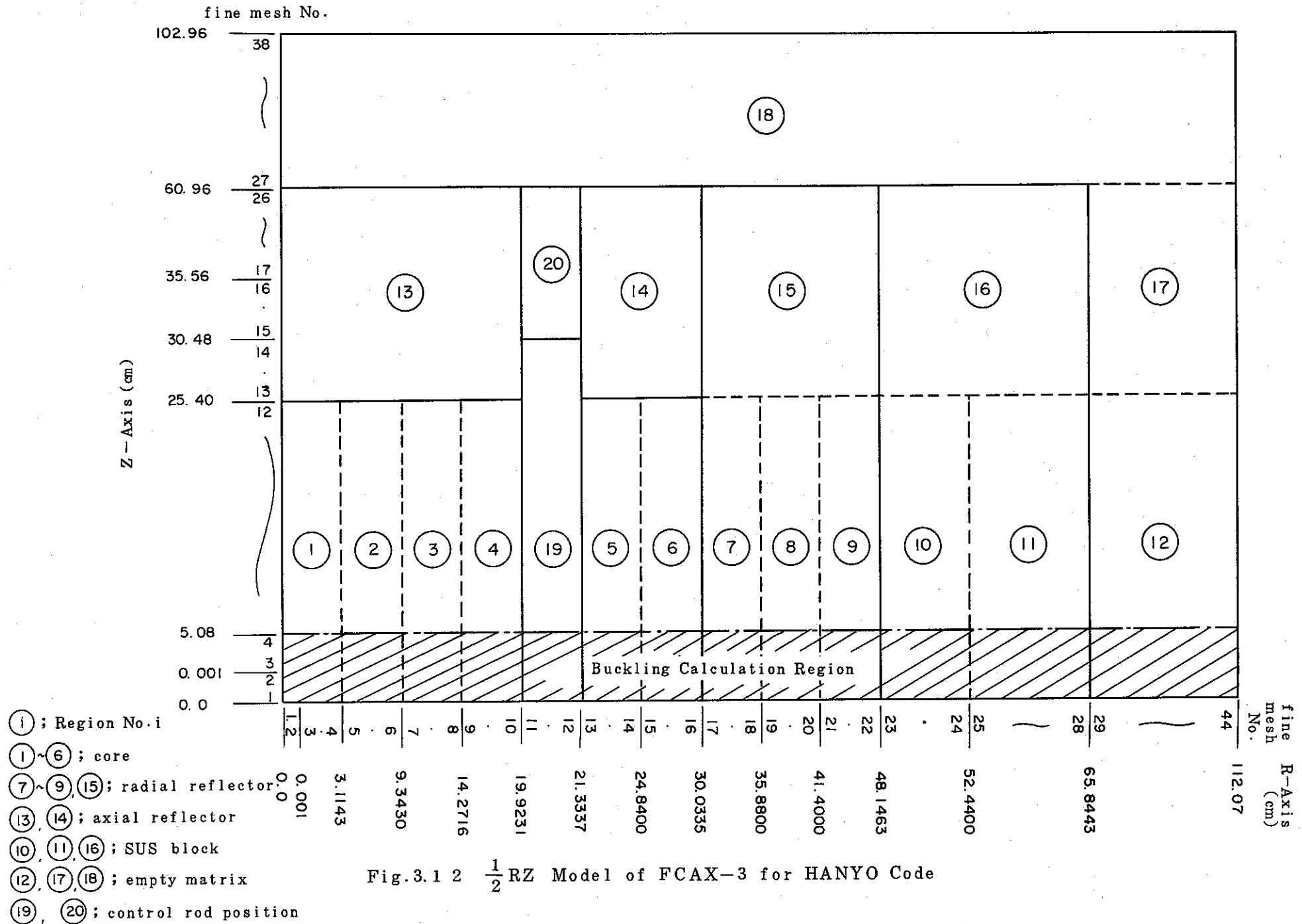
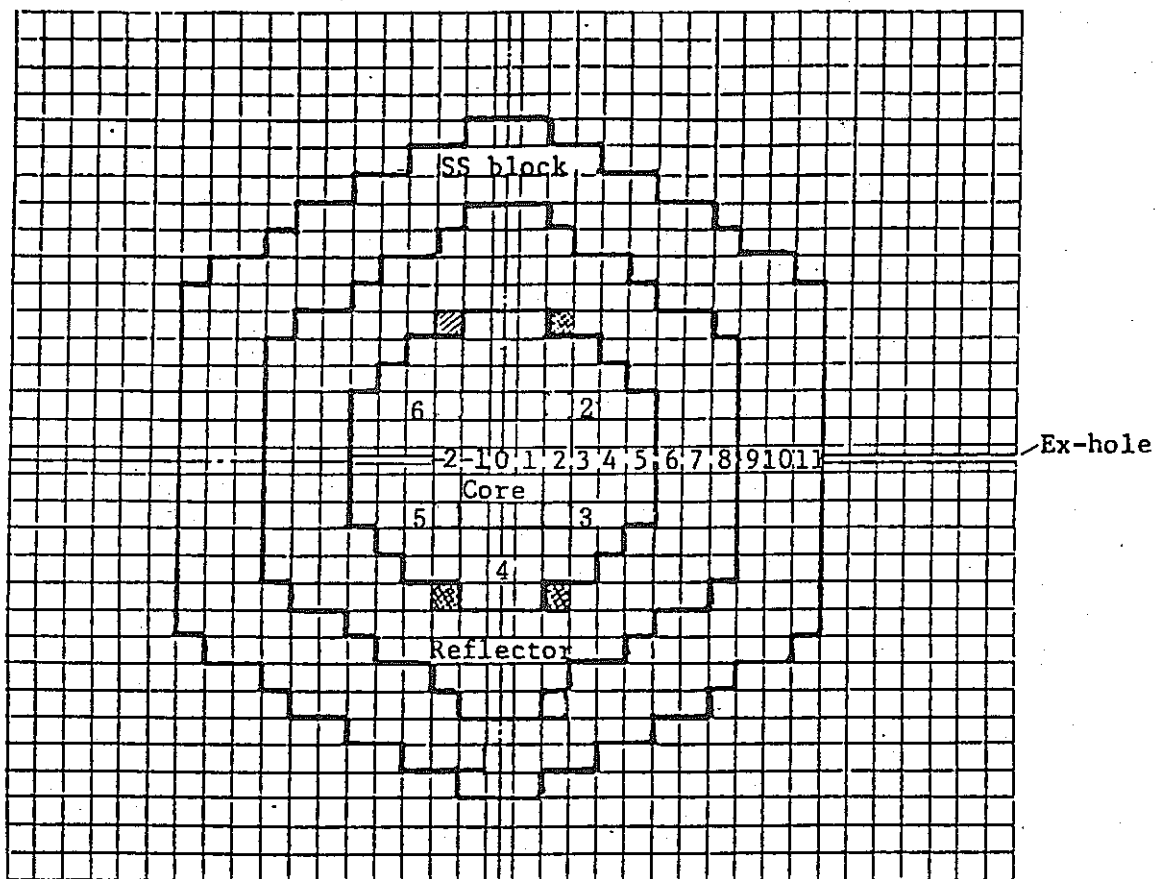




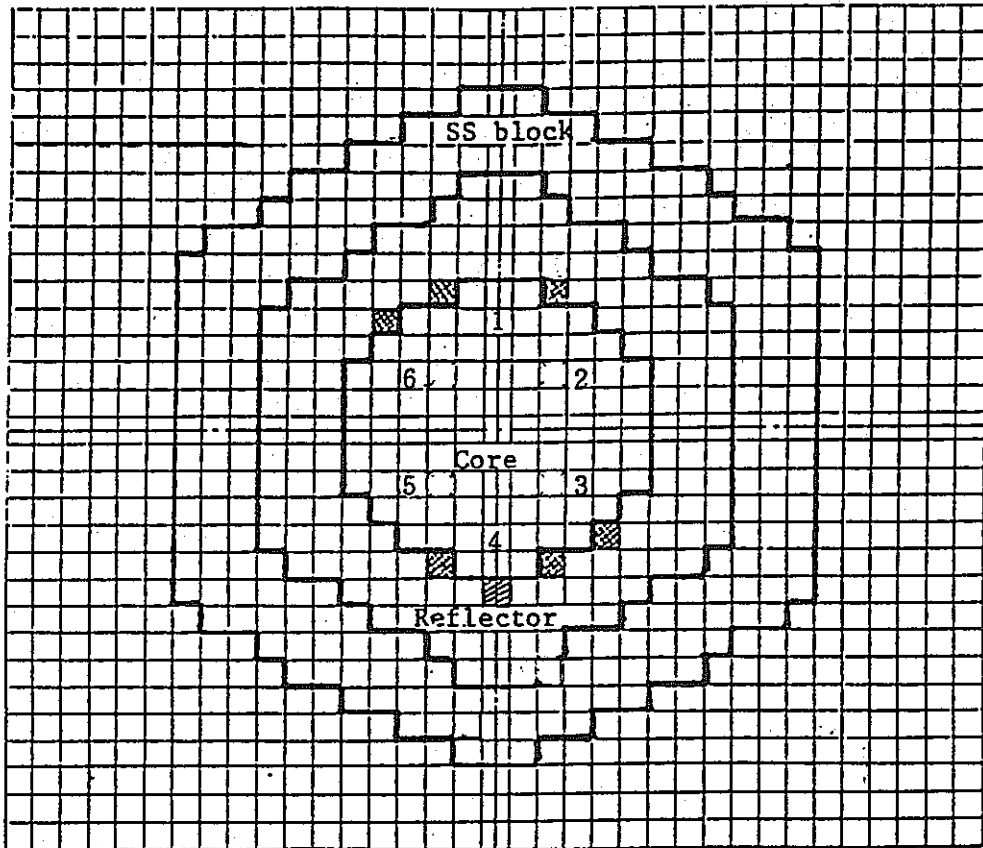
Fig. 3.1 2 $\frac{1}{2}$ RZ Model of FCAX-3 for HANYO Code



Mark		
Reference	Reflector	M-side fuel F-side reflector
* Na	Fuel	Fuel

* Pos.0: Na channel
 [1] ~ [6]: Na channel

Fig.3.1 3 Position of fission chamber insertion for Radial fission rate measurement.





Mark			① ~ ⑥
Reference	Reflector	Reflector	F-side } All Na M-side }
B ₄ C	Fuel	F-side reflector M-side fuel	F-side { B ₄ C : 2,3,5,6 Na : 1,4 M-side All Na

Fig.3.1 4 Loading Pattern for Axial fission rate measurement

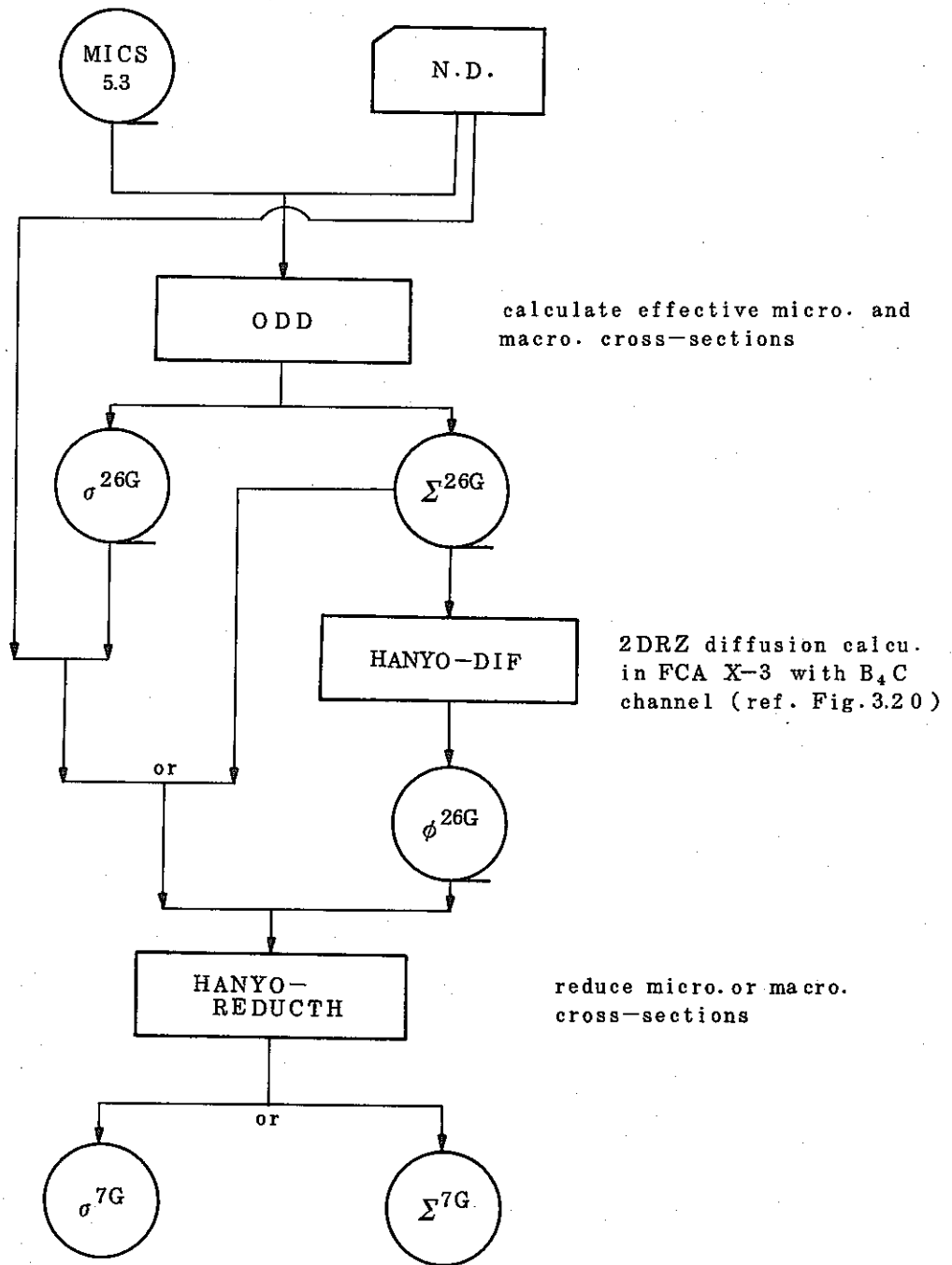
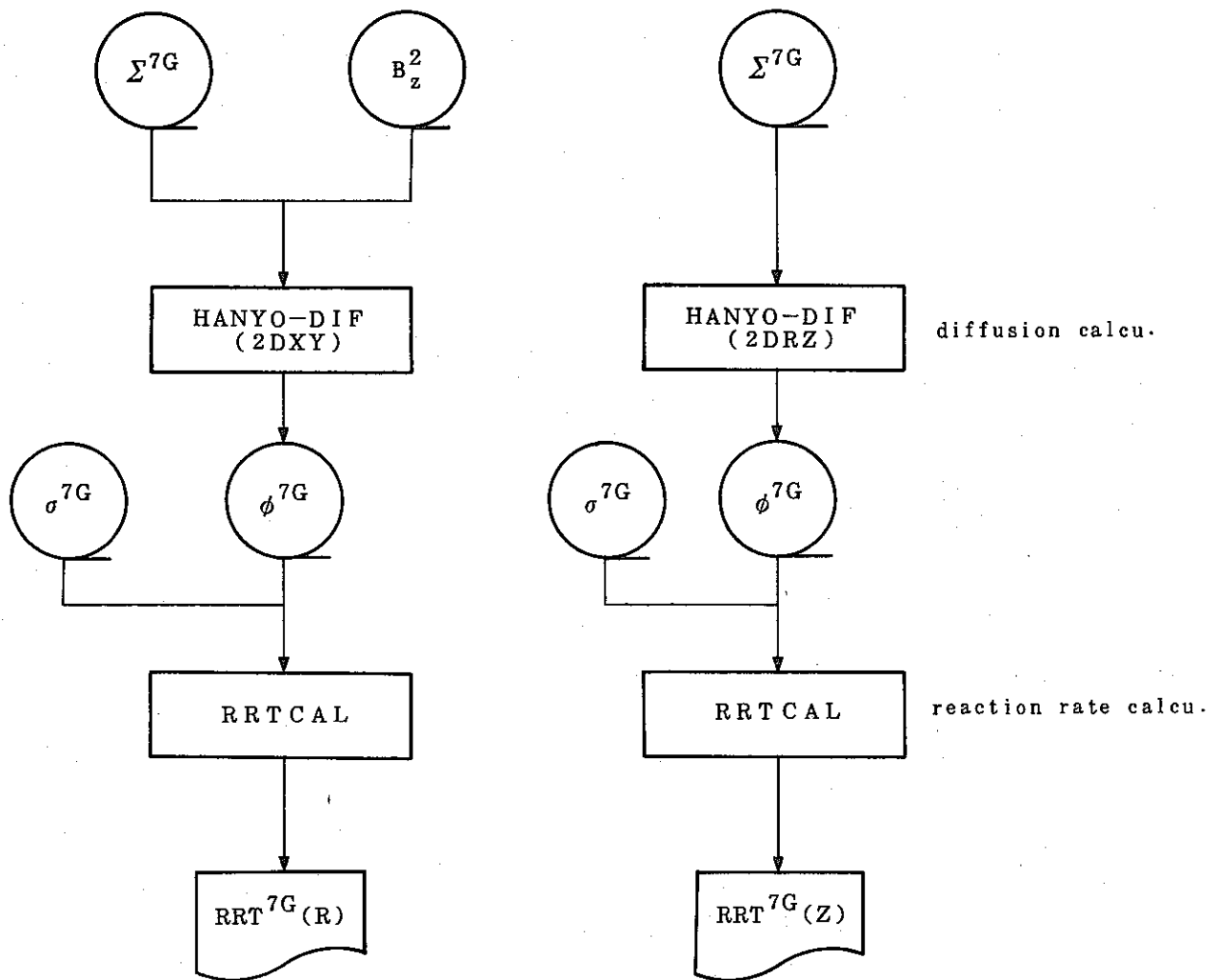


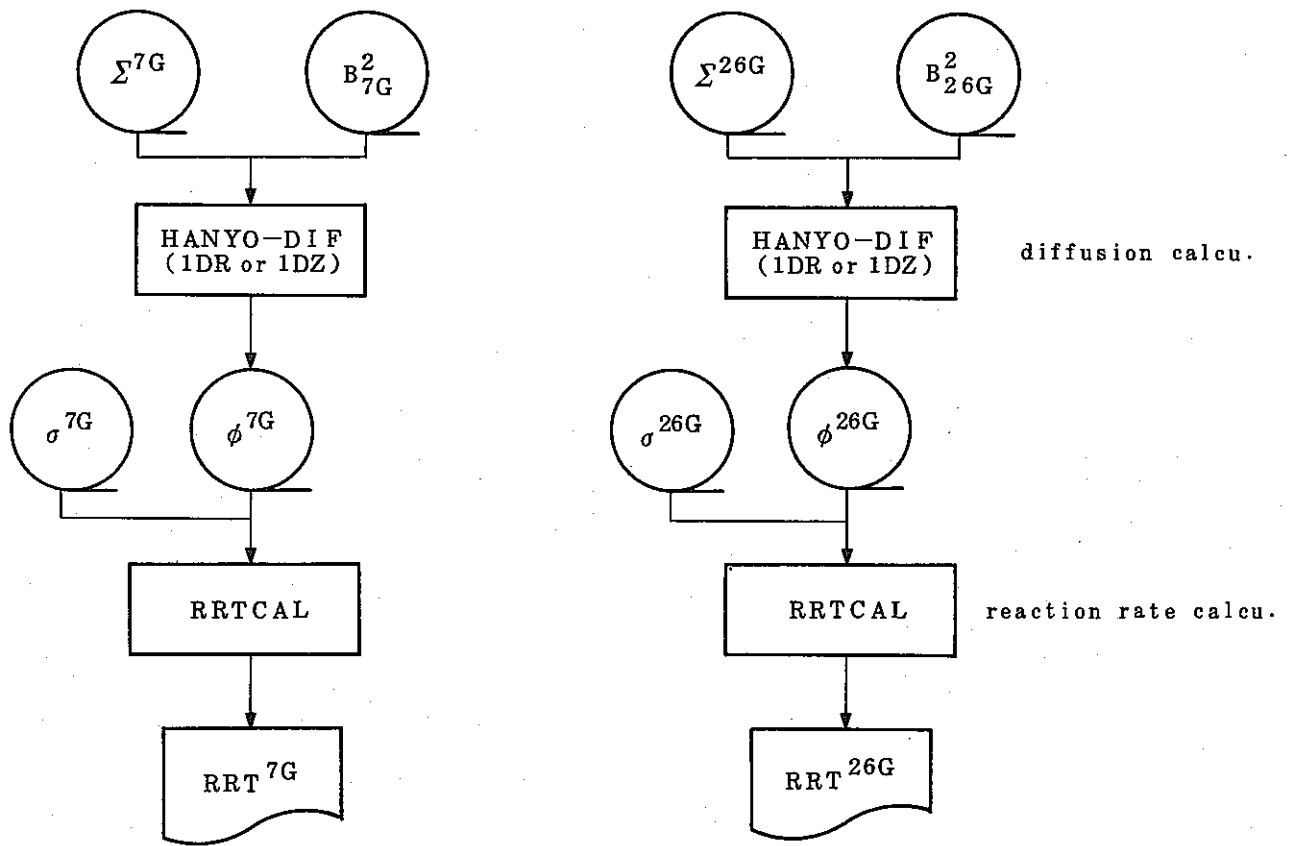
Fig. 3.15 Flow Diagram of Effective Cross-Section Generation (for B₄C Case)



(a) Radial Fission Rate Calc.

(b) Axial Fission Rate Calc.

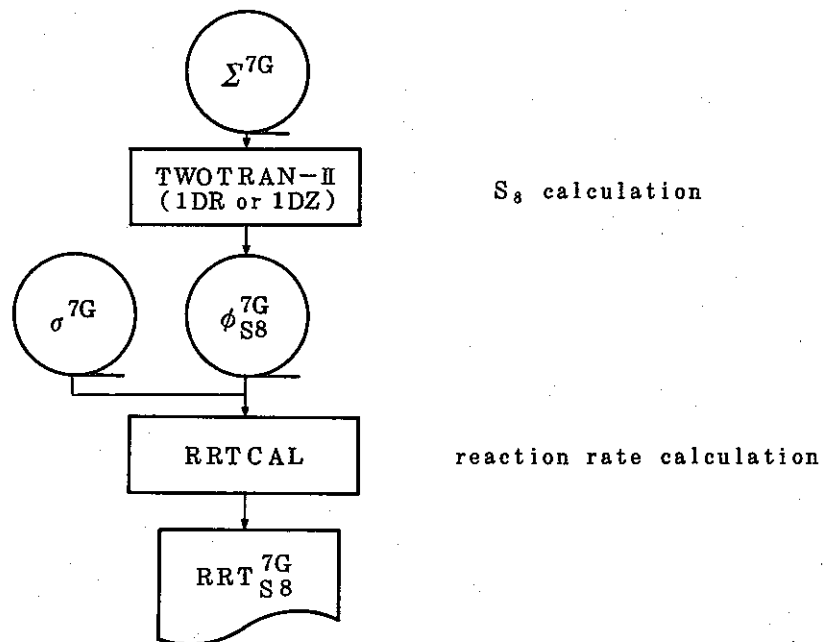
Fig.3.1 6 Flow Diagram of Fission Rate Calculation



(i) 7 Group Calcu.

(ii) 26 Group Calcu.

(a) Calculation of Group Reduction Effect



(b) S_N Calculation

Fig.3.17 Flow Diagram of Group Reduction and S_N Effect Calculation

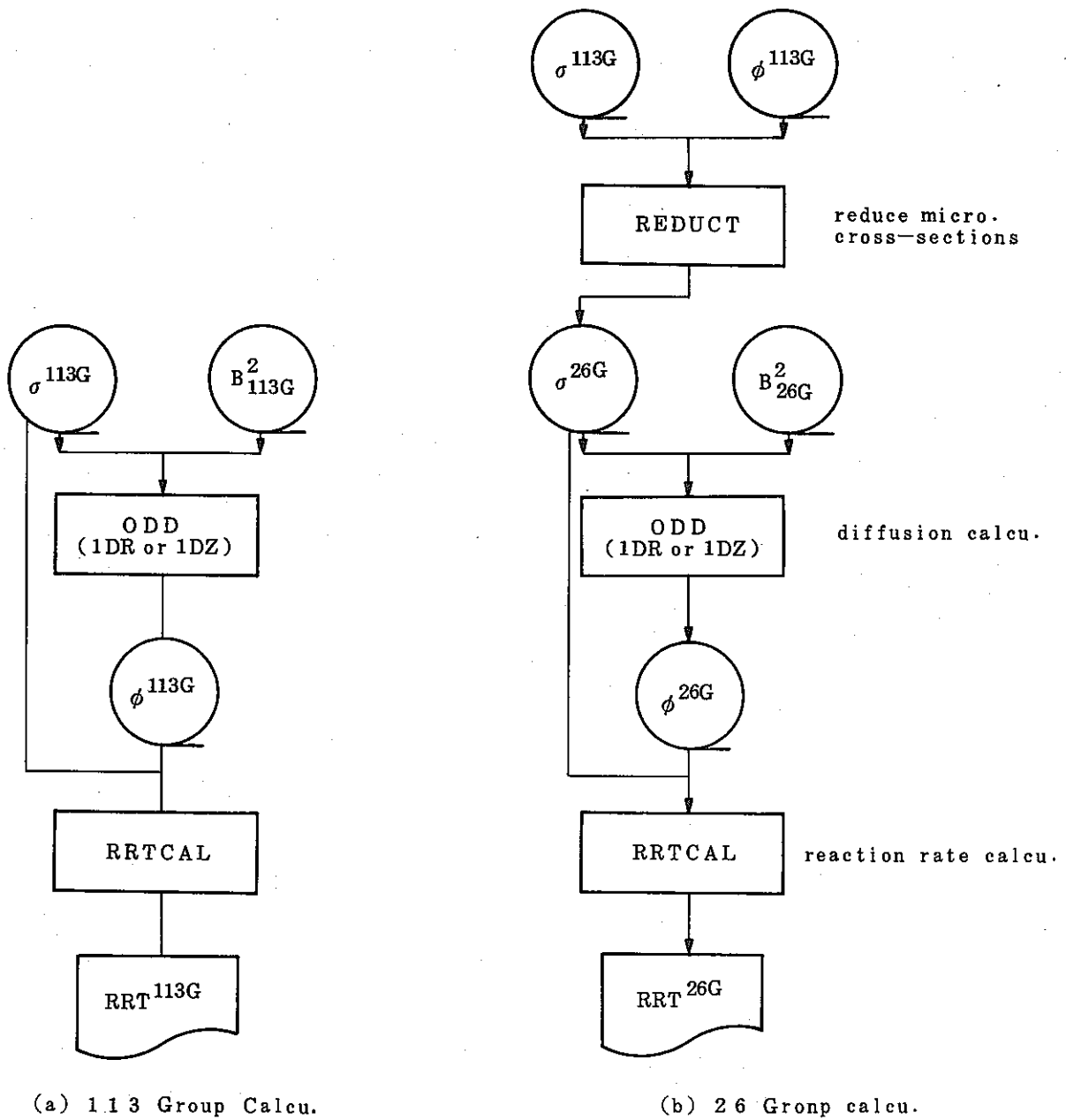



Fig.3.18 Flow Diagram of Fe-Resonance Effect Calculation

Mark Information

① : Region No. 1

Model Mark	Reference	Na	others
①	Fuel	Na	②~⑥ : core fuel ⑦~⑨ : radial reflector ⑩, ⑪ : SUS block
	Reflector	Fuel	⑫ : empty matrix ⑬ : control rod position

Y-Axis Mesh (cm) No.

Reaction Rate Traverse

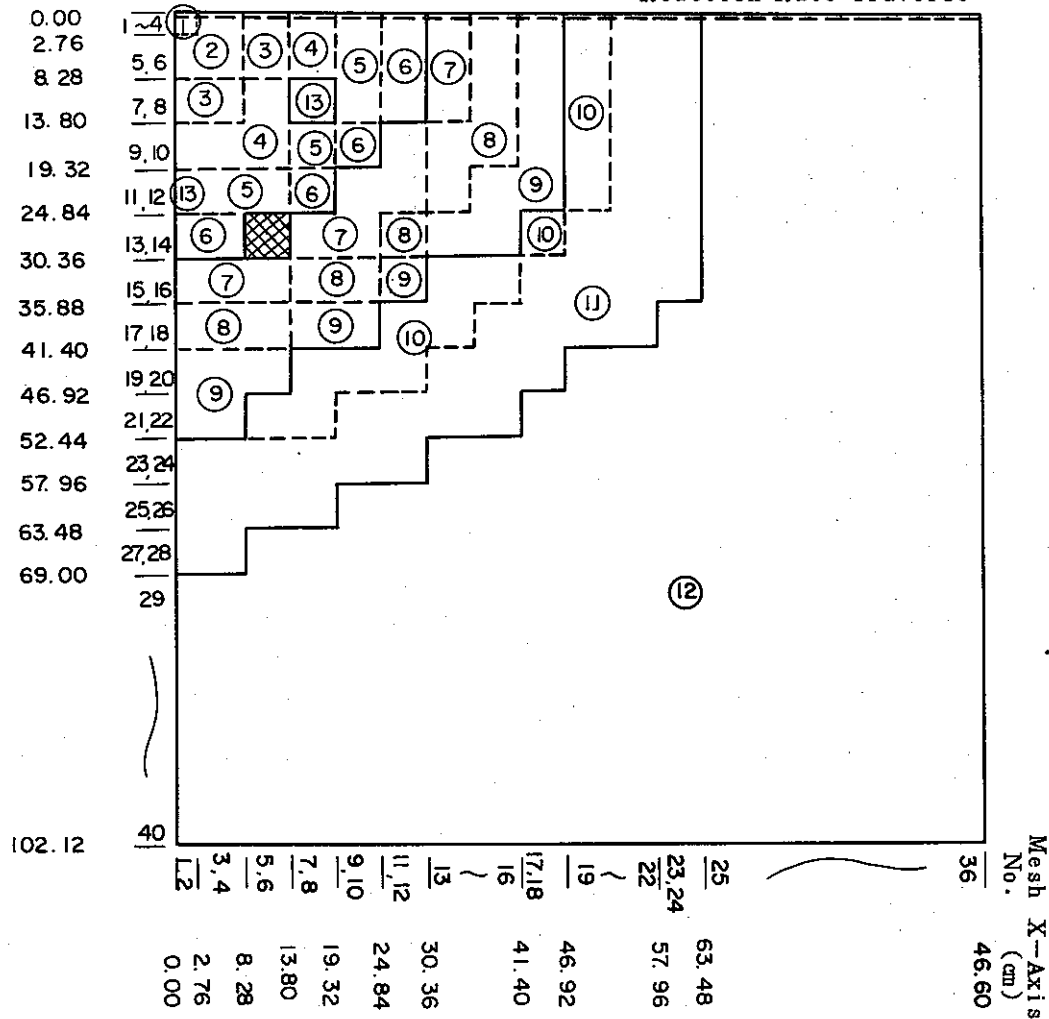


Fig.3.1 9 $\frac{1}{4}$ XY Model of FCAX-3
(for Radial Fission Rate Calculation)

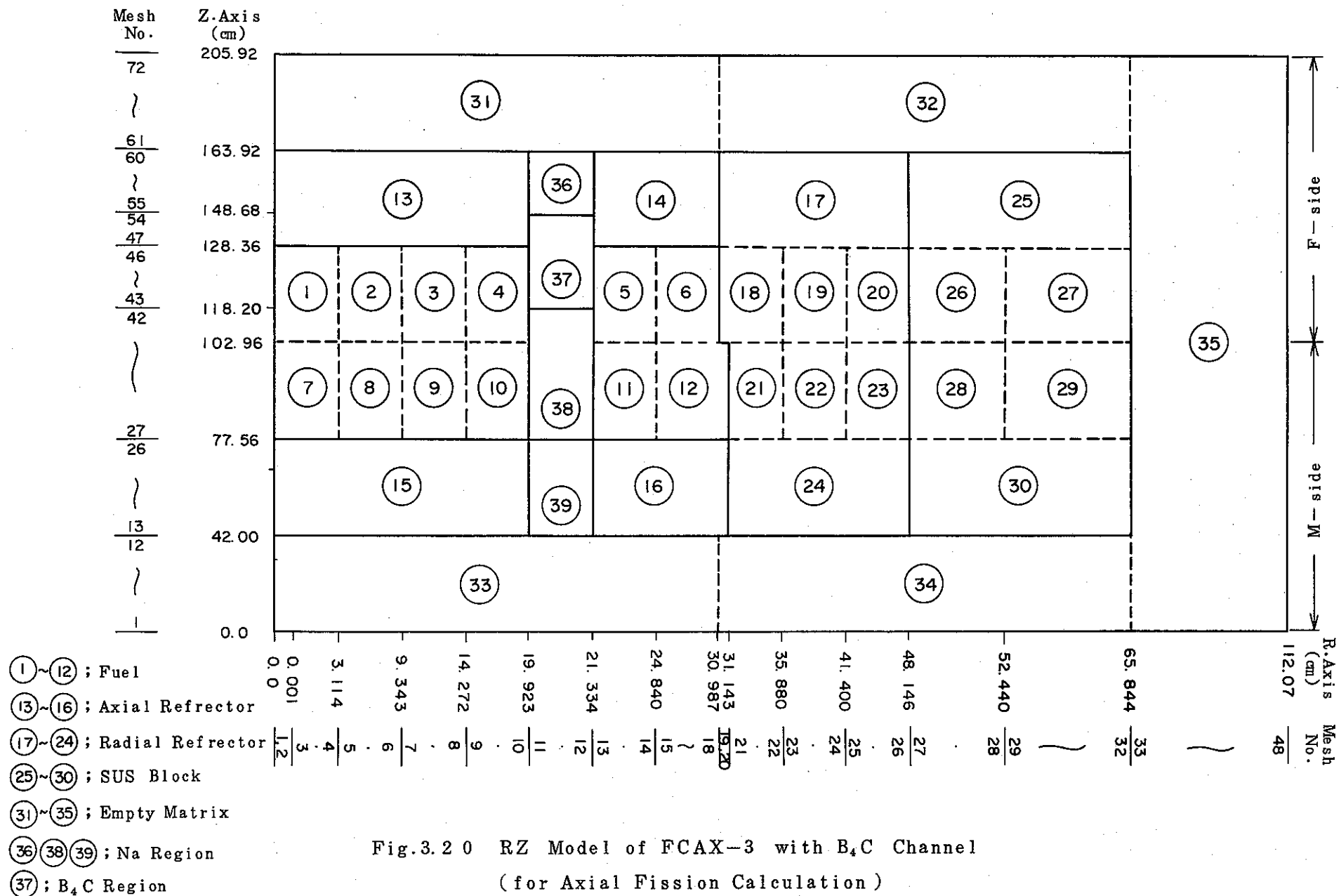
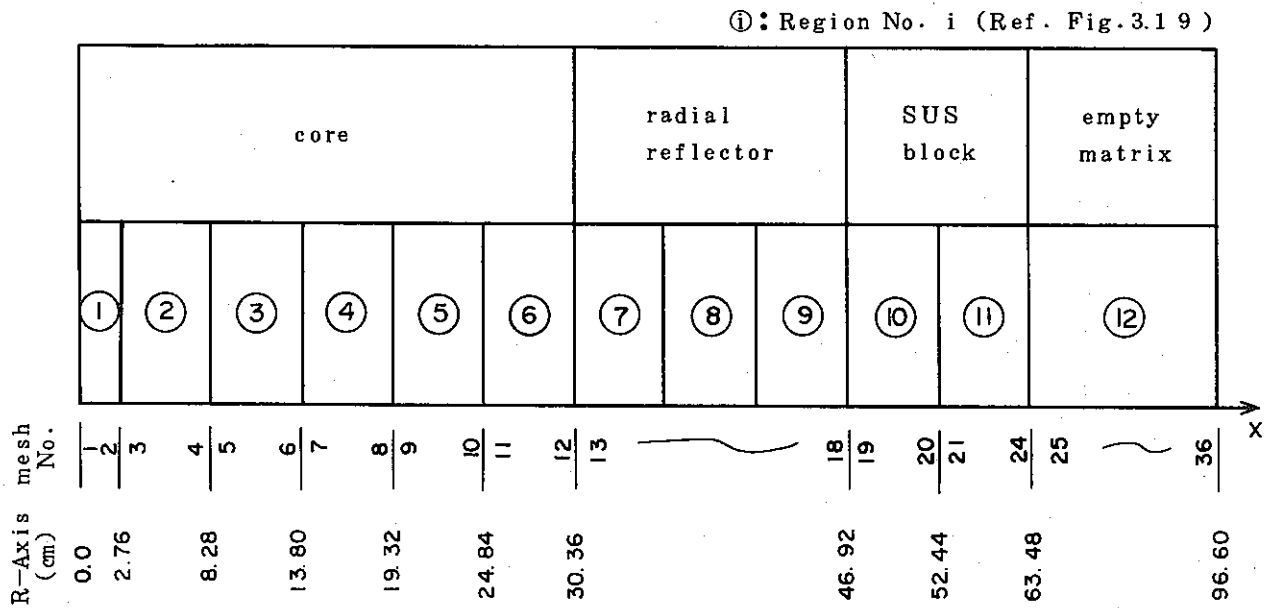
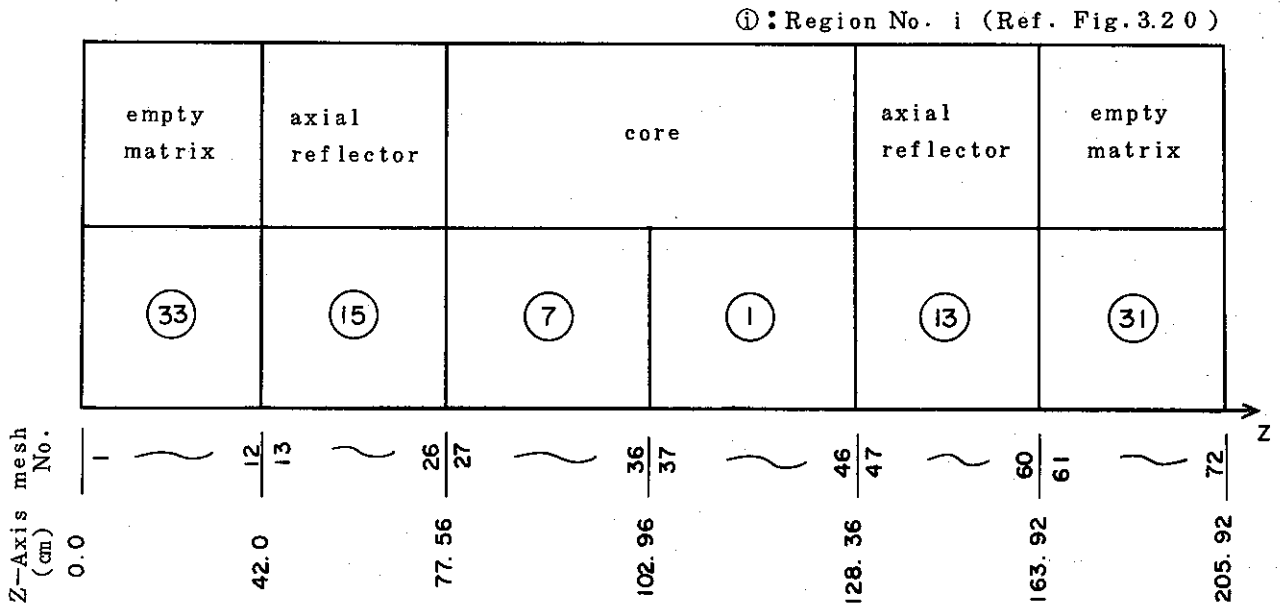


Fig.3.20 RZ Model of FCAX-3 with B₄C Channel
(for Axial Fission Calculation)



(a) X-Model for Radial Fission Rate Calculation



(b) Z-Model for Axial Fission Rate Calculation

Fig. 3.21 1-D Model for Correction Calculations

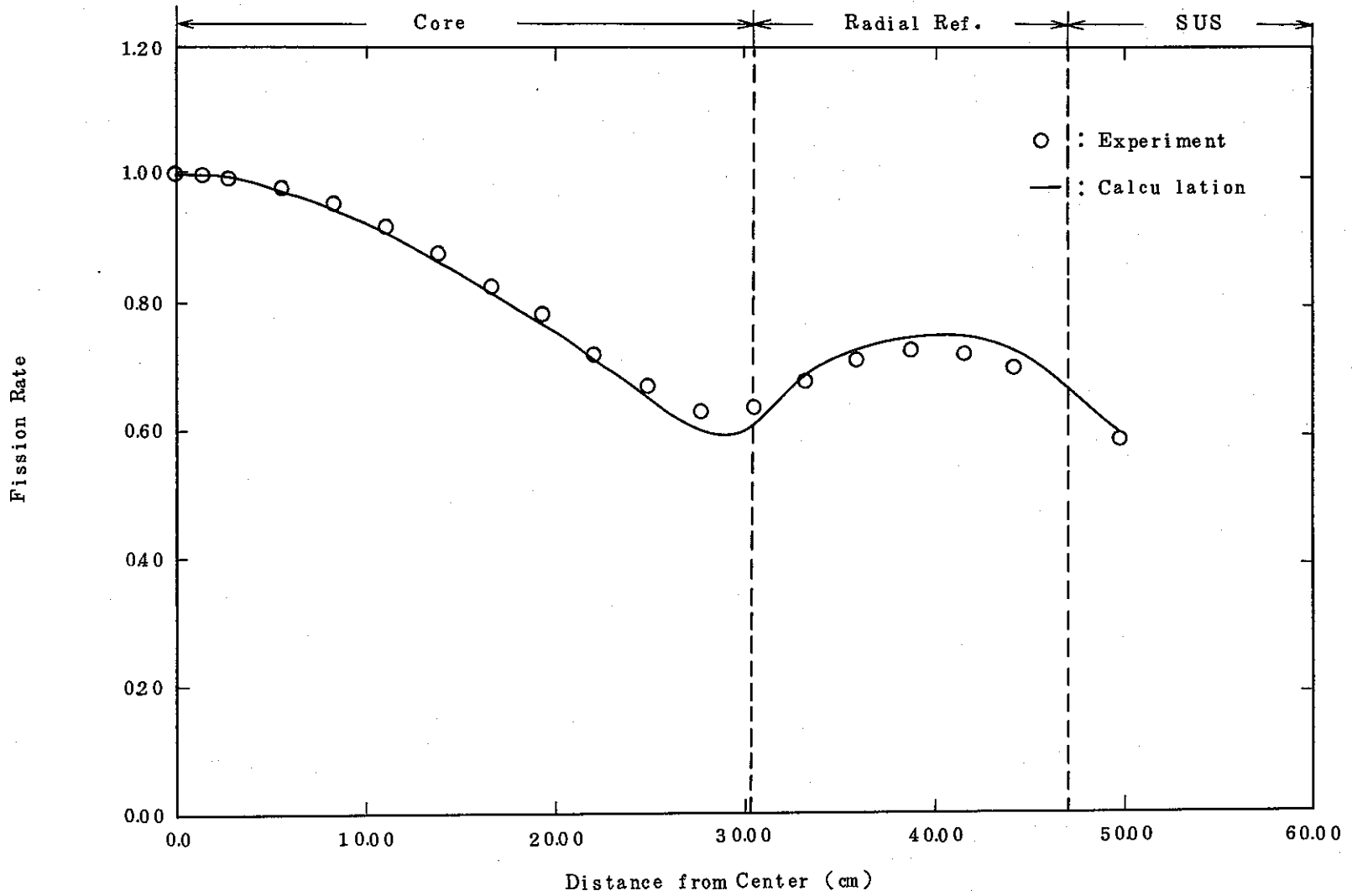


Fig. 3.2 2 Radial Fission Rate Distribution of Pu²³⁹ in FCA X-3
Reference Core

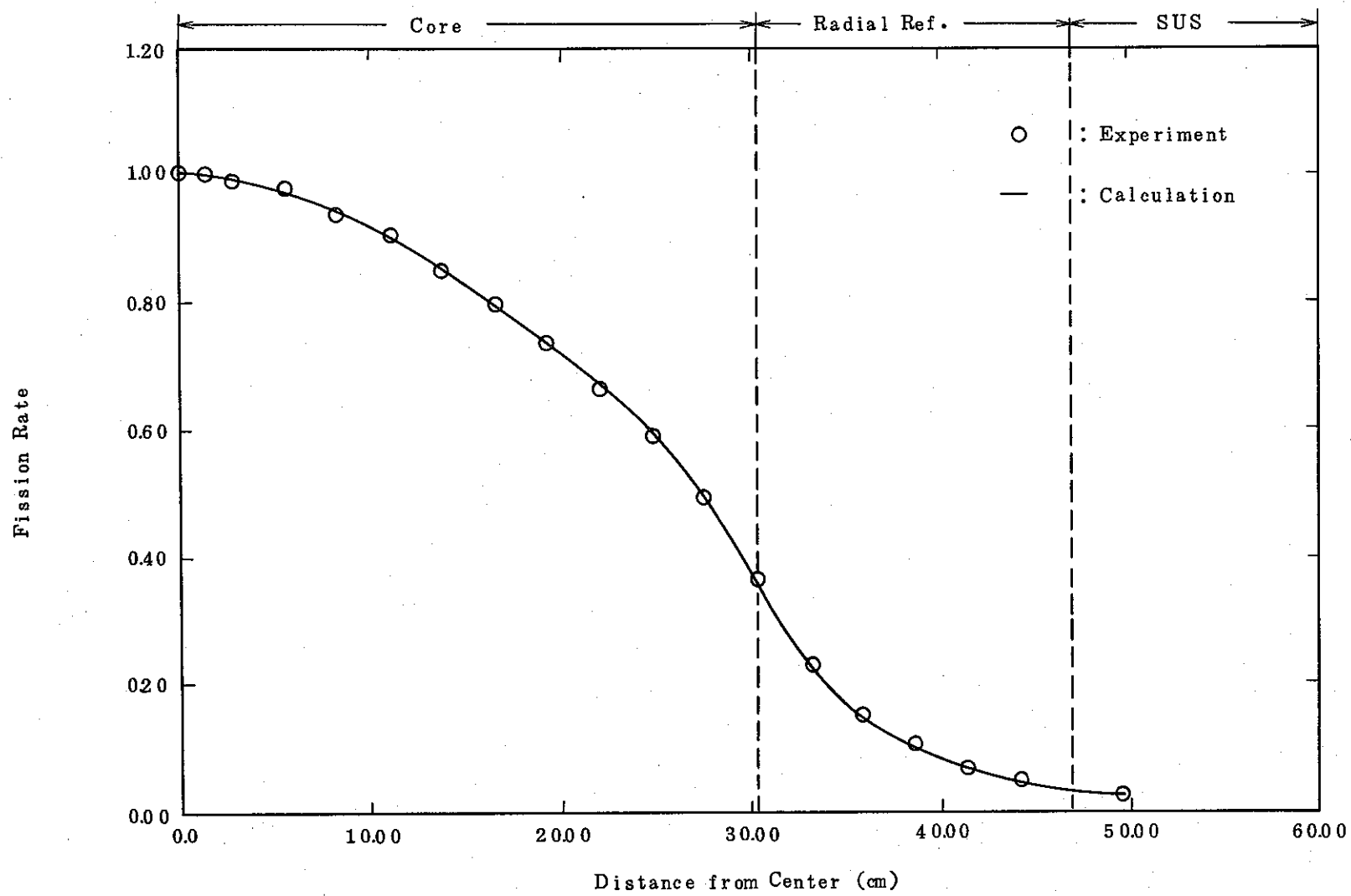


Fig.3.2.3 Radial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 Reference Core

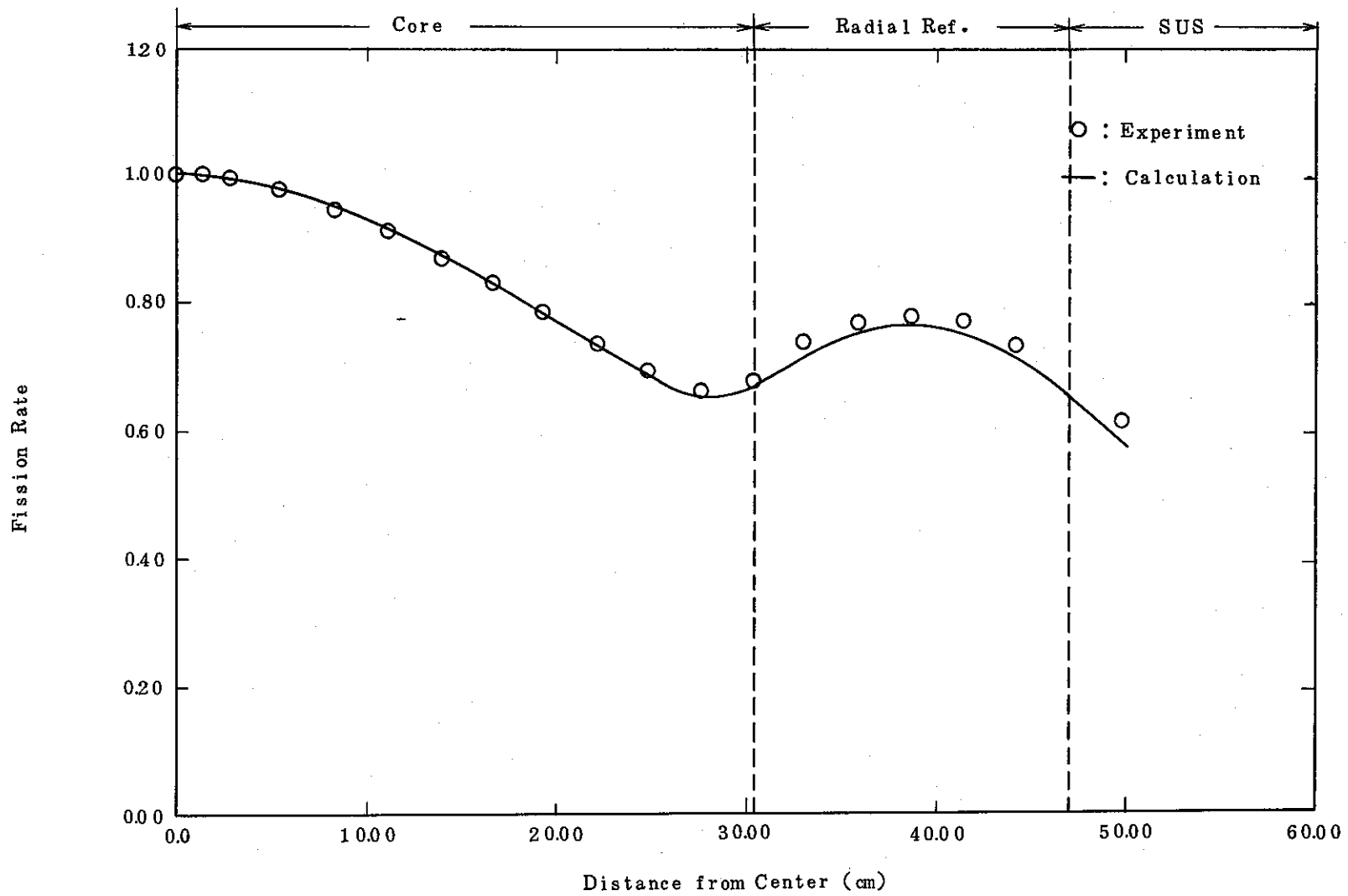


Fig.3.2 4 Radial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 Reference Core

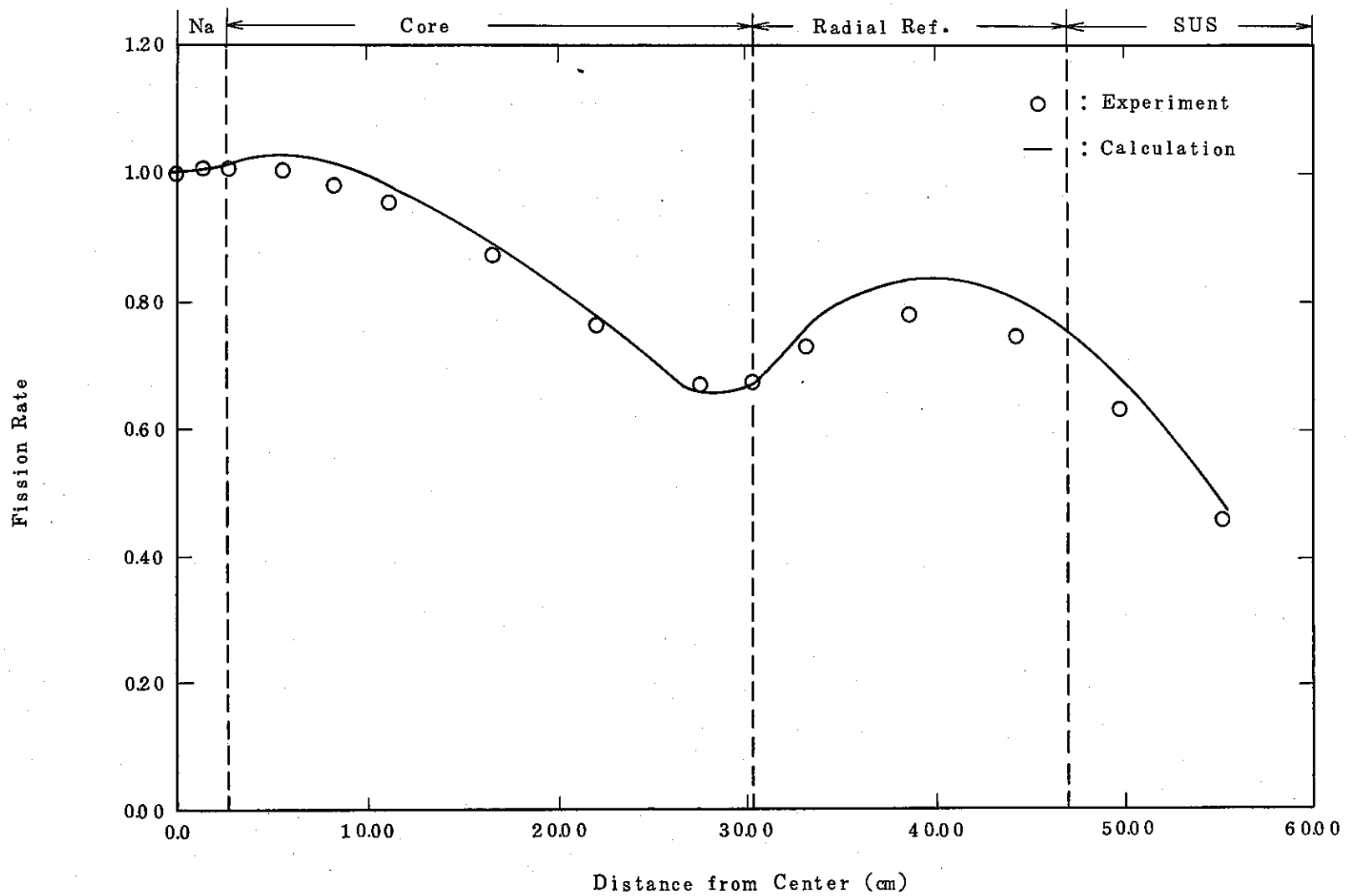


Fig.3.25 Radial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 with Central Na Channel

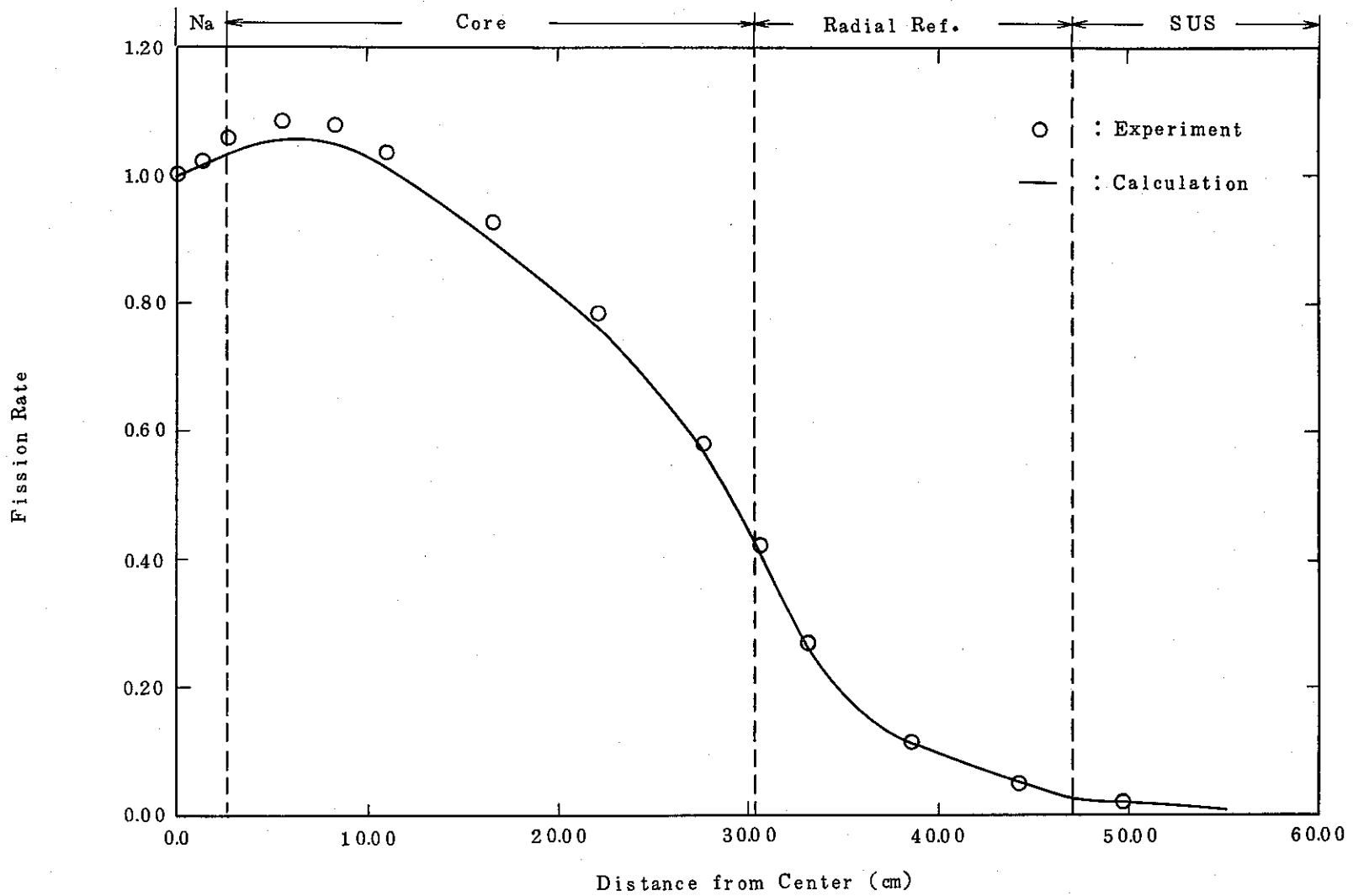


Fig.3.2 6 Radial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 with Central Na Channel

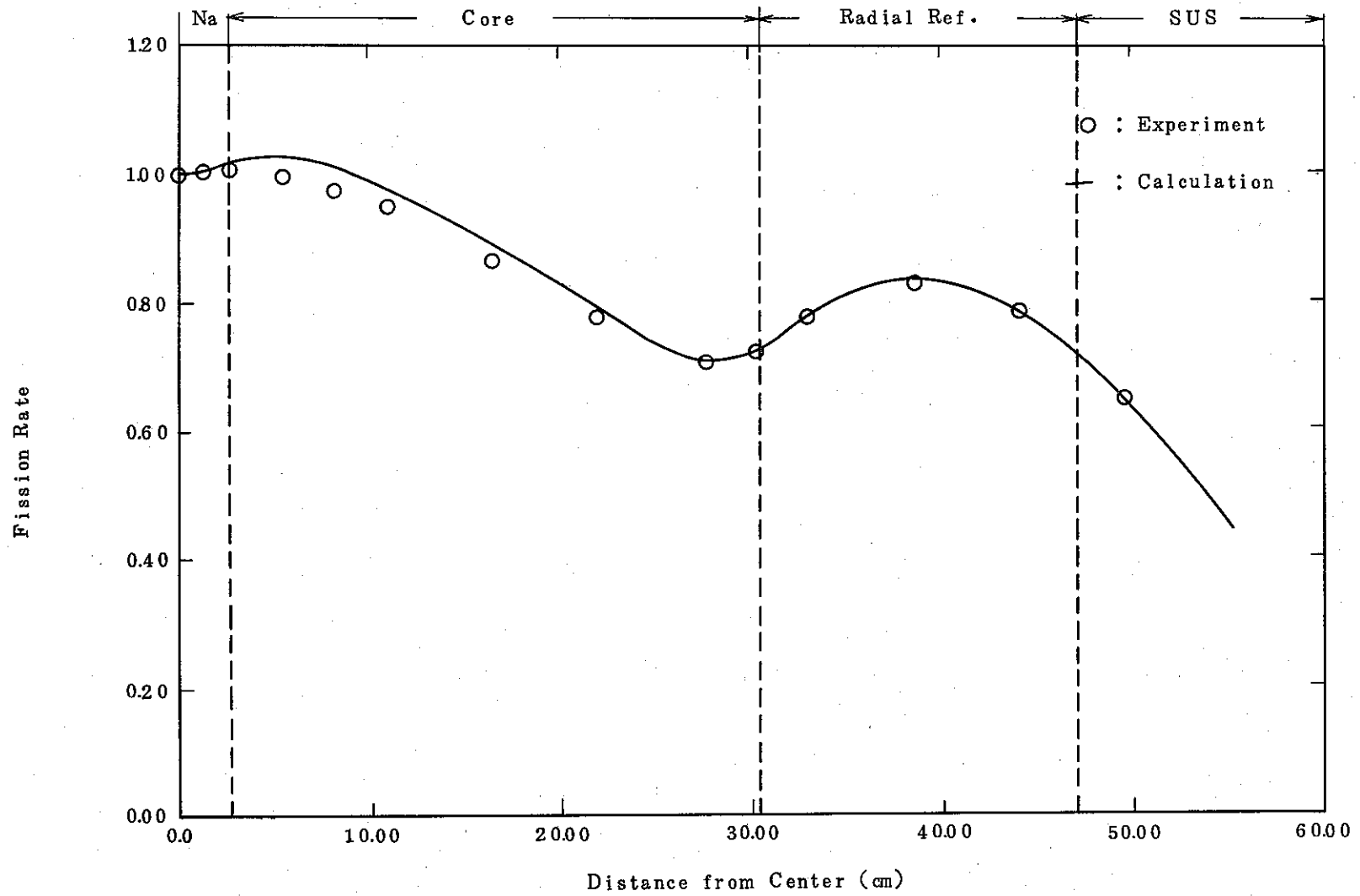


Fig.3.27 Radial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3
with Central Na Channel

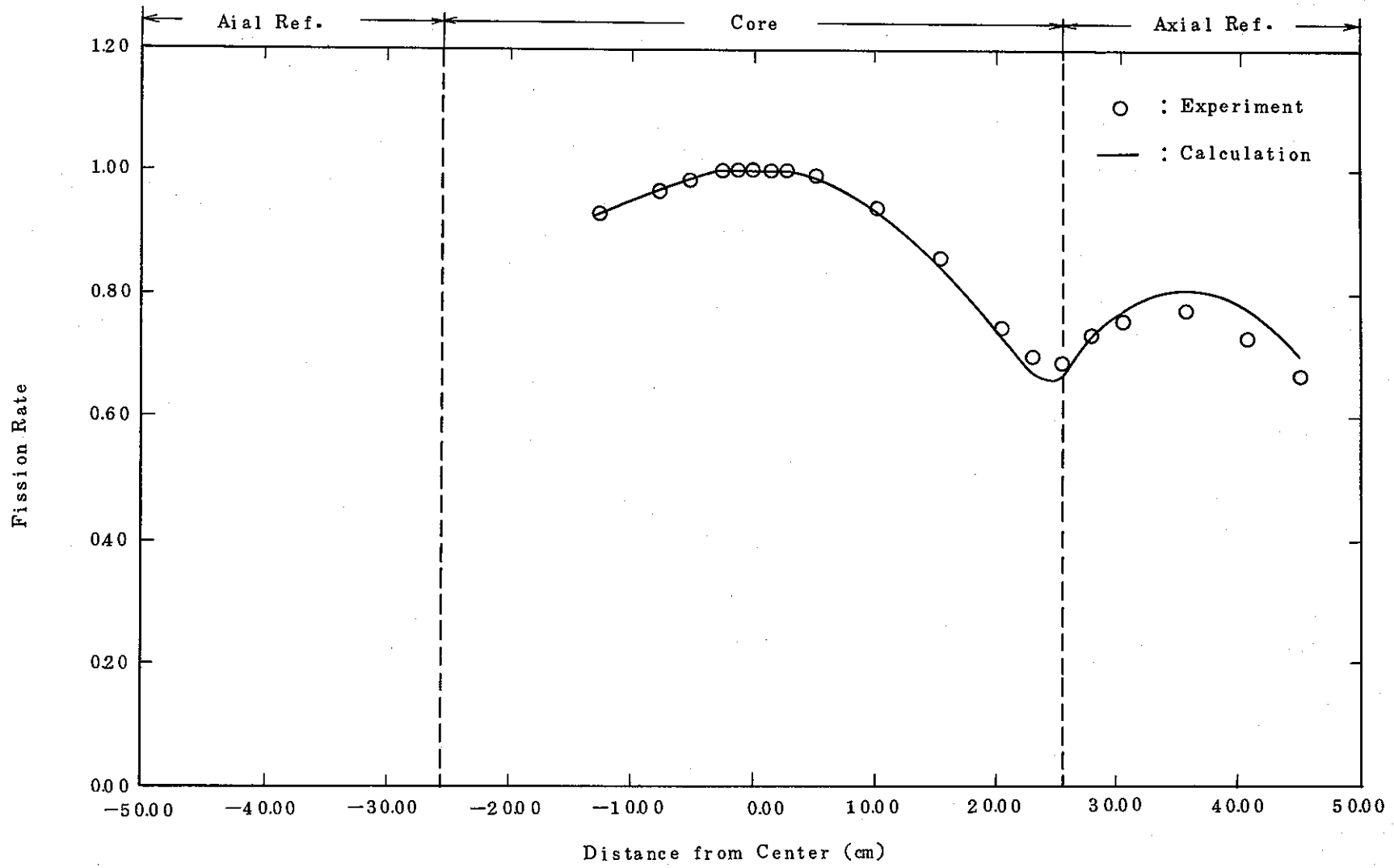


Fig.3.2 8 Axial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 Reference Core

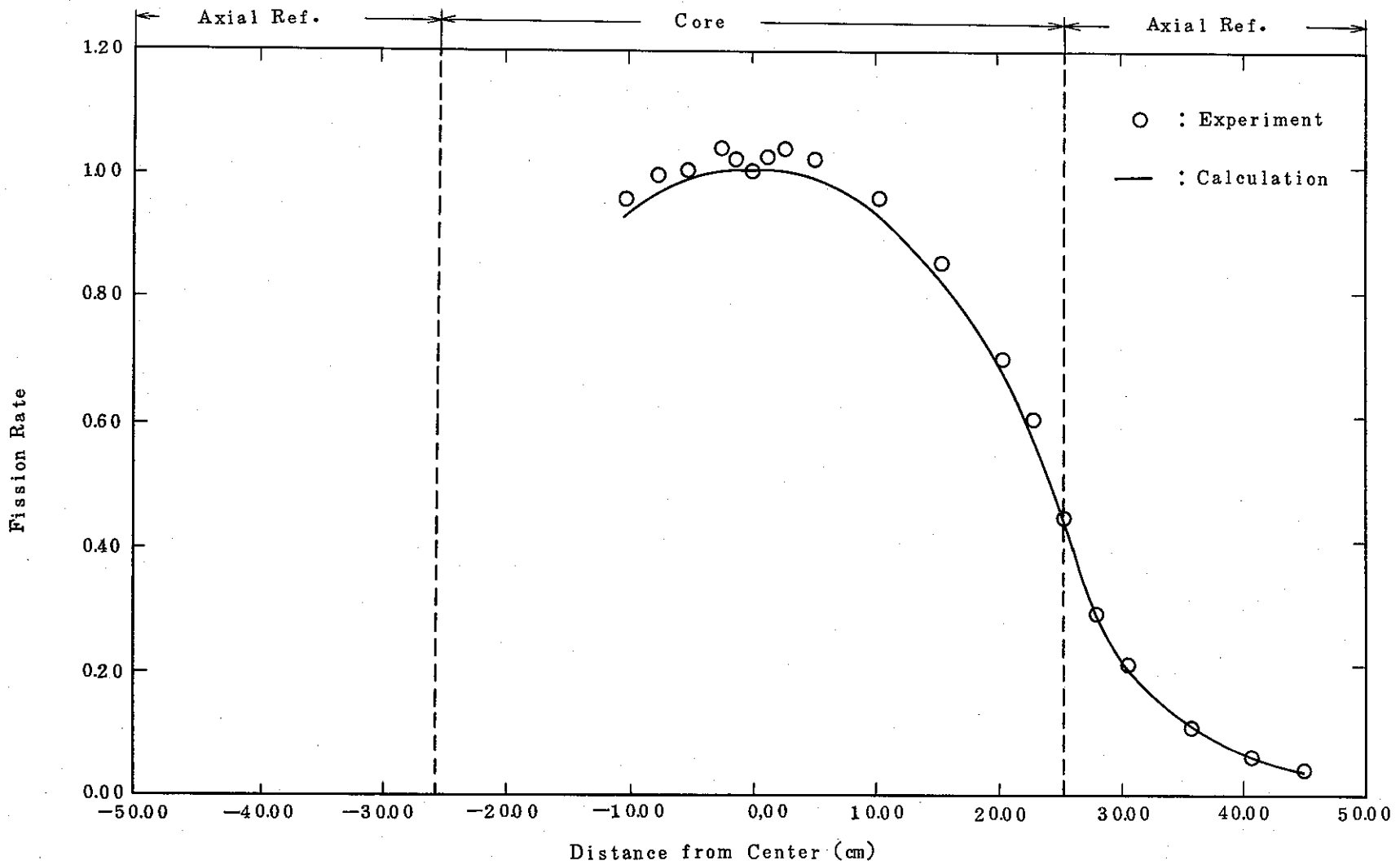


Fig.3.2 9 Axial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 Reference Core

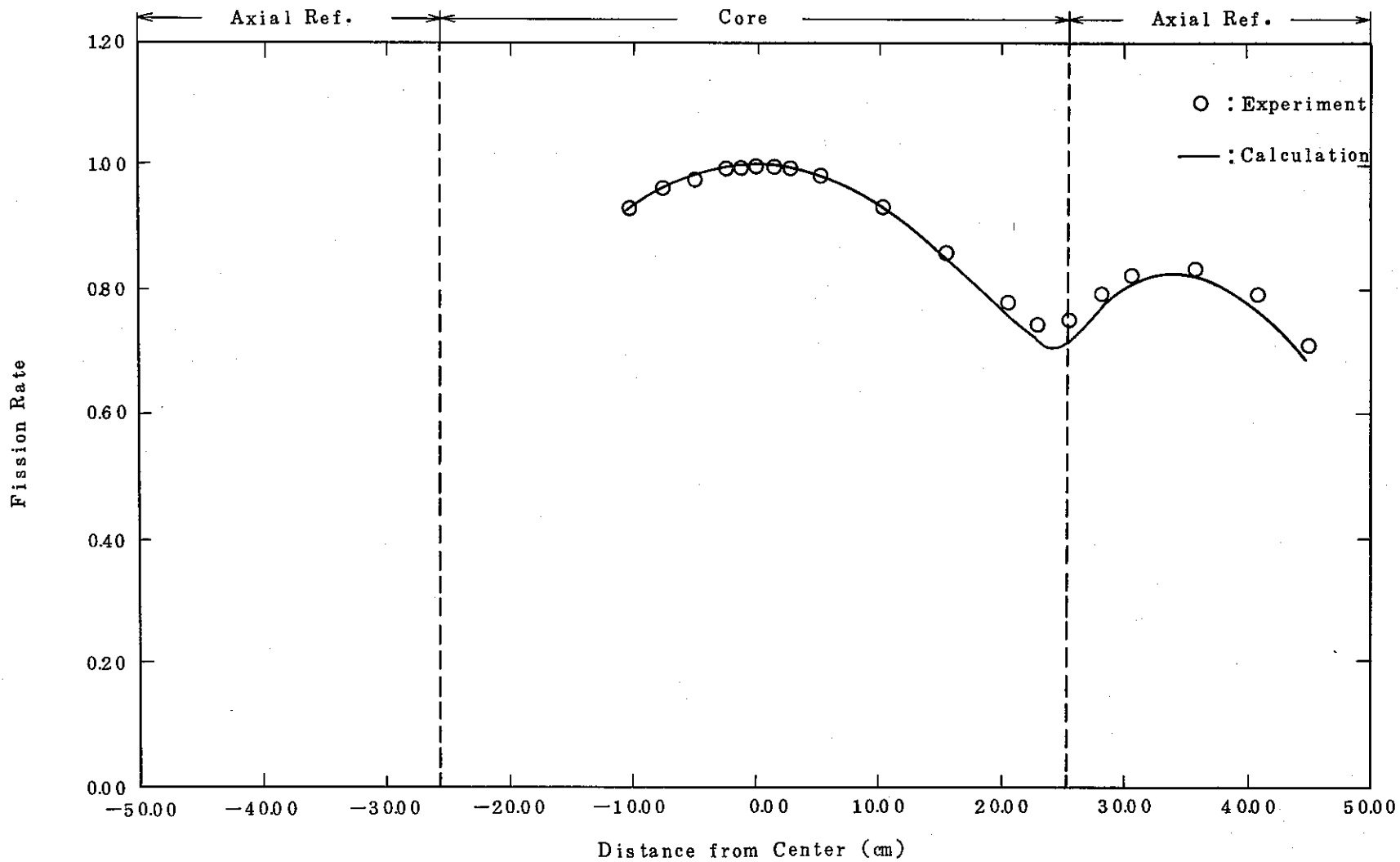


Fig.3.3 0 Axial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3
Reference Core

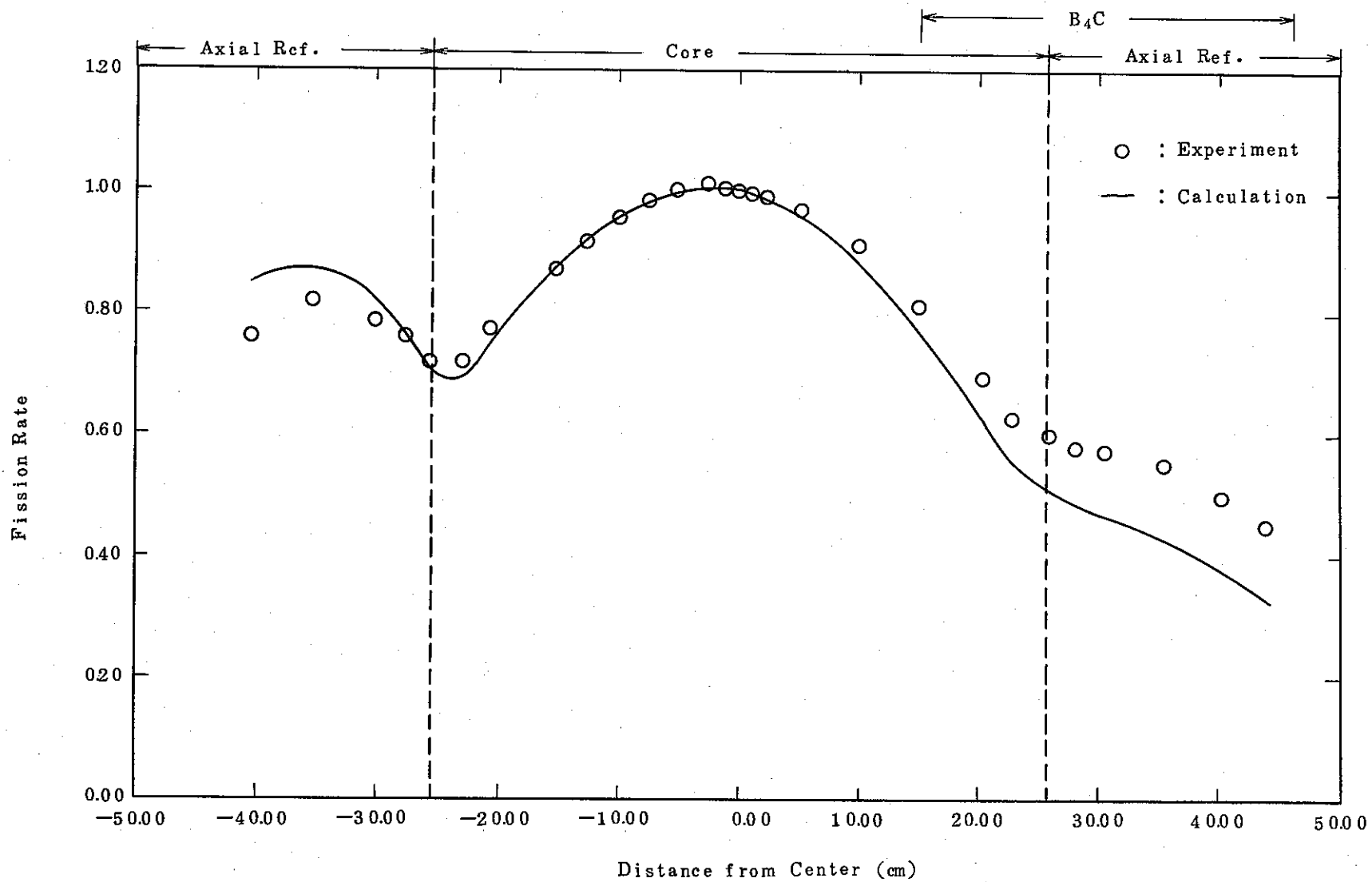


Fig.3.31 Axial Fission Rate Distribution of Pu^{239} in FCA X-3 with B_4C Channel

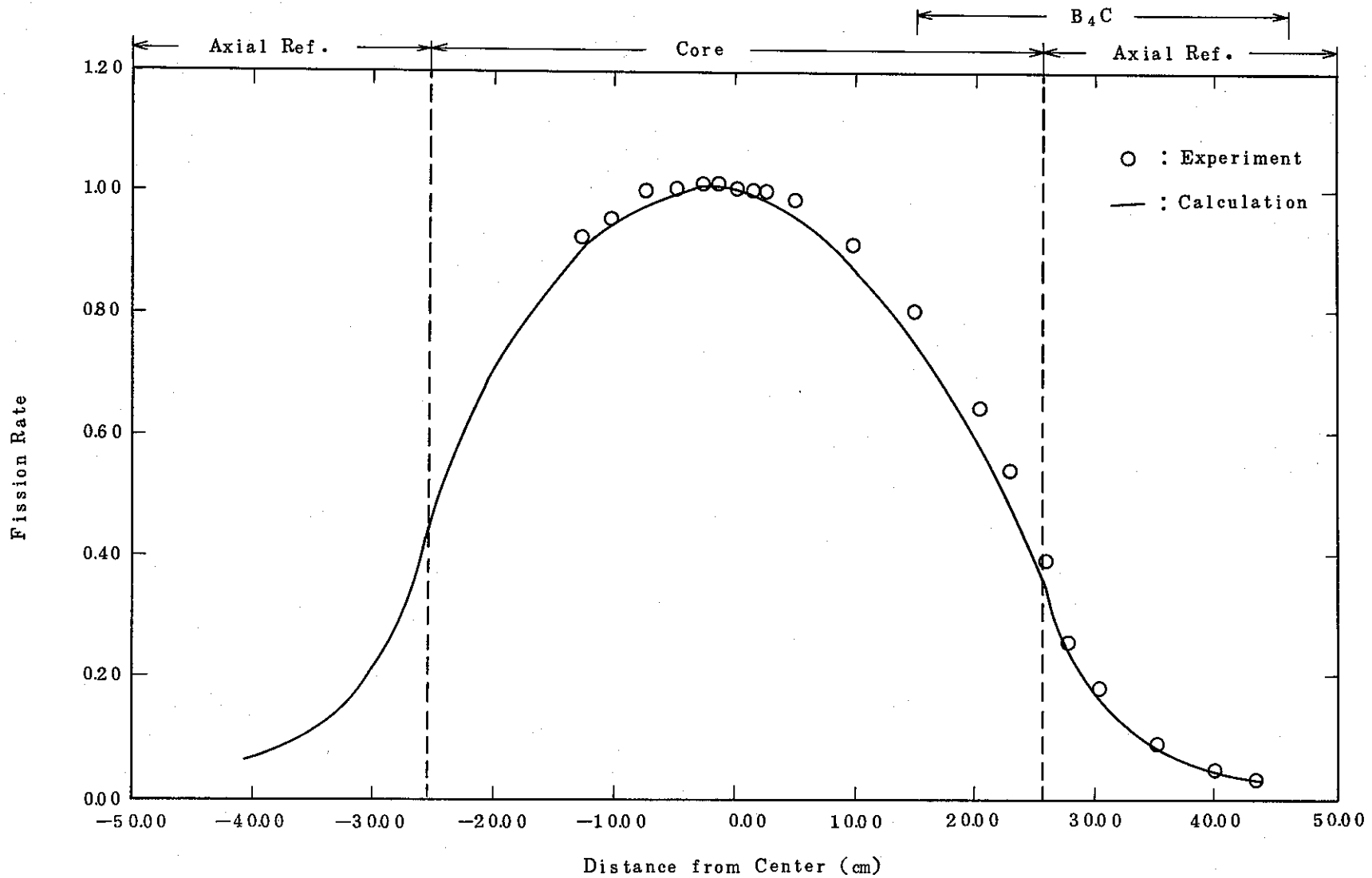


Fig.3.3 2 Axial Fission Rate Distribution of U^{238} in FCA X-3 with B_4C Channel

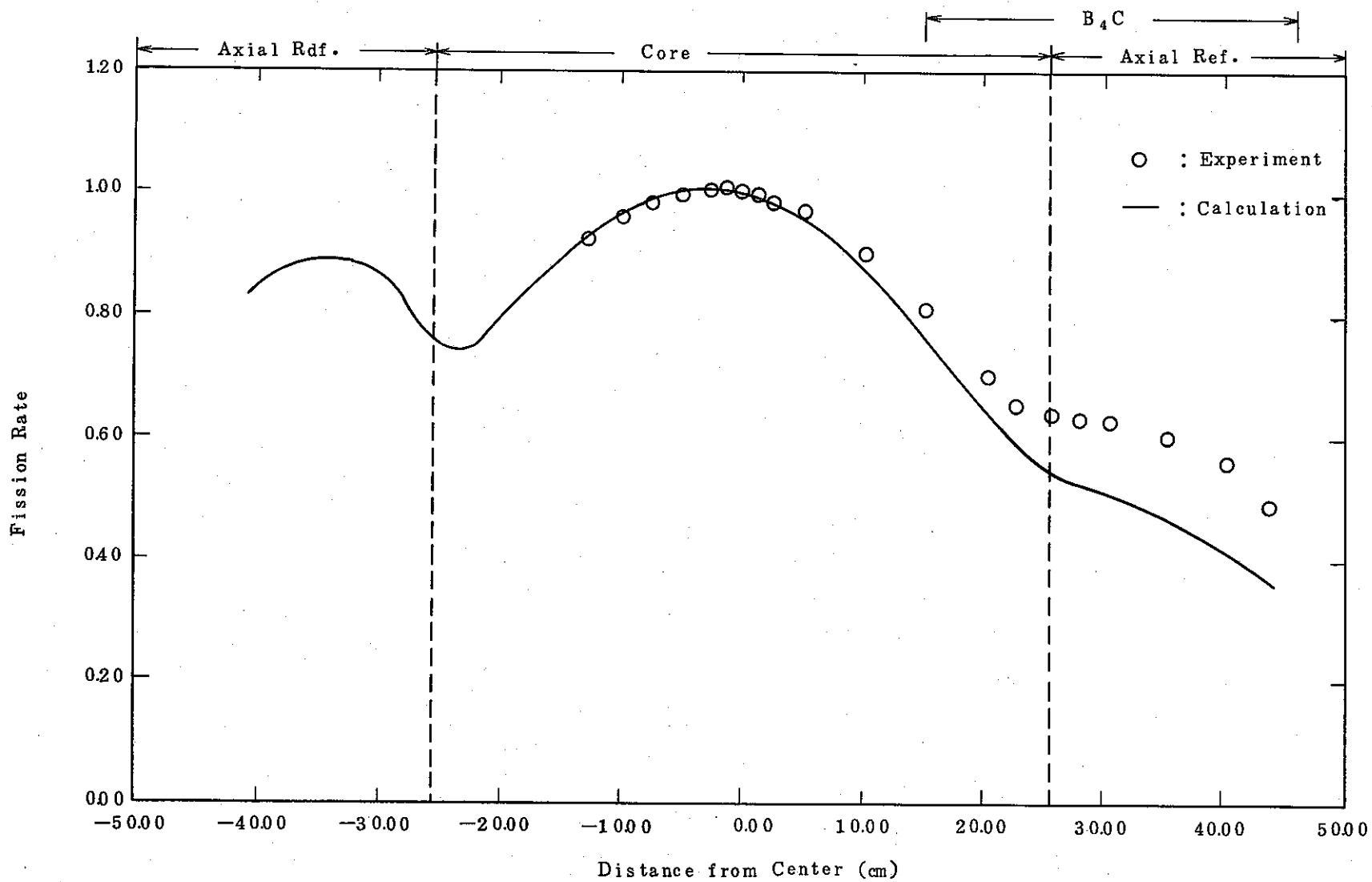
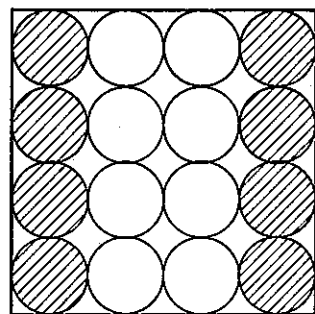
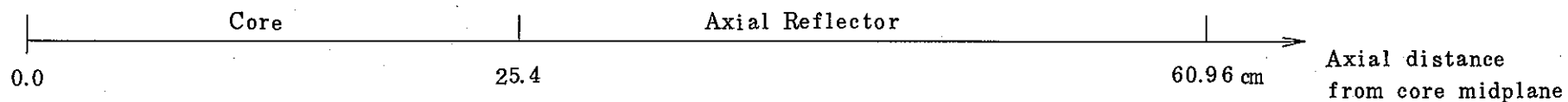
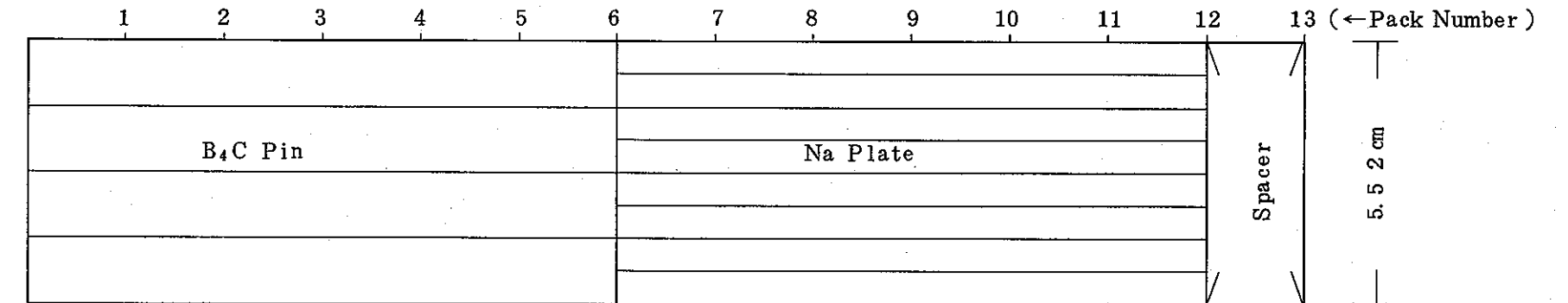
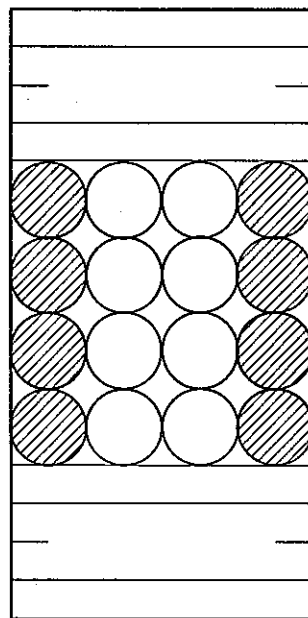


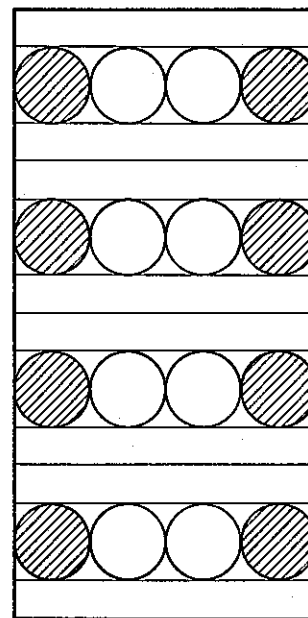
Fig.3.3 3 Axial Fission Rate Distribution of U^{235} in FCA X-3 with B_4C Channel



1 Drawer



2 Drawers



90% Enriched B₄C Pin

Natural B₄C Pin

Fig. 3.3 4 B₄C Drawer for FCA Assembly X-3

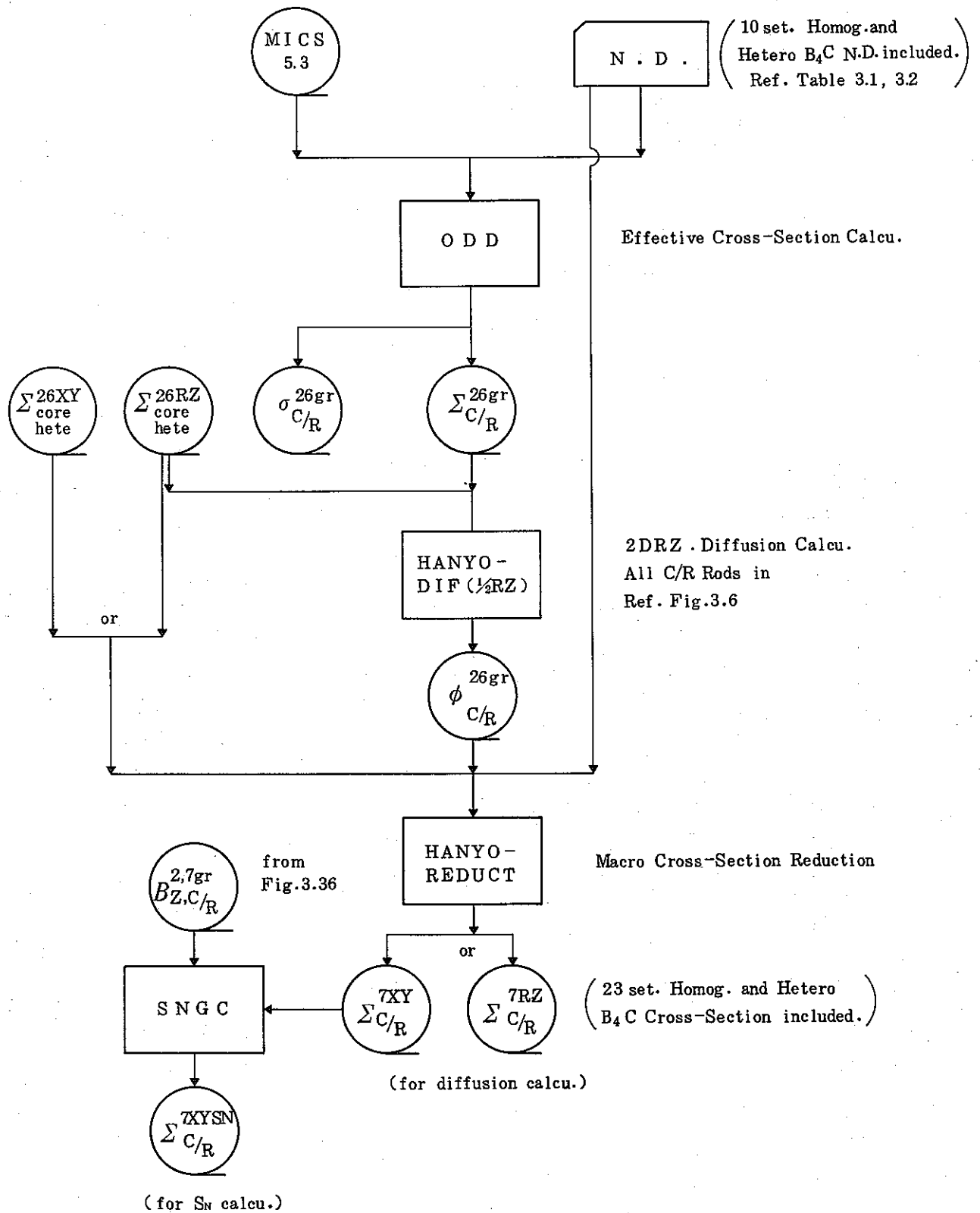


Fig.3.3 5 Flow Diagram of Macro. Cross-Section Generation

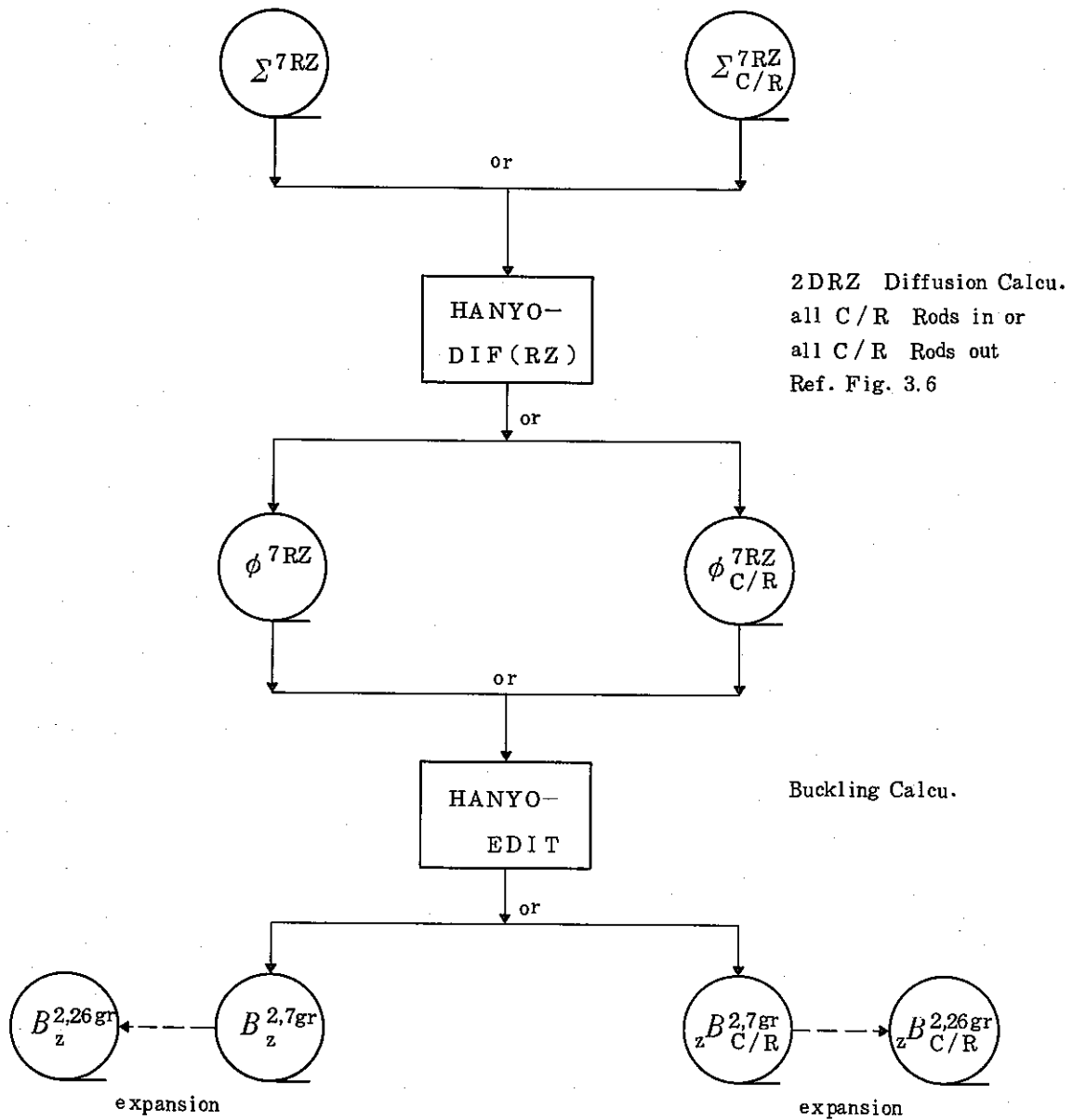
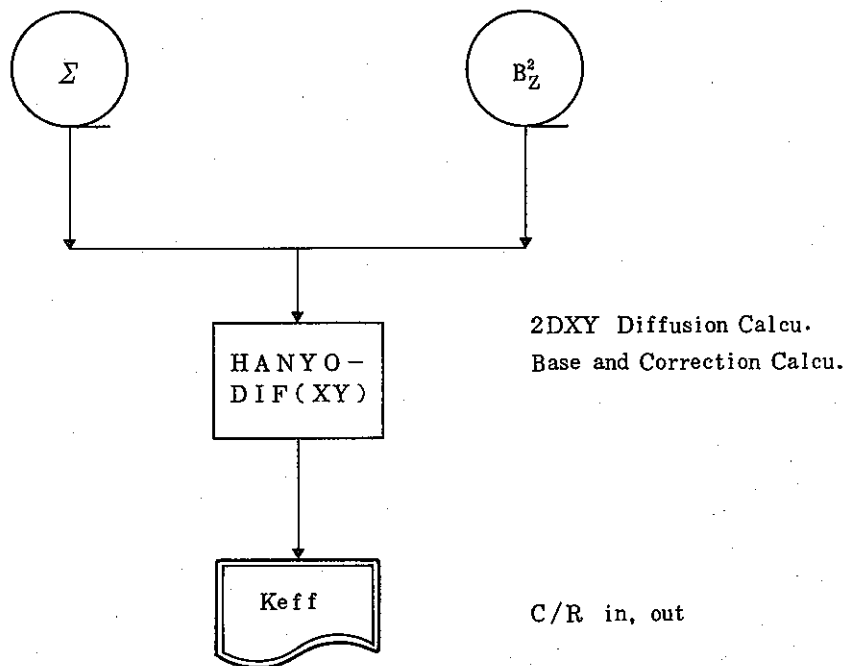
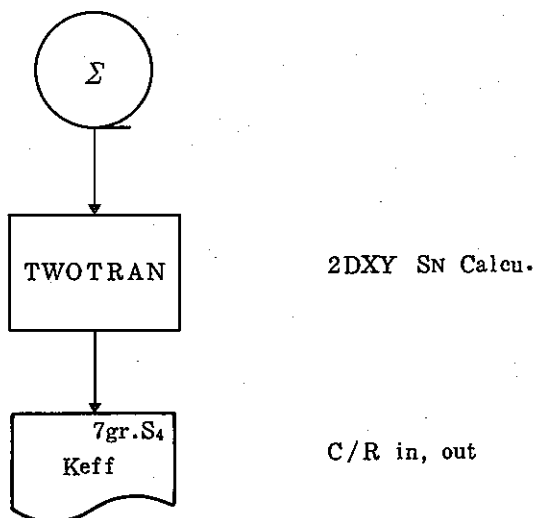


Fig.3.3 6 Flow Diagram of Buckling Generation



(a) Diffusion Calculation



(b) SN Calculation for Correction

Fig.3.37 Flow Diagram of Eigen Value Calculation

- 1 ~ 6 Fuel
- 7 ~ 9 Radial Reflector
- 10 11 SUS Block
- 12 Empty Matrix
- 13 ~ 18 CR or CRP
- 19 ~ 66 Fuel around CR or CRP

Y-Axis Mesh
(cm)

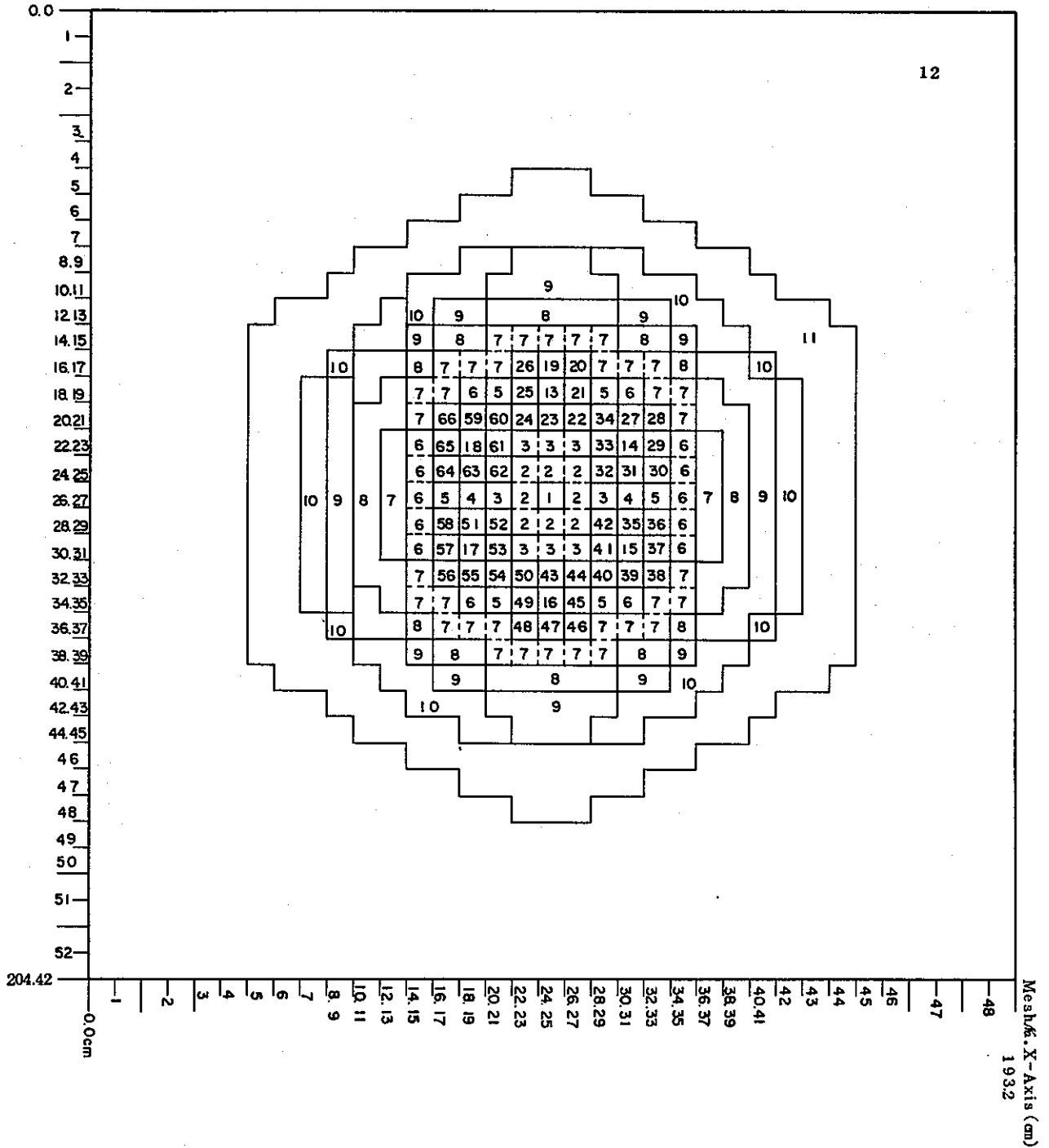


Fig.3.3 8 XY Model of Base Calculation

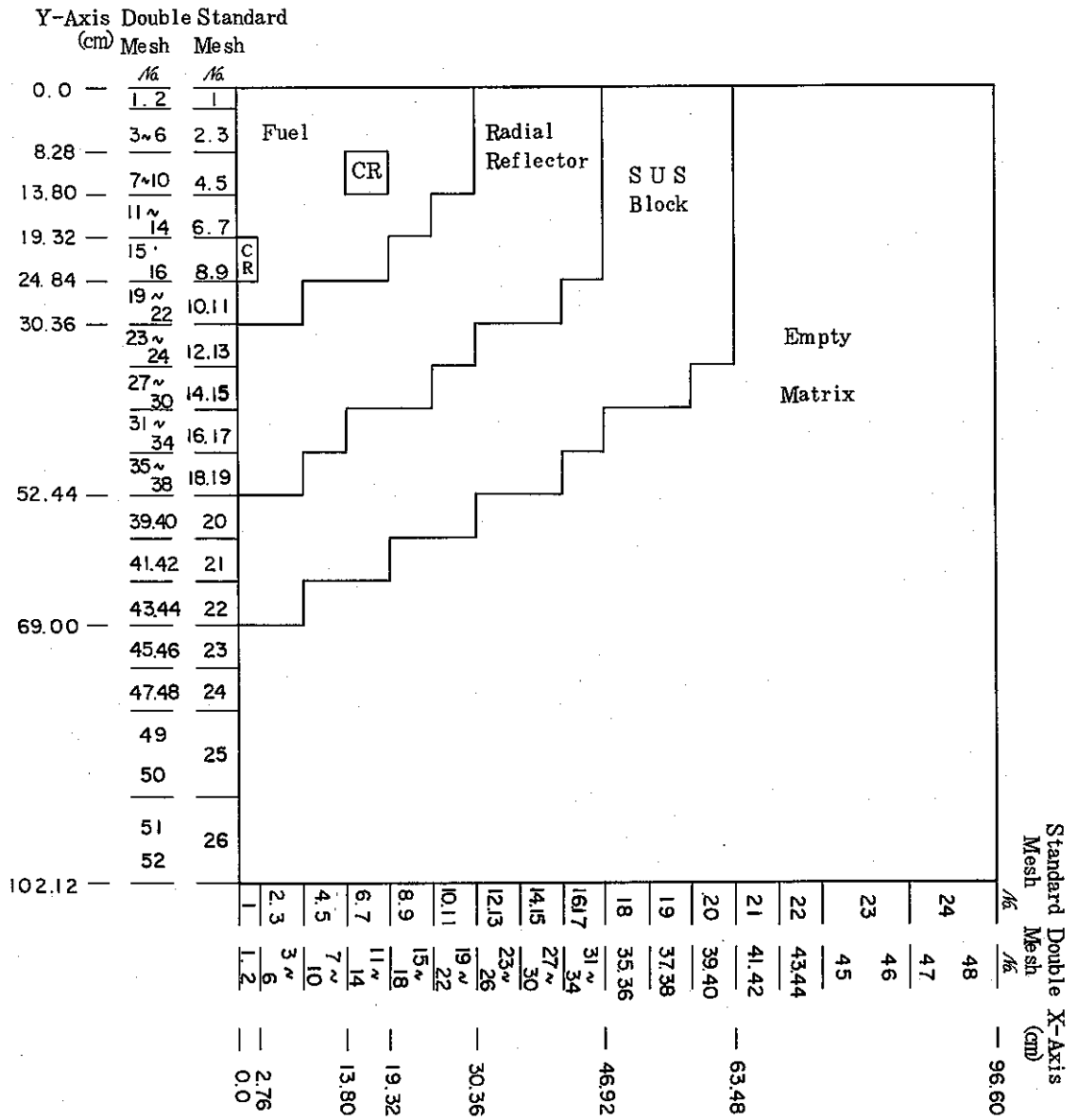
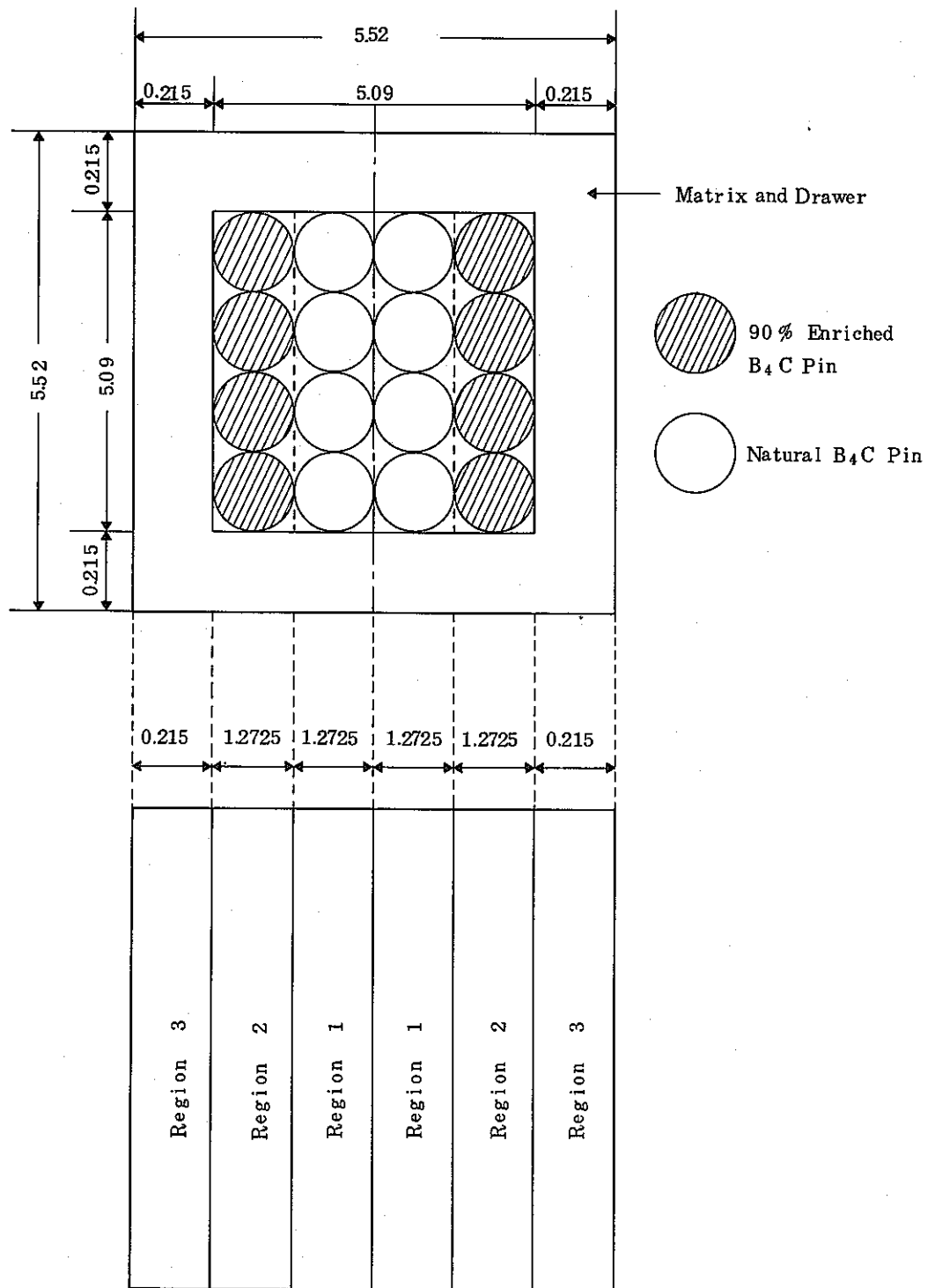
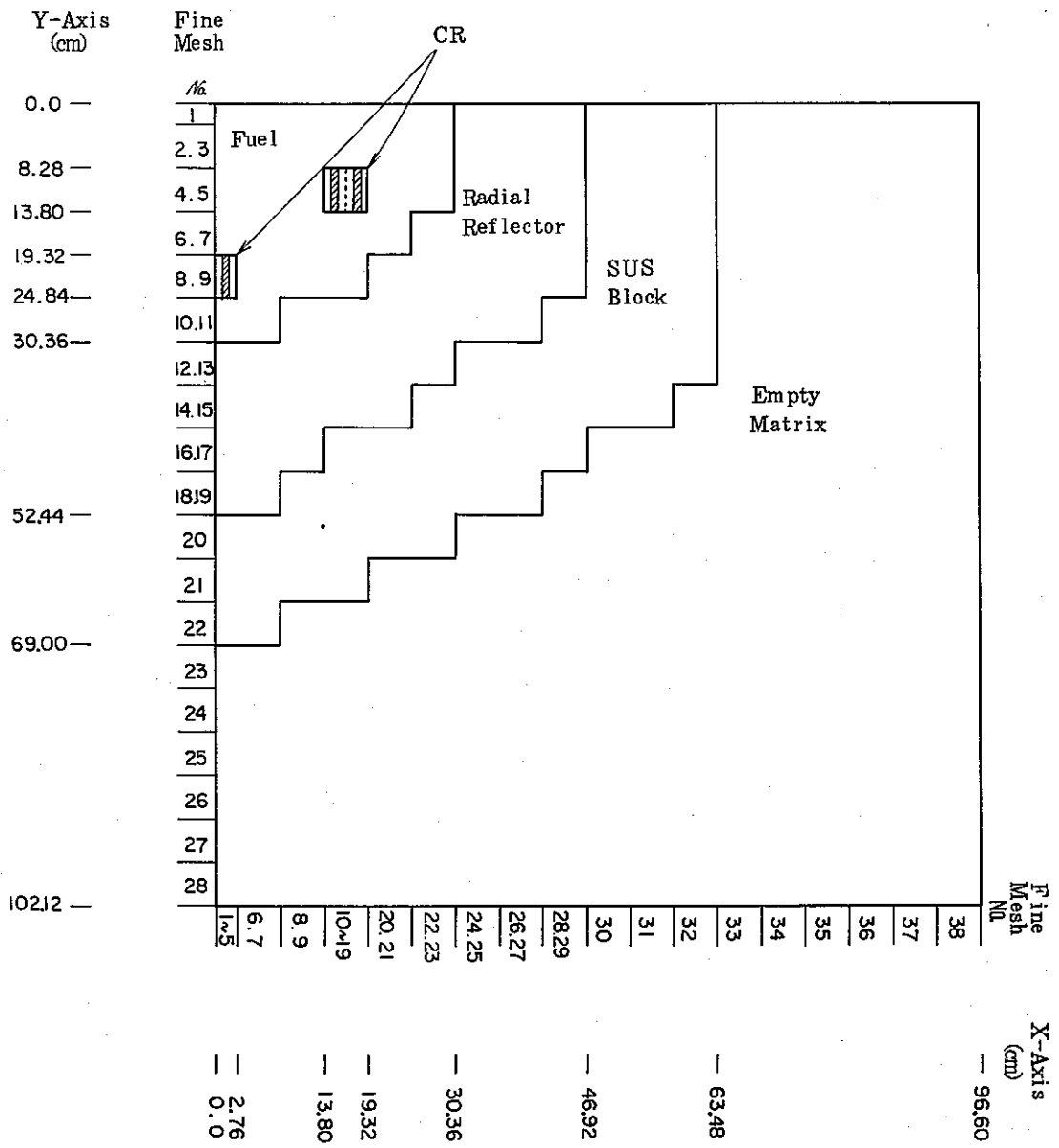


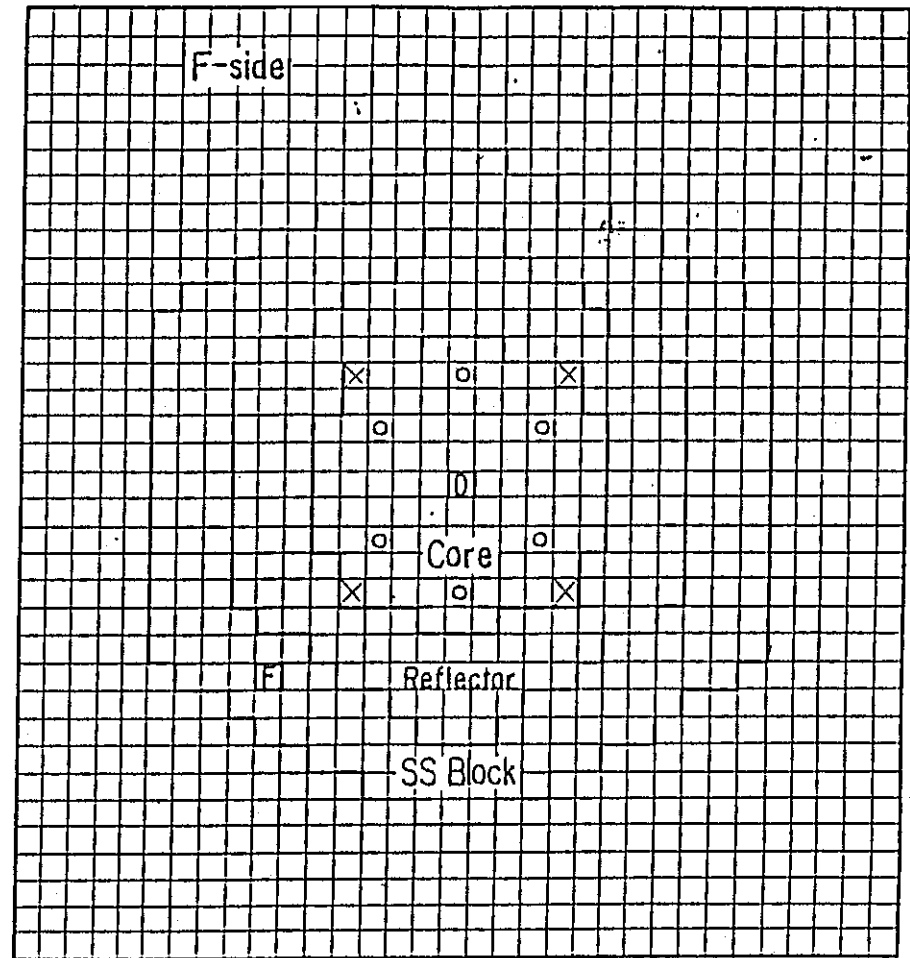
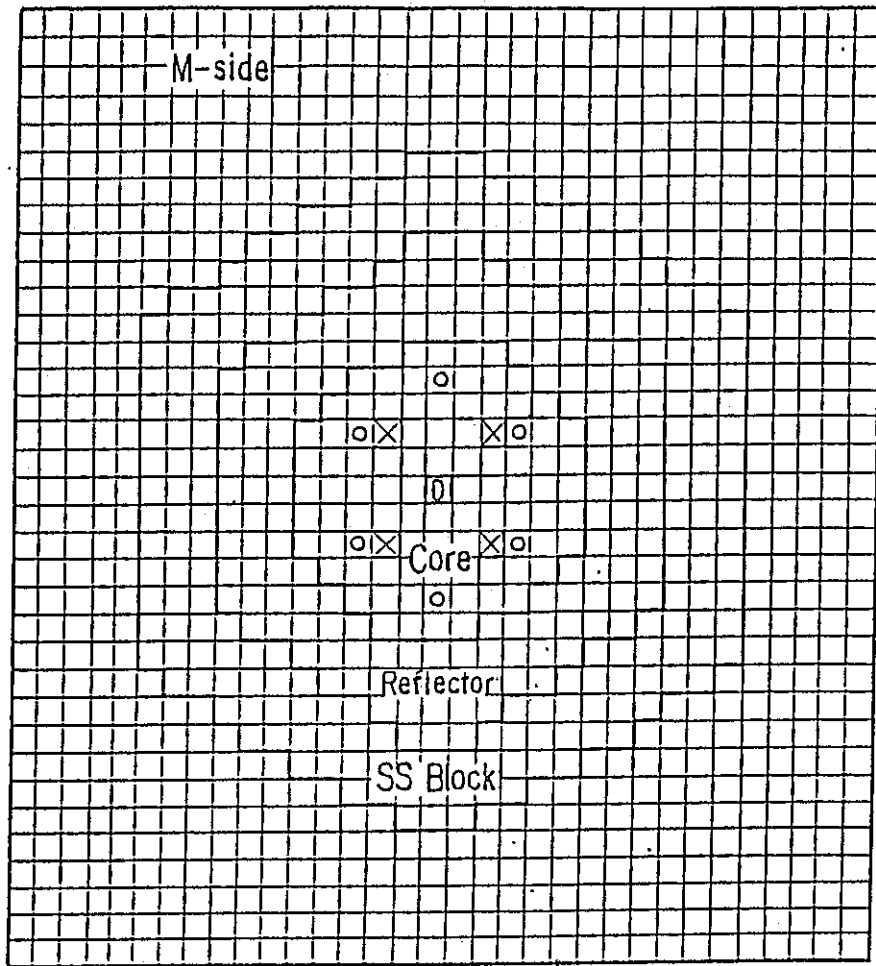
Fig.3.3 9 $\frac{1}{4}$ XY Model of FCA X-3 for Mesh Effect Calculation



(Unit : cm)

Fig.3.40 Heterogeneous B₄C Drawer Model





⊗ Safety / Control Rod

○ No channel

◻ D Experimental hole for Doppler Drawer

◻ F Fine Control Rod

Fig.3.4 2 Vertical Cross Sections of FCA Assembly X-3 for Doppler Experiment

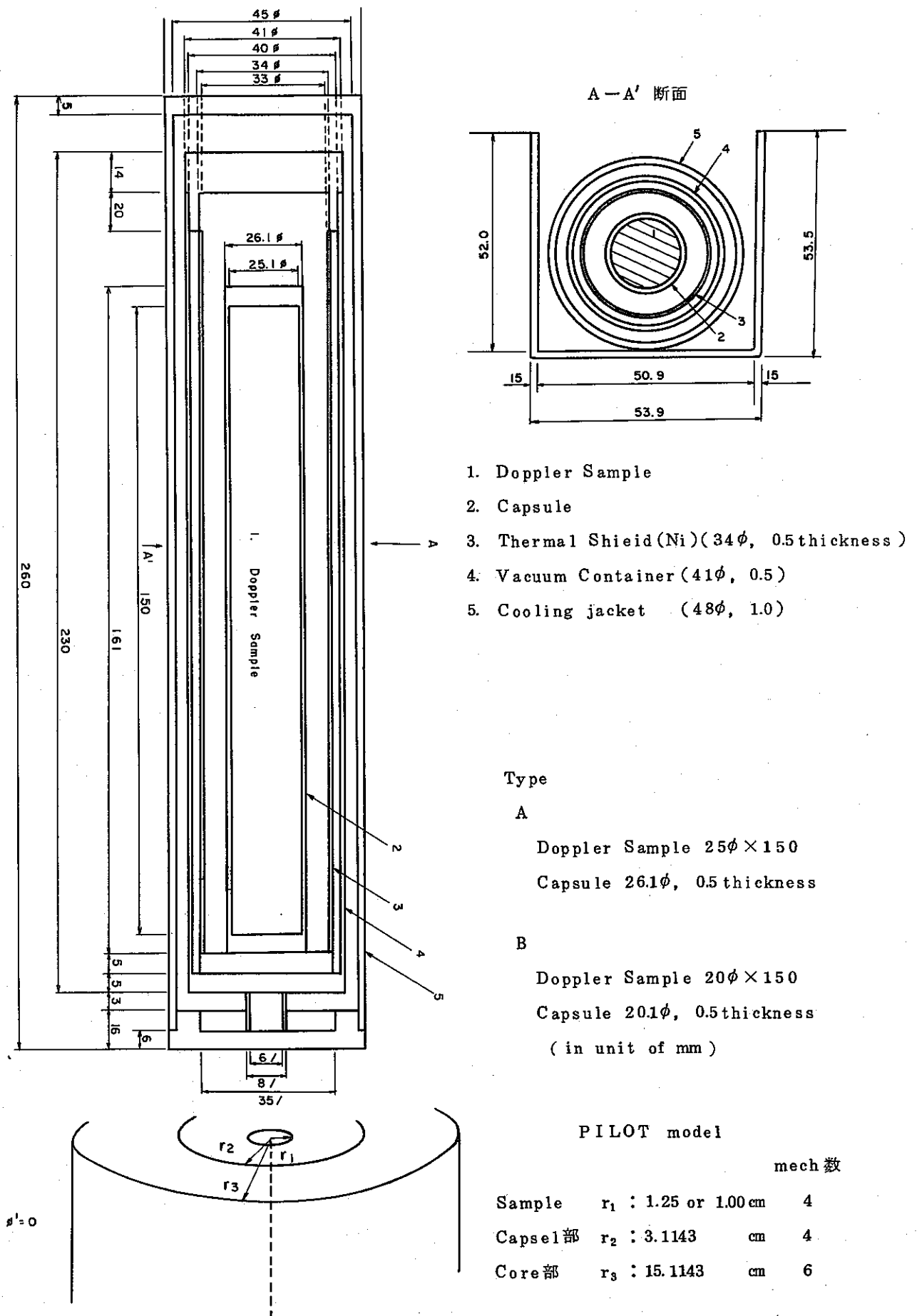


Fig.3.4 3 Cell Calcu. Model of Doppler Sample

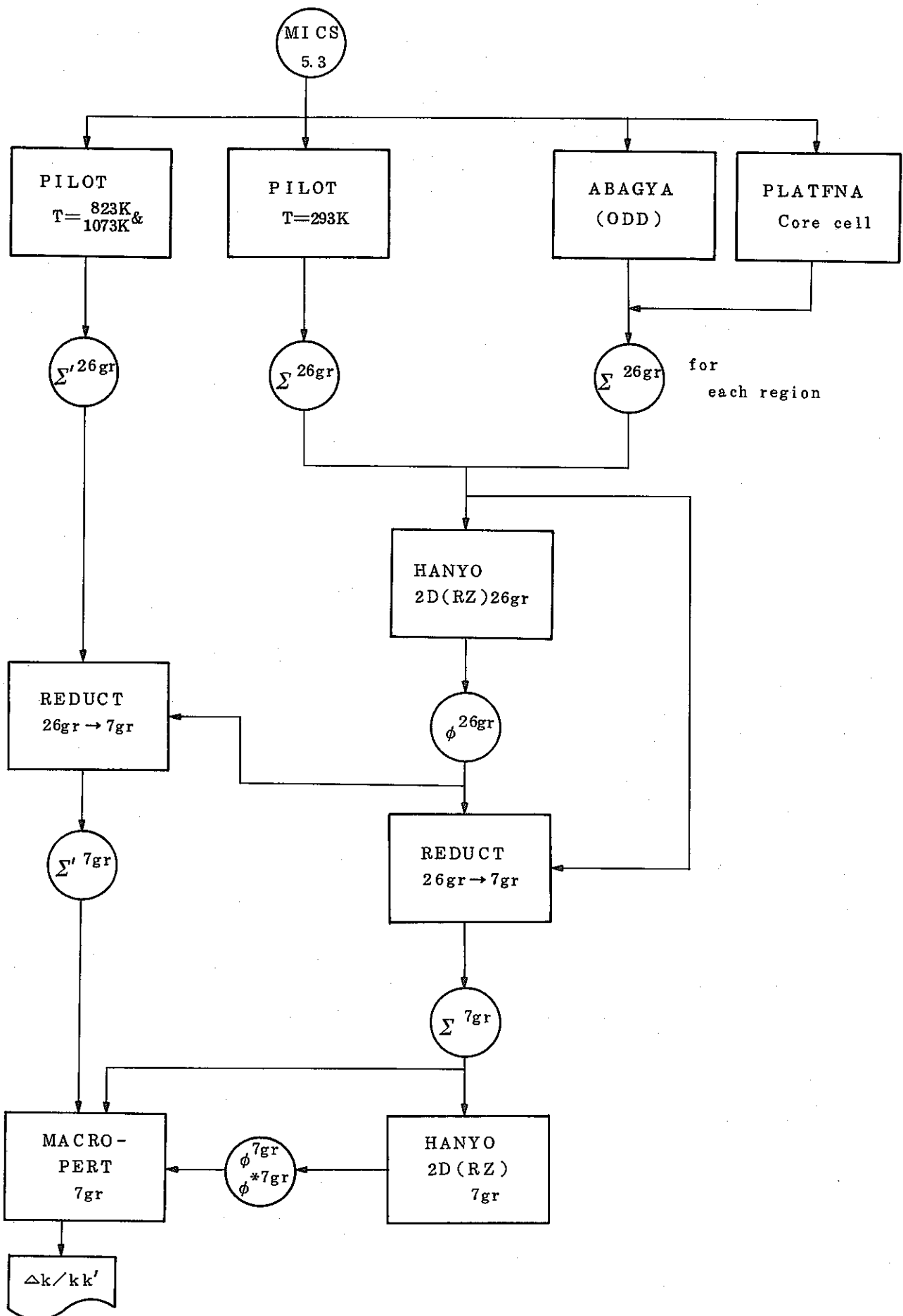
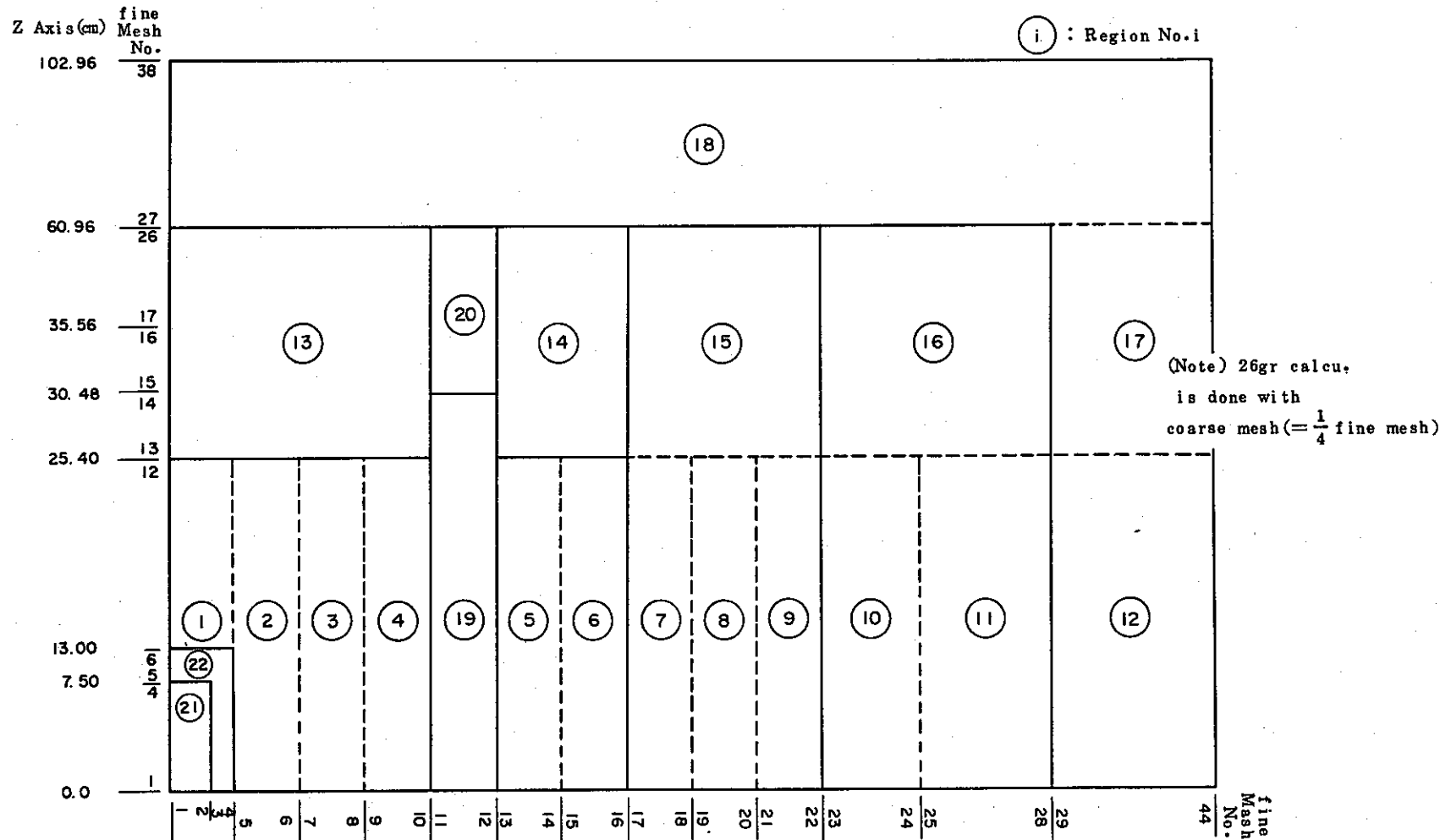


Fig.3.44 Flow Diagram of Doppler Reactivity Calculation



- ① ⑥ ; Core
- ⑦ ⑨ ⑮ ; Radial Reflector
- ⑬ ⑭ ; Axial Reflector
- ⑩ ⑪ ⑯ ; SUS Block
- ⑫ ⑰ ⑱ ; Empty Matrix
- ⑲ ⑳ ; Control Rod Position
- ㉑ ; Sample
- ㉒ ; Sample Buffer

Fig. 3.4 5 $\frac{1}{2}$ RZ Model of 7gr Reference Calculation

4. 反射体付炉心解析の検討

4. 反射体付炉心解析の検討

4.1 はじめに

本章では、本実験解析及びこれまでの反射体付炉心実験解析の結果をまとめ、ブランケットを持たない反射体付炉心固有の特性、解析上の問題等について検討する。

4.2 反射体付炉心実験解析のまとめ

Table 4.1 に、本実験解析及びこれまでの反射体付炉心実験解析の C/E 値をまとめて示した。また、同表には反射体付炉心との比較のためにブランケット付炉心の解析結果も示した。

これらの解析は全て設計手法に準じて行なわれており、使用しているライブラリーは A B B N 型の断面積セットである。

1) 臨界性

臨界性に関する C/E 値は、Table 4.1 より ± 0.3 % の差であり、いずれの炉心間にも差異がない。

ただし、個々の補正効果について検討すると、以下の様に反射体付炉心では輸送補正がブランケット付炉心よりも大きいことがわかる。

炉 心		S N 効果 (% Δ k)	
		ライブラリー M I C S 5.3	J F S - 3 - J 2 <13>
反 射 体 付 炉 心	F C A V - 2 R	1.9 *	—
	F C A X - 2	2.3 <3>	2.5 <13>
	F C A X - 3	2.6	—
付 炉 心 ブ ラ ン ケ ッ ト	F C A X - 1	—	1.4 <13>
	J O Y O M K - I	1.4 <6>	—

* 5.4 節参照

2) 反応率分布及び中心反応率比

F C A V - 2 R 炉心と F C A X - 2 炉心の反応率分布の C/E 値は大差がない。これら 2 炉心と比較すると、F C A X - 3 炉心の C/E 値は中心反応率比で 1 ~ 2 % (Table 4.1)、反応率分布は第 3.4 節と文献 <2>、<3> の比較より 5 ~ 10 % 良くなっている。

Table 4.1 には、炉心燃料の最外層ドロワーにおける反応率を出力分布に換算

した場合のC/E値を示してある。同表より、FCA X-3炉心のC/E値は、FCA V-2R炉心、FCA X-2炉心と比較して3%程良くなっている。

3) 制御棒反応度価値

Table 4.1より、反射体付炉心のC/E値は0.95~1.08の間にあり、FCA X-3炉心のC/E値のバラツキがFCA X-2炉心に比べ小さくなっているが、大きな差はない。

ブランケット付炉心である「常陽」MK-IのC/E値は、文献<6>の数値を基に、第5.4節に従って見直しを行なった。その結果、C/E値は0.94となった。

制御棒反応度価値の計算は、各炉心間で、バックリング計算モデル、バックリング及びマクロ断面積の適用法に微妙な差があることを考慮すると、Table 4.1に示す程度に各炉心間のC/E値のバラツキはありうるものと判断する。

4) サンプルドップラー反応度

UO₂に対するサンプルドップラー反応度のC/E値をTable 4.1に示した。

反射体付炉心のC/E値は0.80~0.89、ブランケット付炉心では0.84~0.89^{<14>}であり、炉心の違いによる特性の差はない。

4.3 反射体付炉心の解析上の問題点

前節のまとめより、以下の事がわかった。

- ① 反射体付炉心では、輸送効果がブランケット付炉心よりも大きい。
- ② 反射体付炉心ではブランケット付炉心の組成と比較してFeが多く、この為解析上の補正項目としてFeの共鳴効果を取り入れている。

臨界性に対する本効果は、FCA V-2R炉心で約0.9%Δk^{<2>}、FCA X-2炉心で約0.6%Δk^{<3>}であった。この効果を考慮した結果が、Table 4.1に示す様に、ブランケット付炉心と同等の結果となっている。従って、反射体付炉心においてはFeの共鳴効果を考慮する必要がある。

- ③ 本FCA X-3炉心の解析結果は、全般に従来の反射体付炉心の解析結果よりもC/E値が良くなっており、反応率分布計算において、特にそれが顕著である。

これは、従来まで解析結果に大きな影響を与えないと考えられていた反射体、エンptyマトリックス領域の計算メッシュ幅の効果であった。(第3.4節の検討を参照)すなわち、反射体付炉心では、ブランケット付炉心に比べて炉心の外へ漏れ出る中性子の数が多いために、炉心の外側領域のメッシュ効果が炉心の内側にまで影響を及ぼす。

従って、反射体付炉心においては、炉心の外側の計算メッシュ幅を(ブランケッ

ト付炉心より)細かくして,解析の精度を上げる必要がある。

4.4 ま と め

反射体付炉心の解析上,考慮すべき点の主なものは,以下の通りである。

- ① 輸送効果補正
- ② Feの共鳴効果補正
- ③ 炉心部以外の領域のメッシュサイズ

Table 4.1 Comparison of C/E Values among Several Cores with Reflector

Item		Core		Core		Core with Blanket
		FCA V-2R	FCA X-2	FCA X-3	ZPR-9/26	
Criticality		0.997 ^{**}	1.003 ^{**}	1.003	—	(JOYO MK-I) ^{<6>} 1.003
Radial Fission Rate	Fission Rate Ratio at Core Center $F^{49}/F^{25}, F^{28}/F^{25}$	—	1.01, 1.05	1.00, 1.03	—	—
	Average C/E Value for Power Distribution in the Outermost Drawer Center	0.945	0.938	0.974	—	—
Control Rod Worth		0.98 ^{**}	0.95~1.08 ^{**}	0.97~1.02	—	(JOYO MK-I) 0.94 ^{***}
Sample Doppler Reactivity (UO ₂)		—	—	0.82~0.89 [*]	0.80	(ZPR-6) ^{<14>} 0.89 (ZPPR-2) ^{<14>} 0.84(0.92) [*]

* Heterogeneous Plate Calculation

** Refer § 5.4

*** Refer § 4.2

5. 「常陽」MK-Ⅱ炉心設計手法の評価・検討

5. 「常陽」MK-II 炉心設計手法の評価・検討

5.1 目的

本報告書で実施した、「常陽」照射用炉心(MK-II)のためのモックアップ実験解析及び、これ迄に実施した同様の実験解析^{<2>}、^{<3>}を通し、「常陽」MK-II 炉心設計手法の妥当性の評価・検討を実施した。

5.2 設計手法と解析手法の比較・検討

MK-II 炉心の炉心核特性値の最終設計値及び、その設計計算手法は、文献<1>に示されている。しかし、その後、炉心特性解析が実施されており、^{<2>}、^{<6>}、^{<15>}これ等の結果も、MK-II 設置許可申請資料に一部採用されている。文献<16>に、これ等炉心設計の流れと、手法の説明がまとめられている。

一方、これ迄に実施したMK-II 炉心のためのモックアップ実験解析は、可能な限り設計手法と同一な手法をその目的から採用している。これ等については、本報告書2, 3章及び、文献<2>、<3>に示している。

そこで、以下に簡単に、モックアップ実験解析を実施した項目

- 実効増倍率
- 出力分布(反応率分布)
- 制御棒反応度価値
- ドップラー反応度
- γ 発熱分布

について、設計手法と解析手法について比較し、まとめる。

(1) 実効増倍率(最小臨界量)

[設計] 文献<15>では二次元三角メッシュXY7群拡散計算、その他の文献<1><2><6>では二次元RZ7群拡散計算を基準実効増倍率計算としている。これに、輸送理論、群数縮約、メッシュ効果、形状効果、Feの共鳴効果、モックアップ実験と実機MK-II炉心の組成差効果、モックアップ実験解析によるバイアス等の補正を施している。

これ等の設計計算手法について、Table 5.1, Table 5.2にまとめて示した。

[解析] 解析は、FCAV-2R^{<2>}、FCA X-2^{<3>}及び本報告書でのFCA X-3炉心について実施している。これ等反射体付3炉心の解析手法は、基本的に全く共通である。

即ち、二次元RZ7群拡散計算を基準計算とし、輸送理論効果、群縮約効果、

メッシュ効果, Fe 共鳴効果について補正を施している。これ等について Table 5.2, 5.3 に示した。

誤差評価については本報告書 3.3(4)節を参照されたい。

(2) 出力分布 (反応率分布)

[設計] 炉内出力分布 (反応率分布) の設計計算は, 文献<1>, <2>, <17> に報告されている。これ等の内容を Table 5.4 に示した。基準計算である 7 群二次元計算に, FCA V-2R 実験解析によるバイアス補正, エネルギー群数縮約, Fe の共鳴微細構造効果, 制御棒 (C/R) 挿入効果を補正し, 炉心出力を定格出力 (100 MW) に規格化し, 出力分布設計値としている。

又, 出力分布設計値に対する誤差 (1σ) は, Table 5.5 の様に評価されている。

[解析] 反応率分布及び中心反応率比の基準計算及び, 補正計算法を Table 5.4 に設計手法と比較し示した。基準計算は, 基本的に設計計算と等価である。

(3) 制御棒反応度価値

[設計] 制御棒反応度価値の設計計算は, 文献<1>, <17> に報告されている。基準計算は, 制御棒全引抜体系, 6本, 及び5本全挿入体系について, 実施されている。計算には, 本報告書 3.5 節で検討した Method 2 に準じた, 軸方向バックリングと縮約断面積の適用法を用いている。Table 5.6 に示す。

基準計算に対し, 輸送理論, 吸収体部マスランピング効果, 軸方向バックリングの影響, メッシュ効果, 実験解析に基づく補正を施している。又, この他設計余裕等を考慮している。これ等をまとめて, Table 5.6, 5.7 に示す。

[解析] 基準計算は, 体系形状から由来するメッシュ形状の違いを除くと, FCA V-2R, FCA X-2 集合体において, 設計と基本的に同等である。FCA X-3 集合体においては, 軸方向バックリングと縮約断面積の適用法が, Method 1 であり, それ以外の解析と異なる。又, 補正因子も Table 5.6 に示すように, 臨界解析に必要な項目については, 設計と同じである。但し, FCA V-2R, X-2 集合体では, 補正因子を炉心に制御棒1体を装荷し求めているが, FCA X-3 集合体では, オフ・センターの6CRP位置に制御棒を全挿入し求めている違いがある。

(4) ドップラー反応度

[設計] ドップラー反応度設計計算は, 文献<1>, <6>, <15>, <17> に報告されている。ドップラー反応度は, 一次元 (R) 又は二次元 (RZ) モデル 7 群直接計算により求めている。尚文献<1>では, 制御棒引抜標準平衡炉心の二

次元計算値を使い、処女炉心、標準初期炉心一次元計算値を補正し、ドップラー反応度を求めている。

ドップラー反応度に対する補正は、文献<6>に於いて、実験解析結果から U^{238} の寄与分に+10%考慮している。

又、反応度誤差としては、 U^{238} ドップラー反応度解析から±15%を、 Pu^{239} ドップラーに対しては、同一重量 U^{238} のドップラー反応度値の20%とし、統計処理により合計約16%としている。この他実機への外挿誤差、炉心サイズの不確かさを考慮し、計30%を設計値の不確かさとしている。

[解析] ドップラー反応度解析は、SEFOR炉心^{<2>}、ZPR-9/26炉^{<2>}

心と本報告書にあるFCA X-3集合体のみに対し、実施されている。SEFOR炉は、実機と同様に炉心の温度を一様に上げているが、他のモックアップ実験同様二次元RZ拡散FOP計算によって反応度を求めている。エネルギー群数は、FCA X-3集合体が7群、それ以外の解析が6群であるが、ドップラー反応度の効かない2群を1群に縮約しているので、エネルギー群数的には同等である。

SEFOR炉解析において、6群(7群と同等)計算では、エネルギー群縮約効果が無い事を確認している。

(5) r 発熱分布

[設計] 炉心内可動反射体位置に関する r 発熱設計計算は、文献<1>、<6>、<18>に報告されている。これ等の設計計算では、二次元(RZ)又は(XY)7群中性子拡散計算により、 r 線源を求め、二次元(RZ)又は(XY)16群 r 線 S_4 、 S_6 輸送計算にて、 r 発熱分布を求めている。特に、文献<6>では二次元(RZ)、(XY)計算を合成し、三次元相当の評価をしている。

Table 5.8に、文献<6>で評価した反射体領域における出力分布設計値の核設計誤差を示した。

[解析] 本報告書で解析したFCA X-2集合体に於ける r 発熱実験が、MK-II r 発熱分布実験として唯一のものである。基準解析は設計手法に準じ、かつ、以下の検討を行ない、基準解析値に対する補正値を求めている。即ち、

- i) r 線輸送計算における S_N 計算、 N 次オーダーの効果
- ii) " 軸方向バックリングの効果
- iii) 中性子束計算のエネルギー群数効果
- iv) r 線源分布の解析結果に対する補正

である。

5.3 設計手法と解析手法の問題点に関する検討

MK-II の設計手法に準じた解析手法によって実施した反射体炉心の実験解析では、

- (1) 実験誤差中に解析値が納まる
- (2) 実験誤差中に解析値が納まっていないが、設計マージン内に納まる。

の二点から、解析手法に問題が無いと考える。しかし、解析手法の詳細において、いくぶんの検討項目があったので、以下にまとめた。

(1) 実効増倍率

前項 5.2 に示した通り、実験解析と設計計算手法は基本的に等しく、特に問題ない。

しかしながら、細かい点では、二点程以下に示す追加検討項目があった。

- i) FCA V-2R 解析に於いて、 S_N 輸送理論補正にメッシュ効果が含まれていた。この他メッシュ効果を補正しているため、メッシュ効果を二重に補正していた。
 - ii) FCA X-2 解析において、板状燃料による中性子非等方の流れを考慮する Benoist 拡散係数の算出法に一部、他の解析と異なる点があった。
- 以上の二点について、次節に於いて見直しを行なう。

(2) 出力分布（反応率分布）

実効増倍率同様、基本的には問題無い。しかし、今回の解析で、炉中心を含み炉内の反応率分布に対する、径方向反射体位置のメッシュ効果が大きいことが判かった。従って、このメッシュ効果に関し、設計値及び、その誤差について見直すことが、有益であろう。5.4 項で、この点を検討する。

(3) 制御棒価値

設計手法と解析手法との大きな違いは、軸方向バックリング及び、縮約断面の適用法（3.5 節の Method 1 and 2）と、補正因子の算出、適用法にある。

この内前者については、Table 3.35 にあるように、Method 1 とこの間の解析結果に大きな差異を生じることが判かる。

しかし、設計、FCA V-2R、1 ケースを除いた FCA X-2 集合体では、炉内の制御棒位置（CRP）に制御棒が全挿入されたものが、計算の対象と成っている。この場合は、Table 3.35 の全 CRP 位置挿入ケースと同等の計算条件となり、Method 2 は、複数本オフセンター制御棒の反応度を実験値を約 6% 過大評価することとなる。この結果は、Table 5.9 に示すこれ迄の解析結果とほぼ一致する。又逆に、Method 1 では、実験値を約 2% 過小評価することになる。

又、後者の問題に関しては、今後の検討課題として残されている。

この他、計算上の問題点として、(1)実効増倍率同様、制御棒反応度計算値に対する輸送理論補正值に、メッシュ効果が含まれており、メッシュ効果を二重に補正している事が判かった。この点についても、次節で見直しを行なう。

(4) ドップラー反応度

設計計算が直接計算であり、解析計算がFOP計算を採用しているのは、対象とする反応度絶対値の大きさに依っているものであり、本質的な計算手法上の差異ではない。

FCA X-3 炉心実験では、同一温度上昇範囲内に於いて、同重量の NUO_2 サンプルドップラー反応度に対しSUSは約1/4 ドップラー反応度寄与があることが、報告されている。^{<8>}一方設計、解析共に、ドップラー反応度としては U^{238} の寄与のみしか評価していない。この点については、次節で検討する。

(5) r 発熱分布

r 発熱分布に関する解析は、本報告書のものが唯一であり、その手法は設計手法に準じているため、手法に関しては特に問題はない。しかしながら、Fig. 2.6, 2.7に示されているように、炉心最外層でのC/E値が、測定誤差を超えている。

そこでTable 5.10に、 r 線源分布と、 r 発熱分布測定値を比較して示した。同表からは、反応率分布解析結果(C/E値)により補正された r 線源分布は、中性子分布に比例し、炉中心から外側に向い、減少していることが分かる。これに反し、 r 発熱分布測定値は、炉中心から外側に向い一度大きく成り、そしてほぼ炉中心の値と同じ大きさにもどっている。従って、炉心最外層でのC/E値の悪さは、解析側に問題があるのではなく、測定側に何らかの問題があることも考えられる。

5.4 設計値の見直し

(1) 実効増倍率

FCA V-2R集合体の解析に於いて輸送理論補正值(+0.017 Δk)に、メッシュ補正が含まれているので、これを除き、+0.0188 Δk と見直した。

又、FCA X-2集合体解析でBenoist 拡散係数計算法に他の集合体との一貫性がなかったので、これを修正した結果、基準計算実効増倍率が、0.9856₂より0.9831₂に成った。

これ等の結果を含め、FCAの3集合体の実効増倍率解析値を比較し、Table 5.3に示した。この結果、FCA X-2とX-3集合体のC/Eはほぼ一致し、1.003であるが、FCA V-2R集合体のC/Eは1.0を下まわっており、3者で一貫性がない。しかし、FCA X-2、X-3集合体解析からは、モックア

ップ体系の制御棒位置の有無は、解析結果、ひいては、実機への外挿上問題を生じないことが判かった。

以上の見直し結果を踏まえ、MK-II炉心最小臨界量の再評価を行ない、Table 5.11, Fig. 5.1に示した。同表では、従来のFCA V-2R解析基準と今回のFCA X-2, X-3集合体解析結果を基準として、示している。又、MK-II炉心の輸送効果^{<2>}の同様の見直しを行なっている。

MK-II炉心最小臨界量は、FCA V-2R及びFCA X-2, X-3集合体解析を基準として、それぞれ、

46.8₈ ± 1.8₉ 体 (FCA V-2R基準)

49.6₁ ± 1.1₆ 体 (FCA X-2, X-3基準)

と予測される。^{*}最小臨界量実測値は49.9₈ ± 0.02体^{<19>}であることから、FCA X-2, X-3集合体実験解析からは、よい予測が出来る事が判かる。これに反し、FCA V-2R集合体は、炉心の大きさ、組成が実機と大きく異なり、MK-II炉心の良いモックアップ実験に必ずしも成っていないため、外挿法適用困難であったものと推定される。

(2) 出力分布

設計では、出力分布基準計算値に対し、FCA V-2R反応率分布解析結果を用い、実験補正を施している。この補正値は6.4%である。^{<1>}, ^{<2>}しかし、MK-II炉心にとり、より良いモックアップ炉心であるFCA X-3集合体解析からは、3.4節に示したように、炉心最外周での出力分布C/E値は基準炉心において、0.974 ± 0.5%であった。

従って、FCA X-3集合体による見直し結果からは、出力分布に対する炉心最外周での実験補正は2.6%でよく、現設計の補正値では、約3.8%程補正のし過ぎに成ると考えられる。一方、出力分布誤差評価として、Table 5.5に示すように、実験解析誤差、±3%、実機への外挿誤差±2.5%、全体として、±3.9%を見込んでいる。この様に、設計値は、いくぶん過大評価と成る可能性がある。

(3) 制御棒価値

制御棒価値設計値としてTable 5.7に示すように、FCA V-2R集合体実験解析結果(C/E = 0.925)をバイアス因子として補正していないので、制御棒価値に8%の余裕をとっていることに成る。FCA V-2R解析に於ける輸送補正値の見直し等により、C/E値は、Table 4.1に示すように0.98と成るが、

* 周辺燃料価値としては、実測値0.482 ± 0.007%△kを使用した。

上記計算余裕の範囲内なので、特に問題を生じない。

一方、FCA X-2, X-3集合体の実験解析結果のC/E値は、Table 4.1にあるように、0.95~1.03 (C/E=1.08の解析結果一点を除く)であり、C/Eが1を超える場合もあり得る。

同表にあるように、設計余裕±15%を設計上考えているため、FCA X-2, X-3集合体解析結果から、制御棒価値設計を見直しても、特に問題を生じないと考える。

ところで、Table 5.12に示しているように、^{<19>} MK-II炉心性能試験結果から、MK-II制御棒価値の設計値が、約6%過大評価していたことが判かる。上記に述べたように、これはFCA V-2Rの見直し前のC/E値で設計計算値を補正していたからであり、見直し後のC/E値を使えば、実機のC/E値は1.0と成ることで判かる。又、FCA X-2, X-3集合体解析結果からの制御棒価値設計計算補正值は、 1.0 ± 0.05 が妥当と考えられるが、この値を使った場合も、実機制御棒価値のC/Eは、 0.98 ± 0.05 と成り、良い結果を得る事が推測される。

この様に、旧来の制御棒設計値そのものは、特に問題は無いが、見直すことにより、約6%程制御棒価値設計値の精度を向上させることが出来た。

(4) ドップラー反応度

文献<8>によると、同一温度上昇範囲内で、同一重量のSUSのドップラー反応度は、 U^{238} ドップラー反応度の約1/4の寄与を持っている。ところが、設計計算では、 U^{238} のみのドップラー反応度を基準値とし、誤差としては、 Pu^{239} ドップラー反応度寄与を考慮しているのみである。(5.2節参照)

SUSのドップラー反応度は負値であることから、このSUSドップラー反応度寄与を無視することは安全側である。

ところで、MK-II炉心の定格時における燃料の炉心平均温度は、約1100°Cであり、構造材(SUS)は約450°Cである。従って、温帯待機状態からのSUSの温度上昇率は燃料の約1/10である。又、SUSの炉内への装荷重量は、燃料の約70%であり、結局、炉心中でのSUSのドップラー反応度寄与は約8%と成る。

従ってSUSのドップラー反応度寄与を無視することは、実質的にドップラー反応度設計誤差30%を更に、8%程度広げていることに相当する。

(5) r発熱分布

2.5節に示した「まとめ」の観点から、特に見直しを行なう必要が無いと考える。

5.5 まとめ

FCA X-2, X-3 集合体の実験解析結果を用い、MK-II 炉心の核特性量を評価すると、設計値が改善される。これは、FCA X 集合体シリーズが、MK-II 炉心の炉心形状、組成を FCA V-2R 集合体に比べ、よりよく模擬していることによると考えられる。

この事から、実機炉心の核特性量を精度良く実験解析からの外挿・評価するためには、実機を十分に模擬した臨界集合体による実験が必要であることも結論付けられる。

又、外挿精度の評価、設計手法の妥当性の評価には、可能な限りの模擬実験及び、多技に渡った項目の実験が必要と思われる。

MK-II 炉心核設計手法及び設計値は全体的に妥当であったことが結論される。

Table 5.1 Design Method and Estimation of Minimum Criticality

項 目	<1> 詳細設計	<6> 特性解析(Ⅱ)	<15> 核特性の評価(Ⅰ)
計 算 条 件	定格出力時寸法及び 原子数密度 集合体ピッチ： 8.1977 cm 組成：旧仕様燃料 (Pu fissile： 75%)	定格出力時の寸法及 び原子数密度 集合体ピッチ： 8.1977 cm 組成：新仕様燃料 (Pu fissile： 80%)	250°C等温状態の寸法 及び原子数密度 集合体ピッチ： 8.17958 cm 組成：新仕様燃料
基 準 計 算	2次元 R-Z 7群	2次元 R-Z 7群	2次元 XY3角メッシュ 7群
keff	0.9934	0.9930	1.00414
輸 送 理 論 補 正	0.019	0.0201±0.0020	0.0201±0.0020
縮 約 効 果 補 正	-0.0007	-0.0007±0.0001	-0.0007±0.0001
メ ッ シ ュ 効 果 補 正	+0.002	+0.0020±0.0002	-0.0014±0.0001
形 状 効 果 補 正	+0.001	+0.0010±0.0010	-
F e 共 鳴 効 果 補 正	-	0.0047±0.0020	0.0047±0.0020
組 成 差 補 正	-	±0.0090	0.0071±0.0070
FCA $V-2R^E/C$	0.015	0.0047±0.0044	0.0047±0.0044
補 正 合 計	+0.0363	+0.0318±0.0117	+0.0345±0.0091
補 正 後 固 有 値	1.0297 1.0383 at 250°C	1.0248±0.0117 1.0334 at 250°C	1.0386±0.0091 (250°C)
最 小 臨 界 本 数 (周 辺 燃 料 価 値) (補 正 後)	47±2本	47.7±4本	46.9±2本

Table 5.2 Method of Correction Calculation for Criticality

Item	Design	Analysis
Transport Effect	2D (RZ) Model 7gr Calcu. S_8 v.s. Diff.	
Energy Correction	1D (R) Diff Calcu. 26 gr v.s. 7gr	2D (RZ) Diff. Calcu. 26 gr v.s. 7gr
Mesh Effect	2D (RZ) 7gr ∞ Mesh v.s. Fine Mesh (2D 1/6 XY Triangle Mesh 7gr 6/Assembly v.s. 24/Assembly)	
Fe Resonance Effect	1D (sphere) Model 113 gr v.s. 26 gr.	
Exp. Correction	E/C factor from FCA V-2 R analysis	
Correction of Composition	Density Coefficients from FCA V-2 R analysis	
Temp. Correction	$\Delta\rho = 3.0\%$ (between 20°C and 250°C)	

Table 5.3 Result of Criticality Analysis for MK-II Core Design

Item	FCA V-2R	FCA X-2	FCA X-3
Reference Calculation (2D RZ 7gr Diff)	0.9716±0.0020	0.9831±0.0013	0.9795±0.0013
Corrections			
Transport (2D RZ 7gr S ₈)	0.0188±0.0020	0.0230±0.0023	0.0261±0.0026
Collapsing (26gr - 7gr)	-0.0003±0.0001	-0.0011±0.0001	-0.0009±0.0001
Mesh (Fine-Coarse.7gr)	-0.0018±0.0002	-0.0019±0.0002	-0.0025±0.0002
Fe Resonance (113gr-26gr 1D sphere)	0.0088±0.0030	0.0056±0.0017	0.0056±0.0017
Sum.of Corrections	0.0190±0.0036	0.0256±0.0029	0.0283±0.0031
keff after Correction (C)	0.9971±0.0041	1.0087±0.0036	1.0078±0.0034
Experimental Value (E)	1.0000±0.0003	1.0061±0.0006	1.0045±0.0005
C / E	0.9971±0.0044	1.0026±0.0042	1.0033±0.0039

Table 5.4 Comparison of Power Calculation between Design and Analysis

Item	Design	Analysis
Reference Calculation	Synthesize 2D(Tringle XY) and 2D(RZ) 7 gr Diff	2D(XY) and (RZ) 7 gr Diff
Correction		
Exp. Correction	E/C bias from FCA V-2R analysis for radial reflector	No
Mesh Effect		No
Energy Collapsing Effect	1D(R/Z) Diff Calcu. 26 gr v.s. 7 gr	
Fe Resonance Effect	1D(R) Diff Calcu. 113 gr v.s. 26 gr	
C/R Insertion Effect	Used	No

Table 5.5 Error Estimation of Power Distribution
in Design

Item	Uncertainty
(1) Experimental Analysis*	$\pm 3 \%$
(2) Exterpolation to JOYO (Difference of Composition) (Exsistance of C/R)	$\pm 2.5 \%$
(3) JOYO Design**	—
Sum	$\pm 3.9 \%$

* Make Correction with Bias from FCA V-2R Analysis

** for Virgin Core, about $\pm 1\%$ for Equiliblium Core

Table 5.6 Comparison of Control Rod Worth Calculation Method between Design and Analysis

Item	Design	Analysis
Reference Calcu. B_z^2 7 gr Cross Section	2D(TriangleXY) 7 gr Diff Method 2 midplane B_z^2	2D(XY) 7gr Diff Method 2 for FCA V-2R X-2 " 1 for FCA X-3 midplane B_z^2
Correction Transport Effect B_4 C Mas Lumping Mesh Effect. Exp. Correction Residence of C/R Worth	} 1D(R) 7gr Homog Diff v.s. Hetero S_4 C/R inserted at Core Center 2D(TriangleXY) 7gr Diff 6 meshes/ass'ly v.s. 24 meshes/ass'ly E/C bias from FCA V-2R Used	} Same as left 2D(XY) 7gr Diff. 2x2 meshes/ drawer v.s. ∞ meshes/ drawer No No

Table 5.7 Correction for Control Rod
Worth in Design

<1>

Item		Correction factor		
		Min.	Nominal	Max.
Correction for Calculation	Transport	0.91	0.91	0.91
	Hetero. (Mass Lumping)	0.93	0.93	0.93
	Residual Worth (Effect of B_z^2)	1.00	1.00	1.01
	Mesh Effect	1.03	1.03	0.03
	E/C Correction from FCA Mockup	1.00	1.08	1.08
	Sum	0.872	0.941	0.951
Design Margin et.	Uncertainty of Core Size (± 5 F/As)	0.99	1.00	1.01
	Design Margin ($\pm 15\%$)	0.85	1.00	1.15
	Total	0.734	0.941	1.105

Table 5.8 Error Estimation of Power Design Calculation in Movable Reflector

	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5
Item	Power/Ass'y	Redial Dist. in S/A	Axial Dist. in S/A	Axial Integral** Power per Unit Area	Power Dist.** per Unit Volume
1st Kind	15%	15%	20%	25%	30%
2nd Kind	15%	10%	15%	20%	25%
3rd Kind	20%	10%	15%	25%	30%

$$* \quad \Delta_4 = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}$$

$$** \quad \Delta_5 = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2}$$

Table 5.9 Results of Control Rod Worth Calculation on FCA V-2R and X-2 Core

Assembly	Rod Material	Rod Position	Rod Worth ($\% \Delta k / k k'$)		C/E
			Calculated	Experiments*	
FCA V-2R	90% B ₄ C 7 pin	[18-14]	1.503	1.542 ± 0.046	0.975
FCA X-2	Natural B ₄ C plate	0	1.019	1.29	0.790
	90% B ₄ C plate	0	3.673	3.67	1.001
	Natural B ₄ C 7 pin	0	0.9168	0.97	0.945
	90% B ₄ C 7 pin	0	2.928	2.93	0.999
	90% B ₄ C 7 pin	+4**	1.474***	1.43	1.030
	90% B ₄ C 7 pin	±4	3.020	2.92	1.034
	90% B ₄ C 7 pin	±4Y	3.045	2.96	1.029
	90% B ₄ C 7 pin	±2	5.384	5.00	1.077
	90% B ₄ C 7 pin	±5	1.943	1.88	1.034

* Rod worth are the ones measured by the source multiplication method.

** A Na-drawer is also inserted in the symmetric 4 position.

*** Average of rod worths calculated by two methods of buckling calculation.

Table 5.10 Comparison of γ -source and γ -heating Distribution

Position	γ -Source [*]	γ -heating
Core ↑ 0 1 2 3 4 ↓	1.0	1.0 ± 30%
	0.977	1.114 +50% -40%
	0.912	—————
	0.820	0.973 +47% -32%
	0.702	—————
Rad. ↑ 6 7 ↓	0.619	1.012 +45% -29%
	0.547	0.0767 ± 17%
	0.391	0.0389 ± 17%
SUS ↑ 8 9 10 Block ↓ 11	0.292	0.0248 ± 17%
	0.272	0.0222 ± 17%
	0.172	0.0142 ± 17%
	0.0856	0.00811 ± 17%

* after correction with C/E of reaction rate analysis.

Table 5.11 Estimation of Minimum Criticality on MK-II Core

Base Analysis	FCA V-2R	FCA X-2 and X-3
Reference Calcu.	0.9660 (47 Ass' ly)	0.9803 (50 Ass' ly)
Correction Transport	0.0220 ± 0.0022	} same as left
Collapsing	-0.0007 ± 0.0001	
Mesh	-0.0014 ± 0.0001	
Fe Resonance	0.0047 ± 0.0020	
Total	0.0246 ± 0.0030	
E/C bias	0.0029 ± 0.0044	-0.0030 ± 0.0040*
Composition Difference	0.0071 ± 0.0070	0.0 ± 0.0
Temperature Correction	± 0.0025	± 0.0025
Corrected keff	1.0006 ± 0.0091	1.0019 ± 0.0056

* average value of FCA X-2 and FCA X-3 core.

Table 5.1 2 Comparison of Control Rod Worth between Design and Measurement

Control Rod	Experiment (E)	Design (C)	C/E
	$\% \Delta k / k k'$	$\% \Delta k / k k'$	
# 1 (3A3)	2.1 8	2.3 3	1.0 7
# 2 (3B3)	2.1 9	2.3 1	1.0 5
# 3 (3C3)	2.1 9	2.3 3	1.0 6
# 4 (3D3)	2.1 9	2.3 4	1.0 7
# 5 (3E3)	2.2 0	2.3 6	1.0 7
# 6 (3F3)	2.2 2	2.3 6	1.0 6

Ref : <19>

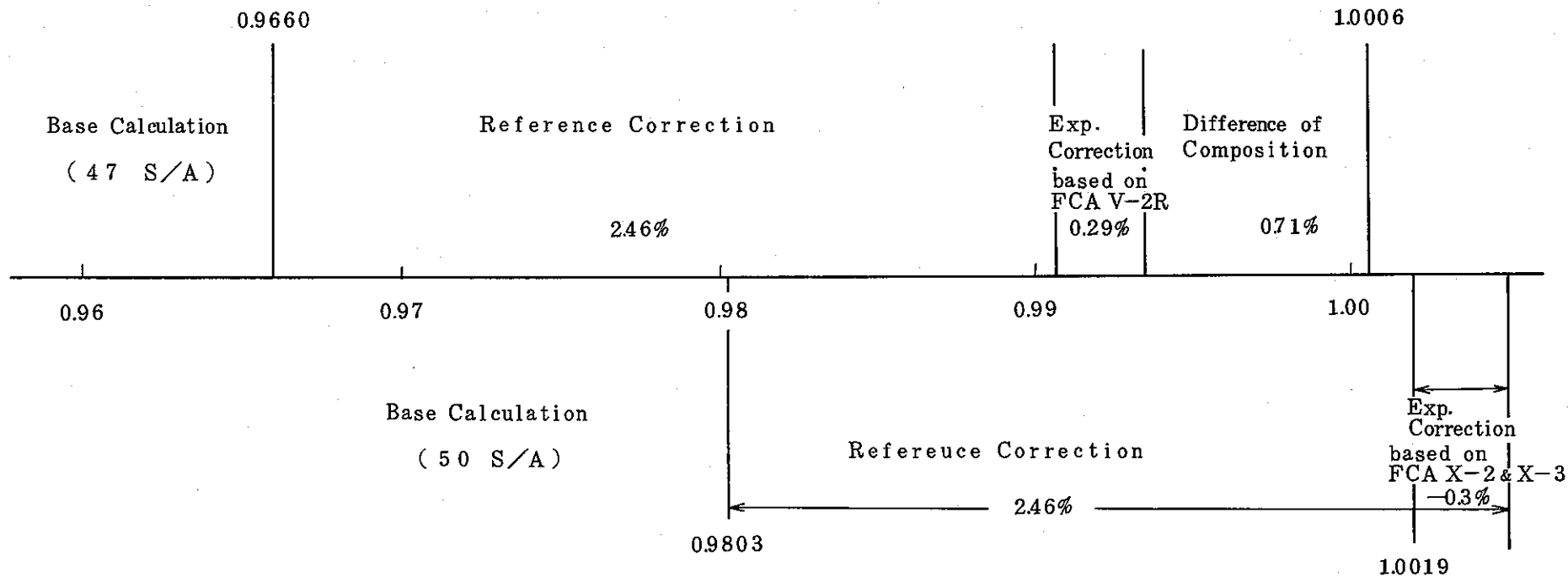


Fig. 5.1 Estimation of Minimum Criticality on MK-II Core

6. あ と が き

6. あとがき

本研究の結果、以下のような結論が得られた。

- (1) F C A X-3 集合体実効増倍率の C/E 値は 1.003 と成り、F C A X-2 集合体と同等な結果を得た。
- (2) 反応率分布解析結果から、炉心最外層位置での出力分布計算の C/E を推定したところ、0.974 と成り、これ迄の解析に比べ、約 3% 改善された。
- (3) 制御棒価値に関する C/E 値は 0.97~1.02 であり、これ迄の F C A V-2 R, X-2 集合体解析に比べいくぶん改善された値を得た。
- (4) N U O₂ サンプルドップラー反応度解析の C/E 値は 0.8~0.9 であり、これ迄の解析と同程度の結果を得た。
- (5) r-発熱分布解析では、実測値の r 発熱分布を実験誤差範囲内で再現できた。
- (6) 反射体付炉心と、ブランケット付炉心の解析結果を比較した結果、反射体付炉心の解析上の問題点を明らかにできた。
- (7) これ迄の設計計算値を見直した。MK-II 炉心をよく模擬した、F C A X シリーズ集合体の解析結果を使用すると、設計計算精度が向上することが明らかになった。
- (8) MK-II 炉心設計に用いた、F C A V-2 R 集合体の解析及び設計手法（解析手法も含む）は、全体的に妥当であった。

7. 謝 辭

7. 謝 辞

本研究の計画・実施にあたり，有益な情報を提供され，御指導いただいた，動力炉・核燃料開発事業団炉物理グループ・リーダーの白方敬章氏に深く感謝の意を表します。

又，FCA X-2，X-3 集合体実験データ及び，解析にあたり，有益なコメントを提示いただいた，日本原子力研究所高速炉物理研究室の中野正文，飯島進，岡島成晃の諸氏に深く感謝いたします。

8. 参 考 文 献

8. 参 考 文 献

- <1> 「『常陽』照射用炉心詳細設計—炉心核熱設計書—」, 三菱原子力工業㈱,
1975年4月他
- <2> 「『常陽』照射用炉心の特性解析—第1分冊—」, ZJ 206 77-06 (1),
三菱原子力工業㈱, 1977年2月
- <3> 田中洋司, 長田博夫; 「高速炉反射体付炉心模擬実験の解析」, PNC SJ
206 82-21, 三菱原子力工業㈱, 1982年10月
- <4> 岡嶋成晃, 大杉俊隆私信; 「熱蛍光線量計を用いたFCA X-2集合体によるガ
ンマ線発熱測定」, 1983年2月
- <5> 「『常陽』照射用炉心のガンマ発熱解析」, 三菱原子力工業㈱, 1979年7月
- <6> 「『常陽』照射用炉心特性解析(Ⅱ)」, ZJ 206 78-11, 三菱原子力
工業㈱, 1978年3月
- <7> 飯島進他; 「FCA X-3集合体による『常陽』MK-II炉心の模擬実験」,
PNC J250 83-10, 1983年3月
- <8> 岡嶋成晃他; 「FCA X-3およびXI-1集合体におけるドップラー効果の
測定」, JAERI-M 84-086, 1984年5月
- <9> 山本正昭他; 「JUPITER実験解析(Ⅲ-E)-ZPPR-10Aの詳細解
析と大型炉の設計精度評価-」, PNC SJ 298 82-01, 1982年
2月
- <10> 宝珠山健, 佐々木誠他; 「高速原型炉級臨界集合体非均質効果の検討(Ⅰ)」,
日本原子力学会, 分科会A19, 1973年11月
- <11> 小林隆俊, 菅原彬他; 「モーツアルト実験解析(Ⅲ)-反応率分布, 制御棒価値-」
SJ 206 74-18, 三菱原子力工業㈱, 1974年6月
- <12> 岡嶋成晃: 私信, 1984年4月
- <13> 中野正文他; 「FCA X集合体による『常陽』MK-II炉心の模擬実験」,
日本原子力学会, 分科会.E47, 1983年9月
- <14> 長沼辰二郎他; 「模擬臨界実験による『もんじゅ』核特性総合評価」, SJ
206 76-14, 1976年4月
- <15> 宝珠山健, 西山征夫他; 「『常陽』照射用炉心核特性の評価(Ⅰ)」, SJ 222
79-02, 三菱原子力工業㈱, 1979年2月
- <16> 「『常陽』照射用炉心の性能試験における特性量総合評価」, PNC SJ
906 82-02, 三菱原子力工業㈱, 1982年3月
- <17> 田中洋司, 手塚広子他; 「『常用』照射用炉心初期サイクルに於ける核熱評価」,

PNC SJ 90682-01, 三菱原子力工業㈱, 1982年3月

- <18> 「『常陽』照射用炉心のガンマ発熱解析」, 三菱原子力工業㈱, 1979年7月
- <19> 池上哲雄; 「『常陽』MK-IIの炉心設計と低出力試験速報」, FBR炉心設計専門委員会資料, FR-154-1, 1983年2月