

PNC^I J265 82-01

大型高速臨界集合体での 中性子ストリーミング効果に関する研究 (Ⅱ)

(受託研究)

1982年3月



大阪大学工学部

大型高速臨界集合体での
中性子ストリーミング効果に関する研究(Ⅱ)

(受 託 研 究)

1982年3月

大阪大学工学部

大型高速臨界集合体での中性子ストリーミング効果に関する研究(Ⅱ)*

竹 田 敏 一 **

谷 本 浩 一 **

小 野 俊 治 **

要 旨

高速臨界集合体における中性子ストリーミング効果が顕著に表われるプレート及びピン形状でのナトリウムボイド反応度、燃料スランピング反応度等の積分量を解析し計算方法についての検討を行なった。

プレート及びピン形状におけるナトリウムボイド反応度の違いは、臨界集合体で得られたバイアス因子を実機ピン形状の体系に外挿する上で重要であり、FCA VII-2 集合体で測定されている。本報告ではプレート及びピンドロワーの格子計算に用いられる格子モデルの違いによるボイド反応度の計算値の違いについて検討し計算方法の問題点を明らかにする。

燃料スランピング反応度はFCA VIII-2 集合体で測定されており、その解析も行なわれているが、計算結果が機関により大幅に異なるケースが生じている。そこで解析を中性子ストリーミング効果を取り入れて実施し、以前の結果と比較検討する。

* 本報告書は大阪大学工学部が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

** 大阪大学工学部 原子力工学科

解析はすべて JENDL-2B-70 群断面積セットを用いた輸送計算をベースとして行なった。中性子ストリーミング効果は Benoist の拡散係数及び Benoist の方式に異種のドロワー間の干渉効果を取り入れた統一拡散係数を用いて取り入れた。

March 1982

Study on Neutron Streaming Effect in a Large
Fast Critical Assembly (II) *

Toshikazu Takeda **
Koichi Tanimoto **
Shunji Ono **

Abstract

Sodium void worths in plate and pin environments and fuel slumping reactivity worths measured in the FCA assembly have been analysed to investigate calculational methods, especially to check methods to estimate the neutron streaming effect.

Comparison of sodium void worths in plate and pin environments has been done experimentally in the FCA VI-2 assembly. In this report we investigate the effect of cell modeling on calculated void worths and clarify problems in calculational methods.

The fuel slumping reactivity worths were measured in the FCA VIII-2 assembly. Though some analyses have been performed, there is a case where the calculated slumping reactivity worths differ remarkably. Then we recalculated the worths taking into account the neutron streaming effect, and compared the results with the previous ones.

* Study performed under contract between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation and Osaka University

** Osaka University, Faculty of Engineering

All the analyses have been carried out on the basis of transport calculations with the JENDL-2B-70 group cross section set. The neutron streaming effect was considered by means of Benoist's diffusion coefficient or the unified diffusion coefficient which includes the neutron streaming interference effect between different drawers.

目 次

List of Tables

List of Figures

1. 緒 言	1
2. プレート及びピン形状におけるナトリウムボイド反応度の解析	3
2. 1 ナトリウムボイド反応度実験の概要	3
2. 2 群定数作成	4
2. 3 ナトリウムボイド反応度の解析モデル	5
2. 4 計算結果	6
2. 5 結 論	8
3. 燃料スランピング反応度の解析	36
3. 1 スランピング反応度実験の概要	36
3. 2 群定数作成	36
3. 3 燃料スランピング反応度解析モデル	39
3. 4 計算結果	40
3. 5 結 論	41
4. 結言および今後の問題点	64
謝 辞	65
参 考 文 献	66
付 録 A ピン格子の実効断面積の作成	67
B スランピング反応度の解析データ	70

List of Tables

Chapter 2

Table 2.1.a	Atomic Composition of Test Region Plate Cell Loaded with 92% Fissile Pu Plate
Table 2.1.b	Atomic Composition of Test Region Plate Cell Loaded with 75% Fissile Pu Plate
Table 2.1.c	Atomic Composition of Test Region Voided Plate Cell Loaded with 75% Fissile Pu Plate
Table 2.1.d	Atomic Composition of 'A' Pattern Axial Blanket
Table 2.1.e	Atomic Composition of Voided 'A' Pattern Axial Blanket
Table 2.1.f	Atomic Composition of Driver Fuel
Table 2.1.g	Atomic Composition of DUO ₂ /Na Blanket
Table 2.1.h	Cell-averaged Densities of Radial Blanket, Axial Blanket & Empty Matrix
Table 2.2.a	Atom Densities of Materials of Individual Regions in 3 Annuli Model Corresponding to 1/16 of Core Pin Cell
Table 2.2.b	Atom Densities of Materials of Individual Regions in 3 Annuli Model Corresponding to 1/16 of Blanket Pin Cell
Table 2.2.c	Atom Densities of Materials of Individual Regions in 4 Annuli Model Corresponding to 1/16 of Core Pin Cell
Table 2.2.d	Atom Densities of Materials of Individual Regions in 4 Annuli Model Corresponding to 1/16 of Blanket Pin Cell
Table 2.2.e	Atom Densities of Individual Regions in 6 Annuli Model of Core Pin Cell
Table 2.2.f	Atom Densities of Individual Regions in 6 Annuli Model of Blanket Pin Cell
Table 2.2.g	Atom Densities of Materials of Individual Regions in Slab Model of Core Pin Cell
Table 2.2.h	Atom Densities of Materials of Individual Regions in Slab Model of Blanket Pin Cell
Table 2.3	Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value of Each Calculation for Plate Cell Axial Voiding
Table 2.4	Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value of Each Calculation for Pin Cell Axial Voiding in Assembly VI-2-P

Table 2.5	Calculated Reactivity Worth Component for Axial Group Void Traverse for Plate and Pin Cell
Table 2.6	Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value with Correction of Streaming Effect and Exact Perturbation, for Plate Cell Axial Voiding
Table 2.7	Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value with Correction of Streaming Effect and Exact Perturbation, for Pin Cell Axial Voiding in Assembly VI-2P
Table 2.8	Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value of Calculation Using Unified Diffusion Coefficient, Corrected by Exact Perturbation Effect
Table 2.9	Sodium Void Reactivity Worth for Channel Void Traverse for Plate and Pin Cell
Table 2.10	Calculated Reactivity Worth Component for Channel Void Traverse for Plate and Pin Cell

Chapter 3

Table 3.1	Comparison of Absorption Cross Sections of Spacer Collapsed by Spectrums of Each Geometry
Table 3.2	Comparison of Cross Sections of Spacer from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation Consisting of Spacer and Test Region (Na in)
Table 3.3	Comparison of Cross Sections of Test Region (Na in) from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation
Table 3.4	Comparison of Cross Sections of Fuel Compacted Drawer from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation
Table 3.5	Comparison of Cross Sections of Test Region (Na in) from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation
Table 3.6	Comparison of $\Delta\Sigma_a$ and $\Delta\nu\Sigma_f$ between Spacer and Test Region (Na out) from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation
Table 3.7	Comparison of $\Delta\Sigma_a$ and $\Delta\nu\Sigma_f$ between Fuel Compacted Drawer and Test Region (Na out) from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation

Table 3.8	Comparison of $\Delta\Sigma_a$ and $\Delta v\Sigma_f$ between Test Regions* from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation
Table 3.9	Comparison of $\Delta\Sigma_a$ and $\Delta v\Sigma_f$ between Test Regions* from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation
Table 3.10	Reactivity Worth Obtained by Diffusion Calculation Using 70-groups Cross Sections
Table 3.11	Reactivity Worth Obtained by Transport Calculation Using the Cross Sections from Infinite-Cell-Calculation
Table 3.12	Reactivity Worth Obtained by Transport Calculations at Various Research Laboratories
Table 3.13	Reactivity Worth Obtained by Transport Calculation Using the Cross Sections from Super-Cell-Calculation
Table 3.14	Components of Fuel Slumping Reactivity Worths for Each Pattern Obtained by Using Cross Sections from Infinite-Cell Calculation
Table 3.15	Components of Fuel Slumping Reactivity Worths for Each Pattern Obtained by Using Cross Sections from Super-Cell Calculation

List of Figures

Chapter 2

- Fig. 2.1 Configuration of FCA VI-2 Assembly
- Fig. 2.2 Configuration of Pin Assembly
- Fig. 2.3 The Central 3x3 Drawers of FCA VI-2
- Fig. 2.4 Vertical Cross Section of Assembly VI-2-B for Axial Voiding
- Fig. 2.5 Vertical Cross Section of Assembly VI-2-P for Axial Voiding
- Fig. 2.6 Vertical Cross Section of Assembly VI-2-B for Channel Void Traverse
- Fig. 2.7 Vertical Cross Section of Assembly VI-2-P for Channel Void Traverse
- Fig. 2.8 Vertical Cross Section of the Unit Cell of Assembly VI-2 Core, and Infinite Slab Model of Plate Cells
- Fig. 2.9 Modeling of Pin Cell
- Fig. 2.10 R-Z Reactor Model for 70-Group Diffusion Calculation
- Fig. 2.11 Model for Calculating Unified Diffusion Coefficient
- Fig. 2.12 R-Z Computational Model of Assembly VI-2
- Fig. 2.13 Axial Distribution of Sodium Void Reactivity Worth (Uncorrected)
- Fig. 2.14 Reactivity Worth of Axial Progressive Sodium Voiding (Uncorrected)
- Fig. 2.15 Axial Distribution of Sodium Void Reactivity Worth (Corrected)
- Fig. 2.16 Reactivity Worth of Axial Progressive Sodium Voiding (Corrected)
- Fig. 2.17 Radial Distribution of Sodium Void Reactivity Worth

Chapter 3

- Fig. 3.1 Vertical Cross Section of FCA Assembly VIII-2
- Fig. 3.2 Loading Pattern of Test Region, Axial Blanket, Driver Region and Control/Safety Rod of FCA VIII-2
- Fig. 3.3 RZ Configuration of FCA VIII-2

- Fig. 3.4 Configurations of the Central 3x3 Drawers Used in
the Slumping Experiment
- Fig. 3.5 Plate Arrangement of Each Cell Loaded in the Central
3x3 Drawers
- Fig. 3.6 Calculational Flow Diagram for Analysis of Slumping
Reactivity Worth in FCA VIII-2
- Fig. 3.7 RZ Model of FCA VIII-2 for Collapsing Group Constants
- Fig. 3.8 1-D Modeling for Super-Cell Calculation
- Fig. 3.9 Super-Cell Model of FCA VIII-2
- Fig. 3.10 RZ Model of FCA VIII-2 Using Cross Sections Obtained
by Infinite-Cell Calculation
- Fig. 3.11 RZ Model of FCA VIII-2 Using Cross Sections Obtained
by Super-Cell Calculation
- Fig. 3.12 Adaptation of Cross Sections Obtained by Super-Cell
Calculation to Core Calculation
- Fig. 3.13 Flux Distribution GROUP = 1
- Fig. 3.14 Flux Distribution GROUP = 5
- Fig. 3.15 Flux Distribution GROUP = 9
- Fig. 3.16 Flux Distribution GROUP = 15
- Fig. 3.17 Change of Reactivity Worth due to Fuel Slumping
Performed by Various Research Laboratories

1. 緒 言

高速臨界集合体の実験解析は単に解析に用いられた Data and Method の改善につながるだけでなく炉物理特性の正確な理解に役立ち、さらに高速炉設計計算に必要なバイアスを得る上でも重要な役割を持っている。臨界集合体は高速炉炉心燃料組成を模擬するように構成されているが臨界集合体の大部分のドロワーにはプレート燃料が用いられており、実際の高速炉炉心に比べると非均質性が強くなっている。このような体系における炉物理特性から高速炉の特性を精度よく外挿する際には臨界集合体特有の非均質効果を正確に取り扱わねばならない。この非均質効果により中性子ストリーミング効果が生じるわけであるが、炉物理上その取り扱いはむつかしく通常 Benoist の拡散係数を用いその効果が評価されている。

大阪大学ではこれまで Benoist の方法⁽¹⁾に異種ドロワー間の干渉効果を取り入れた統一拡散係数⁽²⁾を導出し、ナトリウムボイド反応度等の実験解析に応用し⁽³⁾その適用性について調べてきた。また、中性子輸送摂動コード⁽⁴⁾を開発し、中性子ストリーミングを定量的に評価できるようになった。

本報告書ではこれらの方式を用い日本原子力研究所の高速臨界集合体 F C A を用いて行なわれたピン及びプレート形状におけるナトリウムボイド反応度実験、及び燃料スランピング反応度実験の解析を行ない、計算方法上の検討を行なう。

まず、ナトリウムボイド反応度の実験解析について述べる。高速臨界実験では通常プレート燃料が用いられているが実際の動力炉ではピン燃料が用いられるので、動力炉の設計に当ってはプレート燃料の炉物理特性のピン燃料への外挿法が問題となる。ナトリウムボイド反応度は高速炉の安全上重要な炉物理特性であるが、その計算結果は用いられる断面積セット並びに計算法に強く依存するので、プレート燃料体系のナトリウムボイド反応度のピン燃料体系への外挿はむつかしい問題となる。日本原子力研究所の F C A VI-2 集合体では、プレート燃料並びにピン燃料を用いたナトリウムボイド反応度の実験が行なわれた。⁽⁵⁾ 本報告書ではプレート燃料並びにピン燃料のナトリウムボイド反応度の C/E 値がどの程度異なり、外挿上に問題があるかどうかを確かめるため F C A VI-2 集合体のナトリウムボイド反応度の実験の解析を行なう。断面積セットとしては JENDL-2 B-70 群セット⁽⁶⁾を用いて Benoist の拡散係数に基づく拡散計算、統一拡散係数を用いた修正拡散計算並びに輸送計算を行ない、各計算結果を比較検討する。

次に燃料スランピング反応度の実験解析について述べる。高速炉の炉心熔融に伴う反応度

を測定するため中野氏等は F C A VIII - 2 集合体を用いてスランピング実験を行なった。⁽⁷⁾

また、角田氏等は JAERI Fast Set Version II に用いスランピング実験の解析を行ない、計算法の評価をした。⁽⁸⁾ 本報告では JENDL-2B-70 群セットを用いて F C A VIII - 2 集合体のスランピング実験を解析し、これまでの計算結果と比較検討する。スランピング反応度実験で高密度燃料領域並びにボイド領域が炉内に存在するため、その解析も拡散理論では不十分となるので中性子輸送理論に基づき計算を行なう。また、各燃料スランピング体系で大幅に中性子スペクトルが異なるため、できる限り多数群の計算を行なう事が望まれる。そこで、各燃料スランピング体系ごとに 70 群の拡散計算を行ない、そのスペクトルで各体系ごとの 18 群定数を作成し輸送計算を実行してスランピング反応度を計算した。格子定数は通常無限格子近似を用いた格子計算により求められるが、スランピング実験では通常の燃料格子、高密度燃料格子、ボイド格子が存在するため異種の格子間の干渉効果を評価する必要がある。本報告では異種の格子から構成されるカップルドセル(スーパーセル)を用いてこの効果を検討する。

2. プレート及びピン形状におけるナトリウムボイド反応度の解析

2.1 ナトリウムボイド反応度実験の概要

プレートおよびピン形状における Na ボイド反応度の実験が行なわれた F C A VI-2 集合体の詳細は JAERI-M7888⁽⁹⁾ に記されているので本章では解析に必要なデータを簡単に示す。

F C A VI-2 集合体の基準燃料装荷パターンは Fig. 2.1 の炉心 X Y 断面図に示されるように試験領域、ドライバー、ブランケット、安全棒ドロワーから構成されているが、プレートおよびピン燃料の格子平均の組成をほぼ等しくするためプレート燃料の Na ボイド 実験は一部の試験領域ドロワーの 92% fissile Pu プレートを 75% fissile の dirty Pu プレートに変換して行なわれた。また、試験領域の軸方向ブランケットとしては Fig. 2.1 に示されるように劣化ウラン酸化物とナトリウムよりなるドロワーを用いている。このような体系は F C A VI-2-B 集合体と称されている。

ピン燃料ドロワーとしては Fig. 2.2 に示されるように 9.0mmφ の $\text{PuO}_2 / \text{DUO}_2$ ペレットを 0.3mm 厚のステンレス鋼で被覆したピンを外辺 2", 長さ 6" のステンレス鋼製カランドライア内に 4行4列に配置したものが用いられている。軸方向ブランケットでは DUO_2 ペレットが用いられている。75% fissile Pu のプレート燃料ドロワーの一部をピンカランドライアで置換した系は F C A VI-2-P 集合体と称されており、VI-2-B と VI-2-P 集合体を用いてプレートおよびピン体系の軸方向および径方向 Na ボイド反応度実験が行なわれた。⁽⁵⁾ 軸方向ボイド実験としては軸方向グループボイドトラバースと軸方向ストリーミング実験がある。

軸方向グループボイドトラバース実験では Fig. 2.3 に示される固定 (F) 側中央 3行3列の (1~3)Z, (4~6)Z, (7~9)Z, (10~16)Z の領域のボイド反応度が測定された。軸方向ストリーミング実験では、F側中央 3行3列の累進的領域 (1~16)Z, (4~16)Z, (7~16)Z, (10~16)Z および中央の1本の引出しの (1~3)Z, (4~16)Z, (7~16)Z, (10~16)Z の領域のボイド反応度が測定された。

プレート体系の軸方向ボイド実験の際の燃料装荷パターンを Fig. 2.4 に示し、ピン体系の場合のパターンを Fig. 2.5 に示す。

径方向チャンネルボイドトラバース実験では Fig. 2.6 に示すような 0 から 4 までのそれぞれの位置で F側 (1~16)Z の領域のボイド反応度が測定された。

径方向ボイド実験の際のプレート体系の燃料装荷パターンを Fig. 2.6 に示し、ピン体系の場合のパターンを Fig. 2.7 に示す。

2.2 群定数作成

2.2.1 格子計算

格子平均群定数はCASUPコード⁽¹⁰⁾によりプレートドロワとピンドロワについてJENDL-2B-70群断面積⁽⁶⁾を用いて求めた。自己遮蔽因子は、一次元スラブまたは一次元円筒2領域格子で求め、格子内中性子束分布は、一次元スラブまたは一次元円筒格子で衝突確率法に基づき計算した。CASUPコードの出力データは70群断面積とBenoistの拡散係数である。

プレートドロワの格子計算に用いた一次元スラブモデルと各領域の数密度をそれぞれFig. 2.8, Table 2.1に示す。実験では、Na缶は英国製であるがボイド缶は日本製のものが使われたため、通常ドロワとボイドドロワではSUSの量が異なる。このボイド缶の組成の違いを補正するためにボイドドロワについては、通常ドロワからNaだけを取り去った状態に対応するドロワの格子計算も行なった。“A”パターンの軸方向ブランケットとは、試験領域のドロワと同じ装填パターンでPuプレートの代わりにNUプレートが使用されたものである。プレート体系の軸方向ブランケットは、軸方向ボイド実験では中央3×3ドロワ、径方向ボイド実験では1ドロワが、“A”パターンブランケットに置きかえられてボイド反応度が測定された。ピンドロワの格子計算では、燃料ペレットと構造材からなる2領域モデルで実効マイクロ断面積を求め、格子内中性子束分布は4つのモデルで行った。一本の燃料ペレット領域、被覆管・チューブ領域、ナトリウム領域、およびこれら以外の構造材の領域からなる4領域円筒モデル、ナトリウム領域と構造材を均質化した3領域円筒モデル。これらは、ピンドロワの16分の1に対応する。ピンドロワの断面積を保存して6領域の円筒にしたモデル。およびピンドロワ断面積を保存して一次元スラブモデルとしたもの。以上の4つのモデルを用いた。ピンドロワの格子計算モデルと各領域の数密度は、それぞれFig. 2.9とTable 2.2に示す。

2.2.2 縮約

70群群定数をCITATIONコード⁽¹¹⁾によるR-Z拡散計算で得られる各領域のスペクトルを使って18群に縮約した。Benoistの拡散係数はスペクトルを重みとして縮約した。輸送断面積は70群の輸送断面積をスペクトルを重みとして縮約した。70群の拡散計算はVI-2-B基準体系の2次元R-Zモデルで行なった。Fig. 2.10にその2次元R-Z体系図を示す。

2.2.3 ストリーミング干渉効果の補正

ボイドドロワと通常ドロワとの間の中性子ストリーミングの干渉効果を考慮するために18群のスーパーセル計算により統一拡散係数を計算した。スーパーセルは、Fig. 2.11に示すように中央が均質化したボイドドロワの希釈領域でまわりが均質化した通常のドロワで囲まれた円筒モデルである。g群、k方向、領域i（内側ボイド領域または外側領域）の統一拡散係数は(2.1)式によって定義される。

$$D_{k,i}^g = \frac{\sum_j \phi_j^g V_j P_{ji,k}^g / 3 \Sigma_{t,i}^g}{\phi_i^g V_i} \quad (2.1)$$

ϕ_j^g は領域j、g群の中性子束、 V_j は領域jの体積、 $P_{ji,k}^g$ は方向依存衝突確率、 $\Sigma_{t,i}^g$ は領域i、g群の中性子輸送断面積である。領域i、k方向の拡散係数に対する中性子ストリーミングの干渉効果は、統一拡散係数と通常の拡散係数の比で定義する。

$$f_{k,i}^g = D_{k,i}^g / (1/3 \Sigma_{t,i}^g) \quad (2.2)$$

Benoistの拡散係数にこの因子fを乗じたものを統一拡散係数としてNaボイド反応度の解析に用いた。fの値は外側の通常ドロワの領域では1に近い値であったため、干渉効果補正はボイドドロワに対してのみ行なった。

2.3 ナトリウムボイド反応度の解析モデル

2.3.1 軸方向ナトリウムボイド反応度

計算は18群定数を用いて1/2炉心2次元R-Z体系でTWOTRANコード⁽¹²⁾による輸送計算およびCITATIONコードによる拡散計算で行なった。拡算計算に用いた拡散係数はBenoistの拡散係数、統一拡散係数および従来の $1/3 \Sigma_{tr}$ の拡散係数である。輸送計算、拡散計算ともに空間メッシュは径方向に47点、軸方向に37点取った。TWOTRANの計算では、 S_6P_0 近似を用い再釣合い領域の数は径方向26軸方向16である。Naボイド反応度は2次元輸送摂動コードTRAPERTによる一次摂動および拡散理論に基づく一次摂動で計算し、Benoistの拡散係数を用いたものについて厳密摂動計算を行ない一次摂動に対する補正をした。プレート体系では、3行3列の各ボイドパターンについて日本製ボイド缶を英国製Na缶に対応するボイド缶に置換した場合のSUSの反応度を輸送一次摂動計算で求め、Naボイド

反応度の測定値と計算値に対してNa缶とボイド缶のSUS量のちがいを補正した。ただし摂動計算にはNa-inの体系のangular flux, angular adjoint fluxを用いた。

拡散および輸送計算の際のRZモデル並びにメッシュ数(粗メッシュ数)をFig. 2. 12に示す。

軸方向ボイド反応度の輸送計算結果に対する中性子ストリーミング効果の補正方式について述べる。格子計算によって得られた均質断面積を用いた輸送摂動計算結果にBenoistの D_{tr} , D_{tr}^* を用いた拡散摂動計算結果と $D = 1/3 \Sigma_{tr}$ を用いた拡散摂動計算結果の差をストリーミング補正として加える。ストリーミング効果を考慮したボイド反応度は(2.3)式で定義する。

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(\text{Transport}) + \Delta\rho \\ \Delta\rho &= \rho(D_{\text{Benoist}}) - \rho(1/3\Sigma_{tr}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$\rho(D_{\text{Benoist}})$ はBenoistの拡散係数を用いたボイド反応度, $\rho(1/3\Sigma_{tr})$ は $D=1/3\Sigma_{tr}$ を用いたボイド反応度, $\rho(\text{Transport})$ は輸送計算によるボイド反応度である。

ボイド反応度の一次摂動計算結果に対する厳密摂動計算の効果の補正はBenoistの拡散係数を用いた拡散一次摂動計算結果と拡散厳密摂動計算結果の差を用いて各ボイドパターンに対して行なう, 厳密摂動計算の効果を検討したボイド反応度は(2.4)式で定義する。

$$\rho(E.P) = \rho(\text{FOP}) + \left\{ \rho(D_{\text{Benoist}}, E.P) - \rho(D_{\text{Benoist}}, \text{FOP}) \right\} \quad (2.4)$$

2. 3. 2 径方向チャンネルボイドトラバース

計算は, 18群定数を用いて1/4炉心3次元XYZ体系でCITATIONコードによる拡散計算で行なった。空間メッシュは, 1 mesh / drawerを取った。

拡散係数はBenoistの拡散係数および統一拡散係数を用いた。ナトリウムボイド反応度は拡散一次摂動計算で求めた。ピンドロワの場合には3領域円筒モデルの格子定数を用いた。

2. 4 計算結果

2. 4. 1 軸方向ナトリウムボイドワース

Table 2. 3, 2. 4およびFig. 2. 13, 2. 14に軸方向ナトリウムボイドワースの測定値と補正前の各計算値およびC/Eの値を示す。まずプレートセルでは, Benoistの拡散係

数を用いた計算は 3×3 ドロワ (1~16) Z のケースを除いて 15% 以下の誤差である。統一拡散係数を用いた計算は Benoist の拡散係数を用いた計算よりポイドワースを過大評価する。輸送計算は、中性子ストリーミング補正前では Benoist の拡散係数、統一拡散係数を用いた計算に比べ、ポイドワースは大きくなり、測定値と計算値の差は大きい。次にピンセルでは 4 領域円筒モデルの格子定数を用いた計算を除いて、いずれのケースでもポイドワースを過大評価する。6 領域円筒モデルの格子定数を用いた計算では、ポイドワースは、3 領域円筒モデルの格子定数を用いた計算と近い値になっている。スラブモデルによる格子定数で Benoist の拡散係数を用いた計算では、ポイドワースの過大評価が 37% 以下になった。4 領域円筒モデルの格子定数で Benoist の拡散係数を用いた計算では、炉中心を除いてはポイドワースを過小評価する。

Table 2.5 に軸方向グループポイドトラバースについて Benoist の拡散係数と統一係数を用いた場合の一次摂動計算のポイドワースの各成分を示す。プレートセルとピンセルおよびピンセルの格子モデル間でのポイドワースのちがいは炉中心を除き主に中性子洩れの成分のちがいでよっていることがわかる。ピンセル 4 領域円筒モデルの格子定数で Benoist の拡散係数を用いた計算は、他の格子モデルに比べ中性子洩れの成分が大きいため、ポイドワースは小さくなる。これは、4 領域円筒モデルではポイド領域にスミアされる SUS が少ないため、(サポートプレートのみスミアした)ポイド状態での Benoist の拡散係数が大きくなることによる。また、統一拡散係数を用いると Benoist の拡散係数を用いた場合よりも中性子洩れの成分はおさえられる。

ピンセルでの Fission 成分はプレートセルに比べ大きく、ゼロに近くなっている。これはボイディングにおけるセル内の中性子束分布の変化が、プレートセルの方がピンセルよりも大きいことによる。すなわちボイディングにおける格子平均の核分裂断面積の変化がプレートセルの方が大きくなるからである。

Table 2.6, 2.7 には軸方向ポイドワースの輸送計算の結果に中性子ストリーミング補正および厳密摂動補正を行った値と C/E の値を示す。Table 2.8 には統一拡散係数を用いた計算に、厳密摂動補正を行った値と C/E の値を示す。ストリーミング補正、厳密摂動補正は炉心上端 (7~9) Z で最も大きい。プレートセルではこれらの補正により輸送計算の値は測定値に近づく (Fig. 2.15, 2.16)。ピンセルではスラブモデル及び 4 領域円筒モデルではこれらの補正により輸送計算のポイドワースは測定値に近づく。統一拡散係数を用いたポイドワースに厳密摂動補正を行なった値は、輸送計算のポイドワースにストリーミング

補正と厳密摂動補正を行った値とほぼ一致している。ピンセルについて補正後の値を格子計算モデルと比較すると、スラブモデルと4領域円筒モデルによる格子定数を用いた計算は、3領域円筒モデルや6領域円筒モデルに比べ測定値と近い値を与える。またスラブモデルによる計算値は他のモデルに比べて、プレートセルに関するC/Eと近いC/Eの値を与える。

2.4.2 径方向チャンネルポイドトラバース

Table 2.9 および Fig. 2.17 に径方向チャンネルポイドトラバースの測定値と計算値を示す。ポイドワースの測定値は位置0Rで最も大きく、炉中心から離れるにつれて減少し4Rで最小となる。計算値は、この傾向では測定値と同じであるが、各位置でのポイドワースは過大評価している。ピンセルでの計算値の過大評価は、プレートセルよりも大きい。統一拡散係数を用いると、Benoistの拡散係数を用いた計算よりポイドワースは大きくなる。

Table. 2.10 に径方向チャンネルポイドトラバースのポイドワースの摂動計算による各成分を示す。ポイドワースの径方向での変化は主にスペクトル成分の変化によっている。チャンネルポイドではスペクトル成分と中性子洩れの成分が打ち消し合い、ポイドワースの絶対値は小さくなる。従って測定値と計算値の誤差の割合は大きくなる。

2.5 結 論

ピン燃料ではポイド反応度のFission成分がプレート燃料に比べて絶対値は小さくポイドワースはプレートセルより大きくなる傾向がある。

統一拡散係数を用いた摂動計算ではBenoistの拡散係数を使ったものに比べLeakage成分が押えられポイドワースの計算値は輸送計算に中性子ストリーミング補正を行った値とよく一致し、統一拡散係数を用いると輸送補正、中性子ストリーミング補正が十分取り入れられるので設計計算法として便利である。

ピンセルに関しては、格子計算を一次元スラブモデル及び4領域円筒モデルで行った計算は、一次元3領域及び6領域円筒モデルに比べポイド反応度を減少さす。これは、ポイド時の中性子ストリーミングが増加するためであり、今後モデルの妥当性を検討する必要がある。さらに、ピン体系に対しては炉中心のポイドワースのC/E値は1.2程度となりプレート体系の値と異なっている。

Table 2.1.a Atomic Composition of Test Region Plate Cell Loaded with 92% Fissile Pu Plate

(Unit; 10^{22} atoms/cm³)

Nuclide	Drawer & matrix	Na can	Na meat	DUO ₂	92% fissile Pu	Al ₂ O ₃
Pu-239					1.81666	
Pu-240					0.16017	
Pu-241					0.01515	
U-235				0.00413		
U-238				2.00322		
O				4.01470		5.86815
Na			2.03580			
Al					0.26073	3.91210
Cr	1.36670	1.43808	0.12675	0.08223	0.56773	0.08223
Fe	4.97584	5.33149	0.46462	0.29937	2.10128	0.29937
Ni	0.59577	0.68273	0.05709	0.03584	0.26748	0.03584
Width (cm)	0.22	0.058	0.519	0.635	0.15875	0.15875

Table 2.1.c Atomic Composition of Test Region Voided Plate Cell Loaded with 75% Fissile Pu Plate

(Unit; 10^{22} atoms/cm³)

Nuclide	Drawer & matrix	Void can	Void space	DUO ₂	75% fissile Pu	Al ₂ O ₃
Pu-239					1.65734	
Pu-240					0.58775	
Pu-241					0.17903	
U-235				0.00413		
U-238				2.00322		
O				4.01470		5.86815
Na						
Al					0.31940	3.91210
Cr	1.36670	1.55368	0.17975	0.08223	0.59999	0.08223
Fe	4.97584	5.79291	0.66347	0.29937	2.22099	0.29937
Ni	0.59577	1.04005	0.10240	0.03584	0.28287	0.03584
Width (cm)	0.22	0.04	0.555	0.635	0.15875	0.15875

Table 2.1.b Atomic Composition of Test Region Plate Cell Loaded with 75% Fissile Pu Plate

(Unit; 10^{22} atoms/cm³)

Nuclide	Drawer & matrix	Na can	Na meat	DUO ₂	75% fissile Pu	Al ₂ O ₃
Pu-239					1.65734	
Pu-240					0.58775	
Pu-241					0.17903	
U-235				0.00413		
U-238				2.00322		
O				4.01470		5.86815
Na			2.03580			
Al					0.31940	3.91310
Cr	1.36670	1.43808	0.12675	0.08223	0.59999	0.08223
Fe	4.97584	5.33149	0.46462	0.29937	2.22099	0.29937
Ni	0.59577	0.68273	0.05709	0.03584	0.28287	0.03584
Width (cm)	0.22	0.058	0.519	0.635	0.15875	0.15875

Table 2.1.d Atomic Composition of 'A' Pattern Axial Blanket

(Unit; 10^{22} atoms/cm³)

Nuclide	Drawer & matrix	Na can	Na meat	DUO ₂	Natural U	Al ₂ O ₃
Pu-239						
Pu-240						
Pu-241						
U-235				0.00413	0.03142	
U-238				2.00322	4.33437	
O				4.01470		5.86815
Na			2.03580			
Al						3.91210
Cr	1.36670	1.43808	0.12675	0.08223	0.08223	0.08223
Fe	4.97584	5.33149	0.46462	0.29937	0.29937	0.29937
Ni	0.59577	0.68273	0.05709	0.03584	0.03584	0.03584
Width (cm)	0.22	0.058	0.519	0.635	0.15875	0.15875

Table 2.1.e Atomic Composition of Voided 'A' Pattern Axial Blanket

Nuclide	Drawer & matrix	Void can	Void space	(Unit:10 ²² atoms/cm ³)		
				DUO ₂	Natural U	Al ₂ O ₃
Pu-239						
Pu-240						
Pu-241						
U-235				0.00413	0.03142	
U-238				2.00322	4.33437	
O				4.01470		5.86815
Na						
Al						3.91210
Cr	1.36670	1.55368	0.17975	0.08223	0.08223	0.08223
Fe	4.97584	5.79291	0.66347	0.29937	0.29937	0.29937
Ni	0.59577	1.04005	0.10240	0.03584	0.03584	0.03584
Width (cm)	0.22	0.04	0.555	0.635	0.15875	0.15875

Table 2.1.f Atomic Composition of Driver Fuel

Nuclide	Drawer & matrix	20% enriched U (1/8")	Na can	Na meat	(Unit:10 ²² atoms/cm ³)		
					Al ₂ O ₃	93% enriched U	20% enriched U (1/16")
Pu-239							
Pu-240							
Pu-241							
U-235		0.85191				3.92895	0.85191
U-238		3.3820				0.29709	3.3820
O					5.86815		
Na				2.03580			
Al					3.91210		
Cr	1.3667	0.08223	1.43808	0.12675	0.08223	0.08223	0.08223
Fe	4.97584	0.29937	5.33149	0.46462	0.29937	0.29937	0.29937
Ni	0.59577	0.03584	0.68273	0.05709	0.03584	0.03584	0.03584
Width (cm)	0.22	0.3175	0.058	0.519	0.635	0.15875	0.15875

Table 2.1.g Atomic Composition of DUO₂/Na Blanket

Nuclide	Drawer & matrix	(Unit:10 ²² atoms/cm ³)		
		Na can	Na meat	DUO ₂
Pu-239				
Pu-240				
Pu-241				
U-235				0.00413
U-238				2.00322
O				4.01470
Na			2.03580	
Al				
Cr	1.36670	1.43808	0.12675	0.08223
Fe	4.97584	5.33149	0.46462	0.29937
Ni	0.59577	0.68273	0.05709	0.03584
Width (cm)	0.22	0.058	0.519	0.635

Table 2.1.h Cell-averaged Densities of Radial Blanket, Axial blanket & Empty Matrix
(Unit:10²²atoms/cm³)

Nuclide	Radial blanket	Axial blanket	Empty matrix
Pu-239			
Pu-240			
Pu-241			
U-235	0.02891	0.00840	
U-238	3.98887	4.01746	
O			
Na			
Al			
Cr	0.18461	0.18461	0.11626
Fe	0.67213	0.67213	0.42329
Ni	0.08048	0.08048	0.05068

Table 2.2.a Atom Densities of Materials of Individual Regions in 3 Annuli Model Corresponding to 1/16 of Core Pin Cell (Unit; 10^{22} atoms/cm³)

Nuclide	PuO ₂ /UO ₂	SUS (tube, clad)	Na+SUS
Pu-239	0.28573		
Pu-240	0.10734		
Pu-241	0.03005		
U-235	0.00375		
U-238	1.84937		
O	4.55038		
Na			1.41389
Al			
Cr		1.25127	0.50557
Fe		4.43880	1.82696
Ni		0.61478	0.22852

Table 2.2.c Atom Densities of Materials of Individual Regions in 4 Annuli Model Corresponding to 1/16 of Core Pin Cell

(Unit; 10^{22} atoms/cm ³)			
Nuclide	PuO ₂ /UO ₂	SUS (tube, clad)	Na+SUS Matrix, drawer & calandria
Pu-239	0.28573		
Pu-240	0.10734		
Pu-241	0.03005		
U-235	0.00375		
U-238	1.84937		
O	4.55038		
Na			2.26449
Al			
Cr		1.25127	0.02384 1.30631
Fe		4.43880	0.08458 4.72319
Ni		0.61478	0.01171 0.58889

Table 2.2.b Atom Densities of Materials of Individual Regions in 3 Annuli Model Corresponding to 1/16 of Blanket Pin Cell (Unit; 10^{22} atoms/cm³)

Nuclide	DUO ₂	SUS (tube, clad)	Na+SUS
Pu-239			
Pu-240			
Pu-241			
U-235	0.00469		
U-238	2.31197		
O	4.63479		
Na			1.45983
Al			
Cr		1.23792	0.48471
Fe		4.39143	1.75295
Ni		0.60822	0.21827

Table 2.2.d Atom Densities of Materials of Individual Regions in 4 Annuli Model Corresponding to 1/16 of Blanket Pin Cell

(Unit; 10^{22} atoms/cm ³)			
Nuclide	DUO ₂	SUS (tube, clad)	Na+SUS Matrix, drawer & calandria
Pu-239			
Pu-240			
Pu-241			
U-235	0.00469		
U-238	2.31197		
O	4.63479		
Na			2.33807
Al			
Cr		1.23792	0.01022 1.27341
Fe		4.39143	0.03625 4.60650
Ni		0.60822	0.00502 0.57273

Table 2.2.e Atom Densities of Individual Regions in 6 Annuli Model of Core Pin Cell

Nuclide	(Unit; 10^{22} atoms/cm ³)			
	Na+SUS (No.1)	PuO ₂ /UO ₂	Na+SUS (No.2)	SUS
Pu-239		0.28573		
Pu-240		0.10734		
Pu-241		0.03005		
U-235		0.00375		
U-238		1.83937		
O		4.55038		
Na	1.47563		1.60683	
Al				
Cr	0.43589		0.36340	1.34594
Fe	1.54631		1.28913	4.86378
Ni	0.21416		0.17855	0.60836

Table 2.2.f Atom Densities of Individual Regions in 6 Annuli Model of Blanket Pin Cell

Nuclide	(Unit; 10^{22} atoms/cm ³)			
	Na+SUS (No.1)	DUO ₂	Na+SUS (No.2)	SUS
Pu-239				
Pu-240				
Pu-241				
U-235		0.00469		
U-238		2.31197		
O		4.63479		
Na	1.52358		1.65904	
Al				
Cr	0.43124		0.35952	1.29040
Fe	1.52980		1.27538	4.66675
Ni	0.21188		0.17664	0.58107

Table 2.2.g Atom Densities of Materials of Individual Regions in Slab Model of Core Pin Cell

Nuclide	(Unit; 10^{22} atoms/cm ³)				
	Matrix, drawer & calandria	Na+SUS (No.1)	SUS (tube, clad)	PuO ₂ /UO ₂	Na+SUS (No.2)
Pu-239				0.28573	
Pu-240				0.10734	
Pu-241				0.03005	
U-235				0.00375	
U-238				1.84937	
O					
Na		1.79919			1.74789
Al					
Cr	1.46685	0.24890	1.25127		0.27634
Fe	5.30507	0.89845	4.43880		0.99750
Ni	0.66042	0.11310	0.61478		0.12557
Width (cm)	0.281	0.329	0.1045	0.461	0.540

Table 2.2.h Atom Densities of Materials of Individual Regions in Slab Model of Blanket Pin Cell

Nuclide	(Unit; 10^{22} atoms/cm ³)				
	Matrix, drawer & calandria	Na+SUS (No.1)	SUS (tube, clad)	DUO ₂	Na+SUS (No.2)
Pu-239					
Pu-240					
Pu-241					
U-235				0.00469	
U-238				2.31197	
O				4.63479	
Na		1.85765			1.80469
Al					
Cr	1.41297	0.23711	1.23792		0.26325
Fe	5.11394	0.85662	4.39143		0.95106
Ni	0.63395	0.10730	0.60822		0.11913
Width (cm)	0.281	0.329	0.1045	0.461	0.540

Table 2.3 Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value of Each Calculation for Plate Cell Axial Voiding in FCA VI-2-B

(Unit; $10^{-6} \Delta k/k/kg-Na$)

		Voided Axial Position	Removed Na (kg)	Measurement	Benoist's D (FOP) C/E	Unified D (FOP) C/E	Benoist's D (E.P) C/E	Transport (FOP) C/E
Axial Group Voiding	3x3 Drawers	(1~3)Z	1.222	151.9 ±2	151.1 0.99	153.4 1.01	154.7 1.02	161.1 1.06
		(4~6)Z	1.222	46.9 ±2	44.4 0.95	56.9 1.21	50.3 1.07	76.8 1.64
		(7~9)Z	1.222	-92.8 ±2	-93.4 1.01	-66.4 0.72	-84.0 0.91	-32.7 0.35
		(10~16)Z	2.850	-37.0 ±0.7	-34.4 0.93	-26.6 0.72	-32.7 0.88	-15.2 0.41
Axial Streaming	3x3 Drawers	(1~16)Z	6.515	1.50 ±0.3	4.09 2.72	15.4 10.2	6.13 4.08	31.8 21.1
		(4~16)Z	5.293	-32.6 ±0.4	-29.9 0.92	-16.6 0.51	-27.9 0.86	1.99 -0.06
		(7~16)Z	4.072	-54.1 ±0.5	-52.1 0.96	-38.5 0.71	-49.7 0.92	-20.5 0.38
Axial Streaming	1 Drawer	(1~3)Z	0.1357	142.1 ±7	156.7 1.10	161.1 1.13	157.8 1.11	166.6 1.17
		(4~16)Z	0.5881	-33.6 ±2	-29.2 0.87	0.26 -0.008	-28.7 0.85	3.01 -0.09
		(7~16)Z	0.4524	-51.7 ±2	-52.3 1.01	-22.2 0.43	-51.5 1.00	-20.2 0.39
		(10~16)Z	0.3167	-38.0 ±3	-34.9 0.92	-16.3 0.43	-34.2 0.90	-15.3 0.40

Table 2.4 Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value of Each Calculation for Pin Cell Axial Voiding in Assembly VI-2P

(Unit: $10^{-6} \Delta k/k/kg-Na$)

	Voided Axial Position	Removed Na (kg)	Measurement	3 Annuli Model (1/16 Cell)		6 Annuli Model of Pin Cell				Slab Model of Pin Cell		4 Annuli (1/16 Cell)									
				Benoist's D (FOP)	C/E	Unified D (FOP)	C/E	Benoist's D (FOP)	C/E	Benoist's D (E.P)	C/E	Unified D (FOP)	C/E	Transport (FOP)	C/E	Benoist's D (FOP)	C/E	Unified D (FOP)	C/E	Benoist's D (FOP)	C/E
Axial Group Voiding 3x3 Drivers	(1~3)Z	1.161	134.3 ±2	167.7	1.25	170.1	1.27	163.1	1.21	166.5	1.24	165.4	1.23	188.2	1.25	160.7	1.20	163.1	1.22	159.9	1.19
	(4~6)Z	1.161	44.0 ±2	75.5	1.72	87.9	2.00	75.7	1.72	79.5	1.81	87.8	2.00	81.5	1.85	56.4	1.28	69.3	1.58	42.8	0.97
	(7~9)Z	1.161	-25.4 ±2	-44.1	0.52	-17.7	0.21	-36.0	0.42	-31.3	0.37	-9.56	0.11	-31.0	0.36	-78.3	0.92	-50.7	0.59	-110.4	1.29
	(10~16)Z	2.796	-31.7 ±0.7	-20.5	0.65	-12.5	0.39	-18.4	0.58	-17.5	0.55	-10.4	0.33	-15.7	0.50	-31.7	1.00	-23.2	0.73	-70.2	2.21
Axial Streaming 3x3 Drivers	(1~16)Z	6.278	-0.49 ±0.3	27.7	-56.0	38.9	-78.7	29.3	-59.3	31.1	-63.0	40.4	-81.3	33.4	-67.7	11.5	-23.6	23.3	-47.4	-14.1	29.0
	(4~16)Z	5.117	-31.1 ±0.4	-4.08	0.13	9.11	-0.29	-1.05	0.03	0.38	-0.01	12.1	-0.39	2.86	-0.09	-22.3	0.72	-8.47	0.27	-53.7	1.73
	(7~16)Z	3.957	-50.1 ±0.5	-27.4	0.55	-14.0	0.28	-23.6	0.47	-22.2	0.44	-10.1	0.20	-20.2	0.40	-45.4	0.91	-31.3	0.62	-82.0	1.64
1 Driver	(1~3)Z	0.1290	123.3 ±8	172.4	1.40	176.7	1.43	167.8	1.36	168.9	1.37	172.2	1.40	172.9	1.40	165.5	1.34	170.8	1.39	165.4	1.34
	(4~16)Z	0.5686	-34.8 ±2	-3.38	0.10	25.4	-0.73	-0.25	0.007	0.14	-0.004	28.6	-0.82	3.58	-0.10	-21.8	0.63	8.48	-0.24	-55.1	1.82
	(7~16)Z	0.4396	-57.3 ±2	-27.4	0.48	2.02	-0.04	-23.4	0.41	-23.0	0.40	6.00	-0.11	-20.1	0.35	-45.5	0.79	-14.6	0.26	-82.5	1.44
	(10~16)Z	0.3107	-45.4 ±3	-20.6	0.46	-2.87	0.06	-18.5	0.41	-18.2	0.35	-0.68	0.22	-15.9	0.11	-32.0	0.70	-13.2	0.29	-70.9	1.56

Table 2.5 Calculated Reactivity Worth Component for Axial Group Void Traverse for Plate and Pin Cell

(Unit; $10^{-6} \Delta k/k$)

	Voided Axial Position	Leakage (Benoist's D)	Leakage (Unified D)	Absorption	Moderation	Fission	
Plate Cell	(1~3)Z	-16.26	-13.48	59.26	178.55	-37.00	
	(4~6)Z	-92.54	-77.19	43.15	130.24	-26.64	
	(7~9)Z	-191.60	-158.65	20.70	68.39	-11.59	
	(10~16)Z	-138.81	-116.41	6.10	35.17	-0.524	
Pin Cell	3 Annuli Model	(1~3)Z	-11.70	-8.94	48.45	159.18	-1.32
		(4~6)Z	-63.25	-48.84	35.45	116.32	-0.945
		(7~9)Z	-130.46	-99.79	17.62	62.08	-0.398
		(10~16)Z	-98.60	-76.18	5.59	35.72	-0.0156
	6 Annuli Model	(1~3)Z	-11.00	-8.24	51.99	161.62	-13.37
		(4~6)Z	-58.60	-44.56	38.02	118.11	-9.65
		(7~9)Z	-119.21	-88.55	18.77	62.94	-4.25
		(10~16)Z	-92.77	-70.28	5.74	35.98	-0.458
	Slab Model	(1~3)Z	-14.73	-11.94	51.44	160.29	-10.49
		(4~6)Z	-81.82	-66.80	37.62	117.18	-7.57
		(7~9)Z	-168.67	-136.60	18.59	62.55	-3.34
		(10~16)Z	-129.92	-106.32	5.74	35.90	-0.304
4 Annuli Model	(1~3)Z	-18.47		51.85	158.14	-5.99	
	(4~6)Z	-99.48		37.94	115.54	-4.37	
	(7~9)Z	-206.58		18.88	61.73	-2.15	
	(10~16)Z	-238.15		5.69	36.28	-0.0756	

Table 2.6 Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value with Correction of Streaming Effect and Exact Perturbation, for Plate Cell Axial Voiding (Unit; $10^{-6} \Delta k/k/kg-Na$)

		Voided Axial Position	Transport (FOP) C/E	Streaming Correction	E.P-FOP Correction	Corrected Worth C/E
Axial Group Voiding	3x3 Drawers	(1~3) Z	161.1 1.06	-7.8	3.6	156.9 1.03
		(4~6) Z	76.8 1.64	-21.9	5.9	60.8 1.30
		(7~9) Z	-32.7 0.35	-40.4	9.4	-63.7 0.69
		(10~16) Z	-15.2 0.41	-13.4	1.7	-26.9 0.73
Axial Streaming	3x3 Drawers	(1~16) Z	31.8 21.1	-19.0	2.0	14.8 9.85
		(4~16) Z	1.99 -0.06	-21.7	2.0	-17.7 0.54
		(7~16) Z	-20.5 0.38	-21.5	2.4	-39.6 0.73
Axial Streaming	1 Drawer	(1~3) Z	166.6 1.17	-7.7	1.1	160.0 1.13
		(4~16) Z	3.01 -0.09	-21.8	0.5	-18.3 0.54
		(7~16) Z	-20.2 0.39	-21.8	0.8	-41.2 0.80
		(10~16) Z	-15.3 0.40	-13.7	0.7	-28.3 0.74

Table 2.7 Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value with Correction of Streaming Effect and Exact Perturbation,
for Pin Cell Axial Voiding in Assembly VI-2P

(Unit: $10^{-4} \Delta k/k/kg-Na$)

	Voided Axial Position	Transport (FOP) C/E		Streaming Correction				E. P.-FOP Correction	Corrected Worth								
				3 Annuli (1/16 Cell)	6 Annuli	Slab	4 Annuli (1/16 Cell)		3 Annuli Model (1/16 Cell)	6 Annuli Model	Slab Model	4 Annuli Model (1/16 Cell)					
Axial Group Voiding	3x3 Drawers	(1~3) Z	168.2	1.25	1.2	-3.4	-5.8	-6.6	3.4	172.8	1.29	168.2	1.25	165.8	1.24	165.0	1.23
		(4~6) Z	81.5	1.85	4.4	4.6	-14.7	-28.3	3.8	89.7	2.04	89.9	2.04	70.6	1.61	57.0	1.30
		(7~9) Z	-31.0	0.36	7.7	15.8	-26.5	-58.6	4.7	-18.6	0.22	-10.5	0.12	-52.8	0.62	-84.9	0.99
		(10~16) Z	-15.7	0.50	1.8	3.9	-9.4	-47.9	0.9	-13.0	0.41	-10.9	0.34	-24.2	0.76	-62.7	1.99
Axial Streaming	3x3 Drawers	(1~16) Z	33.4	-67.7	3.3	4.9	-12.9	-38.6	1.8	38.5	-78.6	40.1	-81.8	22.3	-45.5	-3.40	6.94
		(4~16) Z	2.86	-0.09	3.74	6.77	-14.5	-45.9	1.43	8.03	-0.26	11.6	-0.37	-10.2	0.33	-41.6	1.34
		(7~16) Z	-20.2	0.40	3.6	7.4	-14.4	-51.0	1.4	-15.2	0.30	-11.4	0.23	-33.2	0.66	-69.8	1.39
Axial Streaming	1 Drawer	(1~3) Z	172.9	1.40	1.2	-3.4	-5.7	-5.8	1.1	175.2	1.42	170.6	1.38	168.3	1.37	168.2	1.36
		(4~16) Z	3.58	-0.10	3.77	6.90	-14.65	-47.95	0.39	7.74	-0.22	10.9	-0.31	-10.7	0.31	-44.0	1.27
		(7~16) Z	-20.1	0.35	3.5	7.5	-14.6	-51.6	0.4	-16.2	0.28	-12.2	0.21	-34.3	0.60	-71.3	1.24
		(10~16) Z	-15.9	0.11	1.9	4.0	-9.5	-48.4	0.3	-13.7	0.30	-11.6	0.26	-25.1	0.55	-64.0	1.41

Table 2.8 Sodium Void Reactivity Worth and C/E Value of Calculation Using Unified Diffusion Coefficient, Corrected by Exact Perturbation Effect
(Unit; $10^{-6} \Delta k/k/kg-Na$)

		Voided Axial Position	Plate C/E	Pin					
				3 Annuli Model (1/16Cell) C/E		6 Annuli Model C/E		Slab Model C/E	
Axial Group Voiding	3x3 Drawer	(1~3) Z	157.0 1.03	173.5 1.29	168.8 1.26	166.5 1.24			
		(4~6) Z	62.8 1.34	91.7 2.08	91.6 2.08	73.1 1.66			
		(7~9) Z	-57.0 0.62	-13.0 0.15	-4.86 0.06	-46.0 0.54			
		(10~16) Z	-24.9 0.67	-11.6 0.37	-9.50 0.30	-22.3 0.71			
Axial Streaming	3x3 Drawer	(1~16) Z	17.1 11.4	40.7 -83.1	42.2 -86.1	25.1 -51.1			
		(4~16) Z	-14.5 0.44	8.90 -0.29	11.9 -0.38	-8.68 0.28			
		(7~16) Z	-36.1 0.67	-12.6 0.25	-8.7 0.17	-29.9 0.60			
Axial Streaming	1 Drawer	(1~3) Z	162.2 1.14	177.8 1.44	173.3 1.41	171.9 1.39			
		(4~16) Z	0.761 -0.023	25.8 -0.74	29.0 -0.38	8.87 -0.26			
		(7~16) Z	-21.4 0.41	2.42 -0.04	6.4 -0.11	-14.2 0.25			
		(10~16) Z	-15.6 0.41	-2.57 0.06	-0.38 0.008	-12.9 0.28			

Table 2.9 Sodium Void Reactivity Worth for Channel Void Traverse for Plate and Pin Cell

(Unit; $10^{-6} \Delta k/k/kg-Na$)

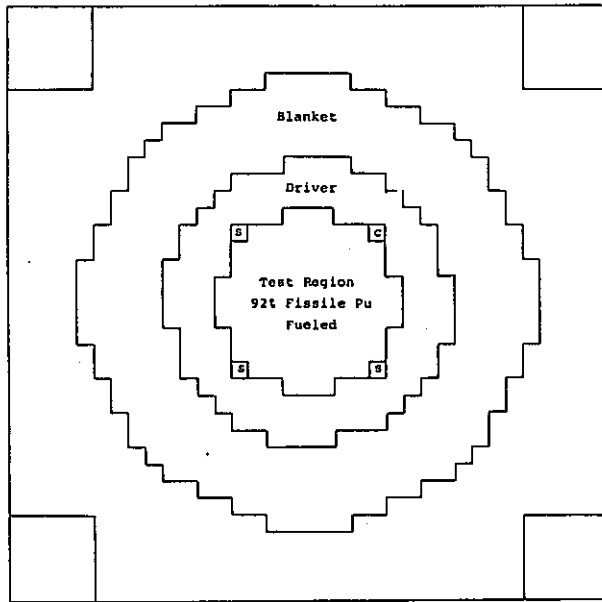
Voided Channel	Plate			Pin		
	Measurement	Calculation Benoist's D Unified D		Measurement	Calculation Benoist's D Unified D	
0 R	4.3±1	5.19	31.4	7.5±1	30.1	60.0
1 R	1.1±1	4.11	30.4	3.3±1	28.2	54.0
2 R	-2.3±1	0.25	26.4	-4.3±1	23.3	49.2
3 R	-11.2±1	-7.00	18.9	-8.5±1	14.7	40.5
4 R	-26.5±1	-18.6	6.79	-20.2±1	1.46	27.0

Removed Na: 0.72384kg for Plate Cell
0.69751kg for Pin Cell

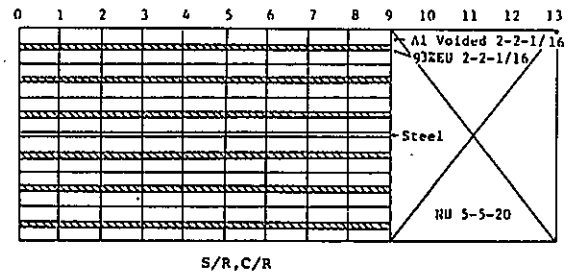
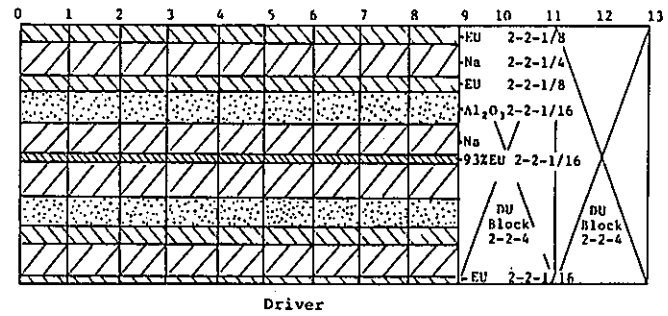
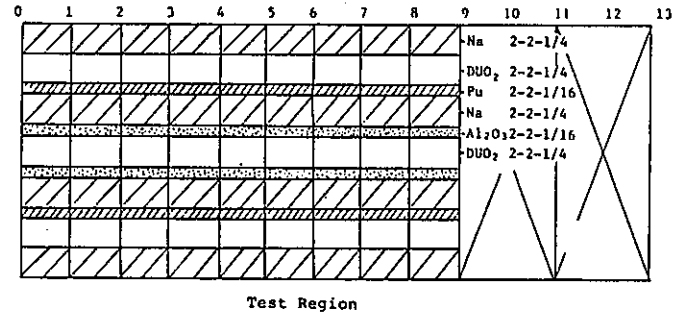
Table 2.10 Calculated Reactivity Worth Component for Channel Void Traverse for Plate and Pin Cell

(Unit; $10^{-6} \Delta k/k$)

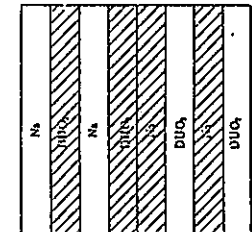
Voided Channel		Leakage (Benoist's D)	Leakage (Unified D)	Absorption	Moderation	Fission
Plate	0 R	-49.76	-30.76	12.10	48.61	-7.20
	1 R	-49.72	-30.72	12.01	47.92	-7.22
	2 R	-49.23	-30.29	11.56	44.97	-7.13
	3 R	-48.18	-29.43	10.78	39.27	-6.94
	4 R	-46.40	-28.04	9.67	29.28	-6.71
Pin	0 R	-36.03	-17.98	12.90	44.47	-0.330
	1 R	-35.98	-17.95	12.73	43.24	-0.334
	2 R	-35.86	-17.84	12.18	40.27	-0.330
	3 R	-35.59	-17.62	11.26	34.92	-0.323
	4 R	-35.09	-17.25	9.98	26.44	-0.314



Vertical Cross Section of Assembly VI-2



Cell Configurations of Assembly VI-2



Cell Pattern of DUO₂/Na blanket

Fig. 2.1 Configuration of FCA VI-2 Assembly

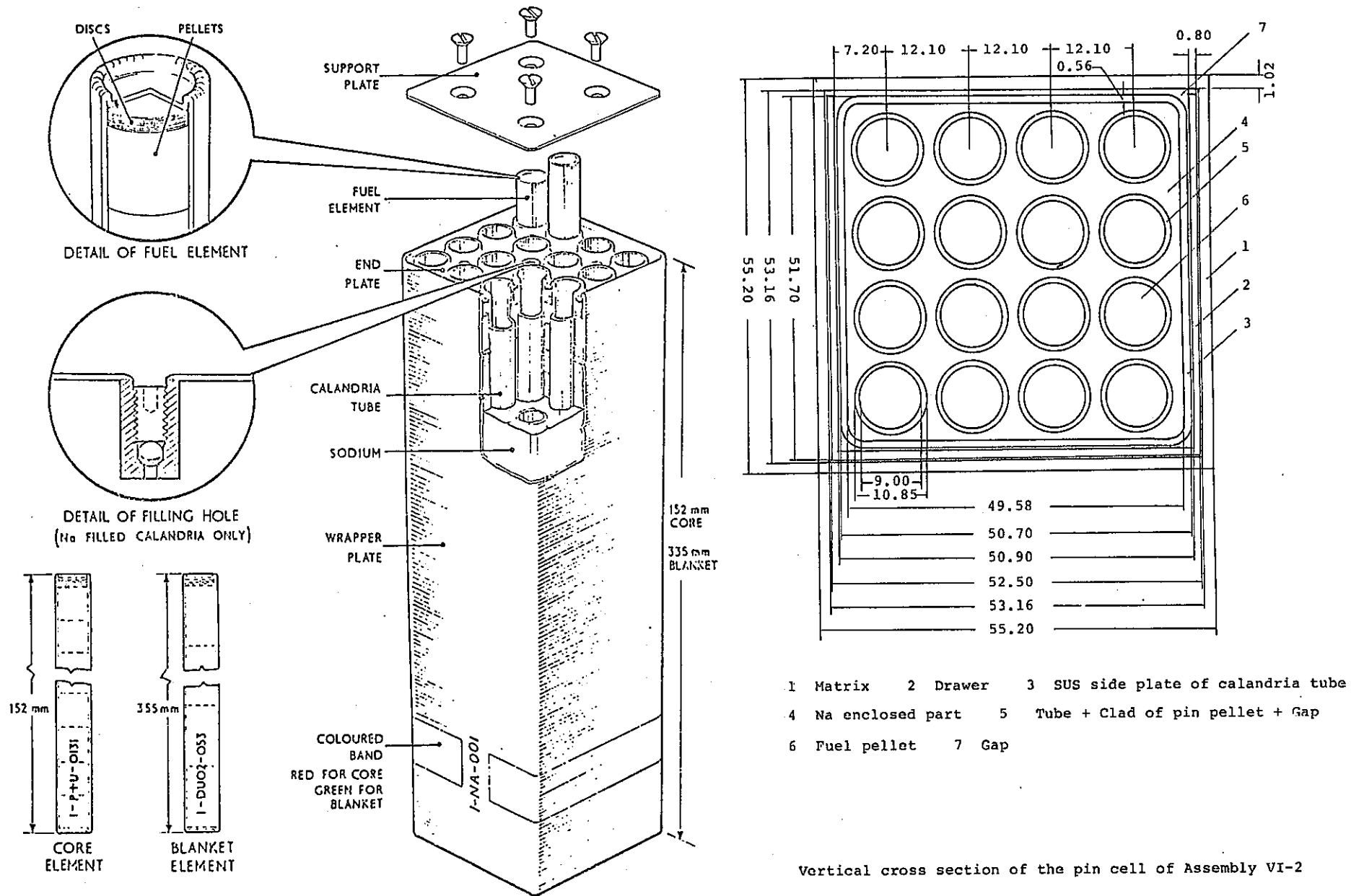


Fig. 2.2 Configuration of Pin Assembly

Vertical cross section of the pin cell of Assembly VI-2

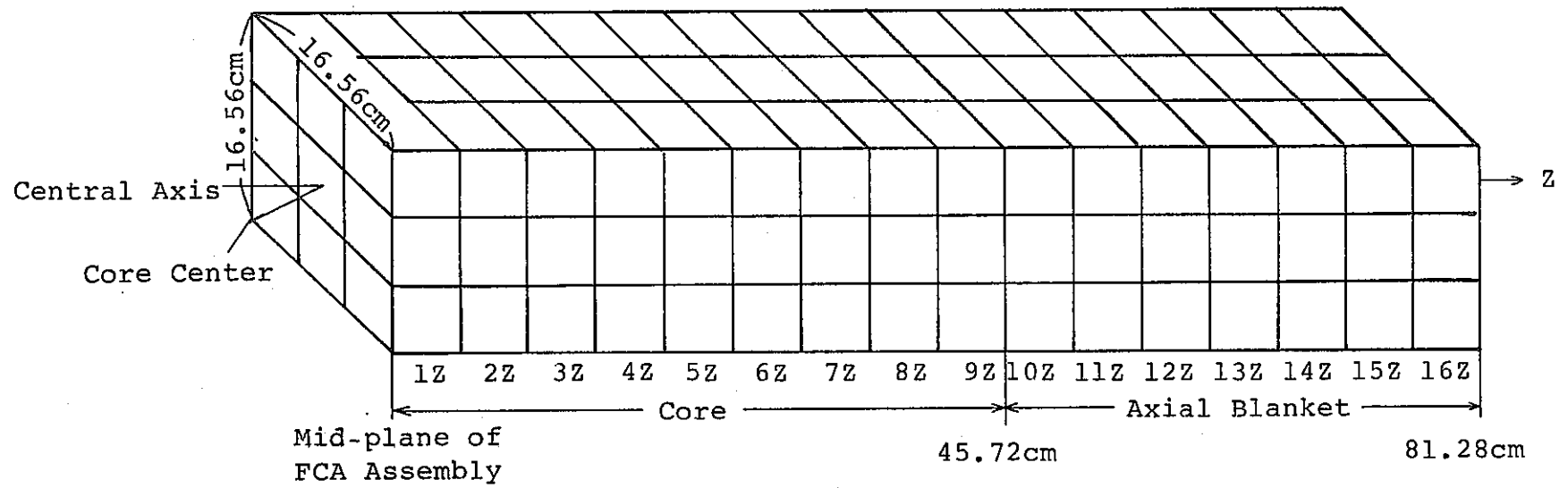
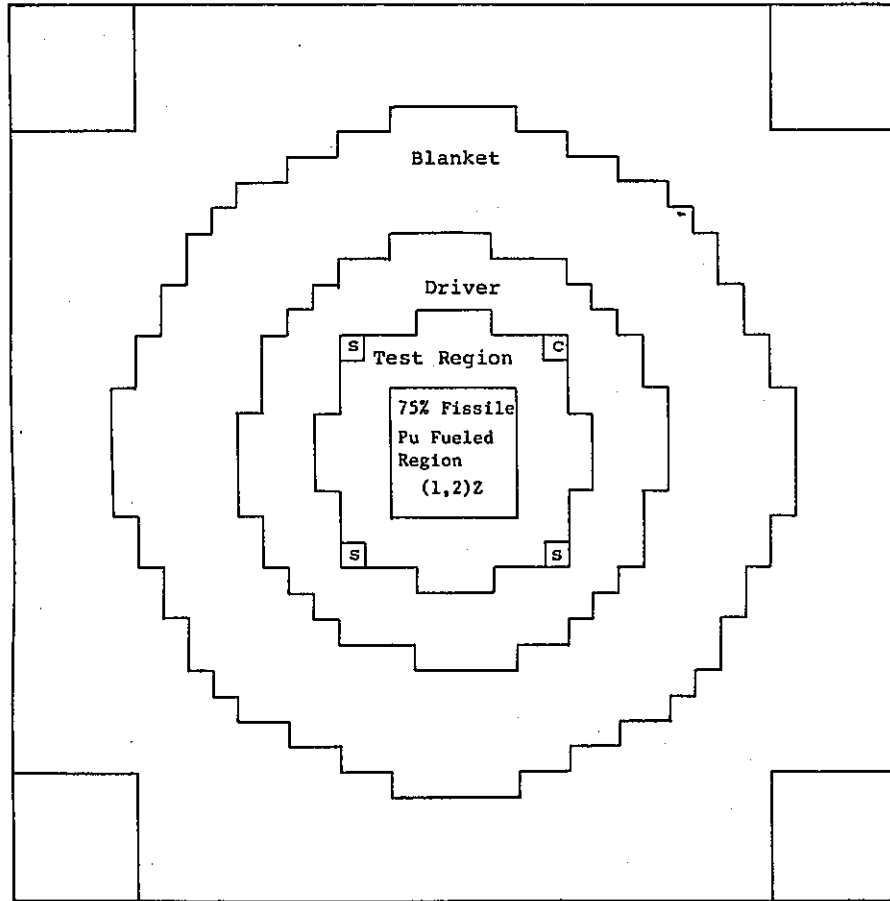
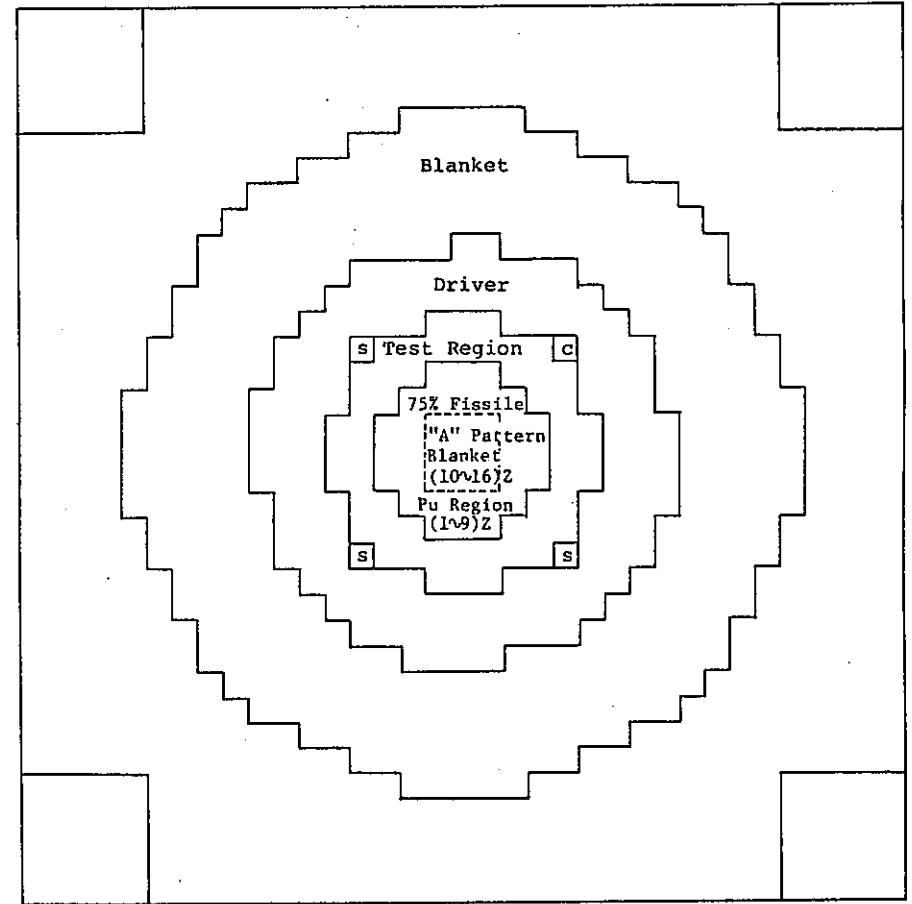


Fig. 2.3 The Central 3x3 Drawers of FCA VI-2

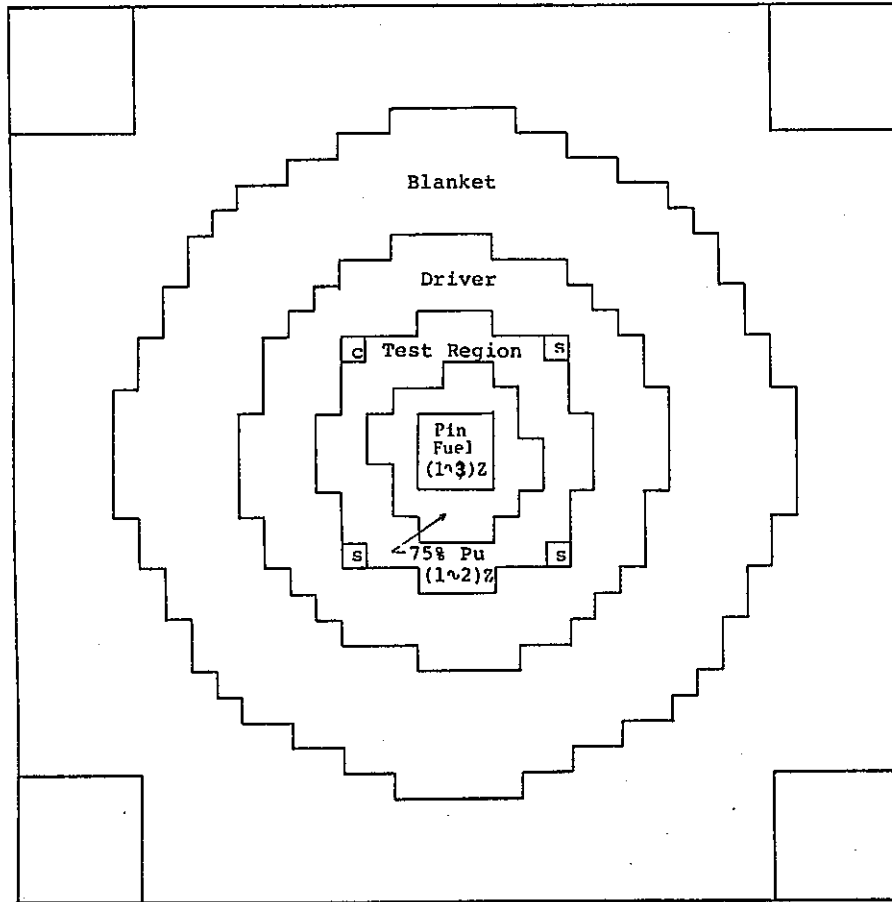


(Movable Side)

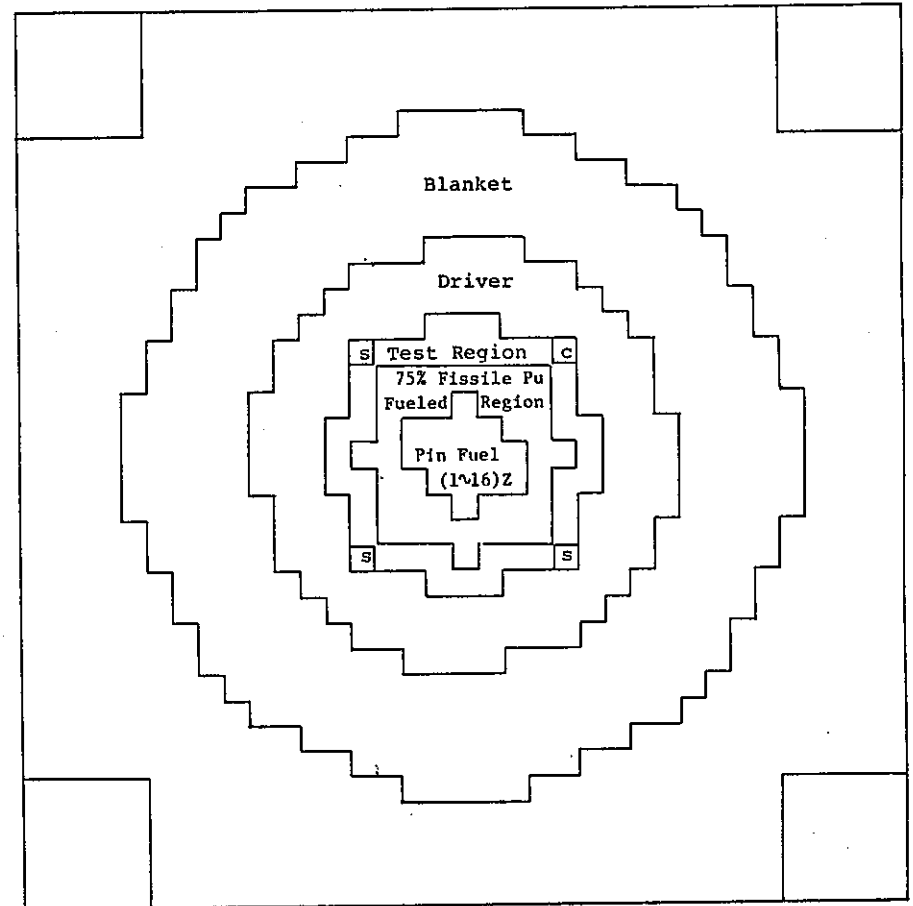


(Fixed Side)

Fig. 2.4 Vertical Cross Section of Assembly VI-2-B for Axial Voiding

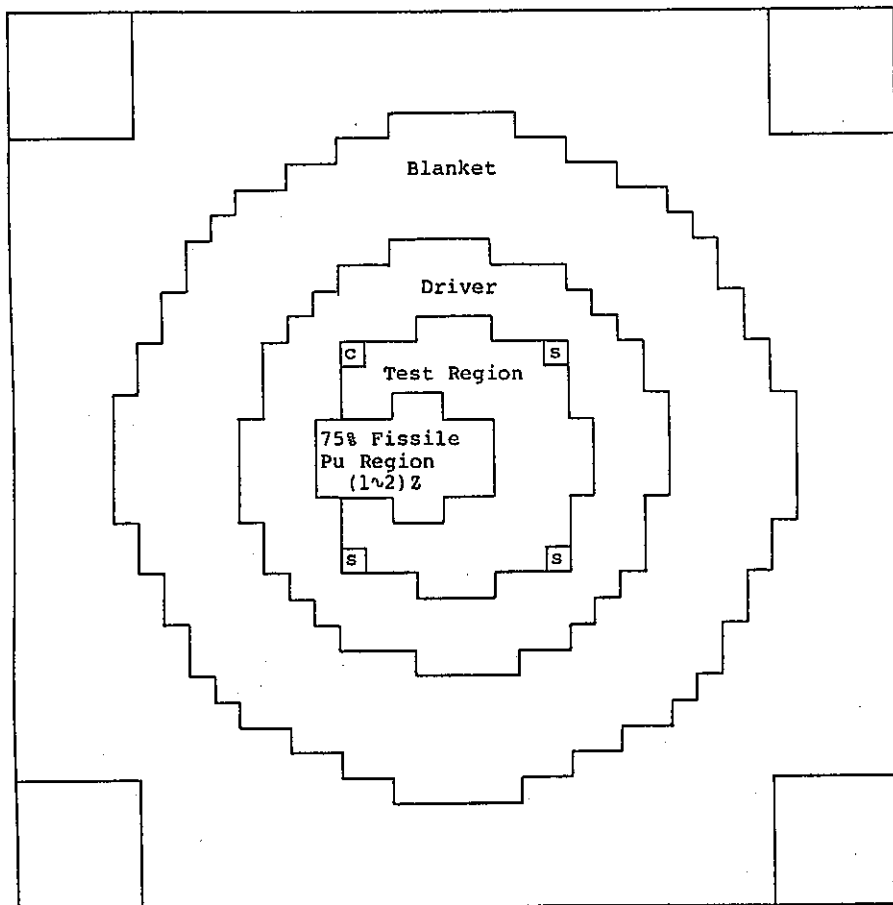


(Movable Side)

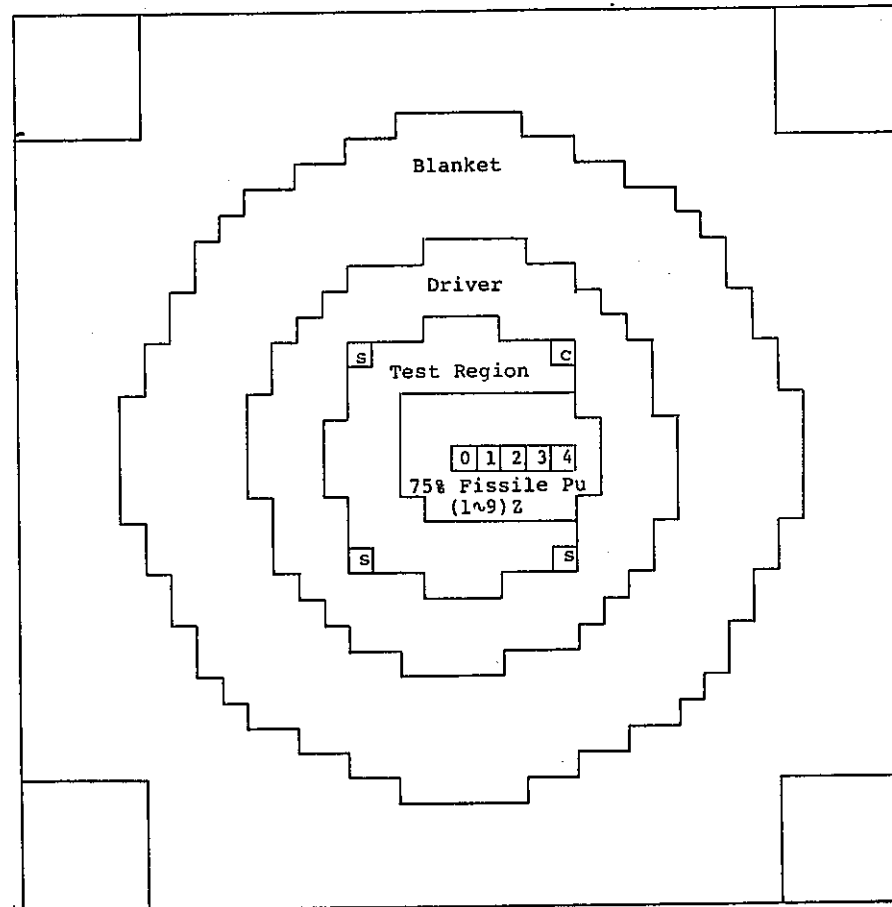


(Fixed Side)

Fig. 2.5 Vertical Cross Section of Assembly VI-2-P for Axial Voiding

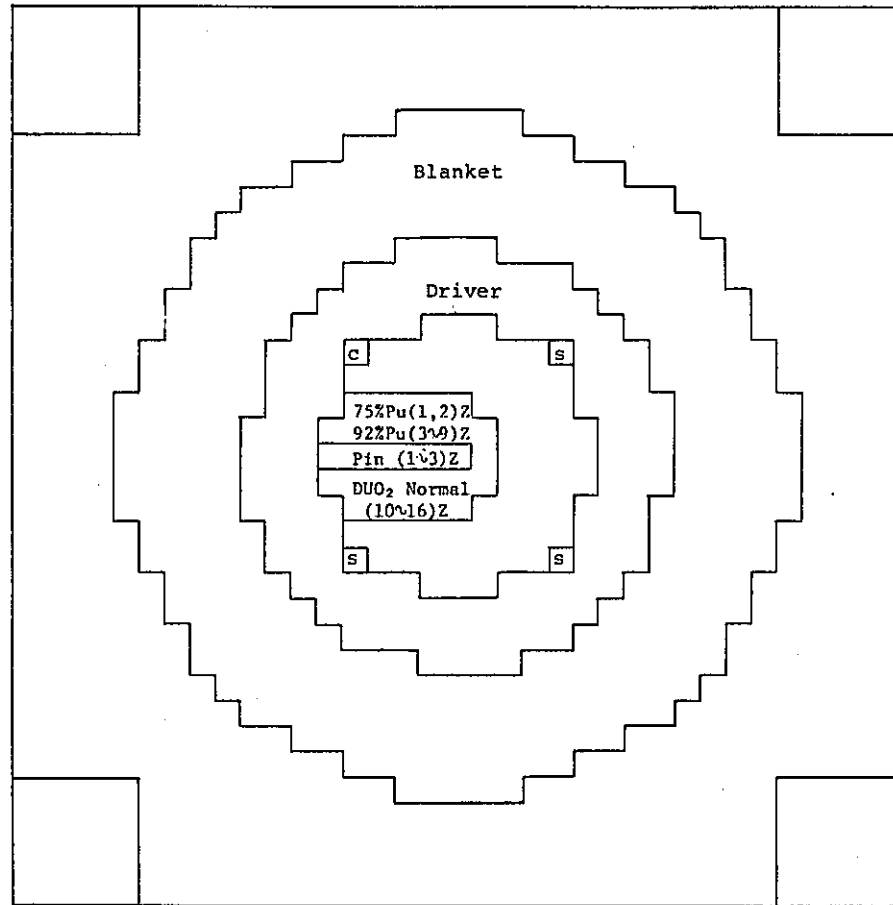


(Movable Side)

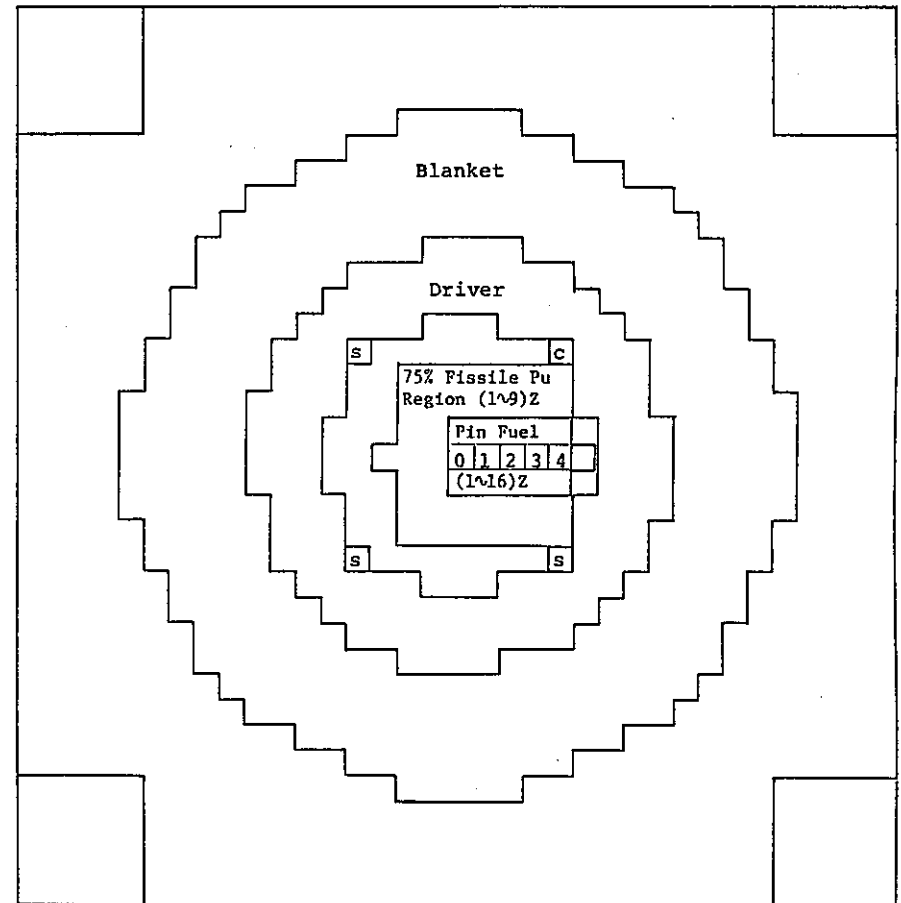


(Fixed Side)

Fig. 2.6 Vertical Cross Section of Assembly VI-2-B for Channel Void Traverse

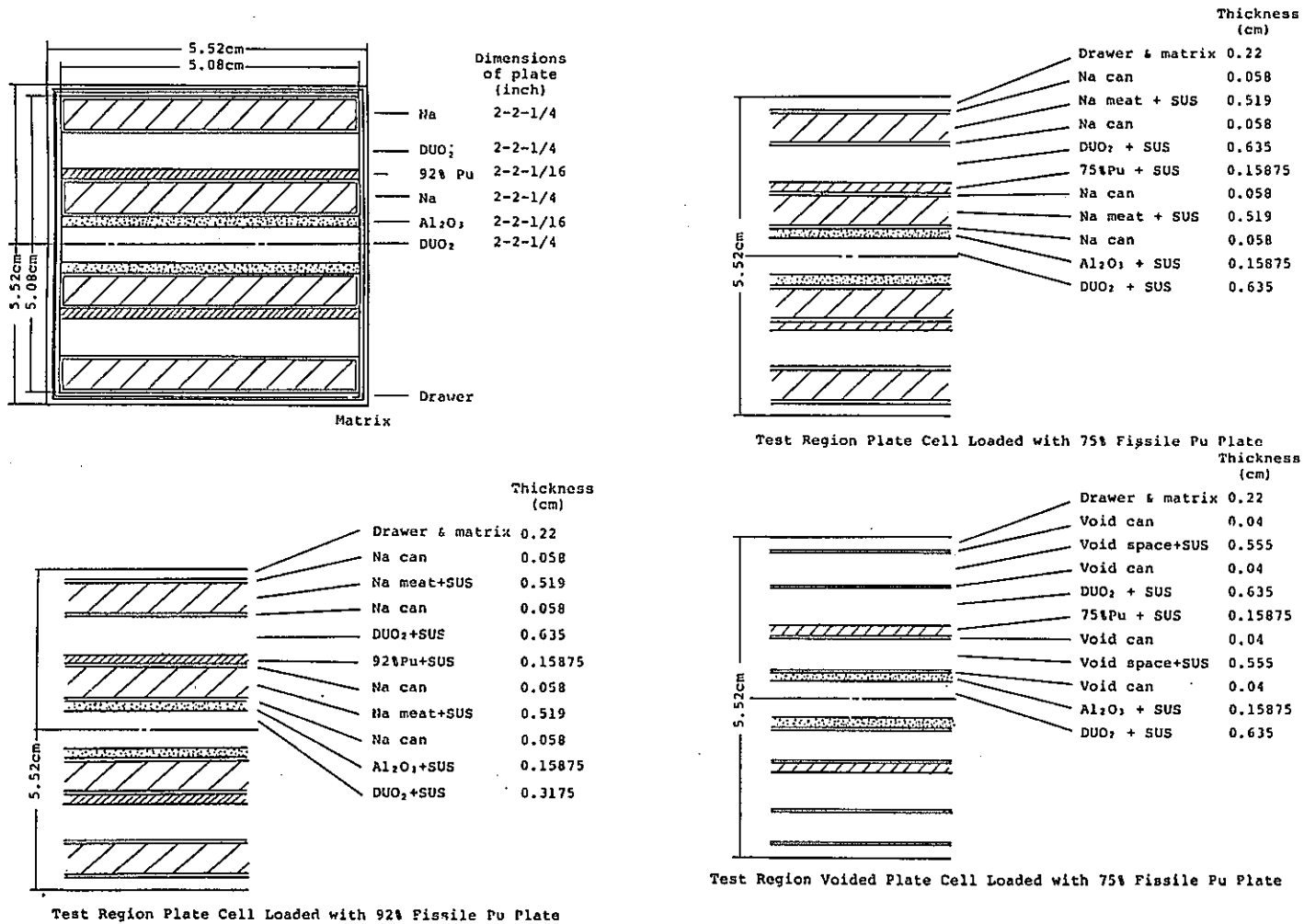


(Movable Side)



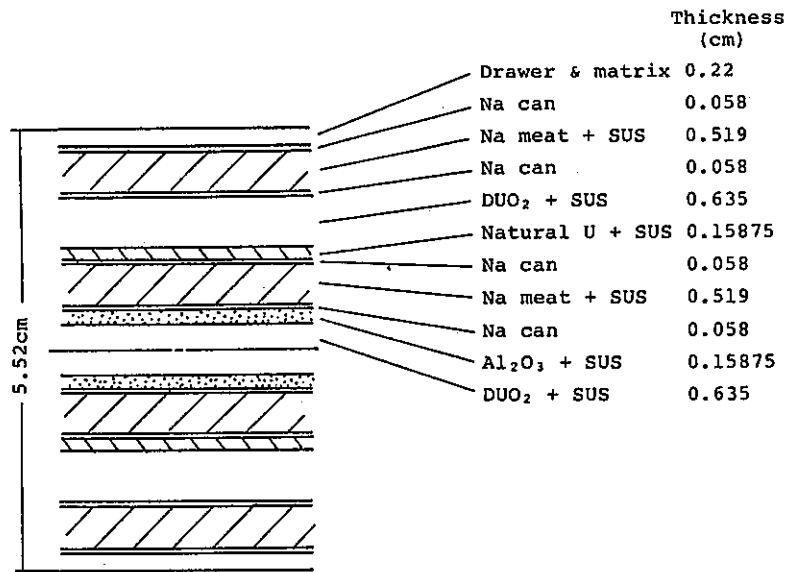
(Fixed Side)

Fig. 2.7 Vertical Cross Section of Assembly VI-2-P for Channel Void Traverse

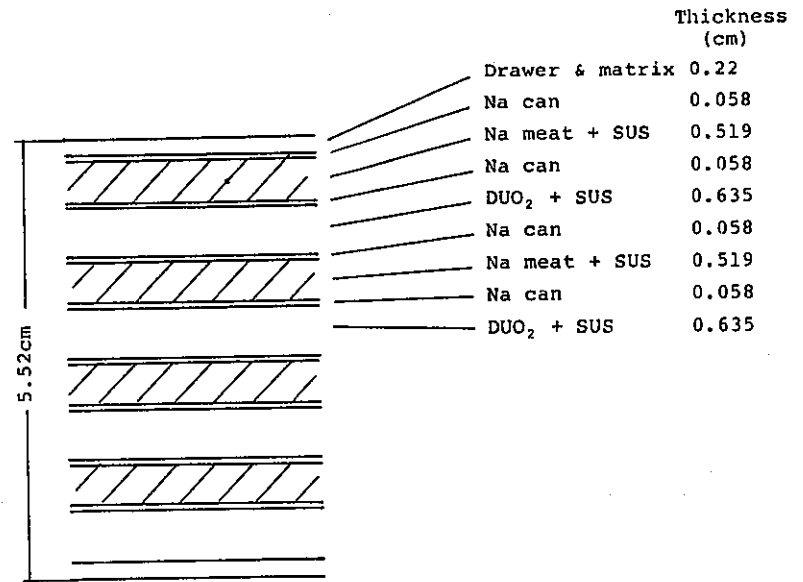


Cited from Reference 9)

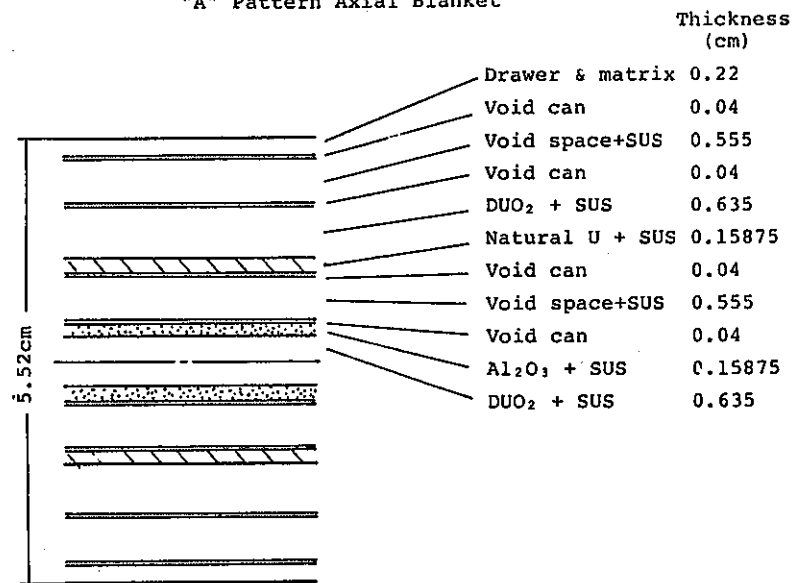
Fig. 2.8 Vertical Cross Section of the Unit Cell of Assembly VI-2 Core, and Infinite Slab Model of Plate Cells



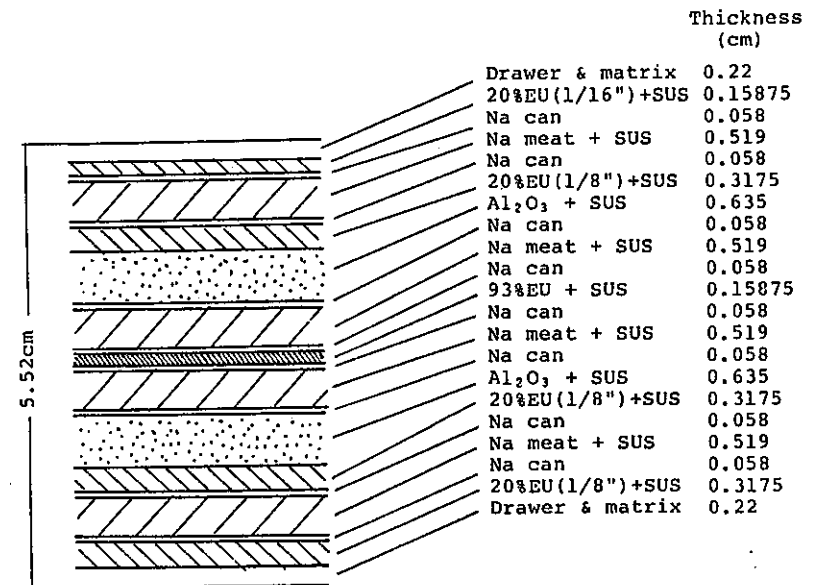
"A" Pattern Axial Blanket



DUO₂/Na Axial Blanket

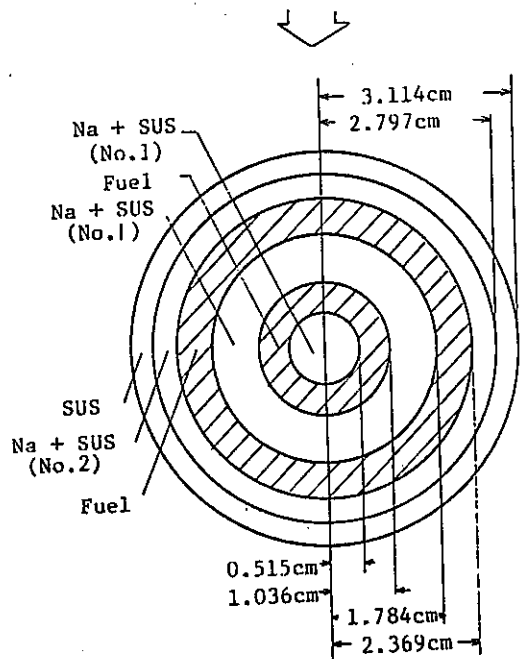
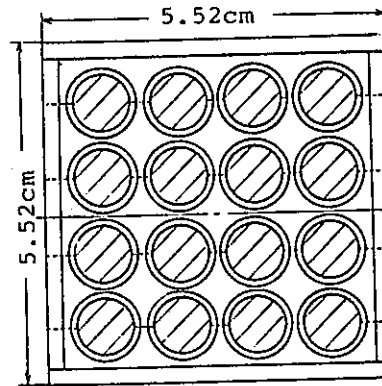
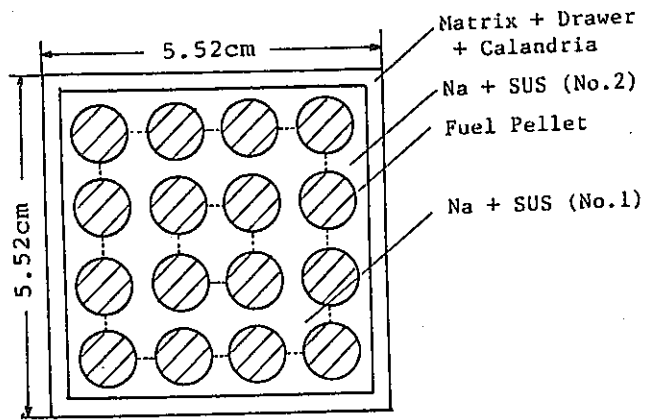


Voided "A" Pattern Axial Blanket

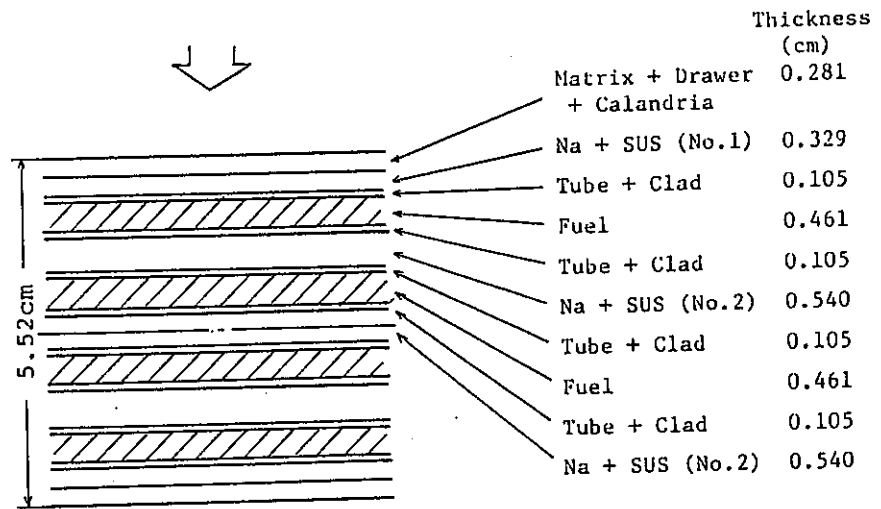


Driver

Fig. 2.8 Continued



6 Annuli Model of Pin Cell



Infinite Slab Model of Pin Cell

Fig. 2.9 Continued

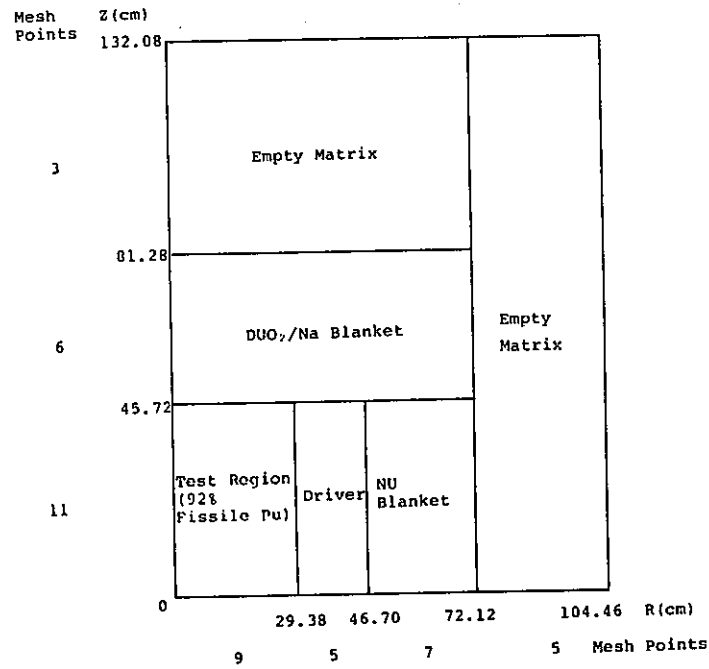


Fig.2.10 R-Z Reactor Model for 70-Group Diffusion Calculation

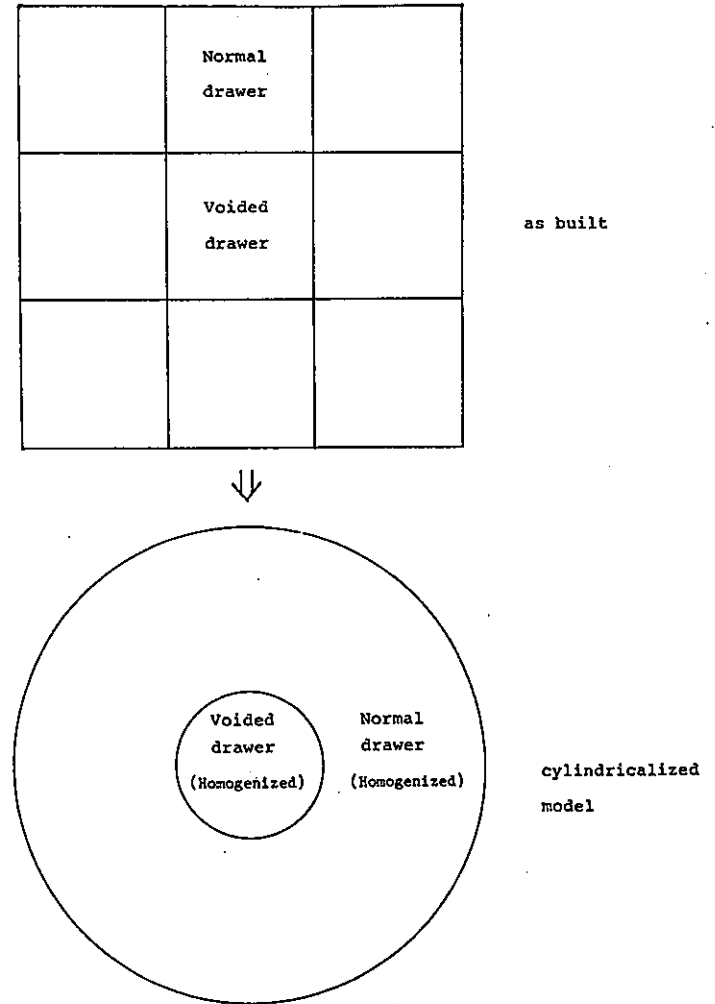
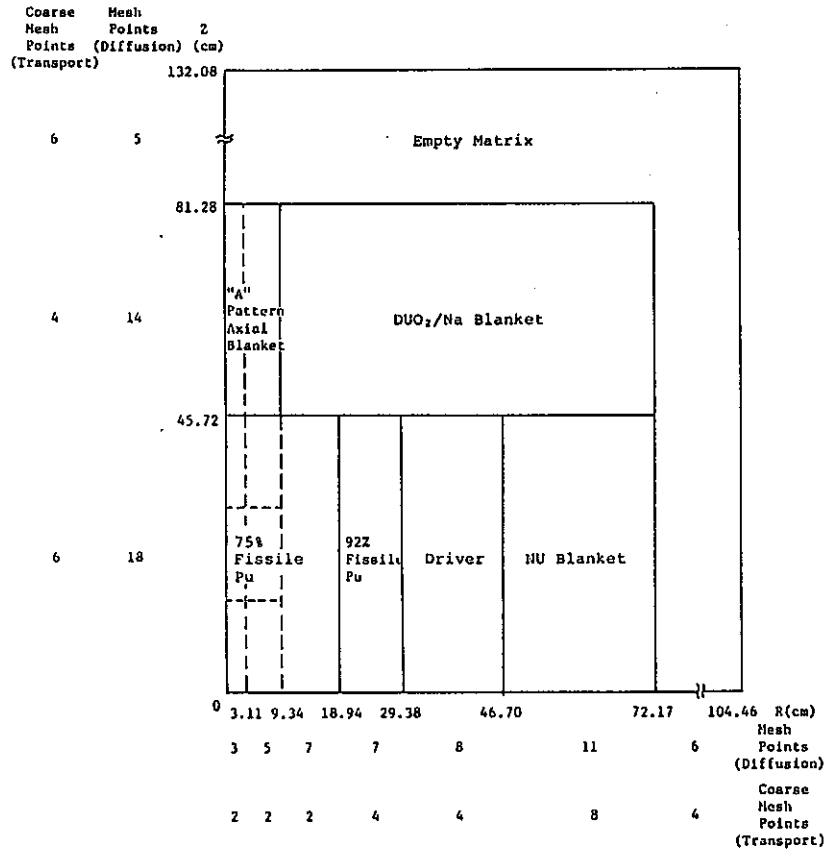
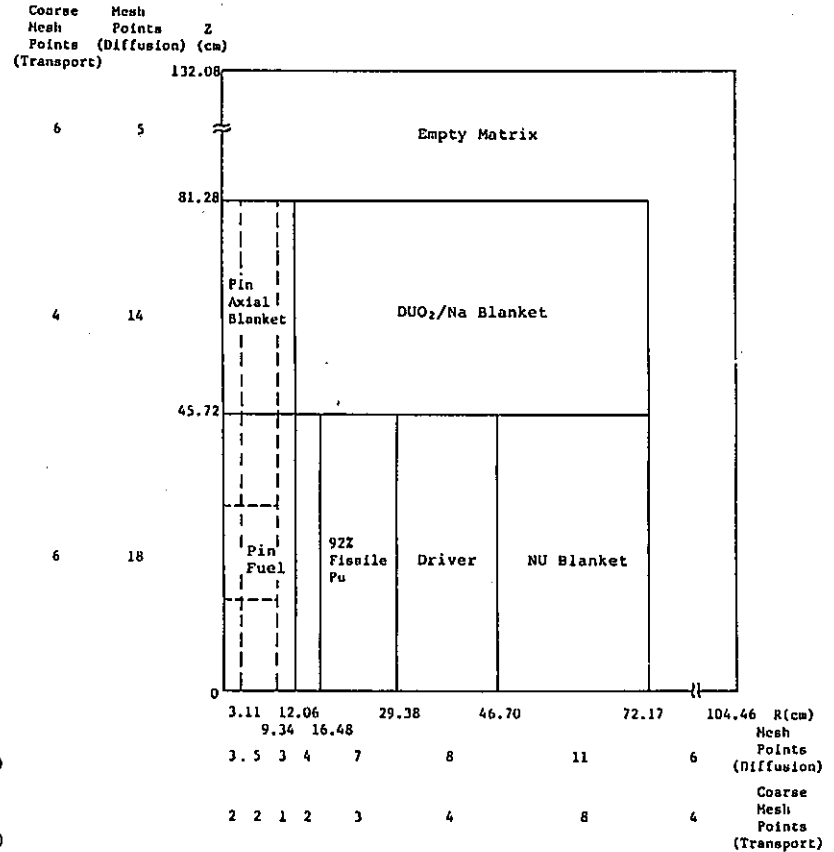


Fig.2.11 Model for calculating unified diffusion coefficient



Assembly VI-2-B



Assembly VI-2-P

Fig. 2.12 R-Z Calculational Model of Assembly VI-2

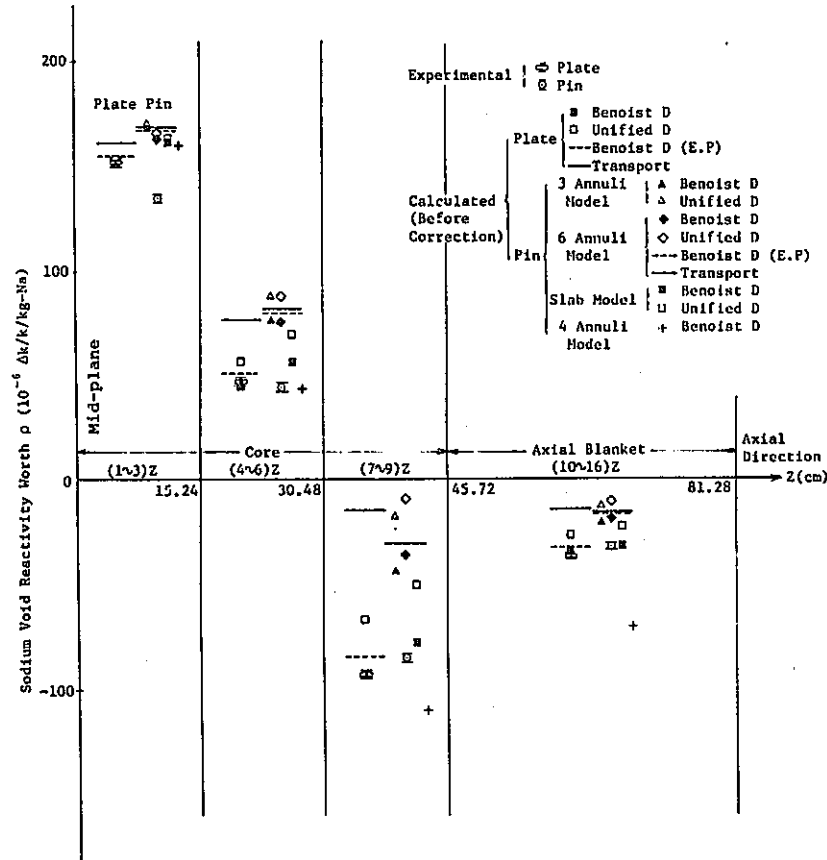


Fig. 2.13 Axial Distribution of Sodium Void Reactivity Worth (Uncorrected)

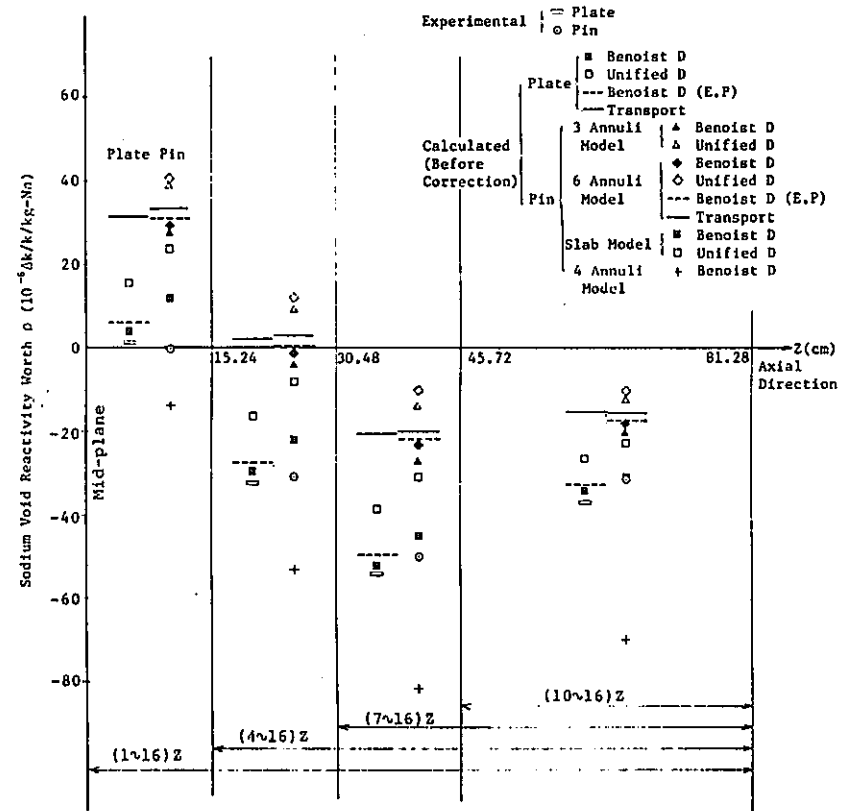


Fig. 2.14 Reactivity Worth of Axial Progressive Sodium Voiding (Uncorrected)

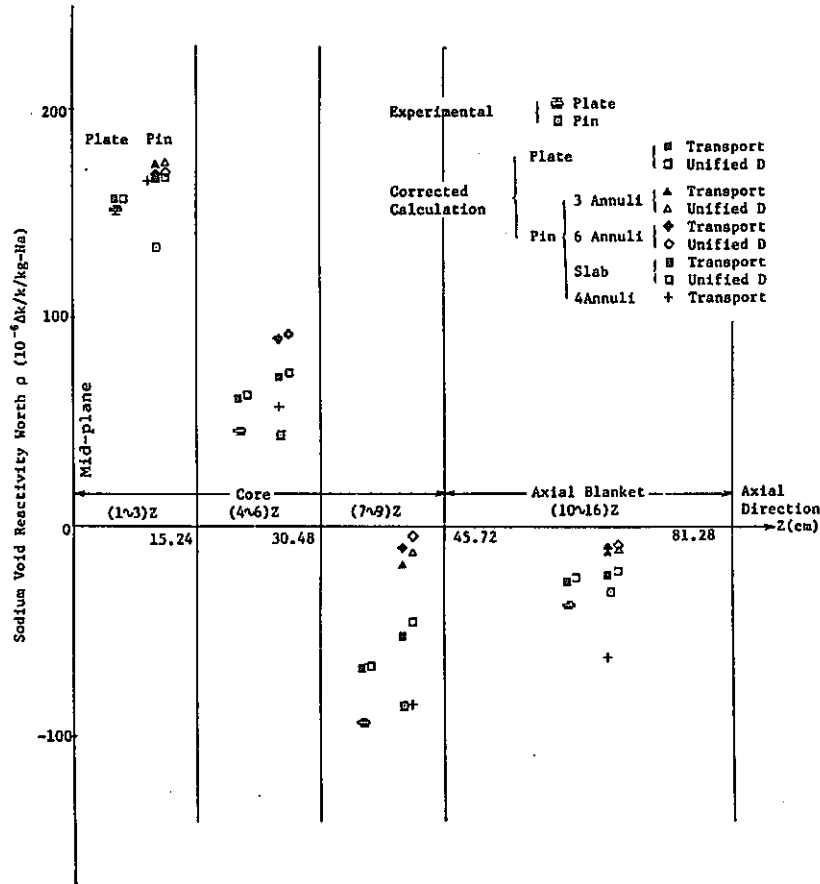


Fig. 2.15 Axial Distribution of Sodium Void Reactivity Worth
(Corrected)

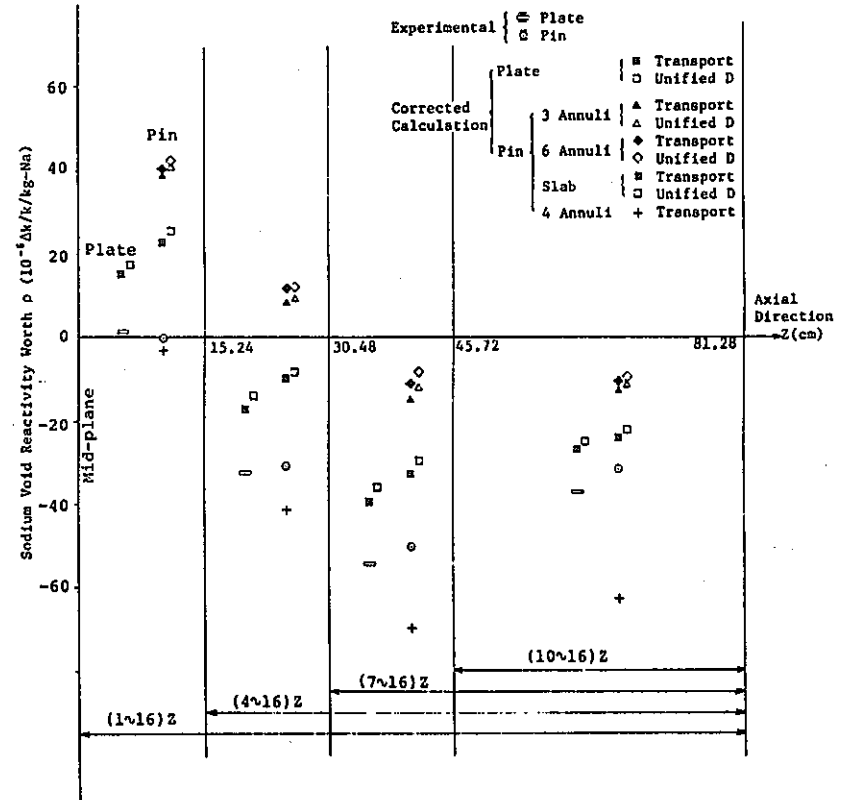


Fig. 2.16 Reactivity Worth of Axial Progressive Sodium Voiding
(Corrected)

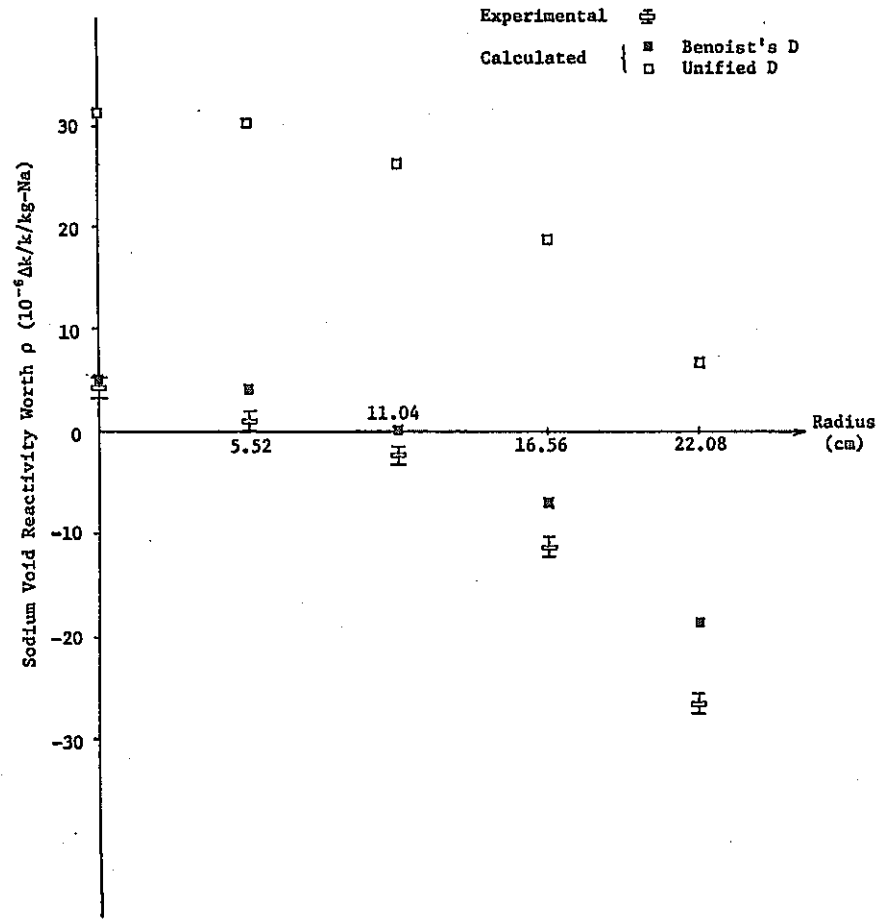
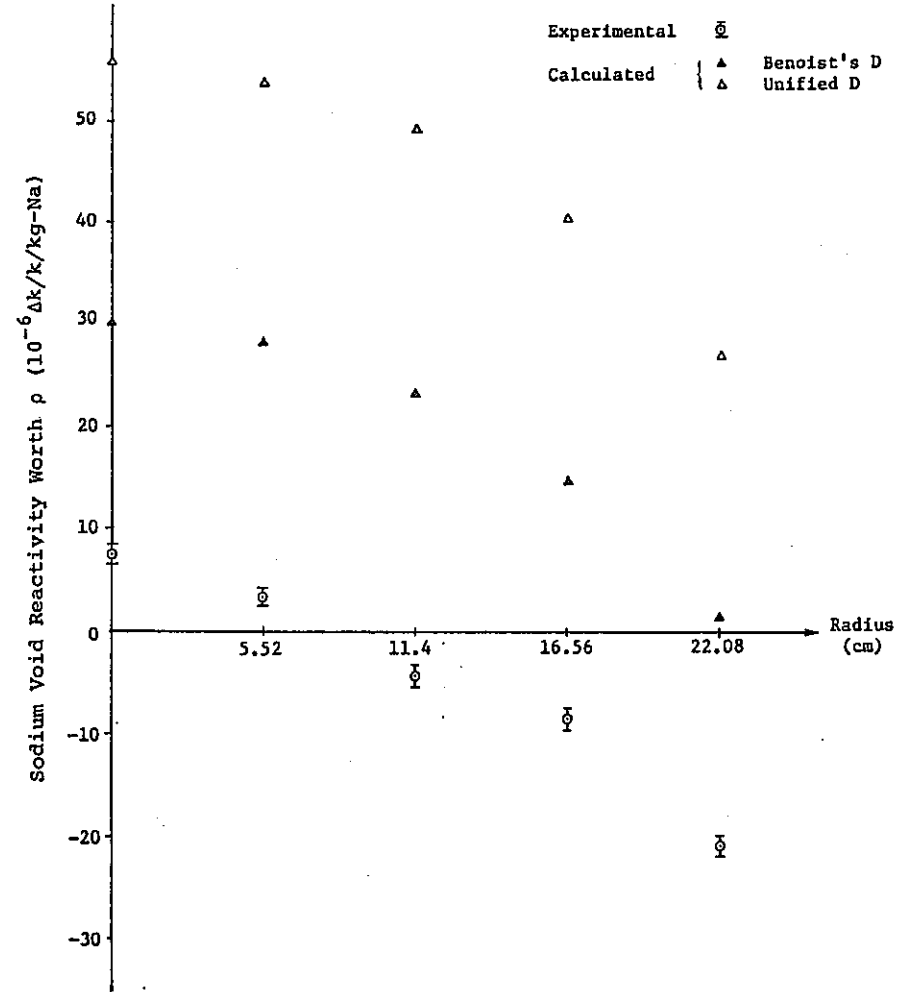


Plate Cell



Pin Cell

Fig. 2.17 Radial Distribution of Sodium Void Reactivity Worth

3. 燃料スランピング反応度の解析

3. 1 スランピング反応度実験の概要

FCAⅧ-2集合体で行なわれたスランピング反応度実験の詳細はJAERI-M-9090⁽⁷⁾, 9091⁽⁸⁾に記述されているので、本章では解析に用いたデータ並びに体系について簡単に説明する。

Fig. 3.1に基準となるFCAⅧ-2集合体の断面図を示す。集合体を構成している試験領域、ドライバー領域、軸方向ブランケット領域および制御棒の引出し装填図をFig. 3.2に示す。燃料スランピング実験はプルトニウムを装荷した試験領域の中心3行3列で行なわれた。(Fig. 3.3参照)

燃料スランピング体系の基準となるA0体系、非対称スランピング体系(A1, A2, A3)および対称スランピング体系(S)の軸方向物質組成分布をFig. 3.4に示す。また、Fig. 3.5にはスランピング実験に用いられた格子の引出し装填図を示す。燃料移動はFig. 3.4に示されるように3パック(15.24cm)を単位として行なわれ、各スランピング体系ではある3パック分の燃料が他の3パックに移りそのパックの燃料の量が倍になるが、SUSスペーサーは燃料と逆方向に移動した構成になっており、中心3×3ドローから正味の物質除去はない。

3. 2 群定数作成

3. 2. 1 平均群定数の作成過程

輸送計算に用いる18群セル平均群定数の作成方法の概略をFig. 3.6に示す。

JENDL-2B 70群ライブラリーを用いてFig. 3.2に示される試験領域、ドライバー領域、軸方向ブランケット、FCA制御・安全棒に相当するドローに対して非均質格子計算コード「CASUP」により無限セル計算を行ない、セル平均群定数及びBenoistの拡散係数を作成した。またFig. 3.5に示される燃料格子の内スペーサーを除いた格子の実効断面積も上で述べた方法に従って作成した。そしてそれ以外の格子(天然ウランブランケット、スペーサー等)については、均質にして自己遮蔽のみ考慮して平均群定数を作成した。なお、セル計算に用いる各領域の数密度及びプレート幅は、付録B(Table B1~B8)に示してある。

次に、このようにして得られた70群群定数を18群に縮約したが、縮約の際に次のようなことに注意した。

燃料スランピング体系では、高密度燃料領域の大きさによってスペクトルが大幅に異なるので各パターン毎に、「CITATION」コードを用いて、拡散計算を行ない、これによって得られた中性子束を縮約の際の重みとして用いた。また炉心部分および軸方向ブランケット部分については、領域を更に分割し、スペクトルの領域依存性を考慮した縮約を行なった。

Fig. 3.7に縮約計算を用いた体系を、各パターン毎に示してある。図中の点線は、先程述べたスペクトルの領域依存性を考慮するために、領域を細分化したことを意味している。

こうして縮約した18群群定数を、燃料スランピング反応度実験を解析するために、輸送計算に用いるわけであるが、輸送計算では、直接中性子ストリーミングの効果を取り扱えないため、我々は次のような方式を採用した。セル計算で得られる $\bar{\Sigma}_{tr}$ を使わないで、Benoistの方向依存拡散係数を次のように行なって等方拡散係数を得る。

$$D_0^g = \frac{2 \cdot D_{//}^g + D_{\perp}^g}{3}, \quad (3.1)$$

D_0^g : g群の等方拡散係数

$D_{//}^g$: g群のプレート平行方向の拡散係数

D_{\perp}^g : g群のプレート垂直方向の拡散係数

次に式(3.2)によって群縮約を行なう。

$$D_0^G = \frac{\sum_g^G D_0^g \phi^g}{\sum_g^G \phi^g} \quad (3.2)$$

ここで、 ϕ^g は、g群のスペクトルである。

このようにして縮約された拡散係数を、式(3.3)により、輸送計算に用いる $\bar{\Sigma}_{tr}^G$ を得る。

$$\bar{\Sigma}_{tr}^G = \frac{1}{3 \cdot D_0^G} \quad (3.3)$$

ただし、均質近似に基づいて得られた群定数については、従来の $\bar{\Sigma}_{tr}$ を用いた。

無限セル計算によって得られた群定数は、燃料が移動した場合、通常の燃料とそれに隣

接する燃料の塊りやボイド領域との間の中性子束空間分布およびしゃへい効果に関する干渉効果が取り入れられていないので、これらの効果を考慮するため、Fig. 3. 8に示すようにスーパーセルモデルを用い、「CASUP」コードによりセル計算を行なった。即ち、燃料の移動する中心3×3ドロワーのまわりに、通常の燃料が取り囲むようなモデルを考え、左右対称になるように、真中のドロワーを半分にして3ドロワーを構成し、反射境界条件で、セル計算を行なった。

Fig. 3. 9には、本解析に使用するドロワーのスーパーセルモデルが示されている。

このようなスーパーセル計算で得られる群定数の縮約は、そのセルが装荷される領域に対応するスペクトルを用いて、各パターン毎に縮約を行なった。

3. 2. 2 群定数の数値比較

3. 2. 1節で述べたようにして得られた無限セル計算による群定数とスーパーセル計算で得られた群定数との比較及び各体系毎のスペクトルで縮約された群定数の比較を行なった。

まず群縮約の効果について述べる。Table 3. 1には、通常のセル計算で得られた70群のスペーサの群定数をA1～Sまでの各体系ごとのスペクトルで縮約した吸収断面積が示されている。この表より、各体系間の断面積の差は、第18群で、4%程度の変化があるだけであった。

次に、通常のセル計算による群定数とスーパーセル計算による群定数とを、A1体系を例にとって、SpacerとFuel Compacted Drawerについて比較した。Table 3. 2, 3. 3には、SpacerとTest Region (Na in)からなるスーパーセル計算による群定数と通常のセル計算による群定数を、それぞれ、Spacerの場合、Test Regionの場合で比較してある。

Spacerの場合 (Table 3. 2 参照) 吸収断面積は、まったく同じである。これは、Spacerが均質であるので、スーパーセル計算を行なっても格子内中性子束に依存しないためである。Table 3. 3において、Test Regionの断面積の変化は、吸収及び生成断面積について、1群で、1.9%、2.9%、5群で、1.2%、1.7%、8群で、0.1%、10群で、0.3%、0.0%とそれぞれ高速群でスーパーセル計算による断面積が増大している。

次にTable 3. 4, 3. 5には、Fuel Compacted DrawerとTest Region (Na in)からなるスーパーセル計算による断面積と通常のセル計算による断面積とをFuel Compacted Drawerの場合、Test Regionの場合で、比較してある。

Table 3.4において、Test Regionに隣接したFuel Compacted Drawerの断面積の変化は、吸収断面積について、1群で、0.2%、5群で、0.1%の増大、生成断面積についても、1群で、0.3%、5群で、0.2%の減少となっている。またTest Regionから離れたFuel Compacted Drawerについては、隣接しているFuel Compacted Drawerと比べて変化は小さい。Table 3.5において、スーパーセル計算によるとTest Regionの吸収及び生成断面積の変化は、1群で、1%、1.4%、5群で0.7%、0.9%それぞれ減少しているが、8群からは、両者共、約0.2%程度逆に増大している。しかしながらSpacerに隣接しているTest Regionの場合と比較して、変化が小さい。これはSpacerと比較して、Fuel Compacted Drawerの場合、中性子ストリーミングの干渉効果が小さい事を示している。

次に、燃料スランピングによる断面積の変化について述べる。まず最初に、Test Region (Na out)がSpacerまたは、Fuel Compacted Drawerに置換されることによる吸収・生成断面積の変化を、それぞれTable 3.6, 3.7に示す。Table 3.6, 3.7から、通常のセル計算の場合と、スーパーセル計算の場合とが、1%以内でしか変化していない。

次に、Table 3.8, 3.9には、それぞれ、SpacerまたはFuel Compacted Drawerに隣接しているTest Region (Na in)の断面積の差が示されている。両者とも、 $\Delta \rho \Delta f$, $\Delta \Delta_a$ が、符号が逆転したり、オーダーが異なったりして、先程のSpacerやFuel Compacted Drawerの吸収・生成断面積の変化と比べて、著しく大きいことがわかる。

3.3 燃料スランピング反応度解析モデル

いままで述べてきた二通りの群定数の作成法に基づいて、燃料スランピング反応度実験の解析を行なった。

まず、炉心計算に際して、輸送計算コード「TWO TRAN-II」を用い、 S_6P_0 近似で18群群定数を使って、実効増倍率を計算した。また中心面に対して対称であるAO, Sの各体系についても全炉心計算をした。

次に、計算体系をRZモデル化する際には、径方向についてFig. 3.1に示した装荷パターンの各領域の体積を保存するように境界を定めた。制御棒の領域には、試験領域の外側に、8本の制御棒の体積を保存した1.29cmの円環を設けた。Fig. 3.10には無限セル計算で得られた群定数をすべての領域に用いたA0~Sまでの計算体系を、Fig. 3.11には、スーパーセル計算で得られた群定数を用いたA0~Sまでの計算体系を示す。Fig. 3.12に示すように中心3×3ドロワーおよびそれに隣接している通常の燃料ドロワーのみにスーパーセルで得られた群定数

を用い、その他の領域は、無限セル計算で得られた群定数を用いた。

3. 4 計 算 結 果

まず最初に、3. 2 節で述べた群縮約のための70群RZ拡散計算の結果をTable 3. 10に示す。表より、燃料移動の領域が大きくなるにつれて、実験値とのずれが大きくなっているのがわかる。特に燃料移動の領域が最も大きい体系(A3)において、実験値では、Worthは増加の傾向になっているのに対して、計算では、逆に減少の傾向となっている。この不一致は、中性子輸送効果によるものだと考えられる。

次にTable 3. 11には、無限セル計算で得られた断面積を使った18群輸送計算結果が示されている。表から、拡散計算に見られたA3体系での反応度の落ち込みがなくなり、炉中心面に対称に燃料が移動したS体系を除いて、C/Eはほぼ0.78と一定になっている。

Fig. 3. 13~3. 16までに、炉中心のZ方向のflux分布を1群、5群、9群、15群とそれぞれ示してある。1群、15群で、体系毎に分布が大きく変化しているが、燃料スランピング反応度値には、5群、9群でのflux分布の方が支配的であるので、5群、9群での各体系毎のflux分布を比較する。A1、A2、A3と、燃料の移動領域が大きくなるにつれて、fluxのピークが軸方向ブランケット方向に移動し、Spacer領域でのfluxの傾きが大きくなっているのがわかる。S体系では炉中心面付近は平坦であるが、SpacerとFuel Compacted Drawerとの境界面でのfluxの勾配の変化は著しく大きい。

Table 3. 12, 3. 17には、MAPI、JAERIそして阪大で行なわれた輸送計算結果と実験値とを比較して示してある。MAPIの結果では、燃料移動の領域が大きくなるにつれて(A2→A3)、Worthは一定になるのに対して、阪大、JAERIの結果は実験値に追随する形で、Worthが大きくなっている。また阪大とJAERIとを比較すると、燃料の移動が小さい体系(A1、A2)及び、燃料が対称に移動する体系では、阪大の計算値は、JAERIの計算値と比べて、実験値をわずかながら過小評価している。しかし、燃料移動の最も大きい体系(A3)では、このような傾向は見られない。

次に、燃料スランピング領域及びそれに隣接するドロワーに、スーパーセル計算で得られた群定数を適用した結果がTable 3. 13に示されている。各スランピング体系に対して計算値はわずかではあるが実験値に近づきC/Eが一定になり改善が見られた。

Table 3. 14, 3. 15には摂動前のA 0体系の随半中性子束と、摂動後の各体系(A 1, A 2, A 3とS)の中性子束を用いて、厳密輸送摂動計算により、それぞれ、通常のセル計算の場合とスーパーセル計算の場合について、反応度の成分を示した。これらの表より減速項がほとんど同じである。これは、スーパーセル計算を行なっても散乱断面積がほとんど変化しないためである。次に吸収、核分裂項はかなり変化している。これはスペーサやFuel Compacted Drawerに隣接するテスト領域のドロワー(Test Region)での $\Delta \Sigma_a, \Delta \nu \Sigma_f$ が、大きく変化するためである。

以上のことをまとめると、スーパーセル計算で得られた断面積を用いることによる効果は、減速項を除いて、大きく変化する。しかし、吸収項と核分裂項は、符号が逆に変化するため全体として、非漏洩成分の変化の割合は大きくない。

3. 5 結 論

以上の解析結果より、次のようなことがわかった。

- 1) S_4P_0 , 12群で輸送計算を行なった原研の結果と、 S_6P_0 , 18群で輸送計算を行なった阪大の結果とは、ほぼ同じ傾向をたどり、実験結果を追従していることがわかった。
- 2) 無限セル計算による断面積を用いた結果とスーパーセル計算による断面積を用いた結果とを比較すると、吸収項および核分裂項は10~40%程度変化した。その符号が逆であるので全体の成分の変化はわずかとなった。

Table 3.1 Comparison of Absorption Cross Sections of Spacer Collapsed by Spectrums of Each Geometry

Group	A1	A2	A3	S
1	1.51516E-03	1.51565E-03	1.51560E-03	1.51551E-03
2	7.26898E-04	7.26745E-04	7.26765E-04	7.26778E-04
3	3.34445E-04	3.34274E-04	3.34027E-04	3.34293E-04
4	1.27449E-04	1.27280E-04	1.27278E-04	1.27307E-04
5	9.65839E-05	9.65836E-05	9.65820E-05	9.65840E-05
6	1.28309E-04	1.28229E-04	1.28197E-04	1.28242E-04
7	1.22174E-04	1.22245E-04	1.22247E-04	1.22241E-04
8	1.30544E-04	1.30602E-04	1.30626E-04	1.30585E-04
9	1.60881E-04	1.60964E-04	1.60997E-04	1.60962E-04
10	2.26814E-04	2.26395E-04	2.26283E-04	2.26477E-04
11	3.59238E-04	3.59856E-04	3.60274E-04	3.59727E-04
12	6.25151E-04	6.25022E-04	6.24989E-04	6.25045E-04
13	3.59889E-04	3.59200E-04	3.59012E-04	3.59304E-04
14	1.20302E-03	1.20454E-03	1.20561E-03	1.20263E-03
15	3.43349E-04	3.43784E-04	3.43965E-04	3.43650E-04
16	5.56705E-04	5.57937E-04	5.58519E-04	5.57635E-04
17	8.77660E-04	8.80014E-04	8.81274E-04	8.79584E-04
18	1.40096E-03	1.42887E-03	1.45230E-03	1.42331E-03

Table 3.2 Comparison of Cross Sections of Spacer from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation Consisting of Spacer and Test Region (Na in)

Group	Infinite-Cell	Super-Cell	
		Adjacent to Test Region	Apart from Test Region
	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta\Sigma_a$
1	1.51516E-03	1.51516E-03	1.51516E-03
2	7.26898E-04	7.26898E-04	7.26898E-04
3	3.34445E-04	3.34445E-04	3.34445E-04
4	1.27449E-04	1.27449E-04	1.27449E-04
5	9.65839E-05	9.65839E-05	9.65839E-05
6	1.28309E-04	1.28309E-04	1.28309E-04
7	1.22174E-04	1.22174E-04	1.22174E-04
8	1.30544E-04	1.30544E-04	1.30544E-04
9	1.60881E-04	1.60881E-04	1.60881E-04
10	2.26814E-04	2.26814E-04	2.26814E-04
11	3.59238E-04	3.59238E-04	3.59238E-04
12	6.25151E-04	6.25151E-04	6.25151E-04
13	3.59889E-04	3.59889E-04	3.59889E-04
14	1.20302E-03	1.20302E-03	1.20302E-03
15	3.43349E-04	3.43349E-04	3.43349E-04
16	5.56705E-04	5.56705E-04	5.56705E-04
17	8.77660E-04	8.77660E-04	8.77660E-04
18	1.40096E-03	1.40096E-03	1.40096E-03

Table 3.3 Comparison of Cross Sections of Test Region (Na in) from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation *

Group	Infinite-Cell		Super-Cell	
	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_a	$\nu\Sigma_f$
1	1.30882E-02	3.48234E-02	1.33348E-02	3.58308E-02
2	3.24443E-03	2.05826E-02	8.43597E-03	2.12684E-02
3	6.62825E-03	1.85888E-02	6.78984E-03	1.91325E-02
4	6.11535E-03	1.61700E-02	6.22319E-03	1.85021E-02
5	3.34313E-03	7.22656E-03	3.38517E-03	7.35047E-03
6	2.85741E-03	5.43696E-03	2.88588E-03	5.48087E-03
7	2.80925E-03	4.87302E-03	2.81234E-03	4.87826E-03
8	3.17602E-03	4.80802E-03	3.18107E-03	4.81200E-03
9	4.13842E-03	5.01894E-03	4.14354E-03	5.01804E-03
10	5.61944E-03	5.10956E-03	5.63924E-03	5.11215E-03
11	6.81701E-03	5.21949E-03	6.85017E-03	5.23549E-03
12	8.88660E-03	6.17090E-02	8.90675E-03	6.17159E-03
13	1.19291E-02	8.93418E-03	1.17565E-02	8.76137E-03
14	1.42602E-02	1.08867E-02	1.44389E-02	1.09349E-02
15	1.98867E-02	1.85299E-02	2.01025E-02	1.85484E-02
16	2.61496E-02	2.79419E-02	2.63185E-02	2.78861E-02
17	3.76775E-02	3.77413E-02	3.78242E-02	3.74695E-02
18	5.99138E-02	8.47821E-02	5.99704E-02	8.42142E-02

* Super-Cell consists of Spacer and Test Region (Na in)

Table 3.4 Comparison of Cross Sections of Fuel Compacted Drawer from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation *

	Infinite-Cell		Super-Cell			
			Adjacent to Test Region		Apart from Test Region	
Group	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_a	$\nu\Sigma_f$
1	2.31118E-02	6.72303E-02	2.31612E-02	6.74295E-02	2.31338E-02	6.73199E-02
2	1.51863E-02	3.96870E-02	1.52255E-02	3.98302E-02	1.52046E-02	3.97572E-02
3	1.25798E-02	3.61462E-02	1.26128E-02	3.62596E-02	1.25963E-02	3.62026E-02
4	1.19624E-02	3.19381E-02	1.19799E-02	3.19954E-02	1.19732E-02	3.19733E-02
5	6.50491E-03	1.42166E-02	6.51697E-03	1.42518E-02	6.51227E-03	1.42382E-02
6	5.56467E-03	1.08189E-02	5.56884E-03	1.08314E-02	5.56871E-03	1.08300E-02
7	5.47213E-03	9.71372E-03	5.47380E-03	9.71786E-03	5.47303E-03	9.71622E-03
8	6.20497E-03	9.62592E-03	6.20433E-03	9.62476E-03	6.20519E-03	9.62649E-03
9	8.11287E-03	1.00510E-02	8.11393E-03	1.00528E-02	8.11302E-03	1.00515E-02
10	1.09419E-02	1.02465E-02	1.09439E-02	1.02449E-02	1.09426E-02	1.02475E-02
11	1.31121E-02	1.04405E-02	1.31172E-02	1.04398E-02	1.31108E-02	1.04392E-02
12	1.67119E-02	1.23250E-02	1.67287E-02	1.23284E-02	1.67119E-02	1.23250E-02
13	2.11877E-02	1.85987E-02	2.12966E-02	1.86404E-02	2.12001E-02	1.86146E-02
14	2.64646E-02	2.21672E-02	2.64232E-02	2.20547E-02	2.64152E-02	2.21054E-02
15	3.79256E-02	3.69562E-02	3.79362E-02	3.68830E-02	3.78439E-02	3.68571E-02
16	4.99138E-02	5.56308E-02	4.99004E-02	5.55093E-02	4.98209E-02	5.55054E-02
17	7.19365E-02	7.62224E-02	7.18635E-02	7.59298E-02	7.17819E-02	7.60135E-02
18	1.15548E-01	1.72491E-01	1.15166E-01	1.71547E-01	1.15208E-01	1.71926E-01

* Super-Cell consists of Fuel Compacted Drawer and Test Region (Na in)

Table 3.5 Comparison of Cross Sections of Test Region (Na in) from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation*

Group	Infinite-Cell		Super-Cell	
	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_a	$\nu\Sigma_f$
1	1.30856E-02	3.48182E-02	1.29637E-02	3.43474E-02
2	8.24439E-03	2.05836E-02	8.15208E-03	2.02677E-02
3	6.62852E-03	1.85900E-02	6.55666E-03	1.83608E-02
4	6.11860E-03	1.61815E-02	6.07930E-03	1.60614E-02
5	3.34312E-03	7.22653E-03	3.32190E-03	7.16590E-03
6	2.85791E-03	5.43830E-03	2.84964E-03	5.41561E-03
7	2.80971E-03	4.87268E-03	2.80769E-03	4.86577E-03
8	3.17656E-03	4.80810E-03	3.18049E-03	4.80918E-03
9	4.14345E-03	5.01975E-03	4.14735E-03	5.01785E-03
10	5.61757E-03	5.10760E-03	5.62049E-03	5.10816E-03
11	6.81422E-03	5.21795E-03	6.81636E-03	5.22077E-03
12	8.87385E-03	6.16164E-03	8.86295E-03	6.15781E-03
13	1.19066E-02	8.92524E-03	1.18222E-02	8.85277E-03
14	1.42489E-02	1.06766E-02	1.43253E-02	1.09670E-02
15	1.98557E-02	1.84771E-02	1.98897E-02	1.85603E-02
16	2.60541E-02	2.78241E-02	2.61123E-02	2.79519E-02
17	3.75561E-02	3.77092E-02	3.76842E-02	3.79567E-02
18	5.97085E-02	8.55210E-02	6.00227E-02	8.61360E-02

* Super-Cell consists of Fuel Compacted Drawer and Test Region (Na in)

Table 3.6 Comparison of $\Delta\Sigma_a$ and $\Delta\nu\Sigma_f$ between Spacer and Test Region (Na out) from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation*

Group	Infinite-Cell		Super-Cell			
			Adjacent to Test Region		Apart from Test Region	
	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta\nu\Sigma_f$	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta\nu\Sigma_f$	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta\nu\Sigma_f$
1	-1.09952E-02	-3.43942E-02	-1.10034E-02	-3.44421E-02	-1.09957E-02	-3.44131E-02
2	-7.37163E-03	-2.03197E-02	-7.38026E-03	-2.03568E-02	-7.37372E-03	-2.03353E-02
3	-6.22482E-03	-1.84015E-02	-6.23261E-03	-1.84304E-02	-6.22797E-03	-1.84153E-02
4	-5.95310E-03	-1.60783E-02	-5.95791E-03	-1.60946E-02	-5.95593E-03	-1.60884E-02
5	-3.21510E-03	-7.14649E-03	-3.22126E-03	-7.16455E-03	-3.21844E-03	-7.15823E-03
6	-2.71835E-03	-5.41336E-03	-2.72129E-03	-5.42186E-03	-2.72122E-03	-5.42133E-03
7	-2.67612E-03	-4.86248E-03	-2.67750E-03	-4.86571E-03	-2.67675E-03	-4.86413E-03
8	-3.03573E-03	-4.81161E-03	-3.03510E-03	-4.81059E-03	-3.03570E-03	-4.81177E-03
9	-3.96624E-03	-5.01970E-03	-3.96728E-03	-5.02132E-03	-3.96671E-03	-5.02043E-03
10	-5.38151E-03	-5.10929E-03	-5.37904E-03	-5.10676E-03	-5.37962E-03	-5.10809E-03
11	-6.44200E-03	-5.22809E-03	-6.44174E-03	-5.22633E-03	-6.43997E-03	-5.22709E-03
12	-8.22414E-03	-6.18129E-03	-8.22908E-03	-6.18348E-03	-8.22107E-03	-6.18153E-03
13	-1.06493E-02	-9.27710E-03	-1.07348E-02	-9.31874E-03	-1.06650E-02	-9.30040E-03
14	-1.30127E-02	-1.10958E-02	-1.29699E-02	-1.10384E-02	-1.29664E-02	-1.10567E-02
15	-1.94360E-02	-1.85676E-02	-1.94277E-02	-1.85470E-02	-1.93921E-02	-1.85371E-02
16	-2.54102E-02	-2.78958E-02	-2.54110E-02	-2.78842E-02	-2.53796E-02	-2.78810E-02
17	-3.65398E-02	-3.78028E-02	-3.65399E-02	-3.77797E-02	-3.64895E-02	-3.77890E-02
18	-5.81071E-02	-8.57308E-02	-5.81053E-02	-8.57494E-02	-5.80378E-02	-8.57908E-02

* In Super-Cell Test Region (Na in) is always adjacent to Spacer

Table 3.7 Comparison of $\Delta\Sigma_a$ and $\Delta v\Sigma_f$ between Fuel Compacted Drawer and Test Region (Na out) from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation*

Group	Infinite-Cell		Super-Cell			
	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta v\Sigma_f$	Adjacent to Test Region		Apart from Test Region	
	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta v\Sigma_f$	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta v\Sigma_f$	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta v\Sigma_f$
1	1.05977E-02	3.28267E-02	1.06389E-02	3.29780E-02	1.06192E-02	3.28975E-02
2	7.08750E-03	1.93693E-02	7.11817E-03	1.94754E-02	7.10381E-03	1.94239E-02
3	6.02059E-03	1.77446E-02	6.04610E-03	1.78290E-02	6.03414E-03	1.77872E-02
4	5.38622E-03	1.58754E-02	5.89901E-03	1.59165E-02	5.89419E-03	1.59005E-02
5	3.19303E-03	7.06911E-03	3.19893E-03	7.08625E-03	3.19655E-03	7.07897E-03
6	2.71877E-03	5.40734E-03	2.72003E-03	5.41134E-03	2.71995E-03	5.41057E-03
7	2.67400E-03	4.85101E-03	2.67430E-03	4.85194E-03	2.67427E-03	4.85186E-03
8	3.03877E-03	4.81427E-03	3.03876E-03	4.81413E-03	3.03901E-03	4.81468E-03
9	3.98977E-03	5.03190E-03	3.98980E-03	5.03208E-03	3.98944E-03	5.03157E-03
10	5.33240E-03	5.13601E-03	5.33707E-03	5.13714E-03	5.33509E-03	5.13821E-03
11	6.30802E-03	5.21131E-03	6.31338E-03	5.21237E-03	6.30875E-03	5.21101E-03
12	7.85247E-03	6.13571E-03	7.86433E-03	6.13702E-03	7.85554E-03	6.13547E-03
13	1.01609E-02	9.31770E-03	1.01848E-02	9.31896E-03	1.01576E-02	9.31040E-03
14	1.22183E-02	1.10368E-02	1.22196E-02	1.09816E-02	1.22154E-02	1.10143E-02
15	1.81142E-02	1.83367E-02	1.81331E-02	1.82841E-02	1.80764E-02	1.82682E-02
16	2.38613E-02	2.76305E-02	2.38474E-02	2.75211E-02	2.37992E-02	2.75202E-02
17	3.44338E-02	3.83943E-02	3.43606E-02	3.81251E-02	3.43297E-02	3.81994E-02
18	5.58766E-02	8.67892E-02	5.54984E-02	8.58776E-02	5.56069E-02	8.62152E-02

* In Super-Cell Test Region (Na in) is always adjacent to Fuel Compacted Drawer

Table 3.8 Comparison of $\Delta\Sigma_a$ and $\Delta\nu\Sigma_f$ between Test Regions* from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation

Group	Infinite-Cell		Super-Cell	
	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta\nu\Sigma_f$	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta\nu\Sigma_f$
1	2.10106E-06	4.30271E-06	2.93199E-04	1.17050E-03
2	4.09782E-06	-9.01520E-07	2.23618E-04	7.87999E-04
3	-3.79980E-07	-1.60187E-06	1.84838E-04	6.17199E-04
4	-3.03984E-06	-1.06990E-05	1.18151E-04	3.61502E-04
5	1.89990E-07	9.98378E-07	5.35098E-05	1.56291E-04
6	-9.29926E-07	-2.42889E-06	1.27500E-05	3.63998E-05
7	-5.59958E-07	4.28408E-07	3.63984E-06	1.07065E-05
8	-4.69852E-07	-7.07805E-08	4.39817E-07	2.25008E-06
9	-5.74067E-06	-9.27597E-07	-4.57093E-06	1.19209E-07
10	3.37884E-06	2.10851E-06	1.43088E-05	1.16974E-06
11	3.06219E-06	1.70991E-06	3.04282E-05	1.37500E-05
12	1.06096E-05	7.86781E-06	3.48017E-05	1.12094E-05
13	2.44007E-05	7.89016E-06	-3.17022E-05	-6.18696E-05
14	3.15979E-05	3.11024E-05	1.29499E-04	3.30061E-06
15	5.13010E-05	8.58977E-05	2.24099E-04	4.82015E-05
16	1.61398E-04	1.97999E-04	2.83100E-04	7.30008E-05
17	2.35301E-04	6.34007E-05	3.00001E-04	-3.23702E-04
18	3.11401E-04	-2.38162E-03	1.68397E-04	-3.27450E-03

* Both of Test Regions (Na in) are always adjacent to Spacer

Table 3.9 Comparison of $\Delta\Sigma_a$ and $\Delta\nu\Sigma_f$ between Test Regions* from Infinite-Cell Calculation with those from Super-Cell Calculation

Group	Infinite-Cell		Super-Cell	
	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta\nu\Sigma_f$	$\Delta\Sigma_a$	$\Delta\nu\Sigma_f$
1	-3.20002E-06	-6.29947E-06	-8.06004E-05	-3.18300E-04
2	-4.84288E-08	1.40071E-06	-6.03124E-05	-2.11600E-04
3	-1.11759E-07	-3.98606E-07	-4.63203E-05	-1.54402E-04
4	2.71946E-06	9.70066E-06	-2.32086E-05	-7.01994E-05
5	1.00117E-08	1.00583E-07	-9.95002E-06	-2.91988E-05
6	1.79978E-07	4.69387E-07	-2.48989E-06	-7.32020E-06
7	8.98726E-08	-5.21541E-08	-6.10016E-07	-1.89245E-06
8	1.00117E-08	1.11759E-08	-1.89990E-07	-5.32717E-07
9	1.79932E-06	2.42144E-07	1.79932E-06	3.39001E-07
10	4.09782E-07	-5.69969E-07	-5.27129E-06	-3.17022E-06
11	-9.98378E-07	-5.77420E-07	-4.60073E-06	-1.65775E-06
12	-5.34952E-06	-3.93018E-06	-1.20774E-05	-4.97326E-06
13	-1.09002E-05	-4.48897E-06	2.02991E-05	2.53506E-05
14	-1.68011E-05	-1.67973E-05	-2.15024E-05	-2.49967E-06
15	-1.97999E-05	-3.11024E-05	-2.86996E-05	-4.00096E-06
16	-4.33996E-05	-5.15021E-05	-3.22983E-05	8.00192E-06
17	-3.46005E-05	-1.03004E-05	9.60007E-06	1.22800E-04
18	-2.85022E-05	-4.23193E-06	8.51974E-05	2.80499E-04

* Both of Test Regions (Na in) are always adjacent to Fuel Compacted Drawer

Table 3.10 Reactivity Worth Obtained by Diffusion Calculation Using
70-groups Cross Sections

Pattern	k_{eff}	Worth* ($\times 10^{-4} \Delta k/kk'$)		C/E	C - E**
		Calculation	Experiment		
A0	1.004832	—————	—————	———	—————
A1	1.005185	3.49	5.3 ± 0.2	0.66	-1.81
A2	1.005383	5.45	12.6 ± 0.3	0.43	-7.15
A3	1.005255	4.19	15.2 ± 0.3	0.28	-11.00
S	1.004240	-5.87	-4.1 ± 0.2	1.43	-1.77

* Relative to A0

** Unit : $\times 10^{-4} \Delta k/kk'$

Table 3.11 Reactivity Worth Obtained by Transport Calculation Using the
Cross Sections from Infinite-Cell-Calculation

Pattern	k_{eff}	Worth* ($\times 10^{-4} \Delta k/kk'$)		C/E	C - E**
		Calculation	Experiment		
A0	1.008173	—————	—————	———	—————
A1	1.008574	3.94	5.3 ± 0.2	0.74	-1.36
A2	1.009173	9.83	12.6 ± 0.3	0.78	-2.77
A3	1.009395	12.01	15.2 ± 0.3	0.79	-3.19
S	1.007685	-4.80	-4.1 ± 0.2	1.17	-0.70

* Relative to A0

** Unit : $\times 10^{-4} \Delta k/kk'$

Table 3.12 Reactivity Worth Obtained by Transport Calculations
at Various Research Laboratories

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

Pattern	Calculation *			Experiment
	HANDAI	JAERI	MAPI	
A0 - A1	3.89	4.5	3.42	5.3 \pm 0.2
A0 - A2	9.75	10.5	7.94	12.6 \pm 0.3
A0 - A3	11.95	11.9	8.11	15.2 \pm 0.3
A0 - S	-4.81	-3.9	-5.36	-4.1 \pm 0.2

HANDAI : 18 groups S₆P₀

JAERI : 12 groups S₄P₀

MAPI : 16 groups S₄P₀

* Computational Methods Used at Various Research Laboratories

	Library Set (energy group)	Computer Code		Computational Conditions
		Transport	Diffusion	
HANDAI	JENDL-2B (70 groups)	TWOTRAN-II	CITATION	S ₆ P ₀ 70,18 groups
JAERI	JAERI Fast Set Version II (25 groups)	TWOTRAN-II TWOTRAN-GG	CITATION	S ₄ P ₀ 25,12 groups
MAPI	MICS 5.2 (26 groups)			S ₄ P ₀ 16 groups

Table 3.13 Reactivity Worth Obtained by Transport Calculation Using the
Cross Sections from Super-Cell-Calculation

Pattern	k _{eff}	Worth* ($\times 10^{-4} \Delta k/k'$)		C/E	C - E**
		Calculation	Experiment		
A0	1.008088	—	—	—	—
A1	1.008548	4.52	5.3 \pm 0.2	0.85	-0.78
A2	1.009172	10.66	12.6 \pm 0.3	0.85	-1.94
A3	1.009411	13.00	15.2 \pm 0.3	0.86	-2.2
S	1.007732	-3.50	-4.1 \pm 0.2	0.85	0.6

* Relative to A0

** Unit : $\times 10^{-4} \Delta k/k'$

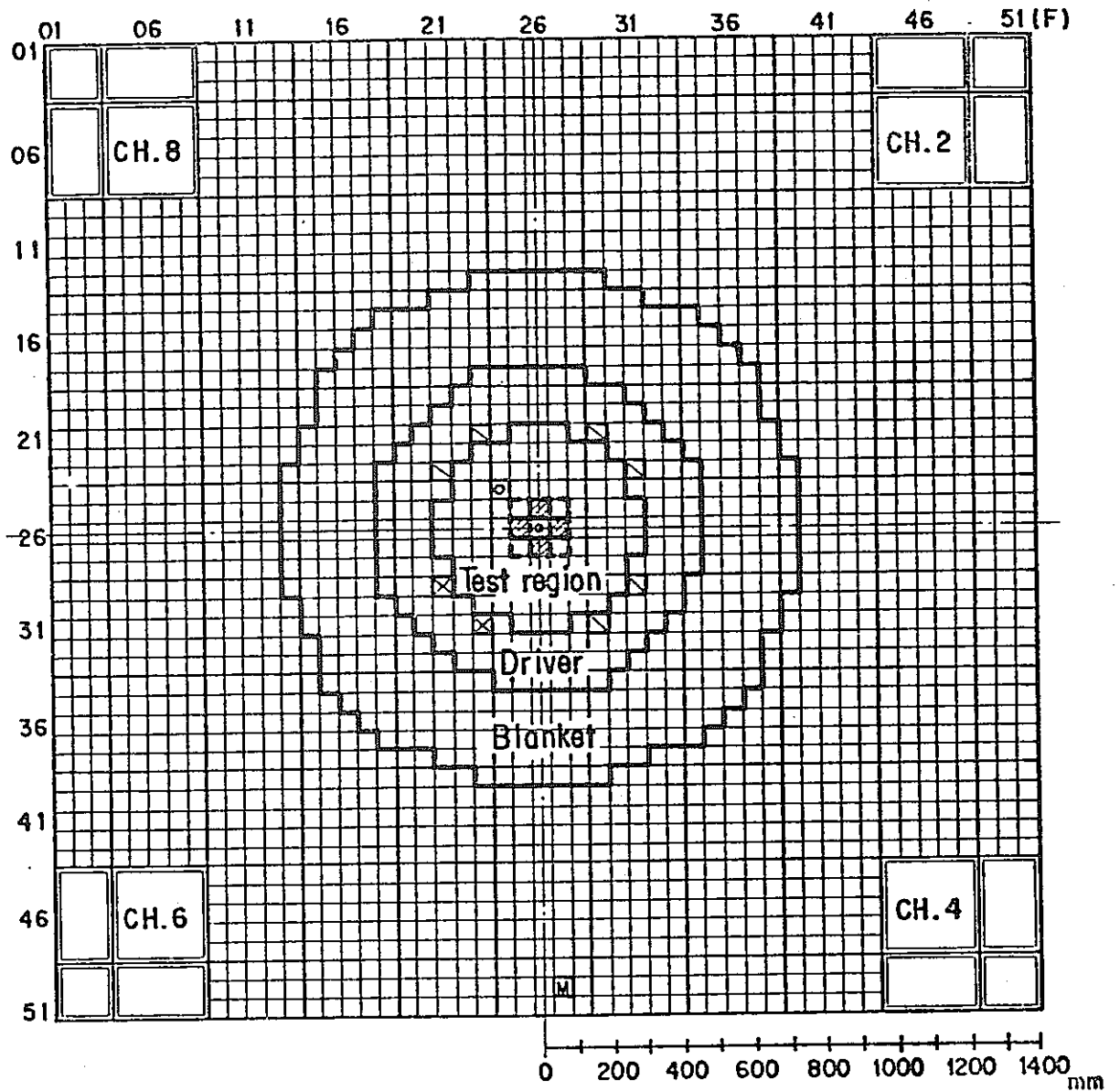
Table 3.14 Components of Fuel Slumping Reactivity Worths for Each Pattern Obtained by Using Cross Sections from Infinite-Cell Calculation ($\times 10^{-4} \Delta k/k'$)

Pattern	Experiment	Calculation (Direct)	Calculation (Exact Perturbation)				
			Net	Leakage	Absorption	Moderation	Fission
A0 - A1	5.3 \pm 0.2	3.94	3.89	-0.22	-0.24	-1.35	5.70
A0 - A2	12.6 \pm 0.3	9.83	9.75	-1.72	-4.40	-3.93	19.80
A0 - A3	15.2 \pm 0.3	12.01	11.95	-5.59	-9.78	-6.15	33.47
A0 - S	-4.1 \pm 0.2	-4.80	-4.81	4.36	33.42	2.07	-44.66

-52-

Table 3.15 Components of Fuel Slumping Reactivity Worths for Each Pattern Obtained by Using Cross Sections from Super-Cell Calculation ($\times 10^{-4} \Delta k/k'$)

Pattern	Experiment	Calculation (Direct)	Calculation (Exact Perturbation)				
			Net	Leakage	Absorption	Moderation	Fission
A0 - A1	5.3 \pm 0.2	4.52	4.47	-0.21	-0.89	-1.37	6.94
A0 - A2	12.6 \pm 0.3	10.66	10.59	-1.74	-5.51	-3.93	21.77
A0 - A3	15.2 \pm 0.3	13.00	12.95	-5.60	-11.28	-6.16	35.99
A0 - S	-4.1 \pm 0.2	-3.50	-3.51	4.40	31.89	2.01	-41.81



Key

- ☒ Control/Safety rod
- ▣ Power monitor counter
- ⊠ Counter position for axial traverse
- ▨ Drawers used for sample worth measurement

Fig.3.1 Vertical cross section of FCA Assembly VIII-2.

Cited from Reference 8)

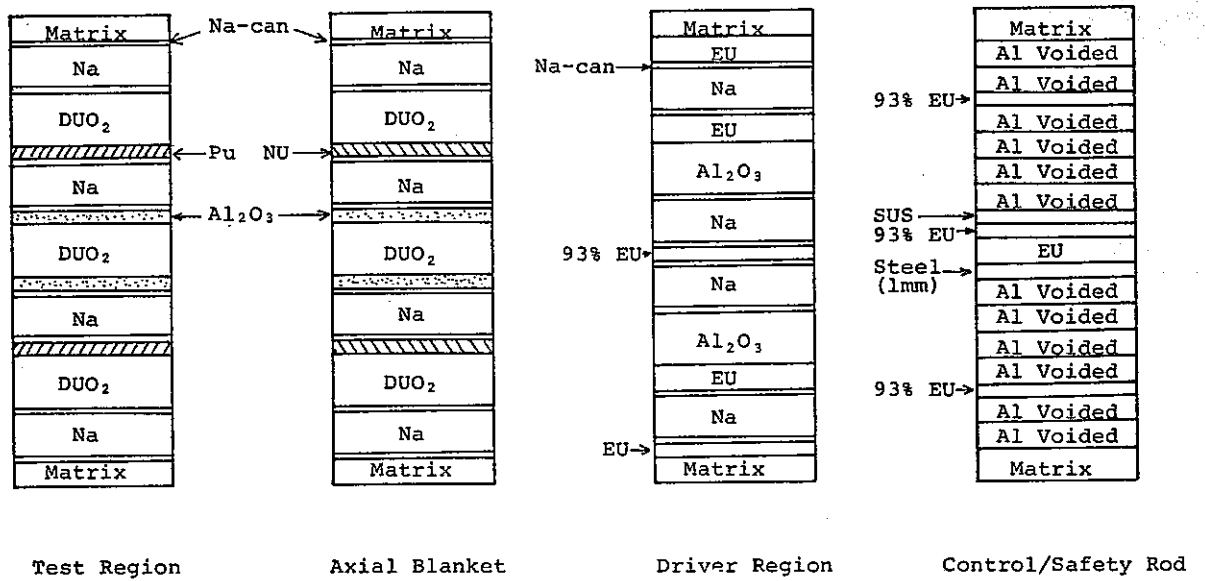


Fig. 3.2 Loading Pattern of Test Region, Axial Blanket, Driver Region and Control/Safety Rod of FCA VIII-2

Cited from Reference 7)

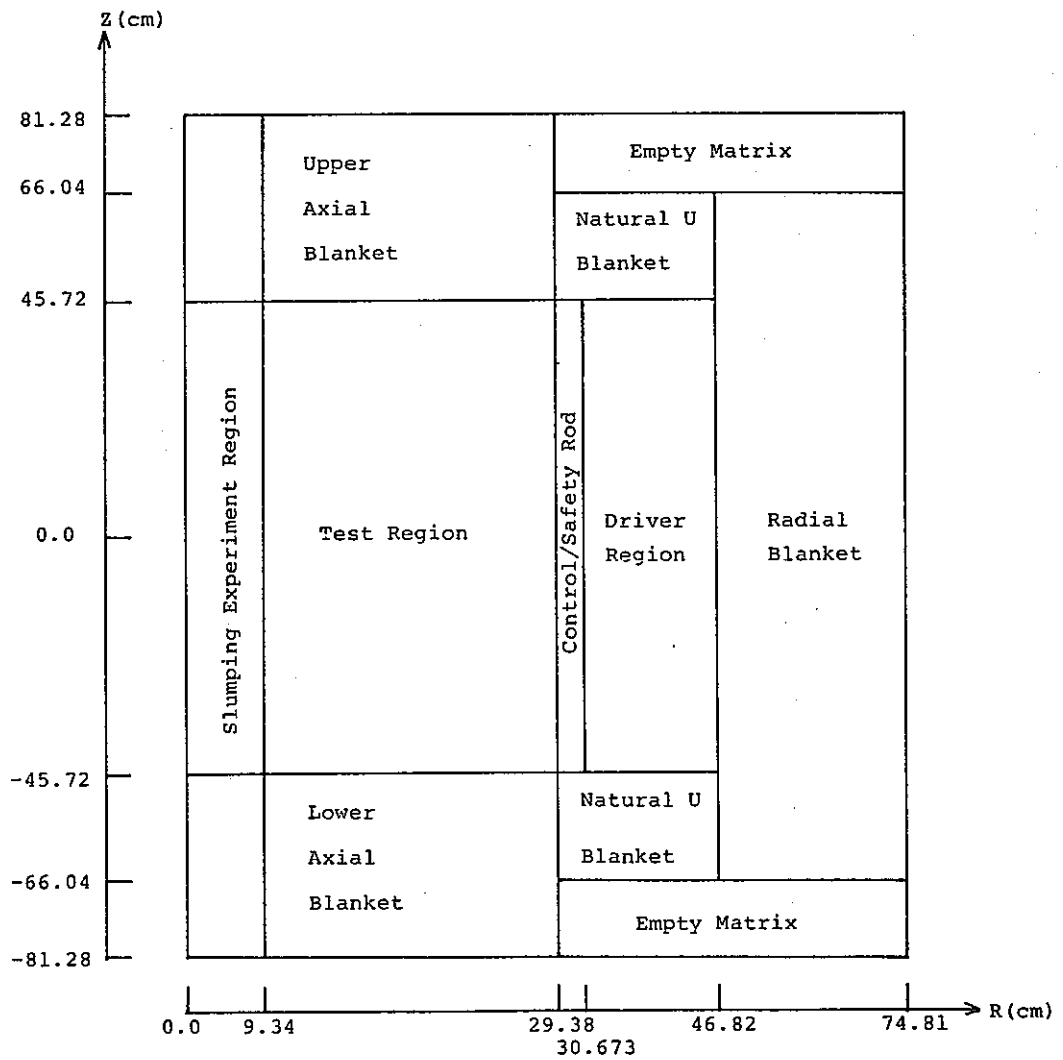


Fig. 3.3 RZ Configuration of FCA VIII-2

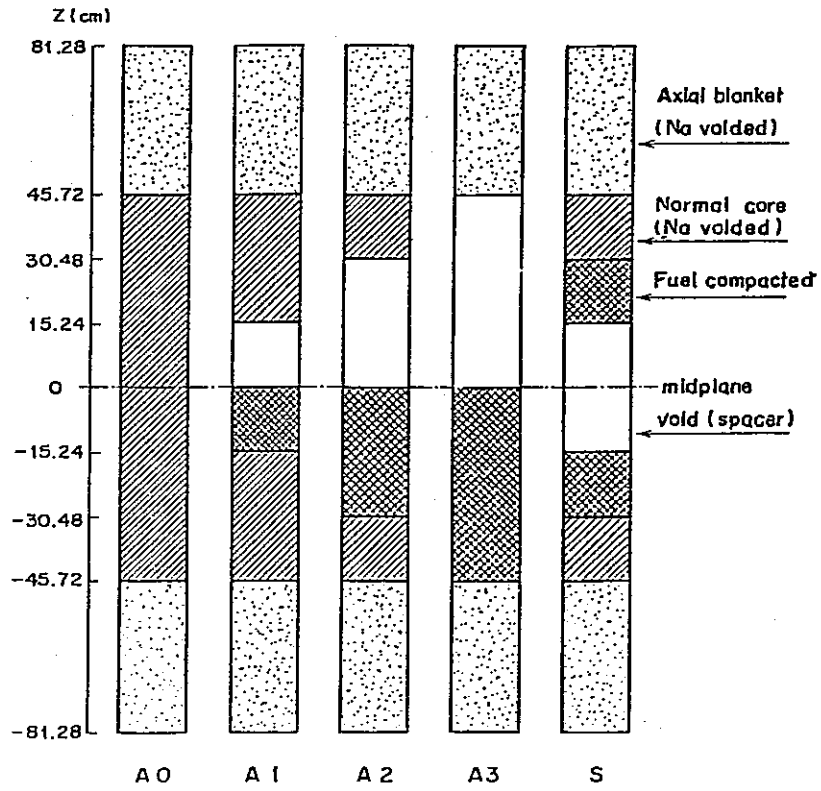


Fig.3.4 Configurations of the central 3x3 drawers used in the slumping experiment.

Cited from Reference 8)

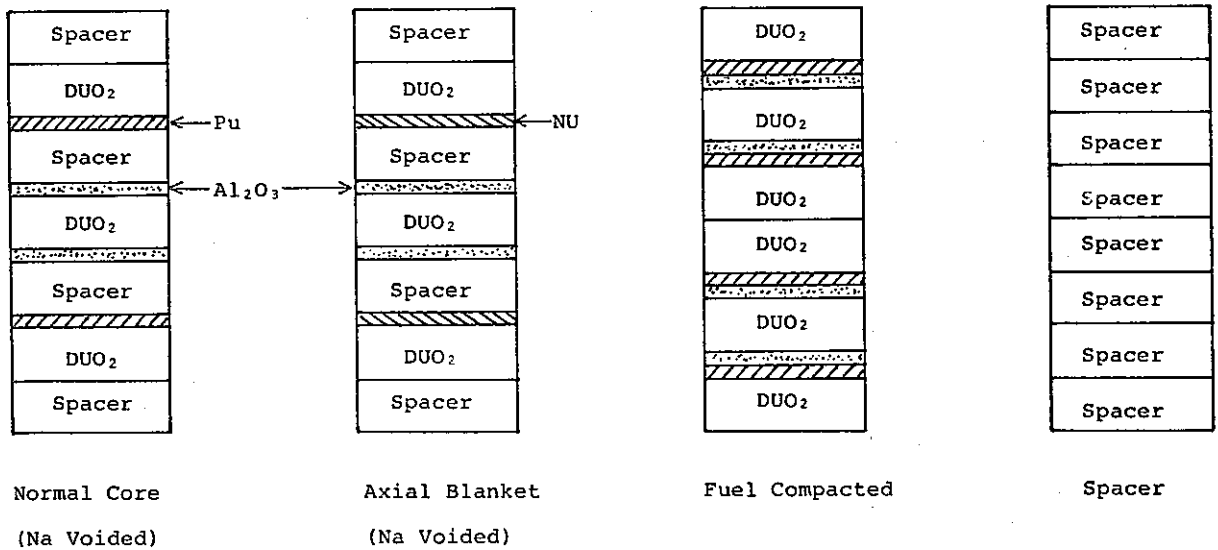


Fig. 3.5 Plate Arrangement of Each Cell Loaded in the Central 3x3 Drawers

Cited from Reference 7)

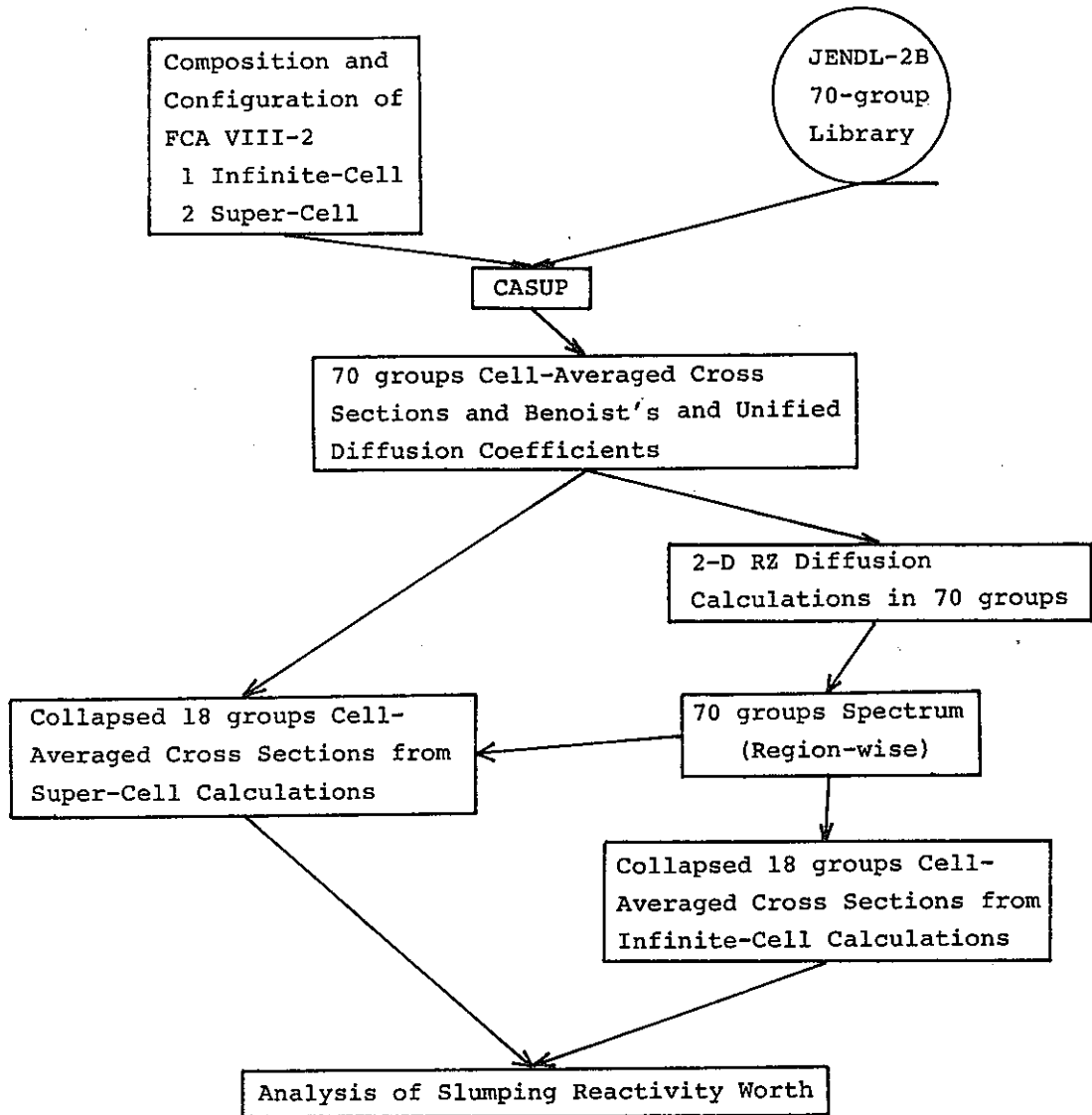


Fig. 3.6 Calculational Flow Diagram for Analysis of Slumping Reactivity Worth in FCA VIII-2

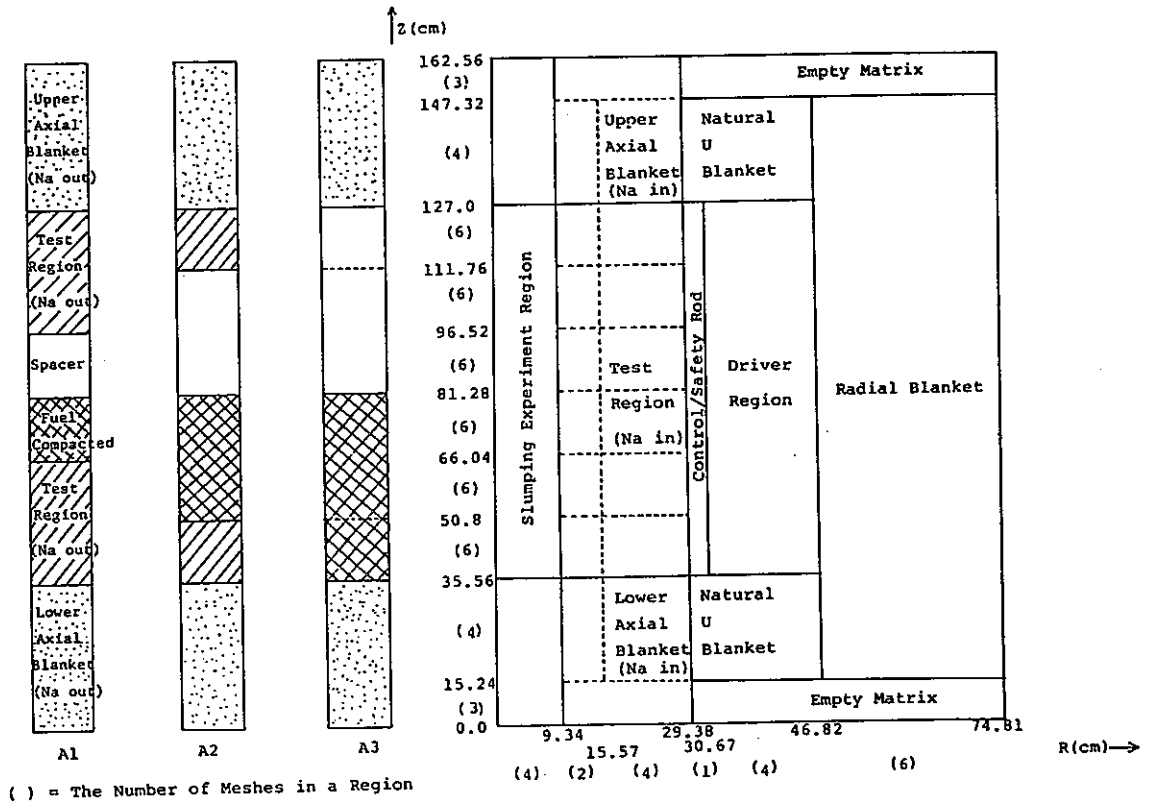
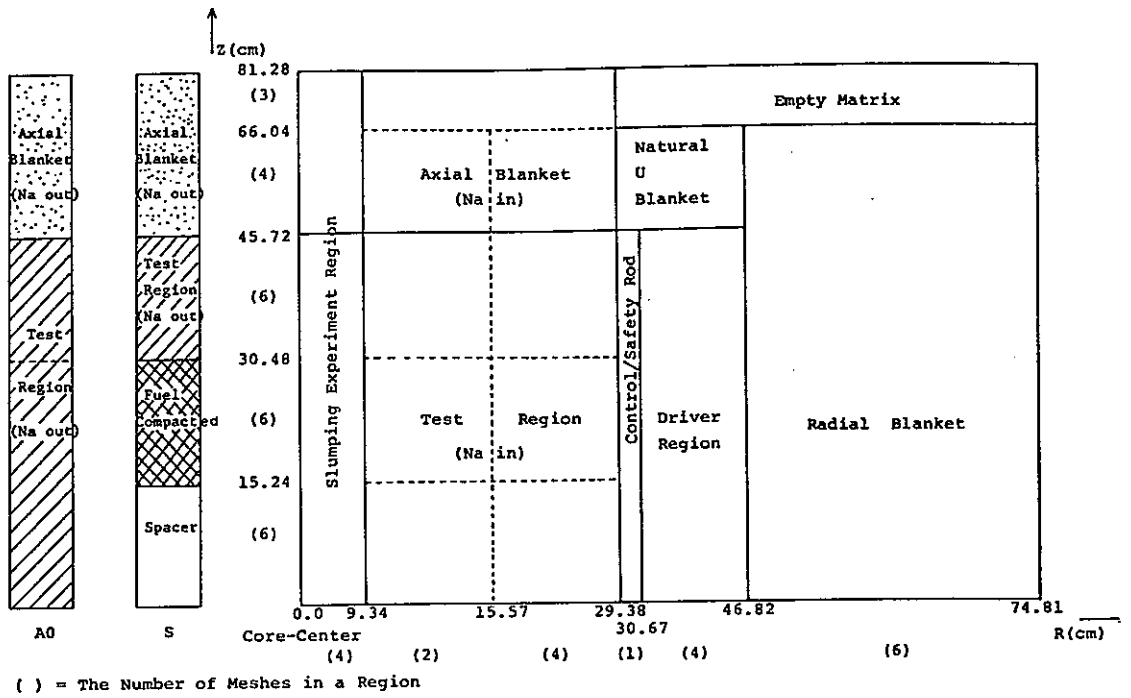


Fig. 3.7 RZ Model of FCA VIII-2 for Collapsing Group Constants

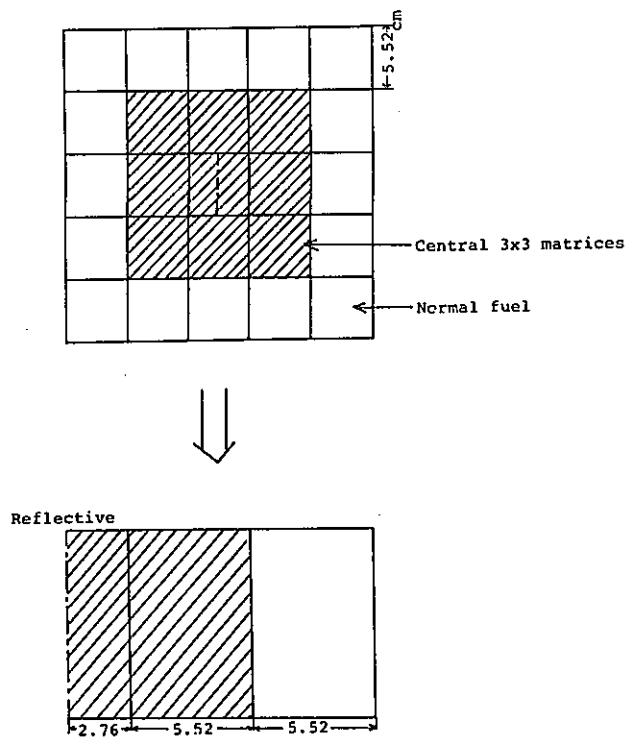


Fig. 3.8 1-D Modeling for Super-Cell Calculation

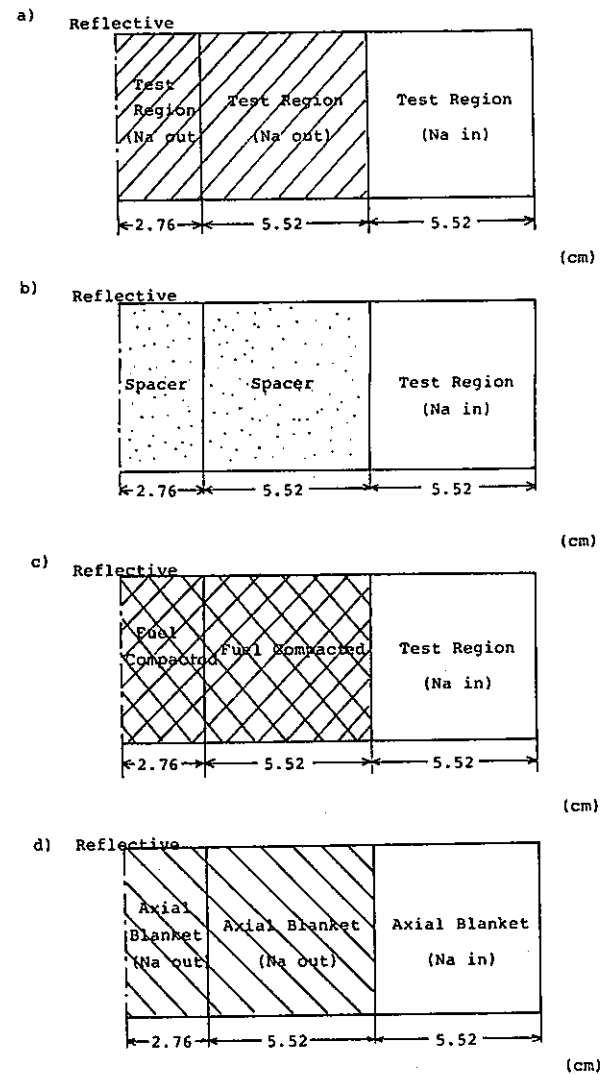
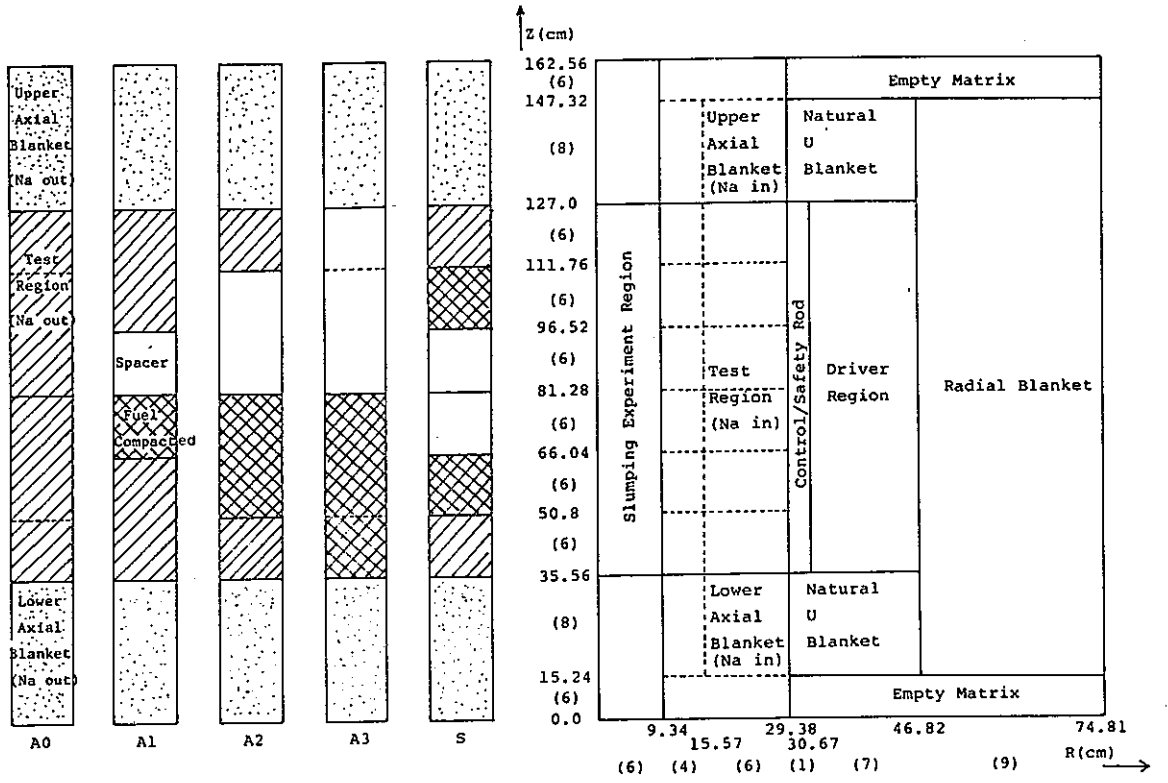
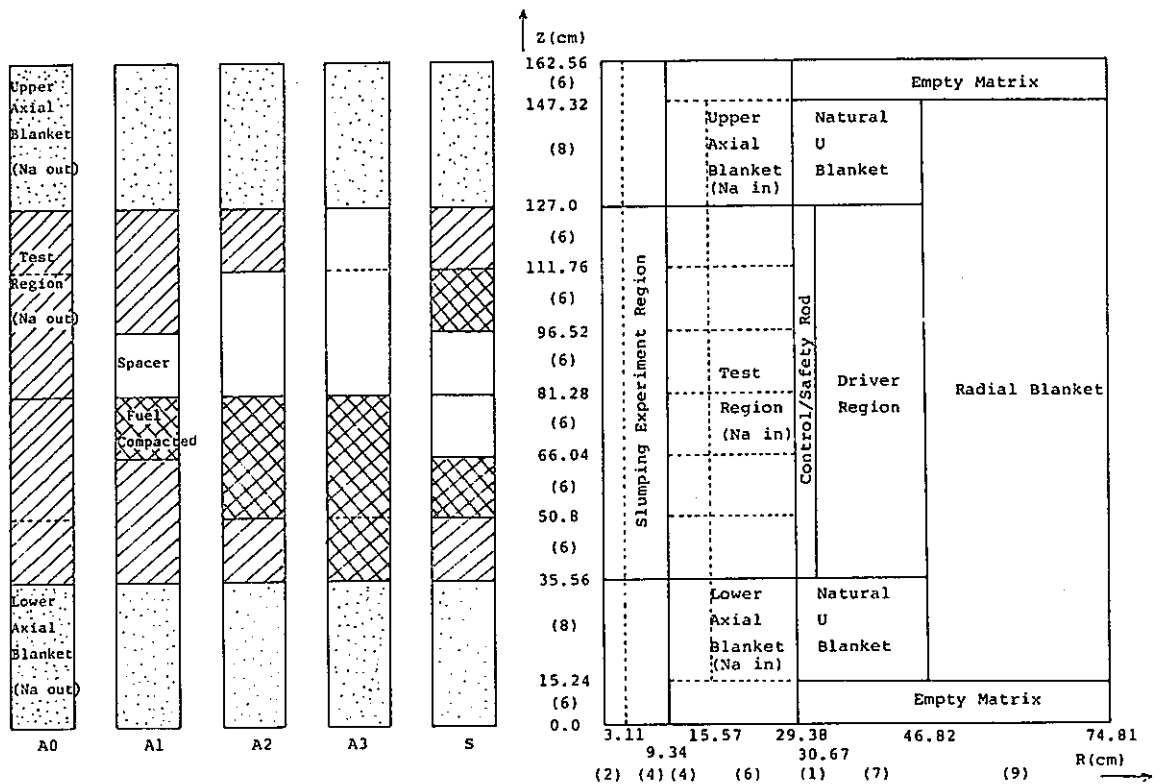


Fig. 3.9 Super-Cell Model of FCA VIII-2



() = The Number of Meshes in a Region

Fig. 3.10 RZ Model of FCA VIII-2 Using Cross Sections Obtained by Infinite-Cell Calculation



() = The Number of Meshes in a Region

Fig. 3.11 RZ Model of FCA VIII-2 Using Cross Sections Obtained by Super-Cell Calculation

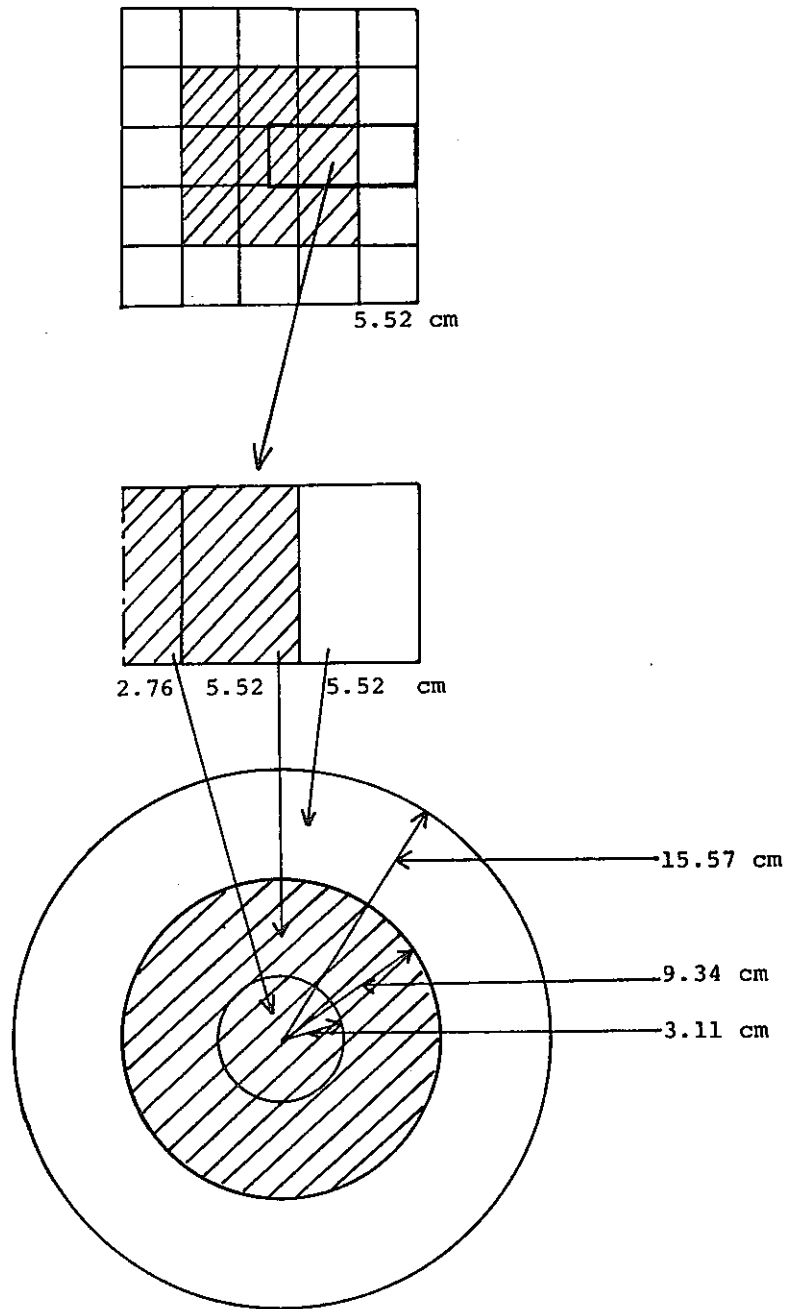


Fig. 3.12 Adaptation of Cross Sections Obtained by Super-Cell Calculation to Core Calculations

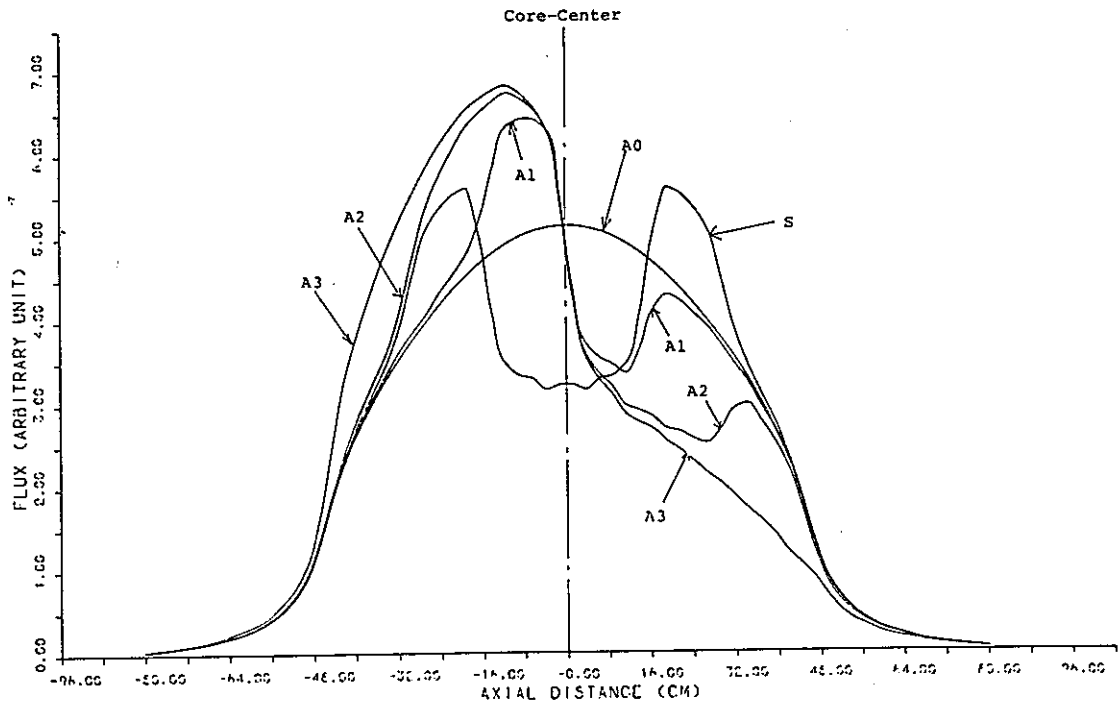


Fig. 3.13 FLUX DISTRIBUTION GROUP = 1

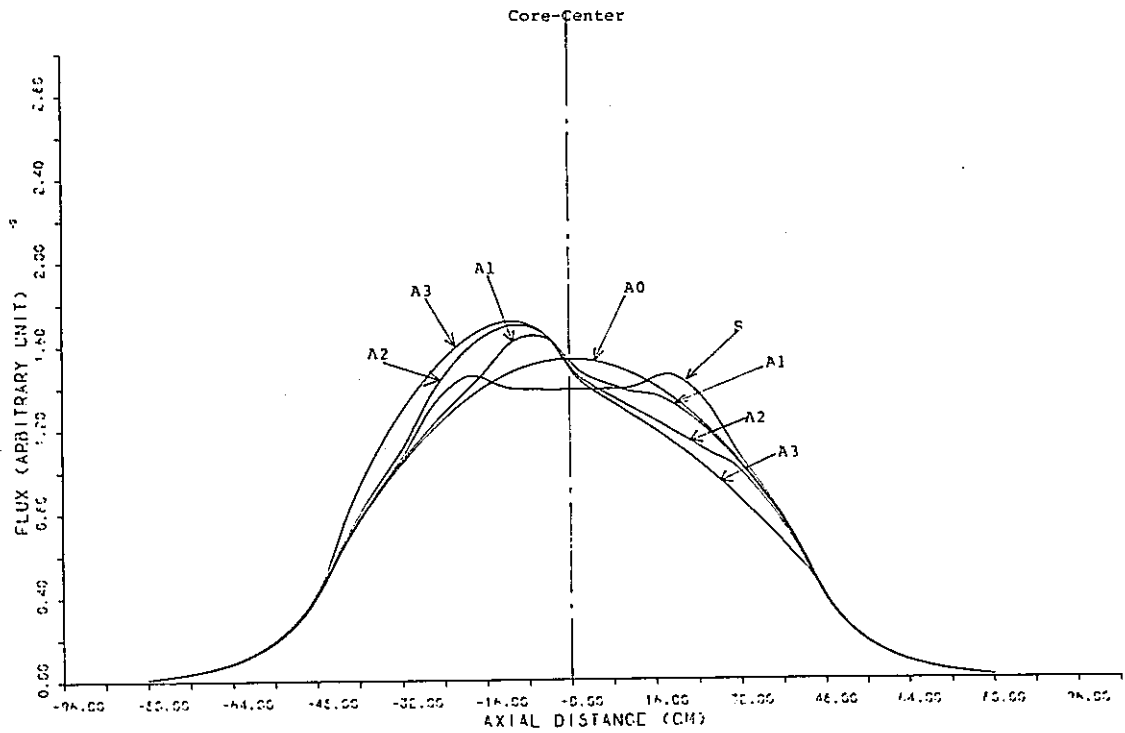


Fig. 3.14 FLUX DISTRIBUTION GROUP = 5

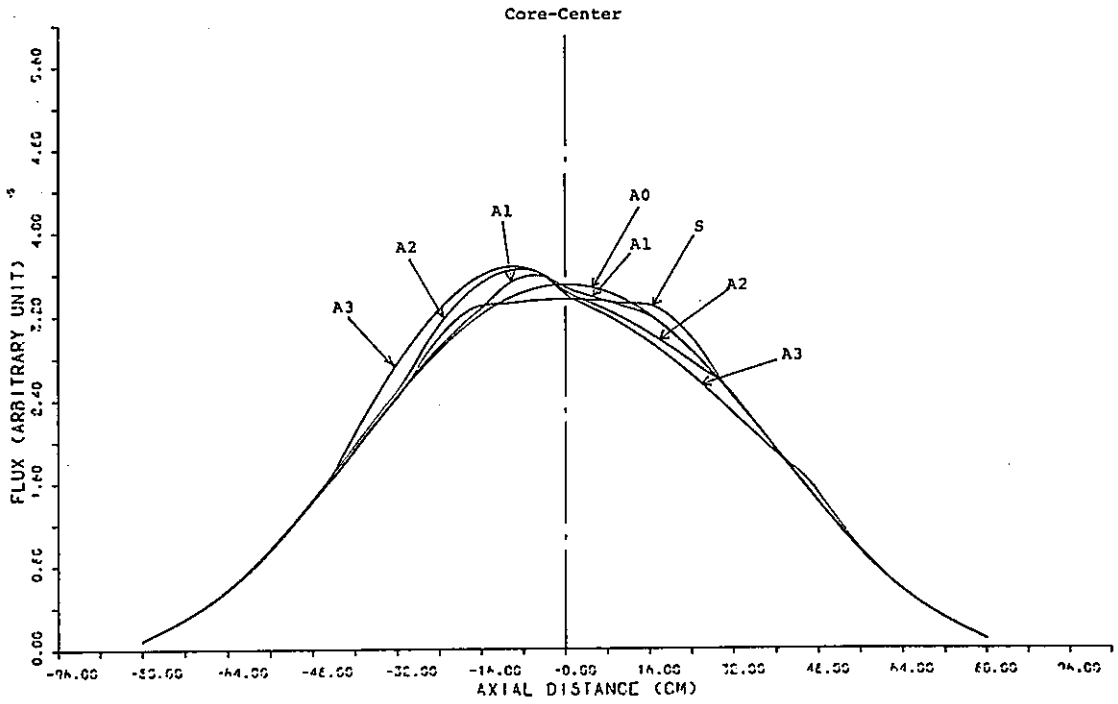


Fig. 3.15 FLUX DISTRIBUTION GROUP = 9

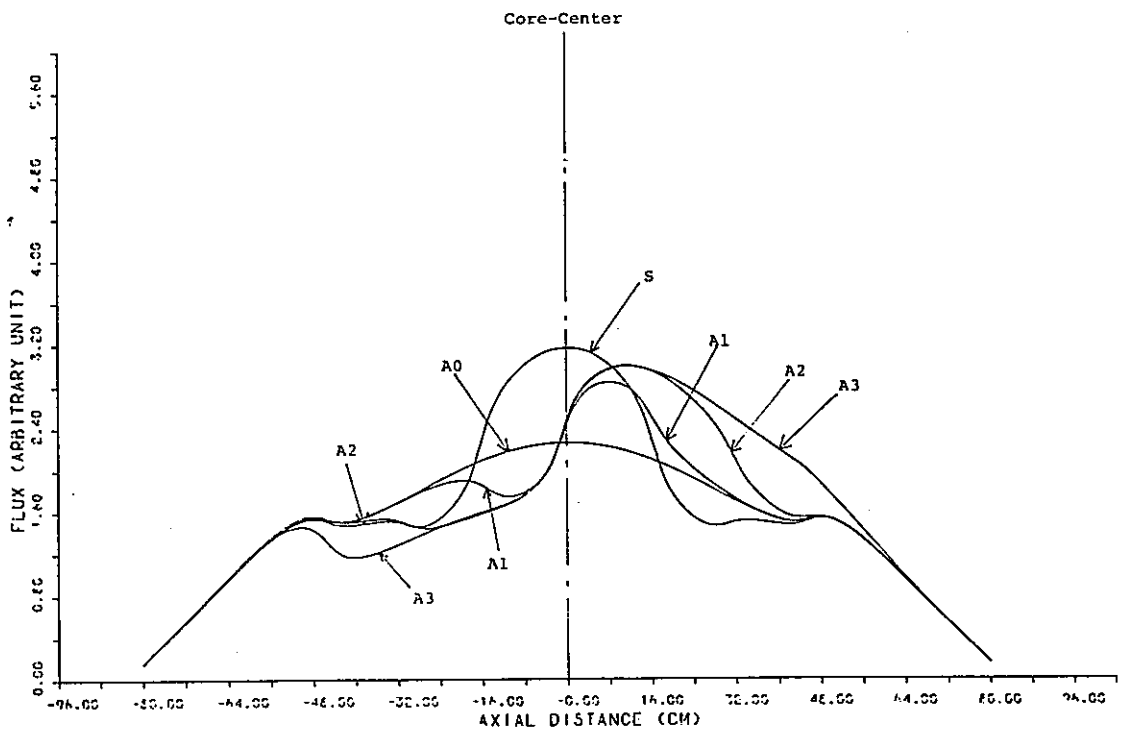


Fig. 3.16 FLUX DISTRIBUTION GROUP = 15

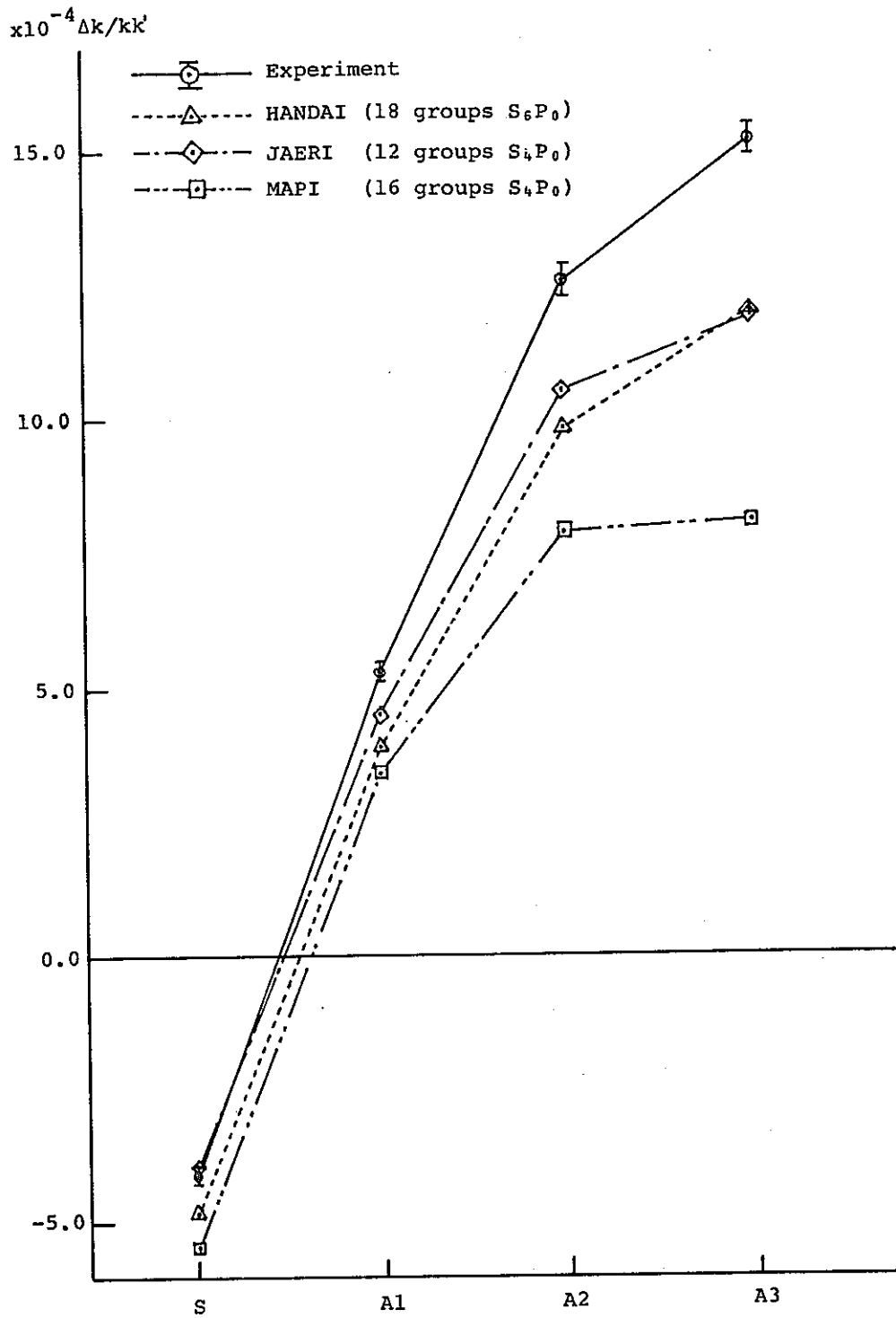


Fig. 3.17 Change of Reactivity Worth due to Fuel Slumping Performed by Various Research Laboratories

4. 結言および今後の問題点

FCAにおけるプレートおよびピン形状のナトリウムボイド反応度の解析では次の事柄が明らかにされた。

- (1) 炉中心のピン形状のボイド反応度に対する計算値の核分裂成分はプレート形状にくらべて大きくなり、ボイド反応度のC/E値も1.2程度となった。
- (2) オフセンターのピン形状のボイド反応度計算に対する中性子もれの成分は各格子モデルにより大幅に異なり、今後ピン形状のストリーミング評価方式を確立する必要がある。

また、燃料スランピング反応度の解析では次の事が明らかにされた。

- (1) 得られた反応度は原研の結果並び測定値とよく一致した。
- (2) スーパーセル計算による隣接ドロワーの干渉効果は反応度に対しては小さかった。

今後、プレートおよびピン形状における炉物理特性の差をさらに詳細につめて、高速炉炉心設計計算に使用されるバイアス因子の妥当性並びにその改善について検討する予定である。

謝

辞

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

参 考 文 献

- (1) P.Benoist, CEA-R-2278 (1964)
- (2) T.Takeda et al., J.Nucl.Sci.Technol.,18,93 (1981)
- (3) T.Takeda et al., PNC Report,J265 80-03 (1980)
- (4) I.Otake et al., PNC Report,N241 80-03 (1980)
- (5) 白方敬章, 私信
- (6) Y.Kikuchi, T.Narita and H.Takano, J.Nucl.Sci.Technol.,
17,567 (1980)
- (7) M.Nakano et al., JAERI-M 9090 (1980)
- (8) H.Tsunoda et al., JAERI-M 9091 (1980)
- (9) T.Iijima et al., JAERI-M 7888 (1978)
- (10) T.Takeda et al., PNC Report,J265 81-01 (1981)
- (11) T.B.Fowler et al., ORNL-TM-2496 (1971)
- (12) K.D.Lathrop et al., LA-4848-MS (1973)
- (13) 昭和56年日本原子力学会年会要旨集 B 4 1

付 録 A ピン格子での実効断面積の計算法

ピン体系での実効断面積を求める時，通常二領域モデルで計算されるが，この時，共鳴自己遮へい効果を考慮する。共鳴自己遮へい因子を導出する際，ドップラ効果に関する温度とともに，potential scattering cross sectionが必要となる。二領域非均質体系での内側領域0，核種mに対するpotential scattering cross sectionは，次式によって与えられる。

$$\sigma_{0,0}^{hm} = \sigma_{0,0}^m + \frac{A_0}{4N_0^m V_0} \cdot \frac{(1-C_0^m)a}{1+(a-1)C_0^m} \quad (\text{A.1})$$

ここで $\sigma_{0,0}^m$ は，均質系でのpotential scattering cross sectionで，次式で与えられる。

$$\sigma_{0,0}^m = \frac{1}{N_0^m} \sum_{m' \neq m} N_0^{m'} \sigma_{t,0}^{m'} \quad (\text{A.2})$$

また，ダンコフ係数 C_0^m は

$$C_0^m = 1 - \gamma - \gamma^4 (1 - \gamma) \quad (\text{A.3})$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{A_0}{4V_1 \Sigma_1}} \quad (\text{A.4})$$

となる。

ここで

$\sigma_{0,0}^{hm}$; 領域0，核種mに対する非均物質系のpotential scattering 断面積

A_0 ; $2\pi r_0$ (領域0の表面積)

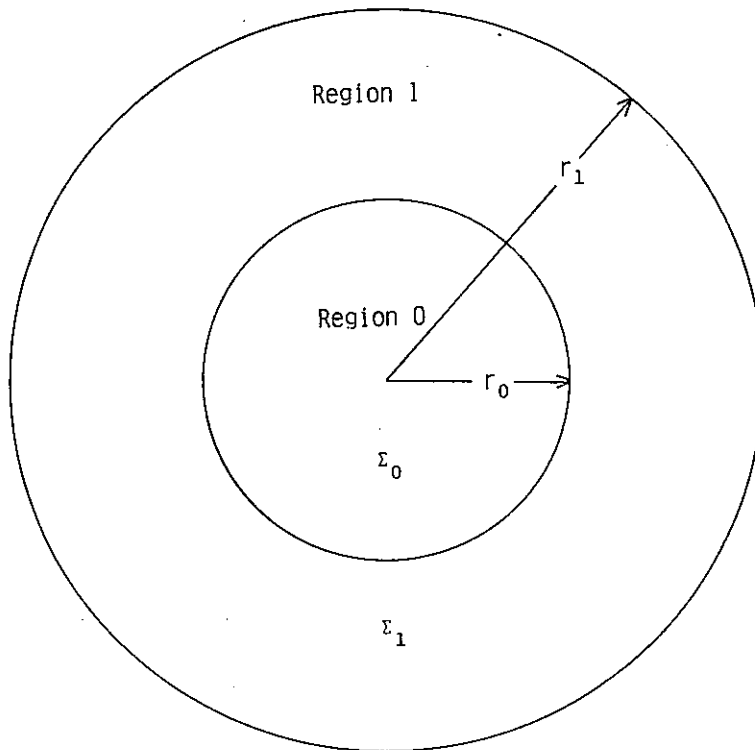
V_0 ; πr_0^3 (領域0の体積)

a ; Levine の補正因子 = 1.30

N_0^m ; 領域 0, 核種 m に対する原子数密度

V_1 ; $\pi(r_1^2 - r_0^2)$ (領域 1 の体積)

Σ_1 ; 領域 1 におけるマクロ断面積



Two-Region Model for Calculating Effective Cross Section

次に、外側領域 1, 核種 m に対する potential scattering cross section は、次のように、内側領域 0 と同じとなる。

$$\sigma_{0,1}^{hm} = \sigma_{0,1}^m + \frac{A_1}{4N_1^m V_1} \cdot \frac{(1-C_1^m)a}{1+(a-1)C_1^m} \quad (\text{A.5})$$

$$\sigma_{0,1}^m = \frac{1}{N_1^m} \sum_{m' \neq m} N_1^{m'} \sigma_{t,1}^{m'} \quad (\text{A.6})$$

$$C_1^m = \frac{a + (1-a)\Sigma_0 \bar{\ell}_0}{a + \Sigma_0 \bar{\ell}_0} \quad (\text{A.7})$$

ここで

$\sigma_{0,1}^{hm}$; 領域1, 核種mに対する非均質系の potential scattering 断面積

N_1^m ; 領域1, 核種mに対する原子数密度

Σ_0 ; 領域0におけるマクロ断面積

A_1 ; $2\pi(r_0+r_1)$ (領域1の表面積)

V_1 ; $\pi(r_1^2-r_0^2)$ (領域1の体積)

a ; Lovine の補正因子= 1.30

$\bar{\ell}_0$; 領域0での mean chord length

$$= \frac{4V_0}{A_0} \quad \begin{array}{l} V_0 \text{ 領域0の体積 } \pi r_0^2 \\ A_0 \text{ 領域0の表面積 } 2\pi r_0 \end{array}$$

$$= 2r_0$$

以上述べた計算式を非均質セル計算コード「CASUP」に組み込んで、ピン体系での共鳴自己遮へい効果を取り入れた実効断面積を算出している。

付 録 B スランピング反応度の解析データ

Table B.1 Atomic Number Density of Test Region (Na-in)

($\times 10^{22}$ atoms/cm³)

Nuclide	Matrix	Na-plate	DUO ₂	Al ₂ O ₃	Pu-plate	Na-can
Pu-239					1.81773	
Pu-240					0.16022	
Pu-241					0.01043	
U-235			0.000404			
U-238			1.99038			
O			3.98884	5.86815		
Na		2.0358				
Al				3.9121	0.26073	
Cr	1.353	0.12593	0.0814	0.0814	0.54711	1.43726
Fe	4.92596	0.46162	0.29637	0.29637	2.11555	5.32849
Ni	0.5898	0.05673	0.03549	0.03549	0.26822	0.68238
Width (cm)	0.22	0.519	0.635	0.15875	0.15875	0.058

Table B.2 Atomic Number Density of Test Region (Na-out)

($\times 10^{22}$ atoms/cm³)

Nuclide	Matrix	Na-plate	DUO ₂	Al ₂ O ₃	Pu-plate	Na-can
Pu-239					1.81773	
Pu-240					0.16022	
Pu-241					0.01043	
U-235			0.000404			
U-238			1.99038			
O			3.98884	5.86815		
Na						
Al				3.9121	0.26073	
Cr	1.353	0.12788	0.0814	0.0814	0.54711	1.49662
Fe	4.92596	0.46283	0.29637	0.29637	2.11555	5.36547
Ni	0.5898	0.05457	0.03549	0.03549	0.26822	0.61662
Width (cm)	0.22	0.519	0.635	0.15875	0.15875	0.058

Table B.3 Atomic Number Density of Axial Blanket (Na-in) ($\times 10^{22}$ atoms/cm³)

Nuclide	Matrix	Na-plate	DUO ₂	Natural U	Al ₂ O ₃	Na-can
Pu-239						
Pu-240						
Pu-241						
U-235			0.000404	0.03073		
U-238			1.99038	4.23914		
O			3.98884		5.86815	
Na		2.0358				
Al					3.9121	
Cr	1.353	0.12593	0.0814	0.0814	0.0814	1.43726
Fe	4.92596	0.46162	0.29637	0.29637	0.29637	5.32849
Ni	0.5898	0.05673	0.03549	0.03549	0.03549	0.68238
Width (cm)	0.22	0.519	0.635	0.15875	0.15875	0.058

Table B.4 Atomic Number Density of Axial Blanket (Na-out) ($\times 10^{22}$ atoms/cm³)

Nuclide	Matrix	Na-plate	DUO ₂	Natural U	Al ₂ O ₃	Na-can
Pu-239						
Pu-240						
Pu-241						
U-235			0.000404	0.03073		
U-238			1.99038	4.23914		
O			3.98884		5.86815	
Na						
Al					3.9121	
Cr	1.353	0.12788	0.0814	0.0814	0.0814	1.49662
Fe	4.92596	0.46283	0.29637	0.29637	0.29637	5.36547
Ni	0.5898	0.05457	0.03549	0.03549	0.03549	0.61662
Width (cm)	0.22	0.519	0.635	0.15875	0.15875	0.058

Table B.5 Atomic Number Density of Driver Region

 $(\times 10^{22} \text{ atoms/cm}^3)$

Nuclide	Matrix	1/8"EU*	Na-plate	93% EU	1/16"EU	Al ₂ O ₃	Na-can
Pu-239							
Pu-240							
Pu-241							
U-235		0.85196		3.93023	0.85158		
U-238		3.38140		0.29712	3.38012		
O						5.92189	
Na			2.03580				
Al						3.94793	
Cr	1.353	0.0814	0.12539	0.0814	0.0814	0.0814	1.43726
Fe	4.92596	0.29637	0.46162	0.29637	0.29637	0.29637	5.32849
Ni	0.5898	0.03549	0.05673	0.03549	0.03549	0.03549	0.68238
Width (cm)	0.22	0.3175	0.519	0.15875	0.15875	0.635	0.058

* Read as 1/8 inches enriched U

Table B.6 Atomic Number Density of Control/Safety Rod Region

 $(\times 10^{22} \text{ atoms/cm}^3)$

Nuclide	Matrix	Al Voided	93% EU*	EU	SUS	Steel
Pu-239						
Pu-240						
Pu-241						
U-235			3.93023	0.85219		
U-238			0.29712	3.38231		
O						
Na						
Al		2.45591				
Cr	1.47956	0.0814	0.0814	0.0814	1.63999	1.63999
Fe	5.37260	0.29637	0.29637	0.29637	5.97082	5.97082
Ni	0.63716	0.03549	0.03549	0.03549	0.7149	0.7149
Width (cm)	0.32875	0.3175	0.15875	0.3175	0.15875	0.100

* Read as 93% enriched U

Table B.7 Atomic Number Density of Fuel Compact ($\times 10^{22}$ atoms/cm³)

Nuclide	Matrix	DUO ₂	Pu-plate	Al ₂ O ₃
Pu-239			1.81773	
Pu-240			0.16022	
Pu-241			0.01043	
U-235		0.000404		
U-238		1.99038		
O		3.98884		5.86815
Na				
Al			0.26073	3.9121
Cr	1.353	0.0814	0.54711	0.0814
Fe	4.92596	0.29637	2.11555	0.29637
Ni	0.5898	0.03549	0.26822	0.03549
Width (cm)	0.22	0.635	0.15875	0.15875

Table B.8 Atomic Number Density of Radial Blanket, Natural U Blanket, Empty Matrix and Spacer ($\times 10^{22}$ atoms/cm³)

Nuclide	Radial Blanket	Natural U Blanket	Empty Matrix	Spacer
Pu-239				
Pu-240				
Pu-241				
U-235	0.00084	0.02891		
U-238	4.01746	3.98887		
O				
Na				
Al				
Cr	0.18276	0.18276	0.12289	0.45564
Fe	0.66539	0.66539	0.44742	1.6428
Ni	0.07967	0.07967	0.05357	0.19172