

PNC TJ202 76-01

SJ102-76-02

本資料は2001年07月31日付けで

登録区分変更する。

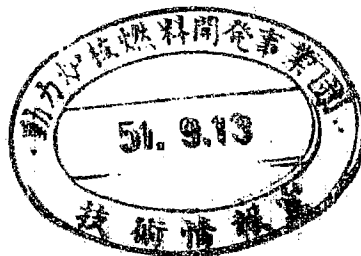
[東海事業所技術情報室]

ビゼー実験予備解析

—制御棒に関する実験の計画検討—

(受託研究)

1976年5月



株式会社 日立製作所

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

電話: 029-282-1122(代表)
ファックス : 029-282-7980
電子メール: jserv@jnc.go.jp

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)
2001

この資料

に配布するもので

す。したがって、この取扱にはじゅうぶん注意を払って下さい。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。



PNC T SJ 202 76 - 01

1976年5月30日

ビゼー実験予備解析

— 制御棒に関する実験の計画検討 — *

松島 秀介^{**} 堀 潔^{**}
加藤 恭義^{**} 漆原 広^{**}
上田 靖之^{**}

要 旨

英・独を中心として実施が予定されている大型炉臨界実施計画—ビゼー実験計画—に関する制御棒実験の計画立案および予備的検討を大型高速炉における制御棒設計上の問題点の検討と併せて実施した。

まず、大型炉制御棒設計上の問題点として、原型炉級炉心設計技術から精度の外挿が困難かまたは精度の低下を招くもの、および大型炉特有の問題となるものを検討した。その結果にもとづき、臨界実験によって設計精度の確認の必要な項目を抽出した。抽出された実験項目および我々が設計した1,000MWeの大型炉に対して好適な実験体系を、使用することのできる燃料の量を考慮の上、設定した。このようにして選定および設定のなされた実験項目と実験体系にもとづき、実験の予備的な解析を大型炉の計算結果と対比させつつ実施した。

今回の検討を通じて、設計しようとする炉心の模擬実験を比較的小さな体系で行なう場合に関して、次のような指針を得るに至った。

1. 内側炉心、外側炉心、径方向ブランケットおよび径方向遮蔽体の各領域の形状は対応する大型炉における値と相似比を一定に保つように縮小する。
2. 炉心燃料の富化度は必要とする余剰反応度を考慮した上制御棒引抜時における両炉心の中性子束分布形が相似形を保つように決定する。
3. 中性子のふるまいから見た相似性を保たせるために、制御棒のB-10濃縮度は制御棒の吸収断面積と燃料の拡散距離の比が両炉心の間で等しくなるように決定する。
4. 必要があるならば、中性子スペクトルの調整のために減速材を加え、中性子束分布の調整のために反射体を配置する。

好適な実験体系は1,870 Kgのプルトニウム (Pu-239等価量) を用い、この指針にもとづき決定された。この体系は、4燃料要素が1,000MWe大型炉の1集合体に対応するように各領

域の等価直径を決め、縮小された。炉心燃料富化度と制御棒濃縮度もまた上記指針に合致するように決められ、1,000MWe 大型炉より多少高めの値となった。

予備解析の結果、今回提案した炉心は1,000MWeの大型炉の炉心と同じ制御棒効果(制御棒価値、出力分布に与える効果および干渉効果)を与えることが明らかとなった。そこで、大型炉の炉心を模擬する臨界実験体系の設計に関する上記の指針の妥当性のある程度の裏付けが得られた。

内側炉心を忠実に模擬した炉心体系は炉中心近くの制御棒実験に対して有効であるが、英国の提案している炉心は必ずしも大型炉の制御棒効果を十分よく模擬することができないことが判明した。

また、減速材の混入および反射材の使用に伴う制御棒効果の検討も併せて実施した。

* 本報告書は、株式会社日立製作所が動力炉・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。

** 株式会社日立製作所

Commercial

SJ 202 76 - 02

May 30, 1976

A Preliminary Experimental Analysis of
the BIZET Program -- Planning and
Analysis of Control Rod Experiment --

by

Hidesuke Matsushima**

Kiyoshi Tsutsumi**

Yasuyoshi Kato**

Hiroshi Urushihara**

Yasuyuki Ueda**

Abstract

A preliminary study has been carried out to investigate design related problems of control rods in a large LMFBR and to provide a plan of control rod experiments for the BIZET Program.

Items of control rod experiments were selected after studying design problems inherent to the large LMFBR and due to an extrapolation of design methods from a prototype LMFBR. Then, a critical mockup core for a 1,000 MWe LMFBR has been designed to cover the experimental items under a restriction of an equivalent fissile plutonium inventory of about 1,800Kg. A series of calculations has been done to evaluate control rod effects of the proposed core comparing with those of the 1,000MWe core.

During this study, a general guideline has been proposed to mock up a large LMFBR by using an insufficient Pu inventory for a full mockup core, as follows.

1. Region sizes of inner core, outer core, radial blanket and radial shield are determined so as to be similar in

a shape and a volume ratio to the designed core.

2. Plutonium enrichments are determined so as to conserve a similar neutron flux shape to the designed core.
3. B-10 enrichments are determined so as to equalize the ratio of the macroscopic absorption cross-section (Σ_a) of a control rod to the diffusion length (L) of the surrounding fuel between two cores.
4. Carbon moderator and/or nickel reflector is used for an adjustment of neutron spectrum or flux distribution, if required.

According to this rule, the critical mockup core, with a contraction ratio of one sub-assembly in the 1,000 MWe core to four-elements in the mockup core, has been proposed to conserve relative locations of control rods in the core. The mock-up core, with slightly higher Pu(1870 Kg Pu fissile inventory) and B-10 enrichments than those of the 1,000 MWe core, was calculated to have an excess reactivity of about 4% $\Delta k/k$ and to provide same neutron flux shapes and same control rod effects, e.g. control rod worth, rod worth interaction and power density change with control rod insertion, as the 1,000 MWe core.

Another proposed core with a close simulation of an inner core is found to be suited for control rod experiments in the near center area of the 1,000 MWe. The UK proposed core seems to be suitable for a benchmark study of a large LMFBR.

The effect of carbon moderator and/or nickel reflector on changes in control rod effects has been also studied.

* Work performed under the contract between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. and Hitachi Ltd.

** Hitachi Ltd.

目 次

| | |
|----------------------------|-----|
| 1. 緒 言 | 1 |
| 2. 大型炉設計上の問題点の検討 | 2 |
| 2.1 炉心仕様 | 2 |
| 2.2 制御棒配置 | 2 |
| 2.3 出力分布 | 10 |
| 2.4 制御棒必要反応度と制御棒価値 | 16 |
| 2.5 制御棒相互干渉効果 | 22 |
| 2.6 1スタックロッドの検討 | 25 |
| 2.7 中性子エネルギースペクトル | 29 |
| 2.8 大型炉の主な特徴 | 33 |
| 3. 実験項目の摘出 | 34 |
| 3.1 制御棒設計に関する問題 | 34 |
| 3.2 大型炉での制御棒に関する問題点 | 35 |
| 3.3 制御棒に関する実験項目 | 36 |
| 3.4 大型炉で特に重要な実験項目 | 40 |
| 4. 好適な実験体系の検討 | 42 |
| 4.1 ビゼー基準体系における制御棒実験 | 42 |
| 4.2 制御棒実験を対象とした好適体系 | 81 |
| 5. 実験の予備的検討 | 127 |
| 5.1 ビゼー基準体系 | 127 |
| 5.2 ビゼー好適体系 | 131 |
| 5.3 核定数ファイルの評価 | 137 |
| 6. 結論と今後の問題点 | 143 |
| 7. 結 言 | 149 |
| 8. 謝 辞 | 150 |
| 9. 参 考 文 献 | 151 |

List of Table

| | | |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table 2.1 - 1 | Design Parameters | 3 |
| " 2.3 - 1 | Maximum Power Density Variation in 1,000MWe Core by Control Rod Insertion | 13 |
| " 2.3 - 2 | Maximum Power Density Variation in 300 MWe Core by Control Rod Insertion | 14 |
| " 2.4 - 1 | Reactivity Requirements and Control Rod Worth | 19 |
| " 2.4 - 2 | Primary Control Rod Worth | 20 |
| " 2.4 - 3 | Secondary Control Rod Worth | 20 |
| " 2.5 - 1 | Interaction Effect of Primary Control Rods | 23 |
| " 2.5 - 2 | Interaction Effect of Secondary Control Rods | 24 |
| " 2.5 - 3 | Interaction Effect between Primary Control Rods and Secondary Control Rods | 24 |
| " 2.8 - 1 | Major Characteristics | 33 |
| " 4.1 - 1 | Cell Averaged Atomic Number Density for BIZET Reference Core | 45 |
| " 4.1 - 2 | B-10 Contents for BIZET Mock-up Cont- rol Rod | 46 |
| " 4.1 - 3 | Fissile Contents for BIZET Reference Core Cell | 46 |
| " 4.1 - 4 | Multi-and Few-Group Structure for Large FBR and BIZET Core Cross-section File... | 49 |
| " 4.1 - 5 | Axial Buckling Values in BIZET Refer- ence Core | 51 |
| " 4.1 - 6 | Comparison of Neutron Flux Ratio bet- ween BIZET Reference Core and the Core in which Void Exists outside the Blanket | 52 |

| | | |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Table 4.1 - 7 | Number of Plate Cells used in BIZET Reference Core | 55 |
| " 4.1 - 8 | Control Rod Positions and Naming in BIZET Reference Core | 55 |
| " 4.1 - 9 | Comparison of Interaction Effect and Single Rod Worth in a 1,000MWe Class FBR with those in BIZET Reference Core | 80 |
| " 4.2 - 1 | Restrictions in BIZET Program | 85 |
| " 4.2 - 2 | Major Differences between 1,000MWe Class FBR and BIZET Reference Core | 86 |
| " 4.2 - 3 | Features and Problems of Proposed A- and B-Core | 87 |
| " 4.2 - 4 | Comparison of Reference Core with A- and B-Core | 92 |
| " 4.2 - 5 | Advantage and Disadvantage due to Carbon Mixing in the Core | 93 |
| " 4.2 - 6 | Advantage and Disadvantage due to Use of Nickel Reflectors | 101 |
| " 4.2 - 7 | Pu Fissile Inventory in the Proposed Cores | 103 |
| " 4.2 - 8 | Core Material Composition | 111 |
| " 4.2 - 9 | Material Composition of Assemblies with Ni Reflector | 112 |
| " 4.2 - 10 | Comparison of Radial Worth Distribution between 1,000MWe FBR and A-Core | 115 |
| " 4.2 - 11 | B-10 Contents for BIZET Mock-up Control Rod | 115 |
| " 4.2 - 12 | Comparison of Multi Rod Interaction between 1,000MWe FBR and A-Core | 117 |
| " 4.2 - 13 | Control Rod Interaction Index | 119 |
| " 4.2 - 14 | Comparison of Core Compositions between 1,000MWe FBR and A-Core | 120 |

| | | |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Table 4.2 - 15 | Interaction Effect based on Disturbance Parameter Method in BIZET Reference Core | 124 |
| " 5.3 - 1 | Calculated Values of Experimental Assemblies by HIMUL-1 File | 142 |
| " 6.2 - 1 | Comparison of BIZET Reference Core with the Proposed A- and B-Core | 145 |
| " 6.2 - 2 | Comparison of 1,000MWe Class FBR with BIZET Mock-up Cores | 146 |

List of Figure

| | | |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 2.2 - 1 | Core Configuration | 9 |
| " 2.3 - 1 | Maximum and Average Power Density in the Assembly | 11 |
| " 2.3 - 2 | Maximum Power Density Distribution in the Layer | 12 |
| " 2.3 - 3 | Maximum Power Density Variation in the Layer by Burnup (All Rods Withdrawn)..... | 15 |
| " 2.4 - 1 | Primary Control Rod Worth as a Function of B-10 Enrichment | 18 |
| " 2.4 - 2 | Variation of Primary Single Control Rod Worth with the Radial Control Rod Position... | 21 |
| " 2.6 - 1 | Power Density Variation with 24 Primary Rods Insertion (One Stuck Rod in Core Center) | 26 |
| " 2.6 - 2 | Power Density Variation with 24 Primary Rods Insertion (One Stuck Rod in 3rd Layer)... | 27 |
| " 2.6 - 3 | Power Density Variation with 24 Primary Rods Insertion (One Stuck Rod in 8th Layer)... | 28 |
| " 2.7 - 1 | Region Averaged Neutron Energy Spectra in 1,000 MWe Core | 30 |
| " 2.7 - 2 | Neutron Energy Spectra in 1,000 MWe Core... | 31 |
| " 2.7 - 3 | Neutron Energy Spectra in Monju | 32 |
| " 4.1 - 1 | BIZET Mock-up Control Rod Cross Section | 44 |
| " 4.1 - 2 | Cross Section Data Processing Flow Diagram for BIZET Core | 48 |
| " 4.1 - 3 | RZ Model for BIZET Reference Core | 50 |
| " 4.1 - 4 | BIZET Core with Void outside the Blanket | 53 |
| " 4.1 - 5 | BIZET Reference Core | 54 |
| " 4.1 - 6 | B-10 Concentration Effect on Core Cent- | |

| | | |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | er Control Rod Worth in BIZET Reference Core | 56 |
| Fig. 4.1 - 7 | Radial Rod Worth Distribution in BIZET Reference Core | 57 |
| " 4.1 - 8 | Control Rod Worth for Partial Insertion... | 58 |
| " 4.1 - 9 | Half-Insertion of a Center Rod in BIZET Reference Core (RZ Model) | 59 |
| " 4.1 - 10 | Axial Flux Distortion due to Center Rod Partial Insertion | 60 |
| " 4.1 - 11 | Variation of Interaction Effect on Control Rod Worth with Rod Distance in BIZET Reference Core | 62 |
| " 4.1 - 12 | Interaction Effect between the First Ring and the Second Ring as a Function of B-10 Contents in the Second Control Rod Ring in BIZET Reference Core..... | 65 |
| " 4.1 - 13 | Interaction Effect among the Control Rods in the First Ring as a Function of B-10 Contents in BIZET Reference Core | 66 |
| " 4.1 - 14 | Interaction Effect among the Control Rods in the First Ring as a Function of Dist- ance from the Core Center and Carbon Contents in BIZET Reference Core..... | 67 |
| " 4.1 - 15 | Energy Spectra in the Inner Core | 68 |
| " 4.1 - 16 | Energy Spectra in the Outer Core | 69 |
| " 4.1 - 17 | Influence on the Power Distribution when a Center Rod is fully Inserted in BIZET Reference Core | 71 |
| " 4.1 - 18 | Power Distribution when a Center Rod is fully withdrawn in BIZET Reference Core... | 72 |
| " 4.1 - 19 | Flux Distribution (1st Group) in BIZET Reference Core | 73 |
| " 4.1 - 20 | Flux Distribution (2nd Group) in BIZET | |

| | | |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| | Reference Core | 74 |
| " 4.1 - 21 | Flux Distribution (3rd Group) in BIZET Reference Core | 75 |
| Fig. 4.1 - 22 | Power Distribution in BIZET Reference Core | 76 |
| " 4.1 - 23 | Power Density Variation with 6 Control Rods Insertion (Locations of P and Q)..... | 77 |
| " 4.2 - 1 | Control Rod Experiment Planning Flow | 84 |
| " 4.2 - 2 | BIZET A-Core (1/4 Core) | 88 |
| " 4.2 - 3 | BIZET B-Core (1/4 Core) | 89 |
| " 4.2 - 4 | RZ Configuration of A-Core | 90 |
| " 4.2 - 5 | RZ Configuration of B-Core..... | 91 |
| " 4.2 - 6 | Reactivity Change with Carbon Contents in both Inner and Outer Cores in the Proposed Core..... | 94 |
| " 4.2 - 7 | Variation of Energy Spectra in the Inner and Outer Core with Carbon Contents in B-Core..... | 95 |
| " 4.2 - 8 | Variation in Energy Spectra in the Inner and Outer Cores due to Carbon Mixing in A-Core | 96 |
| " 4.2 - 9 | Effect of Carbon Contents on Neutron Flux in A-Core(1st Group) | 97 |
| " 4.2 - 10 | Effect of Carbon Contents on Neutron Flux A-Core(2nd Group) | 98 |
| " 4.2 - 11 | Effect of Carbon Contents on Neutron Flux in A-Core (3rd Group) | 99 |
| " 4.2 - 12 | Effect of Carbon Contents on Power Distribution in A-Core | 100 |
| " 4.2 - 13 | Reactivity Change with Nickel Contents in Reflectors | 102 |
| " 4.2 - 14 | Variation of Reactivity with Nickel Reflector Thickness | 102 |

| | | | |
|------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| " | 4.2 - 15 | Effect of Replacement of Blanket with Nickel Reflector on Neutron Flux in A-Core (1st Group) | 103 |
| Fig. | 4.2 - 16 | Effect of Replacement of Blanket with Nickel Reflector on Neutron Flux A-Core (2nd Group) | 104 |
| " | 4.2 - 17 | Effect of Replacement of Blanket with Nickel Reflector on Neutron Flux in A-Core (3rd Group) | 105 |
| " | 4.2 - 18 | Effect of Replacement of Blanket with Nickel Reflector on Power Distribution in B-Core | 106 |
| " | 4.2 - 19 | Comparison of Power Distribution between B-Core and 1,000 MWe Core | 107 |
| " | 4.2 - 20 | Radial Rod Worth Distribution in A-Core .. | 114 |
| " | 4.2 - 21 | Spatial Distribution of Disturbance Parameters when One Control Rod B30 or B80 is Inserted in the Inner Core | 125 |
| " | 4.2 - 22 | Spatial Distribution of Disturbance Parameters when One Control Rod B30 or B80 is Inserted in the Outer Core | 126 |
| " | 5.1 - 1 | Lumping Effect on Control Rod Worth with B-10 Contents in BIZET Reference Core .. | 128 |
| " | 5.1 - 2 | Control Rod Worth vs. Control Rod Area in BIZET Reference Core | 129 |
| " | 5.1 - 3 | Variation of Control Rod Worth at the Core Center with Carbon Contents in BIZET Reference Core | 130 |
| " | 5.2 - 1 | B-10 Concentration Effect on Core Center Control Rod Worth in A-Core | 132 |
| " | 5.2 - 2 | Interaction Effect of B-10 Concentration when Control Rods belong the Same Layer in A-Core | 133 |

| | | | |
|------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| " | 5. 2 - 3 | Interaction Effect of B-10 Concentration when Two Control Rod Groups have the Same B-10 Concentration in A-Core | 134 |
| Fig. | 5. 2 - 4 | Power Density Variation with a Single Control Rod Insertion at the Core Center | 135 |
| " | 5. 2 - 5 | Power Density Variation with 6 Control Rods Insertion | 136 |
| " | 5. 3 - 1 | Keff | 138 |
| " | 5. 3 - 2 | Spectral Indices ($\sigma_i^{28}/\sigma_i^{25}$) | 139 |
| " | 5. 3 - 3 | Spectral Indices ($\sigma_i^{14}/\sigma_i^{25}$) | 140 |
| " | 5. 3 - 4 | Spectral Indices ($\sigma_i^{28}/\sigma_i^{35}$) | 141 |

1 章

1. 緒 言

実証炉級大型炉における核特性の解明と計算精度確認のために計画されているビゼー実験に関し、その予備的検討として主に制御棒に関連する事項を重点的に検討した。

実験の対象とする炉心出力は1,000 MWe 級とし、実プラントにおける問題点を抽出し、これをいかに実験計画の中で取り上げるかを検討し、実験に適した炉心構成を提案することを目的とした。

このような実験に関し、全炉心の模擬ができることが理想的であるがビゼー実験に利用可能とされている燃料は限られており、この条件の中で最大限の効果を得ることが必要である。

また、現時点では実験の対象となる実プラントの炉心構成は明確になっていないこともあり、今回の実験では実証炉級大型炉で特徴的な事項の確認および基本的事項の大型炉での確認を重点的に実施することが実験データ利用の上からも有効と考えられる。

ビゼー計画に関しては、共同作業国である英、独においてすでに検討されている基準体系があり、この体系における検討を実施した上で新たな実験体系を提案する。

われわれの検討は、制御棒の実験に関する問題点を解決することを目的としており、好適な体系の抽出にあたっては制御棒実験を主眼とした体系の選択をしている。

ビゼー実験に関する制限条件、計算の入力データはBIZET Technical Note¹⁾²⁾によったが、不足なものについてはMOZART 実験³⁾⁴⁾における使用データを利用した。

ビゼー計画において使用可能な燃料量は、実プラントの炉心出力密度に応じて600 MWe 級炉心の模擬が可能なものと考えられるが、本検討では「もんじゅ」の出力密度を基準として炉心サイズを定めた。

また、ここに示す実験項目や好適炉心の選択に関する考え方は、ビゼー計画のみならず大型炉心一般の実験計画に参考となるものである。

2

章

2. 大型炉設計上の問題点の検討

ビゼー実験計画に先立ち、実験の目標を明確にし、有効な実験計画作成の基礎とするために大型炉設計上の問題点の検討を行なう。1,000 MWe 炉心を対象とし制御棒に関する事項を重点的に述べる。

2.1 炉心仕様

大型炉設計上の問題点を検討するにあたり1,000 MWe に対応する炉心を設定した。燃料および集合体形状は高速原型炉「もんじゅ」*の設計経験を生かし、熱流力学的効果および機械的強度を考慮して決定した。燃料集合体は「もんじゅ」で照射実績の得られる燃料ピンを使用する事を前提とした。燃料集合体内の燃料ピン本数は「もんじゅ」での169本に対し、ピン配列を周辺に2列増し271本とした。ラッパー管肉厚は、集合体の内圧による応力が、「もんじゅ」の集合体の応力と等しくなる様に決定した。炉心内の燃料集合体数は平均線出力密度が「もんじゅ」とほぼ等しくなる様に決定した。装荷燃料用プルトニウムは、「もんじゅ」の平衡炉心装荷用燃料と同じく、軽水炉の取り出し燃料中のプルトニウムを使用する事とした。

制御棒集合体あたりの吸収体ピン本数は「もんじゅ」に比較して集合体形状の拡大にとまない、ピン配列を1列増し37本とした。

装荷燃料中の内外炉心プルトニウム富化度配分は燃焼末期において、内外炉心の最大出力密度が等しくなる事、および実効増倍率が、後の2.4.1小節に示す炉心固有反応度誤差余裕と運転余裕を見込んだ値になる事を条件として決定した。

炉心仕様を表2.1-1に示す。

2.2 制御棒配置

制御棒は2系統設け、主系統制御棒は調整棒、安全棒の機能を持たせ、後備系統制御棒は後備安全棒の機能を持たせて、各々1ロッドスタックを考慮した。以下に述べる条件を考慮し、図2.2-1に示す制御棒配置とした。全制御棒数は31本で、主系統制御棒は炉心中心に1体3層目に6体、8層目に18体、合計25体配置されており、後備系統制御棒は6層目に6体配置されている。

制御棒配置は以下の条件を考慮して決定した。

- (1) 制御棒必要反応度を満す。
- (2) 主系統制御棒挿入時の出力分布が、できるだけ制御棒引き抜き時の燃焼末期の出力分布に近い。

* 「もんじゅ」の設計は現在進行中であり、そのデータは流動的であるが、本報告書では調整設計(Ⅱ)⁵⁾終了時点のものを基準とした。

Table 2.1-1 Design Parameters

1. Core Description

| Component | Item | Unit | 1000 MWe | Monju |
|-------------------|---------------------------------------------------|-------|----------|-----------------------------------|
| Core | Equivalent Radius | mm | 1,584.2 | 894 |
| | Fuel Height | mm | 1,000 | 930 |
| | Volume | liter | 7,884 | 2,335 |
| | Diameter/Height | | 3.19 | 1.92 |
| | No. of Fuel Assemblies (Inner Core/Outer Core) | | 210/192 | 108/90 |
| Radial Blanket | Equivalent Radius | mm | 1,992.2 | 1,200.2 |
| | No. of Fuel Assemblies | | 252 | 172 |
| Axial Blanket | Axial Blanket Thickness (Upper/Lower) | mm | 350/350 | 300/350 |
| Control Rod | No. of Primary Rod Assemblies | | 25 | Regulating Rod 12 Safety Rod 4 |
| | No. of Secondary Rod Assemblies | | 6 | Back up Safety Rod 3 |
| Miscellaneous | Thermal Power Output | Mwt | 2,500 | 714 |
| | Electric Power Output | Mwe | 1,000 | 300 |
| | Refueling Interval | year | 1 | 0.5 |
| | Load Factor | % | 80 | 80 |

Table 2.1-1 Design Parameters(continued)

2. Core Fuel Assembly Description

| Component | Item | Unit | 1,000MWe | Monju |
|---------------------------------|---------------------------------------------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Fuel | No. of Pins per Assembly | | 271 | 169 |
| | Material | | (Pu-U)O ₂ | (Pu-U)O ₂ |
| | Pellet Density | ¢T.D. | 8.5 | 8.5 |
| | O/M | | 1.98 | 1.98 |
| | Pellet Diameter | mm | 5.4 | 5.4 |
| | Effective Length | mm | 1,000 | 930 |
| | Isotopic Composition of Feed Pu (239/240/241/242) | a/o | 58/24/14/4 | 75/20/5/0 |
| Pu/Pu+U (Inner Core/Outer Core) | a/o | 17.5/22.5 | 18.6/26.3 | |
| Clad | Material | | SUS-316 | SUS-316 |
| | Outer Diameter | mm | 6.5 | 6.5 |
| | Clad Thickness | mm | 0.45 | 0.47 |
| Spacing | Fuel Pin Pitch | mm | 7.9 | 7.9 |
| | Wire Diameter | mm | 1.3 | 1.3 |
| | Gap | mm | 0.1 | 0.1 |
| Wrapper Tube | Material | | SUS-316 | SUS-316 |
| | Assembly Pitch | mm | 145.0 | 115.6 |
| | Outer Diameter Flat-to-Flat | mm | 140.0 | 110.6 |
| | Wall Thickness | mm | 3.8 | 3.0 |
| | Gap between Assemblies | mm | 5.0 | 5.0 |

Table 2.1-1 Design Parameters(Continued)

3. Blanket Fuel Assembly Description

| Component | Item | Unit | 1,000MWe | Monju |
|--------------|--------------------------------|-------|-----------------|-----------------|
| Fuel | No. of Pins per Assembly | | 91 | 61 |
| | Material | | UO ₂ | UO ₂ |
| | Pelet Density | g/T.D | 95 | 95 |
| | O/M | | 2.0 | 2.0 |
| | Pelet Diameter | mm | 10.8 | 10.6 |
| | Effective Length | mm | 1700 | 1580 |
| | ²³⁵ U/U | w/o | 0.2 | 0.2 |
| Clad | Material | | SUS-316 | SUS-316 |
| | Outer Diameter | mm | 12.0 | 11.6 |
| | Clad Thickness | mm | 0.5 | 0.5 |
| Spacing | Fuel Pin Pitch | mm | 13.5 | 13.1 |
| | Wire Diameter | mm | 1.4 | 1.3 |
| | Gap | mm | 0.1 | 0.1 |
| Wrapper Tube | Material | | SUS-316 | SUS-316 |
| | Assembly Pitch | mm | 145.0 | 115.6 |
| | Outer Diameter Flat-to-Flat | mm | 140.0 | 110.6 |
| | Wall Thickness | mm | 3.8 | 3.0 |
| | Gap between Assemblies | mm | 5.0 | 5.0 |

Table 2.1-1 Design Parameters (Continued)

4. Control Rod Assembly Description

| Component | Item | Unit | 1,000 MWe | Monju |
|------------|----------------------------------------|-----------------|------------------|------------------------------------------|
| Absorber | No. of Pins per Assembly | | 37 | 19 |
| | Material | | B ₄ C | B ₄ C |
| | Pellet Density | g/T.D. | 9.5 | 9.5 |
| | Diameter (Primary/Secondary) | mm | 10.4/13.6 | { Regulating Rod 11.1 Safety Rod 14.6 |
| | Effective Length | mm | 1,000 | { Regulating Rod 800 Safety Rod 930 |
| | B-10 Enrichment (Primary/Secondary) | a/o | 50/90 | 45.6/90 (w/o) |
| | B-10 Loading (Primary/Secondary) | Kg/ Assembly | 2.72/8.35 | 1.18/4.39 |
| Clad | Material | | SUS-316 | SUS-316 |
| | Outer Diameter | mm | 15.7 | { Regulating Rod 16.8 Safety Rod 16.9 |
| | Clad Thickness (Primary/Secondary) | mm | 2.5/1.0 | 2.7/1.0 |
| Spacing | Pin Pitch | mm | 17.0 | 18.2 |
| | Wire Diameter | mm | 1.2 | 1.1 |
| | Gap | mm | 0.1 | 0.15 |
| Guard Tube | Material | | SUS-316 | SUS-316 |
| | Inner Diameter | mm | 116.0 | 94.0 |
| | Wall Thickness | mm | 2.0 | 2.0 |

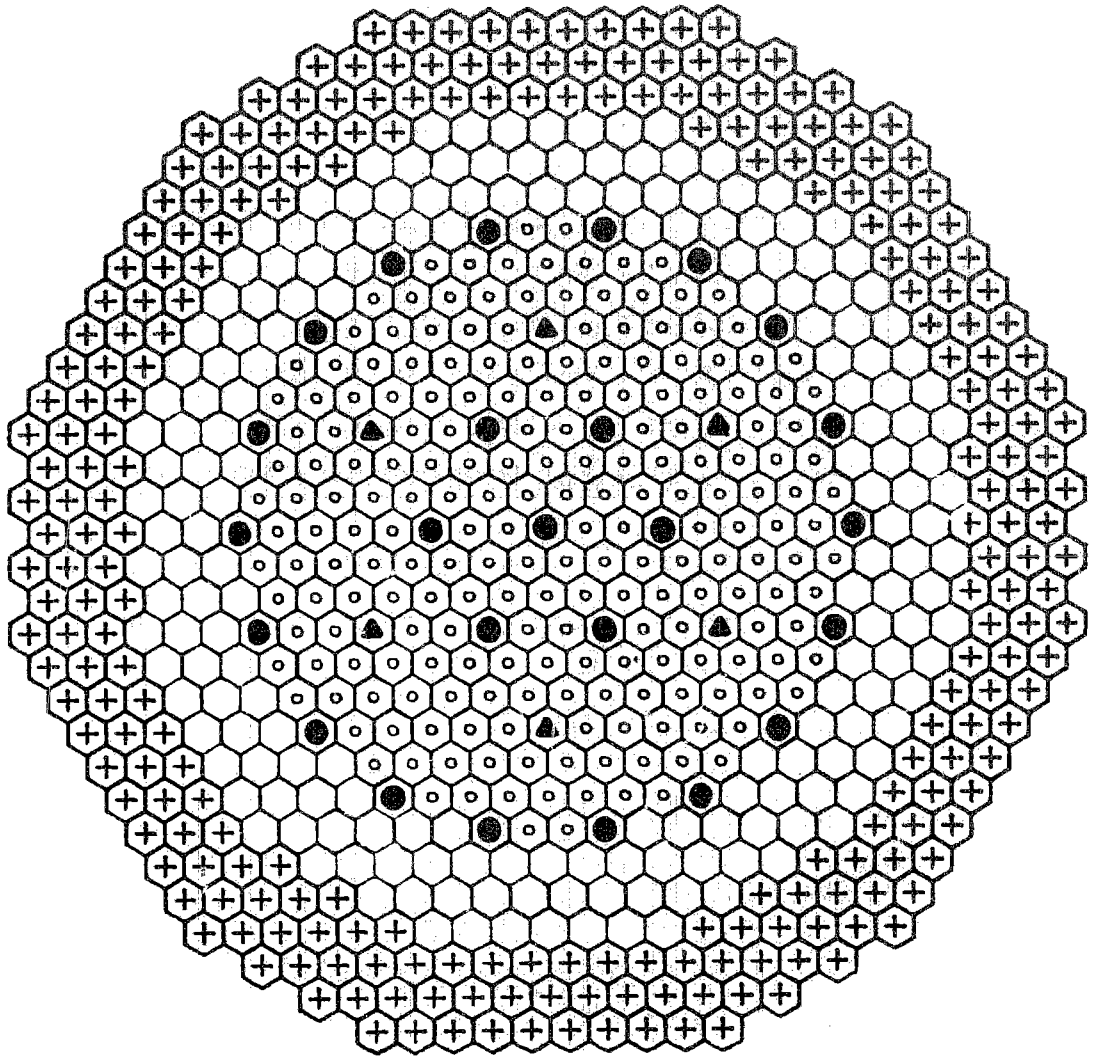
Table 2.1-1 Design Parameters(Continued)

5. Material Volume Fraction in Assemblies

| Assembly | Item | 1,000 M We | Monju | |
|--------------------------------|-----------|------------|------------------|------|
| Core Fuel Assembly | Fuel | 34.1% | 33.5% | |
| | Coolant | 38.8 | 40.1 | |
| | Structure | 24.5 | 24.4 | |
| | Void | 2.6 | 2.0 | |
| Radial Blanket Fuel Assembly | Fuel | 45.8 | 44.8 | |
| | Coolant | 32.9 | 34.2 | |
| | Structure | 19.6 | 19.3 | |
| | Void | 1.7 | 1.7 | |
| Primary Control Rod Assembly | Absorber | 17.3 | Regulating Rod { | |
| | Coolant | 46.5 | | 15.9 |
| | Structure | 35.2 | | 53.9 |
| | Void | 1.0 | | 29.3 |
| Secondary Control Rod Assembly | Absorber | 29.5 | Safety Rod { | |
| | Coolant | 45.6 | | 27.5 |
| | Structure | 24.5 | | 53.5 |
| | Void | 0.4 | | 17.9 |
| | | | 1.1 | |

- (3) 制御棒配置が対称性を持つ。
- (4) 制御棒本数ができるだけ少ない。
- (5) 制御棒1体あたりの反応度が大きすぎない。
- (6) 主系統制御棒のB-10濃縮度が高すぎない。

(1)は反応度制御上要求される条件である。(2)は冷却材流量配分上、制御棒がほぼ全引抜きとなる燃焼末期の出力分布に近いことが好ましいことを考慮したものである。(3)は制御棒挿入による炉心方位角方向の出力分布の変動を小さくし、出力ピーキング係数を減少させる上で有利であり、(5)は制御棒の誤引き抜き等を考えた安全上要求される条件である。(4)と(5)は相反する条件である。(6)はB-10濃縮度を増すと(5)の条件を満たさなくなる事や、吸収体ピン1本あたりのヘリウムガス生成量が増す事で制限される条件である。








-  Inner Core Fuel Assembly
-  Outer Core Fuel Assembly
-  Radial Blanket Fuel Assembly
-  Primary Control Rod Assembly
-  Secondary Control Rod Assembly

Fig 2.2 - 1 Core Configuration

2.3 出力分布

大型炉においては制御棒の駆動にともなう出力分布の変化は大きく、原型炉級炉心における制御棒の効果に比べ、かなり特異な影響を与える。ここでは先に設定した1,000 MWeの炉心における制御棒の出力分布への影響を示す。制御棒の種々な挿入パターンにおける出力分布への効果を示すために、全制御棒引き抜き、中心制御棒挿入(1体)3層全制御棒挿入(6体)、8層全制御棒挿入(18体)、3層と8層全制御棒挿入(24体)および全制御棒挿入(25体)を想定したときのチャンネル平均出力値と最大出力値を図2.3-1に示す。炉心は60°回転対象であるため各々1/6炉心の図を示す。図2.3-2に各燃料層における、その層の最大出力値を主系統制御棒挿入パターン毎に示す。

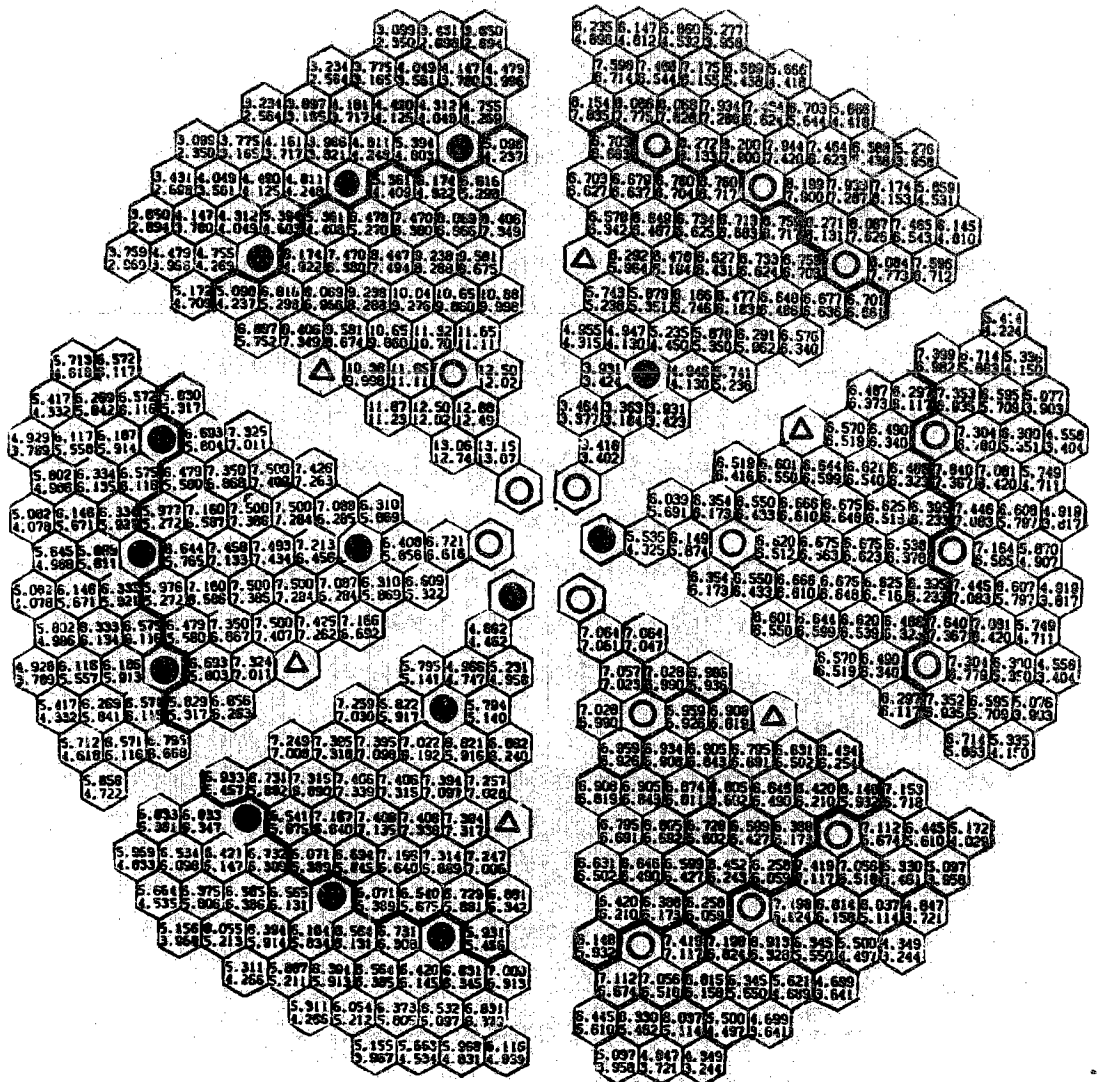
表2.3-1に制御棒引き抜き時を基準にした主系統制御棒挿入による各層の最大出力値の相対変化量を示す。3層主系統制御棒挿入に対しては内側炉心の最大出力値を下げ(最大-50%)、外側炉心の最大出力値を上げる(最大+20%)、8層主系統制御棒に対しては内側炉心の最大出力値を上げ(最大+86%)、外側炉心の最大出力値を下げる(最大-31%)。燃焼初期状態に近いので参考のため記すが、全系統制御棒挿入に対しては内側炉心中心部(1~3層)、内側炉心周辺部(9層)および内側炉心内層部(9~10層)では最大出力値を下げ、内側炉心の5~8層および外側炉心中外層部(11~12層)で最大出力値を上げる。中でも内側炉心1層では-31%、外側炉心12層では+18%とその変化が大きい。

原型炉級の炉心(300 MWe)の制御棒挿入による出力分布の変動を上記と同じ定義で表2.3-2に示す。調整棒を内側炉心の外層部に配置した1例としてのAパターン、内側炉心の内外層部に分散させて配置した場合の1例としてのBパターンにおいて、全調整棒を挿入した場合の相対量を示した。原型炉級の炉心では変化量の大きいAパターンの制御棒挿入でも10%以内の変化である。

図2.3-3に燃焼による各層の最大出力値の変化を示す。最大出力値の変化の最も大きいのは外側炉心の最内層で1サイクル(1年)で4.5%変化している。原型炉心(300 MWe)の外側炉心の最大出力値の変化は1サイクル(0.5年)で2%程度であり、ほぼ同様の値である。

以上に示した様に大型炉心の制御棒挿入による出力分布の変動は原型炉級の炉心に比べて大きい。特に層別に制御棒を挿入した挿入パターンでの、制御棒引き抜き状態に対する出力の相対変化量は非常に大きい。この事は炉心内層部および外層部を一様に出力分布を押える様に制御棒配置を考慮する必要がある事を示している。また制御棒運用においても、最大出力値の相対変化量を小さくする様に考慮する必要がある。

- 主系統制御棒引抜き
- 主系統制御棒挿入
- △ 後備系統制御棒引抜き



- Primary Control Rod Inserted
- Primary Control Rod Withdrawn
- △ Secondary Control Rod Withdrawn

Upper Value: Maximum Power Density in the Assembly(Arbitrary Unit)

Lower Value: Average Power Density in the Assembly(Arbitrary Unit)

Fig.2.3-1 Maximum and Average Power Density in the Assembly

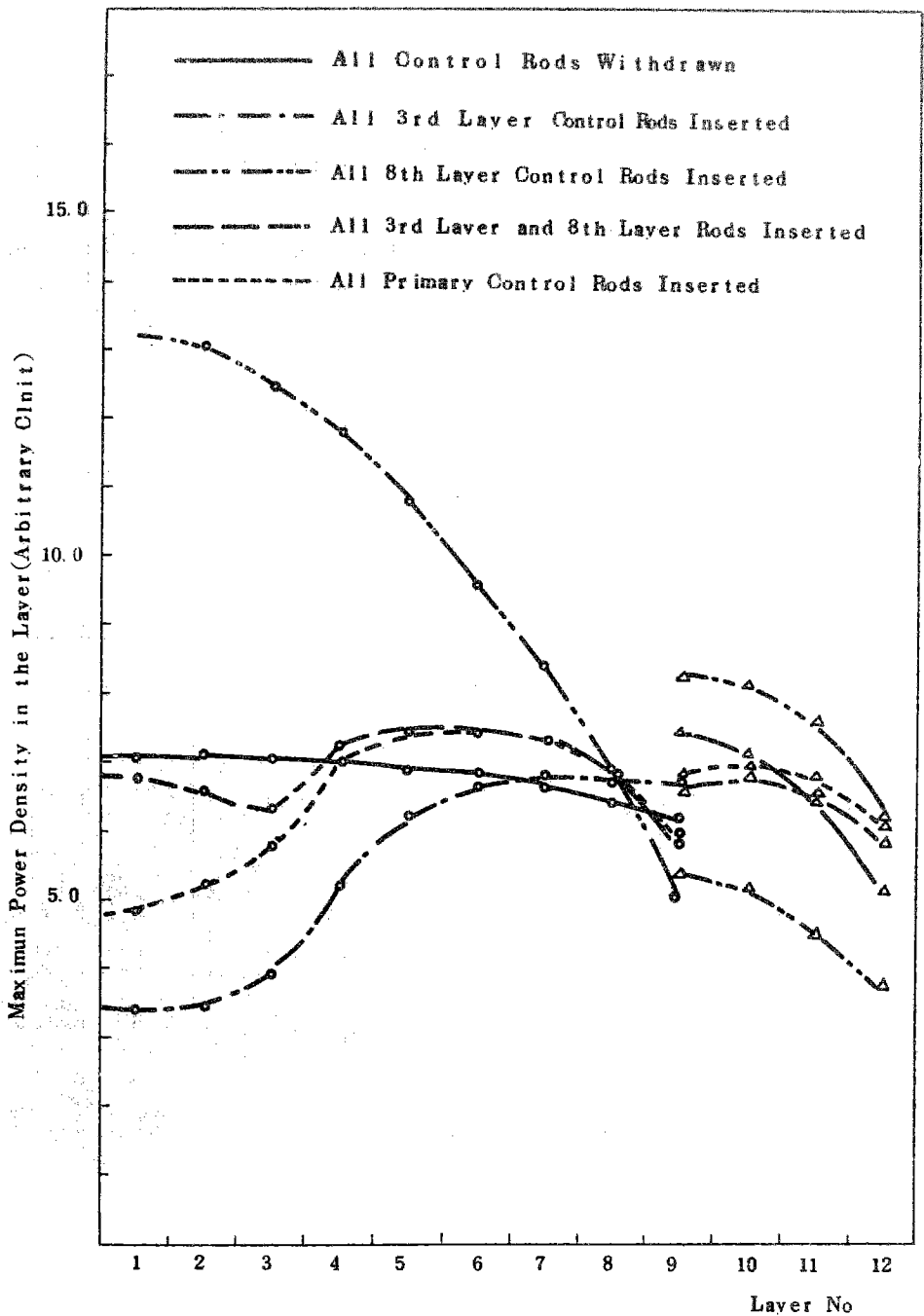


Fig.2.3-2 Maximum Power Density Distribution in the Layer

Table 2.3-1 Maximum Power Density Variation in 1,000MWe
Core by Control Rod Insertion

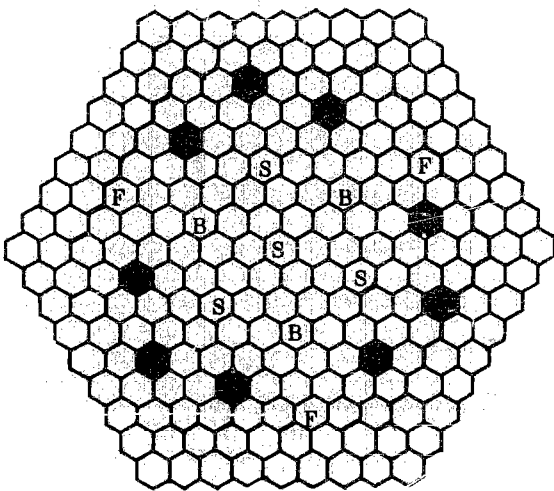
$$\text{Definition: } \frac{(\text{Inserted}) - (\text{Withdrawn})}{(\text{Withdrawn})} \times 100$$

| Region | Layer No. | 3 rd Layer Control Rods Inserted | 8 th Layer Control Rods Inserted | All Primary Control Rods Inserted |
|------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Inner Core | 1 | -51.6 | +86.2 | -31.2 |
| | 2 | -50.9 | +84.8 | -25.9 |
| | 3 | -44.0 | +77.9 | -17.5 |
| | 4 | -25.0 | +70.0 | +0.5 |
| | 5 | -10.7 | +57.5 | +7.2 |
| | 6 | -2.6 | +40.8 | +8.8 |
| | 7 | +1.4 | +26.5 | +10.1 |
| | 8 | +5.1 | +7.0 | +7.0 |
| | 9 | +9.1 | -17.1 | -4.5 |
| Outer Core | 9 | +11.6 | -27.3 | -9.2 |
| | 10 | +14.0 | -27.7 | -2.1 |
| | 11 | +17.9 | -30.5 | +6.0 |
| | 12 | +20.6 | -27.3 | +18.3 |

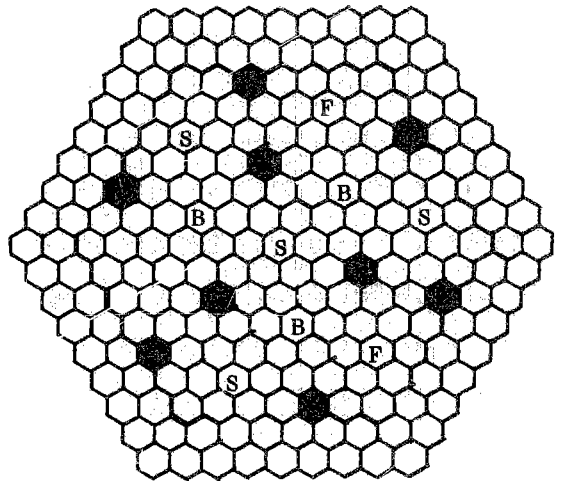
Table 2.3 - 2 Maximum Power Density Variation in
300MWe Core by Control Rod Insertion

Definition : $\frac{(\text{Inserted}) - (\text{Withdrawn})}{(\text{Withdrawn})} \times 100$





| Region | Layer No. | A - Pattern | B - Pattern |
|------------|-----------|-------------|-------------|
| Inner Core | 1 | + 9.3 | - 3.5 |
| | 2 | + 7.3 | - 3.5 |
| | 3 | + 3.9 | - 3.6 |
| | 4 | + 3.1 | - 1.5 |
| | 5 | + 3.3 | - 0.8 |
| | 6 | + 2.8 | + 2.3 |
| Outer Core | 7 | + 8.0 | + 5.3 |
| | 8 | + 10.1 | + 7.4 |



A-Pattern



B-Pattern

-  Coarse Regulating Rod
-  Fine Regulating Rod
-  Safety Rod
-  Backup Safety Rod

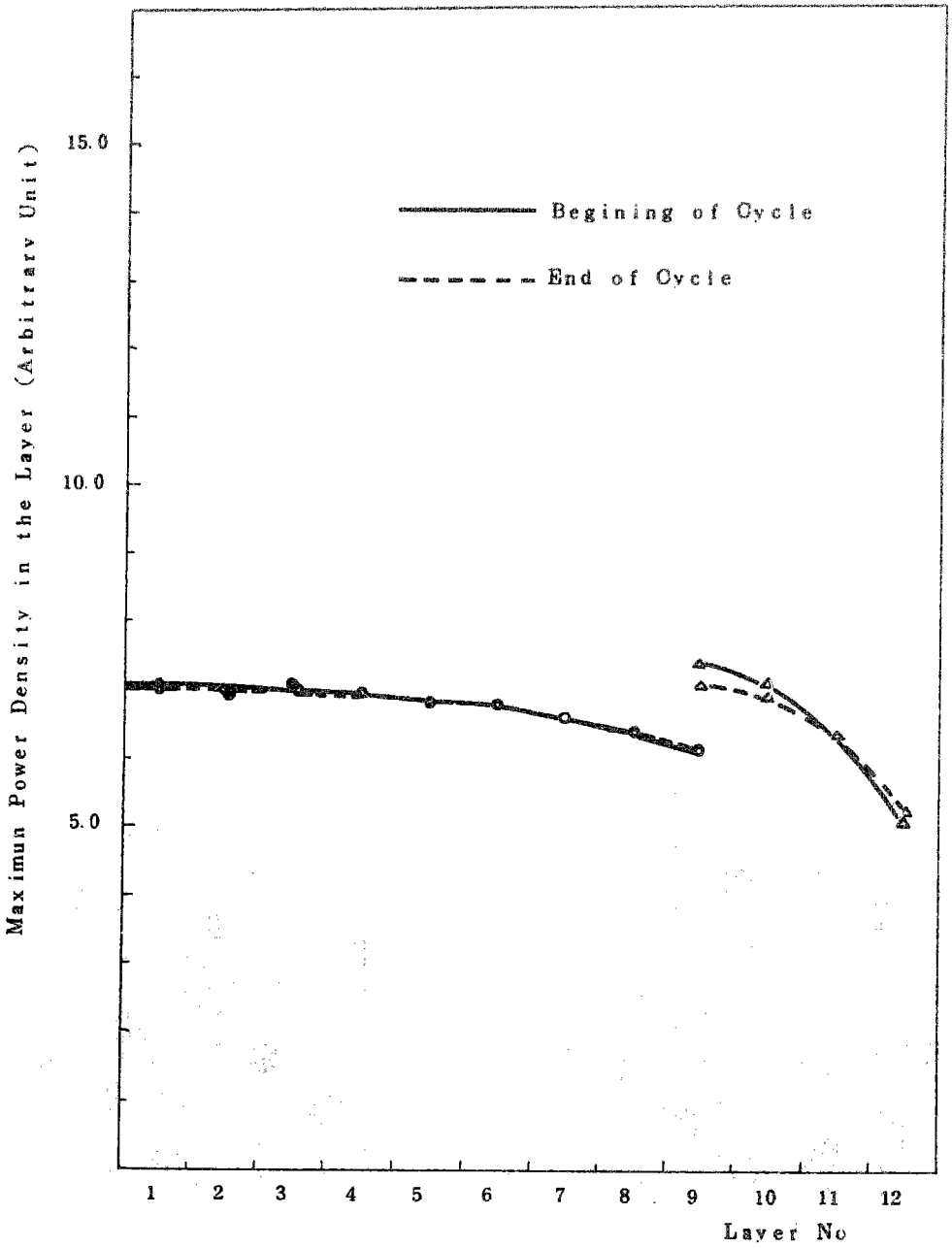


Fig. 2.3 - 3 Maximum Power Density Variation in the Layer by Burn up (All Rods Withdrawn)

2.4 制御棒必要反応度と制御棒価値

2.4.1 制御棒必要反応度

制御棒は主系統および後備系統の2系統とし、各々にスクラム機能を持つものとした。各制御棒に設定した必要反応度を表2.4-1に示す。

燃焼反応度は燃料交換間隔を1年としたときの反応度劣化分で、計算値に10%の設計余裕を見込む。温度補償反応度は冷温停止時から定格運転時までの補償反応度であり、事故補償反応度は、ここでは「もんじゅ」と同じ値を設定する。炉心固有反応度誤差余裕の定量的評価は大型炉の実験解析を待たねばならないが、むやみに大きな余裕を設定することは制御棒の本数の増加となる。ここでは今後の実験解析による評価より、炉心固有反応度誤差が「もんじゅ」と同程度までつめられるものとして「もんじゅ」と同じ値を設定する。運転余裕および停止余裕は運転上必要な余裕であり、これも「もんじゅ」と同じ値を設定する。

2.4.2 吸収体濃度と制御棒価値

吸収体B-10濃度と全主系統制御棒価値の関係を図2.4-1に示す。B-10の高濃度化により、制御棒本数を減少させる事ができるが、反面、制御棒集合体1体あたりの反応度を大きくし、吸収体ピン中のヘリウムガス生成量を多くする。また出力分布に与える影響も増大する。これらの事を考慮し、主系統制御棒のB-10濃度は50%とする。後備系統制御棒B-10濃度は上記の様な問題がないため90%と高濃度にする。

主系統制御棒価値の各種計算値を表2.4-2に示す。制御棒設計余裕の設定には実験解析による定量的評価を待たねばならないが、ここでは「もんじゅ」と同じ10%とする。表2.4-2に示す様に1スタックロッド時の制御棒価値(24本挿入)は8層制御棒1スタックロッド時に最小となっている。図2.4-2には主系統単一制御棒価値の位置による変化を示す。単一制御棒価値の大きい中心制御棒1スタックロッド時よりも、単一制御棒価値の小さい8層制御棒1スタックロッド時の方が制御価値が小さいのは、相互干渉効果による影響と考えられる。

後備系統制御棒価値の各種計算値を表2.4-3に示す。制御棒価値の設計余裕は「もんじゅ」と同じ15%とする。後備系統制御棒価値(1スタックロッド時)は主系統制御棒挿入時の方が引き抜き時より、相互干渉効果により若干小さい。主系統制御棒挿入状態は燃焼初期、主系統引抜時は燃焼末期の後備系統制御棒スクラム時の制御棒価値に近い。

主系統及び後備系統制御棒必要反応度と制御棒価値との対応を表2.4-1に示す。主系統制御棒価値は最も小さい8層1スタックロッド時の値で、後備系統制御棒価値は全主系統制御棒挿入状態で、1スタックロッド時の値である。主系統制御価値は必要反応

度に対して13% (1.15% $\Delta K/KK'$) , および後備系統制御率値は9% (0.25% $\Delta K/KK'$) の余裕を持つ。

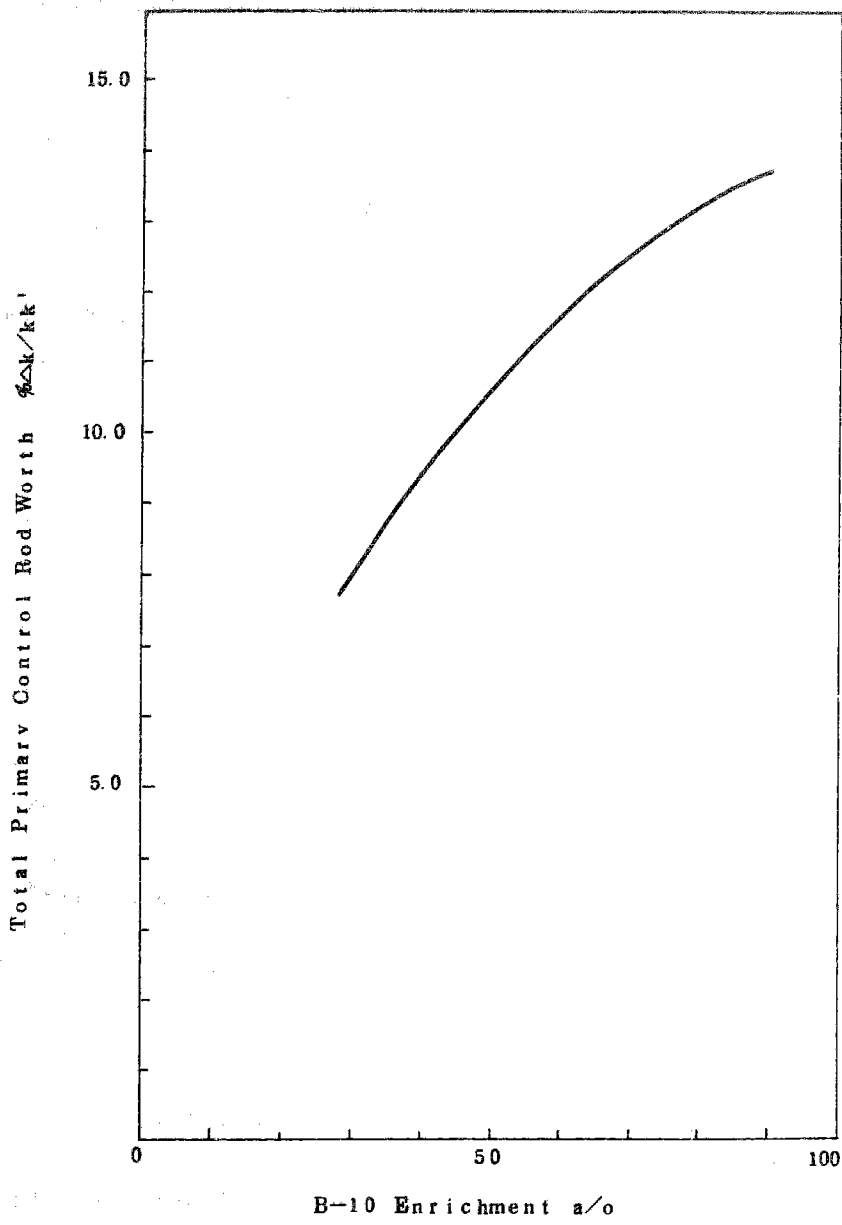


Fig. 2.4 - 1 Primary Control Rod Worth as a Function of B-10 Enrichment

Table 2.4 - 1 Reactivity Requirements and Control Rod Worth

| Requirements | Primary Control Rod | Secondary Control Rods |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Burnup Reactivity | 5.18 % $\Delta K/KK'$ [*] | |
| Cold Shutdown to Full Power Operating | 1.00 | 1.00 % $\Delta K/KK'$ |
| Reactivity for Accident Compensation | 0.70 | 0.70 |
| Shutdown Margin | 1.00 | 1.00 |
| Margin for Keff Uncertainty | 0.50 | |
| Operating Margin | 0.20 | |
| Total | 8.58 % $\Delta K/KK'$ | 2.70 % $\Delta K/KK'$ |
| Control Rod Worth ** | 9.73 % $\Delta K/KK'$ | 2.95 % $\Delta K/KK'$ |

* 10 % design margin included

** The primary control rod worth is defined when one rod in the 8th layer is stuck.
 The secondary control rod worth is defined when the primary control rods are all inserted and one secondary control rod is stuck.

Table 2.4 - 2 Primary Control Rod Worth

| Cases | $\% \Delta K / K K'$ | $\% \Delta k / K K'$ (Subtracted 10% design margin) |
|------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|
| Primary Control Rod Worth (8th Layer 1 rod stuck) | 10.81 | 9.73 |
| Primary Control Rod Worth (3rd Layer 1 rod stuck) | 11.12 | 10.01 |
| Primary Control Rod Worth (Center 1 rod stuck) | 11.41 | 10.27 |
| | | |
| All Primary Control Rod Worth (25 rods) | 11.82 | 10.64 |
| 3rd Layer Control Rod Worth (6 rods) | 2.28 | 2.06 |
| 8th Layer Control Rod Worth (18 rods) | 5.80 | 5.22 |
| Center 1 Rod Worth | 0.49 ₂ | 0.44 ₃ |
| 3rd Layer 1 Rod Worth | 0.45 ₆ | 0.41 ₀ |
| 8th Layer 1 Rod Worth | 0.28 ₂ | 0.25 ₄ |

Table 2.4 - 3 Secondary Control Rod Worth

| Cases | $\% \Delta K / K K'$ | $\% \Delta k / K K'$ (Subtracted 15% design margin) |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|
| Secondary Control Rod Worth (1 rod stuck, Primary Rod Inserted) | 3.47 | 2.95 |
| Secondary Control Rod Worth (1 rod stuck, Primary Rod Withdrawn) | 3.49 | 2.97 |
| | | |
| All Secondary Control Rod Worth (Primary Rod Inserted) | 4.78 | 4.06 |
| All Secondary Control Worth (Primary Rod Withdrawn) | 4.66 | 3.96 |
| 1 Secondary Control Rod Worth | 0.56 ₅ | 0.48 ₁ |

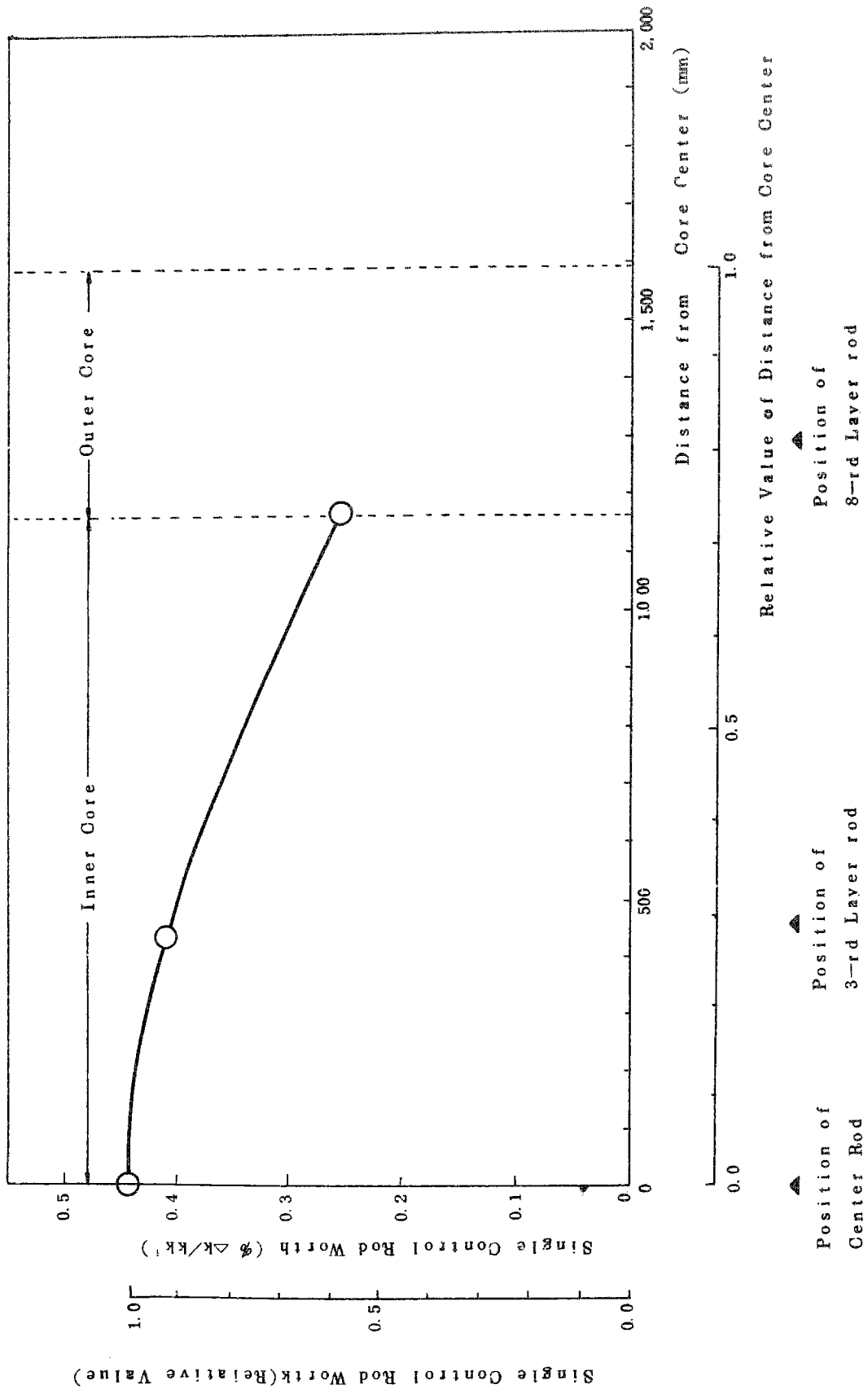


Fig. 2.4 - 2 Variation of Primary Single Control Rod Worth with the Radial Control Rod Position

2.5 制御棒相互干渉効果

2.4.2小節で示した各種制御棒値をもとに制御棒間の干渉効果を求めた。表2.5-1に主系統制御棒の干渉効果を示す。単一制御棒に対する、それが属する層の全制御棒との間の干渉効果は3層(I_3^P)では-16.3%で負となり、8層(I_8^P)では+14.2%と正になっている。各層の制御棒間の干渉効果(I_{3-8}^P, I_{8-3}^P)および各層の単一制御棒に対する全主系統制御棒との間の干渉効果(I^P)はすべて+40%内外の正の値となっている。

表2.5-2に後備系統制御棒の干渉効果(I^B)を示す。その効果は+37.2%と正の値を示している。

表2.5-3に主系統と後備系統制御棒間の干渉効果(I_{P-B})を示す。この場合にはほとんど干渉効果はないことがわかる。

原型炉「もんじゅ」のモックアップ実験体系であるMOZART MZC 炉心の制御棒干渉効果は種々の制御棒パターン(2~4制御棒集合体間)に対して-13%~+2%の値を示している。⁶⁾

以上より大型炉においては原型炉級炉心に比べて、より大きな干渉効果を示すことがわかる。制御棒配置および制御棒運用において、出力分布の平坦化と関連させて干渉効果の有効利用の余地があると考えられる。

Table. 2.5 - 1 Interaction Effect of Primary Control Rods

ρ_C^P : Center Single Rod Worth

ρ_3^P : 3rd Layer Single Rod Worth

ρ_8^P : 8th Layer Single Rod Worth

$\rho_{3 \text{ layer}}^P$: 3rd Layer Control Rod Worth (6 rods)

$\rho_{8 \text{ layer}}^P$: 8th Layer Control Rod Worth (18 rods)

$\rho_{3+8 \text{ layer}}^P$: Primary Control Rod Worth (24 rods, Center One Rod Stuck)

ρ^P : All Primary Control Rod Worth (25 rods)

| Symbol | Definition | Interaction Effect (%) |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| I_3^P | $\frac{\rho_{3 \text{ layer}}^P - 6 \times \rho_3^P}{6 \times \rho_3^P}$ | - 16.3 |
| I_8^P | $\frac{\rho_{8 \text{ layer}}^P - 18 \times \rho_8^P}{18 \times \rho_8^P}$ | + 14.2 |
| I^P | $\frac{\rho^P - (\rho_C^P + 6 \times \rho_3^P + 18 \times \rho_8^P)}{\rho_C^P + 6 \times \rho_3^P + 18 \times \rho_8^P}$ | + 42.3 |
| I_{3-8}^P | $\frac{\rho_{3+8 \text{ layer}}^P - (\rho_{3 \text{ layer}}^P + \rho_{8 \text{ layer}}^P)}{\rho_{3 \text{ layer}}^P + \rho_{8 \text{ layer}}^P}$ | + 41.1 |
| I_{C-3-8}^P | $\frac{\rho^P - (\rho_C^P + \rho_{3 \text{ layer}}^P + \rho_{8 \text{ layer}}^P)}{\rho_C^P + \rho_{3 \text{ layer}}^P + \rho_{8 \text{ layer}}^P}$ | + 37.8 |

Table 2.5 - 2 Interaction Effect of Secondary Control Rods

ρ_a^s : Single Secondary Control Rod Worth
(Primary Control Rods Withdrawn)

ρ^s : All Secondary Control Rod Worth
(Primary Control Rods Withdrawn)

| Symbol | Definition | Interaction Effect (%) |
|--------|------------------------------------------------------|------------------------|
| I^s | $\frac{\rho_a - 6 \times \rho_a^s}{6 \times \rho^s}$ | + 37.2 |

Table 2.5 - 3 Interaction Effect between Primary Control Rods and Secondary Control Rods

ρ^{Total} : All Control Rod Worth (31 rods)

| Symbol | Definition | Interaction Effect (%) |
|-----------|------------------------------------------------------------|------------------------|
| I_{P-S} | $\frac{\rho^{Total} - (\rho^P + \rho^S)}{\rho^P + \rho^S}$ | + 0.73 |

2.6 1 スタックロッドの検討

主系統制御棒1スタックロッド時の制御棒価値と出力分布への影響を炉中心の制御棒、3層および8層の制御棒をスタックさせた場合について検討した。

各々の場合について、制御棒全引抜時からの出力密度の変化割合を図2.6-1から図2.6-3に示す。これらの図から予想されるスタック制御棒価値は8層の制御棒が最大である。

また図2.6-3に示されているように、上記3ケースの中では8層の制御棒をスタックさせた時の出力分布の歪みをもっとも大きいことがわかる。

また、1スタックロッド時の制御棒価値を表2.4-2に記した。

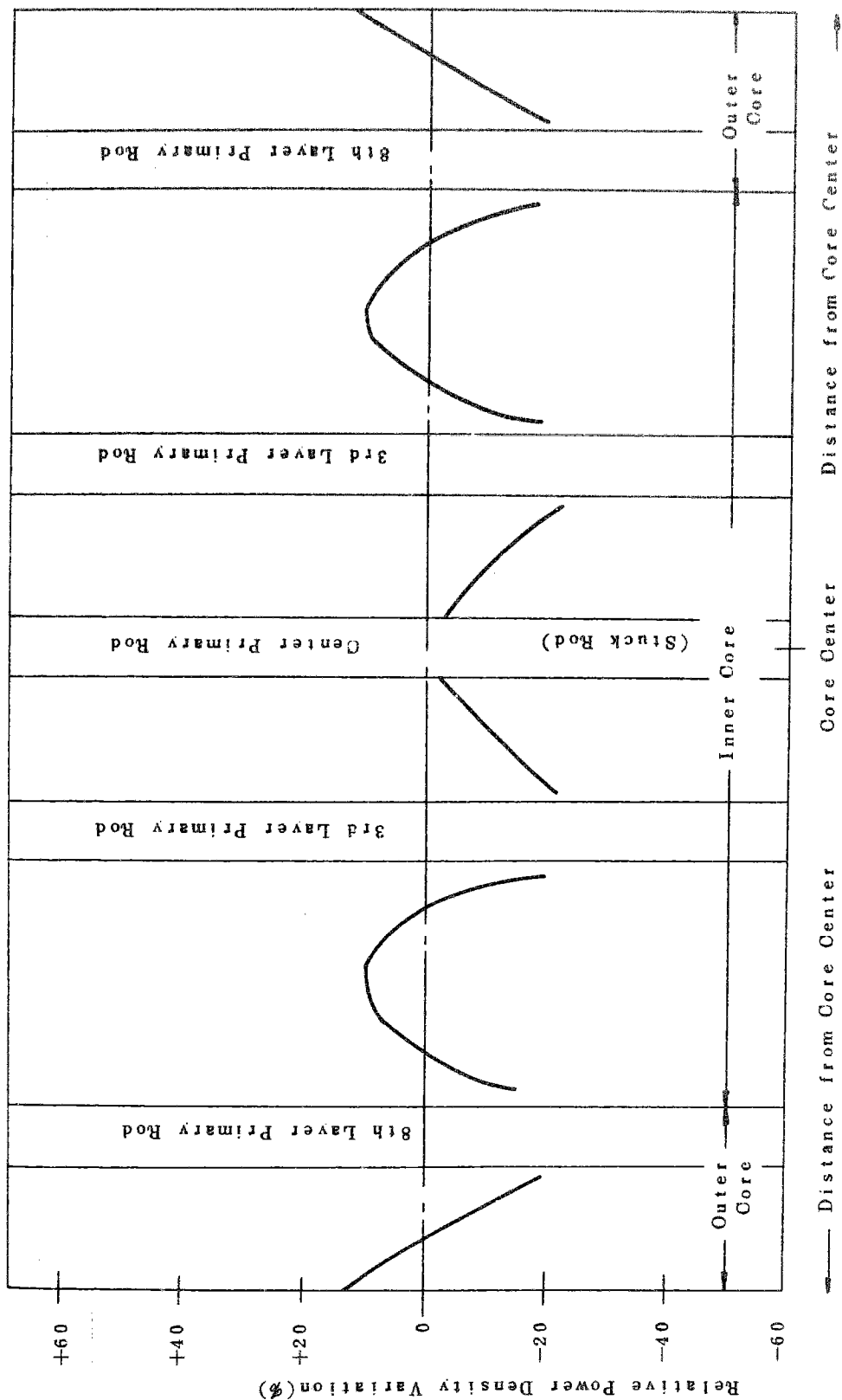


Fig. 2.6 -- 1 Power Density Variation with 24 Primary Rods Insertion (One Stuck Rod in Core Center)

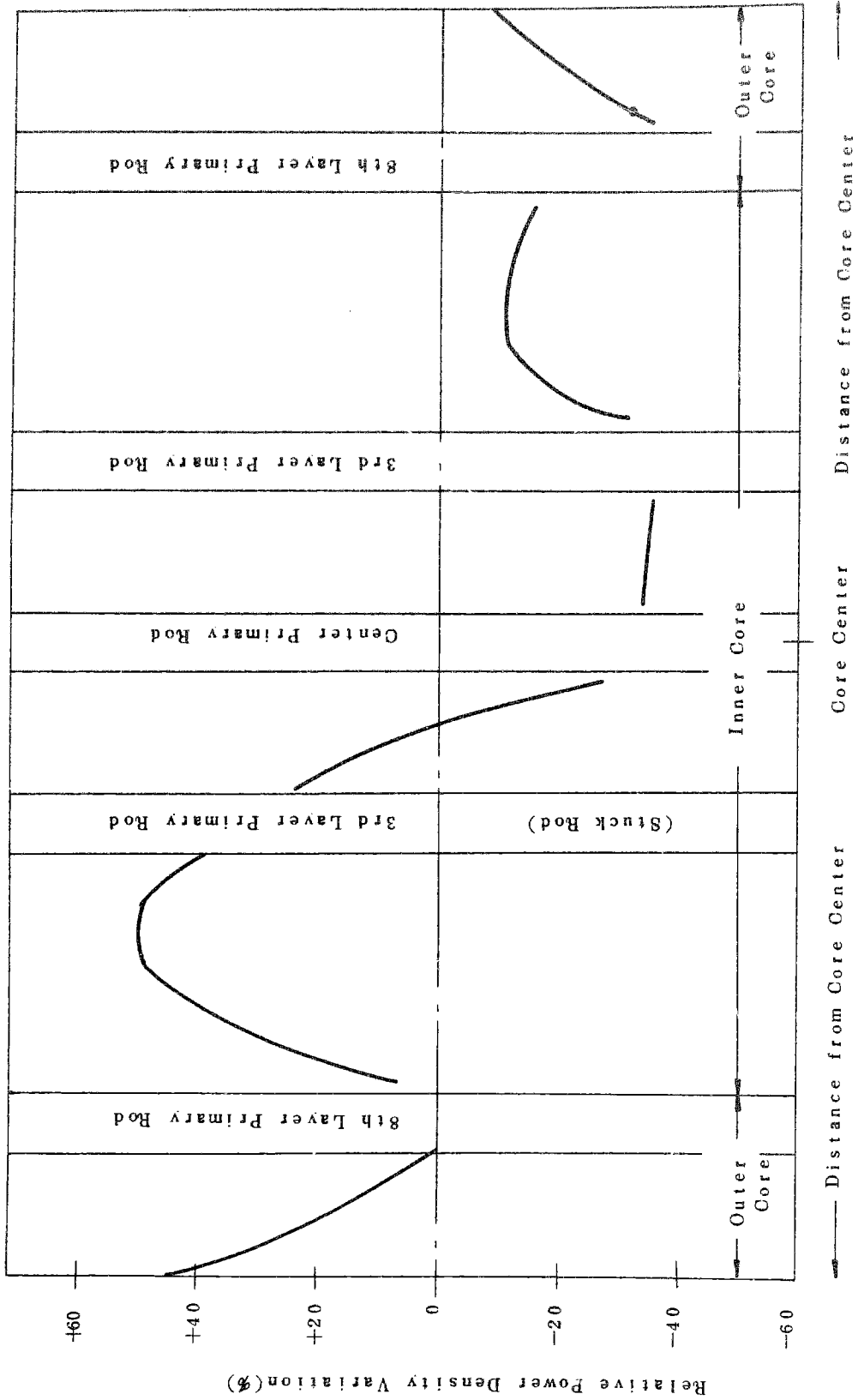


Fig. 2.6 - 2 Power Density Variation with 24 Primary Rods Insertion (One Stuck Rod in 3rd Layer)

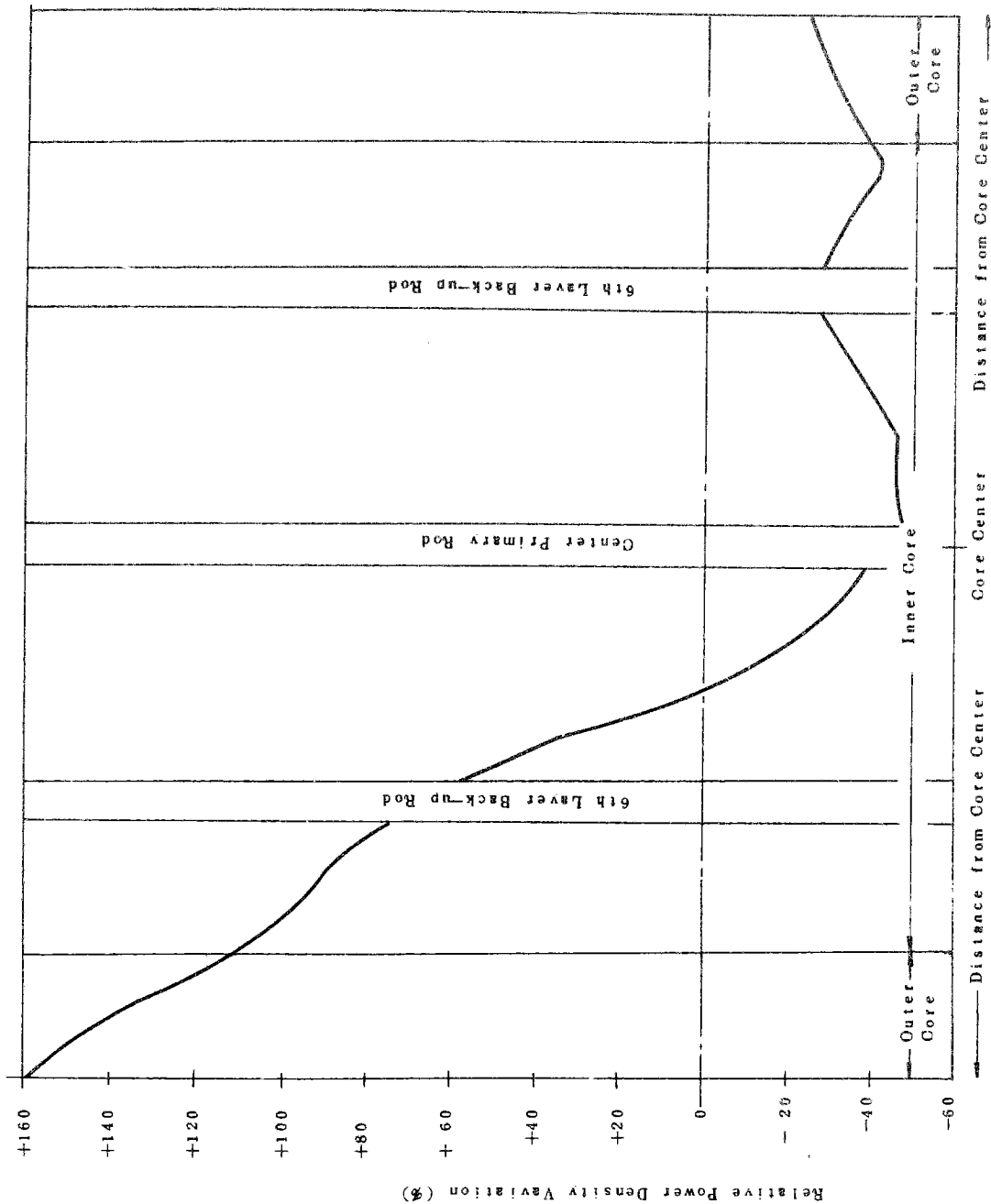


Fig. 2.6 - 3 Power Density Variation with 24 Primary Rods
(One Stuck Rod in 8th Layer)

2.7 中性子エネルギースペクトル

図 2.7-1 に各領域平均の中性子エネルギースペクトルを示す。外側炉心のスペクトルは内側炉心のスペクトルよりややハードになっている。また内側炉心のスペクトルを「もんじゅ」の内側炉心と比較してみると、1,000 MWe 炉心の方がややソフトになっている。

図 2.7-2 に内側炉心の中心と外側境界とのスペクトルの比較を示す。図 2.7-3 に参考として「もんじゅ」炉心の内側炉心の中心と外側境界とのスペクトルの比較を示す。

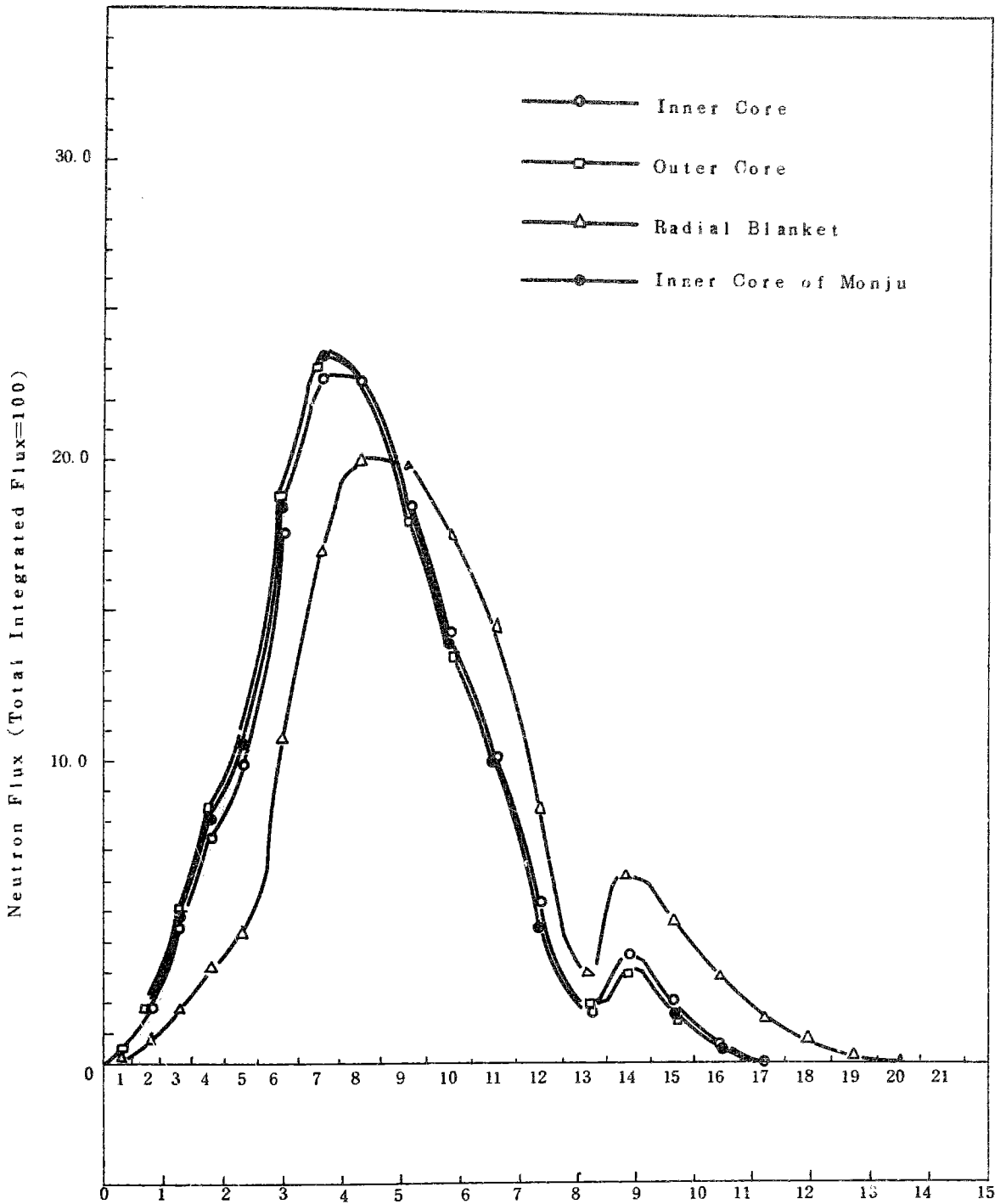


Fig. 2.7 - 1 Region Averaged Neutron Energy Spectro
in 1,000 MWe Core

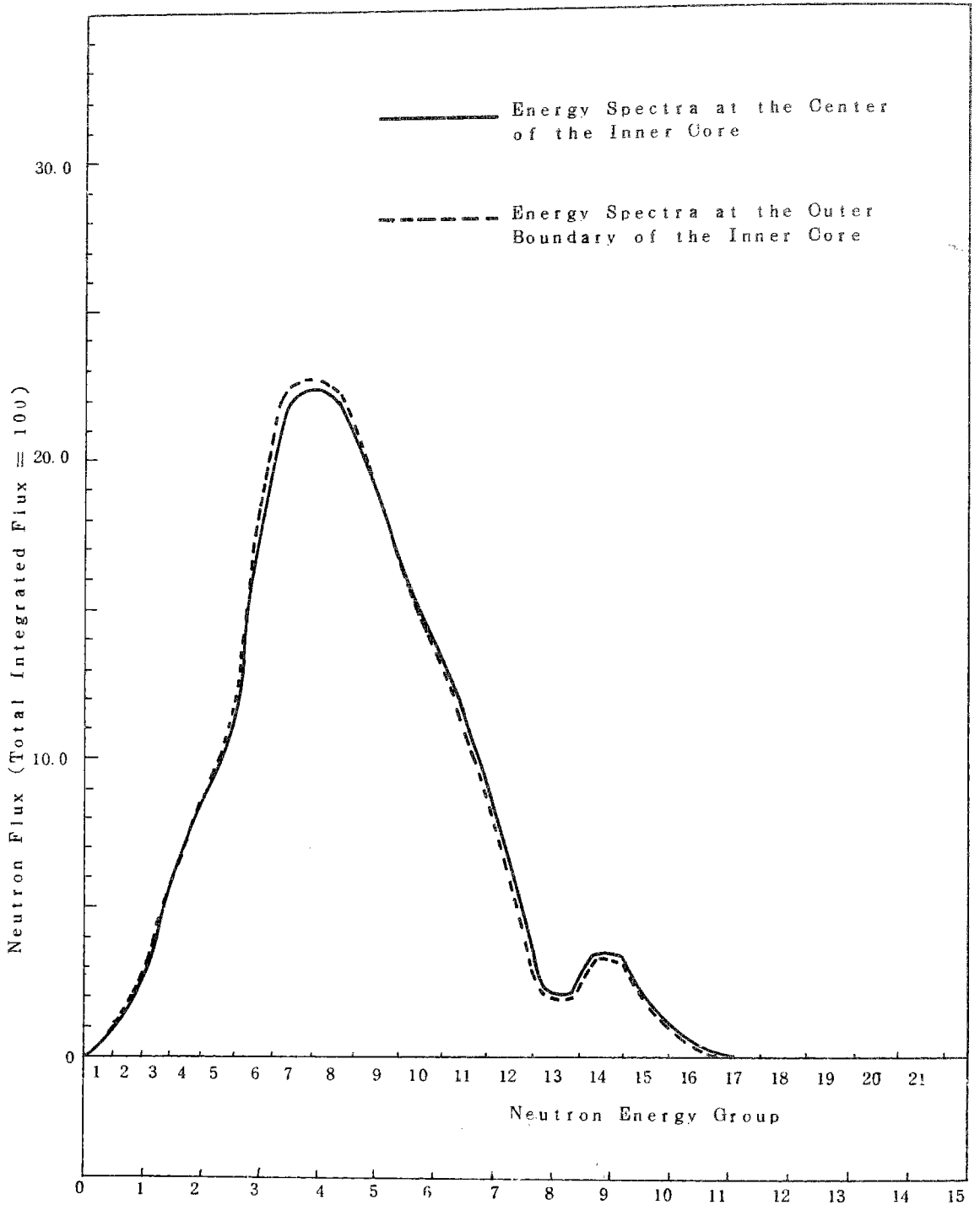


Fig. 2.7-2 Neutron Energy Spectra in 1,000 MWe Core
Lethargy (0 : 10.5 MeV)

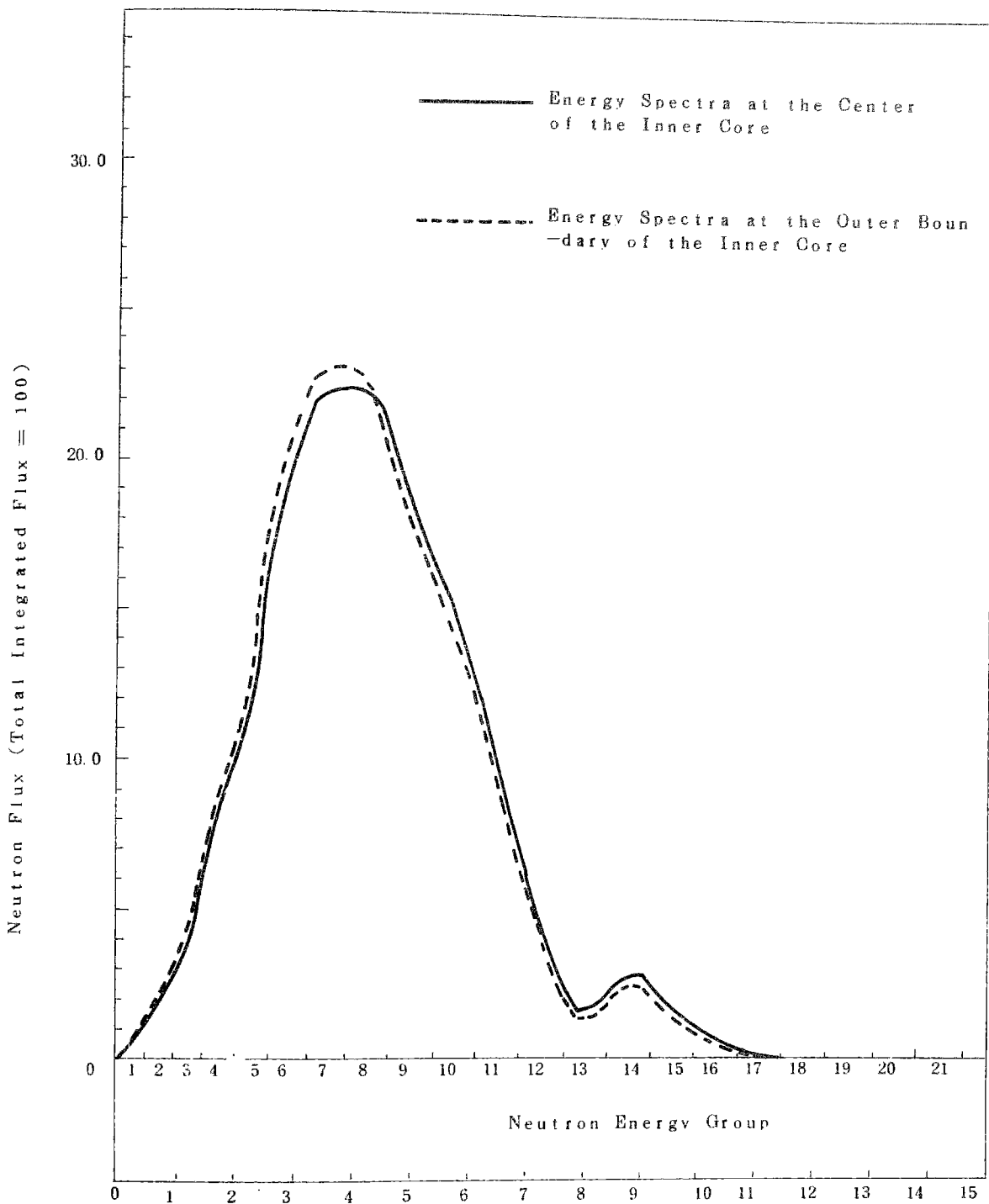


Fig. 2.7 - 3 Neutron Energy Spectra in Monju

2.8 大型炉の主な特徴

以上の検討結果から、1,000 MWe 級の制御棒に関する主要な特徴をまとめると、表 2.8-1 のようになる。

Table 2.8-1 Major Characteristics in 1,000MWe Class FBR in respect to Control Rod Effects

| Major Characteristics in 1,000 MWe FBR | |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Control rod interaction effect in a 1,000 MWe Class FBR is stronger than that of a Proto-type FBR. |
| 2 | When control rod(s) is(are) inserted, power distribution in a 1,000 MWe Class FBR is changed more greatly than that of a Proto-type FBR. |
| 3 | Prediction of stuck rod position in which stuck rod has maximum control rod worth is difficult. |
| 4 | Neutron Energy Spectra in a 1,000 MWe Class FBR are harder than those of a Proto-type FBR. |

3

事

3. 実験項目の抽出

制御棒の実験項目の検討にあたって、まず炉心設計上制御棒に関する問題点を指摘し、実験によって確認を必要とする問題の抽出、さらにその中から大型炉実験に適する問題を取り上げる。

3.1 制御棒設計に関する問題

制御棒の第一の目的は、原子炉の状態を運転員の指示にしたがって一定に保ち、または変化させ、また、必要に応じて自動的にまたは運転員の判断にしたがって急速に停止することにある。この目的を達成するためには種々な問題が山積しており、このような問題をいかに解決していくかが制御棒設計に課せられた課題である。

制御棒本来の目的から考え、炉停止機能という面からみた安全性を保持することが第一であることは言うまでもないが、そのために制御棒の価値をむやみに増加させることは炉や燃料の経済性の低下を招くばかりか、運転上制御棒の運用が非常に困難な炉心を作ってしまうことになりかねない。また、制御棒に関する事故発生時に影響が大きく、かえって安全でない結果になることさえ考えられる。

これらのことを考えると、制御棒設計に関してもその最適点があることは明白であり、設計精度の確認という意味からも、実験による裏付けが重要な条件となってくる。

制御棒に課せられた基本的な機能は、

「炉心のいかなる状態からも、燃料の破損を生じない程度に十分速かに炉を停止し、かつ未臨界状態に保つこと」と考えてよい。

この機能を満すために、次に示すようなかたちで、種々な条件が課せられている。

- (1) 独立に駆動される少なくとも2系統の制御棒を有し、一系統の挿入に失敗しても他の一系統が挿入されること。
- (2) 上記の2系統を主系統と後備系統とに分けると、主系統の最も大きい価値を有する一系統の挿入に失敗したときにも同じ系統の残りの制御棒で要求される機能を満足すること。
- (3) 炉の停止に対して適当な制御余裕をもっていること。
- (4) 一体当りの最大価値は、誤まって引抜かれたときの反応度投入割合が炉の安全性を損わない範囲であること。

ここに示したものは制御棒の設計にあたり、設計者が考慮しなければならない基本的な事項であり、実験計画を進めるに当って、実験項目抽出のためにも十分考慮していかなければならないと同時に、実験項目の意義づけの上からも重要な事項である。

また、これらの基本事項は、炉心や制御棒がいかなる状態にあっても満足されなければならない。

したがって設計計算における誤差は、これら基本事項を満足する範囲内で十分小さくし

なければならぬ。

特に制御棒価値に関しては、その値の不足が許されないことは自明であるが、過大であっても問題を生じることが前述したとおりである。

制御棒に限らず、設計精度を向上させることは、設計上不可欠の問題であるが、特に制御棒においては、価値不足においてはシステムが成立せず、過多の場合は運転上に与える影響など大きく、上下両限界があり重要な問題である。

制御棒に関して価値を例にとって問題点を例示したが、さらに出力分布へ与える影響は同様に重要であり、もし出力分布へ与える影響が設計余裕を越えて過大であれば定格出力を得ることができないばかりでなく、気付かずに運転した場合には燃料に過大な負担を負わす結果となる。

これらの価値および出力分布の総合されたものとして制御棒の運用計画があり最終的には制御棒に関する問題はこゝへ帰着する。

以上制御棒設計に関する問題の重要性について概略を述べたが、これらを整理すると次のように分類される。

1. システム上の問題
2. 価値の問題
3. 出力分布に与える問題
4. 運用に関する問題

こゝで、システム上の問題には反応度バランス上の問題のみでなく、制御棒の配置、本数、炉心特性への影響、経済性への影響などすべてを総括的に含むものである。

3.2 大型炉での制御棒に関する問題点

いま、原型炉級（出力 300 MWe）から実証炉級（出力 1000 MWe）への発展を仮定すると、1000 MWe 程度の炉心でも大型炉特有の問題が現われてくる。

商用化を目指すための第一ステップとして考えるべきことは、炉心の安全性と経済性という点に注目すべきであり、いかに少数の制御棒で条件を満足するシステムを構成するかにある。

第二には、大型化のために生じる炉心特性上の問題である。

現在一般的に行われている大型炉の検討では炉心高さを変えずに、出力の増大に応じて炉心直径の増大に置き換えている。この主たる原因は冷却材ボイド反応度を小さくするために偏平な炉心にあることである。

炉心形状の問題を制御棒設計の観点からみれば、炉心軸長の増大は駆動ストロークの増加につながり、挿入性の問題に影響を与えるが、制御棒本数の増加をおさえることができる。ただし、集合体長の増加に伴ない。B-10 を吸収体に使用する密封型制御棒ではガス

プレナム長の延長も加わり集集体長はさらに長くなる。

大型炉の形状に関するこのような種々の条件から判断するならば、炉心高さは原型炉級炉心からあまり増加をせず、炉心出力の増大に応じた直径をもつ偏平な炉心を考えることが妥当である。

炉心直径の増大により、燃料領域を2領域とするならば、内外燃料の適切な選択により内側燃料領域の出力分布がかなり平坦化され、制御棒一本あたりの価値は同一吸収体濃度の制御棒に対して平均化される一方、制御棒の挿入による出力の歪みが誇張されるおそれがある。

したがって複数本挿入時の干渉による価値の変化が大きくなる可能性があり、スタックロード時の価値に関しても最大スタック価値の制御棒の位置判定に労力を要する。

炉心体積の増大により必要制御棒本数は多くなるが、増殖性の改善により燃焼に伴う炉心反応度劣化が少なくなり、結果的には制御棒本数の増加割合は少ないかまたは制御棒1体あたりの反応度制御価値は小さくなる。これら制御棒に必要な制御反応度の中には温度や出力変化による反応度変化の大型炉特有の変化を考慮しなければならない。

このように、制御棒価値の上からは必要反応度が比較的小さくなるが、炉心の大型化によるスペクトルの軟化などによる制御棒価値への影響、炉心断面の増大による空間的バランスの不安定さなどもあり、設計精度上に新しい問題が生じる。

これら制御反応度に与える影響はそのまゝ出力分布への影響となって現れる。

3.3 制御棒に関する実験項目

制御棒システムに関連する設計上の項目で、炉物理的バックアップを必要とするものについて述べる。

現在の設計技術から考えて、制御棒に関するもので設計上計算が不可能な項目はないものと考えられるが、その精度はまだ十分でなく、実験的裏付けを必要とするものが多い。また、計算精度の不十分なものについては、実験値との比較による補正係数を用いて設計値を定めているものが少なくない。大型炉心になれば、実験による裏付けの必要性はさらに増大する。

制御棒に関連する実験必要項目を大別すると、

1. 制御棒価値に関するもの
2. 出力分布に与える影響

の二者に分けることができる。

以下に掲げるものは、大型炉特有の問題ではないが、原型炉級の炉とは性質も異なり、そのまゝ精度評価を外挿するにはまだ十分な確認が行われていないと考えられる項目である。

3.3.1 制御棒価値に関する実験項目

1) 単一制御棒挿入時の価値

言うまでもなく、基本的な計算精度の評価に必要なものである。これは、次の項目に分類される。

1. 1体あたりの吸収体量と価値の関係
2. 炉心内設置位置と価値の関係
3. 集合体の大きさによる価値の効果
4. 集合体形状による価値の効果
5. 炉心スペクトルによる価値の変化

2) 複数制御棒の挿入による価値（少数本の場合）

主として運転中の状態を考慮して調整棒の挿入状態による価値の変化を確認するものである。この場合、制御棒間の干渉作用として、下記の状態を検討しておく必要がある。

1. 同種制御棒の干渉効果
2. 異種制御棒の干渉効果
3. 相互位置の関係による干渉効果の変化

3) 複数制御棒の挿入による価値（多数本の場合）

主として安全棒の挿入時における価値評価として実施する。多数本挿入時の価値は少数本挿入時の組合せの類推のみからでは解決できない誤差を生じることが多い。

1. 全安全棒挿入時価値
2. 1ロッドスタック時価値
3. 異種制御棒挿入時の価値変化

4) 制御棒部分挿入時の価値

特に運転時の価値を確認すること、および、挿入時の制御反応度投入曲線（いわゆるS字カーブ）の確認のために中途挿入状態での価値評価を必要とする。

1. 典型的部分挿入状態における価値
2. S字カーブの確認

5) 環境による変化

制御棒吸収体の濃度変化のみならず、炉心状態の変化によって制御棒価値に変化が見られる。これらは、燃料の組成変化に起因するものもあれば、出力分布の変化によるものもある。さらに制御棒の非均質な燃焼による価値変化をも検討すべきである。

6) その他の項目

制御棒価値に関するものでその他設計上確認を要する問題は多いが、そのうち代表

的なものをここに掲げる。たゞし静的な特性に関するものに限ることとする。

1. 制御棒有効長と価値の関係
2. 引抜停止位置における価値
3. 偏心挿入の影響

3.3.2 出力分布に関連する項目

制御棒の出力分布に与える影響に関しては主に運転上の問題と関連している。制御棒の第一使命は反応度を制御することにあるが、それと同時に出力分布を調整することは重要な機能であり、特に炉心の大型化にともなってその機能の重要性は増大する。

制御棒本数の多い大型炉心では、出力分布の形成には自由度が多いが、制御棒1体が出力分布へ与える影響は大きく、出力の空間的バランス形成の上で新しい問題が生じる。

制御棒に関する実験では従来価値に重点がおかれてきたが、出力分布に与える影響は効果的な運転法を検討する上からも十分に精度の確認を必要とする重要な課題であると言える。

出力分布に与える影響は、価値の検討と似かよったケースについて検討が必要である。

1) 単一制御棒挿入時の出力分布の変化

単一制御棒挿入時の出力分布の歪は、計算上も単純であり、設計誤差評価の基準となるものである。一般には出力分布の対称性を重んじ非対称な制御棒の挿入はさけるようにされるが、誤操作時の影響、または実験的故意の操作などにおける安全性確認の意味からも炉内各位置における単一制御棒挿入時の出力分布計算の精度を確認しておくことが望ましい。

1. 1体当りの吸収体量による出力分布への影響
2. 炉心内設置位置による影響
3. 集合体の大きさによる影響

2) 複数制御棒の挿入による出力分布への影響（少数本の場合）

制御棒の挿入は一般には炉心中心に対して回転対称になるように使用される。大型炉心においては、制御棒の挿入により出力分布の受ける影響は大きく、しかも複数本の挿入によってはその挙動が複雑となる。こゝでは主に運転に用いられる調整棒の効果を確認する。

1. 対称挿入の場合の効果
2. 非対称挿入の場合の効果
3. 炉中心からの距離による効果

3) 複数制御棒の挿入による出力分布への影響（多数本の場合）

主に燃焼初期におけるいわゆるシム棒挿入時の出力分布への影響など多数制御棒が挿入された場合の出力分布の確認を目的とする。多数本制御棒挿入時の出力平坦化の

問題は、燃焼初期における制御棒計画上からも重要である。

1. サイクル初期に想定される制御棒パターンにおける出力分布
 2. 出力上昇時の制御棒パターンにおける出力分布
- 4) 中途挿入の制御棒が出力分布に与える影響

制御棒の挿入は多くの場合全挿入でなく中途挿入である。このような中途挿入制御棒は、軸方向出力分布に歪みを与える。実際の問題としては、この中途挿入制御棒の存在する炉心における出力分布の評価を十分にしておくことが重要である。

中途挿入制御棒の計算は一般に長時間を要しかつ精度上も十分確認する必要がある。

1. 単一制御棒の中途挿入における出力分布の歪み
 2. 対称な複数制御棒の中途挿入における出力分布の歪み
 3. 非対称な複数制御棒の中途挿入における出力分布の歪み
 4. 全挿入と中途挿入制御棒の混在する炉心における出力分布
 5. 制御棒による出力平坦化の確認
- 5) 環境による変化

燃焼の進んだ炉心における制御棒の出力分布に与える効果の違いを確認しておくことは有効である。検討項目は上述してきた項目の中より基本的なものを選ぶことが必要である。

3.3.3 その他の特性への影響

以上に制御棒に関する基本的な確認必要項目を記してきたが、その他制御棒の影響によって変化を受けるものについて本項に記す。

1) 制御棒の挿入による核特性の変化

平均的な炉心の状態としては何らかの制御棒が挿入されていることが考えられるが解析の複雑さのため反応度係数などは制御棒挿入を考えない炉心での解析または簡単なモデルで制御棒の効果を考慮することが多い。したがって、これら核特性の制御棒挿入による効果をできるかぎり実験により確認しておくことが望ましい。反応度係数の他に増殖率の測定などは特に大型炉にとって重要な項目である。

2) 制御棒吸収体における反応率

制御棒中性子吸収体として B_4C を用いるときは 反応度生成物であるヘリウムガスの発生が制御棒集合体の機械的寿命の直接原因であることを考え、制御棒集合体におけるボロンの中性子反応率分布を確認することはきわめて重要である。

3) 引抜制御棒の影響

出力分布に関連する問題であるが、引抜制御棒の先端が、出力分布形に与える影響を引抜停止位置との関連にて確認を必要とする。特に安全棒の効果において重要であ

る。

3.4 大型炉で特に重要な実験項目

前節までに制御棒に関連する必要実験項目を一般的な観点から摘出したが、本節では大型炉を対象とした場合の重点検討項目を述べる。

原型炉級の実験において局所的、炉物理的問題は解決されているとするならば、大型炉を対象とした実験では

1. 基本的項目の確認
2. 大型炉特有の問題

の二者に分けて考えられる。

3.4.1 基本的確認事項

原型炉級炉心で確認された補正法、精度が大型炉でもそのまま利用できるかどうかの確認をするための実験であり次に掲げるようなものが考えられる。

1) 単一制御棒価値

炉中心および典型的挿入位置における制御棒1体の価値を確認する。制御棒吸収体の含有量は実機に想定されるものに近いことが好ましい。

2) 機能別価値

制御棒の使用は出力分布に与える影響からグループ別に駆動することが好ましいと推定されるが、こゝでグループ分けされる制御棒は機能別または目的別に区分されることが多い。このようにグループ別に駆動される制御棒の価値はあたかも一体の制御棒とみなした方が運用上有効である。そのような意味から、同時に駆動される制御棒を想定した多数本制御棒の典型的組合せにおける価値を確認しておくことが必要である。

3) 基本制御棒の挿入による出力分布への効果

大型炉における制御棒挿入による出力分布への影響は原型炉級炉心におけるよりも大きく、かつ重要な問題である。

大型炉での制御棒挿入時の出力分布の計算精度確認のために基本的な単一制御棒挿入時の出力分布、対称な複数本挿入時の出力分布の確認が必要である。

4) 中途挿入制御棒による出力分布への効果

通常の運転においては制御棒は中途挿入状態で運用されることが一般的である。基本的例として単一制御棒の中途挿入時、実際的な例としてグループ別の挿入による中途挿入時の出力分布への効果を確認しておくことが重要である。

この種の3次元的問題に関するものは、大型炉において特に処理が困難であるにもかかわらず重要度が増すものであり、実験による評価が特に重要である。

3.4.2 大型炉設計上特に重要な問題

1) 複数本制御棒間の相互干渉効果

大型炉においては制御棒複数本挿入時の価値に関する相互干渉効果が大きく、挿入パターンの変化により制御棒価値が大きく変化することは良く知られている。このような現象は設計時にはもちろん、制御棒の運用時にも大きな影響を与え、十分な確認を必要とする問題である。

干渉効果の特殊な問題としてスタックロッド価値の問題も大型炉においては特異な現象を示し、最大スタックロッドが炉心中心以外の場所で生じる場合がある。

これらの現象を考え、設計解析において特異な干渉効果の生じるパターン、干渉効果が正負境界点にあるパターンなどを摘出し、計算結果の評価ができるような実験を実施すべきである。

2) 複数制御棒挿入による出力分布への影響

基本制御棒パターンの他に炉心運用上現われる多くの挿入状態において特に出力の歪みが大きいもの、出力上昇時の挿入状態における出力分布などの中より典型的なものについて確認実験をする。

3) 出力平坦化の確認

大型炉心においては制御棒による出力分布への影響が大きい、また、制御棒による出力分布の制御が必要になる。出力分布の平坦化は熱流設計からも重要な問題であり、実験によって確認をしておきたい。

4) 冷却材ボイド時の制御棒価値

冷却材ボイド時のスペクトル変化により制御棒価値の変化がみられることが知られているが、大型炉における効果を確認しておくことが必要である。

5) 計算値／実験値比 (C/E比) の空間依存性

原型炉級の炉心ではいわゆるC/E値は同一形状組成の制御棒に関しては炉内における位置の有意な依存性はみられない。

大型炉に関して同様な仮定が成立するかの確認をするとともに、空間依存性が認められるときにはその補正法を確立することが必要である。

4

章

4. 好適な実験体系の検討

これまでに1,000 MWe級炉心の典型的仕様とその炉心における制御棒に関する特性、制御棒設計における一般的な問題点、制御棒実験項目、特に大型炉に必要な実験項目などについて述べてきたが、本節からはビゼー実験における具体的な検討に入る。

まず、BIZET Technical Note¹⁾²⁾に記されている体系の中より基準体系を選定し、種々の目的における制御棒配置での制御棒価値、制御棒間の干渉効果、出力分布への影響などについて検討を加えた。

基準体系で生じた問題点を解決するために、制御棒実験を対象とした好適な実験体系を提案し、基準体系と同様な検討を加えた。

4.1 ビゼー基準体系における制御棒実験

ビゼー基準体系について単一制御棒、複数本制御棒の価値および制御棒挿入による出力分布への影響等を算出し、この体系が1,000 MWe級大型炉での制御棒設計上の問題点を充分表現できる体系かどうかの検討を行った。

4.1.1 基本データ

ビゼー基準体系の炉心温度、幾何形状、原子数密度について以下記述する。

1) 炉心温度

炉心構成要素は一様に常温であると仮定した。この温度条件を体系の幾何形状、原子数密度の算出および微視的断面積の作成の際に考慮した。

2) 幾何形状

動燃事業団殿より支給された資料¹⁾²⁾(BTN/UK-1およびBTN/UK-7)にもとづく体系を基準体系としている。図4.1-5に $\frac{1}{4}$ 炉心での平面マップ、図4.1-3にRZ体系の図を示す。9要素制御棒の吸収体部の断面図を図4.1-1に示す。基準体系の選定理由は4.1.3で記述する。

3) 原子数密度

セル毎の原子数密度を表4.1-1に示す。ここで内側炉心燃料、外側炉心燃料の原子数密度は動燃事業団殿より支給された資料²⁾(BTN/UK-7)のピン・セルの数値を使用している。

また9要素制御棒、ブランケットおよび遮蔽体の原子数密度は、動燃事業団とご相談の上、モーツァルト計画で使用した模擬制御棒⁴⁾、ブランケット³⁾および遮蔽体³⁾の値と同じとした。

また、この際には模擬制御棒、ブランケットおよび遮蔽体の中に含まれる水素、ケイ素、チタン等は散乱効果が主でかつ微量であり、制御棒価値にほとんど影響を与えないことからこれらの元素は無視した。

Pu-241 については、ビゼー実験開始までの崩壊による減少は考慮していない。

表 4.1-2 に、ビゼー体系計算で使用する模擬制御棒 1 体当りの B-10 重量を示す。また表 4.1-3 に単位セル当りに含まれる核分裂性核種の重量を示す。内側炉心セル、外側炉心セルの富化度は、各々 16.1% および 20.3% である。

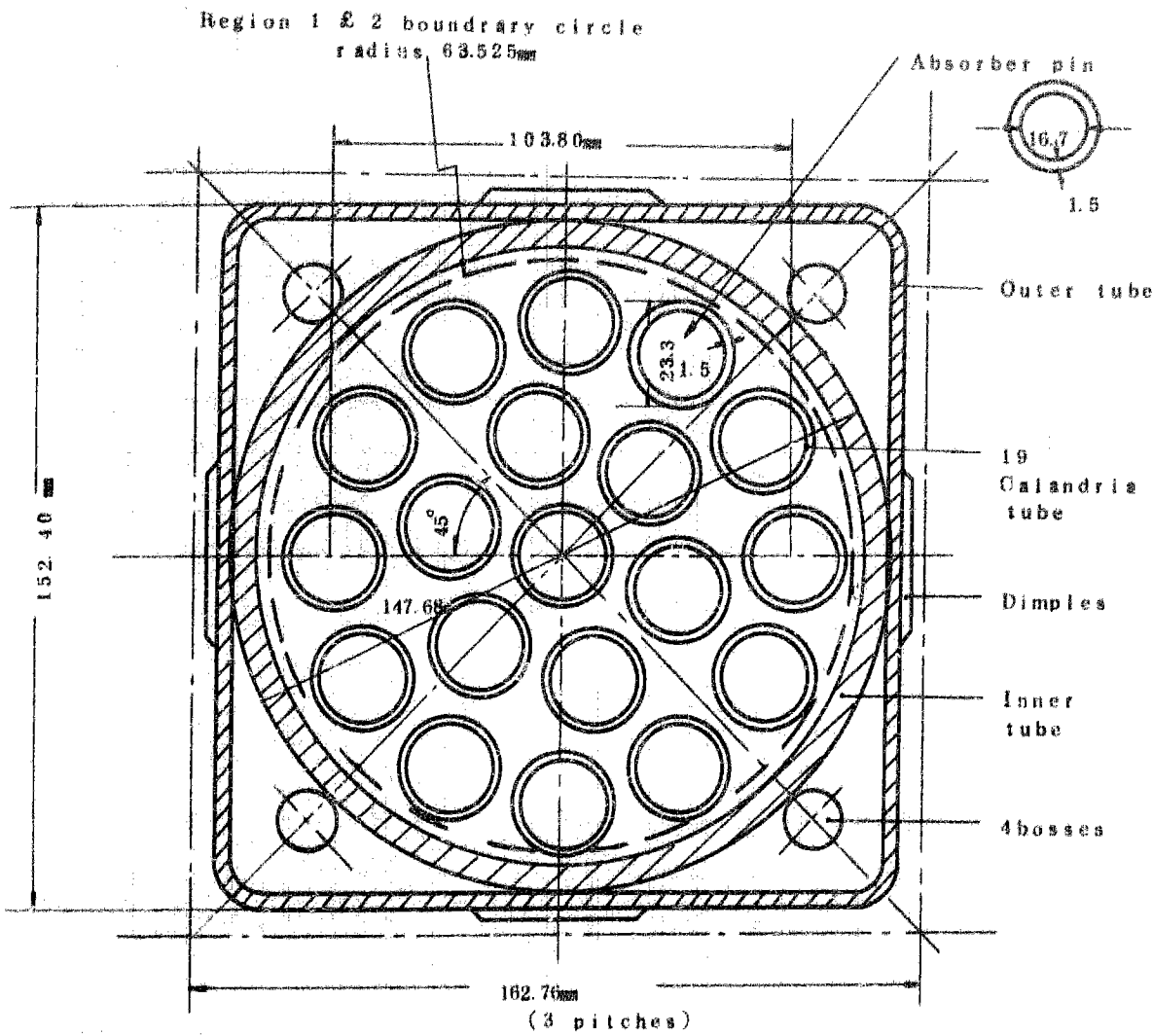


Fig. 4.1 - 1 BIZET Mock-up Control Rod Cross Section
(Nine Element Singularity)

Table 4.1--1 Cell Averaged Atomic Number Density for BIZET Reference Core

| Nuclide | (I) | | (II) | | Radial Blanket | | Axial Blanket | Natural | Shield |
|-------------------|------------|------------|----------|----------|----------------|----------|---------------|---------|-----------|
| | Inner Core | Outer Core | B11-3 | B11-4 | B13-8 | Natural | Uranium | | |
| 1 P.-239 | 0.000894 | 0.001120 | | | | | | | Steel Bar |
| 2 P.-240 | 0.000202 | 0.000258 | | | | | | | |
| 3 P.-241 | 0.000027 | 0.000043 | | | | | | | |
| 4 P.-242 | | | | | | | | | |
| 5 U-235 | 0.000042 | 0.000039 | 0.000074 | 0.000074 | 0.000049 | 0.000291 | | | |
| 6 U-236 | | | | | | | | | |
| 7 U-238 | 0.005816 | 0.005347 | 0.010305 | 0.010218 | 0.006760 | 0.040084 | | | |
| 8 O | 0.013990 | 0.014110 | 0.000001 | 0.010789 | 0.000002 | | | | |
| 9 N _s | 0.008680 | 0.008680 | 0.006250 | | 0.008379 | | | | |
| 10 C _s | 0.003610 | 0.003430 | 0.002518 | 0.000864 | 0.003520 | 0.000864 | | | |
| 11 N _i | 0.001780 | 0.001780 | 0.001274 | 0.000483 | 0.001758 | 0.000483 | | | |
| 12 M _s | | | 0.000013 | 0.000008 | 0.000017 | 0.000008 | | | |
| 13 F _s | 0.012310 | 0.011930 | 0.013669 | 0.014507 | 0.012816 | 0.003193 | | | 0.072028 |

| Nuclide | Name | Na | 30% | | | 80% | | | 90% | | | Nuclide | |
|---------|----------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|--|
| | | | Natural | Boron Rod | Boron Rod | Boron Rod | Boron Rod | Boron Rod | Boron Rod | Na | Name | Ta Rod | |
| 9 | N _s | 0.014096 | 0.009988 | 0.009988 | 0.009988 | 0.009988 | 0.009988 | 0.009988 | 9 | N _s | 0.009988 | | |
| 10 | C _s | 0.004747 | 0.005601 | 0.005601 | 0.005601 | 0.005601 | 0.005601 | 0.005601 | 10 | C _s | 0.004505 | | |
| 11 | N _i | 0.002316 | 0.002732 | 0.002732 | 0.002732 | 0.002732 | 0.002488 | 0.002488 | 11 | N _i | 0.002198 | | |
| 12 | M _s | | | | | | | | 12 | M _s | | | |
| 13 | F _s | 0.015997 | 0.018874 | 0.018874 | 0.018874 | 0.018874 | 0.017024 | 0.017024 | 13 | F _s | 0.015180 | | |
| 14 | B-10 | | 0.003208 | 0.004857 | 0.004857 | 0.013083 | 0.015110 | 0.015110 | 19 | T _s | 0.012103 | | |
| 15 | B-11 | | 0.012989 | 0.011394 | 0.011394 | 0.003288 | 0.001649 | 0.001649 | (I) | Except data for inner and outer core materials, data are based on MOZART data. | | | |
| 16 | C | | 0.004139 | 0.004060 | 0.004060 | 0.003974 | 0.003376 | 0.003376 | | | | | |

Table 4.1-2
B-10 Contents for BIZET Mock-up Control Rod⁽¹⁾
(Kg/Ass)

| Mock-up Rod | Symbol | BIZET | MOZART |
|-------------------|--------|-------|--------|
| Natural Boron Rod | BN | 1.260 | 0.566 |
| 30 % Boron Rod | B30 | 1.908 | 0.857 |
| 80 % Boron Rod | B80 | 5.140 | 2.317 |
| 90 % Boron Rod | B90 | 5.936 | 2.665 |

(1) In this case, Mock-up Rod signifies Nine Element Singularity, Absorber Length in any B-10 content for BIZET Mock-up Rod is 892mm.

Table 4.1-3
Fissile Contents for BIZET Reference Core Cell
(g/cm)

| Cell Name | Pu-239 | Pu-241 | U-235 |
|------------------------------|--------|--------|-------|
| Inner Core Fuel Cell | 10.443 | 0.318 | 0.482 |
| Outer Core Fuel Cell | 13.083 | 0.506 | 0.448 |
| Radial Blanket Cell B11-3 | ———— | ———— | 0.850 |
| Radial Blanket Cell B11-4 | ———— | ———— | 0.850 |
| Axial Blanket Cell B13-8 | ———— | ———— | 0.563 |
| Natural Uranium | ———— | ———— | 3.342 |

4.1.2 計算手法および体系計算の入力定数

1) 使用断面積

図4.1-2に示すように、ENDF/B (Version III) データを処理して作成した26群基本断面積HIMUL-1からビゼー体系を考慮した26群および3群断面積を作成した。

26群、3群のエネルギー群構造は大型炉計算に用いたものと同じものとし、大型炉とビゼー体系の比較を容易にした。(表4.1-4参照)

従来、実験解析には3群より多群の断面積を使用してきたが、以下に示すように3群断面積であっても充分良い精度で実効増倍率、中性子束分布等を表現できることと、予備解析であることを考え、ビゼー体系についても大型炉と同じ群構造をもつ3群断面積を26群断面積とともに使用した。

ここに使用した26群、3群断面積の比較を大型炉について検討した結果、実効増倍率の差は0.05%ΔK以内であり、中性子束分布については各メッシュ点毎に比較して最大相対誤差が3%以内である。

そこで、3群断面積でも今回の予備解析には十分なものであることがわかったので使用した。

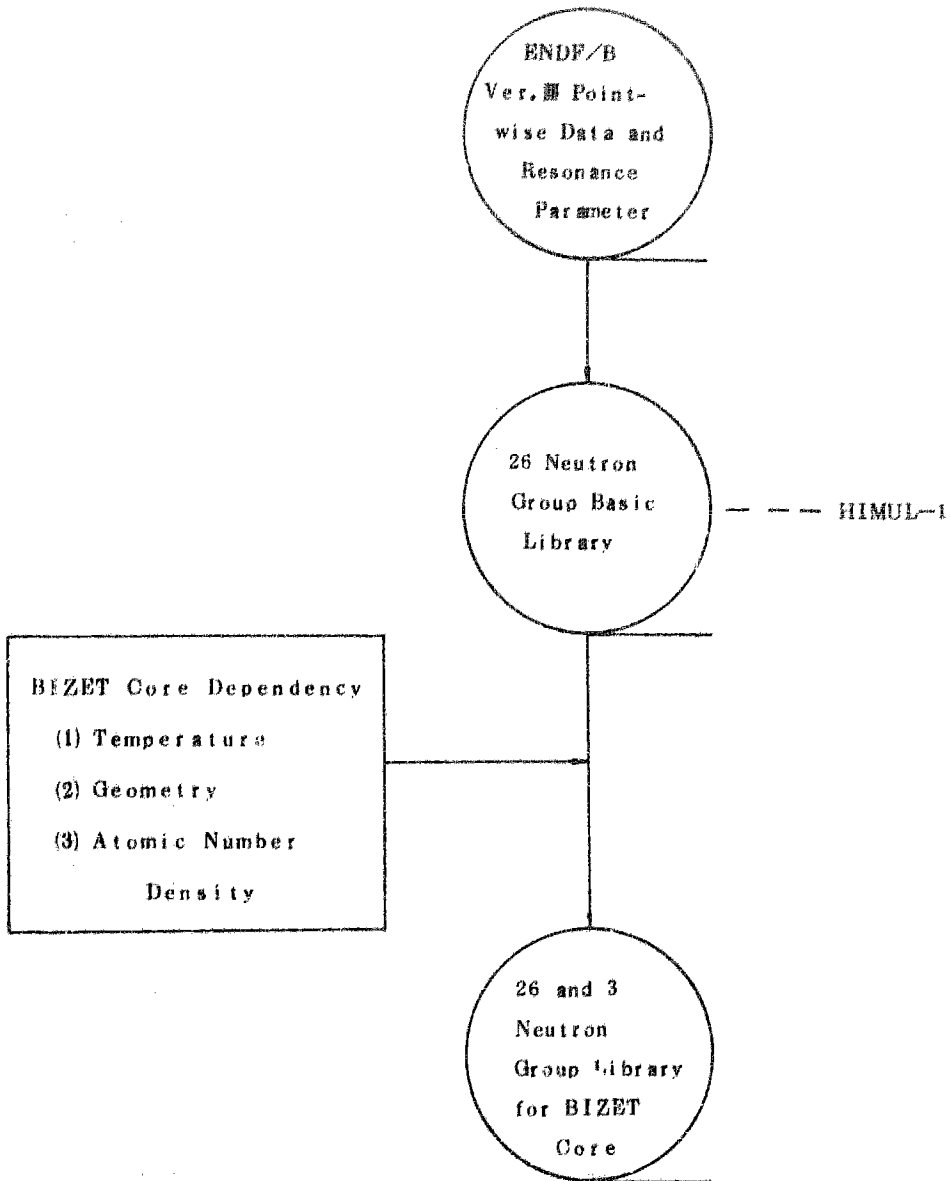


Fig 4.1-2 Cross Section Data Processing Flow Diagram for BIZET Core

Table 4.1-4
Multi-and Few-Group Structure for Large
FBR and BIZET Core Cross-section File

| 26 Group Structure | | | 3 Group Structure | | |
|--------------------|--------------------|----------------|-------------------|----------------------|----------------|
| Group Number | Lower Energy Bound | Lethargy Width | Group Number | Lower Energy Bound | Lethargy Width |
| 1 | 6.5 Mev | 0.48 | (1) 1 | 0.4 Mev | 3.27 |
| 2 | 4.0 | 0.48 | | | |
| 3 | 2.5 | 0.48 | | | |
| 4 | 1.4 | 0.57 | | | |
| 5 | 0.8 | 0.57 | | | |
| 6 | 0.4 | 0.69 | | | |
| 7 | 0.2 | 0.69 | 2 | 0.1 Mev | 1.38 |
| 8 | 0.1 | 0.69 | 3 | 0.0252 ^{ev} | 14.43 |
| 9 | 46.5 Kev | 0.77 | | | |
| 10 | 21.5 | 0.77 | | | |
| 11 | 10.0 | 0.77 | | | |
| 12 | 4.65 | 0.77 | | | |
| 13 | 2.15 | 0.77 | | | |
| 14 | 1.0 | 0.77 | | | |
| 15 | 465 ev | 0.77 | | | |
| 16 | 215 | 0.77 | | | |
| 17 | 100 | 0.77 | | | |
| 18 | 46.5 | 0.77 | | | |
| 19 | 21.5 | 0.77 | | | |
| 20 | 10.0 | 0.77 | | | |
| 21 | 4.65 | 0.77 | | | |
| 22 | 2.15 | 0.77 | | | |
| 23 | 1.0 | 0.77 | | | |
| 24 | 0.465 | 0.77 | | | |
| 25 | 0.215 | 0.77 | | | |
| 26 | 0.0252 | 2.14 | | | |

(1) Upper Energy Bound for 1st Group is 10.5Mev

2) 軸方向バックリング値

大型炉と同様にRZ計算を行ない、必要な領域の軸方向バックリング値を、エネルギー群別、領域別に算出した。その際のビゼー体系のRZモデルを図4.1-3に示す。ビゼー基準体系での軸方向バックリング値を表4.1-5に示す。

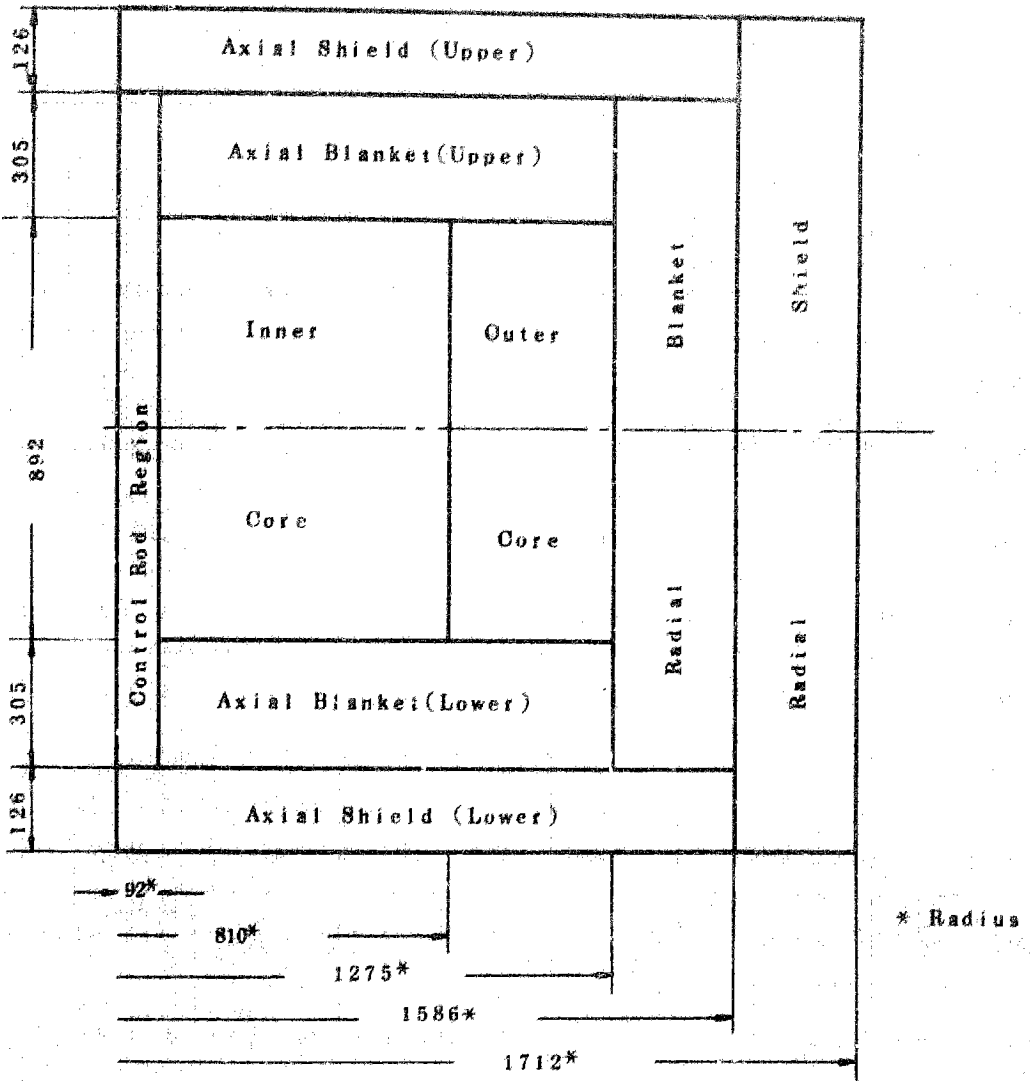


Fig 4.1-3 RZ Model for BIZET Reference Core
(Dimensions in mm)

Table 4.1-5
 Axial Buckling Values in BIZET Reference Core
 (cm^{-2})

| Region | 1st Group | 2nd Group | 3rd Group |
|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Inner Core | 7.272 $\times 10^{-4}$ ⁽¹⁾ | 4.724 $\times 10^{-4}$ | 5.313 $\times 10^{-4}$ |
| Outer Core | 7.518 $\times 10^{-4}$ | 4.820 $\times 10^{-4}$ | 5.176 $\times 10^{-4}$ |
| Radial Blanket ⁽²⁾ | 5.756 $\times 10^{-4}$ | 4.740 $\times 10^{-4}$ | 4.594 $\times 10^{-4}$ |
| Radial Shield ⁽³⁾ | 1.320 $\times 10^{-4}$ | 1.722 $\times 10^{-4}$ | 2.346 $\times 10^{-4}$ |
| Na Follower | 4.988 $\times 10^{-4}$ | 3.594 $\times 10^{-4}$ | 5.027 $\times 10^{-4}$ |
| Natural Boron Rod | 5.268 $\times 10^{-4}$ | 3.124 $\times 10^{-4}$ | 4.782 $\times 10^{-4}$ |
| 30 % Boron Rod | 5.179 $\times 10^{-4}$ | 2.685 $\times 10^{-4}$ | 3.248 $\times 10^{-4}$ |
| 80 % Boron Rod | 4.711 $\times 10^{-4}$ | 3.387 $\times 10^{-5}$ | -5.779 $\times 10^{-4}$ |
| 90 % Boron Rod | 4.548 $\times 10^{-4}$ | -2.244 $\times 10^{-5}$ | -7.952 $\times 10^{-4}$ |

- (1) 7.272 $\times 10^{-4}$ implies 7.272×10^{-4} . In this table, figures are used in the same meaning.
- (2) These values for Radial Blanket are used for B11-3 and Natural Uranium.
- (3) Radial Shield implies Steel Bar.

4.1.3 ビゼー基準体系の選定

ビゼー実験体系は、その目的に応じて炉心の大きさ、制御棒配置等が異なる。この4.1.3では、ビゼー実験体系の特徴を把握するために基準体系を選定し、その炉特性を検討した。

1) 基準体系の選定

BTN/UK-7²⁾によれば、径方向ブランケットB11-3と、天然ウランブロックとの間に間隙をもつ体系(図4.1-4に示す)と、9要素制御棒、4要素制御棒をすべて装荷した体系(図4.1-5に示す)とがある。実験は臨界法で行なわれるので制御棒本数の増加とともに、図4.1-4で示す間隙は径方向ブランケットの炉心内部から外側への移動と、外側炉心燃料の追加により、少なくなり最終的に図4.1-5に示す体系に行きつく。ただし両図ともこの報告書では $1/4$ 体系で示している。

そこで両体系につき2次元XY計算を行ない炉心スペクトルを比較した。その結果を表4.1-6に示す。

両体系間のスペクトルの差は1,000MWe級大型炉とビゼー基準体系との違いと比較して十分に小さいので、実験体系の炉心特性は図4.1-5に示す基準体系で計算しても十分評価できる。また、制御棒挿入により計算体系を変えないことは計算結果の比較・評価が容易になるという大きな利点がある。

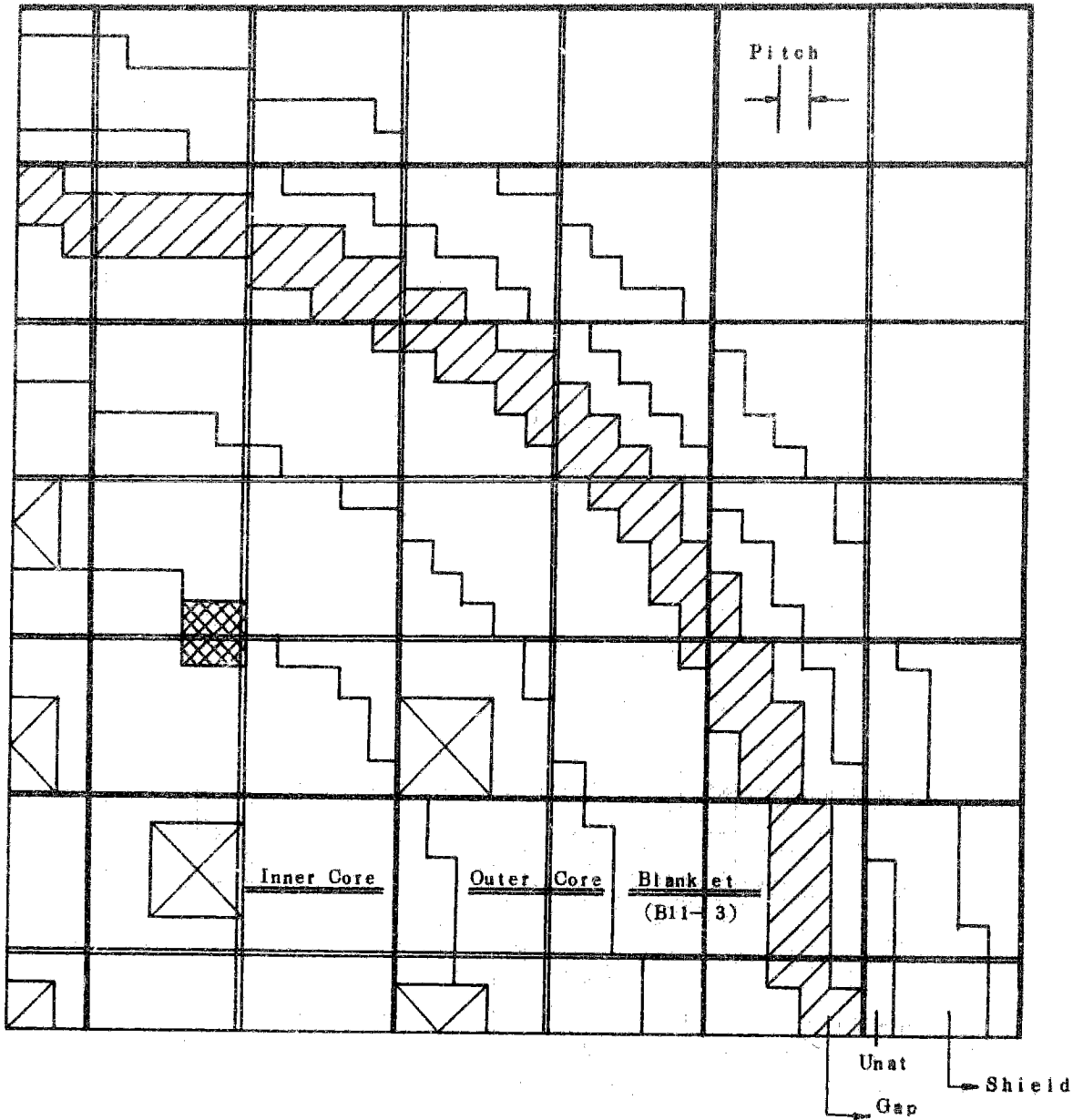
今後、「ビゼー基準体系」は、図4.1-5に示す体系とする。

基準体系での領域別の炉心構成セル数を表4.1-7に示す。また基準体系($1/4$ 体系)での制御棒を表4.1-8に示すような記号をつけ、種類と位置を表わすものとする。

Table 4.1-6

Comparison of Neutron Flux Ratio between BIZET Reference Core and the Core in which Void exists outside Blanket

| Energy Group | Reference Core | | Core with Void outside the Blanket | | 1,000MWe Class FBR | |
|--------------|----------------|------------|------------------------------------|------------|--------------------|------------|
| | Inner Core | Outer Core | Inner Core | Outer Core | Inner Core | Outer Core |
| 1 | 26.8% | 28.8% | 27.3% | 28.8% | 25.1% | 27.7% |
| 2 | 32.3 | 32.7 | 32.4 | 32.6 | 30.4 | 31.0 |
| 3 | 40.9 | 38.5 | 40.3 | 38.6 | 44.5 | 41.3 |



Nine Element Singularity



Four Element Singularity

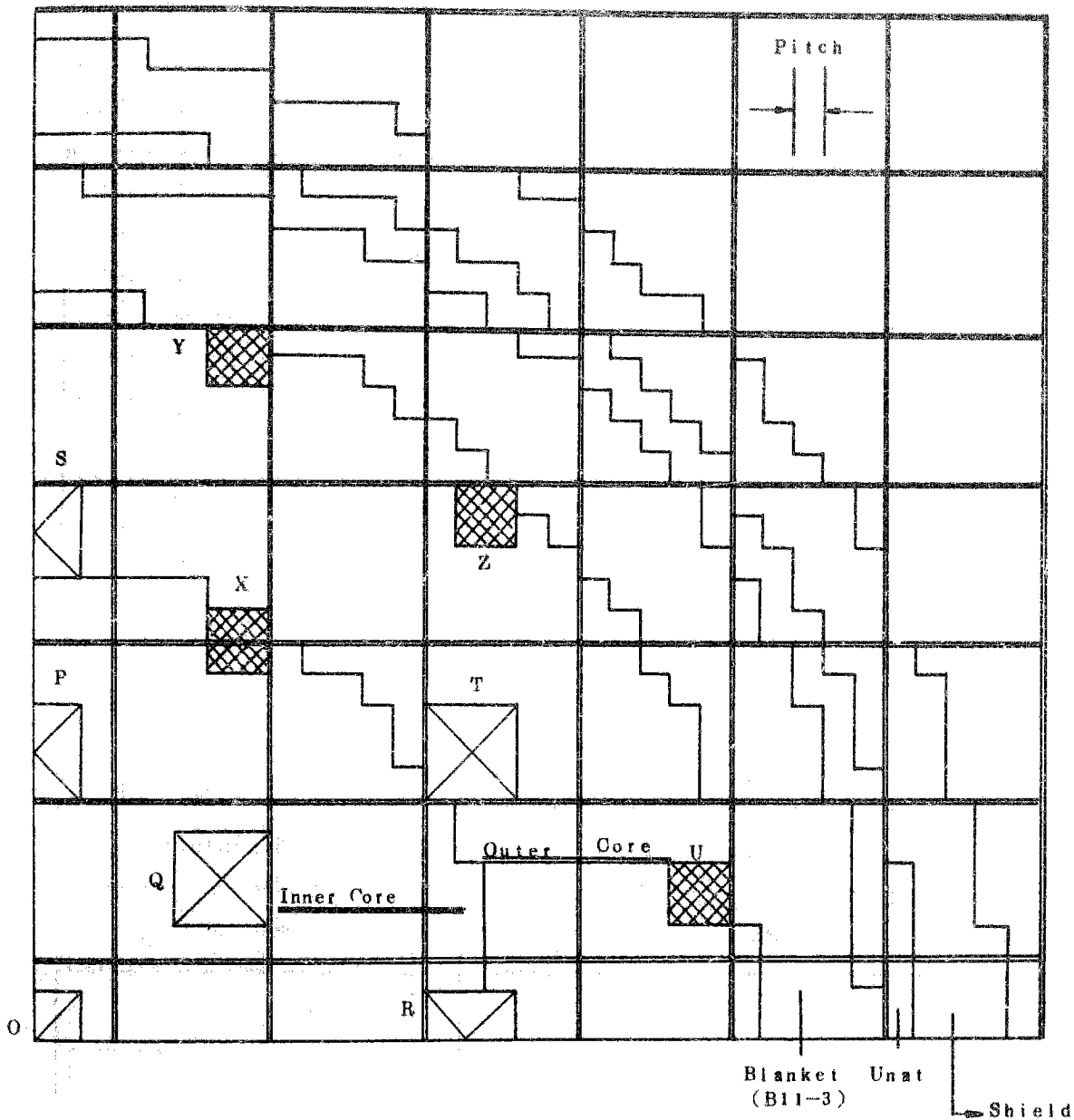


Grid

Fig 4.1-4 BIZET Core with Void
outside the Blanket

(1/4 Core)

Average Pitch = 54.2544mm



Nine Element
Singularity



Four Element
Singularity



Grid

Fig 4.1 - 5 BIZET Reference Core ($\frac{1}{4}$ Core)

Average Pitch = 54.2544 mm

Table 4.1-7
 Number of Plate Cells used in BIZET Reference Core

| Region | Fuel | Nine Element Singularity | Four Element Singularity | Shield | Total |
|-------------------------|------|--------------------------|--------------------------|--------|-------|
| Inner Core | 606 | 81 | 16 | — | 703 |
| Outer Cor | 896 | 54 | 48 | — | 998 |
| Radial Blanket B11-3 | 604 | 0 | 0 | — | 604 |
| Natural Uranium | 248 | 0 | 0 | — | 248 |
| Radial Shield | — | — | — | 492 | 492 |

Table 4.1-8
 Control Rod Positions and Naming
 in BIZET Reference Core

| Nine Element Singularity | | Four Element Singularity | |
|--------------------------|-------------|--------------------------|------------|
| Name | Region | Name | Region |
| O | Core Center | X | Inner Core |
| P | Inner Core | Y | Outer Core |
| Q | | Z | |
| R | | U | |
| S | Outer Core | | |
| T | | | |

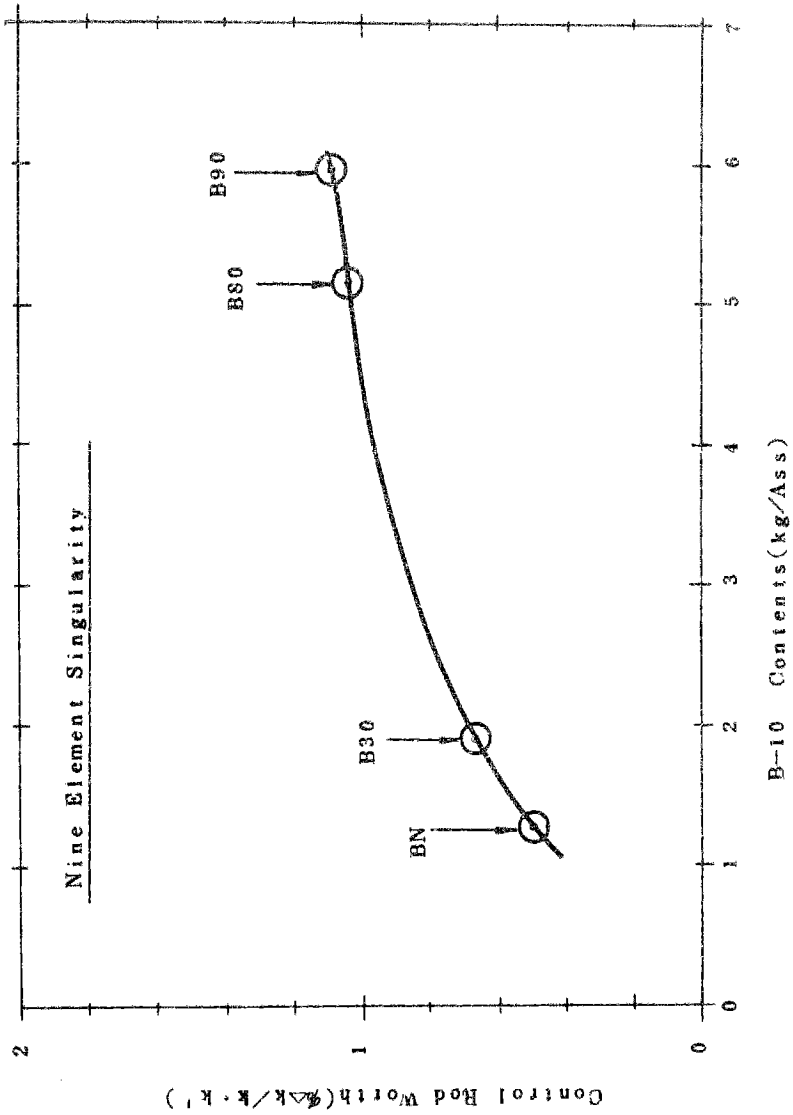


Fig. 4.1-6 B-10 Concentration Effect on Center Control Rod worth in BIZET Reference Core

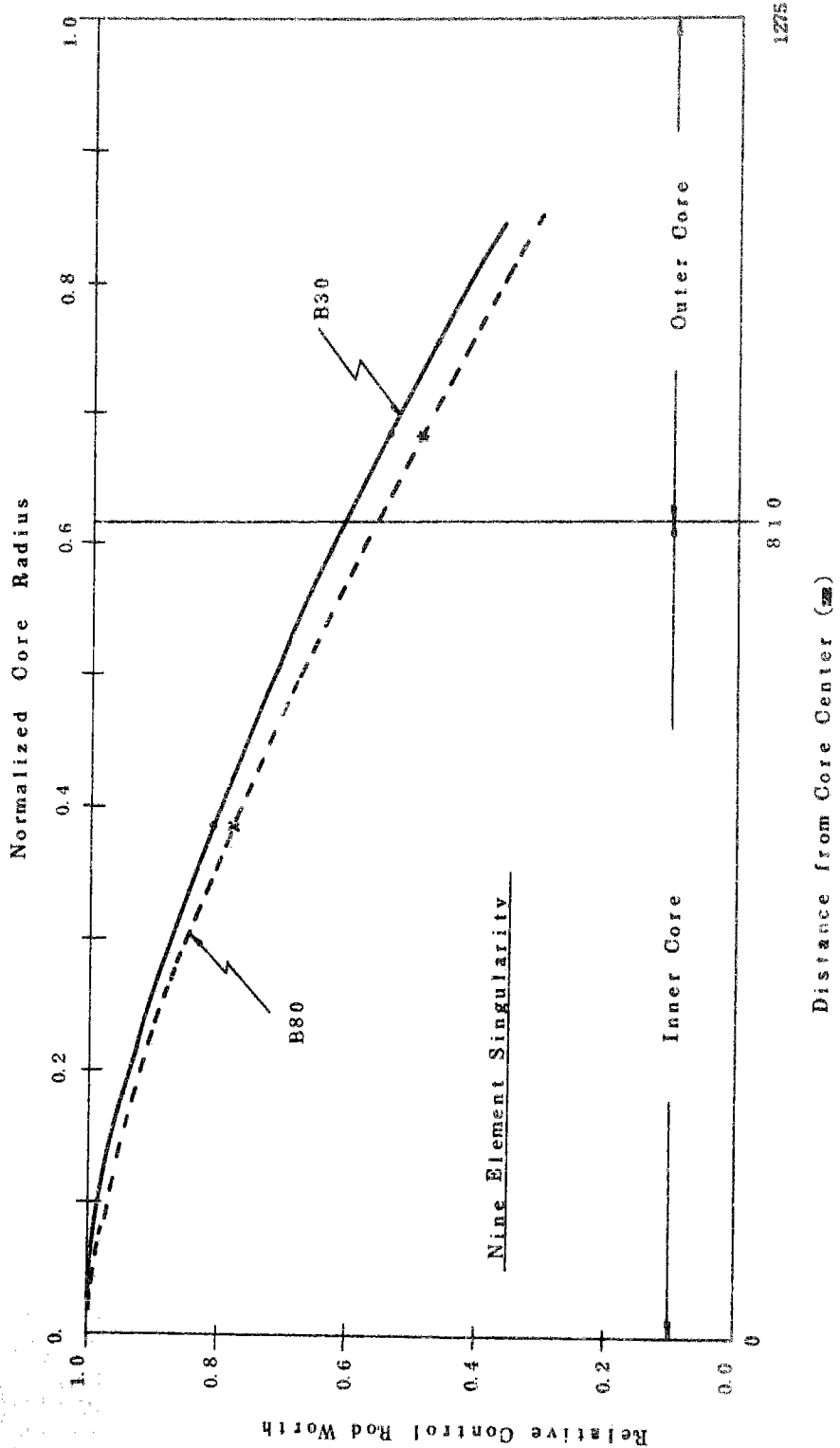


Fig. 4.1-7 Radial Rod Worth Distribution in RIZET Reference Core

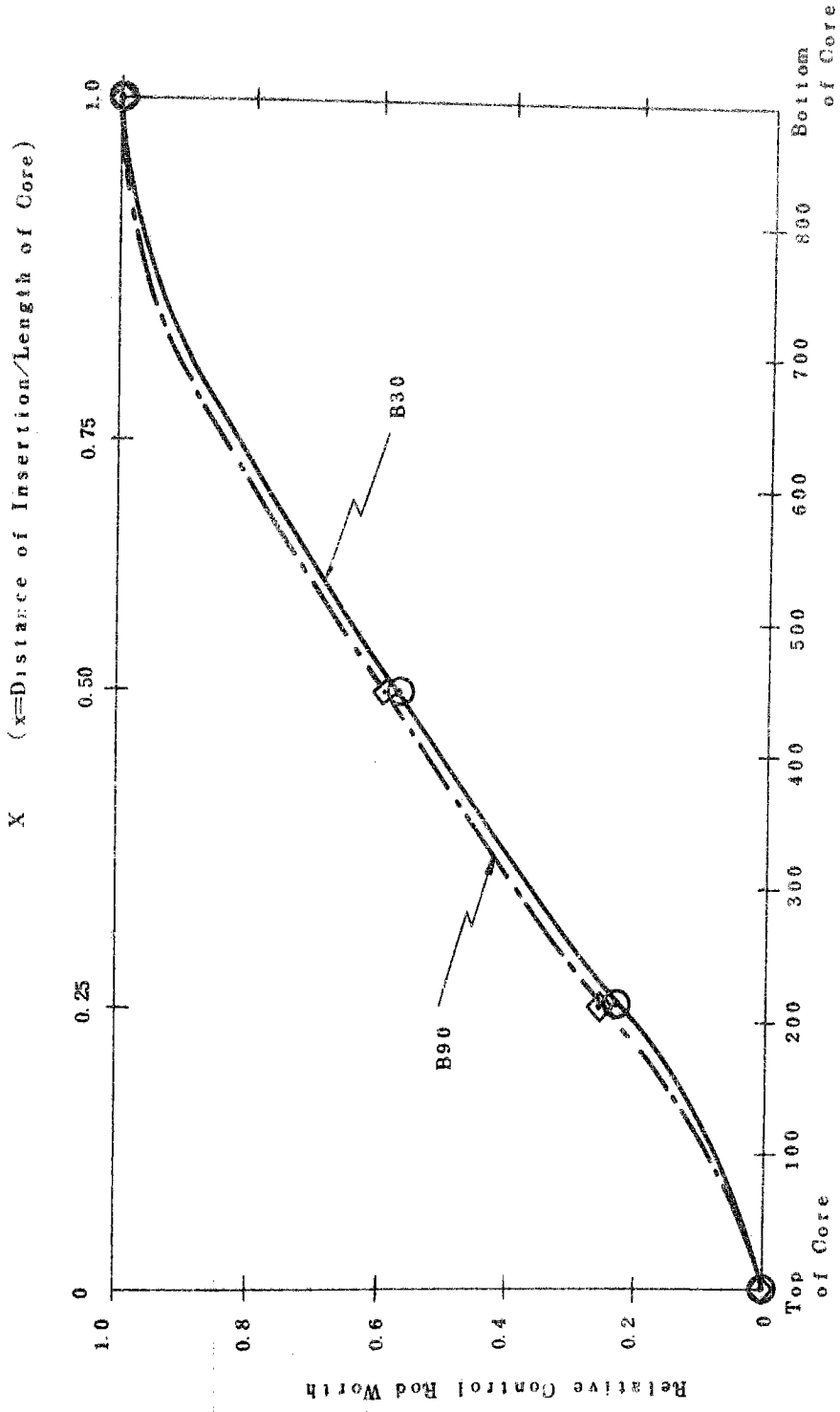


Fig. 4.1-8 Control Rod Worth for Partial Insertion

4.1.4 ビゼー基準体系の検討

1) 吸収材濃度と制御棒価値の関係

図 4.1-5 で炉心中心すなわち O 位置に種々の B-10 濃度の 9 要素制御棒を全挿入し、その制御棒価値を算出した。その結果を図 4.1-6 に示す。

2) 径方向制御棒価値分布

ビゼー基準体系において、B-10 濃度 30% および 80% の 9 要素制御棒 1 体を径方向に位置を変えて全挿入し、その制御棒価値の径方向分布を求めた。図 4.1-7 に示す。

3) 軸方向挿入位置と反応度

ビゼー基準 RZ 体系で炉心中心に、B-10 濃度がそれぞれ 30%、90% の制御棒を挿入深さを変えながら挿入し、そのストローク曲線を求めた。図 4.1-8 にその結果を示す。

この計算の際には、挿入深さに応じて制御棒吸収体部が軸方向上部ブランケットに存在することも考慮している。図 4.1-9 に、半挿入の際の体系を示す。

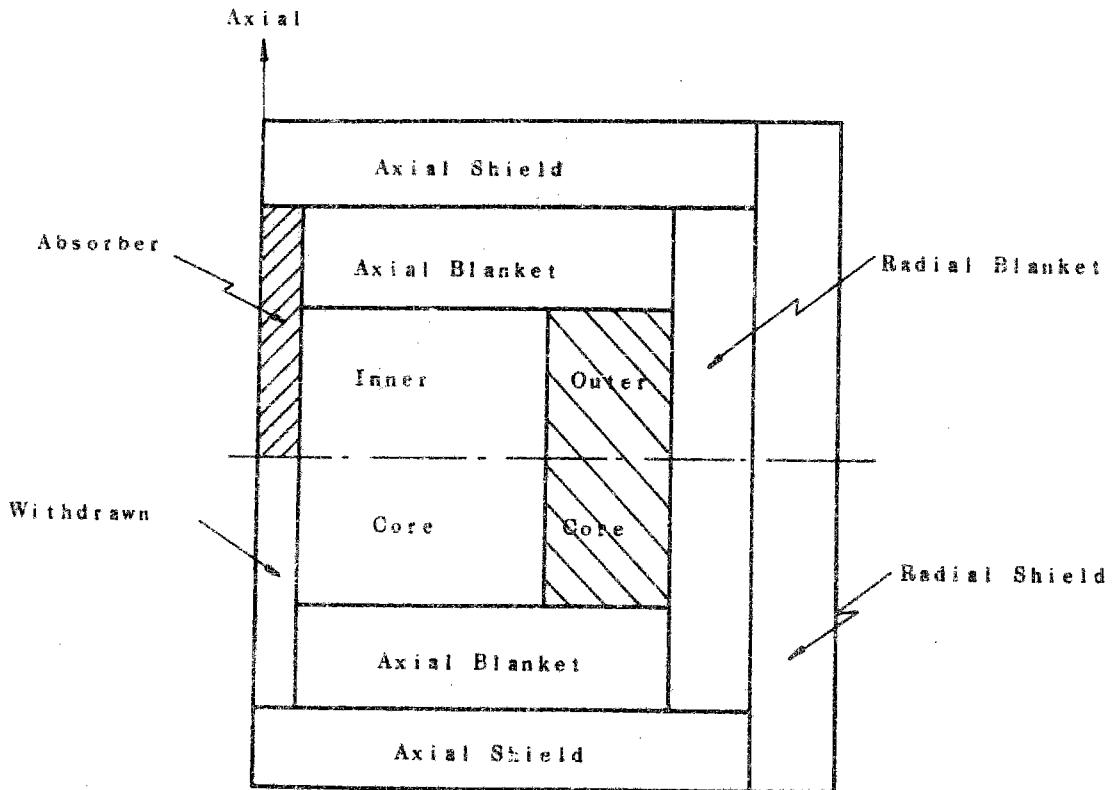


Fig.4.1-9 Half-Insertion of a Center Rod in BIZET Reference Core (RZ Model)

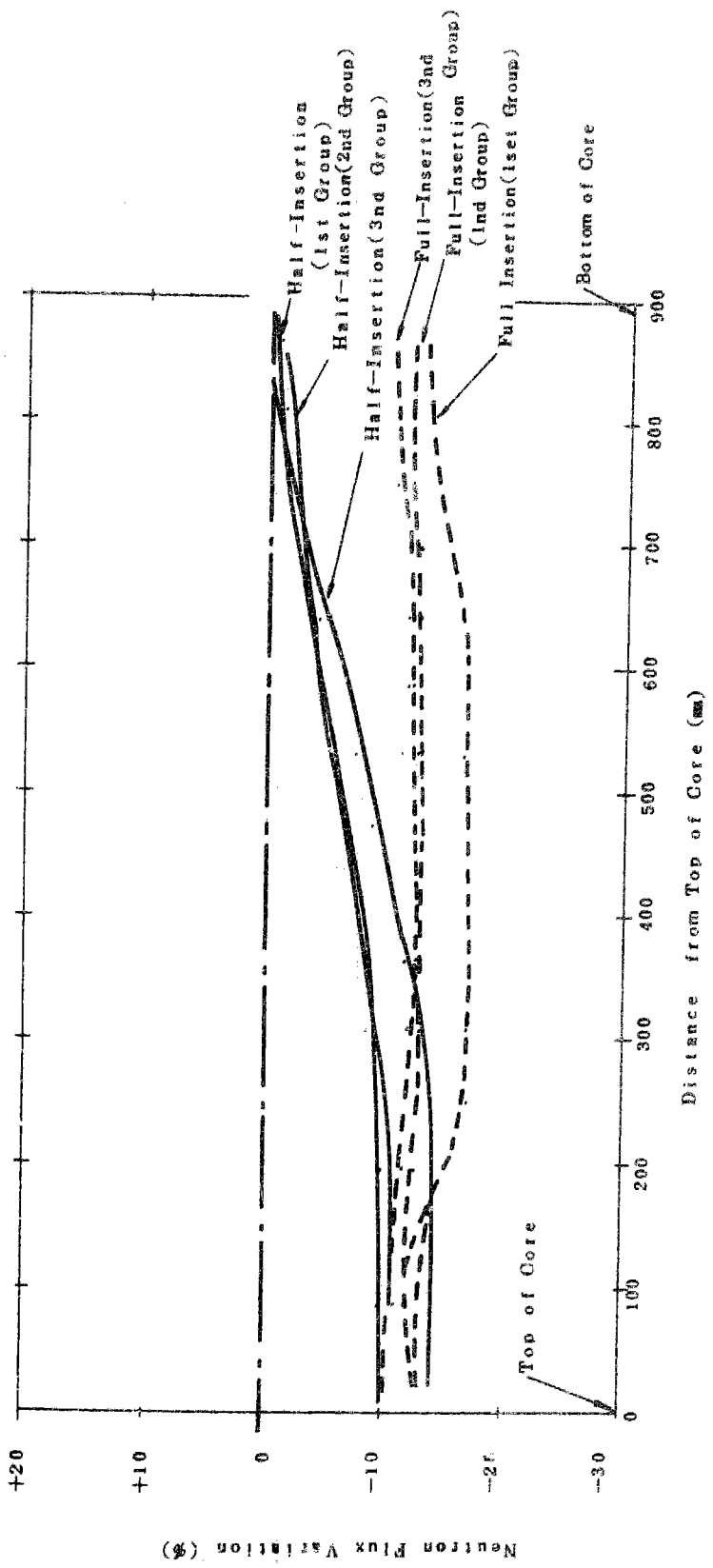


Fig. 4.1-10 Axial Flux Distortion due to Center Rod Partial Insertion

図 4.1 - 8 より, B-10 濃度が増加するにつれ, ストローク曲線が対称形からずれていくことがわかる。図 4.1 - 10 に制御棒引抜時に対する, 制御棒半挿入, 全挿入時の制御棒近傍の中性子束の変化割合を示す。いずれもその中性子束は減少し単位深さあたりの制御棒価値は, 挿入が深くなるにつれて小さくなり, 上下対称形からずれることになる。B-10 濃度が増加するにつれ, 中性子束の減少割合は増しさらに対称形からずれることになる。

4) 制御棒干渉効果

少数本の制御棒間の干渉効果ならびに多数本の制御棒間の干渉効果をビゼー基準体系について検討した。少数本の干渉効果は, 現実的な制御棒挿入パターンである多数本の干渉効果を予測するために必要な情報を提供すると思われるからである。

a. 少数本の制御棒間の干渉効果

ここでは炉心中心に対し, 対称な位置にある同一 B-10 濃度の 2 体の制御棒間の干渉効果について, B-10 濃度が 30%, 80% の場合を検討した。

ここでの干渉効果は, それぞれの位置に 1 体ずつ制御棒を挿入した場合の制御棒価値の和に対し, 2 体を同時に挿入した際の制御棒価値の変化として定義する。すなわち

$$\text{干渉効果 (\%)} = \left\{ \frac{\text{2 本同時挿入時の価値}}{\text{単独挿入時の価値の和}} - 1 \right\} \times 100$$

その結果を図 4.1 - 11 に示す。B-10 濃度が増加するにつれて干渉効果の変化割合が大きくなっている。

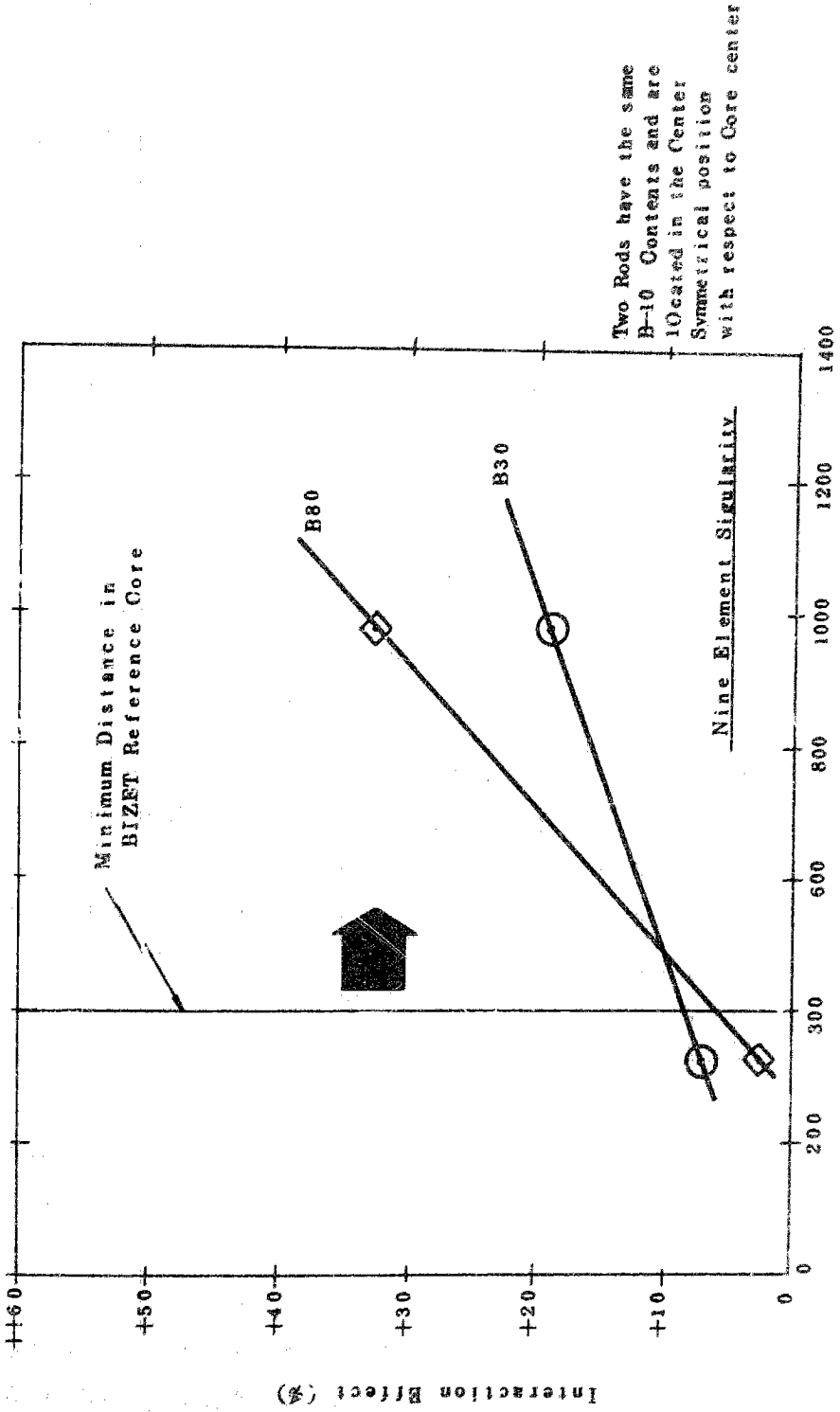


Fig. 4.1-11 Variation of Interaction Effect on Control Rod worth with Rod Distance in BIZET Reference Core

b. 多数本制御棒間の干渉効果

大型炉における制御棒運用法は、原型炉と同様に、同一層内にある制御棒を1つのグループとして同時に駆動すべきであることが、第2章の検討でも明らかになった。ピゼー基準体系において、9要素制御棒のうち、1層の制御棒6体 — 図4.1-5でのPとQの位置にある制御棒 — を後備系統制御棒と考え、炉心中心と2層の制御棒9体 — 図4.1-5でOとR～Tの位置にある制御棒 — を主系統制御棒と考え、それらの干渉効果を検討した。前者を第1グループ、後者を第2グループの制御棒と呼ぶことにする。

まずグループ間の干渉効果を検討した。この場合の干渉効果を以下のように定義する。

干渉効果(%)

$$= \left\{ \frac{\rho}{\sum_0 \rho_0} - 1 \right\} \times 100$$

ただし ρ : すべての制御棒を同時挿入した場合の制御棒値

ρ_0 : Gグループの制御棒だけを挿入した場合の制御棒値

\sum_0 : インデックスGについての和を示す。

この際、第1グループのB-10濃度をパラメータとして干渉効果を求めた。結果を図4.1-12に示す。この体系でみる限り、制御棒グループ間の干渉効果は集合体当りのB-10の装荷量に依存せず、2.5%である。

次にグループ内の干渉効果を検討した。この場合の干渉効果は、少数本と同様な定義を使用した。すなわち

干渉効果(%)

$$= \left\{ \frac{\rho^G}{\sum_i \rho_i^G} - 1 \right\} \times 100$$

ただし ρ^G : Gグループに属する制御棒を同時挿入した際の制御棒値

ρ_i^G : Gグループ内のiという制御棒を単独に挿入した際の制御棒値

\sum_i : インデックスiについての和を示す

この際にもB-10濃度をパラメータとしてその干渉効果を検討した。図4.1-13に結果を示す。グループ内の干渉効果はこの体系では、集合体当りのB-10装荷量に依存して増加するが、その傾向は小さく、集合体当り2Kgと6KgのB-10装荷量をもつ制御棒の干渉効果は約7%から8%への変化が見られるにすぎない。

さらにこの基準体系のスペクトルを1,000MWe級大型炉と一致させるために、体

積率で3%のカーボンを内側炉心および外側炉心に混入した体系についても検討したが、スペクトルの変化による干渉効果への影響は小さいことが判明した。

次に、炉心中心からの距離によるグループ内干渉効果への影響を、第1グループの制御棒について検討した。結果を図4.1-14に示す。これからわかるようにグループ内干渉効果は距離に関して直線的にかつ強く依存する(+2.7%/cm)ことがわかる。

5) 炉心スペクトル

ビゼー基準体系について、26群スペクトルを内側炉心、外側炉心に対して求めた。結果を1,000MWe級大型炉のスペクトルと対比させて、図4.1-15、図4.1-16に示す。ビゼー基準体系の方が、内側炉心、外側炉心とも僅かに硬くなっている。また12群、すなわち10Kev以下のエネルギーでの両者の相違が大きくなっている。

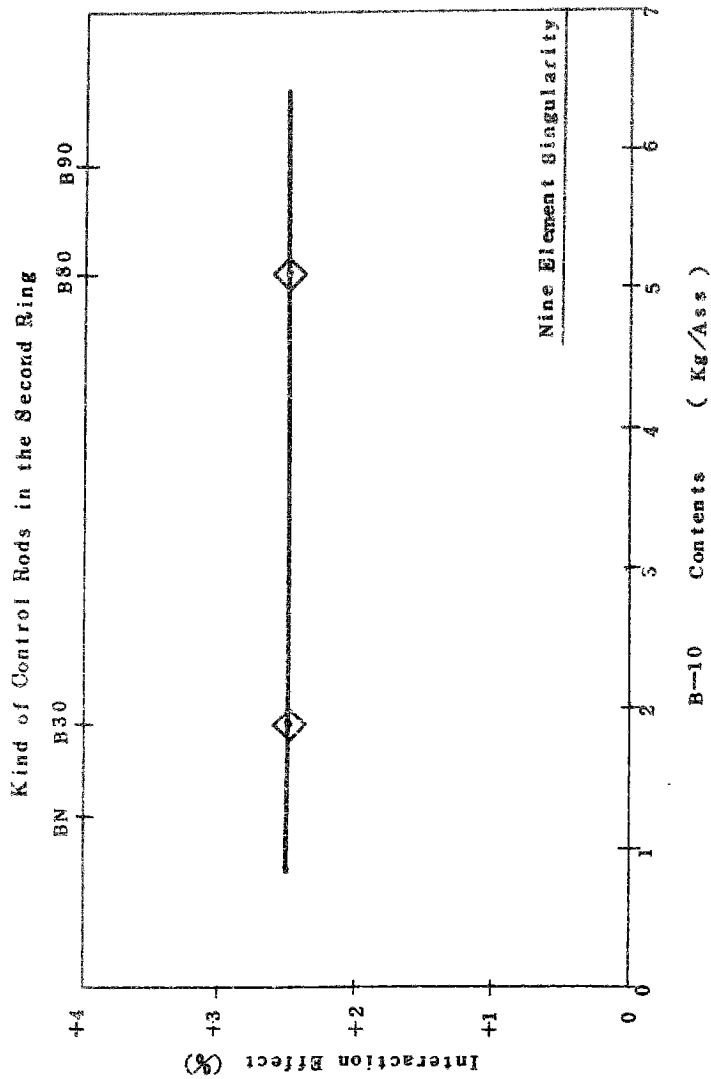


Fig. 4.1-12 Interaction Effect between the First Ring and the Second Ring as a Function of B-10 Contents in the Second control Rod Ring in BIZET Reference Core

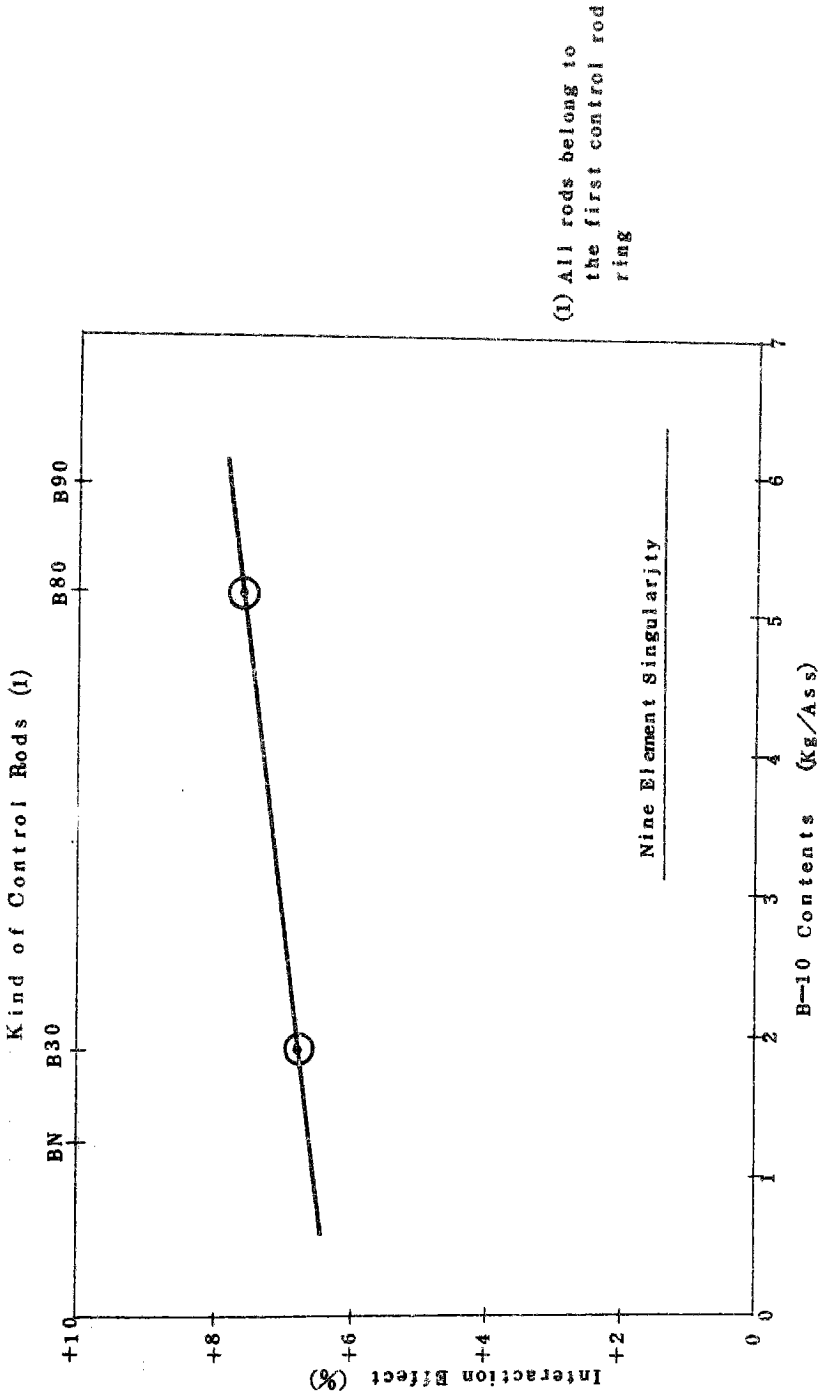


Fig. 4.1-13 Interaction Effect among the Control Rods in the First Ring as a Function of B-10 Contents in BIZET Reference Core

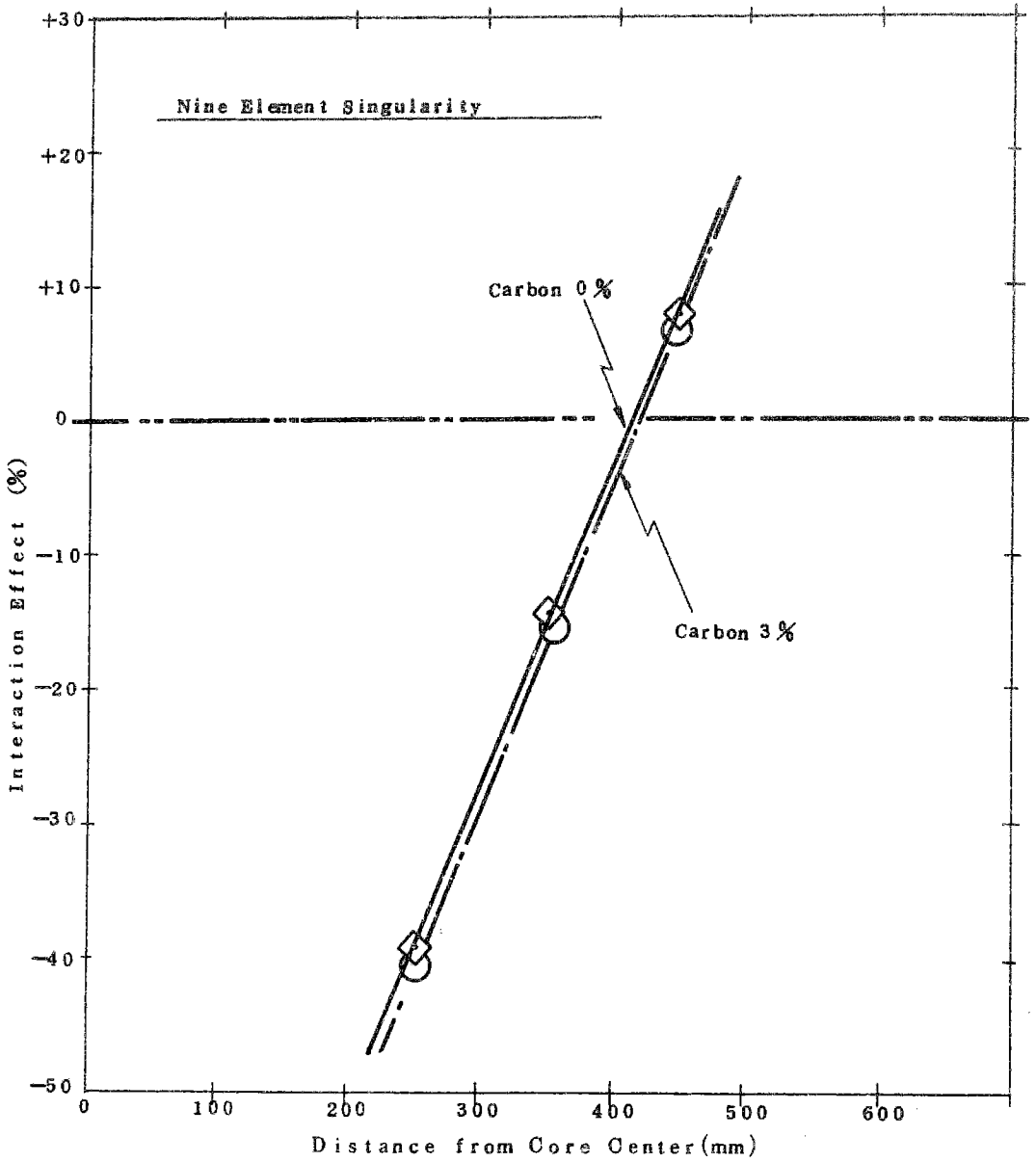


Fig. 4.1-14 Interaction Effect among the Control Rods in the First Ring as a Function of Distance from Core Center and Carbon Contents in BIZET Reference Core

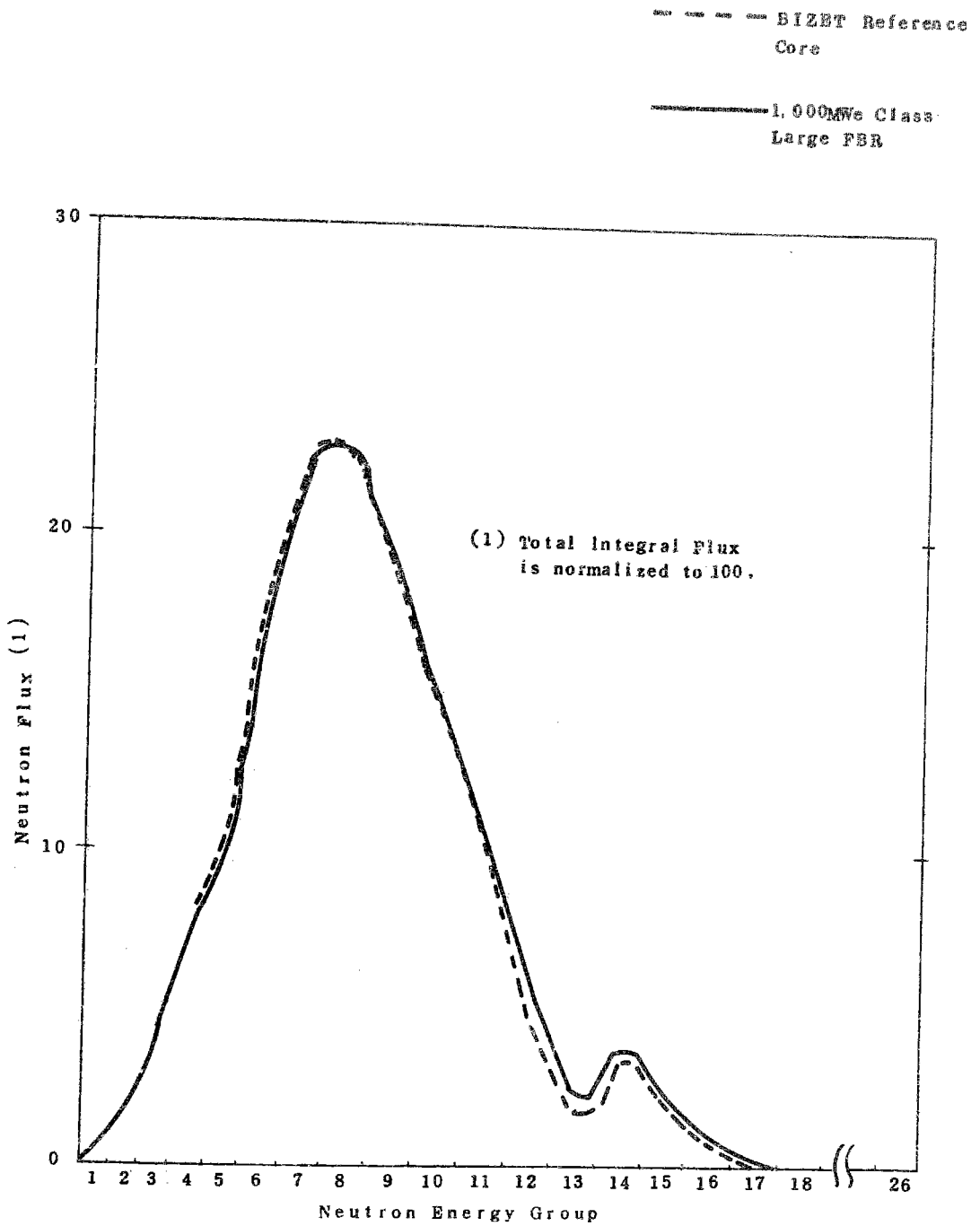


Fig. 4.1-15 Energy Spectra in the Inner Core

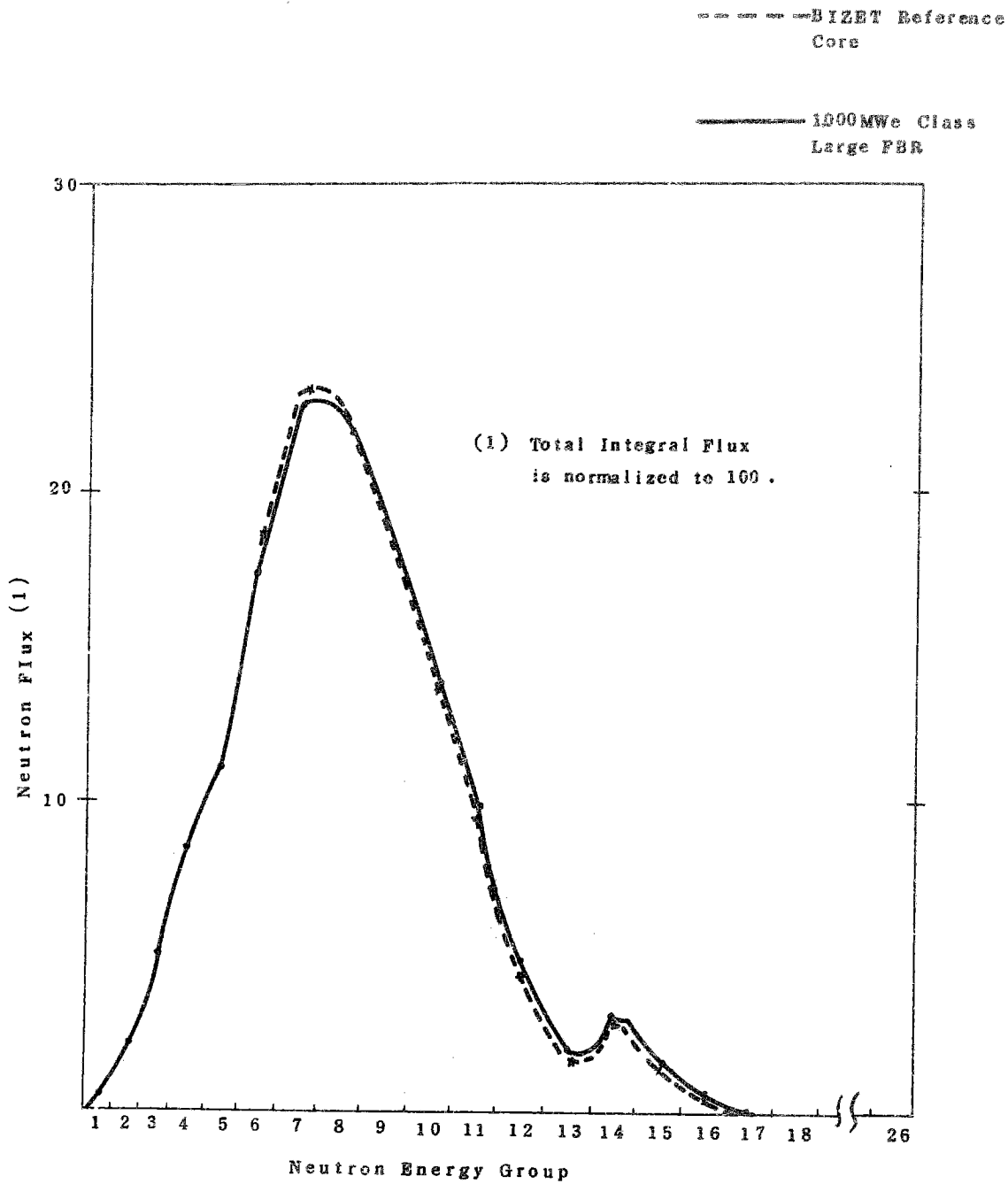


Fig. 4.1-16 Energy Spectra in the Outer Core

6) 中性子束分布および出力分布に対する影響

制御棒値の干渉効果と同様に単一制御棒，複数本制御棒の挿入による中性子束分布，出力分布に対する影響を検討した。

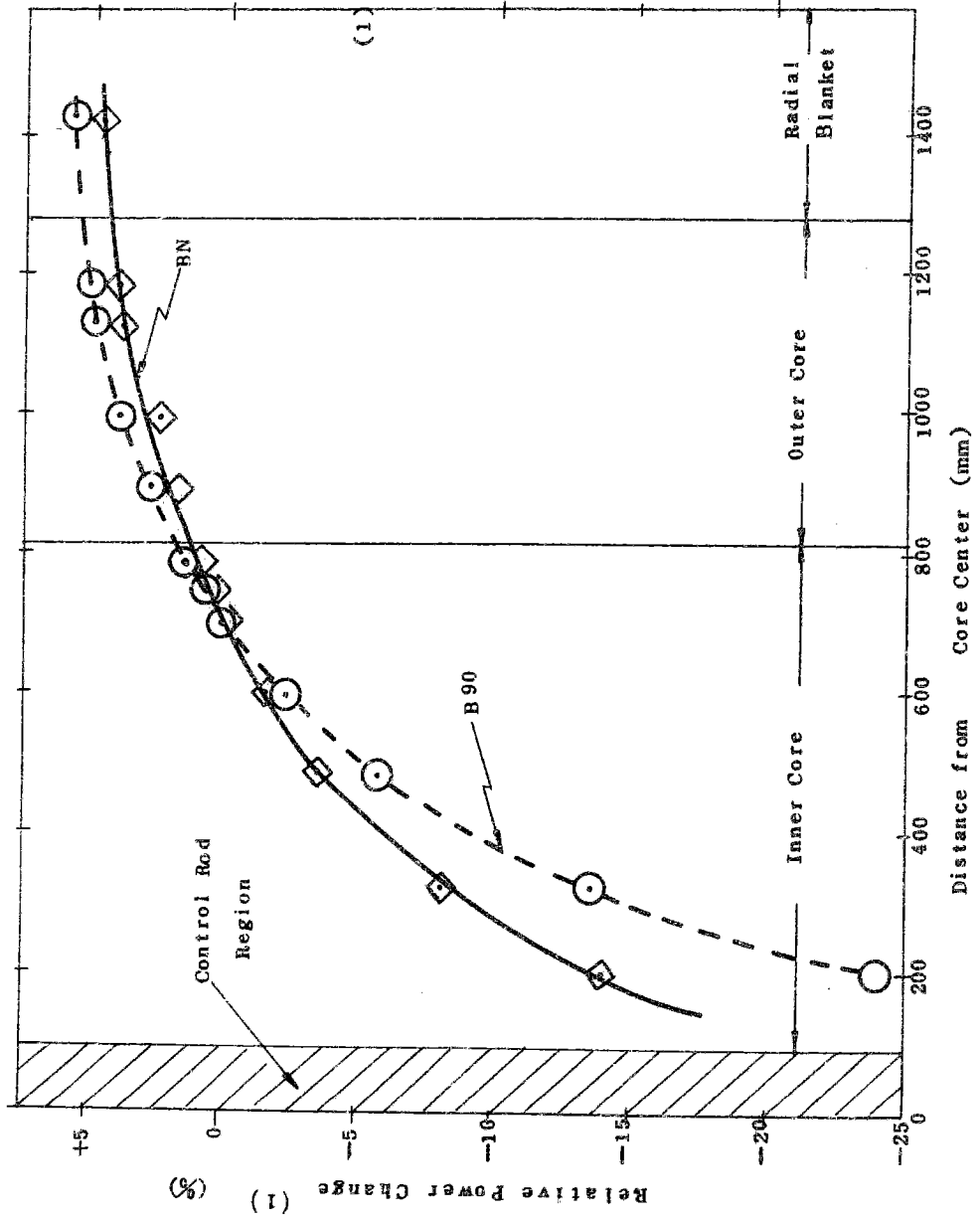
a. 単一制御棒挿入効果

炉心中心に9要素制御棒を全挿入した場合の出力分布への影響を検討した。B-10濃度により影響の強さが異なることが図4.1-17よりわかる。炉心中心の制御棒引抜時の出力分布を図4.1-18に示す。大型炉においては内側炉心，外側炉心の体積をほぼ等しくすることにより出力分布は平坦化されている。ビゼー基準体系は大型炉と比較して，炉心スペクトルが硬く，体系も小さいので出力分布の平坦化を外側炉心を大きくすることで実現している。

b. 複数本制御棒挿入による影響

複数本制御棒間の干渉効果の検討の際と同じ考えにより，制御棒をグループ別に挿入するものとして出力分布への影響を検討した。図4.1-5に示すビゼー基準体系において，9要素制御棒OからTをすべて引抜にした状態，PとQにB-10濃度が30%の制御棒を挿入した状態およびOとR，S，TにB-10濃度が30%の制御棒を挿入した状態での，OからSの径方向への中性子束分布ならびに出力分布を図4.1-19から図4.1-22に示す。

そこで大型炉における制御棒挿入による出力分布への影響と比較するために，PとQの位置にある6体のB-10濃度30%を挿入してその効果を検討した。図4.1-23に結果を示す。出力密度は炉心中心近傍で引抜時より，約30%小さくなる。1,000MWe級大型炉では50%程度であるがB-10重量の相違等を考慮すると，その効果は同程度であると考えられる。



(1) This is defined :

$$\frac{(\text{Inserted}) - (\text{Withdrawn})}{(\text{Withdrawn})} \times 100$$

(Inserted) is the power when a single center rod is fully inserted.

(Withdrawn) is the power when a center rod is fully withdrawn.

Reactor power is kept constant before and after the control rod is inserted.

Fig. 4.1-17 Influence on the Power Distribution when a Center Rod is fully inserted in BIZET Reference Core

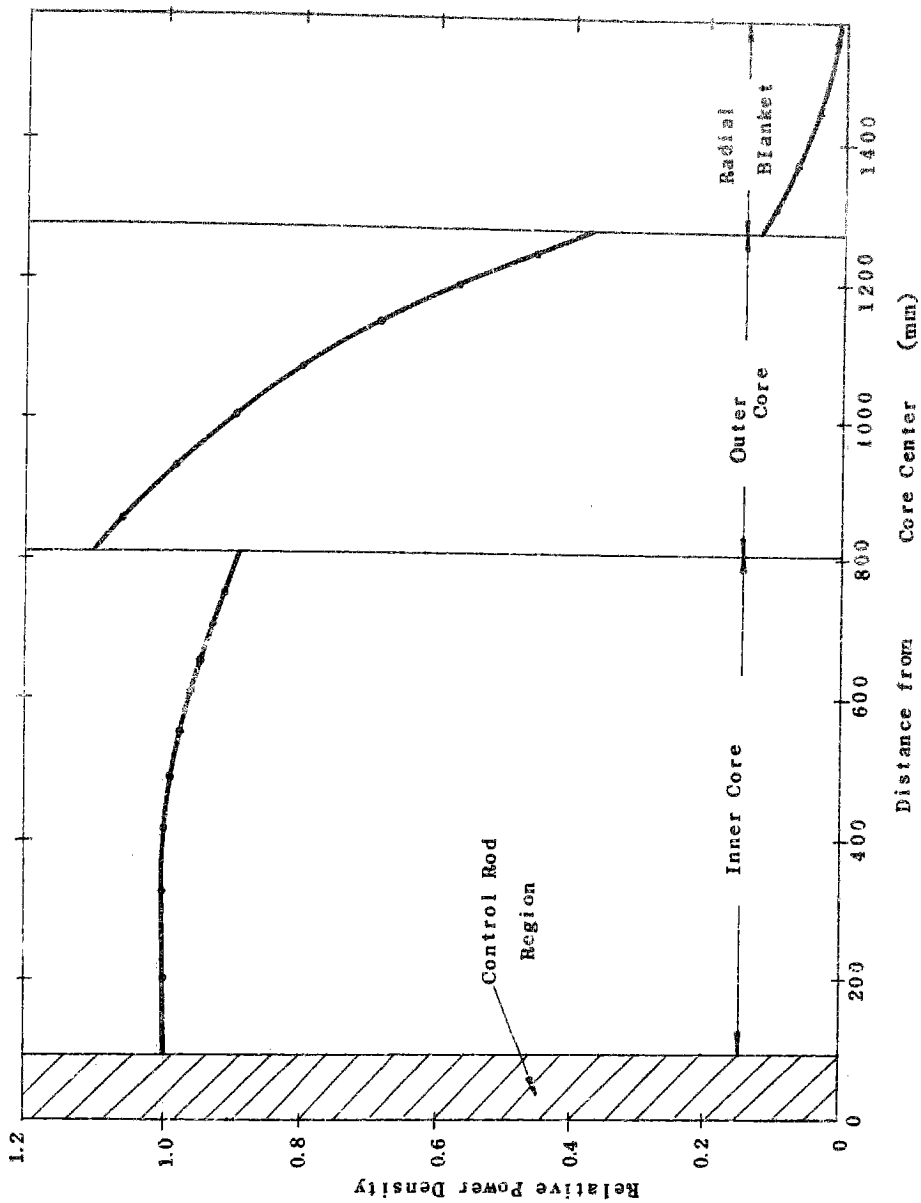


Fig. 4.1-18 Power Distribution when a Center Rod is fully withdrawn in BIZET Reference Core

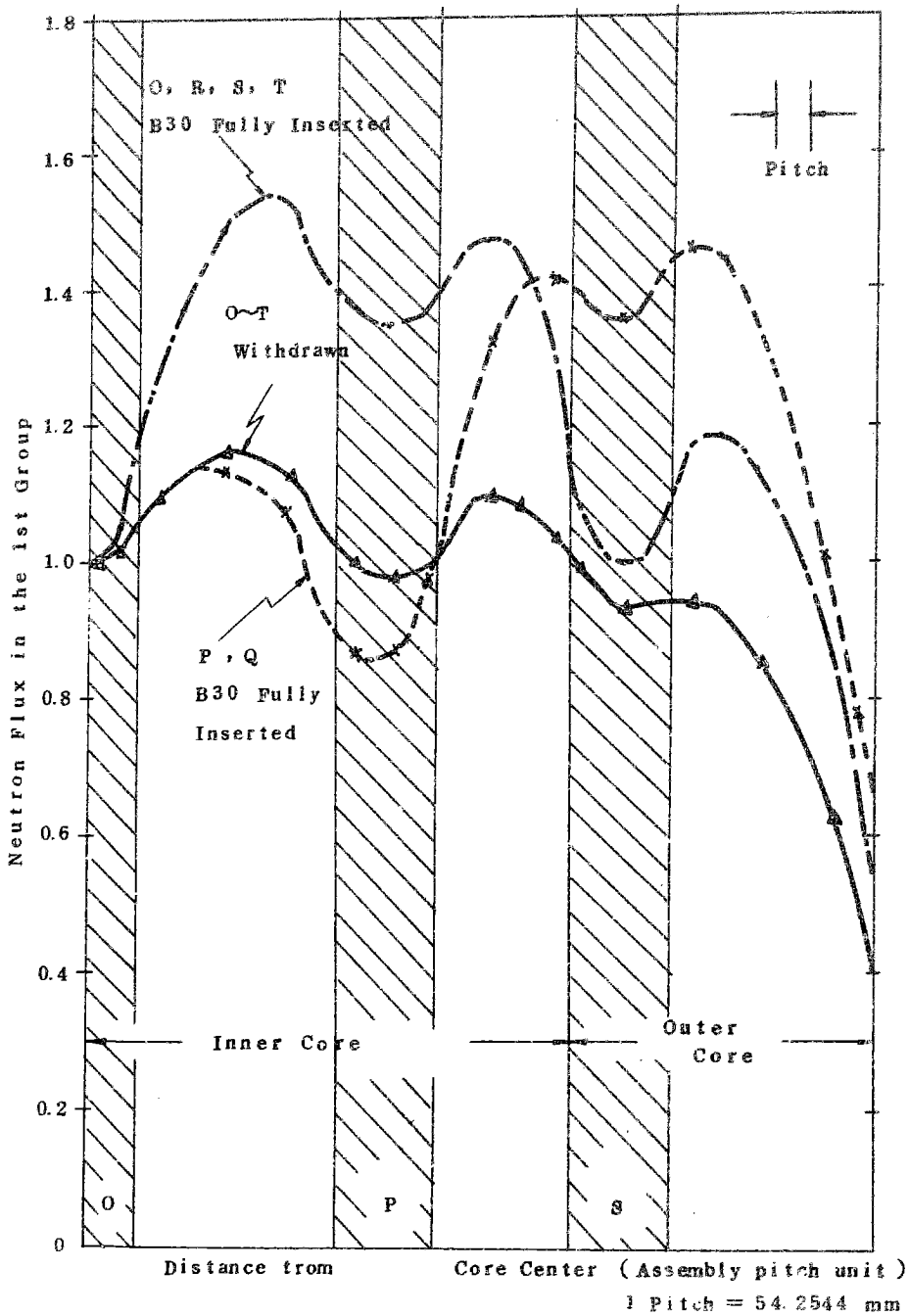


Fig. 4.1-19 Flux Distribution(1st Group)in BIZET Reference Core

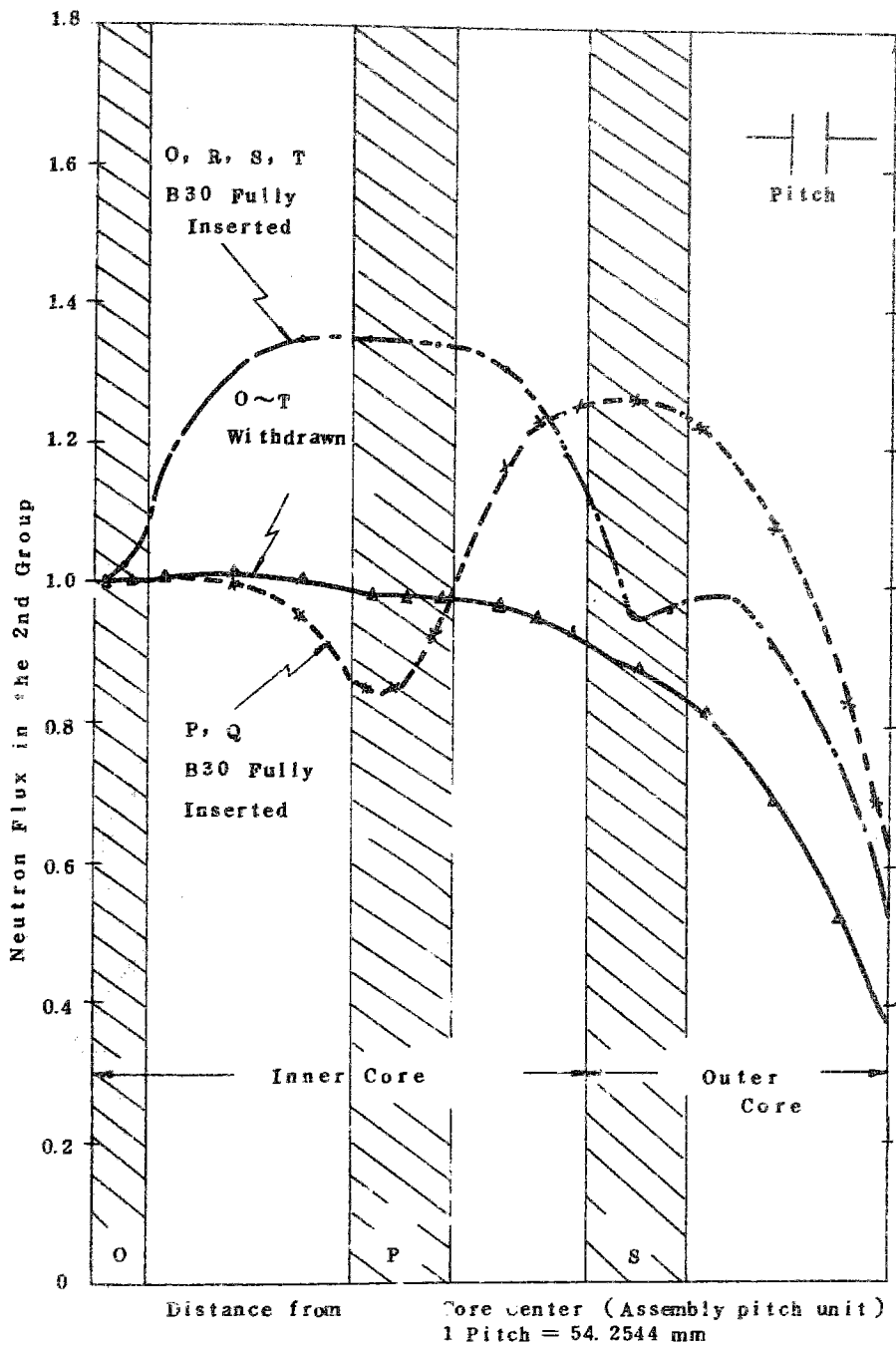


Fig. 4.1-20 Flux Distribution(2nd Group) in BIZET Reference Core

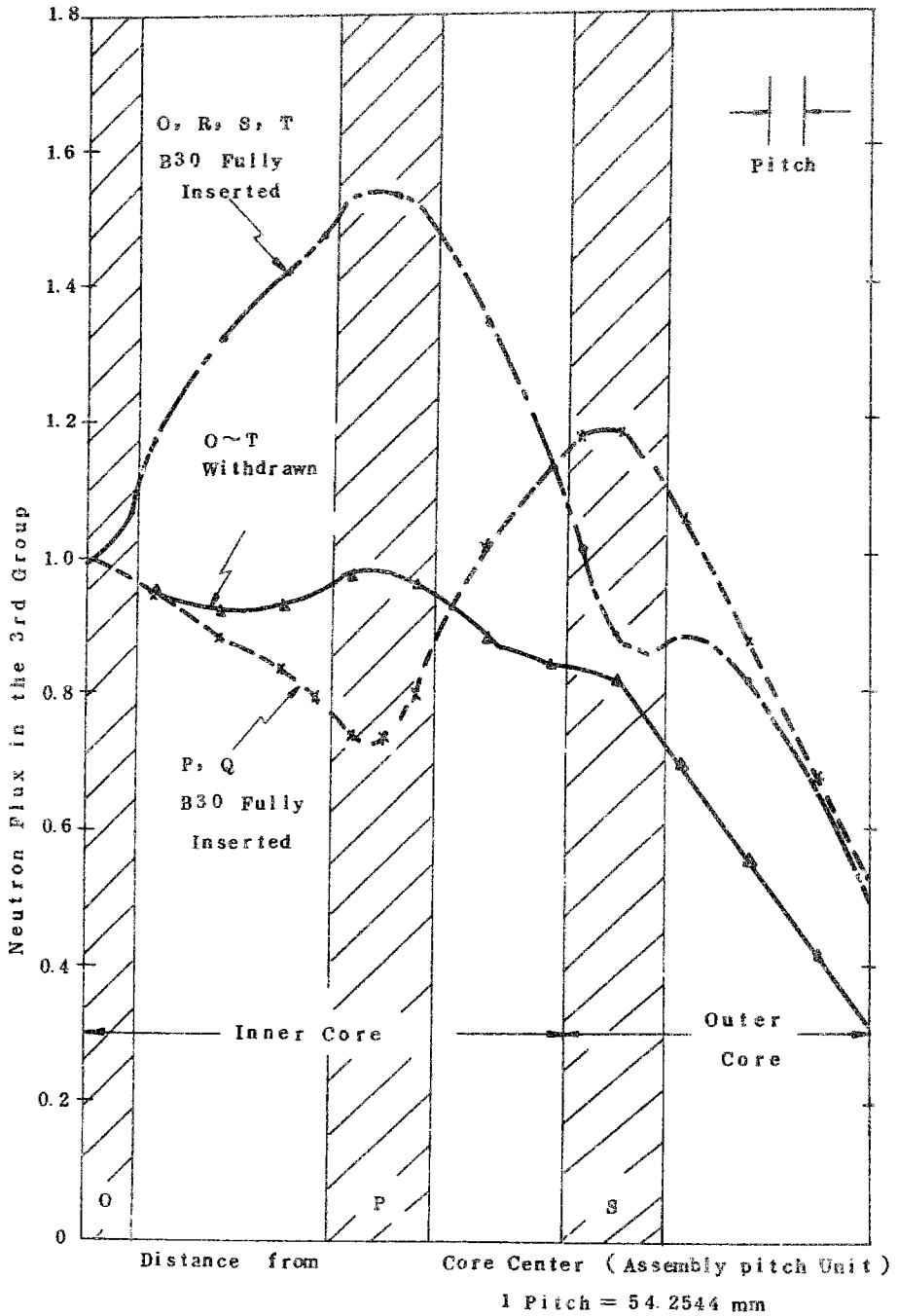


Fig. 4.1-21 Flux Distribution(3rd Group) in BIZET Reference Core

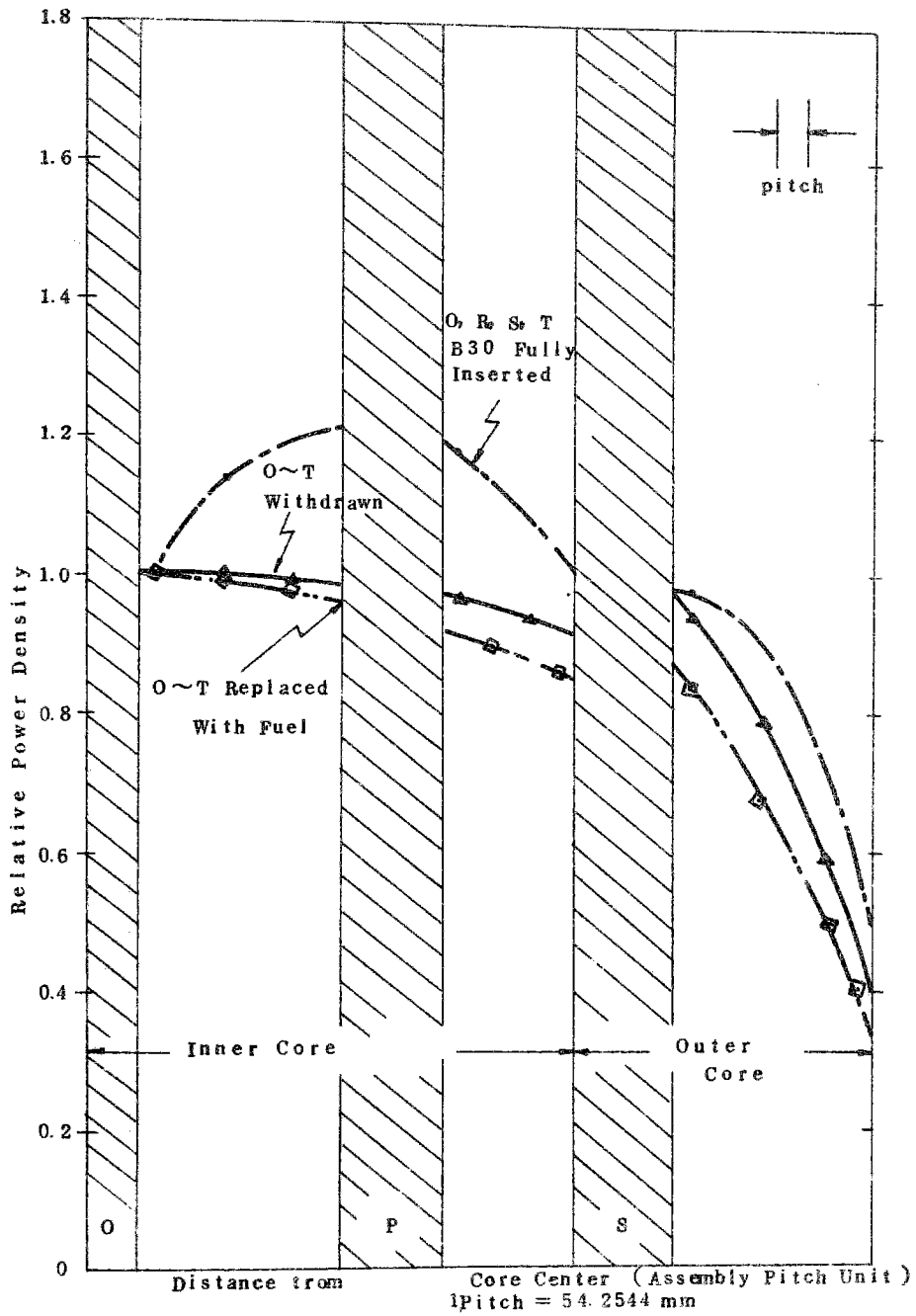


Fig.4.1-22 Power Distribution in BIZET Reference Core

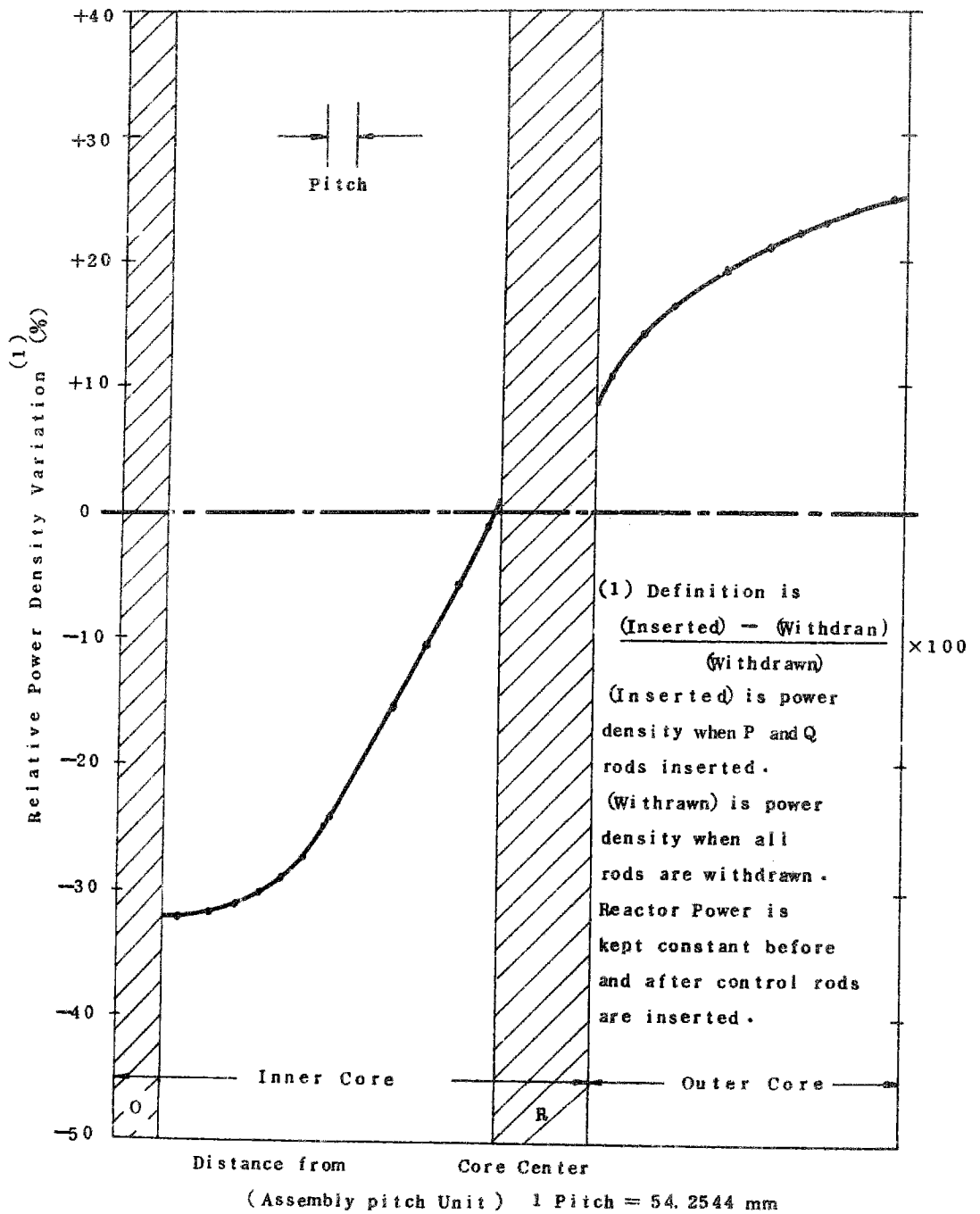


Fig.4.1-23 Power Density Variation with 6 Control Rods Insertion(Locations of P and Q)

4.1.5 ビゼー基準体系での制御棒実験項目の検討

4.1.4での結果にもとづき、ビゼー基準体系で行なう制御棒実験の項目について検討した。

1) 基本的項目の確認

第3章で述べたように、基本的実験項目すなわち、

- a 単一制御棒価値
- b 機能別価値
- c 基本制御棒の挿入による出力分布への効果
- d 部分挿入制御棒による出力分布への効果

については、原型炉級炉心で確認された補正法、計算精度が大型炉でもそのまま利用できるかどうかの確認をするため、それらの実験を行なう必要がある。

2) 大型炉に特に重要な問題

a 複数本制御棒間の干渉効果

4.1.4では少数本および多数本の制御棒間の干渉効果について検討した。

少数本干渉効果の検討は、多数本干渉効果を予測するための基本的情報を提供し多数本制御棒実験として実施する必要のあるパターンを選定に役立つ。4.1.4では炉心中心に対し対称な位置にある同一B-10濃度の2本の制御棒の干渉効果について検討し、その結果基準体系ではB-10濃度が80%までは正の干渉効果がありまたB-10濃度の増加により干渉効果の増加割合の大きいことがわかった。

多数本制御棒実験については、9要素制御棒を2グループに分類し、グループ内およびグループ間の干渉効果について検討した。

ビゼー基準体系では

- (i) グループ間干渉効果はB-10濃度に依存しない
 - (ii) グループ内干渉効果はB-10濃度にわずかに依存し、また炉中心からの距離に対して直線的に増加する
 - (iii) 干渉効果は炉心スペクトルにわずかに依存する
- ということがわかった。

また、1,000 MWe級の大型炉と干渉効果の比較を行なうため、第1グループ内の制御棒干渉効果(B-10濃度は30%)を検討した。

まずそのためには比較の考え方がいくつかあるが、ここでは以下の3つとする。

すなわち、

- (i) 絶対距離を保存する
- (ii) 大型炉と相似的な距離を保存する

(iii) 3層での単一制御棒価値(相対値)を保存する場合である。

(i) 絶対距離を保存する場合

大型炉では、炉心中心から3層制御棒の距離は43.5 cmである。一方基準体系では、3層制御棒に対応する第1グループ(PとQの位置にある制御棒グループ)の中心からの平均距離は、44.5 cmであり、大型炉より1 cm外側に制御棒が存在することになる。そこで制御棒位置と干渉効果の関係の補正を図4.1-14を用いて行なうと、干渉効果は+6%となり、大型炉と傾向そのものが異なっている。この場合の干渉効果はB-10濃度依存性がほとんどないので、B-10濃度を変えてもこの傾向は変わらない。

(ii) 相似的な距離を依存する場合

相似的な距離、すなわち大型炉における3層制御棒の炉中心からの距離と内側炉心の径との比 $43.5/113.7$ を基準体系でも満足する位置に第1グループの制御棒を挿入したと考える場合には、基準体系での干渉効果は-25%となる。また、この位置での単一制御棒の価値は大型炉の値と比較してわずかに小さくなる。

(iii) 単一制御棒価値を大型炉と一致させる場合

大型炉の3層制御棒の単一価値(相対値)と一致する位置に第1グループの制御棒を挿入したと考える場合には、基準体系の干渉効果は-39%であった。B-10濃度を増してもこの値の近傍である。

以上の結果をまとめて表4.1-9に示す。後述するA案体系の結果と、この結果とを比較すると、ビゼー基準体系は、1,000MWe級大型炉の制御棒に関する特性を必ずしも良く表現していないことがわかる。一番近いのは相似的な距離を保存した場合であるが、この時には、炉心中心にある制御棒および隣りあう制御棒の間隔が3ピッチ(16 cm)程度となる。基準体系が9要素制御棒を使用することを考えると、制御棒と制御棒の間に1燃料しか存在しないことになり、制御棒同志が接近しすぎていると思われる。

3) 出力平坦化の確認

ビゼー基準体系において出力平坦化の確認実験をするには、予備的な検討から類推すると、P、Q、S、Tの位置に12本を挿入する体系がよい。9要素制御棒15本をすべて挿入した体系では、外側炉心の出力密度がかなり増加して、出力平坦化上不適当であることがわかった。

4) 冷却材ボイド時の制御棒価値

本実験の目的は、冷却材ボイド時のスペクトル硬化による制御棒価値変化を確かめることであるから、冷却材ボイド反応度の大きい領域におけるナトリウム・ボイド時の制御棒価値を実験することが望ましい。1例としてあげるならば単一制御棒については炉心中心もしくは第1グループ内の1本について、多数本については第1グループの制御棒配置についての実験がある。

5) 計算値/実験値 (O/E) 比の空間依存性

大型炉では炉心の大型化とともに炉心スペクトルの空間依存性が大きくなり、O/E比に空間依存性を生じる恐れがある。

ビゼー基準体系は、1,000MWe級大型炉と比較して多少体系が小さいが、単一制御棒実験解析を通じて、計算値との間に空間依存の有意な補正值の違いがあるかを検討することが必要である。また、このような空間依存性が存在する場合には、大型炉の設計にいかん外挿するかが重要な問題となろう。

Table 4.1-9 Comparison of Interaction Effect and Single Rod Worth in a1000MWe Class FBR with those in BIZET Reference Core

| Core | Conditions | Interaction Effect(%) | Relative Single Rod Worth |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1,000 MWe(1) Class FBR | | - 16 | 1.0 |
| BIZET (2) Reference Core | Conservation of the absolute distance from core center to the control rods | + 6 | 0.88 |
| | Conservation of the relative distance from core center to the control rod | - 25 | 0.97 |
| | Adjustment of relative single rod worth | - 39 | 1.0 |

(1) B-10 Concentration is 50 %

(2) B-10 Concentration is 30 %

4.2 制御棒実験を対象とした好適体系

4.2.1 制御棒実験に必要な条件

臨界実験には目的と規模により種々のものが考えられ、実験に必要な条件もさまざまである。第2～3章において大型炉設計上の問題点と実験項目の抽出を行なったが、ここでは1000MWeの高速炉の炉心を設計する目的で行なわれる制御棒実験に限定し、必要な条件を検討してみる。

制御棒実験の主なねらいは制御棒効果を実験体系で測定し、設計計算値と比較することによって、設計計算値の妥当性の裏づけを得ることである。ここでいう制御棒効果とは、制御棒挿入に伴う実効増倍率の低下(制御棒価値)、出力分布の変化および制御棒の相互作用などを指す。そこで制御棒実験に必要な条件を検討することは制御棒効果に関する実験に必要な条件の検討ということもできる。

以下、制御棒価値、出力分布の変化および制御棒の相互作用等の制御棒効果の実験に必要な条件を記す。

1) 制御棒価値

設計計算において得られた制御棒価値を炉心模擬実験によってその妥当性を確認するためには、実験体系は制御棒挿入位置、吸収体有効長、制御棒構造断面積、B-10装荷量を設計体系にできるかぎり似せ、制御棒価値も両体系でほぼ等しくすることが望ましい。

制御棒価値が両体系でほぼ等しくするにはさらに炉心における中性子束分布(あるいは制御棒価値分布)と中性子スペクトルを似せておく必要がある。

制御棒の価値の測定は単独の制御棒挿入のみならず、次のような制御棒パターンにもとづく多数本の制御棒挿入の場合についても実施する必要がある。

i) 各系統全挿入

主系統および後備系統の制御棒を全数挿入した場合。

ii) 1ロッドスタック条件

主系統および後備系統における価値が最大の制御棒が1本引ぬかれている場合。

iii) 主系統制御棒の種々の挿入パターン

iv) 主系統と後備系統の同時挿入

以上のような多数本制御棒挿入実験に必要な余剰反応度を確保する燃料(Spiked Fuel または付加燃料)の準備も必要である。

2) 出力分布に与える効果

大型炉の炉心では制御棒の本数が多く、中性子スペクトルが軟らかいので原型炉級の高速炉に比較して制御棒の挿入が出力分布に与える効果は複雑なものとなろう。

主系統の制御棒を種々のパターンで挿入した場合、および実際の原子炉の運転時（BOC, MOC, EOC）を模擬した各種制御棒中途挿入パターンにおける出力分布を測定し、解析値と比較検討する必要がある。

3) 制御棒間の相互作用（干渉効果）

制御棒を多数本挿入すると、制御棒間の相互作用により、制御棒価値と出力分布の変化は単独の場合の和より大きくなる時と小さくなる時がある。この干渉作用は中性子スペクトルの軟かい大型炉においてより顕著に現われると予想される。

干渉作用が設計計算において十分正確に評価されているかどうか確認するために解析値と測定値の比較検討を十分に行なう必要がある。

また、制御棒効果は初装荷炉心と平衡炉心では多少異なるので、それぞれの炉心を模擬した炉心についても制御棒実験を実施する必要がある。

4.2.2 目的に合致した種々の方法

大型炉心の制御棒模擬実験の方法は装荷することのできるプルトニウム燃料の量に依存し、図 4.2 - 1 に示すようなフローにもとづいて検討する。

燃料設備が十分にあればフルモックアップ実験を行えば良く、問題はない。ここでは、今回の R & D のように 2 ton 程度のプルトニウムしかない時にいかに大型炉の炉心を模擬した制御棒実験を実施するかについて主として考えることにする。

フルモックアップ実験に不十分な量の燃料を用いて行なう実験の炉心体系としては、多数本制御棒実験を行なうかどうかによって 2 種のものと考えられる。

1) 少数本制御棒実験

内側炉心の中央部に挿入する制御棒の実験には、内側炉心の形状、制御棒配置を模擬した炉心体系で行なうことができる。この場合、外側炉心燃料の厚さが不足し、中性子束が炉心周辺部で大きく落ちこみ、大型炉の中性子束分布を完全には模擬できなくなる。実験体系の内側炉心の中性子束分布の形状を大型炉に似せるためには外側炉心の外周に反射材を配置し、中性子束分布の平坦化をはかる方法がある。

また、炉心のスペクトルの調整には適宜減速材を使用する。

2) 多数本制御棒実験

多数本制御棒実験を行なうには全炉心の形状と制御棒位置を模擬する必要がある。この場合、フルモックアップ以外の方法には炉心形状と集合体の形状を中性子のふるまいからみて相似的に縮小し、制御棒の挿入位置の相対位置を保持する方法がある。

この実験体系においても、炉心形状の絶対値が小さくなっているため、中性子束分布形状が大型炉における形状と相似形になっていないことが予想される。この時は、外側炉心燃料の富化度を高めるかまたは外側炉心の外周に反射体を配置することによ

って補正することができる。

また、炉心中性子スペクトルの調整には減速材の付加を行なう。

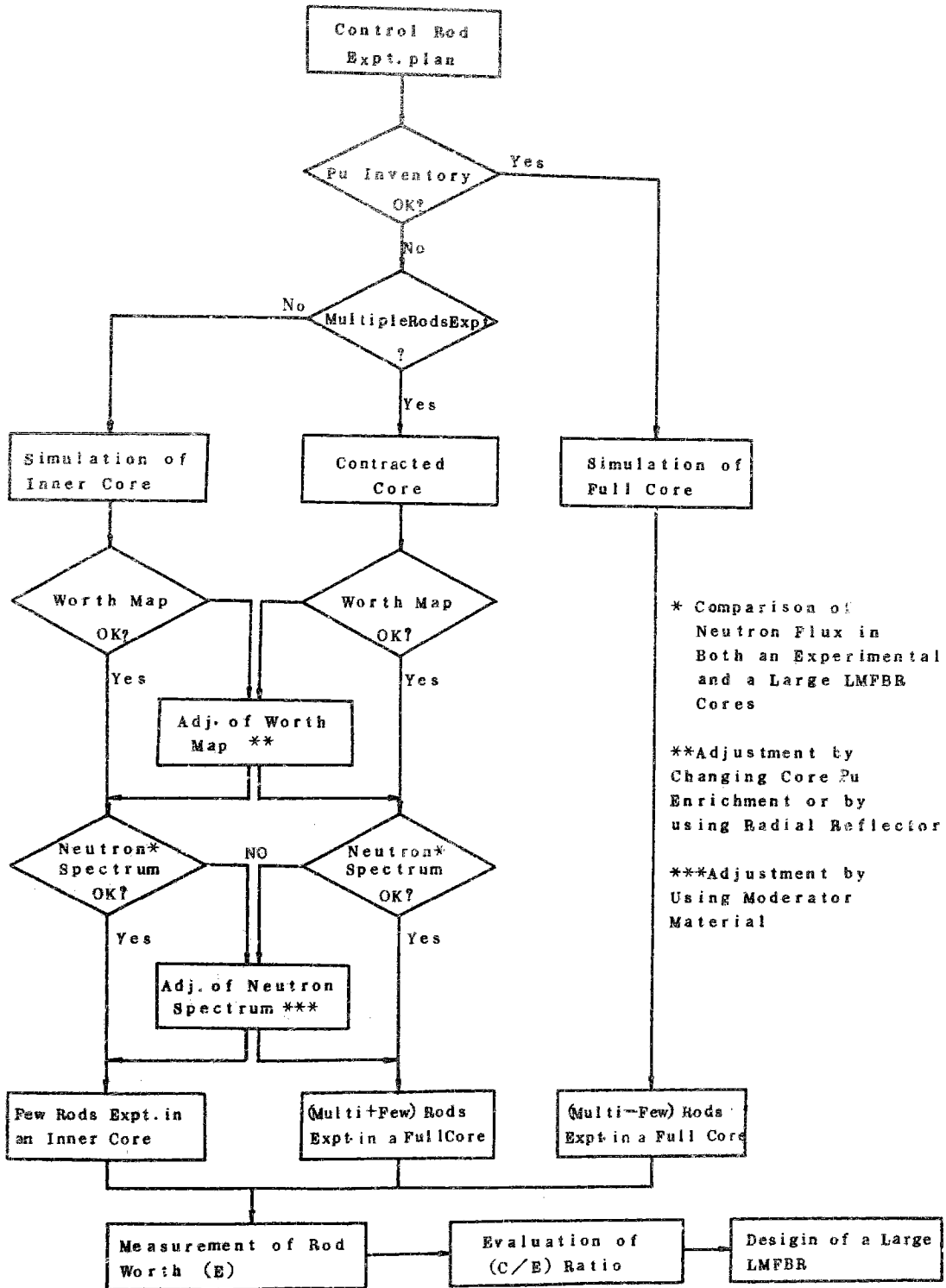


Fig 4.2 - 1 Control Rod Experiment Planning Flow.

4.2.3 ビゼー体系の制限で可能な方法

前節において、制御棒実験の目的に合致した種々の方法を考えたが、ここではビゼー体系の制限のもとで可能な方法を考え、制御棒実験を対象とした好適体系案—A案およびB案—の検討を行なった。

1) ビゼー体系の制限条件

今回の検討では、表4.2-1に示す制限条件を考えているが、絶対条件としては、プルトニウム (fissile) 量だけとする。

Table 4.2-1 Restrictions in BIZET Program

| No. | Items | Restrictions | Class |
|-----|----------------------------------------------------|--------------|-------|
| 1 | Pu Fissile Inventory | 1.8 ton | A (1) |
| 2 | Number of Control Rods with various Boron Contents | Shortage | B (2) |
| 3 | Moderator and Reflectors | Not used | B (2) |

(1) High priority restriction to BIZET Program.

(2) Low priority restriction to BIZET Program.

2) 好適体系を考える際の着眼点

制御棒実験を対象とした好適体系を考えるに当たり、1,000MWe級大型炉とビゼー基準体系との体系上の相違を検討することが大きな手がかりとなる。その相違点をまとめると、表4.2-2となる。

1,000MWe級大型炉における主要な特徴 — 制御棒干渉効果が大きいことおよび出力分布変動が大きいこと — を十分に表現できる体系が、制御棒実験を対象とした好適体系である。また、表4.2-2での相違点をすべてなくすことは、フルモックアップ体系を意味し、プルトニウム (fissile) 量という制限条件を満たさない。そこで、表4.2-2の相違点のいくつかをなくす体系を考え2つの好適体系の原案 — A案, B案 — に行きついた。

Table 4.2-2 Major Differences between 1, 000 MWe Class FBR and BIZET Reference Core.

| 系 | Items | 1,000MWe Class FBR | BIZET Reference Core |
|---|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1 | Inner Core Volume Ratio (1) | 1. 09 | 0. 66 |
| 2 | Control Rod (2) Volume Fraction | 0. 07 | 0. 12 |
| 3 | Energy Spectra | Energy Spectra in the BIZET inner and outer cores are harder than those in a Large FBR. | |
| 4 | Arrangement of Control Rods | The arrangement of Four Element Singularity in the outer edge of outer core in BIZET Reference Core is not suitable for Control Rod Experiments. | |

(1) Ratio of inner core volume to outer core volume excluding control rods.

(2) Fraction of control rod volume to core volume.

3) 好適体系案 — A案, B案 — の概要

A案, B案体系の特徴, 問題点およびその解決策を表4.2-3に示す。A案体系は内側炉心, 外側炉心, ブランケット, 遮蔽体領域および各集合体形状を大型炉との相似を保ちつつ燃料の許す限り, 大きな炉心としたものである。B案体系は制御棒配置, 位置, 相互間隔を含め, 内側炉心の形状を許す限り大きな炉心としたものである。

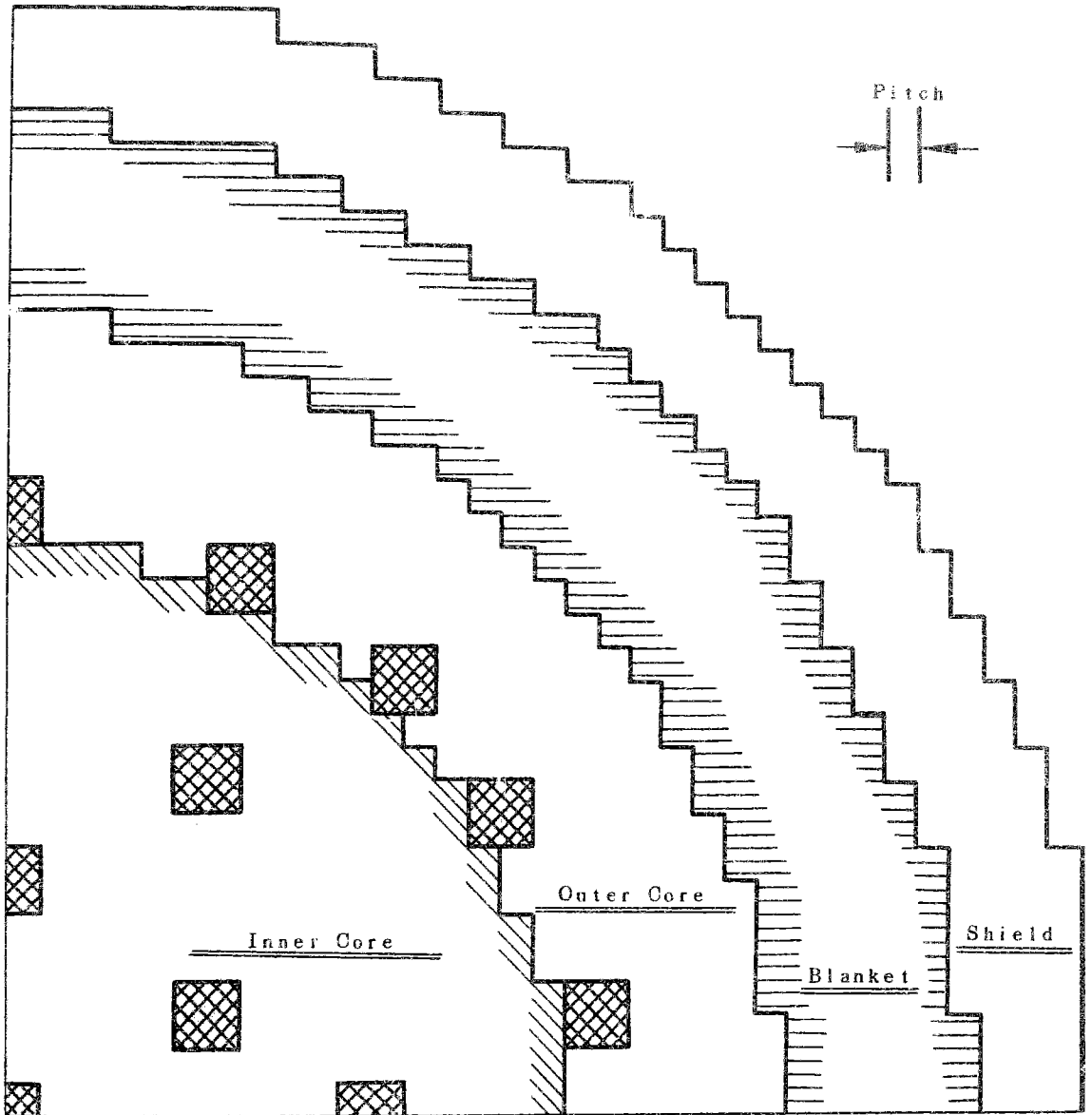
図4.2-2から図4.2-5に, A案, B案体系の平面マップ(1/4炉心)およびRZモデルのジオメトリーを示す。

内側炉心の大きさ, 内側炉心構成要素比, プルトニウム (fissile) 量等の観点からのビゼー基準体系との相違点を表4.2-4に示す。

Table 4.2 - 3 Features and Problems of Proposed A- and B-Core

| Items | | A - Core | | B - Core | |
|------------------------------|-----------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Simu- (1) larity | Inner Core Volume Ratio | 1 | simulated | 1 | not simulated |
| | Control Rod Volume Ratio | 2 | simulated | 2 | simulated |
| | Energy Spectra | 3 | not simulated | 3 | not simulated |
| | Arrangement of Control Rods | 4 | simulated | 4 | simulated |
| Features | | 1 | Inner core volume is greater than Reference Core volume | 1 | Inner core volume is two times as large as Reference Core volume. |
| | | 2 | The ratios of various components are the same as those in 1,000 MWe Class FBR. | 2 | The inner core is closely simulated. |
| Problems of Proposed Core | | 1 | Higher enrichment is outer core* must be necessary. This requires additional ~200kg Pu fissile inventory. * 22.3 % | 1 | Outer core volume is fairly smaller than inner core volume. This gives rise to the problem of steeper flux slope in outer core region. |
| Solutions for above problems | | 1 | Use of high enrichment uranium in the SNEAK core. | 1 | Use of high enrichment uranium in the SNEAK core. |
| | | | | 2 | Radial Blanket is replaced with Nickel Reflector |

(1) Similarity with 1,000 MWe Class FBR



Average Pitch = 54.2544 mm


 Four Element Singularity

Fig. 4.2 - 2 BIZET A-Core (1/4 core)

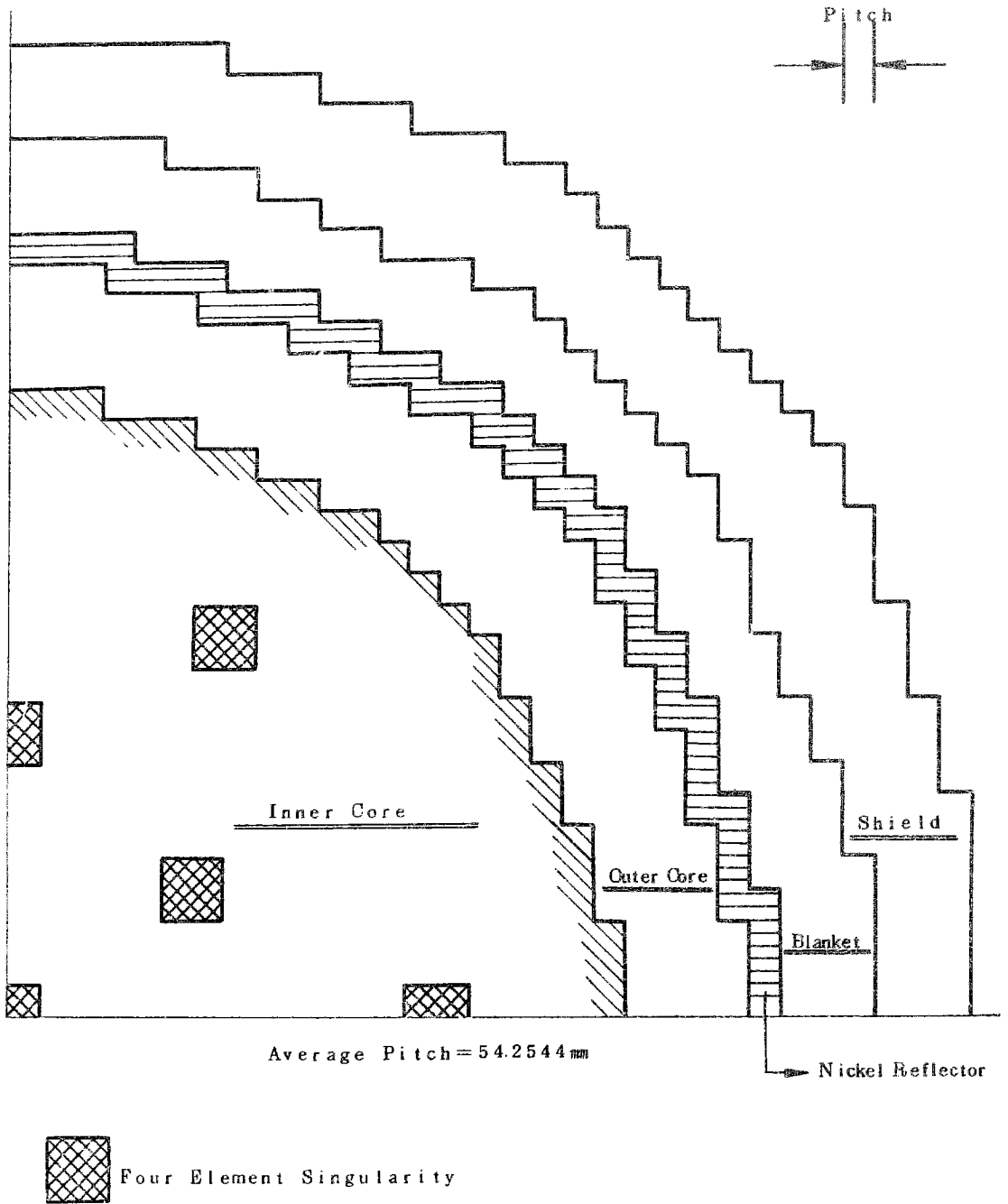


Fig. 4.2 - 3 BIZET B-Core (1/4 core)

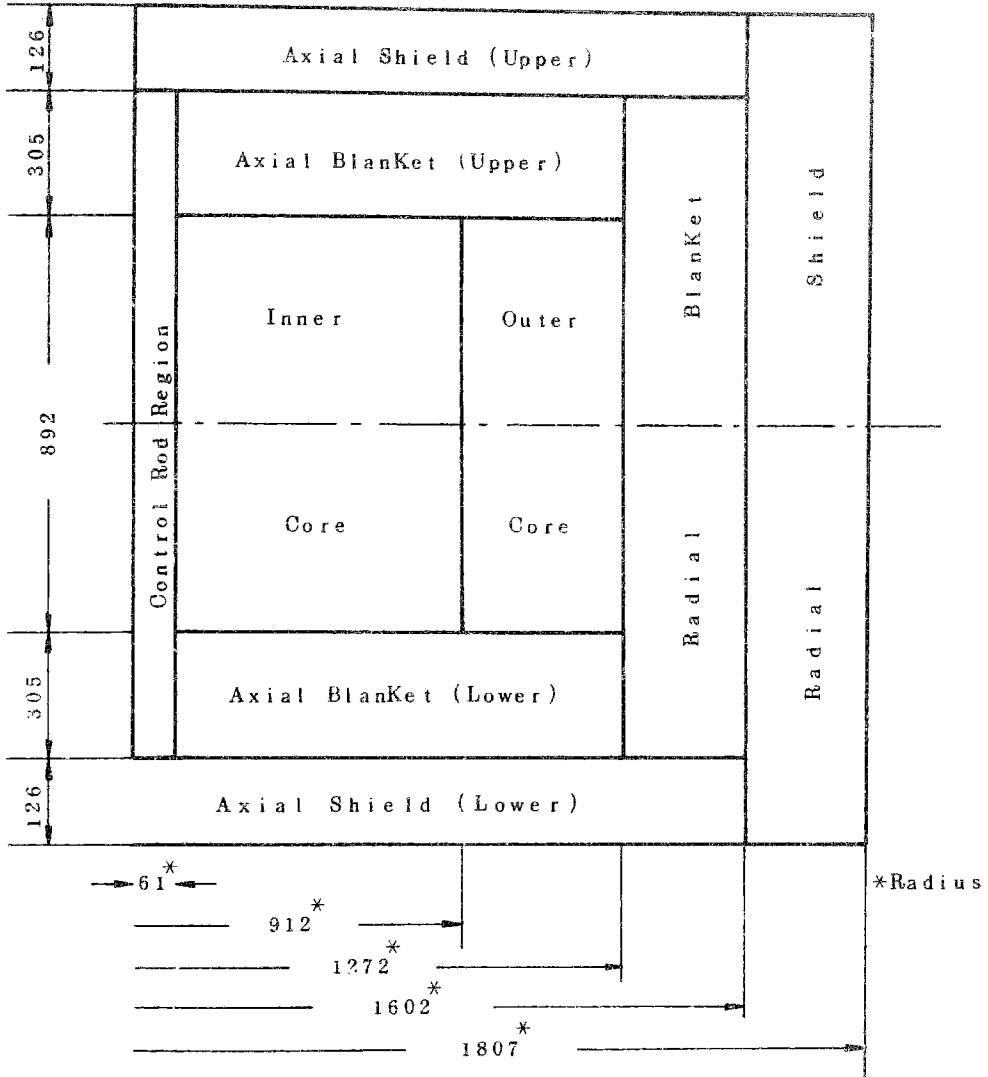


Fig. 4.2-4 RZ Configuration of A-Core
(Dimensions in mm)

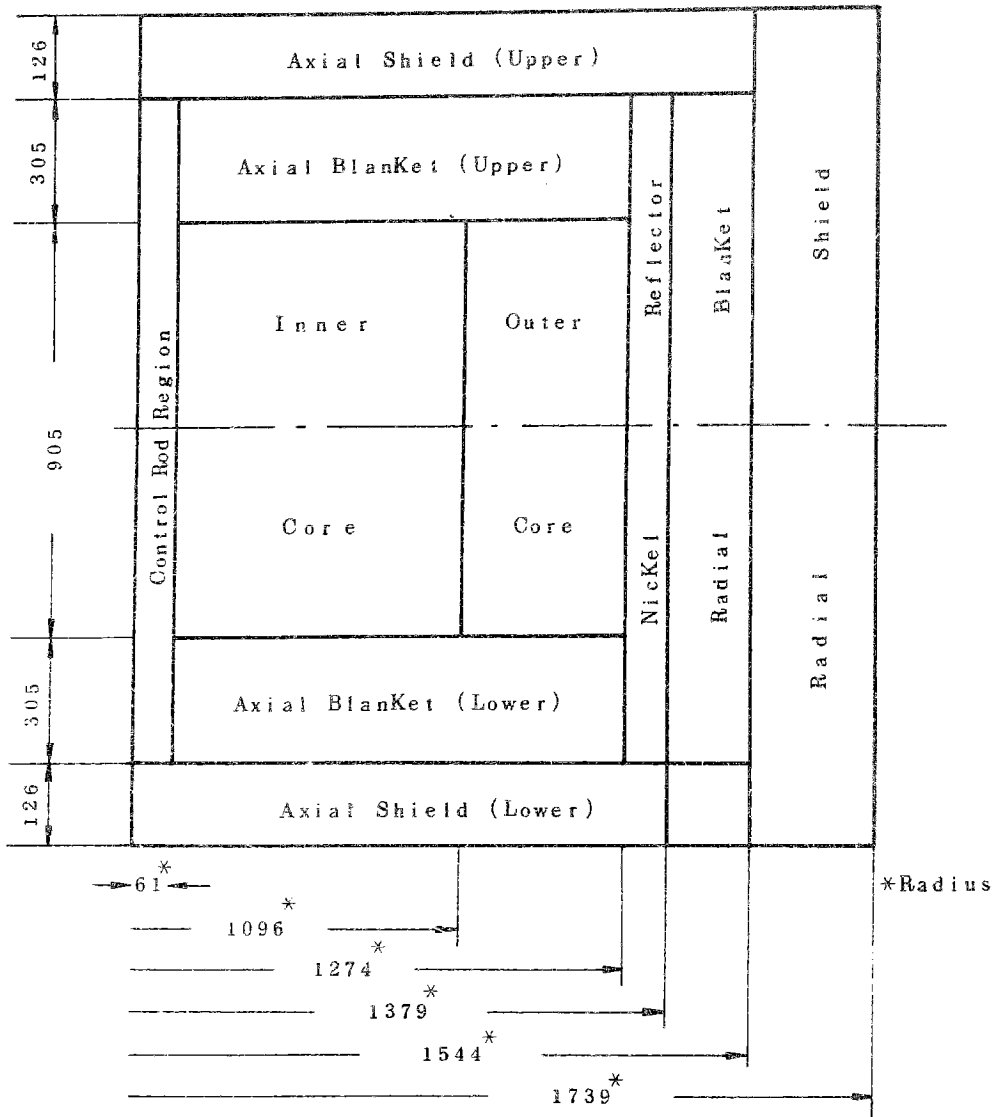


Fig. 4.2 - 5 RZ Configuration of B-Core
(Dimensions in mm)

Table 4.2-4 Comparison of Reference Core with
A - and B - Core

| No | Items | Reference Core | A - Core | B - Core |
|----|-------------------------------------------------|----------------|--------------|----------|
| 1 | Relative (1) Inner Core Volume | 1.0 | 1.27 | 1.95 |
| 2 | Control Rod Volume Fraction in Inner Core | 0.12 | 0.07 | 0.04 |
| 3 | Fissile Inventory | 1.7 ton | 1.9 ton | 1.9 ton |
| 4 | Use of Nickel Reflector | not required | not required | required |
| 5 | Core Height (2) | 1.0 | 1.0 | 1.07 |

(1) Inner core volume in Reference Core is normalized to unity.

(2) Core height in Reference Core is normalized to unity.

4.2.4 好適体系での問題点の検討

A案, B案の両好適体系での共通の問題点をまず検討し, その後それぞれの体系の問題点を検討した。

1) 炉心スペクトルについて

大型炉の模擬において, スペクトルをできるだけ忠実に模擬することは好ましいが制御棒実験, 特に制御棒価値の干渉効果におけるスペクトルの効果を検討したところ以下のような結果を得た。

A案およびB案体系の炉心部にカーボン等の減速材を混入することにより, 炉心スペクトルを1,000MWe級大型炉と一致させることができる。計算結果から得られたカーボン等の減速材の混入の長所, および短所を表4.2-5に示す。

A案およびB案体系は1,000MWe級大型炉と比較してそのスペクトルは僅かに硬い。しかしこのことによる制御棒干渉効果に与える影響は小さいことが検討の結果わかった。(図4.1-14を参照のこと)

カーボンを内側炉心, 外側炉心に同量混入した場合の, 反応度変化, スペクトル変

化，中性子束分布，出力分布への影響を図 4.2 - 6 から図 4.2 - 12 に示す。

Table 4.2 - 5 Advantage and Disadvantage due to Carbon Mixing in the Core

| Items | Effect of Carbon Mixing in the Core | |
|--------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Advantage | 1 | Energy spectra are softened. |
| | 2 | Neutron flux is flattened. |
| | 3 | Power distribution in the inner core is flattened. |
| Disadvantage | 1 | Excess Reactivity is decreased. |
| | 2 | Fuel cell elements must be rearranged. |

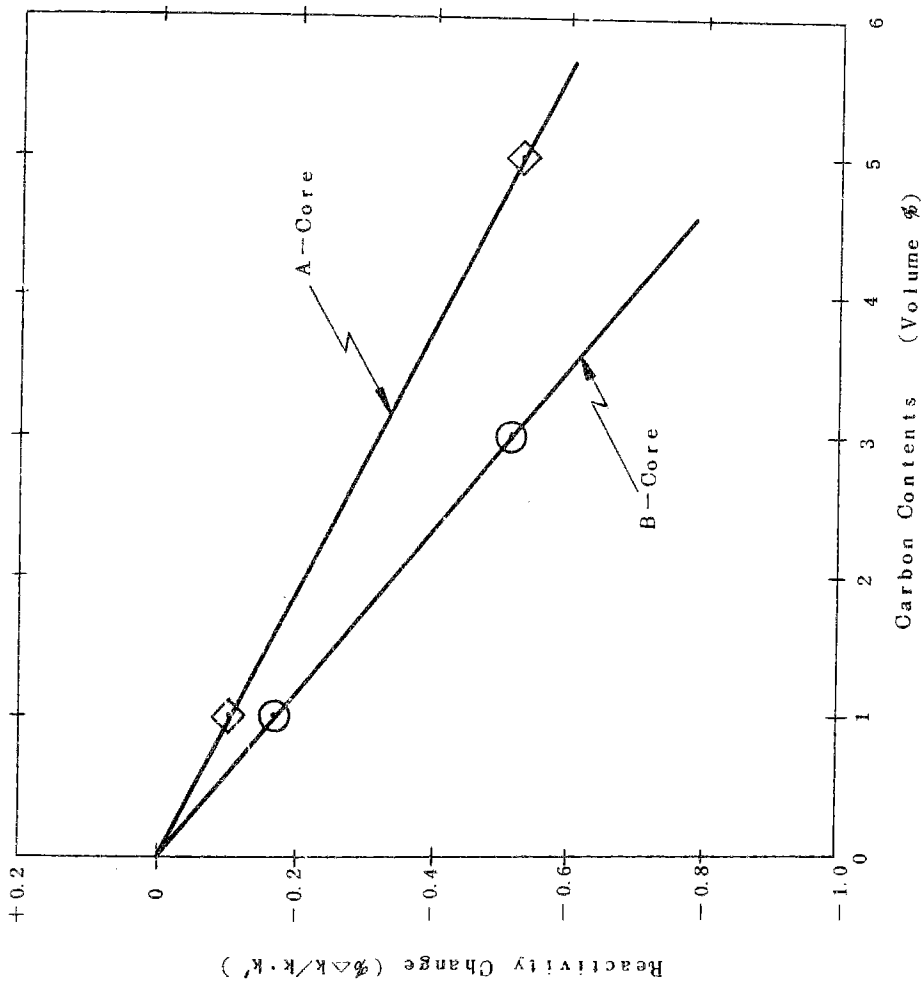
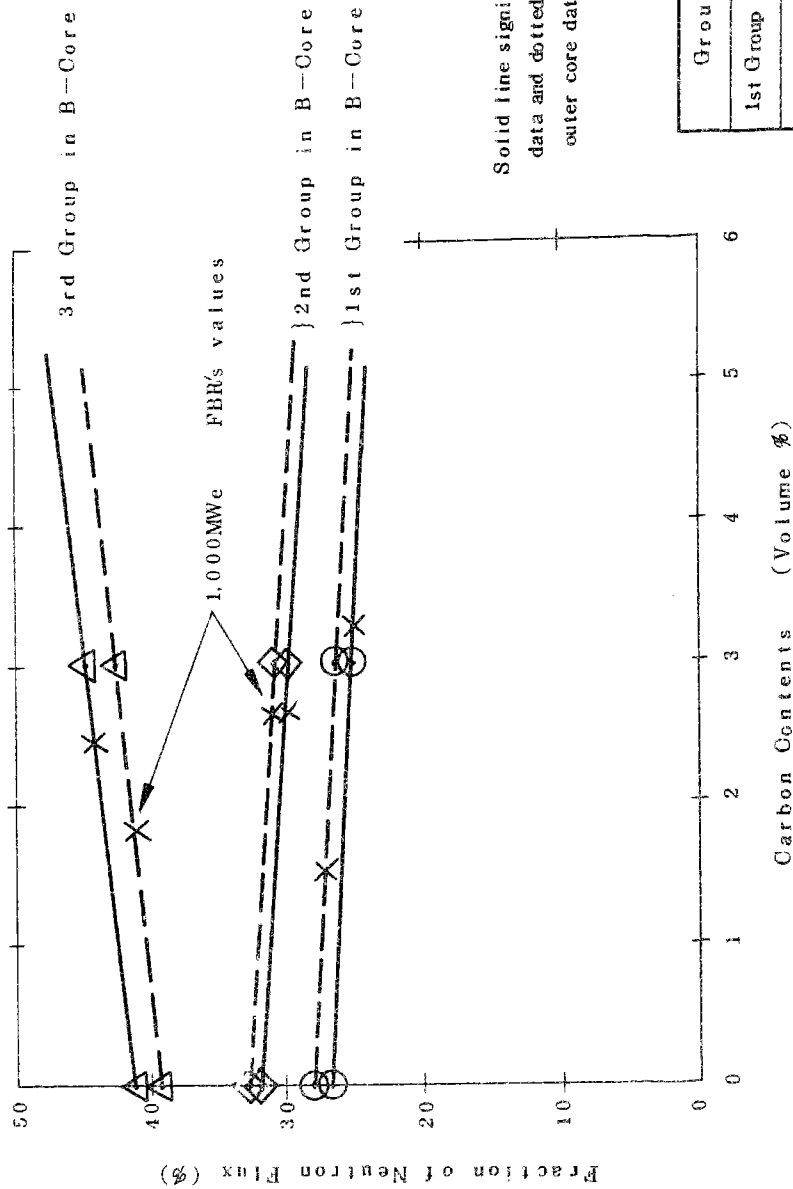


Fig. 4.2-6 Reactivity Change with Carbon Contents in both Inner and Outer Core in the Proposed Core



Solid line signifies inner core data and dotted line signifies outer core data.

| Group Structure | |
|-----------------|----------------|
| 1st Group | 10.5MeV~0.4MeV |
| 2nd Group | 0.4MeV~0.1MeV |
| 3rd Group | 0.1MeV~ |

Fig. 4.2-7 Variation of Energy Spectra in the Inner and Outer Core with Carbon Contents in B-Core

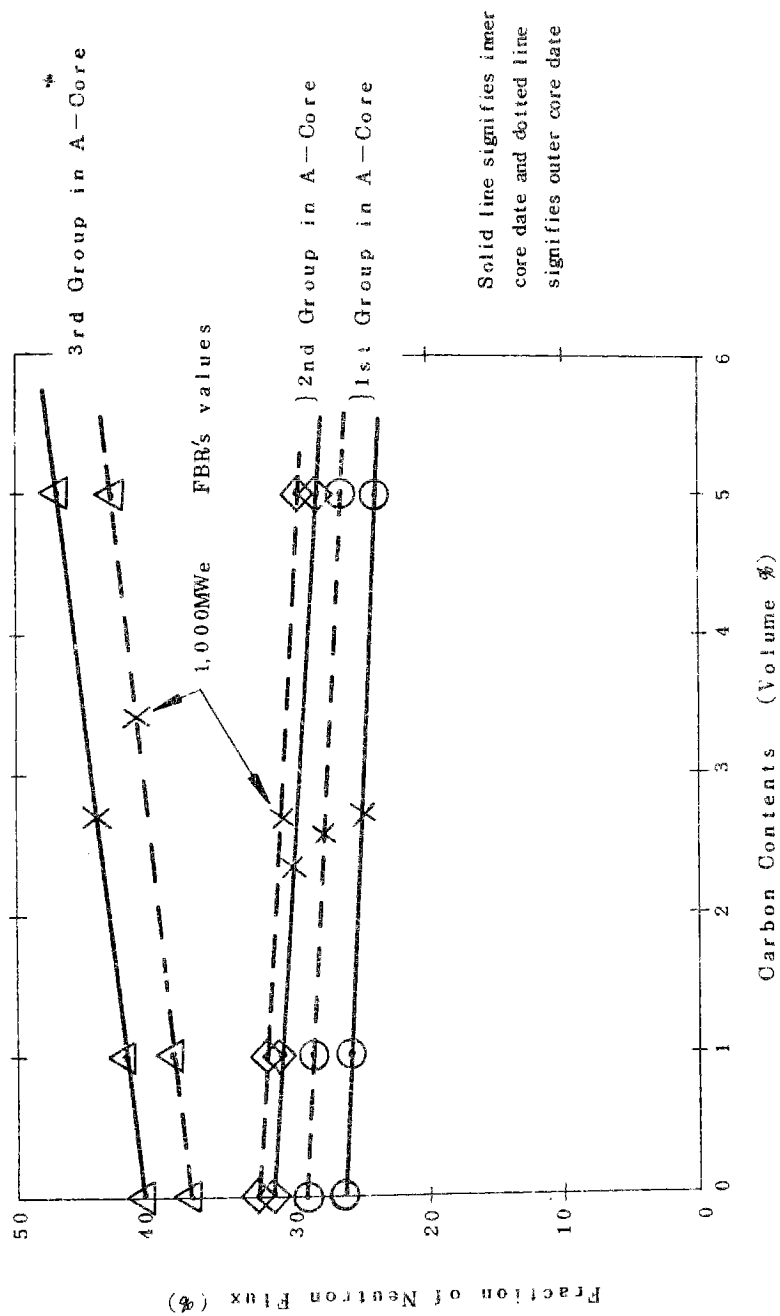


Fig. 4.2-8 Variation in Energy Spectra in the Inner and Outer Core due to Carbon Mixing in A-Core

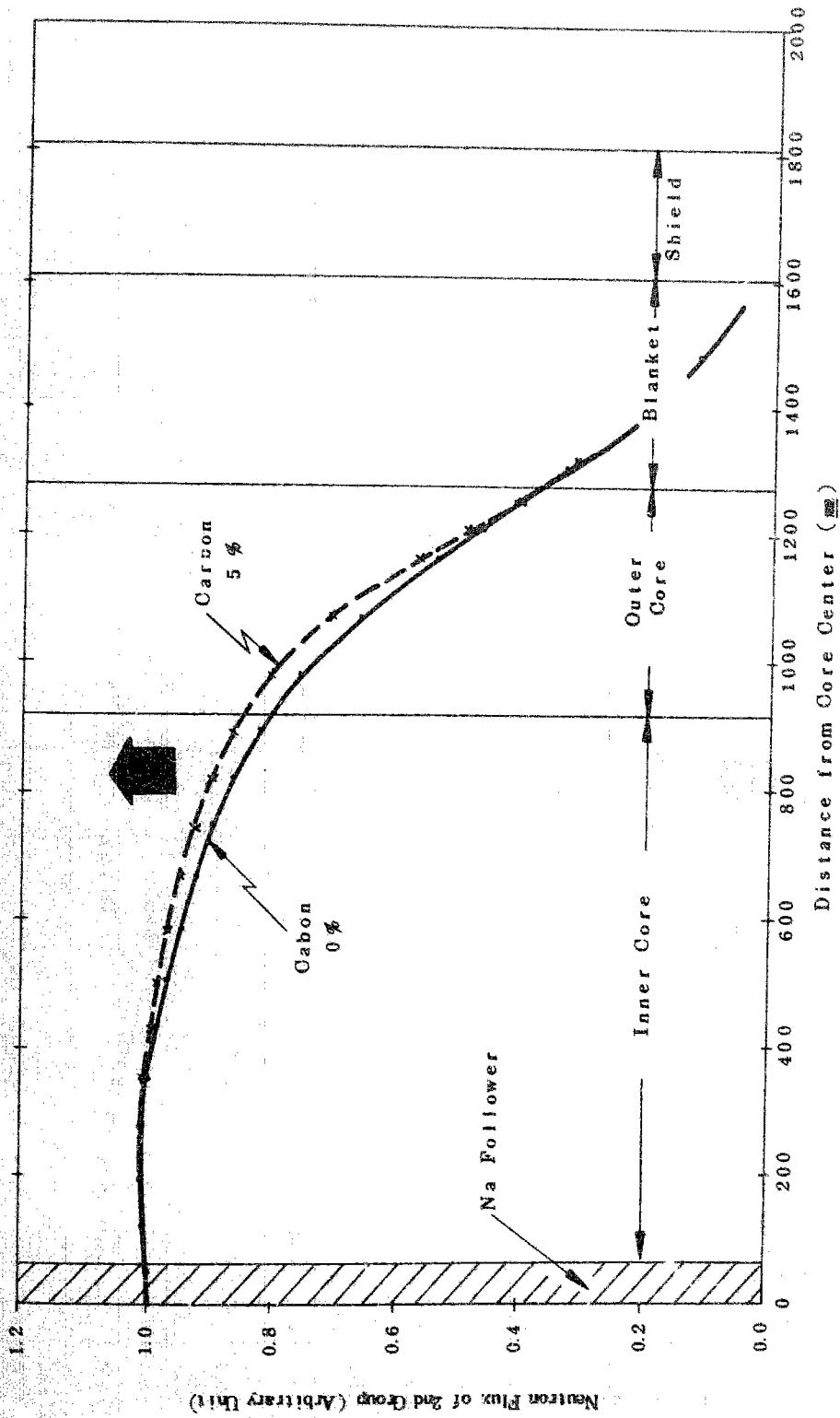


Fig. 4.2-10 Effect of Carbon Contents on Neutron Flux in A-Core

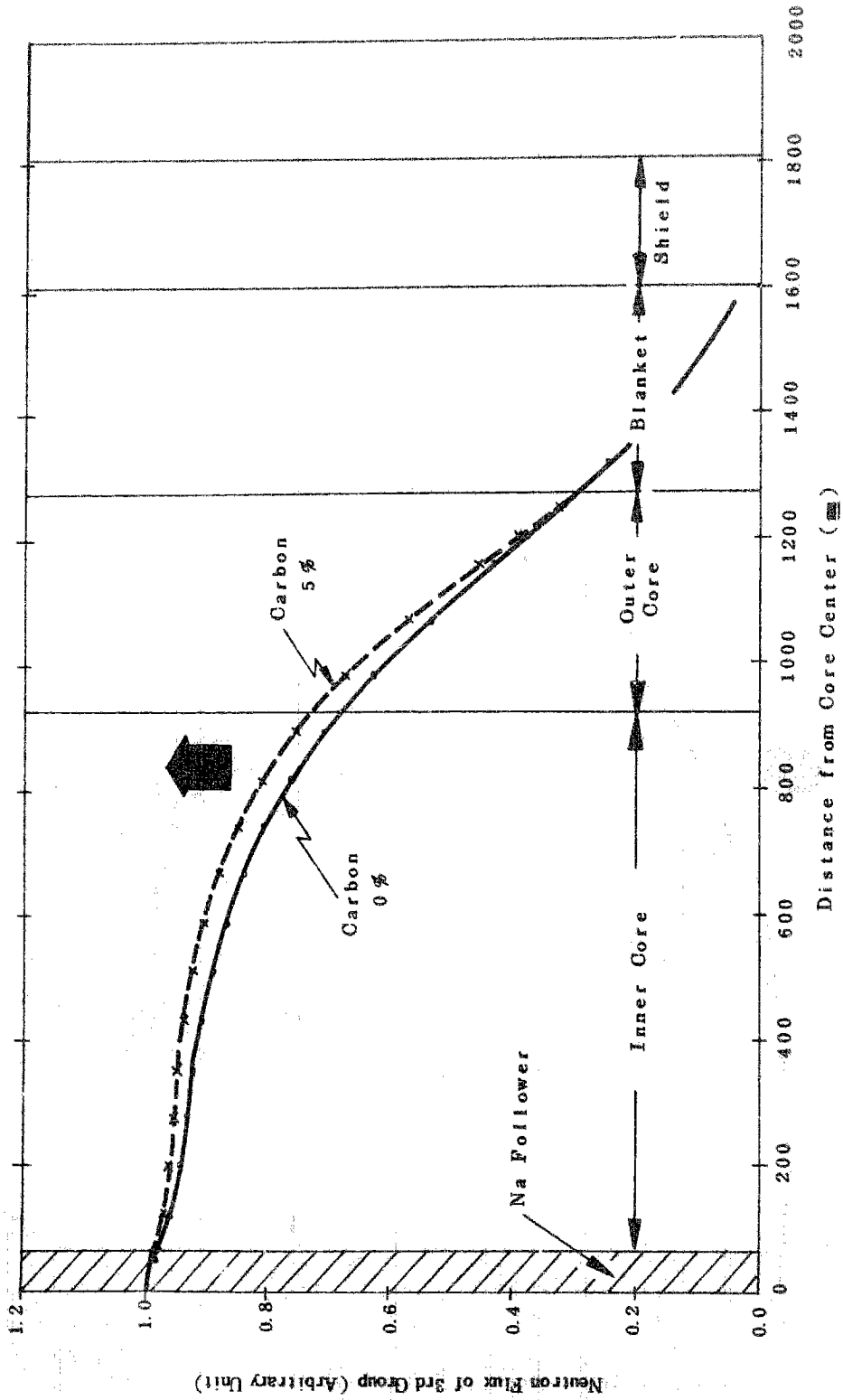


Fig. 4.2-11 Effect of Carbon Contents on Neutron Flux in A - Core

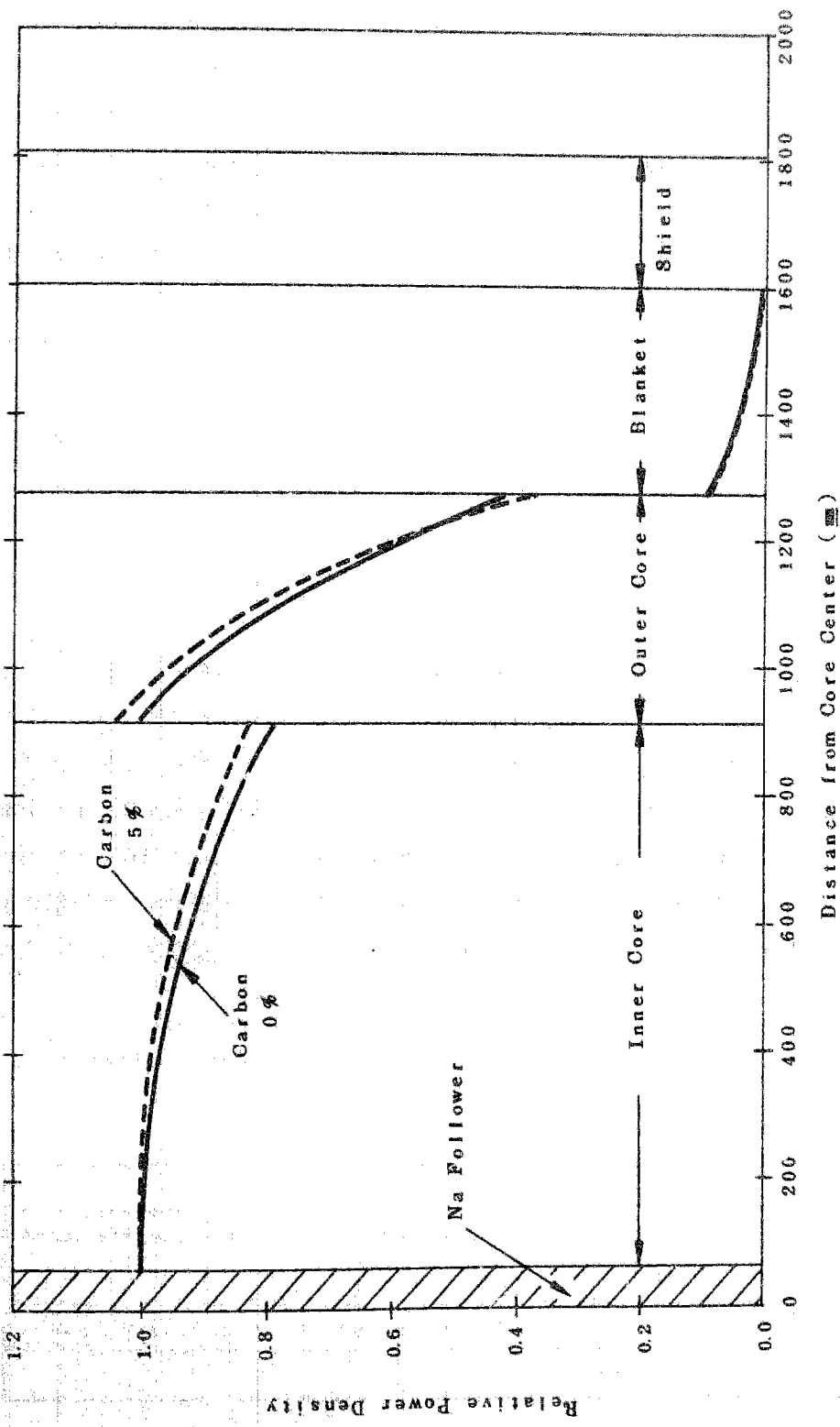


Fig. 4.2-12 Effect of Carbon Contents on Power Distribution in A - Core

2) 反射材の使用について

好適体系案のうちB案は、図 4.2 - 19 に示すように大型炉と比較して内側炉心の勾配が大きい。B案は大型炉の内側炉心を模擬する体系を考えた訳であるが、このようにもれが大きいことは、制御棒価値径方向分布の一致が期待できない。そのため、ニッケル、ベリリウム等の反射材を用いることにより、内側炉心の出力分布あるいは中性子束分布を平坦化し、大型炉の分布と一致させることを考えた。

ここでは反射材としてニッケルを用い検討した。まず、ニッケルの含有率を変化させた場合の反応度変化を図 4.2 - 13 に示す。次にニッケル反射材の厚みを変化させた場合の反応度変化を図 4.2 - 14 に示す。図 4.2 - 5 においてニッケル反射材を用いて径方向ブランケットの一部を置き換えた場合の計算体系を示した。

図 4.2 - 15 から図 4.2 - 18 にブランケットをすべてニッケル反射材に置き換えた場合の中性子束分布、出力分布への影響を示す。反射効果により内側炉心での中性子束分布、出力分布は平坦化される。

上述したような計算結果から反射材を使用した際の長所、短所をまとめて表 4.2 - 6 に示す。

今回の検討では反射材を必要とするのはB案体系である。B案体系についてニッケルの含有率、厚み、ブランケット内の配置等を変えて詳細な検討を行なった。しかし、使用可能な燃料の量の制限により、外側炉心がうすくなり、反射材の使用だけでは外側炉心での中性子束のおちこみを十分防ぐことはできない。(図 4.2 - 19 を参照のこと) B案体系では内側炉心中心部の制御棒に関して、1,000 MWe 級大型炉の内側炉心とほぼ等価な実験ができるので、炉心の大きさによる計算値/実験値比における外挿をなくすることができることに着目して活用していくことがよいと考えられる。

Table 4.2 - 6 Advantage and Disadvantage due to Use of Nickel Reflectors.

| Items | Effect of Use of Nickel Reflectors | |
|--------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Advantage | 1 | Neutron flux and power distributions are flattened in the inner core. |
| | 2 | Excess Reactivity is increased in ordinary case. |
| Disadvantage | 1 | not found. |

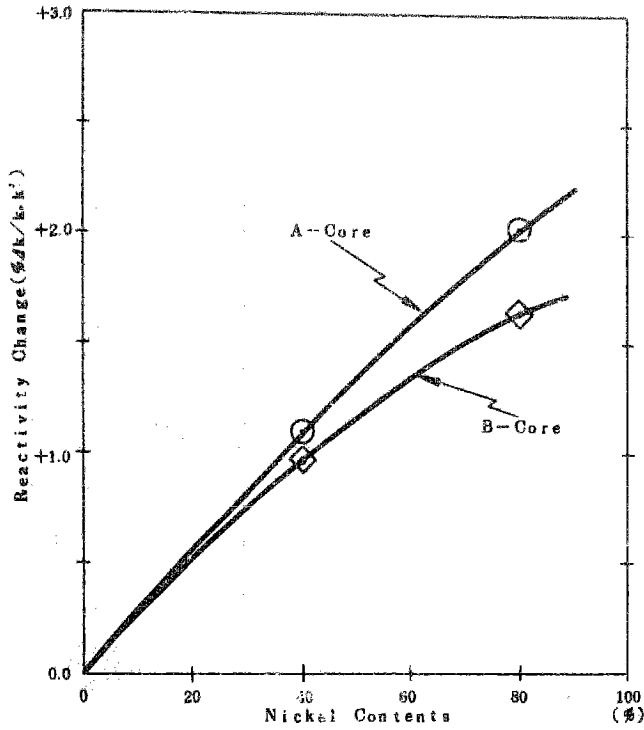


Fig. 4.2-13 Reactivity Change with Nickel Contents in Reflectors

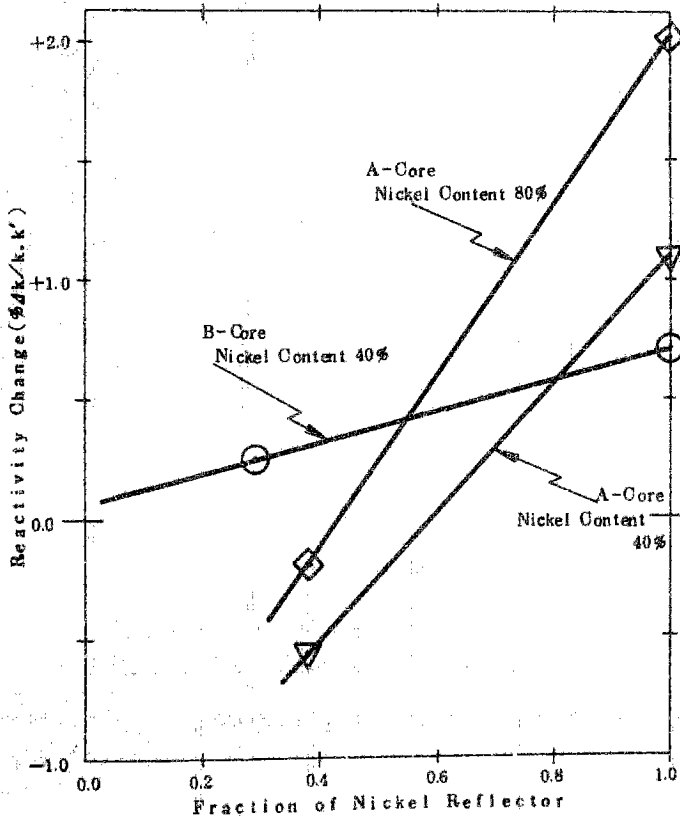


Fig. 4.2-14 Variation of Reactivity with Nickel Reflector Thickness

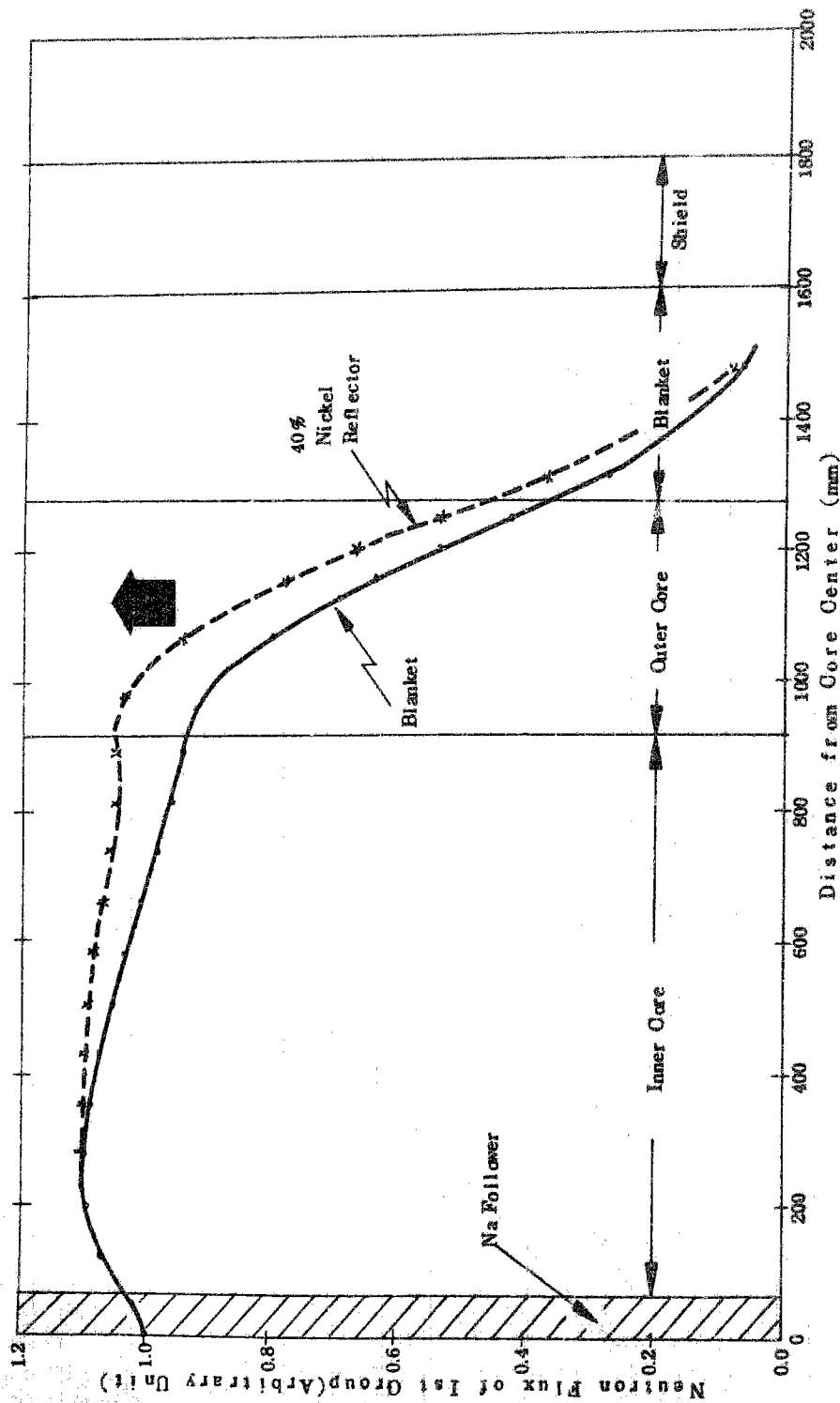


Fig. 4.2-15 Effect of Replacement of Blanket with Nickel Reflector on Neutron Flux in A-Core

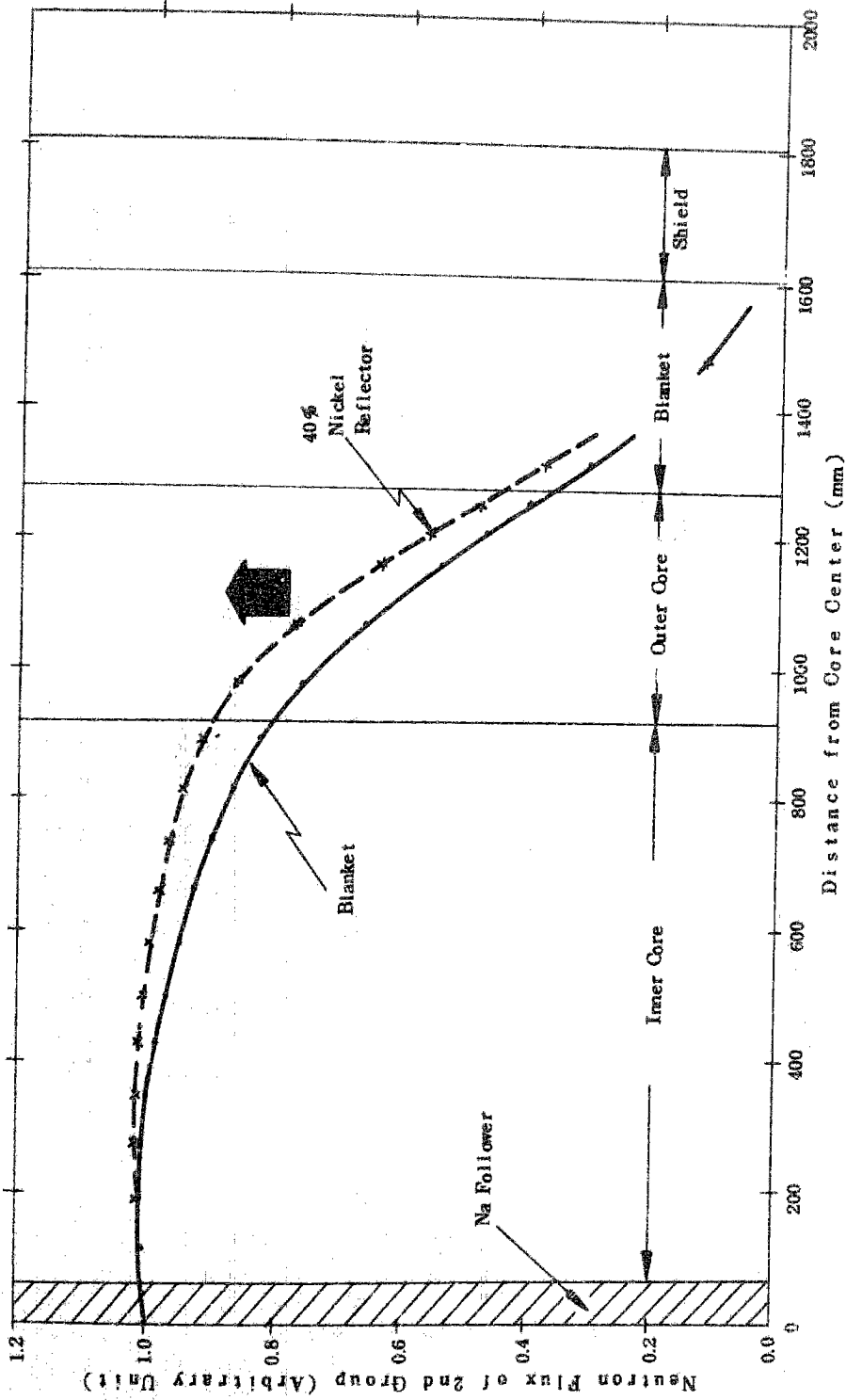


Fig. 4.2-16 Effect of Replacement of Blanket with Nickel Reflector on Neutron Flux in A-Core

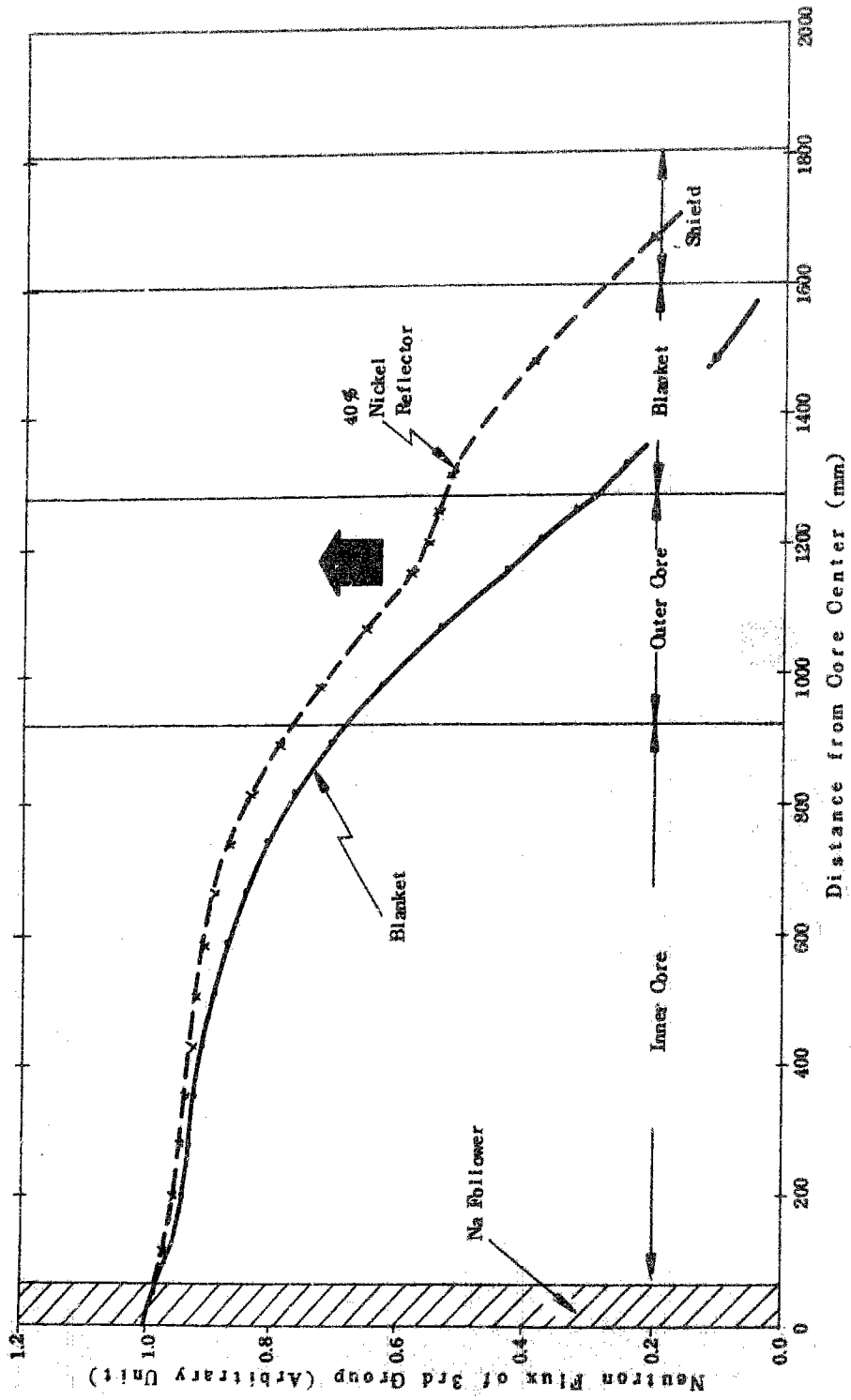


Fig. 4.2-17 Effect of Replacement of Blanket with Nickel Reflector on Neutron Flux in A-Core

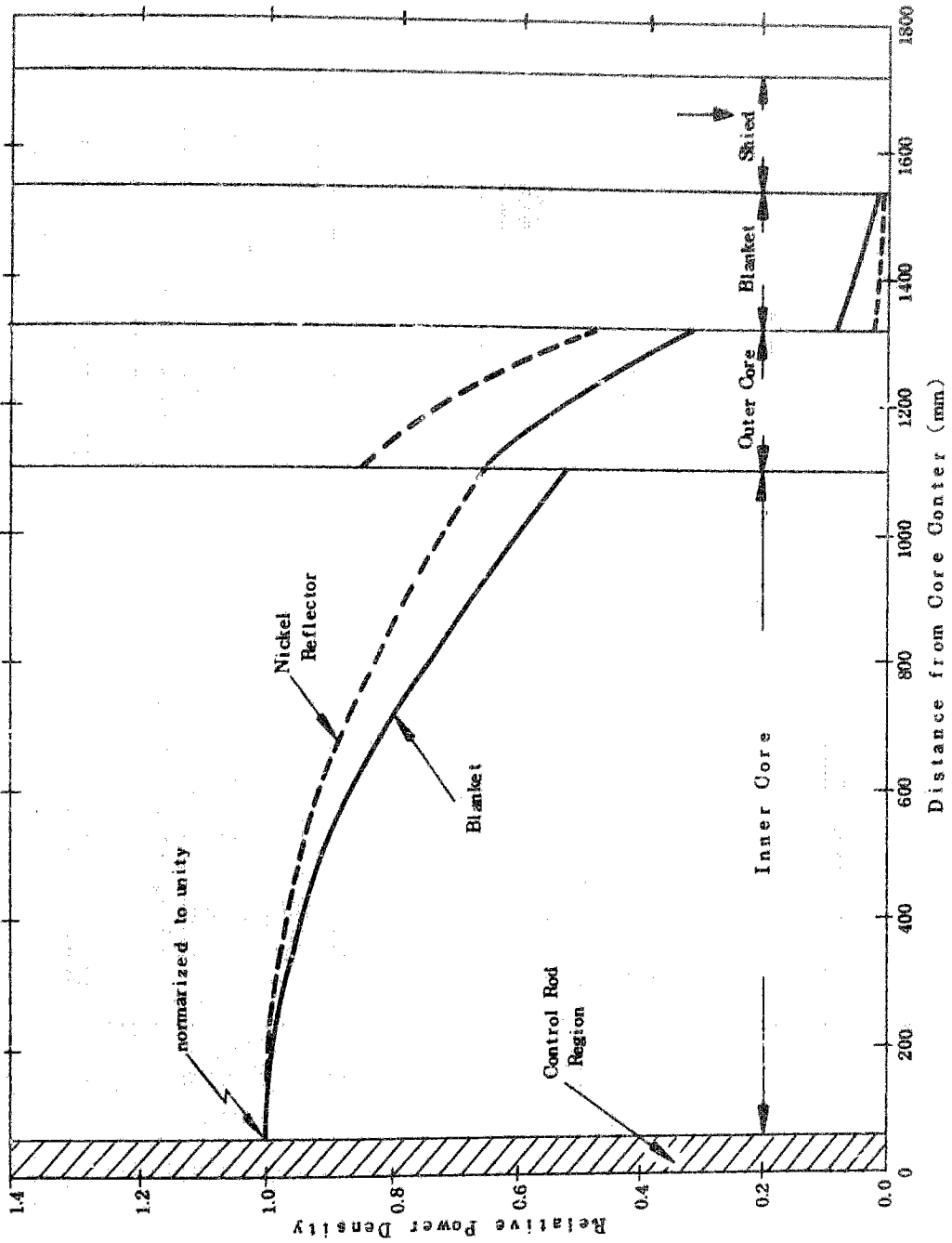


Fig. 4.2-18 Effect of Replacement of Blanket with Nickel Reflector on Power Distribution in B-Core

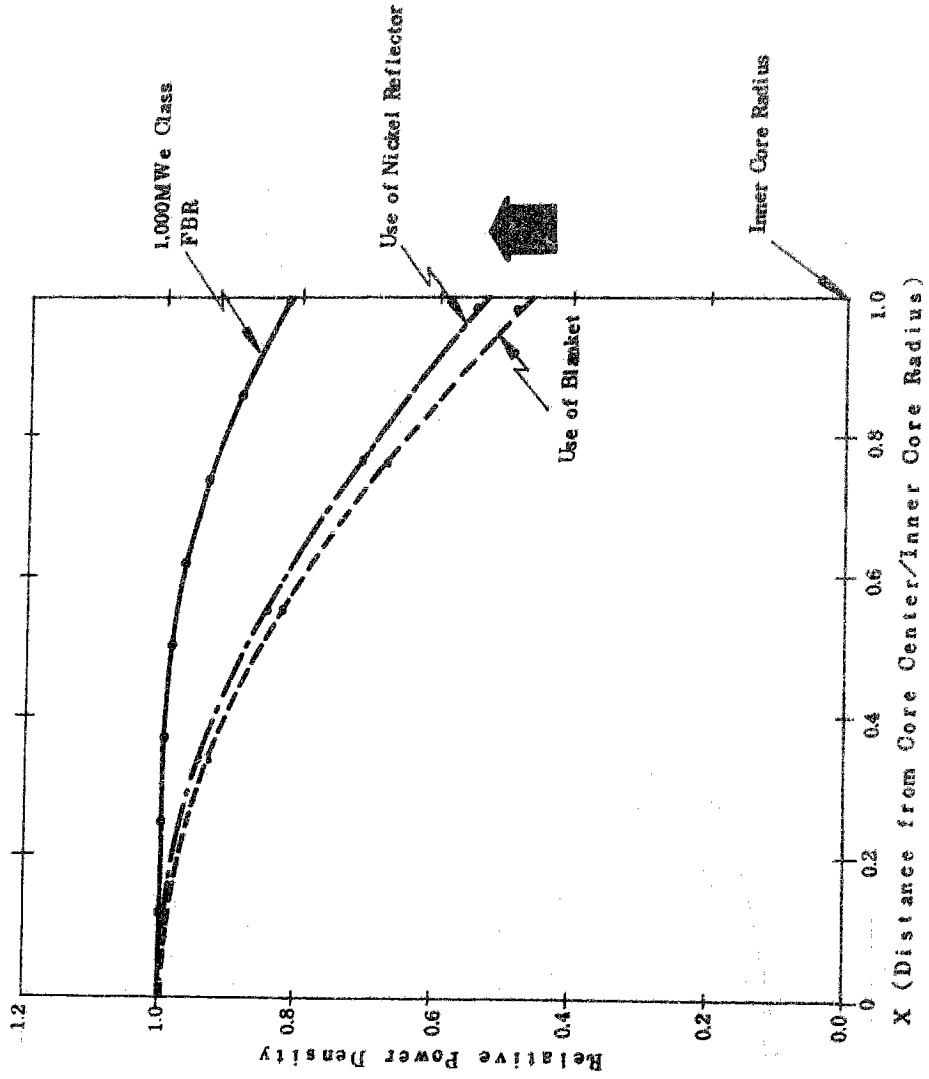


Fig. 4.2-19 Comparison of Power Distribution between B-Core and 1,000 MWe Core

3) 必要とする燃料量の検討

A案, B案の体系ともピゼー基準体系と比較して200 kg程度のプルトニウム (fissile) 燃料をさらに必要とする(表4.2-4を参照のこと)。

しかし, 両案ともドイツの高速炉臨界集合体SNEAKの高濃縮ウラン燃料を使用²⁾することと, プルトニウム富化度の低い内側炉心燃料の増加による剰余分のプルトニウムを外側炉心燃料として使用することによってこの条件を満たすことができる。

表4.2-7にその結果を示す。

4) 必要とする制御棒本数の検討

制御棒に関する基本的実験項目としてB-10濃縮度効果を確認しておくことは重要である。

また, 大型炉においては多数本の制御棒運用が重要な問題となるので, 十分な数の制御棒を準備しておくことが望ましい。例えば, 天然ボロン濃度の4要素制御棒を18本, 90%制御棒を6本, 他にB-10濃度の50%の制御棒数本を用意したい。

これらの制御棒は, 単一制御棒価値, 少数本および多数本制御棒価値の測定やこれらの制御棒挿入による反応率分布に対する影響を検討するために使用する。

Table 4.2-7 Pu Fissile⁽²⁾ Inventory in the Proposed Cores

| Source | | A - Core | B - Core |
|--------|------------------------------|----------|----------|
| 1 | Uranium Fuels from SNEAK (1) | 152 kg | 152 kg |
| 2 | Plutonium from Outer Core | 57 kg | 170 kg |
| Total | | 209 kg | 322 kg |

(1) SNEAK Uranium Plate Fuels (20 U5G8 and 35 U5G8)

(2) Equivalent Pu Fissile Inventory

(3) Net Available Fissile Inventory due to Replacement of Fuel From an Outer Core to an Inner Core

5) 富化度について

A案体系では, 出力の平坦化のために外側炉心の富化度を増している。ピゼー実験ではピン状の燃料も使用されているので, この富化度を変えることはできない。

しかし, プレート状燃料の富化度の変更はプレートの組替で可能である。問題は同一

領域に富化度の異なる燃料が混在することであるが、ZPPR⁷⁾の実験でSpiked燃料を使用する場合と類似なことと考えられる。

4.2.5 減速材と反射材の使用の可能性の検討

比較的小さな炉心体系によって大型炉の炉心模擬実験を行なおうとする時に問題となるのは両炉心の間の中性子スペクトルと中性子束分布の違いである。一般に炉心は大きい程、中性子束スペクトルは軟かく、しかも中性子束分布は平坦である。

そこで、実際に設計しようとする炉心をより小さな炉心で模擬するためには、なんらかの方法によって中性子スペクトルを軟かくし、中性子束分布を平坦化しなければならない。このような目的には、減速材と反射材の使用が考えられる。ここで、炉心模擬実験に減速材としてカーボンの使用および反射材としてニッケルの使用の可能性を検討する。

1) 減速材の使用

減速材を用いた臨界実験の例はENDF/BのCSEWG(Cross Section Evaluation Working Group)が選定したBenchmark Assembly(BNL19302(ENDF-202), 1974)及びFCA実験の範囲でも、ZEBRA-2, VERA-11A, ZPR-3-48, SNEAK-7A及びFCA-II-4Sがある。(表4.2-8にそれ等の炉心組成を参考までに示す。)減速材を用いる目的は、いずれも中性子スペクトルを調整するためである。そのスペクトル調整の目的を大別すると、

(a) 特別なエネルギー領域の核特性を強調するため

(b) 限られた燃料で大型炉心のスペクトルを模擬するため

となる。(a)の例としてFCA-II-4Sがあり、VERA-11Aもこれに近い。(b)の例には、ZEBRA-2, ZPR-3-48, SNEAK-7Aがある。

参考のために、上の各例の特徴の概略を記す。

(a)に属するもの

FCA-II-4S: ~200 e.v. (これはPu α 値が問題になった時代の実験), Kev領域前後の燃料核種の断面積の検討を目的としたもの。

VERA-11A: 表4.2-8の組成からもわかるようにPuを主体としたAssemblyで、Pu断面積実験を目的にしている。

しかし、燃料構造材のみでは、100~200 Kevに鋭いピークをもつ特殊なスペクトルをもつ体系になる。そこでカーボンを加え、現実的な炉心のスペクトルに近づけてPu断面積を測定し、その妥当性の検討を意図したものである。この意味で、上に述べた分類(b)の性格もある。

(b)に属するもの

ZEBRA-2, VERA-11A, ZPR-3-48, SNEAK-7A, いずれも限られた

燃料で 300 MWe またはそれ以上の炉心を模擬するために減速材を加えて中性子スペクトルの調整をしたものである。

減速材を用いてスペクトルを調整する場合、留意すべきことは当然のこととして解析誤差を大きくしないことである。具体的には、減速材を用いることによって炉心中性子スペクトルの計算精度が設計体系の組成を模擬した場合より悪くならないことである。そのため核的な観点からは断面積のエネルギー依存性が単純で、現状の断面積の精度が良い減速材を用いるのが望ましい。その意味において、水素とカーボンの断面積は高速炉の炉心において重要なエネルギー領域で滑らかなエネルギー依存性を持っており、また、断面積の信頼度も高い。

2) ニッケルまたはステンレス鋼反射材の使用

ニッケル反射材を用いた臨界体系で良く知られているものとして、ZPR では ZPR-3-56B があり、ステンレス鋼反射材を用いたものには FCA-V-2R がある。ZPR-3-56B は FTR の炉心模擬実験で FTR 炉心のプルトニウム装荷量を減らし中性子束平坦領域を大きくする炉心設計を検討するために組み立てられ、反射材は ~30 cm 程度の厚さになっている。

FCA-V-2R の場合も“常陽”を照射用炉心として使用する場合、高中性子束でしかも中性子束平坦領域を広くとることを目的として、ニッケル反射材炉心案の検討をするため組まれた。

表 4.2-9 にこれらの反射材の組成を参考のために示す。

ニッケル反射材を用いた時間問題となる可能性のある事項はニッケルに近接した領域の中性子束または反応率の計算精度がニッケルの断面積の精度の影響を強く受けることである。

その結果、臨界法で制御棒値を測定するとき、炉心境界の燃料要素の反応度値の推定の精度が悪いと、制御棒値の測定値の精度が悪くなるのではないかという点が心配となる。しかし、制御棒値を決定する場合周辺燃料の値の計算誤差が系統的であれば制御棒値の測定に特に支障はもたらさないと考えられる。また、制御棒近傍の中性子束分布への効果、制御棒間の干渉効果等に対しては反射体から平均自由行程 (~10 cm) の 2 倍以上離れた領域を対象とする限り、解析精度に影響を与えることはないと予測される。

3) 結 論

現時点で考える限り、減速材としてカーボンあるいは水素を用いる場合もまた、ニッケル反射材を用いる場合も特に実験自体の値をそこなうような問題点は見出されない。

Table 4.2-8 Core Material Composition

Unit : Atoms/Barn-Sec

| | ZEBRA-2 | VERA-11A | ZPR-3-48 | FCA-II-4S | SNEAK-7A* |
|----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Pu - 239 | | 0.007213 | 0.001645 | | 0.0026374 |
| Pu - 240 | | 0.000370 | 0.000106 | | 0.0002369 |
| Pu - 241 | | 0.000028 | 0.000011 | | 0.0000215 |
| Pu - 242 | | | 0.0000004 | | 0.0000011 |
| U - 235 | 0.002526 | | 0.000016 | 0.001470 | 0.0000586 |
| U - 238 | 0.015667 | | 0.007405 | 0.0058359 | 0.0079604 |
| C | 0.037992 | 0.046204 | 0.02077 | 0.04586 | 0.0260987 |
| H | 0.00030876 | | | 0.00787 | |
| Na | | | 0.006231 | | |
| Fe | 0.0036485 | 0.006084 | 0.01018 | 0.01100 | 0.0079713 |
| Cr | 0.000864 | 0.001579 | 0.002531 | 0.00274 | 0.0022423 |
| Ni | 0.000483 | 0.000665 | 0.001119 | 0.00149 | 0.0011664 |
| O | 0.0001544 | | | | 0.0218462 |
| Mn | 0.000064 | | 0.000106 | | 0.0001109 |
| Mo | 0.000008 | | 0.000206 | | 0.0000165 |
| AZ | 0.000019 | | 0.000109 | | 0.0000080 |
| Si | 0.000054 | | 0.000124 | | 0.0000933 |
| Ti | 0.000016 | | | | |
| Cu | 0.000004 | 0.007402 | | | |
| V | 0.000005 | | | | |
| Pb | | 0.000035 | | | |
| Sn | | 0.000043 | | | |
| Ga | | 0.000449 | | | |
| Nb | | | | | |

* Inner Core

Table 4.2-9 Material Composition of Assemblies with Ni Reflector

Unit : Atoms/Barm - Sec

| | ZPR - 3-56B | | | FCA - V - 2R | |
|----------|-------------|------------------|-----------------|--------------|-----------|
| | Core | Radial Reflector | Axial Reflector | Core | Reflector |
| Pu - 239 | } 0.001358 | | | 0.0010453 | |
| Pu - 240 | | | | 0.0000109 | |
| Pu - 241 | } 0.000181 | | | 0.00009314 | |
| Pu - 242 | | | | | |
| U - 235 | 0.000014 | | | 0.001470 | |
| U - 238 | 0.006195 | | | 0.0058359 | |
| O | 0.015 | | | 0.013101 | |
| C | 0.00103 | | | | |
| Na | 0.008669 | 0.00657 | 0.01346 | 0.0081341 | |
| Cr | 0.0025 | 0.00188 | 0.0022 | 0.0032734 | 0.016319 |
| Fe | 0.0137 | 0.00759 | 0.00882 | 0.01195 | 0.057849 |
| Ni | 0.00109 | 0.0476 | 0.0195 | 0.015345 | 0.007135 |
| Mo | 0.000343 | | | | |
| Al | | | | | |
| Mn+Si | 0.00022 | 0.0003 | 0.0003 | 0.008295 | |

4.2.6 A案体系の検討

A案体系が1,000 MWe級大型炉における制御棒効果をどの程度模擬しているかを、単一制御棒径方向値分布と多数本制御棒干渉効果の一致の程度から検討した。

1) 径方向値分布

図4.2-20に4要素制御棒(B-10濃度50%)の径方向値分布を示す。

大型炉の第3層および第8層に相当する位置での制御棒値(相対値)を比較した表4.2-10に示されているように制御棒値分布は非常によく一致している。

ここで、4要素制御棒1体当りのB-10重量を表4.2-11に示しておく。9要素制御棒についても並記しておく。大型炉との比較用にB-10濃度が50%の制御棒の値も示した。

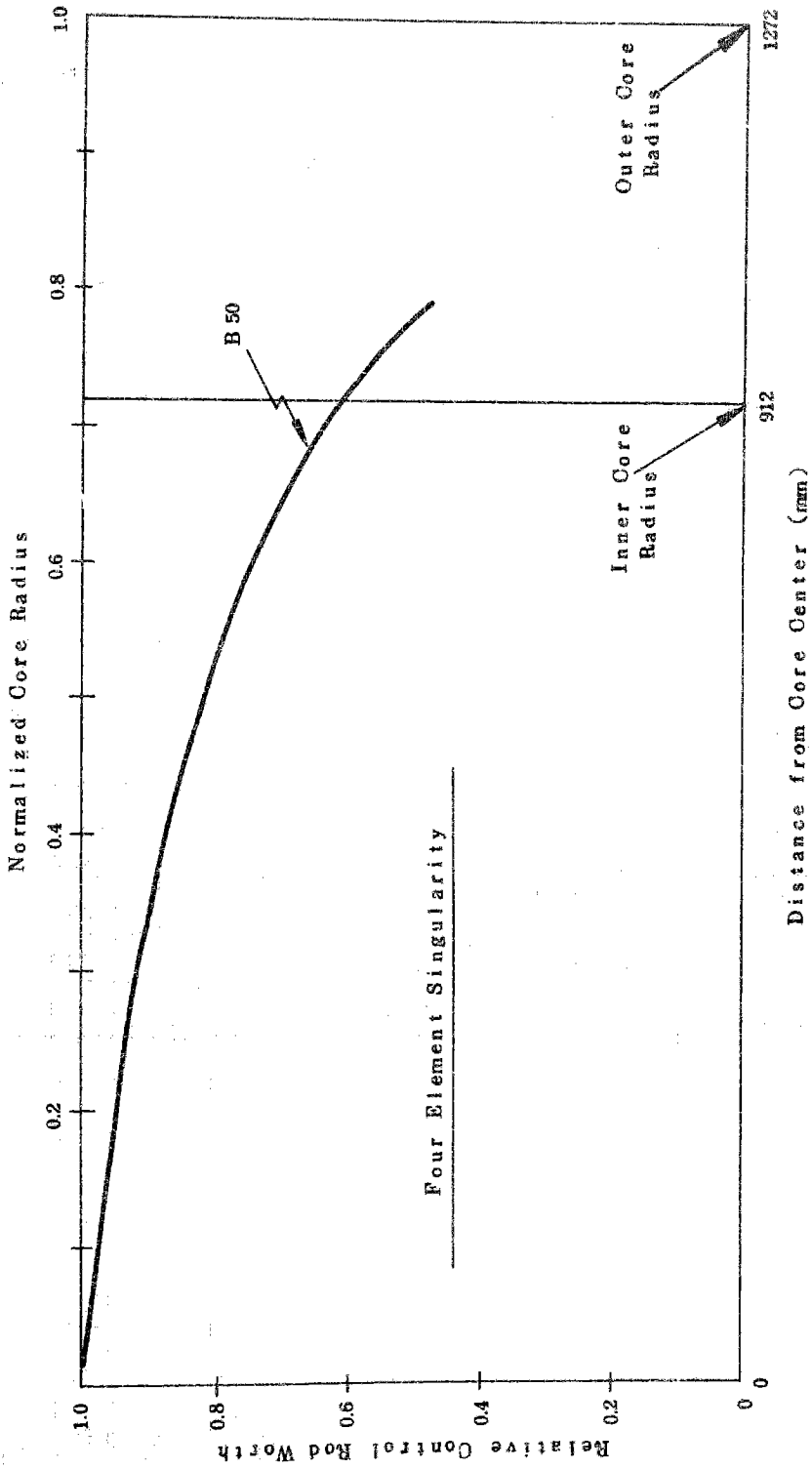


Fig. 4.2 - 20 Radial Rod Worth Distribution in A-Core.

Table 4.2 - 10 Comparison of Radial Worth Distribution between 1,000MWe FBR and A-Core

| Control Rod Location | 1,000 MWe FBR | A - Core | |
|----------------------|---------------|----------|----------|
| | | B 30 | B 80 |
| 3 rd Layer | 0.93 (1) | 0.92 (1) | 0.92 (1) |
| 8 th Layer | 0.57 (1) | 0.59 (1) | |

(1) These values are relative worths which are normalized to core center rod worths.

Table 4.2 - 11 B-10 Contents for BIZET Mock-up Control Rod.

(kg/Ass.)

| Mock-up Control Rod | Symbol | Four Element Singularity | Nine Element Singularity |
|---------------------|--------|--------------------------|--------------------------|
| Natural B - 10 Rod | BN | 0.560 | 1.260 |
| 30% B - 10 Rod | B 30 | 0.848 | 1.908 |
| 50% B - 10 Rod | B 50 | 1.422 | 3.200 |
| 80% B - 10 Rod | B 80 | 2.284 | 5.140 |
| 90% B - 10 Rod | B 90 | 2.638 | 5.936 |

2) 制御棒干渉効果

A案体系は炉心構成要素比、制御棒配置がほとんど大型炉と同一である。そこでまず大型炉での干渉効果と比較し、そのち、ビゼー基準体系と比較する。

a. グループ間の干渉効果 (B50制御棒)

A案体系および、1000MWe級大型炉における主系統制御棒間の干渉効果に関する計算結果を表4.2-12に示す。ただし大型炉で8層に対応する位置の制御棒はプレートの関係でA体系では3cm外側に存在する。こうした両体系の制御棒位置のズレが8層のグループ内およびグループ間の干渉効果の差に大きく寄与していると考えられるのでそれを補正した値も同時に示した。この補正により大型炉とかなり良く一致するようになる。

b. グループ内の干渉効果 (B50制御棒)

大型炉で3層、8層に対応する位置の制御棒のグループ内の干渉効果を検討した。結果を表4.2-12に示す。8層の位置はa.で述べたように3cm外側に存在する。また3層の位置の制御棒もA案体系では2cm大型炉より外側に存在する。ビゼー基準体系で得られたこの層に関する干渉効果の距離による変化+2.7%/cmを使用すると、3層に対応するA案体系の干渉効果はB50制御棒では-14%、B80制御棒では-17%となり、かなり良く一致する。さらにスペクトル効果も考慮するとB50制御棒では-15%、B80制御棒では-18%となる。この際にもビゼー基準体系でのスペクトルによる干渉効果への寄与分(約-1%)をそのまま使用した。

3) ビゼー基準体系との比較

ここでは、1000MWe級大型炉において3層の位置にある主系統制御棒6本に対応する基準体系およびA案体系での6本の制御棒のグループ内の干渉効果を比較する。

4.1.5で述べたように基準体系では、単一制御棒による価値の径方向相対分布を一致させると、干渉効果は、2倍程度の違いが生じる。(表4.1-8を参照のこと)

A案体系ではB50制御棒の場合でも制御棒位置の補正を行なうと、その干渉効果は大型炉と類似の傾向を示す。B80制御棒ではほとんど一致する。カーボンを炉心に混入した場合、一致はさらによくなる。単一制御棒による価値の相対分布は大型炉と同じである。

ここでの検討から、A案体系の方が1000MWe級大型炉の制御棒効果を模擬するという面で基準体系より優れていると言える。炉心スペクトルには両者の差がないと

Table 4.2-12
Comparison of Multi Rod Interaction between
1,000MWe FBR and A-Core

| Symbol(1) | Definition(1) | Interaction Effect(%) | | |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|
| | | 1000MWe FBR | A-Core | |
| | | | Uncorrected | Corrected(3) |
| I_3^P | $\frac{\rho_3^P \text{ layer} - 6 \times \rho_3^P}{6 \times \rho_3^P}$ | -16.3 | -8.6 (-11.7)* | -14.0 (-17.4)* |
| I_8^P | $\frac{\rho_8^P \text{ layer} - 18 \times \rho_8^P}{18 \times \rho_8^P}$ | +14.2 | +3.5 | +11.6 |
| I^P | $\frac{\rho^P - (\rho^P c + 6 \times \rho_3^P + 18 \times \rho_8^P)}{\rho^P c + 6 \times \rho_3^P + 18 \times \rho_8^P}$ | +42.3 | +18.3 | +31.8 |
| I_{3-8}^P | $\frac{\rho_3^P +_8 \text{ layer} - (\rho_3^P \text{ layer} + \rho_8^P \text{ layer})}{\rho_3^P \text{ layer} + \rho_8^P \text{ layer}}$ | +41.1 | +20.3 | +34.3 |
| I_{c-3-8}^P | $\frac{\rho^P - (\rho^P c + \rho_3^P \text{ layer} + \rho_8^P \text{ layer})}{\rho^P c + \rho_3^P \text{ layer} + \rho_8^P \text{ layer}}$ | +37.8 | +19.2 | +32.7 |
| I_{P-S} | $\frac{\rho^{\text{Total}} - (\rho^P + \rho^S)}{\rho^P + \rho^S}$ | +0.7 | +1.6 | / |

(1) See Table 2.5-1 and 2.5-3

(2) No Carbon Contained in this Case

* Values in Pathenthis are for B80 Control Rods.

(3) Distance from Rod to Rod is corrected.

考えてもよいから総合的に見てもA案体系の方が1,000MWe級大型炉に近い制御棒効果を与える実験体系ということになる。

4) 大型炉をA案体系で近似する指標

どのような縮小炉心体系が大型炉の制御棒干渉効果と単一制御棒値の相対分布を良く模擬しているかを検討した。制御棒の吸収マクロ断面積 $\Sigma_{\text{RB}}^{\text{CR}}$ とその制御棒が存在する領域の燃料の拡散距離 L_{fuel} の比, すなわち $\Sigma_{\text{RB}}^{\text{CR}} / L_{\text{fuel}}$ を指標とした。

制御棒干渉効果は制御棒挿入により中性子束分布に歪みを生じ, それが他の制御棒値に影響することにもとづく。上述のパラメータの分子は, 制御棒領域近傍の中性子の制御棒による吸収されやすさを示し, 分母は逆に燃料領域内の逃げやすさを示していると言える。その比は燃料と制御棒が両方存在する体系での中性子の制御棒の存在による逃げにくさを近似的に示している。

表4.2-13に1,000MWe級大型炉(制御棒B-10濃度は50%), A案体系(B-10濃度は50%および80%)の1群に縮約した吸収断面積 $\Sigma_{\text{RB}}^{\text{CR}}$ と拡散距離 L_{fuel} の値およびその比を示す。

そこでこのパラメータを大型炉と一致させる方法は $\Sigma_{\text{RB}}^{\text{CR}}$ を変えるか, L_{fuel} を変えるかであるが, L_{fuel} を変化させることは難しい(例えば炉心内にカーボンを混入してもあまり大きく変化しない)ので, $\Sigma_{\text{RB}}^{\text{CR}}$ を変える, すなわち制御棒のB-10濃度を変えることにする。

A案体系におけるB-10濃度が50%および80%制御棒による干渉効果および単一制御棒値の相対分布から表4.2-13に示す大型炉の $\Sigma_{\text{RB}}^{\text{CR}} / L_{\text{fuel}}$ と一致させるためには, 燃料は変えずに, B-10濃度だけを変えてその値を内挿で求めてやると65%程度になる。

炉心スペクトルを軟化させると, B-10濃度は65%より減少し, またスペクトル軟化に伴ない制御棒による中性子束の歪みは大きくなることも考慮すると, 大型炉とスペクトルを一致させた体系ではB-10濃度は59%程度となり, 制御棒値も大型炉とほぼ等しくなると考えられる。

しかし, ここでの結論は3層の制御棒の干渉効果について得られたものであり, 一般的なものかどうか判断するには今後十分な検討が必要であると思われる。この方法は試みとして非常に面白いものであり, 今後の理論および実験の両面からの詳細なつめが期待される。ピゼー基準体系についても言えることであるが, 制御棒値の径方向分布, 各種パターンにおける制御棒値および反応率の径方向分布の計算値/実験値比が, そのまま体系の大きな1,000MWe級大型炉に適用できる保証はないという点に充分留意する必要がある。ここで炉心形状の違いにもとづく挿

という不確定さが生じることになる。しかしA案体系は基準体系と比較して大型炉に近い制御棒効果を示すのでより優れていると言える。

Table 4.2-13
Control Rod Interaction Index

| Parameter | 1000MWe Class FBR (B50) | | A- Core | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|----|---------------------|----|---------------------|----|---------------------|----|
| | | | B50 | | B80 | | B65 | |
| Σ_a^{CR} | 1.82 | -2 | 1.03 | -2 | 2.44 | -2 | 1.85 | -2 |
| Lfuel | 16.4 | | 17.6 ⁽¹⁾ | | 17.6 ⁽¹⁾ | | 17.6 ⁽¹⁾ | |
| $\Sigma_a^{CR} / \text{Lfuel}$ | 1.11 | -3 | 5.86 | -4 | 1.39 | -3 | 1.05 | -3 |

(1) No carbon contained in this case

4.2.7 好適体系の提案

4.2.3から4.2.6の検討の結果、ビゼー体系の制限のもとで問題点の少ないA案体系が好適体系として採用できることがわかった。

A案体系の問題は、4要素制御棒の追加作成が必要であるということである。ビゼー基準体系が決まっている場合には外側炉心の富化度を2%増したので外側炉心燃料のプレートの組替と配置変更がさらに必要である。A案体系は表4.2-14に示すように4要素が大型炉での1集合体に相当する、すなわち炉心構成要素比が大型炉と一致している体系である。

B案体系は制御棒も含め内側炉心の形状を許す限り大きな炉心としたものであり、内側炉心中心部の制御棒に関しては、1000MWe級大型炉の内側炉心とほぼ等価な実験ができるという利点がある。

減速材使用により大型炉とスペクトルを一致させることは、制御棒干渉効果については寄与が小さいことが確かめられた。そこで減速材の使用は、他の実験とのかねあい、

特殊な目的があることにより決定される。

Table 4.2-14
Comparison of Core Compositions between
1,000MWe FBR and A-Core

| Region | 1,000MWe Class FBR | (1) A-Core |
|-----------------------------|--------------------------|---------------|
| Inner Core Fuel Assembly | 210 | 209 |
| Outer Core Fuel Assembly | 192 | 192 |
| Blanket Fuel Assembly | 252 | 249 |
| Shield Assembly | 420 | 421 |
| Primary Rod | 25 | 25 |
| Secondary Rod | 6 | 6 |

(1) In Proposed A-Core, four elements are assumed to be one assembly in a Large FBR.

4.2.8 Disturbance Parameter 法による干渉効果の検討

大型炉実験体系の検討のための計算手法として、制御棒干渉効果の簡易推定法の有用性について述べる。

負反応度挿入型（吸収体型）の制御棒を用いる体系では、制御棒挿入により中性子束分布に歪みが生じ、その歪みが制御棒値に影響を及ぼし、いわゆる干渉効果の原因となる。この制御棒値干渉効果は、前章にも記したように、制御棒の種類（B-10濃度）、挿入位置あるいは対象とする体系の中性子スペクトルなどによって様相を異にし一般的な議論を困難にしている。

大型炉あるいはピゼー体系のような多数の制御棒が存在する場合、各種制御棒の機能分担の決定や制御棒チャンネル位置の決定あるいは挿入パターンの選定の上で、干渉効果の予測ができれば有効である。従来、このような有効な手段がなく、対象とする体系で予想される典型的な制御棒パターンの中から幾つかの代表例を選びその制御棒値ある

いは干渉効果から他のパターンの値を内外挿入により推定する方法が一般的にとられていた。

ここでは、原型炉級の高速炉体系において得られた制御棒値干渉効果評価法のビゼー体系における有効性を評価し、その結果から実験対象とすべき制御棒挿入パターン選定のためのデータを提供する。

制御棒値干渉効果評価法としては、Influence Function法とDisturbance Parameter法の2法が提案されているが、いずれもExact Perturbation法に理論的根拠を置いており、基本的には同じアプローチであるので、ここでは我々が開発したDisturbance Parameter法のビゼー体系への適用について議論を進めることにする。なお、制御棒チャンネルは図4.2-21に定義した記号で表示する。例えばB30の9要素制御棒をチャンネルPに挿入した体系をB30(P)と書くことにする。また、対称位置にあるチャンネルをP-r、Q₂等と書くことにする。ここでP-rはY軸(負側)上にあるPの対称位置、Q₂は第2象限にあるQの対称位置を意味する。従って「1/4炉心でB30(P)」と表現することは、「B30(P, P-r)」と表現することに等しく、「1/4炉心でB80(P, Q)」と表現することは、「B80(P, P-r, Q, Q₂, Q₃, Q₄)」と表現することと等価である。

さてDisturbance Parameter法ではチャンネルjに制御棒を挿入した場合の他のチャンネルiにおける中性子束の歪みをa_{ij}、体系全体の中性子束分布の歪みの平均をa(j)で表す。式で表示すればDisturbance Parameterは次式で定義される。

$$a_{ij} = \frac{\phi(i:j)}{\phi(i:0)}$$

= $\frac{\text{制御棒 } j \text{ を挿入した場合のチャンネル } i \text{ の中性子束}}{\text{基準体系 (全制御棒引抜時) のチャンネル } i \text{ の中性子束}}$

$$\overline{a(j)} = \frac{S_j}{S_0}$$

= $\frac{\text{制御棒 } j \text{ 挿入体系の Normalization Integral}}{\text{基準体系の Normalization Integral}}$

ここで Normalization Integral の算定に用いる Adjoint Flux はいずれも基準体系（全制御棒引抜字）の値である。

結局、Disturbance Parameter 法によって、チャンネル i と j 同時に制御棒を挿入した場合の全体の反応度値 $\Delta\rho_{ij}$ を単独挿入時の反応度値 $\Delta\rho_i$ と $\Delta\rho_j$ および Disturbance Parameter を用いて次式により推定することができる。

$$\Delta\rho_{ij} = \Delta\rho_i \cdot \frac{a_{ij}}{a(j)} + \Delta\rho_j \cdot \frac{a_{ji}}{a(i)}$$

干渉効果として表示すれば次式になる。

$$\begin{aligned} \epsilon &= \left(\frac{\Delta\rho_{ij}}{\Delta\rho_i + \Delta\rho_j} - 1 \right) \times 100 \quad \% \\ &= \left[\frac{\Delta\rho_i a_{ij} / a(j) + \Delta\rho_j a_{ji} / a(i)}{\Delta\rho_i + \Delta\rho_j} - 1 \right] \times 100 \end{aligned}$$

ビゼー体系に B30 あるいは B80 を 2 本挿入した場合の干渉効果を上記の式に基いて推定し、直接計算から求められる干渉効果とを比較して表 4.2-15 に示す。* いずれも正の干渉効果を示すパターンであり、推定値が 2~3% 過少評価になっている。しかしこの誤差は反応度値にすれば 0.03% $\Delta k/k$ 程度である。誤差の原因は、 $a(j)$ の評価誤差、制御棒挿入によるスペクトルの歪みの無視等であると考えられる。

このように、Disturbance Parameter はビゼー級の大型炉体系においても一応満足できる精度で干渉効果の評価ができるとみることが可能である。そこで、B30 あるいは B80 がチャンネル P-r あるいは S-r に存在する場合の他の 9 要素制御棒チャンネルにおける Disturbance Parameter の比 $a_{ij} / a(j)$ を図 4.2-21 および 22* に示す。この比 $a_{ij} / a(j)$ はそれぞれのチャンネルに他の制御棒を挿入した場合、その反応度値が単独挿入の場合に比べてどの程度変るか、つまり干渉効果の大きさを示す直接のパラメータ** になっている。このパラメータが 1.0 より大きい場合には正の干渉効果となり、逆に 1.0 より小さい場合には負の干渉効果となることを示している。

ここでは、簡単のため制御棒 2 体間の干渉効果を例にとって Disturbance Parameter 法の有効性と応用の仕方を述べたが、2 本以上の制御棒についても全く同様に考えることができる。例えば、 $j=B30(P, P-r)$ に対して、他の制御棒チャンネル

iにおけるDisturbance Parameter $a_i / a(j)$ を同様に図示すれば、第3の制御棒に予想される干渉効果の正負あるいはその大きさが炉心内のマップとして容易に知ることができる。従って、ある一定の制御棒パターンが決められた場合、他のチャンネルに対するDisturbance Parameterの分布を図示することによって、次の制御棒パターンの選定に活用することが可能となる。

- * 基準体系として炉心全体が燃料で構成されている体系を想定した。
- ** 注意すべきことは、第2あるいは第3の制御棒挿入により最初の制御棒の反応度値も影響を受けることである。そのため図中に示した値が直接最終的な干渉効果となるわけではない。

Table 4.2 - 15
Interaction Effect based on Disturbance Parameter
Method in BIZET Reference Core

| Control Rod Configuration | Interaction Effect(%) | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Predictions* | Direct Calculations** |
| B30 (P, P-r) | +12 | +14 |
| B30 (S, S-r) | +15 | +17 |
| B80 (P, P-r) | +17 | +19 |
| B80 (S, S-r) | +20 | +23 |

notes) * Predictions using Disturbance Parameter Method
 a_0 is estimated by total flux.
 $a(j)$ is the same value as the estimation of a
 Prototype FBR.

** These Values are given by direct diffusion calculations.

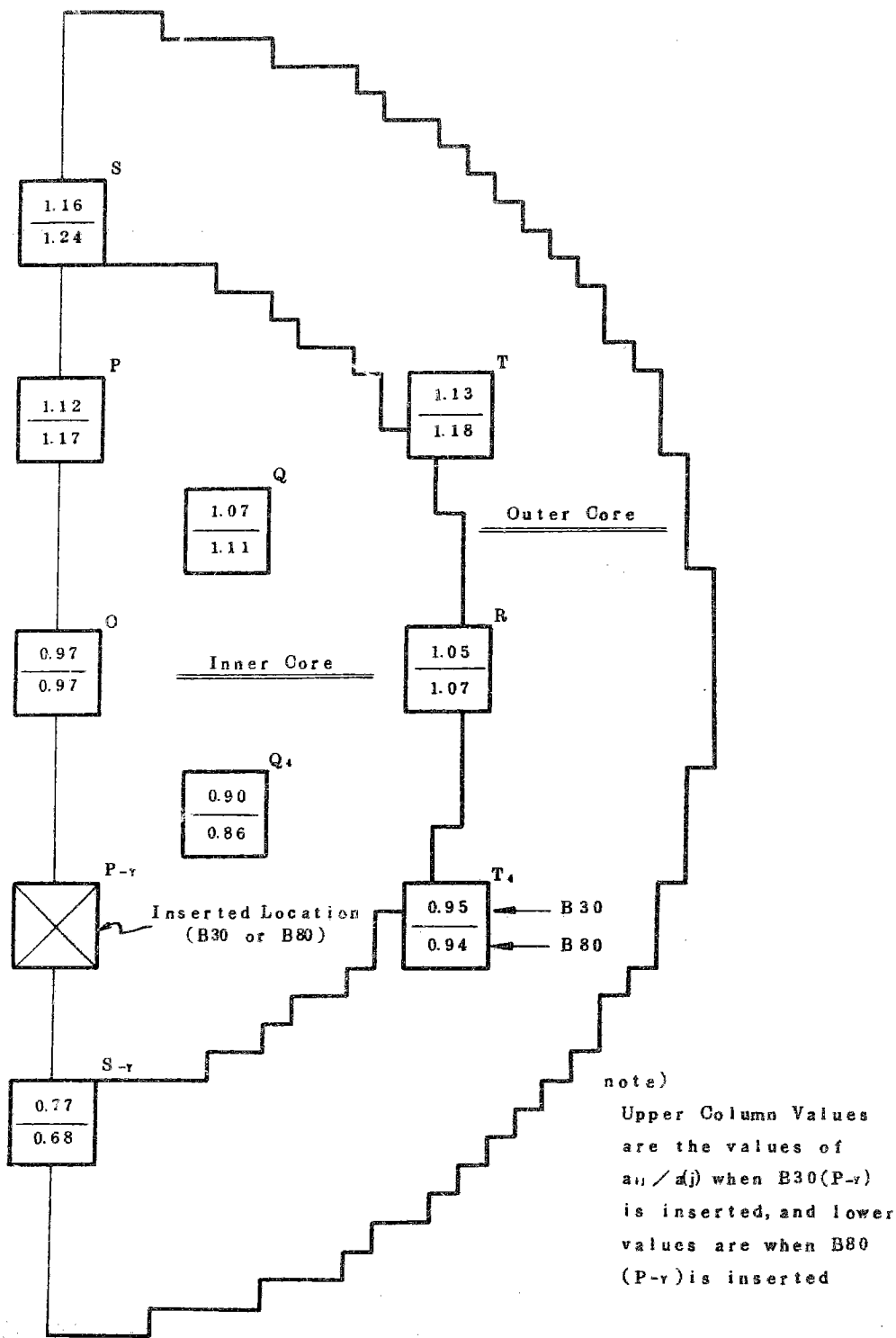


Fig 4.2-21

Spatial Distribution of Disturbance Parameter when One Control Rod B30 or B80 is Inserted in the Inner Core

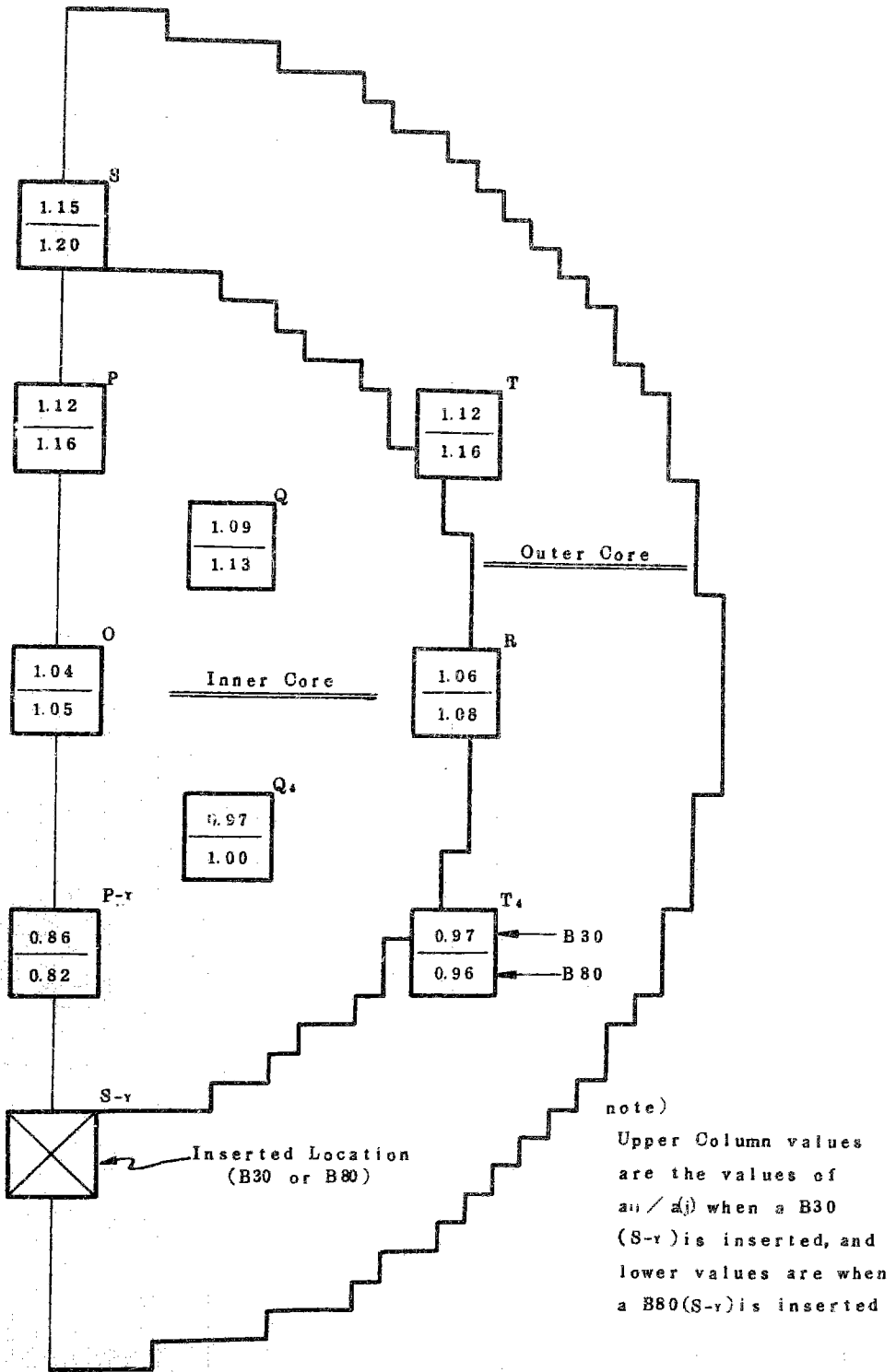


Fig 42-22 Spatial Distribution of Disturbance Parameter When One Control Rod B30 or B80 is Inserted in the Outer Core

5

章

5. 実験の予備的検討

ビゼー基準体系および好適体系—— A案およびB案体系—— における検討を第4章で行なった。第4章では基準体系と好適体系との対比に主眼をおいたので、共通するような性質のものへの検討はこの章に記した。また制御棒実験での挿入可能な本数およびパターンの検討を行なった。

さらに、「JAERI-Fast Set」と「HIMUL-1」を用いてベンチマーク炉心解析結果から、「HIMUL-1」ファイルの評価を行なった。

5.1 ビゼー基準体系

5.1.1 単一制御棒価値

- 1) 制御棒非的質効果 図 5.1-1
- 2) 制御棒径効果 図 5.1-2
- 3) カーボン混入による制御棒価値への影響 図 5.1-3

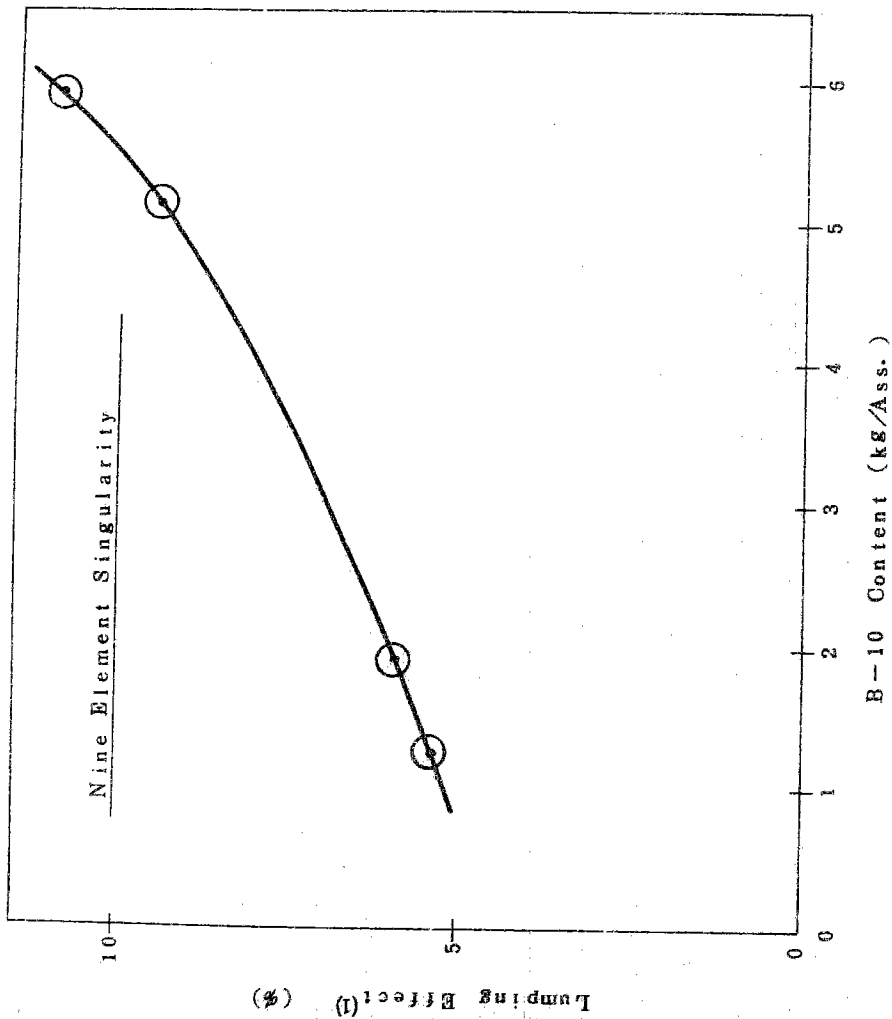


Fig 5.1-1 Lumping Effect on Control Rod Worth with B-10 Contents in BIZET Reference Core

$$(1) \frac{(\text{homo}) - (\text{lump})}{(\text{homo})} \times 100$$

(homo) signifies control

rod worth in a homogenous control rod model.

(lump) signifies control

rod worth in a heterogeneous

control rod model with a

central absorber region and

a surrounding annular coolant

structural region.

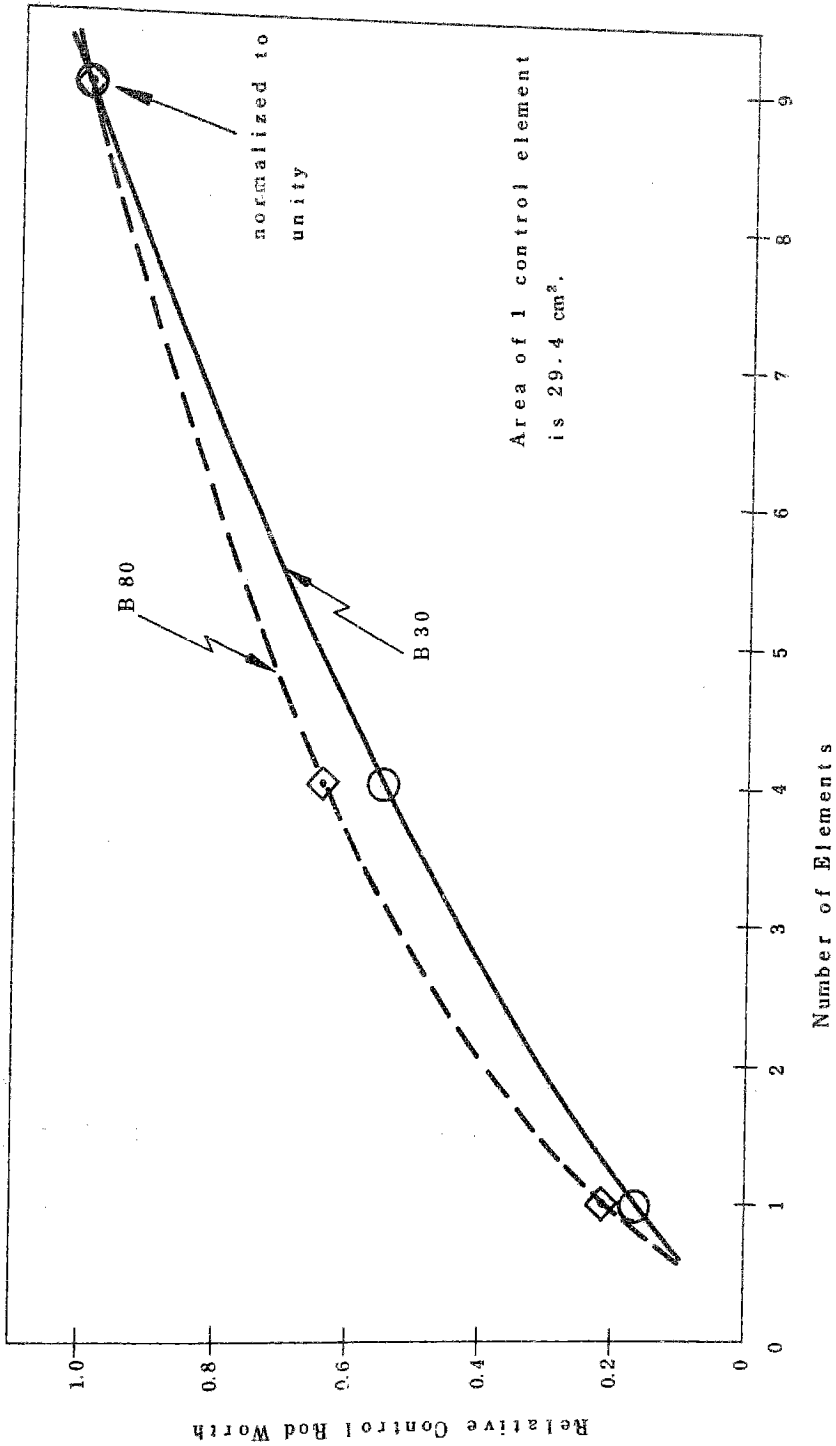


Fig 5.1-2 Control Rod Worth vs. Control Rod Area
in BIZET Reference Core

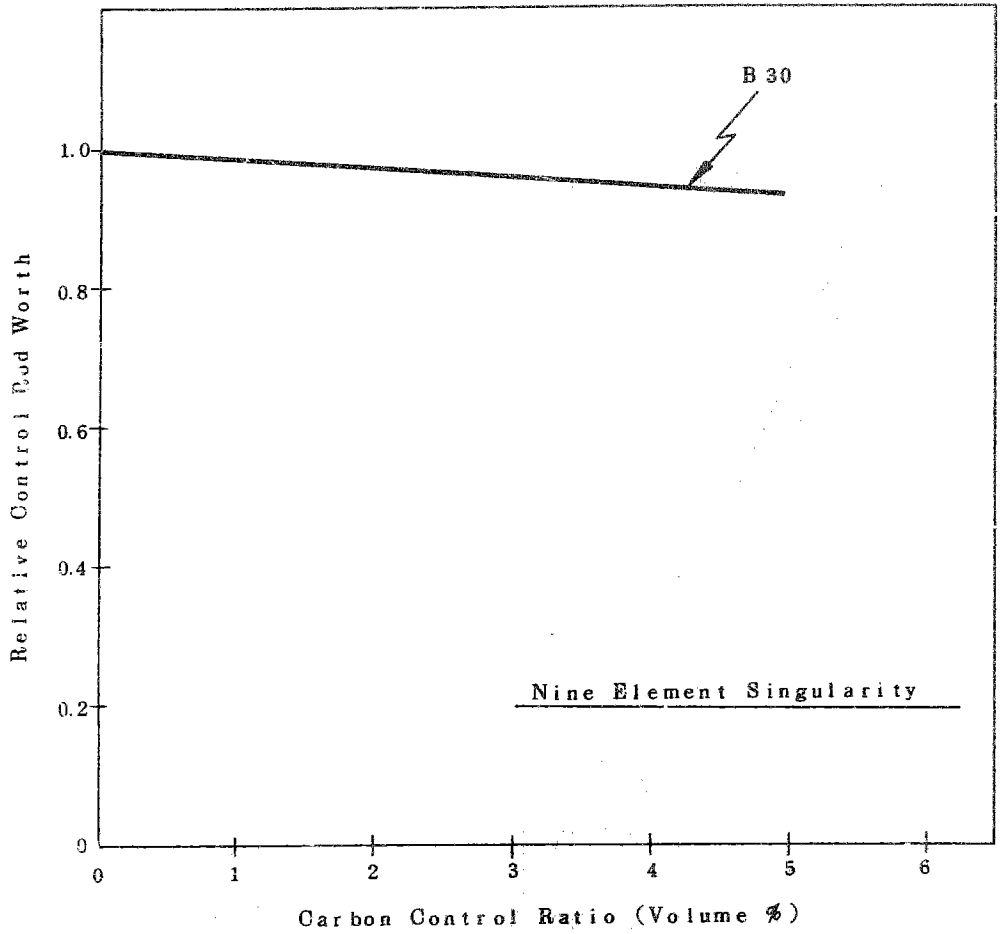


Fig 5.1 - 3

Variation of Control Rod Worth at the Core Center with carbon Contents in BIZET Reference Core

5.1.2 余剰反応度と制御棒挿入本数

BTN/UK-7²⁾によれば、基準体系の余剰反応度は4.3%Δkである。今回の検討では基準体系の余剰反応度は4.0%Δkとなった。

基準体系で、天然ボロン制御棒を使用すると8～10本程度挿入できると考えられるB-10濃度30%程度の制御棒なら、第1グループの制御棒(6本)についてスタックロッドの実験が可能と思われる。

このように基準体系においても、現実の制御棒挿入パターンを近似的に表わす挿入がいくつか可能である。

5.2 ビゼー好適体系(A案)

5.2.1 単一制御棒価値

1) B-10濃度効果……………図5.2-1

5.2.2 複数本制御棒価値

1) 同一層内の干渉効果……………図5.2-2

2) 層間干渉効果*……………図5.2-3

5.2.3 制御棒挿入による出力分布への影響

1) 単一制御棒挿入効果……………図5.2-4

2) 多数本制御棒挿入効果……………図5.2-5

* 4.1.2の図4.1-12と異なり2つのグループの制御棒のB-10濃度を同時に変化させている。

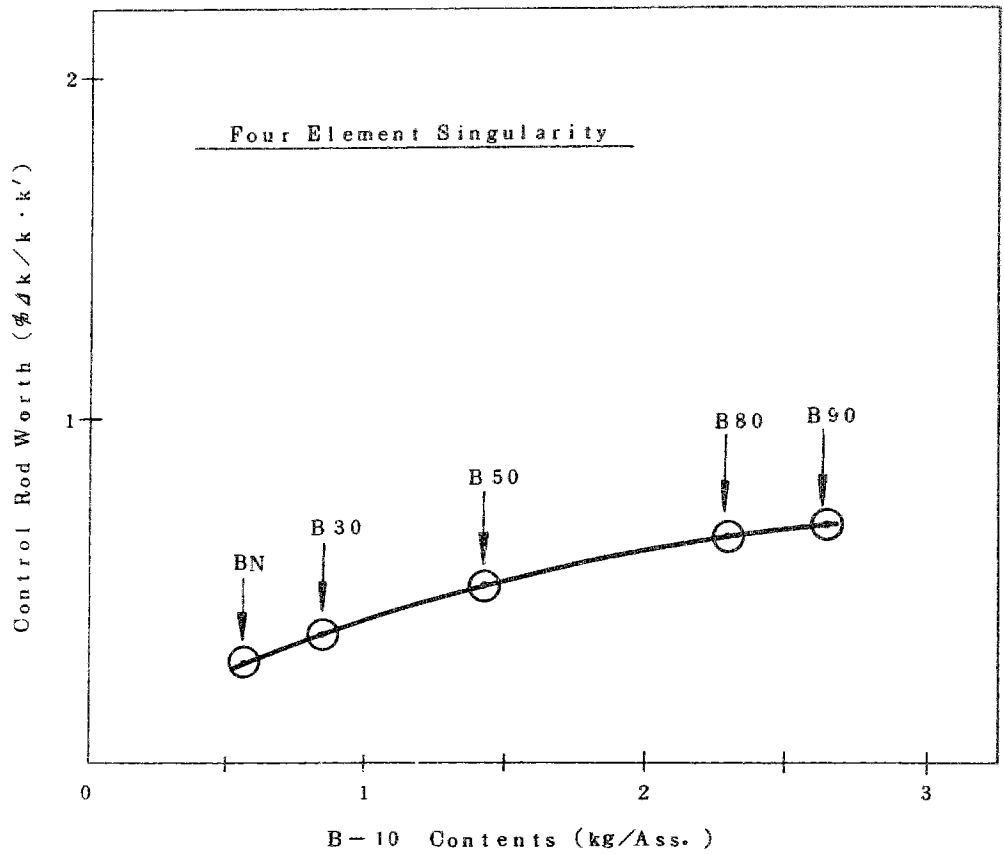


Fig 5.2 - 1 B-10 Concentration Effect on Core Center Control Rod Worth in A-Core

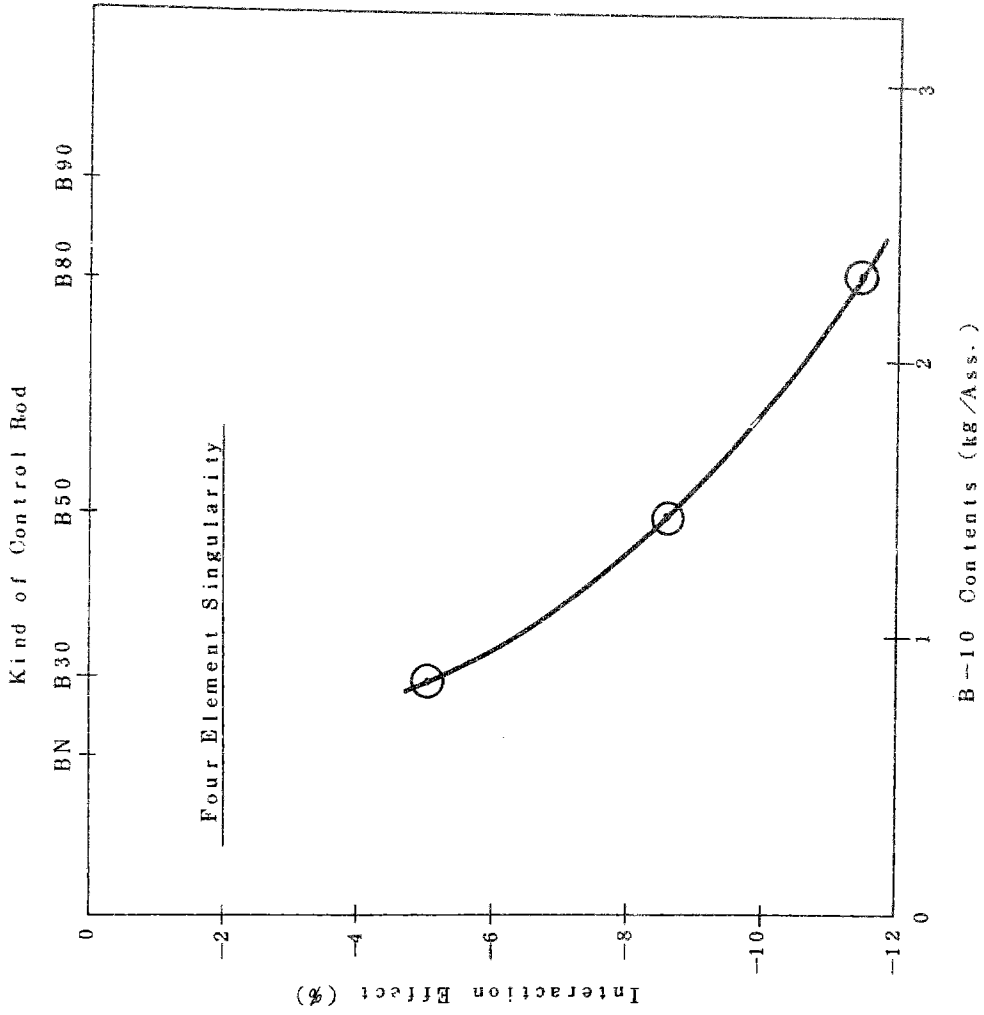


Fig 5.2-2 Interaction Effect of B-10 Concentration when Control Rods belong to the Same Layer in A-Core

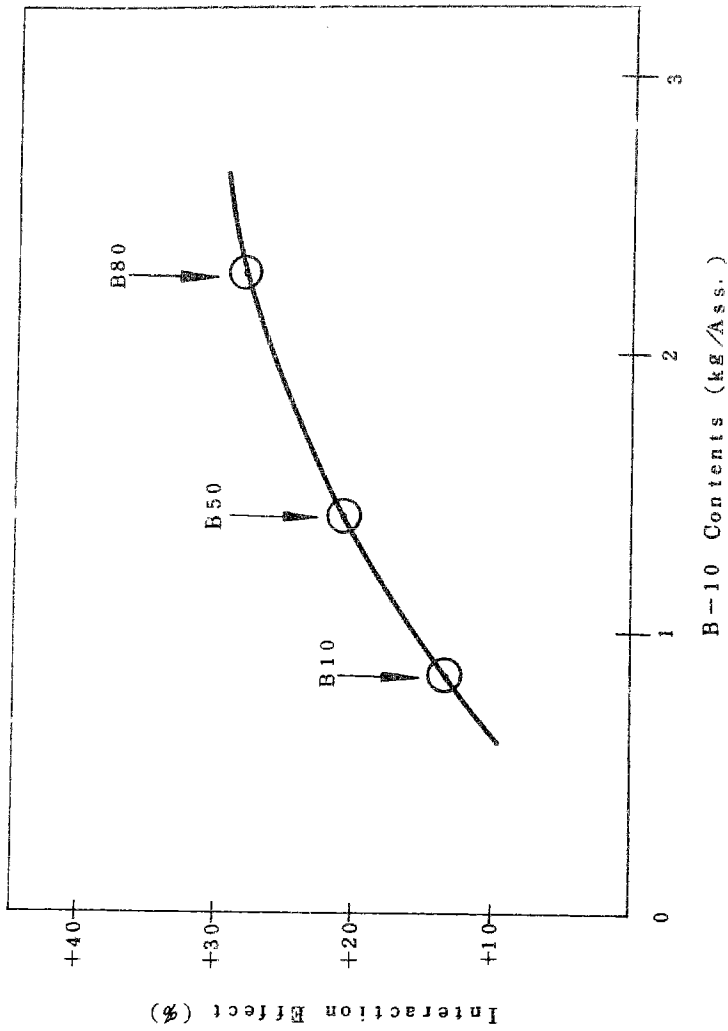


Fig 5.2-3 Interaction Effect of B-10 Concentration
 When Two Control Rod Groups have the Same B-10
 Concentration in A-Core

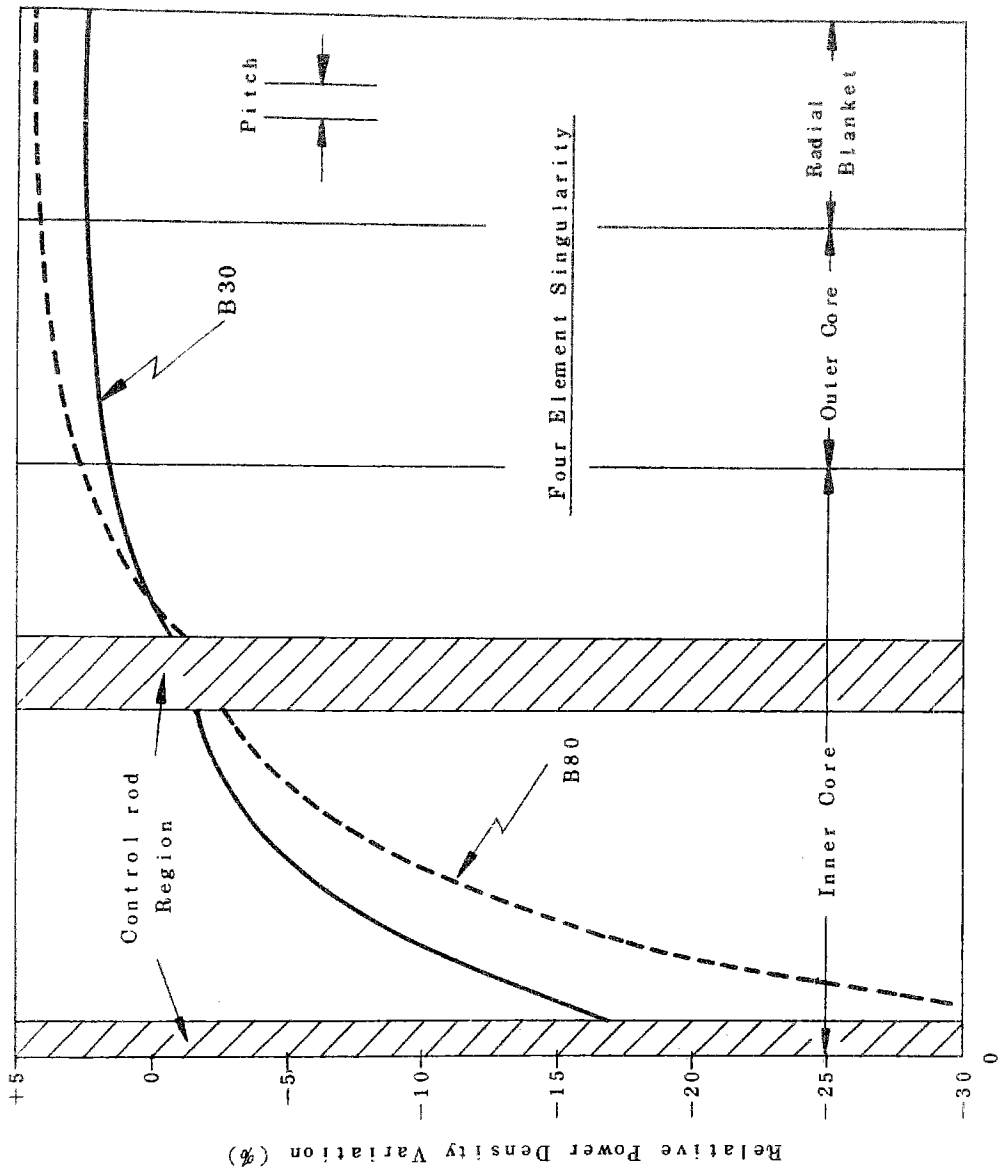
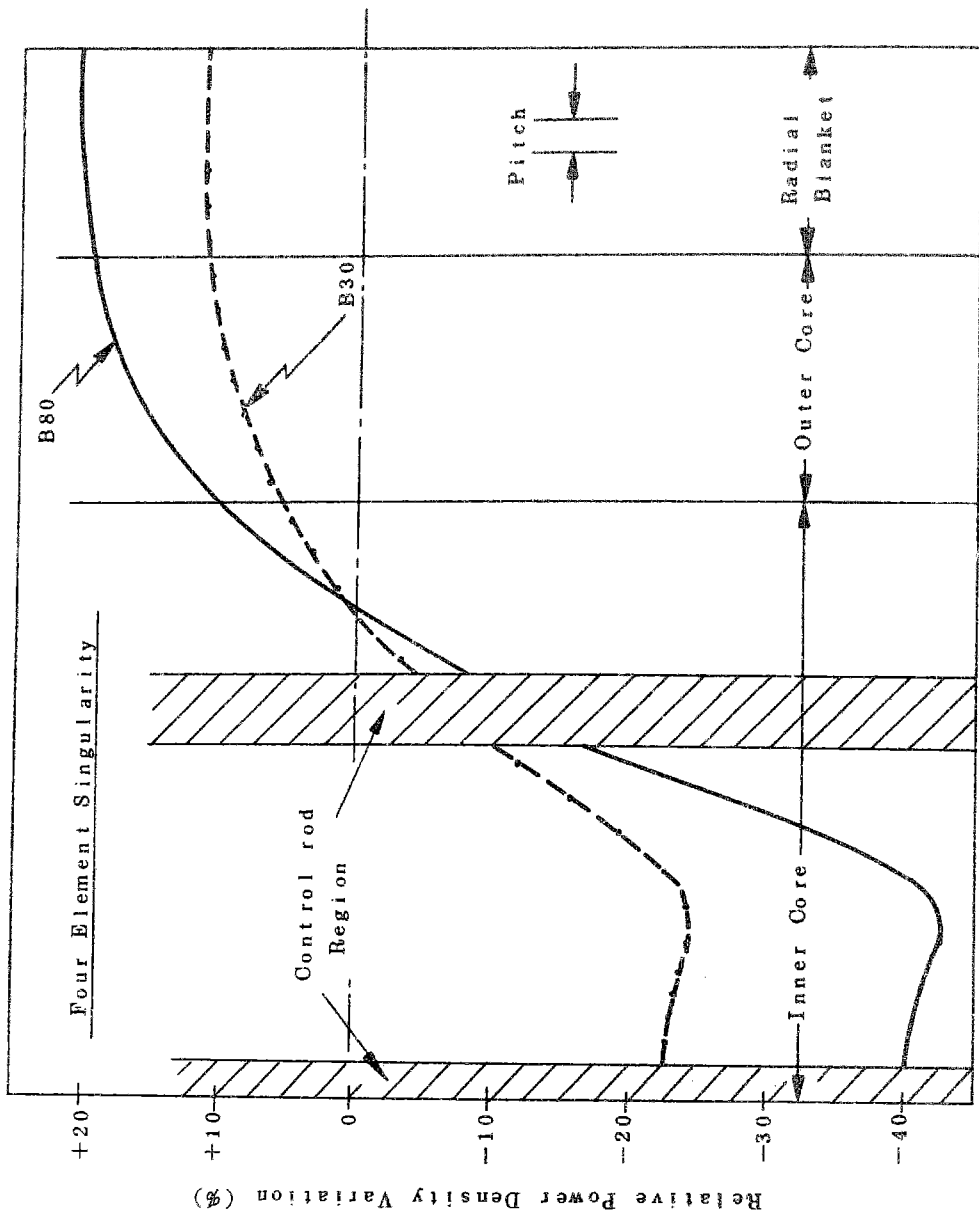


Fig 5.2-4 Distance from core Center (Assembly Pitch Unit)
 Power Density Variation with a single Control Rod Insertion
 at the Core Center



Distance from Core Center (Assembly Pitch Unit)

Fig 5.2-5 Power Density Variation with 6 control rods Insertion

5.2.4 余剰反応度と制御棒挿入本数

1) A案体系

A案体系は基準体系より余剰反応度が大きく、4.7% Δ k程度である。大型炉での後備系統制御棒に対応する制御棒グループについてのスタックロッドの実験は充分可能である。

主系統制御棒に対応する制御棒グループについては、天然ボロン制御棒を使用しても25本の挿入は未臨界になると思われる。しかし、スタックロッドを考える場合には天然ボロン制御棒を使用すると可能であると考えられる。

よって現実の制御棒パターンを模擬した多数本制御棒実験はかなりのB-10濃度の範囲で可能となる(減速材使用により炉心スペクトルを大型炉と一致させた体系でも)。

2) B案体系

B案体系は使用する反射材の量により余剰反応度は異なるが、3~4% Δ k程度である。B案体系の使用目的は内側炉心中心部の制御棒実験用であることを考えると、この余剰反応度で充分であると思われる。

5.3 核定数ファイルの評価

本ビゼー実験予備解析においては、高速炉多群定数作成用の処理コードシステムを使用して、ENDF/B-IIIから作成した多数群定数ファイル「HIMUL-1」を用いた。「HIMUL-1」はBondarenko形式を採用し、群数および群構造は「ABBN」セットと同じ26群である。本節では「HIMUL-1」によるベンチマークテストの結果について報告し今回実施したビゼー実権予備解析結果の妥当性の裏付け、および「JAERI-Fast Set」による解析結果との比較を行なう。

ベンチマークテストは、今後本ファイルの大型炉心への使用頻度を考え、大型ベンチマーク炉心に対する解析を重点的に行なった。図5.3-1に実効増倍率、図5.3-2~図5.3-4に各種中心反応度比の解析結果を示す。図中には「JAERI-Fast Set」による解析結果⁸⁾を比較のため合わせて記す。表5.3-1には「HIMUL-1」による解析結果の平均値を示す。

図に示した範囲で「HIMUL-1」、「JAERI-Fast Set」との間でシステマティックな差はなく、いずれも実験計画の予備検討として影響はないと考えられる。「JAERI-Fast Set」の最新バージョンによるベンチマーク解析結果⁹⁾においても「HIMUL-1」システマティックな差は見られなかった。

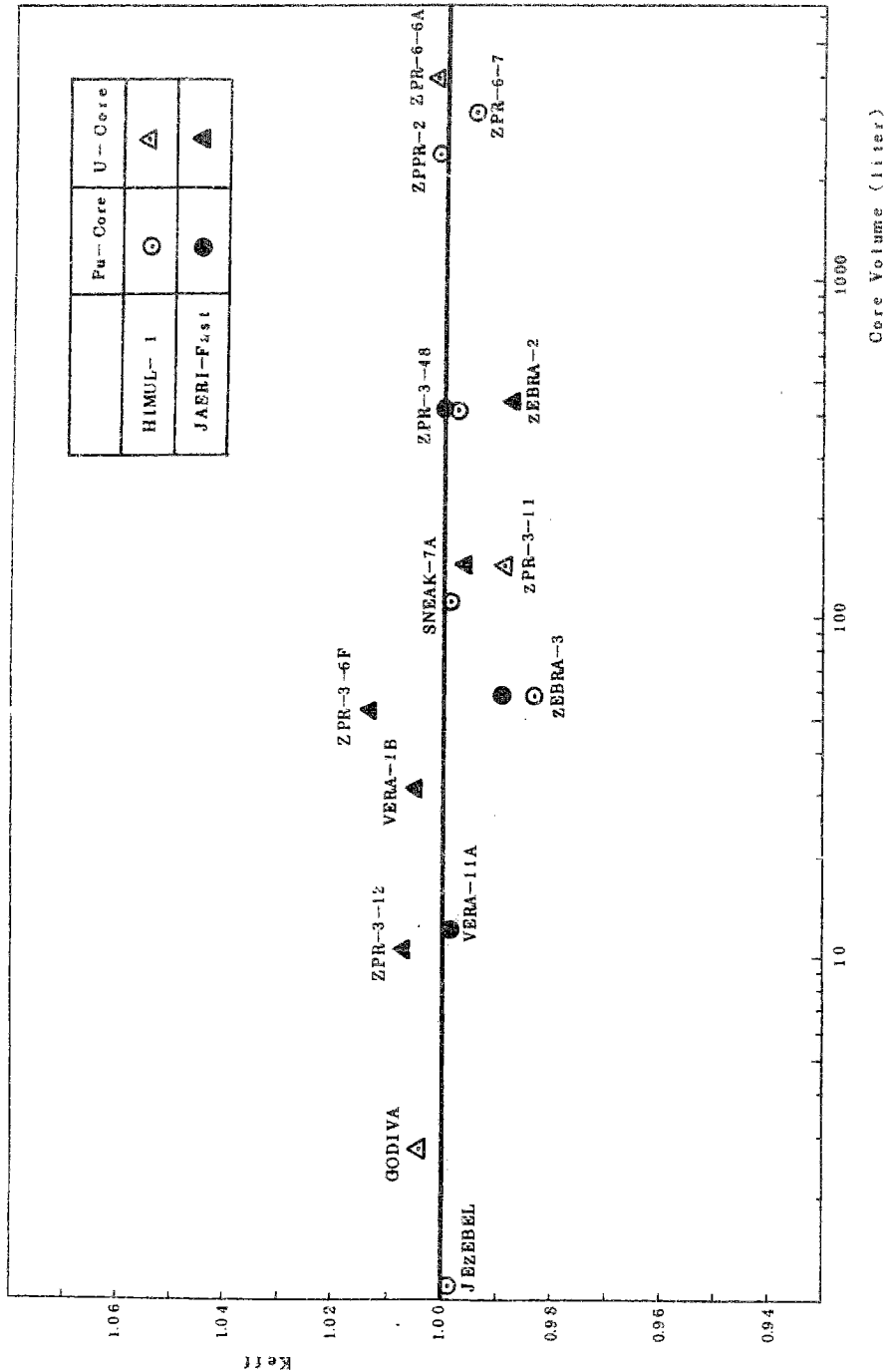


Fig 5.3-1 Keff

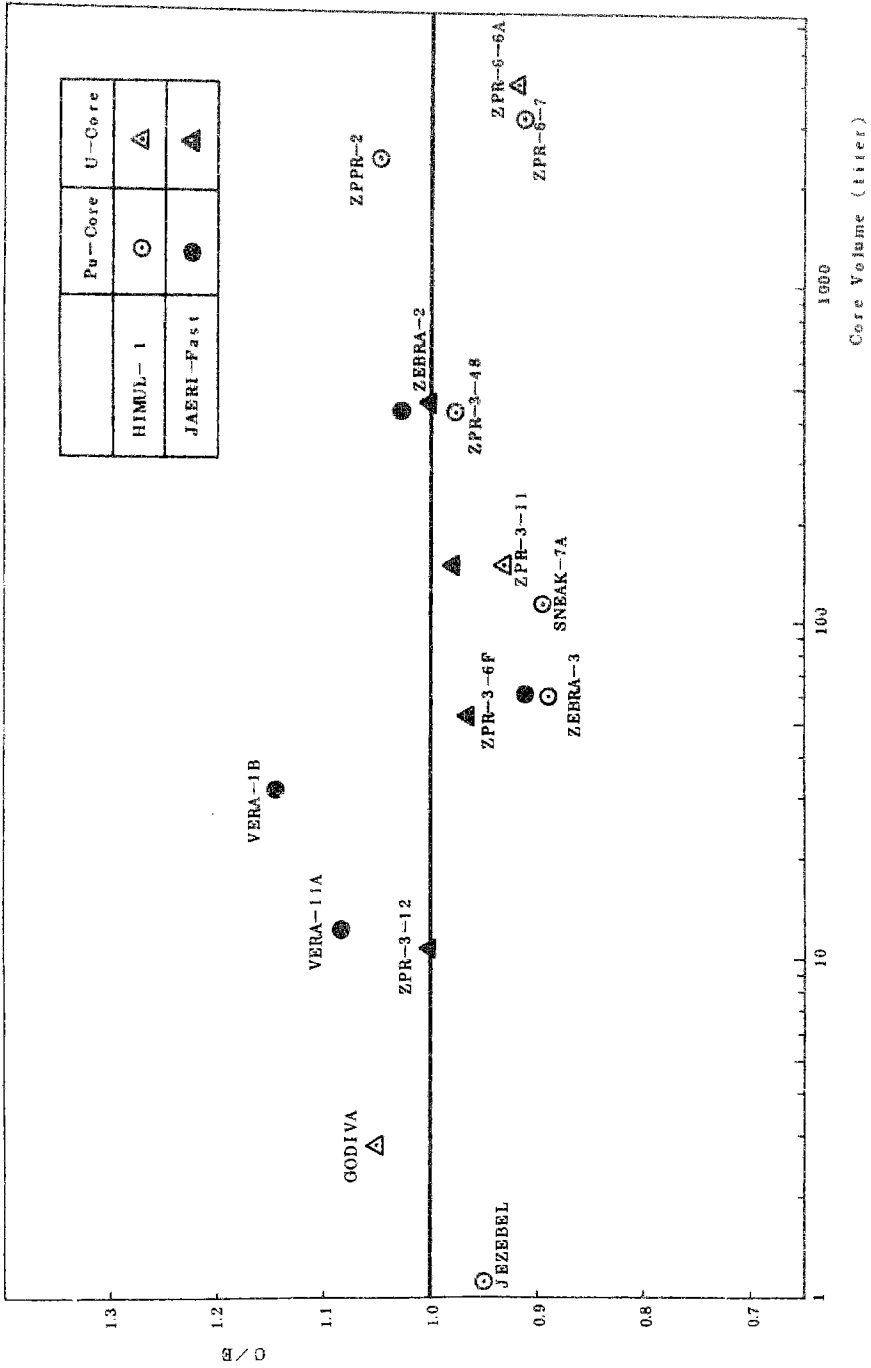


Fig 5.3 -- 2 Spectral Indices(σ_{28}/σ_{25})

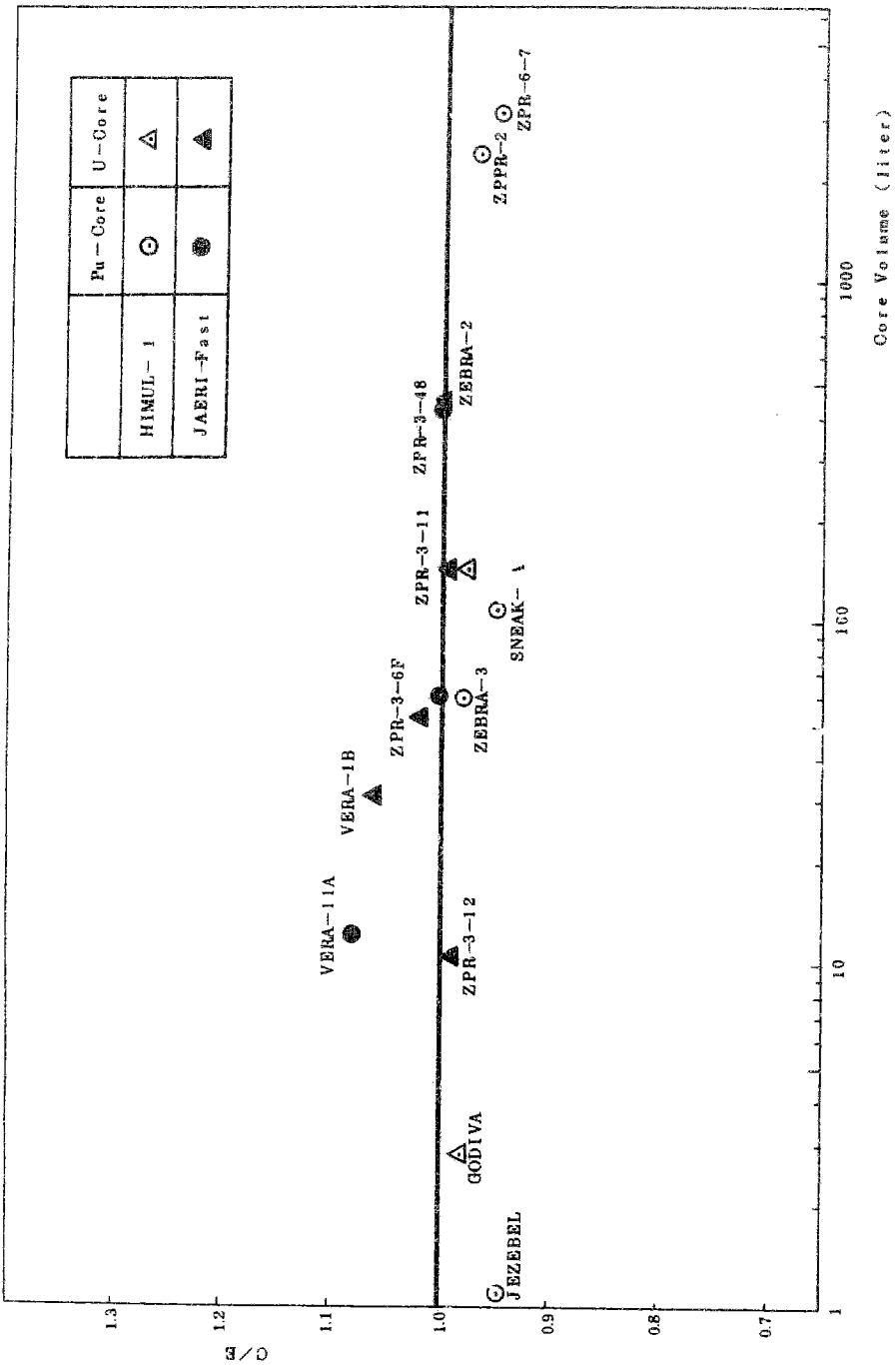


Fig 5.3 - 3 Spectral Indices ($\sigma_{49} / \sigma_{25}$)

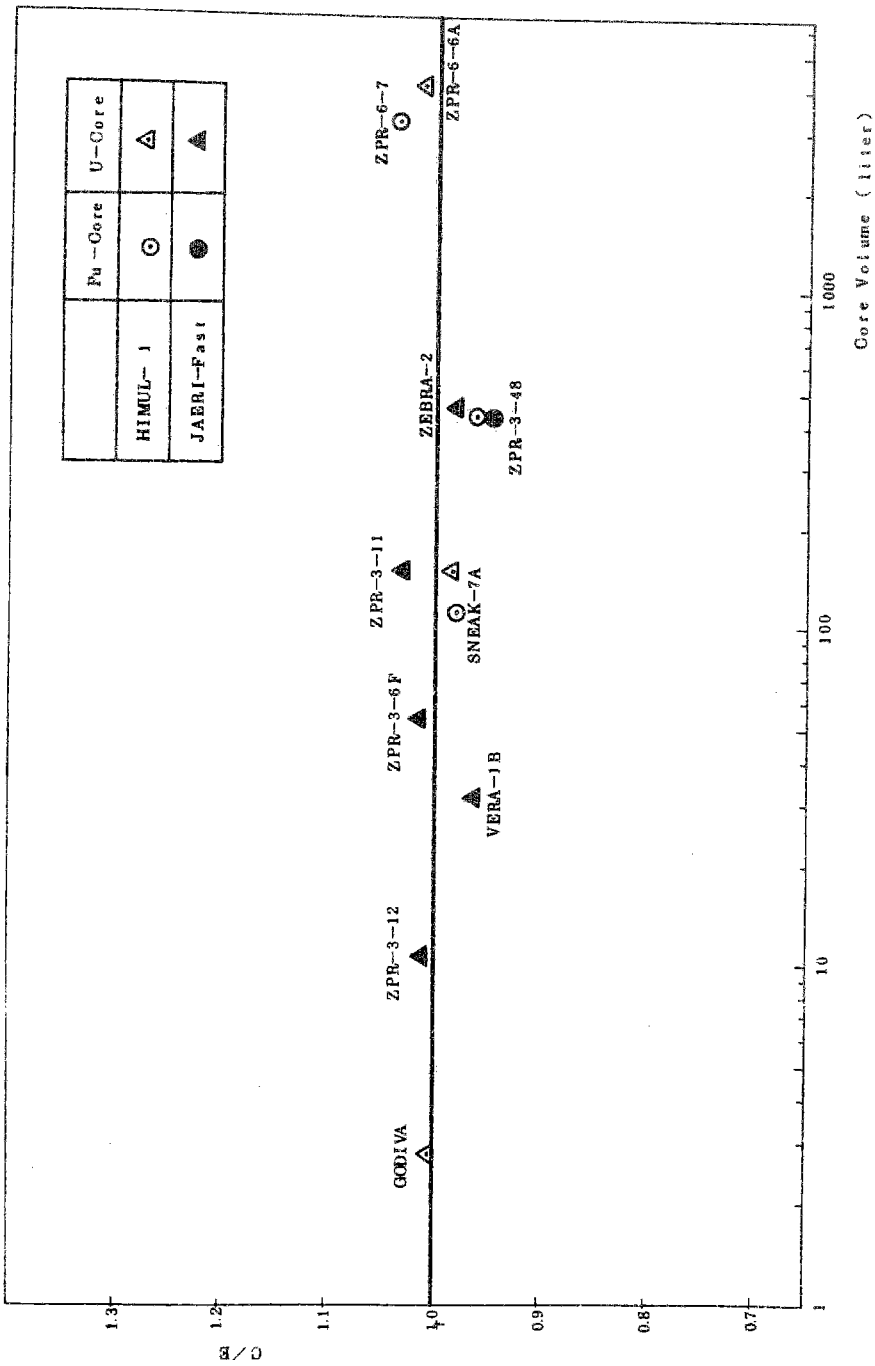


Fig 5.3-4 Spectral Indices ($\sigma_{28} / \sigma_t^{25}$)

Table 5.3 - 1 Calculated Values of Experimental Assemblies by HIMUL-1 File

| | | |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------|
| Keff (9 Cores) | Average Keff | 0.9965 |
| | Average $ Keff-1 $ | 0.0051 |
| $\sigma_f^{238} / \sigma_f^{235}$ (9 Cores) | Average Calculated to Experiment Ratio | 0.951 |
| | Average $ $ Calculated to Experiment-1 $ $ | 0.070 |
| $\sigma_f^{239} / \sigma_f^{235}$ (7 Cores) | Average Calculated to Experiment Ratio | 0.963 |
| | Average $ $ Calculated to Experiment-1 $ $ | 0.037 |
| $\sigma_f^{238} / \sigma_f^{235}$ | Average Calculated to Experiment Ratio over All Assemblies(9 cores) | 0.996 |
| | Average Calculated to Experiment Ratio over All U Assemblies(3 cores) | 0.999 |
| | Average Calculated to Experiment Ratio over All Pu Assemblies(3 cores) | 0.993 |

6. 結論と今後の問題点

今回の検討は、実証炉級大型炉を実験の対象とする大型臨界実験計画 —— ビゼー計画 —— において、この規模の大型炉における問題点を抽出し、これをいかに実験計画の中で取り上げるかを検討し、また、実験に適した炉心体系を提案することを目的とした。

この実験の予備検討において最大の制約条件は、利用可能な燃料が限られていることであり、その制限の中で最大限の効果を上げる実験計画を立案することであった。

また、今回の実験計画は制御棒に関する実験にのみ焦点を絞った。

6.1 結 論

今回の検討では、実験の対象となる実証炉級炉心の構成が明確となっていないこともありまず1,000MWe級炉心を設定し制御棒設計に関する事項に重点をおいた大型炉設計上の問題点を検討し、実験の必要事項を明らかにした。設定した大型炉心には制御棒の本数、配置、吸収体濃度、反応度収支、出力分布に対する影響を考慮したので単に実験の対象とする炉心のみならず、1,000MWe炉心における一つの目安を与えたものである。

この実証炉級炉心における制御棒に関する主たる特徴は下記の3点である。

- (1) 現実的な制御棒パターンにおける制御棒間の価値の干渉効果が大きい。
- (2) 制御棒挿入による出力分布の変動が大きい。
- (3) 最大スタックロッド価値の現われる位置が最大単一制御棒価値を有する層になるとは限らない。

1,000MWe級炉心における必要分裂性プルトニウム量は約3,000Kgであるが、ビゼー計画で使用可能な燃料量は約2,000Kg相当にすぎない。ビゼー計画ではすでに英、独で検討中の炉心構成があり、これを基準体系として制御棒実験を対象とした検討の結果次の問題点が指摘された。

- (1) 内側炉心が小さいこと。
- (2) 制御棒集合体一体の体積が大きいこと。
- (3) 制御棒配置および本数が大型炉の問題点検討には十分でないこと。
- (4) 炉心スペクトルが大型炉と比較して硬いこと。

上記問題点の中で、炉心容積によって必然的に起るスペクトルの違いは検討の結果制御棒干渉効果への影響が小さいことが確かめられた。

基準体系における問題点を解決するために、好適な実験体系の検討を実施した結果、2つの案を提案した。この2案をA案、B案とし、次のような特徴をもつものとした。

- (A 案) 実証炉級大型炉心に比較して中性子のふるまいから考えて構造的に相似とする。

炉心サイズは燃料の許す限り大きくする。

(B 案) 実証炉級大型炉心に比較して内側炉心をできるだけ等体積とし、類似の制御棒配置とする。

この2案を検討する過程で

- (a) プルトニウム量の不足
- (b) 反射材の使用
- (c) 減速材の付加

などの問題が生じたが、プルトニウム量はSNEAK装置から補充可能な範囲で解決でき、反射材の使用は実験解析上の問題が生じないことが判明した。減速材の付加は実効増倍係数の低下をまねく事と、スペクトル補正による制御棒特性への効果が比較的小さいことにより使用を判断すべきである。

ここで提案したA案体系の特徴は

- (a) 余剰反応度が大きく、現実の挿入パターンを考えた多数本の制御棒実験が可能である。
- (b) 制御棒価値の空間分布、干渉効果に関して、大型炉と比較的良く一致した傾向を表わす。
- (c) 適当な制御棒吸収体濃度の選択によりスタックロッド価値の実験ができる。
- (d) 制御棒の挿入による出力分布への影響は大型炉の傾向を良く表わす。

B案では

- (a) 内側炉心の実物に近い模擬が可能である。
- (b) したがって計算値/実験値比の外挿の問題が少ない。

これらの実験計画の予備検討において小型体系で大型炉心の特徴をできるだけ表現する「相似体系法」とも言うべき手法の緒がつかめた、手法の確立は未完成であるが、設計へのサポートにおけるデータの外挿を極力少なくするためには今後有効な手段となる可能性がある。

6.2 検討結果のまとめ表

ビゼー実験体系の幾何形状、富化度等からの比較を表6.2-1に示す。

1,000MWe級大型炉とビゼー実験体系との比較を表6.2-2に示す。

Table 6.2 - 1 Comparison of BIZET Reference Core with the Proposed A-and B-Core

| Items | Reference Core | A-Core | B-Core |
|--------------------------------------|------------------|---------------|---------------|
| 1 Inner Core Diameter | 1.0* | 1.13 | 1.35 |
| 2 Element Number of Control Rod | 9 | 4 | 4 |
| 3 Use of Moderator | Used if required | | |
| 4 Use of Reflector | Not Required | | Required |
| 5 Fuel Enrichment (Inner/Outer Core) | 16.1/20.3 a/o | 16.1/22.3 a/o | 16.1/20.3 a/o |
| 6 Excess Reactivity | 4.0 %ΔK | 4.7 %Δk | 3~4 ** %Δk |

* Normalized

** Excess reactivity in the Proposed B-Core depends on the thickness of reflector.

Table 6.2 - 2 Comparison of 1000MWe Class FBR with
BIZET Mock-up Cores

| Items | 1,000 MWe Class FBR | BIZET Mock-up Core | | | Note |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|
| | | Reference Core | A-Core | B-Core | |
| Core Volume | 1.0 [*] | 0.58 | 0.58 | 0.61 | * Normalized |
| Inner Core Volume | 2.4 | 1.0 ^{**} | 1.3 | 2.0 | ** Normalized |
| Inner Core Diameter | 2.4 ^m | 1.6 ^m | 1.8 ^m | 2.2 ^m | |
| Outer Cor Diameter | 3.2 ^m | 2.5 ^m | 2.5 ^m | 2.5 ^m | |
| Core Height | 1.0 ^m | 0.89 ^m | 0.89 ^m | 0.95 ^m | |
| Inner-to-Outer Core Volume Ratio | 1.1 | 0.66 | 1.1 | 2.8 | |
| Control Rod Volume Fraction | 0.07 | 0.12 | 0.07 | 0.04 | Control Rods belong to inner Core. |
| Pu Fissile Inventory | 3.0 ton | 1.7 ton | 1.9 ton | 1.9 ton | |
| Neutron Energy Spectra | | Neutron Energy Spectra in all BIZET mock-up Cores are harder than those in a Large FBR. | | | |

Table 6.2-2 Comparison of 1,000MWe Class FBR with BIZET Mock-up Core (Continued)

| Items | 1,000MWe Class FBR | BIZET Mock-up Core | | | | Note |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------|---------|-------------------|------|
| | | Reference Core | A-Core | B-Core | | |
| Interaction Effect among the Control Rods in the First Ring | % -16 | % -25 | % -14 | % -2 | | |
| Single Rod Worth belonging to the First Ring ★ | *** 1.0 | 0.97 | 0.99 | 0.89 | *** Normalized | |
| Influence on the Power Distribution when Control Rods in the First Ring are fully Inserted | % -52 | % -69 | % -33 | | | |

★ Relative Power Change in the inner most fuel assembly

6.3 今後の問題点

今回の予備検討では実験に最も重要な燃料量に制約があり、限られた条件の中での最大効果をあげるための実験計画であった。

炉心が大型になるにつれて、フル・モックアップ実験ができる条件は少なくなり、今回のようなケースが増してくるものと思われる。

最終的に実験データを設計に適用するためには実験値の何らかの内挿または外挿が必要となってくるが、そこにはまた新たな誤差が入る。

設計における誤差評価をできる限り精度良く実施するには、実験体系をできる限り実物に近いものとしておくことが必要であり、種々な制限の下での実験では同じ傾向を表わす体系を作ることが必要である。同一傾向を表わす体系が理論的にも説明できるものであればさらに好ましい。

今後の大型炉の実験に関して種々な制限が課せられることを考慮し、大型炉心の模擬手法の開発と理論的裏付けの必要がある。

7. 結 言

本研究の結果，ピゼー計画における条件の中で実証炉級大型炉の制御棒に関する問題点の解決に適した体系を提案することができた。

この検討の中で，実証炉級大型炉での制御棒に関する問題点が明確にされ，今後の実験計画，炉心設計両面への寄与が大きいことが期待される。

また，比較的小型の体系によって大型炉心の模擬実験を行う手法を見いだしたことは今後の実験計画立案に役立つ一方，手法の確立が必要である。

8. 謝 辞

本研究の遂行にあたり、多くのコメントと協力をいただいた動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部の大竹巖氏，瑞慶覧篤氏に対し心から感謝の意を表する。

9. 参考文献

- 1) J. E. Sanders and J. M. Stevenson, "Preliminary Design of a Large Core for Zebra," BIZET Technical Note/UK-1, June (1975).
- 2) G. Ingram and J. M. Stevenson, "Further Considerations of the First BIZET Core", BIZET Technical Note/UK-7, November (1975).
- 3) "Zebra Core 12(MZB) Number Densities Including Print-Out," MOZART Technical Note-32.
- 4) "Data on PNC Mock-up Control Rods and B₄C Pellets," MOZART Technical Note-39.
- 5) もんじゅ調整設計(Ⅱ) 解析検討書第1分冊 PNC報告書 ZJ202-04-03
日立製作所 (昭和50年).
- 6) MOZART 実験解析(Ⅲ) Vol.1
PNC報告書 SJ202 74-13
日立製作所 (昭和49年).
- 7) B. A. Hutchins and J. H. Field, "Critical Experiments and Cooperative Evaluations Program," Fifth Quarterly Report, GEAP-13771-5 (1972).
- 8) 高速炉用定数の開発成果 JAERI-Fast Set Version II
N241 75-19 日本原子力研究所・動力炉核燃料開発事業団(昭和50年11月).
- 9) 長谷川 明 (日本原子力研究所) 私信.