

JAERI-Research
95-059



日本原子力研究所・研究炉JRR-3Mの
燃料領域照射筒内部の詳細中性子スペクトル計算
(協力研究)

1995年9月

曾野浩樹・中野佳洋・山根義宏*・三澤 育*・横尾健司

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 (株)原子力資料サービス

日本原子力研究所・研究炉 JRR-3M の燃料領域照射筒内部の詳細中性子スペクトル計算

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

曾野 浩樹[†]・中野 佳洋・山根 義宏*

三澤 育^{*}・横尾 健司

(1995年8月18日受理)

筆者らは、日本原子力研究所・研究炉 JRR-3M の燃料領域照射筒を用いて、放射化実験により超ウラン元素（Transuranium, TRU）の断面積を積分的に評価することを計画している。この実験解析で必要となる試料照射位置におけるエネルギー 107 群の中性子スペクトルを、燃焼履歴・制御棒パターンを考慮した全炉心拡散計算と、照射筒内部の構造を均質化せずに中性子束を計算する照射筒内部詳細計算とを組み合わせる 2 段階計算により求めた。

2 段階計算で求められた中性子スペクトルは、反応率に着目して実験値と比較した結果、相対値については数%の精度で一致した。しかし、絶対値に関しては、制御棒吸収体の近傍で最大 30 % の差が見られ、より一層の精度向上のためには、制御棒まわりの中性子輸送効果の補正法を改善する必要がある。

本報告書は、名古屋大学と原研との協力研究により得られた成果である。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

- NUCEF 試験室

* 名古屋大学

Calculation of Fine Neutron Spectrum in Irradiation Holes in
Fuel Region of JRR-3M

Hiroki SONO⁺, Yoshihiro NAKANO, Yoshihiro YAMANE*
Tsuyoshi MISAWA* and Kenji YOKOO

Department of Research Reactor
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 18, 1995)

The authors have a plan to evaluate TRU neutron cross sections based on the activation experiments by using JRR-3M. Fine neutron spectrum expressed by 107 energy group structure at irradiation holes in fuel region of JRR-3M core, which was utilized to analyze experimental data, was calculated by 2 step calculation. The first step is the whole core calculation taking account of burnup history and control rod pattern, and the second step is the irradiation hole calculation without any homogenization of irradiation hole components by taking into account of the neutron spectrum of surrounding region.

Fine neutron spectra calculated by 2 step calculation were compared with the experimental results on reaction rate, both agreed within several percents relatively. In the comparison of absolute values, however, the maximum difference was up to 30 percents in the vicinity of control rods. This originates from the neutron transport effect around control rods. An improvement for the treatment of neutron transport effect is needed to get higher accuracy.

Keywords: JRR-3M, Irradiation Hole, TRU Transmutation, Fine Neutron Spectrum, SRAC, 2 Step Neutron Spectrum Calculation, Whole Core Calculation, Irradiation Hole Calculation, Burnup History, Control Rod Pattern, Heterogeneity of Irradiation Hole Components

This report is the results of a collaborative research between Nagoya university and JAERI.

+ Department of NUCEF Project

* Nagoya University

目 次

はじめに	1
1. 実験体系と放射化実験	2
1.1 JRR-3M 炉心	2
1.2 放射化実験	3
2. 詳細スペクトル計算	15
2.1 計算コードおよび中性子断面積ライブラリ	15
2.2 従来の方法の問題点と2段階スペクトル計算法の概要	15
2.3 実効断面積の作成	16
2.4 軸方向バックリング	20
2.5 制御棒近傍の中性子輸送補正	20
2.6 全炉心拡散計算	21
2.7 照射筒内部詳細計算	23
3. スペクトル計算値の検証	42
3.1 スペクトル計算値による反応率計算	42
3.2 反応率絶対値の検証	45
3.3 スペクトル評価値の検証	46
4. 結論	57
謝辞	58
参考文献	59
Appendix A 3次元xyz体系107群全炉心拡散計算における2つの仮定の検証	60
Appendix B JRR-3M 炉心構成要素の原子個数密度	65
Appendix C E3関数	69
Appendix D SRACコードシステムの入力例	70

Contents

Introduction	1
1. Experimental Setup and Irradiation Experiment	2
1.1 JRR-3M Core	2
1.2 Irradiation Experiment	3
2. Calculation of Fine Neutron Spectrum	15
2.1 Code and Neutron Cross Section Library	15
2.2 Problem in Conventional Method and Outline of 2 Step Calculation	15
2.3 Effective Cross Sections	16
2.4 Vertical Buckling	20
2.5 Neutron Transport Correction around Control Rods	20
2.6 Whole Core Diffusion Calculation	21
2.7 Irradiation Hole Calculation	23
3. Verification of Calculated Spectrum	42
3.1 Calculation of Reaction Rate	42
3.2 Verification of Absolute Reaction Rates	45
3.3 Verification of Spectrum Value	46
4. Conclusion	57
Acknowledgement	58
References	59
Appendix A Verification of Two Hypotheses in 3D- <i>xyz</i> Whole Core Diffusion Calculation	60
Appendix B Atom Number Densities of JRR-3M Core Components	65
Appendix C E3 Function	69
Appendix D Sample Input Data of SRAC Code System	70

はじめに

TRU 消滅処理研究では、原子炉や陽子加速器と組み合わせた未臨界体系での TRU の生成および消滅量の予測がその主な研究対象であり、そのためには、TRU と中性子との相互反応断面積（以後、断面積）や核分裂スペクトルなどの中性子核データ（以後、核データ）が必要である。TRU の中でも、主要アクチニドとして重要視されてきた Pu-239, Pu-240, Pu-241 の核データについてはほぼ完成されつつある。しかし、従来マイナーアクチニドと呼ばれていた高次に生成される TRU (Np-237, Am-241, Am-243 など) では測定データが少なく、中でも ($n,2n$) 断面積、非弾性散乱断面積および全断面積に至っては皆無であり、断面積の信頼性は概ね低いのが現状である^[1]。

核データライブラリに収録された断面積の直接的な検証は、放射化実験などで得られた反応率積分値と反応率計算値との比較の形で行うのが主流である。近い将来、TRU 試料の入手が可能になることを想定して、TRU の断面積評価を目的とする TRU 放射化積分実験を精度よく行うための環境を整備しておくことが必要である。

現在、筆者らの研究グループでは、TRU 放射化実験を JRR-3M の燃料領域照射筒（以後、照射筒）を用いて行うことを計画している。この場合、放射化実験の解析を行う上で必要となる試料照射位置における中性子エネルギースペクトル（以後、スペクトル）を炉心計算により求めなければならない。TRU はその多くが共鳴核種であることから、実験解析を精度よく行うには、詳細なスペクトルが必要である。そのためには、炉心計算時の中性子エネルギー群構造を可能な限り細かくして計算を行うことが望ましい。また、照射筒要素のスペクトルは、その周辺の燃料要素の燃焼度や制御棒パターンに依存する。したがって、照射スペクトルを正確に求めるには、照射の都度、燃料要素の燃焼履歴や制御棒パターンを考慮して、スペクトル計算を行う必要がある。

このようなスペクトル計算はモンテカルロ計算により行うことも可能であるが、全計算体系に比べて着目する領域が非常に小さく、スペクトル計算値の統計誤差が大きくなる、また、照射の都度計算を行うため、膨大な計算機資源が必要になるなどの問題があり、スペクトルを求めるためのモンテカルロ計算はあまり得策ではない。そこで、原研で開発された汎用熱中性子炉計算コードシステム SRAC を用い、SRAC の中性子断面積ライブラリで採用されている中性子エネルギー 107 群の群構造（以後、特に断りのない限り、群と言えば中性子エネルギー群を指すものとする）を縮約することなく、なおかつ、照射筒内部の構成を厳密に考慮した試料照射位置における詳細スペクトル計算法を検討した^[2]。

この詳細スペクトル計算法の妥当性を検証するため、断面積のよく知られた核種の放射化実験を、JRR-3M 燃料領域照射筒の VT-1 および RG-1 照射筒を用いて行なった。そして、スペクトル計算値から求めた反応率計算値と反応率実験値とを比較し、その妥当性を検証した。

1. 実験体系と放射化実験

1.1 JRR-3M 炉心

本章の炉心構成および各要素の説明には参考文献 [3] の文章を引用した。ただし、本論文中で用いた名称が参考文献 [3] と異なる部分には修正を加えた。

【炉心構成】

JRR-3M の水平断面を Fig. 1.1 に、垂直断面を Fig. 1.2 に示す。炉心は、Fig. 1.1 に示すように 37 要素セルから成る燃料領域およびこの領域の半径方向を囲む Be 反射体領域から成り、その外側に環状の重水反射体領域がある。さらに、これらの全領域を軽水が囲んでいる。燃料領域の水平断面等価直径は約 53cm、軸方向の燃料有効部高さは 75.0cm である。燃料領域の 37 要素セルは、それぞれ水平断面が一辺 7.72cm の正方形であり、その内訳は、標準型燃料要素 26 体、制御棒要素が軸方向上端に接続されているフォロワ型燃料要素 6 体および照射筒要素 5 体である。

Be 反射体領域は、Al 製重水タンク内壁を含む外径 62cm、高さ 142.4cm の環状の領域であり、4 つの照射筒がある。重水反射体領域は、内径 62cm、外径 196cm、高さ 153cm の円環状であり、9 本の水平実験孔、8 本の垂直照射孔および冷中性子源照射孔が設けられている。燃料領域上下部には、燃料集合体の上下部の Al 材と軽水とで構成される領域があり、これを軸方向反射体と呼ぶ。

【標準型燃料要素】

標準型燃料要素は ETR 型板状燃料である。水平断面を Fig. 1.3 に、垂直断面を Fig. 1.4 に示す。燃料要素の水平断面は $7.62\text{cm} \times 7.62\text{cm}$ の正方形であり、燃料芯材の厚み 0.076cm、被覆材の厚み 0.038cm の燃料板が等間隔に 20 枚並んでいる。燃料板間の減速材ギャップは 0.228cm である。燃料芯材の幅および高さは、それぞれ 6.16cm および 75.0cm である。燃料芯材は、U 濃縮度 19.75 重量 % の U-Alx 分散型合金であり、要素 1 体当たり 300g の U-235 を含む。燃料芯材の U 密度は約 2.2g/cm^3 である。

この詳細スペクトル計算法の妥当性を検証するため、断面積のよく知られた核種の放射化実験を、JRR-3M 燃料領域照射筒の VT-1 および RG-1 照射筒を用いて行なった。そして、スペクトル計算値から求めた反応率計算値と反応率実験値とを比較し、その妥当性を検証した。

1. 実験体系と放射化実験

1.1 JRR-3M 炉心

本章の炉心構成および各要素の説明には参考文献 [3] の文章を引用した。ただし、本論文中で用いた名称が参考文献 [3] と異なる部分には修正を加えた。

【炉心構成】

JRR-3M の水平断面を Fig. 1.1 に、垂直断面を Fig. 1.2 に示す。炉心は、Fig. 1.1 に示すように 37 要素セルから成る燃料領域およびこの領域の半径方向を囲む Be 反射体領域から成り、その外側に環状の重水反射体領域がある。さらに、これらの全領域を軽水が囲んでいる。燃料領域の水平断面等価直径は約 53cm、軸方向の燃料有効部高さは 75.0cm である。燃料領域の 37 要素セルは、それぞれ水平断面が一辺 7.72cm の正方形であり、その内訳は、標準型燃料要素 26 体、制御棒要素が軸方向上端に接続されているフォロワ型燃料要素 6 体および照射筒要素 5 体である。

Be 反射体領域は、Al 製重水タンク内壁を含む外径 62cm、高さ 142.4cm の環状の領域であり、4 つの照射筒がある。重水反射体領域は、内径 62cm、外径 196cm、高さ 153cm の円環状であり、9 本の水平実験孔、8 本の垂直照射孔および冷中性子源照射孔が設けられている。燃料領域上下部には、燃料集合体の上下部の Al 材と軽水とで構成される領域があり、これを軸方向反射体と呼ぶ。

【標準型燃料要素】

標準型燃料要素は ETR 型板状燃料である。水平断面を Fig. 1.3 に、垂直断面を Fig. 1.4 に示す。燃料要素の水平断面は $7.62\text{cm} \times 7.62\text{cm}$ の正方形であり、燃料芯材の厚み 0.076cm、被覆材の厚み 0.038cm の燃料板が等間隔に 20 枚並んでいる。燃料板間の減速材ギャップは 0.228cm である。燃料芯材の幅および高さは、それぞれ 6.16cm および 75.0cm である。燃料芯材は、U 濃縮度 19.75 重量 % の U-Alx 分散型合金であり、要素 1 体当たり 300g の U-235 を含む。燃料芯材の U 密度は約 2.2g/cm^3 である。

【フォロワ型燃料要素】

フォロワ型燃料要素は ETR 型板状燃料であり、 Al 製のガイドチューブで囲まれている。水平断面を Fig. 1.5 に、垂直断面を Fig. 1.6 に示す。ガイドチューブの内側の燃料体部分の水平断面は $6.36\text{cm} \times 6.36\text{cm}$ の正方形であり、燃料芯材の厚み 0.076cm 、被覆材の厚み 0.038cm の燃料板が等間隔に 16 枚並んでいる。燃料板間の減速材ギャップは 0.238cm である。燃料芯材の幅および高さは、それぞれ 4.9cm および 75.0cm である。燃料芯材の U 濃縮度および U 密度は、標準型燃料要素と同じであり、要素 1 体当たり約 190g の U-235 を含む。

【制御棒要素およびコネクタ】

制御棒要素の水平断面を Fig. 1.7 に、垂直断面を Fig. 1.2 に示す。制御棒要素は、 0.5cm の厚みの吸収体と、それを囲む 0.5cm の厚みのガイドチューブから構成されている。吸収体の材質は Hf である。制御棒位置は、燃料有効部下端を原点として、吸収体下端の高さで示す。制御棒全引き抜き位置は 80cm である。制御棒とフォロワ型燃料のコネクタは、Fig. 1.2 に示したように燃料要素上部の 4cm の領域であり、 Al で作られている。

【燃料領域内照射筒要素】

照射筒要素の水平断面を Fig. 1.8 に示す。要素の水平断面は $7.62\text{cm} \times 7.62\text{cm}$ の正方形で、中央に直径 6.0cm の照射孔があり、通常は直径 5.5cm の Al 製プラグが挿入されている。照射筒の材質は Al である。照射キャップセルは、プラグを抜いた後に装荷される。

【Be 反射体】

Be 反射体は、 Fig. 1.1 に示すように 3 種類の反射体要素で構成されている。 A 型、 B 型および C 型の要素はそれぞれ 4 個ずつ使用されており、 B 型および C 型のうち 2 個ずつは照射筒に利用されている。照射孔は直径 4.5cm であり、直径 4.0cm の Be 製プラグ、または照射キャップセルが装荷される。

1.2 放射化実験

“はじめに”でも述べたように、照射筒でのスペクトルは、各燃料要素の燃焼履歴や制御棒パターンに依存する。したがって、試料照射位置のスペクトル計算を正確に行うには、解析対象とする放射化実験での燃焼履歴および制御棒パターンを考慮する必要がある。照射時の燃料要素の燃焼履歴は、原研・研究炉部で開発された JRR-3M 炉心管理用計算コー

ドシステム^[4]により運転サイクルごとに計算され、実験解析に必要なデータとして利用者に提供される。また、制御棒パターンについても、原子炉運転中のモニタリングにより、運転中の各制御棒の高さが利用者に提供される。

ここでは、スペクトル計算に先立ち、スペクトル計算値の検証用として行なった放射化実験について説明する。

1.2.1 照射容器・照射試料

使用した照射キャップセル（以後、キャップセル）は Al 製の円筒であり、キャップを含めたキャップセルの全長 106.5cm、キャップセル内空洞の有効高さ 75.0cm、外径 5.5cm ϕ 、内径 5.0cm ϕ となっている。

照射試料を固定する試料ホルダ（以後、ホルダ）の形状は、直径 5.0cm、高さ 5.0cm の円柱である。ホルダの材質は、照射位置のスペクトルを変化させるため、Al 製とポリエチレン製の 2 種類を用意した。Al 製またはポリエチレン製のそれぞれについて、ホルダの上面中央に試料を取り付けた後、これを垂直に 15 個積み重ねてキャップセルに納め、防水用の O リングを噛ませたキャップをビスで固定した。以上の様子を Fig. 1.9 に示す。

照射試料は、中性子反応断面積のよく知られた金属箔を用い、熱中性子反応用として Au, W を、高速中性子反応用としてしきい反応核種である Al, Ti, Fe, Ni, In の計 7 種を選んだ。箔の仕様を Table 1.1 に、箔を取り付けたホルダの構成を Table 1.2 にそれぞれ示す。

1.2.2 中性子照射

JRR-3M の 1 運転サイクルは定格出力 20MW での 4 週間連続運転であるが、今回の放射化実験は、サイクル開始前の被照射試料のサンプル反応度測定のための運転日を利用して行なった。

照射は平成 6 年 10 月 20 日に 2 回に分けて行い、1 回目の照射はポリエチレン製ホルダを納めたキャップセルを、2 回目の照射は Al 製ホルダを納めたキャップセルを、それぞれ VT-1 および RG-1 照射筒に装荷して行なった。2 回の照射は、ともに熱出力約 200kW で約 1 時間行なった。キャップセルは、照射終了後、原子炉を停止して炉心から取り出し、炉心プール内で 1 日～1 週間冷却した後に、原子炉施設から測定室へ取り出した。

今回の照射の制御棒パターンを Fig. 1.10 に、照射中の出力変化を Fig. 1.11 に示す。また、各燃料要素の燃焼度については “2.3 実効断面積【燃焼度依存断面積】” で示す。

なお、照射における特記注意事項として、ポリエチレン製ホルダを用いた場合、ポリエ

チレンの放射線分解によると思われる気体発生が見られ、キャップセルの内圧がかなり上昇した。発生した気体は非放射性であったが、ポリエチレン製の試料ホルダを用いて、高出力で長時間照射する場合には十分注意を要する。

1.2.3 反応率測定

照射した箔の中性子相互反応率（以後、反応率）は、HPGe 検出器による γ 線測定を行なって求めた^[2]。このとき、HPGe 検出器の絶対検出効率は、標準線源による検出効率曲線の作成、および標準線源と照射箔の幾何学的立体角の差を考慮して求めた。特に後者に関しては、各照射筒のホルダ #10（燃料板下端から 27.5cm）に設置した Au 箔を、検出効率を気にすることなく絶対測定が行なえる $\beta\gamma$ 同時計数器でも測定し、両者で測定した反応率が等しくなるように HPGe 検出器の絶対検出効率を補正した。なお、Al 製のキャップセルに含まれる不純物の放射化のため、冷却時間が 1 日～1 週間と長くなり、今回照射した箔の内 Al, In は測定が行なえなかったので、残る Au, W, Ti, Fe, Ni の 5 種の反応率をスペクトル計算値の検証用として用いる。測定結果は“3. スペクトル計算値の検証”で、計算値と共に示す。なお、今回の 2 回の照射は平均出力が若干異なるので、反応率を出力 200kW での値に換算している。

Table 1.1 Specifications of foils

Nuclide	Size [mm]	Purity [%]	Note / Measured Reaction
Au	$3 \times 3 \times 0.01$	99.99	Bare Foil 36 sheets, Cd covered 6 sheets. / Au-197 (n, γ)
W	$3 \times 3 \times 0.025$	99.95	Bare Foil 6 sheets, Cd covered 6 sheets. / W-186 (n, γ)
Al	$3 \times 3 \times 0.05$	99.2	Cd covered Foil 6 sheets. / Al-27 (n, α)
Ti	$10 \times 10 \times 0.05$	99.5	Cd covered Foil 6 sheets. / Ti-48 (n,p)
Fe	$10 \times 10 \times 0.1$	99.9	Bare Foil 6 sheets. / Fe-54 (n,p)
Ni	$5 \times 5 \times 0.05$	99.7	Bare Foil 6 sheets. / Ni-58 (n,p)
In	$5 \times 5 \times 0.05$	99.99	Bare Foil 6 sheets, Cd covered 6 sheets. / In-115 (n,n')

Table 1.2 Arrangement of foils

Holder #	Height*[cm]	Nuclide (Form)	Note
1	72.5	Au (Bare)	for Distribution of Reaction rate.
2	67.5	W (Bare)	
3	62.5	W (Cd covered)	
4	57.5	Au (Bare)	for Distribution of Reaction rate.
5	52.5	Fe (Bare)	
6	47.5	Au (Bare)	for Distribution of Reaction rate.
7	42.5	Al (Cd covered)	
8	37.5	Ni (Bare)	Center height of Core.
9	32.5	Au (Cd covered)	
10	27.5	Au (Bare)	
11	22.5	In (Cd covered)	Flux Peak
12	17.5	In (Bare)	Flux Peak
13	12.5	Ti (Cd covered)	
14	7.5	Au (Bare)	for Distribution of Reaction rate.
15	2.5	Au (Bare)	for Distribution of Reaction rate.

* from Bottom of Standard Fuel Meat.

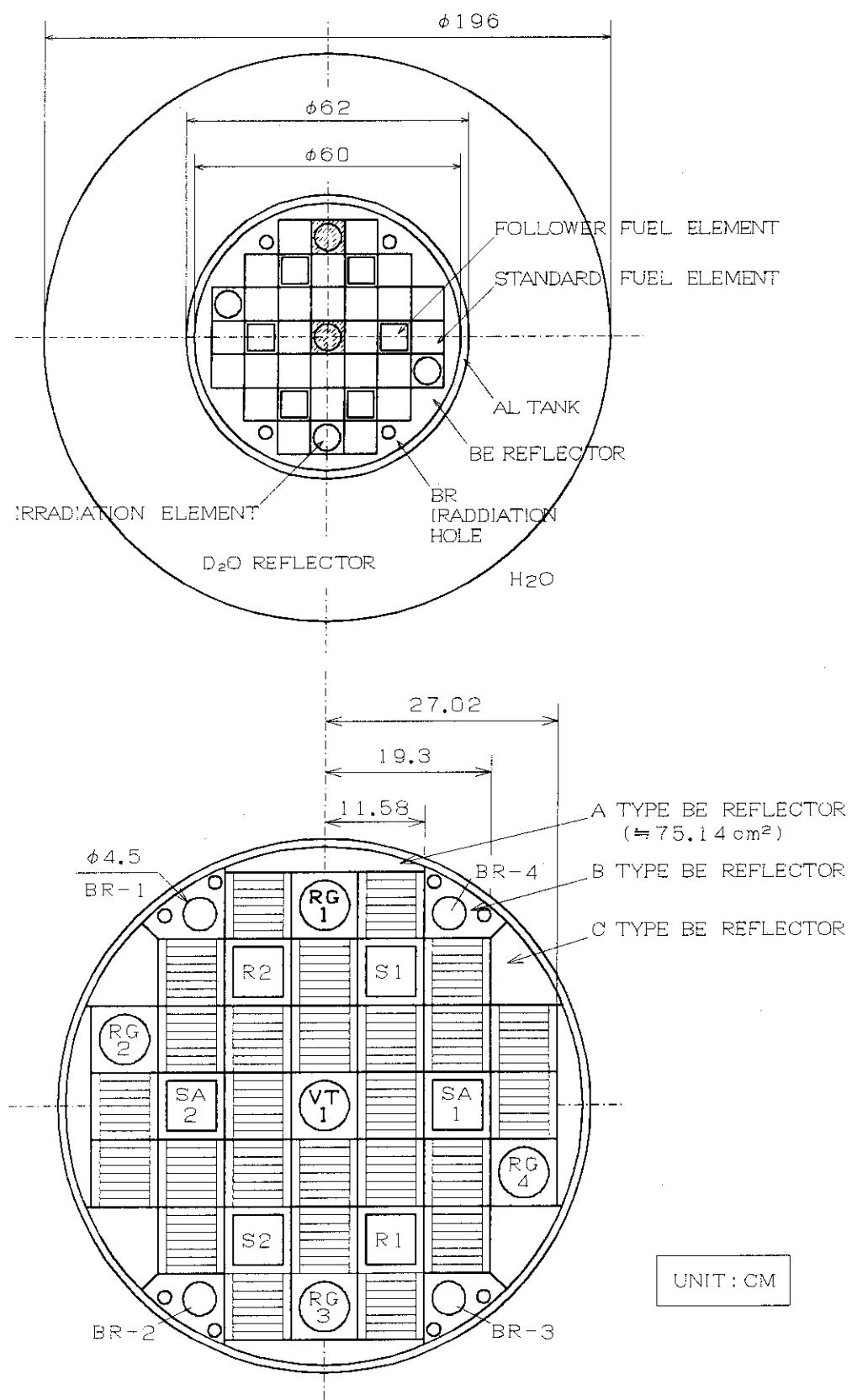


Fig. 1.1 Horizontal cross sections of JRR-3M

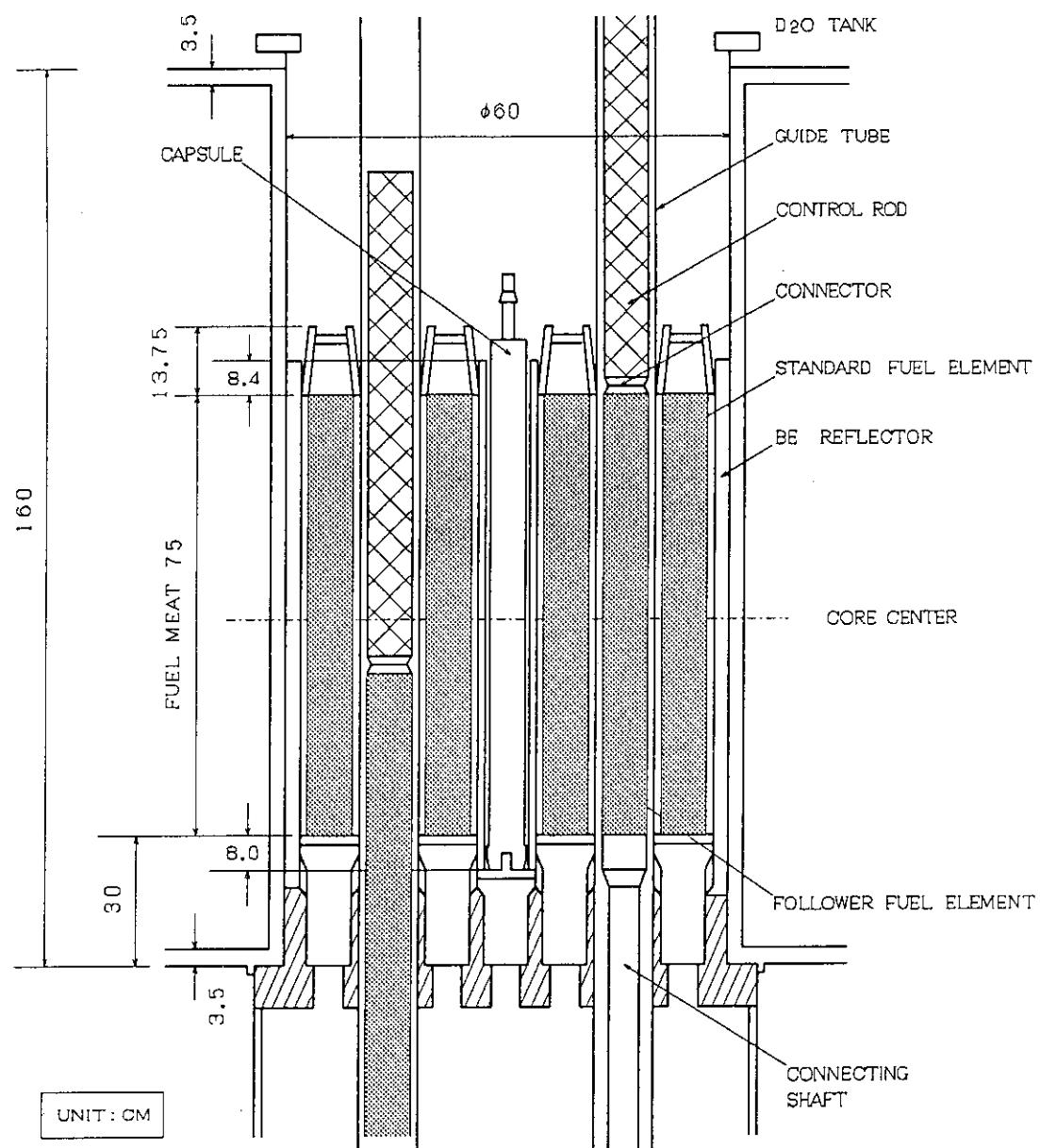


Fig. 1.2 Vertical cross section of JRR-3M

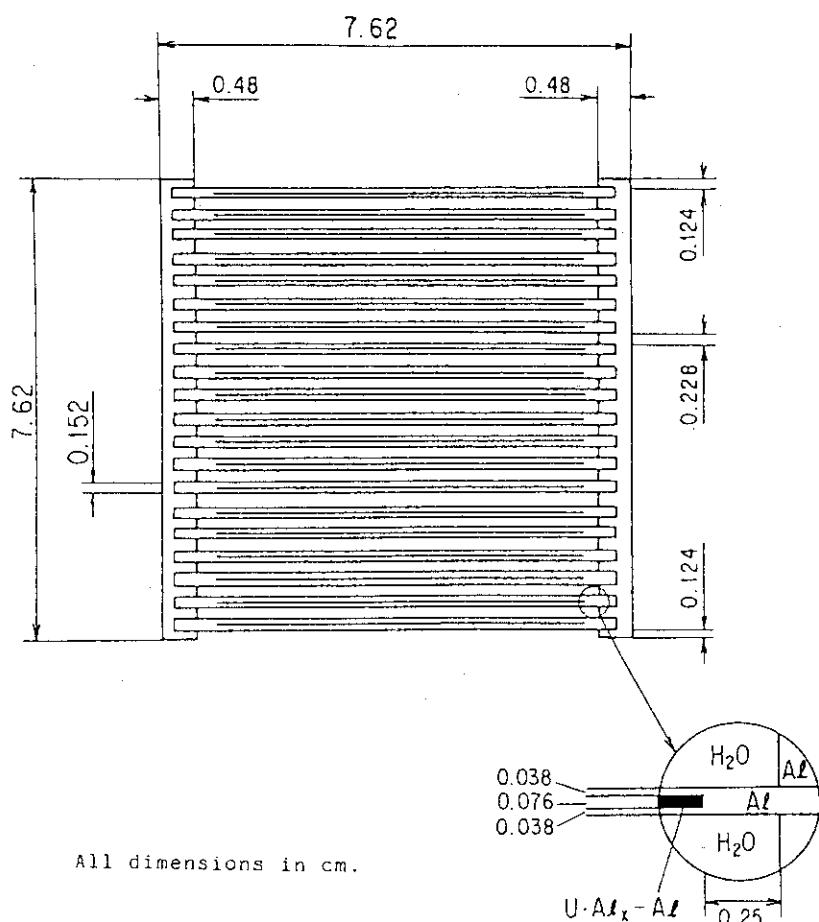
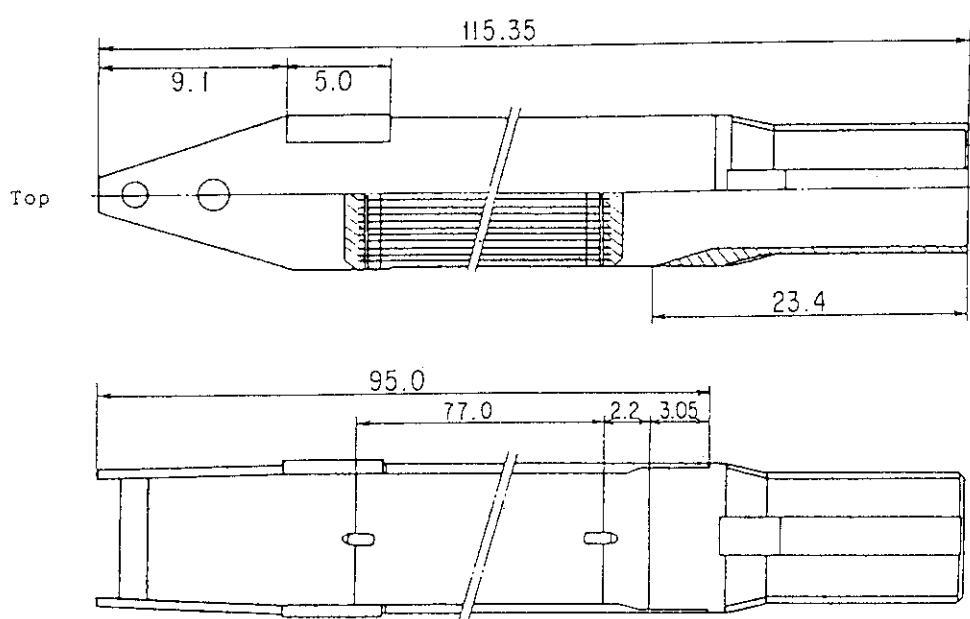
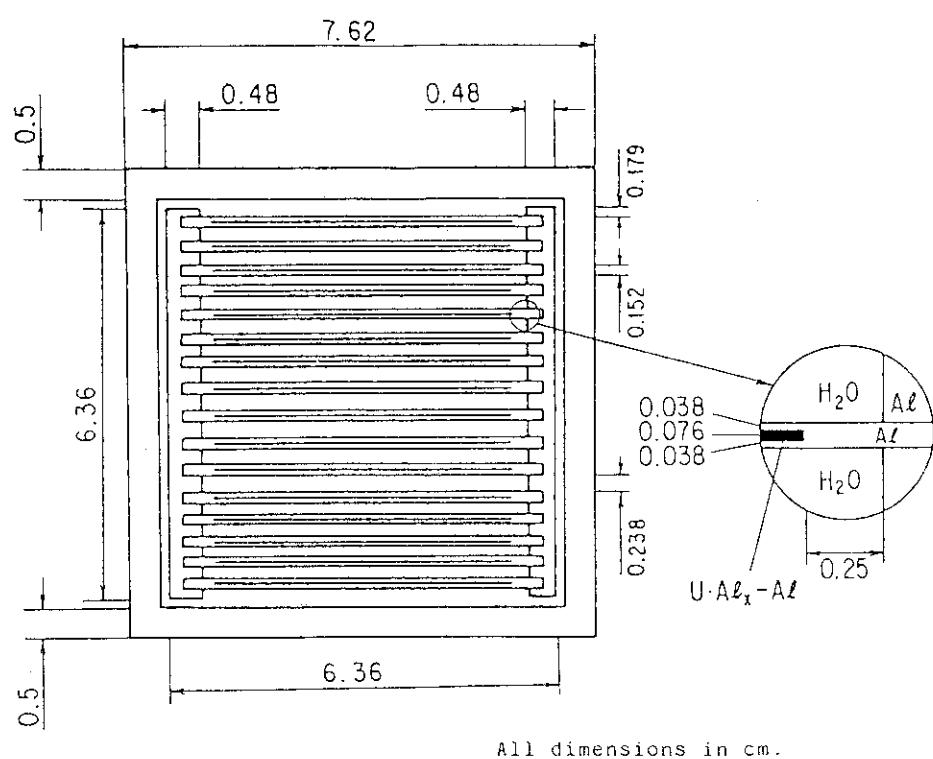


Fig. 1.3 Horizontal cross section of standard fuel element



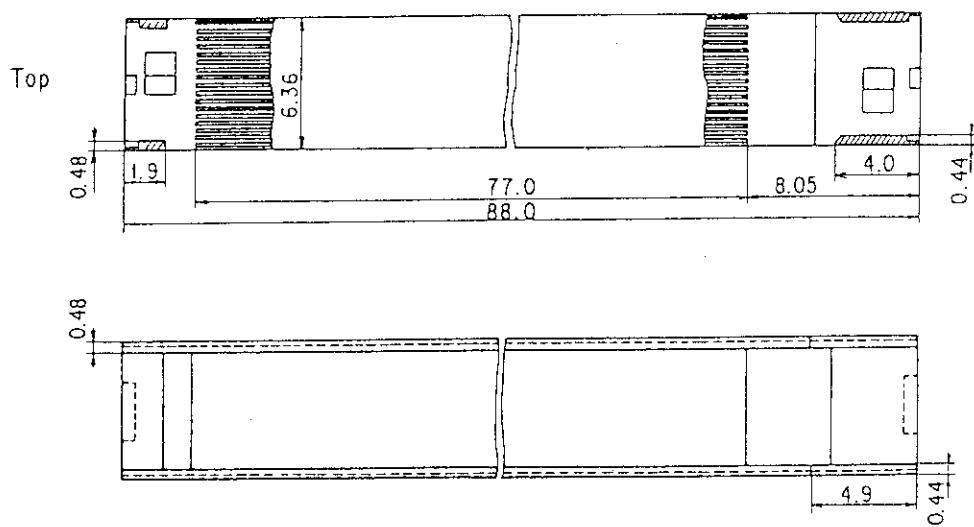
All dimensions in cm.

Fig. 1.4 Vertical cross section of standard fuel element



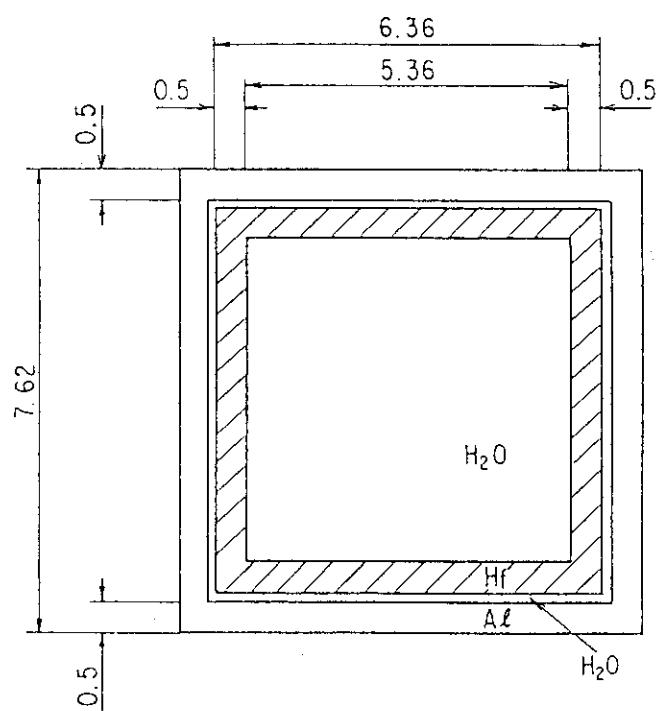
All dimensions in cm.

Fig. 1.5 Horizontal cross section of follower fuel element



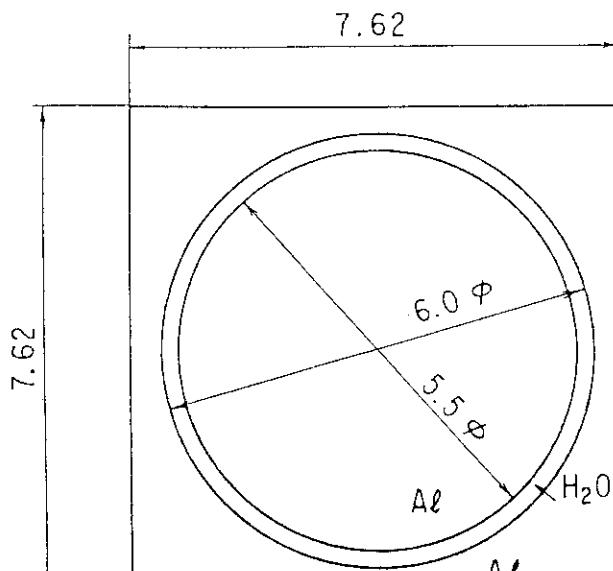
All dimensions in cm.

Fig. 1.6 Vertical cross section of follower fuel element



All dimensions in cm.

Fig. 1.7 Horizontal cross section of control rod



All dimensions in cm.

Fig. 1.8 Horizontal cross section of irradiation element in fuel region

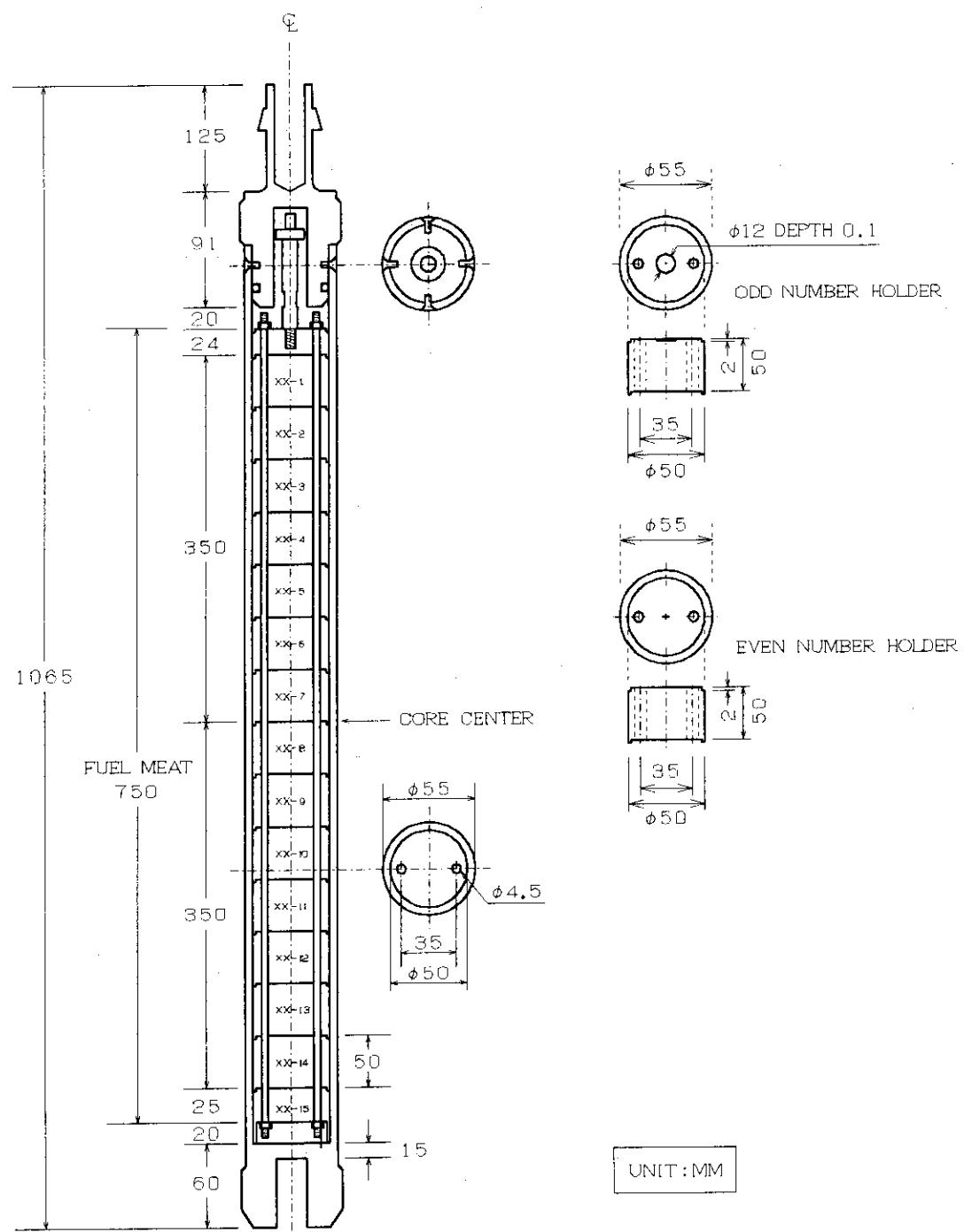


Fig. 1.9 Irradiation capsule and sample holders

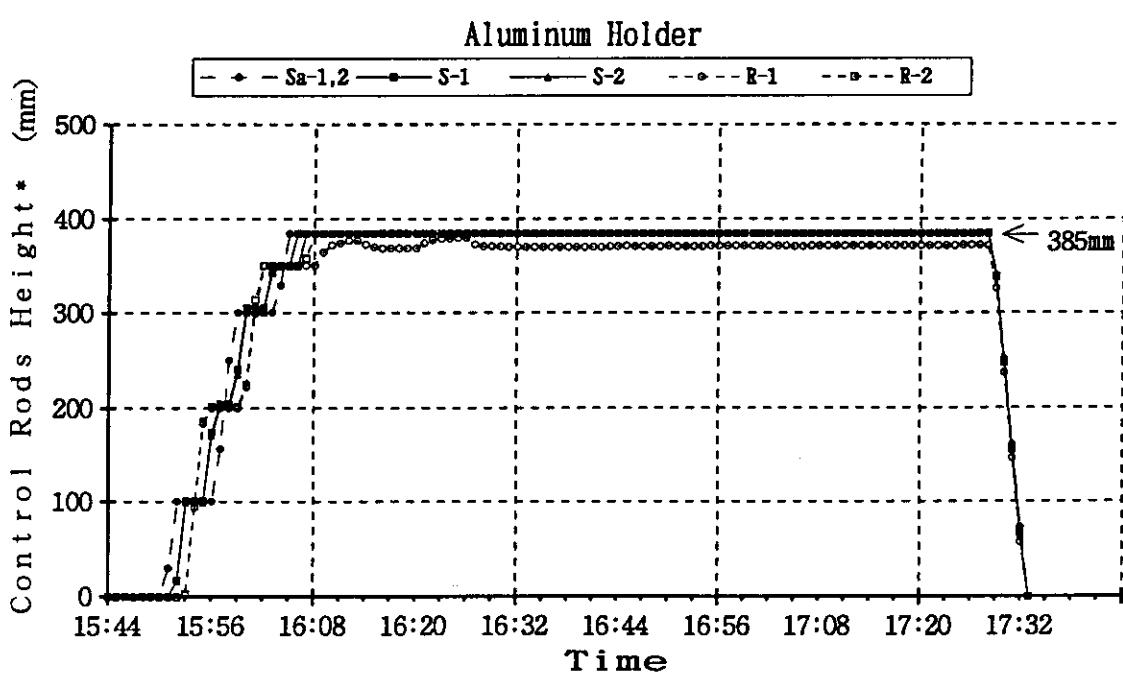
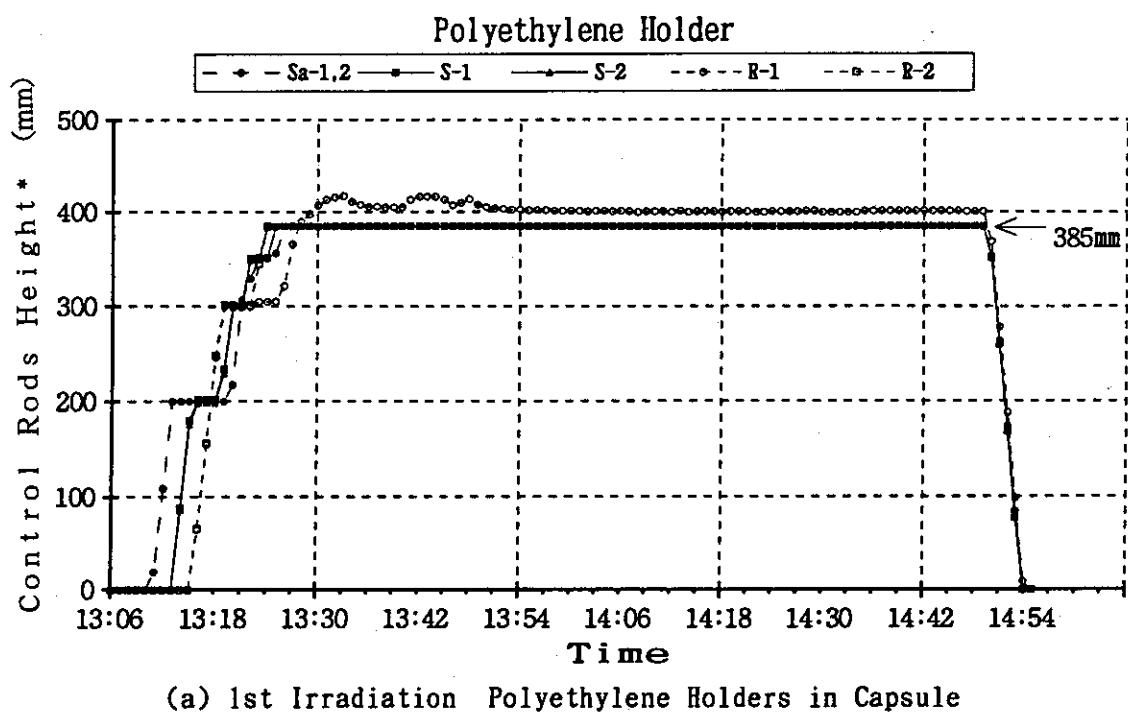
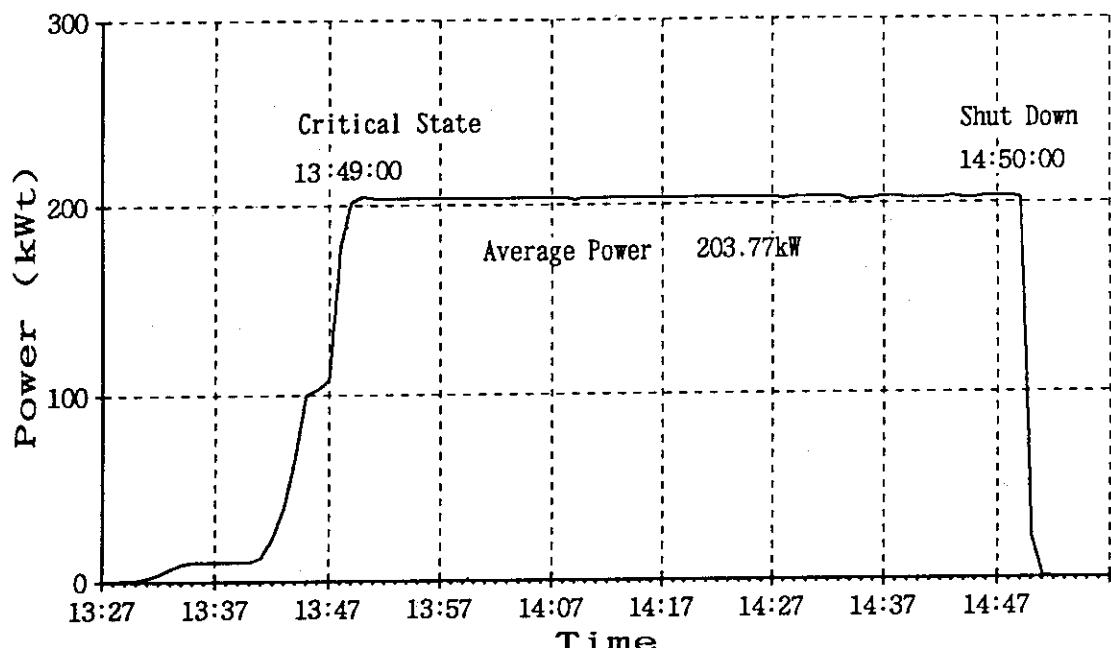
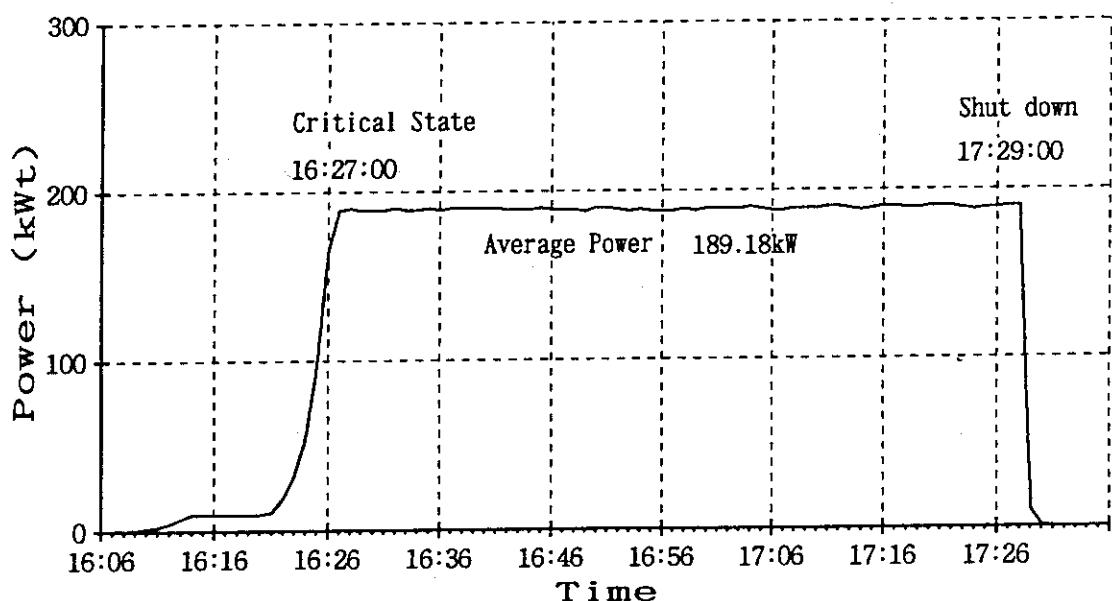


Fig. 1.10 Control rod pattern

* from Bottom of Standard Fuel Meat.



(a) 1st Irradiation, Polyethylene Holders in Capsule.
Measured by Log-N(1) Monitor.



(b) 2nd Irradiation, Aluminum Holders in Capsule.
Measured by Log-N(1) Monitor.

Fig. 1.11 Change of reactor power

2. 詳細スペクトル計算

2.1 計算コードおよび中性子断面積ライブラリ

計算には、原研で開発・整備された熱中性子炉の核設計および解析のためのコードシステム SRAC^[6] ('93年公開版^[6]) を用いた。

中性子断面積は、主として、JENDL-3.2に基づく SRAC 用に整備された中性子エネルギー 107 群の断面積ライブラリを使用した。JENDL-3.2 に登録されていない核種については、ENDF/B-IV に基づくライブラリを使用した。

また、セル燃焼計算に用いる燃焼チェーンは “CHAIN66Y^[7]” を使用した。この燃焼チェーンは、高転換軽水炉の燃焼解析用として開発されたもので、13 種の重核種、66 種の FP および 1 種の疑似核種による合計 80 核種が考慮されている。

2.2 従来の方法の問題点と 2 段階スペクトル計算法の概要

一般に、炉心計算は輸送計算、拡散計算またはモンテカルロ計算により行われる。モンテカルロ計算は、“はじめに”でも述べたように、詳細なスペクトル計算には向きである。また、輸送計算も、計算機容量や計算時間などの制約から、2 次元あるいは 3 次元体系での計算では中性子エネルギー群構造を 2 ~ 10 群程度に縮約して計算を行わなくてはならず、詳細なスペクトルを求めるには向きである。そこで、炉心計算にはしばしば拡散計算が用いられるが、その拡散計算でも 3 次元全炉心計算となると、せいぜい 20 群程度で計算せざるを得ない。

また、照射筒要素は照射筒・照射キャップセルなどから構成されており、試料照射位置におけるスペクトルを求めようとするとき、照射筒内部の細かな構成を全炉心体系で一括して計算させるのはあまり実用的ではない。仮に、その領域を細かく取ったとしても、拡散近似であるが故に、中性子束の急激な変化やボイド領域などを正確に計算することができない。さらに、炉心計算には、通常、均質化実効断面積が用いられるが、均質化セルによる炉心計算では、照射筒セル内の中性子束分布や試料照射位置におけるスペクトルを厳密に求めることができない。

試料照射位置におけるエネルギー 107 群のスペクトルを求めるには、上記の 2 つの問題点、すなわち

- ・全炉心計算時の少数组の問題
- ・均質化セルの問題

を解決しなければならない。この2つの問題を同時に解決することは、現在の計算機能力では事実上不可能である。そこで、この2点を別々に考慮し、それらの結果を組み合わせることにより目的を達成することを考える。つまり、スペクトル計算の第1段階として、炉心全体の情報（炉心構成・燃焼履歴・制御棒パターン）を考慮した“全炉心計算”を行い、照射筒要素セルでの107群中性子束を求める。次に第2段階として、照射筒要素内部の構成を詳細に考慮した“照射筒内部詳細計算”を行い、照射筒内部の107群中性子束分布を求める。そして、これらの結果を合成することにより、試料照射位置における107群スペクトルを求める。この2段階スペクトル計算法の概念図をFig. 2.1に示す。

2.3 実効断面積の作成

各炉心構成要素の実効断面積は、衝突確率法によるセル計算ルーチンPIJまたは1次元SN輸送計算コードANISNを用いて計算されたセル内の中性子束分布およびスペクトルを重みにして、均質化および縮約を行なって求めた。縮約後のエネルギー群構造を以下にまとめる（詳細はTable 2.1参照）。

- ・中性子エネルギー群構造
 - ・3次元xyz体系全炉心拡散計算 : 4群（高速3群、熱1群）
 - ・対数微分定数決定計算の輸送計算 : 10群（高速8群、熱2群）
 - ・2次元xy体系全炉心拡散計算 : 107群（高速70群、熱37群）
- および照射筒内部詳細計算

また、炉心内温度は325Kとした。

各炉心構成要素の実効断面積作成法^[3]を順を追って説明する。なお、セル計算で用いた炉心構成要素の各領域の原子個数密度^[8]（以後、個数密度）はAppendix Bに示した。また、Appendix DにSRACコードシステムの入力例を示したので、適宜参照されたい。

2.3.1 標準型燃料要素およびフォロワ型燃料要素

JRR-3M の標準型およびフォロワ型の燃料要素は、板状燃料集合体であるため、燃料芯材・被覆材・減速材から成る燃料板セルの非均質性と、燃料板セル領域・Al 製側板・減速材から成る燃料要素セルの 2 重の非均質性を持つ。これらの非均質性を別々に考慮するため、以下の 2 ステップによる均質化を行なった。

【ステップ 1】

燃料板セルの均質化断面積は、PIJ を用いて、1 次元平板体系の周期的無限セルで計算した。U-235 および U-238 の共鳴吸収計算には、超詳細エネルギー群で直接計算を行う PEACO ルーチンを用いた。輸送断面積は B1 近似により作成した。燃料板セルの計算体系を、標準型について Fig. 2.2 に、フォロワ型について Fig. 2.3 にそれぞれ示す。なお、図中の Sub-, T-, R-, X-Region は PIJ の入力形式を示し、各々、幾何形状の分割領域の最小単位、熱中性子計算のための分割領域、高速中性子計算のための分割領域、断面積縮約のための分割領域である。

【ステップ 2】

燃料要素セルの実効断面積は、PIJ を用いて、ステップ 1 で得られた燃料板セルの 107 群均質化断面積を用い、2 次元平板体系の周期的無限セルで計算した。断面積の縮約には B1 計算で得られた中性子束分布および 107 群スペクトルを重みとして使用し、その際、B1 計算による実効増倍率が約 1 となるようにバックリングを調整した。燃料要素セルの計算体系を、標準型について Fig. 2.4 に、フォロワ型について Fig. 2.5 にそれぞれ示す。

【燃焼度依存断面積】

今回の放射化実験時の各燃料要素の燃焼度を Fig. 2.6 に示す。全炉心拡散計算では、この燃焼度を、標準型について燃焼度 6 群、フォロワ型について 2 群にそれぞれ分け、各燃焼度群に属する燃料要素の平均燃焼度に対する実効断面積を、セル燃焼計算コード CELBN を用いて作成した。燃焼度群構造を Table 2.2 に示す。

燃料要素の燃焼度依存断面積の作成手順について説明する。まず【ステップ 1】で示した体系で燃料板セルの燃焼計算を行い、各燃焼度群ごとに 107 群均質化断面積を作成する。次に、得られた燃焼度依存の 107 群断面積を用いて【ステップ 2】の燃料要素セル計算を行い、各燃焼度の実効断面積を作成した。縮約する際、B1 近似で用いるバックリングには、未燃焼の燃料要素での値を用いた。また、燃焼計算で使用する中性子束を規格化する

ための炉出力は定格出力の 20MW とし、炉心全体の燃料体積の総量を表すための係数である燃料体積係数 V は次の値を用いた^[3]。

$$\begin{aligned} V &= (6.16\text{cm} \times 20 \text{枚} \times 75\text{cm} \times \text{標準型 26 体}) + (4.90\text{cm} \times 16 \text{枚} \times 75\text{cm} \times \text{フォロワ型 6 体}) \\ &= 275520 [\text{cm}^2] \end{aligned}$$

燃焼初期段階では、FP、特に Xe-135 および Sm-149 により、吸収断面積が急激に変化するため、タイムステップを短くして計算する必要がある。この燃焼初期における吸収断面積の急激な過渡変化を近似的に考慮するため、燃焼中における Xe-135 および Sm-149 の平衡濃度を燃焼開始時点に外挿した量が、燃焼計算開始時に予め添加されているものとして燃料板セルの燃焼計算を行なった^[3]。なお、添加する量は参考文献 [3] の値を用いた。

燃焼計算における FP 添加量

・標準型燃料要素

$$\begin{aligned} \text{Xe-135} &: 1.28519 \times 10^{-8} [\times 10^{24} \text{n/cm}^3] \\ \text{Sm-149} &: 9.60176 \times 10^{-8} [\times 10^{24} \text{n/cm}^3] \end{aligned}$$

・フォロワ型燃料要素

$$\begin{aligned} \text{Xe-135} &: 1.27309 \times 10^{-8} [\times 10^{24} \text{n/cm}^3] \\ \text{Sm-149} &: 9.51616 \times 10^{-8} [\times 10^{24} \text{n/cm}^3] \end{aligned}$$

2.3.2 制御棒要素

制御棒要素セルの実効断面積は、PIJ を用いて、制御棒要素の周りに標準型燃料要素 8 体を配置した 2 次元平板体系の周期的無限セルで計算した。中性子吸収材である Hf の共鳴吸収計算は、NR 近似によるテーブル内挿により行なった。また、輸送断面積は拡張輸送近似により作成した。

制御棒要素セルの計算体系を Fig. 2.7(a), (b) に示す。均質化は、ガイドチューブ領域と制御棒領域ごとに行なった。また、対数微分定数決定（“2.5 制御棒近傍の中性子輸送補正” 参照）の際の輸送計算に用いる 10 群断面積は、制御棒領域をさらに吸収体領域と軽水領域に分割して、均質化および縮約を行なった。

2.3.3 制御棒コネクタ

制御棒コネクタセルの実効断面積は、PIJを用いて、コネクタの両側に標準型燃料要素1体分をそれぞれ配置した1次元平板体系の周期的無限セルで計算した。制御棒コネクタセルの計算体系をFig. 2.8に示す。

2.3.4 燃料領域照射筒要素

照射筒要素セルの実効断面積は、ANISNを用いて、照射筒要素の周りを標準型燃料要素8体分で取り巻き、各領域の面積を保存するようにして、1次元円柱体系のホワイト反射無限セルで計算した。その際、照射孔にはAl製プラグが挿入された状態で計算した。散乱次数および空間角度分点はP0-S8とした。照射筒要素セルの計算体系をFig. 2.9に示す。

2.3.5 半径方向反射体

Be反射体・重水反射体から成る炉心半径方向反射体の実効断面積は、炉心水平断面の面積を保存するように1次元円柱体系に近似し、ANISNで求めた中性子束分布およびスペクトルを重みとして計算した。Al製の重水タンクはBe反射体内にスミアし、また、Be反射体の照射筒はすべて照射孔にBe製プラグが挿入された状態であるとして計算した。重水反射体は広いので、半径方向に2分割してそれぞれ均質化した。なお、重水反射体の照射設備は無視した。半径方向反射体のセル計算体系をFig. 2.10に示す。

2.3.6 軸方向反射体

炉心軸方向反射体の実効断面積は、ANISNを用いて、標準型燃料要素またはフォロワ型燃料要素の両端に軸方向反射体を配置した1次元平板体系で計算した。軸方向反射体のセル計算体系を、標準型燃料要素についてFig. 2.11に、フォロワ型燃料要素についてFig. 2.12に示す。

2.3.7 その他の構成要素

他の構成要素（原子炉プール内軽水、Al製照射筒、Al製照射キャップセル、Al製ホルダ、ポリエチレン製ホルダ、Cdカバー）の実効断面積は、セル計算を行わず、均質化した個数密度とSRAC内蔵の原子炉標準スペクトルにより計算した。なお、輸送断面積は、軽水を含む炉心構成要素にはB1近似を、含まないものには拡張輸送近似を用いて作成した。

2.4 軸方向バックリング

2次元 xy 体系全炉心拡散計算および対数微分定数決定計算（“2.5 制御棒近傍の中性子輸送補正”参照）では、 z 軸方向の中性子の洩れをバックリング B_z で考慮する。以下に示す手順で軸方向バックリングを求めた。

まず、多次元拡散計算コード CITATION を用いて、3次元 xyz 体系 4群全炉心拡散計算を、制御棒を完全に引き抜いた状態で行う。このとき、対数微分定数による制御棒境界条件は設定せず、制御棒セルの実効断面積をそのまま用いた。また、標準型およびフォロワ型燃料要素は、解析対象とする放射化実験の燃焼履歴を基に配置した。次に、同じく CITATION を用いて、2次元 xy 体系 107群全炉心拡散計算を、制御棒引き抜き状態で行い、両者の実効増倍率が一致するように、2次元 xy 体系計算の z 軸方向バックリングを調節した。その結果を Table 2.3 に示す。軸方向バックリングを決定するための3次元 xyz 体系および2次元 xy 体系の計算体系については“2.6 全炉心拡散計算”で述べる。

2.5 制御棒近傍の中性子輸送補正^[3]

拡散計算では、急激な中性子束変化を正確に計算できないため、制御棒の中性子吸収効果を過小評価してしまう。そこで、拡散計算で制御棒近傍の中性子輸送効果を補正するために、CITATION には、対数微分定数を用いた中性子束の境界条件を設定するオプションが用意されている。対数微分定数は次式で定義され、制御棒境界における中性子束勾配の境界条件として用いられる。

$$C_g = - \frac{D_g}{\phi_s} \operatorname{grad} \phi_s \quad (2.1)$$

ただし、

D_g : 第 g 群の拡散係数 [1/cm]

ϕ_s : 吸収体外側の第 g 群中性子束 [1/cm² s]

対数微分定数は、輸送計算による制御棒ワースと拡散計算のそれとが一致するように決定した。輸送計算には2次元 SN 輸送計算コード TWOTRAN を用いた。計算体系は2次元 xy 体系とし、 z 軸方向については“2.4 軸方向バックリング”で得られたバックリング B_z により考慮した。ただし、TWOTRAN ではバックリングを外挿距離を含む炉心長で入力するオプションを使用し、次式により外挿距離 d を求めた。

$$d = \frac{1}{2} \left[\frac{\pi}{Bz} - H \right] = 7.14 \text{ [cm]} \quad (2.2)$$

ただし、 H ：炉心長（= 75.0cm）

中性子輸送補正の計算体系は 1/4 対称とし、体系の中央に制御棒要素を置いて、その周囲を未燃焼の標準型燃料要素で取り囲み、さらにその外側に重水反射体を配置して行なった。計算体系を Fig. 2.13 に示す。その際、制御棒吸収体のない状態、すなわちフォロワ燃料がある状態での輸送計算（TWOTRAN）で得られた実効増倍率が 1 となるように標準型燃料要素の面積を調節した。

まず、TWOTRAN を用いて、2 次元 xy 体系 10 群輸送計算を、制御棒吸収体のない状態とある状態で行い、両者の実効増倍率から制御棒ワースを算出する。この輸送計算では、制御棒吸収体をガイドチューブ領域・吸収体領域・軽水領域の 3 領域に分割して計算した。次に、同じ体系で CITATION を用い、3 次元 xyz 体系計算用には 4 群で、2 次元 xy 体系計算用には 107 群でそれぞれ拡散計算を行い、同様に制御棒ワースを計算する。ただし、拡散計算では、制御棒吸収体をガイドチューブ領域・吸収体および軽水領域の 2 領域に分割して計算した。

そして、拡散計算で得られた制御棒ワースと輸送計算で得られた値とが一致するように、拡散計算で使用する制御棒境界の対数微分定数を調節した。ただし、今回、対数微分定数は (2.1) 式のように各群ごとに与えず、熱群、すなわち 4 群計算では第 4 群、107 群計算では第 71 ~ 107 群に限って、一律の値を入力した。その結果を Table 2.4 に示す。

2.6 全炉心拡散計算

試料照射位置における 107 群スペクトルを求めるための第 1 段階として、燃料要素の燃焼履歴および制御棒パターンなどの炉心全体系の情報を取り入れるための 3 次元 xyz 体系全炉心拡散計算を行う。

107 群スペクトルを求めるには、全炉心計算の段階から 107 群で計算する必要があるが、現在の計算機能力では、JRR-3M 炉心の 3 次元 107 群拡散計算は事実上不可能である。そこで、3 次元体系の 107 群スペクトルを求めるために、まず炉心半径方向のみについて 2 次元 xy 体系 107 群拡散計算を行う。しかし、このままでは、制御棒部分挿入による炉心軸方向の中性子束分布が考慮されない。次にこれを考慮するために、4 群計算ではあるが 3 次元 xyz 体系拡散計算を行う。そして、両者の結果を次の手順により結合させ、擬似的

な3次元107群中性子束を求める。

- ①3次元 xyz 体系計算において、基準高さ z_0 （後述）に対する任意の高さ z での中性子束の比を求め、これを2次元107群中性子束に掛けることにより z 軸方向の分布を考慮する。このとき、3次元 xyz 体系計算で求めた基準 xy 平面（ z_0 ）の中性子束分布 $\phi^{3D}(x,y,z_0)$ と、2次元 xy 体系計算で求めた中性子束分布 $\phi^{2D}(x,y)$ は等しいと仮定している。
- ②手順①のとき、2次元 xy 体系計算と3次元 xyz 体系計算のエネルギー群構造が異なるので、107群構造の第 g 群の中性子束 $\phi^{2D}(x,y,z,g)$ に乗ずる中性子束比 $\phi^{3D}(x,y,z,G) / \phi^{3D}(x,y,z_0,G)$ には、第 g 群が属する4群構造での第 G 群の値を一律に用いる。

これを式で表すと、以下のようになる。

$$\phi^c(x,y,z,g) = \phi^{2D}(x,y,g) \times \frac{\phi^{3D}(x,y,z,G)}{\phi^{3D}(x,y,z_0,G)} \quad (2.3)$$

ただし、

$\phi^c(x,y,z,g)$: 位置 (x,y,z) における第 g 群中性子束 [$1/\text{cm}^2 \text{s}$]

（添字 c は全炉心拡散計算で得られたことを表す）

ϕ^{2D} : 2次元 xy 体系107群中性子束

ϕ^{3D} : 3次元 xyz 体系4群中性子束

z_0 : 3次元計算で基準とする高さ

g, G : エネルギー群数

2次元計算 $g = 1 \sim 107$, 3次元計算 $G = 1 \sim 4$

この2つの操作の妥当性についてはAppendix Aで考察した。

上記の全炉心拡散計算にはCITATIONを用いた。3次元 xyz 体系の計算体系を、 xy 平面^[3]についてFig. 2.14に、 z 軸方向についてFig. 2.15に示す。また、2次元 xy 体系の計算体系はFig. 2.14に示したものと同一であり、 z 軸方向は“2.4 軸方向バックリング”で得られたバックリング Bz により考慮する。重水反射体内の照射設備は、燃料領域照射筒でのスペクトルにはその影響が小さいとして無視した。標準型およびフォロワ型燃料要素は、解析対象とする放射化実験での燃焼履歴（Fig. 2.6）を基に配置する。3次元 xyz 体系全炉心拡散計算での制御棒の高さは、今回の放射化実験の制御棒パターン（Fig. 1.10）から、6本とも燃料の下端から38.5cmとした。3次元 xyz 体系の基準とする xy 平面の高さ z_0

として、制御棒が引き抜かれた部分のほぼ中間であるホルダ #12 の高さ（燃料板下端から 17.5cm）を選んだ。なお、全炉心拡散計算のメッシュポイントと各試料照射位置 (x,y,z) とは一致していないため、試料照射位置における中性子束は、その両隣のメッシュポイントでの値を直線内挿して求めた。

実効増倍率の計算結果を Table 2.5 に示す。2 次元計算は、 z 軸方向に関して、制御棒引き抜き状態もしくは挿入状態といった部分的な炉心であるため、実効増倍率は参考値である。3 次元計算の値は、臨界状態 ($k_{\text{eff}} = 1$) より約 3% 大きめに計算されている。これは、中性子エネルギーが 4 群の少数组計算であること、拡散計算であること等が理由として考えられる。

2.7 照射筒内部詳細計算

試料照射位置における 107 群スペクトルを求めるための第 2 段階として、第 1 段階の全炉心拡散計算では均質化していた照射筒要素のセル内部の中性子束分布およびスペクトルを求めるため、照射筒内部の非均質構造を厳密に考慮した計算を行う。全炉心拡散計算で得られた（均質化）照射筒要素セルでの 107 群中性子束 $\phi^c(x,y,z,g)$ に、照射筒要素の非均質構造および局所的な材質の違いを加味することで、最終的に、試料照射位置における 107 群スペクトルを求める。

照射筒内部の非均質性を考慮する照射筒内部詳細計算は、微小領域の中性子輸送を正確に計算できる 107 群衝突確率法による固有値計算を、PIJ を用いて行う。照射筒の内部およびその周辺の幾何形状、照射筒の軸を中心とする 1 次元円柱体系でモデル化する。

【 VT-1 照射筒】^[2]

照射筒要素の各領域の水平断面積を保存するように半径を調節した。照射筒要素の周りは標準型燃料要素 8 体分で取り囲み*、全体で炉心構成要素（7.72cm 四方） 3×3 体分の面積とした。計算体系を Fig. 2.16 に示す。なお、燃料には、全燃料要素の平均燃焼度（24.14%U）に最も近い燃焼度第 4 群（25.27%U）の標準型燃料要素を使用した。また、境界条件はホワイト反射とした。

* この照射筒内部詳細計算では、外部中性子源として、照射筒の周りに標準型燃料要素を配置して計算しているが、SRAC のオプションで、予め計算された中性子スペクトルを境界入射中性子源として使用することも可能である。

【RG-1 照射筒】^[2]

照射筒要素の周辺を取り囲む燃料要素は4体分（標準型3体+フォロワ型2体×0.5）とし、その外側にBe反射体（AタイプBe反射体の面積を保存）、さらに外側に重水反射体を配置し、全体で炉心構成要素3×3体分の面積とした。その他の計算条件はVT-1照射筒と同じである。計算体系をFig. 2.17に示す。

これらのモデル体系の照射筒要素が配置される領域に、全炉心拡散計算で使用した照射筒要素の均質化断面積を用い、第1段階に用いた均質化セルに相当する照射筒内部の107群中性子束 $\phi^{L_{HOMO}}(rg)$ を計算する。次に、同じ体系において、照射筒要素が配置される場所に、照射筒内部の構成を厳密に再現するように照射キャップセル・Al製ホルダまたはポリエチレン製ホルダ・Cdカバーなどを配置し、同様に照射筒内部の107群中性子束 $\phi^{L_{HET}}(rg)$ を求める。そして、次式で定義する非均質化因子 $f_{HET}(g)$ を各エネルギー群ごとに求める。

$$f_{HET}(g) \equiv \frac{\phi^{L_{HET}}(rg)}{\phi^{L_{HOMO}}(rg)} \quad (2.4)$$

ただし、

$\phi^{L_{HET}}$ ：照射筒を非均質のままで計算した107群中性子束[1/cm²s]

$\phi^{L_{HOMO}}$ ：全炉心拡散計算の照射筒要素均質化断面積を用いて計算した
107群中性子束[1/cm²s]

r：試料照射位置

g：エネルギー群数

照射筒内部の中性子束分布の比較を、VT-1照射筒についてFig. 2.18に、RG-1照射筒についてFig. 2.19にそれぞれ示す。これらの中性子束分布は、高速群として107群中性子束の第1群から第30群までを縮約したものを、熱群として同じく第71群から第107群までを縮約したものを示してある。この図から分かるように、均質化Al製プラグとAl製ホルダ（非均質）の場合の照射筒内部の中性子束分布の差異が確認でき、照射筒内部の正確な中性子束を求めるためには、照射筒内部詳細計算により照射筒内部の構成を厳密に考慮する必要があると言える。

最後に、第1段階の全炉心拡散計算で(2.3)式によって得られた照射筒要素セルでの107群スペクトル $\phi^c(x,y,z,g)$ に、(2.4)式で求めた非均質化因子を掛けることで、照射筒内の非均質性を考慮した試料照射位置における107群中性子束 $\phi(x,y,z,g)$ が求められる。

$$\begin{aligned}\phi(x,y,z,g) &= \phi^c(x,y,z,g) \times f_{HET}(g) \\ &= \phi^c(x,y,z,g) \times \frac{\phi^{L_{HET}}(r,g)}{\phi^{L_{HOMO}}(r,g)}\end{aligned}\quad (2.5)$$

最終的に得られた試料照射位置におけるスペクトルの比較を、 VT-1 照射筒について Fig. 2.20 に、 RG-1 照射筒について Fig. 2.21 にそれぞれ示す。均質化 Al 製プラグ（全炉心拡散計算時）と非均質 Al 製ホルダの場合の比較を見ると、両者はどちらも Al 製であり、組成がほとんど同じであることを考えると、このスペクトルの違いは、均質と非均質の差と考えてよい。このことから、均質化セルでのスペクトルは、照射位置のスペクトルを必ずしも正確に表していないことが示された。少なくとも、Al と軽水から成る構成要素を均質化した場合、スペクトルを軟らかめに計算することが分かった。また、同図から、Al 製ホルダとポリエチレン製ホルダでのスペクトルの違いがはっきりと確認できる。

Table 2.1 Neutron energy group structure

107 Groups Library		10G.	4G.
GRP.	Upper Energy(eV)	GRP.	GRP.
1	1.0000×10^7		
2	7.7880×10^6		
3	6.0653		
4	4.7237		
5	3.6788	1	
6	2.8650		
7	2.2313		
8	1.7377		
9	1.3534		
10	1.0540		
11	8.2085×10^5		
12	6.3928		
13	4.9787		
14	3.8774		
15	3.0197	1	
16	2.3518		
17	1.8316		
18	1.4264		
19	1.1109		
20	8.6517×10^4	2	
21	6.7379		
22	5.2475		
23	4.0868		
24	3.1828		
25	2.4788		
26	1.9305		
27	1.5034		
28	1.1709		
29	9.1188×10^3		
30	7.1017		
31	5.5308		
32	4.3074		
33	3.3546		
34	2.6126		
35	2.0347		
36	1.5846		
37	1.2341		
38	9.6112×10^2	3	
39	7.4852		
40	5.8295		
41	4.5400		
42	3.5358		
43	2.7536		
44	2.1445		
45	1.6702		
46	1.3007		
47	1.0130		
48	7.8893×10^1		
49	6.1442		
50	4.7851	4	
51	3.7267		
52	2.9023		
53	2.2603		
54	1.7603	3	

107 Groups Library		10G.	4G.
GRP.	Upper Energy(eV)	GRP.	GRP.
55	1.3710×10^1		
56	1.0677	5	
57	8.3153×10^0		
58	6.4760		
59	5.0435		
60	3.9279	6	
61	3.0590		
62	2.3824		
63	1.8554		
64	1.6374	7	
65	1.4450		
66	1.2752		
67	1.1254		
68	9.9312×10^{-1}		
69	8.7642	8	
70	7.7344		
71	6.8256×10^{-1}		
72	6.0236		
73	5.3158		
74	4.6912		
75	4.1399		
76	3.8926		
77	3.6528		
78	3.4206		
79	3.1961		
80	2.9792	9	
81	2.7699		
82	2.5683		
83	2.3742		
84	2.1878		
85	2.0090		
86	1.8378		
87	1.6743		
88	1.5183		
89	1.3700		4
90	1.2293		
91	1.0963		
92	9.7080×10^{-2}		
93	8.5397		
94	7.4276		
95	6.4017		
96	5.4520		
97	4.5785		
98	3.7813		
99	3.0602		
100	2.4154		
101	1.8467		
102	1.3543		
103	9.3805×10^{-3}		
104	5.9804		
105	3.3423		
106	1.4663		
107	3.5238×10^{-4}		
107L	1.0000×10^{-5}		

Table 2.3 Vertical buckling for 2D-xy calculation

System	Control Rods	Buckling [cm ⁻²]	k-Effective
3D (xyz)-4G	Full-Out	—	1.1198
2D (xy)-107G	Full-Out	0.0012382	1.1198

Table 2.4 Logarithmic derivatives for control absorbers

Code-Group	Control Rod	Logarithmic Derivative*	k-Effective	Rod Worth [dk/k]
TWOTRAN-10G	Out	—	1.0006	—
TWOTRAN-10G	In	—	0.7911	-0.2644
CITATION-4G	Out	—	1.0032	—
CITATION-4G	In	0.327	0.7928	-0.2645
CITATION-107G	Out	—	0.9863	—
CITATION-107G	In	0.361	0.7822	-0.2646

*Apply the logarithmic derivative to the only thermal group.

Table 2.5 K-effectives of whole core diffusion calculation

Code	System-Group	Rods Height	Log.Derivative	k-Effective
CITATION	3D (xyz)-4G	38.5 cm	0.327	1.0283
	2D (xy)-107G	Full-Out	—	1.1198
	2D (xy)-107G	Full-In	0.361	0.8061

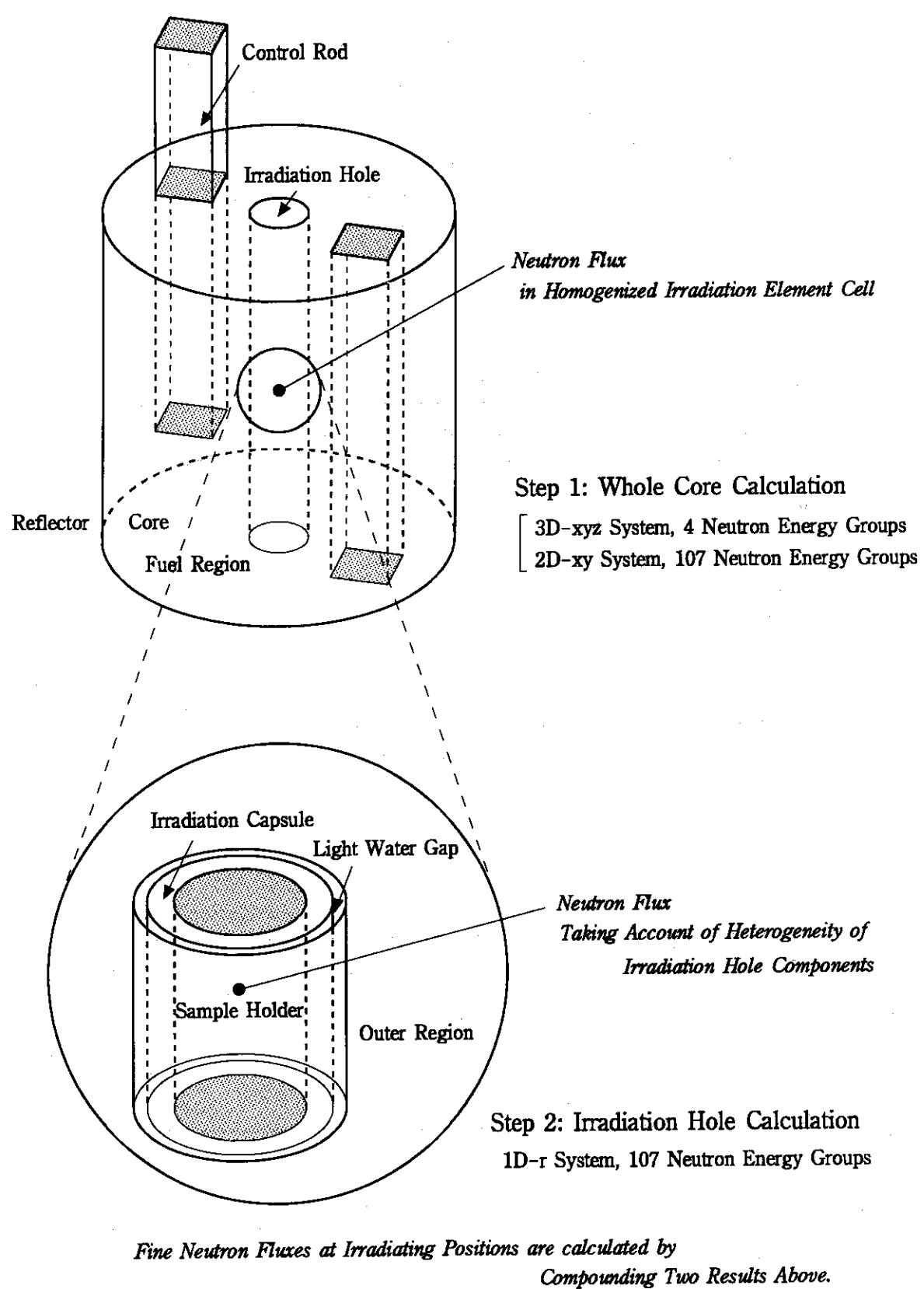


Fig. 2.1 Illustration of 2 step neutron spectrum calculation

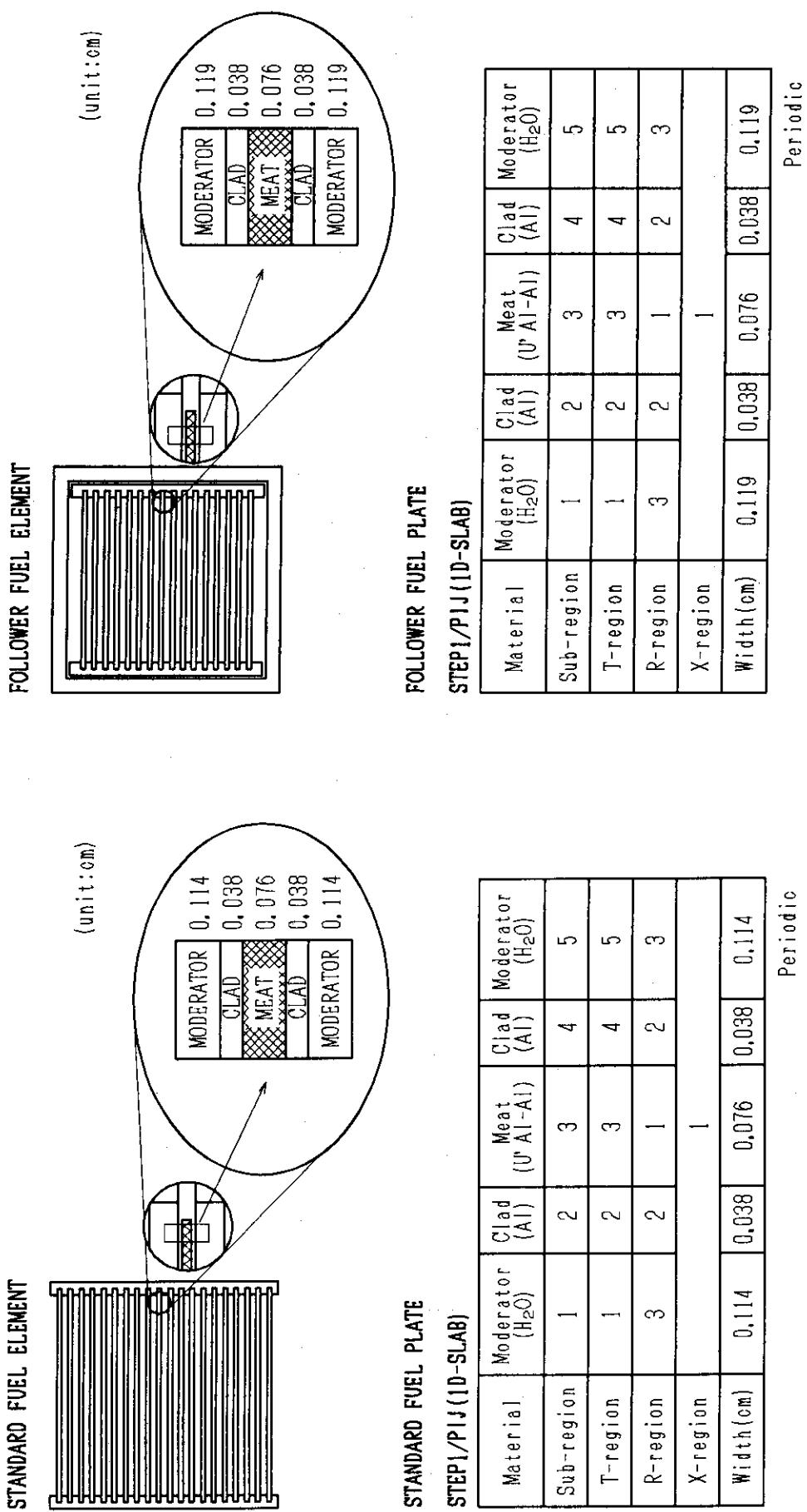


Fig. 2.2 Geometry for standard fuel plate

Fig. 2.3 Geometry for follower fuel plate

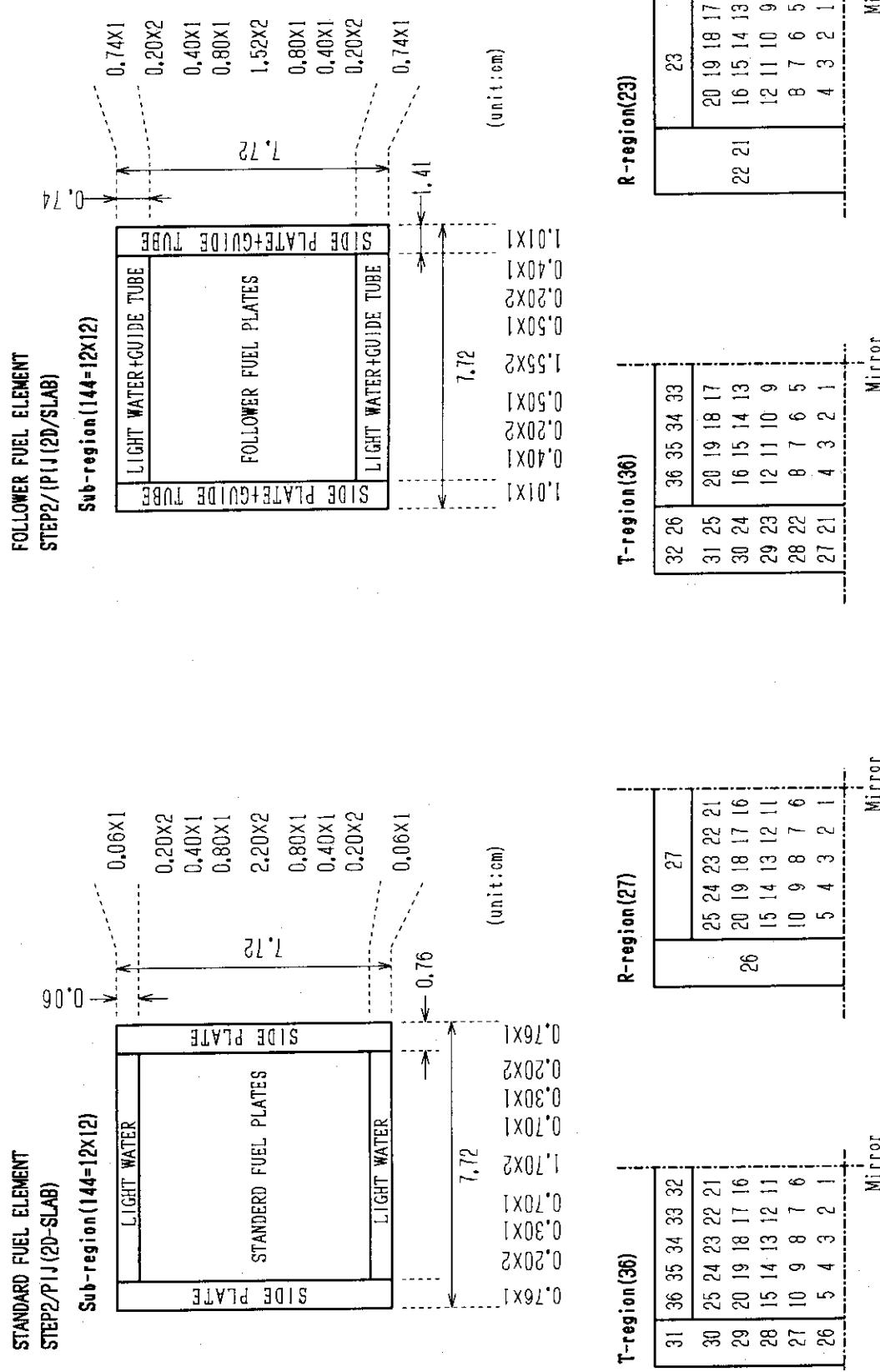
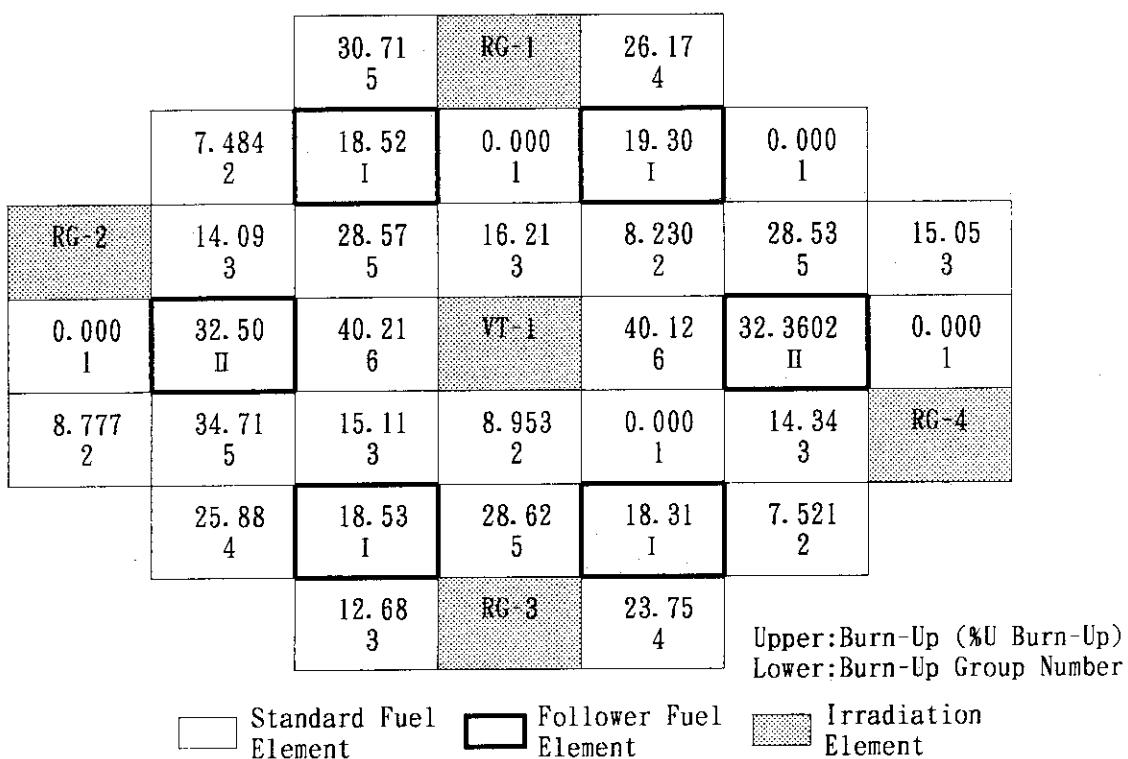


Fig. 2.4 Geometry for standard fuel element

Fig. 2.5 Geometry for follower fuel element



Average Burn-Up Standard Fuel Elements : 24.34%U
 Follower Fuel Elements : 23.25%U
 Total : 24.14%U

Fig. 2.6 Burn-up of fuel elements on '94/10/20.

Table 2.2 Fuel burn-up group structure

Fuel Element	Group	Burn-Up	No. of Elements	Average Burn-Up
Standard Fuel	1	0 %U	5	—
	2	~ 8 %U	5	8.193 %U
	3	~16 %U	6	14.58
	4	~24 %U	3	25.27
	5	~32 %U	5	30.23
	6	~40 %U	2	40.16
Follower Fuel	I	~18 %U	4	18.67 %U
	II	~32 %U	2	32.43

Hf ABSORBER

PIJ(2D-SLAB)

Sub-region(1156=34X34)

(unit:cm)

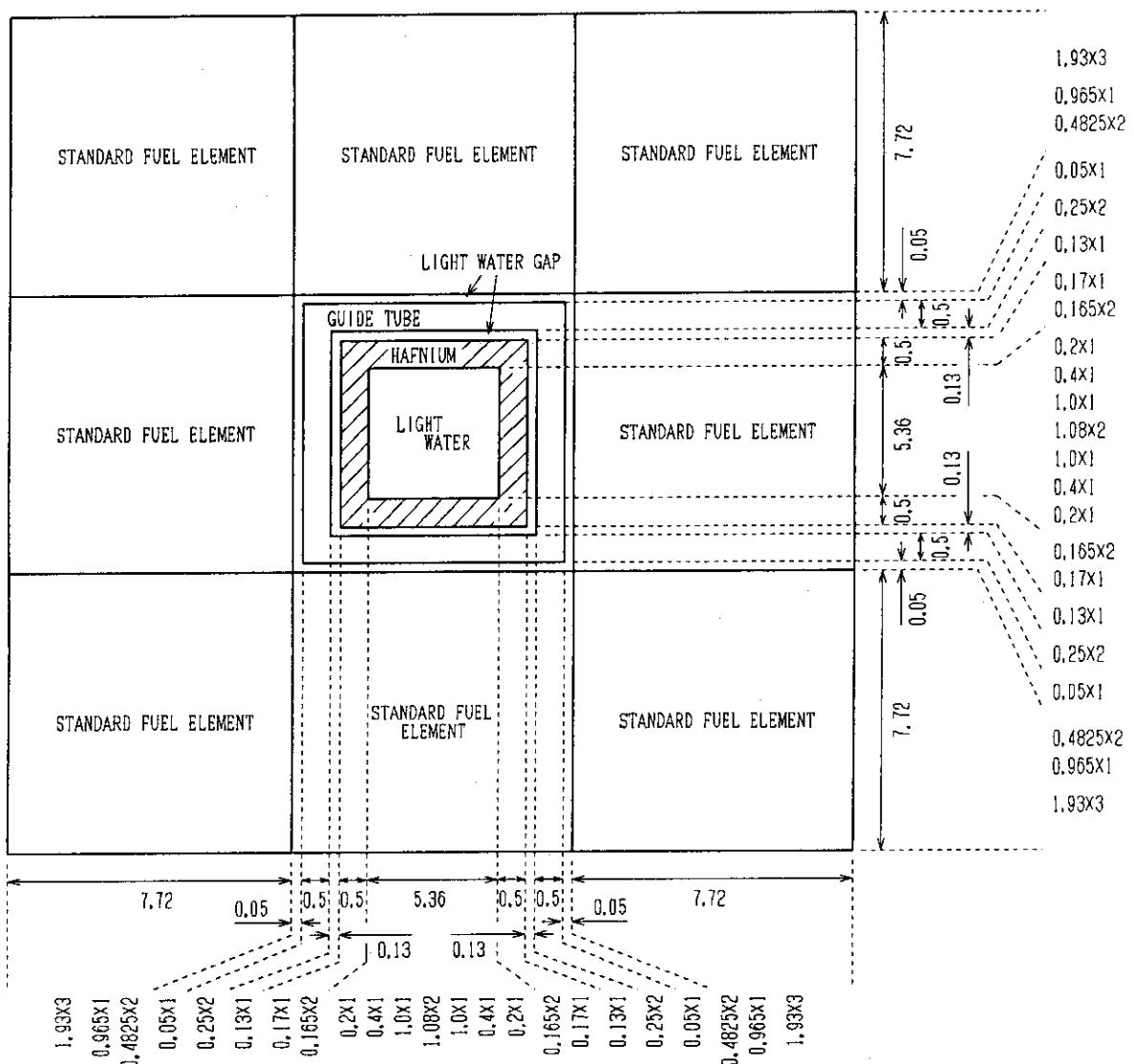


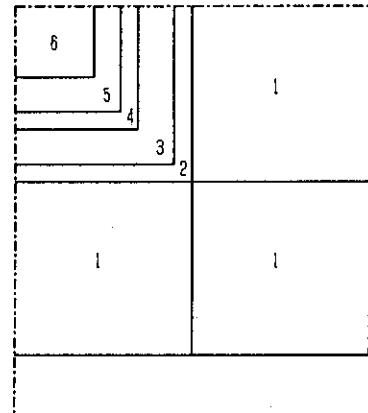
Fig. 2.7(a) Geometry for control rod element

T-region(17)

17 16 15 14	13 12 11	10	9 8	7	6 5 4 3 2 1
16 16 15 14	13 12 11	10	9 8	7	6 5 4 3 2 1
15 15 15 14	13 12 11	10	9 8	7	6 5 4 3 2 1
14 14 14 14	13 12 11	10	9 8	7	6 5 4 3 2 1
13 13 13 13	13 12 11	10	9 8	7	6 5 4 3 2 1
12 12 12 12	12 12 11	10	9 8	7	6 5 4 3 2 1
11 11 11 11	11 11 11	10	9 8	7	6 5 4 3 2 1
10 10 10 10	10 10 10	10	9 8	7	6 5 4 3 2 1
9 9 9 9	9 9 9 9	9 9 8	7	6 5 4 3 2 1	
8 8 8 8	8 8 8 8	8 8 8	7	6 5 4 3 2 1	
7 7 7 7	7 7 7 7	7 7 7	7	6 5 4 3 2 1	
6 6 6 6	6 6 6 6	6 6 6	6	6 5 4 3 2 1	
5 5 5 5	5 5 5 5	5 5 5	5	5 5 4 3 2 1	
4 4 4 4	4 4 4 4	4 4 4	4	4 4 4 3 2 1	
3 3 3 3	3 3 3 3	3 3 3	3	3 3 3 3 2 1	
2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2	2	2 2 2 2 2 1	
1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1	1	1 1 1 1 1 1	

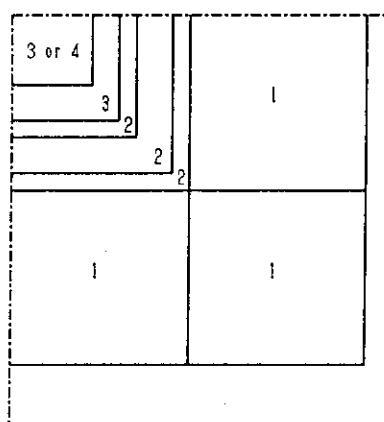
Mirror

R-region(6)



Mirror

X-region(3 or 4)



Mirror

Fig. 2.7(b) Geometry for control rod element

FOLLOWER CONNECTOR/PIJ(1D-SLAB)

Material	Connector (Al+H ₂ O)								Standard Fuel Element								Standard Fuel Element					
Sub-region	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13~22	23	24	25	26	27	28	29~32	33	34
T-region	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13~22	23	24	25	26	27	28	29~32	33	34
R-region	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13~22	23	24	25	26	27	28	29~32	33	34
X-region	1								2								3					
Width(cm)	0.36	0.50	1.00	2.00	2.00	1.00	0.50	0.36	0.25	0.25	0.28	0.48	0.52	0.52	0.25	0.25	0.48	0.38	1.55	0.38	0.38	

PERIODIC

Fig. 2.8 Geometry for follower connector

IRRADIATION ELEMENT WITH ALUMINUM PLUG/ANISN(1D-CYLINDER)

Material	Aluminum Plug			H ₂ O GAP	AL Tube	H ₂ O GAP	Standard Fuel Element			
Width(cm)	2.75			0.25	1.299	0.057	8.711			
X-region	1						2			
Zone No.	1	2	3	4	5	6	7			
Mesh interval (cm)	0.25X5	0.2X3	0.3X3	0.125 X2	0.24064 X5	0.0764 X2	0.2X3	0.5X3	1.0X2	2.6 2.61

WHITE

Fig. 2.9 Geometry for irradiation element

Be-REFLECTOR/ANISN(1D-CYLINDER)

Material	Standard Fuel	Be reflector (BetaAl)	D ₂ O reflector
Zone No.	1	2	3 4
X-region	1	2	3 4
Width(cm)	26.49	4.51	7.5 61.5
Mesh interval (cm)	6.49 6.0 4.0 2.0X5	1.5X2 1.51	1.5X5 1.5 2.0X5 4.0X10 10.0

Mirror

Vacuum

Fig. 2.10 Geometry for radial reflector

AXIAL REFLECTOR(ABOVE or UNDER STANDARD FUEL)/ANISN(1D-SLAB)

Material	Standard Fuel	Axial reflector (Above or Under ST Fuel)	
Zone No.	1	2	3
X-region	1	2	3
Width(cm)	37.5	10.0	20.0
Mesh interval (cm)	10.0 5.0 4.0 3.0X2 2.0X2 1.0 0.5X15	0.5X20	0.5X5 1.0X5 3.0X3 3.5

Mirror

Vacuum

Fig. 2.11 Geometry for axial reflector (Standard fuel element)

AXIAL REFLECTOR(UNDER FOLLOWER FUEL)/ANISN(1D-SLAB)

Material	Follower Fuel	Axial reflector (Under Follower Fuel)	
Zone No.	1	2	3
X-region	1	2	3
Width(cm)	47.5	10.0	20.0
Mesh interval (cm)	20.0 5.0 4.0 3.0X2 2.0X2 1.0 0.5X15	0.5X20	0.5X5 1.0X5 3.0X3 3.5

Mirror

Vacuum

Fig. 2.12 Geometry for axial reflector (Follower fuel element)

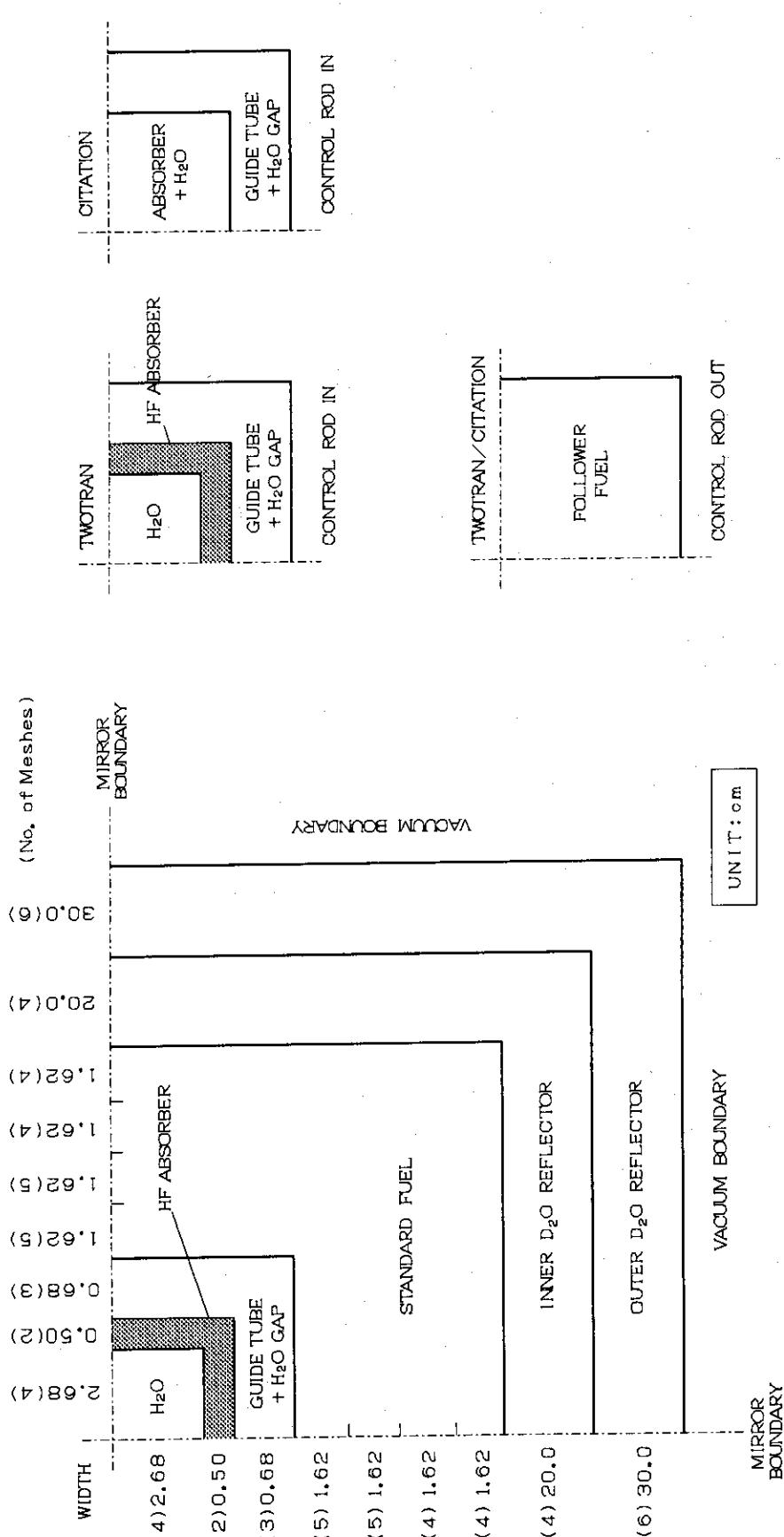


Fig. 2.13 Geometry for logarithmic derivative search

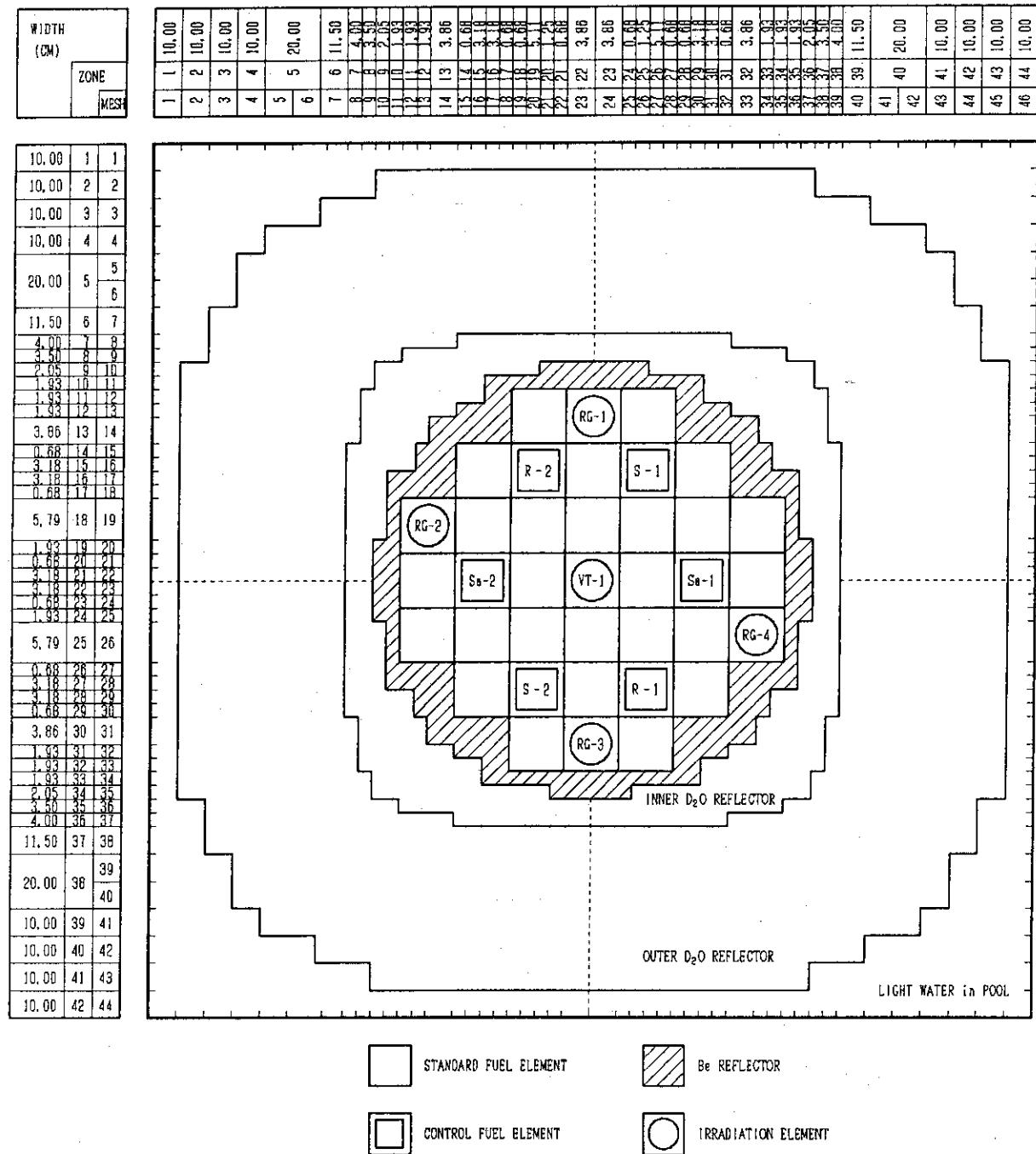


Fig. 2.14 Geometry for whole core calculation (3D/2D) (XY-plane)

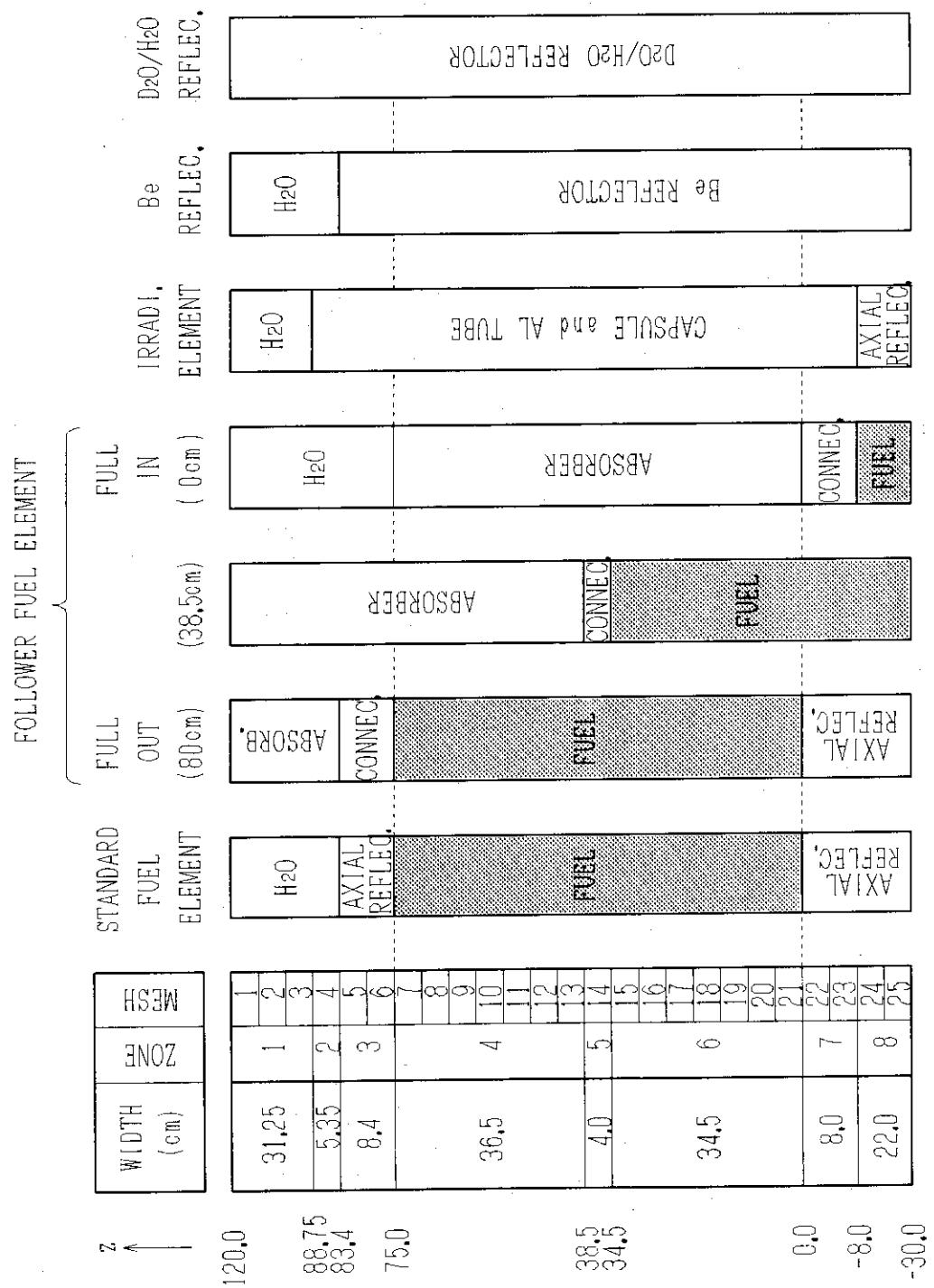


Fig. 2.15 Geometry for whole core calculation (3D)
(Z-axis)

JRR-3M VT HOLE / 1D-CYLINDRICAL

ZONE	MESH	WIDTH	HOMOGENIZED IRRADIATION ELEMENT												CORE CAL.	
			POLY Cd COVER	POLY BARE	Cd											
AL HOLDER																
1	1	0.05														
2	2	0.05														
3	3	0.2														
4	4	0.2														
5	5	0.2														
6	6	1.0														
7	7	1.0														
8	8	0.25														
9	9	0.25														
10	10	0.5														
11	11	0.5														
12	12	0.5														
13	13	0.5														
14	14	0.5														
15	15	0.5														
16	16	0.5														
17	17	0.5														
18	18	0.5														
19	19	0.5														

 $\rightarrow R \text{ (CM)}$

Fig. 2.16 Geometry for irradiation hole calculation at VT-1 hole

JRR-3M RG HOLE / 1D-CYLINDRICAL

ZONE	MESH	WIDTH	HOMOGENIZED IRRADIATION ELEMENT												CORE CAL.	
			POLY Cd COVER	POLY BARE	Cd											
AL HOLDER																
1	1	0.05														
2	2	0.05														
3	3	0.2														
4	4	0.2														
5	5	0.2														
6	6	1.0														
7	7	1.0														
8	8	0.25														
9	9	0.25														
10	10	0.5														
11	11	0.5														
12	12	0.5														
13	13	0.5														
14	14	0.5														
15	15	0.5														
16	16	0.5														
17	17	0.5														
18	18	0.5														
19	19	0.5														

 $\rightarrow R \text{ (CM)}$

Fig. 2.17 Geometry for irradiation hole calculation at RG-1 hole

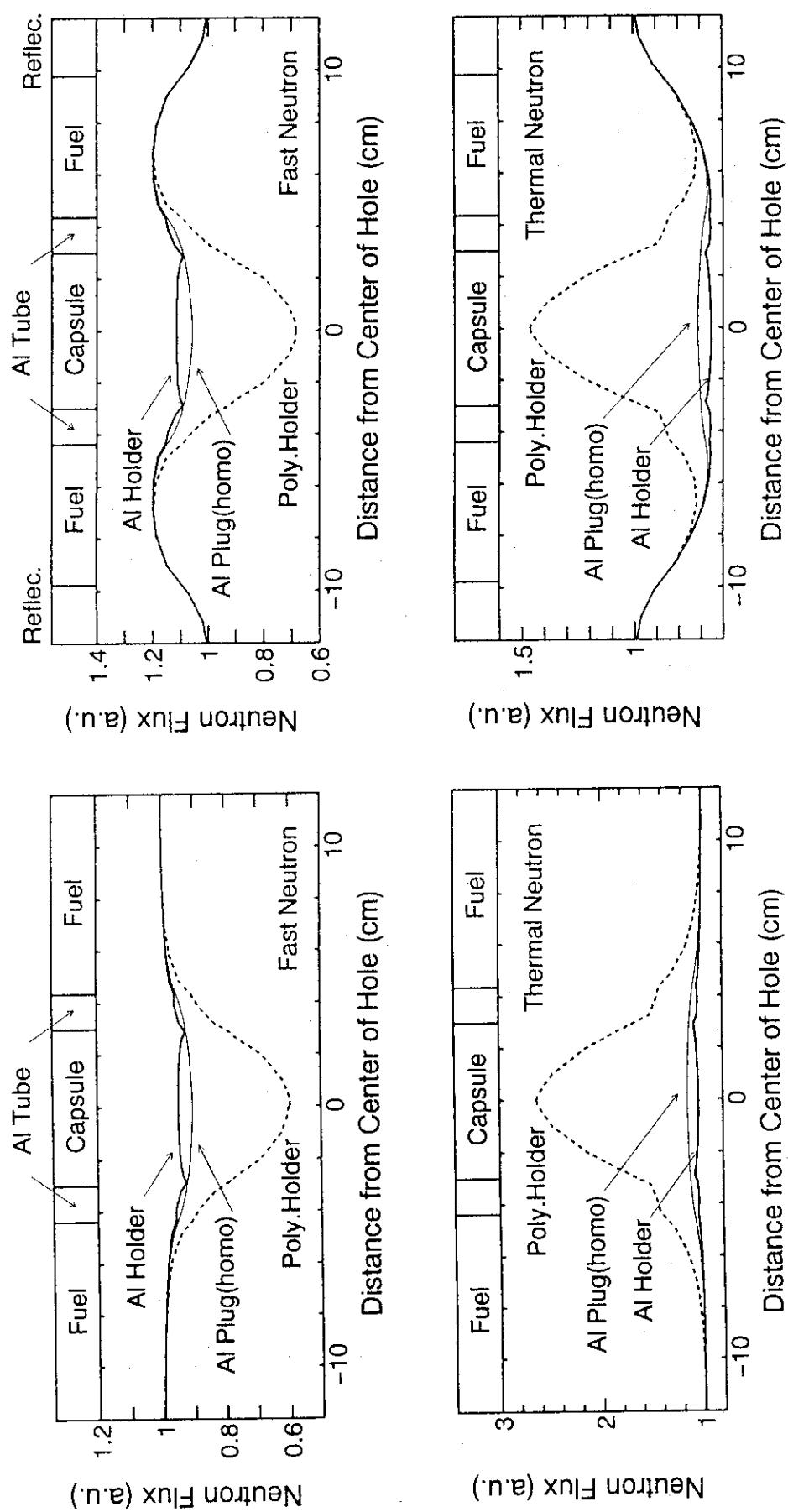


Fig. 2.18 Neutron flux distribution in VT-hole

Fig. 2.19 Neutron flux distribution in RG-hole

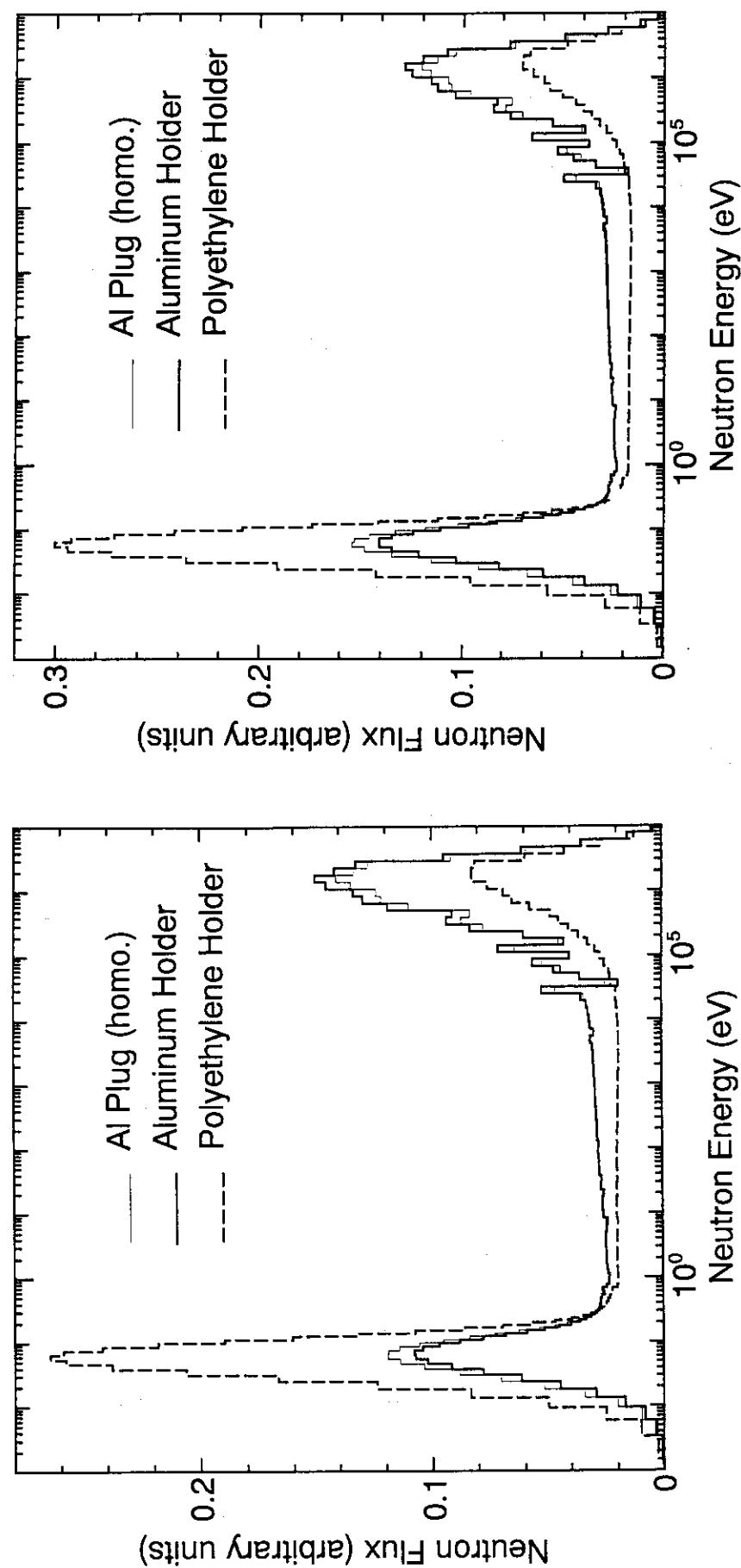


Fig. 2.20 Comparison of neutron spectrum at VT-1 hole

Fig. 2.21 Comparison of neutron spectrum at RG-1 hole

3. スペクトル計算値の検証

3.1 スペクトル計算値による反応率計算

反応率は、中性子束と中性子相互反応断面積を掛け合わせ、それを全エネルギー範囲に渡って積分することにより求められる。共鳴核種の場合、Fig. 3.1 に示したように筒内部の中性子束が自己遮蔽効果によって歪んでいるので、これを考慮して反応率を計算する必要がある。

$$R = \int \sigma(E) \cdot W(E) \cdot \phi(E) dE \quad (3.1)$$

ただし、

R : 1 原子当たりの反応率 [1/atom.s]

σ : 微視的断面積 [barn]

W : 摂動因子（自己遮蔽因子）

ϕ : 中性子束 [1/cm² s]

E : 中性子エネルギー [eV]

(3.1) 式により反応率を求めるには、断面積 $\sigma(E)$ が正確で、なおかつ共鳴核種の場合、自己遮蔽因子 $W(E)$ が正確に求められていることが必要である。以下では、(3.1) 式の具体的な計算について、断面積 $\sigma(E)$ の作成法、自己遮蔽因子 $W(E)$ の計算法および(3.1) 式の数値積分法を説明する。

3.1.1 超詳細断面積

鋭敏かつ急激に変化する共鳴吸収断面積を正確に取り扱うには、SRAC で用意されている 107 群の断面積では十分とは言えない。そこで、共鳴断面積処理コード RESEND^[9] を用いて、共鳴吸収を含む断面積について約 15,000 点のポイントワイズ断面積を作成した。共鳴ピークの広がりを考慮するための温度は 325K とした。一方、共鳴吸収を含まないしきい反応断面積については、RESEND^[9] を用いて約 200 点のポイントワイズ断面積を作成した。W, Ti, Fe および Ni の断面積作成には、マスターライブラリとして JENDL-3^[10] を用いた。JENDL-3 に登録されていない Au については ENDF/B-VI^[11] を用いて作成した。

3.1.2 自己遮蔽因子^[1,2]

箱を Fig. 3.2 に示す 1 次元無限平板で近似し、次の仮定の下に箱の内部における中性子束分布を計算する。

- ・ 箱表面の中性子流は等方である。
- ・ 箱の両側から一様に中性子は入射する。
- ・ 箱中の反応は吸収が支配的である。

箱の左表面から x だけ入った点における中性子束 $\phi(E, x)$ は、箱表面の中性子束 $\phi_s(E)$ を用いて次式で表される。

$$\phi(E, x) = \phi_s(E) \times \left[\int_{-1}^1 \exp\{-\Sigma_0(E)x/\mu\} d\mu + \int_{-1}^1 \exp\{-\Sigma_0(E)(t-x)/\nu\} d\nu \right] \quad (3.2)$$

ここで Σ_0 は次式で表される。

$$\Sigma_0(E) = N \sigma_t(E) + \sum_i N_i \sigma_{t,i}(E) \quad (3.3)$$

ただし、

N : 着目する核種の個数密度 [n/cm³]

σ_t : 着目する核種の微視的全断面積 [barn]

N_i : 箱に含まれる同位体核種 i の個数密度 *[n/cm³]

$\sigma_{t,i}$: 同位体核種 i の微視的全断面積 * [barn]

(* 同位体が含まれる場合)

箱内の中性子束 $\Phi(E)$ は、(3.2) 式を $x=0$ から $x=t$ まで x について積分すればよい。この積分を実行すると、最終的に次式を得る。

$$\Phi(E) = \phi_s(E) \times 2 [E_3(0) - E_3(\Sigma_0(E)t)] / \Sigma_0(E) \quad (3.4)$$

ただし、 E_3 : 第 3 次の積分指数関数^[1,3]
(Appendix C 参照)

自己遮蔽因子 $f_s(E, k)$ は、箱内の中性子束と箱表面における中性子束の比として、次式で表される。

$$\begin{aligned} f_s(E) &= \Phi(E) / \phi_s(E) \\ &= 2 [E_3(0) - E_3(\Sigma_0(E)t)] / \Sigma_0(E) \end{aligned} \quad (3.5)$$

この E_3 関数を用いた自己遮蔽因子の計算は、共鳴吸収断面積の取扱いにおいてよく用いられる方法であり、Au については有効であることが報告されている^[14]。しかし、W については、 E_3 関数で計算した自己遮蔽因子を用いても、それ程よい結果が得られていない。この理由は、W の全断面積の共鳴ピークが主に弾性散乱によるものだからである。つまり、W では、最初に設定した 3 つの仮定のうち「箱中の反応は吸収が支配的」という条件が成り立たない。したがって、このままでは W の自己遮蔽因子を正確に求めることができない。そこで、W の自己遮蔽因子の計算には、さらに第 4 の仮定

- ・散乱の前後で中性子エネルギーは変化しない。
(W の質量数は 186 前後であり、減速能は小さい)

を導入して

$$\sigma_t = \sigma_s \text{ (微視的吸収断面積)}$$

と近似し^[2]、(3.4) 式以下、同様に計算することにした。

一方、しきい反応に対しては、断面積が小さく自己遮蔽の補正は必要ないので、無限希釈状態であるとして $W(E) = 1$ を用いた。

3.1.3 数値積分

断面積と自己遮蔽因子は超詳細のエネルギー点ごとに求められたのに対し、スペクトル計算値は 107 群の群構造である。(3.1) 式の積分に当たって、107 群スペクトルを純粹に検証するため、107 群構造の階段状のスペクトルをそのまま用い、台形公式を用いて次式により数値積分を行なった。

$$\begin{aligned} R_c &= \sum_g \sum_{i \in g} \frac{1}{2} (\sigma_i W_i \phi_g + \sigma_{i+1} W_{i+1} \phi_g) (E_{i+1} - E_i) \\ &= \sum_g \frac{\phi_g}{2} \sum_{i \in g} (\sigma_i W_i + \sigma_{i+1} W_{i+1}) (E_{i+1} - E_i) \end{aligned} \quad (3.6)$$

ただし、

R_c : 反応率計算値 [1/atom.s]

σ_i : 超詳細エネルギー点 E_i における断面積 [barn]

W_i : エネルギー点 E_i における自己遮蔽因子

ϕ_g : 第 g 群中性子束 [$n/cm^2 s$] (per lethargy)

E_i : i 番目の超詳細エネルギー点 [eV]

この様子を Fig. 3.3 に示す。なお、超詳細エネルギー点と 107 群構造の群境界エネルギーとは必ずしも一致しないので、群境界エネルギーにない超詳細エネルギー点での断面積は、その両隣の断面積の値を log-log 内挿して求めている (Fig. 3.3 中の ×印) ^[14]。

3.2 反応率絶対値の検証

反応率計算値と反応率実験値とを絶対値に着目して比較する。反応率計算値は、2 次元 xy 体系 107 群計算で得られた中性子束、すなわち相対スペクトルを用いて計算されるので、反応率絶対値を求めるには、炉出力に合わせてスペクトルを定数倍する必要がある。そこで、VT-1 照射筒での Al 製ホルダ #10 (燃料板下端から 27.5cm) に設置した裸 Au 箔の反応率実験値と反応率計算値が一致するように、各照射筒でのスペクトル計算値を規格化した。この規格化したスペクトル計算値に基づいて算出した反応率を“反応率絶対値”と呼ぶことにする。

3.2.1 軸方向反応率分布

各照射筒の軸方向にそれぞれ 6 枚の裸 Au 箔を配置したので、これらから裸 Au 箔の軸方向反応率分布が得られる。軸方向反応率分布の比較を、VT-1 照射筒について Fig. 3.4(a), (b) に、RG-1 照射筒について Fig. 3.5(a), (b) にそれぞれ示す。なお、Fig. 3.4(a) 以外の図では、反応率絶対値の分布の他に、その照射筒のホルダ #10 の反応率実験値で規格化した相対分布も示してある。

各図において、絶対値による反応率分布の比較を見ると、VT-1 照射筒では比較的よく一致しているが、RG-1 照射筒での一致はあまりよくない。これは、VT-1 照射筒は炉心中心部にあるが、RG-1 照射筒は炉心端の反射体境界に位置しており、拡散計算では反射体境界付近の中性子束を正確に計算できていないことが理由として挙げられる。

また、各照射筒ごとにホルダ #10 の実験値で規格化した相対反応率分布を見ると、規格化した位置が #10 であることにもよるが、制御棒吸収体のある炉心上部での反応率計算値は実験値を過大評価する傾向がある。これは、すなわち、炉心上部における中性子束を過大評価しているものと思われる。この原因としては、炉心上部に位置する制御棒吸収体の中性子吸収効果の過小評価が考えられる。

3.2.2 反応率絶対値

各核種の反応率絶対値の比較を、 VT-1 照射筒について Table 3.1(a), (b) に、 RG-1 照射筒について Table 3.2(a), (b) にそれぞれ示す。

各 Table において全体的に言えることは、熱中性子反応核種である Au および W に比べて、しきい反応核種の C/E 値の 1 からのずれが目立つ。しきい反応核種の多くが制御棒吸収体のある高さに設置され（Table 1.2 参照）、それらすべてにおいて計算値が過大評価であることから、炉心上部では中性子束計算値が過大評価されていると判断できる。これは先の制御棒吸収体の中性子吸収効果の過小評価と傾向が一致するので、このことからも制御棒近傍の中性子に対する中性子輸送効果の補正が不十分であったことが裏付けられる。この中性子吸収の過小評価を考慮に入れると、3 次元全炉心拡散計算の実効増倍率が 1.0283 (Table 2.5) と約 3 % 大きめに評価されていたことも説明がつく。つまり、この反応率分布の比較から、3 次元全炉心拡散計算における制御棒輸送補正法を改善する必要性が認められた。この制御棒輸送補正の改善策として、例えば

- ① 対数微分定数を熱群のみに適用するのではなく、中性子束勾配を考慮した (2.1) 式を用いて、各群ごとに対数微分定数を決定する。
- ② 中性子照射は、通常、臨界状態で行われるので、制御棒パターンを考慮した 3 次元 4 群全炉心拡散計算の実効増倍率が 1 となるように対数微分定数を調節する。

などが挙げられる。

3.3 スペクトル評価値の検証

ある位置でのスペクトルを評価するには、同位置あるいは同条件で照射された異なる核種の複数の試料を用いて行う必要がある。しかし、同じ位置で異なる箔を同時に照射することは、Cd カバーや箔自身による中性子束の歪みを考えると好ましくなく、また、複数回に分けて照射したとしても、照射の再現性が問題となり、全く同じ条件で照射を行うことは困難である。

今回の実験も、中性子束の歪み効果を避けるために、1 つのホルダに箔を 1 枚のみ配置したので、各照射筒でのスペクトルを評価するには、異なる高さにおける反応率実験値をある高さでの値に換算して行う必要がある。例えば Cd 比を評価する場合には、裸箔と Cd カバー付き箔の試料設置高さが異なるので、これを評価対象とする高さに換算しなければ

ならない。しかも“3.2 反応率絶対値の検証”の結果から、制御棒吸収体から離れた位置でスペクトル評価を行うことが望ましい。そこで、制御棒吸収体の無い高さで、かつ Au の反応率を HPGe 検出器と $\beta\gamma$ 同時計数器の両方で測定したホルダ #10 (“1.2.3 反応率測定”参照) を基準の高さに選び、この点におけるスペクトルを評価することにした。

ホルダ #10 の高さへの反応率実験値の換算は、対象とする試料の軸方向反応率分布の測定値を用いて、次式により換算するのが望ましい。

$$R_{\#10} = R_{\#Z} \times \frac{R_{D,\#10}}{R_{D,\#Z}} \quad (3.7)$$

ただし、

$R_{\#10}$: ホルダ #10 での値に換算した反応率実験値

$R_{\#Z}$: ホルダ #Z での反応率測定値

R_D : 軸方向反応率分布用に測定した反応率測定値

(# はホルダ番号を表す)

しかし、今回の放射化実験では照射した試料の種類が多く、すべての試料について軸方向分布を測定することはできなかった。軸方向反応率分布を測定した裸 Au 箔についても、すべての高さでは測定できなかつたので、いずれにせよ、反応率の換算に (3.7) 式を用いることはできない。そこで、軸方向反応率の測定値ではなく、計算値を用いて次式により換算することにした。

$$R_{\#10} = R_{\#Z} \times \frac{R_{C,\#10}}{R_{C,\#Z}} \quad (3.8)$$

ただし、

R_C : 反応率計算値 (# はホルダ番号を表す)

この高さ換算に伴う誤差は、反応率実験値の測定誤差、並びに反応率実験値と計算値との系統的なズレを考慮して、次式により評価した。

$$\begin{aligned} (\text{換算による相対誤差})^2 &= (\text{反応率実験値の相対測定誤差})^2 \\ &\quad + (\text{計算値の相対系統誤差})^2 \\ &= (\text{反応率実験値の相対測定誤差})^2 \\ &\quad + \left[\frac{\text{反応率計算値} - \text{反応率実験値}}{\text{反応率実験値}} \right]^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

以下では、スペクトル評価量としてよく用いられる Cd 比、および今回導入したスペクトルシフト比に着目して、計算値と実験値を比較する。

3.3.1 Cd 比

Cd 比は、その定義から、熱中性子束と熱外中性子束の比を表すスペクトル評価値と言える。

$$(Cd\text{ 比}) = (\text{裸箔の反応率}) / (\text{Cd カバー付き箔の反応率}) \quad (3.10)$$

$$= \frac{(\text{熱中性子束による反応率} + \text{熱外中性子束による反応率})}{(\text{熱外中性子による反応率})}$$

ホルダ #10 における Cd 比の比較を、VT-1 照射筒について Table 3.3 に、RG-1 照射筒について Table 3.4 にそれぞれ示す。Cd 比の実験値の相対誤差が 9% ~ 14% と大きいのは、“3.3 スペクトル評価値の検証”で述べたように、反応率測定値の照射高さによる換算に計算値を用いているからであり、特に、制御棒吸収体のある高さに設置した W で顕著である。C/E 値を見ると、ポリエチレン製ホルダに設置した W の値の 1 からのずれが目立つ。この W の計算値は実験値と誤差の範囲で一致しているものの、今後の実験では、スペクトル評価値の実験値の誤差を低減する対策が必要である。その他の箔については、実験値と計算値とでよい一致が得られた。このことから、熱エネルギー領域および共鳴エネルギー領域のスペクトルはほぼ妥当であると言える。

3.3.2 スペクトルシフト比

試料ホルダの材質の違いによるスペクトルの変化を定量的に表す指標として、スペクトルシフト比を導入する。厳密にスペクトルシフト効果を評価するには、スペクトル自身の評価値である Cd 比などの比、すなわち

$$(スペクトルシフト量) = \frac{(\text{ポリエチレン製ホルダに設置した箔の Cd 比})}{(\text{Al 製ホルダに設置した箔の Cd 比})} \quad (3.11)$$

で定義すべきであるが、Cd 比が定義されないしきい反応核種にもスペクトルシフト比を適用するため、今回、スペクトルシフト比を次式のように反応率の比で定義した。

$$(スペクトルシフト比) = \frac{(ポリエチレン製ホルダに設置した箔の反応率)}{(AI 製ホルダに設置した箔の反応率)} \quad (3.12)$$

上式で定義したスペクトルシフト比は、ポリエチレン製ホルダの場合と AI 製ホルダの場合の照射時の炉出力、すなわち中性子束絶対値が規格化してあれば、スペクトルシフト効果を間接的に表す量として用いることができる。

このスペクトルシフト比は、裸箔の場合と Cd カバー付き箔の場合で、各々次のような特性を持つ。裸箔の場合、Au や W のような熱中性子反応核種では、ポリエチレンによるスペクトル軟化効果により熱中性子が増加することから、スペクトルシフト比は 1 より大きな値をとる。また、Ti や Ni のようなしきい反応核種の場合は、スペクトル軟化効果により高速中性子が減少することから、1 より小さくなる。一方、Cd カバー付き箔の場合、スペクトル軟化効果で増加した熱中性子は Cd によってほとんど吸収されてしまうため、熱中性子增加の効果は打ち消されてしまう。したがって、熱中性子反応核種ではスペクトル軟化硬化により熱外中性子が減少した分だけ、スペクトルシフト比は 1 より若干小さくなる。また、しきい反応核種では、Cd による高速中性子の吸収効果はほとんど無いので、裸箔の場合とほぼ同じ値になる。

ホルダ #10 におけるスペクトルシフト比の比較を、VT-1 照射筒について Table 3.5 に、RG-1 照射筒について Table 3.6 にそれぞれ示す。C/E 値を見ると、VT-1 照射筒では Cd カバー付き Au 箔の 1 からのずれが目立つ。この Cd カバー付き Au 箔のスペクトルシフト比は本来 1 より小さな値となるものであるが、逆に 1 より大きな値をとっており、この実験値に問題があることを示している。また、RG-1 照射筒でも Cd カバー付き Au 箔および Fe の 1 からのずれが目立つ。これも、Cd 比の結果と同様に、誤差の範囲で一致しているものの、計算値の妥当性を議論するためには、実験値の誤差の低減が必要不可欠である。以上の 3 つの箔を除けば、スペクトルシフト比の実験値と計算値はよい一致が得られた。このことから、2 段階スペクトル計算の第 2 段階“照射筒内部詳細計算”における照射筒内部の非均質性の取り扱いが妥当であることが示された。

Table 3.1(a) Comparison of absolute reaction rates at VT-1 hole
(Aluminum Holder/Power 200 kW)

Foil	Hole/Holder—#	Reaction	Reaction Rate (1/atom.s)		C/E
			Experiment	Calculation	
Au (bare)	VT/AL-10	(n, γ)	$(2.768 \pm 0.127) \times 10^{-10}$	2.768×10^{-10}	—
Au (Cd)	VT/AL-9	(n, γ)	$(1.307 \pm 0.060) \times 10^{-10}$	1.379×10^{-10}	1.06
W (bare)	VT/AL-2	(n, γ)	$(2.031 \pm 0.092) \times 10^{-11}$	1.845×10^{-11}	0.91
W (Cd)	VT/AL-3	(n, γ)	$(1.340 \pm 0.061) \times 10^{-11}$	1.258×10^{-11}	0.94
Fe	VT/AL-5	(n, p)	$(5.331 \pm 0.234) \times 10^{-14}$	5.695×10^{-14}	1.07
Ni	VT/AL-8	(n, p)	$(1.414 \pm 0.061) \times 10^{-13}$	1.551×10^{-13}	1.10
Ti	VT/AL-13	(n, p)	$(4.232 \pm 0.186) \times 10^{-16}$	3.579×10^{-16}	0.85

Table 3.1(b) Comparison of absolute reaction rates at VT-1 hole
(Polyethylene Holder/Power 200 kW)

Foil	Hole/Holder—#	Reaction	Reaction Rate (1/atom.s)		C/E
			Experiment	Calculation	
Au (bare)	VT/POLY-10	(n, γ)	$(5.231 \pm 0.239) \times 10^{-10}$	4.930×10^{-10}	0.94
Au (Cd)	VT/POLY-9	(n, γ)	$(1.331 \pm 0.061) \times 10^{-10}$	1.257×10^{-10}	0.94
W (bare)	VT/POLY-2	(n, γ)	$(3.913 \pm 0.176) \times 10^{-11}$	3.441×10^{-11}	0.88
W (Cd)	VT/POLY-3	(n, γ)	$(1.151 \pm 0.052) \times 10^{-11}$	1.108×10^{-11}	0.96
Fe	VT/POLY-5	(n, p)	$(4.081 \pm 0.179) \times 10^{-14}$	4.515×10^{-14}	1.11
Ni	VT/POLY-8	(n, p)	$(1.079 \pm 0.047) \times 10^{-13}$	1.196×10^{-13}	1.11
Ti	VT/POLY-13	(n, p)	$(3.902 \pm 0.172) \times 10^{-16}$	3.339×10^{-16}	0.86

Table 3.2(a) Comparison of absolute reaction rates at RG-1 hole
(Aluminum Holder/Power 200 kW)

Foil	Hole/Holder- #	Reaction	Reaction Rate (1/atom.s)		C/E
			Experiment	Calculation	
Au (bare)	RG/AL-10	(n , γ)	$(2.016 \pm 0.093) \times 10^{-10}$	2.157×10^{-10}	1.07
Au (Cd)	RG/AL-9	(n , γ)	$(8.270 \pm 0.381) \times 10^{-11}$	9.412×10^{-11}	1.13
W (bare)	RG/AL-2	(n , γ)	$(1.503 \pm 0.068) \times 10^{-11}$	1.641×10^{-11}	1.09
W (Cd)	RG/AL-3	(n , γ)	$(8.028 \pm 0.365) \times 10^{-12}$	8.459×10^{-12}	1.05
Fe	RG/AL-5	(n , p)	$(2.570 \pm 0.114) \times 10^{-14}$	3.008×10^{-14}	1.17
Ni	RG/AL-8	(n , p)	$(7.102 \pm 0.309) \times 10^{-14}$	8.393×10^{-14}	1.18
Ti	RG/AL-13	(n , p)	$(2.327 \pm 0.104) \times 10^{-16}$	2.009×10^{-16}	0.86

Table 3.2(b) Comparison of absolute reaction rates at RG-1 hole
(Polyethylene Holder/Power 200 kW)

Foil	Hole/Holder- #	Reaction	Reaction Rate (1/atom.s)		C/E
			Experiment	Calculation	
Au (bare)	RG/POLY-10	(n , γ)	$(3.446 \pm 0.158) \times 10^{-10}$	3.624×10^{-10}	1.05
Au (Cd)	RG/POLY-9	(n , γ)	$(7.463 \pm 0.346) \times 10^{-11}$	7.681×10^{-11}	1.03
W (bare)	RG/POLY-2	(n , γ)	$(2.304 \pm 0.104) \times 10^{-11}$	3.022×10^{-11}	1.31
W (Cd)	RG/POLY-3	(n , γ)	$(6.150 \pm 0.280) \times 10^{-12}$	6.679×10^{-12}	1.09
Fe	RG/POLY-5	(n , p)	$(1.835 \pm 0.080) \times 10^{-14}$	2.394×10^{-14}	1.30
Al	RG/POLY-7	(n , α)	$(2.765 \pm 0.131) \times 10^{-16}$	3.023×10^{-16}	1.09
Ni	RG/POLY-8	(n , p)	$(5.142 \pm 0.224) \times 10^{-14}$	6.493×10^{-14}	1.26
In (Cd)	RG/POLY-11	(n , n')	$(1.598 \pm 0.068) \times 10^{-13}$	1.603×10^{-13}	1.00
In (bare)	RG/POLY-12	(n , n')	$(1.653 \pm 0.071) \times 10^{-13}$	1.554×10^{-13}	0.94
Ti	RG/POLY-13	(n , p)	$(2.058 \pm 0.090) \times 10^{-16}$	1.891×10^{-16}	0.92

Table 3.3 Comparison of cadmium ratios at VT-1 hole

Foil	Hole/Holder	Cd ratio		C/E
		Experiment	Calculation	
Au	VT/AL	1.931±0.165	1.830	0.95
	VT/POLY	3.582±0.370	3.576	1.00
W	VT/AL	1.998±0.255	1.936	0.97
	VT/POLY	4.405±0.622	4.022	0.91

Table 3.4 Comparison of cadmium ratios at RG-1 hole

Foil	Hole/Holder	Cd ratio		C/E
		Experiment	Calculation	
Au	RG/AL	2.208±0.370	2.075	0.94
	RG/POLY	4.182±0.369	3.998	0.96
W	RG/AL	2.140±0.266	2.084	0.97
	RG/POLY	4.019±1.324	4.530	1.13

Table 3.5 Comparison of spectral shift ratios at VT-1 hole

Foil	Hole	Reaction	Spectral Shift ratio		C/E
			Experiment	Calculation	
Au (bare)	VT	(n, γ)	1.890±0.164	1.781	0.94
W (bare)	VT	(n, γ)	1.892±0.311	1.831	0.97
Au (Cd)	VT	(n, γ)	1.019±0.104	0.911	0.89
W (Cd)	VT	(n, γ)	0.859±0.083	0.881	1.03
Fe	VT	(n, p)	0.765±0.108	0.793	1.04
Ni	VT	(n, p)	0.763±0.121	0.771	1.01
Ti	VT	(n, p)	0.922±0.203	0.933	1.01

Table 3.6 Comparison of spectral shift ratios at RG-1 hole

Foil	Hole	Reaction	Spectral Shift ratio		C/E
			Experiment	Calculation	
Au (bare)	RG	(n , γ)	1.709 ± 0.185	1.680	0.98
W (bare)	RG	(n , γ)	1.439 ± 0.476	1.727	1.04
Au (Cd)	RG	(n , γ)	0.902 ± 0.140	0.816	0.90
W (Cd)	RG	(n , γ)	0.766 ± 0.092	0.789	1.03
Fe	RG	(n , p)	0.714 ± 0.253	0.796	1.11
Ni	RG	(n , p)	0.724 ± 0.236	0.774	1.07
Ti	RG	(n , p)	0.884 ± 0.151	0.941	1.06

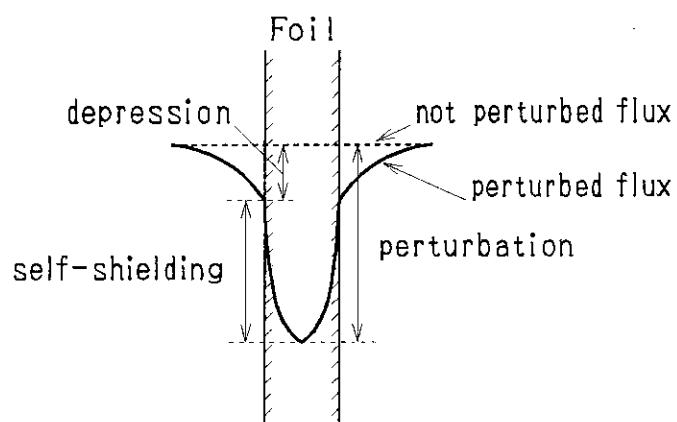


Fig. 3.1 Perturbation by foil's existence

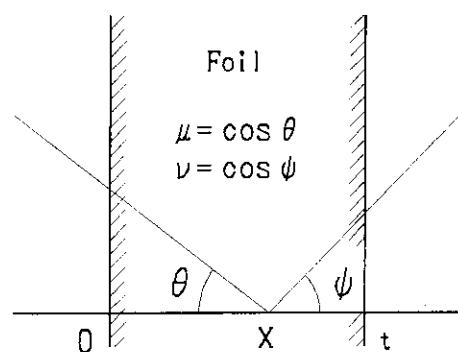


Fig. 3.2 Coordinates of foil

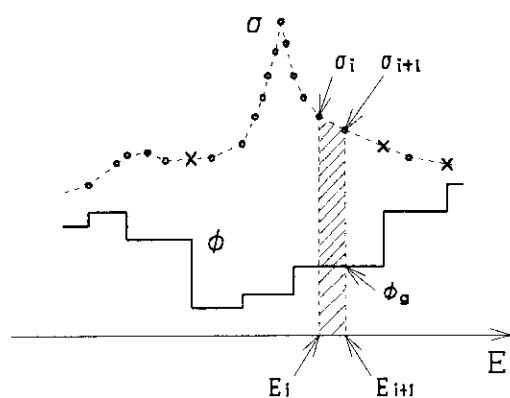


Fig. 3.3 Illustration of integration

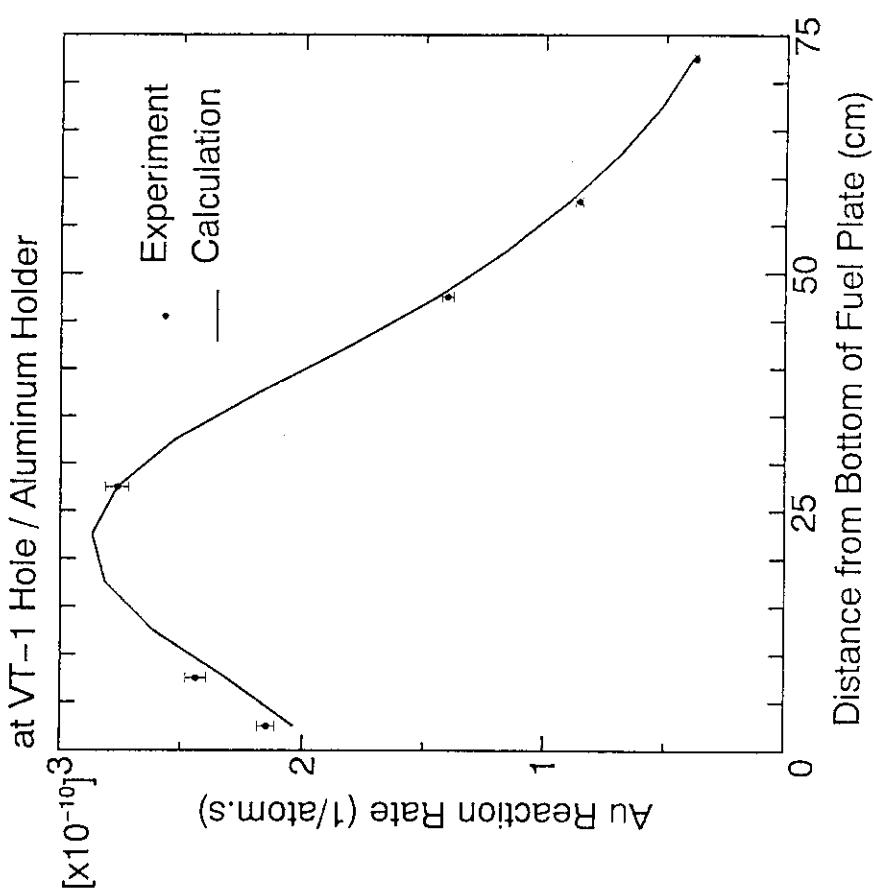


Fig. 3.4(a) Vertical distribution of Au reaction rate

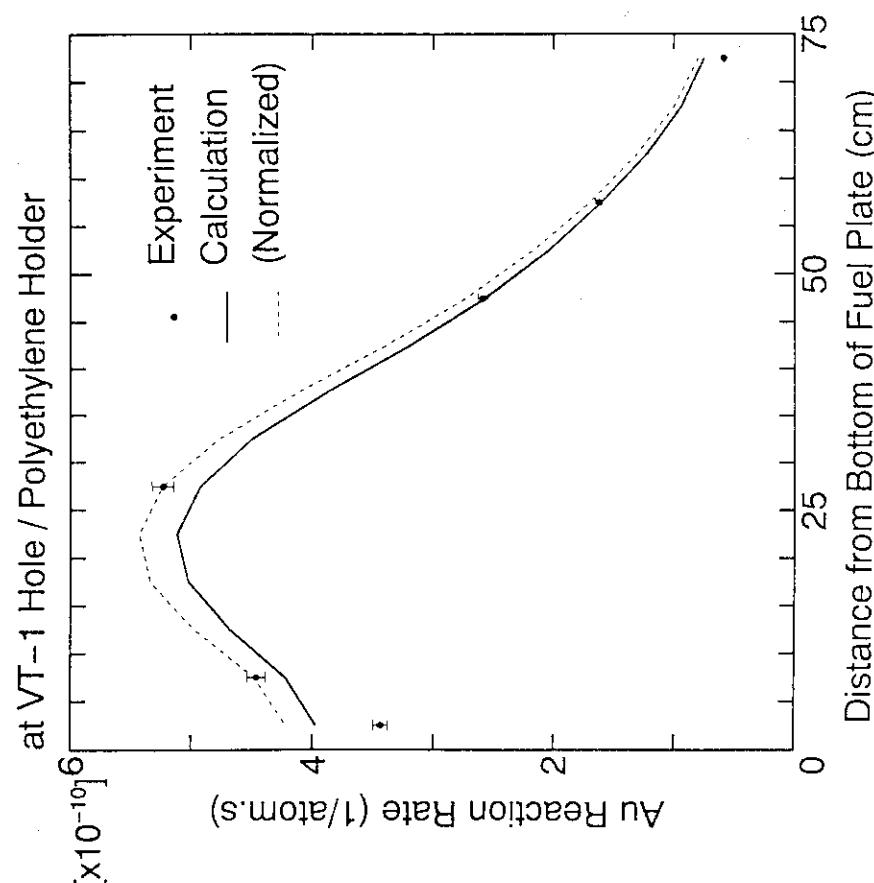


Fig. 3.4(b) Vertical distribution of Au reaction rate

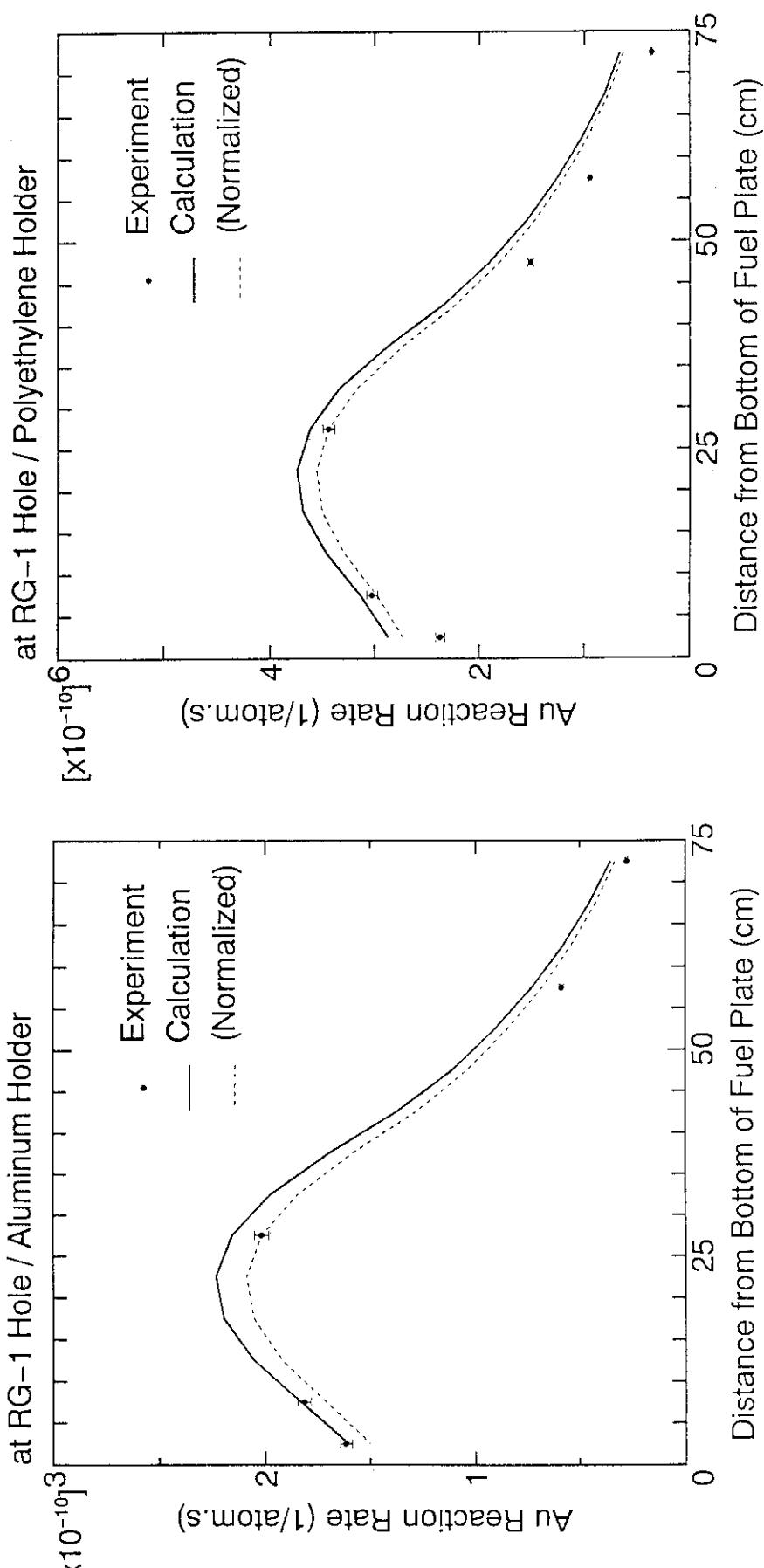


Fig. 3.5(a) Vertical distribution of Au reaction rate

Fig. 3.5(b) Vertical distribution of Au reaction rate

4. 結 論

JRR-3M の燃料領域照射筒を用いて、TRU の断面積評価を目的とする放射化実験を行うことを前提に、全炉心拡散計算および照射筒内部詳細計算の 2 段階計算により、解析対象とする放射化実験の実験条件、すなわち燃料の燃焼履歴・制御棒パターン・照射容器の構造を考慮して、試料照射位置における 107 群中性子スペクトルを求めた。

Cd 比およびスペクトルシフト比に着目すると、2 段階計算で得られたスペクトル計算値は実験値とよく一致し、スペクトル評価に関して妥当なことが示された。一方、反応率絶対値に着目した計算値と実験値との比較では、制御棒吸収体のある高さで計算値が 10 ~ 30% 程度過大評価となり、制御棒輸送補正に改良の余地のあることが分かった。その改善策として、次の 2 つが挙げられる。

- ① 対数微分定数を熱群のみに適用するのではなく、中性子束勾配を考慮し、各群ごとに対数微分定数を設定する。
- ② 中性子照射は、通常、臨界状態で行われるので、制御棒パターンを考慮した 3 次元 4 群全炉心拡散計算の実効増倍率が 1 となるように対数微分定数を調節する。

謝　　辞

本研究を遂行するに当たり、研究炉技術開発室の皆様には種々のご協力をいただきました。

実験を行うに当たっては、研究炉利用課の方々には、照射キャップセルの装荷・取り出しを、また、JRR-3管理課運転員の方々には、本実験のためだけに運転をしていただきました。

反応率測定に際し、高速炉物理研究室・桜井健研究員には、放射線測定に関する文献を提供していただきました。また、名古屋大学工学部原子核工学科仁科研究室の吉井貴君・伏木勝己君・上口真司君には実験にご助力いただきました。特に吉井貴君には、セル計算の手直しやその作図もお願いしました。

SRACコードシステムの使用に際しては、土橋敬一郎原子炉工学部次長、奥村啓介原子炉システム研究室研究員に多くの便宜を図っていただきました。

以上の方々以外にも多くの皆様に種々なご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究は、平成6年度原研施設利用共同研究として行なった。

本研究で行なった数値計算は、名古屋大学大型計算機センターおよび日本原子力研究所情報システムセンター（通信回線を介して利用）で行なった。

参考文献

- [1] 菊池康之, 他 : 原子力誌, 36 [3], 211 (1994)
- [2] 曽野浩樹 : "全炉心および局所領域の2段階計算による詳細中性子スペクトル計算法", 名古屋大学大学院修士論文, (1995)
- [3] 岩崎淳一, 他 : JRR-3 改造炉の核計算(少数群定数), JAERI-M 84-159, (1984)
- [4] 曽山和彦, 他 : JRR-3 炉心管理用計算コードシステム, JAERI-M 91-088, (1991)
- [5] TSUCHIHASHI, K., et al. : SRAC(SRAC93) : JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis, 私信, (1994)
- [6] TSUCHIHASHI, K., et al. : Revised SRAC Code System, JAERI 1302, (1986)
- [7] AKIE, H., et al. : Improvements on Burnup Chain Model and Group Cross Section Library in the SRAC System, JAERI 1323, (1991)
- [8] 曽山和彦 : 材料検査データによる炉心構成要素の原子個数密度, 私信, (1990)
- [9] NAKAGAWA, T. : Program RESEND (Version 84-07) : A Program for Reconstruction of Resonance Cross Sections from Evaluated Nuclear Data in the ENDF/B Format (Modified Version of RESEND), JAERI-M 84-192, (1984)
- [10] SHIBATA, K., et al. : "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, version-3", JAERI 1319, (1990)
- [11] LEMMEL, H., JAEA-NDS-100, Rev.3, (1990)
- [12] 古橋 晃 : 原子力誌, 4 [11], 797 (1962)
- [13] ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I. A. : "Handbook of Mathematical Functions", p.231, (1970), Dover Publications Inc.
- [14] HIRAKAWA, N., et al. : Measurement and Analysis of Cadmium Ratios of Activation Foils in Thermal Critical Assembly (KUCA B3/8"P36EU-NU-EU), J.Nucl.Sci.Technol., 30 [7], 628 (1993)

Appendix A 3次元 xyz 体系 107 群全炉心拡散計算における 2つの仮定の検証

計算を行うことは事実上不可能である。そこで、次の 2つの手順

- ① 3次元 xyz 体系計算において、基準高さ z_0 （後述）に対する任意の高さ z での中性子束の比を求め、これを 2次元 107 群中性子束に掛けることにより z 軸方向の分布を考慮する。
- ② 手順①のとき、2次元 xy 体系計算と 3次元 xyz 体系計算のエネルギー群構造が異なるので、107 群構造の第 g 群の中性子束 $\phi^{2D}(x,y,z,g)$ に乘ずる中性子束比 $\phi^{3D}(x,y,z,G) / \phi^{3D}(x,y,z_0,G)$ には、第 g 群が属する 4 群構造での第 G 群の値を一律に用いる。

により、2次元 xy 体系 107 群全炉心計算と 3次元 xyz 体系 4 群全炉心計算の計算結果を結合させることは本文中で述べた。

上記の 2つの手順は、次の仮定が満たされている場合のみ成立する。

- ① 3次元 xyz 体系計算で求めた基準 xy 平面 (z_0) の中性子束分布 $\phi^{3D}(x,y,z_0)$ と、2次元 xy 体系計算で求めた制御棒引き抜き状態の中性子束分布 $\phi^{2D}(x,y)$ は等しい。
- ② 3次元 xyz 体系計算の 4 群構造のエネルギー境界で区切られる各エネルギー領域では、照射筒内の上下の位置に依らず、スペクトルの形は一定である。

以下ではこれら 2つの仮定の妥当性について検証する。なお、混同を避けるため、「制御棒吸収体」「フォロワ型燃料要素」とこの両方を総称する「制御棒要素」とは区別する。

【制御棒要素と中性子束分布】

仮定①に関して、制御棒要素と中性子束分布との関係を調べるため、3次元 xyz 体系計算および 2次元 xy 体系計算（制御棒吸収体挿入または引き抜きの 2 ケース）で得られた中性子束を比較する。計算モデルは、本文 “2.6 全炉心計算” で示したものと同一である。なお、2次元計算で得られた中性子束は 107 群であるため、これを 3次元計算時と同じ 4 群構造に縮約した。

3次元計算で求めた中性子束分布を比較する z 方向位置は次の 5つとした。

・ z 方向位置

ホルダ #4	(燃料下端から	57.5cm)
ホルダ #6	"	47.5cm)
ホルダ #8	"	37.5cm) ← 廉心中央高さ
ホルダ #10	"	27.5cm)
ホルダ #12	"	17.5cm)

・ 制御棒要素との位置関係

制御棒吸収体
制御棒吸収体
コネクタ
フォロワ型燃料
フォロワ型燃料

VT-1 および RG-1 照射筒の中心軸を通る y 軸方向の中性子束分布の比較を、高速群（第 1 群）について Fig. A.1 に、熱群（第 4 群）について Fig. A.2 にそれぞれ示す。なお、中性子束はすべて廉心中央で規格化してある。

3 次元計算の結果を見ると、制御棒吸収体のある高さに相当する #4 と #6 は同じ分布となり、また、フォロワ燃料のある高さの #10 と #12 も類似の分布となっているが、吸収体の場合（#4, #6）とフォロワ型燃料の場合（#10, #12）を比較すると、両者は全く異なった分布となっている。

一方、2 次元計算で、吸収体引き抜き状態の 2 次元計算の中性子束分布と、位置 #10, #12 の 3 次元計算とが照射筒位置でよく似ていることが確認できる。逆に、吸収体挿入状態での中性子束分布は、軸方向の中性子流を無視しているため、廉心端で中性子束を過小評価している。したがって、2 次元 xy 計算と比較対照する 3 次元計算の z 方向位置としては、制御棒吸収体の無い高さを用いることが望ましいことが分かる。

以上の結果から、制御棒吸収体の無い xy 平面を基準にとれば、仮定①の近似は妥当であると言える。

【制御棒要素とスペクトル】

仮定②に関しては、少數群構造が、例えば熱エネルギー領域・共鳴エネルギー領域・共鳴非分離領域・核分裂スペクトル領域など、物理的に意味を持つエネルギー領域に区切られていれば、その少數群構造のエネルギー境界で区切られる各エネルギー領域のスペクトルの形はそれほど変わらないと思われる。ただ、本文(2.3)式によるスペクトル変換では、スペクトルが少數群構造のエネルギー境界で大幅に不連続*になる可能性がある。また、2 次元計算でのスペクトルと 3 次元計算のスペクトルが大きくかけ離れている場合、(2.3) 式によるスペクトル変換そのものが成り立たなくなる。そこで、この不連続性について、

*スペクトルを多群で表しているので、もともと不連続ではあるが、ここで言う「不連続」とは、スペクトル多群表示の段差が大幅にかけ離れている状態を言う。

炉心の各高さにおける制御棒要素と照射筒でのスペクトルとの関係について調べることにする。

3次元計算で得られた各ホルダ位置でのスペクトルと、2次元計算（吸収体挿入または引き抜きの2ケース）で得られたスペクトルの比較を、VT-1 照射筒について Fig. A.3 に、RG-1 照射筒について Fig. A.4 にそれぞれ示す。先と同様に、2次元計算で得られた 107 群スペクトルを 4 群に縮約した。図では、各ホルダ位置での相対スペクトルを視覚的に比較できるように、中性子束の各群が全体に占める割合（%）の形で示してある。なお、左側に3次元計算で得られた炉心上部（#1）から炉心下部（#15）までの 15 点、右側に2次元計算での吸収体引き抜きおよび挿入の場合の 2 点を示してある。

Fig. A.3 を見ると、制御棒要素から 1 要素分だけ離れた位置にある VT-1 照射筒では、ホルダ位置によるスペクトルの変化は小さく、制御棒吸収体の効果は中性子束の大きさを変化させるのみで、照射筒でのスペクトルは影響をそれほど受けていないことが分かる。したがって、VT-1 照射筒では (2.3) 式による軸方向のスペクトル補正は何ら問題が無いと言える。なお、照射筒の上端（#1）および下端（#15）で熱群（第 4 群）の割合が大きく、炉心中央部に比べてスペクトルが軟らかくなっているのは、炉心上下の軽水反射体の効果によるものである。

Fig. A.4 を見ると、制御棒要素に隣接する RG-1 照射筒では、制御棒吸収体のあるホルダ番号の小さな位置と制御棒吸収体の無い位置で傾向が違っている。すなわち、吸収体の無い位置の #9 から #13 にかけてスペクトルの変化は VT-1 と同様に小さい。一方、コネクタの位置に相当する #8 近りから吸収体のある炉心上部に向かって、徐々にスペクトルが軟らかくなっている。しかし、その変化は小さいことから、本文 (2.3) 式による軸方向のスペクトル補正を行なっても、大幅に不連続となることはないと考えられる。

次に2次元計算と3次元計算のスペクトルの類似性について、両者のスペクトルの比較を見ると、2次元計算の制御棒吸収体挿入と引き抜きとでは若干異なるものの、制御棒引き抜き状態の2次元計算で得られたスペクトルは、3次元計算のスペクトルとほぼ一致することが分かる。

ただ、2次元計算でのスペクトルの傾向は、3次元計算のものと異なっている。すなわち、3次元計算では吸収体のある高さでスペクトルが軟らかくなっているのに対し、2次元計算ではその逆となっている。これは、3次元計算では軸方向の中性子流が考慮されるので、上部の反射体領域から軟らかいスペクトルの中性子流が考慮されているのに対し、2次元計算ではこの効果が考慮されないため、このような逆転現象が起きたと考えられる。

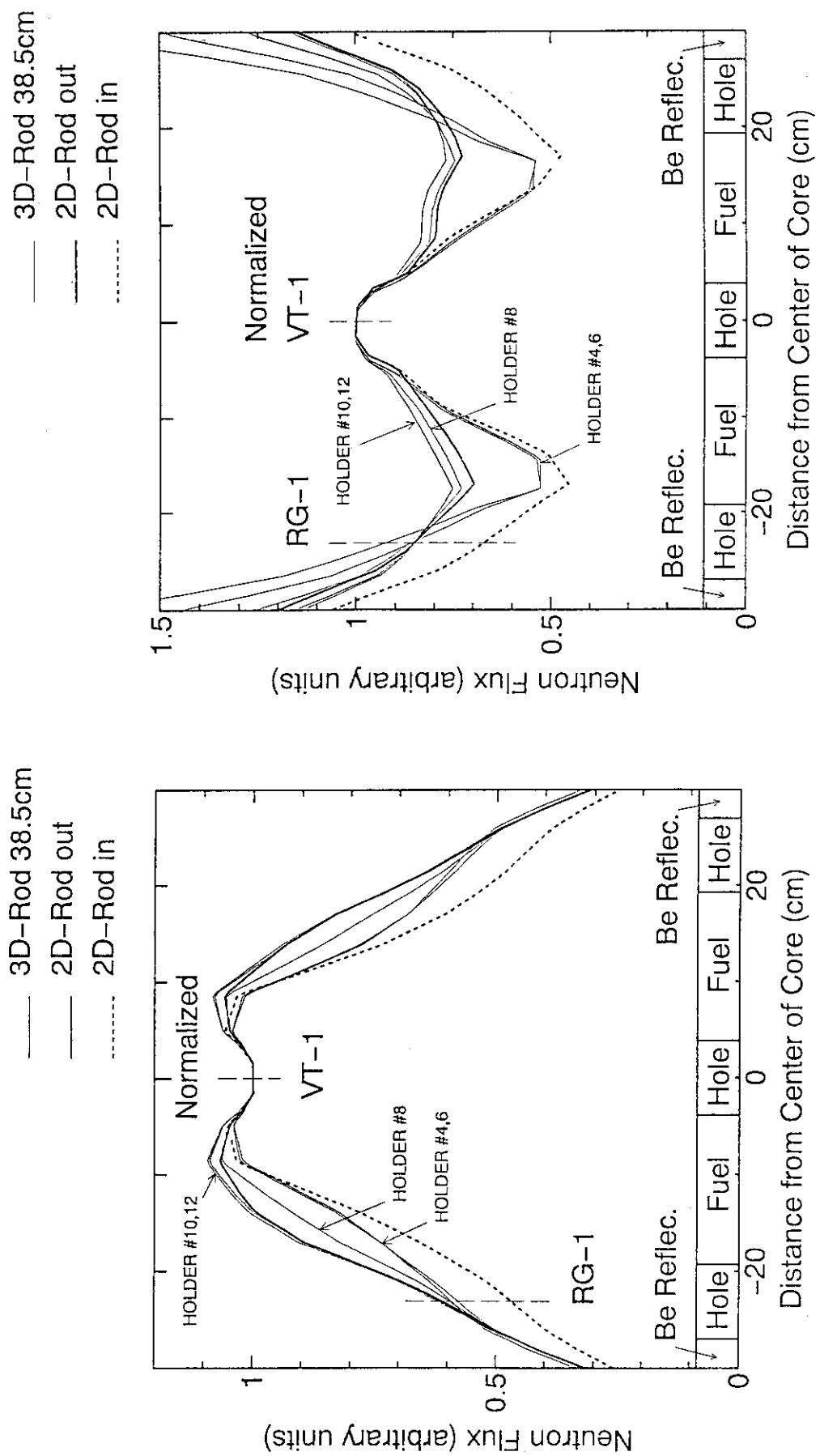


Fig. A.1 East neutron flux distribution on Y-axis

Fig. A.2 Thermal neutron flux distribution on X-axis

VT-1 Hole / Aluminum Plug(Homogenized)
CITATION-3D/2D

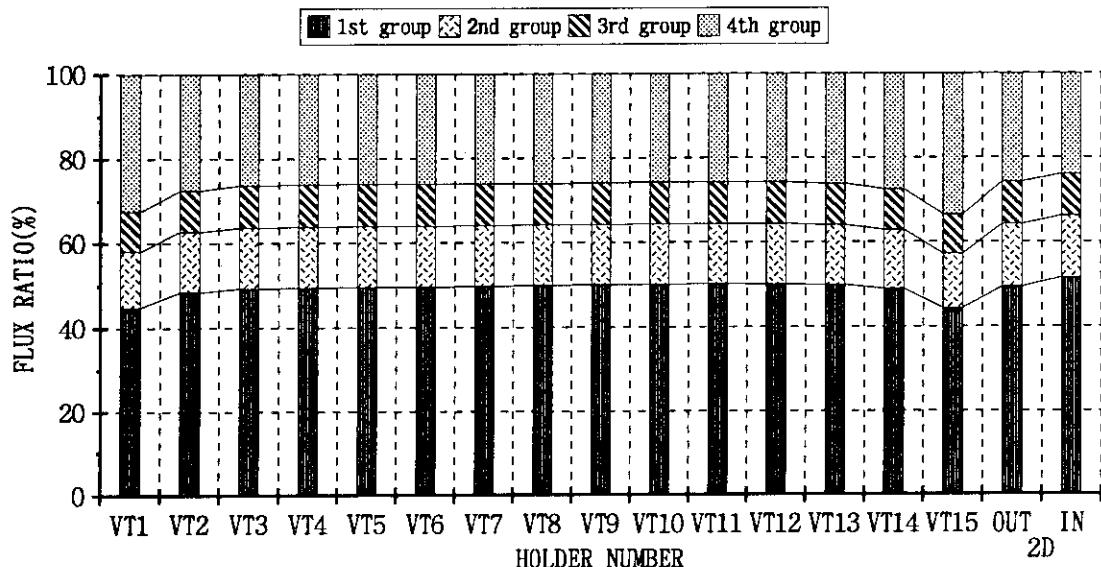


Fig. A.3 Comparison of spectra at VT-1 hole

RG-1 Hole / Aluminum Plug(Homogenized)
CITATION-3D/2D

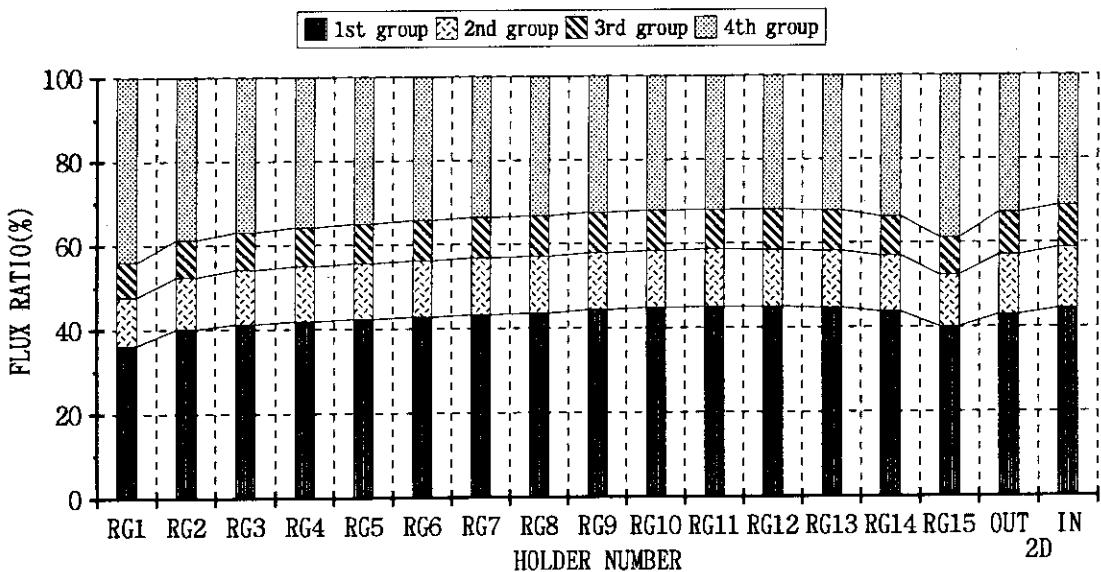


Fig. A.4 Comparison of spectra at RG-1 hole

Appendix B JRR-3M 炉心構成要素の原子個数密度 [8]

Standard Fuel Element

Region		ID	File ID	N. Density	Region	ID	File ID	N. Density
Fuel Plate	Meat	U235	XU050002	1.0759E-03	Side Plate	AL	XAL70002	4.3135E-02
		U238	XU080002	4.2920E-03	H ₂ O	MG	XWGN0002	1.3965E-03
		AL	XAL70002	4.9169E-02		B10	XB000002	1.5924E-07
		B10	XB000002	1.2150E-07		B11	XB010002	6.4501E-07
		B11	XB010002	4.9212E-07		CD	XCDN0002	1.8117E-08
		CD	XCDN0002	1.1803E-07		CU	XCUN0002	5.3801E-07
		CU	XCUN0002	4.1754E-07		FE	XFEN0002	4.7047E-05
		FE	XFEN0002	4.2759E-05		SI	XSIN0002	4.9405E-05
		SI	XSIN0002	2.5980E-05		CR	XCRN0002	2.3135E-06
		CR	XCRN0002	2.5514E-07		NN	XWN50002	1.1793E-05
		NN	XWN50002	4.8296E-07		T1	XT1N0002	2.5124E-06
		L16	XL160002	1.4335E-07		L16	XL160002	9.0075E-09
		L17	XL170002	1.7680E-06		L17	XL170002	1.1109E-07
for	XE	XXE50002				PB	XPBN0002	3.5649E-07
BurnUp	SM	XSM90002				NO	XNON0002	1.9247E-07
Clad	AL	XAL70002				H	XH01H002	1.6991E-02
	MG	XWGN0002				O	XO060002	8.4953E-03
	B10	XB000002			Moderator	H	XH01H002	6.6001E-02
	B11	XB010002				O	XO060002	3.3000E-02
	CD	XCDN0002						
	CU	XCUN0002						
	FE	XFEN0002						
	SI	XSIN0002						
	CR	XCRN0002						
	NN	XWN50002						
	T1	XT1N0002						
	PB	XPBN0002						
	NO	XNON0002						
Node	H	XH01H002						
	O	XO060002						

to be continued.

Follower Fuel Element

Region		ID	File ID	N. Density
Fuel Plate	Neat	U235	XU050002	1.0742E-03
		U238	XU080002	4.2853E-03
		AL	XAL70002	4.8811E-02
		B10	XB000002	1.2081E-07
		B11	XB010002	4.8854E-07
		CD	XCDN0002	1.1717E-07
		CU	XCUN0002	4.1449E-07
		FE	XFEN0002	4.2447E-05
		SI	XSIN0002	2.5790E-05
		CR	XCRN0002	2.5328E-07
		MN	XMN50002	4.7944E-07
		L16	XL160002	1.4231E-07
		L17	XL170002	1.7551E-06
for BurnUp	XE	XXE50002	1.2731E-08	
	SM	XSM90002	9.5162E-08	
Clad		Same as Standard Fuel		
Node	H	XH01H002	6.6001E-02	
	O	XO060002	3.3000E-02	
Side Plate		AL	XAL70002	4.4995E-02
Guide Tube	H_2O	WG	XMGN0002	7.7546E-04
		B10	XB000002	1.9935E-07
		B11	XB010002	8.0746E-07
		CD	XCDN0002	8.2120E-09
		CU	XCUN0002	2.4303E-06
		FE	XFEN0002	4.3700E-05
		SI	XSIN0002	1.2877E-04
		CR	XCRN0002	2.3844E-06
		MN	XMN50002	6.6090E-06
		TJ	XTIN0002	2.5894E-06
		L16	XL160002	4.0879E-09
		L17	XL170002	5.0417E-08
		PB	XPBN0002	1.6071E-07
		MO	XMON0002	8.6767E-08
Node	H	XH01H002	1.5488E-02	
	O	XO060002	7.7440E-03	

Region	ID	File ID	N. Density
Guide Tube	AL	XAL70002	4.0096E-02
	WG	XMGN0002	2.2517E-04
H_2O	B10	XB000002	2.0046E-07
	B11	XB010002	8.1197E-07
	CU	XCUN0002	3.4450E-06
	FE	XFEN0002	3.5279E-05
	SI	XSIN0002	1.6759E-04
	CR	XCRN0002	2.1051E-06
	MN	XMN50002	1.9924E-06
	TJ	XTIN0002	2.2861E-06
	H	XH01H002	2.1406E-02
	O	XO060002	1.0703E-02
	L16	XL160002	1.5721E-08
	L17	XL170002	1.9388E-07
	PB	XPBN0002	2.1504E-07
	MO	XMON0002	1.1610E-07
	H	XH01H002	2.8926E-02
	O	XO060002	1.4463E-02

to be continued.

Hf Absorber

Region	ID	File ID	N. Density
Hf Absorber	HF	XHFN0002	4.3906E-02
	ZR	XZRN0002	8.5534E-04
	AL	XAL70002	2.9359E-06
	CR	XCRN0002	1.5235E-06
	CU	XCUN0002	1.6206E-06
	FE	XFEN0002	4.1844E-05
	MO	XMON0002	4.1284E-07
	NI	XNIN0002	1.3497E-06
	NB	XNB30002	4.2632E-06
	SI	XSIN0002	7.0513E-06
	TA	XTA10002	2.1889E-06
	TJ	XTIN0002	1.6545E-06
	V	XV030002	4.3087E-07
	U	XU080002	1.6640E-08
	V	XVON0002	1.5550E-06
	H	XH010002	2.3578E-05
	C	XC020002	2.7041E-05
	N	XN040002	8.7661E-06
	O	X0060002	1.3121E-04
Guide Tube	AL	XAL70002	5.9342E-02
	MG	XWGN0002	3.3325E-04
	B10	XB000002	2.9668E-07
	B11	XB010002	1.2017E-06
	CU	XCUN0002	5.0986E-06
	FE	XFEN0002	5.2213E-05
	SI	XSIN0002	2.4803E-04
	CR	XCRN0002	3.1155E-06
Moderator	MN	XMN50002	2.9487E-06
	TI	XTIN0002	3.3834E-06
Moderator	H	XH01H002	6.6001E-02
	O	X0060002	3.3000E-02

Be Reflector with Be Plug

Region	ID	File ID	N. Density
Be Reflector	BE	XBE90002	6.9877E-02
	+	XAL70002	2.0623E-02
	Aluminum Tank	XWGN0002	5.5964E-04
	+	B10	XB000002
	Be Plug	XB010002	1.2851E-07
	+	CD	XCDN0002
	H ₂ O	CU	XCUN0002
	FE	XFEN0002	3.0769E-05
	SI	XSIN0002	2.7527E-05
	CR	XCRN0002	2.3258E-05
	MN	XMN50002	8.1620E-06
	L16	XL160002	2.0373E-08
	L17	XL170002	2.5126E-07
	PB	XPBN0002	6.0664E-08
	NO	XMON0002	2.2180E-05
D ₂ O Reflector	AG	XAG90002	1.3178E-07
	NI	XNIN0002	1.0173E-06
	C	XC020002	5.2848E-05
	N	XN040002	1.5031E-05
	H	XH01H002	4.9488E-03
	O	X0060002	2.8654E-03

Connector

Region	ID	File ID	N. Density
Connector	AL	XHFN0002	2.6417E-02
	H	XH01H002	3.6960E-02
	O	X0060002	1.8480E-02

to be continued.

Axial Reflector

Region	ID	File ID	N. Density
Upper/Lower Standard Fuel Element	AL	XAL70002	8.4053E-03
	H	XH01H002	5.6761E-02
	O	X0060002	2.8380E-02
Lower Follower Fuel Element	AL	XAL70002	2.0413E-02
	H	XH01H002	4.3561E-02
	O	X0060002	2.1780E-02

Irradiation Element in Fuel Region (VT/RG)

Region	ID	File ID	N. Density
Irradiation Tube	AL	XAL70002	5.8157E-02
	MG	XWGN0002	1.6329E-03
	CU	XCUN0002	1.7845E-05
	FE	XFEN0002	7.9769E-05
	SI	XSIN0002	5.1912E-05
	CR	XCRN0002	6.5426E-05
	MN	XWMN50002	5.8974E-06
	T1	XT1N0002	3.3834E-06
	B10	XB000002	2.9668E-07
	B11	XB010002	1.2017E-06
Light Water Gap	CD	XCDN0002	1.4411E-07
	H	XH01H002	6.6001E-02
Aluminum plug	O	XO060002	3.3000E-02
	AL	XAL70002	5.8262E-02
	MG	XWGN0002	1.6796E-03
	CU	XCUN0002	2.5493E-05
	FE	XFEN0002	3.7709E-05
	SI	XSIN0002	4.6144E-05
	CR	XCRN0002	6.2311E-04
	MN	XWMN50002	2.9487E-06
	T1	XT1N0002	3.3834E-06
	B10	XB000002	2.9668E-07
Aluminum Capsule/ Aluminum Sample Holder	B11	XB010002	1.2017E-06
	CD	XCDN0002	1.4411E-07
	AL	XAL70002	5.9691E-02
	MG	XWGN0002	4.3113E-06
	T1	XT1N0002	1.1420E-05
High Density Polyethylene Sample Holder ($\rho = 0.96\text{g/cm}^3$)	FE	XFEN0002	2.0342E-05
	SI	XSIN0002	7.5262E-05
	H	XH01P002	8.2431E-02
	C	XC020002	4.1216E-02

Light Water in Reactor Pool

Region	ID	File ID	N. density
Light Water	H	XH01H002	6.6001E-02
O	O	XO060002	3.3000E-02

Appendix C E 3 関数^[13]

$E_3(x)$ 関数は、 $E_1(x)$ 関数を用いて次のように書ける。

$$E_3(x) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-xp}}{p^3} dp = \frac{1}{2} [(1-x)e^{-x} + x^2 E_1(x)] \quad (C.1)$$

$E_1(x)$ 関数の値は、次の 2 式で与えられる。

($0 < x < 1$)

$$\begin{aligned} E_1(x) &= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 - \ln(x) + \varepsilon(x) \\ a_0 &= -0.57721566 \\ a_1 &= 0.99999193 \\ a_2 &= -0.24991055 \\ a_3 &= 0.05519968 \\ a_4 &= -0.00976004 \\ a_5 &= 0.00107857 \\ |\varepsilon(x)| &< 2 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (C.2)$$

($1 < x < \infty$)

$$\begin{aligned} xe^x E_1(x) &= \frac{x^4 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4}{x^4 + b_1 x^3 + b_2 x^2 + b_3 x + b_4} + \varepsilon(x) \\ a_1 &= 8.5733287401 \\ a_2 &= 18.0590169730 \\ a_3 &= 8.6347608925 \\ a_4 &= 0.2677737343 \\ b_1 &= 9.5733223454 \\ b_2 &= 25.6329561486 \\ b_3 &= 21.0996530827 \\ b_4 &= 3.9584969228 \\ |\varepsilon(x)| &< 2 \times 10^{-8} \end{aligned} \quad (C.3)$$

Appendix D SRAC コードシステム入力例

D.1 実効断面積作成 - 全炉心構成要素作成 -

(例: 中性子エネルギー4群構造に縮約)

```

STFP /***** STANDARD FUEL PLATE AT 325K FIRST STEP *****
STANDARD FUEL PLATE AT 325K FIRST STEP
1 1 1 1 2 1 4 3 -2 0 0 0 1 0 2 2 -1 0 0 0 / SRAC CONTROL
0.012 / B2 FOR K-EFF=1.0
J1480 1 2 / FASTP (R,0)
J1480 1 2 / THERMALP (R,0)
J1480 3 2 / FASTU (B,0)
J1480 3 2 / THRMALU (B,0)
J1480 3 2 / MACROWRK (B,0)
J1480 3 2 / FLUX (B,0)
J1480 3 2 / MACRO (B,0)
J1480 3 2 / MICREF (B,0)
70 37 3 1 / FAST 3 GRP , THERMAL 1 GRP
70(1) / USER FAST GROUP STRUCTURE
37(1) / USER THERMAL GROUP STRUCTURE
30 20 20 / CONDENSED FAST GROUP STRUCTURE
37 / CONDENSED THERMAL GROUP STRUCTURE

2 5 5 3 1 1 5 0 0 0 5 0 0 0 0 0 0 0 / PIJ CONTROL
0 100 50 5 5 0 0 .0001 0.001 0.001 1.0 100.0 0.5
3 2 1 2 3 / R BY T
1 1 1 / X BY R
1 2 3 / MATERIAL BY R
0.0 1*0.114 1*0.038 1*0.076 1*0.038 1*0.114 / RX IN CM
3 / NMAT
MEASXDOX 0 13 325.0 0.152 1.0 / FUEL MEAT OF STANDARD FUEL
XU050002 2 0 1.0759E-03
XU080002 2 0 4.2920E-03
XALT0002 0 0 4.9169E-02
XB000002 0 0 1.2150E-07
XB010002 0 0 4.9212E-07
XCDN0002 0 0 1.1803E-07
XCUN0002 0 0 4.1754E-07
XFEN0002 0 0 4.2759E-05
XSIN0002 0 0 2.5980E-05
XCRN0002 0 0 2.5514E-07
XMN50002 0 0 4.8296E-07
XL160002 0 0 1.4335E-07
XL170002 0 0 1.7680E-06
CLADXDOX 0 13 325.0 0.076 1.0 / CLADDING
XALT0002 0 0 5.8064E-02
XMGND0002 0 0 1.8529E-03
XB000002 0 0 2.9668E-07
XB010002 0 0 1.2017E-06
XCDN0002 0 0 1.4411E-08
XCUN0002 0 0 1.7845E-06
XFEN0002 0 0 7.5417E-05
XSIN0002 0 0 8.6518E-05
XCRN0002 0 0 3.1155E-06

```

XMN50002 0 0 1.1795E-05
 XTIN0002 0 0 3.3833E-06
 XPBN0002 0 0 1.5637E-06
 XMON0002 0 0 8.4425E-07
 MODEX00X 0 2 325.0 0.228 1.0 / MODERATOR
 XH01H002 0 0 6.6001E-02
 X0060002 0 0 3.3000E-02
 0 / PEACO
 S022 /*****
 STANDARD FUEL ELEMENT AT 325K SECOND STEP
 1 1 1 1 0 1 4 0 -2 1 0 0 0 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 9.482E-03 / B2 FOR K-EFF=1
 13 144 36 27 1 1 12 12 0 0 5 0 6 45 0 0 90 0 / PIJ CONTROL
 0 100 50 5 5 5 0 0.0001 0.001 0.001 1.2 100.0 0.8
 31 36 35 34 33 32 32 33 34 35 36 31
 30 25 24 23 22 21 21 22 23 24 25 30
 29 20 19 18 17 16 16 17 18 19 20 29
 28 15 14 13 12 11 11 12 13 14 15 28
 27 10 9 8 7 6 6 7 8 9 10 27
 26 5 4 3 2 1 1 2 3 4 5 26
 26 5 4 3 2 1 1 2 3 4 5 26
 27 10 9 8 7 6 6 7 8 9 10 27
 28 15 14 13 12 11 11 12 13 14 15 28
 29 20 19 18 17 16 16 17 18 19 20 29
 30 25 24 23 22 21 21 22 23 24 25 30
 31 36 35 34 33 32 32 33 34 35 36 31 / T BY SUB
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
 25 26 26 26 26 26 27 27 27 27 27 27 / R BY T
 27(1) / X BY R
 25(1) 2 3 / M BY R
 0.0 1*0.76 2*0.20 1*0.30 1*0.70 2*1.70 1*0.70 1*0.30 2*0.20 1*0.76 / RX
 0.0 1*0.06 2*0.20 1*0.40 1*0.80 2*2.20 1*0.80 1*0.40 2*0.20 1*0.06 / RY
 3 / NMAT
 STFPX01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / STANDARD FUEL PLATE
 SIDSX00X 0 17 325.0 1.384 1.0 / SIDE PLATE OF STANDARD FUEL ELEMENT
 XALT0002 0 0 4.3135E-02
 XMGN0002 0 0 1.3965E-03
 XB000002 0 0 1.5924E-07
 XB010002 0 0 6.4501E-07
 XCDN0002 0 0 1.8117E-08
 XCUN0002 0 0 5.3801E-07
 XFEN0002 0 0 4.7047E-05
 XSIN0002 0 0 4.9406E-05
 XCRN0002 0 0 2.3135E-06
 XMN50002 0 0 1.1793E-05
 XTIN0002 0 0 2.5124E-06
 XLI60002 0 0 9.0075E-09
 XLI70002 0 0 1.1109E-07
 XPBN0002 0 0 3.5649E-07
 XMON0002 0 0 1.9247E-07
 XH01H002 0 0 1.6991E-02
 X0060002 0 0 8.4952E-03
 MODEX00X 0 0 325.0 0.0 0.0 / MODERATOR
 S000 /*****

STANDARD FUEL ELEMENT AT 325K SECOND STEP (FOR MACROWRK FILE)

1 1 1 1 0 1 4 0 -2 0 1 0 1 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 9.482E-03 / B2 FOR K-EFF=1
 3 / NMAT

STFPX01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / STANDARD FUEL PLATE
 SIDSX00X 0 0 325.0 0.0 0.0 / SIDE PLATE OF STANDARD FUEL ELEMENT
 NODEX00X 0 0 325.0 0.0 0.0 / MODERATOR
 RFU2 /*****
 CONNECTOR OF FOLLOWER FUEL ELEMENT AT 325K
 1 1 1 1 0 1 4 0 -2 1 0 0 0 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 0.0075 / B2
 2 34 34 34 3 1 34 0 0 0 5 0 0 0 0 0 0 0 / PIJ CONTROL
 0 100 50 55 5 5 0 0.001 0.001 0.001 1.2 100.0 0.8
 8(1) 18(2) 8(3) / X BY R
 8(1) 3(2) 12(2) 3(2) 2(2) 4(2) 2(2) / MATERIAL BY R
 0.0 1*0.36 1*0.50 1*1.00 2*2.00 1*1.00 1*0.50 1*0.36
 2*0.25 1*0.28 1*0.48 10*0.52 1*0.48 1*0.28 2*0.25
 2*0.38 4*1.55 2*0.38 / RX IN CM
 2 / NMAT

CONNX00X 0 3 325.0 15.44 1.0 / CONNECTOR
 XH01H002 0 0 3.6900E-02
 X0060002 0 0 1.8500E-02
 XALT0002 0 0 2.6400E-02

S000X01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / STANDARD FUEL
 CRO2 /*****
 CONTROL ABSORBER ELEMENT AT 325K (2D-PIJ)
 1 1 1 1 0 1 4 3 1 1 0 0 0 0 2 0 -1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 1.1357E-3 / B2
 13 1156 17 6 3 1 34 34 0 0 5 0 6 45 0 0 90 0 / PIJ CONTROL
 0 100 50 55 5 5 0 0.001 0.001 0.001 1.2 100.0 0.8
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1
 1 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 1
 1 2 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9
 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 10 10 10 10 10 10 10
 10 10 10 10 10 10 10 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 11 11 11 11 11 11 11
 11 11 11 11 11 11 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 12 12 12 12 12 12
 12 12 12 12 12 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 13 13 13 13 13

13 13 13 13 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 14 14 14 14
 14 14 14 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 15 15
 15 15 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16
 16 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17
 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17
 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16
 16 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 15 15
 15 15 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 14 14 14
 14 14 14 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 13 13 13 13
 13 13 13 13 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 12 12 12 12 12
 12 12 12 12 12 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 11 11 11 11 11 11
 11 11 11 11 11 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 10 10 10 10 10 10 10
 10 10 10 10 10 10 10 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9
 9 9 9 9 9 9 9 9 9 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
 8 8 8 8 8 8 8 8 8 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 3 2 1
 1 2 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 2 1
 1 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 1
 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 / T BY SUB
 6(1) 2 2(3) 4 3(5) 4(6) / R BY T
 1 3(2) 2(3) / X BY R
 1 2 3 2 4 2 / MATERIAL BY R
 0.0 3*1.93 1*0.965 2*0.4825 1*0.05 2*0.25 1*0.13 1*0.17 2*0.165
 1*0.2 1*0.4 1*1.0 2*1.08 1*1.0 1*0.4 1*0.2 2*0.165 1*0.17 1*0.13
 2*0.25 1*0.05 2*0.4825 1*0.965 3*1.93 / RX IN CM
 0.0 3*1.93 1*0.965 2*0.4825 1*0.05 2*0.25 1*0.13 1*0.17 2*0.165
 1*0.2 1*0.4 1*1.0 2*1.08 1*1.0 1*0.4 1*0.2 2*0.165 1*0.17 1*0.13
 2*0.25 1*0.05 2*0.4825 1*0.965 3*1.93 / RY IN CM
 4 / NMAT
 S000X01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / STANDARD FUEL ELEMENT
 MODEX00X 0 0 325.0 0.0 0.0 / MODERATOR

GID1X00X 0 10 325.0 1.0 1.0 / GUIDE TUBE
 XAL70002 0 0 5.9342E-02
 XMGN0002 0 0 3.3325E-04
 XB000002 0 0 2.9668E-07
 XB010002 0 0 1.2017E-06
 XCUN0002 0 0 5.0986E-06
 XFEN0002 0 0 5.2213E-05
 XSIN0002 0 0 2.4803E-04
 XCRN0002 0 0 3.1155E-06
 XMN50002 0 0 2.9487E-06
 XTIN0002 0 0 3.3834E-06
 HFA1X00X 0 19 325.0 1.0 1.0 / CONTROL ABSORBER
 XHFN0002 2 0 4.3906E-02
 XZRN0002 0 0 8.5534E-04
 XAL70002 0 0 2.9359E-06
 XCRN0002 0 0 1.5235E-06
 XCUN0002 0 0 1.6206E-06
 XFEN0002 0 0 4.1844E-05
 XMON0002 0 0 4.1284E-07
 XNIN0002 0 0 1.3497E-06
 XNB30002 0 0 4.2632E-06
 XSIN0002 0 0 7.0513E-06
 XTA10002 0 0 2.1889E-06
 XTIN0002 0 0 1.6545E-06
 XW030002 0 0 4.3087E-07
 XU080002 0 0 1.6640E-08
 XV0N0002 0 0 1.5550E-06
 XH010002 0 0 2.3578E-05
 XC020002 0 0 2.7041E-05
 XN040002 0 0 8.7661E-06
 X0060002 0 0 1.3121E-04
 DUMY /*****
 LIGHT WATER IN REACTOR POOL AT 325K
 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 1.0E-20 / B2
 1 / NMAT
 W002X00X 0 2 325.0 12.0 1.0 / LIGHT WATER
 XH01H002 0 0 6.6001E-02
 X0060002 0 0 3.3000E-02
 B102 /*****
 BE-REFLECTOR (2:BE 3:INNER 4:OUTER) WITH BE PLUG AT 325K POS8
 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 2 1 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 1.1357E-03 / B2
 15¥ / ANISN CONTROL
 1 0 0 8 2 1 0 4 33 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 0 0 0 35 0 0 0 0 150 0 0 0 0 0 1 0
 16* / PARAMETERS
 1.0 0.0 0.0001 1.420892 40.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.5
 0.0002 0.05 0.002 0.75
 00T
 04* / RADIUS BY EACH MESH
 0.0 1*6.49 1*6.0 1*4.0 5*2.0 2*1.5 1*1.51 6*1.5 5*2.0 10*4.0 1*10.0
 08¥ / ZONE BY EACH MESH
 8(1) 3(2) 5(3) 17(4)
 09¥ / MATERIAL BY EACH ZONE

1 2 3 3
 27¥ / X-REGION BY ZONE
 1 2 3 4
 00T
 3 / NMAT
 S000X01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / STANDARD FUEL ELEMENT
 BERFX00X 0 21 325.0 61.6 1.0 / BE REFLECTOR (BE + AL TANK)
 XBE9B002 0 0 6.9877E-02
 XAL70002 0 0 2.0623E-02
 XMGN0002 0 0 5.5964E-04
 XB000002 0 0 1.2851E-07
 XB010002 0 0 5.2051E-07
 XCDN0002 0 0 6.2177E-08
 XCUN0002 0 0 1.9780E-07
 XFEN0002 0 0 3.0769E-05
 XSIN0002 0 0 2.7527E-05
 XCRN0002 0 0 2.3258E-05
 XMN50002 0 0 8.1620E-06
 XLI60002 0 0 2.0373E-08
 XLI70002 0 0 2.5126E-07
 XPBN0002 0 0 6.0664E-08
 XMON0002 0 0 2.2180E-05
 XAG90002 0 0 1.3178E-07
 XNIN0002 0 0 1.0173E-05
 XC020002 0 0 5.2848E-05
 XN040002 0 0 1.5031E-05
 X0060002 0 0 2.8654E-03
 XH01H002 0 0 4.9488E-03
 DORFX00X 0 3 325.0 180.78 1.0 / D20 REFLECTOR
 XD02D002 0 0 6.6144E-02
 XH01H002 0 0 3.3238E-04
 X0060002 0 0 3.3238E-02
 RSA2 /*****
 AXIAL REFLECTOR ABOVE/UNDER STANDARD FUEL ELEMENT AT 325K POS8
 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 2 1 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 0.0084 / B2
 15¥ / ANISN CONTROL
 1 0 0 8 1 1 0 3 57 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 0 0 0 35 0 0 0 0 150 0 0 0 0 0 1 0
 16¥ / PARAMETERS
 1.0 0.0 0.0 0.0001 1.420892 43.0 43.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.5
 0.0002 0.05 0.002 0.75
 00T
 04¥ / WIDTH BY EACH MESH
 0.0 1*10.0 1*5.0 1*4.0 2*3.0 2*2.0 1*1.0 15*0.5 20*0.5
 5*0.5 5*1.0 3*3.0 1*3.5
 08¥ / ZONE BY EACH MESH
 23(1) 20(2) 14(3)
 09¥ / MATERIAL BY EACH ZONE
 1 2 2
 27¥ / X-REGION BY ZONE
 1 2 3
 00T
 2 / NMAT
 S000X01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / STANDARD FUEL ELEMENT

AXRAX00X 0 3 325.0 27.5 1.0 / AXIAL REFLECTOR OF STANDARD FUEL
 XAL70002 0 0 8.4053E-03
 XH01H002 0 0 5.7299E-02
 X0060002 0 0 2.8650E-02
 CLFO /*****
 FOLLOWER FUEL PLATE AT 325K FIRST STEP
 1 1 1 1 2 1 4 3 -2 0 0 0 1 0 2 2 -1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 0.012 / B2 FOR K-EFF=1.0 (CLEAN)
 2 5 5 3 1 1 5 0 0 0 5 0 0 0 0 0 0 0 / PIJ CONTROL
 0 100 50 5 5 5 1 0.0001 0.001 0.001 1.2 100.0 0.8
 3 2 1 2 3 / R BY T
 1 1 1 / X BY R
 1 2 3 / MATERIAL BY R
 0.0 1*0.119 1*0.038 1*0.076 1*0.038 1*0.119 / RX IN CM
 3 / NMAT
 MEACX00X 0 13 325.0 0.152 1.0 / FUEL MEAT OF FOLLOWER FUEL ELEMENT
 XU050002 2 0 1.0742E-03
 XU080002 2 0 4.2853E-03
 XAL70002 0 0 4.8811E-02
 XB000002 0 0 1.2061E-07
 XB010002 0 0 4.8854E-07
 XCDN0002 0 0 1.1717E-07
 XCUN0002 0 0 4.1449E-07
 XFEN0002 0 0 4.2447E-05
 XSIN0002 0 0 2.5T9DE-05
 XCRN0002 0 0 2.5328E-07
 XMN50002 0 0 4.7944E-07
 XL160002 0 0 1.4231E-07
 XL170002 0 0 1.7551E-06
 CLDFX00X 0 13 325.0 0.076 1.0 / CLADDING
 XALT0002 0 0 5.8064E-02
 XMGN0002 0 0 1.8529E-03
 XB000002 0 0 2.9668E-07
 XB010002 0 0 1.2017E-06
 XCDN0002 0 0 1.4411E-08
 XCUN0002 0 0 1.7845E-06
 XFEN0002 0 0 7.5417E-05
 XSIN0002 0 0 8.6518E-05
 XCRN0002 0 0 3.1155E-06
 XMN50002 0 0 1.1795E-05
 XTIN0002 0 0 3.3833E-06
 XPBN0002 0 0 1.5637E-06
 XMON0002 0 0 8.4425E-07
 MDEFX00X 0 2 325.0 0.238 1.0 / MODERATOR
 XH01H002 0 0 6.5001E-02
 X0060002 0 0 3.3000E-02
 0 / PEACO
 F022 /*****
 FOLLOWER FUEL ELEMENT AT 325K SECOND STEP
 1 1 1 1 0 1 4 0 -2 1 0 0 0 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 0.0065 / B2 FOR K-EFF=1
 13 144 36 23 1 1 12 12 0 0 5 0 6 45 0 0 90 0 / PIJ CONTROL
 0 100 50 5 5 5 0 0.0001 0.001 0.001 1.2 100.0 0.8
 32 26 36 35 34 33 33 34 35 36 26 32
 31 25 20 19 18 17 17 18 19 20 25 31

30 24 16 15 14 13 13 14 15 16 24 30
 29 23 12 11 10 9 9 10 11 12 23 29
 28 22 8 7 6 5 5 6 7 8 22 28
 27 21 4 3 2 1 1 2 3 4 21 27
 27 21 4 3 2 1 1 2 3 4 21 27
 28 22 8 7 6 5 5 6 7 8 22 28
 29 23 12 11 10 9 9 10 11 12 23 29
 30 24 16 15 14 13 13 14 15 16 24 30
 31 25 20 19 18 17 17 18 19 20 25 31
 32 26 36 35 34 33 33 34 35 36 26 32 / T BY SUB
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
 13 14 15 16 17 18 19 20 21 21 21 21
 21 21 22 22 22 22 22 22 23 23 23 23 / R BY T
 23(1) / X BY R
 20(1) 2 2 3 / M BY R
 0.0 1*1.01 1*0.40 2*0.20 1*0.50 2*1.55 1*0.50 2*0.20 1*0.40 1*1.01 / RX
 0.0 1*0.74 2*0.20 1*0.40 1*0.80 2*1.52 1*0.80 1*0.40 2*0.20 1*0.74 / RY
 3 / NMAT
 CLFOX01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / FOLLOWER FUEL PLATE
 SIDFX00X 0 17 325.0 1.3B4 1.0 / SIDE PLATE + GUIDE TUBE
 XAL70002 0 0 4.4995E-02
 XMGN0002 0 0 7.7546E-04
 XB000002 0 0 1.9935E-07
 XB010002 0 0 8.0746E-07
 XCDN0002 0 0 8.2120E-09
 XCUN0002 0 0 2.4303E-06
 XFEN0002 0 0 4.3700E-05
 XSIN0002 0 0 1.2877E-04
 XCRN0002 0 0 2.3844E-06
 XMN50002 0 0 6.6090E-06
 XTIN0002 0 0 2.5894E-06
 XL160002 0 0 4.0879E-09
 XL170002 0 0 5.0417E-08
 XPBN0002 0 0 1.6071E-07
 XMOND002 0 0 8.6767E-08
 XH01H002 0 0 1.5488E-02
 X0060002 0 0 7.7440E-03
 MODCX00X 0 12 325.0 0.11B8 1.0 / GUIDE TUBE + MODERATOR
 XAL70002 0 0 4.0096E-02
 XMGN0002 0 0 2.2517E-04
 XB000002 0 0 2.0046E-07
 XB010002 0 0 8.1197E-07
 XCUN0002 0 0 3.4450E-06
 XFEN0002 0 0 3.5279E-05
 XSIN0002 0 0 1.6759E-04
 XCRN0002 0 0 2.1051E-06
 XMN50002 0 0 1.9924E-06
 XTIN0002 0 0 2.2861E-06
 XH01H002 0 0 2.1406E-02
 X0060002 0 0 1.0703E-02
 F000 /*****
 FOLLOWER FUEL ELEMENT AT 325K SECOND STEP (FOR MACROWRK FILE)
 1 1 1 1 0 1 4 0 -2 0 1 0 1 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 0.0065 / B2 FOR K-EFF=1
 3 / NMAT

CLFOX01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / FOLLOWER FUEL PLATE
 SIDFX00X 0 0 325.0 0.0 0.0 / SIDE PLATE + GUIDE TUBE
 MODCX00X 0 0 325.0 0.0 0.0 / GUIDE TUBE + MODERATOR
 RF02 /*****
 AXIAL REFLECTOR UNDER FOLLOWER FUEL ELEMENT AT 325K POS8
 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 2 1 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 0.0084 / B2
 15¥ / ANISN CONTROL
 1 0 0 8 1 1 0 3 57 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 0 0 0 35 0 0 0 0 150 0 0 0 0 0 1 0
 16* / PARAMETERS
 1.0 0.0 0.0001 1.420892 62.0 62.0 0.0 0.0 0.0 0.5
 0.0002 0.05 0.002 0.75
 00T
 04* / WIDTH BY EACH MESH
 0.0 1*20.0 1*5.0 1*4.0 2*3.0 2*2.0 1*1.0 15*0.5 20*0.5
 5*0.5 5*1.0 3*3.0 1*3.5
 08¥ / ZONE BY EACH MESH
 23(1) 20(2) 14(3)
 09¥ / MATERIAL BY EACH ZONE
 1 2 2
 27¥ / X-REGION BY ZONE
 1 2 3
 00T
 2 / NMAT
 F000X01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / FOLLOWER FUEL ELEMENT
 AXIFX00X 0 3 325.0 60.0 1.0 / AXIAL REFLECTOR OF FOLLOWER FUEL
 XAL70002 0 0 2.0413E-02
 XH01H002 0 0 4.3974E-02
 X0060002 0 0 2.1987E-02
 I02A /*****
 IRRADIATION TUBE IN FUEL REGION WITH AL PLUG AT 325K POS8
 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 2 1 0 2 2 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 1.1357E-03 / B2
 15¥ / ANISN CONTROL
 1 0 0 8 2 1 1 7 30 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 0 0 0 35 0 0 0 0 50 0 0 0 0 0 1 0
 16* / PARAMETERS
 1.0 0.0 0.0001 1.420892 30.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.5
 0.0002 0.05 0.002 0.75
 00T
 04* / RADIUS BY EACH MESH
 0.0 5*0.25 3*0.2 3*0.3 2*0.125 5*0.24064 2*0.0764
 3*0.2 3*0.5 2*1.0 1*2.6 1*2.61
 08¥ / ZONE BY EACH MESH
 5(1) 3(2) 3(3) 2(4) 5(5) 2(6) 10(7)
 09¥ / MATERIAL BY EACH ZONE
 4 4 4 3 2 3 1
 27¥ / ANISN X-REGION BY ZONE
 6(1) 2
 00T
 4 / NMAT
 S000X01X 0 0 325.0 0.0 0.0 / STANDARD FUEL ELEMENT
 ALTBX00X 0 11 325.0 4.124 1.0 / ALUMINUM TUBE
 XAL70002 0 0 5.8157E-02

XMGN0002 0 0 1.6329E-03
XCUN0002 0 0 1.7845E-05
XFEN0002 0 0 7.9769E-05
XSIN0002 0 0 5.1912E-05
XCRN0002 0 0 6.5426E-05
XMN5002 0 0 5.8974E-06
XTIN0002 0 0 3.3834E-06
XB000002 0 0 2.9668E-07
XB010002 0 0 1.2017E-06
XCDN0002 0 0 1.4411E-07
MODEX00X 0 0 325.0 0.0 0.0 / LIGHT WATER GAP
ALPLX00X 0 11 325.0 5.0 1.0 / ALUMINUM PLUG
XALT0002 0 0 5.8262E-02
XMGN0002 0 0 1.6796E-03
XCUN0002 0 0 2.5493E-06
XFEN0002 0 0 3.7709E-05
XSIN0002 0 0 4.6144E-05
XCRN0002 0 0 6.2311E-04
XMN5002 0 0 2.9487E-06
XTIN0002 0 0 3.3834E-06
XB000002 0 0 2.9668E-07
XB010002 0 0 1.2017E-06
XCDN0002 0 0 1.4411E-07

/*

*/

D. 2 全爐心拏散計算

(例：2次元 x y 体系 1 0 7 群拡散計算／全制御棒引き抜き)


```

13 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 10 10 10 10 10 3 3 3 3 9 9 4
 4 4 4 10 10 10 10 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 13
13 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 10 10 10 10 10 3 3 3 3 9 9 4
 4 4 4 10 10 10 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 13
13 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 10 10 3 3 3 3 9 9 4
 4 4 4 10 10 11 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 13
13 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 10 10 10 10 10 10 10 10 10
10 10 10 10 10 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 13
13 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 10 10 10 10 10 10 10
10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 13
13 13 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11
11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 13 13
13 13 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11
11 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 13 13
13 13 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12
12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 13 13
13 13 13 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12
12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 13 13 13
13 13 13 13 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12
12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 13 13 13 13
13 13 13 13 13 13 13 13 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12
12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 13 13 13 13
13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13
13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13
008
-99
024
1 0.0012382
999

```

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
13 / NMAT													
S022A010	0	0	325.0	0.0	0.0	/	1	STANDARD FUEL ELEMENT #1 BURN					
S122A010	0	0	325.0	0.0	0.0	/	2	STANDARD FUEL ELEMENT #2 BURN					
S222A010	0	0	325.0	0.0	0.0	/	3	STANDARD FUEL ELEMENT #3 BURN					
S322A010	0	0	325.0	0.0	0.0	/	4	STANDARD FUEL ELEMENT #4 BURN					
S422A010	0	0	325.0	0.0	0.0	/	5	STANDARD FUEL ELEMENT #5 BURN					
S522A010	0	0	325.0	0.0	0.0	/	6	STANDARD FUEL ELEMENT #6 BURN					
F122A010	0	0	325.0	0.0	0.0	/	7	FOLLOWER FUEL ELEMENT #1 BURN					
F222A010	0	0	325.0	0.0	0.0	/	8	FOLLOWER FUEL ELEMENT #2 BURN					
I02AA010	0	0	325.0	0.0	0.0	/	9	IRRADIATION ELEMENT					
B102A020	0	0	325.0	0.0	0.0	/	10	BE REFLECTOR					
B102A030	0	0	325.0	0.0	0.0	/	11	INNER D2O REFLECTOR					
B102A040	0	0	325.0	0.0	0.0	/	12	OUTER D2O REFLECTOR					
W002A000	0	0	325.0	0.0	0.0	/	13	LIGHT WATER IN REACTOR POOL					

```

/*
//
```

D.3 照射筒内部詳細計算

(例: VT-1 照射筒 / ポリエチレンホルダ / カドミカバー)

```

VTPC
IRRADIATION HOLE INNER TRANSPORT CAL. BY PIJ (VT/POLY/CD)
1 0 0 1 0 0 0 0 2 1 0 1 0 0 2 0 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
1.0E-20 / DUMMY
J1480      1 2 / FASTP    (R, 0)
J1480      1 2 / THERMALP (R, 0)
J1480      3 2 / FASTU    (B, 0)
J1480      3 2 / THRMALU  (B, 0)
J1480      3 2 / MACROWRK (B, 0)
J1480      3 2 / FLUX     (B, 0)
J1480      3 2 / MACRO    (B, 0)
J1480      3 2 / MICREF   (B, 0)
70 37 70 37 / FAST 70 GRP , THERMAL 37 GRP
70(1)      / USER FAST   GROUP STRUCTURE
37(1)      / USER THERMAL GROUP STRUCRURE
70(1)      / CONDENSED FAST GROUP STRUCTURE
37(1)      / CONDENSED THERMAL GROUP STRUCTURE

3 19 19 19 1 0 19 0 0 0 0 0 6 0 0 0 0 0 / PIJ CONTROL
1 4 150 5 5 5 0 0.0001 0.001 0.001 1.2 100.0 0.8
19(1) / X BY R
1 1 2 2 2 2 3 4 5 5 4 6 6 6 6 6 6 6 6 / R BY MAT
0.0 2*0.05 2*0.2 2*1.0 2*0.25 1*0.5 1*0.799 1*0.057 7*1.0 1*1.711
6 / NMAT
CDCVA000 0 0 325.0 0.0 0.0 / 1 CD COVER
HDPLA000 0 0 325.0 0.0 0.0 / 2 POLYETHYLENE HOLDER
CAPSA000 0 0 325.0 0.0 0.0 / 3 AL CAPSULE
W002A000 0 0 325.0 0.0 0.0 / 4 H2O GAP
ALTBA000 0 0 325.0 0.0 0.0 / 5 AL TUBE
S322A010 0 0 325.0 0.0 0.0 / 6 STANDARD FUEL ELEMENT (4TH BURN-UP)

/*
*/

```