

JAERI-M
83-133

JMTRにおける軽水炉燃料の局所線
出力評価法の検討
(OWL-1照射孔)

1983年8月

河村 弘・安藤 弘栄・永岡 芳春
小向 文作・新見 素二

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

JAERI-M 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、お申しこしください。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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

JMTRにおける軽水炉燃料の局所線出力評価法の検討
(OWL - 1 照射孔)

日本原子力研究所東海研究所材料試験炉部

河村 弘・安藤 弘栄⁺・永岡 芳春

小向 文作・新見 素二

(1983年7月29日受理)

JMTRでは、種々の照射孔で軽水炉燃料が照射されており、その照射挙動を解析するために、燃料棒の局所線出力を、より正確に、そして、より簡便に求める努力が続けられている。本報告書では、水ループOWL-1照射孔に装荷されている3本バンドル軽水炉燃料集合体(79LF-39J)内の各燃料棒の局所線出力評価法について検討した。

この検討のために、JMTR臨界実験装置(JMTRC)を用いて、Dy箔放射化法による実験を実施した。新しい試みとして、局所線出力評価のために必要な、そして出力上昇時変動しやすい軸方向熱中性子束分布係数(F_z)について、3次元核計算結果とJMTRC実験結果を比較した。両者が、非常によく一致したため、 F_z が3次元核計算で評価できることが実証された。さらに、各燃料棒の出力分担比(F_h)と軸方向熱中性子束分布についても報告する。

⁺ 研究炉管理部

The Evaluation Method of the Local Linear Heat Rate for
LWR Fuel Experiments in JMTR
(OWL-1 Irradiation-Hole)

Hiroshi KAWAMURA, Hiroei ANDO[†], Yoshiharu NAGAOKA
Bunsaku KOMUKAI and Motoji NIIMI

Department of JMTR Project, Oarai Research Establishment, JAERI

(Received July 29, 1983)

The LWR fuels have been irradiated at the various irradiation-holes in JMTR, and we have been making the efforts to get the local linear heat rate of the fuel rod more accurately and more easily. In this report, we studied the method to estimate the local linear heat rate of each fuel rod in the fuel rod assembly (79LF-39J) irradiated at the water loop OWL-1 irradiation-hole.

For this study, we made the experiment at the JMTR critical facility (JMTRC) by the Dy activation method. As the new try, we compared the result of the three dimensional calculation with the result of the JMTRC experiment about the axial thermal neutron flux distribution factor (F_z) which is necessary to estimate the local linear heat rate and is liable to vary during the JMTR power-up. As both agreed very well, it was established that the F_z could be estimated by the three dimensional calculation. Furthermore, we report the heat generation ratio (F_H) and the axial thermal neutron flux distribution of each fuel rod.

Keywords: JMTR, LWR Fuel, Local Linear Heat Rate, JMTRC,
Dy Activation Method, Thermal Neutron Flux Distribution Factor

[†] Department of Research Reactor Operation, Tokai, JAERI

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Experimental Object	3
3. Experimental Method	3
3.1 Reactor Core Arrangement and Control Rod Position of JMTRC ..	3
3.2 Fuel Rods and Assembly used for the Experiment	3
3.3 Relative Measurement of the Thermal Neutron Flux by the By Activation	3
4. Experimental Result and Discussion	5
4.1 Estimate of the Axial Thermal Neutron Flux Distribution Factor (F_z) by the JMTRC Experiment	5
4.2 Estimate of the Axial Thermal Neutron Flux Distribution Factor (F_z) by the Three dimensional Calculation	5
4.3 Estimate of the Heat Generation Ratio (F_H) by the Direct Method	6
4.4 Estimate of the Heat Generation Ratio (F_H) by the Indirect Method	6
4.5 Estimate of the Horizontal Thermal Neutron Flux Distribution	7
5. Conclusion	10
6. Concluding Remarks	11
Acknowledgements	11
References	11

目 次

1. 序 論.....	1
2. 実験目的.....	2
3. 実験方法.....	3
3.1 JMTRC の炉心配置及び制御棒位置	3
3.2 実験に用いた燃料棒及び集合体.....	3
3.3 D_y 箔の放射化による熱中性子束の相対測定	3
4. 実験結果及び検討.....	5
4.1 JMTRC 実験による軸方向熱中性子束分布係数 (F_z) 評価	5
4.2 3 次元核計算による軸方向熱中性子束分布係数 (F_z) 評価	5
4.3 直接法による出力分担比 (F_H) 評価	6
4.4 関接法(一次平面近似計算)による出力分担比 (F_H) 評価	6
4.5 水平方向の熱中性子束分布評価.....	7
5. 結 論.....	10
6. あとがき.....	11
謝 辞.....	11
参考文献.....	11

List of Tables

- Table 1 Fuel centerline temperature measurement experiment summary
- Table 2 Relation between the JMTR power (MW) and the control rod SH-1, 3 or SH-2 position
- Table 3 Heat generation ratio (F_H) by the direct method and the indirect method

List of Figures

- Fig. 1 Irradiation schedule of the third experiment at JMTR (79LF-39J)
- Fig. 2 JMTRC expriment assembly
- Fig. 3 Standard core at JMTRC
- Fig. 4 Experiment-1 core at JMTRC
- Fig. 5 Experiment-2 core at JMTRC
- Fig. 6 Flux measurement points in the foil activation method
- Fig. 7 Flux measurement points on the SPND mockup
- Fig. 8 Activity data of the Dy foil put axially on the fuel rod surface (Experiment-1)
- Fig. 9 Activity data of the Dy foil put axially on the fuel rod surface (Experiment-2)
- Fig.10 Standarized axial thermal neutron flux distribution (Experiment-1)
- Fig.11 Standarized axial thermal neutron flux distribution (Experiment-2)
- Fig.12 Axial thermal neutron flux distribution by the three dimensional calculation
- Fig.13 Modified curve of the standarized axial thermal neutron flux distribution by the three dimensional calculation
- Fig.14 Relation between the axial thermal neutron flux distribution factor (F_z) and the control rod SH-1, 3 position
- Fig.15 Relation between the axial thermal neutron flux distribution factor (F_z) and the control rod SH-1, 3 of SH-2 position
- Fig.16 Activity data of the Dy tape put on the fuel rod circumference (Experiment-1)
- Fig.17 Activity data of the Dy tape put on the fuel rod circumference (Experiment-2)
- Fig.18 Activity data of the Dy tape put on the SPND mockup
- Fig.19 79LF-39JNM horizontal section arrangement
- Fig.20 Horizontal thermal neutron flux distribution at the thermocouple tip position for measuring the fuel centerline temperature

1. 序論

JMTRでは、種々の照射孔で軽水炉燃料が照射されている。そして、その照射挙動を解析するためには、燃料棒の局所線出力を、より正確に及びより簡便に求める努力が続けられている。今回は、特に、水ループOWL-1照射孔に装荷されている3本バンドル軽水炉燃料集合体(79LF-39J)について、その集合体内の各燃料棒の局所線出力評価法を検討した。

この79LF-39Jは、第3次燃料中心温度測定実験用集合体である。燃料中心温度測定実験は、計装付き燃料棒による照射実験であり¹⁾、通常時燃料ふるまい計算コードの検証及び炉内計装技術の確立を目的として計画されたものである。また、この実験は、第1次から第3次までのシリーズ実験として実施されている。第1次^{2), 3), 4)}及び第2次実験は、すでに終了しており、第3次実験は、昭和57年3月から昭和58年6月まで、6サイクル(1サイクルは約22日)実施される予定である(Fig. 1)。第1次から第3次実験までの実験概要をTable 1に示す。

局所線出力評価法の検討のための実験装置として、JMTR付属のJMTR臨界実験装置(JMTRC)を用いた。なお、JMTRCは、JMTRの炉心配置及び炉心構成を模擬することによって、JMTRの核的特性(中性子束分布、中性子スペクトル等)を把握できるように考慮された原子炉である(この局所線出力評価法の検討のために実施した実験を、以後、JMTRC実験と呼ぶことにする)。また、JMTRC実験のための試料として、79LF-39J核的模擬体(79LF-39JNM)を用いた。79LF-39JNMは、燃料棒3本からなる集合体であり、その概略図をFig. 2に示す。これら燃料棒の主要構成物(UO_2 ペレット、アルミナ断熱ペレット、被覆管、端栓、管状タイロッド、計測線案内管等)は、79LF-39Jの燃料棒と同じ仕様になっている。

JMTRC実験は、JMTRの出力上昇時の軸方向及び水平方向の熱中性子束分布を正確に把握するために、JMTRの出力上昇時の制御棒位置を模擬して実施した。そして、第2次燃料中心温度測定実験の予備実験⁵⁾と同様の手法により、OWL-1試料部の水平方向熱中性子束分布を一次平面で近似し、自己出力型中性子検出器(SPND)出力から各燃料棒の出力分担比を精度良く評価できるか否かを確認するとともに、新しい手法として、軸方向熱中性子束分布係数を3次元核計算⁶⁾から求めることについても検討した。

2. 実験目的

JMTRは、ステップ状に炉出力50MWまで出力上昇されるが、その各々のステップ、例えば、炉出力XMWでの線出力を正確に求めることができ、燃料棒の照射挙動（特に、熱的挙動）を評価する上で重要である。また、燃料棒熱的挙動を解析するためには、燃料中心温度とその温度の測定位置における局所線出力を把握することが必要になる。この燃料中心温度測定位置における炉出力XMW時の局所線出力評価式を下に示す。

$$Q_x^i = \frac{(Q_{all})_x \cdot F_H^i}{M \cdot L} \cdot F_z \quad \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

$$(Q_{all})_x = \frac{(SPND)_x}{(SPND)_{50}} \cdot (Q_{all})_{50} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2)$$

ただし

Q	； 燃料中心温度測定位置における局所線出力	(w/cm)
$(SPND)$	； SPND指示値	(—)
Q_{all}	； 水ループOWL-1での試料総発熱量	(W)
F_H	； 出力分担比	(—)
F_z	； 燃料中心温度測定位置における軸方向熱中性子束分布係数	(—)
M	； 燃料棒の本数 (= 3)	(—)
L	； スタック長	(cm)

また添字は、

X	； JMTR出力 X MW時の値
50	； JMTR出力 50 MW時の値
i	； 燃料番号 ($i = 1, 2, 3$)

JMTRC実験の目的は、上記(2.1)式中の F_z 及び F_H を、JMTRCにおける実験により求めるとともに、この実験値 F_z と3次元核計算により求めた F_z 、及び実験値 F_H と1次平面近似計算により求めた F_H を各々比較検討し、どの程度の精度で評価できるかを把握することである。この検討結果から、実験値と計算値が、有意な差がなく一致していた場合、JMTRC実験を実施しなくても、より簡便な方法により、 F_H 及び F_z 、すなわち、燃料棒の局所線出力を評価できるようになる。

3. 実験方法

3.1 JMTRC の炉心配置及び制御棒位置

OWL-1は、反射体第2層目(D-7)にあり、JMTR炉心が高出力密度かつ、小型の炉心であるため、制御棒の動きにより、比較的中性子束分布が変動しやすく、燃料棒の局所線出力評価に影響を与えると思われる。そのため、JMTRC実験は、JMTRの出力上昇時の制御棒SH-1, 3がまだ抜けきっていない状態を模擬して実施した。実際のJMTR出力上昇中の制御棒位置をTable 2に示す。なお、この例は、JMTR第58サイクルの制御棒位置であり、同サイクルは、第3次燃料中心温度測定実験の照射開始サイクルである。

JMTRC実験に使用したJMTRCの標準炉心をFig. 3に示す。この標準炉心から燃料要素をA型からB型、B型からC型、あるいはA型からC型のように入れかえて、 ^{235}U 量を減らすことにより、反応度を調節して制御棒SH-1及びSH-2(各々JMTRのSH-1及びSH-3に相当)の位置が、556 mm及び723 mm(抜けきると850 mmになる)で臨界になるようにして、JMTRC実験を2回実施した。前者を実験1、後者を実験2と呼ぶことにする。各々の炉心構成をFig. 4及びFig. 5に示す。なお、JMTRCのすべての制御棒の吸収体の長さは、JMTRのものより50 mm長い。そのため、JMTRCの制御棒SH-1, 2の臨界点556 mm及び723 mmは、JMTRのJMTRC SH-1, 2相当制御棒SH-1, 3に対して各々506 mm及び673 mmとなる。

3.2 実験に用いた燃料棒及び集合体

本実験に用いた集合体79LF-39JNMは、3本の燃料棒からなっており、その集合体中の燃料棒は、JMTRの照射実験に使用するものと核的特性がかわらないように、ほぼ同一の仕様(材料、寸法等)となっている。集合体及び燃料棒の概要を、Fig. 2に示す。なお、この集合体は、上下の六角ナットをはずすことにより、燃料棒3本が、容易に取りはずせるような構造であり、放射化箔等の取付け、取外しに便利になっている。

3.3 D_y の放射化による熱中性子束の相対測定

JMTRC実験では、2種類のJMTRC炉心構成(実験1及び実験2)で、 D_y 箔(フォイル又はテープ)を用いた箔放射化法により、熱中性子束の相対測定を実施した。そのために用いた D_y フォイルと D_y テープの貼布位置(測定点)をFig. 6に示す。以下に熱中性子束の相対測定として実施したことについて、具体的に述べる。

まず、燃料棒に直接 D_y フォイル又は D_y テープを貼布し、それらの放射化により、軸方向の熱中性子束分布及び各燃料棒の出力分担比を求めた。さらに、軸方向の熱中性子束分布の測定

値と、3次元核計算により求められた計算値を比較し、3次元核計算値の F_z 評価への適用性について検討した。

次に、各自己出力型中性子検出器(SPND)位置に SPND 模擬物(SUS 304 シースの補償導線)を挿入し、それに巻いた D_y テープの放射化により、熱中性子束相対値を求めた(ただし、実験 2 では一部案内管外面に D_y テープを巻いた)。そして、それを用いて OWL-1 試料部の水平方向熱中性子束分布を一次平面で近似することにより、関接的に出力分担比を求めた。その値と燃料棒に直接 D_y テープを巻いて求めた出力分担比と比較し、一次平面近似計算の適用性を確認した。また、このことについては、前回第 2 次燃料中心温度測定実験(78 LF - 35 J)の予備実験でも検討したが、今回は前回と比べて濃縮度が約 1.5 倍になったため、その効果の有無について確認するためにも実施した。

Fig. 6 に示されている D_y フォイル及び D_y テープ番号について説明する。まず、 D_y フォイル No. 1 ~ No. 39 は、燃料棒の軸方向熱中性子束分布を知るために貼布されたもので、各燃料棒ごとに軸方向に 13 枚づつ貼付されている。 D_y フォイル No. 40 ~ No. 53 と D_y テープ #4 ~ #6 の軸方向貼布位置は、燃料中心温度測定位置(炉中心から -33 mm)である。また #1 ~ #3 位置での D_y テープの貼布については、JMT-R 実験で、Co-SPND と Rh-SPND が装荷されることになっているので、1 つの案内管内に前記 2 本の SPND 模擬物(SPND mock up)を入れて、軸方向に 3 カ所、 D_y テープを貼布して測定した。貼布位置を Fig. 7 に示す。放射代された D_y フォイル及び D_y テープは、NaI(Tl) ウェル・シンチレーションカウンターにより計測された。なお、出力分担比測定用の D_y テープ #4 ~ #6 は、照射後、約 □ 3 mm に切断してから計測した。今回の測定は、相対測定であるので、単位質量当たりの計数率でデータを処理した。 D_y テープ #1 ~ #3 は、照射後切断せず、そのまま計測した。

4. 実験結果及び検討

4.1 JMTRC 実験による軸方向熱中性子束分布係数 (F_z) 評価

燃料棒 3 本の軸方向に、各々貼布した 13 枚の D_y の比放射能 (cps/mg) をプロットし、Fig. 8 (実験 1) 及び Fig. 9 (実験 2) を得た。それらに示した 3 本の曲線について、スタック領域の軸方向平均値が 1.0 になるように規格化した軸方向熱中性子束分布を Fig. 10 (実験 1) 及び Fig. 11 (実験 2) に示す。なお、燃料棒の照射挙動評価のために、燃料ふるまい計算コード FREG-4⁷⁾ を用いて解析しようとしているが、そのコードへの入力データとして、この軸方向熱中性子束分布が使用される。また、それらの図から、各々の燃料棒の燃料中心温度測定位に於ける軸方向熱中性子束分布係数 F_z を求めた。その結果を下に示す。

	Experiment - 1	Experiment - 2
Rod. 1	1.37	1.29
Rod. 2	1.35	1.29
Rod. 3	1.36	1.29

軸方向熱中性子束分布は、Rod. 1, Rod. 2 及び Rod. 3 に対して有意な差がなかった。実験 1 及び実験 2 に対して、各々 Rod. 1 の値を代表値とし、FREG-4 コード⁷⁾ の入力データとして用いる。

4.2 3 次元核計算による軸方向熱中性子束分布係数 (F_z) 評価

3 次元核計算によって求められた軸方向熱中性子束分布（以下、核計算曲線と呼ぶ）を図 12 に示す⁶⁾。Fig. 12 には、6 種の制御棒位置における軸方向熱中性子束分布が示されている。曲線①は、軸方向熱中性子束分布の平均値が 1.0 になるように規格化されたものであり、その他 5 種の曲線②～⑥は、曲線①に対する相対値として示されている（すなわち、曲線①及び②～⑥の平均値は 1.0 ではない）。

また、この 3 次元核計算曲線 (Fig. 12) は、均質な試料が炉中心から上下 375 mm (+375 mm ~ -375 mm) の領域に装荷されているという条件で計算されたものであり、本実験のように、均質部 (燃料棒の UO_2 スタック部) が +375 mm ~ -241 mm である場合、Fig. 12 中の曲線をそのまま用いて JMTRC 実験曲線と比較することはできない。そこで、実験曲線と比較するために必要な Fig. 12 中の核計算曲線の修正方法について、Fig. 12 中の曲線① (制御棒 SH-1, 3 が 525 mm) を用いて説明する。まず、Fig. 12 中の曲線①の +375 mm ~ -375 mm の領域での軸方向熱中性子束平均値 M_o を求め、次に、+375 mm ~ -241 mm 領域 (第 3 次実験用燃料棒の UO_2 ペレット装荷位置) での軸方向熱中性子束平均値 M_e を求め、さらに、曲線①の軸方

向熱中性子束(相対値)をMe/Moで割ることにより、 UO_2 ペレット装荷領域での軸方向熱中性子束平均値が1.0になる修正核計算曲線が得られる。この方法により、Fig. 12中の曲線①及び②について修正曲線を求め、JMTRC実験結果と比較したものをFig. 13に示す。Fig. 12中の曲線①及び②についての修正曲線は、各々、Fig. 13中の曲線③及び④である。

このFig. 13中に示されている修正された核計算曲線③及び④から、燃料中心温度測定位置、すなわち、炉中心から-33mmの点における軸方向熱中性子束分布係数(F_z)を求め、それらの値を直線で結ぶとともに、Fig. 13中の実験曲線①及び②についても上記の測温点における値(F_z)をプロットした。それらの直線及び実験データをFig. 14に示す。

このFig. 14から明らかなように、制御棒SH-1, 3が500mmから800mmの間にある場合には、3次元核計算結果から求められた燃料中心温度測定位置における軸方向熱中性子束分布係数(F_z)の内挿曲線と実験2の F_z とは良く一致しており、上記の制御棒領域では(2.2)式中の F_z を求めるためのJMTRC実験は必要ないということが立証された。つまり、JMTRCを用いた実験において、50MW時に、制御棒SH-1, 3位置が525mmと800mmの間の時には、局所線出力評価のための軸方向熱中性子束分布係数(F_z)として、3次元核計算結果(Fig. 14の直線)を用いれば良いということになる。また、JMTRCを用いた実験において、50MW時に、制御棒SH-1及びSH-3がぬけきってしまい、制御棒SH-2が挿入されている時については、Fig. 13からFig. 14を作図したと同様の手法により、Fig. 12の3次元核計算曲線②～⑤から、Fig. 15を得た。なお、Fig. 14の結果もこのFig. 15中に含めて示した。

4.3 直接法による出力分担比(F_H)評価

燃料棒外周部の燃料中心温度測定相当位置に巻いたDyテープ(長さ約40mm)を15分割し、それらの比放射能と燃料棒外周部の相対位置との関係を実験1, 2に対してプロットし、各々Fig. 16及びFig. 17に示した。これらの図中に示されているRod. 1, Rod. 2及びRod. 3の曲線下の面積(比放射能の燃料棒外周距離での積分値)を求めた。その面積の比が、Rod. 1, Rod. 2及びRod. 3の試料総発熱量に対する出力分担比(F_H)を示すことになる。この手法を直接法と呼ぶこととする。その値を下表に示す。

	Experiment -1	Experiment -2
Rod. 1	1.16	1.15
Rod. 2	0.91	0.89
Rod. 3	0.93	0.96

4.4 間接法(一次平面近似計算)による出力分担比(F_H)評価

79LF-39JNM集合体の燃料中心温度測定用熱電対位置における水平方向断面をFig. 19に示す。この水平方向断面における水平方向熱中性子束分布を一次平面で近似するという手法(間接法)により、出力分担比を求め、4.3節で直接法により求めた出力分担比と比較した。

上記の水平方向断面における水平方向熱中性子束分布を一次平面で近似すると

$$\left| \begin{array}{cccc} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{array} \right| = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

なお,

(x, y) ; 燃料棒の座標

(x_i, y_i) ; SPND No. i の座標

ただし, z と z_i は, 熱中性子束の大きさを示す。

また, (4.1) 式を円筒座標に変換するため,

$$\left. \begin{array}{l} x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta, \quad z = \phi \\ x_1 = r_0 \cos \theta_1, \quad y_1 = r_0 \sin \theta_1, \quad z = \phi_1 \\ x_2 = r_0 \cos \theta_2, \quad y_2 = r_0 \sin \theta_2, \quad z = \phi_2 \\ x_3 = r_0 \cos \theta_3, \quad y_3 = r_0 \sin \theta_3, \quad z = \phi_3 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ただし,

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 ; SPND # 1, # 2 及び # 3 位置に装荷された模擬物のまわりに巻かれた D_y テープの放射化量 (JMT RC 実験により求めた。)

r_0 ; SPND 配置半径 ($= \frac{2.9}{2}$ cm) (SPND # 1, # 2 及び # 3 は, 同心円上にある。)

(r, θ) ; 燃料棒の座標 ($r = \frac{1.9}{2}$ cm) (Rod. 1, 2 及び 3 も, 同心円上にある。)

ϕ ; (r, θ) 点の熱中性子束相対値

(4.2) 式を (4.1) 式に代入して, $\theta_1 = 0$ とすると,

$$\begin{aligned} & \{ (\phi_3 - \phi_1) \sin \theta_2 - (\phi_2 - \phi_1) \sin \theta_3 \} (r \cos \theta - r_0) \\ & + \{ (\phi_2 - \phi_1) (\cos \theta_3 - 1) - (\phi_3 - \phi_1) (\cos \theta_2 - 1) \} \cdot r \sin \theta \\ & + \{ (\sin \theta_3) (\cos \theta_2 - 1) - (\sin \theta_2) (\cos \theta_3 - 1) \} (\phi - \phi_1) \cdot r_0 = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

(4.3) 式に,

$$r_0 = \frac{2.9}{2} \text{ (cm)}, \quad \theta_2 = \frac{4}{3} \pi, \quad \theta_3 = \frac{2}{3} \pi$$

及び,

$$\text{Rod. 1 の座標 } \left(\frac{1.9}{2}, \frac{\pi}{3} \right) \text{ あるいは}$$

$$\text{Rod. 2 の座標 } \left(\frac{1.9}{2}, \frac{5}{3}\pi \right) \text{ あるいは}$$

$$\text{Rod. 3 の座標 } \left(\frac{1.9}{2}, \pi \right)$$

を代入すると、Rod. 1, Rod. 2あるいはRod. 3の位置に対する ϕ （熱中性子束相対値）が、 ϕ_1 , ϕ_2 及び ϕ_3 の関数として求められる。その式を次下に示す。

(1) Rod. 1

$$\phi_{\text{Rod.1}} = 0.552 (\phi_1 + \phi_3) - 0.104 \phi_2 \quad \dots \dots \dots \quad (4.4)$$

(2) Rod. 2

$$\phi_{\text{Rod.2}} = 0.552 (\phi_1 + \phi_2) - 0.104 \phi_3 \quad \dots \dots \dots \quad (4.5)$$

(3) Rod. 3

$$\phi_{\text{Rod.3}} = 0.552 (\phi_2 + \phi_3) - 0.104 \phi_1 \quad \dots \dots \dots \quad (4.6)$$

これらの ϕ 値から、燃料棒の出力分担比 F_H が次のように求められる。

$$F_H^i = \frac{\phi_{\text{Rod.}i}}{\sum_{i=1}^3 \phi_{\text{Rod.}i}} \quad \dots \dots \dots \quad (4.7)$$

ただし、

$$\phi_{\text{Rod.}i} : \text{Rod. } i \text{ の熱中性子束相対値 } (i = 1, 2, 3)$$

次に、JMTRC実験により求めた ϕ_1 , ϕ_2 及び ϕ_3 について述べる。 ϕ_1 , ϕ_2 及び ϕ_3 は、SPND位置に装荷されたSPND模擬物に巻かれたDyテープの放射比量(Fig. 16)から求めた。Dyテープは、軸方向に3カ所巻かれており(Fig. 7)，それらの場所のDyテープの放射化量を用いて、SPNDエミッターポジションでの平均Dyテープ放射化量を求め、その値をもって、 ϕ_1 , ϕ_2 あるいは ϕ_3 とした。それらの ϕ 値を下に示す。

	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
Experiment -1	2598	2029	2673
Experiment -2	1904	1338	2039

(Dimension : cps/mg)

上記の値を(4.4)～(4.6)式に代入し、 $\phi_{\text{Rod.}1} \sim \phi_{\text{Rod.}3}$ を求め、さらに、(4.7)式により、燃料棒の出力分担比を求めた。この間接法により求めた値と、4.3節で直接法により求めた値との比較結果を、Table 3に示す。この比較から、両者が±5%以内で一致しており、燃料棒の ^{235}U の濃縮度が、2.3%の場合に、前回同様⁵⁾、JMTR実験での局所線出力評価に、十分、一次平面近似が適用できることが確認された。

4.5 水平方向の熱中性子束分布評価

3.1節で述べたように、Be反射体2層目のOWL-1照射孔では、制御棒の動きにより、比較的中性子束分布が変動しやすいため、制御棒SH-1, 3の位置が506 mmと673 mmでの水平方向の熱中性子束分布をD_yフォイルの比放射能から求め、Fig. 20に示した。なお、水平方向熱中性子束分布測定用D_yフォイルの貼布位置は、3.3節で述べたとおりであり、D_yフォイルNo.52の比放射能を1.0に規格化してFig. 20に示した。制御棒SH-1, 3の位置が、506 mmと673 mmでは、水平方向の熱中性子束分布に対して、最大約10 %の違いがあることが確認された。

5. 結 論

JMTRの水ループOWL-1照射孔に装荷されている3本バンドル軽水炉燃料集合体(79LF-39J)内の各燃料棒の局所線出力を評価するために、79LF-39Jを核的に模擬した集合体(79LF-39JNM)を実験試料として、JMTR臨界実験装置(JMTRC)を用いた実験(JMTRC実験)を実施した。この実験により得られた値及び検討結果について、以下にまとめる。

(1) 軸方向の熱中性子束分布について

実験1及び2に対して、Fig. 10及びFig. 11に示したような軸方向熱中性子束分布になった。両実験とも、Rad. 1, Rad. 2及びRad. 3に対する曲線が、各々、±2%で一致しており、どの曲線を通常時燃料ふるまい計算コードFREG-4の入力データに採用しても有意な差はないので、Rad. 1の曲線を採用するものとする。

(2) 軸方向の熱中性子束分布係数 F_z について

JMTRC実験により求めた F_z と、3次元核計算曲線(Fig. 12)を本実験仕様に合致するように修正した軸方向熱中性子束分布曲線(Fig. 13)から求めた F_z とを比較検討した。Fig. 14に示したように、両者は、非常に良く一致した。今後は、Fig. 15に示した曲線を用いることにより、JMTRC実験を実施しなくても、より簡便な方法で、 F_z を評価できるようになることが実証された。

(3) 出力分担比 F_H について

燃料棒に直接Dyテープを巻き、そのDyテープの放射化量により求めた F_H (直接法)と、SPND模擬物にDyテープを巻き、そのDyテープの放射化量を用いた一次平面近似計算により求めた F_H (間接法)を比較するため、Table 3に示した。両者は、±5%で一致しており、燃料棒の ^{235}U の濃縮度が2.3%の場合、前回同様⁵⁾ JMTRを用いた実験での線出力評価に、十分、一次平面近似が適用できることを確認した。

(4) 水平方向の熱中性子束分布について

Be反射体2層目のOWL-1照射孔では、制御棒の動きにより比較的中性子束分布が変化しやすいため、制御棒SH-1, 3の位置が506 mmと673 mmでの水平方向熱中性子束分布を比較し、Fig. 20に示した。両者の間で、最大約10%の違いがあることを確認した。

6. あとがき

JMTRで軽水炉燃料集合体を照射する時、その集合体内の各燃料棒の安全評価等のために、JMTRでの照射前に、局所線出力をより正確に把握しておく必要がある。そこで、これまでには、JMTRC実験^{3), 5)}を実施し、局所線出力を求めるために必要な軸方向熱中性子束分布係数 F_z と出力分担比 F_H を求めてきた。しかし、今回の実験により、手間のかかるJMTRC実験を実施しなくても、 F_z を計算により求めることができることを実証した。しかし、 F_H は、これまでの核計算手法ではまだ、求めることができない。今後は、 F_H を計算コード（3次元中性子拡散計算コードFEDM-BURN等⁸⁾）を用いて評価し、JMTRC実験をまったく実施しなくても、より簡便な手法により、集合体内の各燃料棒の局所線出力が正確に評価できるようにしていく予定である。

謝 辞

本実験を実施するにあたり、材料試験炉部次長（元計画課長）佐藤雅幸氏、現計画課長小山田六郎氏及び計画課諸氏に御支援していただいた。また、千代田メインテナンス株式会社の宮林久男氏と照沼光男氏には、実験に使用したDyテープとDy箔の加工と重量測定をしていただいた。以上、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 安藤弘栄、他：私信
- (2) 中島照夫、他：JAERI-M 9600，“(JMTRにおける燃料中心温度測定実験(I)－第1次燃料試料(77LF-33J)の設計と製作－)”(1981).
- (3) 安藤弘栄、河村弘、他：JAERI-M 9202，“JMTRにおける燃料中心温度測定(II)－第1次燃料試料の実験解析－”(1980).
- (4) 酒井陽之、他：JAERI-M 82-034，“JMTRにおける燃料中心温度測定実験(III)－第1次燃料の照射後試験－”(1982).
- (5) 河村弘、安藤弘栄、他：JAERI-M 82-020，“JMTRにおける燃料中心温度測定実験(IV)－第2次試料の予備実験－”(1982).
- (6) 永岡芳春：JAERI-M 6661，“JMTR運転中の熱中性子束変動の評価(3次元計算による解析)”(1976).
- (7) 原山泰雄、泉文男、他：JAERI-M 9631，“FREG-4：照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム”(1981).
- (8) Y. Naito, et al：“A New Mixed Method with Finite Diffusion Calculation”, J. Nucl. Sci. Technol. 18(8) pp. 571～580 (1981).

6. あとがき

JMTRで軽水炉燃料集合体を照射する時、その集合体内の各燃料棒の安全評価等のために、JMTRでの照射前に、局所線出力をより正確に把握しておく必要がある。そこで、これまでには、JMTRC実験^{3), 5)}を実施し、局所線出力を求めるために必要な軸方向熱中性子束分布係数 F_z と出力分担比 F_H を求めてきた。しかし、今回の実験により、手間のかかるJMTRC実験を実施しなくても、 F_z を計算により求めることができることを実証した。しかし、 F_H は、これまでの核計算手法ではまだ、求めることができない。今後は、 F_H を計算コード（3次元中性子拡散計算コードFEDM-BURN等⁸⁾）を用いて評価し、JMTRC実験をまったく実施しなくても、より簡便な手法により、集合体内の各燃料棒の局所線出力が正確に評価できるようにしていく予定である。

謝 辞

本実験を実施するにあたり、材料試験炉部次長（元計画課長）佐藤雅幸氏、現計画課長小山田六郎氏及び計画課諸氏に御支援していただいた。また、千代田メインテナンス株式会社の宮林久男氏と照沼光男氏には、実験に使用したDyテープとDy箔の加工と重量測定をしていただいた。以上、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 安藤弘栄、他：私信
- (2) 中島照夫、他：JAERI-M 9600，“(JMTRにおける燃料中心温度測定実験(I)－第1次燃料試料(77LF-33J)の設計と製作－)”(1981).
- (3) 安藤弘栄、河村弘、他：JAERI-M 9202，“JMTRにおける燃料中心温度測定(II)－第1次燃料試料の実験解析－”(1980).
- (4) 酒井陽之、他：JAERI-M 82-034，“JMTRにおける燃料中心温度測定実験(III)－第1次燃料の照射後試験－”(1982).
- (5) 河村弘、安藤弘栄、他：JAERI-M 82-020，“JMTRにおける燃料中心温度測定実験(IV)－第2次試料の予備実験－”(1982).
- (6) 永岡芳春：JAERI-M 6661，“JMTR運転中の熱中性子束変動の評価(3次元計算による解析)”(1976).
- (7) 原山泰雄、泉文男、他：JAERI-M 9631，“FREG-4：照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム”(1981).
- (8) Y. Naito, et al：“A New Mixed Method with Finite Diffusion Calculation”, J. Nucl. Sci. Technol. 18(8) pp. 571～580 (1981).

6. あとがき

JMTRで軽水炉燃料集合体を照射する時、その集合体内の各燃料棒の安全評価等のために、JMTRでの照射前に、局所線出力をより正確に把握しておく必要がある。そこで、これまでには、JMTRC実験^{3), 5)}を実施し、局所線出力を求めるために必要な軸方向熱中性子束分布係数 F_z と出力分担比 F_H を求めてきた。しかし、今回の実験により、手間のかかるJMTRC実験を実施しなくても、 F_z を計算により求めることができることを実証した。しかし、 F_H は、これまでの核計算手法ではまだ、求めることができない。今後は、 F_H を計算コード（3次元中性子拡散計算コードFEDM-BURN等⁸⁾）を用いて評価し、JMTRC実験をまったく実施しなくても、より簡便な手法により、集合体内の各燃料棒の局所線出力が正確に評価できるようにしていく予定である。

謝 辞

本実験を実施するにあたり、材料試験炉部次長（元計画課長）佐藤雅幸氏、現計画課長小山田六郎氏及び計画課諸氏に御支援していただいた。また、千代田メインテナンス株式会社の宮林久男氏と照沼光男氏には、実験に使用したDyテープとDy箔の加工と重量測定をしていただいた。以上、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 安藤弘栄、他：私信
- (2) 中島照夫、他：JAERI-M 9600，“(JMTRにおける燃料中心温度測定実験(I)－第1次燃料試料(77LF-33J)の設計と製作－)”(1981).
- (3) 安藤弘栄、河村弘、他：JAERI-M 9202，“JMTRにおける燃料中心温度測定(II)－第1次燃料試料の実験解析－”(1980).
- (4) 酒井陽之、他：JAERI-M 82-034，“JMTRにおける燃料中心温度測定実験(III)－第1次燃料の照射後試験－”(1982).
- (5) 河村弘、安藤弘栄、他：JAERI-M 82-020，“JMTRにおける燃料中心温度測定実験(IV)－第2次試料の予備実験－”(1982).
- (6) 永岡芳春：JAERI-M 6661，“JMTR運転中の熱中性子束変動の評価(3次元計算による解析)”(1976).
- (7) 原山泰雄、泉文男、他：JAERI-M 9631，“FREG-4：照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム”(1981).
- (8) Y. Naito, et al：“A New Mixed Method with Finite Diffusion Calculation”, J. Nucl. Sci. Technol. 18(8) pp. 571～580 (1981).

Table 1 Fuel centerline temperature measurement experiment summary

Item \ Assembly No.	77LF - 33J				78LF - 35J			79LF - 39J						
Fuel Rod Number	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3				
Irradiation Schedule	S.54.11.12~S.55.2.10 (48~49 cycle)				S.56.9.24~S.57.2.13 (55~57 cycle)			S.57.3.13~S.58.6.22 (58~63 cycle)						
Pellet - Cladding Diametral Gap (μm)	100	200	300	400		200			200					
Cladding Material	Normal				Normal	with Cu barrier	with Zr Liner	Normal						
Gap Gas Component	He 100 %				He 100 %			He 75%He20%						
^{235}U Enrichment (w/o)	1.5				1.5			2.3						
Thermocouple for Fuel Centerline Temperature	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
Fuel Rod Elongatation Detector	○				○	○	○		○	○	○			
FP Gas Pressure Gauge			○					○						
SPND	Emitter Rh	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
	Emitter Co							○	○	○	○			
UO_2 Pellet	L / D	1.03	1.04	1.05	1.06	1.04			1.04					
	Density	95 % T.D												
	O/U Ratio	2.005			2.009			2.01						
	Pellet Shape	Flat												

Table 2 Relation between the JMTR power (MW) and the control rod SH-1, 3 or SH-2 position

<58 cycle>

	Thermal Power (MW)	SH-1 (mm)	SH-2 (mm)	SH-3 (mm)
FORMER	12.8	547.9	-18.0	549.4
	18.8	581.3	-18.0	581.8
	29.7	590.3	-18.0	590.7
	40.1	637.3	-18.0	637.1
	45.3	689.9	-18.0	690.1
	49.1	700.1	-18.0	700.7
LATTER	12.1	601.1	-18.0	600.8
	17.7	620.9	-18.0	620.9
	29.5	627.7	-18.0	628.1
	40.0	693.3	-18.0	693.4
	45.0	801.2	-18.0	802.2
	50.4	801.2	-18.0	802.2

FORMER : 1982.3.13

LATTER : 1982.3.27

Table 3 Heat generation ratio (F_H) by the direct method and the indirect method

a) Experiment - 1

Item Rod. No.	Direct Method	Indirect Method
Rod. 1	1.16	1.11
Rod. 2	0.91	0.93
Rod. 3	0.93	0.96

b) Experiment - 2

Item Rod. No.	Direct Method	Indirect Method
Rod. 1	1.15	1.16
Rod. 2	0.89	0.90
Rod. 3	0.96	0.94

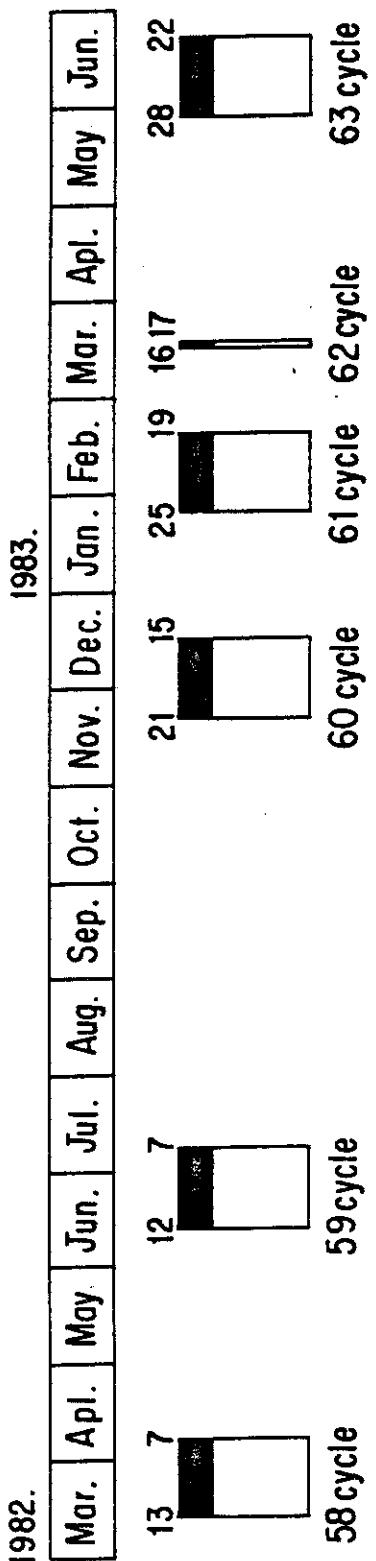
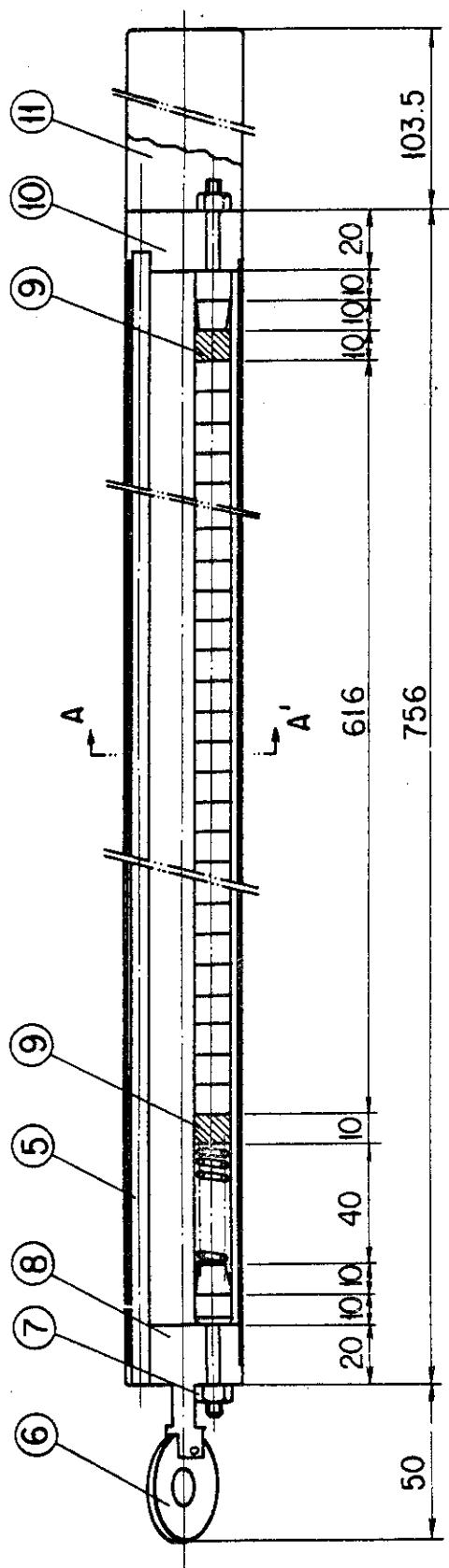


Fig. 1 Irradiation schedule of the third experiment at JMTR (79LF-39J)



Parts Name	Number	Material	Note
Adapter	1	A5052	
Lower Tie-plate	1	SUS304	
Adiabatic Pellet	2	Al2O3	
Upper Tie-plate	1	SUS304	
Hexagonal Nut	6	SUS304	
Handling Knob	1	SUS304	
Guide Tube	3	SUS304 enter SPND mock up	
Tubular Tie-Rod	1	SUS304	
Fuel Rod No.3	1		
Fuel Rod No.2	1		
Fuel Rod No.1	1		

A-A' Cross-Section

Fig. 2 JMTIRC experiment assembly

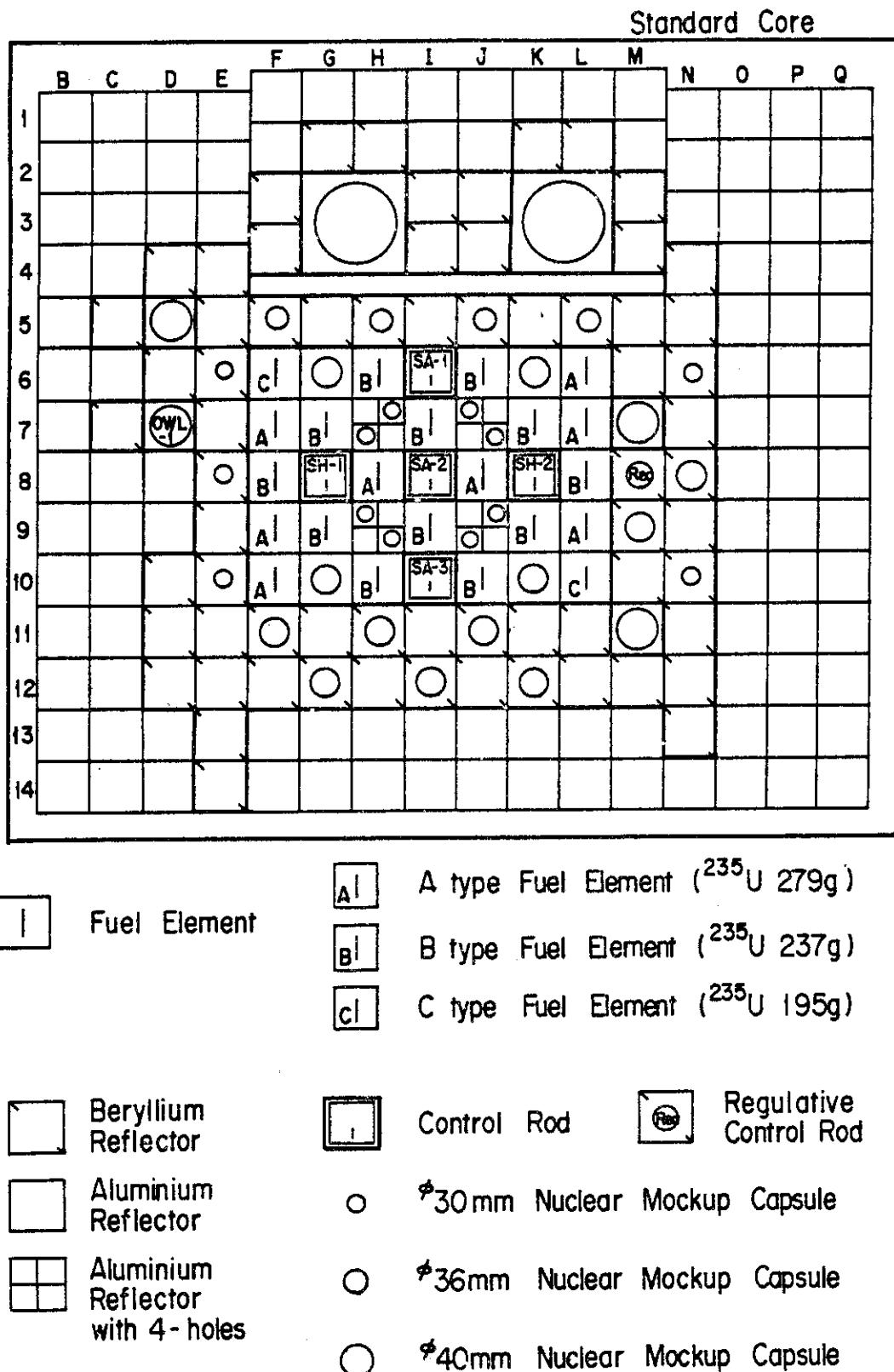
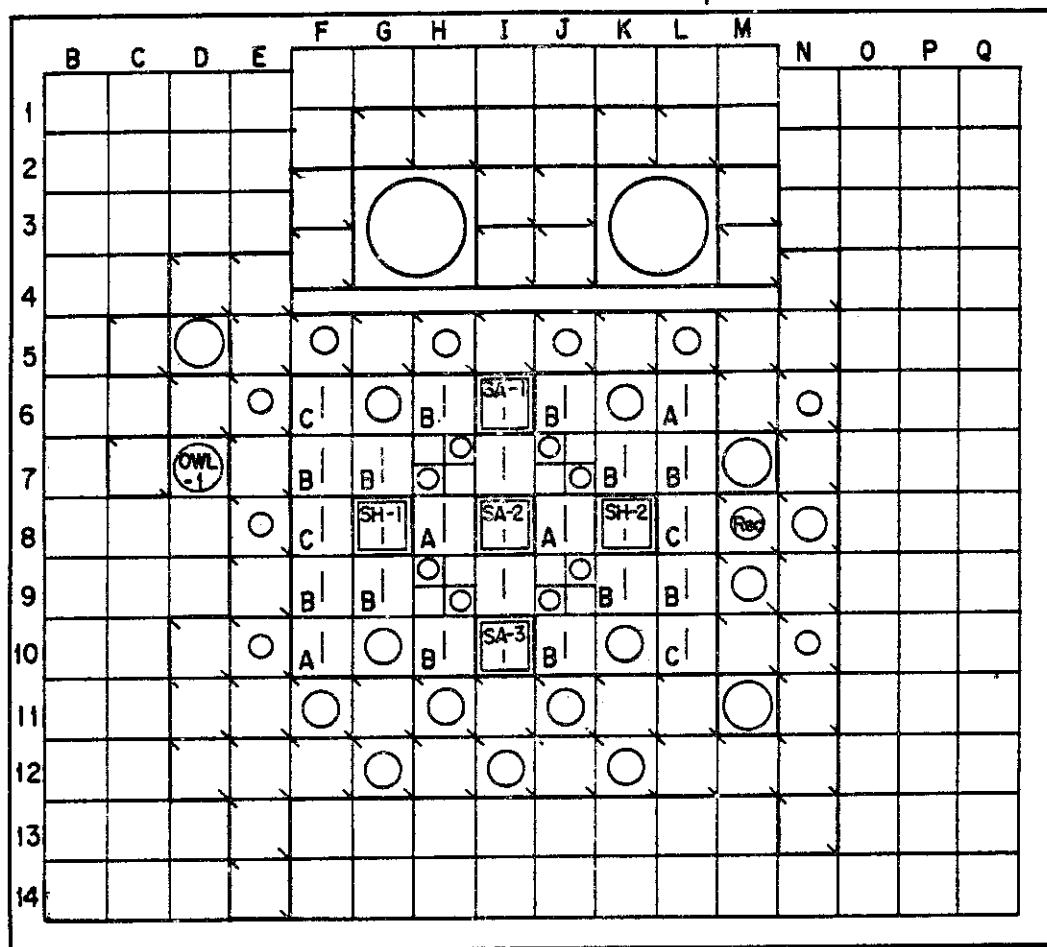


Fig. 3 Standard core at JMTRC

Experiment - I Core



| Fuel Element

A | A type Fuel Element (^{235}U 279g)

B | B type Fuel Element (^{235}U 237g)

C | C type Fuel Element (^{235}U 195g)



Beryllium Reflector



Control Rod



Regulative Control Rod



Aluminium Reflector with 4-holes



30mm Nuclear Mockup Capsule



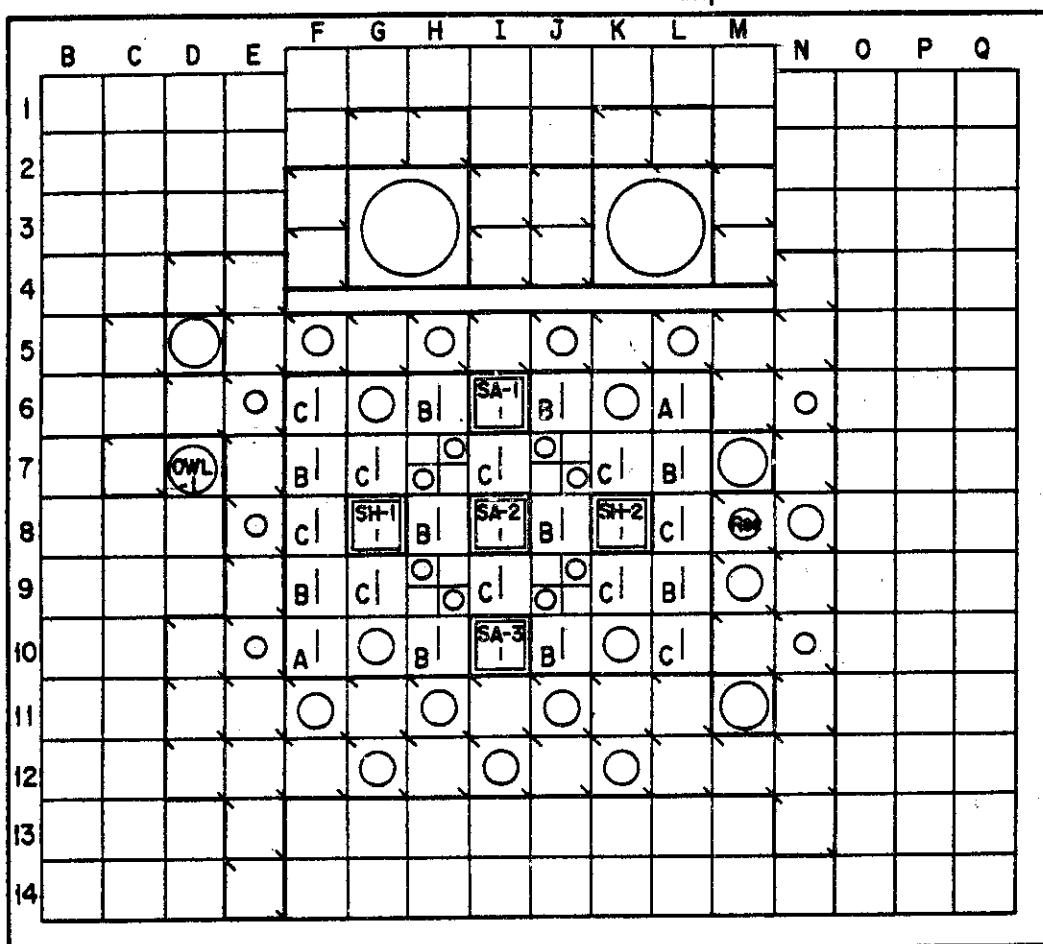
36mm Nuclear Mockup Capsule



40mm Nuclear Mockup Capsule

Fig. 4 Experiment - I core at JMTRC

Experiment - 2 Core



I Fuel Element

A A type Fuel Element (^{235}U 279g)

B B type Fuel Element (^{235}U 237g)

C C type Fuel Element (^{235}U 195g)

Beryllium Reflector

Control Rod

Regulative Control Rod

Aluminium Reflector

$\frac{1}{2}$ 30mm Nuclear Mockup Capsule

Aluminium Reflector with 4-holes

$\frac{1}{2}$ 36mm Nuclear Mockup Capsule

$\frac{1}{2}$ 40mm Nuclear Mockup Capsule

Fig. 5 Experiment-2 core at JMTRC

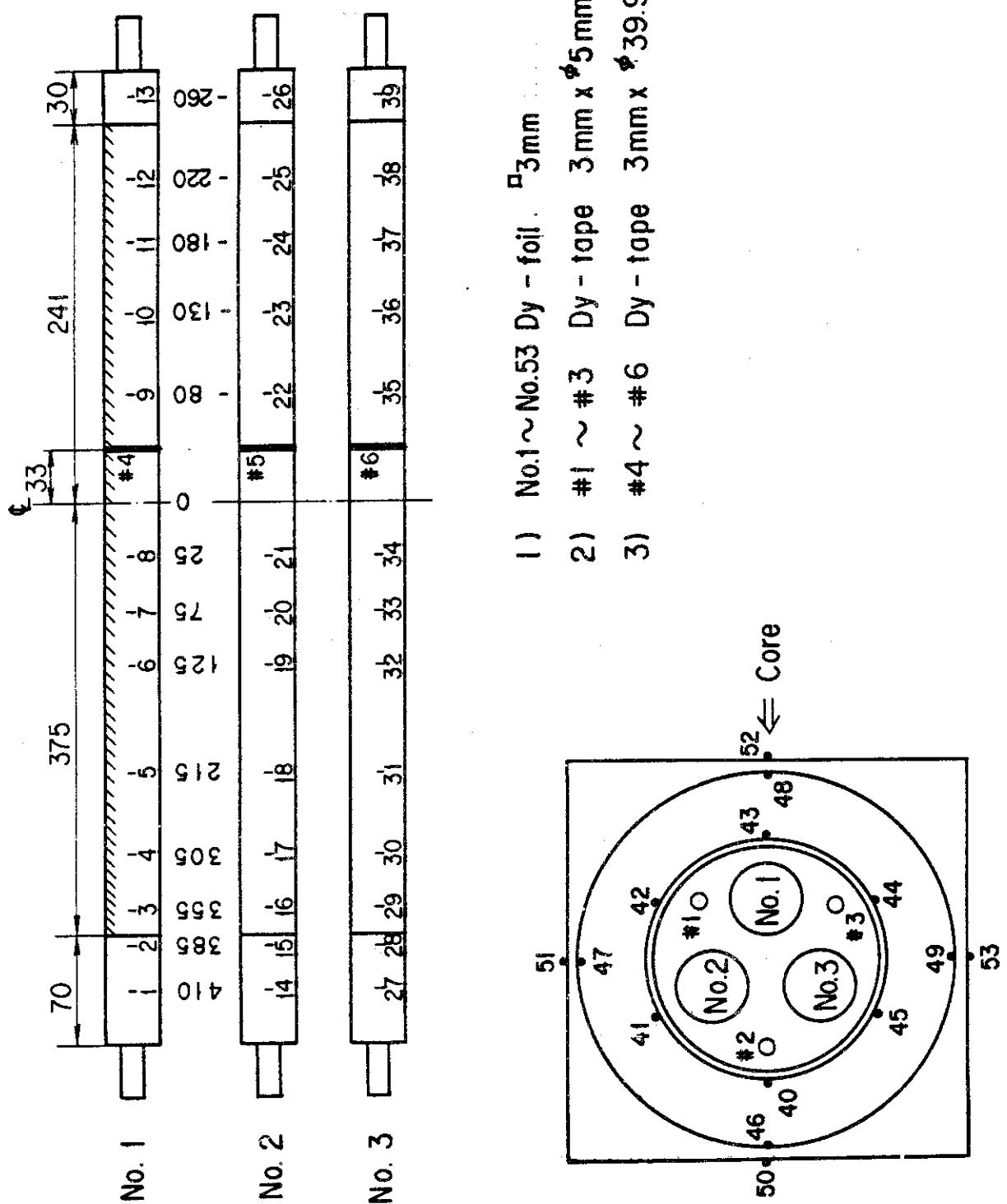


Fig. 6 Flux measurement points in the foil activation method

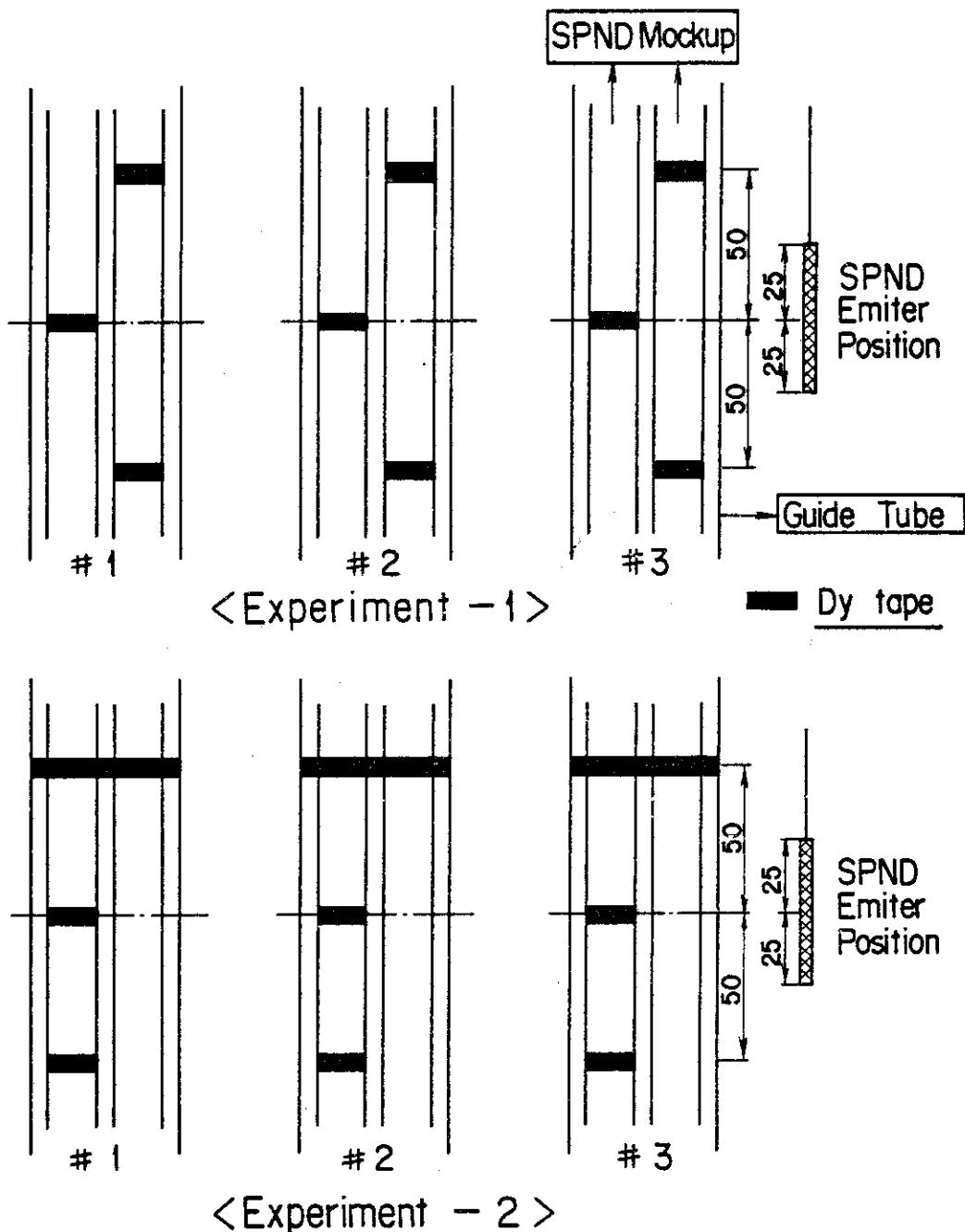


Fig. 7 Flux measurement points on the SPND mockup

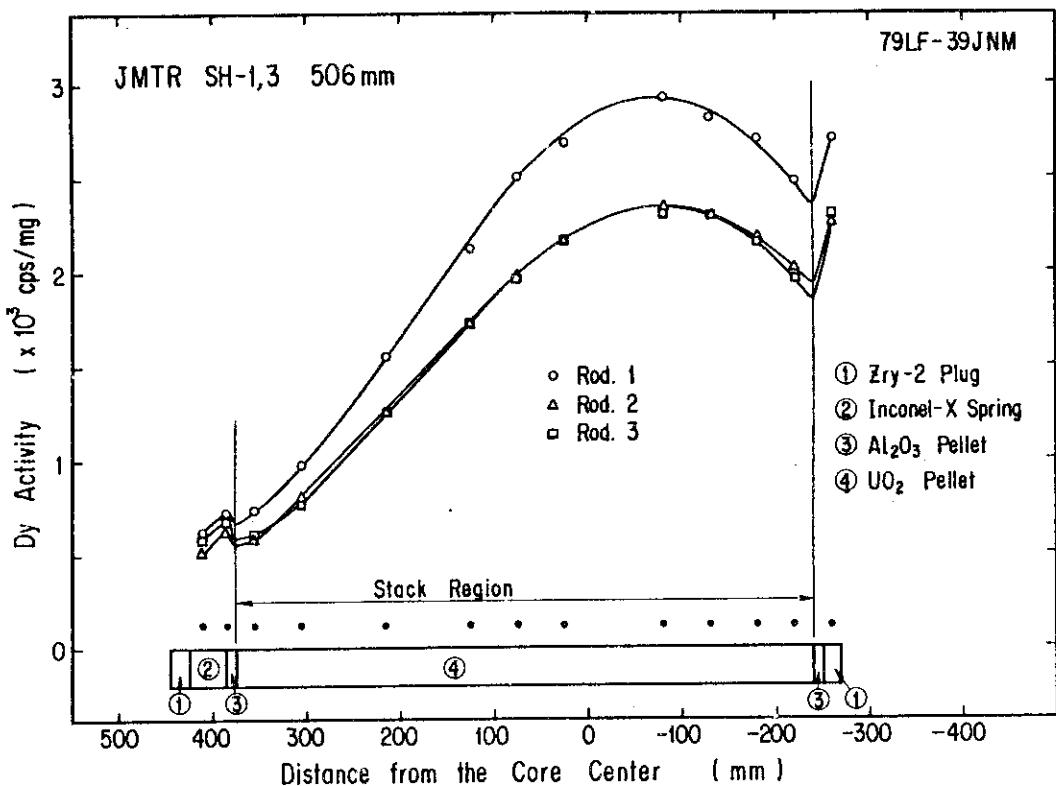


Fig. 8 Activity data of the Dy foil put axially on the fuel rod surface (Experiment-1)

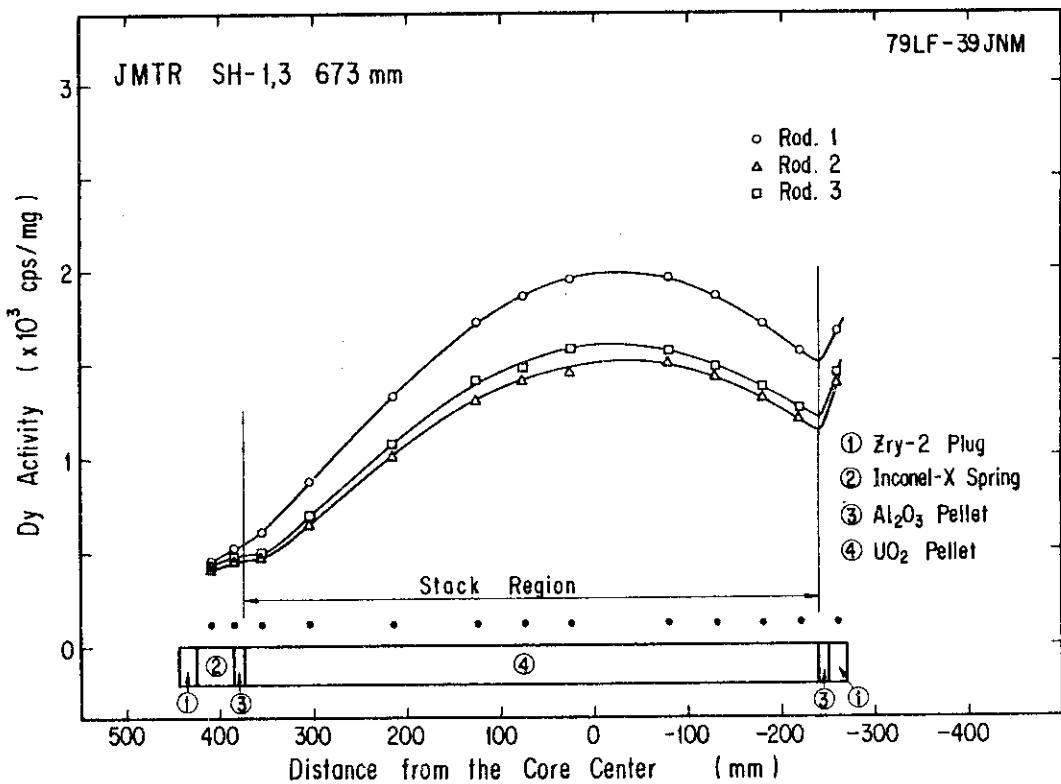


Fig. 9 Activity data of the Dy foil put axially on the fuel rod surface (Experiment-2)

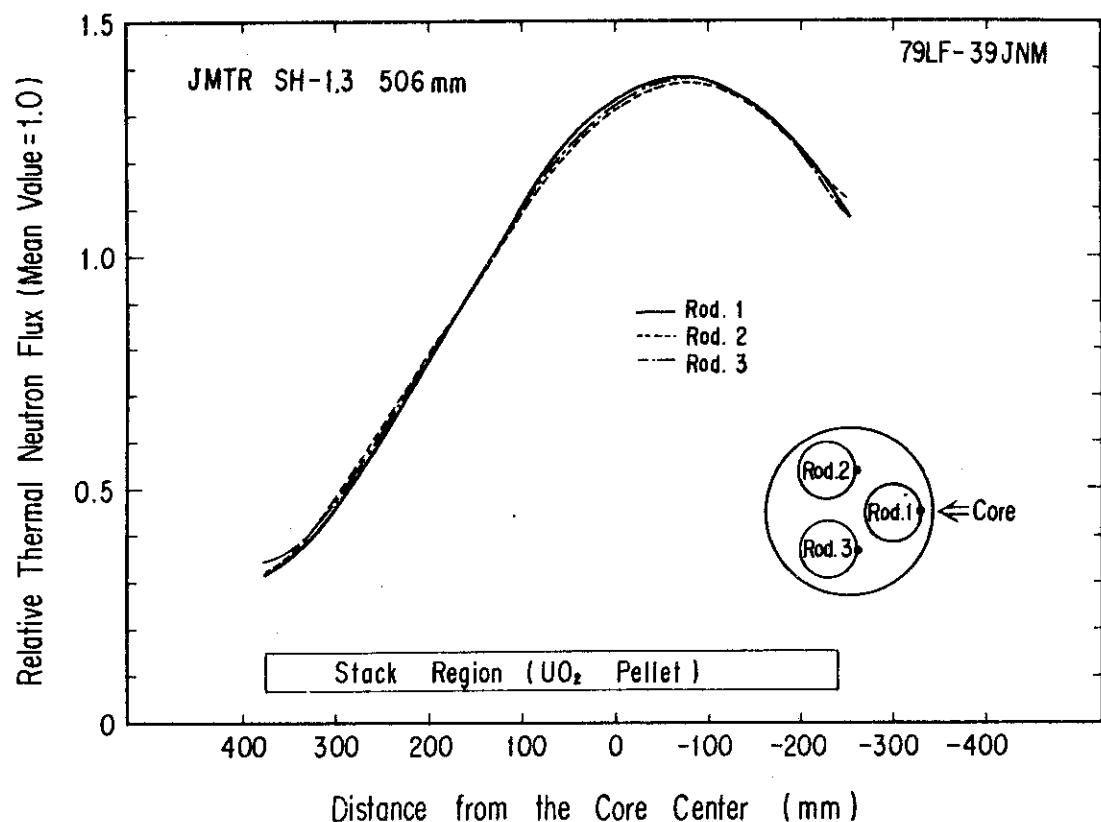


Fig.10 Standardized axial thermal neutron flux distribution (Experiment-1)

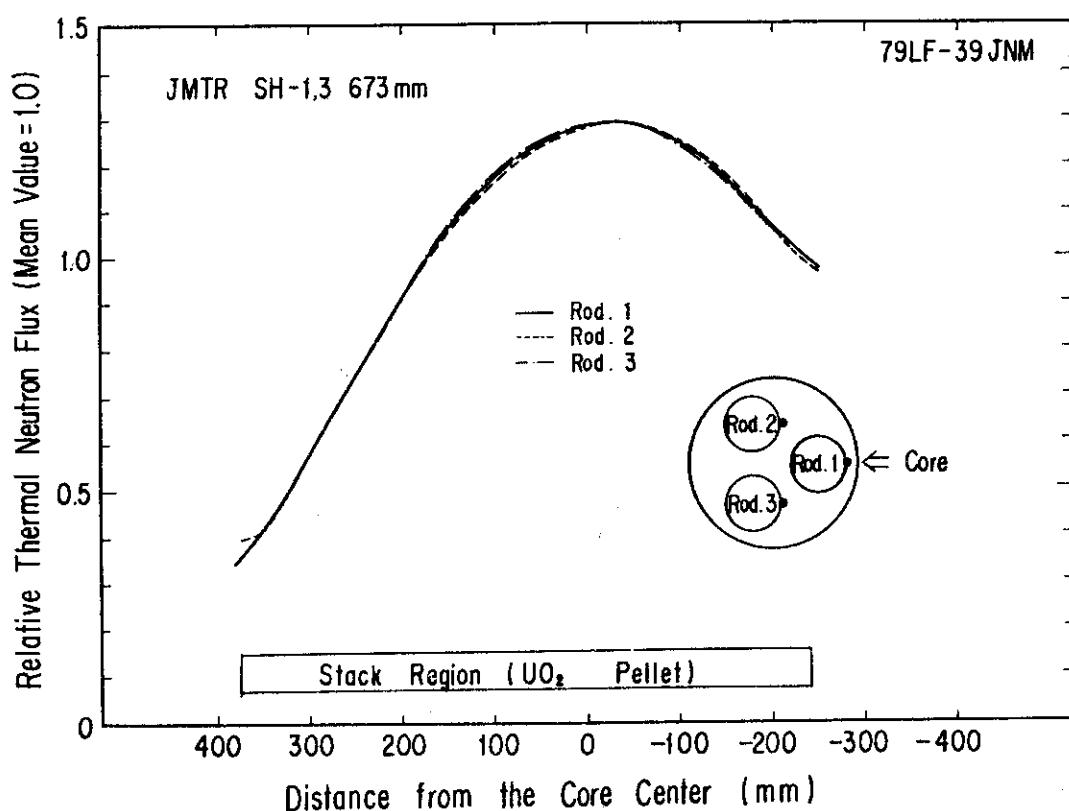


Fig.11 Standardized axial thermal neutron flux distribution (Experiment-2)

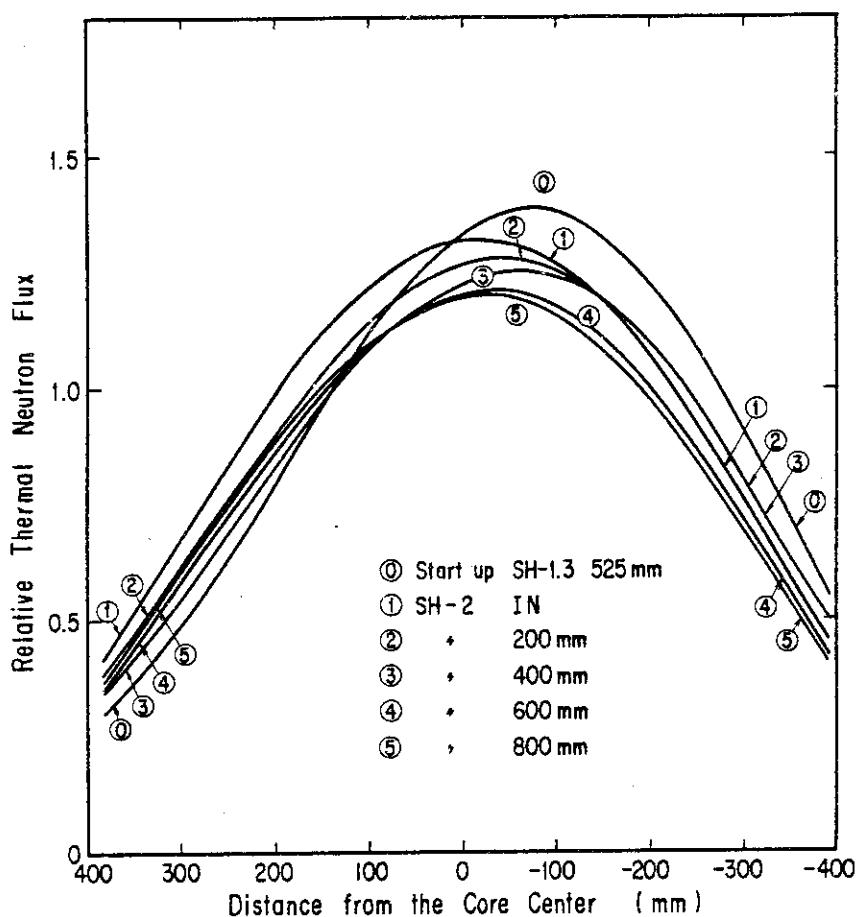


Fig.12 Axial thermal neutron flux distribution by the three dimensional calculation

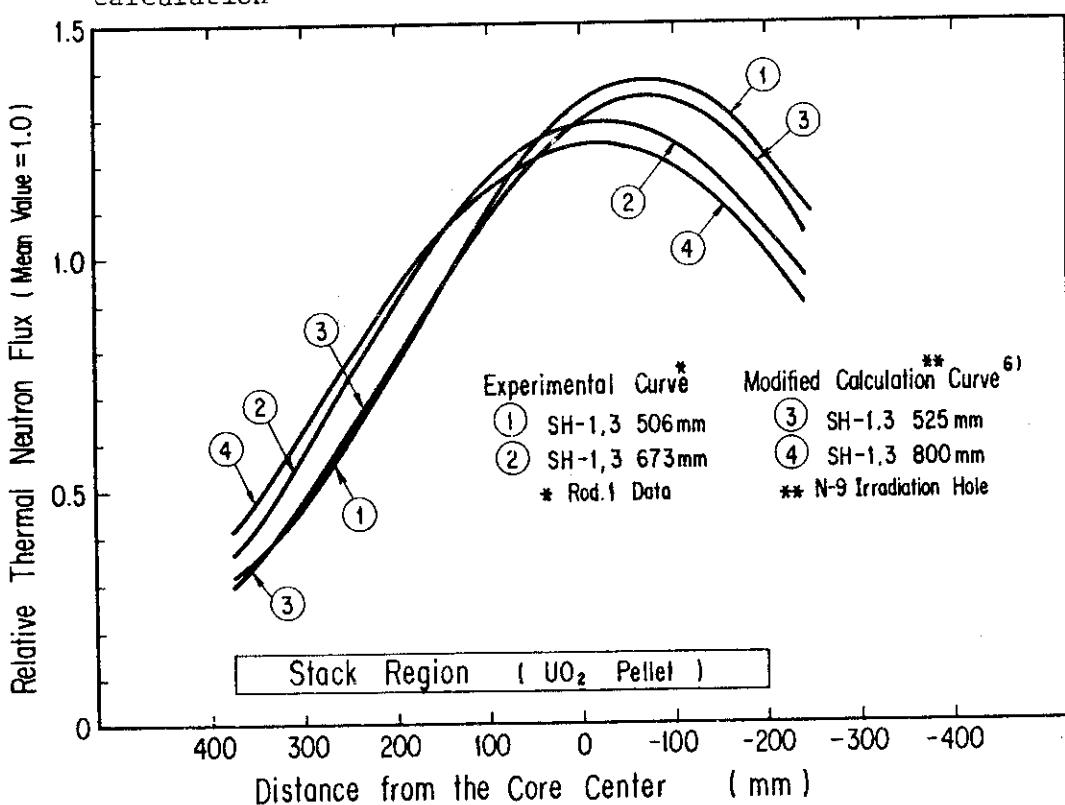


Fig.13 Modified curve of the standarized axial thermal neutron flux distribution by the three dimensional calculation

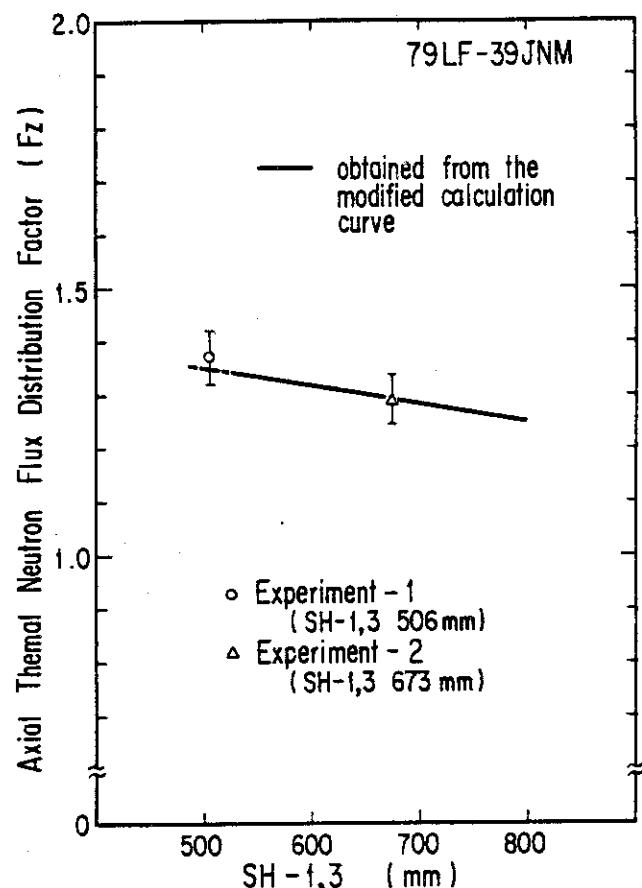


Fig.14 Relation between the axial thermal neutron flux distribution factor (F_z) and the control rod SH-1, 3 position

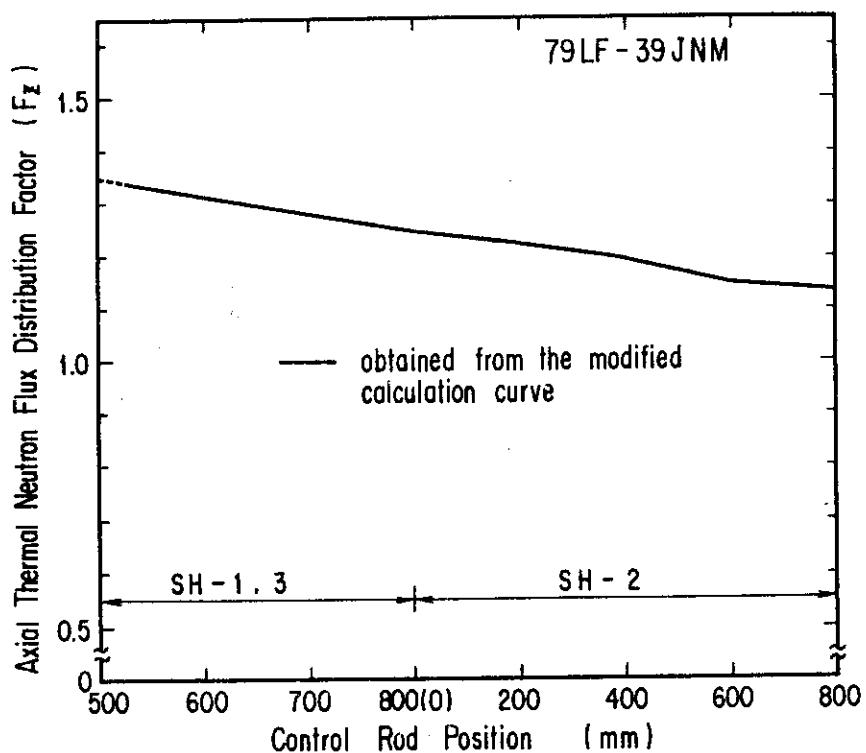


Fig.15 Relation between the axial thermal neutron flux distribution factor (F_z) and the control rod SH-1, 3 of SH-2 position

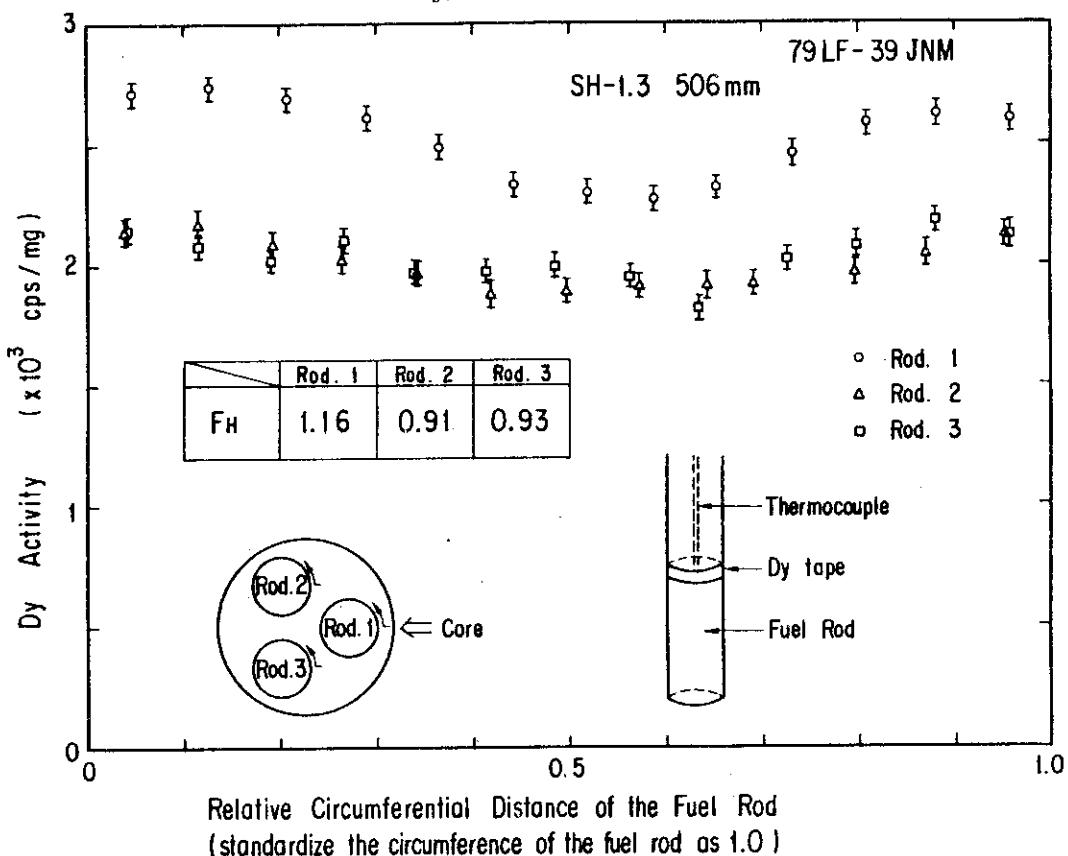


Fig.16 Activity data of the Dy tape put on the fuel rod circumference (Experiment-1)

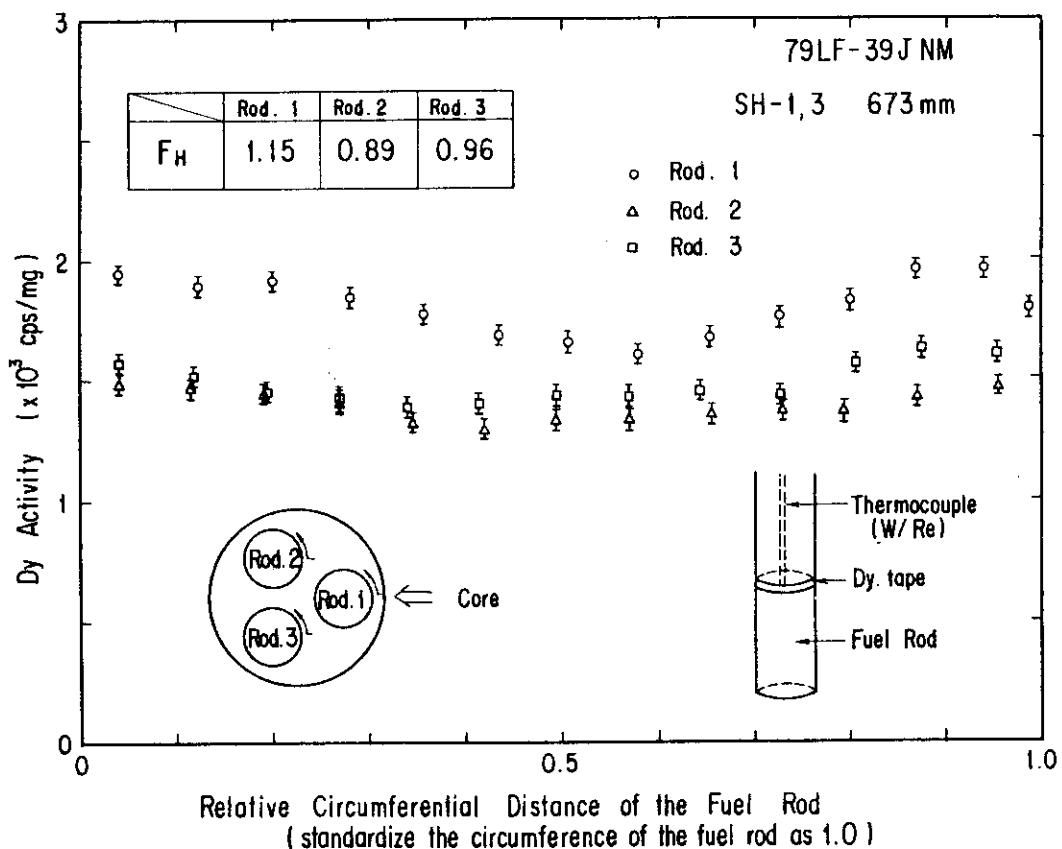


Fig.17 Activity data of the Dy tape put on the fuel rod circumference (Experiment-2)

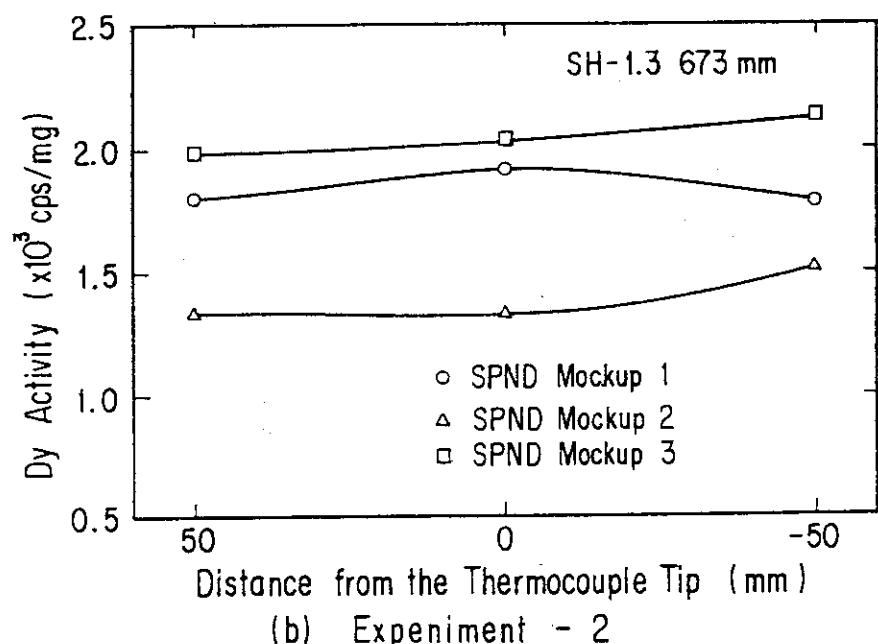
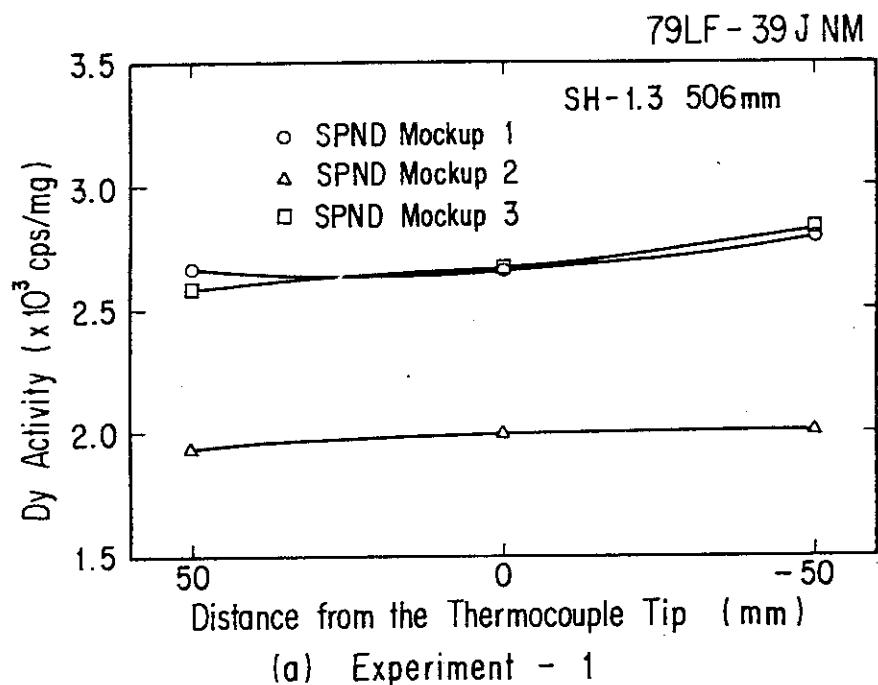
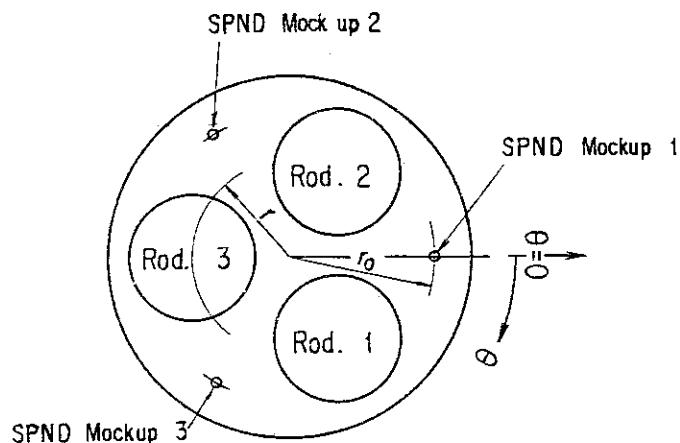


Fig.18 Activity data of the Dy tape put on the SPND mockup



The Dy tape is wound on each
SPND mockup.
(The SPND mockup is the MI cable.)

Fig.19 79LF-39JNM horizontal section arrangement

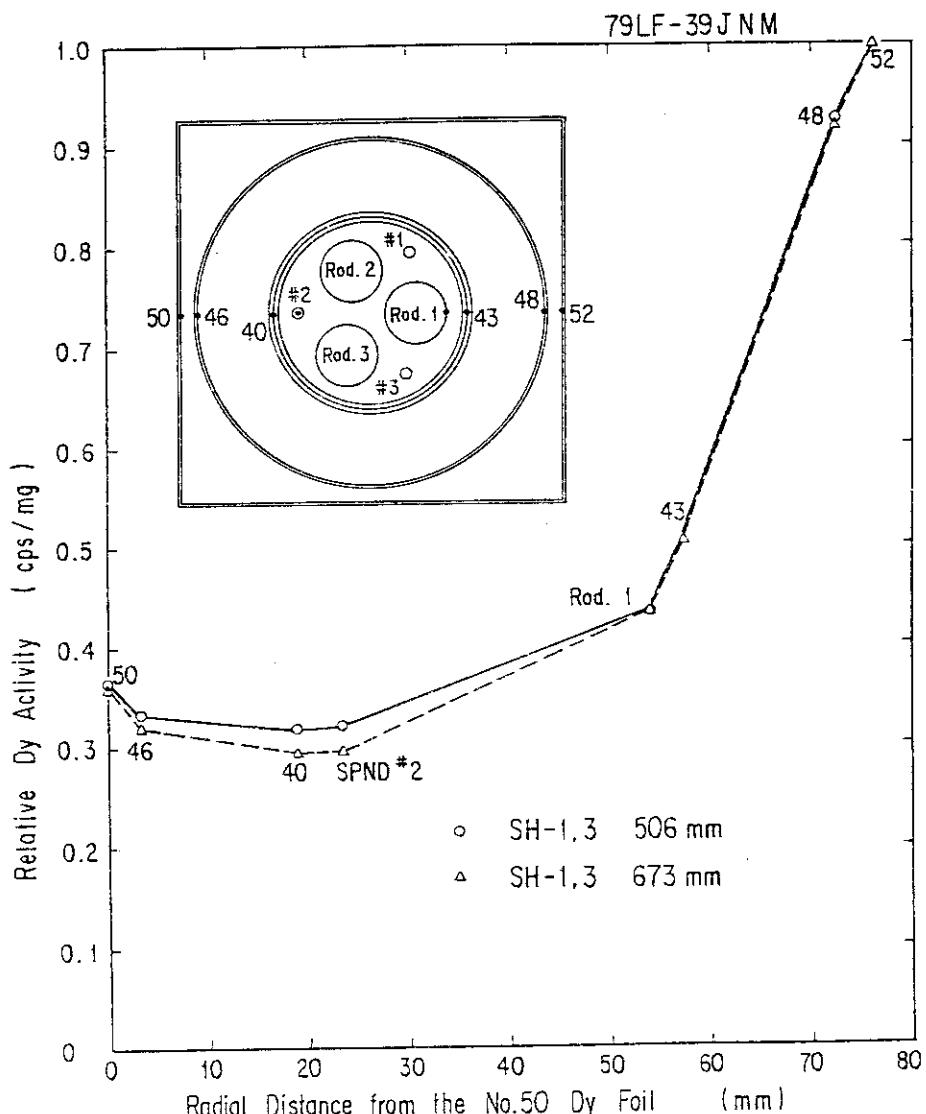


Fig.20 Horizontal thermal neutron flux distribution at the thermocouple tip position for measuring the fuel centerline temperature