

JAERI-M

85-211

JMTR出力急昇試験設備における
燃料棒出力評価法

1985年12月

河村 弘・土田 昇・桜井 文雄
石井 忠彦・瀬崎 勝二

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）で複写による実費領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 Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

JMTR 出力急昇試験設備における燃料棒出力評価法

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

河村 弘・土田 昇・桜井 文雄

石井 忠彦・瀬崎 勝二

(1985年12月10日受理)

JMTR では、軽水炉燃料の安全性研究として出力急昇試験設備 (BOCA / OSF-1) を用いて種々の出力急昇試験が行われている。本出力急昇試験では、燃料の破損しきい値等を明確にするために、燃料棒の出力を精度良く評価することが重要になる。本報告書では、BOCA / OSF-1での出力評価方法及びその評価精度について検討した。その結果、OSF-1 冷却水入口側温度の不安定性のため、一般的なカロリメトリック法、すなわち OSF-1 冷却水の出入口温度差と流量から求める方法と異なる OSF-1 冷却水出口側温度のみによる出力評価法により、燃料棒出力が 300 W/cm 及び 600 W/cm 時に各々 ± 6.5 % 及ばず ± 4.5 % の精度で評価できることが明らかになった。

Method for evaluating the linear heat rate
of the fuel rod in BOCA/OSF-1

Hiroshi KAWAMURA, Noboru THUTHIDA,
Fumio SAKURAI, Tadahiko ISHII
and Katsuzi SEZAKI

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment, JAERI

(Receive December 10, 1985)

The various power-ramp tests have been conducting by using BOCA/OSF-1 facility installed in JMTR for the safety research of LWR fuels. In the power-ramp tests, it is important to evaluate the linear heat rate of the fuel rod accurately during the tests for obtaining the threshold of the fuel failure, etc. In this paper, the method and its accuracy for evaluating the linear heat rate of the fuel rod was examined. As the method for evaluating the linear heat rate, we used the method with evaluating only the outlet temperature of the OSF-1 coolant, instead of the ordinary calorimetric method, i.e. the method using the flow rate and the temperature difference between the inlet and the outlet of the OSF-1 coolant because the inlet temperature of the OSF-1 coolant is unstable. The accuracies in evaluating the linear heat rate of the fuel rod are $\pm 6.5\%$ at 300 W/cm and $\pm 4.5\%$ at 600 W/cm, respectively.

Keywords: BOCA/OSF-1, LWR, JMTR, Power-Ramping Test, Power Evaluation, Heater Pin, Linear Heat Rate

目 次

1. 序 論	1
2. 燃料棒出力評価法	2
3. 照射試験	4
4. 照射試験結果及び考察	5
4.1 H キャップセルによる出力較正	5
4.2 キャップセルの γ 発熱	6
4.3 軸方向出力分布	6
4.4 燃料棒出力評価精度	6
5. 結 論	7
6. あとがき	7
謝 辞	7
参考文献	8
付録A ステップ状出力急昇試験時の出力評価法	33
付録B 試験結果の計算処理法	36
付録C ^3He ガス圧変化時の SPND 特性	42
付録D SPND 出力のみによる燃料棒出力の経時変化評価法	49

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Method for Evaluating the Linear Heat Rate of Fuel Rod	2
3. Irradiation Test	4
4. Results and Discussion	5
4.1 Power Calibration by H-Capsule	5
4.2 γ -Heat of Capsule	6
4.3 Axial Thermal Neutron Flux Distribution	6
4.4 Accuracy in Evaluating the Linear Heat Rate of Fuel Rod ...	6
5. Conclusion	7
6. Concluding Remarks	7
Acknowledgements	7
References	8
Appendix-A Power Evaluating Method of Fuel Rod in the Stepwise Power-Ramping Test	33
Appendix-B Method for the Statistical Analysis of the Data	36
Appendix-C SPND Characteristics during the Change of ^3He Gas Pressure	42
Appendix-D Power Evaluating Method of Fuel Rod by only SPND Output	49

Table Contents

- Table 1 Characteristics of BOCA/OSF-1
- Table 2 Accuracy in evaluating the linear heat rate of fuel rod in foreign research and test reactors
- Table 3 Irradiation test for the evaluation of the linear heat rate of the fuel rod in BOCA/OSF-1
- Table 4 Relation of the outlet temperature of OSF-1 coolant to the linear heat rate of the electric heater ($0 \rightarrow 500$ W/cm) on February 5, 1985
- Table 5 Relation of the outlet temperature of OSF-1 coolant to the linear heat rate of the electric heater ($600 \rightarrow 0$ W/cm) on February 5, 1985
- Table 6 Relation of the outlet temperature of OSF-1 coolant to the linear heat rate of the electric heater ($0 \rightarrow 500$ W/cm) on February 7, 1985
- Table 7 Relation of the outlet temperature of OSF-1 coolant to the linear heat rate of the electric heater ($600 \rightarrow 0$ W/cm) on February 7, 1985
- Table 8 Experimental results (^3He pressure, outlet temperature of OSF-1 coolant and SPND output) on February 6, 1985
- Table 9 Accuracy of Q_{A0} determination

Figure Contents

- Fig. 1 JMTR core
- Fig. 2 Cutaway of OSF-1 irradiation facility
- Fig. 3 Detail figure of core-position of OSF-1 irradiation facility
- Fig. 4 Temperature history of OSF-1 coolant during JMTR 65th cycle
- Fig. 5 Cutaway of BOCA capsule (H capsule) containing the electric heater
- Fig. 6 Cutaway of BOCA capsule (F capsule) containing the fuel rod
- Fig. 7 History pattern of OSF-1 coolant temperature in H capsule
- Fig. 8 History pattern of OSF-1 coolant temperature in F capsule
- Fig. 9 Operating history of JMTR 67th cycle
- Fig. 10 Operating history of electric heater on February 5, 1985
- Fig. 11 Operating history of electric heater on February 7, 1985
- Fig. 12 Relation of ΔT to linear heat rate of electric heater
($\Delta T = T_x - T_b$)
- Fig. 13 Irradiation history of H capsule on February 6, 1985
- Fig. 14 Axial thermal neutron flux distribution¹⁰⁾
- Fig. 15 $f_A(Z)$ curve on January 15, 1985 (81F-9J capsule)
- Fig. 16 $F_A(Z)$ curve obtained from the $f_A(Z)$ curve shown in Fig. 15
- Fig. 17 $F_A(Z)$ curve on JMTR 67 cycle (81F-9J capsule)

1. 序 論

軽水炉燃料の安全性研究として、燃料棒の出力を急昇させる、いわゆる出力急昇試験が諸外国及び我国において盛んに実施されている。諸外国では、BR-2炉（ベルギー）、DR-3炉（デンマーク）、GETR（アメリカ）、HBWR（ノルウェー）、HFR（オランダ）、OSIRIS炉（フランス）、SILOE炉（フランス）、R-2炉（スウェーデン）等の試験・研究炉で実施されており、我国では JMTR の出力急昇試験設備^{1)~4)}（以後、BOCA / OSF-1と称す）で BOCA キャプセル（Boiling water Capsule）を用いて実施中である。BOCA / OSF-1 の諸特性を Table 1 に示す。

出力急昇試験の主な目的は、出力急昇された場合の PCI / SCC 破損メカニズム及び破損しきい値の解明である。従って、出力急昇試験では燃料照射挙動の出力依存性を解明するために、燃料棒の出力を精度良く評価することが必要となる。諸外国の主な試験・研究炉における燃料棒の出力評価精度を Table 2^{5), 6)} に示す。同表に示すように出力評価精度は 5 %程度なので、JMTRにおいても同程度を目標とする。出力急昇試験方法及び照射装置のタイプも合せて Table 2 に示す。なお、照射装置のタイプとして、「N.C.」とは燃料棒の冷却水が自然循環である装置を、「F.C.」とは強制循環である装置を指す。

我々は、「照射実験法の開発」という観点から、これまで JMTR の水ループ OWL-1 を用いて燃料棒を何本か束ねた集合体形状での照射時における各燃料棒の出力評価法について種々の検討を行なってきた。^{7)~9)} 今回は、BOCA / OSF-1 における燃料棒出力評価法についての検討を試みた。

当初は、一般的なカロリメトリック法、すなわち BOCA キャプセルの外面を冷却している水（以後、OSF-1 冷却水と称す）の出入口温度差と流量から求める方法の適用を試みたが、BOCA キャプセルの偏心に伴う流路断面の不均一化等によると思われる OSF-1 冷却水入口側温度の不安定性のために、上記の出力評価精度目標値を満足できない状況になった。そこで、OSF-1 冷却水出口側温度のみにより、出力を評価することを試みた。

本報告書では、OSF-1 冷却水出口側温度のみによる出力評価法について記すとともに、その出力評価法の精度についても合せて検討する。

2. 燃料棒出力評価法

J MTR炉心をFig. 1に示す。同図中のBOCAと付記してある所が、BOCA / OSF-1照射孔である。その照射孔に試験用燃料棒を装荷したBOCAキャップセルを挿入し、燃料棒の出力急昇試験を実施する。出力急昇試験では、装荷した燃料棒の任意の軸方向位置における出力（すなわち、線出力）を正確に把握することが、試験結果を解析する上で重要な因子となる。BOCA / OSF-1では、一般的な燃料棒出力評価法であるカロリメトリック法を採用するために、BOCAキャップセル外面を冷却するOSF-1冷却水の温度を入口側、出口側の2カ所で測定する。そのため、上記の2カ所には、OSF-1冷却水温度測定用CA熱電対が各々2本づつ軸対称に取付けられている。BOCA / OSF-1の概略図及び同設備の炉心部詳細図を各々Fig. 2及びFig. 3に示す。設計段階においては、装置のこれらの熱電対から得たOSF-1冷却水の出入口温度差と流量から、約±5%以内の精度で燃料棒出力を求める計画であった。しかし、BOCAキャップセルの偏心に伴う流路断面の不均一化等によると思われるOSF-1冷却水入口側温度の不安定性のために、上記の出力評価精度目標値を満足することが困難な状況になった。ヒータピン出力をかえながらJ MTR第65サイクルに行なった出力較正試験時のOSF-1冷却水挙動をFig. 4に示す。安定な挙動を示しているOSF-1冷却水出口側温度(OUT-1, 2)に対して、OSF-1冷却水入口温度(IN-1, 2)は、非常に不安定な挙動を示している。そこで、我々は、OSF-1冷却水出口側温度のみを用いた燃料棒出力評価法を考案し、その方法の適用性について検討を加えた。以下に、2種類のBOCAキャップセル、すなわちヒータピンを装荷したキャップセル（以後Hキャップセルと称す）と燃料棒を装荷したキャップセル（以後Fキャップセルと称す）を用いて、その燃料棒出力評価法の概要について記す。なお、Hキャップセル及びFキャップセルの概略図を各々Fig. 5及びFig. 6に示す。

まず、原子炉熱出力が 50 MW 時に、H キャップセルを用いて、ヒータピン出力をかえながら OSF-1 冷却水出口側温度の変化量 ΔT (mV) とヒータピン平均出力 \bar{y} (W/cm) との相関式を求める。次に、同じく原子炉熱出力が 50 MW 時に、F キャップセルを ^3He ガス圧力 A_0 (MPa) の BOC A / OSF-1 へ挿入し、キャップセル挿入前後における OSF-1 冷却水出口側温度の変化量と上記相関式から、出口側温度変化量測定時 ($t = t_0$) の F キャップセル内の燃料棒平均出力 $\bar{Q}_{A_0}(t_0)$ (W/cm) を求める。さらに、軸方向に 3 本計装されている自己出力型中性子検出器 (SPND) 出力から、 \bar{Q}_{A_0} 評価時の軸方向出力分布曲線 $f_{A_0}(z)$ を求め、その $f_{A_0}(z)$ の平均値が 1 になるように規格化した軸方向出力分布曲線 $F_{A_0}(z)$ を求める。この $F_{A_0}(z)$ 曲線を用いて、 \bar{Q}_{A_0} 評価時 ($t = t_0$) の任意の軸方向位置 z_1 における燃料棒出力 $Q_{A_0}(t_0, z_1)$ (W/cm) が、次式により求められる。

$$Q_{A_0}(t_0, z_1) = \bar{Q}_{A_0}(t_0) \cdot F_{A_0}(t_0, z_1) \quad \dots \dots \dots (1)$$

本評価方法の主要部である、H キャップセルによる ΔT vs \bar{y} 相関式及び F キャップセル内の燃料棒の平均出力 \bar{Q}_A 。についてより詳細に記す。

$\triangle T$ vs \bar{y} 相関式を求めるためには、H キャップセルを用いた出力較正試験を行なうことが必要となる。出力較正試験時における OSF-1 冷却水出口側温度の履歴パターン例を Fig. 7 に示す。図中の Up 及び Down は、各々、H キャップセルを炉心から 1.1 m 引上げた時及び炉心へ挿入した時を表わしている。なお、1.1 m 引上げたり、再挿入したりする理由は、燃料棒を除いた BOCA キャップセル構成材による γ 発熱量を評価するためである。

T_a は上記 1.1 m 引上げた時の OSF-1 冷却水出口側温度であり、T_b 及び T_x は、各々、ヒータピン平均出力が 0 W/cm 時及び \bar{y} W/cm 時の OSF-1 冷却水出口側温度である。従って、ヒータピンが平均出力で \bar{y} W/cm 発熱した時と、0 W/cm 時における OSF-1 冷却水出口側温度の変化量 ΔT は、次式により求められる。

(2)式により求めた ΔT とヒータピン平均出力 \bar{y} (W/cm)から、燃料棒出力較正のための相関式を求める。なお、Fig. 7中の Δt は、Hキャップセルを炉心に挿入した時と炉心から1.1m引上げた時とのOSF-1冷却水出口側温度の差であり、この温度差はキャップセルの γ 発熱に起因する。

次に、F キャップセル内の燃料棒の平均出力 \bar{Q}_{A0} の求め方について記す。まず、炉心に挿入されている F キャップセルを炉心から 1.1 m 引上げ、再度炉心へ挿入した時の OSF-1 冷却水出口側温度の履歴パターン例を Fig. 8 に示す。次に、 $T_b = T_a + \Delta t$ の関係及び(2)式から、 T_x , T_a 及び Δt を用いて以下のように ΔT を求める。

この ΔT と前記燃料棒出力較正相関式から、燃料棒の平均出力 \bar{Q}_{A_0} を求めることができる。さらに、その \bar{Q}_{A_0} 評価時($t = t_0$)における $F_{A_0}(z_1)$ を求めると、(1)式より時間 t における軸方向位置 z_1 の燃料棒出力 $Q_{A_0}(t_0, z_1)$ が求まる。また、 \bar{Q}_{A_0} 評価時と同じ ${}^3\text{He}$ 圧力 A_0 時の燃料棒出力経時変化は次式により求まる。

$$Q_{AO}(t, z_1) = \frac{f_{AO}(t, z_1)}{f_{AO}(t_0, z_1)} \cdot Q_{AO}(t_0, z_1) \quad \dots \dots \dots (4)$$

なお、 ^3He 壓力をかえながらステップ状に出力急昇した時の燃料棒出力の求め方は、付録Aにその詳細を記す。

3. 照 射 試 験

2章で述べた「今回提案した燃料棒出力評価方法」の適用性について検討するために、J MTR 第67サイクル（昭和 60 年 1 月 14 日から 2 月 8 日まで）に各種の照射試験を実施した。試験項目を以下に示す。

- ① H キャップセルによる出力較正試験
- ② キャップセルの γ 発熱評価
- ③ ^3He ガス加圧時の SPND 出力特性評価試験
- ④ F キャップセル内の燃料棒出力評価試験

これらの試験について試験実施日、使用キャップセル（H キャップセルあるいは F キャップセル）及び試験パラメータを Table 3 に整理するとともに、第 67 サイクルの原子炉運転履歴と上記試験日程を Fig. 9 に図示する。なお、使用した H キャップセルの名称は 83 BM-1 J、F キャップセルの名称は 81 F-9 J である。

4. 照射試験結果及び考察

4.1 Hキャップセルによる出力較正

Hキャップセル（83 BM-1J）を用いて、OSF-1冷却水出口側温度の変化量 ΔT (mV) とヒータピン平均出力 \bar{y} (W/cm)との関係、すなわち、出力較正曲線を求めるための試験を昭和60年2月5日と2月7日の2日間実施した。各々のHキャップセル運転履歴（ヒータピン出力 y のパターン）をFig.10及びFig.11に示す。なお、ヒータピン出力 y は平均出力ではなく、軸方向熱中性子束分布のピーク位置の出力である。各ヒータピン出力ステップの保持時間は30分以上とした。これは、OSF-1冷却水出口側温度の安定性を確保するためである。OSF-1冷却水出口側温度測定用熱電対は、同一軸方向位置の2カ所に各1本づつ装着されている（以後、それら2本の熱電対の名称を各々T/S 503及びT/S 504と称す）。なお、各ヒータピン出力ステップにおけるOSF-1冷却水出口側温度データとしては、各ステップの終りから15分間に2秒毎にサンプリングしたデータ、すなわち450点のデータの平均値を採用した。2月5日と2月7日のデータをTable 4からTable 7に示す。また、ヒータピン出力が0W/cm時のOSF-1冷却水出口側温度(T_b)は時間とともに変化することがあるため、約1時間毎に測定した。ヒータピン出力 y W/cm時の ΔT を評価するために必要な T_b は、そのヒータピン出力前後において測定した T_b の平均値とした。例えば、Table 4中の100 W/cm時の T_b は、 $(1.620 + 1.612) / 2 = 1.616$ mVとなる。なお、 ΔT 評価のために必要な T_x 及び T_b は、T/S 503とT/S 504の指示値の平均値450点をさらに平均したものとした。また、Table 4中のヒータピン出力が100 W/cm時の T_x の 1.700 ± 0.006 とは、平均値が1.700で、標準偏差が±0.006であることを示す。なお、これら測定値の計算処理法については付録Bで述べる。

これらの試験結果から求めた ΔT とヒータピン出力 y との相関をFig.12に示す。従って、 ΔT とヒータピン平均出力 \bar{y} との相関式は、(5)式となる。

$$\bar{y} = 1.16 \times 10^3 \cdot \Delta T \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

なお、Fig.12中には、ヒータピン出力 y が500 W/cm時にOSF-1流量を $1.9 \text{ m}^3/\text{h}$ から $1.7 \text{ m}^3/\text{h}$ あるいは $2.1 \text{ m}^3/\text{h}$ に変えた場合のOSF-1冷却水出口側温度差 ΔT も合せて示してある（この試験は、熱の逃げ量を評価するために行なったもので、出力較正試験時以外では通常、OSF-1流量は $1.9 \text{ m}^3/\text{h}$ で一定となっている）。

Table 4～Table 7及びFig.12から得た知見を以下に示す。

- ① T/S 503及びT/S 504指示値の15分間（450点）の各平均値比、すなわち M_{503}/M_{504} が約1%以下であることから、2本の熱電対指示値に有意な差がない。
- ② T/S 503及びT/S 504指示値の各々の平均値 M とその標準偏差との比、すなわち σ/M も約1%以下であることから、各熱電対指示値に対して有意なバラツキがない。
- ③ ΔT とヒータピン平均出力との相関式は、出力が300 W/cmで±1.0%，600 W/cmで±

0.5 % の各標準偏差内で求められる。

4.2 キャプセルの γ 発熱

F キャップセル内の、燃料棒を除いたすべての構造材による Δt 発熱量（すなわち Fig. 8 中の Δt ）を評価するために、F キャップセル内の燃料棒を除いた構造と有意な差のない構造を有する H キャップセルを用いた試験を昭和 60 年 2 月 6 日に実施した。試験方法としては、H キャップセルを炉心から 1.1 m 引上げた時と、炉心へ再挿入した時の OSF-1 冷却水出口側温度の変化量から求める方法を採用した。試験結果を Table 8 及び Fig. 13 に示す。これらの結果から、 ^3He ガス圧が 3.94 MPa 時の Δt は、0.104 ($= 1.605 - 1.501$) mV となった。

4.3 軸方向出力分布

「第2章」で述べたように任意の軸方向位置における燃料棒出力を求めるためには、軸方向出力分布曲線 $F_A(z)$ 及び $f_A(z)$ を正確に把握しておく必要がある（参照(1)式及び(2)式）。以下に、 $F_A(z)$ 曲線及び $f_A(z)$ 曲線の求め方を示す。

SPND の測定点（3点）のみで、正確な軸方向出力分布を求めることはできないため、Fig. 14 に示す 3 次元核計算により求められた軸方向熱中性子束分布曲線¹⁰⁾を補助曲線として用い、SPND 測定点 3 点と Fig. 14 から 25 点、合計 28 点を 7 次の最小二乗法でフィッティングして $f_A(z)$ 曲線及び $F_A(z)$ 曲線を求めた。実例として、JMTR 第 67 サイクルの 81F-9J キャップセル装荷時における昭和 60 年 1 月 15 日の $f_A(z)$ 曲線及び $F_A(z)$ 曲線を各々 Fig. 15 及び Fig. 16 に示す。また、JMTR 第 67 サイクル時の種々の時点における $F_A(z)$ 曲線を Fig. 17 に示す。

Fig. 15 ~ Fig. 17 から得た知見を以下に示す。

- Fig. 15 から, $f_A(z)$ と SPND 測定値 3 点のフィッティング誤差は ±1 % 以内である。
 - Fig. 16 及び Fig. 17 から, $F_A(z)$ 曲線が運転サイクル中であまり変化しないこと及びピーキング係数が大抵 1.12 である。

なお、本分布評価に用いたSPNDの照射時諸特性については付録Cで詳細に述べる。

4.4 燃料棒出力評価精度

これまでに述べてきた「OSF-1冷却水出口側温度のみによる燃料棒出力評価方法」、すなわち燃料棒出力 Q_{A_0} について、その評価精度を詳細に検討した。検討項目及び各検討項目の精度等を Table 9 に示す。同表より、 Q_{A_0} の評価精度 ϵ は次式から求められる。

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \dots + \epsilon_{12}^2 + \epsilon_{13}^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

(6)式とTable 9中の値より、 \bar{Q}_{A0} が300 W/cm時及び600 W/cm時の出力評価精度は、各々±6.5 %及び±4.5 %（標準偏差1σ値）となった。

5. 結 論

OSF-1 冷却水出口側温度のみによる燃料棒出力評価について各種の検討を行なった。これらの検討により得た結果を以下に示す。

- ① H キャップセルを用いて行なった出力較正試験から、ヒータピン平均出力 \bar{y} (W/cm)とOSF-1 冷却水出口側温度差 ΔT との相関式を求めた。その結果を以下に示す。

$$\bar{y} = 1.16 \times 10^3 \cdot \Delta T$$

なお、本相関式の標準偏差 (1σ) は、 \bar{y} が 300 W/cm で $\pm 1.0\%$ 、 600 W/cm で $\pm 0.5\%$ である。

- ② OSF-1 冷却水出口側温度のみにより燃料棒出力 Q_A を求める場合の出力評価精度は、 \bar{Q}_A が $300 \sim 600 \text{ W/cm}$ の範囲内では $\pm 4.5\% \sim \pm 6.5\%$ である。

6. あ と が き

将来、JMTR の OSF-1 照射設備を用いて高燃焼度の高性能燃料の出力急昇試験が予定されており、なお一層の高い出力評価精度が望まれる。従って、OSF-1 冷却水出口側温度のみによる出力評価法をさらに確証するため、今後も電気ヒータピンを内蔵するキャップセルを用いた出力較正試験を実施し、キャップセルの γ 発熱による OSF-1 出口側冷却水温度の経時変化等について検討していく必要がある。

また、付録 A に示した評価方法以外のより簡便な評価方法 (${}^3\text{He}$ ガス圧変化時の燃料棒出力経時変化を SPND のみで追っていく方法) についても、その評価精度を含めた検討が必要である。この出力評価方法についての概略を付録 D に示す。

謝 辞

本報告書をまとめる上で、計画課長 小山田六郎氏に有意気な助言をいただいた。出力較正試験等を実施する上で、照射第 2 課の大津 洋氏、浦本敏正氏他 BOCA 運転グループの方々に多大な御支援をいただいた。また、出力較正試験時等に得た各種データを解析するために千代田メイントナンス(株)の照沼光男氏にデータ処理用プログラムを作成していただいた。

以上、記して謝意を表します。

5. 結 論

OSF-1 冷却水出口側温度のみによる燃料棒出力評価について各種の検討を行なった。これらの検討により得た結果を以下に示す。

- ① H キャップセルを用いて行なった出力較正試験から、ヒータピン平均出力 \bar{y} (W/cm)とOSF-1 冷却水出口側温度差 ΔT との相関式を求めた。その結果を以下に示す。

$$\bar{y} = 1.16 \times 10^3 \cdot \Delta T$$

なお、本相関式の標準偏差 (1σ) は、 \bar{y} が 300 W/cm で $\pm 1.0\%$ 、 600 W/cm で $\pm 0.5\%$ である。

- ② OSF-1 冷却水出口側温度のみにより燃料棒出力 Q_{A0} を求める場合の出力評価精度は、 \bar{Q}_{A0} が $300 \sim 600 \text{ W/cm}$ の範囲内では $\pm 4.5\% \sim \pm 6.5\%$ である。

6. あ と が き

将来、JMTR の OSF-1 照射設備を用いて高燃焼度の高性能燃料の出力急昇試験が予定されており、なお一層の高い出力評価精度が望まれる。従って、OSF-1 冷却水出口側温度のみによる出力評価法をさらに確証するため、今後も電気ヒータピンを内蔵するキャップセルを用いた出力較正試験を実施し、キャップセルの γ 発熱による OSF-1 出口側冷却水温度の経時変化等について検討していく必要がある。

また、付録 A に示した評価方法以外のより簡便な評価方法 (${}^3\text{He}$ ガス圧変化時の燃料棒出力経時変化を SPND のみで追っていく方法) についても、その評価精度を含めた検討が必要である。この出力評価方法についての概略を付録 D に示す。

謝 辞

本報告書をまとめる上で、計画課長 小山田六郎氏に有意気な助言をいただいた。出力較正試験等を実施する上で、照射第2課の大津 洋氏、浦本敏正氏他 BOCA 運転グループの方々に多大な御支援をいただいた。また、出力較正試験時等に得た各種データを解析するために千代田メイントナンス(株)の照沼光男氏にデータ処理用プログラムを作成していただいた。

以上、記して謝意を表します。

5. 結 論

OSF-1冷却水出口側温度のみによる燃料棒出力評価について各種の検討を行なった。これらの検討により得た結果を以下に示す。

- ① H キャップセルを用いて行なった出力較正試験から、ヒータピン平均出力 \bar{y} (W/cm)とOSF-1冷却水出口側温度差 ΔT との相関式を求めた。その結果を以下に示す。

$$\bar{y} = 1.16 \times 10^3 \cdot \Delta T$$

なお、本相関式の標準偏差 (1σ) は、 \bar{y} が 300 W/cm で $\pm 1.0\%$ 、 600 W/cm で $\pm 0.5\%$ である。

- ② OSF-1冷却水出口側温度のみにより燃料棒出力 Q_{A0} を求める場合の出力評価精度は、 \bar{Q}_{A0} が $300 \sim 600 \text{ W/cm}$ の範囲内では $\pm 4.5\% \sim \pm 6.5\%$ である。

6. あ と が き

将来、JMTRのOSF-1照射設備を用いて高燃焼度の高性能燃料の出力急昇試験が予定されており、なお一層の高い出力評価精度が望まれる。従って、OSF-1冷却水出口側温度のみによる出力評価法をさらに確証するため、今後も電気ヒータピンを内蔵するキャップセルを用いた出力較正試験を実施し、キャップセルの γ 発熱によるOSF-1出口側冷却水温度の経時変化等について検討していく必要がある。

また、付録Aに示した評価方法以外のより簡便な評価方法 (${}^3\text{He}$ ガス圧変化時の燃料棒出力経時変化をSPNDのみで追っていく方法) についても、その評価精度を含めた検討が必要である。この出力評価方法についての概略を付録Dに示す。

謝 辞

本報告書をまとめる上で、計画課長 小山田六郎氏に有意義な助言をいただいた。出力較正試験等を実施する上で、照射第2課の大津 洋氏、浦本敏正氏他BOCA運転グループの方々に多大な御支援をいただいた。また、出力較正試験時等に得た各種データを解析するために千代田メイントナンス(株)の照沼光男氏にデータ処理用プログラムを作成していただいた。

以上、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 材料試験炉部編 : JAERI -M 83-053, " JMTR 照射ハンドブック ", (1983)
- 2) 中田宏勝, 石井忠彦, 他 : JAERI -M 8533, " ^3He - BOCA 出力急昇試験設備の開発・
1 (開発計画と設備概要) ", (1979)
- 3) 中田宏勝, 濑崎勝二, 他 : JAERI -M 9343, " ^3He - BOCA 出力急昇試験設備の開発・
2 (試験計画と ^3He - BOCA の設計) ", (1981)
- 4) 中田宏勝, 濑崎勝二, 他 : JAERI -M 85-021, " JMTR 出力急昇試験設備の開発(その
3), (BOCA 照射設備特性試験の結果) ", (1985)
- 5) G. Rönnberg, et al : " Power ramp test technique at Studsvik ", Proceedings of
the KTG / ENS / JRC meeting on ramping and load following behavior of reactor
fuel, Petten (1978)
- 6) 原子力安全研究協会編 : NEN-ANSEN No. 10, " 軽水炉燃料の PCI 破損の研究の現
状 ", (1980)
- 7) 安藤弘栄, 河村弘, 他 : JAERI -M 9202, " JMTR における燃料中心温度測定実験(II)
- 第 1 次燃料試料の実験解析 - ", (1980)
- 8) 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)
- 9) 河村弘, 安藤弘栄, 他 : 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)
- 10) 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)

Table 1 Characteristics of BOCA/OSF-1

Item	Specification	
OSF-1 Position in Core	D - 9	
Thermal Neutron Flux	$1.2 \sim 2.6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\cdot\text{s}$	
Fast Neutron Flux	$2 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\cdot\text{s}$	
γ -Heat Rate	2 W/g	
Power Increment Ratio	2.4 (Max.)	
Power Ramp Rate	Power Up	$290 \sim 0.05 \text{ W/cm}\cdot\text{min}$
	Power Down	$29 \sim 5 \text{ W/cm}\cdot\text{min}$

Table 2 Accuracy in evaluating the linear heat rate of fuel rod in foreign research and test reactors

Item Reactor	Power Ramp Method	Facility Type	Accuracy ^{*1}
BR-2	VNS (^3He) VIC ($^3\text{He}-\text{Cd}$)	N.C.	$\pm 5\%$
DR-3	Change of reactor power	F.C.	$\pm 5\%$
HBWR	PSR (^3He) PCR (Ag)	F.C.	$\pm 5\%$
HFR	Change of distance from reactor core	N.C.	$\pm 5\%$
OSIRIS	Change of distance from reactor core	F.C.	$\pm 2\%$
R-2	Loop (^3He)	F.C.	$\pm 2.3\%$

(N.C. : Natural Circulation)
(F.C. : Forced Circulation)

* 1 Accuracy of L.H.R. evaluation of fuel rod

Table 3 Irradiation test for the evaluation of the linear heat rate
of the fuel rod in BOCA/OSF-1

Test Aim	Test Data	Using Capsule	Test Parameter		
Evaluation of Correlation between L.H.R. and OSF-1 Coolant Temperature	1985. 2. 5	H-Capsule	³ He Pressure	3.95MPa	
	1985. 2. 7			0.17MPa	
r-Heat Evaluation of Capsule	1985. 2. 6	H-Capsule	—		
Evaluation of Effect of ³ He Pressure upon SPND Output	1985. 2. 5	H-Capsule	—		
	1985. 2. 7		—		
	1985. 1. 17	F-Capsule	³ He Pressure	—	
	1985. 1. 19				
L.H.R. Evaluation of Fuel Rod	1985. 1. 16	F-Capsule	—		
	1985. 1. 18		—		

(L.H.R. ; Linear Heat rate)

Table 4 Relation of the outlet temperature of OSF-1 coolant to the linear heat rate of the electric heater ($0 \rightarrow 500 \text{ W/cm}$) on February 5, 1985

1985.2.5

P (W/cm)	Item	$(R_{503} + R_{504}) / 2$			M_{503}	$\sigma / M (\%)$	
		T _a	T _b	T _a - T _b		503	504
0	—	1.620 ± 0.006	—	0	0.996	0.50	0.49
100	1.700 ± 0.006	—	—	0.084	0.996	0.47	0.47
200	1.767 ± 0.007	—	—	0.151	0.996	0.51	0.56
0	—	1.612 ± 0.006	—	—	0.996	0.50	0.56
300	1.851 ± 0.0085	—	—	0.235	0.989	0.59	0.59
400	1.930 ± 0.0075	—	—	0.314	0.990	0.52	0.52
0	—	1.620 ± 0.006	—	—	0.996	0.56	0.49
500	2.009 ± 0.007	—	—	0.391	0.995	0.45	0.55
0	—	1.617 ± 0.007	0	—	0.999	0.50	0.62

P : Linear heat rate of electric heater (W/cm)

R : Raw data of OSF-1 coolant temperature (mV)

M : Mean value of R for 15 minutes (mV)

 σ : Standard deviation of M (mV)

Table 5 Relation of the outlet temperature of OSF-1 coolant to the linear heat rate of the electric heater ($600 \rightarrow 0$ W/cm) on February 5, 1985

1985. 2. 5

P (W/cm)	$(R_{503} + R_{504}) / 2$			M_{503}	σ / M (%)	
	T_x	T_b	$T_x - T_b$		M_{504}	503
600	2.092 ± 0.008	—	0.476	0.994	0.58	0.57
0	—	1.615 ± 0.006	—	1.000	0.50	0.56
500	2.014 ± 0.0075	—	0.409	0.995	0.50	0.55
400	1.935 ± 0.007	—	0.330	0.994	0.47	0.62
0	—	1.596 ± 0.0095	—	0.998	0.69	0.75
300	1.825 ± 0.010	—	0.233	0.993	0.71	0.71
0	—	1.588 ± 0.007	—	0.999	0.63	0.57
200	1.752 ± 0.007	—	0.164	0.995	0.51	0.57
100	1.668 ± 0.0065	—	0.080	0.996	0.60	0.54
0	—	1.588 ± 0.006	—	0.996	0.57	0.57

P : Linear heat rate of electric heater (W/cm)

R : Raw data of OSF-1 coolant temperature (mV)

M : Mean value of R for 15 minutes (mV)

 σ : Standard deviation of M (mV)

Table 6 Relation of the outlet temperature of OSF-1 coolant to the linear heat rate of the electric heater ($0 \rightarrow 500 \text{ W/cm}$) on February 7, 1985

1985.2.7

P (W/cm)	Item	$(R_{503} + R_{504}) / 2$			M_{503}	$\sigma / M (\%)$	
		T _x	T _b	T _x - T _b		M ₅₀₄	503
0	—	1.635 ± 0.006	—	0	0.996	0.55	0.55
100	1.716 ± 0.0065	—	—	0.075	0.995	0.53	0.52
200	1.793 ± 0.007	—	—	0.154	0.999	0.73	0.73
0	—	1.647 ± 0.0075	—	—	0.999	0.55	0.67
300	1.897 ± 0.0105	—	—	0.238	1.005	1.16	0.74
400	1.986 ± 0.0135	—	—	0.327	0.994	1.06	0.70
0	—	1.672 ± 0.0075	—	—	0.999	0.54	0.54
500	2.061 ± 0.0125	—	—	0.396	0.994	0.92	0.68
0	—	1.659 ± 0.006	—	—	0.998	0.42	0.60

P : Linear heat rate of electric heater (W/cm)

R : Raw data of OSF-1 coolant temperature (mV)

M : Mean value of R for 15 minutes (mV)

 σ : Standard deviation of M (mV)

Table 7 Relation of the outlet temperature of OSF-1 coolant to the linear heat rate of the electric heater ($600 \rightarrow 0$ W/cm) on February 7, 1985

P (W/cm)	$(R_{503} + R_{504}) / 2$			M_{503}	σ / M (%)	
	T _x	T _b	T _x - T _b		M_{504}	5 0 3
6 0 0	2.127 ± 0.0085	—	0.470	0.990	0.52	0.51
5 0 0	2.054 ± 0.012	—	0.397	0.996	0.98	0.73
0	—	1.656 ± 0.0065	—	1.000	0.48	0.60
4 0 0	1.980 ± 0.0145	—	0.323	1.001	1.36	0.81
3 0 0	1.907 ± 0.0105	—	0.250	1.011	1.10	0.84
0	—	1.658 ± 0.007	—	1.001	0.54	0.60
2 0 0	1.816 ± 0.0075	—	0.163	0.999	0.77	0.66
1 0 0	1.730 ± 0.0060	—	0.077	0.996	0.52	0.52
0	—	1.648 ± 0.0075	0	1.002	0.67	0.61

P : Linear heat rate of electric heater (W/cm)

R : Raw data of OSF-1 coolant temperature (mV)

M : Mean value of R for 15 minutes (mV)

σ : Standard deviation of M (mV)

Table 8 Experimental results (^3He pressure, outlet temperature of OSF-1 coolant and SPND output) on February 6, 1985

No.*	Item	^3He Pressure (MPa)	Outlet Temperature of OSF-1 Coolant (mV)	SPND Output (mV)
(1)		3.9 4	1.6 0 5	1 8 0.9
(2)		3.9 4	1.5 0 1	0.
(3)		0.1 7	1.5 0 9	0.
(4)		0.1 7	1.6 2 7	4 5 2.1

1985. 2. 6

* See Fig. 13

Table 9 Accuracy of Q_{AO} determinationFlow rate of OSF-1 Coolant

Reproducibity of differential pressure transducer	: ϵ_1	$\pm 0.1\%$
Accuracy of distributer	: ϵ_2	$\pm 0.1\%$
Reproducibity of A/D converter	: ϵ_3	$\pm 0.2\%$

Outlet Temperature of OSF-1 Coolant

Accuracy of zero point compensator ($40 \pm 0.5^\circ\text{C}$)	: ϵ_4	$\pm 0.1\%$
Reproducibity of A/D converter	: ϵ_5	$\pm 1.5\%$

Correlation Curve for Q_{AO} Estimate

Scatter of outlet temperature of OSF-1 coolant	: ϵ_6	$\pm 1.0\%$
Accuracy of power of heater rod	: ϵ_7	$\pm 0.2\%$
Accuracy of power indicater	: ϵ_8	$\pm 0.2\%$
Accuracy of A/D converter	: ϵ_9	$\pm 0.2\%$
Accuracy of fitting the correlation curve	: ϵ_{10}	
at 300 W/cm		$\pm 1.0\%$
at 600 W/cm		$\pm 0.5\%$
Accuracy of ΔT	: ϵ_{11}	
at 300 W/cm		$\pm 5.4\%$
at 600 W/cm		$\pm 2.7\%$

Axial Power Distribution (f_A or F_A)

Scatter of SPND power	: ϵ_{11}	$\pm 0.5\%$
Accuracy of fuel stack length ($\pm 1/400$)	: ϵ_{12}	$\pm 0.3\%$
Scatter among powers of three SPNDs at same thermal neutron flux	: ϵ_{13}	$\pm 3\%$



Fuel Power (W/cm)	Accuracy of Q_{AO} Determination (%)
300	± 6.5
600	± 4.5

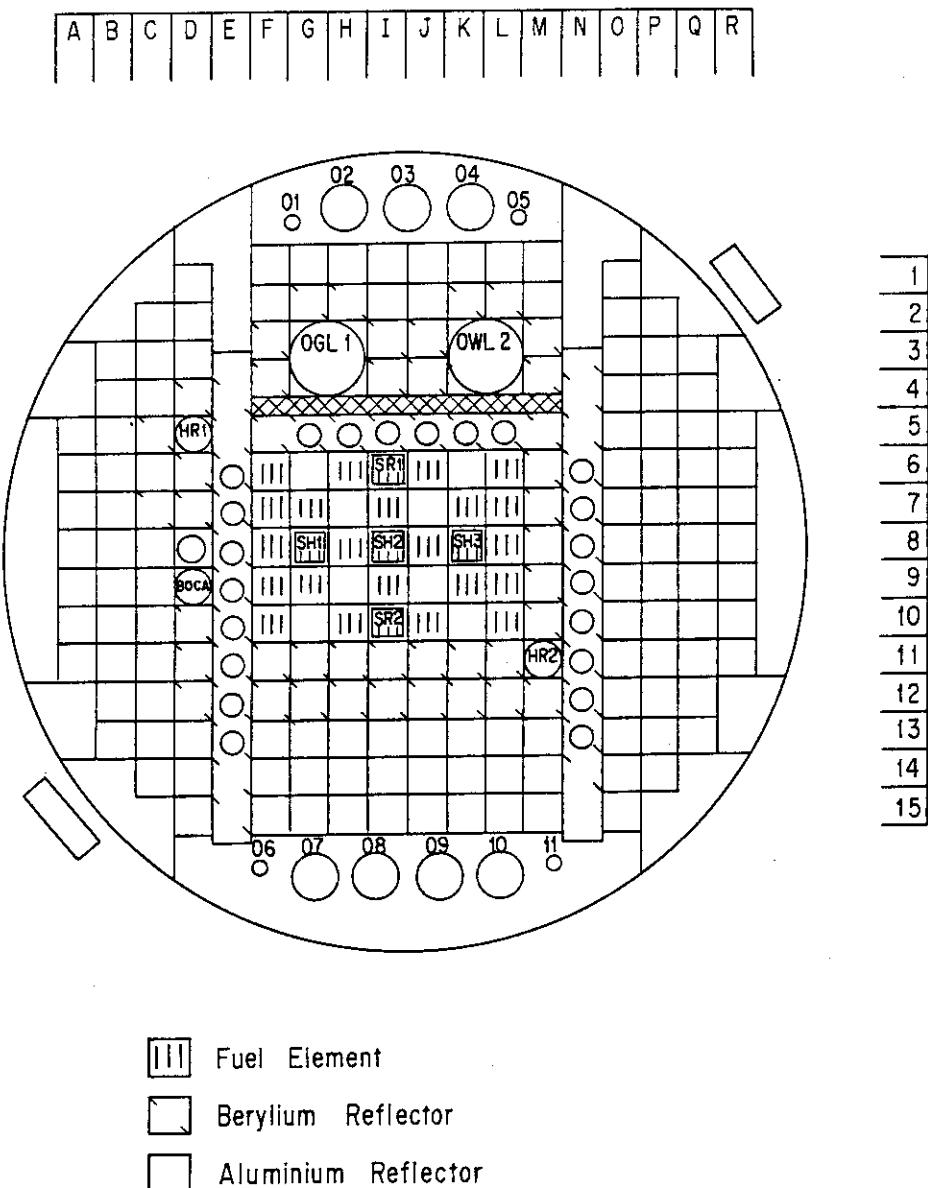


Fig. 1 JMTR core

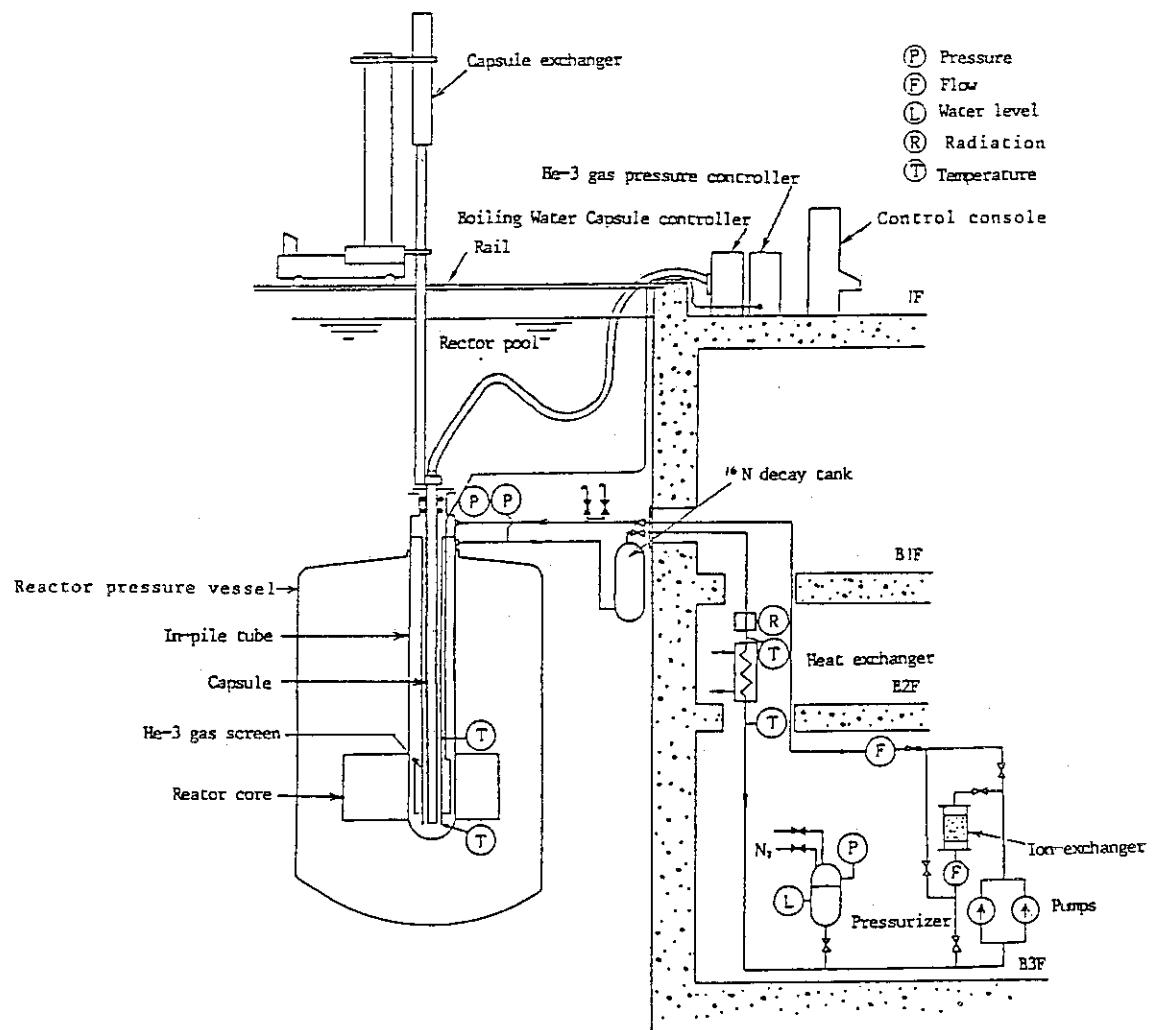


Fig. 2 Cutaway of OSF-1 irradiation facility

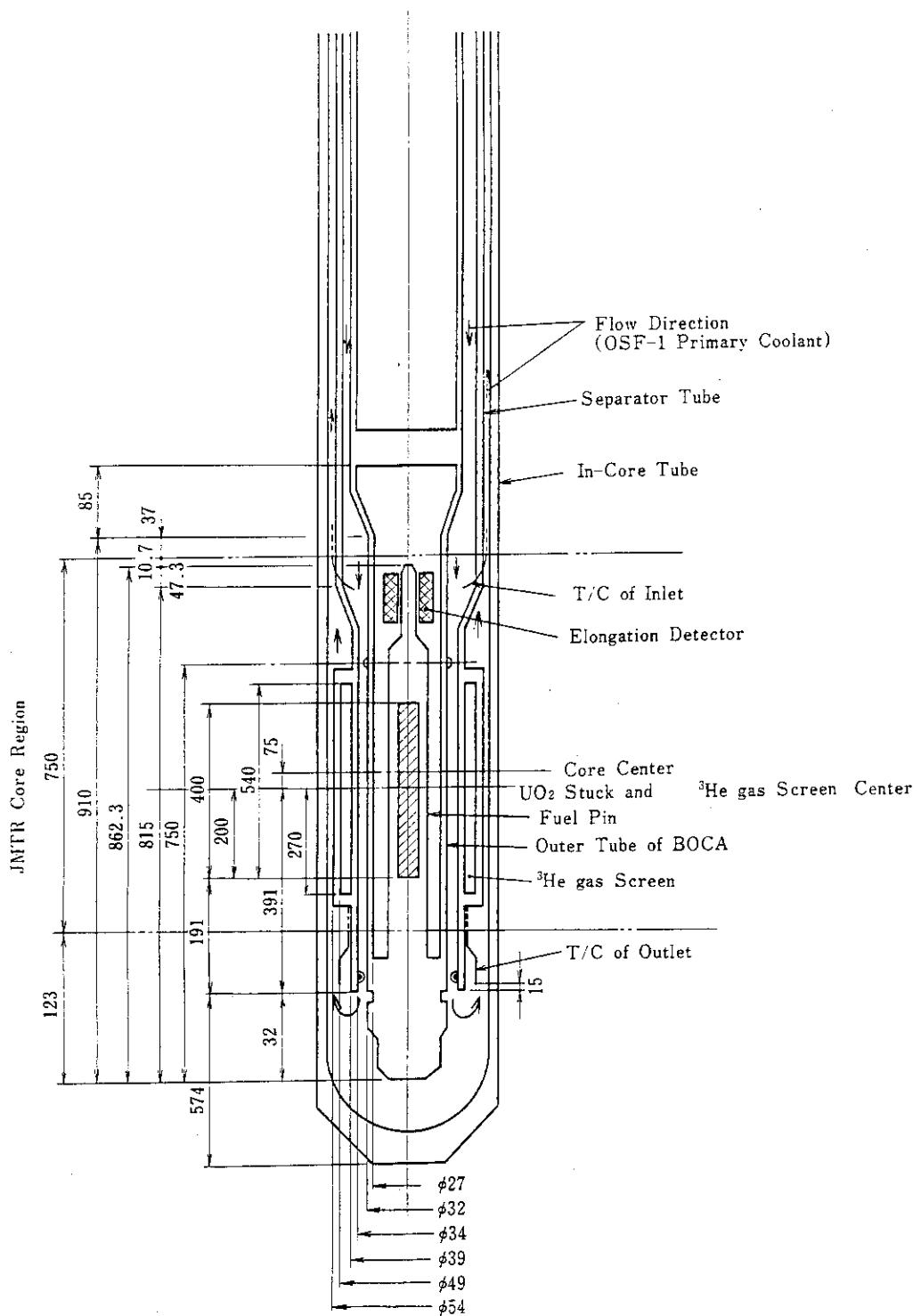


Fig. 3 Detail figure of core-position of OSF-1 irradiation facility

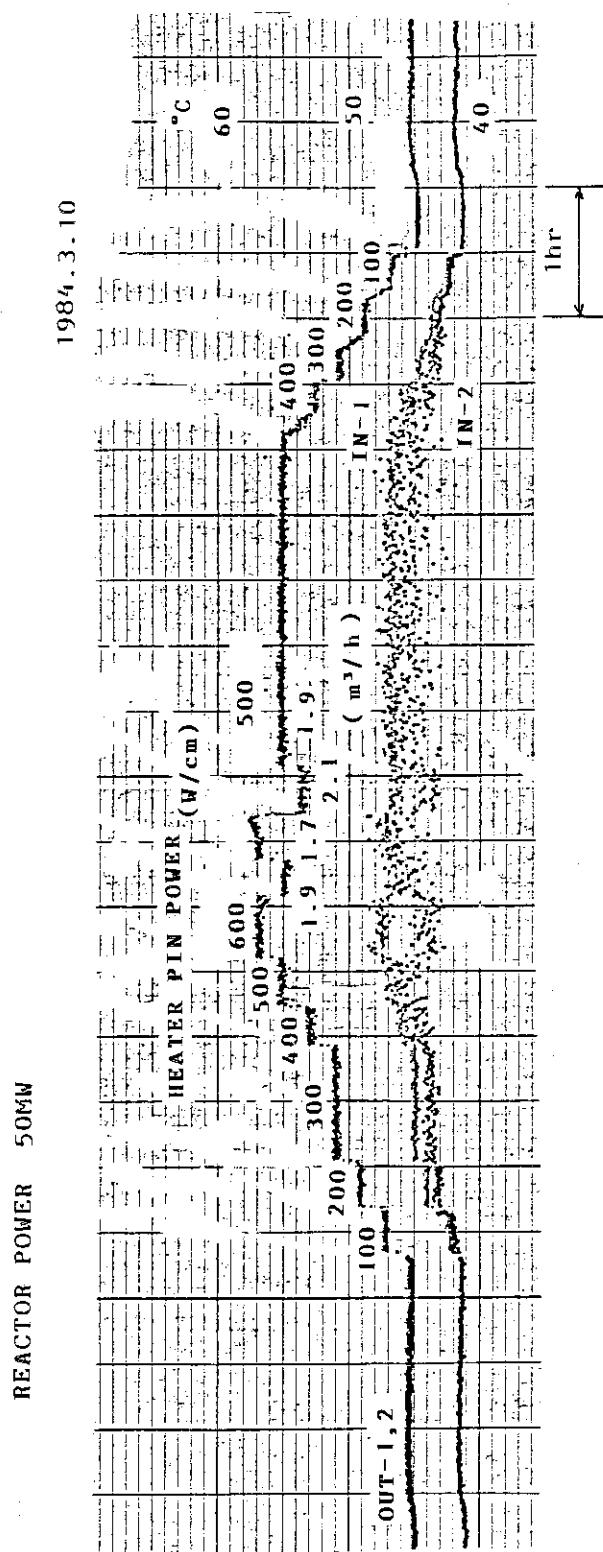


Fig. 4 Temperature history of OSF-1 coolant during JMTR 65th cycle

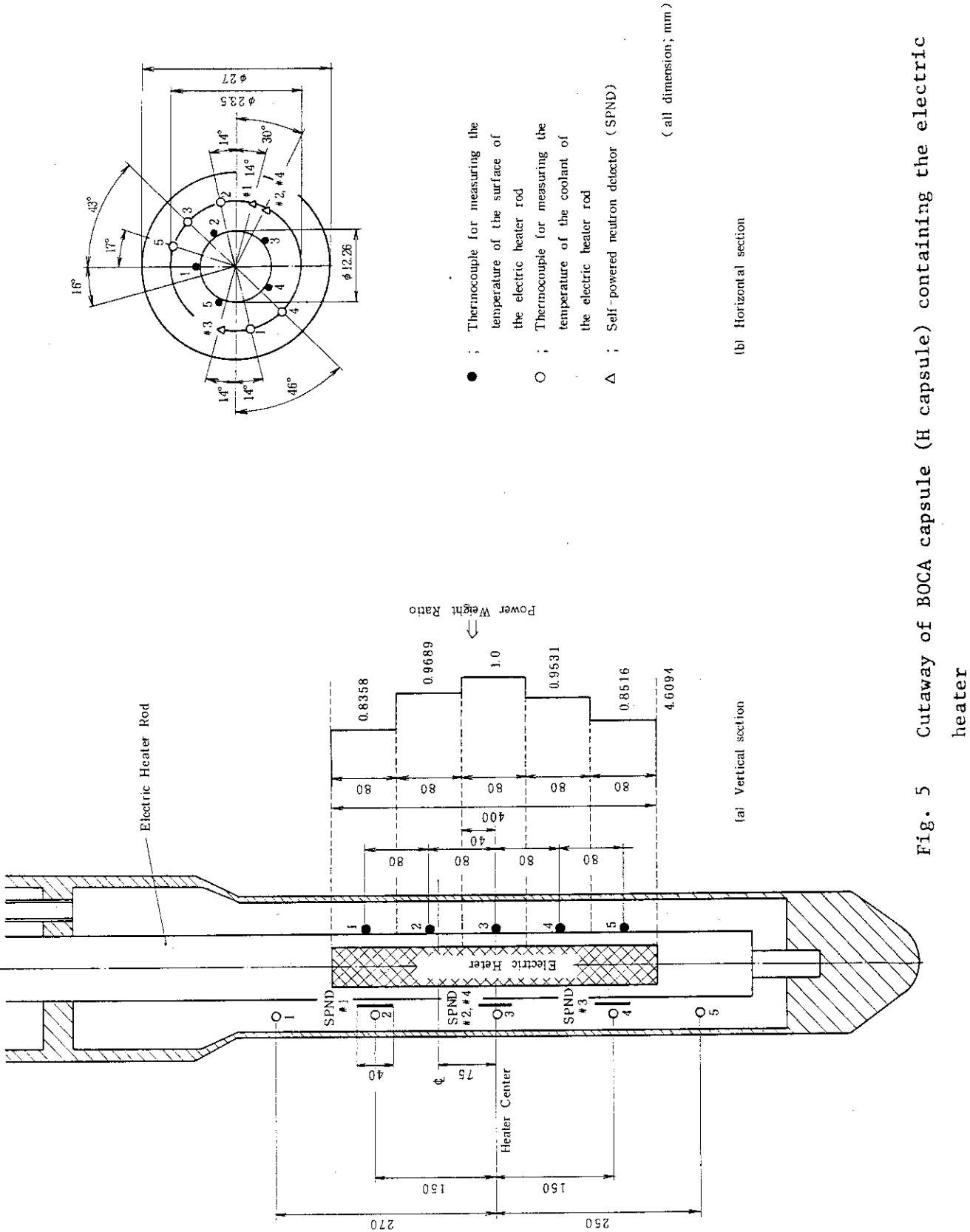


Fig. 5 Cutaway of BOCA capsule (H capsule) containing the electric heater

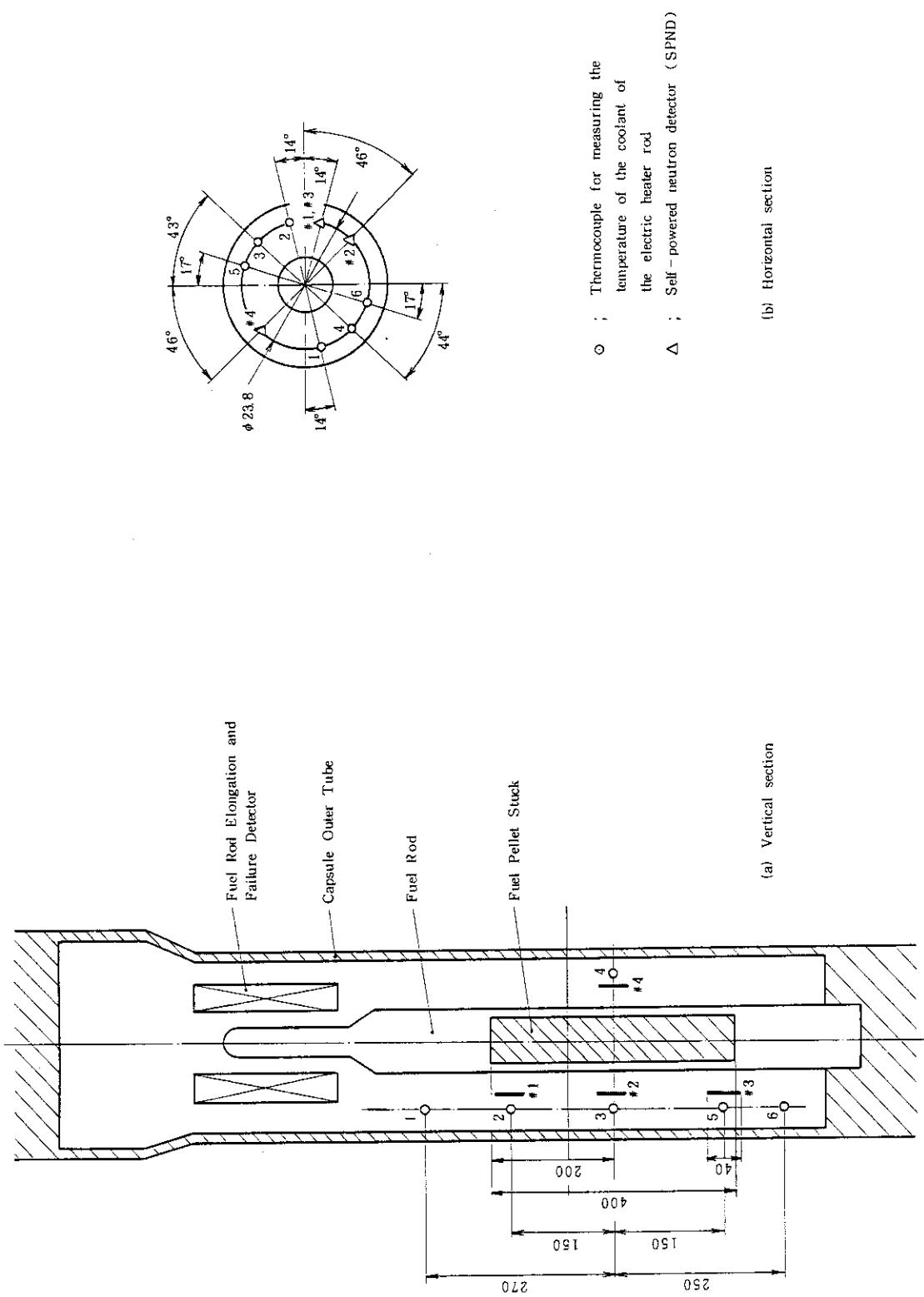
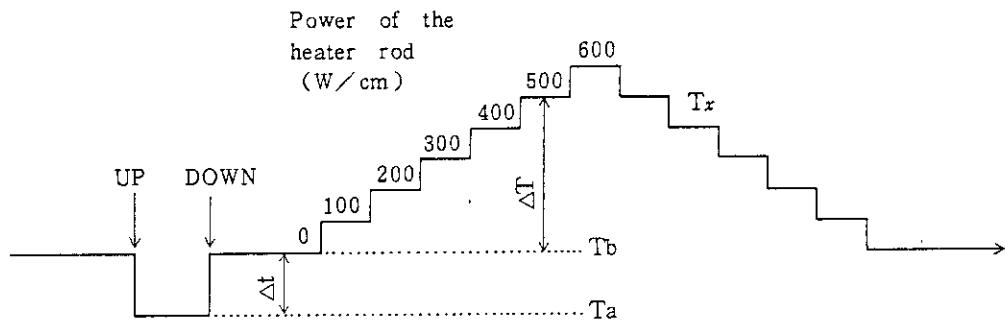


Fig. 6 Cutaway of BOCA capsule (F capsule) containing the fuel rod

UP : The capsule is pulled up 1.1 m from the normal position
 DOWN : The capsule is re-inserted to the normal position



T_x : Outlet temperature of the OSF-1 coolant

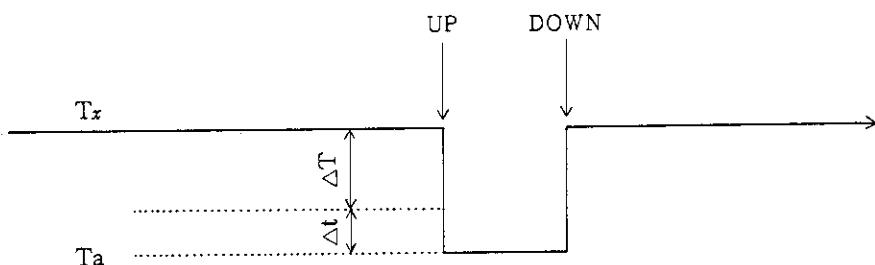
T_b : T_x at 0 W/cm

T_a : T_x when the capsule is pulled up 1.1 m

$$\begin{aligned} (\Delta T &= T_x - T_b) \\ (\Delta t &= T_b - T_a) \end{aligned}$$

Fig. 7 History pattern of OSF-1 coolant temperature in H capsule

UP : The capsule is pulled up 1.1 m from the normal position
 DOWN : The capsule is re-inserted to the normal position



T_x : Outlet temperature of the OSF-1 coolant

T_a : T_x when the capsule is pulled up 1.1 m

$$(\Delta T = T_x - T_a - \Delta t)$$

Fig. 8 History pattern of OSF-1 coolant temperature in F capsule

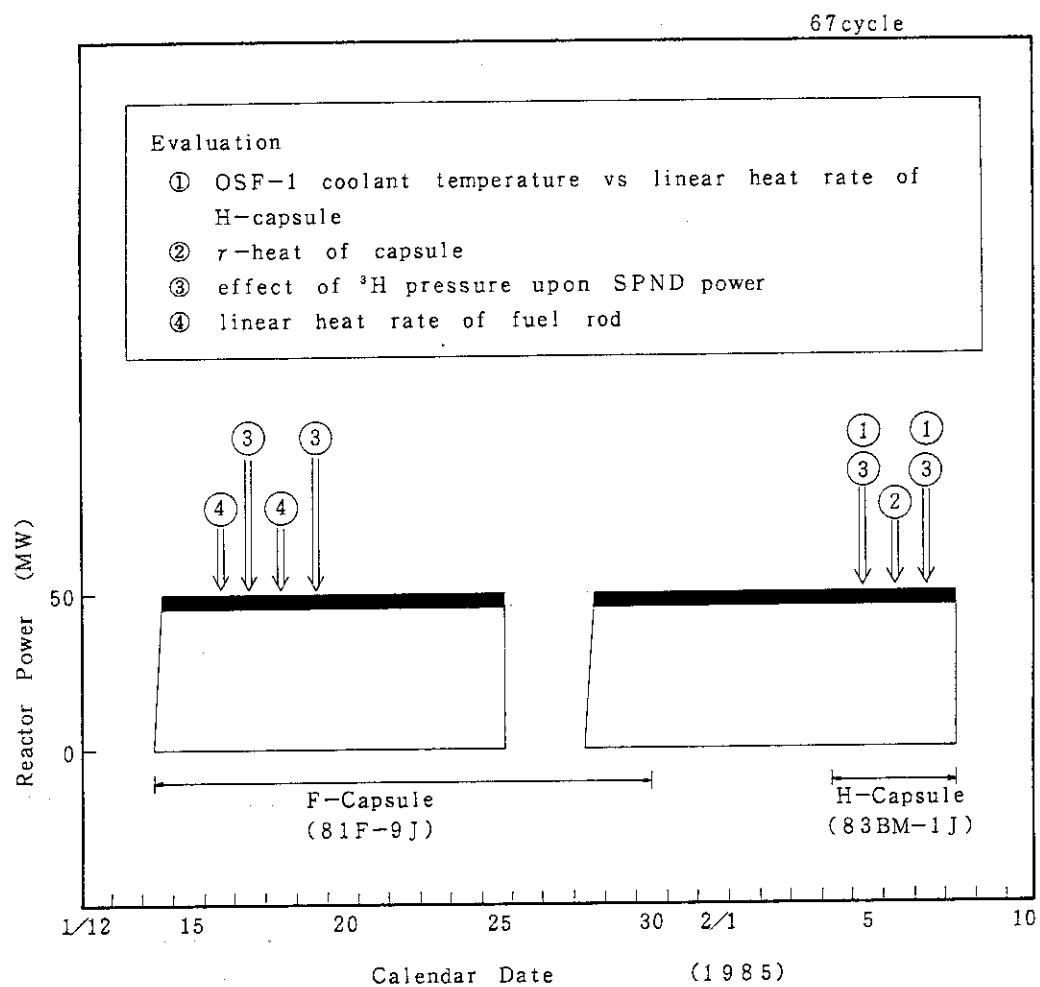


Fig. 9 Operating history of JMTR 67th cycle

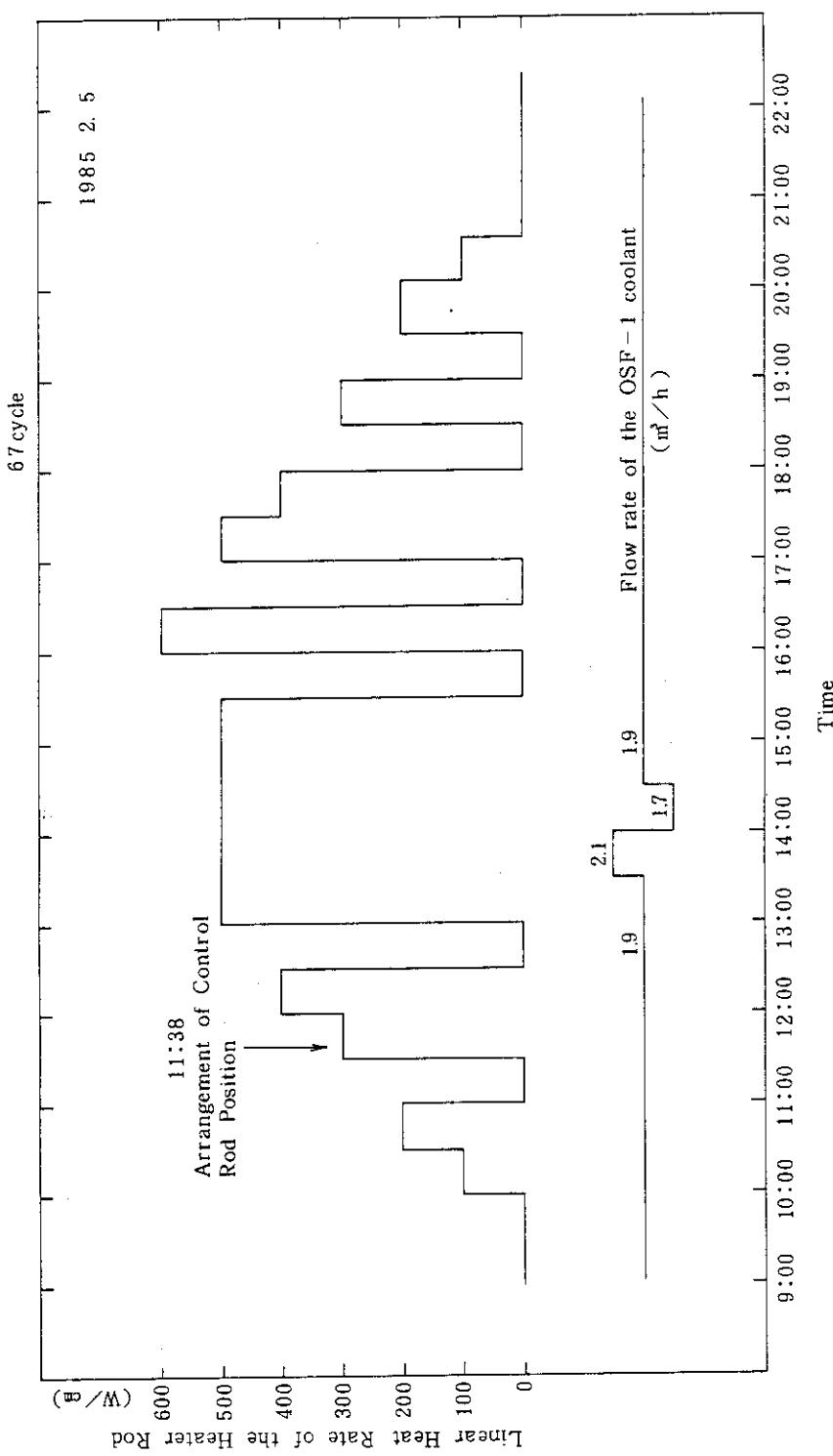


Fig. 10 Operating history of electric heater on February 5, 1985

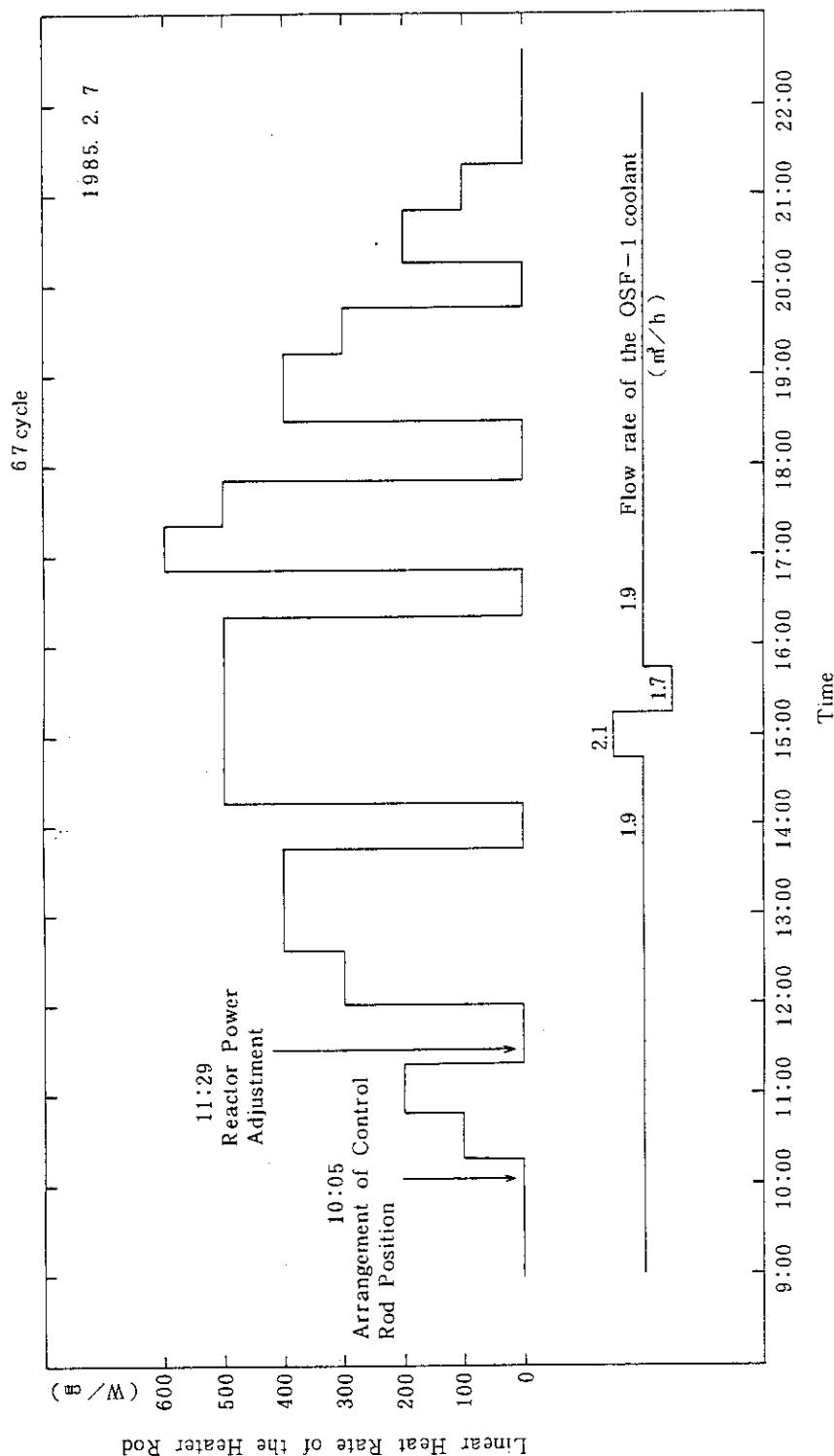


Fig. 11 Operating history of electric heater on February 7, 1985

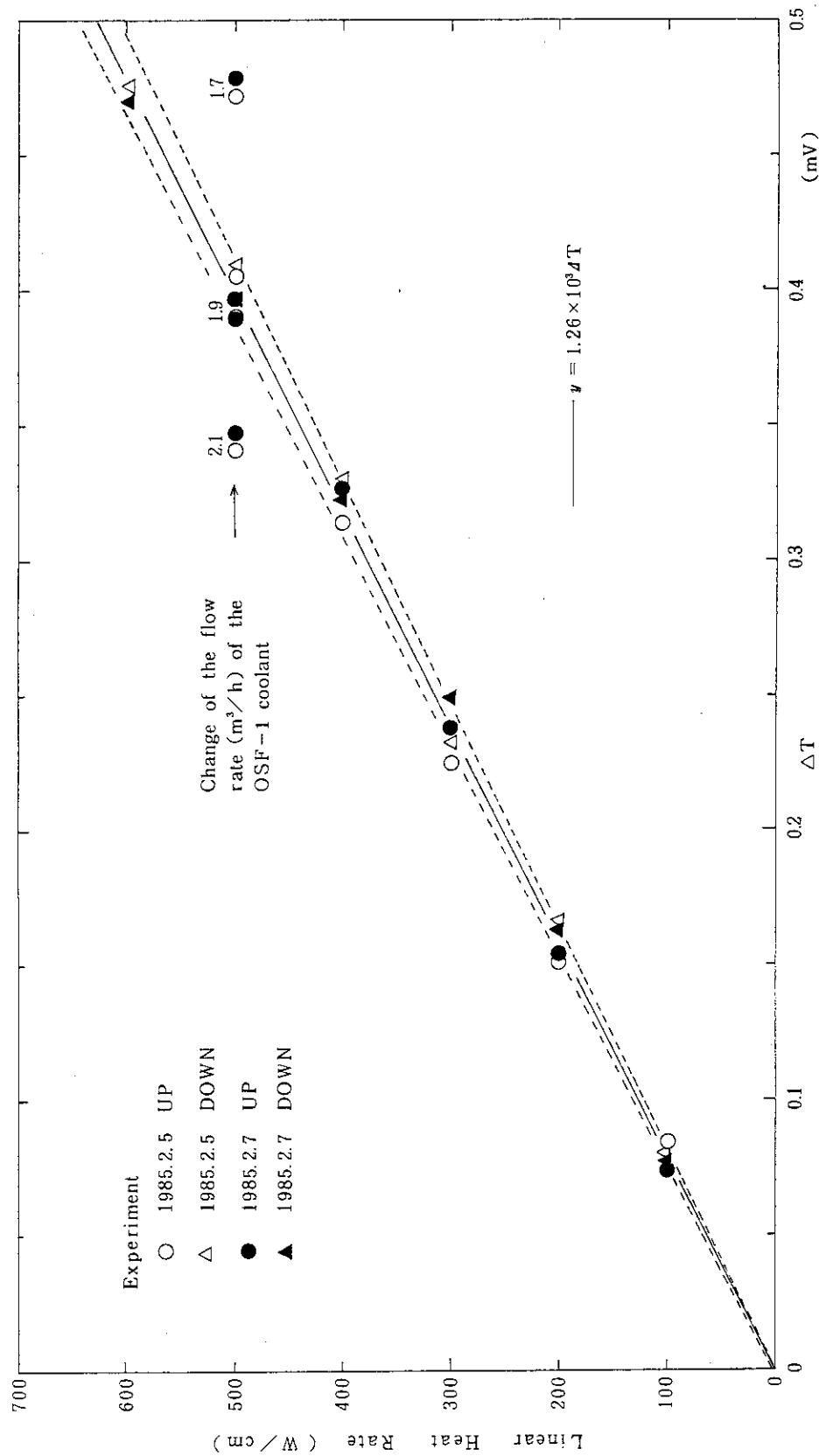


Fig. 12 Relation of ΔT to linear heat rate of electric heater
($\Delta T = T_x - T_b$)

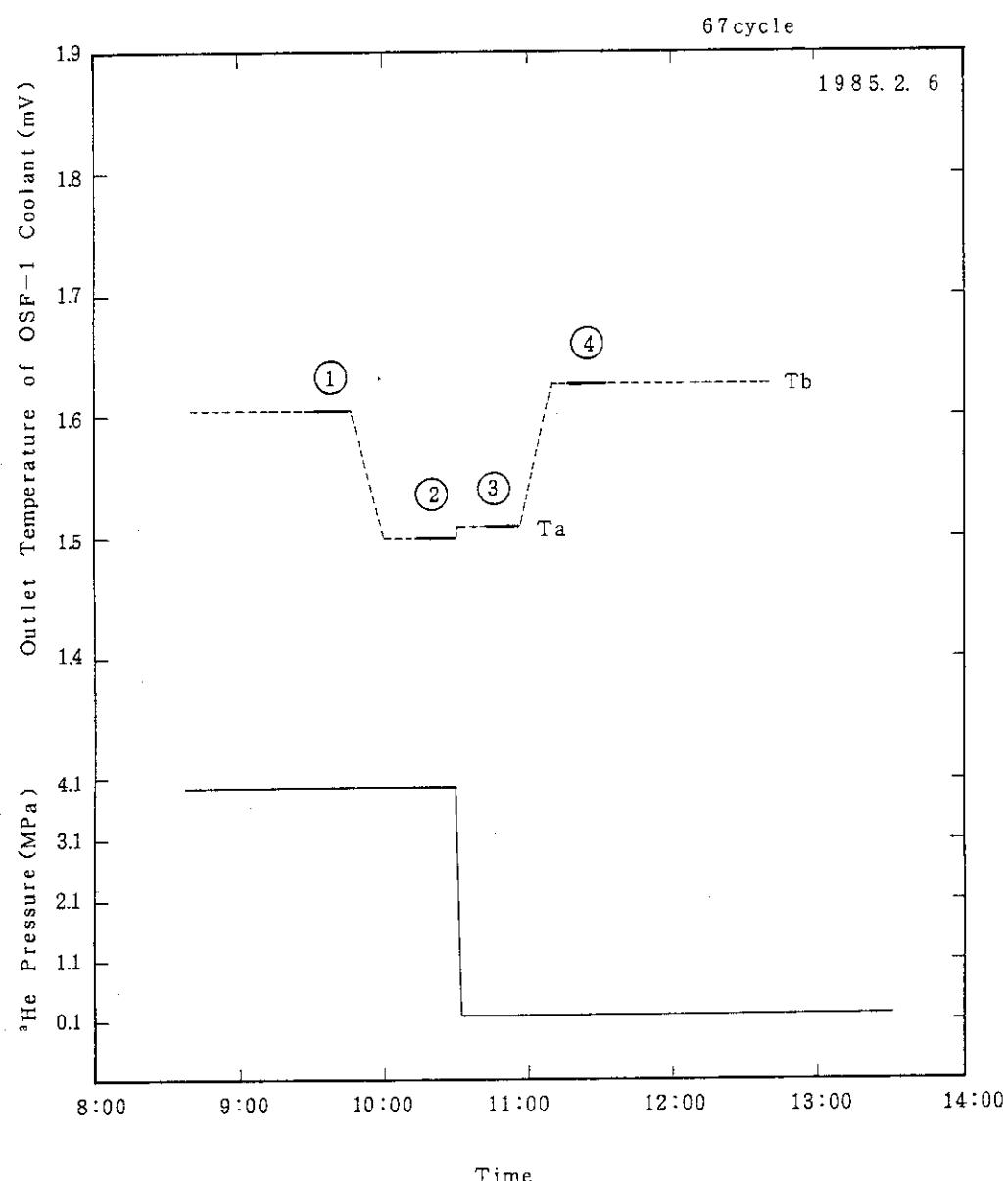


Fig. 13 Irradiation history of H capsule on February 6, 1985

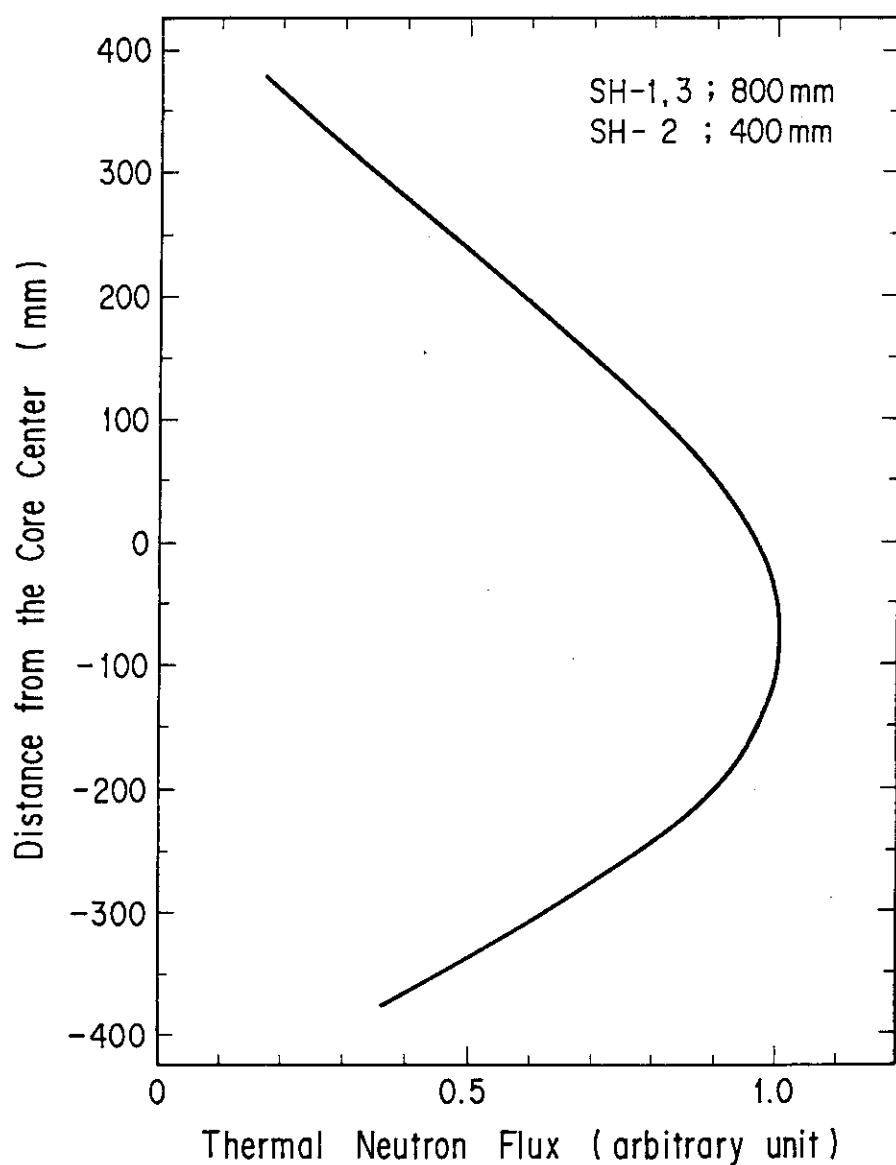


Fig. 14 Axial thermal neutron flux distribution¹⁰⁾

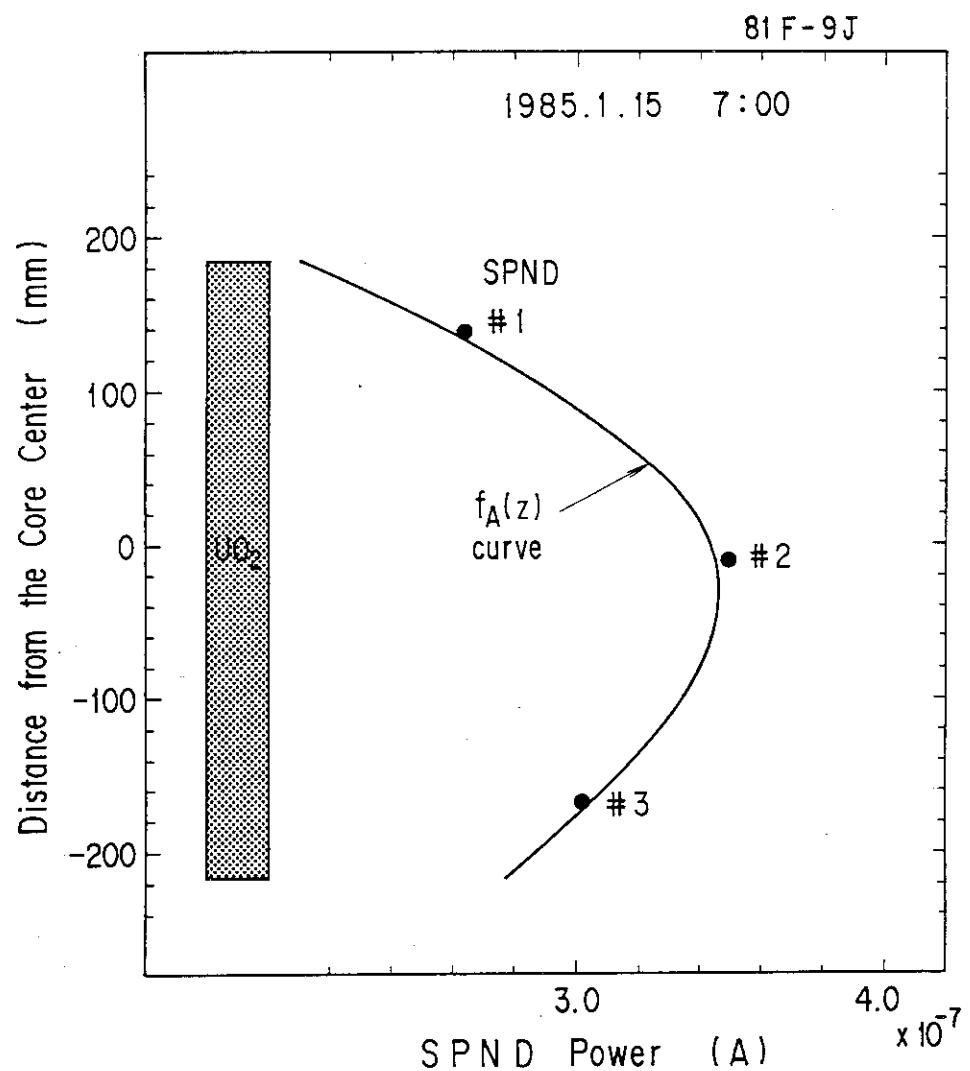


Fig. 15 $f_A(z)$ curve on January 15, 1985 (81F-9J capsule)

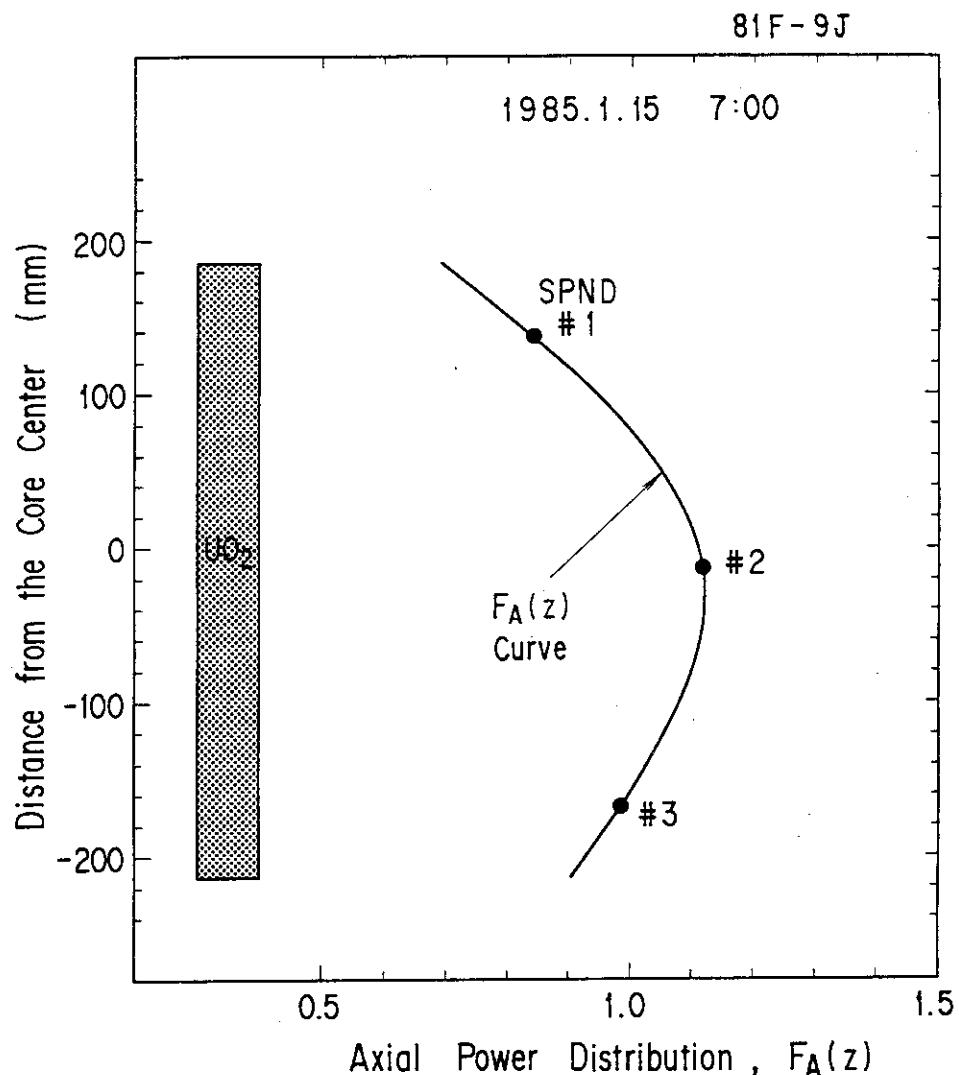
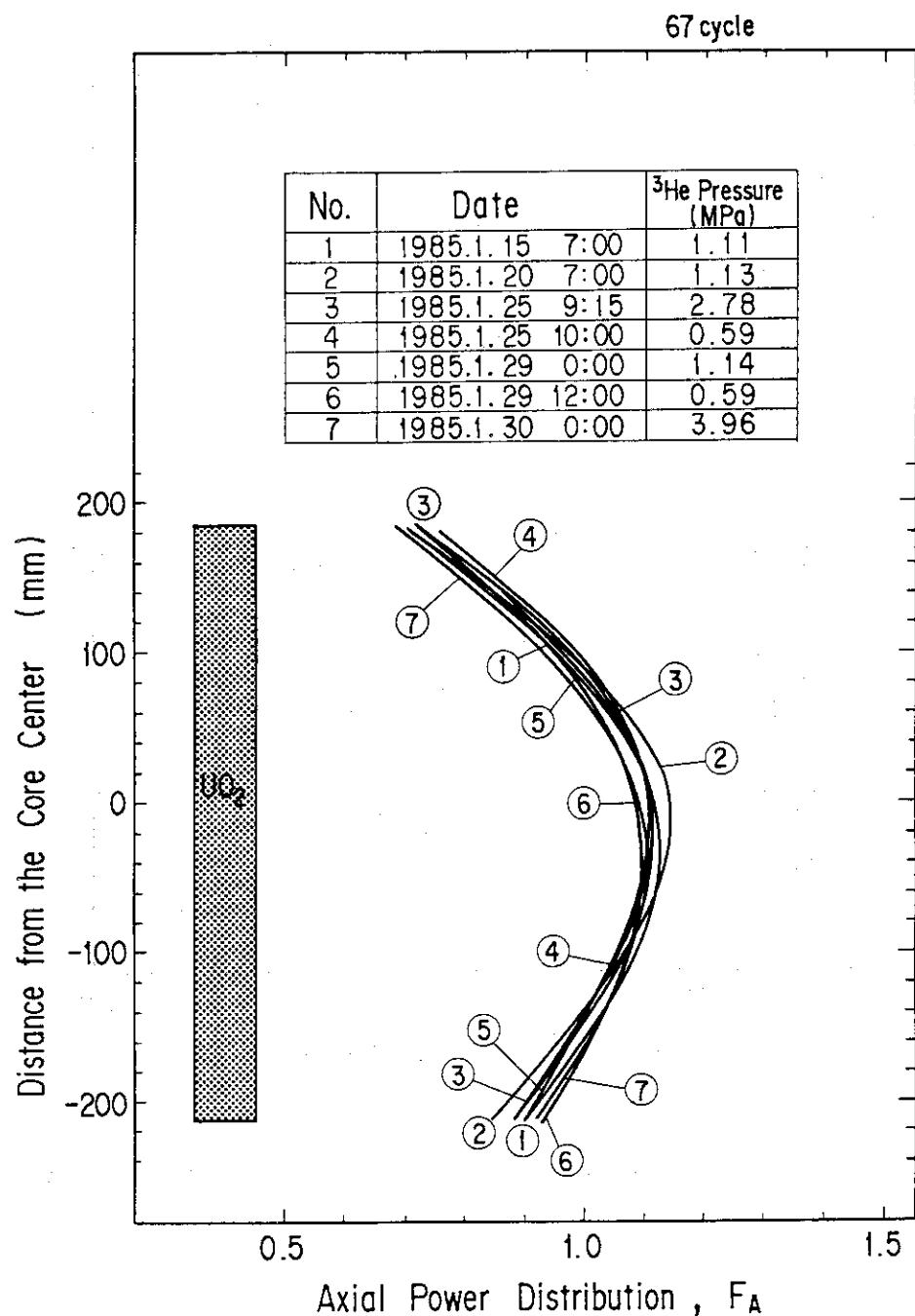


Fig. 16 $F_A(z)$ curve obtained from the $f_A(z)$ curve shown in Fig. 15

Fig. 17 $F_A(Z)$ curve on JMTR 67 cycle (81F-9J capsule)

付録A ステップ状出力急昇試験時の出力評価法

^3He ガス圧を変えながら、ステップ状の出力急昇試験を行なっている時の燃料棒出力変化パターン等の1例をFig.A-1に示す。以後、Fig.A-1を用いて、ステップ状出力急昇試験時の出力評価法を評価手順に従って説明する。

- ① BOCA キャプセルを 1.1 m 引上げた状態で、OSF-1 冷却水出口側温度 T_a (mV) を測定する。
- ② BOCA キャプセルを炉心へ挿入した状態で、OSF-1 冷却水出口側温度 T_o (mV) を測定し、次式より ΔT を求める（第2章参照）。

$$\Delta T = T_o - T_a - \Delta t \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A} \cdot 1)$$

- ③ (A・1) 式より求めた ΔT を(4)式に代入して、 T_o 測定時の平均燃料棒出力 \bar{Q}_o (W/cm) を求める。
- ④ さらに、 T_o 測定時の SPND 3 本の出力から、 $F_{AO}(z)$ 曲線を求め、任意の軸方向位置 z_1 における局所線出力 Q_o を次式より求める。

$$Q_o(z_1) = F_{AO}(z_1) \cdot \bar{Q}_o \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A} \cdot 2)$$

この $Q_o(z_1)$ を基準線出力として以後の出力経時変化を評価する。

- ⑤ ^3He ガス圧が一定である出力経時変化、すなわち Q_o から Q_o' の評価は、SPND 出力変化から求める。

$$Q_o' = \frac{f_{AO}'(z_1)}{f_{AO}(z_1)} \cdot Q_o \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A} \cdot 3)$$

ただし、 $f_{AO}(z_1)$ は Q_o 評価時の SPND 出力 3 本から、 $f_{AO}'(z_1)$ は Q_o' 評価時の SPND 出力 3 本から各々求めたものである（第2章参照）。

- ⑥ ^3He ガス圧がかわる出力急昇試験前後の出力変化、すなわち Q_o' から Q_1 の評価を説明する。まず、 Q_o' 評価時の SPND 3 本の出力から求めた $F_{AO}(z_1)$ と Q' から、 Q_o' 評価時の平均燃料棒出力 \bar{Q}_o' を求める。

$$\bar{Q}_o' = \frac{Q_o'}{F_{AO}'(z_1)} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A} \cdot 4)$$

- ⑦ \bar{Q}_o' と(4)式から $\Delta T_o'$ を求める。

$$\Delta T_o' = \frac{\bar{Q}_o'}{1.16 \times 10^3} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A} \cdot 5)$$

- ⑧ $\Delta T_o'$ 、 T_o' 及び Δt_o から、 Q_o' 評価時に仮に BOCA キャプセルを 1.1 m 引上げた時の

OSF-1冷却水出口側温度 $T_{a'}$ を求める。

$$T_{a'} = T_0' - \Delta T_0' - \Delta t_0 \quad \dots \dots \dots \quad (A \cdot 6)$$

⑨ さらに、この $T_{a'}$ を T_1 から引くことにより、 ΔT_1 を求める。

$$\Delta T_1 = T_1 - T_{a'} - \Delta t_0 \quad \dots \dots \dots \quad (A \cdot 7)$$

⑩ (A・7) 式で求めた ΔT_1 を(4)式に代入して、 T_1 測定時の平均燃料棒出力 \bar{Q}_1 (W/cm) を求める。

⑪ 次に、 T_1 測定時の SPND 出力 3 本の出力から、 $F_1(z)$ 曲線を求め、任意の軸方向位置 z_1 における局所線出力 Q_1 を次式より求める。

$$Q_1 = F_1(z_1) \cdot \bar{Q}_1 \quad \dots \dots \dots \quad (A \cdot 8)$$

⑫ 以後、随時⑤から⑪をくりかえすことにより Q_n まで評価できる。

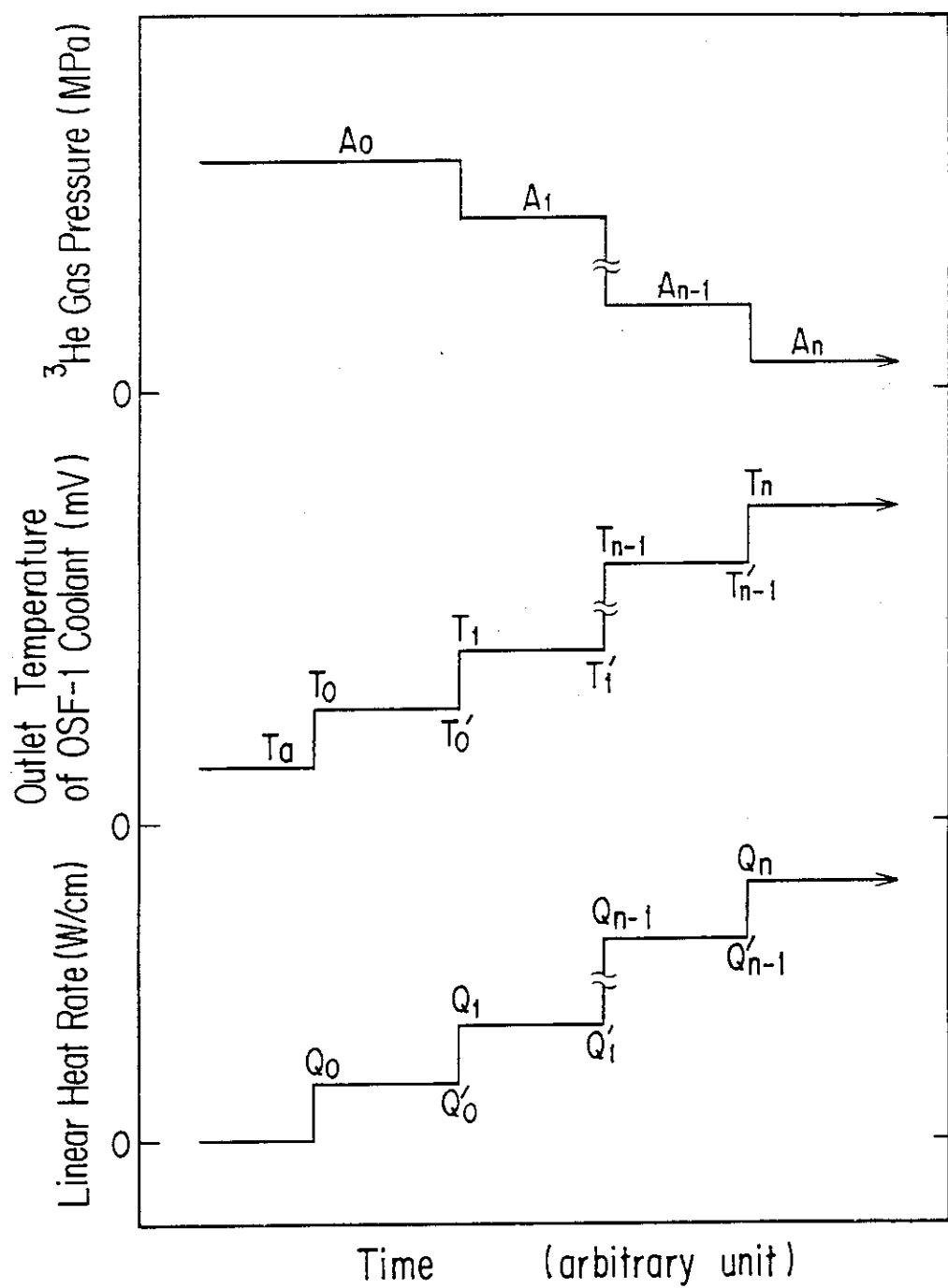


Fig. A.1 Example of the L.H.R. change of the fuel rod in the stepwise power-ramp test

付録B 試験結果の計算処理法

出力較正試験時のデータ、すなわちOSF-1冷却水出口側温度、SPND出力等の計算処理には、JMTR出力急昇試験設備の燃料棒照射挙動分析装置CESIL (Computerized Elaborate System for Irradiation Data Logging)を用いた。CESILはミニコンピュータ(PANAFACOM製U-1500)を用い、上記の各種データの収集及び処理を専用に行なう計算機システムである。そのシステムは、容量2MBのCPUを中心に6台のディスプレイ端末、ラインプリンタ、X-Yプロッタ、磁気テープ装置、2基のディスク等から構成されている。CESILの構成図をFig. B-1に示す。また、実験中の各種データは、任意に指示したサンプリング間隔でディスクに書き込まれ、実験者は、任意の時間にそれらのデータの入ったディスクにアクセスすることができるようになっている。実験終了後は、ディスクに入ったデータ内容を磁気テープにコピーして保存しておき、その保存データを利用したい場合には、磁気テープからディスクにロードして再度データにアクセスすることができる。データの流れをFig. B-2に示す。

本試験結果の計算処理は、任意にデータ処理用のプログラムを作成し、ディスク上のデータにアクセスして行なった。今回のデータ処理で用いた計算プログラムをTable B-1に示す。なお、このプログラムは、指定した時間内の計測データの平均値、標準偏差等を求めるものである。

参考文献

- 1) 濑崎勝二、土田昇及び佐川尚司：“材料試験炉における燃料棒照射挙動分析システム”，FACOMジャーナル，10，No.7 (1984) 10。

Table B.1 Program for the statistical analysis of the data

```

00010 C   TSUJYOU DATA READ :: FILE NAME(NDATAF)
00020     PROGRAM CHIE2
00030 C
00040     DIMENSION    YL(11),YS(11)
00050     DIMENSION    LDCTL(64),KSAMP(11),KDATE1(4),KDATE2(4)
00060     DIMENSION    LSTGE1(9,30),JDT1(14,30)
00070     DIMENSION    LSTGE2(9,30,10),JDT2(14,30,10)
00080     DIMENSION    JDATA(16),RDATA(64)
00090     DIMENSION    OUT(11,15),SX(11),SY(11),SX2(11),SY2(11),SXY(11)
00100     INTEGER       LDCTL*4,LSTGE1*4,LSTGE2*4,IREC*4,LDP*4
00110     DATA          KSAMP/62,45,46,31,32,15,16,17,18,21,64/
00120     REAL*8        OUT,SX,SY,SX2,SY2,SXY,X,Y
00130     REAL*8        EN,XA,YA,V,SD,R1,R2,R3,R
00140     REAL*8        YL,YS,ZL,ZS,S1,S196,S2
00150 C
00160 C***** JOB-CONTROL *****
00170     READ(5,'(5X,I5,5X,I5,5X,I5)') LDP,NCASE,NMAX
00180 C   LDP :: DATA POINT
00190 C   NCASE :: NO OF CASE
00200 C   NMAX :: MAX. OF DATA
00210 C*****
00220 C
00230 C!!!! CONTROL-RECORD !!!!!!!
00240 C
00250     WRITE(6,'(/"  CONTROL-RECORD  "')')
00260     READ(1,REC=1      ,IOSTAT=IOS) LDCTL
00270     WRITE(6,'(10X,2I10)' ) (I,LDCTL(I),I=1,33)
00280 C
00290 C!!!! STAGE-RECORD !!!!!!!
00300 C
00310     WRITE(6,'(/"  STAGE-RECORD  "')')
00320     NSTAGE = LDCTL(6)
00330     J = 1
00340     DO 10 IREC = 2,9
00350     READ(1,REC=IREC      ,IOSTAT=IOS)
00360     *           (LSTGE1(I,J)  ,I=1,9),(JDT1(K,J)  ,K=1,14),
00370     *           (LSTGE1(I,J+1) ,I=1,9),(JDT1(K,J+1) ,K=1,14),
00380     *           (LSTGE1(I,J+2) ,I=1,9),(JDT1(K,J+2) ,K=1,14),
00390     *           (LSTGE1(I,J+3) ,I=1,9),(JDT1(K,J+3) ,K=1,14)
00400     IF(J+3.GE.NSTAGE) GOTO 11
00410     J=J+4
00420     10 CONTINUE
00430     11 DO 12 J = 1,NSTAGE
00440       WRITE(6,'(10X,I5,5X,4I10,
00450       *I5,1H.,I2,1H.,I2,1H.,I2,1H.,I2,1H.,I3,
00460       *I5,1H.,I2,1H.,I2,1H.,I2,1H.,I2,1H.,I3)')
00470       *J,
00480       *LSTGE1(1,J),LSTGE1(2,J),LSTGE1(8,J),LSTGE1(9,J),
00490       *(JDT1(K,J),K=1,14)
00500     12 CONTINUE
00510 C
00520 C!!!! SUB STAGE-RECORD !!!!!!!
00530 C
00540     WRITE(6,'(/"  SUB STAGE-RECORD  "')')
00550     DO 25 N = 1,NSTAGE
00560     NSUB=LSTGE1(1,N)

```

Table B.1 (Contents)

```

00570      IHRP=10+3*(N-1)
00580      J = 1
00590      DO 20 IREC=IHRP,IHRP+2
00600      READ(1,REC=IREC ,IOSTAT=IOS)
00610      *          (LSTGE2(I,N,J ),I=1,9),(JDT2(K,N,J ),K=1,14),
00620      *          (LSTGE2(I,N,J+1),I=1,9),(JDT2(K,N,J+1),K=1,14),
00630      *          (LSTGE2(I,N,J+2),I=1,9),(JDT2(K,N,J+2),K=1,14),
00640      *          (LSTGE2(I,N,J+3),I=1,9),(JDT2(K,N,J+3),K=1,14)
00650      IF(J+3.GE.NSUB) GOTO 25
00660      J=J+4
00670      20 CONTINUE
00680      25 CONTINUE
00690      DO 30 N = 1,NSTAGE
00700      NSUB     = LSTGE1(1,N)
00710      DO 30 J = 1,NSUB
00720      WRITE(6,'(10X,I5,***-*,I4,4I10,
00730      *I5,1H.,I2,1H.,I2,1H.:I2,1H.:I2,1H.,I3,
00740      *I5,1H.,I2,1H.,I2,1H.:I2,1H.:I2,1H.,I3*)')
00750      *N,J,
00760      *LSTGE2(1,N,J),LSTGE2(2,N,J),LSTGE2(8,N,J),LSTGE2(9,N,J),
00770      *(JDT2(K,N,J),K=1,14)
00780      30 CONTINUE
00790 C      IF(NCASE.EQ.0) STOP
00810           IREC = LDP#2+98-2
00820      DO 1000 KK=1,NCASE
00830      READ(5,'(2I5,7I3)') KPRT,KDATE1,KDATE2
00840 C!!!! DATAE-RECORD !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
00850 C
00860      NDATA = 0
00870      IPRINT= 0
00880      DO 92 J=1,11
00890      SX(J)=0.
00900      SY(J)=0.
00910      SX2(J)=0.
00920      SY2(J)=0.
00930      SXY(J)=0.
00940      YL(J) = -1.D10
00950      YS(J) = 1.D10
00960      92 CONTINUE
00970 C
00980 C      X(1)=0.0
00990      WRITE(6,'(1H1,/*' DATA-RECORD   ''*)'
01000      WRITE(6,'(2I5,7I3)') KPRT,KDATE1,KDATE2
01010      WRITE(6,93)
01020      93 FORMAT('      NO. C-NO. Y M D H M S   GAIN',
01030      *      ' U320   U303   U304   U401   U402  ',
01040      *      ' U501   U502   U503   U504   U501+2 U503+4 ')
01050 C
01060      LOOP = 0
01070      100      IREC = IREC+2
01080      READ(1,REC=IREC ,IOSTAT=IOS) JDATA,(RDATA(I),I=1,56)
01090      READ(1,REC=IREC+1,IOSTAT=IOS)           (RDATA(I),I=57,64)
01100      IF(LOOP.EQ.0) THEN
01110      IF(KDATE1(1).EQ.JDATA(5).AND.KDATE1(2).EQ.JDATA(6).AND.
01120      * KDATE1(3).EQ.JDATA(7).AND.KDATE1(4).EQ.JDATA(8)) GOTO 111
01130      GOTO 100
01140      ENDIF

```

Table B.1 (Contents)

```

01150    111 LOOP = 1
01160      NDATA = NDATA+1
01170      IPRINT= IPRINT+1
01180      RDATA(64)=(RDATA(17)+RDATA(18))*0.5
01190      RDATA(21)=(RDATA(15)+RDATA(16))*0.5
01200      DO 200 K = 1,11
01210      X      = DBLE(FLOAT(NDATA))
01220      Y      = DBLE(RDATA(KSAMP(K)))
01230      SX(K)  = SX(K) + X
01240      SY(K)  = SY(K) + Y
01250      SX2(K) = SX2(K) + X**2,
01260      SY2(K) = SY2(K) + Y**2
01270      SXY(K) = SXY(K) + X*Y
01280 C
01290      IF(Y.GE.YL(K)) THEN
01300      YL(K) = Y
01310      ENDIF
01320      IF(Y.LE.YS(K)) THEN
01330      YS(K) = Y
01340      ENDIF
01350 C
01360      200 CONTINUE
01370      IF(NDATA.GE.NMAX) WRITE(6,*(''  ERROR?? NDATA >= NMAX''))
01380      IF(NDATA.GE.NMAX) GOTO 300
01390 C
01400      IF(NDATA.EQ.1) THEN
01410      WRITE(6,60)(JDATA(I),I=3,9)
01420      60 FORMAT(5X,'START>>>',*
01430      *I5,1H.,I2,1H.,I2,1H,I2,1H:,I2,1H:,I2,1H.,I3)
01440      ENDIF
01450 C
01460      IF(IPRINT.EQ.KPRT) THEN
01470      WRITE(6,61)NDATA,JDATA(1),(JDATA(I),I=3,10),
01480      *(RDATA(KSAMP(K)),K=1,11)
01490      61 FORMAT(5X,2I5,
01500      *I5,1H.,I2,1H.,I2,1H,I2,1H:,I2,1H:,I2,1H.,I3,I5,11F8.2)
01510      IPRINT = 0
01520      ENDIF
01530 C
01540      IF(KDATE2(1).EQ.JDATA(5).AND.KDATE2(2).EQ.JDATA(6).AND.
01550      * KDATE2(3).EQ.JDATA(7).AND.KDATE2(4).EQ.JDATA(8)) GOTO 300
01560      GOTO 100
01570 C
01580      300 WRITE(6,62)(JDATA(I),I=3,9)
01590      62 FORMAT(5X,'END>>>>',*
01600      *I5,1H.,I2,1H.,I2,1H,I2,1H:,I2,1H:,I2,1H.,I3)
01610 C
01620      DO 400 K=1,11
01630      EN   = DBLE(FLOAT(NDATA))
01640      XA   = SX(K)/EN
01650      YA   = SY(K)/EN
01660      V    = (SY2(K)-(SY(K)**2)/EN)/EN
01670      SD   = DSQRT(V)
01680      R1   = EN*SXY(K)-SX(K)*SY(K)
01690      R2   = EN*SX2(K)-(SX(K))**2
01700      R3   = EN*SY2(K)-(SY(K))**2
01710      R   = R1/DSQRT(R2*R3)
01720 C

```

Table B.1 (Contents)

```

01730      S1    = 100.*SD/YA
01740      S196 = 100.*1.96*SD/YA
01750      S2    = 100.*2.0*SD/YA
01760 C
01770      ZL    = (YL(K)-YA)/SD
01780      ZS    = (YS(K)-YA)/SD
01790 C
01800      OUT(K,1) = EN
01810      OUT(K,2) = XA
01820      OUT(K,3) = YA
01830      OUT(K,4) = R
01840      OUT(K,5) = V
01850      OUT(K,6) = SD
01860      OUT(K,7) = SD * 1.96
01870      OUT(K,8) = SD * 2.00
01880 C
01890      OUT(K,9) = S1
01900      OUT(K,10)= S196
01910      OUT(K,11)= S2
01920 C
01930      OUT(K,12) = YL(K)
01940      OUT(K,13) = YS(K)
01950      OUT(K,14) = ZL
01960      OUT(K,15) = ZS
01970 C
01980 400 CONTINUE
01990 C
02000      WRITE(6,500) OUT
02010 500 FORMAT(/15X,'NUMBER OF DATA' N = ',11F8.0,
02020      *     /15X,'X DATA-AVERAGE' XA = ',11F8.3,
02030      *     /15X,'SAMPLE MEAN' YA = ',11F8.3,
02040      *     /15X,'CORRELATION COEFFICIENT' R = ',11F8.3,
02050      *     /15X,'VARIANCE' V = ',11F8.3,
02060      *     /15X,'STANDARD DEVIATION' SD = ',11F8.3,
02070      *     /15X,'95% ERROR' SD*1.96 = ',11F8.3,
02080      *     /15X,'TWO SIGMA' SD*2.0 = ',11F8.3,
02090      *     /15X,'ONE SIGMA %' SD % = ',11F8.3,
02100      *     /15X,'95% ERROR SIGMA' 1.96*SD% = ',11F8.3,
02110      *     /15X,'TWO SIGMA %' 2.0*SD % = ',11F8.3,
02120      *     /15X,'MAX' MAX = ',11F8.3,
02130      *     /15X,'MIN' MIN = ',11F8.3,
02140      *     /15X,'ZMAX' ZMAX = ',11F8.3,
02150      *     /15X,'ZMIN' ZMIN = ',11F8.3)
02160 1000 CONTINUE
02170      STOP
02180      END

```

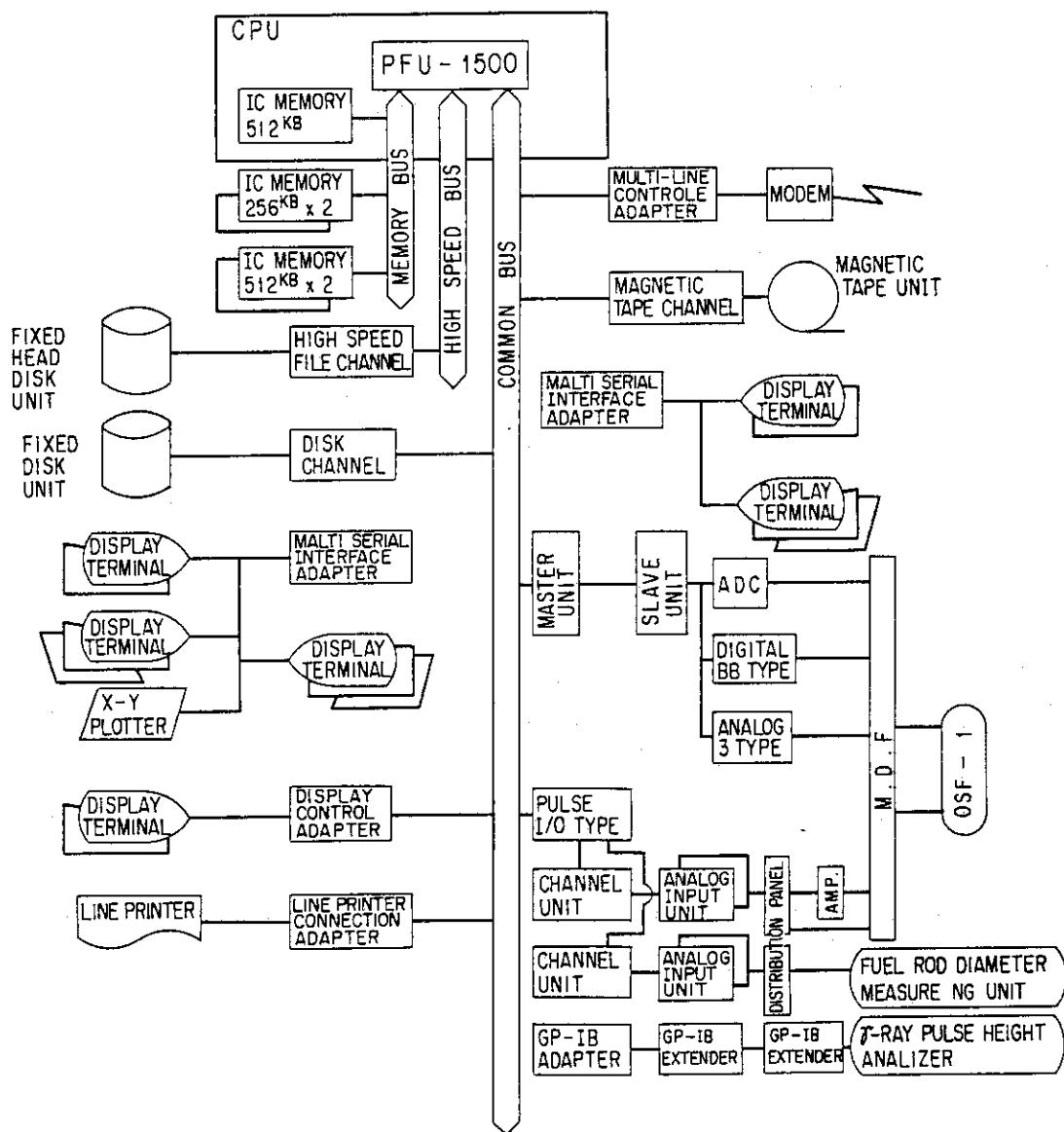


Fig. B.1 Schematic diagram of CESIL

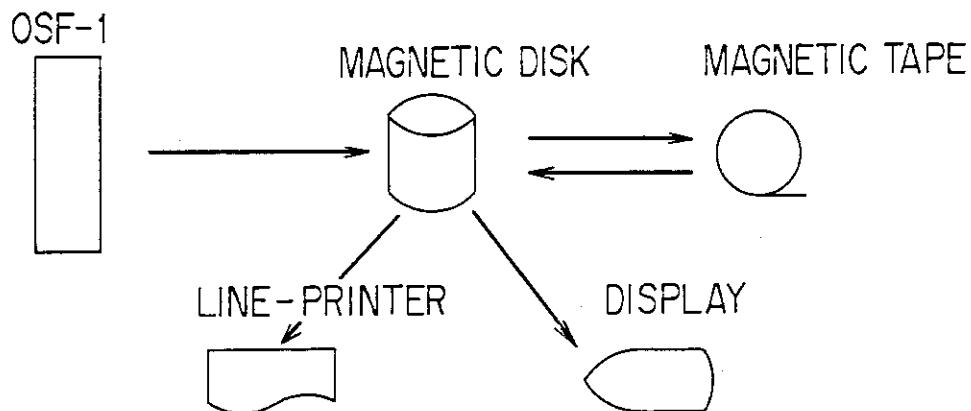


Fig. B.2 Data flow diagram

付録C ^3He ガス圧変化時のSPND特性

F キャプセルを用いて、 ^3He ガス圧変化時における SPND 特性評価のための試験を 2 回(1月 17 日及び 1 月 19 日) 実施した。なお、試験に用いた SPND は、SPND^{#2} である。それら 2 回の試験から得た結果 (^3He ガス圧、OSF-1 冷却水出口側温度及び SPND^{#2} 出力) を Table C・1 及び Table C・2 に示すとともに、 ^3He ガス圧 OSF-1 冷却水出口側温度との関係を Fig. C・1 及び Fig. C・2 に、 ^3He ガス圧と SPND^{#2} 出力との関係を Fig. C・3 に示す。

次に、H キャプセルを用いて、燃料棒出力の変化(すなわち、SPND^{#2} 装入場所の温度変化)により、SPND 出力がどれだけ変化するかについて 2 回(2 月 5 日及び 2 月 7 日) 試験を実施した。その結果を Fig. C・4 に示す。なお、燃料棒出力が 300 W/cm 時の SPND^{#2} 挿入位置の温度は約 230 °C であり、600 W/cm 時は約 260 °C である。

これらの試験結果から得た知見を以下に要約する。

- ① Fig. C・3 に示した 2 回の試験結果に有意な差がなかったことから、 ^3He ガス圧変化と SPND 出力との関係に良い再現性を有することを確認した。
- ② Fig. C・3 の曲線を用いることにより、任意の ^3He ガス圧における燃料棒出力が予測可能となった。
- ③ Fig. C・4 から、燃料棒出力が 300 W/cm から 600 W/cm までの範囲内では SPND 出力に有意な差がないこと、言いかえれば、SPND 挿入場所の温度で補正する必要がないことが明らかになった。

Table C.1 Experimental results (^3He pressure, outlet temperature of OSF-1 coolant and SPND output) on Jan. 17, 1985

Item No.*	^3He Pressure (MPa)	Outlet Temperature of OSF-1 Coolant (mV)	SPND Output (mV)
①	1.13	1.867	349.1
②	0.74	1.918	394.1
③	0.48	1.950	428.9
④	1.03	1.892	359.9
⑤	1.81	1.838	299.0
⑥	3.78	1.741	211.9
⑦	1.95	1.815	289.6
⑧	1.16	1.862	346.3

1985.1.17

* See Fig. C.1

Table C.2 Experimental results (^3He pressure, outlet temperature of OSF-1 coolant and SPND output) on Jan. 19, 1985

Item No.*	^3He Pressure (MPa)	Outlet Temperature of OSF-1 Coolant (mV)	SPND Output (mV)
①	1.07	1.851	347.4
②	0.79	1.885	376.8
③	0.50	1.941	416.9
④	1.08	1.879	345.6
⑤	(1.93)	1.830	286.2
⑥	3.83	1.745	203.8
⑦	2.01	1.811	279.5
⑧	1.16	1.868	340.7

1985.1.19

* See Fig. C.2

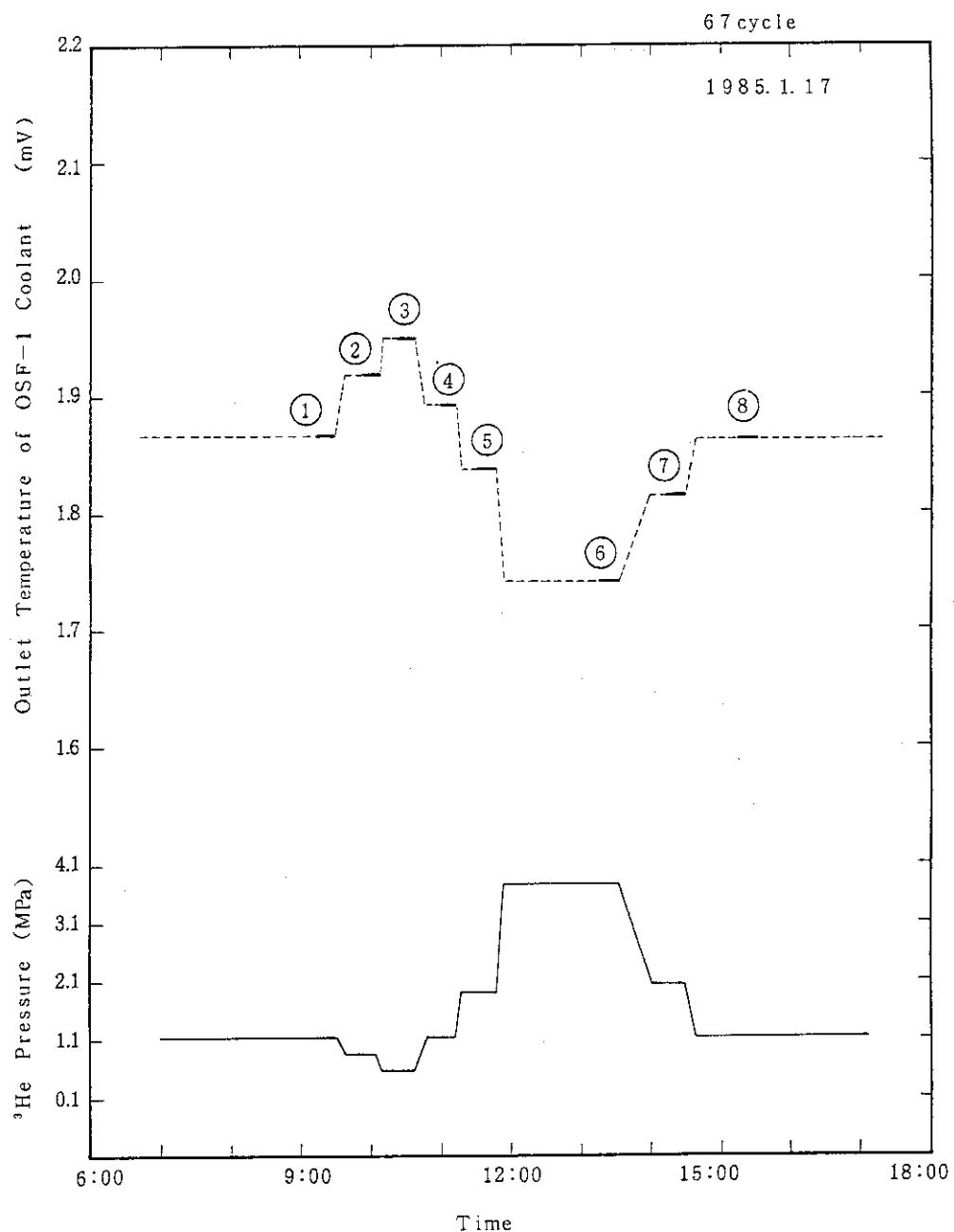


Fig. C.1 Irradiation history of F capsule on January 17, 1985

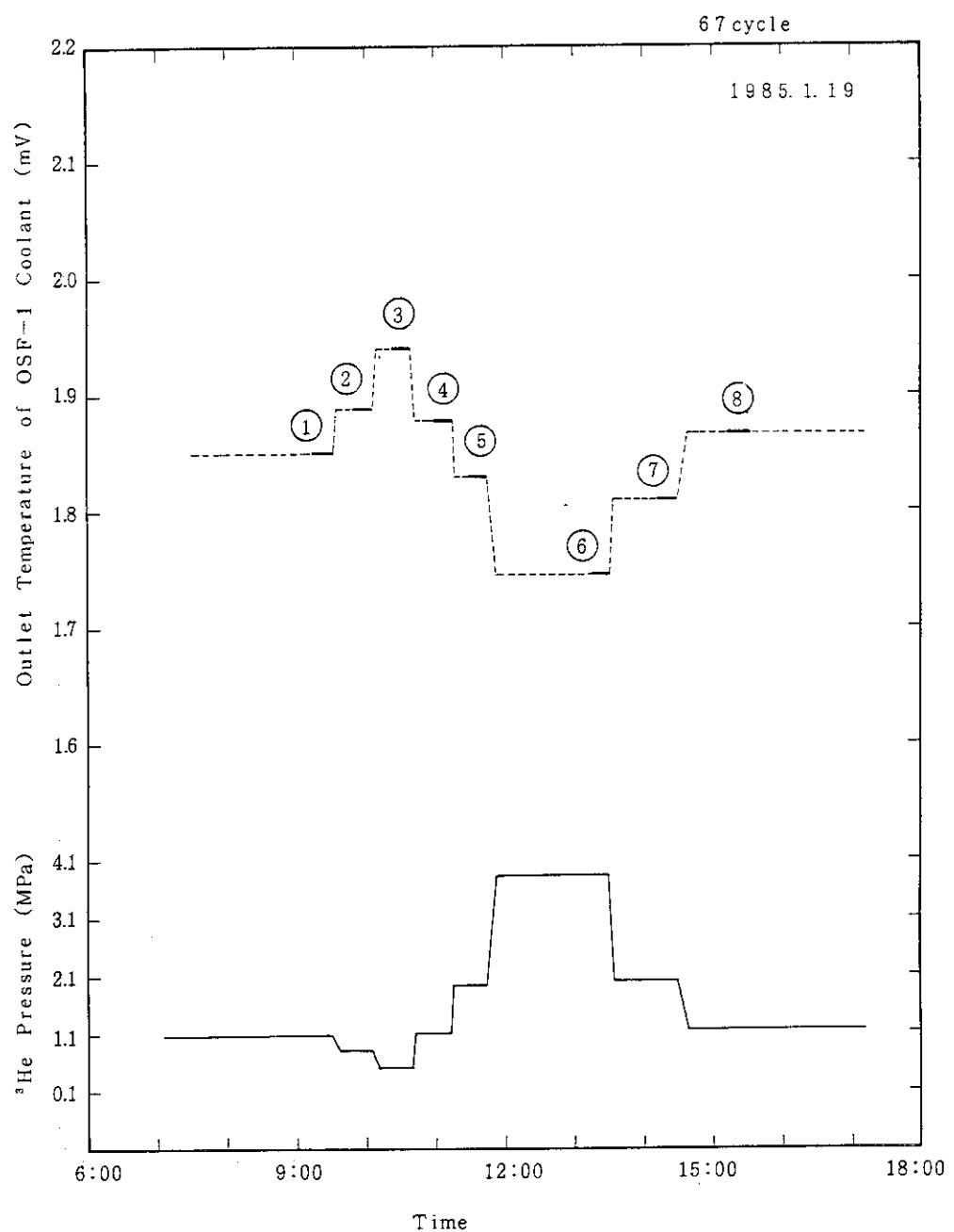


Fig. C.2 Irradiation history of F capsule on January 19, 1985

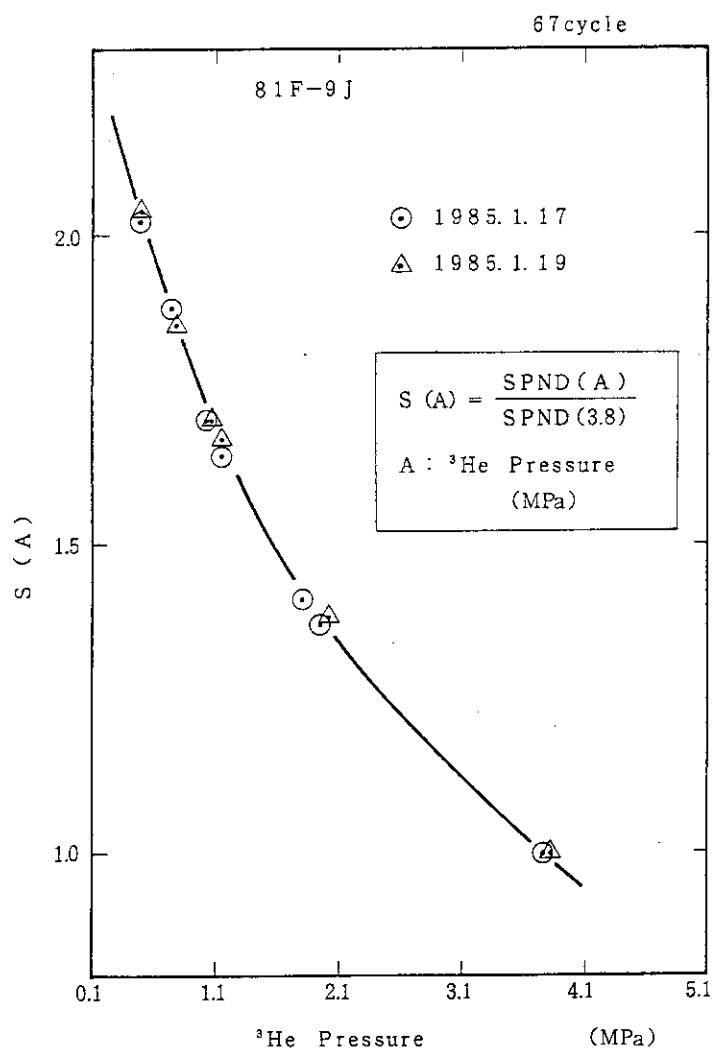


Fig. C.3 Relations of SPND output to ${}^3\text{He}$ pressure on Jan. 17 and Jan. 19, 1985

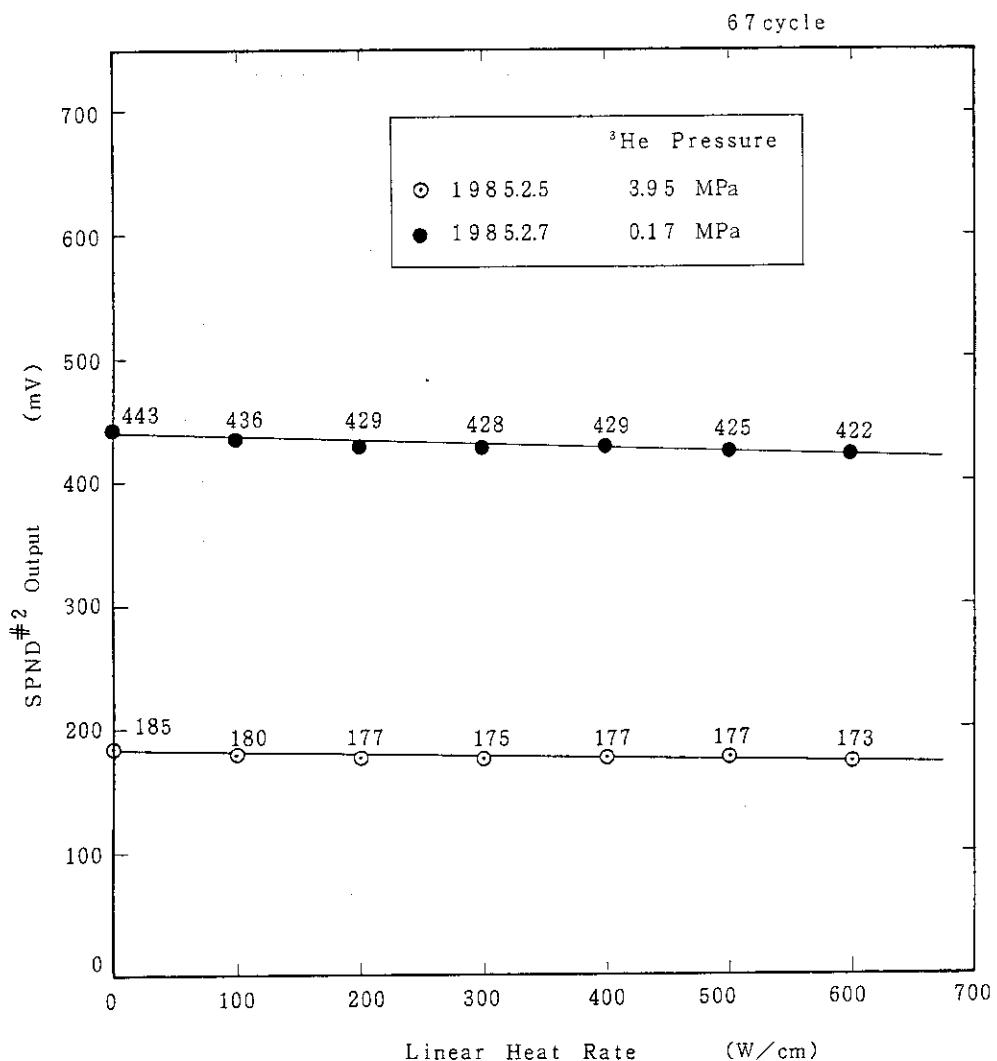


Fig. C.4 Relations of SPND output to linear heat rate on Feb. 5 and Feb. 7, 1985

付録D SPND出力のみによる燃料棒出力の 経時変化評価法

^3He ガス圧をかえながらステップ状に出力急昇している時の ^3He ガス圧 A (MPa) における燃料棒出力 $Q_A(t, z_1)$ は、次式により求められる。

$$Q_A(t, z_1) = \frac{f_A(t, z_1)}{f_{A_0}(t_0, z_1)} \cdot Q_{A_0}(t_0, z_1) \cdot K(A) \quad \dots \quad (\text{D} \cdot 1)$$

(D・1) 式において $K(A) = 1$ の時は、(D-1) 式は(4)式となる。なお、 $K(A)$ は、SPND (エミッタ: Rh) と UO_2 ペレット (^{235}U) との中性子スペクトル変化に伴う感度補正係数である。 $K(A)$ を (D・2) 式に示す。

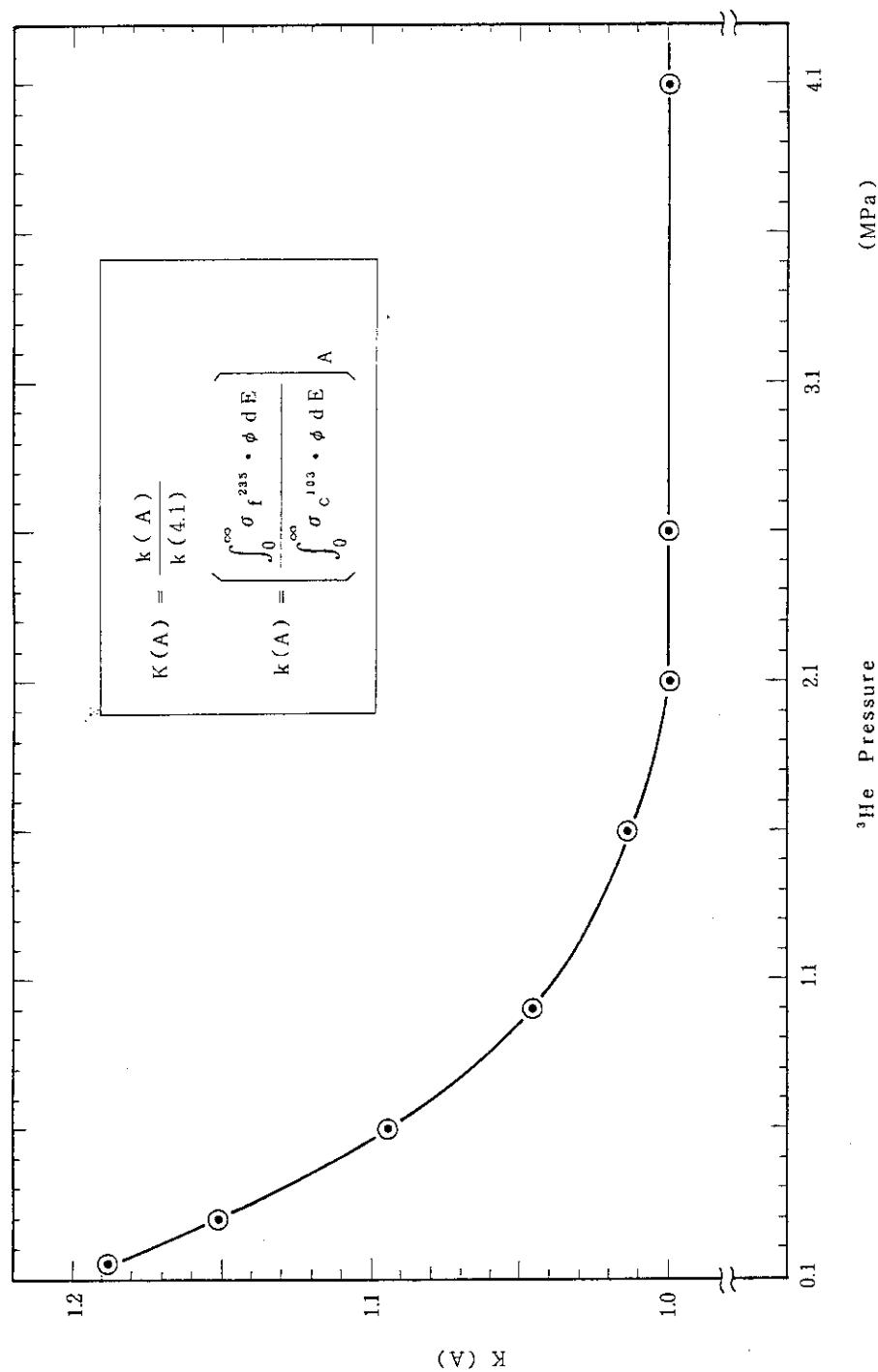
$$K(A) = \frac{k(A)}{k(A_0)} \quad \dots \quad (\text{D} \cdot 2)$$

ただし、 $k(A)$ は ^3He ガス圧 A (MPa) における $\int_0^\infty \sigma_f^{235} dE$ と $\int_0^\infty \sigma_c^{103} dE$ の比であり、 σ^{235} は ^{235}U の核分裂面積、 σ^{103} は ^{103}Rh の放射化断面積である。 $K(A)$ は参考文献(1)で求められており、 $K(4.1)$ を 1 に規格化した場合の $K(A)$ と A との関係を Fig. D・1 に示す。

今後は、 $K(A)$ の評価精度について十分検討していくことが必要である。

参 考 文 献

- 1) 小向文作、河村 弘、他：JAERI-M 85-087，“BOCAキャップセルによる燃料中心温度測定実験 (80F-1J, 2J)”，(1985)

Fig. D.1 Relation of $K(A)$ to ${}^3\text{He}$ pressure