

JAERI-M
85-087

BOCAキャプセルによる燃料中心温度測定実験
(80F-1J及び80F-2J)

1985年7月

小向 文作・河村 弘・安藤 弘栄・桜井 文雄
新見 素二・瀬崎 勝二・小山田 六郎

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。
入手の間合わせは、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）にて、
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, Tokaimura, 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 日青工業株式会社

BOCA キャプセルによる燃料中心温度測定実験
(80F-1J 及び 80F-2J)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

小向 文作・河村 弘・安藤 弘栄⁺

桜井 文雄・新見 素二・瀬崎 勝二

小山田六郎

(1985年6月5日受理)

JMTR (材料試験炉) の ^3He 出力制御型沸騰水キャプセル (BOCA キャプセル) を用いて、燃料中心温度測定実験を実施した。本実験の目的は、出力サイクル及び出力急昇下での燃料ふるまいに及ぼす燃料棒設計パラメータの影響を評価することにある。

実験では、製造時ペレット-被覆管直径ギャップが異なる2本の8×8型BWR燃料棒を用いた。

すなわち、直径ギャップは、各々90 μm (Rod 1) 及び190 μm (Rod 2) であり、燃料挙動データとしては、燃料中心温度及び燃料棒伸びを測定し、燃料ふるまいコード“FEMAXI-III”による計算値と比較した。

得られた結果は次の通りである。

- ① 製造時ペレット-被覆管直径ギャップの違いによる燃料中心温度の差は、300W/cmにおいて約120 $^{\circ}\text{C}$ であった。また、両燃料棒の燃料中心温度は、ともに第1回目原子炉起動時よりも第2回目原子炉起動時の方が高かった。
- ② 出力サイクル及び出力急昇時の燃料中心温度は、第2回目原子炉起動時の場合と同じであった。
- ③ Rod 2の燃料棒伸びは、第1回目原子炉起動時が最も大きく、それ以後は出力サイクル数とともに減少した。また、PCMI (Pellet Cladding Mechanical Interaction) 開始線出力は、出力サイクル数とともに上昇した。
- ④ FEMAXI-IIIで計算した燃料中心温度は、実測値と良く一致した。

⁺ 東海研究所研究炉管理部

Fuel centerline temperature measuring experiment
using the BOCA capsules

(80F-1J, 2J)

Bunsaku KOMUKAI, Hiroshi KAWAMURA, Hiroei ANDO,
Fumio SAKURAI, Motoji NIIMI, Katsuji SEZAKI
and Rokuro OYAMADA

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment, JAERI

(Received June 5, 1985)

Fuel centerline temperature measuring experiments were performed in the JMTR (Japan Materials Testing Reactor) using the He-3 power controlled boiling capsules (BOCA capsules). The purpose of the experiments is to evaluate effects of the fuel rod design parameter on fuel behavior under power cycle condition and power ramp condition.

Two 8 x 8 BWR type fuel rods were different in the fabricated pellet-cladding diametral gap and used in the experiments; one fuel rod (Rod 1) with 90 μm diametral gap and another (Rod 2) with 190 μm diametral gap. In order to obtain detailed data on the fuel behavior, fuel centerline temperature and fuel rod elongation were measured and compared with calculated values by the fuel behavior analysis code "FEMAXI-III".

The following results were drawn through the experiments.

- ① Difference in the fuel centerline temperature due to the difference in the fabricated pellet-cladding diametral gap was about 120°C at 300W/cm.
Increase in fuel centerline temperature of each fuel rod during the 2nd reactor power up was higher than that during the 1st reactor power up.
- ② Correlations between the fuel centerline temperature and linear heat rating during the power cycle and the power ramp were nearly equal to these during the 2nd reactor power up.
- ③ The highest fuel rod elongation of Rod 2 was observed during the 1st reactor power up and often then the fuel rod elongation decreased with increase in number of the power cycles.

The linear heat rating at PCMI (Pellet Cladding Mechanical Interaction) initiation increased with increase in number of the the power cycles.

- ④ The calculated fuel centerline temperatures by FEMAXI-III were in good agreement with the measured values.

Keywords: LWR Fuel Rod, Fuel Centerline Temperature Measurement, JMTR, BOCA, Power Ramp, Power Cycle, Fuel Rod Elongation, FEMAXI-III, BWR

目 次

1. 序 論	1
2. 実 験	2
2.1 BOCA照射設備の概要	2
2.2 実 験 試 料	2
2.3 実 験 方 法	3
3. 線出力評価	3
3.1 線出力評価方法	3
3.2 80 F-2J (Rod 2) の線出力評価	4
3.3 80 F-1J (Rod 1) の線出力評価	5
3.4 線出力評価法の適用範囲	5
3.5 線出力の誤差評価	5
4. 実験結果及び考察	6
4.1 照 射 履 歴	6
4.2 燃料中心温度評価	7
4.3 燃料棒伸び評価	7
4.4 FEMAXI-Ⅲによる被覆管直径変位および最大周方向応力の評価	8
5. 結 論	9
謝 辞	9
参 考 文 献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	2
2.1 Discription of the BOCA facility	2
2.2 Experiment Specimens	2
2.3 Experiment Method	3
3. Evaluation of Linear Heat Rating	3
3.1 Evaluation Method of Linear Heat Rating	3
3.2 Evaluation of Linear Heat Rating of 80F-2J(Rod 2)	4
3.3 Evaluation of Linear Heat Rating of 80F-1J(Rod 1)	5
3.4 Application of Evaluation Method of Linear Heat Rating	5
3.5 Error Evaluation of Linear Heat Rating	5
4. Experiment Results and Discussion	6
4.1 Irradiation History	6
4.2 Evaluation of Fuel Centerline Temperature	7
4.3 Evaluation of Fuel Rod Elongation	7
4.4 Evaluation of Diameter Change and Maximum Hoop Stress in cladding by the FEMAXI-III code	8
5. Conclusions	9
Acknowledgment	9
References	10

1. 序 論

軽水炉燃料の安全性研究のために今後検討すべき項目として、「高燃焼度下での燃料ふるまい」、「過渡時のPCI挙動」、「FPガス放出機構」等が我国あるいは諸外国においてあげられている。それらすべての項目に対して、把握すべき燃料の最も基本的な因子の1つが燃料中心温度である。そのため、各種炉内照射試験においては、燃料中心温度の正確な把握が実験を遂行する上で重要となる。上記観点から、JMTR¹⁾においても燃料中心温度測定技術の開発を主眼とし、次の事項を目的とした照射実験を行ってきた。

- ① 炉内計装技術の確立
- ② 燃料棒設計パラメータの熱的照射挙動に与える影響の調査

JMTRで実施した燃料中心温度測定実験の概要をTable 1に示す。本実験は、OWL-1実験^{2)~8)}とBOCA実験とに大きく分けることができる。前者は、水ループOWL-1を用いた実験であり、後者は、BOCA出力急昇試験設備^{9)~11)}を用いた実験である。従って、前者は主に定常時、後者は出力急昇時の照射を模擬した実験である。前者は3次、後者は2次に亘って実施した。各次の実験パラメータを以下に示す。

OWL-1実験

- 第1次実験：製造時ペレット-被覆管ギャップ幅（100 μm 、200 μm 、300 μm 及び 400 μm ）
- 第2次実験：被覆管仕様（Cuバリヤ付き、Zrライナー付き及び標準）
- 第3次実験：封入ガス成分及び圧力（He 100%で1 atm、He 75%・Xe 25%で1.33 atm及びHe 40%・Xe 60%で5.00 atm）

BOCA実験

- 第1次実験：製造時ペレット-被覆管ギャップ幅（90 μm 及び190 μm ）
- 第2次実験：被覆管の偏平の有無

本実験に用いた燃料棒はすべて8×8型BWR仕様のものである。

本報告書では、実験目的②の観点から、BOCA実験の内、第1次実験について、その実験結果及びその結果を用いて実施した燃料ふるまい計算コードFEMAXI-III¹²⁾の検証結果について述べる。

2. 実 験

2.1 BOCA照射設備の概要

BOCA 照射設備は、軽水炉燃料の出力急昇時における挙動を調べるために設けられたものでキャプセル制御装置、 ^3He 圧力可変装置およびBOCAキャプセルで構成されている。BOCA キャプセルの装荷位置を Fig. 1 に示す。またBOCA 照射設備の概略図を Fig. 2 に示す。

BOCA キャプセルに組込んだ燃料棒の発熱は、キャプセル外筒内部の水の自然対流により外筒に伝えられ原子炉一次冷却水により除熱される。この場合、燃料棒の表面温度は発熱が増すに従って高くなるが、水圧で決まる飽和温度を越えると核沸騰を生じ、発熱量が更に増えても核沸騰が持続し表面温度は飽和温度よりわずかに高い温度に保たれる。BOCA キャプセル内部の冷却水圧力は $73 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ であり、この場合、発熱量が約 250 W/cm 付近から核沸騰が始まり、約 700 W/cm まで燃料棒表面温度はほぼ一定となる。また、燃料棒の線出力の変化は、BOCA キャプセルの周囲に配置された ^3He ガス圧力を変化させることにより行なわれる。 ^3He ガス圧力を $40 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ から $0.5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ に減圧することにより燃料棒線出力を約 2.5 倍増加させることができる。

2.2 実験試料

製造時のペレット-被覆管直径ギャップが異なる2本の燃料棒 Rod 1 及び Rod 2 を実験に供した。各々の製造時直径ギャップは $90 \mu\text{m}$ 及び $190 \mu\text{m}$ である。それらの燃料棒仕様と OWL-1 燃料中心温度測定実験で用いた燃料棒仕様をならべて Table 2 に、また Rod 1 及び Rod 2 の燃料棒組立図を Fig. 3 に示す。UO₂ ペレットは粉末プレス法により成型した後、 1700°C で約3時間焼結し、さらに再焼結して焼きしまりにくいペレットとした。被覆管材は、 8×8 型 BWR 仕様の Zry-2 (再結晶処理) である。

各種の計装品を燃料棒及びBOCAキャプセル内に取付けた。燃料棒には、最高線出力位置(燃料スタックのほぼ中心)での燃料中心温度を測定するため、W/Re 熱電対を燃料棒下部端栓から挿入し、また燃料棒押びを測定するため差動トランス方式の伸び計を上部端栓に取付けた。W/Re 熱電対は、素線が W 5% / 26% Re でシース外径が $\phi 2$ の二重シース(内側材質が Ta, 外側が W 5% / 95% Re) となっており、絶縁材は BeO 粉末である。キャプセルの計装品として自己出力型中性子検出器 (SPND; エミッターが Rh のもの 2 本, Co のもの 1 本) 及び BOCA キャプセル内冷却水温度測定用 C/A 熱電対が軸方向 5 箇所各 1 本ずつ取付けられている。燃料棒及びBOCAキャプセルに取付けた各計装品の位置関係を Fig. 4 に示す。

2.3 実験方法

実験では、出力サイクル及び出力急昇時の燃料ふるまいに対する燃料設計パラメータ（ペレット-被覆管ギャップ）の影響を調べるため、Rod 1 及び Rod 2 の出力を今後商用炉で予想される日負荷追従運転を模擬して数回変動させた後、照射終了直前に急昇させた。実験における両燃料棒の運転パターンを Fig. 5 に示す。この場合、日負荷追従運転を模擬するため、 ^3He ガス圧力を $0.5 \sim 25$ ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) まで約 1 時間で変化させることにより、燃料棒出力を約 50% 変動させた。また出力急昇試験では、 ^3He ガス圧力を 25 ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) の加圧状態から 0.5 ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) まで約 2 分間で減圧させ約 2 倍の出力変化を与えた。

BOCA キャプセルの照射条件は次の通りである。

熱中性子束 (0.682 eV)	6.2×10^{13} n/cm ² ·sec
高速中性子束 (> 1.0 MeV)	2.2×10^{13} n/cm ² ·sec
γ 線加熱率	≈ 2 W/g
冷却水圧力	73 kg/cm ² G
冷却水温度	常温 ~ 288 °C
^3He ガス圧力	$0.5 \sim 40$ kg/cm ² G

3. 線出力評価

3.1 線出力評価方法

出力急昇試験においては、燃料棒の線出力が実験上重要なパラメータであり、燃料棒の照射挙動を解析・評価するにあたっては、線出力が精度良く測定されている必要がある。線出力は、一般にカロリメトリー法により測定される。本実験における線出力も当初 BOCA キャプセル冷却水（原子炉一次冷却水）の出入口温度差及び流量を使ってカロリメトリー法により求める予定であったが、冷却水入口側に取付けてある CA 熱電対の指示値のバラツキが大きく、この方法で線出力を評価した場合、その誤差は約 $\pm 20\%$ となることが判明した。このため本評価では、新たな方法としてカロリメトリー法によらない次の 2 つの線出力評価方法を検討した。

- ① BOCA キャプセル内に取り付けた Rh エミッター SPND の指示値を用いた線出力評価法。すなわち、SPND 出力と SPND の熱中性子に対する感度 (A/ϕ_{th}) よりキャプセル内の熱中性子束を推定し、 UO_2 ペレットの核分裂断面積（核計算値）と SPND 出力より推定した熱中性子束から線出力を求める方法。
- ② OWL-1 で実施した燃料中心温度測定実験データを用いた線出力評価法。すなわち、本評価法では、同実験で得られた燃料中心温度と線出力の関係をもとに、 $80\text{F}-2\text{J}$ (Rod 8) に取付けられた SPND (Rh エミッター) 出力をお互いの燃料中心温度を介して校正する。
- ④ ① について検討した結果、Rh エミッター SPND の熱中性子感度 (A/ϕ_{th}) が測定者により約 $\pm 20\%$ 程度異なっていること、また SPND の出力から熱中性子束を求めるためには、感度

2.3 実験方法

実験では、出力サイクル及び出力急昇時の燃料ふるまいに対する燃料設計パラメータ（ペレット-被覆管ギャップ）の影響を調べるため、Rod 1 及び Rod 2 の出力を今後商用炉で予想される日負荷追従運転を模擬して数回変動させた後、照射終了直前に急昇させた。実験における両燃料棒の運転パターンをFig.5に示す。この場合、日負荷追従運転を模擬するため、 ^3He ガス圧力を0.5～25 (kg/cm²G)まで約1時間で変化させることにより、燃料棒出力を約50%変動させた。また出力急昇試験では、 ^3He ガス圧力を25 (kg/cm²G)の加圧状態から0.5 (kg/cm²G)まで約2分間で減圧させ約2倍の出力変化を与えた。

BOCA キャプセルの照射条件は次の通りである。

熱中性子束 (0.682 eV)	6.2×10^{13} n/cm ² ·sec
高速中性子束 (> 1.0 MeV)	2.2×10^{13} n/cm ² ·sec
r線加熱率	≈ 2 W/g
冷却水圧力	73 kg/cm ² G
冷却水温度	常温～288 ℃
^3He ガス圧力	0.5～40 kg/cm ² G

3. 線出力評価

3.1 線出力評価方法

出力急昇試験においては、燃料棒の線出力が実験上重要なパラメータであり、燃料棒の照射挙動を解析・評価するにあたっては、線出力が精度良く測定されている必要がある。線出力は、一般にカロリメトリー法により測定される。本実験における線出力も当初 BOCA キャプセル冷却水（原子炉一次冷却水）の出入口温度差及び流量を使ってカロリメトリー法により求める予定であったが、冷却水入口側に取付けてある CA 熱電対の指示値のバラツキが大きく、この方法で線出力を評価した場合、その誤差は約±20%となることが判明した。このため本評価では、新たな方法としてカロリメトリー法によらない次の2つの線出力評価方法を検討した。

- ① BOCA キャプセル内に取り付けた Rh エミッター SPND の指示値を用いた線出力評価法。すなわち、SPND 出力と SPND の熱中性子に対する感度 (A/φ_{th}) よりキャプセル内の熱中性子束を推定し、UO₂ ペレットの核分裂断面積 (核計算値) と SPND 出力より推定した熱中性子束から線出力を求める方法。
- ② OWL-1 で実施した燃料中心温度測定実験データを用いた線出力評価法。すなわち、本評価法では、同実験で得られた燃料中心温度と線出力の関係をもとに、80 F-2J (Rod 8) に取付けられた SPND (Rh エミッター) 出力をお互いの燃料中心温度を介して校正する。
- ④ ①について検討した結果、Rh エミッター SPND の熱中性子感度 (A/φ_{th}) が測定者により約±20%程度異なっていること、また SPND の出力から熱中性子束を求めるためには、感度

とともに BOCA キャプセル内における Rh のカドミウム比が必要となるが、現時点では正確なデータがないため、本報告書では②の評価方法によって線出力を評価することとした。

以下に②の評価方法について示す。ハルデン炉等のデータでは、同一ギャップの燃料棒の場合、燃料中心温度が線出力の指標として使用できる事が知られている。

JMTR では、OWL-1 を利用して、これまで3次に亘る燃料中心温度測定実験が実施されており、この実験では Table 2 に示すように 80F-2J に装荷された燃料棒 (Rod 2) とほぼ同一仕様の燃料棒が 78LF-35J 及び 79LF-39J で照射されている。OWL-1 の場合、線出力はカロリメトリ法により求められており、その測定誤差は±4%と見積られている³⁾。Fig. 6 に 78LF-35J 及び 79LF-39J の線出力と燃料中心温度の関係を示す。同図において、1st Ramp, 2nd Ramp は、それぞれ第1回目と第2回目の原子炉起動時に得られたデータである。これより両燃料棒のペレット-被覆管ギャップが約 200 μm と比較的大きいにもかかわらず、1st Ramp, 2nd Ramp 時の燃料中心温度は良く一致していることがわかる。この事は、線出力を推定する指標として燃料中心温度が有効であること、すなわち同図はギャップが 200 μm 前後の燃料棒の線出力と燃料中心温度との校正曲線として使用可能であることを示している。

3.2 80F-2J (Rod 2) の線出力評価

Fig. 6 に示した OWL-1 燃料中心温度測定実験データを用いて、燃料棒仕様がほぼ同一である Rod 2 の線出力を求める方法を Fig. 7 に示す。ここでは、Fig. 7 に示すように OWL-1 実験データとして 79LF-39J から得られた第1回目の原子炉起動時の燃料中心温度と線出力の関係を使用した。これは、同燃料棒の製造時直径ギャップが Rod 2 のそれにより近いこと、また、第1回目の原子炉起動時データの場合、それ以後の照射履歴の違いによる影響を考慮する必要がないからである。従って Rod 2 のデータとして、第1回目の原子炉起動時に得られた燃料中心温度と SPND#2 の関係を使用した。ここで SPND#2 は、Fig. 4 に示すように中心温度測定用熱電対位置の近傍に取り付けられている。

以上のデータをもとに、79LF-39J と Rod 2 の間で燃料中心温度が同じ場合、同一線出力であることにより Rod 2 に取り付けられた SPND#2 を校正し、以後はこの校正曲線を利用し SPND#2 の出力から線出力が得られる。すなわち、Fig. 7 に示すように原子炉出力が 50 MW で、かつ BOCA の ³He ガス圧力が 0.5 kg/cm²G 時の SPND#2 出力 (I (50, 0.5)) に対応する線出力 (Q (50, 0.5)) は、燃料中心温度を媒介として与えられる。次に各照射ステップにおける線出力は、I (50, 0.5) と Q (50, 0.5) を用いて、次式により求める。原子炉出力 X MW, ³He ガス圧力 P (kg/cm²G) 時の線出力 (Q (X, P)) は、

$$Q(X, P) = K(P) \cdot \theta(T) \cdot \frac{I(X, P)}{I(50, 0.5)} \cdot Q(50, 0.5) \quad (1)$$

ただし、

K(P) : 中性子スペクトルの変化(すなわち ³He ガス圧力変化)に伴う SPND#2

と UO_2 ペレットの感度差の補正係数であり、

$$K(P) = \left[\int_0^{\infty} \sigma_f^{235} \phi \, dE / \int_0^{\infty} \sigma_c^{103} \phi \, dE \right] \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 $K(0.5) = 1$ に規格化した値。Fig. 8 に ^3He ガス圧力に対する $K(P)$ を示す。

$\theta(T)$: 冷却水温度に対する SPND の感度補正係数。Fig. 9 に線出力と $\theta(T)$ の関係を示す。上記関係は、伊藤らによる SPND 実験データ¹³⁾ (温度による SPND の感度変化) および石井らによる BOCA 炉外実験データ⁹⁾ (線出力とキャプセル内冷却水温度) を使って求めた。

$I(X, P)$: 原子炉出力 X MW, ^3He ガス圧力 P ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) 時の SPND #2 出力

$I(50, 0.5)$: 原子炉出力 50 MW, ^3He ガス圧力 0.5 ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) 時の SPND #2 出力
($= 3.85 \times 10^{-7} \text{A}$)

$Q(50, 0.5)$: 原子炉出力 50 MW, ^3He ガス圧力 0.5 ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) 時の線出力 ($= 486 \text{W}/\text{cm}$)

3.3 80F-1J (Rod 1) の線出力評価

Rod 1 の線出力は、上述した $Q(X, P)$ の関係式に Rod 1 と Rod 2 に取付けられた SPND #2 間の感度の違いを補正することにより求められる。ここでは、SPND #2 間の感度の違いを、第 1 回目の原子炉起動時における原子炉出力とそれぞれの SPND #2 出力との関係を調べるにより求めた。Fig. 10 に原子炉出力と SPND 出力の関係を示す。Rod 1 の SPND 感度は、Rod 2 の SPND に比べ約 3% 低い。

3.4 線出力評価法の適用範囲

OWL-1 における燃料中心温度測定実験では、冷却水が常に飽和温度に近いのに対して、BOCA キャプセルにおいては低線出力領域では、冷却水の沸騰は起らない。Fig. 11 に OWL-1 と BOCA キャプセルにおける燃料棒線出力と被覆管表面温度の関係を示す。Fig. 10 において、OWL-1 における被覆管表面温度は FREG-4¹⁴⁾ による計算値、BOCA キャプセルの場合は、BOCA キャプセルの炉外試験データ⁹⁾ である。これより、OWL-1 と BOCA キャプセルにおける燃料棒被覆管表面温度は、線出力が $200 \text{W}/\text{cm}$ 以上であれば、その違いが 10°C 以内であることがわかる。従って、本線出力評価法は、 $200 \text{W}/\text{cm}$ 以上の線出力に対して有効と考えられる。

3.5 線出力の誤差評価

上述した方法により線出力を評価する場合、誤差の要因として以下の 3 つが考えられる。

- ① OWL-1 における線出力測定誤差 (ϵ_1)

OWL-1におけるカロリメトリー法による線出力測定誤差は±4%である。

② Rod 1 及び Rod 2 の SPND #2 の誤差 (ϵ_2)

SPND #2 出力を ^3He ガス圧力および原子炉出力条件で整理し、そのバラツキの統計処理を行った。その結果、標準偏差は±3%であり、ここではこの値を SPND の誤差とした。

③ K(P) の誤差 (ϵ_3)

^3He ガス圧力を 0.5 kg/cm²G から増圧することにより BOCA キャプセル内の中性子スペクトルが変化する。この場合、SPND の Rh エミッターと UO₂ ペレットでは中性子に対する反応断面積が異なるため、SPND 指示値と線出力の変化は比例しない。K(P) は、両者の中性子に対する感度の違いを補正するための係数であり、核計算コード SRAC システム¹⁵⁾ を用いて求めた。SRAC システムの BOCA 試料に関する計算精度は、臨界実験装置 (JMTRC) を用いた ^3He -BOCA 核的模擬実験より約±6%であることが確認されている。

以上より、Rod 1, Rod 2 の線出力を本評価法により求めた場合の誤差は、以下のように推定される。

i) ^3He ガス圧力 = 0.5 (kg/cm²G) の場合

$$\begin{aligned}\epsilon &= \pm \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} \\ &= \pm \sqrt{4^2 + 3^2} = \pm 5\%\end{aligned}$$

ii) ^3He ガス圧力 > 0.5 (kg/cm²G) の場合

$$\begin{aligned}\epsilon &= \pm \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2} \\ &= \pm \sqrt{4^2 + 3^2 + 6^2} = \pm 8\%\end{aligned}$$

なお、燃料中心温度測定用熱電対の測定誤差は、銀の融点温度 (961.93℃) における熱電対出力のバラツキが±0.1%以内であるので無視した。

4. 実験結果及び考察

4.1 照射履歴

Rod 1 及び Rod 2 の照射履歴 (原子炉出力, 燃料中心温度, 線出力, ^3He ガス圧力) をそれぞれ Fig. 12, Fig. 13 に示す。照射前半では ^3He ガス圧力を 0.5 ~ 25 (kg/cm²G) の範囲でランプ状に変化させることにより、軽水炉の日負荷追従運転を模擬した出力サイクル試験を行った。この時 Rod 1 及び Rod 2 の線出力は、約 200 W/cm ~ 430 W/cm の範囲で変化した。また、照射直前に ^3He ガス圧力を 25 (kg/cm²G) から 0.5 (kg/cm²G) まで急激に減圧させて出力急昇試験を実施した。 ^3He ガスの急激な減圧により Rod 1 の線出力は 203 W/cm から最高出力 408 W/cm まで出力急昇速度 104 W/cm・min で上昇した。一方、Rod 2 の線出力は 204 W/cm から最高出

OWL-1におけるカロリメトリー法による線出力測定誤差は±4%である。

② Rod 1 及び Rod 2 の SPND #2 の誤差 (ϵ_2)

SPND #2 出力を ^3He ガス圧力および原子炉出力条件で整理し、そのバラツキの統計処理を行った。その結果、標準偏差は±3%であり、ここではこの値を SPND の誤差とした。

③ K(P) の誤差 (ϵ_3)

^3He ガス圧力を $0.5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ から増圧することにより BOCA キャプセル内の中性子スペクトルが変化する。この場合、SPND の Rh エミッターと UO_2 ペレットでは中性子に対する反応断面積が異なるため、SPND 指示値と線出力の変化は比例しない。K(P) は、両者の中性子に対する感度の違いを補正するための係数であり、核計算コード SRAC システム¹⁵⁾ を用いて求めた。SRAC システムの BOCA 試料に関する計算精度は、臨界実験装置 (JMTRC) を用いた ^3He -BOCA 核的模擬実験より約±6%であることが確認されている。

以上より、Rod 1, Rod 2 の線出力を本評価法により求めた場合の誤差は、以下のように推定される。

i) ^3He ガス圧力 = $0.5 \text{ (kg/cm}^2\text{G)}$ の場合

$$\begin{aligned}\epsilon &= \pm \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} \\ &= \pm \sqrt{4^2 + 3^2} = \pm 5\%\end{aligned}$$

ii) ^3He ガス圧力 $> 0.5 \text{ (kg/cm}^2\text{G)}$ の場合

$$\begin{aligned}\epsilon &= \pm \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2} \\ &= \pm \sqrt{4^2 + 3^2 + 6^2} = \pm 8\%\end{aligned}$$

なお、燃料中心温度測定用熱電対の測定誤差は、銀の融点温度 (961.93°C) における熱電対出力のバラツキが±0.1%以内であるので無視した。

4. 実験結果及び考察

4.1 照射履歴

Rod 1 及び Rod 2 の照射履歴 (原子炉出力, 燃料中心温度, 線出力, ^3He ガス圧力) をそれぞれ Fig. 12, Fig. 13 に示す。照射前半では ^3He ガス圧力を $0.5 \sim 25 \text{ (kg/cm}^2\text{G)}$ の範囲でランプ状に変化させることにより、軽水炉の日負荷追従運転を模擬した出力サイクル試験を行った。この時 Rod 1 及び Rod 2 の線出力は、約 $200 \text{ W/cm} \sim 430 \text{ W/cm}$ の範囲で変化した。また、照射直前に ^3He ガス圧力を $25 \text{ (kg/cm}^2\text{G)}$ から $0.5 \text{ (kg/cm}^2\text{G)}$ まで急激に減圧させて出力急昇試験を実施した。 ^3He ガスの急激な減圧により Rod 1 の線出力は 203 W/cm から最高出力 408 W/cm まで出力急昇速度 $104 \text{ W/cm} \cdot \text{min}$ で上昇した。一方、Rod 2 の線出力は 204 W/cm から最高出

力431 W/cmまで出力急昇速度115 W/cm・minで上昇した。

4.2 燃料中心温度評価

Rod 1及びRod 2の燃料中心温度と線出力の関係を、各々Fig. 14及びFig. 15に示す。これらの図において1st(○印)、2nd(△印)は、それぞれ第1回目と第2回目の原子炉起動時データを示し、3rd~7th(●印)は³Heガス圧力変更時データを示している。また破線は、FEMAXI-IIIコードによる計算値を示す。Rod 1及びRod 2のFEMAXI-IIIコード入力データを各々Table 3(Rod 1)及びTable 4(Rod 2)に示す。

Fig. 14及びFig. 15より以下のことがわかる。

- ① Rod 1(直径ギャップ: 90 μm)とRod 2(直径ギャップ: 190 μm)の燃料中心温度は、線出力300 W/cmにおいて、各々約1000℃及び約1120℃であり、ペレット-被覆管ギャップの違いによる燃料中心温度の差は、同線出力において120℃である。
- ② Rod 1及びRod 2の燃料中心温度は、共に第1回目原子炉起動時よりも第2回目原子炉起動時の方が高い。第1回目と第2回目の燃料中心温度の差は、線出力300 W/cmにおいてRod 1で約50℃、Rod 2で約60℃である。また、第2回目原子炉起動時以後の出力サイクル時の燃料中心温度は、第2回目原子炉起動時とほぼ同じである。
- ③ FEMAXI-IIIによる燃料中心温度の計算値は、第2回目原子炉起動時以後の実験データと良い一致を示す。しかし計算値では、②で述べたような第1回目と第2回目原子炉起動時における燃料中心温度の違いは見られない。

次に出力急昇試験時におけるRod 1及びRod 2の燃料中心温度の過渡変化をFig. 16に示す。同図より以下のことがわかる。

- ① Rod 1及びRod 2の燃料中心温度は、出力急昇によりほぼ直線的に上昇し、最高線出力到達後は一定値を示している。
- ② 出力急昇後の燃料中心温度は、出力急昇実施以前における同一線出力での値とほぼ等しい。
- ③ 出力急昇試験前後におけるFEMAXI-IIIによる計算値(同図中の破線)は、実験データに良く一致している。

4.3 燃料棒伸び評価

Rod 1およびRod 2には、照射中における燃料棒伸びを測定するため伸び計を取り付けたが、Rod 1の伸び計は原子炉起動中に故障したため、データが得られなかった。従って、ここではRod 2の伸びを評価した結果について述べる。

燃料棒伸びは、差動トランス方式の伸び計により測定した。この場合、差動トランスの一次側には400 Hz、50 mAの電流を入力することにより、二次側に得られる2つの出力(E_1 、 E_2)を演算処理($(E_1 - E_2)/(E_1 + E_2)$)し、これを炉外校正データと比較して伸びが求められる。すなわち、 $R = (E_1 - E_2)/(E_1 + E_2)$ とすると、伸び(l)は炉外校正データより次式で得られる。

- ① 伸び計温度が 50℃未満の場合

$$l = -10.730 \cdot R + 0.7651$$

- ② 伸び計温度が 50℃以上の場合

$$l = -10.766 \cdot R + 0.7651$$

しかし実際の燃料棒の伸びを評価する場合、以下の理由により、伸び計から得られる伸びの指示値に BOCA キャプセル外筒の熱膨張を加え補正する必要がある。すなわち、燃料棒は BOCA キャプセル外筒の下部端栓に、また伸び計（差動トランス）は上部端栓に取り付けられているため、発熱量が増大して燃料棒が伸びるとともに BOCA キャプセル外筒も伸び、伸び計は燃料棒と BOCA キャプセル外筒の伸びの差を指示する。

Fig. 17 に、キャプセルの熱膨張を補正し、かつ被覆管の熱膨張を差し引いた燃料スタック伸び量（すなわち PCMI による伸び量）を実線で示す。同図において 1st（○印）、2nd（△印）は、それぞれ第 1 回目と第 2 回目の原子炉起動時データであり、3rd（□印）は、³He ガス圧力変更時データである。また FEMAXI-III による計算値（破線）も合わせて示した。この場合計算値は、最高線出力部における被覆管軸方向ひずみを FEMAXI-III により計算し、これに燃料スタック長の 400mm を乗じて求めた伸び量から被覆管の熱膨張を差し引くことにより求めた。これより以下のことがわかる。

- ① Rod 2 の燃料スタック伸び量は、第 1 回目原子炉起動時も大きく、この場合 486W/cm で 240 μm である。そして第 2 回目原子炉起動時以後は伸び量が減少する。
- ② PCMI が開始する線出力は、第 1 回目原子炉起動時において約 300 W/cm であり、第 2 回目原子炉起動時以降は、第 1 回目よりも高くなる。
- ③ FEMAXI-III による計算結果は、実験データの傾向に良く追従している。また、PCMI 開始線出力計算値は 347 W/cm である。

なお、第 4 回目以後の出力上昇（出力急昇試験時を含む）においては、PCMI による燃料棒伸びが認められなかった。

4.4 FEMAXI-III による被覆管直径変位及び最大周方向応力の評価

FEMAXI-III により Rod 1 及び Rod 2 の被覆管直径変位と最大周方向応力を出力履歴をもとに計算した。それらの結果を各々 Fig. 18 (Rod 1) 及び Fig. 19 (Rod 2) に示す。これらの計算結果より次のことがわかる。

被覆管直径変位は、線出力が約 400 W/cm の場合 Rod 1 が約 40 μm、Rod 2 が約 20 μm であり、Rod 1 は Rod 2 に比べほぼ 2 倍の直径増加を生じる。また Rod 1 の場合、線出力が約 200 W/cm から約 400 W/cm に変化すると約 2 倍の直径変化を生じるのに対し、Rod 2 では直径増加が約 10% ときわめて小さい。

一方最大周方向応力については、両 Rod とも第 1 回目原子炉起動時が最も大きく、Rod 1 が約 140 MPa、Rod 2 が約 2 MPa であり、照射が進むとともに減少傾向を示す。この場合 Rod

2の周方向応力は、第1回目原子炉起動時を除くと冷却水圧力により圧縮応力となっている。

5. 結 論

BOCA キャプセルを用いて、製造時ペレット-被覆管ギャップが異なる2本の燃料棒Rod 1（直径ギャップ：90 μm ）及びRod 2（直径ギャップ：190 μm ）の燃料中心温度及び燃料棒伸び（Rod 2のみ）を測定し、その測定データとFEMAXI-IIIによる計算値を比較した結果以下の知見を得た。

- ① Rod 1 及び Rod 2 の燃料中心温度は、線出力300 W/cmにおいて、Rod 1が約1000 $^{\circ}\text{C}$ 、Rod 2が約1120 $^{\circ}\text{C}$ であり、ギャップの違いによる燃料中心温度差は、同線出力において約120 $^{\circ}\text{C}$ であった。
- ② 両燃料棒の燃料中心温度は、共に第1回目原子炉起動時よりも第2回目原子炉起動時の方が高かった。第1回目と第2回目の燃料中心温度差は、線出力300 W/cmにおいてRod 1が約50 $^{\circ}\text{C}$ 、Rod 2が約60 $^{\circ}\text{C}$ であった。また、第2回目原子炉起動時以後の出力サイクル（負荷追従運転模擬）及び出力急昇時における燃料中心温度VS線出力の曲線は、第2回目原子炉起動時のものとほぼ同じであった。
- ③ FEMAXI-IIIによる燃料中心温度の計算値は、第2回目原子炉起動時以後の実験データと良い一致を示した。しかし計算値では、②で述べたような第1回目と第2回目原子炉起動時における燃料中心温度に違いがみられなかった。
- ④ Rod 2のPCMIによる伸びは、第1回目原子炉起動時が最も大きく、線出力486 W/cmで240 μm の伸びを示した。この時のPCMI開始線出力は約300 W/cmであり、PCMI開始線出力は、出力サイクル数と共に上昇した。
- ⑤ FEMAXI-IIIで計算した被覆管軸方向ひずみから190 μm ギャップ棒の伸びを求め実験データと比較した。その結果、計算値は実験データの傾向に良く追従している。

謝 辞

本実験を実施するにあたり、照射第1課の石井忠彦氏、土田昇氏及び佐川尚司氏には、実験準備及びデータ採取において協力をいただいた。

照射第2課中田宏勝氏には、燃料棒伸びを評価する上で有意義な助言をいただいた。

また、BOCA照射設備の運転にあたっては、照射第2課の方々に協力をいただいた。

以上、記して心から謝意を表します。

2の周方向応力は、第1回目原子炉起動時を除くと冷却水圧力により圧縮応力となっている。

5. 結 論

BOCA キャプセルを用いて、製造時ペレット-被覆管ギャップが異なる2本の燃料棒Rod 1（直径ギャップ：90 μm ）及びRod 2（直径ギャップ：190 μm ）の燃料中心温度及び燃料棒伸び（Rod 2のみ）を測定し、その測定データとFEMAXI-IIIによる計算値を比較した結果以下の知見を得た。

- ① Rod 1 及び Rod 2 の燃料中心温度は、線出力300W/cmにおいて、Rod 1が約1000 $^{\circ}\text{C}$ 、Rod 2が約1120 $^{\circ}\text{C}$ であり、ギャップの違いによる燃料中心温度差は、同線出力において約120 $^{\circ}\text{C}$ であった。
- ② 両燃料棒の燃料中心温度は、共に第1回目原子炉起動時よりも第2回目原子炉起動時の方が高かった。第1回目と第2回目の燃料中心温度差は、線出力300W/cmにおいてRod 1が約50 $^{\circ}\text{C}$ 、Rod 2が約60 $^{\circ}\text{C}$ であった。また、第2回目原子炉起動時以後の出力サイクル（負荷追従運転模擬）及び出力急昇時における燃料中心温度VS線出力の曲線は、第2回目原子炉起動時のものとほぼ同じであった。
- ③ FEMAXI-IIIによる燃料中心温度の計算値は、第2回目原子炉起動時以後の実験データと良い一致を示した。しかし計算値では、②で述べたような第1回目と第2回目原子炉起動時における燃料中心温度に違いがみられなかった。
- ④ Rod 2のPCMIによる伸びは、第1回目原子炉起動時が最も大きく、線出力486W/cmで240 μm の伸びを示した。この時のPCMI開始線出力は約300W/cmであり、PCMI開始線出力は、出力サイクル数と共に上昇した。
- ⑤ FEMAXI-IIIで計算した被覆管軸方向ひずみから190 μm ギャップ棒の伸びを求め実験データと比較した。その結果、計算値は実験データの傾向に良く追従している。

謝 辞

本実験を実施するにあたり、照射第1課の石井忠彦氏、土田昇氏及び佐川尚司氏には、実験準備及びデータ採取において協力をいただいた。

照射第2課中田宏勝氏には、燃料棒伸びを評価する上で有意義な助言をいただいた。

また、BOCA照射設備の運転にあたっては、照射第2課の方々に協力をいただいた。

以上、記して心から謝意を表します。

2の周方向応力は、第1回目原子炉起動時を除くと冷却水圧力により圧縮応力となっている。

5. 結 論

BOCA キャプセルを用いて、製造時ペレット-被覆管ギャップが異なる2本の燃料棒Rod 1 (直径ギャップ: $90\ \mu\text{m}$)及びRod 2 (直径ギャップ: $190\ \mu\text{m}$)の燃料中心温度及び燃料棒伸び(Rod 2のみ)を測定し、その測定データとFEMAXI-IIIによる計算値を比較した結果以下の知見を得た。

- ① Rod 1及びRod 2の燃料中心温度は、線出力 $300\ \text{W/cm}$ において、Rod 1が約 $1000\ ^\circ\text{C}$ 、Rod 2が約 $1120\ ^\circ\text{C}$ であり、ギャップの違いによる燃料中心温度差は、同線出力において約 $120\ ^\circ\text{C}$ であった。
- ② 両燃料棒の燃料中心温度は、共に第1回目原子炉起動時よりも第2回目原子炉起動時の方が高かった。第1回目と第2回目の燃料中心温度差は、線出力 $300\ \text{W/cm}$ においてRod 1が約 $50\ ^\circ\text{C}$ 、Rod 2が約 $60\ ^\circ\text{C}$ であった。また、第2回目原子炉起動時以後の出力サイクル(負荷追従運転模擬)及び出力急昇時における燃料中心温度VS線出力の曲線は、第2回目原子炉起動時のものとほぼ同じであった。
- ③ FEMAXI-IIIによる燃料中心温度の計算値は、第2回目原子炉起動時以後の実験データと良い一致を示した。しかし計算値では、②で述べたような第1回目と第2回目原子炉起動時における燃料中心温度に違いがみられなかった。
- ④ Rod 2のPCMIによる伸びは、第1回目原子炉起動時が最も大きく、線出力 $486\ \text{W/cm}$ で $240\ \mu\text{m}$ の伸びを示した。この時のPCMI開始線出力は約 $300\ \text{W/cm}$ であり、PCMI開始線出力は、出力サイクル数と共に上昇した。
- ⑤ FEMAXI-IIIで計算した被覆管軸方向ひずみから $190\ \mu\text{m}$ ギャップ棒の伸びを求め実験データと比較した。その結果、計算値は実験データの傾向に良く追従している。

謝 辞

本実験を実施するにあたり、照射第1課の石井忠彦氏、土田昇氏及び佐川尚司氏には、実験準備及びデータ採取において協力をいただいた。

照射第2課中田宏勝氏には、燃料棒伸びを評価する上で有意義な助言をいただいた。

また、BOCA照射設備の運転にあたっては、照射第2課の方々に協力をいただいた。

以上、記して心から謝意を表します。

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(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実験(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) 安藤弘栄, 他：JAERI-M 83-003, “燃料中心温度測定実験第1次試料(77LF-33J)の実験総合報告”, (1983).
- 6) 河村弘, 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).
- 7) 伊藤昇, 他：JAERI-M 82-187, “JMTRにおける燃料中心温度測定実験(V) - 第2次燃料試料の設計製作-”, (1982).
- 8) 河村弘, 他：JAERI-M 83-133, “JMTRにおける軽水炉燃料の局所線出力評価法(OWL-1照射孔)”, (1983).
- 9) 中田宏勝, 他：JAERI-M 8533, “ ^3He -BOCA出力急昇試験設備の開発・1”, (1979).
- 10) 中田宏勝, 他：JAERI-M 9343, “ ^3He -BOCA出力急昇試験設備の開発・2”, (1981).
- 11) 中田宏勝, 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).
- 12) 中島鉄雄, 他：JAERI-M 9251, “FEMAXI-III軸対称有限要素法による燃料ふるまいコード”, (1981).
- 13) 伊藤治彦, 他：私信「JMTRキャプセルプログレスレポート(SPDのJRR-4における実験)」, (1979).
- 14) 原山泰雄, 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).
- 15) 土橋敬一郎, 他：JAERI-1285, “SRAC：核設計と解析のための原研熱中性子炉標準化コードシステム”, (1983).

Table 1 燃料中心温度測定実験の概要

Experiment Item	OWL-1 Experiments			BOCA Experiments	
	1st	2nd	3rd	1st	2nd
Irradiation Facilities	OWL-1			BOCA	
Name of Irradiation Assemblies and Capsules	77LF-33J	78LF-35J	79LF-39J	80F-1J 80F-2J	81F-8J 81F-9J
Number of Fuel Rods	4	3	3	2*	2*
Experiment Parameters	P/C	Cladding	Gap Gas	P/C	Cladding
	Gap	Specification	Content	Gap	Ovality

* Each fuel rod is inserted to each capsule.

Table 2 80F-2JとOWL-1燃料中心温度測定実験用燃料棒の製造時データ

項目		燃料試料	80F-1J	80F-2J	78LF-35J	79LF-39J
²³⁵ U濃縮度(W/O)			2.790	2.790	1.486	2.304
UO ₂ ペレット	密度(%T.D.)		95.0	94.7	95.0	94.7
	焼結温度(°C)		1,700	1,700	1,700	1,700
	O/U比		2.01	2.01	2.009	2.01
	長さ(mm)		10.95	10.86	10.90	11.15
	直径(mm)		10.70	10.60	10.59	10.60
	スタック長さ(mm)		404.50	400.65	615.1	618.1
	形状(mm)		チャンファ付き 幅 0.2 深さ 0.1	チャンファ付き 幅 0.2 深さ 0.1	フラット	フラット
被覆管	内径(mm)		10.79	10.79	10.80	10.80
	外径(mm)		12.53	12.53	12.50	12.51
ペレット/被覆管直径ギャップ(μm)			90	190	210	200
充てんガス			He	He	He	He
充てんガス圧力(atm)			1.0	1.0	1.0	1.0
プレナム容積(cm ³)			5.5	5.5	6.3	5.3

Table 3 80 F-1 J 入力データ

		INPUT DATA LIST							
CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	
1.	FEMAXI 80F-1J								
2.	YINPUT INPCK=0 YEND								
3.	R	4	2						
4.	0	1.079	1.252						
5.	0	1	0.23	1.07	1.1	0.0279	0.95	5.05	
6.	0	1	0.23						
7.	0	1	0.23						
8.	0	1	0.23						
9.	0	1	0.0						
10.	0	1	0.0						
11.	0	1	0.0						
12.	0	1	0.0						
13.	0.02	0.01							
14.	5.5	0.098	1.0	0.0	0.0	0.0	367.2		
15.	44								
16.						323.0	7.4		
17.	0.8860.9530.9941.0000.9720.9150.8350.741	44							
18.	2.088	193.		8.8 E12	558.0				
19.	33.192	174.		8.8 E12	548.0				
20.	33.336	291.		1.3 E13	565.0				
21.	37.752	291.		1.3 E13	565.				
22.	38.088	371.		1.7 E13	565.				
23.	40.584	377.		1.7 E13	565.				
24.	40.752	427.		2.0 E13	565.				
25.	41.256	427.		2.0 E13	565.				
26.	41.424	474.		2.22E13	565.				
27.	57.096	437.		2.22E13	565.				
28.	57.192	250.		1.1 E12	565.				
29.	57.576	257.		1.1 E12	565.				
30.	61.752	258.		1.2 E12	565.				
31.	62.088	338.		1.7 E13	565.				
32.	64.584	350.		1.7 E13	565.				
33.	64.92	437.		2.0 E13	565.				
34.	65.52	437.		2.0 E13	565.				
35.	69.6	167.		2.0 E13	548.				
36.	82.056	170.		2.0 E13	548.				
37.	85.416	430.		2.0 E13	565.				
38.	85.656	430.		2.0 E13	565.				
39.	86.496	206.		2.0 E13	565.				
40.	115.248	202.		2.0 E13	565.				
41.	116.376	425.		2.0 E13	565.				
42.	127.248	425.		2.0 E13	565.				
43.	128.16	202.		2.0 E13	565.				
44.	139.248	202.		2.0 E13	565.				
45.	140.712	429.		2.0 E13	565.				
46.	151.248	429.		2.0 E13	565.				
47.	152.256	203.		2.0 E13	565.				
48.	163.248	203.		2.0 E13	565.				
49.	164.424	419.		2.0 E13	565.				
50.	175.248	424.		2.0 E13	565.				
51.	176.256	203.		2.0 E13	565.				
52.	257.512	195.		2.0 E13	565.				
53.	0.03333	407.		2.0 E13	565.				
54.	0.2							-100	1
55.	0.4							-100	1
56.	0.6								
57.	0.8								
58.	1.0								
59.	1.248	407.		2.0 E13	565.				
60.	1.249	0.001		2.0 E 9	323.				
61.	STOP								

Table 4 80 F-2 J入力データ

		INPUT DATA LIST							
CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	
1.	FEMAXI-3 CALCULATION 80F-2J								
2.	YINPUT INPCK=0 YEND								
3.	8	4	2						
4.	0	1.079	1.252						
5.	0	1	0.23	1.060	1.1	0.0279	0.95	5.00	
6.	0	1	0.23					5.00	
7.	0	1	0.23					5.00	
8.	0	1	0.23					5.00	
9.	0	1	0.0					5.00	
10.	0	1	0.0					5.00	
11.	0	1	0.0					5.00	
12.	0	1	0.0					5.00	
13.	0.02	0.01							
14.	5.5	0.098	1.0	0.0	0.0	0.0	351.0		
15.	44								
16.					323.0	7.4			
17.	0.8860	9530.9941	0.0000	9720.9150	8350.741		44		
18.	4.872		178.	8.1 E12	548.0				
19.	5.712		301.	1.4 E13	565.0				
20.	8.4		393.	1.8 E13	565.0				
21.	11.16		434.	2.0 E13	565.				
22.	11.832		486.	2.22E13	565.				
23.	18.864		486.	2.22E13	565.				
24.	19.944		0.001	2.0 E 9	323.				
25.	1728.		0.001	2.0 E 9	323.				
26.	1730.		123.	5.1 E12	503.				
27.	1733.		175.	8.1 E12	548.				
28.	1734.		297.	1.4 E12	565.				
29.	1737.		384.	1.8 E13	565.				
30.	1739.		455.	2.22E13	565.				
31.	1757.		423.	2.22E13	565.				
32.	1757.376		214.	2.22E13	565.				
33.	1757.832		214.	2.22E13	565.				
34.	1757.928		300.	2.22E13	565.				
35.	1780.8		319.	2.22E13	565.				
36.	1781.712		173.	2.22E13	548.				
37.	1800.96		173.	2.22E13	548.				
38.	1804.56		433.	2.22E13	565.				
39.	1804.824		433.	2.22E13	565.				
40.	1805.64		205.	2.22E13	565.				
41.	1831.56		205.	2.22E13	565.				
42.	1832.496		0.001	2.0 E 9	323.				
43.	1877.04		0.001	2.0 E 9	323.				
44.	1877.496		217.	1.0 E13	565.				
45.	1877.784		292.	1.4 E13	565.				
46.	1880.64		380.	1.7 E13	565.				
47.	1883.472		458.	2.22E13	565.				
48.	1884.576		453.	2.22E13	565.				
49.	1884.888		214.	2.22E13	565.				
50.	1895.808		214.	2.22E13	565.				
51.	1896.936		439.	2.22E13	565.				
52.	1907.808		434.	2.22E13	565.				
53.	1908.408		204.	2.22E13	565.				
54.	1923.968		198.	2.22E13	565.				
55.	0.01667		431.	2.22E13	565.		-100 1		
56.	1.0						-100		
57.	3.0								
58.	5.0								
59.	5.815		431.	2.22E13	565.			1	
60.	5.816		0.001	2.0 E 9	323.				
61.	STOP								

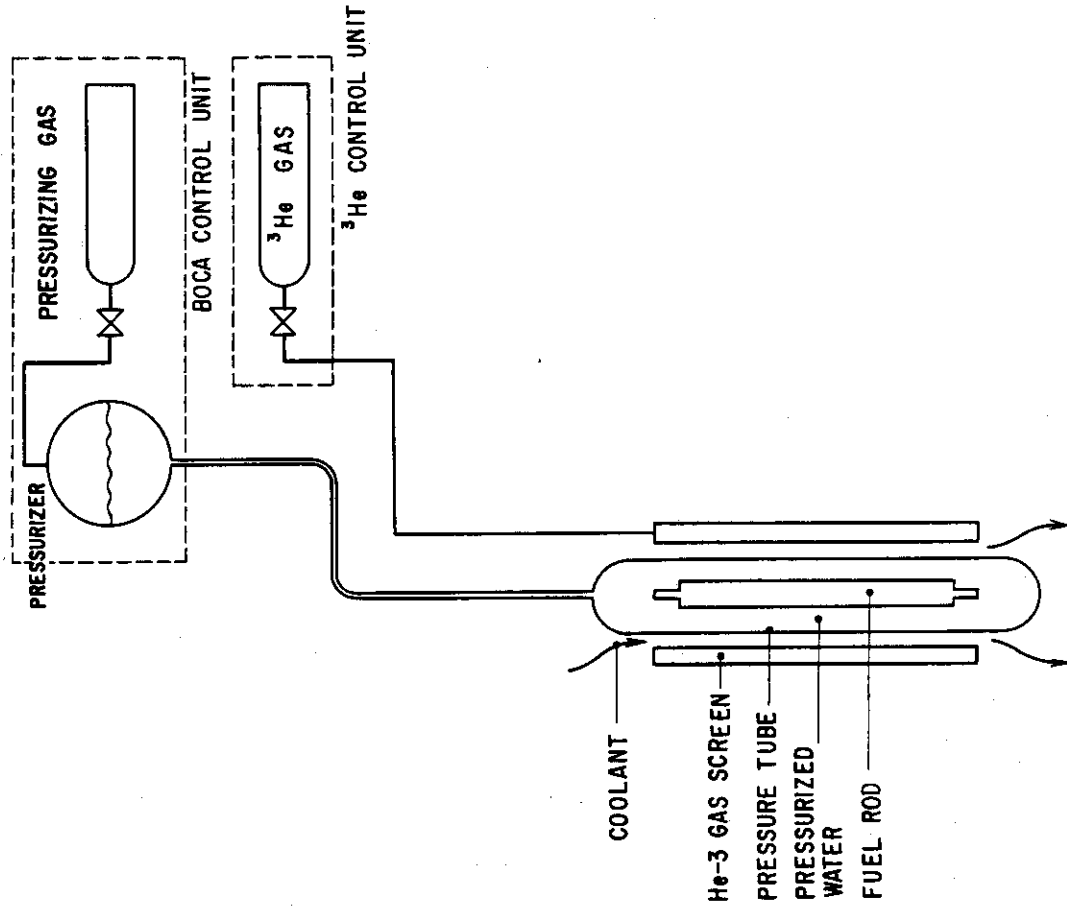


Fig. 2 BOCA照射設備の概略図⁹⁾

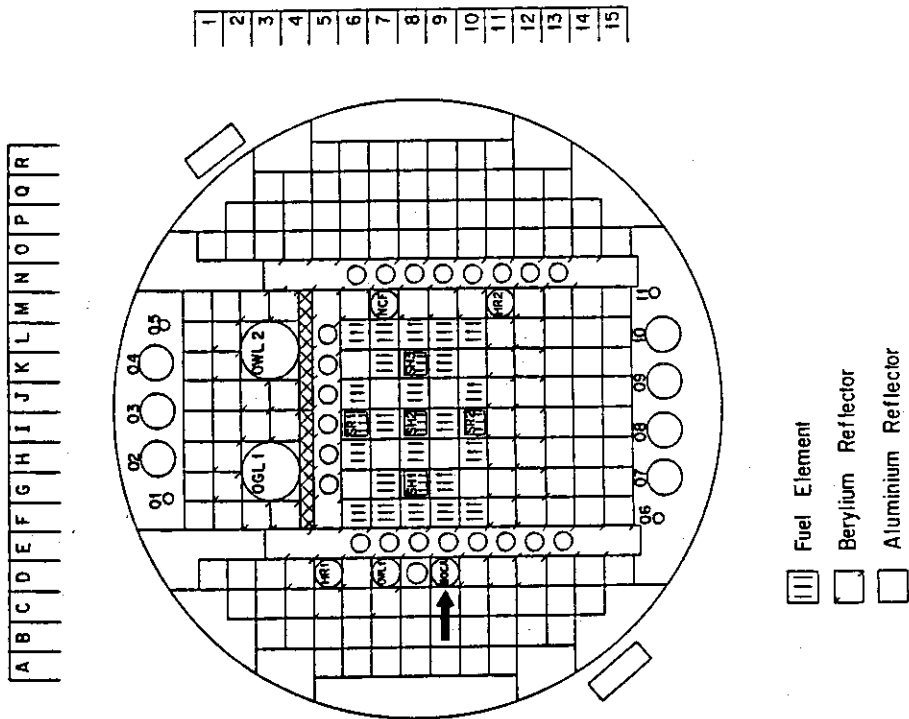
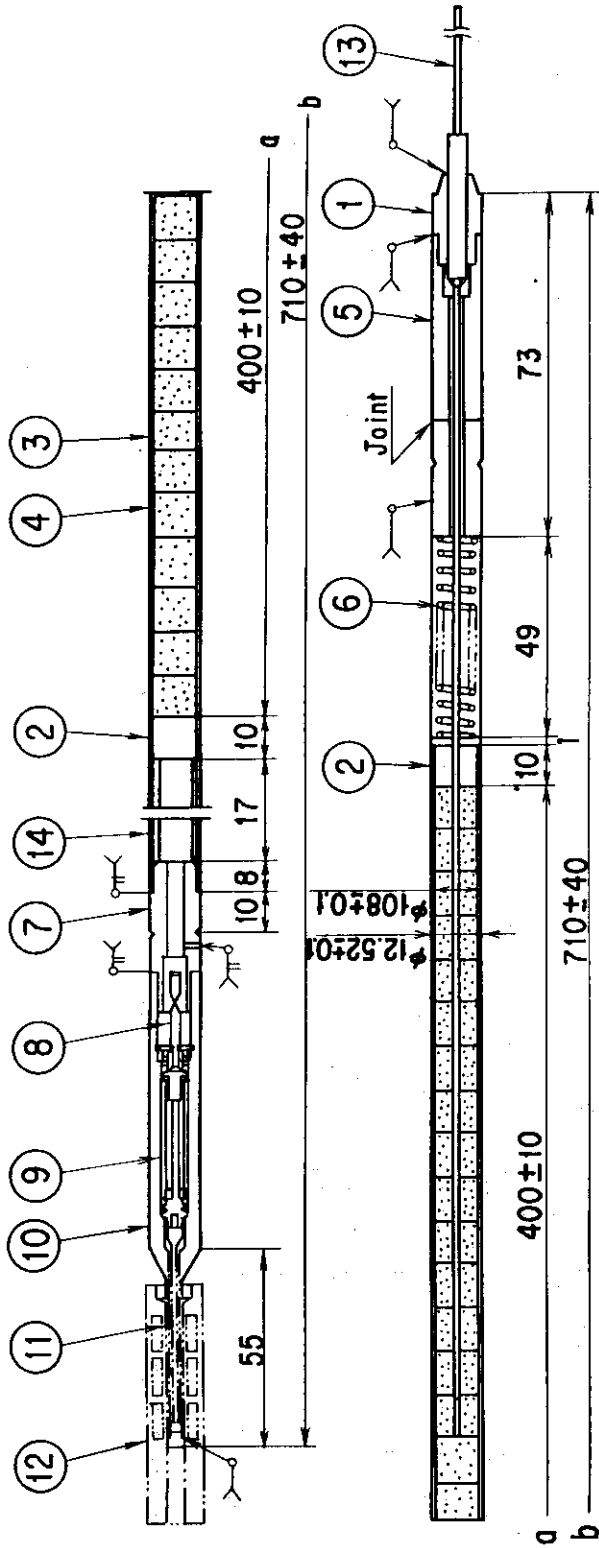


Fig. 1 JMTR炉心装荷図



14	Sleeve	SUS 304	
13	Thermocouple	W5/26 Re	BeO, W95Re Sheath, $\phi 2$
12	Differential transformer		
11	Core	SUS 410	for the Differential Transformer
10	Bellows housing	Zry - 2	
9	Bellows	SUS 304	Inner Pressure 14 atm at 20°C, He
8	Pipe	SUS 304	for filling He in the Fuel Rod
7	Upper End Plug	Zry - 2	
6	Spring	Inconel - X	
5	Transition Joint	SUS304/Zry-4	
4	Cladding	Zry - 2	$\phi 12.5^{+0.05}$, $x 10.86$
3	UO ₂ Pellet	2.8% EUO ₂	
2	Adiactic Pellet	Al ₂ O ₃	
1	Lower End Plug	SUS 304	
No.	Part's Name	Material	

Fig. 3 燃料棒組立図

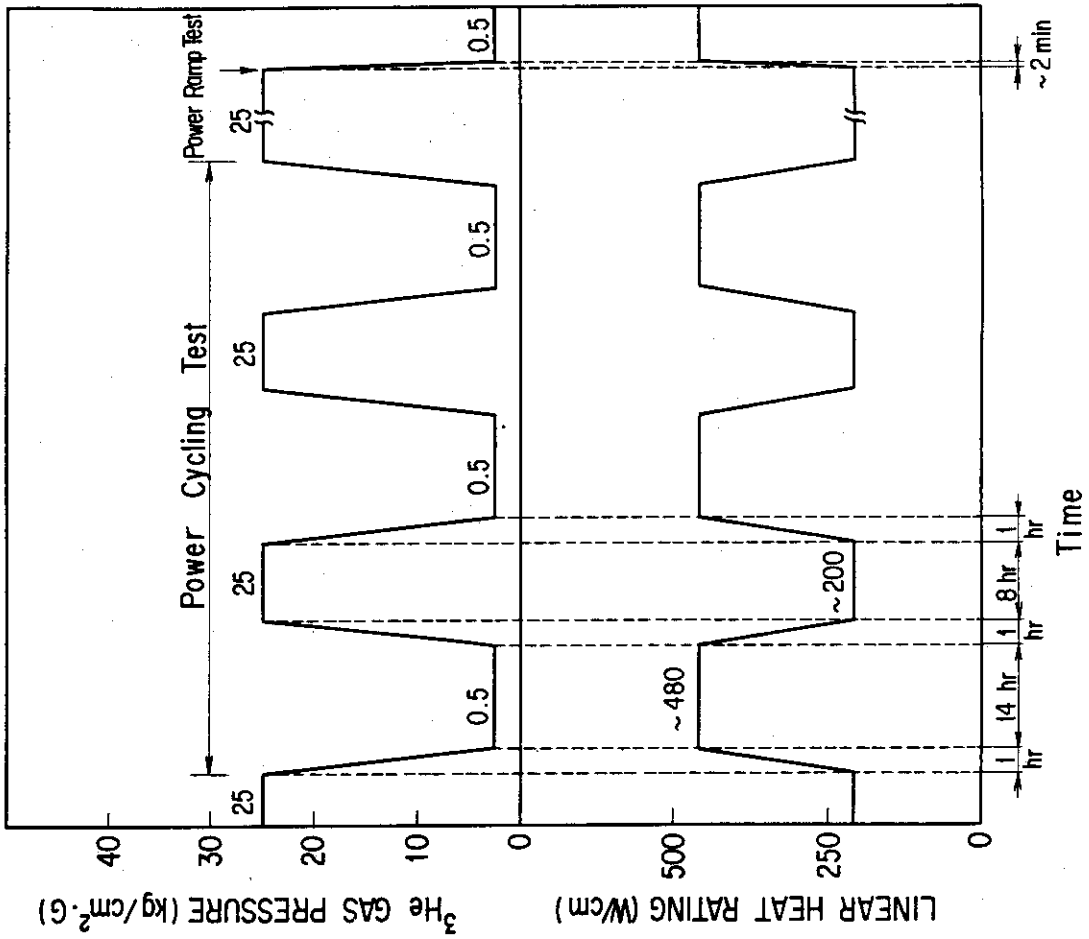


Fig. 5 ³He ガス圧力変更パターンと線出力

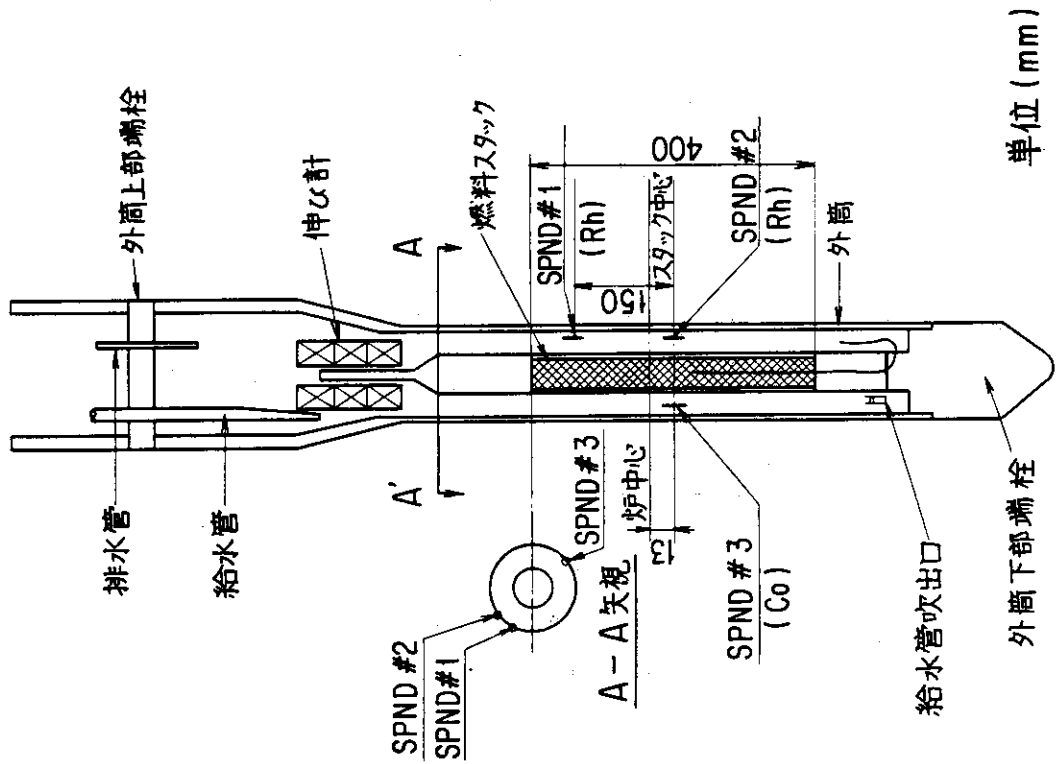


Fig. 4 計装品の取り付け位置

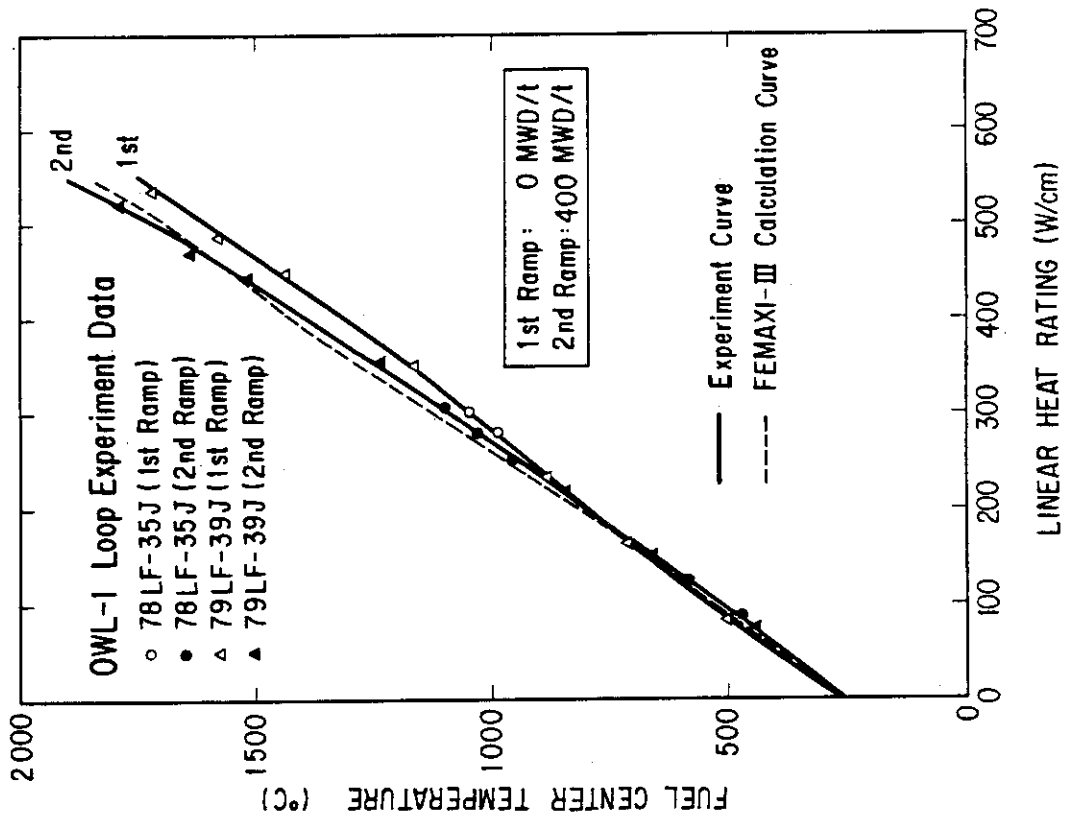


Fig. 6 OWL-1 燃料中心温度測定実験データ

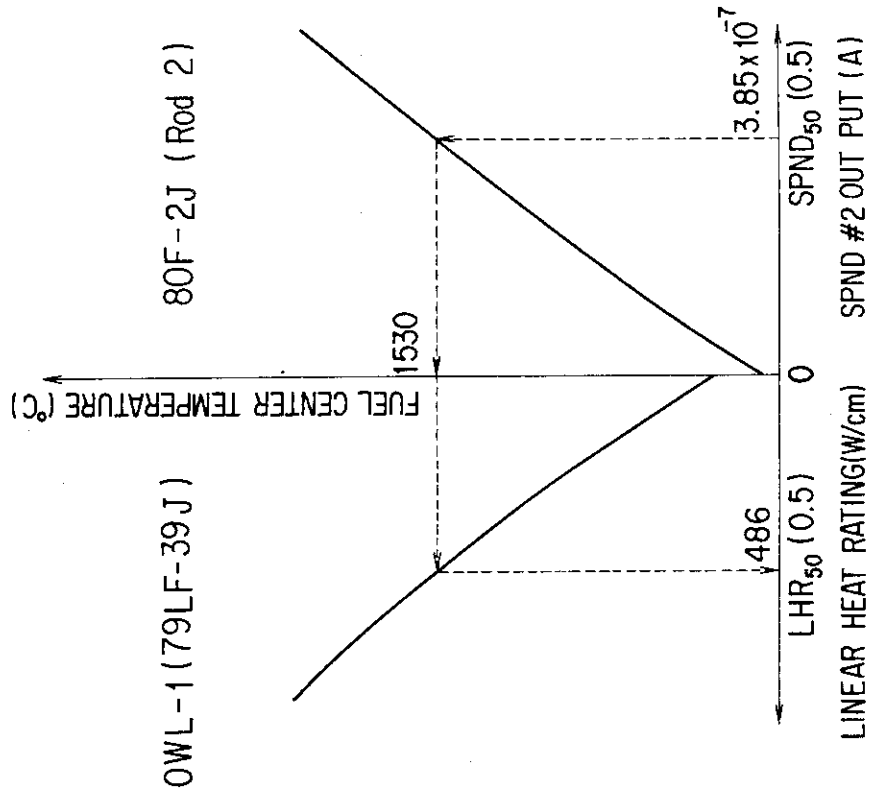


Fig. 7 80F-2J (Rod 2) の線出力校正方法

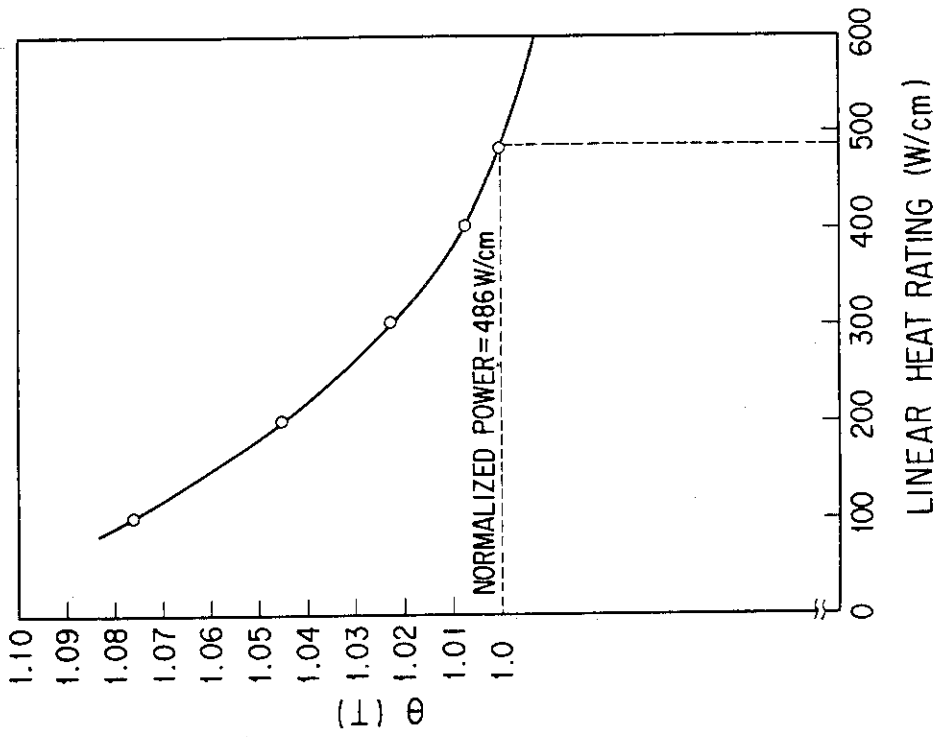


Fig. 9 線出力（冷却水温度）に対する SPND 感度の補正係数

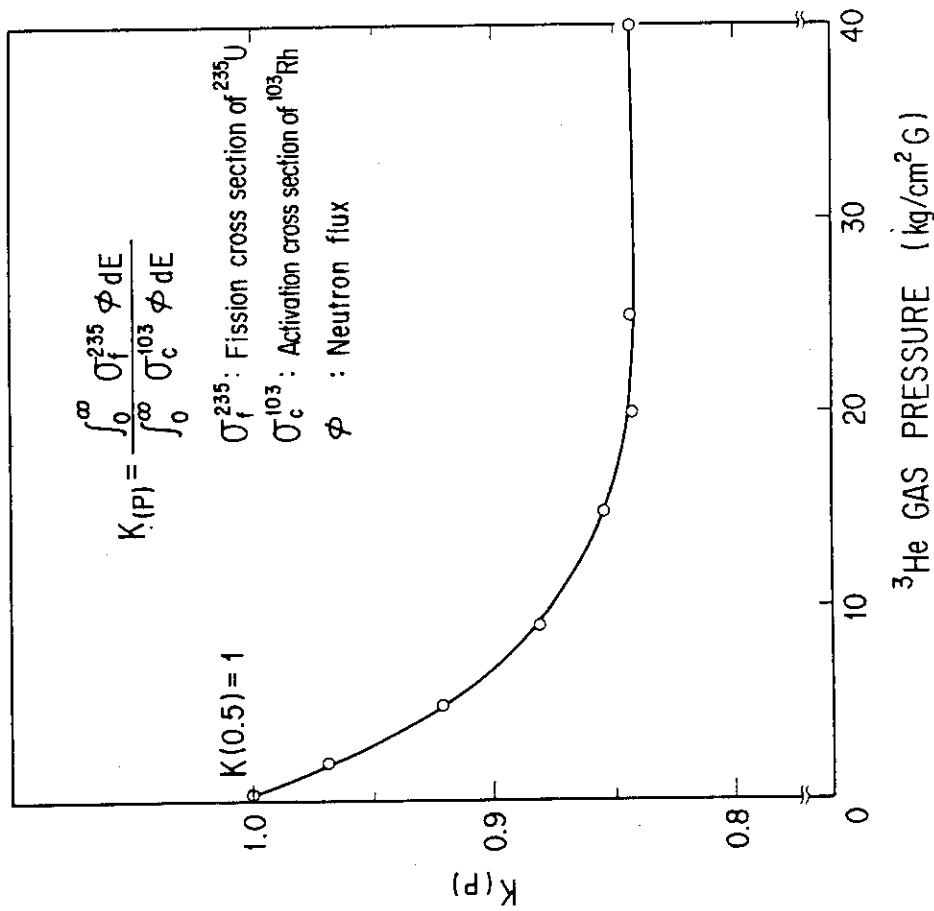


Fig. 8 ^3He ガス圧力と K (P) の関係

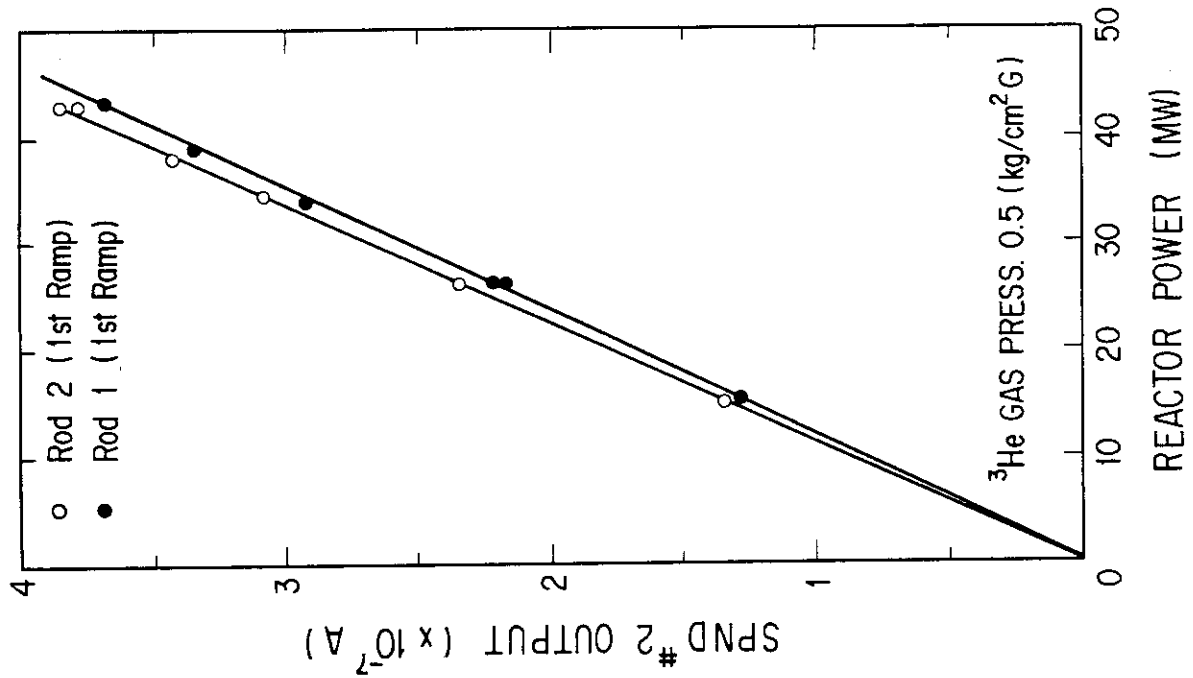


Fig. 10 原子炉出力とSPND #2出力の関係

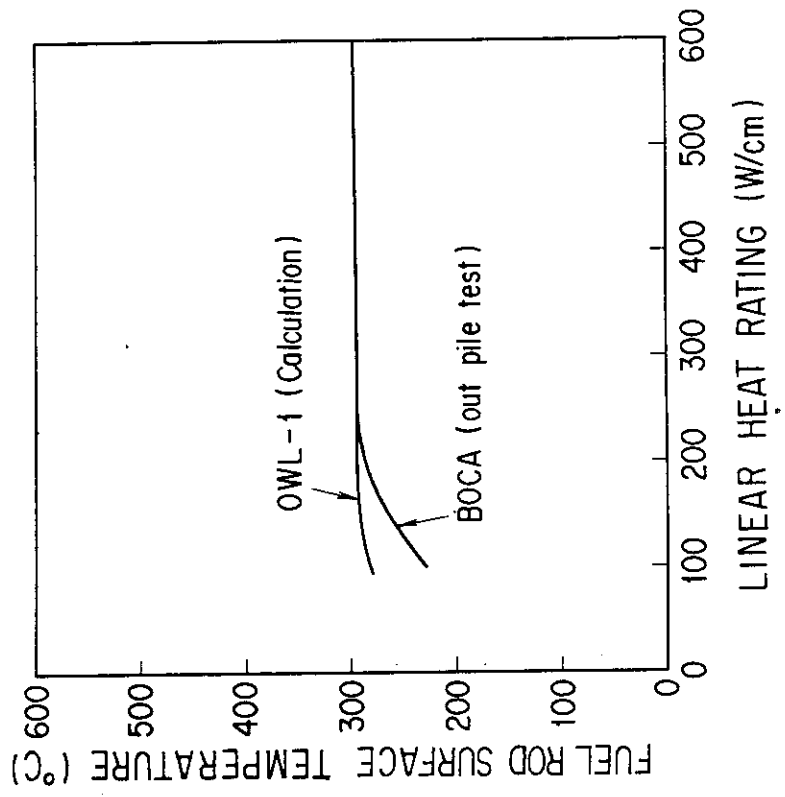


Fig. 11 線出力と被覆管表面温度*

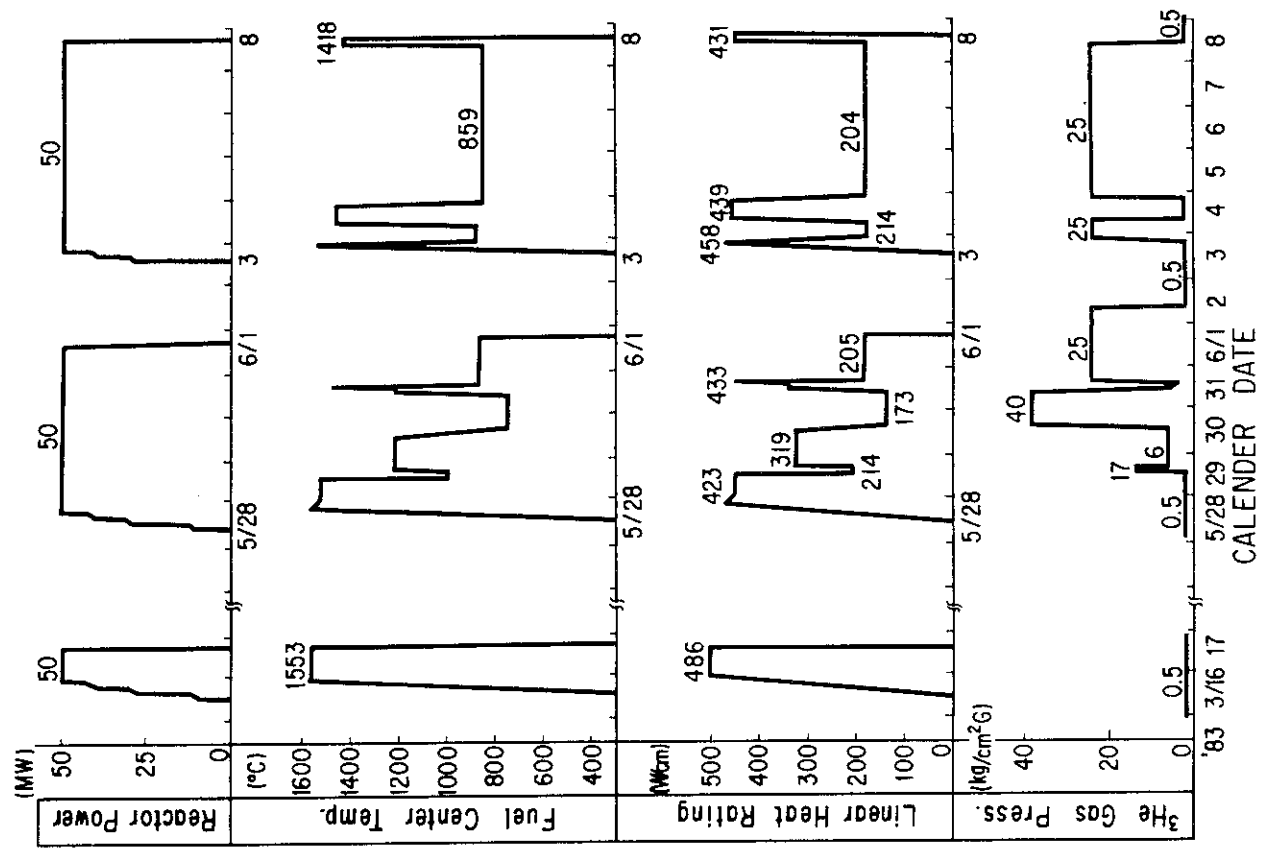


Fig. 13 80 F-2 J (Rod 2) の照射履歴

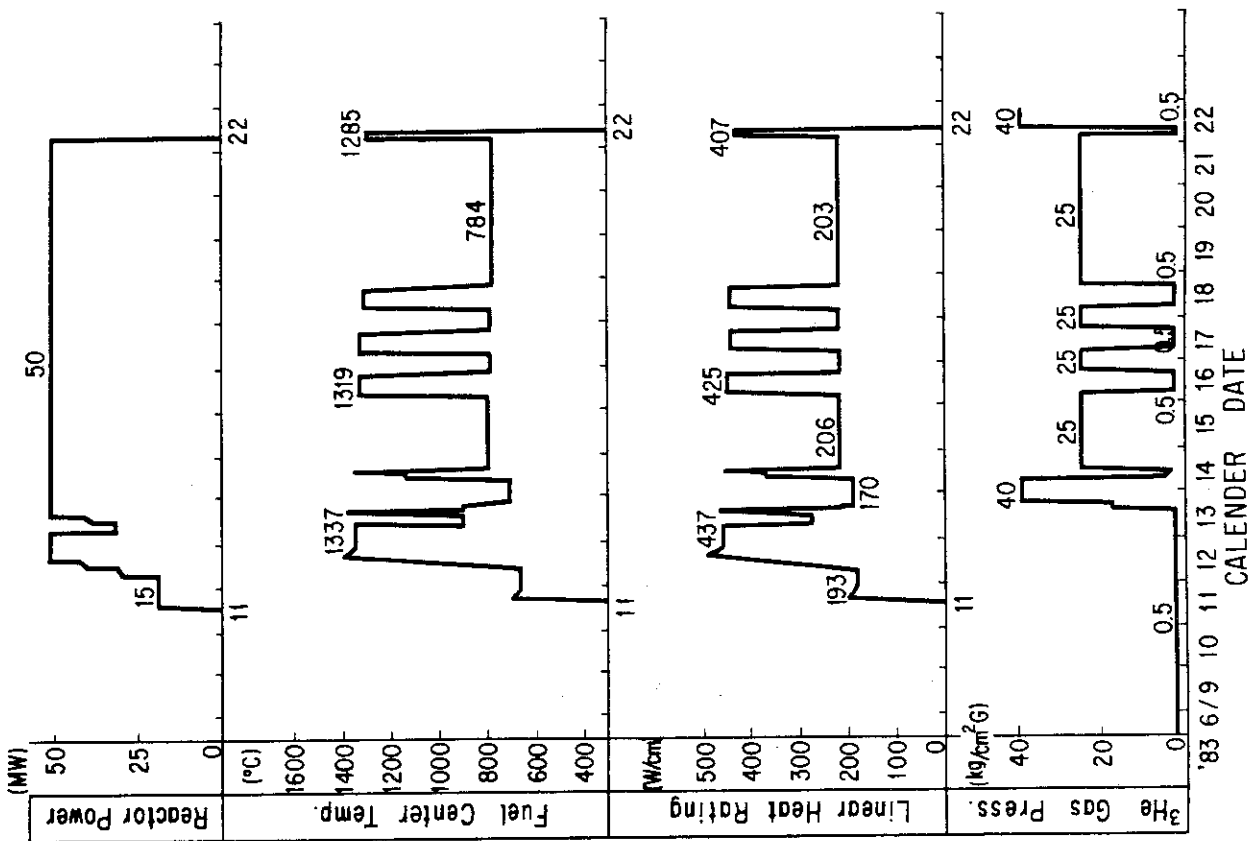


Fig. 12 80 F-1 J (Rod 1) の照射履歴

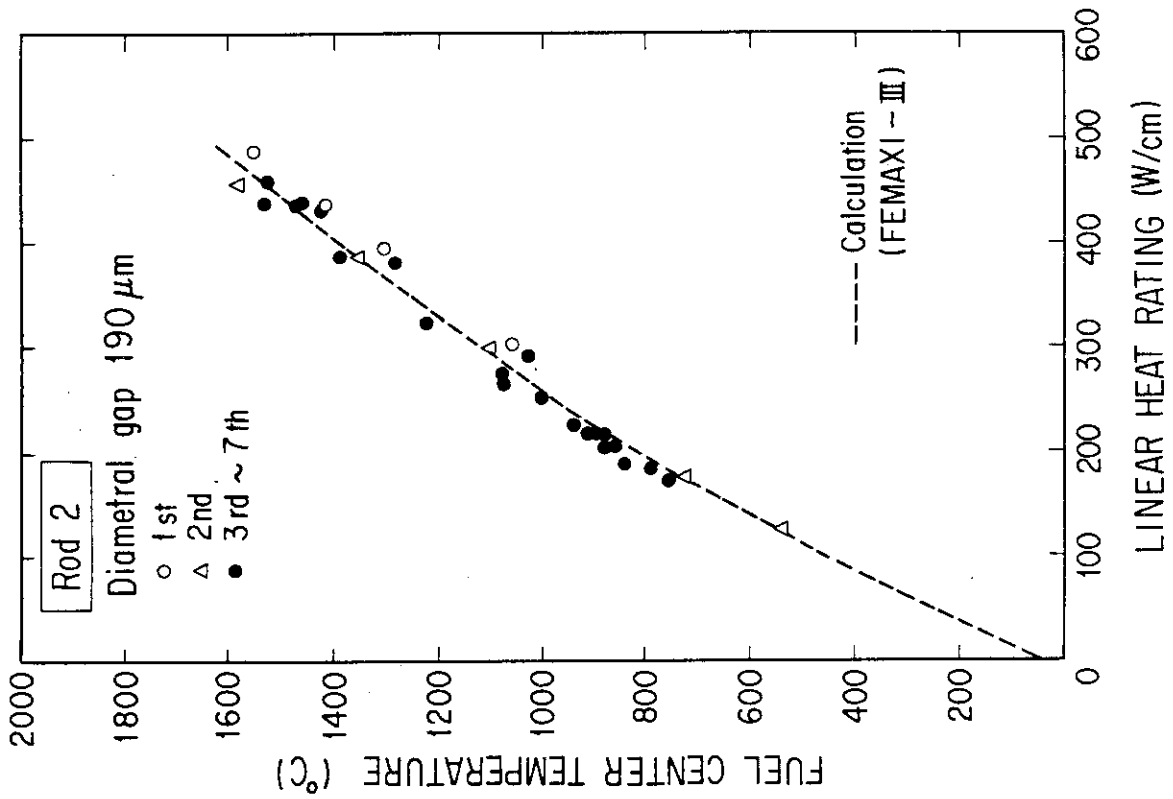


Fig. 15 80 F-2 J (Rod 2) の線出力と燃料中心温度

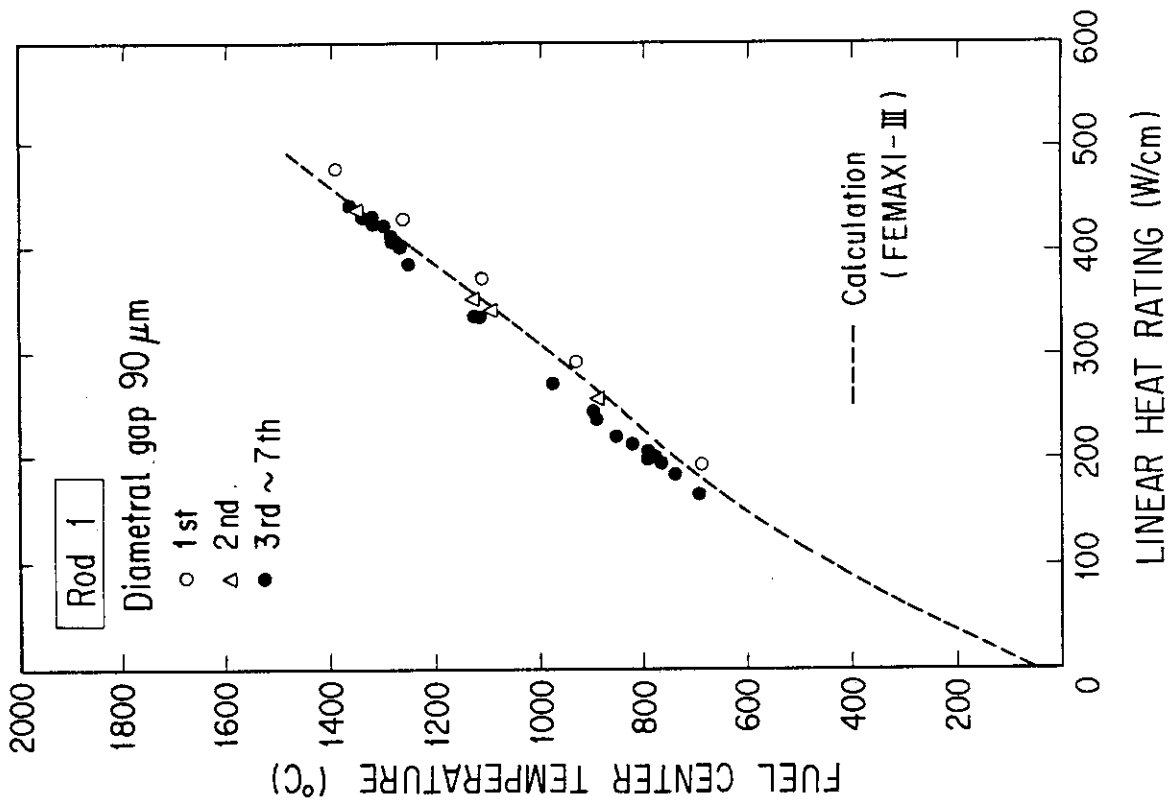


Fig. 14 80 F-1 J (Rod 1) の線出力と燃料中心温度

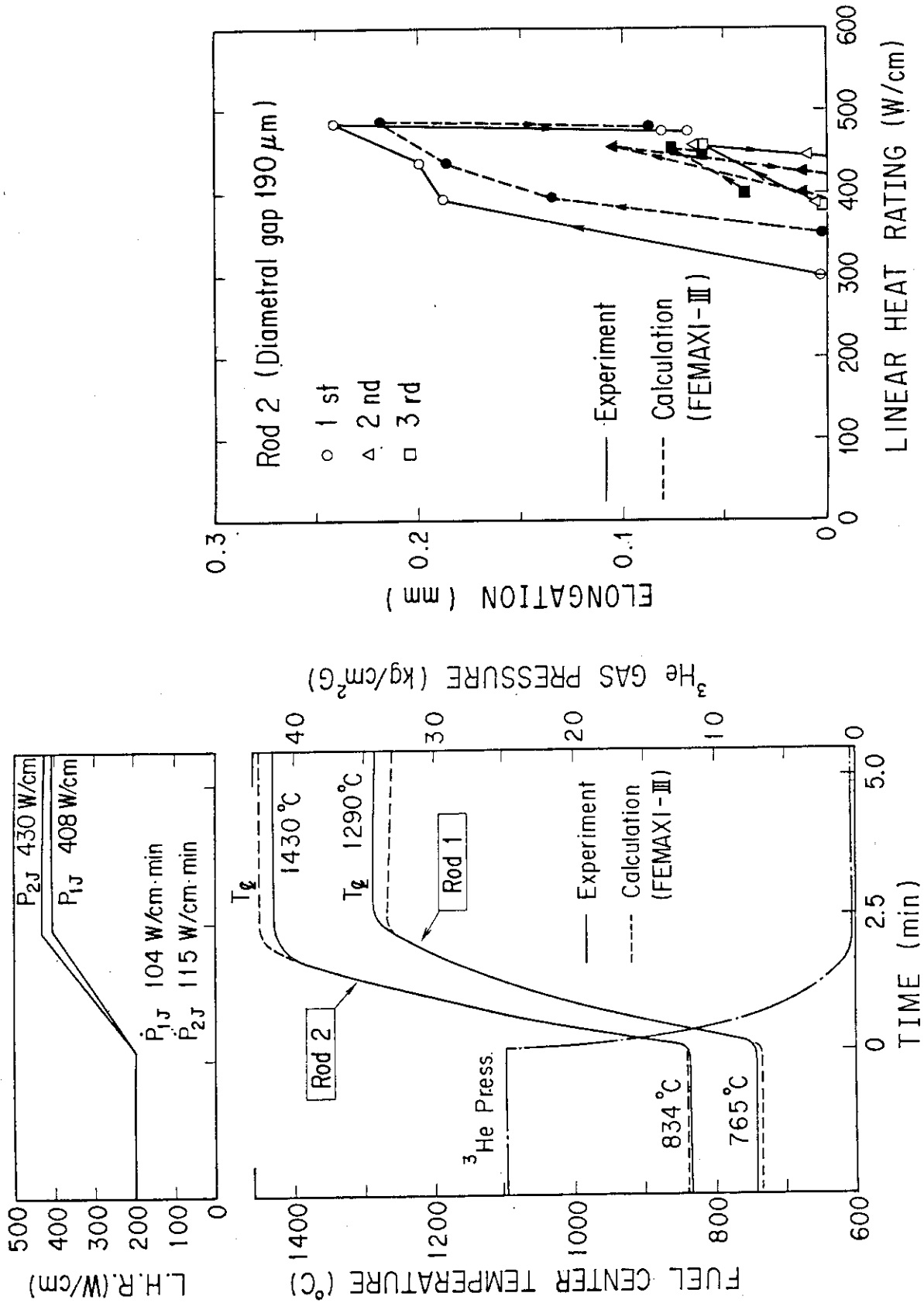


Fig. 17 80 F-2 J (Rod 2) の燃料棒伸び特性

Fig. 16 出力急昇試験時における燃料中心温度の過渡応答

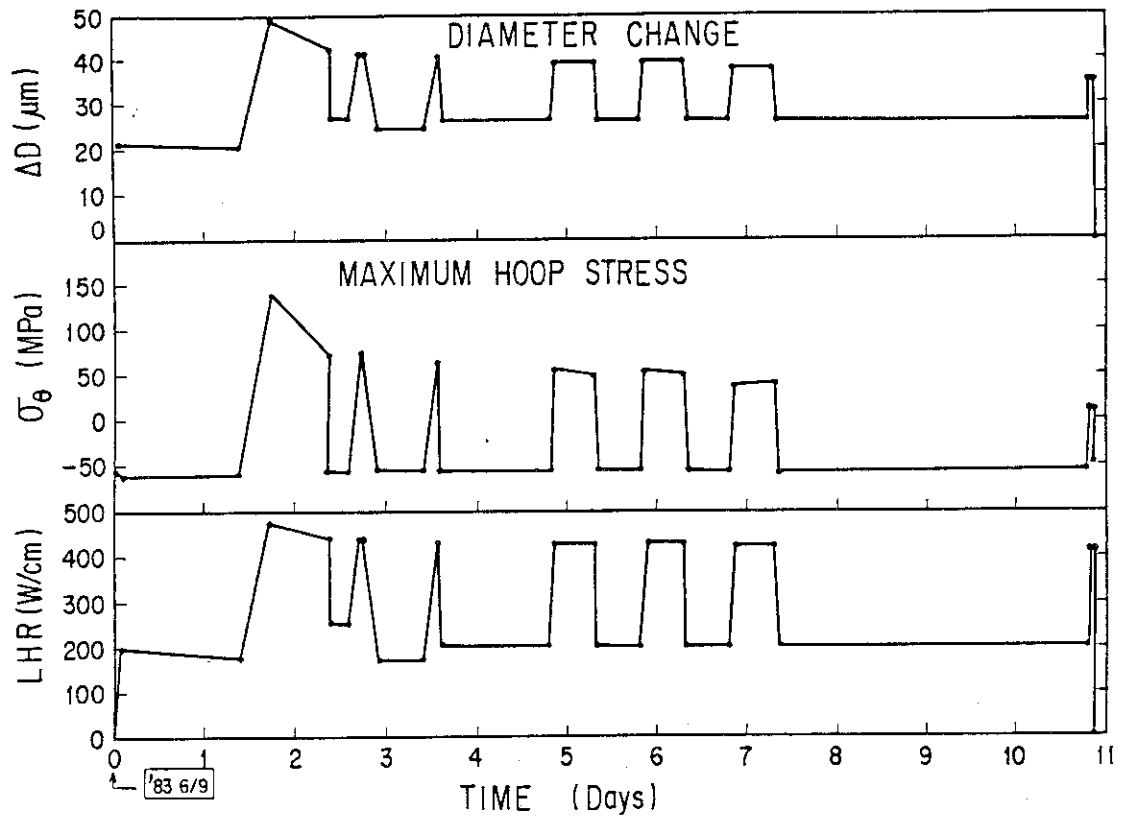


Fig. 18 80 F - 1 J (Rod 1) の被覆管直径変位と最大周方向応力 (F E M A X I - III による計算値)

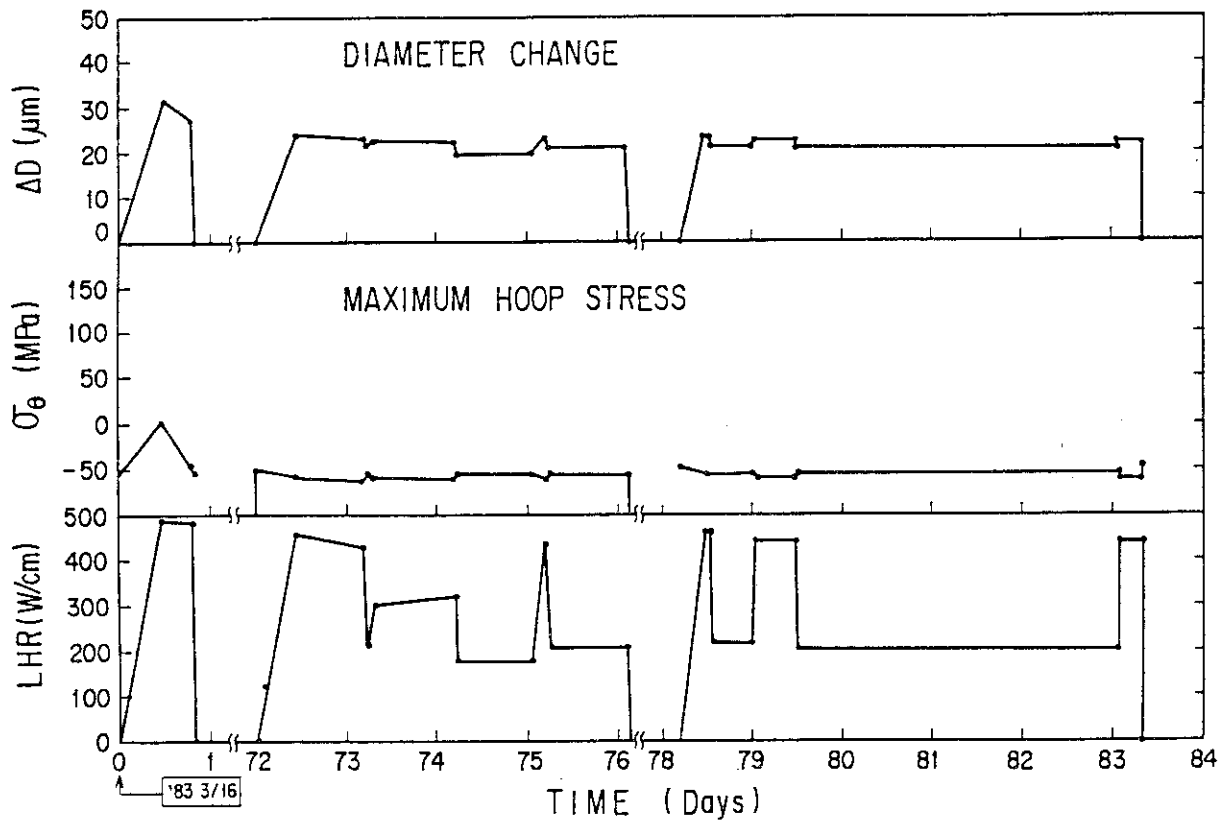


Fig. 19 80 F - 2 J (Rod 2) の被覆管直径変位と最大周方向応力 (F E M A X I - III による計算値)