

JAERI-Research  
95-083



出力変動時のFPガス放出  
(JMTRにおける動力炉燃料再照射試験)

1995年11月

中村仁一・遠藤泰一・石井忠彦・清水道雄・古田照夫

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

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

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 核原子力資料サービス

出力変動時のFPガス放出  
(JMT-Rにおける動力炉燃料再照射試験)

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

中村 仁一・遠藤 泰一<sup>+</sup>・石井 忠彦<sup>+</sup>  
清水 道雄<sup>+</sup>・古田 照夫

(1995年10月27日受理)

敦賀1号炉で照射された長尺燃料棒を切断短尺化して、燃料棒内圧計を再計装し、JMT-R出力急昇試験設備(BOCA/OSF-1)を用いて、出力変動時のFPガス放出挙動を明らかにするための再照射試験を実施した。試験は、最高出力約40kW/mでの定常運転と高出力レベル約40kW/mと低出力レベル約20kW/mの間での出力サイクル運転及び日負荷追従模擬運転を行い、高出力保持時間を等しくして、その間の燃料棒内圧変化を測定した。出力変動時、特に出力降下時に顕著な燃料棒内圧の上昇が観察された。また、一回の出力サイクルにより生じる内圧上昇幅は、直前の高出力保持時間に依存し、出力サイクルを繰り返した場合、一サイクル毎の内圧上昇幅は、次第に減少する傾向を示した。また、出力レベルを30, 35, 40kW/mと変化させながら、定常運転と出力サイクル運転を繰り返した場合、いずれの出力レベルにおいても、出力サイクル運転は、定常運転に比べて、FPガス放出をやや加速させる傾向を示した。この出力低下時のFPガス放出は、出力低下時の熱応力に起因する、結晶粒界上のFPガス気泡からの放出であろうと推定される。

Fission Gas Release during Power Change  
(Re-irradiation Test of LWR Fuel Rod at JMTR)

Jinichi NAKAMURA, Yasuichi ENDO<sup>+</sup>, Tadahiko ISHII<sup>+</sup>  
Michio SHIMIZU<sup>+</sup> and Teruo FURUTA

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

(Received October 27, 1995)

A full length rod irradiated at Tsuruga unit 1 was refabricated to short length rods, and rod inner pressure gauges were re-instrumented to the rods. Re-irradiation tests to study the fission gas release during power change were carried out by means of BOCA/OSF-1 facility at JMTR. In the tests, steady state operation at 40kW/m, power cycling and daily load follow operations between 20 and 40kW/m were conducted for the same high power holding time, and the rod inner pressure change during the tests was measured. The rod inner pressure increase was observed during power change, especially during power reduction. The rod inner pressure increase during a power cycling depended on the length of the high power operation just before the power cycling. The width of the rod inner pressure increase during a power cycling decreased gradually as the power cycling was repeated continuously. When steady state operation and power cycling were repeated at the power levels of 30, 35 and 40kW/m, the power cycling accelerated the fission gas release compared with the steady state operation. The fission gas release during power reduction is estimated to be the release from FP gas bubbles on the grain boundary caused by the thermal stress in the pellet during power reduction.

---

<sup>+</sup> Department of JMTR Project, Oarai Research Establishment

Keywords: Fission Gas Release, LWR Fuel, BOCA, Power Change, Power Cycling, Re-instrumentation, JMTR

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.燃料棒の特性と内圧計再計装 .....	1
2.1 燃料棒製作と燃料棒内圧計再計装 .....	1
2.2 燃料棒の照射履歴と再照射前の燃料状態 .....	2
3.照射試験施設の概要と試験方法 .....	2
3.1 JMTR出力急昇試験設備(BOCA/OSF-1)の概要 .....	2
3.2 燃料棒出力測定法と測定精度 .....	3
3.3 燃料棒内圧測定法 .....	3
3.4 照射試験モード .....	4
4.試験結果 .....	4
4.1 定常運転燃料棒の照射試験結果 .....	4
4.2 出力サイクル燃料棒の照射試験結果 .....	4
4.3 日負荷追従運転燃料棒の照射試験結果 .....	5
4.4 出力レベルを変化させた出力サイクル燃料棒の照射試験結果 .....	6
4.5 照射後のガス分析結果及び非破壊試験結果 .....	6
5.考 察 .....	7
5.1 出力変動がFPガス放出に及ぼす影響 .....	7
5.2 商用炉での負荷追従運転と試験炉での出力サイクル運転 .....	8
6.結 論 .....	10
謝 辞 .....	10
参考文献 .....	10

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Characteristics of Fuel Rods and Re-instrumentation .....	1
2.1 Fabrication of Fuel Rod and Re-instrumentation of Inner Pressure Gauge .....	1
2.2 Irradiation History and Characteristics of the Rod .....	2
3. Outline of the Irradiation Facility and the Experimental Method .....	2
3.1 Outline of BOCA/OSF-1 .....	2
3.2 Rod Power Measurement and Precision .....	3
3.3 Method of Rod Inner Pressure Measurement .....	3
3.4 Operation Mode .....	4
4. Test Results .....	4
4.1 Steady State Operation .....	4
4.2 Power Cycling Operation .....	4
4.3 Daily Load Follow Operation .....	5
4.4 Power Cycling at Different Power Levels .....	6
4.5 Gas Puncturing and Non-destructive Test .....	6
5. Discussions .....	7
5.1 Effect of Power Change on Fission Gas Release .....	7
5.2 Daily Load Follow at Commercial LWR and Power Cycling at Test Reactor .....	8
6. Conclusion .....	10
Acknowledgement .....	10
References .....	10

## 1. はじめに

商用炉での燃料の高燃焼利用と、負荷追従運転導入の傾向のなかで、高燃焼度での燃料の健全性に影響を及ぼす因子として、被覆管の水側腐食と並んでFPガス放出についての研究が重要である。中でも、負荷追従時、及び高燃焼度でのFPガス放出の加速の有無及び加速機構を明かにする必要がある。出力変動時のFPガス放出については、Notley and MacEwan<sup>(1)</sup>がUO<sub>2</sub>燃料の炉内燃料棒内圧測定より定常運転間の炉停止の前後で燃料棒の内圧上昇を観察した。一方、Kogaiら<sup>(2)</sup>は、強いペレット-被覆管力学的相互作用(PCMI)が作用する高出力下では、UO<sub>2</sub>の結晶粒界に保持されるFPガス量は、PCMIによりペレット内に生ずる静水圧に依存し、出力が低下してPCMIが低下した時に結晶粒界からFPガスが放出されるというモデルを提唱した。出力サイクルによるFPガス放出の加速の有無については、GEのRowlandら<sup>(3)</sup>が、日負荷追従運転と、出力を15%の範囲で1分間の周期で変動させる自動周波数調整運転(Automatic Frequency Control Operation)、及び定常運転を行い、出力サイクルによるFPガス放出の加速は無いとの結論を導いている。しかし、Rowlandらのデータも出力サイクル初期にFPガス放出が大きくなる傾向を示しており、出力サイクルによるFPガス放出の加速を完全に否定するものとはなっていないと考えられる。

一方、実験炉で新燃料を照射して高燃焼度を得るには、稼動率等の問題のため長時間を要し、高燃焼度燃料の照射挙動研究のためには、発電炉で照射した燃料棒を短尺化して、実験炉で再照射することが不可欠であると考えられる。

そこで、本試験では、敦賀1号炉で照射された燃料棒を短尺化して内圧計を再計装した後、J M T Rで再照射し、出力変動時のFPガス放出挙動を明かにすることをめざした。本報告書は、このうち4本の燃料棒の再照射試験結果をまとめたもので、一部の燃料棒の再照射試験後のパンクチャー試験結果も含まれている。

## 2. 燃料棒の特性と内圧計再計装

### 2.1 燃料棒製作と燃料棒内圧計再計装

日本原子力発電(株)の敦賀1号炉で、約22,000 MWd/tUまで照射された燃料集合体J A B - 74については、日本原子力研究所燃料試験施設で詳細な非破壊検査および破壊検査が実施され、その結果が既に報告されている。<sup>(4)</sup> 今回使用したのは、非破壊検査のみが行われたC6燃料棒であり、燃料試験施設でこの燃料棒から短尺燃料棒の製作が行われた。この燃料棒の燃料集合体内位置を第1図に、ガンマースキャンデータを第2図に示す。スペーサー部を除いて、出力の平坦な部分から5本の燃料棒を切りだし、両端のペレットのかき出しを行った後、第3図に示すように、新端栓を溶接し短尺燃料棒を製作した。燃料棒の主な仕様を第1表に示す。これら5本の短尺燃料棒(C6-1, C6-2, C6-3, C6-4, C6-5)

## 1. はじめに

商用炉での燃料の高燃焼利用と、負荷追従運転導入の傾向のなかで、高燃焼度での燃料の健全性に影響を及ぼす因子として、被覆管の水側腐食と並んでFPガス放出についての研究が重要である。中でも、負荷追従時、及び高燃焼度でのFPガス放出の加速の有無及び加速機構を明かにする必要がある。出力変動時のFPガス放出については、Notley and MacEwan<sup>(1)</sup>がUO<sub>2</sub>燃料の炉内燃料棒内圧測定より定常運転間の炉停止の前後で燃料棒の内圧上昇を観察した。一方、Kogaiら<sup>(2)</sup>は、強いペレット-被覆管力学的相互作用(PCMI)が作用する高出力下では、UO<sub>2</sub>の結晶粒界に保持されるFPガス量は、PCMIによりペレット内に生ずる静水圧に依存し、出力が低下してPCMIが低下した時に結晶粒界からFPガスが放出されるというモデルを提唱した。出力サイクルによるFPガス放出の加速の有無については、GEのRowlandら<sup>(3)</sup>が、日負荷追従運転と、出力を15%の範囲で1分間の周期で変動させる自動周波数調整運転(Automatic Frequency Control Operation)、及び定常運転を行い、出力サイクルによるFPガス放出の加速は無いとの結論を導いている。しかし、Rowlandらのデータも出力サイクル初期にFPガス放出が大きくなる傾向を示しており、出力サイクルによるFPガス放出の加速を完全に否定するものとはなっていないと考えられる。

一方、実験炉で新燃料を照射して高燃焼度を得るには、稼動率等の問題のため長時間を要し、高燃焼度燃料の照射挙動研究のためには、発電炉で照射した燃料棒を短尺化して、実験炉で再照射することが不可欠であると考えられる。

そこで、本試験では、敦賀1号炉で照射された燃料棒を短尺化して内圧計を再計装した後、J M T Rで再照射し、出力変動時のFPガス放出挙動を明かにすることをめざした。本報告書は、このうち4本の燃料棒の再照射試験結果をまとめたもので、一部の燃料棒の再照射試験後のパンクチャー試験結果も含まれている。

## 2. 燃料棒の特性と内圧計再計装

### 2.1 燃料棒製作と燃料棒内圧計再計装

日本原子力発電(株)の敦賀1号炉で、約22,000 MWd/tUまで照射された燃料集合体J A B - 7 4については、日本原子力研究所燃料試験施設で詳細な非破壊検査および破壊検査が実施され、その結果が既に報告されている。<sup>(4)</sup> 今回使用したのは、非破壊検査のみが行われたC6燃料棒であり、燃料試験施設でこの燃料棒から短尺燃料棒の製作が行われた。この燃料棒の燃料集合体内位置を第1図に、ガンマースキャンデータを第2図に示す。スペーサー部を除いて、出力の平坦な部分から5本の燃料棒を切りだし、両端のペレットのかき出しを行った後、第3図に示すように、新端栓を溶接し短尺燃料棒を作成した。燃料棒の主な仕様を第1表に示す。これら5本の短尺燃料棒(C6-1, C6-2, C6-3, C6-4, C6-5)

を燃料試験施設から J M T R ホットラボに輸送し、第 4 図に示すようなベローズ部と差動トランスよりなる内圧計部を短尺燃料棒に組み込んで内圧計の再計装を行った。第 3 図に示すように、まず、短尺燃料棒の端栓に内圧計を溶接し、アーク放電により、燃料棒部と内圧計部間の隔壁に穿孔して、内圧計付き燃料棒を完成させた。

## 2.2 燃料棒の照射履歴と再照射前の燃料状態

C 6 燃料棒は、敦賀 1 号炉で集合体平均燃焼度約 22,000 MWd/tUまで照射された。集合体平均の出力履歴とガンマスキャンデータから推定した集合体内出力分布より得られ短尺燃料棒の敦賀 1 号炉での照射履歴を第 5 図に示す。燃料棒出力は、照射初期で約 23kW/m であり、照射末期では、約 18-20kW/m 程度の出力となっている。

燃料挙動解析コード FEMAXI-IV<sup>(5)</sup>による燃料中心温度の計算値を第 6 図に示す。燃料中心温度は、約 1100°C で Vitanza の FPガス放出しきい値<sup>(6)</sup>より低い。パンクチャー試験から求めた C 6 燃料棒の再照射前のガス組成は、He: 90.0%, Xe: 8.86%, Kr: 1.12% で、これから求めた再照射前の FPガス放出率は、約 0.4% と小さな値となっている。しかし、C 6 燃料棒の燃料棒短尺化時の残材の金相試験結果は、ペレット外周部の結晶粒径が約 5 μm 程度であり、隣接する出力履歴のほぼ同じ燃料棒で 10% 以上の FPガス放出率が測定されていることから<sup>(4)</sup>、製造時の結晶粒径が小さいことにより、結晶粒界に FPガスバブルがかなり蓄積した状態にあったと推定される。

C 6 燃料棒の燃料棒短尺時の残材について行った金相試験の一例を第 7 図に示す。ペレットの結晶粒径は、外周部で約 4.8-5.3 μm、中心部で約 5.9-6.7 μm であり、中心部でやや粒成長が生じていたことを示した。また、ペレット密度の測定値は、約 96.5%TD で、初期密度 94.5 ± 1.3%TD に較べてやや焼きしまりを起こしていた。

## 3. 照射試験施設の概要と試験方法

### 3.1 J M T R 出力急昇試験設備(BOCA/OSF-1)の概要

J M T R 出力急昇試験設備(BOCA/OSF-1)の全体構成を第 8 図に、炉内部分の概念図を第 9 図に示す。また、性能緒元を第 2 表にまとめてある。BOCA/OSF-1 は、沸騰水キャプセルと <sup>3</sup>He 出力制御装置を組み合わせたものである。沸騰水キャプセル(以下「BOCA」という。)は、ほとんど滞留した加圧水中に燃料棒を装荷し沸騰により燃料棒の表面温度を制御するタイプのキャプセルである。水の純化と破損検出のため 1cc/s でキャプセル内の水が循環するよう炉外装置に接続されている。キャプセルの冷却は、主としてキャプセル外壁を通して炉内管冷却水への伝熱によって行われ、炉内管冷却水の温度上昇から燃料棒の出力を求めている。キャプセルの内圧は、73気圧で使用され、燃料棒は核沸騰伝熱で冷却されることから、BWR タイプの冷却水条件での照射となっている。

<sup>3</sup>He 出力制御装置は、<sup>3</sup>He(n, p)<sup>3</sup>H 反応により局所的な熱中性子束を制御して、燃料棒出力

を燃料試験施設からJ M T Rホットラボに輸送し、第4図に示すようなベローズ部と差動トランスよりなる内圧計部を短尺燃料棒に組み込んで内圧計の再計装を行った。第3図に示すように、まず、短尺燃料棒の端栓に内圧計を溶接し、アーク放電により、燃料棒部と内圧計部間の隔壁に穿孔して、内圧計付き燃料棒を完成させた。

## 2.2 燃料棒の照射履歴と再照射前の燃料状態

C 6 燃料棒は、敦賀1号炉で集合体平均燃焼度約 22,000 MWd/tUまで照射された。集合体平均の出力履歴とガンマスキャンデータから推定した集合体内出力分布より得られ短尺燃料棒の敦賀1号炉での照射履歴を第5図に示す。燃料棒出力は、照射初期で約23kW/mであり、照射末期では、約18-20kW/m程度の出力となっている。

燃料挙動解析コードFEMAXI-IV<sup>(5)</sup>による燃料中心温度の計算値を第6図に示す。燃料中心温度は、約1100°CでVitanzaのFPガス放出しきい値<sup>(6)</sup>より低い。パンクチャー試験から求めたC 6 燃料棒の再照射前のガス組成は、He:90.0%, Xe:8.86%, Kr: 1.12% で、これから求めた再照射前のFPガス放出率は、約0.4%と小さな値となっている。しかし、C 6 燃料棒の燃料棒短尺化時の残材の金相試験結果は、ペレット外周部の結晶粒径が約 5 μm程度であり、隣接する出力履歴のほぼ同じ燃料棒で10%以上のFPガス放出率が測定されていることから<sup>(4)</sup>、製造時の結晶粒径が小さいことにより、結晶粒界にFPガスバブルがかなり蓄積した状態にあったと推定される。

C 6 燃料棒の燃料棒短尺時の残材について行った金相試験の一例を第7図に示す。ペレットの結晶粒径は、外周部で約4.8-5.3 μm、中心部で約5.9-6.7 μmであり、中心部でやや粒成長が生じていたことを示した。また、ペレット密度の測定値は、約96.5%TDで、初期密度94.5±1.3%TDに較べてやや焼きしまりを起こしていた。

## 3. 照射試験施設の概要と試験方法

### 3.1 J M T R 出力急昇試験設備(BOCA/OSF-1)の概要

J M T R出力急昇試験設備(BOCA/OSF-1)の全体構成を第8図に、炉内部分の概念図を第9図に示す。また、性能緒元を第2表にまとめてある。BOCA/OSF-1は、沸騰水キャプセルと<sup>3</sup>He出力制御装置を組み合わせたものである。沸騰水キャプセル(以下「BOCA」という。)は、ほとんど滞留した加圧水中に燃料棒を装荷し沸騰により燃料棒の表面温度を制御するタイプのキャプセルである。水の純化と破損検出のため1cc/sでキャプセル内の水が循環するよう炉外装置に接続されている。キャプセルの冷却は、主としてキャプセル外壁を通して炉内管冷却水への伝熱によって行われ、炉内管冷却水の温度上昇から燃料棒の出力を求めている。キャプセルの内圧は、73気圧で使用され、燃料棒は核沸騰伝熱で冷却されることから、BWRタイプの冷却水条件での照射となっている。

<sup>3</sup>He出力制御装置は、<sup>3</sup>He(n, p)<sup>3</sup>H反応により局所的な熱中性子束を制御して、燃料棒出力

を制御する装置である。キャップセルの外側に位置するアルミ合金製の二重管内の<sup>3</sup>Heの圧力を最大40気圧まで加圧することにより出力の制御を行っている。<sup>3</sup>Heガス圧力と熱中性子束（相対値）との関係を第10図に示す。燃料棒出力変化速度は、第2表に示した程度であり、出力急昇速度に比べ出力降下速度は、ガスの加圧に時間要するため、約1桁程度小さい。

### 3.2 燃料棒出力測定法と測定精度

BOCA/OSF-1設備炉心部の詳細を第11図に示す。OSF-1冷却水は、キャップセル外面に沿って降下し、キャップセルを冷却して下端で反転して流路仕切管の外側を上昇する。OSF-1冷却水入口温度と出口温度は、それぞれ4対の熱電対により測定され、冷却水流量は、OSF-1制御装置により定格値の1.9m<sup>3</sup>/hに制御している。

燃料棒出力の測定は、OSF-1冷却水の出入口温度差から次の式で評価する。

$$Q = K \cdot W \cdot \Delta T_{o1} \quad (1)$$

$$P = Q \cdot F_z / L \quad (2)$$

ここで

K : 熱的定数(W·s/cm<sup>3</sup>·°C)

W : OSF-1冷却水流量(cm<sup>3</sup>/s)

$\Delta T_{o1}$  : 冷却水出入口温度差(°C)

Q : 燃料棒発熱量(W)

P : 燃料棒出力(W/cm)

F<sub>z</sub> : 燃料棒長手方向ピーキング係数: 1.03

L : 燃料棒スタック長(cm)

先ず、照射試験の前にヒータキャップセルを用いて出力較正試験を実施し、電気出力と冷却水出入口温度差の関係を求める。次に、照射試験時の出入口温度差より燃料棒発熱量を求め、(2)式より燃料棒出力を算出する。

OSF-1冷却水出入り口温度差測定による、燃料棒の出力評価精度に関する誤差要因とそれの相対誤差の例を第3表に示す。出力測定精度は、各要因の二乗和の平方根として求めると、約200W/cmで約±7%(2σ)、約400W/cmで約±5%(2σ)と推定される。

### 3.3 燃料棒内圧測定法

本試験に用いたFPガス圧力計は、ベローズと差動トランスを組み合わせたものであり、燃料棒内圧の変化にともないベローズが伸縮する。その時のベローズの一端に接続されたマグネットコアの変位を差動トランスにより検出し、燃料棒の内圧測定を行う。この時、内圧計近傍のBOCA圧力水温度を測定し、内圧計の室温と300°Cでの圧力較正値から温度補正を行って燃料棒内圧を求めている。

### 3.4 照射試験モード

上記4本の完成した燃料棒をBOCAキャップセルに組み込み、出力変動時のFPガス放出挙動に注目した、出力サイクル試験を実施した。出力サイクル試験の運転モードを第12図に示す。定常運転、出力サイクル運転、日負荷追従模擬運転を行い、各々のFPガス放出挙動を燃料棒内圧計を用いて測定し、各モードでの放出挙動を比較した。最高出力での保持時間は、比較のため定常運転、出力サイクル、日負荷追従運転の各燃料棒で同じとし各燃料棒とも84時間と176時間の計260時間の高出力運転を行った。また、サイクル数、出力レベルがFPガス放出に及ぼす効果を調べる出力サイクル試験も実施した。これらの燃料棒の仕様、照射条件を第4表に示す。

## 4. 試験結果

### 4.1 定常運転燃料棒の照射試験結果

定常運転燃料棒のピーク線出力と燃料棒内圧計の測定値を一回目と二回目の照射についてそれぞれ第13図、第14図に示す。第13図に示すように燃料棒内圧は、20kW/m以上の出力での出力急昇時に圧力の上昇を示し、高出力保持中の圧力上昇は、ほぼ時間の1/2乗に近い依存性を示して、約0.65MPaの上昇を示した。図13の高出力保持84時間後に出力を10kW/mhで40.7kW/mから約20kW/mまで降下させた時の燃料棒内圧の変化を時間軸を拡大して第15図に示す。出力降下開始約6分後に圧力上昇が開始し、約30分間で約0.27MPaの圧力上昇を示した。低出力保持中には、圧力の上昇はほとんど見られなかった。第14図に示す2回目の照射試験中の燃料棒内圧変化は、1回目の内圧変化と同様の傾向を示し、照射途中の予定外の炉停止時と照射終了時の出力低下時に内圧上昇を示したがその上昇幅は、1回目の照射時に比べて小さかった。照射試験前後での室温での燃料棒内圧変化から、燃料棒内圧フリーボリュームが照射前後で変わらないと仮定してFPガス放出率を求めるとき、高出力保持84時間後の放出率は、約17%、高出力保持260時間後の放出率は、約27%であった。

### 4.2 出力サイクル燃料棒の照射試験結果

出力サイクル運転燃料棒のピーク線出力と燃料棒内圧計の測定値を一回目と二回目の照射についてそれぞれ第16図、第17図に示す。燃料棒内圧は、高出力保持中に緩やかな上昇を示したが、出力変動時、特に、出力降下時に顕著な圧力上昇を示した。出力低下時の燃料棒の内圧上昇は、出力低下直前の高出力保持時間に依存しており直前の高出力保持時間が長いほど、圧力上昇幅が大きくなっている。また、運転後期の連続サイクル運転時の1サイクル毎の圧力上昇は、運転初期の出力サイクル時の圧力上昇に比べて小さく、

### 3.4 照射試験モード

上記4本の完成した燃料棒をBOCAキャップセルに組み込み、出力変動時のFPガス放出挙動に注目した、出力サイクル試験を実施した。出力サイクル試験の運転モードを第12図に示す。定常運転、出力サイクル運転、日負荷追従模擬運転を行い、各々のFPガス放出挙動を燃料棒内圧計を用いて測定し、各モードでの放出挙動を比較した。最高出力での保持時間は、比較のため定常運転、出力サイクル、日負荷追従運転の各燃料棒で同じとし各燃料棒とも84時間と176時間の計260時間の高出力運転を行った。また、サイクル数、出力レベルがFPガス放出に及ぼす効果を調べる出力サイクル試験も実施した。これらの燃料棒の仕様、照射条件を第4表に示す。

## 4. 試験結果

### 4.1 定常運転燃料棒の照射試験結果

定常運転燃料棒のピーク線出力と燃料棒内圧計の測定値を一回目と二回目の照射についてそれぞれ第13図、第14図に示す。第13図に示すように燃料棒内圧は、20kW/m以上の出力での出力急昇時に圧力の上昇を示し、高出力保持中の圧力上昇は、ほぼ時間の1/2乗に近い依存性を示して、約0.65MPaの上昇を示した。図13の高出力保持84時間後に出力を10kW/mhで40.7kW/mから約20kW/mまで降下させた時の燃料棒内圧の変化を時間軸を拡大して第15図に示す。出力降下開始約6分後に圧力上昇が開始し、約30分間で約0.27MPaの圧力上昇を示した。低出力保持中には、圧力の上昇はほとんど見られなかった。第14図に示す2回目の照射試験中の燃料棒内圧変化は、1回目の内圧変化と同様の傾向を示し、照射途中の予定外の炉停止時と照射終了時の出力低下時に内圧上昇を示したがその上昇幅は、1回目の照射時に比べて小さかった。照射試験前後での室温での燃料棒内圧変化から、燃料棒内圧フリーボリュームが照射前後で変わらないと仮定してFPガス放出率を求めるとき、高出力保持84時間後の放出率は、約17%、高出力保持260時間後の放出率は、約27%であった。

### 4.2 出力サイクル燃料棒の照射試験結果

出力サイクル運転燃料棒のピーク線出力と燃料棒内圧計の測定値を一回目と二回目の照射についてそれぞれ第16図、第17図に示す。燃料棒内圧は、高出力保持中に緩やかな上昇を示したが、出力変動時、特に、出力降下時に顕著な圧力上昇を示した。出力低下時の燃料棒の内圧上昇は、出力低下直前の高出力保持時間に依存しており直前の高出力保持時間が長いほど、圧力上昇幅が大きくなっている。また、運転後期の連続サイクル運転時の1サイクル毎の圧力上昇は、運転初期の出力サイクル時の圧力上昇に比べて小さく、

また回を重ねる毎に小さくなる傾向を示した。第16図の計10回の出力サイクル時の燃料棒内圧変化を拡大して第18図に示す。各出力サイクル前後で内圧の上昇が認められ、その上昇幅は、直前の高出力保持時間に依存していることがわかる。ところで、出力低下時には燃料温度が低下しギャップも開くため、自由体積中のガス量が同じでも燃料棒内圧は低下し、燃料棒の内圧上昇の原因となったFPガス放出が出力降下時に生じたのか出力上昇時に生じたのかはっきりしない。そこで、図中には、出力低下時の燃料棒内圧を40kW/mの出力での内圧に補正した時の推定値も示した。この圧力補正是、出力サイクル前後での圧力上昇がかなり小さくなった最後の10回目の出力サイクル時の40kW/m時と20kW/m時の内圧測定値の比1.08を各出力サイクル時の20kW/mでの内圧測定値に掛けて求めたものである。この補正圧力値の変化から、出力サイクル時の燃料棒内圧の上昇は、ほとんど出力低下時のFPガス放出により生じており、出力上昇時のFPガス放出は、相対的に小さいことがわかる。

第17図に示す2回目の照射試験中の燃料棒内圧変化は、1回目の内圧変化と同様の傾向を示したが1サイクル毎の内圧上昇幅は、次第に小さくなる傾向を示し、1回目の照射時に比べて小さかった。試験前後での室温での燃料棒内圧変化からFPガス放出率を求めると、総高出力保持84時間後の放出率は、約21%、高出力保持260時間後の放出率は、約33%であった。

#### 4.3 日負荷追従運転燃料棒の照射試験結果

日負荷追従運転燃料棒のピーク線出力と燃料棒内圧計の測定値を一回目と二回目の照射についてそれぞれ第19図、第20図に示す。燃料棒内圧は、高出力保持中に緩やかな上昇を示したが、出力変動時、特に、出力降下時に顕著な圧力上昇を示した。運転後期の1サイクル毎の圧力上昇は、運転初期の出力サイクル時の圧力上昇に較べて小さくなる傾向を示した。第20図に示す二回目の照射試験時(JMTR106サイクル)の燃料棒内圧は、照射初期の106サイクル前半サイクル中に大きな上昇速度を示したのに対して、続く後半サイクル中の上昇速度は、急に小さくなった。内圧計の2つの差動トランス出力と燃料棒内圧との関係を調べたところ、照射前の差動トランス出力と圧力値の相関関係からのずれが生じており、水蒸気が差動トランス内に侵入して差動トランス内のコイルの絶縁が劣化したため内圧計の測定値が異常を示したものと推定された。このため、第20図に示す内圧測定値は、燃料棒内圧の相対的な変化は示すものの、その絶対値は、信頼性が低いと考えられる。尚、第19図に示す内圧測定値については、このような現象は観察されず、内圧計は、正常に作動していたと推定される。

照射試験前後での室温での燃料棒内圧変化からFPガス放出率を求めると、高出力保持91時間後の放出率は、約25%であり、この値は、上に述べた出力サイクル運転燃料棒の84時間高出力保持後の放出率、約21%とほぼよい一致を示した。

#### 4.4 出力レベルを変化させた出力サイクル燃料棒の照射試験結果

以上の試験結果より出力低下時にFPガスの放出が起こることがわかったが、試験時の燃料棒の最高出力は、約40kW/mと通常の商用炉燃料の出力よりかなり大きくなっている。そこで、燃料の高出力レベルを変化させた場合の出力サイクルの効果を調べるために、C6-1燃料棒を用いて、30, 35, 40kW/mの各出力レベルで定常運転と出力サイクル運転を実施した。この燃料棒のピーク線出力と燃料棒内圧計の測定値を第21図に示す。各出力レベルでの高出力保持時間は、定常運転、出力サイクル運転とも各22時間と等しくなるようにした。出力レベルが高くなるにつれて燃料棒内圧の上昇幅は、大きくなっている。各高出力保持時間における燃料棒内圧の変化を第22図に示す。この図より、各出力レベルとも定常運転時の圧力上昇より出力サイクル時の圧力上昇のはうが、1.3-1.6倍程度大きいことがわかる。このことから、30-40kW/mの出力レベルでは、出力サイクル運転は、定常運転に比べてFPガス放出をやや加速させる傾向にあると考えられる。

#### 4.5 照射後のガス分析結果及び非破壊試験結果

試験を行った4本の燃料棒のうち、C6-2, C6-4の2本の非破壊検査とガス分析が終了した。第5表にガス分析結果を示す。パンクチャー試験によって測定されたこれら2本の燃料棒のフリーボリュームは、再組立時の初期値（計算値）ときわめて良い一致を示した。一方、最終内圧は、内圧計の測定値がパンクチャー試験結果より約20%大きくなっている。また、ガス分析により得られた、He, Xe, Krのガス量から、再組立時充填ガスの組成（He:89.7%, Xe:9.17%, Kr:1.11%）を用いて、再照射時に放出されたFPガス量（Xe, Kr）及びFPガス放出率を求めると、第5表に示したようになる。この表から、内圧計により求めたFPガス放出率は、ガス分析から求めた値に比べて約24%過大評価している。照射後試験で内圧計の再校正試験を行ったところ、このような内圧計測定値の誤差の原因は、主として照射によるベローズのゼロ点のシフトであることが明らかになった。内圧計測定から求めたFPガス放出率とガス分析から求めたFPガス放出率の比は、2本の燃料棒ともほぼ一致しており、また照射量もほぼ同等であることから、このベローズのゼロ点のシフトは、両方の燃料棒内圧の時間変化の相対比較には、大きな影響は与えないと考えられる。

また、非破壊検査では、燃料棒の直径測定、ガンマスキャン、X線撮影等が実施された。ガンマスキャンの測定結果を第23図に示す。2本の燃料棒ともペレット境界部に対応する位置にCs-137のピークが観察され、Csが高温部から低温部に移動したと推定される。直径測定では、燃料棒の平均直径の増加は、認められなかった。

## 5. 考 察

### 5.1 出力変動が F P ガス放出に及ぼす影響

今回の一連の試験で明らかになった出力変動時の F P ガス放出の特徴は、出力変動時、特に出力低下時に顕著な内圧上昇が観察されたことである。

出力低下時の燃料棒内圧の上昇について、高出力では、ギャップが閉じているために燃料から放出された F P ガスが内圧計部に到達できずギャップ部等にたまり、出力低下時にペレットの温度低下によりギャップが開き、内圧計部に F P ガスが到達して圧力上昇を示すという説明も考えられる。しかし、使用した燃料棒は、 $310 \mu\text{m}$ の大ギャップ燃料棒であり、 $40\text{kW}/\text{m}$ の出力レベルでもギャップが完全に閉じるような強いPCMIは、存在しないと推定されること、また、定常運転燃料棒が、高出力運転時に、ほぼ高出力保持時間の $1/2$ 乗に比例する内圧上昇を示し、高出力運転時にも内圧計が燃料棒の圧力変化を連続的に測定していたことから、出力低下時の内圧計の圧力上昇は、燃料棒内部からの新たな F P ガス放出を示しているものと推定される。

狭ギャップ燃料棒で強いPCMIが存在する場合の出力低下時の F P ガス放出については、PCMIによるペレット内の静水圧が出力低下時に減少し、結晶粒界の F P ガスバブルが、増大連結してガス放出が生じるという説明がなされてきた。<sup>(2)</sup> ところが今回の燃料棒は $310 \mu\text{m}$ の大ギャップ燃料棒であり、最高出力でもPCMIは、小さいと推定される。

定常運転燃料棒、出力サイクル運転燃料棒、日負荷追従運転燃料棒の高出力保持時間と燃料棒内圧上昇の関係を第24図に示す。この図では低出力の保持時間と出力変化時の時間を省略しており、ステップ状に圧力上昇を示している部分が出力低下時または、出力サイクル時に対応している。日負荷追従運転燃料棒の2回目の照射試験の測定結果は、内圧計の異常のため図から除外してある。出力サイクル運転燃料棒、日負荷追従運転燃料棒とも84時間付近までは、同程度の圧力上昇を示しており、その値は、定常運転燃料棒の内圧上昇値より大きくなっている。また、出力サイクル運転燃料棒で出力サイクルを繰り返した場合、1サイクル毎の圧力上昇幅は、小さくなるものの、全体の圧力上昇速度は、出力サイクルを連続的に行う直前の内圧上昇速度より大きくなっていることがわかる。

第24図の圧力測定値をもとに推定した F P ガス放出率と高出力保持時間の関係を第25図に両対数プロットで示す。第24図と同様にステップ状の F P ガス放出率の上昇が出力低下時と出力サイクル時に対応しているが、いずれの運転モードの F P ガス放出率の推定値も、全体としては、高出力保持時間の $1/2$ 乗にほぼ比例する依存性を示していることがわかる。

本試験のような低出力での基礎照射後の出力急昇時の F P ガス放出は、Booth<sup>(7)</sup>の等価球モデルでは、照射後焼鈍時の F P ガス放出に対応し、その放出率は、高温での保持時間の $1/2$ 乗に比例することがよく知られている。Boothのモデルでは、結晶粒界に対応する等価球表面に拡散により到達した F P ガスは、全て放出されるとしているが、実際には、結

晶粒界上でガス気泡を形成し、これらが成長合体して連結し、開気孔が形成された時にペレット外に放出されることになる。Boothのモデルでは、結晶粒界に到達するFPガス量は、高出力保持時間の1/2乗に比例する。実際には、FPガスのトラッピングや、再溶解、結晶粒の成長による粒界へのFPガスの掃き出し等多くの複雑な機構が存在するが、結晶粒界に到達するFPガス量は、ほぼ高出力保持時間の1/2乗に比例すると推定される。第25図に示されるFPガス放出率が全体としては、高出力保持時間の1/2乗に比例し、出力変動時にステップ状にFPガスが放出されることから、全体のFPガス放出は、FPガスの粒界への拡散に支配されており、出力変動は、粒界上のガス気泡からFPガスがペレット外へ放出されるのを早める効果を持つと推定される。

出力低下時の粒界上のFPガス気泡からのガス放出の機構としては、次のようなモデルが考えられる。

基礎照射時に生成したFPガスは、拡散により結晶粒界に到達してガス気泡を形成する。今回使用した燃料棒の基礎照射後のFPガス放出率は、約0.4%と小さかったことから、粒界上のガス気泡の連結は、この時点では、まだ生じていないと推定される。しかし、隣接する出力履歴のほぼ同じ燃料棒で10%以上のFPガス放出率が測定されていることと<sup>(4)</sup>、製造時の結晶粒径が約5μmと小さいことにより、結晶粒界にFPガスバブルがかなり蓄積した状態にあったと推定される。

再照射試験での高出力時には、燃料中心温度は約1450°C程度まで上昇すると推定され、FPガスは、拡散により結晶粒界に次々と到達して、粒界上のFPガス気泡が成長合体し、その一部は開気孔を形成してペレット外に放出される。ペレット中央部は、熱膨張により初期は、圧縮応力状態にあるが、高出力で長時間保持するとペレットのクリープにより圧縮応力は、緩和し低下していくと推定される。

次に出力が低下すると、圧縮応力が低下していたペレット中央部では、温度の低下により体積が縮小し、応力状態が圧縮応力から引っ張り応力に反転するものと推定される。この引っ張り応力が結晶粒界に作用し、結晶粒界の剥離、マイクロクラックの発生を引き起こし、または、粒界上のFPガス気泡の成長合体を促し開気孔形成により、結晶粒界上のFPガス気泡からFPガスがペレット外へ放出されるものと推定される。

この仮説は、定常運転、出力サイクル運転とも、内圧上昇が全体として、ほぼ、高出力保持時間の1/2乗に比例したこと、また、短い高出力保持時間の後に出力サイクルを繰り返しても、1回の出力サイクルによる内圧上昇は、小さくなる一方、長い高出力保持時間後の出力サイクルでは、内圧上昇が大きくなること等の観察結果を説明できると考えられる。

## 5.2 商用炉での負荷追従運転と試験炉での出力サイクル運転

今回の試験では、出力変動時、特に出力低下時に顕著な内圧上昇が観察され、燃料の高出力レベルを30, 35, 40kW/mと変化させながら定常運転と出力サイクル運転を繰り返した場合にも、各出力レベルとも出力サイクル運転が定常運転に比べてややFPガス放出を加速させるという結果が得られた。一方、フランス等では、商用炉での負荷追従運転が実施さ

れているが、負荷追従運転によるFPガス放出の増大は報告されていない。この両者の結果の違いについて考察を行う。

今回の試験条件と商用炉での照射条件とで異なるものとして燃料棒の出力レベルの差があげられる。本試験では、FPガス放出に対する出力変動の影響を調べるために、高出力運転の出力レベルを約40kW/mと基礎照射時の出力25kW/m以下に比べて高く設定し、1出力サイクルでの内圧変化を測定できるようにした。これにより、各出力変動時の燃料棒内圧変化を測定することが可能となった。

前節の考察より、出力低下時の燃料棒内圧上昇は、ペレットの熱応力に起因する粒界上のFPガス気泡からの放出によるものと推定される。この機構は、粒界上のガス気泡からの放出であるため、結晶粒界上にFPガスが次々と到達して、粒界上でのガス気泡の成長が急速に起こる場合、すなわち基礎照射でFPガスが粒界にある程度蓄積した後、高出力で照射する場合に顕著になると推定される。しかもペレットの中央部が高出力時初期に圧縮応力を生じ、かつ高出力保持中にその圧縮応力が緩和する程度の高温である場合にこの効果が大きくなると考えられる。また、今回の燃料ペレットの結晶粒径は約5μmと小さいことから、本試験は、出力低下時のFPガス放出を非常に顕著に示しやすい状態であったと考えられる。また、初期ギャップが310μmと大きいことから、一旦かなりの量のFPガス放出が起こった場合、ギャップコンダクタンスが低下して、燃料温度がさらに上昇し、さらにFPガスが放出される、サーマルフィードバックが起こりやすい条件であったとも考えられる。

一方、商用炉の場合には、一般に燃焼度とともに燃料出力は低下し、照射後期に高出力になることは、通常はないと考えられる。つまり、結晶粒界上にFPガスが次々と到達して、粒界上でのガス気泡の成長が急速に起こることは、通常時には起こらず、また、燃料中心温度も低い値に留まると考えられる。このため商用炉での負荷追従運転では、FPガス放出の増大が起こらないものと推定される。今回燃料の高出力レベルを30, 35, 40kW/mと変化させながら定常運転と出力サイクル運転を繰り返した場合に、各出力レベルとも出力サイクル運転が定常運転に比べてややFPガス放出を加速させるという結果が得られたが、燃料棒内圧の上昇は出力が高いほど顕著であり、出力サイクル運転時の高出力レベルと基礎照射時の出力レベルの差が出力変動時のFPガス放出において重要である可能性を示唆している。

ところで、商用炉で照射後期に燃料棒出力が高くなるケースとしては、異常な過渡変化により燃料棒出力が短時間上昇する場合を考えられるが、その場合でも、高出力に保持される時間は、短いと推定され、出力低下時のFPガス放出が、燃料の健全性に大きな影響を与えることはないと推定される。

## 6. 結 論

敦賀 1 号炉で照射された燃料棒を短尺化して燃料棒内圧計を再計装し、J M T R の B O C A キャプセルを用いて、出力変動時の F P ガス放出挙動に注目した照射試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 出力変動時、特に出力低下時には、顕著な燃料棒の内圧上昇が観察され、この内圧上昇は、直前の高出力保持時間に依存した。また、1サイクル毎の内圧上昇幅は、サイクル数とともに減少する傾向を示した。
- (2) 出力サイクル運転は、定常運転に比べて、F P ガス放出をやや加速させる傾向にある。この効果は、30, 35, 40kW/mの各出力レベルで観察された。
- (3) 出力低下時の燃料棒内圧上昇は、ペレットの熱応力に起因する粒界上の F P ガス気泡からの放出によるものと推定される。

## 謝 辞

この試験を行うに当たり、日本原子力発電（株）には、燃料棒を提供していただきました。燃料試験施設の方々には、短尺燃料棒の製作、及び再照射前のPIEで御協力いただき、また材料試験炉部の多くの方々に照射試験の遂行でお世話になりました。また、内田正明氏には、試験方法等について有益な助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) M. J. F. Notley and J. R. MacEwan, Nucl. App. 2(1966)477
- (2) T. Kogai et al., J. Nucl. Mater. 158(1988)64
- (3) T. Rowland et al., International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Avignon, April(1991)
- (4) 土江 他、原子力学会誌、29(1987)219
- (5) T. Nakajima and H. Saito, Nucl. Eng. Des. 101(1987)267
- (6) C. Vitanza et al. ANS Topical Meeting, Portland, USA(1979)
- (7) A. H. Booth: CRDC-721(1957)

## 6. 結 論

敦賀 1 号炉で照射された燃料棒を短尺化して燃料棒内圧計を再計装し、J M T R の B O C A キャップセルを用いて、出力変動時の F P ガス放出挙動に注目した照射試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 出力変動時、特に出力低下時には、顕著な燃料棒の内圧上昇が観察され、この内圧上昇は、直前の高出力保持時間に依存した。また、1サイクル毎の内圧上昇幅は、サイクル数とともに減少する傾向を示した。
- (2) 出力サイクル運転は、定常運転に比べて、F P ガス放出をやや加速させる傾向にある。この効果は、30, 35, 40kW/m の各出力レベルで観察された。
- (3) 出力低下時の燃料棒内圧上昇は、ペレットの熱応力に起因する粒界上の F P ガス気泡からの放出によるものと推定される。

## 謝 辞

この試験を行うに当たり、日本原子力発電（株）には、燃料棒を提供していただきました。燃料試験施設の方々には、短尺燃料棒の製作、及び再照射前の PIE で御協力いただき、また材料試験炉部の多くの方々に照射試験の遂行でお世話になりました。また、内田正明氏には、試験方法等について有益な助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) M. J. F. Notley and J. R. MacEwan, Nucl. App. 2(1966)477
- (2) T. Kogai et al., J. Nucl. Mater. 158(1988)64
- (3) T. Rowland et al., International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Avignon, April(1991)
- (4) 土江 他、原子力学会誌、29(1987)219
- (5) T. Nakajima and H. Saito, Nucl. Eng. Des. 101(1987)267
- (6) C. Vitanza et al. ANS Topical Meeting, Portland, USA(1979)
- (7) A. H. Booth: CRDC-721(1957)

## 6. 結 論

敦賀 1 号炉で照射された燃料棒を短尺化して燃料棒内圧計を再計装し、J M T R の B O C A キャップセルを用いて、出力変動時の F P ガス放出挙動に注目した照射試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 出力変動時、特に出力低下時には、顕著な燃料棒の内圧上昇が観察され、この内圧上昇は、直前の高出力保持時間に依存した。また、1サイクル毎の内圧上昇幅は、サイクル数とともに減少する傾向を示した。
- (2) 出力サイクル運転は、定常運転に比べて、F P ガス放出をやや加速させる傾向にある。この効果は、30, 35, 40kW/m の各出力レベルで観察された。
- (3) 出力低下時の燃料棒内圧上昇は、ペレットの熱応力に起因する粒界上の F P ガス気泡からの放出によるものと推定される。

## 謝 辞

この試験を行うに当たり、日本原子力発電（株）には、燃料棒を提供していただきました。燃料試験施設の方々には、短尺燃料棒の製作、及び再照射前の PIE で御協力いただき、また材料試験炉部の多くの方々に照射試験の遂行でお世話になりました。また、内田正明氏には、試験方法等について有益な助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) M. J. F. Notley and J. R. MacEwan, Nucl. App. 2(1966)477
- (2) T. Kogai et al., J. Nucl. Mater. 158(1988)64
- (3) T. Rowland et al., International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Avignon, April(1991)
- (4) 土江 他、原子力学会誌、29(1987)219
- (5) T. Nakajima and H. Saito, Nucl. Eng. Des. 101(1987)267
- (6) C. Vitanza et al. ANS Topical Meeting, Portland, USA(1979)
- (7) A. H. Booth: CRDC-721(1957)

第1表 短尺燃料棒の主な仕様

・被覆管外径	14.3 mm
・被覆管肉厚	0.81 ± 0.08 mm
・ペレット外径	12.37 ± 0.03 mm
・ギャップ幅	310 μm
・スタック長	229-285 mm
・初期密度	94.5 ± 1.3 %TD
・初期濃縮度	2.79 %
・燃焼度	23.3-26.5 MWd/kgU
・初期結晶粒径	約 5 μm
・基礎照射時FGR	約 0.4 %

第2表 BOCA/OSF-1 装置の性能諸元

項 目	デ タ
冷 却 材	純 水
通 常 運 転 圧 力	7.3 MPa
キャプセル内冷却水流量	1 cm <sup>3</sup> /s
熱 中 性 子 束	$3 \sim 8 \times 10^{13} n/cm^2 \cdot s$ $4 \sim 11 \times 10^{13} n/cm^2 \cdot s$ (ジルカロイ製炉内管)
高 速 中 性 子 束	$2 \times 10^{13} n/cm^2 \cdot s$
最 大 発 热 量	30 kW
炉 内 管 冷 却 材	純 水
炉 内 管 冷 却 水 流 量	1.9 m <sup>3</sup> /h
中 性 子 吸 収 体	He-3ガス
He-3ガス圧力変化幅	0.03 ~ 4 MPa
燃 料 棒 出 力 变 化 幅	2 ~ 3 倍
燃 料 棒 出 力 变 化 速 度	30 kW/m · min ~ 5 W/m · min

第3表 燃料棒出力評価精度の例  
(J M T R 93サイクル: C6-2燃料棒)

O S F - 1 冷却水流量測定精度	
差圧発振器の精度	± 0. 1 %
ディストリビュータの精度	± 0. 1 %
A/D変換器の精度	± 0. 2 %
O S F - 1 冷却水入口温度測定精度	
零点補償器の精度(40 °Cで0.05°C)	± 0. 1 %
A/D変換器の精度	± 0. 9 %
O S F - 1 冷却水出口温度測定精度	
零点補償器の精度(40 °Cで0.05°C)	± 0. 1 %
A/D変換器の精度	± 0. 9 %
出力較正曲線作成精度	
O S F - 1 冷却水出入口温度差の分散	± 0. 9 %
ヒータピンの出力測定精度	
出力計の精度	± 0. 2 %
A/D変換器の精度	± 0. 2 %
較正曲線のフィッティング精度	
195W/cm 時	± 1. 1 %
407W/cm 時	± 0. 5 %
出入口温度差の測定精度	
195W/cm 時	± 1. 5 %
407W/cm 時	± 1. 4 %
ガンマ発熱量の測定誤差	
195W/cm 時	± 2. 3 %
407W/cm 時	± 1. 1 %
軸方向出力分布評価精度	
S P N D測定誤差	± 0. 1 %
出力分布曲線フィッティング精度	± 0. 3 %
出力評価精度 (2 σ)	
ベース照射 (195W/cm) 時	± 6. 8 %
最高出力 (407W/cm) 時	± 4. 9 %

第4表 各燃料棒仕様と照射条件

## ・燃料棒仕様

	定常運転	出力サイクル	日負荷運転	出力レベルを変化させた出力サイクル
燃料棒No.	C6-2	C6-4	C6-3	C6-1
スタック長(mm)	247.2	284.6	229.0	244.1
燃焼度(MWd/kgU)	24.6	26.5	25.9	23.3
	(基礎照射時: 出力~20kW/m、FGR 0.4%)			
封入ガス圧(MPa)	0.11	0.15	0.15	0.15
	(ガス組成 He 90%, Xe 9%, Kr 1% 長尺燃料棒と同一)			
フリーキリュ-4(cc)	8.36	8.39	9.11	9.67

## ・照射条件

	定常運転	出力サイクル	日負荷運転	出力レベルを変化させた出力サイクル
燃料棒No.	C6-2	C6-4	C6-3	C6-1
最高線出力(kW/m)	40.5	40.5	40.9	40.9(35,30)(E°-ク)
高出力保持時間(h)	260	260	260	44
出力上昇速度(kW/mh)	10	1200	20	1200
出力低下速度(kW/mh)	10	150	20	150

第5表 パンクチャー試験及びガス分析結果と内圧計値の比較

燃料棒番号	C 6 - 2 (定常運転燃料棒)	C 6 - 4 (出力サイクル燃料棒)
燃焼度(MWd/kgU)	24.6	26.5
UO <sub>2</sub> 重量 (g)	310.8	354.2
フリーボリューム		
初期 (cc)	8.36	8.39
PIE (cc)	8.32	8.37
初期内圧(atm)室温	1.1	1.5
最終内圧		
内圧計(atm, 室温)	8.3	11.8
PIE (atm, 0°C)	5.85	9.58
最終ガス量(PIE, STP)		
He (cc)	3.1	13.1
Xe (cc)	41.9	61.0
Kr (cc)	3.8	6.1
放出FPガス量(STP)		
内圧計(cc)	55.8	93.4
PIE (cc)	45.35	65.6
生成FPガス量(cc, STP)	203.5	249.9
FPガス放出率		
内圧計	27.4%FGR	32.7%FGR
PIE	22.2%FGR	26.2%FGR

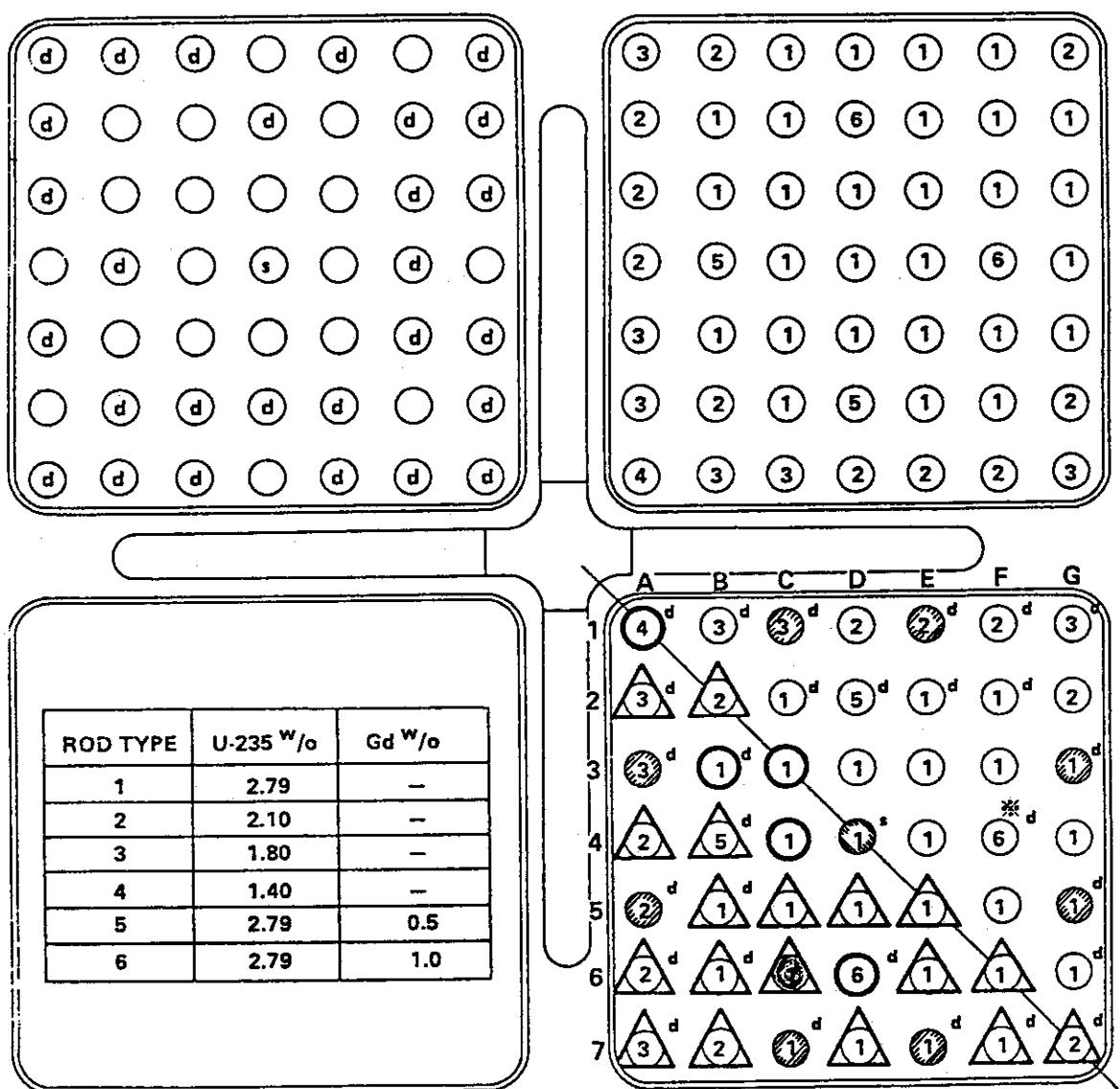
○ : CATEGORY-I (NDT + DT) : 5 RODS/B'DL

△ : " -II (NDT ONLY): 18 " / "

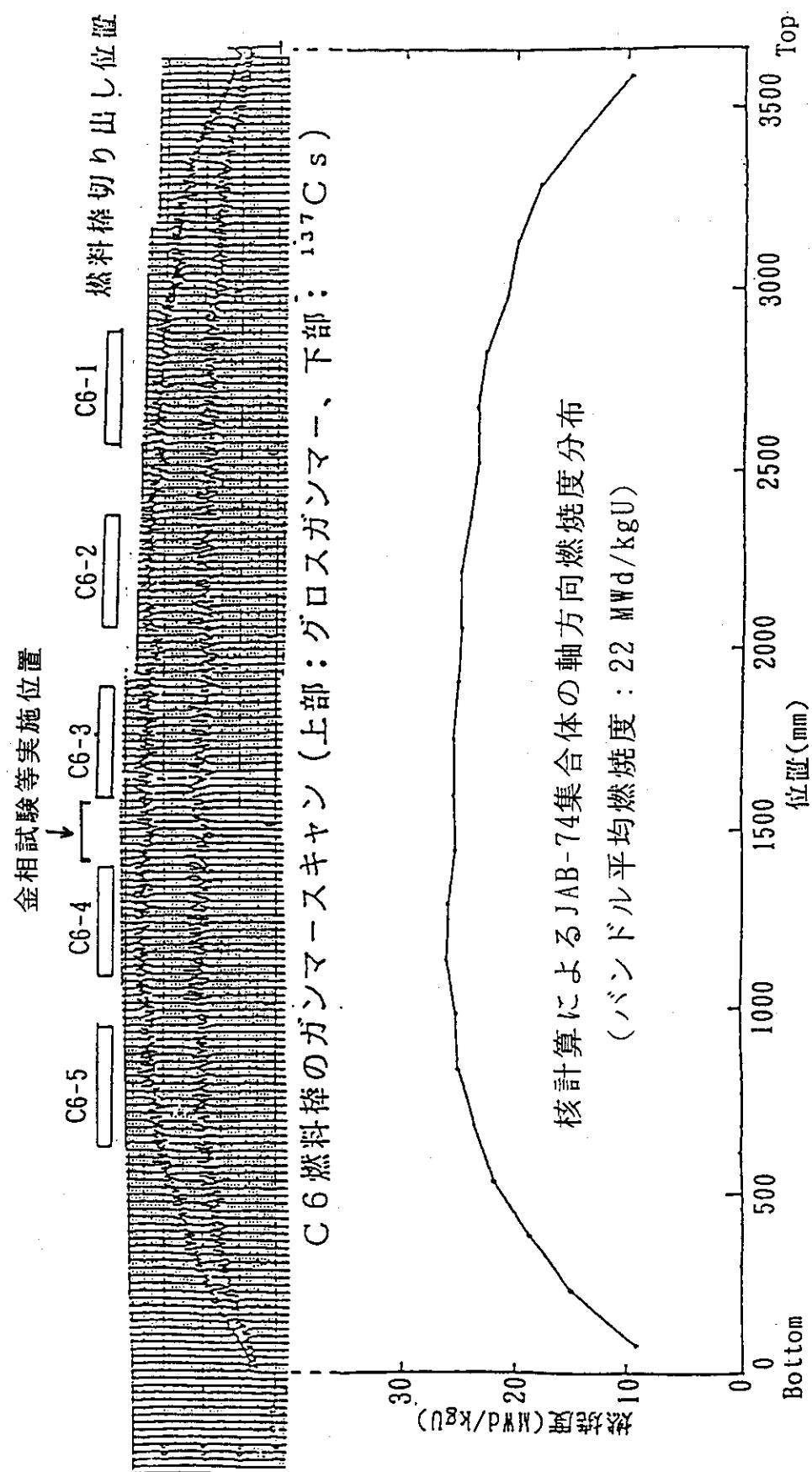
● : TIE ROD

●<sup>s</sup> : SEGMENTED ROD

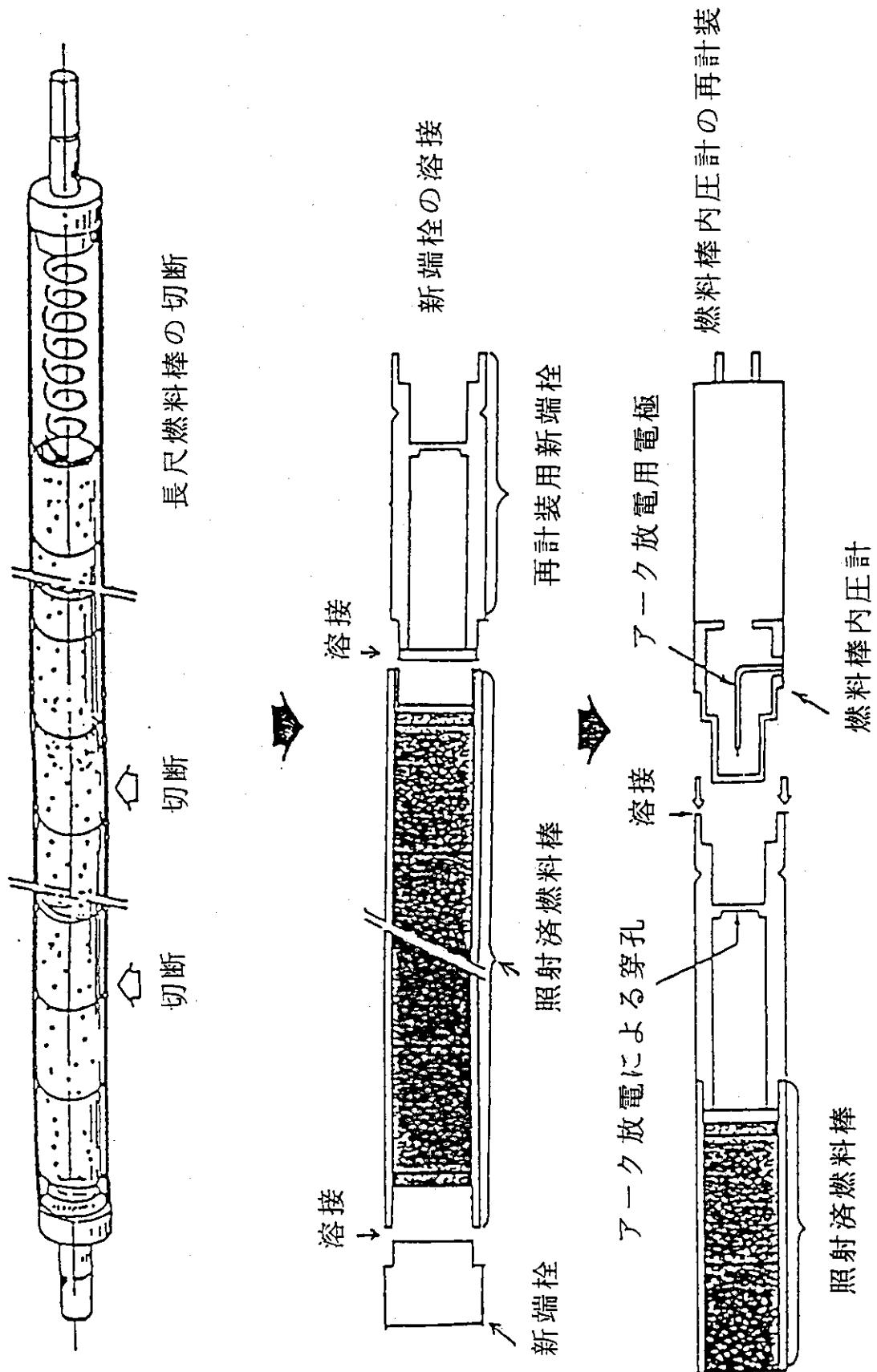
○<sup>d</sup> : DISHED PELLET ROD



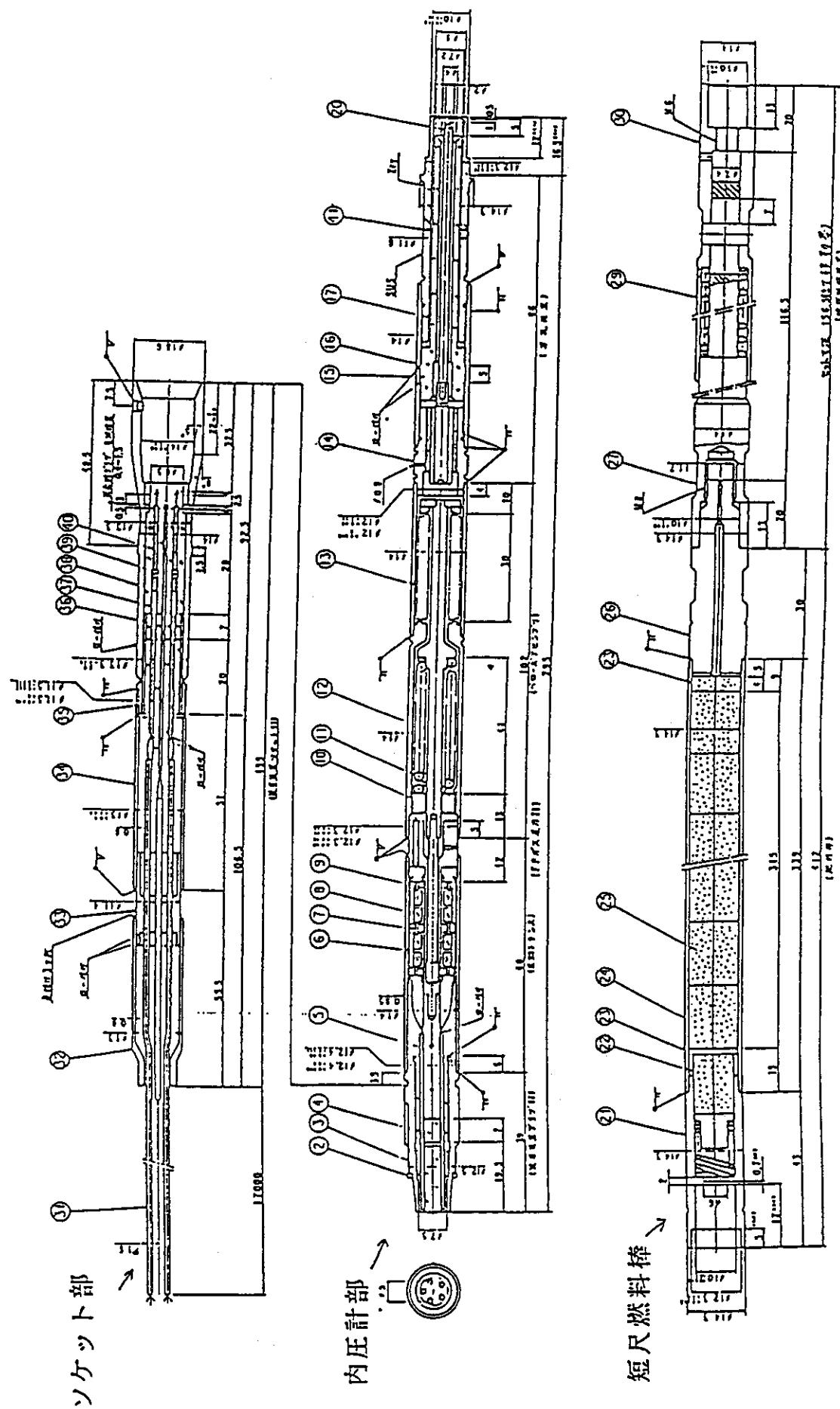
第1図 C6燃料棒の燃料集合体内位置



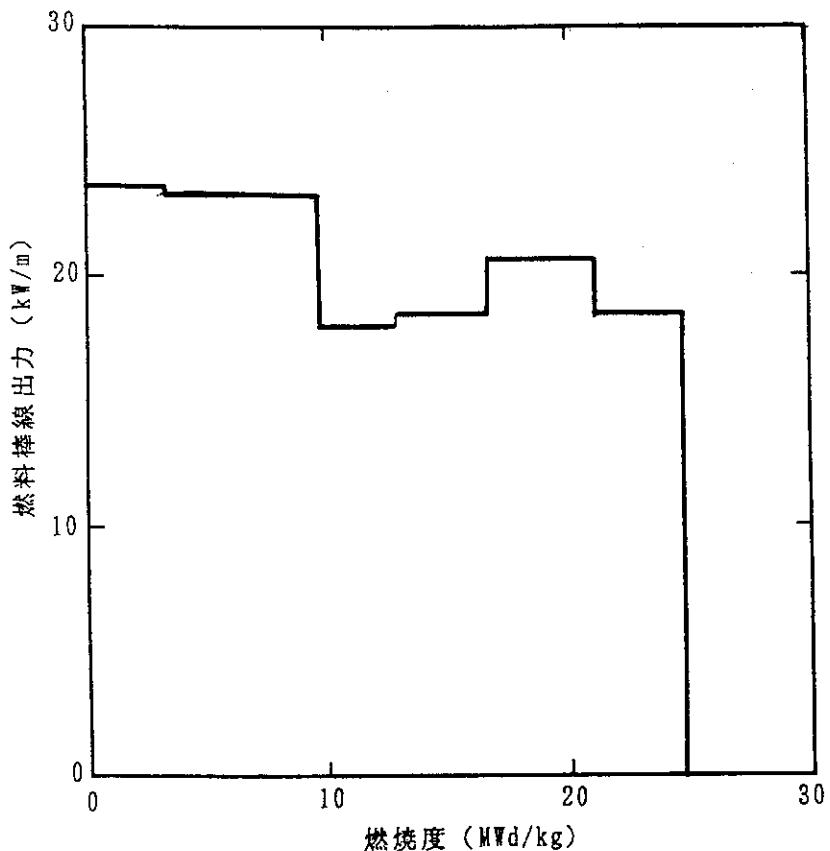
第2図 C 6 燃料棒の出力分布とガンマスキャンデータ



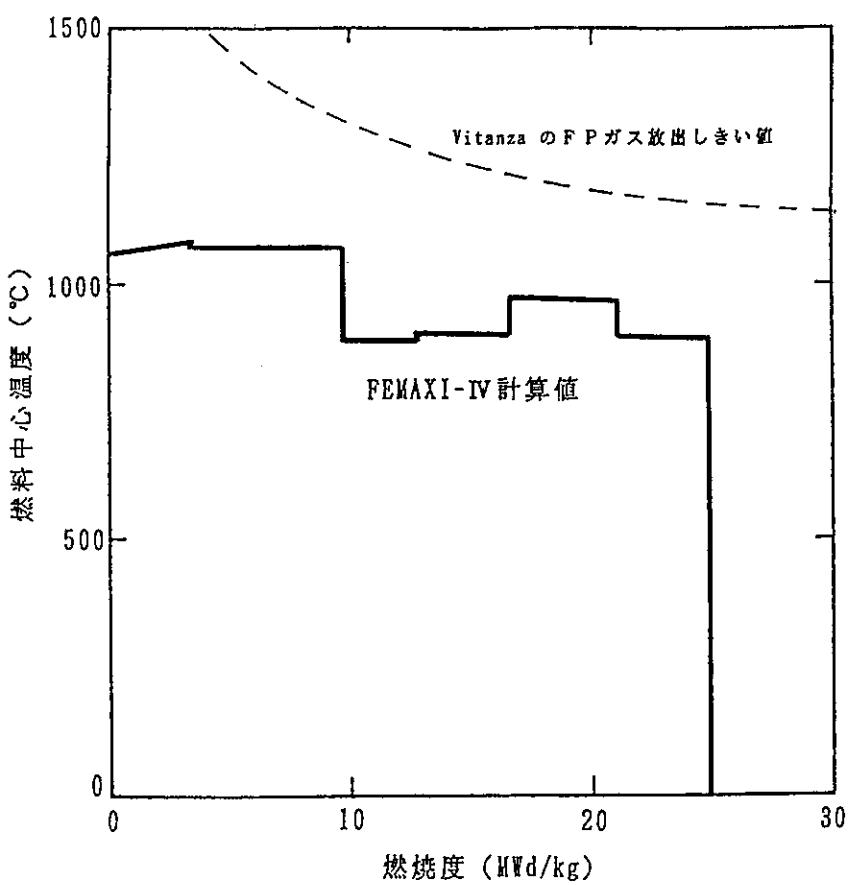
第3図 短尺燃料棒の製作と燃料棒内圧計の再計装



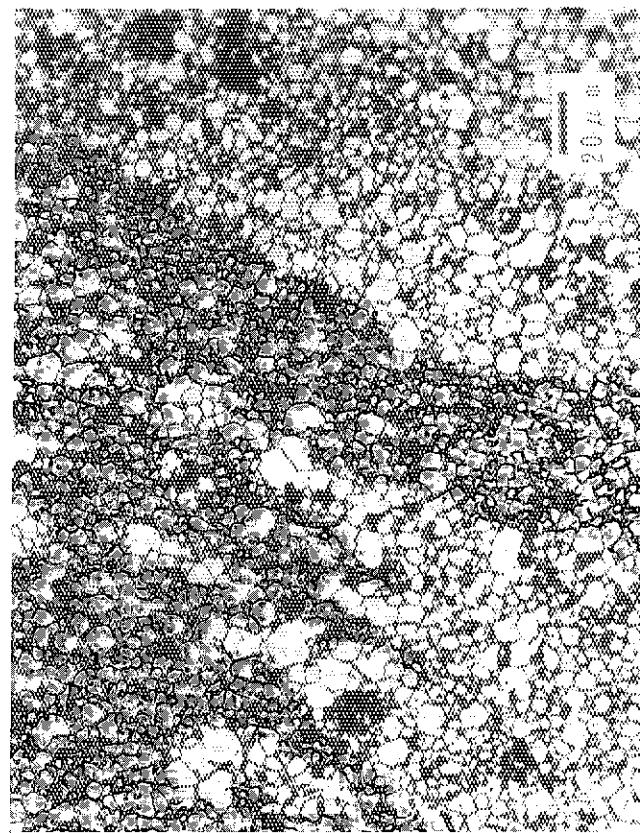
第4図 短尺燃料棒と再計装用内圧計



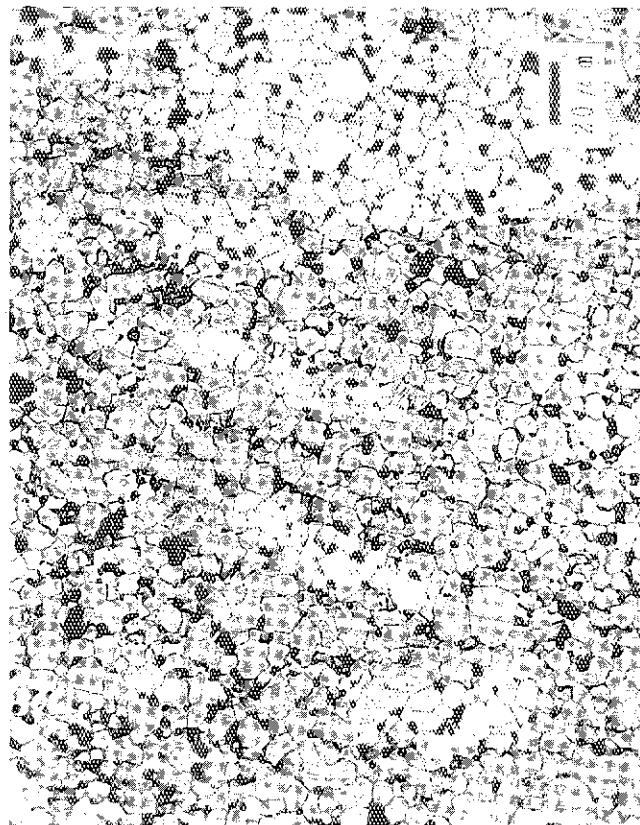
第5図 敷賀炉燃料の基礎照射時出力履歴 (C6-2)



第6図 敷賀炉燃料の基礎照射時燃料中心温度 (C6-2)

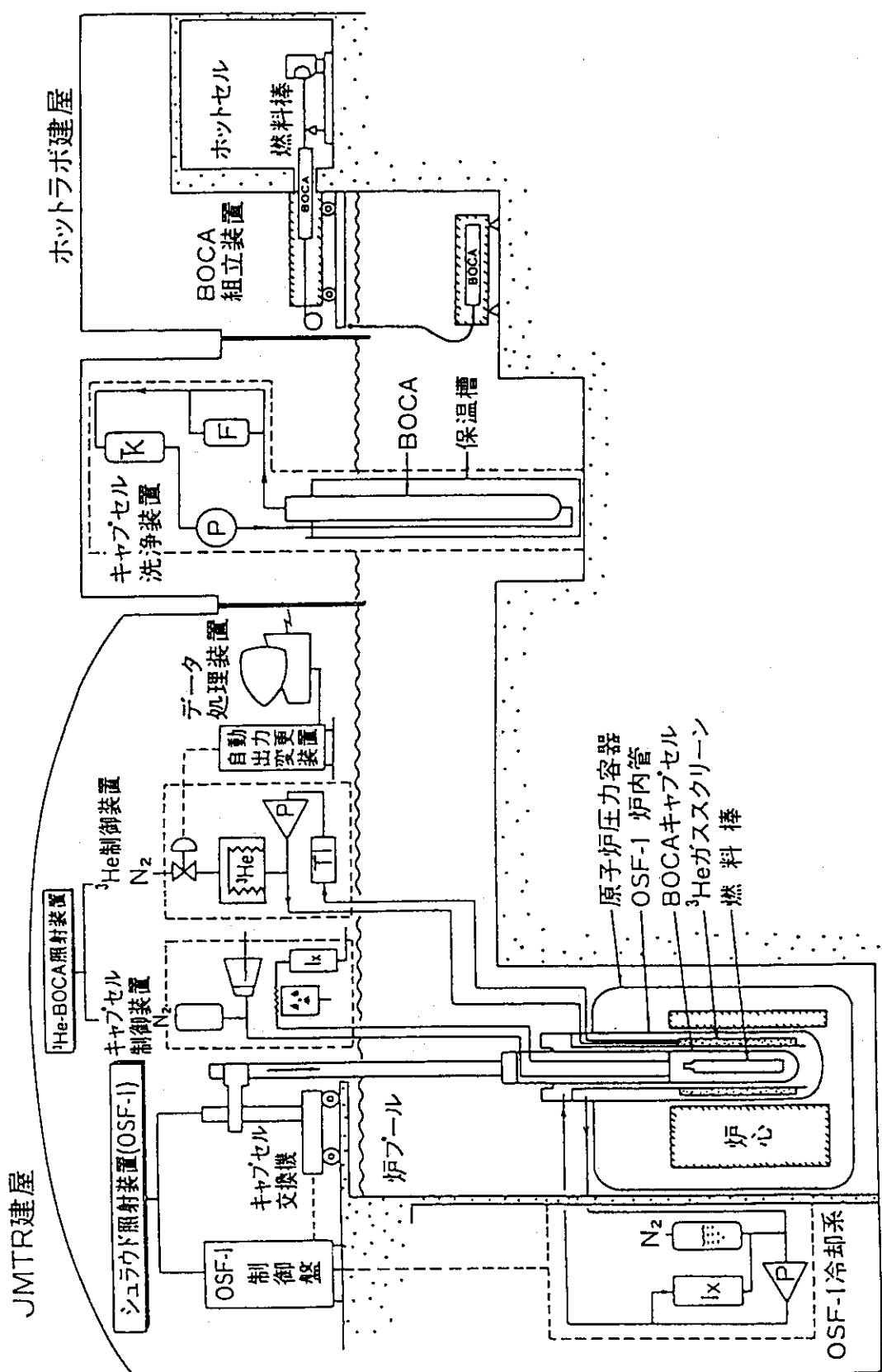


(b)ペレット外周部

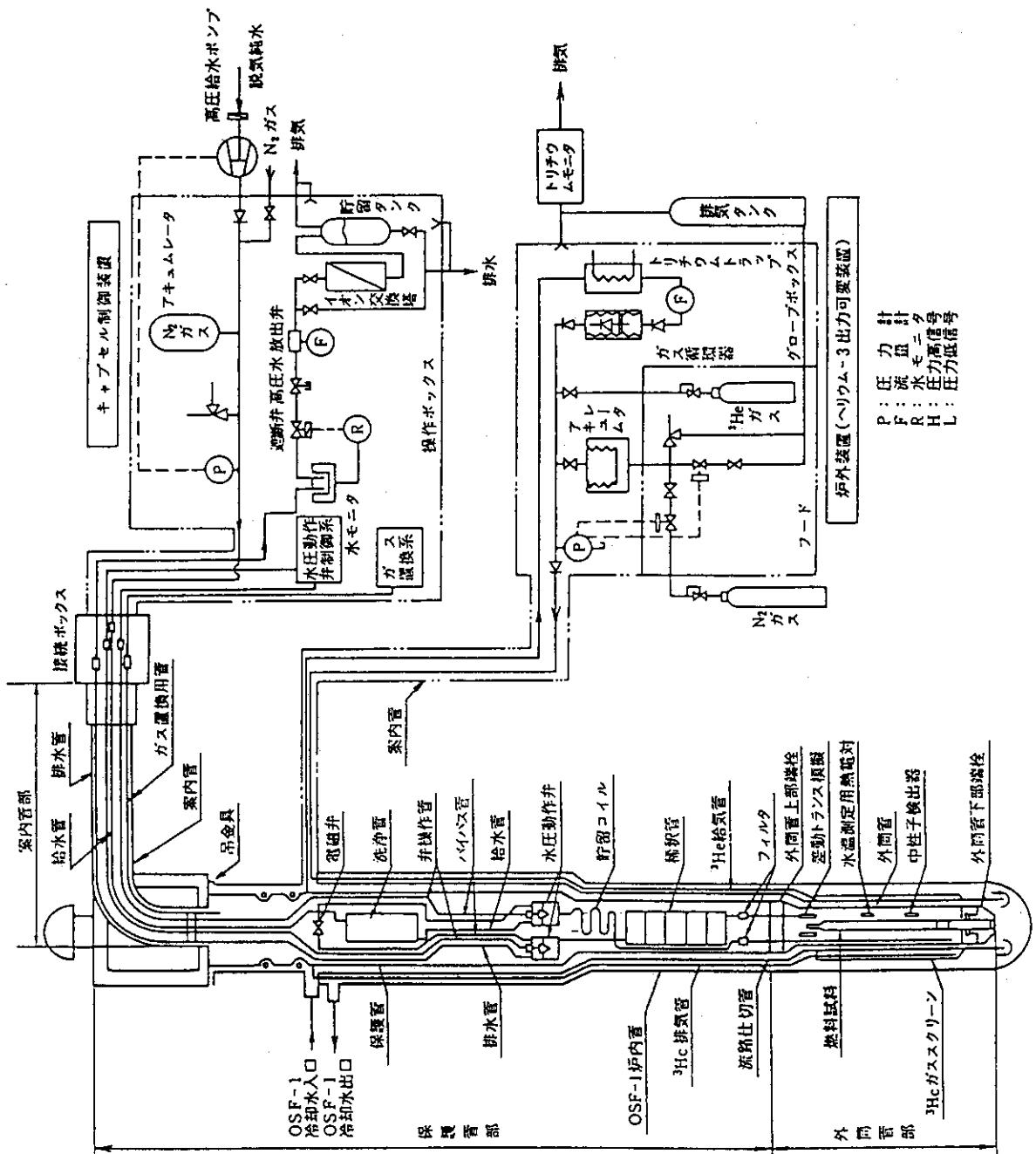


(a)ペレット中心付近

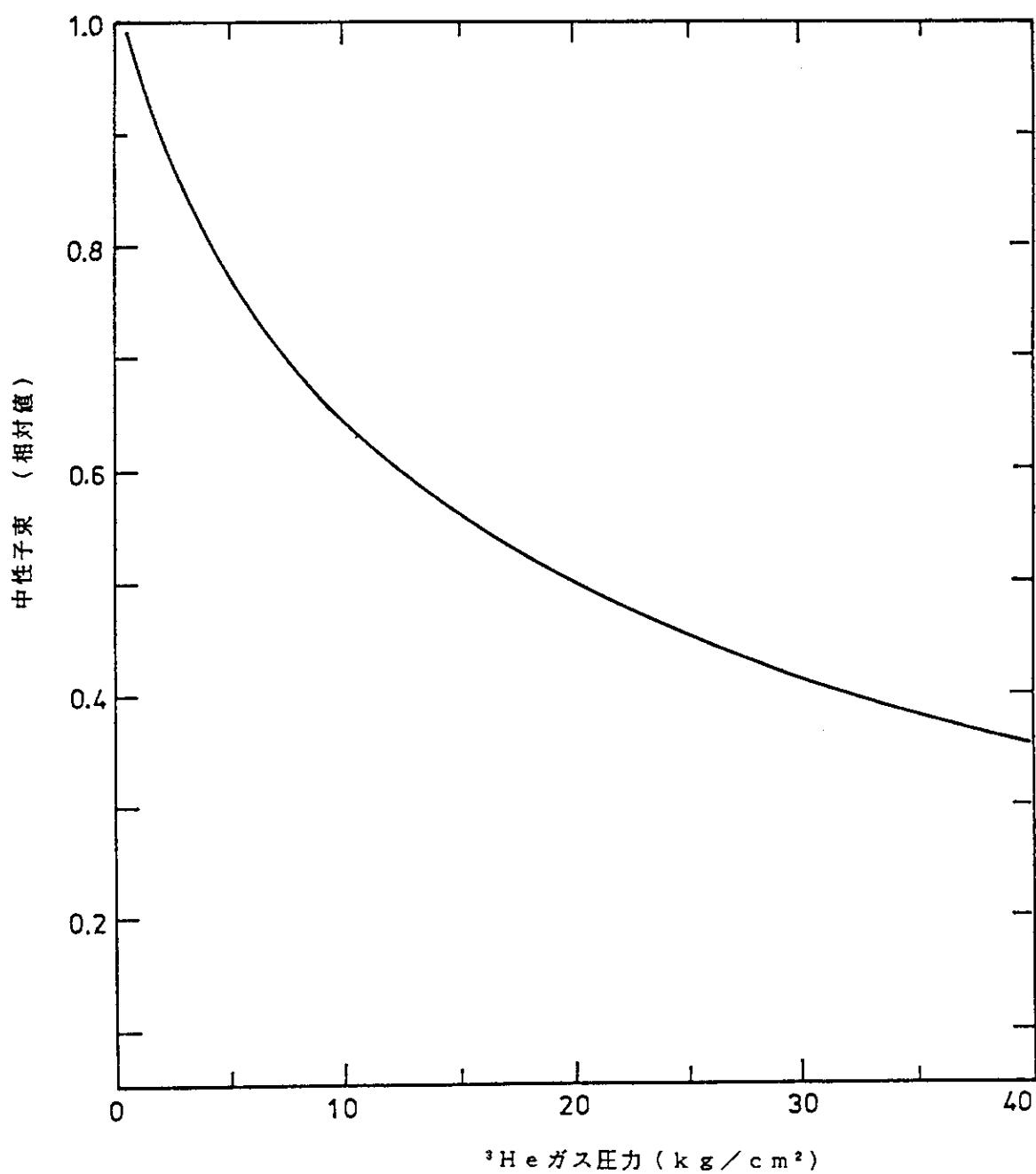
第7図 再照射前のC6燃料棒の金相写真(エッチ後)



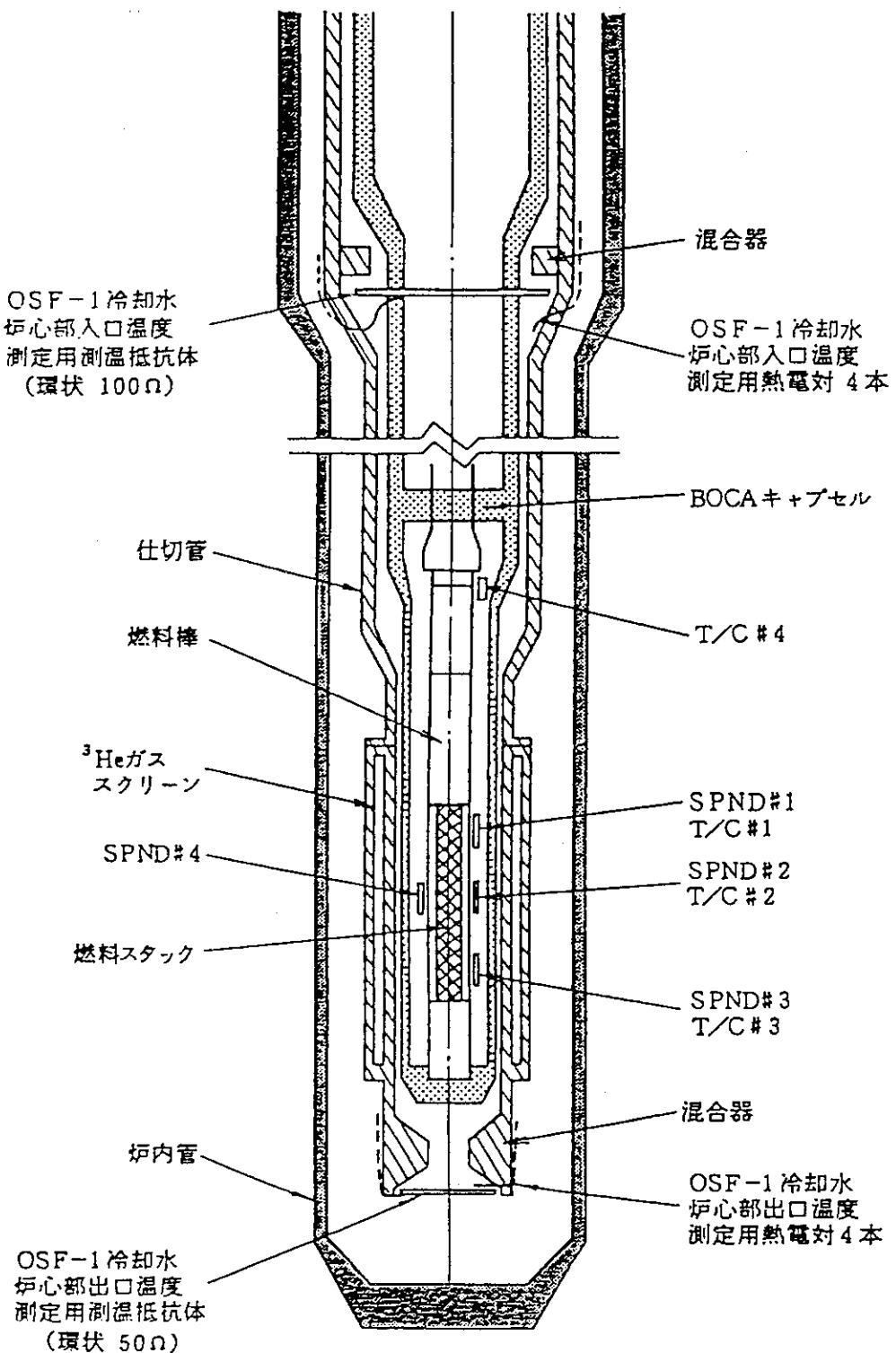
第8図 JMT-R出力急昇試験設備(BOCA/OSF-1)の全体構成



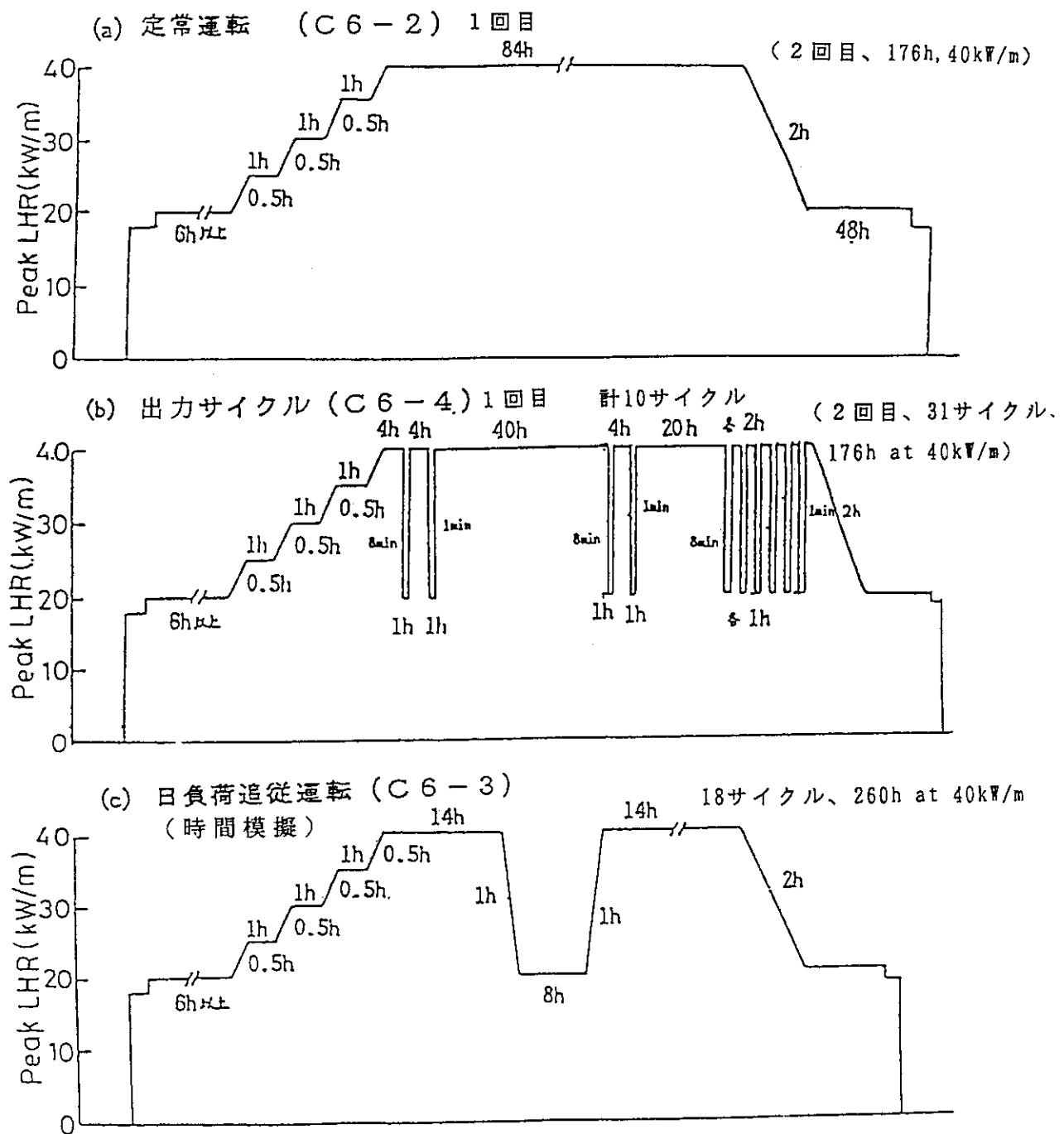
第9図 沸騰水キャッセルの基本構成図



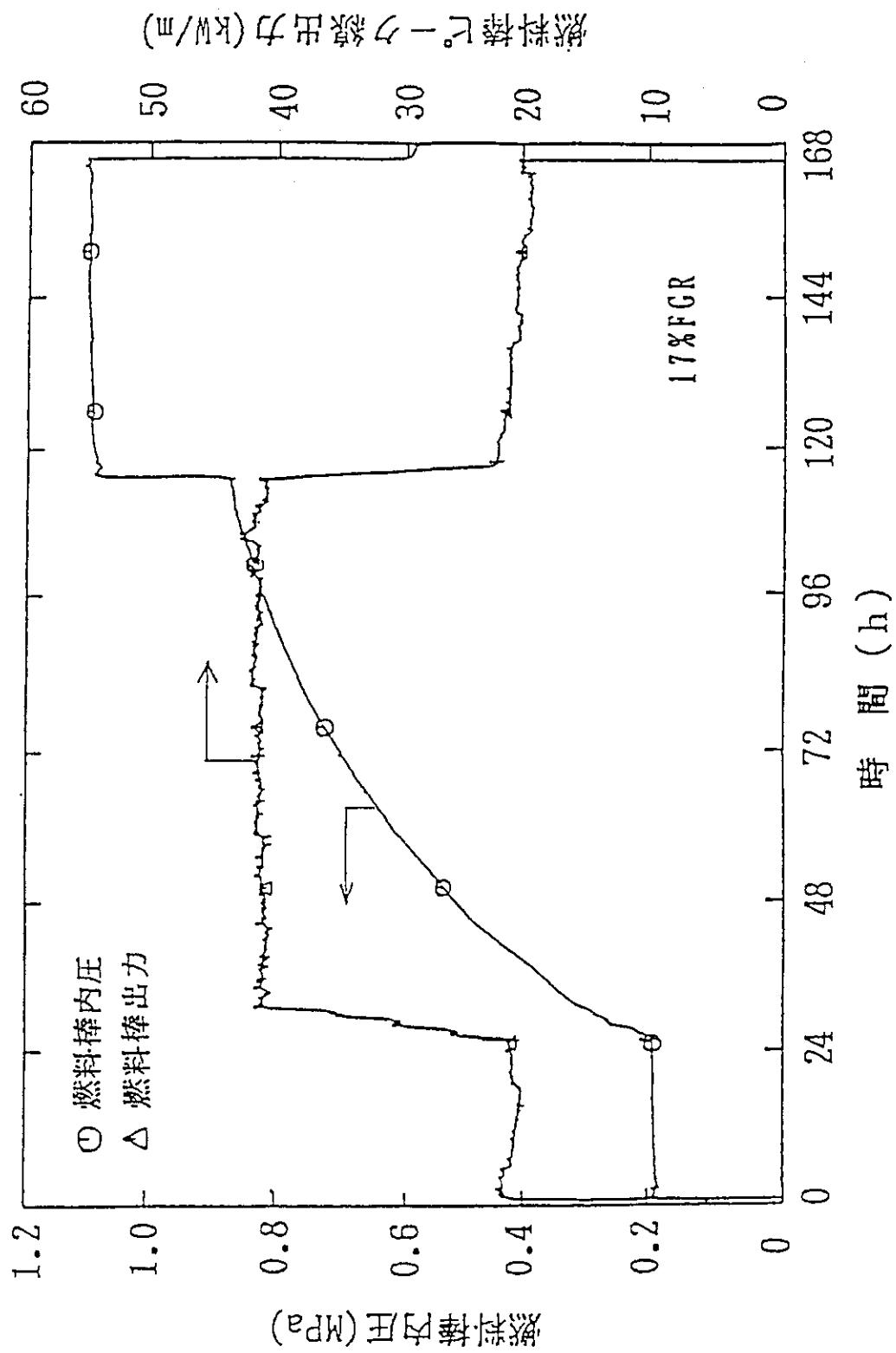
第10図  ${}^3\text{He}$  ガス加圧による中性子束抑制



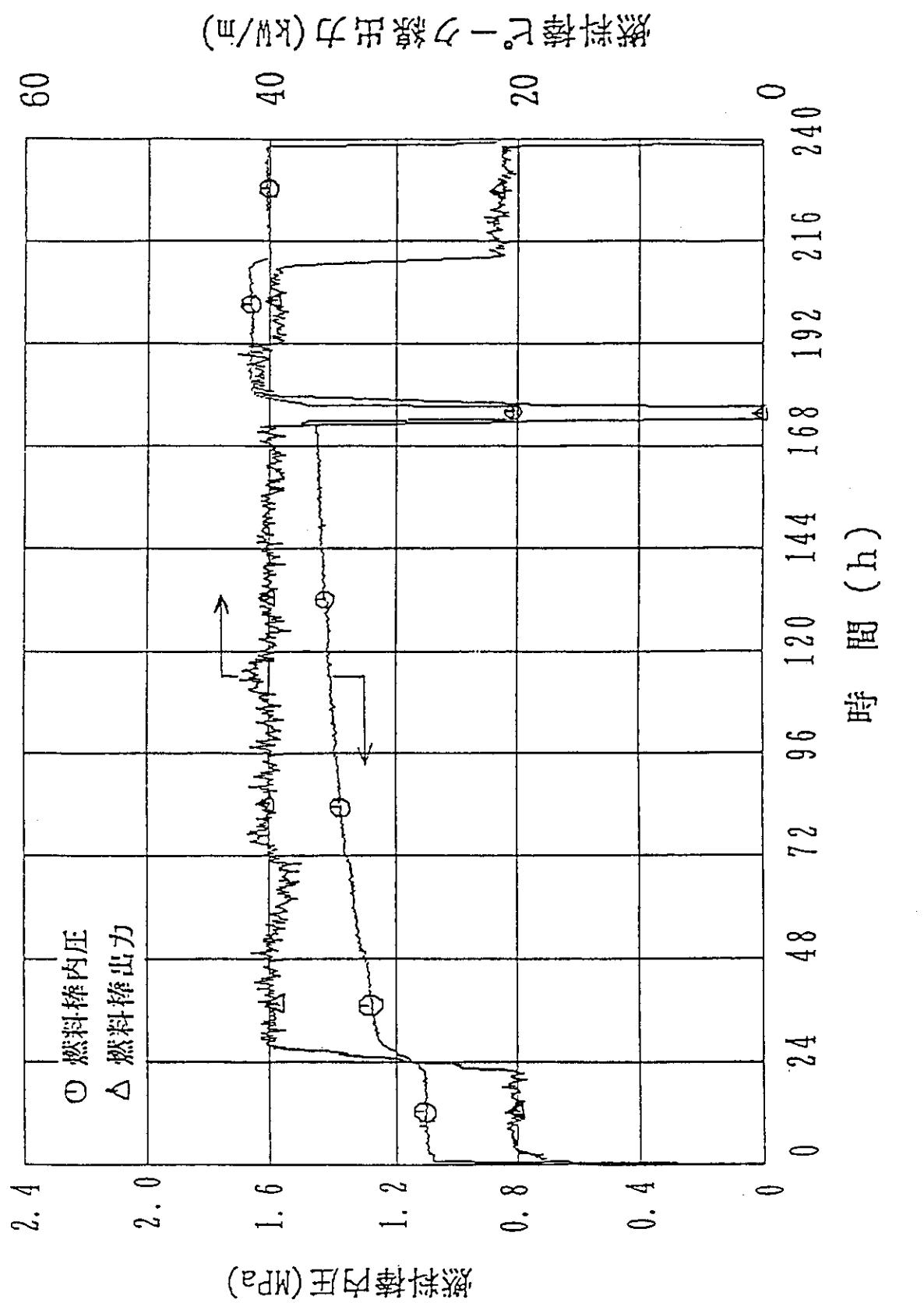
第11図 BOCA/OSF-1炉心部詳細



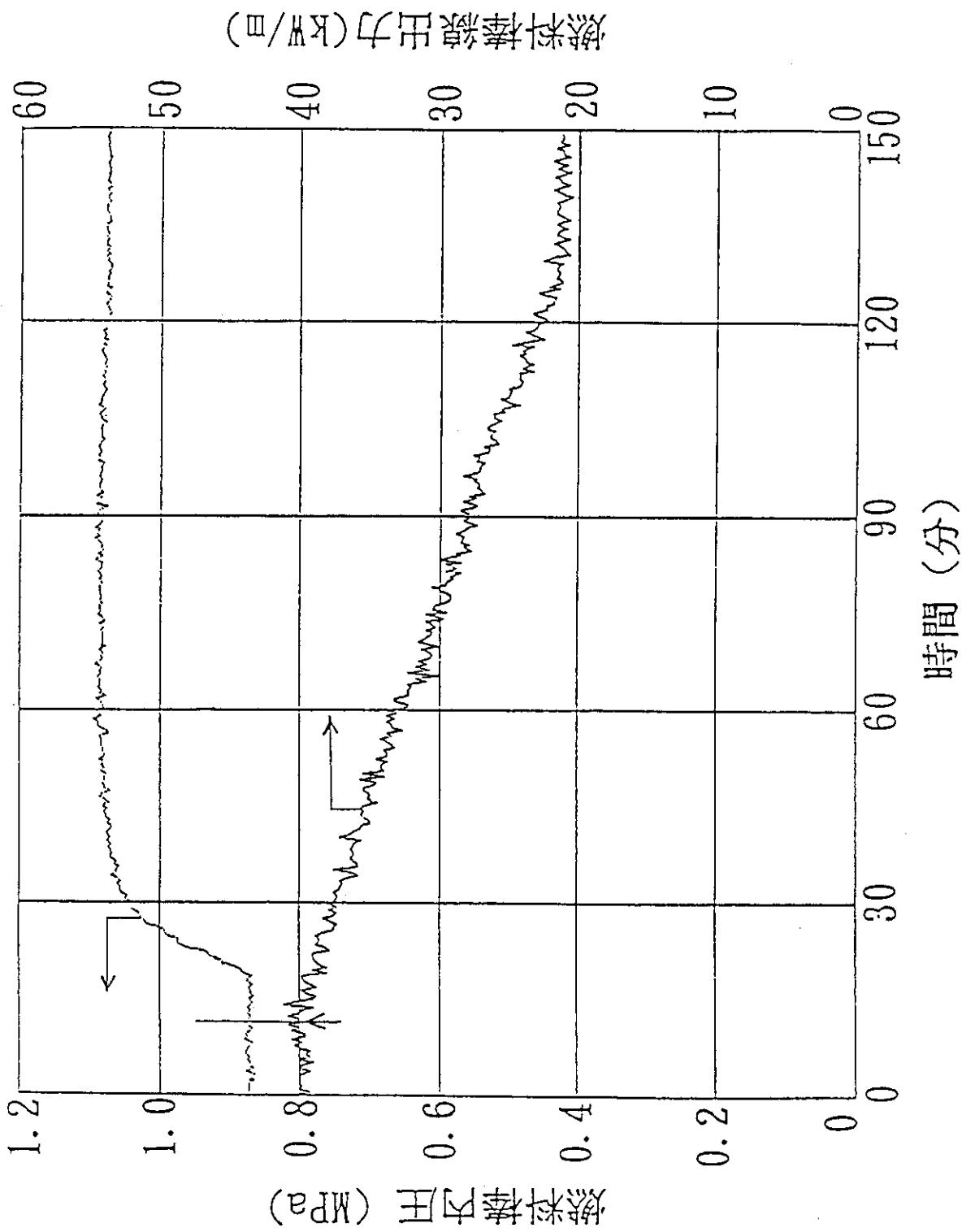
第12図 再照射試験時の運転モード



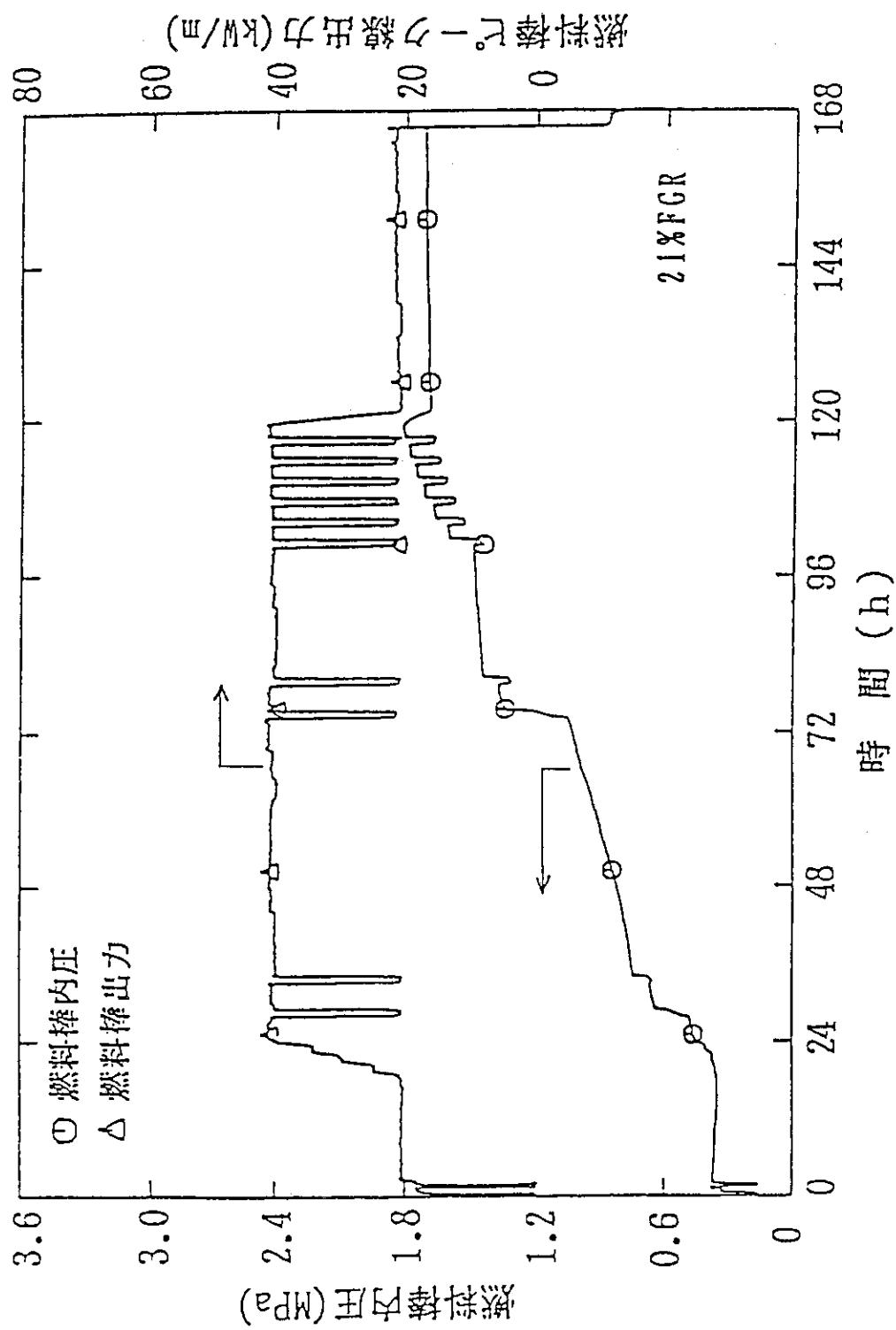
第13図 定常運転での燃料棒出力と燃料棒内圧変化(C6-2, 1回目)



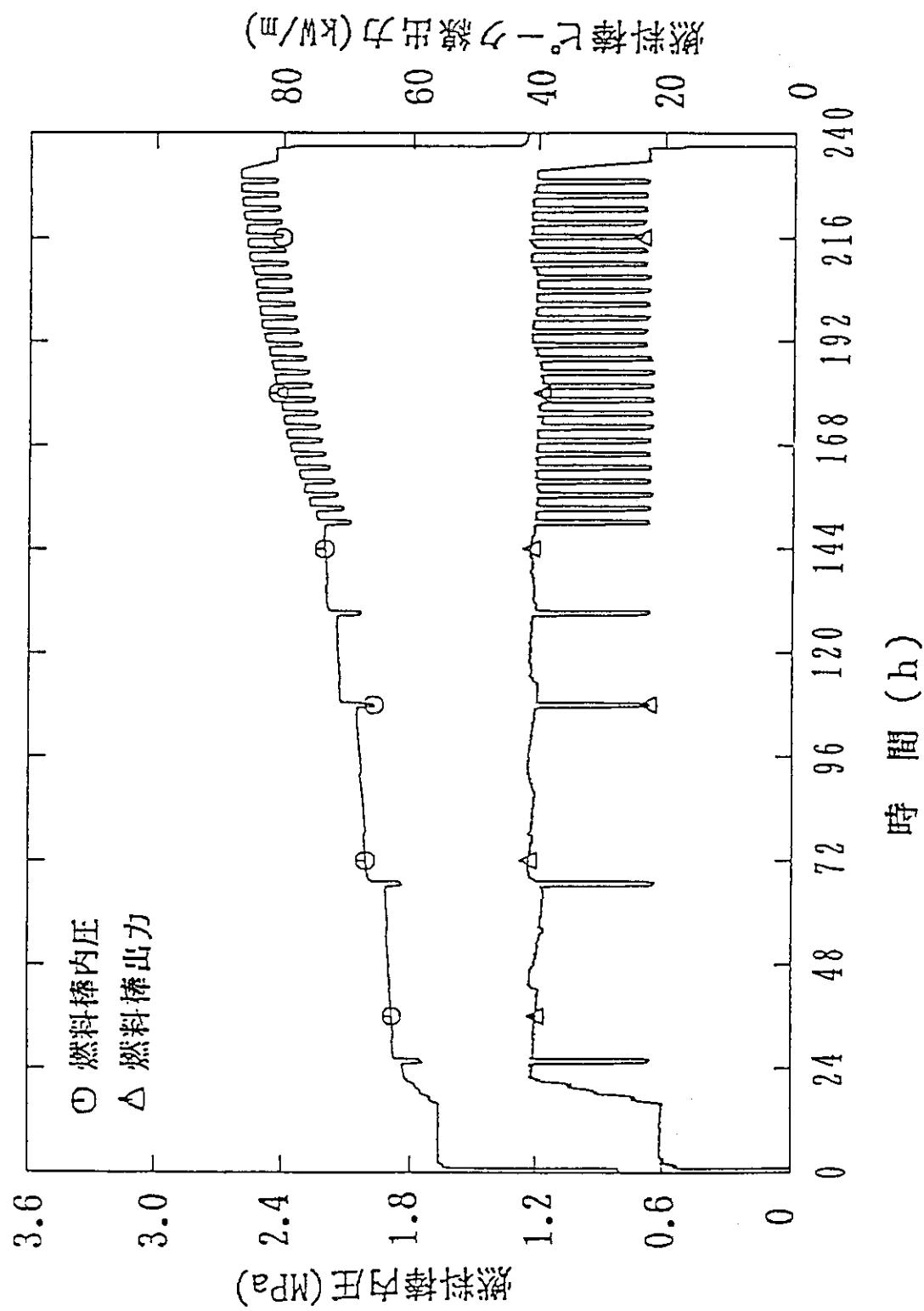
第14図 定常運転での燃料棒出力と燃料棒内圧変化(C6-2, 2回目)



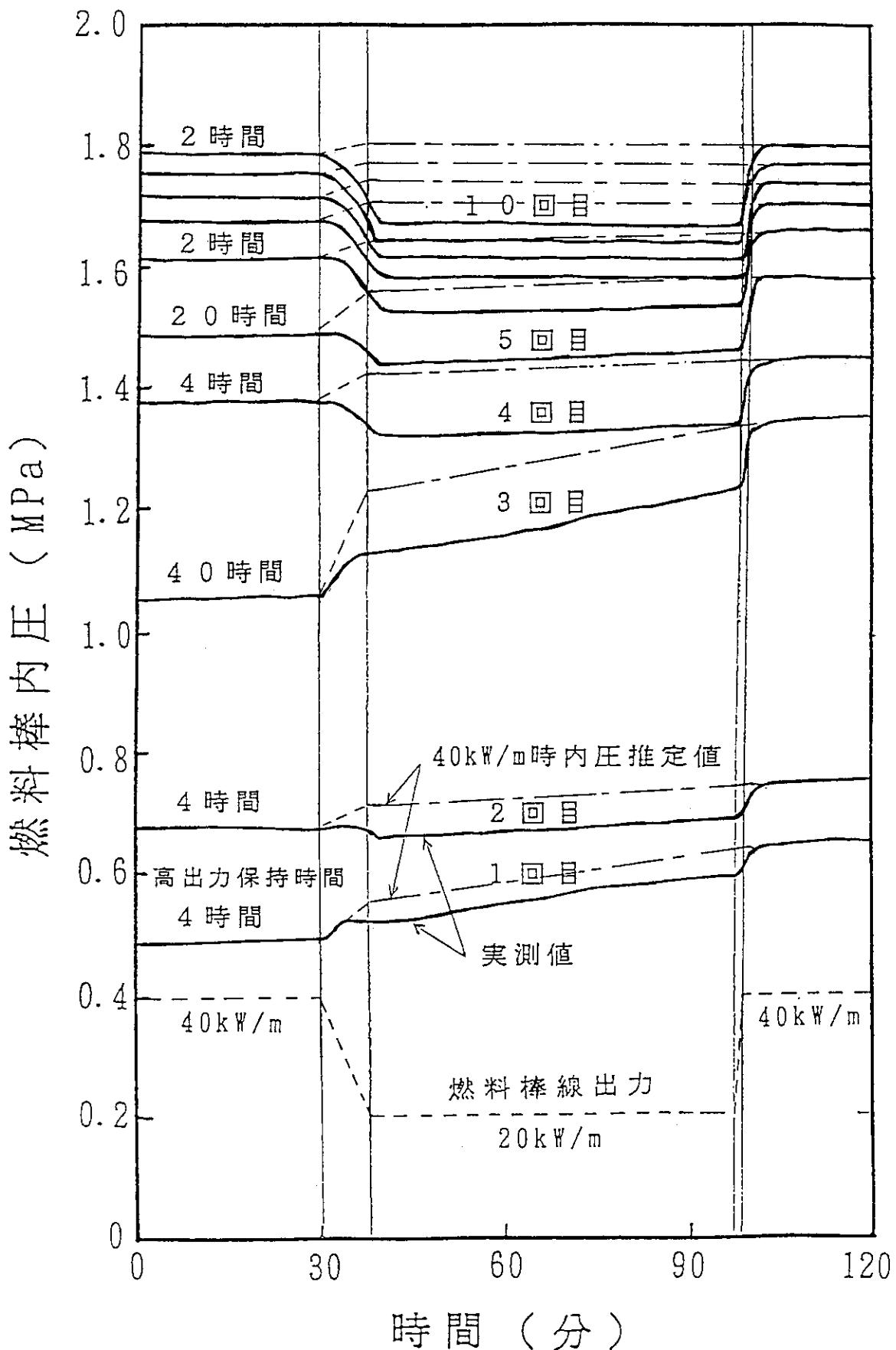
第15図 出力低下時の燃料棒内圧上昇(C6-2, 1回目)



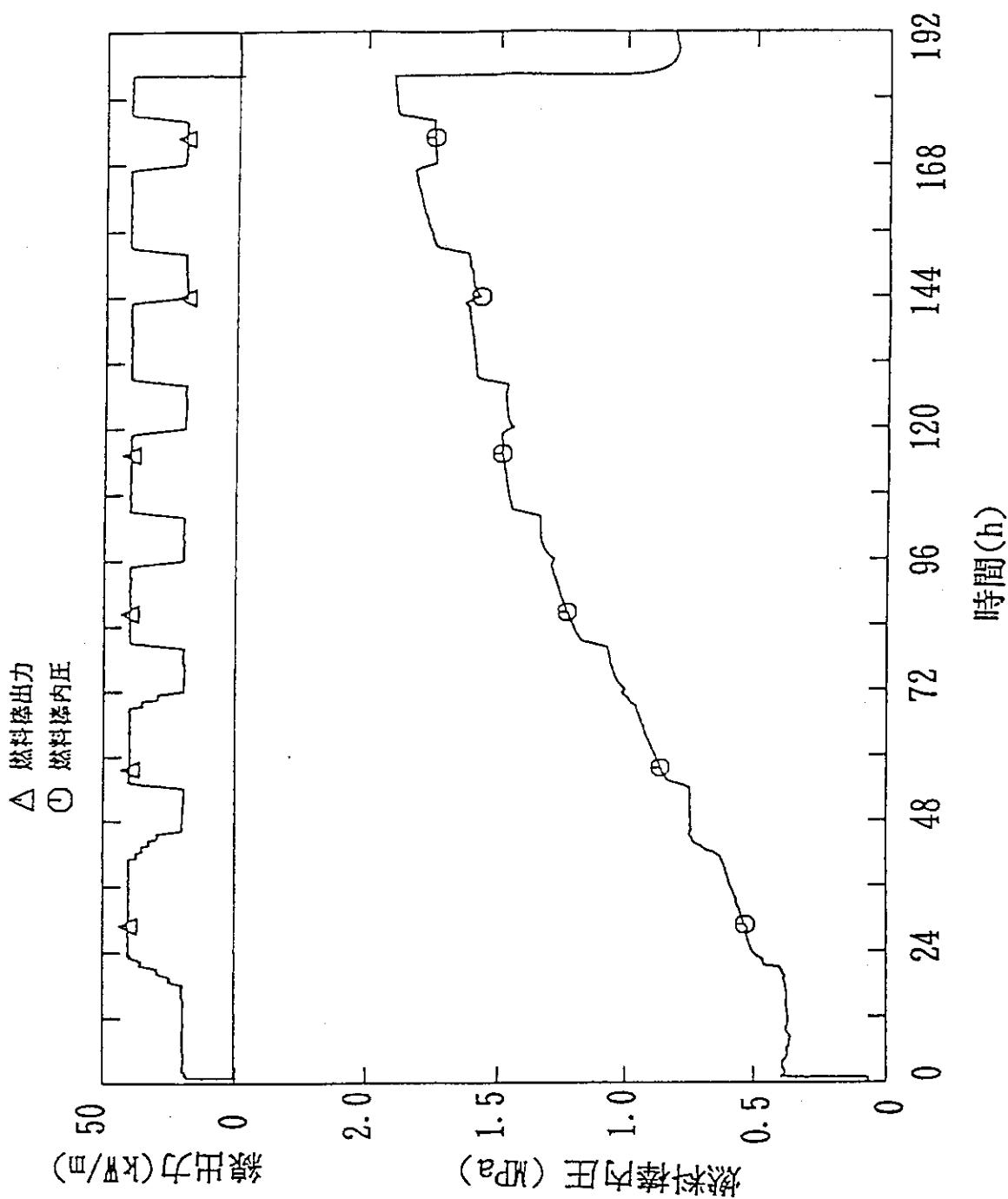
第16図 出力サイクル運転での燃料棒出力と燃料棒内圧変化(C6-4, 1回目)



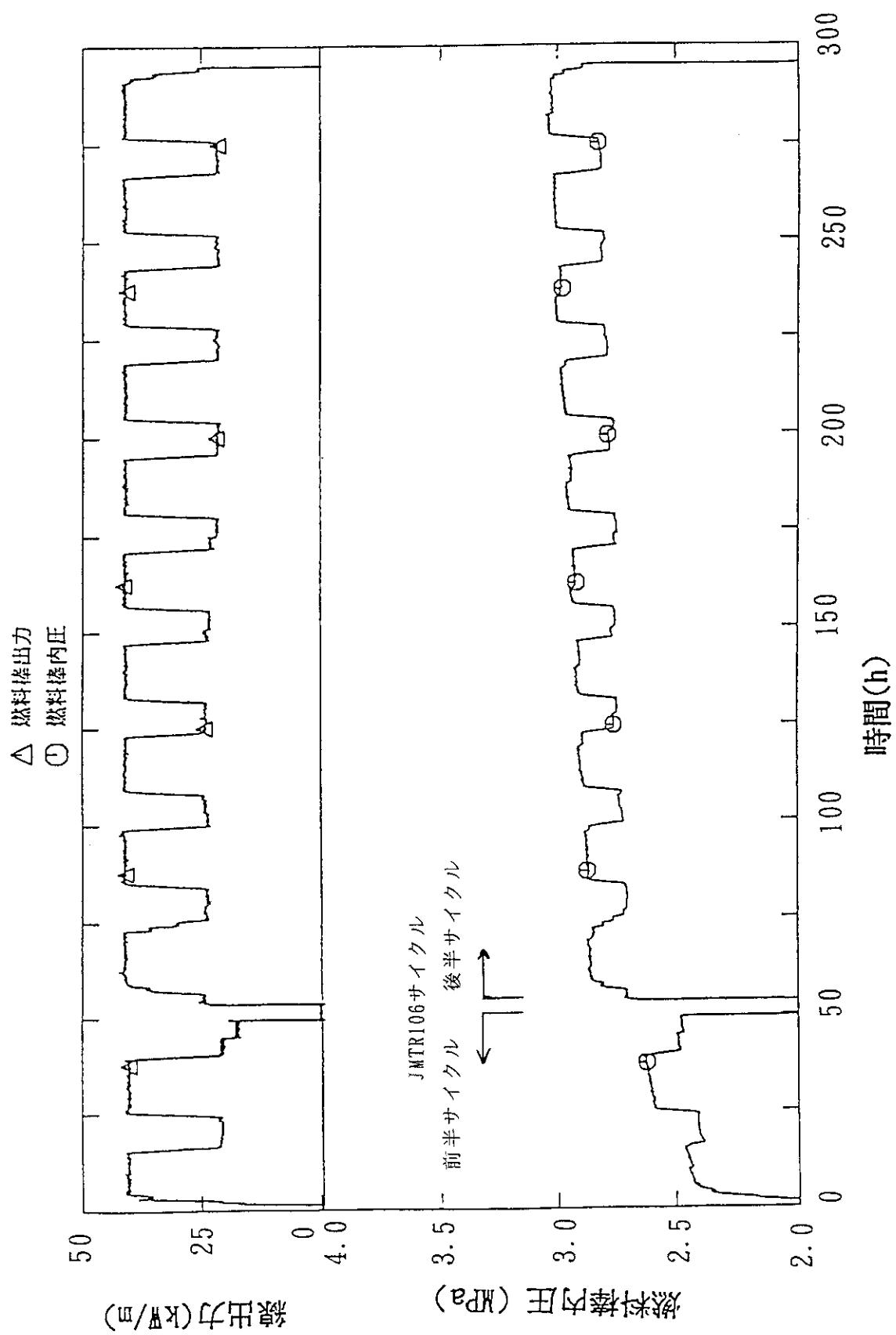
第17図 出力サイクル運転での燃料棒出力と燃料棒内圧変化(C6-4, 2回目)



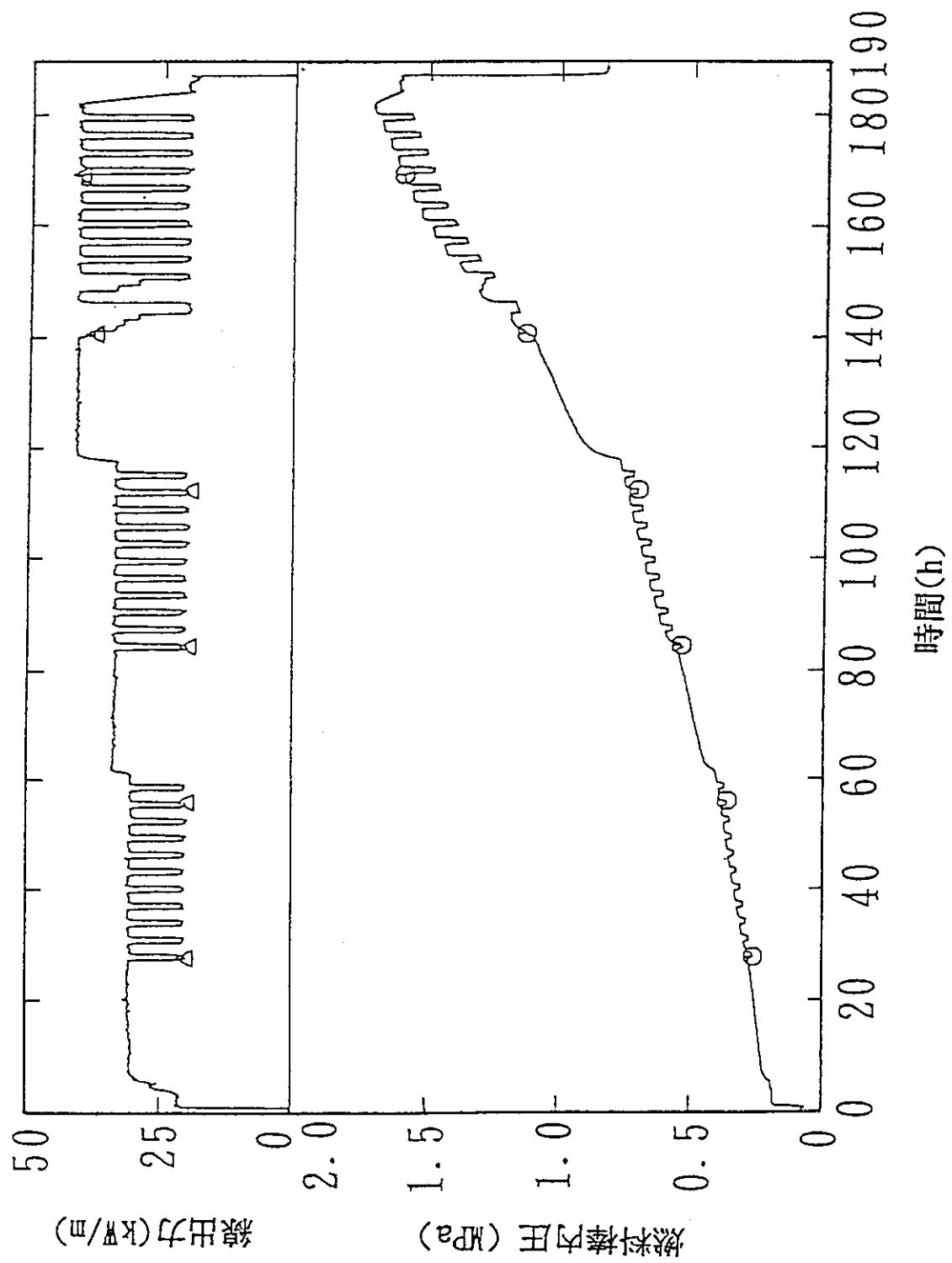
第18図 出力サイクル時の燃料棒内圧変化と40kW/m時内圧推定値(C6-4, 1回目)

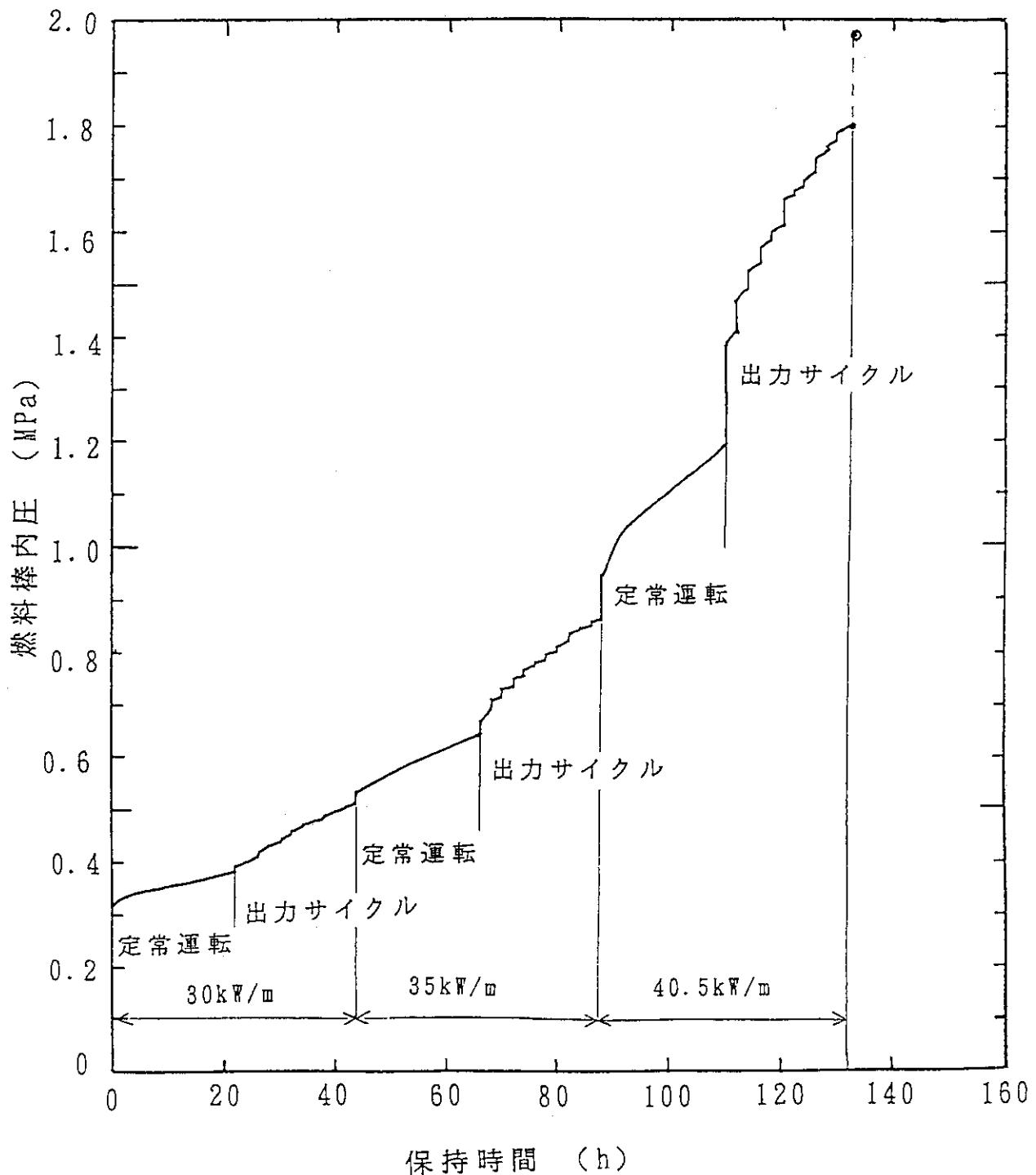


第19図 日負荷追従運転での燃料棒出力と燃料棒内圧変化(C6-3, 1回目)

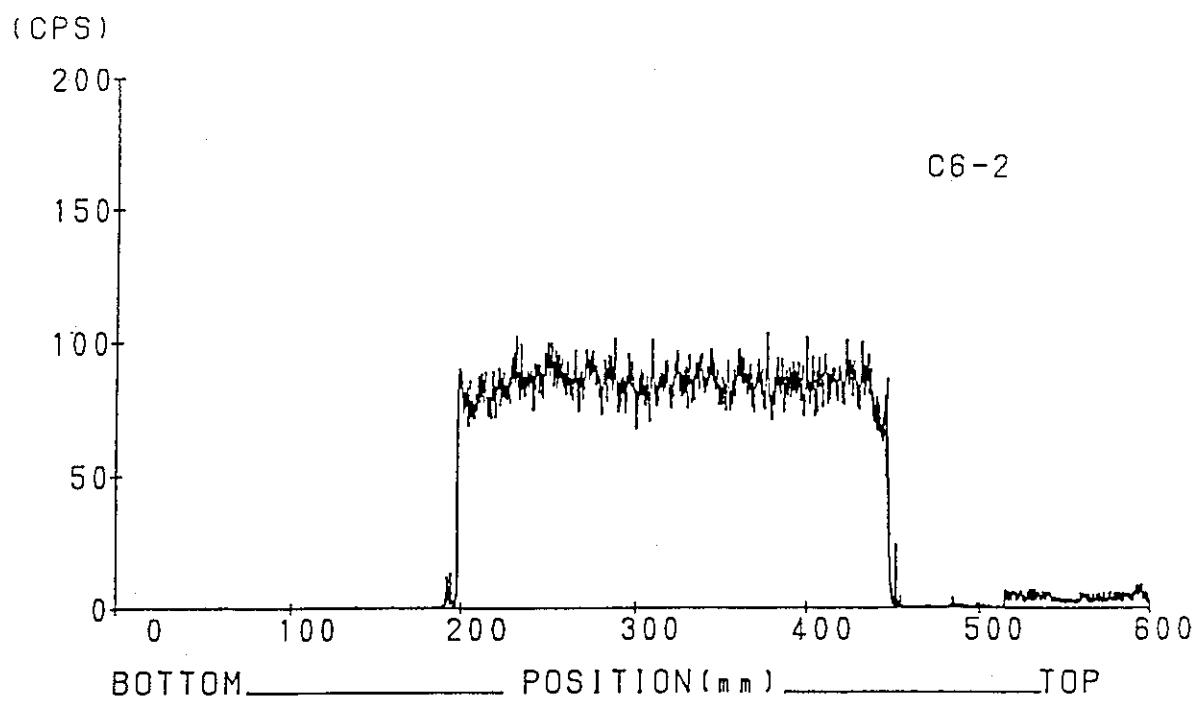


第20図 日負荷追従運転での燃料棒出力と燃料棒内圧変化(C6-3, 2回目)

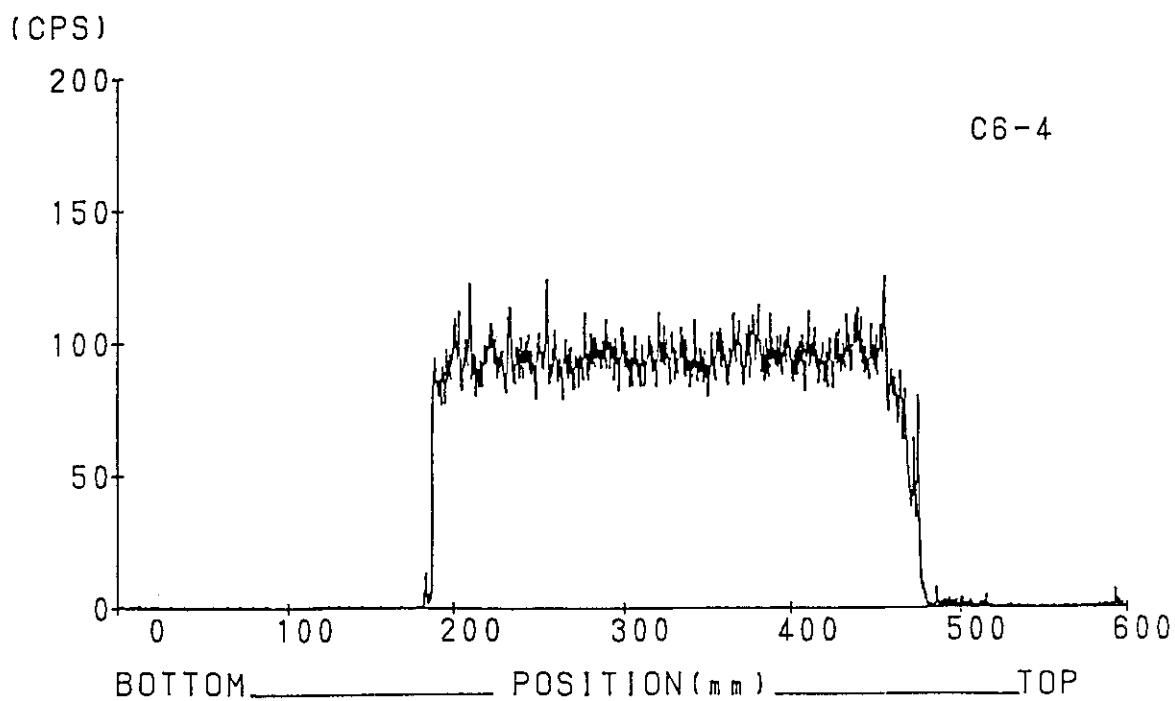




第22図 出力レベルを変化させた出力サイクル運転時の燃料棒内圧変化と各出力レベルでの高出力保持時間の関係(C6-1)

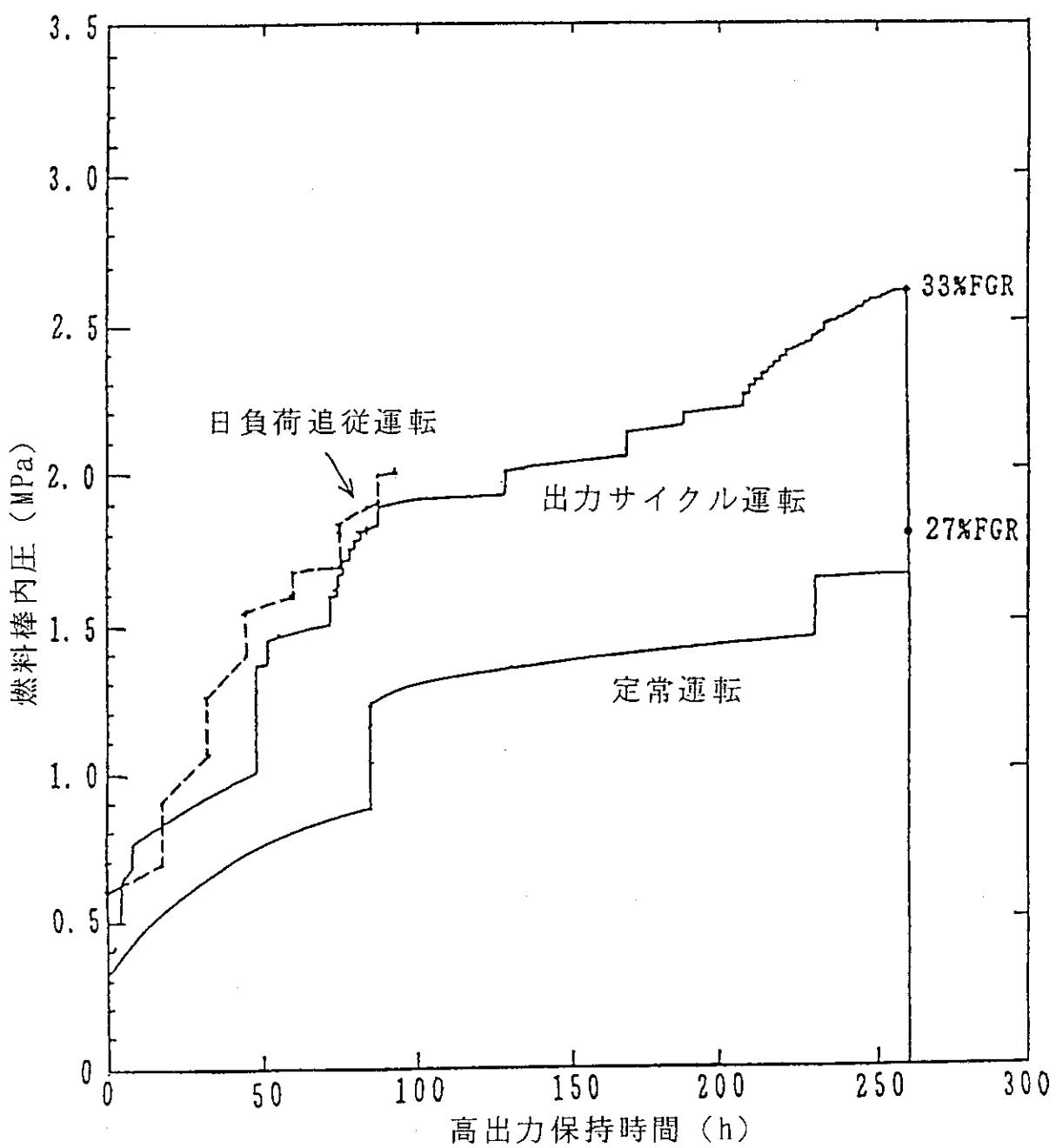


(a)定常運転燃料棒(C6-2)

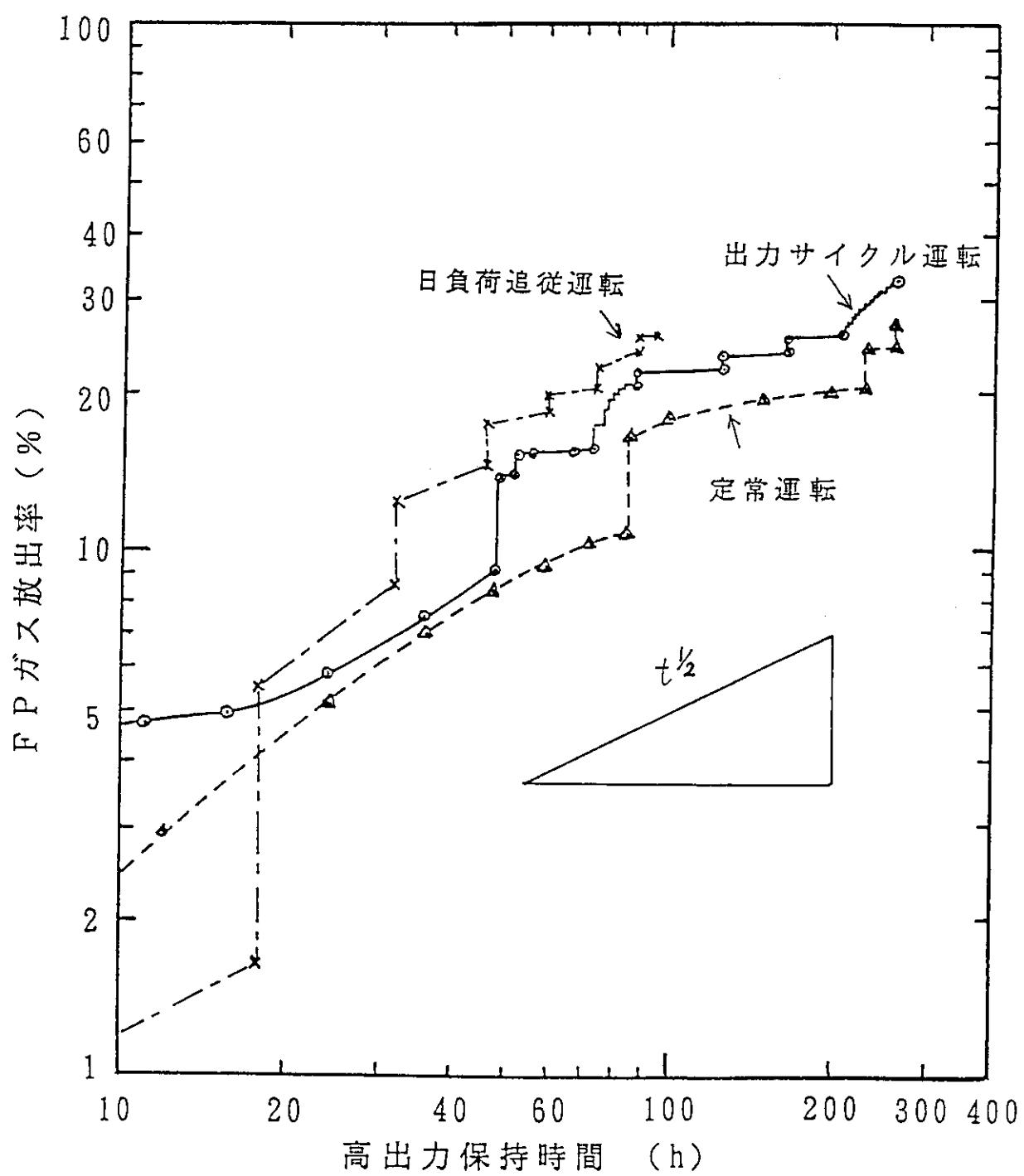


(b)出力サイクル運転燃料棒(C6-4)

第23図 再照射試験後の燃料棒のガンマスキャンデータ(Cs-137)



第24図 運転モードの異なる燃料棒の内圧変化と40kW/mでの高出力保持時間の関係



第25図 運転モードの異なる燃料棒のF Pガス放出率推定値と  
40kW/mでの高出力保持時間の関係