

J A E R I - M

88-202

J M T R · B O C A 装置による燃料の
出力急昇実験

1988年10月

内田 正明・中村 仁一・市川 達生・加島 洋一
瀬崎 勝二・石井 忠彦・岩井 孝

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）で複写による実費頒布をおこなっております。

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

J M T R・B O C A 装置による燃料の出力急昇実験

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

内田 正明・中村 仁一・市川 達生・加島 洋一⁺
瀬崎 勝二⁺・石井 忠彦⁺・岩井 孝⁺

(1988年9月21日受理)

J M T R 出力急昇試験設備 (BOCA/OSF-1) を用いて、国産試験燃料ピンの出力急昇試験を実施した。B W R 8 × 8 型およびP W R 17 × 17 型を模擬したピンを、O W L - 2 ループで 5 - 8 MWd/kg-U まで低出力照射した後、計 7 本 (B型 5 本、P型 2 本) を BOCA/OSF-1 装置に移し、初期出力約 30 kW/m から最高出力 48 - 56 kW/m まで、出力急昇させた。このうち 3 本については、最高出力到達後最高 300 回の出力サイクルを加え、残り 4 本は最高出力を 50 時間以上保持した。この結果、どの燃料ピンにも、破損あるいは欠陥を生じなかった。

ベース照射済み燃料ピンの出力急昇試験と並行して、新燃料による出力急昇試験を実施した。このうち 5 本については、ギャップ幅を小さくし、ヨウ素を添加して被覆管の炉内応力腐食実験としたが、被覆管の極端な減肉加工を行った 1 本を除いては、破損は生じなかった。

Power ramp experiment of fuel rods in JMTR boiling capsules

Masaaki UCHIDA, Jinichi NAKAMURA, Michio ICHIKAWA
Yoichi KASHIMA⁺, Katsuji SEZAKI⁺, Tadahiko ISHII⁺
and Takashi IWAI⁺

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

(Received September 21, 1988)

Test fuel rods of Japanese origin were power ramp tested in the Power Ramping Facility (BOCA/OSF-1) in the JMTR. Test fuel rods simulating the BWR 8x8 type and PWR 17x17 type were base-irradiated in the OWL-2 loop to burnups of 5 - 8 MWd/kg-U, and seven rods (five type-B and two type-P) were then transferred to the BOCA and power ramped from the initial power level of 30 kW/m to peak power levels of 48 - 56 kW/m. Three rods out of them were given maximum 300 power cycling after reaching the peak power. The remaining two rods were held at the peak power for more than 50 hours. None of the rods failed, nor defected.

In pararell with the above tests, ramp testing of fresh fuel rods was made. Five fuel rods were prepared with small gap size and iodine addition aiming at an in-pile stress corrosion experiment of the cladding tubes. Failure occurred in only one rod which had extremely thinned cladding.

Keywords: LWR, Fuel Pin, Power Ramp, JMTR, BOCA, Power Cycle, Failure

+ Department of JMTR Division, Oarai Research Establishment

目 次

1. 序 論	1
2. 照射施設の概要	2
3. 燃料試料の設計	3
3.1 ベース照射燃料	3
3.2 新燃料出力急昇用の特殊設計	4
4. 照射条件	5
4.1 ベース照射	5
4.2 BOCA装置における照射条件	6
5. 燃料の破損・非破損に関する実験結果と検討	7
5.1 ベース照射燃料の出力急昇	7
5.2 ヨウ素入り新燃料の出力急昇	9
6. 結 論	13
謝 辞	13
参考文献	13
付録 出力急昇時の出力履歴	41

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of irradiation facility	2
3. Fuel design	3
3.1 Fuel rods for base-irradiation	3
3.2 Special design for ramping of fresh rods	4
4. Irradiation conditions	5
4.1 Base-irradiation	5
4.2 Irradiation condition in the BOCA	6
5. Results and discussions on fuel failure/non-failure	7
5.1 Ramping of base-irradiated fuel rods	7
5.2 Ramping of fresh rods with iodine	9
6. Conclusion	13
Acknowledgement	13
References	13
Appendix Power history during ramp tests	41

1. 序 論

本稿は、J M T R 出力急昇試験設備（BOCA/OSF-1, 通称BOCA装置）において行われた一連の出力急昇実験について、試験条件および直接の結果（破損させるために極めて特殊な工夫をしたもの以外、燃料ピンは破損しなかった）について、記録を残すこと目的としている。

出力上昇に関連した燃料破損があることは、1960年代から知られていたが、燃焼度との関係が明らかにされ、「出力急昇」、「ベース照射」等の語が一般化するようになったのは、1971年Mogardの論文⁽¹⁾の発表以来である。それ以来、北欧の試験研究炉を中心に、数多くの模擬試験が行われ、破損を防ぐための燃料の設計や原子炉の運転法が、少なくとも現行程度の原子炉の使用条件に関する限り、ほぼ確立した観がある。

一方、日本の国産燃料の、国内施設による試験研究は、ここで報告する試験が最初のものである。これに使用したJ M T R 出力急昇試験設備は、今後様々な燃焼度での燃料の変動出力下の挙動に関する実験に使用される予定である。本稿で述べる試験は、5-8 MWd/kg-Uまで照射された燃料の、定型化された出力急昇試験および出力サイクル試験（および新燃料を用いた出力急昇試験）であるが、その目的は単にこの燃焼度における国産燃料の性能確認にとどまらず、今後予定されている種々の照射試験の基礎とすることを意図している。このために、燃料棒1本毎に非常に詳細な照射後試験が行われている。

ただし、照射後試験結果の詳細は別報で扱うこととし、本報自体は燃料棒の照射条件を明らかにし、破損・非破損の結果がどのようにして得られたかを述べることに限定することにする。

次に実験全体の概要、経過について述べる。

本実験に用いられた出力急昇装置は、BOCA/OSF-1 (Boiling Water Capsule/Oarai Shroud Facility No.1) といい、沸騰キャップセル（炉内管）、冷却材制御装置、³Heによる出力制御装置、燃料交換機等から成る。ベース照射はOWL-2ループ中で行われた。BOCAもOWL-2ループも、冷却材圧力の点からは、基本的にBWRモードである。しかし試験燃料棒はBWR型(8×8型), PWR(17×17型)双方を含んでいる。

ベース照射開始以来の実験の経過を第1図に、また燃料棒1本毎の出力急昇条件の要約を第1表に示す。ベース照射は、1981年から約2年間行われ、BWR燃料で約5.5 MWd/kg-U, PWR燃料で6-8 MWd/kg-Uの燃焼度が蓄積された。BOCA装置では、ベース照射と並行して、新燃料を用いた出力急昇が繰り返し行われた。実験番号R-1からR-11までおよびR-20, R-21が、新燃料を用いた出力急昇であり、各試験の目的は、装置の性能確認、燃料中心温度測定、ヨウ素添加による燃料の意図的破損等多岐にわたる。

ベース照射済燃料の出力急昇は、1985年から1986年にかけて、R-12からR-18まで計7本（うちBWR型5本, PWR型2本）行われた。このうち3本については、出力急昇により最高出力に達した後、最高300回の出力サイクルが加えられた。出力急昇後の燃料棒は、大洗ホットラボにおいて、順次照射後試験が行われた。今日までに、試験はほぼ終了している。

これらの出力急昇／出力サイクルにより破損したのは、破損を起させるために極めて特異な設計をした新燃料1本のみ（R-21）であり、本来の目的であるベース照射後に出力急昇を行った燃料棒については、1本も破損は見られなかった。これは照射中に放射能の放出がなかったというばかりでなく、照射後試験により、進行中の欠陥もないことを確認したものである。

なおベース照射用アセンブリーは、2つのサブアセンブリーに分割される構造になっており、これまでの出力急昇に用いたのは、このうち炉心方向を向いて燃焼度の高いサブアセンブリーからの燃料棒である。残りのサブアセンブリーについては、より高い燃焼度での試験のため、OWL-2で追加ベース照射を実施中である。

2. 照射施設の概要

ベース照射に用いられたOWL-2ループ、および出力急昇に用いられたBOCA/OSF-1装置は、第2図に示すようにJMT-Rのベリリウム反射体領域に設置されている。

OWL-2ループの性能、諸元を第2表に、また炉内構造の概念図を第3図に示す。OWL-2は、圧力および冷却材温度の点からは、BWR型のループであるが、1次冷却系内に水蒸気がない状態で運転できるという意味で、PWRモード運転も可能である。

BOCA/OSF-1照射装置の全体概念図を第4図に、炉内部分の概念図を第5図に示す。また性能諸元を第3表にまとめてある。BOCA/OSF-1は、基本的に沸騰水キャップセルと³He出力制御装置とを組み合わせたものである。沸騰水キャップセルとは、ほとんど滞留した加圧水中に燃料試料を装荷し、沸騰により試料の表面温度を制御するタイプのキャップセルである。キャップセルは、炉外装置に接続され、水の純化等の目的のため、1cc/sの水が循環される。この冷却水は運転中約250°Cとなる。この循環によっても、キャップセル内冷却水の熱交換が行われるが、キャップセルの冷却は主として、外壁を通して炉内管冷却水への伝熱によって行われる。

燃料試料（実際は模擬発熱体）の線出力密度と表面温度の関係についての、実測値と計算値を第6図に示す。

約20kW/m以上の出力の下では、試料の表面温度は核沸騰伝熱によって決まってしまう。この伝熱モードの特徴は、表面温度と水の飽和温度の差が、熱流束（従って線出力密度）にほとんど依存せず、圧力のみによって決まることがある。従って、外部から圧力を制御することにより、キャップセル冷却水温に関係なく燃料試料表面温度を一定にした照射が可能になるものである。

BOCA/OSF-1の場合、構造上の制限から、圧力は73気圧で使用される。従って、圧力・温度の点からも、伝熱モードの上からも、BWRタイプの照射が行われる。第6図からわかるように、20kW/m以上の出力では、試料表面温度は出力や設計条件によらず約300°Cである。

³He出力制御装置は、³He(n, p)³H反応を利用して、局所的な中性子束を、原子炉全体の出力とあまり関係なく抑制するものである。キャップセル挿入位置の外側に、ステンレス製の二重管が設置され、その空隙に³Heガスが最大40気圧まで加圧して装填される。加圧量と、熱中性子束の低下率の関係を第7図に示す。

これらの出力急昇／出力サイクルにより破損したのは、破損を起させるために極めて特異な設計をした新燃料1本のみ（R-21）であり、本来の目的であるベース照射後に出力急昇を行った燃料棒については、1本も破損は見られなかった。これは照射中に放射能の放出がなかったというばかりでなく、照射後試験により、進行中の欠陥もないことを確認したものである。

なおベース照射用アセンブリーは、2つのサブアセンブリーに分割される構造になっており、これまでの出力急昇に用いたのは、このうち炉心方向を向いて燃焼度の高いサブアセンブリーからの燃料棒である。残りのサブアセンブリーについては、より高い燃焼度での試験のため、OWL-2で追加ベース照射を実施中である。

2. 照射施設の概要

ベース照射に用いられたOWL-2ループ、および出力急昇に用いられたBOCA/OSF-1装置は、第2図に示すようにJMT-Rのベリリウム反射体領域に設置されている。

OWL-2ループの性能、諸元を第2表に、また炉内構造の概念図を第3図に示す。OWL-2は、圧力および冷却材温度の点からは、BWR型のループであるが、1次冷却系内に水蒸気がない状態で運転できるという意味で、PWRモード運転も可能である。

BOCA/OSF-1照射装置の全体概念図を第4図に、炉内部分の概念図を第5図に示す。また性能諸元を第3表にまとめてある。BOCA/OSF-1は、基本的に沸騰水キャップセルと³He出力制御装置とを組み合わせたものである。沸騰水キャップセルとは、ほとんど滞留した加圧水中に燃料試料を装荷し、沸騰により試料の表面温度を制御するタイプのキャップセルである。キャップセルは、炉外装置に接続され、水の純化等の目的のため、1cc/sの水が循環される。この冷却水は運転中約250°Cとなる。この循環によっても、キャップセル内冷却水の熱交換が行われるが、キャップセルの冷却は主として、外壁を通して炉内管冷却水への伝熱によって行われる。

燃料試料（実際は模擬発熱体）の線出力密度と表面温度の関係についての、実測値と計算値を第6図に示す。

約20kW/m以上の出力の下では、試料の表面温度は核沸騰伝熱によって決まってしまう。この伝熱モードの特徴は、表面温度と水の飽和温度の差が、熱流束（従って線出力密度）にほとんど依存せず、圧力のみによって決まることである。従って、外部から圧力を制御することにより、キャップセル冷却水温に関係なく燃料試料表面温度を一定にした照射が可能になるものである。

BOCA/OSF-1の場合、構造上の制限から、圧力は73気圧で使用される。従って、圧力・温度の点からも、伝熱モードの上からも、BWRタイプの照射が行われる。第6図からわかるように、20kW/m以上の出力では、試料表面温度は出力や設計条件によらず約300°Cである。

³He出力制御装置は、³He(n, p)³H反応を利用して、局所的な中性子束を、原子炉全体の出力とあまり関係なく抑制するものである。キャップセル挿入位置の外側に、ステンレス製の二重管が設置され、その空隙に³Heガスが最大40気圧まで加圧して装填される。加圧量と、熱中性子束の低下率の関係を第7図に示す。

出力急昇は、あらかじめ加圧・装填したガスを、炉外のタンクに放出することにより行われる。40気圧から0.5気圧までの放出時間は、最小で80秒かかり、これによって最大出力急昇速度が決定される。たとえば、40気圧加圧状態で22kW/mの出力であったものを、0.5気圧で60kW/mの出力まで急昇させるとすれば、この間の平均出力上昇速度は最大で28.5kW/m·min_{0.5}となる。圧力差による自然放出過程を利用するので、圧力が低下するに従って圧力低下速度は小さくなるが、一方、第7図に見られるように、一定の圧力低下に対する中性子束の変化は、低圧状態の方が大きい。これらの効果が相殺し合って、かなり直線性の良い出力変化が得られるものである。出力降下には、ガスの加圧過程を要するので、その速度は上昇の場合に比べて、約1桁程度小さい。

BOCA/OSF-1装置の炉内管は、1988年にそれまでのステンレスからジルカロイ製のものに変換され、その結果、出力は30~40%増加する。本稿で述べる出力急昇実験は、すべてステンレス炉内管の時に行われたものである。

なお沸騰水キャップセル(BOCA)とは、狭義にはBOCA/OSF-1装置の炉内管の中に挿入されるキャップセルを意味し、燃料試料1本毎に1体用意される(現在、再使用が可能になっている)。従って、燃料からJMT-R炉水までの圧力バウンダリーは、燃料被覆管を含め3層あることになる。BOCA/OSF-1装置の燃料(キャップセル)交換機は、原子炉の運転中にキャップセルが交換できるよう設計されており、これにより1サイクル中に複数の出力急昇実験が可能となっている。

3. 燃料試料の設計

3.1 ベース照射燃料

実験に用いた燃料試料の断面図を第8図に示す。燃料ピンは、全長が約700mm、スタック長は原則として400mm以下である。設計は、第8図(4)のベース照射用燃料が基本であり、(1)から(3)の新燃料出力急昇用の燃料では、目的に応じてそれぞれ特殊な設計がなされている。

ベース照射(出力急昇)用燃料は、BWRタイプ8本、PWRタイプ18本が製作された。これらの設計諸元を第4表に示す。BWRタイプの燃料は8×8型を、PWRタイプの燃料は17×17型を基本として設計されており、濃縮度も含めてそれぞれ実炉燃料を非常に忠実に模擬している。ただし、上部プレナムの大きさと燃料スタック長の比率が、実炉燃料にくらべてかなり大きくなっている。

第8図の全燃料ピンに共通する計装は、上部端栓にとりつけられたSUS403製のコアであり、キャップセル側に固定されたコイルによって、燃料ピンの伸びが測定される。

ベース照射用燃料ピンは、第9図に示すように、PWR型を内側、BWR型を外側にした二重円環状の集合体を組み、OWL-2ループ炉心管内で、ハンガー・ロッドにより上部から吊り下げられた状態で照射された。図に示すように、燃料ピン位置はPWR、BWR各18ずつあり、PWR型の場合全位置が燃料ピンで占められているが、BWR型の場合18本中8本が燃料

出力急昇は、あらかじめ加圧・装填したガスを、炉外のタンクに放出することにより行われる。40気圧から0.5気圧までの放出時間は、最小で80秒かかり、これによって最大出力急昇速度が決定される。たとえば、40気圧加圧状態で22kW/mの出力であったものを、0.5気圧で60kW/mの出力まで急昇させるとすれば、この間の平均出力上昇速度は最大で28.5kW/m·min_{0.5}となる。圧力差による自然放出過程を利用するので、圧力が低下するに従って圧力低下速度は小さくなるが、一方、第7図に見られるように、一定の圧力低下に対する中性子束の変化は、低圧状態の方が大きい。これらの効果が相殺し合って、かなり直線性の良い出力変化が得られるものである。出力降下には、ガスの加圧過程を要するので、その速度は上昇の場合に比べて、約1桁程度小さい。

BOCA/OSF-1装置の炉内管は、1988年にそれまでのステンレスからジルカロイ製のものに変換され、その結果、出力は30~40%増加する。本稿で述べる出力急昇実験は、すべてステンレス炉内管の時に行われたものである。

なお沸騰水キャップセル(BOCA)とは、狭義にはBOCA/OSF-1装置の炉内管の中に挿入されるキャップセルを意味し、燃料試料1本毎に1体用意される(現在、再使用が可能になっている)。従って、燃料からJMT-R炉水までの圧力バウンダリーは、燃料被覆管を含め3層あることになる。BOCA/OSF-1装置の燃料(キャップセル)交換機は、原子炉の運転中にキャップセルが交換できるよう設計されており、これにより1サイクル中に複数の出力急昇実験が可能となっている。

3. 燃料試料の設計

3.1 ベース照射燃料

実験に用いた燃料試料の断面図を第8図に示す。燃料ピンは、全長が約700mm、スタック長は原則として400mm以下である。設計は、第8図(4)のベース照射用燃料が基本であり、(1)から(3)の新燃料出力急昇用の燃料では、目的に応じてそれぞれ特殊な設計がなされている。

ベース照射(出力急昇)用燃料は、BWRタイプ8本、PWRタイプ18本が製作された。これらの設計諸元を第4表に示す。BWRタイプの燃料は8×8型を、PWRタイプの燃料は17×17型を基本として設計されており、濃縮度も含めてそれぞれ実炉燃料を非常に忠実に模擬している。ただし、上部プレナムの大きさと燃料スタック長の比率が、実炉燃料にくらべてかなり大きくなっている。

第8図の全燃料ピンに共通する計装は、上部端栓にとりつけられたSUS403製のコアであり、キャップセル側に固定されたコイルによって、燃料ピンの伸びが測定される。

ベース照射用燃料ピンは、第9図に示すように、PWR型を内側、BWR型を外側にした二重円環状の集合体を組み、OWL-2ループ炉心管内で、ハンガー・ロッドにより上部から吊り下げられた状態で照射された。図に示すように、燃料ピン位置はPWR、BWR各18ずつあり、PWR型の場合全位置が燃料ピンで占められているが、BWR型の場合18本中8本が燃料

ピンであり、残りはダミー・ピンで占められている。ダミー・ピンは、 UO_2 の代りにSUS-304製の模擬ペレットを用いている以外は、燃料ピンと同様に作られている。

集合体を構成するグリッドは、第9図中に直線で示したように、左右に2分割できる構造になっており、本稿で述べる出力急昇試験は、そのうち炉心方向を向いた半集合体から取られた燃料ピンについて行われた。

今回の試験における平均燃焼度 $5 - 8 \text{ MWd/kg-U}$ は、この半集合体についての値であり、残りの半集合体は中性子束勾配が大きいため、半分程度の燃焼度に留まっている。外側の半集合体は、より高い燃焼度での試験のため、1986年より炉心側を向くよう方向を逆転してベース照射が続けられている。

3.2 新燃料出力急昇用の特殊設計

ベース照射なしの出力急昇は、計12回行われたが、そのための燃料試料は、計画の進展に従って順次製作された。R-20, R-21を除き、基本的にBWRタイプであるが、それぞれの目的に合わせてかなり特殊な設計がなされている。これらの燃料ピンの設計諸元を第5表に示す。それぞれのピンの特殊性について以下に述べる。

(1) 中心温度測定用ピン (R-4, R-5, R-10, R-11)

これらの燃料ピンは、BWRタイプであるが、被覆管の外径は12.52 mmと、通常のBWR燃料よりやや太くなっている。燃料スタック長は400 mmであるが、そのうち下部の220 mmは、直径2.3 mmの中心孔を有し、5% - 26% W-Reシース熱電対が挿入されている。このため、下部にプレナムを持つ構造となっている。

封入ガスの圧力はすべて1気圧であるが、R-4, R-5ではヘリウムのみが封入されているのに対して、R-10, R-11では高燃焼度におけるFPガス放出を模擬して、ヘリウム60%, キセノン40%の混合ガスが封入されている。

さらにR-4では、ペレット被覆直徑ギャップが $90 \mu\text{m}$ に縮めてあり、R-11では、被覆管の直徑を周方向に不均一にするオバリティ加工がなされている。燃料ピン計装としては、中心熱電対の他、ベローズ付伸び計を装備している。

(2) ヨウ素添加燃料ピン (R-2, R-3, R-6, R-20, R-21)

早期破損検出技術開発のため、新燃料を意図的に破損させる目的で、破損管に過大な応力がかかるよう設計した上、燃料ピン中にヨウ素を持ちこんだ燃料ピンである。燃料挙動研究の上からは、ヨウ素によるジルカロイ応力腐食実験を炉内で行った形となっている。R-2, R-3, R-6がBWR型、R-20, R-21がPWR型の設計になっている。

ペレットの熱膨脹による被覆管の歪みを大きくするため、ペレット被覆ギャップ幅は直徑で $80 \mu\text{m}$ (R-2, R-3, R-6), $30 \mu\text{m}$ (R-20, R-21)と小さくしている。さらに被覆管に生ずる歪みを周方向に局所化させるため、被覆の内面あるいは外面上に、軸方向の傷がつけられた。ピン(キャップセル)毎の傷の位置、大きさ等を第10図にまとめて示す。内面傷はま

た、プレナム中に添加したヨウ素が気化して、ギャップ部に移行するための通路という意図も持つつけられたものである。スタック長は、R-2, R-3を除いて短かく設計されている。

いずれのピンの場合も、製作にあたっては、ヨウ素またはヨウ化物は小さな石英ガラス製アンプルに密封されて、小さな鉄球と共にプレナム中に挿入し、燃料ピンの溶接・密封後に、外部から磁石で鉄球を操作してアンプルを割るという方法で添加された。これは燃料工場で裸のヨウ素を扱うことを避けるためにとられた措置である。

ヨウ素の形態および添加方法は、次に示すように、ピン毎にやや異なっている。

① R-2, R-3, R-6, R-20

ヨウ素は、単体ヨウ素 (I_2) 固体として 1 g (R-20では 0.3 g) がアンプル中に封入された。アンプルを割った後、プレナムを高温に、燃料スタックを低温に保つ温度勾配加熱を行い、ヨウ素気体をギャップ部に移行させた。アンプルが割れてヨウ素が移行したことは、X線により確認した。

② R-21

単体ヨウ素の代りに、次の粉末を機械的に混合した試薬を添加した。

CsI	0.21 g
MoO ₂	0.15 g
MoO ₃	0.14 g

これは CsI の酸化反応



の反応により発生するヨウ素を利用したものであり、混合物を大量に加えても、平衡ヨウ素圧が極端に高くないため、ヨウ素圧を適当なレベルに制御できるものである。

4. 照射条件

4.1 ベース照射

燃料集合体 79 L F-14 A の OWL-2 ループにおけるベース照射は、1981年2月から1983年2月まで、J M T R 第53サイクルから61サイクルまで、9サイクルにわたって行われた。平均線出力密度は BWR タイプで 24.1 kW/m , PWR タイプで 19.6 kW/m (いずれも炉心側半集合体平均) であった。また同じ半集合体についての平均燃焼度は、BWR タイプで 5.6 MWd/kg-U , PWR タイプで 7.2 MWd/kg-U である。これらの平均燃焼度と平均線出力密度に対応する実効照射日数は 178 日である。

これらの平均出力は、ループ冷却水の入口・出口温度差から熱的に算出されたものである (炉内管を通しての原子炉冷却水への放熱は、電気ヒーターを用いた伝熱実験結果により補正されている。)。一方、燃料ピン毎の出力分担比は、臨界実験装置 J M T R C における炉物理実験により求めている。この出力分担比と、前記平均値から求めた燃料ピン毎の線出力密度と

た、プレナム中に添加したヨウ素が気化して、ギャップ部に移行するための通路という意図も持つつけられたものである。スタック長は、R-2, R-3を除いて短かく設計されている。

いずれのピンの場合も、製作にあたっては、ヨウ素またはヨウ化物は小さな石英ガラス製アンプルに密封されて、小さな鉄球と共にプレナム中に挿入し、燃料ピンの溶接・密封後に、外部から磁石で鉄球を操作してアンプルを割るという方法で添加された。これは燃料工場で裸のヨウ素を扱うことを避けるためにとられた措置である。

ヨウ素の形態および添加方法は、次に示すように、ピン毎にやや異なっている。

① R-2, R-3, R-6, R-20

ヨウ素は、単体ヨウ素 (I_2) 固体として 1 g (R-20では 0.3 g) がアンプル中に封入された。アンプルを割った後、プレナムを高温に、燃料スタックを低温に保つ温度勾配加熱を行い、ヨウ素気体をギャップ部に移行させた。アンプルが割れてヨウ素が移行したことは、X線により確認した。

② R-21

単体ヨウ素の代りに、次の粉末を機械的に混合した試薬を添加した。

CsI	0.21 g
MoO ₂	0.15 g
MoO ₃	0.14 g

これは CsI の酸化反応



の反応により発生するヨウ素を利用したものであり、混合物を大量に加えても、平衡ヨウ素圧が極端に高くないため、ヨウ素圧を適当なレベルに制御できるものである。

4. 照射条件

4.1 ベース照射

燃料集合体 79 L F-14 A の OWL-2 ループにおけるベース照射は、1981年2月から1983年2月まで、J M T R 第53サイクルから61サイクルまで、9サイクルにわたって行われた。平均線出力密度は BWR タイプで 24.1 kW/m , PWR タイプで 19.6 kW/m (いずれも炉心側半集合体平均) であった。また同じ半集合体についての平均燃焼度は、BWR タイプで 5.6 MWd/kg-U , PWR タイプで 7.2 MWd/kg-U である。これらの平均燃焼度と平均線出力密度に対応する実効照射日数は 178 日である。

これらの平均出力は、ループ冷却水の入口・出口温度差から熱的に算出されたものである (炉内管を通しての原子炉冷却水への放熱は、電気ヒーターを用いた伝熱実験結果により補正されている。)。一方、燃料ピン毎の出力分担比は、臨界実験装置 J M T R C における炉物理実験により求めている。この出力分担比と、前記平均値から求めた燃料ピン毎の線出力密度と

燃焼度を、第6表に示す。

さらに軸方向の出力分布も、J M T R C 実験結果から求めることができるが、それよりもベース照射直後に行われたガンマ・スキャンの結果が、より直接的なデータを与える。第11図にその1例を示す。これから求めた軸方向ピーキング係数は、1.11である。図からわかるように、ピーキング係数が比較的小さいのは、エンド・ピーキングが大きいためである。

ループの冷却水条件は、全期間を通じて、出口圧力74ata、入口温度260°C、流量400kg/minであった。この流量に対応する平均質量速度は1280kg/m²·s、平均流速は1.6m/sである。また、この圧力に対応する飽和温度は288°Cである。したがって、入口サブクーリングは28°Cであるが、強制対流熱伝達によるフィルム温度差が28°Cになるのは、このような条件下では、被覆管表面熱流束が60W/cm²の場合に相当する。前記の平均線出力密度は、BWRタイプの場合62W/cm²、PWRタイプで65W/cm²の平均熱流束に対応する。冷却水温度の上昇も考えあわせると、ベース照射中の燃料ピンは、BWRタイプ、PWRタイプを問わず、大部分の位置でわずかにサブクール沸騰が起こる状態にあったと考えられる。したがって被覆管表面温度は、タイプ、位置によらず、ほぼ290°Cで一定であったと考えられる。

燃料中心温度については、計測データはないが、後述の熱電対付き新燃料によるBOCA実験データを基に推定すると、最高出力燃料ピンの最高位置で約1000°Cであったと考えられる。

4.2 BOCA装置における照射条件

キャプセル毎の出力履歴の詳細は、付録にまとめて示す。このうちR-15（サイクル）とR-16の出力急昇部分を拡大して、それぞれ第12図、第13図に示す。出力急昇時間は1分、3分、10分の3つのモードがあり、R-15は3分、R-16は10分の例である。最高線出力密度（最高位置、以下同様）は、第1表に示したとおり、ベース照射燃料の場合48-50kW/mであり、R-16の場合のみ56kW/mまで引き上げられた。新燃料の出力急昇実験の場合、個々のキャプセル毎に様々な目的を持っているために、出力履歴は一般に複雑であるが、ヨウ素を添加して燃料の破損を狙ったR-2、R-3の場合、最高出力は41-43kW/mとやや低かった。一方同じ目的で、被覆管の極端な減肉加工を行い、実際に燃料を破損させたR-21の場合、最高出力も54kW/mと高いレベルにとられた。

これらの出力の値は、電気ヒーターピンの発熱量に対して較正されたキャプセル出口水温測定値にもとづいて決定された。精度は約±5%である。この出力の精度は、積算値を燃焼度測定値と比較する形での検証はされていないが、ベース照射なし出力急昇燃料ピンの一部（R-4、R-5、R-10、R-11）に燃料中心熱電対が装備されており、この読みを用いて間接的に精度評価を行うことができる。第14図にR-11における燃料中心温度測定結果とFEMAX I-IIIコードによる計算結果を示す。実測値と計算値の一致はかなり良い。

FEMAX I-IIIコードは、ハルデン炉における燃料中心温度測定データを用いて、良く検証されている。ハルデン炉の照射データは、入念な出力較正がなされており、またFEMAX I-IIIコードは、少くとも照射初期に関する限り、実験データと非常に良く一致するので、FEMAX I-IIIコード計算を介して、今回の実験の出力精度を、ハルデンのそれに対して検証したこ

となる。

R-12, 15, 17では、出力急昇後直ちに出力サイクルを行っている。その基本的なパターンを第12図に記入してあるが、1サイクルの所用時間は28分、高出力期間は10分である。（R-12のみは、1サイクル43分、高出力期間20分とした。）R-14, R-16, R-18は、サイクル運転のレファレンスのため、出力急昇後、サイクルの高出力期間の合計だけ高出力照射し、その後低出力期間の合計だけ低出力照射している。

第15図にR-3のガンマ・スキャン結果を示す。R-3はベース照射なしの燃料ピンなので、この分布が出力急昇キャップセルにおける軸方向発熱量分布を示すことになる。またR-3のスタック長は400 mmで、ベース照射した燃料ピンと同じであり、また出力急昇キャップセルにおける燃料ピンの装荷方法は両者共基本的に同じなので、この分布がベース照射した燃料ピンの出力急昇中の出力分布になる。分布の形は、第11図に示したベース照射中の分布とほとんど同じであるが、エンドピーキングは小さい。軸方向ピーキング係数は約1.1である。

出力急昇キャップセルの冷却水圧力は、全部のランについて、7.26 MPa ($73\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) であった。したがって第6図の関係により、30kW/m以上の出力では被覆管表面温度は出力に関係なくほぼ300°Cに保たれる。また沸騰伝熱のため、軸方向位置による相違はほとんどない。このことはBWRタイプ、PWRタイプの燃料ピンに共通であり、表面温度300°Cは、BWR実炉条件よりは15°C程度高く、PWR実炉条件（ピーク位置）よりは20-30°C程度低い条件となる。

5. 燃料の破損・非破損に関する実験結果と検討

出力急昇を行った燃料ピンは、第7表に示すように、1本ずつ詳細な照射後試験が行われている。これらの結果については、今後総合的な解析を行い、報告する予定であるが、序論でも述べたように、ここでは出力急昇による燃料の破損・非破損に直接関係する事項に限って報告することにする。

5.1 ベース照射燃料の出力急昇

ベース照射の後に出力急昇された燃料ピンは、合計7本ある。またこのうち3本は、出力急昇の後149回または300回の出力サイクルを加えた。これらの燃料ピンには1本も破損が生じなかった。ここでいう非破損とは、被覆管を貫通するクラック等が生じなかっただというばかりでなく、貫通までに至らなかっただクラック、欠陥等もなかっただという意味である。貫通クラックがなかっただことは、照射中に冷却水中に放射能放出が見られなかっただこと、照射後のリーコロケーション（R-13のみ）、およびパンクチュア時に内圧が保持されていたことにより確認された。また被覆管の内面に未貫通のクラック（少なくとも大きなもの）が生じていないことは、渦電流探傷結果および外観検査によって確認された（出力急昇による内面クラックが発達すると、未貫通の場合でも外面附近にすべり線が蓄積し、外観上「Xマーク」として観察され

となる。

R-12, 15, 17では、出力急昇後直ちに出力サイクルを行っている。その基本的なパターンを第12図に記入してあるが、1サイクルの所用時間は28分、高出力期間は10分である。（R-12のみは、1サイクル43分、高出力期間20分とした。）R-14, R-16, R-18は、サイクル運転のレファレンスのため、出力急昇後、サイクルの高出力期間の合計だけ高出力照射し、その後低出力期間の合計だけ低出力照射している。

第15図にR-3のガンマ・スキャン結果を示す。R-3はベース照射なしの燃料ピンなので、この分布が出力急昇キャップセルにおける軸方向発熱量分布を示すことになる。またR-3のスタック長は400 mmで、ベース照射した燃料ピンと同じであり、また出力急昇キャップセルにおける燃料ピンの装荷方法は両者共基本的に同じなので、この分布がベース照射した燃料ピンの出力急昇中の出力分布になる。分布の形は、第11図に示したベース照射中の分布とほとんど同じであるが、エンドピーキングは小さい。軸方向ピーキング係数は約1.1である。

出力急昇キャップセルの冷却水圧力は、全部のランについて、7.26 MPa (73 kg/cm² G) であった。したがって第6図の関係により、30 kW/m以上の出力では被覆管表面温度は出力に関係なくほぼ300°Cに保たれる。また沸騰伝熱のため、軸方向位置による相違はほとんどない。このことはBWRタイプ、PWRタイプの燃料ピンに共通であり、表面温度300°Cは、BWR実炉条件よりは15°C程度高く、PWR実炉条件（ピーク位置）よりは20-30°C程度低い条件となる。

5. 燃料の破損・非破損に関する実験結果と検討

出力急昇を行った燃料ピンは、第7表に示すように、1本ずつ詳細な照射後試験が行われている。これらの結果については、今後総合的な解析を行い、報告する予定であるが、序論でも述べたように、ここでは出力急昇による燃料の破損・非破損に直接関係する事項に限って報告することにする。

5.1 ベース照射燃料の出力急昇

ベース照射の後に出力急昇された燃料ピンは、合計7本ある。またこのうち3本は、出力急昇の後149回または300回の出力サイクルを加えた。これらの燃料ピンには1本も破損が生じなかった。ここでいう非破損とは、被覆管を貫通するクラック等が生じなかっただというばかりでなく、貫通までに至らなかっただクラック、欠陥等もなかっただという意味である。貫通クラックがなかっただことは、照射中に冷却水中に放射能放出が見られなかっこと、照射後のリーコロケーション（R-13のみ）、およびパンクチュア時に内圧が保持されていたことにより確認された。また被覆管の内面に未貫通のクラック（少なくとも大きなもの）が生じていないことは、渦電流探傷結果および外観検査によって確認された（出力急昇による内面クラックが発達すると、未貫通の場合でも外面附近にすべり線が蓄積し、外観上「Xマーク」として観察され

る場合がある。)。

ここでこのような結果をもたらした実験条件について、他の機関における結果を参考しつつ、若干の検討を加える。研究炉におけるいわゆる出力急昇実験においては、出力変動パターンは一般に著しく模式化されている。一定期間の低出力ベース照射の後、かなりの冷却期間を経て、燃料ピンは調整出力レベル（通常ベース照射出力と同程度にとられる）に1日から数日保持された後、一気に、または段階的に高出力レベルに引き上げられ、その状態に1日以上保持されるのが通常のパターンである。本実験も基本的にこのパターンに従ったものであるが、このようなパターンの下で破損／非破損の結果を整理しようとする場合、考えられる変数としては、最高出力レベル (P_{max})、ベース照射または調整出力レベル (P_0)、出力急昇幅 ($\Delta P = P_{max} - P_0$)、出力急昇速度 \dot{P} がある。これらの変数のいずれもが、燃料の破損に影響するが、他の変数が常識的な範囲にとられた場合、単一の変数で破損に最も影響するのは P_{max} であるとされており、「破損しきい値」などと呼ばれる。

第16図に今回の実験における P_{max} を、スタズビックにおける出力急昇実験^{(3), (4)}で決定された破損しきい値の概略レベルと比較して表示した。出力急昇による燃料の破損は、通常 10 MWd/kg 以上の燃焼度で見られる現象であり、破損しきい値はこの附近で強い燃焼度依存性を示す。本実験の燃焼度 $5 \sim 8 \text{ MWd/kg-U}$ で、燃料の破損が観測された実例は、研究炉における出力急昇実験に関する限りほとんどなく、この領域での破損しきい出力は、少くとも 50 kW/m 以上と考えられる。すなわち本実験結果 ($48 \sim 56 \text{ kW/m}$ で非破損) は、従来の実験結果と矛盾するものではない。（実炉での破損例との比較は、確率の問題等、複雑な考慮を要する。）

P_{max} 以外の変数について見ると、初期出力レベル P_0 （したがって出力急昇幅）は、他の実験と同程度である。しかし出力急昇速度について見ると、本実験における速度は最高 36 kW/m/min であり、インターランプ計画における $3.9 \sim 5.4$ 、オーバーランプ計画における $5.4 \sim 12$ 、ハルデン⁽⁵⁾における $0.6 \sim 3.9$ （単位はいずれも kW/m/min ）に比べて、非常に速い出力上昇が行われている。すなわち、燃料の破損／非破損は燃焼度と最高出力レベルでほとんど決定されるものであり、出力上昇速度が引き上げられても、破損しきい出力が大きく低下することはないことを示している。

本実験では、出力急昇後の最高出力は、最低でも50時間保持された。出力急昇破損は、最高出力到達後数分から数時間で起こり、24時間以上経過して破損が起こることはほとんどないことが知られており、他の実験でも保持時間は1日から数日程度である。従ってこの面から本実験における破損のための条件が不足していることはない。

出力急昇破損はPCI破損とも呼ばれ、PCI（ペレット被覆相互作用）が大きいことが破損の必要条件であることが知られている。この面から今回の実験結果（非破損）を検討して見る。

各燃料ピンには伸び計のコアが取り付けられており、PCIによるピンの伸びが計測できるよう設計されていた。しかし測定の基準点（差動トランス）がキャップセル外筒上に設定されており、出力上昇によって外筒が大きく熱膨脹するため、出力変動中の燃料ピンの伸び測定は事实上不可能であった。伸び計のデータは、付録の出力履歴のプロットに、一緒に示してある。出力上昇によって、燃料ピンは伸びるはずであるが、見かけ上収縮の信号が観測される。これ

を計算により補正することは不可能ではないが、補正量の任意性が非常に大きくなる。

しかし、一定出力保持中の伸び計読みの変化は、データとすることができます。また出力サイクル中でも、サイクルの同一位相点での読み同士は比較することができます。このような観点から、付録に示した伸び計読みの長期的変動を見ると、燃料ピンは収縮するか（R-12, 13, 16）、またはほぼ一定の長さを保つ（R-14, 15, 17）かのいずれかである。後者の場合、被覆管の強制伸びが保持されたのか、あるいは熱膨脹以外の伸びが最初から非常に小さかったかのいずれかであるが、後述する照射後試験結果を併せて考えると、強制伸びが最初から小さかったものと考えられる。いずれにせよ、この結果から、出力サイクルを加えることによって、被覆管の軸方向歪が増すことがなかったことは結論される。

出力急昇による燃料ピンの変形量絶対値に関するデータは、照射後の寸法測定から得られる。第8表に出力急昇前後の燃料ピンの平均直径（スタック部）、長さ、リッジ高さ、残留ギャップ幅の測定結果をまとめて示す。平均直径は、出力急昇によって、数ミクロン増加したように見えるが、直径の絶対値の測定精度は $5\text{ }\mu\text{m}$ であり、また端栓部でもほぼ同程度の数値の増加が見られているので、出力急昇による直径増加は事実上ゼロである。長さについてもほぼ同様である。

リッジ高さについては、R-16についてのみ、第17図に示すようにはっきり認めうるリッジ（約 $5\text{ }\mu\text{m}$ ）が見られた。また残留ギャップ幅は、約 $150\text{ }\mu\text{m}$ であるが、R-16のみが $117\text{ }\mu\text{m}$ とやや小さい値となっている。これは第1表に示したように、他の燃料ピンの最高出力が約 49 kW/m であったのに対して、R-16のみ 56 kW/m と高いレベルまで出力急昇されたことによるものと考えられる。

いずれにしても、インターランプ⁽³⁾、オーバーランプ⁽⁴⁾等これまでに良く知られている出力急昇破損実験において、破損燃料ピンの変形量が、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 程度のリッジ、または数 $10\text{ }\mu\text{m}$ の平均直径増加となっているのと比べて、これらの変形量測定値はきわめて小さい。出力急昇破損の主要な原因と考えられているペレット被覆相互作用が小さかったことが、今回の実験における燃料の非破損という結果をもたらしたことは明らかである。

相互作用の小ささは、残留ギャップ幅が最小であったR-16においても、出力急昇前で $200\text{ }\mu\text{m}$ 、後で $117\text{ }\mu\text{m}$ と、 8×8 型燃料としては非常に大きい値であったことからも当然の結果である。出力急昇破損が起こるために、一定の燃焼度（ 10 MWd/kg 程度以上）が蓄積されて、スエリング、リロケーションによりギャップがつぶれることができることが必要条件であることを示している。

ベース照射後に出力急昇を行った燃料ピンのFPガス放出測定結果を第9表に示す。放出率は、出力を高くしたR-16において8.2%となっている他は、3%以下の小さな値となっている。出力サイクルをえたものと定常的に照射したものとの間には、絶対値は小さいながら、放出率に顕著な差が認められる。これについては、別報で詳しく報告する予定である。

5.2 ヨウ素入り新燃料の出力急昇

燃料の出力急昇破損の原因に関して、最も有力な説は、ペレットの熱膨脹による応力と、FPヨウ素の雰囲気によって、ジルカロイが応力腐食（SCC）を起こすとするものである。これ

までに、炉外でジルカロイに応力とヨウ素雰囲気を与えて脆性破壊を起こさせる実験は数多く行われている。しかし、これらの模擬実験と、実際の燃料による出力急昇実験との間には、大きな条件の開きがあり、炉内でUO₂ペレットの熱膨脹と、制御されたヨウ素雰囲気により、S C Cが起こるかどうかを調べる実験はほとんど行われていない。

B O C A装置による出力急昇実験のうち、R-2, R-3, R-6, R-20, R-21の5本は、新燃料に単体ヨウ素またはヨウ素化合物を添加して燃料破損を起させることを狙った、いわば炉内S C C実験となっている。これらの実験の燃料設計データは第5表に、出力急昇条件は第1表にまとめられている。

破損／非破損という見地からの結果は、R-21のみが炉内で破損検出され、R-2, R-3, R-6, R-20については、炉内で放射能が検出されなかつばかりでなく、照射後試験によっても未貫通欠陥も発見されなかつた。R-21については、破損は起つたものの、3.1で述べたようにあらかじめ被覆管に極端な減肉加工を施しているため、単純な機械的な破損であつた可能性が大きい。

ここで各ピンについて、照射後試験結果を一部参考しつつ、なぜ応力腐食破損が起らなかつたかについて検討する。

(1) 被覆管の変形（応力の大きさ）

5本の応力腐食模擬実験用燃料はいずれも、ペレット－被覆機械的相互作用（P C M I）による被覆管の歪を大きくするため、初期ギャップ幅を80 μmまたは30 μmとかなり小さくとつてゐる。さらにR-20, R-21では、被覆管の周方向変形量を1ヶ所の歪として集中させたため、1母線に沿つて減肉加工を行つてゐる。

付録に各ピンの出力履歴と伸び計の測定値を示してあるが、このうちR-2とR-3（付図A-12, A-13）については、一応キャップセルの熱膨脹分の補正を行つてゐる。ただし、前節で述べたように、正確な補正是困難であり、図示した燃料ピン伸びの絶対量は過大であると思われる。

前節と同様に、ここでは一定出力保持中の長さの変化のみを、信頼できるデータとして検討する。R-2, R-3の燃料ピンは出力急昇後の出力保持中にそれぞれ0.31および0.45 mm収縮している。これは燃料スタック長の約0.1%に相当する。すなわちギャップ幅を小さくした燃料ピンは出力上昇中に少なくとも0.1%以上伸び、出力保持中に急速に収縮したものと考えられる。新燃料におけるこのような伸び・収縮の挙動は、ハルデンにおける多くの実験で良く知られている。

R-2, R-3の出力急昇後の寸法測定（直径スキャン）および残留ギャップ幅測定の結果を、それぞれ第18図、第19図に示す。ベース照射を行つた燃料ピンの場合と異なり、残留ギャップ幅は場所によつては20 μm以下にまで縮小している。（残留ギャップ幅測定は同じ場所について3回ずつ行われるが、1回目はかなり狭いギャップ幅が得られ、2回目には広がつてほぼ落着くのがふつうである。ここでは2回目と3回目の平均値を、残留ギャップ幅として採用している。）一方リッジ変形は、R-2において特に顕著であり、最大のものは約20 μmに達している。しかしこれらの観測結果の軸方向分布を見ると、残留ギャップがスタック上部で特

に狭くなっているのに対して、リッジはスタック下半部で特に顕著であり、一見お互いに矛盾するかのような結果となっている。

これらの観測事実を理解する鍵はハルデン炉で行われた照射中の燃料棒直徑測定実験の結果⁽⁶⁾から得られる。筆者らはギャップ幅を100 μmとした燃料ピン（外径はBWR 8×8 サイズ、ディッシュペレットを用いている）をハルデン炉で照射し、照射中のリッジの成長および回復の挙動を、直徑センサーにより調べた。この時、リッジ高さは約20 μm（直径、最高時、最高位置）であったが、この時観察された興味ある事実は、リッジ高さが相対出力の低いスタック下部で大きくなっていること、及びスタック下部ではリッジ（直徑の差）は大きいものの、平均直徑は上部より小さくなっていることである。

この事実は、被覆管に働く軸力を考慮することで説明された。すなわち、スタック上部でのペレット被覆相互作用のために、スタックの伸びが妨害されるようになると、下部の被覆管は軸方向に引張応力を受け、内側に弾性変形することにより、ペレットとの間に強い相互作用（リッジ変形）をすることになると考えられる。

これは照射中に観察された事実の説明であるが、これにペレットの塑性（またはクリープ）を併せ考えることにより、今回の照射後試験結果を説明することができる。すなわちピン下部のペレットは、軸方向と半径方向の2つの方向で、被覆管から圧縮応力を受ける。照射初期のUO₂ペレットは可塑性が大きいために、両方向について永久変形するが、軸方向の変形は照射中の伸び計の収縮信号として観測され、半径方向の変形は照射終了後の残留ギャップとして観測されると考えられる。両方向で圧縮された場合の体積の逃げ場としては、製造時気泡、ディッシュ体積が考えられる。

炉内応力腐食実験としての立場からこの結果を見ると、初期ギャップ幅を小さくしてペレット被覆相互作用を強めても、燃焼度のごく低いペレットは塑性変形しやすいために、被覆管を長時間にわたって強い応力状態に置くことは困難であることを示すものである。

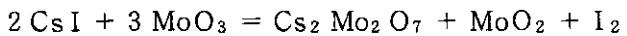
(2) ヨウ素添加量とその効果

新燃料を用いた炉内応力腐食実験R-2, R-3, R-6, R-20では、いずれも燃料内自由空間中に1gの単体ヨウ素が添加された。燃料ピン内の自由空間体積はピン毎に異なるが、大体10mℓ程度である。一方、キャプセル内の冷却水温度は、高出力運転時には約250℃となり、プレナムの温度も同程度であると考えられる。もしI₂が250℃で気体-固体平衡になるとすれば、平衡ヨウ素圧は9.4気圧であり、気相中のヨウ素量は0.56gとなる。実際にはギャップ部のガスはこれよりはるかに高温になるので、このヨウ素圧を維持するのに必要なヨウ素量は0.56gより小さくなる。すなわちヨウ素添加量1gは、気-固平衡ヨウ素分圧を維持するのに十分な量であり、平衡状態では燃料ピン内のヨウ素圧はプレナム中の最低温部における平衡によって支配される。

実際のヨウ素の添加法は3.2で述べたように、最初にヨウ素をプレナム部に置いた後に、温度勾配によりギャップ部に移動させる方法をとった。もし高温のギャップ部だけで過渡的な平衡が成り立つとすれば、ヨウ素圧は数10気圧になるであろうが、このような高圧がギャップ部に維持されるとは思われない。ヨウ素がなければプレナムの圧力は2気圧に過ぎないので、高

圧のヨウ素ガスは急速にプレナムに移動するであろう。結局、プレナムの最低温部における平衡により、10気圧程度のヨウ素圧が維持されると考えるのが妥当である。

一方、R-21ではヨウ素発生剤としてCsI, MoO₂, MoO₃の混合物が添加された。これらの添加物の間だけで化学平衡が成り立つとすると、ヨウ素圧は平衡反応式



によって、

$$P_{\text{I}_2} (\text{atm}) = 2.02 \times 10^8 \exp\left(-\frac{12520}{T}\right)$$

となり（Tは温度（K）），250°Cではヨウ素圧は0.008気圧となる。

一方、R-2, R-3のような400mmのスタック長を持つ燃料を10,000MWd/t(1%FIMA)までふつうに照射したとすると、生成するFPヨウ素量は0.8mgであり、これが全部気体として放出されたとすると、ヨウ素圧は0.014気圧となるが、そのようなことは有り得ず、実際のヨウ素圧はこれより数桁低いであろう。

結論として、今回の新燃料を用いた炉内応力腐食実験、特にR-20以前の試料におけるヨウ素圧は、実験の燃料の出力急昇破損の模擬条件としては、非常に過大なのである。

R-2の燃料の出力急昇後の金相試験において、第20図に示すようなパターンが観察された。このパターンの特異な点は、外周部に数多くの半径方向クラックが見られることである。通常の条件で照射されるUO₂燃料では、出力、燃焼度にかかわらずこのように多くのクラックが観察されることはない。倍率を大きくした顕微鏡写真観察では、個々の断片については通常の照射UO₂組織に比べて特異な点は見られなかった。すなわち、クラックの多いことだけが異常なのである。

この異常に多くのクラックは、高いヨウ素蒸気圧の存在に関係していると考えられる。照射中のUO₂ペレットには、数個のクラックが入った後でもなお、外周部には円周方向の引張応力が存在している。高いヨウ素蒸気圧の下でUO₂との間で表面反応（たとえばUO₂I₂の生成）が起り、これに従ってクラックが進展したと考えられる。個々のUO₂断片の内部に異常が見られないことは、ヨウ素のような大きな原子の固体中の拡散速度を考えれば当然である。このような表面化学反応を伴なうクラック進展は応力腐食の考え方そのものであり、ヨウ素蒸気によるUO₂の応力腐食が起ったと考えるのが妥当である。

このように多くの外周クラックがペレットに生じたことが被覆管の応力腐食に及ぼす影響を考えてみると、クラックが多いことは被覆管の平均的な周応力をむしろ増す方向に働く。しかし、R-2, R-3において観測された変形量がハルデン等で観測された小ギャップ、低燃焼度燃料におけるそれと比べて特に大きいとはいえないことから、これはあまり大きな効果ではなかったであろう。一方、UO₂のクラックの位置で被覆管に応力集中が起こることが知られているが、クラックの数が多くなれば当然個々のクラック位置における応力集中は小さくなるであろう。この効果の定量的な評価はむずかしいが、被覆管の外面を1母線に沿って減肉加工し、応力集中を図ったR-20において燃料破損が起らなかった事との関連で考えれば、これもあり大きな効果であったとは考えられない。

R-21の照射後試験は現在進行中であり、被覆管の減肉加工の大きさからいって、単純な機械的な破損である可能性が高いが、ヨウ素圧は応力腐食を起こす条件を満たしているので、破面等を詳細に調べる予定である。

6. 結 論

- (1) BWR 8×8型およびPWR 17×17型を模擬した国産試験燃料ピンをJMT-R・OWL-2ループで5-8 MWd/kg-Uの燃焼度までベース照射し、沸騰キャップセル(BOCA)装置により、局部最高出力48-56kW/mまでの出力急昇試験及び3本については300回の出力サイクル試験を行った。いずれのピンにおいても、破損または欠陥の発生は見られなかった。燃料ピンの変形（直径、長さの増加、リッジ）はきわめて小さく、またペレット-被覆管のギャップは117-150 μm残されていた。
- (2) 上記出力急昇試験に関連して、新燃料を用いた出力急昇試験を行ったが、うち5本はギャップ幅を小さくし、ヨウ素を添加して、炉内応力腐食実験とした。このうち1本が破損したが、このピンは被覆管肉厚を1母線に沿って0.1 mmまで削っており、機械的な破損と考えられる。（照射後試験は現在未完である）。残りの4本は最高20 μmのリッジが観察されたが破損しなかった。

謝 辞

この試験は、著者らばかりでなく、材料試験炉部の多くの職員の共同作業によってなされたものである。またこの試験の計画、および結果の整理は、（財）原子力安全研究協会・燃料安全専門委員会の協力を得て行われた。あわせて感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) H. Mogard, S. Aas, and S. Junkrans, "Power increase and fuel defection", A/CONF. 45/p /314 p 273 (1971)
- (2) M.G. Balfour et al, "High burnup zircaloy-clad UO₂ fuel performance in the Jose Cabrera (Zorita) PWR", Nuclear Fuel Performance, BNES London, 1985
- (3) 菊地 章、市川○生、「インターランプ計画の研究成果」日本原子力学会誌、23巻(1981) p 507
- (4) H. Mogard et al, The Over-Ramp Project Final Report, STUDSVIK-STOR-37, (1981)
- (5) K.O. Vilpponen et al, "Fuel performance under power ramp conditions in the HBWR", Paper presented at IAEA Specialists' Meeting, Risoe, 22-26 Sept., 1980

R-21の照射後試験は現在進行中であり、被覆管の減肉加工の大きさからいって、単純な機械的な破損である可能性が高いが、ヨウ素圧は応力腐食を起こす条件を満たしているので、破面等を詳細に調べる予定である。

6. 結 論

- (1) BWR 8×8型およびPWR 17×17型を模擬した国産試験燃料ピンをJMT-R・OWL-2ループで5-8 MWd/kg-Uの燃焼度までベース照射し、沸騰キャップセル(BOCA)装置により、局部最高出力48-56kW/mまでの出力急昇試験及び3本については300回の出力サイクル試験を行った。いずれのピンにおいても、破損または欠陥の発生は見られなかった。燃料ピンの変形（直径、長さの増加、リッジ）はきわめて小さく、またペレット-被覆管のギャップは117-150 μm残されていた。
- (2) 上記出力急昇試験に関連して、新燃料を用いた出力急昇試験を行ったが、うち5本はギャップ幅を小さくし、ヨウ素を添加して、炉内応力腐食実験とした。このうち1本が破損したが、このピンは被覆管肉厚を1母線に沿って0.1 mmまで削っており、機械的な破損と考えられる。（照射後試験は現在未完である）。残りの4本は最高20 μmのリッジが観察されたが破損しなかった。

謝 辞

この試験は、著者らばかりでなく、材料試験炉部の多くの職員の共同作業によってなされたものである。またこの試験の計画、および結果の整理は、（財）原子力安全研究協会・燃料安全専門委員会の協力を得て行われた。あわせて感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) H. Mogard, S. Aas, and S. Junkrans, "Power increase and fuel defection", A/CONF. 45/p /314 p 273 (1971)
- (2) M.G. Balfour et al, "High burnup zircaloy-clad UO₂ fuel performance in the Jose Cabrera (Zorita) PWR", Nuclear Fuel Performance, BNES London, 1985
- (3) 菊地 章、市川○生、「インターランプ計画の研究成果」日本原子力学会誌、23巻(1981) p 507
- (4) H. Mogard et al, The Over-Ramp Project Final Report, STUDSVIK-STOR-37, (1981)
- (5) K.O. Vilpponen et al, "Fuel performance under power ramp conditions in the HBWR", Paper presented at IAEA Specialists' Meeting, Risoe, 22-26 Sept., 1980

R-21の照射後試験は現在進行中であり、被覆管の減肉加工の大きさからいって、単純な機械的な破損である可能性が高いが、ヨウ素圧は応力腐食を起こす条件を満たしているので、破面等を詳細に調べる予定である。

6. 結 論

- (1) BWR 8×8型およびPWR 17×17型を模擬した国産試験燃料ピンをJMT-R・OWL-2ループで5-8 MWd/kg-Uの燃焼度までベース照射し、沸騰キャップセル(BOCA)装置により、局部最高出力48-56kW/mまでの出力急昇試験及び3本については300回の出力サイクル試験を行った。いずれのピンにおいても、破損または欠陥の発生は見られなかった。燃料ピンの変形（直径、長さの増加、リッジ）はきわめて小さく、またペレット-被覆管のギャップは117-150 μm残されていた。
- (2) 上記出力急昇試験に関連して、新燃料を用いた出力急昇試験を行ったが、うち5本はギャップ幅を小さくし、ヨウ素を添加して、炉内応力腐食実験とした。このうち1本が破損したが、このピンは被覆管肉厚を1母線に沿って0.1 mmまで削っており、機械的な破損と考えられる。（照射後試験は現在未完である）。残りの4本は最高20 μmのリッジが観察されたが破損しなかった。

謝 辞

この試験は、著者らばかりでなく、材料試験炉部の多くの職員の共同作業によってなされたものである。またこの試験の計画、および結果の整理は、（財）原子力安全研究協会・燃料安全専門委員会の協力を得て行われた。あわせて感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) H. Mogard, S. Aas, and S. Junkrans, "Power increase and fuel defection", A/CONF. 45/p /314 p 273 (1971)
- (2) M.G. Balfour et al, "High burnup zircaloy-clad UO₂ fuel performance in the Jose Cabrera (Zorita) PWR", Nuclear Fuel Performance, BNES London, 1985
- (3) 菊地 章、市川○生、「インターランプ計画の研究成果」日本原子力学会誌、23巻(1981) p 507
- (4) H. Mogard et al, The Over-Ramp Project Final Report, STUDSVIK-STOR-37, (1981)
- (5) K.O. Vilpponen et al, "Fuel performance under power ramp conditions in the HBWR", Paper presented at IAEA Specialists' Meeting, Risoe, 22-26 Sept., 1980

R-21の照射後試験は現在進行中であり、被覆管の減肉加工の大きさからいって、単純な機械的な破損である可能性が高いが、ヨウ素圧は応力腐食を起こす条件を満たしているので、破面等を詳細に調べる予定である。

6. 結 論

- (1) BWR 8×8型およびPWR 17×17型を模擬した国産試験燃料ピンをJMT-R・OWL-2ループで5-8 MWd/kg-Uの燃焼度までベース照射し、沸騰キャップセル(BOCA)装置により、局部最高出力48-56kW/mまでの出力急昇試験及び3本については300回の出力サイクル試験を行った。いずれのピンにおいても、破損または欠陥の発生は見られなかった。燃料ピンの変形（直径、長さの増加、リッジ）はきわめて小さく、またペレット-被覆管のギャップは117-150 μm残されていた。
- (2) 上記出力急昇試験に関連して、新燃料を用いた出力急昇試験を行ったが、うち5本はギャップ幅を小さくし、ヨウ素を添加して、炉内応力腐食実験とした。このうち1本が破損したが、このピンは被覆管肉厚を1母線に沿って0.1 mmまで削っており、機械的な破損と考えられる。（照射後試験は現在未完である）。残りの4本は最高20 μmのリッジが観察されたが破損しなかった。

謝 辞

この試験は、著者らばかりでなく、材料試験炉部の多くの職員の共同作業によってなされたものである。またこの試験の計画、および結果の整理は、（財）原子力安全研究協会・燃料安全専門委員会の協力を得て行われた。あわせて感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) H. Mogard, S. Aas, and S. Junkrans, "Power increase and fuel deflection", A/CONF. 45/p /314 p 273 (1971)
- (2) M. G. Balfour et al, "High burnup zircaloy-clad UO₂ fuel performance in the Jose Cabrera (Zorita) PWR", Nuclear Fuel Performance, BNES London, 1985
- (3) 菊地 章、市川○生、「インターランプ計画の研究成果」日本原子力学会誌、23巻(1981) p 507
- (4) H. Mogard et al, The Over-Ramp Project Final Report, STUDSVIK-STOR- 37, (1981)
- (5) K. O. Vilpponen et al, "Fuel performance under power ramp conditions in the HBWR", Paper presented at IAEA Specialists' Meeting, Risoe, 22-26 Sept., 1980

- (6) M.Uchida and M.Ichikawa, "In-pile diameter measurement of light water reactor test fuel rods for assessment of pellet-cladding mechanical interaction", Nucl. Technol., vol. 51 (1981) p 33

第1表 J M T R における出力急昇試験の概要

試験目的	実験番号	キャプセル番号	ビン燃料番号	タイプ	仕様*	燃焼度(Gwd/tU)	初期出力(kW/m)	最高出力(kW/m)	急昇時間(分)	保持時間(時間)	サイクル	出力破損	実施年度
新燃試験	R-2	79F-3A	-	BWR	I	0	20	43	2	6	-	無	57
	R-3	79F-4A	-	BWR	I	0	18	41	2	12	-	無	57
	R-4	80F-1J	-	BWR	T	0	19	44	2	50	7	無	58
	R-5	80F-2J	-	BWR	T	0	0	49	2	34	7	無	58
	R-6	81F-6A	-	BWR	I, D	0	19	48	2	30	4	無	58
	R-8	81F-7J	-	BWR	-	0	18	47	スティップ	48	2	無	58
	R-10	81F-8J	-	BWR	T, X	0	28	42	2	75	4	無	59
	R-11	81F-9J	-	BWR	T, X	0	35	43	2	10	7	無	59
	R-20	85BF-21J	-	PWR	I, D	0	19	59	1	9	37	有	61
	R-21	85BF-22J	-	PWR	I, D	0	18	54	1	0.05	-	無	61
ベース照射燃料の試験	R-12	82BF-3A	IB-6	BWR	-	5.8	35	50	3	52	149	無	60
	R-13	82BF-4A	IB-3	BWR	-	5.3	22	50	1	89	-	無	59
	R-14	83BF-3A	IB-4	BWR	-	5.7	33	48	10	50	-	無	60
	R-15	83BF-4A	IB-7	BWR	-	5.6	29	49	3	52	300	無	60
	R-16	84BF-17A	IB-8	BWR	-	5.1	30	56	10	50	-	無	61
	R-17	84BF-18A	IP-6	PWR	-	7.8	30	49	3	52	300	無	60
	R-18	85BF-19A	IP-4	PWR	-	7.7	27	48	10	50	-	無	61

* 特殊仕様 I : ヨウ素添加, D : 欠陥付被覆管, X : キセノン封入, T : 中心熱電対付

** 線出力密度は最高位置における値である。

第2表 OWL-2 ループの諸元

炉心位置	K, L-3, 4
熱中性子束	$5.4 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
最大	$4.1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
平均	$5.5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
高速中性子束	$4.2 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
最大	0.5 W/g
冷却材	水
冷却材流量	1100 kg/min
冷却材温度	270°C (285°C) *
冷却材圧力	$73 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$
蒸気含有率または不純物濃度	20% (最大)
炉心部有効寸法	$\phi 117.8 \times 750 \text{ } \ell$
試料最大発熱量	850 kW
特記	• PWR ($73 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ まで), BWR, AT R の燃材料の照射 • 貨通型

第3表 BOCA/OSF-1 装置の性能諸元

項目	項目	項目	項目
冷却材	純水	-	タ
通常運転圧力	7.3 MPa	-	-
キャプセル内冷却水流量	$1 \text{ cm}^3/\text{s}$	-	-
熱中性子束	$3 \sim 8 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	-	-
高遠中性子束	$4 \sim 11 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ (ジルカロイ製炉内管)	-	-
最大発熱量	$2 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	-	-
炉内管冷却水流量	$1.9 \text{ m}^3/\text{h}$	-	-
中性子吸収体	He - 3ガス	-	-
He - 3ガス圧力変化幅	$0.03 \sim 4 \text{ MPa}$	-	-
燃料棒出力変化幅	$2 \sim 3$ 倍	-	-
燃料棒出力変化速度	$30 \text{ kW/m} \cdot \text{min} \sim 5 \text{ W/m} \cdot \text{min}$	-	-

* () 内は沸騰水モードの場合

第4表 OWL-2ベース照射燃料主要仕様

項目	BWRタイプ燃料	PWRタイプ燃料
①ペレット		
材質(密度)	焼結研磨UO ₂ (95%TD)	焼結研磨UO ₂ (95%TD)
形状	ディッシュ・チャンファ付	ディッシュ・チャンファ付
寸法 外径	10.31 mm	8.19 mm
高さ	10.3 mm	9.0 mm
濃縮度	2.8%	4.5%
②被覆管		
材質	ジルカロイ-2 再結晶化焼ナマシ材	ジルカロイ-4 冷間加工歪取焼ナマシ材
寸法 内径	約10.5 mm	約8.4 mm
肉厚	約0.9 mm	約0.6 mm
表面処理	内面 オートクレーブ 外面 オートクレーブ	内面 サンドblast 外面 機械的研磨
③燃料棒		
ペレット 被覆管間隙	0.23 mm	0.17 mm
スタック長	400 mm	400 mm
充填気体	ヘリウム(He)	ヘリウム(He)
充填圧力	3気圧(絶対圧)	15気圧(絶対圧)
プレナム体積	7.1 cc	4.3 cc

第5表 新燃料出力急昇用ピンの製造諸元

	R 2, R 3	R 4	R 5	R 6	R 8	R 10	R 11	R 20	R 21
タ イ プ	BWR	BWR	BWR	BWR	BWR	BWR	BWR	PWR	PWR
濃 縮 度 (w/o)	2. 810	2. 790		2. 828		2. 803			4. 0
ペ レ ット 密 度 (%TD)	94. 9	95. 0	94. 7	95. 0	95. 1	94. 5	94. 3		95
直 径 (mm)	10. 46	10. 70	10. 60	10. 46	10. 30	10. 59	10. 62		9. 89
高 さ (mm)	16. 14	10. 95	10. 86	16. 01	15. 96	11. 07	11. 14		10
端 面 形 状	フ ラ ッ ト	チャ ン フ ハ 付	フ ラ ッ ト	チャ ン フ ハ 付	フ ラ ッ ト				
ス タ ク 長 さ (mm)	403	405	401	128	399	399	401		210
被 覆 管 材 質	Zry-2 (SR)	Zry-2 (RX)	Zry-2 (RX)	Zry-2 (RX)	Zry-2 (RX)	Zry-2 (RX)	Zry-2 (RX)	Zry-2 (RX)	Zry-2 (RX)
外 � 径 (mm)	12. 28	12. 53		12. 27		12. 52	12. 53		10. 72
内 径 (mm)	10. 54	10. 79		10. 54		10. 81	10. 79		9. 92
ペ レ ット 一 被 覆 ギ ャ ッ プ (mm)	0. 08	0. 09	0. 19	0. 08	0. 24	0. 22	0. 17		0. 03
封 入 ガ ス 成 分	He	He	He	He 20%	He	He 60%	He	He	He
封 入 ガ ス 壓 力 (atm)	1. 0	1. 0		1. 0		1. 0		1. 0	
ブ レ ナ ム 体 積 (mℓ)	7. 7	5. 5	5. 8	10. 1		7. 1			6. 0
添 加 物	I ₂ 1g	—	I ₂ 1g	—	—	—	I ₂ 0. 3g	CsI, MoO ₂	
特 殊 加 工 (mm)	—	—	—	—	—	—	—	MoO ₃	外 面 傷 (深さ 0.12) (残肉 0.1)
燃 料 計 装	伸び計	T/C	伸び計	伸び計	T/C	伸び計	T/C	伸び計	伸び計

第6表 ベース照射中の燃料ピン毎の出力および燃焼度

rod No	線出力密度 (kW/m)	燃焼度 (MWd/kg-U)	用途 (キャップセルNo等)
I B - 3	23.2	5.35	R - 13
	24.6	5.67	R - 14
	25.2	5.81	P I E
	25.2	5.81	R - 12
	24.3	5.60	R - 15
	22.3	5.14	R - 16
II B - 1	15.7	3.62	追加ベース照射
	14.1	3.24	"
I P - 1	16.6	6.16	
	18.6	6.89	
	20.0	7.42	
	21.9	7.74	R - 18
	21.1	7.82	P I E
	21.1	7.82	R - 17
	20.3	7.54	
	19.1	7.08	
	17.3	6.43	
II P - 1	15.2	5.65	追加ベース照射
	13.7	5.04	"
	12.3	4.58	"
	11.6	4.29	"
	11.2	4.17	"
	11.2	4.17	"
	12.0	4.44	"
	12.8	4.75	"
	14.5	5.38	"

第7表 照射後試験項目

- 完了
- 実施予定
- ▲ 出力急昇しない燃料ピンについて実施

	新燃料出力急昇後										ベース照射+出力急昇後					
	R 1	R 2	R 3	R 6	R 8	R 10	R 11	R 20	R 21	照射後	R 12	R 13	R 14	R 15	R 16	R 17
外観検査	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
X線検査	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ガソンマ・スキャン	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
寸法測定	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
リーコロケーション	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
渦電流探傷	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ギヤップ測定	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
FPGガス捕集	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	○
金相試験	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	▲	●	●	●	●	○
オートラジオグラフ											●	●	●	●	●	
硬度測定		●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	▲	●	●	●	○
被覆管押広げ試験		●	●	●						○	○					
SEM観察		●	●							○	○		●	●	●	○

第8表 出力急昇による燃料寸法変化

R No (rod No)	R 12 (IB-6)	R 13 (IB-3)	R 14 (IB-4)	R 15 (IB-7)	R 16 (IB-8)	R 17 (IP-6)
リッジ高さ * (μm)	出力急昇後 ~ 0	~ 0	< 3	~ 0	4	~ 0
直 径 (mm)	出力急昇前 12.276	12.288	12.291	12.277	12.277	9.493
	出力急昇後 12.277	12.290	12.289	12.279	12.285	9.496
V溝間距離 (mm)	出力急昇前 536.23	536.37	536.35	536.53	536.29	535.50
	出力急昇後 536.28	536.42	536.35	536.57	536.36	535.53
残留ギャップ幅 (μm)	出力急昇前 				200	
	出力急昇後 145	142	157	152	117	159

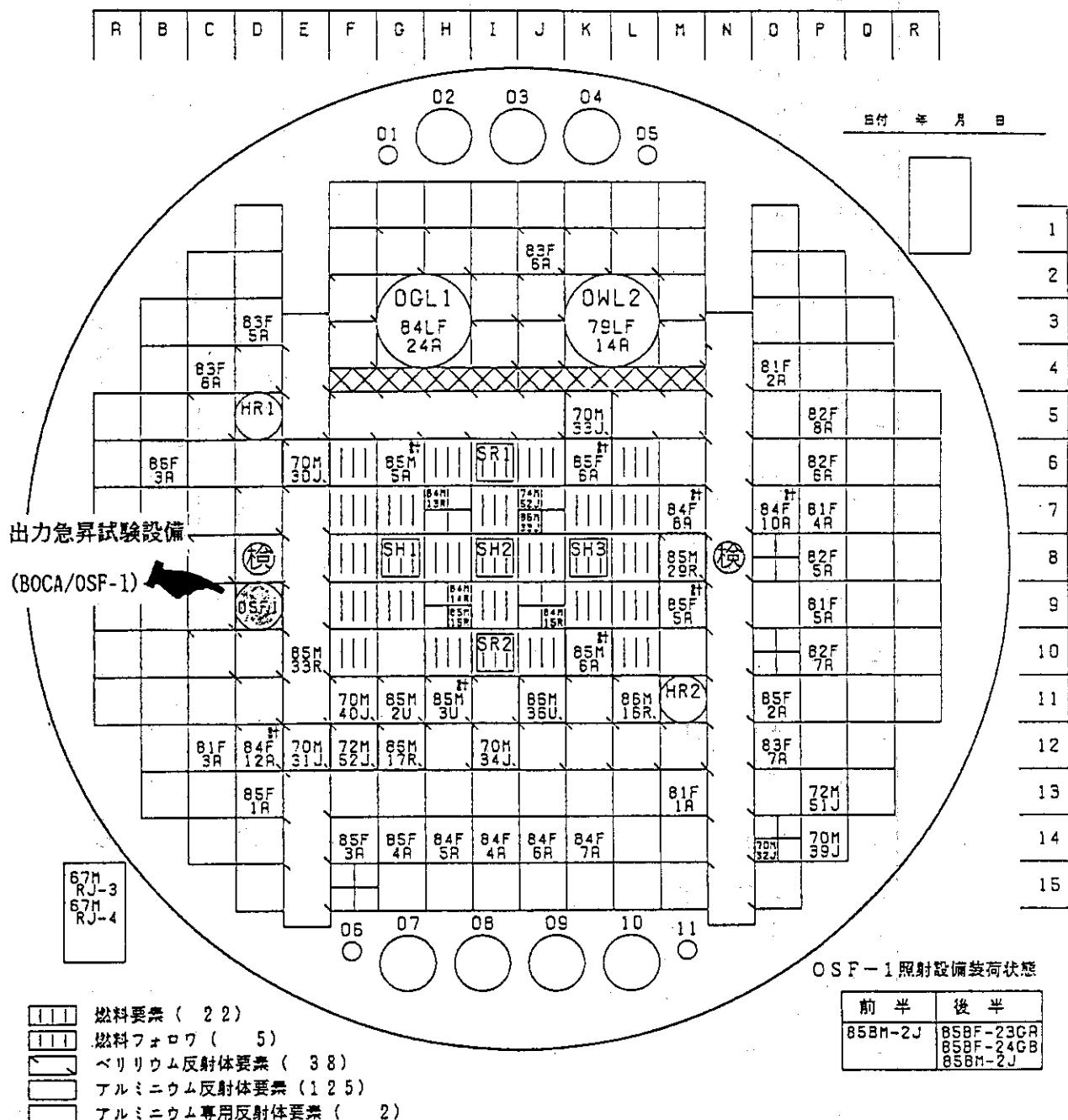
* 直径の差、最大の数個の平均

第9表 ベース照射後出力急昇した燃料のガス分析結果

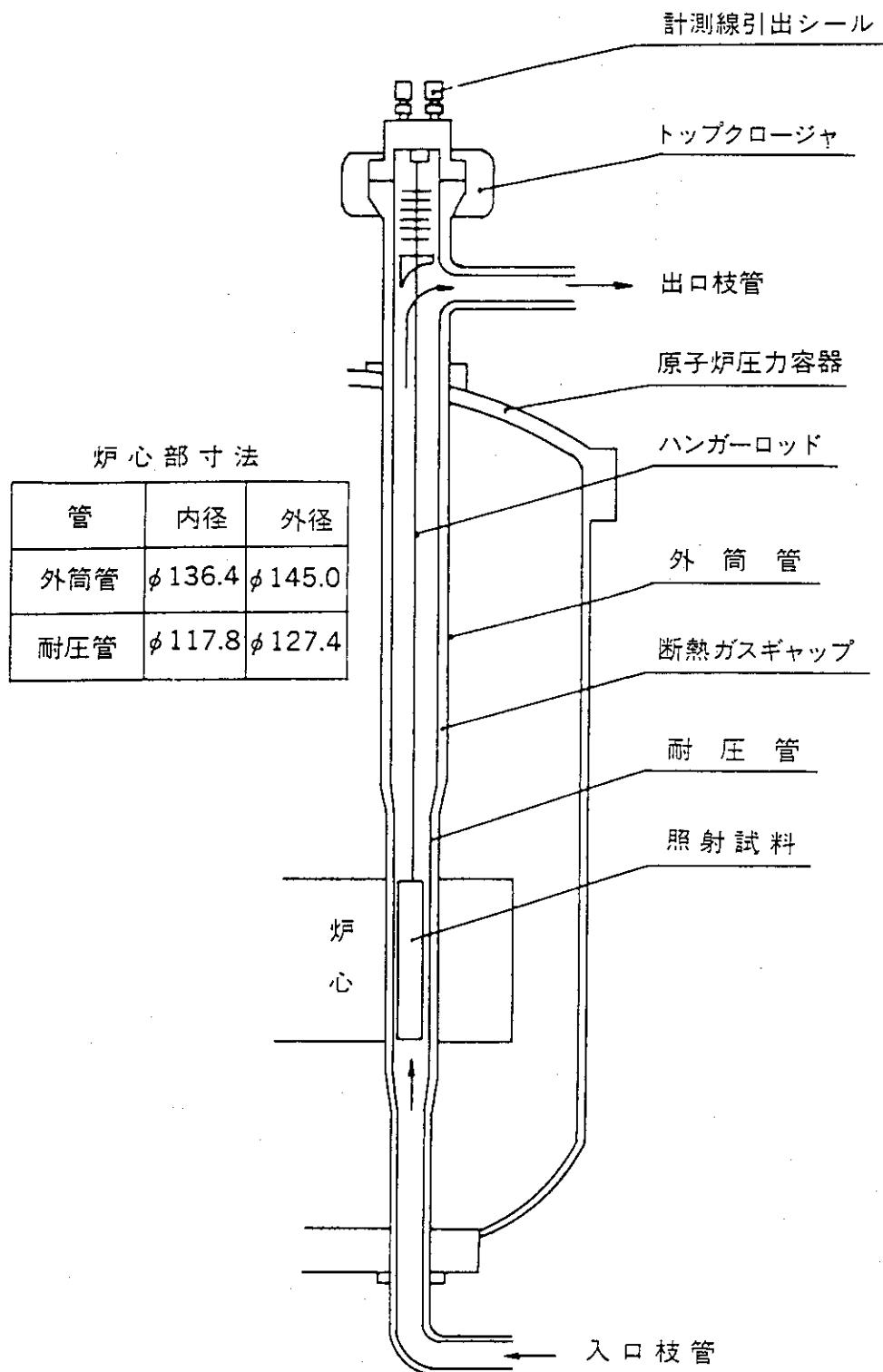
実験番号	ピン番号	燃焼度 (MWd/kg-U)	最高出力 (kW/m)	最高出力算時間 (hr)	自由体積 (cc)	全ガス量 (ccSTP)	ガスの割合 (%)			F Pガス 放出率(%)
							He	Kr	Xe	
-	I B - 5	5.8	ベース照射のみ	-	-	23.0	99.8	0.02	0.18	0.1
R - 12	I B - 6	5.8	50	(149°C)	52	10.4	25.3	94.8	0.7	4.5
R - 13	I B - 3	5.4	50	89	-	23.3	98.8	0.2	1.1	0.6
R - 14	I B - 4	5.7	48	51	9.0	24.4	98.7	0.2	1.1	0.6
R - 15	I B - 7	5.6	49	(300°C)	52	9.2	24.7	95.2	0.5	4.3
R - 16	I B - 8	5.1	56	50	9.2	26.4	85.4	1.8	12.9	8.2
-	I P - 5	7.8	ベース照射のみ	-	-	77.0	100	< 0.01	< 0.01	< 0.02
R - 17	I P - 6	7.8	49	(300°C)	52	6.0	76.5	98.4	0.2	1.5
R - 18	I P - 4	7.7	48	50	5.8	75.9	99.5	0.07	0.41	0.8

西 暦 年 度	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
J M T R サイクル	55 53 54	56 55 56	57 57 58 59	58 60 61 62 63	59 64 65 66	60 69 70 71 72 73	61 74 75 76
O W L - 2 ループ照射							→ 再照射
性能確認その他の 目的の出力急昇 (未照射燃料)			R1 79 LF14 A	R4 R5 R8 R10	R6 R11		
ヨウ素添加燃料の出力 急昇 (未照射燃料)		R2 R3				→ R 20(P) → R 21(P)	
ベース照射済燃料の 出力急昇				R6 R13	R14 R15 R16 R17P R18(P)		
照射後試験		R1	R2 R3	R10 R6 R11 79 LE14A R8	R12 R13 R14 R15 R16 R17P R18(P)	R12 R13	

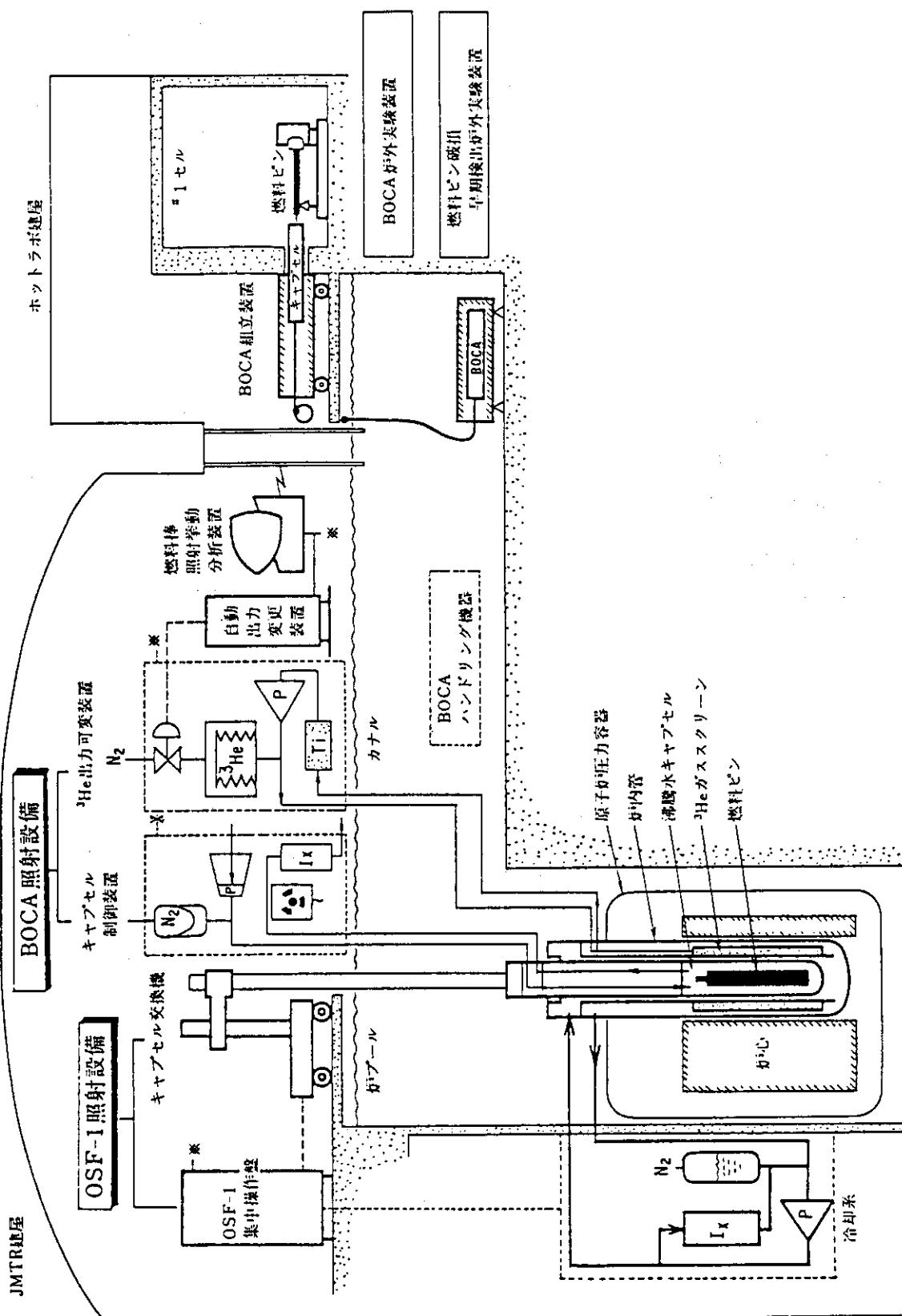
第1図 J M T R・B O C A装置による出力急昇実験の経過



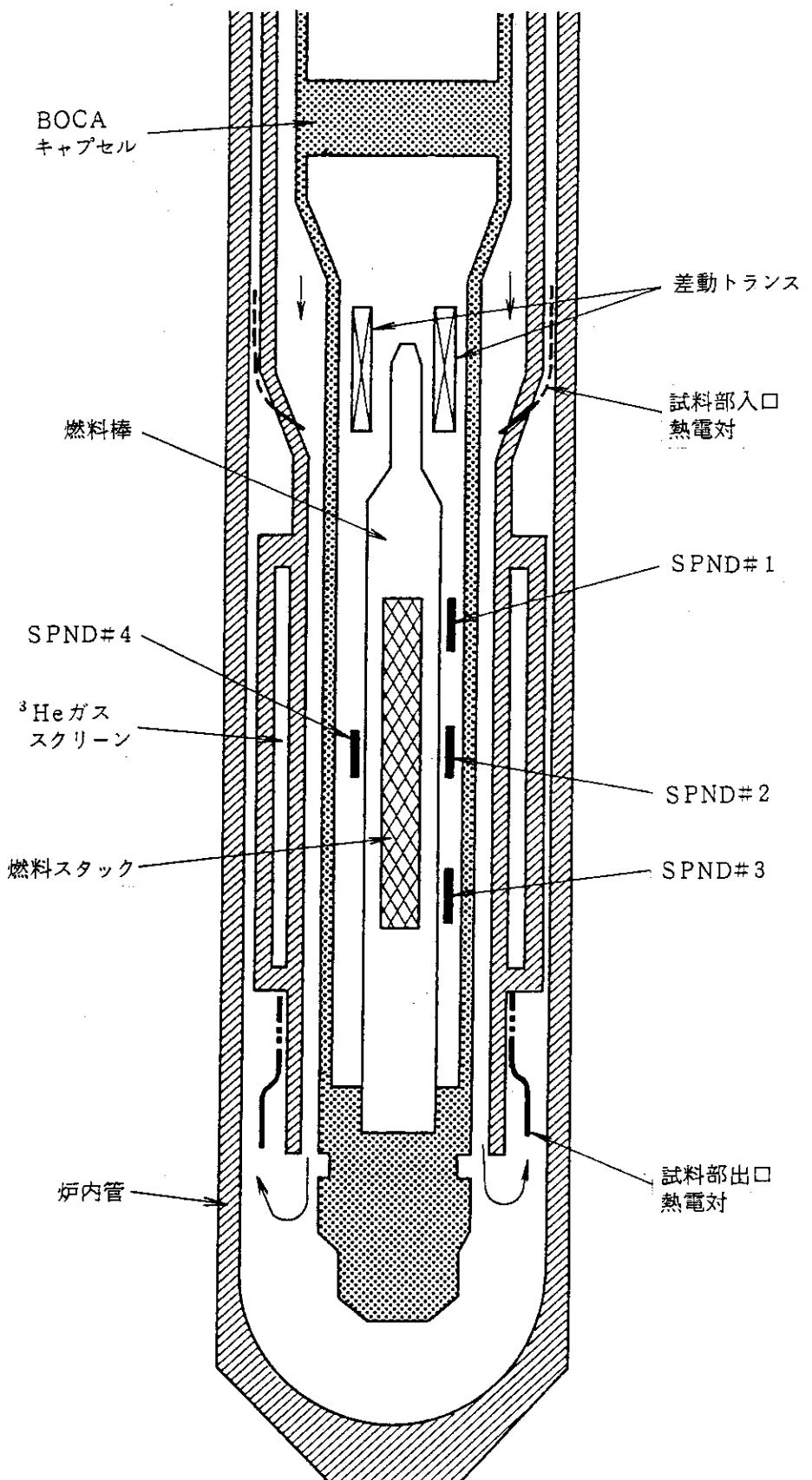
第2図 J M T R 炉心配置図



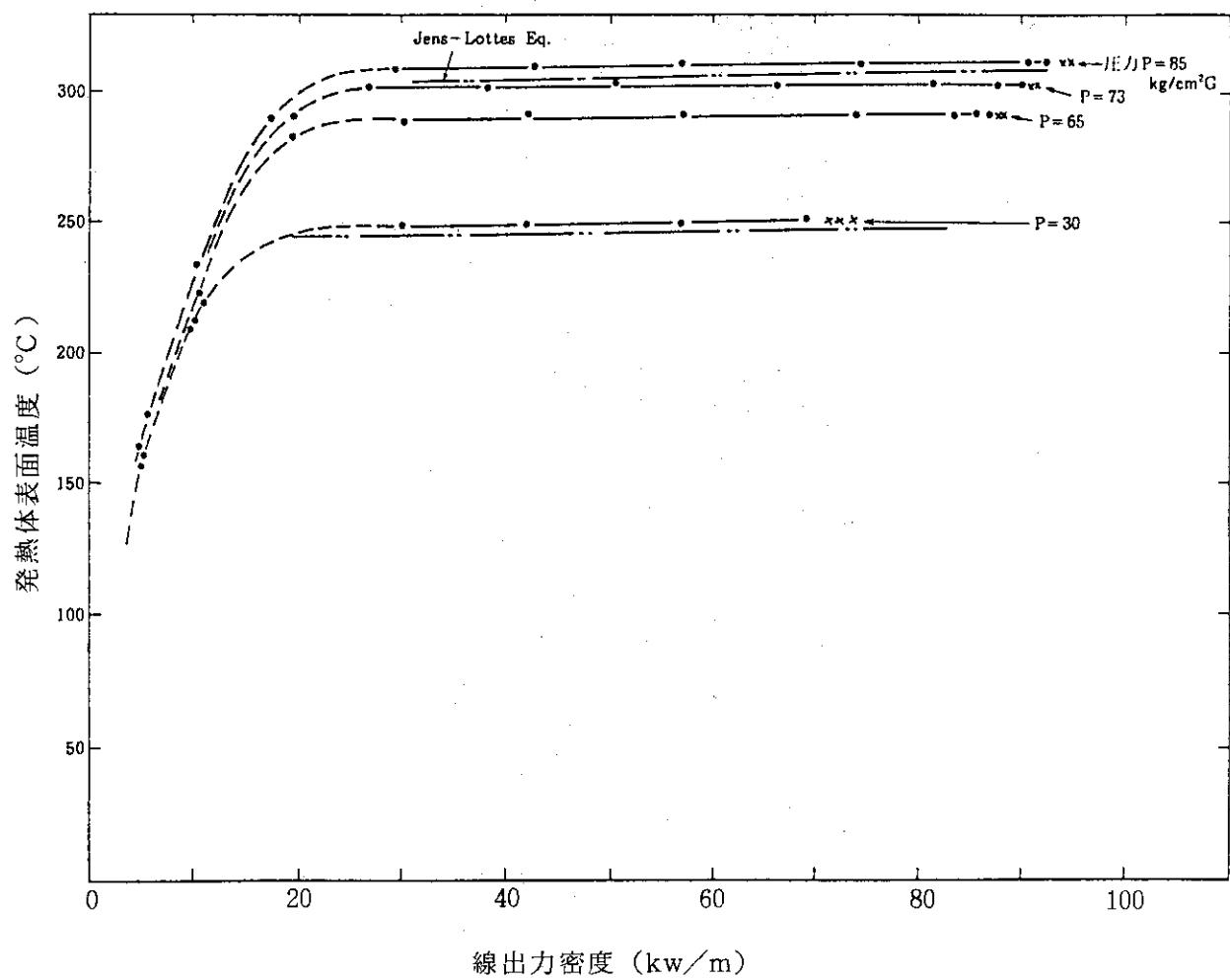
第3図 OWL-2の炉内管構造



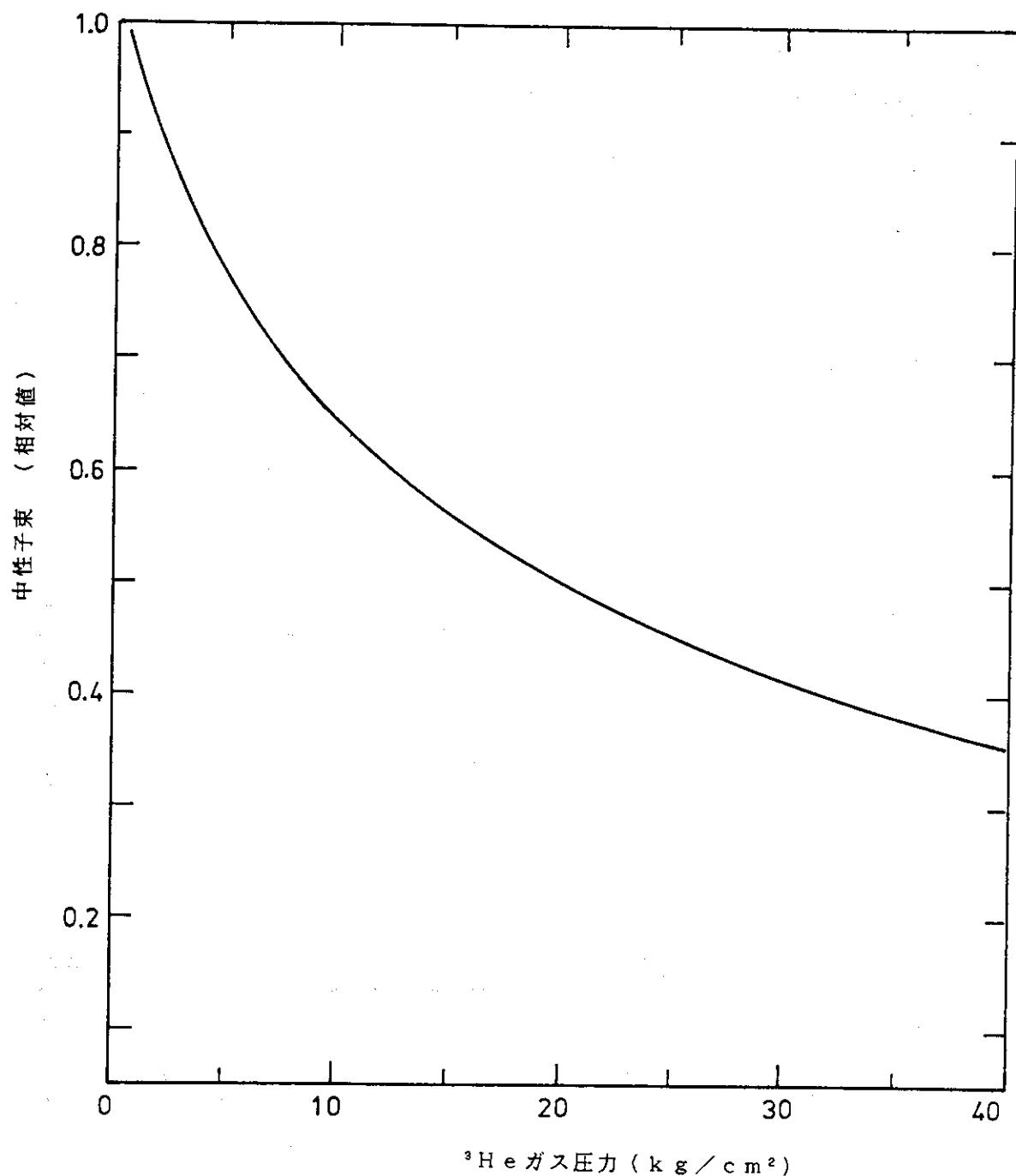
第4図 JMTR出力急昇試験設備 (BOCA/OSA-F-1) の全体構成



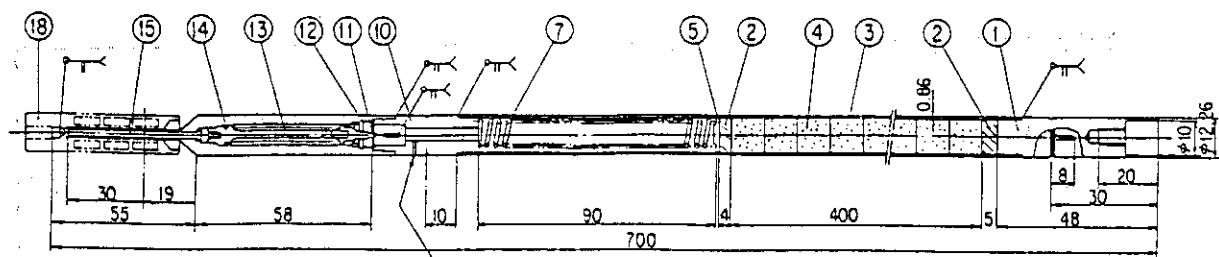
第5図 BOCA/OSF-1炉心部詳細



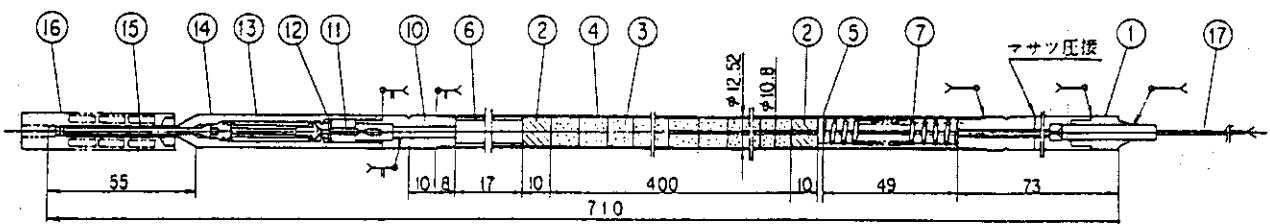
第6図 B O C A キャップセル内の燃料ピン（または模擬発熱体）の表面温度と
線出力密度の関係

第7図 ${}^3\text{He}$ ガス加圧による中性子束抑制

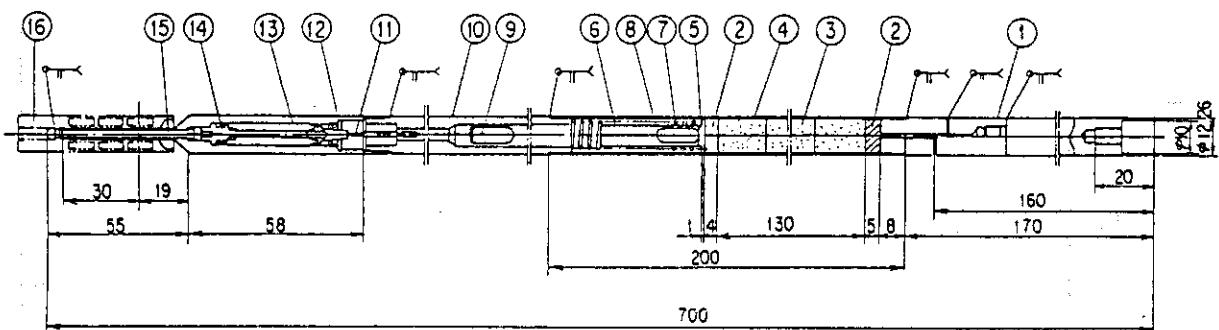
(1) 出力急昇試験設備特性試験用



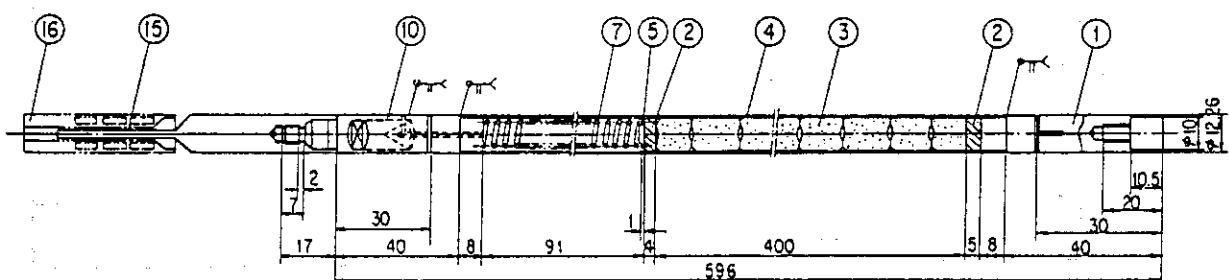
(2) 燃料照射挙動 (中心温度測定) 用



(3) PCI / SCC 破損挙動解明用



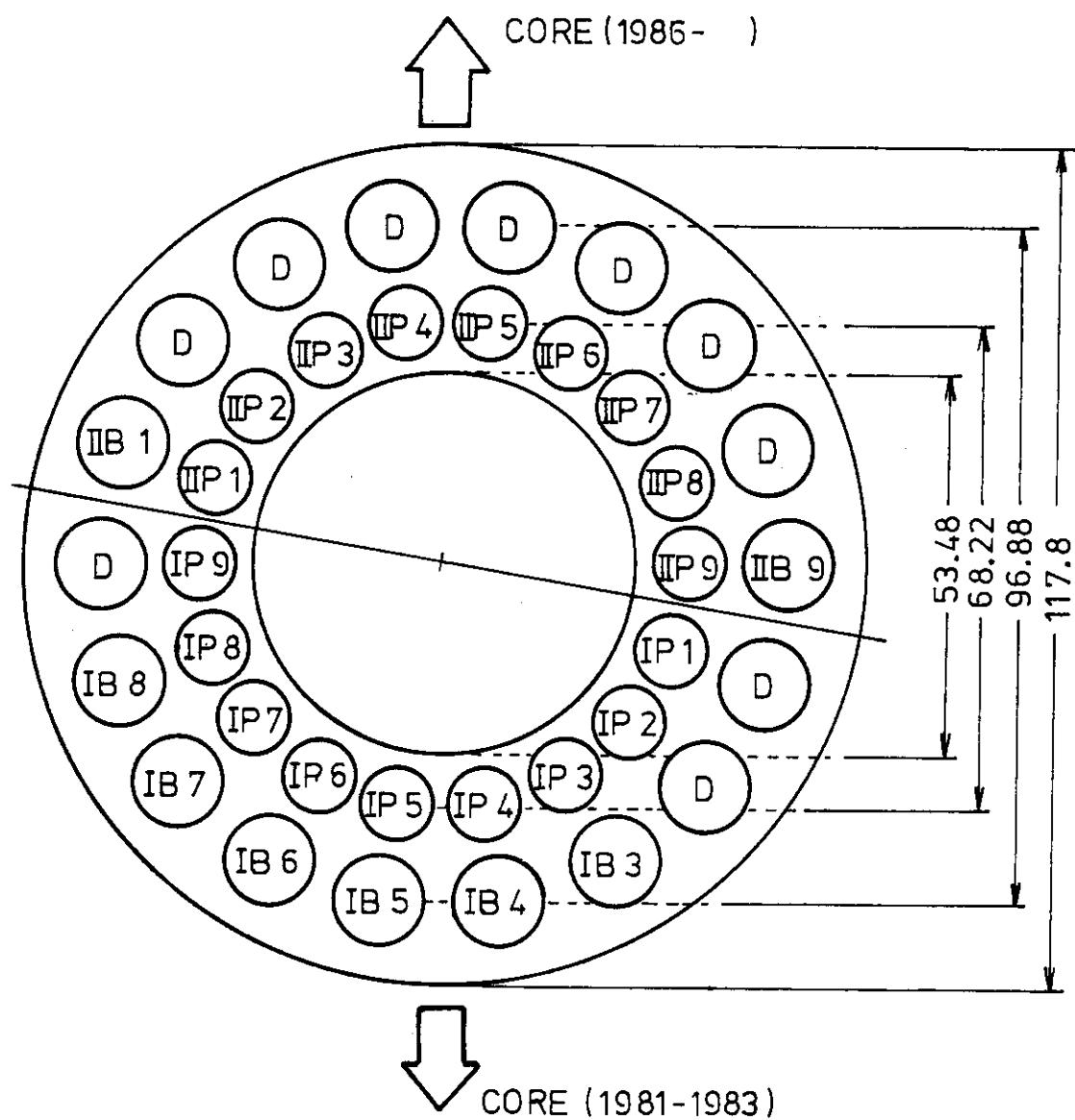
(4) ベース照射用



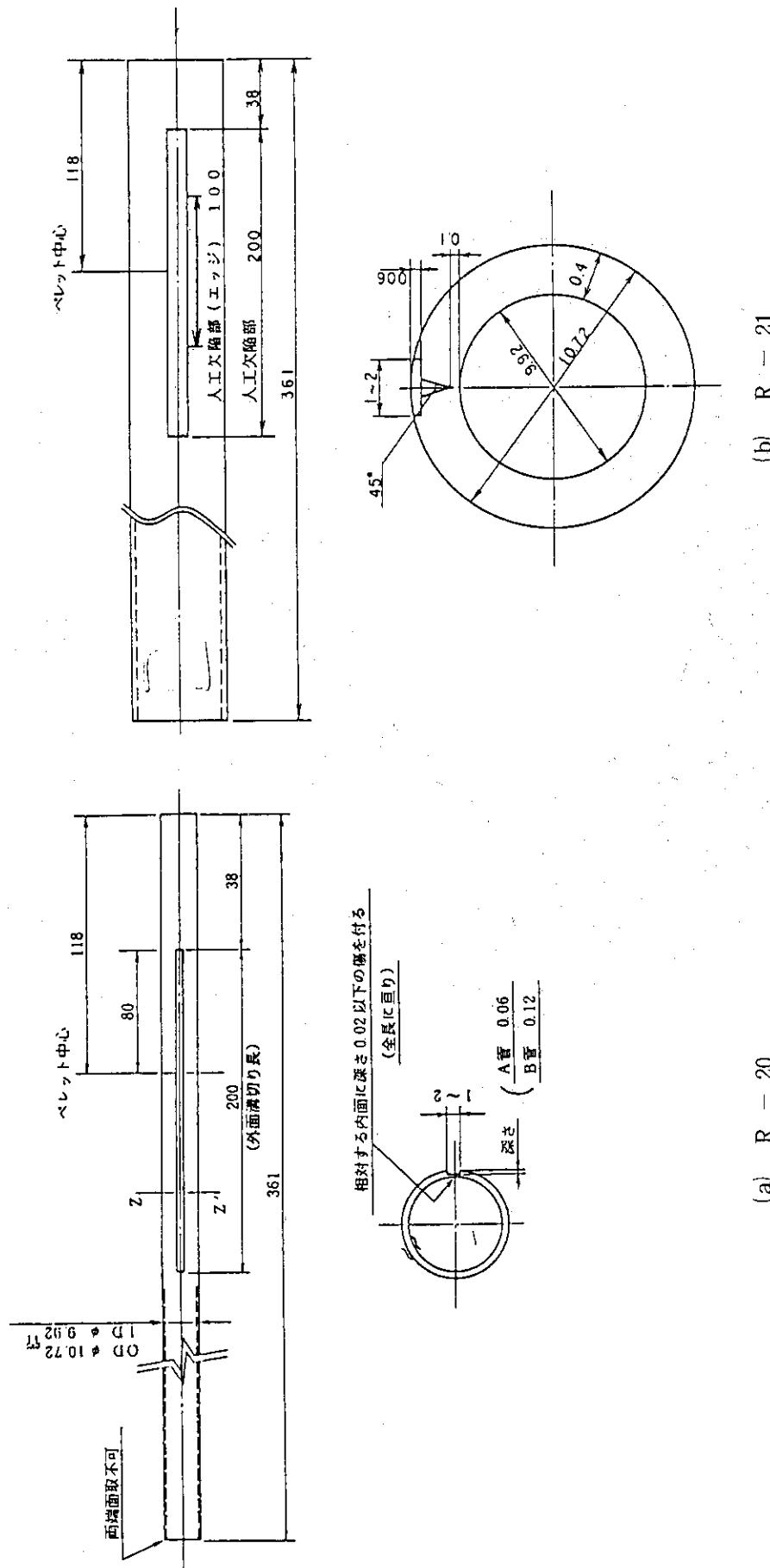
9	球	SUS304
8	ヨウ素入りアンプル	石英ガラス
7	スプリング	インコネルX
6	スリーブ	SUS304
5	押工板	SUS304
4	被覆管	ジルカロイ-2
3	ベレット	UO ₂
2	絶縁ベレット	Al ₂ O ₃
1	下部端栓	ジルカロイ-2
番号	品 名	材 質

17	中心温度測定用熱電対	W5/26Re
16	差動トランス	
15	コア	SUS403
14	ペローズハウジング	ジルカロイ-2
13	ペローズ	SUS304
12	止メ輪	SUS304
11	加圧用管	SUS304
10	上部端栓	ジルカロイ-2
番号	品 名	材 質

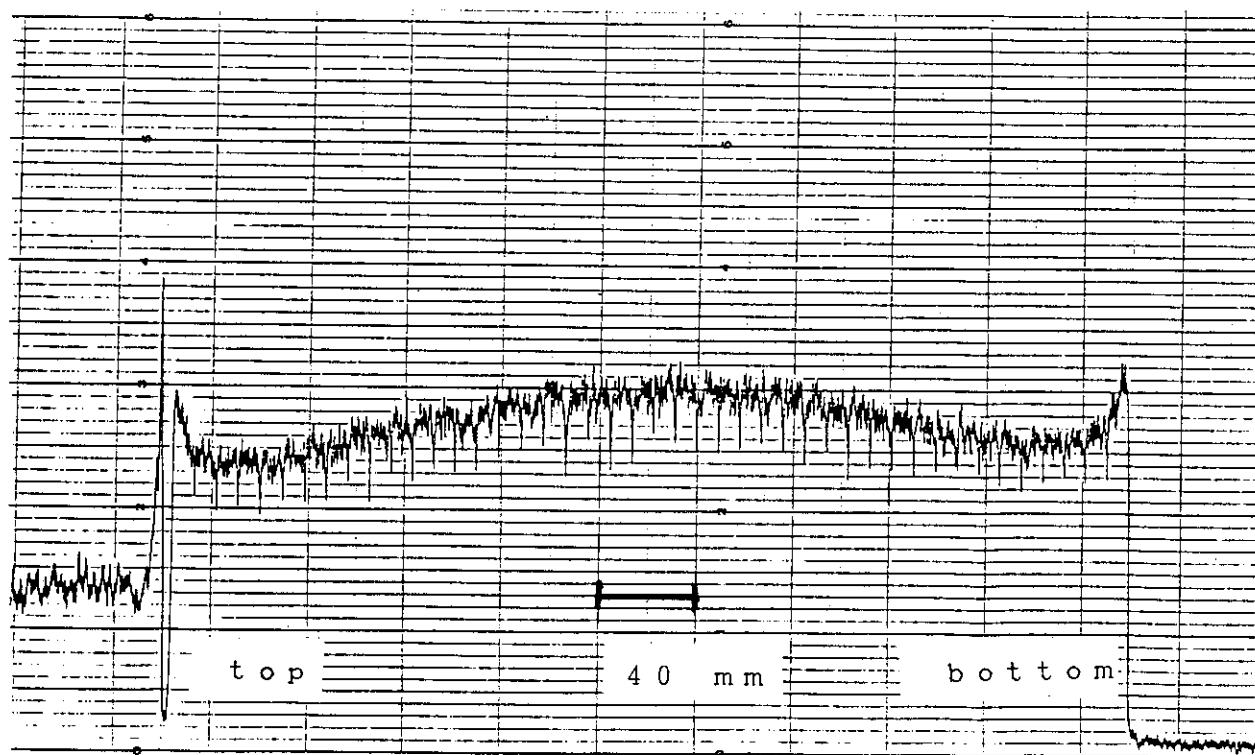
第8図 J M T R 出力急昇試験燃料棒組立図



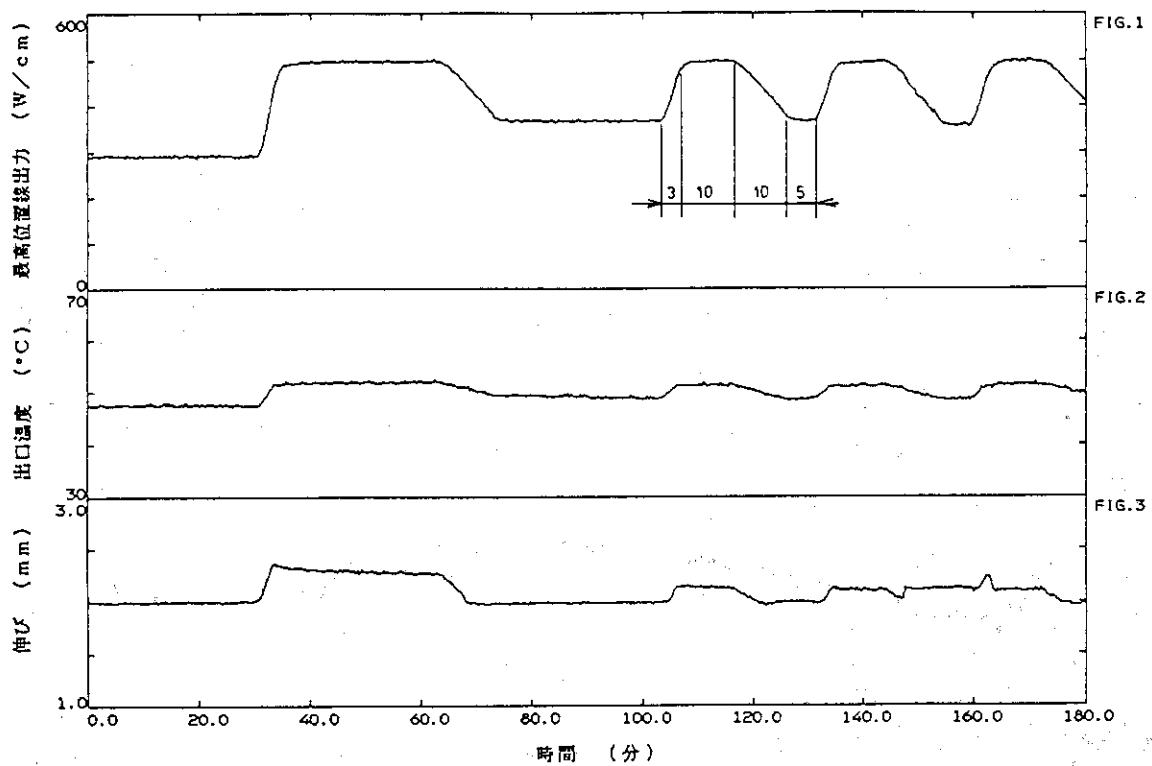
第9図 ベース照射用集合体



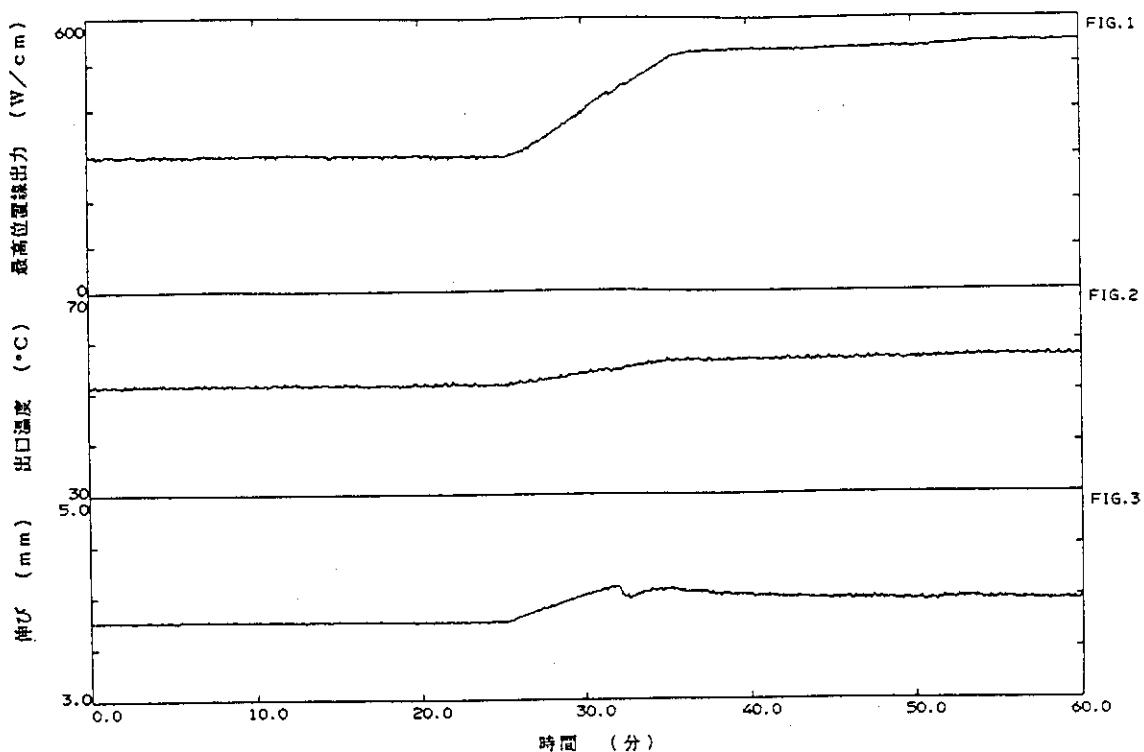
第10図 R=20, R=21における被覆管外面減肉加工



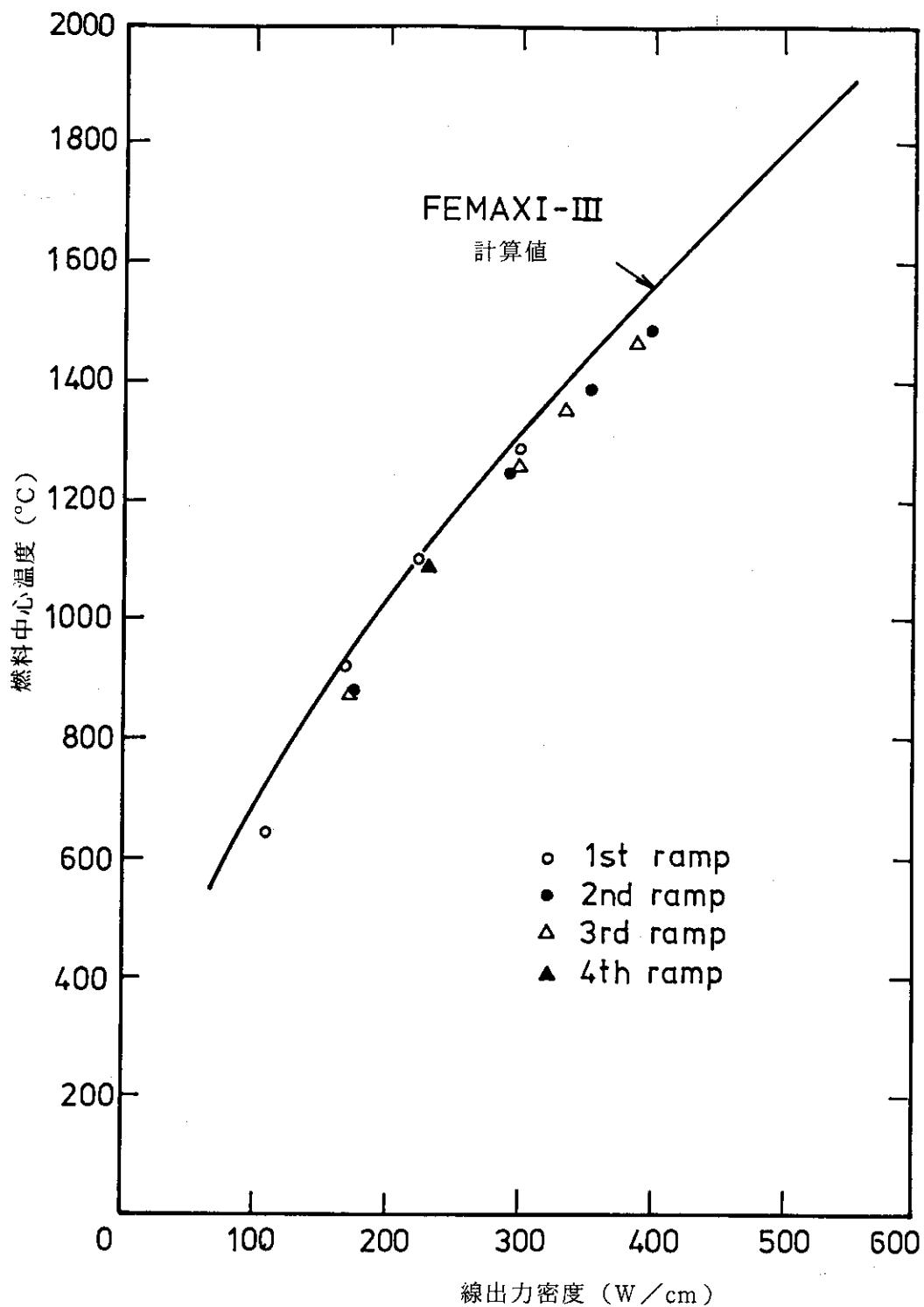
第11図 ベース照射後燃料ピン（IP-5）のグロス・ガンマスキャン結果



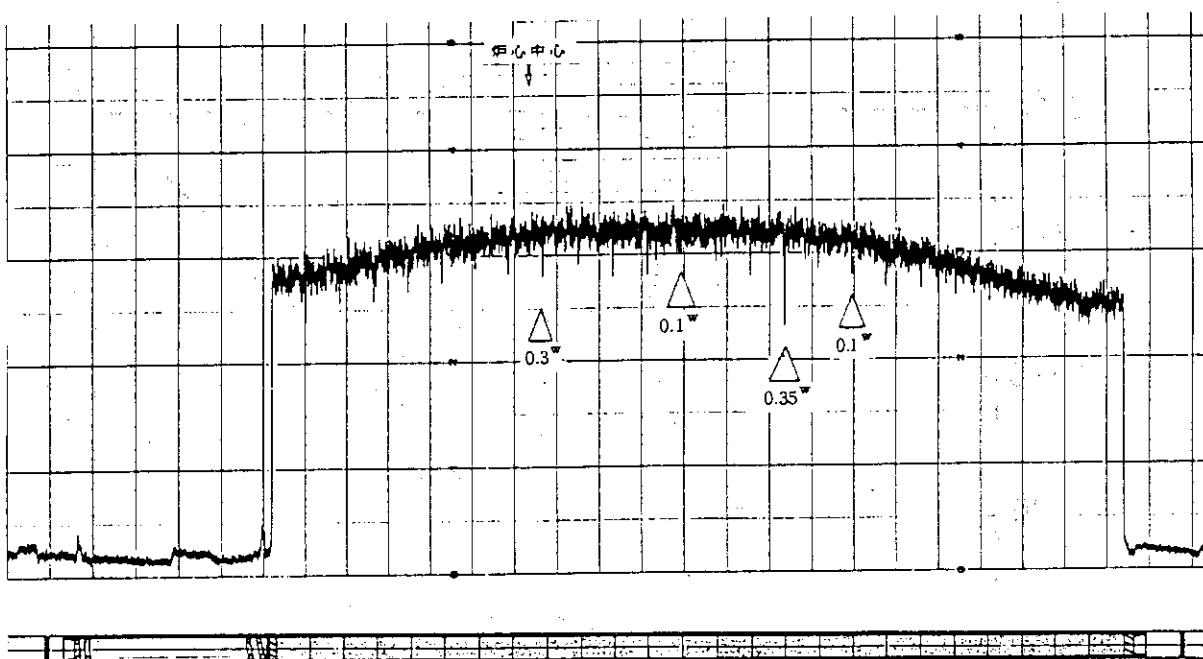
第12図 出力急昇、出力サイクル運転パターン (R-15)



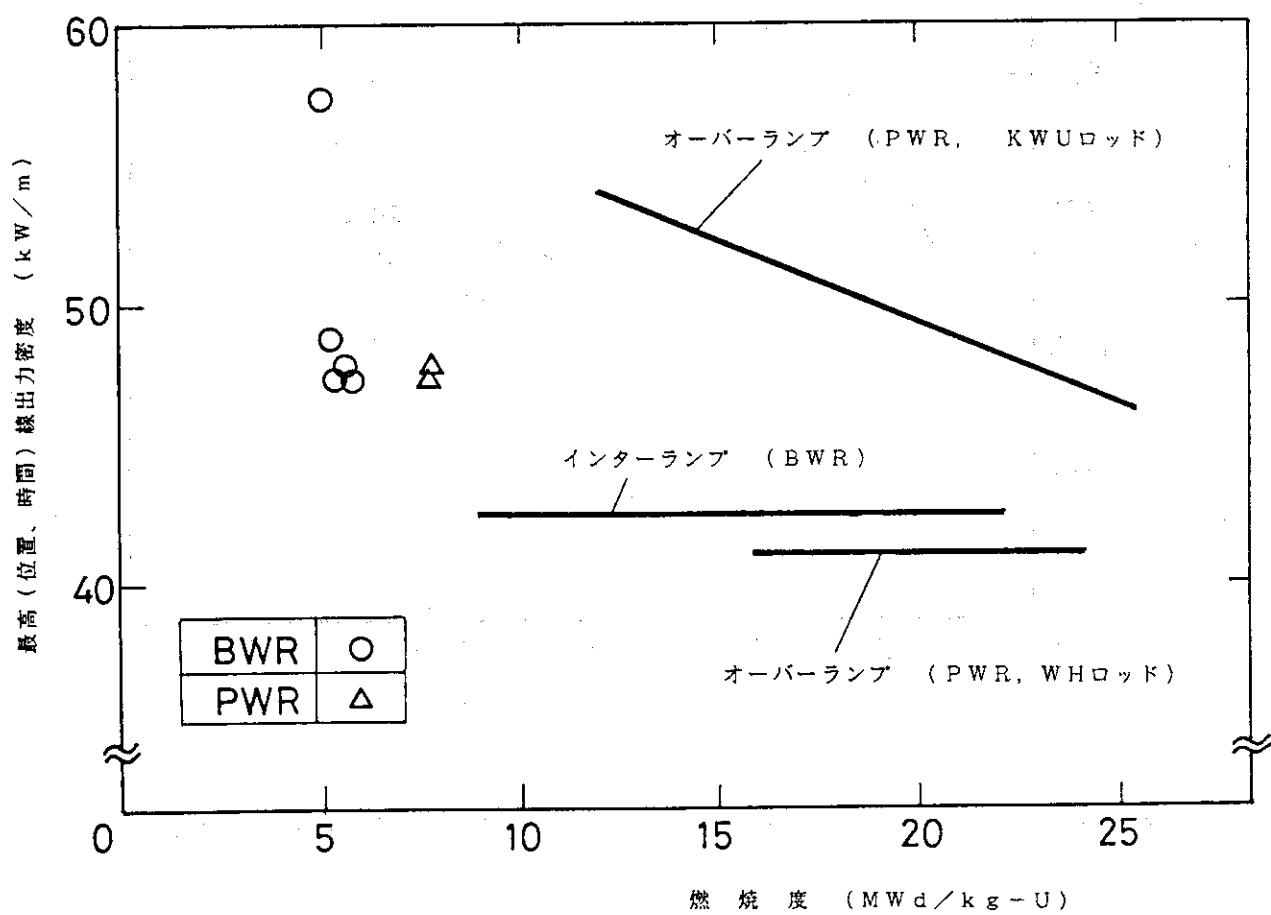
第13図 出力急昇運転パターン (R-16)



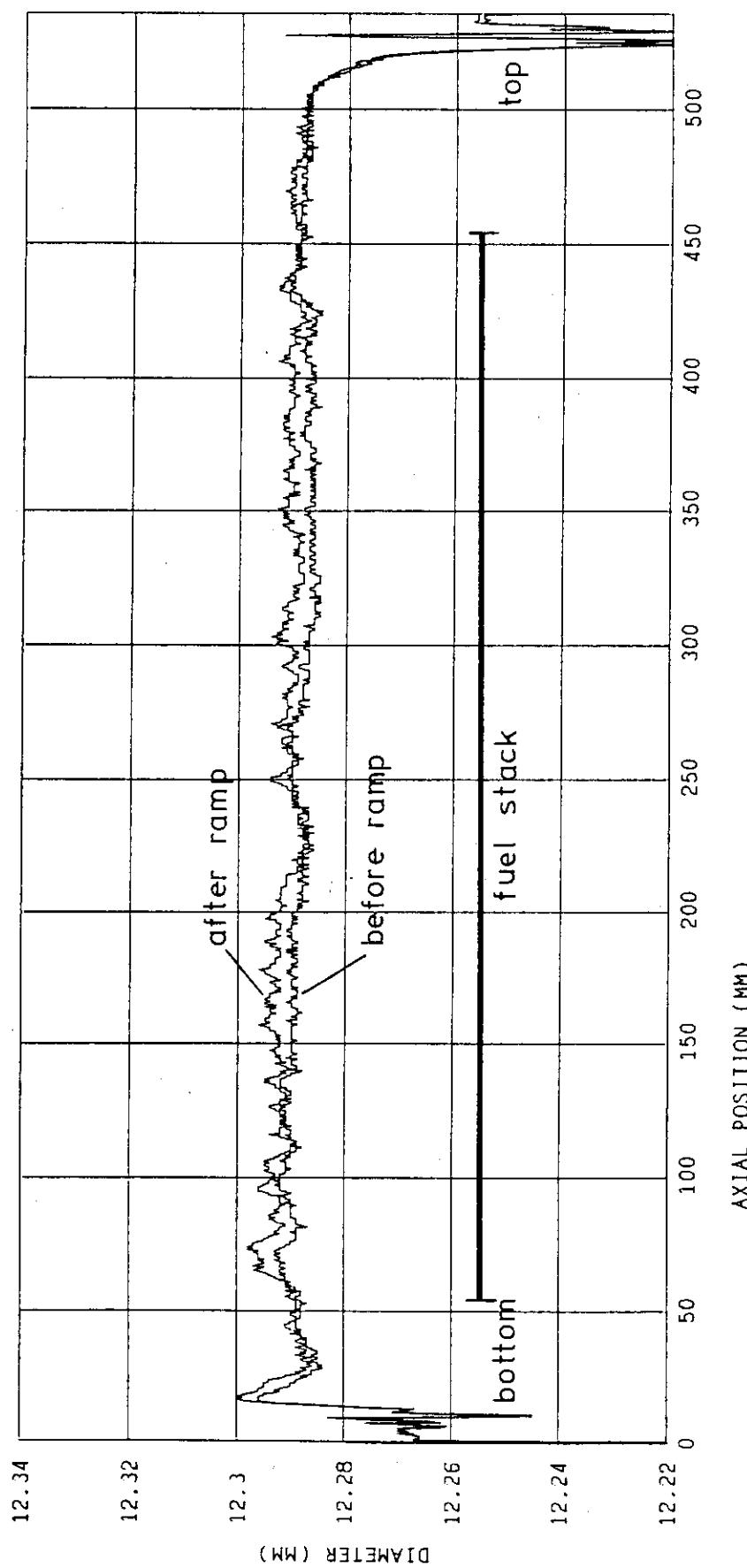
第14図 新燃料を用いた出力急昇実験における燃料中心温度測定値と計算値



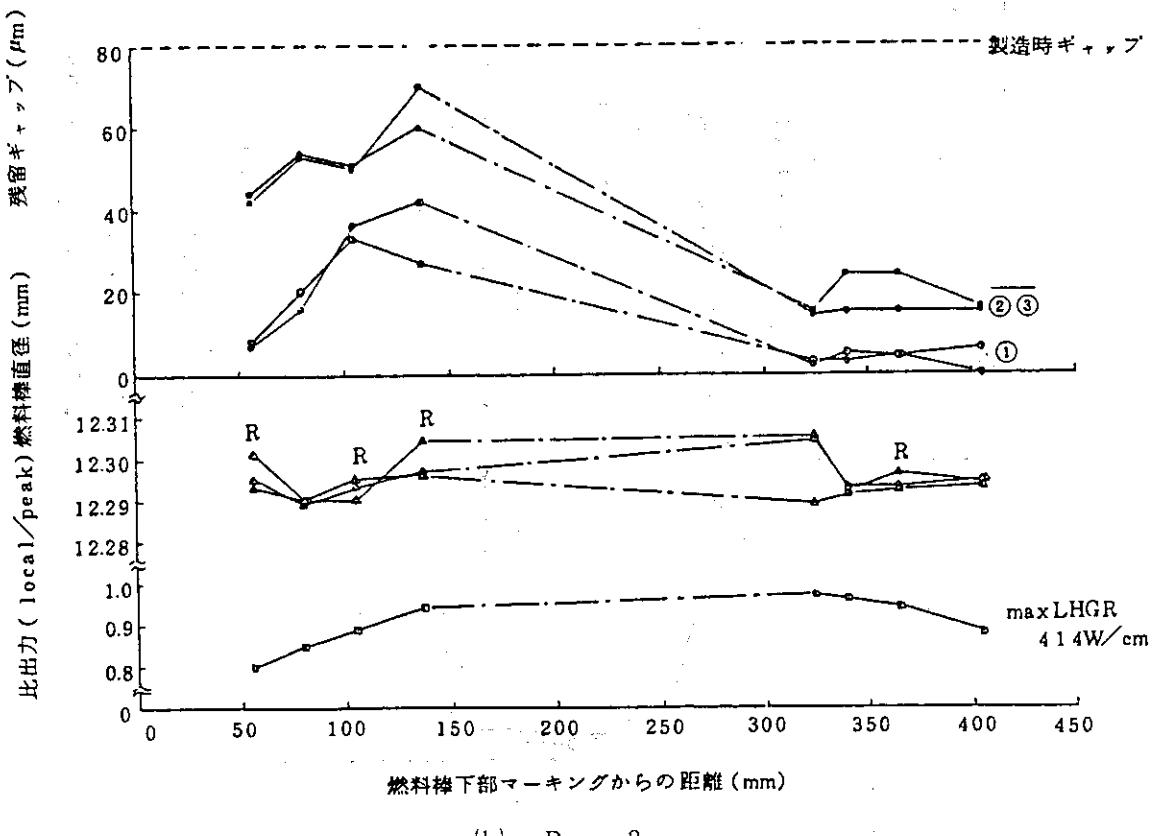
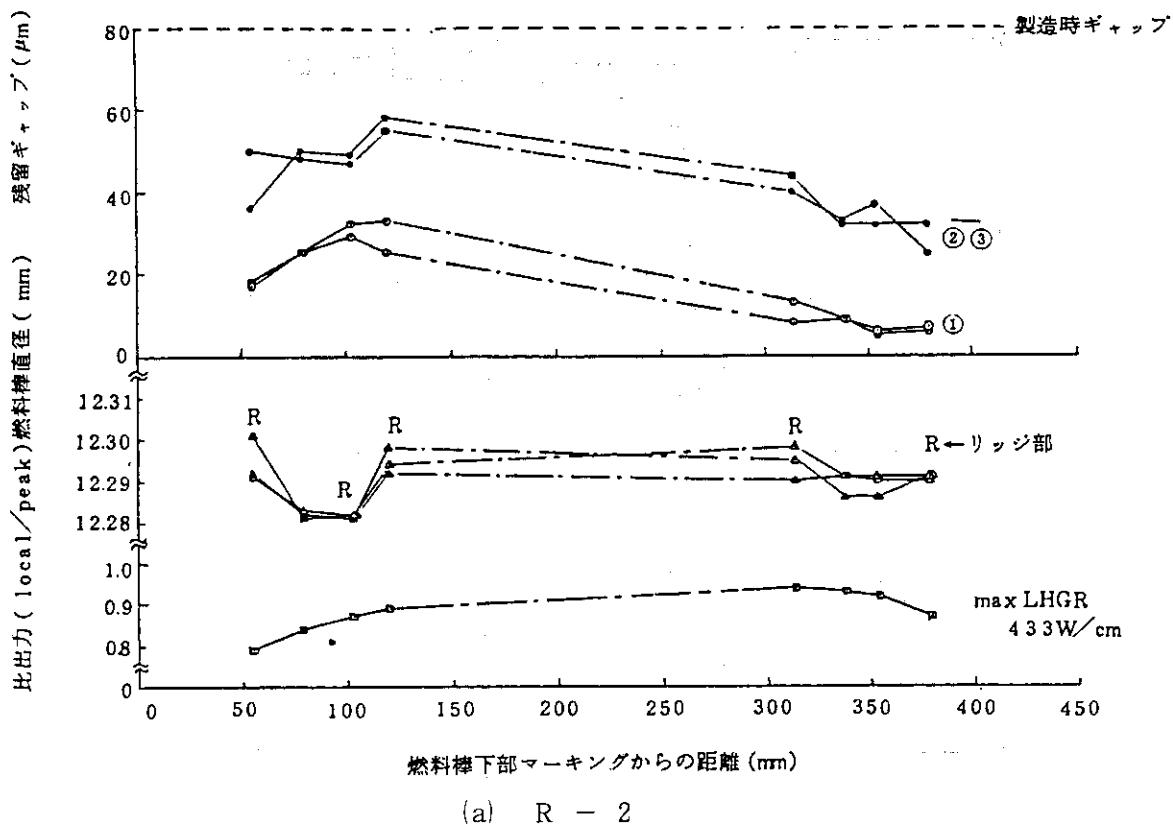
第15図 新燃料の出力急昇試験（R-3）後のグロス・ガンマスキャン結果
(矢印は軸方向ギャップの観察位置を示す。)



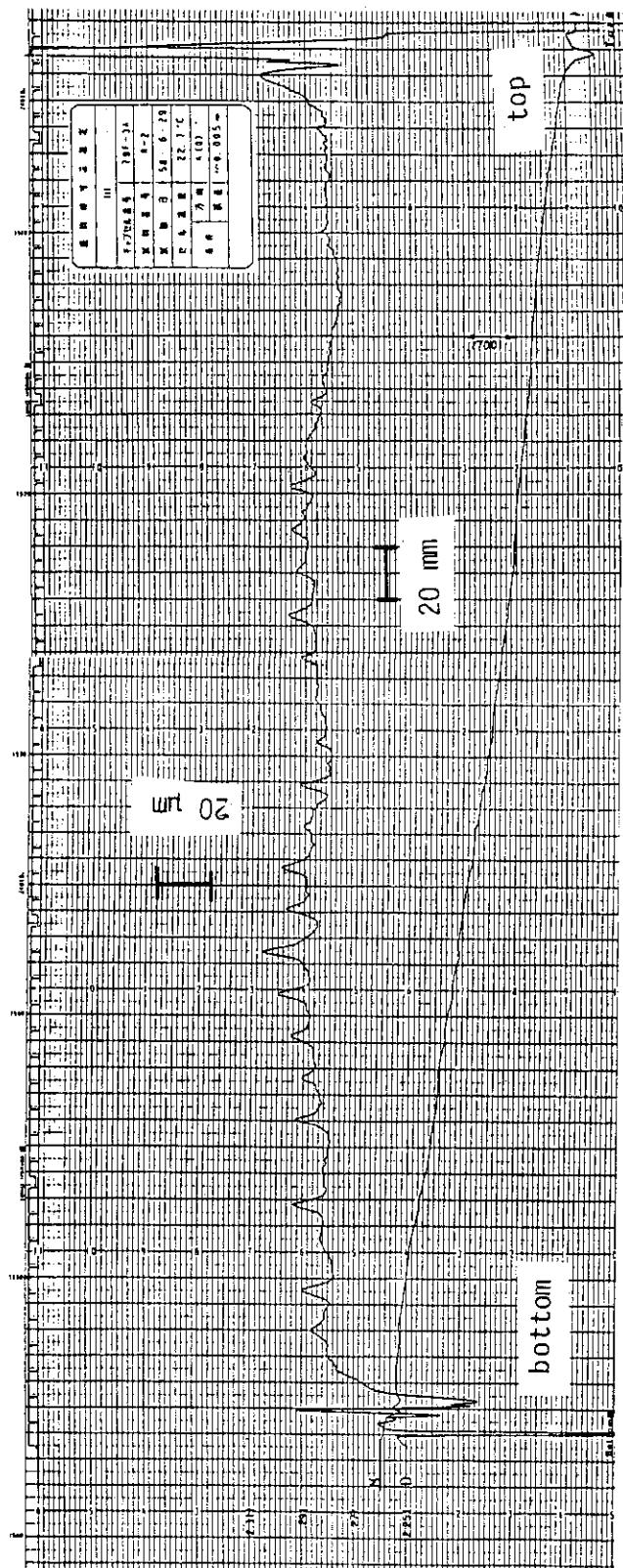
第16図 出力急昇試験における最高出力と燃焼度
(直線はスタズビック出力急昇試験で破損が起った条件を示す。)



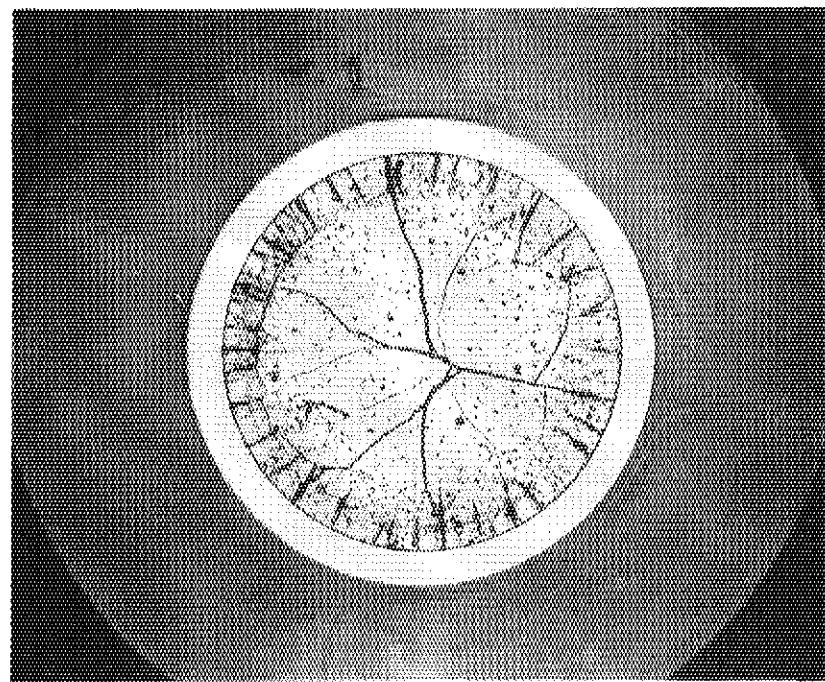
第17図 出力急昇前後の燃料ピンの直径分布 (R - 16)



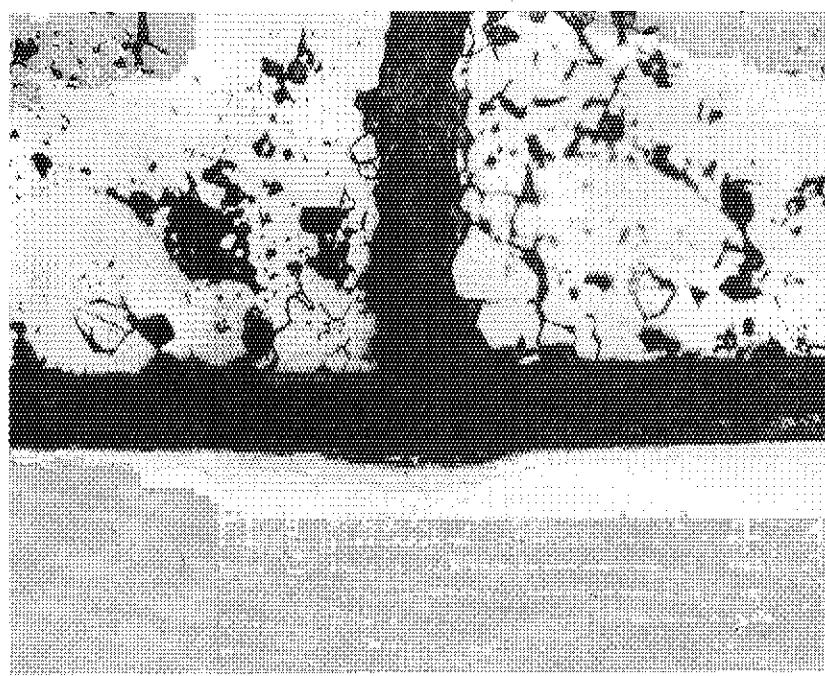
第18図 新燃料の出力急昇後の残留ギャップ分布



第19図 新燃料の出力急昇後の直徑分布 (R-2)



(a) 断面全体写真



(b) ギャップ部拡大写真

第20図 新燃料にヨウ素を添加して出力急昇した後の UO_2 組織

付録 出力急昇時の出力履歴

各燃料ピンの出力急昇リグにおける照射履歴（原則として線出力密度、キャップセル出口温度、燃料ピン伸びからなる）を、図A-1からA-23に示す。（ベース照射後出力急昇したR-12からR-18までのデータを先に入れている。）R-6以後は計算機プロットとなっている。

ここに示した線出力密度は、基本的にはキャップセル冷却水出口温度測定値に基づくものであるが、経時変化はS P N D読みに従ってプロットしてある。これは出口温度が、炉外装置の運転に伴い、入口温度と平行する変動を示すため、出口温度に基づく出力の自動的なプロットが困難であったためである。

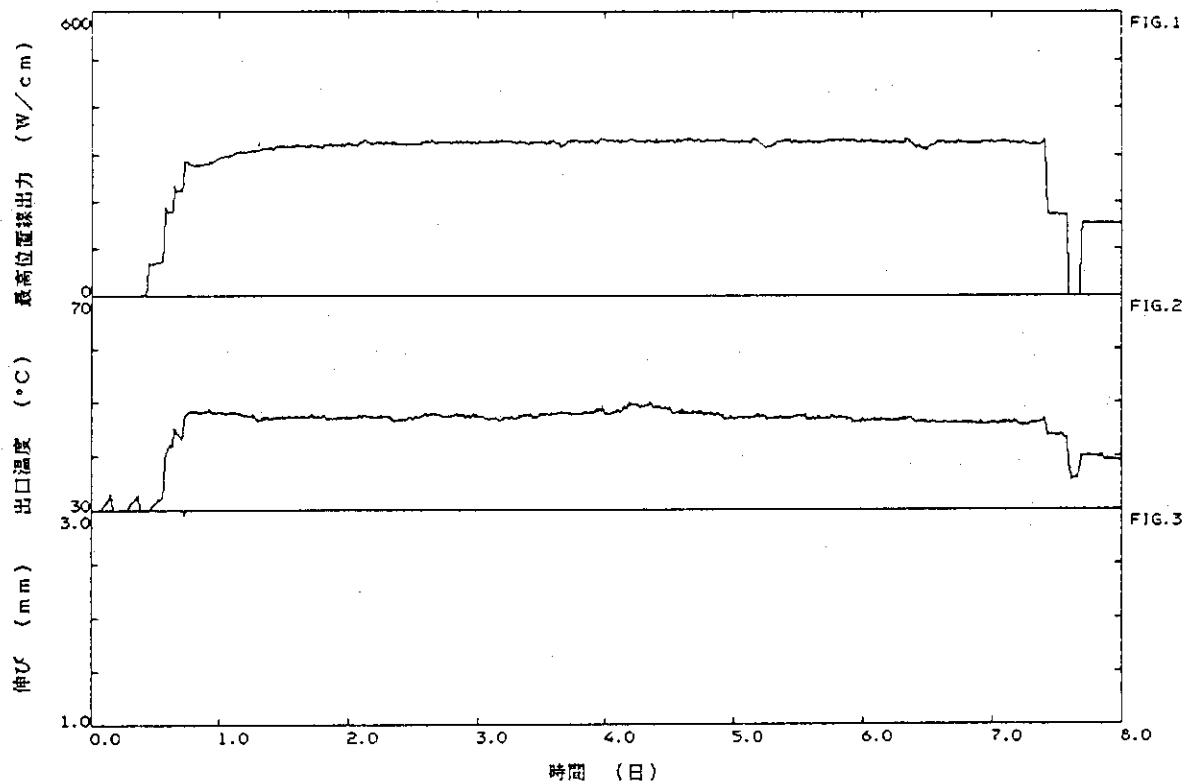


図 A - 1 R - 12 試行 (1985.3.5-12)

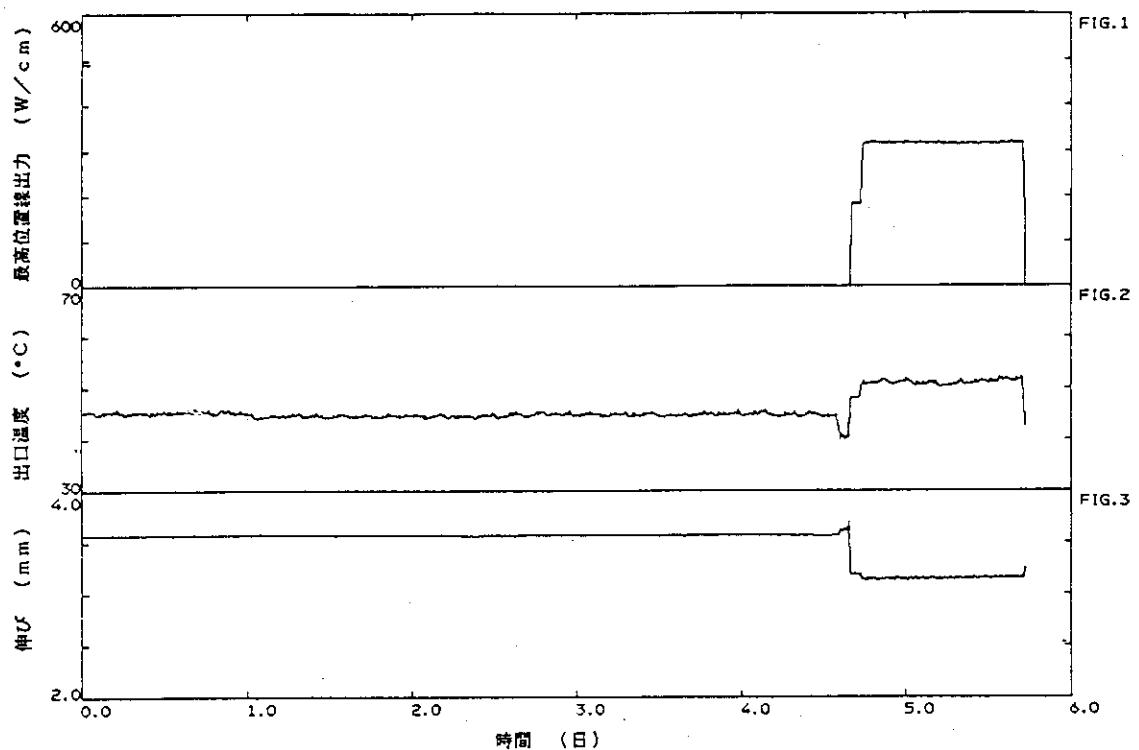


図 A - 2 R - 12 前半 (1985.9.26-31)

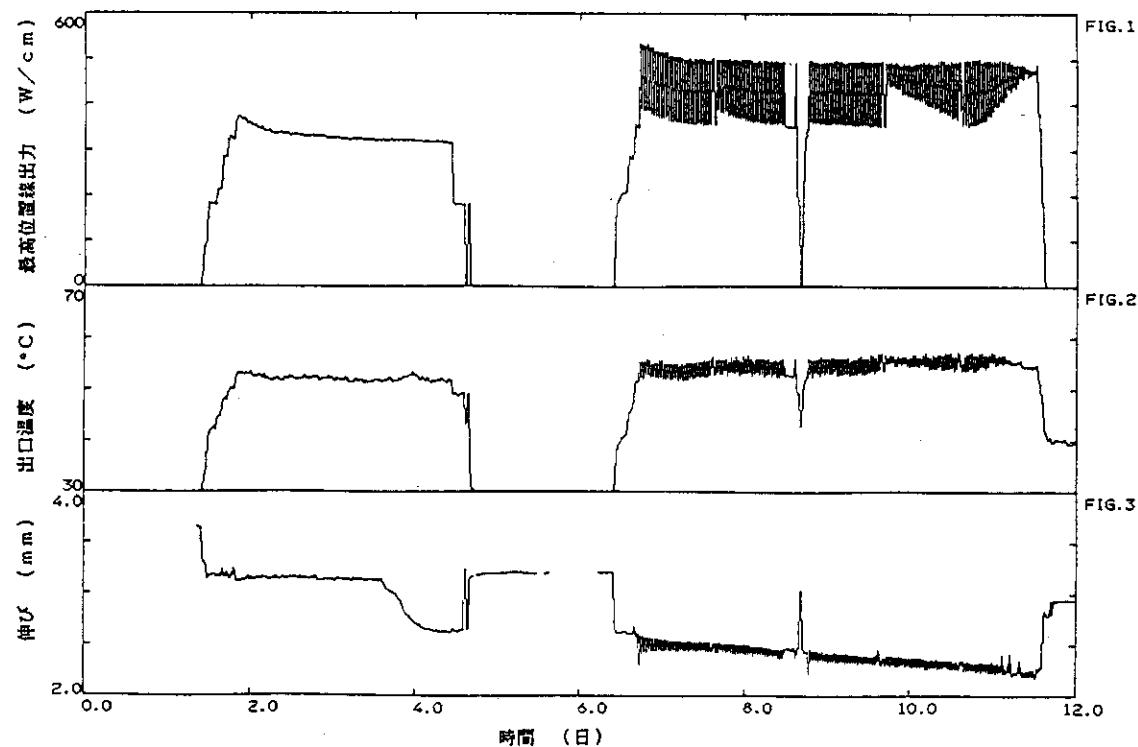


図 A - 3 R - 12後半 (1985.10.3-14)

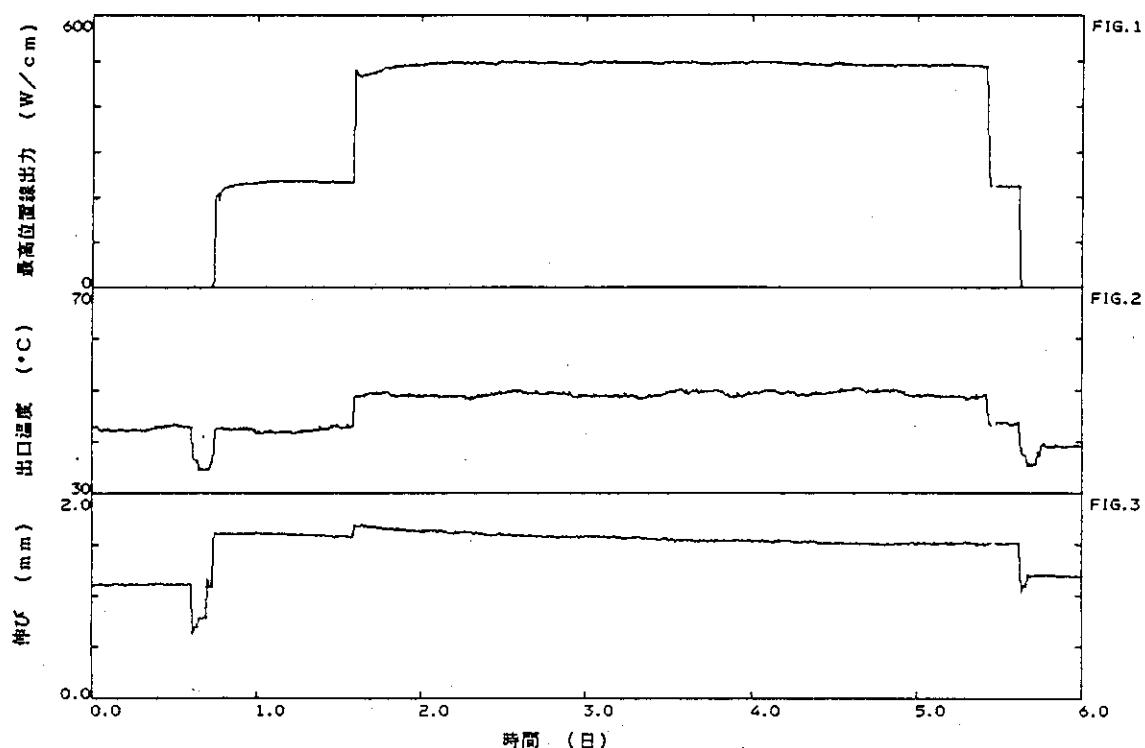


図 A - 4 R - 13 (1985.1.30-2.4)

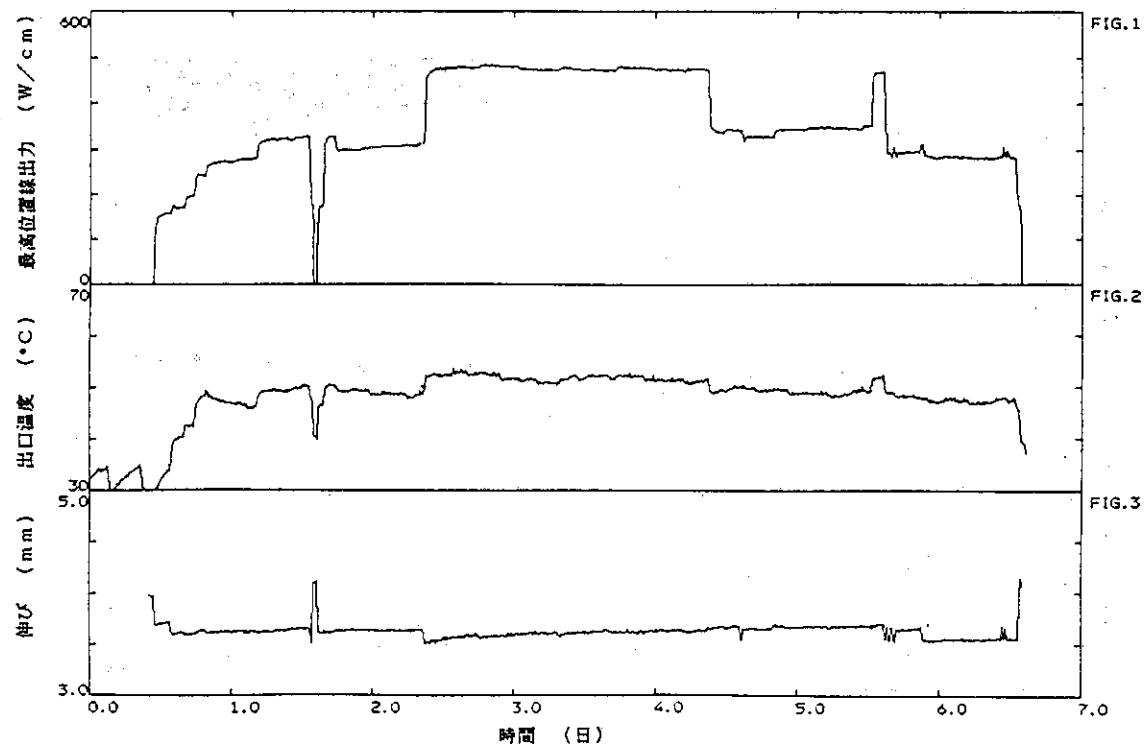


図 A - 5 R - 14 (1985.11.13-19)

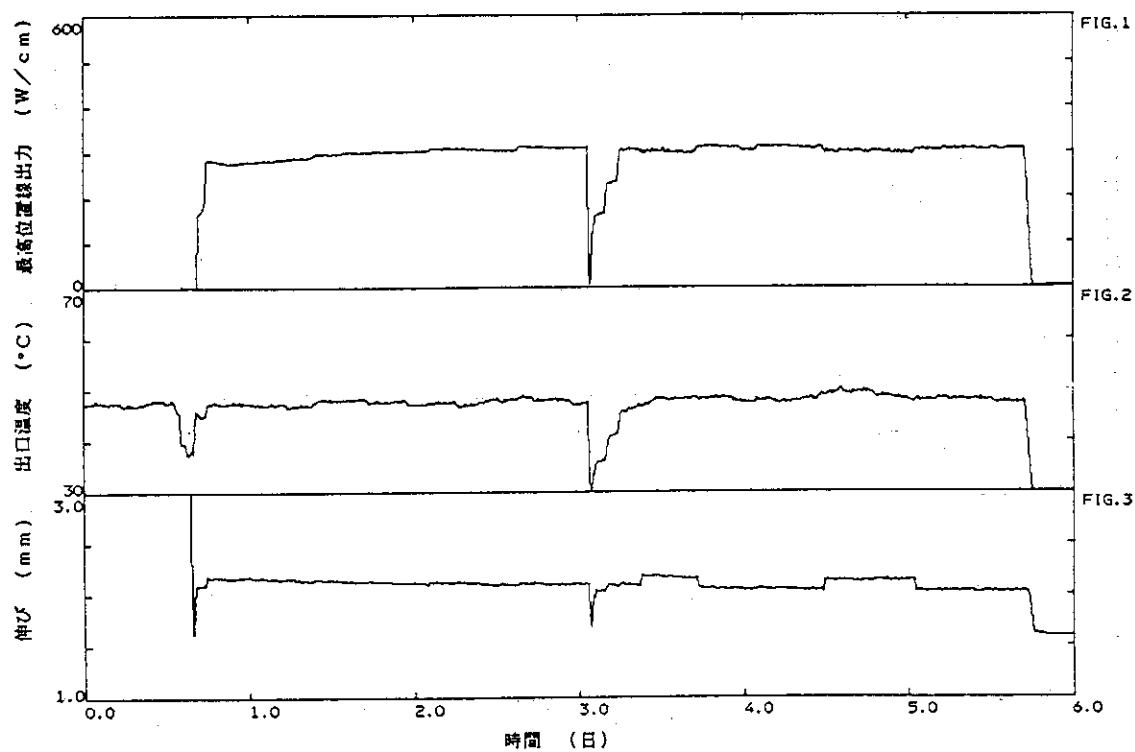


図 A - 6 R - 15前半 (1985.11.19-24)

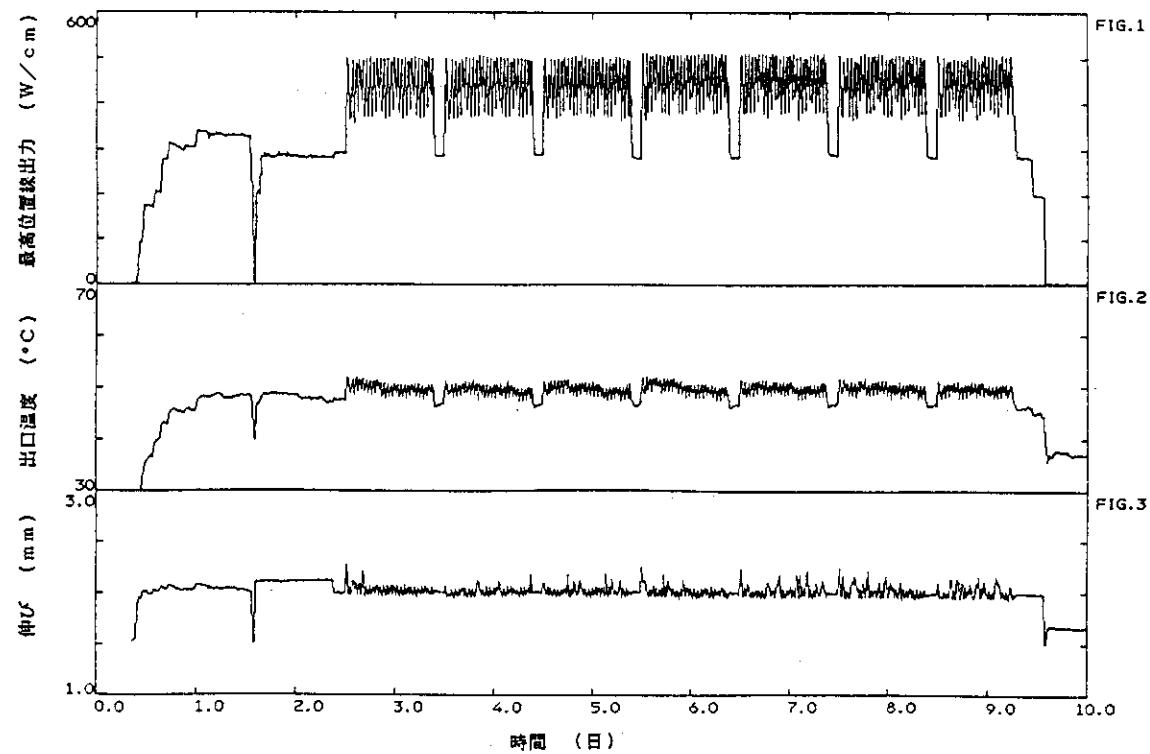


図 A - 7 R - 15 後半 (1985.11.27-12.6)

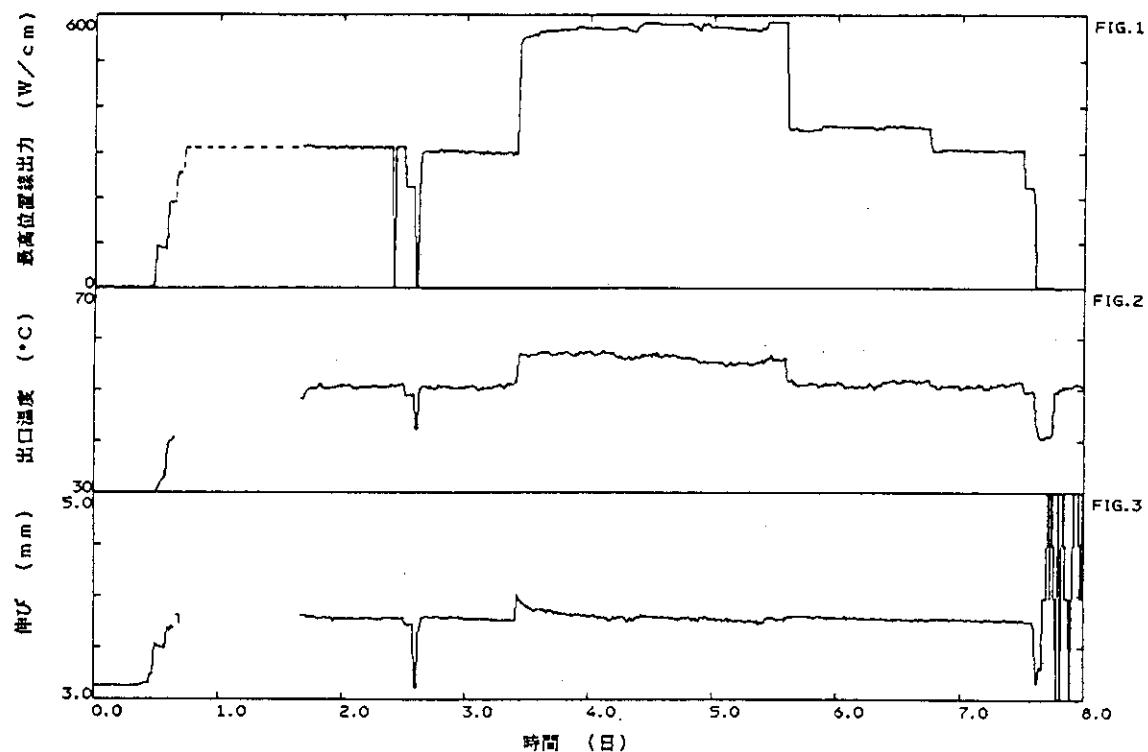


図 A - 8 R - 16 (1986. 5.21-28)

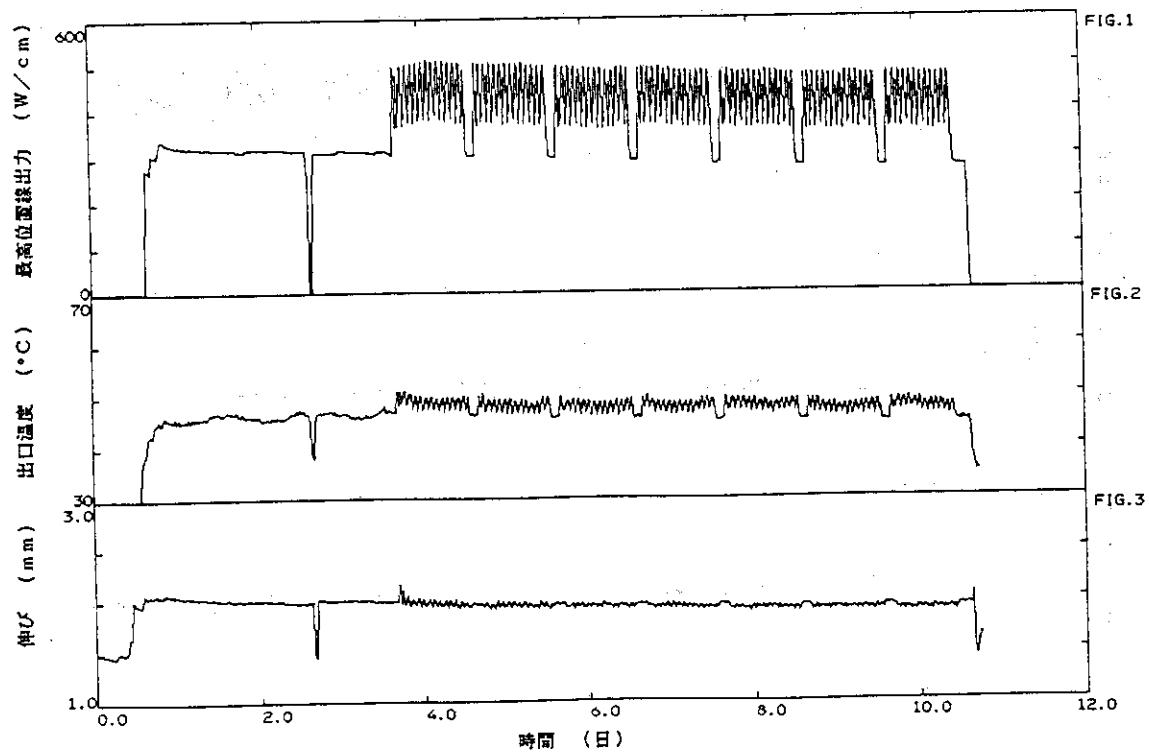


図 A - 9 R - 17 (1986. 1.14 - 25)

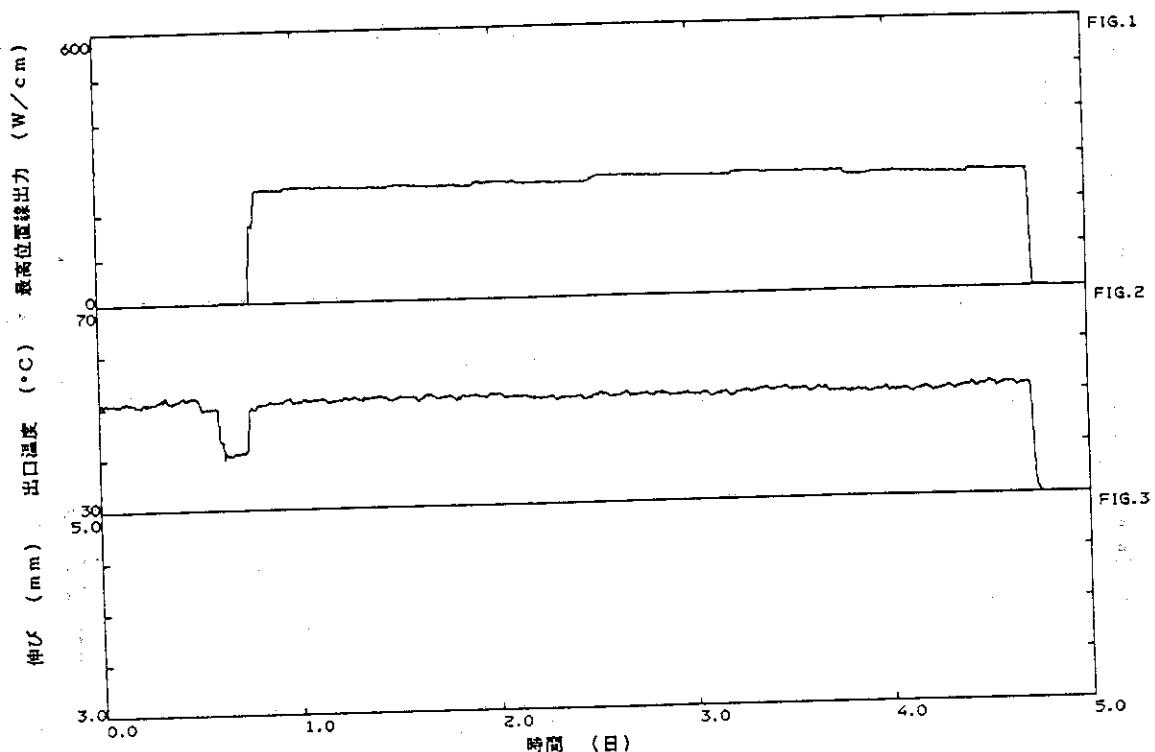


図 A - 10 R - 18前半 (1986. 5.28 - 6. 1)

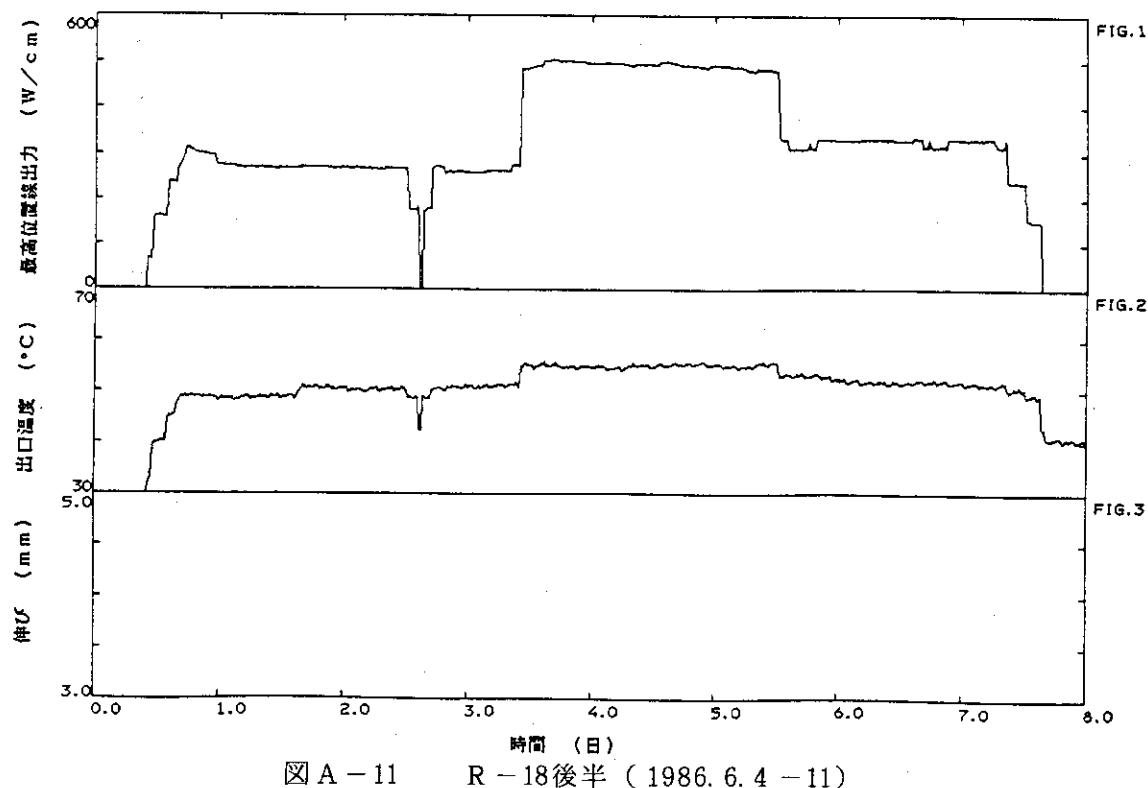


図 A-11 R-18後半 (1986. 6. 4 - 11)

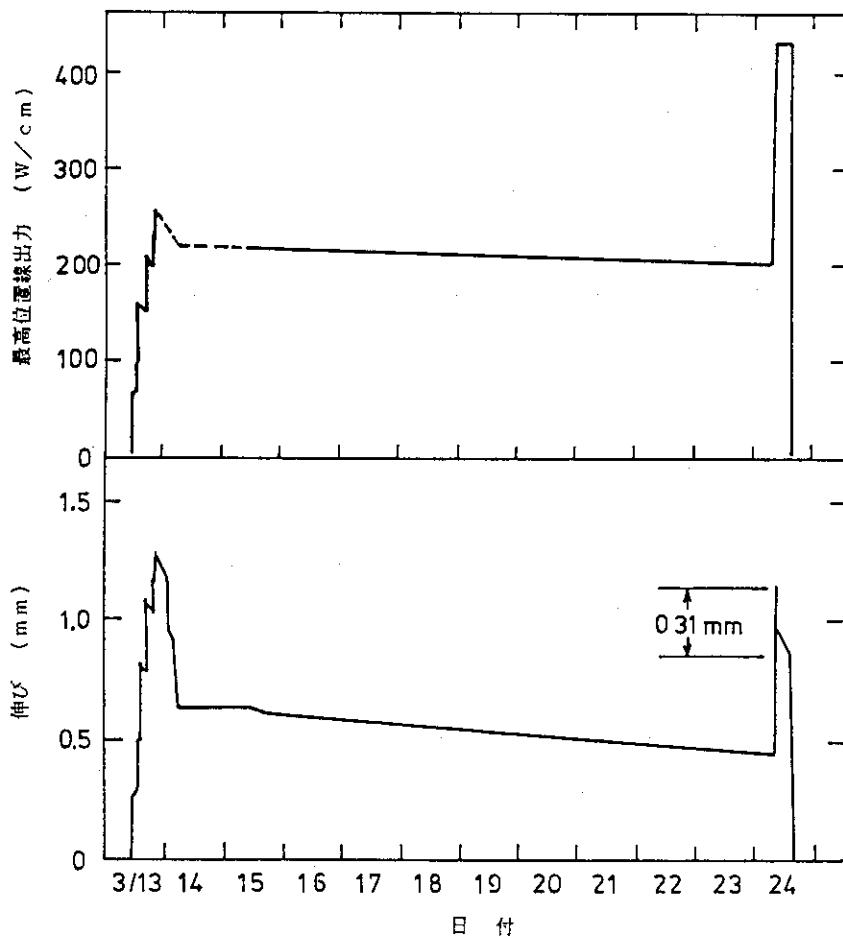


図 A-12 R-2 (1982. 3.13 - 25)

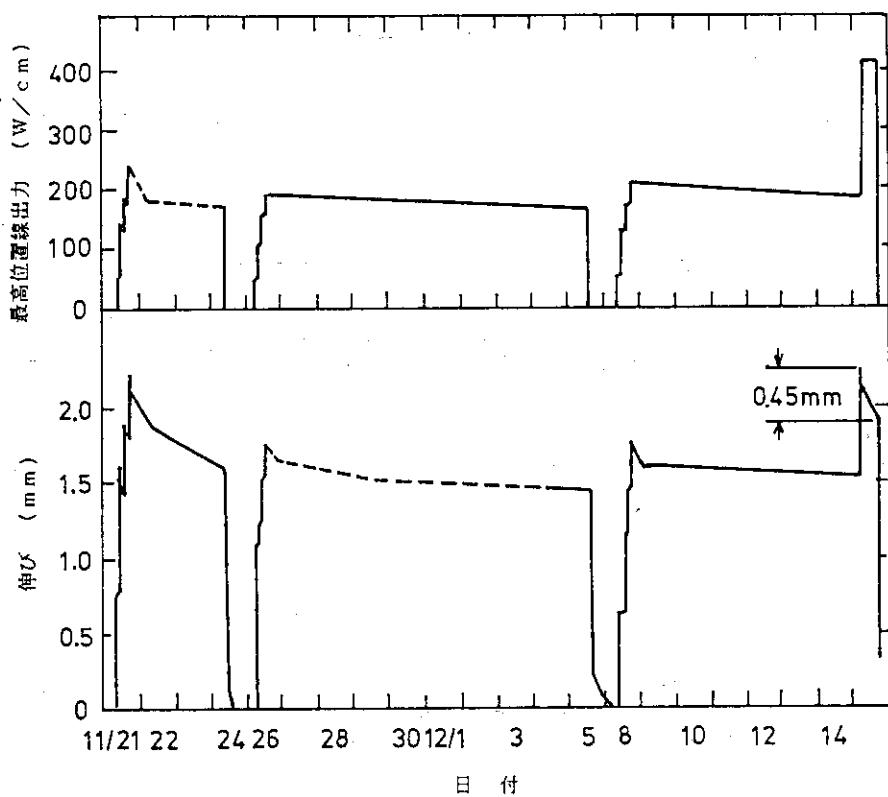


図 A - 13 R - 3 (1982.11.21 - 12.15)

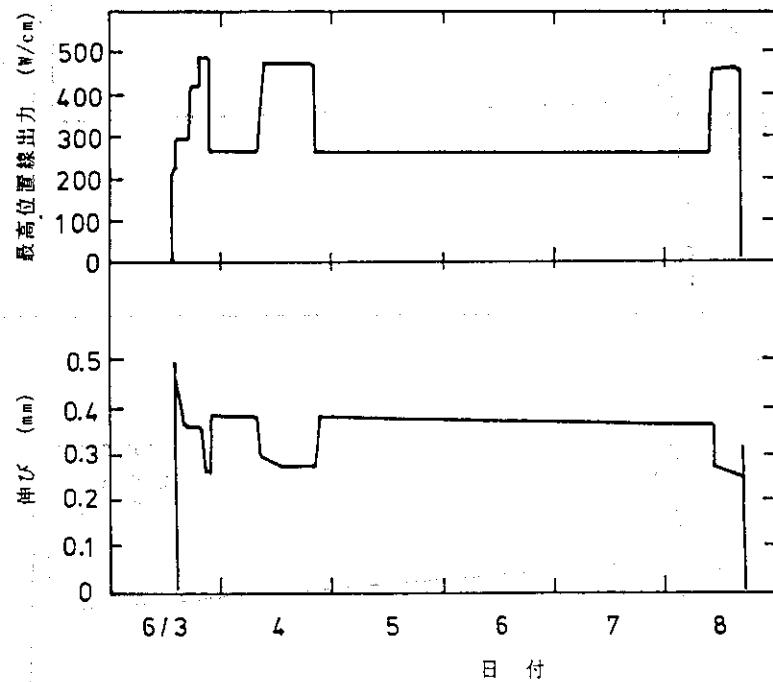


図 A - 14 R - 5 (1983.6.3 - 8)

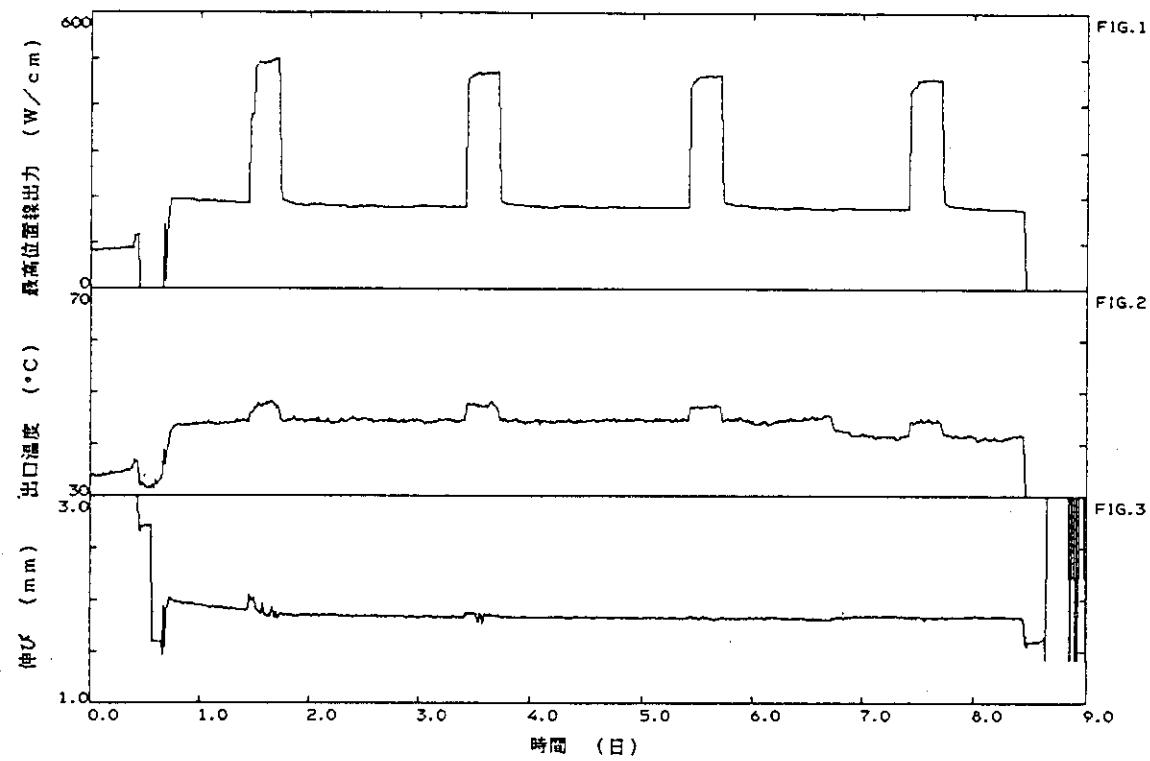


図 A-15 R-6 (1984.3.23-31)

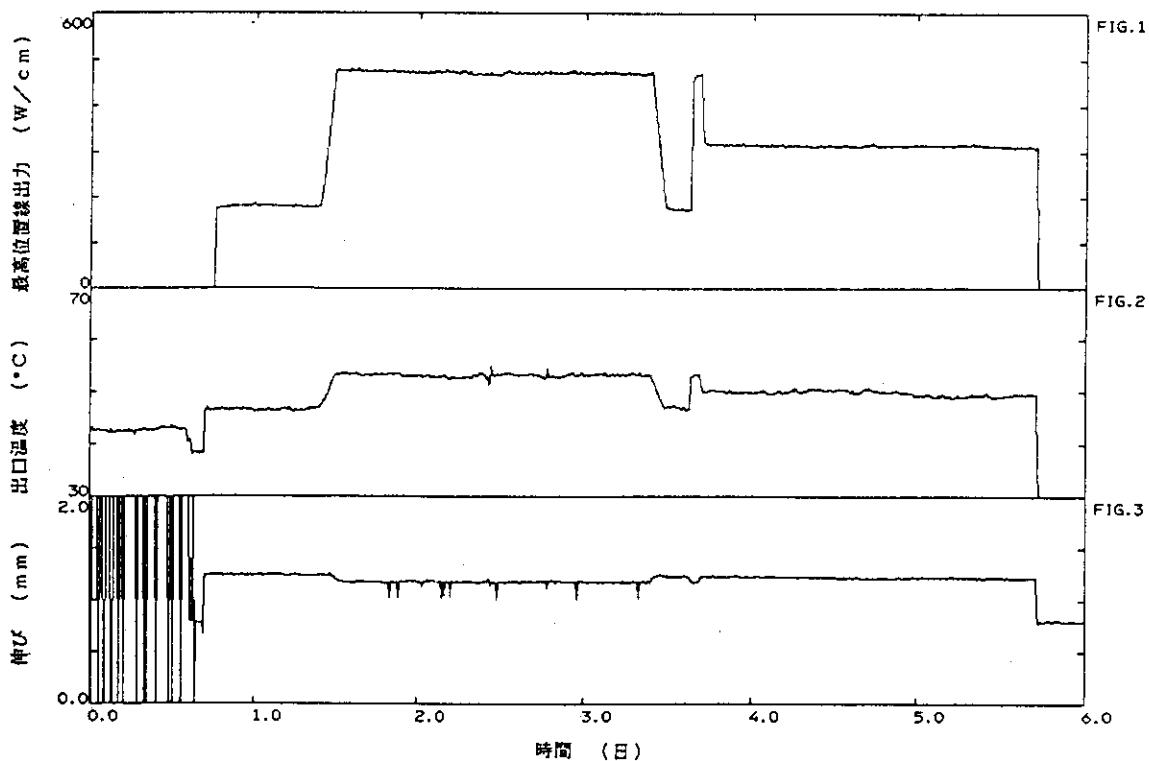


図 A-16 R-8 (1984.3.13-18)

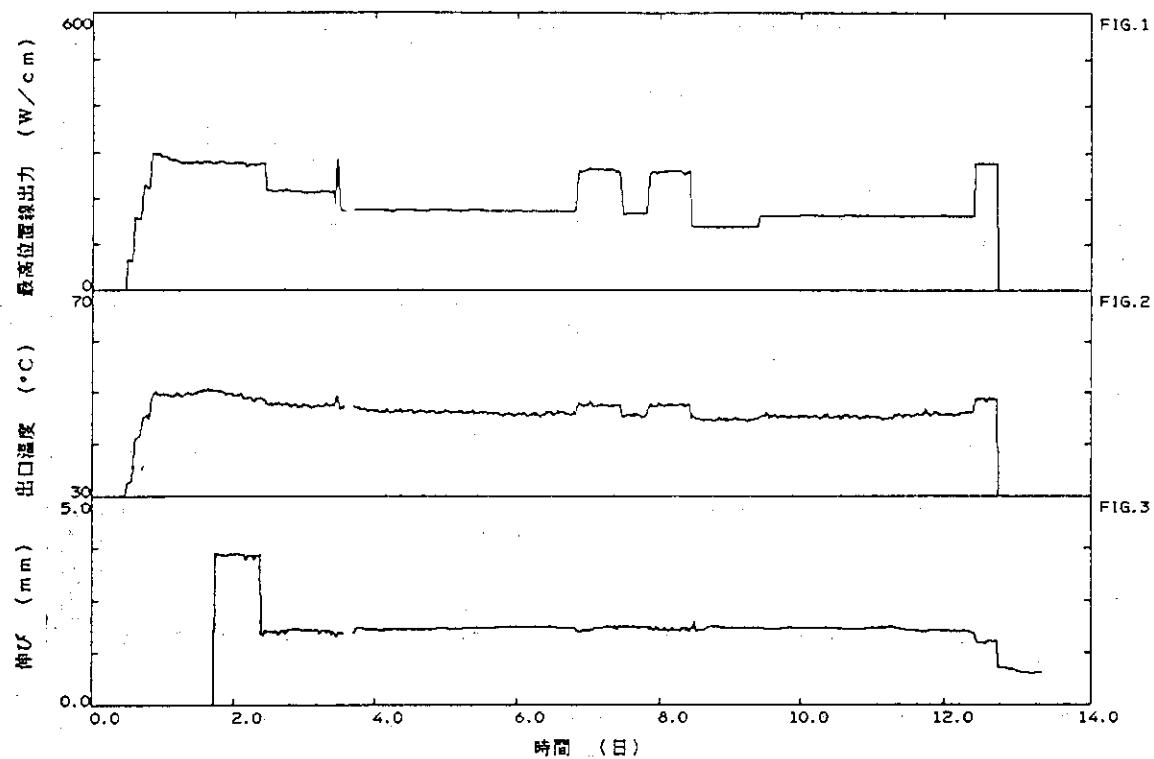


図 A - 17 R - 10 前半 (1984. 5. 8 - 21)

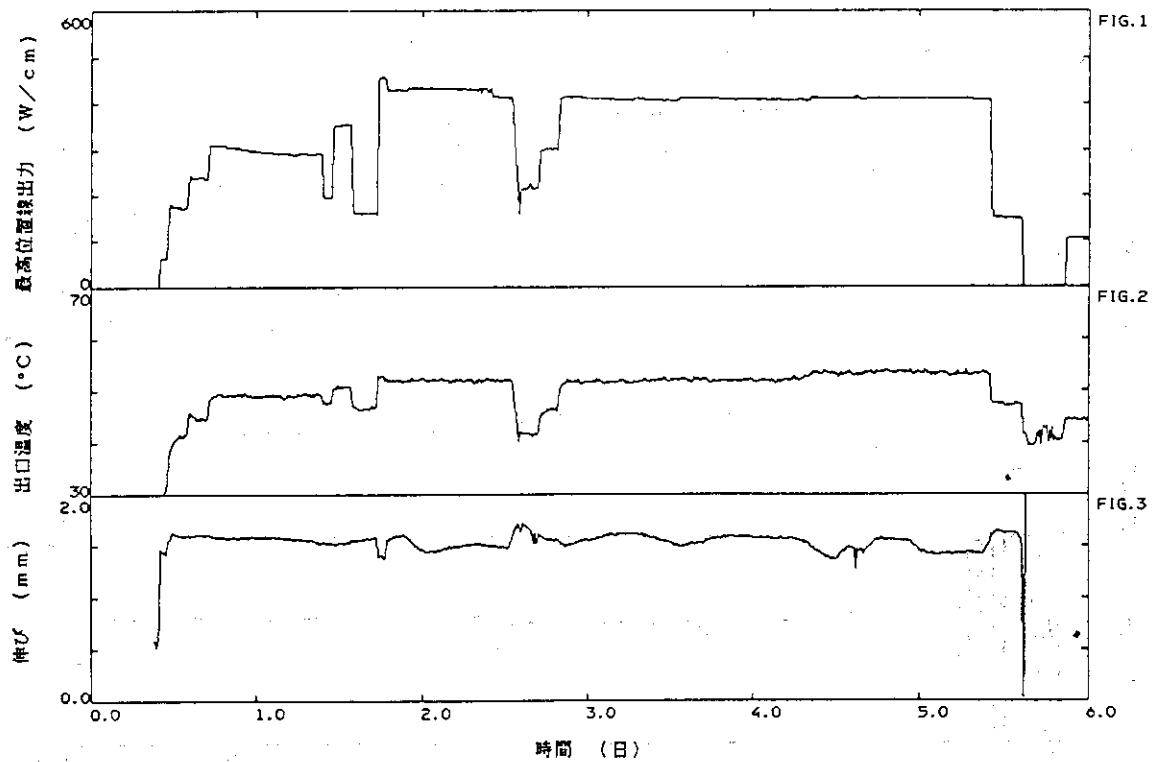


図 A - 18 R - 10 後半 (1984. 5. 23 - 28)

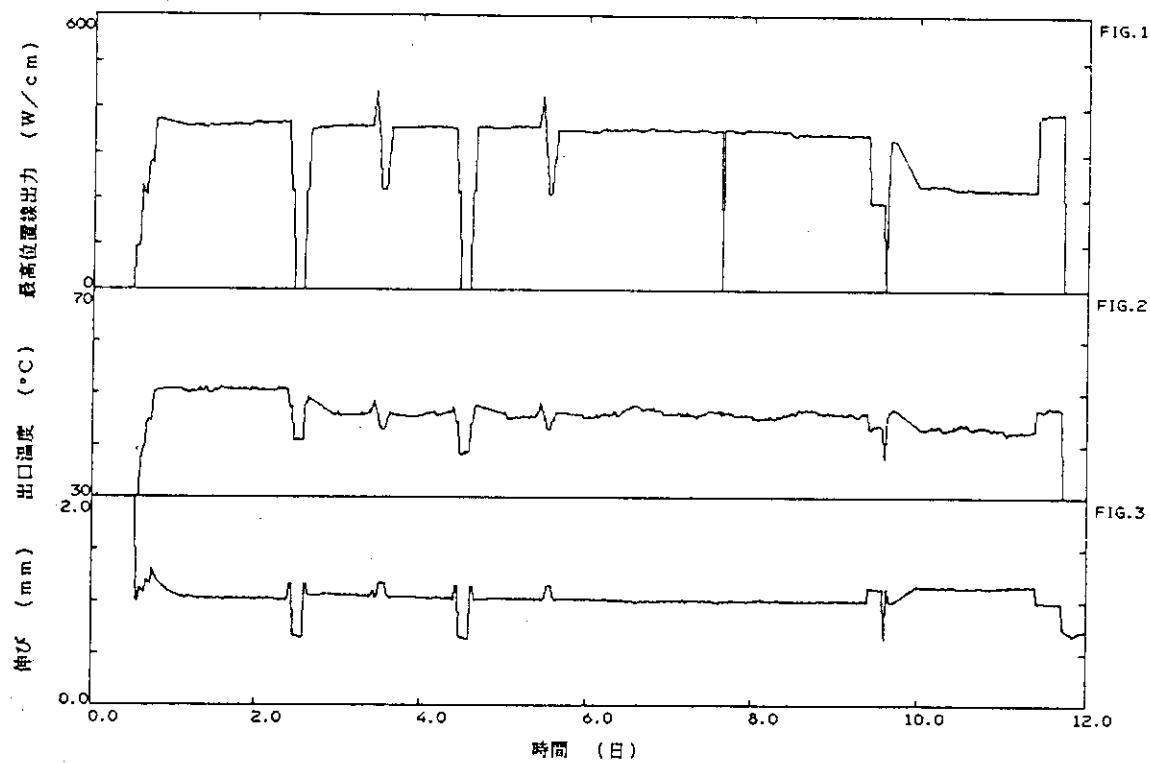


図 A - 19 R - 11 前半 (1985. 1.14 - 25)

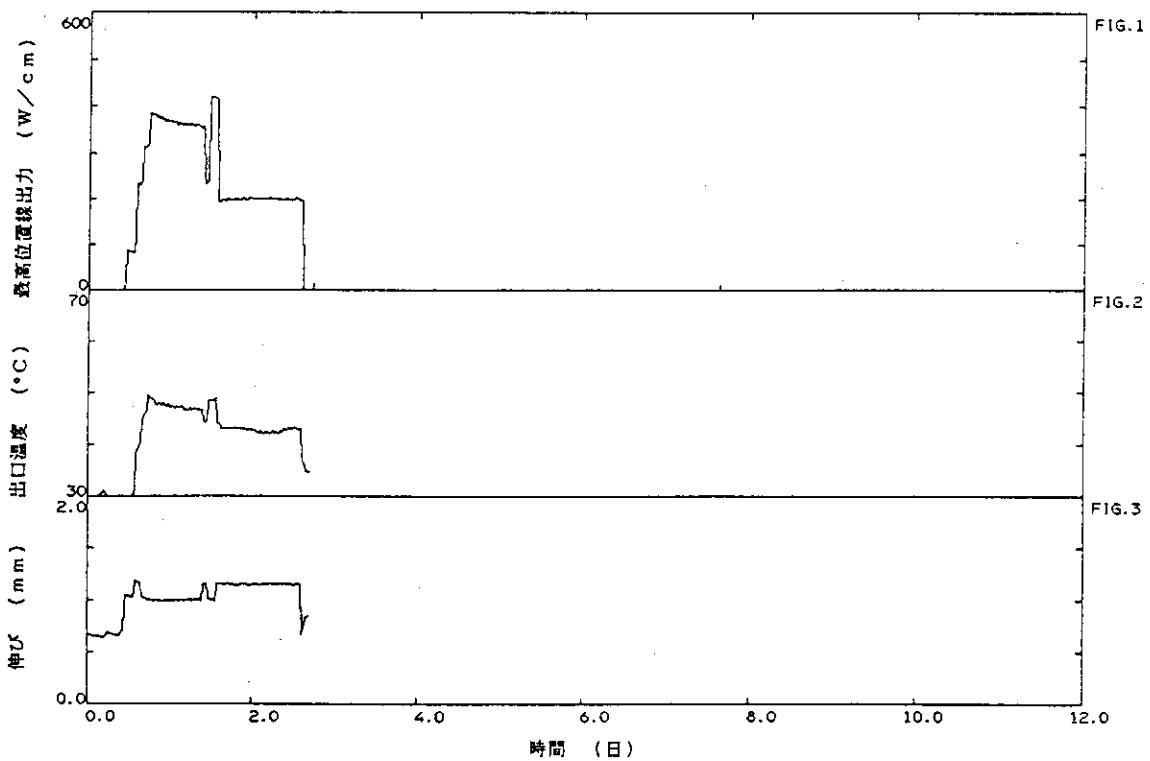


図 A - 20 R - 11 後半 (1985. 1.28 - 30)

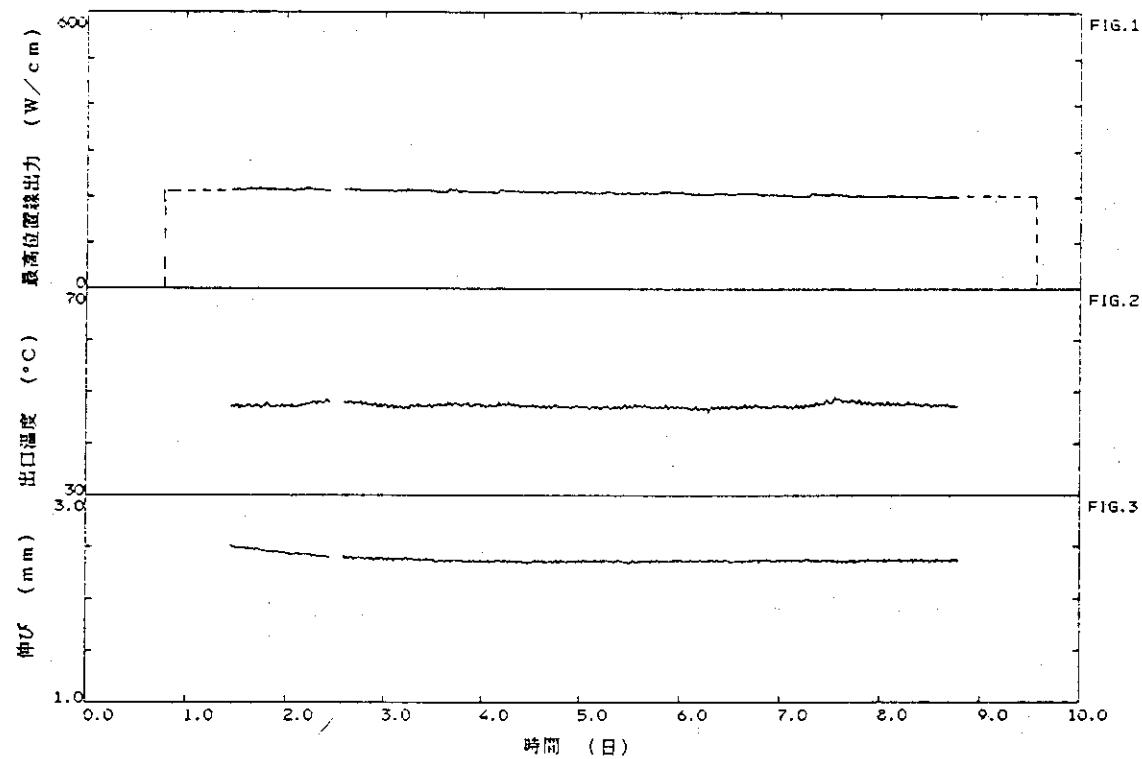


図 A - 21 R - 20前半 (1986. 7.11 - 20)

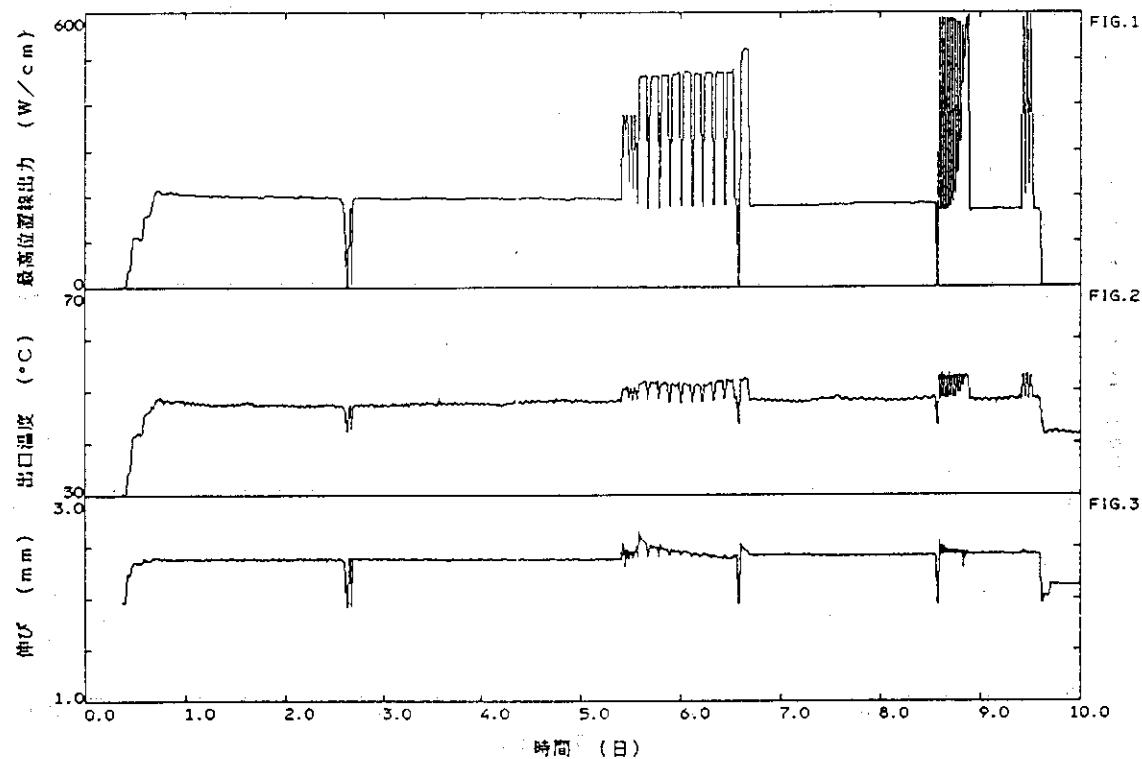


図 A - 22 R - 20後半 (1986. 23 - 8. 1)

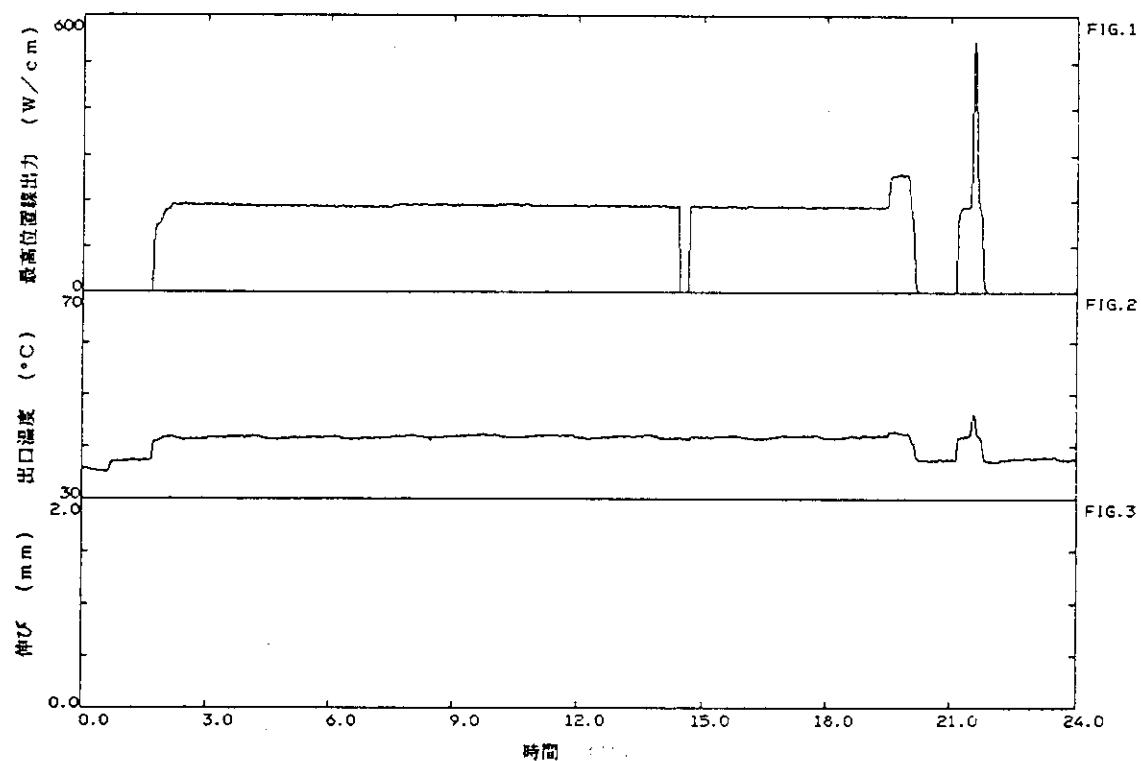


図 A-23 R-21 (1986.12.3-4)