

JAERI-Tech  
2000-027



JP0050348



JRR-3Mシリサイド燃料炉心の特性試験

2000年3月

JRR-3管理課・研究炉利用課

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開している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 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（〒319-1195 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 Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

## JRR-3M シリサイド燃料炉心の特性試験

日本原子力研究所東海研究所研究炉部  
JRR-3 管理課・研究炉利用課

(2000年2月9日受理)

JRR-3Mは、アルミナイド燃料炉心により平成2年3月22日の初臨界から平成11年9月5日まで運転され、それまでの積算熱出力量は、688,719.9MWH に達した。JRR-3Mは、年間の使用済燃料の発生を抑制するためシリサイド燃料炉心に変更した。JRR-3においては、原子炉の安全確認を主眼とする炉物理試験を中心としたJRR-3Mシリサイド燃料炉心特性試験を平成11年9月から平成11年11月の期間に行った。本報告は、これらの特性試験により、シリサイド燃料炉心となったJRR-3Mは、以前のアルミナイド燃料炉心と同程度の性能を有していることが確認され、燃料の効率的利用と原子炉の安定運転達成の見通しが得られた結果について報告する。なお、JRR-3Mのシリサイド燃料炉心による初臨界は、平成11年9月17日14時38分に達成し、その後、JRR-3Mでは、平成11年11月15日から利用運転を開始した。

## Characteristic Experiments of JRR-3M Silicide Core

JRR-3 Operation Division  
Research Reactor Utilization Division

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

(Received February 9, 2000)

The JRR-3M achieved integrated thermal power of 688,719.9 MWH using aluminide ( $UAl_x$ -Al) fuels from its first criticality of March 22, 1990 to September 5, 1999.

In order to reduce the number of spent fuel generated a year, the core was converted to silicide ( $U_3Si_2$ -Al) core. Characteristic experiments of the silicide core, mainly reactor physics experiments, were carried out from September 1999 to November 1999.

This report describes the procedure and results of the experiments. It was verified that the silicide core has almost the same performance as that of the aluminide core and will be operated safely and the silicide fuel will be consumed effectively. The first criticality of the silicide core was achieved at 14:38 on 17<sup>th</sup> September 1999 and the operation for joint-use was started on 15<sup>th</sup> November 1999.

Keywords : JRR-3M, Characteristic Experiment, Silicide Core, First Criticality,

## 目 次

1. はじめに	1
2. 最小臨界測定試験	8
3. 全炉心構成・過剰反応度測定試験	17
4. 中性子束分布測定（燃料領域）試験	36
5. 制御棒反応度値測定試験	51
6. 重水ダンプ効果測定試験	65
7. 減速材温度効果測定試験	70
8. 燃料要素反応度測定試験	75
9. 制御棒落下法試験	78
10. 動特性パラメータ測定試験	81
11. 炉雑音解析法による核出力測定試験	88
12. 自動制御特性試験	107
13. 中性子束分布測定（照射孔）試験	137
14. キセノン反応度測定試験	143
15. 出力上昇試験（飽和値測定試験）	150
16. 崩壊熱測定試験	160
17. 結 び	173
あとがき	175
謝 辞	176
参考文献	176
付録 A 仮設中性子計測系の準備	177
付録 B 中性子源（Sb - Be）	186
付録 C JRR-3シリサイド燃料炉心の特性試験計画の概要	187
付録 D 逆動特性法（IK法）の測定原理	190

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Critical Approach Experiment .....	8
3. Full Core Loading Excess Reactivity Measurement .....	17
4. Neutron Flux Distribution (Fuel Region) Measurement .....	36
5. Control Rod Reactivity Worth Measurement .....	51
6. Heavy Water Dump Effect of Reactivity Measurement .....	65
7. Moderator Temperature Coefficients Measurement .....	70
8. Reactivity of Fuel Element Effect Measurement .....	75
9. Shut-Down Margin Measurement with Rod Drop Method .....	78
10. Kinetic Parameter Measurement .....	81
11. Nuclear Power Measurement with Reactor Noise Analysis Method .....	88
12. Automatic Control System Characteristic Experiment .....	107
13. Neutron Flux Distribution (Irradiation Ports) Measurement .....	137
14. Xe Reactivity Measurement .....	143
15. Power Up Test (Saturation Experiment) .....	150
16. Decay Heat Measurement .....	160
17. Conclusion .....	173
Postscript .....	175
Acknowledgments .....	176
Reference .....	176
Appendix A Temporary Neutron Instrumentation System .....	177
Appendix B Neutron Source .....	186
Appendix C Plan and General Description at Characteristic Tests .....	187
Appendix D Principle of Inverse Kinetics (IK) Method .....	190

## 1. はじめに

### (1) 経緯

JRR-3 (Japan Research Reactor No.3) は、天然金属ウラン燃料重水減速冷却型で原子炉熱出力 10MW の研究用原子炉として、昭和 37 年 9 月 12 日に初臨界を達成した後、昭和 47 年 1 月から昭和 50 年 2 月の間にウラン酸化物燃料重水減速重水冷却型に移行した。その後、昭和 60 年 8 月から工事を開始して、低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型で原子炉熱出力 20MW の研究用原子炉に改造し、初臨界を平成 2 年 3 月 22 日に達成した。改造後の研究用原子炉 (JRR-3M) は、中性子ビーム実験、燃料材料照射などに用いられ、平成 11 年 9 月 5 日までに運転時間累計 36,611 時間 58 分、積算熱出力量 688,719.9MWH である。JRR-3M の主要諸元を Table1.1 に、概要を Fig. 1.1 に示す。

JRR-3M は、燃料の効率的利用を図る目的で、燃料芯材を低濃縮ウラン・アルミニウム分散型合金とした燃料要素 (以下アルミナイド燃料と略す。) から低濃縮ウランシリコンアルミニウム分散型合金とする燃料要素 (以下シリサイド燃料と略す。) に変更した。シリサイド燃料は、ウラン密度約  $4.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  (アルミナイド燃料: 約  $2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )、最大燃焼度 (燃料要素平均の最高値) 60% (アルミナイド燃料: 約 50%) で、燃料要素 1 体当たりに燃料板を 1 枚追加するとともに線径 0.4mm のカドミウムワイヤをアルミニウム合金で被覆した可燃性吸収体を配置した構造である。また、燃料交換方式を、あらかじめ平衡炉心を想定して炉心装荷位置を固定したグループ毎に交換する 5 バッチ分散方式から燃料要素 1 体当たりの燃焼度毎に順次交換する燃焼度管理方式に変更した。シリサイド燃料の主要仕様を Table1.2 に、構造を Fig. 1.2 に示す。

シリサイド燃料炉心の  $^{235}\text{U}$  装荷量は、約 14kg でアルミナイド燃料炉心 (約 9kg) に比べ約 1.6 倍に増加したため、年間の使用済燃料の発生量は約 1/2 に減少するものと推定される。核特性としては、ウラン装荷量が増加するため燃料領域の中性子束が減少し中性子スペクトルが硬くなったが他の特性項目についてはアルミナイド燃料炉心と大差のない解析結果を得た。熱水力特性は、燃料要素内の燃料板間流路が 1 流路増加したことにより 1 流路あたりの流量は約 97% に減少しているが、燃料板の厚さが約 1.52mm から約 1.27mm と薄く、核的熱水路係数も約 97% に減少していることから、最小 DNBR はアルミナイド燃料炉心と同程度であり、燃料の許容設計限界 (DNBR1.5) に余裕のある結果であった。アルミナイド燃料炉心とシリサイド燃料炉心を比較した核設計結果を Table1.3 に、熱水力設計結果を Table1.4 に示す。

シリサイド燃料は、シリサイド燃料への変更に係る原子炉設置変更許可<sup>1)</sup>を平成 10 年 1 月に取得し、その後、初装荷用のシリサイド燃料の製作を行い平成 11 年 2 月に搬入した。

### (2) 特性試験

JRR-3Mシリサイド燃料炉心の特性試験は、試験要領書にもとづき、JRR-3 管理課を中心に研究炉利用課、研究炉技術管理課、施設放射線管理第 1 課及び施設第 1 課の協力のもとに行われた。なお、JRR-3Mシリサイド燃料炉心の特性試験に係る、各試験項目毎の実績工程を Table1.5 に、仮設中性子計測系と中性子源について付録 A と付録 B に及び計画の概要を付録 C に示す。

以下、特性試験項目毎に目的、方法、結果、評価について示す。

Table 1.1 JRR-3M 主要諸元

目的	ビーム実験、燃料材料照射、RI 生産
型式	低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型
臨界年月日	平成 2 年 3 月 22 日
最大熱出力	2 0 MW
最大熱中性子束	$3 \times 10^{18} (\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
炉心の形状・大きさ	円柱形・直径：0. 6 m、高さ：0. 7 5 m
制御棒	ハフニウム
運転形態	サイクル運転、2 6 日連続/サイクル

Table 1.2 シリサイド燃料の主要仕様

燃料要素		単位	標準型燃料要素	フォロワ型燃料要素
項目				
外形		$\times 10^{-3} \text{m}$	約 76.2 $\times$ 76.2 $\times$ 1150	約 64 $\times$ 64 $\times$ 880
<sup>235</sup> U濃縮度		w%	約 20	約 20
<sup>235</sup> U含有量		$\times 10^{-3} \text{kg}$	約 472	約 302
ウラン密度		$\times 10^3 \text{kg/m}^3$	約 4.8	約 4.8
芯材	厚さ	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 0.51	約 0.51
	幅	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 62	約 49
	長さ	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 750	約 750
被覆	厚さ	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 0.38	約 0.38
	厚さ	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 1.27	約 1.27
	幅	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 71	約 60
燃料板	長さ	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 770	約 770
	冷却材流路数	----	20	16
	冷却材流路厚さ	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 2.35	約 2.40
燃料心材	----	ウランシリコンアルミニウム分散型合金 ( $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ )		
被覆材	----	アルミニウム合金 A6061, AG3NE または相当品		
可燃性 吸収体	種類	----	カドミウム	カドミウム
	線径	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 0.4	約 0.4
	長さ	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 750	約 750
	被覆材種類	----	アルミニウム合金	アルミニウム合金
	被覆材厚さ	$\times 10^{-3} \text{m}$	約 0.20	約 0.20
	本数	本	42	34
最大燃焼度	%	燃料要素平均 60%		

注：AG3NE は、仏国で開発されたアルミニウム合金である。



Table1.3 核設計結果の比較

項目	単位	アルミナイド燃料炉心	シリサイド燃料炉心
燃料交換方式	----	5バッチ分散方式	燃焼度管理方式
燃料最大取り出し燃焼度	%	約50	60
最大過剰反応度 初装荷炉心	$\Delta k/k$	約0.16 約0.11(平衡炉心初期) 約0.09(平衡炉心末期)	約0.18 0.20(過剰反応度最大炉心) 約0.09(平衡炉心)
全制御棒反応度価値 初装荷炉心	$\Delta k/k$	約0.31 約0.33(平衡炉心初期) 約0.35(平衡炉心末期)	約0.27 0.28(過剰反応度最大炉心) 約0.31(平衡炉心)
炉停止余裕 初装荷炉心	$\Delta k/k$	約0.14 約0.22(平衡炉心初期) 約0.26(平衡炉心末期)	約0.13 0.13(過剰反応度最大炉心) 約0.22(平衡炉心)
ワロッド・スタック・ジーン 初装荷炉心	$\Delta k/k$	約0.04 約0.11(平衡炉心初期) 約0.15(平衡炉心末期)	約0.04 0.03(過剰反応度最大炉心) 約0.11(平衡炉心)
減速材温度係数 初装荷炉心	$\times 10^{-4}$ $\Delta k/k/^\circ C$	( $0^\circ C \sim 100^\circ C$ ) -1.3~-4.0 -1.5~-3.3(平衡炉心初期)、 -1.5~-3.1(平衡炉心末期)	( $0^\circ C \sim 200^\circ C$ ) -2.3~-4.2 -2.1~-3.2(過剰反応度最小炉心)、 -2.3~-3.5(平衡炉心)
減速材ボイド係数 初装荷炉心	$\times 10^{-3}$ $\Delta k/k/^\circ C$	(0%~50%) -4.0~-17 -3.0~-12(平衡炉心初期)、 -3.0~-10(平衡炉心末期)	(0%~50%) -4.1~-7.0 -2.7~-4.8(過剰反応度最小炉心)、 -2.9~-5.1(平衡炉心)
ドプラ係数 初装荷炉心	$\times 10^{-5}$ $\Delta k/k/^\circ C$	( $0^\circ C \sim 400^\circ C$ ) -2.5~-1.7 -2.6~-1.7(平衡炉心初期)、 -2.6~-1.7(平衡炉心末期)	( $0^\circ C \sim 200^\circ C$ ) -3.4~-1.8 -3.0~-2.2(過剰反応度最小炉心)、 -2.5~-2.3(平衡炉心)
重水ダンプ反応度価値 (全量排出時)	$\Delta k/k$	約0.06	約0.07
炉心平均中性子束 初装荷炉心	$\times 10^{18}$ ( $m^{-2} \cdot s^{-1}$ )	高速群・熱外群・熱群 約1.9・約0.9・約0.8	高速群・熱外群・熱群 約1.4・約1.0・約0.5
即発中性子寿命 初装荷炉心	$\times 10^{-4}$ s	約1.2	約1.5
実行遅発中性子発生割合 初装荷炉心	$\times 10^{-3}$ ---	約7.6	約7.2

Table1.4 熱水力設計結果の比較

項目	単位	アルミナイド燃料炉心	シリサイド燃料炉心
主要な熱的仕様 炉心熱出力 平均出力密度 1次冷却材流量 1次冷却材炉心入口温度 1次冷却材炉心出口温度 炉心入口圧力 炉心全伝熱面積 平均熱流速	MW kW/l m <sup>3</sup> /h °C °C MPa m <sup>2</sup> ×10 <sup>4</sup> W/m <sup>2</sup>	約 20 約 156 約 2400 約 35 約 44 約 15.19 約 53 約 38	約 20 約 155 約 2400 約 35 約 44 約 15.19 約 56 約 36
核的熱水路係数 半径方向出力分布因子；F <sub>R</sub> 局所的出力分布因子；F <sub>L</sub> 軸方向出力分布因子；F <sub>Z</sub>	---	約 2.19 (F <sub>R</sub> × F <sub>L</sub> ) 約 1.42	約 2.25 (F <sub>R</sub> × F <sub>L</sub> ) 約 1.34
工学的熱水路係数 冷却水バルブ温度上昇因子 フィルム温度上昇因子 熱流速因子	----	約 1.33 約 1.37 約 1.17	約 1.32 約 1.36 約 1.16
定格出力運転時の熱特性 燃料板表面最高温度 平均 ホットスポット 燃料芯材最高温度 平均 ホットスポット 沸騰開始温度 ホットスポット 最小 DNBR	°C	約 59 約 101 約 62 約 107 約 107 約 2.1	約 58 約 99 約 61 約 107 約 113 約 2.5

Table1.5 JRR-3シリアサイド燃料炉心の特性試験実績工程

番号	項目	平成11年																															
		9月					10月					11月					12月																
	年月日	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
1	臨界試験準備																																
2	最小臨界測定試験																																
3	全炉心構成・過剩反応度測定試験																																
4	中性子束分布測定(燃料領域)試験																																
5	制御棒反応度値測定試験																																
6	重水タンク効果測定試験																																
7	減速材温度効果測定試験																																
8	燃料要素反応度測定試験																																
9	制御棒落下試験																																
10	動特性パラメータ測定試験																																
11	炉雑音解析法による核出力測定試験																																
12	自動制御特性測定試験																																
13	中性子束分布測定(照射孔)試験																																
14	キセノン反応度測定試験																																
15	出力上昇試験(飽和値測定試験)																																
16	解凍熱測定試験																																

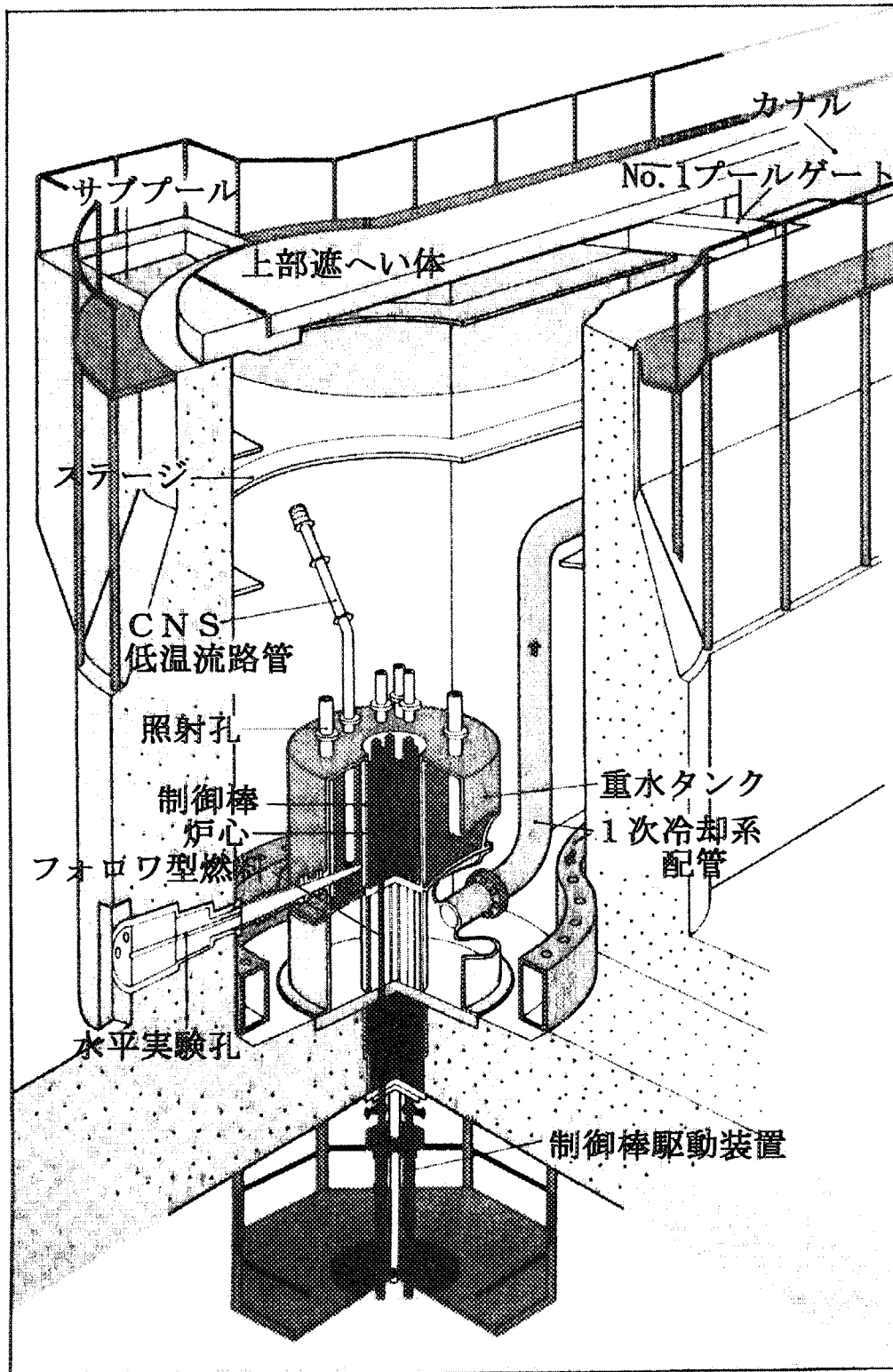


Fig. 1.1 JRR-3M の概要

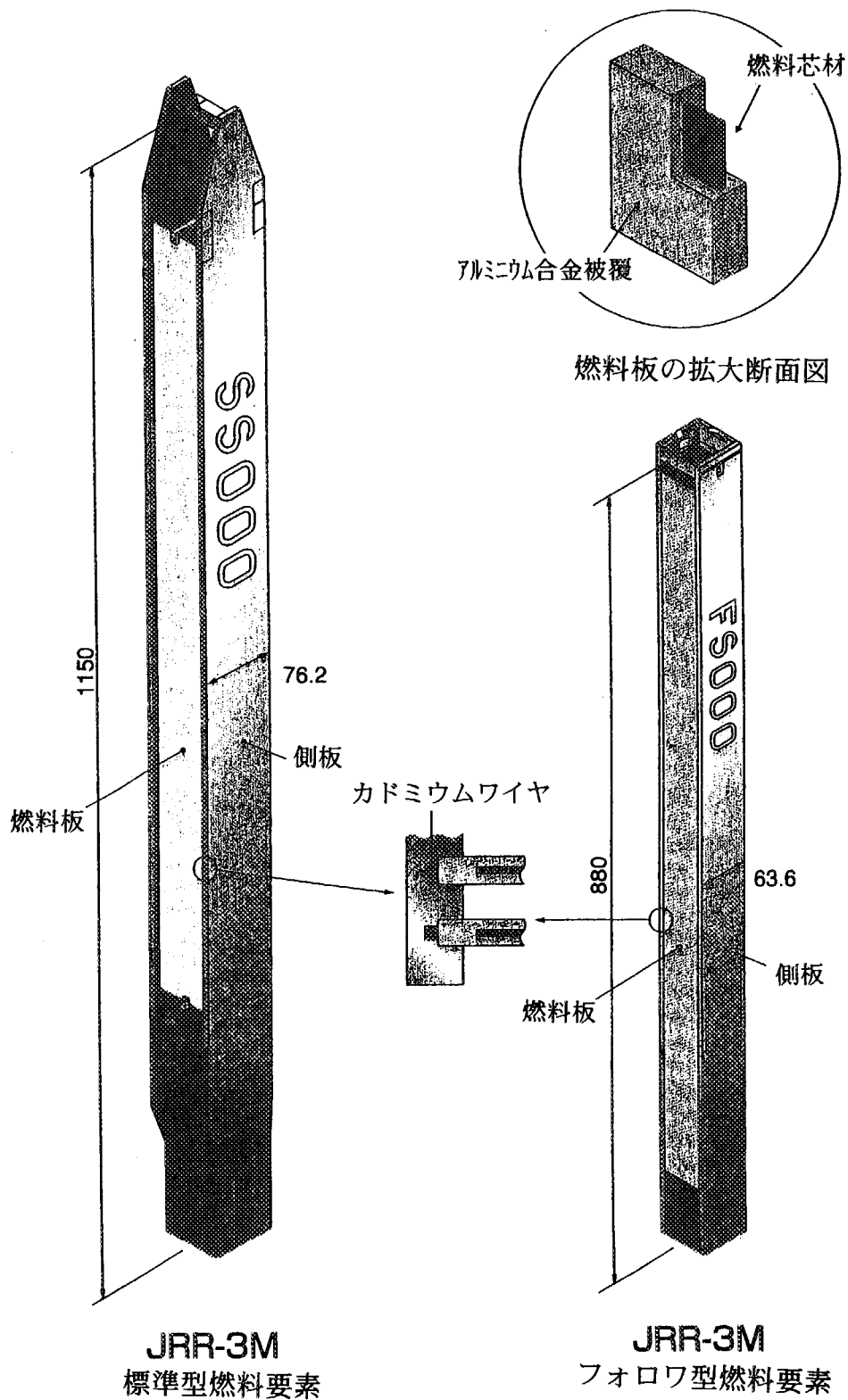


Fig. 1.2 シリサイド燃料の構造

## 2. 最小臨界測定試験

### 2. 1 目的

シリサイド燃料を炉心に装荷して最小臨界炉心を構成し、最小臨界量を求める。

### 2. 2 方法

最小臨界測定試験は、炉心にシリサイド燃料を装荷して臨界に近づける臨界近接と臨界となった場合の臨界を確認する臨界確認により行った。

#### (1) 臨界近接

臨界近接は、シリサイド燃料の装荷体数を臨界パラメータとして段階的に増加し炉心の実効増倍率を1に近づける方法により行った。この時の方法として逆増倍係数法<sup>2)</sup> (Inverse multiplication method ; 1/M method) を用いた。

1/M測定は、全制御棒である6体のフォロワ型燃料要素を装荷後、6体目及び8体目の標準型燃料要素装荷時に、制御棒全挿入状態及び制御棒全引抜き状態での仮設中性子計測系のBF<sub>3</sub>比例計数管(以下BF<sub>3</sub>と略す。)ch1~BF<sub>3</sub>-ch4の計数率を測定した。また、9体目以降は1体装荷毎に、同様に仮設中性子計測系の計数率を測定した。この測定時の計測時間は計測誤差が2%以内になるように設定した。

最終的に逆増倍係数が0になる点を臨界点とし、最小臨界炉心とした。

最小臨界測定時の燃料装荷順序及び中性子源、仮設中性子検出器の配置をFig. 2. 1に示す。

#### (2) 臨界確認

最小臨界の確認は、仮設中性子計測系のγ線補償型電離箱(以下CICと略す。)の信号の監視状態で制御棒を引き抜き臨界近接とした後、炉心から中性子源を引き抜き同電離箱の出力を調整し、一定となったことを確認することにより行った。

### 2. 3 結果

#### (1) 臨界近接

仮設中性子計測系のBF<sub>3</sub>の計数率を測定しながらシリサイド燃料を装荷した。11体目から13体目までの逆増倍曲線をもとに最小臨界炉心を15体と予測した。なお、全制御棒引抜き時の1/M曲線を見ると各チャンネルとも同じ様な傾向を示し、検出器の設置位置の違いによる曲線の違いは顕著に現れなかったが、燃料を装荷した時に装荷した燃料の近くに配置している検出器の指示が変化する等の状況は見られた。

仮設中性子計測系指示確認記録をTable 2. 1に、1/M評価用データをTable 2. 2に、1/M算出結果をTable 2. 3に示す。また、全制御棒引き抜き時の1/M曲線をFig. 2. 2に示す。

#### (2) 臨界確認

仮設中性子計測系のCIC-ch1の信号を監視しながら制御棒を引き抜き、制御棒の引き抜きを停止し、出力が上昇することを確認した後、制御棒を調整して出力を一定に保持する。その

後、中性子源を引き抜いた後、再度制御棒を調整して出力を一定とした状態を約10分間保持し臨界の確認をした。さらに、制御棒を引き抜き出力の上昇を確認し、すでに臨界であったことを再度確認した。最小臨界炉心は、標準型燃料要素15体、フォロワ型燃料要素6体により構成された。臨界時の確認経過記録をFig. 2.3に、臨界時パラメータ記録をTable 2.4に示す。

## 2. 4 評価

シリサイド燃料炉心の最小臨界量の評価については、以下のとおりである。

### (1) 逆増倍曲線による最小臨界量の算出

各チャンネルの逆増倍曲線を直線外挿して最小臨界量を求めるとBF<sub>3</sub>-ch1は14.1体、BF<sub>3</sub>-ch2は14.1体、BF<sub>3</sub>-ch3は14.4体、BF<sub>3</sub>-ch4は14.2体、平均で14.2体となった。

### (2) 実効増倍率の計算結果からの最小臨界量の算出

連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード、MVP<sup>1), 3)</sup> (以下MVPコードと略す。)による燃料要素装荷に伴う実効増倍率の計算結果から、14体目の実効増倍率は0.993539、15体目の実効増倍率は1.00671となる。この値を用いて計算すると最小臨界量は次のようになる。

$$14\text{体} + \frac{1 - 0.993539}{1.00671 - 0.993539} = 14.5\text{体}$$

### (3) 余剰反応度測定に基づく最小臨界量の算出

最小臨界量を15体炉心の余剰反応度測定値を用いて算出すると、15体炉心の余剰反応度の逆動特性法による測定値は0.0059725 Δk/kであり実効増倍率はexp(0.0059725) = 1.0060となる。

15体目の燃料要素の反応度計算値0.0067 Δk/k/体を用いて計算すると最小臨界量は次のようになる。

$$15\text{体} - \frac{1.0060 - 1.0}{0.0067} = 14.1\text{体}$$

上記(1)～(3)の3ケースにより最小臨界量を算出した結果はいずれも良く一致した。

### (4) 最小臨界<sup>235</sup>U量の算出

最小臨界<sup>235</sup>U量は臨界時に炉心に装荷されていた標準型燃料要素とフォロワ型燃料要素の数から算出すると

$$(0.472\text{kg} \times 15\text{体}) + (0.302\text{kg} \times 5\text{体}) + (0.302\text{kg} \times 615.7\text{mm} / 800.0\text{mm}) = 8.822\text{kg}$$

となり、製作公差を考慮すると最小臨界<sup>235</sup>U量は約8.82kgである。

Table 2.1 仮設中性子計測系指示確認記録

No.	測定条件			中性子東計測結果															
	月日	時刻	標準燃料要素数 * 1	Ch. 1			Ch. 2			Ch. 3			Ch. 4			Ch. 1		Ch. 2	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
1	9/13	13:04	0	1177	1338	-	695	702	-	1269	1299	-	4558	4595	-	1.1E-09	-0.065	1.1E-09	-0.009
2	9/13	13:30	0	16788	16973	17017	70788	71660	71838	425312	429095	434472	4	5	0	1.1E-09	0.008	1.1E-09	0.016
3	9/13	14:55	6	2221	2299	2165	7510	7604	7416	60176	59895	59948	0	1	2	1.1E-09	0.010	1.1E-09	0.016
4	9/13	15:33	6	247	232	249	129	102	133	269	252	293	647	634	652	1.1E-09	-0.065	1.1E-09	-0.008
5	9/13	16:22	8	2029	1984	1993	7343	7199	7290	59196	59312	59324	4	2	4	1.1E-09	0.009	1.1E-09	0.016
6	9/13	16:55	8	2655	2808	2498	1439	1444	1401	3938	3794	3513	11481	11548	11496	1.1E-09	-0.064	1.1E-09	-0.007
7	9/13	17:35	9	2436	2343	2371	8481	8645	8696	78201	77954	77488	24	26	30	1.1E-09	0.011	1.1E-09	0.018
8	9/13	18:10	9	11805	10391	10310	1303	1201	1326	2847	2577	2582	23692	23596	23989	1.1E-09	-0.059	1.1E-09	-0.004
9	9/14	10:58	10	22404	22386	22394	13801	13726	13587	139238	139352	138658	61	57	73	1.1E-09	0.010	1.1E-09	0.018
10	9/14	11:35	10	7615	7390	7136	671	671	644	1052	1095	1112	11396	11382	11436	1.1E-09	-0.056	1.1E-09	-0.004
11	9/14	13:40	11	9786	9650	9665	10551	10569	10613	146789	147691	147434	42	54	54	1.1E-09	0.010	1.1E-09	0.018
12	9/14	14:20	11	4910	5131	4903	677	757	738	1769	1725	1742	16145	16165	16136	1.1E-09	-0.056	1.1E-09	-0.003
13	9/14	15:20	12	8133	8005	8141	10201	10193	10051	130572	130099	130827	42	34	44	1.1E-09	0.010	1.1E-09	0.018
14	9/14	15:55	12	6520	6595	6340	1115	1103	1071	2279	2207	2266	26160	26035	25985	1.1E-09	-0.046	1.1E-09	-0.003
15	9/14	16:40	13	7924	8198	8006	10223	10184	10131	128003	128653	128235	59	71	64	1.1E-09	0.010	1.1E-09	0.018
16	9/14	17:15	13	14325	13673	14035	2797	2770	2875	3775	3785	3725	83690	83555	83502	1.1E-09	-0.023	1.1E-09	0.003
17	9/16	10:45	14	53112	52325	52758	24050	23467	23653	168815	169369	169703	303	318	302	1.1E-09	0.010	1.1E-09	0.018
18	9/16	11:40	14	115032	116330	113146	36931	37341	37407	13229	13405	13125	568352	566471	566084	1.1E-09	0.038	1.1E-09	0.018
19	9/16	13:50	15	21042	21406	21509	19164	19291	19163	211860	212037	212755	365	334	362	1.1E-09	0.015	1.1E-09	0.023
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
33																			
34																			
35																			
36																			
37																			
38																			
39																			
40																			

\* 1 制御棒位置 0:全挿入状態、1:全引抜き状態を示す。



Table 2.2 1/M評価用データ

No.	測定条件		中性子束計測結果											
	測定日時	燃料制御棒要素位置	BF3計数率						CIC指示値					
			Ch1		Ch2		Ch3		Ch4		Ch1		Ch2	
月日	時刻	要素数*3	値 (cps)	誤差*2(%)	値 (cps)	誤差*2(%)	値 (cps)	誤差*2(%)	値 (cps)	誤差*2(%)	値 (cps)	誤差*2(%)	電流値(A)	電流値(A)
1	9/13	13:04	0	1	12.58	2.0	6.99	2.7	12.84	2.0	46.27	1.0	-6.50E-11	-9.00E-12
2	9/13	13:30	0	0	169.26	0.4	714.29	0.2	4296.26	0.1	0.03	33.3	8.00E-12	1.60E-11
3	9/13	14:55	6	0	222.83	1.2	751.00	0.7	6000.63	0.2	0.10	57.7	1.00E-11	1.60E-11
4	9/13	15:33	6	1	24.27	3.7	12.13	5.2	27.13	3.5	64.43	2.3	-6.50E-11	-8.00E-12
5	9/13	16:22	8	0	200.20	1.3	727.73	0.7	5927.73	0.2	0.33	31.6	9.00E-12	1.60E-11
6	9/13	16:55	8	1	26.54	1.1	14.28	1.5	37.48	0.9	115.08	0.5	-6.40E-11	-7.00E-12
7	9/13	17:35	9	0	238.33	1.2	860.73	0.6	7788.10	0.2	2.67	11.2	1.10E-11	1.80E-11
8	9/13	18:10	9	1	216.71	0.6	25.53	1.6	51.91	1.1	475.18	0.4	-5.90E-11	-4.00E-12
9	9/14	10:58	10	0	2239.47	0.4	1370.47	0.5	13908.27	0.2	6.37	7.2	1.00E-11	1.80E-11
10	9/14	11:35	10	1	738.03	0.7	66.20	2.2	108.63	1.8	1140.47	0.5	-5.60E-11	-4.00E-12
11	9/14	13:40	11	0	970.03	0.6	1057.77	0.6	14730.47	0.2	5.00	8.2	1.00E-11	1.80E-11
12	9/14	14:20	11	1	498.13	0.8	72.40	2.1	174.53	1.4	1614.87	0.5	-5.60E-11	-3.00E-12
13	9/14	15:20	12	0	809.30	0.6	1014.83	0.6	13049.93	0.2	4.00	9.1	1.00E-11	1.80E-11
14	9/14	15:55	12	1	648.50	0.7	109.63	1.7	225.07	1.2	2606.00	0.4	-4.60E-11	-3.00E-12
15	9/14	16:40	13	0	804.27	0.6	1017.93	0.6	12829.70	0.2	6.47	7.2	1.00E-11	1.80E-11
16	9/14	17:15	13	1	1401.10	0.5	281.40	1.1	376.17	0.9	8358.23	0.2	-2.30E-11	3.00E-12
17	9/16	10:45	14	0	5273.17	0.3	2372.33	0.4	16929.57	0.1	30.77	3.3	1.00E-11	1.80E-11
18	9/16	11:40	14	1	11483.60	0.2	3722.63	0.3	1325.30	0.5	56763.57	0.1	3.80E-11	1.80E-11
19	9/16	13:50	15	0	2131.90	0.4	1920.60	0.4	21221.73	0.1	35.37	3.1	1.50E-11	2.30E-11
20														
21														
22														
23														
24														
25														
26														

\*1 制御棒位置 0:全挿入状態、1:全引抜き状態を示す。  
 \*2 計測誤差 = 100 / √(計測回数 \* (計数率) \* (計数時間))  
 \*3 標準型燃料要素数を示す。

Table 2.3 1/M算出結果

制御棒位置	No.	測定条件				BF <sub>3</sub> 計数率(cps)				CIC指示値(A)				炉内温度(°C)		
		測定日時		時刻	標準型燃料要素数	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	平均	Ch 1	Ch 2	Ch 3	平均	入口	出口
		月日	時刻													
全挿入 1/M <sub>0</sub>	1				0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	30.9	31.1	
	2	9/13	14:55	6	0.760	0.951	0.716	0.300	0.682	0.682	0.300	0.682	0.682	30.9	31.1	
	3	9/13	16:22	8	0.845	0.982	0.725	0.090	0.660	0.660	0.090	0.660	0.660	30.9	31.1	
	4	9/13	17:35	9	0.710	0.830	0.552	0.011	0.526	0.526	0.011	0.526	0.526	30.9	31.1	
	5	9/14	10:58	10	0.076	0.521	0.309	0.005	0.228	0.228	0.005	0.228	0.228	31.3	31.6	
	6	9/14	13:40	11	0.174	0.675	0.292	0.006	0.287	0.287	0.006	0.287	0.287	31.3	31.6	
	7	9/14	15:20	12	0.209	0.704	0.329	0.008	0.312	0.312	0.008	0.312	0.312	31.3	31.6	
	8	9/14	16:40	13	0.210	0.702	0.335	0.005	0.313	0.313	0.005	0.313	0.313	31.3	31.6	
	9	9/16	10:45	14	0.032	0.301	0.254	0.001	0.147	0.147	0.001	0.147	0.147	31.2	31.7	
	10	9/16	13:50	15	0.079	0.372	0.202	0.001	0.164	0.164	0.001	0.164	0.164	31.2	31.7	
	11															
	14															
	全引抜き 1/M <sub>1</sub>	1			0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	30.9	31.1
		2	9/13	15:33	6	0.518	0.576	0.473	0.718	0.571	0.571	0.718	0.571	0.571	30.9	31.1
3		9/13	16:55	8	0.474	0.489	0.343	0.402	0.427	0.427	0.402	0.427	0.427	30.9	31.1	
4		9/13	18:10	9	0.058	0.274	0.247	0.097	0.169	0.169	0.097	0.169	0.169	30.9	31.1	
5		9/14	11:35	10	0.017	0.106	0.118	0.041	0.070	0.070	0.041	0.070	0.070	31.3	31.6	
6		9/14	14:20	11	0.025	0.096	0.074	0.029	0.056	0.056	0.029	0.056	0.056	31.3	31.6	
7		9/14	15:55	12	0.019	0.064	0.057	0.018	0.039	0.039	0.018	0.039	0.039	31.3	31.6	
8		9/14	17:15	13	0.009	0.025	0.034	0.006	0.018	0.018	0.006	0.018	0.018	31.3	31.6	
9		9/16	11:40	14	0.001	0.002	0.010	0.001	0.003	0.003	0.001	0.003	0.003	31.2	31.7	
10																
11																
14																

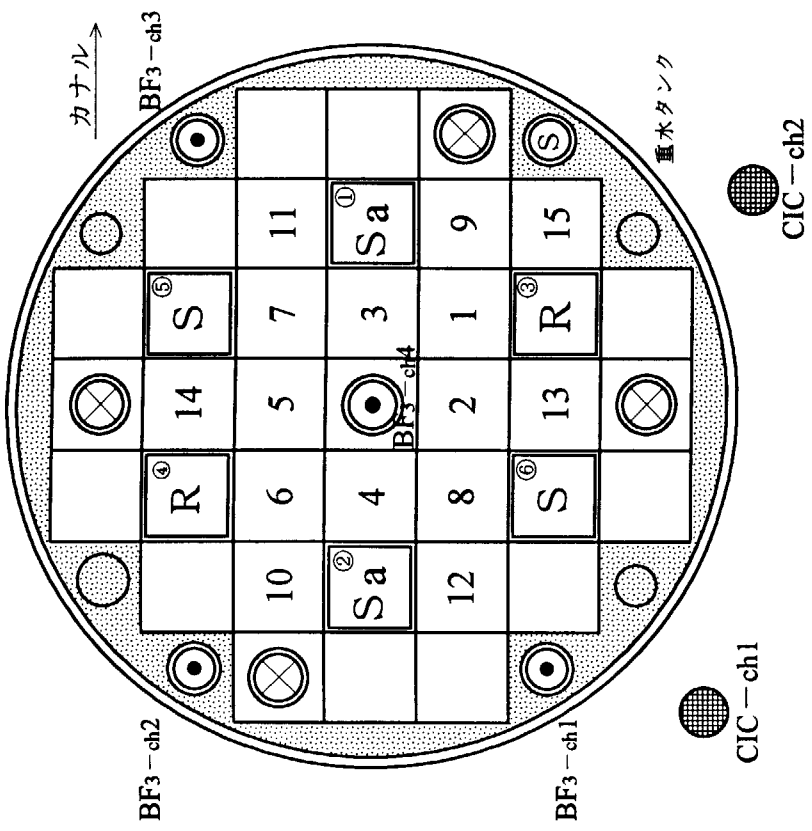
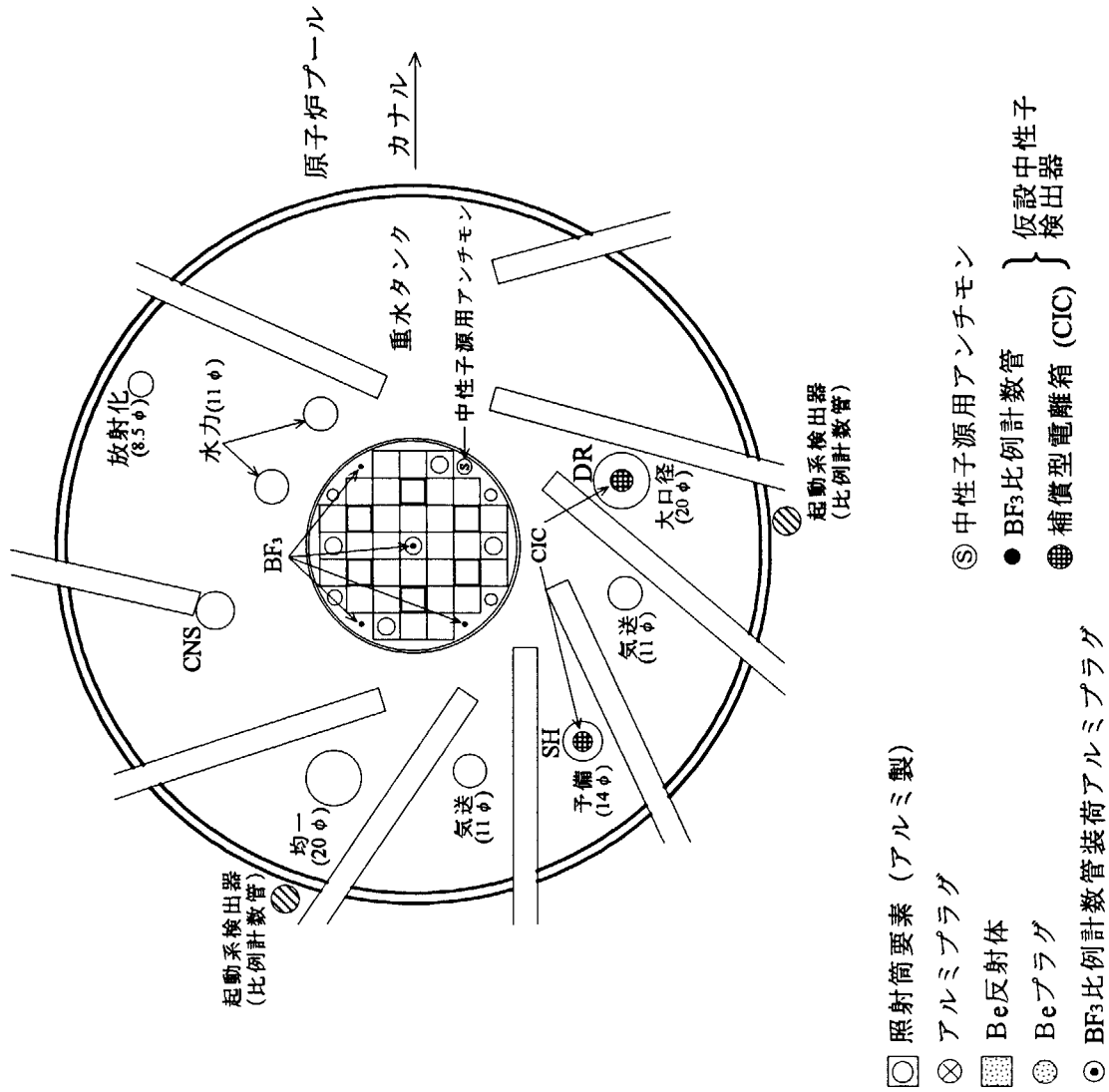
Table 2. 4 臨界時パラメータ記録

確認日: 99. 9. 17

臨界制御棒位置 [mm]					1次冷却材出入口温度 [°C]		
Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2	入口	出口
800.0	800.0	800.0	800.0	615.7	800.0	A (TI216A)	B (TI212B)
						A (TI216B)	B (TI212A)
				29.0	29.0	26.5	26.5

中性子計数率 [cps]				電流 [A]	
BF <sub>3</sub> -1	BF <sub>3</sub> -2	BF <sub>3</sub> -3	BF <sub>3</sub> -4	起動系 A	起動系 B
0.49×10 <sup>5</sup>	0.10×10 <sup>6</sup>	0.67×10 <sup>6</sup>	0.10×10 <sup>6</sup>	7.10×10 <sup>2</sup>	1.87×10 <sup>3</sup>
				0.155×10 <sup>-8</sup>	0.432×10 <sup>-9</sup>

重水温度 [°C]		炉ブール水温度 [°C]		臨界時間	
A (TI231A)	B (TI231B)	(TI1711)			
21.4	21.5	29.1		14:38	



- 標準型燃料要素 (数字は装荷順序を示す)
- フォロロ型燃料要素 (○内の数字は装荷順序を示す)
- 制御棒要素 (R: 微調整棒 S, Sa: 粗調整棒)

- 照射筒要素 (アルミ製)
- ⊗ アルミブラダ
- ▨ Be反射体
- ⊙ Beブラダ
- ⊙ BF3比例計数管装荷アルミブラダ

- ⊙ 中性子源用アンチモン
- BF3比例計数管 } 仮設中性子検出器
- ⊙ 補償型電離箱 (CIC)

Fig. 2. 1 最小臨界測定時の燃料装荷順序及び中性子源、仮設中性子検出器の配置

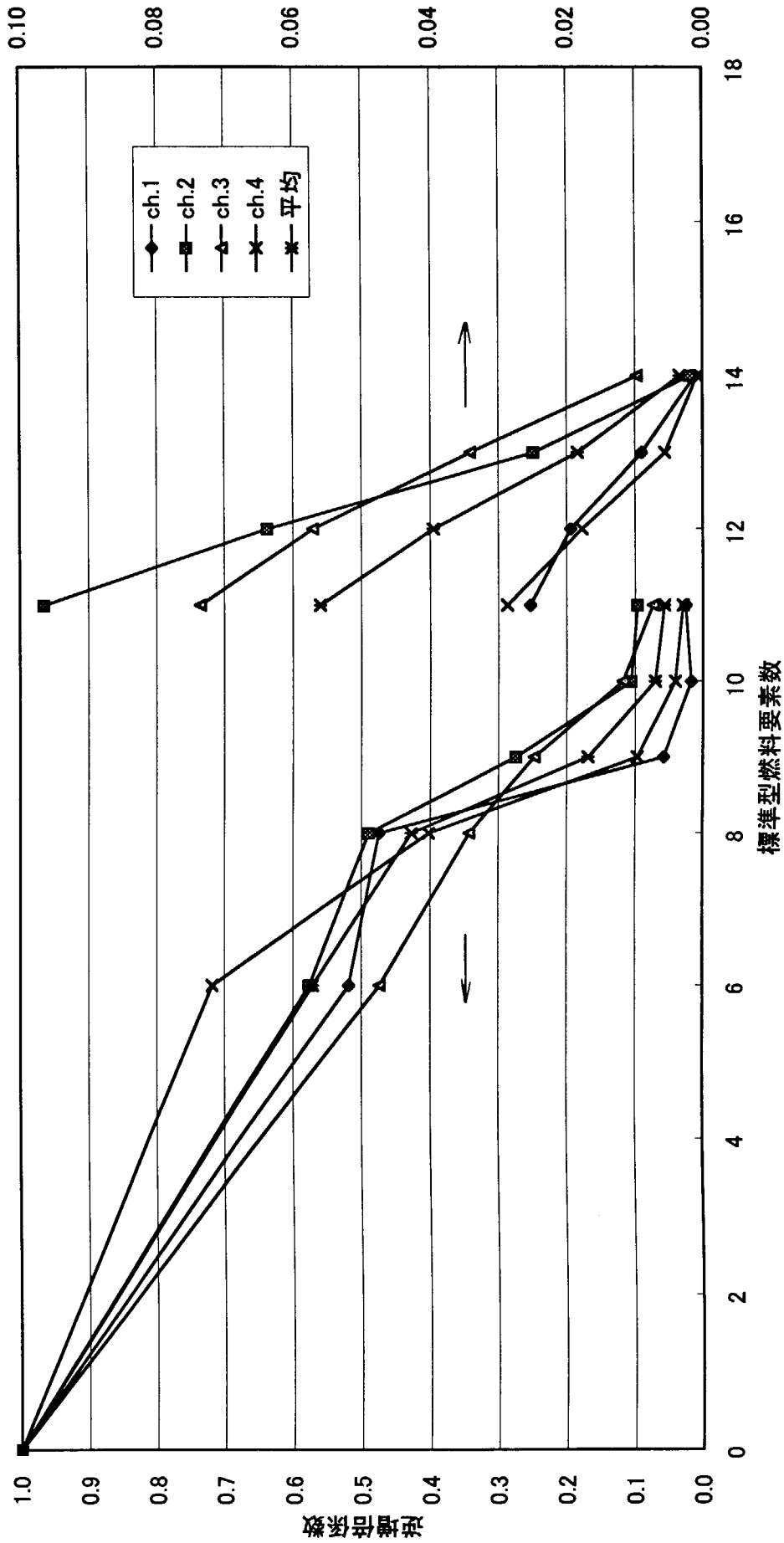


Fig. 2.2 全制御棒引抜き時の1/M曲線

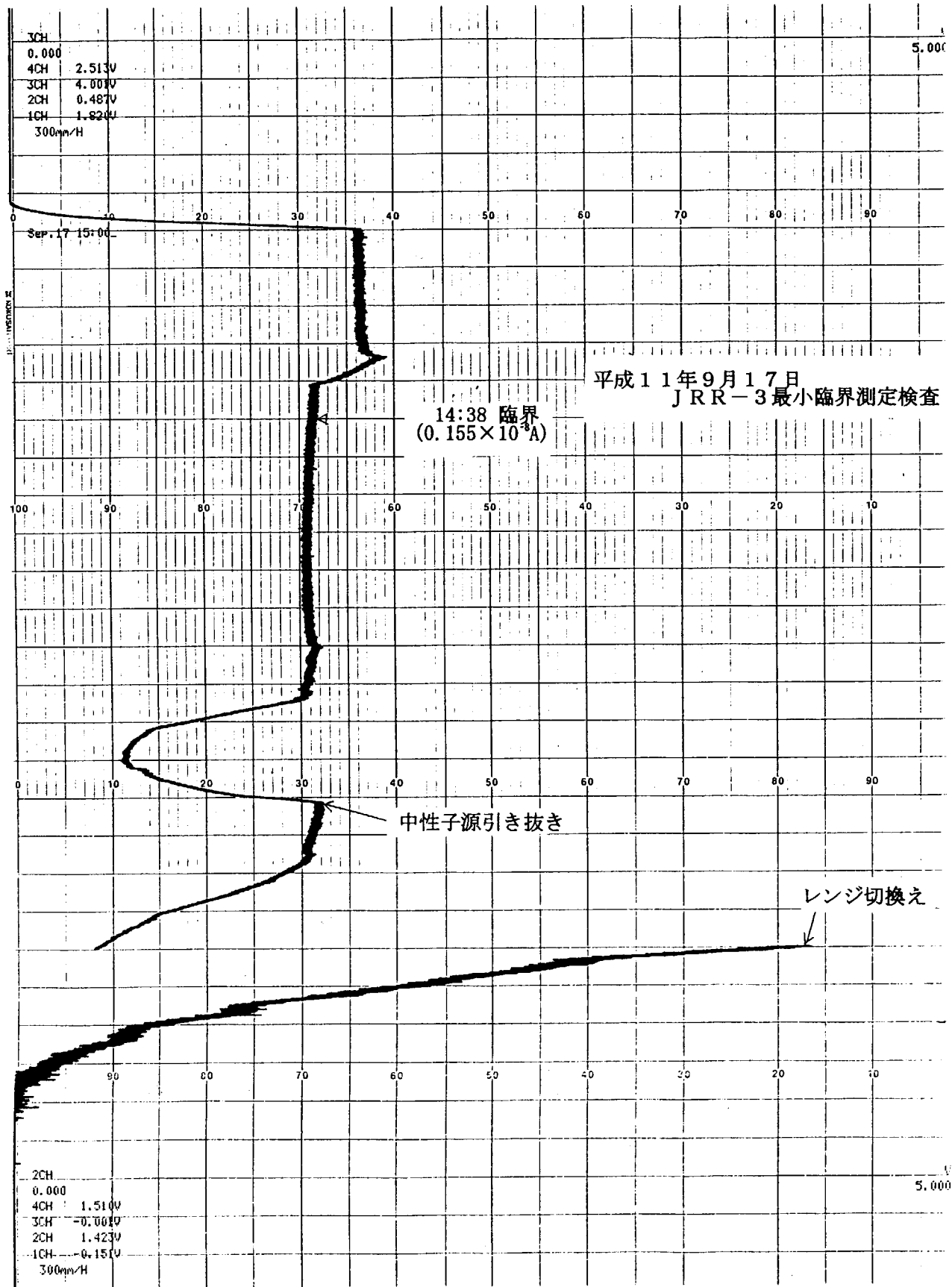


Fig. 2.3 臨界確認経過 (仮設C1C-ch1)

### 3. 全炉心構成・過剰反応度測定試験

#### 3. 1 目的

最小臨界炉心構成後、標準型燃料要素を1体ずつ、所定の位置に安全に装荷し、未臨界を確認しながら全炉心を構成する。また、標準型燃料要素を1体ずつ装荷毎に原子炉の内蔵する過剰反応度（燃料追加法<sup>4)</sup>）を逆動特性法<sup>5)</sup>（IK法）により測定し基準値を満足することを確認する。

#### 3. 2 方法

##### (1) 全炉心構成時の燃料装荷

全炉心構成は、中性子源用アンチモンを所定位置に挿入して全制御棒を全挿入とした状態で、標準型燃料要素1体を装荷するごとに本設の起動系検出器（BF<sub>3</sub>比例計数管：2チャンネル）により測定した計数率（C）と、最小臨界炉心における全制御棒全挿入状態での計数率（C<sub>0</sub>）とから、逆増倍係数（C<sub>0</sub>/C=1/M）を計算して装荷体数に対する1/M曲線をプロットし、次の燃料要素を装荷しても未臨界であることを予測しつつ行った。また、最小臨界炉心から全炉心に至るまでの標準型燃料要素を1体ずつ装荷した炉心について、全制御棒の全挿入時において実効増倍率KeffのMVP<sup>1), 3)</sup>コードによる計算値を用いて燃料装荷時の1/M曲線を予測した。逆増倍係数の予測値は次式により求めた。

$$1/M_c = (1 - K_{effi}) / (1 - K_{eff0})$$

1/M<sub>c</sub> : 逆増倍係数予測値

K<sub>eff0</sub> : 最小臨界炉心の全制御棒の全挿入時Keff予測計算値

K<sub>effi</sub> : 燃料i体炉心の全制御棒全挿入時Keff予測計算値

##### (2) 全炉心構成時の臨界制御棒位置の確認

標準型燃料要素15体を装荷した炉心（最小臨界炉心）は、R-1制御棒のみで（他の制御棒は全引き抜き位置）臨界制御棒位置を確認した。その後、全制御棒フラット位置での臨界制御棒位置を確認した。標準型燃料要素16体装荷した炉心以降の全炉心構成までは、標準型燃料要素1体追加する毎に、R-1制御棒による（他の制御棒は、標準型燃料要素1体追加前のフラット位置）臨界制御棒位置及び全制御棒フラット位置での臨界制御棒位置を確認した。

##### (3) 過剰反応度測定

最小臨界炉心の過剰反応度をIK法で測定した後、燃料1体を追加する毎に、臨界制御棒位置を確認し燃料追加前と後での臨界位置の差に相当する部分の制御棒反応度をIK法により測定した。得られた制御棒の等価反応度を燃料1体追加による過剰反応度の増加分として、最小臨界炉心の過剰反応度測定値に順次加算することにより全炉心に至るまでの各標準型燃料要素の装荷体数毎の過剰反応度を求めた。過剰反応度の算出は次に示す計算式<sup>6)</sup>を用いた。

$$\rho_{TOTAL} = \rho_{15} + \Delta\rho_{16} + \dots + \Delta\rho_i + \dots + \Delta\rho_{26}$$

$$\rho_{TOTAL}^{20} = \rho_{TOTAL} - \alpha \cdot (T - 20)$$

$$k_{eff} = \exp \{ \rho_{TOTAL}^{20} \}$$

$$\rho_{ex} = (k_{eff} - 1) / k_{eff}$$

- $\rho_{15}$  : 最小臨界炉心の超過反応度 ( $\Delta k/k$ )  
 $\Delta \rho_i$  : 第  $i$  体目の標準型燃料要素を追加した時の反応度増加分 ( $\Delta k/k$ )  
 $\rho_{TOTAL}$  : 最小臨界炉心の過剰反応度と標準型燃料要素を追加する毎に増加した反応度増加分の積算値との合計 ( $\Delta k/k$ )  
 $\alpha$  : 減速材温度係数 ( $\Delta k/k/^\circ C$ )  
 $T$  : 最小臨界炉心における過剰反応度測定時の炉心温度 ( $^\circ C$ )  
 $\rho_{TOTAL}^{20}$  : 炉心温度  $20^\circ C$  に補正した  $\rho_{TOTAL}$  ( $\Delta k/k$ )  
 $k_{eff}$  : 炉心温度  $20^\circ C$  における実効増倍係数  
 $\rho_{ex}$  : 炉心温度  $20^\circ C$  における原子炉の内蔵する過剰反応度 ( $\Delta k/k$ )

#### (4) 測定条件

最小臨界測定試験終了後、解析条件と同じ炉心状態とするため仮設中性子計測系のBF<sub>3</sub>検出器を取り外し、照射筒の照射孔にはアルミニウム合金製プラグを、ベリリウム反射体内の円柱孔にはベリリウム合金製プラグを挿入した。原子炉の運転は、冷却系を自然循環モードとし、線形出力計指示を10Wとして行った。

### 3. 3 結果

#### (1) 全炉心の構成

すべての標準型燃料要素が炉心の所定の位置に装荷され、全炉心を構成した。燃料装荷記録をTable3.1に示す。

装荷した標準型燃料要素数毎の逆増倍係数  $1/M$  を算出した結果と予測曲線とは標準型燃料要素数の増加に伴い同じ傾向を示し燃料追加時の未臨界予測ができた。中性子計数率記録をTable3.2に逆増倍曲線をFig3.1に示す。また、各標準型燃料要素装荷毎の臨界制御棒位置は、20cm以上の制御棒の引き抜きを必要とした。標準型燃料要素装荷毎の臨界パラメータ記録をTable3.3に、臨界制御棒位置と標準型燃料要素装荷数をFig3.2に示す。

#### (2) 過剰反応度測定

標準型燃料要素1体追加前後のR-1臨界制御棒位置の差は約10cmから約28cmであった。燃料追加による増加反応度は、IK法により1ステップあたり約0.04% $\Delta k/k$ ～約0.09% $\Delta k/k$ で約13ステップから約21ステップの測定反応度を合計して求めた。

標準型燃料要素1体追加毎の増加反応度は、0.6% $\Delta k/k$  (15体目装荷時)～約1.6% $\Delta k/k$  (19体目装荷時)で平均約1.2% $\Delta k/k$ の炉心装荷位置の違いによる特性を示した結果を得た。15体目装荷時の過剰反応度測定記録～26体目装荷時の過剰反応度測定記録をTable3.4～Table3.15に、標準型燃料要素装荷毎の反応度増加量をFig3.3に示す。

各標準型燃料要素装荷体数毎の過剰反応度は、標準型燃料要素装荷毎の増加反応度の加算で求めた。基準温度補正には、シリサイド燃料炉心の平衡炉心初期の最大値である減速材温度係



数-4.  $2 \times 10^{-2} \% \Delta k/k/^\circ\text{C}$  (核計算コードSRACコードシステム<sup>1), 2)</sup> (以下、SRACコードと略す。) による解析結果) を用いた。

温度補正後の過剰反応度14.1% $\Delta k/k$ は、測定値を加算した積算値14.6% $\Delta k/k$ に比し約3% (26体装荷) 小さい算出結果を得た。過剰反応度測定結果をTable3.16に、過剰反応度測定結果の積算値と温度補正後について各々Fig3.4、Fig3.5に示す。

### 3.4 評価

#### (1) 全炉心構成

全炉心構成においては、未臨界を確保して燃料の追加を行うことが重要である。

1/M曲線及び臨界制御棒位置による確認結果は、各々余裕のある未臨界性を示し、MVPコード<sup>1), 3)</sup> による解析結果を用いた1/M予測も1/M測定結果と良い一致を示したことから安全に全炉心構成を行うことができた。

#### (2) 過剰反応度

炉心温度20 $^\circ\text{C}$ に補正した全炉心構成後の原子炉の内蔵する過剰反応度は、14.1% $\Delta k/k$ であり基準値(18.1% $\Delta k/k$ 以下)を満足することを確認した。また、アルミナイド燃料の初装荷炉心における過剰反応度15.9% $\Delta k/k$ に対して14.1% $\Delta k/k$ とシリサイド燃料炉心の方が少ない過剰反応度を示した。これは、シリサイド燃料に変更する際、ウラン増量により増加する過剰反応度を抑制する目的で、燃料要素に可燃性のカドミウムワイヤを配置したことによる中性子吸収効果の影響で過剰反応度の減少が見られた。また、過剰反応度の予測評価をMVPコード<sup>1), 3)</sup> により行った結果は、14.7% $\Delta k/k$ と実測値14.6% $\Delta k/k$ と良い一致を示した。

Table3.1(1/2) 燃料装荷記録  
[標準型燃料要素]

装荷 順序	燃料要素 番 号	装荷 位置	燃料装荷日時		装荷 順序	燃料要素 番 号	装荷 位置	燃料装荷日時	
			開始時間	終了時間				開始時間	終了時間
1	SS001	E5	9/13 13:51	14:00	14	SS014	D2	9/16 9:52	9:59
2	SS002	D5	9/13 14:01	14:07	15	SS015	F6	9/17 11:35	11:45
3	SS003	E4	9/13 14:09	14:15	16	SS016	B2	9/20 17:38	17:45
4	SS004	C4	9/13 14:16	14:23	17	SS017	F2	9/20 19:55	20:02
5	SS005	D3	9/13 14:25	14:33	18	SS018	B6	9/20 21:45	21:52
6	SS006	C3	9/13 14:34	14:40	19	SS019	G4	9/21 9:55	10:02
7	SS007	E3	9/13 16:01	16:07	20	SS020	A4	9/21 12:28	12:35
8	SS008	C5	9/13 16:08	16:14	21	SS021	G3	9/21 14:30	14:37
9	SS009	F5	9/13 17:20	17:26	22	SS022	A5	9/21 16:11	16:20
10	SS010	B3	9/14 10:05	10:10	23	SS023	E7	9/21 17:49	17:55
11	SS011	F3	9/14 13:23	13:32	24	SS024	C1	9/21 19:28	19:34
12	SS012	B5	9/14 14:51	15:03	25	SS025	E1	9/22 11:54	12:01
13	SS013	D6	9/14 16:20	16:29	26	SS026	C7	9/22 14:16	14:23

Table3.1(2/2) 燃料装荷記録  
[フォロー型燃料要素]

装荷 順序	燃料要素 番 号	装荷 位置	燃料装荷日時	
			開始時間	終了時間
1	FS001	F4	9/9 10:05	10:37
2	FS002	B4	9/9 10:43	11:14
3	FS003	E6	9/9 13:30	14:07
4	FS004	C2	9/9 14:19	14:48
5	FS005	E2	9/9 14:58	15:40
6	FS006	C6	9/9 15:48	16:17

Table3.2 中性子計数率記録

STEP	日時	装荷 体数	起動系 A		起動系 B	
			C (cps)	C <sub>o</sub> (cps)	C (cps)	C <sub>o</sub> (cps)
				1/M		1/M
1	9/20	1 5	12.0	12.0	5.8	5.8
	10:56			1		1
2	17:58	1 6	15.0	12.0	6.7	5.8
				0.8		0.87
3	20:13	1 7	15.0	12.0	7.0	5.8
				0.8		0.83
4	22:05	1 8	16.0	12.0	7.1	5.8
				0.75		0.82
5	9/21	1 9	16.5	12.0	8.7	5.8
	10:45			0.73		0.67
6	12:55	2 0	16.5	12.0	8.8	5.8
				0.73		0.66
7	14:47	2 1	16.7	12.0	9.7	5.8
				0.72		0.60
8	16:33	2 2	17.0	12.0	11.0	5.8
				0.71		0.53
9	18:05	2 3	20.0	12.0	12.9	5.8
				0.6		0.45
1 0	9/22	2 4	20.3	12.0	14.7	5.8
	11:04			0.59		0.39
1 1	12:14	2 5	20.8	12.0	15.5	5.8
				0.58		0.37
1 2	14:57	2 6	21.3	12.0	17.5	5.8
				0.56		0.33

注) 計測時の検出器位置指示値は、

起動系 A 4 0 3 mm、起動系 B 3 5 3 mm である。

Table3.3 (1/2) 標準型燃料要素装荷毎の臨界パラメータ記録

装荷 体数	測定 時間	制御棒位置 (mm)								測定指示				炉水 温度 (°C)	重水 温度 (°C)
		Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2	起動系 A	起動系 B	CIC-ch1 (A)	CIC-ch2 (B)				
15	11:47	800.0	800.0	800.0	800.0	569.5	800.0	1.25 E3 (cps)	3.45E3 (cps)	0.315	E-8	0.082	E-8	27.4	25.6
	17:20	682.0	682.0	682.0	682.0	685.0	682.0	—	—	0.197	E-8	0.056	E-8	27.4	25.5
16	18:39	682.0	682.0	682.0	682.0	399.8	682.0	—	—	0.179	E-8	0.043	E-8	32.3	25.3
	19:42	587.0	587.0	587.0	587.0	588.0	587.0	—	—	0.206	E-8	0.055	E-8	32.6	25.4
17	20:48	587.0	587.0	587.0	587.0	349.8	587.0	—	—	0.199	E-8	0.050	E-8	32.4	25.5
	21:27	525.0	525.0	525.0	525.0	523.0	525.0	—	—	0.207	E-8	0.057	E-8	32.3	25.6
18	22:40	525.0	525.0	525.0	525.0	330.4	525.0	—	—	0.198	E-8	0.044	E-8	32.2	25.4
	23:11	479.0	479.0	479.0	479.0	481.0	479.0	—	—	0.198	E-8	0.047	E-8	32.1	25.3
19	11:21	479.0	479.0	479.0	479.0	271.3	479.0	—	—	0.190	E-8	0.049	E-8	31.4	22.1
	12:15	430.0	430.0	430.0	430.0	433.0	430.0	—	—	0.141	E-8	0.039	E-8	31.3	21.4
20	13:32	430.0	430.0	430.0	430.0	243.2	430.0	—	—	0.200	E-8	0.043	E-8	31.3	21.0
	14:15	393.0	393.0	393.0	393.0	397.0	393.0	—	—	0.197	E-8	0.045	E-8	31.2	20.7
21	15:20	393.0	393.0	393.0	393.0	220.3	393.0	—	—	0.187	E-8	0.047	E-8	31.2	20.4
	15:58	362.0	362.0	362.0	362.0	363.6	362.0	—	—	0.167	E-8	0.044	E-8	31.1	20.4
22	17:00	362.0	362.0	362.0	362.0	197.4	362.0	—	—	0.198	E-8	0.039	E-8	31.2	20.5
	17:34	336.0	336.0	336.0	336.0	338.3	336.0	—	—	0.193	E-8	0.040	E-8	31.1	20.5

Table3.3 (2/2) 標準型燃料要素装荷毎の臨界パラメータ記録

装荷 体数	測定 時間	制御棒位置 (mm)								測定指示				平均 炉水温度 (℃)	通水温度 (℃)		
		Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2	起動系 A	起動系 B	CIC-ch1	CIC-ch2						
23	18:40	336.0	336.0	336.0	336.0	231.4	336.0	336.0	336.0	336.0	336.0	1.25 E3 (cps)	3.45E3 (cps)	0.190 E-8	0.042 E-8	31.2	20.4
	19:16	316.0	316.0	316.0	316.0	318.0	316.0	316.0	316.0	316.0	316.0	—	—	0.186 E-8	0.044 E-8	31.1	20.2
24	20:11	316.0	316.0	316.0	316.0	213.8	316.0	316.0	316.0	316.0	316.0	—	—	0.182 E-8	0.040 E-8	31.2	20.1
	11:39	299.0	299.0	299.0	299.0	304.6	299.0	299.0	299.0	299.0	299.0	—	—	0.147 E-8	0.033 E-8	31.3	19.8
25	12:48	299.0	299.0	299.0	299.0	158.7	299.0	299.0	299.0	299.0	299.0	—	—	0.200 E-8	0.044 E-8	31.8	19.3
	13:57	279.0	279.0	279.0	279.0	282.0	279.0	279.0	279.0	279.0	279.0	—	—	0.189 E-8	0.044 E-8	31.6	19.1
26	15:24	279.0	279.0	279.0	279.0	170.5	279.0	279.0	279.0	279.0	279.0	—	—	0.198 E-8	0.042 E-8	31.4	19.0
	16:05	262.0	262.0	262.0	262.0	264.1	262.0	262.0	262.0	262.0	262.0	—	—	0.198 E-8	0.044 E-8	31.3	19.0

Table3.4 15体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ°	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 %Δk/k
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	568.3	800	800	800	800	800	27.4	—
1	576.4	↓	800	800	800	800	27.4	0.03918
2	↓	700.7	800	800	800	800	27.4	-0.02979
3	590.5	↓	800	800	800	800	27.4	0.03952
4	↓	659	800	800	800	800	27.4	-0.03758
5	607.8	↓	800	800	800	800	27.3	0.04231
6	↓	625.1	800	800	800	800	27.4	-0.04270
7	628.2	↓	800	800	800	800	27.4	0.04180
8	↓	596.8	800	800	800	800	27.3	-0.04496
9	651.2	↓	800	800	800	800	27.4	0.03942
10	↓	574.5	800	800	800	800	27.4	-0.03937
11	676.8	↓	800	800	800	800	27.3	0.03832
12	↓	553.6	800	800	800	800	27.4	-0.04257
13	709.5	↓	800	800	800	800	27.3	0.03480
14	↓	535.2	800	800	800	800	27.4	-0.04211
15	800	↓	800	800	800	800	27.4	0.04282

Table3.5 16体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ°	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 %Δk/k
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	399.8	682	682	682	682	682	32.3	—
1	415.3	↓	682	682	682	682	32.3	0.10232
2	↓	607.5	682	682	682	682	32.3	-0.09434
3	437.4	↓	682	682	682	682	32.4	0.05812
4	↓	576.7	682	682	682	682	32.4	-0.05918
5	457.9	↓	682	682	682	682	32.4	0.07158
6	↓	546.7	682	682	682	682	32.4	-0.06369
7	478.6	↓	682	682	682	682	32.4	0.06595
8	↓	521.8	682	682	682	682	32.5	-0.06125
9	499.4	↓	682	682	682	682	32.5	0.05991
10	↓	500	682	682	682	682	32.5	-0.06304
11	522.2	↓	682	682	682	682	32.5	0.06060
12	↓	479.5	682	682	682	682	32.5	-0.06315
13	546.5	↓	682	682	682	682	32.5	0.05619
14	↓	460.6	682	682	682	682	32.5	-0.06509
15	574.8	↓	682	682	682	682	32.5	0.05999
16	↓	441.9	682	682	682	682	32.5	-0.06647
17	606.7	↓	682	682	682	682	32.5	0.05198
18	↓	426.5	682	682	682	682	32.6	-0.05499
19	640	↓	682	682	682	682	32.6	0.04506
20	↓	411.4	682	682	682	682	32.6	-0.06266
21	685.3	↓	682	682	682	682	32.6	0.03662

Table3.6 17体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 % $\Delta k/k$
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	349.8	587	587	587	587	587	32.4	—
1	361.3	↓	587	587	587	587	32.4	0.07620
2	↓	545.8	587	587	587	587	32.4	-0.07117
3	383.5	↓	587	587	587	587	32.4	0.08088
4	↓	512.3	587	587	587	587	32.4	-0.07323
5	407	↓	587	587	587	587	32.4	0.08480
6	↓	482.9	587	587	587	587	32.4	-0.07362
7	431	↓	587	587	587	587	32.4	0.08114
8	↓	456.7	587	587	587	587	32.4	-0.07834
9	457.8	↓	587	587	587	587	32.4	0.07866
10	↓	432.8	587	587	587	587	32.4	-0.08024
11	486.3	↓	587	587	587	587	32.4	0.07351
12	↓	411.1	587	587	587	587	32.3	-0.08022
13	519.5	↓	587	587	587	587	32.3	0.07665
14	↓	389.6	587	587	587	587	32.4	-0.08268
15	559.2	↓	587	587	587	587	32.3	0.07207
16	↓	369.2	587	587	587	587	32.3	-0.08397
17	588.1	↓	587	587	587	587	32.3	0.00705

Table3.7 18体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 % $\Delta k/k$
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	330.4	525	525	525	525	525	32.2	—
1	340.7	↓	525	525	525	525	32.2	0.07364
2	↓	491.1	525	525	525	525	32.2	-0.07258
3	361	↓	525	525	525	525	32.2	0.07736
4	↓	460.9	525	525	525	525	32.2	-0.07854
5	383.5	↓	525	525	525	525	32.2	0.08215
6	↓	434.4	525	525	525	525	32.2	-0.07472
7	406.2	↓	525	525	525	525	32.2	0.08059
8	↓	410.5	525	525	525	525	32.2	-0.07491
9	430.3	↓	525	525	525	525	32.1	0.07994
10	↓	388.3	525	525	525	525	32.2	-0.07568
11	457.7	↓	525	525	525	525	32.2	0.07928
12	↓	366.5	525	525	525	525	32.2	-0.08138
13	489	↓	525	525	525	525	32.1	0.07762
14	↓	345.6	525	525	525	525	32.1	-0.08246
15	523.1	↓	525	525	525	525	32.1	0.06074

Table3.8 19体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 %Δk/k
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	271.3	479	479	479	479	479	31.4	—
1	279.9	↓	479	479	479	479	31.4	0.06571
2	↓	449.6	479	479	479	479	31.4	-0.06876
3	297.5	↓	479	479	479	479	31.4	0.07660
4	↓	421.6	479	479	479	479	31.4	-0.07445
5	316.5	↓	479	479	479	479	31.4	0.08404
6	↓	395.8	479	479	479	479	31.4	-0.07234
7	335.4	↓	479	479	479	479	31.4	0.08093
8	↓	371.5	479	479	479	479	31.4	-0.07873
9	355.2	↓	479	479	479	479	31.4	0.08096
10	↓	349.3	479	479	479	479	31.4	-0.07538
11	374.6	↓	479	479	479	479	31.4	0.07421
12	↓	328.3	479	479	479	479	31.4	-0.07839
13	396.2	↓	479	479	479	479	31.4	0.07945
14	↓	307.3	479	479	479	479	31.4	-0.07685
15	419	↓	479	479	479	479	31.3	0.07748
16	↓	286.2	479	479	479	479	31.4	-0.07876
17	443.3	↓	479	479	479	479	31.4	0.07077
18	↓	265.6	479	479	479	479	31.4	-0.08073
19	471.6	↓	479	479	479	479	31.3	0.07161
20	↓	245.1	479	479	479	479	31.4	-0.07516
21	481.5	↓	479	479	479	479	31.3	-0.02425

Table3.9 20体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 %Δk/k
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	243.2	430	430	430	430	430	31.3	—
1	252.4	↓	430	430	430	430	31.3	0.06595
2	↓	405.8	430	430	430	430	31.3	-0.07271
3	272.1	↓	430	430	430	430	31.3	0.08058
4	↓	381.8	430	430	430	430	31.3	-0.07456
5	292	↓	430	430	430	430	31.3	0.08105
6	↓	359.6	430	430	430	430	31.3	-0.07610
7	311.9	↓	430	430	430	430	31.2	0.07900
8	↓	338.6	430	430	430	430	31.3	-0.07906
9	333	↓	430	430	430	430	31.2	0.08139
10	↓	318.5	430	430	430	430	31.2	-0.07754
11	354.5	↓	430	430	430	430	31.2	0.07980
12	↓	299	430	430	430	430	31.2	-0.07956
13	377.8	↓	430	430	430	430	31.2	0.07930
14	↓	279.4	430	430	430	430	31.2	-0.08307
15	403.4	↓	430	430	430	430	31.2	0.07784
16	↓	260.5	430	430	430	430	31.2	-0.07652
17	430.4	↓	430	430	430	430	31.2	0.07571
18	↓	242.7	430	430	430	430	31.2	-0.06720
19	433.7	↓	430	430	430	430	31.2	-0.04550



Table3.10 2 1 体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 % $\Delta k/k$
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	220.3	393	393	393	393	393	31.2	—
1	229	↓	393	393	393	393	31.2	0.06433
2	↓	370.4	393	393	393	393	31.2	-0.07265
3	248.8	↓	393	393	393	393	31.2	0.08194
4	↓	346.3	393	393	393	393	31.2	-0.08012
5	269.3	↓	393	393	393	393	31.2	0.08533
6	↓	323.4	393	393	393	393	31.2	-0.08027
7	290	↓	393	393	393	393	31.2	0.08569
8	↓	301.2	393	393	393	393	31.2	-0.08291
9	310.6	↓	393	393	393	393	31.2	0.07921
10	↓	280.6	393	393	393	393	31.2	-0.08232
11	332.4	↓	393	393	393	393	31.1	0.08222
12	↓	260.4	393	393	393	393	31.1	-0.07855
13	354.5	↓	393	393	393	393	31.1	0.07993
14	↓	239.7	393	393	393	393	31.1	-0.08208
15	378.9	↓	393	393	393	393	31.1	0.07748
16	↓	218.6	393	393	393	393	31.1	-0.08193
17	397.3	↓	393	393	393	393	31.1	0.02986

Table3.11 2 2 体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 % $\Delta k/k$
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	197.4	362	362	362	362	362	31.2	—
1	207.3	↓	362	362	362	362	31.2	0.06631
2	↓	339.9	362	362	362	362	31.2	-0.07786
3	228.5	↓	362	362	362	362	31.2	0.07712
4	↓	318.1	362	362	362	362	31.2	-0.07890
5	249.6	↓	362	362	362	362	31.2	0.08131
6	↓	297.3	362	362	362	362	31.2	-0.07743
7	270.5	↓	362	362	362	362	31.2	0.08201
8	↓	276	362	362	362	362	31.2	-0.08546
9	291.4	↓	362	362	362	362	31.2	0.07076
10	↓	258.6	362	362	362	362	31.2	-0.06778
11	311	↓	362	362	362	362	31.2	0.07538
12	↓	239.4	362	362	362	362	31.2	-0.07811
13	334.4	↓	362	362	362	362	31.2	0.08364
14	↓	218.9	362	362	362	362	31.2	-0.07735
15	345.9	↓	362	362	362	362	31.1	0.00001
16	↓	↓	362	362	362	362	31.2	—
17	363.6	↓	362	362	362	362	31.1	0.10787

Table3.12 2 3 体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 % $\Delta k/k$
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	231.4	336	336	336	336	336	31.2	—
1	237.1	↓	336	336	336	336	31.2	0.05030
2	↓	315.8	336	336	336	336	31.2	-0.07790
3	252	↓	336	336	336	336	31.2	0.06655
4	↓	294.1	336	336	336	336	31.2	-0.08223
5	269.5	↓	336	336	336	336	31.2	0.08761
6	↓	271.7	336	336	336	336	31.2	-0.07462
7	285.5	↓	336	336	336	336	31.2	0.07851
8	↓	250.6	336	336	336	336	31.2	-0.07785
9	301.9	↓	336	336	336	336	31.2	0.07456
10	↓	229.7	336	336	336	336	31.2	-0.07993
11	319	↓	336	336	336	336	31.2	0.07469
12	↓	208.6	336	336	336	336	31.2	-0.07846
13	338.1	↓	336	336	336	336	31.2	0.08636

Table3.13 2 4 体目装荷時の過剰反応度測定記録

ステップ	制御棒位置 (mm)						炉心温度 ℃	反応度 % $\Delta k/k$
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	213.8	316	316	316	316	316	31.2	—
1	221.3	↓	316	316	316	316	31.2	0.06198
2	↓	299.5	316	316	316	316	31.2	-0.08223
3	239.1	↓	316	316	316	316	31.2	0.07747
4	↓	282.5	316	316	316	316	31.2	-0.07925
5	256.4	↓	316	316	316	316	31.2	0.07845
6	↓	266.5	316	316	316	316	31.2	-0.07231
7	272.9	↓	316	316	316	316	31.2	0.07716
8	↓	250.1	316	316	316	316	31.2	-0.07882
9	289.9	↓	316	316	316	316	31.2	0.07155
10	↓	234.4	316	316	316	316	31.2	-0.07764
11	306	↓	316	316	316	316	31.2	0.06023
12	↓	220.1	316	316	316	316	31.2	-0.07513
13	317.6	↓	316	316	316	316	31.2	0.02217

Table3.14 25体目挿入時の過剰反応度測定記録

ステップ°	制御棒位置 (mm)						炉心温度 °C	反応度 % $\Delta k/k$
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	158.7	299	299	299	299	299	31.7	—
1	168.2	↓	299	299	299	299	31.7	0.06416
2	↓	285.4	299	299	299	299	31.7	-0.07776
3	188.4	↓	299	299	299	299	31.7	0.07541
4	↓	271.1	299	299	299	299	31.7	-0.07676
5	207.7	↓	299	299	299	299	31.7	0.07763
6	↓	256.5	299	299	299	299	31.7	-0.08131
7	226.6	↓	299	299	299	299	31.7	0.07573
8	↓	242.7	299	299	299	299	31.7	-0.07614
9	244.1	↓	299	299	299	299	31.7	0.07277
10	↓	229.1	299	299	299	299	31.7	-0.07415
11	261.8	↓	299	299	299	299	31.7	0.07508
12	↓	214.9	299	299	299	299	31.7	-0.07798
13	280	↓	299	299	299	299	31.7	0.07321
14	↓	200.9	299	299	299	299	31.7	-0.07517
15	298.5	↓	299	299	299	299	31.7	0.07460
16	↓	185.8	299	299	299	299	31.7	-0.07654
17	304.9	↓	299	299	299	299	31.6	-0.02217

Table3.15 26体目挿入時の過剰反応度測定記録

ステップ°	制御棒位置 (mm)						炉心温度 °C	反応度 % $\Delta k/k$
	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2		
0	170.4	279	279	279	279	279	31.4	—
1	179.6	↓	279	279	279	279	31.4	0.07270
2	↓	263.9	279	279	279	279	31.4	-0.07763
3	196.6	↓	279	279	279	279	31.4	0.07521
4	↓	248.5	279	279	279	279	31.4	-0.08063
5	213.6	↓	279	279	279	279	31.4	0.07748
6	↓	233.1	279	279	279	279	31.4	-0.07719
7	229.9	↓	279	279	279	279	31.4	0.07934
8	↓	217.6	279	279	279	279	31.4	-0.07563
9	245.7	↓	279	279	279	279	31.4	0.07700
10	↓	202	279	279	279	279	31.4	-0.07722
11	261.9	↓	279	279	279	279	31.4	0.07932
12	↓	185.6	279	279	279	279	31.4	-0.07559
13	278.2	↓	279	279	279	279	31.4	0.07797
14	↓	168.2	279	279	279	279	31.4	-0.07850
15	282	↓	279	279	279	279	31.4	-0.03602

Table 3.16 過剩反応度測定結果

装荷 体数	燃料装 荷日	制御棒位置 (mm)						測定値 % $\Delta$ K/K	積算値 % $\Delta$ K/K	温度補正後 % $\Delta$ K/K	事前解析 % $\Delta$ K/K	炉心温度 T11711	仮設温度	重水温度 T1231A	炉心出口 T1211A
		R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2								
15	9/17	685.0	682.0	682.0	682.0	682.0	682.0	0.60	0.6	0.3	0.7	27.4	27.5	25.6	30.1
16	9/20	588.0	587.0	587.0	587.0	587.0	587.0	1.40	2.0	1.5	2.1	32.5	27.5	25.4	30.1
17	9/20	523.0	525.0	525.0	525.0	525.0	525.0	1.30	3.3	2.8	3.3	32.3	27.4	25.6	32.2
18	9/20	481.0	479.0	479.0	479.0	479.0	479.0	1.20	4.5	3.8	4.5	32.1	27.3	25.3	30.1
19	9/21	433.0	430.0	430.0	430.0	430.0	430.0	1.60	6.1	5.6	6.2	31.3	27.4	21.4	31.0
20	9/21	397.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	1.50	7.6	7.1	7.6	31.2	27.7	20.7	31.1
21	9/21	363.6	362.0	362.0	362.0	362.0	362.0	1.30	8.9	8.4	8.9	31.1	27.7	20.4	31.2
22	9/21	338.3	336.0	336.0	336.0	336.0	336.0	1.20	10.1	9.6	10.0	31.1	28.0	20.5	31.2
23	9/21	318.0	316.0	316.0	316.0	316.0	316.0	1.00	11.1	10.6	11.3	31.1	28.3	20.2	31.2
24	9/21	301.0	299.0	299.0	299.0	299.0	299.0	1.00	12.1	11.7	12.2	31.1	28.4	20.1	31.3
25	9/22	282.0	279.0	279.0	279.0	279.0	279.0	1.30	13.4	12.9	13.5	31.6	26.4	19.1	30.7
26	9/22	264.1	262.0	262.0	262.0	262.0	262.0	1.20	14.6	14.1	14.7	31.3	26.6	19.0	30.8

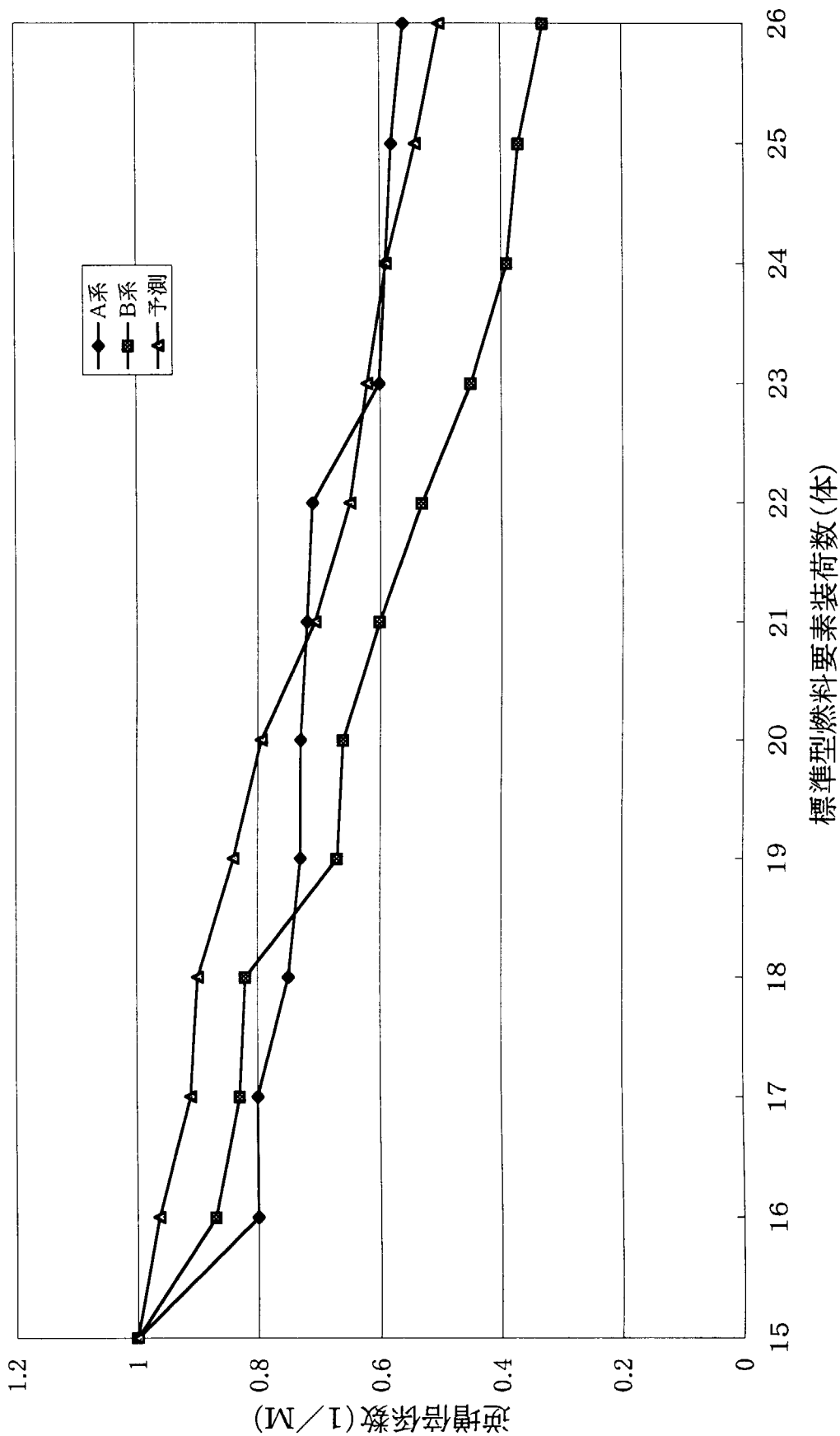


Fig.3.1 シリサイド燃料炉心における逆増倍曲線

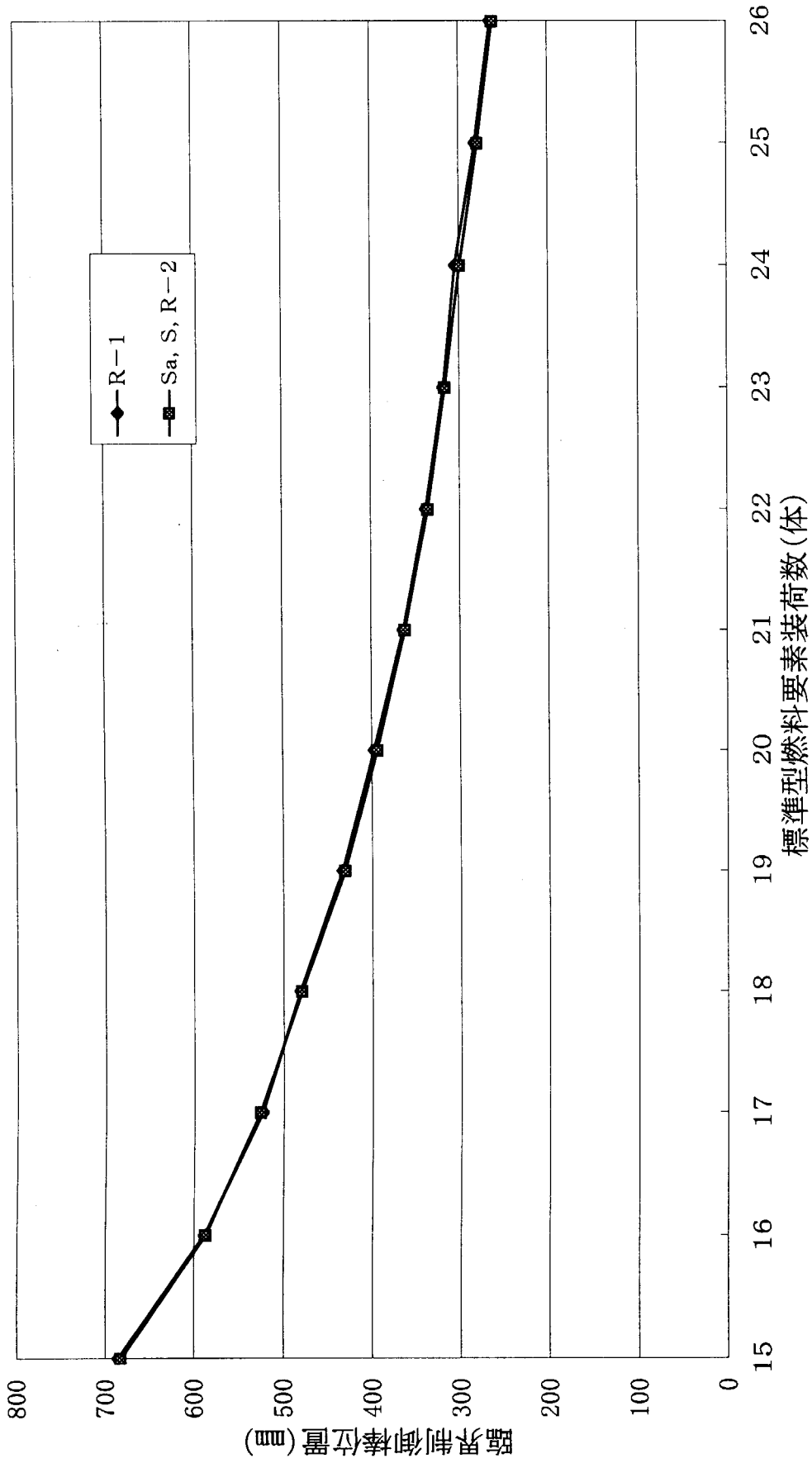


Fig.3.2 臨界制御棒位置と標準型燃料要素装荷数

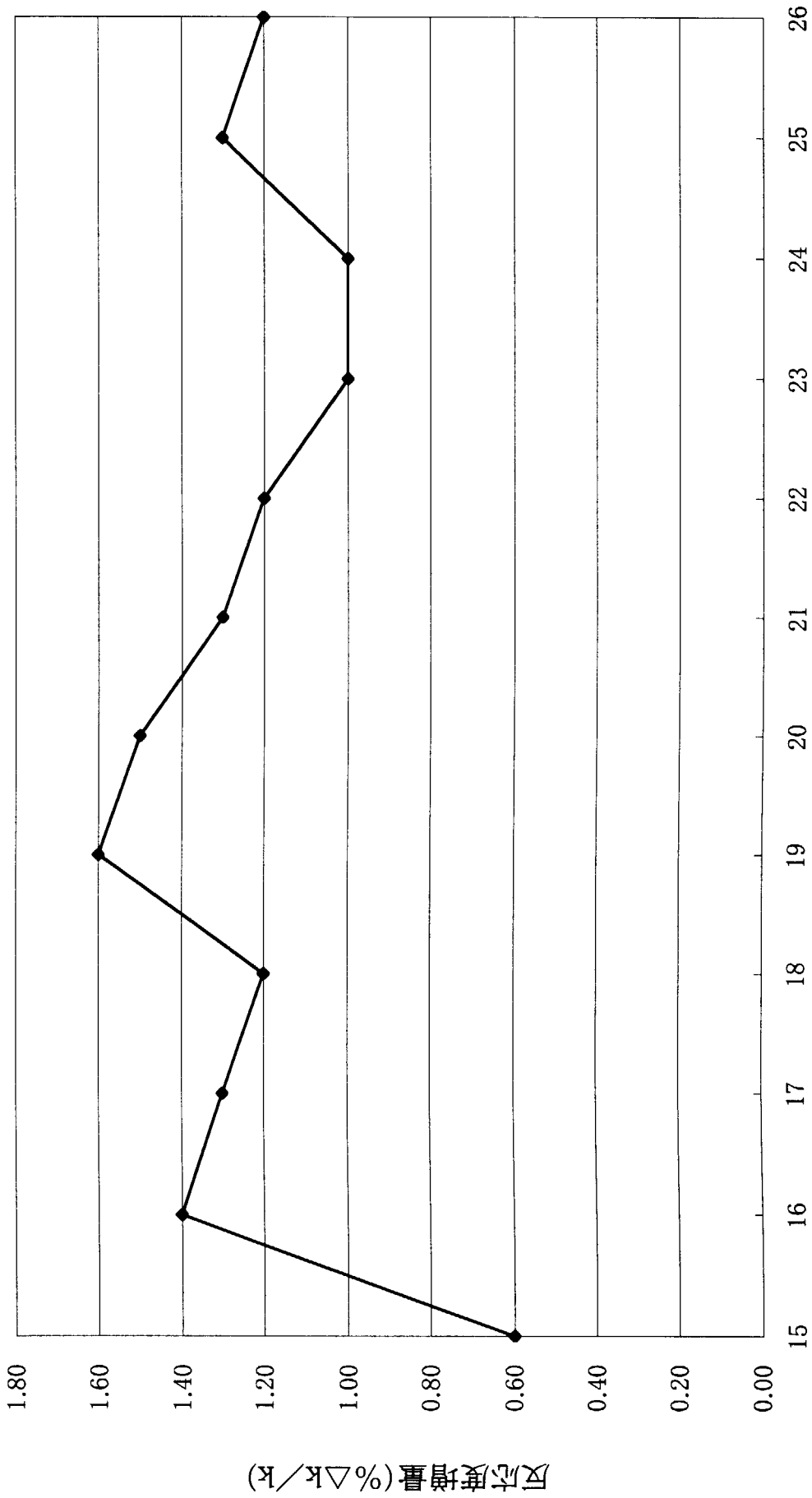


Fig.3.3 標準型燃料要素装荷毎の反応度増加量

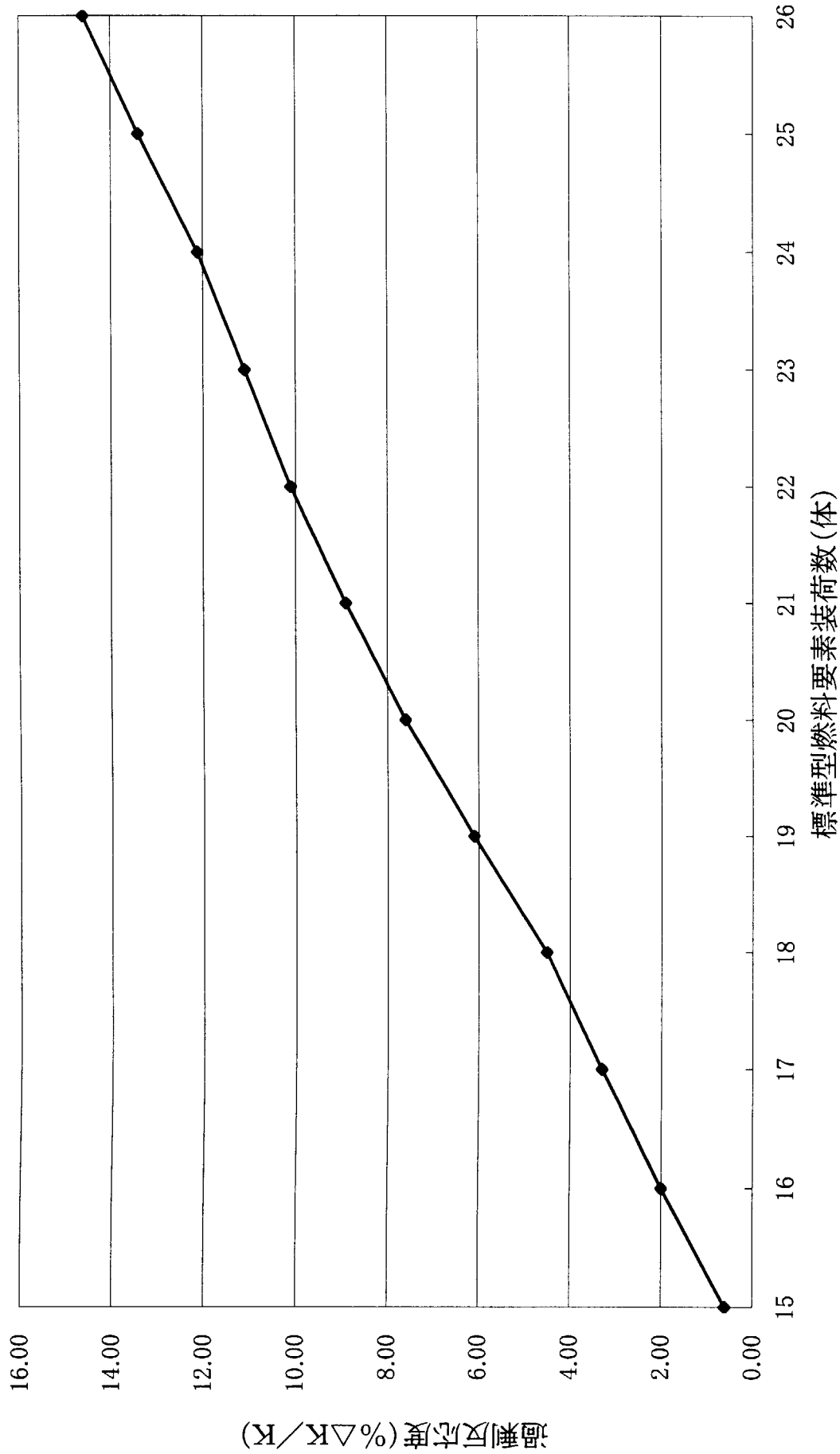


Fig.3.4 過剩反応度測定結果(積算値)



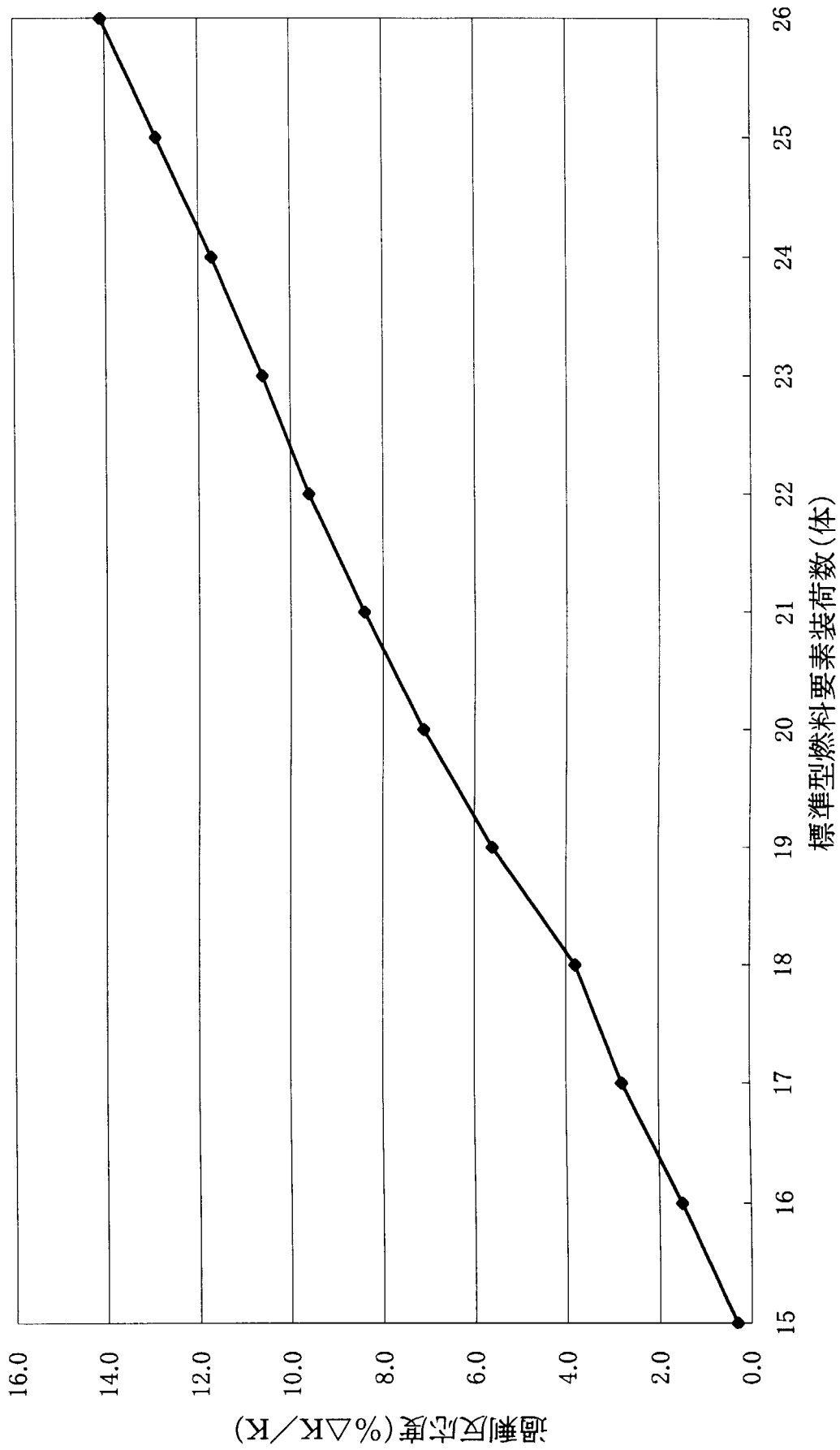


Fig.3.5 過剩反応度測定結果(温度補正後)

## 4. 中性子束分布測定（燃料領域）試験

### 4.1 目的

燃料領域の熱中性子束を測定し、アルミナイド燃料初装荷時の熱中性子束と比較し、共同利用運転に備える。

### 4.2 方法

燃料板間に金箔を固定し、原子炉を低出力で一定時間運転した後、金箔を取り出した。また、熱中性子寄与分のみを求めるためのカドミ比を測定するため、カドミウム板で包んだ金箔についても同様な条件で原子炉の運転を行い、炉心から取り出した。金箔放射化法<sup>9)</sup>により、これらの金箔の放射化量を絶対測定して熱中性子束を算出した。

#### (1) 金箔の固定方法

燃料板間に金箔を固定するため、燃料板間に挿入する高分子ポリエチレンシートを適当な形状に切断したホルダーに金箔を張り付けた。また、カドミウム板で包んだ金箔についても同じ方法で、燃料板間に固定した。

金箔作成の手順及びホルダーの寸法並びに金箔の固定方法をFig.4.1～Fig.4.4に示す。

#### (2) 測定対象燃料位置

平成2年に行ったアルミナイド燃料炉心の中性子束測定では、炉心の対称性を考慮して、1/2炉心について重点的に測定している。（その反対側については、代表点のみの測定としていた。）

今回の測定では、

- ①アルミナイド燃料時の測定対象燃料位置と同じ炉心位置とした。
- ②アルミナイド燃料時の測定で同一の測定結果が得られる箇所については、一括して代表点の測定とした。
- ③横方向の測定対象燃料位置は、アルミナイド燃料時の横方向の測定データを参考にして、熱中性子束の最大値と最小値の差が最も大きいベリリウム反射体近くと、最も差の小さい炉心中心部の炉心位置とした。
- ④アルミナイド燃料時の軸方向の測定データでは制御棒位置がフラットであったため、熱中性子分布は、炉心下部で膨らんでおり、全ての燃料位置で同じ傾向を示していた。今回の軸方向の熱中性子束の測定においても制御棒位置をフラットで行うこととし、軸方向の測定対象燃料位置は、炉心中心部と炉心外周部の任意の炉心位置とした。

以上より、測定する燃料位置は、燃料板間横方向の測定は炉心位置C1、D3とした。軸方向の測定は炉心位置C4、G3とした。測定対象燃料位置をFig.4.5に示す。

#### (3) 測定燃料板間位置

測定燃料板間位置は、アルミナイド燃料の特性測定時と比較評価するため、金箔の取り付け位置を同じ位置にすることとした。

横方向の測定位置は、燃料ミート中心位置について5カ所を測定できるように均等に配置した。また、軸方向の測定位置は、燃料板間中心位置について7カ所に均等に配置した。測定燃料板間位置をFig.

4.6に示す。

#### (4) 金箔照射条件

金箔とカドミウム板で包んだ金箔の2回の照射運転を行った。各々の運転は原子炉出力20W、照射時間2時間、全制御棒をフラットパターンとする同一条件で行った。詳細を次に示す。

項目	金箔の照射時	Cd比測定時
20W到達時間	9/27 13:59	9/28 13:58
原子炉停止時間	15:59	15:58
照射時間	2 時間	2 時間
線形出力計A	20 W	20 W
制御棒位置		
S-1	264 mm	266 mm
Sa-1	264 mm	266 mm
R-1	263 mm	263 mm
S-2	264 mm	266 mm
Sa-2	264 mm	266 mm
R-2	264 mm	266 mm

#### (5) 金箔の放射エネルギー測定

照射後、金箔を張り付けたホルダー毎に燃料板から抜き出した後、このホルダーから金箔を取り外した。放射エネルギーの測定は、 $\beta - \gamma$ 同時計数法<sup>9)</sup>により測定した。

#### (6) 熱中性子束の算出

金箔の放射エネルギーから以下の式により熱中性子束を求めた。

$$\phi_{th} = \frac{1}{NoW} \times \frac{1.128}{\sigma} \times \frac{1}{g(T)} \times \bar{A} \times \frac{\exp(\lambda td)}{1 - \exp(-\lambda ti)}$$

$$\times \frac{\lambda tm}{1 - \exp(-\lambda tm)} \times \left(1 - \frac{1}{FCd}\right) \times f \times \frac{1}{E} \quad [n/m^2.s]$$

ここで、

- No : 単位質量当たりの<sup>197</sup>Au原子数 [ $\times 10^{27}$  atoms/kg]
- W : 金箔の質量 [kg]
- $\sigma$  : 放射化断面積 [ $\times 10^{-28}$  m<sup>2</sup>]
- g(T) : 中性子温度Tにおける非 $1/v$ 因子 ( $1/v$ 吸収物質ではg(T)=1)
- $\lambda$  : 崩壊定数 [1/s]
- td : 冷却時間[s]
- ti : 照射時間[s]
- tm : 計測時間[s]
- Fcd : カドミ比
- f : 熱中性子スペクトル補正係数 (  $\frac{0.625\text{eV以下の熱中性子束}}{0.4 \text{ eV以下の熱中性子束}}$  )
- E : 金箔の厚さ(自己遮蔽効果)の補正
- A : 放射エネルギー[Bq]

である。

## (7) 熱中性子束を求めるための各種の補正係数

## ①カドミ比(Fcd)

金箔とカドミウム板で包んだ金箔の放射エネルギーから、カドミ比を求めた。

## ②金箔の厚さ(自己遮蔽効果)の補正(E)

今回使用した金箔の厚さは、0.25mmであるため、厚さによる自己遮蔽効果を考慮した。

金箔内で、吸収されずに到達する中性子は、

$$I(x) = I_0 e^{-N\gamma t} \quad \text{で表される。}$$

$$N \quad : \quad \text{金の原子個数密度(1/m}^3\text{)}: 3.057 \times 10^{24} \text{ (1/kg)} \times 1.93 \times 10^4 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\gamma t \quad : \quad \text{全断面積 (m}^2\text{)} \quad : 1.078 \times 10^{-26} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$t \quad : \quad \text{金箔の厚さ(m)}$$

金の $N\gamma t$  :  $6.36 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$  であるので、次の通りとなる。

項目	金箔厚さ	$I_0$	$I(x)$
アルミナイド燃料時	0.04 mm	1	0.97
シリサイド燃料時	0.25 mm	1	0.85

金箔内で、吸収されずに到達する中性子は、0.25mmで0.85となる。自己遮蔽による減衰部分と減衰しない場合の面積比を求め、これを補正係数とした。

$$\begin{aligned} \text{補正係数 (E)} &= \frac{\text{減衰した場合}}{\text{減衰無しの場合}} = \frac{0.85 \times 0.25 + (1 - 0.85) \times 0.25/2}{1 \times 0.25} \\ &= 0.93 \end{aligned}$$

## ③熱中性子スペクトル補正係数(f)

JRR-3Mでは、0.625eV以下の中性子を熱中性子としていることから、カドミウムにより0.4eV以下の中性子がカットされるための補正を行った。0.625eV以下の中性子と0.4eV以下の中性子の割合をMPVコード<sup>1),3)</sup>により評価し、補正係数を求めた。

$$\text{熱中性子スペクトル補正係数 (f)} = 1.05$$

## 4.3 結果

各測定位置の金箔(質量:189.5mg~218.0mg、個数:24個×2(半分はCd比用))を2時間照射し、約7日間の冷却後、1000秒または2000秒の測定時間で放射化量を絶対測定した。測定した放射化量から24個のカドミ比を求め、補正無しの熱中性子束を算出した。次に、自己遮蔽効果及び熱中性子スペクトルの補正を行って補正熱中性子束を算出した。この補正熱中性子束を測定値とした。

熱中性子束分布は、燃料要素軸方向は下部位置で熱中性束が膨らむ測定結果となり燃料要素横方向は炉心中心に近づくに従い増大し、ベリリウム反射体付近にて熱中性子束が膨らむ結果となった。燃料要素横方向の熱中性子束分布をFig.4.7に、燃料要素軸方向の熱中性子束分布をFig.4.8に示す。

#### 4.4 評価

本試験における熱中性子束測定では代表点のみの測定ではあったが、炉心径方向及び燃料要素軸方向の熱中性子束分布は、測定結果とSRACコード<sup>11,7)</sup>による解析結果がよく一致した。熱中性子束分布の測定結果と解析結果の比較を炉心径方向についてFig.4.9に、燃料要素軸方向についてFig.4.10に示す。

アルミナイド燃料初装荷炉心とシリサイド燃料炉心の熱中性子束分布の比較を燃料要素横方向及び燃料要素軸方向について各々Fig.4.11及びFig.4.12に示す。アルミナイド燃料の熱中性子束の測定値は、原子炉出力10Wでの値であるため、シリサイド燃料の熱中性子束測定値を10W換算した値を用いて比較した。その結果、横方向、軸方向ともにアルミナイド燃料初装荷炉心に対するシリサイド燃料炉心の熱中性子束の比(シリサイド燃料/アルミナイド燃料)はほぼ一定であり、全測定点の平均は約0.51であった。この熱中性子束の減少は、アルミナイド燃料に比べシリサイド燃料はウラン密度を増加し、カドミウムワイヤを配置したことによるものと考えられる。ただし、重水タンク内の熱中性子束については、アルミナイド燃料炉心と同等の熱中性子束を維持している結果をSRACコード<sup>11,7)</sup>による解析によって得ている。

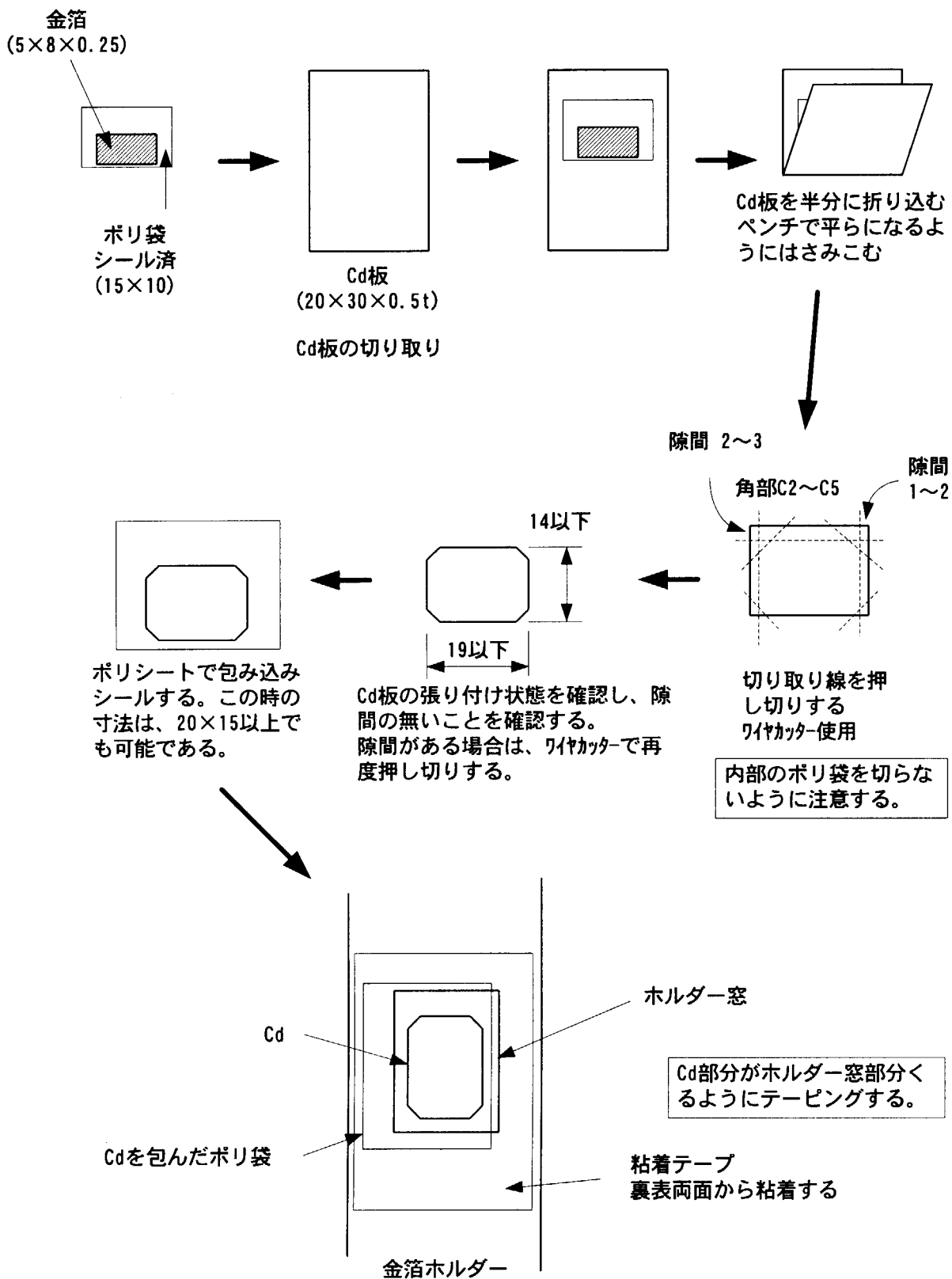


Fig. 4.1 金箔の作成手順

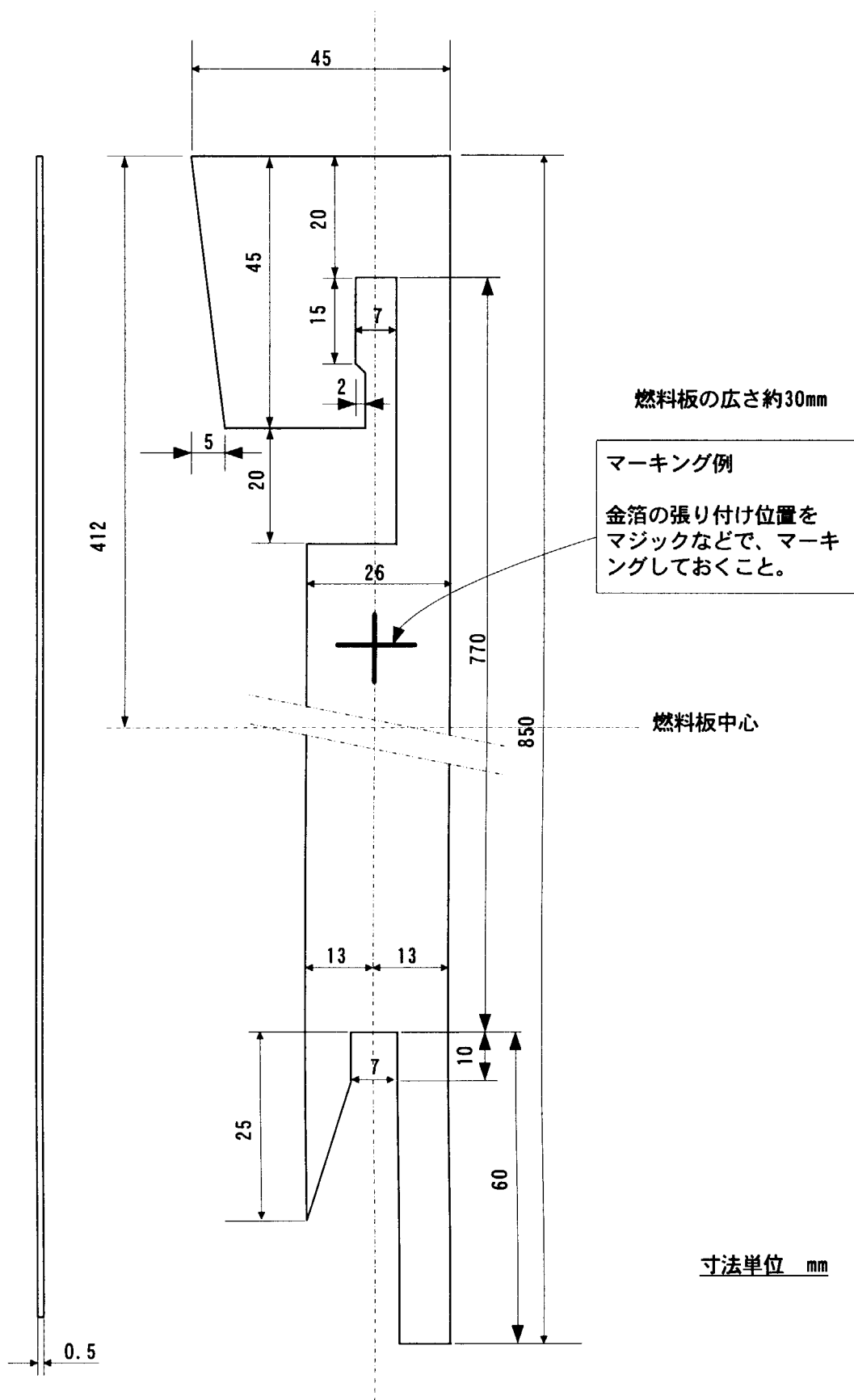


Fig. 4.2 ホルダー製作寸法

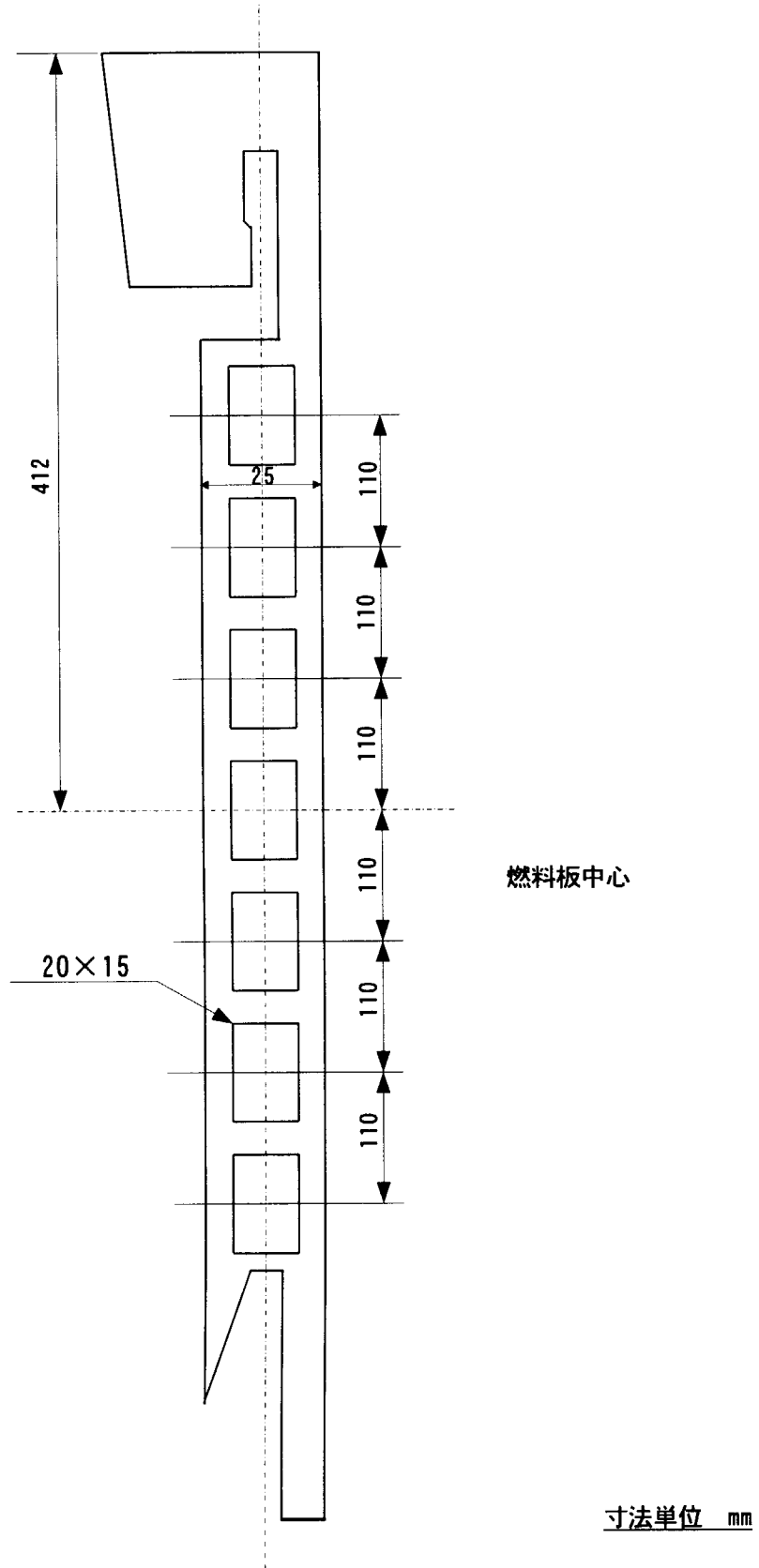


Fig. 4.3 Cd用ホルダーの寸法



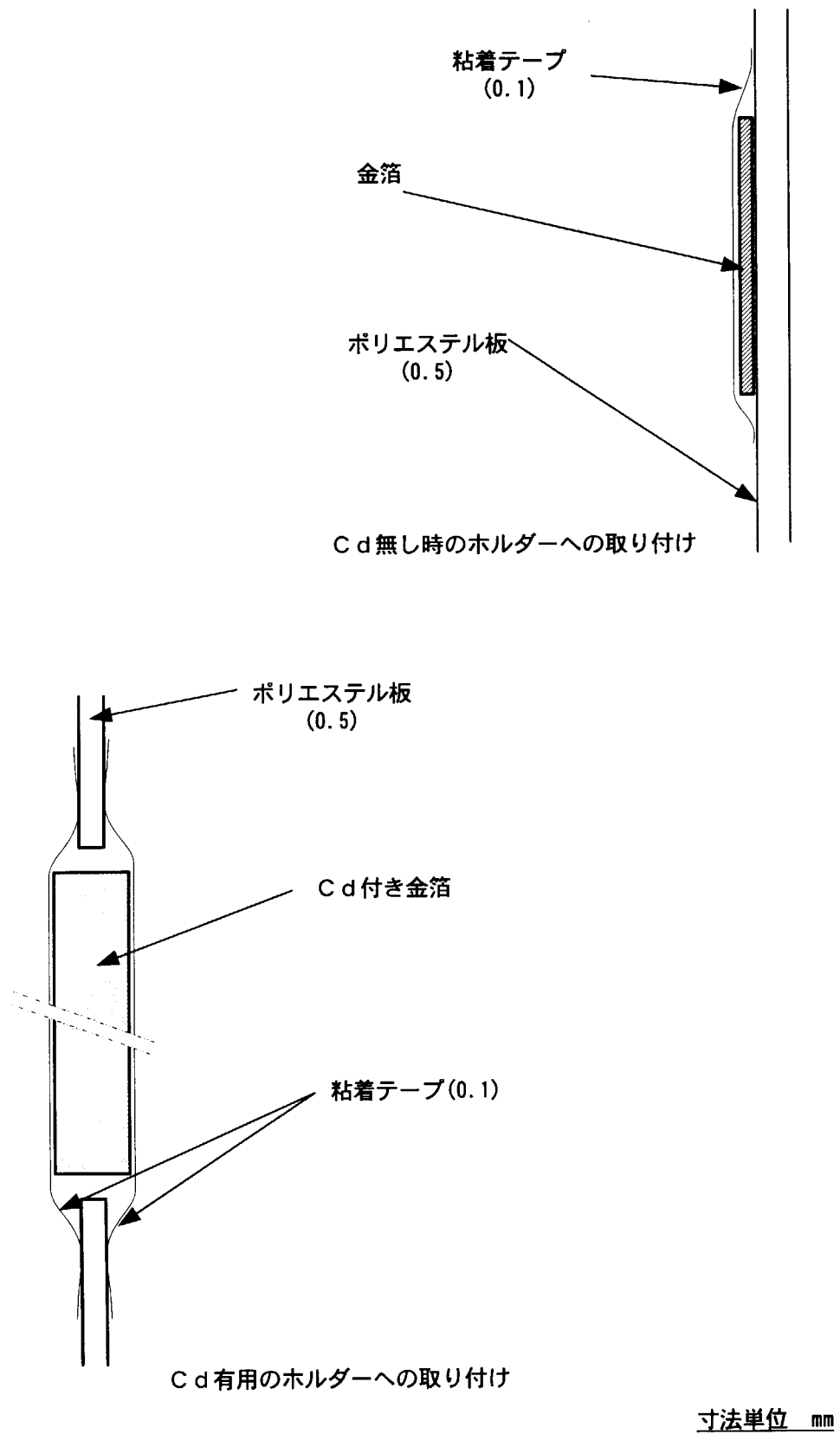


Fig. 4.4 金箔のホルダーへの固定方法

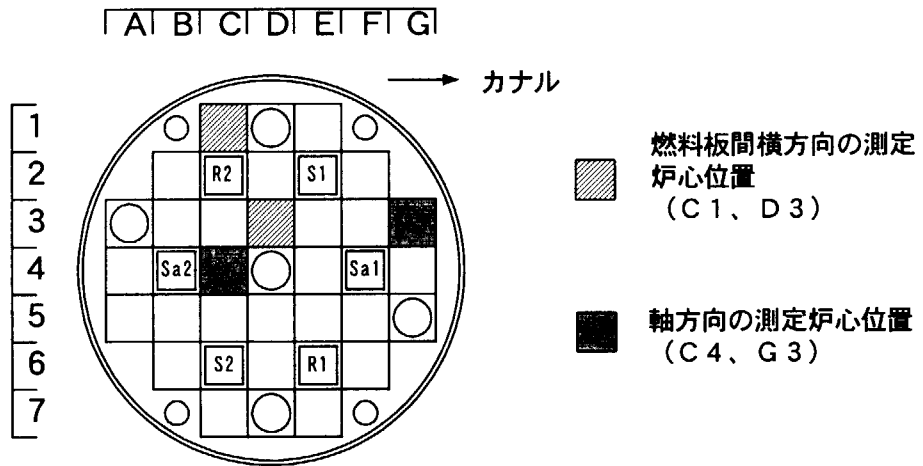


Fig. 4.5 測定対象燃料位置

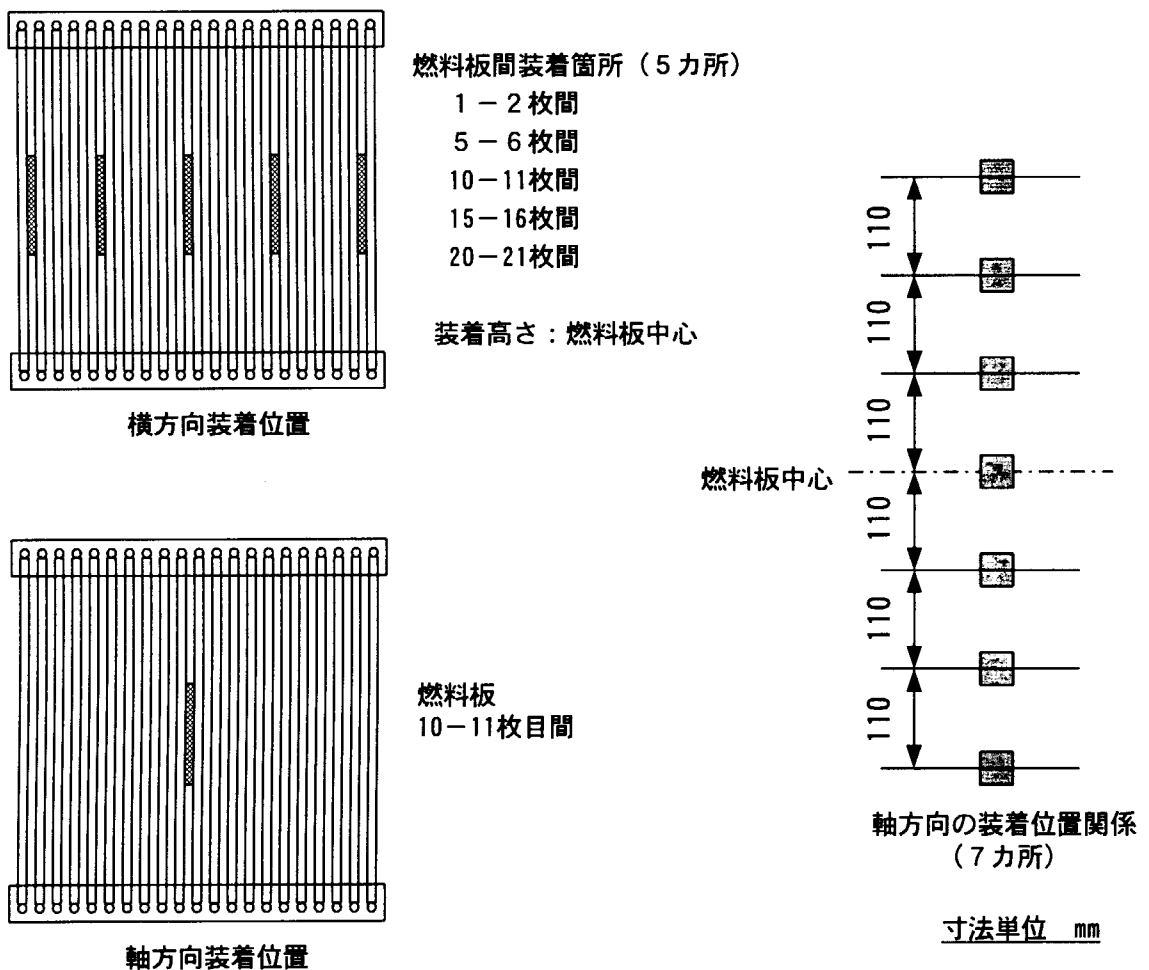


Fig. 4.6 測定燃料板間位置

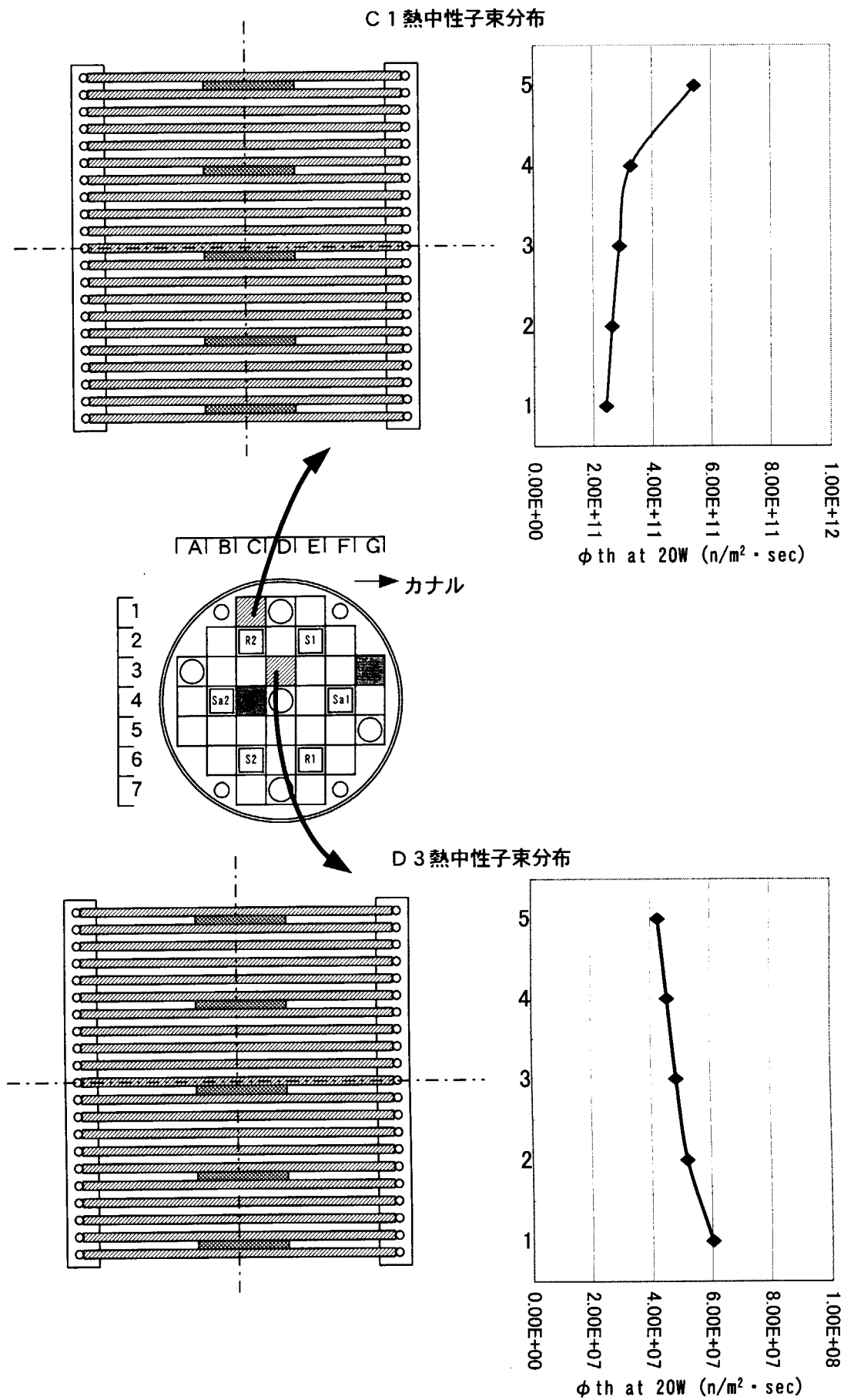


Fig. 4.7 横方向の熱中性子束分布

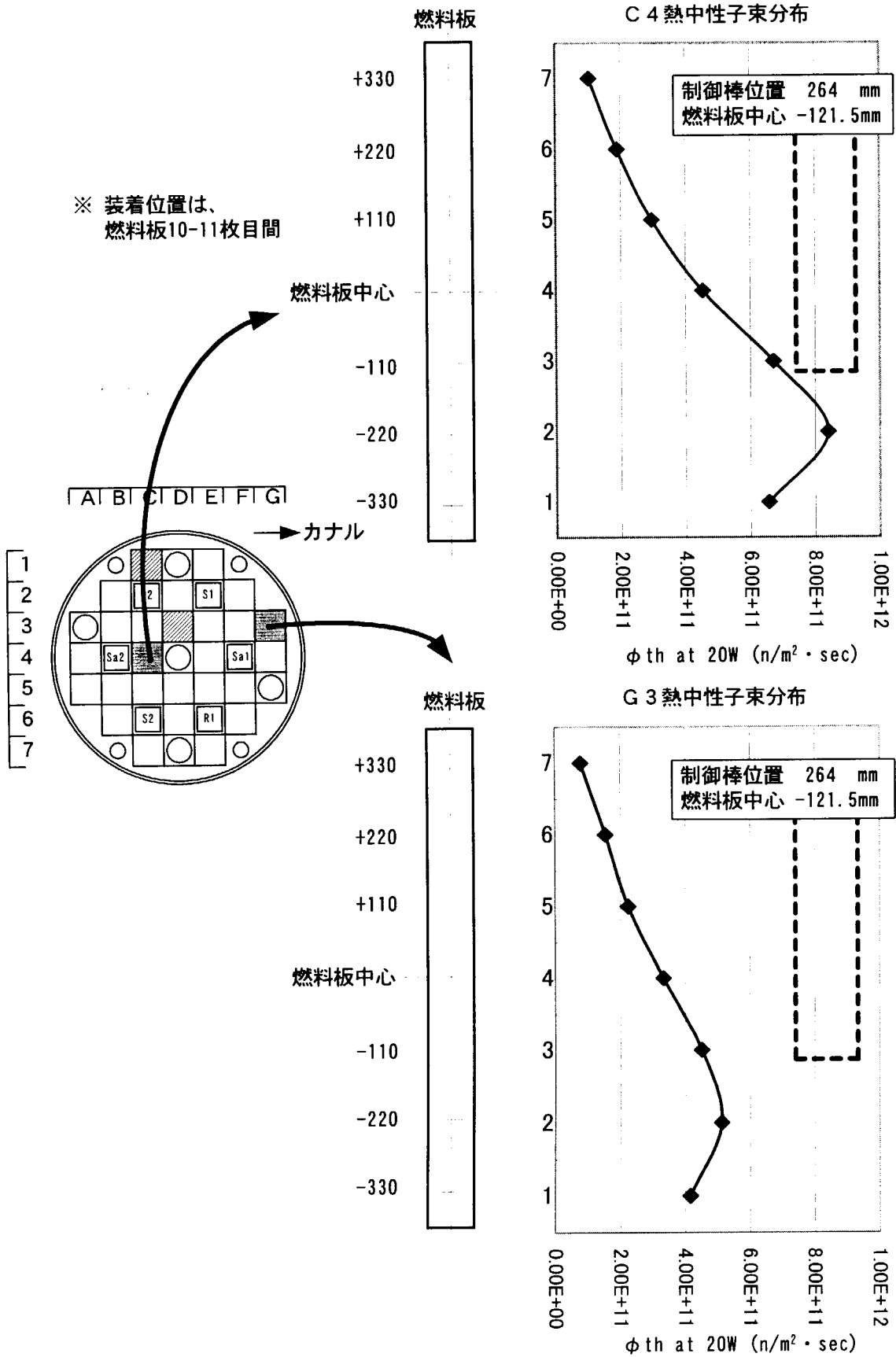


Fig. 4.8 軸方向の熱中性子束分布

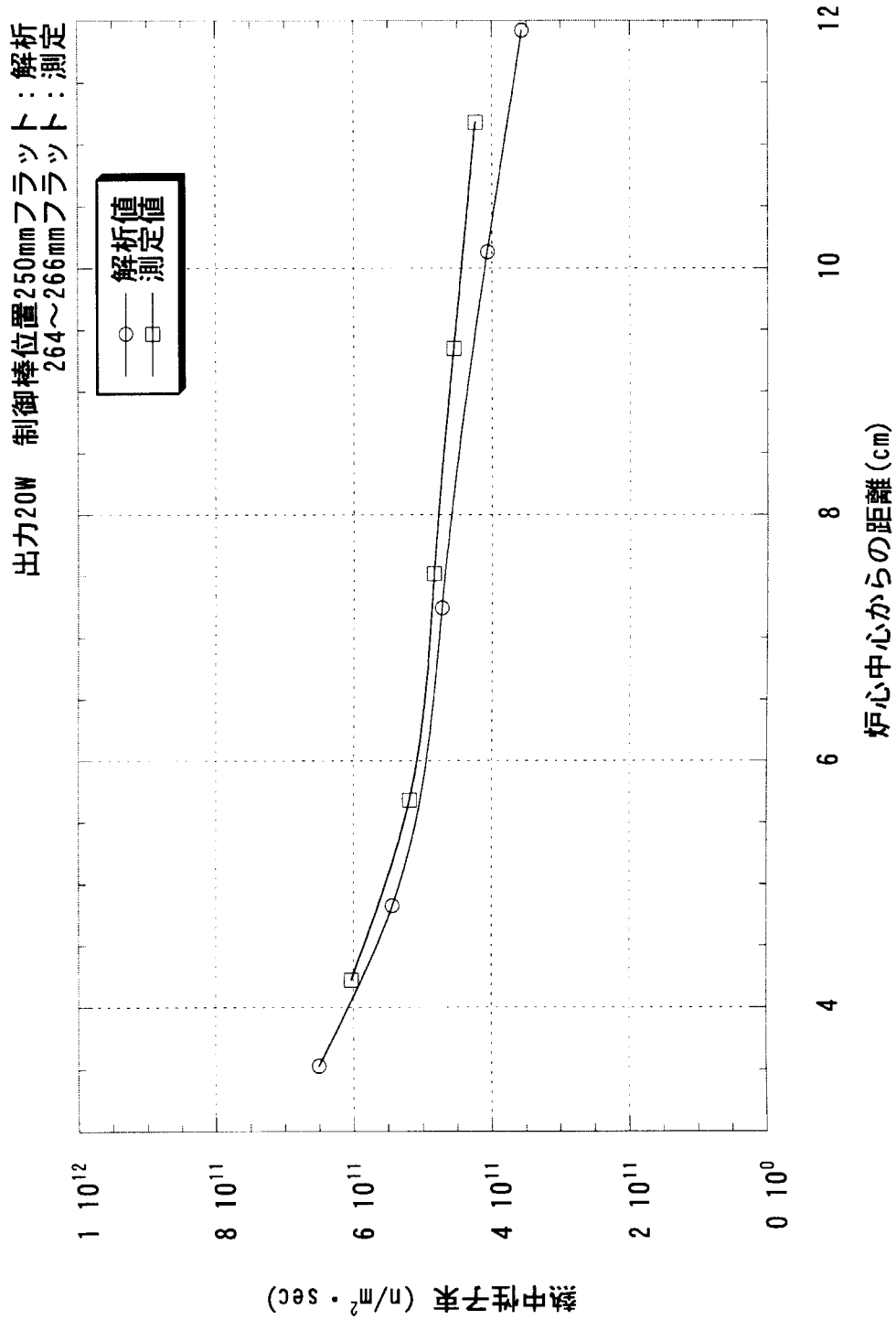


Fig. 4.9 解析結果と測定結果の比較 (炉心径方向)

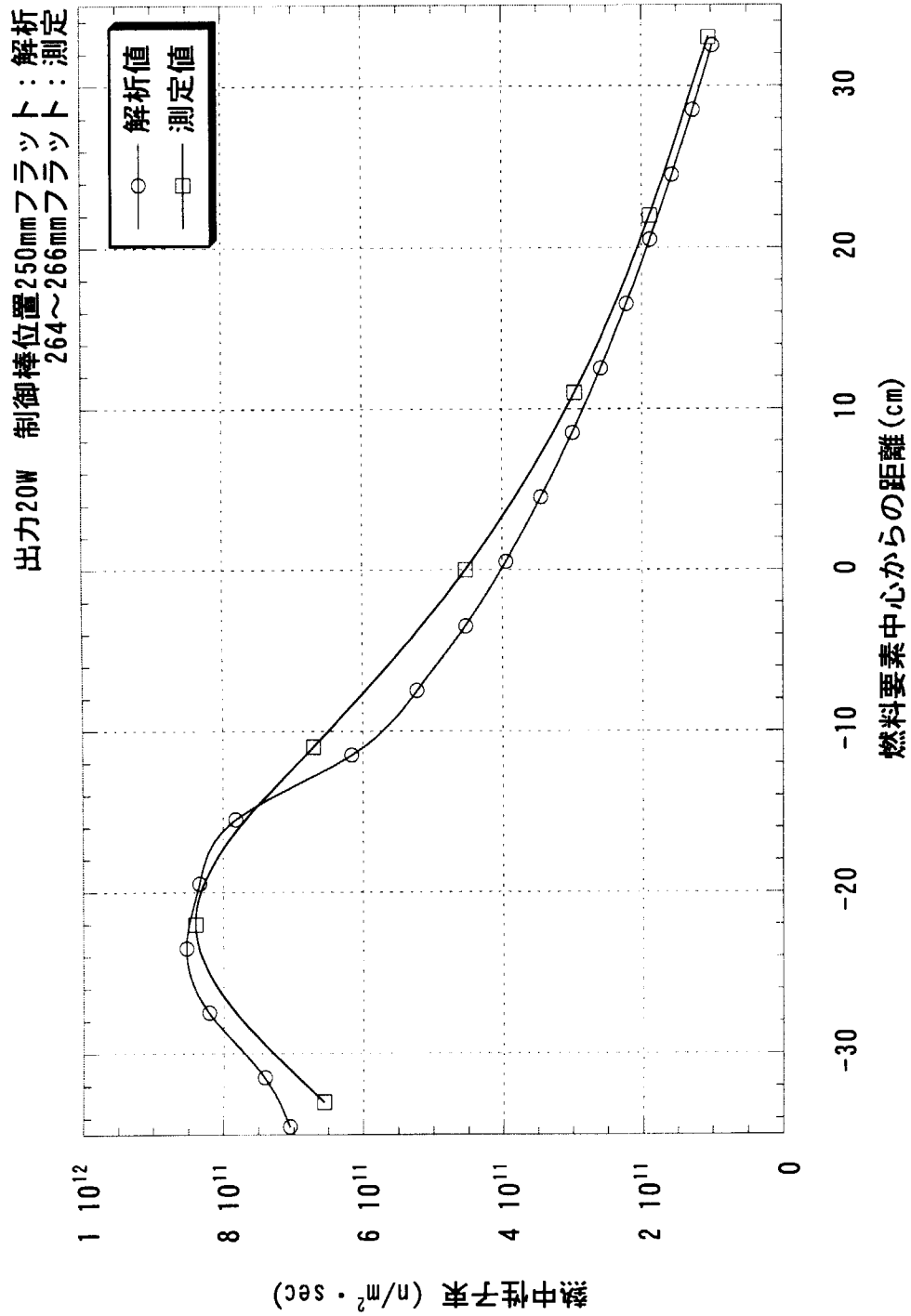


Fig. 4.10 解析結果と測定結果の比較 (燃料要素軸方向)

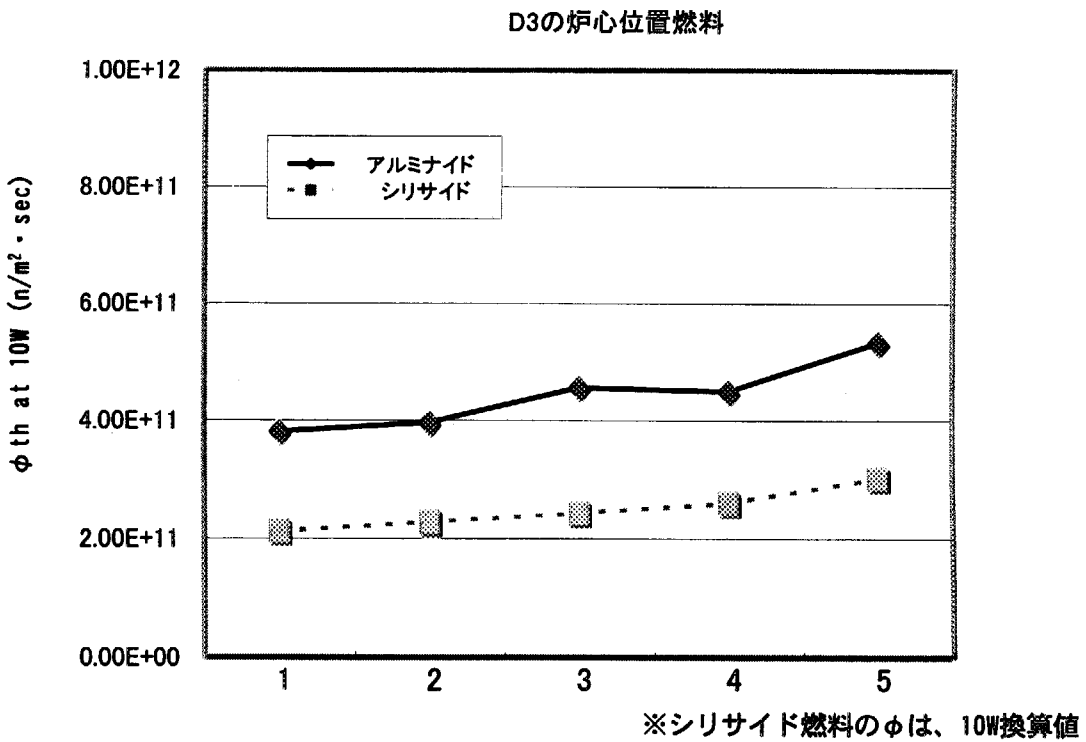
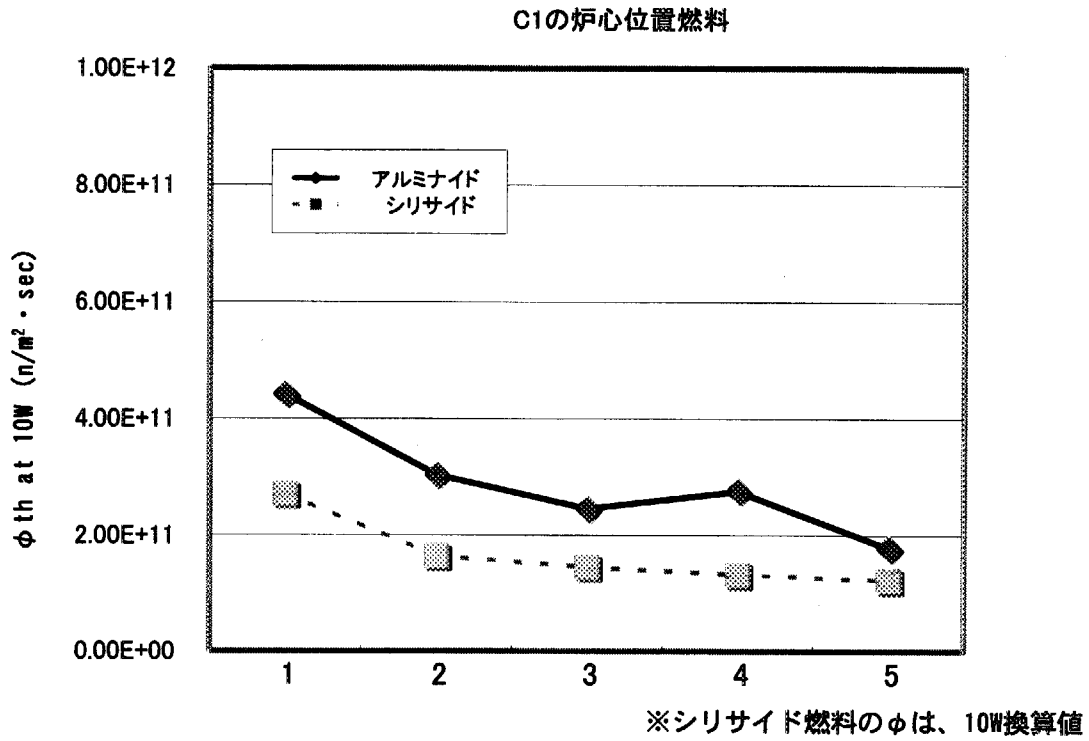


Fig. 4.11 燃料要素横方向の熱中性子束分布の比較

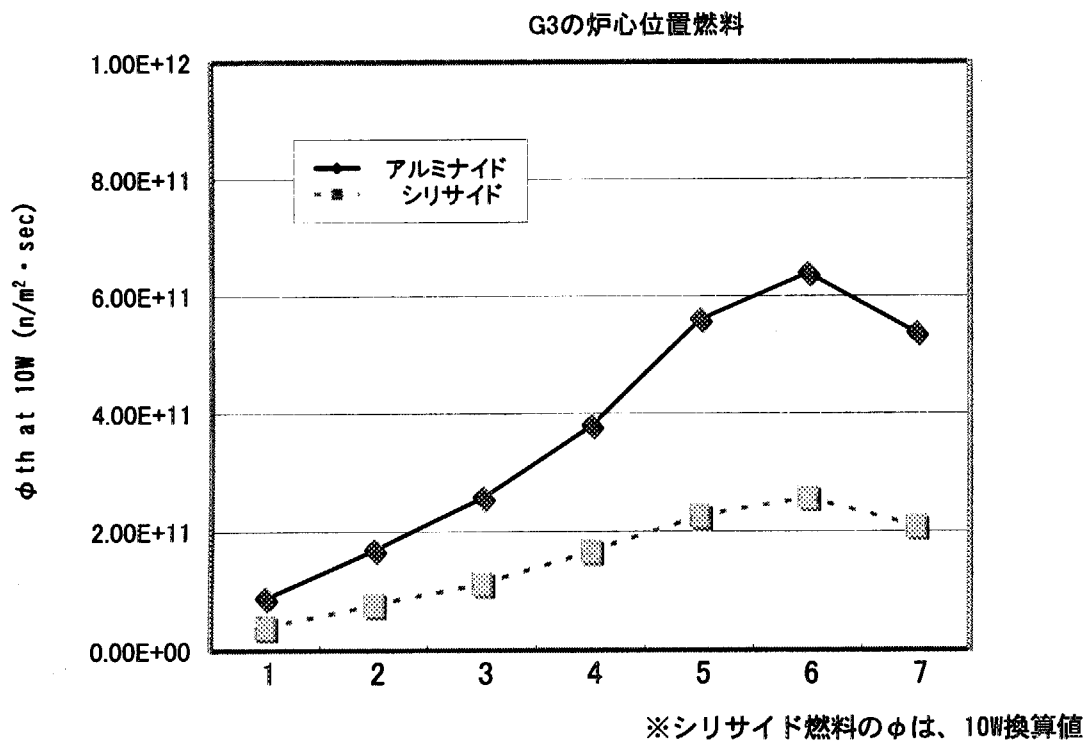
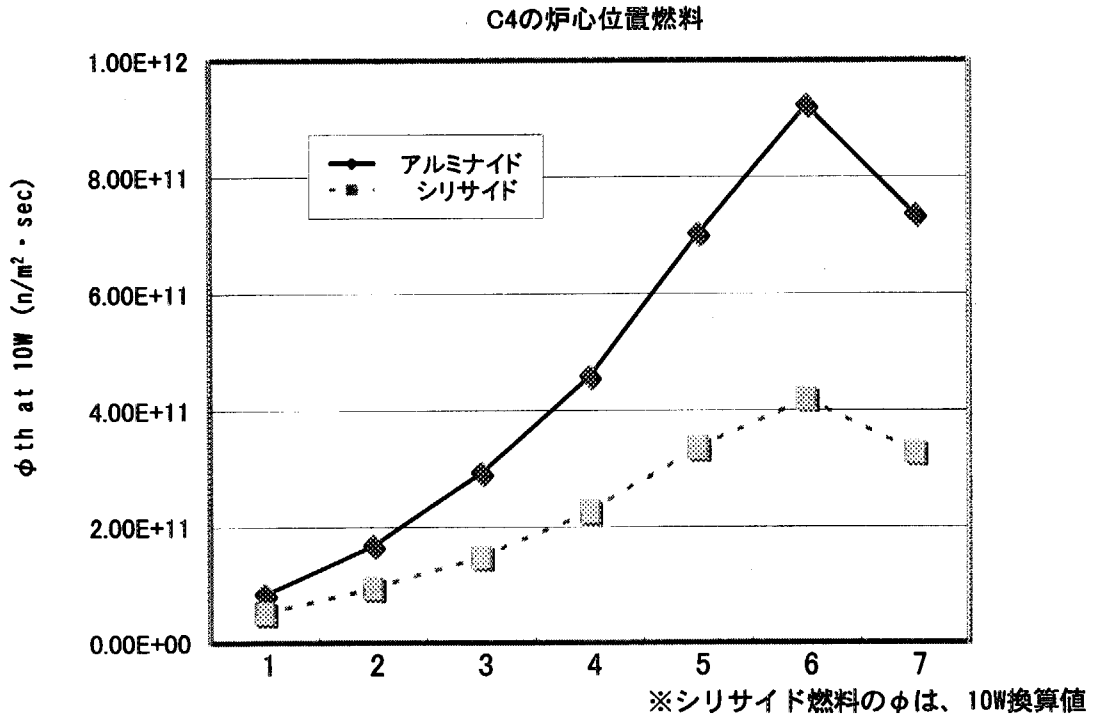


Fig. 4.12 燃料要素軸方向の熱中性子束分布の比較



## 5. 制御棒反応度値測定試験

### 5.1 目的

各制御棒の反応度値を逆動特性法（I K法）により測定し、反応度制御能力及び最大反応度添加率を求め、それぞれの値が制限値を満足していることを確認する。

### 5.2 方法

被測定制御棒を全挿入、補償用制御棒（Sa-1 の場合 Sa-2、S-1 の場合 S-2、R-1 の場合 R-2）を全引き抜きの状態とし、その他の制御棒により原子炉を臨界状態（仮設C I C - c h 1 電流値約  $0.1 \times 10^7 \text{A}$ ）とした。次に、反応度測定装置を制御棒校正モードで起動し、レコーダに仮設中性子計測系C I C - c h 1 の信号と反応度を出力した。

測定は、レコーダを監視しながら行い、最初のステップは被測定制御棒を所定の距離（反応度で約  $0.03\% \Delta k/k$ ）引き抜き原子炉を臨界超過とした。その後、原子炉出力が初期値の約6倍（仮設C I C - c h 1 電流値約  $0.6 \times 10^7 \text{A}$ 、線形出力計約5W）に上昇したところで補償用制御棒を所定の距離（反応度で約  $-0.075\% \Delta k/k$ ）挿入した。そして再び、原子炉出力が初期値まで低下したところで被測定制御棒を所定の距離（反応度で約  $0.075\% \Delta k/k$ ）引き抜き原子炉を臨界超過とした。以上の操作を被測定制御棒及び補償用制御棒の全ストロークについて行った。

### 5.3 結果

各制御棒の各ステップ毎の測定記録をもとに各制御棒毎の全反応度値を求め、反応度値曲線（積分曲線）から最小二乗法を用いて10次近似式を作成した。この10次近似式で表した積分曲線を微分して反応度変化率曲線（微分曲線）を作成した。各制御棒毎の反応度値及び最大反応度変化率を Table5.1 に、最大反応度添加率を Table5.2 に示す。また、反応度値曲線（積分曲線）を Fig.5.1(1)～5.1(6)に、反応度変化率曲線（微分曲線）を Fig.5.2(1)～5.2(6)に示す。

### 5.4 評価

各制御棒の反応度値の合計から求めた反応度制御能力（最大反応度効果を有する制御棒1本〔Sa-2 制御棒  $4.583\% \Delta k/k$ 〕が未挿入とした時）は  $19.3\% \Delta k/k$  であり、制限値である制御棒の反応度制御能力  $19.1\% \Delta k/k$  以上であることを確認した。また、原子炉停止余裕（最大反応度効果を有する制御棒1本を引抜きとした時）は  $5.0\% \Delta k/k$  であり、制限値の  $1.0\% \Delta k/k$  以上（炉心温度  $20^\circ\text{C}$  において）であることを確認をした。

最大反応度添加率は、各制御棒の反応度変化率曲線（微分曲線）から求めた最大反応度変化率と、それぞれの制御棒の最大駆動速度とから求めた。さらに、制御棒の引き抜き操作上可能な最大引き抜き本数の条件（粗調整棒2本同時引き抜き、または微調整棒自動引き抜き時）における最大反応度添加率は、R-2 制御棒自動引き抜き時の  $4.70 \times 10^{-2}\% \Delta k/k/s$  が最大であったが、制限値である  $7.5 \times 10^{-2}\% \Delta k/k/s$  以下であることを確認した。

Table 5.1 反応度値及び最大反応度変化率

制御棒	反応度値(% $\Delta k/k$ )	最大反応度変化率(% $\Delta k/k/mm$ )
粗調整棒(Sa-1)	4.255	$1.032 \times 10^{-2}$
粗調整棒(Sa-2)	4.583	$1.099 \times 10^{-2}$
粗調整棒(S-1)	3.967	$0.968 \times 10^{-2}$
粗調整棒(S-2)	3.863	$0.984 \times 10^{-2}$
微調整棒(R-1)	3.467	$0.872 \times 10^{-2}$
微調整棒(R-2)	3.728	$0.938 \times 10^{-2}$

Table 5.2 最大反応度添加率

制御棒	最大反応度変化率 (% $\Delta k/k/mm$ )	最大駆動速度 (m/s)	最大反応度添加率 (% $\Delta k/k/s$ )
粗調整棒(Sa-1)	$1.03 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.75 \times 10^{-2}$
粗調整棒(Sa-2)	$1.10 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.87 \times 10^{-2}$
粗調整棒(S-1)	$0.97 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.65 \times 10^{-2}$
粗調整棒(S-2)	$0.98 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.67 \times 10^{-2}$
微調整棒(R-1)	$0.87 \times 10^{-2}$	$5.0 \times 10^{-3}$	$4.35 \times 10^{-2}$
微調整棒(R-2)	$0.94 \times 10^{-2}$	$5.0 \times 10^{-3}$	$4.70 \times 10^{-2}$

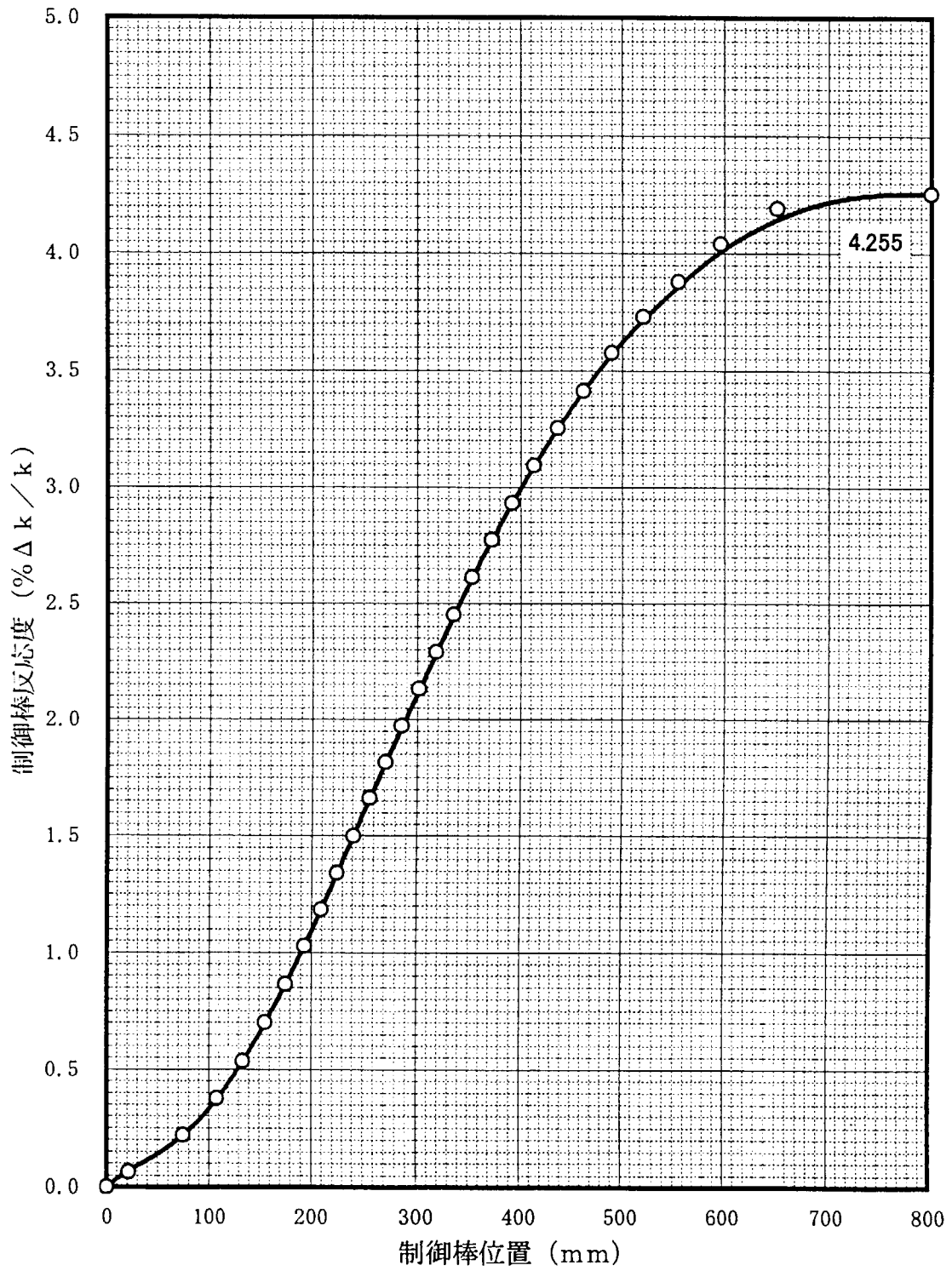


Fig. 5.1 (1) 反応度値曲線 (S a - 1)

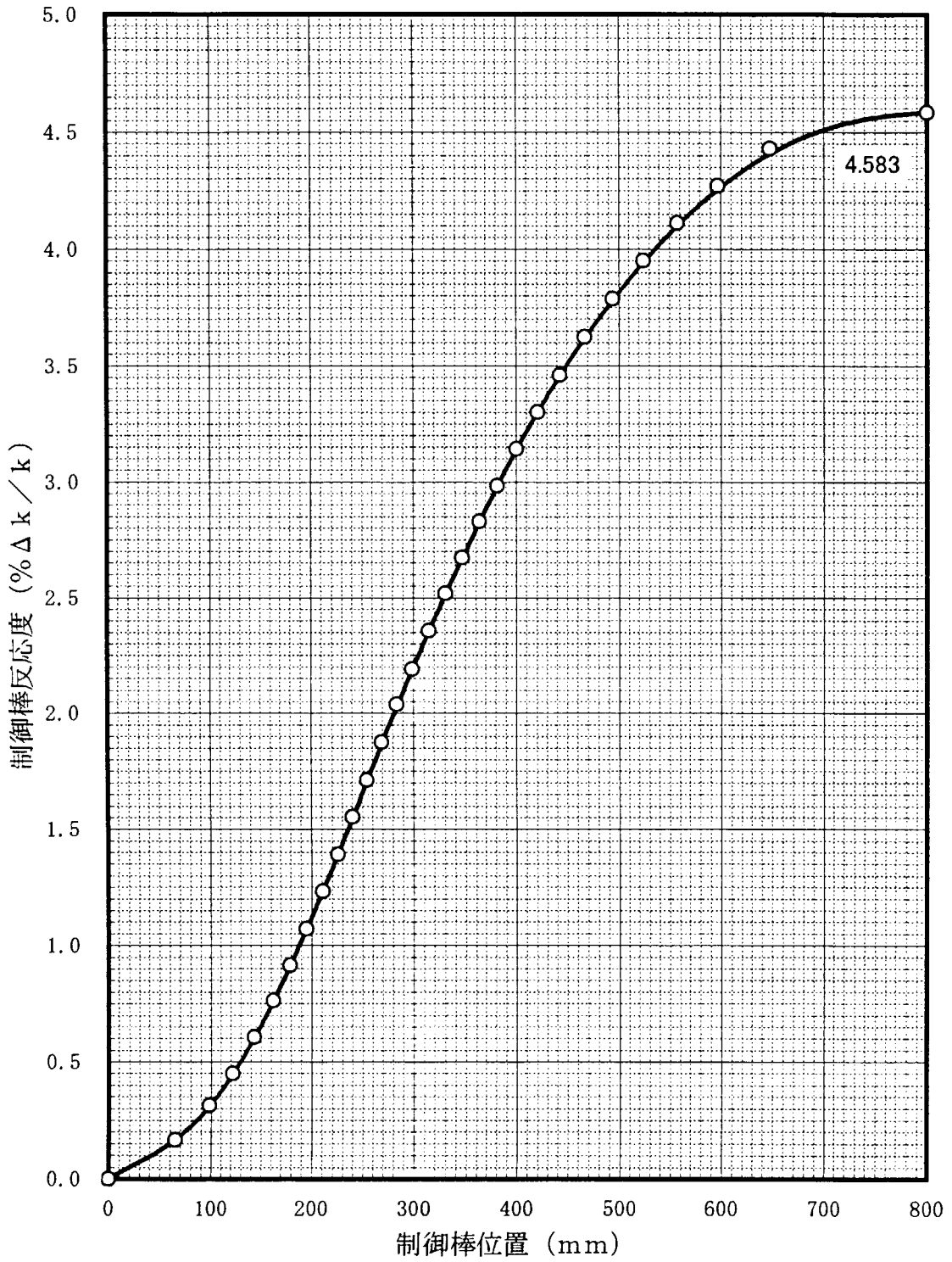


Fig. 5.1 (2) 反応度値曲線 (S a - 2)

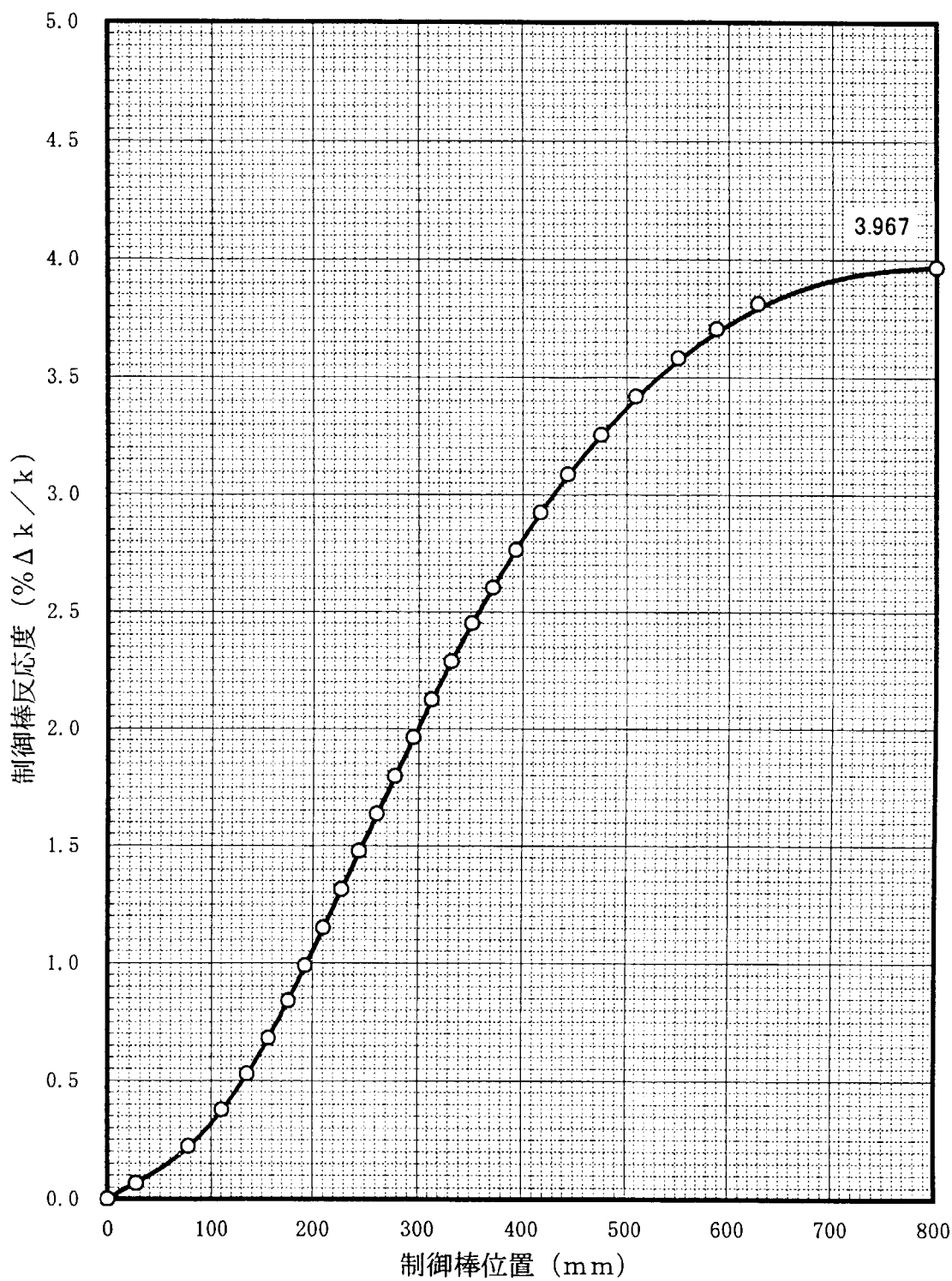


Fig. 5.1 (3) 反応度値曲線 (S-1)

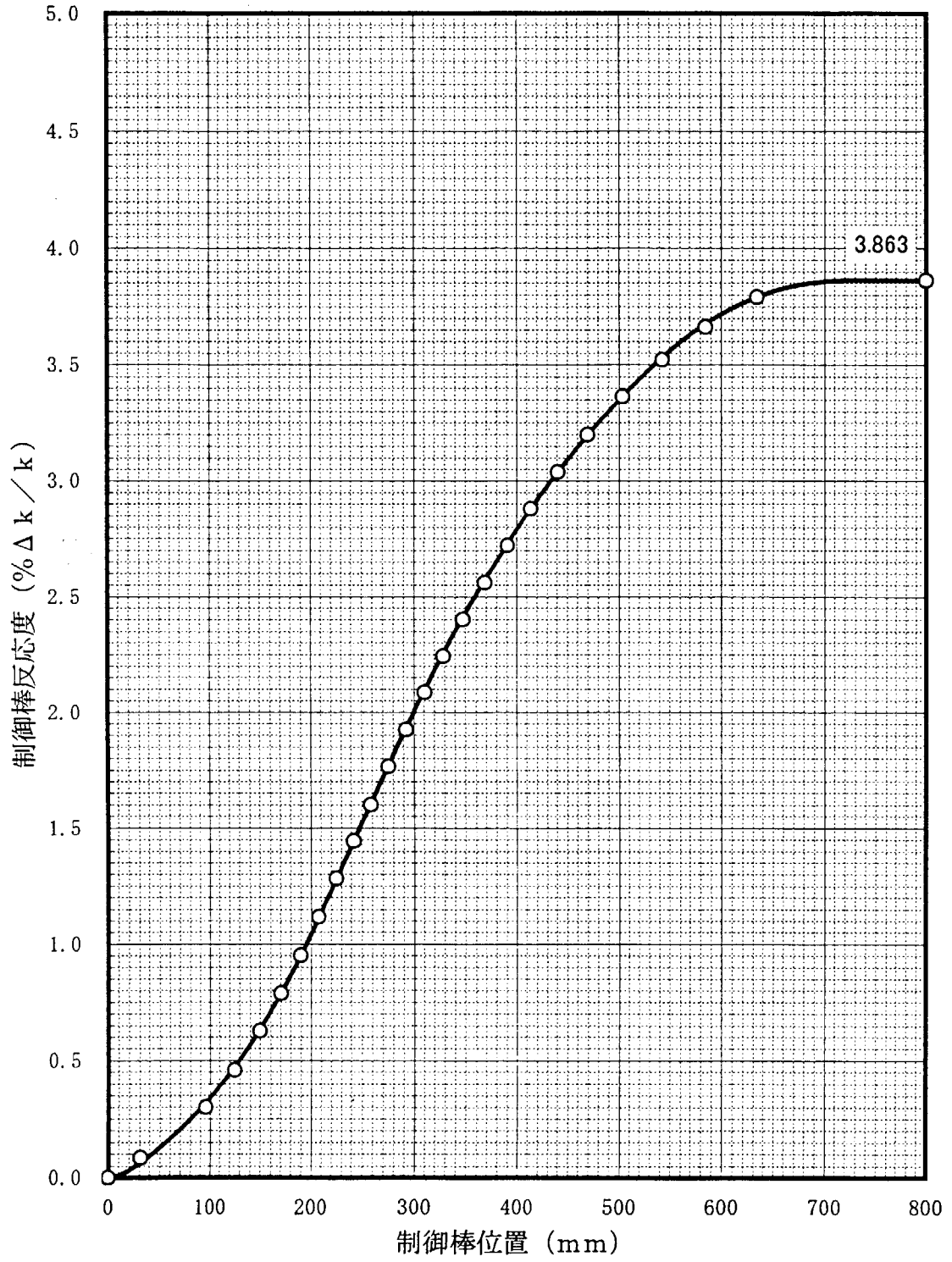


Fig. 5.1 (4) 反応度価値曲線 (S-2)

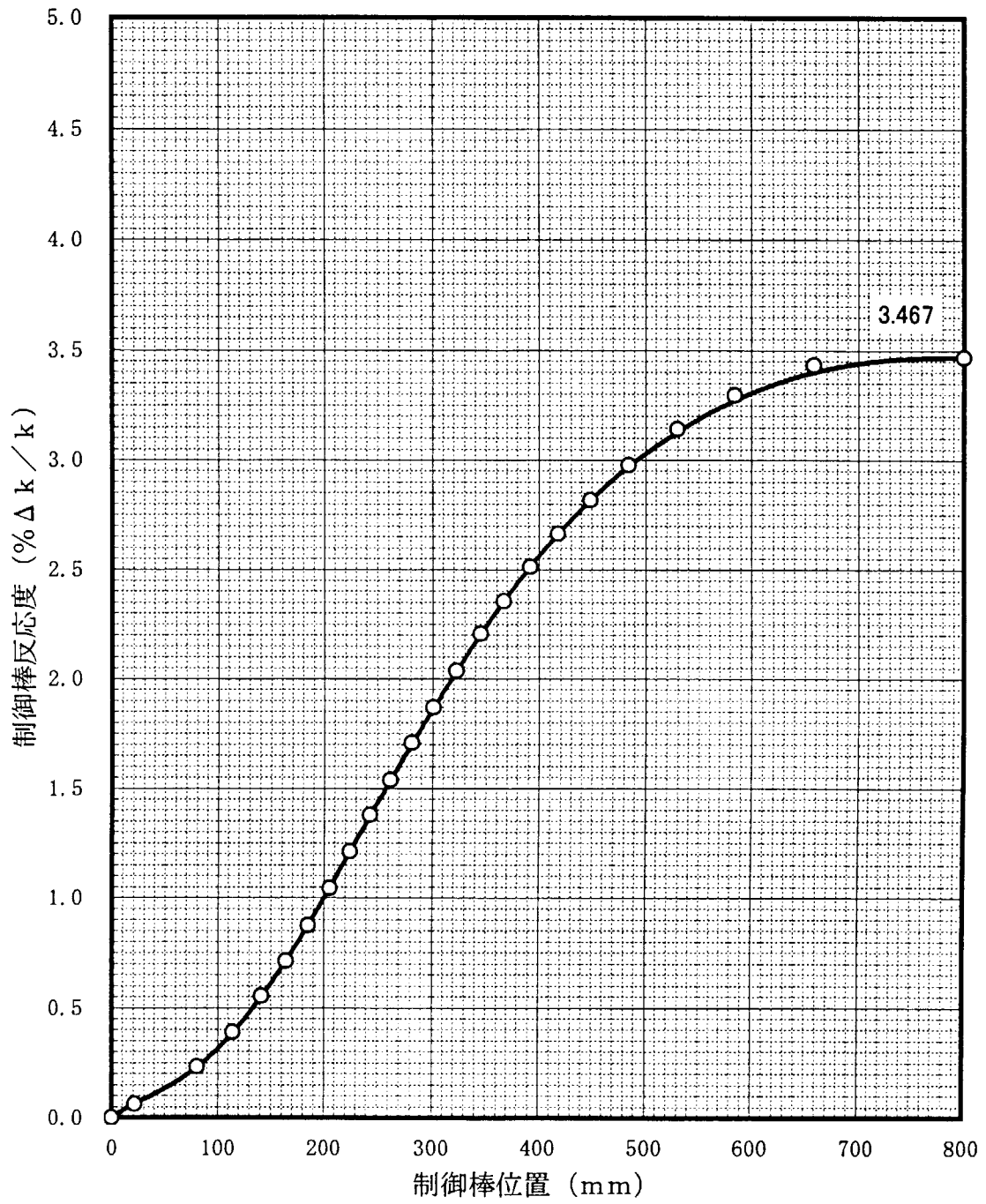


Fig. 5.1 (5) 反応度価値曲線 (R-1)

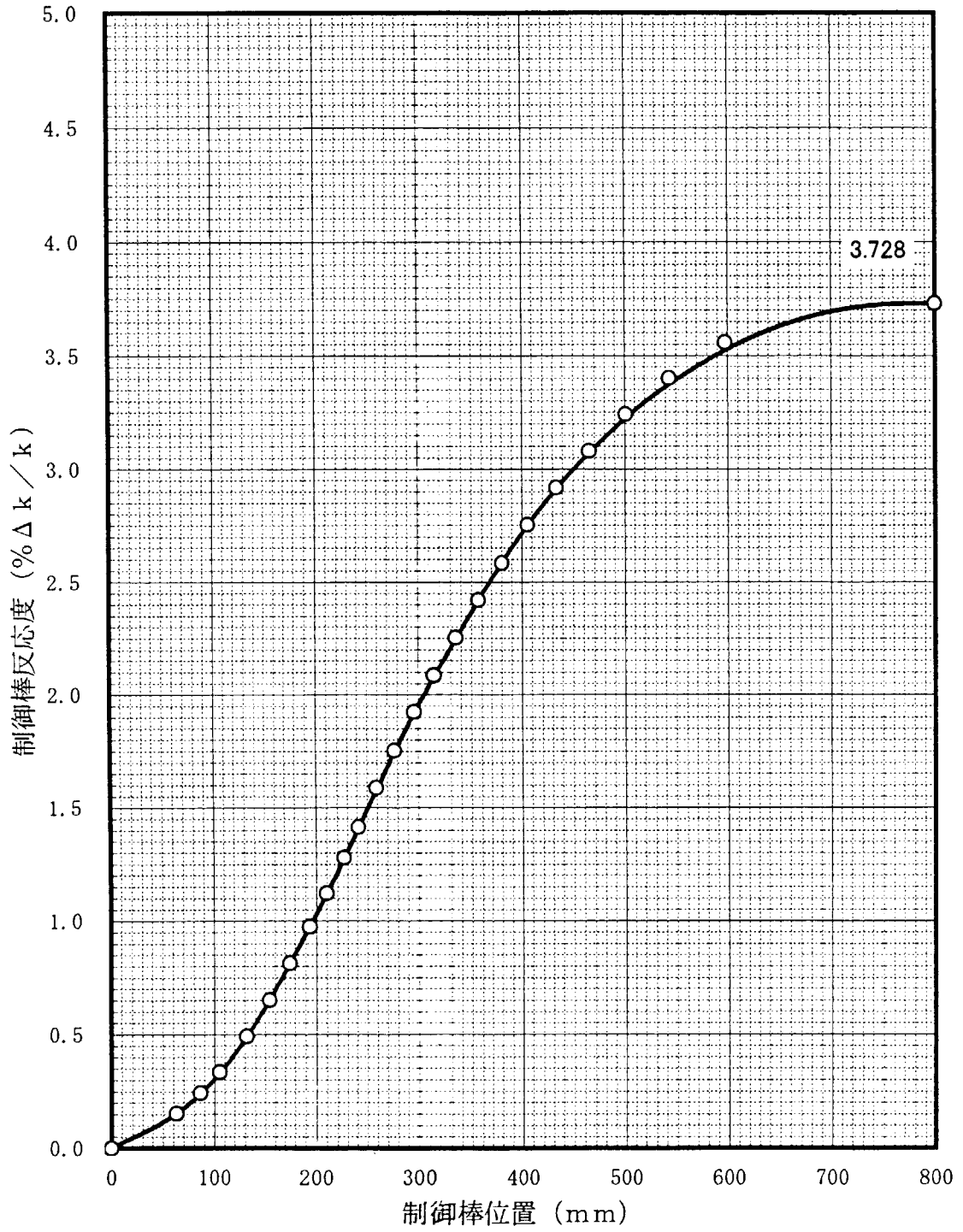


Fig. 5.1 (6) 反应度估值曲线 (R-2)



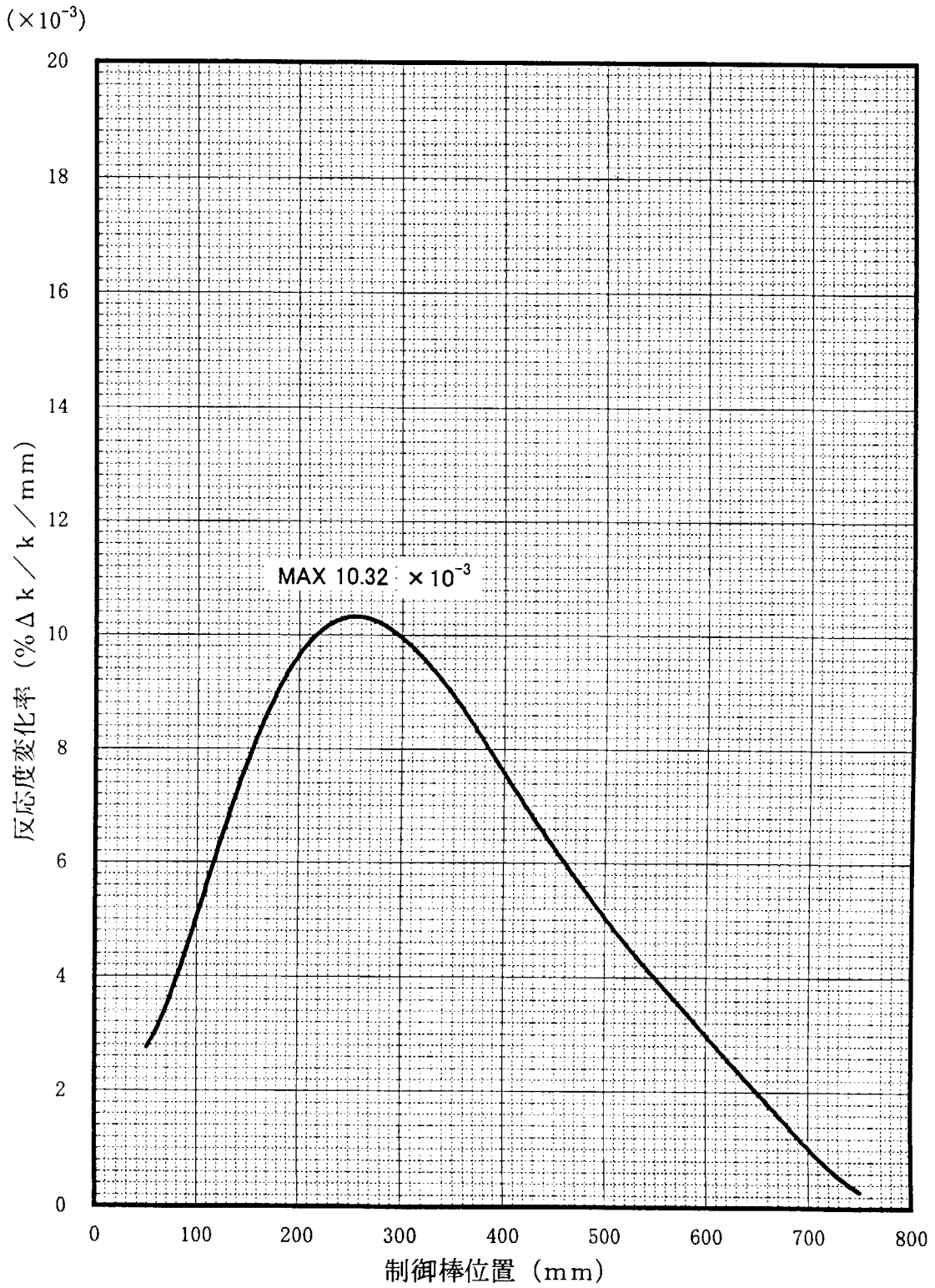


Fig. 5.2 (1) 反応度変化率曲線 (S a - 1)

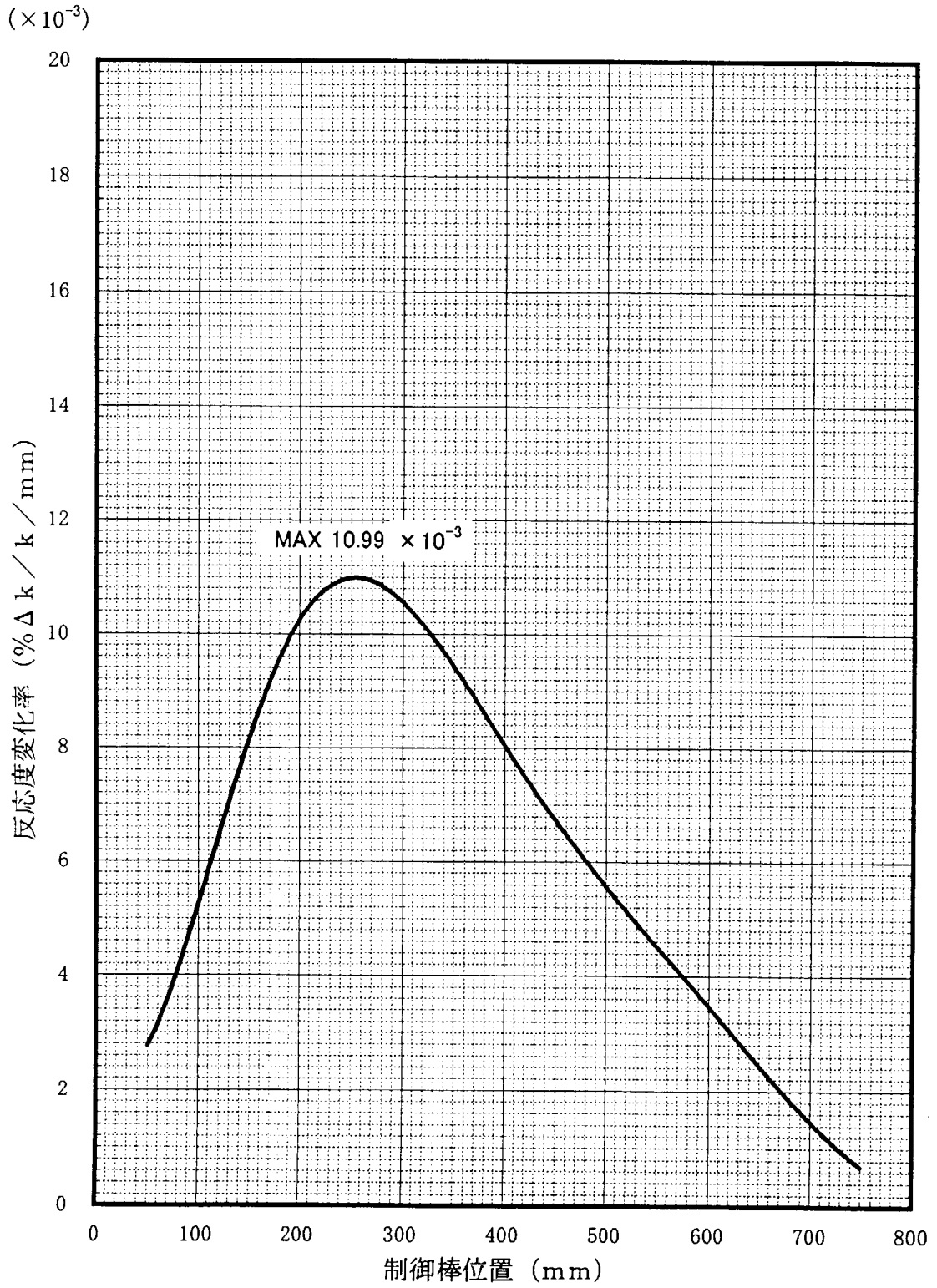


Fig. 5.2 (2) 反応度変化率曲線 (S a - 2)

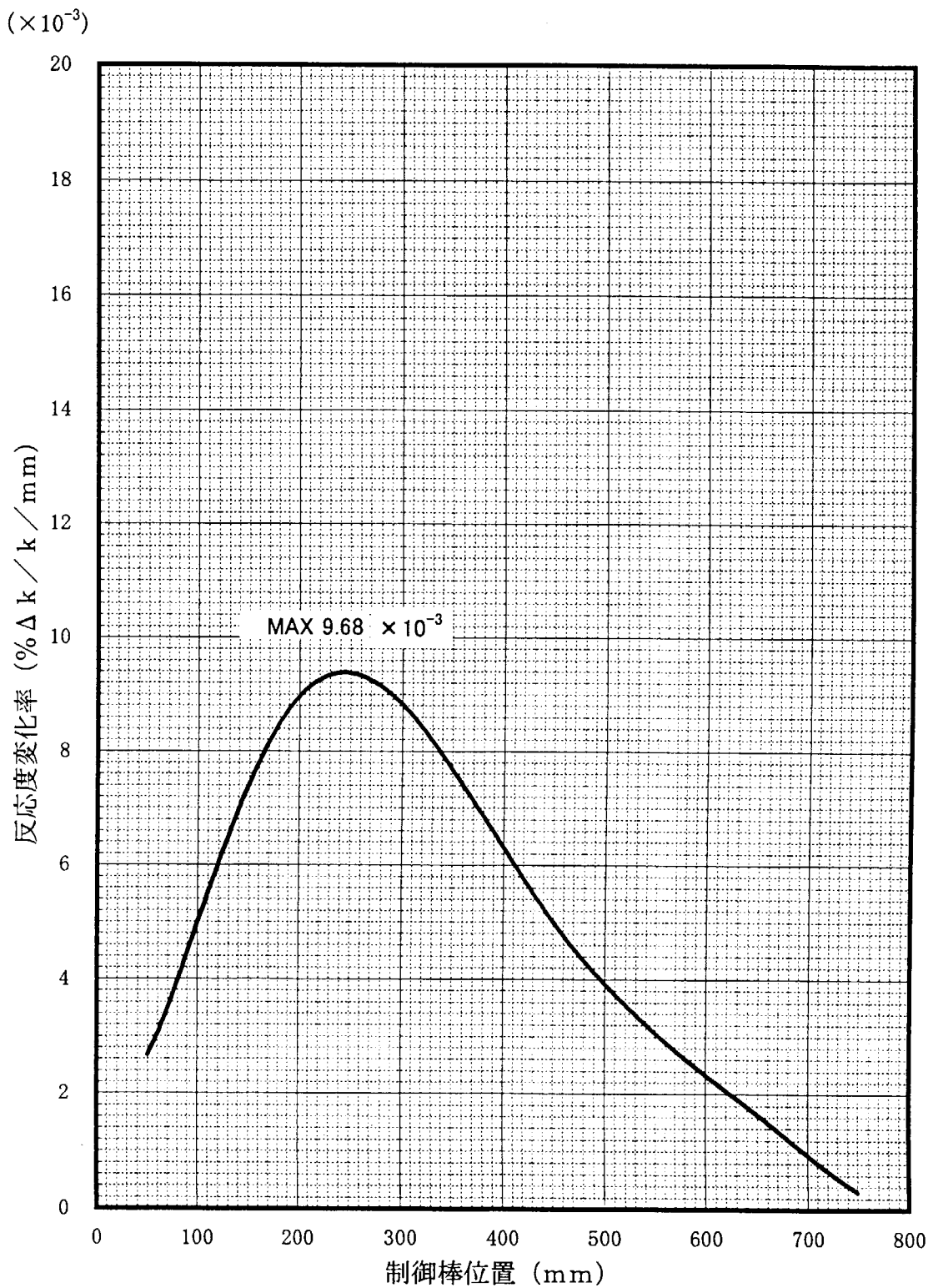


Fig. 5.2 (3) 反応度変化率曲線 (S - 1)

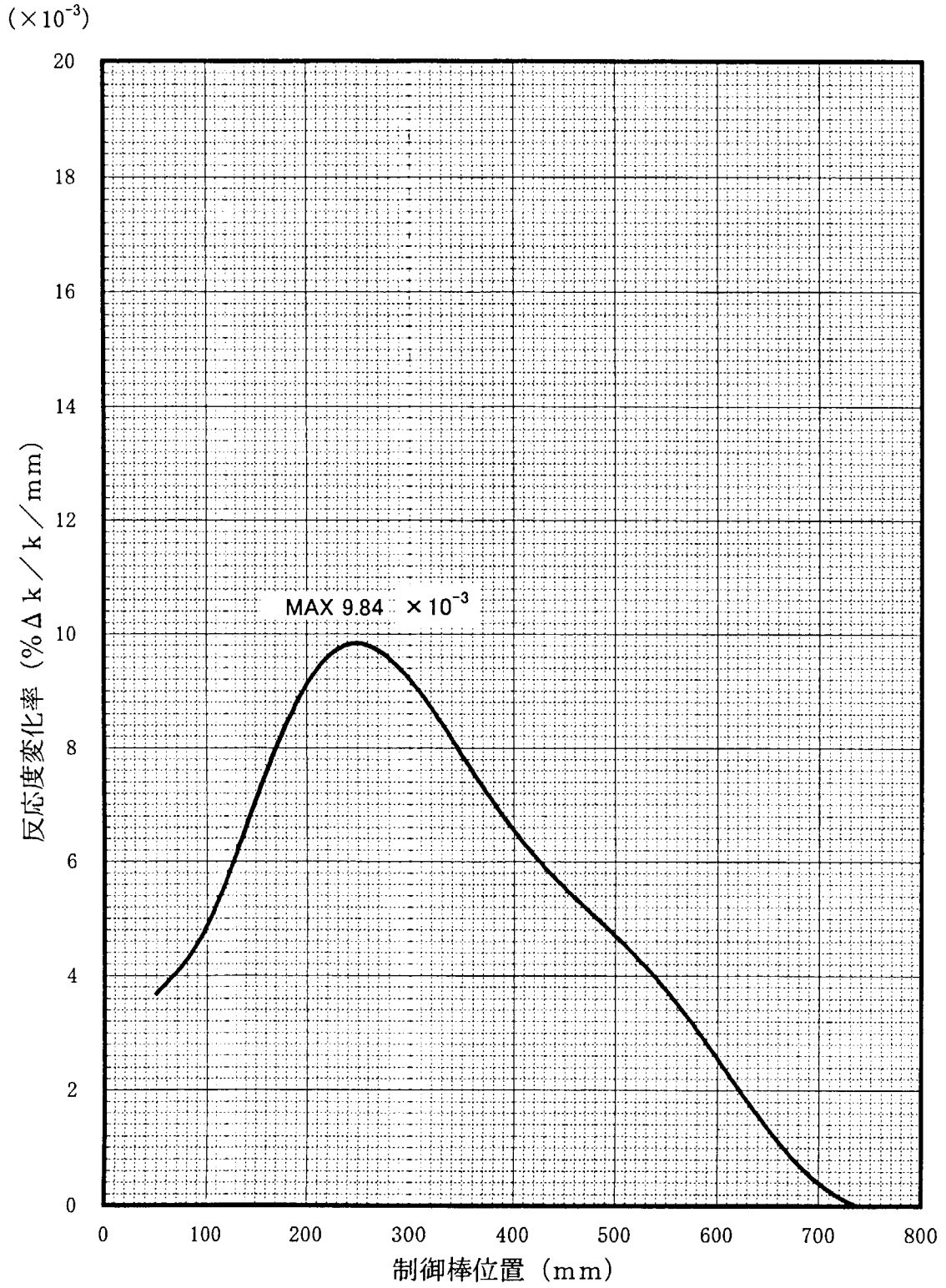


Fig. 5.2 (4) 反応度変化率曲線 (S-2)

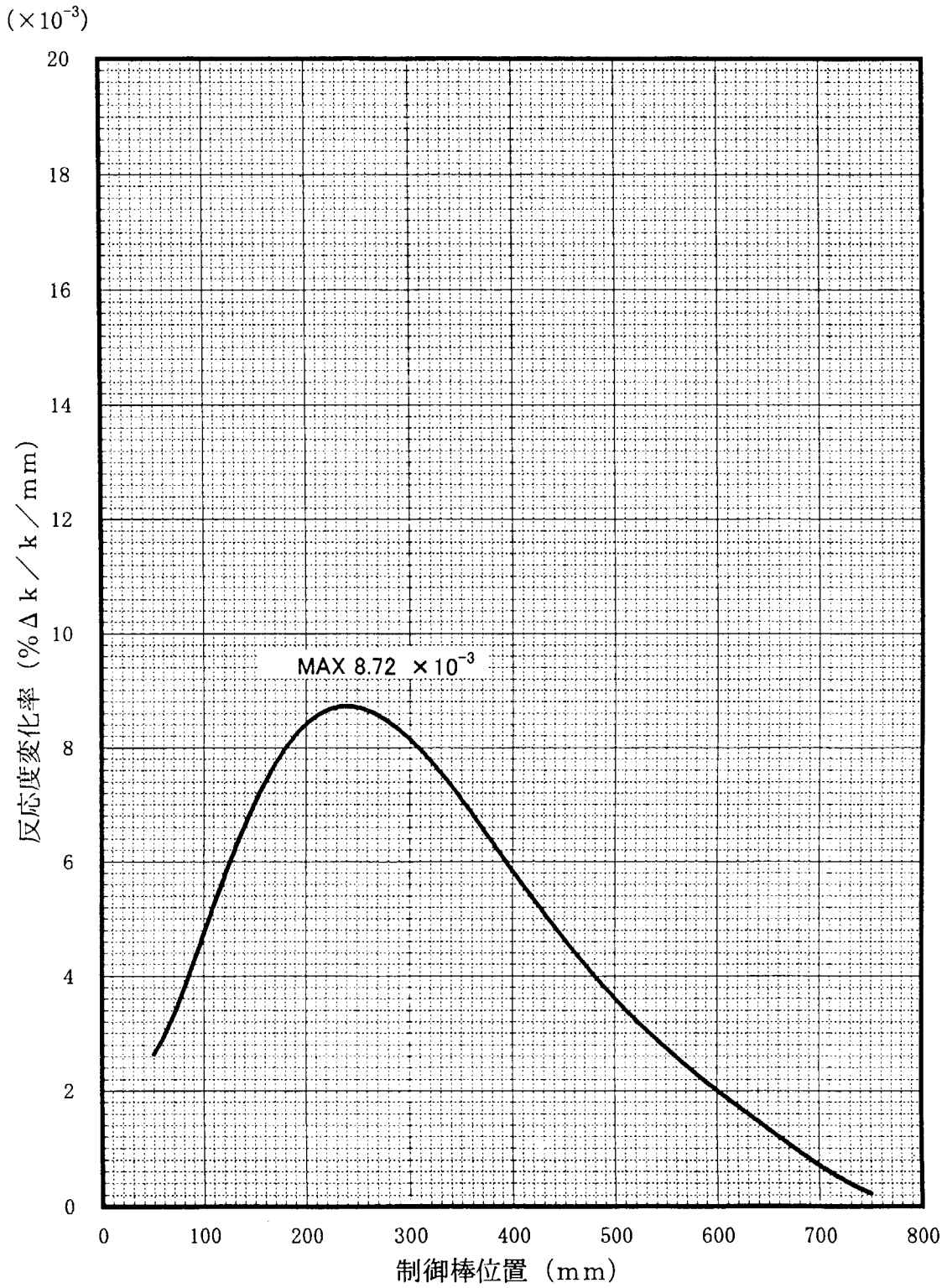


Fig. 5.2 (5) 反応度変化率曲線 (R-1)

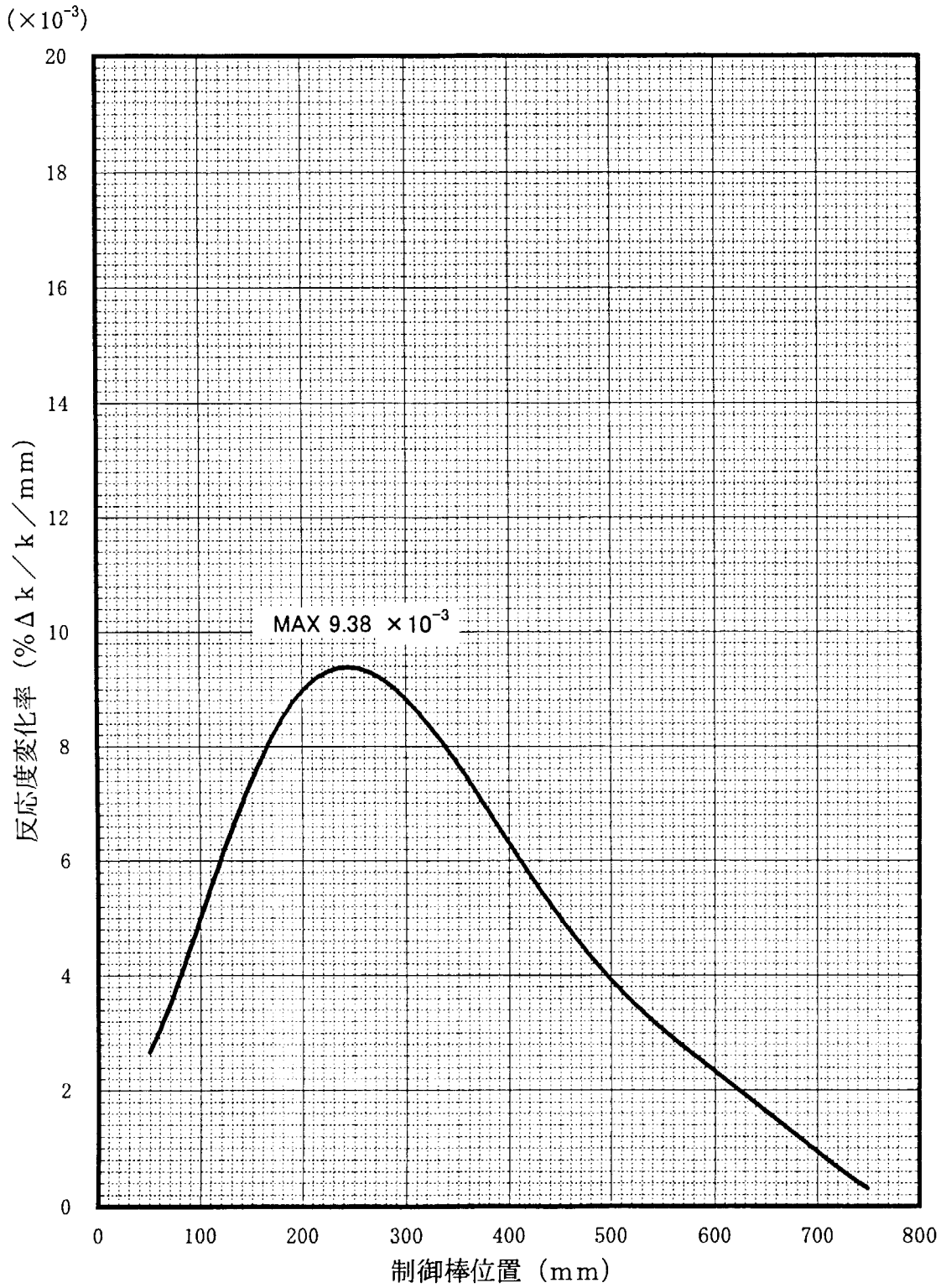


Fig. 5.2 (6) 反応度変化率曲線 (R-2)

## 6. 重水ダンプ効果測定試験

### 6. 1 目的

重水ダンプ効果測定試験は、炉心の外周に設けた重水タンク内の重水が炉心に対して中性子放射材として寄与しており、重水の水位の低下に伴う負の反応度添加量を測定し、後備停止系としての重水ダンプ系の反応度制御能力が制限値を満足していることを確認する。

### 6. 2 方法

重水ダンプ系は、重水ダンプ弁の開操作により重水タンク内の重水を重水溢流タンク内に自然落下させる構造であり、その構成をFig. 6. 1に示す。重水ダンプ効果の測定は、原子炉出力約10Wによる（線形出力計A系指示）の臨界状態で、重水の水位変化による反応度効果のみを測定した。重水ダンプに係る原子炉スクラム信号はいずれもバイパスした。

反応度の算出は、重水タンク内の軸方向炉心中心位置に配置した仮設CIC検出器の信号を対数増幅器を介して反応度測定装置に入力し、IK法による定在中性子源（重水領域からの光中性子）の強度を考慮した演算処理を行い（IK法による測定原理について付録Dに示す。）求めた。更に、第5章の制御棒反応度値測定結果を用いて、重水ダンプ弁開操作前後の臨界制御棒位置の差から反応度を算出した。

重水ダンプ試験は、先ず、重水の水位が燃料の上部から17cm低下した場合の反応度を測定することとし、重水溢流タンクの重水の水位が70～71cmとなるように、バルブ開操作から58秒後にバルブを閉とした。次に、重水の水位がさらに3cm低下した場合の反応度を測定するため、重水溢流タンクの重水の水位が約7.7cm上昇するまで重水をダンプさせた。

### 6. 3 結果

IK法による測定は、仮設CIC-ch1, ch2の信号を用いた反応度演算結果の平均値を測定値とした。

IK法による反応度変化の計測は、測定開始約30秒後にダンプ弁の開操作に続いて、開操作から約58秒後に閉操作を行い約100秒後には反応度変化が安定する計測結果を得た。

代表して試験No.3のch1, ch2各々の反応度変化計測記録をFig. 6. 2, Fig. 6. 3に示す。

IK法による測定結果は、重水溢流タンク水位変化量70.7cmで $-1.33\% \Delta k/k$ 、重水ダンプ弁開とした重水溢流タンク水位変化量7.7cmで $-0.22\% \Delta k/k$ であることから、重水ダンプ効果（重水タンク通常水位から燃料有効部上端から下方へ20cm低下の水位変化）として $-1.55\% \Delta k/k$ を得た。IK法による測定記録をTable6. 1に示す。

重水ダンプ弁操作前後の臨界制御棒位置の差により求めた反応度は、重水溢流タンク水位変化70.7cmで、 $-1.27\% \Delta k/k$ である。臨界制御棒位置の差による測定記録をTable6. 2に示す。

### 6. 4 評価

(1) 重水ダンプ弁開操作後、重水溢流タンク水位が約71cm変化するのに100秒以内であることが定期検査で確認されている。これは重水タンク水位に換算すると燃料有効部上端から下方へ約17cmである。従って、燃料有効部上端から下方へ20cmである重水ダンプ水位に到達する前に $-1.3$

3%  $\Delta k/k$ の反応度添加が測定されたことから、制限値1.0%  $\Delta k/k$ 以上を十分満足した。

(2) MVPコード<sup>(1),(3)</sup>を用いた事前解析結果、-1.64%  $\Delta k/k$  (初期炉心) に対し、測定結果(E)は-1.55%  $\Delta k/k$ であり若干低めの値となった。

Table 6.1 IK法による測定記録

No.	試験 月日	重水ダンプ弁	ダンプ前後の制御棒位置 (mm)						炉心温度 (°C)	反応度 (% $\Delta k/k$ )		
			Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2		ch1	ch2	平均値
1	11月2日	58秒後「閉」操作	750.0	750.0	0.0	0.0	162.6	0.0	25.6	-1.344	-1.316	-1.33
2	11月2日	再「開」操作	750.0	750.0	0.0	0.0	312.8	0.0	25.5	-0.223	-0.221	-0.22
3	11月4日	58秒後「閉」操作	750.0	750.0	0.0	0.0	151.5	0.0	24.1	-1.341	-1.315	-1.33

Table 6.2 臨界制御棒位置の差による測定記録

No.	試験 月日	ダンプ前の制御棒位置 (mm)						ダンプ後の制御棒位置 (mm)						炉心温度 (°C)	反応度 (% $\Delta k/k$ )		
		Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2	Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2		ダンプ前(a)	ダンプ前(b)	(b)-(a)
4	11月2日	750.0	750.0	0.0	0.0	162.6	0.0	750.0	750.0	0.0	0.0	312.8	0.0	25.6	0.644	1.96	-1.27



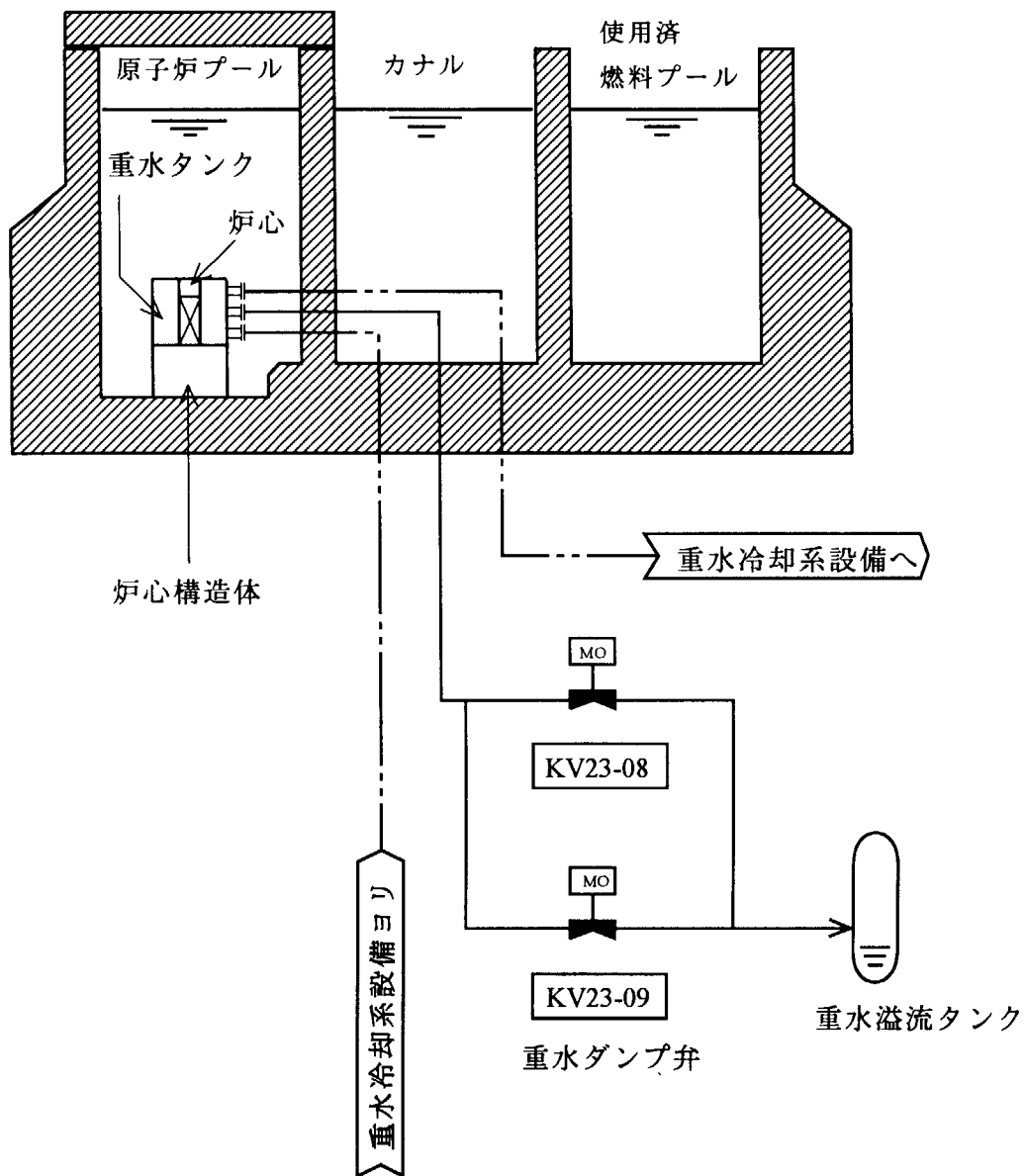


Fig. 6.1 重水ダンプ系の構成

# 重水ダンプ時反応度測定 (IK法)

年月日 1999/11/04  
時刻 15:37

試験名 番号 CH. 解析範囲(秒) 反応度(%dk/k) 中性子源強度  
DUMP\_ 04 1 150.0 - 342.0 -1.3413 0.137E-03

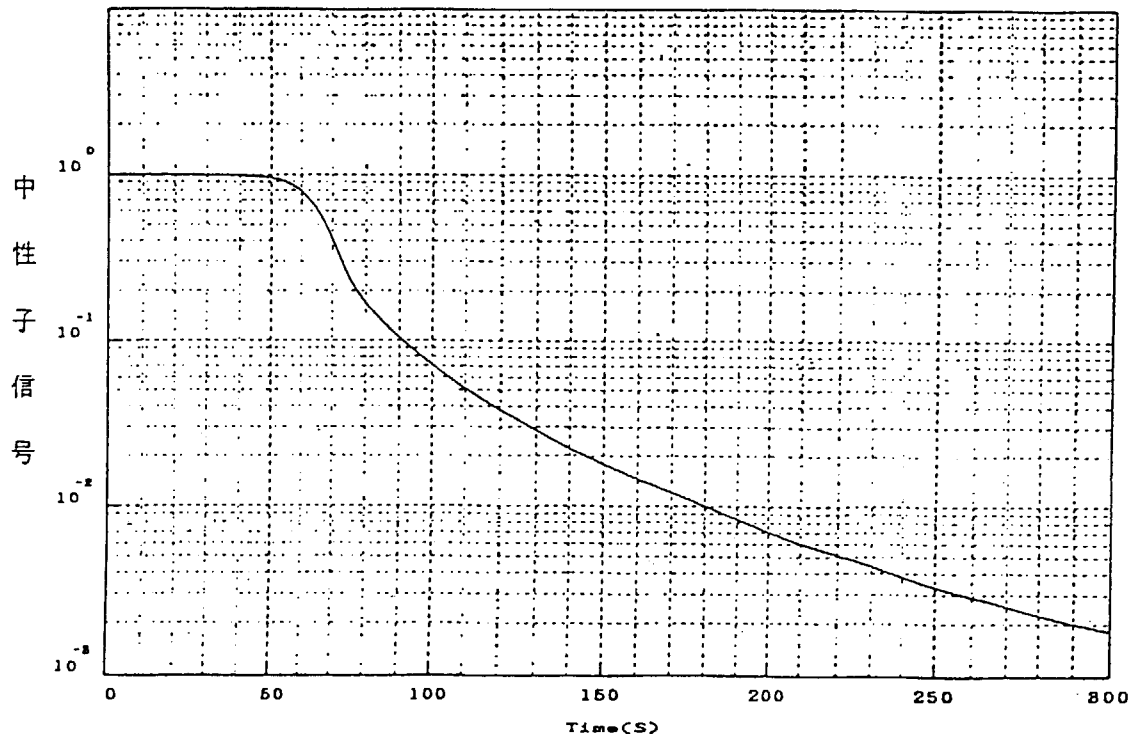
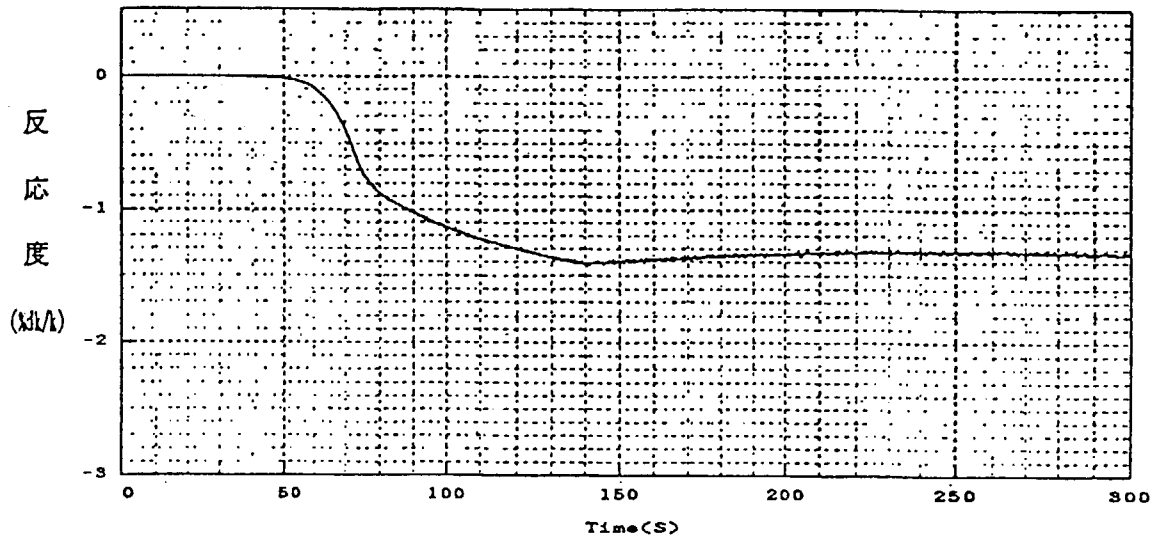


Fig. 6.2 重水ダンプ反応度計測記録 (記録No.3 ch1)

# 重水ダンプ時反応度測定 (I K法)

年月日 1999/11/04  
時刻 15:37

試験名	番号	CH.	解析範囲(秒)	反応度 (kdk/k)	中性子源強度
DUMP_	04	2	150.0 - 342.0	-1.3149	0.902E-04

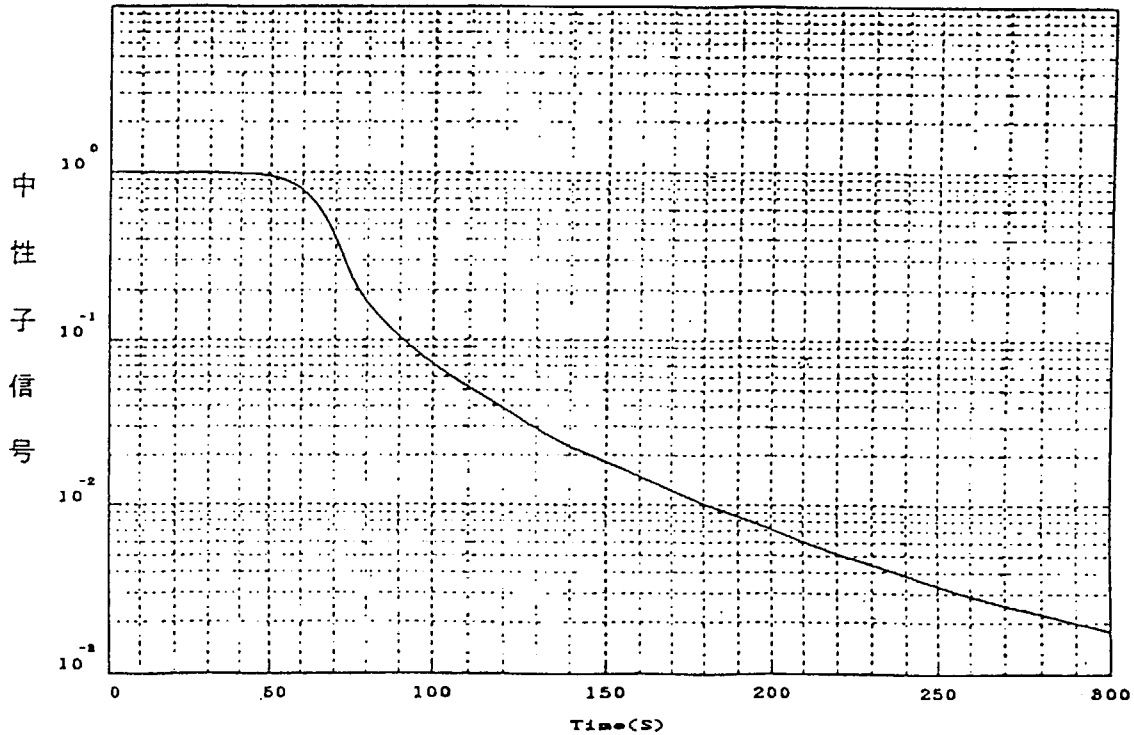
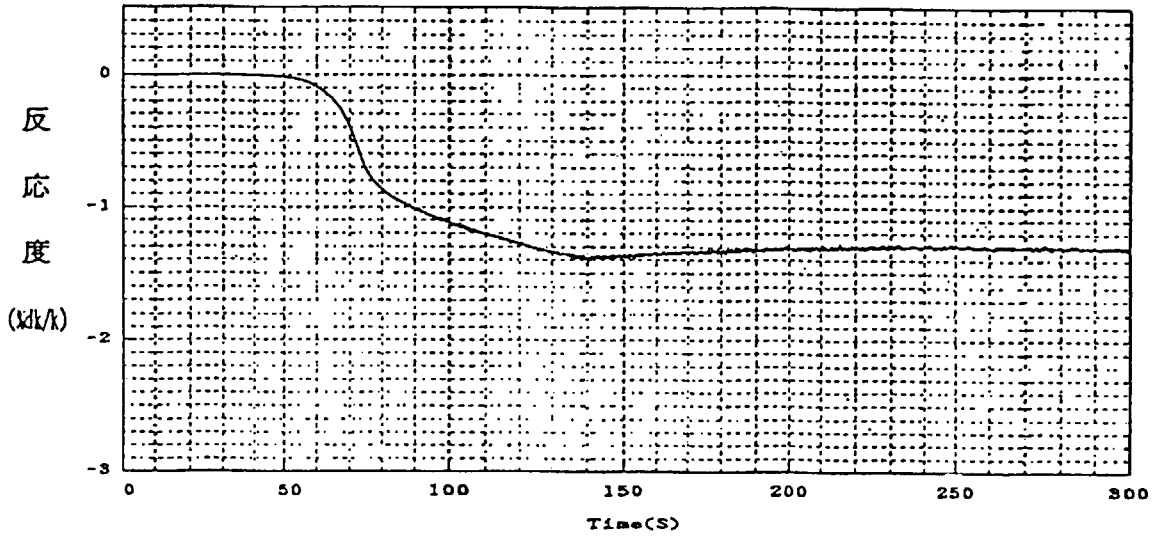


Fig. 6.3 重水ダンプ反応度計測記録 (記録No. 3 ch2)

## 7. 減速材温度効果測定試験

### 7. 1 目的

均一な減速材温度上昇による反応度効果を実験的に求め、減速材温度係数が負であることを確認するとともに、以後の運転管理に必要な減速材温度係数を明確にし、反応度特性測定時の基準温度補正に使用する。

### 7. 2 方法

減速材温度係数は、2次冷却系を停止して1次冷却材ポンプを連続運転し、ポンプの損失熱による炉心温度の上昇を測定し、この温度上昇に伴う反応度変化を臨界状態の制御棒位置の変化から測定するものである。

試験は全燃料要素装荷後、原子炉を出力50W、全制御棒フラットパターンで臨界とした後、R-1制御棒による自動制御運転を行い、2次冷却系を停止し、1次冷却材ポンプの運転による損失熱で減速材（1次冷却材）温度を上昇させる方法で行った。

減速材温度は、炉心上部に設置した仮設温度計と既設の1次冷却材炉心出口温度計の平均とした。Fig.7.1に仮設温度計の配置を示す。

### 7. 3 結果

減速材温度係数は、減速材温度上昇に伴う自動制御棒位置の変化から反応度変化を求め、減速材温度変化に伴う反応度変化から、最小二乗法により求めた1次近似式の係数を減速材温度係数とした。なお、減速材温度を23.3℃から33.9℃まで上昇するのに要した時間は約8時間であった。Table7.1に測定記録を、Fig.7.2に減速材温度変化に伴う反応度変化を示す。

得られた1次近似式は、 $y$ （反応度変化） $= -0.013x$ （減速材温度） $+ 0.313$ であった。減速材温度23.3℃から33.9℃における減速材温度係数は $-0.013\% \Delta k/k/^\circ\text{C}$ であり、負であることを確認した。

### 7. 4 評価

減速材温度効果の測定は、2日間にわたり40℃近傍まで測定を行う計画であったが、特性試験計画変更のため33.9℃までの試験記録から減速材温度係数を求めることとなった。試験予定の40℃近傍まで測定を実施することが出来ず測定範囲が縮小したが、各減速材温度変化に伴う減速材温度係数の変化をみると $-0.0115 \sim -0.0145\% \Delta k/k/^\circ\text{C}$ の範囲であり、また、通常運転において1次冷却材炉心出入口温度の平均で40℃に達することはないので、今後の反応度特性測定の基準温度補正に使用しても良いと考える。得られた減速材温度係数は $-0.013\% \Delta k/k/^\circ\text{C}$ であり、アルミナイド燃料炉心の値（ $-0.010\% \Delta k/k/^\circ\text{C}$ ）と同程度の測定結果を得た。Fig.7.3に減速材温度変化に伴う減速材温度係数の変化を示す。

Table 7.1 減速材温度係数測定記録

No	項目	時間									
		12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	
1	線形出力 (A/B)	W	49.44 / 46.14	49.76 / 46.08	49.53 / 49.56	50.23 / 46.01	49.86 / 45.65	49.99 / 45.56	50.10 / 46.20	50.07 / 46.20	49.74 / 46.38
		Sa-1	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0
	制御棒位置	Sa-2	"	"	"	"	"	"	"	"	"
		S-1	"	"	"	"	"	"	"	"	"
		S-2	"	"	"	"	"	"	"	"	"
		平均	273.8	277.6	279.8	281.6	283.6	285.5	287.5	289.2	290.8
R-1	最大値	274.3	278.1	280.3	282.1	284.0	286.0	288.2	289.7	291.3	
	最小値	273.2	277.1	279.3	281.0	283.1	285.0	286.8	288.7	290.3	
R-2	mm	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0	263.0	
3	仮設温度計 (TC5)	23.7	26.0	27.4	28.8	29.9	31.0	32.3	33.4	34.3	
4	1次冷却材炉心出口温度 (TI-211A/B)	°C	22.9 / 22.9	25.3 / 25.2	26.8 / 26.8	28.0 / 28.0	29.2 / 29.2	30.3 / 30.3	31.4 / 31.4	32.5 / 32.5	33.5 / 33.5
		°C	22.9 / 22.9	25.3 / 25.3	26.8 / 26.8	28.1 / 28.1	29.2 / 29.2	30.4 / 30.4	31.4 / 31.4	32.5 / 32.5	33.5 / 33.5
5	1次冷却材炉心入口温度 (TI-216A/B)	°C	22.9	25.3	26.8	28.0	29.2	30.3	31.4	32.5	33.5
		°C	22.9	25.3	26.8	28.0	29.2	30.3	31.4	32.5	33.5
6	重水タンク入口温度 (TI-2318)	°C	22.9	24.8	26.5	27.9	29.0	30.2	31.3	32.3	33.4
		°C	22.8	24.7	26.4	27.8	29.0	30.1	31.2	32.2	33.2
7	重水タンク出口温度 (TI-231A/B)	°C	22.8	24.7	26.4	27.8	29.0	30.1	31.2	32.2	33.2
		°C	22.8	24.7	26.4	27.8	29.0	30.1	31.2	32.2	33.2
8	冷却材温度 (No.3とNo.4の平均)	°C	23.3	25.6	27.1	28.4	29.6	30.7	31.9	33.0	33.9
9	反応度 (R-1の平均)	%Δk/k	1.639	1.671	1.690	1.705	1.722	1.738	1.755	1.769	1.782
10	反応度変化量	%Δk/k	0	-0.032	-0.051	-0.066	-0.083	-0.099	-0.116	-0.130	-0.143

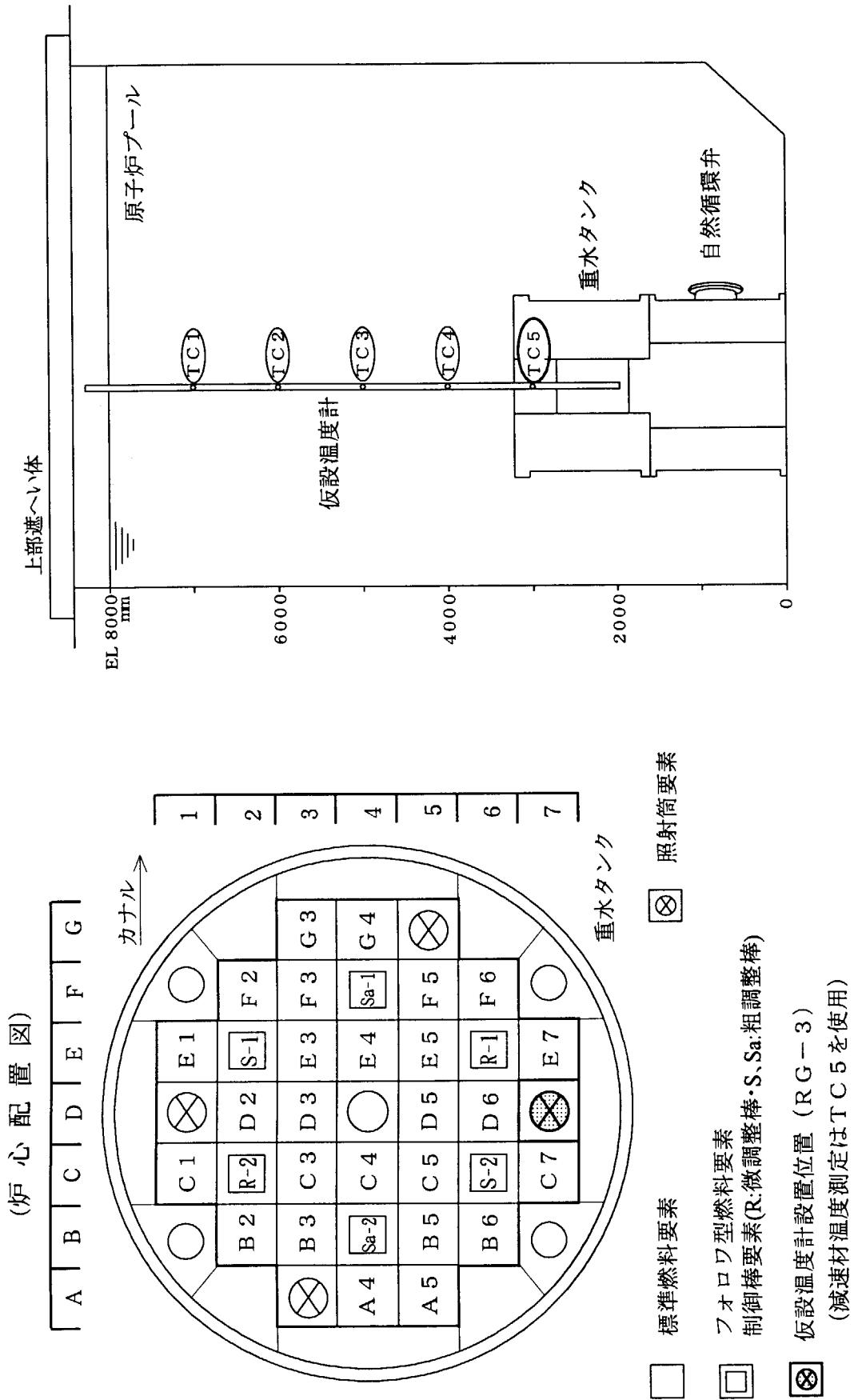


Fig. 7.1 仮設温度計の配置

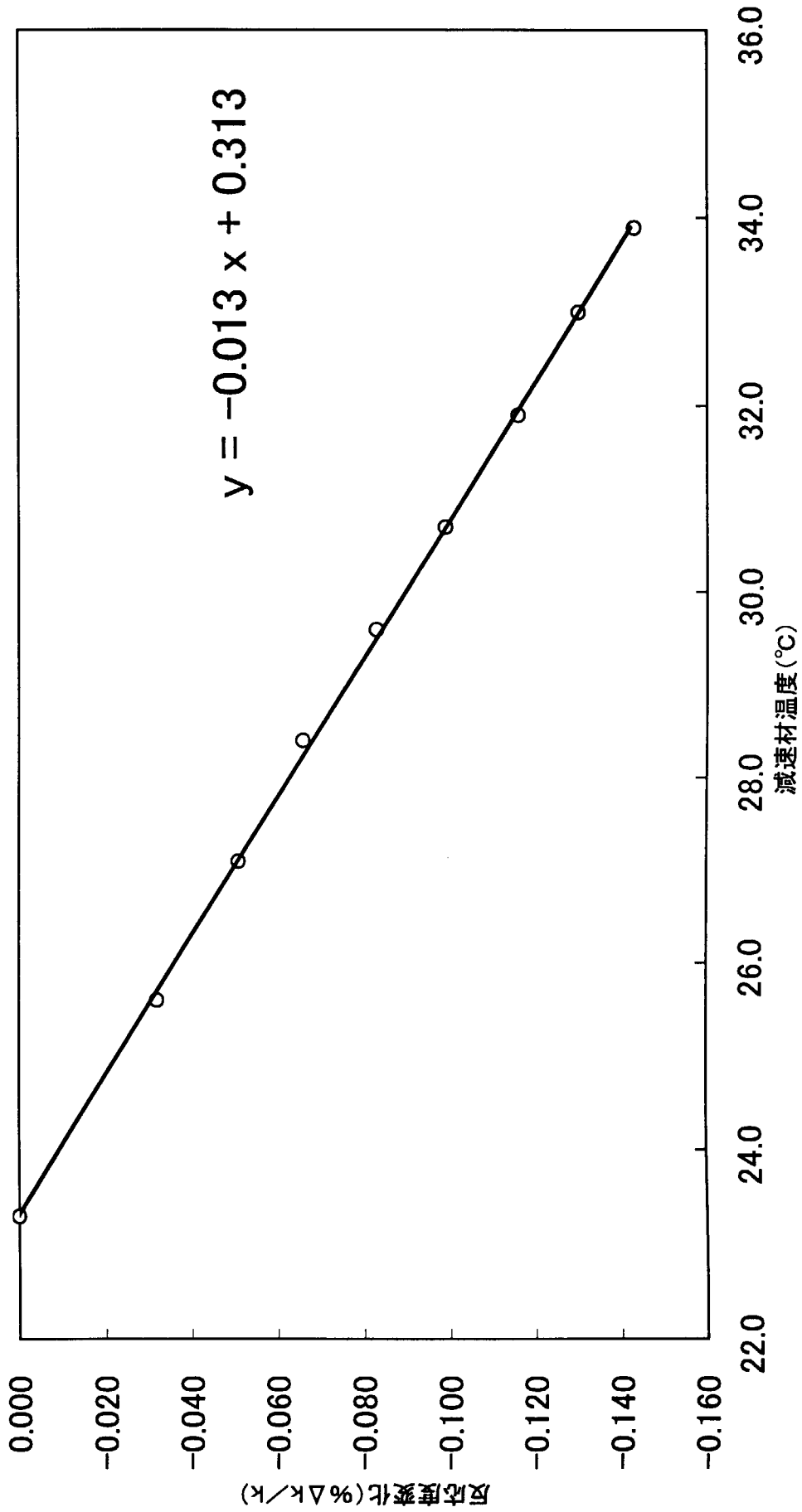


Fig. 7.2 減速材温度変化に伴う反応度変化

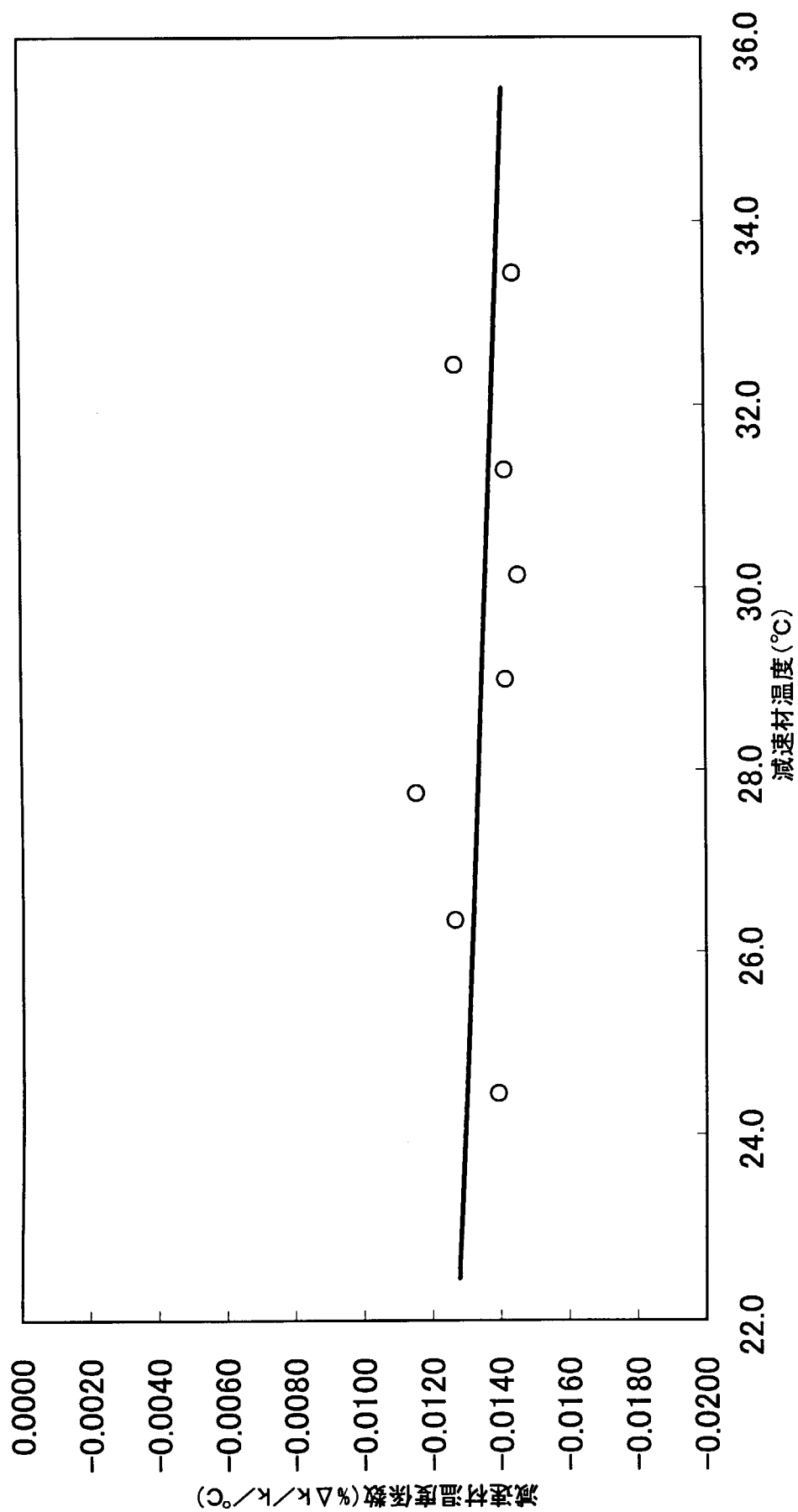


Fig.7.3 減速材温度変化に伴う減速材温度係数の変化



## 8. 燃料要素反応度測定試験

### 8. 1 目的

燃料交換計画、運転計画等の基礎データに資するため、燃料要素の反応度値を測定する。

### 8. 2 方法

全燃料装荷炉心において、9体の標準型燃料要素について各1体当たりの反応度値を比較法により求めた。比較法による測定には「5. 制御棒反応度値測定試験」で校正済の制御棒を用い（補償用制御棒）、測定する燃料要素1体を引き抜く前と後における臨界時の補償用制御棒の位置を測定し、その差を補償用制御棒の校正曲線（積分反応度曲線）及び制御棒反応度表より反応度に換算した。補償用制御棒は、測定する燃料要素との干渉効果が小さいものとしてR-1制御棒を選んだ。本試験で使用するR-1制御棒反応度値表をTable 8.1に示す。

#### (1) 測定条件

原子炉の運転は、全制御棒フラットパターンとし、10Wの線形出力計(Lin-N A)の指示で臨界とした。

試験は、S a、S及びR-2の制御棒を275mmもしくは280mm(D3測定時のみ)で固定し、燃料要素を1本引き抜くごとにR-1制御棒にて臨界位置の測定を行った。燃料要素の引き抜き及び挿入作業時にはS a、S制御棒を固定したままR-1及びR-2制御棒を全挿入とし未臨界とした。燃料要素9体の測定終了後に全燃料挿入時の臨界位置を測定した。データ収集は臨界から約5分後に行った。

### 8. 3 結果

今回の試験で得られた燃料要素反応度値測定結果をTable 8.2に示す。試験の結果、最大反応度を有する燃料要素は炉心位置D3で2.38%Δk/k、最小反応度の燃料要素は炉心位置C1で0.94%Δk/kであった。また、9体の平均は1.52%Δk/kであった。

### 8. 4 評価

今回の試験の結果とアルミナイド燃料時に行った試験との比較をTable 8.3に示す。この結果、炉心位置A5、C4の燃料で多少の違いが見られたがその他はほぼ同じ値であることが分かった。従って、今回測定していない他の燃料要素についてもアルミナイド燃料炉心時と同様の値を示すものと思われる。測定結果は、今後の運転計画等の基礎データとして活用することとする。

Table8.1 R - 1 制御棒反応度係数値表

平成11年11月1日

(mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.000	0.004	0.007	0.010	0.014	0.017	0.020	0.023	0.026	0.029
10	0.032	0.035	0.038	0.041	0.043	0.046	0.049	0.051	0.054	0.057
20	0.059	0.062	0.064	0.067	0.069	0.072	0.074	0.076	0.079	0.081
30	0.084	0.086	0.088	0.091	0.093	0.096	0.098	0.100	0.103	0.105
40	0.108	0.110	0.113	0.115	0.118	0.120	0.123	0.125	0.128	0.130
50	0.133	0.136	0.138	0.141	0.144	0.146	0.149	0.152	0.155	0.158
60	0.161	0.164	0.167	0.170	0.173	0.176	0.179	0.182	0.185	0.189
70	0.192	0.195	0.199	0.202	0.205	0.209	0.213	0.216	0.220	0.224
80	0.227	0.231	0.235	0.239	0.243	0.247	0.251	0.255	0.259	0.263
90	0.267	0.271	0.276	0.280	0.285	0.289	0.294	0.298	0.303	0.307
100	0.312	0.317	0.322	0.327	0.331	0.336	0.341	0.346	0.352	0.357
110	0.362	0.367	0.372	0.378	0.383	0.389	0.394	0.400	0.405	0.411
120	0.417	0.422	0.428	0.434	0.440	0.446	0.452	0.458	0.464	0.470
130	0.476	0.482	0.489	0.495	0.501	0.508	0.514	0.520	0.527	0.533
140	0.540	0.547	0.553	0.560	0.567	0.574	0.580	0.587	0.594	0.601
150	0.608	0.615	0.622	0.629	0.637	0.644	0.651	0.658	0.666	0.673
160	0.680	0.688	0.695	0.703	0.710	0.718	0.725	0.733	0.740	0.748
170	0.756	0.763	0.771	0.779	0.787	0.795	0.802	0.810	0.818	0.826
180	0.834	0.842	0.850	0.858	0.866	0.874	0.883	0.891	0.899	0.907
190	0.915	0.923	0.932	0.940	0.948	0.957	0.965	0.973	0.982	0.990
200	0.998	1.007	1.015	1.024	1.032	1.040	1.049	1.057	1.066	1.075
210	1.083	1.092	1.100	1.109	1.117	1.126	1.135	1.143	1.152	1.160
220	1.169	1.178	1.186	1.195	1.204	1.212	1.221	1.230	1.238	1.247
230	1.256	1.265	1.273	1.282	1.291	1.299	1.308	1.317	1.326	1.334
240	1.343	1.352	1.360	1.369	1.378	1.387	1.395	1.404	1.413	1.421
250	1.430	1.439	1.448	1.456	1.465	1.474	1.482	1.491	1.500	1.508
260	1.517	1.526	1.534	1.543	1.551	1.560	1.569	1.577	1.586	1.594
270	1.603	1.612	1.620	1.629	1.637	1.646	1.654	1.663	1.671	1.680
280	1.688	1.697	1.705	1.713	1.722	1.730	1.739	1.747	1.755	1.764
290	1.772	1.780	1.789	1.797	1.805	1.813	1.822	1.830	1.838	1.846
300	1.854	1.862	1.871	1.879	1.887	1.895	1.903	1.911	1.919	1.927
310	1.935	1.943	1.951	1.959	1.967	1.975	1.982	1.990	1.998	2.006
320	2.014	2.021	2.029	2.037	2.045	2.052	2.060	2.068	2.075	2.083
330	2.090	2.098	2.105	2.113	2.120	2.128	2.135	2.143	2.150	2.157
340	2.165	2.172	2.179	2.187	2.194	2.201	2.208	2.215	2.223	2.230
350	2.237	2.244	2.251	2.258	2.265	2.272	2.279	2.286	2.293	2.300
360	2.306	2.313	2.320	2.327	2.334	2.340	2.347	2.354	2.360	2.367
370	2.374	2.380	2.387	2.393	2.400	2.406	2.413	2.419	2.426	2.432
380	2.438	2.445	2.451	2.457	2.464	2.470	2.476	2.482	2.488	2.495
390	2.501	2.507	2.513	2.519	2.525	2.531	2.537	2.543	2.549	2.554
400	2.560	2.566	2.572	2.578	2.584	2.589	2.595	2.601	2.606	2.612
410	2.618	2.623	2.629	2.634	2.640	2.645	2.651	2.656	2.662	2.667
420	2.672	2.678	2.683	2.688	2.693	2.699	2.704	2.709	2.714	2.719
430	2.725	2.730	2.735	2.740	2.745	2.750	2.755	2.760	2.765	2.770
440	2.775	2.779	2.784	2.789	2.794	2.799	2.803	2.808	2.813	2.817
450	2.822	2.827	2.831	2.836	2.841	2.845	2.850	2.854	2.859	2.863
460	2.867	2.872	2.876	2.881	2.885	2.889	2.894	2.898	2.902	2.906
470	2.911	2.915	2.919	2.923	2.927	2.931	2.936	2.940	2.944	2.948
480	2.952	2.956	2.960	2.964	2.968	2.971	2.975	2.979	2.983	2.987
490	2.991	2.995	2.998	3.002	3.006	3.009	3.013	3.017	3.021	3.024
500	3.028	3.031	3.035	3.039	3.042	3.046	3.049	3.053	3.056	3.060
510	3.063	3.066	3.070	3.073	3.077	3.080	3.083	3.086	3.090	3.093
520	3.096	3.100	3.103	3.106	3.109	3.112	3.115	3.119	3.122	3.125
530	3.128	3.131	3.134	3.137	3.140	3.143	3.146	3.149	3.152	3.155
540	3.158	3.161	3.164	3.167	3.169	3.172	3.175	3.178	3.181	3.183
550	3.186	3.189	3.192	3.194	3.197	3.200	3.202	3.205	3.208	3.210
560	3.213	3.216	3.218	3.221	3.223	3.226	3.228	3.231	3.233	3.236
570	3.238	3.241	3.243	3.245	3.248	3.250	3.253	3.255	3.257	3.260
580	3.262	3.264	3.266	3.269	3.271	3.273	3.275	3.278	3.280	3.282
590	3.284	3.286	3.288	3.291	3.293	3.295	3.297	3.299	3.301	3.303
600	3.305	3.307	3.309	3.311	3.313	3.315	3.317	3.319	3.321	3.323
610	3.324	3.326	3.328	3.330	3.332	3.334	3.336	3.337	3.339	3.341
620	3.343	3.344	3.346	3.348	3.349	3.351	3.353	3.354	3.356	3.358
630	3.359	3.361	3.363	3.364	3.366	3.367	3.369	3.370	3.372	3.373
640	3.375	3.376	3.378	3.379	3.381	3.382	3.383	3.385	3.386	3.387
650	3.389	3.390	3.391	3.393	3.394	3.395	3.397	3.398	3.399	3.400
660	3.402	3.403	3.404	3.405	3.406	3.407	3.409	3.410	3.411	3.412
670	3.413	3.414	3.415	3.416	3.417	3.418	3.419	3.420	3.421	3.422
680	3.423	3.424	3.425	3.426	3.427	3.428	3.429	3.430	3.430	3.431
690	3.432	3.433	3.434	3.435	3.435	3.436	3.437	3.438	3.438	3.439
700	3.440	3.441	3.441	3.442	3.443	3.443	3.444	3.445	3.445	3.446
710	3.447	3.447	3.448	3.448	3.449	3.449	3.450	3.450	3.451	3.452
720	3.452	3.453	3.453	3.453	3.454	3.454	3.455	3.455	3.456	3.456
730	3.456	3.457	3.457	3.458	3.458	3.458	3.459	3.459	3.459	3.460
740	3.460	3.460	3.461	3.461	3.461	3.461	3.462	3.462	3.462	3.462
750	3.463	3.463	3.463	3.463	3.463	3.464	3.464	3.464	3.464	3.464
760	3.464	3.465	3.465	3.465	3.465	3.465	3.465	3.465	3.466	3.466
770	3.466	3.466	3.466	3.466	3.466	3.466	3.466	3.466	3.466	3.466
780	3.466	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467
790	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467	3.467
800	3.467									

(% Δk/k)

Table8.2 燃料要素反応度値測定結果

対象燃料要素位置	測定用制御棒	臨界制御棒位置(mm)						炉プール水温度(°C)	重水温度(°C)	R-1反応度:A	全炉心R-1反応度:B	反応度効果A-B(% $\Delta k/k$ )
		Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2					
C4	R-1	275.0	275.0	275.0	275.0	583.9	275.0	21	17.2	3.27	1.02	2.25
A4	R-1	275.0	275.0	275.0	275.0	335.3	275.0	21	17.6	2.13	1.02	1.11
A5	R-1	275.0	275.0	275.0	275.0	327.6	275.0	21.1	17.8	2.08	1.02	1.06
B3	R-1	275.0	275.0	275.0	275.0	374.0	275.0	21.2	18.1	2.40	1.02	1.38
F2	R-1	275.0	275.0	275.0	275.0	348.5	275.0	21.2	18.3	2.23	1.02	1.21
C3	R-1	275.0	275.0	275.0	275.0	454.0	275.0	21.1	18.4	2.84	1.02	1.82
C1	R-1	275.0	275.0	275.0	275.0	312.5	275.0	21.1	18.4	1.96	1.02	0.94
D3	R-1	280.0	280.0	280.0	280.0	543.2	280.0	21.2	18.3	3.17	0.79	2.38
D2	R-1	275.0	275.0	275.0	275.0	391.5	275.0	21.2	18	2.51	1.02	1.49
全炉心	R-1	275.0	275.0	275.0	275.0	202.2	275.0	21.4	16.7	1.02	-	-
全炉心	R-1	280.0	280.0	280.0	280.0	173.9	280.0	21.4	16.7	0.79	-	-

\* 炉プール水温度は仮設温度計を使用した。

Table8.3 アルミナイド燃料との比較

対象燃料要素位置	アルミナイド燃料反応度:A(% $\Delta k/k$ )	シリサイド燃料反応度:B(% $\Delta k/k$ )	比較値B/A
C4	2.61	2.25	0.86
A4	1.24	1.11	0.90
A5	1.25	1.06	0.85
B3	1.37	1.38	1.01
F2	1.32	1.21	0.92
C3	1.76	1.82	1.03
C1	1.02	0.94	0.92
D3	2.39	2.38	1.00
D2	1.44	1.49	1.03

## 9. 制御棒落下法試験

### 9. 1 目的

制御棒落下法<sup>10)</sup>による反応度の測定は、中性子計測信号から直接に原子炉停止余裕（ワンロードスタックを想定しない）を算出する方法であり、解析における制御棒臨界位置と全挿入位置の実効増倍率の差により反応度を求める計算モデルに類似しているため、測定結果とSRACコード<sup>11,7)</sup>による事前解析結果を比較する目的で行う。

### 9. 2 方法

原子炉停止余裕は、原子炉出力をパラメータに臨界状態から手動スクラム操作により全制御棒を炉心に挿入した場合の中性子束変化を反応度測定装置で約300秒間収集し、オフライン処理にて中性子源（重水反射体領域からの光中性子）を考慮したIK法により算出した。IK法の測定原理を付録Dに示す。また、臨界制御棒位置からも、第5章の制御棒反応度値測定結果を用いて算出した。測定は、原子炉出力10W、20W、100W、10kWの計4ケースについて行った。仮設CIC検出器位置は、原子炉出力20W、100W時は、重水レベルより約25mm上側に設置し、原子炉出力10W時は炉心中心に設置した。また、原子炉出力10kW時の測定は、本設の対数出力炉周期系A、Bの対数増幅器出力の信号を用いた。

### 9. 3 結果

IK法による各測定においては、手動スクラム操作による制御棒の炉心挿入によく追従した反応度変化の計測を行った。試験ケースNo. 4(10kW)の制御棒落下法測定記録をFig. 9. 1に代表として示す。また、各計測チャンネルの相当する反応度算出記録から平均値を測定値とした。制御棒落下法試験結果をTable 9. 1に示す。

IK法による測定結果は、検出器位置が重水水位より約25mm上部で燃料領域から離れた場合(No. 1, 2)では、検出器位置が燃料領域中心の場合(No. 3)に比べて約30%減少している。また、検出器位置が燃料領域中心の場合(No. 3)と検出器が炉心中心近くに設置されている本設の対数増幅器出力で測定した場合(No. 4)の結果はよく一致した。

制御棒反応度値を用いて算出した結果は、臨界制御棒位置に影響するが、いずれの場合もよく一致した。

### 9. 4 評価

制御棒落下法による原子炉停止余裕をIK法により算出した結果、検出器の軸方向設置位置による影響が大きいことが明らかになった。そこで、炉心領域の中性子変化に比例した計測ができる軸方向の炉心中心位置に検出器を設置して試験した場合で評価することとする。

原子炉停止余裕は、SRACコード<sup>11,7)</sup>による事前解析結果(C)-13.4% $\Delta k/k$ に対して、IK法による測定結果(D)-12.8% $\Delta k/k$ で、C/D=1.05とよく一致した。また、制御棒反応度値を用いた結果(E)-13.8% $\Delta k/k$ に対しC/E=0.97とよく一致した。

Table 9.1 制御棒落下法試験結果

試験ケース	測定日 H11.	試験出力	スクラム前 制御棒位置 (mm)						IK法による炉停止余裕 (%Δk/k)	制御棒反応度価値からの 炉停止余裕 (%Δk/k)
			Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2		
No.1	9.28	20 W	266.0	266.0	266.0	266.0	263.0	266.0	- 9.63	-13.74
No.2	9.29	100 W	265.0	265.0	265.0	265.0	263.1	265.0	- 9.57	-13.79
No.3	11. 5	10 W	263.0	263.0	263.0	263.0	269.5	263.0	-12.75	-13.83
No.4	11.16	10 kW	275.0	275.0	275.0	275.0	272.9	275.0	-12.96	-13.20

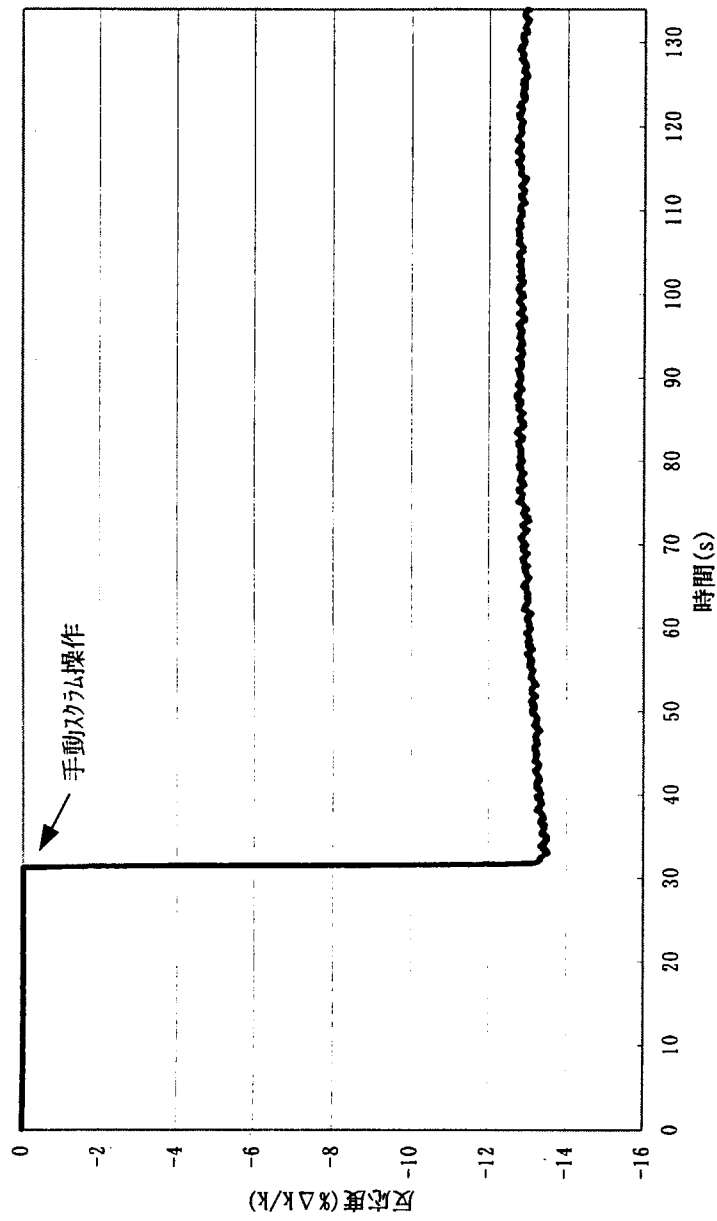


Fig. 9.1 制御棒落下法測定記録(10kW)

## 10. 動特性パラメータ測定試験

### 10.1 目的

シリサイド燃料炉心における動特性パラメータ( $\beta/\lambda$ )を炉雑音解析法<sup>11)</sup>により測定し、炉物理特性の確認を行う。

### 10.2 方法

炉雑音信号は、仮設の $\gamma$ 線補償形電離箱(以下、仮設CIC)を用いて2チャンネルの検出器出力電流を増幅し、さらにローパスフィルタを介したものを、サンプリング周期0.02秒で約2000秒間収録した。炉雑音解析は、2信号相互相関法<sup>12),13)</sup>により、パーソナルコンピュータに組み込んだ信号処理プログラムで、バンドパスフィルタをパラメータにオフライン処理により行った。

測定時の原子炉出力は、線形出力計(Lin-NA)で20.7[W]、仮設CIC出力は、CIC-ch1:  $4.35 \times 10^{-8}$ [A]、CIC-ch2:  $9.60 \times 10^{-9}$ [A]とした。炉雑音解析においてバンドパスフィルタ中心周波数(以下、BPF中心周波数)は、CASE1: 3.962[Hz], 7.906[Hz], CASE2: 3.962[Hz], 9.953[Hz], CASE3: 4.988[Hz], 7.906[Hz], CASE4: 4.988[Hz], 9.953[Hz], CASE5: 6.280[Hz], 9.953[Hz]の5通り選択し、解析を行った。

### 10.3 結果

CASE1~CASE5の測定記録をFig.10.1~Fig.10.5に示す。これらの図は、いずれも収録データをフーリエ変換して得られた周波数に対するクロスパワースペクトル密度(以下、CPSD)を表している。BPF中心周波数 $f_1, f_2$ を設定し、これら2つのバンドパスフィルタに対するCPSD値の比(M)を用いて次式により、 $\beta/\lambda$ を算出した。

$$(\beta/\lambda)^2 = \frac{(2\pi f_2)^2 - (2\pi f_1)^2}{M-1} - (2\pi f_1)^2$$

$\beta/\lambda$ 測定値は、CASE1~CASE5の算出値の平均値から、45.7を得た。

### 10.4 評価

$\beta/\lambda$ 測定結果から、即発中性子寿命 $\lambda$ を $\alpha = \beta/\lambda$ の関係により算出する。実効遅発中性子発生割合 $\beta$ 値は、解析で求めた値:  $7.267 \times 10^{-3}$ を採用する。 $\beta/\lambda = 45.7$ に $\beta = 7.27 \times 10^{-3}$ を用いると、 $\lambda = 1.59 \times 10^{-4}$ である。

動特性パラメータ $\beta/\lambda$ 測定値と、SRACコード<sup>1),7)</sup>による解析値との比較をTable 10.1に示す。測定値は、標準偏差(1 $\sigma$ )を考慮すると、41.1 ~ 50.3となる。これに対して拡散計算による解析値48.9であり、良く一致した。

次に、アルミナイド燃料炉心における $\beta/\lambda$ とシリサイド燃料炉心における $\beta/\lambda$ を比較す

る。それぞれの結果を Table10.2 に示す。アルミナイド燃料炉心の  $\beta/\ell$  に比べて、シリサイド燃料炉心の  $\beta/\ell$  は、35%減少している。アルミナイド燃料炉心との差については、今後、炉物理的要因等について詳細な検討を行うこととする。

Table 10.1  $\beta/\ell$  測定値及び解析値

	BPF 中心周波数 [Hz]		$\beta/\ell$ 測定値 (E 値)	$\beta/\ell$ 解析値 (C 値) ※1	C/E 値
CASE1	3.962	7.906	46.2	48.9	1.06
CASE2	3.962	9.953	40.0	48.9	1.22
CASE3	4.988	7.906	50.8	48.9	0.96
CASE4	4.988	9.953	40.9	48.9	1.20
CASE5	6.280	9.953	50.7	48.9	0.96
平均	—		45.7	48.9	1.07

※1 解析値 :  $\beta=7.267 \times 10^{-3}$ ,  $\ell=1.486 \times 10^{-4}$ [s]

Table10.2 アルミナイド燃料炉心とシリサイド燃料炉心との比較

	実行遅発中性子割合 $\beta$	即発中性子寿命 $\ell$ [s]	$\beta/\ell$
アルミナイド燃料炉心	$7.56 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-4}$	69.8
シリサイド燃料炉心	$7.27 \times 10^{-3}$	$1.59 \times 10^{-4}$	45.7



解析年月日	1999/09/28	試験名称	TEST00
解析時刻	14:55:07	試験番号	03
解析範囲 (秒)	3 ~ 2013	サンプリング周期 (秒)	0.02
BPF 中心周波数 (Hz)	3.962		7.906
通過帯域幅 (Hz)	0.904		1.852

$\beta/l$  46.2

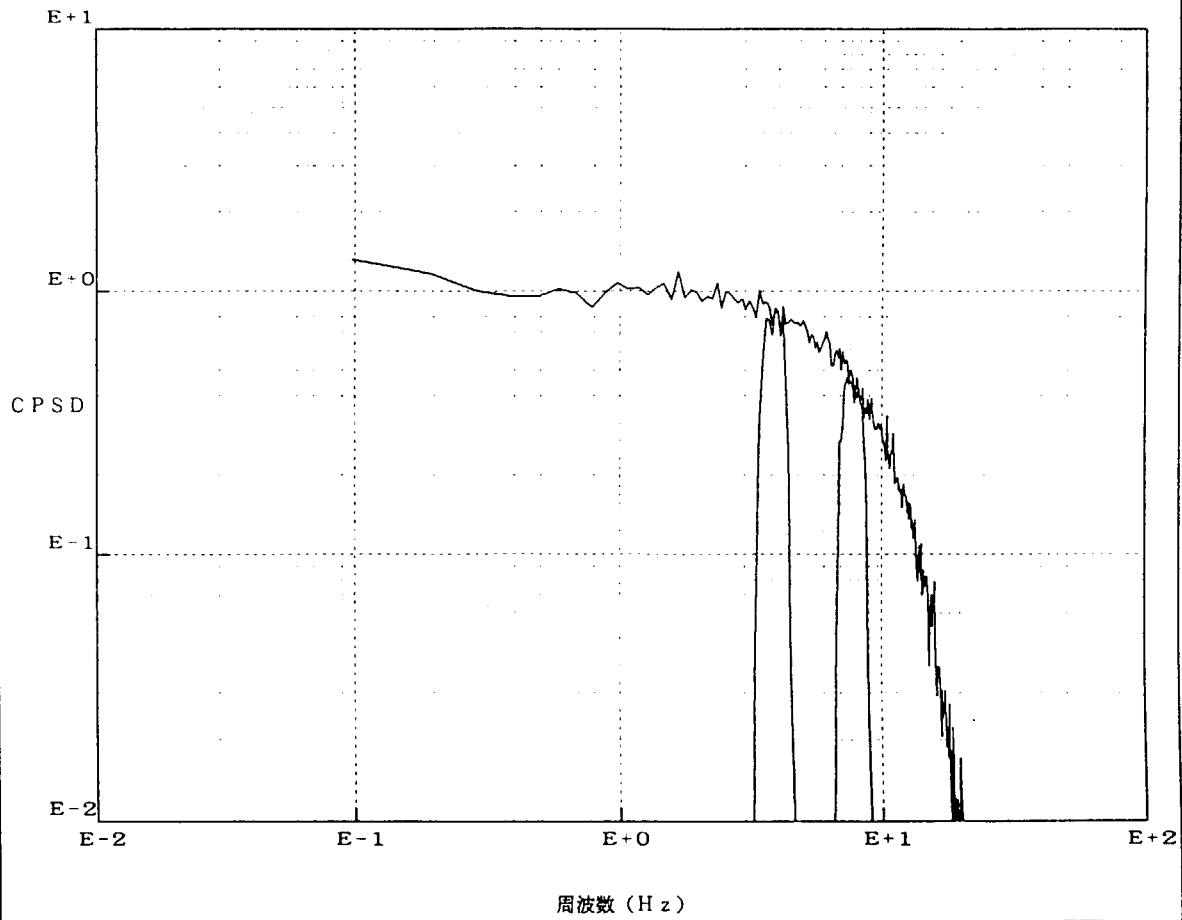


Fig.10.1  $\beta/l$  測定記録 (CASE1)

解析年月日	1999/09/28	試験名称	TEST00
解析時刻	14:55:07	試験番号	03
解析範囲 (秒)	3 ~ 2013	サンプリング周期 (秒)	0.02
BPF 中心周波数 (Hz)	3.962	9.953	
通過帯域幅 (Hz)	0.904	2.312	

$\beta/l$  40.0

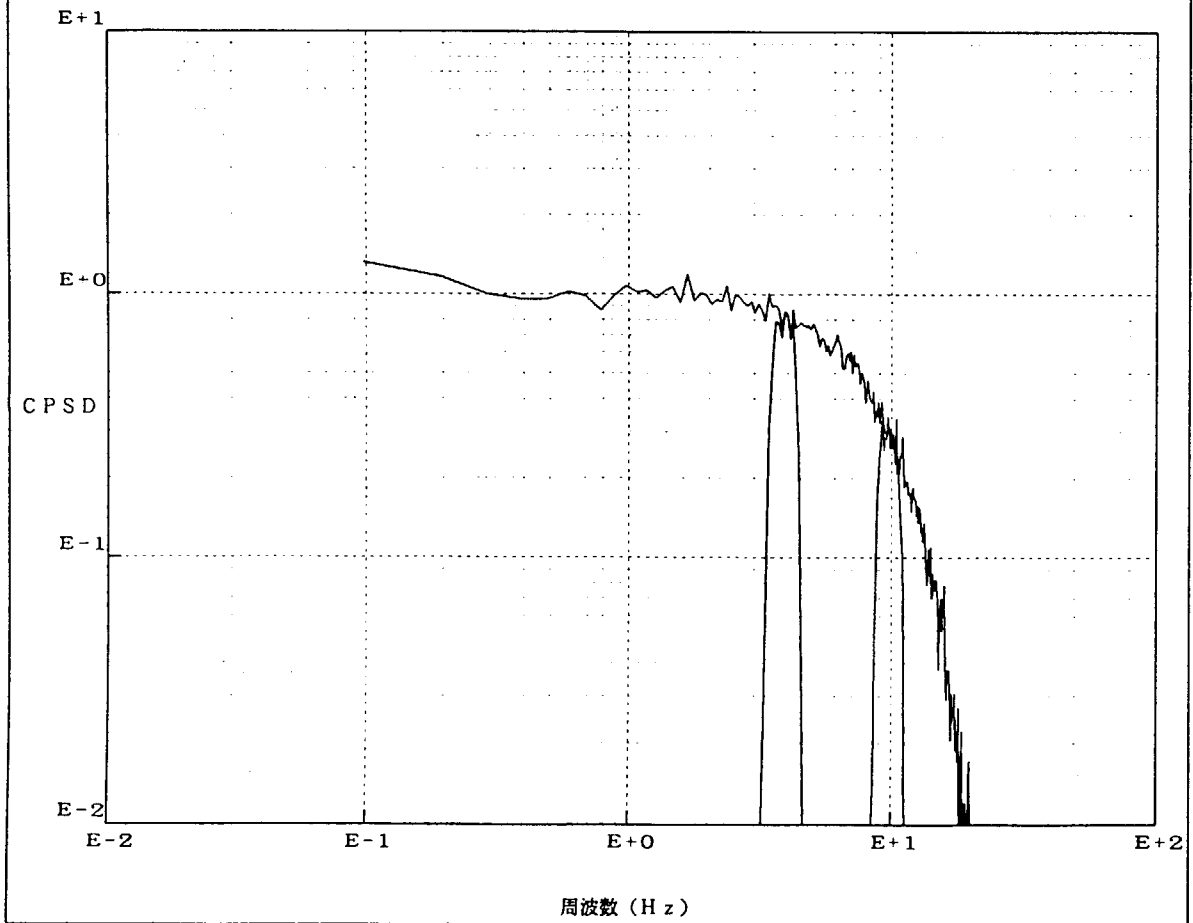


Fig.10.2  $\beta/l$  測定記録 (CASE2)

解析年月日	1999/09/28	試験名称	TEST00
解析時刻	14:55:07	試験番号	03
解析範囲 (秒)	3 ~ 2013	サンプリング周期 (秒)	0.02
BPF 中心周波数 (Hz)	4.988		7.906
通過帯域幅 (Hz)	1.132		1.852

$\beta/l$  50.8

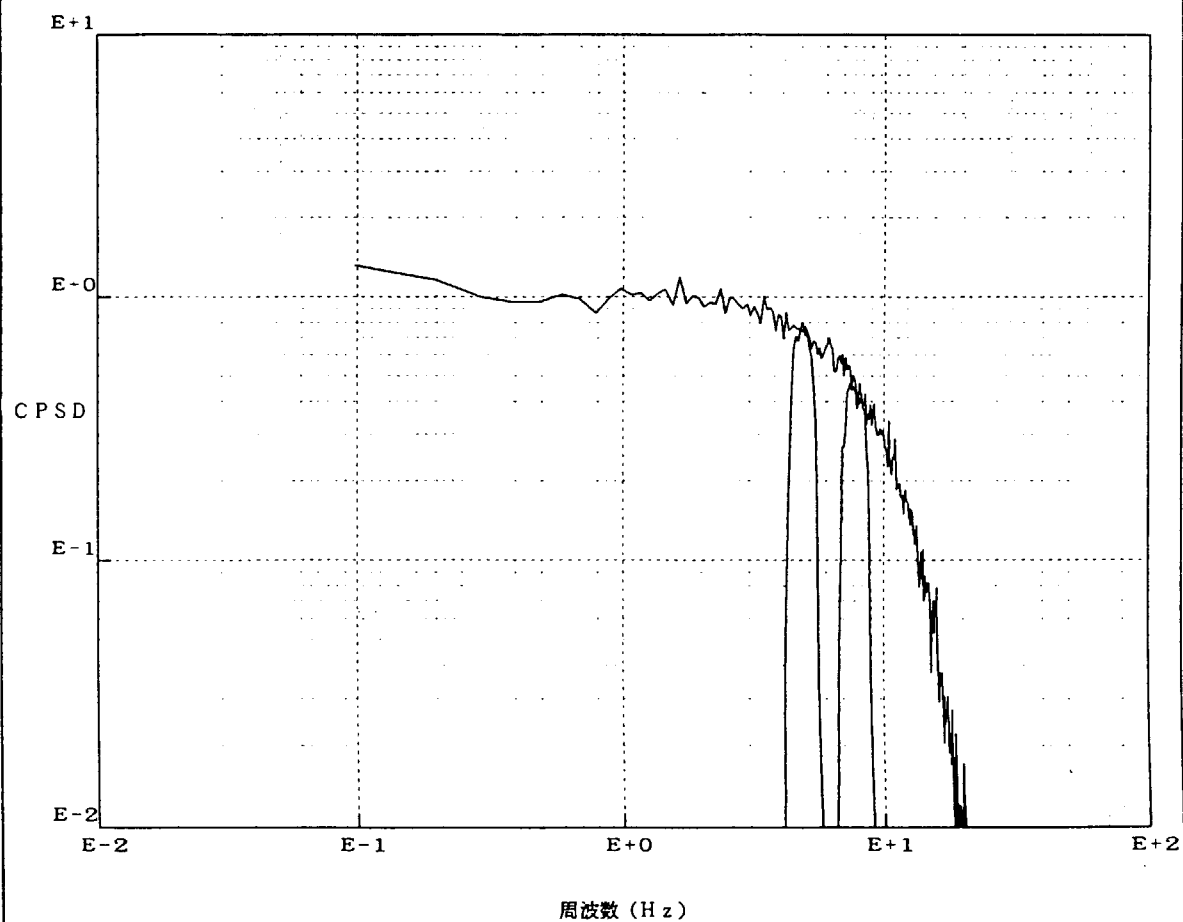


Fig.10.3  $\beta/l$  測定記録 (CASE3)

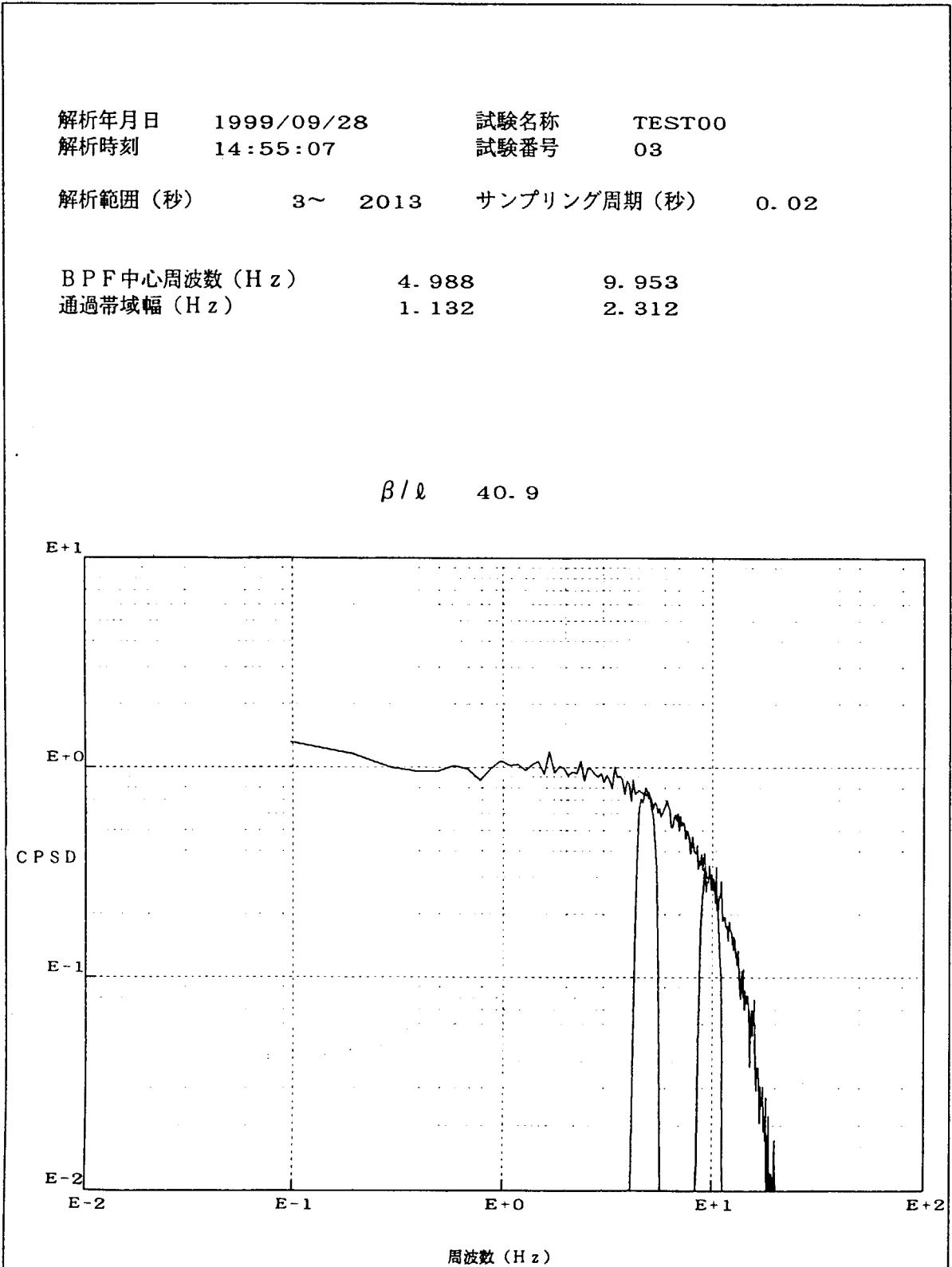


Fig.10.4  $\beta/l$  測定記録 (CASE4)

解析年月日	1999/09/28	試験名称	TEST00
解析時刻	14:55:07	試験番号	03
解析範囲 (秒)	3 ~ 2013	サンプリング周期 (秒)	0.02
BPF 中心周波数 (Hz)	6.280	9.953	
通過帯域幅 (Hz)	1.354	2.312	

$\beta/l$  50.7

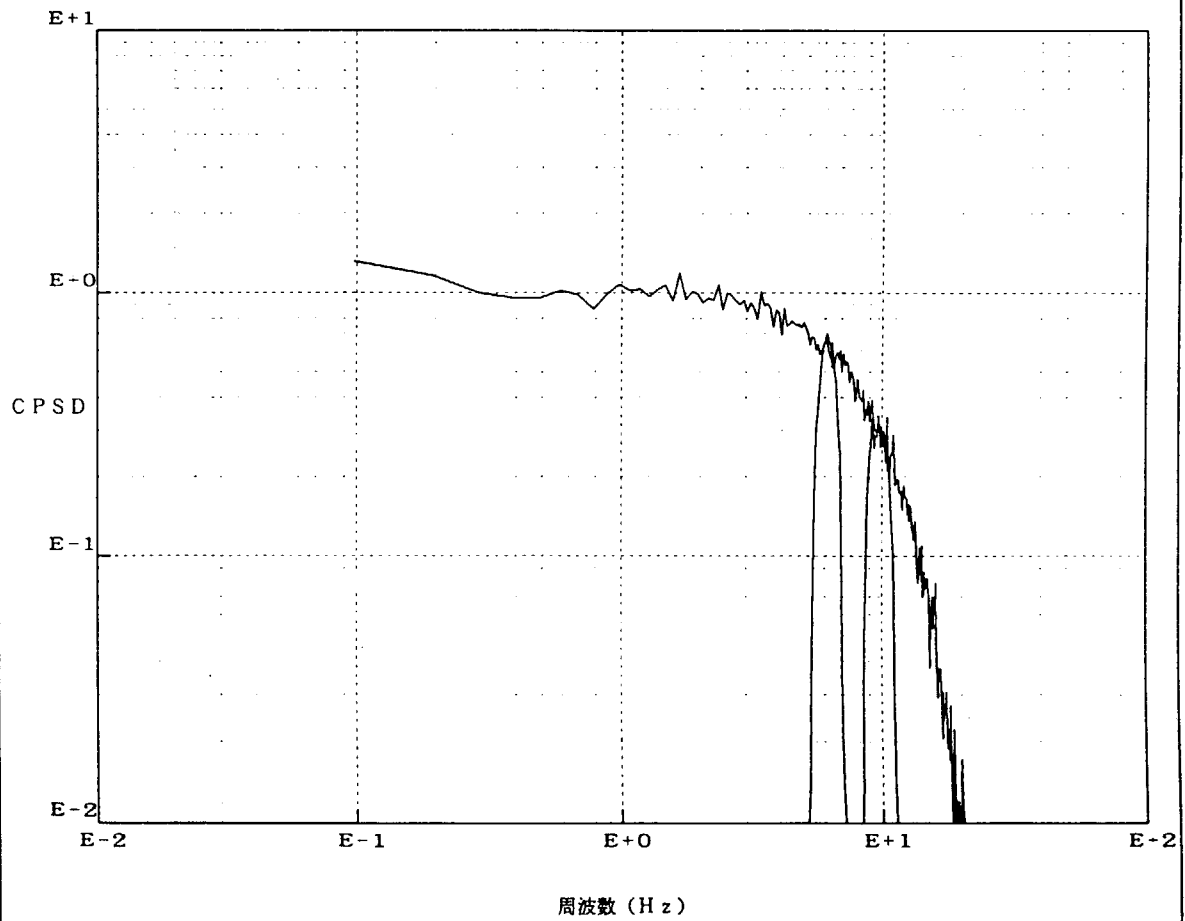


Fig.10.5  $\beta/l$  測定記録 (CASE5)

## 1 1. 炉雑音解析法による核出力測定試験

### 1 1. 1 目的

既設中性子計装設備の指示値の妥当性を確認し安全な原子炉の運転を確保するために、仮設の中性子検出器信号を用いて核出力（原子炉出力）を炉雑音解析法<sup>11)</sup>により同定する。

### 1 1. 2 方法

炉雑音信号としては、仮設の $\gamma$ 線補償形電離箱（CIC）を用いた2チャンネルの検出器出力電流を増幅した信号およびローパスフィルタを介して高周波成分を除去した交流成分の信号を用いた。信号の収録は、IK法反応度測定装置のパーソナルコンピュータにより0.02秒間隔で1800秒～2000秒間のデータ収集を行った。炉雑音解析は、2検出器相互相関法<sup>12)</sup>により、パーソナルコンピュータに組み込んだ信号処理プログラムで、バンドパスフィルタをパラメータにオフライン処理により行った。

#### (1) 測定原理

核出力（原子炉出力）は、2つの検出器の出力を掛け合わせることににより、互いに独立な検出器雑音を除去する相互相関法を用いた次式により算出する。

$$P = i_{10} \cdot i_{20} \cdot \frac{2 \times 3.2 \times 10^{-11}}{v_1 \cdot v_2} \cdot \frac{\overline{v^2 - v}}{v^2} \cdot \int_0^{\infty} |G_R|^2 \cdot |G_{F1}| \cdot |G_{F2}| \cdot |G_{Amp1}| \cdot |G_{Amp2}| \, df \quad (11.1)$$

ここで、

$P$  ; 核出力（原子炉出力）

$i_{10}$ 、 $i_{20}$  ; CICチャンネル1、2の各平均電流

$v_1$ 、 $v_2$  ; CICチャンネル1、2の各交流成分電圧

$v$  ; 1回の核分裂により生ずる平均中性子数

$G_R$  ; 原子炉の伝達関数

$G_{F1}$ 、 $G_{F2}$  ; チャンネル1、2の各バンドパスフィルタの伝達関数

$G_{Amp1}$ 、 $G_{Amp2}$  ; チャンネル1、2の各増幅器の伝達関数

である。

#### (2) 測定条件

原子炉の運転は、自然循環運転モードで、線形出力計（Lin-N A）の指示を基準に<1W、20W、50W、100Wにて制御棒フラットパターン、微調整棒手動操作の約1時間の出力保持を行った。試験ケースは、原子炉出力（Lin-N A指示）20Wで2ケース、<1W、50W、100Wで各1ケースの5ケースとした。データ収録は、仮設のCIC-ch1信号の仮設記録計指示値が安定してから、制御棒操作を2～5回（0.1mm/回）に制限し、約40分間の収集を行った。データ収集中の線形出力計指示の平均は、仮設のCIC-ch1指示から求めた修正係数を用いて算出した値とした。各試験ケース毎の修正Lin-N A、制御棒位置等の測定条件をTable 11.1に示す。

増幅器のゲインは、交流成分の信号をオシロスコープで確認して調整した。5 ケースの試験の内、20W 時のデータ収集は、中性子束分布測定試験と並行して実施したことから、仮設の CIC-ch1 と CIC-ch2 の交流成分信号のレベルが異なる場合と同程度に調整した場合の 2 ケースとした。他のケースは、仮設の CIC-ch1 と CIC-ch2 の交流成分信号のレベルが同程度となるように調整してデータ収集を行った。各試験ケースにおけるデータ収録時の信号波形を Fig.11.1(1)～Fig.11.1(4)に、増幅器のゲイン設定結果を Table 11.2 に示す。

原子炉の伝達関数の算出に用いた核定数は、過剰反応度測定試験時の全炉心構成時と同様である。

### 11.3 結果

原子炉の動特性は、原子炉の伝達関数算出結果と収録データの高速フーリエ解析 (FFT) によるクロスパワースペクトル密度 (CPSD) 曲線が良い一致を示したことから、SRAC コード<sup>1)</sup>を用いた解析結果と同様な特性を有していることを確認した。各原子炉出力毎の FFT 結果と原子炉伝達関数算出結果を Fig.11.2(1)～Fig.11.2(4)に示す。

核出力 P は、各試験ケース毎に折れ点周波数より低い範囲の 6～7 種類のバンドパスフィルタ (BPF) を用い、各 BPF 毎に算出した核出力を平均して求めた。各試験ケースの各 BPF 毎の核出力算出結果を Fig.11.3(1)～Fig.11.3(7)、Fig.11.4(1)～Fig.11.4(7)、Fig.11.5(1)～Fig.11.5(6)、Fig.11.6(1)～Fig.11.6(7)、Fig.11.7(1)～Fig.11.7(9)に示す。

核出力測定値 (核出力⑥の平均) は、修正 Lin-N A の値に対して、原子炉出力 20W 時で約 1.14 倍、原子炉出力 50W 時で約 1.087 倍、原子炉出力 100W 時で約 0.97 倍の結果を得た。真の原子炉出力 = Lin-N A 指示 × Lin-N A 校正係数の関係とした各試験ケースの核出力算出結果および Lin-N A 校正係数を Table11.3 に示す。

### 11.4 評価

(1) 仮設の 2 つの CIC 検出器信号を用いた炉雑音解析法による核出力 (原子炉出力) の測定結果は、アルミナド燃料平衡炉心で熱出力校正済である本設の中性子計装設備 (Lin-N A) と比較して、原子炉出力 20W 時 14%、原子炉出力 100W 時 3%と低い原子炉出力では差が大きくなる結果となった。

(2) 原子炉出力 20W 時に差が大きくなる要因は、仮設 CIC 検出器を炉心燃料領域部から上側に外れて設置したことから、制御棒引き抜きによる (中性子吸収体) 影響で炉心部の中性子数に比例した計測が期待できないため、検出器設置位置に起因する測定誤差が生じたと考えられる。

炉雑音解析法による測定結果と Lin-N A 指示の比較を Fig.11.8 に示す。

従って、原子炉出力 100W 時において、3%以内で良く一致した結果が得られたことから、本設の中性子計装設備は、核出力での校正は行わず、出力上昇時の熱出力と比較する点検調整(出力定点点検)を実施することとした。

Table11.1 炉雑音測定試験の測定条件(1)

試験名称 (試験ヶ-ス)	Lin-N A (測定開始時) (W) ①	CIC-ch1 (測定開始時) CIC-ch2 (測定開始時) (A) ②	CIC-ch1 (平均) CIC-ch2 (平均) (A) ③	修正係数 ③/② ④	修正 Lin-N A ①×④ (W) ⑤	R-1 位置 他制御棒位置 (mm)	炉 <sup>o</sup> -ll水温度 (仮設) (°C)
TEST00-02	20.2	0.417E-7 0.097E-7	0.431E-7 0.095E-7	1.034 ---	20.9	263 266	28.2
TEST00-03	20.7	0.435E-7 0.096E-7	0.449E-7 0.099E-7	1.032 ---	21.4	263 266	28.6
TEST00-04	1> ( CIC-ch1 ; 0.45E-8A)	0.450E-8 0.093E-8	0.475E-8 0.098E-8	1.056 ---	---	264 265	29.9
TEST00-05	50.5	0.101E-6 0.021E-6	0.113E-6 0.0238E-6	1.119 ---	56.5	264 265	29.9
TEST00-06	101.8	0.200E-6 0.0418E-6	0.200E-6 0.0419E-6	1.00 ---	101.8	263 265	29.9



Table11.2 炉雑音測定試験の測定条件(2)

試験名称 (試験ケース)	測定日時	核定数設定	CIC-ch1 ゲイン	CIC-ch2 ゲイン	AC amp ch.3ゲイン	AC amp ch.4ゲイン	AC amp ch.5ゲイン	AC amp ch.6ゲイン	備考
TEST00-02	H11.9.28 14 : 13~	2 JRR-3_26	1.0E 7	1.0E 7	6 ×50 LPF20Hz	6 ×50 LPF20Hz	3 ×5 LPF20Hz	3 ×5 LPF20Hz	CIC-ch1 ; ch.3,5 CIC-ch2 ; ch.4,6 に接続
TEST00-03	H11.9.28 14 : 55~	3 JRR3 26 Gm2	1.0E 7	1.0E 7	6 ×50 LPF20Hz	6 ×50 LPF20Hz	3 ×5 LPF20Hz	4 ×10 LPF20Hz	CIC-ch1 ; ch.3,5 CIC-ch2 ; ch.4,6 に接続
TEST00-04	H11.9.29 14 : 15~	4 test-04	1.0E 8	1.0E 8	5 ×20 LPF50Hz	6 ×50 LPF50Hz	3 ×5 LPF50Hz	3 ×5 LPF50Hz	CIC-ch1 ; ch.3,5 CIC-ch2 ; ch.4,6 に接続
TEST00-05	H11.9.29 15 : 24~	5 test-05	4.0E 6	4.0E 6	6 ×50 LPF50Hz	6 ×50 LPF50Hz	3 ×5 LPF50Hz	4 ×10 LPF50Hz	CIC-ch1 ; ch.3,5 CIC-ch2 ; ch.4,6 に接続
TEST00-06	H11.9.29 16 : 20~	1 JRR3	2.0E 6	2.0E 6	6 ×50 LPF50Hz	6 ×50 LPF50Hz	4 ×10 LPF50Hz	5 ×20 LPF50Hz	CIC-ch1 ; ch.3,5 CIC-ch2 ; ch.4,6 に接続

Table11.3 核出力演算結果

試験名称 (試験ケース)	核出力の演算結果 (W) ⑥										核出力 ⑥の平均 (W) ⑦	Lin-N A校正係数 ⑦/⑤
	バンドパスフィルタ (Hz)											
	1.577	1.986	2.500	3.147	3.962	4.988	6.280	7.906	9.953			
TEST00-02	22.1	20.8	35.1	21.3	19.3	24.9	24.2	----	----	----	23.9	1.14
TEST00-03	32.6	19.3	24.0	21.4	23.2	24.6	28.0	----	----	----	24.5	1.14
TEST00-04	3.3	2.9	3.4	2.7	2.6	3.0	----	----	----	----	2.98	----
TEST00-05	61.3	66.5	46.9	73.0	65.0	59.4	57.5	----	----	----	61.4	1.087
TEST00-06	79.1	124.2	79.1	84.6	126.8	110.3	89.0	参考 (85.9)	参考 (102)		99.0	0.97

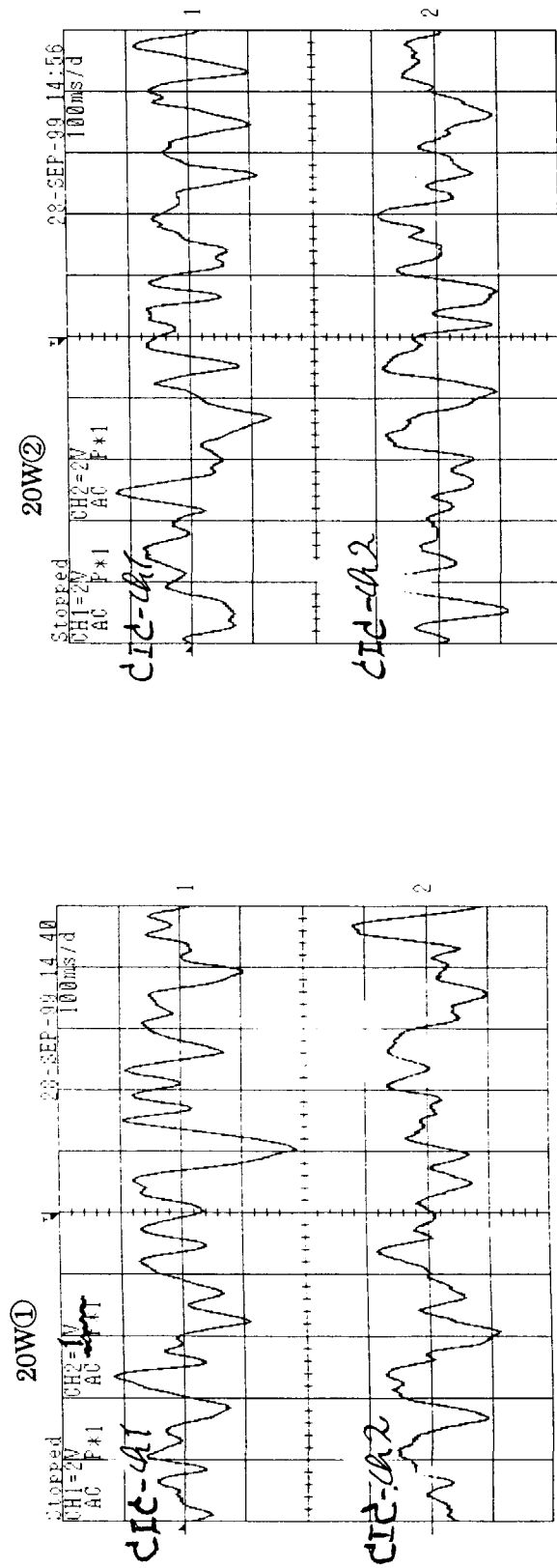


Fig. 11.1(1) データ収録信号 (TEST00-02)

Fig. 11.1(2) データ収録信号 (TEST00-03)

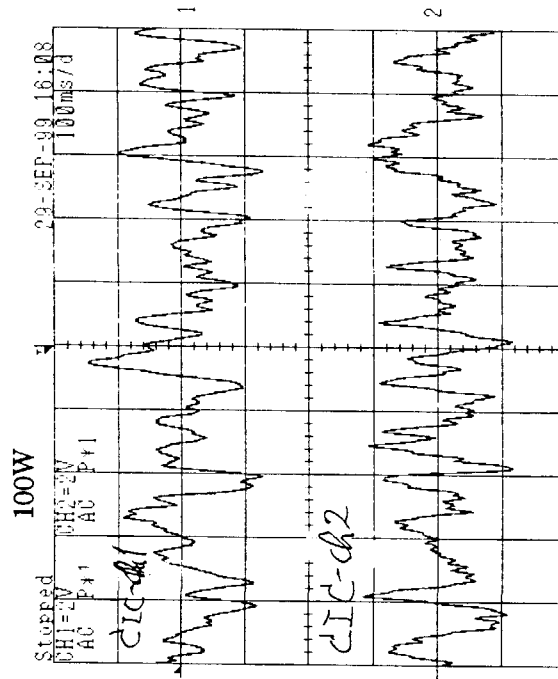


Fig. 11.1(4) データ収録信号 (TEST00-06)

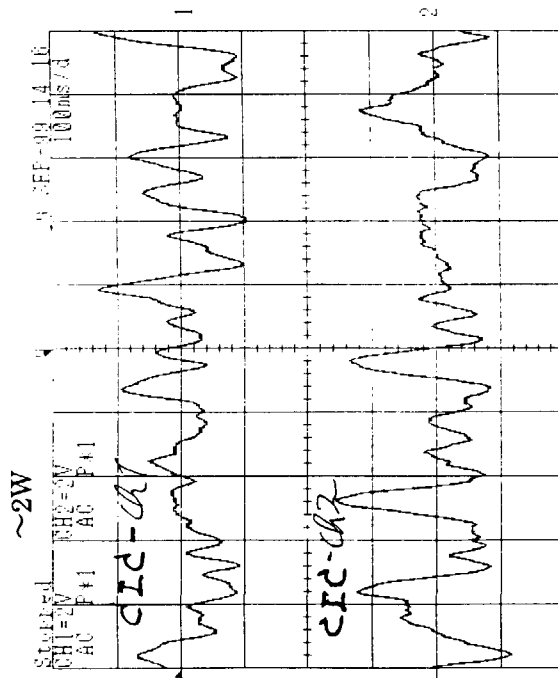


Fig. 11.1(3) データ収録信号 (TEST00-04)

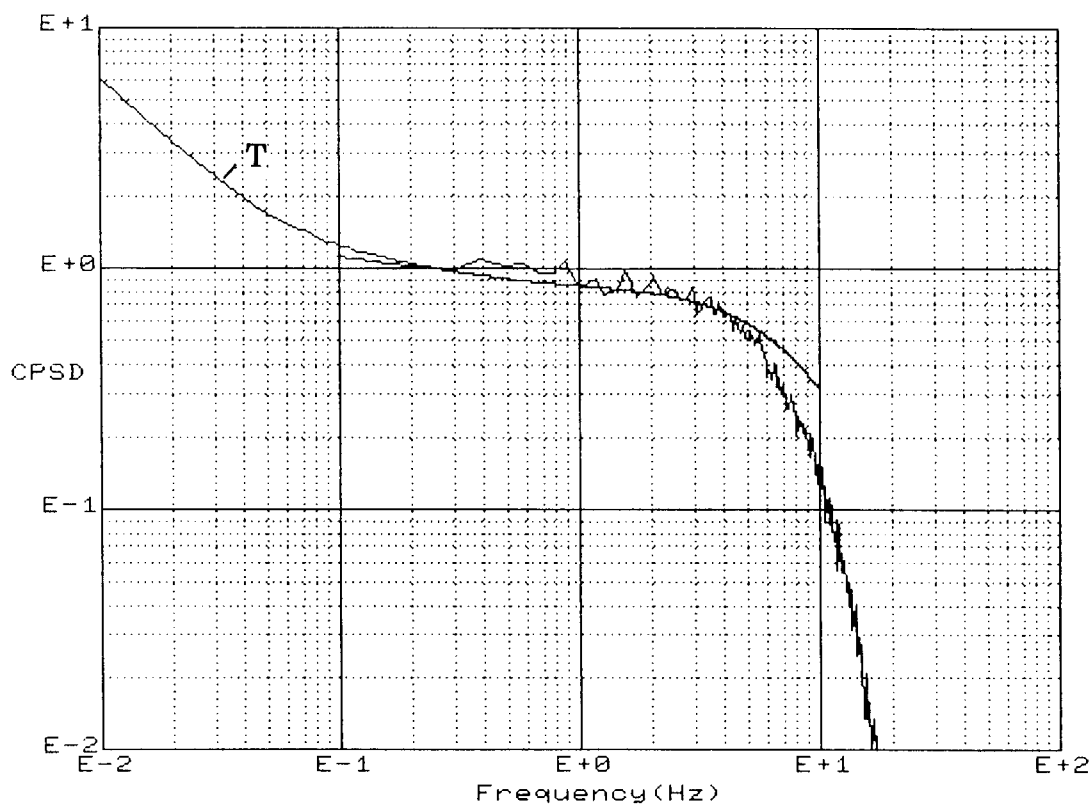


Fig. 11.2(1) FFT 結果と原子炉伝達関数 T (1>W)

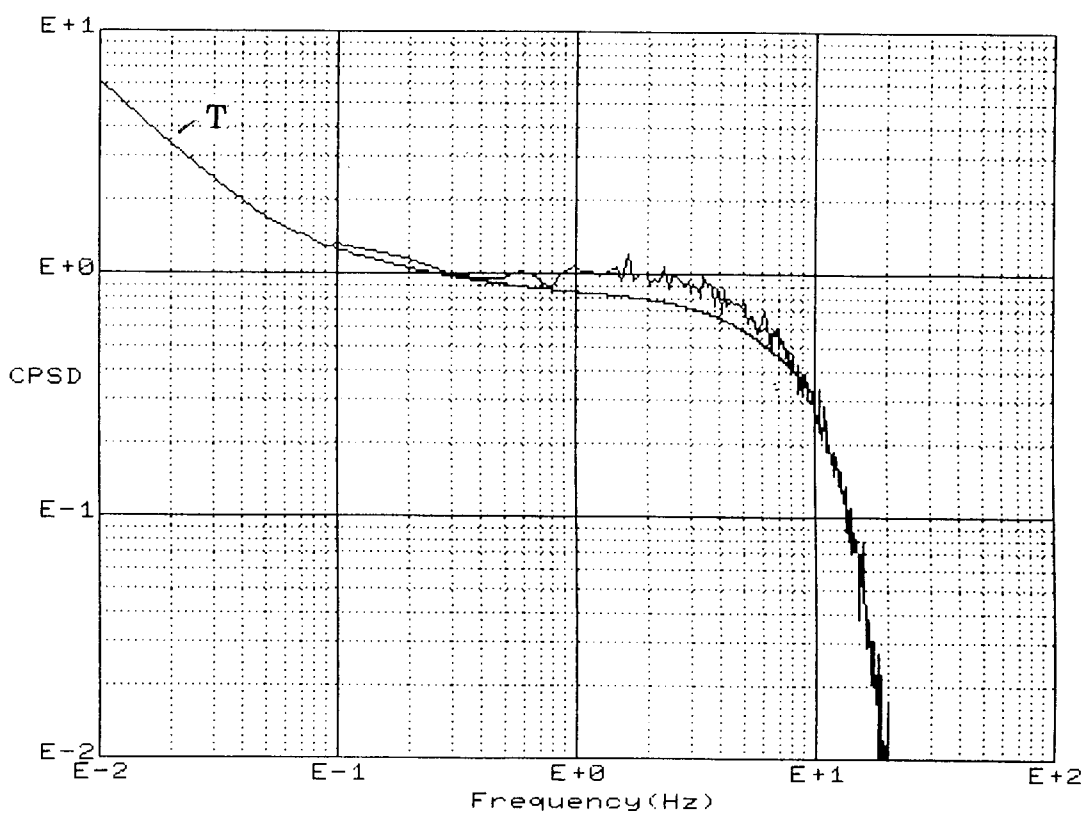


Fig. 11.2(2) FFT 結果と原子炉伝達関数 T (20W)

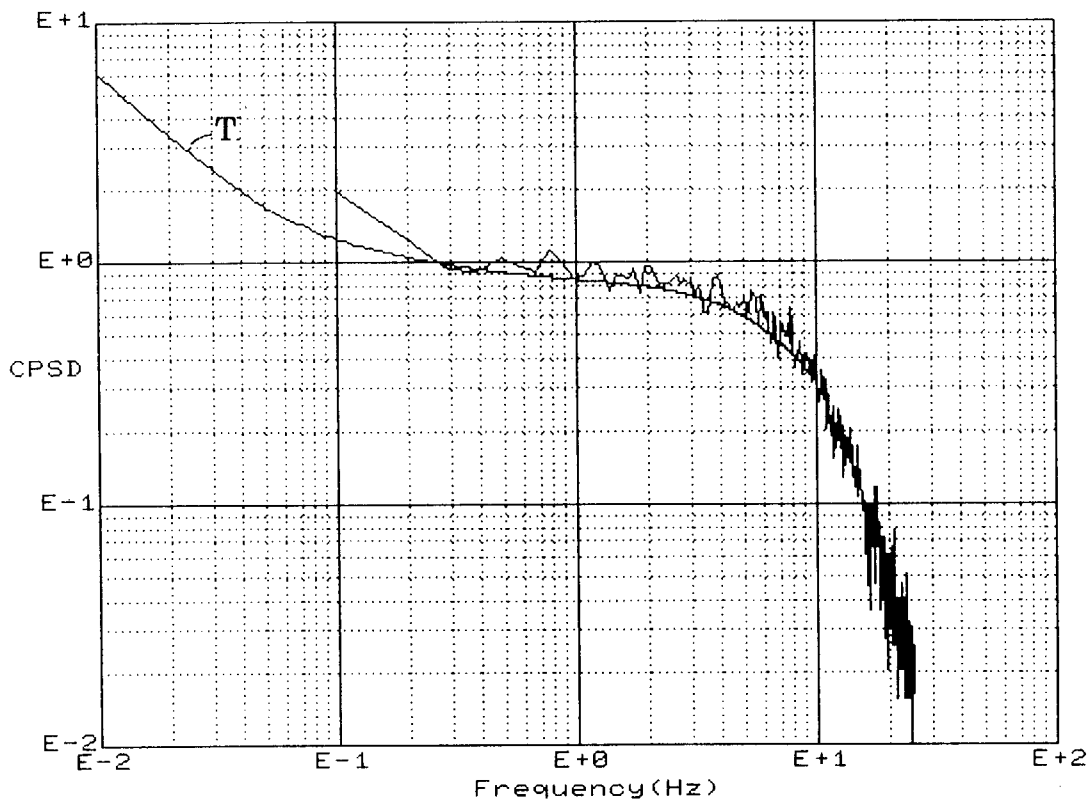


Fig. 11.2(3) FFT 結果と原子炉伝達関数 T (50W)

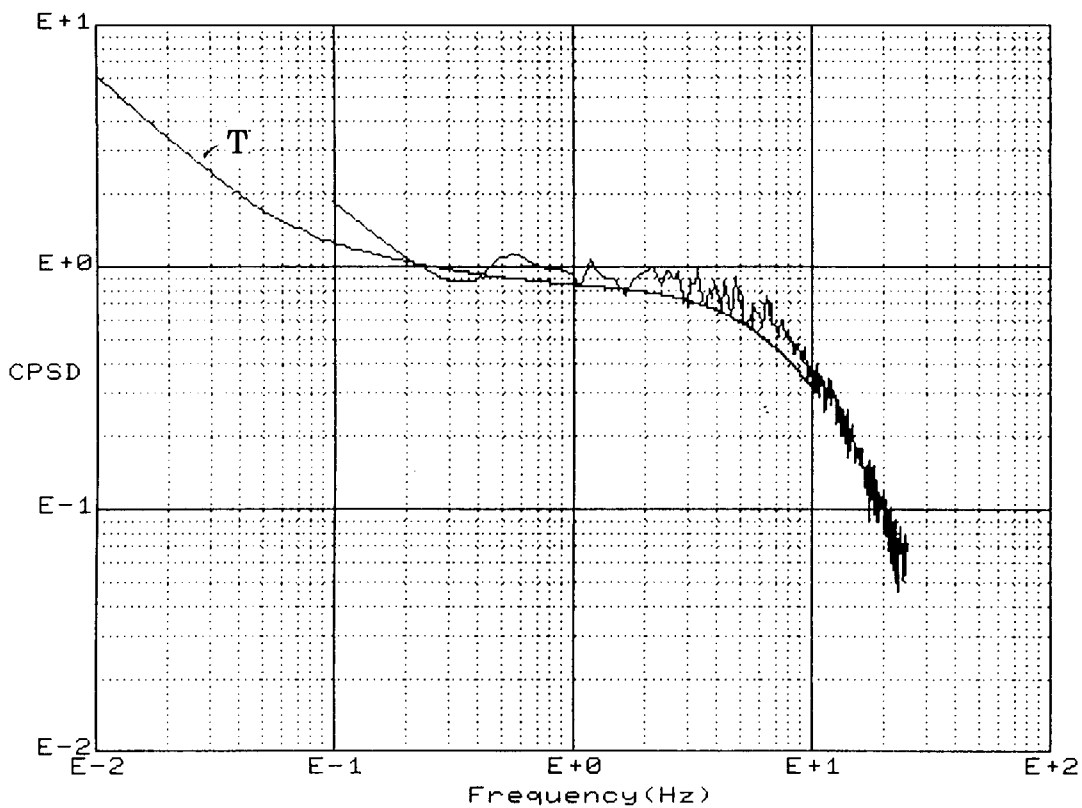


Fig. 11.2(4) FFT 結果と原子炉伝達関数 T (100W)

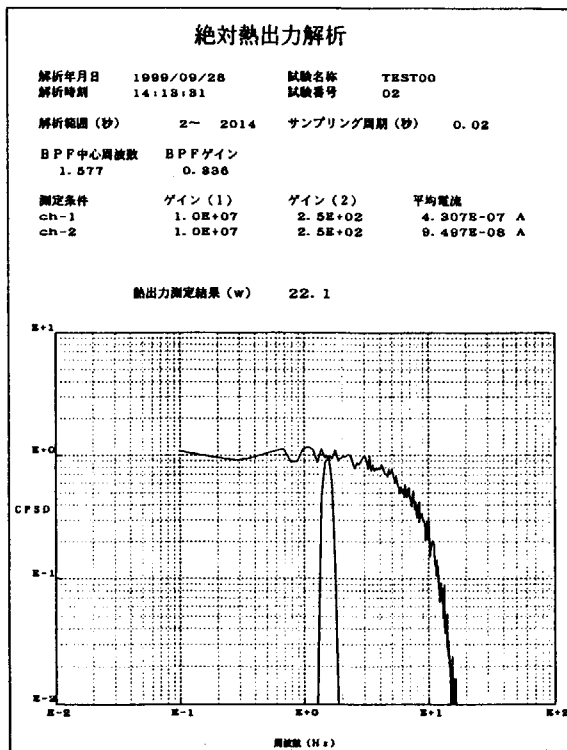


Fig. 11.3(1) 核出力算出結果 (TEST00-02)

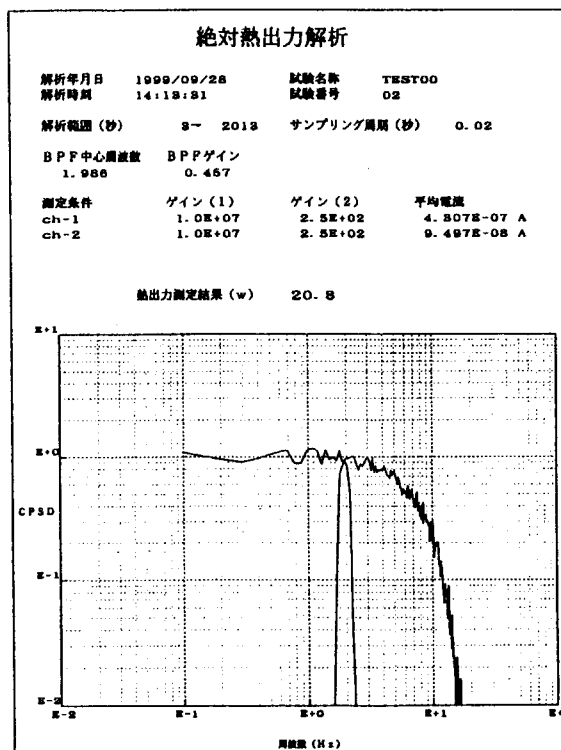


Fig. 11.3(2) 核出力算出結果 (TEST00-02)

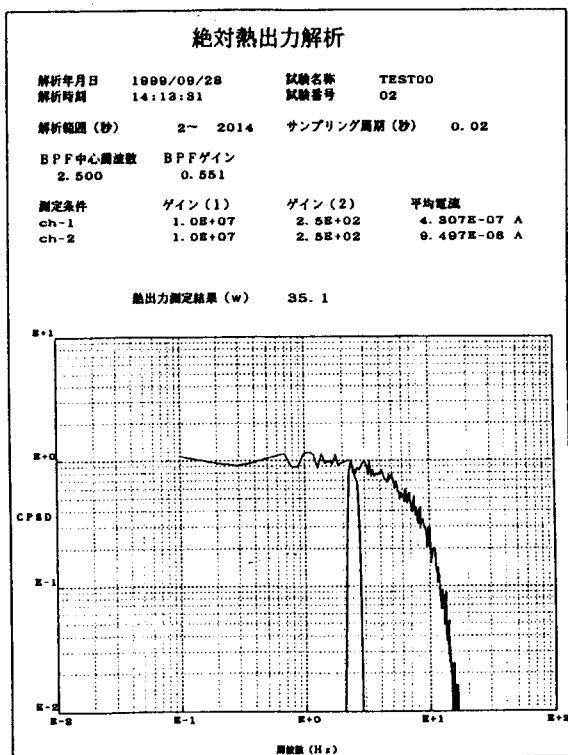


Fig. 11.3(3) 核出力算出結果 (TEST00-02)

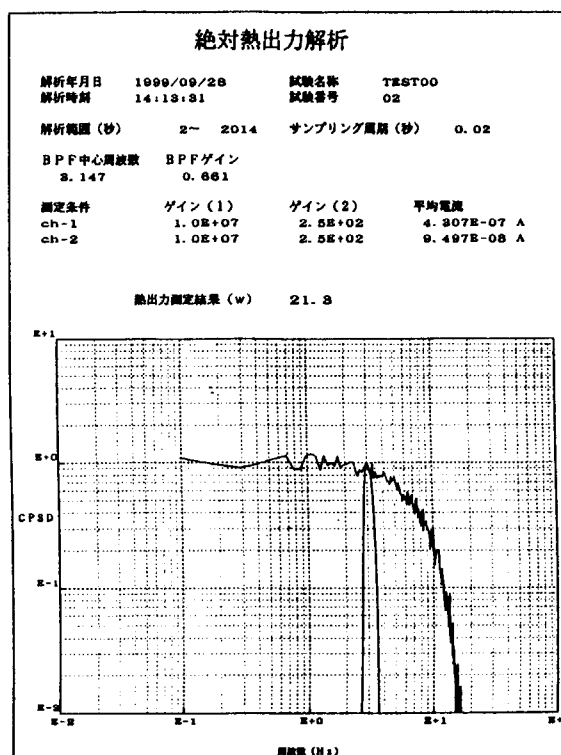


Fig. 11.3(4) 核出力算出結果 (TEST00-02)

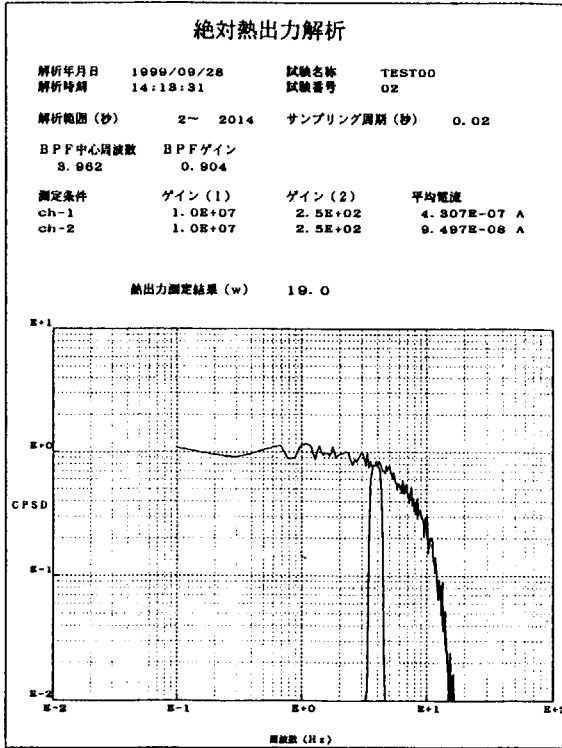


Fig. 11.3(5) 核出力算出結果 (TEST00-02)

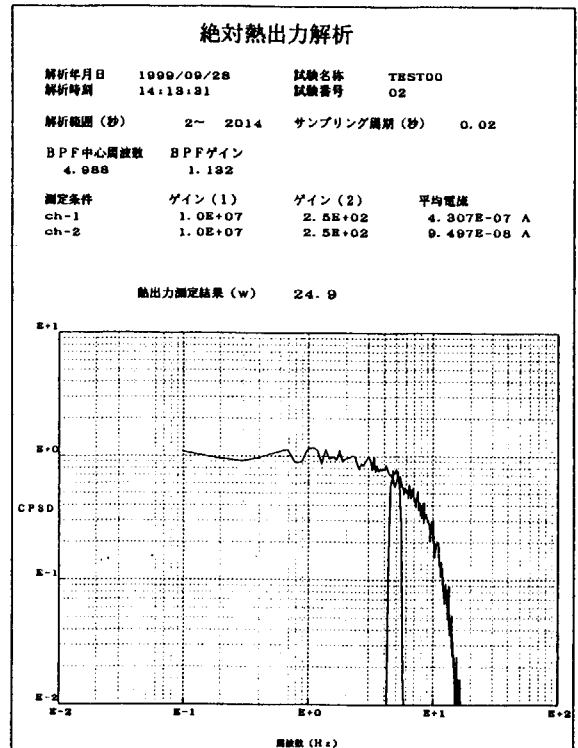


Fig. 11.3(6) 核出力算出結果 (TEST00-02)

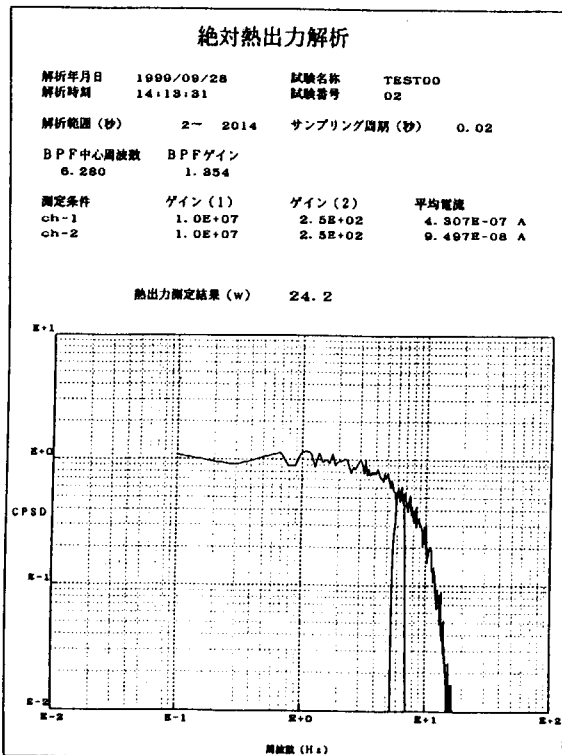


Fig. 11.3(7) 核出力算出結果 (TEST00-02)

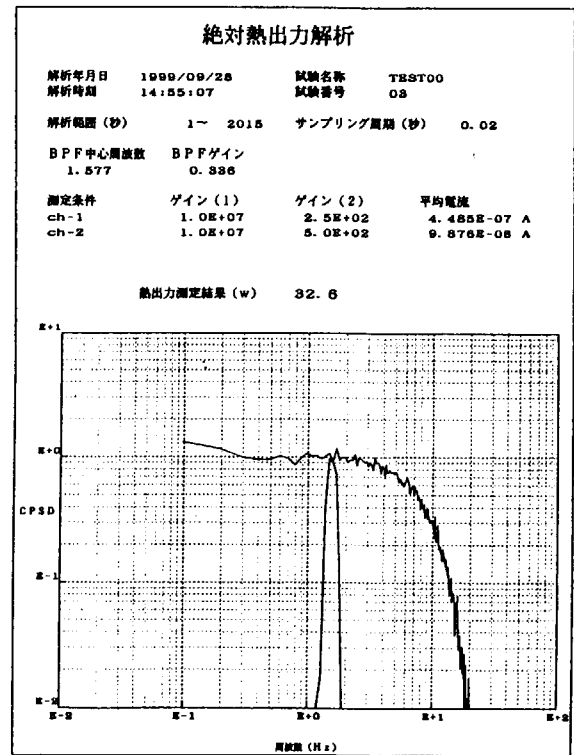


Fig. 11.4(1) 核出力算出結果 (TEST00-03)



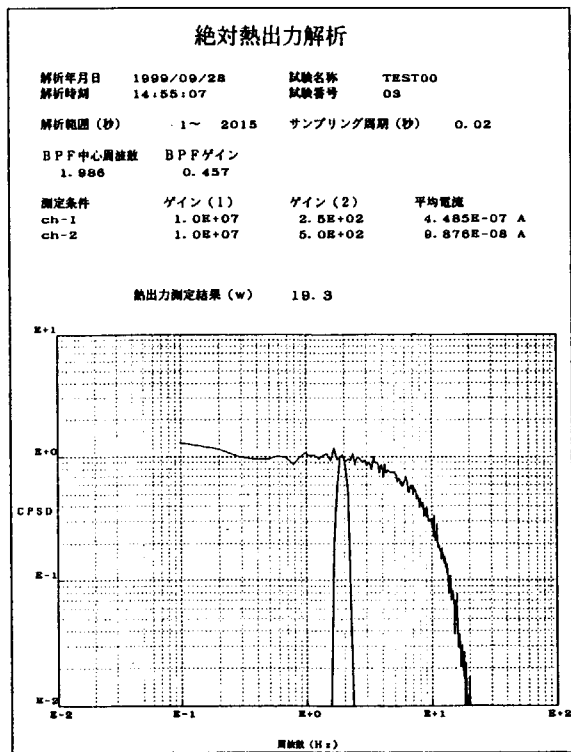


Fig. 11.4(2) 核出力算出結果 (TEST00-03)

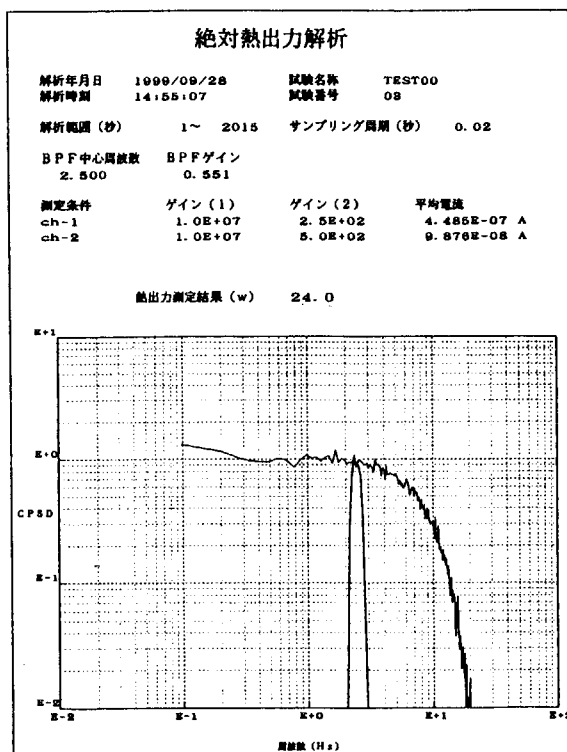


Fig. 11.4(3) 核出力算出結果 (TEST00-03)

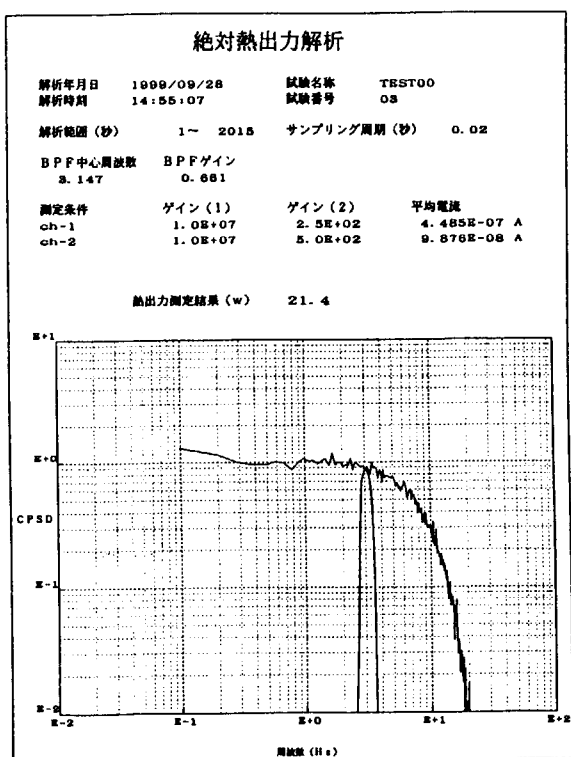


Fig. 11.4(4) 核出力算出結果 (TEST00-03)

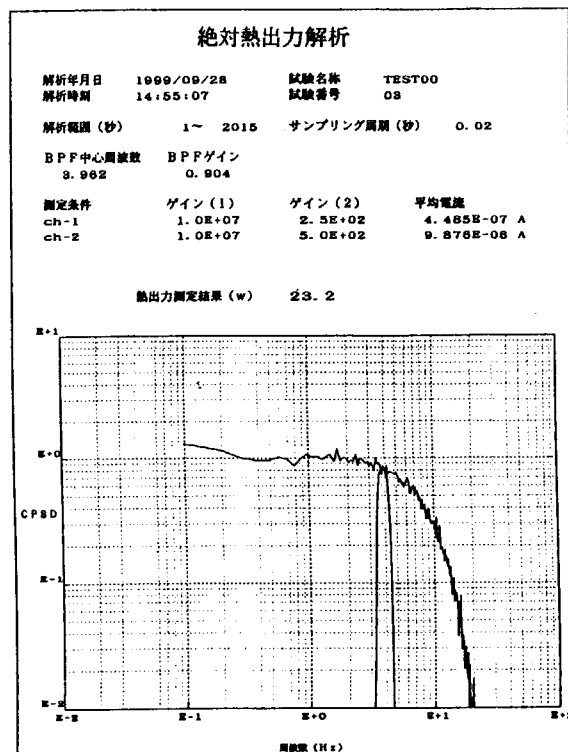


Fig. 11.4(5) 核出力算出結果 (TEST00-03)

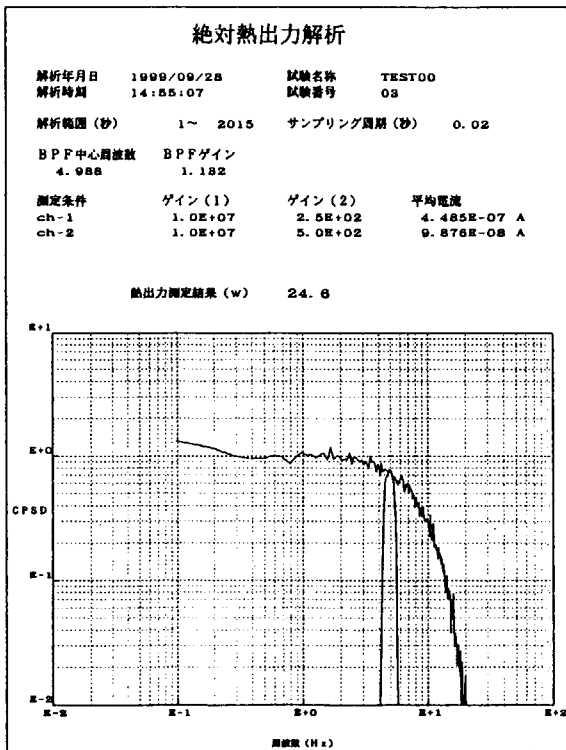


Fig. 11.4(6) 核出力算出結果 (TEST00-03)

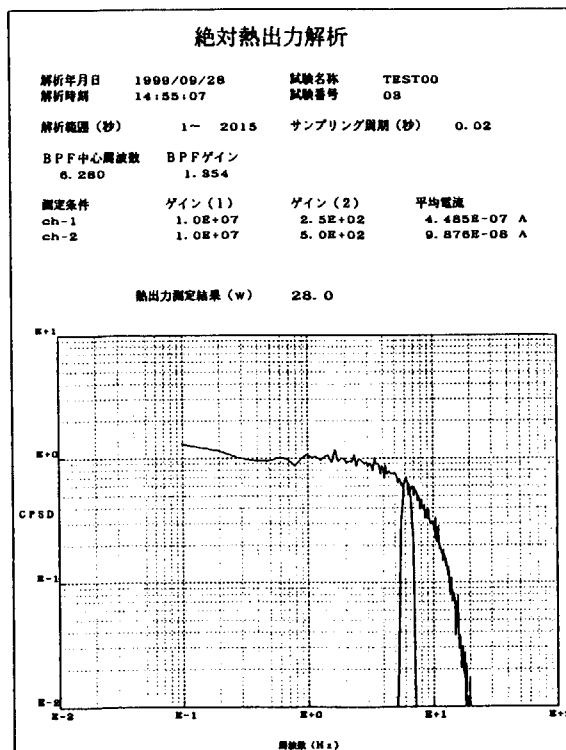


Fig. 11.4(7) 核出力算出結果 (TEST00-03)

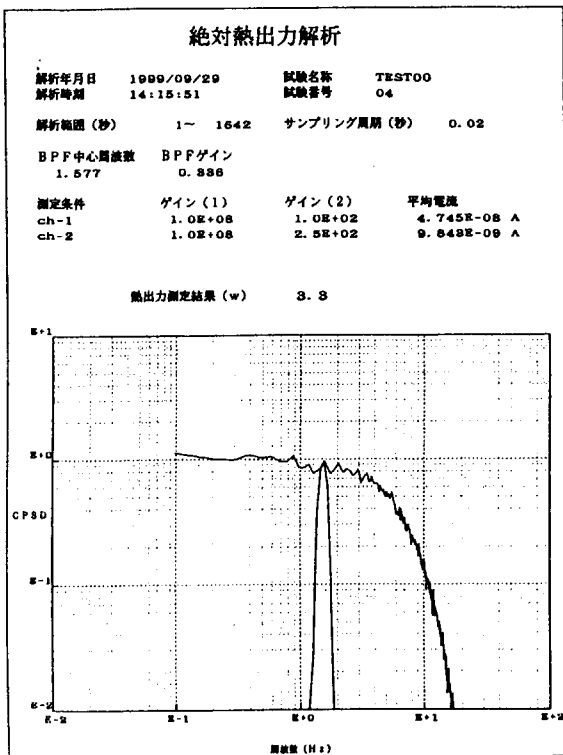


Fig. 11.5(1) 核出力算出結果 (TEST00-04)

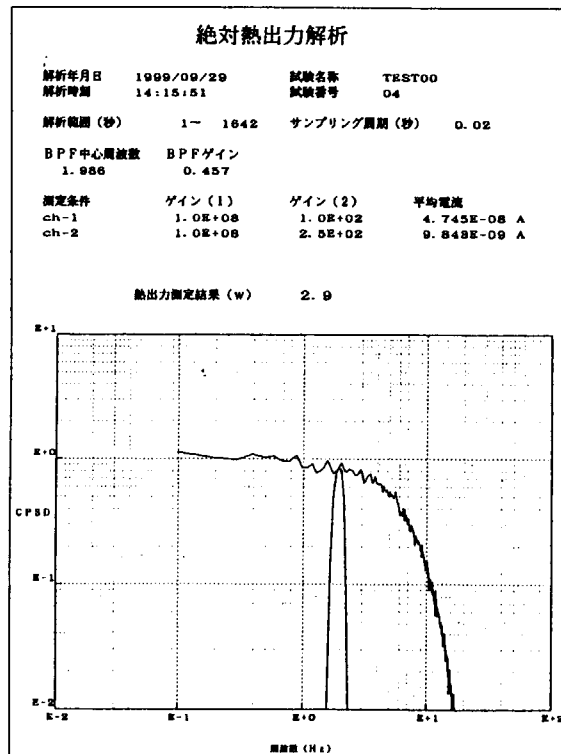


Fig. 11.5(2) 核出力算出結果 (TEST00-04)

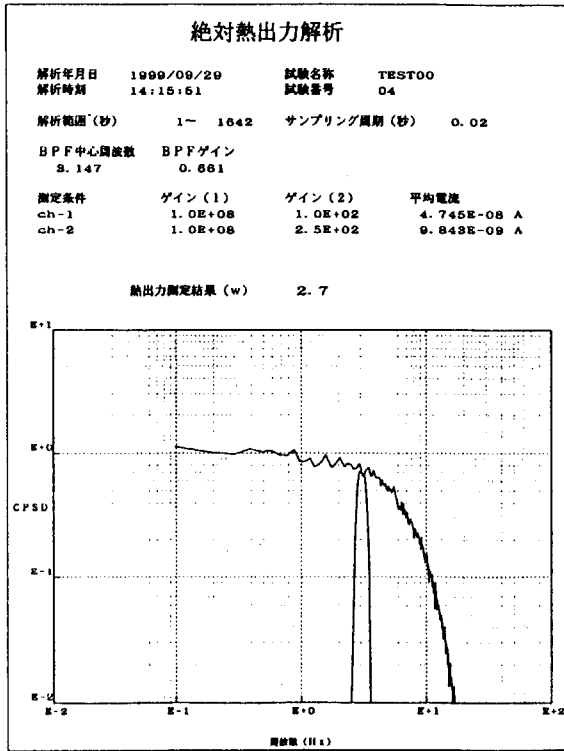


Fig. 11.5(3) 核出力算出結果 (TEST00-04)

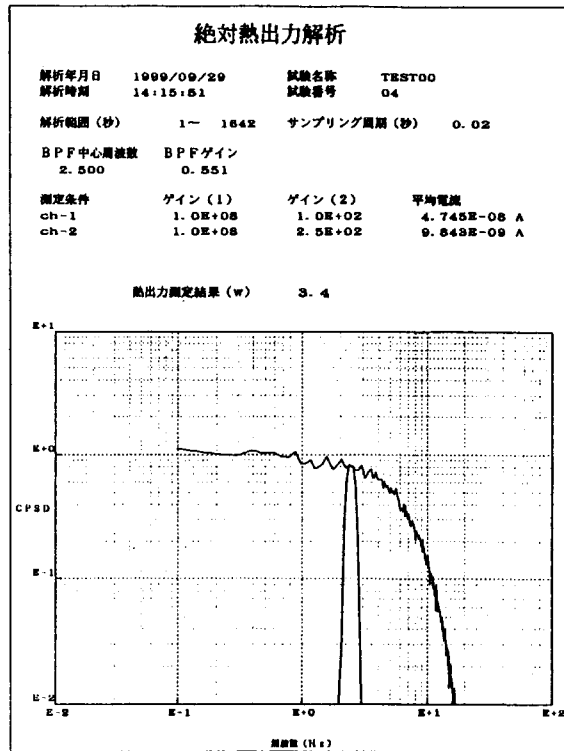


Fig. 11.5(4) 核出力算出結果 (TEST00-04)

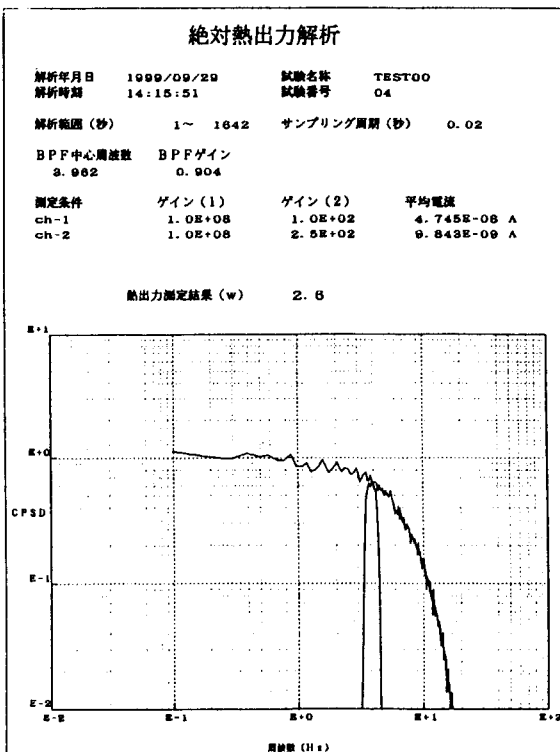


Fig. 11.5(5) 核出力算出結果 (TEST00-04)

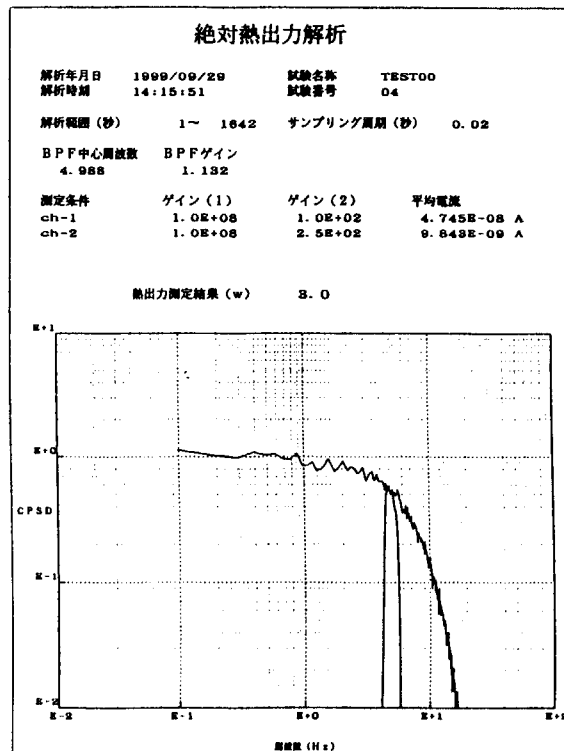


Fig. 11.5(6) 核出力算出結果 (TEST00-04)

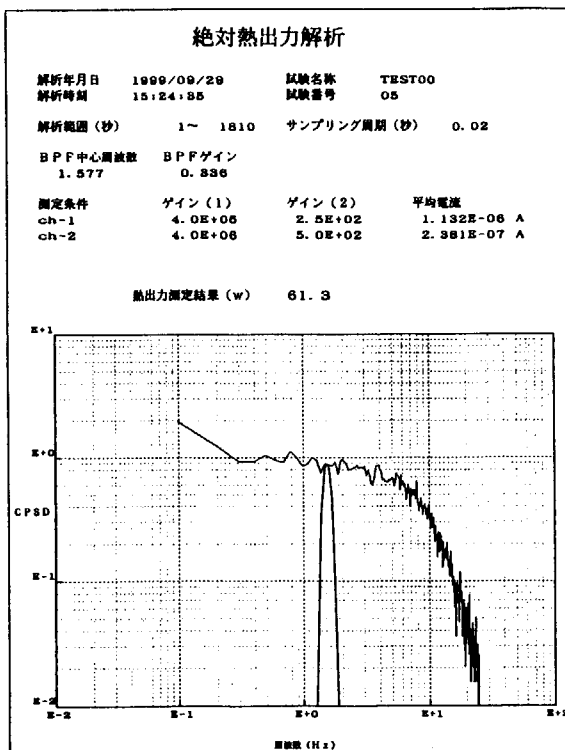


Fig. 11.6(1) 核出力算出結果 (TEST00-05)

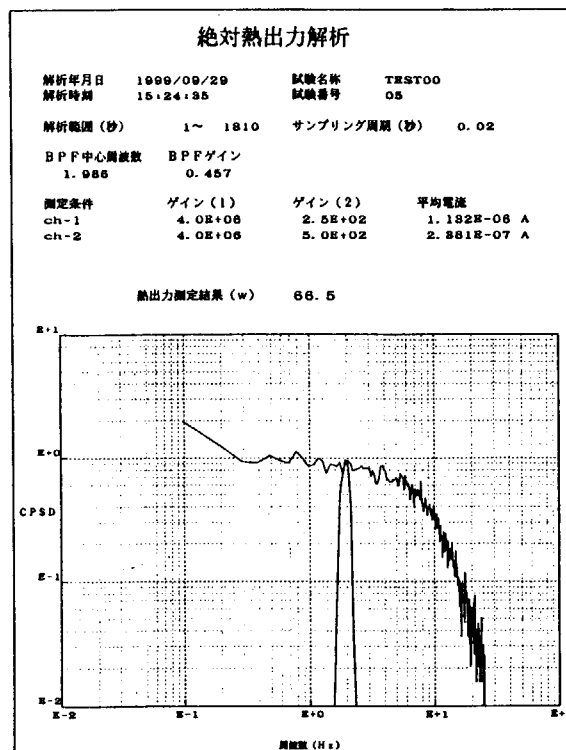


Fig. 11.6(2) 核出力算出結果 (TEST00-05)

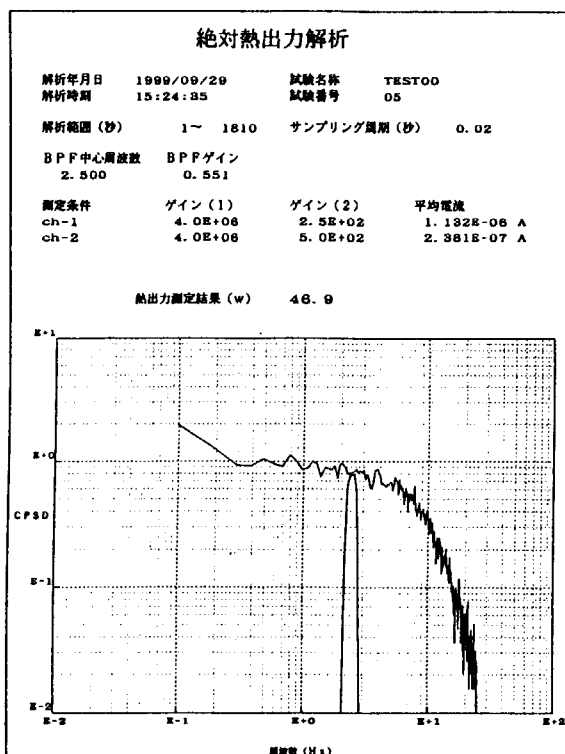


Fig. 11.6(3) 核出力算出結果 (TEST00-05)

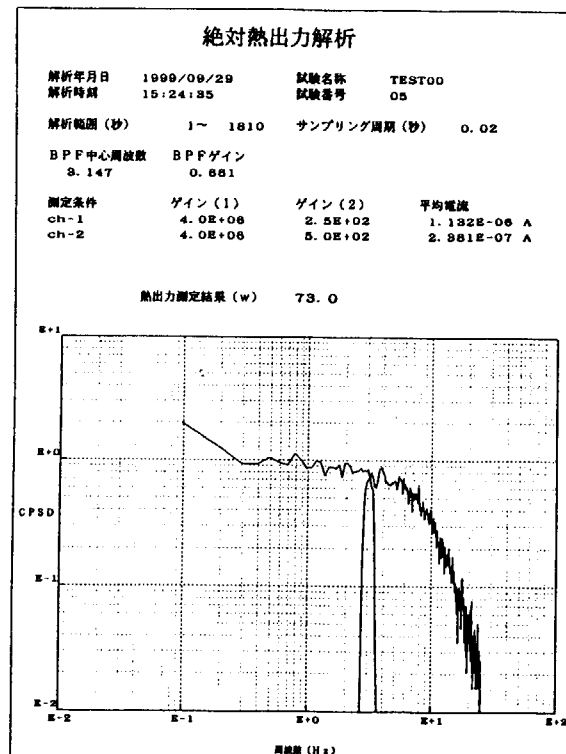


Fig. 11.6(4) 核出力算出結果 (TEST00-05)

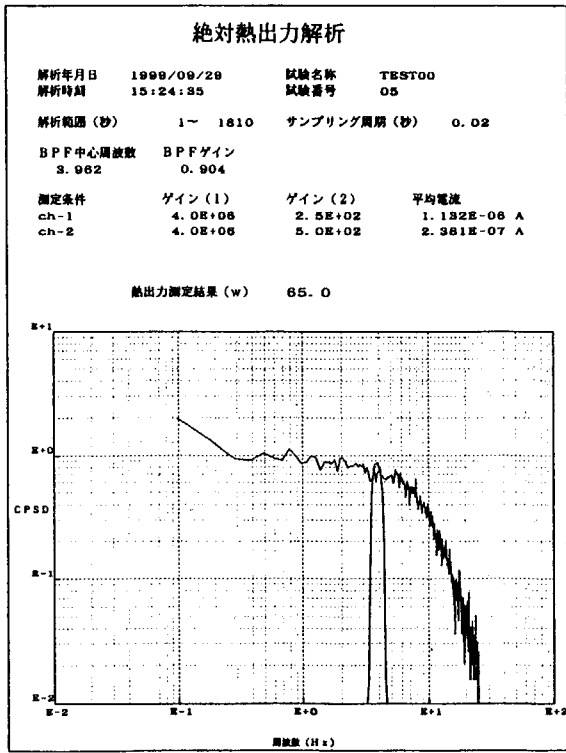


Fig. 11.6(5) 核出力算出結果 (TEST00-05)

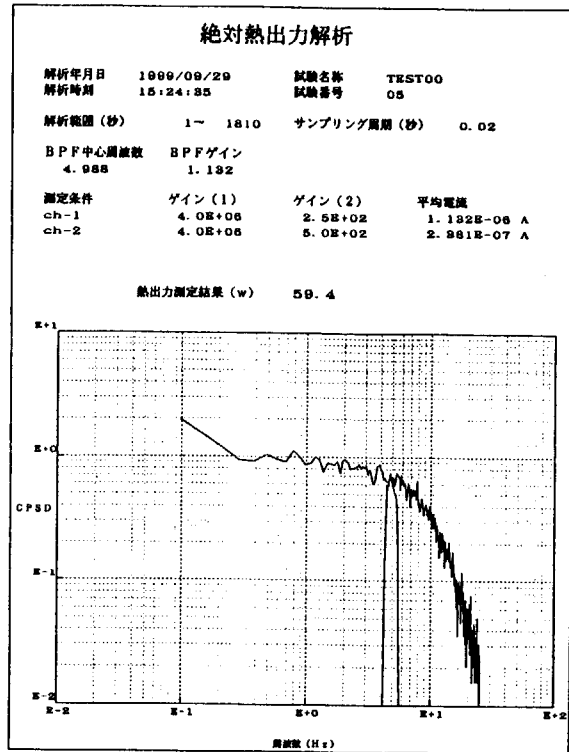


Fig. 11.6(6) 核出力算出結果 (TEST00-05)

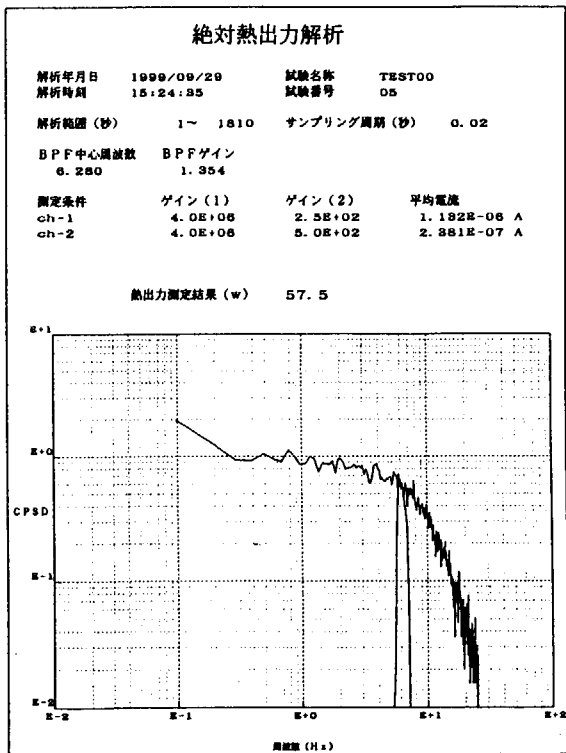


Fig. 11.6(7) 核出力算出結果 (TEST00-05)

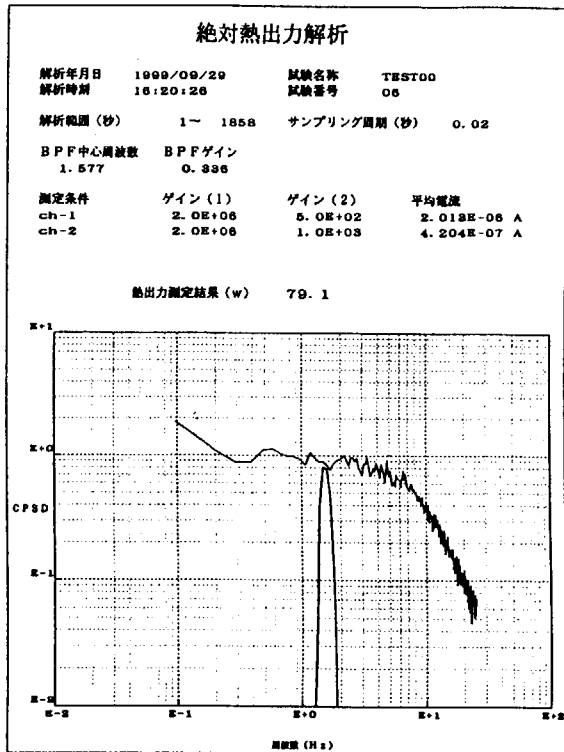


Fig. 11.7(1) 核出力算出結果 (TEST00-06)

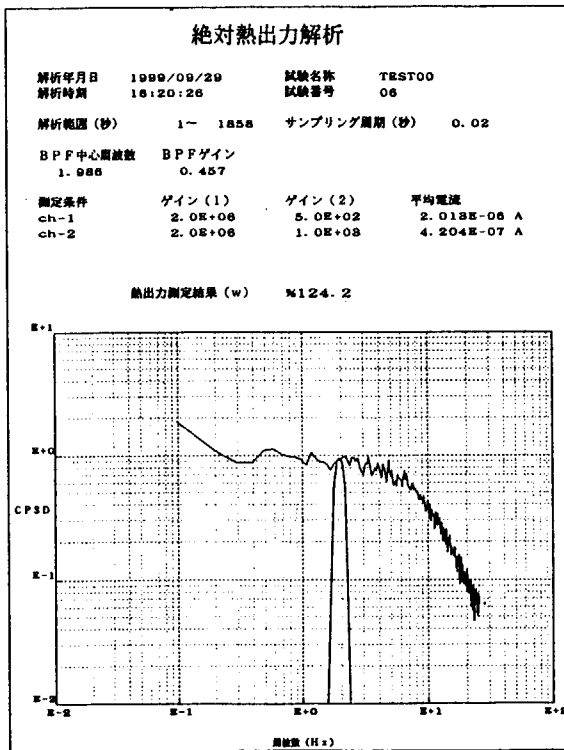


Fig. 11.7(2) 核出力算出結果 (TEST00-06)

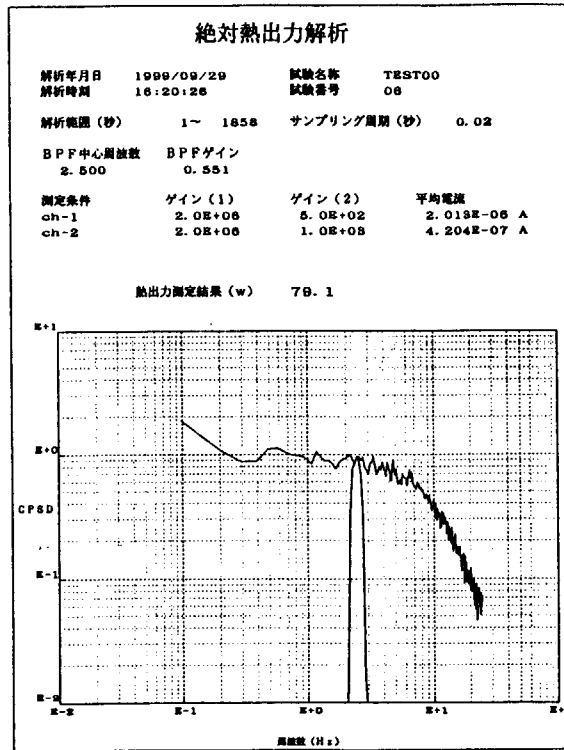


Fig. 11.7(3) 核出力算出結果 (TEST00-06)

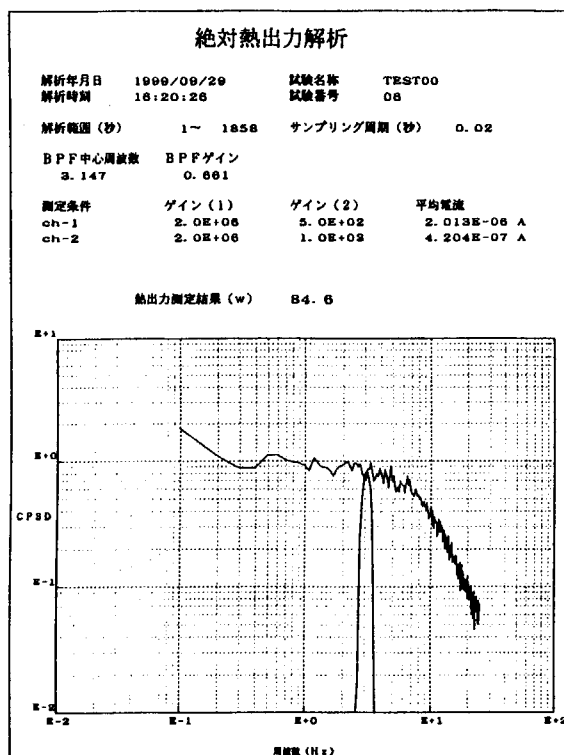


Fig. 11.7(4) 核出力算出結果 (TEST00-06)

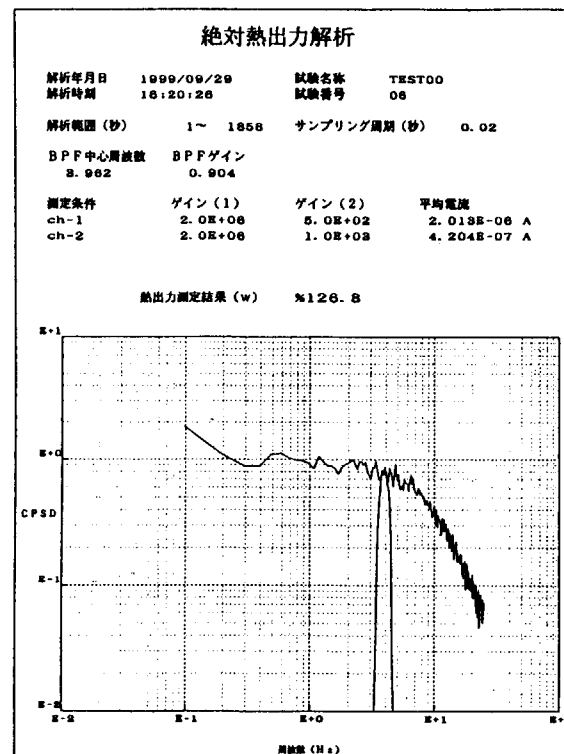


Fig. 11.7(5) 核出力算出結果 (TEST00-06)

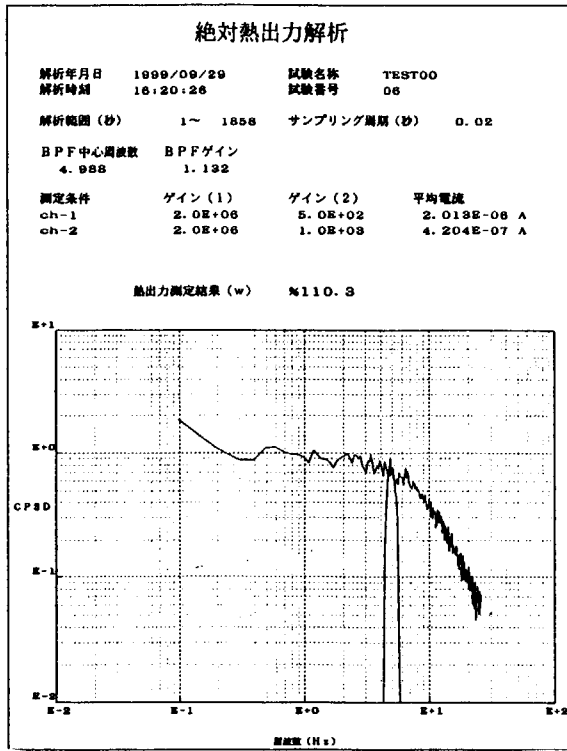


Fig. 11.7(6) 核出力算出結果 (TEST00-06)

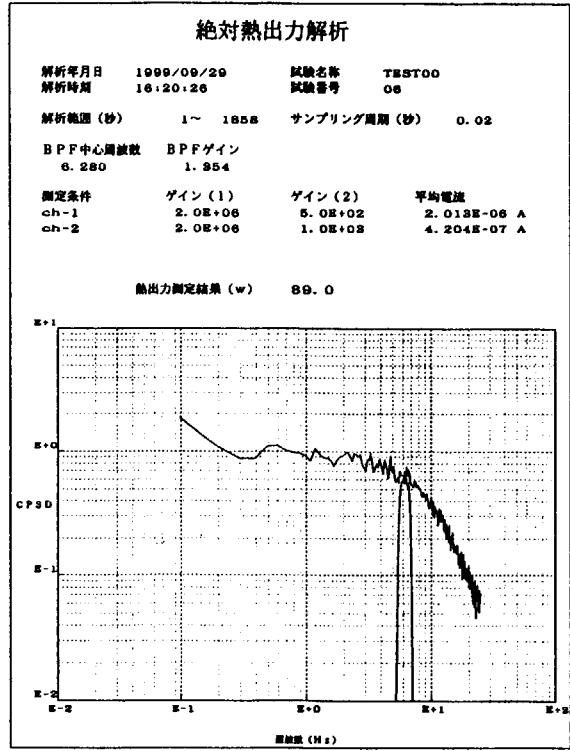


Fig. 11.7(7) 核出力算出結果 (TEST00-06)

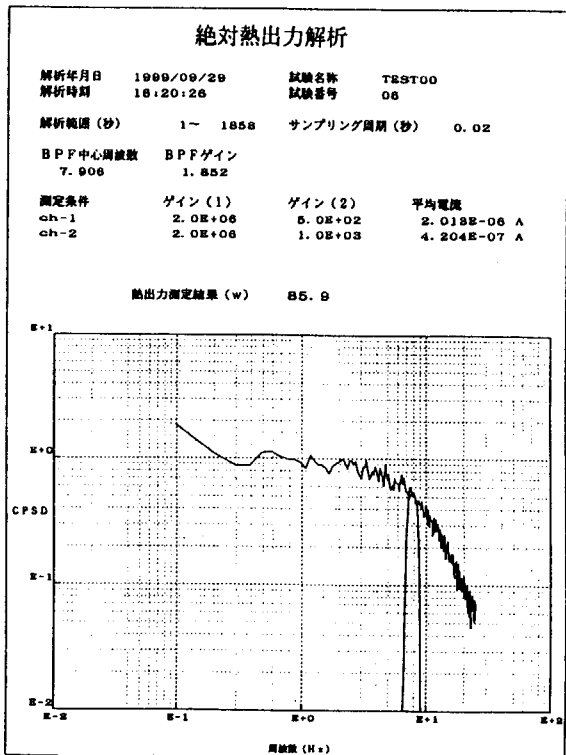


Fig. 11.7(8) 核出力算出結果 (TEST00-06)

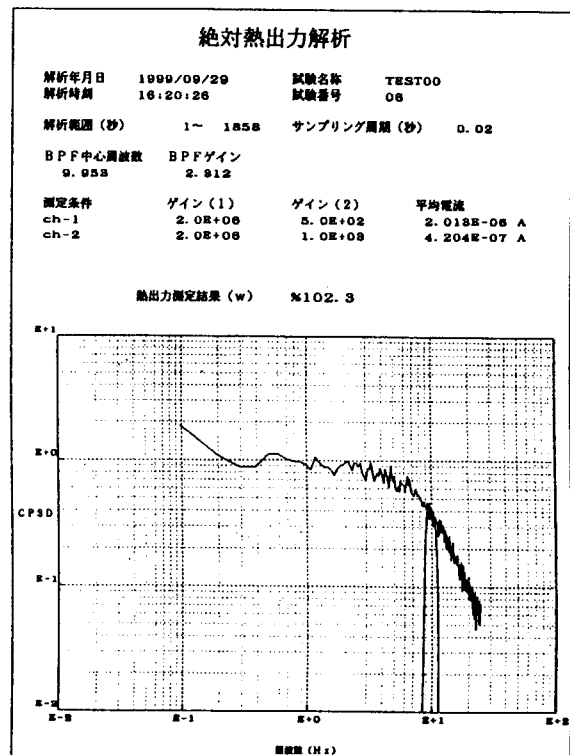


Fig. 11.7(9) 核出力算出結果 (TEST00-06)

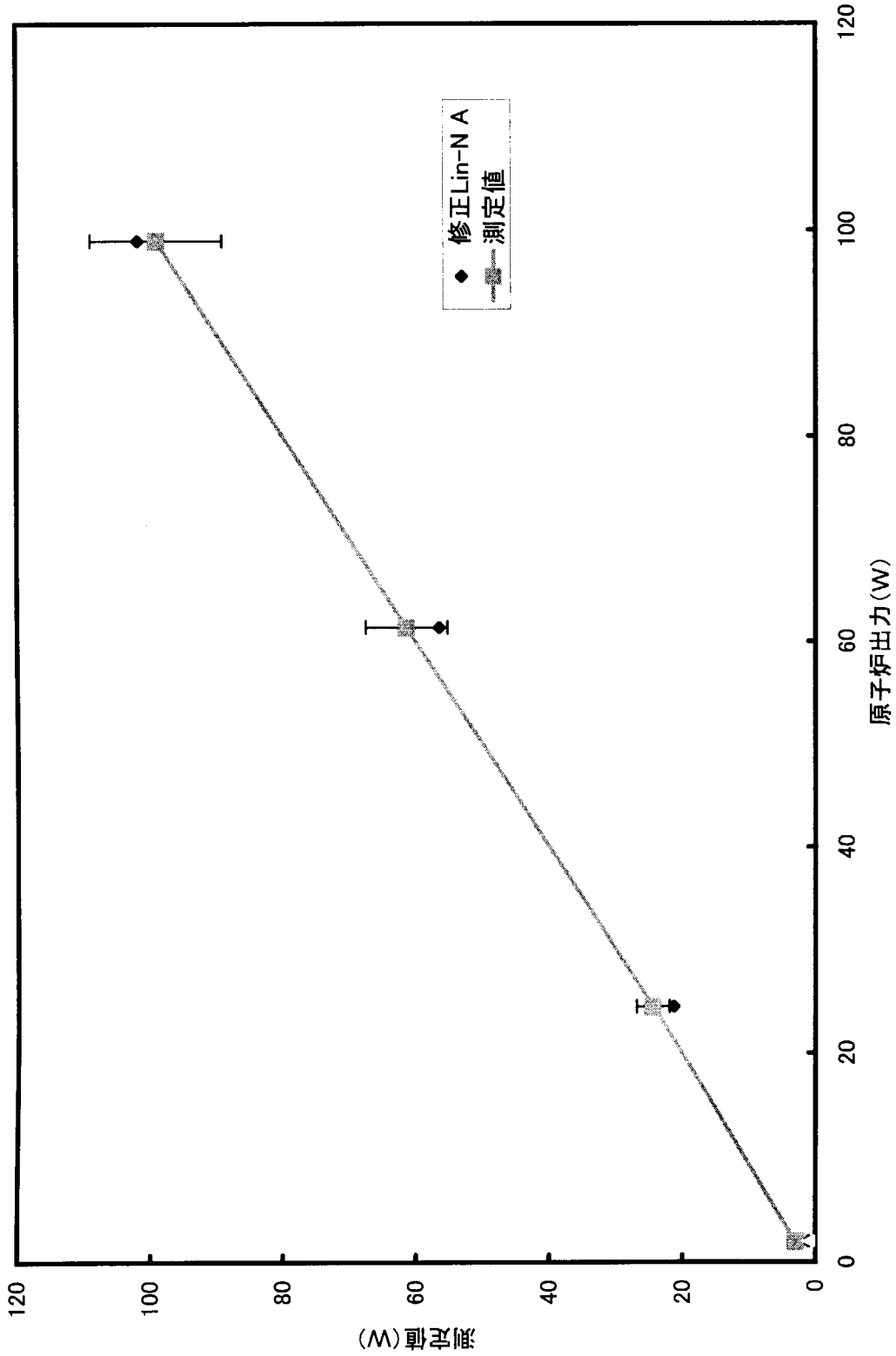


Fig. 11.8 炉雑音解析法による核出力測定結果とLin-N A指示の比較



## 1 2 . 自動制御特性試験

### 1 2 . 1 目的

シリサイド燃料炉心において通常の運転条件で、低出力から定格出力まで、安定に自動制御が行えることを確認する。

### 1 2 . 2 方法

原子炉出力の自動制御は、線形出力系の信号を入力し、設定値との誤差信号を微調整棒の駆動信号として出力する自動制御回路により行う。

試験は、炉心へ想定される外乱を与える条件毎に次の4ケースとした。試験時の記録は、関係する24項目の計測信号を読みとるとともに、必要なアナログ信号は速応性を有するアナライジングレコーダに入力し応答特性を確認しながら行った。

また、自動制御回路のPID定数、不感帯巾、進み、遅れの各設定は、変更せずに実施した。

#### (1) 定値制御特性

原子炉出力50W, 10kW, 200kW, 20MWの各出力で、手動操作により出力を安定に保持した状態において、微調整棒の自動制御投入操作を行い、各信号を約500秒間計測記録し応答を確認した。

#### (2) 粗調整棒の手動引き抜き、挿入による外乱応答特性試験

原子炉出力10kW, 20MWの各出力で、微調整棒の自動制御投入後、粗調整棒を約5mm(約0.05% $\Delta k/k$ )引き抜き及び挿入の操作を行い、各信号を約300秒間計測、記録し応答を確認した。

#### (3) 水カラビットの挿入、取り出しによる外乱応答特性試験

原子炉出力10kWで微調整棒(R-1)の自動制御投入後、水力照射設備(HR-1)により空キャプセルとカドミウム試料入りキャプセル(約0.0147% $\Delta k/k$ )の炉心挿入及び取り出し操作を行い、各信号を約500秒間計測、記録し応答を確認した。

#### (4) 追値制御特性試験

原子炉出力200kW以上の微調整棒(R-1)自動制御投入状態(定値制御状態)で、通常の運転手順と同じ目標出力及び印加炉周期を設定し出力上昇の自動追値操作を行い、各信号を約500秒間計測、記録し応答を確認した。なお、原子炉出力18MWから20MWへの出力上昇は、手動追値操作で行った。

### 1 2 . 3 結果

#### (1) 定値制御特性

原子炉出力50W, 10kW, 20MWの各出力でR-1自動制御投入及び原子炉出力200kWでR-2自動制御投入を行った。原子炉出力50W, 10kWにおいては、入力信号の雑音等の影響が生じているが、R-1及びR-2の微調整棒による制御特性上の差は見られなかった。応答は、線形出力の変化に表れない程度の誤差出力の変化及び制御棒位置変化であり、安定した

一定出力の保持特性の結果を得た。各試験出力毎の測定記録をTable 12.1~Table 12.4に、各原子炉出力毎の主要信号の応答特性をFig. 12.1~Fig. 12.4に示す。

#### (2) 粗調整棒の手動引き抜き、挿入による外乱応答特性試験

原子炉出力10kWにおいては、R-2自動制御投入後、Sa-1引き抜き4.8mm、挿入4.4mmの操作を行った。最大誤差出力は、Sa-1引き抜き時+1.0%、Sa-1挿入時-1.0%で、R-2は各々5.1mm挿入、4.2mm引き抜きの応答であり、原子炉出力は短時間に整定する安定した制御特性結果を得た。

原子炉出力20MWにおいては、R-1自動制御投入後、Sa-2引き抜き5.4mm、挿入4.7mmの操作を行った。最大誤差出力は、Sa-2引き抜き時+1.3%、Sa-2挿入時-1.0%で、R-1は各々4.0mm挿入、4.3mm引き抜きの応答であり、原子炉出力は短時間に整定する安定した制御特性結果を得た。

原子炉出力10kW時、20MW時について各々の測定記録をTable 12.5, Table 12.6に、各々の主要信号の応答特性をFig. 12.5, Fig. 12.6に示す。

#### (3) 水カラビットの挿入、取り出しによる外乱応答特性試験

原子炉出力10kW、R-1自動制御投入後において、HR-1照射孔への空ラビット及びカドミウム入りラビットの挿入、取り出し操作を行った。

空ラビットの挿入時は、自動制御への影響を与えなかった。カドミウム入りラビット挿入時は、最大誤差出力-1.0%でR-1は1.7mm引き抜きの応答を示し、カドミウム入りラビット取り出し時は最大誤差出力+0.6%でR-1は1.5mm挿入の応答であり、原子炉出力は短時間で整定する安定した制御特性結果を得た。空ラビット操作時の測定記録をTable 12.7に、主要信号応答特性をFig. 12.7に示す。カドミウム入りラビット操作時の測定記録をTable 12.8に、主要信号応答特性をFig. 12.8に示す。

#### (4) 追値制御特性試験

原子炉出力200kWから2MWへの出力上昇は、印加炉周期を120秒としてR-1自動追値操作を行い、出力上昇開始時で最大誤差出力-0.48%、目標出力到達時で最大誤差出力+0.5%を示した。

原子炉出力2MWから10MWへの出力上昇は、印加炉周期を120秒としてR-1自動追値操作を行い、出力上昇開始時で最大誤差出力-0.5%、目標出力到達時で最大誤差出力+0.5%を示した。

原子炉出力10MWから15MWへの出力上昇は、印加炉周期を120秒としてR-1自動追値操作を行い、出力上昇開始時で最大誤差出力-0.42%、目標出力到達時で最大誤差出力+0.5%を示した。

原子炉出力15MWから18MWへの出力上昇については、印加炉周期を480秒としてR-1自動追値操作を行い、出力上昇開始時で最大誤差出力-0.3%、目標出力到達時で最大誤差出力+0.3%を示した。

原子炉出力18MWから20MWの出力上昇については、印加炉周期を960秒としてR-1手動追値操作を行い、操作中の最大誤差出力+0.3%以下を示した。原子炉出力は、出力上昇ステップのいずれにおいても、設定した炉周期で追従し、短時間で整定する安定した制御特性結果を

得た。

各出力上昇ステップ毎の追値制御操作時の測定記録をTable 12.8～Table 12.13に、主要信号応答特性をFig. 12.9～Fig. 12.13に示す。

#### 12.4 評価

想定した反応度外乱に対して、最大誤差出力は設計値の $\pm 1.5\%$ 以内であり、原子炉出力は異常な振動もなく短い時間で整定した結果を得たことから、現状の自動制御系は、シリサイド燃料炉心においても円滑で安定した制御特性を有することが確認できた。

試験ケース毎に最大誤差出力が $\pm 1.5\%$ 以内であること及び原子炉出力等の応答が円滑であることの判定を行った結果をTable 12.14に示す。

Table 12.1 定値制御特性試験記録 R-1 出力値50W

試験年月日 H11.9.29

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 50W )

運転モード (NCV)

No	試験項目	試験前	試験終了後	備考	
1	PID定数	P=12cm/min/% I=100秒 D=-		仮設温度計  (試験前) ① 28.3℃ ② 28.4℃ ③ 30.3℃ ④ 31.1℃ ⑤ 31.2℃	
2	不感帯幅	a = ±0.3%			
3	進み遅れ	進み T1=0 遅れ T1=0.16秒			
4	炉プール水温(TI1711)	30.4 (℃)	30.4 (℃)		
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	0.3 (℃)	0.3 (℃)		
6	炉プール水位(LI171A)	1 (cm)	1 (cm)		
7	一次冷却材流量(FI215A)	0 (m <sup>3</sup> /h)	0 (m <sup>3</sup> /h)		
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)		
9	重水温度(TI231A)	20.7 (℃)	20.9 (℃)		(試験後)
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)		① 28.3℃
11	熱出力	19.2 k (W)	17.0 k (W)		② 28.6℃
12	線形出力 A	50.2 (%)	50.3 (%)		③ 30.3℃
13	線形出力 B	45.5 (%)	46.0 (%)		④ 31.1℃
14	線形出力レンジ A	12.5 (W)	12.5 (W)		⑤ 31.1℃
15	線形出力レンジ B	12.5 (W)	12.5 (W)		
16	制御棒位置R-1	264.6 (mm)	263.7 (mm)		
17	制御棒位置R-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)		
18	制御棒位置S-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)		
19	制御棒位置S-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)		
20	制御棒位置Sa-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)		
21	制御棒位置Sa-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)		
22	R-1 相対位置	+1.0 (mm)	+0.7 (mm)		
23	R-2 相対位置	+0.8 (mm)	+0.8 (mm)		
24	S-1 相対位置	+0.8 (mm)	+0.8 (mm)		
25	S-2 相対位置	+0.8 (mm)	+0.9 (mm)		
26	Sa-1 相対位置	+1.0 (mm)	+1.1 (mm)		
27	Sa-2 相対位置	+1.0 (mm)	+1.0 (mm)		

仮設温度計の測定位置は第16章Fig. 16.1を参照のこと。

Table 12.2 定値制御特性試験記録 R-1 出力値10kW

試験年月日 H11.11.9

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 10kW )

No	試験項目	試験前	試験終了後	備考
1	PID定数	P=12cm/min/% I=100秒 D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進み T1=0 遅れ T1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	23.6 (°C)	23.6 (°C)	
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	0.1 (°C)	0.1 (°C)	
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	
9	重水温度(TI231A)	15.7 (°C)	15.7 (°C)	
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.1 (mm)	54.0 (mm)	
11	熱出力	0.25M(W)	0.25M(W)	
12	線形出力 A	100.3 (%)	100.0 (%)	
13	線形出力 B	92.7 (%)	92.3 (%)	
14	線形出力レンジ A	12.5k (W)	12.5k (W)	
15	線形出力レンジ B	12.5k (W)	12.5k (W)	
16	制御棒位置R-1	262.5 (mm)	262.3 (mm)	
17	制御棒位置R-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
18	制御棒位置S-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
19	制御棒位置S-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
20	制御棒位置Sa-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
21	制御棒位置Sa-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
22	R-1 相対位置	-0.9 (mm)	-0.8 (mm)	
23	R-2 相対位置	-0.7 (mm)	-0.7 (mm)	
24	S-1 相対位置	-0.8 (mm)	-0.8 (mm)	
25	S-2 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	
26	Sa-1 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	
27	Sa-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	

Table 12.3 定値制御特性試験記録 R-2 出力値 200 kW

試験年月日 H11.11.9

自動制御微調整棒 ( R-2 )

試験出力 ( 200 kW )

No	試験項目	試験前	試験終了後	備考
1	P I D定数	P = 12cm/min/% I = 100秒 D = -		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進み T1=0 遅れ T1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	23.6 (°C)	23.6 (°C)	
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	0.1 (°C)	0.1 (°C)	
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	
9	重水温度(TI231A)	15.7 (°C)	15.7 (°C)	
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.1 (mm)	54.1 (mm)	
11	熱出力	0.42M(W)	0.43M(W)	
12	線形出力 A	100.2 (%)	100.2 (%)	
13	線形出力 B	92.6 (%)	92.6 (%)	
14	線形出力レンジ A	250k (W)	250k (W)	
15	線形出力レンジ B	250k (W)	250k (W)	
16	制御棒位置 R-1	261.8 (mm)	264.9 (mm)	
17	制御棒位置 R-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
18	制御棒位置 S-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
19	制御棒位置 S-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
20	制御棒位置 S a-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
21	制御棒位置 S a-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
22	R-1 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	
23	R-2 相対位置	-0.8 (mm)	-0.7 (mm)	
24	S-1 相対位置	-0.8 (mm)	-0.8 (mm)	
25	S-2 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	
26	S a-1 相対位置	-0.3 (mm)	-0.3 (mm)	
27	S a-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	

Table 12.4 定値制御特性試験記録 R-1 出力値 20MW

試験年月日 H11.11.9

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 20MW )

No	試験項目	試験前	試験終了後	備考
1	PID定数	P=12cm/min/% I=100秒 D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進み T1=0 遅れ T1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	27.3 (°C)	27.2 (°C)	
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	6.6 (°C)	6.6 (°C)	
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	
9	重水温度(TI231A)	28.9 (°C)	28.2 (°C)	
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)	
11	熱出力	19.18M(W)	19.19M(W)	
12	線形出力 A	86.7 (%)	86.7 (%)	
13	線形出力 B	78.7 (%)	79.2 (%)	
14	線形出力レンジ A	25M (W)	25M (W)	
15	線形出力レンジ B	25M (W)	25M (W)	
16	制御棒位置 R-1	273.5 (mm)	278.0 (mm)	
17	制御棒位置 R-2	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
18	制御棒位置 S-1	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
19	制御棒位置 S-2	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
20	制御棒位置 Sa-1	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
21	制御棒位置 Sa-2	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
22	R-1 相対位置	-0.7 (mm)	-0.8 (mm)	
23	R-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	
24	S-1 相対位置	-0.7 (mm)	-0.7 (mm)	
25	S-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	
26	Sa-1 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	
27	Sa-2 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	

Table 12.5 粗調整棒手動引き抜き、挿入による外乱応答特性  
試験記録 R-2 出力値 10 kW

試験年月日 HH1.11.9

自動制御微調整棒 ( R-2 )

試験出力 ( 10 kW )

No	試験項目	粗調整棒 引抜前	粗調整棒 引抜後	粗調整棒 挿入後
1	P I D定数	P = 12cm/min/% I = 100秒 D = -		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進みT1=0 遅れT1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	23.5 (°C)	23.5 (°C)	23.5 (°C)
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	0.1 (°C)	0.1 (°C)	0.1 (°C)
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	2 (cm)
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m³/h)	2456 (m³/h)	2456 (m³/h)
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m³/h)	71.7 (m³/h)	71.7 (m³/h)
9	重水温度(TI231A)	15.7 (°C)	15.7 (°C)	15.7 (°C)
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.0 (mm)	54.0 (mm)	54.0 (mm)
11	熱出力	0.25 M(W)	0.25 M(W)	0.23 M(W)
12	線形出力 A	100.0 (%)	100.0 (%)	100.0 (%)
13	線形出力 B	92.3 (%)	92.3 (%)	92.3 (%)
14	線形出力レンジ A	12.5 k(W)	12.5 k(W)	12.5 k(W)
15	線形出力レンジ B	12.5 k(W)	12.5 k(W)	12.5 k(W)
16	制御棒位置 R-1	261.8 (mm)	261.8 (mm)	261.8 (mm)
17	制御棒位置 R-2	264.8 (mm)	259.7 (mm)	263.9 (mm)
18	制御棒位置 S-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)	265.0 (mm)
19	制御棒位置 S-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	265.0 (mm)
20	制御棒位置 S a-1	265.0 (mm)	269.8 (mm)	265.4 (mm)
21	制御棒位置 S a-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	265.0 (mm)
22	R-1 相対位置	-0.4 (mm)	-0.4 (mm)	-0.4 (mm)
23	R-2 相対位置	-0.9 (mm)	-0.8 (mm)	-0.4 (mm)
24	S-1 相対位置	-0.8 (mm)	-0.8 (mm)	-0.8 (mm)
25	S-2 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)
26	S a-1 相対位置	-0.6 (mm)	-0.7 (mm)	-0.2 (mm)
27	S a-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)



Table 12.6 粗調整棒手動引き抜き、挿入による外乱応答特性  
試験記録 R-1 出力値 20MW

試験年月日 H11.11.9

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 20M )

No	試験項目	粗調整棒 引抜前	粗調整棒 引抜後	粗調整棒 挿入後
1	P I D定数	P=12cm/min/% I=100秒D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進みT1=0 遅れT1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	27.2 (°C)	27.2 (°C)	27.2 (°C)
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	6.6 (°C)	6.6 (°C)	6.6 (°C)
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	2 (cm)
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	2456 (m <sup>3</sup> /h)
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)
9	重水温度(TI231A)	28.2 (°C)	28.0 (°C)	28.0 (°C)
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)	54.2 (mm)
11	熱出力	19.29M(W)	19.18M(W)	19.26M(W)
12	線形出力 A	86.8 (%)	86.5 (%)	86.7 (%)
13	線形出力 B	79.2 (%)	78.4 (%)	79.2 (%)
14	線形出力レンジ A	25M (W)	25M (W)	25M (W)
15	線形出力レンジ B	25M (W)	25M (W)	25M (W)
16	制御棒位置 R-1	273.5 (mm)	269.5 (mm)	273.8 (mm)
17	制御棒位置 R-2	272.0 (mm)	272.0 (mm)	272.0 (mm)
18	制御棒位置 S-1	272.0 (mm)	272.0 (mm)	272.0 (mm)
19	制御棒位置 S-2	272.0 (mm)	272.0 (mm)	272.0 (mm)
20	制御棒位置 Sa-1	272.0 (mm)	272.0 (mm)	272.0 (mm)
21	制御棒位置 Sa-2	272.0 (mm)	277.4 (mm)	272.7 (mm)
22	R-1 相対位置	-0.7 (mm)	-0.9 (mm)	-0.2 (mm)
23	R-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)
24	S-1 相対位置	-0.7 (mm)	-0.7 (mm)	-0.7 (mm)
25	S-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)
26	Sa-1 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)
27	Sa-2 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	-0.1 (mm)

Table 12.7 水カラボットの挿入、取り出しによる外乱応答特性  
試験記録 R-1 出力値 10 kW (空ラビット)

試験年月日 H11.11.16

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 10 kW )

No	試験項目	試験前	挿入後	取り出し後
1	P I D定数	P=12cm/min/% I=100秒D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進み T1=0 遅れ T1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	25.9 (°C)	25.9 (°C)	25.9 (°C)
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	0.1 (°C)	0.1 (°C)	0.1 (°C)
6	炉プール水位(LI171A)	1 (cm)	1 (cm)	1 (cm)
7	一次冷却材流量(FI215A)	0 (m³/h)	0 (m³/h)	0 (m³/h)
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m³/h)	71.7 (m³/h)	71.7 (m³/h)
9	重水温度(TI231A)	17.8 (°C)	17.8 (°C)	17.8 (°C)
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)	54.2 (mm)
11	熱出力	— (W)	— (W)	— (W)
12	線形出力 A	100.0 (%)	100.0 (%)	100.0 (%)
13	線形出力 B	85.1 (%)	85.1 (%)	85.1 (%)
14	線形出力レンジ A	12.5 k (W)	12.5 k (W)	12.5 k (W)
15	線形出力レンジ B	12.5 k (W)	12.5 k (W)	12.5 k (W)
16	制御棒位置 R-1	274.0 (mm)	273.0 (mm)	274.0 (mm)
17	制御棒位置 R-2	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
18	制御棒位置 S-1	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
19	制御棒位置 S-2	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
20	制御棒位置 S a-1	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
21	制御棒位置 S a-2	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
22	R-1 相対位置	+1.2 (mm)	+1.2 (mm)	+1.2 (mm)
23	R-2 相対位置	+0.8 (mm)	+0.8 (mm)	+0.8 (mm)
24	S-1 相対位置	+0.9 (mm)	+0.9 (mm)	+0.9 (mm)
25	S-2 相対位置	+1.2 (mm)	+1.2 (mm)	+1.2 (mm)
26	S a-1 相対位置	+1.1 (mm)	+1.1 (mm)	+1.1 (mm)
27	S a-2 相対位置	+1.0 (mm)	+1.0 (mm)	+1.0 (mm)

Table 12.8 水カラビットの挿入、取り出しによる外乱応答特性  
試験記録 R-1 出力値 10 kW (Cd入りラビット)

試験年月日 H11.11.16

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 10 kW )

No	試験項目	試験前	挿入後	取り出し後
1	PID定数	P=12cm/min/% I=100秒D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進み T1=0 遅れ T1=0.16秒		
4	炉プール水温 (TI1711)	25.9 (°C)	25.9 (°C)	25.9 (°C)
5	一次炉心出入口温度差 (TI21A1)	0.1 (°C)	0.1 (°C)	0.1 (°C)
6	炉プール水位 (LI171A)	1 (cm)	1 (cm)	1 (cm)
7	一次冷却材流量 (FI215A)	0 (m <sup>3</sup> /h)	0 (m <sup>3</sup> /h)	0 (m <sup>3</sup> /h)
8	重水流量 (FI233A)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)
9	重水温度 (TI231A)	17.8 (°C)	17.8 (°C)	17.8 (°C)
10	重水溢流タンク水位 (LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)	54.2 (mm)
11	熱出力	— (W)	— (W)	— (W)
12	線形出力 A	100.0 (%)	100.0 (%)	100.0 (%)
13	線形出力 B	85.1 (%)	85.1 (%)	85.1 (%)
14	線形出力レンジ A	12.5 k (W)	12.5 k (W)	12.5 k (W)
15	線形出力レンジ B	12.5 k (W)	12.5 k (W)	12.5 k (W)
16	制御棒位置 R-1	273.4 (mm)	275.1 (mm)	273.2 (mm)
17	制御棒位置 R-2	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
18	制御棒位置 S-1	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
19	制御棒位置 S-2	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
20	制御棒位置 Sa-1	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
21	制御棒位置 Sa-2	275.0 (mm)	275.0 (mm)	275.0 (mm)
22	R-1 相対位置	+1.0 (mm)	+0.5 (mm)	+0.5 (mm)
23	R-2 相対位置	+0.8 (mm)	+0.8 (mm)	+0.8 (mm)
24	S-1 相対位置	+0.9 (mm)	+0.9 (mm)	+0.9 (mm)
25	S-2 相対位置	+1.2 (mm)	+1.2 (mm)	+1.2 (mm)
26	Sa-1 相対位置	+1.1 (mm)	+1.1 (mm)	+1.1 (mm)
27	Sa-2 相対位置	+1.0 (mm)	+1.0 (mm)	+1.0 (mm)

Table 12.9 追値制御特性試験記録 R-1 出力値200kW→2MW

試験年月日 H11.11.9

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 200kW → 2MW )

目標出力 (2MW) 炉周期 (120秒)

No	試験項目	試験前	試験終了後	備考
1	PID定数	P=12cm/min/% I=100秒 D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進みT1=0 遅れT1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	23.5 (°C)	23.5 (°C)	
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	0.2 (°C)	0.2 (°C)	
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m³/h)	2456 (m³/h)	
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m³/h)	71.7 (m³/h)	
9	重水温度(TI231A)	15.6 (°C)	15.6 (°C)	
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)	
11	熱出力	0.43M(W)	2.23M(W)	
12	線形出力 A	99.3 (%)	50.0 (%)	
13	線形出力 B	91.7 (%)	45.9 (%)	
14	線形出力レンジ A	250k (W)	5M (W)	
15	線形出力レンジ B	250k (W)	5M (W)	
16	制御棒位置R-1	261.6 (mm)	263.4 (mm)	
17	制御棒位置R-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
18	制御棒位置S-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
19	制御棒位置S-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
20	制御棒位置Sa-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
21	制御棒位置Sa-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
22	R-1 相対位置	-0.3 (mm)	-0.2 (mm)	
23	R-2 相対位置	-0.7 (mm)	-0.7 (mm)	
24	S-1 相対位置	-0.8 (mm)	-0.8 (mm)	
25	S-2 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	
26	Sa-1 相対位置	-0.3 (mm)	-0.3 (mm)	
27	Sa-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	

Table 12.10 追値制御特性試験記録 R-1 出力値 2MW→10MW

試験年月日 H11.11.9

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 2MW → 10MW )

目標出力 ( 10MW ) 炉周期 ( 120秒 )

No	試験項目	試験前	試験終了後	備考
1	PID定数	P=12cm/min/% I=100秒 D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進みT1=0 遅れT1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	23.4 (°C)	23.4 (°C)	
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	0.8 (°C)	3.6 (°C)	
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	
9	重水温度(TI231A)	16.1 (°C)	18.6 (°C)	
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)	
11	熱出力	2.23M(W)	10.14M(W)	
12	線形出力 A	49.8 (%)	49.7 (%)	
13	線形出力 B	45.6 (%)	45.6 (%)	
14	線形出力レンジ A	5M (W)	25M (W)	
15	線形出力レンジ B	5M (W)	25M (W)	
16	制御棒位置R-1	264.1 (mm)	271.3 (mm)	
17	制御棒位置R-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
18	制御棒位置S-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
19	制御棒位置S-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
20	制御棒位置Sa-1	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
21	制御棒位置Sa-2	265.0 (mm)	265.0 (mm)	
22	R-1 相対位置	-0.9 (mm)	-0.8 (mm)	
23	R-2 相対位置	-0.7 (mm)	-0.7 (mm)	
24	S-1 相対位置	-0.7 (mm)	-0.7 (mm)	
25	S-2 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	
26	Sa-1 相対位置	-0.3 (mm)	-0.3 (mm)	
27	Sa-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	

Table 12.11 追値制御特性試験記録 R-1 出力値10MW→15MW

試験年月日 H11.11.9

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 10MW → 15MW )

目標出力 ( 15MW ) 炉周期 ( 120秒 )

No	試験項目	試験前	試験終了後	備考
	PID定数	P=12cm/min/% I=100秒 D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進みT1=0 遅れT1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	23.4 (°C)	22.2 (°C)	
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	3.6 (°C)	5.2 (°C)	
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m³/h)	2456 (m³/h)	
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m³/h)	71.7 (m³/h)	
9	重水温度(TI231A)	19.6 (°C)	24.6 (°C)	
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)	
11	熱出力	10.57M(W)	15.20M(W)	
12	線形出力 A	49.8 (%)	74.7 (%)	
13	線形出力 B	45.9 (%)	67.7 (%)	
14	線形出力レンジ A	25 M (W)	25 M (W)	
15	線形出力レンジ B	25 M (W)	25 M (W)	
16	制御棒位置R-1	251.9 (mm)	267.0 (mm)	
17	制御棒位置R-2	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
18	制御棒位置S-1	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
19	制御棒位置S-2	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
20	制御棒位置Sa-1	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
21	制御棒位置Sa-2	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
22	R-1 相対位置	-0.5 (mm)	-0.8 (mm)	
23	R-2 相対位置	-0.4 (mm)	-0.4 (mm)	
24	S-1 相対位置	-0.7 (mm)	-0.7 (mm)	
25	S-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	
26	Sa-1 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	
27	Sa-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	

Table 12.12 追値制御特性試験記録 R-1 出力値 1.5MW→1.8MW

試験年月日 H11.11.9

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 1.5MW → 1.8MW )

目標出力 ( 1.8MW ) 炉周期 ( 480秒 )

No	試験項目	試験前	試験終了後	備考
1	PID定数	P=12cm/min/% I=100秒 D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進みT1=0 遅れT1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	22.2 (°C)	25.3 (°C)	
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	5.2 (°C)	5.9 (°C)	
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	
9	重水温度(TI231A)	24.6 (°C)	27.9 (°C)	
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)	
11	熱出力	15.22M(W)	17.15M(W)	
12	線形出力 A	74.6 (%)	85.0 (%)	
13	線形出力 B	67.7 (%)	77.6 (%)	
14	線形出力レンジ A	25 M(W)	25 M(W)	
15	線形出力レンジ B	25 M(W)	25 M(W)	
16	制御棒位置R-1	267.3 (mm)	277.5 (mm)	
17	制御棒位置R-2	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
18	制御棒位置S-1	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
19	制御棒位置S-2	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
20	制御棒位置Sa-1	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
21	制御棒位置Sa-2	269.0 (mm)	269.0 (mm)	
22	R-1 相対位置	-0.9 (mm)	-0.9 (mm)	
23	R-2 相対位置	-0.4 (mm)	-0.4 (mm)	
24	S-1 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	
25	S-2 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	
26	Sa-1 相対位置	-0.4 (mm)	-0.4 (mm)	
27	Sa-2 相対位置	-0.5 (mm)	-0.5 (mm)	

&lt;手動追値&gt;

Table 12.13 追値制御特性試験記録 R-1 出力値 18MW→20MW

試験年月日 H11.11.9

自動制御微調整棒 ( R-1 )

試験出力 ( 18MW → 20MW )

目標出力 ( 20MW ) 炉周期 ( 960秒 )

No	試験項目	試験前	試験終了後	備考
1	PID定数	P=12cm/min/% I=100秒 D=-		
2	不感帯幅	a = ±0.3%		
3	進み遅れ	進みT1=0 遅れT1=0.16秒		
4	炉プール水温(TI1711)	26.8 (°C)	27.3 (°C)	
5	一次炉心出入口温度差(TI21A1)	6.1 (°C)	6.6 (°C)	
6	炉プール水位(LI171A)	2 (cm)	2 (cm)	
7	一次冷却材流量(FI215A)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	2456 (m <sup>3</sup> /h)	
8	重水流量(FI233A)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	71.7 (m <sup>3</sup> /h)	
9	重水温度(TI231A)	29.2 (°C)	28.9 (°C)	
10	重水溢流タンク水位(LI232A)	54.2 (mm)	54.2 (mm)	
11	熱出力	17.33M(W)	19.4 M(W)	
12	線形出力 A	85.0 (%)	86.6 (%)	
13	線形出力 B	76.1 (%)	78.5 (%)	
14	線形出力レンジ A	25 M(W)	25 M(W)	
15	線形出力レンジ B	25 M(W)	25 M(W)	
16	制御棒位置R-1	266.2 (mm)	272.4 (mm)	
17	制御棒位置R-2	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
18	制御棒位置S-1	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
19	制御棒位置S-2	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
20	制御棒位置Sa-1	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
21	制御棒位置Sa-2	272.0 (mm)	272.0 (mm)	
22	R-1 相対位置	-0.9 (mm)	-0.8 (mm)	
23	R-2 相対位置	-0.7 (mm)	-0.7 (mm)	
24	S-1 相対位置	-0.8 (mm)	-0.8 (mm)	
25	S-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	
26	Sa-1 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	
27	Sa-2 相対位置	-0.6 (mm)	-0.6 (mm)	



Table 12.14 自動制御特性試験判定表

試験項目	試験出力	対象自動 制御棒	最大 誤差出力値	判定	測定 データ	実施日
定値制御特性試験	50 W	R-1	+0.6%	良	Fig. 12.1	9/29
	10 kW	R-1	<-0.3%	良	Fig. 12.2	11/9
	200 kW	R-2	<±0.3%	良	Fig. 12.3	11/9
	20 MW	R-1	-0.3%	良	Fig. 12.4	11/9
粗調整棒手動引抜き 挿入による外乱応答 特性試験	10 kW	R-2	±1.0%	良	Fig. 12.5	11/9
	20 MW	R-1	+1.3%	良	Fig. 12.6	11/9
水カラビットの、挿 入取り出しによる外 乱応答特性試験	10 kW	R-1	-1.0%	良	Fig. 12.7 Fig. 12.8	11/16
追値制御特性試験	200 kW →2MW	R-1	+0.5%	良	Fig. 12.9	11/9
	2MW →10MW	R-1	±0.5%	良	Fig. 12.10	11/9
	10MW →15MW	R-1	+0.5%	良	Fig. 12.11	11/9
	15MW →18MW	R-1	±0.3%	良	Fig. 12.12	11/9
	18MW →20MW	R-1	<+0.3%	良	Fig. 12.13	11/9

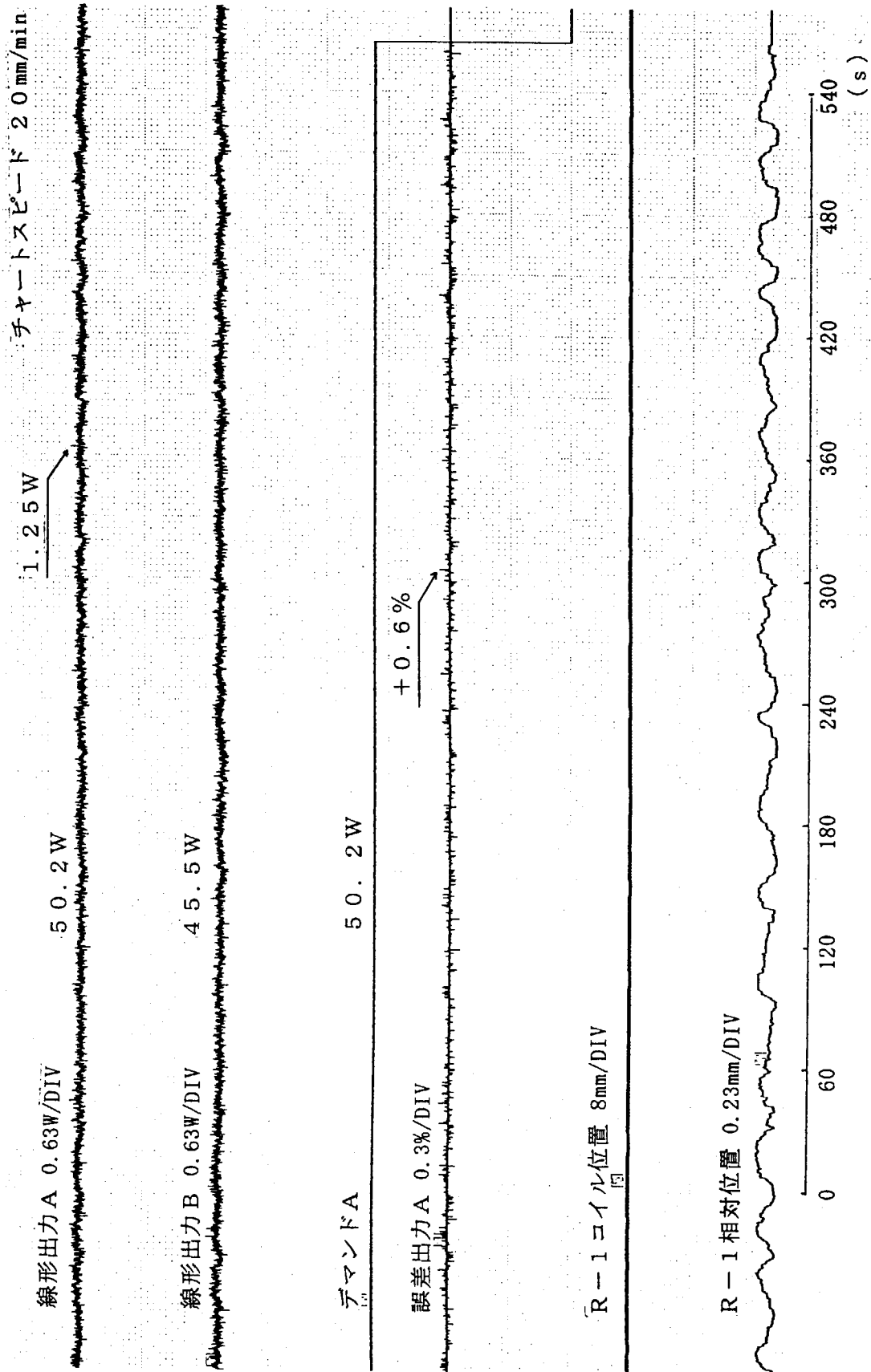


Fig. 12.1 定値制御特性試験 R-1 出力値 50W

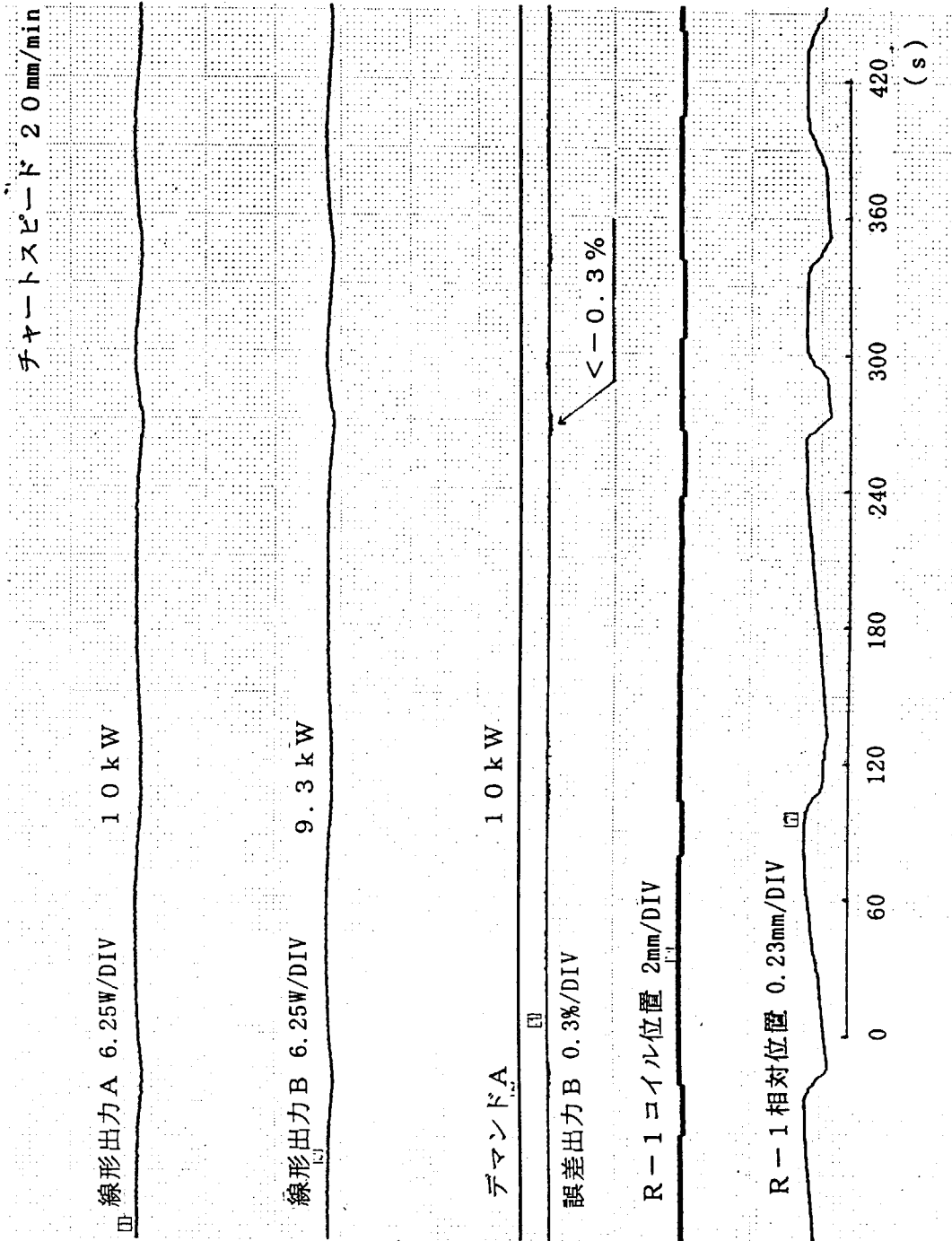


Fig. 12.2 定値制御特性試験 R-1 出力値 10 kW

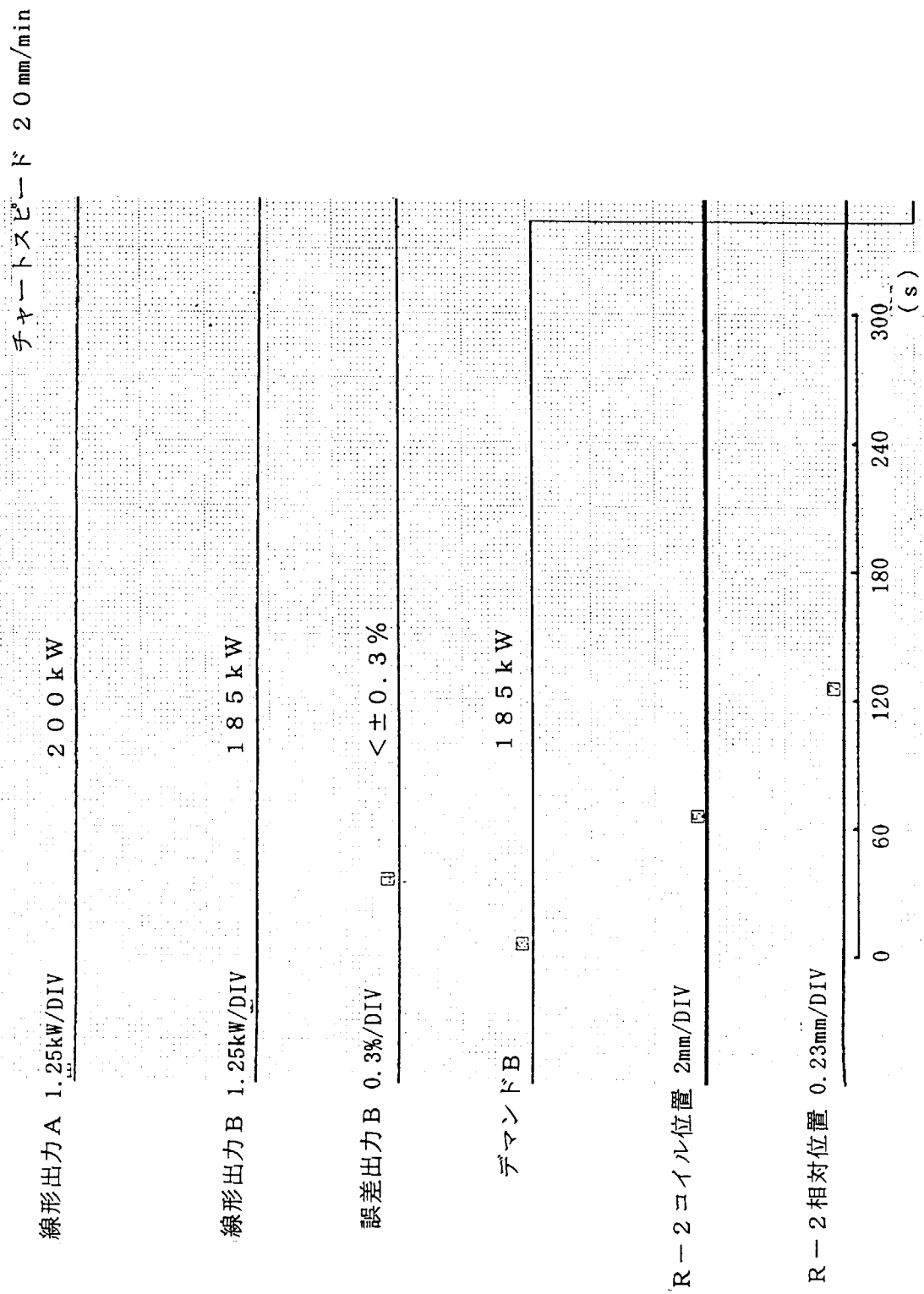


Fig. 12.3 定値制御特性試験 R-2 出力値 200 kW

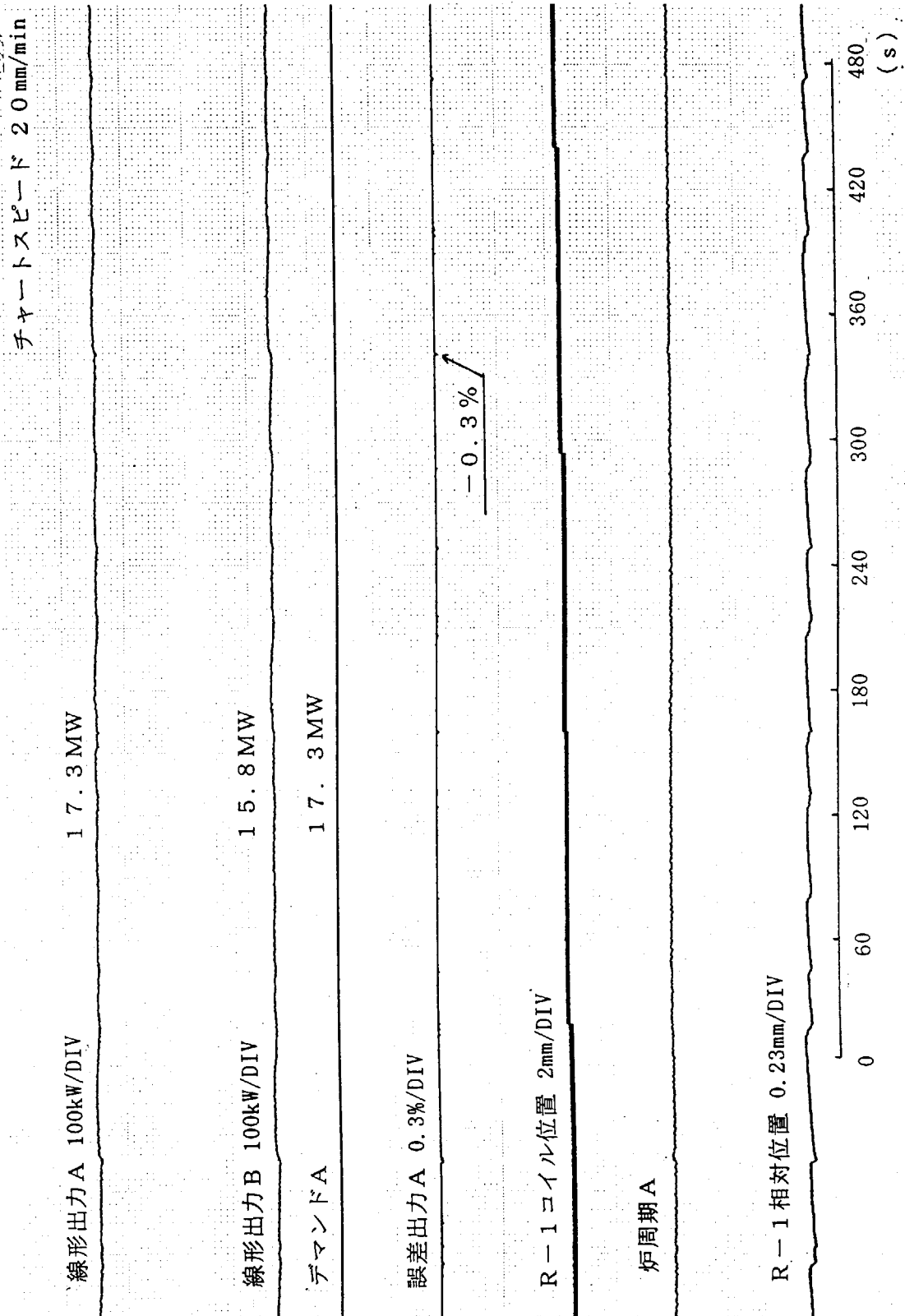


Fig. 12.4 定値制御特性試験 R-1 出力値 20 MW

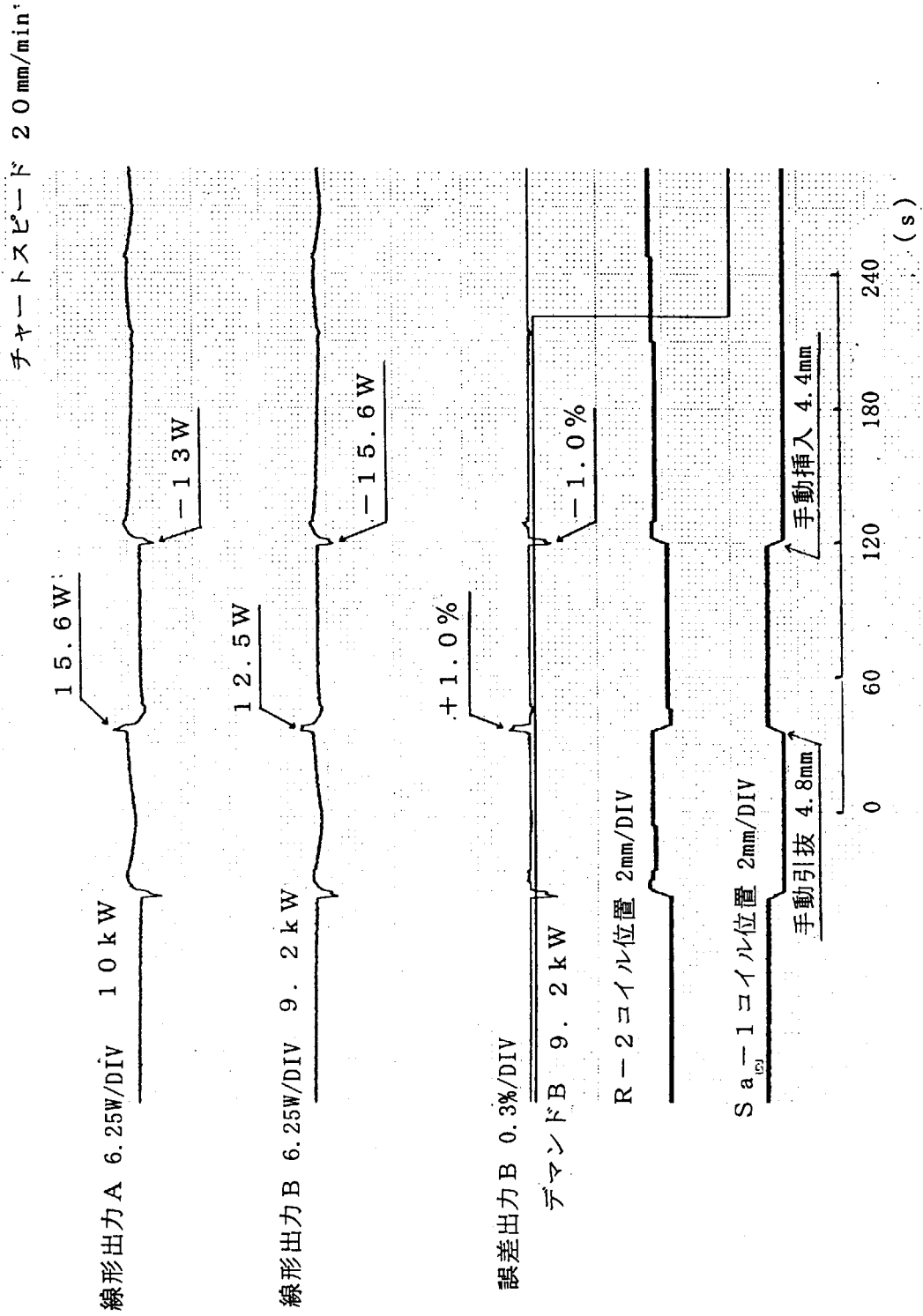


Fig. 12.5 粗調整棒手動引き抜き、挿入による乱応答特性試験 10 kW 出力値による

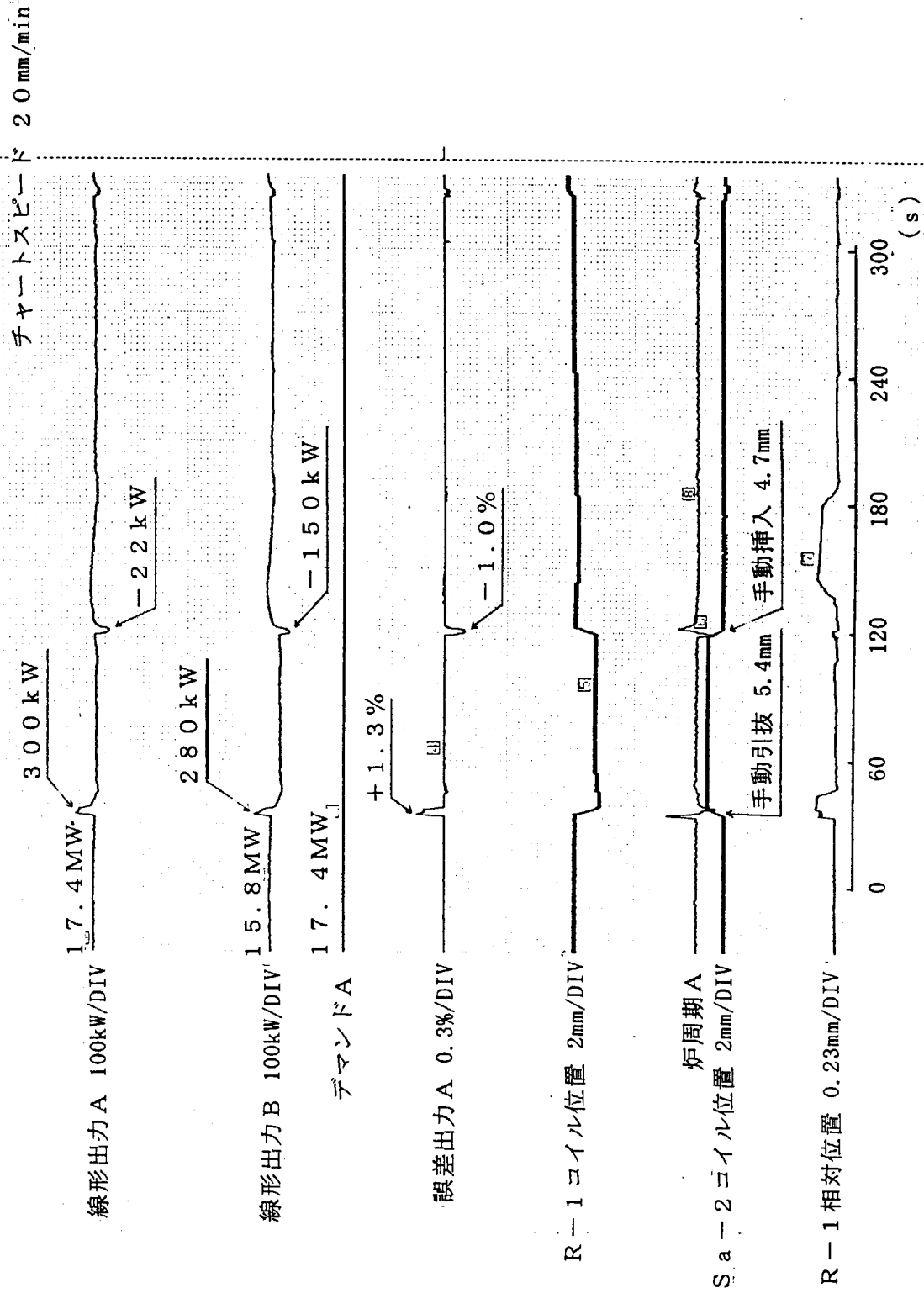


Fig. 12.6 粗調整棒手動引き抜き、挿入による R-1 出力値 20 MW 外乱応答特性試験

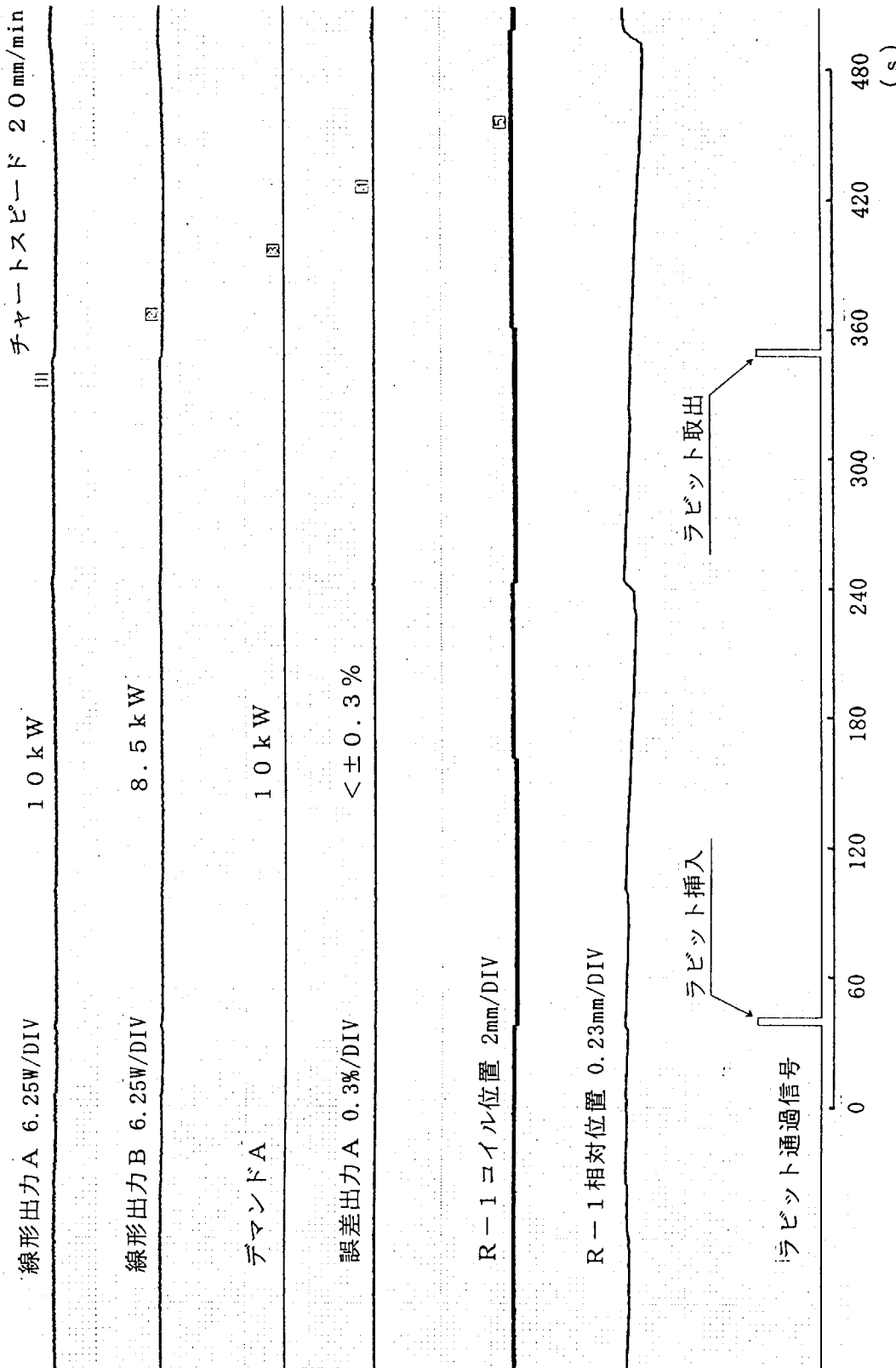


Fig. 12.7 水カラビットの挿入、取り出しによる外乱応答特性試験 (空ラビット)



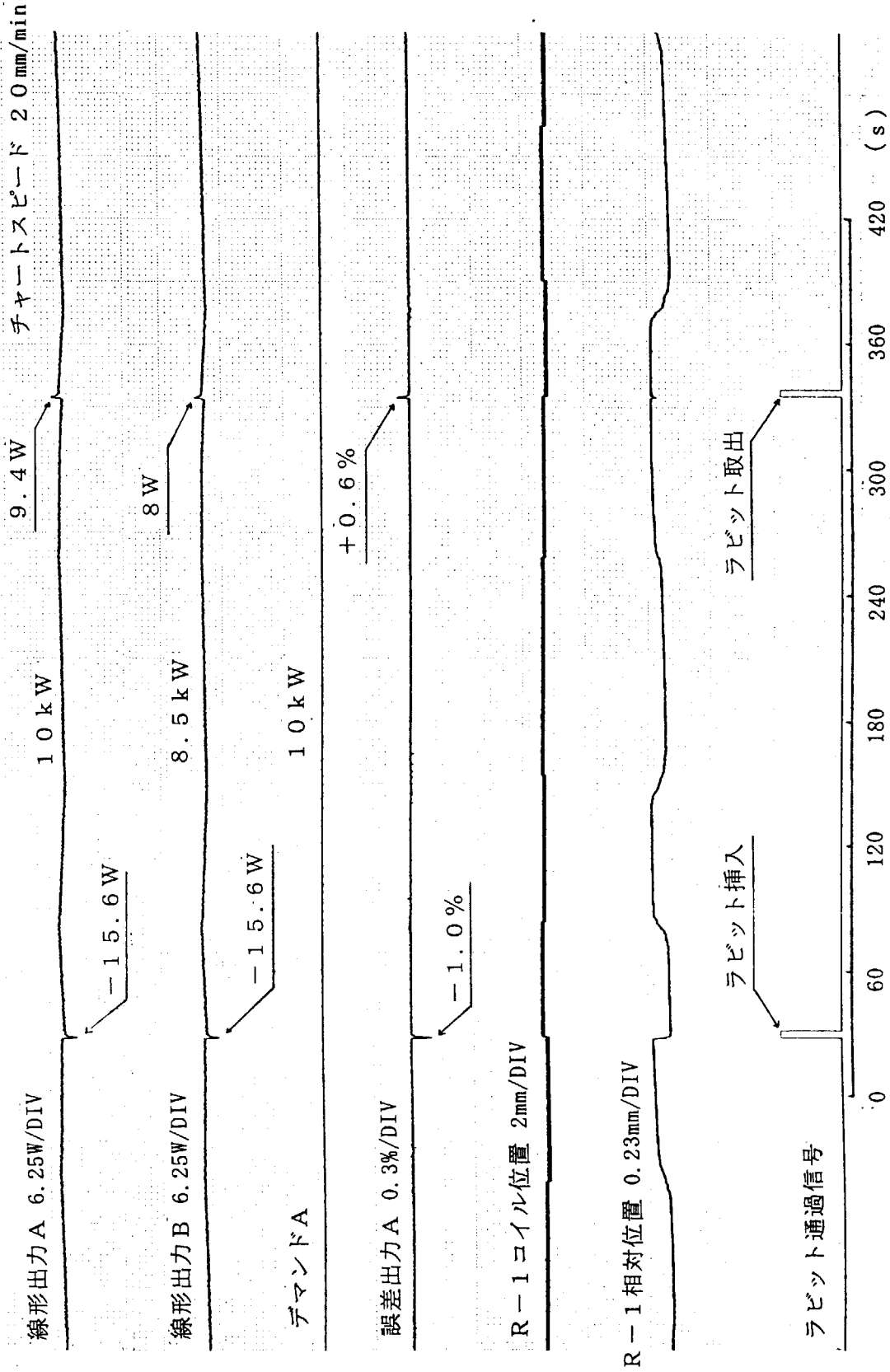


Fig. 12.8 水カララビットの挿入、取り出しによる外乱応答特性試験  
R-1 出力値 10 kW (Cd入りラビット)

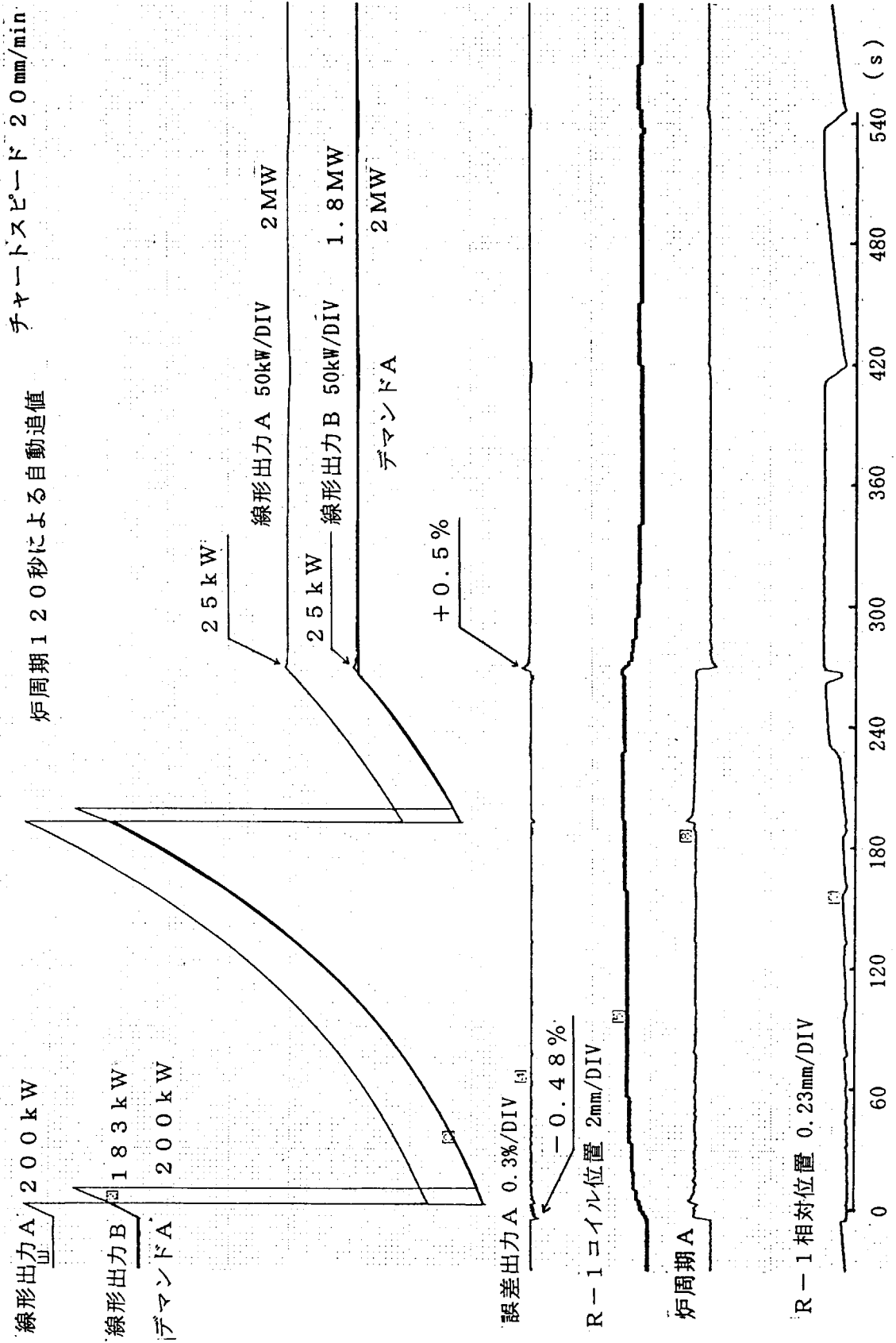


Fig. 12.9 追値制御特性試験 R-1 出力値 200 kW → 2 MW

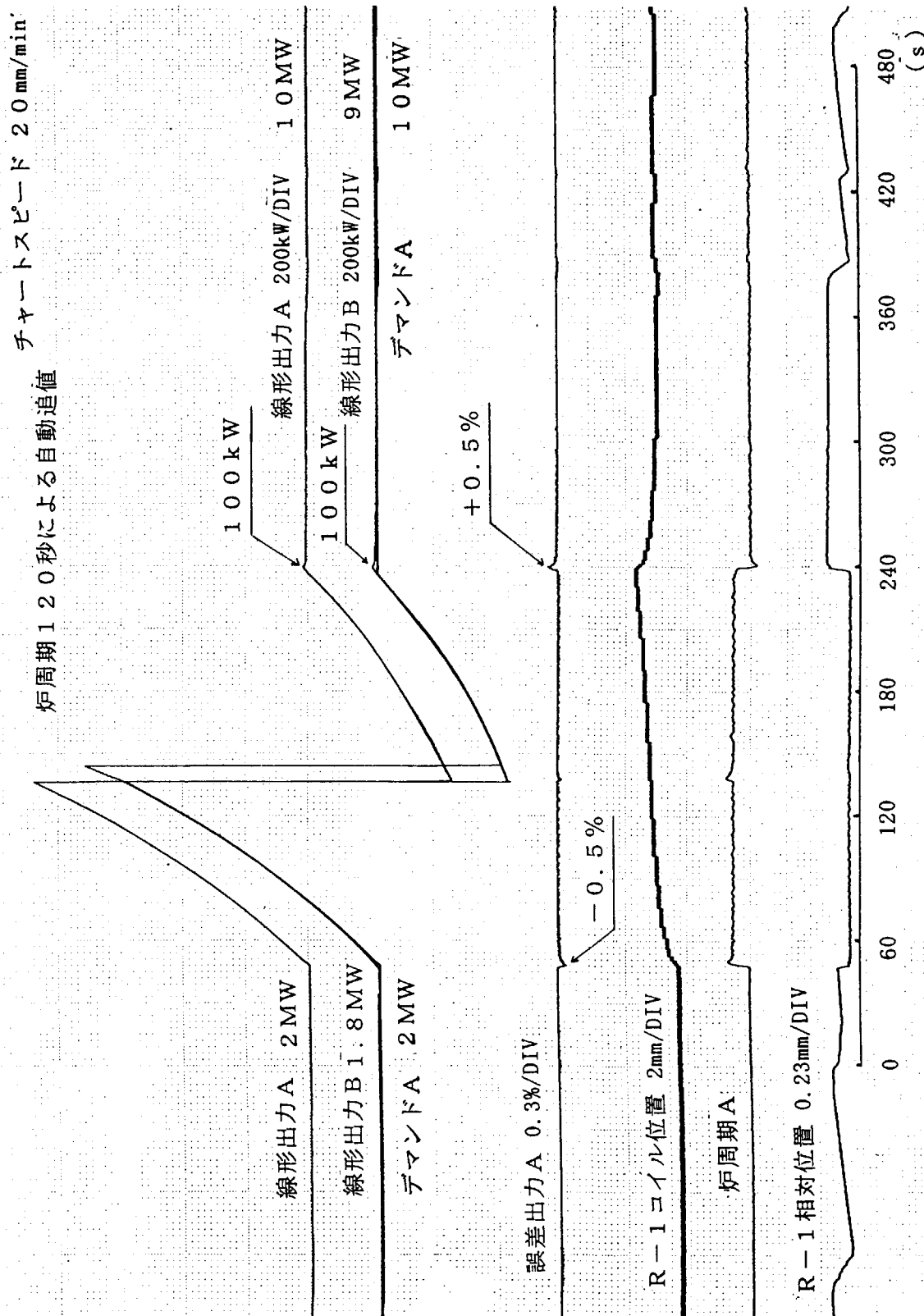


Fig. 12.10 追値制御特性試験 R-1 出力値 2 MW → 10 MW

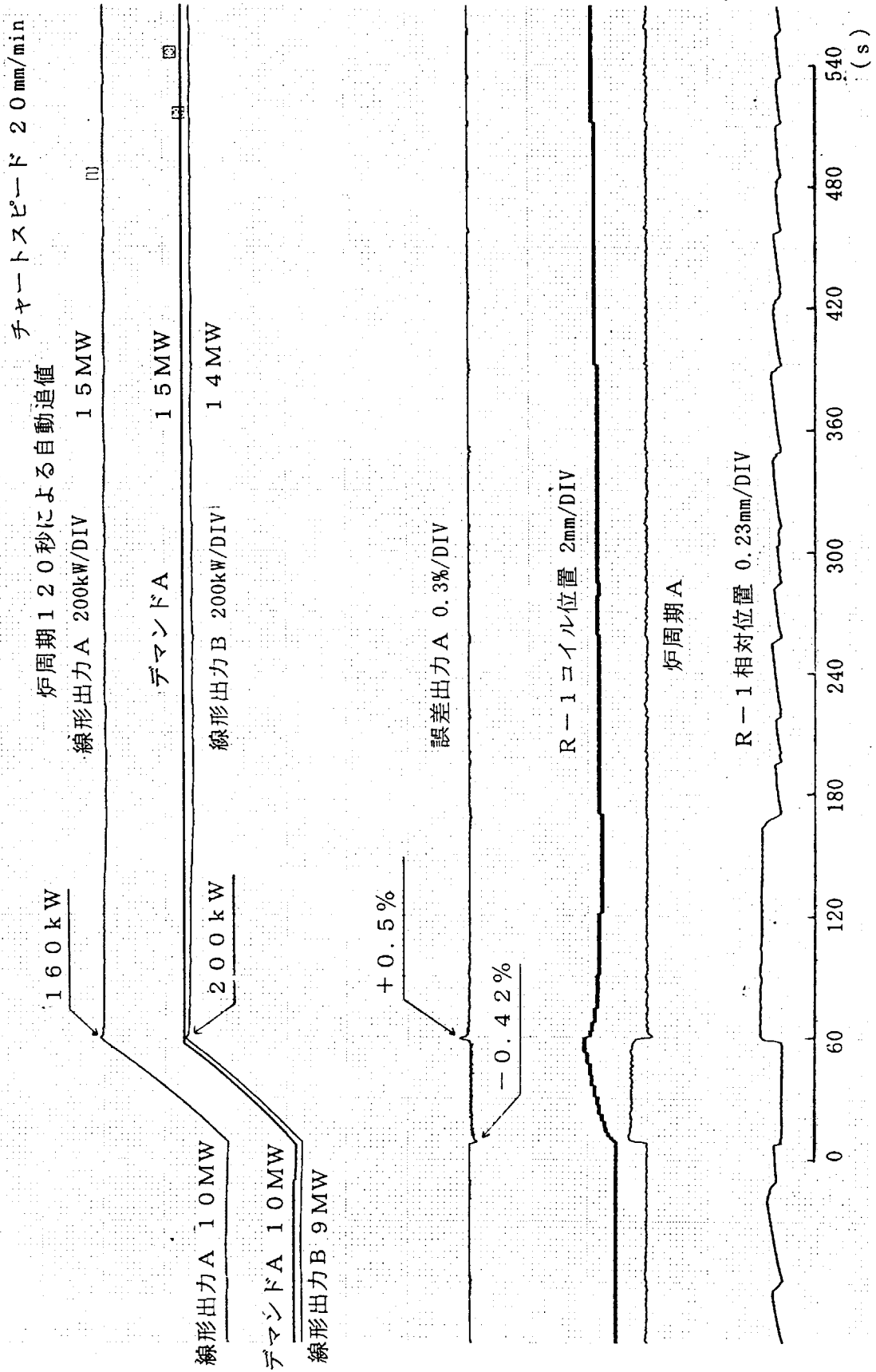


Fig. 12.11 追値制御特性試験 R-1 出力値 10 MW → 15 MW

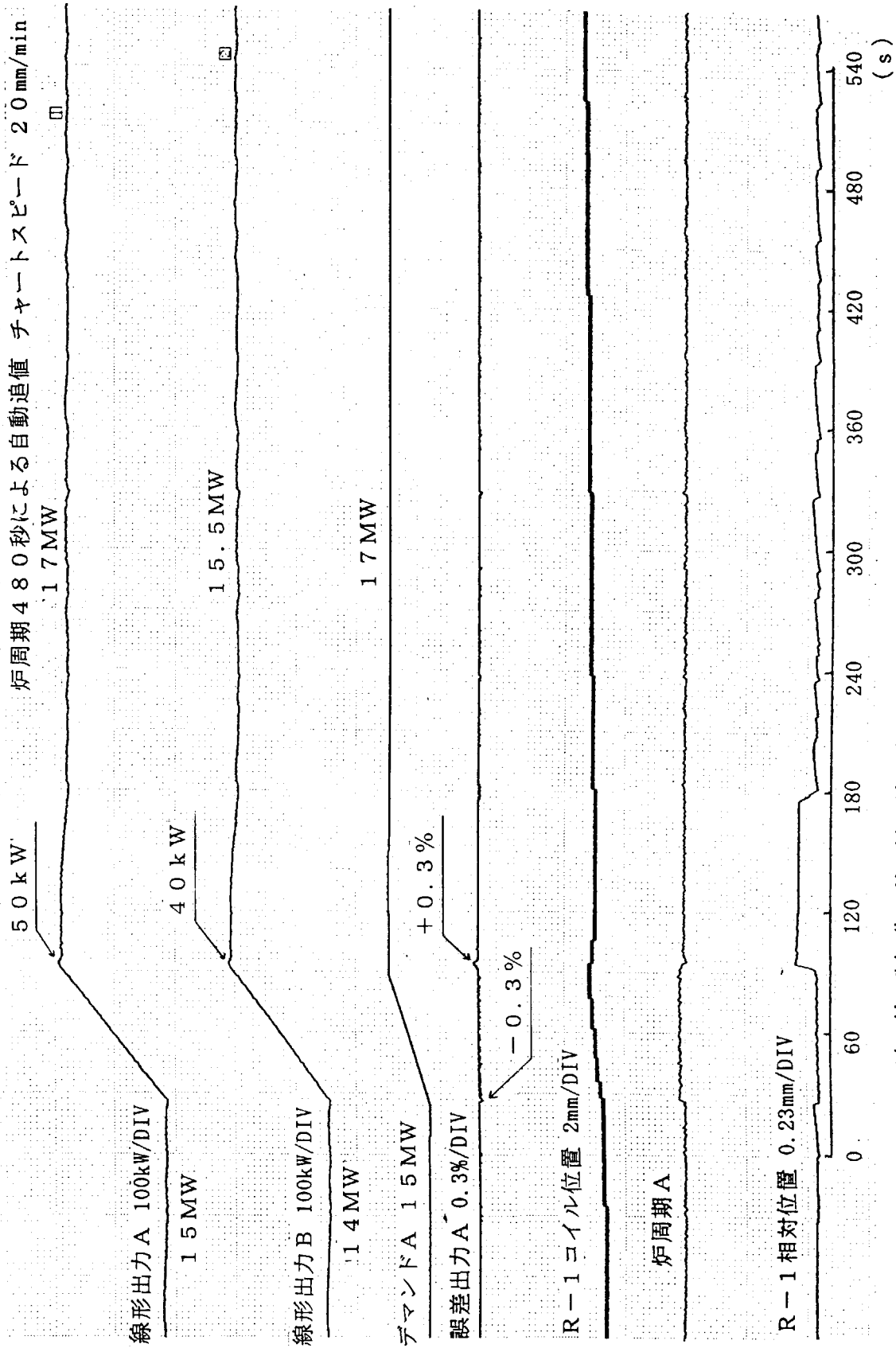


Fig. 12.12 追値制御特性試験 R-1 出力値 15 MW → 18 MW

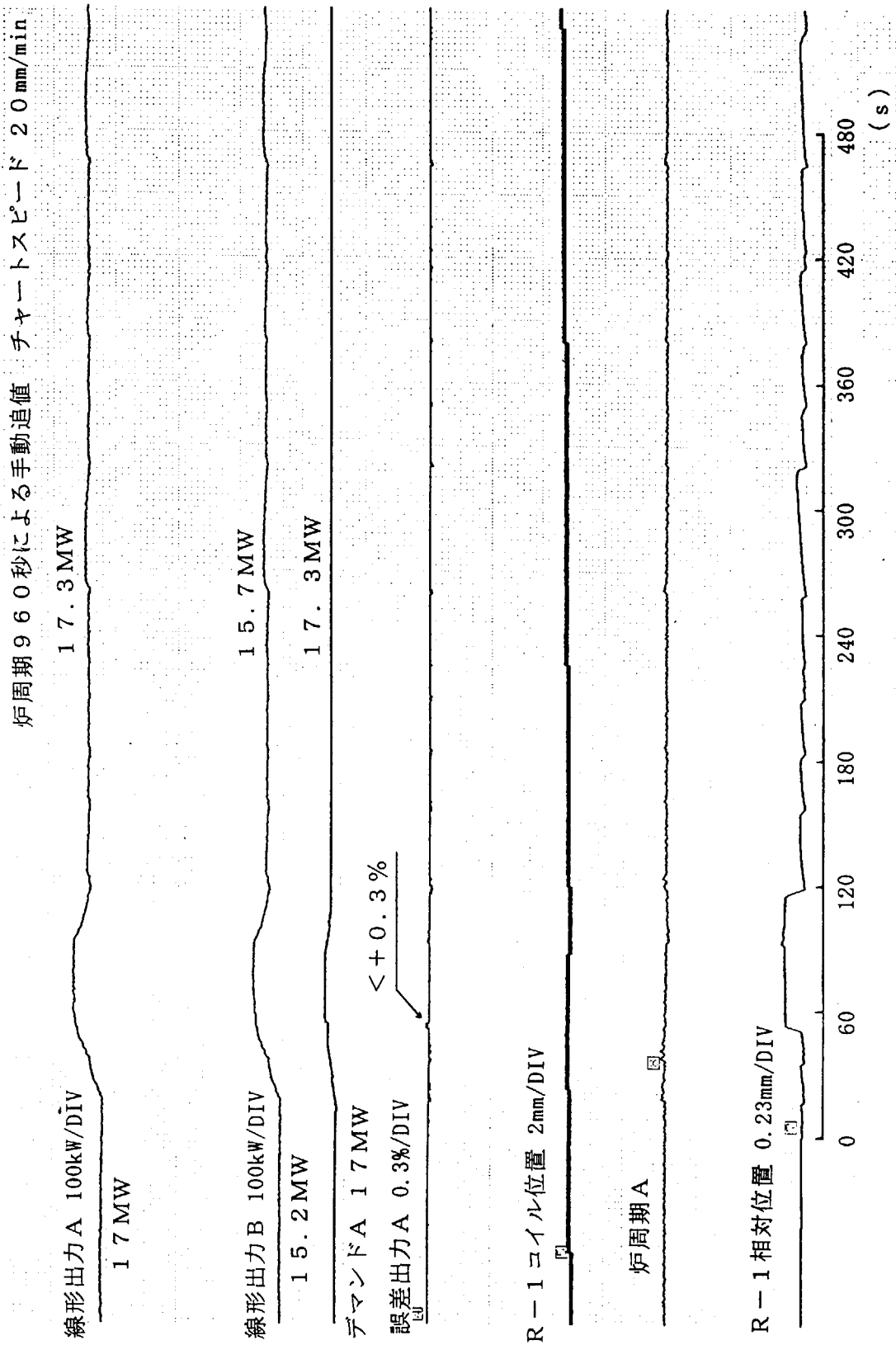


Fig. 12.13 追値制御特性試験 R-1 出力値  
18 MW → 20 MW < 手動追値 >

## 1 3 . 中性子束分布測定（照射孔）試験

### 1 3 . 1 目的

照射設備及び中性子ビーム実験設備における中性子束を測定し、今後の利用に反映するものである。

### 1 3 . 2 方法

平成11年11月9日から11月12日までの原子炉の高出力運転時（20 MW）に水力照射設備（HR-1, 2）、気送照射設備（PN-1, 2）、放射化分析用照射設備（PN-3）での中性子束及び中性子ビーム実験設備の中性子ビーム特性を測定した。また、平成11年11月16日に均一照射設備の中性子束の測定を原子炉出力（10 kW）で行った。照射設備の熱中性子束の測定には金箔を、高速中性子束の測定にはニッケル線及びニッケル板を使用した。また、カドミウム比は、裸の金箔とカドミウム板で覆った金箔の放射化量の比から求めた。

#### （1）使用した検出器

検出器には熱中性子束測定用として、金箔（ $3 \times 3 \times 0.01 \text{ mm}$  純度99.996%）を用い、高速中性子束測定用として、ニッケル線（ $\phi 0.5 \text{ mm}$  純度99.9%）及びニッケル板（ $5 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}$  純度99.55%）を使用した。

#### （2）検出器の照射

原子炉出力20 MWで、水力照射設備、気送照射設備、放射化分析用照射設備に設置した検出器を照射した。

水力照射設備（HR-1, 2）では裸の金箔、カドミウムカバー金箔（金箔を厚さ0.5 mm 純度99.99%のカドミウム板で包んだもの）を8分間、気送照射設備（PN-1, 2）では裸の金箔、カドミウムカバー金箔を2分間、ニッケル線を上段10分間、下段18分間の照射を行った。放射化分析用照射設備（PN-3）の底部は裸の金箔を1分間、カドミウムカバー金箔を10分間、ニッケル板を20分間照射した。PN-3の中間部は裸の金箔、カドミウムカバー金箔を30秒間照射した。また、原子炉出力10 kWにて、均一照射設備（SI-1）で裸の金箔照射を1時間行った。

#### （3）照射後の検出器の放射能測定

生成放射能は、金箔については $\beta$ - $\gamma$ 同時測定法によって測定した。またニッケル線、ニッケル板についてはGe検出器及びマルチチャンネル波高分析器を用い、 $^{58}\text{Co}$ の光電ピーク面積を計数し、 $^{152}\text{Eu}$ 標準線源比較法により求めた。

## (4) 熱中性子束の算出

Auの放射能、カドミウムで覆ったAuの放射能を $\beta-\gamma$ 同時計数法で測定した結果から熱中性子束 $\phi_{th}$ を次式<sup>12)</sup>で算出する。

$$\phi_{th} = \frac{1}{N_0 \cdot W_B} \times \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \frac{1}{\sigma_{a0}} \times \frac{1}{g_{a(Tn)}} \times \sqrt{\frac{Tn}{T_0}} \times A \times \left( 1 - \frac{F_{CD}}{R_{CD}} \right) \\ \times \frac{1}{1 - X \cdot F_{CD}} \times \frac{\lambda_{tm}}{1 - \exp(-\lambda_{tm})} \times \frac{\exp(\lambda_{td})}{1 - \exp(-\lambda_{ti})} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times Kp$$

ここで、

- $N_0$  : Au 1g 中の原子数 $3.057 \times 10^{24} (g^{-1})$
- $W_B$  : Auの重量(kg)
- $\sigma_{a0}$  :  $v_0 = 2200m/s$ の中性子に対するAuの放射化断面積 $9.88 \times 10^{-27} (m^2)$
- $g_{a(Tn)}$  : 実効中性子温度 $Tn$ におけるAuの非 $1/v$ 因子 1.0073
- $Tn$  : 照射孔内の減速材中の実効中性子温度(K) 328.9(K)
- $T_0$  :  $v_0 = 2200m/s$ の中性子に対応する温度 293.6(K)
- $F_{CD}$  : カドミウムによる共鳴中性子束の吸収補正 1.0
- $R_{CD}$  : カドミウム比
- $X$  : 熱中性子束のカドミ透過量の補正因子( $1 - X \cdot F_{CD} = 1$ )
- $\lambda$  :  $^{198}Au$ の崩壊定数 $2.975 \times 10^{-6} (sec^{-1})$
- $t_m$  : 計測時間(sec)
- $t_d$  : 冷却時間(sec)
- $t_i$  : 照射時間(sec)
- $f_1$  : Auによる熱中性子束の自己しゃへい効果の補正因子 1.08
- $f_2$  : Auの挿入による熱中性子束の歪効果の補正因子 1.001
- $f_3$  : カドミウムしきいエネルギー(0.5eV) と炉心設計における熱中性子上限エネルギー(0.625eV)との差の補正因子 1.002
- $Kp$  : 原子炉出力比 (定格出力20MW/照射出力)

試料の放射能 $A$  (Bq)は、

$$A = \frac{N_{\beta} \cdot N_{\gamma}}{N_{\beta \gamma} \left( 1 + \frac{(1 - \epsilon_{\beta}) \alpha \epsilon_c}{\epsilon_{\beta} (1 + \alpha)} \right)}$$



ここで、

- $N_{\beta}$  :  $\beta$ 線の計数率( $S^{-1}$ )
- $N_{\gamma}$  :  $\gamma$ 線の計数率( $S^{-1}$ )
- $N_{\beta\gamma}$  :  $\beta-\gamma$ の同時計数率( $S^{-1}$ )
- $\alpha$  : 411.8keVにおける電子転換率 0.044
- $\varepsilon_{\beta}$  :  $\beta$ 検出器の効率 ( $\varepsilon_{\beta}=N_{\beta\gamma}/N_{\gamma}$ )
- $\varepsilon_c$  : 転換電子に対する $\beta$ カウンタの効率( $\varepsilon_c/\varepsilon_{\beta}=0.918$ )

## (2) 高速中性子束の算出

Niを照射して、(n,p)反応で生成したCo-58の放射能をGe検出器で測定した結果から、高速中性子束 $\phi f$ を次式<sup>12)</sup>で算出する。

$$\phi f = \frac{1}{N_0 \cdot W} \times \frac{1}{\sigma_{a0}} \times \frac{1}{\alpha} \times \frac{K}{\varepsilon \cdot Y_{\gamma}} \times \frac{\lambda_{tm}}{1 - \exp(-\lambda_{tm})} \times \frac{\exp(\lambda_{td})}{1 - \exp(-\lambda_{ti})} \times K_p$$

ここで、

- $N_0$  : Ni 1g 中の原子数  $1.0259 \times 10^{25} (kg^{-1})$
- $W$  : Niの重量(kg)
- $\sigma_{a0}$  : 中性子に対するNiの放射化断面積  $1.66 \times 10^{-29} (m^2)$
- $\alpha$  : Ni中の $^{58}Ni$ の存在比0.6776
- $K$  :  $^{58}Co$ の計数率( $s^{-1}$ )
- $\varepsilon$  : 計数効率
- $\lambda$  :  $^{58}Co$ の崩壊定数  $1.1331 \times 10^{-7} (sec^{-1})$
- $Y_{\gamma}$  :  $^{58}Co$ からの811KeVの $\gamma$ 線放出率 0.994
- $t_m$  : 計測時間(sec)
- $t_d$  : 冷却時間(sec)
- $t_i$  : 照射時間(sec)
- $K_p$  : 原子炉出力比 (定格出力20MW/照射出力)

### 13.3 結果

熱中性子束、高速中性子束及びカドミウム比の測定結果をアルミナイド燃料平衡炉心の特性測定値と併せてTable 13.1に示す。また、中性子ビーム実験設備のビーム特性をTable 13.2に示す。

これより、照射設備のシリサイド燃料初期炉心における熱中性子束及び高速中性子束はアルミナイド燃料平衡炉心における値より約10～20%、約30%それぞれ減少している。また、中性子ビーム実験設備のビーム強度も概ね減少している。

今回の特性測定の結果を、アルミナイド燃料平衡炉心における値と比較したが、これは、今後の照射設備及び中性子ビーム実験設備の利用に際し、中性子束の変化に早期の対応が必要なことから行ったものである。今後は今回測定できなかった照射孔を含め、この種の特性測定を実施して、JRR-3Mの照射孔の特性を把握する予定である。

Table 13.1 JRR-3M照射設備特性測定結果  
20MW換算

設備名	照射位置	熱中性子束 ( $m^{-2} \cdot s^{-1}$ )			高速中性子束 ( $m^{-2} \cdot s^{-1}$ )			カドミウム比		
		アルミニウム燃料	シリサイド燃料	比	アルミニウム燃料	シリサイド燃料	比	アルミニウム燃料	シリサイド燃料	
水力照射設備	HR-1 上 中 下	8.9×10 <sup>17</sup>	—	—	—	—	—	—	—	
		1.1×10 <sup>18</sup>	8.9×10 <sup>17</sup>	0.81	—	—	—	—	8.2	
		1.2×10 <sup>18</sup>	9.6×10 <sup>17</sup>	0.80	1.7×10 <sup>16</sup>	—	—	5	7.7	
	HR-2 上 中 下	7.1×10 <sup>17</sup>	—	—	—	—	—	—	—	
		9.7×10 <sup>17</sup>	8.7×10 <sup>17</sup>	0.89	—	—	—	—	8.7	
		1.0×10 <sup>18</sup>	9.8×10 <sup>17</sup>	0.98	1.4×10 <sup>16</sup>	—	5	8.2	—	
気送照射設備	PN-1 上 下	6.0×10 <sup>17</sup>	4.7×10 <sup>17</sup>	0.78	—	7.4×10 <sup>14</sup>	—	—	30	
		6.0×10 <sup>17</sup>	5.2×10 <sup>17</sup>	0.87	1.7×10 <sup>15</sup>	1.2×10 <sup>15</sup>	0.70	26	22	
	PN-2 上 下	4.6×10 <sup>17</sup>	4.3×10 <sup>17</sup>	0.93	—	6.2×10 <sup>14</sup>	—	—	31	
		5.0×10 <sup>17</sup>	4.7×10 <sup>17</sup>	0.94	1.5×10 <sup>15</sup>	1.1×10 <sup>15</sup>	0.73	26	24	
	放射化分析用照射設備	中間	1.0×10 <sup>16</sup>	8.2×10 <sup>15</sup>	0.82	—	—	—	700	530
		底部	1.9×10 <sup>17</sup>	1.5×10 <sup>17</sup>	0.79	6.0×10 <sup>13</sup>	4.4×10 <sup>13</sup>	0.73	300	290
均一照射設備	SI-1	2.0×10 <sup>17</sup>	1.2×10 <sup>17</sup>	0.60	—	—	—	—	—	

比：  
シリサイド (初期炉心)  
アルミニウム (平衡炉心)

Table 13.2 JRR-3M中性子ビーム実験設備特性測定結果

ビームポート	実 験 装 置	強 度 比
1 G	高分解能粉末中性子回折装置 (HRPD)	0.83
1 G-A	生体高分子結晶構造解析用中性子回折計 (BIX-III)	0.60
2 G	三軸型中性子分光器 (TAS-1)	0.91
3 G	中性子トポグラフィ及び精密光学実験装置 (PNO)	————
4 G	汎用三軸型中性子分光器 (GPTAS)	————
5 G	偏極中性子散乱装置 (PONTA)	————
6 G	東北大学中性子散乱分光器 (TOPAN)	————
7 R-TNRF-1	中性子ラジオグラフィ装置 (NRG)	0.77
-2	//	0.80
T1-1	中性子偏極回折装置 (HQR)	————
T1-2	単結晶中性子回折装置 (KSD)	————
T1-3	粉末中性子回折装置 (KPD)	0.86
T1-4-1	即発ガンマ線分析装置 (PGA)	0.79
T1-4-1 A	低温化学実験装置 (LCE)	————
T1-4-2	中性子カメラ回折装置 (NDC)	————
T1-4-3	TOF型中性子反射率計	————
T2-1	残留応力解析装置 (RESA)	0.86
T2-2	中性子単結晶4軸解析装置 (FONDER)	————
T2-3	中性子IP付生体物質中性子回折計 (BIX-II)	0.83
T2-4	高分解能三軸型中性子分光器 (TAS-2)	————
C1-1	高エネルギー分解能三軸型中性子分光器 (HER)	————
C1-2	二次元位置測定小角散乱装置 (SANS-U)	0.75
C1-3	超高分解能後方散乱装置 (ULS)	0.68
C2-1	冷中性子散乱実験デバイス開発装置 (LTAS)	0.93
C2-2	中性子スピネコー分光器 (NSE)	————
C2-3-1	冷中性子ラジオグラフィ装置 (CNRG)	————
C2-3-2	即発ガンマ線分析装置 (PGA)	————
C2-3-2 A	低温化学実験装置 (LCE)	————
C2-3-4	TOF型中性子反射率計	————
C3-1-1	高分解能パルス冷中性子分光器 (AGNES)	1.0
C3-1-2	多層膜中性子干渉計 (MIN)	————
C3-2	中性子小角散乱装置 (SANS-J)	0.66

強度比： $\frac{\text{シリサイド (初期炉心)}}{\text{アルミナイド (平衡炉心)}}$

## 1 4. キセノン反応度測定試験

### 1 4. 1 目的

原子炉運転中における核分裂生成物（主としてキセノン）の毒物効果が原子炉運転制御にもたらす問題を把握し、運転に役立つデータを取得するため、シリサイド燃料炉心においてキセノン反応度測定試験を実施した。

### 1 4. 2 方法

#### (1) Xe飽和反応度の測定

Xe濃度が燃料体内で飽和する時間は約48時間である。このため、原子炉を20MW出力で3日間運転し、所定時間でのデータを収集し、飽和Xe反応度を求める。反応度は、原子炉起動時の10kW臨界時における各制御棒位置を基点とし、その後の原子炉出力上昇ステップの各出力点と20MWでXeの濃度が十分に飽和するまでの間の所定時刻における制御棒位置の各データをもとに、次式により求めた。

$$\Delta \rho = \Delta \rho_{Sa-1} + \Delta \rho_{Sa-2} + \Delta \rho_{S-1} + \Delta \rho_{S-2} + \Delta \rho_{R-1} + \Delta \rho_{R-2} - \Delta \rho_T$$

ここで、

$\Delta \rho$  : Xe反応度 (Sm反応度を含む) [%  $\Delta k/k$ ]

$\Delta \rho_{Sa-1}, \dots, \Delta \rho_{R-2}$ : 各制御棒 (Sa-1, Sa-2, ..., R-2) の位置変化に相当する反応度 [%  $\Delta k/k$ ] は、制御棒校正試験データから採取した。

#### (2) 原子炉停止後のXeビルドアップ反応度の測定

原子炉を20MW出力で運転し、炉心内のXe濃度が十分飽和した状態から、原子炉出力を短時間（約25分）で約2kWまで下降し約1時間ごとに原子炉出力を50kWまたは80kWに上昇し、その時の制御棒位置を測定した。測定したデータから前述と同様に反応度を算出してXeビルドアップ反応度を求める。

### 1 4. 3 結果

原子炉の起動から原子炉出力20MWでXe濃度が飽和状態に達するまでのXe飽和反応度は、48時間後に約4.1%  $\Delta k/k$ の平衡状態を示し、 $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ 等の濃度から反応度を求める計算式<sup>15)</sup>による計算値に比べて約0.5%  $\Delta k/k$ 高い結果となった。Xe飽和反応度の測定記録と $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ 等の濃度から反応度を求める計算式<sup>15)</sup>による計算値をTable 14.1にXe飽和反応度の時間経過をFig.14.1に示す。原子炉出力20MWのXe濃度飽和状態から、原子炉を停止（急激の出力下降）した時のXeビルドアップ反応度は、約9時間15分後に最大値約8.9%  $\Delta k/k$ と $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ 等の濃度から反応度を求める計算式<sup>15)</sup>による計算値に比べて約0.4%  $\Delta k/k$ 高い結果を得た。原子炉停止後のXeビルドアップ反応度の測定記録と $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ 等の濃度から反応度を求める計算式<sup>15)</sup>による計算値をTable 14.2に、時間経過をFig. 14.2に示す。

#### 14.4 評価

測定結果は、原子炉の運転に伴ってXe濃度が増加し飽和する及び原子炉停止後は、よう素の崩壊によりXe濃度増加の最大値を示した後減衰する計算結果と良い一致を示した。原子炉の起動から定格運転及び原子炉停止後のXe反応度の時間経過をFig. 14.3に示す。

$^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ 等の濃度から反応度を求める計算式<sup>15)</sup>による計算値は、 $^{235}\text{U}$ の燃焼等を考慮していないため、Xe飽和反応度約4.1%  $\Delta k/k$ 及びXeビルドアップ反応度最大値約8.9%  $\Delta k/k$ の測定値に対してそれぞれ約0.5%  $\Delta k/k$ 及び約0.4%  $\Delta k/k$ 低い値を示した。また、Xeビルドアップ反応度の最大値約8.9%  $\Delta k/k$ は、アルミナイド燃料炉心の約12.8%に比べて十分低い値であり、原子炉の再起動時間に余裕のあることが明らかとなった。アルミナイド燃料炉心に比べて小さくなった原因は、ウラン量の増加に伴う燃料領域熱中性子束の低下、カドミウイアの装荷に伴う巨視的吸収断面積の増加が考えられる。

Table 14.1 20MW運転時のXe飽和反応度計算値及び実測値

No	経過時間 [h]	原子炉出力[MW]	$\Delta \rho$ [% $\Delta k/k$ ]			実測値
			計算値			
			Xe	Sm	Xe+Sm	
1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
3	2	2	0.04	0.00	0.04	0.03
4	3	15	0.44	0.00	0.44	0.23
5	4	20	0.77	0.00	0.77	0.43
6	5	20	1.00	0.00	1.00	0.64
7	6	20	1.22	0.00	1.22	0.87
8	7	20	1.43	0.00	1.43	1.11
9	8	20	1.61	0.00	1.62	1.35
10	9	20	1.79	0.00	1.79	1.58
11	10	20	1.94	0.00	1.95	1.79
12	11	20	2.09	0.00	2.09	1.98
13	12	20	2.21	0.00	2.22	2.16
14	13	20	2.33	0.00	2.34	2.31
15	14	20	2.44	0.00	2.44	2.45
16	15	20	2.53	0.01	2.54	2.60
17	16	20	2.62	0.01	2.62	2.72
18	17	20	2.70	0.01	2.70	2.83
19	18	20	2.77	0.01	2.77	2.93
20	19	20	2.83	0.01	2.84	3.02
21	20	20	2.89	0.01	2.89	3.11
22	21	20	2.94	0.01	2.95	3.19
23	22	20	2.98	0.01	2.99	3.26
24	23	20	3.02	0.01	3.04	3.32
25	24	20	3.06	0.01	3.08	3.38
26	25	20	3.10	0.01	3.11	3.43
27	26	20	3.13	0.02	3.14	3.47
28	27	20	3.15	0.02	3.17	3.52
29	28	20	3.18	0.02	3.20	3.56
30	29	20	3.20	0.02	3.22	3.59
31	30	20	3.22	0.02	3.24	3.63
32	31	20	3.24	0.02	3.26	3.65
33	32	20	3.26	0.02	3.28	3.69
34	33	20	3.27	0.02	3.30	3.72
35	34	20	3.28	0.03	3.31	3.74
36	35	20	3.30	0.03	3.32	3.76
37	36	20	3.31	0.03	3.34	3.78
38	37	20	3.32	0.03	3.35	3.79
39	38	20	3.33	0.03	3.36	3.81
40	39	20	3.33	0.03	3.37	3.82
41	40	20	3.34	0.03	3.38	3.84
42	41	20	3.35	0.04	3.38	3.87
43	42	20	3.35	0.04	3.39	3.87
44	43	20	3.36	0.04	3.40	3.89
45	44	20	3.36	0.04	3.40	3.90
46	45	20	3.37	0.04	3.41	3.91
47	46	20	3.37	0.04	3.42	3.92
48	47	20	3.38	0.05	3.42	3.93
49	48	20	3.38	0.05	3.43	3.93
50	49	20	3.38	0.05	3.43	3.94
51	50	20	3.38	0.05	3.43	3.94
52	51	20	3.39	0.05	3.44	3.95
53	52	20	3.39	0.05	3.44	3.96
54	53	20	3.39	0.06	3.45	3.97
55	54	20	3.39	0.06	3.45	3.97
56	55	20	3.39	0.06	3.45	3.98
57	56	20	3.39	0.06	3.46	3.99
58	57	20	3.40	0.06	3.46	4.00
59	58	20	3.40	0.06	3.46	4.01
60	59	20	3.40	0.07	3.46	4.01
61	60	20	3.40	0.07	3.47	4.02
62	61	20	3.40	0.07	3.47	4.03
63	62	20	3.40	0.07	3.47	4.03
64	63	20	3.40	0.07	3.48	4.04
65	64	20	3.40	0.08	3.48	4.04
66	65	20	3.40	0.08	3.48	4.04
67	66	20	3.40	0.08	3.48	4.06
68	67	20	3.40	0.08	3.48	4.06
69	68	20	3.40	0.08	3.49	4.06
70	69	20	3.40	0.09	3.49	4.06
71	70	20	3.40	0.09	3.49	4.07
72	71	20	3.40	0.09	3.49	4.08
73	72	20	3.41	0.09	3.50	4.08
74	73	20	3.41	0.09	3.50	4.09
75	74	20	3.41	0.09	3.50	4.09
76	75	20	3.41	0.10	3.50	4.09
77	76	20	3.41	0.10	3.50	4.10
78	77	20	3.41	0.10	3.51	4.10
79	77.5	20	3.41	0.10	3.51	4.10

Table 14.2 原子炉停止後のXeビルドアップ反応度計算値及び実測値

No	経過時間 [h]	原子炉出力[kW]	$\Delta \rho$ [% $\Delta k/k$ ]			実測値
			計算値			
			Xe	Sm	Xe+Sm	
1	0	80	3.41	0.10	3.51	4.10
2	1	80	4.69	0.10	4.79	--
3	2	80	5.73	0.11	5.84	6.24
4	3	80	6.55	0.11	6.66	7.07
5	4	80	7.20	0.11	7.31	7.68
6	5	80	7.68	0.11	7.80	8.26
7	6	80	8.03	0.12	8.15	8.57
8	7	80	8.26	0.12	8.38	8.77
9	8	80	8.40	0.12	8.52	8.88
10	9	80	8.45	0.12	8.58	8.91
11	9.08	80	8.45	0.12	8.58	8.91
12	9.17	80	8.45	0.12	8.58	8.91
13	9.25	80	8.45	0.12	8.58	8.91
14	9.33	80	8.45	0.13	8.58	8.91
15	9.42	80	8.45	0.13	8.58	8.91
16	9.50	80	8.45	0.13	8.58	8.90
17	9.58	80	8.45	0.13	8.57	8.91
18	9.67	80	8.45	0.13	8.57	8.90
19	9.75	80	8.44	0.13	8.57	8.90
20	9.83	80	8.44	0.13	8.57	8.89
21	9.92	80	8.44	0.13	8.56	8.89
22	10	80	8.43	0.13	8.56	8.89
23	11	50	8.36	0.13	8.49	8.79
24	12	50	8.24	0.13	8.37	8.70
25	13	50	8.07	0.13	8.21	8.55
26	14	50	7.88	0.14	8.01	--
27	15	50	7.66	0.14	7.80	8.19
28	16	50	7.42	0.14	7.56	--
29	17	50	7.17	0.14	7.31	7.74
30	18	50	6.91	0.14	7.05	--
31	19	50	6.64	0.15	6.78	--
32	20	50	6.36	0.15	6.51	6.99
33	21	50	6.09	0.15	6.24	--
34	22	50	5.82	0.15	5.97	--
35	23	50	5.55	0.15	5.70	--
36	24	50	5.28	0.16	5.44	--
37	25	50	5.02	0.16	5.18	5.67
38	26	50	4.77	0.16	4.93	--
39	27	50	4.52	0.16	4.68	--
40	28	50	4.28	0.16	4.45	--
41	29	50	4.05	0.17	4.22	--
42	30	50	3.83	0.17	4.00	4.45
43	31	50	3.62	0.17	3.79	--
44	32	50	3.41	0.17	3.59	--
45	33	50	3.22	0.17	3.39	--
46	34	50	3.03	0.17	3.21	--
47	35	50	2.86	0.18	3.03	3.42
48	36	50	2.69	0.18	2.87	--
49	37	50	2.53	0.18	2.71	--
50	38	50	2.37	0.18	2.56	--
51	39	50	2.23	0.18	2.41	--
52	40	50	2.09	0.18	2.28	2.62
53	41	50	1.96	0.19	2.15	--
54	42	50	1.84	0.19	2.03	--
55	43	50	1.73	0.19	1.92	--
56	44	50	1.62	0.19	1.81	--
57	45	50	1.52	0.19	1.71	2.01
58	46	50	1.42	0.19	1.61	--
59	47	50	1.33	0.19	1.52	--
60	48	50	1.24	0.20	1.44	1.74



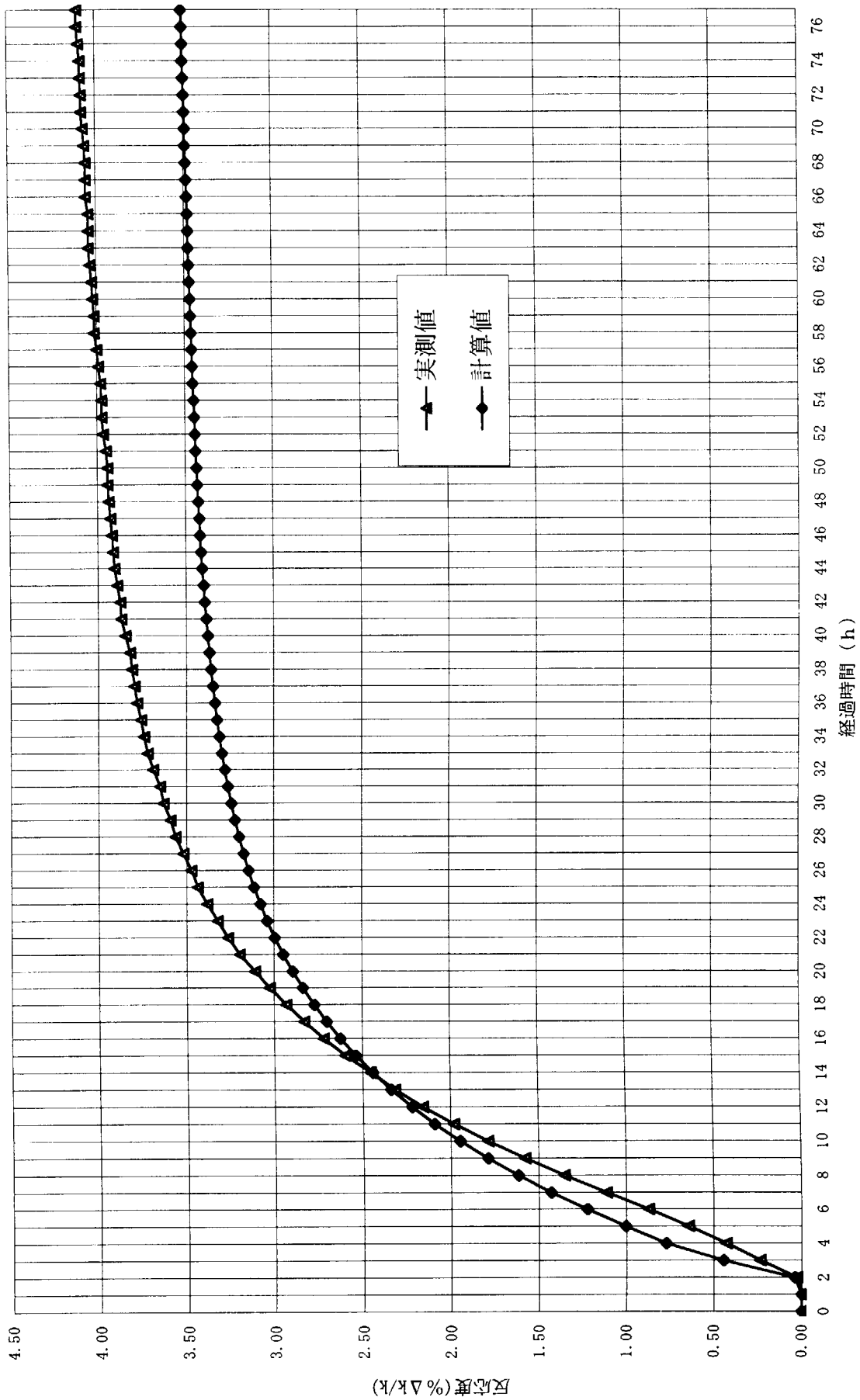


Fig. 14.1 20MW運転時のXe飽和反応度変化

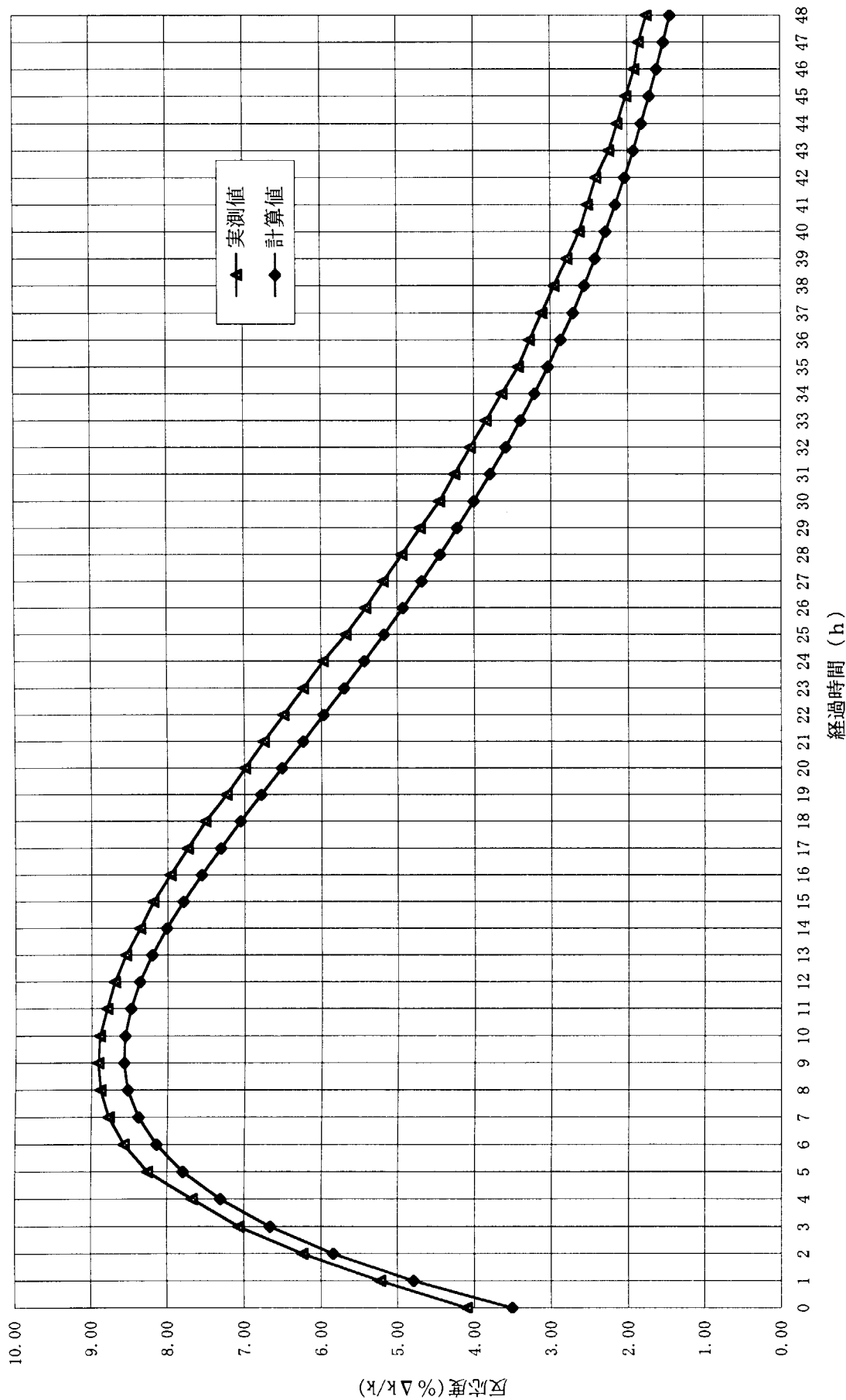


Fig. 14.2 原子炉停止後のXeビルドアップ反応度変化

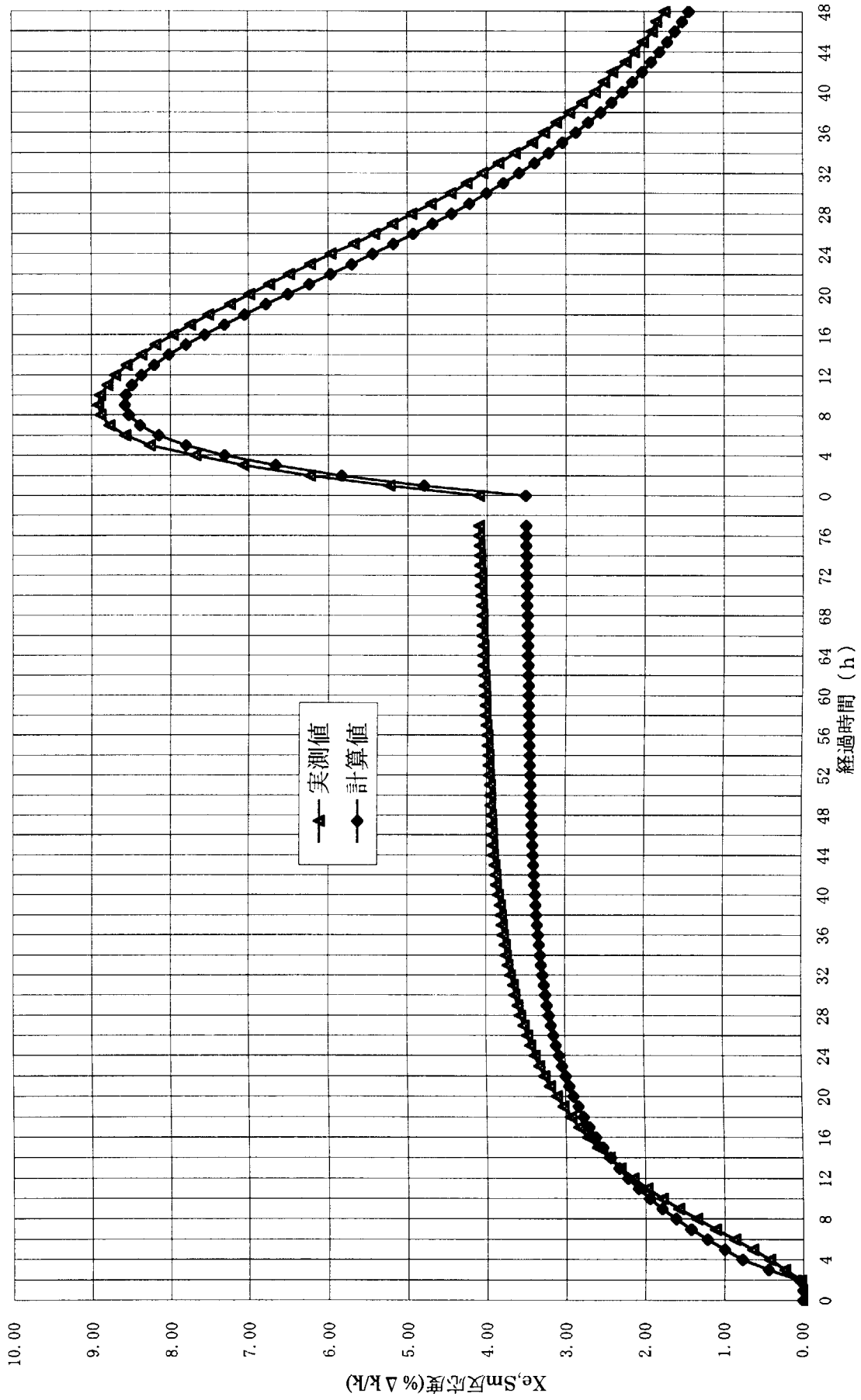


Fig. 14.3 Xe飽和・Xeビルドアップ反応度変化

## 15. 出力上昇試験（飽和値測定試験）

### 15.1 目的

出力上昇試験は、低出力から定格出力 20MW まで原子炉出力を段階的に上昇し、熱出力と核出力を測定し、大幅な相違のないことを確認する。また、燃料の健全性を確認するため、定格出力運転中に破損燃料検出系の遅発中性子を測定し、アラーム設定値以下であることを確認する。さらに、原子炉の運転性能の一確認事項として、定格出力状態での 1 次冷却材の出口温度の飽和値等を測定し、制限値以下であることを確認する。

### 15.2 方法

出力上昇は、原子炉出力 10kW で臨界を確認後、100kW、200kW、2MW、10MW、15MW、18MW、20MW と段階的に制御棒フラットパターン操作で実施した。出力上昇毎に、熱出力、線形出力 A 系及び B 系、対数出力炉周期 A 系及び B 系、安全系 A 系及び B 系の値を測定した。

定格出力 20MW に到達した後は、原子炉の性能を確認するため、原子炉を約 80 時間連続運転し、その間 1 時間間隔で制御棒位置、1 次冷却系、2 次冷却系及び重水系の温度、流量並びに熱出力等を測定した。また、核分裂生成物の  $\beta^-$  崩壊に伴う遅発中性子を測定した。遅発中性子は、1 次冷却系設備のサンプリングラインに据え付けてある BF<sub>3</sub> 比例計数管により測定している。系統の概略図を Fig.15.1 に示す。

### 15.3 結果

出力上昇中の熱出力と核出力の測定結果を Table 15.1 に示す。2MW、10MW、15MW、18MW 及び 20MW における熱出力に対する各計装指示値との比を Fig.15.2 に示す。出力上昇は、核出力（線形出力 A 系）を基準に行った。定格出力運転中における遅発中性子指示値を Table 15.2 及び Fig.15.3 に示し、運転性能の確認に用いる主要な項目の測定記録を Table 15.3 及び Fig.15.4 に示す。

燃料の健全性を確認するために実施した遅発中性子指示値については、起動時は  $2.51 \times 10^2 \text{s}^{-1}$  であったが、定格出力中  $1.2 \text{s}^{-1}$  以下で推移した。遅発中性子測定系のアラーム設定値はバックグラウンドの 2 倍としており、そのアラーム設定値は、約 1 年間の共同利用運転中の指示値の平均として入力している。平成 10 年度の平均値は  $2.6 \text{s}^{-1}$  であり、アラーム設定値としては  $5.2 \text{s}^{-1}$  としている。このことから、アラーム設定値以下であることが確認できた。

### 15.4 評価

定格出力への出力上昇は、核計装の指示が熱出力に比し大幅な相違を示さなかったことから、安全に出力上昇操作を行うことができた。しかし、各核計装の指示をより一致させるため、今回の試験結果を基に、検出器高さ位置の調整を行うこととした。

原子炉の冷却系統設備は、定格出力到達後約1日以降において、1次冷却材炉心入口温度、出口温度及び $\Delta T$ が一定状態で推移したことから、燃料変更前と同等の性能を維持していることが確認できた。また、炉心出口温度は運転中約34℃であり、制限値(42℃)以下を満足する値であった。

遅発中性子指示値は、定格出力中 $1.2s^{-1}$ 以下で推移した。これは、運転により1次冷却材中の $^{17}N$ からの中性子及び燃料板表面に付着していたウラン等からのFP核種( $^{87}Br$ ,  $^{88}Br$ ,  $^{137}I$ )を検出したためと考えられる。また、SRACコードシステム<sup>1), 7)</sup>を用いた計算結果による燃料領域の平均速中性子束 $1.34 \times 10^{18}n/m^2 \cdot s$ を用いると、 $^{17}N$ からの中性子数は $1.1s^{-1}$ であると推定できる。また、平成10年度の平均値 $2.6s^{-1}$ に比し約1/2の測定結果となったのは、燃料領域における平均速中性子束はアルミナイド燃料がシリサイド燃料より高いために、遅発中性子指示値に差が生じていると思われる。

Table 15.1 中性子計装指示値 (調整前)

計測時間	熱出力 (MW)	線形 A(MW)	線形 B(MW)	対数 A(MW)	対数 B(MW)	安全系 A(MW)	安全系 B(MW)
1999/11/9 12:20	0.0	0.0	9.20E-03	9.20E-03	9.90E-03	1.02E-02	1.04E-02
1999/11/9 12:37	0.1	0.1	9.26E-02	9.15E-02	9.96E-02	9.53E-02	9.89E-02
1999/11/9 12:52	0.2	0.2	1.85E-01	1.84E-01	2.00E-01	1.90E-01	1.98E-01
1999/11/9 13:15	2.3	2.0	1.8	1.8	2	1.9	2
1999/11/9 13:17	10.6	10.0	9.2	8.9	9.7	9.3	9.8
1999/11/9 14:08	15.3	15.0	13.5	13.2	14.6	13.9	14.7
1999/11/9 14:55	18.8	17.0	15.4	15	16.5	15.7	16.7
1999/11/9 16:00	19.0	17.8	16.1	15.7	17.1	16.4	17.4
1999/11/10 0:00	19.5	18.0	16.3	15.8	17.2	19.4	19.5
1999/11/10 12:00	19.3	18.0	16.2	15.9	17.2	19.3	19.4
1999/11/11 0:00	19.4	18.0	16.3	15.9	17.2	19.3	19.4
1999/11/11 12:00	19.4	18.0	16.1	15.9	17.2	19.3	19.4
1999/11/12 0:00	19.3	18.0	16.2	15.9	17.2	19.2	19.3
1999/11/12 12:00	19.4	18.0	16.3	15.9	17.2	19.3	19.4

Table 15.2 定格運転中における遅発中性子指示値

測定日	計測時間	遅発中性子指示値( $s^{-1}$ )		サンプリング流量( $m^3/h$ )
		A系(RI4513)	B系(RI4516)	FI2629
11月9日	9:00	0.03	0.02	0
	17:00	1.13	1.12	25.1
11月10日	0:00	1.10	1.04	25.1
	9:00	0.93	1.07	25.2
	17:00	1.01	1.09	25.3
11月11日	0:00	0.96	1.04	25.3
	9:00	1.13	1.06	25.3
	17:00	1.03	1.17	25.2
11月12日	0:00	1.16	1.12	25.3
	9:00	1.10	1.10	25.2
	11:11	0.88	0.91	25.2

Table 15.3 高出力運転運転中のデータ (1/3)

測定日	測定時間	制御棒位置(mm)								原子炉出力(MW)				1次冷却系								2次冷却塔			
		Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2	線形系	線形系	A	B	A	B	A	B	熱出力	流量A	流量B	入口温度	出口温度	ΔT	炉プール温度(°C)	入口圧力(kg/cm <sup>2</sup> )	出口圧力(kg/cm <sup>2</sup> )	入口温度(°C)
1999/11/9	11:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0.6	0.32	2458	2458	16	16	16.1	16.1	0.1	0.1	23.6	0.93	-0.23	16.2	15.8
1999/11/9	12:00:00	265	265	265	264.9	263	265	0.010	0.009	0.010	0.010	0.248	2456	2461	15.8	15.7	15.8	16	0.1	0.1	23.6	0.93	-0.23	15.9	15.6
1999/11/9	13:00:00	265	265	265	264.9	262	265	0.199	0.183	0.189	0.196	0.428	2457	2454	15.6	15.6	15.7	15.8	0.2	0.1	23.5	0.93	-0.22	15.8	15.4
1999/11/9	14:00:00	268.9	269	269	268.9	262	269	14.9	13.5	13.9	14.7	15.19	2472	2474	22.6	22.6	27.8	27.9	5.2	5.2	21.6	0.94	-0.18	23	19.1
1999/11/9	15:00:00	272	272	271.9	272	272	272	17.3	15.7	16	17	19.1	2478	2478	26.9	26.9	33.4	33.5	6.6	6.5	27.3	0.92	-0.18	27.9	22.5
1999/11/9	16:00:00	275	274.9	275	275	279	275	17.8	16.1	16.4	17.4	18.99	2478	2475	26.9	26.9	33.4	33.5	6.5	6.5	27.1	0.92	-0.17	27.8	22.6
1999/11/9	17:00:00	281	281	280.9	281	272	281	17.8	15.9	19.2	19.2	19.33	2483	2483	26.7	26.6	33.3	33.3	6.6	6.6	26.9	0.92	-0.18	27.6	22.2
1999/11/9	18:00:00	284	283.9	284	284	283	284	17.7	16	19.2	19.2	19.2	2475	2477	26.7	26.7	33.3	33.3	6.6	6.6	26.7	0.93	-0.18	27.6	22.3
1999/11/9	19:00:00	286.9	287	287	286.9	294	287	17.8	16.1	19.2	19.2	19.28	2484	2478	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.7	0.93	-0.17	27.7	22.3
1999/11/9	20:00:00	292.9	292.9	292.9	293	286	293	17.7	15.9	19.1	19.2	19.26	2481	2485	26.6	26.6	33.2	33.2	6.6	6.6	26.7	0.93	-0.18	27.5	22.2
1999/11/9	21:00:00	296	295.9	295.9	295.9	294	296	17.7	16	19.1	19.2	19.12	2481	2488	26.9	26.9	33.4	33.5	6.6	6.5	26.8	0.92	-0.18	27.8	22.5
1999/11/9	22:00:00	299	298.9	298.9	299	300	299	17.8	16	19.1	19.2	19.26	2482	2483	26.7	26.7	33.3	33.3	6.6	6.6	26.9	0.92	-0.18	27.6	22.3
1999/11/9	23:00:00	301.9	302	301.9	301.9	304	302	17.7	16	19.1	19.2	19.23	2480	2484	26.7	26.6	33.2	33.3	6.6	6.6	26.8	0.93	-0.18	27.6	22.3
1999/11/10	0:00:00	305	305	304.9	305	306	305	18	16.2	19.3	19.4	19.38	2486	2481	26.8	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.8	0.93	-0.18	27.7	22.4
1999/11/10	1:00:00	307.9	308	307.9	308	307	308	17.9	16.2	19.3	19.4	19.42	2482	2472	26.8	26.8	33.5	33.6	6.7	6.6	26.8	0.93	-0.17	27.8	22.4
1999/11/10	2:00:00	311	311	311	311	306	311	17.9	16.1	19.3	19.4	19.31	2483	2482	26.9	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/10	3:00:00	314	314	314	314	304	314	18	16.1	19.3	19.4	19.3	2477	2469	26.9	26.9	33.5	33.6	6.6	6.6	27	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/10	4:00:00	314	314	314	314	318	314	18	16.3	19.3	19.4	19.37	2476	2478	26.7	26.7	33.4	33.5	6.6	6.6	26.8	0.92	-0.17	27.7	22.3
1999/11/10	5:00:00	317	317	317	316.9	313	317	18	16.2	19.3	19.4	19.43	2490	2485	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.17	27.7	22.3
1999/11/10	6:00:00	317	317	317	316.9	325	317	18	16.3	19.3	19.4	19.4	2483	2478	26.9	26.9	33.5	33.6	6.6	6.6	26.8	0.93	-0.17	27.8	22.5
1999/11/10	7:00:00	320	320	320	320	319	320	17.9	16.1	19.2	19.4	19.42	2486	2485	26.9	26.8	33.5	33.6	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.4
1999/11/10	8:00:00	320	320	320	320	329	320	18	16.4	19.4	19.5	19.54	2487	2488	26.9	26.9	33.6	33.6	6.7	6.7	27	0.93	-0.18	27.9	22.5
1999/11/10	9:00:00	323	322.9	323	323	320	323	18.1	16.2	19.3	19.5	19.45	2475	2475	26.9	26.8	33.5	33.6	6.7	6.7	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.4
1999/11/10	10:00:00	323	322.9	323	323	328	323	17.9	16.2	19.2	19.4	19.43	2485	2488	26.8	26.8	33.5	33.5	6.7	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.4
1999/11/10	11:00:00	326	326	325.9	326	318	326	18	16.1	19.1	19.4	19.29	2477	2466	26.9	26.9	33.5	33.6	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.17	27.9	22.5
1999/11/10	12:00:00	326	326	325.9	326	325	326	18	16.2	19.2	19.4	19.29	2487	2483	27	27	33.6	33.6	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	28	22.6
1999/11/10	13:00:00	326	326	325.9	326	330	326	18	16.3	19.3	19.5	19.47	2478	2476	26.7	26.7	33.4	33.4	6.7	6.7	26.8	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/10	14:00:00	326	326	325.9	326	335	326	18	16.4	19.4	19.5	19.47	2473	2478	26.8	26.8	33.5	33.5	6.7	6.7	26.8	0.93	-0.18	27.8	22.4
1999/11/10	15:00:00	329	329	329	329	324	329	18	16.2	19.3	19.5	19.42	2486	2484	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.8	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/10	16:00:00	329	329	329	329	328	329	18.1	16.3	19.3	19.5	19.49	2480	2483	26.7	26.7	33.3	33.4	6.7	6.6	26.8	0.93	-0.18	27.6	22.3
1999/11/10	17:00:00	329	329	329	329	333	329	18	16.3	19.3	19.5	19.41	2485	2486	26.8	26.8	33.4	33.5	6.7	6.6	26.8	0.92	-0.18	27.7	22.4
1999/11/10	18:00:00	329	328.9	329	329	336	329	18.1	16.4	19.3	19.5	19.47	2482	2481	26.9	26.8	33.5	33.6	6.7	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.4

Table 15.3 高出力運転運転中のデータ (2/3)

測定日	測定時間	制御棒位置(mm)						原子炉出力(MW)						1次冷却系						2次冷却塔					
		Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2	線形系	線形系	A	B	A	B	熱出力	流量A	流量B	入口温度	出口温度	ΔT	炉プール温度(°C)	入口圧力(kg/cm <sup>2</sup> )	出口圧力(kg/cm <sup>2</sup> )	入口温度(°C)	出口温度(°C)	
1999/11/10	19:00:00	332	332	331.9	331.9	323	332	17.9	16	19.2	19.4	19.36	2479	2479	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.8	0.92	-0.18	27.7	22.3
1999/11/10	20:00:00	332	332	331.9	331.9	326	332	18	16.1	19.3	19.5	19.29	2477	2478	26.8	26.8	33.3	33.4	6.6	6.6	26.7	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/10	21:00:00	332	332	331.9	331.9	329	332	18.1	16.2	19.3	19.5	19.48	2488	2490	26.7	26.7	33.3	33.4	6.7	6.6	26.8	0.93	-0.17	27.6	22.3
1999/11/10	22:00:00	332	332	331.9	331.9	331	332	18.1	16.3	19.3	19.5	19.43	2471	2483	26.7	26.7	33.4	33.5	6.7	6.7	26.7	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/10	23:00:00	332	332	331.9	331.9	334	332	18.1	16.3	19.3	19.5	19.43	2486	2485	26.8	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.7	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/11	0:00:00	332	332	331.9	331.9	337	332	18	16.3	19.3	19.5	19.29	2476	2481	26.9	26.9	33.5	33.6	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/11	1:00:00	332	332	331.9	331.9	339	332	18	16.3	19.3	19.4	19.32	2480	2474	26.9	26.8	33.5	33.6	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.4
1999/11/11	2:00:00	332	332	331.9	331.9	341	332	18	16.3	19.3	19.4	19.39	2480	2472	26.8	26.8	33.4	33.5	6.7	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/11	3:00:00	334.9	334.9	335	334.9	326	335	18.1	16.1	19.3	19.5	19.32	2482	2479	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.8	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/11	4:00:00	334.9	334.9	335	334.9	328	335	17.9	16	19.1	19.3	19.32	2487	2483	26.8	26.8	33.4	33.4	6.6	6.6	26.8	0.92	-0.18	27.7	22.4
1999/11/11	5:00:00	334.9	334.9	335	334.9	330	335	18	16.1	19.2	19.4	19.32	2485	2481	26.8	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.4
1999/11/11	6:00:00	334.9	334.9	335	334.9	332	335	18	16.1	19.2	19.4	19.31	2485	2478	26.9	26.9	33.5	33.6	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/11	7:00:00	334.9	334.9	335	334.9	334	335	18	16.1	19.2	19.4	19.2	2479	2475	26.9	26.9	33.5	33.5	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/11	8:00:00	334.9	334.9	335	334.9	334	335	18.1	16.3	19.3	19.5	19.41	2486	2484	26.9	26.9	33.5	33.6	6.6	6.6	27	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/11	9:00:00	334.9	334.9	335	334.9	335	335	18	16.2	19.2	19.4	19.33	2480	2475	27	26.9	33.6	33.7	6.6	6.6	27	0.93	-0.17	27.9	22.5
1999/11/11	10:00:00	334.9	334.9	335	334.9	337	335	18.1	16.2	19.3	19.5	19.37	2486	2484	27	27	33.6	33.7	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	28	22.6
1999/11/11	11:00:00	334.9	334.9	335	334.9	338	335	18	16.2	19.2	19.4	19.25	2478	2471	26.8	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.9	0.92	-0.18	27.8	22.4
1999/11/11	12:00:00	334.9	334.9	335	334.9	339	335	18	16.3	19.3	19.4	19.42	2482	2486	27	26.9	33.6	33.6	6.6	6.6	27	0.92	-0.18	28	22.5
1999/11/11	13:00:00	334.9	334.9	335	334.9	339	335	18	16.2	19.2	19.4	19.34	2482	2475	26.8	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.9	0.94	-0.18	27.7	22.3
1999/11/11	14:00:00	334.9	334.9	335	334.9	341	335	17.9	16.2	19.2	19.4	19.43	2483	2483	26.8	26.8	33.5	33.6	6.7	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.4
1999/11/11	15:00:00	334.9	334.9	335	334.9	342	335	18	16.3	19.3	19.4	19.37	2482	2479	27	26.9	33.6	33.7	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.9	22.5
1999/11/11	16:00:00	334.9	334.9	335	334.9	343	335	18	16.4	19.3	19.5	19.5	2482	2482	26.9	26.9	33.6	33.6	6.7	6.6	27	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/11	17:00:00	334.9	334.9	335	334.9	343	335	18.1	16.4	19.4	19.5	19.52	2483	2484	26.7	26.7	33.3	33.4	6.7	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.6	22.2
1999/11/11	18:00:00	334.9	334.9	335	334.9	344	335	17.9	16.3	19.3	19.3	19.29	2474	2467	26.9	26.9	33.5	33.6	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/11	19:00:00	338	338	337.9	337.9	328	338	18	16.1	19.2	19.4	19.31	2481	2479	26.8	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.7	22.4
1999/11/11	20:00:00	338	338	337.9	337.9	329	338	18	16.1	19.2	19.4	19.32	2482	2474	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.8	0.92	-0.18	27.6	22.3
1999/11/11	21:00:00	338	338	337.9	337.9	331	338	18	16.1	19.2	19.4	19.33	2482	2484	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.8	0.92	-0.18	27.7	22.3
1999/11/11	22:00:00	338	338	337.9	337.9	332	338	18	16.1	19.2	19.4	19.24	2484	2473	26.8	26.8	33.3	33.4	6.6	6.6	26.8	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/11	23:00:00	338	338	337.9	337.9	332	338	18	16.1	19.2	19.4	19.39	2487	2482	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.8	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/11	0:00:00	338	338	337.9	337.9	332	338	18	16.1	19.2	19.4	19.4	2487	2482	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.8	0.93	-0.18	27.6	22.2
1999/11/12	0:00:00	338	338	337.9	337.9	333	338	18	16.1	19.2	19.4	19.27	2478	2482	26.7	26.7	33.3	33.4	6.6	6.6	26.8	0.93	-0.18	27.6	22.3
1999/11/12	1:00:00	338	338	337.9	337.9	334	338	18	16.1	19.2	19.4	19.26	2479	2480	26.8	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.8	0.94	-0.18	27.7	22.4
1999/11/12	2:00:00	338	338	337.9	337.9	334	338	18	16.1	19.2	19.4	19.25	2484	2472	27	27	33.6	33.6	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.9	22.6



Table 15.3 高出力運転運転中のデータ (3/3)

測定日	測定時間	制御棒位置(mm)						原子炉出力(MW)						1次冷却系						2次冷却塔					
		Sa-1	Sa-2	S-1	S-2	R-1	R-2	線形系 A	線形系 B	安全系 A	安全系 B	安全系 A	安全系 B	流量A (m <sup>3</sup> /h)	流量B (m <sup>3</sup> /h)	入口温度 A(°C)	入口温度 B(°C)	出口温度 A(°C)	出口温度 B(°C)	ΔT A(°C)	ΔT B(°C)	炉プールの 温度(°C)	入口圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	出口圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	入口温度 (°C)
1999/11/12	3:00:00	338	338	337.9	337.9	335	338	18	16.2	19.3	19.4	19.42	2482	2473	26.7	26.7	33.3	33.4	6.7	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.6	22.3
1999/11/12	4:00:00	338	338	337.9	337.9	335	338	18	16.2	19.2	19.4	19.26	2472	2474	26.8	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.7	22.4
1999/11/12	5:00:00	338	338	337.9	337.9	336	338	18	16.2	19.3	19.5	19.41	2477	2488	26.9	26.9	33.6	33.6	6.6	6.6	27	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/12	6:00:00	338	338	337.9	337.9	336	338	18.1	16.2	19.2	19.5	19.37	2488	2485	26.8	26.8	33.4	33.5	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.7	22.3
1999/11/12	7:00:00	338	338	337.9	337.9	336	338	18	16.2	19.2	19.4	19.29	2482	2476	26.9	26.9	33.5	33.6	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/12	8:00:00	338	338	337.9	337.9	338	338	18	16.2	19.3	19.4	19.43	2486	2484	26.9	26.8	33.5	33.6	6.6	6.6	27	0.92	-0.18	27.8	22.4
1999/11/12	9:00:00	338	338	337.9	337.9	339	338	18	16.2	19.3	19.4	19.38	2487	2483	26.9	26.9	33.6	33.6	6.6	6.6	27	0.93	-0.18	27.9	22.5
1999/11/12	10:00:00	338	338	337.9	337.9	339	338	18	16.2	19.2	19.4	19.37	2480	2485	27	27	33.6	33.7	6.6	6.6	27	0.92	-0.18	27.9	22.6
1999/11/12	11:00:00	338	338	337.9	337.9	340	338	18	16.3	19.3	19.5	19.37	2478	2484	26.9	26.9	33.5	33.6	6.6	6.6	27	0.93	-0.17	27.8	22.5
1999/11/12	12:00:00	338	338	337.9	337.9	341	338	18	16.3	19.3	19.4	19.37	2470	2473	27	27	33.4	33.5	6.6	6.6	27	0.92	-0.18	27.9	22.5
1999/11/12	13:00:00	338	338	337.9	337.9	340	338	18	16.3	19.3	19.5	19.37	2473	2472	26.8	26.8	33.5	33.5	6.7	6.6	27	0.92	-0.18	27.7	22.3
1999/11/12	14:00:00	338	338	337.9	337.9	342	338	18	16.3	19.3	19.4	19.31	2484	2481	26.9	26.9	33.4	33.5	6.6	6.6	26.9	0.93	-0.18	27.8	22.5
1999/11/12	15:00:00	338	338	337.9	337.9	343	338	18	16.3	19.3	19.4	19.38	2484	2484	27	27	33.6	33.7	6.6	6.6	27	0.93	-0.17	27.9	22.5
1999/11/12	16:00:00	338	338	337.9	337.9	343	338	17.9	16.3	19.2	19.3	19.38	2489	2489	27	26.9	33.6	33.7	6.6	6.6	27	0.93	-0.18	27.9	22.5

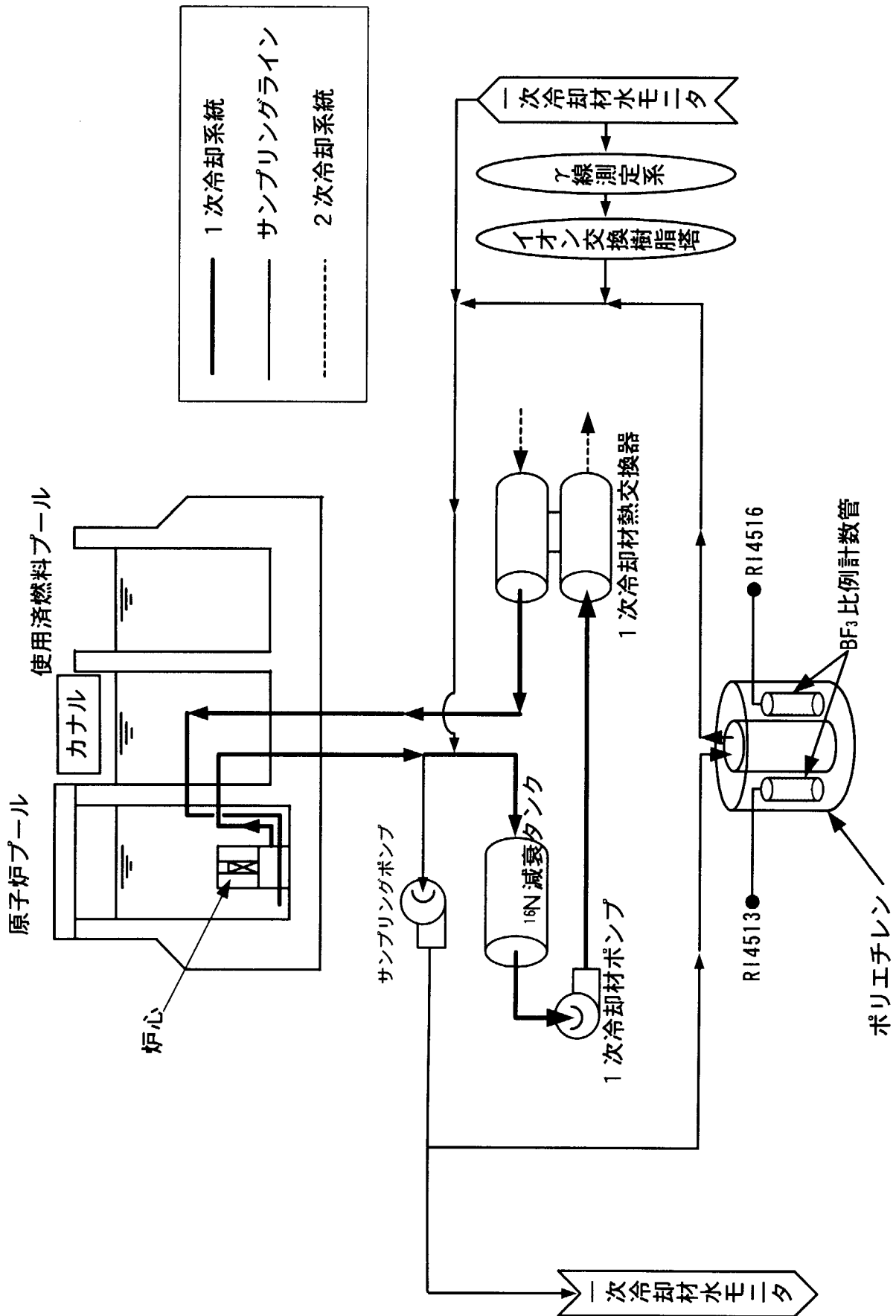


Fig. 15.1 遅発中性子検出器系統図

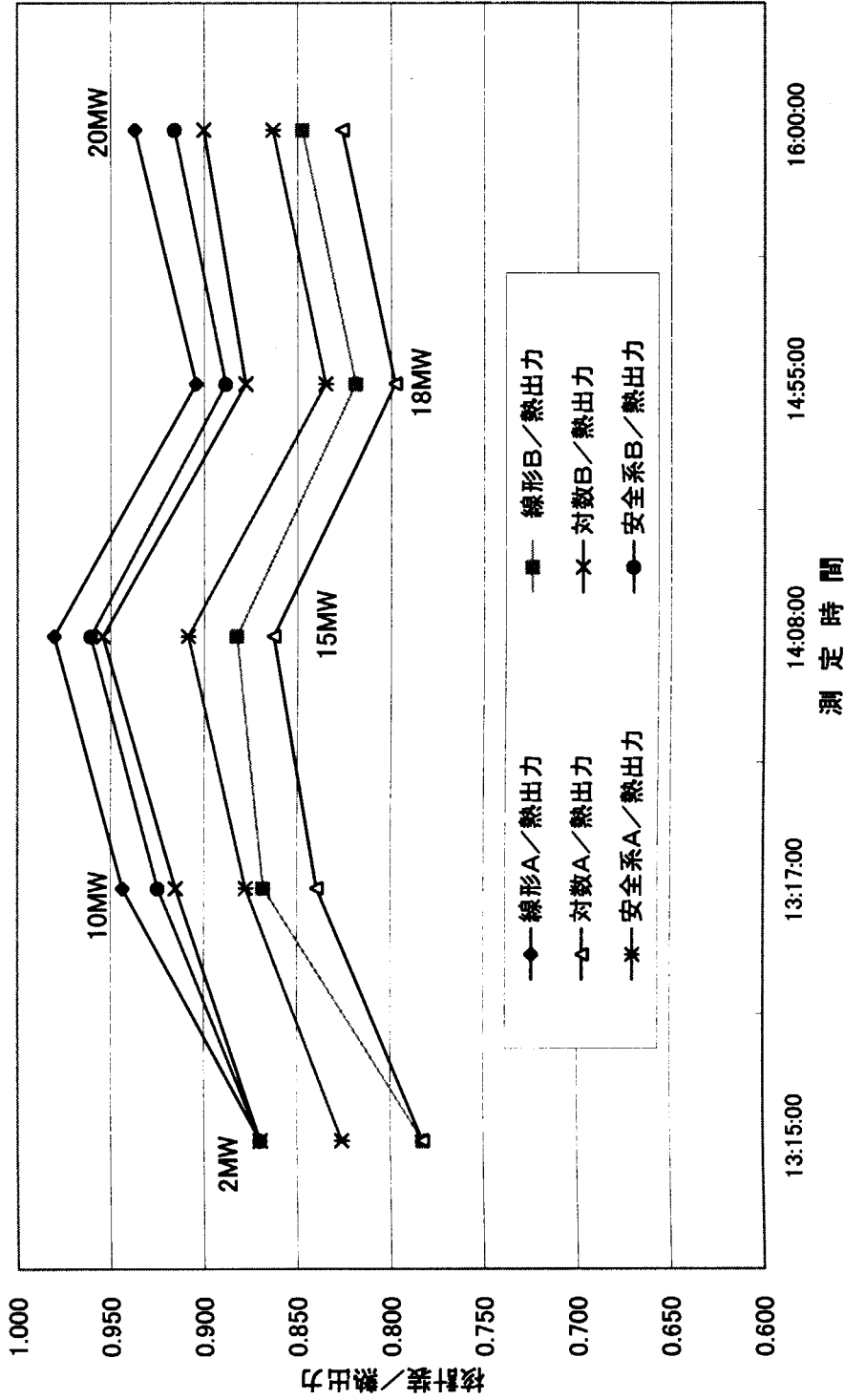


Fig. 15.2 調整前における各核計装指示値と熱出力との比

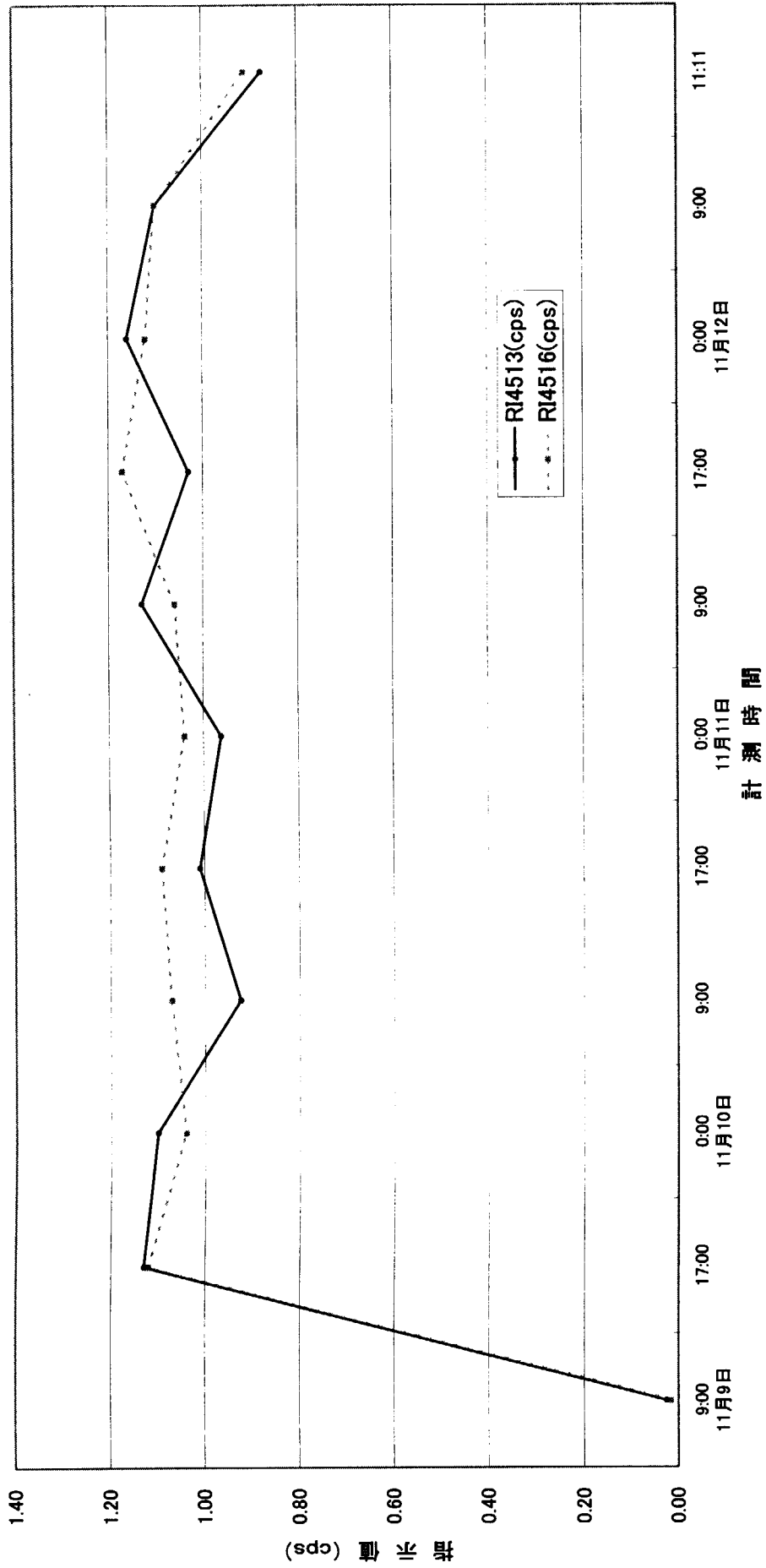


Fig 15.3 定格出力運転中における遅発中性子指示値

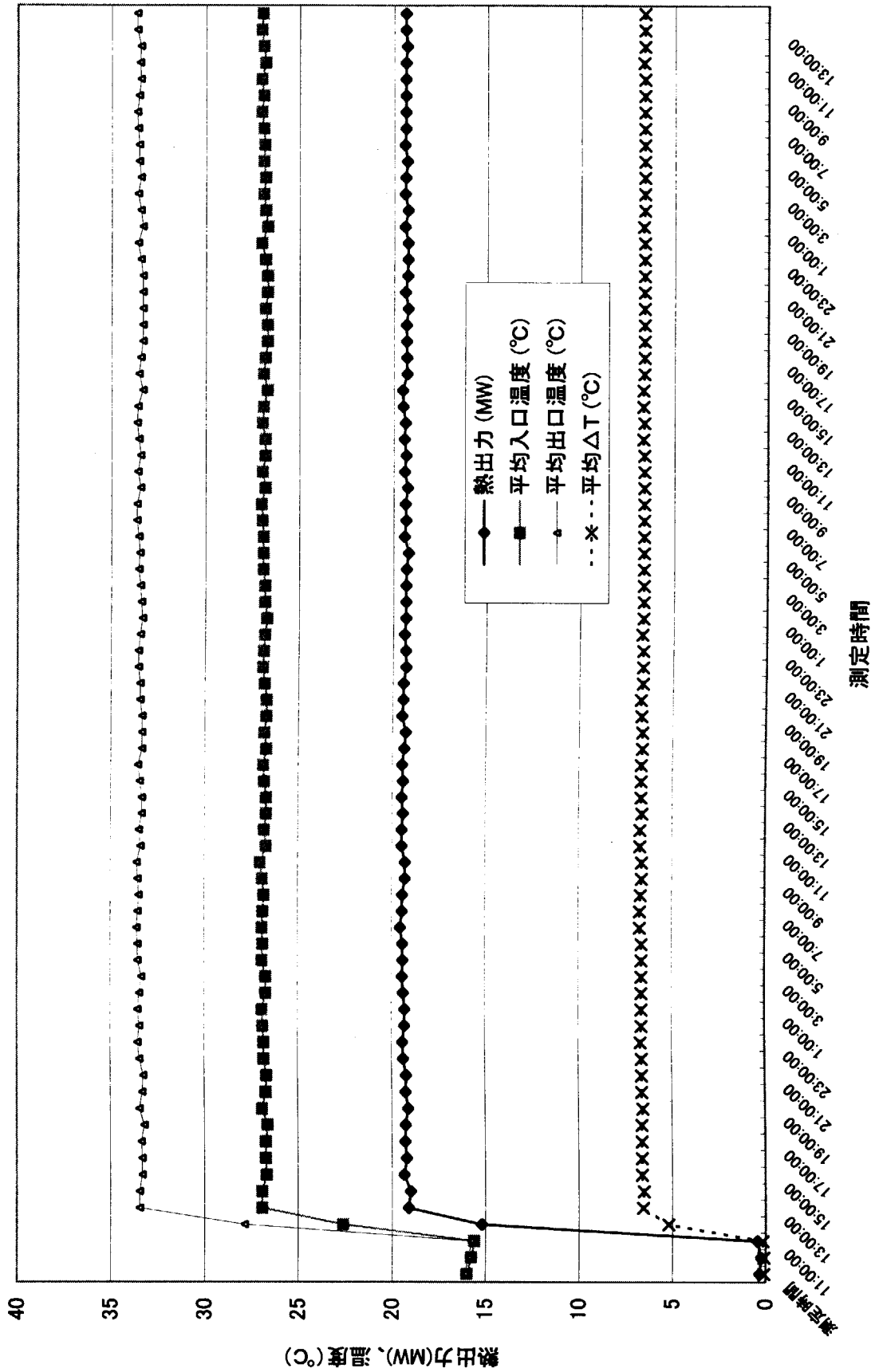


Fig. 15.4 飽和値確認の測定記録

## 16. 崩壊熱測定試験

### 16.1 目的

定格出力が 20MW の JRR-3M では、原子炉停止後に核分裂生成物の崩壊により放出される  $\beta$  線及び  $\gamma$  線のエネルギーが冷却材の顕著なエンタルピ増大をもたらす、原子炉プール水温度を上昇させる。この炉プール水温度上昇を予測することは、原子炉プールを管理する上で重要である。本試験では、原子炉停止過程における炉心冷却及び自然循環冷却運転中の原子炉プール水温度分布の変化を仮設温度計等により測定し、原子炉プール水のエンタルピ増加量から求める原子炉プール水温度予測計算に反映させることで、JRR-3M の崩壊熱を評価する。

### 16.2 方法

原子炉停止後の崩壊熱による冷却材のエンタルピ増大がもたらす原子炉プール水温度の上昇と、以下に示す原子炉プール水温度変化予測計算とを比較することにより、原子炉停止後における自然循環冷却中の崩壊熱変化を評価した。

#### (1) 原子炉プール水温度の測定

原子炉出力 20MW の定格出力運転状態から原子炉停止操作を行った。原子炉停止後の冷却設備の運転は定格出力運転の状態を維持し、炉心出入口温度が十分に低くなることを確認するまで最低 4 時間冷却運転を行い、既設水温度計及び仮設温度計 TC1~TC5 により、この間の原子炉プール水温度を測定した。その後、1 次冷却系及び 2 次冷却材補機ポンプ以外の 2 次冷却系の運転を停止し、自然循環弁を開け、自然循環冷却運転を開始した。同時に、上部遮蔽体を約 100mm 開き、Fig. 16.1 に示す位置に仮設温度計 TC6~TC10 を設置し、仮設温度計及び既設温度計により、自然循環冷却運転中の崩壊熱による原子炉プール水の温度変化を測定した。

#### (2) 自然循環運転時原子炉プール水温度変化の予測

原子炉プール水温度変化予測計算は、以下に示す式(16.1)~(16.6)により、炉心からの崩壊熱  $Q_1$ 、原子炉プール躯体からの放熱  $Q_2$ 、原子炉プール水面からの放熱  $Q_3$ 、プールゲートからカナルへの放熱  $Q_4$ 、カナル水面からの放熱  $Q_5$  及び 1 次冷却系炉心入口配管からカナルへの放熱  $Q_6$  を評価し、原子炉プール水のエンタルピ増加量を式(16.8)から求めることで、原子炉プール水温度の過渡変化を計算している。本予測計算の熱収支の概要を Fig. 16.2 に示す。

$$Q_1 = P_0 \cdot 0.1301 \cdot \int_t^{t+dt} \tau^{-0.2834} d\tau \quad (16.1)$$

$$Q_2 = A_b \cdot K_b \cdot (T_p - T_0) \cdot dt \quad (16.2)$$

$$Q_3 = h_{fg} A_{su1} \cdot (0.0152v + 0.0178) \cdot 1.333 \times 10^2 (p_a - p_w) \cdot dt \quad (16.3)$$

$$Q_4 = A_{rg} \cdot K_{rg} \cdot (T_p - T_c) \cdot dt \quad (16.4)$$

$$Q_5 = h_{fg} A_{su2} \cdot (0.0152v + 0.0178) \cdot 1.333 \times 10^2 (p_a - p_w) \cdot dt \quad (16.5)$$

$$Q_6 = \frac{2\pi\lambda_{pi}l(T_p - T_c)}{\frac{\lambda_{pi}}{\alpha_p R_i} + \ln \frac{R_o}{R_i} + \frac{\lambda_{pi}}{\alpha_c R_o}} \cdot dt \quad (16.6)$$

また、本試験においては、重水冷却系が起動していたため、原子炉プール水の熱は重水タンクへ放熱していたと考えられる。よって、次式を原子炉プールからの放熱量  $Q_7$  として与えることとする。

$$Q_7 = C_{ph} \rho_h F_h \cdot \Delta T_h \cdot dt \quad (16.7)$$

本試験においては、キセノン反応度測定試験と同時に行ったため、Fig. 16.3 に示したステップ状の出力 80kW 及び 50kW を原子炉プール水への加熱量  $Q_8$  として与えることとする。

即ち、微小時間  $dt$  間に加わる原子炉プール水温度及びカナル水温度は次式により与えられる。

$$dT_p = \frac{k_1 Q_1 - k_2 Q_2 - Q_3 - Q_4 - Q_6 - Q_7 + Q_8}{\rho C_{pw} V_p} \quad (16.8)$$

$$dT_c = \frac{Q_4 - Q_5 + Q_6}{\rho C_{pw} V_c} \quad (16.9)$$

ただし、式(16.8)における  $k_2$  の値は、アルミナイド燃料炉心時に本予測計算で評価した平均値である 4.1 を用いた。

$A_b$ : 原子炉プール躯体外表面積 [m <sup>2</sup> ]	$A_{rg}$ : 原子炉プール-カナル間境界面積 [m <sup>2</sup> ]
$A_{su1}$ : 原子炉プール水表面積 [m <sup>2</sup> ]	$A_{su2}$ : カナル水表面積 [m <sup>2</sup> ]
$C_{pw}$ : 軽水の定圧比熱 [J/kg·K]	$C_{ph}$ : 重水の定圧比熱 [J/kg·K]
$F_h$ : 重水冷却系流量 [m <sup>3</sup> /s]	$K_b$ : 原子炉プール-建屋熱通過率 [W/m <sup>2</sup> ·K]
$K_{rg}$ : 原子炉プール-カナル熱通過率 [W/m <sup>2</sup> ·K]	$P_0$ : 原子炉運転中の出力 [W]
$R_o$ : 炉心入口配管外径 [m]	$R_i$ : 炉心入口配管内径 [m]
$T_p$ : 原子炉プール水平平均温度 [°C]	$T_0$ : 原子炉建屋室内温度 [°C]
$V_p$ : 原子炉プール水容積 [m <sup>3</sup> ]	$V_c$ : カナル水容積 [m <sup>3</sup> ]
$h_{fg}$ : 蒸発潜熱 [J/kg]	$l$ : カナル内炉心入口配管の長さ [m]
$p_w$ : 空気の飽和蒸気圧 [Pa]	$p_a$ : 空気の水蒸気分圧 [Pa]
$t$ : 原子炉停止後の経過時間 [s]	$v$ : プール水表面空気流速 [m/s]
$\alpha_p$ : 配管内面熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> ·K]	$\alpha_c$ : 配管外面熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> ·K]
$\rho_w$ : 軽水の比重 [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_h$ : 重水の比重 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda_{pi}$ : 炉心入口配管の熱伝導率 [W/m·K]	$\Delta T_h$ : 重水冷却系熱交換器出入口温度差 [°C]

### (3) 崩壊熱の評価

式(16.8)における補正係数  $k_1$  を変化させることにより、自然循環弁開後の原子炉プール水温度変化測定データと本予測計算の計算結果とを一致させることで、次式で表される崩壊熱  $P$  を求めることとする。

$$P = k_1 \cdot P_0 \cdot 0.1301 t^{-0.2834} \quad (150 < t < 4 \times 10^6) \quad (16.10)$$

### 16.3 結果

定格出力による長時間運転（約80時間）後に原子炉を停止した場合の原子炉プール水温度変化を Fig. 16.4、Fig. 16.5 及び Fig. 16.6 に示す。Fig. 16.4 に示すように、原子炉停止直後では、炉心冷却運転のため1次冷却系及び2次冷却系は定格出力運転時の状態を維持した高設定で運転されていることから、仮設温度計 TC1~TC5 の測定結果を示した原子炉プール水温度は急激に降下し、約4時間の冷却運転の間に降下し続けた。しかし、Fig. 16.6 に示すように、既設原子炉プール水温度計が示す温度は、原子炉停止後に急激に変化することなく、炉心冷却運転中及びその停止後も緩やかに下降を続け、原子炉停止から約7時間経過後、原子炉プール水温度は急激に下降し、約22°Cに達した。既設原子炉プール水温度計のみが仮設温度計 TC1~TC5 と異なる温度変化を示す原因は、既設原子炉プール水温度計がカナルに近い位置の水面下約50cmに設置されていることから、強制循環冷却及び自然循環冷却時共に原子炉プール内の流れによる影響が少なく、更に仮設温度計に比べ、炉心から離れた位置に設置されているためであると考えられる。これに対し、Fig. 16.4 に示すように、炉心の真上に設置された仮設温度計 TC1~TC5 は、炉心に近づくに従い温度降下が急激であることから、対流に対する応答性が高いことが分かる。

その後、自然循環運転に移行すると同時に、仮設温度計 TC6~TC10 を挿入して測定を続けた結果、Fig. 16.4 及び Fig. 16.5 に示すように、全ての原子炉プール水温度は上昇傾向を示した。式(16.10)に示すように、崩壊熱は時間の経過と共に指数関数的に減少していくが、本試験においても、測定開始直後の崩壊熱が比較的大きいうちには、既設原子炉プール水温度計及び各仮設温度計指示の時間的変化は大きい温度変化率で上昇し、その後崩壊熱が徐々に減少するに従い、小さい温度変化率で上昇していくことが理解できる。また、仮設温度計 TC1~TC5 が示す原子炉プール水温度の上昇過程において、一時的な温度の上昇下降が十数カ所見られるが、これらはキセノン反応度測定試験におけるパルス状の出力に対応していることが Fig. 16.3 との比較により確認できる。

Fig. 16.6 に示すように、既設原子炉プール水温度計による温度は、仮設温度計による平均温度と比べ、測定開始直後において最大約0.5°C異なるものの、時間経過と共にほぼ等しい値を示しており、本設の原子炉プール水温度計が示す温度を原子炉プール水の平均温度として用いることが可能である。本報告書における原子炉プール水温度の予測は、原子炉プール水平平均温度を予測するものであり、空間的な温度分布については評価を行っていない。従って、原子炉プール水平平均温度を予測することは、本設の原子炉プール水温度計 TI1711 の測定点における温度を予測することと同等である。よって、本予測計算で求める原子炉プール水温度を既設原子炉プール水温度計と比較することにより、崩壊熱を評価することとする。

### 16.4 評価

原子炉運転中の平均熱出力19.4MW、原子炉停止後520分経過後の原子炉プール水温度22.0°C、カナル水温度28.4°C、原子炉建屋室内温度20.0°Cを初期条件として、本試験の実測データと計算結果が一致する補正係数 $k_1$ を求めた。計算初期で崩壊熱が支配的であることが予想できるため、崩壊熱の補正係数である $k_1$ は、原子炉プール水温度が上昇し始める崩壊熱が支配的な初期



の温度変化率に合わせることにより求めた。計算結果と原子炉プール水温度の比較を Fig. 16.7 に示す。補正係数  $k_1$  は、運転データにおける原子炉プール水の初期温度上昇率と一致する値を求めた結果、 $k_1=0.55$  を得た。得られた補正係数  $k_1$  を式(16.10)に代入した原子炉停止後の崩壊熱を次式に示す。

$$P = 0.55 \cdot 19.4 \times 10^3 \cdot 0.1301 \cdot t^{-0.2834} \quad (150 < t < 4 \times 10^6) \quad [\text{kW}] \quad (16.11)$$

しかし、原子炉停止から約20時間経過すると、計算値は測定値より高くなり、その差は時間の経過と共に高くなる傾向を示した。この計算値と測定値の差は、本計算における放熱量の評価で不確定要素の一番強い重水タンクへの放熱量  $Q_7$  が原因であると考えられる。この放熱量  $Q_7$  は、重水冷却系の熱交換器出入口温度差と流量から求めている。Fig. 16.8 に示すように、本試験における自然循環冷却中の重水熱交換器出入口温度差は、平均で約  $0.29^\circ\text{C}$  と小さい値ではあるが、この値を式(16.8)に代入して求められる放熱は約  $28.0\text{kW}$  と高い値となる。すなわち、重水熱交換器出入口温度差を測定している2つの测温抵抗体の測定誤差  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  を本試験の測定値に含めた場合、重水熱交換器出入口温度差は  $0.1 \sim 0.5^\circ\text{C}$  となり、重水タンクへの放熱は  $9.3 \sim 46.7\text{kW}$  となる。式(16.8)に重水熱交換器出入口温度差  $0.1^\circ\text{C}$  及び  $0.5^\circ\text{C}$  を代入して計算を行った結果を Fig. 16.9 に示す。この計算の結果、原子炉停止後48時間経過した時点で、これらの結果の差は、約  $4^\circ\text{C}$  と大きな値になり、重水熱交換器出入口温度差の僅かな測定誤差が本予測計算に支障を来すことが明らかになった。即ち、本試験の崩壊熱による原子炉プール水温度上昇変化は、通常の利用運転後の変化とは異なるものであるため、式(16.11)が今後の利用運転後の崩壊熱であると決定することはできない。

以上より本試験では、キセノン反応度測定試験が並行して行われ、通常原子炉停止後の自然循環冷却中に起動していない重水冷却系が起動していたため、不確定要素を多く含んだ測定結果となった。よって、今後もこの試験を継続し、JRR-3M 原子炉停止後の崩壊熱を適切に評価する予定である。

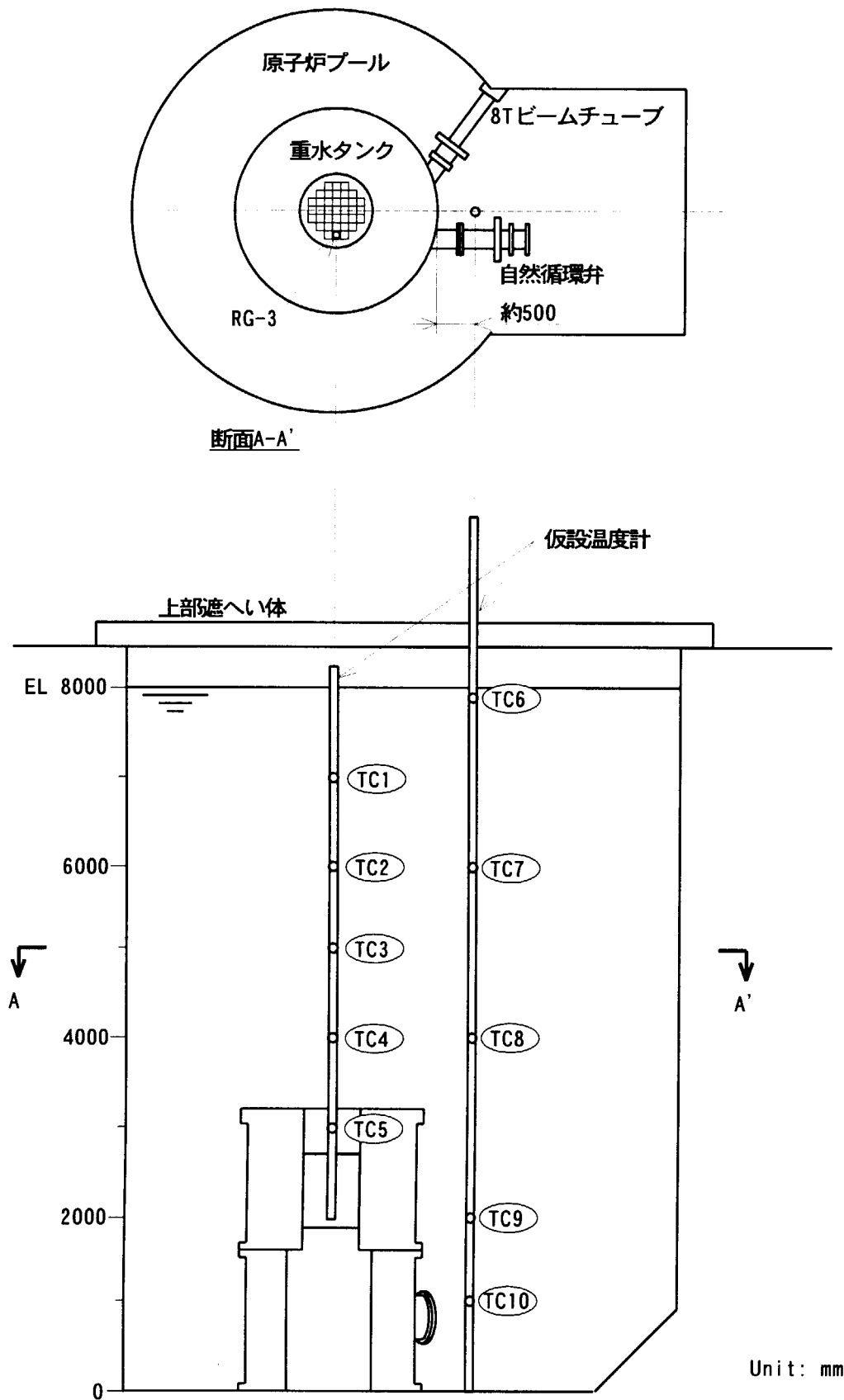


Fig. 16.1 仮設温度計設置位置

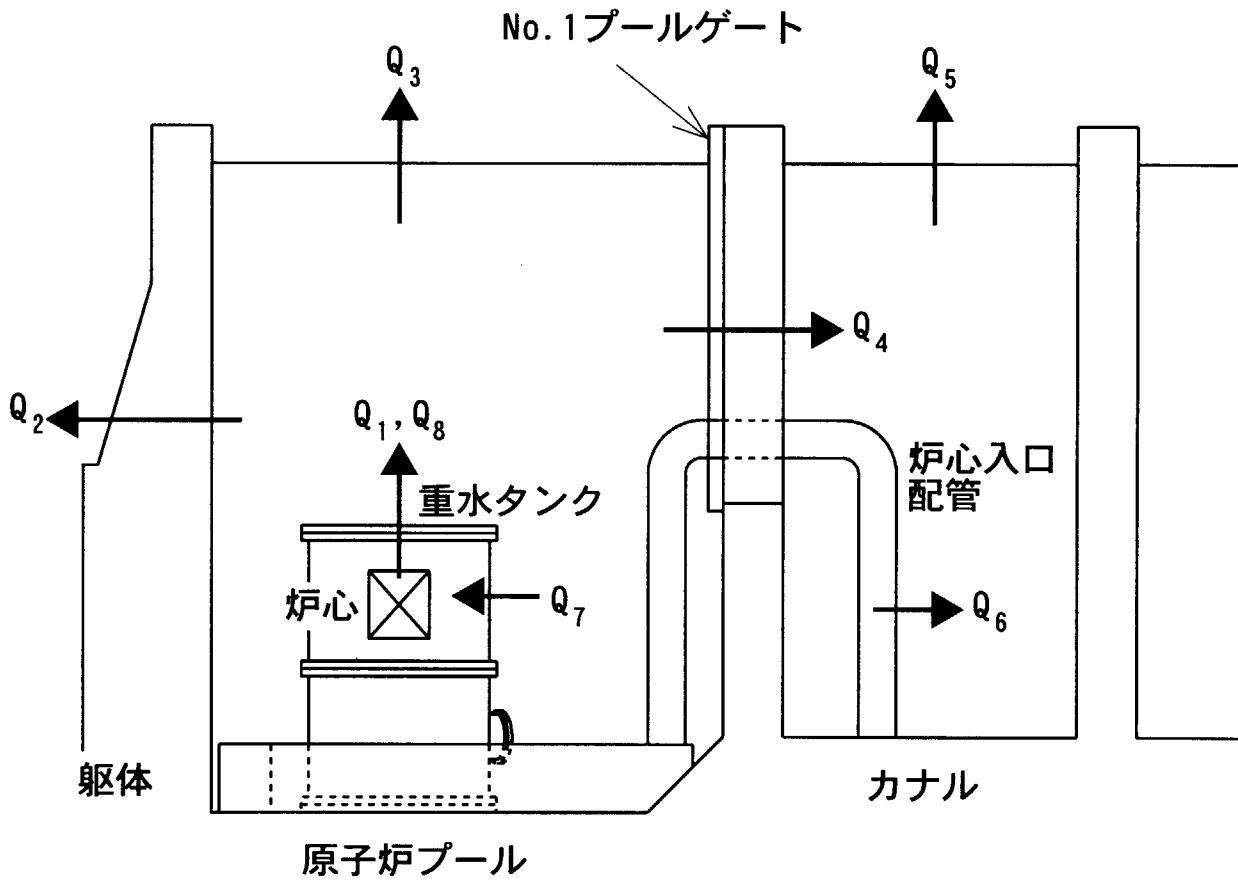


Fig. 16.2 原子炉プール水温度予測システムにおける熱収支の概略図

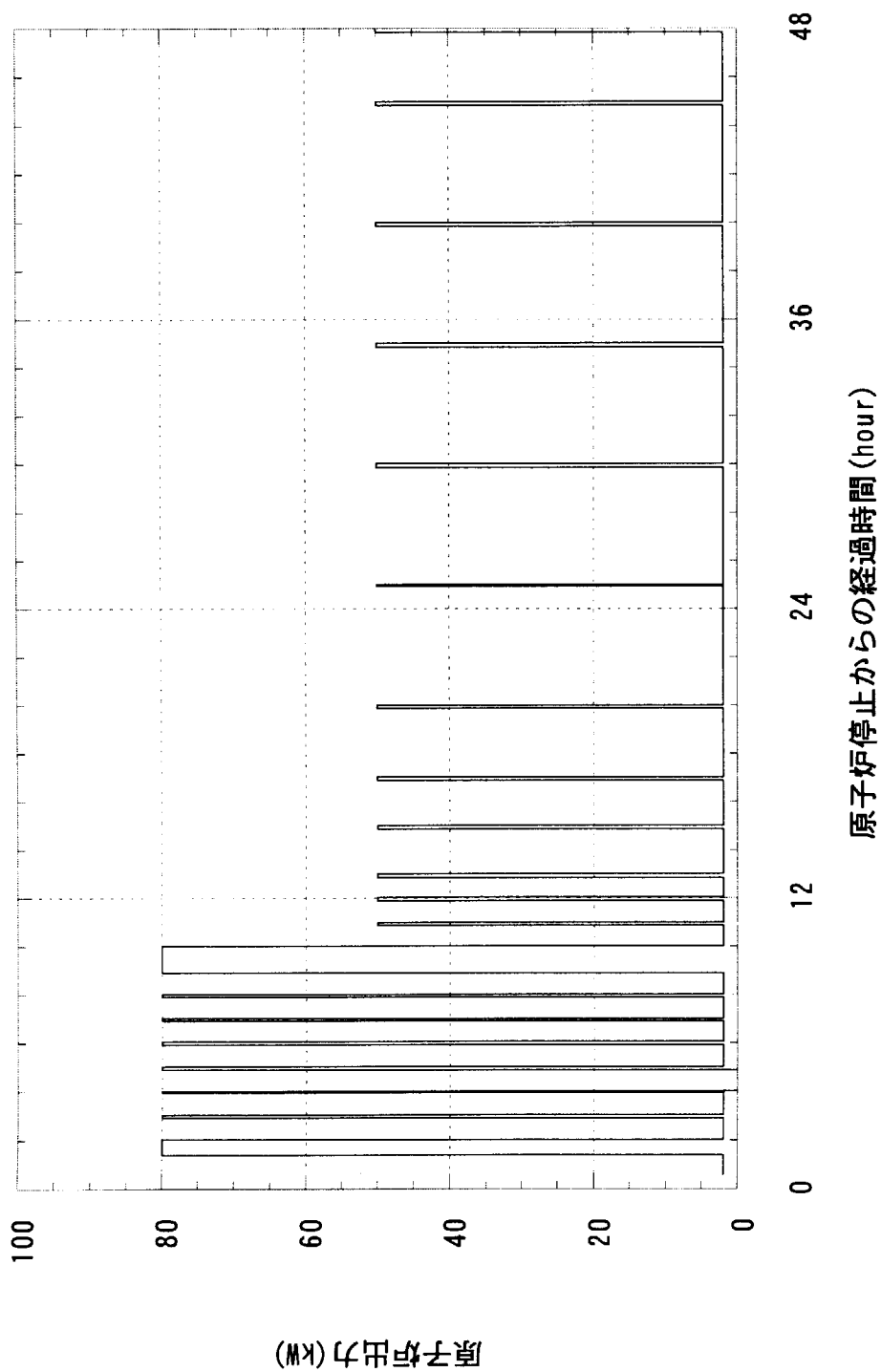


Fig. 16.3 キセノン反応度測定試験における運転パターン

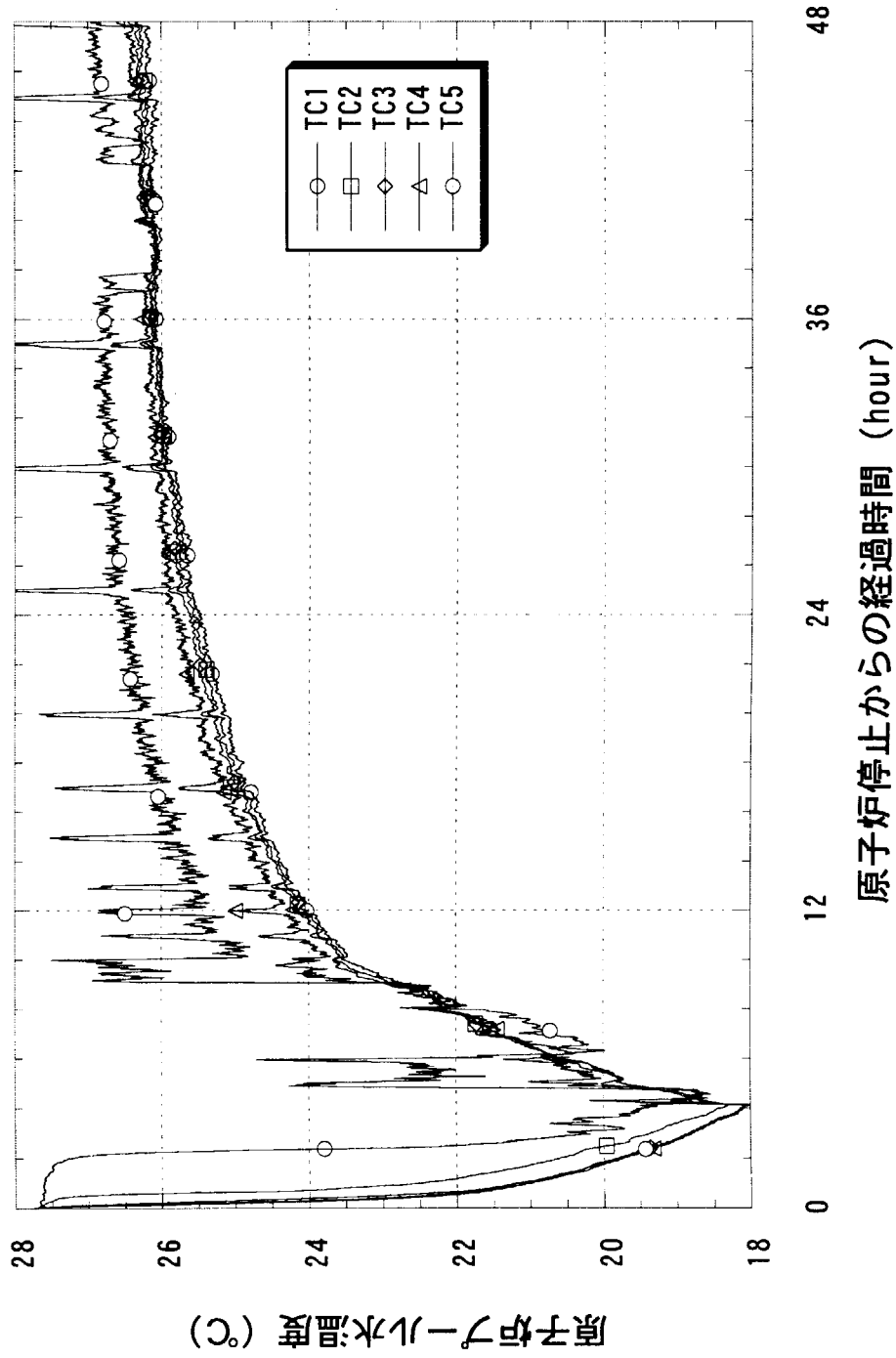


Fig. 16.4 原子炉停止後の原子炉プール水温度変化 (仮設温度計TC1~TC5)

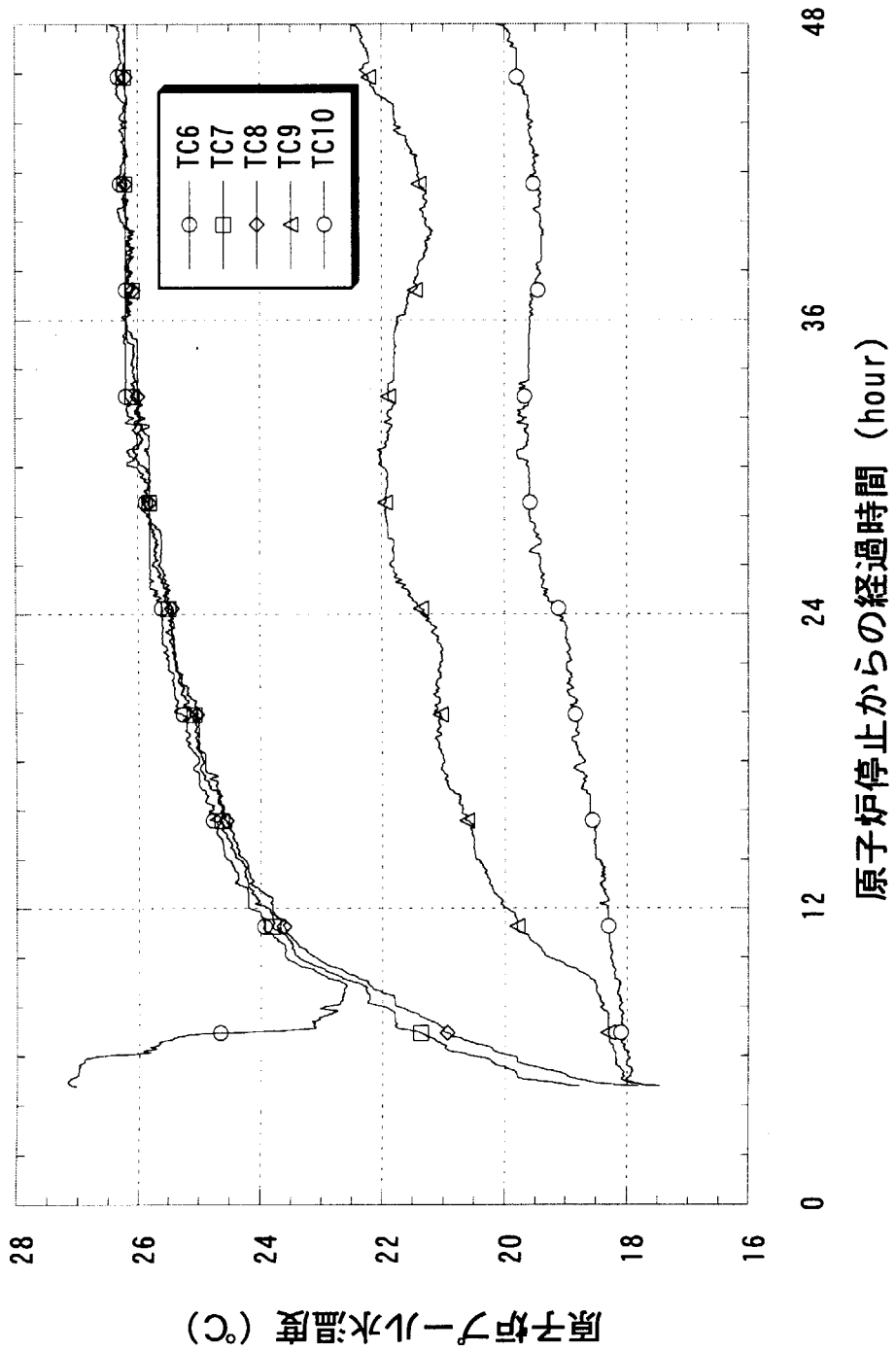


Fig. 16.5 原子炉停止後の原子炉プール水温度変化 (仮設温度計TC6~TC10)

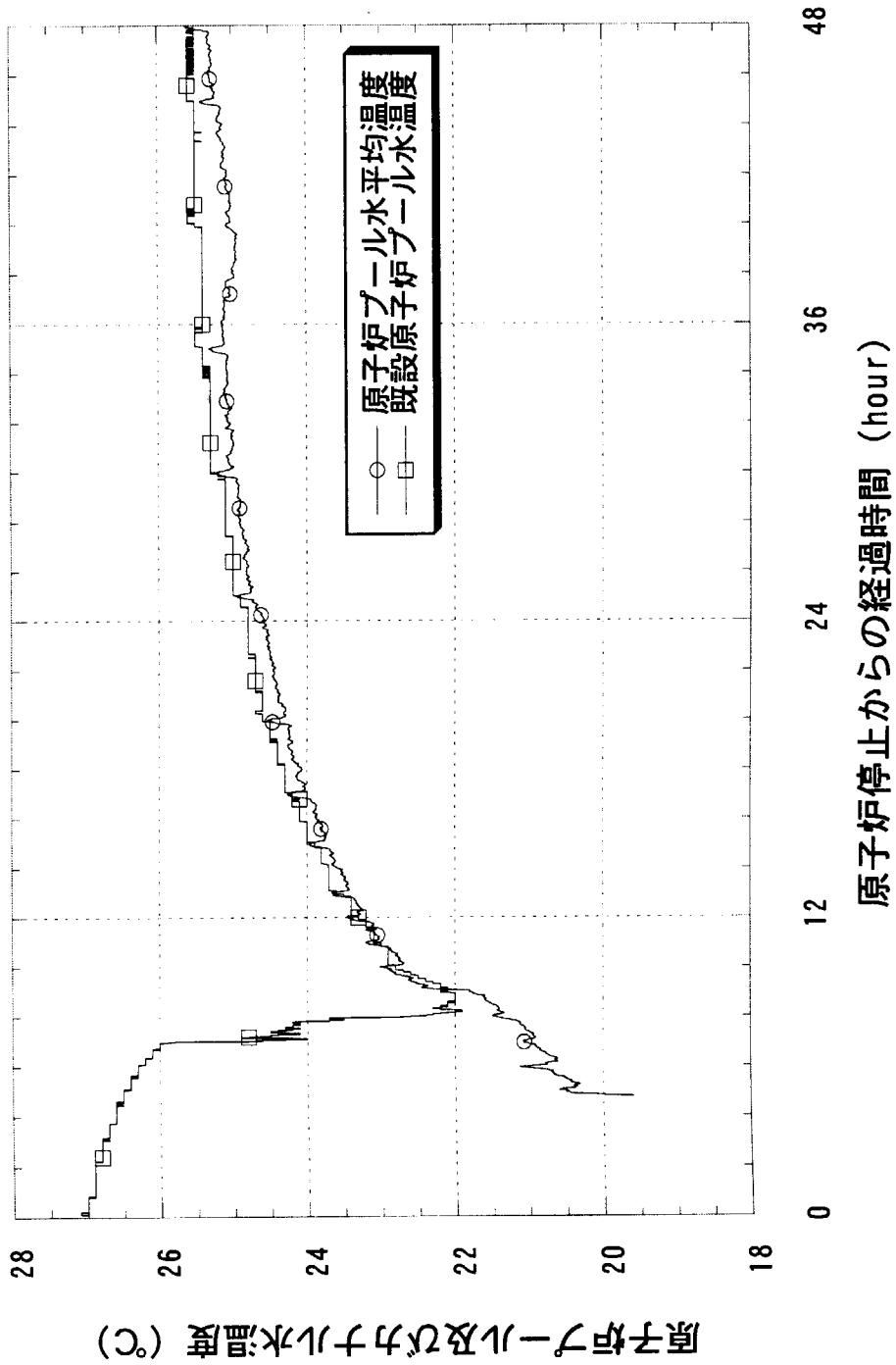


Fig. 16.6 原子炉停止後の原子炉プール水温度変化(既設温度計及び仮設温度計平均値)

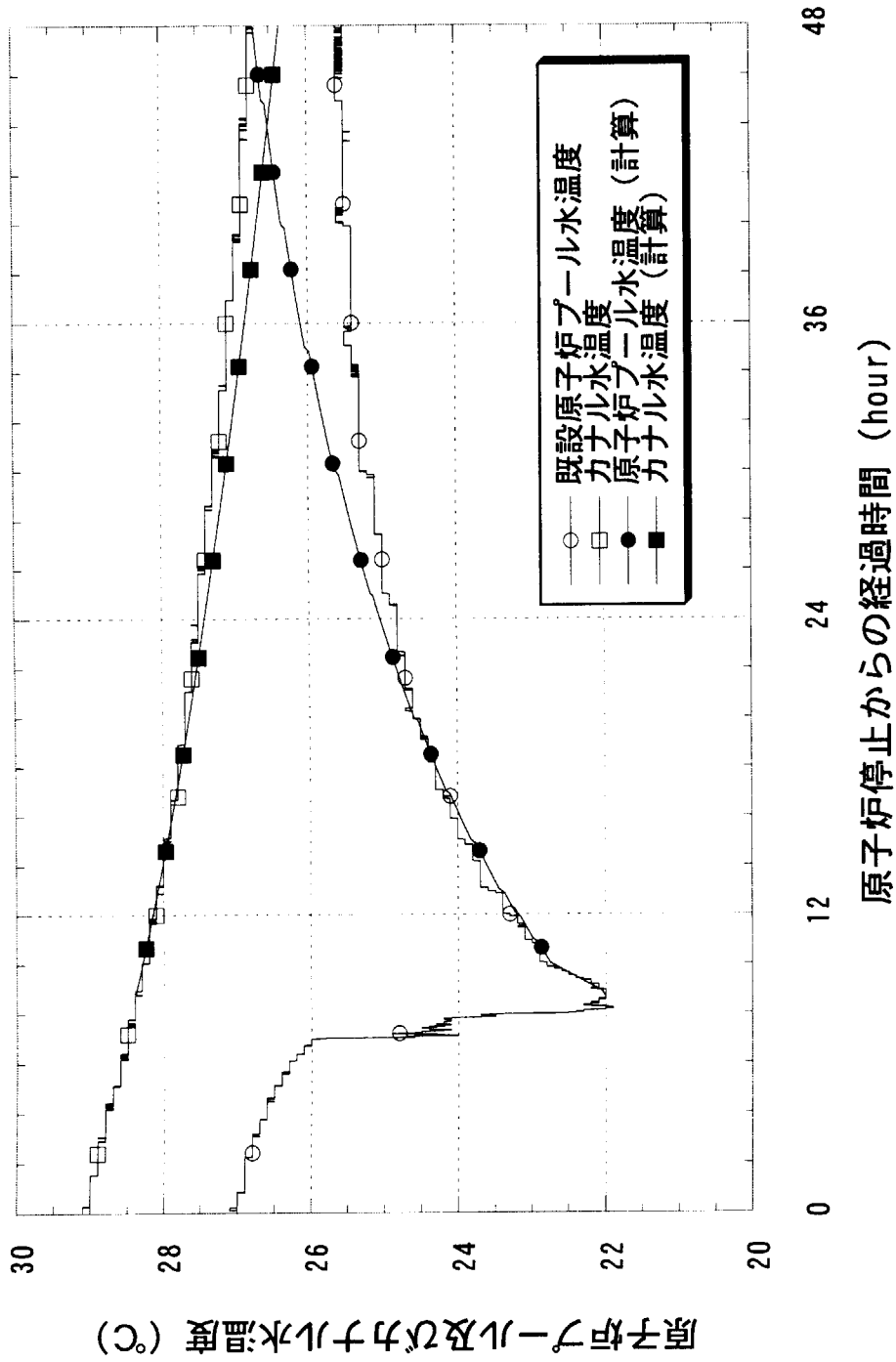


Fig. 16.7 原子炉プール水温度の測定結果と計算結果の比較



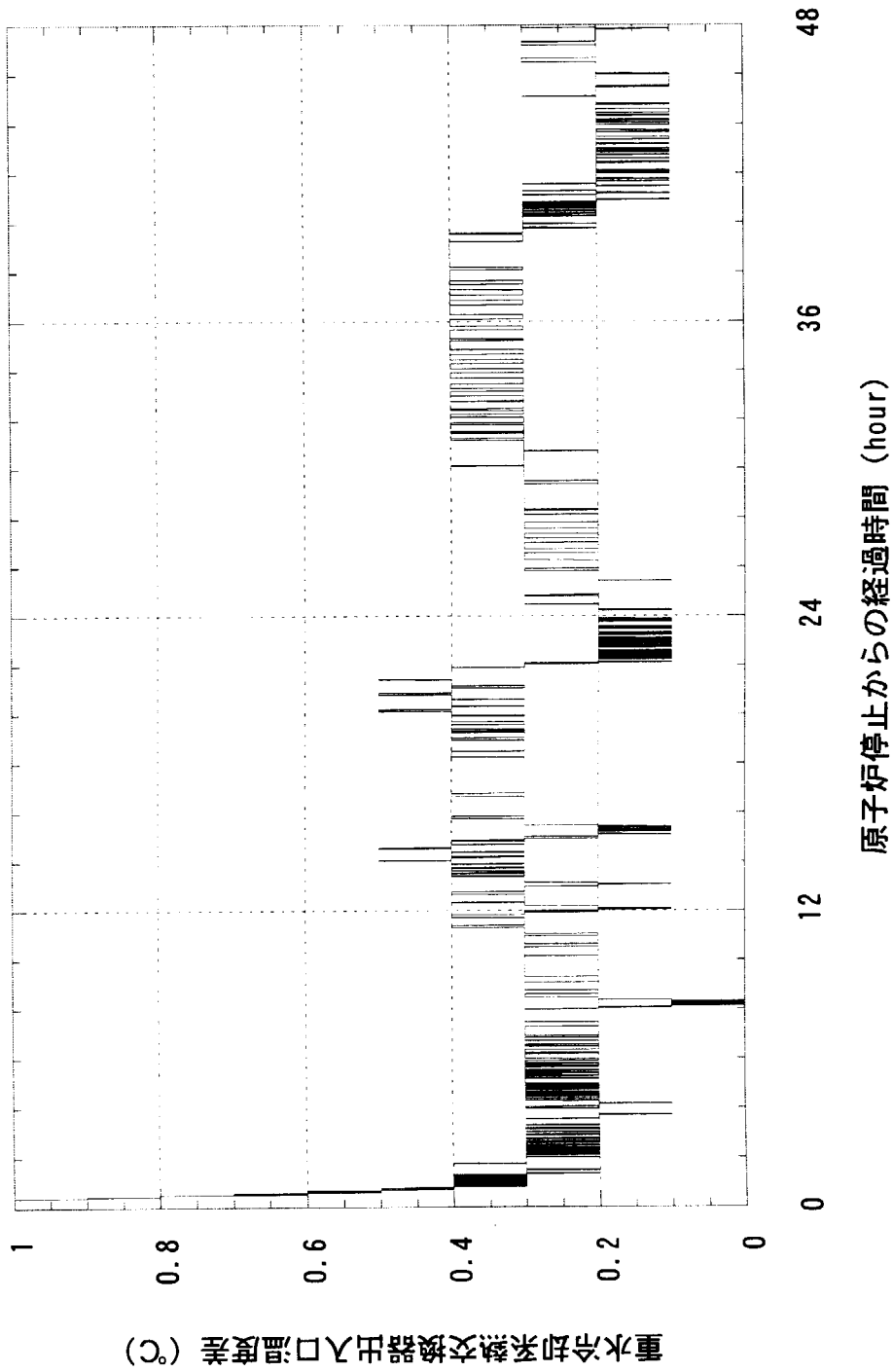


Fig. 16.8 原子炉停止後の重水冷却系熱交換器出入口温度差

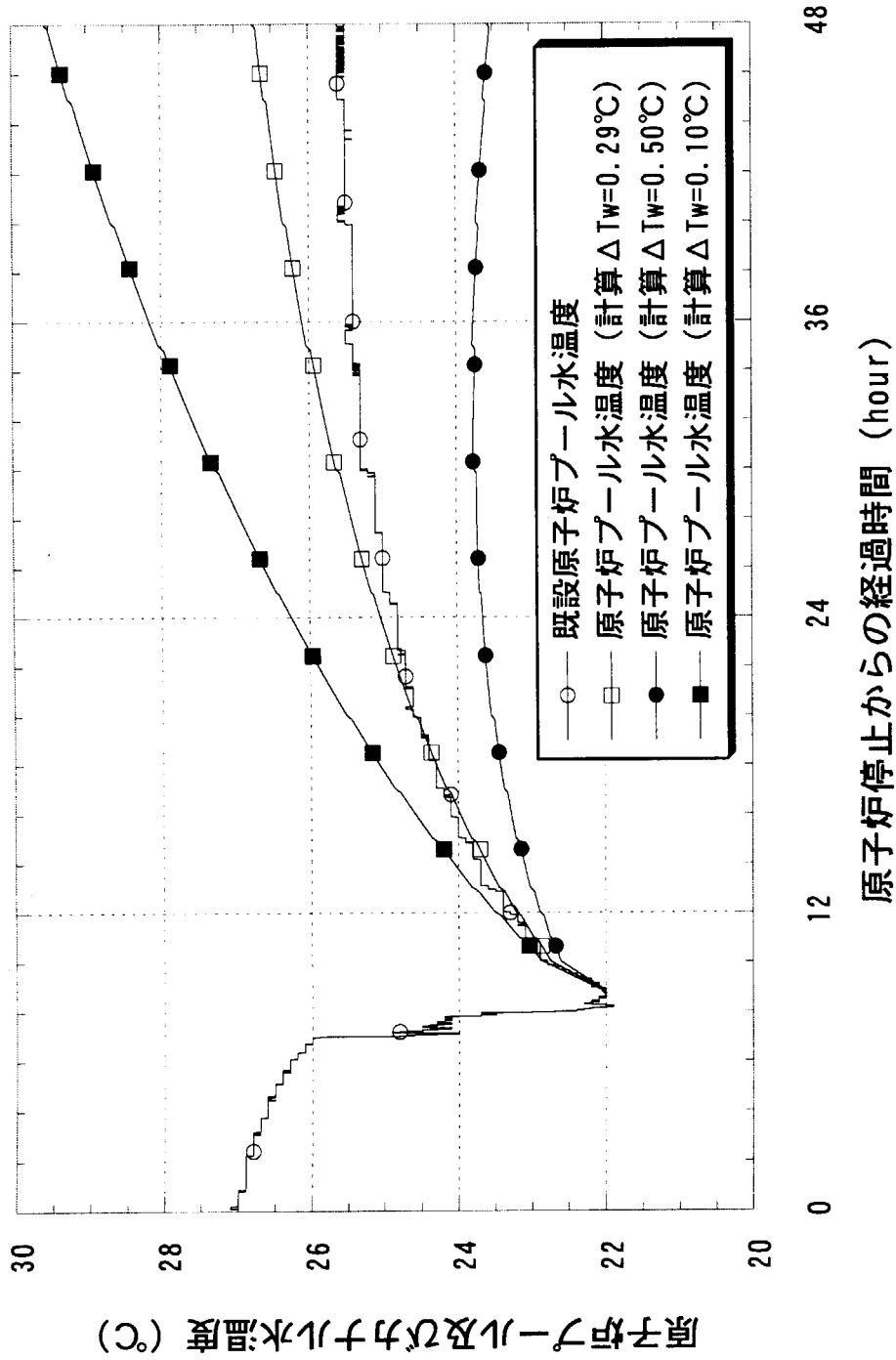


Fig. 16.9 重水冷却系熱交換器出入口温度差による原子炉プール水温度の測定結果の比較

## 17. 結 び

全炉心の燃料をアルミナイド燃料からカドミウマイヤを配置したシリサイド燃料に変更した炉心特性を確認した。

- (1) 初臨界は、事前解析結果に一致したフォロー型燃料要素 6 体と標準型燃料要素 15 体の炉心装荷で、平成 11 年 9 月 17 日（金）14 時 38 分に達成した。
- (2) 核特性の過剰反応度  $14.1\% \Delta k/k$ 、制御棒反応度制御能力  $19.3\% \Delta k/k$ 、制御棒の反応度停止余裕  $5.2\% \Delta k/k$  および制御棒の最大反応度添加率  $4.7E-2\% \Delta k/k/s$  の各測定結果は、各々運転上の制限値  $18.1\% \Delta k/k$  以下、 $19.1\% \Delta k/k$  以上、 $1\% \Delta k/k$  以上および  $7.5E-2\% \Delta k/k/s$  以下を満足するものであった。また、重水ダンプ反応度の測定結果  $1.55\% \Delta k/k$  は、制限値  $1\% \Delta k/k$  以上を満足するものであった。
- (3) 減速材温度係数  $-0.013\% \Delta k/k/^\circ C$  は、アルミナイド燃料炉心と同程度の結果を得た。
- (4) 燃料領域の熱中性子束は、アルミナイド燃料炉心に比しウラン密度が増加したことから約 40%～約 60%低減したが、水力照射設備（HR-1）等重水タンク位置においては同程度の結果を得た。
- (5) 原子炉出力の自動制御特性は、通常運転中に予想される外乱に対し一定出力を保持する定値制御特性及び通常運転の手順で出力を上昇する追値制御特性とも円滑で安定した制御特性である測定結果を得た。
- (6) 初装荷時のキセノン蓄積反応度は、原子炉を停止して 9.25 時間経過後に最大  $8.91\% \Delta k/k$  となり、アルミナイド燃料炉心に比し約 30%低減した結果を得た。

シリサイド燃料炉心の測定結果とアルミナイド燃料初装荷炉心時の測定結果およびシリサイド燃料炉心の事前解析結果と比較した特性試験結果まとめを Table17.1 に示す。

シリサイド燃料炉心は、ウラン密度の増加及びカドミウムマイヤの配置に起因した熱中性子束分布測定結果等の核特性を示したが、アルミナイド燃料の初装荷炉心と同程度の余裕のある運転上の制限値等が確認できた。また、事前解析結果は、約 10%の範囲内で測定結果と一致した。従って、JRR-3M シリサイド燃料炉心の特性試験を実施した結果から、今後の JRR-3M 運転管理に用いる解析手法及び年間の使用済燃料要素数低減計画の妥当性並びに安全かつ安定な原子炉運転達成の確証が得られた。

Table17.1 特性試験結果まとめ

項目	アルサイト' 燃料炉心 (初装荷時)	シサイト' 燃料炉心 (E)	事前解析結果 (C)	C/E
最小臨界炉心時標準型燃料 要素装荷数 [体]	14	15	注1 15	----
過剰反応度 (燃料追加法) [% $\Delta k/k$ ]	15.9	14.1	注1 14.9	1.06
全炉心臨界制御棒位置 [mm]	258	262	注1 240	----
制御棒反応度制御能力 (ワロッド' スタック時) [% $\Delta k/k$ ]	23.4	19.3	注2 18.4	0.95
制御棒の反応度停止余裕 (ワロッド' スタック時) [% $\Delta k/k$ ]	4.1	5.2	注1 4.3	----
制御棒落下法 (炉停止余裕) [% $\Delta k/k$ ]	----	-12.8	注1 -13.3	1.04
制御棒の最大反応度添加率 (R-2) [% $\Delta k/k/s$ ]	5.4E-2	4.7E-2	----	----
減速材温度係数 at30°C [% $\Delta k/k/^\circ C$ ]	-0.010	-0.013	注1 -0.026	2.0
重水ダンプ反応度 [% $\Delta k/k$ ]	-1.37	-1.55	注2 -1.64	1.06
熱中性子束 [ $m^{-2} \cdot s^{-1}$ ] 燃料領域平均	7.4E17	3.5E17	注1 4.5E17	----
照射設備 [ $m^{-2} \cdot s^{-1}$ ] HR-1 (中段)	1.03E18	0.89E18	注1 1.96E18	----
核出力校正 (線形出力計A系指示値/熱 出力計指示値)	0.96 (18.8/19.6)	0.93 (18.0/19.4)	----	----
セ/ソ蓄積反応度 (最大; 停止 後時間) [% $\Delta k/k$ ; h] (飽和値% $\Delta k/k$ )	12.8; 9.7 (飽和値 4.6)	8.91; 9.25 (飽和値 4.1)	注3 7.91; 9.25 (飽和値 3.29)	0.89 ----

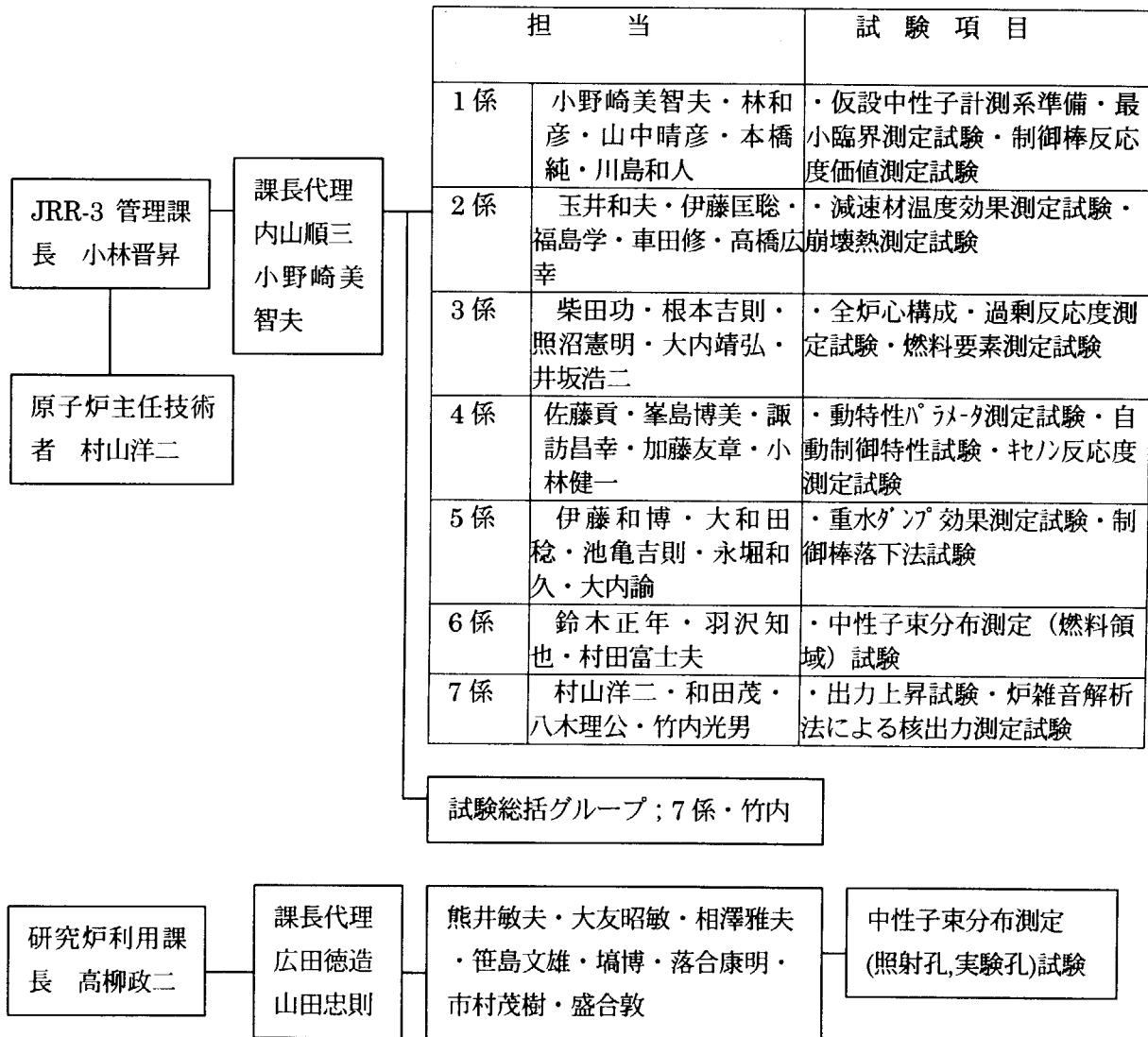
注1: SRAC コード<sup>1),7)</sup>による。

注2: MVP コード<sup>1),3)</sup>による。

注3: Xe,Sm 濃度からの反応度算出式<sup>15)</sup>による。

## あ と が き

JRR-3 シリサイド燃料炉心の特性試験は、R3-11-05 サイクル終了後、平成 11 年 9 月 6 日から平成 11 年 9 月 30 日と平成 11 年 11 月 1 日から平成 11 年 11 月 14 日の間に実施した。本特性試験の実施体制は、以下のとおりである。



研究炉技術管理課；吉島哲夫・菊地博之・広瀬彰・田山政徳・田村健道・小島正男・田中純利

施設放射線管理第 1 課；長谷川圭佑・藪田肇・岩谷征男・宍戸宣仁・白川勝

施設第 1 課；池田三郎・小泉民男・松本雅弘・滝田謙二・和田弘明・砂押和明・三代浩司・菊池治男  
宇野秀一

## 謝 辞

本報をまとめるにあたり、海江田圭右研究炉部長、高橋秀武研究炉部次長兼アイソトープ開発室長、桜井文雄 JRR-4 管理課長に技術的なご指導、ご鞭撻を頂いた。また、エネルギーシステム研究部新型燃料燃焼研究グループ中野佳洋氏に解析のご協力と助言を頂いた。深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 日本原子力研究所：“日本原子力研究所東海研究所原子炉設置変更許可申請書（JRR-3 原子炉施設）平成 10 年 1 月”（1998）.
- (2) 伏見康治他：“実験物理学講座 29 原子炉”，共立出版株式会社（1972）.
- (3) T.Mori, et al : JAERI-Data/Code 94-007, “MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード”（1994）.
- (4) 金子義彦他：JAERI-Research 97-003, “正の大きな反応度測定における修正法の提案”（1997）.
- (5) Yasuo OHSAWA and Kanji KATO : J.Nucl.Sci.and Technol.,8 [3],122~128（1971）.
- (6) Eich,W.J., et al : Nucl.Sci,Eng.,24,272~283（1966）.
- (7) 奥村啓介他：JAERI Data/Code 96-015, “SRAC95;汎用核計算コードシステム”（1996）.
- (8) 日本原子力学会臨界実験専門委員会：“原子炉物理実験”，コロナ社（1964）.
- (9) グレン F. ノル，訳者木村逸郎、阪井英次：“放射線計測ハンドブック（第 2 版）”，日刊工業新聞社（1991）.
- (10) 金子義彦他：日本原子力学会誌，VOL.19, No6, 380~390（1977）.
- (11) 須田信英：“原子炉の動特性と制御”，同文書院（1969）.
- (12) 川口千代二，荒克之：“原子炉の計測”，幸書房（1978）.
- (13) Tsutomu NOMURA : J.Nucl.Sci.and Technol.,3 [1],14~19（1966）.
- (14) 大友昭利他：JAERI M93-154, “JRR-3M 平衡炉心時の垂直照射孔における中性子束及びカドミ比の測定”（1993）.
- (15) 研究炉部 JRR-2 管理課, 研究炉利用課：JAERI-M6943, “JRR-2 改修後の特性測定”（1977）.

## 付録 A 仮設中性子計測系の準備

### 1. 目的

臨界試験時の炉心内中性子を測定し、臨界の接近及び定量を行うために仮設の中性子計測系及び反応度測定システムを準備する。

### 2. 機器構成

仮設中性子計測系は、BF<sub>3</sub>検出器を用いた4チャンネル、CIC検出器を用いた2チャンネルで構成した。

BF<sub>3</sub>検出器の信号は、炉上面に置いたプリアンプを介し、制御室まで信号を伝送した。制御室に配置した計数測定装置で計数率の測定を行った。

CIC検出器の信号は、炉上面に配置した高圧電源及び線形増幅器、対数増幅器で構成する反応度測定用の信号増幅装置を経由して、制御室まで信号を伝送した。信号は、反応度測定システムに接続して、データの収集及び加工ができるようにした。また、BF<sub>3</sub>検出器からの計数率信号、CIC検出器からの電流信号及び反応度測定システムからの反応度信号を記録計に接続し、原子炉操作卓で監視できるようにした。仮設BF<sub>3</sub>計測系の系統図をFig.A.1に仮設CIC計測系の系統図をFig.A.2に示す。

### 3. 検出器の設置

仮設BF<sub>3</sub>-ch1, ch2, ch3, ch4の検出器は、アルミ製小型保護筒に入れて、燃料領域D4、ベリリウム反射体領域A2, G2, A6の炉心位置の各照射孔に挿入し、CIC-ch1, ch2の検出器は、アルミ製小型保護筒に入れて、重水タンク領域SH, DRの各照射孔に挿入した。信号ケーブルは水密性のホースで保護し、炉プール外に取り出した。アルミ製小型保護筒と水密性のホースはシール材で水が入らないようにするとともに、中にシリカゲルを入れた。アルミ製小型保護筒に挿入操作用ローブをBF<sub>3</sub>用は一本ずつ、CIC用は二本ずつ、取り付けた。

なお、今回使用したアルミ製小型保護筒は、アルミナイド燃料炉心特性試験時平成2年に製作されたものであり、各照射孔に全挿入したときに、検出器の位置が炉心の中央と一致するように設計されている。CIC検出器の設置位置については、初め、重水タンクの上面位置に設置したが、重水ダンプ試験直前にアルミ製小型保護筒を全挿入状態の位置に変更した。仮設中性子検出器の配置図をFig.A.3に仮設中性子検出器と照射孔の垂直位置関係図をFig.A.4に示す。

### 4. 計測機器の調整

仮設中性子計測系は、臨界試験開始前にVHTRC施設で入出力特性測定、ディスクリレベル特性測定を行い、測定装置の特性を確認した後、本特性試験に使用した。

#### (1) 絶縁抵抗測定

同軸ケーブル、コネクタ及び検出器の絶縁抵抗を超絶縁計（レンジ1000V）を使用して測定した結果、 $10^{10}\Omega$ 以上の値を示したので絶縁抵抗としては良好であった。絶縁抵抗測定結果をTable A.1、Table A.2に示す。

## (2) 静電容量測定

同軸ケーブル、コネクタ及び検出器の静電容量を静電容量計を使用して測定した結果、ケーブル1m当たりの静電容量(MIL規格)にケーブルの長さをかけ、検出器、コネクタの静電容量を足した値と同じぐらいの値を示したので静電容量としては良好であった。静電容量測定結果をTable A.1、Table A.2に示す。

## (3) 入出力特性測定

仮設BF<sub>3</sub>計測系について、検出器信号ラインに模擬信号としてパルス発生器を接続し、その模擬信号をもとにプリアンプ、リニアアンプ、ディスクリアンプの入出力波形が規定内であることをオシロスコープで確認した。

## (4) ディスクリレベル特性測定

仮設BF<sub>3</sub>計測系について、ディスクリ電圧を変化させてそのときの計数率を測定し特性曲線を作成したが、 $\gamma$ 線の影響が大きかったため有意なディスクリ特性を得ることができなかった。ディスクリ電圧は、VHTRC施設で測定した $\gamma$ 線の影響が少ないディスクリ特性を用いて設定した。標準型燃料要素未装荷、中性子源挿入及びフォロア型燃料要素付制御棒を全引抜き状態で、計数率が10CPSぐらいを示すディスクリ電圧値に設定した。仮設中性子計測系据付調整記録表をTable A.3に示す。

## (5) ノイズの確認

検出器を炉心に挿入した状態でオシロスコープにより、各箇所ノイズを確認した。ノイズを減らすために、測定装置ラックにアース線を接続した。それ以外のノイズの入りやすいケーブル部については、アルミ箔を巻いてシールドした。

## 5. 使用目的

各試験に使用した中性子計測系は次表の通りである。

名 称	使 用 目 的
仮設BF <sub>3</sub> ch1,ch2,ch3,ch4	臨界近接時1/M測定 原子炉起動時の監視
仮設CIC ch1,ch2	臨界の確認 低出力時の監視 燃料追加法、制御棒落下法、炉雑音解析法 制御棒校正、重水ダンプ効果の測定
起動系A, B	原子炉起動
線形出力系A, B	原子炉出力の監視、制御
対数出力炉周期系A, B	安全保護系、制御棒落下法
安全系A, B	安全保護系



Table A.1 炉頂-制御室間ケーブルの絶縁抵抗、静電容量の測定結果  
 黒ケーブル8本: RG-59A/U 耐電圧: 1000V 測定日平成11年8月18日

	BF <sub>3</sub> HV①	BF <sub>3</sub> HV②	BF <sub>3</sub> HV③	BF <sub>3</sub> HV④	CICHV①	CICHV②	BF3①	BF3②
黒ケーブル								
制御室側コネクタ	SHV	SHV	SHV	SHV	SHV	SHV	BNC	BNC
絶縁抵抗Ω	2.5×10 <sup>10</sup>	1.2×10 <sup>10</sup>	2.6×10 <sup>10</sup>	3.5×10 <sup>10</sup>	2.6×10 <sup>10</sup>	3.0×10 <sup>10</sup>	1.6×10 <sup>10</sup>	4.5×10 <sup>10</sup>
静電容量nF	7.3	7.3	7.4	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2
炉頂側コネクタ	SHV	SHV	SHV	SHV	BNC	BNC	BNC	BNC

青ケーブル4本: RG-58CLN 耐電圧: 1000V

	CIC①	CIC②	BF3③	BF3④
青ケーブル				
制御室側コネクタ	MHV	MHV	BNC	BNC
絶縁抵抗Ω	2.6×10 <sup>10</sup>	5.0×10 <sup>10</sup>	1.8×10 <sup>10</sup>	8.0×10 <sup>9</sup>
静電容量nF	11.0	11.0	11.0	9.8
炉頂側コネクタ	BNC	BNC	BNC	BNC

Table A.2 BF<sub>3</sub>, CIC検出器間ケーブルの絶縁抵抗、静電容量測定結果

絶縁抵抗測定日 平成11年8月19日(木)

静電容量測定日 平成11年8月31日(火)

ケーブルNo.	BF <sub>3</sub> ①	BF <sub>3</sub> ②	BF <sub>3</sub> ③	BF <sub>3</sub> ④
コネクタ (AMP側、 検出器側)	SHV、HN	SHV、HN	SHV、HN	SHV、HN
絶縁抵抗 (Ω)	$1.2 \times 10^{10}$	$1.4 \times 10^{10}$	$1.3 \times 10^{10}$	$3.0 \times 10^{10}$
静電容量 (nF)	1.47	1.42	1.46	1.42

絶縁抵抗測定日 平成11年8月19日(木)

静電容量測定日 平成11年8月31日(火)

ケーブル No.	CIC① 信号	CIC① HV+	CIC① HV-	CIC② 信号	CIC② HV+	CIC② HV-
コネクタ (AMP側、検 出器側)	BNC、 HN	SHV、 HN	SHV、 HN	BNC、 HN	SHV、 HN	SHV、 HN
絶縁抵抗 (Ω)	$1.35 \times 10^{11}$	$1.5 \times 10^{10}$	$1.1 \times 10^{10}$	$7.0 \times 10^{11}$	$2.0 \times 10^{10}$	$1.7 \times 10^{10}$
静電容量 (nF)	1.55	0.93	0.92	1.54	0.92	0.90

耐電圧：1000V

Table A.3 仮設中性子計測系据付調整記録

	BF3 CH. 1	BF3 CH. 2	BF3 CH. 3	BF3 CH. 4	CIC CH. 1	CIC CH. 2	確認月日
検出器番号	1D202	8H203	8H201	8H202	964840	964839	9月10日
炉心据付位置	A6	A2	G2	D4	SH	DR	9月10日
高圧電源設定 値 (V)	1700	1700	1700	1700	正 500 負 -20	正 500 負 -20	9月11日
リニアアンプ 設定値	0.36 7.0	0.36 7.0	0.36 7.0	0.36 7.0	-	-	9月11日
ディスクリ設 定値 (mV)	1.1	1.86	1.65	2.7	-	-	9月13日
アルミ保護筒 据付高さ	全挿入	全挿入	全挿入	全挿入	プラグ有り(1m) 全挿入	プラグ有り(1m) 全挿入	9月10日 10月29日
制御棒全引抜 各指示値	12.58cps	6.99cps	12.84cps	46.27cps	-0.065×10 <sup>-9</sup> A	-0.009×10 <sup>-9</sup> A	9月13日

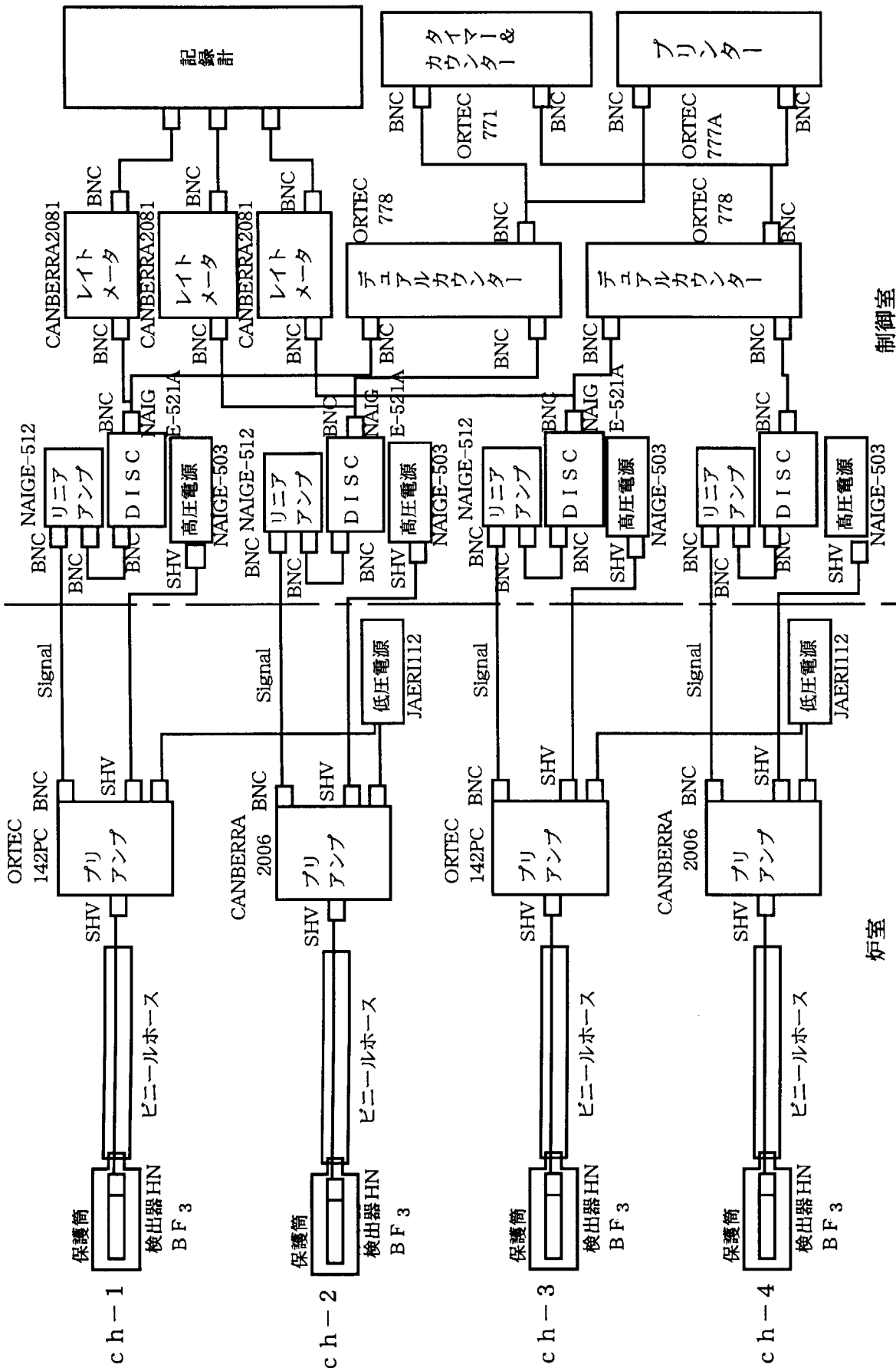


Fig.A.1 仮設BF<sub>3</sub>計測系の系統図

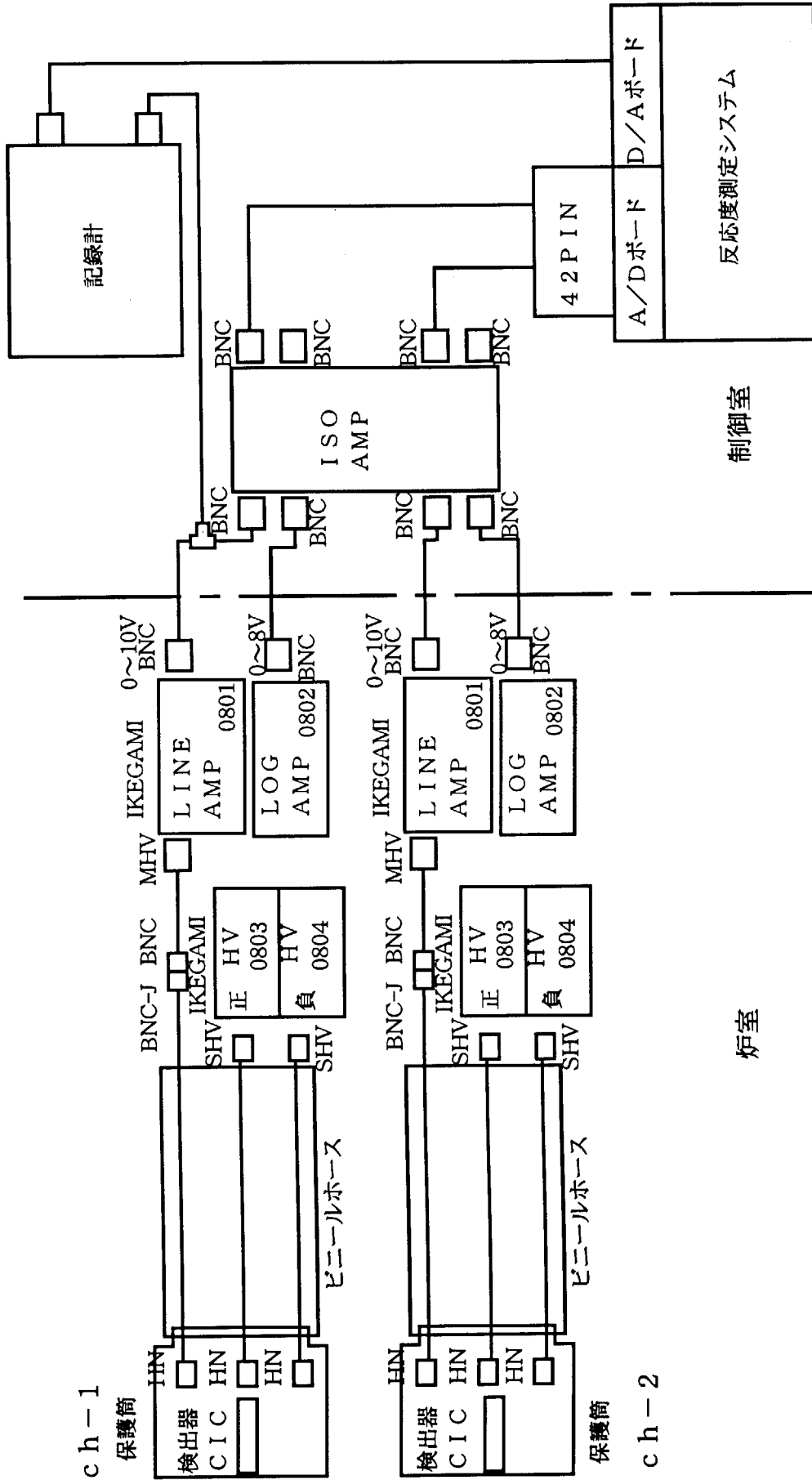
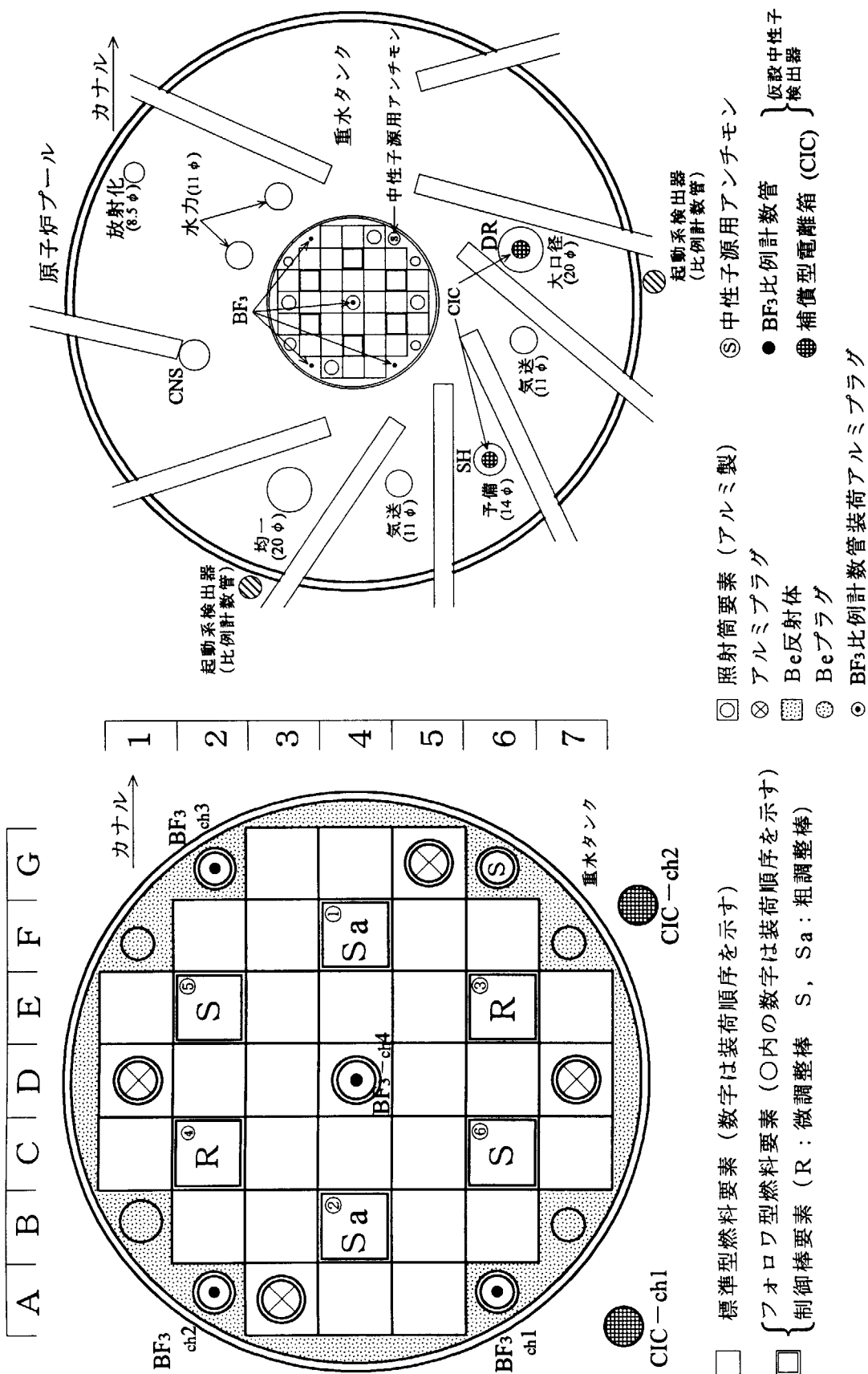


Fig.A.2 仮設C I C計測系の系統図



- 標準型燃料要素 (数字は装荷順序を示す)
- フォロワ型燃料要素 (○内の数字は装荷順序を示す)
- { 制御棒要素 (R: 微調整棒, S: 粗調整棒)
- 照射筒要素 (アルミ製)
- ⊗ アルミプラグ
- ▨ Be反射体
- ⊙ Beプラグ
- ⊙ BF<sub>3</sub>比例計数管装荷アルミプラグ
- ⊙ 起動系検出器 (比例計数管)
- ⊙ 均一 (20φ)
- ⊙ 気送 (11φ)
- ⊙ 予備 (14φ)
- ⊙ SH
- ⊙ 気送 (11φ)
- ⊙ DR
- ⊙ 大口径 (20φ)
- ⊙ 補償型電離箱 (CIC)
- ⊙ BF<sub>3</sub>比例計数管
- ⊙ 仮設中性子検出器
- ⊙ 中性子源用アンチモン
- ⊙ 起動系検出器 (比例計数管)

Fig. A. 3 中性子源、仮設中性子検出器の配置図

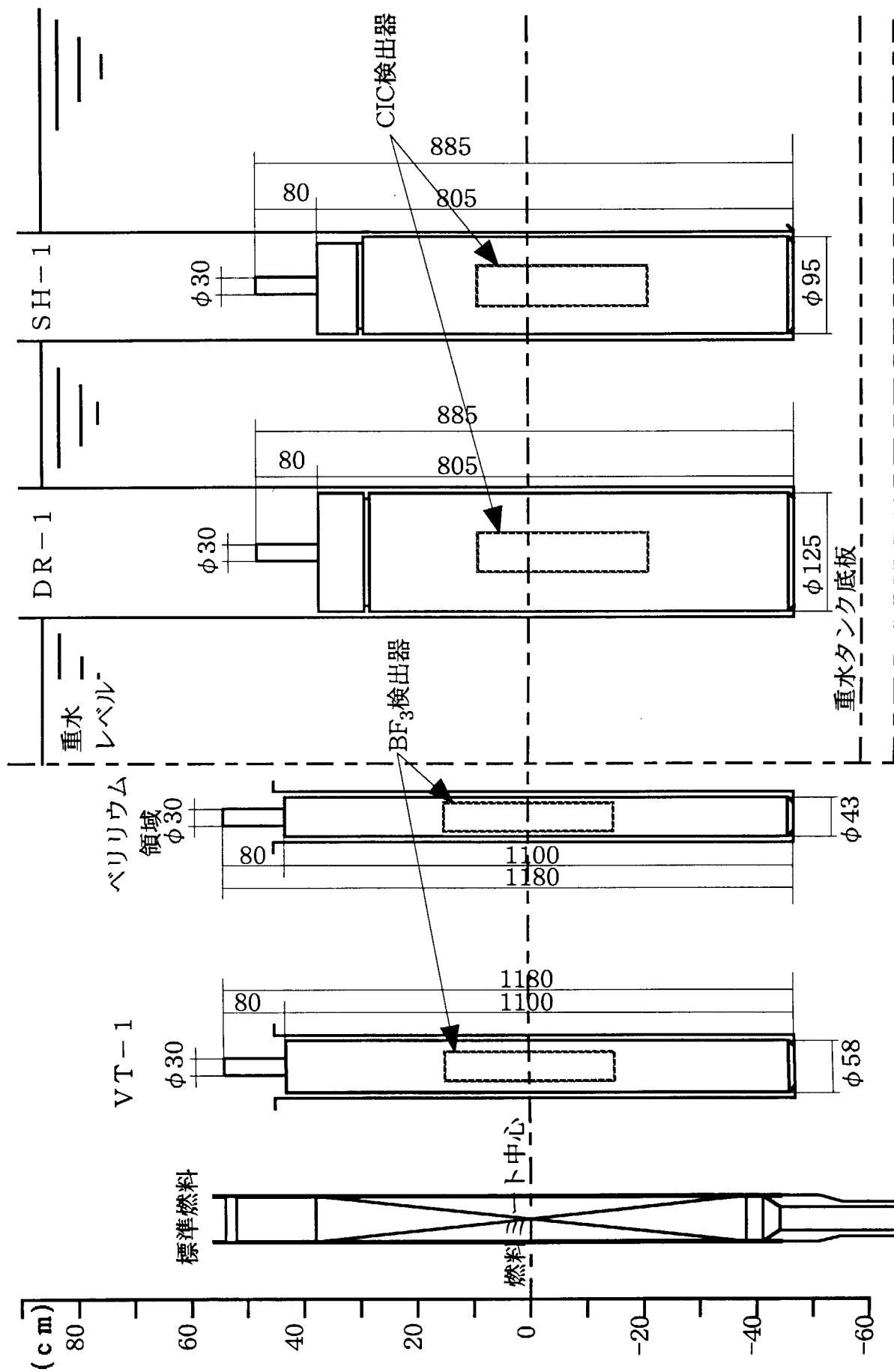


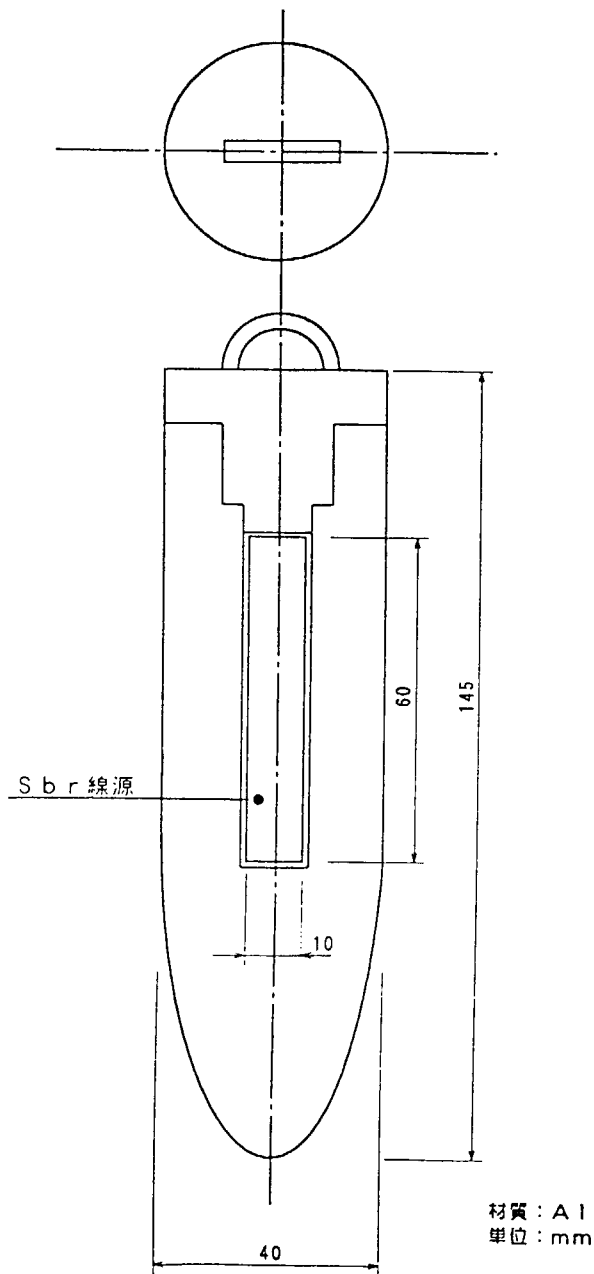
Fig.A.4 仮設中性子検出器と照射孔の垂直位置関係

付録 B

中性子源 (S b - B e)

原子炉起動用の中性子は、 $^{124}\text{Sb}$ の $\gamma$ 線源を炉心のベリリウム反射体内に挿入し、原子炉の起動に必要な中性子を発生させる。 $^{124}\text{Sb}$ 線源及びベリリウム反射体で発生する中性子数ならびに $^{124}\text{Sb}$ 線源形状を下記に示す。

$^{124}\text{Sb}$ 線源 : 数量 350 GBq、 個数 1個  
 中性子発生率 : 約  $2 \times 10^7$  n/s



$^{124}\text{Sb}$ 線源



## 付録C JRR-3 シリサイド燃料炉心の特性試験計画の概要

### 1. 目的

JRR-3 は、平成 11 年 9 月に、アルミナイド燃料からカドミウム-ワイヤの可燃性吸収体を配置したシリサイド燃料に全炉心を変更する計画である。本特性試験は、平成 2 年の特性試験結果と大きな相違がなく、原子炉の安全な運転の確保ができることを確認する。

### 2. 試験工程

特性試験は、平成 11 年 9 月 6 日（月）～平成 11 年 11 月 14 日（日）の期間に実施する。各試験の所要日数は、燃料装荷に約 8 日、制御棒反応度値測定に約 4 日、中性子束分布測定に約 4 日、減速材温度効果測定に約 2 日、自動制御特性測定に約 2 日、燃料要素反応度測定に約 3 日、飽和値測定に約 5 日、キセノン効果測定に約 3 日等である。また、使用前検査は 4 回を予定する。

### 3. 試験体制

特性試験は、試験の総括を行う試験総括グループを編成し、運転実施計画表に基づいて実施する。試験総括グループは、試験内容の周知徹底を図り、試験の進捗、結果等を協議し確実に安全な試験の実施を総括する。原子炉の運転、測定等は、各係毎に分担して試験要領書に従って行う。また、関係各課室の協力を得るものとする。

### 4. 試験概要

逆増倍係数の測定による臨界近接、燃料追加法による過剰反応度の測定を行い全炉心を構成する。最小臨界、過剰反応度、反応度制御能力、重水ダンプ反応度、飽和値等の性能に係る使用前検査を受検するとともに、中性子束分布、減速材温度特性、キセノン蓄積特性、自動制御系の外乱応答特性等について確認する。各試験項目に対する概要を第 1 表に示す。

中性子源領域での測定等に予備中性子計測系（BF<sub>3</sub>系 4 チャンネル、CIC 系 2 チャンネル）及びアンチモンを用いた中性子線源 1 個を使用する。

### 5. 試験要領

試験要領は、目的、方法、判定基準、異常時の措置等について、平成 2 年に実施した特性試験要領書を基本に手順、記録紙等を具体化して作成した。

第1表 JRR-3 シリサイド燃料炉心の特性試験概要

番号	試験項目	目的	判定基準	概要	備考 [使用前検査]
1	模擬燃料要素装荷、フオロワ型燃料要素交換等の準備作業	模擬燃料要素装荷、フオロワ型燃料要素交換を行い、予備中性子計測系の動作を確認する。	全制御棒下限位置で3cps以上の計数であること。	26体の使用済燃料を模擬燃料要素に交換する。使用済フオロワ型燃料要素6体を未使用フオロワ型燃料要素に交換する。中性子源及び予備中性子検出器は、予備中性子計測系の動作を確認しながら所定の軸方向位置に設置する。また、全制御棒の下限位置及び上限位置において逆増倍係数の基準計数を測定する。	
2	最小臨界測定試験	最小の標準型燃料要素装荷体数を確認する。	臨界であること。	炉心燃料装荷体数が4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13体の各ステップで逆増倍係数(1/M)を測定して最小臨界到達の装荷体数を予測する。臨界は、予備CIC系の信号を監視しながらR-1制御棒を操作し、中性子源を炉心外に取り出した状態で確認する。	[最小臨界測定検査]
3	全炉心構成・過剰反応度測定試験	全ての燃料要素を装荷した状態における過剰反応度が制限値を満足することを確認する。	全燃料要素が所定の配置で装荷されていること。過剰反応度が炉心温度20℃において0.181Δk/k以下であること。	最小臨界炉心構成後、最小臨界炉心の過剰反応度は、炉心に挿入されている制御棒反応度を逆特性法(IK法)により測定して求める。1燃料要素装荷毎の追加反応度をIK法により測定し、過剰反応度が制限値を越えないことを確認しながら全炉心を構成する。全炉心の過剰反応度は、最小臨界炉心の過剰反応度に追加反応度を積算する燃料追加法により算出する。	[燃料装荷検査] [過剰反応度検査]
4	中性子束分布測定(燃料領域)試験	燃料領域の熱中性子束分布を測定する。	—	燃料板間に配置した金箔(約25枚)を原子炉出力約20Wで約2時間照射し、γ線スペクトル測定(炉利用施設所掌装置)を行う。燃料板間に配置したカドミウム板被覆の金箔(約25枚)を原子炉出力約20Wで約2時間照射し、カドミウム比を求めると同様の測定を行う。測定結果を用いて熱中性子束分布を算出する。	
5	制御棒反応度値測定試験	制御棒の反応度制御能力(最大反応度を有する制御棒1本が未挿入時)、原子炉停止余裕(最大反応度を有する制御棒1本が全引き抜き時)及び最大反応度追加率を測定し、基準値を満足することを確認する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>制御棒の反応度制御能力が0.191 Δk/k以上</li> <li>原子炉停止余裕が炉心温度20℃において0.01Δk/k以上</li> <li>最大反応度追加率が<math>7.5 \times 10^{-4} \Delta k/k/s</math>以下であること。</li> </ul>	原子炉出力10W以下で各制御棒の全ストロークについて、反応度変換率曲線、反応度値曲線をIK法により測定し求める。制御棒の反応度制御能力は、各制御棒の反応度値を合計し、原子炉停止余裕は制御棒の反応度制御能力から過剰反応度を減算することにより算出する。最大反応度追加率は、それぞれの制御棒の最大駆動速度と最大反応度変換率からそれぞれの制御棒の最大反応度追加率を求め、制御棒の引き抜き操作可能な最大引き抜き本数における最大反応度追加率を算出する。	[反応度制御能力検査] [最大反応度追加率検査]
6	重水ダンブ効果測定試験	重水ダンブ効果を測定し、重水ダンブ系の反応度制御能力が基準値を満足することを確認する。	炉心温度20℃において重水ダンブ系の反応度制御能力が0.01Δk/k以上であること。	原子炉出力10W以下の臨界状態で重水ダンブ井を動作(重水沿流タンク水位高、重水流置低、重水ダンブ井内の各原子炉スクラム信号を模擬電圧信号の入力によりバイパスする。)させ、IK法により反応度を測定する。また、再臨界の制御棒操作(ワットタンク)を行い制御棒反応度値表を用いた反応度値も算出する。	[重水ダンブ井の反応度制御能力検査]

番号	試験項目	目的	判定基準	概要	備考 [使用前検査]
7	減速材温度効果測定試験	減速材温度係数を測定し、負であることを確認する。	減速材温度係数が負であること。	1次冷却設備のポンプジュール熱により加熱し、約20℃～約40℃に減速材温度を変化させる。この期間において、原子炉出力約50Wで自動制御運転のR-1制御棒の位置変化から制御棒反応度係数値表を用いて単位温度当たりの反応度を算出する。	
8	燃料要素反応度測定試験	燃料要素の等価反応度を測定する。	—	26体の標準型燃料要素を1体毎に炉心装荷有無の状態で、原子炉出力約10W以下、制御棒フラットパターンでの臨界制御棒位置とR-1または、R-2の補償制御棒位置との差から制御棒反応度係数値表を用いて各燃料要素反応度を算出する。	
9	制御棒落下法試験	制御棒落下法による炉停止余裕を測定する。	—	原子炉臨界状態から手動スクラム操作により制御棒を急速に炉心に挿入し、制御棒により炉心に投入される負の反応度を、IK法を用いて測定する。	
10	動特性パラメータ測定試験	炉雑音解析法によるβ <sub>eff</sub> 及び核出力を測定する。	—	原子炉出力約1W、約10W、約100Wにおける約40分間のCIC検出器信号を用いて、2検出器法による炉雑音解析によりβ <sub>eff</sub> 、核出力を算出する。	
11	自動制御特性測定試験	反応度制御系の定置制御時における、所定の外乱に対する応答の安定性を確認する。追従制御時の応答の安定性を確認する。	安定な制御応答であること。	原子炉出力約20kWの制御棒自動投入状態において、S-1制御棒の引き抜き、挿入操作を行う反応度外乱及び水力照射設備による反応度外乱を与えて線形出力計指示等を測定する。飽和値測定試験時の出力上昇操作（追従制御時）に併せて線形出力計指示等を測定する。	
12	中性子束分布測定（照射孔）試験	各照射孔の中性子束分布を測定し、照射利用の指標に寄与する。	—	SIHR孔等の各照射孔に金箔を配置し、原子炉出力約10kW、約2時間間の照射を行い、絶対測定により中性子束分布を算出する。	
13	キセノン反応度測定試験	高出力運転時の毒物効果を測定し原子炉の運転管理に供する。	—	原子炉出力約20MWで約5日間運転し、制御棒位置の変化から平衡状態のキセノン反応度を算出する。原子炉出力約2kW（制御棒位置等測定時は約50kWまたは約80kW）にて約4時間計測し手動リバー스로原子炉を停止する。自然循環運転モードにて原子炉を再起動し、原子炉出力約2kWで仮設プールの温度計を監視しながら約3日間運転し、適時約50kWまたは約80kWに出力上昇して制御棒の位置等を測定して最大キセノン反応度、到達時間を算出する。	
14	飽和値確認試験	定格運転時の平衡状態を測定し基準値を満足していることを確認する。	1次冷却材炉心出口温度の飽和値が42℃以下。	通常運転の起動ステップで定格出力運転を約5日間行い、1次冷却材温度の飽和値を測定する。	[冷却材飽和値確認検査]
15	FP漏洩測定試験	定格出力運転時のFP漏洩を測定し、燃料の健全性を確認する。	運転中性子測定系指示がバックグラウンドの2倍以下。	通常運転の起動ステップで定格出力運転を約5日間行い、FPD選発中性子測定系指示値を測定する。	[FP漏えい検査]
16	崩壊熱測定試験	原子炉停止後の自然循環冷却運転が60時間以上可能であることを確認する。	—	原子炉手動リバー스로停止後、仮設温度計による原子炉プール水の温度分布変化を約3日間測定する。予め設定した相関式と照合し、自然循環冷却による崩壊熱除去能力を評価する。キセノン反応度測定試験時に併せて行う。	

## 付録 D 逆動特性法 (IK法) の測定原理

## 1. 概要

中性子吸収置換法による反応度の測定は、正の炉周期法 (P.P法) による制御棒反応度値測定、制御棒落下法の積分計数法による原子炉停止余裕測定等に用いている。JRR-3M の制御棒反応度値測定は、P.P法に比し約 1/5 に測定時間が短縮できる逆動特性法 (IK法) の測定手法を用いて平成 2 年より実施している。また、平成 2 年の特性試験においては、重水ダンプ操作時の重水タンクの水位低下に伴う反応度測定を IK法により実施している。以下に JRR-3M シリサイド燃料炉心の特性試験用に準備した IK法の測定原理について示す。

## 2. 測定原理

## (1) 原理

原子炉出力は、核分裂反応を制御棒等により制御することで調整される。核分裂反応は、増倍率  $k(t)$  で表わされ反応度  $\rho(t) = (k(t) - 1) / k(t)$  の関係にある。中性子数  $n$  と反応度  $\rho$  の関係は、時間的に空間依存のない単純化した一群拡散モデルから 1 点炉動特性方程式が得られる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \sum \lambda_i C_i + S \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

$n$  : 中性子数

$\rho$  : 反応度

$\Lambda$  : 平均中性子世代時間

$\beta$  : 実効遅発中性子割合

$C_i$  :  $i$  群の遅発中性子先行核数

$\lambda_i$  :  $i$  群の遅発中性子先行核崩壊定数

$\beta_i$  :  $i$  群の遅発中性子割合

$S$  : 中性子源強度

(1)式、(2)式を変形、積分することにより、反応度を求める次式 (逆動特性方程式) を得る。

$$\rho = \beta + \frac{\Lambda}{n} \frac{dn}{dt} - \frac{\Lambda}{n} \sum \lambda_i C_i - \frac{S\Lambda}{n} \quad (3)$$

$$C_i = C_{i(0)} e^{-\lambda_i t} + \frac{\beta_i}{\Lambda} \int_0^t n(\tau) e^{-\lambda_i (t-\tau)} d\tau \quad (4)$$

$$C_{i(0)} = \frac{1}{\lambda_i \Lambda} \beta_i n_0 \quad (5)$$

時刻  $t_j$  の時の  $n$  の値を  $n_j$ 、サンプリング周期  $\Delta t$  を  $(t_j - t_{j-1})$  とすると

$$\mu_j = \frac{dn/dt}{n} = \frac{\ln(n_j/n_{j-1})}{\Delta t} \quad (6)$$

$$A_{i,j} = \int_0^{\Delta t} n(\tau) e^{-\lambda_i(t-\tau)} d\tau$$

$$= A_{i,j-1} e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{1}{\mu_j + \lambda_i} (n_j - n_{j-1} e^{\lambda_i \Delta t}) \quad (7)$$

として反応度  $\rho_j$  は、次式で求められる。

$$\rho_j = \beta + \Lambda \mu_j - \frac{1}{n_j} \sum \beta_i (n_0 e^{-\lambda_i t} + \lambda_i A_{i,j}) - \frac{S \Lambda}{n_j} \quad (8)$$

また、中性子源強度  $S$  を考慮しない反応度  $\rho'$  は、

$$\rho' = \beta + \Lambda \mu_j - \frac{1}{n_j} \sum \beta_i (n_0 e^{-\lambda_i t} + \lambda_i A_{i,j}) \quad (9)$$

である。

従って、真の反応度  $\rho$  は、次式で表す。

$$\rho = \rho' - \frac{S \Lambda}{n} \quad (10)$$

即ち、臨界状態を初期条件として中性子数  $n$  の時間変化を測定することにより、投入反応度  $\rho$  (真の反応度) を得る。

## (2) 投入反応度が一定で臨界近傍の場合

中性子源の影響が無視できる原子炉出力 (中性子源強度  $S \leq$  中性子数  $n$ ) で行う制御棒反応度価値測定等は、(9)式の反応度  $\rho'$  の実時間測定により行う。また、中性子源の影響を考慮する場合は、あらかじめ次項(3)の手法により小さな負の反応度を投入して中性子源強度  $S$  を求め、(10)式の反応度  $\rho$  の実時間測定により行う。

## (3) 臨界状態から投入反応度が一定で中性子源の影響を受ける場合

中性子源が影響する大きな負の反応度測定等の測定は、既知の測定データの統計処理を行い投入反応度を求める。未知数である投入反応度  $\rho$  と中性子源強度  $S$  を一定として、既知である(9)式の反応度  $\rho'$  の時系列データと観測値である中性子数  $n$  の時系列データを用いた(10)式を単回帰モデル

( $Y=aX+b$ )により次に示す統計処理を行う。  $S=a$ 、 $\rho = b$ 、 $\Lambda/n=X$ 、 $\rho' = Y$  及び指定の処理時間範囲を  $T$  とするデータ変換を行う。

中性子源強度  $S$  は、

$$a = \frac{T \cdot \sum X \cdot Y - \sum X \cdot \sum Y}{T \cdot \sum X \cdot X - \sum X \cdot \sum X} \quad (11)$$

真の反応度  $\rho$  は、

$$b = \frac{\sum Y - a \cdot \sum X}{T} \quad (12)$$

である。既知である  $X$ 、 $Y$  から回帰係数  $a$ 、 $b$  を求め中性子源強度  $S$  を算出する。即ち、算出した中性子源強度  $S$  を用いて、時系列データ全点の反応度  $\rho'$  を(10)式で再評価することにより真の反応度  $\rho$  (投入反応度) を推定値として得る。

#### (4) 臨界状態から一定の投入反応度に中性子源の影響と 時間的反應度変化が加わった場合

臨界状態から制御棒の炉心挿入による負の反応度に、中性子源の影響及び反応度温度効果等による正の反応度が加わった測定を行う場合は、中性子源強度  $S$  の算出は反応度温度効果等の正の反応度が時間と共に変化するため、前記(3)と同様な統計的方法の処理による手法は適用できない。しかし、(9)式の反応度  $\rho'$  は、中性子数の変化が中性子源強度  $S$  の影響を受けない範囲(中性子数  $n >$  中性子源強度  $S$ ) と中性子源強度  $S$  の影響を受ける範囲においても実時間の測定値として得ることができる。そこで、中性子源強度  $S$  の影響を受ける範囲の反応度  $\rho'$  を用いて中性子源強度  $S$  を推定し、真の反応度  $\rho$  を求める測定手法を開発した。以下にその統計的方法の処理について示す。

(10)式より、反応度  $\rho'$  と真の反応度  $\rho$  との差  $\Delta\rho$  は、

$$\Delta\rho = \rho' - \rho = \frac{S\Lambda}{n} \quad (13)$$

の関係である。

そこで、中性子源強度  $S$  の影響を受けない範囲の反応度  $\rho'$  を用いて、中性子源強度  $S$  の影響を受ける範囲の真の反応度を仮想した反応度  $\hat{\rho}$  を、多項式近似回帰モデル等の外挿により推定する。中性子数の変化が中性子源強度  $S$  の影響を受けない(無視できる)範囲の(9)式で測定される反応度  $\rho'$  は、真の反応度  $\rho$  に等しいとすると、回帰係数  $\alpha$ 、 $\beta$  を用いた多項式近似の次式で表される。

$$\rho = \rho' = \alpha_1 t^j + \dots + \alpha_2 t^2 + \alpha_1 t + \beta \quad (14)$$

そこで、中性子源強度  $S$  の影響を受ける範囲の真の反応度を仮想した外挿の反応度  $\hat{\rho}$  を次式で推定する。

$$\hat{\rho} = \hat{\alpha}_j t^j + \dots + \hat{\alpha}_2 t^2 + \hat{\alpha}_1 t + \hat{\beta} \quad (15)$$

従って、中性子源強度  $S$  は、中性子束の変化が中性子源強度  $S$  の影響を受ける範囲で(9)式の反応度  $\rho'$  の測定値と、(14)式、(16)式から次式で求めることができる。

$$S = \frac{\Delta \rho n}{\Lambda} = \frac{(\rho' - \hat{\rho}) n}{\Lambda} \quad (16)$$

即ち、この中性子源強度  $S$  を用いて(9)式の測定値を(10)式で時系列データ全点の再評価を行うことにより、制御棒により投入される負の反応度に正の反応度の時間変化を加えた真の反応度  $\rho$  を得る。

### 3. 動特性パラメータ

IK法に用いた動特性パラメータは、シリサイド燃料の炉心装荷量に合わせた解析結果を用いた。以下に各燃料体数毎の動特性パラメータの値を示す。

#### シリサイド燃料炉心における動特性パラメータ

燃料体数		14	15	16	17	18	19
即発中性子寿命 [sec]		5.98973E-05	6.73612E-05	7.22740E-05	7.80989E-05	7.80069E-05	8.69710E-05
即発中性子生成時間 [sec]		6.15201E-05	6.79140E-05	7.19669E-05	7.65857E-05	7.88183E-05	8.72300E-05
実効遅発中性子発生割合	1群	2.51789E-04	2.49969E-04	2.48593E-04	2.47079E-04	2.48768E-04	2.47331E-04
	2群	1.64632E-03	1.63578E-03	1.62782E-03	1.61904E-03	1.62875E-03	1.62036E-03
	3群	1.48164E-03	1.48149E-03	1.47383E-03	1.46537E-03	1.47485E-03	1.46673E-03
	4群	2.99021E-03	2.97093E-03	2.95638E-03	2.94033E-03	2.95836E-03	2.94285E-03
	5群	8.88238E-04	8.82351E-04	8.77921E-04	8.73005E-04	8.78636E-04	8.73747E-04
	6群	3.24439E-04	3.22261E-04	3.20622E-04	3.18804E-04	3.20883E-04	3.19081E-04
	合計	7.59264E-03	7.54278E-03	7.50517E-03	7.46363E-03	7.51025E-03	7.47010E-03
実効遅発中性子崩壊定数[sec <sup>-1</sup> ]	1群	1.27035E-02	1.27035E-02	1.27035E-02	1.27035E-02	1.27035E-02	1.27035E-02
	2群	3.17045E-02	3.17045E-02	3.17045E-02	3.17045E-02	3.17045E-02	3.17045E-02
	3群	1.15295E-01	1.15294E-01	1.15293E-01	1.15282E-01	1.15296E-01	1.15292E-01
	4群	3.11726E-01	3.11724E-01	3.11723E-01	3.11720E-01	3.11729E-01	3.11720E-01
	5群	1.40034E+00	1.40034E+00	1.40034E+00	1.40034E+00	1.40034E+00	1.40034E+00
	6群	3.87472E+00	3.87470E+00	3.87470E+00	3.87468E+00	3.87474E+00	3.87468E+00
燃料体数		20	21	22	23	24	25
即発中性子寿命 [sec]		9.26607E-05	1.03413E-04	1.11065E-04	1.20044E-04	1.28946E-04	1.40382E-04
即発中性子生成時間 [sec]		9.28187E-05	1.03547E-04	1.11883E-04	1.19296E-04	1.29719E-04	1.38960E-04
実効遅発中性子発生割合	1群	2.46438E-04	2.45847E-04	2.45512E-04	2.43854E-04	2.43270E-04	2.41483E-04
	2群	1.61514E-03	1.61161E-03	1.60959E-03	1.59995E-03	1.59646E-03	1.58604E-03
	3群	1.46170E-03	1.45837E-03	1.45650E-03	1.44718E-03	1.44390E-03	1.43382E-03
	4群	2.93325E-03	2.92689E-03	2.92333E-03	2.90566E-03	2.89932E-03	2.88008E-03
	5群	8.70730E-04	8.68806E-04	8.67752E-04	8.62208E-04	8.60270E-04	8.54243E-04
	6群	3.17969E-04	3.17258E-04	3.16868E-04	3.14822E-04	3.14107E-04	3.11885E-04
	合計	7.44523E-03	7.42878E-03	7.41955E-03	7.37357E-03	7.35733E-03	7.30755E-03
実効遅発中性子崩壊定数[sec <sup>-1</sup> ]	1群	1.27035E-02	1.27035E-02	1.27035E-02	1.27034E-02	1.27034E-02	1.27034E-02
	2群	3.17044E-02	3.17045E-02	3.17045E-02	3.17044E-02	3.17044E-02	3.17043E-02
	3群	1.15290E-01	1.15291E-01	1.15291E-01	1.15288E-01	1.15288E-01	1.15284E-01
	4群	3.11715E-01	3.11715E-01	3.11717E-01	3.11709E-01	3.11708E-01	3.11698E-01
	5群	1.40033E+00	1.40034E+00	1.40034E+00	1.40033E+00	1.40033E+00	1.40033E+00
	6群	3.87465E+00	3.87465E+00	3.87466E+00	3.87461E+00	3.87460E+00	3.87454E+00

## 動特性パラメータ計算結果(燃料体数:26)

燃料体数		26
即発中性子寿命 [sec]		1.48603E-04
即発中性子生成時間 [sec]		1.45131E-04
実効遅発中性子発生割合	1群	2.40040E-04
	2群	1.57764E-03
	3群	1.42570E-03
	4群	2.86480E-03
	5群	8.49409E-04
	6群	3.10102E-04
	合計	7.26749E-03
実効遅発中性子崩壊定数[sec <sup>-1</sup> ]	1群	1.27034E-02
	2群	3.17043E-02
	3群	1.15281E-01
	4群	3.11691E-01
	5群	1.40032E+00
	6群	3.87449E+00
制御棒位置 [cm]		28
実効増倍率		1.02



# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>19</sup>	1.63377 × 10 <sup>20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

