

JAERI-Tech

JP0250058

2001-084



逆動特性法を用いる制御棒校正用装置の実用化

2002年1月

山中 晴彦・林 和彦・本橋 純・川島 和人
市村 俊幸・玉井 和夫・竹内 光男

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所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）で複写による実費領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, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

逆動特性法を用いる制御棒校正用装置の実用化

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

中山 晴彦・林 和彦・本橋 純・川島 和人
市村 俊幸・玉井 和夫・竹内 光男

(2001年11月6日受理)

JRR-3における炉心反応度の管理は、制御棒校正結果を用いて行っている。制御棒校正は、年1回の定期自主検査時等に、6本の制御棒の全駆動範囲について逆動特性法（IK法）を用いた反応度測定により行っている。IK法による反応度の測定は、従来のペリオド法（P.P法）に比し作業時間が大幅に短縮できる長所がある。JRR-3では、約10年間のIK法を用いた反応度測定の実績を活かした測定装置の高機能化及び測定結果の信頼性向上を図った逆動特性法を用いる制御棒校正用装置を製作し、実用できることを確認した。

本報は、JRR-3における制御棒校正の方法、製作した制御棒校正用装置の機能、性能及び平成12年度 JRR-3 定期自主検査時の制御棒校正データを用いて行った本装置の機能及び性能の検証結果について報告する。

Practical Use of Control Rod Calibration System with the Inverse Kinetics Method

Haruhiko YAMANAKA, Kazuhiko HAYASHI, Jun MOTOHASHI, Kazuhito KAWASHIMA,
Toshiyuki ICHIMURA, Kazuo TAMAI and Mitsuo TAKEUTI

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

(Received November 6 ,2001)

The control rod calibration results in the JRR-3 are used as a reactivity standard to measure and manage the reactivity change in the core. The total travel of all six control rods has been calibrated by an inverse kinetics method (IK method) during an annual maintenance period. The IK method has the great merit in saving measuring time compared with the conventional positive period method (PP method). The JRR-3 control rod calibration system was renovated and put into practical use in order to improve reliability and function by accumulating 10-year experience with the IK method in the JRR-3.

The report shows the function, the performance and results of verification of the JRR-3 control rod calibration system.

Keywords : JRR-3, Control Rod Calibration, Inverse Kinetics Method(IKM)

目 次

1. はじめに	1
2. 制御棒校正	4
2. 1 制御棒系	4
2. 2 制御棒校正使用設備	5
3. IK 法制御棒校正装置の概要	18
3. 1 機器構成	18
3. 2 ソフト処理機能	19
4. IK 法制御棒校正装置の機能及び性能の確認	34
4. 1 制御棒校正手順	34
4. 1. 1 測定手順	34
4. 1. 2 測定データの処理	36
4. 2 制御棒校正結果	36
4. 3 IK 法制御棒校正装置の機能及び性能の確認結果	37
5. おわりに	45
謝辞	45
参考文献	45
付録 1. 逆運動特性法（IK法）の測定原理	46
付録 2. JRR-3 制御棒校正試験要領書	48
付録 3. 制御棒校正試験データの処理（平成 12 年度）	53
付録 4. 各原子炉施設等における反応度測定の現状について	100

Contents

1. Introduction	1
2. Control Rod Calibration	4
2. 1 Control Rod System	4
2. 2 Used Equipment of Control Rod Calibration	5
3. Outline of Control Rod Calibration with Inverse Kinetics Method	18
3. 1 Composition of Instrument	18
3. 2 Function of Soft Processing	19
4. Confirm about The Function and Performance of Control Rod Calibration with Inverse Kinetics Method	34
4. 1 Procedure of Control Rod Calibration	34
4. 1. 1 Measurement Procedure	34
4. 1. 2 Processing of Measurement Data	36
4. 2 Result of Control Rod Calibration	36
4. 3 Verification about The Function and Performance of Control Rod Calibration with Inverse Kinetics Method	37
5. Conclusion	45
Acknowledgement	45
References	45
Appendix 1. Principle of Inverse Kinetics (IK) Method	46
Appendix 2. Manual of Control Rod Calibration Experiment of JRR-3	48
Appendix 3. Processing Result of Control Rod Calibration Data (Manual Self Inspection in 2000)	53
Appendix 4. About The Present Condition of The Reactivity Measurement of Research Reactors in JAERI	100

1. はじめに

JRR-3 (Japan Research Reactor No.3) は、最大熱出力 20MWのベリリウム反射体及び重水反射体付き軽水冷却減速のプール型研究炉である。また、改造後の初臨界を平成 2 年 3 月に達成した後、年間 7 サイクルの共同利用運転（1 運転サイクル：連続 26 日運転）を行うことにより、中性子ビーム実験、燃料材料照射、R I 製造等に幅広く活用されている。⁽¹⁾ JRR-3 の主要諸元を第 1.1 表に、概要を第 1.1 図に示す。

JRR-3 は、使用済燃料要素発生数低減化対策として、平成 11 年 9 月に低濃縮ウラン・アルミニウム分散型合金を用いた燃料要素（以下、アルミナイト燃料という。）からウラン密度を高めた低濃縮ウラン・シリコン・アルミニウム ($U_3Si_2 - A1$) 分散型合金を用いた燃料要素（以下、シリサイド燃料という。）に変更した。⁽²⁾ シリサイド燃料は、過剰反応度の変化を小さくし、炉心の出力分布を平坦化するために可燃性毒物としてカドミウムワイヤを側板に埋め込む構造となっている。JRR-3 は、初期の 3 サイクルの共同利用運転を経て、平成 12 年 4 月から約 3 ヶ月間に渡り平成 12 年度定期自主検査を行った。

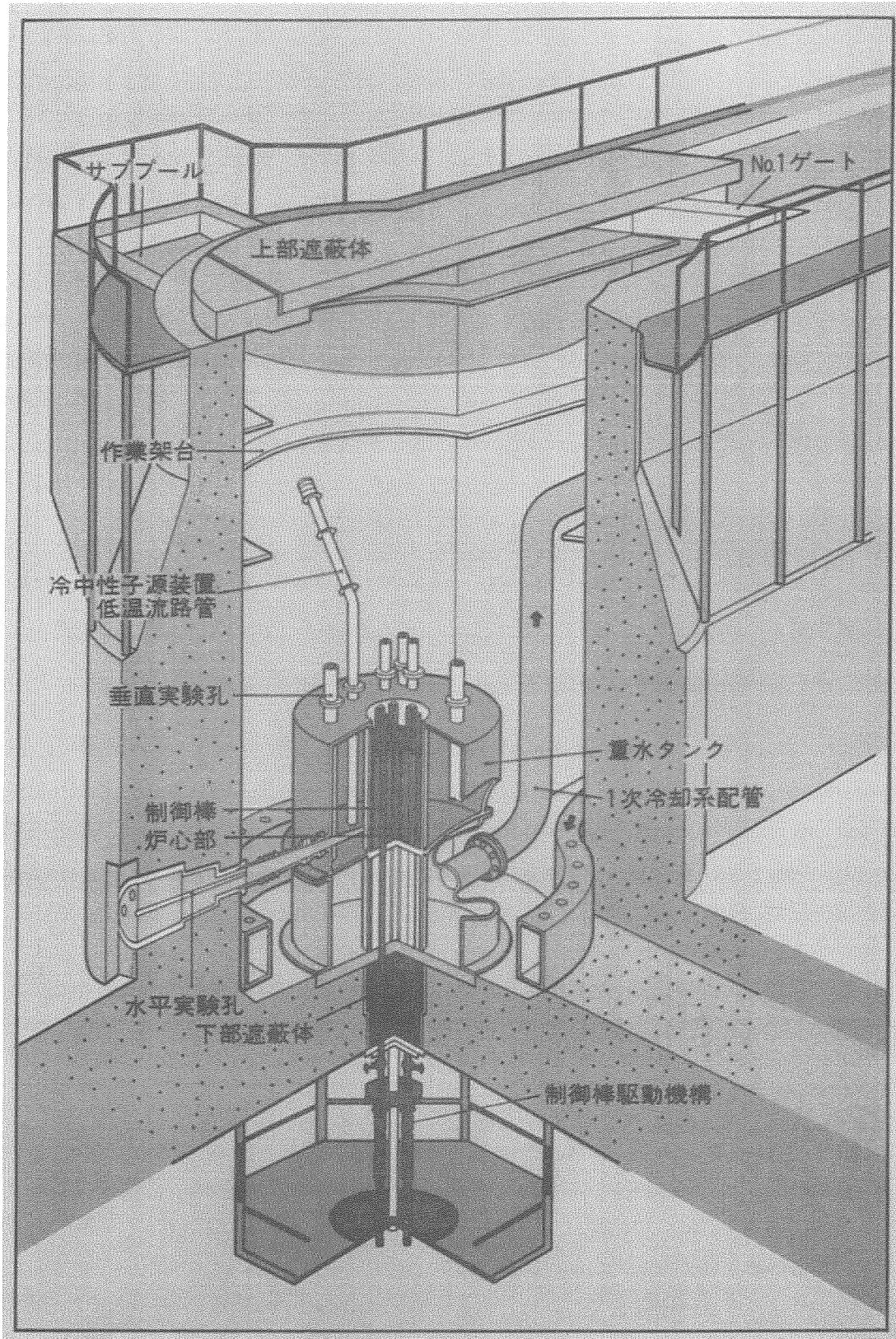
平成 12 年度定期自主検査項目の最大過剰反応度検査、反応度停止余裕検査及び最大反応度添加率検査においては、制御棒校正（Control Rod Calibration）の結果を用いて、運転上におけるそれぞれの制限値の確認及び炉心性能の確認等を行っている。また、制御棒校正の結果は、臨界制御棒位置の予測、燃料交換による反応度収支、照射試料反応度等の算出及び運転管理に使用している。

JRR-3 における IK 法による制御棒校正は、各制御棒の全駆動距離についての反応度価値（制御棒価値 Control Rod Worth）を測定するものであり、既設の制御棒系、既設の中性子計装設備及び仮設の反応度測定装置を用い、これまでに約 10 年の実績を有している。これらの実績を踏まえて、測定精度の向上及び制御棒校正作業の合理化を目的として逆動特性法を用いる制御棒校正用装置（以下、IK 法制御棒校正装置という。）を製作した。測定精度の向上を図るために、最新のエレクトロニクス技術の導入及び測定手法の改良を行った。また、制御棒校正作業の合理化を図るために、デジタル通信方式による測定情報（中性子数、制御棒位置）収集機能及びオフライン処理による反応度平均値算出機能を追加し、さらに原子炉運転員と測定員との情報共有化により誤操作防止を図るために二重化液晶型表示装置（Liquid Crystal Display、以下 LCD と略す。）⁽⁴⁾ の採用を行った。

また、平成 12 年度定期自主検査時の制御棒校正の結果を用いて、制御棒校正装置の機能及び性能の確認を行った。

第 1.1 表 J R R - 3 の主要諸元

項 目	諸 元
目 的	ビーム実験、燃料材料照射、R I 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 (改造後)
最大熱出力	20 MW
炉心の形状・大きさ	円柱形・直径 : 60 cm、高さ : 75 cm
燃料要素	シリサイド燃料 (標準型 : 26 体、フォロア型 : 6 体)
制御棒	6 本 (中性子吸收材 : ハフニウム)
運転形態	7 サイクル運転 / 年、26 日連続 / サイクル
積算熱出力	約 689,000 MWH (平成 11 年 8 月末)
シリサイド燃料に 変更	平成 11 年 9 月 (特性試験 : 平成 11 年 9 月 ~ 平成 11 年 11 月)



第1.1図 JRR-3の概要

2. 制御棒校正

JRR-3 の制御棒は、安全棒（S a - 1, S a - 2）2本、粗調整棒（S - 1, S - 2）2本、微調整棒（R - 1, R - 2）2本の合計6本からなる。JRR-3 の炉心配置を第2.1図に示す。

JRR-3 における制御棒校正は、原子炉臨界状態から炉心に配置した6本の制御棒のうち、対称位置にある2本の制御棒を交互に操作して、それに伴う中性子数の時間的変化から逆動特性法⁽⁵⁾、⁽⁶⁾（Inverse Kinetics method、以下IK法と略す。）を用いて制御棒駆動距離当りの反応度（以下ステップ反応度と略す。）を測定することにより行う。制御棒価値は、ステップ反応度を制御棒全駆動距離で積算して求める。IK法を用いることにより測定精度の向上及び制御棒校正の作業時間の短縮を図ることができる。IK法の測定原理を付録1に示す。

JRR-3 制御棒校正に係る設備は、第2.2図に示すように、制御棒と制御棒駆動機構で構成する制御棒系及び中性子計装設備、原子炉制御操作卓とIK法制御棒校正装置とで構成する制御棒校正使用設備である。各設備の概要は次のとおりである。

2. 1 制御棒系

（1）制御棒

制御棒は、第2.1表の制御棒の主要仕様及び第2.3図のJRR-3制御棒構造に示すように、中性子吸收体とフォロワ型燃料要素で構成される。中性子吸收体は、軸方向に対して一様な構造である。しかし、フォロワ型燃料要素は中性子吸收体との接続及び燃料取扱い治具（ハンドリングツール）の装着を行うため、軸方向上端部の約25mmについて燃料板を配置しない構造としている。また、制御棒は、第2.4図の制御棒駆動距離説明図に示すように、中性子吸收体により標準型燃料要素の燃料板長さを十分覆っている下限位置（制御棒全挿入位置）からフォロワ型燃料要素の燃料板軸方向中心と炉心軸方向中心（標準型燃料要素燃料板軸方向中心）が一致する上限位置（制御棒全引抜き位置）までの範囲を駆動する設計である。

制御棒上限位置近傍においては、中性子吸收体とフォロワ型燃料要素の接続部における中性子吸收効果の不連続性により、制御棒の反応度価値に不連続性が生じることが考えられる。

（2）制御棒駆動機構

制御棒駆動機構（Control Rod Drive Mechanism、以下CRDMと略す。）⁽³⁾は、炉心下部の炉下室内に設置し、制御棒を炉心の下部側から上部側へ押し上げることにより制御棒駆動を行う方式である。また、中央制御室に配置した原子炉制御操作卓からの上昇、下降及び停止の操作信号により、約800mmの駆動距離を連続的に約10cm/min（1.6mm/s）の駆動速度にて円滑に作動する機能を有している。

制御棒駆動機構の主要仕様を第2.2表に、制御棒駆動装置及び制御棒の制御系をそれぞれ第2.5図及び第2.6図に示す。

制御棒校正時の制御棒操作は、添加反応度が±約1%Δk/k/ステップで炉周期計指示が20秒以

内を目標にステップ状の反応度添加を行うため、約 2 秒間から約 30 秒間の連続操作を必要とする。

2. 2 制御棒校正使用設備

制御棒校正使用設備は、中性子計装設備及び制御棒系よりそれぞれ中性子信号及び制御棒位置指示信号を原子炉制御操作卓に入力し、原子炉制御操作卓から制御棒駆動信号を制御棒系へ出力するとともに反応度測定、監視に必要な情報を IK 法制御棒校正装置へデジタル通信方式で出力する機能を有している。制御棒校正使用設備の構成を第 2.7 図に示す。

(1) 中性子計装設備

制御棒校正時に用いる中性子計装設備は、JRR-3 中性子計装設備のうち、線形出力系 A、線形出力系 B である。線形出力系は、炉心内の中性子束を重水反射体タンク外周の炉心軸方向中心位置に配置した γ 線補償型電離箱（以下、C I C と略す。）の中性子検出器により電流信号に変換し、中央制御室に配置した中性子計装盤内の切換可変 11 レンジ付き増幅器で電流 - 電圧変換増幅することにより原子炉の運転出力に対応した電圧信号を原子炉制御操作卓に出力する機能を有している。線形出力系の主要仕様を第 2.3 表に、系統構成について第 2.8 図に示す。

検出器から中央制御室までの約 30m の間の信号伝送は、中性子検出器出力の電流信号がピコアンペアからミリアンペアの微小電流であるため、約 30 m の三重同軸ケーブルを用いることにより外来雑音信号の混入を防止する対策を施している。中性子計装盤と原子炉制御操作卓の間は、 1.25 mm^2 のビニル被覆の信号線で接続しているため、編シールドネットを用いることにより外来雑音信号の混入防止対策を行っている。

制御棒校正時のステップ反応度測定用切換え可変レンジは、重水反射体領域からの光中性子の影響が除外される原子炉出力（約 10kW～約 40kW）に対応する 50kW レンジを使用することとした。

(2) 原子炉制御操作卓

原子炉制御操作卓は、ASTMAC（横河電機株式会社の登録商標である。）システムを用いて中性子計装設備、制御棒系等の情報を CRT 画面表示するとともに、制御棒の駆動、原子炉の出力制御等の安全な原子炉の運転操作を行う機能を有している。

JRR-3 における ASTMAC システムは、マスターステーション 1 台と Ethernet（米国ゼロックス社の登録商標である。）により分散接続したコントローラ 2 台の構成である。JRR-3 の ASTMAC システムの構成を第 2.9 図に示す。

マスターステーションは、OS（オペレーションシステム）に Windows NT（米国マイクロソフト社の登録商標である。）、基本言語に Visual Basic Application Edition（米国マイクロソフト社の登録商標である。）を用いることにより、0.1 秒周期で更新表示を行うコイル位置表示処理、1 秒周期で更新表示を行うプロセスデータ表示処理、警報発生項目の記録、表示を行う警報処理及びこれらの画面表示を行う画面処理の各機能を有している。マスターステーションの主要

仕様を第 2.4 表に、マスターステーションの機能を第 2.10 図に示す。

コントローラは、中性子計装設備等と信号の入出力を行うターミナルボード、リレーボード、アナログ信号とデジタル信号を数 m s 以下の高速応答で信号変換処理を行う入出力モジュール、Ethernet 通信及び自立分散制御を行う C P U モジュールで構成される。入出力信号数は、アナログ入力信号 80 点、デジタル入力信号 416 点及びデジタル出力信号 8 点である。コントローラの主要仕様を第 2.5 表に示す。

制御棒校正に必要な信号は、線形出力 A 信号とレンジ信号、線形出力 B 信号とレンジ信号、 S a - 1, S a - 2, S - 1, S - 2, R - 1, R - 2 の各制御棒位置指示信号である。線形出力信号は、0~6.25 V D C のアナログ信号を 12bit 倍精度のデジタル信号に変換し、バイナリ（2 進数）表記のデータ形式にて最速 1 m s で Ethernet に出力される。線形出力のレンジ信号は、A 系 4bit、B 系 4bit の無電圧接点信号を、8bit のデジタル信号に変換後、最速 20m s で Ethernet に出力される。各制御棒位置指示信号は、20m s 毎に更新する 1bit のラッチ信号と 16bit のバイナリ形式の位置指示信号の無電圧接点信号を 17bit のデジタル信号に変換後、最速 20m s で Ethernet に出力される。これら Ethernet 上のデータを伝送する通信モジュールは、コントローラに内装され、Ethernet ケーブルを介して T C P / I P プロトコル⁽⁷⁾ により 10M d p s で IK 法制御棒校正装置に伝送する機能を有している。

（3）IK 法制御棒校正装置

新たに製作した IK 法制御棒校正装置は、原子炉制御操作卓内にある ASTMAC システムより Ethernet ケーブルを介して入力された線形出力信号及び制御棒位置信号を用いて、制御棒操作毎に加えられる反応度を IK 法により測定するものである。

IK 制御棒校正装置の詳しい内容については、第 3 章に述べる

第 2.1 表 制御棒の主要仕様

項 目	仕 様
構 造	上部：ボックス型中性子吸收部 下部：フォロワ型燃料部
主 要 材 料	上部：ハフニウム 下部：燃料要素
外 形 尺 法	上部：縦約 64mm × 横約 64mm × 長さ約 790mm (厚さ約 5mm) 下部：縦約 64mm × 横約 64mm × 長さ約 880mm (燃料芯材長さ約 750mm)
数 量	6 本

第 2.2 表 制御棒駆動機構の主要仕様

項 目	仕 様
方 式	可動コイル型ボールスクリュー駆動
主 要 材 料	オーステナイト系ステンレス鋼、アルミニウム合金
駆 動 速 度	手動操作時：最大 10cm/min
駆 動 距 離	約 800mm
数 量	6 本

第 2.3 表 線形出力系の主要仕様

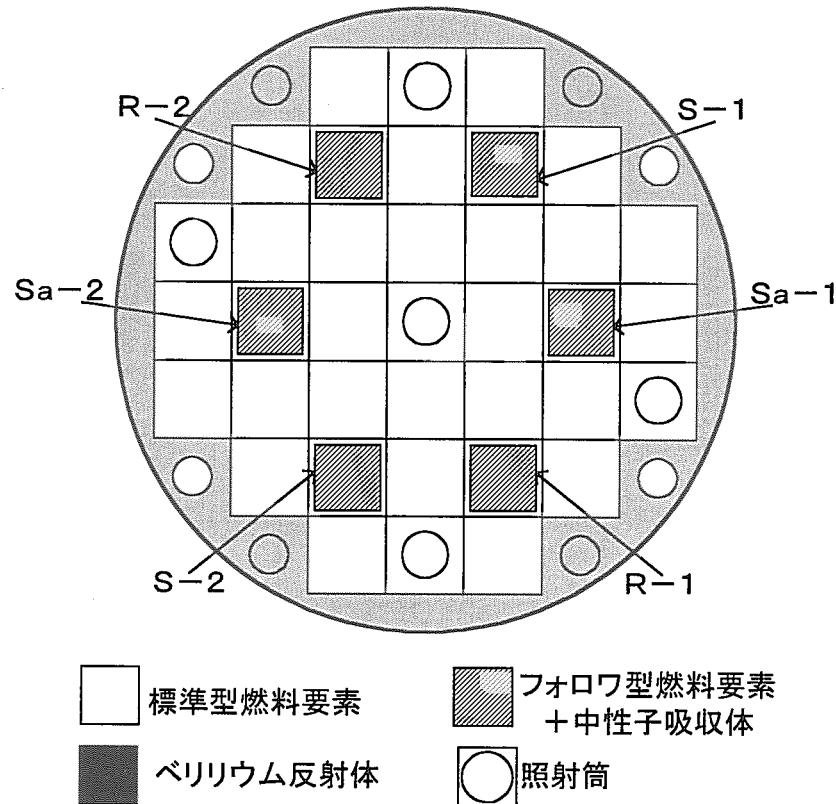
項 目	仕 様
計測範囲	1.25W～25MW
中性子検出器	γ 線補償型電離箱 (C I C) 中性子感度 : $2.3 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
線形増幅器	電流入力電圧変換増幅形 11 レンジ付 入力信号 : $10^{-11} \text{ A} \sim 10^{-3} \text{ A}$ 出力信号 : 0 V～6.25 V D C
レンジ範囲	5W, 25W, 125W, 500W, 2.5kW, 12.5kW, 50kW, 250kW, 1.25MW, 5MW, 25MW
系 統 数	A系、B系 各 1 系統

第 2.4 表 マスタステーションの主要仕様

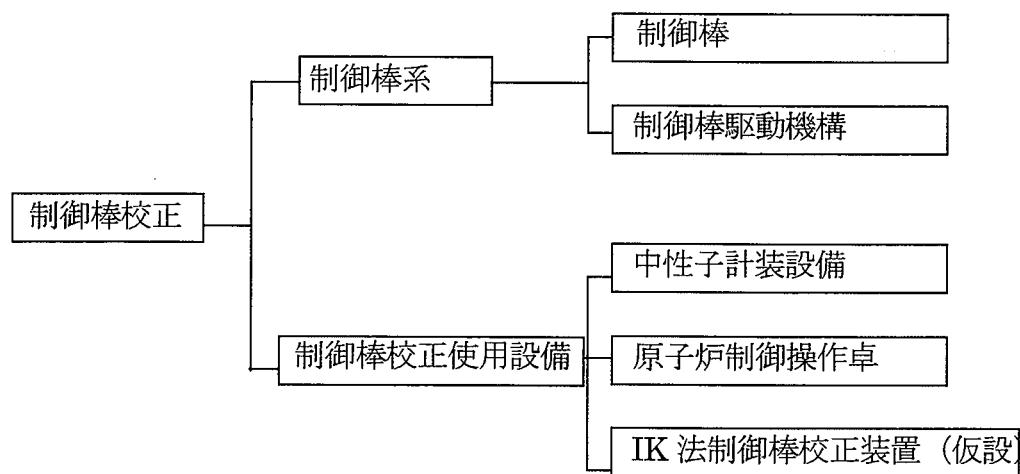
項 目	仕 様
型 式	Vectra VLSiMT6500 (HP 社)
C R T	21 インチカラー
主メモリ容量	128MB
ハードディスク容量	4GB
演 算 周 期	500MHZ
O S	Windows NT (米国マイクロソフト社の登録商標)
言 語	Visual Basic Application Edition (米国マイクロソフト社の登録商標)

第 2.5 表 コントローラの主要仕様

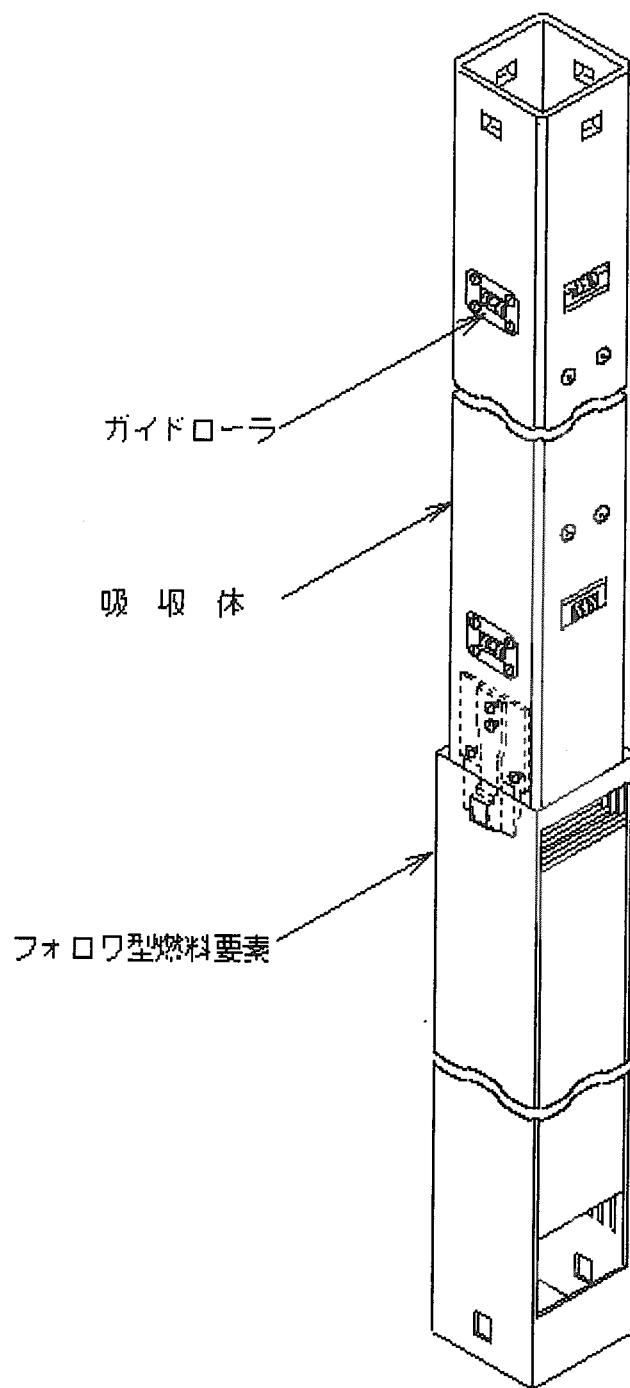
項 目	仕 様
型 式	FA-M3 (YOKOGAWA 社)
C P U モジュール	処理速度 : 0.07μs/命令 容量 : 56k ステップ 最大入力点数 : 4096 点
アナログ入力 モジュール	入力信号 : ±10VDC 分解能 : 5.7m V 信号変換周期 : 1m s
Ethernet 通信 モジュール	アクセス制御方式 : CSMA/CD 方式 伝送速度 : 10Mbps プロトコル : TCP/IP
無電圧接点入力 モジュール	10 点入力端子台タイプ
トランジスタ出力 モジュール	10 点出力端子台タイプ



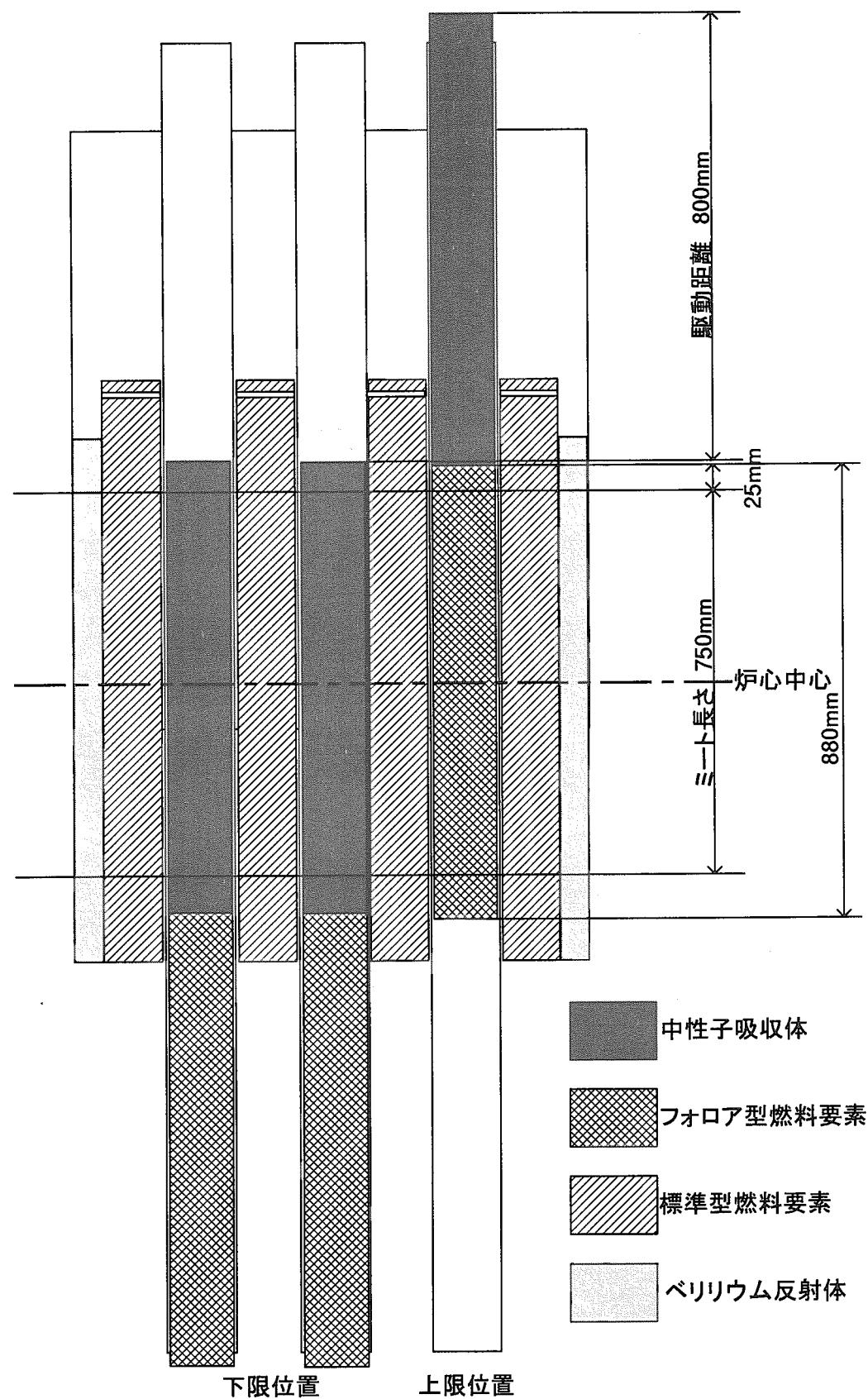
第2.1図 JRR-3炉心配置



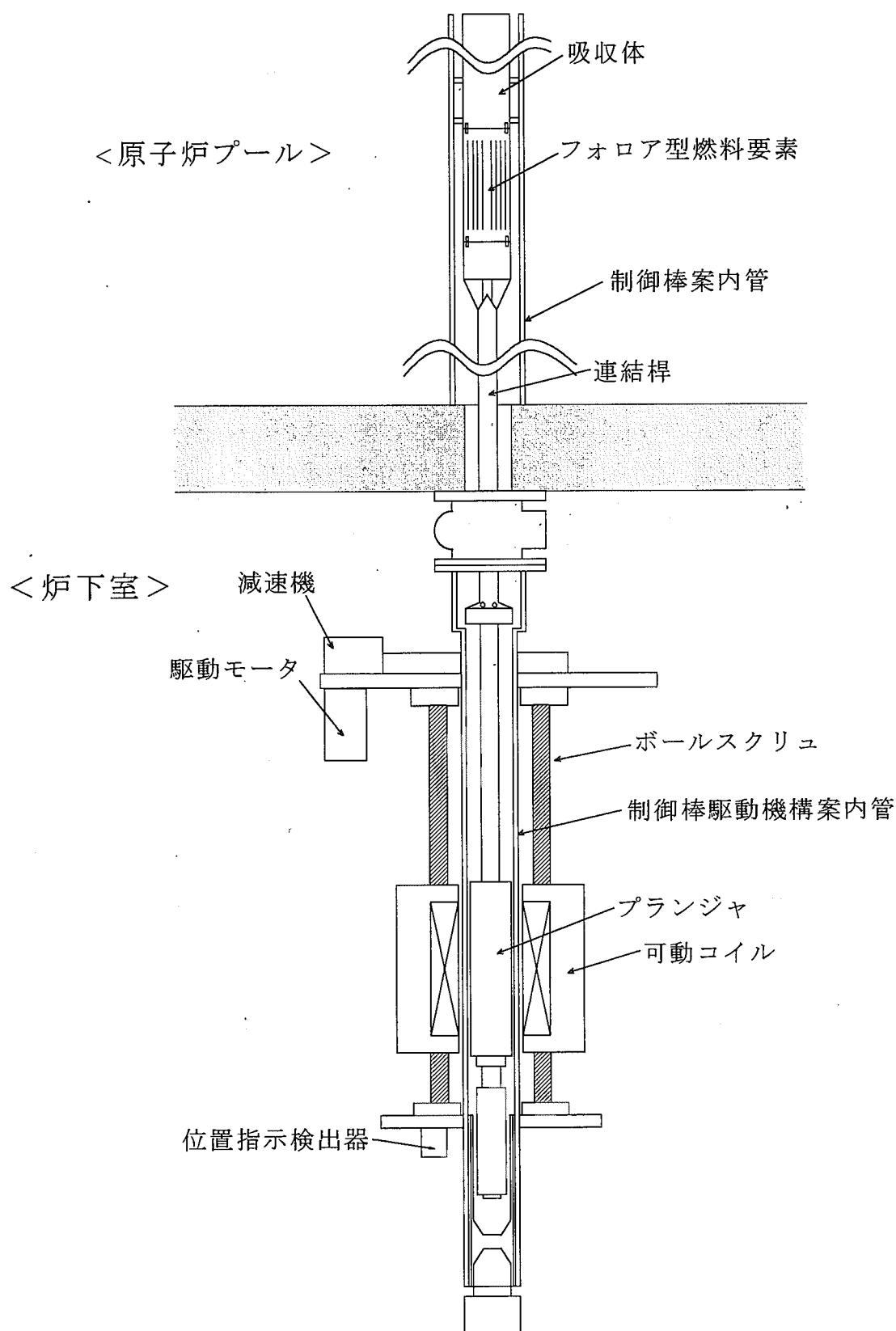
第2.2図 JRR-3制御棒校正に係る設備



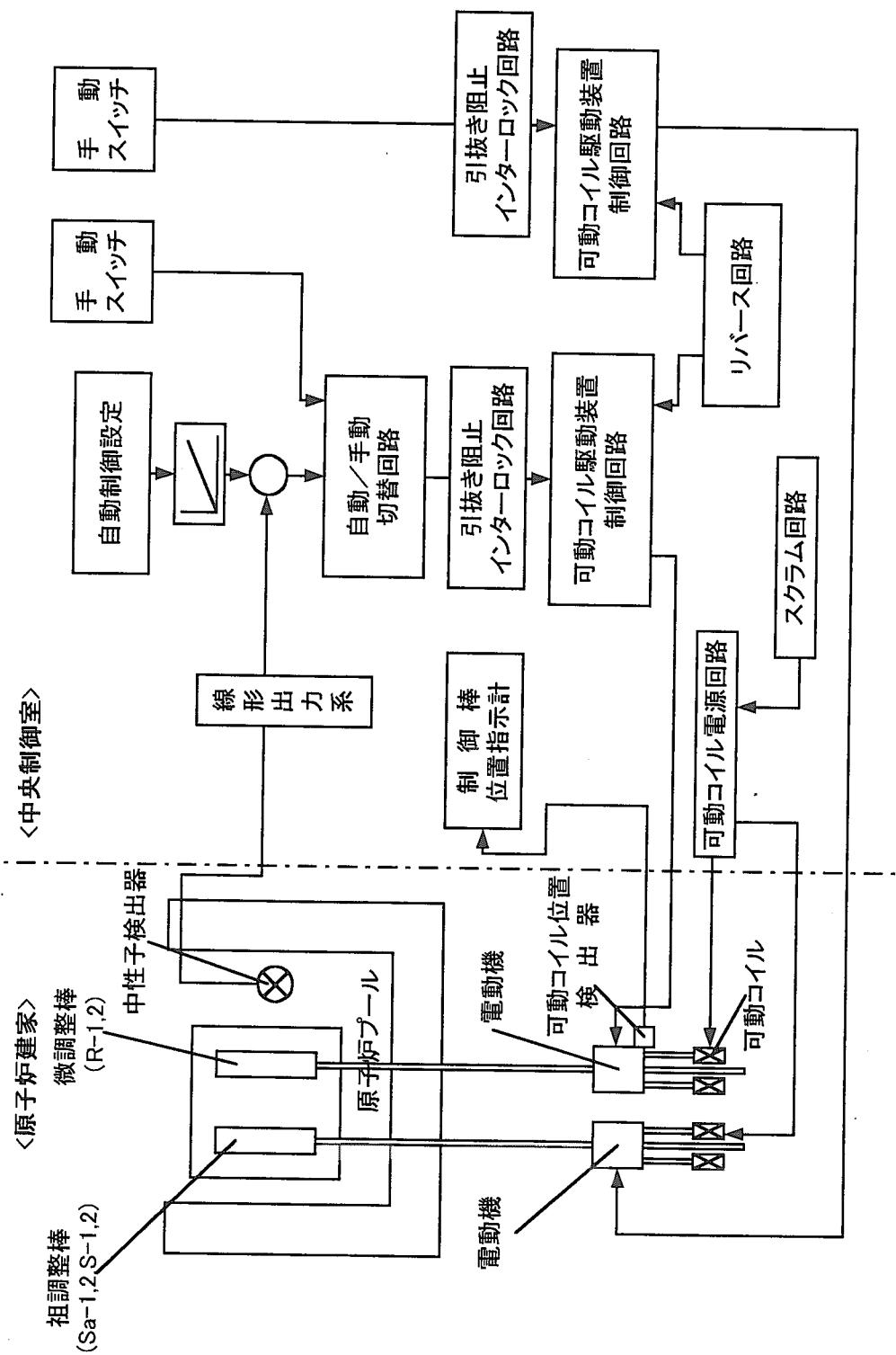
第2.3図 JRR-3制御棒構造



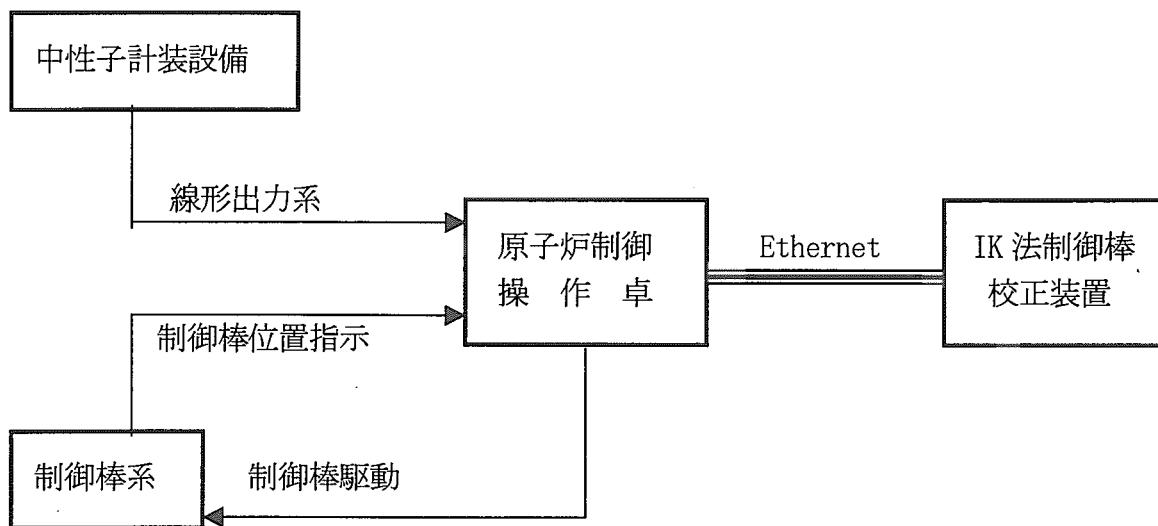
第2.4図 制御棒駆動距離説明図



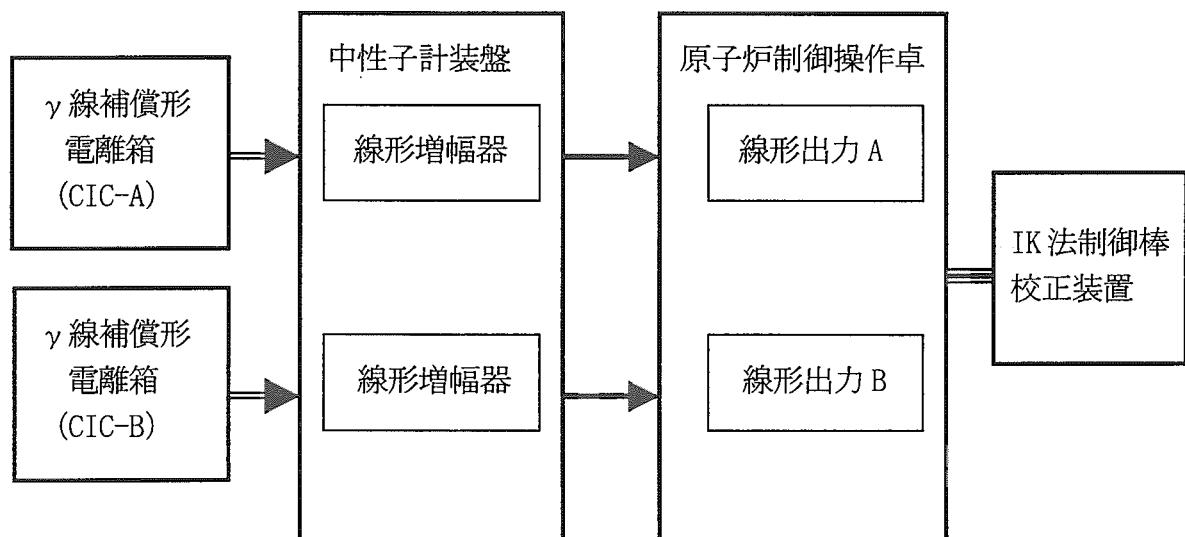
第 2.5 図 制御棒駆動装置



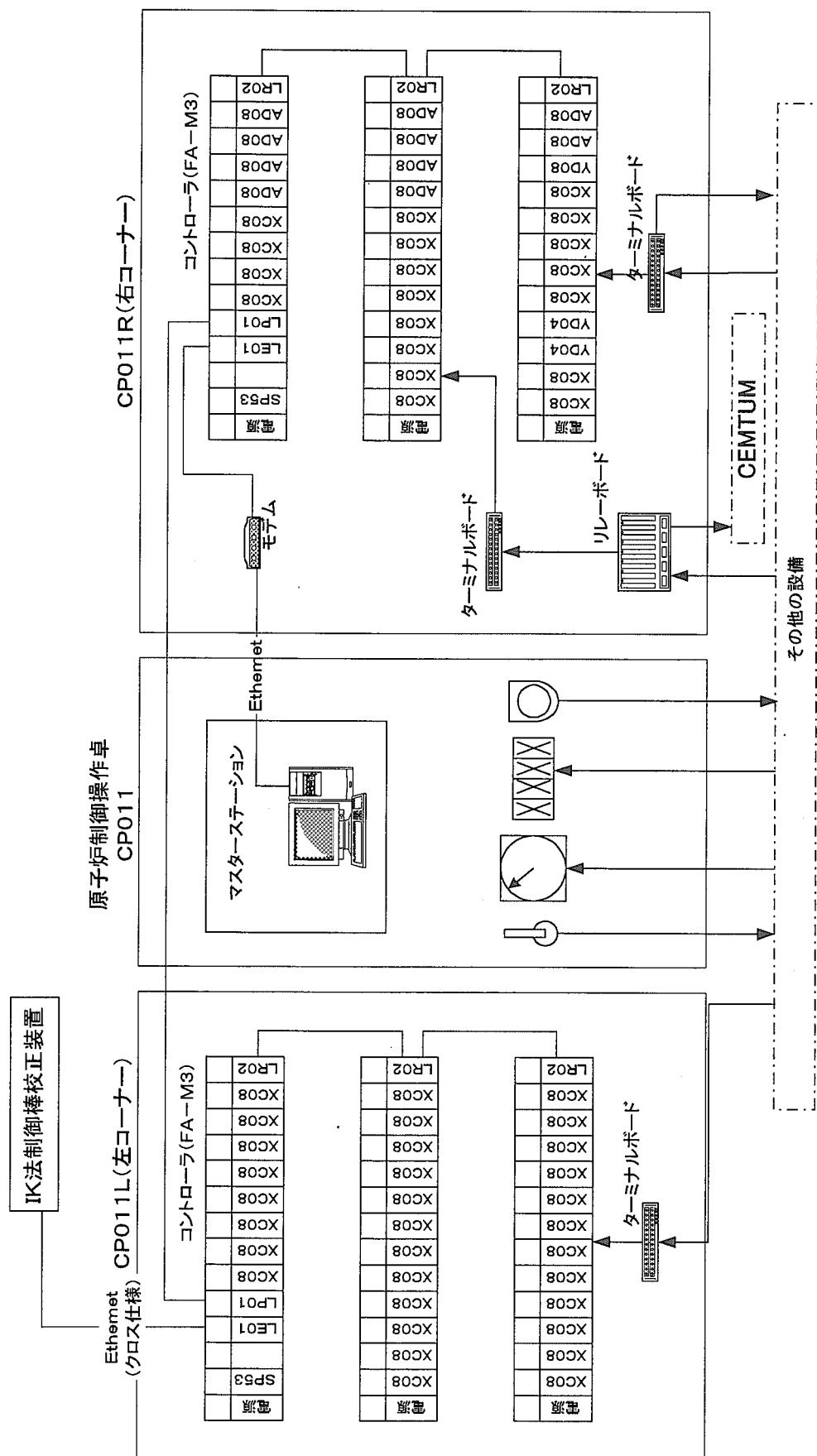
第2.6図 制御棒の制御系



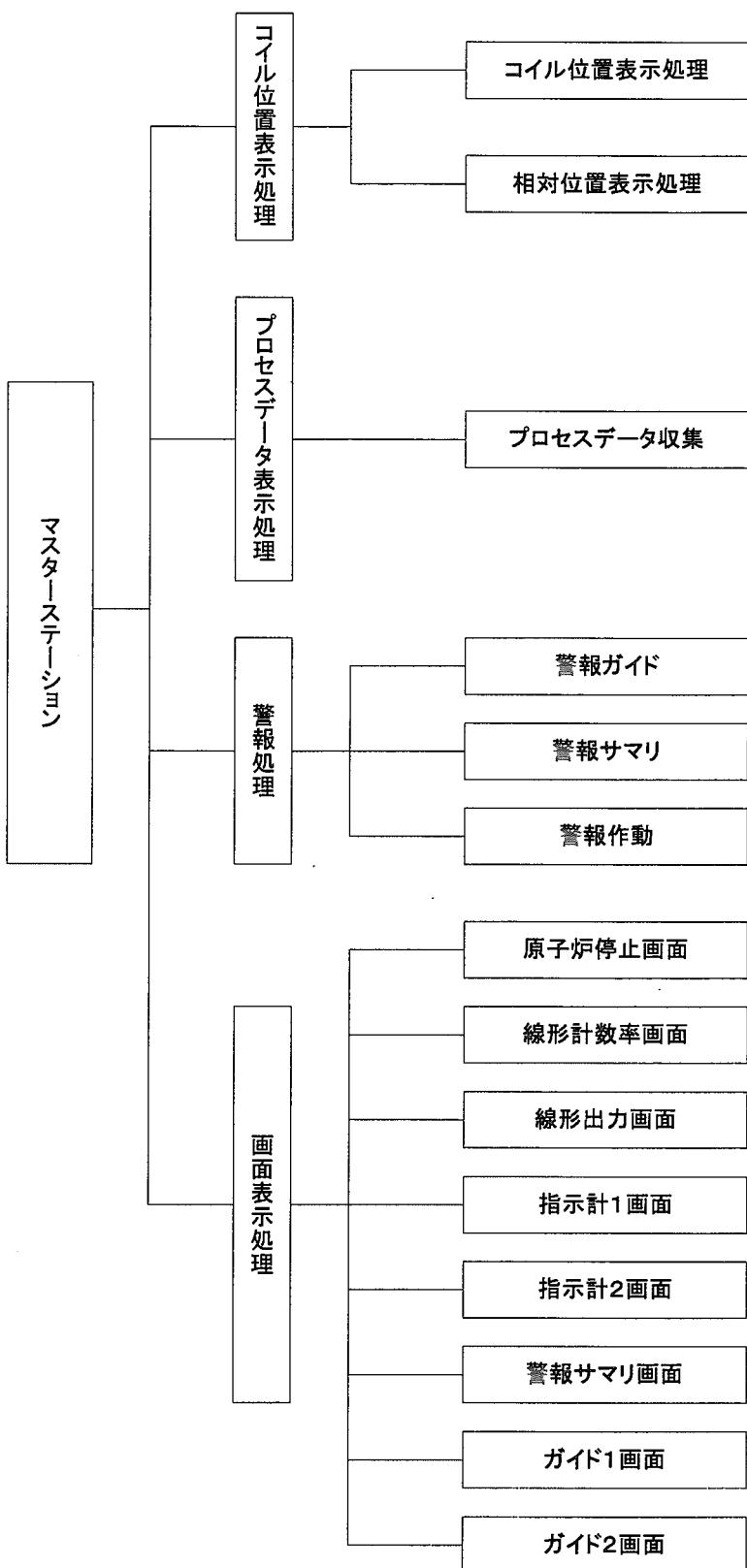
第2.7図 制御棒校正使用設備



第2.8図 線形出力系



第2.9図 JRR-3のASTMACシステム



第2.10図 マスタステーションの機能

3. IK 法制御棒校正装置の概要

新たに製作した IK 法制御棒校正装置は、測定精度の向上及び制御棒校正作業の合理化を図るために、次の機能を有するように設計した。

- ① IK 法を用いて反応度算出を行うことにより、連続的に短時間の制御棒校正が実施できる。
- ② 中性子源強度の影響を考慮した反応度算出を行うことにより、高精度の測定ができる。
- ③ 既設設備とデジタル通信接続を行うことにより、入出力信号処理用の構成機器を最小にし、測定結果の信頼性、保守性の向上を図ることができる。
- ④ パーソナルコンピュータを用いて時系列の計測値表示及び時系列の測定結果等の記録、保存を行うことにより、作業の合理化を図ることができる。
- ⑤ 液晶型表示装置の多重化を行うことにより、測定員と運転員が情報を共有し、作業の合理化、効率化の向上を図ることができる。
- ⑥ 汎用ソフトを用いることにより、測定機能追加等が容易にできる。
- ⑦ 階層構造で対話型の測定プログラムの作成を行うことにより、測定操作が単純で確実となり、作業の合理化、効率化の向上を図ることができる。
- ⑧ 拡声器を用いることにより、制御棒操作タイミングの確認を確実にし、誤操作を防止することができる。
- ⑨ オフラインで任意範囲の平均反応度の算出を行うことにより、制御棒の誤操作等による再臨界操作を省略し、作業効率の向上を図ることができる。
- ⑩ オフラインで制御棒校正の再現、または再評価を行うことにより、再測定を省略し容易に測定経過の確認ができ、測定結果の信頼性と作業の合理化、効率化の向上を図ることができる。
- ⑪ 1組毎の測定データを汎用データ形式に変換することにより、他のパーソナルコンピュータを用いた EXCEL 等によるデータ処理を容易にし、測定作業とデータ整理作業を平行して実施し作業効率の向上を図ることができる。

3. 1 機器構成

IK 法制御棒校正装置は、本体、測定監視用と運転監視用液晶型表示装置及び拡声器の機器構成である。IK 法制御棒校正装置の主要仕様を第 3.1 表に、構成を第 3.1 図に示す。

本体は、中央演算処理装置に Pentium III（米国インテル社の登録商標である。）を用いる演算処理速度 1 GHz で、固定ディスク容量 30GB と高速大容量型のパーソナルコンピュータであり、OS には Windows 98 を使用している。本体のスロットには、Ethernet 通信カード、ビデオカード、ボイスサウンドカード等を内装している。Ethernet 通信カードは、ASTMAC システムからの線形出力信号、制御棒位置信号の入力を Ethernet ケーブルにて、TCP/IP プロトコルにより 10Mbps の伝送速度にて行う等の機能を有している。ビデオカードは、2 台の液晶型表示装置に同一の表示、情報を高速で出力する機能を有している。ボイスサウンドカードは、最大 120 W の音声信号を出力する機能を有している。また、メディア変換機器として、小容量から大容量

のメディア変換を行うため、650MB用のCD-RWドライブ、1.44MB用FDドライブを本体内に内蔵している。

測定監視用と運転監視用液晶型表示装置（15インチ・カラーの TFT 方式の表示器）は、測定員と原子炉運転員の意思の疎通を確実に図ることができるように、それぞれ同一の画面表示を行うこととした。線形出力値、反応度値等のリアルタイム表示、トレンド表示及びバーグラフ表示を0.2秒周期で更新する高精細度画面表示機能を有している。

拡声器は、原子炉運転員が運転監視用液晶型表示装置の画面表示による視覚的な情報と併せて測定対象の制御棒操作開始の聴覚的なタイミングを図るために、警告音を発生して誤操作防止を図るために、原子炉操作卓に2台配置した。警告音については、1秒の断続音を最大120Wで発生する機能を有している。

3. 2 ソフト処理機能

(1) プログラム言語及びアプリケーションソフト

OSには、マルチタスク可能なWindows98（マイクロソフト社の登録商標である。）を用い、プログラム言語には、Visual Basic Application Edition（マイクロソフト社の登録商標である。）とVisual C++（マイクロソフト社の登録商標である。）を用いた。

Visual Basic Application Editionは、Windows上で動作するプログラム言語としては広く用いられ使いやすいという利点があり、今後の装置及びOSのバージョンアップにも適応すると思われる所以基本ソフトとした。

Visual C++は、高精度でプログラムを実現できる長所がある反面、言語の機能等の豊富な知識が必要であるため、1ms単位の精度が要求されるデータ取得用の周期指定タイマー部分のプログラム言語として使用した。

LCD画面表示のトレンドグラフ及びバーグラフ表示を行うために、びじゅあるコンボRETURN（エムエムシーコンピュータリサーチ社の登録商標である。）を用いた。びじゅあるコンボRETURNは、特別な言語を記述する必要がなく、描画データ数やグラフ要素数は無制限、豊富なグラフ要素、強力な印刷処理、軽快な動作速度を特徴とし、複雑なグラフを容易に実現できる機能を有している。

ASTMACシステムとネットワーク上でデータをやり取りするアプリケーションソフトとして、FA-M3イーサネット用DDEI/Oサーバー（横河電機社の登録商標である。）を用いた。

(2) 処理機能

処理機能は、メインメニューでのメニュー選択、オンラインでの反応度測定、オフラインでの反応度測定、ステップ編集でのステップ反応度テーブルの編集及びメンテナンスでの測定条件設定の各処理機能を有している。

各処理機能は、階層的構造で構成する各処理機能に対応した画面を用いて実行する。各処理機能毎の画面は、画面上端部に設けたメニューバーの複数のボタンに割り付けた処理をマウス操作で選択・実行できると共に、操作のガイドを表示する等の画面対話方式の機能を有している。さ

らに、誤操作を防止しし容易な操作で安全かつ確実に制御棒校正が実行できるよう考慮した情報の項目、配置、色合い等の画面表示に決定した。IK 法制御棒校正装置の機能を第 3.2 図に示す。

1) メインメニュー機能

メインメニュー画面を第 3.3 図に示す。メインメニューは、「オンライン」、「オフライン」、「ステップ編集」、「メンテナンス」及び「終了」の各処理機能を選択するボタンで構成した。「終了」は、Windows 9 8 の初期画面に戻る機能である。

2) オンライン処理機能

オンライン処理機能は、線形出力信号及び制御棒位置指示信号を指定した周期で収録し、反応度の算出を行って、デジタル表示、トレンド表示、バーグラフ表示するオンライン反応度測定の機能である。オンライン反応度測定画面例を第 3.4 図に示す。

メニューバーは、「収録開始」、「収録終了」、「X 軸設定」、「Y 軸設定」、「メニューへ戻る」、「取得データ」、「選択核定数 No××」、「中性子源強度」、「平均範囲（上昇）」及び「平均範囲（下降）」の各ボタンで構成した。

画面構成は、メニューバー表示部、計測値のデジタル表示部、線形出力と反応度変化（反応度演算結果）トレンド表示部及びバーグラフ表示部を配置する構成とした。

画面作成は、アナログ表示とデジタル表示を併用しつつ、同一画面内に測定、監視に必要な全ての情報を形状、色彩に配慮して表示することにより視認性の向上を図った。デジタル表示項目は、指定収録周期で更新する各制御棒位置、収録開始からの経過時間、ステップ反応度算出のための演算回数（ステップ）、ステップ反応度（平均範囲〔上昇〕及び平均範囲〔下降〕内におけるステップ反応度算出の平均値）及び指定収録周期で更新する線形出力と反応度である。また、「表示信号」部をクリックすると c h. A 又は c h. B に切り替わる機能を持っている。

トレンド表示は、秒単位目盛の X 軸、線形出力計測値用目盛の左側 Y 軸及び反応度演算結果用目盛の右側 Y 軸により指定収録周期の線形出力と反応度演算結果を「収録開始」から「収録終了」までの時系列表示を行うことにより、計画通りの測定が行われているかの判断及び制御棒操作量の推定を容易にし、作業効率の向上を図った。

バーグラフ表示は、指定収録周期で更新する線形出力計測値を右側に反応度演算結果を左側に並べて表示し、線形出力計測値用目盛に反応度評価範囲（平均範囲（上昇）、平均範囲（下降））設定マーカと制御棒操作開始（引抜、挿入）マーカを設けて、制御棒操作性の向上を図った。

測定条件の設定には、メッセージガイドをマルチ画面表示する対話方式の機能を採用し、設定の確認、修正等を容易かつ確実に行えるようにしている。但し、収録中は、核定数及び中性子源強度の変更はできない。また、平均範囲は現在の指示値が平均範囲外の時にのみ変更できることとした。

測定の終了は、「収録終了」を選択操作により行う。また、ステップ数が 500 に達した場合、あるいは測定時間が 9 時間（収録周期が 0.2 秒以上の場合。但し収録周期が 0.1 秒では 6 時間）に達した場合は自動的に測定を終了することとした。測定が終了した場合は、データ保存確認メッセージに従った操作を行うことにより、データを保存することができる。

3) オフライン処理機能

オフライン処理機能は、オンラインにて収録した測定データの再現、再評価、中性子源強度の算出及びステップ反応度の算出を自動的に行わなかった測定ステップ個所の平均反応度算出を行うものである。オフライン反応度測定画面例を第3.5図に示す。

メニューバーは、「データ選択」、「計算開始」、「計算終了」、「X軸設定」、「Y軸設定」、「チャンネル変更」、「平均値算出」、「メニューへ戻る」、「選択核定数 No××」、「中性子源強度」、「平均範囲（上昇）」及び「平均範囲（下降）」の各ボタン構成とした。

画面構成は、オンライン画面に平均値算出時の時間軸範囲を示すカーソル位置表示部を追加したものである。

オフライン反応度測定における測定条件設定は、オンライン処理機能と同様とした。

4) ステップ編集機能

ステップ編集機能は、オンライン反応度測定にて作成したステップ反応度テーブルデータの修正、挿入、削除を行うものである。編集可能なデータは、対象データの測定日、測定の開始時間、演算に用いた核定数、設定した中性子源強度、平均反応度範囲値（上昇方向、下降方向）及びステップデータのテーブルである。ステップ編集画面例を第3.6図に示す。

メニューバーは、「ファイル選択」、「終了（登録後）」及び「キャンセル」の各ボタンで構成した。

5) メンテナンス機能

メンテナンス機能は、線形出力と反応度の小数点以下表示桁数の設定、収録周期の設定、平均反応度算出までの猶予範囲の設定及び線形出力信号を平滑化するフィルタの設定を行うものである。メンテナンス画面例を第3.7図に示す。

メニューバーは「終了（更新）」及び「キャンセル」のボタン構成とした。

小数点以下表示桁は、線形出力は0～3桁及び反応度は3～6桁を選択できる。

収録周期は、100ms、200ms（デフォルト設定）、400ms、500ms及び1000msから選択できる。

猶予範囲の設定は、上昇と下降の反応度算出範囲が同じ場合に線形出力信号の揺らぎ及びノイズにより反応度算出範囲が切り替わる際の誤動作（反応度算出終了と反応度算出開始が繰り返されること）を防止するために設定するものであり、0kW、0.1kW、0.2kW、0.5kW、1kW、2kW、5.0kWから選択できる。

フィルタの設定は、高周波ノイズ成分をカットするために線形信号 Y に係数 $F_{(1)}$ と係数 $F_{(2)}$ を用いた時刻(t)で表し次式によるフィルタ処理を係数 $F_{(1)}+F_{(2)}=1$ とし、係数 $F_{(1)}$ は、0～1.0の範囲で選択できる。フィルタは、収集した線形信号 $Y_{(t)}$ に係数 $F_{(2)}$ をかけた値（変化部分）と一つ前の線形信号 $Y_{(t-1)}$ に係数 $F_{(1)}$ をかけた値（ベースとなる部分）をあわせ、この値を超えるものについて改めて線形信号 $Y(t)$ に戻す処理を行う。

$$Y_{(t)} = Y_{(t-1)} \times F_{(1)} + Y_{(t)} \times F_{(2)}$$

Y : 線形出力信号 t : 時間 $F_{(1)}$: フィルタ値 1 $F_{(2)}$: フィルタ値 2

(3) 制御棒校正のためのソフト処理操作手順

制御棒校正のためのソフト処理操作手順を第3.8図に示す。

ソフト処理を作動させる手順は、始めに IK 法制御棒校正装置の電源投入により Windows 98、FA-M3 Ethernet 用 DDE I/O サーバの順に起動し、Windows 98 初期画面となることを確認する。次に「制御棒校正」アイコンの選択を行い、「メインメニュー」画面の表示を確認する。

全ての操作が終了したら、「メインメニュー」より「終了」を選択操作して Windows 98 初期画面へ戻る。

1) オンライン処理

「メインメニュー」から「オンライン」を選択操作し、オンライン画面を表示する。オンライン画面での手順を次に示す。

① 核定数の選択及び確認を行う。

「選択核定数 N o」のボタンを選択し、反応度演算に用いる動特性パラメータの新規登録、修正または選択を行う。

② X 軸、Y 軸の確認及び変更を行う。

「X 軸変更」を選択し、トレンド表示部の X 軸始点と終点を秒単位で入力する。また、「Y 軸変更」を選択し、トレンド表示部の線形出力軸、反応度軸、制御棒操作開始位置又は制御棒操作停止位置の上下限値を入力する。

③ 自動評価範囲（上昇）、（下降）の確認及び変更を行う。

自動評価範囲の設定は、線形出力信号からステップ反応度を算出するために線形出力信号の変化巾の範囲を設定するものである。正の反応度添加時（「平均範囲（上昇）」を選択）及び負の反応度添加時（「平均範囲（下降）」を選択）におけるステップ反応度算出範囲の上下限値を入力する。

④ 必要に応じて中性子源強度の補正をする。

「中性子源強度」を選択し、オフライン反応度測定にて測定した中性子源強度の算出結果を入力し、中性子源強度の補正を行う。

⑤ 収録開始前条件（出力臨界状態及び制御棒位置）を確認する。

⑥ 「収録開始」を選択操作してステップ反応度算出を開始する。

⑦ 「収録終了」を選択操作してステップ反応度算出を終了させる。

⑧ メッセージに従った操作を行うことによりデータ保存を行うか選択する。FA-M3 からの直接のデータは C:\jrr3\new\data 内に、ステップ反応度データは C:\jrr3\new\step 内に保存される。

⑨ 「メニューへ戻る」を選択し、平均反応度算出が必要であればオフライン処理を行い、必要なければステップ編集を行う。

2) ステップ編集

「メインメニュー」から「ステップ編集」を選択操作し、ステップ編集画面を表示する。ステップ編集画面での手順を次に示す。

- ① データの選択を行い、対象データ（Step 年月日時分.csv）を表示させる。
- ② ステップデータが正常に保存されていることを確認し、必要に応じてステップ編集を行う。
ステップ編集は、該当するステップをマウス操作により選択し、ステップ表示した反応度、時間、制御棒位置を入力して行う。ステップデータの挿入、削除は、該当するステップをマウス操作（右クリック）し、コンテキストメニュー表示に従った操作にて行う。
- ③ 編集及び確認後、「終了（登録後）」選択操作し、メインメニューに戻る。修正結果等を無効にする場合は、「キャンセル」の選択操作を行う。
保存データは、ステップ反応度データが C:\jrr3\new\step 内の基のデータに上書き保存される。

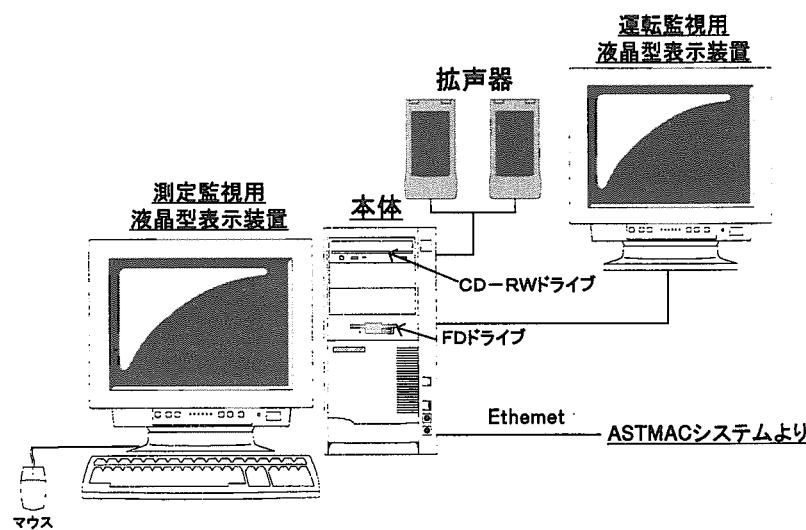
3) オフライン処理

「メインメニュー」から「オフライン」を選択操作し、オフライン画面を表示する。オフライン画面での手順を次に示す。

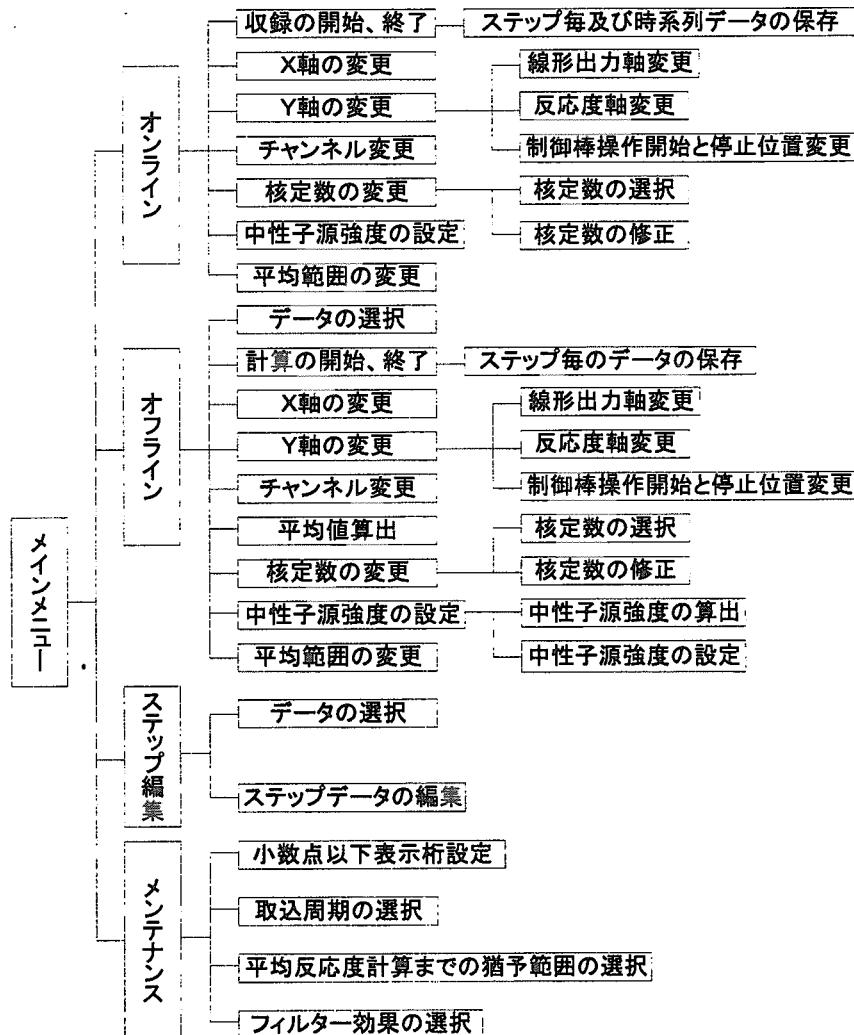
- ① データの選択を行い、対象データ（Data 年月日時分.csv）を表示させる。
- ② 核定数の選択及び確認を行う。
「選択核定数No」のボタンを選択し、反応度演算に用いる動特性パラメータの新規登録、修正または選択を行う。
- ③ 必要に応じて中性子源強度の補正を行う。
中性子源強度の算出は、「中性子源強度」と「計算」を選択し、中性子源強度算出範囲の（始点）、（終点）をマウス操作にて決定することにより中性子源強度の算出結果の表示を行う。更に「中性子源強度」を選択し、算出結果を入力し、中性子源強度の補正を行う。
- ④ 「計算開始」を選択操作してステップ反応度算出を行う。
計算は、最終データに達するまであるいは「計算終了」の選択操作を行うまで実行する。また、計算開始前に時間軸（X軸）を長めに設定することによりトレンド表示負荷が軽減され、計算が早く終了することができる。
- ⑤ データ保存確認メッセージに従った操作を行い、データ保存を行うか選択する。ステップ反応度データが C:\jrr3\new\step 内の基のデータに上書き保存される。
- ⑥ 「メニューへ戻る」を選択操作して終了する。平均反応度算出が必要であれば次項の操作を行う。
- ⑦ 「平均値算出」を選択操作して、評価したい範囲の始点、終点を選択して、平均反応度の算出及び結果の表示を行う。
- ⑧ 「メニューへ戻る」を選択操作して終了し、必要に応じてステップ編集を行う。

第3. 1表 I K法制御棒校正装置の主要仕様

項目	仕 様
本 体	型式 : Dimension XPS B (DELL 社製)
	演算処理速度 : 1 G H z
	主記憶容量 : 2 5 6 M B
	固定ディスク容量 : 3 0 G B
	内装ユニット : Ethernet 通信カード C D - R W ドライブ F D ドライブ L C D 出力 64MB ビデオカード ボイスサウンドカード キーボード・マウスカード
測定監視用と 運転監視用 液晶型表示装置 (L C D)	型式 : 1501FP (DELL 社製) 方式 : TFT15 インチカラー 解像度 : 1280 × 1024 ピクセル 台数 : 2 台
拡 声 器	型式 : harman/kardon HK695 サブウーファ付 出力 : 1 2 0 W 外形 : 幅 9cm × 奥行き 15cm × 高さ 29cm 台数 : 1 式



第3.1図 IK法制御棒校正装置の構成

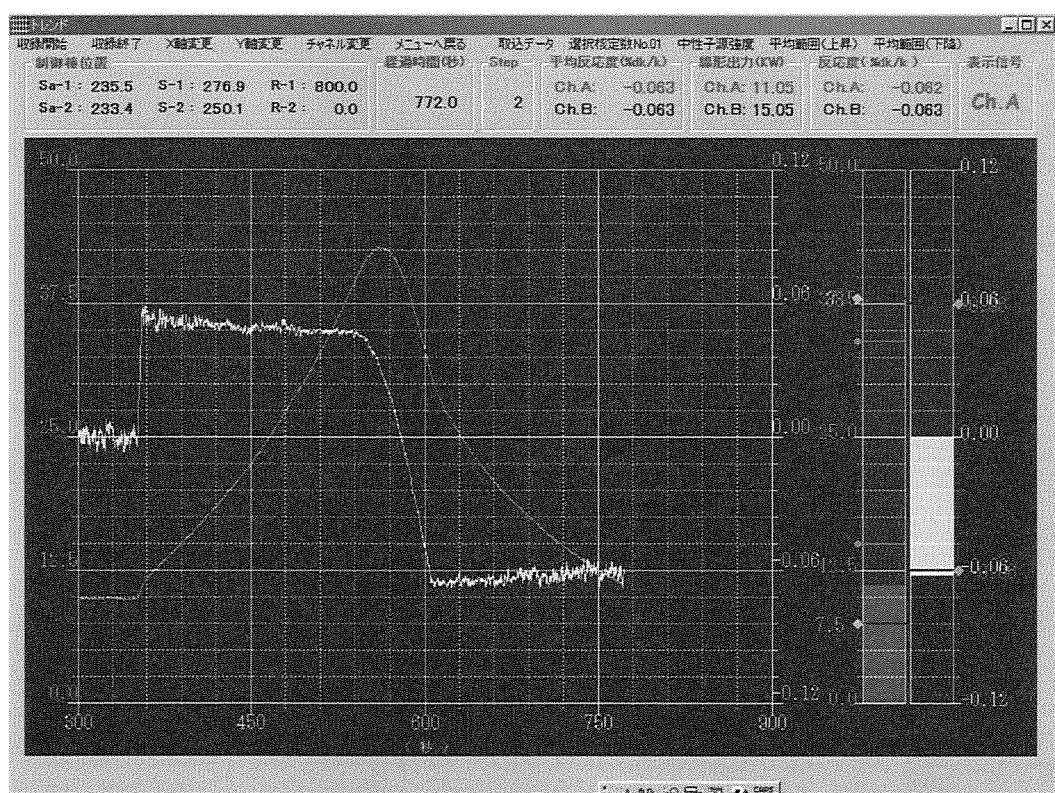


第3.2図 IK法制御棒校正装置の機能

This is a blank page.

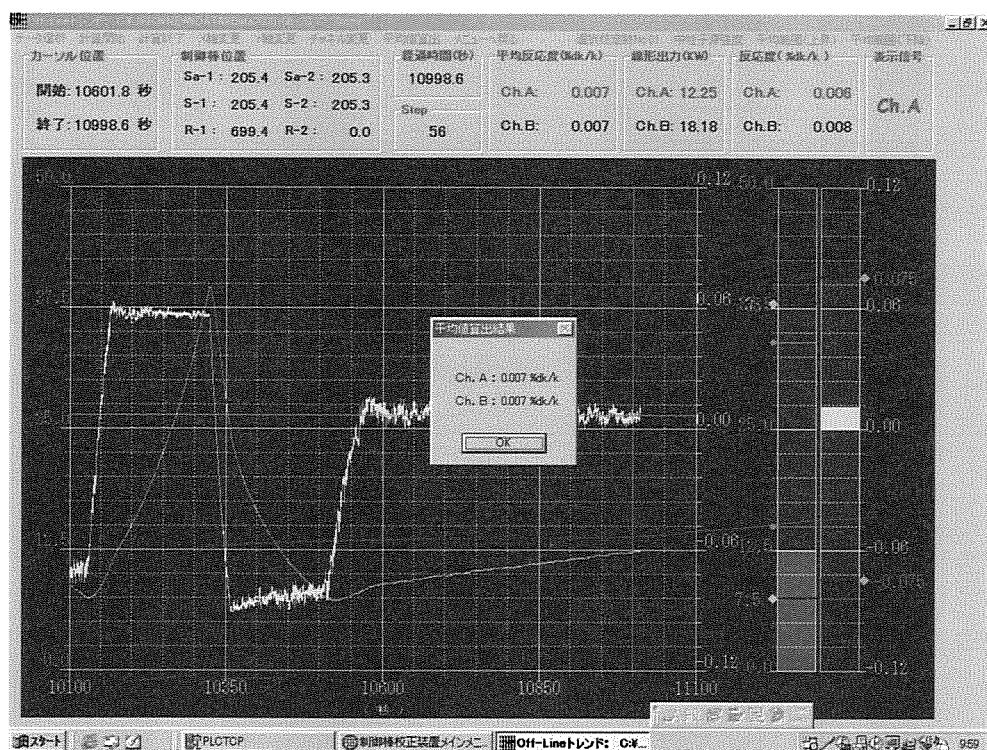


第3.3図 メインメニュー画面



第3.4図 オンライン反応度測定画面例

This is a blank page.

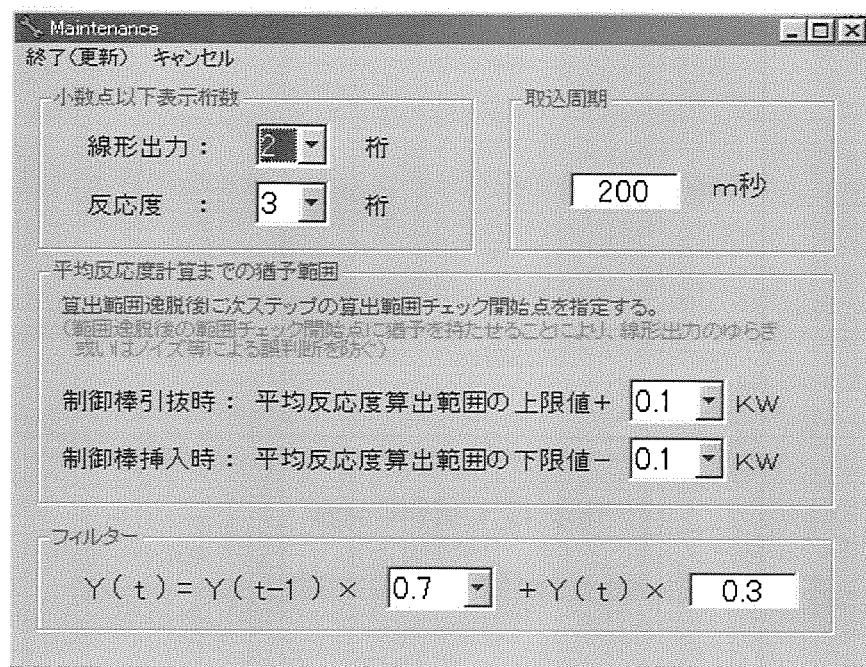


第3.5図 オフライン反応度測定画面例



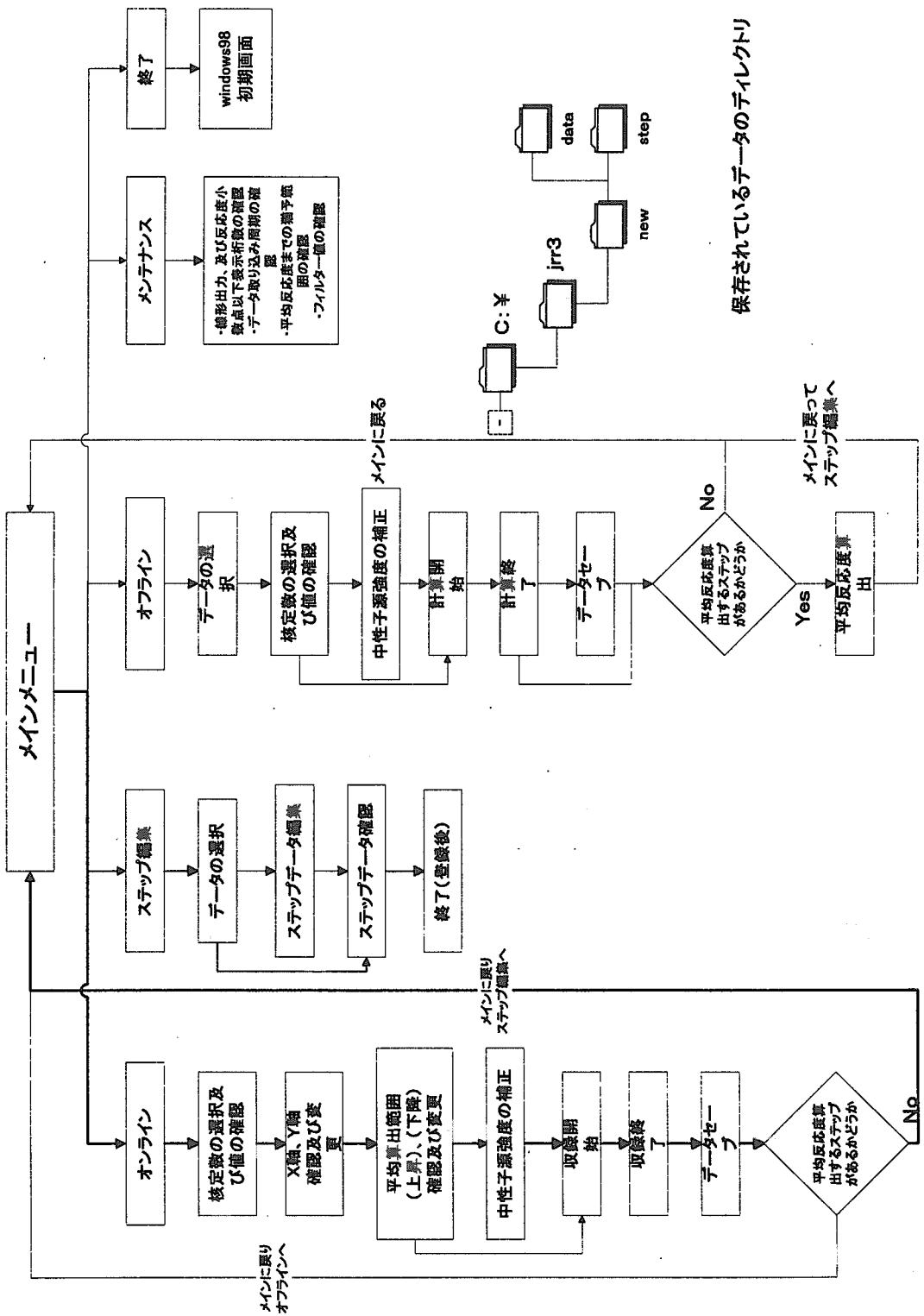
第3.6図 ステップ編集画面例

This is a blank page.



第 3.7 図 メンテナンス画面例

This is a blank page.



第3.8図 制御棒校正のためのソフト処理操作手順

4. IK法制御棒校正装置の機能及び性能の確認

平成12年度定期自主検査の結果を用いてIK法制御棒校正装置の機能及び性能の確認を行った。以下に制御棒校正手順及び制御棒校正結果を示す。

4. 1 制御棒校正手順

4. 1. 1 測定手順

第4.1図に制御棒校正作業のフロー図を示す。平成12年度定期自主検査での測定は、以下に示すように、S_a制御棒、S制御棒、R制御棒の順序でそれぞれの制御棒毎に各1組として実施した。また、平成12年度定期自主検査時の経験に基づいた標準的な制御棒校正作業の要領を作成した。付録2.にJRR-3制御棒校正試験要領を示す。

以下に平成12年度定期自主検査で行った測定手順を示す。

(1) 測定前準備

- ① 原子炉起動前点検が終了していること。
- ② 冷却系運転モードは高設定であること。
- ③ 原子炉運転モードは低設定であること。
- ④ 試験用機器が正常に接続していること。
- ⑤ プロセス量の測定

炉心出口及び入口温度、臨界時の線形出力、1次冷却材流量を記録用紙に記録する。

(2) S_a制御棒の校正

- ① 全制御棒をフラット位置（各制御棒の引抜き位置が同じ状態を言う。）で臨界（線形出力約10kW）とし、10分以上保持後、運転状態を記録する。
- ② 制御棒フラット位置の臨界状態から、S_a-2を全引き抜き位置、S_a-1は全挿入位置に入れ替え、それ以外の制御棒をフラット位置とする。
- ③ 原子炉出力を線形出力で約35kWまで上昇させる。
- ④ 線形出力計レンジを手動に切り替え、50kWレンジを選択する。
- ⑤ 各制御棒位置を記録する。
- ⑥ IK法制御棒校正装置のメインメニュー画面より「オンライン」反応度測定画面を選択し、各種確認事項をチェックし、「収録開始」を選択する。
- ⑦ S_a-2制御棒を反応度指示で約-0.025%Δk/k（制御棒位置で約700mm）まで、ステップで挿入する。
- ⑧ 線形出力が約10kWまで降下した時点でS_a-1制御棒を反応度指示で約0.025%Δk/k（制御棒位置で約30mm）までステップで引き抜く。
- ⑨ 線形出力が約40kWまで上昇した時点でS_a-2制御棒を反応度指示で約-0.075%Δk/kまでステップで挿入する。
- ⑩ 線形出力が約10kWまで降下した時点でS_a-1制御棒を反応度指示で約0.075%Δk/kまでステップで引き抜く。

- ⑪ 以下、⑨、⑩の操作を S a - 1 制御棒が全引き抜き、S a - 2 制御棒が全挿入になるまで繰り返す。なお、S a - 1 制御棒が途中で全引き抜きになった場合には補償制御棒として S - 1 制御棒を引き抜く。
- ⑫ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。70 ステップ目は、平均反応度処理機能により反応度を求める。
- ⑬ 原子炉を手動リバースで停止する。

(3) S 制御棒の校正

- ① S a 制御棒の校正手順の内 S a を S に読み替えた手順で行う。
- ② 測定作業終了後、「データ保存確認」でデータ保存を行う。60 ステップ目は平均反応度処理機能により反応度を求める。
- ③ S - 1 制御棒約 50mm、S - 2 制御棒約 580mm、他の制御棒フラット位置で線形出力約 35 k W の臨界操作を行う。
- ④ 制御棒校正装置の画面より「オンライン」反応度測定画面を選択し、各種確認事項をチェックし、「収録開始」を選択する。
- ⑤ S - 2 制御棒を約 640mm までステップ当たりの添加反応度約 0.075% $\Delta k/k$ とした引抜き操作を行う。(補償用の S - 1 制御棒は、挿入操作を行う。)
- ⑥ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。
- ⑦ S - 1 制御棒約 640mm、S - 2 制御棒で線形出力約 10 k W の臨界操作を行う。
- ⑧ 制御棒校正装置の画面より「オンライン」反応度測定画面を選択し、各種確認事項をチェックし、「収録開始」を選択する。
- ⑨ S - 1 制御棒を約 710mm まで引抜き操作を行う。
- ⑩ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。
- ⑪ 原子炉を手動リバースで停止する。

(4) R 制御棒の校正

- ① R - 1 : 全挿入、R - 2 : 700mm 位置、それ以外の制御棒をフラット位置で線形出力約 10 k W 臨界とする。
- ② 「(2) S a 制御棒の校正」の④、⑤、⑥を行う。
- ③ R - 2 制御棒を 800mm まで連続で引き抜き測定する。
- ④ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。その後、①の状態に制御棒位置を戻し、線形出力約 10 k W 臨界状態とする。
- ⑤ 「(2) S a 制御棒の校正」の⑤、⑥を行う。
- ⑥ R - 1 制御棒を反応度指示で約 0.025% $\Delta k/k$ までステップで引き抜き測定し、続いて R - 2 制御棒を反応度指示で約 -0.025% $\Delta k/k$ までステップで挿入し測定する。
- ⑦ 以降、「(2) S a 制御棒の校正」の S a を R に読み替えて⑩と⑨を繰り返して R 制御棒 0~700mm の範囲を測定する。
- ⑧ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。
- ⑨ R - 1 : 700mm 位置、R - 2 : 全挿入、それ以外の制御棒をフラット位置で線形出力約 10 k W 臨界とする。

- ⑩ 「(2) Sa 制御棒の校正」の⑤、⑥を行う。
- ⑪ R - 1 制御棒を 800mmまで連続で引き抜き測定する。
- ⑫ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。
- ⑬ 原子炉を手動リバースで停止する。

4. 1. 2 測定データの処理

IK 法制御棒校正装置を用いて測定された制御棒の操作ステップ毎の制御棒位置指示値、ステップ当たりの反応度等の測定データは、制御棒の操作ステップ順に CSV 形式の「制御棒校正データテーブル」として 1 組の制御棒校正毎に保存される。「制御棒校正データテーブル」は、制御棒校正装置から FD または CD を媒体にして、制御棒校正試験データ処理用のパーソナルコンピュータに移植される。

制御棒校正試験データ処理は、制御棒反応度価値及び最大反応度変化率の算出並びにデータ処理用テーブルの作成、制御棒校正記録の作成、1 次データファイルの出力、フィッティング処理の実行、作図処理、作表処理及び帳票出力を行うものである。平成 12 年度定期検査時の制御棒校正試験データ処理の結果を付録 3. に示す。

データ処理用テーブルは、制御棒校正データテーブルを制御棒引き抜き操作ステップ順または制御棒挿入操作ステップ順に並び替え、さらに EXCEL 形式テーブルに変換処理して作成される。制御棒校正記録は、制御棒操作ステップ毎の制御棒の移動量と平均位置並びにステップ毎の反応度変化量及び反応度変化率と反応度積算を制御棒下限位置から上限位置方向のステップ順に並び替え、EXCEL 形式テーブルに変換処理して作成される。1 次データファイルは、制御棒校正記録の作成で算出した各制御棒毎の制御棒位置における反応度積算値のテキスト形式ファイルである。フィッティング処理の実行においては、まず、1 次データファイルを用いて反応度積算の積分曲線を最小 2 乗法により 10 次の多項式で近似し、各制御棒毎に積分曲線係数データファイルが作成される。また、反応度積算の 10 次の多項式を微分処理し、微分曲線を 9 次の多項式に近似し、各制御棒毎の微分曲線係数データファイルが作成される。次に、積分曲線及び微分曲線係数データファイルをもとに多項式近似式による EXCEL 作図機能を用いて、反応度価値曲線及び反応度変化率曲線が作図され、EXCEL 作表機能を用いて、各制御棒毎の制御棒反応度価値表及び制御棒過剰反応度表が作表される。

4. 2 制御棒校正結果

(1) ステップ反応度

1 ステップ当たりに添加する反応度が約 $\pm 0.07\% \Delta k/k$ になるように制御棒の引き抜き操作または挿入操作を行った。1 組当たりの制御棒操作ステップ数及び測定所要時間は、Sa 制御棒で 74 ステップの約 4 時間、S 制御棒で 64 ステップの約 4 時間、R 制御棒で 59 ステップの約 3 時間であった。制御棒校正作業は、測定手順を検討しながら行ったにも拘わらず、多重化した LCD 機能及びオフライン処理機能等により効率よく安全に実施できた。

ステップ毎の反応度演算の結果、各制御棒において反応度計算開始時から反応度計算終了時ま

で約 100 秒の間に約 $0.001\% \Delta k/k$ 減少することが判った。これは、重水領域で発生する光中性子の影響であると考えられ、その強度の影響を調べるためにオフライン処理機能を用いて Sa 制御棒を代表に中性子源強度を求め、反応度の再評価を行った。その結果、中性子源強度 $1.22\text{W}/\text{s}$ を考慮したステップ毎の反応度で最大 0.36% 及び反応度積算では 0.16% の僅かな増加であることから、中性子源の影響は少ないことが判った。また、反応度信号での振幅の差がステップの始めと終わりで約 2.5% と小さいことから、雑音信号の混入による影響が少なく、精度の良い測定結果を得ることができた。中性子源強度の算出結果を第 4.2 図に、中性子源強度を考慮しない場合の計算例を第 4.3 図に及び中性子源強度を考慮した場合の再評価例を第 4.4 図に示す。

制御棒上下端部の小さな反応度値をオンライン処理機能で測定する場合でかつ、投入されるステップ当たりの反応度が中性子信号の自動評価範囲に達しない場合は、再臨界操作が必要である。しかし、この場合であってもオフライン処理機能により平均反応度として算出できることから再臨界操作は行わなかった。オフライン処理機能による平均反応度の算出は、Sa 制御棒、S 制御棒各 1 回であった。

中性子吸收体とフォロワ型燃料要素の接続部構造に起因する制御棒の反応度の不連続性により、制御棒校正曲線にピークが生じることが考えられる。IK 法は制御棒操作開始から終了までに加わる反応度を測定するものであり、ピーク位置での反応度を正確に測定するものではない。測定精度が高く効率的な制御棒校正を実施するためには、ピーク位置を正確に求めておく必要がある。制御棒 S-2 において、約 650mm から上限位置まで連続的に引抜き操作を行い、反応度の変化を測定した結果、約 700mm でピークが発生することが判った。なお、制御棒上限位置からピーク位置までの反応度は約 $0.11\% \Delta k/k$ であった。測定結果を第 4.5 図に示す。

全制御棒は全て同様な構造であるため、S-2 以外の制御棒においても約 700mm でピークが発生すると考えられる。今後、制御棒校正を行う際には、測定範囲を、制御棒下限位置から約 700mm までの範囲及び制御棒約 700mm から上限位置までの範囲に分割して測定することとした。

(2) 制御棒反応度値

制御棒反応度値及び最大反応度変化率の測定結果を第 4.1 表に示す。制御棒反応度値の測定結果は、対称位置にある制御棒同士良く一致した値を示し、全制御棒反応度値は $26\% \Delta k/k$ を得た。また、測定系の精度約 $\pm 1\%$ ⁽⁵⁾、有効数字 2 衔の数値丸め精度約 $\pm 1.5\%$ 、中性子源強度の影響による精度約 $\pm 0.5\%$ 等を考慮して約 $\pm 3\%$ 以内の高い精度の測定結果を得た。

制御棒の最大反応度変化率は、最大反応度値を有する Sa-2 制御棒で $0.0113\% \Delta k/k/\text{mm}$ の結果を得た。

4. 3 IK 法制御棒校正装置の機能及び性能の確認結果

平成 12 年度 JRR-3 定期自主検査時の制御棒校正の結果を用いて新たに製作した IK 法制御棒校正装置の機能及び性能の確認を行った。その結果、本装置は、次に示す測定を可能とする機能を有していることが実証できた

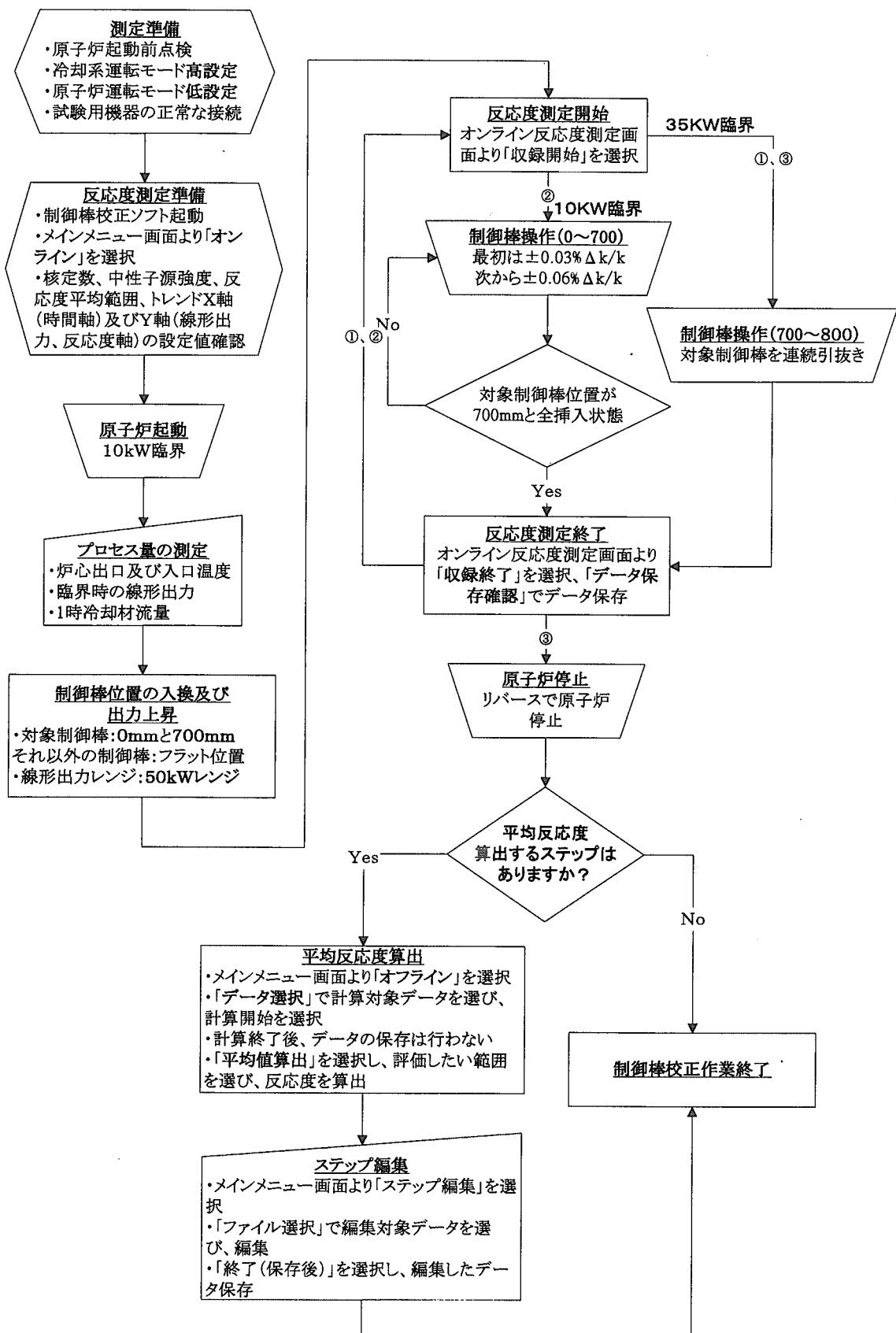
- (1) IK法を用いた反応度測定プログラム及び階層構造で対話型の測定プログラムにより、作業の合理化、効率化を図った測定。
- (2) 既設設備からの多種類の測定信号を自動収集することによりデータの手入力による誤りをなくし信頼性が向上した測定。
- (3) 制御棒引き抜き量の誤操作時等における測定途中の再臨界操作をなくす合理化した測定。
- (4) 中性子源の影響を評価、デジタル技術を駆使した回路構成の採用による高精度の測定。
- (5) 液晶型表示器を多重に設けて原子炉運転員の監視・操作と測定班の確認が同時に行うことができる安全かつ確実な測定。

また、時系列の測定記録は、次に示す各オフライン処理機能により、有効に評価、活用を図ることができるなどを確認した。

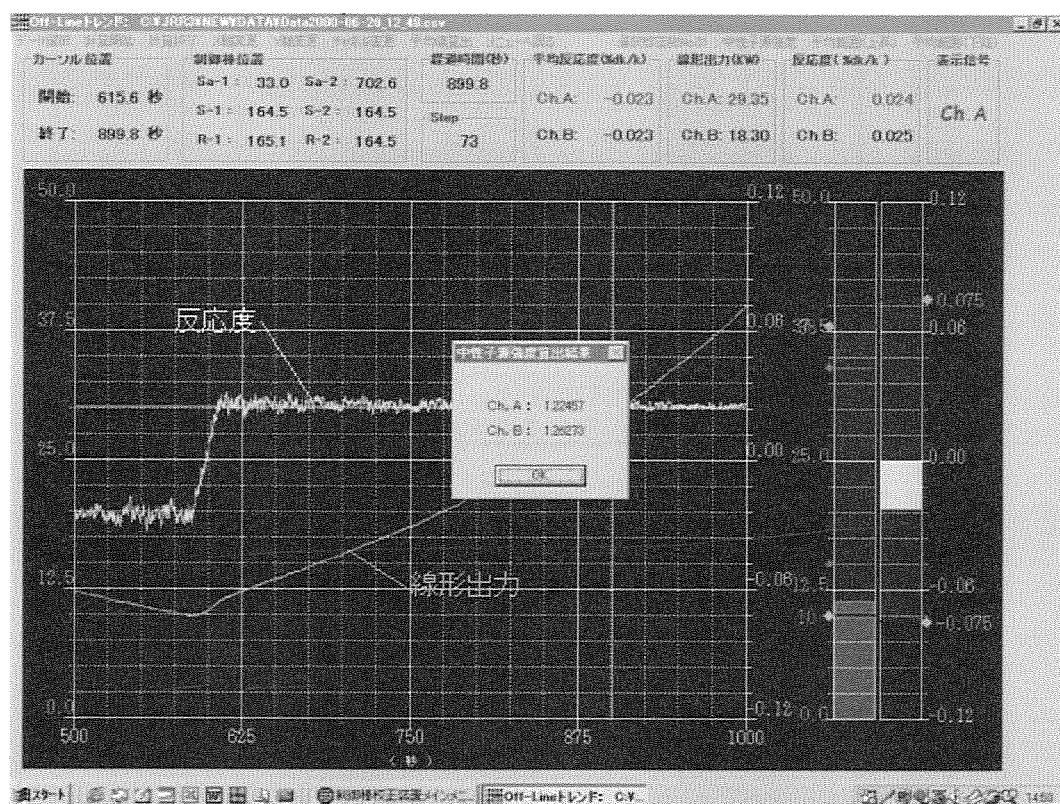
- ① 測定条件の再設定及び時間軸を圧縮した測定経過の再現。
- ② 任意操作ステップの平均反応度の算出。
- ③ 中性子源強度の算出。
- ④ フロッピーディスク (FD)・コンパクトディスク (CD)への記録、編集。

第 4.1 表 制御棒校正結果

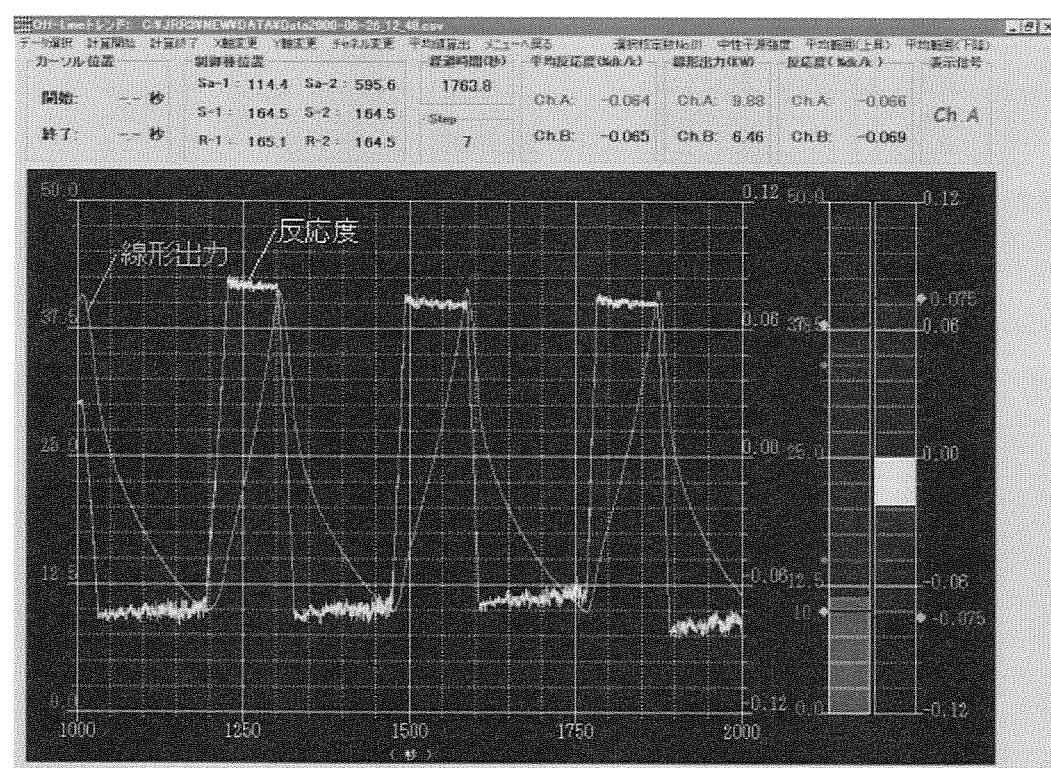
制御棒名称	制御棒反応度値 (% $\Delta k/k$)	最大反応度変化率 (% $\Delta k/k/mm$)
S a - 1	4.8	0.0109
S a - 2	5.0	0.0113
S - 1	4.1	0.0108
S - 2	4.2	0.0110
R - 1	3.9	0.0106
R - 2	3.9	0.0107
合計	25.9	—



第4.1図 制御棒校正作業のフロー

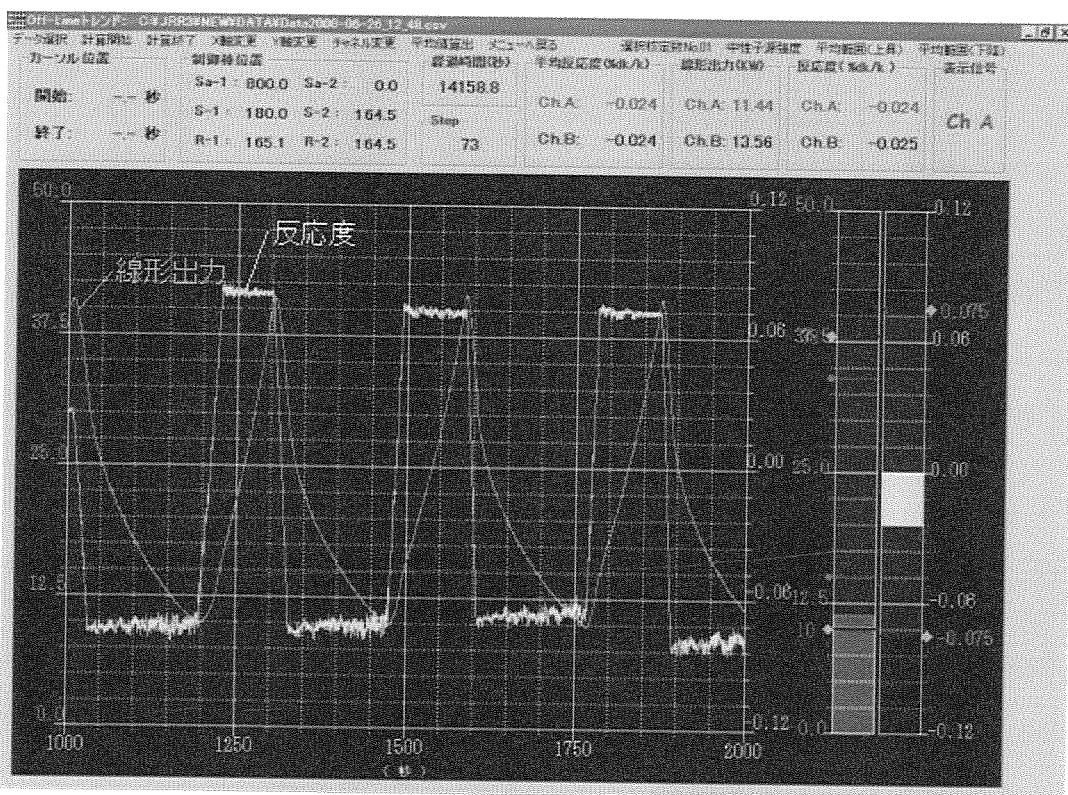


第4.2図 中性子源強度の算出結果

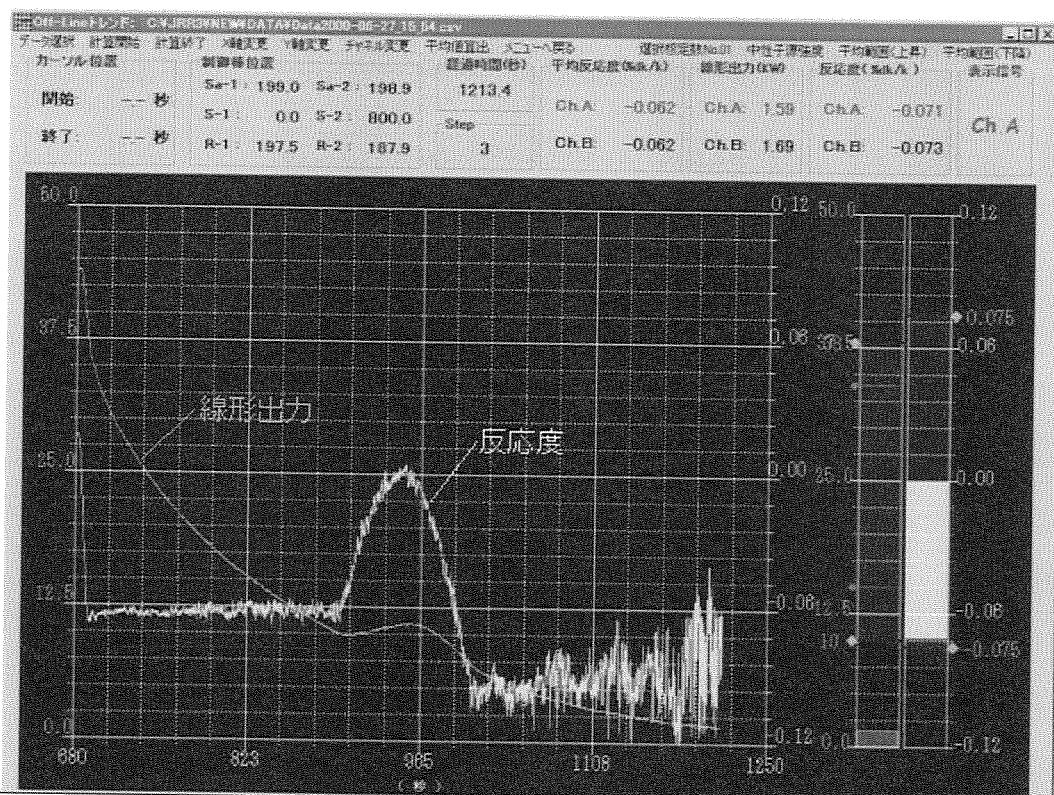


第4.3図 中性子源強度を考慮しない場合の計測例

This is a blank page.



第4.4図 中性子源強度を考慮した場合の再評価例



第4.5図 650mm～上限位置までの制御棒引抜き操作時の計測例

This is a blank page.

5. おわりに

JRR-3 は、IK 法を用いた制御棒校正に関して約 10 年の実績を有しており、この実績を踏まえて、測定精度の向上及び制御棒校正作業の合理化を目的とした IK 法制御棒校正装置を作製し、平成 12 年度 JRR-3 定期自主検査時の制御棒校正の結果を用いて、本装置の機能及び性能の確認を行った。その結果、本装置を用いることにより、測定精度が高く、効率的な制御棒校正作業を円滑かつ確実に実施できることを確認した。なお、他施設の反応度測定（当所の各原子炉施設等における反応度測定の現状について付録 4. に示す。）においても JRR-3 制御棒校正装置で用いている汎用性のある測定プログラム、測定手法等を参考とするとできると考えられる。

謝　　辞

本報をまとめるにあたり、高柳政二研究炉部長、小林晋昇研究炉部次長、桜井文雄 JRR-3 管理課長に技術的なご指導、ご鞭撻を頂いた。また、測定に当たり原子炉の運転を担当した JRR-3 管理課諸氏と関係者、測定データの纏めについて放射線利用振興協会 JRR-3 グループ 堀田克敏氏及び測定プログラムの作成について日立エンジニアリングサービス株式会社八塚尚氏に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) 日本原子力研究所研究炉部 : JAERI-Review 99-032, “平成 10 年度研究炉部年報（運転・利用と研究・技術開発）2000 年 2 月” (2000).
- (2) 日本原子力研究所 JRR-3 管理課・研究炉利用課 : JAERI-Tech 2000-027, “JRR-3M シリサイド燃料炉心の特性試験”, (2000).
- (3) 安 成弘、原子力辞典編集委員会、“原子力辞典”、日刊工業新聞社 (1995).
- (4) 武田康司他：“電気工学ハンドブック 8 編電子デバイス”，社団法人電気学会 (1993).
- (5) Yasuo OHSAWA and Kanji KATO : J.Nucl.Sci.and Technol., 8 [3], 122~128 (1971).
- (6) 竹内光男他 : JAERI-Tech 2000-0054, “定常的な中性子源の影響を受ける場合の逆動特性法による制御棒反応度価値測定手法の開発”, (2000).
- (7) 松尾浩、松尾道明：“TCP/IP ネットワーク”，日刊工業新聞社 (1995).

付録 1.

逆運動特性法（IK法）の測定原理

(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している。核分裂反応は、増倍率 $k(t)$ で表され、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 ρ の関係は、一群拡散モデルを空間依存のない単純化したモデルから得られる一点炉動特性方程式を表される。

ここで、N：中性子数

ρ : 反応度 ($\Delta k / k$)

β : 遅発中性子の全発生中性子に対する割合

ℓ : 即発中性子寿命 (s)

λ_i: i群の遅発中性子先行核の崩壊定数 (1/s)

C_i : i 郡の遅発中性子先行核の数

β_{ij} : i 群の遅発中性子の全発生中性子に対する割合

S : 由性子源強度

(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

$$Ci = Ci(0) e^{-\lambda i t} + \frac{\beta i}{\lambda} \int N(\tau) e^{-\lambda i(t-\tau)} d\tau \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (4)$$

時刻 t_+ の時の N の値を N_+ 、サンプリング周期 Δt を $(t_+ - t_{-})$ とすると

$$A_{i,j} = \int_0^t N(\tau) e^{-\lambda_i(t-\tau)} d\tau = A_{i,j-1} e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{1}{\mu_i + \lambda_i} (N_j - N_{j-1} e^{-\lambda_i \Delta t}) \quad \dots \quad (7)$$

として反応度 α は、次式で求められる。

$$\rho_j = \beta + \Lambda \mu_j - \frac{1}{N_j} \sum_i \beta_i (N_0 e^{-\lambda \Delta t_i} + \lambda_i A_{i,j}) - \frac{S\Lambda}{N_j} \quad \dots \quad (8)$$

また、中性子源強度 S の影響が少なく、 $S = 0$ とみなせる場合の反応度 ρ は

$$\rho_j = \beta + \Lambda \mu_j - \frac{1}{N_j} \sum_i \beta_i (N_0 e^{-\lambda \Delta t_i} + \lambda_i A_{i,j}) \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (9)$$

である。

従って、真の反応度 ρ は、次式で表す。

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 ρ （眞の反応度）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 $S <$ 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 ρ' 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反応度を投入して中性子源強度 S を求め、(10)式の反応度 ρ の実時間測定により行う。

(3) 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 ρ 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 ρ' 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。 $S = a$ 、 $\rho = b$ 、 $A/n = X$ 、 $\rho' = Y$ 及び指定の処理時間範囲を T とするデータ変換を行う。

真の反応度 ρ は、

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 ρ' を(10)式で再評価することにより真の反応度 ρ （投入反応度）を推定値として得る。

付録 2 . J R R - 3 制御棒校正試験要領書

制御棒校正における 1 回当たりの投入反応度について、 $\pm 0.075\% \Delta k / k$ を目標に行った場合、線形出力系の検出器に近い制御棒では、反応度投入の影響が緩和される前に反応度評価を開始する場合が生じる。これは、線形出力 50 kW レンジの $10\sim40\text{ kW}$ と比較的余裕の少ない範囲で反応度測定を行っているためである。この出力の測定範囲を大きく変更することはできないため、より正確な測定結果を得るために 1 回当たりに投入する反応度を $\pm 0.06\% \Delta k / k$ で行うこととする。次に測定手順を示す。

(1) 測定前準備

- ① 原子炉起動前点検が終了していること。
- ② 冷却系運転モードは高設定であること。
- ③ 原子炉運転モードは低設定であること。
- ④ 試験用機器が正常に接続されていること。
- ⑤ プロセス量の測定（制御棒校正前）

炉心出口及び入口温度、臨界時の線形出力、1 次冷却材流量を記録用紙に記録する。

(2) S a 制御棒の反応度測定

- ① 制御棒をフラット位置（各制御棒の引抜き位置が同じ状態を言う。）で臨界（線形出力 10 kW ）とし、10 分以上保持する。運転記録Ⅲを要求印字により出力する。
- ② 制御棒フラット位置の臨界状態から、S a - 2 を 700 mm 位置に、S a - 1 を全引き抜き位置に入れ替え、それ以外の制御棒をフラット位置とする。
- ③ 原子炉出力を線形出力で 35 kW まで上昇させる。
- ④ 線形出力計レンジを手動に切り替え、 50 kW レンジを選択する。
- ⑤ 各制御棒位置を記録する。
- ⑥ IK 法制御棒校正装置のメインメニュー画面より「オンライン」反応度測定画面を選択し、核定数、中性子源強度、反応度平均範囲、トレンドX軸（時間軸）及びY軸（線形出力、反応度軸）の設定値を確認し、「収録開始」を選択させる。
- ⑦ S a - 2 制御棒を 800 mm まで連続で引き抜き測定する。
- ⑧ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。その後、②の状態に制御棒位置を戻し、線形出力約 10 kW 臨界状態とする
- ⑨ 再度「収録開始」を選択する。
- ⑩ S a - 1 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $+0.03\% \Delta k / k$ （制御棒位置で 650 mm ）ぐらい、ステップで挿入する。

- ⑪ 線形出力（液晶画面）が 40 k w まで上昇した時点で S a - 2 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $-0.03\% \Delta k/k$ （制御棒位置で 30mm ）までステップで引き抜く。
- ⑫ 線形出力（液晶画面）が 10 k w まで降下して時点で S a - 1 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $+0.06\% \Delta k/k$ までステップで挿入する。
- ⑬ 線形出力（液晶画面）が 10 k w まで降下した時点で S a - 2 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $-0.06\% \Delta k/k$ までステップで引き抜く。
- ⑭ 以下、⑪、⑬の操作を S a - 1 制御棒が 700mm まで引き抜き、S a - 2 制御棒が全挿入になるまで繰り返す。なお、S a - 1 が途中で 700mm まで引き抜き状態になった場合は、R - 2 を補償制御棒として引き抜く。また、S a - 2 が途中で全挿入になった場合には、R - 1 を補償制御棒として挿入する。
- ⑮ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。
- ⑯ S a - 1 : 700mm 位置、S a - 2 : 全挿入、それ以外の制御棒をフラット位置で線形出力約 35 k W 臨界とする。
- ⑰ 再度「収録開始」を選択する。
- ⑱ S a - 1 制御棒を 800mm まで連続で引き抜き測定する。
- ⑲ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。必要に応じて平均反応度処理機能により反応度を求めてテーブルデータを編集する。
- ⑳ 最後に原子炉を手動リバースで停止する。

(3) S 制御棒の反応度測定

- ① 制御棒をフラット位置で臨界（線形出力 10 k w ）とし、10分以上保持する。運転記録Ⅲを要求印字により出力する。
- ② 制御棒フラット位置の臨界状態から、S - 2 を 700mm 位置に、S - 1 を全引き抜き位置に入れ替え、それ以外の制御棒をフラット位置とする。
- ③ 原子炉出力を線形出力で 35 k w まで上昇させる。
- ④ 線形出力計レンジを手動に切り替え、 50 k w レンジを選択する。
- ⑤ 各制御棒位置を記録する。
- ⑥ IK 法制御棒校正装置のメインメニュー画面より「オンライン」反応度測定画面を選択し、核定数、中性子源強度、反応度平均範囲、トレンドX軸（時間軸）及びY軸（線形出力、反応度軸）の設定値を確認し、「収録開始」を選択させる。
- ⑦ S - 2 制御棒を 800mm まで連続で引き抜き測定する。
- ⑧ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。その後、②の状態に制御棒位置を戻し、線形出力約 10 k W 臨界状態とする
- ⑨ 再度「収録開始」を選択する。
- ⑩ S - 1 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $+0.03\% \Delta k/k$ （制御棒位置で 650mm ）ぐらい、ステップで挿入する。
- ⑪ 線形出力（液晶画面）が 40 k w まで上昇した時点で S - 2 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $-0.03\% \Delta k/k$ （制御棒位置で 30mm ）までステップで引き抜く。

- ⑫ 線形出力（液晶画面）が 10 k W まで降下して時点で S - 1 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $+ 0.06\% \Delta k/k$ までステップで挿入する。
- ⑬ 線形出力（液晶画面）が 10 k W まで降下した時点で S - 2 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $- 0.06\% \Delta k/k$ までステップで引き抜く。
- ⑭ 以下、⑫、⑬の操作を S a - 1 制御棒が 700mm まで引き抜き、S a - 2 制御棒が全挿入になるまで繰り返す。なお、S - 1 が途中で 700mm まで引き抜き状態になった場合は、R - 2 を補償制御棒として引き抜く。また、S - 2 が途中で全挿入になった場合には、R - 1 を補償制御棒として挿入する。
- ⑮ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。
- ⑯ S - 1 : 700mm 位置、S - 2 : 全挿入、それ以外の制御棒をフラット位置で線形出力約 35 k W 臨界とする。
- ⑰ 再度「収録開始」を選択する。
- ⑱ S - 1 制御棒を 800mm まで連続で引き抜き測定する。
- ⑲ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。必要に応じて平均反応度処理機能により反応度を求めてテーブルデータを編集する。
- ⑳ 最後に原子炉を手動リバースで停止する。

(4) R 制御棒の反応度測定

- ① 制御棒をフラット位置で臨界（線形出力 10 k W ）とし、10分以上保持する。運転記録Ⅲを要求印字により出力する。
- ② 制御棒フラット位置の臨界状態から、R - 2 を 700mm 位置に、R - 1 を全引き抜き位置に入れ替え、それ以外の制御棒をフラット位置とする。
- ③ 原子炉出力を線形出力で 35 k W まで上昇させる。
- ④ 線形出力計レンジを手動に切り替え、 50 k W レンジを選択する。
- ⑤ 各制御棒位置を記録する。
- ⑥ IK 法制御棒校正装置のメインメニュー画面より「オンライン」反応度測定画面を選択し、核定数、中性子源強度、反応度平均範囲、トレンドX軸（時間軸）及びY軸（線形出力、反応度軸）の設定値を確認し、「収録開始」を選択させる。
- ⑦ R - 2 制御棒を 800mm まで連続で引き抜き測定する。
- ⑧ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。その後、②の状態に制御棒位置を戻し、線形出力約 10 k W 臨界状態とする
- ⑨ 再度「収録開始」を選択する。
- ⑩ R - 1 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $+ 0.03\% \Delta k/k$ （制御棒位置で 650mm ）ぐらい、ステップで挿入する。
- ⑪ 線形出力（液晶画面）が 40 k W まで上昇した時点で R - 2 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $- 0.03\% \Delta k/k$ （制御棒位置で 30mm ）までステップで引き抜く。
- ⑫ 線形出力（液晶画面）が 10 k W まで降下して時点で R - 1 制御棒を反応度指示（液晶画面）で $+ 0.06\% \Delta k/k$ までステップで挿入する。

- ⑬ 線形出力（液晶画面）が 10 kWまで降下した時点で R-2 制御棒を反応度指示（液晶画面）で -0.06%Δk/k までステップで引き抜く。
- ⑭ 以下、⑫、⑬の操作を S a-1 制御棒が 700mmまで引き抜き、S a-2 制御棒が全挿入になるまで繰り返す。なお、R-1 が途中で 700mmまで引き抜き状態になった場合は、S-2 を補償制御棒として引き抜く。また、R-2 が途中で全挿入になった場合には、S-1 を補償制御棒として挿入する。
- ⑮ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。
- ⑯ R-1 : 700mm位置、R-2 : 全挿入、それ以外の制御棒をフラット位置で線形出力約 35 kW臨界とする。
- ⑰ 再度「収録開始」を選択する。
- ⑱ R-1 制御棒を 800mmまで連続で引き抜き測定する。
- ⑲ 測定作業終了後、「収録終了」を選択し「データ保存確認」でデータ保存を行う。必要に応じて平均反応度処理機能により反応度を求めてテーブルデータを編集する。
- ⑳ 最後に原子炉を手動リバースで停止する。

制御棒校正 (S a、S、R) 記録用紙
実施日 平成 年 月 日 ()

制御棒校正開始前炉心データ (:)

臨界出力	線形出力A	k w
	線形出力B	k w
炉心出口温度	T I 2 1 1 A	°C
	T I 2 1 1 B	°C
炉心入口温度	T I 2 1 6 A	°C
	T I 2 1 6 B	°C
1次冷却材流量	F I 2 1 5 A	m ³ /h
	F i 2 1 5 B	m ³ /h

制御棒校正終了後炉心データ (:)

炉心出口温度	T I 2 1 1 A	°C
	T I 2 1 1 B	°C
炉心入口温度	T I 2 1 6 A	°C
	T I 2 1 6 B	°C

核定数及び操作設定

即発中性子寿命 (sec)	ℓ	1. 5 2 1 1 0 E - 4	Y 軸	平均範囲	上昇	15.00~34.00KW
実効遅発中性子発生割合 (sec ⁻¹)	$\beta 1$	2. 4 0 0 4 0 E - 4		下降	23.00~12.00KW	
	$\beta 2$	1. 5 7 7 6 4 E - 3		線形出力	0~50KW	
	$\beta 3$	1. 4 2 5 7 0 E - 3		反応度	-0.12~0.12% Δ k/k	
	$\beta 4$	2. 8 6 4 6 0 E - 3		操作開始	7.5~38KW	
	$\beta 5$	8. 4 9 4 0 9 E - 4		操作終了	-0.06~0.06% Δ k/k	
	$\beta 6$	3. 1 0 1 0 2 E - 4		X 軸	0~600 秒	
実効遅発中性子崩壊定数 (sec ⁻¹)	$\lambda 1$	1. 2 7 0 3 4 E - 2	メンテナ ンス	線形出力	少数 2 桁	
	$\lambda 2$	3. 1 7 0 4 3 E - 2		反応度	少数 3 桁	
	$\lambda 3$	1. 1 5 2 8 1 E - 1		取込周期	2 0 0 m秒	
	$\lambda 4$	3. 1 1 6 9 1 E - 1		猶予範囲	+0.1、-0.1	
	$\lambda 5$	1. 4 0 0 3 2 E + 0		フィルタ	0.7、0.3	
	$\lambda 6$	3. 8 7 4 4 9 E + 0				

付録3. 制御棒校正試験データの処理（平成12年度）

This is a blank page.

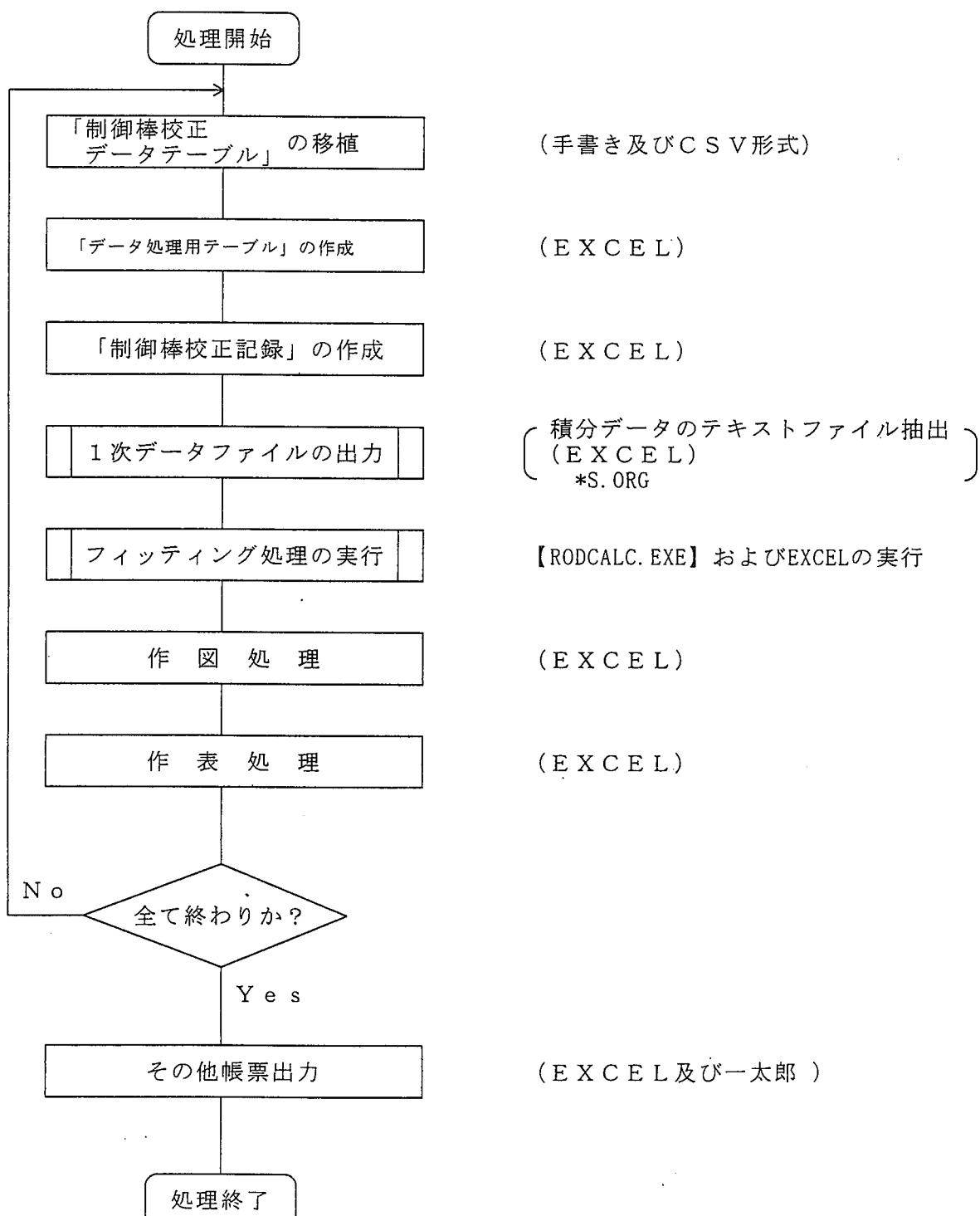
付録3. 制御棒校正試験データの処理（平成12年度）

1. はじめに

平成12年度の制御棒校正は、平成12年6月26日～28日にわたって実施した。測定の結果出力された「制御棒校正データテーブル」のデータをもとに、各制御棒毎の「反応度価値曲線」（積分データ）及び「反応度変化率曲線」（微分データ）を作成し、更に、各制御棒毎の「制御棒反応度表」及び「制御棒過剰反応度表」の作表を行った。処理フローは、「反応度価値曲線」の近似式から「反応度変化率曲線」を求める方式である。

2. データの処理フロー

「制御棒校正記録用紙」のデータを起点としたデータの処理フローを以下に示す。



2.1 「制御棒校正データテーブル」の移植

1組の制御棒校正作業終了後、CDまたはFDを媒体としてCSV形式の「制御棒校正データテーブル」を制御棒校正試験データ処理用のパソコンコンピュータに移植する。

2.2 「データ処理用テーブル」の作成

「制御棒校正データテーブル」を元に、EXCELで「データ処理用テーブル」を作成し、「制御棒校正記録」の作成に備える。

2.3 「制御棒校正記録」の作成

「データ処理用テーブル」をもとに、EXCEL上で「制御棒校正記録」を作成し、1次データファイル(*S.ORG)出力に備える。

このとき、「データ処理用テーブル」からの入力ファクターは、

制御棒位置	H	(mm)
反応度 ρ (始め)	ρ	(% $\Delta k / k$)
反応度 ρ (終わり)	ρ	(% $\Delta k / k$)

である。

対する「制御棒校正記録」の中での出力値は、

制御棒位置の変化量	ΔH	(mm)
制御棒の平均位置	$H_{\text{始}} + 1/2 \Delta H$	(mm)
反応度変化量	$\Delta \rho$	(% $\Delta k / k$)
反応度積算	ρ	(% $\Delta k / k$)
反応度変化率	$\Delta \rho / \Delta H$	(% $\Delta k / k / mm$)

である。

2.4 1次データファイルの出力

2.3のワークシートの中で、制御棒位置をXデータ、反応度積算をYデータとしてテキストファイル出力したものを、反応度価値曲線(積分曲線)の1次データファイルとする。

それぞれの、ファイル名称を次に示す。

表 2-1 1次データファイル

積分曲線の1次データ
Sa-1S. ORG
Sa-2S. ORG
S-1S. ORG
S-2S. ORG
R-1S. ORG
R-2S. ORG

2.5 フィッティング処理の実行

各制御棒においては、最小二乗法により、収束条件に近い積分曲線の近似式係数を求め、作図及び作表の出力に備える。

2.5.1 入力データ

表 2-2 【RODCALC. EXE】への入力データ

制御棒 種類	Sa-1 ~ R-2
積分曲線の1次データ（実測）	*S. ORG

2.5.2 出力データ

表 2-3 【RODCALC. EXE】の出力データ

制御棒 種類	Sa-1 ~ R-2
積分曲線係数データ	*SK. DAT

2.5.3 係数値の調整

【RODCALC. EXE】で得られた係数値 (*SK. DAT) およびEXCELで求めた係数値をEXCELに読み込み、ゴールシーク機能を用い、値収束のための微調整を行い、最終の係数値を求める。

2.6 作図処理

2.5.3 で得られた係数値をもとに、制御棒毎の「制御棒の反応度価値曲線」及び「制御棒の反応度変化率曲線」を作図出力する。（EXCEL）

2.7 作表処理

2.5.3 で得られた係数値をもとに、EXCEL上で「制御棒反応度表」及び「制御棒過剰反応度表」を作成、出力する。

2.8 その他帳票作成

全制御棒のデータが出揃ったところで、次の帳票を出力する。

「制御棒校正結果」

3. 図・表

- 3.1 「近似式係数データ」
- 3.2 「制御棒反応度値曲線」
- 3.3 「制御棒反応度変化率曲線」
- 3.4 作図処理概要
- 3.5 [RODCCALC.EXE] ソースリスト

3.1 「近似式係数データ」

This is a blank page.

制御棒校正に基づく積算値10次式積分曲線の係数データ

$$[\text{式: } S(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_{10}x^{10}] \quad \dots \quad (1)$$

となり、下記の係数値となります。

* * * * * S a - 1 * * * * *		* * * * * S a - 2 * * * * *	
Peak	4.818	Peak	5.017
a ₀	0. 000000000000000E+00	a ₀	0. 000000000000000E+00
a ₁	1. 438913133484780E-03	a ₁	1. 912554369592040E-03
a ₂	6. 163164698591570E-07	a ₂	-1. 206649358209690E-05
a ₃	1. 919143528539280E-07	a ₃	3. 324200008592020E-07
a ₄	-9. 861407246347650E-10	a ₄	-1. 808406424608220E-09
a ₅	4. 095783608104590E-12	a ₅	7. 088893708151470E-12
a ₆	-1. 406259176218050E-14	a ₆	-2. 110774425525490E-14
a ₇	3. 066991489338800E-17	a ₇	4. 135452414767420E-17
a ₈	-3. 836377408667990E-20	a ₈	-4. 841083582254540E-20
a ₉	2. 519987131647210E-23	a ₉	3. 051399178372640E-23
a ₁₀	-6. 748273635858210E-27	a ₁₀	-7. 954304063357120E-27

	S-1		S-2
Peak	4. 140	Peak	4. 237
a ₀	0. 000000000000000E+00	a ₀	0. 000000000000000E+00
a ₁	1. 916497348831920E-03	a ₁	2. 067457144424360E-03
a ₂	3. 249069777666590E-06	a ₂	-3. 201666629593090E-07
a ₃	1. 231808965940220E-07	a ₃	1. 552453738895570E-07
a ₄	2. 464851378558560E-10	a ₄	1. 188708298460740E-10
a ₅	-4. 377606784011780E-12	a ₅	-4. 037470011097890E-12
a ₆	1. 468100374070730E-14	a ₆	1. 393943655978150E-14
a ₇	-2. 384936571971870E-17	a ₇	-2. 259888370049780E-17
a ₈	2. 081561398957190E-20	a ₈	1. 943504793163380E-20
a ₉	-9. 225740119473310E-24	a ₉	-8. 378755153894710E-24
a ₁₀	1. 582945895416170E-27	a ₁₀	1. 366420717709510E-27

	R-1		R-2
Peak	3. 949	Peak	3. 942
a ₀	0. 000000000000000E+00	a ₀	0. 000000000000000E+00
a ₁	1. 780147848675210E-03	a ₁	2. 327100131176970E-03
a ₂	1. 445650286768800E-05	a ₂	-1. 430825250281490E-06
a ₃	-3. 281817129163760E-08	a ₃	1. 729539178541020E-07
a ₄	1. 389130033224720E-09	a ₄	4. 450945861878000E-11
a ₅	-9. 402356497545390E-12	a ₅	-4. 287739434338800E-12
a ₆	2. 826299070268160E-14	a ₆	1. 612273174396530E-14
a ₇	-4. 656825678348570E-17	a ₇	-2. 829528780426260E-17
a ₈	4. 374432224622170E-20	a ₈	2. 679849503789430E-20
a ₉	-2. 201568949281090E-23	a ₉	-1. 319203493217230E-23
a ₁₀	4. 609734121934250E-27	a ₁₀	2. 638038111685540E-27

以上の積分曲線10次式 (1) より、求める微分曲線の式は次のようにになります。

$y = S'(x)$ より

$$y = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + \dots + 10a_{10}x^9 \quad \dots \quad (2)$$

となります。

制御棒校正に基づく最大反応度変化率及び9次式微分曲線の係数データ

(2) 式を書き直すと

$$[\text{式: } B(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \dots + b_9x^9] \dots \quad (3)$$

となり、下記の係数値となります。

***** Sa-1 *****		***** Sa-2 *****	
MAX	10.92E-03 %Δ k/k/mm	MAX	11.26E-03 %Δ k/k/mm
b ₀	1.438913133484780E-03	b ₀	1.912554369592040E-03
b ₁	1.232632939718310E-06	b ₁	-2.413298716419380E-05
b ₂	5.757430585617840E-07	b ₂	9.972600025776050E-07
b ₃	-3.944562898539060E-09	b ₃	-7.233625698432890E-09
b ₄	2.047891804052290E-11	b ₄	3.544446854075730E-11
b ₅	-8.437555057308300E-14	b ₅	-1.266464655315290E-13
b ₆	2.146894042537160E-16	b ₆	2.894816690337190E-16
b ₇	-3.069101926934390E-19	b ₇	-3.872866865803640E-19
b ₈	2.267988418482490E-22	b ₈	2.746259260535370E-22
b ₉	-6.748273635858210E-26	b ₉	-7.954304063357120E-26
***** S-1 *****		***** S-2 *****	
MAX	10.78E-03 %Δ k/k/mm	MAX	11.04E-03 %Δ k/k/mm
b ₀	1.916497348831920E-03	b ₀	2.067457144424360E-03
b ₁	6.498139555333180E-06	b ₁	-6.403333259186180E-07
b ₂	3.695426897820650E-07	b ₂	4.657361216686700E-07
b ₃	9.859405514234250E-10	b ₃	4.754833193842960E-10
b ₄	-2.188803392005890E-11	b ₄	-2.018735005548940E-11
b ₅	8.808602244424380E-14	b ₅	8.363661935868910E-14
b ₆	-1.669455600380310E-16	b ₆	-1.581921859034850E-16
b ₇	1.665249119165760E-19	b ₇	1.554803834530700E-19
b ₈	-8.303166107525980E-23	b ₈	-7.540879638505240E-23
b ₉	1.582945895416170E-26	b ₉	1.366420717709510E-26
***** R-1 *****		***** R-2 *****	
MAX	10.62E-03 %Δ k/k/mm	MAX	10.65E-03 %Δ k/k/mm
b ₀	1.780147848675210E-03	b ₀	2.327100131176970E-03
b ₁	2.891300573537590E-05	b ₁	-2.861650500562970E-06
b ₂	-9.845451387491270E-08	b ₂	5.188617535623050E-07
b ₃	5.556520132898870E-09	b ₃	1.780378344751200E-10
b ₄	-4.701178248772700E-11	b ₄	-2.143869717169400E-11
b ₅	1.695779442160900E-13	b ₅	9.673639046379160E-14
b ₆	-3.259777974844000E-16	b ₆	-1.980670146298380E-16
b ₇	3.499545779697730E-19	b ₇	2.143879603031550E-19
b ₈	-1.981412054352980E-22	b ₈	-1.187283143895510E-22
b ₉	4.609734121934250E-26	b ₉	2.638038111685540E-26

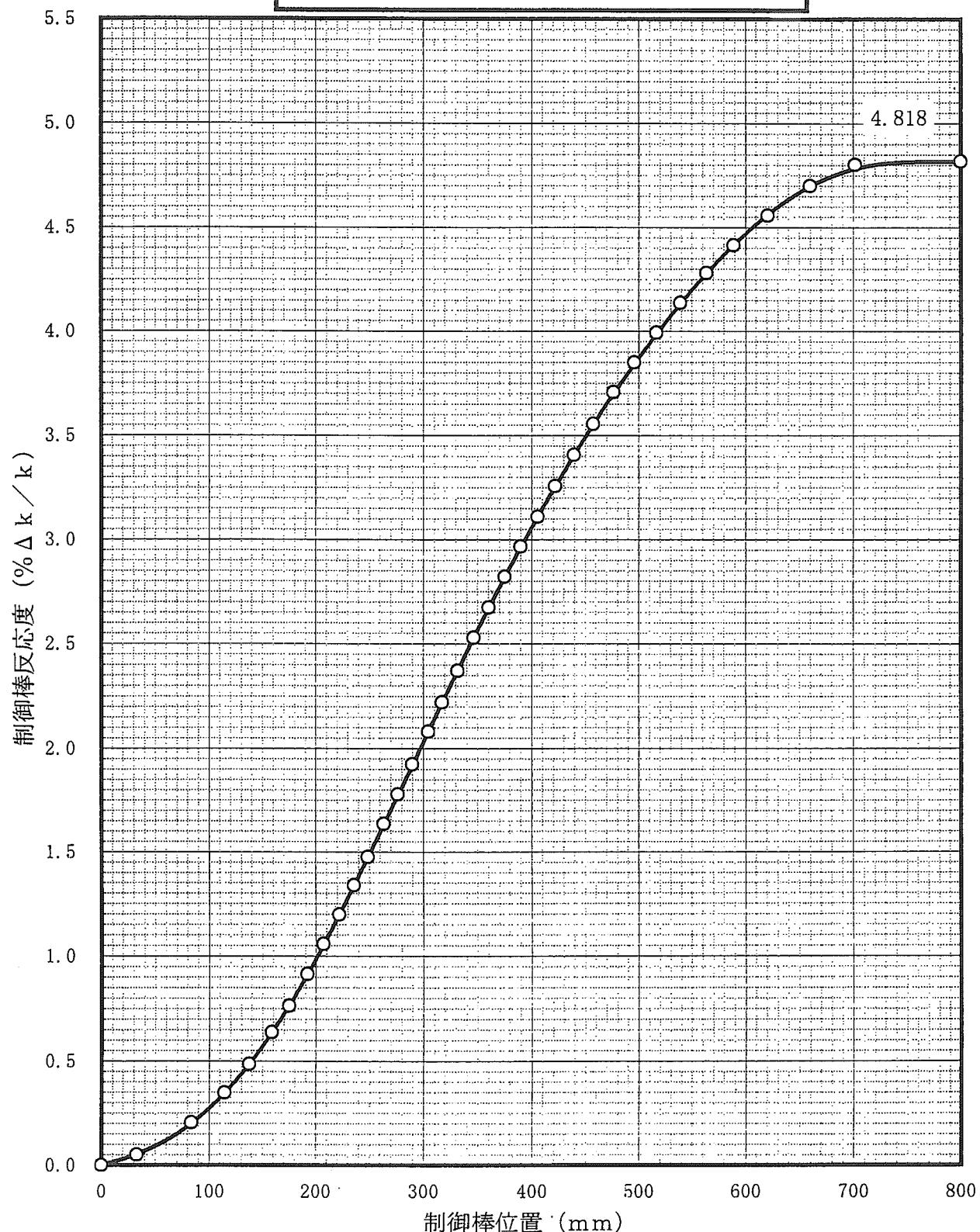
3.2 「制御棒反応度価値曲線」

This is a blank page.

制御棒の反応度価値曲線

制御棒 : Sa-1

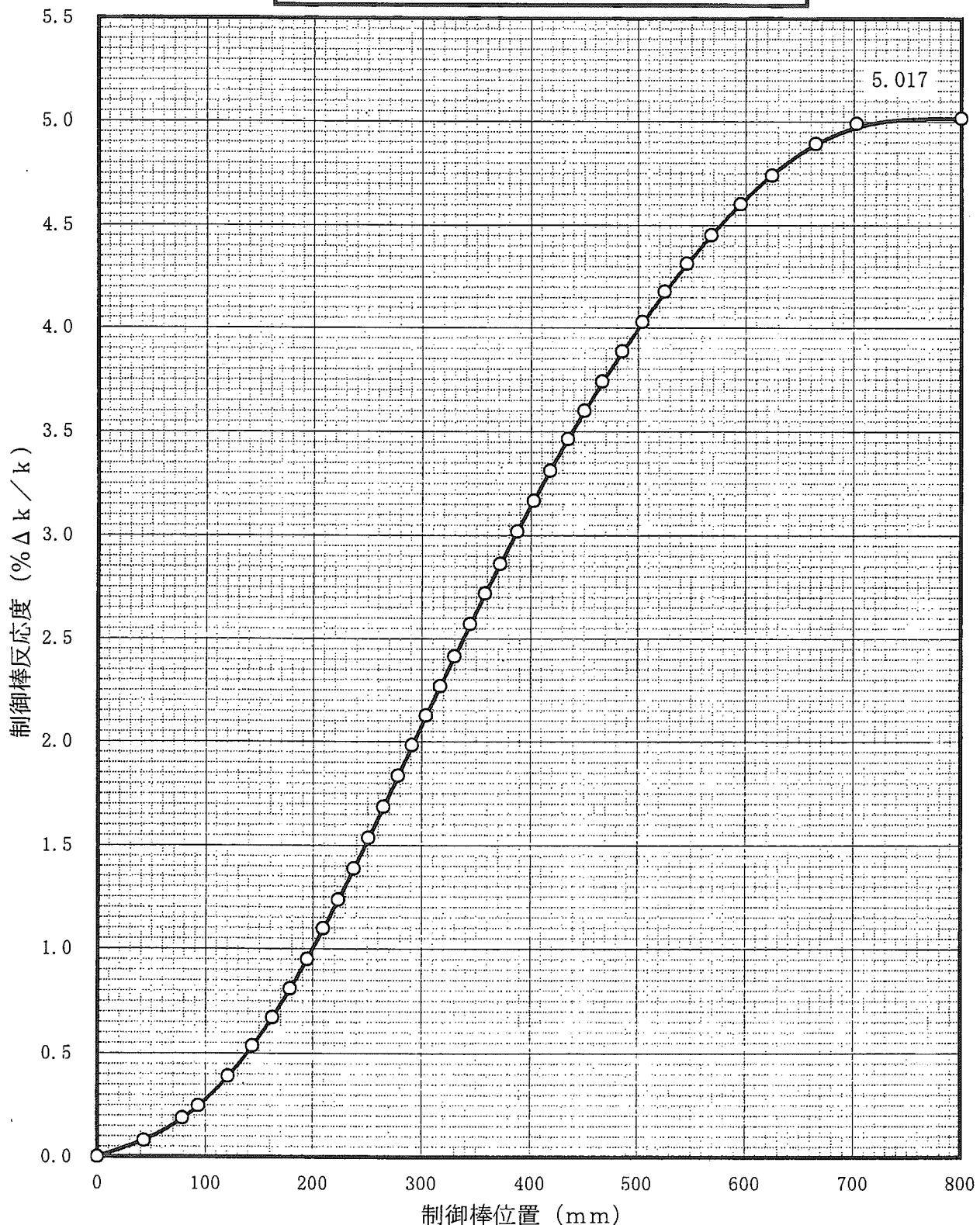
測定日 : 平成12年6月26日



制御棒の反応度価値曲線

制御棒 : Sa-2

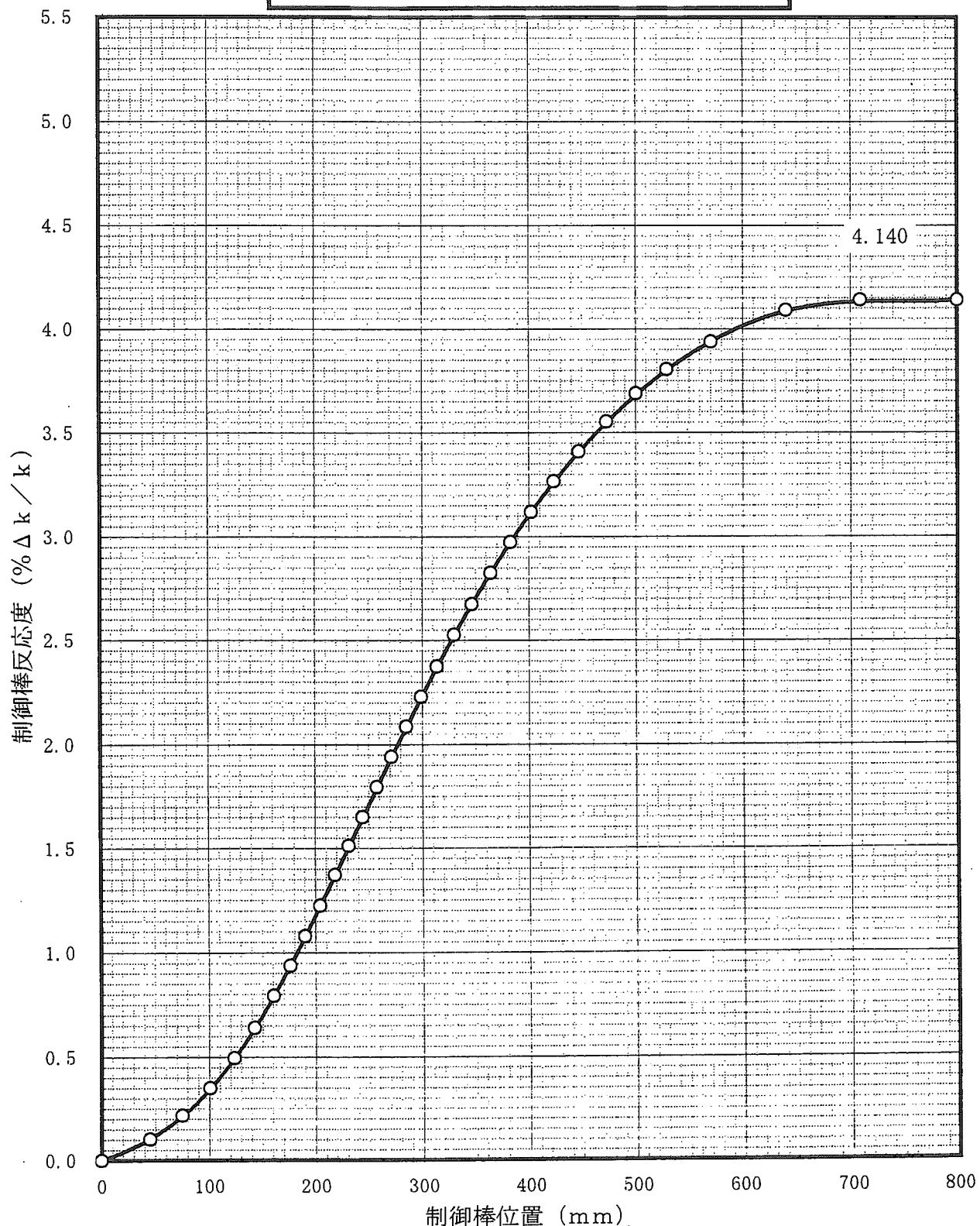
測定日 : 平成12年6月26日



制御棒の反応度価値曲線

制御棒 : S-1

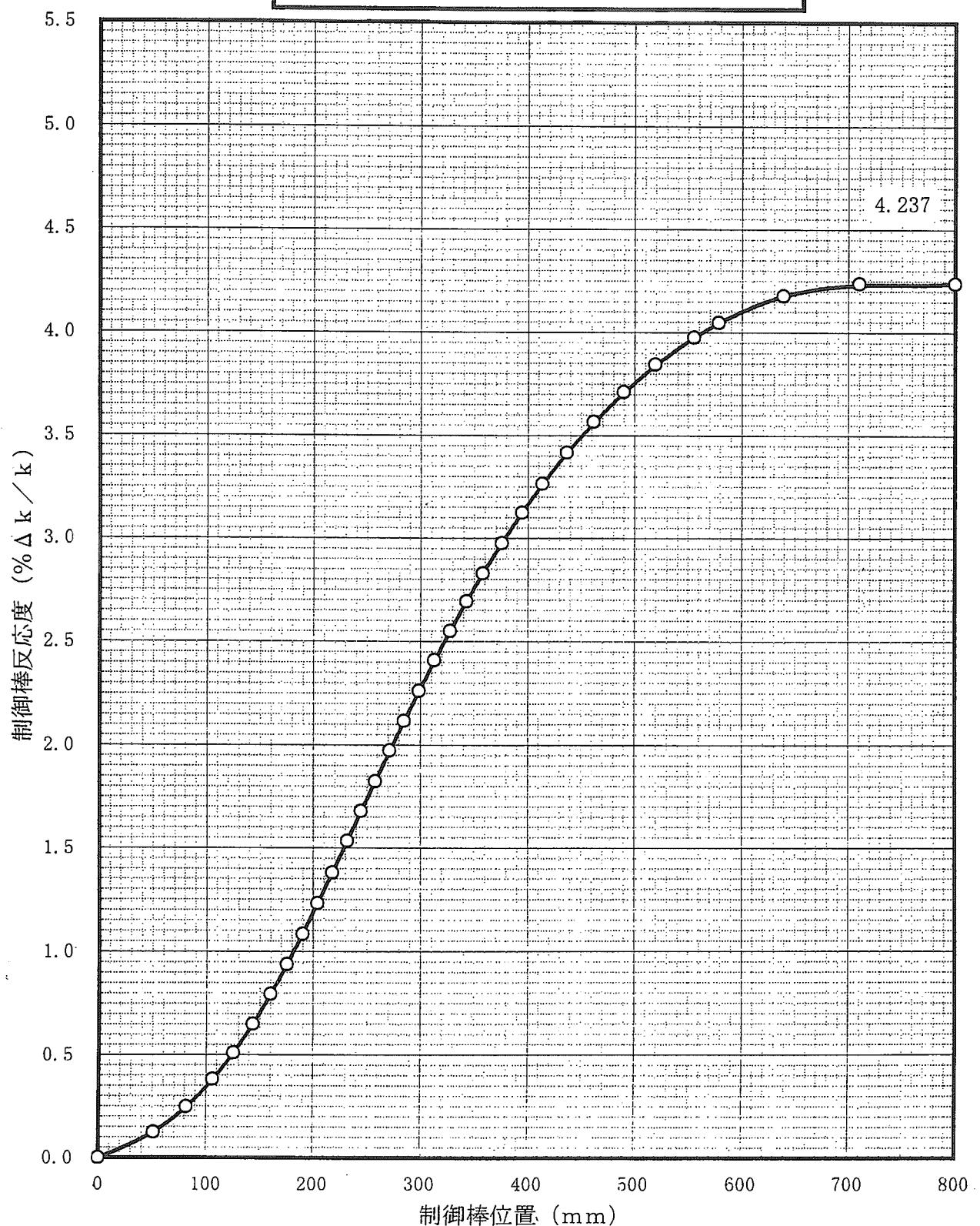
測定日 : 平成12年6月27日



制御棒の反応度価値曲線

制御棒 : S-2

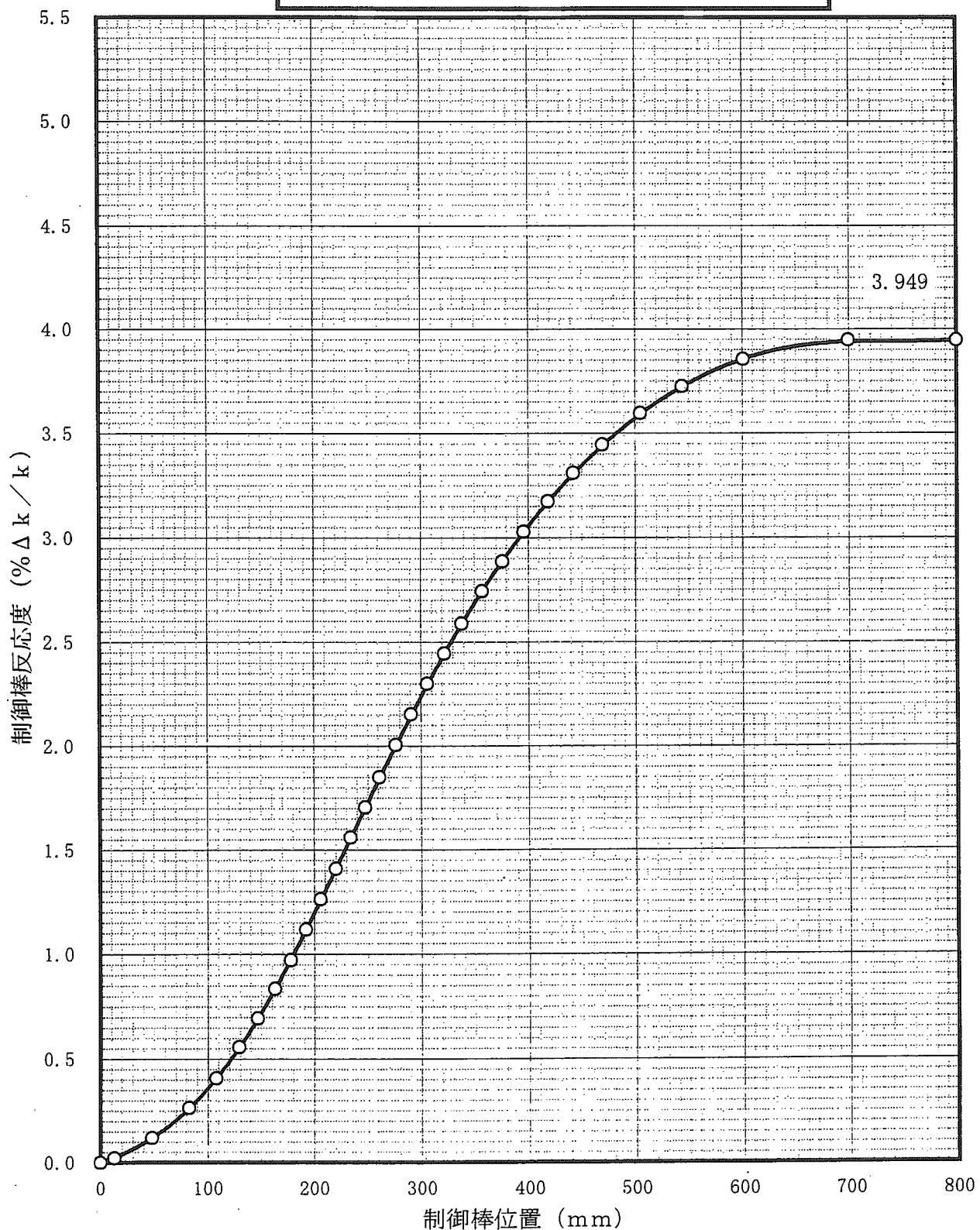
測定日 : 平成12年6月27日



制御棒の反応度価値曲線

制御棒 : R-1

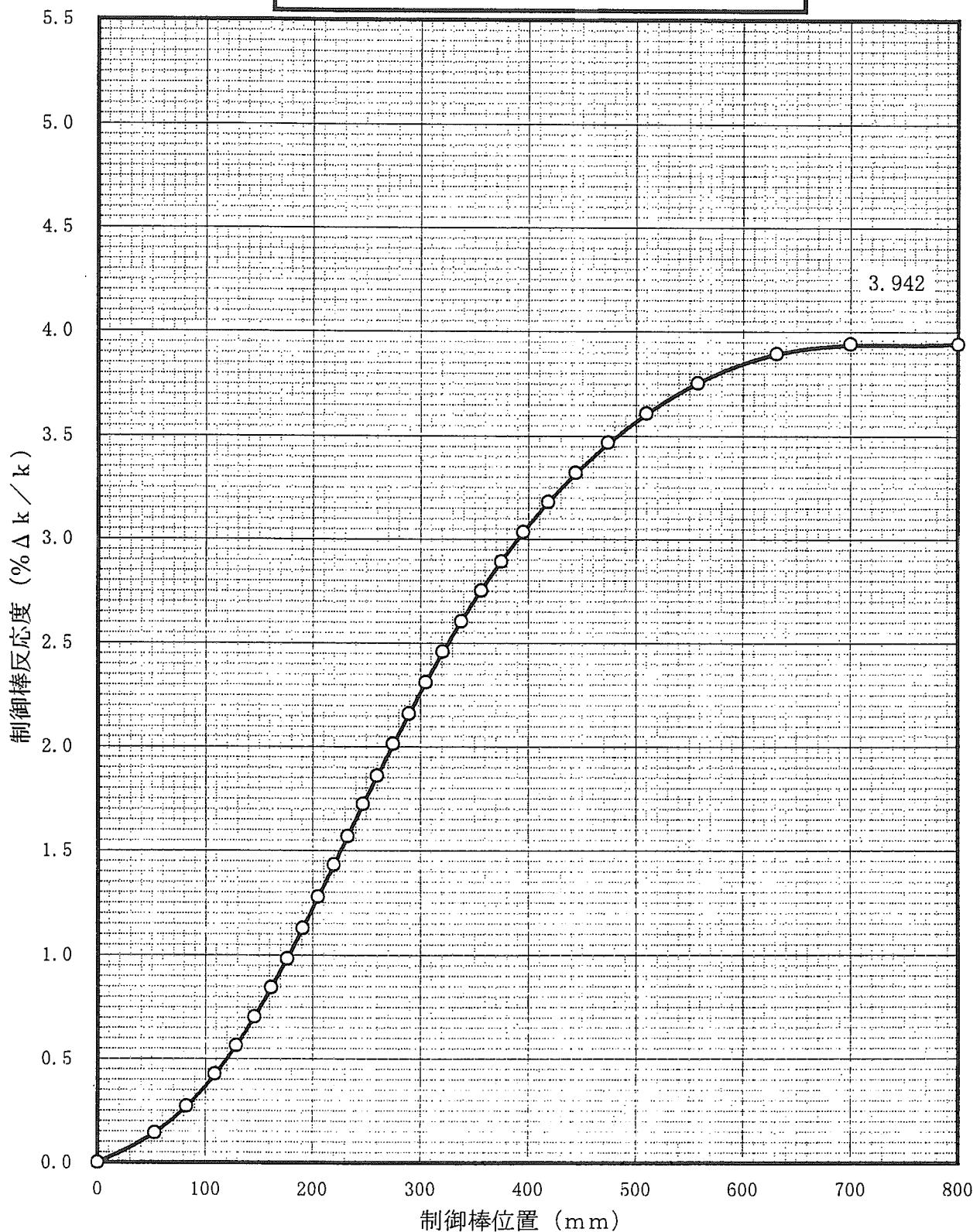
測定日 : 平成12年6月28日



制御棒の反応度価値曲線

制御棒 : R-2

測定日 : 平成12年6月28日



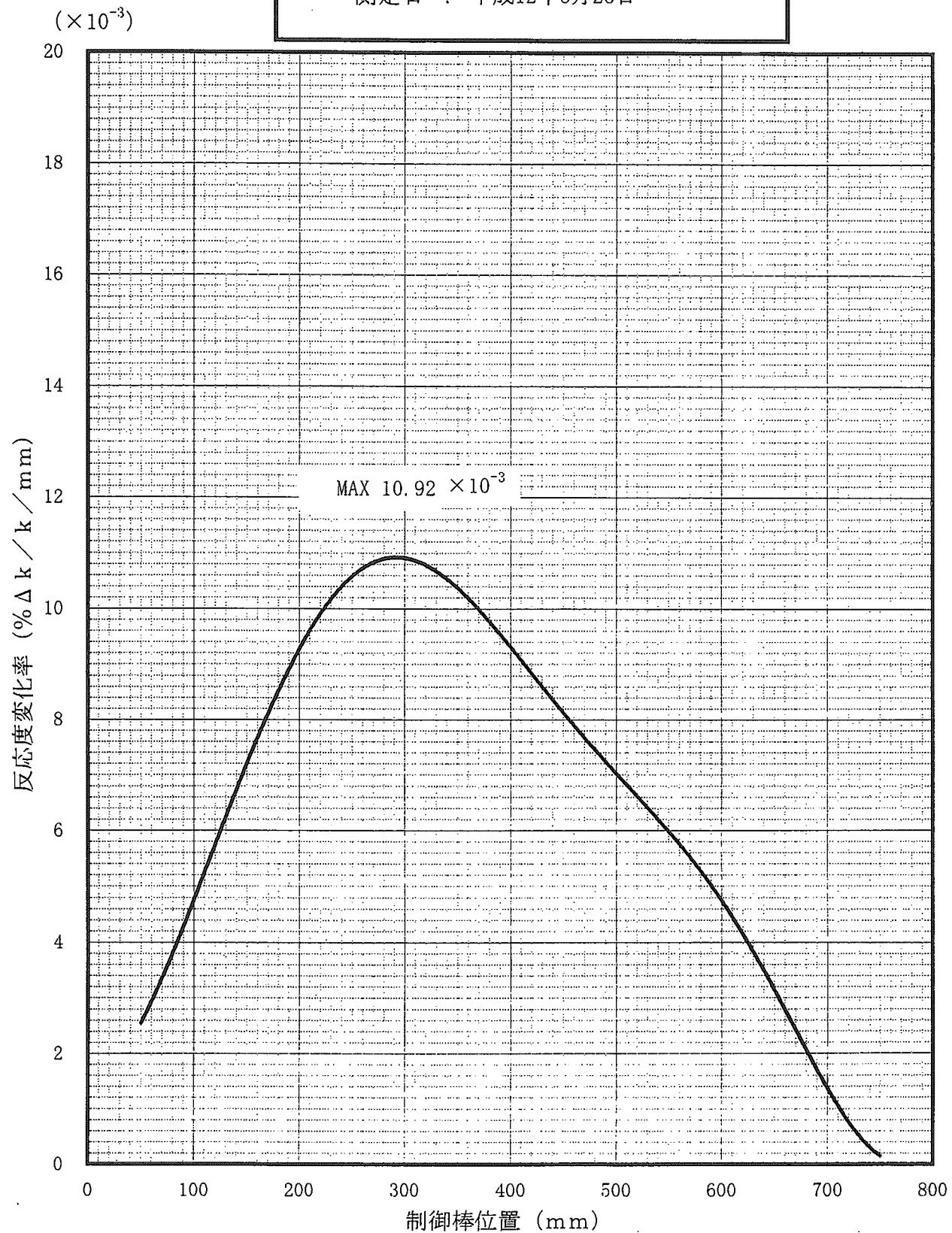
3.3 「制御棒反応度変化率曲線」

This is a blank page.

制御棒の反応度変化率曲線

制御棒 : Sa-1

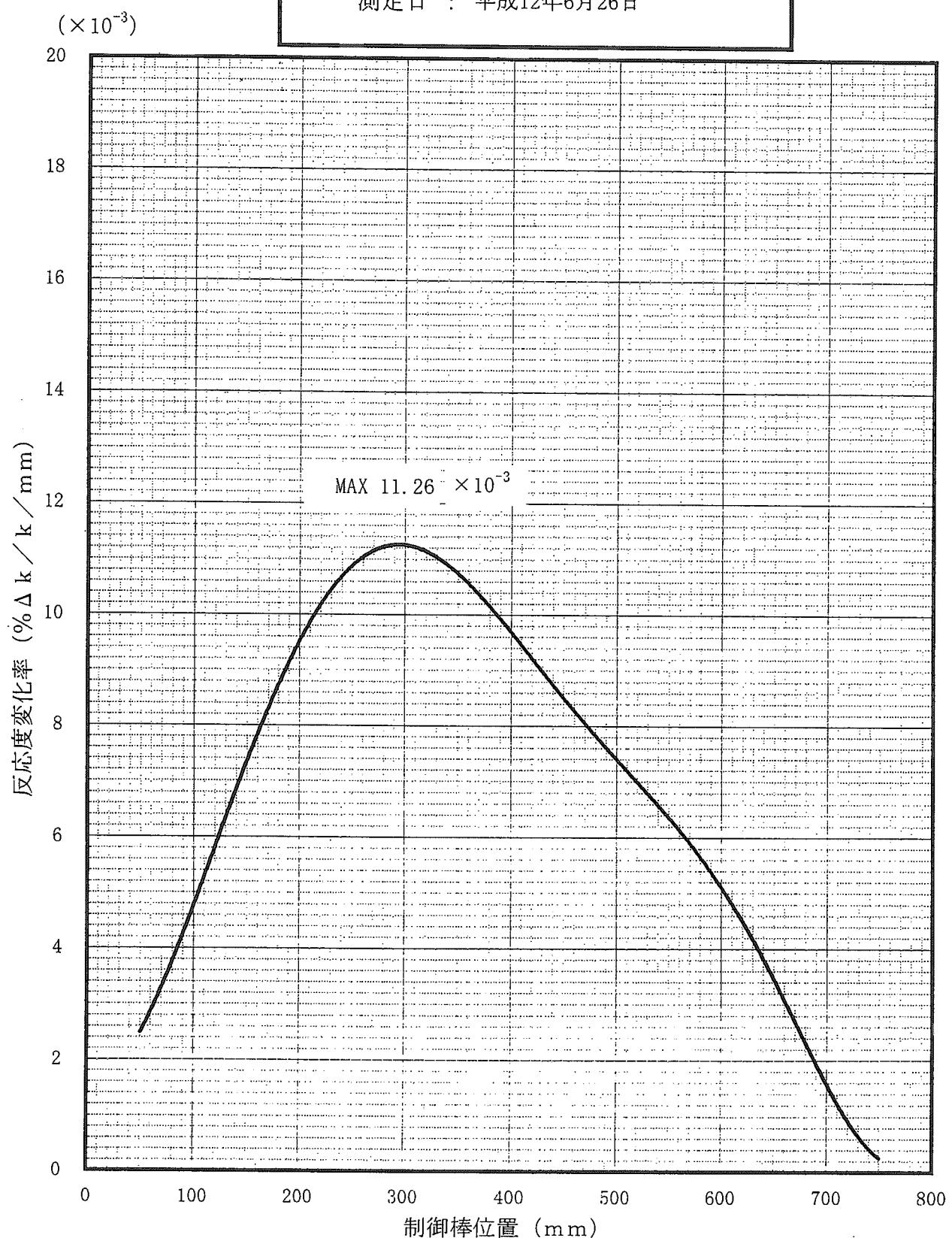
測定日 : 平成12年6月26日



制御棒の反応度変化率曲線

制御棒 : Sa-2

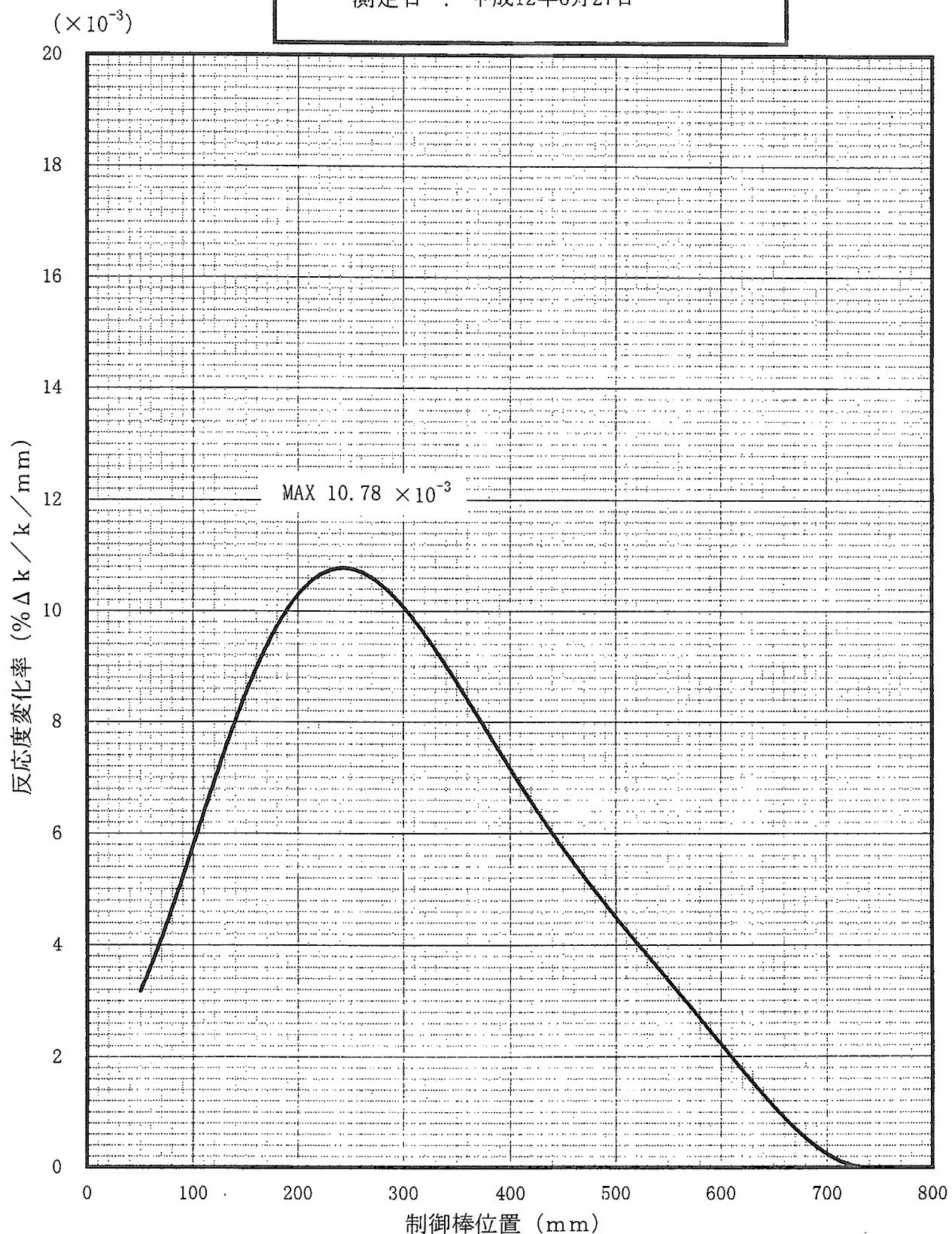
測定日 : 平成12年6月26日



制御棒の反応度変化率曲線

制御棒 : S-1

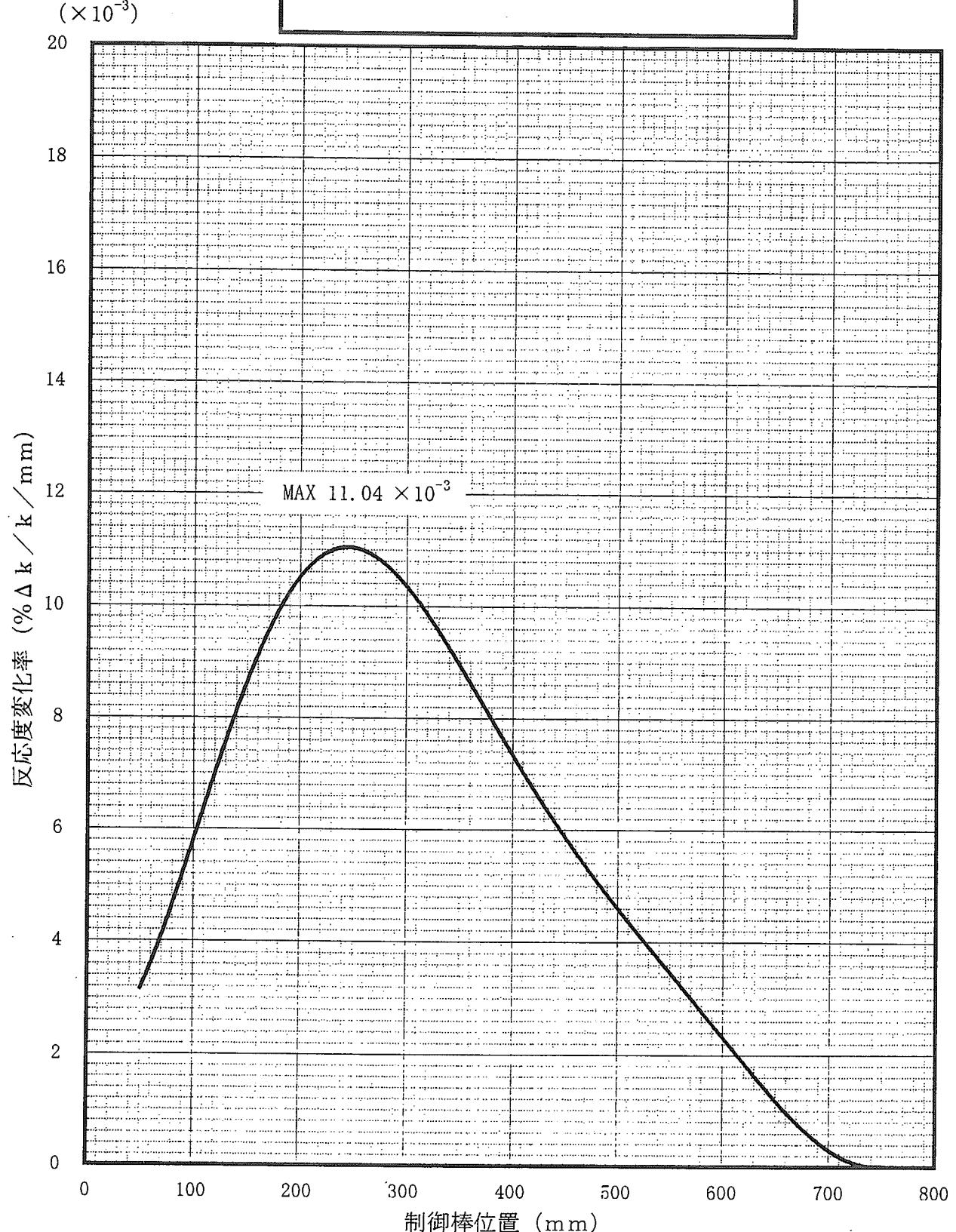
測定日 : 平成12年6月27日



制御棒の反応度変化率曲線

制御棒 : S-2

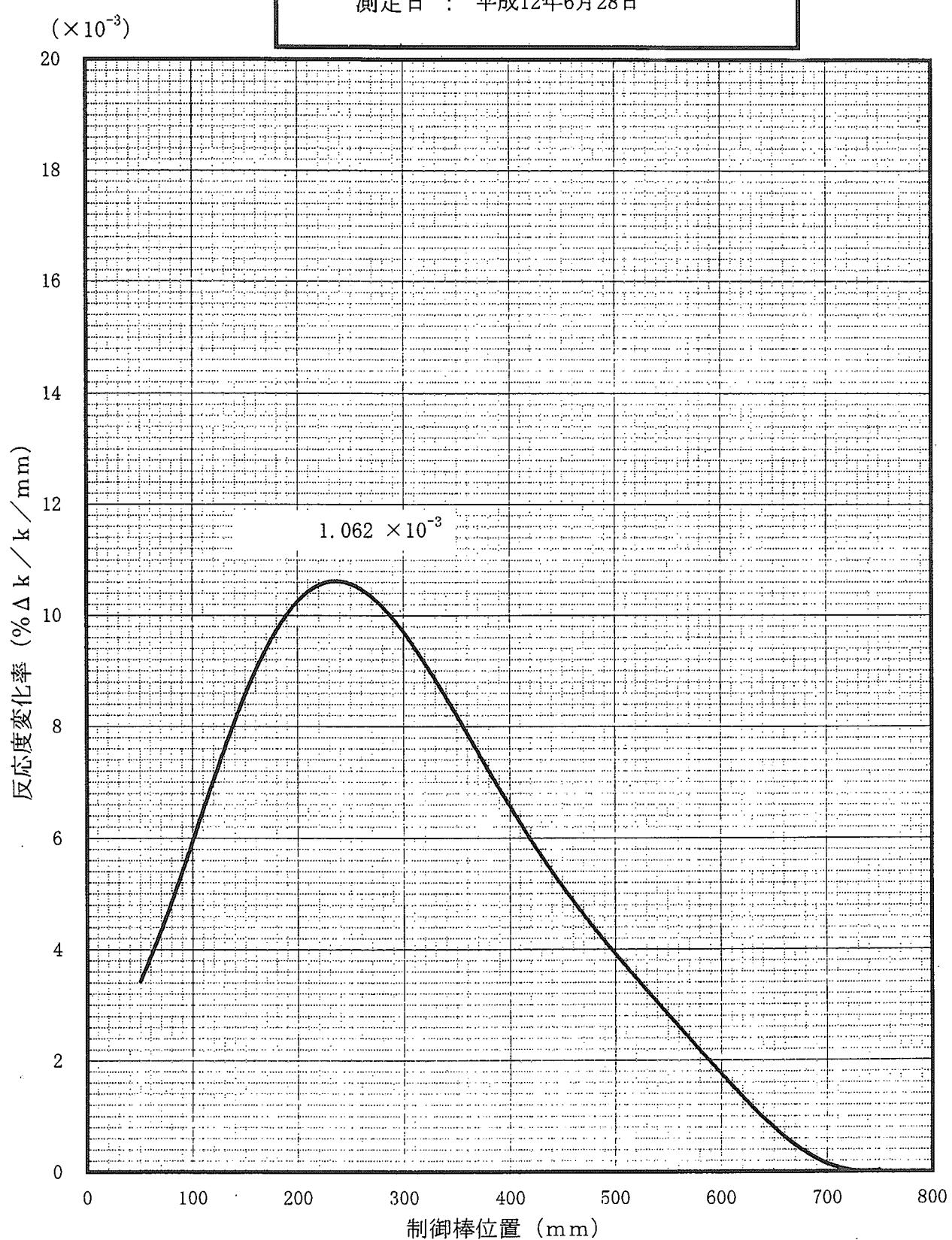
測定日 : 平成12年6月27日



制御棒の反応度変化率曲線

制御棒 : R-1

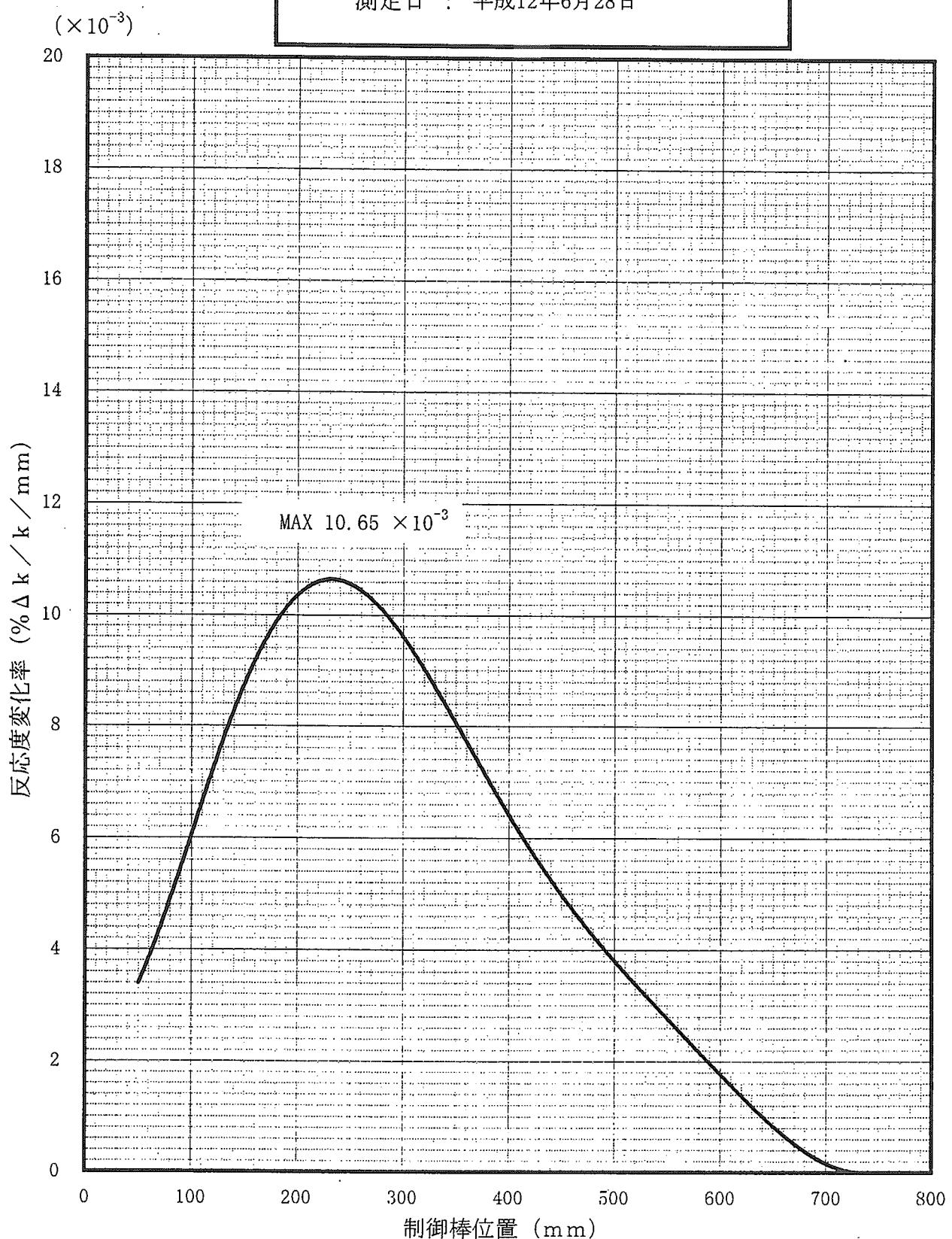
測定日 : 平成12年6月28日



制御棒の反応度変化率曲線

制御棒 : R-2

測定日 : 平成12年6月28日



3.4 作図処理概要

This is a blank page.

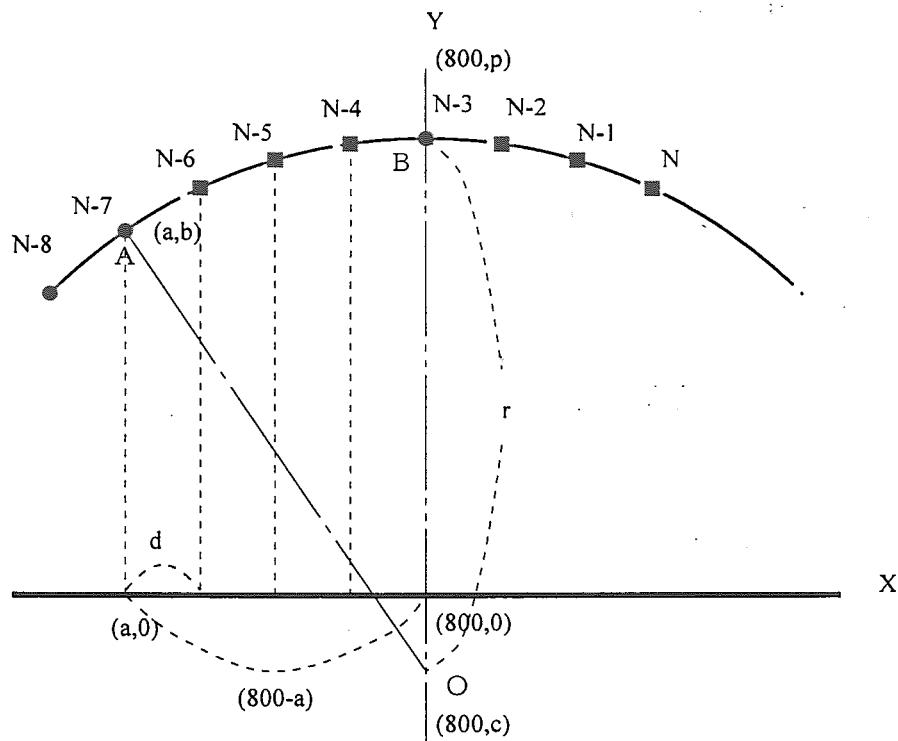
●作図処理概要

【反応度価値曲線（積分曲線）の場合】

- ① 「制御棒校正記録」より抽出した1次データ（積分データ）を入力とし、最小二乗法による近似式算出プログラム【RODCALC.EXE】で10次式を出力した。
- ② このフィッティングカーブは、(0, 0)を通ることから、係数値において $a_0 = 0$ とおいた。
- ③ 次に、 $x = 800$ における反応度計算値が実測値の積算値に収束するよう EXCEL のゴールシーク機能を使用し係数 a_1 を調整した。
- ④ グラフおよび計算値を確認し、 $x = 750$ 前後でのグラフの振動のないことを確認し、調整終了とする。

・計算アルゴリズム

IK法による測定データから、制御棒位置 800 m 前後において次図のような内外挿データを補間する。



上図で、点O(800, c)を中心とし、点B(800, p)を頂点とする円弧を考える。
この円弧が反応度価値実測データのA, Bを通るとときのX座標の距離は上図より

800 - a

となる。

この距離を4等分したときのX座標に対応する円弧上の内挿点を
N-6, N-5, N-4 とする。

また、これと X = 800 の軸と対称の位置にある外挿点をそれぞれ
N-2, N-1, N とする。

このとき、円弧の方程式は、

$$(x-800)^2 + (y-c)^2 = r^2 \quad (1)$$

(1)は実測点 A(a, b)、B(800, p)を通るので、

$$(a-800)^2 + (b-c)^2 = r^2 \quad (2)$$

$$(p-c)^2 = r^2 \quad (3)$$

(2)-(3)より

$$c = \frac{(a-800)^2 + (b^2 - p^2)}{2(b+p)} \quad (4)$$

(3)を(1)に代入すると

$$(x-800)^2 + (y-c)^2 = (p-c)^2 \quad (5)$$

となる。これより

$$y = \sqrt{(p-c)^2 - (x-800)^2} + c \quad (\text{ただし、 } a \leqq x < 1600-a) \quad (6)$$

図から、 $d=(800-a)/4$ となるから、実測点および内外挿点における x 座標は次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} x_{N-7}=a \\ x_{N-6}=a+d \\ x_{N-5}=a+2d \\ x_{N-4}=a+3d \\ x_{N-3}=800 \\ x_{N-2}=800+d \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$\begin{array}{l} x_{N-1}=800+2d \\ x_N=800+3d \end{array} \quad \downarrow$$

(7)の一群を(6)に代入し、各々のy座標値を求めることができる。
 これら内外挿点が求められたら、最小二乗近似式に当てはめ、10次の係数値を得る。
 このとき、(N-6)番目以降の実測および内外挿点には、調整係数を乗じてからピーク値に収束するよう処理を行う。

【反応度変化率曲線（微分曲線）の場合】

積分曲線の近似式は、10次式なので次のように表すことができる。

$$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{10}x^{10} \quad (8)$$

微分曲線は、(8)を微分したものであるから、

$$y = f'(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + \dots + 10a_{10}x^9 \quad (9)$$

と表すことができる。係数値を書き換えると、

$$y = f'(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_9x^9 \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

とおける。

作図は、EXCELで行い、特に図の調整を必要としなかった。

This is a blank page.

3.5 [RODCCALC.EXE] ソースリスト

This is a blank page.

本プログラムは、1次データファイル(*S.ORG)を入力し、10次近似式の積分曲線係数データ(*SK.DAT)を出力する。以下に内容を示す。

[RODCALC.EXE] for Rod Calibration of JRR-3M by Katsutoshi Hotta

```

VERSION 5.00
Object = "{F9043C88-F6F2-101A-A3C9-08002B2F49FB}#1.2#0"; "COMDLG32.OCX"
Begin VB.Form frmMain
    Caption      =   "RodCalc"
    ClientHeight =   6795
    ClientLeft   =   1860
    ClientTop    =   1920
    ClientWidth  =   9480
    LinkTopic    =   "Form1"
    ScaleHeight  =   6795
    ScaleWidth   =   9480
    Begin VB.CommandButton cmdEnd
        Caption      =   "終了"
        Height       =   495
        Left         =   540
        TabIndex     =   10
        Top          =   4560
        Width        =   1755
    End
    Begin MSComDlg.CommonDialog dlgFileOpen
        Left         =   180
        Top          =   5580
        _ExtentX    =   847
        _ExtentY    =   847
        _Version    =   393216
        Filter      =   "*S.ORG"
    End
    Begin VB.TextBox txtKeisu
        Height       =   2295
        Left         =   4380
        MultiLine    =   -1, True
        TabIndex     =   8
        Top          =   300
        Width        =   2475
    End
    Begin VB.PictureBox picGraph
        Height       =   6255
        Left         =   4320
        ScaleHeight  =   6195
        ScaleWidth   =   4815
        TabIndex     =   7
        Top          =   240
        Width        =   4875
    End
    Begin VB.CheckBox chkBDot
        Caption      =   "実測点表示"
        Height       =   495
        Left         =   2640
        TabIndex     =   6
        Top          =   3120
        Width        =   1215
    End
    Begin VB.CheckBox chkSDot
        Caption      =   "実測点表示"
        Height       =   495
        Left         =   2640
        TabIndex     =   5
        Top          =   2400
        Width        =   1215
    End
    Begin VB.CommandButton cmdBLine
        Caption      =   "反応度変化率曲線"
        Height       =   495
        Left         =   540
        TabIndex     =   4
        Top          =   3120
        Width        =   1755
    End
    Begin VB.CommandButton cmdSLine
        Caption      =   "反応度値曲線"
        Height       =   495
    End
End

```

```

        Left      = 540
        TabIndex = 3
        Top      = 2400
        Width    = 1755
    End
    Begin VB.CommandButton cmd9JI
        Caption   = "9次式係数表示"
        Height   = 495
        Left     = 540
        TabIndex = 2
        Top      = 1680
        Width    = 1755
    End
    Begin VB.CommandButton cmd10JI
        Caption   = "10次式係数表示"
        Height   = 495
        Left     = 540
        TabIndex = 1
        Top      = 960
        Width    = 1755
    End
    Begin VB.CommandButton cmdFileRead
        Caption   = "ファイル読み込み"
        Height   = 495
        Left     = 540
        TabIndex = 0
        Top      = 240
        Width    = 1755
    End
    Begin VB.Label lblInfo
        Caption   = "Label1"
        Height   = 255
        Left     = 540
        TabIndex = 9
        Top      = 6180
        Width    = 3435
    End
End
Attribute VB_Name = "frmMain"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False

```

'宣言領域

```

Option Explicit
Dim X() As Single, Y() As Single
Dim A() As Double
Dim Sk() As Double
Dim Bk() As Double
Dim M As Integer
Dim sngOrgX() As Single
Dim sngOrgY() As Single
Dim OrgBX() As Single
Dim OrgBY() As Single
Dim intNum As Integer
Dim sngPeak As Single
Dim Peak As Single
Dim strFname As String

```

'オリジナルデータ読み込みルーチン

```

Private Sub DataRead(strFname As String, intNum As Integer, sngOrgX() As Single, sngOrgY() As Single)
    Dim i As Integer
    intNum = intOrgFileNum(strFname)
    ReDim sngOrgX(intNum)
    ReDim sngOrgY(intNum)
    Open strFname For Input As #1
    For i = 0 To intNum - 1
        Input #1, sngOrgX(i), sngOrgY(i)
    Next i
End Sub

```

```

    Next i
    Close #1
End Sub
' ピーク値出力ルーチン
Private Function sngPeakValue(strFname As String, intNum As Integer) As Single
    Dim strSkip As String
    Dim sngDummy As Single
    Dim f As Integer
    Dim i As Integer

    f = FreeFile
    On Error GoTo ErrTrap
    Open strFname For Input As #f
    For i = 1 To intNum
        If i <> intNum Then
            Line Input #f, strSkip
        Else
            Input #f, sngDummy, sngPeak
        End If
    Next i
    sngPeakValue = sngPeak
    Close #f
ErrTrap:
    If Err <> 0 Then
        MsgBox ("Error No. " & Err & " のエラー発生！！")
    End If
End Function
' ガウス・ジョルダン法ルーチン
Private Sub Jordan(M As Integer, A() As Double, Sk() As Double, Bk() As Double, FitPeak As Single)
    Dim i As Integer
    Dim j As Integer
    Dim k As Integer
    Dim EPS As Single
    Dim PIV As Double
    Dim DEL As Double

    ReDim Sk(M) As Double
    ReDim Bk(M - 1) As Double
    EPS = 0.00001
    On Error GoTo ErrTrap
    For i = 0 To M
        PIV = A(i, i)
        If Abs(PIV) < EPS Then
            MsgBox ("ピボット数が " & EPS & " を越えた！！")
        End If
        For j = 0 To M + 1
            A(i, j) = A(i, j) / PIV
        Next j
        For k = 0 To M
            DEL = A(k, i)

```

```

For j = 0 To M + 1
  If k <> i Then
    A(k, j) = A(k, j) - DEL * A(i, j)
  End If
  Next j

  Next k

  Next i

  For i = 0 To M
    Sk(i) = A(i, M + 1)
  Next i

  For i = 1 To M
    Bk(i - 1) = Sk(i) * i
  Next i

ErrTrap:
  If Err <> 0 Then
    MsgBox ("Error No. " & Err & " のエラー発生！！")
  End If

End Sub

' オリジナルファイルのデータ組数算出

Private Function intOrgFileNum(strFname As String) As Integer
  Dim strSkip As String
  Dim intCnt As Integer

  On Error GoTo ErrTrap

  Open strFname For Input As #1

  Do Until EOF(1)
    Line Input #1, strSkip
    intCnt = intCnt + 1
  Loop

  Close #1

  intOrgFileNum = intCnt

ErrTrap:
  If Err <> 0 Then
    MsgBox ("Error No. " & Err & " のエラー発生！！")
  End If

End Function

' M次式係数の出力

Private Sub cmd10JI_Click()
  Dim strTxt As String
  Dim strT1 As String
  Dim strT2 As String
  Dim i As Integer
  Dim DataName As String

  DataName = Left$(strFname, Len(strFname) - 5) & "SK.DAT"

  On Error GoTo ErrTrap

  picGraph.Visible = False
  txtKeisu.Visible = True
  txtKeisu.Text = ""

  ' M次式係数値出力

  Open DataName For Output As #1

  For i = 0 To M

```

```

        strT1 = Format(i, "a00  ")
        If Sk(i) >= 0 Then
            strT2 = Format(Sk(i), " 0.00000000000000E+00")
        Else
            strT2 = Format(Sk(i), "0.00000000000000E+00")
        End If

        Print #1, strT2
        strTxt = strTxt + strT1 + strT2 + Chr(13) + Chr(10)
        txtKeisu.Text = strTxt

    Next i

    Close #1

ErrTrap:
    If Err <> 0 Then
        MsgBox ("Error No. " & Err & " のエラー発生！！")
    End If

End Sub

'M-1 次式係数の表示

Private Sub cmd9JI_Click()
    Dim strTxt As String
    Dim strT1 As String
    Dim strT2 As String
    Dim i As Integer

    On Error GoTo ErrTrap

    cmd10JI.Value = False
    picGraph.Visible = False
    txtKeisu.Visible = True
    txtKeisu.Text = ""

    For i = 0 To M - 1
        strT1 = Format(i, "b00  ")
        If Bk(i) >= 0 Then
            strT2 = Format(Bk(i), " 0.00000000000000E+00")
        Else
            strT2 = Format(Bk(i), "0.00000000000000E+00")
        End If

        strTxt = strTxt + strT1 + strT2 + Chr(13) + Chr(10)
        txtKeisu.Text = strTxt

    Next i

ErrTrap:
    If Err <> 0 Then
        MsgBox ("Error No. " & Err & " のエラー発生！！")
    End If

End Sub

' 反応度変化率曲線作成・イベント

Private Sub cmdBLine_Click()
    txtKeisu.Visible = False
    Dim i As Integer
    Dim Data(0 To 800, 0 To 1) As Double

    picGraph.Visible = True
    picGraph.Cls
    picGraph.Scale (-20, 0.0205)-(820, -0.0005)
    picGraph.Line (0, 0.02)-(800, 0), , B

    ' ***** 微分カーブ描画

```

```

For i = 50 To 750
    Data(i, 0) = i
    Data(i, 1) = BVal(Bk(), i)

    If i = 50 Then
        picGraph.PSet (Data(i, 0), Data(i, 1))
    Else
        picGraph.Line -(Data(i, 0), Data(i, 1))
    End If

Next i

' ***** *B.ORG データ・プロット

If chkBDot.Value Then
    For i = 1 To intNum - 2
        picGraph.Circle (OrgBX(i), OrgBY(i)), 8
    Next i
End If

' ***** 最大反応度変化率表示

Dim BMaxRate As Single
BMaxRate = BMax(intNum, OrgBY(), Bk())

picGraph.CurrentX = 220
picGraph.CurrentY = BMaxRate + 0.0018
picGraph.Print "MAX"
picGraph.CurrentX = 300
picGraph.CurrentY = BMaxRate + 0.0018
picGraph.Print Format(BMaxRate, "#0.00E+00")

End Sub

Private Sub cmdEnd_Click()
    End
End Sub

' ファイル読み込み処理・イベント

Private Sub cmdFileRead_Click()

    Dim FName As String
    Dim FitPeak As Single
    Dim FitRate As Single

    On Error GoTo ErrTrap

    cmd10JI.Visible = False
    cmd9JI.Visible = False
    cmdSLine.Visible = False
    cmdBLine.Visible = False
    chkSDot.Visible = False
    chkBDot.Visible = False
    txtKeisu.Visible = False
    picGraph.Visible = False
    lblInfo.Visible = False

    ' ***** ファイル読み込みダイアログ

    lblInfo.Visible = True
    lblInfo.Caption = cmdFileRead.Caption
    dlgFileOpen.FilterIndex = 1
    dlgFileOpen.Filter = "*s.org|*s.org|all|*.*"
    dlgFileOpen.InitDir = "c:\RodCalc"
    dlgFileOpen.ShowOpen
    strFname = dlgFileOpen.FileName

    If Len(strFname) > 0 Then
        Call DataRead(strFname, intNum, sngOrgX(), sngOrgY())
    Else
        Exit Sub
    End If

ErrTrap:
    If Err <> 0 Then

```

```

    MsgBox ("Error No. " & Err & " のエラー発生！！")
End If

FName = Mid$(strFname, Len(dlgFileOpen.InitDir) + 2)
lblInfo.Caption = FName & "表示中 . . ."
FitRate = 1
Call Fitting(FitRate, FitPeak)

' ピーク値とフィッティングピーク値の差分判定

While Abs(FitPeak - Peak) > 0.005
    FitRate = FitRate - 0.0001
    Call Fitting(FitRate, FitPeak)
Wend

Call OrgBXCalc(intNum, sngOrgX(), sngOrgY(), OrgBX(), OrgBY())

txtKeisu.Visible = True
txtKeisu.Text = "Peak=" + Format(sngPeak, "#.###")

cmd10JI.Visible = True
cmd9JI.Visible = True
cmdSLine.Visible = True
cmdBLine.Visible = True

chkSDot.Visible = True
chkBDot.Visible = True

End Sub

' フィッティング処理・イベント

Private Sub Fitting(FitRate As Single, FitPeak As Single)

    Dim N As Integer
    N = intNum + 6 - 1
    N = intNum - 1

    M = 10          ' 近似曲線次数入力

    Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer
    Dim c As Double
    Dim d As Single
    Dim f As Integer
    ReDim X(N) As Single, Y(N) As Single
    ReDim A(M, M + 1) As Double

    f = FreeFile

    ' ***** ピーク値取得

    Peak = sngPeakValue(strFname, intNum)

    Open strFname For Input As #f

        For i = 0 To N - 7
            For j = 0 To N
                Input #f, X(j), Y(j)
            Next i
        Close #f

    ' ***** 内外挿データ生成

    For i = N - 7 To N

        c = (Peak ^ 2 - (X(N - 7) - 800) ^ 2 - Y(N - 7) ^ 2) / (2 * (Peak - Y(N - 7)))
        d = (800 - X(N - 7)) / 4
        X(i) = X(N - 7) + (i - (N - 7)) * d

        If i > N - 3 Then
            Y(i) = c + Sqr((Peak * (FitRate + 0.0055) - c) ^ 2 - (X(i) - 800) ^ 2)
        Else
            Y(i) = c + Sqr((Peak * FitRate - c) ^ 2 - (X(i) - 800) ^ 2)
        End If

    Next i

```

```

' ***** 正規方程式作成

For i = 0 To M
    For j = 0 To M
        For k = 0 To N
            A(j, i) = A(j, i) + X(k) ^ (i + j)
        Next k
    Next j
Next i

For j = 0 To M
    For k = 0 To N
        A(j, M + 1) = A(j, M + 1) + Y(k) * X(k) ^ j
    Next k
Next j

' ***** ガウス・ジョルダンルーチンへ

Call Jordan(M, A, Sk, Bk, FitPeak)

FitPeak = SVal(Sk(), 800)

End Sub

' 反応度価値曲線作成・イベント

Private Sub cmdSLine_Click()

    Call txtCls

    Dim i As Integer
    Dim Peak As Single
    Dim FitPeak As Single
    Dim Data(0 To 800, 0 To 1) As Double

    ' ***** ピクチャボックス設定

    picGraph.Visible = True
    picGraph.Cls
    picGraph.Scale (-20, 5.6)-(820, -0.1)
    picGraph.Line (0, 5.5)-(800, 0), , B

    ' ***** M次式積分曲線・プロット

    For i = 0 To 800

        Data(i, 0) = i
        Data(i, 1) = SVal(Sk(), i)

        If i = 0 Then
            picGraph.PSet (Data(i, 0), Data(i, 1))
        Else
            picGraph.Line -(Data(i, 0), Data(i, 1))
        End If

    Next i

    ' ***** *S.ORG データプロット

    If chkSDot.Value Then

        For i = 0 To intNum - 1
            picGraph.Circle (sngOrgX(i), sngOrgY(i)), 8
        Next i

    End If

    ' ***** ピーク値表示

    Peak = sngPeakValue(strFname, intNum)
    picGraph.CurrentX = 710
    picGraph.CurrentY = Peak + 0.3
    picGraph.Print Format(Peak, "#.###")

End Sub

' フォームロード・イベント

```

```

Private Sub Form_Load()
    cmd10JI.Visible = False
    cmd9JI.Visible = False
    cmdSLine.Visible = False
    cmdBLine.Visible = False
    chksDot.Visible = False
    chkBDot.Visible = False
    txtKeisu.Visible = False
    picGraph.Visible = False
    lblInfo.Visible = False

    ChDrive "c:"
    ChDir "c:\data\制御棒校正\rod2000\"
End Sub

' 制御棒の反応度値出力ルーチン

Private Function SVal(Sk() As Double, XPos As Integer) As Double
    Dim i As Integer
    Dim YVal As Double

    For i = 0 To M
        YVal = YVal + Sk(i) * XPos ^ i
    Next i

    SVal = YVal
End Function

' 制御棒の反応度変化率出力ルーチン

Private Function BVal(Bk() As Double, XPos As Integer) As Double
    Dim i As Integer
    Dim YVal As Double

    For i = 0 To M - 1
        YVal = YVal + Bk(i) * XPos ^ i
    Next i

    BVal = YVal
End Function

' テキストボックス不可視・ルーチン

Private Sub txtCls()
    txtKeisu.Visible = False
End Sub

' 反応度変化率実測データ生成・ルーチン

Private Sub OrgBXCalc(intNum As Integer, sngOrgX() As Single, sngOrgY() As Single, OrgBX() As Single, OrgBY() As Single)
    Dim i As Integer
    ReDim OrgBX(intNum - 1), OrgBY(intNum - 1)

    For i = 0 To intNum - 1
        Select Case i
            Case 0
                OrgBX(0) = 0
                OrgBY(0) = 0
            Case 800
                OrgBX(800) = 800
                OrgBY(800) = 0
            Case Else
                OrgBX(i) = (sngOrgX(i - 1) + sngOrgX(i)) / 2
                OrgBY(i) = (sngOrgY(i) - sngOrgY(i - 1)) / (sngOrgX(i) - sngOrgX(i - 1))
        End Select
    Next i
End Sub

```

' 反応度変化率実測データ最大値サーチ

```
Private Function OrgBXMax(intNum As Integer, OrgBY() As Single) As Single
    Dim MAX As Single
    Dim i As Integer
    For i = 0 To intNum - 1
        If i = 0 Then
            MAX = OrgBY(i)
        Else
            If OrgBY(i) > MAX Then
                MAX = OrgBY(i)
            End If
        End If
    Next i
    OrgBXMax = MAX
End Function
```

' M-1次式微分曲線における最大値サーチ

```
Private Function BLineMax(Bk() As Double) As Single
    Dim i As Integer
    Dim j As Integer
    Dim MAX As Single
    Dim BR As Single
    For i = 0 To 800
        BR = 0
        For j = 0 To M - 1
            BR = BR + Bk(j) * i ^ j
        Next j
        If i = 0 Then
            MAX = BR
        Else
            If BR > MAX Then
                MAX = BR
            End If
        End If
    Next i
    BLineMax = MAX
End Function
```

' 最大反応度変化率サーチ・ルーチン

```
Private Function BMax(intNum As Integer, OrgBY() As Single, Bk() As Double) As Single
    Dim OrgBMax As Single
    Dim BLMax As Single
    OrgBMax = OrgBXMax(intNum, OrgBY())
    BLMax = BLineMax(Bk())
    BMax = BLMax
End Function
```

```
Type=Exe
Form=frmMain.frm
Reference=*¥G{00020430-0000-0000-C000-000000000046}#2.0#0..¥..¥..¥WINDOWS¥SYSTEM¥stdole2.tlb
#OLE Automation
Object={5E9E78A0-531B-11CF-91F6-C2863C385E30}#1.0#0; MSFLXGRD.OCX
Object={F9043C88-F6F2-101A-A3C9-08002B2F49FB}#1.2#0; COMDLG32.OCX
Object={648A5603-2C6E-101B-82B6-000000000014}#1.1#0; MSCOMM32.OCX
Object={65E121D4-0C60-11D2-A9FC-0000F8754DA1}#2.0#0; MSCHRT20.OCX
IconForm="frmMain"
Startup="frmMain"
HelpFile=""
Title="RodCalc"
Command32=""
Name="RodCalc"
HelpContextID="0"
Description="制御棒校正データの処理プログラム"
CompatibleMode="0"
MajorVer=1
MinorVer=0
RevisionVer=0
AutoIncrementVer=1
ServerSupportFiles=0
VersionCompanyName="JRR-3"
CompilationType=0
OptimizationType=0
FavorPentiumPro(tm)=0
CodeViewDebugInfo=0
NoAliasing=0
BoundsCheck=0
OverflowCheck=0
FlPointCheck=0
FDIVCheck=0
UnroundedFP=0
StartMode=0
Unattended=0
Retained=0
ThreadPerObject=0
MaxNumberOfThreads=1
```

付録 4. 各原子炉施設等における反応度測定の現状について

東海研究所、大洗研究所に設置されている原子炉施設等における、反応度測定方法についての調査結果を以下に示す。

対象施設

調査対象は、東海研究所、大洗研究所の原子炉施設、臨界実験装置の9施設とした。

東海研究所

JRR-3、JRR-4、NSRR、TRACY、STACY、FCA、TCA

大洗研究所

JMTR、HTTR

*各施設の調査にあたっては、JRR-4 管理課 新井信義氏、NSRR 管理室 大沼和良氏、NUCEF 技術第1課 桜庭耕一氏、炉工学施設管理室 藤崎伸吾氏、佐藤邦雄氏、JMTR 計画課 小向文作氏、JMTR 原子炉第1課 五来滋氏、HTTR 試験室 斎藤賢司氏の協力を得た。

表 1(1) 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途	測定条件、方法	原理等	システム
JRR-3 (20MW)	制御棒校正 (臨界試験時、定期自主検査時等)	臨界近傍にて正、負のステップ反応度を交互に連続的に測定する。 臨界時出力約 10 kW (臨界試験時約 10W)。 対象 3 組 / 6 本 R1-R2,S1-S2,Sa1-Sa2,ストローク 800mm。 1 組 : 約 60 バッファ ~ 約 70 バッファ : 約 2.5 時間 ~ 約 3 時間。 出力変化範囲約 5 kW ~ 約 40 kW (臨界試験時約 2W ~ 約 80W)。	IK 法 測定系誤差 : 土 1 % 測定時反応度 : 約 ± 0.1% Δk/k/ステップ	中性子検出器 : CIC、中性子感度 : 2.3E - 14A/nv 線形増幅器 : 11 レンジ付き電流入力電圧変換型 反応度測定装置 (仮設) : LAN 接続入力、パーソナルコンピュータ 演算処理速度 : 1GHz 記憶容量 : 2GB 演算周期 : 0.2s OS : Windows 98 アプロケーション : VB 等 R3 制御棒校正の測定記録用プログラム 表示方式 : 2 重 LCD 反応度測定範囲 : ± 0.2% Δk/k 機能 : LCD 対話形式、ステップ反応度は、ステップ毎の任意範囲の平均を算出、再臨界操作不要の連続的測定が可能、中性子源の影響を考慮、オンライン再評価等
	制御棒挿入時における臨界状態から停止後の対数増幅器出力信号を約 200 秒以上収録し、IK 法により算出する。 炉停止余裕 (臨界試験時、点検運転時等)	制御棒挿入 IK 法 測定時反応度 : 約 -20% Δk/k	アナログ 2 信号入力の DOS 用測定プログラム 測定範囲 : -30% Δk/k 機能 : CRT 対話型、対数増幅器遅れ応答修正、中性子源強度を考慮、0.1 秒周期で 600 秒間のデータ収録、オンライン再評価等	

臨界試験時の中性子検出器、増幅器は、仮設を用いる。

表 1(2) 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途	測定条件、方法	原理等	システム
JRR-4 (3.5MW)	制御棒校正 (定期自主検査時等)	臨界状態から制御棒1本を引き抜き操作し、原子炉出力の倍加時間から正の反応度を算出する。臨界時出力約20W、 対象：4組7本：2～約20ステップ／組：C1-C4,C2-C3,C5,B1,B2,ストローブ650mm。 所要時間約20時間 測定時の出力変化幅約200W～約1kW。	PP法、比較法 測定時反応度：約0.1% $\Delta k/k$ /ステップ	中性子検出器：CIC、中性子感度：4.4E－14A/nv 線形増幅器：12レンジ付き電流入力電圧変換型 記録計：2ペンレコーダーストップウォッチ3台
	反応度監視 (制御棒校正時等)	臨界状態の確認、臨界状態から正、負の反応度投入時に反応度計指示値を監視。	IK法	中性子検出器：CIC、中性子感度：4.4E－14A/nv 線形増幅器：12レンジ付き電流入力電圧変換型 原子炉制御操作監視装置：LAN接続入力、パーソナルコンピュータ 演算速度：200MHz 記憶容量：4GB 表示周期：0.1s OS：Windows NT 反応度計：20イチCRT画面デジタル表示 反応度測定範囲： $\pm 9.999\% \Delta k/k$ 機能：反応度演算は、制御棒引き抜き操作信号で開始し、中性子信号を0.03秒周期で入力するデータ収録装置(HP900)にて1000点の演算結果ファイルを作成する。

表1(3) 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途 (定期検査時等)	測定条件、方法	原理等	システム
NSRR (300 kW) (ハルス23,000 kW)	制御棒校正 (定期自主 検査時等)	臨界状態から全引き抜きの制御棒1本を急速 炉心挿入する。仮設中性子検出器は、所定の 信号(記録計のフルスケール近く)が得られ る位置に設定する。臨界時出力約200W,スト ローク381mm,R-1～R-6,1、S-1,2、Ta,b,c計 11本。制御棒反応度測定は、記録紙から1- 20,2-20,3-20.5-20,10-20,15-20秒の各No-Nを 読みとり、各N/N ₀ から算出した反応度を平 均して求めめる。	制御棒下法 測定時反応度： 約-2\$	仮設中性子検出器：CIC、中性子感度：2.3 cps/nv 線形電流増幅器：臨界時出力10E-8A 1ペン記録計、定規 β : 0.0073
R-20 反応度監視	リソロット・スタック 炉停止余裕 (定期自主 検査時)	PP法 測定時反応度： 30¢以内/ステップ 制御棒1本の全ストロークについて所定量引 き抜くたび毎に、臨界状態から原子炉出力の 倍加時間を測定し正の反応度を算出する。臨 界時出力15W,測定時出力レジ12にて～1k W、R-1,S1本,R1本,Ta、計4本(約9時間、8 ステップ/本、 全引き抜きのR-1を除いた制御棒を臨界状態 から急速炉心挿入し反応度計出力信号を記録 計に記録すると共に指示値を読む。臨界時出 力約100W、反応度計-10\$レンジ、 -10\$、デジタル表示：3-1/2	中性子検出器：FC、中性子感度：8E-18±20%A/nv キャバゲ回路：0～330 kW、17レジ付き 1ペン記録計、ストップウォッチ2台	
		IK法 R-20反応度計指示はPP法測定時に参考記録 する。 専用測定系統の反応度計によりパルス運転時 の添加反応度を収集する。	中性子検出器：FC、中性子感度：8E-18±20%A/nv キャバゲ回路：レジ11～330W 1ペン記録計 反応度計：MODEL R-20(GA社製)、入力10V、 出力0-100mV,0-10V、反応度測定レジ±10¢1\$、 -10\$、デジタル表示：3-1/2 専用測定系統：中性子検出器 FC、対数増幅器、反 応度デジタル表示(地上通信 kk)	

表1(4)-1 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途	測定条件、方法	原理等	システム
JMTR (50MW)	過剩反応度 (定期自主 検査等)	最少臨界炉心から燃料を1体 追加毎に SH-2 と SH-1,3 制御 棒の臨界操作挿入分を PP 法 により算出した反応度を積算 し、全炉心構成時の過剰反応度 を求める。臨界時出力 20 kW, 2 ~4 点/体、所要時間 7 体/2 日、 出力変化 40~180 kW。 過剰反応度曲線作成	燃料追加法 PP 法 測定時反応度：約 0.1% $\Delta k/k$ カップ ^a	中性子検出器：CIC、中性子感度：4.6E-14A/nv 線形増幅器：12 レンジ付き電流入力電圧変換型 系統：ch7,ch8,ch9 記録計 3 ペン ch7,8,9 平均値指示で倍加時間計測 計測レンジ：200 kW
	1 本の制御 棒を全引き 抜きした場 合の k_{eff} (定期自主 検査等)	全制御棒全挿入時の計数率 (N_0) と制御棒 1 本を全引き 抜きして (SR-1,2 は 650mm) 1,2,3,4,5 分経過毎の各計数率 N_{ave} との比 (N_0/N_{ave}) 及 び制御棒落下法で測定した全 制御棒全挿入時の k_{eff} を用い、 て実効増倍率を算出する。 SH-1,2,3、SR-1,2 計 5 本	中性子増倍法 測定時反応度：約 3% $\Delta k/k$	中性子検出器：FC、中性子感度：0.7cps/nv 計数計、タイマー：～ 10^5 カウント 系統：ch1,ch2,ch3

表 1(4)-2 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途	測定条件、方法	原理等	システム
JMTR (50MW)	制御棒校正 (点検運転、定期自主検査時等)	臨界状態から制御棒 1 体を引き抜き操作し、原子炉出力の倍加時間測定から正の反応度を算出する。臨界時出力約 20 kW。 SR-1,2 : 1/2 本、測定範囲約 550～650mm、約 5 ステップ/本約 3 時間、出力変化範囲 40～180 kW。SH-2 : 燃料追加法による過剩反応度測定時(0～800mm)の結果を用いる。 SH-1,3 : 燃料追加法による過剩反応度測定時(約 400～800mm)の結果を用いる。	PP 法 測定時反応度：約 0.1% Δk/k ペタップ	中性子検出器：CIC、中性子感度：4.6E-14A/nV 線形形増幅器：12 レンジ付き電流入力電圧交換型 系統：ch7,ch8,ch9 記録計 3 ペン ストップウォッチ 2 台 ch7,8,9 平均値指示で倍加時間計測 計測レンジ：200 kW
	制御棒反応度変化率測定(定期自主検査時等)	SH-1,3 各制御棒の約 100～約 350mm について SH-2 制御棒校正結果を用いて比較法にて測定する。5 点/本、所要時間 1 日。	比較法 測定時反応度：約 0.1% Δk/k ペタップ	線形出力系：臨界確認 制御棒位置指示計
炉停止余裕測定(点検運転、定期自主検査時等)	臨界状態の計数率(No)と全制御棒急速炉心挿入後 10～70 秒間の計数値(N-BG)から算出する。起動系各系統での算出結果を平均する。	制御棒落下下遅れ積分法 測定時反応度：約 -30% Δk/k	中性子検出器：FC、中性子感度：0.7 cps/nV 計数計、タイマー：～10 ⁵ カウント 系統：ch1,ch2,ch3	
	臨界時出力 20 kW	サイクル運転時の SH-1,3 と SH-2 制御棒位置から制御棒校正結果を用いて積算値熱出力量に対応した過剩反応度の変化を図式化して確認する。	制御棒校正結果表 過剰反応度曲線図 燃耗特性計算結果	

表 1(5) 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途 (定期自主 検査時等)	測定条件、方法	原理等	システム	
HTTR (30MW)	制御棒校正 (定期自主 検査時等)	臨界近傍にて正、負のステップ反応度を交互に連続的に測定する。 臨界時出力約 10 kW。 対象：4 本/16 本。 C : 1 本、ストローク 4060mm、38 ステップ 約 5 時間 R-1 : 6 本、ストローク 4060mm、26 ステップ 約 1.5 時間 R-2 : 6 本、ストローク 3335mm、13 ステップ 約 1 時間 R-3 : 3 本、ストローク 4060mm、9 ステップ 約 1 時間 測定時出力変化範囲約 10 kW～約 27 kW 測定レンジ：線形チャンベル回路 9 kW～29.94 kW 指示のレンジ	IK 法 測定時 反応度：約 ±0.1% Δ k/k ² ア	中性子検出器 : FC、 中性子感度 : 0.1 cps/nv (カウントモード)、 1.6E-14A/nv (キャビティモード) 線形チャンベル回路、対数チャンベル回路の各 信号。 計装系 : 3 系統 反応度測定は 3 系統の代表値を用いる。 反応度測定装置 : Power Edge 4300 演算処理速度 : 550MHz 記憶容量 : 9GB 反応度演算周期 : 0.1s OS : Windows 表示方式 : 2 ペン記録計、CRT 表示 反応度測定範囲 : ±0.2% Δ k/k	反応度監視には、PRM 系統の（中性子検出器： ³ He 電離管型）の炉出力による反応度演算結果 も用いている。

表1(6) 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途 (定期自主検査時等)	測定条件、方法	原理等	システム
炉停止余裕 (定期自主検査時等)	液位調整による計数率(Ac)5kcps 以上の臨界状態から安全棒、調整トランジエント棒を炉心に急速挿入し、自然計数率近くまでの積算値(At)により反応度を求める。 $\rho \Delta k/k = -13.04 \times Ac/At \times \beta$ $\beta = 0.007$	液位調整による計数率(Ac)5kcps 以上の臨界状態から安全棒、調整トランジエント棒1本を上限位置のケースと安全棒3本のみ上限位置のケースについて測定する。	制御棒落下下積分法 測定反応度： 約7% $\Delta k/k$	中性子検出器： ^{10}B 、中性子感度：3 cps/nv 計数計・タイマ：6 デカート 2 系統
TRACY (10 kW) (パルス5000MW)	クロットスタックマジン (定期自主検査時等)	液位調整による計数率(Ac)5kcps 以上の臨界状態から安全棒、調整トランジエント棒の内1本を全引き抜き状態で炉心に急速挿入する毎に、自然計数率近くまでの積算値(At)により各反応度を求める。 安全棒3本、調整トランジエント棒1本を上限位置のケースと安全棒3本のみ上限位置のケースについて測定する。	制御棒落下下積分法 測定反応度： 約5% $\Delta k/k$	中性子検出器： ^{10}B 、中性子感度：3 cps/nv 計数計・タイマ：6 デカート 2 系統
液位反応度 (定期自主検査時等)		各制御棒全引き抜きの未臨界状態から臨界液位を越える給液を行うステップ状反応度を添加し、出力の倍増時間を測定することにより正の反応度を算出する。臨界時出力約1W 安全棒3本、調整トランジエント棒1本を上限位置のケースと安全棒3本のみ上限位置のケースについて測定する。	PP 法	中性子検出器：CIC、中性子感度：7.6E-14A/nv 線形増幅器：16 レジ付き、 測定時のレジ：6.7E-3～2W 2 系統 記録計：2 ペンレコーダ ストップウォッチ2台

表 1(7) 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途	測定条件、方法	原理等	システム
炉停止余裕 (定期自主検査時等)	計数率(Ac)5kcps 以上の臨界状態から安全棒の全数を炉心に急速挿入し、自然計数率近くまでの積算値(At)により反応度を求める。 $\rho \Delta k/k = 13.04 \times Ac/At \times \beta$ $\beta = 0.007$	制御棒落下積分法	中性子検出器： ^{10}B 、中性子感度：4 cps/nv 計数計・タイマ：6 ディジット 2 系統	
STACY (200W)	計数率(Ac)5kcps 以上の臨界状態から各安全棒の 1 本を全引き抜き状態で他を炉心に急速挿入する毎に、自然計数率近くまでの積算値(At)により各反応度を求める。 800 φ 円筒型炉心：安全棒 6 本 280T 平板型炉心：安全棒 3 本	制御棒落下積分法	中性子検出器： ^{10}B 、中性子感度：4 cps/nv 計数計・タイマ：6 ディジット 2 系統	
液位反応度 (定期自主検査時等)	安全棒全引き抜きの未臨界状態から臨界液位を越える給液を行うステップ状反応度を添加し、出力の倍増時間測定することにより正の反応度を算出する。臨界時出力約 1W 以下	PP 法	中性子検出器：CIC、中性子感度：7.6E-14A/nv 線形增幅器：16 ディジット、 測定時のレジジ：1W 以下 2 系統 記録計：2 ペンレコーダ ストップウォッチ 2 台	

表1(8) 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途	測定条件、方法	原理等	システム
FCA (2 kW)	制御棒校正 (定期自主検査時等)	臨界状態から安全棒を約40mmの挿入操作を行い原子炉出力の倍加時間を測定し、基準反応度を算出する。水平対向形の炉心構成であるため、左右それぞれの制御棒の全ストロークについて、基準反応度を測定単位とする比較法にて測定する。 臨界時出力：10W～100W 測定時出力変化範囲：20%～80%/ Δ t 対象：安全棒6組、制御棒2組 約10 Δ t /600mm、測定時間2組/1日	PP法 比較法 測定時 Δ t : E-7A Δ t 2系統 記録計：2ペンレコーダ ストップウォッチ2台	中性子検出器：UIC、中性子感度：3E-13A 線形増幅器：9レジ/E-12A～E-4A

表 1(9) 各施設の反応度測定について

施設名 (最大熱出力)	目的、用途	測定条件、方法	原理等	システム
安全板の負反応度 (定期自主検査時等)	臨界状態から全引き抜きの安全板 3 体を急速炉心挿入する。スクラム後 1 秒毎の計数が 3cps 以上の計数率である約 100 秒間の積算計数 (N) を測定する。 臨界時出力：約 5kcps (No)、 対象：安全板 3 体、 ストローク：152.3cm $\rho (\$)=12.54(N/N_0)$	制御棒落下積分法 測定時反応度：約 -5 \\$ /本	中性子検出器： ^{10}B 、中性子感度：3 cps/nv 計数計・タイマー：～10kcps 記録計：CH4,5,6 各積算値 ($\beta =0.008$)	
TCA (200W) (定期自主検査時等)	水位等価反応度 リオド計指示を目標に炉心水位を調整し、 原子炉出力の倍加時間と測定して反応度を 算出する。臨界時出力約 1W、測定時出力変化幅～数 W、水位変化幅約 7cm。	PP 法 測定時反応度：約 0.1% $\Delta k/k$	中性子検出器：CIC(GE 社) 線形出力計：13 ベンジ /10 ⁻¹⁰ ～0.8 × 10 ⁻⁶ A、 測定レンジ 10W。 記録計：2 ペンレコーダ トップウォッチャ 2 台	
反応度測定実験	臨界状態の確認。 臨界状態から正、負の反応度を投入しメータ指示値を読む。	IK 法	中性子検出器：CIC 線形出力計：18 レンジ付き電流入力電圧変換型 反応度測定装置：2 チャンネル入力 AP-1102 (MAPI 社)、 マクロプロセッサ内蔵 16bit, 10MHz、 演算周期：0.2s 表示方式：2 アナログ指示計 反応度測定範囲：± 1% $\Delta k/k$	

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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
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
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
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
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	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 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	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
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

逆動特性法を用いる制御棒校正用装置の実用化

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。