

JAERI-Tech
2000-054



JP0050839



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年9月

竹内 光男・和田 茂・高橋 広幸・林 和彦・村山 洋二

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

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値測定手法の開発

日本原子力研究所東海研究所研究炉部
竹内 光男・和田 茂・高橋 広幸・林 和彦・村山 洋二

(2000年8月4日受理)

研究用原子炉である JRR-3Mにおいては、原子炉の内蔵する過剰反応度等を定期的に測定し制限値内であることを確認することなどにより、安全な運転を維持する運転管理を行っている。原子炉の内蔵する過剰反応度は、制御棒の反応度値測定結果を用いて算出している。従来の制御棒反応度値の測定は、炉周期法等により行っている。しかし、中性子源が存在する場合は、測定誤差を生ずることが考えられている。そこで、定常的な中性子源（測定時に強度が一定である中性子源）の影響を考慮した逆動特性法（IK 法）による制御棒反応度値の測定手法を新たに開発した。本報は、新たに開発した測定手法を用いることにより、従来手法に比較して測定精度を大きく改善できた結果について報告する。

The Development of the Measurement Technique of
the Control Rod Worth with the Inverse Kinetics Method
Considering the Influence of the Steady Neutron Source

Mitsuo TAKEUCHI, Shigeru WADA, Hiroyuki TAKAHASHI,
Kazuhiko HAYASHI and Yoji MURAYAMA

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

(Received August 4 ,2000)

At the research reactor such as JRR-3M, the operation management is carried out in order to ensure safe operation, for example, the excess reactivity is measured regularly and confirmed that it satisfies a safety condition. The excess reactivity is calculated using control rod position in criticality and control rod worth measured by a positive period method (P.P method), the conventional inverse kinetic method (IK method) and so on. The neutron source, however, influences measurement results and brings in a measurement error. A new IK method considering the influence of the steady neutron sources is proposed and applied to the JRR-3M. This report shows that the proposed IK method measures control rod worth more precisely than a conventional IK method.

Keywords : JRR-3M, Excess Reactivity, Control Rod Worth, Steady Neutron Source,
IK Method

目 次

1. 緒言	1
2. 測定方法	2
2.1 測定原理	2
2.2 測定系統	4
2.3 計測システムの誤差	4
3. 測定結果	6
3.1 中性子源強度を考慮しない場合	6
3.2 中性子源強度の同定	7
3.3 中性子源強度を考慮した場合	7
3.4 制御棒反応度価値測定結果	7
4. 解析結果	8
4.1 解析の方法	8
4.2 解析結果	8
5. 評価	9
6. 結言	10
謝辞	11
参考文献	11
付録 A 制御棒反応度価値測定の事前検討	29

Contents

1. Introduction -----	1
2. Measuring Method -----	2
2.1 Measurement Principle-----	2
2.2 Measurement System -----	4
2.3 Measurement Error-----	4
3. Measurement Result -----	6
3.1 Without Consideration of Neutron Source -----	6
3.2 Identification of Neutron Source -----	7
3.3 With Consideration of Neutron Source -----	7
3.4 The Result of The Control Rod Worth Measurement -----	7
4. Analysis Result -----	8
4.1 Overview -----	8
4.2 Result -----	8
5. Evaluation -----	9
6. Conclusion -----	10
Acknowledgement -----	11
References -----	11
Appendix A The Preliminary Examination of The Control Rod Worth Measurement -----	29

1. 緒言

研究用の原子炉である JRR-3M (Japan Research Reactor No.3 Modified)においては、定期的に原子炉の内蔵する過剰反応度等を測定し、炉心の核特性を確認することにより安全な運転を確保するための運転管理を行っている⁽¹⁾。原子炉の内蔵する過剰反応度は、制御棒の反応度価値等を測定して算出している。従来の制御棒反応度価値の測定は、中性子数の時間的な変化から反応度を求める炉周期法⁽²⁾ (Positive Period Method) 等により行っていた。しかし、核分裂により発生する中性子のほかに中性子源が炉心部に存在する場合は、測定結果に影響を及ぼして測定誤差が大きくなると考えられている。そこで、測定時に強度が一定である中性子源(定常的な中性子源と略す。)の影響を受ける場合の制御棒反応度価値測定の手法を新たに開発し、JRR-3M シリサイド燃料初装荷炉心の特性試験⁽³⁾時における制御棒反応度価値測定に適用した。

JRR-3M は、低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型の研究用原子炉として、アルミナイト燃料にて平成 2 年 3 月 20 日に初臨界到達後、約 20 万 MWH の運転実績を有している。平成 11 年 9 月に燃料の効率的利用を図るため、燃料をアルミナイト燃料からシリサイド燃料に変更した⁽³⁾。シリサイド燃料初装荷炉心の核特性の確認は、平成 11 年 9 月～平成 11 年 11 月の期間に行つた⁽³⁾。炉心の核特性の確認は、低い原子炉出力で行うため、飽和放射能に達している炉心構造材からの γ 線によって、中性子検出器の中性子検出感度の低下が発生する。または、 γ -n 反応により核分裂以外に中性子を発生して測定結果に影響を及ぼすことが予想された。特に制御棒反応度価値測定試験は、原子炉出力約 10 kW で反応度測定を行う定期検査時に比較して約 1/1000 の原子炉出力(約 10W)で実施した。JRR-3M の主要仕様を Table 1 に、JRR-3M の概要を Fig.1 に示す。

従来、制御棒反応度価値は、炉周期法等により 1～4% の不確かさで測定されている⁽⁴⁾。

JRR-3M においては、測定時間の短縮、測定精度の向上を図るために、原子炉臨界近傍にて正、負の反応度を交互に連続的に添加することにより、中性子数の単位時間当たりの変化から反応度を算出する逆動特性法⁽⁵⁾ (Inverse Kinetics Method, 以下 IK 法と略す。) を用いて測定を行っている。しかし、シリサイド燃料初装荷炉心の特性試験時のように制御棒反応度価値測定時に原子炉の出力が低い場合等は、炉心部にベリリウム反射体、重水反射体を配置していることから、ベリリウム及び重水の γ -n 反応⁽⁶⁾により発生する光中性子源に起因した定常的な中性子源が存在することとなり、測定結果への影響が測定誤差となる。そこで、このような炉心状態においても、あらかじめ制御棒反応度価値測定時と同じ原子炉出力の状態で中性子源強度を同定し、この中性子源強度を考慮した IK 法を用いて制御棒反応度価値測定が行える新たな測定手法の開発を行うことにより、制御棒反応度価値測定の測定精度の向上を図った。

以下に、新たに開発した定常的な中性子源の影響がある場合の制御棒反応度価値測定の測定方法、測定結果、評価等について示す。

2. 測定方法

2. 1 測定原理

(1) 原理

原子炉出力は、核分裂連鎖反応を制御棒等により制御することで調整される。核分裂連鎖反応の成立は、中性子増倍率 $k(t)$ で表わされる。中性子増倍率 $k(t)$ は、反応度 $\rho(t) = (k(t) - 1) / k(t)$ の関係にある⁽⁷⁾。中性子数 n と反応度 $\rho(t)$ 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 1 点炉動特性方程式で表される⁽⁷⁾。

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

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

n : 中性子数

ρ : 反応度

Λ : 平均中性子世代時間

β : 実効遅発中性子割合

C_i : i 群の遅発中性子先行核数

λ_i : i 群の遅発中性子先行核崩壊定数

β_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。

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

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

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

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

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

$$A_{i,j} = \int_0^t n(\tau) e^{-\lambda_i(t-\tau)} d\tau \\ = A_{i,j-1} e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{1}{\mu_j + \lambda_i} (n_j - n_{j-1} e^{\lambda_i \Delta t}) \quad (7)$$

として反応度 ρ_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 ρ'_j は、

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

である。

従って、中性子源強度 S を考慮した真の反応度 $\rho(t)$ は、次式で表す。

$$\rho(t) = \rho'(t) - \frac{S \Lambda}{n(t)} \quad (10)$$

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 $\rho(t)$ (真の反応度) を得る。

(2) 定常的な中性子源が存在する場合の測定

中性子源の影響が無視できる高い原子炉出力 ((10)式で中性子源強度 $S \ll$ 中性子数 $n(t)$ の関係の場合) で行う制御棒反応度価値測定等は、(9)式の反応度 $\rho'(t)$ の実時間測定により行うことができる。しかし、中性子源強度 S が測定される中性子数 $n(t)$ よりも大きい場合は、真の反応度 $\rho(t)$ に影響を与えて測定結果の誤差が増加することになり、測定精度に影響することが(10)式より明らかである。そこで、中性子源の影響を受ける場合の測定は、あらかじめ次項 (3) の手法により小さな負または正の反応度を投入して中性子源強度 S を求め、(10) 式を用いた反応度 $\rho(t)$ の実時間測定により、高精度で制御棒反応度価値測定を行う新たな測定手法を開発した。

(3) 中性子源強度の同定

中性子源強度 S は、制御棒反応度価値測定時と同程度の原子炉出力の臨界状態にて小さな負の反応度を投入し、未臨界の平衡状態を示すまでの測定データの統計処理⁽⁸⁾により同定する。未知数である投入反応度 $\rho(t)$ 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 $\rho'(t)$ の時系列データと観測値である中性子数 $n(t)$ の時系列データを用いた(10)式を単回帰モデル⁽⁸⁾ ($Y=aX+b$) により次に示す統計処理を行う。 $S=a$ 、 $\rho(t)=b$ 、 $\Lambda/n(t)=X$ 、 $\rho'(t)=Y$ 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 ρ は、

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

である。

従って、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 を算出するものである。

2. 2 測定系統

測定系統は、 γ 線補償型電離箱⁽⁹⁾ (γ -Compensated Ionization Chamber, 以下 CIC と略す。) の中性子検出器、線形増幅器、反応度測定装置等により構成した。反応度測定装置は、アナログ信号入出力部と演算処理部、CRT 等で構成した。反応度測定の系統構成を Fig.2 に示す。

線形増幅器は、炉心部の中性子数に比例した CIC 検出器出力の電流信号を入力して、最低電流値 $10^{-11}A$ からデカード毎の計測レンジ（信号の増幅度を切り替える増幅器の帰還抵抗の意、以下計測レンジと略す。）に対応した増幅を行い直流電圧信号（中性子数信号に對応する。）を出力する。反応度測定装置は、線形増幅器からの中性子数信号を入力し、アナログ信号の絶縁増幅器を介した A-D 変換器⁽¹⁰⁾ (Analog to Digital Converter) により 16bit の分解能でデジタル信号に変換の後に、0.2 秒周期にて反応度算出等の演算処理を行い CRT 表示、データ保存を行う。また、反応度測定装置は、測定記録等のプリンタ出力及び反応度演算結果を直流電圧信号（反応度信号に對応する。）で出力する機能を有する。反応度信号と中性子数信号は、記録計で指示されることにより制御棒操作等の測定手順の判断情報に用いる。

2. 3 計測システムの誤差

計測システム⁽¹¹⁾ の誤差は、使用機器の特性による誤差及びアナログ信号の揺らぎによる誤差を検討し、測定系統の系統誤差⁽¹²⁾を算出した。使用機器に対する誤差、系統誤差の算出結果を Table2 に示す。

（1）機器の誤差

機器の誤差は、測定に使用する機器の単体及び機器を組み合わせた場合の信号入出力特性から算出した。

機器の単体は、検出器、線形増幅器及び反応度測定装置とした。

検出器については、反応度測定時の出力電流範囲（約 $2 \times 10^{-8}A$ から約 $8 \times 10^{-8}A$ ）の直線性誤差⁽¹¹⁾±0.37%（反応度測定時の計測レンジにおける直流電圧信号に含まれる交流信号成分の割合）を反応度算出に与える誤差とした。ただし、 γ 線補償型の中性子検出器を用いることにより γ 線の影響を除くことができ、炉心内の中性子数に比例した電流を出力する検出器設置位置での測定と仮定する。線形増幅器については、反応度測定時の計測レンジにおける遅れ応答特性による誤差は十分小さいことから、反応度測定時の計測範囲に対応した模擬信号を入力し、検出器ケーブルを含めた機器校正結果による誤差を検討した。反応度測定装置の絶縁増幅器は、模擬信号入力による機器校正結果の誤差を検討した。反応度測定装置の A-D 変換器は、設計値を用いた誤差を検討した。また、反応度測定装置の演算装置の内部デジタル演算については、浮動小数点（有効範囲±1.70141E±38）の単精度で有効桁数 6 桁（7 桁目を四捨五入）であるので、小数点以下 5 桁目の丸め誤差を検

討した。

機器を組み合わせた場合は、信号のデジタル化に係る誤差と反応度測定装置の反応度算出に係る誤差とした。

信号のデジタル化に係る誤差は、線形増幅器、絶縁増幅器、A-D 変換器及び内部デジタル演算により生ずる各誤差を加算した結果が得られるように、中性子検出器近くから模擬信号を入力して反応度測定装置の CRT 表示で出力を確認する方法の各機器を組み合わせた校正結果から、相対誤差-0.10%とした。

反応度測定装置の反応度算出に係る誤差は、反応度演算、演算周期及び添加反応度算出時に生ずる。反応度演算の誤差は、デジタル信号化を行う場合の最小変換単位（1digit）が変化することに対応する中性子数信号の最小変化幅 dn が反応度に換算するとどの位に相当するかで表す。よって、アナログ信号入力の分解能を $0.3mV/digit$ とすると、変化反応度 $\delta k = (\ell/n) \cdot (dn/dt)$ ⁽⁹⁾ の関係から即発中性子寿命 $\ell : 1.5E-4(s)$ 、 $dn : 0.0003(V)$ 、 $dt : 0.01(s)$ 、変化前の中性子数 $n : 1.0(V)$ にて $\delta k : 4.5E-6\Delta k/k/digit$ と測定対象反応度の $0.1\%\Delta k/k$ に比し相対誤差 $\pm 0.007\%$ であることから、A-D 変換器は十分な分解能で反応度演算を行うことを示している。演算周期は、模擬信号を用いた検討結果により、1ステップ当たりの測定対象反応度を $0.15\%\Delta k/k$ 以下とした場合に相対誤差が $\pm 0.10\%$ 以内となる 0.2 秒周期の設定である。添加反応度は、演算周期毎のアナログ信号のゆらぎを含んだ反応度演算結果を単純平均することにより、1ステップ当たりに添加した反応度として算出した。

（2）アナログ信号のゆらぎ

添加反応度の算出に用いる反応度演算結果は、中性子数信号を一定の周期で入力した演算を行うこと及び中性子数信号の微分処理演算を行うことから、中性子数信号であるアナログ信号への電源ノイズ、外来ノイズ等の混入により測定誤差の増加要因となる影響を受けやすいので、測定系のノイズ対策は重要である⁽⁹⁾⁽¹³⁾。ここでは、添加反応度算出の誤差に関するアナログ信号を反応度に換算する信号処理を行う反応度測定装置について検討する。

アナログ信号のゆらぎ成分としては、核分裂反応に伴う成分、電気部品に起因する雑音の混入及び外来雑音の混入が考えられる。一般的な測定系においては、検出器出力からのアナログ信号のゆらぎはそのままデジタル信号に変換される。そこで、反応度測定装置においては、高周波ノイズを絶縁増幅器の低周波通過フィルタ（LPF）でハード的に除去すると共に、中性子数入力信号について採取データの前 50 サンプリングの重み付き移動平均処理⁽¹⁴⁾により平均の中性子数を求め 1 回の演算周期毎の反応度演算を行う。さらに演算周期を 0.2 秒とすることで低周波ノイズ対策を図っている。ノイズは、交流成分（v）として直流成分（V）に混入している状態を仮定する。反応度演算結果は、演算周期毎の直流成分の変化幅（ ΔV ）にノイズ成分を加えた変化幅（ $(\Delta V \pm v)/V$ ）に対応して算出される。ノイズ成分（v）の影響は、 $\Delta V \pm v$ が一定で、V が計測レンジの範囲内で変化するので、最小の V の時点での反応度演算結果に及ぼす割合が最大となる。計測レンジの範囲内の中性子数が小さい時点ではノイズ成分の影響が大きいので反応度演算結果のゆらぎ幅が大きく、

計測レンジの範囲内の中性子数が大きい時点ではノイズ成分の影響が小さいので反応度演算結果のゆらぎ幅が小さくなる。すなわち、反応度演算結果のゆらぎ幅は、測定時の原子炉出力（直流成分である中性子数に対応する。）とノイズ成分（交流成分）の大きさに関係する。今回測定時のゆらぎ幅は、反応度演算結果の±0.2%～±1.5%である。測定対象をR-1 制御棒、R-2 制御棒とした場合の代表的な測定ステップの計測記録を Fig.3 に示す。

反応度演算結果を単純平均する 1 ステップ当たりの添加反応度算出に係る誤差は、演算周期毎の反応度演算結果を 600 点以上について単純平均して算出しているので、 $n \pm \sigma / N^{1/2}$ (n : 平均値、 σ : 標準偏差、 N : 回数) の関係⁽¹⁵⁾から標準偏差 σ の $1/24.5$ 以下となり、反応度演算結果のゆらぎ幅 ±0.2%～±1.5% を用いた標準偏差 σ が ±0.85% であるので相対誤差⁽¹⁵⁾を ±0.03% とした。

従って、計測システムの系統誤差は、中性子数信号の測定誤差 ±0.38% と反応度算出に係る誤差 ±0.81% の 2 乗和平方根⁽³⁾により算出し、±0.9% 以内の良好な精度で測定できる結果を得た。また、中性子数信号が 2 倍となる倍加時間を測定して反応度を算出する炉周期法を基準とした IK 法の誤差は、Table 3 に示すように相対誤差 1% 以内の満足する結果を得ている。

3. 測定結果

制御棒反応度価値の測定手順は、原子炉出力約 10W の臨界状態から被測定用制御棒を所定量引き抜き、正の反応度を添加して測定するステップに続いて、補償用制御棒を所定量挿入し、負の反応度を添加して測定するステップを交互に、連続的に行うことにより、制御棒の全駆動範囲について測定を行うものである。なお、被測定用制御棒と補償用制御棒の組み合わせは、制御棒反応度干渉効果が最小となるように選択した。各ステップの反応度（各添加反応度）は、即発中性子の影響が小さく安定ペリオドで中性子数が変化しているとみなせる範囲の反応度演算結果を平均化して算出される。ここでは、R-1 制御棒（被測定用制御棒）と R-2 制御棒（補償用制御棒）の制御棒反応度価値測定時における従来手法の中性子源強度を考慮しない場合と新たに開発した手法である中性子源強度の同定及び中性子源強度を考慮する場合について、測定途中の代表的な測定ステップの計測記録及び制御棒反応度価値測定結果について示す。

3. 1 中性子源強度を考慮しない場合

中性子源強度を考慮しない場合の R-1 制御棒の引き抜き操作、R-2 制御棒の挿入操作に伴う中性子数信号及び反応度信号の計測記録を Fig.4 に示す。

測定対象制御棒を R-1,2 とした各ステップにおける中性子数信号と (10) 式の右辺第 1 項に対応する (9) 式の反応度演算結果の反応度信号について比較すると、制御棒操作による中性子数信号は急激な変化に続いて安定ペリオドの状態にて変化しているが、反応度信号は早い応答で正及び負の反応度の添加反応度量に相当した変化を示しているので、制

御棒操作に追従した反応度の添加がよく測定できている。しかし、計測レンジの中性子数レベルが高い範囲における反応度信号は平均的な一定の指示を示すが、計測レンジの中性子数レベルが低い範囲における反応度信号は、中性子源の影響を受ける割合が大きくなるので、徐々に減少する傾向を示している。また、反応度信号のゆらぎ幅は、第2章2.3節に述べた直流成分に対するノイズ成分の関係から説明できることが明らかであることを示している。

3. 2 中性子源強度の同定

中性子源強度の同定方法は、原子炉出力約10Wの臨界状態にてS-1制御棒の挿入操作を行い中性子源強度を(11)式により算出する。結果は、S-1制御棒の操作量が約3mmで、添加反応度は約-0.03% $\Delta k/k$ にて中性子源強度15W/sを得た。

3. 3 中性子源強度を考慮した場合

中性子源強度15W/sを考慮したR-1,2制御棒反応度価値測定時の反応度信号及び中性子数信号の計測記録をFig.5に示す。

測定対象制御棒R-1,2について、3.2節で同定した中性子源強度15W/sを(10)式に入力した各ステップの測定結果は、計測レンジの中性子数レベルが低い範囲であっても反応度信号が平均的な一定の指示を示したことから、中性子源の影響による測定誤差についての検討を必要としない反応度演算結果であることを確認した。

また、中性子源強度32W/sを考慮したR-1,2制御棒反応度価値測定時の反応度信号及び中性子数信号の計測記録をFig.6に示す。

測定対象制御棒R-1,2について、中性子源強度を約2倍の32W/sに増加させた値を(10)式に入力した各ステップの測定結果は、計測レンジの中性子数レベルが低い範囲において反応度信号が徐々に増加する傾向を示したことから、中性子源の影響を過大に考慮した結果であることを確認した。

3. 4 制御棒反応度価値測定結果

定常的な中性子源の影響がある場合の制御棒反応度価値測定におけるR-1制御棒及びR-2制御棒について、従来のIK法の中性子源強度を考慮しない場合、新たに開発したIK法の中性子源強度を考慮する場合及び過大に中性子源強度を考慮した場合の各測定結果を比較する。

測定手法の違い、即ち、中性子源を考慮する場合と考慮しない場合のR-1,2制御棒反応度価値測定結果をTable 4に示す。

R-1,2制御棒反応度価値は、中性子源強度15W/sを考慮した場合の測定結果を基準にすると、中性子源強度を考慮しない場合の測定結果は約97%であり、過大に中性子源強度を考慮した場合(32W/s)の測定結果は約103%である。即ち、従来の中性子源強度を考慮

の測定結果は、中性子源による影響の測定誤差として約 3%過小評価していることが明らかになった。

4. 解析結果

4. 1 解析の方法

制御棒反応度価値の解析は、JRR-3M シリサイド燃料初装荷炉心の制御棒反応度価値測定時の制御棒操作に類似させた解析モデルにて実効増倍率を求め、反応度に換算することにより測定結果と比較する目的で行った。解析の対象制御棒は、R-1、R-2 制御棒とした。

解析コードは、連続エネルギー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⁽¹⁶⁾（以下 MVP コードと略す。）を用いた。核データライブラリは、JENDL-3.2⁽¹⁷⁾に基づくものを使用した。解析では、発生中性子数 2,300,000、ヒストリー数を 10,000 ヒストリー（スキップ数 30）とした。

解析モデルは、非均質性が大きい炉心構造であることから詳細な間隙及び形状寸法を用いて、重水反射体重水レベル、制御棒（中性子吸収体及びフォロワ燃料）、板状燃料、可燃性吸収体、ベリリウム反射体、垂直照射孔プラグ、制御棒操作位置についてモデル化した。制御棒反応度価値測定開始時の状態の解析モデルについて水平断面図及び垂直断面図を各々 Fig.7、Fig.8 に示す。

計算方法は、引き抜き操作用の R-1 制御棒を 0cm 位置と挿入操作用の R-2 制御棒を 80cm 位置で他の制御棒（Sa-1,2 制御棒、S-1,2 制御棒）は約 25cm 位置の測定開始制御棒操作位置から、R-1,2 制御棒を実際の制御棒反応度価値測定時に類似させて交互に制御棒操作を行い、制御棒操作位置変化毎の実効増倍率を求め反応度 ($\rho_{Step} = (k_1 - k_2) / k_1 \cdot k_2$) の換算を行う。さらに、制御棒操作ステップ毎の反応度 (ρ_{Step}) を R-1,2 制御棒全ストロークに渡り加算して R-1,2 制御棒の各制御棒反応度価値を算出した。

4. 2 解析結果

制御棒操作ステップは、R-1 制御棒で引き抜き操作を 11 ステップ、R-2 制御棒で挿入操作を 11 ステップとした。挿入側 R-2 制御棒の 11 ステップ目は、S-2 制御棒により補償した。

R-1,2 制御棒の制御棒反応度価値は、R-1 制御棒 : 3.387% $\Delta k/k$ 、R-2 制御棒 : 3.415% $\Delta k/k$ の結果を得た。R-1 制御棒と R-2 制御棒の制御棒反応度価値の差は、軸方向の反応度価値が対象でないため補償制御棒操作位置の違いにより生じたものである。計算誤差は、各制御棒操作ステップ毎の統計標準誤差を 2 乗和平方根により算出し $\pm 0.3\%$ の結果を得た。MVP コードによる R-1,2 制御棒の制御棒反応度価値解析結果を Table5 及び R-1,2 制御棒の制御棒反応度価値曲線を Fig.9 に示す。

5. 評 價

測定手法の妥当性は、従来手法及び新たに開発した手法を用いた第3章の制御棒反応度価値測定結果と事前検討結果を比較することにより評価する。また、第4章の解析結果と第3章の制御棒反応度価値測定結果を比較し測定手法の妥当性を確認する。

(1) 事前検討結果と測定結果の比較

事前検討は、定常的な中性子源が存在する場合を想定した模擬中性子数信号を用いて制御棒反応度価値測定のシミュレーションを行うことにより、第3章の制御棒反応度価値測定結果と比較して測定手法の妥当性を評価する目的で行った。測定手法の違いによる測定誤差への影響について確認した制御棒反応度価値測定の事前検討の詳細を付録Aに示す。

はじめに、第2章の(1)式で示す中性子数について中性子源強度を想定して4次のルンゲクッタ法⁽¹⁸⁾により近似解を求め、(10)式の中性子数 n に入力する模擬信号を作成した。

次に、(10)式の中性子源強度 S をパラメータにして、実測定を想定した反応度（以下、測定反応度と略す。）を算出し、中性子源強度 S を考慮しない場合との比較を行い測定誤差の影響を確認する検討を行った。

事前検討の条件は、臨界時の原子炉出力（初期出力）約10W、R制御棒反応度価値4.0% $\Delta k/k$ 及び中性子源強度15W/sを想定し、各添加反応度を $\pm 0.08\% \Delta k/k$ とした場合の模擬中性子数信号に比例した模擬原子炉出力信号を用いた。また、測定反応度は、(10)式の中性子源強度 S を0W/s、15W/s、32W/sの3ケースについて求めた。あわせて、中性子源強度15W/sを想定した原子炉出力100W、1kWの2ケースについて測定反応度を求め、測定時の原子炉出力に対する中性子源強度による測定反応度への影響を確認した。

R-1 制御棒反応度価値について事前検討結果と測定結果の測定手法の違いによる相対比をTable6に示す。

事前検討結果は、臨界時の原子炉出力10Wにおいて、中性子源強度を考慮しない場合の測定反応度は添加反応度0.08% $\Delta k/k$ に対して約0.078% $\Delta k/k$ 、制御棒反応度価値4.0% $\Delta k/k$ に対して約3.91% $\Delta k/k$ の結果を得たことから、中性子源強度を適切に考慮した場合に比して、相対の測定誤差が約2%（相対比約0.98）の過小評価となる予測をおこなった。また、考慮する中性子源強度 S が32 W/sのケースは、中性子源強度を適切に考慮した場合に比して、相対比約1.03の結果を得た。さらに、測定時の原子炉出力が十分高い場合は、中性子源が測定誤差に影響を及ぼさない予測結果を得た。

測定結果は、新たに開発した手法により臨界時の原子炉出力約10Wにて同定した中性子源強度15W/sを考慮した測定結果に比して、従来の手法による中性子源強度を考慮しない場合と中性子源強度を過大に考慮する新たに開発した手法による場合は相対比で各々0.97と1.03の結果を得た。また、従来の手法は、定常的な中性子源強度を15W/s、32W/sと増加した場合に測定誤差が約-3%、約-6%と増加することから中性子源強度に比例した誤差の影響を受けることが見込まれる結果を得た。

即ち、事前検討結果とJRR-3Mシリサイド燃料初装荷炉心の特性試験時の測定結果は、

良く一致した結果が得られた。従って、新たに開発した手法による測定結果は、定常的な中性子源の影響により約3%の過小評価結果となる従来の手法に比し、高い精度で制御棒反応度値を測定できることが確認できた。

(2) 測定結果と解析結果の比較

R-1,2制御棒の制御棒反応度値の測定結果と解析結果を比較する。R-1,2制御棒反応度値の測定結果と解析結果の比較をTable7に示す。

解析結果は、第4章に示すようにR-1制御棒反応度値3.387% $\Delta k/k$ 、R-2制御棒反応度値3.415% $\Delta k/k$ で統計誤差±0.2%である。

測定結果は、第3章に示すように従来の中性子源強度を考慮しない場合のR-1制御棒反応度値3.210% $\Delta k/k$ 、R-2制御棒反応度値3.463% $\Delta k/k$ であり、新たに開発した中性子源強度を考慮した場合のR-1制御棒反応度値3.304% $\Delta k/k$ 、R-2制御棒反応度値3.553% $\Delta k/k$ で測定誤差±0.9%である。

従って、新たに開発した手法による測定結果は、従来の手法による測定結果に比し、解析結果によく一致していることが確認できた。

これらのことから、新たに開発した中性子源強度を考慮するIK法の測定手法は、定常的に存在する中性子源の影響による測定誤差を生ずることなく、高い精度にて制御棒反応度値の測定が実施できる確証を得た。

6. 結 言

新たに開発した制御棒反応度値の測定手法は、制御棒反応度値測定時と同程度の原子炉出力状態において、あらかじめ定常的な中性子源強度を短時間に同定し、この中性子源強度を考慮したIK法により実時間での反応度測定を行うものである。

新たに開発した測定手法は、JRR-3Mシリサイド燃料初装荷炉心の特性試験時に適用した測定結果を事前検討結果及び解析結果と比較することにより、定常的な中性子源の影響を受ける反応度の測定条件下であっても、従来の方法に比し高い精度で実時間測定ができる事を実証した。

原子炉の核的制限値の確認に関する炉心反応度の測定精度の向上は、より適切な原子炉の反応度管理を図ることができ、安全かつ安定な原子炉の運転管理に寄与できる。

今後、大きな負の反応度を測定する場合を含めて、定常的な中性子源の影響を受ける場合の反応度測定を行うJRR-3M定期検査時等において、本測定手法を活用する計画である。また、他炉においても同様な問題解決に適用できる測定手法である。

謝　　辞

本報をまとめるにあたり、海江田圭右研究炉部長、小林晋昇研究炉部次長兼 JRR-3 管理課長、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、測定に当たり原子炉の運転を担当した JRR-3 管理課関係者及び測定プログラムの作成、事前解析について日立エンジニアリングサービス株式会社八塙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) 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) 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).
- (4) 金子義彦他 : 日本原子力学会誌, Vol.19, No6, 380~390 (1977).
- (5) Yasuo OHSAWA and Kanji KATO : J.Nucl.Sci.and Technol., 8 [3], 122~128 (1971).
- (6) 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).
- (7) ジェームス J. ドゥデルシュタット他成田正邦他訳：“原子炉の理論と解析”，現代工学社 (1982).
- (8) 鈴木武、山田作太郎：“数理統計学”，内田老鶴圃 (1996).
- (9) 川口千代二、荒克之：“原子炉の計測”，幸書房 (1978).
- (10) 竹本晃、稻村浩：“A-D 変換を使いこなす”，CQ 出版株式会社 (1990).
- (11) 日本規格協会 : JIS B 0155, “工業プロセス計測制御用語” (1986).
- (12) 日本規格協会 : JIS Z 8103, “計測用語” (1990).
- (13) 島津洋一郎、中野雄三 : 日本原子力学会, Vol. 32, No.3, 285~291 (1990).
- (14) 鳥居孝：“計測の信号処理”，コロナ社 (1997).
- (15) ニコラスツルファニディス, 訳阪井英次：“放射線計測の理論と演習（下）応用編”，現代工学社 (1986).
- (16) 森貴正、中川正幸 : 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).
- (17) K.Shibata, et al., : JAERI-1319, “JENDL-3: Japanese Evaluation Nuclear Data Library, Version3”, (1990)
- (18) 伊理正夫、藤野和建：“数値計算の常識”，共立出版 (1999).

Table 1 Specifications of JRR-3M

Name	JRR-3M
Purpose	Beam Experiments, Irradiation tests of fuels and materials, RI production
Type	Low-Enriched Uranium, Light water moderate, coolant Pool and D ₂ O reflector tank type
First criticality	Mar.22,1990 with Aluminide fuel core Sep.17,1999 with Silicide fuel core
Maximum Thermal Output	20,000k W
Shape and Size of Reactor Core	Cylindrical, $\phi 0.6\text{m} \times 0.75\text{m}$ H
Coolant	Light water
Fuel	Silicide fuel ; 26 standard type, 6 follower type
Control Rod	Hafnium ; 6
Operation Mode	Cycle Operation ; 26 days/cy

Table 2 The error of the measurement system

Items	CIC	Time constant of Liner-N Amplifier with cable	Liner-N Amplifier	The equipment for the reactivity measurement			
				Isolation Amplifier	Analog Digital Converter	Digital calculation processing	Reactivity calculation
Error of an equipment	(±0.37%)	0.0058s	(0.05%FS)	(±0.12%FS)	±0.007%FS	±0.001%	±0.3m V/digit : ±4.5E-6% Δk/k/digit ±0.007%
Error of combined equipment	(±0.37%)		CRT display value of the calculated neutron number signal (-0.02%FS, -0.1%)				<±0.77%/60step> <±0.26%/60step>
Systematic error						<±0.38%>	<±0.81%>
						<±0.90%>	

Note : () is an equipment proofreading result by the calculated signal input. < > is a square mean root calculation result.

Table 3 Comparison of measurement result of reactivity by positive period method and IK method

number of measurement	Positive period method			IK method		Relative error (%)
	Doubling time (s)			Reactivity (%Δk/k)	Reactivity (%Δk/k)	
	3V~6V	4V~8V	Average	①	②	
1 st	103.89	101.16	102.53	0.04447	0.04406	-0.92
2 nd	115.78	117.28	116.53	0.03992	0.03991	-0.03
3 rd	116.92	117.86	117.39	0.03967	0.03981	0.35

Table 4 Comparison of the result of the control rod worth measured by IK method with and without consideration of neutron source

Control rod	Conventional IK method	New IK method	
	Without consideration of neutron source	With consideration of neutron source of 15W/s	With consideration of neutron source of 32W/s
R-1	3.210 (%Δk/k)	3.304 (%Δk/k)	3.400 (%Δk/k)
R-2	3.463 (%Δk/k)	3.553 (%Δk/k)	3.656 (%Δk/k)
Ratio	Approx,0.97	1.00	Approx,1.03

Table5 The R-1,2 control rod worth calculation by MVPcorde

Control rod position [cm]					Effective multiplication factor	Error [%]	Reactivity [% Δ k/k]	
S-1	S-2	Sa-1 Sa-2	R-1	R-2	k-eff	1sigma	R-1	R-2
25.30	25.16	25.30	0.00	80.00	1.00036	0.070		
25.30	25.16	25.30	2.00	80.00	1.00132	0.063	0.0958	
25.30	25.16	25.30	2.00	64.00	1.00028	0.064		0.1038
25.30	25.16	25.30	8.00	64.00	1.00196	0.065	0.1676	
25.30	25.16	25.30	8.00	55.00	1.00026	0.066		0.1696
25.30	25.16	25.30	13.00	55.00	1.00163	0.062	0.1367	
25.30	25.16	25.30	13.00	51.00	1.00127	0.062		0.0359
25.30	25.16	25.30	18.00	51.00	1.00414	0.058	0.2855	
25.30	25.16	25.30	18.00	41.00	1.00093	0.063		0.3194
25.30	25.16	25.30	25.00	41.00	1.00758	0.061	0.6594	
25.30	25.16	25.30	25.00	34.00	1.00161	0.063		0.5916
25.30	25.16	25.30	30.00	34.00	1.00654	0.067	0.489	
25.30	25.16	25.30	30.00	27.00	1.00103	0.065		0.5469
25.30	25.16	25.30	35.00	27.00	1.00489	0.067	0.3837	
25.30	25.16	25.30	35.00	24.00	1.00184	0.066		0.3030
25.30	25.16	25.30	45.00	24.00	1.00710	0.066	0.5213	
25.30	25.16	25.30	45.00	17.00	1.00120	0.071		0.5851
25.30	25.16	25.30	56.00	17.00	1.00600	0.066	0.4766	
25.30	25.16	25.30	56.00	9.00	1.00043	0.062		0.5534
25.30	25.16	25.30	60.00	9.00	1.00202	0.068	0.1586	
25.30	25.16	25.30	60.00	6.00	1.00109	0.069		0.0927
25.30	25.16	25.30	80.00	6.00	1.00122	0.057	0.0130	
25.30	25.5	25.30	80.00	0.00	1.00008	0.067		0.1139
					total	0.3	3.387	3.415

Table6 Comparison of new and conventional IK methods
 the preliminary examination result and the measurement
 result of the R-1 control rod worth

Items	Conventional technique	Technique which was developed newly	
	Not considering neutron source strength	Considering neutron source strength	Considering neutron source strength excessively
Preliminary examination result	0.98	1.00	1.03
Measurement result of characteristic test in JRR-3M	0.97	1.00	1.03

Table 7 Measurement result and analysis result of the R-1, 2 control rod worth

Control rod	Measurement result		Analysis result
	Without consideration of neutron source (%Δk/k)	With consideration of neutron source (%Δk/k)	MVP cord (%Δk/k)
R-1	3.210	3.304	3.387
(relative ratio)	(0.95)	(0.98)	(1.00)
R-2	3.463	3.553	3.415
(relative ratio)	(1.01)	(1.04)	(1.00)

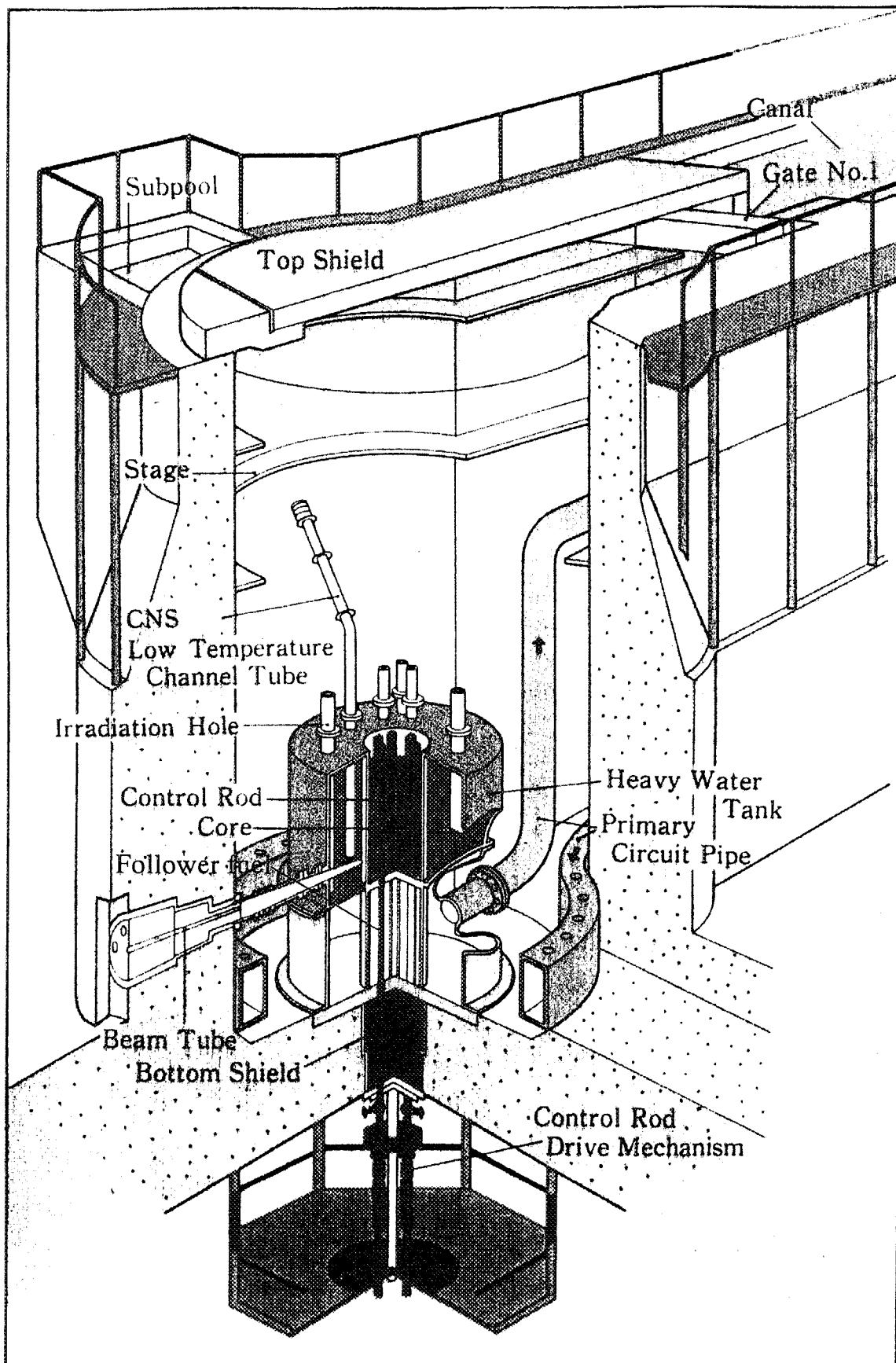
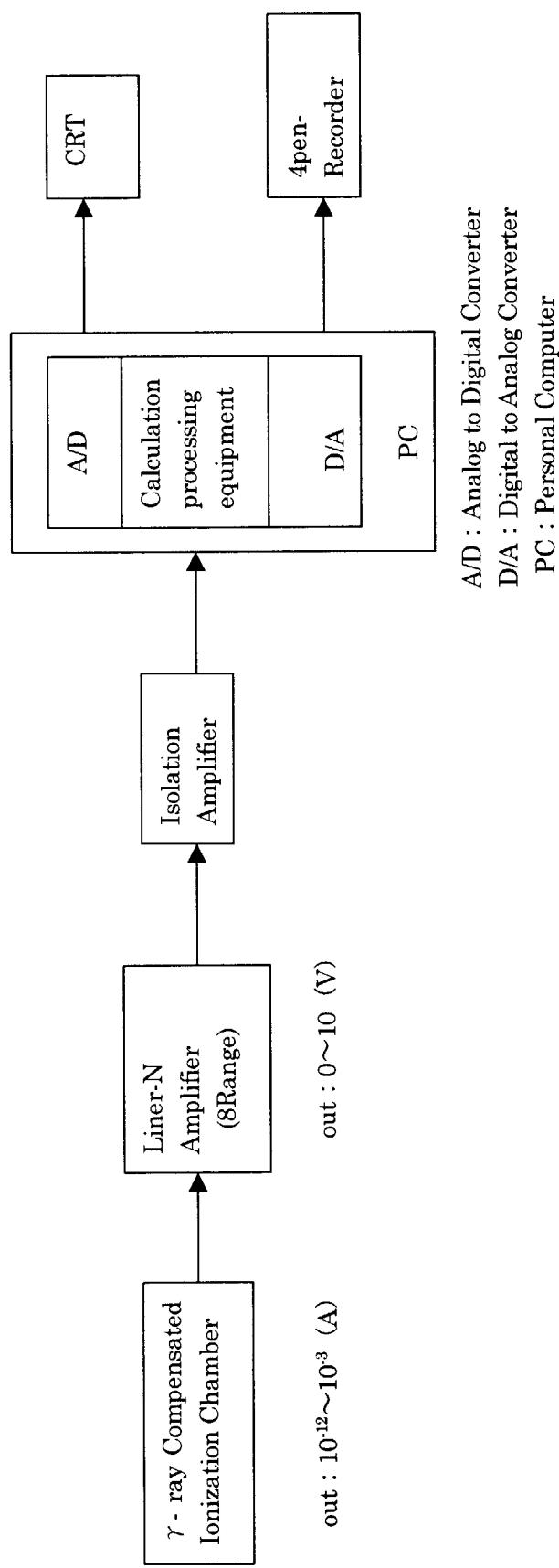


Fig. 1 Overview of JRR-3M



A/D : Analog to Digital Converter
 D/A : Digital to Analog Converter
 PC : Personal Computer

Fig.2 Measurement system for IK method

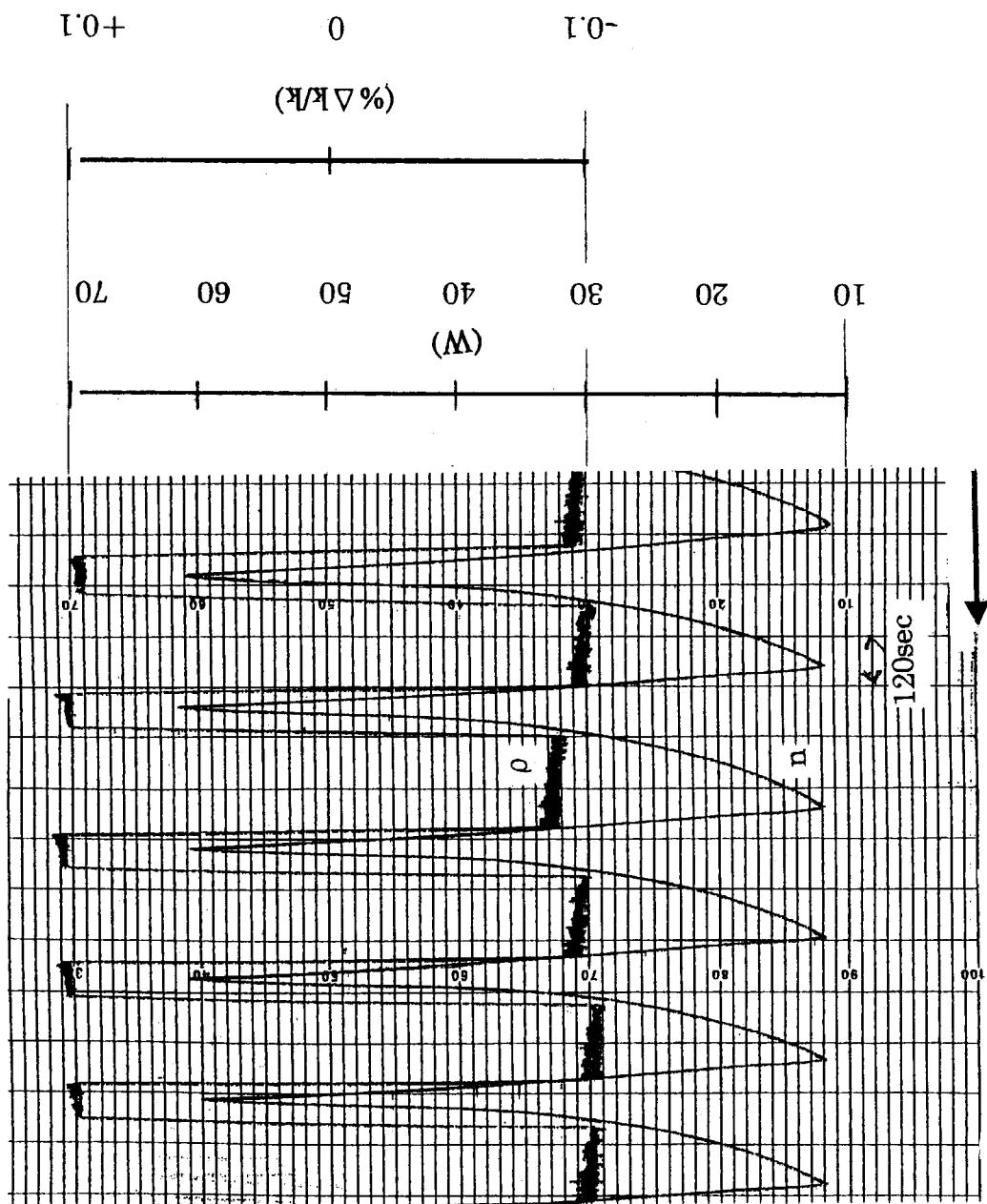


Fig.3 Typical recorded data of output of CIC(n) and corresponding reactivity(ρ) measured with IK method

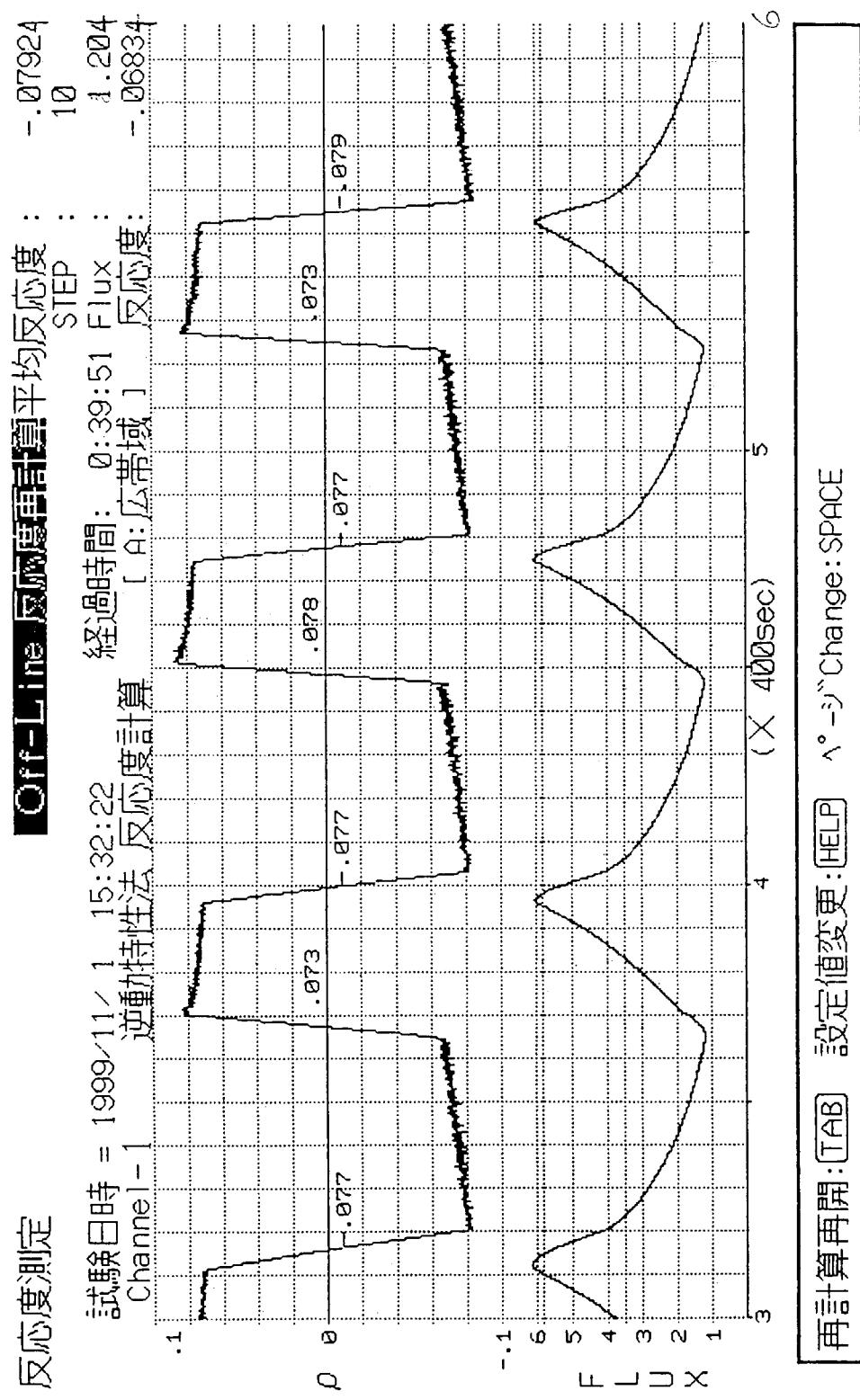


Fig.4 Recorded data of output of CIC(FLUX : $10^{-8}A$) and corresponding reactivity(ρ : % $\Delta k/k$) measured with IK method and without consideration of neutron sources

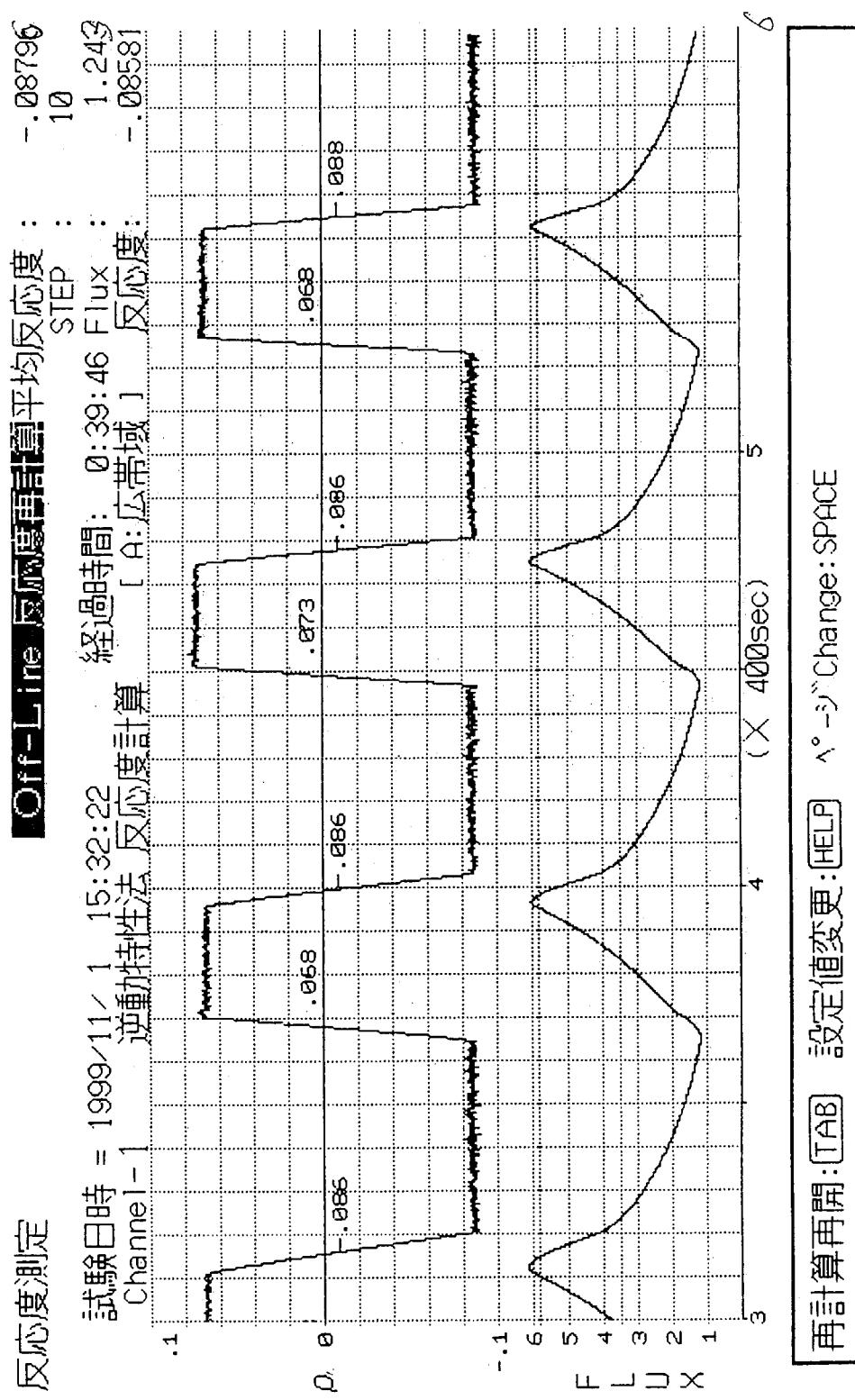


Fig.5 Recorded data of output of CIC(FLUX : $10^{-8}A$) and corresponding reactivity(ρ : % $\Delta k/k$) measured with IK method considering neutron sources of 15W/s

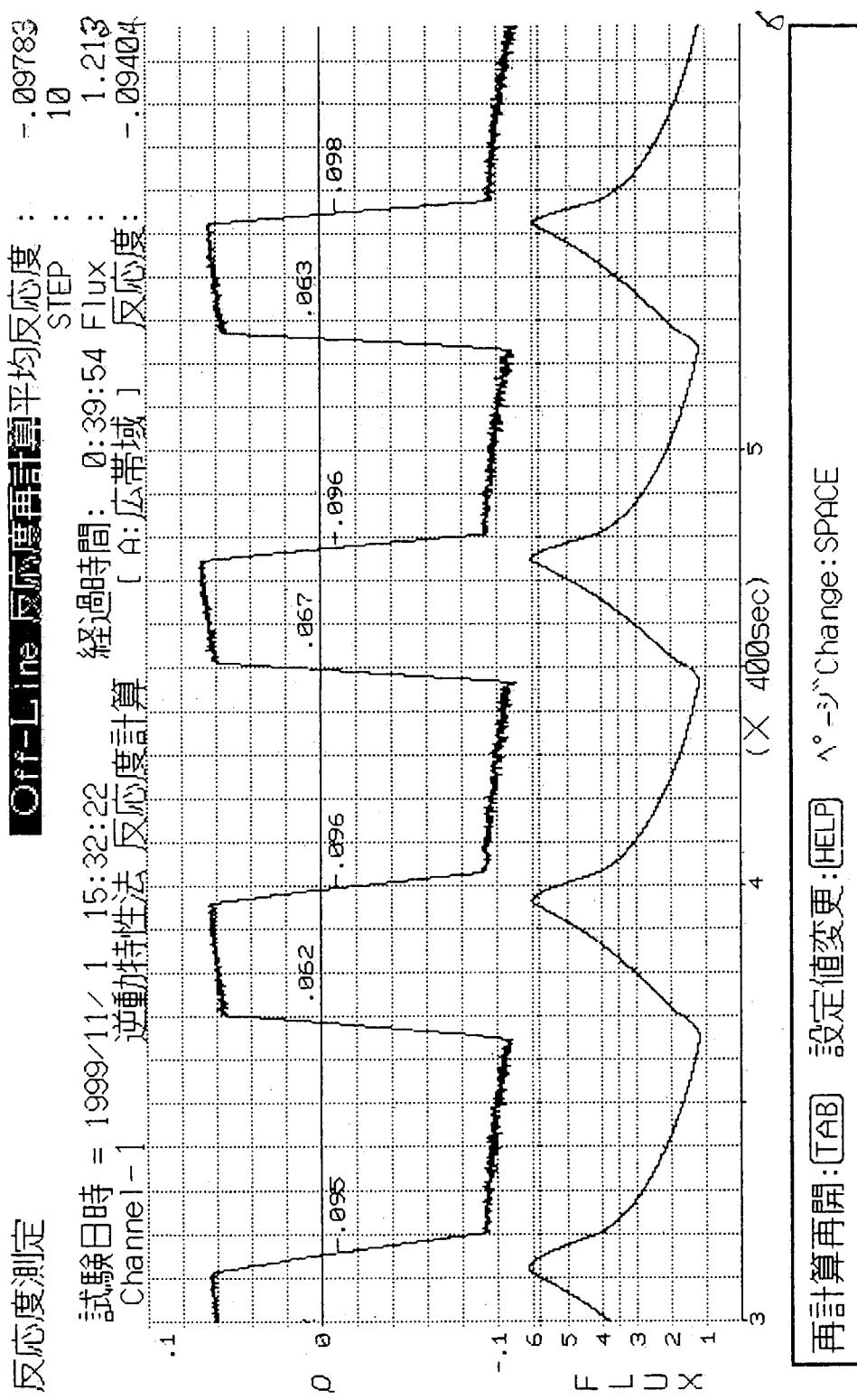


Fig.6 Recorded data of output of CIC(Flux : 10^8 A) and corresponding reactivity(ρ : % $\Delta k/k$) measured with IK method considering neutron sources of 32W/s

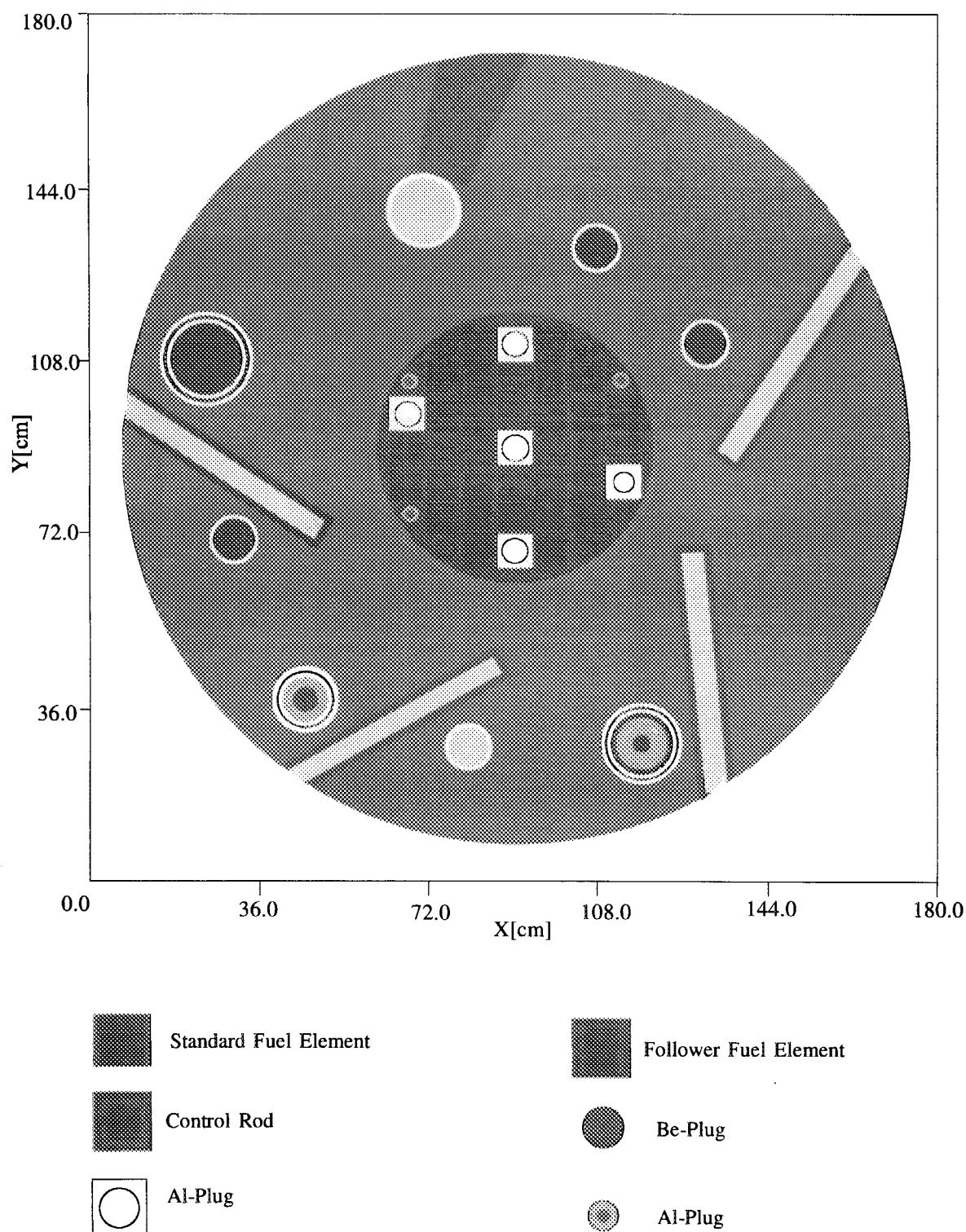


Fig.7 Horizontal cross section model of core and D₂O regions for MVP cord calculation

This is a blank page.

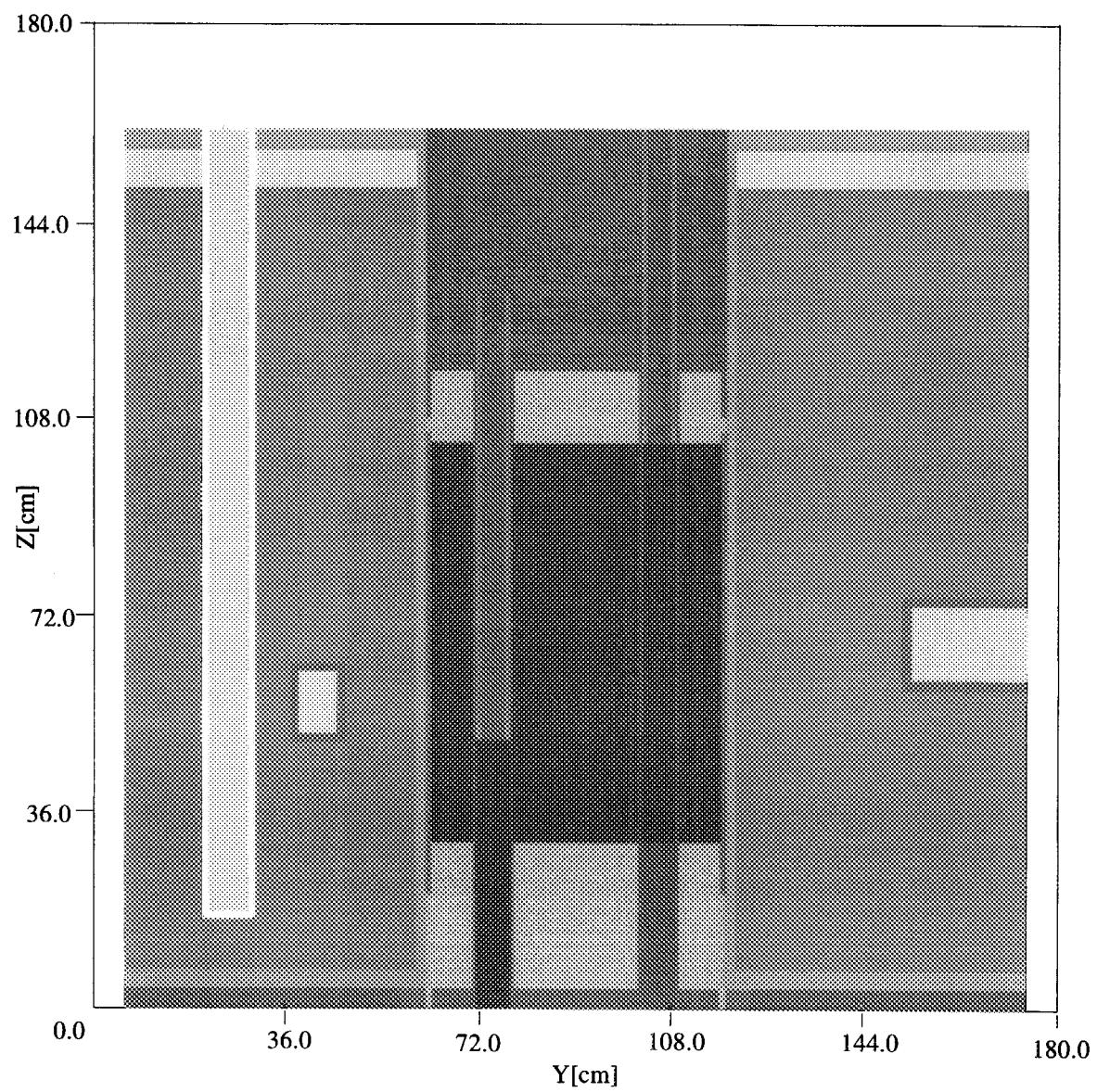


Fig.8 Vertical cross section model of core and D₂O regions
for MVP cord calculation

This is a blank page.

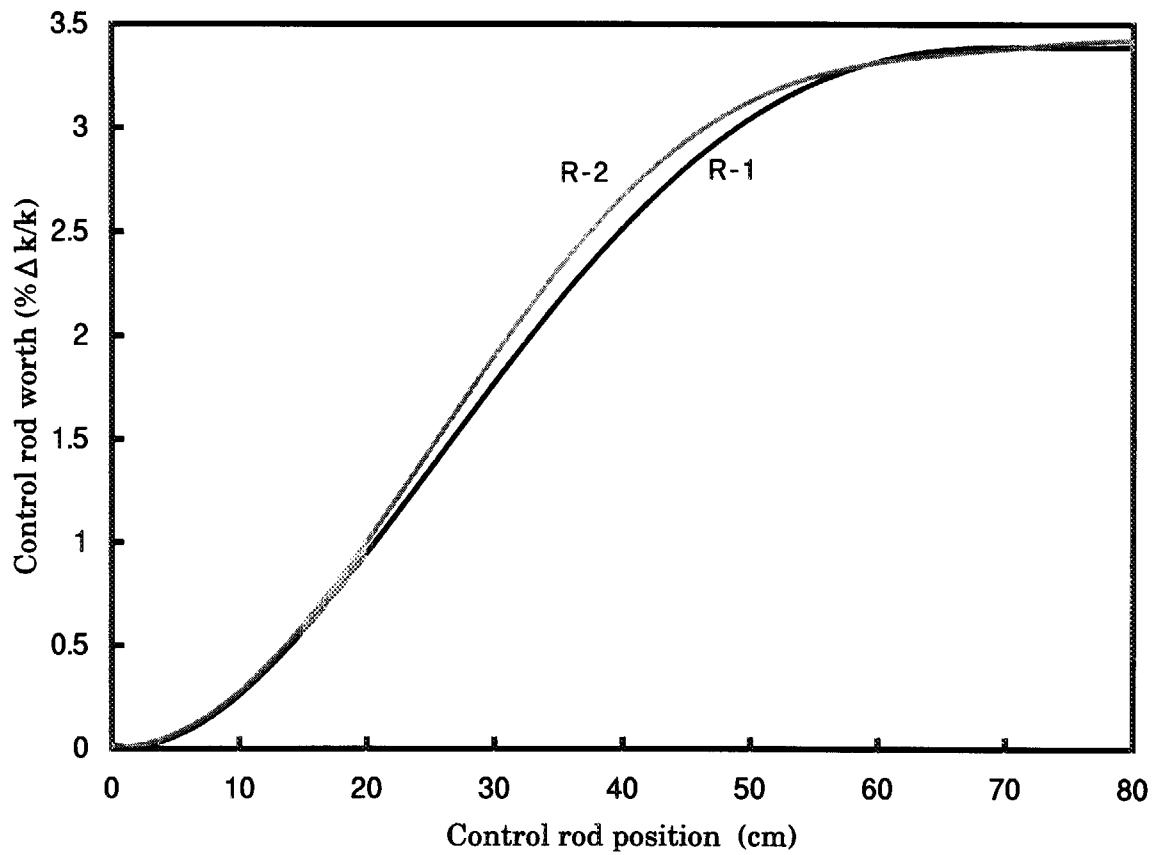


Fig.9 Control-rod worth of R-1 and R-2 calculated by MVP cord

This is a blank page.

付録 A 制御棒反応度価値測定の事前検討

1. 概要

制御棒反応度価値測定の事前検討は、想定した中性子源強度を考慮した1点炉動特性方程式の近似解による中性子数と事前検討用の制御棒反応度価値曲線を用いて、中性子源強度を考慮しない従来の手法と中性子源強度を考慮した手法の制御棒反応度価値を求め測定手法の違いによる測定誤差の影響を確認した。制御棒反応度価値は、測定時の制御棒操作に類似させた添加反応度に対応した反応度（以下測定反応度と略す。）を中性子源強度をパラメータとして算出し、測定反応度を積算して求めた。また、初期原子炉出力をパラメータとして測定時の原子炉出力が測定誤差に及ぼす影響の確認を行った。

2. 条件

動特性方程式に入力する動特性パラメータは、シリサイド燃料初装荷炉心モデルによる汎用核計算コードシステムの SRAC コードにより求めた値を用いた。動特性パラメータを表 1 に示す。

対象制御棒は、R-1 制御棒、R-2 制御棒の 1 組とした。事前検討用の R-1,2 制御棒の制御棒反応度価値曲線は、9次の多項式を用いて近似した。反応度 ρ と制御棒位置 CR の関係は、次式となる。

$$\rho = \sum_{i=0}^9 \alpha_{(i)} \cdot CR^i$$

多項式の 9次の係数 α を表 2 に示す。事前検討用の R-1 及び R-2 制御棒の制御棒反応度価値を表 3 に示す。R-1 及び R-2 制御棒の制御棒反応度価値曲線（事前検討用）を図 1 に示す。

制御棒反応度価値は、制御棒位置 80cm（制御棒全引き抜き位置）において 4% $\Delta k/k$ とした。制御棒操作時の駆動速度は、0.0167cm/s の一定速度とした。

中性子数に比例した模擬原子炉出力は、中性子源強度を 15W/s と想定した表 4 に示す 3 ケースについて 4次のルンゲクッタ法を用いて 0.1 秒周期の 5000 秒経過データとして算出した。

測定開始の制御棒位置は、R-1 制御棒を引き抜き操作側の全挿入位置（0cm）、R-2 制御棒を挿入操作側の全引き抜き位置（80cm）とした。

3. 方法

模擬原子炉出力は、一定速度で制御棒を操作して所定の反応度を添加することにより算出した。制御棒操作による反応度添加は、R-1 制御棒を +0.05% $\Delta k/k$ の反応度添加まで操作し、模擬原子炉出力が所定の出力に達した時点で、R-2 制御棒を -0.08% $\Delta k/k$ の反応度添加まで操作する。次に、模擬原子炉出力が所定の出力に達した時点で R-1 制御棒を +0.08% $\Delta k/k$ の反応度添加まで操作する。引き続き、R-1 制御棒全引き抜き位置となるまで反応度添加を交互に繰り返すことにより行った。制御棒操作を開始する所定の模擬原子炉

出力は、初期出力 10Wにおいては 1 ステップ目を 10W、2 ステップ目を 60W、3 ステップ目以降を 20W または、60W とする同様の変化幅とした。初期出力が 100W、1k W の各ケースは、2 ステップ目を各 600W、6k W、3 ステップ目以降を各 200W、2k W または、各 600W、6k W とする同様の変化幅とした。

測定反応度は、模擬原子炉出力を用いて、新たに開発した制御棒反応度価値測定プログラムと同様な逆運動特性方程式により中性子源強度をパラメータとして算出した。中性子源強度は、中性子源強度を考慮しない場合 ($S=0\text{W/s}$)、中性子源強度を考慮する場合 ($S=15\text{W/s}$) 及び中性子源強度を過大に考慮した場合 ($S=32\text{W/s}$) とした。初期出力のパラメータは、10W、100W 及び 1k W の各ケースとした。

4. 結果

R-1 制御棒は、51 ステップの制御棒操作による反応度添加で制御棒の全駆動範囲を測定できることが予測できた。制御棒操作ステップを図 2 に示す。

制御棒操作ステップの各添加反応度は、所定の添加反応度に設定できた。しかし、2 ステップと最終ステップは、表 3 に示すように制御棒位置 76cm の反応度価値が制御棒位置 80cm の反応度価値より大きな値を用いているために、正側にパルス状の添加反応度が生じる結果となった。制御棒操作ステップの各添加反応度を図 3 に示す。

模擬原子炉出力は、所定の添加反応度に良く対応した時間変化にて算出できた。初期出力 10W、100W 及び 1k W の模擬原子炉出力について各々図 4、図 8 及び図 12 に示す。

中性子源強度を考慮しない場合の測定反応度は、模擬原子炉出力の低い範囲について想定した中性子源強度の影響により過小評価の算出結果を示した。初期出力 10W、100W 及び 1k W の中性子源強度を考慮しない場合の測定反応度について各々図 5、図 9、図 13 に示す。

中性子源強度を考慮した場合の測定反応度は、各ステップの添加反応度を良く測定できた。初期出力 10W、100W 及び 1k W の中性子源強度を考慮した場合の測定反応度について各々図 6、図 10、図 14 に示す。

中性子源強度を過大に考慮した場合の測定反応度は、模擬原子炉出力の低い範囲について過大評価の算出結果を示した。初期出力 10W、100W 及び 1k W の中性子源強度を過大に考慮した場合の測定反応度について各々図 7、図 11、図 15 に示す。

制御棒反応度価値は、制御棒操作が行われてない範囲の各ステップの測定反応度を平均してステップ毎の反応度価値を求め、全駆動距離について積算して算出した。初期出力 10W、100W 及び 1k W の R-1 制御棒の制御棒反応度価値算出結果を各々表 4、表 5、表 6 に示す。

初期出力が 10W の模擬原子炉出力を用いた R-1 制御棒反応度価値は、中性子源強度を考慮した場合に比し、中性子源強度を考慮しない場合は約 5% の過小評価であり、中性子源強度を過大に考慮した場合は約 3% の過大評価となる結果を得た。また、原子炉出力が十分高い出力で測定を行う場合は、中性子源が測定誤差に影響を及ぼさない結果を得た。R-1 制御棒反応度価値の事前検討結果を表 7 に示す。

表 1 動特性パラメータ

i	β	λ (s ⁻¹)
1	2.40040E-4	1.27034E-2
2	1.57764E-3	3.17043E-2
3	1.42570E-3	1.15281E-1
4	2.86460E-3	3.11691E-1
5	8.49409E-4	1.40032E0
6	3.10102E-4	3.87449E0
即発中性子寿命	1.48603E-4 (s)	

表 2 多項式 9 次の係数

i	$\alpha(i)$
0	-1.684775309875874D-04
1	.01103384600213148
2	1.266245322653167D-03
3	-1.758822883752854D-05
4	7.904395671984668D-06
5	-4.576296465354001D-07
6	1.122621267382669D-08
7	-1.425997639010926D-10
8	9.290315267047693D-13
9	-2.467569132266281D-15

表3 事前検討用制御棒反応度価値

制御棒位置 (cm)	R制御棒の 反応度価値 (%Δk/k)	R-1又はR-2の 反応度価値 (%Δk/k)	R-1又はR-2の 規格化反応度価値 (%Δk/k)
0	0	0	0
4	0.119	0.0595	0.06396131
8	0.337	0.1685	0.18113413
12	0.675	0.3375	0.36280575
16	1.155	0.5775	0.62080095
20	1.757	0.8785	0.94436993
24	2.447	1.2235	1.31523803
28	3.182	1.5910	1.71029318
32	3.900	1.9500	2.09621100
36	4.567	2.2835	2.45471683
40	5.163	2.5815	2.77506087
44	5.676	2.8380	3.05079324
48	6.117	3.0585	3.28782633
52	6.468	3.2340	3.47648532
56	6.772	3.3860	3.63988228
60	7.002	3.5010	3.76350498
64	7.192	3.5960	3.86562808
68	7.329	3.6645	3.93926421
72	7.418	3.7090	3.98710082
76	7.455	3.7275	4.00698795
80	7.442	3.7210	4.00000058

表4 R-1制御棒反応度価値算出結果(初期出力10W)

制御棒位置 (cm)	S=0W/s (%Δk/k)	S=15W/s (%Δk/k)	S=32W/s (%Δk/k)
0	0	0.02229	0.04755
3.29	0.03636	0.02772	0.01794
3.29	0.09444	0.10231	0.11123
8.78	0.06304	0.05774	0.05173
8.78	0.09387	0.10234	0.11193
12.13	0.06302	0.05774	0.05176
12.13	0.09390	0.10234	0.11190
14.72	0.06301	0.05773	0.05174
14.72	0.09389	0.10230	0.11184
16.92	0.06301	0.05773	0.05174
16.92	0.09393	0.10231	0.11182
18.90	0.06305	0.05775	0.05176
18.90	0.09393	0.10230	0.11180
20.73	0.06312	0.05782	0.05183
20.73	0.09394	0.10230	0.11178
22.47	0.06312	0.05783	0.05183
22.47	0.09401	0.10236	0.11182
24.15	0.06312	0.05782	0.05182
24.15	0.09407	0.10241	0.11187
25.79	0.06307	0.05777	0.05177
25.79	0.09404	0.10237	0.11182
27.41	0.06304	0.05774	0.05174
27.41	0.09397	0.10229	0.11173
29.04	0.06307	0.05778	0.05178
29.04	0.09402	0.10234	0.11178
30.70	0.06311	0.05781	0.05182
30.70	0.09403	0.10235	0.11179
32.39	0.06312	0.05783	0.05184
32.39	0.09406	0.10239	0.11182
34.13	0.06310	0.05781	0.05182
34.13	0.09409	0.10242	0.11185
35.96	0.06313	0.05784	0.05185
35.96	0.09402	0.10235	0.11179
37.88	0.06310	0.05781	0.05183
37.88	0.09402	0.10234	0.11177
39.94	0.06308	0.05779	0.05181
39.94	0.09404	0.10237	0.11180
42.18	0.06303	0.05776	0.05178
42.18	0.09408	0.10241	0.11186
44.64	0.06302	0.05775	0.05178
44.64	0.09399	0.10233	0.11178
47.39	0.06302	0.05776	0.05179
47.39	0.09398	0.10233	0.11179
50.55	0.06302	0.05778	0.05183
50.55	0.09403	0.10240	0.11188
54.28	0.06295	0.05771	0.05178
54.28	0.09391	0.10232	0.11184
58.88	0.06293	0.05771	0.05181
58.88	0.09382	0.10229	0.11190
65.30	0.06287	0.05772	0.05188
65.30	0.09358	0.10230	0.11218
80.00	0.01182	0.00486	0.00303
合計	3.91099	3.99997	4.10701

表5 R-1制御棒反応度価値算出結果(初期出力100W)

制御棒位置 (cm)	S=0W/s (%Δk/k)	S=15W/s (%Δk/k)	S=32W/s (%Δk/k)
0	0	0.00223	0.00476
3.29	0.04868	0.04778	0.04677
3.29	0.08152	0.08225	0.08307
8.78	0.07832	0.07780	0.07721
8.78	0.08145	0.08228	0.08321
12.13	0.07833	0.07780	0.07721
12.13	0.08145	0.08228	0.08322
14.72	0.07831	0.07779	0.07720
14.72	0.08141	0.08224	0.08318
16.92	0.07831	0.07779	0.07719
16.92	0.08142	0.08225	0.08319
18.90	0.07834	0.07782	0.07722
18.90	0.08141	0.08224	0.08318
20.73	0.07841	0.07789	0.07729
20.73	0.08141	0.08224	0.08318
22.47	0.07842	0.07789	0.07729
22.47	0.08147	0.08230	0.08324
24.15	0.07841	0.07789	0.07729
24.15	0.08152	0.08235	0.08329
25.79	0.07836	0.07783	0.07724
25.79	0.08148	0.08231	0.08325
27.41	0.07833	0.07780	0.07721
27.41	0.08140	0.08223	0.08317
29.04	0.07837	0.07784	0.07724
29.04	0.08145	0.08228	0.08322
30.70	0.07840	0.07788	0.07728
30.70	0.08146	0.08229	0.08323
32.39	0.07842	0.07790	0.07730
32.39	0.08149	0.08232	0.08326
34.13	0.07840	0.07787	0.07728
34.13	0.08152	0.08235	0.08330
35.96	0.07843	0.07790	0.07731
35.96	0.08146	0.08229	0.08323
37.88	0.07840	0.07788	0.07728
37.88	0.08145	0.08228	0.08322
39.94	0.07838	0.07786	0.07726
39.94	0.08147	0.08230	0.08325
42.18	0.07835	0.07782	0.07723
42.18	0.08152	0.08235	0.08329
44.64	0.07834	0.07781	0.07722
44.64	0.08144	0.08227	0.08321
47.39	0.07834	0.07782	0.07723
47.39	0.08143	0.08226	0.08321
50.55	0.07836	0.07784	0.07725
50.55	0.08150	0.08234	0.08328
54.28	0.07829	0.07777	0.07719
54.28	0.08142	0.08226	0.08320
58.88	0.07829	0.07778	0.07720
58.88	0.08139	0.08223	0.08318
65.30	0.07828	0.07778	0.07721
65.30	0.08139	0.08224	0.08321
80.00	0.02525	0.02492	0.02455
合計	3.99085	4.00001	4.01038

表6 R-1制御棒反応度価値算出結果(初期出力1k W)

制御棒位置 (cm)	S=0W/s (%Δk/k)	S=15W/s (%Δk/k)	S=32W/s (%Δk/k)
0	0	0.00022	0.00048
3.29	0.04988	0.04979	0.04969
3.29	0.08017	0.08024	0.08033
8.78	0.07986	0.07980	0.07975
8.78	0.08019	0.08027	0.08036
12.13	0.07986	0.07981	0.07975
12.13	0.08019	0.08027	0.08037
14.72	0.07985	0.07980	0.07974
14.72	0.08015	0.08024	0.08033
16.92	0.07985	0.07979	0.07974
16.92	0.08016	0.08024	0.08034
18.90	0.07988	0.07982	0.07976
18.90	0.08015	0.08024	0.08033
20.73	0.07995	0.07989	0.07983
20.73	0.08015	0.08023	0.08033
22.47	0.07995	0.07990	0.07984
22.47	0.08021	0.08029	0.08039
24.15	0.07994	0.07989	0.07983
24.15	0.08026	0.08034	0.08044
25.79	0.07989	0.07984	0.07978
25.79	0.08022	0.08031	0.08040
27.41	0.07986	0.07981	0.07975
27.41	0.08014	0.08022	0.08032
29.04	0.07990	0.07985	0.07979
29.04	0.08019	0.08028	0.08037
30.70	0.07993	0.07988	0.07982
30.70	0.08020	0.08029	0.08038
32.39	0.07996	0.07990	0.07984
32.39	0.08023	0.08032	0.08041
34.13	0.07993	0.07988	0.07982
34.13	0.08027	0.08035	0.08044
35.96	0.07996	0.07991	0.07985
35.96	0.08020	0.08028	0.08038
37.88	0.07993	0.07988	0.07982
37.88	0.08019	0.08027	0.08037
39.94	0.07991	0.07986	0.07980
39.94	0.08022	0.08030	0.08039
42.18	0.07988	0.07983	0.07977
42.18	0.08026	0.08035	0.08044
44.64	0.07987	0.07982	0.07976
44.64	0.08018	0.08026	0.08036
47.39	0.07987	0.07982	0.07976
47.39	0.08018	0.08026	0.08035
50.55	0.07990	0.07984	0.07979
50.55	0.08025	0.08033	0.08042
54.28	0.07983	0.07978	0.07972
54.28	0.08017	0.08025	0.08034
58.88	0.07983	0.07978	0.07972
58.88	0.08014	0.08023	0.08032
65.30	0.07984	0.07979	0.07973
65.30	0.08015	0.08024	0.08033
80.00	0.02696	0.02693	0.02690
合計	3.99909	4.00001	4.00107

表7 制御棒反応度価値事前検討結果

中性子源強度 (W/s)	R-1 制御棒反応度価値 (% $\Delta k/k$)					
	平均原子炉出力 40W	相対比	平均原子炉出力 400W	相対比	平均原子炉出力 4 kW	相対比
0	3.91099	0.978	3.99085	0.998	3.99909	1.000
15	3.99997	1.000	4.00001	1.000	4.00001	1.000
32	4.10701	1.027	4.01038	1.003	4.00107	1.000

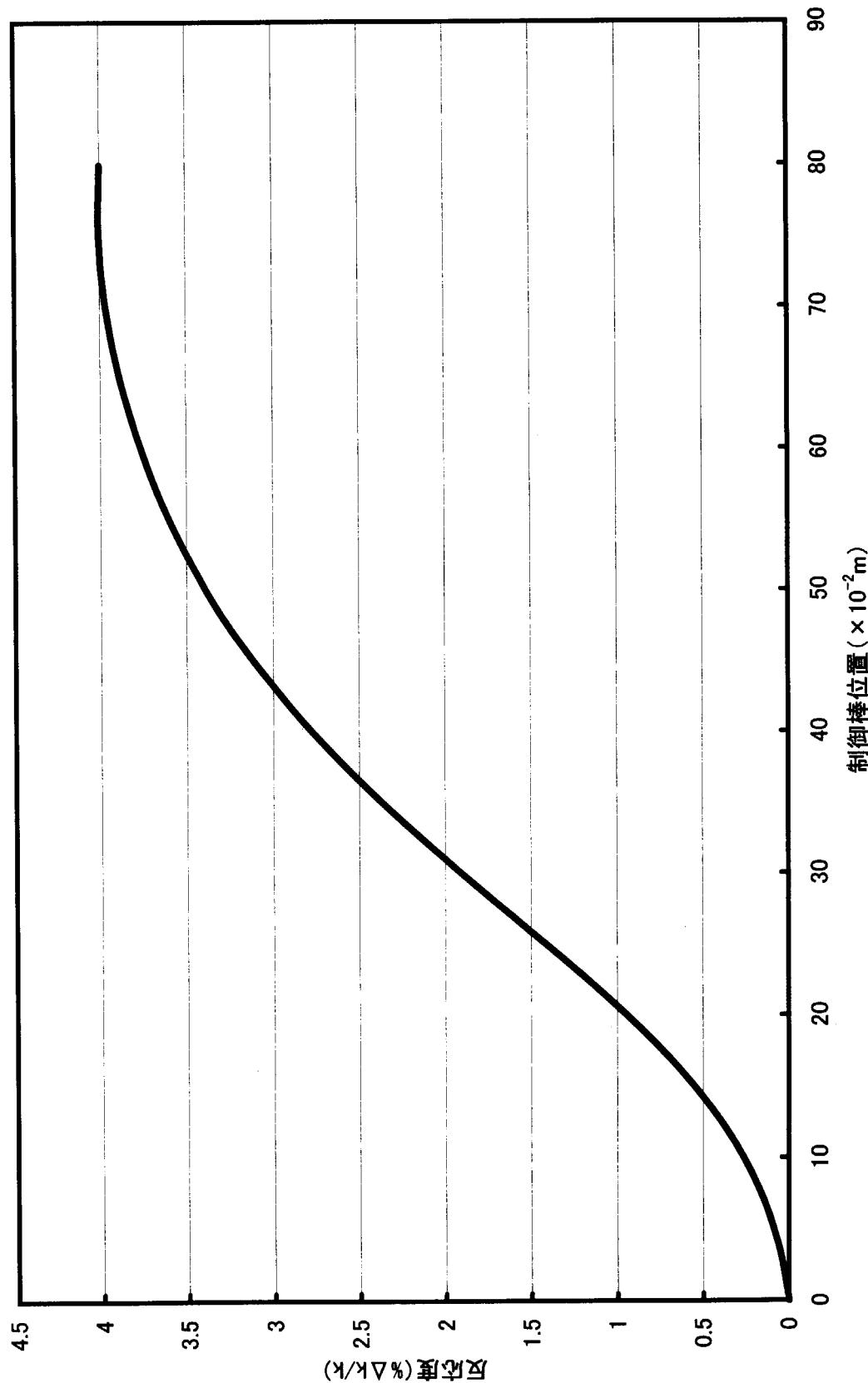


図1 R-1及びR-2制御棒の制御棒反応度価値曲線(事前検討用)

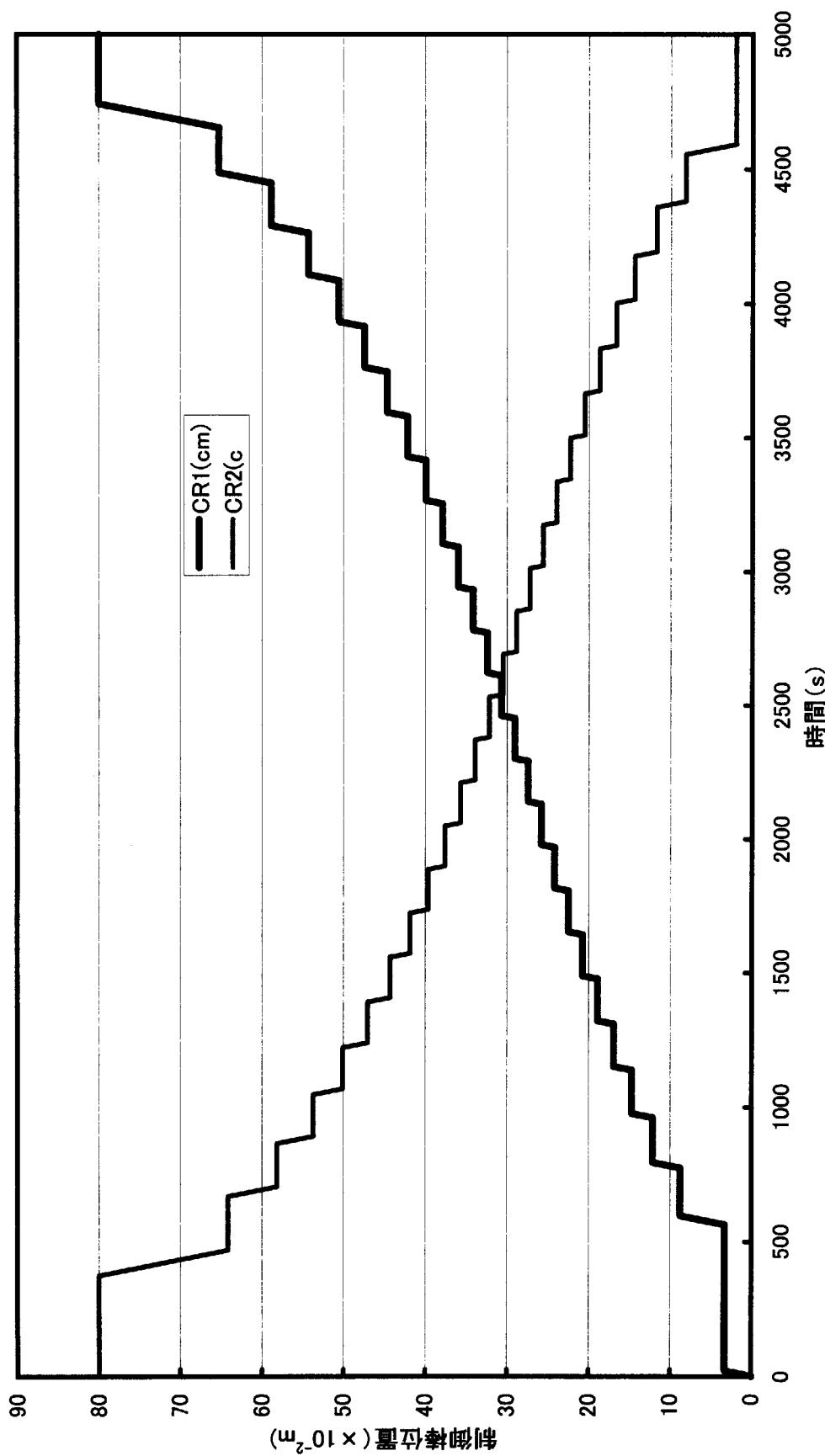


図2 制御棒操作ステップ

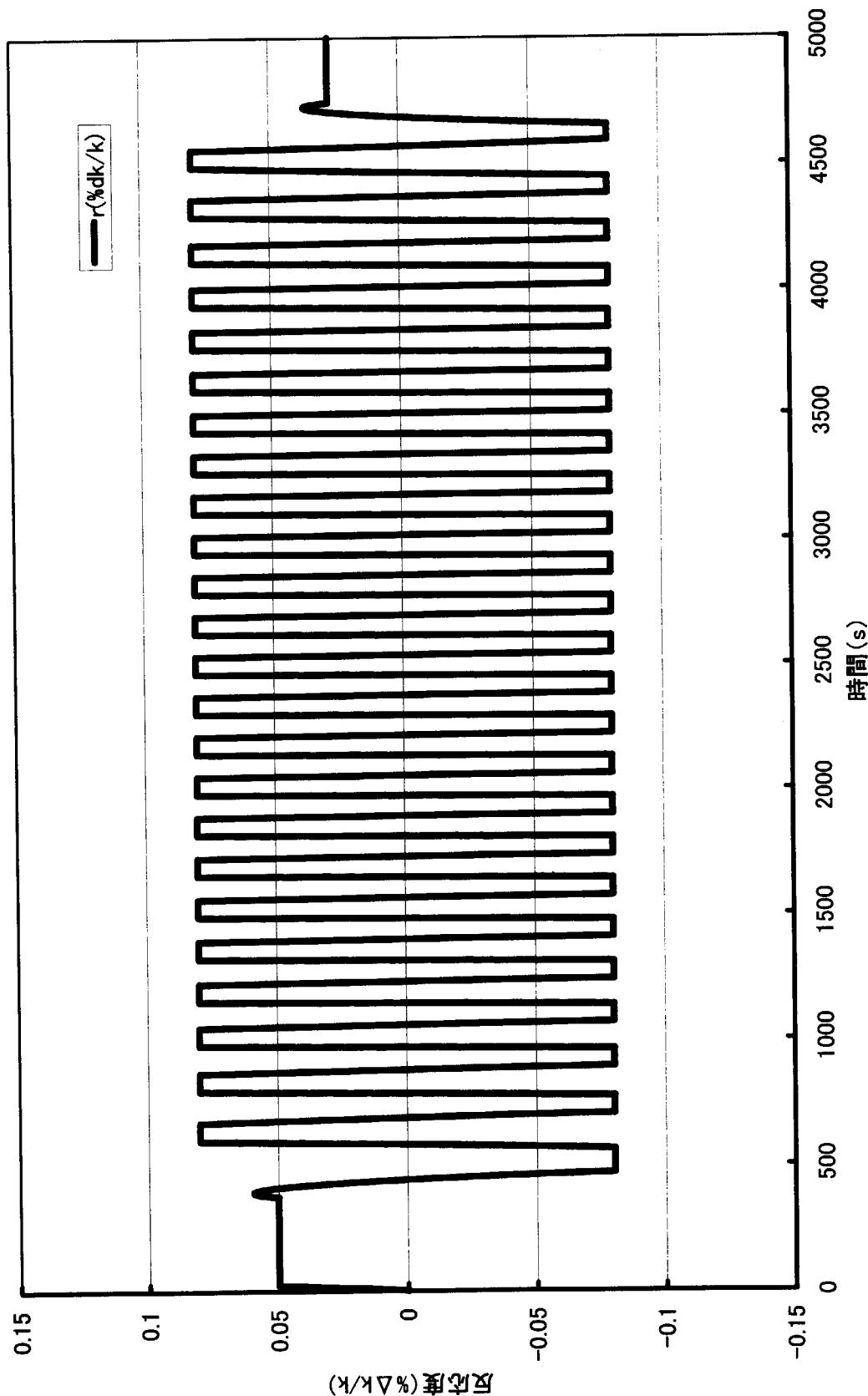


図3 制御棒操作ステップの添加反応度

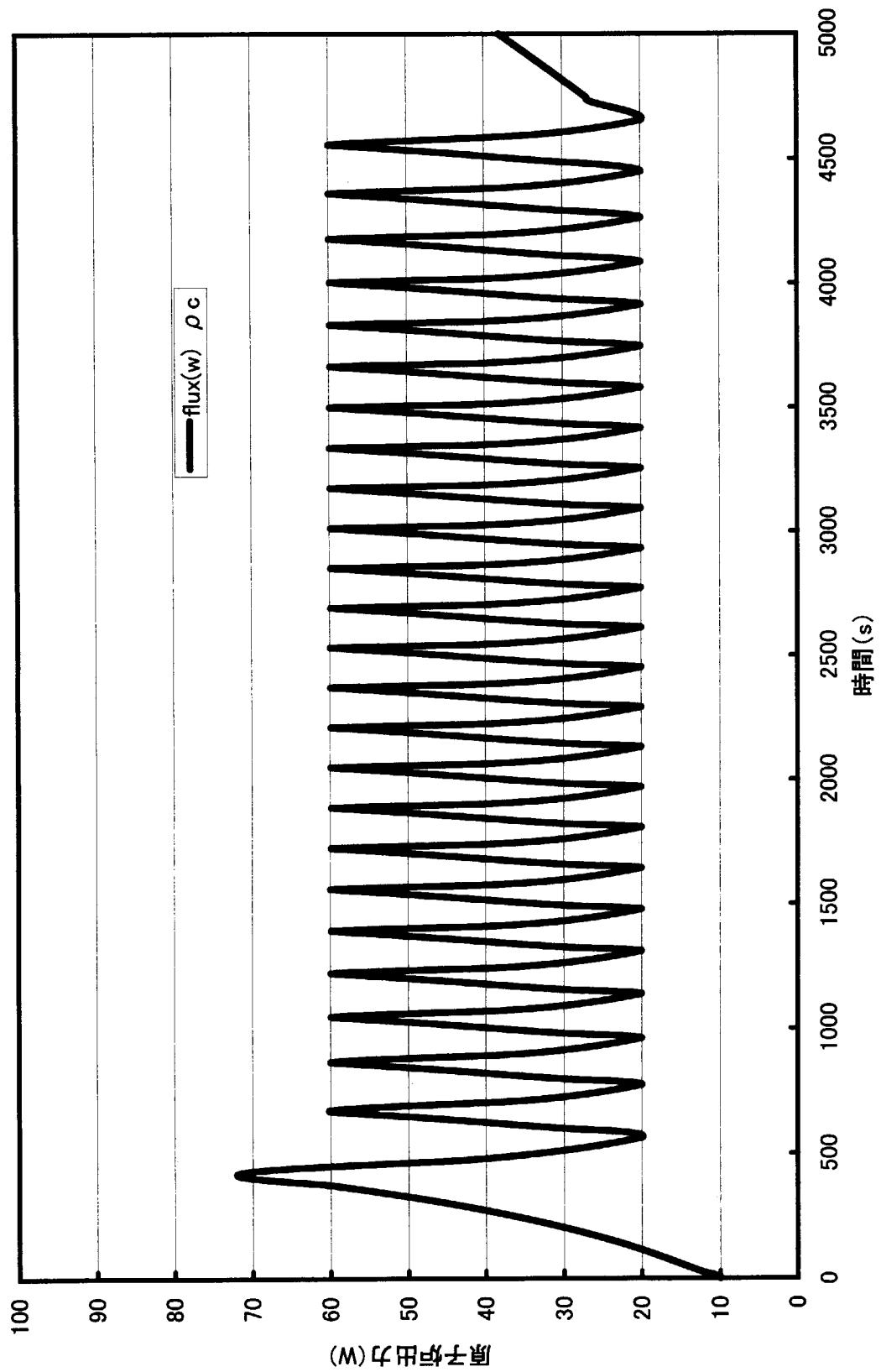


図4 模擬原子炉出力(初期出力10W)

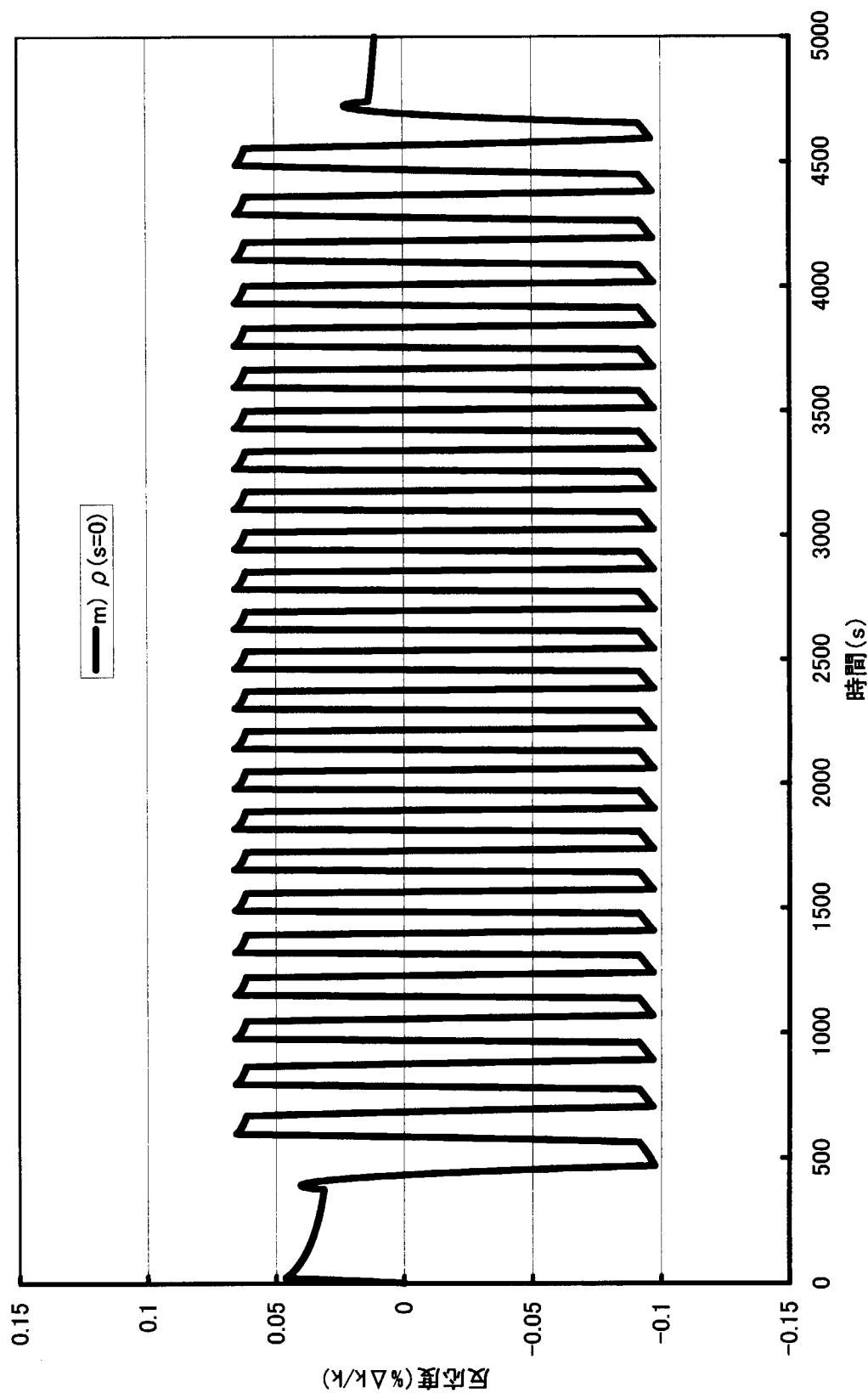


図5 中性子源強度を考慮しない場合の測定反応度(初期出力10W)

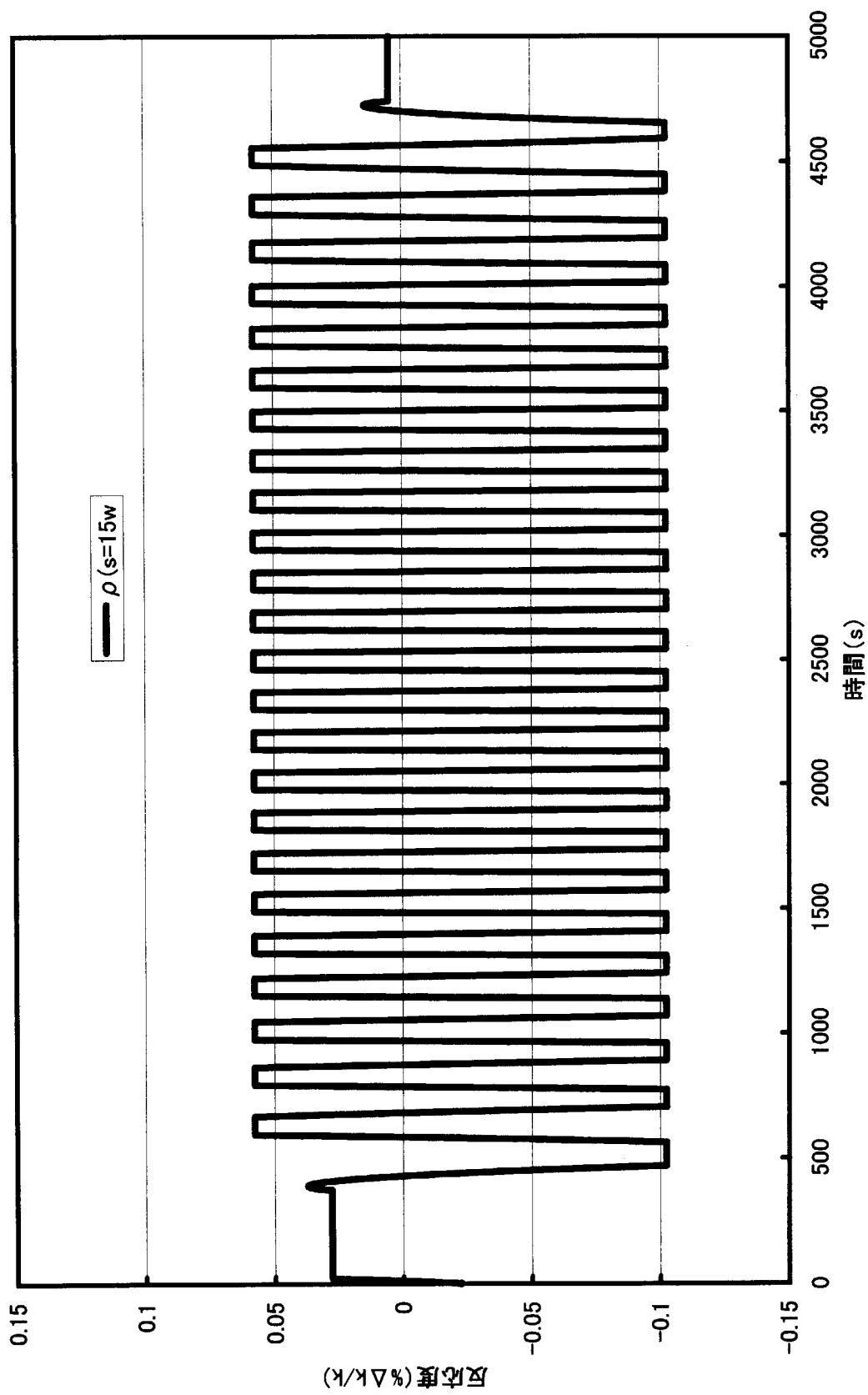


図6 中性子源強度を考慮した場合の測定反応度(初期出力10W)

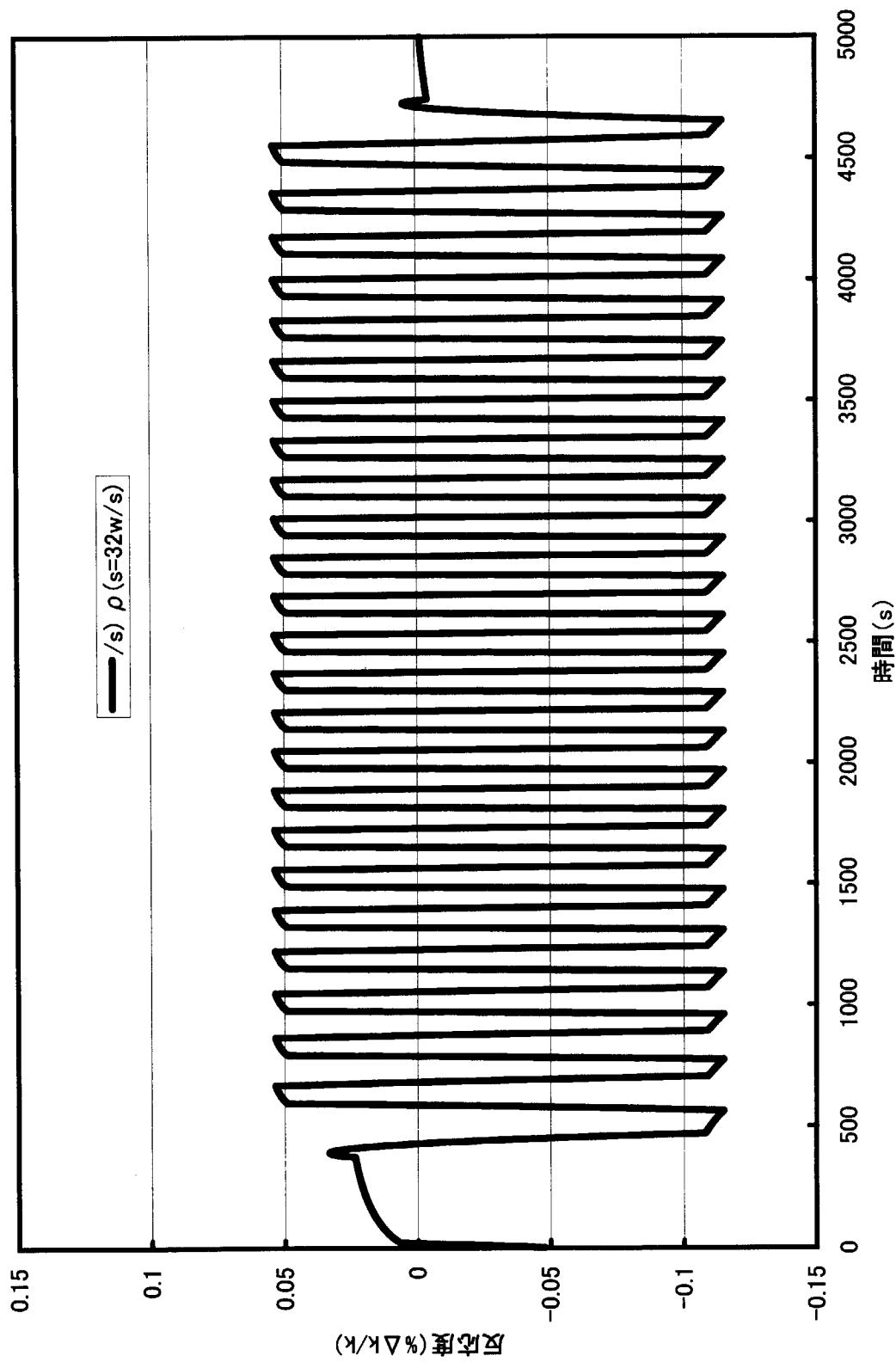


図7 中性子源強度を過大に考慮した場合の測定反応度(初期出力10W)

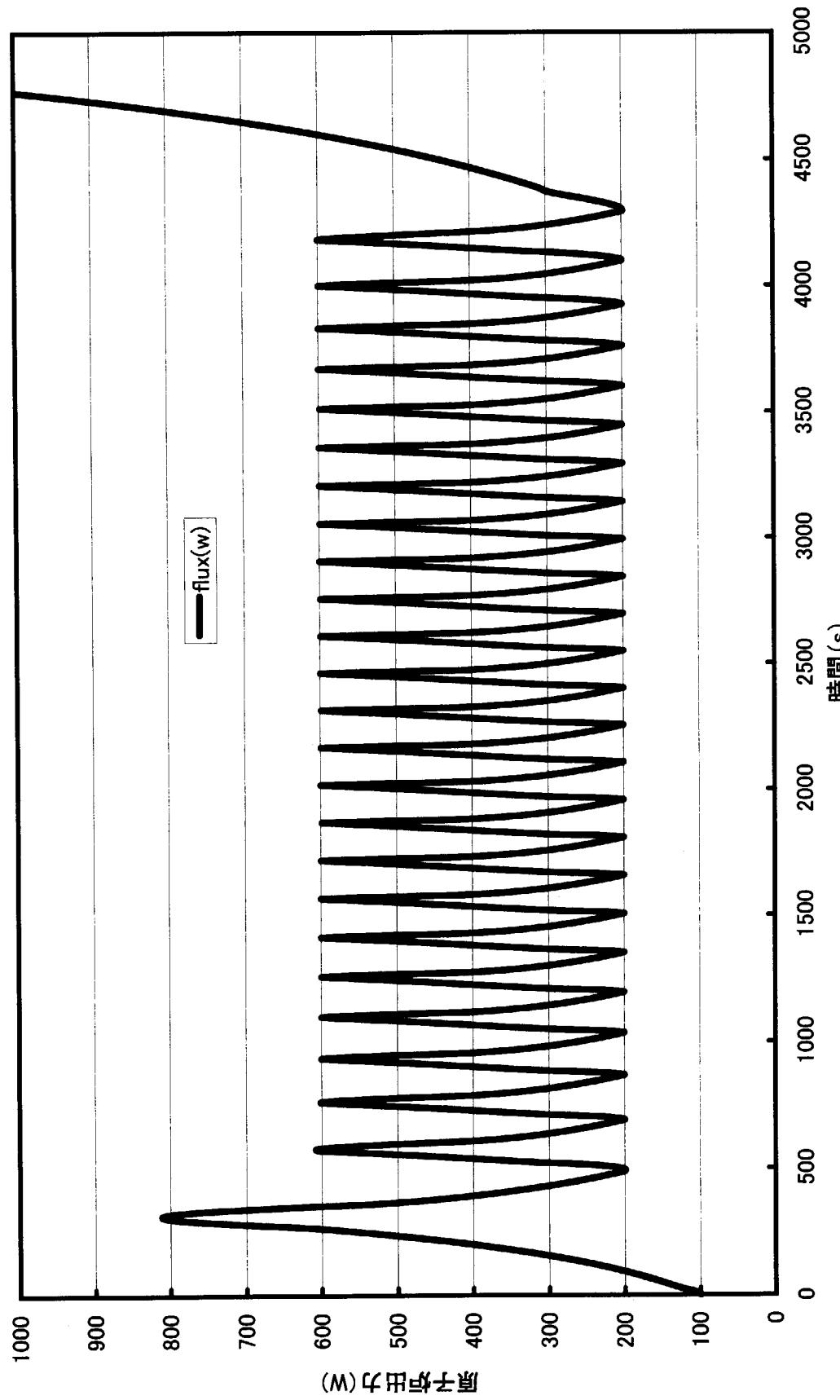


図8 模擬原子炉出力(初期出力100W)

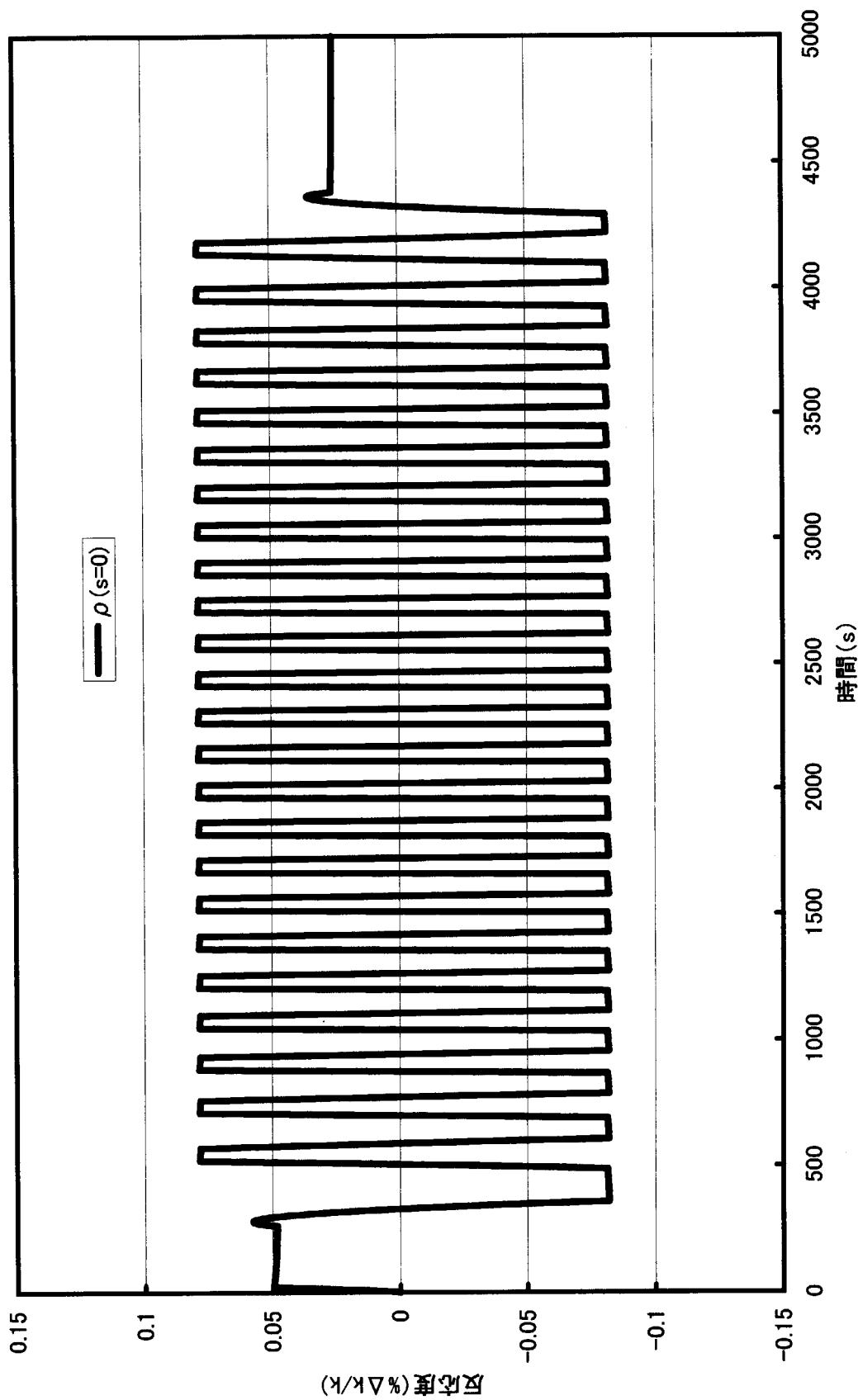


図9 中性子源強度を考慮しない場合の測定反応度(初期出力100W)

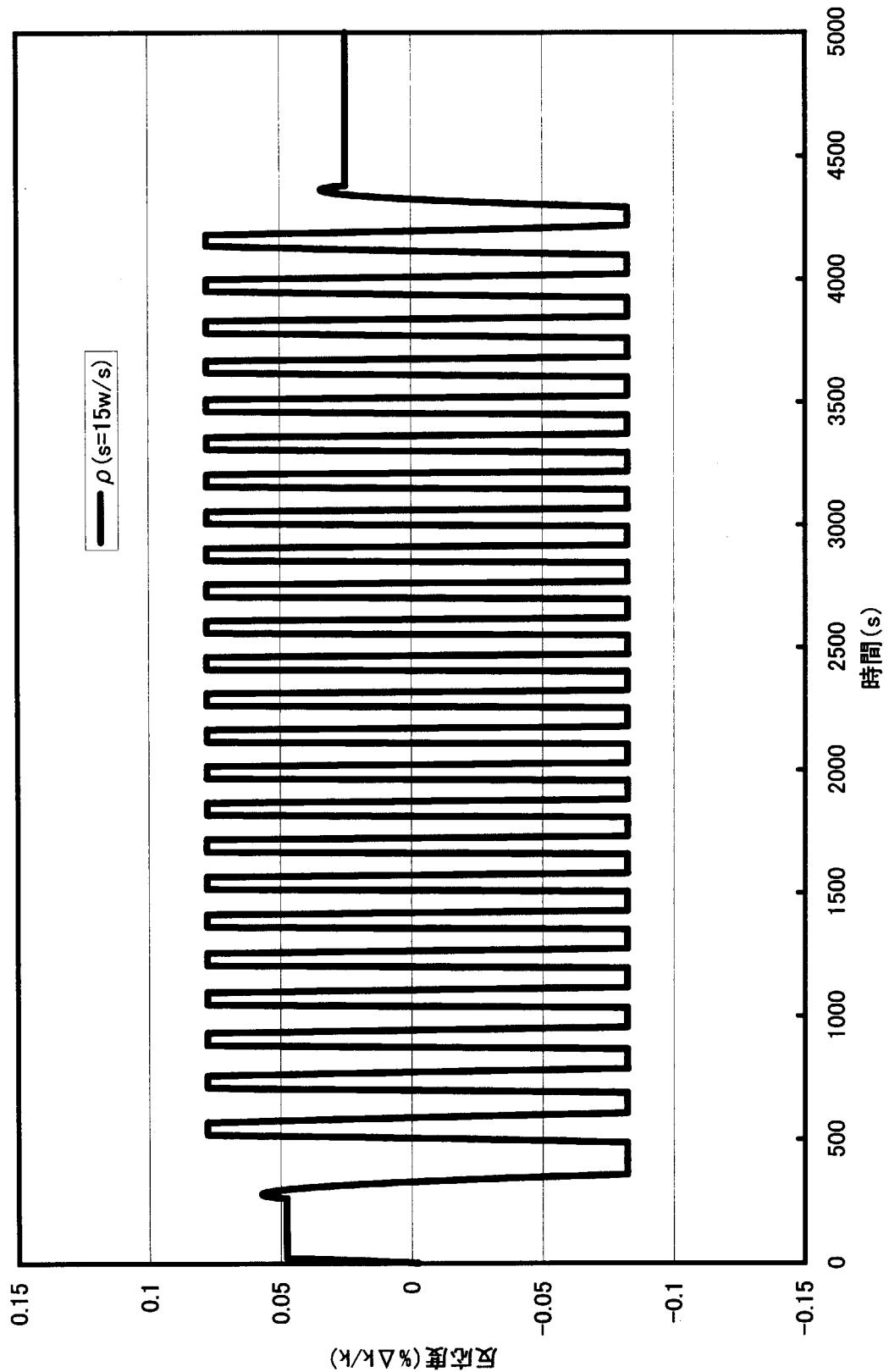


図10 中性子源強度を考慮した場合の測定反応度(初期出力100W)

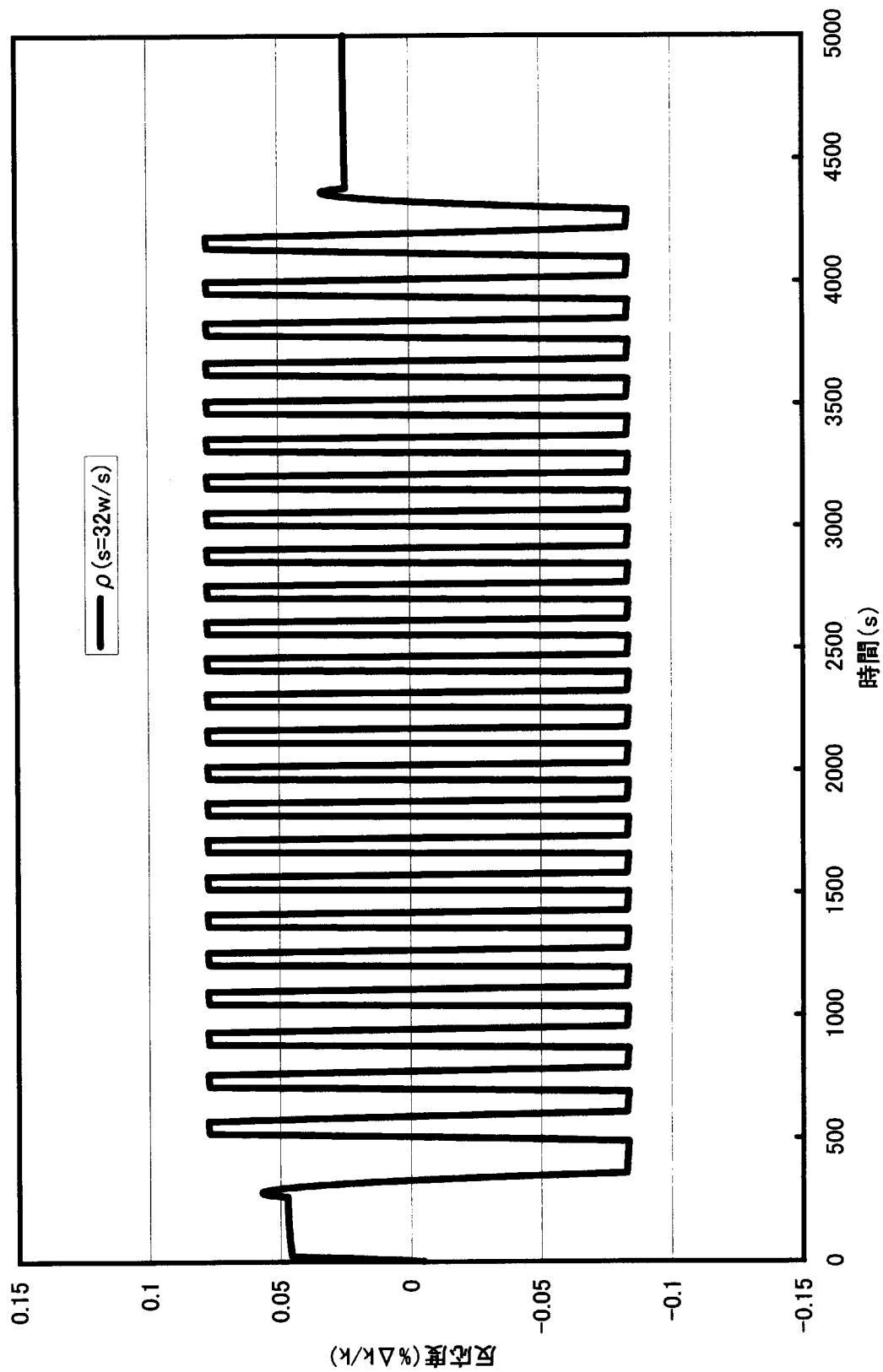


図11 中性子源強度を過大に考慮した場合の測定反応度(初期出力100W)

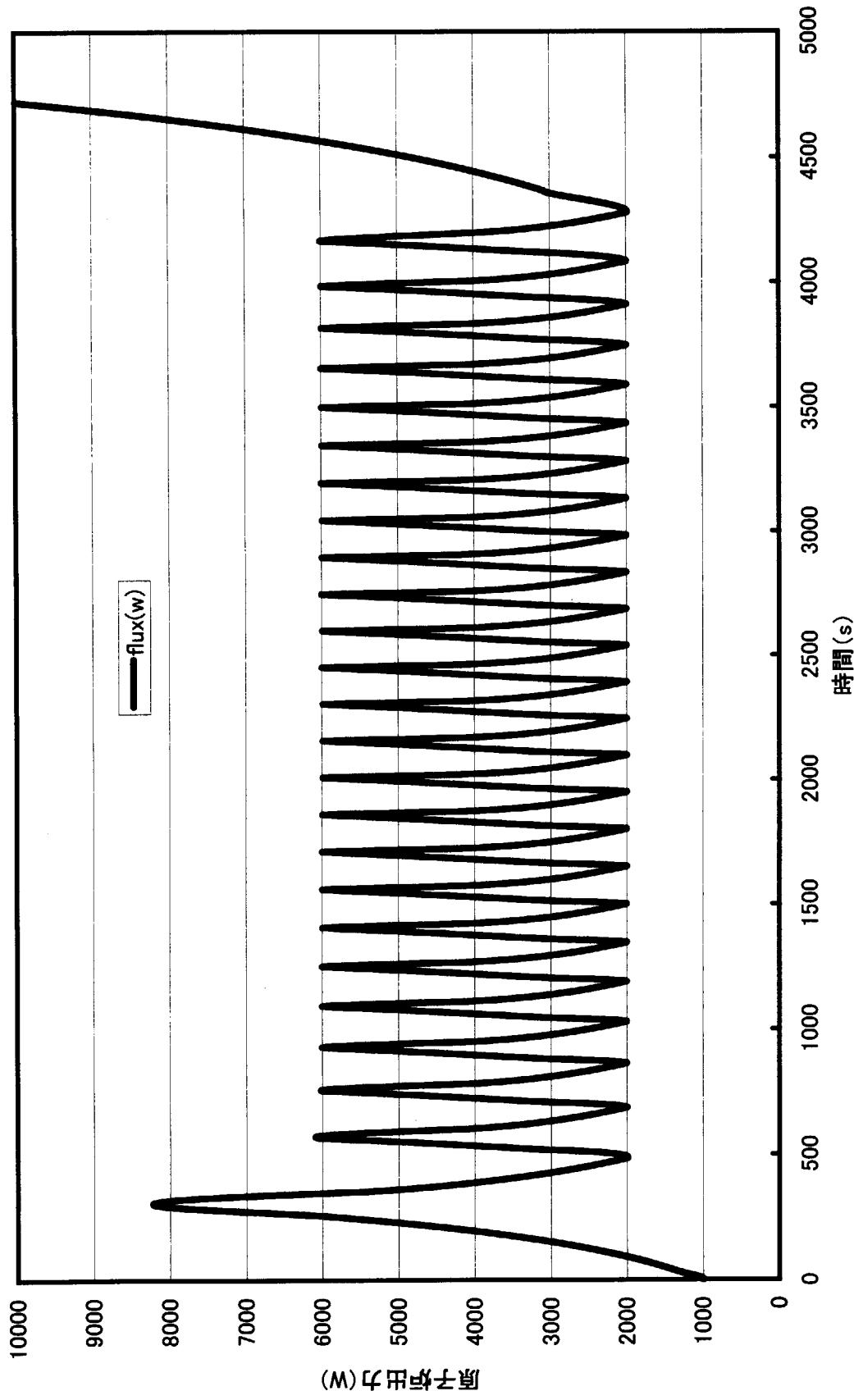


図12 中性子源強度を考慮しない場合の測定反応度(初期出力1k W)

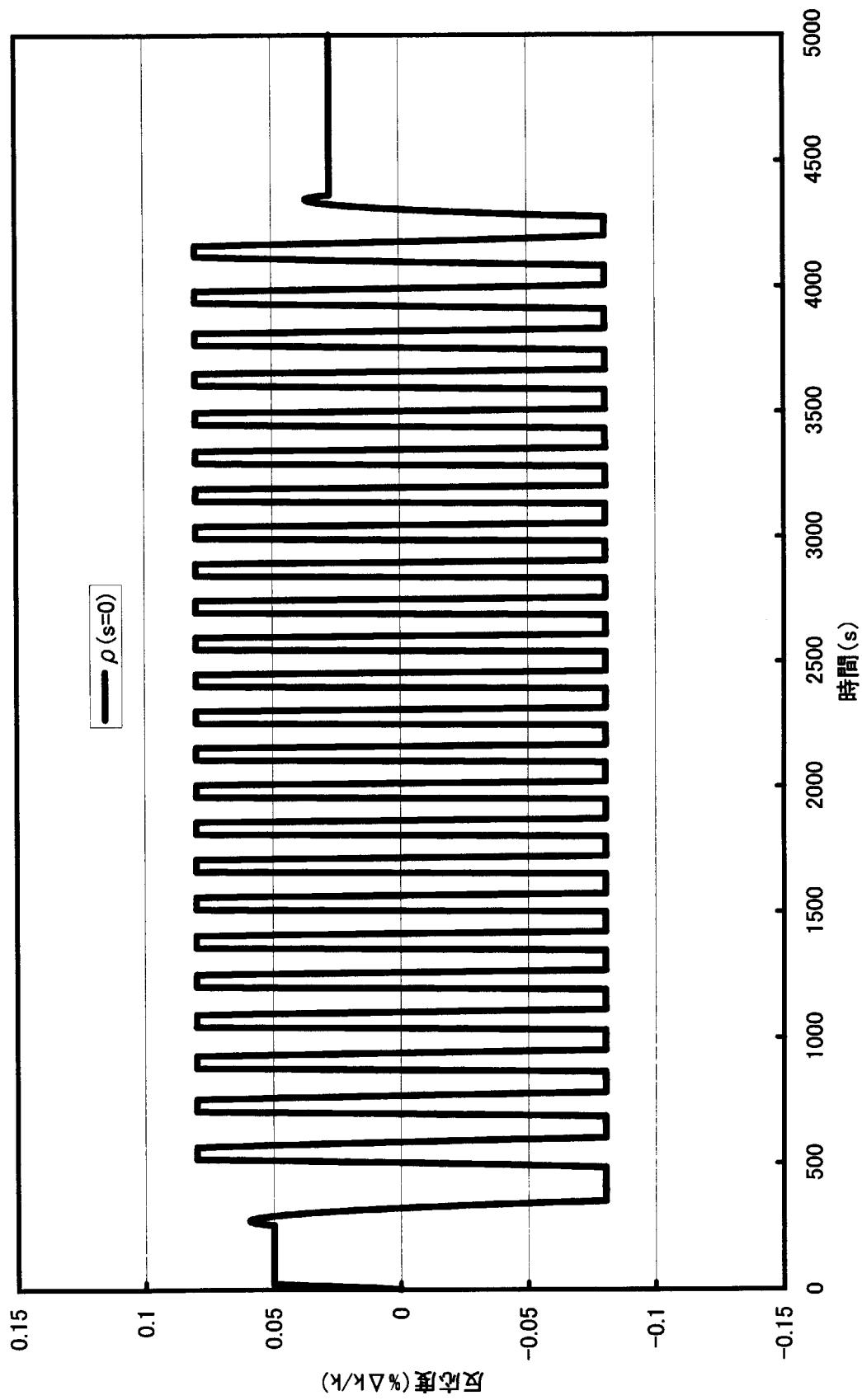


図13 中性子源強度を考慮しない場合の測定反応度(初期出力1kW)

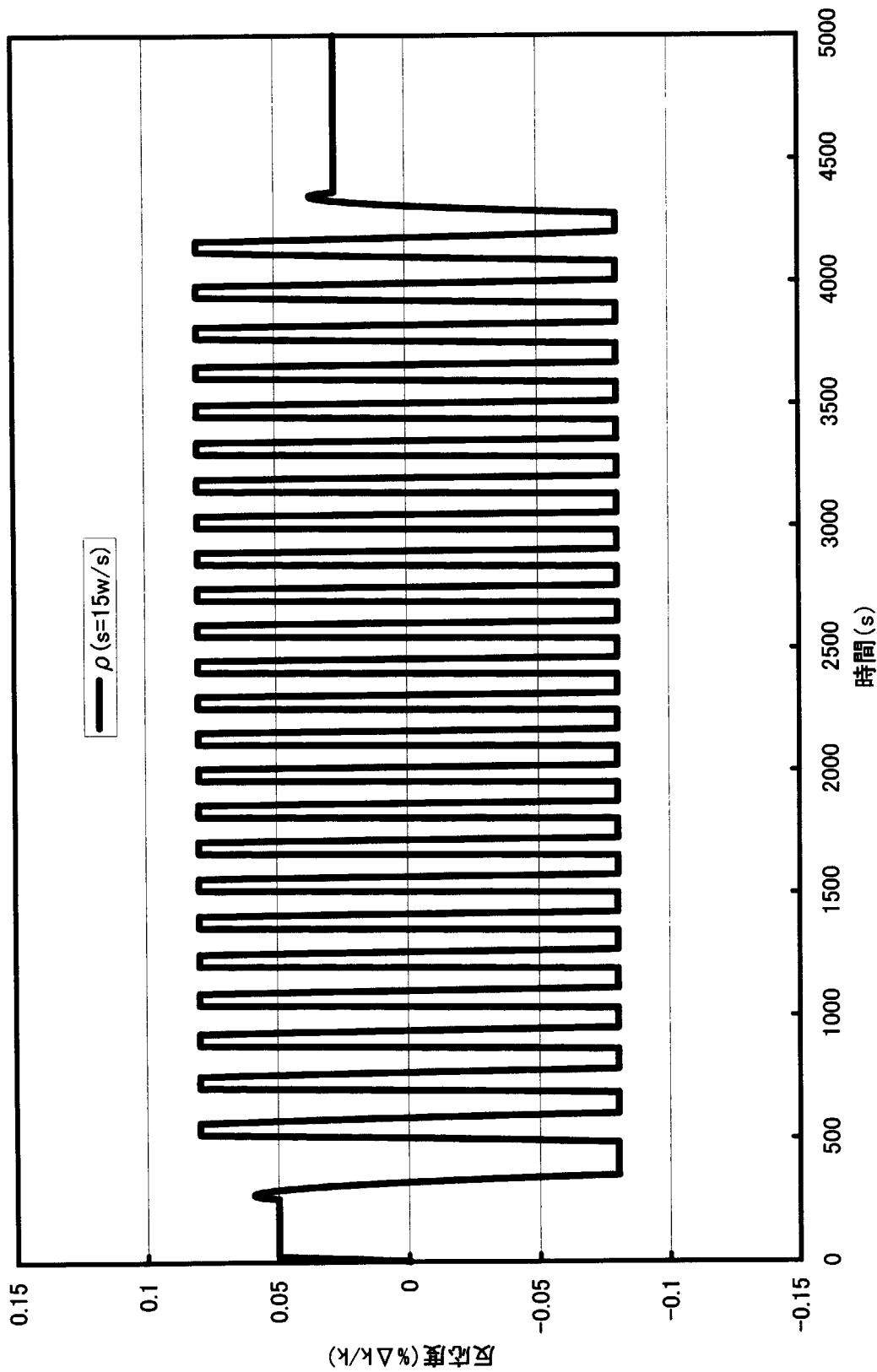


図14 中性子源強度を考慮した場合の測定反応度(初期出力1k W)

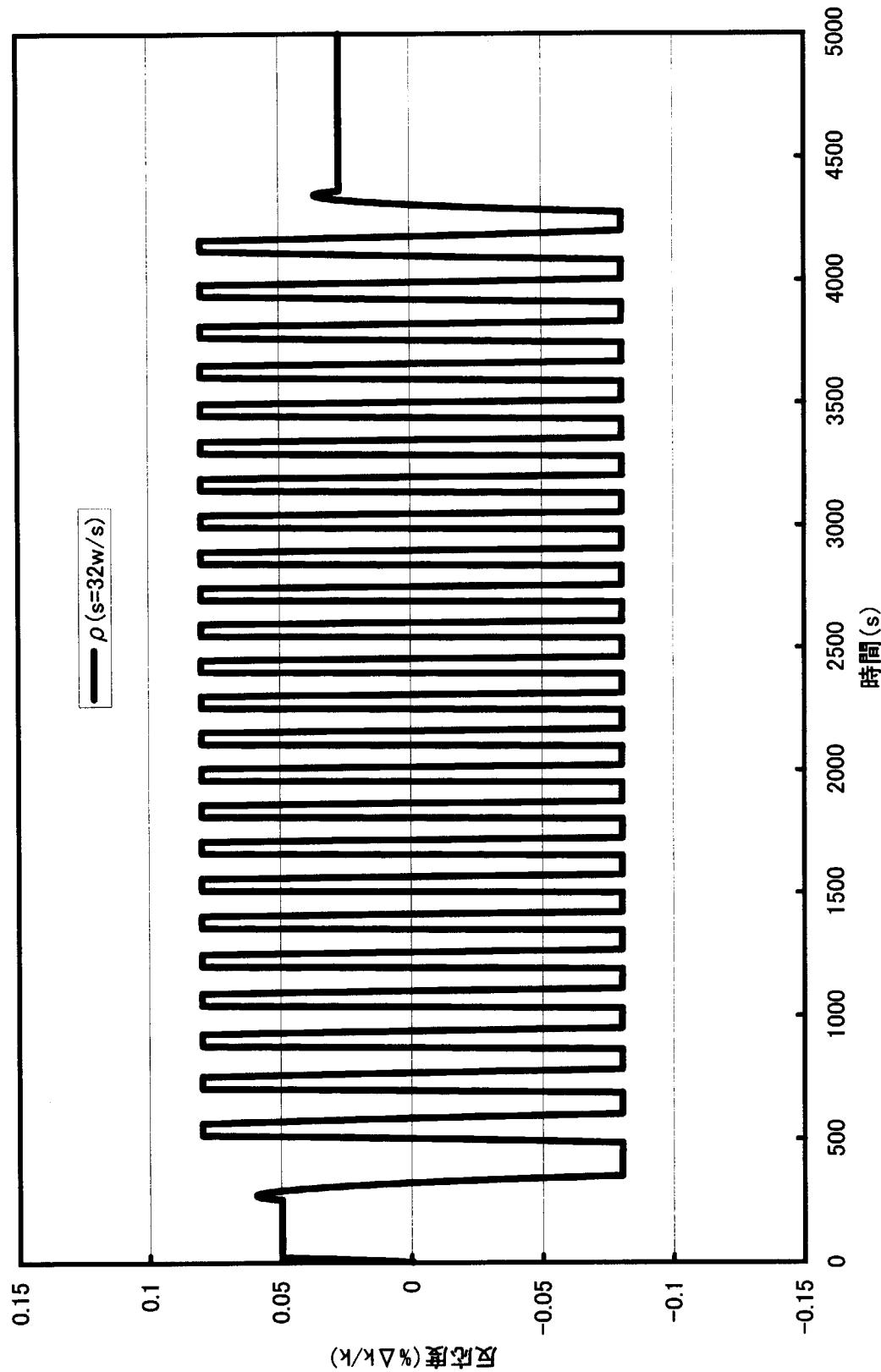


図15 中性子源強度を過大に考慮した場合の測定反応度(初期出力1kW)

This is a blank page.

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
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s ²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m ²
上率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	ファラード	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²
セルシウス温度	ヘンリー	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	°C	
放照度	ルーメン	lm	cd·sr
吸収線量	ルクス	lx	lm/m ²
当量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg
	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

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

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

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)

1. 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、1eV および1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 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。

3. 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。

4. EC関係理事会指令では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	

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

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

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	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 ⁻²	
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)	
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1855 J(15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		= 4.1868 J(国際蒸気表)	
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	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876	
	3.7 × 10 ¹⁰	1	0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01

(86年12月26日現在)

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