

## NSRR 制御棒校正表の妥当性の検証

Verification of the Tables for Control Rods Calibration at NSRR

求 惟子 安掛 寿紀 柳澤 宏司

Yuiko MOTOME, Toshiki AGAKE and Hiroshi YANAGISAWA

原子力科学研究所

研究基盤技術部

Department of Research Infrastructure Technology Development

Nuclear Science Research Institute

January 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課  
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).  
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.  
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

## NSRR 制御棒校正表の妥当性の検証

日本原子力研究開発機構  
原子力科学研究所 研究基盤技術部

求 惟子、安掛 寿紀、柳澤 宏司<sup>+</sup>

(2024 年 12 月 23 日受理)

NSRR 定期事業者検査の反応度抑制効果確認検査（正ペリオド法、制御棒落下法）において使用している制御棒校正表について、その妥当性の検証を行った。

制御棒校正表は、逆時間方程式により即発臨界未満でのステップ状の反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表（DOUBLING TIME-REACTIVITY）と遅発臨界状態からステップ状の負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線から改良落下法により反応度投入量を計算した表（DECAY OF NEUTRON FLUX AFTER INSTANTANEOUS REDUCTION OF REACTIVITY）で構成され、その作成は 1975 年頃に遡る。

この制御棒校正表には、数値の出典、計算に使用したデータ等の記録が十分に示されていないため、その妥当性について改めて検証を行った。検証では、NSRR のパラメータを使用した逆時間方程式により正ペリオドと反応度の関係を解析的に評価するとともに、改良落下法については軽水型原子炉動特性解析コード EUREKA-2 によって制御棒校正表の数値の再評価を行った。

その結果、再評価した数値と、制御棒校正表の各表に示されている数値との差の標準偏差は、いずれも 0.035%未満であり、実用上十分な一致を示すことから、制御棒校正表は妥当であることを確認した。

---

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4  
+ 原子力科学研究所 原子力施設検査室

## **Verification of the Tables for Control Rods Calibration at NSRR**

Yuiko MOTOME, Toshiki AGAKE and Hiroshi YANAGISAWA<sup>+</sup>

Department of Research Infrastructure Technology Development  
Nuclear Science Research Institute  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 23, 2024)

The tables for calibration of control rods were verified, which is used positive period method and improved rod drop method of periodic inspection at Nuclear Safety Research Reactor (NSRR).

Those tables are “DOUBLING TIME-REACTIVITY” and “DECAY OF NEUTRON FLUX AFTER INSTANTANEOUS REDUCTION OF REACTIVITY”. They are prepared around 1975.

Since those tables do not clearly express source of values and records of data used in calculations, the authors verified those tables again. For the verification, the tables were reproduced as follows. For the positive period method, the relationship between the period and reactivity was analytically evaluated by using the inhour equation with NSRR’s parameters. For the improved rod drop method, the ratios of neutron flux after the rod drop with parameters of negative reactivities was calculated using the EUREKA-2 code.

As a result, the values described in the tables well agree with those by the present evaluation because it is confirmed that standard deviations of the differences in the value by between the present evaluation and the tables are less than 0.035%. For this reason, it is verified that these tables are valid in the practical use for NSRR operations.

Keywords: NSRR, TRIGA, Calibration of Control Rods, Positive Period Method,  
Improved Rod Drop Method, EUREKA-2

---

<sup>+</sup> Nuclear Facility Inspection Office, Nuclear Science Research Institute

目次

1. はじめに .....	1
2. 検証方法 .....	1
2.1 反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表の検証方法 .....	1
2.2 出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表の検証方法 .....	3
3. 検証結果 .....	4
3.1 反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表の検証結果 .....	4
3.2 出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表の検証結果 .....	4
4. まとめ .....	5
謝辞 .....	5
参考文献 .....	6
付録 A 最小臨界点位置の推移 .....	20
付録 B 負反応度投入量に対する出力減衰量計算図表の検証 .....	24
付録 C 反応度抑制効果及び反応度変化率の推移 .....	27

Contents

1. Introduction .....	1
2. Verification method .....	1
2.1 Verification method of “DOUBLING TIME-REACTIVITY” .....	1
2.2 Verification method of “DECAY OF NEUTRON FLUX AFTER INSTANTANEOUS REDUCTION OF REACTIVITY” .....	3
3. Verification result .....	4
3.1 Verification result of “DOUBLING TIME-REACTIVITY” .....	4
3.2 Verification result of “DECAY OF NEUTRON FLUX AFTER INSTANTANEOUS REDUCTION OF REACTIVITY” .....	4
4. Summary .....	5
Acknowledgements .....	5
References .....	6
Appendix A Changes in position of minimum critical point .....	20
Appendix B Verification of output attenuation chart by negative reactivity .....	24
Appendix C Changes in reactivity suppression effect and reactivity change rate .....	27

図表リスト

Table 3.1	各パラメータ	7
Table 3.2	$\Delta k/k$ 単位の反応度投入量の比較	8
Table 3.3	ドル単位の反応度投入量の比較	9
Table 3.4	倍加時間が 0.5 sec 前の反応度投入量と比較した結果	10
Table 3.5	EUREKA-2 の解析で得られた値 $R_c$ と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値 $R_a$ を比較した結果 ( $N(j)=N(1)$ )	11
Table 3.6	EUREKA-2 の解析で得られた値 $R_c$ と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値 $R_a$ を比較した結果 ( $N(j)=N(2)$ )	12
Table 3.7	EUREKA-2 の解析で得られた値 $R_c$ と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値 $R_a$ を比較した結果 ( $N(j)=N(3)$ )	13
Fig.3.1	経過時間 5 sec で 1.5 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線	14
Fig.3.2	経過時間 5 sec で 2.0 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線	14
Fig.3.3	経過時間 5 sec で 2.5 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線	15
Fig.3.4	経過時間 5 sec で 3.0 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線	15
Fig.3.5	経過時間 5 sec で 3.5 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線	16
Fig.3.6	経過時間 5 sec で 4.0 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線	16
Fig.3.7	経過時間 5 sec で 4.5 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線	17
Fig.3.8	経過時間 5 sec で 5.0 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線	17
Fig.3.9	EUREKA-2 の解析で得られた出力比の値 ( $N(j)=N(1)$ )	18
Fig.3.10	EUREKA-2 の解析で得られた出力比の値 ( $N(j)=N(2)$ )	18
Fig.3.11	EUREKA-2 の解析で得られた出力比の値 ( $N(j)=N(3)$ )	19

## 1. はじめに

NSRR では、従来から、定期事業者検査（旧施設定期検査）の反応度抑制効果確認検査（正ペリオド法<sup>1)</sup>、制御棒落下法<sup>1)</sup>）において、制御棒校正表を使用している。制御棒校正表は、逆時間方程式により即発臨界未満でのステップ状の反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表（DOUBLING TIME-REACTIVITY、以下「反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表」という。）と遅発臨界状態からステップ状の負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線から改良落下法<sup>2)</sup>により反応度投入量を計算した表（DECAY OF NEUTRON FLUX AFTER INSTANTANEOUS REDUCTION OF REACTIVITY、以下「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」という。）で構成されている。

NSRR の主な運転方式はパルス運転であり、1975 年の初臨界から 2024 年 3 月末時点での積算出力の実績は約  $1.6 \times 10^5$  kWh であり、それを基に算出した燃焼度は 0.107 % である。これは、定格出力 20 MW でサイクル運転を行う JRR-3 のような試験研究炉と比較すると格段に小さい燃焼度である。燃料の燃焼に伴う燃料交換を行っていないことから、1975 年の初臨界以降、炉心構成を変更していない。制御棒校正表のデータを算出するために必要な核特性データに大きな変化がないことから、1975 年に行われた最初の施設定期検査以降、継続してこの表を用いて\*1反応度抑制効果を確認している。

しかしながら、制御棒校正表には、数値の出典及び計算に使用したデータ等の記録が十分に示されていないため、その妥当性について改めて検証を行った。

なお、令和元年度までは国が施設定期検査として検査を行っていたが、令和 2 年度以降は事業者の独立検査組織である原子力施設検査室が定期事業者検査を行っている。また、制御棒校正表のデータは検査結果に直接影響を及ぼすものである。このことから、NSRR 管理課と原子力施設検査室が共通して利用する技術データである制御棒校正表の検証を両者が共同で行った。

## 2. 検証方法

### 2.1 反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表の検証方法

一定出力で運転中に反応度の増加又は減少が起こると、原子炉は非定常状態になり出力が変動する。この時の変動の大きさ、速さ等を原子炉動特性といい、これを表す微分方程式を原子炉の動特性方程式といい、原子炉内で中性子束の空間分布が変化しないと仮定し、遅発中性子を 6 群として扱う場合、以下の式で表される。

---

\*1 現行の手順と同様に、倍加時間から反応度投入量を算出している。落下法は、改良落下法で実施している。

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (2.1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} N(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (i = 1 \sim 6) \quad (2.2)$$

ここで、

- $N(t)$  : 中性子密度(n/cm<sup>2</sup>)
- $\rho$  : 反応度( $\Delta k/k$ )
- $\beta_i$  :  $i$  番目の遅発中性子群の発生割合(-)
- $\lambda_i$  :  $i$  番目の遅発中性子先行核の崩壊定数(s<sup>-1</sup>)
- $C_i$  :  $i$  番目の遅発中性子先行核密度(n/cm<sup>2</sup>)
- $\Lambda$  : 中性子世代時間(s)

臨界状態にある原子炉にステップ状の正の反応度を印加すると、原子炉出力は過渡状態を経過した後、印加した反応度に応じて一定の炉周期で指数的に上昇する。この指数的に上昇する領域で原子炉出力が  $e$  倍になるまでの時間をペリオドという。 $\rho(t) = \Delta\rho$  とし、(2.1) 式及び (2.2) 式を  $\Delta\rho$  で解くと、ペリオドと印加反応度との関係を表す逆時間方程式と呼ばれる以下の式になる。

$$\Delta\rho = \frac{\Lambda}{T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} \quad (2.3)$$

$$T = \frac{T_d}{\ln 2} \quad (2.4)$$

ここで、

- $T$  : ペリオド(s)
- $T_d$  : 倍加時間(s)

また、(2.3) 式の逆時間方程式を全遅発中性子割合  $\beta$  で除すと、ドル単位の印加反応度で逆時間方程式を表すことができる。

$$\frac{\Delta\rho}{\beta} = \frac{\Lambda}{\beta T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\alpha_i}{1 + \lambda_i T} \quad (2.5)$$

$\alpha_i = \beta_i / \beta$  は相対収率という。

「反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表」は、倍加時間に対して、 $\Delta k/k$  単位の反応度投入量とドル単位の反応度投入量の両方が示されているため、(2.3) 式及び (2.5) 式を用いてそれぞれ反応度投入量を算出し、「反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表」の数値と比較し、検証する。

「反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表」は、倍加時間が 1.0 sec から 120.0 sec まで、0.1 sec ごとに反応度投入量が示されているが、NSRR の制御棒校正における制御棒の連続引抜きでは、倍加時間はほぼ 20.0 sec ~ 25.0 sec の範囲になることから、10.0 sec ~ 30.0 sec の範囲について 1.0 sec ごとに反応度投入量を計算した。



なお、(2.3) 式及び (2.5) 式ともに第 1 項は第 2 項に比べ無視できるほど小さいが、第 1 項も含めて反応度投入量を算出した。

## 2.2 出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表の検証方法

落下法は、一定の出力で臨界状態を保った後、制御棒を急速に挿入して負の反応度を加え、反応度印加前後の原子炉出力変動の測定から印加した反応度を求める方法である。 $\rho(t) = \rho$  とし、(2.1) 式及び (2.2) 式をラプラス変換して解き、極限をとると、

$$n_0 \frac{\Lambda + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i}}{-\rho} = \int_0^{\infty} n(t) dt \quad (i = 1 \sim 6) \quad (2.6)$$

となる。左辺の分子の第 1 項は第 2 項に比べ無視できるほど小さいので、(2.6) 式は、

$$\rho = - \frac{n_0 \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i}}{\int_0^{\infty} n(t) dt} \quad (2.7)$$

となる。分母の積分は、制御棒を落下させてから計数がなくなるまでの計数の和となる。

一般的な落下法では、(2.7) 式を用いて、測定対象制御棒を落下させたときの計数値等から制御棒価値を求めるが、NSRR では改良落下法を用いて制御棒価値を求めている。改良落下法は、測定対象制御棒を落下させた際の出力減衰曲線から、1 秒、2 秒、3 秒、5 秒、10 秒、15 秒、20 秒後の出力値を読み取り、それらの出力値の比 ( $N(i)/N(j)$ 、 $i=5, 10, 15, 20, j=1, 2, 3$ ) に対応する反応度投入量を「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」から読み取り、反応度投入量の平均値を測定対象制御棒の制御棒価値とする方法である。改良落下法については、1977 年に原子力学会誌ショートノート（以下「レポート」という。）で報告<sup>2)</sup>されており、負の反応度投入量に対する出力減衰曲線は一点近似の計算コード EXCURS<sup>3)</sup>によって求めている。

「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」は、1.01 ドルから 10.00 ドルまで 0.01 ドルごとの反応度投入量に対応する出力値の比 ( $N(i)/N(j)$ 、 $i=0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, j=0, 1, 2, 3, 4, 5$ ) が記載されている。「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」は、レポートと同様のコードによって求めたものと考えられるが、解析データは残っていない。

「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」が、上記レポートと同様の手法で解析されたものであることを検証するため、軽水炉の反応度投入事象時における核熱水力学的挙動を解析するために開発された一点炉動特性解析コード EUREKA-2<sup>4)</sup>を用いて、ステップ状の負の反応度を投入した場合の原子炉出力の変化を解析し、その出力比と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値を比較した。EUREKA-2 では、遅発中性子先行核の崩壊定数 $\lambda_i$ 、相対収率 $\alpha_i$ は入力データではなく、FORTRAN のソースプログラムに直接記述されている（ブロックデータ DATC の ALPHA 及び FI）。そこで、Table 3.1 に示す

NSRR の安全解析及び基本設計書<sup>5)</sup>に記載されたデータによりソースプログラムを書き換え、再コンパイルして作成した NSRR 専用の EUREKA-2 を今回の検証に使用した。また、今回の計算は遅発臨界からのステップ状の負の反応度投入による未臨界状態を対象とするため、ノード、ジャンクション及びヒートスラブ等の伝熱流動計算に関する入力データはダミー値を設定し、伝熱流動計算からフィードバックする反応度をゼロとして計算した。

ステップ状の負の反応度は、1.5 ドル、2.0 ドル、2.5 ドル、3.0 ドル、3.5 ドル、4.0 ドル、4.5 ドル及び 5.0 ドルとし、NSRR の定期事業者検査で実施している方法のパターン (N(i)/N(j), i=5, 10, 15, 20, j=1, 2, 3) の出力比の値を比較した。

### 3. 検証結果

#### 3.1 反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表の検証結果

検証には、遅発中性子群の発生割合 $\beta_i$ 、遅発中性子先行核の崩壊定数 $\lambda_i$ 、相対収率 $\alpha_i$ として Table 3.1 に示す値を使用した。また、(2.3) 式及び (2.5) 式を用いて 10.0 sec~30.0 sec の範囲について 1 sec ごとに反応度投入量を算出し、比較した結果を Table 3.2 及び Table 3.3 に示す。今回算出した反応度投入量の値と制御棒校正表の反応度投入量の値との差は、 $\Delta k/k$  単位の反応度投入量の場合  $10^{-8} \Delta k/k$  程度、ドル単位の反応度投入量の場合 0.00  $\phi$  となった。また、反応度投入量の値の差の標準偏差は  $2.0 \times 10^{-6} \%$  となった。

倍加時間はストップウォッチを用いて運転員が測定している。ストップウォッチは 2 つ使用し、1 つは予備としている。2 つのストップウォッチの差は大きくても 0.5 sec 程度である。10.5 sec~30.5 sec の範囲について 1 sec ごとに反応度投入量を算出し、0.5 sec 前の反応度投入量と比較した結果を Table 3.4 に示す。 $T_d$  が 0.5 sec 前の反応度投入量との差 ( $\Delta k/k$ ) から、倍加時間の測定誤差による影響は  $10^{-5} \Delta k/k$  程度といえる。

算出した反応度投入量と「反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表」の値との差 ( $10^{-8} \Delta k/k$  程度) は、倍加時間の測定誤差による影響 ( $10^{-5} \Delta k/k$  程度) に比べ、三桁小さい。

以上のことから、「反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表」のデータは妥当であると判断する。

#### 3.2 出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表の検証結果

EUREKA-2 による計算結果として、1.5 ドル、2.0 ドル、2.5 ドル、3.0 ドル、3.5 ドル、4.0 ドル、4.5 ドル及び 5.0 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線を Fig.3.1 ~ Fig.3.8 に示す。また、これらの反応度投入量に対応する出力値の比 (N(i)/N(j), i=5, 10, 15, 20, j=1, 2, 3) の値について、EUREKA-2 の解析で得られた値を Fig.3.9~Fig.3.11 に示すとともに、投入した負の反応度をパラメータとして、EUREKA-2 による出力比と「出力減

衰曲線から反応度投入量を計算した表」による出力比の値を比較した結果を Table 3.5 ～ Table 3.7 に示す。

EUREKA-2 による出力比の値と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」による出力比の値との比は最大で  $1.00 \pm 0.002$  となり、よく一致している。また、EUREKA-2 による出力比の値と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」による出力比の値との差の標準偏差は  $3.5 \times 10^{-2} \%$  であった。

#### 4. まとめ

定期事業者検査の反応度抑制効果確認検査（正ペリオド法、落下法）で使用している「反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表（DOUBLING TIME-REACTIVITY）」と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表（DECAY OF NEUTRON FLUX AFTER INSTANTANEOUS REDUCTION OF REACTIVITY）」について、検証を行った。

「反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表」については、NSRR の安全解析及び基本設計書に記載されたパラメータを使用して逆時間方程式により反応度投入量を求めることで再現することができた。

「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」については、EUREKA-2 の解析によって精度よく再現することができた。

再評価した数値と、制御棒校正表の「反応度投入量と正ペリオドの関係を計算した表」及び「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」に示されている数値との差の標準偏差は、それぞれ  $2.1 \times 10^{-6} \%$  以内、 $3.5 \times 10^{-2} \%$  以内であり、実用上十分な一致を示すことから、制御棒校正表は妥当であることを確認した。

以上のことから、各々の表の出典が改めて明確になったため、制御棒校正表を使用することは妥当であると判断した。

今後は EUREKA-2 等の解析結果に基づいて、多変量回帰分析を行い、表形式ではなく数式形式で校正値を求める方法を検討する。

#### 謝辞

本報告書の取り纏めにあたって、原子力科学研究所研究基盤技術部 NSRR 管理課長の小林哲也氏並びに同研究所原子力施設検査室長の八木理公氏からのご支援を頂き、深く感謝申し上げます。また、同研究所研究基盤技術部技術主席の井澤一彦氏には、本報告書を読覧して頂くとともに、有意義なご指摘、ご助言を頂き、深く感謝申し上げます。さらに、同研究所研究基盤技術部 NSRR 管理課の秋山佳也氏及び敦賀事業本部新試験研究炉推進室長の

村尾裕之氏には、本報告書の有意義なご指摘、ご助言を頂き、深く感謝申し上げます。

本報告書で示した EUREKA-2 の計算結果は、日本原子力研究開発機構のスーパーコンピュータ「HPE SGI8600」を利用して得られたものです。

### 参考文献

- 1) 三澤毅ら, 原子炉物理実験, 京都大学学術出版会, 2018, pp.75-97, ISBN 978-4-87698-977-5.
- 2) 富井格三ら, 制御棒較正における改良落下法, 日本原子力学会誌, Vol.19, No.11, 1977, pp.763-765.
- 3) Shinzo Saito, EXCURS-A Computing Programme for Analysis of Core Transient Behaviour in a Sodium Cooled Fast Reactor, JAERI-M 7280, 1977, 67p.
- 4) 大西信秋ら, 軽水炉の反応度投入事象解析コード EUREKA-2, JAERI-M 84-074, 1984, 62p.
- 5) Gulf Energy & Environmental Systems, TRIGA Annular Core Pulse Reactor, Safety Analyses and Preliminary Design for the Nuclear Safety Research Reactor, 1972.

Table 3.1 各パラメータ 5)

群	崩壊定数 $\lambda_i(\text{sec}^{-1})$	遅発中性子割合 $\beta_i$	相対収率 $\alpha_i(=\beta_i/\beta)$
1	0.01244	0.0002409	0.033
2	0.03051	0.0015987	0.219
3	0.11140	0.0014308	0.196
4	0.3013	0.0028835	0.395
5	1.1362	0.0008395	0.115
6	3.0135	0.0003066	0.042
遅発中性子割合	$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i = 0.0073$		
中性子世代時間	$\Lambda = 3.0 \times 10^{-5} \text{ (sec)}$		

Table 3.2  $\Delta k/k$  単位の反応度投入量の比較

倍加時間 $T_d(s)$	ペリオド $T(s)$	計算値 $\Delta\rho_c(\Delta k/k)$	制御棒校正表のデータ $\Delta\rho_d(\Delta k/k)$	$\Delta\rho_c - \Delta\rho_d$ ( $\Delta k/k$ )
10.0	14.43	2.45965E-03	2.45966E-03	-1.0E-08
11.0	15.87	2.34630E-03	2.34630E-03	0.0E+00
12.0	17.31	2.24489E-03	2.24489E-03	0.0E+00
13.0	18.76	2.15343E-03	2.15343E-03	0.0E+00
14.0	20.20	2.07037E-03	2.07038E-03	-1.0E-08
15.0	21.64	1.99449E-03	1.99449E-03	0.0E+00
16.0	23.08	1.92479E-03	1.92480E-03	-1.0E-08
17.0	24.53	1.86049E-03	1.86050E-03	-1.0E-08
18.0	25.97	1.80092E-03	1.80092E-03	0.0E+00
19.0	27.41	1.74552E-03	1.74553E-03	-1.0E-08
20.0	28.85	1.69384E-03	1.69384E-03	0.0E+00
21.0	30.30	1.64548E-03	1.64543E-03	5.0E-08
22.0	31.74	1.60010E-03	1.60011E-03	-1.0E-08
23.0	33.18	1.55742E-03	1.55743E-03	-1.0E-08
24.0	34.62	1.51719E-03	1.51720E-03	-1.0E-08
25.0	36.07	1.47917E-03	1.47913E-03	4.0E-08
26.0	37.51	1.44319E-03	1.44320E-03	-1.0E-08
27.0	38.95	1.40907E-03	1.40907E-03	0.0E+00
28.0	40.40	1.37666E-03	1.37660E-03	6.0E-08
29.0	41.84	1.34582E-03	1.34583E-03	-1.0E-08
30.0	43.28	1.31644E-03	1.31645E-03	-1.0E-08

Table 3.3 ドル単位の反応度投入量の比較

倍加時間 $T_d(s)$	ペリオド $T(s)$	計算値 $\Delta\rho_c(\rho)$	制御棒校正表のデータ $\Delta\rho_d(\rho)$	$\Delta\rho_c - \Delta\rho_d(\rho)$
10.0	14.43	33.69	33.69	0.00
11.0	15.87	32.14	32.14	0.00
12.0	17.31	30.75	30.75	0.00
13.0	18.76	29.50	29.50	0.00
14.0	20.20	28.36	28.36	0.00
15.0	21.64	27.32	27.32	0.00
16.0	23.08	26.37	26.37	0.00
17.0	24.53	25.49	25.49	0.00
18.0	25.97	24.67	24.67	0.00
19.0	27.41	23.91	23.91	0.00
20.0	28.85	23.20	23.20	0.00
21.0	30.30	22.54	22.54	0.00
22.0	31.74	21.92	21.92	0.00
23.0	33.18	21.33	21.33	0.00
24.0	34.62	20.78	20.78	0.00
25.0	36.07	20.26	20.26	0.00
26.0	37.51	19.77	19.77	0.00
27.0	38.95	19.30	19.30	0.00
28.0	40.40	18.86	18.86	0.00
29.0	41.84	18.44	18.44	0.00
30.0	43.28	18.03	18.03	0.00

Table 3.4 倍加時間が 0.5 sec 前の反応度投入量と比較した結果

倍加時間 $T_d$ (s)	ペリオド $T$ (s)	計算値 $\Delta\rho_c(\Delta k/k)$	$T_d$ が 0.5 sec 前の ときの計算値 $\Delta\rho_{c(-0.5s)}(\Delta k/k)$	$\Delta\rho_c - \Delta\rho_{c(-0.5s)}$ ( $\Delta k/k$ )
10.5	15.15	2.40134E-03	2.45965E-03	-5.83E-05
11.5	16.59	2.29424E-03	2.34630E-03	-5.21E-05
12.5	18.03	2.19802E-03	2.24489E-03	-4.69E-05
13.5	19.48	2.11093E-03	2.15343E-03	-4.25E-05
14.5	20.92	2.03160E-03	2.07037E-03	-3.88E-05
15.5	22.36	1.95892E-03	1.99449E-03	-3.56E-05
16.5	23.80	1.89201E-03	1.92479E-03	-3.28E-05
17.5	25.25	1.83015E-03	1.86049E-03	-3.03E-05
18.5	26.69	1.77273E-03	1.80092E-03	-2.82E-05
19.5	28.13	1.71924E-03	1.74552E-03	-2.63E-05
20.5	29.58	1.66927E-03	1.69384E-03	-2.46E-05
21.5	31.02	1.62244E-03	1.64548E-03	-2.30E-05
22.5	32.46	1.57844E-03	1.60010E-03	-2.17E-05
23.5	33.90	1.53701E-03	1.55742E-03	-2.04E-05
24.5	35.35	1.49791E-03	1.51719E-03	-1.93E-05
25.5	36.79	1.46094E-03	1.47917E-03	-1.82E-05
26.5	38.23	1.42590E-03	1.44319E-03	-1.73E-05
27.5	39.67	1.39266E-03	1.40907E-03	-1.64E-05
28.5	41.12	1.36105E-03	1.37666E-03	-1.56E-05
29.5	42.56	1.33096E-03	1.34582E-03	-1.49E-05
30.5	44.00	1.30227E-03	1.31644E-03	-1.42E-05



Table 3.5 EUREKA-2 の解析で得られた値  $R_c$  と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値  $R_d$  を比較した結果 ( $N(j)=N(1)$ ) (1/2)

$\rho(\$)$	計算結果		制御棒校正表のデータ		計算結果		制御棒校正表のデータ	
	$R_c=N(5)/N(1)$	$R_d=(N(5)/N(1))_d$	$R_c/R_d$	$R_c=N(10)/N(1)$	$R_d=(N(10)/N(1))_d$	$R_c/R_d$		
1.5	0.6852	0.6845	1.001	0.5041	0.5037	1.001		
2.0	0.6606	0.6598	1.001	0.4746	0.4741	1.001		
2.5	0.6440	0.6432	1.001	0.4554	0.4549	1.001		
3.0	0.6321	0.6312	1.001	0.4419	0.4414	1.001		
3.5	0.6231	0.6221	1.002	0.4320	0.4314	1.001		
4.0	0.6161	0.6151	1.002	0.4243	0.4237	1.001		
4.5	0.6105	0.6094	1.002	0.4182	0.4176	1.002		
5.0	0.6059	0.6048	1.002	0.4133	0.4126	1.002		

Table 3.5 EUREKA-2 の解析で得られた値  $R_c$  と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値  $R_d$  を比較した結果 ( $N(j)=N(1)$ ) (2/2)

$\rho(\$)$	計算結果		制御棒校正表のデータ		計算結果		制御棒校正表のデータ	
	$R_c=N(15)/N(1)$	$R_d=(N(15)/N(1))_d$	$R_c/R_d$	$R_c=N(20)/N(1)$	$R_d=(N(20)/N(1))_d$	$R_c/R_d$		
1.5	0.4030	0.4027	1.001	0.3362	0.3360	1.001		
2.0	0.3744	0.3741	1.001	0.3096	0.3094	1.001		
2.5	0.3562	0.3559	1.001	0.2930	0.2927	1.001		
3.0	0.3437	0.3433	1.001	0.2816	0.2813	1.001		
3.5	0.3345	0.3341	1.001	0.2734	0.2731	1.001		
4.0	0.3276	0.3272	1.001	0.2672	0.2669	1.001		
4.5	0.3221	0.3216	1.002	0.2624	0.2620	1.001		
5.0	0.3177	0.3172	1.002	0.2585	0.2580	1.002		

Table 3.6 EUREKA-2 の解析で得られた値  $R_c$  と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値  $R_d$  を比較した結果 ( $N(j)=N(2)$ ) (1/2)

$\rho(\$)$	計算結果		制御棒校正表のデータ		計算結果		制御棒校正表のデータ	
	$R_c=N(5)/N(2)$	$R_d=(N(5)/N(2))_d$	$R_c/N(2)$	$R_d$	$R_c=N(10)/N(2)$	$R_d=(N(10)/N(2))_d$	$R_c/R_d$	$R_e/R_d$
1.5	0.7698	0.7699	1.000	0.7664	0.5664	0.5665	1.000	1.000
2.0	0.7511	0.7512	1.000	0.5396	0.5396	0.5398	1.000	1.000
2.5	0.7384	0.7385	1.000	0.5221	0.5221	0.5223	1.000	1.000
3.0	0.7292	0.7293	1.000	0.5098	0.5098	0.5100	1.000	1.000
3.5	0.7223	0.7224	1.000	0.5007	0.5007	0.5009	1.000	1.000
4.0	0.7169	0.7170	1.000	0.4938	0.4938	0.4939	1.000	1.000
4.5	0.7126	0.7126	1.000	0.4882	0.4882	0.4883	1.000	1.000
5.0	0.7090	0.7090	1.000	0.4837	0.4837	0.4838	1.000	1.000

Table 3.6 EUREKA-2 の解析で得られた値  $R_c$  と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値  $R_d$  を比較した結果 ( $N(j)=N(2)$ ) (2/2)

$\rho(\$)$	計算結果		制御棒校正表のデータ		計算結果		制御棒校正表のデータ	
	$R_c=N(15)/N(2)$	$R_d=(N(15)/N(2))_d$	$R_c/N(2)$	$R_d$	$R_c=N(20)/N(2)$	$R_d=(N(20)/N(2))_d$	$R_c/R_d$	$R_e/R_d$
1.5	0.4528	0.4530	1.000	0.3778	0.3778	0.3780	1.000	0.999
2.0	0.4257	0.4259	0.999	0.3520	0.3520	0.3522	0.999	0.999
2.5	0.4084	0.4086	1.000	0.3359	0.3359	0.3361	1.000	0.999
3.0	0.3965	0.3967	1.000	0.3249	0.3249	0.3251	1.000	0.999
3.5	0.3878	0.3880	1.000	0.3170	0.3170	0.3171	1.000	1.000
4.0	0.3812	0.3814	0.999	0.3110	0.3110	0.3111	1.000	1.000
4.5	0.3760	0.3761	1.000	0.3062	0.3062	0.3064	1.000	0.999
5.0	0.3718	0.3718	1.000	0.3025	0.3025	0.3025	1.000	1.000

Table 3.7 EUREKA-2 の解析で得られた値  $R_c$  と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値  $R_d$  を比較した結果 ( $N(j)=N(3)$ ) (1/2)

$\rho(\%)$	計算結果		制御棒校正表のデータ		計算結果		制御棒校正表のデータ	
	$R_c=N(5)/N(3)$	$R_d=(N(5)/N(3))_d$	$R_c/R_d$	$R_d=N(10)/N(3)$	$R_c/R_d$	$R_d=(N(10)/N(3))_d$	$R_c/R_d$	
1.5	0.8488	0.8489	1.000	0.6245	0.6245	0.6247	1.000	
2.0	0.8361	0.8362	1.000	0.6007	0.6007	0.6009	1.000	
2.5	0.8275	0.8276	1.000	0.5852	0.5852	0.5853	1.000	
3.0	0.8213	0.8214	1.000	0.5742	0.5742	0.5744	1.000	
3.5	0.8166	0.8166	1.000	0.5661	0.5661	0.5662	1.000	
4.0	0.8129	0.8130	1.000	0.5599	0.5599	0.5600	1.000	
4.5	0.8099	0.8100	1.000	0.5549	0.5549	0.5550	1.000	
5.0	0.8075	0.8075	1.000	0.5509	0.5509	0.5509	1.000	

Table 3.7 EUREKA-2 の解析で得られた値  $R_c$  と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値  $R_d$  を比較した結果 ( $N(j)=N(3)$ ) (2/2)

$\rho(\%)$	計算結果		制御棒校正表のデータ		計算結果		制御棒校正表のデータ	
	$R_c=N(15)/N(3)$	$R_d=(N(15)/N(3))_d$	$R_c/R_d$	$R_c=N(20)/N(3)$	$R_c/R_d$	$R_d=(N(20)/N(3))_d$	$R_c/R_d$	
1.5	0.4993	0.4995	1.000	0.4165	0.4165	0.4167	1.000	
2.0	0.4739	0.4741	1.000	0.3919	0.3919	0.3921	0.999	
2.5	0.4577	0.4579	1.000	0.3765	0.3765	0.3766	1.000	
3.0	0.4466	0.4468	1.000	0.3660	0.3660	0.3661	1.000	
3.5	0.4384	0.4386	1.000	0.3583	0.3583	0.3585	1.000	
4.0	0.4322	0.4324	1.000	0.3526	0.3526	0.3528	0.999	
4.5	0.4274	0.4275	1.000	0.3481	0.3481	0.3482	1.000	
5.0	0.4234	0.4235	1.000	0.3445	0.3445	0.3445	1.000	

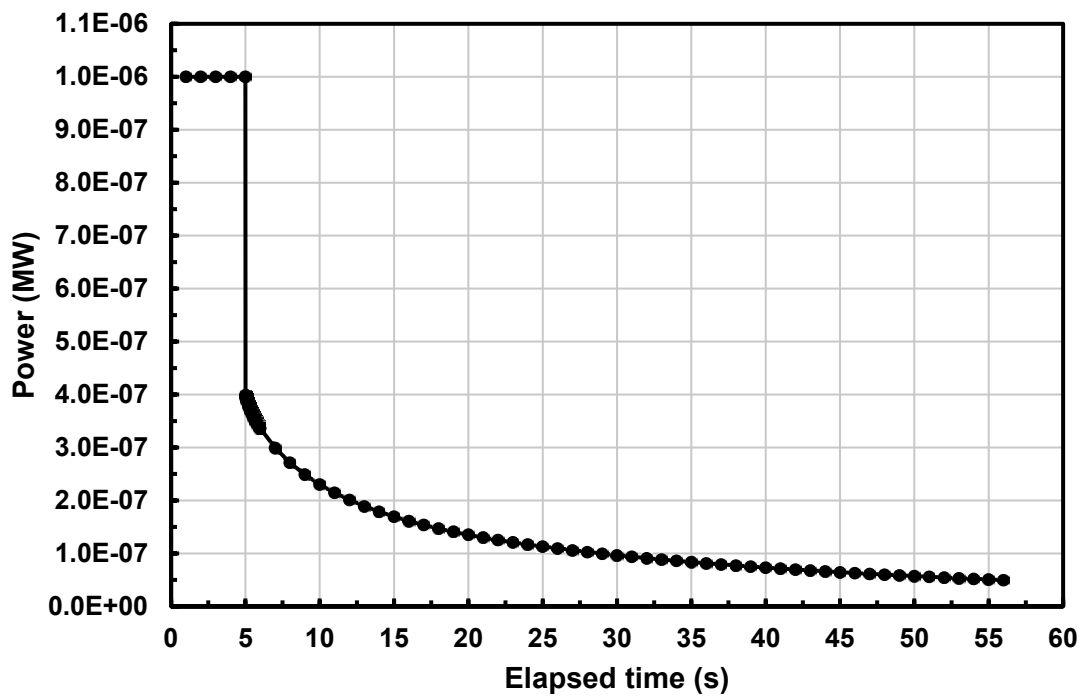


Fig.3.1 経過時間 5 sec で 1.5 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線

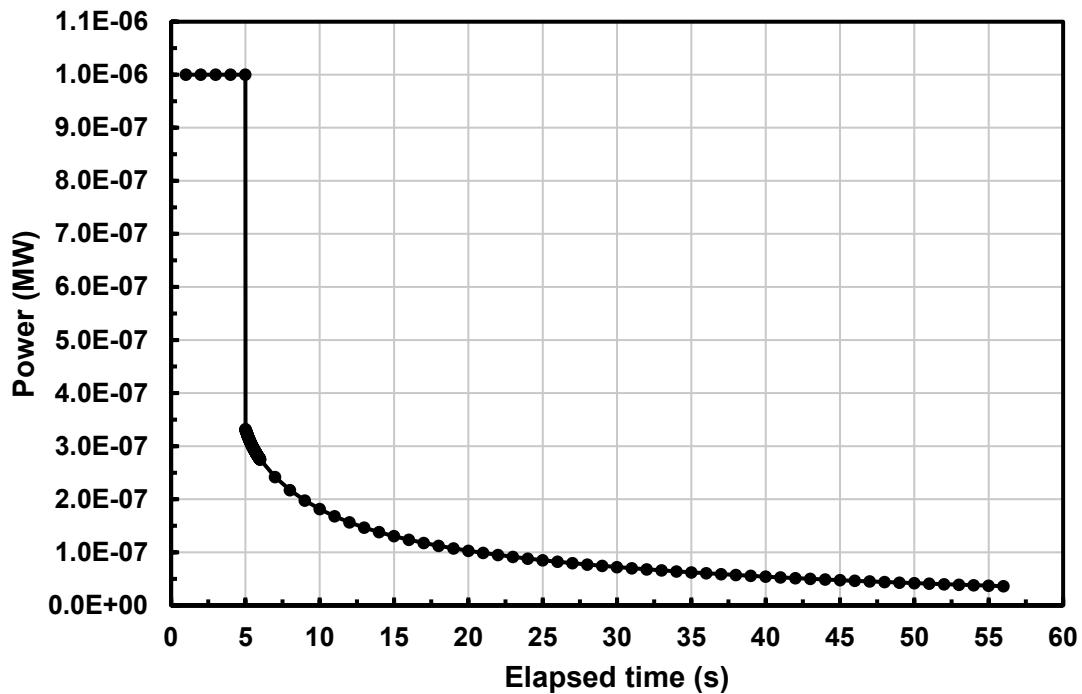


Fig.3.2 経過時間 5 sec で 2.0 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線

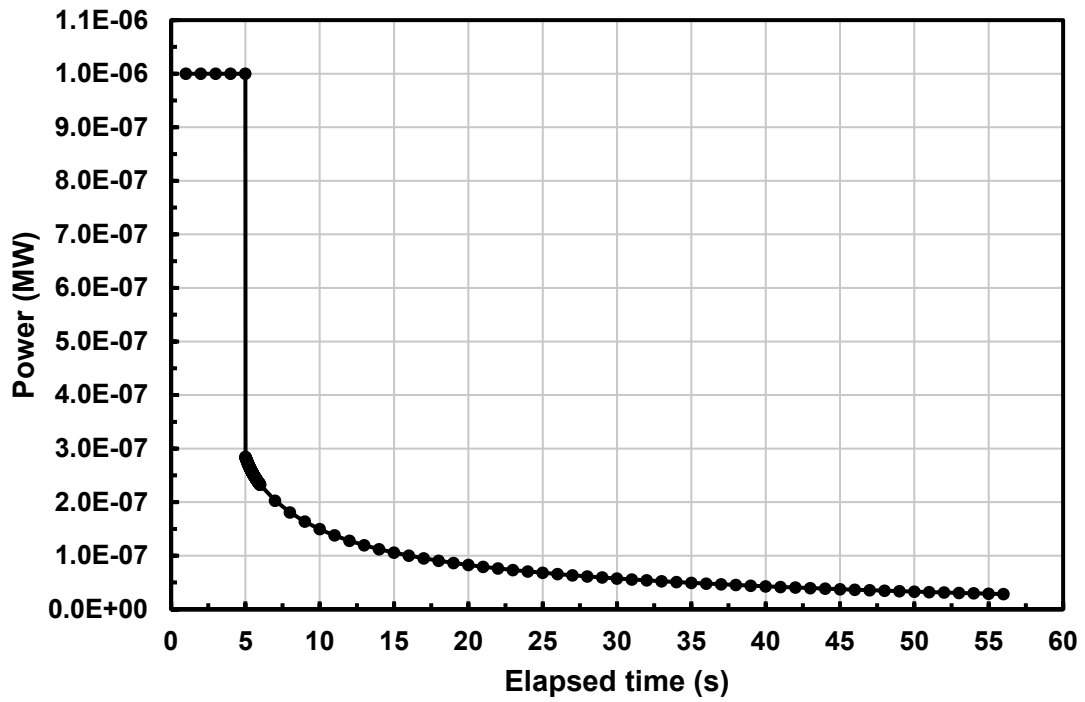


Fig.3.3 経過時間 5 sec で 2.5 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線

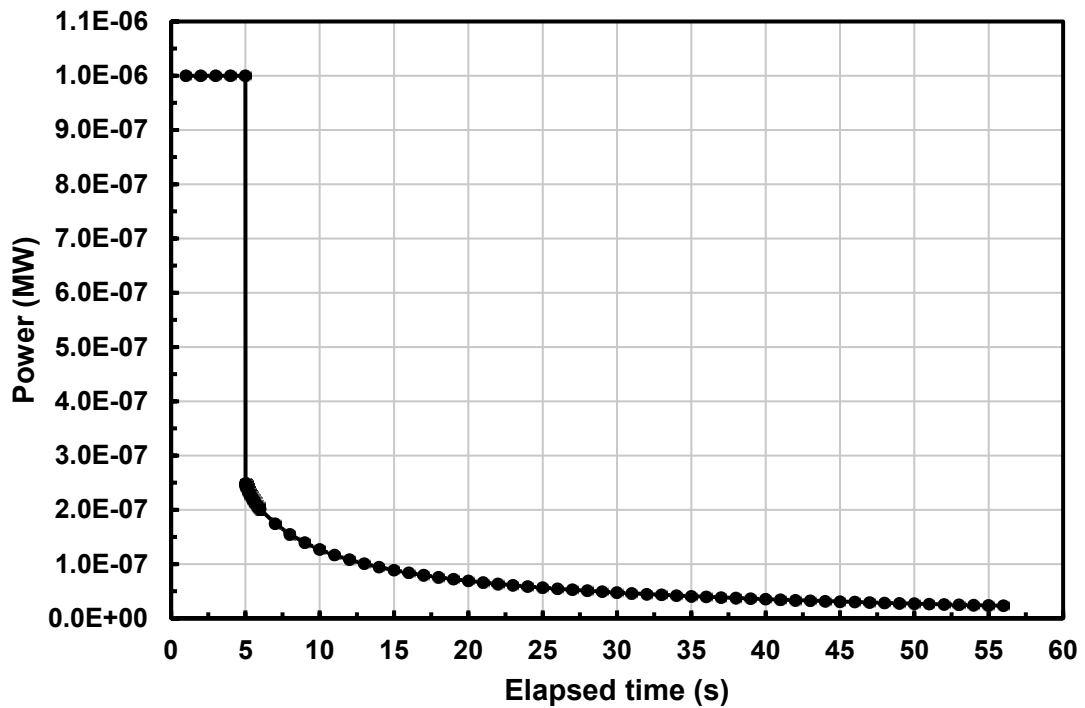


Fig.3.4 経過時間 5 sec で 3.0 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線

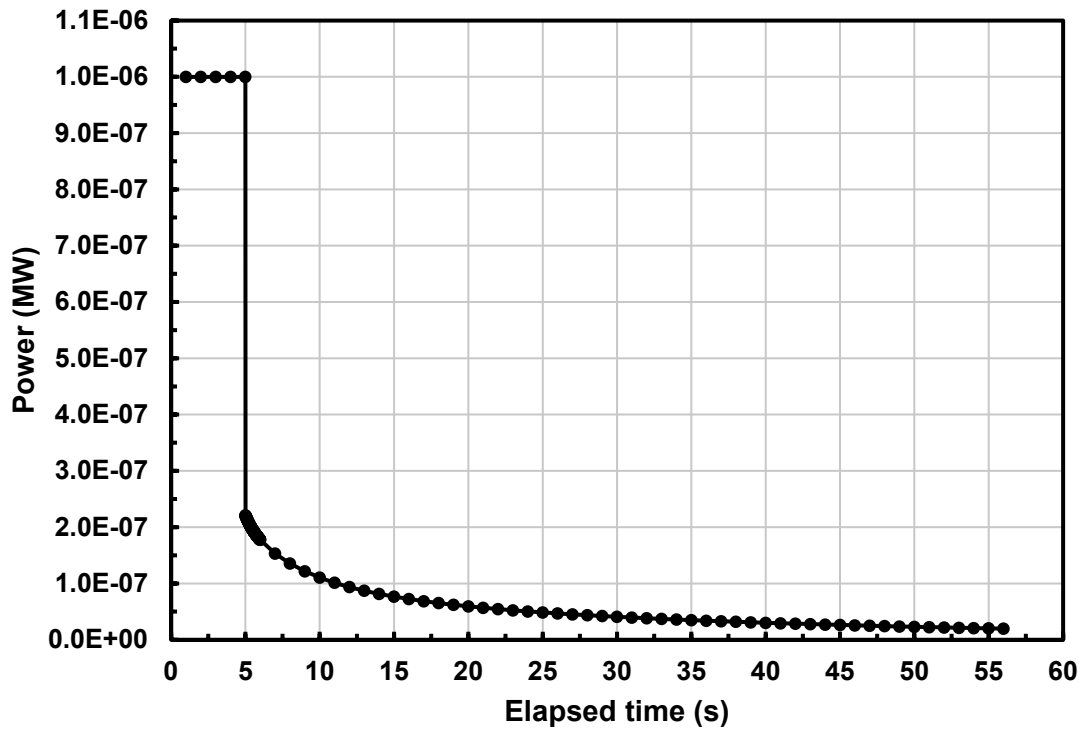


Fig.3.5 経過時間 5 sec で 3.5 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線

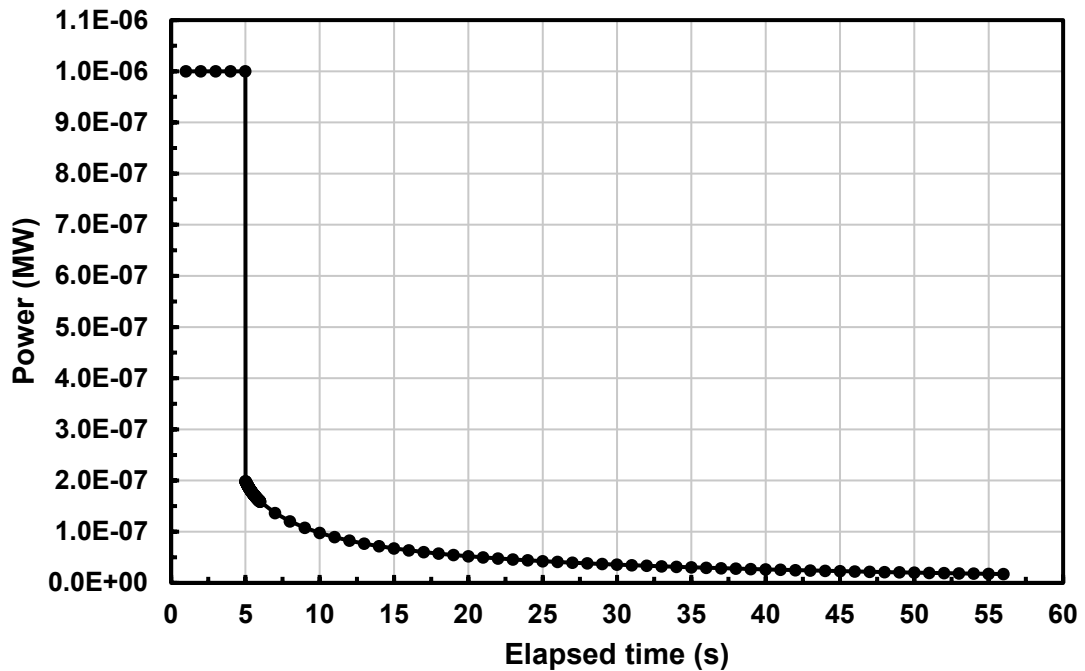


Fig.3.6 経過時間 5 sec で 4.0 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線

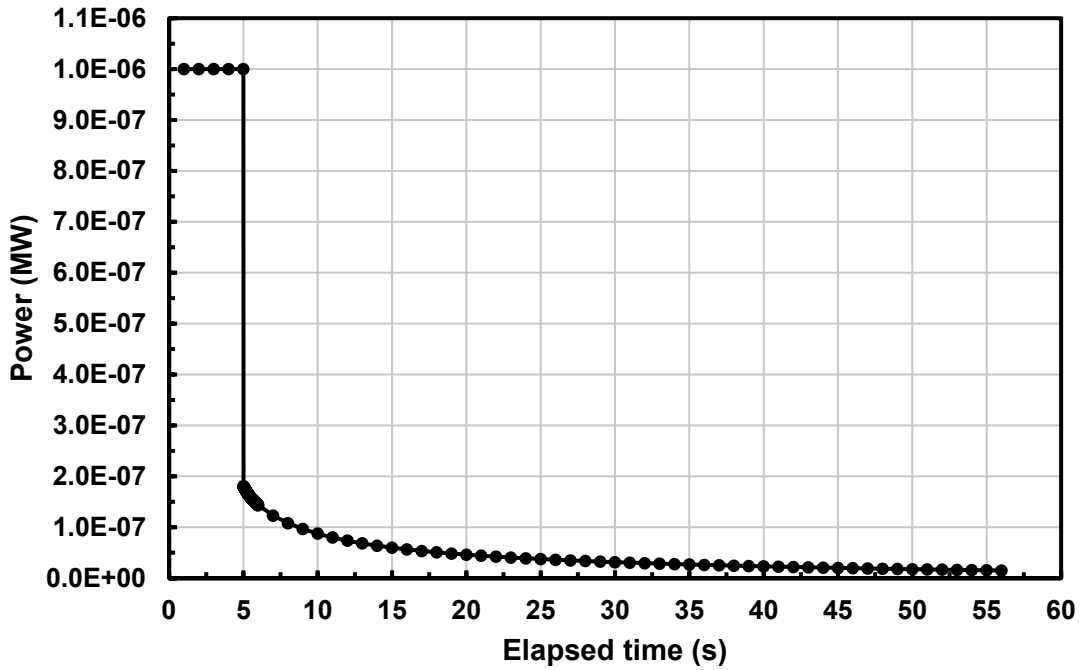


Fig.3.7 経過時間 5 sec で 4.5 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線

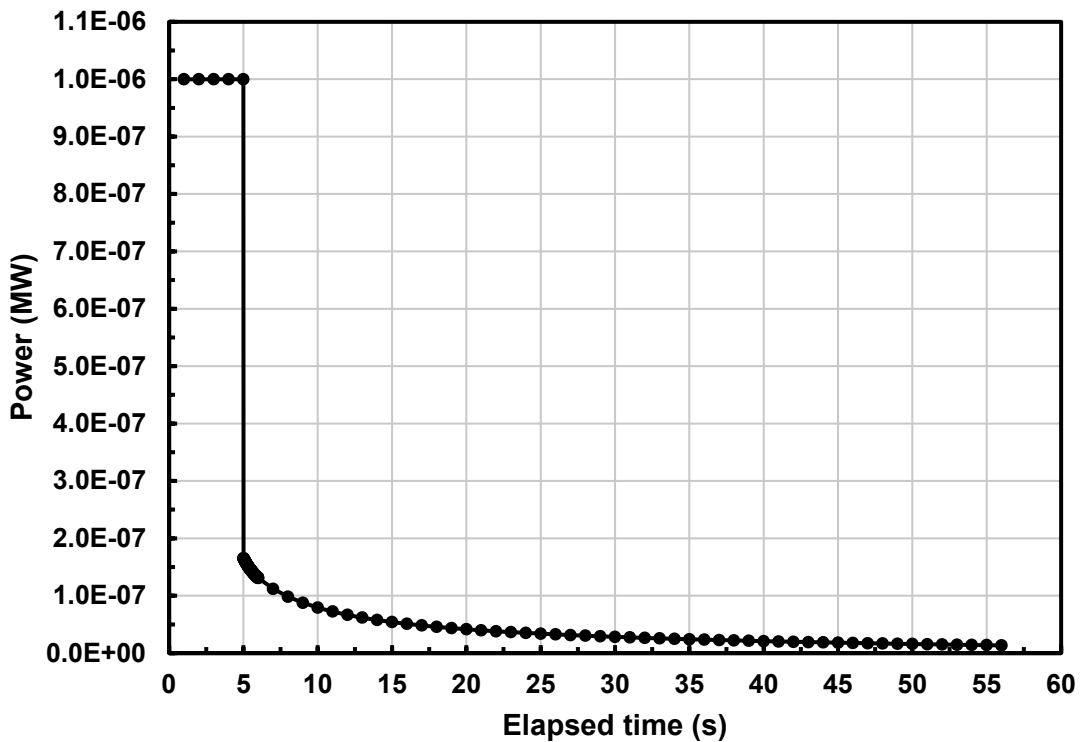


Fig.3.8 経過時間 5 sec で 5.0 ドルの負の反応度を投入した場合の出力減衰曲線

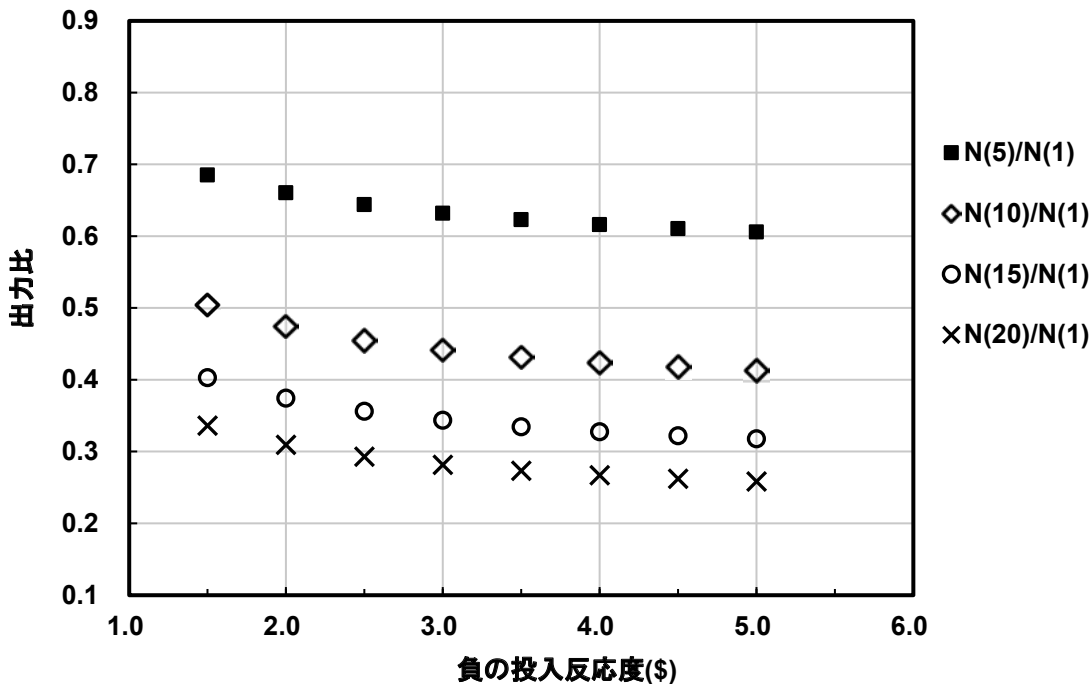


Fig.3.9 EUREKA-2 の解析で得られた出力比の値 ( $N(j)=N(1)$ )

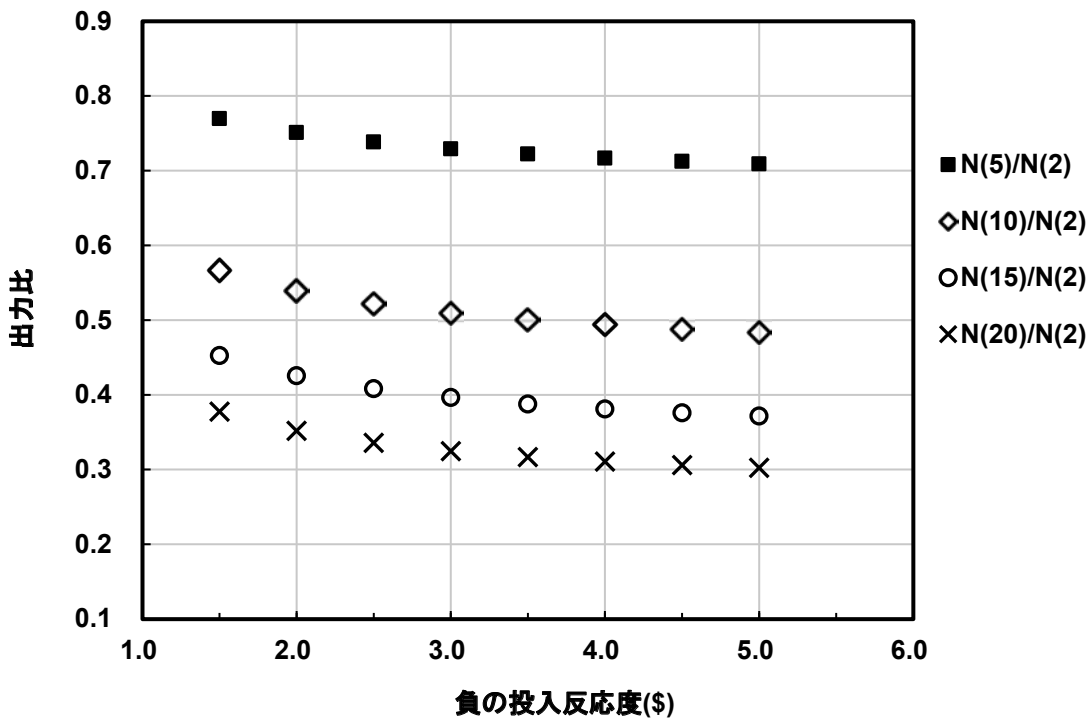


Fig.3.10 EUREKA-2 の解析で得られた出力比の値 ( $N(j)=N(2)$ )



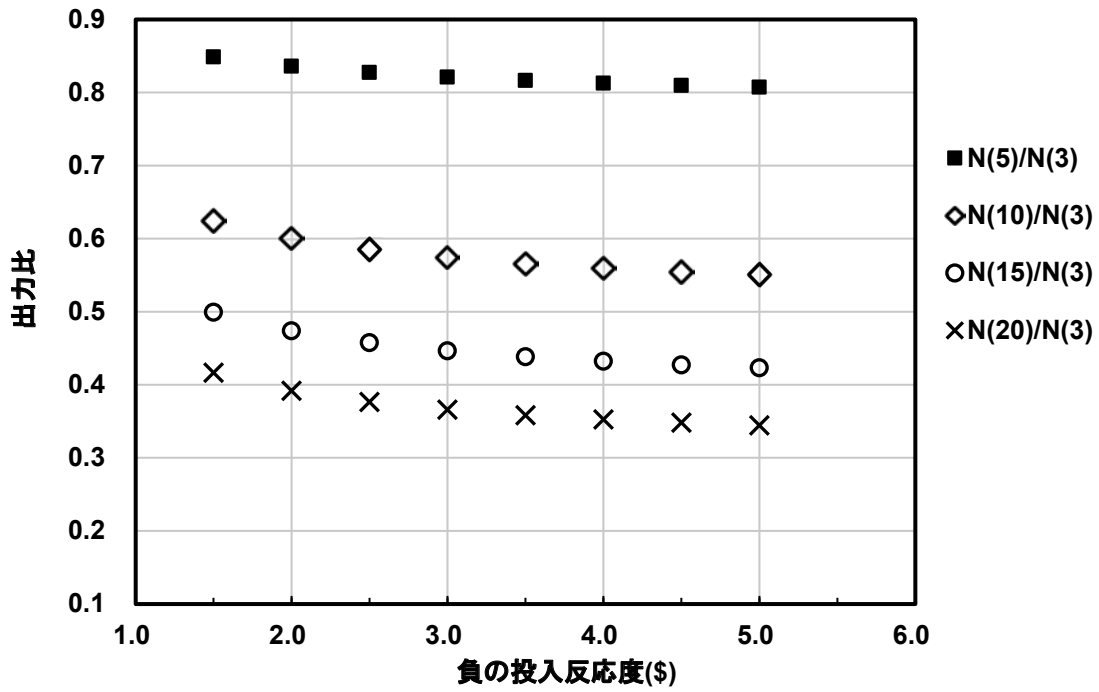


Fig.3.11 EUREKA-2 の解析で得られた出力比の値 (N(j)=N(3))

## 付録 A 最小臨界点位置の推移

NSRR では、原則毎年度行っている定期事業者検査（旧施設定期検査）において、最小臨界点位置（バンク操作で臨界調整した制御棒位置）を確認している。最大過剰反応度確認検査における最小臨界点位置の推移を Table A.1 及び Fig.A.1 に、年度末の積算出力と最小臨界点位置の相関関係を Fig.A.2 に、最小臨界点位置測定時のプール水温を Fig.A.3 に示す。

なお、制御棒位置は、電動駆動を行う制御棒のストローク長（381 mm）を 100 unit（全挿入状態）～900 unit（全引抜状態）で表示したもので管理している。

Fig.A.1 から分かるように、最小臨界点位置は上昇傾向にある。年度末の積算出力と最小臨界点位置は相関関係があり、プール水温と最小臨界点位置に相関は見られないことから、臨界点位置の上昇は主に燃料の燃焼に伴うものと推定される。1975 年の初臨界から 2024 年 3 月末時点での積算出力の実績は約  $1.6 \times 10^5$  kWh であり、それを基に算出した燃焼度は 0.107% である。また、最小臨界点位置は上昇傾向にあるものの、最大の 257 unit（2021 年度及び 2023 年度）と最小の 214 unit（1975 年度及び 1977 年度）の差は 43 unit であり、制御棒の全長 800 unit の約 5.4% である。最小臨界点位置に大きな変化がないことから、制御棒校正表のデータを算出するために必要な核特性データに大きな変化がないといえる。

Table A.1 最小臨界点位置の推移(1/2)

年度	最小臨界点 位置(unit)	プール水温(°C)	年度末の積算出力 (累計) (kWh)
1975	214	24.2	1.54E+04
1976	222	30.1	2.25E+04
1977	214	26.8	3.23E+04
1978	228	25.1	4.01E+04
1979	229	25.1	4.51E+04
1980	232	25.4	5.09E+04
1981	230	24.4	5.48E+04
1982	235	24.9	5.82E+04
1983	225	25.2	6.34E+04
1984	229	24.9	7.12E+04
1985	228	22.8	7.53E+04
1986	229	23.7	7.91E+04
1987	232	25.0	8.20E+04
1988	228	27.3	9.18E+04
1989	—	—	9.65E+04
1990	234	24.7	9.97E+04

Table A.1 最小臨界点位置の推移(2/2)

年度	最小臨界点 位置(unit)	プール水温(°C)	年度末の積算出力 (累計) (kWh)
1991	238	23.1	1.03E+05
1992	235	24.4	1.07E+05
1993	232	23.2	1.09E+05
1994	237	24.7	1.12E+05
1995	241	23.9	1.16E+05
1996	240	23.7	1.19E+05
1997	242	24.2	1.22E+05
1998	238	23.9	1.25E+05
1999	249	22.7	1.27E+05
2000	250	24.4	1.30E+05
2001	252	25.9	1.36E+05
2002	249	25.1	1.38E+05
2003	250	19.8	1.40E+05
2004	252	22.1	1.42E+05
2005	252	17.7	1.44E+05
2006	254	21.5	1.45E+05
2007	254	20.5	1.46E+05
2008	—	—	1.48E+05
2009	254	25.4	1.49E+05
2010	253	22.7	1.50E+05
2011	—	—	1.50E+05
2012	—	—	1.50E+05
2013	254	22.4	1.53E+05
2014	—	—	1.53E+05
2015	—	—	1.53E+05
2016	—	—	1.53E+05
2017	—	—	1.53E+05
2018	255	22.6	1.54E+05
2019	256	19.1	1.56E+05
2020	—	—	1.56E+05
2021	257	22.2	1.57E+05
2022	256	21.9	1.59E+05
2023	257	22.1	1.60E+05

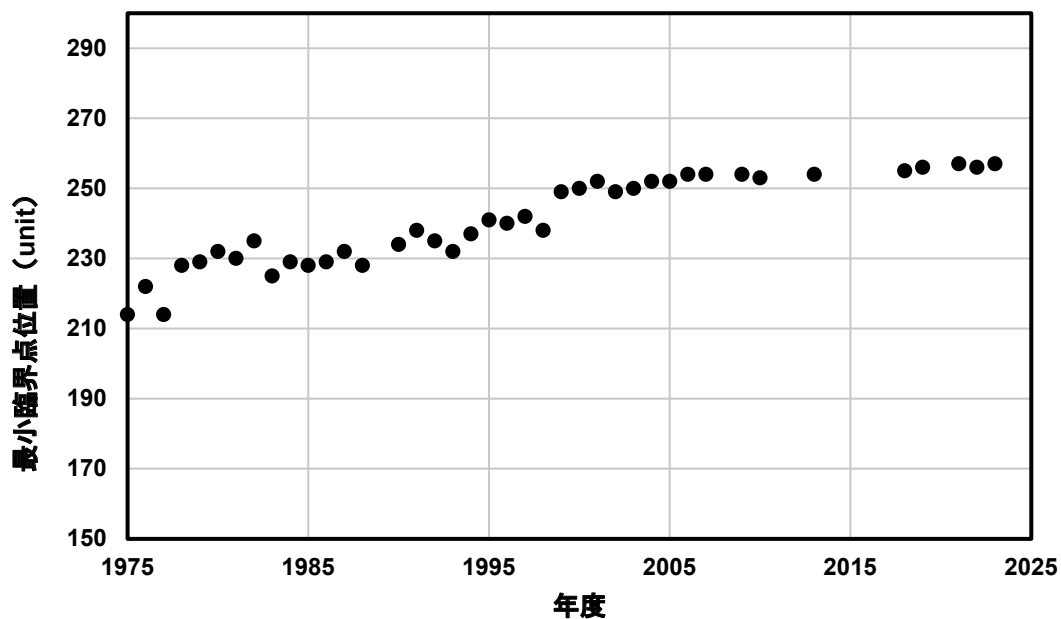


Fig.A.1 最小臨界点位置の推移

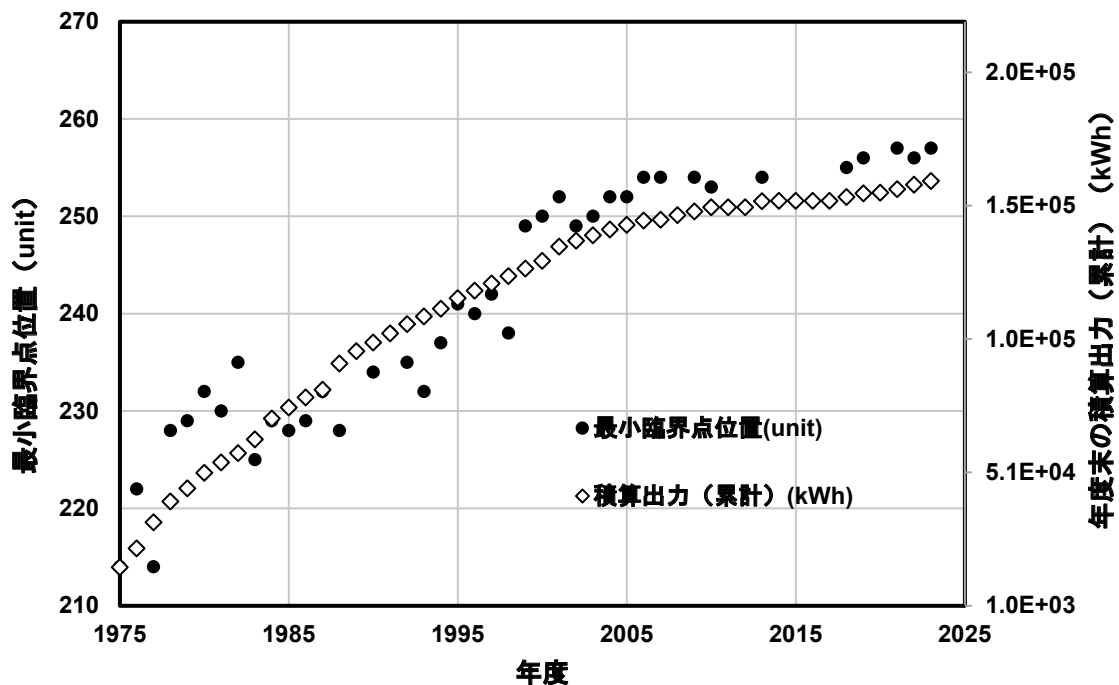


Fig.A.2 最小臨界点位置と積算出力の関係

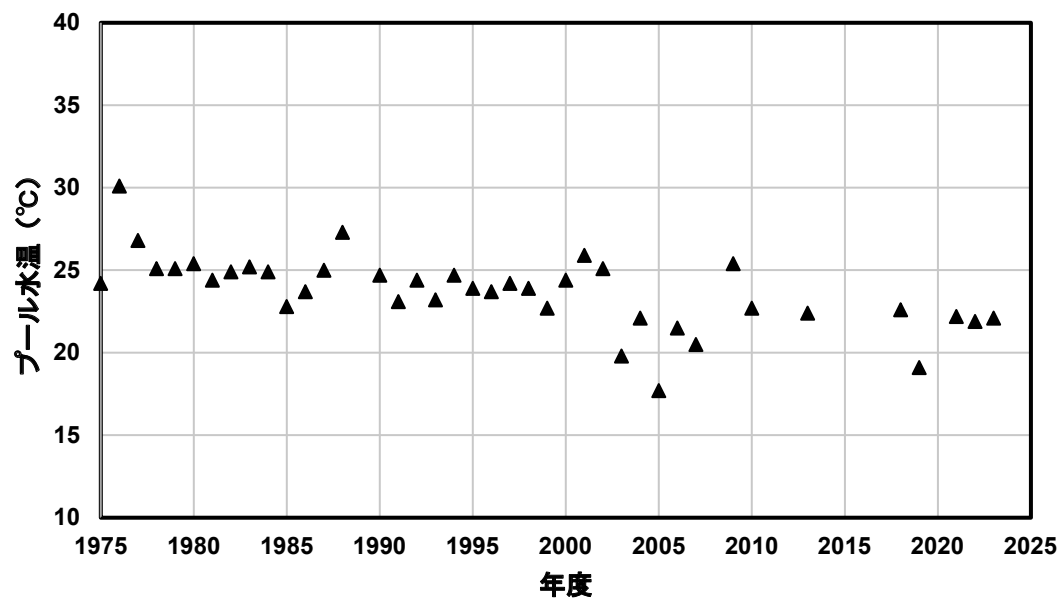


Fig.A.3 最小臨界点位置測定時のプール水温

## 付録 B 負反応度投入量に対する出力減衰量計算図表の検証

改良落下法については、1977年に日本原子力学会誌ショートノート（以下「レポート」という。）で報告<sup>2)</sup>されており、負反応度投入量に対する出力減衰曲線は一点近似の計算コード EXCURS によって求めている。「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」も同様のコードによって求めたものと考えられるが、解析データは残っていない。

「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」が、上記レポートと同様の手法で解析されたものであることを検証するため、レポートの第 1 図「負反応度投入量に対する出力減衰量計算図表」を画像解析し、曲線の数値と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」を比較した。

レポートの第 1 図「負反応度投入量に対する出力減衰量計算図表」の横軸は約 0.5 ドル～3.0 ドルの範囲で、0.5 ドルごとに目盛がふられている。出力値の比は  $N(20)/N(1)$ 、 $N(10)/N(1)$ 、 $N(5)/N(1)$ 、 $N(25)/N(5)$ 、 $N(15)/N(5)$ 、 $N(10)/N(5)$  の 6 つである。また、御棒棒落下時の「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」は、1.01 ドルから 10.00 ドルまで 0.01 ドルごとの反応度投入量に対応する出力値の比 ( $N(i)/N(j)$ 、 $i=0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50$ 、 $j=0, 1, 2, 3, 4, 5$ ) が記載されている。

以上のことから、レポートの第 1 図の目盛上の値から 0.01 ドルずらした 1.01 ドル、1.51 ドル、2.01、2.51 ドル、3.01 ドル、3.51 ドル、4.01 ドル、4.51 ドル及び 5.01 ドルについて、 $N(20)/N(1)$ 、 $N(10)/N(1)$ 、 $N(5)/N(1)$ 、 $N(25)/N(5)$ 、 $N(15)/N(5)$ 、 $N(10)/N(5)$  の出力値の比の値を比較した。

レポートの第 1 図を画像解析した結果を Fig.B.1 に示す。各曲線について、横軸が最小値（約 0.5 ドル）、1 ドル、1.5 ドル、2 ドル、2.5 ドルのときの縦軸の値を読み取り、その座標をプロットするとともに近似曲線を表示した。近似曲線は指数関数とした。レポートについては、電子データがなかったため、保管されていた紙媒体をスキャンしたものを画像解析した。紙媒体はコピーされたものであり、若干歪んでいたため、横軸、縦軸、 $t=10$  sec、5 sec が若干ずれているが、おおむね一致している。

1.01 ドル、1.51 ドル、2.01 ドル、2.51 ドル、3.01 ドル、3.51 ドル、4.01 ドル、4.51 ドル及び 5.01 ドルの反応度投入量に対応する出力値の比 ( $N(20)/N(1)$ 、 $N(10)/N(1)$ 、 $N(5)/N(1)$ 、 $N(25)/N(5)$ 、 $N(15)/N(5)$ 、 $N(10)/N(5)$ ) について、近似曲線から得られる値と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の値を比較した結果を Table B.1 に示す。

近似曲線から得られる値と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の比は  $0.98 \pm 0.04$  となり、おおむね一致しているといえる。若干の違いは画像解析の精度によるものと考えられる。

Table B.1 近似曲線から得られた値  $R_c$  と「出力減衰曲線から反応度投入量を計算した表」の数値  $R_d$  を比較した結果

$\rho(\%)$	$R_c=N(20)/N(1)$	$R_d=N(20)/N(1)_d$	$R_c/R_d$	$R_c=N(10)/N(1)$	$R_d=N(10)/N(1)_d$	$R_c/R_d$	$R_c=N(5)/N(1)$	$R_d=N(5)/N(1)_d$	$R_c/R_d$
1.01	0.3975	0.3837	1.04	0.5678	0.5532	1.03	0.7349	0.7236	1.02
1.51	0.3450	0.3354	1.03	0.5143	0.5030	1.02	0.6927	0.6839	1.01
2.01	0.3120	0.3090	1.01	0.4794	0.4737	1.01	0.6642	0.6594	1.01
2.51	0.2885	0.2925	0.99	0.4539	0.4546	1.00	0.6429	0.6429	1.00
3.01	0.2707	0.2812	0.96	0.4340	0.4412	0.98	0.6259	0.6310	0.99
3.51	0.2564	0.2730	0.94	0.4179	0.4312	0.97	0.6120	0.6220	0.98
4.01	0.2447	0.2668	0.92	0.4045	0.4235	0.96	0.6001	0.6150	0.98
4.51	0.2347	0.2619	0.90	0.3930	0.4175	0.94	0.5898	0.6093	0.97
5.01	0.2262	0.2580	0.88	0.3829	0.4126	0.93	0.5808	0.6047	0.96

$\rho(\%)$	$R_c=N(25)/N(5)$	$R_d=N(25)/N(5)_d$	$R_c/R_d$	$R_c=N(15)/N(5)$	$R_d=N(15)/N(5)_d$	$R_c/R_d$	$R_c=N(10)/N(5)$	$R_d=N(10)/N(5)_d$	$R_c/R_d$
1.01	0.4679	0.4588	1.02	0.6362	0.6255	1.02	0.7794	0.7646	1.02
1.51	0.4238	0.4189	1.01	0.5953	0.5879	1.01	0.7478	0.7355	1.02
2.01	0.3950	0.3975	0.99	0.5679	0.5666	1.00	0.7261	0.7183	1.01
2.51	0.3740	0.3844	0.97	0.5474	0.5531	0.99	0.7096	0.7071	1.00
3.01	0.3576	0.3755	0.95	0.5313	0.5438	0.98	0.6965	0.6992	1.00
3.51	0.3444	0.3691	0.93	0.5180	0.5370	0.96	0.6856	0.6933	0.99
4.01	0.3333	0.3642	0.92	0.5067	0.5318	0.95	0.6762	0.6887	0.98
4.51	0.3238	0.3605	0.90	0.4970	0.5277	0.94	0.6681	0.6852	0.98
5.01	0.3155	0.3575	0.88	0.4884	0.5244	0.93	0.6609	0.6822	0.97

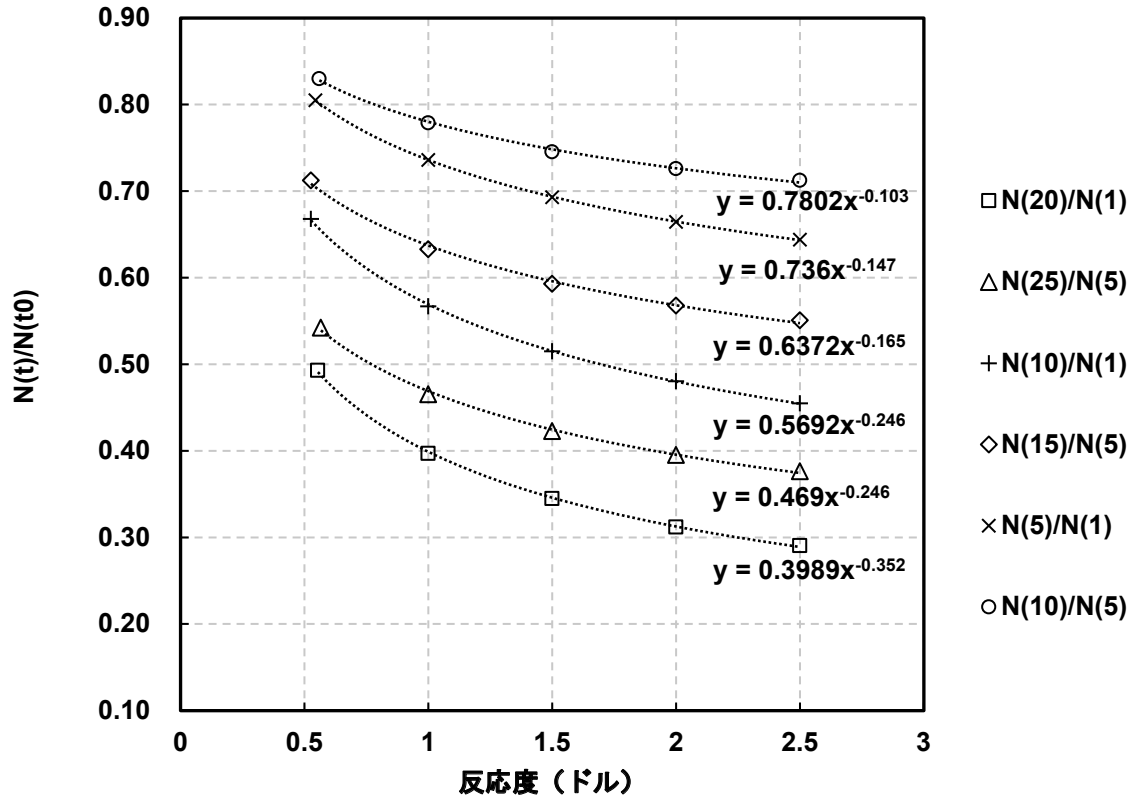


Fig.B.1 画像解析した出力減衰曲線



### 付録 C 反応度抑制効果及び反応度変化率の推移

NSRR の制御棒は、安全棒 (S1、S2) が 2 本、調整棒 (R1~R6) が 6 本、トランジェント棒 (TA、TB、TC) が 3 本の計 11 本ある。原則毎年度行っている定期事業者検査 (旧施設定期検査) において、全ての制御棒の反応度抑制効果並びに S1、S2、R1、TA 及び BANK の反応度変化率の測定を行っている。反応度変化率は、反応度変化率曲線が極大となる制御棒位置の-5unit から+5unit まで引き抜いたときの反応度を制御棒の駆動速度で除した反応度変化率である。

なお、BANK とは調整棒 6 本を同時に駆動させる操作のことである。

反応度抑制効果の推移を Table C.1 及び Fig.C.1 に、反応度変化率の推移を Table C.2 及び Fig.C.2 に示す。図から分かるように、核特性データにばらつきは見られるが、大きな変化はない。

Table C.1 反応度抑制効果の推移

単位： $\Delta k$ 

年度	S1	S2	R1	R2	R3	R4	R5	R6	TA	TB	TC
1989	0.0129	0.0129	0.0191	0.0154	0.0139	0.0147	0.0139	0.0161	0.0123	0.0128	0.0134
1990	0.0145	0.0134	0.0218	0.0174	0.0166	0.0177	0.0172	0.0192	0.0126	0.0140	0.0134
1991	0.0138	0.0144	0.0198	0.0166	0.0152	0.0166	0.0160	0.0185	0.0127	0.0134	0.0134
1992	0.0137	0.0134	0.0204	0.0160	0.0142	0.0161	0.0157	0.0174	0.0119	0.0142	0.0134
1993	0.0143	0.0149	0.0212	0.0163	0.0150	0.0167	0.0157	0.0181	0.0127	0.0138	0.0139
1994	0.0143	0.0138	0.0221	0.0163	0.0154	0.0162	0.0162	0.0191	0.0129	0.0132	0.0129
1995	0.0136	0.0131	0.0209	0.0161	0.0151	0.0155	0.0165	0.0172	0.0126	0.0129	0.0126
1996	0.0137	0.0138	0.0209	0.0162	0.0160	0.0160	0.0154	0.0168	0.0126	0.0127	0.0136
1997	0.0143	0.0143	0.0203	0.0167	0.0160	0.0167	0.0165	0.0181	0.0126	0.0131	0.0135
1998	0.0144	0.0133	0.0202	0.0149	0.0151	0.0169	0.0158	0.0178	0.0124	0.0128	0.0135
1999	0.0136	0.0130	0.0195	0.0153	0.0153	0.0178	0.0163	0.0176	0.0125	0.0127	0.0142
2000	0.0146	0.0145	0.0221	0.0170	0.0165	0.0186	0.0170	0.0181	0.0135	0.0135	0.0142
2001	0.0137	0.0141	0.0198	0.0157	0.0157	0.0169	0.0164	0.0178	0.0129	0.0126	0.0132
2002	0.0135	0.0140	0.0220	0.0165	0.0161	0.0185	0.0168	0.0186	0.0121	0.0126	0.0134
2003	0.0146	0.0139	0.0215	0.0164	0.0163	0.0201	0.0172	0.0189	0.0135	0.0139	0.0138
2004	0.0149	0.0130	0.0204	0.0166	0.0146	0.0164	0.0163	0.0175	0.0125	0.0122	0.0126
2005	0.0137	0.0140	0.0204	0.0159	0.0149	0.0174	0.0156	0.0170	0.0130	0.0125	0.0129
2006	0.0141	0.0135	0.0198	0.0157	0.0152	0.0180	0.0160	0.0180	0.0142	0.0124	0.0130
2007	0.0138	0.0140	0.0206	0.0163	0.0160	0.0181	0.0162	0.0180	0.0127	0.0129	0.0134
2009	0.0134	0.0132	0.0209	0.0156	0.0167	0.0183	0.0159	0.0192	0.0121	0.0124	0.0133
2010	0.0136	0.0139	0.0200	0.0157	0.0153	0.0164	0.0162	0.0181	0.0127	0.0131	0.0133
2013	0.0146	0.0135	0.0225	0.0172	0.0178	0.0196	0.0162	0.0181	0.0133	0.0138	0.0136
2019	0.0143	0.0135	0.0227	0.0150	0.0147	0.0170	0.0154	0.0182	0.0121	0.0126	0.0138
2021	0.0144	0.0135	0.0225	0.0154	0.0167	0.0174	0.0168	0.0176	0.0133	0.0132	0.0135
2022	0.0148	0.0131	0.0197	0.0165	0.0159	0.0177	0.0170	0.0182	0.0118	0.0128	0.0136
2023	0.0140	0.0142	0.0208	0.0170	0.0168	0.0183	0.0158	0.0197	0.0130	0.0129	0.0130

Table C.2 反応度変化率の推移

単位： $\Delta k/\text{min}$ 

年度	S1	S2	R1	TA	BANK
1989	0.00415	—	0.00563	0.00550	0.01060
1990	—	0.00425	0.00545	0.00538	0.01070
1991	—	0.00430	0.00570	0.00540	0.01070
1992	0.00430	—	0.00570	0.00550	0.01080
1993	—	0.00416	0.00561	0.00549	0.01076
1994	0.00420	—	0.00549	0.00562	0.01081
1995	—	0.00421	0.00563	0.00561	0.01081
1996	0.00430	—	0.00580	0.00560	0.01120
1997	—	0.00430	0.00570	0.00580	0.01120
1998	0.00430	—	0.00550	0.00560	0.01120
1999	—	0.00420	0.00570	0.00570	0.01120
2000	0.00430	—	0.00560	0.00550	0.01190
2001	—	0.00410	0.00550	0.00550	0.01160
2002	0.00430	—	0.00570	0.00560	0.01160
2003	0.00440	0.00430	0.00590	0.00550	0.01150
2004	0.00440	0.00440	0.00580	0.00570	0.01160
2005	0.00444	0.00431	0.00576	0.00576	0.01160
2006	0.00441	0.00426	0.00580	0.00587	0.01170
2007	0.00428	0.00410	0.00572	0.00576	0.01180
2009	0.00430	0.00429	0.00565	0.00565	0.01250
2010	0.00428	0.00436	0.00572	0.00565	0.01213
2013	0.00431	0.00416	0.00560	0.00556	0.01179
2019	0.00437	0.00437	0.00550	0.00555	0.01200
2021	0.00441	0.00416	0.00562	0.00573	0.01129
2022	0.00448	0.00426	0.00562	0.00555	0.01147
2023	0.00419	0.00405	0.00555	0.00570	0.01192

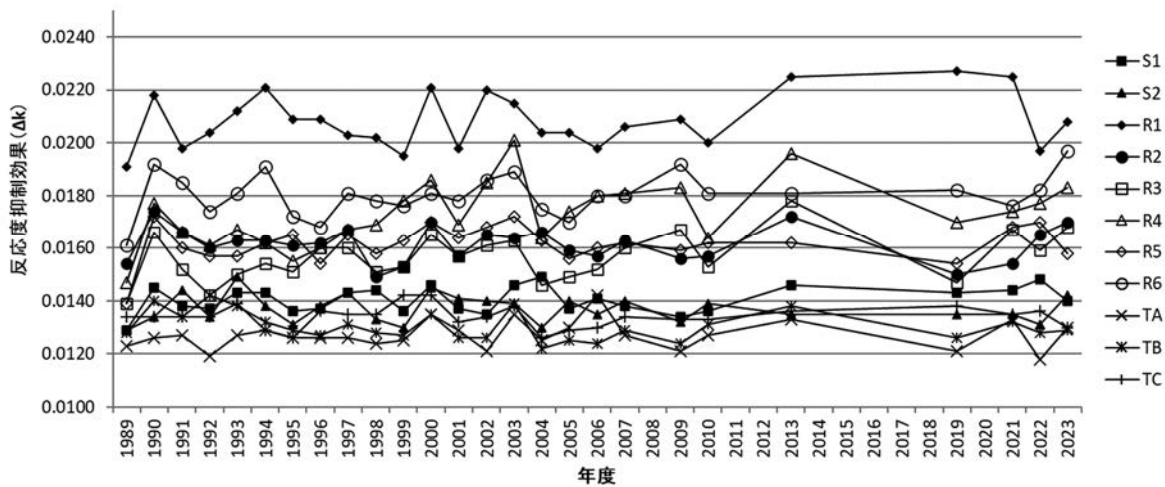


Fig.C.1 反応度抑制効果の推移

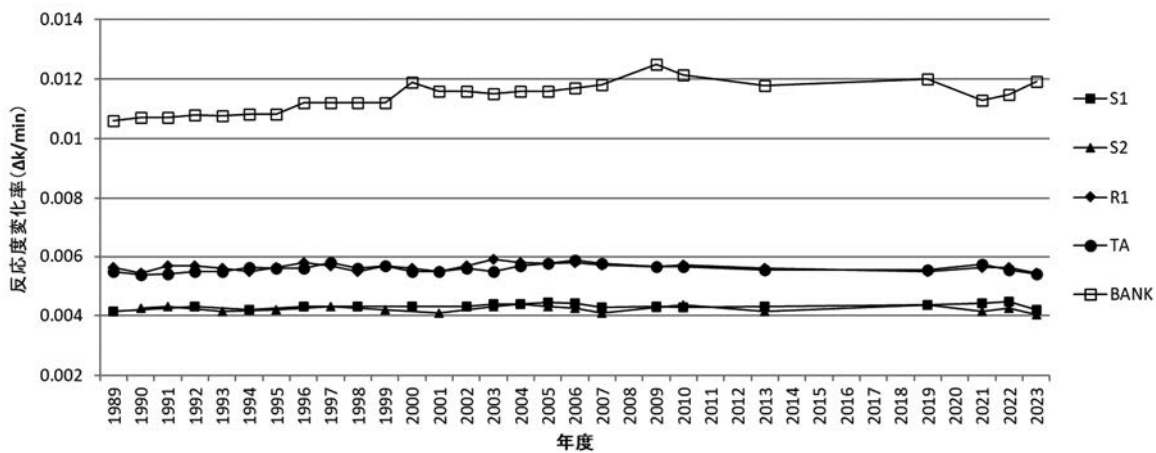


Fig.C.2 反応度変化率の推移



