

JAERI-Review

95-010



JRR-4 及び NSRR を用いた原子炉物理の基礎実験

1995年6月

小原 徹*・堀木欧一郎・中島照夫
渡辺終吉・石島清見・片西昌司

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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこみください。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

JRR-4 及び NSRR を用いた原子炉物理の基礎実験

日本原子力研究所原子力総合研修センター

小原 徹*・堀木欧一郎・中島 照夫⁺

渡辺 終吉⁺・石島 清見⁺⁺・片西 昌司⁺⁺

(1995年5月19日受理)

本書は、1994年8月に日本原子力研究所の JRR-4 (Japan Research Reactor - 4) 及び NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) を用いて行われた東京工業大学大学院の学生実験のために書かれたテキストを整理したものである。同実験では、炉物理の基礎実験として JRR-4 では、① 制御棒校正実験、② キセノンの反応度効果の測定を、NSRR では即発臨界状態での即発的なフィードバック効果による原子炉の動特性の測定を行った。本書には、実験原理、実験手順、結果の解析手法について記載されている。

日本原子力研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+ 研究炉部

++ 原子炉安全工学部

* 東京工業大学原子炉工学研究所

Basic Experiments of Reactor Physics using the Research
Reactor JRR-4 and NSRR

Toru OBARA*, Oichiro HORIKI, Teruo NAKAJIMA†, Shukichi WATANABE†,
Kiyomi ISHIJIMA++ and Shoji KATANISHI++

Nuclear Education Center
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 19, 1995)

This report is based on lectures given to graduate students of Tokyo Institute of Technology. It covers educational experiments conducted with the Japan Research Reactor 4 (JRR-4) and the Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) at Japan Atomic Energy Research Institute in August 1994. During this period, the following basic experiments on reactor physics were performed: JRR-4; ① Control rod calibration by positive period method, ② Measurement of Xe poisoning after high power operation, and NSRR; Measurement of reactor kinetics during power excursion caused by prompt critical. The principle of experiments, experimental procedure, and analysis of results are described in this report.

Keywords : Reactor Physics, Research Reactor, JRR-4, NSRR, Educational Experiment, Positive Period Method, Xe Poisoning, Reactor Kinetics, Prompt Critical, Prompt Temperature Coefficient

* Department of Research Reactor

++ Department of Reactor Safety Research

* Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

目 次

1. まえがき	1
2. JRR-4 制御棒校正実験	2
3. JRR-4 キセノン効果実験	9
4. NSRR によるパルス実験	16
付 錄	22
参考資料	24

Contents

1. Preface	1
2. Control Rod Calibration with JRR-4	2
3. Measurement of Xe Poisoning in JRR-4	9
4. Measurement of Reactor Kinetics with NSRR	16
Appendix	22
Reference Data	24

1. まえがき

東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻では、1990年度から日本原子力研究所の臨界集合体を用いて学生実験を行ってきた。1994年度(平成6年度)の学生実験では研究炉JRR-4を用いて炉物理実験を行うこととなり、また見学という形でNSRRのパルス実験に立ち会うこととなった。そこで事前講義と実験のためテキストを作成したが、それに実験の経験をもとに若干の修正を加え参考資料として実験の結果をつけ加えたものが本メモである。

今回行った実験は研究炉を用いた実験のため、従来の臨界集合体での実験とは異なった実験テーマとなった。研究炉では臨界集合体のような炉心変更の自由度は小さいが、臨界集合体とは異なり出力運転を行うという特徴がある。そこで、JRR-4の実験では、はじめに制御棒校正実験を行った後この結果をもとにキセノンの反応度効果の測定実験を行った。またNSRRでの見学ではNSRRのパルスと反応度フィードバック効果の関係についての考察を行った。これらはいずれも原子炉動特性に関わる実験である。すなわち、制御棒較正実験ではペリオド法を通じてフィードバック効果のない場合の原子炉の動特性を、Xe反応度測定実験では燃焼による原子炉の動特性を、またNSRRによるパルス実験では即発的なフィードバック効果による原子炉の動特性を対象とした実験になっている。このうち後者の2つの実験はこれまで行われてきた臨界集合体を用いた学生実験では扱うことのできなかったテーマである。

実験計画及び実験テキストは東工大小原が原案を作成し、原研JRR-4中島、渡辺、NSRR石島、総合研修センター堀木がコメントし修正する形で作成された。実験内容を決めるに当たっては、それぞれの研究炉の特徴が生かされること、また純粹な中性子工学にとどまらず原子炉システム全体への理解と関心が深まるような内容になるように心がけたつもりである。

平成7年4月

東京工業大学	原子炉工学研究所	小原 徹
日本原子力研究所	原子力総合研修センター	堀木欧一郎
	J R R - 4 管理課	中島照夫
		渡辺終吉
	反応度安全研究室	石島清見
		片西昌司

2. JRR-4 制御棒校正実験

中心テーマ

フィードバック効果がない場合の原子炉動特性・制御棒価値

2.1 実験の目的

原子炉は通常、制御棒の引抜き、挿入によって反応度を与えることができ、それにより運転制御を行うことが出来るようになっている。この制御棒の引抜量（ストローク）と反応度の大きさの関係を知り、制御棒の校正を行っておくことは原子炉の運転制御上きわめて重要なことである。本実験では、JRR-4 の制御棒価値をペリオド法及び補償法を用いて測定を行うことで、フィードバック効果がない場合の原子炉動特性及び制御棒価値について理解を深める。ペリオド法は制御棒校正をはじめ、あらゆる反応度測定の基準となる測定法である。また、ある制御棒の価値をペリオド法で測定することで、別の制御棒の価値の測定が補償法によって行われる。

2.2 実験内容

- ・ 1組の粗調整棒に対しペリオド法と補償法を用いて価値を測定し制御棒校正曲線を作成する。
- ・ 微調整棒の価値をペリオド法で測定し、制御棒校正曲線を作成する。

2.3 理論

2.3.1 ステップ状反応度添加の場合の原子炉動特性⁽¹⁾

はじめ原子炉が出力 P_0 で臨界状態であったとする。この原子炉に時刻 $t=0$ でステップ状に反応度 ρ_0 が添加された場合を考える。

1点炉動特性方程式は、

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\{(1 - \beta_{\text{eff}})k - 1\}}{l} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (2 \cdot 1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_{i \text{ eff}} k}{l} n + \lambda_i C_i \quad (2 \cdot 2)$$

と表される。ここで、

n : 炉心全体の中性子数

k : 実効倍率

$\beta_{i\text{eff}}$: i 群の実効的な遅発中性子生成率

$$\beta_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^6 \beta_{i\text{eff}}$$

l : 即発中性子平均寿命

C_i : 第 i 群の遅発中性子先行核数

λ_i : 第 i 群の遅発中性子先行核の崩壊定数

である。炉心の出力は中性子数 n に比例すると考えられるので n を原子炉出力と考えることが出来る。但しこの場合 C_i も出力の単位に換算して値を用いることになる。ここで、反応度 ρ と中性子世代時間 Λ を以下のように定義する。

$$\rho = \frac{k-1}{k} \quad (2 \cdot 3)$$

$$\Lambda = \frac{l}{k} \quad (2 \cdot 4)$$

この定義を用いて、式(2・1),(2・2)を書き換えると以下のようになる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (2 \cdot 5)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_{i\text{eff}}}{\Lambda} n - \lambda_i C_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (2 \cdot 6)$$

反応度が投入される前 ($t < 0$) は出力が一定 (このときの中性子数を n_0 とする) だから、式(2・5)において $dn/dt=0$ とすると、初期状態の遅発中性子先行核濃度

$$C_i(0) = \frac{\beta_{i\text{eff}}}{\lambda_i \Lambda} n_0 \quad (2 \cdot 7)$$

が得られる。

いま時刻 $t = 0$ にステップ状に反応度 ρ_0 が投入された場合の解を以下のように仮定する。

$$n(t) = n_\omega e^{\omega t} \quad (2-8)$$

$$C_i(t) = C_{i\omega} e^{\omega t} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (2-9)$$

これらを、式(2-5), (2-6) に代入すると、

$$\omega n_\omega = \frac{\rho_0 - \beta_{eff}}{\Lambda} n_\omega + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_{i\omega} \quad (2-10)$$

$$\omega C_{i\omega} = \frac{\beta_{i\omega}}{\Lambda} n_\omega - \lambda_i C_{i\omega} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (2-11)$$

が得られる。(2-11)式を $C_{i\omega}$ について解くと、

$$C_{i\omega} = \frac{\beta_{i\omega} n_\omega}{\Lambda (\omega + \lambda_i)} \quad (2-12)$$

が得られ、(2-10)に代入すると ρ_0 と ω について次の式が得られる。

$$\rho_0 = \omega \Lambda + \sum_{i=1}^6 \frac{\omega \beta_{i\omega}}{\omega + \lambda_i} \quad (2-13)$$

この式を ω について解くと 7つの実根 ω_1 ($i=1, 2, \dots, 7$) がえられる。すなわち、1点炉動特性方程式の解は次のように表される。

$$n(t) = \sum_{i=1}^7 n_i e^{\omega_i t} \quad (2-14)$$

$$C_i = \frac{\beta_{i\omega}}{\Lambda} \sum_{i=1}^7 \frac{n_i}{(\omega_i + \lambda_i)} e^{\omega_i t} \quad (2-15)$$

ここで簡単のため n_{ω_1} は n_1 とあらわした。 ω_1 が求められていれば(2-14)式と(2-15), (2-7)式を連立させて解くと n_1 が得られ、ステップ反応度投入後の原子炉の挙動が求められる。

さて、(2-13)式を解いて得られる ω_1 は ρ_0 が正のとき、1つが正で残りがすべて負、 ρ_0 が負の時はすべてが負である。このため反応度投入後十分に時間が経過したのちの原子炉の挙動はもっとも大きい ω_1 (ω_1 とする) で支配され、原子炉出力は

$$n(t) \sim n_1 e^{\omega_1 t} \quad (2-16)$$

に漸近する。ここで、原子炉ペリオド τ を

$$\tau = \frac{1}{\omega_1} \quad (2-17)$$

で定義する。ペリオド τ は時間のディメンジョンをもち、投入反応度が正の時は出力が e 倍になる時間を表している。

2.3.2 ペリオド法による制御棒価値の測定

式(2-13)の関係を用いれば、臨界状態の原子炉に（未知の）反応度 ρ_0 を与えたとき、そのペリオド τ を測定することで、（ $\Lambda, \beta_{\text{eff}}, \lambda_i$ が既知ならば）与えた反応度 ρ_0 を知ることが出来る。また、 ρ_0 を β_{eff} で割ることでドル単位の反応度を求めることが出来る。通常実験では出力が 2 倍になる時間（ダブリングタイム） T_2 を測定する。ペリオド τ とダブルリングタイム T_2 には、

$$\tau = \frac{T_2}{\ln 2} \quad (2-18)$$

の関係が成り立つ。

ところで、即発中性子の寿命 τ は、どんな原子炉でも 10^{-3}sec 以下であり、さらに軽水減速原子炉では 10^{-4} sec 以下である。このため、制御棒校正実験のような小さい反応度投入による長いペリオド（数十秒～数百秒）の測定の場合は式(2-13)の第 1 項を省略して、

$$\rho(t) = \sum_{i=1}^6 \frac{\omega \beta_{i\text{eff}}}{\omega + \lambda_i} \quad (2-19)$$

として計算してかまわない。

式(2-19)の $\beta_{i\text{eff}}$ は実効的な遅発中性子の生成率を表しているが、これは同じ ^{235}U を燃料としている原子炉でも、それぞれ異なった値を持っている。これは主に遅発中性子が即発中性子より低いエネルギーで放出されることに起因している。

2.4 実験手順

・実験手順、注意事項の説明、作業分担の確認

測定する制御棒を決める。（例C4:ペリオド法、C1:補償法）

ペリオド法測定での1回の移動量 ΔH をきめる。

・起動前点検

班に分かれて制御室、炉室の点検作業を見学する。

・粗調整棒価値のペリオド法、補償法による測定

原子炉を起動し炉を臨界とする。

微調整棒を300mmまで引き抜き、ペリオド法測定の制御棒(C4)を下限、補償法測定の制御棒(C1)を上限、他の制御棒(C2,C3)を等高として出力10Wで臨界になるようにする。

C4を ΔH だけ引き抜き、引き抜き完了時から出力100Wになる時間（待ち時間）を記録する。次に、出力が100Wから200Wになる時間と、300Wから600Wになる時間をストップウォッチで測定する。二つの時間の平均をダーリングタイム T_2 とする。測定後C1を挿入し10W臨界を保つようする。C1の位置が十分安定してから（約5分）その位置を記録する。以上の手順を繰り返しC4,C1の制御棒校正曲線を作成する。

どちらか一方の制御棒の位置が限界になった時は、C2,C3の位置を変え、もう一方の制御棒の残りの部分をペリオド法で測定する。

・微調整棒(C5)のペリオド法による測定実験

C5位置を下限として、C1-C4が等高の状態で臨界とする。そしてC5の制御棒価値をペリオド法で測定する。手順は粗調整棒の時とおなじ。補償にはC1を用いる。

・実験の終了、データ整理、停止後点検

停止後点検も班毎に立ち会う。

2.5 実験上の注意点

・臨界時の出力レベル

JRR-4 では炉内に中性子源をおいたまま実験を行う。臨界時の出力レベルはこれによる効果が無視できる程度の大きさとするのが望ましい。

・一回の測定で与える反応度量

一回の測定で与える反応度の大きさが大きすぎると出力の上昇が早くなり時間計測に誤差が生じる上操作ミスの恐れも生じる。また、小さすぎるとはじめの臨界からのずれの誤差の影響が大きくなる上測定に時間がかかるので、ペリオドが20~30秒となるようにして測定する。

・測定する出力範囲

ダブリングタイムを測定する出力の範囲は待ち時間と出力上昇に伴う温度上昇を考慮する必要がある。待ち時間を長くすると測定の精度は上がるが、出力が上昇して温度効果による影響が無視できなくなる恐れがある。

・制御棒の相互干渉効果

制御棒のパターンが変わると炉心の中性子束分布が変わるために制御棒価値に違いが生じる。得られた制御棒校正曲線を用いる場合はこの点に注意する必要がある。

2.6 レポート

2.6.1 事前レポート

1群摂動理論によれば、高さHの裸の円柱型原子炉上端からx の距離のところまで制御棒下端が挿入されたときの反応度は、

$$\rho(x) = \rho(H) \left\{ \frac{x}{H} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi x}{H}\right) \right\} \quad (2-20)$$

で与えられる。(2) このグラフを書き、制御棒の引き抜き距離と反応度の関係をあらかじめ考察せよ。

2.6.1 実験レポート

・得られた実験データに基づいて制御棒校正曲線を作成し、その曲線について考察せよ。JRR-4 の核特性データは表2-1 に示してある。

・制御棒校正是正のペリオドを求めることが通常行われ、負のペリオドを測定することはほとんどない。この理由を考察せよ。

参考文献

- (1) E.E. ルイス著、成田、藤田、小澤訳「原子炉の安全工学（上巻）」pp.118-123、現代工学社（1984）
- (2) ラマーシュ著、武田、仁科訳「原子炉の初等理論（下巻）」第12.3節～12.6節、第15.6節、吉岡書院（1976）

表2-1 JRR-4 の核特性データ

$\tau = 5.2 \times 10^{-5} \text{ sec}$	$\beta_{\text{eff}} = 0.0075$
$\beta_{1\text{ eff}} = 0.2490 \times 10^{-3}$	$\lambda_1 = 0.0124 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{2\text{ eff}} = 1.6520 \times 10^{-3}$	$\lambda_2 = 0.0305 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{3\text{ eff}} = 1.4750 \times 10^{-3}$	$\lambda_3 = 0.111 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{4\text{ eff}} = 2.9736 \times 10^{-3}$	$\lambda_4 = 0.301 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{5\text{ eff}} = 0.8685 \times 10^{-3}$	$\lambda_5 = 1.14 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{6\text{ eff}} = 0.3151 \times 10^{-3}$	$\lambda_6 = 3.01 \text{ sec}^{-1}$

3. JRR-4 キセノン効果実験

中心テーマ

燃焼に伴う原子炉の動特性

3.1 実験の目的

出力運転を行っている原子炉炉心の燃料は、核分裂、中性子捕獲、放射性崩壊等によりその組成が常に変化を続けている。燃料の組成の変化は当然臨界性の変化、すなわち反応度をもたらす。ある種の核分裂生成物は非常に大きな吸収断面積を持つために燃料内のごく少量の蓄積が大きな反応度をもたらす。特にキセノンは非常に大きい熱吸収断面積をもち動力炉の運転制御に大きな影響を与える。ここでは、JRR-4 の定常運転中および運転後のキセノンによる反応度効果を測定し、原子炉の出力運転に伴うキセノンの作用についての理解を深める。

3.2 実験内容

- クリーンな状態の炉心を起動しほぼステップ状に出力を3.5MWとし、定常運転としたときのキセノンによる反応度効果を、微調整棒の位置変化から測定する。
- 3時間の定常運転の後出力を1kWとして臨界を保ち、その後のキセノンによる反応度効果を粗調整棒の位置の変化から測定する。

3.3 理論

3.3.1 キセノン毒作用(1)

キセノンは非常に大きい熱中性子断面積を持つ核分裂生成物で、その蓄積量は熱中性子動力炉の運転に大きな影響を与える。その崩壊系列には ^{135}Sb , ^{135}Te , ^{135m}Xe なども存在するが、単寿命核の崩壊が瞬間的であると近似して崩壊系列を簡略化し ^{135}I の中性子吸收を無視すると ^{135}I と ^{135}Xe の崩壊図は図3-1のようにあらわすことができる。このとき ^{135}I と ^{135}Xe の原子数密度に対して次のような連立方程式が成り立つ。

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \sum_f \phi - \lambda_I I \quad (3-1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \gamma_I \sum_f \phi + \lambda_I I - \lambda_X X - \sigma_a^X \phi X \quad (3-2)$$

ここで、

- I : ^{135}I の原子数密度
- X : ^{135}Xe の原子数密度
- λ_I : ^{135}I の β 崩壊定数
- λ_X : ^{135}Xe の β 崩壊定数
- γ_I : ^{135}I の核分裂収率
- γ_X : ^{135}Xe の核分裂収率
- Σ_f : 1群マクロ核分裂断面積
- ϕ : 1群中性子束
- σ_a^X : ^{135}Xe 1群ミクロ吸収断面積

である。

この方程式を解くと、 ^{135}I と ^{135}Xe の原子数密度の時間変化 $I(t)$, $X(t)$ は次のように得られる。

$$I(t) = \left\{ I(0) + \gamma_I \int_0^t dt' \Sigma_f \phi \exp(\lambda_I t') \right\} \exp(-\lambda_I t) \quad (3-3)$$

$$X(t) = \left[X(0) + \int_0^t dt' (\lambda_I I + \gamma_I \Sigma_f \phi) \exp \left\{ \int_0^t dt'' (\lambda_{t''} + \sigma_a^X \phi) \right\} \right] \exp \left\{ - \int_0^t dt'' (\lambda_{t''} + \sigma_a^X \phi) \right\} \quad (3-4)$$

この式をもとに原子炉起動後のキセノン濃度の変化と原子炉停止後のキセノン濃度変化を求めてみる。

原子炉が始め停止状態で核分裂生成物の濃度がゼロである（クリーン炉心）とする。時刻 $t=0$ で中性子束がステップ状に ϕ_0 になり定常運転を続けたとすると、式 (3-3), (3-4) で ^{135}I と ^{135}Xe の初期濃度をゼロとおいて解くことで $t=0$ 以降の濃度はそれぞれ、

$$I(t) = \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_I} \left\{ 1 - \exp(-\lambda_I t) \right\} \quad (3-5)$$

$$X(t) = \frac{(\gamma_I + \gamma_X)\Sigma_f \phi_0}{\lambda_X + \sigma_a^X \phi_0} [1 - \exp \{-(\lambda_X + \sigma_a^X \phi_0)t\}] \\ + \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_X - \lambda_I + \sigma_a^X \phi_0} [\exp \{-(\lambda_X + \sigma_a^X \phi_0)t\} - \exp(-\lambda_I t)] \quad (3-6)$$

と得ることが出来る。

また、原子炉が出力運転中急に停止し、時刻 $t=0$ でステップ状に中性子束がゼロとなった場合を考える。時刻 $t=0$ での ^{135}I と ^{135}Xe の濃度をそれぞれ I_0, X_0 とするとき、式(3-3), (3-4) で中性子束をゼロとおいて解くことで、 $t=0$ 以降の ^{135}I と ^{135}Xe の濃度は、

$$I(t) = I_0 \exp(-\lambda_I t) \quad (3-7)$$

$$X(t) = X_0 \exp(-\lambda_X t) + \frac{\lambda_I I_0}{\lambda_I - \lambda_X} \{ \exp(-\lambda_X t) - \exp(-\lambda_I t) \} \quad (3-8)$$

と得ることが出来る。

3.2.2 キセノンの蓄積による反応度

原子炉の実効増倍率 k を 6 因子公式で表し、濃度 X のキセノンによって生じる反応度 $\rho(X)$ を求めることにする。6 因子公式は、

$$k = \eta p f \epsilon P_{FNL} P_{TNL} \quad (3-9)$$

但し、

- k : 実効増倍率
- η : エータ値
- p : 共鳴を逃れる確率
- f : 热中性子利用率
- ϵ : 高速核分裂係数
- P_{FNL} : 高速中性子がもれない確率

P_{TNL} : 热中性子がもれない確率

と表される。キセノンの毒作用は热中性子利用率 f に影響を与える。厳密には、キセノン毒作用は热中性子の漏れない確率 P_{TNL} にも影響を与えるが、その影響は通常小さいのでここでは無視することにする。キセノンの蓄積がない場合の热中性子利用率 f は、

$$f = \frac{\sum_a^F}{\sum_a^F + \sum_a^M} \quad (3-10)$$

と表され、またキセノン濃度が X であるときの热中性子利用率 f' は、

$$f' = \frac{\sum_a^F}{\sum_a^F + \sum_a^M + \sigma_a^X X} \quad (3-11)$$

と表される。ここで、

\sum_a^F : 燃料の1群マクロ吸收断面積

\sum_a^M : 減速材及び構造材の1群マクロ吸收断面積

である。よって、濃度 X のキセノンによる反応度 $\rho(X)$ は、

$$\rho(X) = \frac{f' - f}{f'} = - \frac{\sigma_a^X}{\sum_a^F + \sum_a^M} = - f \frac{\sigma_a^X X}{\sum_a^F} \quad (3-12)$$

と表される。

3.4 実験手順

- 実験手順、注意事項の説明、作業分担の確認

- 起動前点検

- 定常出力運転時のキセノン効果測定

原子炉を起動し低出力で臨界を保つ。制御棒位置は、微調整棒(C5)は300mmとして、粗調整棒は(C4)を300mm、(C1)(C2)(C3)を等高としてその位置を記録する。冷却水の入口温度と出口温度を記録する。

次に、炉出力を上昇させ3.5MWとする。出力上昇開始時と3.5MW到達時の時刻を記録する。定常

出力の際の制御棒の配置を記録する。定常出力後の粗調整棒の高さははじめの臨界時と同じとし、(C5)の位置のみ変える。また、冷却水の入口温度と出口温度を記録する。

定常出力後(C5)を自動調節として運転を続け、30分ごとに粗調整棒(C4)の位置を調整することで微調整棒(C5)を300mmの位置に戻す。このときの(C4)の位置を記録する。また冷却水入口と出口温度も同時に記録する。以上の運転を3時間継続する。

得られた粗調整棒(C4)の位置変化と先の制御棒較正実験で得られた較正曲線から反応度変化を求める。冷却水の入口温度と出口温度の平均を炉心温度として炉心温度変化による反応度を求め、これを全反応度変化から引き、さらに燃焼による反応度変化を補償することでXeによる反応度変化を求める。

・定常出力運転後のキセノン効果測定

3時間の定常出力運転後原子炉の出力をできるだけ早く下げ1kWとする。

粗調整棒(C4)以外の制御棒の位置を先の定常出力運転の際の配置と同じとし、(C4)を調整することで原子炉を臨界とする。

出力を下げた直後の粗調整棒(C4)の位置と冷却水の入口、出口温度を記録する。以後30分毎に1kW臨界での(C4)の位置と冷却水の入口、出口温度を記録する。これを3時間続ける。

先の制御棒較正実験で得られた(C4)の較正曲線と制御棒の位置の変化から反応度変化量を求め、冷却水入口温度と出口温度の平均を炉心温度としてもとめた炉心温度変化による反応度を差し引くことでXeの反応度変化を求める。

・実験の終了、データ整理、停止後点検

3.5 レポート

3.5.1 事前レポート

表3-1に示したJRR-4のデータを用いて、クリーン炉心の状態から、ステップ状に出力を上昇させ、1時間定常運転、3時間定常運転、6時間定常運転をしたときの運転開始から運転終了後30時間までの ^{135}Xe による反応度をそれぞれ求めよ。定常運転の時の出力は1MW及び3.5MWの二つの場合に対して求めよ。また、JRR-4を出力3.5MWで長時間運転した後急激に出力をゼロとした場合、最大キセノン濃度のときに原子炉を起動するために必要な余剰反応度を求めよ。

3.5.2 実験レポート

原子炉運転中及び停止後の制御棒位置及び炉心温度からキセノンによる反応度の変化をもとめ考察せよ。JRR-4の温度係数および燃焼による反応度補正は表3-1に示した値を用いよ。また、事前レポート

の結果と比較し考察せよ。

参考文献

- (1) JJ. ドウデルスタッフ、LJ. ハミルトン著、成田、藤田訳「原子炉の理論と解析（下）」
PP.505-578 (1981)

表3-1 JRR-4 実験での核定数データと温度係数

$$\gamma_I = 0.61 \times 10^{-1}$$

$$\gamma_X = 0.2 \times 10^{-2}$$

$$\lambda_I = 0.2873 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$$

$$\lambda_X = 0.2093 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$$

$$\Sigma_a^F = 0.746 \text{ cm}^{-1}$$

$$\Sigma_f = 0.626 \text{ cm}^{-1}$$

$$\sigma_a^X = 0.27 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$$

$$f = 0.85$$

$$1W\text{あたりの平均熱中性子束 } \phi$$

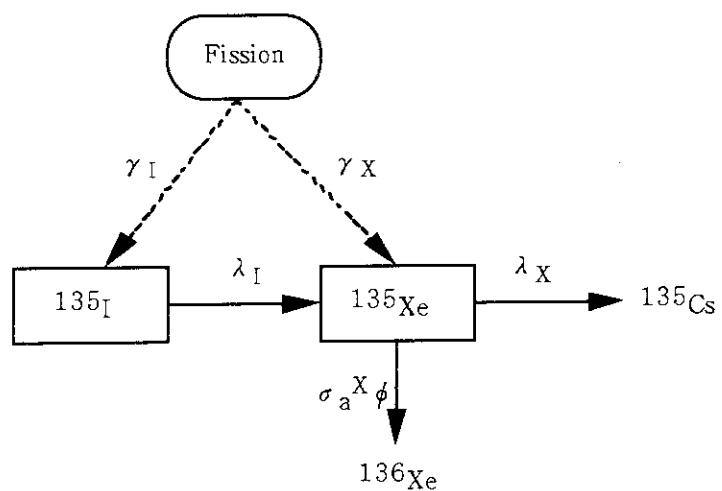
$$\phi = 0.993 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \text{ sec W}$$

$$\text{炉心温度係数}$$

$$d\rho/dT = -0.0125 \% \Delta k/k/^\circ C$$

$$\text{燃焼による反応度補正}$$

$$0.0265 \% \Delta k/k / \text{MWD}$$

図3-1 簡略化した ^{135}I , ^{135}Xe の崩壊図

4. NSRRによるパルス実験

中心テーマ

フィードバック効果がある場合の原子炉の動特性と原子炉の固有安全

4.1 実験の目的

原子炉の安全性を考える上で原子炉固有の反応度フィードバック効果は重要な役割を果たす。原子炉に反応度が投入され即発超臨界となった場合は、遅発超臨界の場合と異なり非常に急激な出力のバーストが発生するが、適切に設計された原子炉では原子炉固有のフィードバック効果により、このような場合においても原子炉の健全性を損なうことなく現象を収束させることができると可能である。本実験では国内で唯一即発超臨界実験が可能な原子炉NSRRによる実験を通じて、即発超臨界時の原子炉の挙動、温度フィードバックがある場合の原子炉の動特性及び温度フィードバック効果による原子炉の固有安全性についての理解を深める。

4.2 実験内容

- ・ステップ状に反応度が投入されたときのNSRRの出力変化を記録し、投入反応度の大きさとパルス波形の関係を調べる。
- ・即発超臨界時の投入反応度と最大出力、放出エネルギー、半値幅との関係を調べ、NSRRの即時温度係数を求める。
- ・得られた即時温度係数からNSRRで投入可能な反応度の上限を推定する。

4.3 理論

4.3.1 即時温度係数⁽¹⁾

非常に大きな反応度が原子炉に投入され出力が急激に上昇するような事象においては、急激な出力の変化にくらべて燃料から被覆材さらに冷却剤への熱の伝達現象は十分遅いものと考えられ、燃料要素は断熱的に扱うことが出来ると考えられる。このため、反応度フィードバック ρ_{fb} は燃料要素の温度の上昇によってのみ起こると考えられる。

この場合 ρ_{fb} は、

$$d\rho_{fb} = \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial T_{fe}} dT_{fe} \quad (4-1)$$

と表される。ここで、 T_{fe} は炉心内の燃料要素の平均温度を表している。燃料要素を断熱として扱うことができるため、炉心の燃料要素の全質量を M_{fe} 、燃料要素の比熱を C_{fe} 、原子炉出力を $P(t)$ とすると、

$$M_{fe} C_{fe} dT_{fe} = P(t) dt \quad (4\cdot2)$$

がなりたつ。よって、

$$d\rho_{fb} = \mu P(t) dt \quad (4\cdot3)$$

の関係が成り立つ。但し、

$$\mu = \frac{1}{M_{fe} C_{fe}} \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial T_{fe}} \quad (4\cdot4)$$

である。ここで μ は即時温度係数と呼ばれる量で、もし μ が温度に依存しないと、

$$\rho_{fb}(t) = \mu E(t) \quad (4\cdot5)$$

となる。ここで、

$$E(t) = \int_0^t P(t) dt \quad (4\cdot6)$$

は反応度投入後からの積分出力（放出エネルギー）をあらわしている。

4.3.2 即発超臨界時の出力バースト

即発超臨界によって出力バーストは非常に短い時間で起きると考えられるので、先の即時温度係数をもちいて出力バーストを評価することが可能である。ここでは、 $t=0$ でステップ状に反応度 ρ_0 が投入され即発超臨界状態になった場合を考える。

4.3.1 節での議論から、燃料が断熱的に扱えるとき $t > 0$ での反応度変化は、

$$\rho(t) = \rho_0 + \rho_{\text{fb}} = \rho_0 - |\mu| \int_0^t P(t') dt' \quad (4\cdot7)$$

で表される。ここで μ は負であると仮定している。これは線形エネルギーモデルと呼ばれる。いま、バーストが非常に急速に起こるとこの間の遅発中性子先行核の崩壊は事実上無視でき、(2・5)式において $\lambda_i = 0$ とおくことができる。よって、(2・5)式と(4・7)式から次の関係が得られる。

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{1}{\Lambda} \left\{ \rho_0 - \beta_{\text{eff}} - |\mu| \int_0^t P(t') dt' \right\} P(t) \quad (4\cdot8)$$

(4・8)式では、(2・5)式の炉心全体の中性子数 n を原子炉出力 P でおきかえて表している。この式を、時間について 2 回積分することにより以下の式が得られる。

$$E(t) = \frac{\Lambda}{|\mu|} \left(R + \frac{\rho_0 - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda^2} \right) \frac{1 - \exp(-R t)}{1 + A \exp(-R t)} \quad (4\cdot9)$$

ここで、

$$R \equiv \sqrt{\frac{(\rho_0 - \beta_{\text{eff}})^2}{\Lambda^2} + \frac{2|\mu| P(0)}{\Lambda}} \quad (4\cdot10)$$

$$A \equiv \frac{\Lambda R + \rho_0 - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda R - \rho_0 + \beta_{\text{eff}}} \quad (4\cdot11)$$

(4・9)式を微分すると出力の時間変化が以下のように求められる。

$$P(t) = \frac{2\Lambda R^2}{|\mu|} \frac{A \exp(-R t)}{\{1 + A \exp(-R t)\}^2} \quad (4\cdot12)$$

出力バーストを表す重要なパラメータとして、無限時間までの積分出力（全放出エネルギー）、最大出力、バーストの半値幅を考える。

無限時間までの全放出エネルギー $E(\infty)$ は、

$$E(\infty) = \frac{\Lambda}{|\mu|} \left(R + \frac{\rho_0 - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} \right) \quad (4 \cdot 13)$$

と求められる。また、最大出力 P_{\max} は(4-12)式の時間微分をゼロとおいて、

$$P_{\max} = \frac{\Lambda R^2}{2 |\mu|} \quad (4 \cdot 14)$$

と求められる。ここで初期出力 $P(0)$ が小さく

$$(\rho_0 - \beta_{\text{eff}}) > 2\Lambda |\mu| P(0) \quad (4 \cdot 15)$$

が成り立つ場合は、

$$R \approx \frac{\rho_0 - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} \quad (4 \cdot 16)$$

$$\Lambda \approx \frac{(\rho_0 - \beta_{\text{eff}})^2}{\Lambda |\mu| P(0)} \quad (4 \cdot 17)$$

とおくことが出来るので、

$$E(\infty) \approx \frac{2(\rho_0 - \beta_{\text{eff}})}{|\mu|} \quad (4 \cdot 18)$$

$$P_{\max} \approx \frac{(\rho_0 - \beta_{\text{eff}})^2}{2\Lambda |\mu|} \quad (4 \cdot 19)$$

と表すことができる。また、バーストの半値幅は

$$\Gamma \approx \frac{3.52 \Lambda}{\rho_0 - \beta_{\text{eff}}} \quad (4 \cdot 20)$$

で与えられる。

式(4・18),(4・19),(4・20)から、原子炉が即発超臨界となった場合のバーストの積分出力、最大出力、バーストの半値幅と投入反応度の間には簡単な関係が成り立つことが予想されることがわかる。

4.4 実験手順

- ・実験内容と作業分担の確認、起動前点検
投入反応度を確認する。投入反応度は0.8\$～3.0\$の予定。
記録すべきデータを確認する。（炉出力、燃料温度、プール水温度、温度測定の位置等）
- ・原子炉を起動し、トランジエント棒を所定の反応度となるように投入し調整棒の位置を調整することで低出力で原子炉を臨界とする。このときの、炉出力、燃料温度を記録する。
- ・トランジエント棒を急速に引き抜くことによって反応度を投入する。トランジエント棒引き抜き開始後の出力、燃料温度、プール水温度、トランジエント棒の位置を記録する。（記録はデータレコーダーに自動的に行われる所以このデータを利用する。）
- ・以上の測定を反応度を変え繰り返す。
- ・実験の終了、停止後点検、実験データの整理

4.5 レポート

4.5.1 事前レポート

表4-1に示されたNSRRのデータを用いて、ペリオドと投入反応度の関係のグラフを作成せよ。グラフは0.5\$から5\$の範囲で作成せよ。

4.5.2 実験レポート

- ・それぞれのケースについて出力の時間変化と燃料温度の変化をグラフに表せ。

- ・出力変化のデータからピーク半値幅とペリオドをもとめ投入反応度を求め投入反応度の確認をせよ。ペリオドを出力変化のどの部分で求めたかについて理由を示せ。
- ・反応度の違いによるパルス波形の違いについて1点動特性モデルや事前レポートの結果をもとに考察せよ。
- ・ピーク出力、積分出力、ピーク半値幅と投入反応度のグラフを作成せよ。これらの値と投入反応度の関係について考察せよ。
- ・得られた実験データから、NSRRの即時温度係数をもとめよ。表4-2のデータを使用せよ。
- ・NSRRのトリガ燃料の温度上限は1000°Cである。実験で得られた燃料温度が炉心内での最高の燃料温度を示しているとしたとき、NSRRは最大何ドルの反応度の投入に耐えることが出来ると考えられるか推定せよ。

参考文献

- (1) E.E. ルイス著、成田、藤田、小澤訳「原子炉の安全工学（上巻）」pp.160-163、現代工学社 (1984)
- (2) 同上、pp.192-197

表4-1 NSRR の核特性データ

$\Delta = 30 \times 10^{-6} \text{ sec}$	$\beta = 0.0073$
$\beta_{1\text{ eff}} = 0.2409 \times 10^{-3}$	$\lambda_1 = 0.01244 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{2\text{ eff}} = 1.5987 \times 10^{-3}$	$\lambda_2 = 0.03051 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{3\text{ eff}} = 1.4308 \times 10^{-3}$	$\lambda_3 = 0.11114 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{4\text{ eff}} = 2.8835 \times 10^{-3}$	$\lambda_4 = 0.3013 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{5\text{ eff}} = 0.8395 \times 10^{-3}$	$\lambda_5 = 1.1362 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{6\text{ eff}} = 0.3066 \times 10^{-3}$	$\lambda_6 = 3.0135 \text{ sec}^{-1}$

表4-2 NSRRの燃料要素の全質量M_{fe} 及び比熱C_{fe}

M _{fe}	=	$3.27 \times 10^5 \text{ g}$
C _{fe}	=	$0.07542 + 0.1617 \times 10^{-3} \times T \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$

(T : 燃料温度(°C))

- ・出力変化のデータからピーク半値幅とペリオドをもとめ投入反応度を求め投入反応度の確認をせよ。ペリオドを出力変化のどの部分で求めたかについて理由を示せ。
- ・反応度の違いによるパルス波形の違いについて1点動特性モデルや事前レポートの結果をもとに考察せよ。
- ・ピーク出力、積分出力、ピーク半値幅と投入反応度のグラフを作成せよ。これらの値と投入反応度の関係について考察せよ。
- ・得られた実験データから、NSRRの即時温度係数をもとめよ。表4-2のデータを使用せよ。
- ・NSRRのトリガ燃料の温度上限は1000°Cである。実験で得られた燃料温度が炉心内の最高の燃料温度を示しているとしたとき、NSRRは最大何ドルの反応度の投入に耐えることが出来ると考えられるか推定せよ。

参考文献

- (1) E.E. ルイス著、成田、藤田、小澤訳「原子炉の安全工学（上巻）」pp.160-163、現代工学社
(1984)
- (2) 同上、pp.192-197

表4-1 NSRRの核特性データ

$\Lambda = 30 \times 10^{-6} \text{ sec}$	$\beta = 0.0073$
$\beta_{1\text{ eff}} = 0.2409 \times 10^{-3}$	$\lambda_1 = 0.01244 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{2\text{ eff}} = 1.5987 \times 10^{-3}$	$\lambda_2 = 0.03051 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{3\text{ eff}} = 1.4308 \times 10^{-3}$	$\lambda_3 = 0.11114 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{4\text{ eff}} = 2.8835 \times 10^{-3}$	$\lambda_4 = 0.3013 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{5\text{ eff}} = 0.8395 \times 10^{-3}$	$\lambda_5 = 1.1362 \text{ sec}^{-1}$
$\beta_{6\text{ eff}} = 0.3066 \times 10^{-3}$	$\lambda_6 = 3.0135 \text{ sec}^{-1}$

表4-2 NSRRの燃料要素の全質量M_{fe} 及び比熱C_{fe}

M _{fe}	=	$3.27 \times 10^5 \text{ g}$
C _{fe}	=	$0.07542 + 0.1617 \times 10^{-3} \times T \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ (T: 燃料温度(°C))

付 錄

付録1 学生への注意事項

1.1 必要な手続き

- (1) 実験参加学生は学生実習生として受け入れられるので以下の書類を原研に提出する。
 - ① 学生実習生身上調書
 - ② 研究計画書
 - ③ 健康診断個人票
- (2) 留学生は事前に大使館を通じて科学技術庁に申請をする必要がある。

1.2 持参すべきもの

- (1) 事前レポート
- (2) 実験テキスト
- (3) 筆記用具
- (4) レポート用紙（A4版）
- (5) 関数電卓またはプログラム電卓
- (6) 作業着または作業しやすい服装
- (7) 印鑑
- (8) 健康保険証のコピー
- (9) 現金
- (10) 着替え、洗面用具、雨具等

1.3 レポート

レポートに関する注意事項は各実験項目で示してあるが、共通の事項を以下に示す。

- ① レポート用紙は普通横罫のA4版を用いること。
- ② レポートは各個人毎に作成する。但し、実験方法の説明、測定データ等、同じになる項目については分担して書き、そのコピーを用いてもよい。
- ③ レポートは各実験テーマ毎に作成すること。
- ④ レポートの表紙には以下のことを書くこと。
報告者名、所属研究室、学籍番号、実験テーマ、共同実験者名、実験日、実験場所、
その他必要な条件
- ⑤ 内容は次のようにまとめること。

1. 目的
 2. 理論（解析に用いた数式等の説明をいれること）
 3. 実験方法（実験装置、実験条件、実験手順等）
 4. 実験結果（実験データ、得られた物理量、グラフ等）
 5. 考察
 6. 参考文献、定数等の出典（テキスト以外の場合）
 7. 感想
- ⑥ 提出の締め切りは実験の翌週の金曜日午後5時とする。

参考資料（1994年度実験結果）

1994年度（平成6年度）の東京工業大学理工学研究科原子核工学専攻の学生実験（原研グループ）の実験は平成6年8月29日（月）から9月2日（金）にかけて行われた。このうちJRR-4での制御棒校正実験及びキセノン反応度実験はそれぞれ8月30日及び31日に行われ、NSRRでのパルス実験は9月1日に行われた。実験で得られたデータを参考資料として示す。

A1. JRR-4制御棒校正実験

実験時のJRR-4の炉心配置図を図A1-1に示す。実験では制御棒C-4をペリオド法でC-1を補償法で測定した。また、微調整棒C-5をペリオド法で測定した。その結果を表A1-1、表A1-2及び図A1-2～図A1-4に示す。

A2. JRR-4キセノン効果実験

事前レポートの課題として評価を行った定常運転時のキセノン反応度を図A2-1、図A2-2に示す。また実験によって得られたデータ及び反応度を表A2-1及び図A2-3にそれぞれ示す。

A3. NSRRによるパルス実験

実験の際の炉心燃料、検出器の配置図を図A3-1に示す。解析に使用したデータの核計装チャンネルはD2、また燃料温度データはFT-2によるものを用いた。実験は投入反応度2\$、3\$、4\$で行い、参考実験として投入反応度1.2\$での実験も行った。実験によって得られた投入反応度2\$の場合の出力変化、積分出力変化、燃料温度変化を図A3-2～図A3-5に示す。また、各投入反応度でのパルスの半値幅と半値幅より求めた投入反応度及びパルスのペリオドとペリオドから求めた投入反応度を表A3-1に示す。また、各投入反応度でのピーク出力と積分出力を表A3-2に、投入即発反応度 ($\rho_0 - \beta_{eff}$) とピーク出力及び積分出力の関係を図A3-6に示す。さらに、投入反応度と積分出力から求めた即時温度係数 μ を表A3-3に示す。

表A1-1 C-4制御棒校正実験結果

C-4の位置 (mm)	Waiting time (sec)	100→200 (sec)	300→600 (sec)	Average (sec)	C-1の位置 (mm)	$\Delta \rho (\times 10^{-3})$	ΔH (mm)	$\rho (\times 10^{-3})$
0					651			0
75	9.10	16.90 17.00	18.00 17.90	17.45	542	1.893	75	1.893
112	20.20	18.10 18.00	18.80 18.80	18.43	499	1.834	37	3.727
139	23.60	18.00 17.90	18.90 18.80	18.40	467	1.836	27	5.563
162	23.40	17.80 17.70	18.30 18.80	17.93	440	1.864	23	7.427
181	26.70	18.50 18.20	19.40 19.40	18.88	418	1.809	19	9.236
199	24.90	17.50 17.60	18.20 18.00	17.83	397	1.87	18	11.106
216	26.90	18.60 19.40	19.00 19.30	18.97	378	1.804	17	12.91
232	24.70	16.90 16.80	17.90 17.70	17.33	360	1.9	16	14.81
247	25.30	18.00 18.60	19.00 19.00	18.65	343	1.822	15	16.632
262	28.30	18.50 18.30	19.20 19.30	18.83	327	1.812	15	18.444
277	27.80	18.30 18.20	19.40 19.60	18.88	312	1.809	15	20.253
292	29.00	18.80 18.90	19.70 19.60	19.25	297	1.789	15	22.042
307	30.10	19.00 19.80	19.90 20.00	19.52	283	1.774	15	23.816
322	29.20	19.00 19.00	19.90 19.90	19.45	269	1.778	15	25.594
338	27.30	18.30 18.40	19.30 19.10	18.78	254	1.815	16	27.409
356	21.00	15.60 15.70	16.60 16.70	16.15	238	1.977	18	29.386
375	20.20	16.00 15.80	16.60 16.60	16.30	221	1.967	19	31.353
395	23.20	17.20 17.50	18.10 18.00	17.70	204	1.877	20	33.23
417	20.00	16.40 16.50	17.30 17.20	16.85	186	1.931	22	35.161
442	18.70	16.30 16.50	16.90 17.50	16.80	166	1.934	25	37.095
471	15.30	15.70 15.30	16.90 16.10	16.43	142	1.958	29	39.053
507	13.50	16.80 13.60	17.40 16.40	16.95	115	1.924	36	40.977
560	3.60	15.50 15.20	16.70 16.90	17.15	74	1.911	53	42.888
650	12.00	33.10 33.20	34.70 34.70	33.93	30	1.253	90	44.141

C-1のペリオド法

C-1の位置 (mm)	Waiting time (sec)	100→200 (sec)	300→600 (sec)	Average (sec)		$\Delta \rho$	ΔH (mm)	ρ
74	14.00	19.90 20.00 20.00	21.10 21.30 21.00	20.55		1.721	74	

その他の制御棒位置 C-2 428mm
 C-3 428mm
 C-4 650mm

表A1-2 C-5制御棒校正実験結果

C-4の位置 (mm)	Waiting time (sec)	100→200 (sec)	300→600 (sec)	Average (sec)	C-1の位置 (mm)	$\Delta \rho (\times 10^{-4})$	ΔH (mm)	$\rho (\times 10^{-3})$
101	78.8	89.4	107.2	98.15	349	5.633	101	0.5633
		89.4	107.2					
		89.4	106.3					
180	32	45.6	55	50.28	340	9.502	79	1.5135
		45.7	54.8					
		49.9	58.8	54.28				
242	36.4	49.9	58.8	54.28	332	8.979	62	2.4114
		49.9	58.8					
		49.8	58.8					
297	44.9	56.8	67.7	62.32	325	8.089	55	3.2203
		56.9	67.6					
		57	67.9					
350	66.2	78	92.4	85.08	319	6.331	53	3.8534
		77.9	92.4					
		77.7	92.1					
439	49.4	64	76.6	70.32	313	7.367	89	4.5901
		64.4	76.5					
		63.9	76.5					
650	103.3	121.8	146.5	134.15		4.327	211	5.0228
		121.8	146.5					

その他の制御棒の位置 C-2 355mm
 C-3 355mm
 C-4 355mm

表A2-1 JRR-4キセノン効果実験の結果

時刻	核出力	熱出力	入口(℃)	出口(℃)	平均(℃)	C4 (mm)	$\rho_{\text{水}} (\%)$	$\rho_{\text{水}} (\%)$	$\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{水}} (\%)$	$\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{水}} (\%)$
9:54 (起動)	—	—	25.9	26.2	26.05	—	—	—	—	—
10:22	10W	—	25.8	25.9	25.85	300	2.29	0.0025	2.39×10^{-9}	2.2875
10:41 (10:31)	200kW	257kW	26.3	26.9	26.6	302	2.30	0.0068	5.34×10^{-5}	2.2931
10:56 (10:46)	3500kW	3129kW	33.9	40.4	37.15	319	2.41	0.1387	8.68×10^{-4}	2.2704
11:16	3500kW	3236kW	36.1	42.8	39.45	324	2.60	0.1675	2.16×10^{-3}	2.4303
11:46	3500kW	—	36.9	43.7	40.3	331	2.65	0.1781	4.09×10^{-3}	2.4678
12:16	3500kW	3299kW	36.9	43.8	40.35	339	2.75	0.1787	6.02×10^{-3}	2.5653
12:46	3500kW	3284kW	37.0	43.8	40.4	348	2.84	0.1794	7.95×10^{-3}	2.6527
13:16	3500kW	3289kW	36.8	43.6	40.2	358	2.95	0.1769	9.88×10^{-3}	2.7632
13:46	3500kW	3300kW	36.7	43.4	40.05	369	3.05	0.1750	0.0118	2.8632
14:04 (13:54)	1kW	213kW	28.8	29.2	29.0	358	2.95	0.0369	0.0121	2.9010
14:24	1kW	160kW	27.1	27.4	27.25	369	3.05	0.0150	0.0121	3.0229
14:54	1kW	131kW	26.4	26.7	26.55	387	3.25	0.0062	0.0121	3.2317
15:24	1kW	121kW	26.1	26.4	26.25	405	3.40	0.0025	0.0121	3.3854
15:54	1kW	116kW	26.0	26.2	26.1	424	3.56	0.0006	0.0121	3.5473
16:24	1kW	111kW	25.8	26.0	25.9	440	3.70	-0.0019	0.0121	3.6898
16:54	1kW	111kW	25.7	25.9	25.8	458	3.81	-0.0131	0.0121	3.8110
										1.5235

表A3-1 各パルスの半値幅及びペリオド

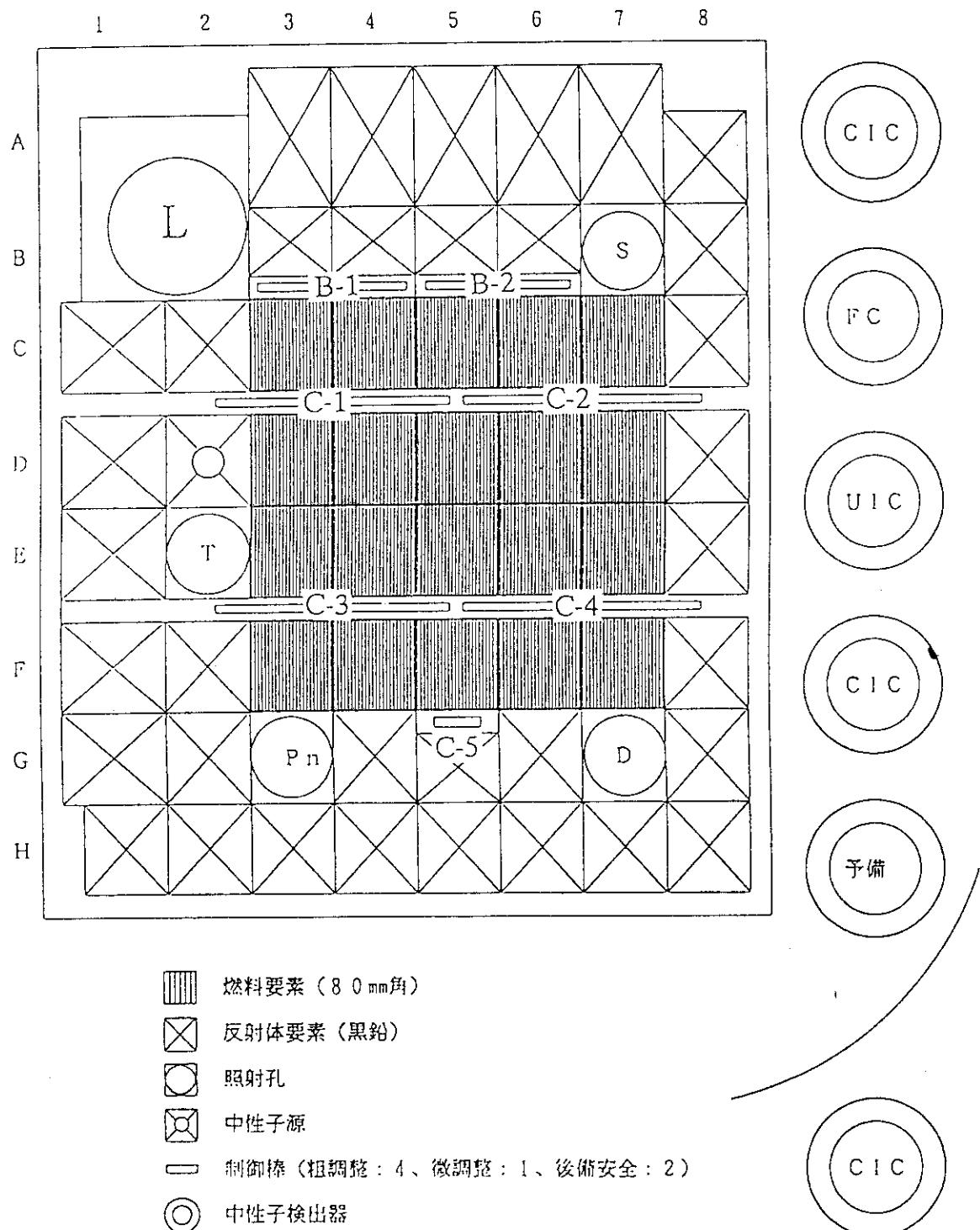
投入反応度 (\$)	半値幅 (ms)	半値幅から求めた 投入反応度 (\$)	ペリオド (ms)	ペリオドから求め た投入反応度 (\$)
2	15.9	1.9	4.2	1.9
3	7.1	3.0	2.1	2.9
4	5.2	3.8	1.4	3.8
1.2 (参考)	99.1	1.2	—	—

表A3-2 各パルスのピーク出力及び積分出力

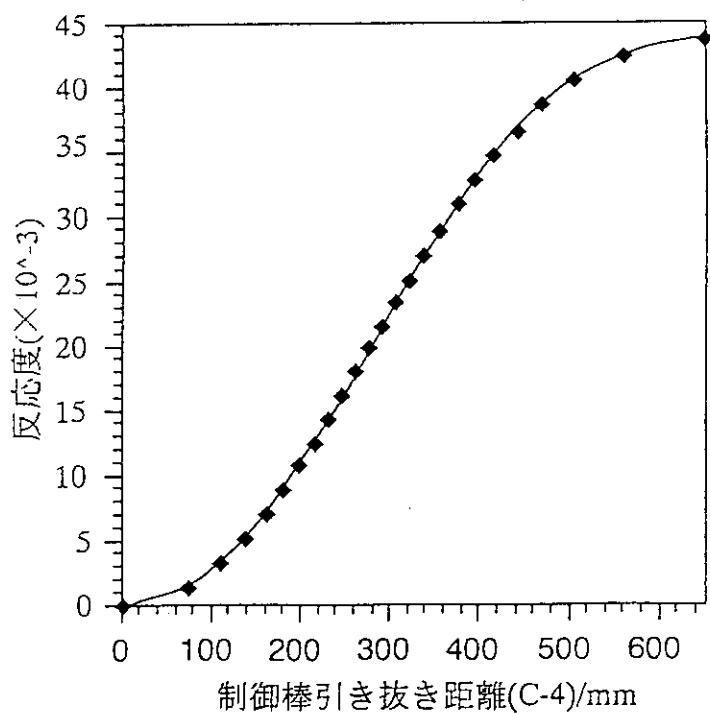
投入反応度 (\$)	ピーク出力 (MW)	積分出力 (MWs)
2	1658	27.4
3	7194	57.2
4	14454	90.7
1.2 (参考)	49	6.0

表A3-3 積分出力から求めた即時温度係数

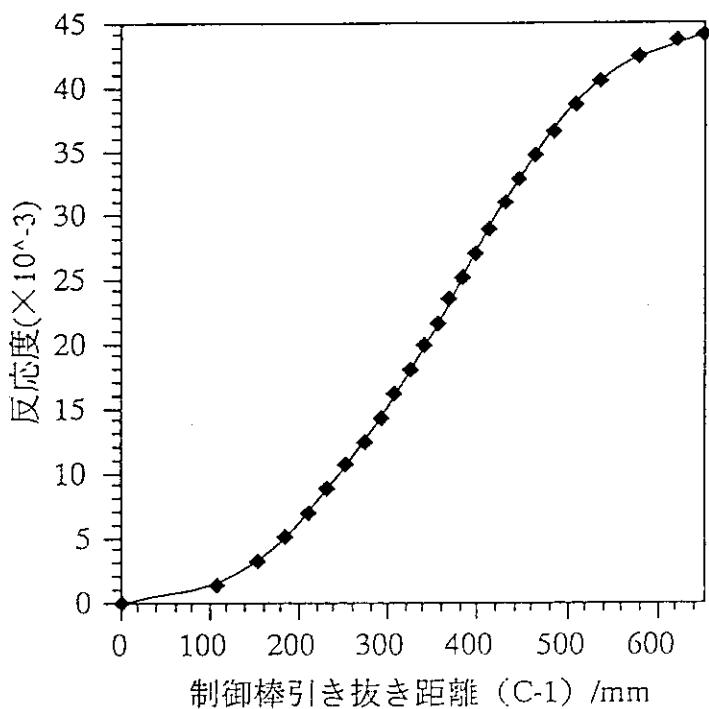
投入反応度 (\$)	積分出力 (MW)	即時温度係数 μ (J^{-1})
2	27.4	-5.3×10^{-10}
3	57.2	-5.1×10^{-10}
4	90.7	-4.8×10^{-10}



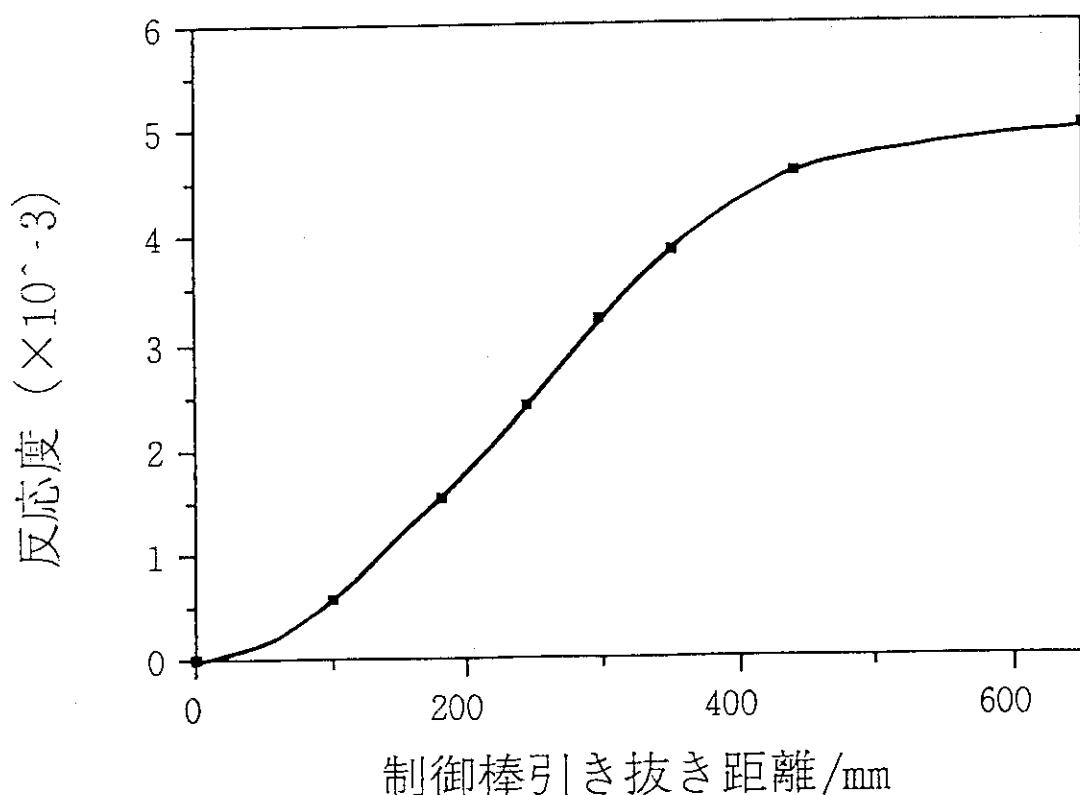
図A1-1 JRR-4炉心配置図



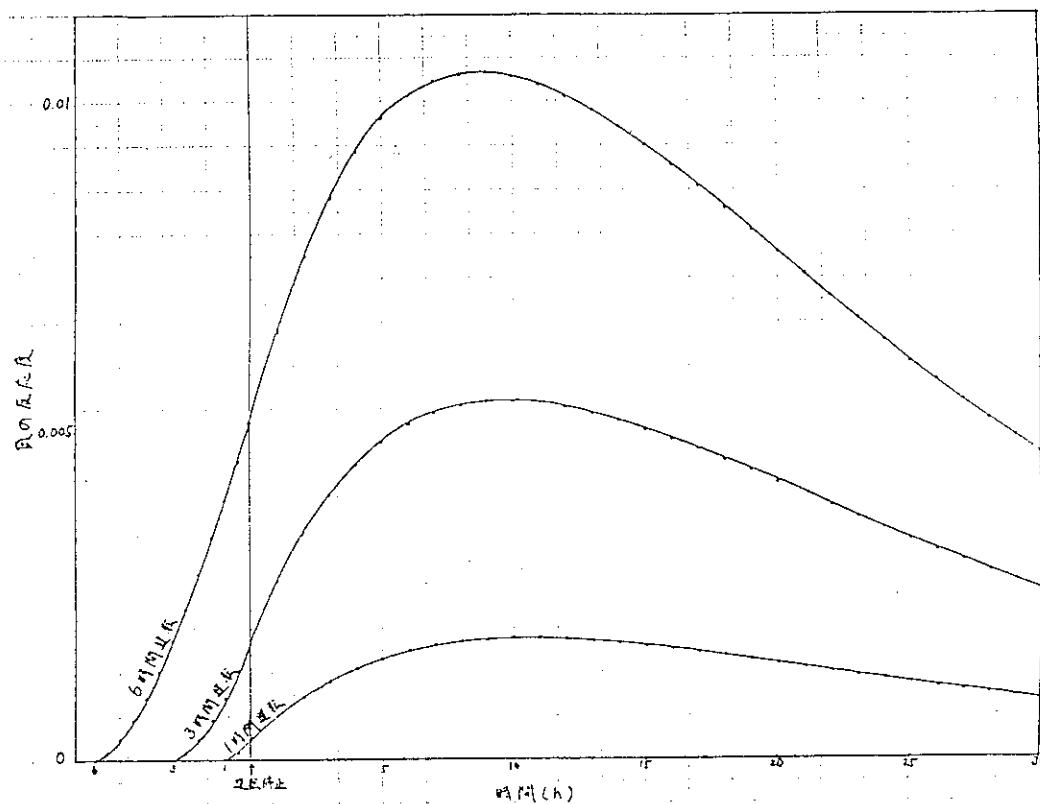
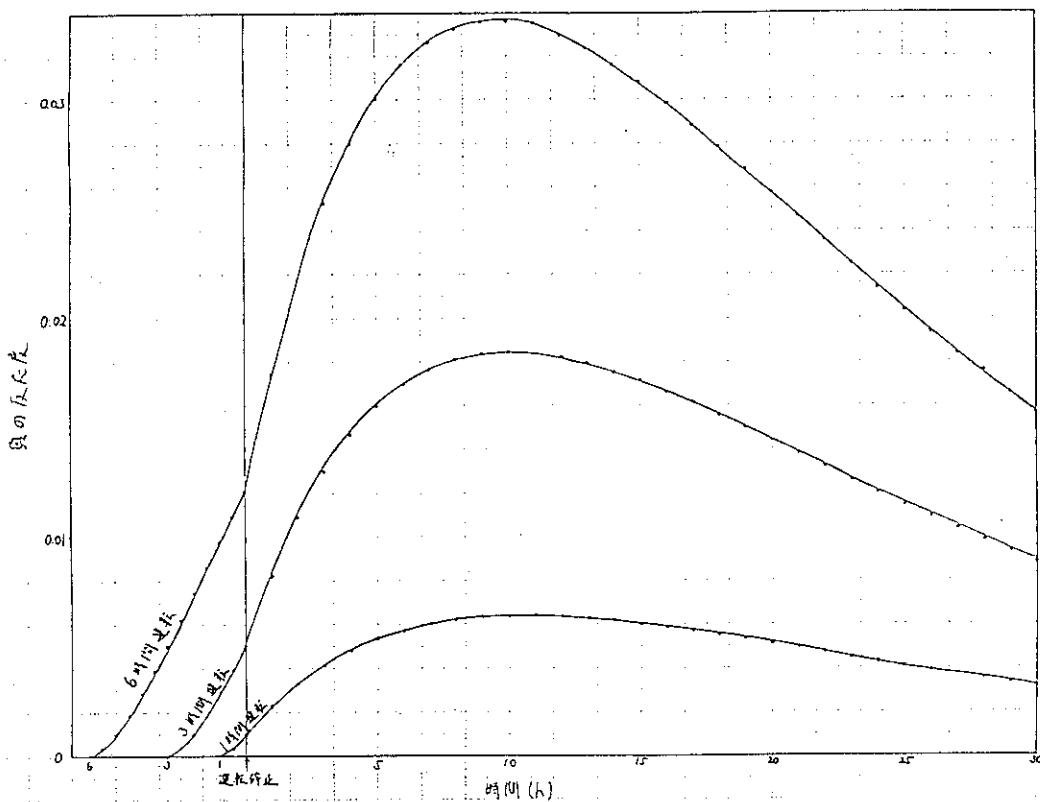
図A1-2 C-4制御棒校正実験結果

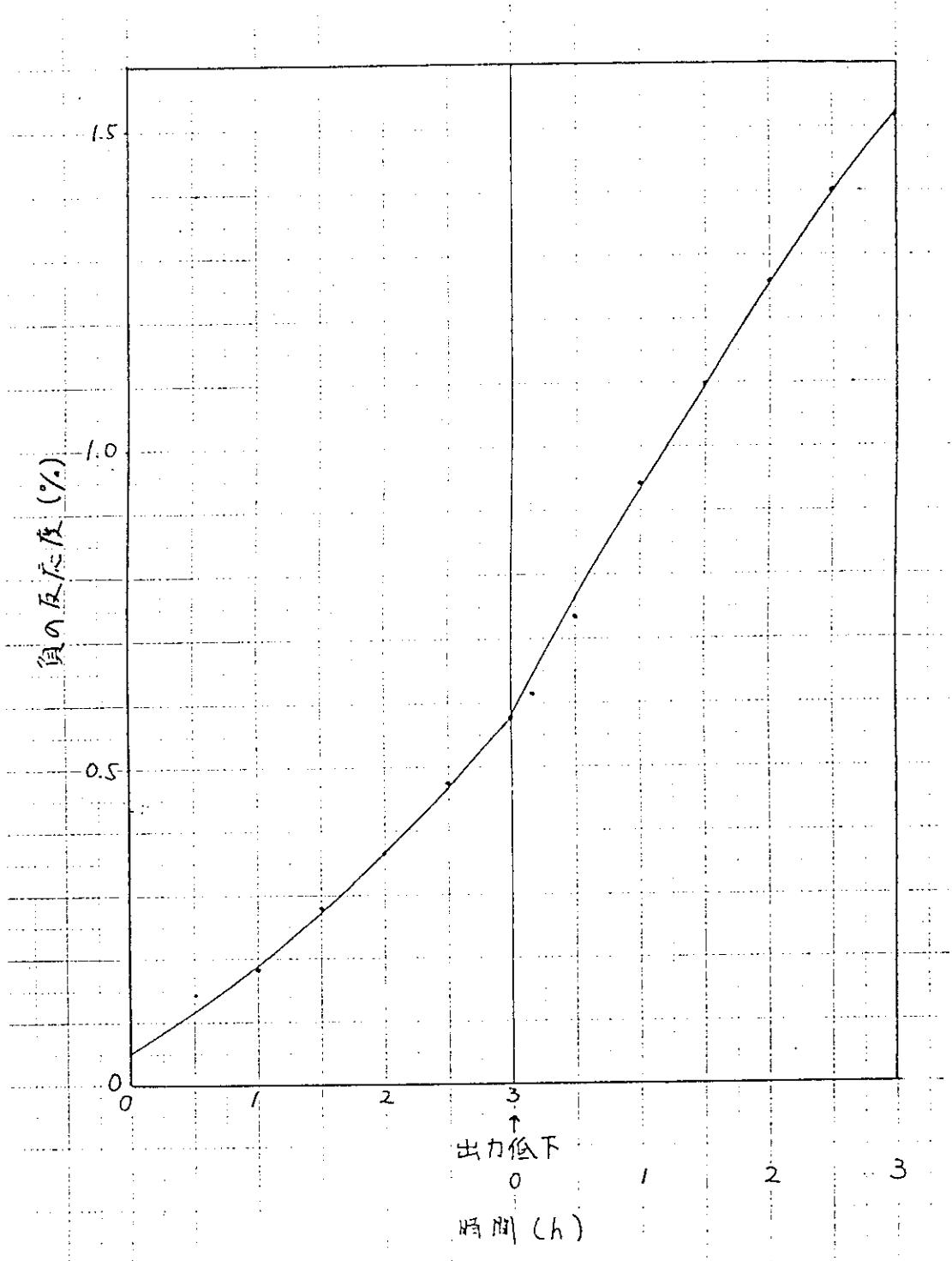


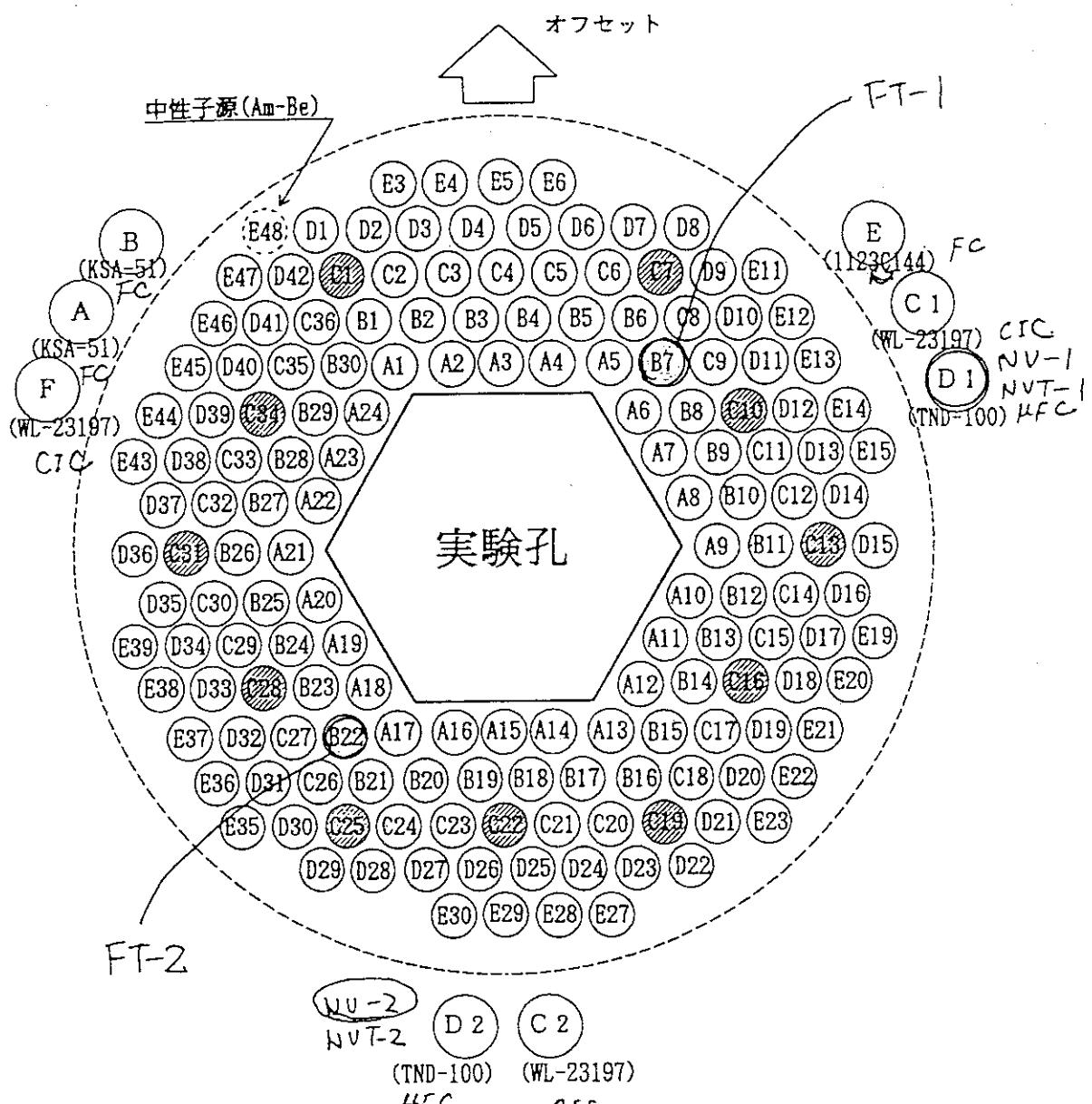
図A1-3 C-1制御棒校正実験結果



図A1-4 C-5制御棒校正実験結果

図A2-1 出力1MWで定常運転したときの ^{135}Xe による反応度図A2-2 出力3.5MWで定常運転したときの ^{135}Xe による反応度

図A2-3 実験によって得られた ^{135}Xe の反応度 (3.5MW3時間運転)



制御棒の名称	炉心装荷位置
調整棒 R-1 R-2 R-3 R-4 R-5 R-6	C-1
	C-7
	C-13
	C-19
	C-25
	C-31
安全棒 S-1 S-2	C-16 C-28
トランジエント棒 Tr-A Tr-B Tr-C	C-10 C-22 C-34

チャンネル名	検出器型式	製造メーカー
A, B	KSA-51	東芝 FC
C1, C2, F	WL-23197	ウェスティングハウス
D1, D2	TND-100	東芝 μFC
E	11230144	GE FC

凡 例
..... 制御棒
..... 炉心燃料
..... 計装燃料

図A3-1 NSRRの炉心燃料及び検出器の配置

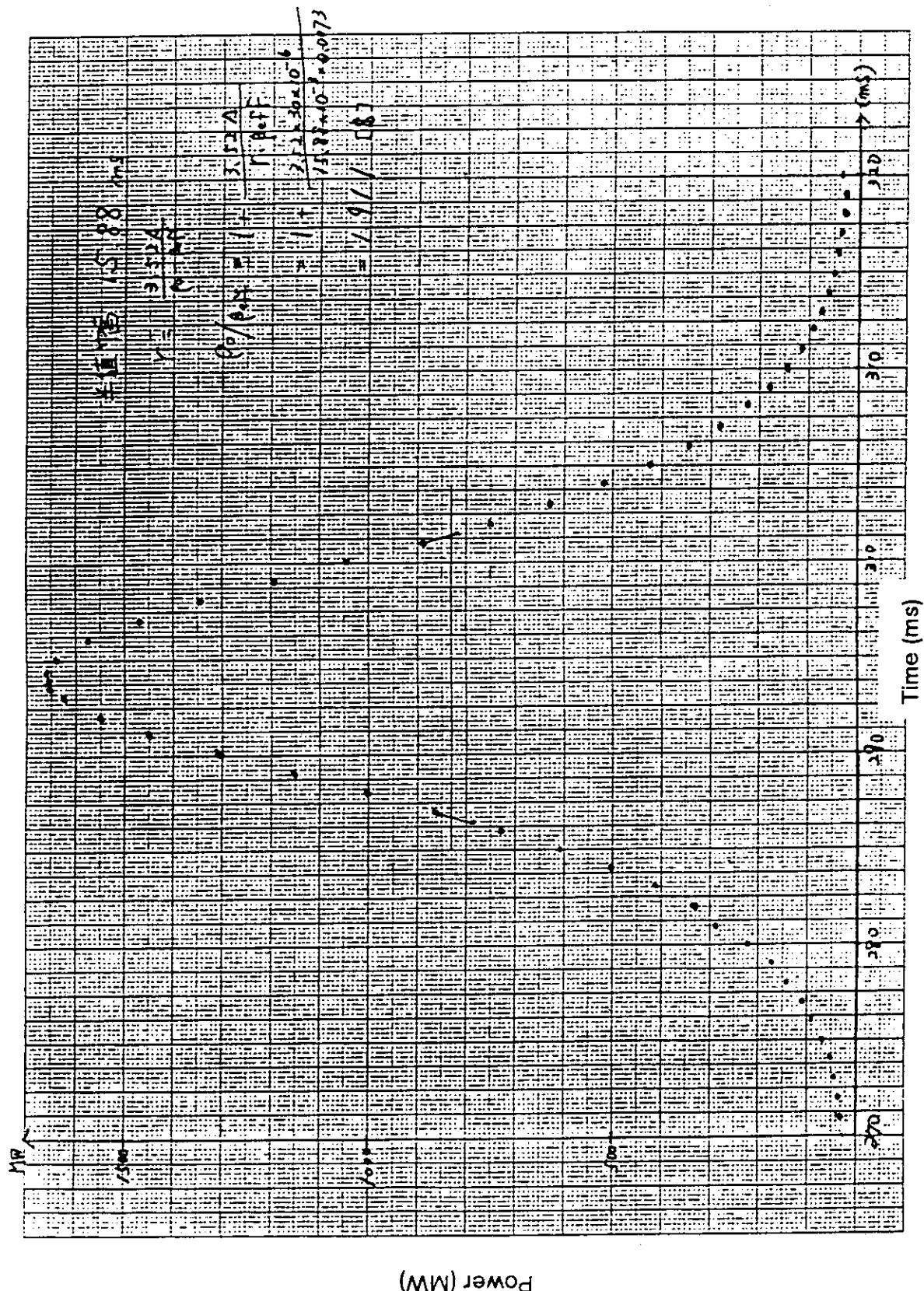


図 A3-2 反応度投入後の出力変化 (投入反応度 2.0% の場合) (1)

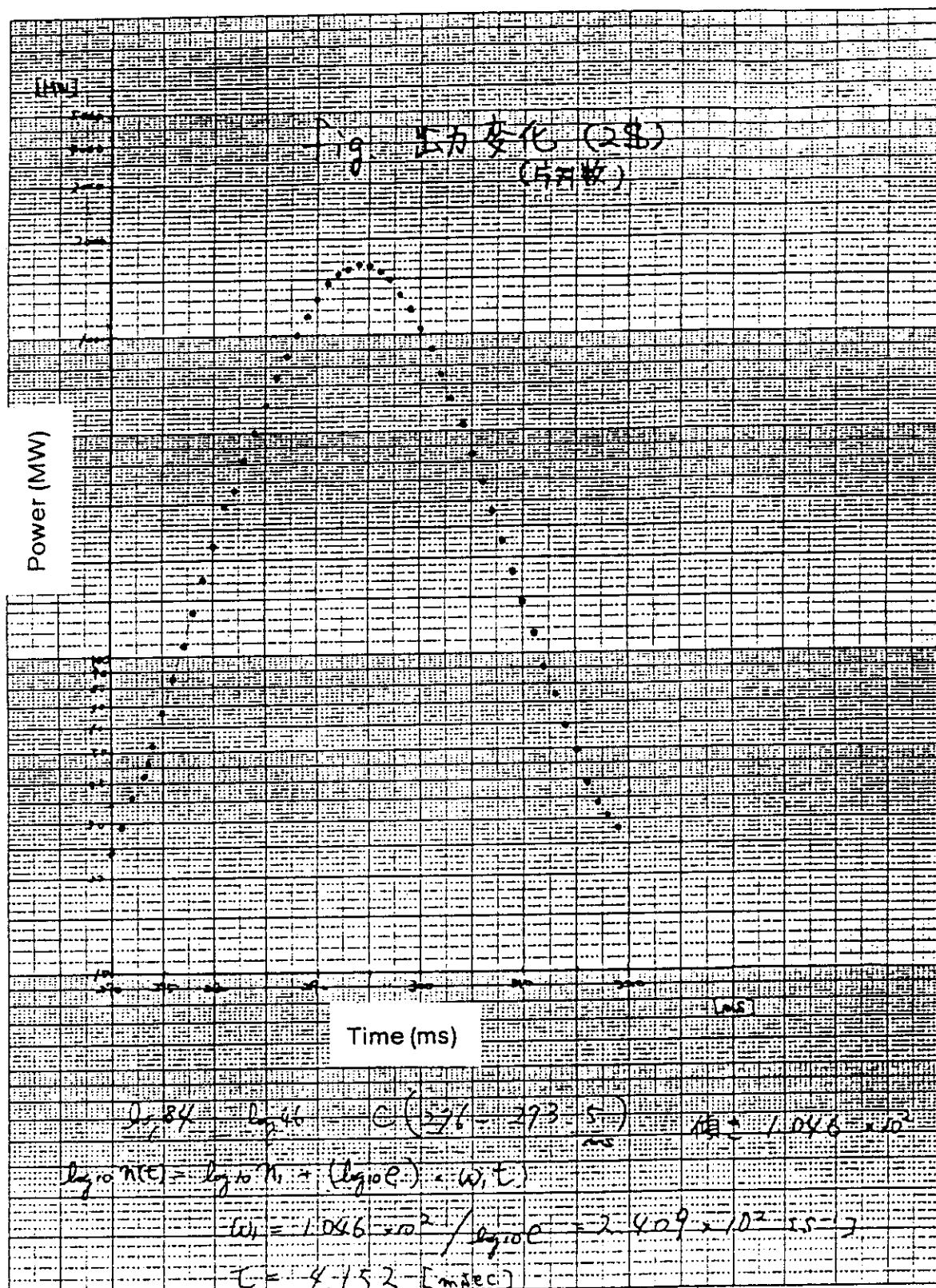
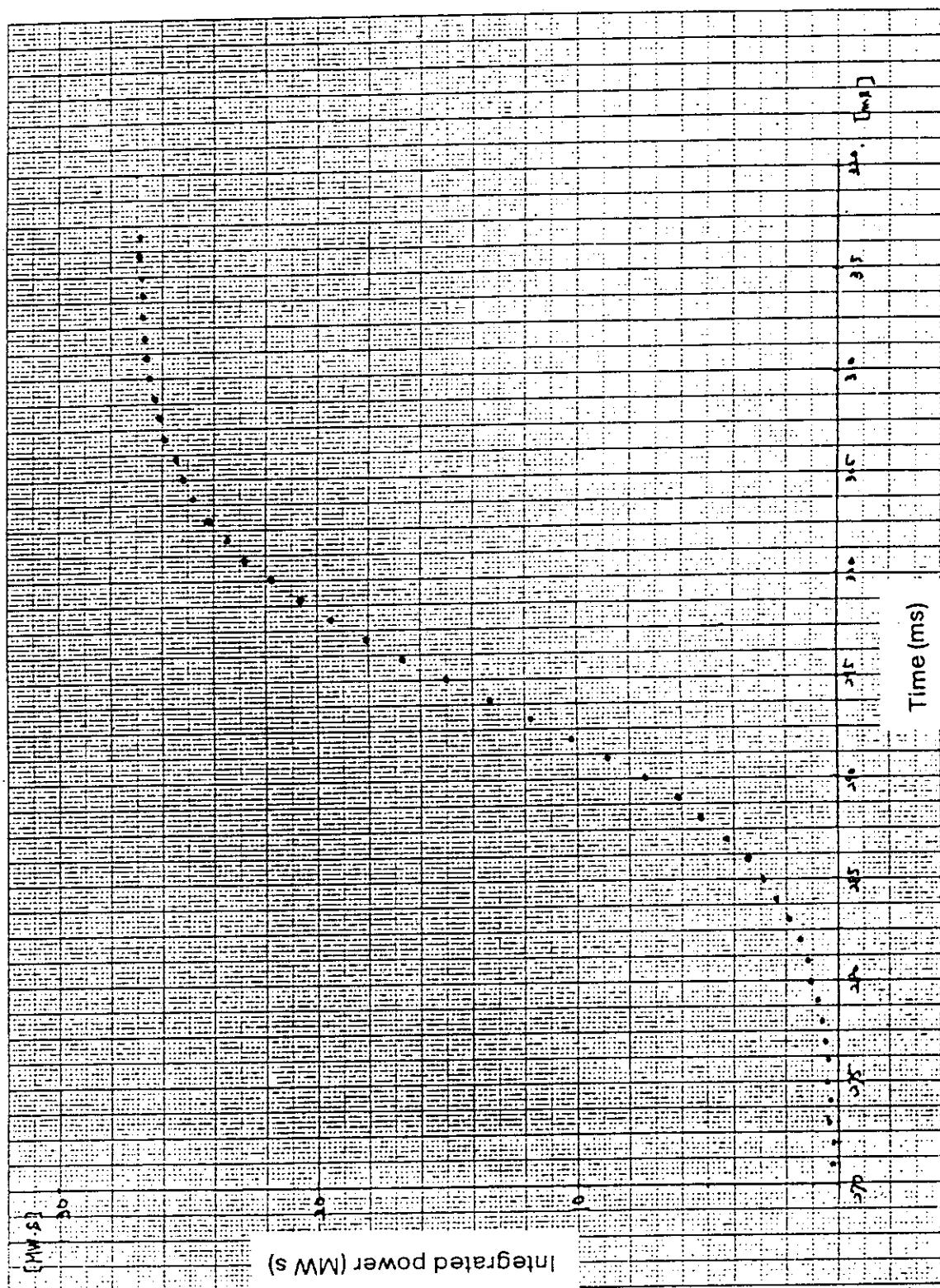
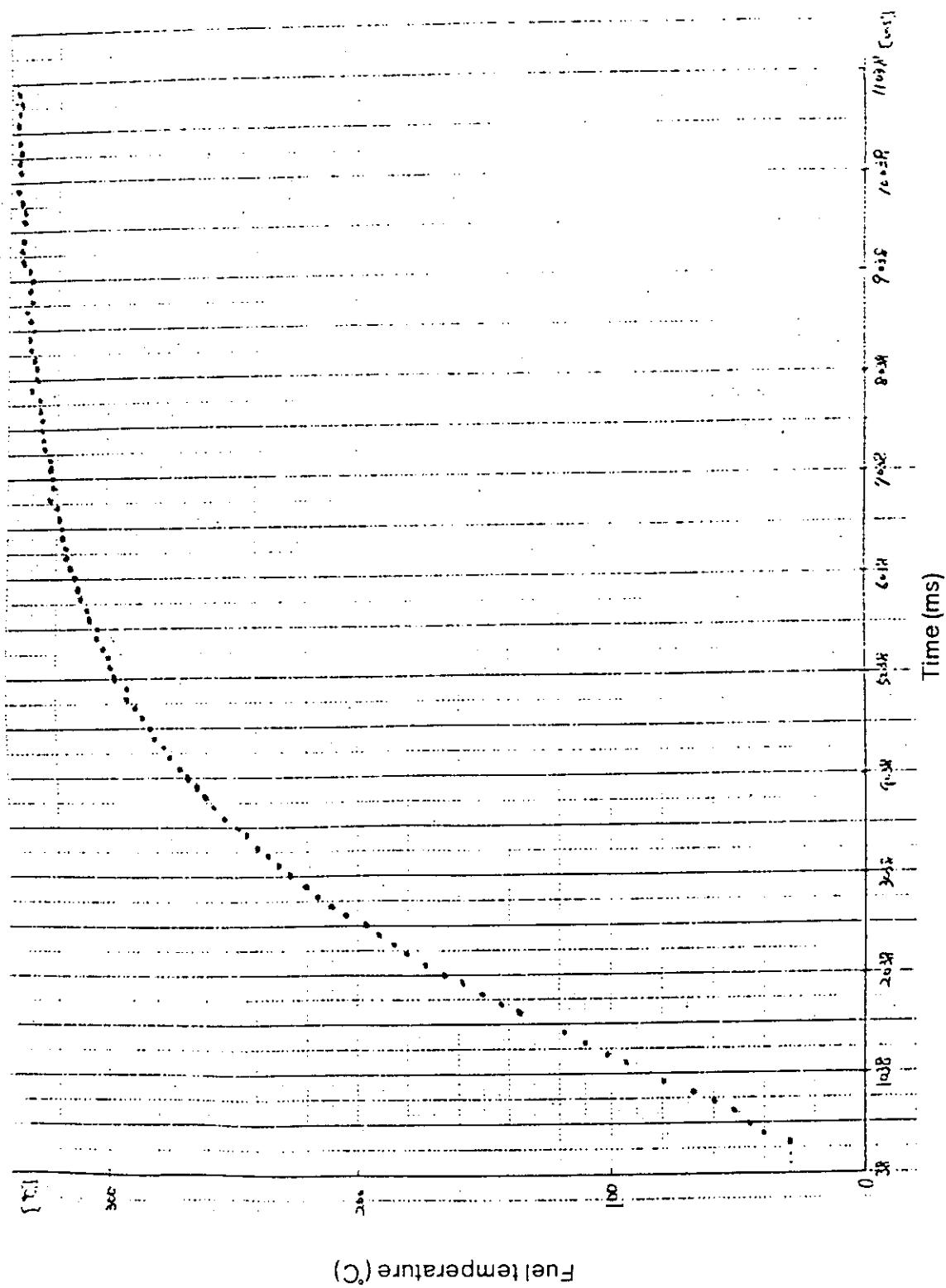


図 A3-3 反応度投入後の出力変化（投入反応度 2 \$ の場合）(2)



図A3-4 反応度投入後の積分出力の変化（投入反応度 2.0% の場合）



図A3-5 反応度投入後の燃料温度の変化（投入反応度2 \$ の場合）
(温度測定チャネルFT-2)

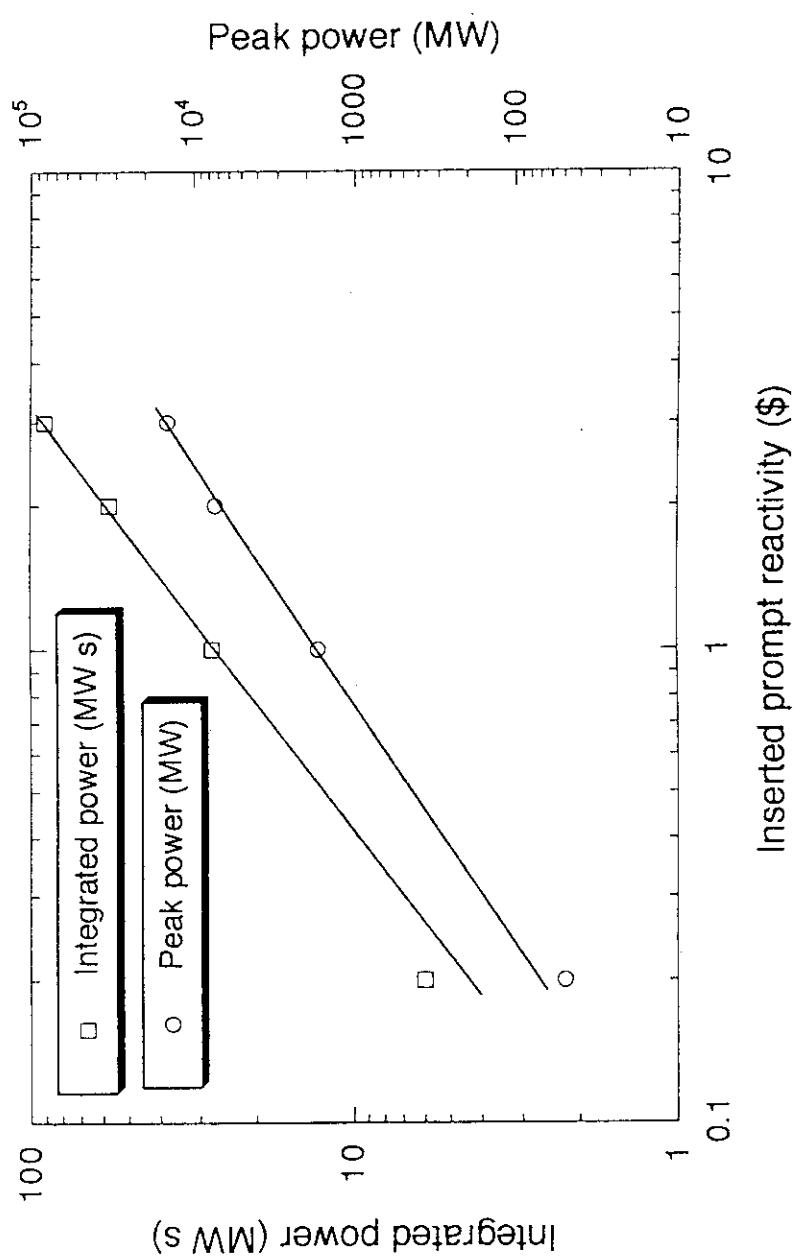


図 A3-6 投入即発反応度 ($\rho_0 \cdot \beta_{\text{eff}}$) と積分出力及びピーク出力の関係