

JAERI-M
84-118

JRR-3 改造炉の出力自動制御系設計の
ための反応度応答解析

1984年6月

原見 太幹・松崎 徳則*・植村 瞳**
鶴田 晴通・大西 信秋

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

JAERI-M 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（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

J R R - 3 改造炉の出力自動制御系設計のための反応度応答解析

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部

原見 太幹・松崎 徳則^{*}・植村 瞳^{**}・鶴田 晴通
大西 信秋

(1984年6月1日受理)

本報告は、JRR-3 改造炉の炉心核計算および、原子炉動特性解析に基づき、原子炉出力の自動制御系の設計に資することを目的として行った反応度応答特性の解析について述べたものである。

原子炉の動特性を特徴付ける即発中性子寿命(ℓ)と実効遅発中性子割合 (β_{eff})は、燃焼度、炉心温度ならびに制御棒位置を考慮した種々の炉心状態を仮定し、解析コード「SRAC コードシステム」を用い、中性子拡散計算と摂動計算によって求めた。

ステップ状およびランプ状外乱反応度に対する自動制御系の応答特性は、アナログ計算機で解析し、その結果に基づき、自動制御運転時の微調整棒駆動速度を定めた。これにより実験物の炉心挿入および取り出し時に添加される最大の反応度外乱 ($\pm 7.3 \times 10^{-4} \Delta k / k$ ステップ状および $\pm 3.0 \times 10^{-4} \Delta k / k / s$ ランプ状) に対して、自動制御系は、速やかに応答し、所定の原子炉出力制御ができることを確認した。

* 日本鋼管株式会社

** コンピューターサービス株式会社

Reactivity Response Analyses for the Design of
Automatic Power Level Control System of Upgraded JRR-3

Taikan HARAMI, Tokunori MATSUZAKI*, Mutsumi UEMURA**
Harumichi TSURUTA and Nobuaki ONISHI

Department of Research Reactor Operation
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June 1, 1984)

This reports the analytical results of transient responses to inserted reactivities for the design of the automatic power level control system of upgraded JRR-3.

The parameters of reactor kinetics, prompt neutron lifetime and effective delayed neutron fraction, have been calculated by neutron diffusion theory and perturbation theory using the SRAC code system. Burn-up processes, reactor temperatures and configurations of control rods have been taken into account in the calculation.

The transient responses of the automatic control system to a step reactivity change of $\pm 7.3 * 10^{-4} \Delta k/k$ and a ramp reactivity change of $\pm 3.0 * 10^{-4} \Delta k/k/\text{sec}$ have been obtained by analogue computer. As the result, when a regulator rod is used for the automatic power control, its driving velocity has been designed to be 30 cm/min. It has been confirmed that this designed control system can quickly respond to the reactivity perturbations and maintain a desired power level.

Keywords: JRR-3, Automatic Control System, Reactor Kinetics, Prompt Neutron Lifetime, Effective Delayed Neutron Fraction, Neutron Diffusion Theory, Perturbation Theory, SRAC, Step Reactivity Change, Ramp Reactivity Change, Analogue Computer, Regulator Rod

* Nihon Kohkan K.K.

** Computer Services Cooperation

目 次

| | |
|---|----|
| 1. 序 | 1 |
| 2. 炉心構成 | 2 |
| 2.1 概 要 | 2 |
| 2.2 燃料要素 | 2 |
| 2.3 制御棒及び制御棒案内管 | 3 |
| 2.4 照射筒要素 | 3 |
| 2.5 ベリリウム反射体と重水タンク | 3 |
| 3. 動特性定数計算 | 8 |
| 3.1 概 要 | 8 |
| 3.2 計算体系と計算方法 | 8 |
| 3.2.1 縮約群定数 | 8 |
| (1) 標準型燃料領域とフォロワ型燃料領域 | 8 |
| (2) 照射筒領域 | 9 |
| (3) ベリリウム反射体及び重水反射体領域 | 9 |
| (4) 制御棒領域 | 9 |
| 3.2.2 中性子拡散計算 | 9 |
| 3.3 炉心条件と動特性定数 (ℓ , β_{eff}) | 23 |
| 3.3.1 燃焼度の影響 | 23 |
| 3.3.2 炉心温度の影響 | 23 |
| 3.3.3 制御棒配置の影響 | 23 |
| 3.3.4 各炉心条件で得た ℓ , β_{eff} の動特性への影響 | 23 |
| 3.3.5 平衡炉心の ℓ , β_{eff} | 24 |
| 4. 反応度外乱応答解析 | 30 |
| 4.1 概 要 | 30 |
| 4.2 原子炉動特性基本式 | 30 |
| 4.3 自動制御系モデル | 32 |
| 4.4 反応度外乱応答特性と制御棒駆動速度 | 37 |
| 4.4.1 ステップ状約 1.6 ¢ 外乱応答 | 37 |
| 4.4.2 ステップ状約 4 ¢ 外乱応答 | 37 |
| 4.4.3 ランプ状約 4 ¢ / sec 外乱応答 | 37 |
| 4.5 温度効果を考慮した反応度外乱応答 | 50 |
| 4.5.1 EUREKA-2 コードによる温度効果解析 | 50 |
| 4.5.2 アナログ計算機による応答解析 | 51 |
| 4.6 周波数特性 | 59 |

| | |
|--------------|----|
| 5. 結 言 | 61 |
| 謝 辞 | 61 |
| 参考文献 | 61 |

Content

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Core Configuration | 2 |
| 2.1 General Description | 2 |
| 2.2 Fuel Elements | 2 |
| 2.3 Control Rod and Guide Tube | 3 |
| 2.4 Irradiation Cell Element | 3 |
| 2.5 Beryllium Reflector and Heavy Water Tank | 3 |
| 3. Calculation of Reactor Kinetic Parameters | 8 |
| 3.1 General Description | 8 |
| 3.2 Calculation Geometry and Method | 8 |
| 3.2.1 Regionwise Few-Group Constants | 8 |
| (1) Standard Fuel Element and Follower Fuel Element Regions | 8 |
| (2) Irradiation Cell Region | 9 |
| (3) Beryllium and Heavy Water Reflector Regions | 9 |
| (4) Control Rod Region | 9 |
| 3.2.2 Neutron Diffusion Calculation | 9 |
| 3.3 Core Conditions and Kinetic Parameters (λ , β_{eff}) | 23 |
| 3.3.1 Effect of Burn-Up | 23 |
| 3.3.2 Effect of Core Temperature | 23 |
| 3.3.3 Effect of Control Rod Configuration | 23 |
| 3.3.4 Effect of Various Values of λ and β_{eff} on Kinetics | 23 |
| 3.3.5 λ and β_{eff} in the Equilibrium Core | 24 |
| 4. Reactivity Response Analyses | 30 |
| 4.1 General Description | 30 |
| 4.2 Reactor Kinetic Equation | 30 |
| 4.3 Automatic Control System Model | 32 |
| 4.4 Reactivity Response Characteristics and Driving Velocity of Control Rod | 37 |
| 4.4.1 Response to a Step Reactivity of About 10 c | 37 |
| 4.4.2 Response to a Step Reactivity of About 4 c | 37 |
| 4.4.3 Response to a Lamp Reactivity of About 4c/sec | 37 |
| 4.5 Temperature Effect on Reactivity Response | 50 |
| 4.5.1 Temperature Effect Analyses by EUREKA-2 Code | 50 |
| 4.5.2 Response Analyses by Analogue Computer | 51 |

| | |
|--|----|
| 4.6 Frequency Response Characteristics | 59 |
| 5. Concluding Remarks | 61 |
| Acknowledgment | 61 |
| References | 61 |

I. 序

本原子炉は一定出力で運転するよう設計されている。運転中に出力変動をひき起こす反応度外乱があっても、速やかに所定の出力になるように、適切な応答をもった自動制御系を設ける必要がある。本稿は、本原子炉の出力自動制御系設計に資することを目的として行った反応度外乱応答解析および自動制御運転時の制御棒駆動速度の検討結果について報告する。

炉心の反応度外乱には、実験物の移動による反応度変化、1次冷却材温度変化による反応度変化およびキセノン濃度変化による反応度変化等の比較的短時間に変化するものと、燃焼や核分裂生成核種蓄積による組成変化による反応度変化等長時間に及ぶものがある。実験物の移動による反応度変化として、重水タンク中の水力ラビットや気送管照射設備における照射試料の出し入れが考えられる。この操作は運転中にも行われる。この反応度変化は、ステップ状で、その最大反応度変化は $\pm 7.3 \times 10^{-4} \Delta k / k$ と設計されている。

出力自動制御系設計は、核的外乱に対して出力が振動することなく、また振動しても十分早く減衰するように設計することである。

反応度応答特性を記述する動特性方程式は、即発中性子寿命と実効遅発中性子割合によって表わされるが、これらパラメータに与える燃焼度、制御棒配置や炉心温度の影響を調べるために、12群縮約定数を用いた炉心2次元x-y中性子拡散計算と摂動計算を行った。計算には、「SRACコードシステム」¹⁾に内蔵されているPIJ, ANISN, TWOTRAN, CITATION等のコードを用いた。

自動制御用制御棒駆動速度を決めるため、ステップ状外乱 ($\pm 7.3 \times 10^{-4} \Delta k / k$)とランプ状外乱 ($\pm 3.0 \times 10^{-4} \Delta k / k / s$)に対する応答解析を行った。制御棒駆動速度は10cm/minから180cm/minの広い範囲にわたって解析を行い応答特性を調べた。温度効果によるフィードバック反応度を含むより実際的な解析も行った。応答特性はアナログ計算で解析した。

以下、炉心構成を概説し、第3章に即発中性子寿命と実効遅発中性子割合の計算結果を示す。第4章に制御棒駆動速度の検討と反応度応答特性解析の結果を述べる。

2 炉心構成

2.1 概要

本原子炉の炉心設計の基本的なものを示すと、

- (1) 热出力 ; 20 MW
- (2) 炉形式 ; プール型
- (3) 燃料 ; 20%濃縮ウラン ETR型
- (4) 燃料要素の平均燃焼度 ; 50%以下
- (5) 減速材・冷却材 ; 軽水
- (6) 反射体 ; 重水、ベリリウム

である。なお、利用目的は、燃料・材料照射及びビーム実験である。

本原子炉炉心は、図 2.1-1 に示したように、37 の要素からなる燃料領域、Al タンク壁で囲まれたベリリウム反射体領域及びその外側の重水反射体領域の 3 つの領域で構成する。燃料領域の 37 要素は、26 体の標準型燃料要素、6 体のフォロワ型燃料要素（制御棒要素）及び 5 体の照射筒要素から成る。ベリリウム反射体領域は、Be 及びそれを囲む Al 製の重水タンク壁で構成する。Be 反射体領域には 4 本の照射筒がある。重水反射体領域は、燃料領域及び Be 反射体領域を径方向に囲む。重水反射体中には、図 2.1-1 に示すように、9 本の水平実験孔及び 9 本の垂直照射孔がある。

2.2 燃料要素

標準型燃料要素は、燃料板、燃料側板及び減速材（軽水）から成る。フォロワ型燃料要素（制御棒要素）は、燃料板と燃料側板から成る燃料部分、制御棒吸収体（材質はハフニウム）、並びにそれらを接続する Al 部分、及びそのまわりを囲む Al の制御棒案内管から構成する。

標準型燃料要素及びフォロワ型燃料要素の水平断面図を図 2.2-1、図 2.2-2 にそれぞれ示す。

標準型燃料要素は ETR 型燃料板及びそれを固定する燃料側板から成り、燃料板間を減速材（軽水）で満す。燃料板を等間隔で 20 枚配列する。フォロワ型燃料要素は、ETR 型燃料板、燃料側板及びそれらを囲む制御棒案内管から成り、それらの間を減速材（軽水）で満す。燃料板を、等間隔で 16 枚配列する。

燃料板は、図 2.2-1 及び 2.2-2 に示すように、UA₂ 分散型合金の芯材を Al 合金 (A 5052) で被覆したものである。燃料板、Al 被覆及び芯材の厚みはそれぞれ 0.152 cm, 0.038 cm 及び 0.076 cm である。燃料芯材の軸方向長さは、75.0 cm で、燃料領域の高さに等しい。燃料芯材の U-Al₂ 分散型合金は、密度 6.80 g/cm³ の U-Al₃ と 6.06 g/cm³ の U-Al₄ 及び Al で構成する。

^{235}U 濃縮度は 19.75 w/o である。燃料側板は Al 合金 (A6061) である。

2.3 制御棒及び制御棒案内管

制御棒要素の水平断面を図 2.3-1 に示す。制御棒要素は、制御棒吸収体及びそれを囲む制御棒案内管から成り、その間は減速材（軽水）で満たす。

制御棒位置を標準型燃料要素実効部下端の位置を原点として、制御棒実効吸収体部下端の引抜き距離で示すと、制御棒全引抜き位置は、79.0 cm である。

2.4 照射筒要素

燃料領域内の照射筒要素水平断面を図 2.4-1 に示す。照射筒の材質は、Al 合金である。この計算においては、Al プラグを装荷したものとする。ベリリウム反射体領域内の照射筒は 4 個あるが、この計算では、Be のプラグを装荷したものを用いる。

2.5 ベリリウム反射体と重水タンク

ベリリウム反射体は図 2.1-1 に示すように、炉心を包むように配置し、重水タンクは、円柱殻型の Al 製とする。重水タンク内には水平実験孔及び垂直照射孔が存在するが、この計算ではそれらを考慮していない。又使用する重水は 100% 濃度であるとする。

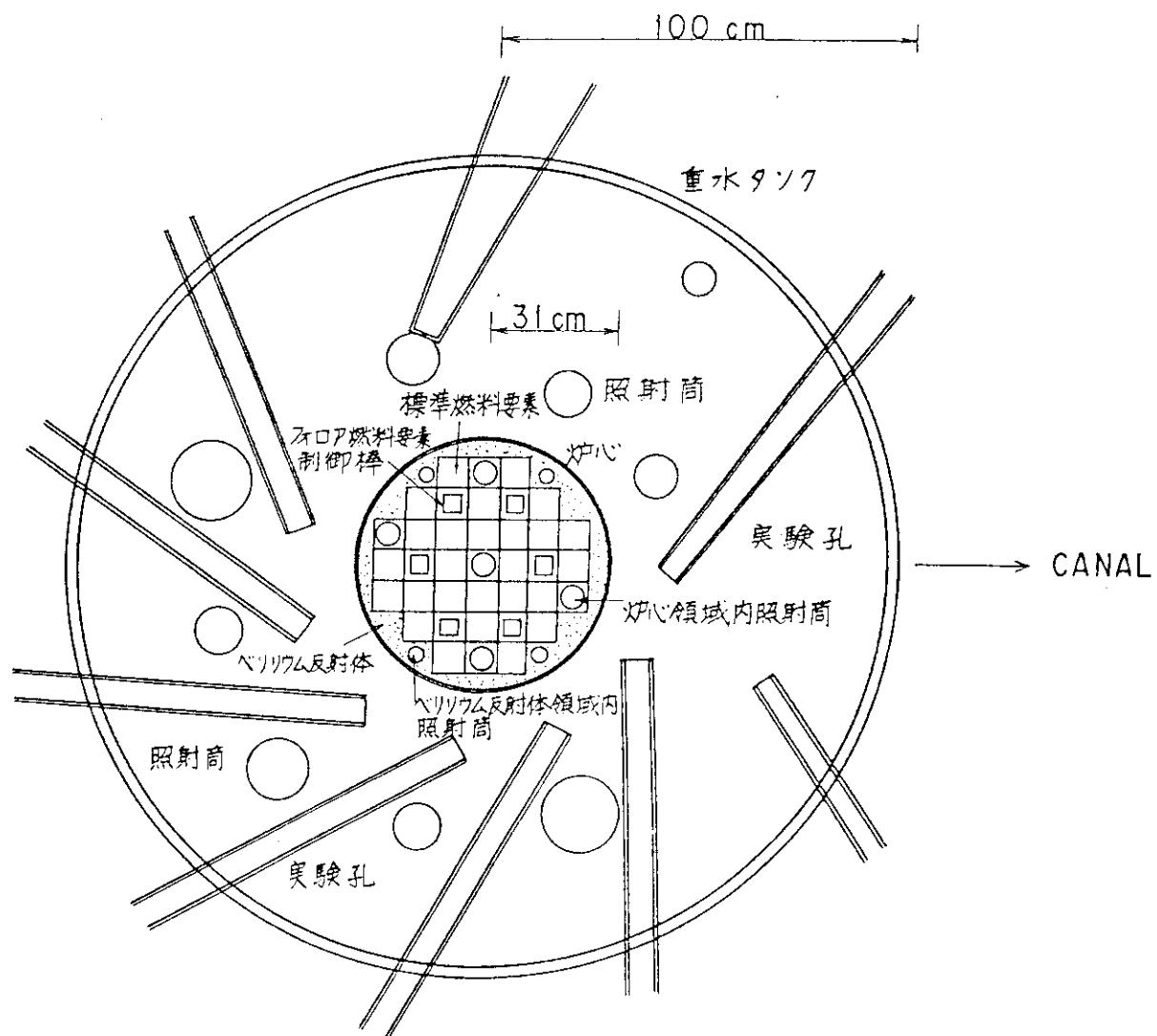


図 2.1-1 JRR-3 炉心断面図と重水タンク内実験孔及び照射筒の配置

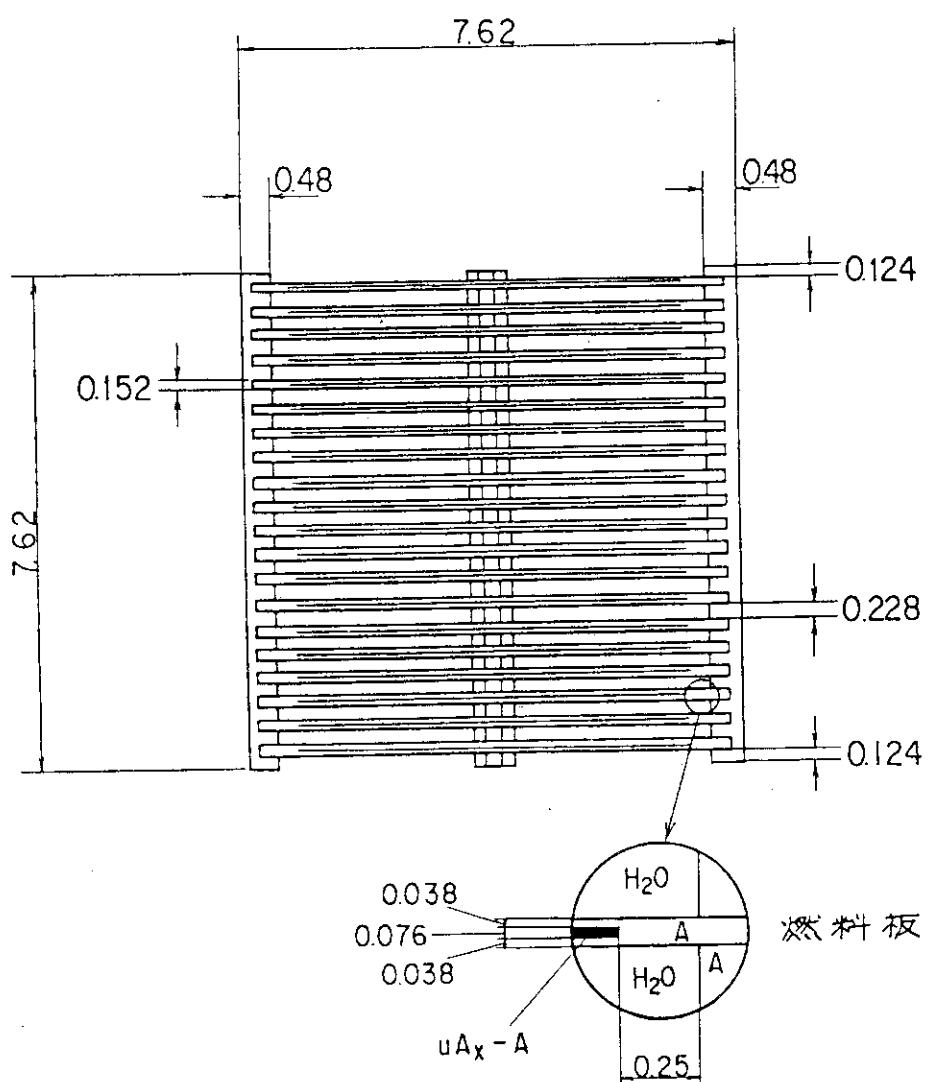


図 2.2-1 標準型燃料要素水平断面図 (単位: cm)

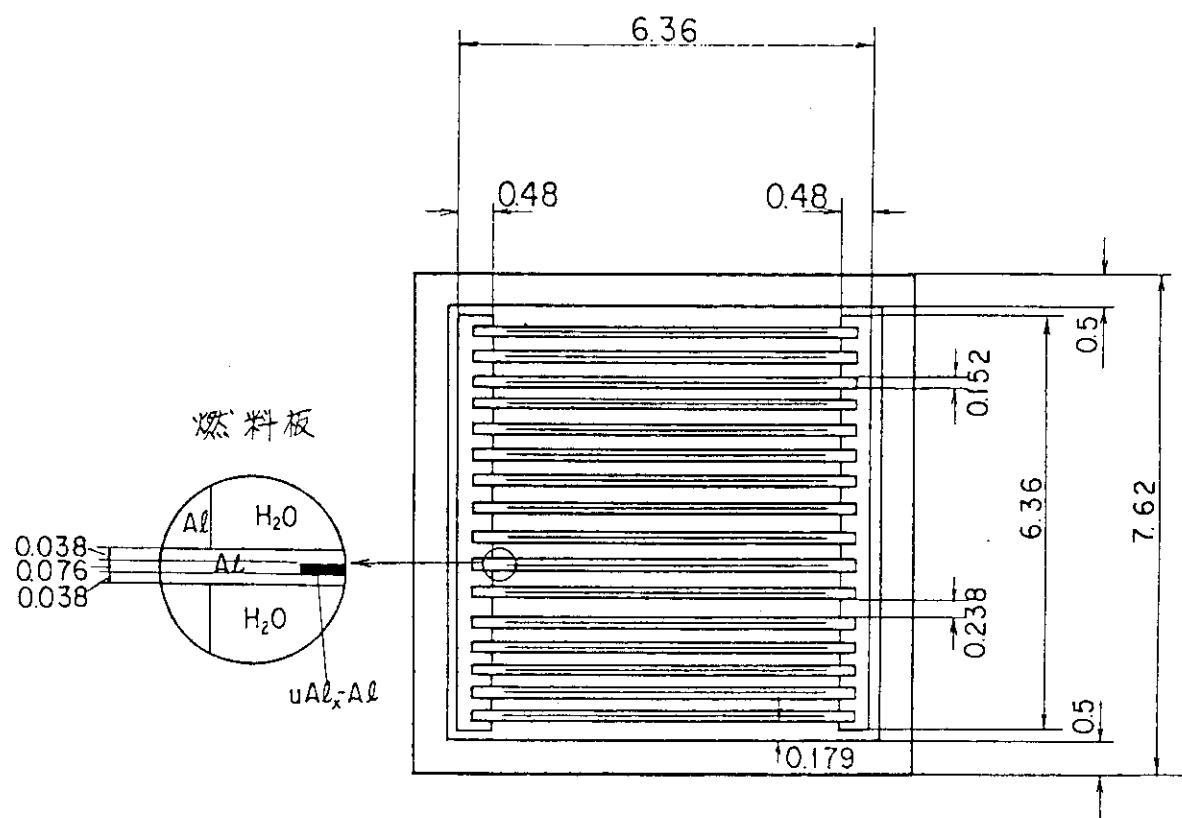


図 2.2-2 フォロワ型燃料要素水平断面図（単位：cm）

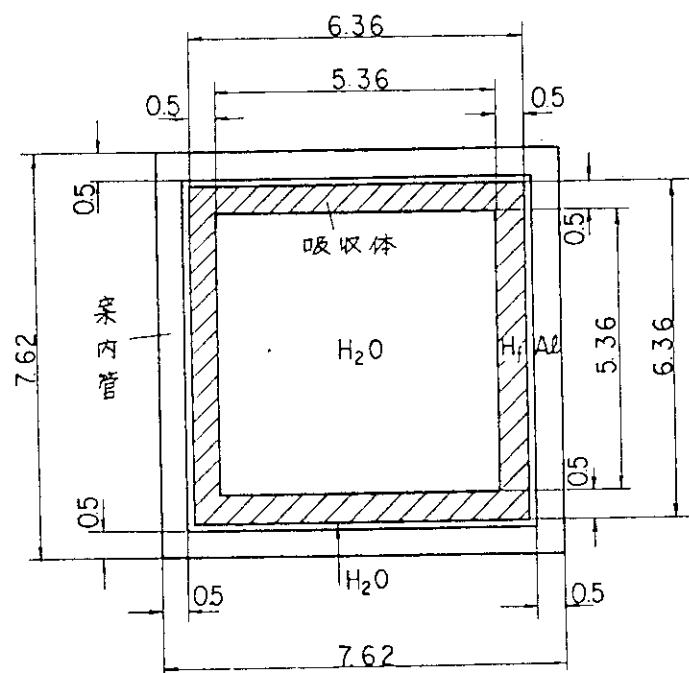


図 2.3-1 制御棒要素水平断面図（単位：cm）

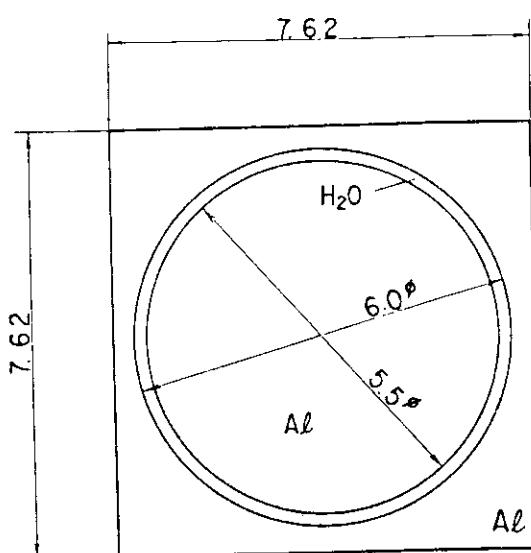


図 2.4-1 燃料領域内照射筒要素水平断面図（単位：cm）

3. 動特性定数計算

3.1 概要

この章では、炉心反応度に影響を及ぼす外乱のうち、比較的ゆっくりした変化のもの、例えば燃焼や核分裂生成核種蓄積による炉心の組成変化や冬期、夏期の炉心温度変化によるものが、炉心動特性を特徴付ける定数 ℓ 、 β_{eff} にどれだけ影響するかを調べる。各炉心状態について中性子束を中性子拡散計算で求め、 ℓ 、 β_{eff} は摂動論で計算した。計算は炉心 2 次元(x , y)体系で行い、縮約エネルギー群数は 12 群である。ただし、この計算では光中性子による β への影響は考慮していない。

計算コードは「SRACコードシステム」に内蔵されている PIJ, CITATION, ANISN 及び TWOTRAN を用いた。

以下、縮約群定数計算体系、計算方法を述べ、炉心計算で得る ℓ 、 β_{eff} の動特性に与える影響を議論する。

3.2 計算体系と計算方法

ここに、各炉心領域で計算に使用した体系とマクロ断面積計算方法、並びに炉心の中性子拡散計算について述べる。

炉心計算は、炉心内各領域の 12 群縮約定数を用いて行う。縮約エネルギー構造とエネルギー切断は、表 3.2-1 に示す。各領域のスペクトル計算に必要な核断面積データは、ENDF/B - IV を用いる。

3.2.1 縮約群定数

(1) 標準型燃料及びフォロア型燃料領域

これら燃料領域の均質化マクロ断面積を計算するに当って、まず燃料板 1 枚の、燃料芯合金、被覆材及び減速材のみから成る 1 次元無限平板体系の計算 (PLATE 計算) を行う。その結果得られる多群均質化断面積を用い、燃料要素内燃料板 20 枚 (標準型燃料要素) 又は 16 枚 (フォロワ型燃料要素) とサイドプレート、水ギャップを含めた 2 次元均質化計算 (CELL 計算) を行った。各ステップの計算はエネルギー群数 72 群で行い、CELL 計算後 12 群に縮約した。この計算には全エネルギー範囲にわたって、衝突確率法 (PIJ) を用いた。

以上の計算に用いた体系を示すと、標準型燃料について、図 3.2-1 に燃料板計算モデルと計算領域を、図 3.2-2 に燃料要素計算モデル、図 3.2-3 に燃料要素計算領域を示す。フォロワ型燃料については、図 3.2-4 に燃料板計算モデル及び計算領域を、図 3.2-5 に燃料要素計算モデル、図 3.2-6 に燃料要素計算領域を示す。

各燃料領域の核種個数密度を表 3.2-2 と表 3.2-3 に示す。

(2) 照射筒領域

燃料領域内照射筒要素は、中空のアルミニウムブロックであり、この中にアルミニウムのプラグを装荷した。この場合、要素内を均質にし、SRACライブラリ内蔵スペクトルを用いてエネルギー縮約を行った。核種個数密度を表3.2-4に示す。

(3) ベリリウム反射体及び重水反射体領域

ベリリウム及び重水については、ANISNを用いた輸送計算によって、1次元円筒体系でスペクトル計算を行った。重水タンクは領域が大きいため、半径方向に2つの領域に分割し、それぞれに縮約断面積を求めた。ベリリウム反射体中の照射孔はBeのプラグを装荷して計算した。

なお、重水反射体の外側に位置する軽水領域についてはSRAC内蔵スペクトルを用いてエネルギー縮約を行った。軽水の核種個数密度を表3.2-5に示す。

図3.2-7にベリリウム、重水の計算モデル及び計算領域を示す。核種個数密度を表3.2-6と表3.2-7に示す。

(4) 制御棒領域

制御棒要素は、フォロワ燃料要素、制御棒案内管及び中性子吸収体から成るが、フォロワ燃料要素以外の少数群定数は、次のような手順で求めた。

- 1) 図3.2-8に示すように、制御棒領域の外側に標準型燃料要素を置いた1次元無限平板スペクトルを計算し、吸収体領域及び制御棒案内管領域の少数群均質化マクロ断面積を作成する。このとき、ハフニウムは熱外エネルギー領域に多くの共鳴吸収ピークを持つため、領域メッシュができるだけ小さくするとともに、SRACに用意されている超詳細エネルギー構造を用い、衝突確率法(PIJ計算)により解く。
- 2) 対数微分境界条件については、図3.2-9に示すような制御棒領域を炉心中央に持つ2次元の模擬炉心において、TWOTRANコードによって18群輸送計算を行う。一方、同一体系で12群拡散計算(CITATION)を行い、2つの計算で得られる制御棒反応度価値が一致するように、対数微分境界条件を決めた。

制御棒吸収体少数群定数として、熱群のみ対数微分境界条件を用い、高速群及び熱外群については1)で得た均質化少数群定数を使用する。制御棒案内管については、1)で得た12群定数を用いる。核種個数密度を表3.2-8に示す。

3.2.2 中性子拡散計算

炉心臨界計算は、CITATIONコードによって2次元体系 $x y \frac{1}{2}$ 炉心で行う。その計算体系を図3.2-10に示す。図でx方向がカナル方向を示す。メッシュ数は、x方向に45、y方向に88である。燃料要素当たり5~6メッシュ分割である。重水タンクは円筒型であるが、これを等価面積の箱型で近似した。重水反射体領域では炉心近辺で、1メッシュが数センチ、外側で10cmになるようにした。

2次元計算であるため、軸方向のものは、バックリングにより評価した。その大きさは

$1.1357 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$ である。

この炉心計算で得る中性子束、随伴中性子束を用い、摂動論によって ϵ と β_{eff} を計算した。

表 3.2 - 1 少数群エネルギー構造

--- CONDENSED ENERGY GROUP STRUCTURE ---

| GR. N | UP. U | UP. E (EV) | |
|-------|---------|-------------|----|
| 1 | 0.0000 | 10.0000 E+6 | |
| 2 | 0.5000 | 60.6531 E+5 | 1 |
| 3 | 1.0000 | 36.7879 E+5 | |
| 4 | 1.5000 | 22.3130 E+5 | |
| 5 | 2.0000 | 13.5335 E+5 | |
| 6 | 2.5000 | 82.0850 E+4 | 2 |
| 7 | 3.0000 | 49.7871 E+4 | |
| 8 | 3.5000 | 30.1974 E+4 | |
| 9 | 4.0000 | 18.3156 E+4 | |
| 10 | 4.5000 | 11.1090 E+4 | |
| 11 | 5.0000 | 67.3794 E+3 | 3 |
| 12 | 5.5000 | 40.8677 E+3 | |
| 13 | 6.0000 | 24.7875 E+3 | |
| 14 | 6.5000 | 15.0344 E+3 | |
| 15 | 7.0000 | 91.1882 E+2 | |
| 16 | 7.5000 | 55.3084 E+2 | 4 |
| 17 | 8.0000 | 33.5463 E+2 | |
| 18 | 8.5000 | 20.3468 E+2 | |
| 19 | 9.0000 | 12.3410 E+2 | |
| 20 | 9.5000 | 74.8518 E+1 | |
| 21 | 10.0000 | 45.3999 E+1 | 5 |
| 22 | 10.5000 | 27.5364 E+1 | |
| 23 | 11.0000 | 16.7017 E+1 | |
| 24 | 11.5000 | 10.1301 E+1 | |
| 25 | 12.0000 | 61.4421 E+0 | |
| 26 | 12.5000 | 37.2665 E+0 | 6 |
| 27 | 13.0000 | 22.6033 E+0 | |
| 28 | 13.5000 | 13.7096 E+0 | |
| 29 | 14.0000 | 83.1529 E-1 | |
| 30 | 14.5000 | 50.4348 E-1 | 7 |
| 31 | 15.0000 | 30.5902 E-1 | |
| 32 | 15.5000 | 18.5539 E-1 | |
| 33 | 15.7500 | 14.4498 E-1 | |
| 34 | 16.0000 | 11.2535 E-1 | 8 |
| 35 | 16.2500 | 87.6425 E-2 | |
| 36 | 16.5000 | 68.2560 E-2 | |
| 37 | 16.6250 | 60.2357 E-2 | |
| 38 | 16.7500 | 53.1579 E-2 | |
| 39 | 16.8750 | 46.9116 E-2 | |
| 40 | 17.0000 | 41.3994 E-2 | |
| 41 | 17.0616 | 38.9261 E-2 | |
| 42 | 17.1252 | 36.5276 E-2 | |
| 43 | 17.1909 | 34.2052 E-2 | |
| 44 | 17.2587 | 31.9627 E-2 | |
| 45 | 17.3290 | 29.7929 E-2 | 9 |
| 46 | 17.4019 | 27.6985 E-2 | |
| 47 | 17.4774 | 25.6843 E-2 | |
| 48 | 17.5560 | 23.7425 E-2 | |
| 49 | 17.6378 | 21.8779 E-2 | |
| 50 | 17.7230 | 20.0910 E-2 | |
| 51 | 17.8121 | 18.3784 E-2 | |
| 52 | 17.9053 | 16.7429 E-2 | |
| 53 | 18.0031 | 15.1829 E-2 | |
| 54 | 18.1059 | 13.6996 E-2 | |
| 55 | 18.2141 | 12.2947 E-2 | |
| 56 | 18.3288 | 10.9624 E-2 | |
| 57 | 18.4503 | 97.0827 E-3 | |
| 58 | 18.5797 | 85.2982 E-3 | 11 |
| 59 | 18.7181 | 74.2737 E-3 | |
| 60 | 18.8667 | 64.0171 E-3 | |
| 61 | 19.0273 | 54.5192 E-3 | |
| 62 | 19.2019 | 45.7852 E-3 | |
| 63 | 19.3923 | 37.8474 E-3 | |
| 64 | 19.6048 | 30.6016 E-3 | |
| 65 | 19.8414 | 24.1544 E-3 | |
| 66 | 20.1099 | 18.4665 E-3 | |
| 67 | 20.4200 | 13.5428 E-3 | |
| 68 | 20.7872 | 93.8080 E-4 | |
| 69 | 21.2374 | 59.8020 E-4 | |
| 70 | 21.8192 | 33.4228 E-4 | |
| 71 | 22.6431 | 14.6632 E-4 | |
| 72 | 24.0689 | 35.2381 E-5 | |

L.B.

(12 群縮約エネルギー構造)

4~16

群縮約エネルギー構造)

17

18

表 3.2-2 標準型燃料要素個数密度（個数／barn・cm）

| 計算領域 | 核種 | 温度 (°K) | | | |
|--------------|------------------|------------------------|----------|----------|----------|
| | | 300 | 325 | 350 | 400 |
| 標準燃料要素平均 | ^{235}U | 1.7196-4 ^{*)} | 1.7196-4 | 1.7196-4 | 1.7196-4 |
| | ^{238}U | 6.8989-4 | 6.8989-4 | 6.8989-4 | 6.8989-4 |
| | H | 3.5815-2 | 3.5478-2 | 3.4994-2 | 3.3688-2 |
| | O | 1.7907-2 | 1.7739-2 | 1.7497-2 | 1.6844-2 |
| | Al | 2.5799-2 | 2.5799-2 | 2.5799-2 | 2.5799-2 |
| 燃料板ミート | ^{235}U | 1.0945-3 | 1.0945-3 | 1.0945-3 | 1.0945-3 |
| | ^{238}U | 4.3912-3 | 4.3912-3 | 4.3912-3 | 4.3912-3 |
| | Al | 4.7522-2 | 4.7522-2 | 4.7522-2 | 4.7522-2 |
| 燃料板被覆 | Al | 6.0038-2 | 6.0038-2 | 6.0038-2 | 6.0038-2 |
| 軽水 | H | 6.6627-2 | 6.6001-2 | 6.5101-2 | 6.2671-2 |
| | O | 3.3313-2 | 3.3000-2 | 3.2550-2 | 3.1335-2 |
| サイドプレート + 軽水 | H | 1.7748-2 | 1.7581-2 | 1.7341-2 | 1.6694-2 |
| | O | 8.8738-3 | 8.7904-3 | 8.6705-3 | 8.3470-3 |
| | Al | 4.4046-2 | 4.4046-2 | 4.4046-2 | 4.4046-2 |

*) : 1.7196×10^{-4} を意味する。

表 3.2 - 3 フォロワ型燃料要素個数密度（個数／barn・cm）

| 計算領域 | 核種 | 温度(°K) | | | |
|------------|------------------|-----------|----------|----------|----------|
| | | 300 | 325 | 350 | 400 |
| フォロア燃料要素平均 | ^{235}U | 1.0943-4* | 1.0943-4 | 1.0943-4 | 1.0943-4 |
| | ^{238}U | 4.3902-4 | 4.3902-4 | 4.3902-4 | 4.3902-4 |
| | H | 2.9200-2 | 2.8926-2 | 2.8531-2 | 2.7467-2 |
| | O | 1.4600-2 | 1.4463-2 | 1.4266-2 | 1.3733-2 |
| | Al | 3.2474-2 | 3.2474-2 | 3.2474-2 | 3.2474-2 |
| 燃料板ミート | ^{235}U | 1.0945-3 | 1.0945-3 | 1.0945-3 | 1.0945-3 |
| | ^{238}U | 4.3912-3 | 4.3912-3 | 4.3912-3 | 4.3912-3 |
| | Al | 4.7522-2 | 4.7522-2 | 4.7522-2 | 4.7522-2 |
| 燃料板被覆 | Al | 6.0038-2 | 6.0038-2 | 6.0038-2 | 6.0038-2 |
| 燃料板軽水 | H | 6.6627-2 | 6.6001-2 | 6.5101-2 | 6.2671-2 |
| | O | 3.3313-2 | 3.3000-2 | 3.2550-2 | 3.1335-2 |
| ガイドチューブ+軽水 | H | 2.1609-2 | 2.1406-2 | 2.1114-2 | 2.0326-2 |
| | O | 1.0804-2 | 1.0703-2 | 1.0557-2 | 1.0163-2 |
| | Al | 4.0566-2 | 4.0566-2 | 4.0566-2 | 4.0566-2 |
| ガイドプレート+軽水 | H | 1.5635-2 | 1.5488-2 | 1.5277-2 | 1.4707-2 |
| ガイドチューブ | O | 7.8175-3 | 7.7440-3 | 7.6384-3 | 7.3533-2 |
| | Al | 4.5949-2 | 4.5949-2 | 4.5949-2 | 4.5949-2 |

* : 1.0943×10^{-4} を意味する。

表 3.2-4 炉心内照射簡要素素 (Al ダミープラグ装荷, 325 K)

| 核種 | 個数密度(個数/barn·cm) |
|----|--------------------------|
| H | 6.7000 - 3 ^{*)} |
| O | 3.3499 - 3 |
| Al | 5.3944 - 2 |

*) : 6.7000×10^{-3} を意味する

表 3.2-5 軽水個数密度(個数／barn・cm)

| 核種 | 温 度 (K) | | | |
|----|----------|----------|----------|----------|
| | 300 | 325 | 350 | 400 |
| H | 6.6627-2 | 6.6001-2 | 6.5101-2 | 6.2671-2 |
| O | 3.3314-2 | 3.3000-2 | 3.2550-2 | 3.1336-2 |

表 3.2-6 Be 反射体要素個数密度 (Be 反射体内
照射筒にダミープラグを挿入, 325 K)

| 核種 | 個数密度(個数/barn·cm) |
|----|------------------|
| Al | 1.4650 - 2 |
| H | 1.0032 - 2 |
| O | 5.0160 - 3 |
| Be | 7.4262 - 2 |

表 3.2 - 7 重水個数密度（重水濃度 100%，
個数／barn・cm）

| 核種 | 温 度 (K) | | |
|----|-----------------------|----------|----------|
| | 300 | 325 | 350 |
| D | 6.6396-2 [*] | 6.5838-2 | 6.4970-2 |
| O | 3.3198-2 | 3.2919-2 | 3.2485-2 |

*) : 6.6396×10^{-3} を意味する

表 3.2 - 8 制御棒要素個数密度（個数／barn
cm : 325 K）

| 計算領域 | 核種 | 個数密度 |
|---------|----|----------|
| 水 | H | 6.6001-2 |
| | O | 3.3000-2 |
| ハフニウム | Hf | 4.4873-2 |
| | H | 6.6001-2 |
| 内側キャップ | O | 3.3000-2 |
| | | |
| ガイドチューブ | Al | 6.0039-2 |
| | | |
| 外側キャップ | H | 6.6001-2 |
| | O | 3.3000-2 |

| | 減速材 (H_2O) | 被覆材 (Al) | バート部 | バート部 | 被覆材 (Al) | 減速材 (H_2O) |
|----------------|----------------|----------|------|------|----------|----------------|
| Material No. | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Sub-region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| T-region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| R-region No. | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 |
| X-region No. | 1 | | | | | |

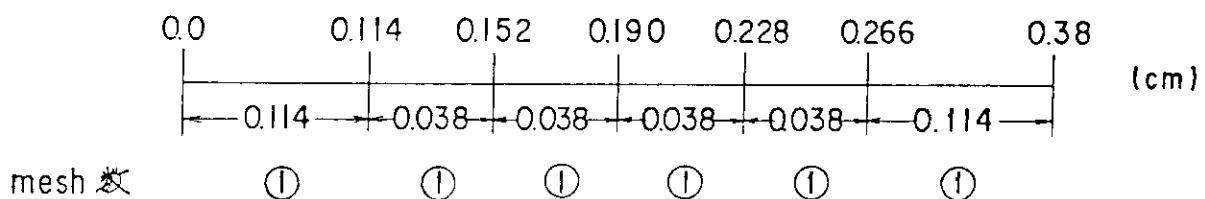
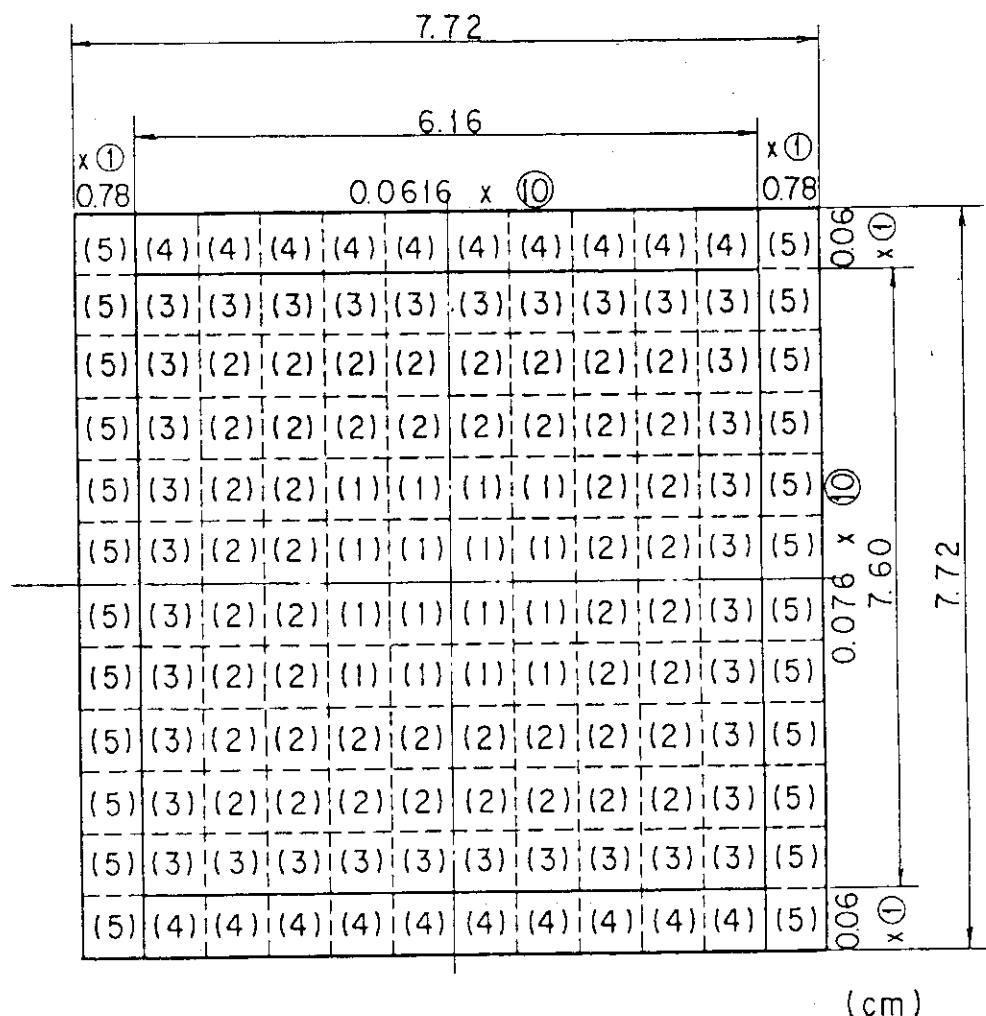


図 3.2-1 標準型燃料板計算モデル

| | 燃 料 板 | | | 軽水 | サイドプレート + 軽水 |
|--------------|-------|---|---|----|-----------------|
| Material No. | 1 | | | 2 | 3 |
| T-region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| R-region No. | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| X-region No. | 1 | | | 1 | 1 |

図 3.2-2 標準型燃料要素計算モデル



- Material
- (1),(2),(3): 燃料板
 - (4): 軽水
 - (5): サイドプレート + 軽水
- 数字は mesh 數
 () 数字は各 Sub-region 毎
 に対応した T-region
 番号

図 3.2-3 標準型燃料要素の計算モデル

| | 減速材(H_2O) | 被覆材(Al) | ミート部 | ミート部 | 被覆材(Al) | 減速材(H_2O) |
|----------------|---------------|---------|------|------|---------|---------------|
| Material No. | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Sub-region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| T - region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| R - region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| X - region No. | | | | | | |

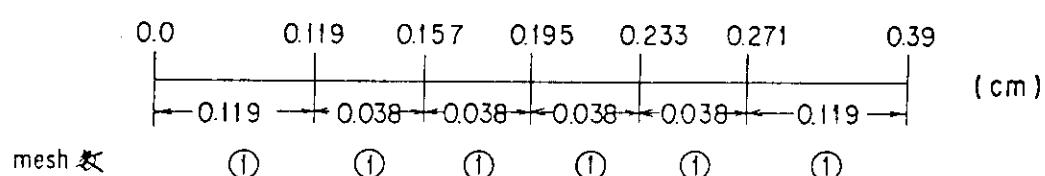
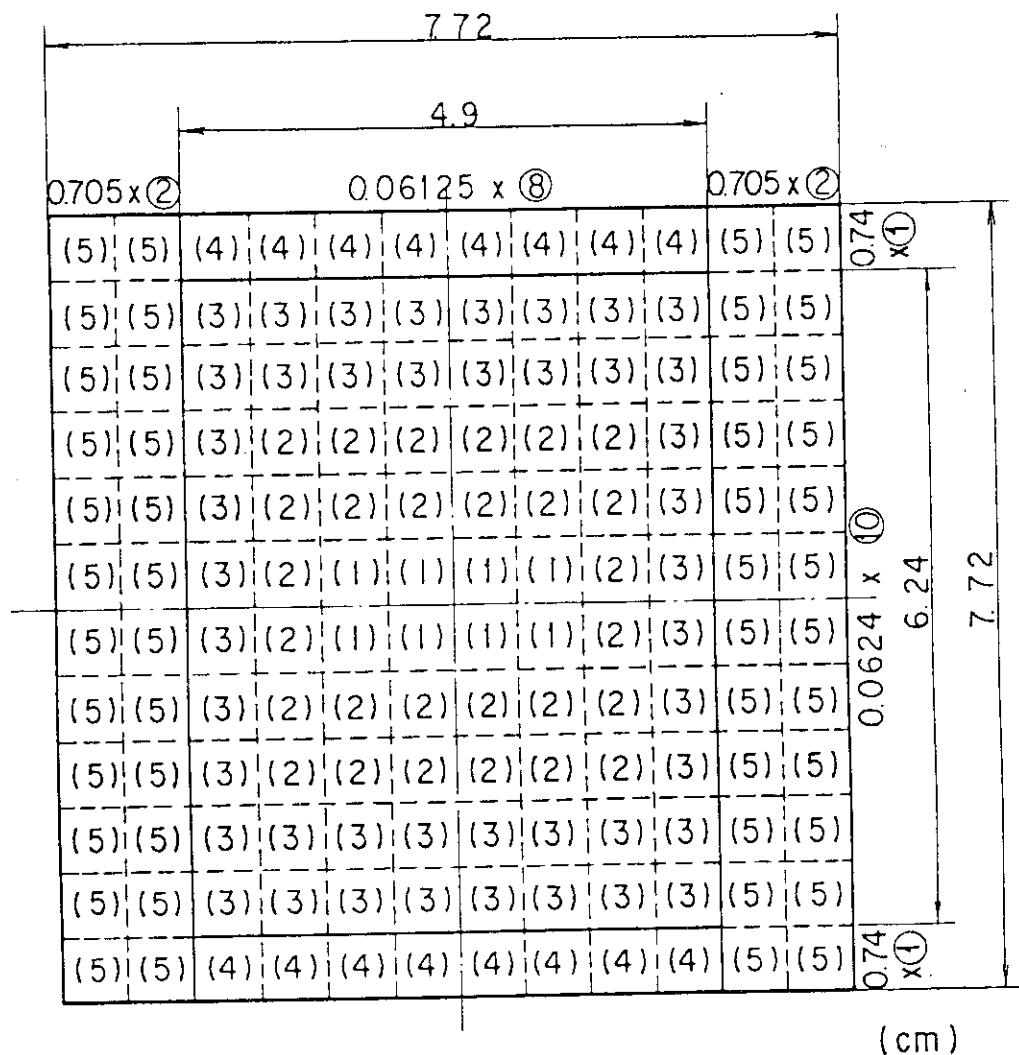


図 3.2-4 フォロワ型燃料板計算モデル

| | 燃 料 板 | | | 軽 水 | サイドブレード + 軽水 |
|--------------|-------|---|---|-----|-----------------|
| Material No. | 1 | | | 2 | 3 |
| T-region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| R-region No. | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| X-region No. | | 1 | | 1 | 1 |

図 3.2-5 フォロワ型燃料要素計算モデル



Material

○ 数字はmesh数

(1),(2),(3)：燃料板

() 数字は各Sub-region毎

(4)：軽水

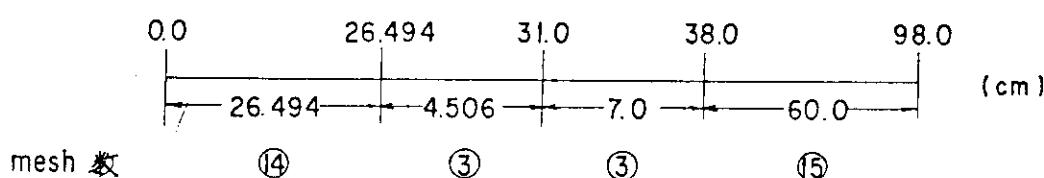
に対応したT-region

(5)：サイドプレート + 軽水

番号

図 3.2-6 フォロワ型燃料要素の計算モデル

| | 標準型燃料 (Be プラグ) | Be + Al (Be プラグ) | D ₂ O (100% 濃度) | D ₂ O (100% 濃度) |
|--------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Material No. | 1 | 2 | 3 | 3 |
| Zone No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| X-region No. | 1 | 2 | 3 | 4 |

図 3.2-7 Be, D₂O 反射体計算モデル(円筒体系)

| Standard fuel (homogenized fuel) | H ₂ O | Al | H ₂ O | Hf | H ₂ O | | | | Hf | H ₂ O | Al | H ₂ O | Standard fuel (homogenized fuel) |
|-------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 7.72 ^{*)} | 0.05 | 0.5 | 0.13 | 0.5 | 5.36 | | | | 0.5 | 0.13 | 0.5 | 0.05 | 7.72 |
| Material No. | 1 | 2 | 3 | 2 | 4 | | | | 2 | 4 | 2 | 3 | 2 |
| Sub-region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| T-region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| mesh 幅 (cm) | 3 x 0.965 | 0.4825 x 0.05 | 0.25 x 0.10 | 0.17 x 0.065 | 0.2 x 0.04 | 0.1 x 0.018 | 0.08 x 0.01 | 0.04 x 0.01 | 0.02 x 0.01 | 0.01 x 0.01 | 0.01 x 0.01 | 0.01 x 0.01 | 0.01 x 0.01 |
| R-region No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| X-region No. for CITATION | 1 | | 2 | | | | | | 3 | | 2 | | 1 |
| X-region No. for TWOTRAN | 1 | | 2 | | 3 | | | | 4 | 3 | 2 | | 1 |

*) : 単位 cm

図 3.2-8 制御棒領域計算モデル

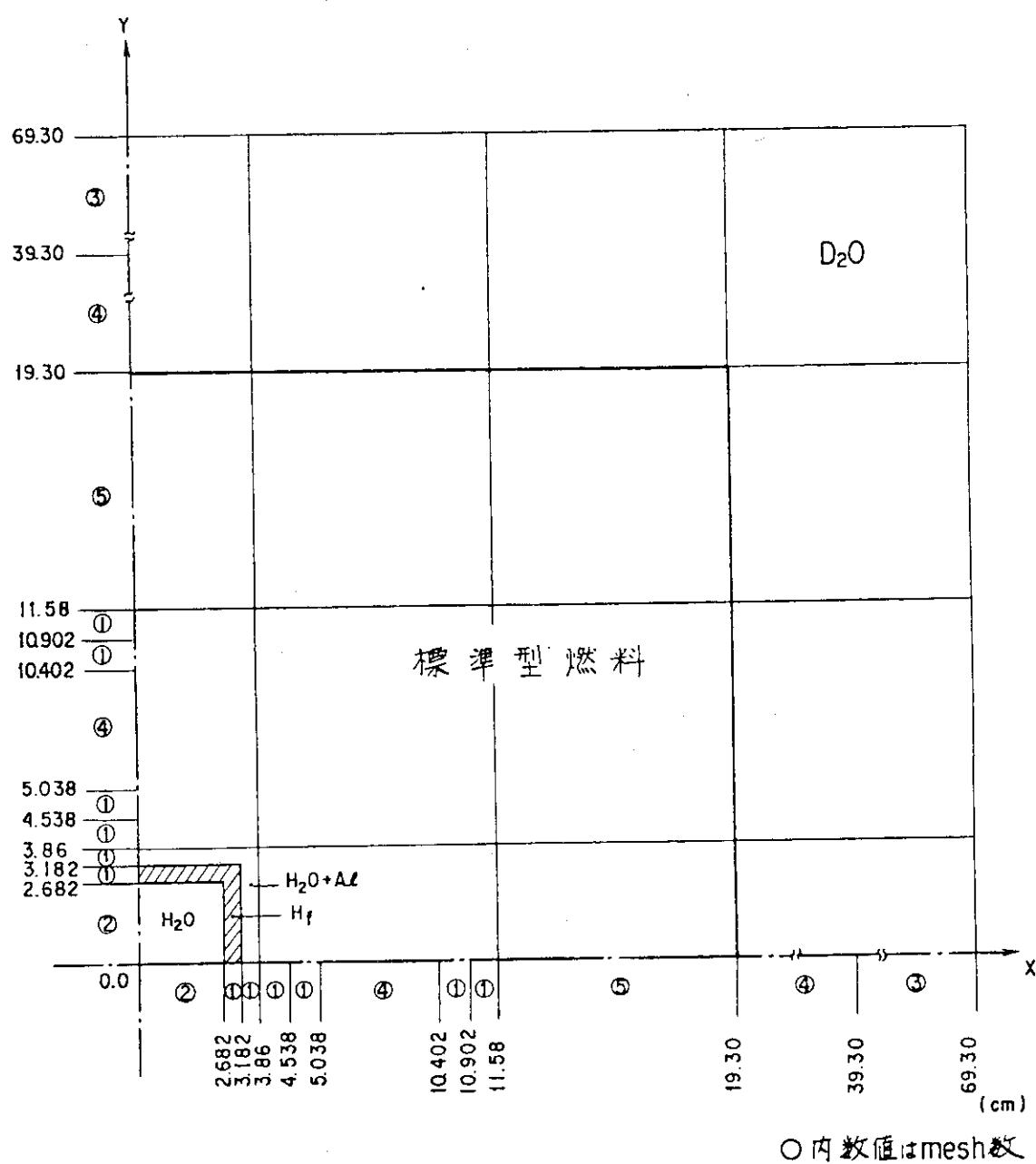


図 3.2-9 制御棒反応度価値計算のための体系

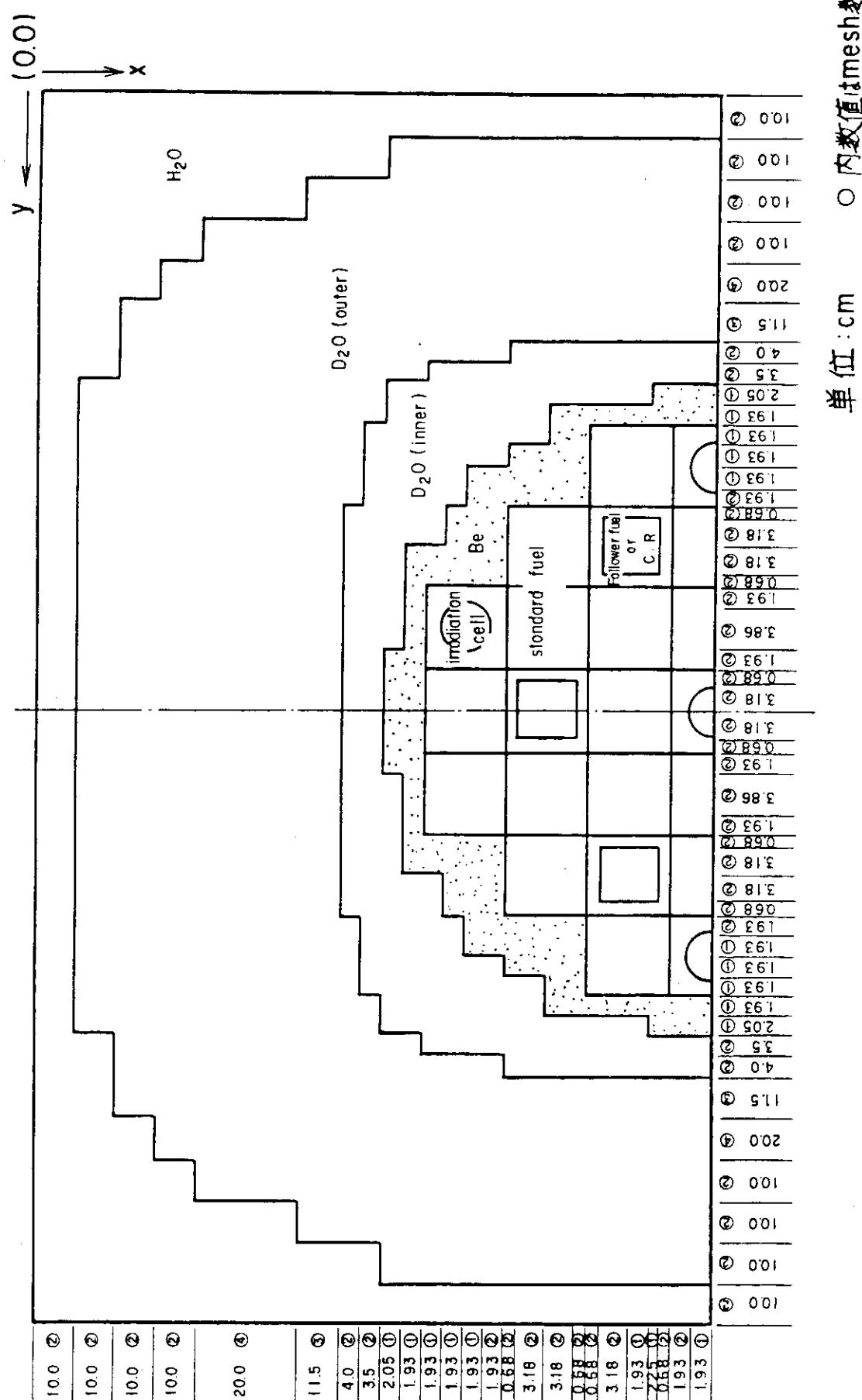


図 3.2-10 炉心計算形状 (2次元x-y)

3.3 炉心条件と動特性定数 (ℓ , β_{eff})

以上の計算体系、方法によって得る即発中性子寿命 ℓ と実効遅発中性子割合 B_{eff} を示す。これら定数の炉心条件、つまり燃焼度、制御棒位置及び炉心温度への依存を評価した。

3.3.1 燃焼度の影響

燃焼中のウラン及びプルトニウムの各同位体核種の燃焼による減損量及び生成量は、燃焼計算結果から得たものを使用し、表 3.3-1 に示す。表の値は、標準型燃料及びフォロワ型燃料について、燃焼度に対する燃料板中の各同位体核種の個数密度を示す。

炉心温度 325 K で、制御棒全引抜き位置にある炉心において、燃焼度が 0 % から 50 % に進んだ時の ℓ と β_{eff} を表 3.3-2 に示す。表 3.3-2 の値は、炉心軸方向バックリングを $1.1357 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$ 一定として、燃焼度を変えて臨界計算を行った結果である。

別の計算方法として、燃焼度に応じて軸方向バックリングを調整し、 $k_{\text{eff}} = 1$ となるように臨界計算を行った。その結果を表 3.3-3 に示す。

3.3.2 炉心温度の影響

0 % 燃焼度炉心において、制御棒は全引抜き位置にあるとし、得られた ℓ , β_{eff} の炉心温度依存性を表 3.3-4 に示す。

3.3.3 制御棒配置の影響

3.2.4 で議論したように、制御棒要素を標準型燃料が取り囲む炉心において、輸送計算 (TWOTRAN による 18 群計算、18 群縮約エネルギー構造を表 3.2-1 に示す。) で求めた制御棒の反応度係数を再現するように、拡散計算 (CITATION による 12 群計算) の対数微分境界条件を決める。12 群のうち、熱群に対応する 4 群に対し、対数微分境界条件を求める。この計算では、この 4 つの群に対する条件を等しいと仮定した。表 3.3-5 より境界定数として 0.15 を得た。

図 3.3-1 に制御棒位置と各名称を示す。図中記号の Sa rod と S rod は粗調整棒で、R rod は微調整棒である。表 3.3-6 に、それぞれの制御棒の引抜き、挿入パターンに応じて行った臨界計算結果と即発中性子寿命、実効遅発中性子割合の値を示す。この場合、炉心温度は 325 K で、炉心はクリーン状態にあるとする。また、Sa rod 2 本全引抜き状態にある場合について得た燃焼度の影響を表 3.3-7 に示す。

3.3.4 各炉心条件で得た ℓ , β_{eff} の動特性への影響

以上の炉心計算で得たそれぞれの ℓ , β_{eff} の値について、動特性への影響 (ステップ状約 10 % 反応度外乱応答) を計算し、その結果をまとめて表 3.3-8 に示す。計算は EUREKA-2 コード²⁾ を用いた。なお、EUREKA-2 コードを用いて行った計算条件は、4.5.1 で述べるものと同じである。表に示す種々の炉心条件を考慮したが、炉心動特性におよぼす影響の違いは小さい。

3.3.5 平衡炉心の ℓ , β_{eff}

炉心の平衡燃焼度は、B.O.C.（平衡炉心初期）で 18%，E.O.C.（平衡炉心末期）で 26% である。これらの燃焼度に対応する即発中性子寿命、実効遅発中性子割合を表 3.3-2 で得た 10% と 30% 燃焼度に対応する値から直線内挿で求めた。その結果を表 3.3-9 に示す。

なお、表 3.3-3 で求めた ℓ , β_{eff} から平衡炉心の値を求めるとき、表 3.3-10 のようになる。表 3.3-9 と表 3.3-10 のそれぞれの ℓ と β_{eff} の炉心動特性への影響を調べた結果を表 3.3-11 に示す。最大原子炉出力に至る時間はクリーン炉心で差が最も大きくなるが、ピーク値にほとんど差はない。

表 3.3-1 燃焼に伴う個数密度の変化

標準型燃料

| DAY | 3.44700E-01 | 1.72369E+00 | 3.44942E+00 | 3.52185E+01 | 1.09818E+02 | 1.89743E+02 |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MWD | 6.89372E+00 | 3.44594E+01 | 6.89516E+01 | 6.96796E+02 | 2.14384E+03 | 3.67909E+03 |
| U235-% | 1.00000E-03 | 5.00000E-03 | 1.00000E-02 | 1.00000E-01 | 3.00000E-01 | 5.00000E-01 |

| ID | NAME | U235-% | 1.000E-03 | 5.000E-03 | 1.000E-02 | 1.000E-01 | 3.000E-01 | 5.000E-01 |
|----|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | U05 | 1.094E-03 | 1.093E-03 | 1.089E-03 | 1.084E-03 | 9.851E-04 | 7.663E-04 | 5.476E-04 |
| 2 | U06 | 0.0 | 1.865E-07 | 9.368E-07 | 1.874E-06 | 1.865E-05 | 5.494E-05 | 8.937E-05 |
| 3 | U08 | 4.391E-03 | 4.391E-03 | 4.391E-03 | 4.390E-03 | 4.377E-03 | 4.345E-03 | 4.307E-03 |
| 4 | PU9 | 0.0 | 1.210E-07 | 6.202E-07 | 1.241E-06 | 1.167E-05 | 2.931E-05 | 3.895E-05 |
| 5 | PU0 | 0.0 | 4.780E-11 | 1.235E-09 | 4.954E-09 | 4.640E-07 | 3.457E-06 | 7.776E-06 |
| 6 | PU1 | 0.0 | 4.260E-14 | 5.498E-12 | 4.432E-11 | 4.236E-08 | 9.742E-07 | 3.569E-06 |
| 7 | PU2 | 0.0 | 6.480E-18 | 4.185E-15 | 6.786E-14 | 6.913E-10 | 5.734E-08 | 4.609E-07 |
| 8 | XE5 | 0.0 | 1.260E-08 | 1.276E-08 | 1.273E-08 | 1.206E-08 | 1.028E-08 | 8.062E-09 |
| 9 | SM9 | 0.0 | 9.597E-09 | 3.925E-08 | 6.228E-08 | 8.954E-08 | 7.542E-08 | 5.863E-08 |
| 10 | F5N | 0.0 | 1.409E-06 | 7.042E-06 | 1.408E-05 | 1.408E-04 | 4.226E-04 | 7.049E-04 |
| 11 | F5S | 0.0 | 3.459E-07 | 1.727E-06 | 3.451E-06 | 3.403E-05 | 9.847E-05 | 1.564E-04 |
| 12 | F5R | 0.0 | 4.255E-09 | 2.038E-08 | 3.867E-08 | 1.687E-07 | 1.485E-07 | 1.044E-07 |
| 13 | F9N | 0.0 | 1.430E-10 | 3.685E-09 | 1.485E-08 | 1.512E-06 | 1.418E-05 | 4.239E-05 |
| 14 | F9S | 0.0 | 3.738E-11 | 9.629E-10 | 3.878E-09 | 3.907E-07 | 3.568E-06 | 1.030E-05 |
| 15 | F9R | 0.0 | 1.032E-13 | 2.541E-12 | 9.702E-12 | 4.325E-10 | 1.382E-09 | 1.959E-09 |

フォロワ型燃料

| DAY | 3.44952E-01 | 1.72498E+00 | 3.45195E+00 | 3.52370E+01 | 1.09813E+02 | 1.89601E+02 |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MWD | 6.89875E+00 | 3.44850E+01 | 6.90019E+01 | 6.97102E+02 | 2.14337E+03 | 3.67557E+03 |
| U235-% | 1.00000E-03 | 5.00000E-03 | 1.00000E-02 | 1.00000E-01 | 3.00000E-01 | 5.00000E-01 |

| ID | NAME | U235-% | 1.000E-03 | 5.000E-03 | 1.000E-02 | 1.000E-01 | 3.000E-01 | 5.000E-01 |
|----|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | U05 | 1.094E-03 | 1.093E-03 | 1.089E-03 | 1.084E-03 | 9.851E-04 | 7.663E-04 | 5.476E-04 |
| 2 | U06 | 0.0 | 1.855E-07 | 9.317E-07 | 1.864E-06 | 1.855E-05 | 5.467E-05 | 8.900E-05 |
| 3 | U08 | 4.391E-03 | 4.391E-03 | 4.391E-03 | 4.390E-03 | 4.377E-03 | 4.346E-03 | 4.309E-03 |
| 4 | PU9 | 0.0 | 1.185E-07 | 6.071E-07 | 1.215E-06 | 1.43E-05 | 2.876E-05 | 3.826E-05 |
| 5 | PU0 | 0.0 | 4.630E-11 | 1.196E-09 | 4.798E-09 | 4.507E-07 | 3.379E-06 | 7.650E-06 |
| 6 | PU1 | 0.0 | 4.017E-14 | 5.182E-12 | 4.178E-11 | 4.002E-08 | 9.252E-07 | 3.410E-06 |
| 7 | PU2 | 0.0 | 6.100E-18 | 3.939E-15 | 6.386E-14 | 6.519E-10 | 5.433E-08 | 4.392E-07 |
| 8 | XE5 | 0.0 | 1.254E-08 | 1.269E-08 | 1.266E-08 | 1.199E-08 | 1.021E-08 | 7.998E-09 |
| 9 | SM9 | 0.0 | 9.600E-09 | 3.923E-08 | 6.220E-08 | 8.918E-08 | 7.502E-08 | 5.824E-08 |
| 10 | F5N | 0.0 | 1.411E-06 | 7.048E-06 | 1.409E-05 | 1.409E-04 | 4.229E-04 | 7.054E-04 |
| 11 | F5S | 0.0 | 3.461E-07 | 1.728E-06 | 3.454E-06 | 3.407E-05 | 9.862E-05 | 1.567E-04 |
| 12 | F5R | 0.0 | 4.258E-09 | 2.038E-08 | 3.867E-08 | 1.677E-07 | 1.473E-07 | 1.036E-07 |
| 13 | F9N | 0.0 | 1.392E-10 | 3.585E-09 | 1.445E-08 | 1.471E-06 | 1.381E-05 | 4.131E-05 |
| 14 | F9S | 0.0 | 3.638E-11 | 9.369E-10 | 3.773E-09 | 3.803E-07 | 3.477E-06 | 1.005E-05 |
| 15 | F9R | 0.0 | 1.004E-13 | 2.471E-12 | 9.429E-12 | 4.183E-10 | 1.334E-09 | 1.894E-09 |

表 3.3-2 ℓ , β_{eff} の燃焼度依存性

| 燃焼度(%) | ℓ (sec) | β_{eff} | k_{eff} |
|--------|------------------------|------------------------|------------------|
| 0 | 1.167×10^{-4} | 7.559×10^{-3} | 1.199 |
| 1 | 1.142×10^{-4} | 7.546×10^{-3} | 1.143 |
| 10 | 1.164×10^{-4} | 7.434×10^{-3} | 1.111 |
| 30 | 1.232×10^{-4} | 7.185×10^{-3} | 1.041 |
| 50 | 1.332×10^{-4} | 6.917×10^{-3} | 0.946 |

(325K)

表 3.3-3 ℓ , β_{eff} の燃焼度依存性

| 燃焼度(%) | ℓ (sec) | β_{eff} | k_{eff} | Buckling (cm ⁻²) |
|--------|------------------------|------------------------|------------------|------------------------------|
| 0 | 6.577×10^{-5} | 8.004×10^{-3} | 1.016 | 3.45×10^{-3} |
| 1 | 7.110×10^{-5} | 7.863×10^{-3} | 1.015 | 2.75×10^{-3} |
| 10 | 7.727×10^{-5} | 7.692×10^{-3} | 1.008 | 2.45×10^{-3} |
| 30 | 1.066×10^{-4} | 7.257×10^{-3} | 1.011 | 1.50×10^{-3} |
| 50 | 1.931×10^{-4} | 6.783×10^{-3} | 1.002 | 5.0×10^{-4} |

(325K)

表 3.3-4 ℓ , β_{eff} の温度依存性

| 温度(K) | ℓ (sec) | β_{eff} | k_{eff} |
|-------|------------------------|------------------------|------------------|
| 300 | 1.164×10^{-4} | 7.559×10^{-3} | 1.202 |
| 325 | 1.167×10^{-4} | 7.559×10^{-3} | 1.199 |
| 350 | 1.184×10^{-4} | 7.566×10^{-3} | 1.193 |
| 400* | 1.232×10^{-4} | 7.585×10^{-3} | 1.177 |

(クリーン炉芯)

(*; 冷却材は加圧状態で沸騰していない
と仮定した場合)

表 3.3 - 5 対数微分境界条件の決定

| | | 中性子吸収体 | オロク型燃料 | | 差 | |
|------------------------------|--|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| TWOTRAN による 結果 (18群計算) | k_{eff} | 1.172 | 1.258 | Δk_{eff} | 0.0856 | |
| | P | 14.70% $\Delta k/k$ | 20.50% $\Delta k/k$ | ΔP | 5.80% $\Delta k/k$ | |
| CITATION による結果 (12群計算) | 対数微分 境界条件 $C_9 = C_0 + C_1 = C_{12}$ $= 0.20$ | k_{eff} | 1.154 | 1.240 | Δk_{eff} | 0.086 |
| | P | 13.37% $\Delta k/k$ | 19.37% $\Delta k/k$ | ΔP | 6.00% $\Delta k/k$ | |
| | | k_{eff} | 1.156 | 1.240 | Δk_{eff} | 0.084 |
| | 0.15 | P | 13.53% $\Delta k/k$ | 19.37% $\Delta k/k$ | ΔP | 5.84% $\Delta k/k$ |
| | | k_{eff} | 1.159 | 1.240 | Δk_{eff} | 0.081 |
| | 0.10 | P | 13.75% $\Delta k/k$ | 19.37% $\Delta k/k$ | ΔP | 5.62% $\Delta k/k$ |
| | | k_{eff} | 1.162 | 1.240 | Δk_{eff} | 0.078 |

表 3.3 - 6 制御棒配置の影響

| 制御棒位置 | | | ℓ (sec) | β_{eff} | k_{eff} | P (% $\Delta k/k$) |
|------------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|------------------|-----------------------|
| Sa (2本) | S (2本) | R (2本) | | | | |
| F.O | F.O | F.O | 1.167×10^{-4} | 7.559×10^{-3} | 1.199 | 16.60 |
| F.O | F.I | F.I | 1.197×10^{-4} | 7.654×10^{-3} | 1.034 | 3.29 |
| F.I | F.O | F.I | 1.275×10^{-4} | 7.626×10^{-3} | 1.019 | 1.86 |
| F.I | F.I | F.O | 1.279×10^{-4} | 7.614×10^{-3} | 1.011 | 1.09 |
| F.I | F.I | F.I | 1.327×10^{-4} | 7.607×10^{-3} | 0.917 | -9.05 |

(7リ-ン炉心:325K)

(F.O:全引抜, F.I:全挿入)

表 3.3 - 7 ℓ , β_{eff} の燃焼度依存性
(Sa rod全引抜き位置)

| 燃焼度(%) | ℓ (sec) | β_{eff} | k_{eff} |
|--------|------------------------|------------------------|------------------|
| 0 | 1.197×10^{-4} | 7.654×10^{-3} | 1.034 |
| 1 | 1.174×10^{-4} | 7.640×10^{-3} | 0.987 |
| 10 | 1.194×10^{-4} | 7.528×10^{-3} | 0.959 |
| 30 | 1.255×10^{-4} | 7.278×10^{-3} | 0.894 |
| 50 | 1.343×10^{-4} | 7.012×10^{-3} | 0.809 |

(325K)

表 3.3-8 炉心計算で得た ℓ , β_{eff} の動特性への影響

| 炉心状態 | | | ℓ | β_{eff} | 約10ステップ状外乱応答 (0~0.3secの間) | |
|------|------|------------|---------------|----------------------|------------------------------|-------------|
| 燃焼度 | 温度 | 制御棒配置 | $\times 10^4$ | $\times 10^{-3}$ | 最高原子炉出力 | 反応度添加開始から時間 |
| 0 % | 300K | 全引抜き | 1.164 sec | 7.559 | 21.87 MW | 66 msec |
| | 325 | 全引抜き | 1.167 | 7.559 | 21.87 | 66 |
| | | 全挿入 | 1.327 | 7.607 | 21.84 | 72 |
| | | S 0 2本引抜き* | 1.197 | 7.654 | 21.84 | 67 |
| | | S 2本引抜き* | 1.275 | 7.626 | 21.84 | 71 |
| | | R 2本引抜き* | 1.279 | 7.614 | 21.85 | 70 |
| | 350 | 全引抜き | 1.184 | 7.566 | 21.87 | 67 |
| | 400 | 全引抜き | 1.232 | 7.586 | 21.86 | 69 |
| 10 | 325 | 全引抜き | 1.164 | 7.434 | 21.88 | 63 |
| | | S 0 2本引抜き* | 1.194 | 7.528 | 21.86 | 64 |
| 30 | 325 | 全引抜き | 1.232 | 7.185 | 21.96 | 71 |
| | | S 0 2本引抜き* | 1.255 | 7.278 | 21.93 | 73 |
| 50 | 325 | 全引抜き | 1.332 | 6.912 | 22.06 | 86 |
| | | S 0 2本引抜き* | 1.343 | 7.012 | 22.03 | 86 |

(*印 : S, S または R rod 2本のみ全引抜き状態にあり、他の4本の rod は全挿入状態にある場合)

表 3.3-9 平衡炉心の即発中性子寿命と実効遅発中性子割合(表 3.3-2 より)

| 遅発中性子群(i) | 崩壊定数 λ_i (sec ⁻¹) | 遅発中性子割合 | | |
|----------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | クリーン炉心 | B. O. C. | E. O. C. |
| 1 | 1.272×10^{-2} | 0.038 | 0.038 | 0.038 |
| 2 | 3.174×10^{-2} | 0.207 | 0.208 | 0.208 |
| 3 | 1.160×10^{-1} | 0.190 | 0.190 | 0.190 |
| 4 | 3.110×10^{-1} | 0.409 | 0.408 | 0.407 |
| 5 | 1.400 | 0.130 | 0.130 | 0.129 |
| 6 | 3.870 | 0.027 | 0.027 | 0.027 |
| β_{eff} | | 7.56×10^{-3} | 7.34×10^{-3} | 7.24×10^{-3} |
| ℓ (sec) | | 1.17×10^{-4} | 1.19×10^{-4} | 1.22×10^{-4} |

表 3.3 - 10 平衡炉心の即発中性子寿命と実効遅発中性子割合（表 3.3 - 3 より）

| 遅発中性子群 (i) | 遅発中性子割合 | | |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | クリーン炉心 | B. O. C | E. O. C |
| 1 | 0.038 | 0.038 | 0.038 |
| 2 | 0.204 | 0.206 | 0.208 |
| 3 | 0.191 | 0.190 | 0.190 |
| 4 | 0.410 | 0.409 | 0.408 |
| 5 | 0.130 | 0.130 | 0.130 |
| 6 | 0.027 | 0.027 | 0.027 |
| β_{eff} | 800×10^{-3} | 7.52×10^{-3} | 7.34×10^{-3} |
| ℓ (sec) | 65.8×10^{-5} | 85.3×10^{-5} | 99.5×10^{-5} |

表 3.3 - 11 炉心計算の違いによる動特性への影響

| 炉心状態 | 図 | 最大原子炉出力(0~0.3秒) 反応性添加開始からの時間 | |
|----------|-------|------------------------------|--------------|
| クリーン | 4 5-1 | 21.87 | MW 0.065 sec |
| | | 21.80 | 0.040 |
| B. O. C. | 4 5-2 | 21.94 | 0.070 |
| | | 21.92 | 0.056 |
| E. O. C. | 4 5-3 | 21.97 | 0.080 |
| | | 21.96 | 0.070 |

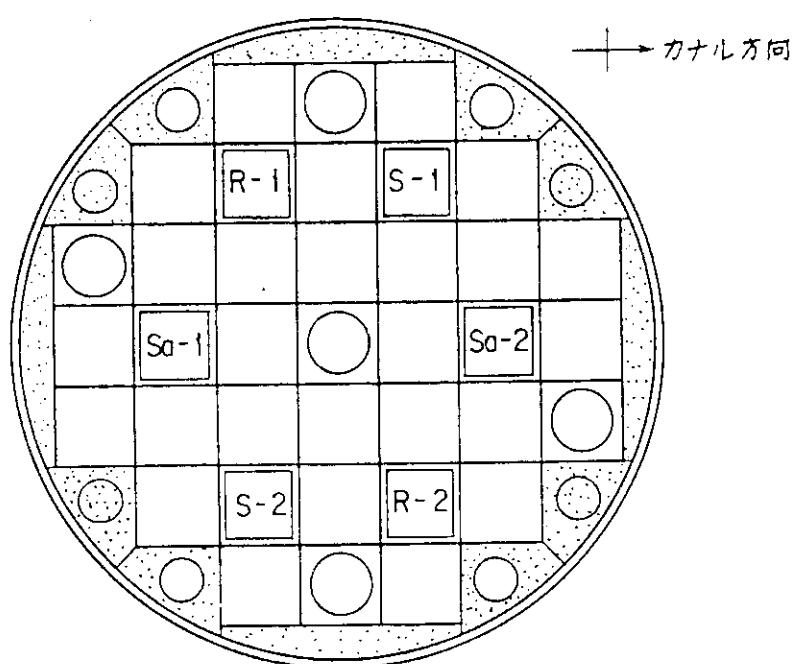


図 3.3 - 1 制御棒配置

4 反応度外乱応答解析

4.1 概 要

本原子炉は減速材温度係数、ボイド係数及びドプラ係数がすべて負で、強い自己制御性を持っているが、更に自動制御系を設け、原子炉が十分な減衰特性をもつようとする。

自動制御系は、重水タンク外周に設置する中性子検出器の線形出力系の信号と出力設定器からの信号との偏差信号により、微調整棒1本を駆動制御することにより行う。ステップ状又はランプ状の出力変動を与える反応度外乱があっても、速やかに所定の出力になるように、適切な応答をもった自動制御系を設ける。

この章は、以上の設計を目的とし、制御棒駆動による反応度外乱の応答制御の特性を議論する。応答特性は、アナログ計算機によって解析した。

以下、原子炉動特性を記述する基本式、自動制御系の概要、最後に本解析で得た反応度外乱に対する応答特性を述べる。

4.2 原子炉動特性基本式

定格出力運転中の原子炉に、反応度外乱が加わり、反応度変化が起こると、原子炉は非定常状態になり出力が変動する。この過渡変化を記述する原子炉の動特性方程式は、炉心内の全中性子数の変化のみに注目する1点近似において、次式で与えられる。

$$\frac{d n(t)}{d t} = \frac{\rho - \beta_{\text{eff}}}{\ell} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{d C_i(t)}{d t} = \frac{\beta_i}{\ell} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

(1)式は、炉内中性子総数 $n(t)$ の生成、消滅を表わす微分方程式で、 ρ は反応度、 ℓ は即発中性子寿命、 β_{eff} は実効遅発中性子割合で、遅発中性子先行核(その総数を C_i とする)はその半減期によって6群に分けられている。 λ_i は第 i 群の遅発中性子先行核の β_i は第 i 群の遅発中性子が核分裂による全発生中性子に対して占める割合であり、

$$\sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta_{\text{eff}} \quad (3)$$

である。表 4.2-1 に遅発中性子に関する数値をまとめて示す。

(2)式は、第 i 群の遅発中性子先行核の生成、消滅を表わす微分方程式である。 $\sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t)$ は単位時間に炉内に放出される遅発中性子数を表わす。

定常状態にある原子炉の応答を求める場合、定常状態を基準として、それからのずれを新しい変数にとることによって、ゼロ状態応答のみを求めればよいようになることができる。 $t=0$

で定常状態（そのときの n , C_i の値を夫々 n_0 , C_{i0} とする）にある炉に、反応度を添加したときの初期値からの変動を

$$N = \frac{n - n_0}{n_0}, \quad C_i = \frac{C_i - C_{i0}}{C_{i0}}$$

で表わし、(1), (2)式を新変数 N , C_i について変換し、

$$\frac{\beta_i}{\ell} n_0 = \lambda_i C_{i0} \quad (4)$$

$$\frac{\beta}{\ell} n_0 = \sum_i \lambda_i C_{i0} \quad (5)$$

の関係を用いると、

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} N + \frac{\rho}{\ell} + \frac{\beta}{\ell} \sum_i \frac{\beta_i}{\beta} C_i \quad (6)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_i N - \lambda_i C_i \quad (7)$$

通常さらに N , C_i , t についてスケーリングを次のように行うが、

$$T = \alpha_t \cdot t$$

$$\bar{N} = \alpha_N \cdot N$$

$$\bar{C}_i = \alpha_c \cdot C_i$$

ここでは、 $\alpha_t = \alpha_N = \alpha_c = 1$ とし、(6)と(7)式をそのまま用いる。

表 4.2.1 遅発中性子に関する数値

| 遅発中性子群(i) | 半減期*(sec) | 寿命*(sec) | 崩壊定数 λ_i (sec ⁻¹) | 遅発中性子割合 $\alpha_i = \beta_i / \beta_{eff}$ | | |
|---------------|-----------|----------|---------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| | | | | リノ炉心 | 平衡炉心初期 | 平衡炉心末期 |
| 1 | 54.493 | 78.616 | 1.272×10^{-2} | 0.038 | 0.038 | 0.038 |
| 2 | 21.838 | 34.506 | 3.174×10^{-2} | 0.207 | 0.208 | 0.208 |
| 3 | 5.975 | 8.621 | 1.160×10^{-1} | 0.190 | 0.190 | 0.190 |
| 4 | 2.229 | 3.215 | 3.110×10^{-1} | 0.409 | 0.408 | 0.407 |
| 5 | 0.495 | 0.714 | 1.400 | 0.130 | 0.130 | 0.129 |
| 6 | 0.179 | 0.258 | 3.870 | 0.027 | 0.027 | 0.027 |
| β_{eff} | | | | 7.56×10^{-3} | 7.34×10^{-3} | 7.24×10^{-3} |
| ℓ (sec) | | | | 1.17×10^{-4} | 1.19×10^{-4} | 1.22×10^{-4} |

(* ; 半減期、寿命及び崩壊定数は ^{235}U の値である)

4.3 自動制御系モデル

本原子炉において、炉心の中性子束を一定に制御するため、図4.3-1に示すような反応度自動制御系を設ける。この制御系は、線形出力系の信号と出力設定からの信号との偏差信号を用いて、制御棒の挿入度を制御することにより、実験物等による反応度変化、キセノン濃度変化、温度変化及び燃料の燃焼等によって生じることが予想される反応度変化を調整し、所要の運転状態に維持し得るよう設計する。

図4.3-2に解析に用いた自動制御系モデルを示す。さらに詳細に図4.3-3に炉心の動特性を示すアナログ計算用結線図を、図4.3-4に制御系のアナログ計算用結線図を示す。図4.3-3の中の値は、4.2の炉心動特性で述べたもので表4.2-1にまとめて示している。図4.3-4の制御系では次のものを考慮した。

- コントローラの比例感度 $K_p = 33$
- 制御棒モータ1次遅れ $T = 0.15 \text{ sec}$
- 制御棒駆動装置における強磁性材料のプランジャー（図4.3-5）と懸吊用電磁石の相対位置のずれをバックラッシュで表わした時の不感帯の幅 $a = 0.05 \text{ cm}$ (図4.3-6)
- 制御棒駆動距離は、制御棒駆動速度 $K_s (\text{cm/sec})$ の関数で与える。
- 制御棒反応度添加率 $K_w (\text{ドル/cm})$ は、自動制御用微調整棒反応度価値で決まる。

本原子炉の反応度自動制御は、図3.3-1の微調整棒 (R_{rod}) 1本で行う。この制御棒の反応度価値曲線を図4.3-7に示す。図の縦軸は、反応度価値を全ストロークで1.0になるように規格化している。この時、他の制御棒、粗調整棒 ($S_{\text{a rod}}$) 2本は全引抜き位置にあり、粗調整棒 (S_{rod}) 2本は、燃焼度に応じてB.O.C.で27cm引抜き位置にあり、E.O.C.で42cm引抜き位置にあるとする。この燃焼度の規格化反応度価値曲線への影響は、ほとんどない。B.O.C.とE.O.C.のそれぞれの平衡炉心における R_{rod} 2本分の制御棒全反応度価値は、約8.5% $\Delta k/k$ と約8.0% $\Delta k/k$ である。 R_{rod} 1本分の反応度価値は、E.O.C.で上記の半分の約4.0% $\Delta k/k$ とし、B.O.C.で干渉効果を考慮し大きく見積って約5.7% $\Delta k/k$ とした。これによって制御棒反応度添加率として計算誤差を考慮してより広い範囲の添加率をカバーして、解析できる。その結果得られる反応度添加率 (% $\Delta k/k/cm$) を図4.3-8に示す。

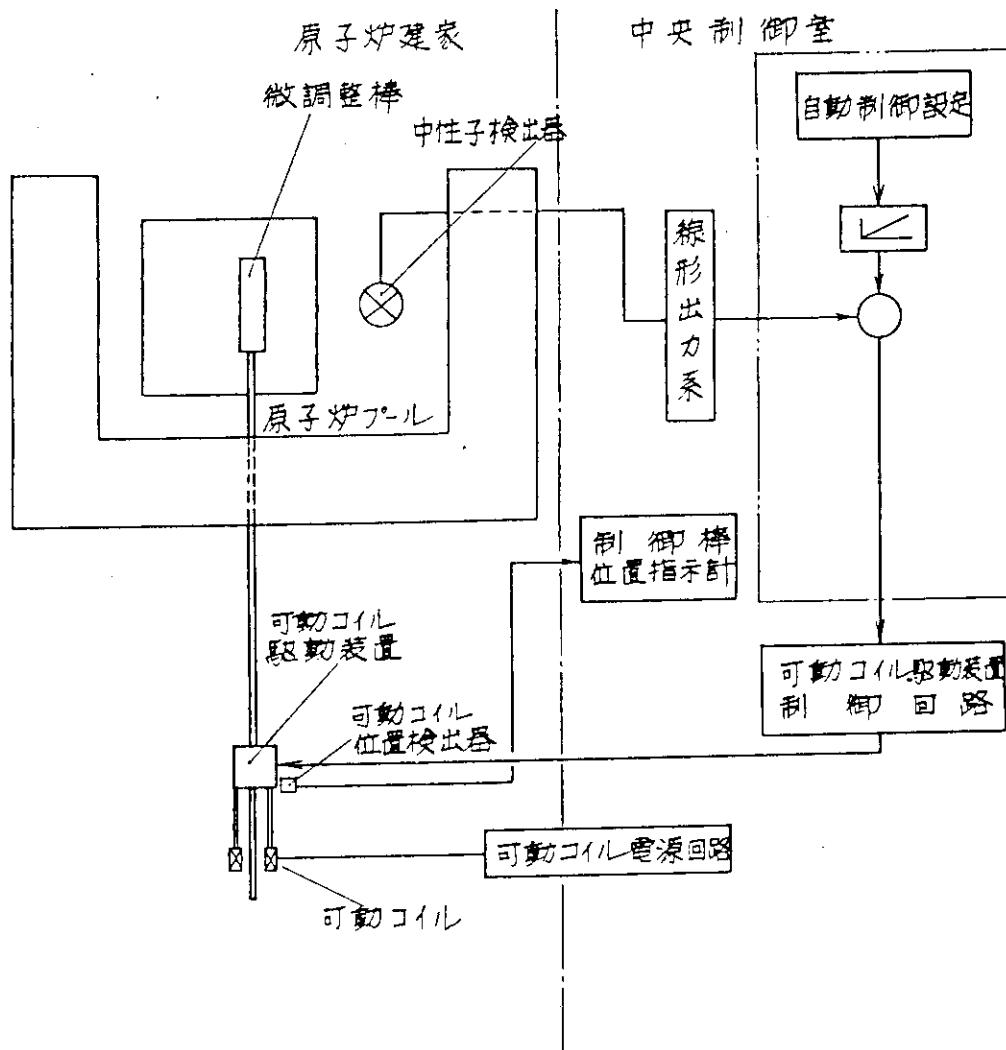


図 4.3-1 原子炉自動制御系統説明図

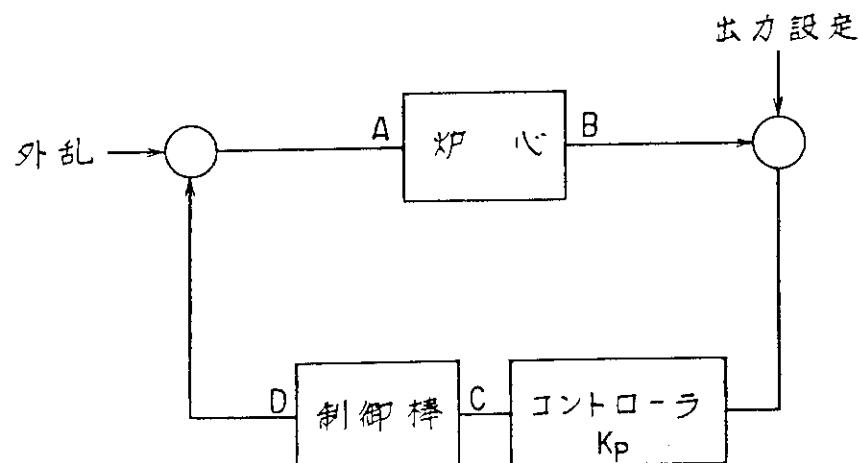


図 4.3-2 自動制御系モデル

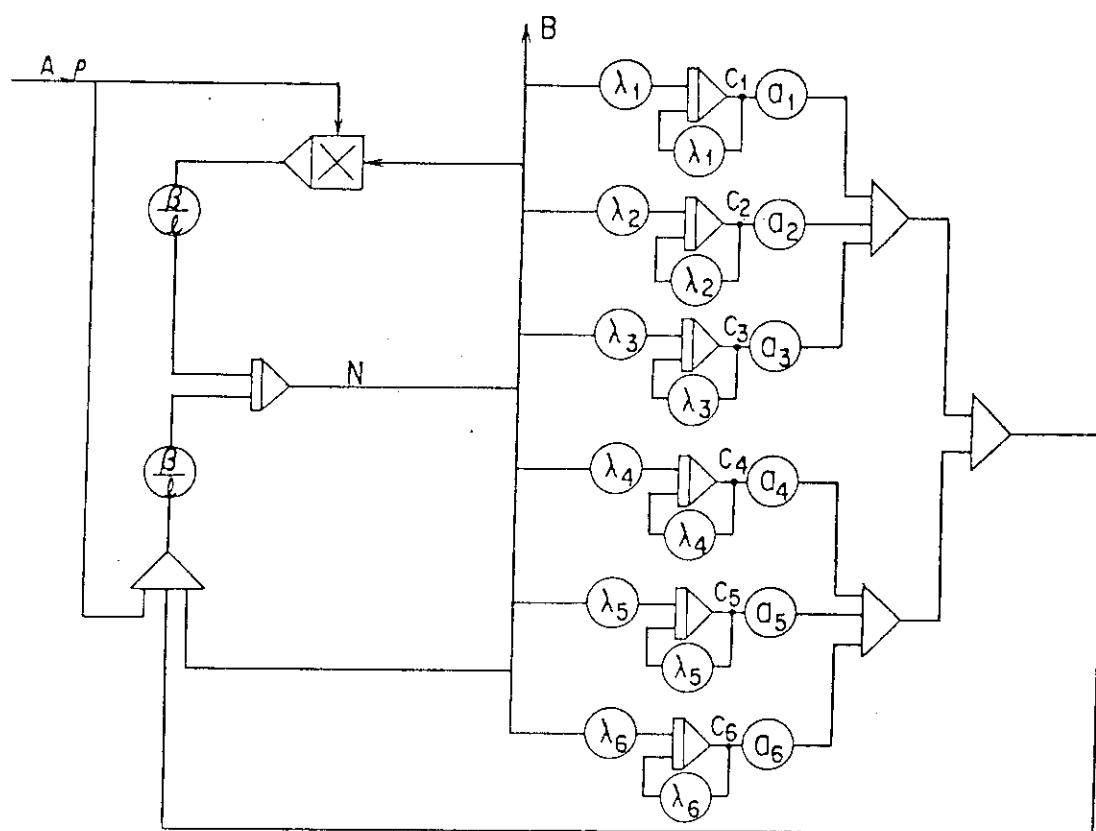


図 4.3-3 炉心動特性アナログ計算用結線図

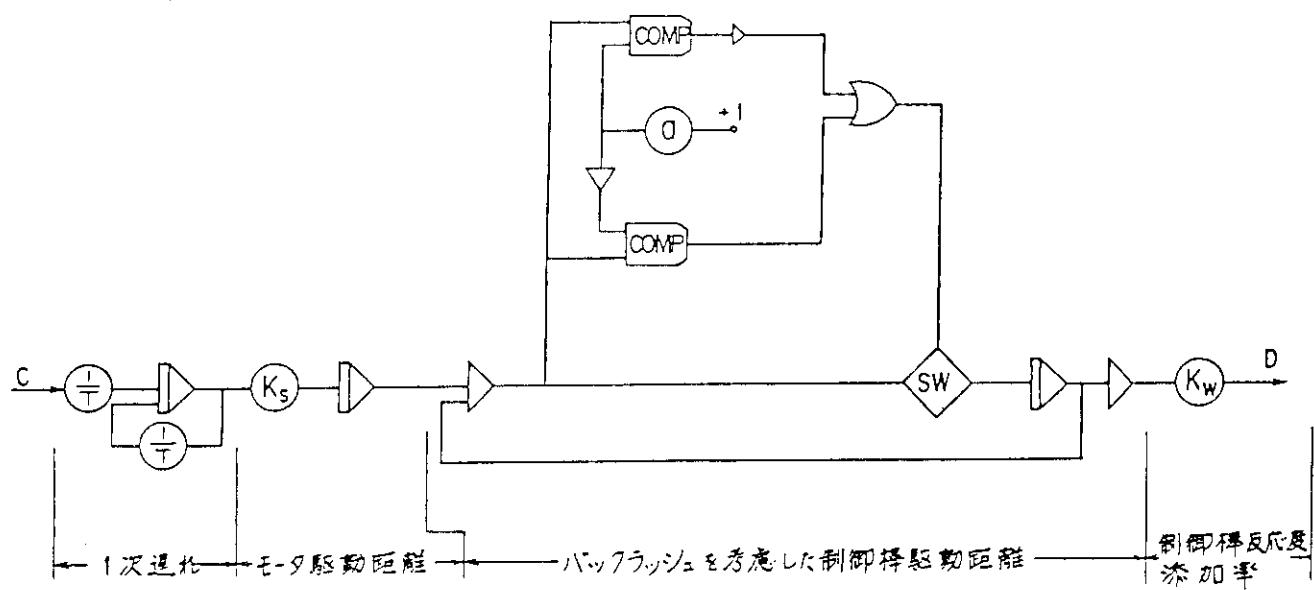


図 4.3-4 制御系アナログ計算用結線図

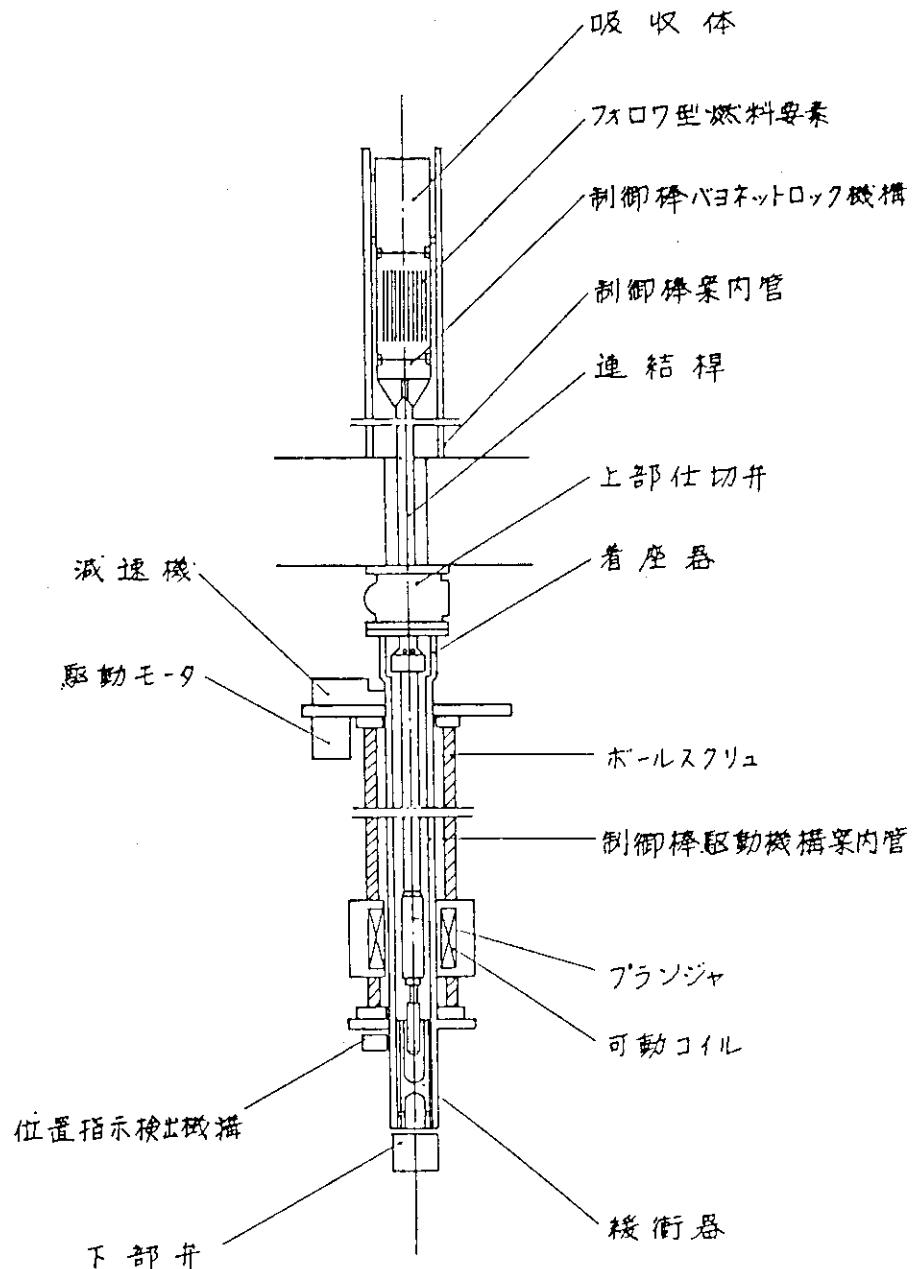


図 4.3-5 制御棒駆動装置概要説明図

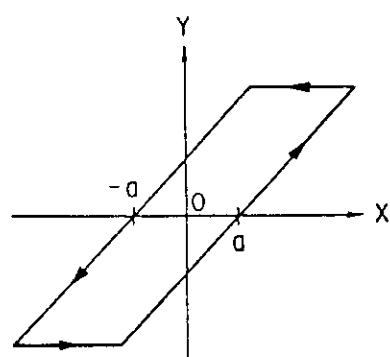


図 4.3-6 BACKLASH

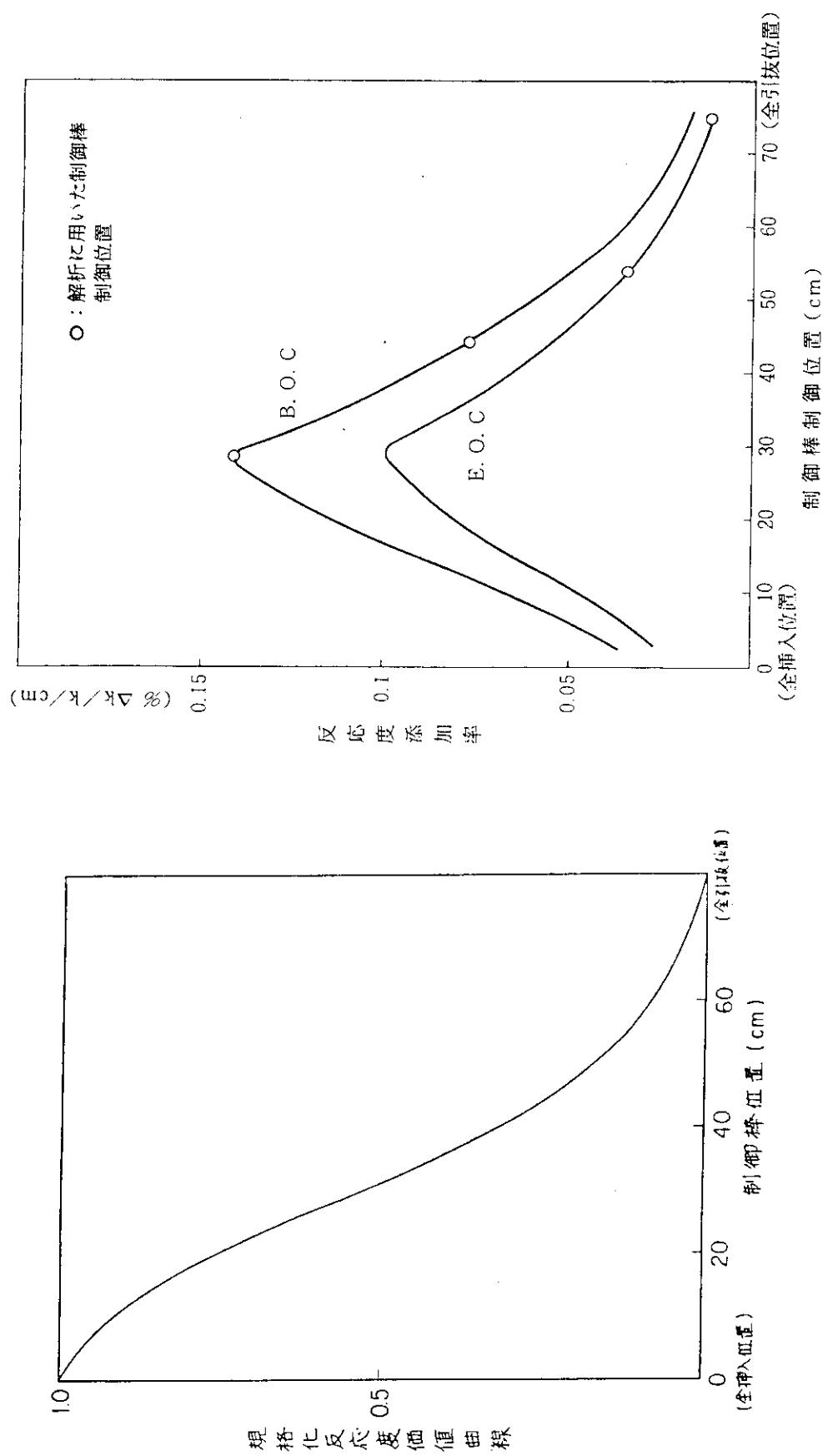


図 4.3-7 微調整棒反応度値曲線

図 4.3-8 制御棒反応度添加率

4.4 反応度外乱応答特性と制御棒駆動速度

自動制御系設計で最も重要なものの1つに制御棒駆動速度がある。制御棒による反応度添加率は、制御棒の炉心位置における反応度値とその駆動速度の積で決める。この節ではステップ状およびランプ状外乱に対する制御応答特性を調べ、原子炉が十分な減衰特性をもつように制御棒駆動速度の検討を行った。外乱反応度は、ステップ状 $7.3 \times 10^{-4} \Delta k/k$ (約 10 \$) とステップ状 $3.0 \times 10^{-4} \Delta k/k$ (約 4 \$)，ならびにランプ状 $3.0 \times 10^{-4} \Delta k/k/\text{sec}$ である。制御棒駆動速度は、 10 cm/min から 180 cm/min までの範囲を考慮し、炉心内制御棒自動制御位置は、制御棒による反応度添加率として広範囲に渡るように選んだ。応答減衰は、外乱整定時間(反応度外乱投入開始から、偏差出力が 0.5 %以内に整定されるまでの時間)によって判断した。

4.4.1 ステップ状約 10 \$ 外乱応答

各制御棒駆動速度と各制御棒制御位置を仮定して得た応答曲線を図 4.4-1 から図 4.4-3 に示す。各応答曲線から得た 0.5 %精度偏差出力整定時間と制御棒駆動速度の関係を図 4.4-4 に示す。図からわかるように制御棒駆動による反応度添加率が 0.35 ドル/sec 以上になると、応答が振動的になり制御できなくなる。また、反応度添加率が 0.009 ドル/sec 以下になると、整定時間が 30 秒以上になり、すみやかに制御できなくなる。なお、図には示していないが、参考のため Backlash を除いた解析では反応度添加率が大きいと、振動応答は現われるが永久振動にはならない。図 4.4-5 に各制御棒駆動速度を仮定した場合、出力整定時間が 10 秒以下となる炉心内軸方向制御範囲を燃焼初期、燃焼末期それぞれについて示す。 10 cm/min の駆動速度では速やかな応答が不可能なことがわかる。以上の考察により駆動速度が 30~70 cm/min であれば、自動制御系は外乱に対し適切な応答をすることがわかる。

4.4.2 ステップ状約 4 \$ 外乱応答

各制御棒駆動速度について得た応答曲線を図 4.4-6 から図 4.4-8 に示す。0.5 %精度偏差出力整定時間と制御棒駆動速度の関係を図 4.4-9 に示す。約 10 \$ の外乱応答の場合と比べて 0.3 ドル/sec 以上の制御棒反応度添加率による挙動は同じように振動し、0.35 ドル/sec より大きな添加率では、応答が永久振動となる。一方、0.003 ドル/sec のような小さい制御棒反応度添加率でも 20 秒の整定時間で出力が所定の値に戻る。図 4.4-10 に整定時間が 10 秒以内になる制御棒制御位置の範囲を示しているが、この外乱が比較的小さい場合には燃焼末期において 10 cm/min の駆動速度としても広い範囲にわたってすみやかに制御することができる。

4.4.3 ランプ状約 4 \$/sec 外乱応答

図 4.4-11 から図 4.4-13 に $3.0 \times 10^{-4} \Delta k/k/\text{sec}$ のランプ状外乱反応度(全反応度量は $7.3 \times 10^{-4} \Delta k/k$)が炉心に投入された時の出力応答曲線を示す。駆動速度 10 cm/min の場合以外は、すみやかに出力が減衰していることがわかる。

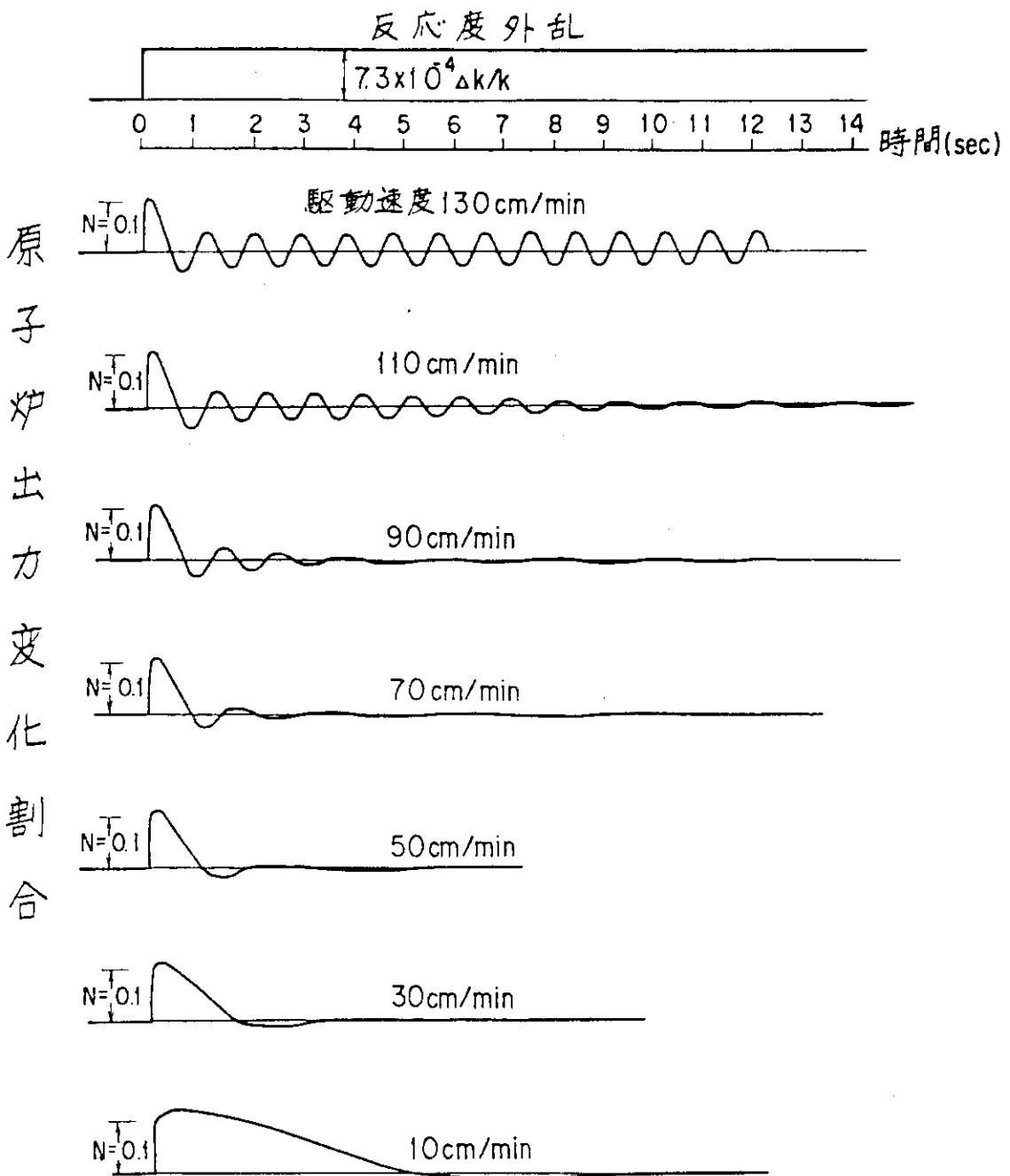


図 4.4-1 ステップ状外乱応答（約10%）制御位置：B.O.C. 30cm

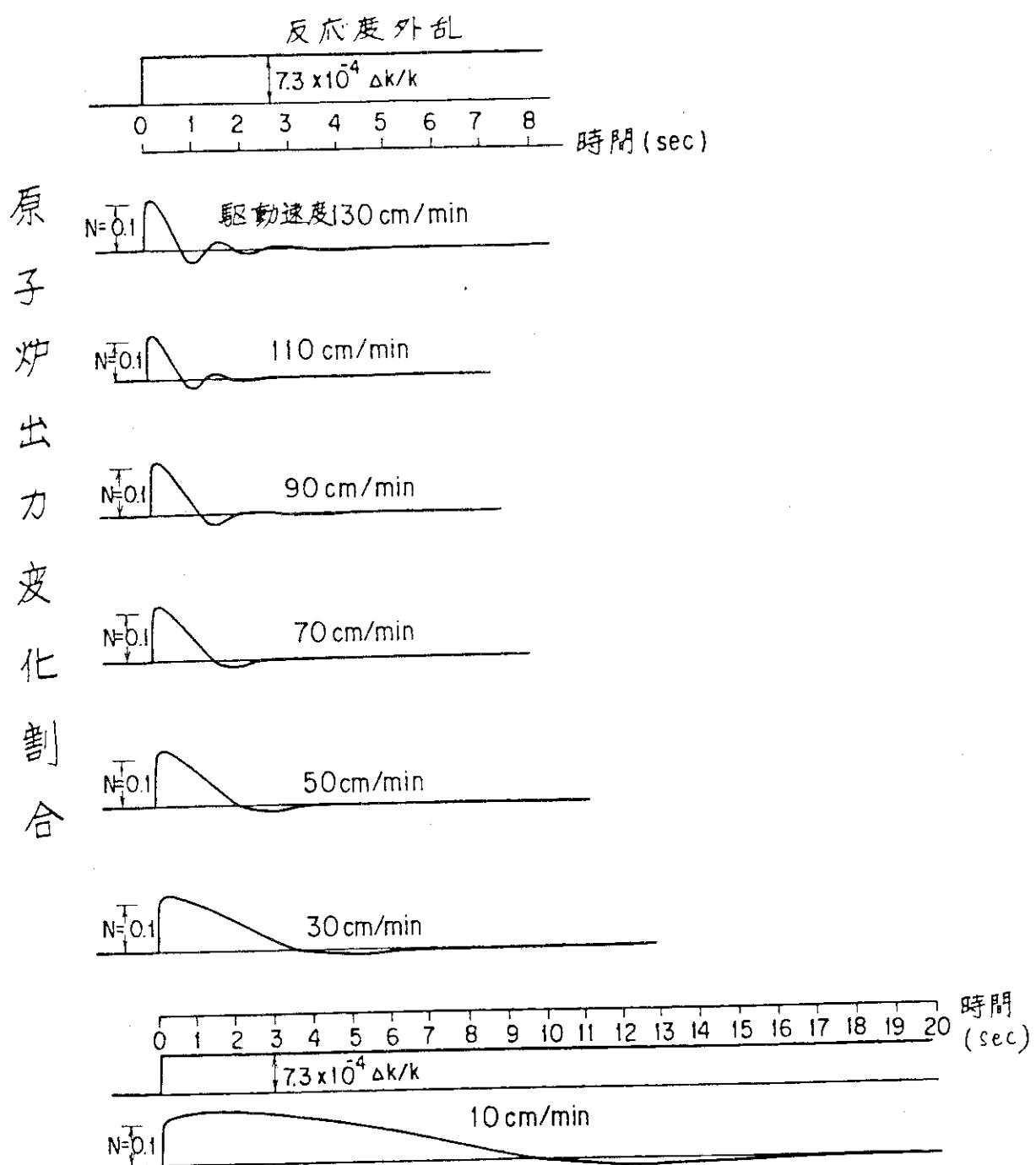


図 4.4-2 ステップ状外乱応答（約10φ）制御位置：B.O.C. 45 cm

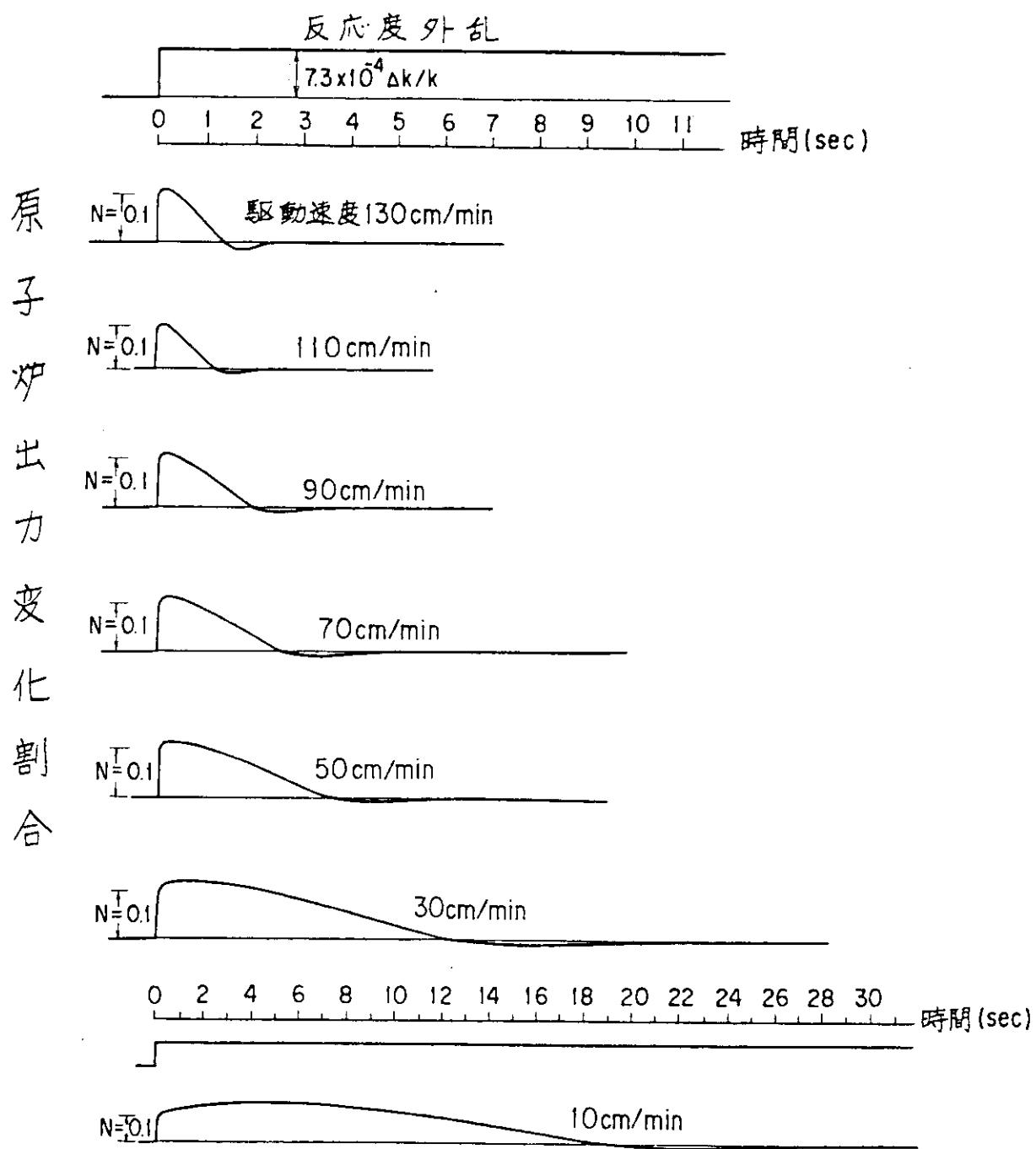


図 4.4 - 3 ステップ状外乱応答（約10%）制御位置：E.O.C. 55cm

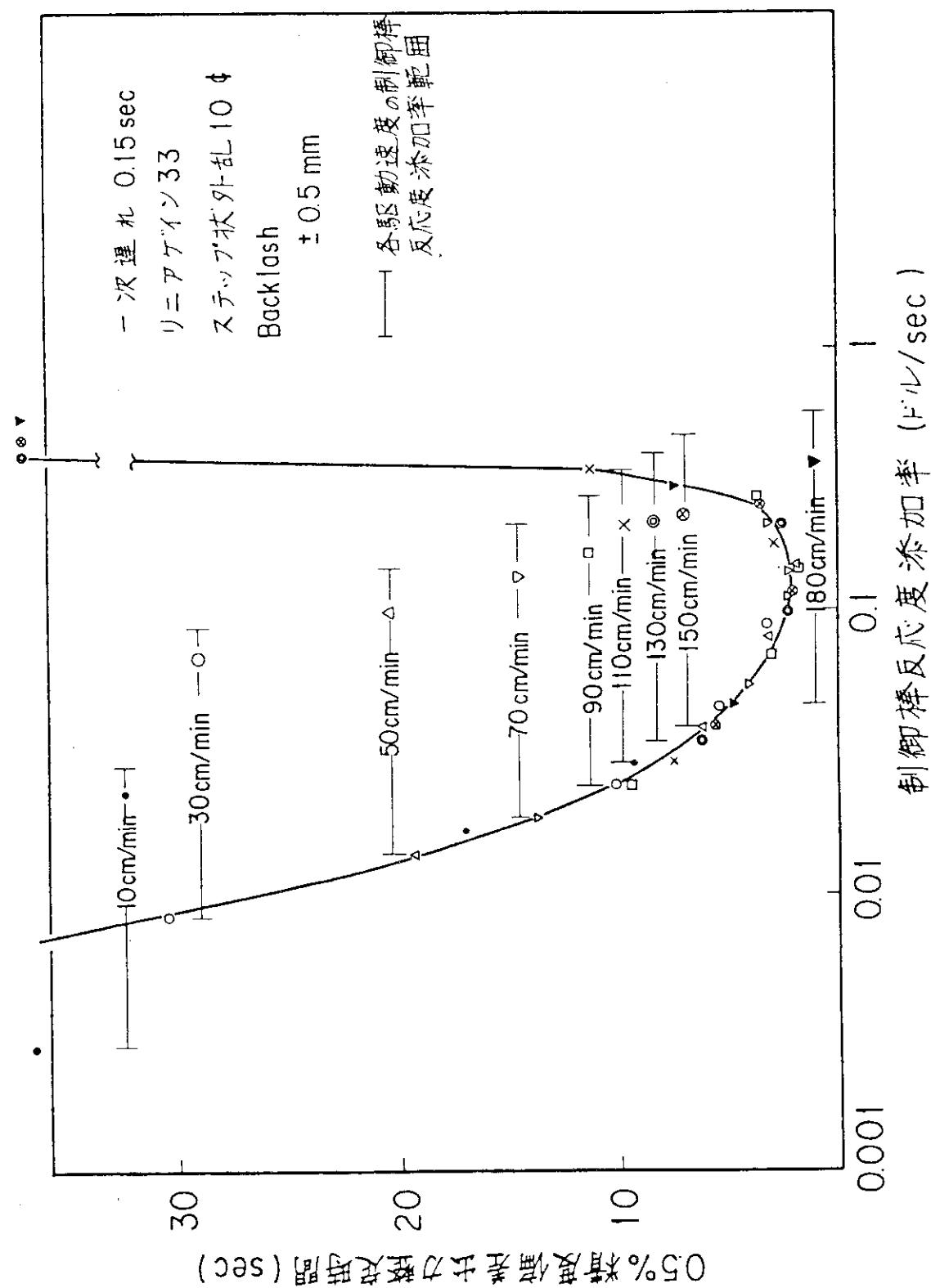


図 4.4-4 ステップ状外乱(約10¢)時の出力整定時間と制御棒駆動速度

| 制御棒駆動速度 | 全挿入位置 | | | | | | | | 全引抜き位置 | |
|-----------|-------|----|----|----|----|--------|-------|--------|--------|--|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | (cm) | | | | |
| 10 cm/min | | | | | | B.O.C. | | | | |
| | | | | | | | 制御不可能 | E.O.C. | | |
| 30 cm/min | | | | | | B.O.C. | | | | |
| | | | | | | | | E.O.C. | | |
| 50 cm/min | | | | | | B.O.C. | | | | |
| | | | | | | | | E.O.C. | | |
| 70 cm/min | | | | | | B.O.C. | | | | |
| | | | | | | | | E.O.C. | | |

図 4.4-5 ステップ状反応度外乱（約10%）の時、出力整定時間が10秒以内になる制御棒制御範囲

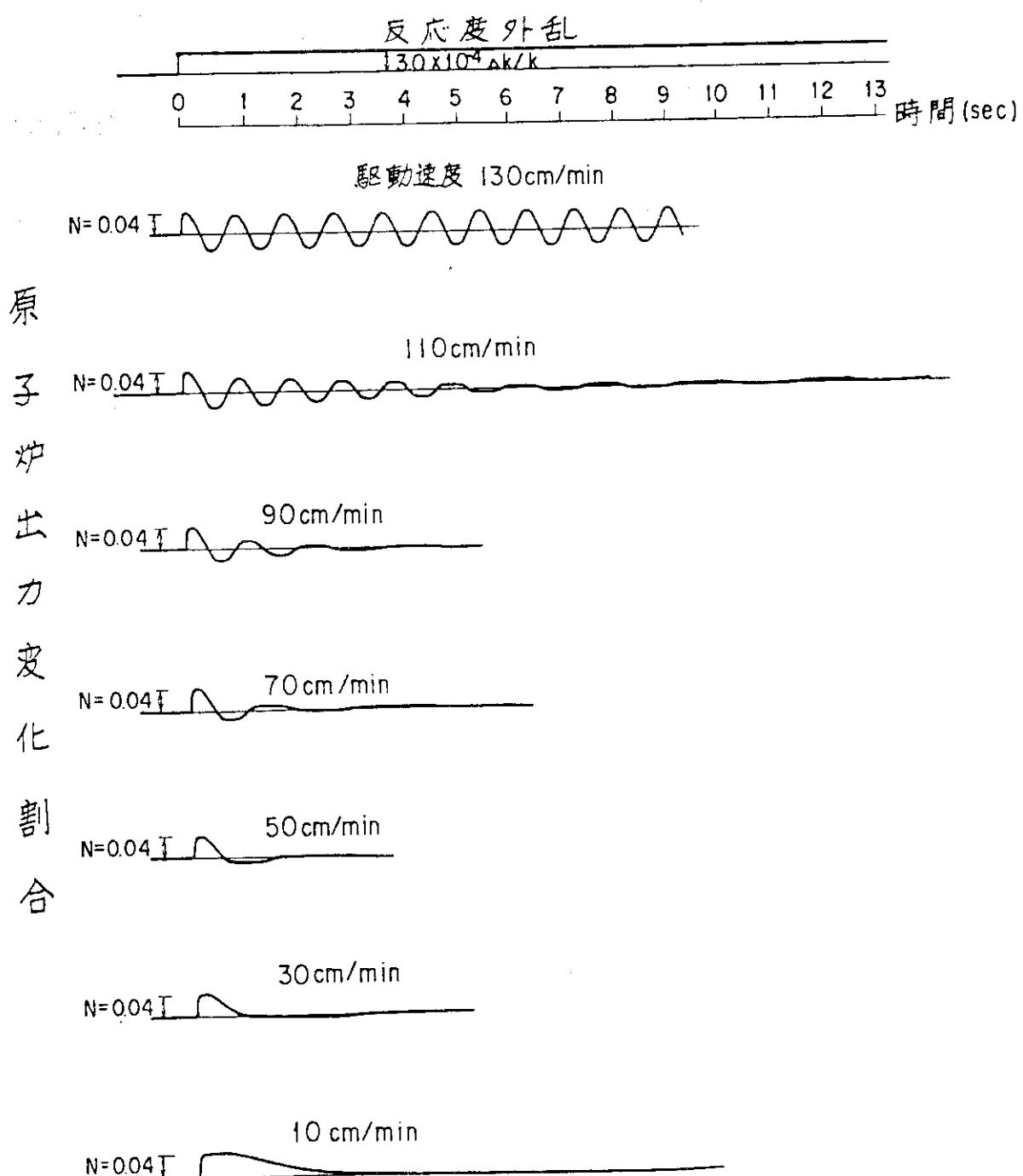
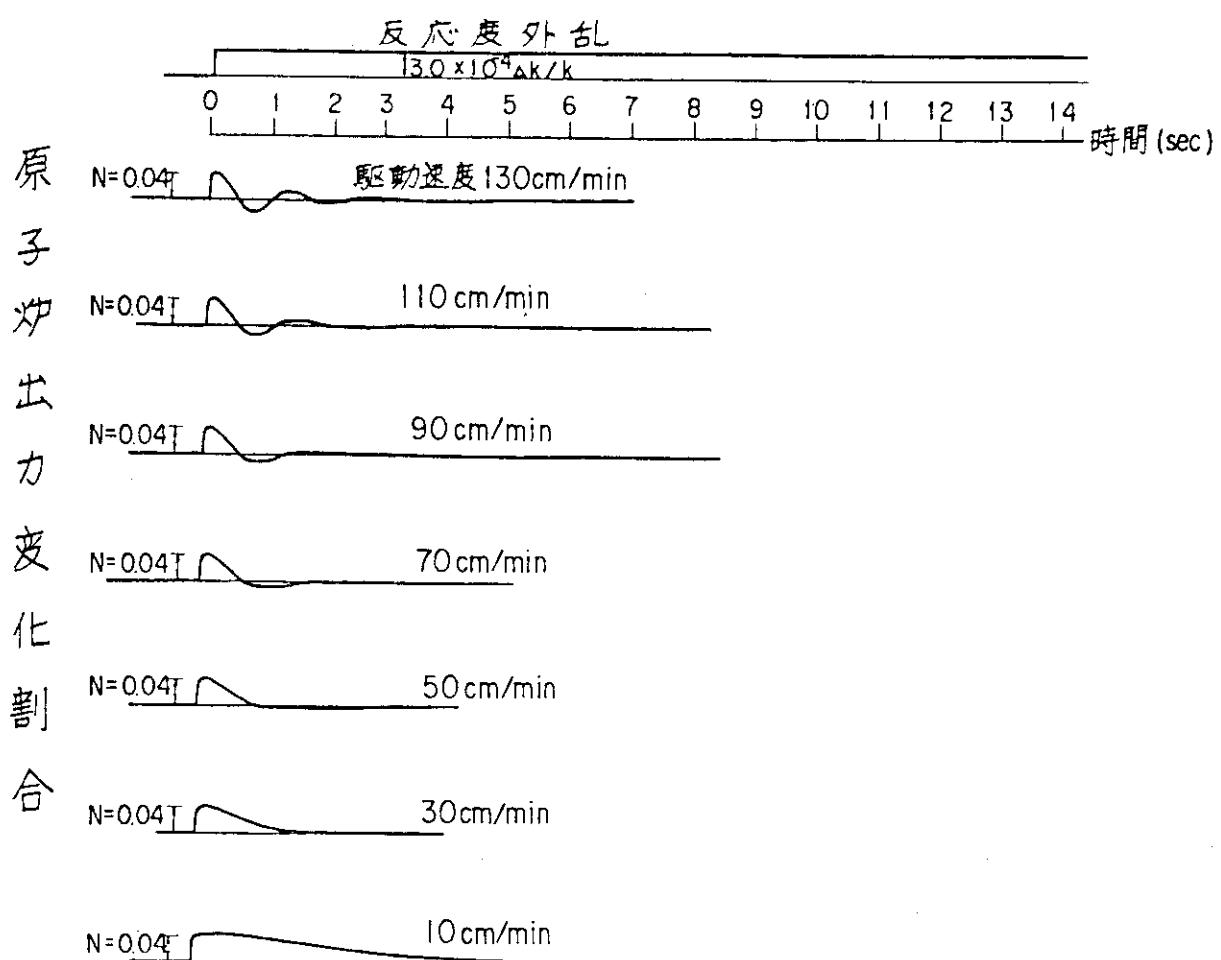


図 4.4-6 ステップ状外乱応答（約 4 %）制御位置：B.O.C.30cm

図 4.4-7 ステップ状外乱応答(約 4 δ) 制御位置: B.O.C. 45 cm

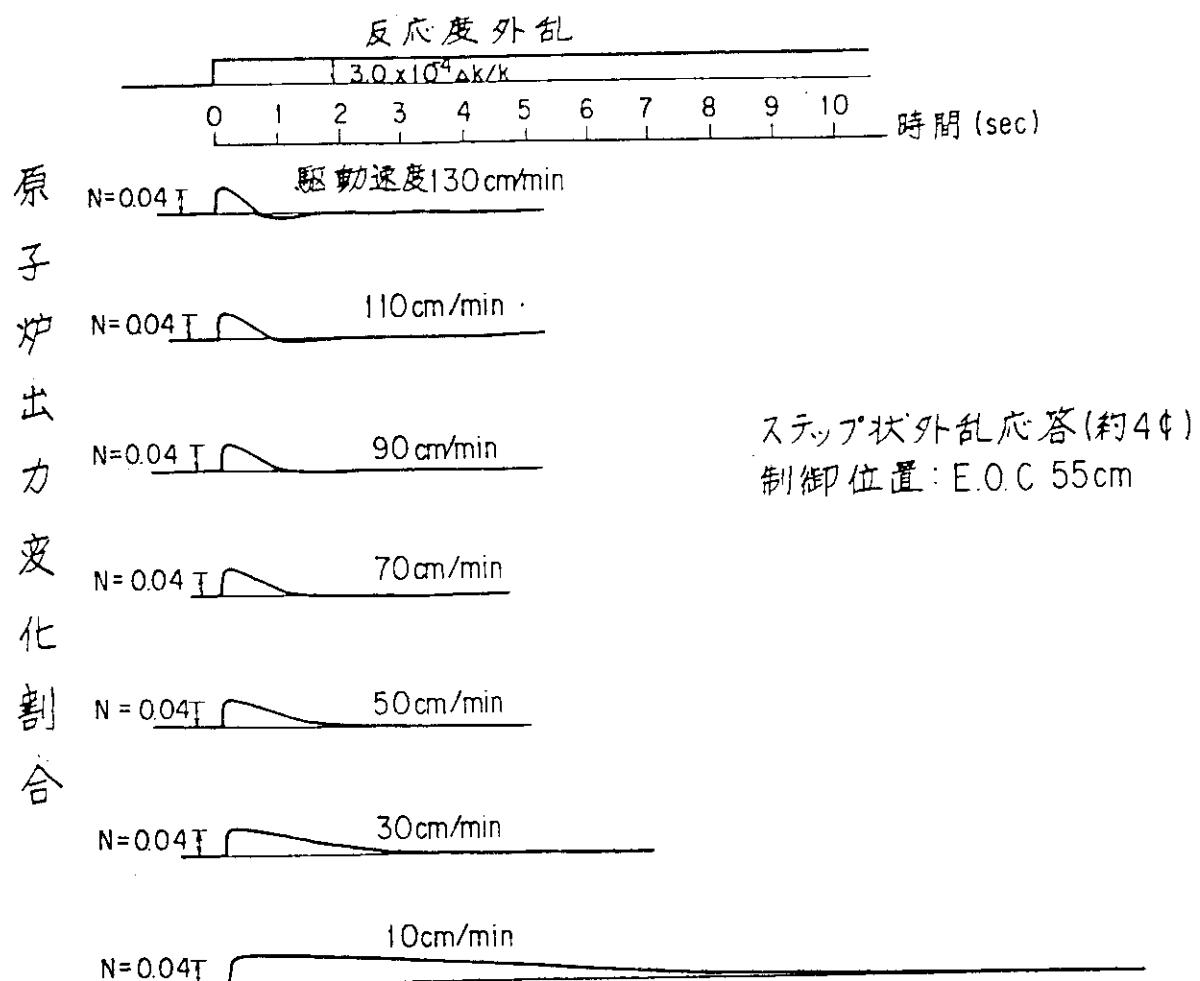


図 4.4-8 ステップ状外乱応答(約4%) 制御位置: E.O.C. 55 cm

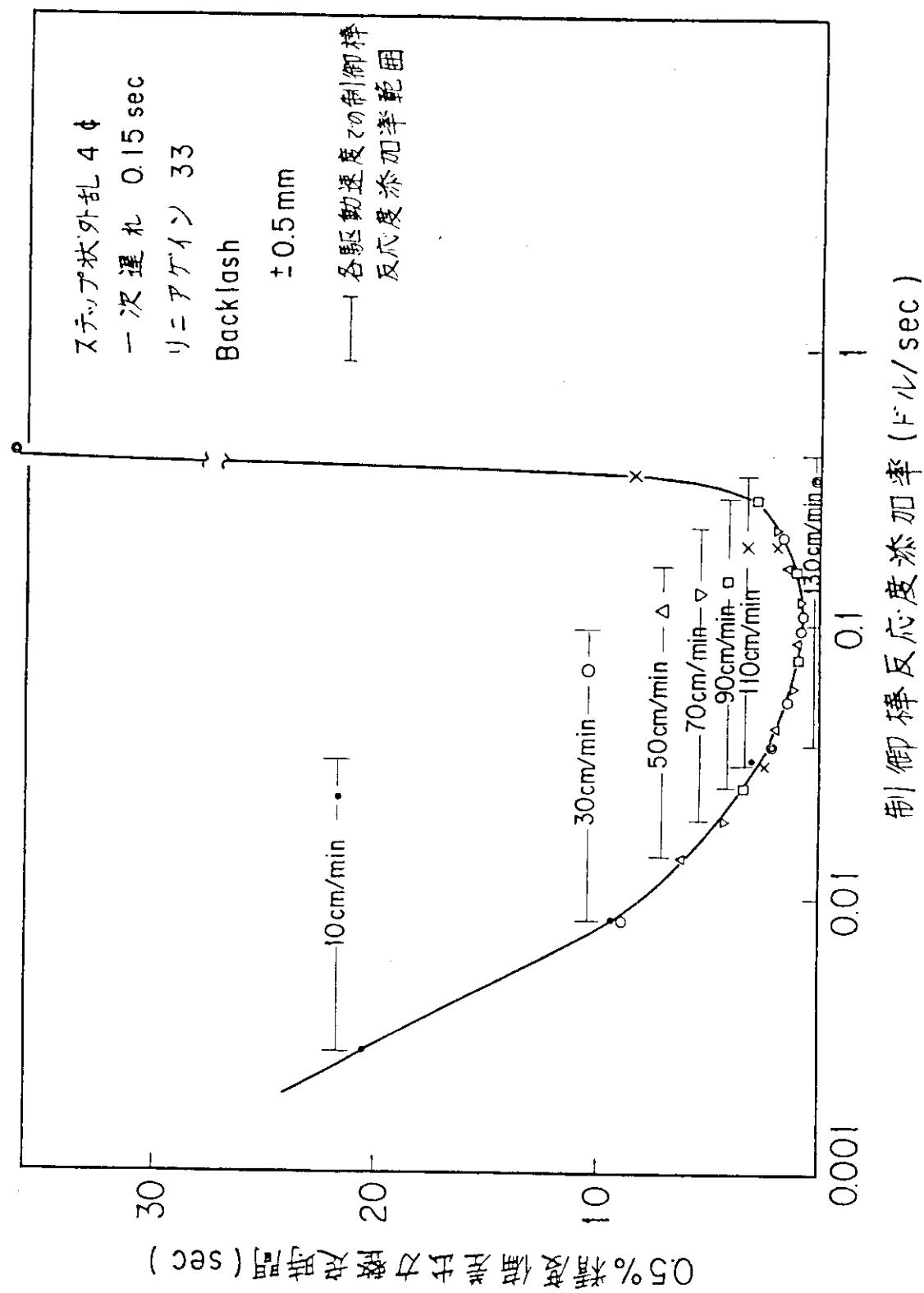


図 4.4-9 ステップ状外乱 (図 4.4) 時の出力整定時間と制御棒駆動速度

| 制御棒駆動速度 | 全挿入位置 | | | | | 全引抜き位置 |
|-----------|-------|----|----|----|--------|--------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80(cm) | |
| 10 cm/min | | | | | | B.O.C. |
| | | | | | | E.O.C. |
| 30 cm/min | | | | | | B.O.C. |
| | | | | | | E.O.C. |
| 50 cm/min | | | | | | B.O.C. |
| | | | | | | E.O.C. |
| 70 cm/min | | | | | | B.O.C. |
| | | | | | | E.O.C. |

図 4.4-10 ステップ状反応度外乱(約4%)の時、出力整定時間が10秒内になる制御棒制御範囲

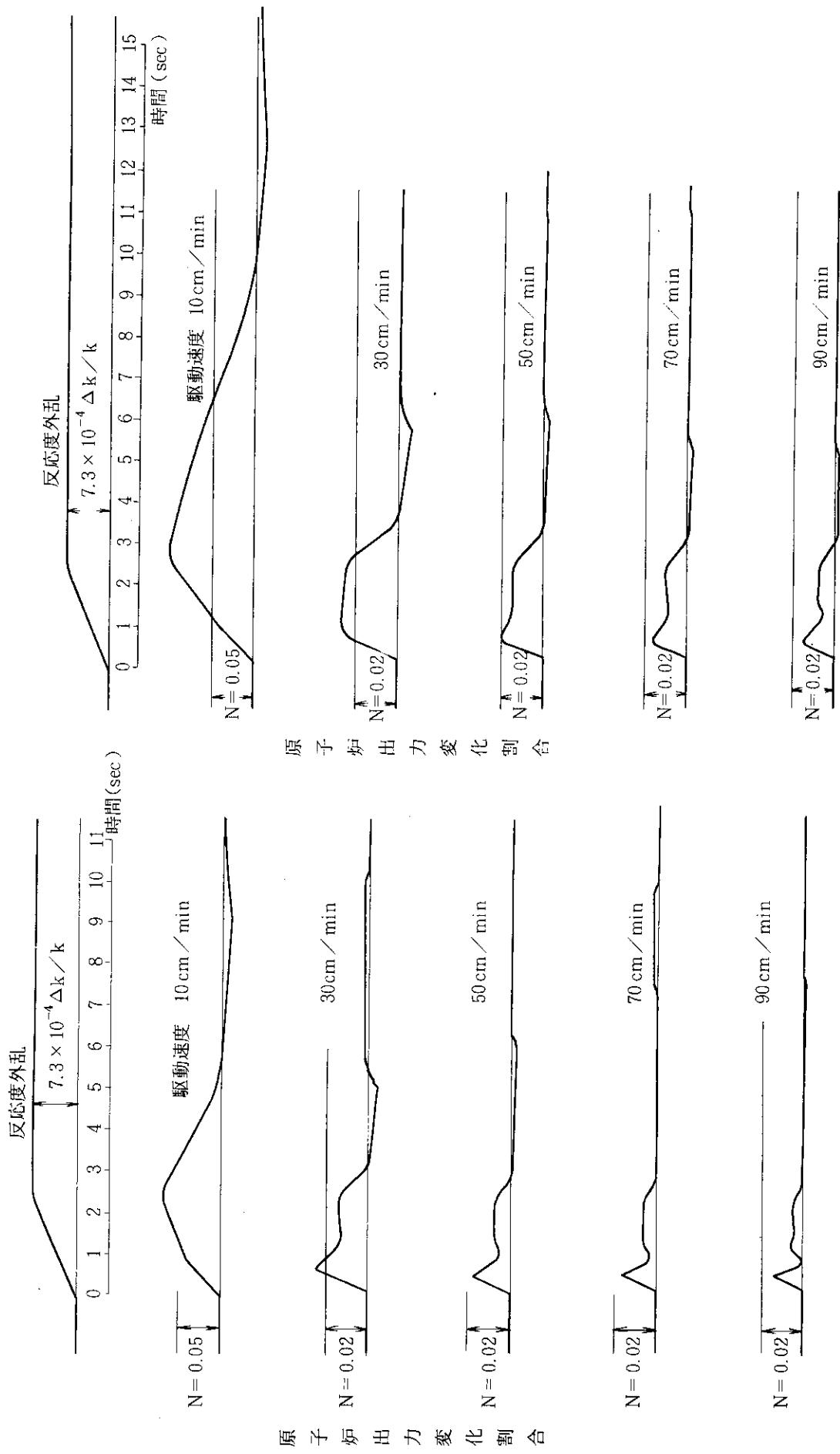


図 4.4.11 プンプ状反応度外乱応答(約 4 C/s)
制御位置 : B. O. C. 30 cm

図 4.4.12 プンプ状反応度外乱応答(約 4 C/s)
制御位置 : B. O. C. 45 cm

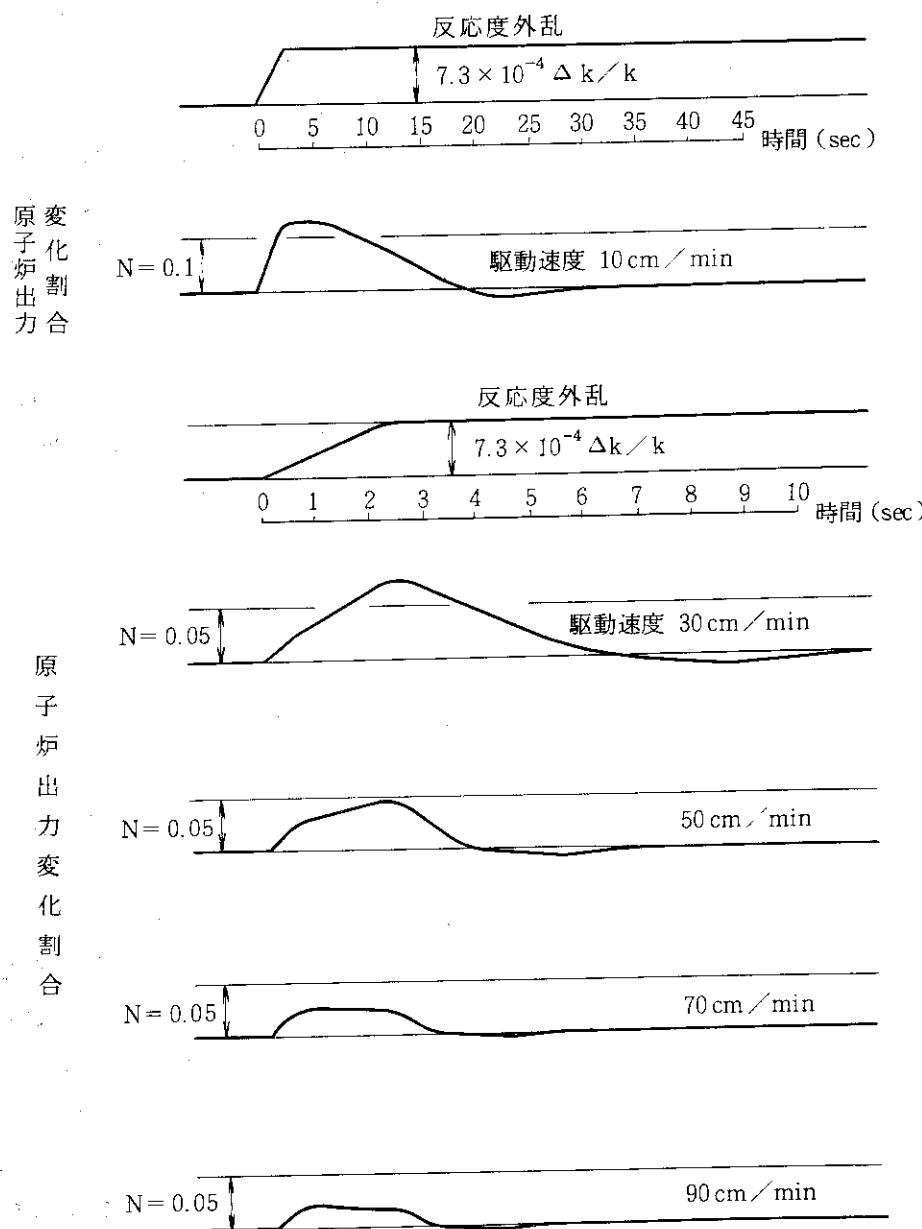


図 4.4.13 ランプ状反応度外乱応答（約 $4 \text{ } \text{eV}/\text{s}$ ）
制御位置： E.O.C. 55 cm

4.5 温度効果を考慮した反応度外乱応答

前節で行った自動制御用制御棒駆動速度を設計評価する時は、温度効果を考慮せず制御棒挿入による抑制効果のみで炉心減衰特性を解析した。実際には反応度外乱投入によって燃料温度、冷却材温度が上昇し、その結果、負の反応度が炉心にフィードバックされる。この節ではこれら温度変化によるフィードバック反応度を考慮に入れ解析を行う。

フィードバック反応度を考慮する場合、その量と時定数が問題となる。ここでは、設計値の反応度外乱に対し、炉心出力、燃料温度ならびに冷却材温度の挙動を、「反応度投入事象解析コード EUREKA-2」を用いて解析する。炉心核計算で得る反応度係数を用い、フィードバック反応度を計算する。この計算結果を用い、アナログ計算による反応度外乱応答解析を行う。

この節の目的は、原子炉を安定に運転するために設けた制御棒による反応度抑制効果以外に、原子炉固有の温度効果によるフィードバック現象が系の安全性にどのような影響を及ぼすかを調べることである。それは、フィードバックの符号にかゝわらずシステム全体として検討しておく必要がある。

4.5.1 EUREKA-2 コードによる温度効果解析

炉心の出力挙動、燃料温度および減速材温度変化によるフィードバック反応度の時間挙動を調べるために、EUREKA-2 によってステップ状外乱、ランプ状外乱が投入された場合について計算を行った。

EUREKA-2 コードの特徴や詳細な入力データは別の機会に報告する。計算対象の炉心は、本原子炉定格運転状態に対応するものとする。

約 10~W に当る $7.3 \times 10^{-4} \Delta k / k$ のステップ状反応度添加の場合、結果を図 4.5-1 から図 4.5-3 に示す。図はそれぞれクリーン炉心、B.O.C.炉心およびE.O.C.炉心におけるもので、炉心出力変化と温度効果によるフィードバック反応度を示す。各図に参考のため温度効果によるフィードバックを考慮しない時の炉心出力変化を示している。燃焼度に応じてフィードバックの効き方が多少異っているが、温度効果によるフィードバックを考慮すると原子炉出力は安全保護系のスクラム設定値 22~MW に達せず、抑制されることがわかる。ステップ状に反応度が添加された後、先ず燃料板温度が上昇し、少し遅れて減速材温度が上昇する。反応度が添加された初期にはドプラ効果が効き始め、その後減速材温度効果によるフィードバックが支配的となる。また、炉心出力変化に対し時定数をもってフィードバック反応度が炉心に働くことがわかる。

ここで炉心出力変化とフィードバック反応度の関係を求めるため、ランプ状反応度添加（添加率 $\pm 7.3 \times 10^{-4} \Delta k / k / 0.5\text{~s}$ の三角形反応度）の場合について計算した。その結果を図 4.5-4 に示す。減速材温度と燃料温度は、炉心出力に対し、約 0.1~sec の遅れで線形に変化していることがわかる。減速材温度効果によるフィードバック反応度は、近似的に遅れ時間を無視した場合炉心出力 N によって $-0.14 \cdot N$ (ドル) と表わされ、ドプラ効果によるフィードバック反応度は、 $-0.07 \cdot N$ (ドル) となる。ここに $N = \frac{n - n_0}{n_0}$ である。

よって温度効果として、これら合計して $-0.21 \cdot N$ （ドル）のフィードバック反応度が加えられるとする。

4.5.2 アナログ計算機による応答解析

前節で考慮した温度効果によるフィードバック反応度を用いて、設計値の $\pm 7.3 \times 10^{-4} \Delta k / k$ ステップ状外乱および $\pm 3.0 \times 10^{-4} \Delta k / k / s$ ランプ状外乱（最大反応度添加量 $\pm 7.3 \times 10^{-4} \Delta k / k$ ）に対する自動制御系の応答を解析した。この節では制御棒駆動速度を 30 cm/min の場合についてのみ行う。

図4.5-5にステップ状外乱応答の解析を示す。原子炉出力変化に対しフィードバック反応度を $0 \sim 250 \text{ msec}$ の間の遅れ時間（1次遅れ時間）を仮定して解析を行った。結果が示すように、解析条件によるスペクトルの違いはあるが、整定時間への影響はほとんどなく、すみやかに所定の出力になるように原子炉出力を制御する。

図4.5-6～図4.5-8にランプ状外乱応答結果を示す。図はそれぞれ、温度効果によるフィードバックを考慮しない場合、時間遅れなしでフィードバックを考慮した場合、および0.1秒の時間遅れで考慮した場合について示す。解析条件によるスペクトルの多少の違いはあるが、整定時間への影響はほとんどなく、いずれの場合もすみやかに外乱を抑制し、所定の出力になるように制御する。

以上の解析より、温度効果によるフィードバック反応度を考慮した場合も、設計値の反応度外乱に対し自動制御系は原子炉出力が一定になるようにすみやかに応答する設計になっていることを確認した。

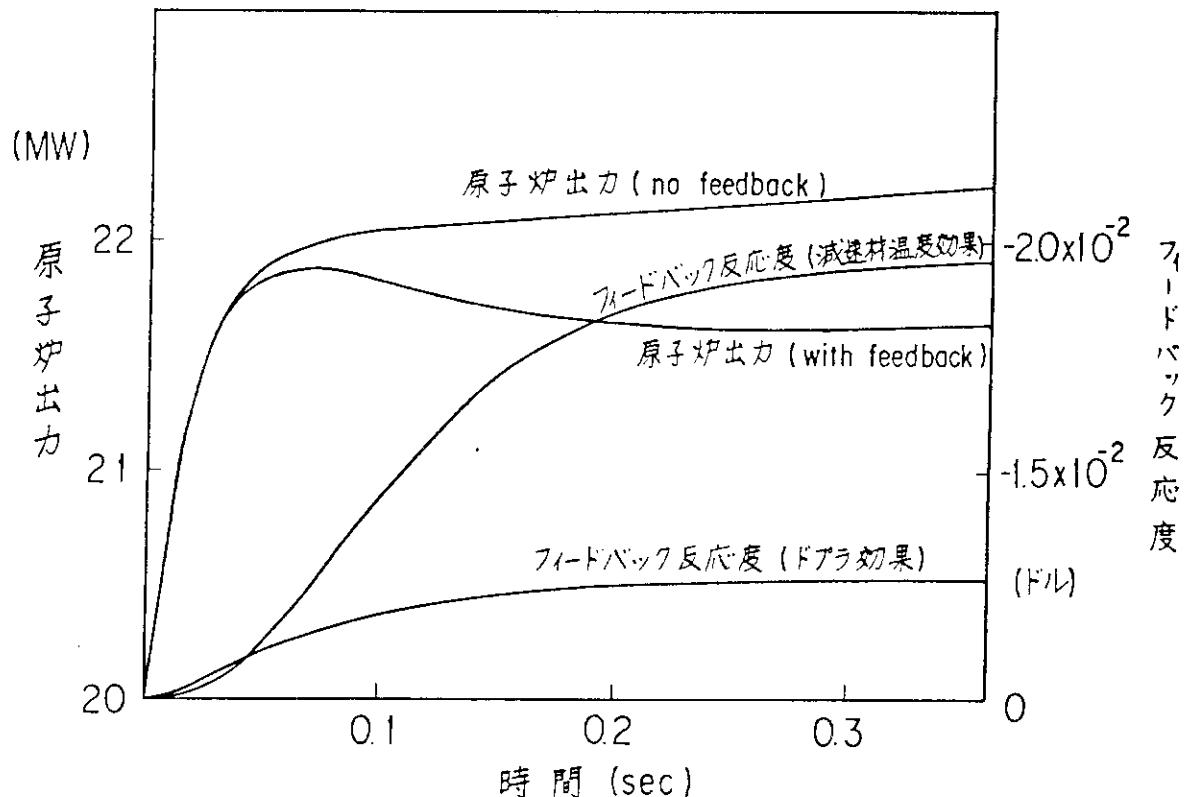


図 4.5-1 クリーン炉心におけるステップ状外乱（約10%）過渡変化
(EUREKA-2 コードによる計算結果)

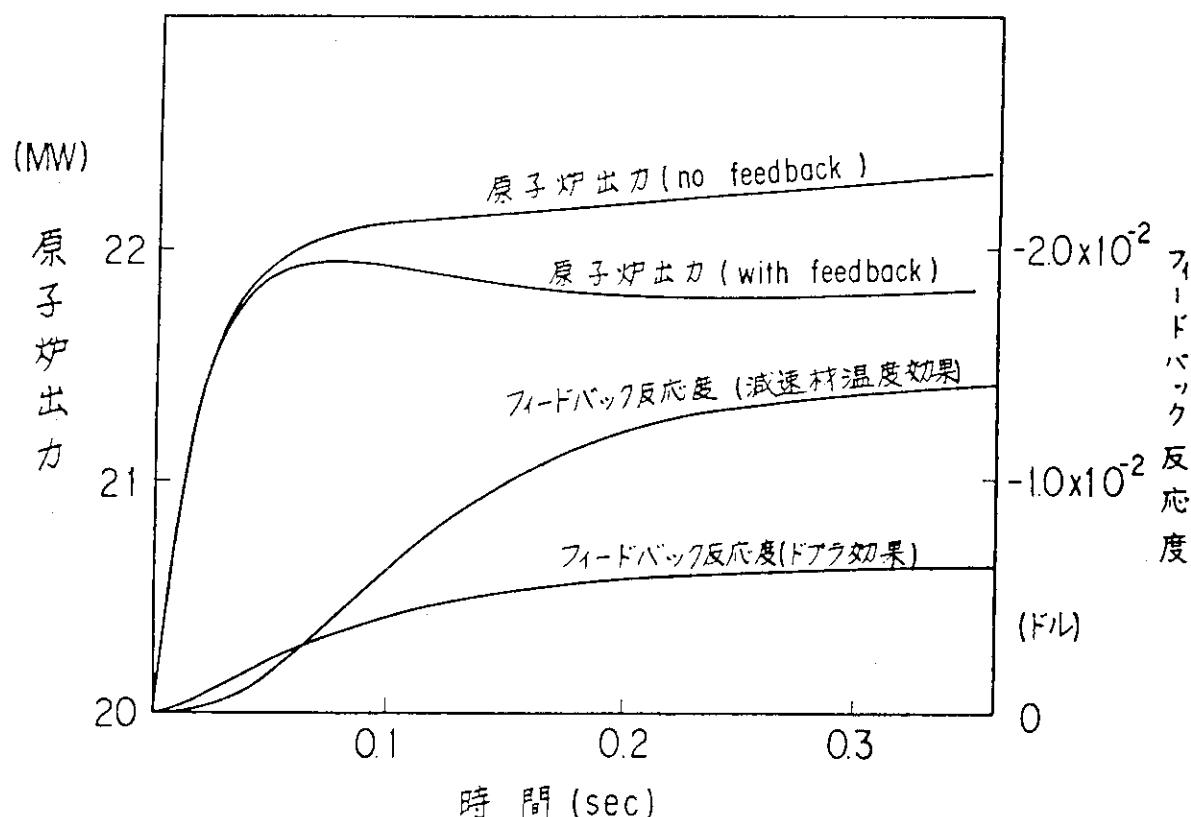


図 4.5-2 B.O.C. 炉心におけるステップ状外乱（約10%）過渡変化
(EUREKA-2 コードによる計算結果)

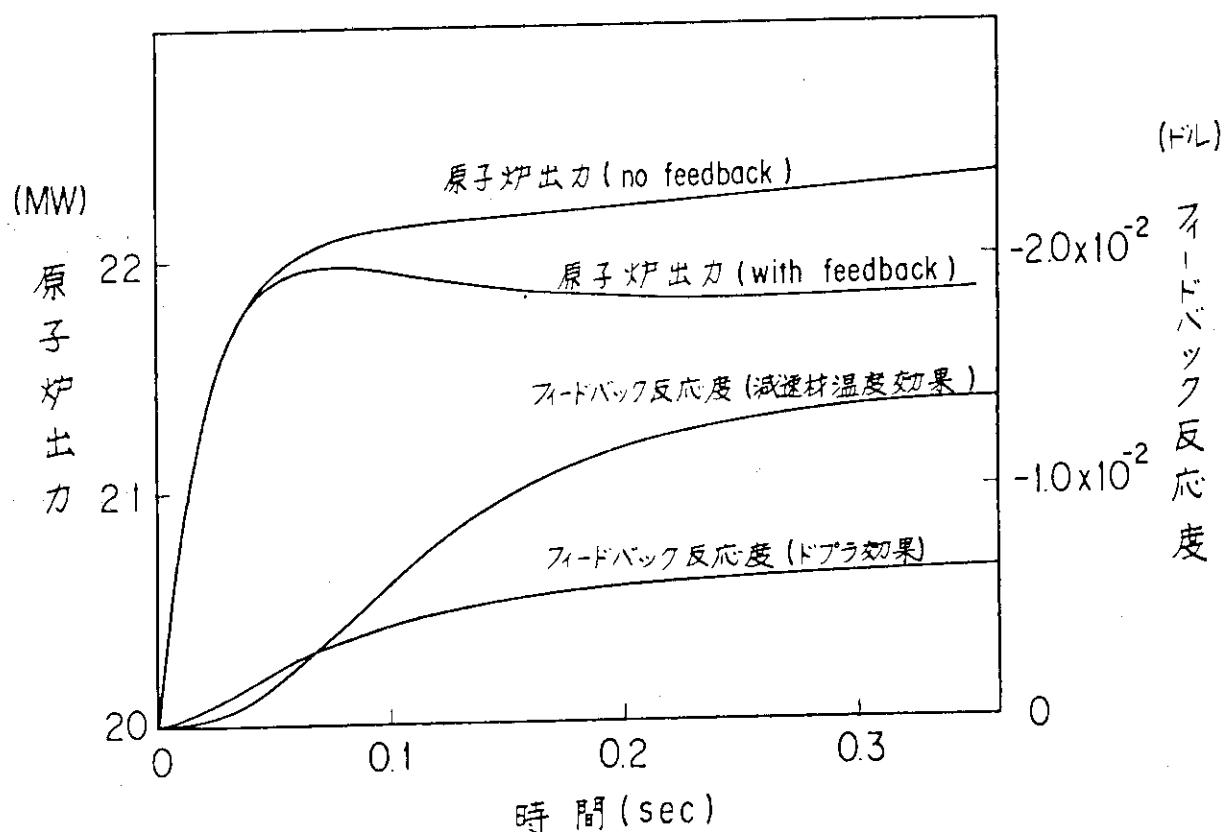


図 4.5-3 E.O.C. 炉心におけるステップ状外乱(約10%)過渡変化
(EUREKA-2 コードによる計算結果)

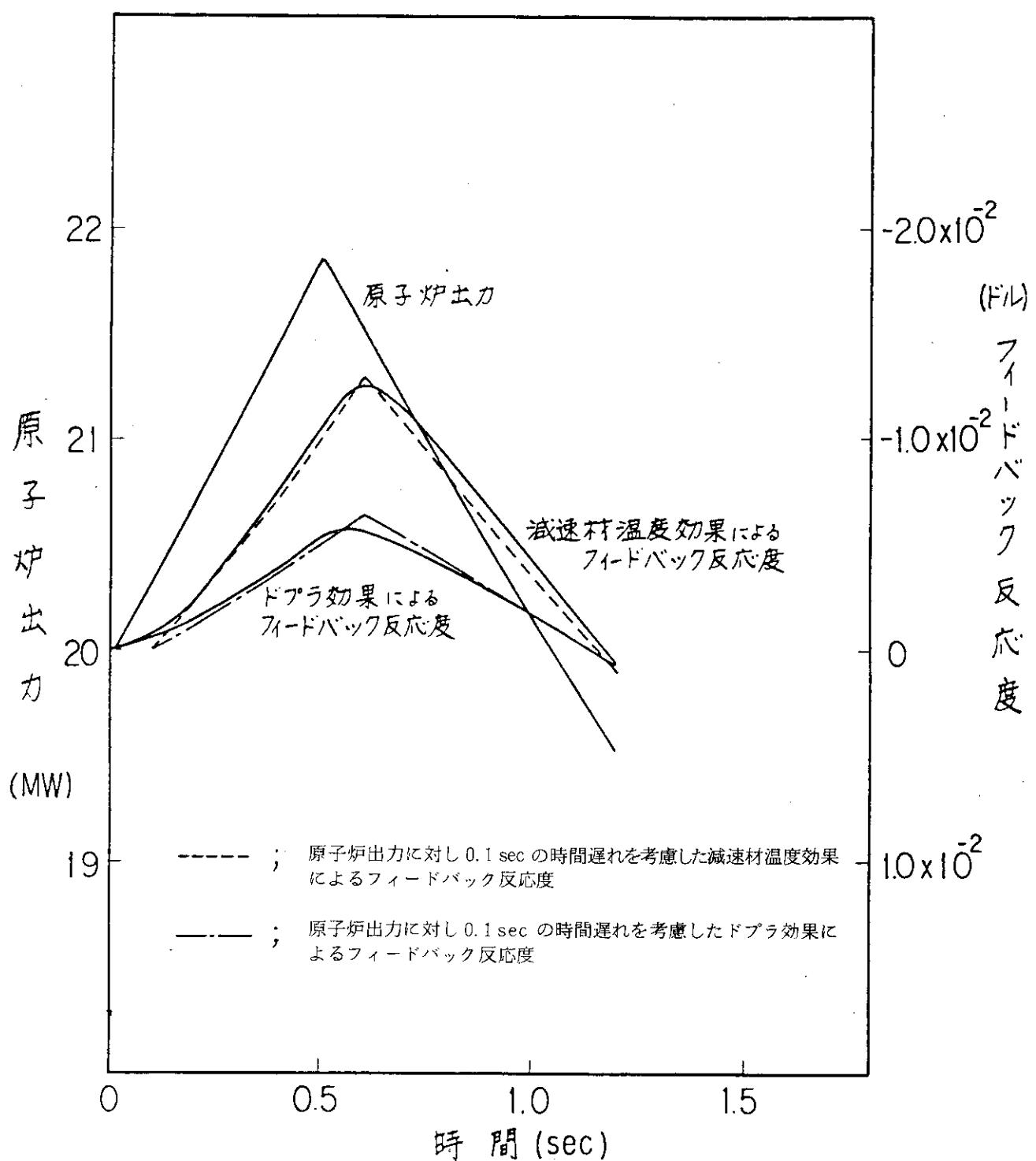


図 4.5-4 E.O.C.炉心におけるランプ状三角外乱（最大反応度量約 10ϵ ）過渡変化
(EUREKA-2 コードによる計算結果)

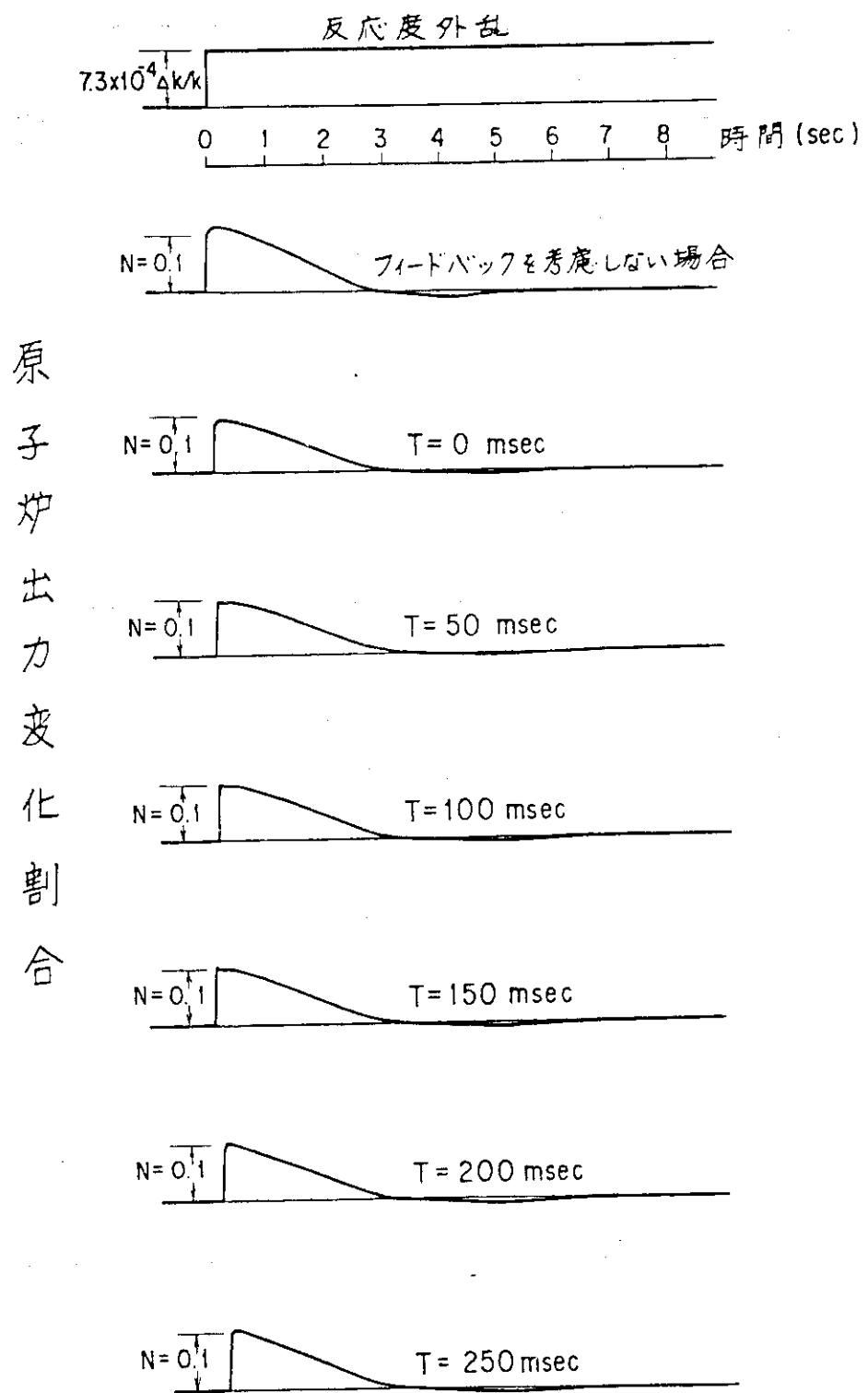


図 4.5-5 ステップ状外乱応答（温度効果によるフィードバックを一次時間遅れ T で考慮した場合：制御棒制御位置 B.O.C. 曲線の45cm）

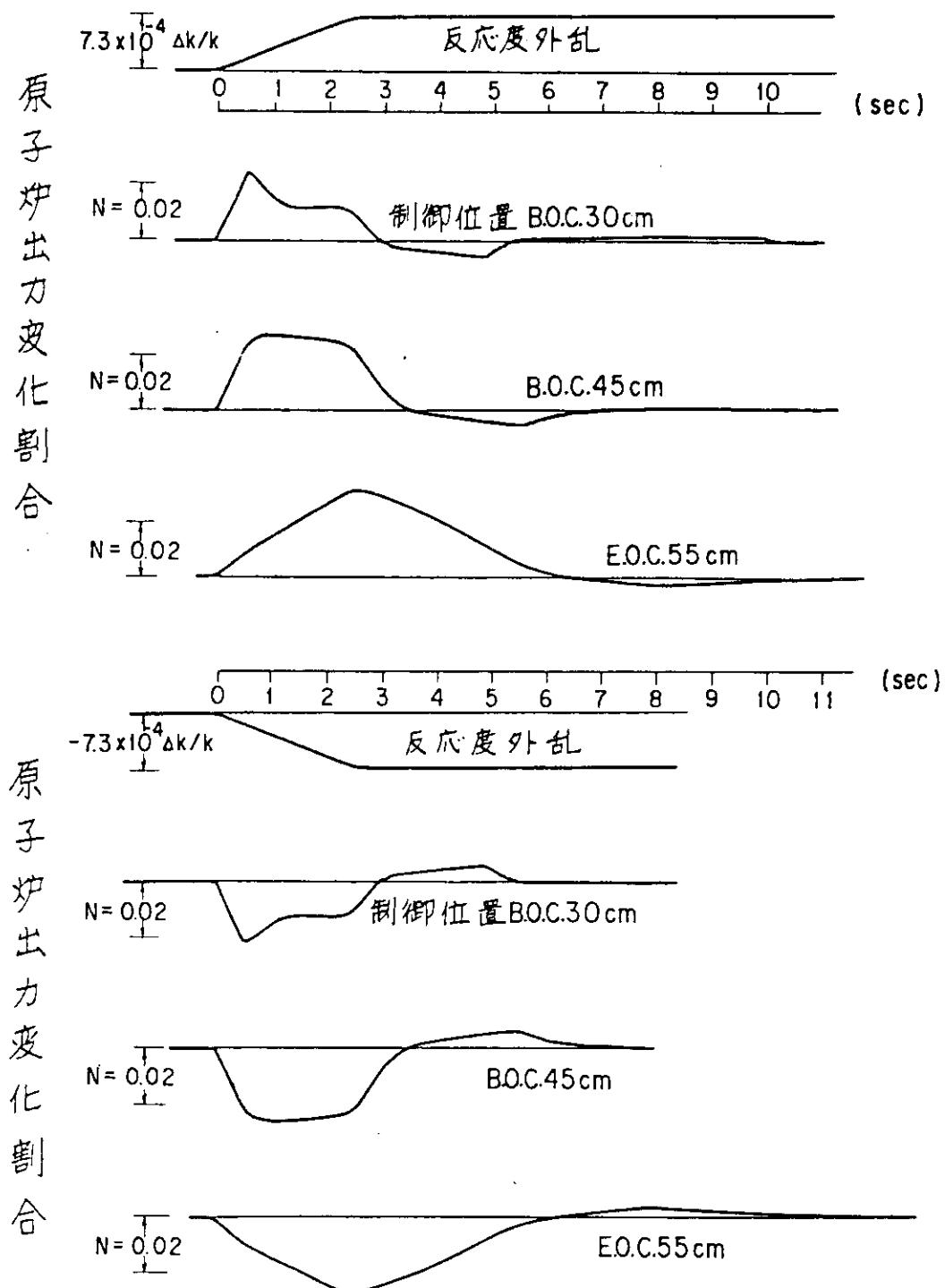


図 4.5-6 ランプ状外乱応答（温度効果によるフィードバックを考慮しない場合）

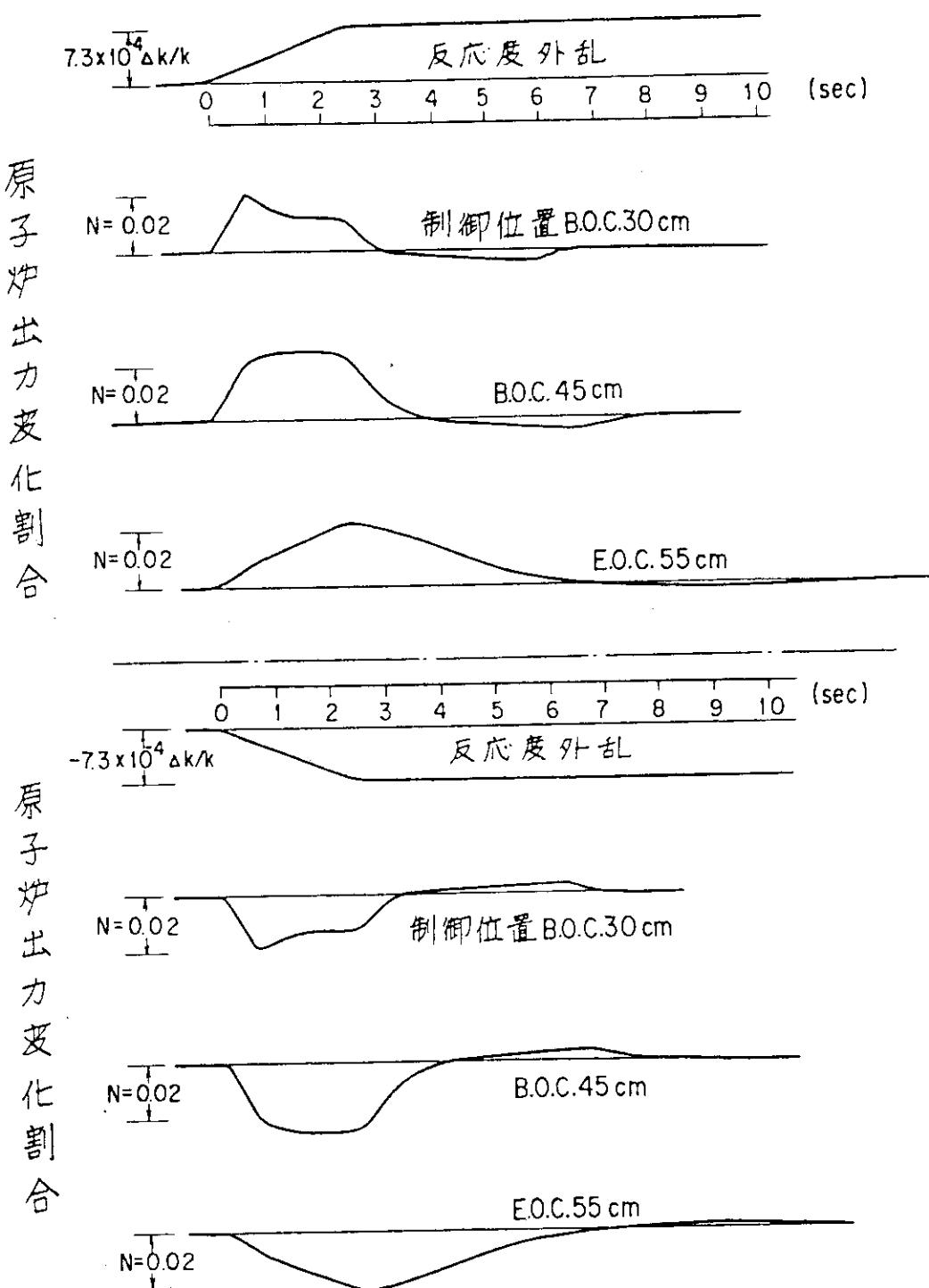


図 4.5-7 ランプ状外乱応答（温度効果によるフィードバックを時間遅れなしで考慮した場合）

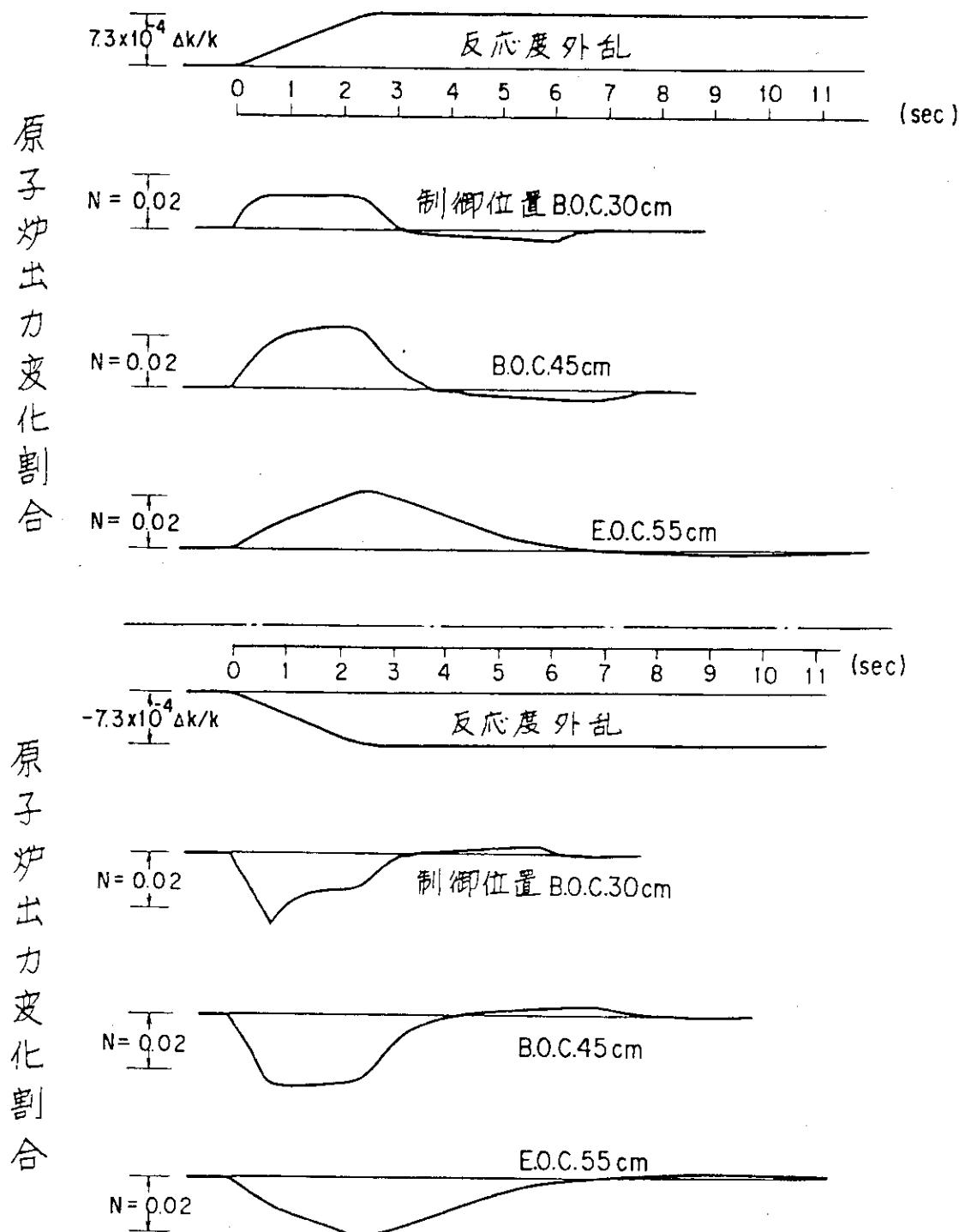


図 4.5-8 ランプ状外乱応答（温度効果によるフィードバックを
0.1 sec の時間遅れで考慮した場合）

4.6 周波数特性

制御系の周波数特性を解析し、系の安定性を調べる。周波数応答は、正弦波入力に対する系の定常応答である。応答特性から安定度を表す量である位相余有と利得余有を求める。一般に、利得余有が 12 dB 以上、位相余有が 40° 以上あると良い応答を示すとされている。^{3), 4)}

周波数応答は、図 4.3-2 中の外乱入力位置から正弦波を入力し、制御棒位置の“D”で出力を取る開ループ系で行った。この解析では、正弦波入力に対し、出力に現われる同一角周波数の正弦波成分のみを、入力と比較した。図 4.6-1～図 4.6-3 に、それぞれ駆動速度 $10, 30, 50\text{ cm/min}$ の場合の周波数応答特性 (Bode 線図) を示す。制御棒制御位置は、B.O.C. 曲線の 30 cm 位置である。解析で得た位相余有、ゲイン余有を図中に示すが、いずれの場合も上記の安定基準を満たす。

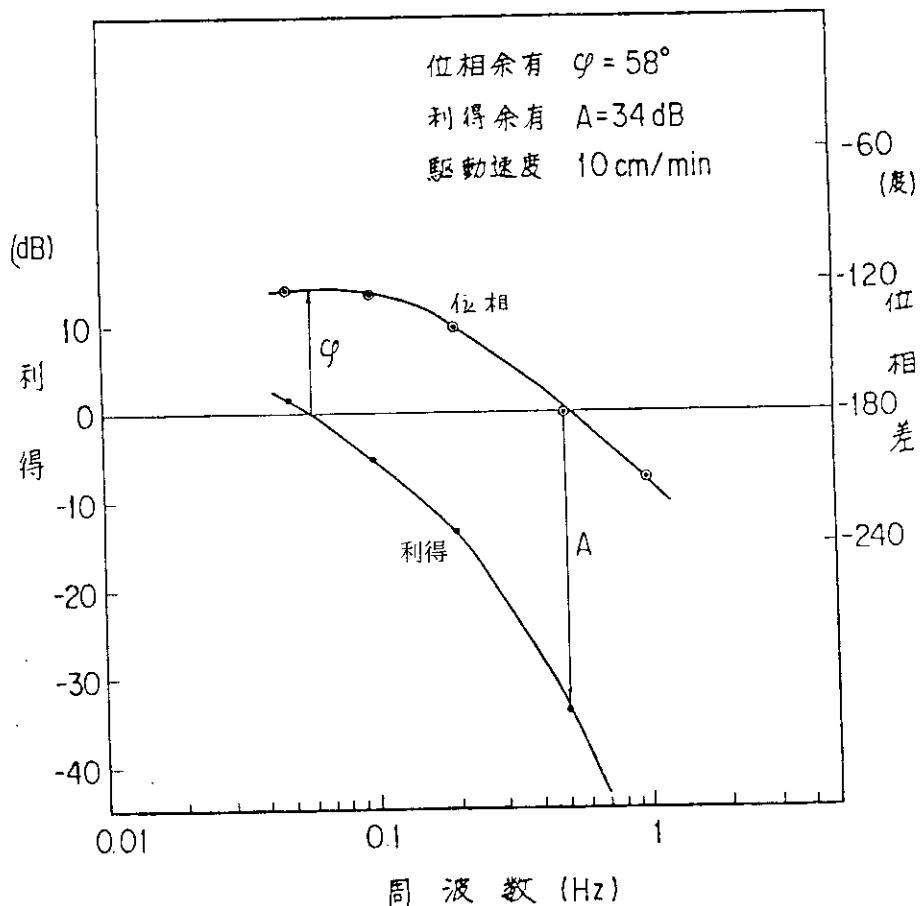
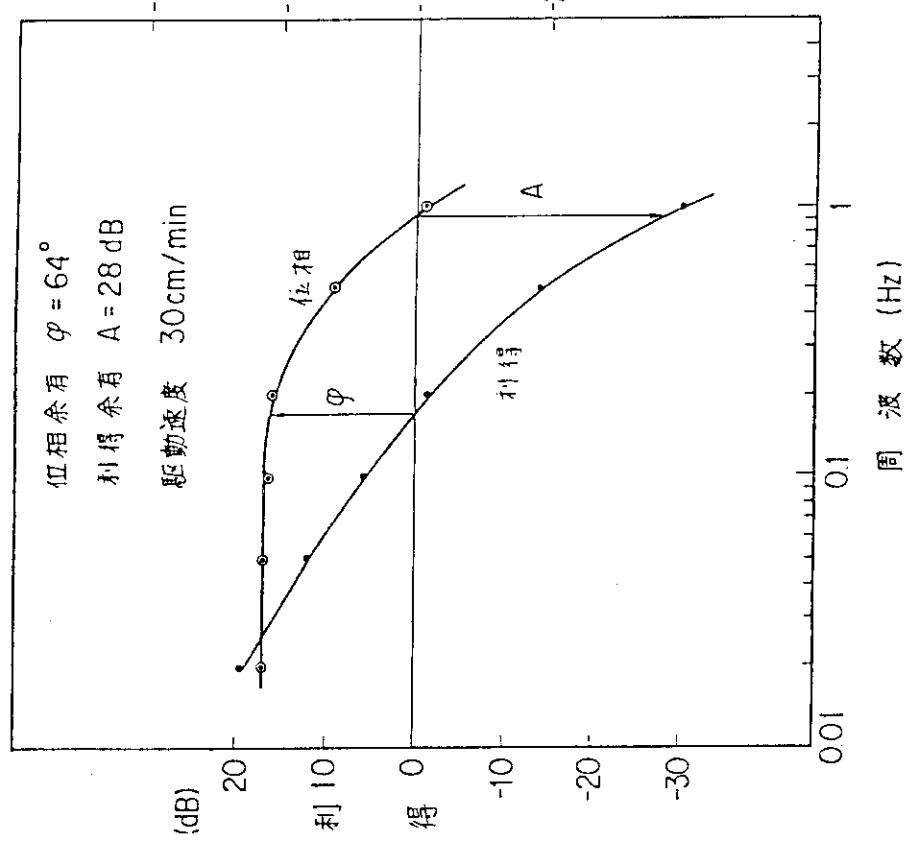
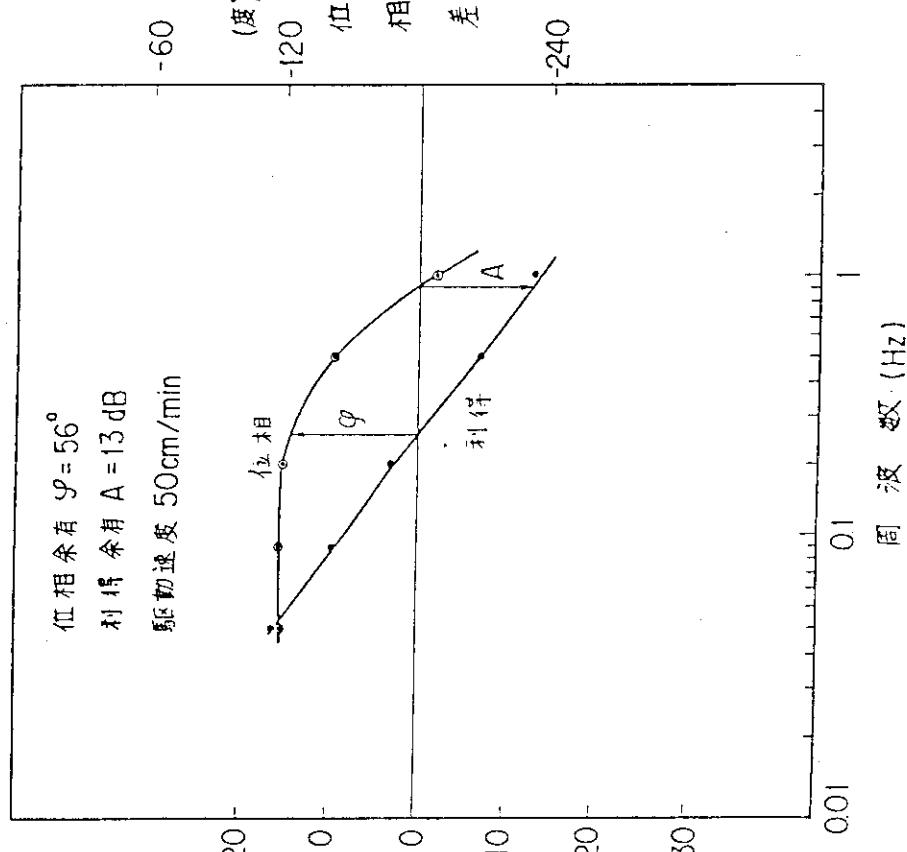


図 4.6-1 周 波 数 特 性
(駆動速度 10 cm/min)

図 4.6-2 周波数特性
(駆動速度 30 cm/min)図 4.6-3 周波数特性
(駆動速度 50 cm/min)

5 結 言

JRR-3炉心動特性を表わす即発中性子寿命と実効遅発中性子割合を「SRACコードシステム」によって求め、自動制御系設計に必要な制御棒駆動速度を決定した。

即発中性子寿命と実効遅発中性子割合を燃焼度、炉心温度および制御棒位置について種々の条件を仮定して計算した結果、同じ約 $10\text{ } \mu\text{ステップ}$ 状反応度外乱に対し、炉心最高出力で高々 0.5% の違いしか現われない。これは、アナログ計算機の精度を考慮すると、これら炉心条件の違いによる ℓ 、 β_{eff} の違いが動特性に与える影響はほど無視できる。

制御棒駆動速度を検討した結果、 30 cm/min と設計した。この速度で制御すると、ステップ状($\pm 7.3 \times 10^{-4} \Delta k/k$)およびランプ状($\pm 3.0 \times 10^{-4} \Delta k/k$)の外乱が原子炉運転中に添加されても、自動制御系は原子炉出力がすみやかに所定の出力になるように応答することを確認した。

謝 辞

本報告を作成するに当り、研究炉管理部次長 佐藤一男氏、研究炉開発室 宮坂靖彦氏、一色正彦氏、安藤弘栄氏、竹内光男氏および関係諸氏に深く感謝する。SRAC計算コードを使用するに当って、市川博喜氏と岩崎淳一氏に御協力いたゞき感謝の意を表する。アナログ計算機によるシミュレーションに際し、原子炉工学部原子炉制御研究室室長 篠原慶邦氏、同研究室 渡辺光一氏、ならびに原子炉研修所 小川繁氏に御支援いたゞき感謝する。

参 考 文 献

- 1) K. Tsuchihashi, et al.: "SRAC JAERI, Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis", JAERI 1285 (1983).
- 2) 大西信秋 他：“軽水炉の反応度投入事象解析コード EUREKA-2”，JAERI-M 84-074 (1984).
- 3) 増淵正美：“自動制御基礎理論” コロナ社 (1964).
- 4) 高橋安人：“自動制御理論” 岩波書店 (1962).

5. 結 言

JRR-3炉心動特性を表わす即発中性子寿命と実効遅発中性子割合を「SRACコードシステム」によって求め、自動制御系設計に必要な制御棒駆動速度を決定した。

即発中性子寿命と実効遅発中性子割合を燃焼度、炉心温度および制御棒位置について種々の条件を仮定して計算した結果、同じ約 $10\text{~}\mu\text{s}$ ステップ状反応度外乱に対し、炉心最高出力で高々 0.5% の違いしか現われない。これは、アナログ計算機の精度を考慮すると、これら炉心条件の違いによる ℓ 、 β_{eff} の違いが動特性に与える影響はほど無視できる。

制御棒駆動速度を検討した結果、 30~cm/min と設計した。この速度で制御すると、ステップ状($\pm 7.3 \times 10^{-4} \Delta k/k$)およびランプ状($\pm 3.0 \times 10^{-4} \Delta k/k$)の外乱が原子炉運転中に添加されても、自動制御系は原子炉出力がすみやかに所定の出力になるように応答することを確認した。

謝 辞

本報告を作成するに当り、研究炉管理部次長 佐藤一男氏、研究炉開発室 宮坂靖彦氏、一色正彦氏、安藤弘栄氏、竹内光男氏および関係諸氏に深く感謝する。SRAC計算コードを使用するに当って、市川博喜氏と岩崎淳一氏に御協力いたゞき感謝の意を表する。アナログ計算機によるシミュレーションに際し、原子炉工学部原子炉制御研究室室長 篠原慶邦氏、同研究室 渡辺光一氏、ならびに原子炉研修所 小川繁氏に御支援いたゞき感謝する。

参 考 文 献

- 1) K. Tsuchihashi, et al.: "SRAC JAERI, Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis", JAERI 1285 (1983).
- 2) 大西信秋 他："軽水炉の反応度投入事象解析コード EUREKA-2" , JAERI-M 84-074 (1984).
- 3) 増淵正美："自動制御基礎理論" コロナ社 (1964).
- 4) 高橋安人："自動制御理論" 岩波書店 (1962).

5. 結 言

JRR-3炉心動特性を表わす即発中性子寿命と実効遅発中性子割合を「SRACコードシステム」によって求め、自動制御系設計に必要な制御棒駆動速度を決定した。

即発中性子寿命と実効遅発中性子割合を燃焼度、炉心温度および制御棒位置について種々の条件を仮定して計算した結果、同じ約10%ステップ状反応度外乱に対し、炉心最高出力で高々0.5%の違いしか現われない。これは、アナログ計算機の精度を考慮すると、これら炉心条件の違いによる β_{eff} の違いが動特性に与える影響はほど無視できる。

制御棒駆動速度を検討した結果、30cm/minと設計した。この速度で制御すると、ステップ状($\pm 7.3 \times 10^{-4} \Delta k/k$)およびランプ状($\pm 3.0 \times 10^{-4} \Delta k/k$)の外乱が原子炉運転中に添加されても、自動制御系は原子炉出力がすみやかに所定の出力になるように応答することを確認した。

謝 辞

本報告を作成するに当り、研究炉管理部次長 佐藤一男氏、研究炉開発室 宮坂靖彦氏、一色正彦氏、安藤弘栄氏、竹内光男氏および関係諸氏に深く感謝する。SRAC計算コードを使用するに当って、市川博喜氏と岩崎淳一氏に御協力いたゞき感謝の意を表する。アナログ計算機によるシミュレーションに際し、原子炉工学部原子炉制御研究室室長 篠原慶邦氏、同研究室 渡辺光一氏、ならびに原子炉研修所 小川繁氏に御支援いたゞき感謝する。

参 考 文 献

- 1) K. Tsuchihashi, et al. : "SRAC JAERI, Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis", JAERI 1285 (1983).
- 2) 大西信秋 他：“軽水炉の反応度投入事象解析コード EUREKA-2”，JAERI-M 84-074 (1984).
- 3) 増淵正美：“自動制御基礎理論” コロナ社 (1964).
- 4) 高橋安人：“自動制御理論” 岩波書店 (1962).