

JAERI-Data/Code

JP0050007

99-045



種々の反応度印加に対する動特性解析の  
ための簡易プログラム：REARA

1999年11月

島川聰司・田畠俊夫・小向文作

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那  
珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料セ  
ンター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布  
を行っております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research  
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy  
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

## 種々の反応度印加に対する動特性解析の ための簡易プログラム：R E A R A

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

島川 聰司・田畠 俊夫・小向 文作

(1999年10月4日受理)

原子炉の動特性解析には、従来、強い時間依存性をもつ原子炉挙動を解くための同時性の取り扱いが優れていることから、アナログ計算機が用いられており、原子炉運転中の安定性判断に対しての一般的な方法として利用されてきた。しかしながら、アナログ計算機では、複数の反応度事象が混在したり、非線形の時間依存をもつような複雑な反応度印加のモードの動特性解析には多くの制限があり、それらの条件の実現は困難を極める。また、いくつかの事象をパラメトリックに解析する場合、わずかな条件の変更でさえアナログプログラミング回路の変更を伴うために必要な準備作業時間も長くなる。そのため一般的には、アナログ計算機による反応度印加に対する応答解析は、実際の事象をかなり簡略化して典型的な事象に置き換えた条件で行われていた。

そこで、複雑な反応度印加条件に対しても簡易かつ迅速に解析可能なデジタル解析プログラム「R E A R A (REActivity Response Analyses program)」を開発した。解法は、遅発中性子先行核が6群で定義される一点炉近似動特性方程式について、逐次的に解を求める計算法に基づいている。自動制御系や温度フィードバックなどの効果やパルス状の中性子打ち込みに対する応答解析が簡便に行えるようになっている。解析結果は数値データ出力の他に、ディスプレイ画面上に変化曲線やデジタルデータをグラフィカルに表示できることから、原子炉運転員の訓練時に、動特性を理解するためのシミュレーション用プログラムとしても利用できる。

本プログラムの解析結果を過去に実施したアナログ計算機による結果と比較して、両者の相違が非常に小さいことから、プログラムの妥当性を確認した。本プログラムを使用することにより、動特性解析の計算準備作業にかかる時間を飛躍的に節約でき、さらに動特性解析に関する詳細な情報を取得することができる。

## REARA: Reactor Kinetic Analysis Program for Various Events of Reactivity Insertion

Satoshi SHIMAKAWA, Toshio TABATA and Bunsaku KOMUKAI

*Department of JMTR  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken*

(Received October 4, 1999)

The analog computers have been widely adopted for reactor kinetic analysis because of an advantage on the treatment of simultaneity to solve a reactor behavior with a strong time-dependence. The analog analysis was generally utilized in stability characterization during reactor operation. However there are many limitations on the analog computer to solve reactivity insertion events, which have multiple modes or non-linear time dependence. In addition, the analog computer must be restructured by changing electrical circuits in the case of parametrical analysis and it takes long time even for small change of analysis condition. For such reasons, the analog analysis has been generally utilized for solving typical and simple reactivity insertion mode.

A digital program, called REARA (REActivity Response Analysis program), has been developed for easy and quick analysis for complex reactivity insertion events. This program is based on the method with one after another solution for a point kinetic equation with six groups of delayed neutron precursors. Complex events can be analyzed including the automatic control rod system and/or reactivity feedback from reactor coolant temperature change. Optional mode is installed to simulate a reactor response in the pulsed neutron source experiment. The program is useful as an educational tool in the training of reactor operators, since the outputs can be shown in graphical display with digital meter.

The calculated results by the digital program agreed well with ones by analog computer. This program can significantly reduce the preparation time for calculations and give various additional information on reactor kinetics.

Keywords : Reactor Kinetics, Computer Code, JMTR, Reactivity Insertion, Control Rod, Pulsed Neutron Source Experiment

## 目 次

1. 序言	1
2. 数学的背景	2
3. 解法及び物理方程式への展開	4
3.1 一般的な原子炉動特性	4
3.2 外乱として強制的に印加される反応度量	5
3.2.1 ステップ状反応度印加モード	5
3.2.2 ランプ状反応度印加モード	6
3.2.3 正弦波状反応度印加モード	7
3.3 自動制御棒による補償反応度量	8
3.4 原子炉冷却水の温度変化による反応度フィードバック	8
4. 差分方程式への変換	10
4.1 一点炉近似方程式	10
4.2 外乱反応度の方程式	10
4.3 自動制御棒の方程式	11
4.4 温度フィードバックの方程式	11
5. 入出力及び画面表示	13
5.1 入力項目	13
5.2 出力項目	20
5.3 画面表示	21
5.3.1 入力画面例	21
5.3.2 解析画面	22
6. 解析例	23
6.1 正の反応度印加に対する自動制御特性	23
6.2 パルス中性子法実験のシミュレーション	24
7. 結言	25
謝辞	25
参考文献	25
付録 プログラムを実行させるために必要な環境と解析速度	30

## Contents

1. Introduction -----	1
2. Mathematical Background -----	2
3. Solution and Reduction of Physical Equations -----	4
3.1 General Description -----	4
3.2 Forced Reactivity Insertion -----	5
3.2.1 Step Mode -----	5
3.2.2 Ramp Mode -----	6
3.2.3 Sine Curve Mode -----	7
3.3 Correction Reactivity by Automatic Control Rod -----	8
3.4 Reactivity Feedback by Coolant Temperature Changing -----	8
4. Transformation of Equations -----	10
4.1 One Point Kinetic Equation -----	10
4.2 Equation for Forced Reactivity -----	10
4.3 Equation for Automatic Control Rod -----	11
4.4 Equation for Temperature Feedback -----	11
5. Input and Output -----	13
5.1 Input Format -----	13
5.2 Output Format -----	20
5.3 Graphical Display -----	21
5.3.1 Input Page -----	21
5.3.2 Output Page -----	22
6. Example Analysis Results -----	23
6.1 Automatic Control Rod Ability for Positive Step Reactivity Insertion -----	23
6.2 Simulation of Pulsed Neutron Source Experiment -----	24
7. Conclusion -----	25
Acknowledgments -----	25
Reference -----	25
Appendix . Executing Environments and Analysis Speed -----	30

## 1. 序言

研究用原子炉、特に材料試験炉は炉心に反応度変化を与える種々の照射試験を行いながら運転することから、発電用原子炉に比べて複雑で変化に富んだ反応度印加事象が発生する。そこで、原子炉の運転においてあらかじめ安全性と安定性を確認しておくために、種々の反応度印加事象に対する原子炉出力等の応答特性を把握しておく必要がある。

原子炉建設がはじまった昭和40年代頃から最近まで、原子炉安全審査等の動特性解析はアナログ計算機に依存していた。これは、使用する方程式間の同時性といった取り扱いが、デジタル計算機では困難なためであった。しかしながら、アナログ計算機を用いる解析では、その準備作業（アナログ回路のプログラミング）にかかる膨大な時間、想定する反応度印加モードを簡略化しなければならない、といった点に不便さがあり、解析は実際の事象をかなり抽象化した条件で行う必要があった。また、アナログとデジタルを融合させたハイブリッド計算機を用いたとしても実際に想定される事象に対して緻密に評価した結果を得ることは困難であった。一方で、大型計算機を駆使して正確な計算が可能なデジタル解析コードも存在するが、非線形となる複雑な反応度印加事象を詳細に設定して解析するには、特別な知識と経験を必要とし、簡易に解くには不向きであった。

そこで、これらの問題を克服するために、できるかぎり想定条件に近い複雑な反応度印加条件に対して、パソコンを使って解析できるデジタル計算プログラムを開発した。特長は、自動制御系や温度フィードバックなどの効果を含めた高速な解析、かつパルス状の中性子打ち込みに対する応答といった中性子源の外乱に対する解析が可能となるように、事象の独立性と拡張性に富んだ計算モデルを採用した点である。また、対話形式の入力インターフェースを備えることにより、従来のアナログ解析のために必要とされた計算準備作業にかかる多大な時間の浪費を飛躍的に節約することもできる。

本報告では、一点炉近似動特性方程式に対して複数の反応度印加事象を同時に考慮できるデジタル計算機用プログラムの内容について述べる。また、本プログラムを用いて、正の反応度印加に対する自動制御特性及びパルス中性子実験シミュレーションの解析例について述べる。

## 2. 数学的背景

中性子エネルギーが1群、遅発中性子先行核が6群の一点炉近似動特性方程式は、7本の常微分連立方程式として以下のように与えられる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\beta_{eff}}{\Lambda}(\rho - 1)n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i + S \quad (2.1)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda}n - \lambda_i c_i \quad , \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6. \quad (2.2)$$

ここで、

- $n$ : 中性子数 (原子炉出力に比例)
- $c_i$ : 第  $i$  群の遅発中性子先行核濃度
- $t$ : 時間(s)
- $\beta_{eff}$ : 実効遅発中性子発生割合
- $\beta_i$ : 第  $i$  群の遅発中性子発生割合
- $$\sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta_{eff}$$
- $\lambda_i$ : 第  $i$  群の遅発中性子先行核の崩壊定数( $s^{-1}$ )
- $\Lambda$ : 平均中性子世代時間(s)
- $\rho$ : 外部反応度印加(\$)
- $S$ : 中性子源

である。

これら的一点炉近似動特性方程式は、反応度  $\rho$  が時間の非線形関数である場合、 $\rho$  の変化が中性子数  $n$  に依存してフィードバックする現象が発生するために、簡単に解を求めることが困難にしている。また、中性子のふるまい過程を表す時定数が  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  秒(=  $\Lambda$  の範囲)から約 80 秒(=  $\lambda$  の最大値)といった非常に幅広い時間スケールを扱うため、ルンゲクッタ法などを利用して直接的な数値解を求ることすらも複雑にしている。

そこで、連立微分方程式を差分方程式に変換して、微少時間毎に逐次解きながら重ね合わせる計算モデルを採用した。当然ながら、この計算モデルが適用できるか否かは、原子炉動特性に対する物理的考察を必要とする。ゆっくりとした反応度変化に対しては、線形方程式を解いた状態で使用することになるので、微小時間幅  $\Delta t$  は特に小さくする必要はない。ただし、大きな反応度変化が急激に印加される場合に微分方程式間の時間的独立性を求ることは難しいことから、微小時間幅  $\Delta t$  が物理現象に対して十分小さくなるように設定して、妥当性のある解析を可能にした。また、同時性を無視できないほど結合力の強い中性子数  $n$  と遅発中性子先行核濃度  $c$  については同時性を実現させておく必要がある。ここで、 $c$  の時間変化が激しくないことに注目して、 $n$  に対する 2 次のテーラー展開による予測値と、 $c$  の値か

ら算出される  $n$  の値をあらかじめ収束させる処理を行うことにより、解析における時間のずれによる誤差発生を抑制した。

以上の考え方に基づいて、各反応度事象を独立ルーチンとして扱うことにより、必要に応じて物理現象を追加して拡張することが可能なコーディングを実現させることができた。また、逐次解法により、複雑な反応度印加条件に対して、デジタル計算機による動特性解析を高速に行うことが可能となった。解析式群の展開では、まず物理方程式を相対変化量で扱えるように変換を行った上で、各式に対し時間分離した解を求めておき、それらを重ね合わせて逐次算出してゆき、連続的な時間解析として扱う方法を採用している。それ故、一点炉近似方程式に対して、制御棒插入や炉心温度変化といった複数の反応度変化を線型独立ルーチンとして追加することができ、非線型な事象に対するプログラムの拡張を容易にしている。この方法を採用することにより、高速に初期値問題を解くことが可能である。

### 3. 解法及び物理方程式への展開

#### 3.1 一般的な原子炉動特性

一点炉近似動特性方程式(2.1)式及び(2.2)式に、初期条件として  $t=0$  のとき、 $\frac{dn}{dt}=0$ 、  
 $\rho=\rho_0$ 、 $n=n_0$ 、 $\frac{dc_i}{dt}=0$ 、 $c_i=c_{i0}$  を代入すると、

$$S = -\frac{\beta_{eff}}{\Lambda}(\rho_0 - 1)n_0 - \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_{i0} \quad (3.1)$$

$$\lambda_i c_{i0} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n_0 \quad (3.2)$$

となり、

$$S = -\frac{\beta_{eff}}{\Lambda} \left( (\rho_0 - 1)n_0 + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\beta_{eff}} n_0 \right) \quad (3.3)$$

が導かれる。

一方、(2.1)式の各因子を初期値からの変動量として表すために、

$$\rho = \rho_0 + \delta\rho \quad (3.4)$$

$$N = \frac{(n - n_0)}{n_0}, \quad \frac{dN}{dt} = \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dt} \quad (3.5)$$

$$C_i = \frac{(c_i - c_{i0})}{c_{i0}}, \quad \frac{dC_i}{dt} = \frac{1}{c_{i0}} \frac{dc_i}{dt} \quad (3.6)$$

ここで、  $N$ : 中性子の初期値からの変動比 (原子炉出力の初期値からの変動比)

$C_i$ : 第  $i$  群の遅発中性子先行核濃度の初期値からの変動比

と変換し、これら(3.1)～(3.6)式を(2.1)式及び(2.2)式に代入して書き換えると、

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\beta_{eff}}{\Lambda}(\rho_0 + \delta\rho - 1)N + \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} \left( \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\beta_{eff}} C_i + \delta\rho \right) \quad (3.7)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = -\lambda_i C_i + \lambda_i N \quad (3.8)$$

となり、一般的な原子炉動特性を表す物理方程式が得られる。

(3.4)式中の $\delta\rho$ は、時間とともに変化する初期値からの反応度変動の総量を表し、その内訳は外乱として強制的に印加される反応度量、自動制御棒による補償反応度量、炉心温度変化による反応度フィードバック量の和と定義すれば、以下の式で示される。

$$\delta\rho = \delta\rho_F + \delta\rho_H + \delta\rho_Q \quad (3.9)$$

ここで、  
 $\delta\rho_F$ : 強制反応度印加(\$)  
 $\delta\rho_H$ : 自動制御棒による反応度補償(\$)  
 $\delta\rho_Q$ : 温度変化による反応度フィードバック(\$)

である。

それぞれの反応度量については次節で述べる。

### 3.2 外乱として強制的に印加される反応度量

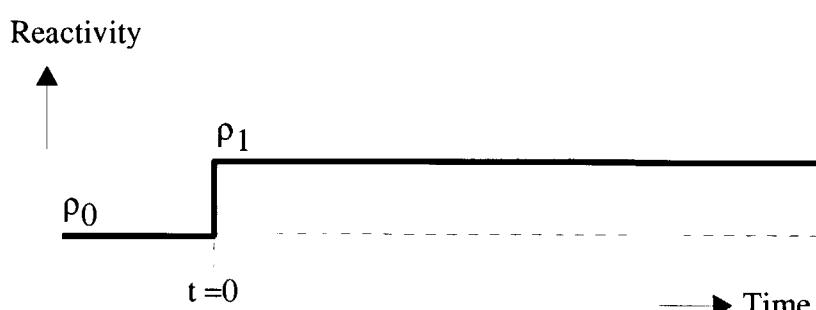
対象とする反応度印加は、制御棒の異常引抜きや原子炉内の物質の挙動（例えば、水力ラビットの試料挿入・取出や中性子を強く吸収する材料の物理的変化を制御した照射試験：J MTR出力急昇試験の中性子吸收スクリーンであるヘリウム-3ガスの圧力変化）を指す。即ち、原子炉安全審査の動特性解析等で対象とするものである。本プログラムで扱える反応度印加の形状として、ステップ状、ランプ状、正弦波状が選択できる。また、反応度量の単位は、セント、ドル、%Δk/kのいずれかで与えることができる。

#### 3.2.1 ステップ状反応度印加モード

ステップ状反応度印加は、時刻  $t=0$  で瞬時に反応度が印加し、 $t>0$  では一定の反応度状態が続くといったモードであり、一般的には次の条件となる。

$$\begin{array}{ll} t < 0 & : f(t) = \rho_0 \\ 0 \leq t & : f(t) = \rho_1 \end{array}$$

模式的には、以下のような反応度変化となる。

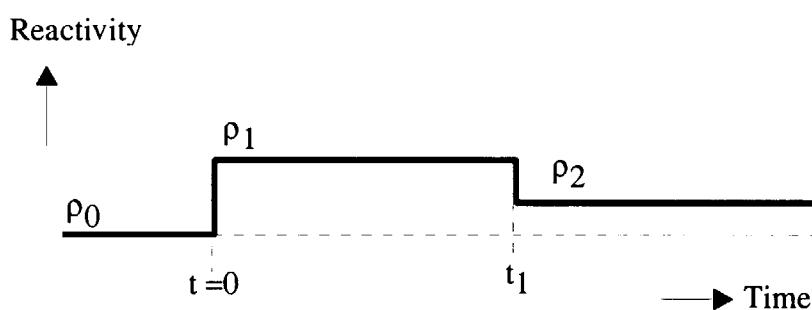


ここで例えば反応度条件が、 $\rho_0=0.0\%\Delta k/k$ 、 $\rho_1=+0.1\%\Delta k/k$  であれば、運転中（臨界状態）に  $0.1\%\Delta k/k$  の正の反応度が外乱等により印加された事象を意味する。また、 $\rho_0=0.0\%\Delta k/k$ 、 $\rho_1=-12.0\%\Delta k/k$  であれば、運転中（臨界状態）に原子炉が瞬時にスクラムし、制御棒によつて  $-12.0\%\Delta k/k$  の反応度が印加された事象を意味する。

さらに以下のように条件を複雑にすれば、

$$\begin{aligned} t < 0 & : f(t) = \rho_0 \\ 0 \leq t < t_1 & : f(t) = \rho_1 \\ t_1 \leq t & : f(t) = \rho_2 \end{aligned}$$

以下のような単一パルス状の反応度変化を表現することが可能である。



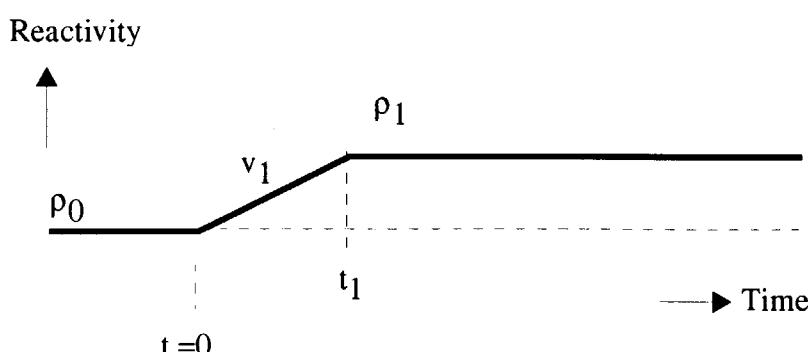
### 3.2.2 ランプ状反応度印加モード

ランプ状反応度印加は、時刻  $t=0$  から比較的ゆっくりと反応度が一定の傾きで増加（もしくは減少）していく、 $t>t_1$  では一定の反応度状態が続くモードであり、一般的には次の条件となる。

$$\begin{aligned} t < 0 & : f(t) = \rho_0 \\ 0 \leq t < t_1 & : f(t) = vt \\ t = t_1 & : f(t) = v t_1 = \rho_1 \\ t_1 < t & : f(t) = \rho_1 \end{aligned}$$

ここで、 $v$  は反応度印加速度である。

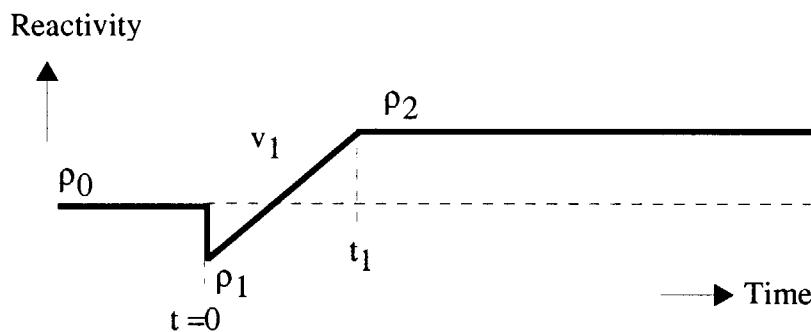
模式的には、以下のような反応度変化となる。



さらに条件を複雑にすれば、

$$\begin{aligned}
 t < 0 & : f(t) = \rho_0 \\
 t = 0 & : f(t) = \rho_1 \\
 0 < t < t_1 & : f(t) = \rho_1 + vt \\
 t = t_1 & : f(t) = \rho_1 + v t_1 = \rho_2 \\
 t_1 < t & : f(t) = \rho_2
 \end{aligned}$$

以下のようなノコギリ状の反応度変化を表現することが可能である。



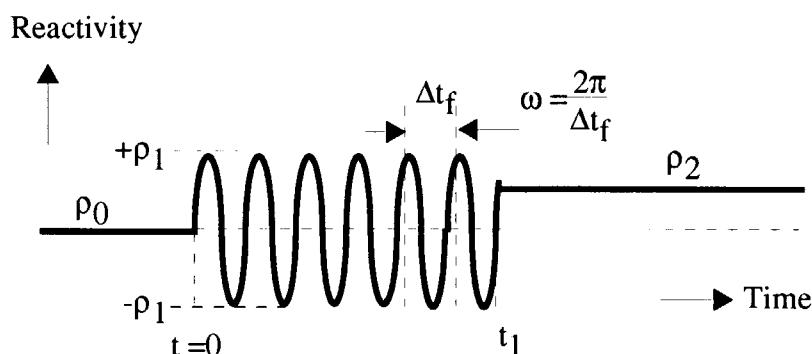
### 3.2.3 正弦波状反応度印加モード

正弦波状反応度印加は、時刻  $t=0$  から反応度が周期的に変化するモードであり、一般的には次の条件となる。

$$\begin{aligned}
 t < 0 & : f(t) = \rho_0 \\
 0 \leq t < t_1 & : f(t) = \rho_1 \sin(\omega t) \\
 t_1 \leq t & : f(t) = \rho_2
 \end{aligned}$$

ここで、 $\omega$ は周波数であり、周期 $\Delta t_f$ に逆比例する。

模式的には、以下のような反応度変化となる。



### 3.3 自動制御棒による補償反応度量

外乱として印加された反応度などにより定常状態が乱され、原子炉出力に変化が起こると、定常状態の出力値に戻すように自動制御棒は、自動的に引抜又は挿入される。例えば、正の強制反応度が印加されると炉出力の急昇が起こり、炉出力を低下させるために自動的に制御棒が挿入され、外乱として印加された反応度と同等の負の反応度を与える制御棒位置に自動的に収束する。

制御棒の初期位置からの移動量は、

$$H = h - h_0 \quad (3.10)$$

ここで、  $H$ : 自動制御棒の初期位置からの移動量( $mm$ )：正は引抜、負は挿入

$h$ : 自動制御棒の位置( $mm$ )

$h_0$ : 自動制御棒の初期位置( $mm$ )

と定義する。

その際に補償するための反応度の量は、自動制御棒の移動量に依存する。一般に、このような制御は、中性子計数に対して移動量の加速度を制御する方法が採用される。例えば J M T R の自動制御系電気回路<sup>10</sup>を伝達関数で表現すると、制御棒の加速度を表す物理方程式は次式のようになる。

$$\frac{d^2H}{dt^2} = \frac{K_H}{T_H} N - \frac{1}{T_H} \frac{dH}{dt} \quad (3.11)$$

ここで、  $K_H$ : 自動制御系の比例定数

$T_H$ : 自動制御系の時定数

と定義する。

### 3.4 原子炉冷却水の温度変化による反応度フィードバック

原子炉が熱絶縁されている場合の反応度温度係数によるフィードバック効果を表すための項である。反応度の印加により炉出力が変化し、原子炉冷却水の温度変化が起こる。温度変化は中性子断面積や減速材密度（この場合は冷却水）の変化を生じさせ、結果として反応度のフィードバックが起こる。通常の原子炉では温度係数が負になるように設計されているため、炉出力の上昇は自動的に抑制される。ここでは、原子炉が熱絶縁されていると仮定しているため、一度上昇した炉出力は時間とともに下降する。

温度変化量  $Q$  は、

$$Q = q - q_0 \quad (3.12)$$

ここで、  
     $Q$ : 初期温度からの差( $K$ )  
     $q$ : 温度( $K$ )  
     $q_0$ : 初期温度( $K$ )

と定義する。

温度変化は原子炉出力に依存し、物理方程式は次式のようになる。

$$\frac{dQ}{dt} = K_Q N - T_Q Q \quad (3.13)$$

ここで、  
     $Q$ : 原子炉内の冷却水温度( $^{\circ}\text{C}$ )  
     $K_Q$ : 温度変化の比例定数  
     $T_Q$ : 温度変化の時定数

である。

#### 4. 差分方程式への変換

前節の(3.7)から(3.13)式で与えられる連立微分方程式を差分方程式に変換して解く際には、微小時間幅 $\Delta t$ では他の式に組み込まれた因子の変化は無視でき、各式はお互いに独立であるという仮定をしている。ただし、結合力の強い(3.7)式と(3.8)式における中性子数Nと遅発中性子先行核濃度Cについては、Cの時間変化が激しくないことに基づいて、Nに対する2次のテーラー展開による予測値を両式を用いて収束させことにより、誤差発生を抑制している。

##### 4.1 一点炉近似方程式

(3.7)式を差分化して、その解を求める

$$N(t + \Delta t) = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\beta_{eff}} C_i(t + \Delta t) + \delta\rho}{\rho_0 + \delta\rho - 1} \cdot \left( e^{\frac{\beta_{eff}}{\Lambda} (\rho_0 + \delta\rho - 1) \Delta t} - 1 \right) + N(t) \cdot e^{\frac{\beta_{eff}}{\Lambda} (\rho_0 + \delta\rho - 1) \Delta t} \quad (4.1)$$

となり、同様に(3.8)式は、

$$C_i(t + \Delta t) = N'(t + \Delta t) \cdot \left( 1 - e^{-\lambda_i \Delta t} \right) - C_i(t) \cdot e^{-\lambda_i \Delta t} \quad (4.2)$$

となる。

ここで、

$$\begin{aligned} N: & \quad 2\text{次のテーラー展開による}N\text{の予測値} \\ N'(t + \Delta t): & N(t) + \frac{dN(t)}{dt} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \frac{d^2N(t)}{dt^2} \cdot (\Delta t)^2 \\ \frac{dN(t)}{dt}: & \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} (\rho_0 + \delta\rho(t) - 1) N(t) + \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} \left( \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\beta_{eff}} C_i(t) + \delta\rho(t) \right) \\ \frac{d^2N(t)}{dt^2}: & \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} (\rho_0 + \delta\rho(t) - 1) \left( \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} (\rho_0 + \delta\rho(t) - 1) N(t) + \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} \left( \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\beta_{eff}} C_i(t) + \delta\rho(t) \right) \right) + \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\beta_{eff}} (\lambda_i C_i(t) + \lambda_i N(t)) \end{aligned}$$

ただし、プログラム上は、(4.1)式で算出される $N(t + \Delta t)$ と差が生じないように、収束処理を施している。

である。

##### 4.2 外乱反応度の方程式

外乱反応度は、(3.9)式の右辺の項 $\delta\rho_F$ であり、

$$\delta\rho_F(t) = f(t) \quad (4.3)$$

と表現した。関数 $f(t)$ は前章で述べたようにステップ状、ランプ状、正弦波状モードの中か

ら選択できる。

#### 4.3 自動制御棒の方程式

自動制御系の炉出力補償における自動制御棒による補償反応度量を、

$$\delta\rho_H(t) = \varepsilon_H(H) \cdot H(t) \quad (4.4)$$

と表現する。

一般に、炉内中性子束は炉心の上下方向に対して余弦曲線的な分布を示すが、自動制御棒の移動範囲が狭く、その範囲における中性子束分布の変化が小さい場合には、制御棒価値の係数  $\varepsilon_H(H)$  は定数として近似できる。本プログラムはこの考えにしたがって、制御棒価値の計数を定数で入力することとした。

$$\varepsilon_H(H) \equiv C_H \quad (4.5)$$

ただし、上述の近似が成立しない場合には厳密に制御棒の上下位置に対する変数として扱う必要があり、自動制御棒の初期位置からの移動量  $H$  に対する制御棒価値の係数  $\varepsilon_H(H)$  を高次関数表現に改良することが今後の課題である。

一方、初期位置からの移動量  $H$  は、(3.11)式に示されるように 2 次の微分方程式で与えられることから、まず  $N$  が独立であるとして(3.11)式を解くことにより、1 次微分である制御棒の移動速度を以下のように求めた。

$$\frac{dH(t + \Delta t)}{dt} \cong K_H N \left( 1 - e^{\frac{1}{T_H} \Delta t} \right) + H(t) e^{\frac{1}{T_H} \Delta t} \quad (4.6)$$

これに時間幅  $\Delta t$  を乗じて、時刻  $t$  の制御棒移動速度に加算することにより、時刻  $t + \Delta t$  における自動制御棒の位置を求める。

$$H(t + \Delta t) \cong H(t) + \left( K_H N \left( 1 - e^{\frac{1}{T_H} \Delta t} \right) + H(t) e^{\frac{1}{T_H} \Delta t} \right) \Delta t \quad (4.7)$$

となる。なお、制御棒の位置は、初期位置( $H=0\text{mm}$ )からの距離を表し、正の値の時には引き抜かれた距離、負の値の時には挿入された距離を意味する。

#### 4.4 温度フィードバックの方程式

炉心冷却水の温度変化による反応度フィードバックは、

$$\delta\rho_Q(t + \Delta t) = \varepsilon_Q \cdot Q(t + \Delta t) \quad (4.8)$$

ここで、  $\varepsilon_Q$ : 温度係数(\$/K)

なお、初期値は  $Q(0) = 0$ ,  $\delta\rho_Q(0) = \varepsilon_Q \cdot Q(0) = 0$

と表現し、(3.13)式を  $N$  が独立であるとして解くことにより、 $\Delta t$  秒後の温度変化は以下のように表すことができる。

$$Q(t + \Delta t) \cong \frac{K_Q}{T_Q} N (1 - e^{-T_Q \Delta t}) + Q(t) e^{-T_Q \Delta t} \quad (4.9)$$

## 5. 入出力及び画面表示

### 5.1 入力項目

REA R A プログラムでの入力作業は、入力画面に従って対話式に行う（入力画面の表示例は 5.3.1 節を参照）。入力項目及びその内容は、以下のとおりである。

解析条件：

(1) 遅発中性子先行核の群数指定

0 : 0 群

1 : 1 群

6 : 6 群

(2) 解析時間幅

1 : high (高速 :  $\Delta t=50\text{ms}$ ) : 入出力のテスト用

2 : mid (中速 :  $\Delta t=10\text{ms}$ ) : 一般的な解析条件

3 : low (低速 :  $\Delta t=1\text{ms}$ ) : 詳細な解析条件

4 : kame (最低速 :  $\Delta t=0.1\text{ms}$ ) : 超詳細な解析条件

(3) 原子炉出力レベル

1 : ゼロ出力

2 : 高出力(温度フィードバック効果を考慮可能)

(4) 反応度単位

1 : セント( $= \$ / 100$ )

2 : ドル (\$)

3 : %  $\Delta k/k$

(5) 反応度タイプ

1 : 直線 (ステップ状もしくはランプ状の場合)

2 : 正弦波

(6) 自動制御棒

1 : オン (自動制御棒あり)

2 : オフ (自動制御棒なし)

(7) 中性子源

1 : 無

2 : 有 (パルス中性子法などの模擬)

反応度パラメータ：

(10) 反応度の不連続変化

1 : 無

2 : 有

(11) 初期反応度(  $t < 0$  )

数値を入力 (負の値ならば未臨界定常状態)

入力制限 : 数値が 100 以下であること

(12) 印加反応度(  $t = 0$  )

数値を入力

入力制限 : 数値が 100 以下であること

(13) 印加反応度速度(  $t < 0$  )

数値を入力

表示制限 : (5)で 1 を選択した場合のみ表示

入力制限 : 数値が 100 以下であること

(13) 印加反応度速度(  $t < 0$  )

数値を入力

表示制限 : (5)で 1 を選択した場合のみ表示

入力制限 : 数値が 150 以下であること

(14) 正弦波の振幅 (  $t < 0$  )

数値を入力

表示制限 : (5)で 2 を選択した場合のみ表示

入力制限 : 数値が 0.01~100 の範囲であること

(15) 正弦波の周期 (  $t < 0$  )

数値を入力

表示制限 : (5)で 2 を選択した場合のみ表示

入力制限 : 数値が 0.01~1000 の範囲であること

## (16) 不連続変化後の反応度

数値を入力

表示制限 : (10)で 2 を選択した場合のみ表示

入力制限 : 数値が -100~100 の範囲であること

## (17) 不連続変化が発生する時刻

数値を入力

表示制限 : (10)で 2 を選択した場合のみ表示

入力制限 : 数値が 0 以上であること

即発中性子データ :

(20) 即発中性子世代時間 (  $\Lambda$  :sec )

数値を入力

入力制限 : 数値が 0~10 の範囲であること

遅発中性子データ :

(30) 実効遅発中性子濃度 (  $\beta_{\text{eff}}$  )

数値を入力

表示制限 : (1)で 0 以外を選択した場合のみ表示  
入力制限 : 数値が 0~10 の範囲であること

(31) 遅発中性子先行核第 1 群の割合 ( $= \beta_1 / \beta_{\text{eff}}$ )

数値を入力

表示制限 : (1)で 0 以外を選択した場合のみ表示  
入力制限 : 数値が 0.00001~1 の範囲であること

(32) 遅発中性子先行核第 2 群の割合 ( $= \beta_2 / \beta_{\text{eff}}$ )

数値を入力

表示制限 : (1)で 6 を選択した場合のみ表示  
入力制限 : 数値が 0.00001~1 の範囲であること

(33) 遅発中性子先行核第 3 群の割合 ( $= \beta_3 / \beta_{\text{eff}}$ )

(32)と同じ

(34) 遅発中性子先行核第 4 群の割合 ( $= \beta_4 / \beta_{\text{eff}}$ )

(32)と同じ

(35) 遅発中性子先行核第 5 群の割合 ( $= \beta_5 / \beta_{\text{eff}}$ )

(32)と同じ

(36) 遅発中性子先行核第 6 群の割合 ( $= \beta_6 / \beta_{\text{eff}}$ )

(32)と同じ

(41) 遅発中性子先行核第 1 群の崩壊定数 ( $= \lambda_1$ )

数値を入力

表示制限 : (1)で 0 以外を選択した場合のみ表示  
入力制限 : 数値が 0.00001~10 の範囲であること

(42) 遅発中性子先行核第 2 群の崩壊定数 ( $= \lambda_2$ )

数値を入力

表示制限 : (1)で 6 を選択した場合のみ表示  
入力制限 : 数値が 0.00001~10 の範囲であること

(43) 遅発中性子先行核第 3 群の崩壊定数 ( $= \lambda_3$ )

(42)と同じ

(44) 遅発中性子先行核第 4 群の崩壊定数 ( $= \lambda_4$ )

(42)と同じ

(45) 遅発中性子先行核第 5 群の崩壊定数 ( $= \lambda_5$ )

(42)と同じ

(46) 遅発中性子先行核第 6 群の崩壊定数( $= \lambda_6$ )

(42)と同じ

温度フィードバックデータ : (3)で 2 を選択した場合のみ表示

(51) 比例定数  $K_t$  (°C/MW/s)

数値を入力

入力制限 : 数値が 0 以上であること

(52) 時定数  $\lambda t$  (1/s)

数値を入力

入力制限 : 数値が 0 以上であること

(73) 反応度係数(反応度/°C)

数値を入力

入力制限 : 数値が 0 以上であること

中性子源データ : (7)で 2 を選択した場合のみ表示

(61) 中性子源の強度(n/s)

数値を入力

入力制限 :  $1 \times 10^{10}$  以下であること

(62) 中性子源の挿入時刻(s)

数値を入力

入力制限 : 数値が 0 以上であること

(63) 中性子源の取出時刻(s)

数値を入力

入力制限 : 数値が 0 以上であること

制御棒データ : (6)で on を選択した場合のみ表示

(70) 制御棒速度の飽和

  1 : 無

  2 : 有 (駆動速度のリミッタがある場合)

(71) 自動制御棒の比例定数 Kc

数値を入力

入力制限 : 数値が 0 以上であること

入力説明 :  $Kc = ks \times Es \times v / 10$  (例:=512)

    ks:誤差増幅器とサーボ増幅器の総合利得(例:=20)

    Es:基準電圧(例:=10/1.3)

    v:サーボ増幅器出力電圧に対する制御棒速度(例:=33.3)

    注) 例は JMTR の場合

(72) 自動制御棒の時定数

数値を入力

入力制限 : 数値が 0 以上であること

(73) 自動制御棒の制御棒価値(反応度/mm)

数値を入力

入力制限 : 数値が 0 以上であること

(74) 自動制御棒の正の飽和速度 (mm/s)

数値を入力

表示制限 : (70)で 2 を選択した場合のみ表示

入力制限 : 数値が 0 以上であること

(74) 自動制御棒の負の飽和速度 (mm/s)

数値を入力

表示制限 : (70)で 2 を選択した場合のみ表示

入力制限 : 数値が 0 以下であること

画面表示設定 :

(1) オーバーライトモード

1 : no (前回の表示をクリアして新規表示)

2 : yes (前回の表示に上書きして表示)

(2) プロットするデータ数

1 : 1 種類のデータをプロット

2 : 2 種類のデータをプロット

3 : 3 種類のデータをプロット

(3) デジタルメータ

1 : off

2 : on (計算中のデータ変化をデジタルで表示)

(4) X 軸の目盛り線の数

数値を入力

(5) Y 軸の目盛り線の数

数値を入力

(6) 最大値及び最小値のサーチ

1 : off

2 : on (計算中のデータ変化をデジタルで表示)

時間軸設定 :

(11) 最小時間 (開始時刻)

数値を入力

入力制限 : 数値が -1000 ~ 1000 の範囲であること

(12) 最大時間 (終了時刻)

数値を入力

入力制限 : 数値が正であること

ファイル出力関係 :

## (15) 計算結果のファイル出力

1 : off

2 : on (DUMP.TXT として、(20),(30),(40)で選択したデータが出力)

## (16) 出力するデータの時間幅

数値を入力

入力制限 : 数値が 0.001s 以上であること (0.1s が望ましい)

プロット設定 :

## (20) プロットするデータの種類

1: 炉出力 ( $n/n_o$ )中性子数と同じ。ただし、初期値(時刻  $t=0$  の時の値  $n_o$ )との比で与えられることに注意。2: 遅発中性子先行核割合( $c/c_o$ ) : 時刻  $t=0$  の時の値  $c_o$  との比初期値(時刻  $t=0$  の時の値  $c_o$ )との比で与えられることに注意。3: ペリオド( $T_p$ ) : s炉出力が 2.7 倍( $=e$  倍)になるために必要な時間。

$$\begin{aligned} T_p &= \Delta t / \log((N(t)+1)/(N(t-\Delta t)+1)) \\ &= \Delta t / \log((n(t)/n_o)/(n(t-\Delta t)/n_o)) \\ &= \Delta t / \log((n(t))/(n(t-\Delta t))) \end{aligned}$$

4: 温度変化( $T-T_o$ ) : °C5: 制御棒位置変化( $H-H_o$ ) : mm6: 制御棒駆動速度( $V_H$ ) : mm/s

7: 初期印加反応度 : 選択した単位

外乱として強制的に印加した反応度の時間変化。

8: 反応度( $\rho$ )

外乱その他の影響の結果として生じる反応度の時間変化。選択した単位で表示。

9: 中性子減衰定数( $A$ ): 1/s (即発遅発中性子 + 遅発中性子)ペリオドの逆数とは異なり、バックグラウンド( $=n_o$ )補正が加味される。

$$\begin{aligned} A &= \log((N(t)+1)-n_o)/(N(t-\Delta t)+1)-n_o) / \Delta t \\ &= \log((n(t)/n_o)-n_o)/(n(t-\Delta t)/n_o-n_o)) / \Delta t \\ &= \log((n(t)-1)/(n(t-\Delta t)-1)) / \Delta t \end{aligned}$$

10:即発中性子減衰定数(  $\alpha$  ):1/s (臨界時の値  $\alpha_c = \beta_{\text{eff}}/\Lambda$ )  
 遅発中性子先行核の増減による中性子数変動の寄与を排除したもの。

## (21) Y軸の最小値

数値を入力

 : 数値が 1000 以下であること

## (22) Y軸の最大値

数値を入力

 : 数値が正であること

## (23) 表示色

1: 青

2: 赤

3: 紫

4: 緑

5: 水色

6: 黄

7: 白

## (30) プロットするデータの種類

(20)と同じ

## (31) Y軸の最小値

(21)と同じ

## (32) Y軸の最大値

(22)と同じ

## (33) 表示色

(23)と同じ

## (40) プロットするデータの種類

(20)と同じ

## (41) Y軸の最小値

(21)と同じ

## (42) Y軸の最大値

(22)と同じ

## (43) 表示色

(23)と同じ

## 5.2 出力項目

出力は、画面上で確認できるデータとファイルにダンプされるデータがあり、画面出力は前節の画面表示設定、時間軸設定、プロット設定の項で与えた条件で実行される（入力画面の表示例は 5.3.2 節を参照）。

一方、ダンプされるファイルはカンマ区切りテキスト形式のファイルであり、ファイル名は、DUMP.TXT である。ファイル出力の内容を以下に示す。

計算条件：1～3 行目

$\beta_{\text{eff}}$ ,  $\Lambda$ , 反応度単位, 印加反応度、印加反応度速度, 解析スピード

(例 : .007677,4.271E-05," \$ ",-.1,0,"mid")

時間依存データ：4～X 行目

下記の中から 3 つ（プロット指定したデータ）について時間毎にカンマ区切りテキストで出力する。

時刻、プロット 1 のデータ、プロット 2 のデータ、プロット 3 のデータ

(例 : .01,.9214,-.0041666,-.1)

1:炉出力 ( $n/n_o$ )

2:遅発中性子先行核割合( $c/c_o$ ) : 時刻  $t=0$  の時の値  $c_o$  との比

3:ペリオド( $T_p$ ) : s

4:温度変化( $T-T_o$ ) : °C

5:制御棒位置変化( $H-H_o$ ) : mm

6:制御棒駆動速度( $V_H$ ):mm/s

7:初期印加反応度：選択した単位

8:反応度( $\rho$ )

9:中性子減衰定数( $A$ ):1/s (即発遅発中性子+遅発中性子)

10:即発中性子減衰定数( $\alpha$ ):1/s (臨界時の値  $\alpha_c = \beta_{\text{eff}}/\Lambda$ )

最大最小値のデータ：X+1～X+4 行目

プロット 1 : 最大値とその時刻、最小値とその時刻

プロット 2 : 最大値とその時刻、最小値とその時刻

プロット 3 : 最大値とその時刻、最小値とその時刻

(例 : "PLOT-1",1.03326,"at",2.68,.90435,"at",.27)

## 5.3 画面表示

## 5.3.1 入力画面例

(1) 入力画面 1 : 主に解析条件を入力するページ

```

REACTIVITY RESPONSE ANALYSES PROGRAM ver.1.0 PAGE-1
ANALYSES CONDITIONS REACTIVITY PARAMETERS
(1) DELAYED NEUTRON GROUP < 6 > (10) REACTIVITY CHANGE < off >
(2) ANALYSES SPEED < high > (11) INITIAL REACTIVITY < 0.000>
(3) POWER LEVEL < zero > (12) INSERTED REACTIVITY < 0.100>
(4) REACTIVITY UNIT < %dk/k > (13) REACTIVITY SPEED < 0.000>
(5) REACTIVITY TYPE < liner >
(6) AUTO CONTROL ROD < on >
(7) NEUTRON SOURCE INSERT < no >

PROMPT NEUTRON LIFE TIME
(30) 1p <4.271E-05>

DELAYED NEUTRON PARAMETERS CONTROL ROD PARAMETERS
(30) BETA <7.677E-03> (41) RAMDA-1 <1.272E-02> (70) SATURATION < yes >
(31) BETA-1/BETA <1.00000> (42) RAMDA-2 <3.174E-02> (71) Ks < 5.000E+02>
(32) BETA-2/BETA <0.21100> (43) RAMDA-3 <1.160E-01> (72) Tm < 7.150E-01>
(33) BETA-3/BETA <0.18200> (44) RAMDA-4 <3.110E-01> (73) COEFF. < 3.700E-03>
(34) BETA-4/BETA <0.40600> (45) RAMDA-5 <1.400E+00> (74) SAT. SP+ < 3.000E+01>
(35) BETA-5/BETA <0.13000> (46) RAMDA-6 <3.870E+00> (75) SAT. SP- <-3.000E+01>

Do you need to change parameter (y/n) ? ■

```

(2) 入力画面 2 : 主に画面表示及びデータ出力条件を入力するページ

```

REACTIVITY RESPONSE ANALYSES PROGRAM ver.1.0 PAGE-2
GRAPHICS CONDITIONS DATA PLOT (Y-AXIS) CONDITIONS
(1) OVER WRITING < no > PLOT-1
(2) NUMBER OF PLOT DATA < 3 > (20) DATA NAME < n/no >
(3) DIGITAL METER < on > (21) MIN. VALUE < 3.000E-01>
(4) X-AXIS MESH < 10 > (22) MAX. VALUE < 1.300E+00>
(5) Y-AXIS MESH < 10 > (23) PLOT COLOR < 7 >
(6) MAX & MIN SEARCH < 3 >

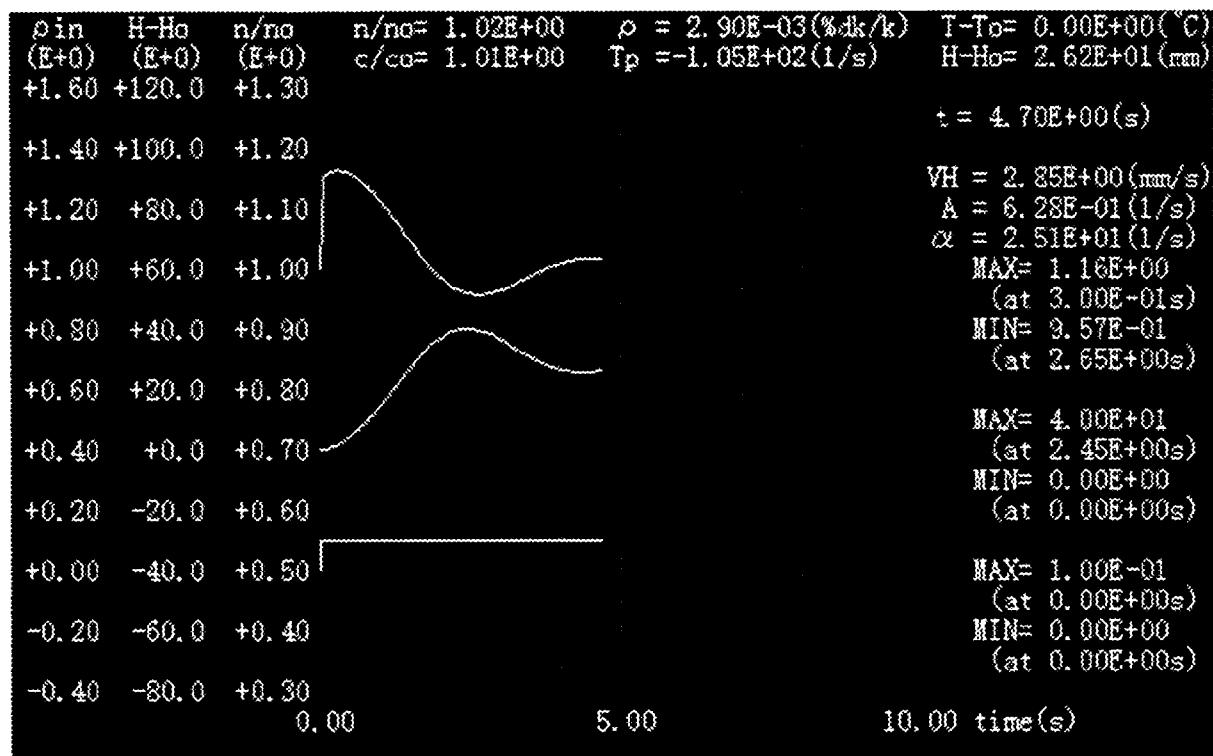
TIME (X-AXIS) CONDITIONS PLOT-2
(11) MIN. TIME (s) < 0.00E+00> (30) DATA NAME < H-Ho >
(12) MAX. TIME (s) < 1.00E+01> (31) MIN. VALUE <-8.000E+01>
(32) MAX. VALUE < 1.200E+02>
(33) PLOT COLOR < 7 >

FILE OUTPUT CONDITIONS PLOT-3
(15) OUTPUT < yes > (40) DATA NAME < pin >
(16) TIME SPAN (s) < 1.00E+00> (41) MIN. VALUE <-4.000E-01>
(42) MAX. VALUE < 1.600E+00>
(43) PLOT COLOR < 7 >

Do you need to change parameter (y/n/r) ? ■

```

## 5.3.2 解析画面



ステップ状の反応度印加に対する応答解析の例。プロットしているデータは、上から炉出力 (n/n<sub>0</sub>)、制御棒位置変化(H-H<sub>0</sub>)、反応度(ρ)である。

## 6. 解析例

### 6.1 正の反応度印加に対する自動制御特性

解析内容は、正のステップ状反応度が印加された際、自動制御系（自動制御棒）によって、速やかに原子炉出力を反応度印加前の定常状態に復帰するかどうかの解析である。解析条件を以下に示す。

解析条件：

原子炉特性：J M T R 炉心

遅発中性子群：6 群

炉出力：零出力（温度フィードバックなし）

解析速度：mid (10ms)

解析対象時間：10 s

自動制御棒：オン（J M T R 制御棒条件）

中性子源：なし

印加反応度：

(1) ステップ状：0.1% $\Delta k/k$

(2) ランプ状：0.2% $\Delta k/k$ まで 5 秒間で直線的に増加し、その後 0.2% $\Delta k/k$ で一定。

解析結果を、図 1 に示す。炉出力変化 $\Delta n$  のデジタル解析による結果は、過去に実施したアナログ解析とほぼ同じ結果を示す。ステップ状反応度印加に対しては、4~5 秒後付近の炉出力変化にわずかに相違が見られる。また、ランプ状反応度印加に対しては、2~4 秒後付近及び 6.5~8.0 秒付近の 2 カ所に相違が見られる。これらの相違が発生している領域は、外乱発生もしくは条件変更後に自動制御系による補償の効果が収束する領域であり、自動制御棒の伝達関数の設定部分に、相違の原因があると考えられる。アナログ解析を実施した際に、自動制御棒の制御棒価値に係わるポテンショメータ設定や回路構成素子の特性がいくぶん不安定であったことから、アナログ解析の自動制御系に関する部分で誤差発生が考えられる。ただし、原子炉の反応度印加に対する安定性を解析する上で、これらの相違は安定性の判断を異にするものにはならない。また、今回のデジタル解析を応用すれば、炉出力変化 $\Delta n$  以外にも制御棒位置変化や制御棒駆動速度の変化などのデータが簡易に得ることができることから、アナログ解析に比べてその有効性は高い。

パラメトリックな解析結果として、図 2 にステップ状反応度変化に対する平均中性子世代時間( $\Lambda$ )の影響を、図 3 に実効遅発中性子割合( $\beta_{eff}$ )の影響を示す。平均中性子世代時間( $\Lambda$ )は  $1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$  s といった 10 倍の範囲の変動が生じても、反応度印加直後の出力の立ち上がりが異なるだけで、定常状態への復帰の傾向は全く影響を及ぼさない。一方、実効遅発中性子割合( $\beta_{eff}$ )の影響は大きく、 $7.0 \times 10^{-3} \sim 8.0 \times 10^{-3}$  といった約 15% の変動で、炉出力の最高到達値が反比例した値に変化し、定常状態への復帰の傾向もわずかであるが異なった傾向を示す。

## 6.2 パルス中性子法実験のシミュレーション

内容はパルス中性子法実験の詳細解析である。具体的には、パルス状の中性子が臨界状態の原子炉に打ち込まれた直後の非常に短時間の中性子減衰をシミュレーションし、その減衰係数から得られる動特性パラメータ  $\alpha(\beta_{\text{eff}}/\Lambda)$  の時間依存性を調べることである。解析条件を以下に示す。

解析条件：

原子炉特性：J M T R 炉心

遅発中性子群：1群の場合と6群の場合

炉出力：零出力（温度フィードバックなし）

解析速度：kame (0.1ms)

解析対象時間：40ms

自動制御棒：オフ

中性子源：パルス状の中性子を発生させ、1ms 後に取り除く

印加反応度：なし

パルス中性子法では、得られるデータは即発中性子と遅発中性子を合わせた減衰係数  $A$  であり、パルスの入射と測定が遅発中性子の寿命 ( $\lambda$  の逆数) に比べて十分短い時間内であるときに、 $A=\alpha=\beta_{\text{eff}}/\Lambda$  が成立する。

過去に得られた実験データの例<sup>2)</sup>を図4に示す。この実験では、動特性パラメータ  $\alpha$  を算出するための基本モードの範囲を 12~25ms としている。これは、入射後 10ms 以内では高次モードの影響が著しいこと、またパルス入射後 27ms 以降では計数誤差が大きいことから、それらを排除することにより設定した範囲である。

図5に本コードによる解析結果を示す。解析では、高次モードの影響は加味されないため、入射直後からほぼ一定の中性子の減衰が見られるが、中性子減衰係数  $A$  は理論値（この場合、 $\beta_{\text{eff}}=0.007677$ ,  $\Lambda=4.27 \times 10^{-5}$  なので、即発中性子減衰係数  $\alpha$  は  $169 \text{ s}^{-1}$  である）に対して、時間とともに小さな値を示す。パルスの入射は、1ms であるので遅発中性子の寿命に比べて十分短いが、測定開始時間は高次モードの影響を逃れるようにするために入射後 10ms 以降となり、測定時間幅を考慮すると遅発中性子の寿命に比べて十分に短いとは言い難い条件になっている。そのため、図6に示すように入射直後はほぼ理論値と同じ  $169 \text{ s}^{-1}$  となっているものの、時間経過とともに遅発中性子の効果が大きくなり、中性子減衰係数  $A$  は即発中性子減衰係数  $\alpha$  の値と相違が生じる。一方、中性子減衰曲線から遅発中性子先行核の影響を取り除いた中性子減衰係数、すなわち本プログラムで強制的に算出した即発中性子減衰係数  $\alpha$  は、理論値を同じく  $169 \text{ s}^{-1}$  で一定となる。実験上は、中性子減衰係数  $A$  から即発中性子減衰係数  $\alpha$  を分離して測定することは困難である。本プログラムによる解析で得られるデータから、中性子パルスの入射量に依存する遅発中性子先行核の増加の効果、すなわち即発中性子減衰係

数の測定実験における遅発中性子の影響を調べることが可能となる。例えば、遅発中性子1群の場合には、1群化した遅発中性子寿命の値が約100msとなることから、基本モードの対象範囲12~25msでは比較的一定な値となり、その平均値は理論値 $169\text{ s}^{-1}$ に近い値 $167\text{ s}^{-1}$ となる。一方、より実際に近い条件となる遅発中性子6群の場合には、第5群及び第6群の遅発中性子寿命が非常に短いため、基本モードの対象範囲での平均値は理論値よりも約10%小さな $159\text{ s}^{-1}$ となる。この相違が遅発中性子の影響であり、実験で得られた中性子減衰係数を補正することにより、即発中性子減衰係数 $\alpha$ を求め、正確な動特性パラメータ $\beta_{eff}/\Lambda$ を推定することができる。

## 7. 結言

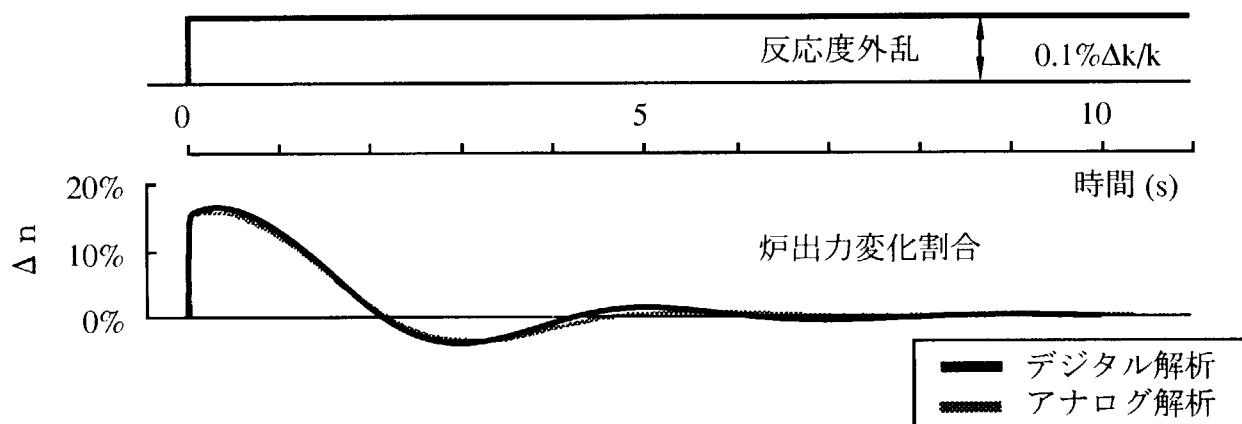
種々の反応度印加事象を簡易に解析できるプログラム REARAを開発した。本プログラムを使うことにより、動特性解析を行うために必要な準備期間を大幅に短縮することが可能となる。必要な準備期間とは、原子炉物理の専門的知識や複雑な計算機処理に係わるあまり一般的ではないプログラミング知識や経験などを取得するための時間である。解析結果の妥当性は、アナログ解析との比較から検証した。本プログラムによる解析結果は数値データ出力の他に、ディスプレイ画面上にグラフィカルな変化曲線やデジタルメータを表示できることから、動特性を理解するための原子炉運転員訓練用シミュレーションプログラムとしても利用できる。このプログラムを使用することにより、従来のアナログ解析のために必要とされた計算準備作業にかかる多大な時間を飛躍的に節約でき、さらに多種多様な付加情報を取得することができる。

## 謝 辞

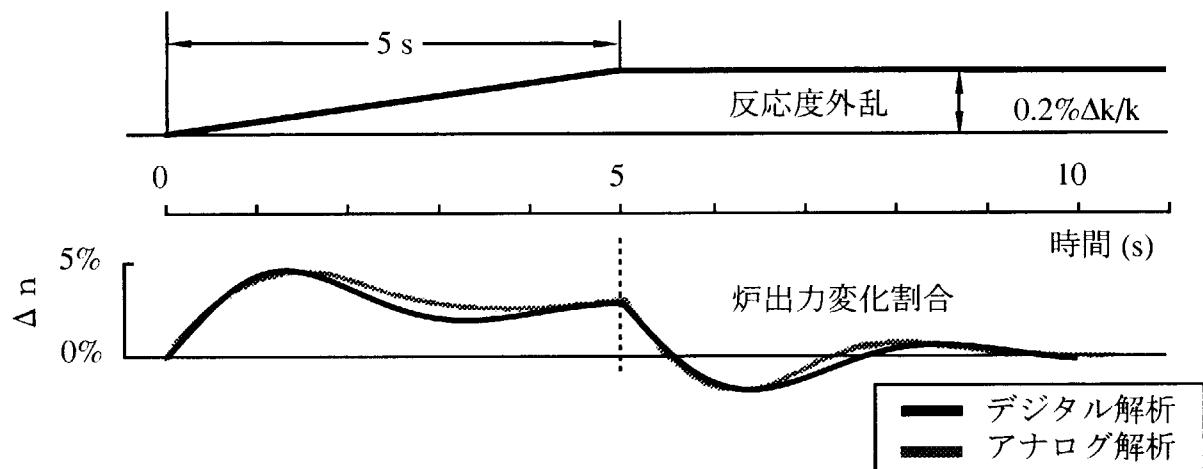
動特性解析に関しては、原研東海研修センター・新藤隆一氏から有益なご助言をいただいた。本報告書をまとめるにあたり、原研材料試験炉部・馬場治部長、同・佐藤博原子炉第1課長、同・藤木和男計画課長にご指導いただいた。以上、記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 小向文作、島川聰司、武田卓士、永岡芳春；”アナログ計算機によるJ M T R の動特性解析－MEU及びL E U炉心－”, private communication
- 2) S.Shimakawa et,al, “Critical Experiment of JMTRC MEU Cores (II)”, Proceedings of 8th International Meeting of RERTR, (1985)

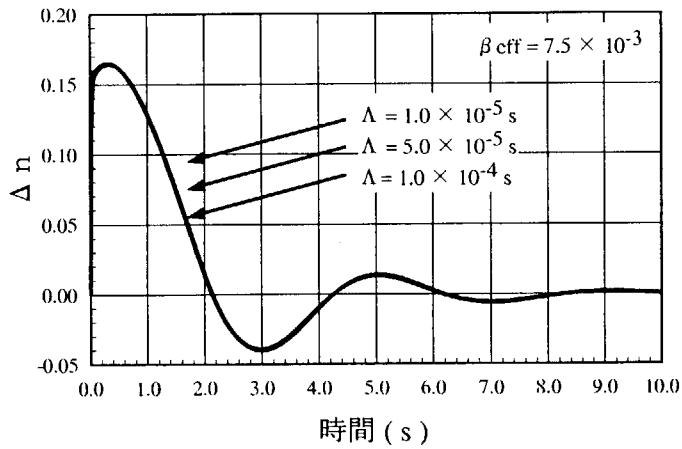


(a) ステップ状反応度印加に対する応答

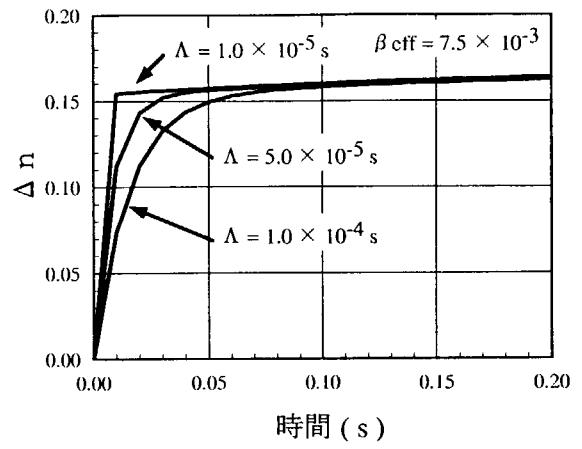


(b) ランプ状反応度印加に対する応答

図 1 正の印加反応度に対する自動制御特性  
(デジタル解析とアナログ解析)

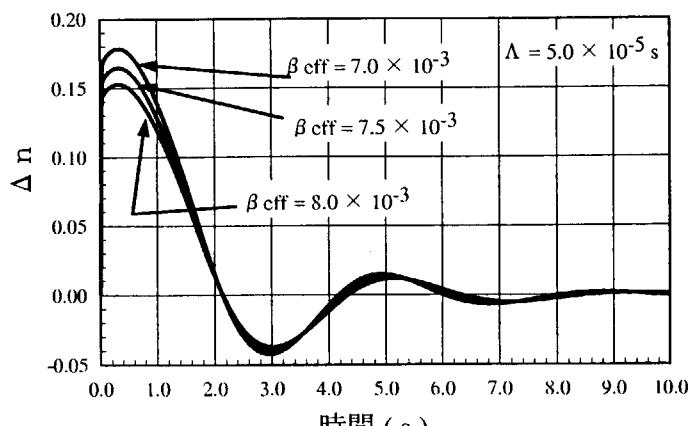


(a) 全体的な傾向

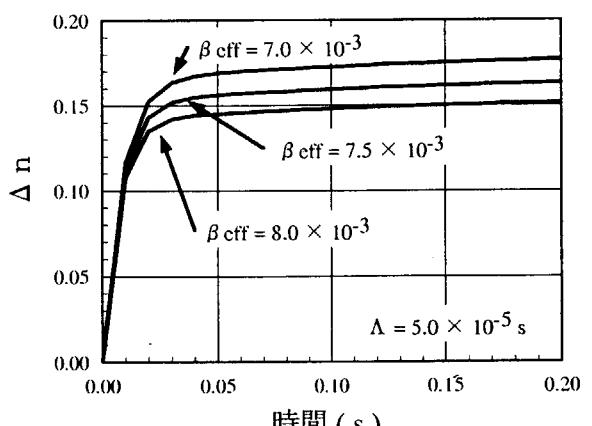


(b) 反応度印加直後の時間軸拡大

図2 平均中性子世代時間( $\Lambda$ )の影響  
(J M T Rのステップ状反応度印加に対する応答)



(a) 全体的な傾向



(b) 反応度印加直後の時間軸拡大

図3 実効遅発中性子割合( $\beta_{eff}$ )の影響  
J M T Rのステップ状反応度印加に対する応答

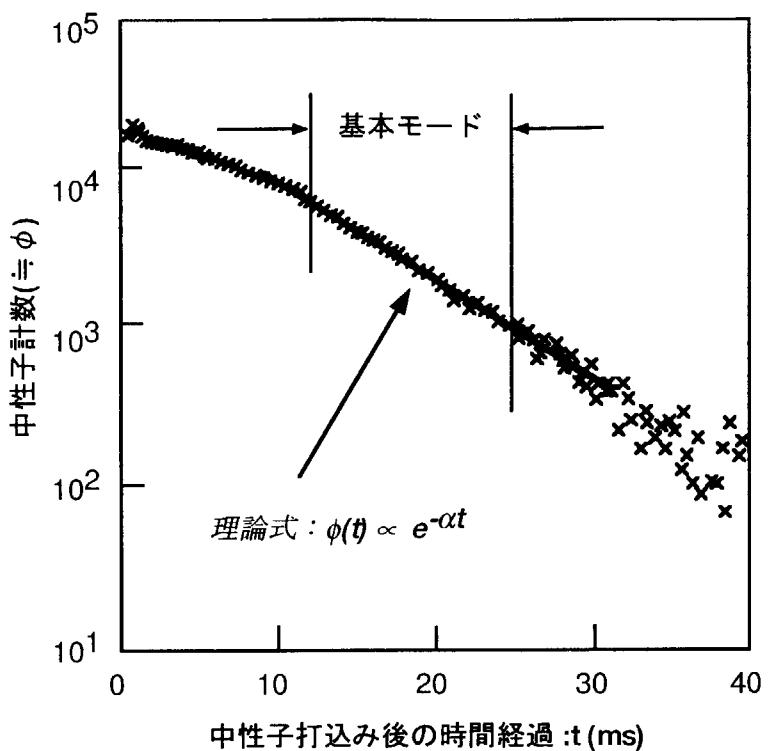


図4 パルス中性子法実験の例 (J M T R C)

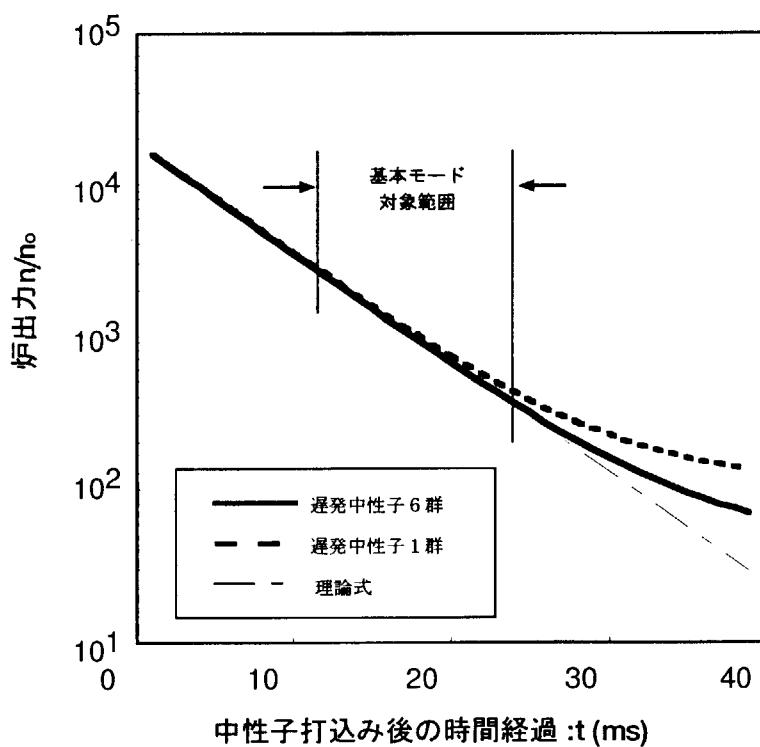


図5 パルス中性子法シミュレーション結果

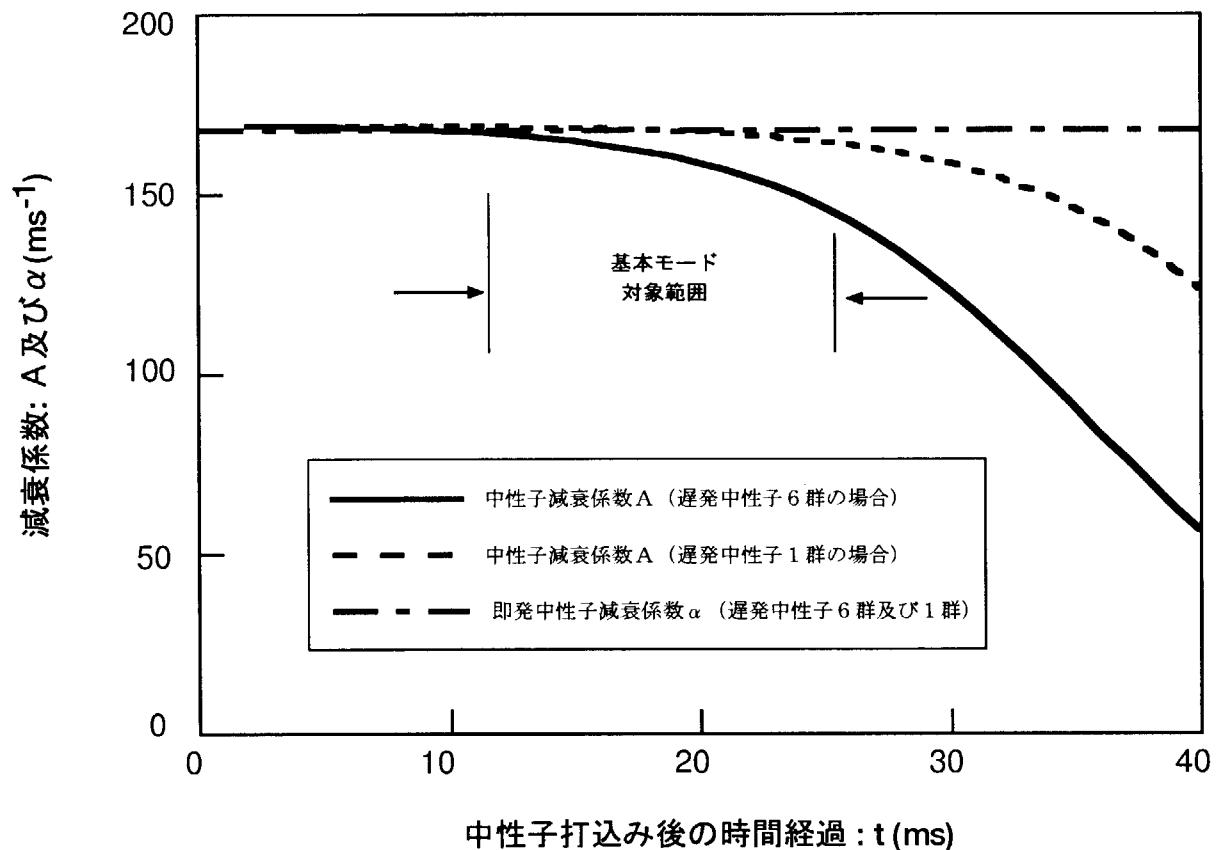


図 6 中性子減衰係数 A と即発中性子減衰定数  $\alpha$  の時間依存性 (解析データ)

## 付録 プログラムを実行させるために必要な環境と解析速度

本プログラムは、開発言語として N88BASIC を採用しているため、NEC 製 PC98 シリーズのコンピュータで実行させることを前提としている。しかしながら、他のコンピュータ環境でも動作できることが望ましいので、PC98 以外にも 2 種類のコンピュータ環境で解析できることを確認した。

確認した動作環境は、以下のとおりである。

### (1) PC98

ハードウェア	: NEC PC-9821 Ra300
プロセッサー	: Pentium II
動作クロック	: 300MHz
動作 OS	: Windows98
動作状況	: MS-Dos Window での N88BASIC 6.2
コンパイルの有無	: 有 (Basic-c コンパイラによるロードモジュール版) 無 (インタプリタ版)

### (2) PC-AT

ハードウェア	: Epson Endeavor Pro-400L
プロセッサー	: Pentium II
動作クロック	: 450MHz
動作 OS	: Windows95
動作状況	: BASIC98 ver.4.1 による N88BASIC エミュレーション
コンパイルの有無	: 無 (インタプリタ版)

### (3) Macintosh

ハードウェア	: Apple Power Macintosh
プロセッサー	: PowerPC G3
動作クロック	: 400MHz
動作 OS	: MacOS8.6
OS エミュレーション	: RealPC ver.1.0.5 による Windows95 エミュレーション
動作状況	: BASIC98 ver.4.1 による N88BASIC エミュレーション
コンパイルの有無	: 無 (インタプリタ版)

上記のうち、(2) 及び (3) のハードウェアでは、通常、本プログラムのソースである N88BASIC は実行できないため、エミュレーションソフトウェアを介して実行させた。

高速で解析できることを確かめるために、6.1 節で述べた正の反応度印加に対する自動制御特性のステップ状反応度印加について、その解析速度を計測した。その結果を下表に示す。

動作環境の違いによる解析速度

解析時間幅 $\Delta t$	解 析 速 度 (s)			
	PC98 Pentium II 300MHz		PC-AT Pentium II 450MHz	Macintosh PowerPC G3 400MHz
	インタプリタ	コンパイル	インタプリタ	インタプリタ
50 ms	2	1	16	133
10 ms	5	3	60	522
1 ms	38	21	486	4586

解析対象時間 = 10 s

解析の対象とした時間は、10秒である。

PC98 を用いた場合、解析時間幅が 10ms であれば実時間 10s の約半分の 5s で解析が完了する。解析時間幅を 1ms にした詳細解析でも、約 40s で解析は完了する。PC98 を用いれば、十分短い時間で解析できる。また、コンパイルしてロードモジュールを作成することにより、約 2 倍の速度向上が実現できる。

PC-AT 互換機では、解析時間幅を 50ms にした場合は実時間に近い速度で解析できるものの、解析時間幅 10ms では 1 分間の解析時間を要する。テストに用いた PC-AT 互換機は、PC98 に比べて 1.5 倍程度のプロセッサ能力があるものの、N88BASIC エミュレーションによる速度劣化が非常に大きいことがわかる。

Macintosh は、解析時間幅を 50ms にしても短時間での解析は不可能なので、正確な解析を行うには向きである。反応度変化の概略を把握するといった参考的な使用が妥当と考えられる。

解析速度の環境依存性は、当然ながらプログラム開発言語の種類によるものである。

N88BASIC で書かれた本プログラムを Microsoft Visial Basic 等に移植すれば、PC-AT 互換機用でも PC98 で N88BASIC を用いる場合と同程度の解析速度まで向上することが望める。

また、Macintosh の場合でも、REALbasic(Macintosh 用の Visial Basic 互換言語)に移植すれば、WindowsOS エミュレーションと N88BASIC エミュレーションの両者から解放されるため、PC98 での解析と同等もしくはそれ以上の高速な解析が可能であると考えられる。

This is a blank page.



種々の反応度印加に対する動特性解析のための簡易プログラム・REARA