

JAERI - M
91-071

反応度事故時燃料温度挙動解析コード
SHETEMP

1991年5月

新谷 文將・秋元 正幸

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。
入手の間合わせは、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、お申しこしてください。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 Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 副 (株)原子力資料サービス

反応度事故時燃料温度挙動解析コード SHETEMP

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

新谷 文将・秋元 正幸*

(1991年4月1日受理)

燃料棒と冷却材間の熱伝達係数や冷却材温度などの冷却条件の変化が無視できる体系での反応度事故時の原子炉出力と燃料棒温度挙動を制御棒の動きを考慮して解析できる高速計算コード SHETEMP を作成した。この計算コード作成のねらいは、冷却材の流動計算を行わないことにより高速計算を達成し、原子炉の設計や安全審査で必要になる数多くのパラメータ計算ができる計算コードを提供することである。

本コードは、原子炉過渡熱水解析コード ALARM - P1 に組み込まれている原子炉動特性と熱伝導を計算するルーチンを抜き出し、制御棒駆動系の特性を考慮して原子炉出力を制御するモデルを新たに追加して、これらのみで計算できるようにしたものである。従って、ALARM - P1 と同じく、原子炉出力挙動に関しては一点近似原子炉動特性方程式を適用して修正ルンゲ・クッタ法で解き、燃料温度挙動に関しては平板及び円柱状に対する非定常一次元熱伝導方程式を適用してクランク・ニコルソン法で解く。炉出力の制御は PID 調節器や制御棒駆動機構の動作を考慮して行われる。計算ルーチンの ALARM - P1 からの抜き出しに伴うプログラミングのミスをチェックするために、本コードの解析結果と理論解との比較をし、その妥当性を確認した。また、標準的なモデル化をした場合のサンプル計算から、本コードは、上記の要件を満足できる事が分かった。

本コードは、当初原研原子炉工学部で実施した高温ガス炉臨界実験装置 VHTRC の建設に係る安全解析の一環として行う反応度事故解析を目的として開発された。しかし、本コードは解析モデル上、対象を VHTRC のみに限定しておらず、平板及び円柱の一般の一次元熱伝導問題、及び一点近似モデルの範囲内で原子炉の動特性問題に適用可能であり、しかも高速計算が可能である。このため本報告書をコードマニュアルとして公刊し、本コードを広く一般の利用に供することにした。

本報は、SHETEMP の使用マニュアルとして利用できるように構成したものである。このため本報は解析モデル、及びプログラムのチェックのための理論解と本コードの計算結果の比較の他、入力データの製作法の理解のためのサンプル問題、コードの構造、入力データ仕様及び計算コードの使用法について記述している。

SHETEMP: A Computer Code for Calculation of Fuel Temperature
Behavior under Reactivity Initiated Accidents

Fumimasa ARAYA and Masayuki AKIMOTO⁺

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

(Received April 1, 1991)

A fast running computer code SHETEMP has been developed for analysis of reactivity initiated accidents under constant core cooling conditions such as coolant temperature and heat transfer coefficient on fuel rods. This code can predict core power and fuel temperature behaviours. A control rod movement can be taken into account in power control system. The objective of the code development can provide fast running capability with easy handling of the code required for audit and design calculations where a large number of calculations are performed for parameter surveys during short time period. The fast running capability of the code was realized by neglection of fluid flow calculation.

The computer code SHETEMP was made up by extracting and conglomerating routines for reactor kinetics and heat conduction in the transient reactor thermal-hydraulic analysis code ALARM-P1, and by combining newly developed routines for reactor power control system. As ALARM-P1, SHETEMP solves point reactor kinetics equations by the modified Runge-Kutta method and one-dimensional transient heat conduction equations for slab and cylindrical geometries by the Crank-Nicholson methos. The model for reactor power control system takes into account effects of PID regulator and control rod drive mechanism. In order to check

⁺ Computing and Information Systems Center

errors in programming of the code, calculated results by SHETEMP were compared with analytic solution. Based on the comparisons, the appropriateness of the programming was verified. Also, through a sample calculation for typical modelling, it was concluded that the code could satisfy the fast running capability required for audit and design calculations.

This report will be described as a code manual of SHETEMP. It contains descriptions on a sample problem, code structure, input data specifications and usage of the code, in addition to analytical models and results of code verification calculations.

Keywords: SHETEMP, Computer Code, Reactivity Initiated Accident, One-dimensional Heat Conduction, Point Reactor Kinetics, Reactor Power Control System

目 次

1. はじめに	1
2. 解析モデル	2
2.1 解析モデルの概要	2
2.2 熱伝導計算モデル	2
2.3 炉心出力計算モデル	6
2.4 炉出力制御モデル	9
2.5 原子炉スクラム及びタイム・ステップ・サイズ	11
3. 理論解との比較	16
4. サンプル問題	23
4.1 VHTRC 装置の概略	23
4.2 解析例	23
5. プログラムの構造及び使用法	35
5.1 プログラム形式の一般事項	35
5.2 プログラムの構造	35
5.3 入出力コントロール	35
5.4 使用法	36
6. おわり	41
謝 辞	41
参考文献	42
付録 A 入力データ仕様	43
付録 B サンプル問題の入力データ・リスト	51
付録 C 原研大型計算機における JCL	53

Contents

1. Introduction	1
2. Analytical Models	2
2.1 Outline of SHETEMP	2
2.2 Heat Conduction Model	2
2.3 Power Generation Model	6
2.4 Reactor Power Control System	9
2.5 Reactor Scram Model and Time Step Size	11
3. Comparisons of SHETEMP with Analytical Solution	16
4. Sample Problem	23
4.1 Overview of VHTRC Test Facility	23
4.2 Example of Calculation	23
5. Program Organization and Usage	35
5.1 General Description of the Code	35
5.2 Program Organization	35
5.3 Input/Output Control	35
5.4 Usage of SHETEMP	36
6. Concluding Remarks	41
Acknowledgments	41
References	42
Appendix A Input Data Requirements	43
A.1 Problem Title	43
A.2 Problem Dimension Data	43
A.3 Time Step Control Data	43
A.4 Kinetics Constants Data	43
A.5 Reactivity Insertion Data	44
A.6 Scram Data	45
A.7 Fuel Doppler Reactivity Data	45
A.8 Moderator Temperature Coefficient Reactivity Data	46
A.9 Core Region Data	46
A.10 Initial Boundary Condition Data	46
A.11 Transient Boundary Condition Data	47
A.12 Heat Conductor Geometry Data	47
A.13 Thermal Property Data	48
A.14 Control System Data	49
Appendix B Input Data List of Sample Problem	51
Appendix C JCL at JAERI Computer	53

1. はじめに

原子炉の設計計算や安全審査計算においては、短時間に数多くの計算を行わなければならないため、用いる計算コードには高い計算精度と共に高速計算ができるという要件が課される。このような要件を満足する計算コードの作成は、数値解法上及びプログラミング上の工夫を凝らす他、扱う現象の特徴を解析モデルに反映することにより達成する事ができる。通常、原子炉の過渡熱水力学解析コードは解析に長時間を要するが、このかなりの部分は流動計算に費やされており、原子炉動特性や熱伝導等の残りの計算部分の計算に要する時間は比較的短い。このことから、炉心の冷却条件の変化が無視できるような体系での反応度事故の解析のための上記要件に叶った計算コードの作成は、流動計算を削除できるという特徴を利用して、原子炉の過渡熱水力学解析コードから流動計算部分を削除するだけでかなり達成できるものと期待できる。

本報では、このような観点から、原研で開発した内容の良く分かっている PWR 大破断冷却材喪失事故解析コード ALARM - P1⁽¹⁾⁽²⁾ から、原子炉核動特性計算及び熱伝導計算ルーチンを抜き出し、これに原子炉出力を制御するモデルを新たに追加して、これらのみで計算できるようにすることにより作成した計算コード SHETEMP について記す。

本コードの解析モデルは、原子炉出力挙動に対して一点近似原子炉動特性方程式を適用し修正ルンゲ・クッタ法により計算するモデル、燃料温度挙動に対して平板あるいは円柱状熱伝導体に対する非定常一次元熱伝導方程式を適用しクランク・ニコルソン法により計算するモデル、制御棒駆動系の動作を考慮して炉出力制御するモデルから構成される。前二者は ALARM - P1 とほぼ同一である。原子炉出力制御モデルは本コードの作成に際して新たに追加したモデルであり、PID 調節器、サーボ機構、及び制御棒駆動機構の動作を考慮して制御する。一方、本コードは冷却材の流動を扱うモデルを持たないため、燃料と冷却材の間の熱伝達は熱伝導計算での入力データにより与えられる境界条件として扱う。

ALARM - P1 は多くの解析に用いられている事から、抜き出したルーチンの信頼性はかなり高いと考えられるが、抜き出しに伴うプログラミングの誤りを検討するために、SHETEMP の計算結果と理論解との比較を実施し、その妥当性を確認した。また、標準的なモデル化をしたサンプル計算から、本コードは上記の要件を満足できる事が分かった。

本報は SHETEMP の使用マニュアルとして使用できるように構成した。このため、解析モデルと共に、プログラミングの誤りを検討するために実施した本コードと理論解との比較結果、入力データの作成法を解説したサンプル問題、その他本コードの使用に必要なプログラムの構造、使用法、入力データ仕様について記した。

2. 解析モデル

2.1 解析モデルの概要

本コードは炉心全体をいくつかの体積要素に分割し、それぞれの体積要素に含まれる燃料は全て核的及び熱的に同一であると仮定して、反応度事故解析を行う。更に、各体積要素間の熱の授受はないものと仮定する。ここで、これらの体積要素を炉心領域 (Core Region) と呼ぶことにする。従って、本コードでは各炉心領域毎にひとつずつの温度分布を求めることになるため、この分割には燃料の形状、物性値、発熱密度等を考慮して行う。例えば、軽水炉の反応度事故時の炉心内最高温度を評価しようとする場合、出力密度の違いから最高出力燃料棒1本とその他の平均出力燃料棒に分け、更に軸方向出力分布を考慮し、それぞれを軸方向に所望の精度で計算できる程度に分割して扱う。今、軸方向分割数をそれぞれ10とすると、全体として20 (最高出力燃料棒:10, 平均出力燃料棒:10) の炉心領域に分割して計算することになる。

本コードで扱える熱伝導体の形状は平板と円柱の2種類であり、それぞれ何層もの材質の異なる層から構成された熱伝導体として扱うことができる。この材質の異なる各層を材質領域 (Material Region) と呼ぶことにする。本コードには流体挙動を計算するモデルがないため、燃料を冷却する冷却材と燃料との授受は熱伝導計算での境界条件として扱われ、入力データで与えられる。炉心全体の出力変化は、一点近似原子炉動特性方程式及び核分裂生成物の壊変式で模擬する。炉心内の出力の空間的分布は定常状態と過渡状態と同じであるとして扱われる。遅発中性子及び核分裂生成物はそれぞれ6群及び11群で近似される。またアクチニドの崩壊熱は1群として扱い、過渡変化中一定であると仮定している。本コードで考慮する反応度は反応度事故の起因となる挿入反応度、制御棒反応度、燃料のドップラー反応度、及び減速材の温度係数に基づく反応度である。

通常、原子炉出力は制御棒を挿入あるいは引き抜くことにより、あるいは炉心流量の増減、あるいはホウ素濃度の増減により制御される。本コードではこれらのうちPID調整器、サーボ機構、及び制御棒の動きを考慮して原子炉出力を制御するモデルのみを有している。

次章において個々のモデルを記述する。

2.2 熱伝導計算モデル^{(1), (3)}

本コードで採用している一次元熱伝導方程式の解法の概要を以下に記す。

基礎式

熱伝導体の温度変化は次式で表わされる。

$$(\rho C_p) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \{k \nabla T\} + QP' \quad (1)$$

- ここに t : 時間 (s)
 ρ : 熱伝導体の密度 (kg / m³)
 C_p : 熱伝導体の比熱 (kcal / kg)
 T : 熱伝導体の温度 (°C)
 k : 熱伝導体の熱伝導率 (kcal / m · °C · s)
 Q : 熱伝導体の初期状態の発熱密度 (kcal / m³ · s)
 P' : 規格化出力 (= $P(t) / P(0)$)
 $P(t)$: 時刻 t での炉出力 (MW) ($P(0)$ は時刻 0, 即ち, 初期状態での炉出力で入力データ (POWER 0) で与えられる。)

Fig. 1 に示すような平板状及び円柱状熱伝導体を扱うことにする。式(1)をFig. 1 に示される体積 V_n について積分し差分形で表わすと次式のようなになる。

$$\frac{T_n^{m+1} - T_n^m}{\Delta t} D_n = (T_{n-1} - T_n) k_{ln} y_{ln}^s - (T_n - T_{n+1}) k_{rn} y_{rn}^s + (Q_{ln} y_{ln}^v + Q_{rn}^v) \frac{P(t)}{P(0)} \quad (2)$$

ここに $D_n = (\rho C_p)_{ln} y_{ln}^v + (\rho C_p)_{rn} y_{rn}^v$

$y_{ln}^v = y_{ln} / 2$ $y_{rn}^v = y_{rn} / 2$ $y_{ln}^s = 1 / y_{ln}$ $y_{rn}^s = 1 / y_{rn}$	}	平板	$y_{ln}^v = 2\pi \frac{y_{ln}}{2} (x_n - \frac{y_{ln}}{4})$ $y_{rn}^v = 2\pi \frac{y_{rn}}{2} (x_n + \frac{y_{rn}}{4})$ $y_{ln}^s = -\frac{2\pi}{y_{ln}} (x_n - \frac{y_{ln}}{2})$ $y_{rn}^s = \frac{2\pi}{y_{rn}} (x_n + \frac{y_{rn}}{2})$	}	円柱
--	---	----	---	---	----

n : 空間メッシュ番号

m : 時間ステップ数

添字 ln (rn) は空間メッシュ点 n の左側 (右側) の値であることを示す。

式(2)を Crank - Nicholson 法を適用すると次式のようにまとめられる。

$$a_n T_n^{m+1} + b_n T_n^{m+1} + c_n T_{n+1}^{m+1} = d_n \quad (3)$$

ここに $a_n = -k_{ln} y_{ln}^s \Delta t / 2$

$c_n = -k_{rn} y_{rn}^s \Delta t / 2$

$b_n = \sigma D_n - a_n - c_n$

$$d_n = \sigma \{ -a_n T_{n-1}^m + (D_n + a_n + c_n) T_n^m - c_n T_{n+1}^m \} \\ + (Q_{1n} y_{1n}^v + Q_{rn} y_{rn}^v) \frac{p^{m+1} + \sigma p^m}{2 p^0} \Delta t$$

$$\sigma = \begin{cases} 0, & 0 \text{ (定常状態)} \\ 1, & 0 \text{ (過渡状態)} \end{cases}$$

式(3)は三重対角行列であり、次に述べる境界条件の下に解くことができる。

境界条件

本コードでは次の2つの境界条件を扱うことができる。

(i) 断熱 ($k \frac{dT}{dx} |_B = 0$, Bは境界面を表わす。)

(ii) 周囲温度(冷却材温度) T_{Bvik} と熱伝達率 h が既知 (熱伝導体境界面に

において $k \frac{dT}{dx} |_B = -h (T_B - T_{Bvik})$)

これらの境界条件を式(3)に適用すると左側境界 ($n=0, x=x_0$) と右側境界 ($n=N, x=x_N$) での差分式は次のようにまとめられる。

1) 左側境界

$$b_0 T_0^{m+1} + C_0 T_0^m = \begin{cases} d_0 \text{ (断熱)} \\ d'_0 \text{ (} h_0 \text{ と } T_{0Bvik} \text{ が既知)} \end{cases} \quad (4)$$

ここに $C_0 = -k_{r0} y_{r0}^s \Delta t / 2$

$$b_0 = \sigma D'_0 - C_0$$

$$D'_0 = (\rho C p)_{r0} y_{r0}^v$$

$$d_0 = \{ (D'_0 + C_0) T_0^m - C_0 T_1^m \} + Q_{r0} y_{r0}^v \frac{p^{m+1} + p^m}{2 p^0} \Delta t$$

$$d'_0 = d_0 \left(\frac{q_0^{m+1} + \sigma q_0^m}{2} \right) \Delta t y_{i0}^{s'}$$

$$y_{i0}^{s'} = \begin{cases} 1 \text{ (平板)} \\ 2 \pi x_0 \text{ (円柱)} \end{cases}$$

$$q_0 = -h_0 (T_0 - T_{0Bvik})$$

2) 右側境界

$$a_N T_{N+1}^m + b_N T_N^m = \begin{cases} d_N \text{ (断熱)} \\ D'_N \text{ (} h_N \text{ と } T_{NBvik} \text{ が既知)} \end{cases} \quad (5)$$

ここに $a_N = -k_{1N} y_{1N}^s \Delta t / 2$

$$b_N = \sigma D'_N - a_N$$

$$D'_N = (\rho C p)_{1N} y_{1N}^v$$

$$d_N = \sigma \{ -a_N T_{N-1}^m + (D'_N + a_N) T_N^m \} + Q_{1N} y_{1N} \frac{p^{m+1} + p^m}{2p^0} \Delta t$$

$$d'_N = d_N \left(\frac{q_N^{m+1} + \sigma q_N^m}{2} \right) \Delta t y_{1N}^{s'}$$

$$y_{1N}^{s'} = \begin{cases} 1 & (\text{平板}) \\ 2\pi X_N & (\text{円柱}) \end{cases}$$

$$q_N = -h_N (T_N - T_{NBulk})$$

h 及び T_{Bulk} はそれぞれ時間の関数として入力データ (Initial Boundary Condition Data, Transient Boundary Condition Data) で与えられる。

以上より式 (3) は次のように整理することができる。

$$T_N^{m+1} + W_N T_{N+1}^{m+1} = g_N \quad (6)$$

$$\text{ここに } W_N = \frac{C_N}{b_N - a_N W_{N-1}}$$

$$g_N = \frac{d_N - a_N g_{N-1}}{b_N - a_N W_{N-1}}$$

この式は、 T_N が決まれば全てのメッシュ点の温度が決まることを示している。

ここで h_N と T_{NBulk} が既知の場合について式 (5) と (6) から T_N^{m+1} を求めると次のようになる。

$$T_N^{m+1} = \frac{a_N g_{N-1} - d'_N}{a_N W_{N-1} - b_N} \quad (7)$$

ここで式 (6) を用いることにより全てのメッシュ点の温度を計算できる。

ギャップ・モデル

本コードには熱伝導体内にギャップ領域が存在する場合、ギャップ・コンダクタンス h_{gap} ($k \text{ cal} / m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$) を用いてギャップの熱伝達を扱うモデルが用意されている。このモデルではギャップ領域の熱容量が無視され、この領域を通して伝えられる熱流束は Fig. 2 のようなメッシュ分割の時には次式で与えられる。

$$q = h_{gap} (T_n - T_{n+1}) \quad (8)$$

ここに T_n, T_{n+1} : ギャップ領域の境界面 (メッシュ点 n 及び $n+1$) の温度 ($^\circ C$) ギャップ・モデルを適用した場合には、ギャップ領域をメッシュ分割することはできない。このため y_{1n} 及び y_{1n+1} はギャップ幅 y_{gap} に等しく置かれる。このモデルを用いた時の式 (2) に相当するメッシュ点 n に関する差分式は次のようになる。

$$\frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)}{\Delta t} D_n'' = (T_{n-1} - T_n) k_{1n} y_{1n}^s - (T_n - T_{n+1}) h_{gap} y_{rn}^{s'} + Q_{1n} y_{1n}^v \frac{P(t)}{P(0)} \quad (9)$$

ここに $D_n'' = (\rho C_p)_{1n} y_{1n}^v$

$$y_{rn}^{s'} = \begin{cases} 1 & (\text{平板}) \\ 2 \pi X_n & (\text{円柱}) \end{cases}$$

式(3)の場合と同様に、式(9)に Crank-Nicolson 法を適用すると次のように変数を定義することにより形式的に式(3)と同一の式が得られる。

$$\begin{aligned} c_n &= -h_{gap} y_{rn}^{s'} \Delta t / 2 \\ b_n &= \sigma D_n'' - a_n - c_n \\ d_n &= \sigma \{ -a_n T_{n-1}^m + (D_n'' + a_n + c_n) T_n^m - c_n T_{n+1}^m \} \\ &\quad + Q_{1n} y_{1n}^v \frac{P^{m+1} + \sigma P^m}{2 P^0} \Delta t \end{aligned}$$

メッシュ点 $n+1$ についても同様の操作により式(3)と形式的に同一の式が得られる。

2.3 炉心出力計算モデル^{(1), (4)}

2.2 節で述べた熱伝導方程式に現れる出力変化項 $P(t)$ は、ここで記す一点近似動特性方程式及び核分裂生成物の壊変式を解いて与えられる。以下にその概要を記す。

一点近似動特性方程式

炉内の中性子密度及び遅発中性子先行核濃度の変化は次式で与えられる。ただし遅発中性子は6群で近似して扱う。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\beta}{l} (R(t) - 1) n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i(t) + S(t) \quad (10)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = -\lambda_i c_i(t) + \frac{\beta_i}{l} n(t), \quad i=1 \sim 6 \quad (11)$$

ここに $n(t)$: 炉内中性子密度

$c_i(t)$: 第 i 群遅発中性子先行核濃度

l : 実効中性子寿命 (s)

β_i : 第 i 群遅発中性子割合 ($\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$)

λ_i : 第 i 群遅発中性子先行核壊変定数 (s^{-1})

$R(t)$: 反応度 ($\$$)

本コードに内蔵されている β_i 及び λ_i は Table 1⁽¹¹⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾ に示されている。これらの定数は入力データ (Kinetics Constants Data) で与えることも可能である。

核分裂生成物の崩壊

核分裂生成物は近似的に 11 群で扱われ、その壊変は次式で与えられる。

$$\frac{d\chi_{Dj}}{dt} = \lambda_{Dj} (n - \chi_{Dj}), \quad j = 1 \sim 11 \quad (12)$$

ここに χ_{Dj} : 第 j 群規格化核分裂生成物密度 $\chi_{Dj}(t) / \chi_{Dj}(0)$

λ_{Dj} : 第 j 群核分裂生成物壊変定数 (s^{-1})

n : 規格化中性子密度 $n(t) / n(0)$

壊変定数 λ_{Dj} のコード内蔵データは Table 2⁽¹¹⁾ に示されている。これらの定数も入力データ (Kinetics Constants Data) で変更可能である。

本コードでは核分裂生成物のうちアクチニドの崩壊による発熱は過渡変化中一定であるとして扱っている。式 (10) ~ (12) は Cohen の修正ルンゲ・クッタ法で解くことができる。⁽¹¹⁾

反応度

式 (10) に表われる反応度 $R(t)$ として、本コードでは反応度事故の起因となる挿入反応度、制御棒反応度、燃料のドップラー反応度、及び減速材の温度係数による反応度の 4 種類を扱うことができ、次式で与えられる。

$$R(t) = R_0 + R_I(t) + R_{CR}(t) + R_D(t) + R_T(t) \quad (13)$$

ここで R_0 : 初期状態での全反応度 (\$)

$R_I(t)$: 挿入反応度 (\$)

$R_{CR}(t)$: 制御棒反応度 (\$)

$R_D(t)$: 燃料のドップラー反応度 (\$)

$R_T(t)$: 減速材の温度係数による反応度 (\$)

これらの反応度の与え方を以下に記す。

初期状態で全反応度 R_0 は入力データ (REAC0) で与えられ、過渡計算中一定値として扱われる。初期において定常状態が保たれていることを前提としてコードが作られているので通常は REAC0 = 0 である。

挿入反応度 R_I は、反応度事故の起因事象となるものであり、これが何により引き起こされたのかを特定しないものとして、反応度を時間の関数として入力データ (Reactivity Insertion Data) で与えるものとしている。入力データは計算開始後の時間 t (s) 依存の挿入反応度 R_I (\$) のテーブル形式で与えられ、各計算時刻での挿入反応度は時刻 t で入力データ間を直線内挿して決定される。一方、事故の起因となる反応度の挿入は制御棒の誤操作や落下等により発生することもあり、次に述べる制御棒反応度と関連している場合もある。しかし、本コードではこれらの関連は無視しており、入力データを作成する際にはこれらの関連を考慮して作成することになる。

制御棒反応度 R_{CR} は炉出力を所望のレベルに設定するために制御する反応度 R_C と、事故時に緊急に炉を停止するためのスクラム時の反応度 R_S とに分けて扱われる。これらは制御棒の挿入による効果を与えるものであるため、両者は関連している。しかし、一般には炉出力制御は炉内に存在する制御棒の一部を動かして制御するのに対し、スクラムは全制御棒を挿入することになり核的効果には大きな違いがある。このため、本コードではこれらを別々に扱うことにした。スクラムは炉出力が入力データで与えた出力レベル (TRPVAL) を越えたことにより発生するとモデル化されており、その反応度はスクラム発生以後の時間対、スクラム反応度 R_S (\$) のテーブル形式の入力データで与えられ、これらを時間により直線内挿することにより与えられる。炉出力制御反応度 R_C は 2.4 節で記す制御系モデルにより与えられる。

燃料のドップラー反応度 R_D は全炉心の燃料平均温度 T_{AF} (全発熱部の平均温度) を求め、入力で与えられる T_{AF} (°C) 依存のドップラー反応度 R_{DOP} (\$) のテーブル形式のデータ (Fuel Doppler Reactivity Data) から次式で与えられる。

$$R_D(t) = R_{DOP}(T_{AF}) - R_{DOP,0} \quad (14)$$

ここに $R_{DOP,0}$: 定常状態での燃料のドップラー反応度 ($= R_{DOP,0}(T_{AF})|_{t=0}$) (\$)。
燃料の平均温度 $T_{AF}(t)$ は次式により与えられる。

$$T_{AF}(t) = \sum_{K=1}^{NOCOR} W_{FTK} T_{FAVK}(t) \quad (15)$$

$$\text{ここに } T_{FAVK}(t) = \frac{\sum_1^{\text{発熱部}} V_{k1} T_{k1}(t)}{\sum_1^{\text{発熱部}} V_{k1}}$$

k : 炉心領域番号 (NOCOR: 全炉心領域)

l : 熱伝導計算におけるメッシュ点番号

W_{FTK} : 全炉心の燃料の平均温度計算のための重み係数 (入力データ ($W_{FT}(k)$, $k=1 \sim NOCOR$) で与えられ、 $\sum_{k=1}^{NOCOR} W_{FTK} = 1.0$ でなければならない。)

T_{k1} : 炉心領域 k におけるメッシュ点 1 の温度 (°C)

V_{k1} : 炉心領域 k におけるメッシュ点 1 を含む要素の体積 (m^3)

この式からわかるように、全炉心の燃料の平均温度 T_{AF} は各炉心領域の発熱部の体積平均された温度を、入力データで与えられる係数 W_{FT} を全炉心にわたって平均した温度として定義される。

減速材の温度係数による反応度 R_T も前述したドップラー反応度と同様の考え方で与えられる。即ち、反応度 R_T は全炉心の減速材平均温度 T_{AM} (°C) に対するフィードバック反応度 $R_M(T_{AM})$ (\$) として与えられる入力データ (Moderator Temperature Reactivity Data) から次式で計算される。

$$R_T(t) = R_M(T_{AM}) - R_{M0} \quad (16)$$

ここで R_{MO} : 定常状態での減速材の温度係数によるフィードバック反応度

$$(R_M (T_{AM}) |_{t=0}) (\$)$$

全炉心の減速材の平均温度 T_{AM} も前述の全炉心の燃料の平均温度 T_{AF} と同様の考え方で与えられる。

$$T_{AM} (t) = \sum_{K=1}^{NOCOR} W_{MTk} T_{MAVk} (t) \quad (17)$$

$$\text{ここに } T_{MAVk} (t) = \frac{\sum_1^{\text{全メッシュ}} W_{MTRkm} V_{kl} T_{kl} (t)}{\sum_1^{\text{全メッシュ}} W_{MTRkm} V_{kl}}$$

k : 炉心領域番号

l : 熱伝導計算におけるメッシュ点番号

m : メッシュ点 l を含む材質領域番号

W_{MTk} : 全炉心の減速材の平均温度計算のための重み係数 (入力データ (WMT (k), $k = 1 \sim NOCOR$) で与えられ, $\sum_{k=1}^{NOCOR} W_{MTk} = 1.0$ でなければならない。)

W_{MTRkm} : 炉心領域におけるメッシュ点 l の含まれる材質領域 m に対する重み係数 (入力データ (WMTR (m)) で与えられる。)

T_{kl} : 炉心領域 k におけるメッシュ点 l の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

V_{kl} : 炉心領域 k におけるメッシュ点 l の含まれる要素の体積 (m^3)

式 (17) からわかるように, T_{AM} は各炉心領域毎に入力データで与えられた係数 W_{MTR} (Heat Conductor Geometry Data) を重みとして体積平均した温度を, 全炉心にわたり W_{MT} (Moderator Temperature Coefficient Reactivity Data) を重みとして平均したものと定義される。

炉出力

炉心の出力変化は次式により計算される。

$$\frac{p(t)}{p(0)} = (1 - \alpha_D - \alpha_{act}) n(t) + \sum_{j=1}^{11} \alpha_{Dj} \chi_{Dj} + \alpha_{act} \quad (18)$$

ここに α_{Dj} : 核分裂生成物第 j 群の出力割合 ($\alpha_D = \sum_{j=1}^{11} \alpha_{Dj}$)

α_{act} : アクチニドの発熱割合

Table 2^{(1), (6)} にはコード内蔵の α_{Dj} 及び α_{act} が示されている。これらの値は入力データ (Kinetics Constants Data) で変更可能である。

2.4 炉出力制御モデル

本コードは制御棒位置を動かして炉心出力を変えるモデルを備えている。このモデルは本コー

ド作成時に新たに作成された。この制御回路全体の構成をブロック線図で示したのが、Fig. 3である。この図に示されているように、この制御系はPID調節器、サーボ機構、制御棒駆動機構、制御棒位置から反応度への変換を模擬する回路から構成されている。これらの回路の概要を以下に記す。

(1) PID 調節器

原子炉出力と制御しようとする出力設定値との偏差を入力 (F_1) として取り込み、比例器、積分器、微分器を通して、制御棒位置を変更するためのサーボモータの回転数を制御する信号を出力する (F_{11} , F_{12} , F_{13})。それぞれの伝達関数は K_P , K_I/s , K_{DS} である。

(2) サーボ機構

この回路は、入力信号をサーボモータに与える電圧に変換するサーボアンプを模擬する回路、サーボモータの回転を模擬する回路、及びサーボ機構のフィードバック系を構成する速度発電機を模擬する回路より成っている。PID 調節器からの出力 F_2 ($= F_{11} + F_{12} + F_{13}$) がサーボ機構の入力となり、これに速度発電機からのフィードバック信号が合成される (F_3)。この合成された信号 F_3 は出力偏差 F_3 とサーボモータへの電圧 F_4 の関係を与える関数発生器により模擬されるサーボアンプへ伝えられる。サーボアンプからの出力 F_4 はサーボモータを模擬する回路に入り、モータの回転速度を出力 F_5 として与える。サーボモータの伝達関数は $K_M/s (1 + T_{MS})$ で与えられる¹⁷⁾。

このモータの応答をより良くするために速度発電機を考慮したフィードバック回路を設ける。この伝達関数は K_{TS} と仮定される。 K_T はサーボモータの回転速度と速度発電機で発生する励磁電圧との間の比例定数である。一方、炉出力偏差とサーボモータの回転速度、あるいは制御棒速度の間の関係が直接与えられることがあるがこの場合、サーボアンプでの関数発生器を用いてサーボモータの回転あるいは制御棒速度を求め、サーボモータ及び速度発電機をバイパス ($K_M = K_{TG} = 0$) し、 F_{51} として出力することも可能になっている。

(3) 制御棒位置

ここでは、サーボ機構から与えられるサーボモータ回転数あるいは制御棒駆動機構の速度 F_6 等から、制御棒位置 F_7 を求める。まず、制御棒の運動を考える。制御棒に対して力 f が加わる時次の運動方程式が成立する。

$$m \frac{dv}{dt} + k_f v = f$$

ここで m : 制御棒質量

k_f : 抵抗係数

f : 制御棒に加わる力

この時の力 F_6 と速度 F_7 の関係を与える伝達関数は $K_{CRDM} / (1 + T_{CRDM} s)$ となる。

ここで、 $K_{CRDM} = 1/k_f$, $T_{CRDM} = m/k_f$ である。一方、力 f が制御目標速度 v_s と比例する場合、即ち $f = k_p v_s$ の関係が満たされる時にも同様の伝達関数 $1 / (1 + T_{CRSM} s)$ で表わされる。

次に駆動系にバッククラッシュによる制御棒作動の遅れを考慮して、むだ時間 L 秒の後に

動き出すものとする (F_s)。

最後に、これまでの回路からの出力としての制御棒の速度 F_s から制御棒位置 F_r を求める。いま、速度 v と移動距離 d との関係は伝達関数 K_0/s で与えられる。ここで、 K_0 は信号 F_s をモータ回転数として扱う場合サーボモータ回転速度から制御棒速度への変換係数であり、 F_s が速度の場合 1 である。

(4) 制御棒位置 / 反応度変換

制御棒位置 F_r と制御棒反応度 R_0 の関係を与える関数発生器により制御棒位置を反応度に変換する。この反応度 R_0 は前節で述べた一点近似原子炉動特性の計算に反映される。

2.5 原子炉スクラム及びタイム・ステップ・サイズ

(1) 原子炉スクラム

原子炉スクラムによる反応度変化は以下のように取り扱われる。即ち、入力データ (Scram Data) で与えられた設定値 (TRPVAL) に炉心出力が到達すると、入力で与えられた時間遅れ (DELTIM) をもって原子炉スクラムが作動を開始する。

スクラム反応度 R_s は前述のようにスクラム作動開始後の時間 t_s 対スクラム反応度 R_s の形の入力データで与えられる。

(2) タイム・ステップ・サイズ

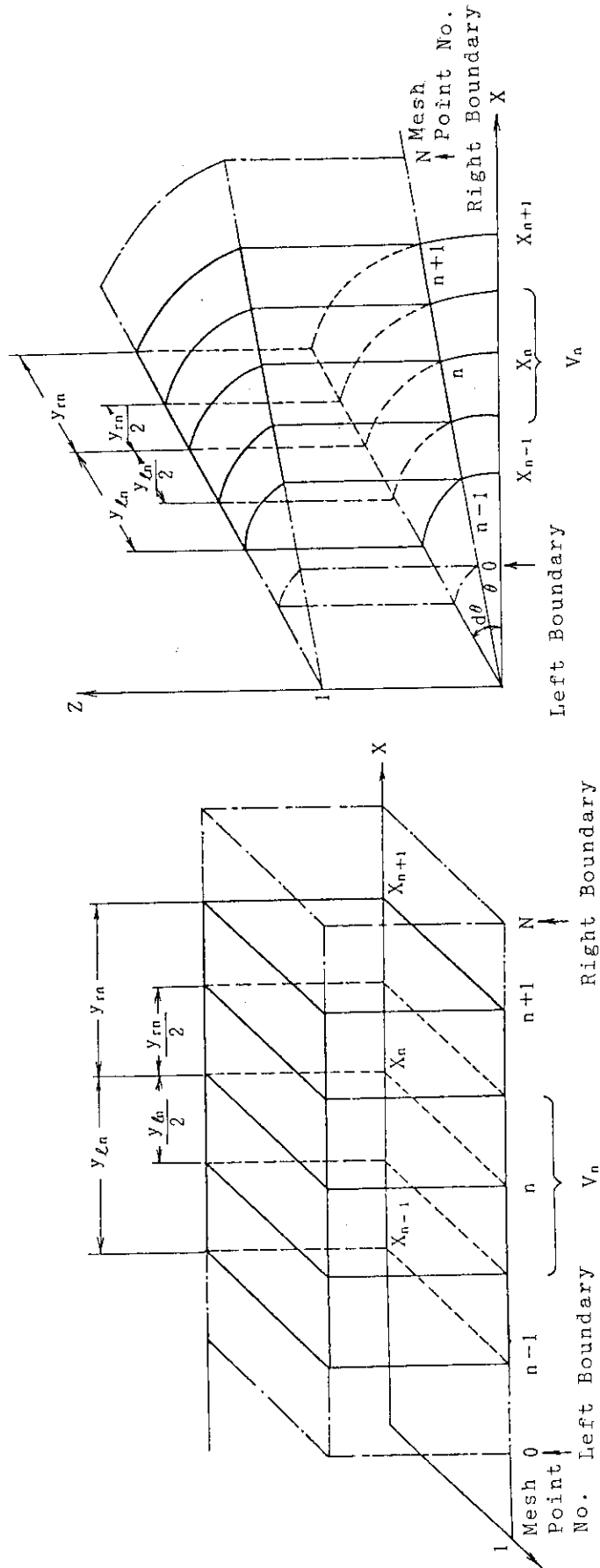
タイム・ステップ・サイズは入力データ (Time Step Control Data) によりユーザーが指定しなければならない。タイム・ステップ・サイズは計算精度と計算機の CPU 時間の観点から変更できることが望ましいので、本コードでは計算対象とする時間帯をいくつかの時間帯に区切って、それぞれの時間帯毎にタイム・ステップ・サイズを入力できるようになっている。

Table 1 Built-in Data of Delayed Neutron Constants^{(5), (6)}

Group	Delayed Neutron Fraction β_i / β	Decay Time Constant λ_i (sec ⁻¹)
1	0.038	0.0127
2	0.213	0.0317
3	0.188	0.115
4	0.407	0.311
5	0.128	1.40
6	0.026	3.87

Table 2 Built-in Data for Fission Products Decay⁽⁵⁾

Group j	Power Fraction of Fission Products α_{Dj}	Decay Constants of Fission Products λ_{Dj} (sec ⁻¹)	Power Fraction of Actinides α_{act}
1	0.00299	1.772	0.0032
2	0.00825	5.774×10^{-1}	
3	0.01550	6.743×10^{-2}	
4	0.01935	6.214×10^{-3}	
5	0.01165	4.739×10^{-4}	
6	0.00645	4.810×10^{-5}	
7	0.00231	5.344×10^{-6}	
8	0.00164	5.726×10^{-7}	
9	0.00085	1.036×10^{-7}	
10	0.00043	2.959×10^{-8}	
11	0.00057	7.585×10^{-10}	
Total	0.06999		



(a) Slab Type Heat Conductor

(b) Cylindrical Type Heat Conductor

Fig. 1 Mesh Points Layout

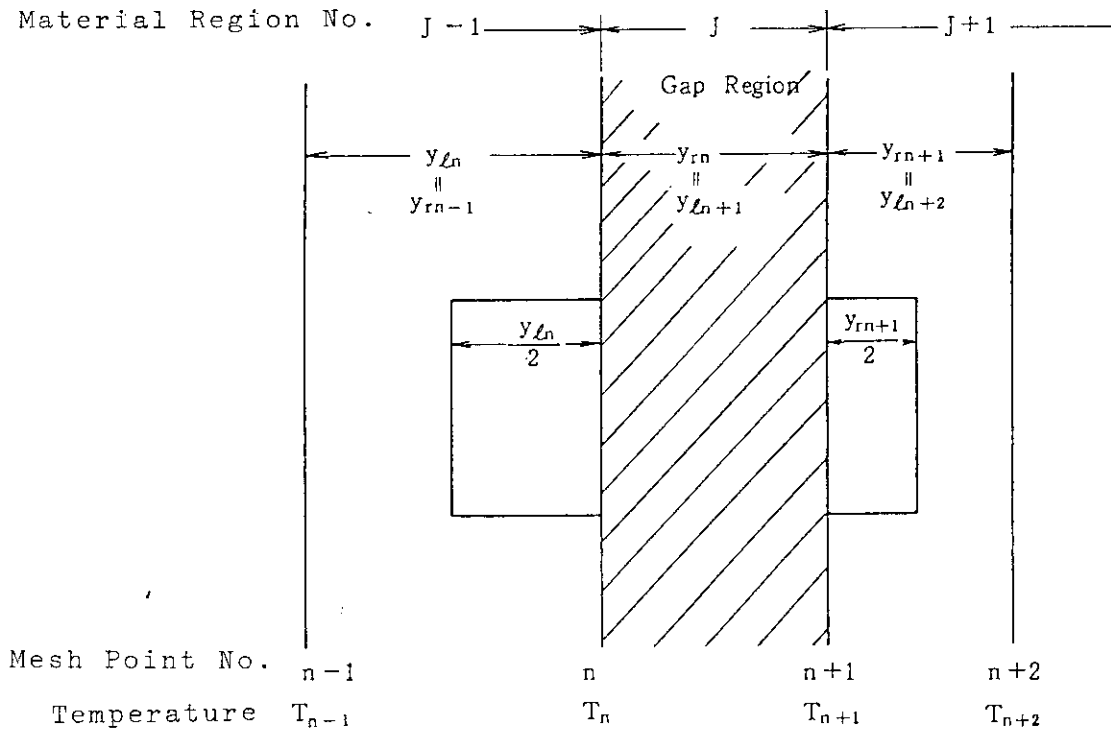


Fig. 2 Mesh Points adjacent to Gap Region

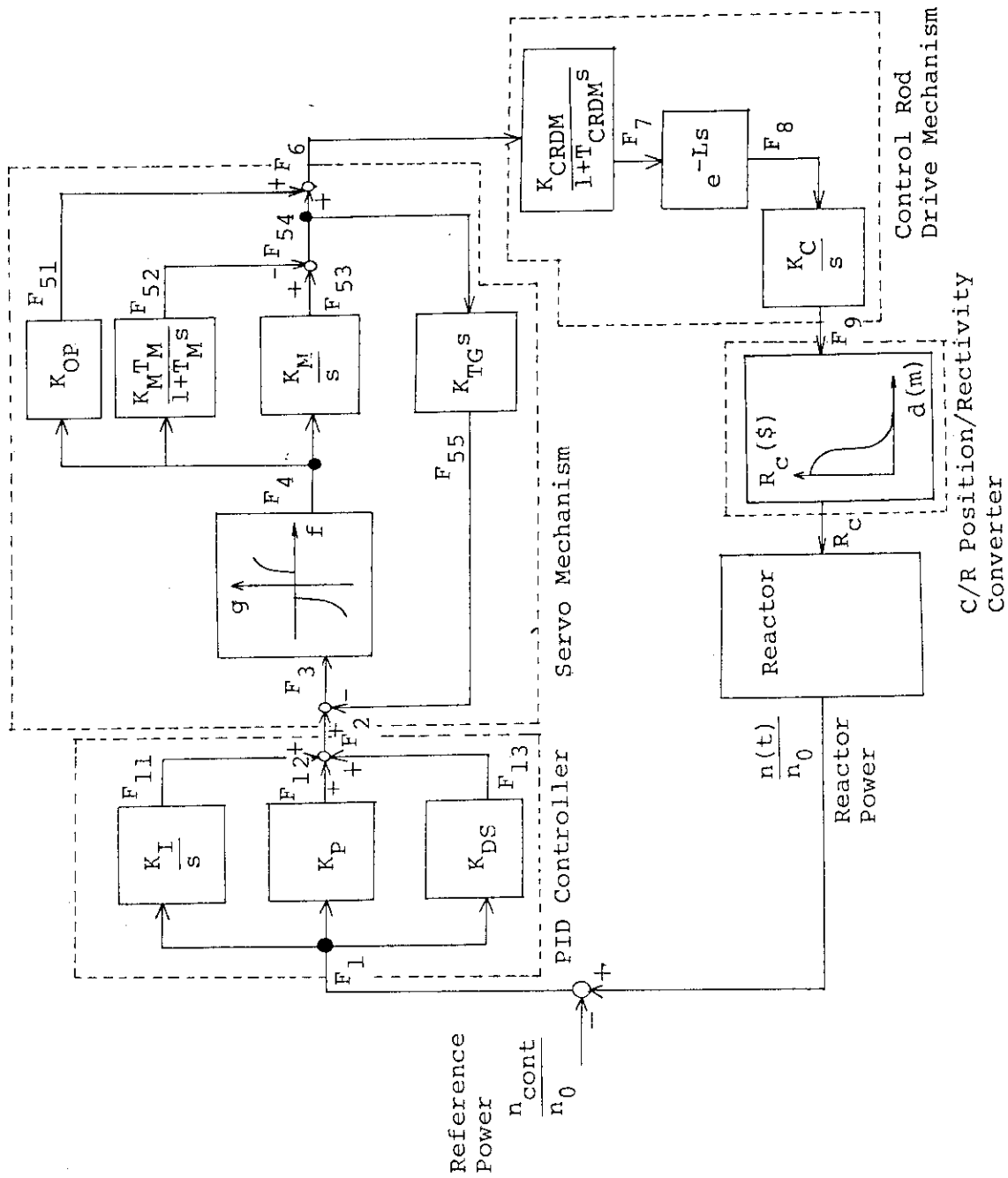


Fig. 3 Block Diagram of Reactor Power Control System

3. 理論解との比較

SHETEMP で用いたサブルーチンの ALARM-P1 からの抜き出しに伴うエラーの検討のために、理論解のわかっている問題に本コードを適用し、得られた結果と理論解との比較を行った。実施したケースは次の3ケースである。

- 1) 遅発中性子を1群で近似した場合のステップ状反応度挿入に対する出力変化
- 2) 定常状態にある一様発熱円柱の温度分布
- 3) はじめ一様温度にある有限厚さの平板の両面が急に冷却される場合の非定常温度分布

以下の記述からわかるように、全てのケースにおいて理論解と SHETEMP により得られた結果の一致は良好であることが確認された。以下に、計算の概要を記す。

- 1) 遅発中性子を1群で近似した場合のステップ状反応度挿入に対する出力変化⁽⁸⁾

この計算は SHETEMP の1点近似原子炉動特性方程式の計算精度の検証のために行った。このため、熱伝導計算の影響がないように問題が設定された。

中性子源がない臨界状態にある原子炉にステップ状反応度が加わる場合を扱う。反応度フィードバックは無視する。初期条件は時刻 $t = 0_-$ で反応度 $\rho = 0$ 、中性子束 $\frac{dn(t)}{dt} = 0$ 、 $n(t) = n_0$ 、遅発中性子先行核濃度 $\frac{dc_i(t)}{dt} = 0$ 、 $c_i(t) = c_{i0} = -\frac{\beta_i}{\lambda_i} n_0$ である。ステップ状反応度挿入条件は $t = 0_+$ で $\rho = (\text{一定})$ である。このような条件の下で動特性方程式 (10) 及び (11) をラプラス変換及び逆ラプラス変換することにより解くと中性子束変化は次式のように与えられる。

$$\frac{n(t)}{n_0} = \sum_{j=1}^2 \frac{1 + \frac{\beta}{s_j + \lambda}}{\left[\frac{d}{ds} \left(1s + \frac{s\beta}{s + \lambda} - \rho \right) \right]_{s=s_j}} \exp(s_j t)$$

ここに s_j は次の特性方程式の解である。

$$1s + \frac{s\beta}{s + \lambda} - \rho = 0$$

解析条件を $1 = 10^{-3} \text{ s}$ 、 $\beta = 0.006502$ 、 $\lambda = 0.0767 \text{ s}^{-1}$ 、 $\rho = 0.1 \$$ として、上式と SHETEMP を用いて得られた結果を Fig. 4 及び Table 3 に比較して示してある。ただし図中では両者の一致が良好で重なるため SHETEMP のみ示した。100 秒までの計算の段階では両者の相対誤差は 0.05 % 以内であり、良く一致している。

尚、SHETEMP の計算は次のようにして行った。遅発中性子のうち第1群のみが炉出力へ寄与するとし、第2群から第6群、核分裂生成物及びアクチニドは全て炉出力へ寄与しないとした。またフィードバック反応度は全てゼロとした。タイム・ステップ・サイズは計算中一定で 20 ms とした。

2) 定常状態にある一様発熱円柱の温度分布⁽⁹⁾

この計算は SHETEMP の定常状態の温度分布の計算精度の検討のために実施したものである。問題の設定は、定常状態にある一様発熱密度 (s_e) を有する円柱状発熱体の温度分布を求めることとする。また、この発熱体の熱伝導率 k は一様であるとする。

熱流束 q_r と発熱密度 s_e の間には次の関係が成立する。

$$\frac{d}{dr} (rq_r) = s_e r$$

ここで発熱体の中心 ($r = 0$) で熱流束 q_r は有限であるという条件の下に上式を解くと次式が得られる。

$$q_r = \frac{s_e r}{2}$$

一方、熱流束 q_r は温度 T と次式の関係がある。

$$q_r = -k \frac{dT}{dr}$$

上2式を円柱表面 ($r = R$) で温度 $T = T_0$ とすることにより次式が得られる。

$$T - T_0 = \frac{s_e R^2}{4k} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\}$$

次のような条件の下に上式と SHETEMP を用いて計算した結果が Table 4 に示されている。解析条件は、 $R = 0.1 \text{ m}$, $s_e = 100 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{s}$, $k = 0.01611 \text{ kcal/m} \cdot \text{s} \cdot \text{°C}$, $T_0 = 20 \text{ °C}$ と設定した。尚、SHETEMP の計算においては、発熱密度が $s_e = 100 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{s}$ になるように円柱全体の出力を与え、円柱表面での境界条件は $T_0 = 20 \text{ °C}$ になるように周囲温度と熱伝達率を設定した。更に、半径方向のメッシュ分割数を 10 とした。

Table 4 に示されているように両者の一致は極めて良好であり両者の相対誤差は 0.002 % 以下であった。

3) はじめ一様温度にある有限厚さの平板の両面が急に冷却される場合の非定常温度分布⁽¹⁰⁾

有限厚さの平板がはじめ一様温度 T_0 に保たれており、時刻 $t = 0$ から $T = 0 \text{ °C}$ になる流体に熱伝達率 h で熱伝達が生じて平板の両面から冷却される場合の平板内の非定常温度分布を計算する。温度分布は平板の中心を軸として対象であるので、平板中心を $x = 0$ 、両面側で $x = -L/2$ 及び $x = L/2$ とする。

平板両側面で次式が成立する。

$$-k \left(\frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x=L/2} \text{ または } -L/2 = hT \Big|_{x=L/2} \text{ または } -L/2$$

発熱のない場合の非定常熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

ここに、 a : 温度伝導率 ($= k / \rho C_p$) (m^2/s)

温度 T を変数分離し位置 x の関数と時刻 t の関数で表わし、上記の境界条件の下にこの方程式を解くと次式が得られる。

$$\frac{T}{T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \frac{P_n L}{2}}{\frac{P_n L}{2} + \sin \frac{P_n L}{2} \cdot \cos \frac{P_n L}{2}} e^{-a P_n^2 t} \cos (P_n x)$$

ここに、 n は正の整数であり、 P_n は次式を満たす全ての固有値である。

$$\tan \frac{P_n L}{2} = \frac{h}{P_n k}$$

ここで得られた理論解と SHETEMP によって得られた結果を Table 5 に示す。この表からわかるように、両者の相対誤差は 100 秒での計算で 0.03 % 以下と小さく、良く一致している。図上では両者の差は見えないため、Fig. 5 には $t = 10$ s と 100 s での SHETEMP の結果のみを示した。この計算の条件は、 $L = 1$ m, $k = 1$ kcal/m \cdot s \cdot °C, $h = 1$ kcal/m 2 \cdot s \cdot °C, $T_0 = 100$ °C とした。理論解では $n = 5$ までを採用した。一方、SHETEMP の計算ではメッシュ分割数を 20, タイム・ステップ・サイズを 1 ms とした。

Table 3 Reactor Power Transients by Analytic Solution and SHETEMP

Time (s)	Normalized Power $n(t)/n(0)$		Relative Error $((2)-(1)) / (1)$
	(1) Analytic Solution	(2) SHETEMP	
0.1	1.04926	1.04879	-0.0004479
0.2	1.07689	1.07670	-0.0001764
0.5	1.10707	1.10706	-0.00009033
1.0	1.11701	1.11700	-0.00008952
5.0	1.15548	1.15546	0.0002423
10.0	1.20504	1.20502	0.0001660
15.0	1.25673	1.25671	-0.0001591
20.0	1.31064	1.31062	-0.0001526
25.0	1.36686	1.36684	-0.0001463
30.0	1.42549	1.42547	-0.0001403
40.0	1.55040	1.55038	-0.0001290
50.0	1.68626	1.68624	-0.0001186
70.0	1.99475	1.99471	-0.0002005
90.0	2.35966	2.35962	-0.0001695
100.0	2.56644	2.56639	-0.0001948

Table 4 Steady State Temperature Distribution by Analytic Solution and SHETEMP

Radius (m)	Temperature (°C)		Relative Error ((2)-(1))/(1)
	(1) Analytic Solution	(2) SHETEMP	
0.00	35.51831	35.5189	0.0000166
0.01	35.36313	35.3637	0.0000161
0.02	34.89758	34.8982	0.0000178
0.03	34.12166	34.1222	0.0000158
0.04	33.03538	33.0359	0.0000157
0.05	31.63873	31.6392	0.0000149
0.06	29.93172	29.9322	0.0000160
0.07	27.91434	27.9148	0.0000165
0.08	25.58659	25.5870	0.0000160
0.09	22.94848	22.9488	0.0000139
0.10	20.00000	20.0002	0.0000100

Table 5 Transient Temperature Distribution by Analytic Solution and SHETEMP

Time (s)	Distance from Center	Temperature (°C)		Relative Error ((2)-(1))/(1)
		(1) Analytic Solution	(2) SHETEMP	
10	0	90.1057	90.1232	0.0001942
	0.1	89.3606	89.3785	0.0002003
	0.2	87.1287	87.1471	0.0002112
	0.3	83.4231	83.4413	0.0002182
	0.4	78.2776	78.2933	0.0002006
	0.5	71.7578	71.7681	0.0001435
100	0	19.4141	19.4111	-0.0001545
	0.1	19.2487	19.2455	-0.0001662
	0.2	18.7551	18.7517	-0.0001813
	0.3	17.9419	17.9381	-0.0002118
	0.4	16.8228	16.8185	-0.0002556
	0.5	15.4170	15.4120	-0.0003243

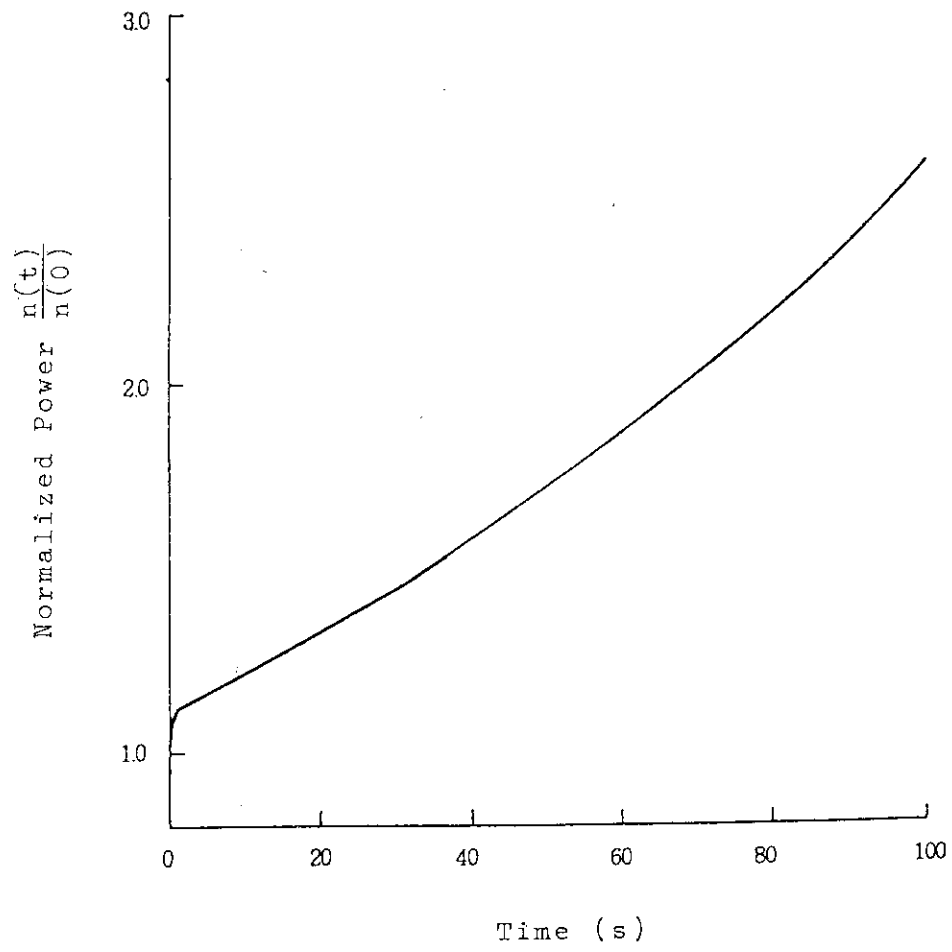


Fig. 4 Power Transient calculated by SHETEMP

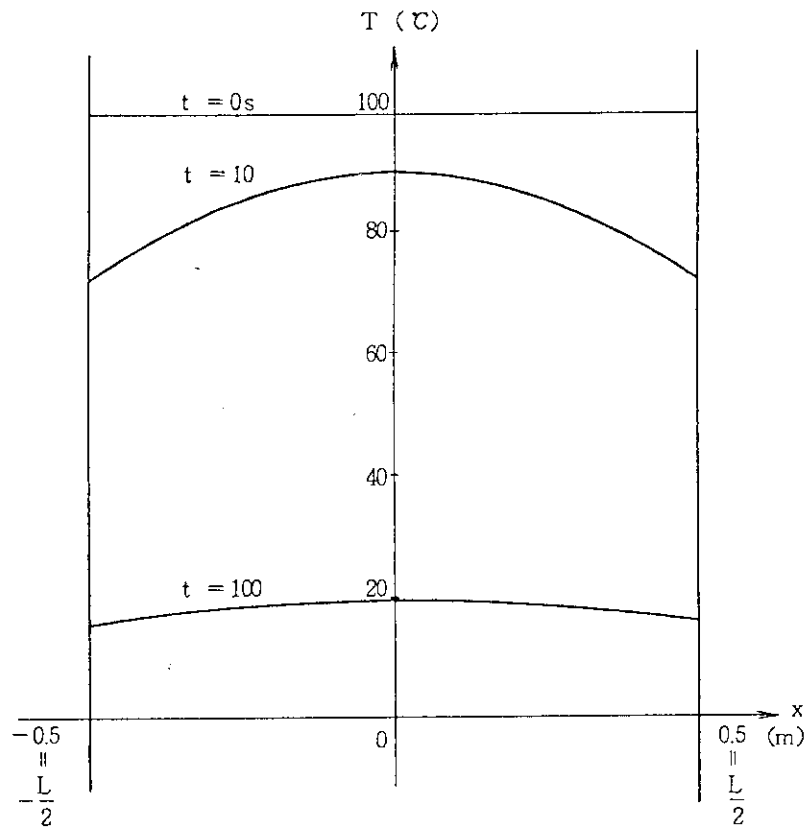


Fig. 5 Transient Temperature Distributions in Slab Type Heat Conductor calculated by SHETEMP

4. サンプル問題

本章では SHETEMP の使用法の理解の助けとして、高温ガス炉臨界実験装置 (VHTRC) の反応度事故解析に標準的と思われるモデル化をして本コードを適用した例をサンプル問題としてとりあげ、入力データの作成手順及び解析結果について述べる。尚、ここに示されているデータは本装置の設計段階でのものを使用しているため、最終仕様と異っており、以下で示される解析結果は、最終仕様のもを示しているものではない。

4.1 VHTRC 装置の概略⁽¹⁾

VHTRC 炉心の概念図を Fig. 6⁽¹⁾ に示す。図に見られるように、炉心は六角柱の炉心黒鉛ブロックと反射体黒鉛ブロックを横積みにした構造になっており、更に可動側と固定側に 2 分割されて配置されている。炉心黒鉛ブロックの断面を拡大して示したのが Fig. 7⁽¹⁾ である。炉心黒鉛ブロックは半径 30 cm、長さ 120 cm の正六角柱であり、燃料棒、制御棒、安全棒等の挿入される孔が 17 個あいている。それらの直径は中央の制御・安全棒孔が 5.5 cm であり、他の孔は全て 4.7 cm である。このような形状の六角柱の炉心黒鉛ブロックは炉心全体で 24 体装荷されており、これらに燃料棒を適宜必要量挿入して実験することができるようになっている。4.2 節で述べる解析においては、Fig. 6⁽¹⁾ に示された状態、即ち中心部の炉心黒鉛ブロック 12 体にそれぞれ 12 本ずつ合計 144 本の燃料棒が挿入された状態を扱うことにする。燃料棒の挿入されている様子を示すために、燃料棒挿入部分を拡大して示したのが Fig. 8⁽¹⁾ である。挿入された燃料棒は被覆粒子燃料コンパクトと、それを固定する燃料鞘からできている。(Fig. 9⁽¹⁾ 参照。) 更に燃料コンパクトは直径約 900 μ の被覆粒子から成形されている。

4.2 解析例

ここでは SHETEMP を VHTRC の反応度事故に適用した例を一例用いて示すことにする。ここで解析するのは、反応度投入事故中の燃料棒及びその周囲 (Fig. 7⁽⁹⁾ に斜線で示した部分) の温度分布である。

以下において、解析条件、入力データ及び解析結果の順に記す。

(1) 解析条件

初期の炉心出力が 1.0×10^{-5} (MW) の状態にある VHTRC 炉心に、反応度がランプ状に 0.42 (% $\Delta k/k/sec$) で最大 2% まで投入され、炉心出力が 20 (W) に到達した時刻から 25 秒の遅れをもって -1.6 (% $\Delta k/k$) のスクラムによる反応度がステップ状に入る場合を解析する。ただし、ホット・スポットの発熱密度は平均発熱部の 3 倍であるとする。

(2) 入力データ

解析対象形状

解析するのは Fig. 7 に斜線で示した燃料棒とその周囲の黒鉛減速材の温度分布であるため、

解析ではこの斜線部分を模擬した Fig. 10 に示される燃料棒と黒鉛減速材から成る熱伝導体（モデル燃料棒）にモデル化して扱う。即ち、解析上 VHTRC 炉心はこのようなモデル燃料棒の集合体として扱われる。今回解析対象とする VHTRC 炉心には 144 本の燃料棒が装荷されているので、解析でもこれと同数の 144 本のモデル燃料棒を扱う。

炉心領域分割

ホット・スポットを模擬するため、炉心を 2 つの炉心領域に分けて計算することにする。炉心領域 1 は、平均発熱密度を有するモデル燃料棒 143 本から構成されるとし、炉心領域 2 は、高発熱密度を有するモデル燃料棒 1 本から成るものとする。炉心領域 2 の発熱密度は炉心領域 1 の 3 倍であるので、炉心領域 1 及び 2 の全炉心出力に対する出力割合はそれぞれ 0.9794 及び 0.0206 である。

境界条件

本コードでは熱伝導計算のために左境界面と右境界面を定義する必要がある。（この両境界面の間で熱伝導計算を行う。）この選択は任意であるが、ここでは便宜的に Fig. 9 に示したように燃料コンパクト内面を左境界面、モデル燃料棒外面を右境界面とする。ここで、モデル燃料棒外面の径は、六角柱の炉心黒鉛ブロックの体積を 12 等分（1 体の炉心黒鉛ブロックには 12 本の燃料棒が挿入されている。）した時にできる円筒外面の径によって与える。

燃料棒温度をより高く計算するために、燃料コンパクト内で発生した熱は左右両境界面から逃げないと仮定して、両境界面で断熱として計算する。

材質領域分割

解析対象とする Fig. 7 の斜線部分は、燃料コンパクト、空気層、燃料鞘、空気層、及び黒鉛減速材の 5 つの異なる材質層から構成されている。材質領域は原則的には各材質層毎に分割される。また、本コードは、同一材質領域内での発熱密度及びメッシュ間隔を同一として扱うため、発熱分布のより詳細な考慮及びメッシュ点間隔の変更をしたい場合には、同一材質層をいくつかの材質領域に分割する。

本解析においては Fig. 10 に示された 5 つの材質領域として解析する。

核動特性データ⁽⁹⁾

計算に用いた VHTRC 炉心の核動特性データを他の主なデータとともに Table 6⁽¹⁰⁾ に示した。この表に示されていないデータは全てコード内蔵データを用いた。

解析に用いた入力データ・リストを付録 B に示した。

(3) 解析結果

得られた解析結果を Fig. 11 及び 12 に示す。Fig. 11 には、炉心出力、炉心放出エネルギーの積分値、全反応度、及び高発熱密度領域（炉心領域 2）の燃料コンパクト内面温度が示されている。炉心出力は反応度付加開始と同時に上昇し始め、約 4.1 秒で最大出力 286.8 MW に到達し以後減少する。約 26 秒での出力の急減はスクラムによる負の反応度が投入されたためである。炉心出力の積分値は炉心出力の変化に従って約 4 秒まで急激に増加し、以後はゆるやかに増加している。全反応度は計算開始後ほぼ付加反応度の変化に従って上昇するが、最大付加反応度投入時刻（約 4.76 秒）以前の約 4 秒から燃料のドップラー反応度のために減少する。約 26 秒での反応度のステップ状の減少は Fig. 12 から分かるように、原子炉スクラムによる

負のスクラム反応度がステップ状に投入されたためである。この原子炉スクラムは炉心出力が 20 W に到達（約 1 秒）してから 25 秒の遅れをもって作動したものである。このような全反応度変化に対する減速材の温度係数による反応度の効果は燃料のドップラー反応度やスクラム反応度に比べて小さいが、時間とともに負で増加の傾向を示している。

モデル燃料棒の内面（燃料コンパクト内面）を断熱として扱っているので炉心内の最高温度は、炉心領域 2（高発熱密度燃料）のモデル燃料棒内面で観測される。この温度変化も Fig. 11 に示されている。炉心出力が 1 MW のオーダーに到達する約 3 秒までは変化が少なく、この時刻以降急激に上昇する。約 16.9 秒に最高温度 1154 °C に到達して以後ゆるやかに減少する。

以上の計算は原研大型計算機 FACOM-M 780 上で実行した。計算に要した CPU 時間は物理時間の 90 秒間に対して、30 秒であった。また、使用メモリ量に関しては、現状のプログラムをそのまま用いたため使用メモリの最適化を行っていないため、1088 kB であった。これらの値は原研計算機システムを利用する場合においては、優先順位の高いクラスに入るため、多数の計算を実行するのに大きな困難はないものと考えられる。

Table 6 Input Data for SHETEMP Sample Problem

Core Region No (NOCOR)	2
Initial Power (POWER0) (MW)	1.0×10^{-5}
Kinetics Parameters	0.79154×10^{-3}
Neutron Life Time (sec)	0.27515×10^{-3}
Delayed Neutron Fraction β_1	0.15032×10^{-2}
" β_2	0.13558×10^{-2}
" β_3	0.29312×10^{-2}
" β_4	0.92186×10^{-3}
" β_5	0.18725×10^{-3}
" β_6	1.272×10^{-2}
Decay Constant of Delayed Neutron λ_1 (sec ⁻¹)	3.174×10^{-2}
" λ_2	1.16×10^{-1}
" λ_3	3.11×10^{-1}
" λ_4	1.40×10^0
" λ_5	3.87×10^0
" λ_6	
(Other kinetics Parameters are given by Built in data)	
Doppler Reactivity ($\Delta K/K/^\circ C$)	-0.64×10^{-4} ($\approx -8.9205 \times 10^{-3}$ $\$/^\circ C$)
Temperature Reactivity of Graphite Moderator ($\Delta K/K/^\circ C$)	-1.0×10^{-4} ($\approx -1.3938 \times 10^{-2}$ $\$/^\circ C$)

Table 6 (Continued)

Core Region Data	Core Region #1	Core Region #2
Boundary condition	Adiabatic at both sides	Adiabatic at both sides
Initial temperature	Uniform at 20°C	Uniform at 20°C
Power Fraction (POWFR)	0.9794	0.0206
Heat Transfer Area at Left Boundary (AHTL)(m ²)	11.806	54.536
Heat Transfer Area at Right Boundary (AHTR)(m ²)	0.082561	0.38137
Volume (VOLS)(m ³)	1.0805	0.0075558
(Fuel Dimension is shown in Fig.10)		
Mesh No.		
Fuel Compact	5	
Air Region 1	1	
Graphite Sheath	4	
Air Region 2	1	
Graphite Moderator	10	
Gap Model	Gap Model is not used in Both Air Regions 1 and 2	
Time Step Size	$0 \leq t < 5$ $\Delta t = 0.001$ sec $5 \leq t < 10$ $\Delta t = 0.002$ $10 \leq t < 40$ $\Delta t = 0.005$ $40 \leq t$ $\Delta t = 0.05$ t: Time (sec) Δt : Time step size (sec)	

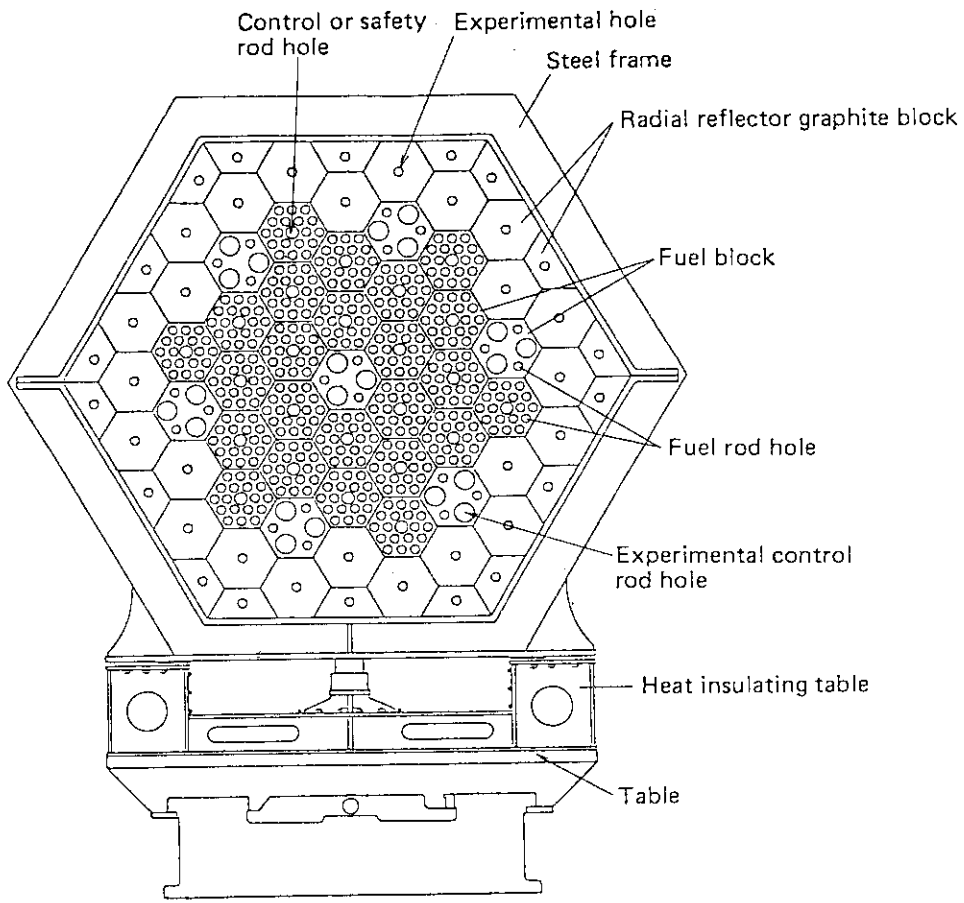


Fig. 6 Cross Section of VHTRC Core

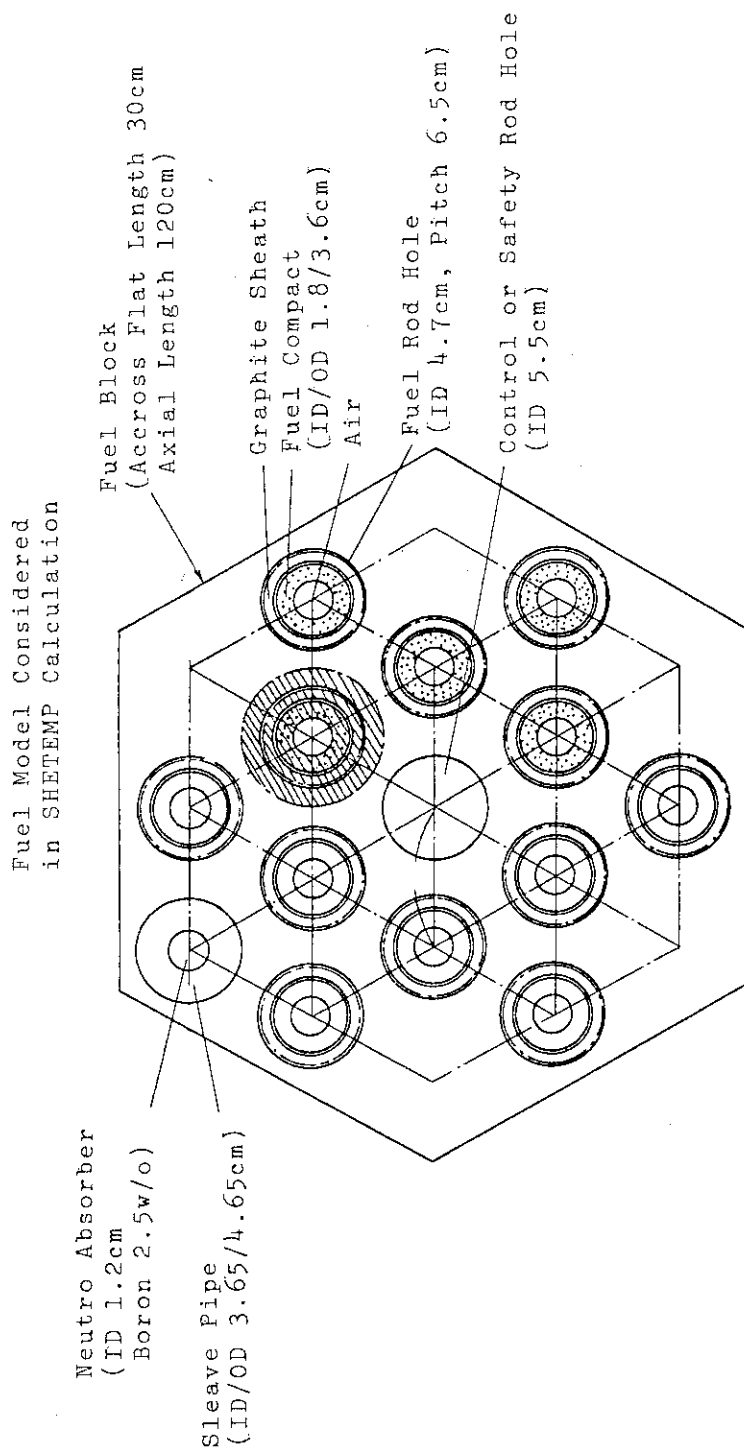


Fig. 7 Cross Section Fuel Assembly

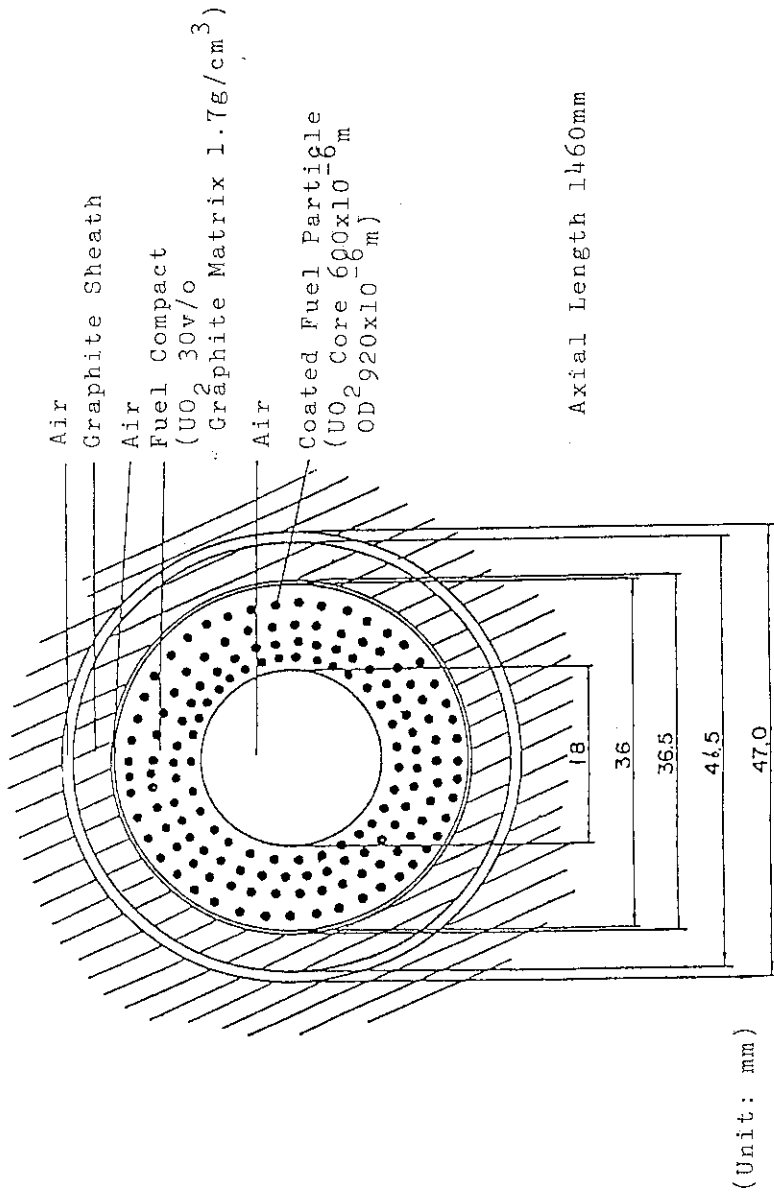


Fig. 8 Cross Section of Vicinity of Fuel Rod

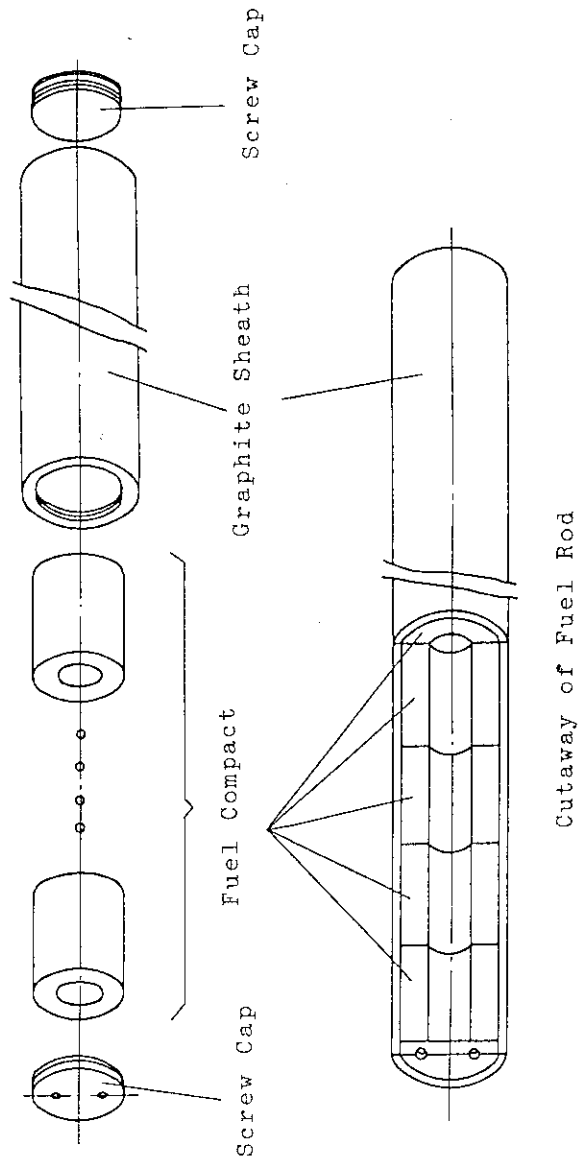


Fig. 9 Structure of Fuel Rod

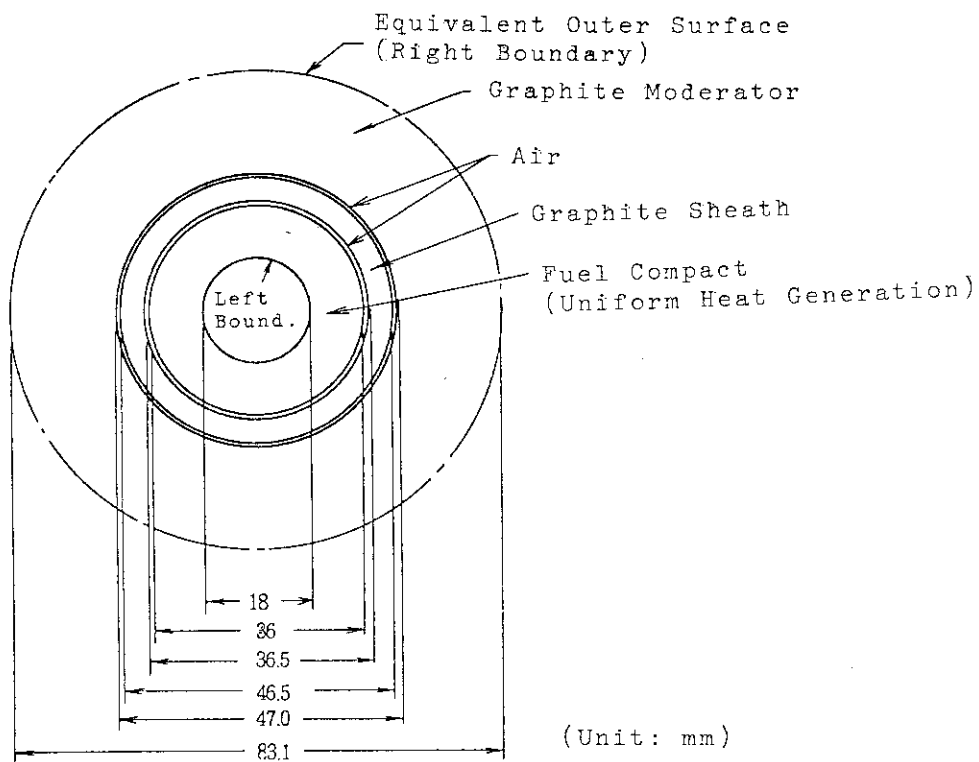


Fig. 10 Fuel Model for SHETEMP Calculation

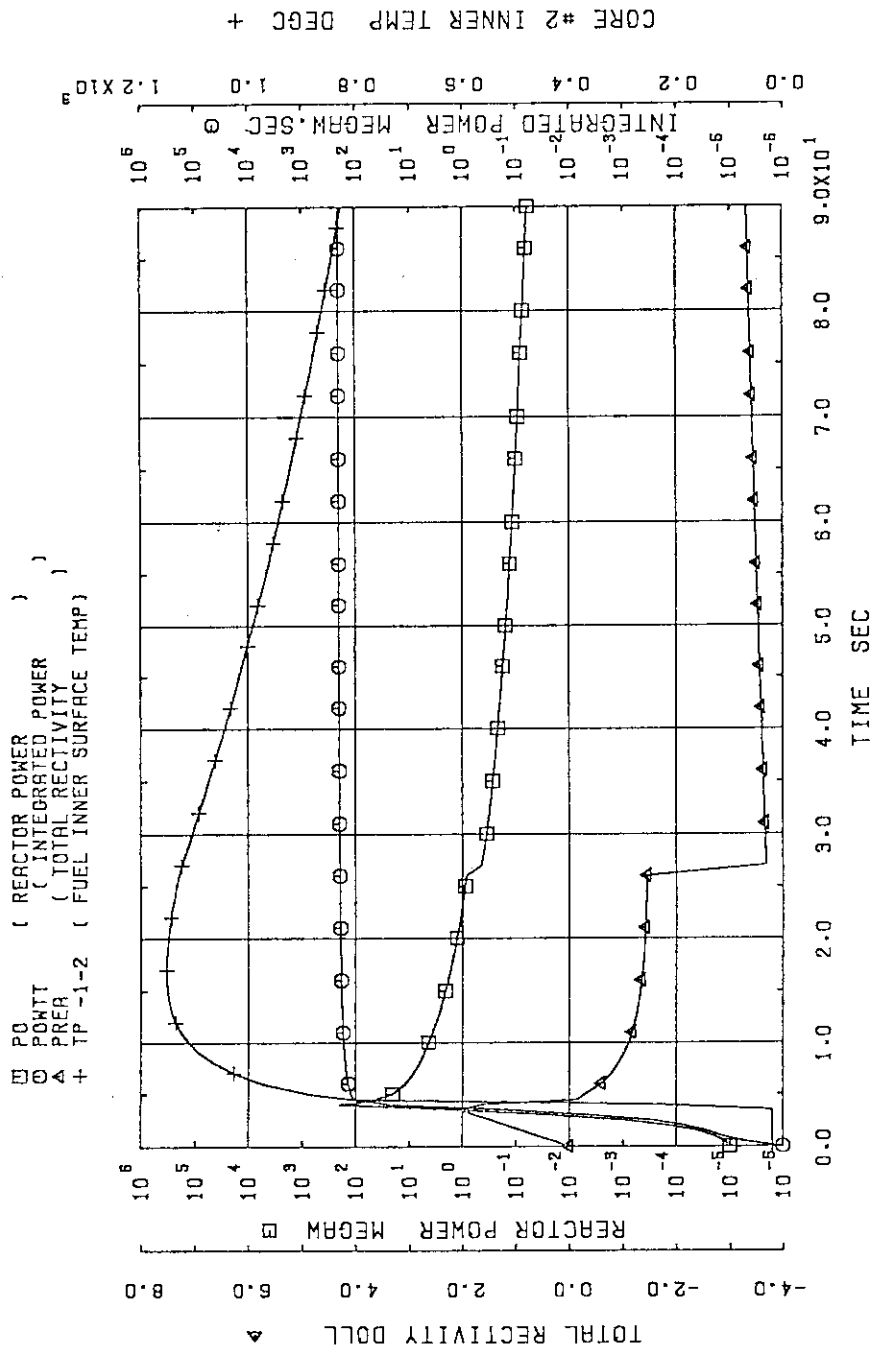


Fig. 11 Results of Sample Calculation by SHETEMP

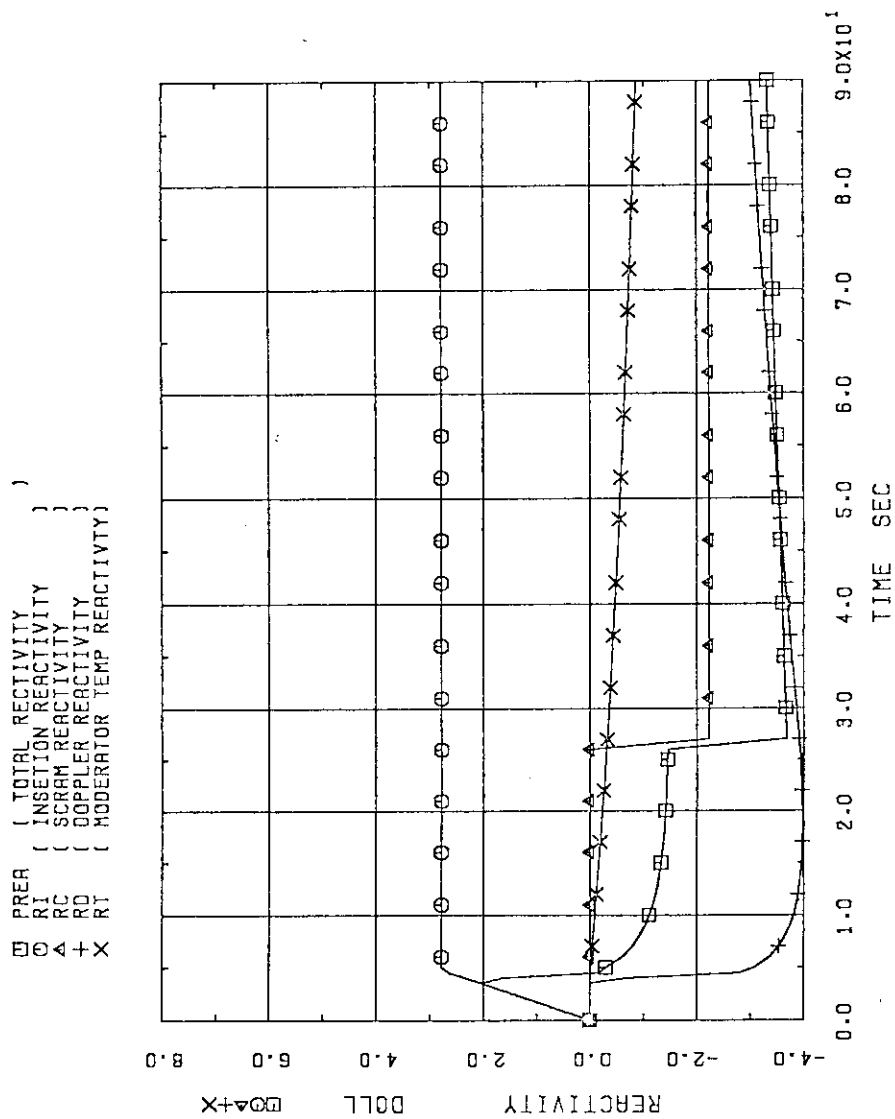


Fig. 12 Reactivity Transients of Sample Calculation by SHETEMP

5. プログラムの構造及び使用法

ここでは、SHETEMP の構造や使用法について記す。ただし、計算に必要な入力データは付録 A に示した。

5.1 プログラム形式の一般事項

プログラムの形式に関して項目ごとに箇条書きにすると以下のようなものである。

- 使用言語 FORTRAN-IV
- 使用計算機 FACOM-M780
- 使用メモリ量 1088 kB (但し、この数値は現在のバージョンをそのまま用いたものであり、扱う問題により最大の変数領域を変更する事によりメモリ量は変化する。)
- 計算に要する時間 入力データにより変わり得るが、4章で示した計算の場合には、1タイム・ステップ当り約2 msecであった。
- 必要なロジカル・ユニット
 - ユニット1 プロットデータ編集プログラム SPLEDIT^(1,2) の作業用ファイル
 - ユニット4 プロット・データの出力ファイル
 - ユニット9 フリー・フォーマット入力サブルーチン REAG^(1,3) の作業用ファイル

5.2 プログラムの構造

Fig. 13 にプログラムの処理の流れを示す。この図からわかるようにプログラムの処理は ① 入力データの読み込み及び変数の番地割り付け (SUBROUTIN INPUT), ② 定常設定 (INHEAT, STCONT), ③ 出力制御系過渡計算 (CONTRL), ④ 炉出力過渡計算 (RKEN), ⑤ 熱伝導過渡計算 (SLABHT), ⑥ プリント及びプロット出力 (MAJEDT, PLTAPE) となっている。ここで、① の変数の番地割り付けは、本コードが可変ディメンジョン形式で書かれており、扱う問題の大きさに応じて使用するメモリ量を変えるために行われる。従って他のプログラムに本コードを組み込む場合使用する領域の最後の番地から本コード用の領域を設定すれば良い。更に、組み込む際の労力をできるだけ少くし、プログラム作成上のエラーを少くするために、サブルーチンをコールする際の引き数を少くするようにプログラミングされている。

5.3 入出力コントロール

入力データの読み込みは、フリー・フォーマット入力サブルーチン REAG^(1,3) を用いて、フ

リー・フォーマットで入力できる。データの書き方は参考文献(13)を参照されたい。

計算結果のプリント出力フォーマットは決まっており、炉心出力、反応度、熱伝導体の温度分布及び境界面での熱流束等が出力される。プリント出力の時間間隔は、タイム・ステップ・コントロールのデータ NPRNT により変更可能である。

プロット出力はデータ・プロット・システム SPLPACK⁽¹²⁾ を用いて行う。このプロット・システムは、作図のためのデータ・ファイルを作成するデータ編集プログラム SPLEDIT、これにより作られたデータ・ファイル上のデータを作図する作図プログラム SPLPLOT 等いくつかのプログラムにより構成されている。データ・ファイル作成時のプロット・データの出力間隔はプリント出力と同様に、タイム・ステップ・コントロール・データの NPLOT によってコントロールできる。SPLPACK の使用法の詳細については参考文献(12)を参照されたい。本コードのプロット出力可能な変数は Table 7 に示されている。

5.4 使用法

計算を実行する時の計算機の処理の流れを Fig. 14 に示した。図からわかるように、SHETEMP はプロット処理のために SPLPACK コード・システムを用いているので、SHETEMP を実行するには、プロット・データ編集プログラム SPLEDIT をリンクしなければならない。実行のための JCL を付録 C に示したので、この JCL をそのまま用いれば良い。

プロット出力は、前述のとおり作図プログラム SPLPLOT によって SHETEMP と独立して行うが、このプログラムの入力データ及び出力方法等の使用方法の詳細は、参考文献(12)を参照されたい。

Table 7 SHETEMP Plot Variables

Variable ID	Description
NQ	Normalized Power
PREA	Total Reactivity
RI	Reactivity Inserted
RS	Scram Reactivity
RD	Fuel Doppler Reactivity
RT	Reactivity due to Moderator Temperature Coefficient
RC	Control rod Reactivity due to power control system
RCR	Total control rod reactivity (RS+RC)
PO	Reactor Power
RP	Reactor Period
POWTT	Integrated Power
CT	Left Surface Temperature
TS	Right Surface Temperature
HL	Heat Transfer Coefficient at Left Surface
HR	Heat Transfer Coefficient at Right Surface
PL	Heat Flux at Left surface
PR	Heat Flux at Right Surface
WL	Heat Transfer Rate at Left Surface
WR	Heat Transfer Rate at Right Surface
TL	Left Bulk Temperature
TR	Right Bulk Temperature
TM	Fuel Average Temperature of Core Region
TG	Moderator Average Temperature of Core Region
FQ	Power generated in Core Region
TGT	Average Moderator Temperature
TMT	Average Fuel Temperature
TP	Temperature at Mesh Point
FUN1	Variable F ₁ of Power Control System
FUN2	Variable F ₂ of Power Control System
FUN3	Variable F ₃ of Power Control System
FUN4	Variable F ₄ of Power Control System
FUN6	Variable F ₆ of Power Control System
FUN7	Variable F ₇ of Power Control System
FUN8	Variable F ₈ of Power Control System

Table 7 (Continued)

FUN9	Variable F ₉ of Power Control System
FUN11	Variable F ₁₁ of Power Control System
FUN12	Variable F ₁₂ of Power Control System
FUN13	Variable F ₁₃ of Power Control System
FUN51	Variable F ₅₁ of Power Control System
FUN52	Variable F ₅₂ of Power Control System
FUN53	Variable F ₅₃ of Power Control System
FUN54	Variable F ₅₄ of Power Control System
FUN55	Variable F ₅₅ of Power Control System

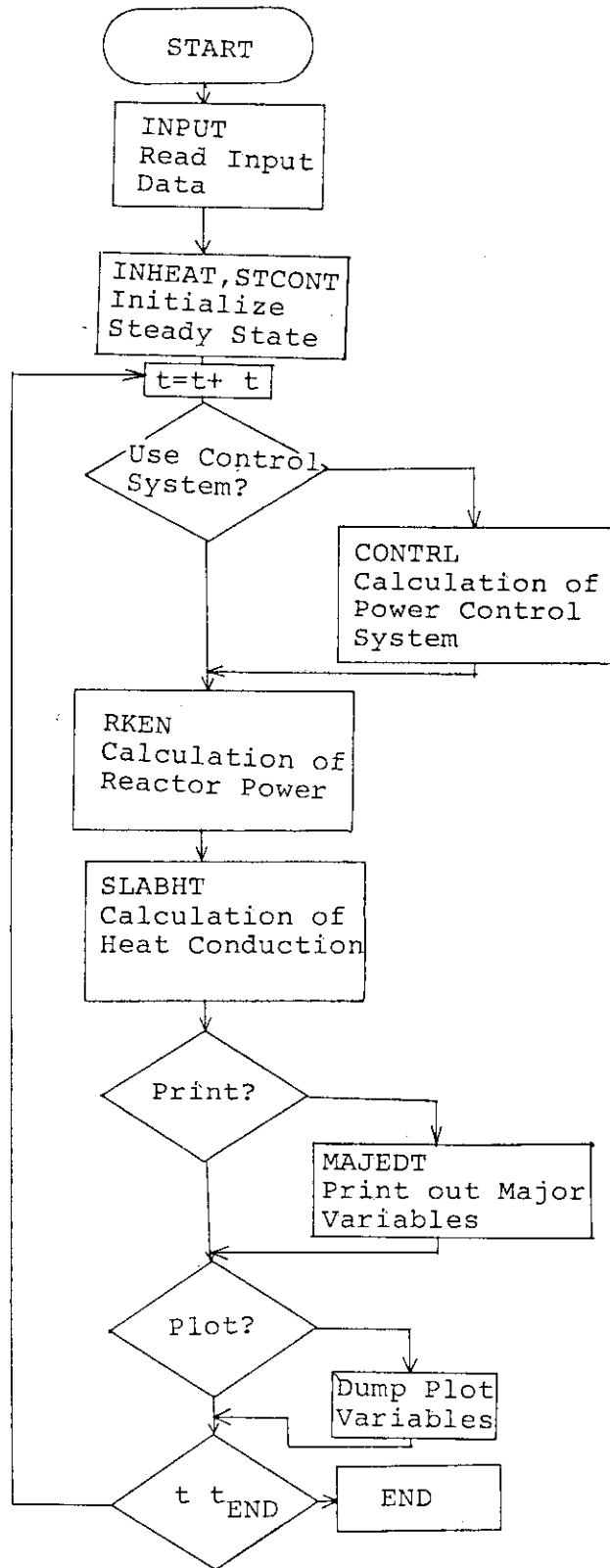


Fig. 13 Flow Chart of SHETEMP

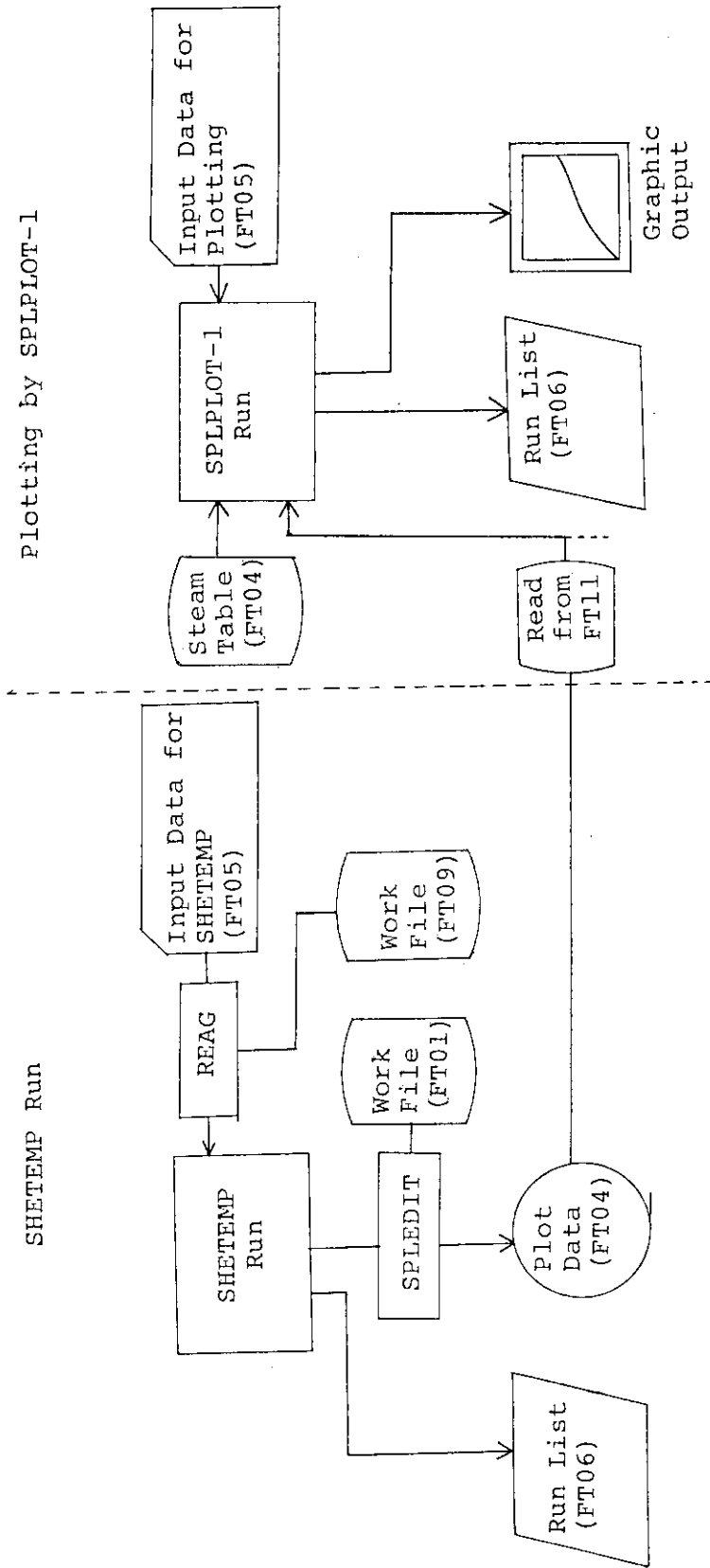


Fig. 14 Relationship and Data Flow between SHETEMP and Other Codes

6. お わ り に

燃料棒と冷却材間の熱伝達係数や冷却材温度などの冷却条件の変化が無視できる体系での反応度事故時の原子炉出力と燃料棒温度挙動を制御棒の動きを考慮して解析できる高速計算コード SHETEMP を作成した。この計算コード作成のねらいは、冷却材の流動計算をしないことにより高速計算を達成し、原子炉の設計や安全審査で必要になる多くのパラメータ計算ができる計算コードを提供することである。この要件を達成するために、過渡熱水解析コード ALARM-P1 から一点近似原子炉動特性と非定常次元熱伝導計算のルーチンを抜き出し、これに制御棒駆動系の動作を考慮して炉出力を制御するモデルを新たに追加し、これらのみで計算できるようにした。

ALARM-P1 からのサブルーチンの抜き出しに伴うプログラミングのミスを検討するために、本コードの与える数値解と理論解の比較を実施した。この結果、良好な一致が得られ、プログラミング上の問題の無いことが確認された。また、標準的なモデル化したサンプル問題の計算の結果、本コードは上記の要件を満足できることが確認された。

SHETEMP は、当初原研原子炉工学部炉物理実験研究室で実施した高温ガス炉臨界実験装置 VHTRC の建設に係る安全解析の一環として行う反応度事故解析を目的として開発された。しかし、本コードは解析モデル上、対象を VHTRC のみに限定しておらず、平板及び円柱の一般の熱伝導問題、及び一点近似モデルの範囲内で原子炉の動特性問題に適用可能であり、しかも高速計算が可能である。このため本報告書をコードマニュアルとしてまとめ、本コードを広く一般の利用に供することにした。

謝 辞

SHETEMP の作成の機会を与えてくれた、原子炉工学部炉物理実験研究室に対し感謝致します。また、解析結果の検討においても貴重な助言をいただいた当該研究室の皆様、殊に安田秀志室長、及び原子炉システム研究室土橋敬一郎主任研究員に謝意を表します。更に、炉出力制御モデルの作成に対して助言を与えてくれた原子炉安全工学部人的因子研究室横林正雄主任研究員に謝意を表します。

6. お わ り に

燃料棒と冷却材間の熱伝達係数や冷却材温度などの冷却条件の変化が無視できる体系での反応度事故時の原子炉出力と燃料棒温度挙動を制御棒の動きを考慮して解析できる高速計算コード SHETEMP を作成した。この計算コード作成のねらいは、冷却材の流動計算をしないことにより高速計算を達成し、原子炉の設計や安全審査で必要になる多くのパラメータ計算ができる計算コードを提供することである。この要件を達成するために、過渡熱水解析コード ALARM-P1 から一点近似原子炉動特性と非定常次元熱伝導計算のルーチンを抜き出し、これに制御棒駆動系の動作を考慮して炉出力を制御するモデルを新たに追加し、これらのみで計算できるようにした。

ALARM-P1 からのサブルーチンの抜き出しに伴うプログラミングのミスを検討するために、本コードの与える数値解と理論解の比較を実施した。この結果、良好な一致が得られ、プログラミング上の問題の無いことが確認された。また、標準的なモデル化をしたサンプル問題の計算の結果、本コードは上記の要件を満足できることが確認された。

SHETEMP は、当初原研原子炉工学部炉物理実験研究室で実施した高温ガス炉臨界実験装置 VHTRC の建設に係る安全解析の一環として行う反応度事故解析を目的として開発された。しかし、本コードは解析モデル上、対象を VHTRC のみに限定しておらず、平板及び円柱の一般の熱伝導問題、及び一点近似モデルの範囲内で原子炉の動特性問題に適用可能であり、しかも高速計算が可能である。このため本報告書をコードマニュアルとしてまとめ、本コードを広く一般の利用に供することにした。

謝 辞

SHETEMP の作成の機会を与えてくれた、原子炉工学部炉物理実験研究室に対し感謝致します。また、解析結果の検討においても貴重な助言をいただいた当該研究室の皆様、殊に安田秀志室長、及び原子炉システム研究室土橋敬一郎主任研究員に謝意を表します。更に、炉出力制御モデルの作成に対して助言を与えてくれた原子炉安全工学部人的因子研究室横林正雄主任研究員に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) M. Akimoto, et al., "ALARM-P1 : A Computer Program for Pressurized Water Reactor Blowdown Analysis", JAERI-M 8004, Dec. 1978.
- (2) 佐々木忍, 新谷文将, "ALARM-P1 コードによる LPWR LOCA 時のブローダウンの解析", JAERI-M 82-161, 1982年11月。
- (3) R. J. Wagner, "HEAT 1 A One Dimensional Time Dependent or Steady Heat Conduction Code for The IBM-650", IDO-16867, April 1963.
- (4) R. J. Wagner, "IREKIN Program for The Numerical Solution of The Reactor Kinetics Equations", IDO-17114, Jan. 1966.
- (5) G. R. Keepin, et al., "Delayed Neutrons from Fissionable Isotopes of Uranium, Plutonium, and Thorium", Physical Review, Vol. 107, No. 4, Aug. 1957.
- (6) K. V. Moore, et al., "RELAP 4 - A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulics Analysis.", ANCR-1127, Dec. 1973.
- (7) 添田喬, 中溝高好, "わかる自動制御演習", 日新出版, 昭和47年。
- (8) 石森富太郎編, "原子炉工学講座3 - 原子炉物理", 培風館。
- (9) R. B. Bird, et al., "Transport Phenomena", Wiley International Edition.
- (10) 一色尚次, "基礎機械工学全書9 - 伝熱工学", 森北出版。
- (11) 安田秀志 : 私信。
安田秀志他, "VHTRC (高温ガス臨界実験装置) の建設", JAERI 1305, Aug. 1987.
- (12) 村松健他, "過渡現象の実験結果及び計算結果の編集・作図用標準プログラムパッケージ SPLPACK-1 の使用手引", JAERI-M 83-166, 1983年11月。
- (13) 浅井清, 土橋敬一郎, "FREE FORMAT でデータを読むサブルーチン", JAERI-M 4458, 1971年5月。

付録A 入力データ仕様

All input data are read into the SHETEMP program in free format via the subroutine REAG, which converts BCD information to integer or floating binary information. Data punched on a card may be delimited by blank column or comma. The slash (/) indicates the end of the BCD field to be converted. If no slash is present, 72 columns of the first card are scanned and scanning the columns of the following cards is continued so far as to satisfy the number of required data. In the read-in process, the bracket () or asterisk * are allowed and defined as follows:

2(1.0, 1.5E-3) = 1.0, 1.5E-3, 1.0, 1.5E-3

3(0) = 0, 0, 0

1.0, 3*0.2, 2*-0.1 = 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.5, 1.4

/* appearing in the first and second columns is identified as a comment card. JAERI-M 4458, "A Subroutine Reading Data in Free Format (in Japanese)" should be referred to for more detailed information.

The order of the data (W1, W2, ...), the format (I or R), the variable name and the input data requirements are given where applicable.

A.1 Problem Title (One Card)

The information punched in the first column to the 72nd of a card will be printed at the top of the page of output.

A.2 Problem Dimension Data

Number of entries are 6 integers and two floating point number.

W1-I NTC Number of time step control data blocks (NTC > 0)
 W2-I NOCOR Number of core regions (NOCOR > 0)
 W3-I NINIT Number of initial boundary condition data blocks (NINIT > 0)
 W4-I NTRAN Number of Transient boundary condition data blocks (NTRAN ≥ 0)
 W5-I NGOM Number of slab geometry data blocks (NGOM > 0)
 W6-I NMAT Number of material data blocks (NMAT > 0)
 W7-I ICONT Control system option index
 =0:Not use control system
 =1:Use control system
 W8-R POWER0 Initial power (MW)
 W9-R TCAL Dummy input. Set TCAL=0.0.

A.3 Time Step Control Data

NTC data blocks are required. Each data block consists of 2 integer entries and 2 floating point number entries.

W1-I NPRNT Number of time steps per print
 W2-I NPLOT Number of time steps per plot data edit
 W3-R DELTM Time step size (sec) (DELTM > 0.)
 W4-R TLAST End of current time step data
 TLAST(NTC) indicates the time of the problem termination

A.4 Kinetics Constants Data

The data set consists of two parts.

(i) The first part of the data set has one integer entry and two floating point number entries.

W1-I ITBL Kinetics parameter indicator
 =0---use built-in data
 =1---use input data
 W2-R BETABL Effective delayed neutron fraction over mean lifetime (sec^{-1})
 W3-R REACO Initial reactivity ($\$$)

(ii) The second part of the data set is required only if ITBL=1, and consists of 5 data Tables.

(a) 6 floating point number entries

Normalized effective delayed neutron fraction
 $(\beta_i/\beta, i=1\sim 6, \beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i)$
 The "i"s are in ascending order.

(b) 6 floating point number entries

Decay constants of delayed neutron groups
 $(\lambda_i, i=1\sim 6) (\text{sec}^{-1})$
 The "i"s are in ascending order.

(c) 12 floating point number entries

Energy fraction of fission gamma groups and total fraction
 $(\alpha_{Dj}, j=1\sim 11, \sum_{j=1}^{11} \alpha_{Dj})$
 The "j"s are in ascending order.

(d) 11 floating point number entries

Decay constants of fission gamma groups
 $(\lambda_{Dj}, j=1\sim 11)$
 The "j"s are in ascending order.

(e) One floating point number entry

Energy fraction of actinide decay heat
 (α_{act})

A.5 Reactivity Insertion Data

This data set consists of two parts.

(i) The first part of the data has one integer entry.

W1-I NINSRT Number of data points for reactivity insertion data table
 $(NINSRT \geq 0)$

(ii) The second part of the data consists of $2 \times NINSRT$ floating point number entries. Data arrangement is as follows:

time t_1 (sec), reactivity ρ_{11} (\$), t_2 , ρ_{12} , ----- t_{NINSRT} , $\rho_{1 NINSRT}$
 t_1 must be zero.

A.6 Scram Data

This data set consists of the following three parts.

(i) The first part of the data has one integer entry and two floating point number entries.

W1-I ITRIPC Trip control option index
 =0-----No scram
 =1-----Power trip
 W2-R TRPVAL Trip set point
 If ITRIP=1, TRPVAL means power (MW).
 If ITRIP=0, TRPVAL is dummy.
 W3-R DELTIM Delay time for initiation of action after reaching set point
 (sec)

(ii) The second part of the data set has one integer entry.

W1-I NSCRAM Number of data points for scram data table

(iii) The third part of the data set has $2 \times NSCRAM$ floating point number entries. Data arrangement is as follows:

time after scram t_{s1} (sec), reactivity ρ_{s1} (\$), t_{s2} , ρ_{s2}
 ----- $t_{s NSCRAM}$, $\rho_{s NSCRAM}$
 The user should set $t_{s1}=0.0$.

A.7 Fuel Doppler Reactivity Data

This data set consists of two parts.

(i) The first part of the data set has 1 integer entry and NOCOR floating point number entries.

W1-I NTEREA Number of data points for fuel Doppler table data
 W2-R WFT(1) Weighting factor in the average fuel temperature calculation for the 1st core region
 W3-R WFT(2) Weighting factor in the average fuel temperature calculation for the 2nd core region
 ⋮
 W1+NOCOR-R WFT(NOCOR) Weighting factor in the average fuel temperature calculation for the NOCOR-th core region
 (WFT(1)+-----+WFT(NOCOR)=1.0)

(ii) The second part of the data set has $2 \times NTEREA$ floating point number entries. Data arrangement is as follows:

average fuel temperature T_{AF1} (°C), Doppler reactivity R_{D1} (\$), T_{AF2} , R_{D2} ,
 -----, $T_{AF NTEREA}$, $R_{DNTEREA}$
 The temperature values must be in ascending order.

A.8 Moderator Temperature Coefficient Reactivity Data

This data set consists of two parts.

(i) The first part of the data set has 1 integer entry and NOCOR floating point number entries.

W1-I NTEMP Number of data points for moderator temperature coefficient table data
 W2-R WMT(1) Weighting factor of average moderator temperature calculation for 1st core region
 W3-R WMT(2) Weighting factor of average moderator temperature calculation for 2nd core region
 ⋮
 W1+NOCOR-R WMT(NOCOR) Weighting factor of average moderator temperature calculation for NOCOR-th core region
 (WMT(1)+-----+WMT(NOCOR)=1.0)

(ii) The second part of the data set has $2 \times \text{NTEMP}$ floating point number entries. Data arrangement is as follows:

average moderator temperature T_{AM1} (°C), reactivity ρ_{T1} (\$),
 T_{AM2} , ρ_{T2} , -----, T_{AM} NTEMP, ρ_{T} NTEMP
 The average moderator temperature values are in ascending order.

A.9 Core Region Data

This data set consist of NOCOR data blocks. Each data block has 5 integer entries and 4 floating point number entries.

W1-I IGOM Geometry index ($1 \leq \text{IGOM} \leq \text{NGOM}$)
 W2-I INITL Initial boundary condition index at left surface
 ($0 \leq \text{INITL} \leq \text{NINIT}$)
 =0-----Adiabatic
 W3-I INITR Initial boundary condition index at right surface
 ($0 < \text{INITR} \leq \text{NINIT}$)
 W4-I ITRNL Transient boundary condition index at left surface
 ($0 \leq \text{ITRNL} \leq \text{NTRAN}$)
 =0-----Adiabatic
 W5-I ITRNR Transient boundary condition index at right surface
 ($0 \leq \text{ITRNR} \leq \text{NTRAN}$)
 =0-----Adiabatic
 W6-R AHTL Heat transfer are a at left surface(m^2)
 If $\text{INITL}=0$ and $\text{ITRNL}=0$, set $\text{AHTL}=0$.
 W7-R AHTR Heat transfer are a at right surface(m^2)
 W8-R VOLS Volume of heat conductor(m^3)
 W9-R POWFR Power fraction ($0 \leq \text{POWFR} \leq 1$)
 NOCOR
 ($\sum_{i=1} \text{POWFR}_i = 1.0$)

A.10 Initial Boundary Condition Data

This data set consists of NINIT data blocks. Each data block has 2 floating point number entries.

W1-R HTC1 Heat transfer coefficient at heat conductor boundary
(kcal/m²-sec-°C)
(HTCI ≥ 0.)

W2-R TBLK1 Bulk temperature (°C)

If initial conditions for both heat conductor boundary will be set as adiabatic condition (INITL=0, and INITR>0, and HTC1=0.), the conductor temperatures is assumed as uniform distribution with the value of TBLK1.

A.11 Transient Boundary Condition Data

This data set consists of NTRAN data blocks. Each data block consists of three parts.

(i) The first part of the data block has two integer entries.

W1-I NHTC Number of time vs. heat transfer coefficient table data points
(NHTC ≥ 0)

=0-----Adiabatic (h=0. is assumed.)

=1-----Heat transfer coefficient remains constant value

W2-I NTBLK Number of time vs. bulk temperature table data points (NTBLK > 0)

=1-----Bulk temperature is assumed to be constant.

(ii) The second part of the data block has 2 × NHTC floating point number entries. Data arrangement is as follows:

time after calculation start t_i (sec), heat transfer coefficient h_i
(kcal/m²-sec-°C), -----t_{NHTC}, h_{NHTC}
Time values are in ascending order.

(iii) The third part of the data block has 2 × NTBLK floating point number entries. Data arrangement is as follows:

time after calculation start t_i (sec), bulk temperature
T_{BULK1} (°C), -----, t_{NTBLK}, T_{BULK} NTBLK
Time values are in ascending order.

A.12 Heat Conductor Geometry Data

This data set consists of NGOM data blocks. Each data block consists of two parts.

(i) The first part of the data block requires 4 integer entries and 4 floating point number entries.

W1-I JGOM Geometry type
=1-----Rectangular
=2-----Cylindrical

W2-I NREG Number of material regions (NREG ≥ 1)

W3-I IMATID(1) Material index of the first material region
(1 ≤ IMATID(1) ≤ NMAT)

W4-I ISPST(1) Number of space steps of the first material region
(ISPST(1) ≥ 1)

W5-R WREG(1) Region width of the first region(m) (WREG>0.)
 W6-R POFRRG(1) Fraction of the power generated in the first material region
 W7-R WMTR(1) Weighting factor for moderator average temperature calculation
 for the first material region
 W8-R RDLFT Radial distance from center of cylindrical conductor to left
 boundary surface If WREG<0., RDLFT means outer radius.

(ii) The second part of the data block is required if NREG \geq 2. These data must be set for the second material region to NREG-th material region. Data for each region have 3 integer entries and 3 floating point number entries.

W1-I IGAP(J) Gap indicator
 =0-----No gap
 =1-----Gap region (Gap conductance model is applied for the
 region.)
 W2-I IMATID(J) Material index ($1 \leq \text{IMATID}(J) \leq \text{NMAT}$)
 W3-I ISPST(J) Number of space steps ($\text{ISPST}(J) \geq 1$)
 If IGAP(J)=1, set ISPST(J)=1.
 W4-R WREG(J) Region width(m) (WREG(J) \neq 0.)
 W5-R POFRRG(J) Fraction of the power generated in the J-th material region
 (POFRRG(J) \geq 0.)
 W6-R WMTR(J) Weighting factor for moderator average temperature calculation
 for the J-th material region

If WREG<0., left boundary surface should be outer surface.

Sum of POFRRG should be unity ($\sum_{J=1}^{\text{NREG}} \text{POFRRG}(J) = 1.0$)

The expression of WMTR is appeared as WMTR in the equation(17).

A.13 Thermal Property Data

This data set consists of NMAT data blocks. Each data block consists of 6 parts.

(i) The first part of the data block has one integer entry.

W1-I NTATK Number of data points for thermal conductivity (NTATK \geq 1)

(ii) The second part of the data block requires 2 \times NTATK floating point number entries. Data arrangement is as follows:

temperature T_{k1} ($^{\circ}\text{C}$), thermal conductivity k_1 (kcal/m-sec- $^{\circ}\text{C}$),
 ----- $T_{k\text{NTATK}}$, k_{NTATK}

(iii)The third part of the data block has one integer entry.

W1-I NTAHC Number of data points for volumetric heat capacity (NTAHC \geq 1)

(iv) The fourth part of the data block has 2 \times NTAHC floating point number entries. Data arrangement is as follows:

temperature $T_{\rho 1}$ ($^{\circ}\text{C}$), volumetric heat capacity(ρCp)₁
 (kcal/m³- $^{\circ}\text{C}$), -----, $T_{\rho \text{NTAHC}}$, (ρCp)_{NTAHC}

(v) The fifth part of the data block has one integer entry.

W1-I NTAGP Number of data points for gap conductance

(vi) The sixth part of the data block has $2 \times \text{NTAGP}$ floating point number entries. Data arrangement is as follows:

temperature T_{g1} ($^{\circ}\text{C}$), gap conductance $h_{g\text{gap}}$ ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{-sec-}^{\circ}\text{C}$),
 -----, $T_{g\text{NTAGP}}$, $h_{g\text{gap NTAGP}}$

The temperature values (T_k , T_p , T_g) are in ascending order.

A.14 Control System Data

The following data are required only if ICONT=1 on the problem dimension card.

(i) Reference Power Data

This data specify normalized power level which is used as reference power in the control system, n_{cont}/n_0 shown in Fig. 3. This data block consists of two parts.

(a) The first part of the data block has one integer entry.

W1-I NTPSET Number of data points of reference power table

(b) The second part of the data block consists of $2 \times \text{NTPSET}$ floating point number entries.

time t , (s), reference normalized power $\frac{n_{\text{cont},i}}{n_0}$, ---
 ----- t_{NTPSET} (s), $\frac{n_{\text{cont},i}}{n_0}$ NTPSET

(ii) PID Controller Data

Three floating number entries are required.

W1-R GKI Gain of integrator K_i

W2-R GKP Gain of multiplier K_p

W3-R GKD Gain of differentiator K_d

(iii) Servo Amplifier Characteristic Data

This data block consists of two parts. This data block specify the characteristics of the servo amplifier which include power deviations from reference power (input signal of the amplifier) and output voltages or control rod velocities (output signal of the amplifier).

(a) The first part of the data consists of one integer entry.

W1-I NTAMP Number of data points of servo amplifier characteristic table.

(b) The second part of the data block consists of $2 \times \text{NTAMP}$ floating point entries.

W1-R TAMP(1) Power deviation for the first data point
 W2-R TAMP(2) Output voltage of the amplifier (V) or control rod velocity
 (m/s) for the first data point
 :
 :
 W $2 \times \text{NTAMP}$ -R TAMP($2 \times \text{NTAMP}$)

(iv) Servo Motor Characteristic Data

This data block specifies the servo motor characteristics described in Section 2.4 and consists of 4 floating point entries.

W1-R GKOP Gain of bypass circuit of servo motor K_{OP} shown in Fig. 3
 W2-R GKMOT Gain of servo motor K_M shown in Fig. 3
 W3-R TMOT Time constant of servo motor T_{MOT} shown in Fig. 3 (s)
 W4-R GKTG Gain of servo generator K_{TG} shown in Fig. 3

(v) Control Rod Drive Mechanism Characteristic Data

This data block specifies characteristics of the control rod drive mechanism (CRDM) and consists of 7 floating point number entries.

W1-R GKCRDM Gain of CRDM K_{CRDM} shown in Fig. 3.
 W2-R TCRDM Time constant of CRDM T_{CRDM} shown in Fig. 3 (s)
 W3-R GL Loss time of CRDM L shown in Fig. 3 (s)
 W4-R GKC Gain of integrator K_c shown in Fig. 3
 W5-R DST Insertion depth of control rod at steady state (m)
 W6-R DMAX Maximum insertion depth of control rod (m)
 W7-R DMIN Minimum insertion depth of control rod (m)
 The insertion depth of the control rod is limited between DMAX
 and DMIN in transient condition.

(vi) Control Rod Reactivity Data

This data block specifies relation ship between the control rod position (insertion depth) and reactivity and consists of two parts.

(a) The first part of the data block has one integer entry.

W1-I NTRC Number of data points of control rod reactivity table.

(b) The second part of the data block consists of $2 \times \text{NTRC}$ floating point number entries.

W1-R TRC(1) Control rod insertion depth for the first point (m)
 W2-R TRC(2) Control Rod Reactivity for the first point (\$)
 :
 :
 W $2 \times \text{NTRC}$ -R TRC($2 \times \text{NTRC}$)

付録B サンプル問題の入力データ・リスト

```

SHETEMP SAMPLE INPUT DATA
/* PROBLEM DIMENSION CARD
/*   NTC NOCOR NINIT NTRAN  NGOM  NMAT ICONT POWRO  TCAL
      4     2     1     0     1     3     0  1.0E-5  0.0
/* TIME STEP CONTROL CARDS
/*   NPRNT NPLOT DELTM  TLAST
      5000   500   0.001    5.0
      2500   500   0.002   10.0
      2000   200   0.005   40.0
      1000   100   0.02    90.0
/* KINETICS CONSTANTS DATA CARDS
/*   ITBL BETABL  REACO
      1   9.0640   0.0   / ITBL=0:USE BUILT-IN DATA
/* DELAYED NEUTRON FRACTION
      .038351   .209521   .188976
      .408560   .128492   .026100   /SHE DATA
/* DELAYED NEUTRON DECAY CONSTANTS (1/SEC)
      .01272   .03174   .116
      .311     1.40     3.87   /SHE DATA
/* FISSION PRODUCTS POWER FRACTION
      0.00299  0.00825  0.01550  0.01935  0.01165  0.00645
      0.00231  0.00164  0.00085  0.00043  0.00057  0.06999 /BUILT-IN
/* FISSION PRODUCTS DECAY CONSTANTS (1/SEC)
      1.772    5.774E-1  6.743E-2  6.214E-3  4.739E-4  4.810E-5
      5.344E-6  5.726E-7  1.036E-8  2.959E-8  7.585E-10   /BUILT-IN
/* ACTINIDES POWER FRACTION
      0.0032 /BUILT-IN DATA
/* REACTIVITY INSERTION DATA
/*   NINSRT
      3
/*   TINS
      0.0  0.0  4.7619  2.7877  1000.0  2.7877
/* SCRAM DATA CARDS
/*   ITRIPC (0:NO SCRAM, 1:POWER(MW), 2:MAX. TEMP.(C))
/*       TRPVAL (MW OR C)
/*       DELAY TIME (SEC)
      1     2.0E-5  25.0
/*   NSCRAM
      2
/*   TSCR
      0.0 -2.2301  1000.0 -2.2301
/* DOPPLER REACTIVITY DATA
/*   NTEREA WFT(1) WFT(2)
      2     1.0     0.0
/*   DOPRO
      0.0  0.0  10000.0 -89.205
/* TEMPERATURE COEFFICIENT DATA CARDS
/*   NTEMP WMT(1) WMT(2)
      2     1.0     0.0
/*   TEMPC
      0.0  0.0  10000.0 -139.39
/* CORE SECTION DATA
/*   IGOM INITL INITR ITRNL ITRNR
/*   AHTL AHTR  VOLS  POWFR
/*****SECTION 1
      1     0     1     0     0
      11.806   54.536   1.0805   0.97945
/*****SECTION 2
      1     0     1     0     0
      0.082561  0.38137  0.0075558  0.02055
/* INITIAL CONDITION DATA
/*   HTCI  TBLK

```

```

0.0          20.0      /  SET NO. 1
/* TRANSITION CONDITION DATA
/* THIS DATA SET IS IGNORED, BECAUSE NTRAN=0.
/* SLAB GEOMETRY DATA CARDS
/* JGOM NREG IMATID ISPST WREG      POFRRG      WMTR      RDLFT
/* IGAP IMATID ISPST WREG      POFRRG      WMTR      RDLFT
/* **** SET NO. 1 (CORE SECTION 1 & 2) ****
      2      5      2      5      0.009      1.0      0.0      0.009
      0      1      1      1      0.00025     0.0      0.0
      0      3      4      0      0.005      0.0      0.5
      0      1      1      0      0.00025     0.0      0.0
      0      3     10      0      0.018073    0.0      0.5

/*
/* THERMAL PROPERTY DATA
/*
/****** SET NO. 1 (AIR)
/* NTATK
      21
/* TPK
      10.0    5.932744E-06    20.0    6.114318E-06    100.0    7.524689E-06
      400.0   1.214506E-05    500.0   1.345062E-05    600.0   1.463889E-05
      1000.0  1.821911E-05    1200.0  1.930557E-05    1400.0  1.992287E-05
      1600.0  2.007103E-05    1800.0  1.975006E-05    2000.0  1.895998E-05
      2300.0  1.689521E-05    2600.0  1.377492E-05    2800.0  1.110827E-05
      3000.0  7.972523E-06    3500.0  7.972523E-06    4000.0  7.972523E-06
      4500.0  7.972523E-06    5000.0  7.972523E-06    10000.0 7.972523E-06
/* NTAHC
      21
/* TPC
      10.0    2.898065E-01    20.0    2.801034E-01    100.0    2.215698E-01
      400.0   1.292197E-01    500.0   1.153525E-01    600.0   1.051000E-01
      1000.0  8.320165E-02    1200.0  7.827073E-02    1400.0  7.543361E-02
      1600.0  7.401961E-02    1800.0  7.361680E-02    2000.0  7.395834E-02
      2300.0  7.548648E-02    2600.0  7.789439E-02    2800.0  7.986116E-02
      3000.0  8.205527E-02    3500.0  8.829790E-02    4000.0  9.531862E-02
      4500.0  1.028728E-01    5000.0  1.108090E-01    10000.0 1.989056E-01
/* NTAGP
      - 1
/* TPG
      0.0      0.0
/****** SET NO. 2 (UO2)
      1
      0.0    2.99975E-3
      21
      10.0    3.357920E+02    20.0    3.581704E+02    100.0    4.810452E+02
      400.0   6.473518E+02    500.0   6.745613E+02    600.0   6.974353E+02
      1000.0  7.700964E+02    1200.0  8.016265E+02    1400.0  8.318369E+02
      1600.0  8.612598E+02    1800.0  8.901841E+02    2000.0  9.187769E+02
      2300.0  9.612590E+02    2600.0  1.003425E+03    2800.0  1.031418E+03
      3000.0  1.059343E+03    3500.0  1.128948E+03    4000.0  1.198363E+03
      4500.0  1.267661E+03    5000.0  1.336886E+03    10000.0 2.027806E+03
      1
      0.0      0.0
/****** SET NO. 3 (GRAPHIT)
      1
      0.0    5.999503E-3
      21
      10.0    2.860076E+02    20.0    2.982056E+02    100.0    3.955417E+02
      400.0   6.402986E+02    500.0   6.862375E+02    600.0   7.219421E+02
      1000.0  8.072800E+02    1200.0  8.314548E+02    1400.0  8.492385E+02
      1600.0  8.627424E+02    1800.0  8.732556E+02    2000.0  8.816057E+02
      2300.0  8.912324E+02    2600.0  8.984004E+02    2800.0  9.021885E+02
      3000.0  9.053628E+02    3500.0  9.112898E+02    4000.0  9.151938E+02
      4500.0  9.177424E+02    5000.0  9.193401E+02    10000.0 9.144038E+02
      1
      0.0      0.0
/****** END OF DATA

```

付録 C 原研大型計算機における JCL

```

//JCLG JOB
//JCLG EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER ?????3205,FU.ARAYA,?????.??
//      T.4 W.4 I.5 C.1
//      OPTP PASSWORD=??????
//FORT1 EXEC FORT77,SO='J3080.¥UNTCNA',A='ELM(DUMMY),OPTIMIZE(O)',
//      B='NOSOURCE,LINECOUNT(O),BYNAME',Q='.FORT'
//FORT2 EXEC FORT77,SO='J3080.¥SPLEDIT',A='ELM(*)',OPTIMIZE(O)',
//      B='NOSOURCE,LINECOUNT(O),BYNAME',Q='.FORT',DISP=MOD
//FORT3 EXEC FORT77,SO='J3205.SHECNTRL',A='ELM(*)',OPTIMIZE(O)',
//      B='NOSOURCE,LINECOUNT(O),BYNAME',Q='.FORT',DISP=MOD
//LINK EXEC LKED77
//RUN EXEC GO
//DATA EXPAND DISKTO,DDN=SYSIN,DSN='J3205.SHETEMP',
//      Q='.DATA(CONTCK3)'
//DISK01 EXPAND DISK,DDN=FT01F001
//FT04F001 DD DSN=J3205.SHECNTRL.SPLDATA,DISP=(NEW,CATLG,CATLG),
//      SPACE=(TRK,(50,10),RLSE),UNIT=TSSWK
//DISK09 EXPAND DISK,DDN=FT09F001
++
//

```