

JAERI-M

5531

LOFTY：冷却材強制循環能力喪失事
故解折コード

1974年2月

今西 肇*・江崎 正弘・三竹 晋

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

LOFTY：冷却材強制循環能力喪失事故解析コード

日本原子力研究所動力炉開発管理室

今西 肇，江崎正弘，三竹 晋

(1973年12月27日受理)

本コードは高温ガス冷却炉の冷却材強制循環能力喪失事故時のプラント動特性を解析するために開発された。このコードは既存のプラント動特性解析コードICARUS1に流動計算を追加し、強制循環能力喪失事故時のプラント動特性を解析できるようにしたものである。

本コードの特徴は以下のとおりである。

- (1) 解析の対象とするプラントの構成は原子炉，蒸気発生器，蒸気改質器およびこれらを結ぶ配管系と循環機で構成される1次冷却回路であり，炉外冷却ループが複数である場合にはその1ループのみをとり扱う。
- (2) 冷却材流動解析の基本式は1次冷却系ループに沿った1次元の冷却材流れに運動量保存則を適用して得る。
- (3) 冷却材は非圧縮性流体として扱う。
- (4) 冷却材温度については流れ方向に沿った分布を考慮している。
- (5) 冷却材物性値およびプラントを構成する各要素の各構造材料の物性値には温度依存性を考慮している。
- (6) 事故状態を表わす外乱としてガス循環機揚程の時間的変化を入力する。

本コードはFORTRAN-IVで書かれておりFACOM230-60で使用可能である。

LOFTY: A Computer code for Analyzing a "Loss of Forced Circulation" Accident of the Multi-purpose High Temperature Gas-Cooled Reactor

Hazimu IMANISHI*, Masahiro EZAKI, Susumu MITAKE
Office of Power Reactor Projects, JAERI
(Received December 27, 1973)

The code LOFTY is used for analyzing the interdependence of thermal, nuclear and coolant mass flow transient behaviours in a "loss of forced circulation" accident of the Multi-purpose High Temperature Gas-cooled Reactor (MHTGR). It's developed by the coupling of an original hydrodynamics code of one-dimensional incompressible fluid with the code ICARUS1 used for thermal and nuclear transient analysis of the MHTGR plant.

Features of the code are;

- (1) Thermal characteristics of plant components, reactor core, steam generator, steam reformer are analyzed by a unit cell model, and all the cooling loops are simplified into one loop.
- (2) In analysis of the hydrodynamics, the one-dimensional momentum equation is applied along the primary cooling loop.
- (3) Primary coolant is assumed to be incompressible.
- (4) The thermal properties of a coolant are taken as the functions of temperature and pressure.
- (5) The variation in circulator head is given as input.

The code is written in FORTRAN-IV Language and used with FACOM 230-60.

* Visiting researcher (Century Research Center Co., Ltd.)

目 次

1. はじめに	1
2. 解析モデル	3
2.1 解析モデルの範囲	3
2.2 基礎式	3
2.3 圧力損失	6
2.3.1 流路の摩擦圧力損失	6
2.3.2 流路形状変化による圧力損失	6
3. 計算コード	8
3.1 コードの構成	8
3.2 入力データ	8
3.3 出力	8
4. 計算例	9
5. 結 び	9
謝 辞	10
参考文献	10
Appendix A : Input Format	17

1 はじめに

原子炉プラントの安全設計は、平常運転時および運転中に予想されるいかなる状態にもプラントの構成機器が所定の性能を保ち、また万一重大な事故が発生したとしても、事故の拡大を防ぎ、早急に終結せしめ公衆に重大な災害をもたらさぬようになされねばならない。周辺公衆に大きな災害をもたらす事故のひとつとして大量の放射性物質の漏洩が考えられ、これに対して十分なる評価、検討がなされ、対策がとられなければならない。

現在、日本原子力研究所で設計研究が進められている多目的高温ガス実験炉プラントにおける大量の放射性物質の漏洩は、例えば炉心の異常高温およびその後の一次系冷却材の漏洩により生じ得る。炉心の異常高温は冷却材強制循環能力喪失事故あるいは冷却材減圧事故等の炉心冷却能力喪失による場合が最も厳しいものと考えられる。勿論、冷却材強制循環能力喪失事故は冷却材の漏洩とは限らないが、この事故は燃料からの核分裂生成物の漏洩の増大、構造材損傷による冷却材漏洩の可能性の増大などの危険性を有しているので重要な検討事項といえよう。さて、実験炉では循環機スティックによる冷却機能停止（循環機停止記録¹⁾によると軸受の故障が上位に入っており、本原子炉の如く高温の場合にはその可能性がより大きいと考えられる）に加えて電源喪失による冷却機能停止（循環機を電動機駆動とした為に発生が考えられる。開発中の Fort St. Vrain 炉では、蒸気タービン駆動としている為に発生し得ないと考えられる）の発生が考えられ、これらの冷却機能停止事故における炉心および各構成機器の温度上昇、冷却材の停滞あるいは逆流現象などに起因する異常高温点の発生、さらに炉心プレナム周辺構造材の損傷および通常運転時には低温である配管の損傷について検討が必要となる。なお、循環機スティックによる冷却機能停止事故については Fort St. Vrain 炉の安全解析²⁾においても LOFC (Loss of Forced circulation) Accident と称し、DBA (Design Basis Accident) として行っており、下向流を採用したガス冷却炉での重要な検討課題となっている。このような観点から冷却材強制循環系の機能が喪失される事故時におけるプラントの動特性を把握する本コードの開発を行った。

本コードは原子炉プラントの全エネルギーバランスを解いて温度計算を行うサブコードと冷却回路中の冷却材の運動量保存則を解いてその流動特性を計算するサブコードより成り立っているが、前者のエネルギーバランスを解くサブコードは既存のプラント動特性解析コード ICARUS 1 を修正したものである。本報告書では新たに付け加えられた流動特性計算を行う部分について主に述べる。したがって温度計算などを行う部分については ICARUS 1 の報告書³⁾を必要に応じて参照していただくこととし、以下に ICARUS 1 コードの内容の概略を記すにとどめる。

- (1) プラントの構成要素として、原子炉、改質器、蒸気発生器および配管系をとりあつかう。
- (2) 原子炉運転中の出力変動は 1 群 1 点近似の中性子動特性（遅発中性子は 6 群）でおこなう。原子炉停止後においては崩壊熱を取り入れることができる。
- (3) 各プラント構成要素（配管系は除く）の温度計算は、各要素の単位セルについておこなう。時間依存の 2 次元熱平衡式を差分方程式につ解く。流体の部分について炉心および蒸

気発生器では定常近似の熱平衡式を、改質器においては時間依存の熱平衡式を解く。

- (4) 配管系では流体をスラグ流とし、配管との間で熱の授受がないと仮定して、配管系の輸送遅れの模擬行なり。
- (5) 各物質の物性値は温度の関数として取り扱う。
- (6) 過渡特性解析に考慮できる外乱入力は反応度挿入、1次冷却材流量、蒸気発生器における給水流量および改質器における原料ガス流量等の時間的変化である。

2. 解析モデル

2.1 解析モデルの範囲

本コードはプラント動特性解析コード ICARUS 1 を基本にし、これに 1 次冷却材についての流動計算を加えたものである。対象とするプラントの構成要素は原子炉、改質器、蒸気発生器、循環機および配管系である。これらの要素により構成される一巡ループを対象とし、その全体のモデルは Fig. 2.1 に示されるようである。原子炉、改質器、蒸気発生器中の冷却材流路は多数の単位セル（あるいは、チャンネル）から構成されているが単位セル内の構造、単位セル内の冷却材の状態は全て同じと仮定し、ただ 1 々の単位セルで代表させる。また、配管系においては、同一機器を結ぶ並行した複数の系統は存在しないものとする。炉心の構造としてペブルベット型は解析の対象外とし、ブロック燃料型、又は棒状燃料型の炉心を取り扱う。

新たに付け加えた流動計算には次の仮定が設けられている。(1)冷却材の時間的圧力変化が小さいので、冷却材は非圧縮性流体として扱う。(2)エネルギー保存則では冷却材の流れの運動エネルギーに比べて内部エネルギーがきわめて大きい、したがって熱力学的な考察では運動エネルギーを省略し、ICARUS 1 コードでの熱平衡式から得られる温度をさらに補正することはしない。(3)1 次冷却系の一巡閉ループに沿った冷却材流に一次元の時間依存の運動量保存則を適用して冷却材流量の変動を計算する。(4)冷却材物性値の温度依存性を考慮する。(5)ループ中の冷却材インベントリの変化はないものとして扱う。(6)摩擦係数の算出においては冷却材流路の形状変化（例えば縮流、拡流、エルボ、ベンド等）の効果をも考慮する。(7)外乱としてガス循環機揚程変化および熱交換器 2 次側流量変化を入力として扱う。

2.2 基礎式

一次冷却ループの冷却材流に一次元の運動量保存則を適用し、流動計算を行う。

Euler の一次元運動方程式より次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho u] + \frac{\partial}{\partial x} [\rho u^2] = -g \rho \frac{\partial z}{\partial x} - g \tau_s \frac{s}{A_c} - g \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.1)$$

ここで、

ρ : 流体の比重量 (Kg/m³)

u : " 流速 (m/sec)

g : 重力加速度 (m/sec²)

τ_s : 流体のせん断応力 (Kg/m²)

s : 流管の円周 (m)

A_c : " 断面積 (m²)

p : " 圧力 (Kg/m²)

z : 重力方向の座標 (m)

x : 流路に沿った座標 (m)

冷却材通路を微小セグメントに分割し、(2.1)式を流路の任意のセグメント内(長さ l (m))で積分すると、

$$\int_0^l \frac{\partial}{\partial t} [\rho u] dx + \int_0^l \frac{\partial}{\partial x} [\rho u^2] dx = - \int_0^l \left(g \rho \frac{\partial z}{\partial x} + g \tau_s \frac{s}{A_c} + g \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx \quad (2.2.a)$$

となる。

ここで、連続方程式 $m = \rho u A_c$ (m : 重量流量 (Kg/sec)) を用いて、(2.2.a)を整理すると次式を得る。

$$l \left[\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{m^2}{A_c} \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_0} \right) \right] = -g A_c \bar{\rho} (z_l - z_0) - g \tau_s s l - g A_c (p_l - p_0) \quad (2.2.b)$$

ここで、

subscript 0 = セグメント入口

l = セグメント出口

$\bar{\rho}$ = セグメント内の平均比重量

(2.2.b)式の右辺第2項は摩擦圧力損失 ΔP_f を示し、摩擦係数 f を用いた次の式で表わせる。

$$\begin{aligned} \Delta P_f &= \frac{\tau_s s l}{A_c} \\ &= \frac{f l}{2 g D_e A_c} \frac{m^2}{\rho} \end{aligned}$$

ここで、 D_e は流管の等価直径 (m)

この関係を(2.2.b)式に代入し、セグメント内の圧力差 ΔP_i を求めると、

$$\begin{aligned} \Delta P_i &\equiv p_0 - p_l \\ &= \frac{l}{g A_c} \frac{\partial}{\partial t} [m] + \frac{m^2}{g A_c} \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_0} \right) + \bar{\rho} (z_l - z_0) + \frac{f l}{2 g D_e A_c} \frac{m^2}{\rho} \quad (2.3) \end{aligned}$$

となる。さらに流路の形状変化(縮流および曲り等)による圧力損失 ΔP_c (2.3節参照)を加えて、(2.3)式より1巡ループの流路の全圧力差をとれば、これは圧力の平衡から循環機の揚程 ΔP_p に等しい。したがって、

$$\Delta P_p = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\ell}{g A_c} \right]_i \frac{\partial}{\partial t} \langle m \rangle + \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{g A_c^2} \left(\frac{1}{\rho \ell} - \frac{1}{\rho_0} \right) \right]_i m^2 + \sum_{i=1}^n \left[\bar{\rho} (z_\ell - z_0) \right]_i + \sum_{i=1}^n \left[\frac{f \ell}{2g D_e A_c^2 \rho} m^2 + \Delta P_c \right]_i \quad (2.4)$$

ここで、 i : i 番目のセグメント
 n : 全セグメント数

となり、簡単化のために

$$U = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\ell}{g A_c} \right]_i \quad (2.5)$$

$$V(m) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{g A_c^2} \left(\frac{1}{\rho \ell} - \frac{1}{\rho_0} \right) \right]_i m^2 + \sum_{i=1}^n \left[\bar{\rho} (z_\ell - z_0) \right]_i + \sum_{i=1}^n \left[\frac{f \ell}{2g D_e A_c^2 \rho} m^2 + \Delta P_c \right]_i \quad (2.6)$$

とおくと、(2.4)式は

$$U \frac{\partial}{\partial t} \langle m \rangle = -V(m) + \Delta P_p(t) \quad (2.7)$$

となる。(2.6)式の右辺第1項は加速圧力損失、第2項は静圧、第3項は摩擦圧力損失である。

定常状態では(2.7)式の左辺を零として、定常の温度分布、流量より初期循環揚程を定める、即ち(2.7)式より

$$\Delta P_p(t_0) = V(m_0)$$

ここで、 t_0 : 初期時間
 m_0 : 初期流量

となる。

過渡現象の解析は循環機揚程の時間的変化を外乱とし(2.7)式の流動計算ならびに温度計算(ICARUS1を修正した部分で)を行う。循環機揚程変化を次のように表わすこととする。

$$\Delta P_p(t) = \Delta P_p(t_0) \cdot f(t)$$

ここで、 $f(t)$: 初期揚程に対する相対値を表わす関数

2.3 圧力損失

前節で述べた摩擦圧力損失 ΔP_f および形状変化による圧力損失 ΔP_c を求める式について概説する。

2.3.1 流路の摩擦圧力損失; ΔP_f

流路はなめらかな内表面をもつ円筒と仮定し、摩擦圧力損失係数は層流 ($Re \leq 3000$) と乱流 ($Re > 3000$) に分けてとり扱う。

- (1) $Re \leq 3000$ の場合 : ハーゲン・ポアズイユの式

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.9)$$

- (2) $Re > 3000$ の場合 : ニクラゼの式

$$f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \quad (2.10)$$

ここで, Re : レイノルズ数

摩擦圧力損失 ΔP_f は係数 f より次式で表わせる。

$$\Delta P_f = \frac{f \ell}{2g D_e A_c^2 \rho} m^2 \quad (2.11)$$

2.3.2 流路形状変化による圧力損失; ΔP_c

流体を非圧縮性と仮定し、実験式⁵⁾を参照して模擬する。

- (1) Bend による圧力損失 (Fig. 2.2(a)参照)

$$\Delta P_c = K \cdot C \cdot \frac{1}{2g \rho A_c^2} m^2 \quad (2.12)$$

ここで,

K : R/D および f によって定まる損失係数 (Fig. 2.3(a)参照)

C : θ および R/D によって定まる損失係数 (Fig. 2.3(b)参照)

- (2) Abrupt contraction に伴う圧力損失 (Fig. 2.2(b)参照)

$$\Delta P_c = K_c \cdot \frac{1}{2g \rho A_c^2} m^2 \quad (2.13)$$

ここで,

K_c : A_2/A_c によって定まる損失係数 (Fig. 2.3(c)参照)

- (3) Abrupt expansion に伴う圧力損失 (Fig. 2.2(c)参照)

$$\Delta P_c = \lambda \frac{1}{2g \rho A_1^2} m^2 \quad (2.14)$$

ここで, 損失係数 $\lambda = (1 - A_1/A_2)^2$

- (4) Contraction に伴う圧力損失 (Fig. 2.2(d)参照)

$$\Delta P_c = \lambda \cdot \frac{1}{2g \rho A_2^2} m^2 \quad (2.15)$$

ここで、 λ : θ によって定まる損失係数

例えば、 $\theta = 15^\circ$ のとき : $\lambda = 0.02$

$\theta = 22.5^\circ$ $\lambda = 0.04$

$\theta = 30^\circ$ $\lambda = 0.07$

(5) Expansion に伴う圧力損失 (Fig. 2.2(e) 参照)

$$\Delta P_c = (1 - \eta) \frac{1}{2g \rho A_1^2} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] m^2 \quad (2.16)$$

ここで、 η : θ および A_1/A_2 によって定まる損失係数 (Fig. 2.3(d) 参照)

(6) Elbow に伴う圧力損失 (Fig. 2.2.(f) 参照)

$$\Delta P_c = \lambda \frac{1}{2g \rho A^2} m^2$$

ここで、 λ : θ によって定まる損失係数 (Fig. 2.3(e) 参照)

3. 計算コード

3.1 コードの構成

本コードは原子炉プラントの熱計算コード ICARUS1 を修正して1次冷却系の流動計算を付加したものである。したがって、定常計算は従来通り ICARUS1 の定常計算オプションを用いて、初期流量と初期出力を与えて定常状態の温度分布を求め、この初期状態に対応する循環機の初期揚程 $\Delta P_p(t_0)$ を求める。過渡計算は循環機揚程の時間的変化 $f(t)$ を外乱として、冷却材流量および温度計算を行い、プラント状態の過渡変化を求める。

本コードの計算フローの概略を Fig. 3.1 に示す。以下に流動計算のために新たに付け加えたサブルーチンの内容を列記する。

FLOW：各機器および配管系の相対的位置（垂直方向）、配管系の大きさに関する入力を行う。

LOOP：各機器および配管系の圧力損失計算ルーチンを制御する。

COREA：炉心の圧力損失計算

GENER：蒸気発生器の圧力損失計算

FORME：改質器の圧力損失計算

EFFCT：配管系の圧力損失計算

ELBOW：elbow での圧力損失計算

CONT：contraction での圧力損失計算

EX：abrupt expansion での圧力損失計算

AMITER：bend での圧力損失計算

ABRUP：abrupt contraction での圧力損失計算

DIFFUSER：expansion での圧力損失計算

ELTHE：bend での圧損係数 C を求める。

AMDA：elbow での圧損係数 λ を求める。

FNEW：expansion での圧損係数 η を求める。

FKC：abrupt contraction での圧損係数 K_c を求める。

RAMDA：contraction での圧損係数 λ を求める。

ELO：bend での圧損係数 K を求める。

3.2 入力データ

入力データの一覧表とその内容を Appendix A に示す。

3.3 出力

全入力定数、各機器初期温度が出力され、その後は入力により指定された時間間隔により、その時刻毎に各温度ならびに流量などが出力される。すなわち、炉心については全出力、投入反応度、フィードバック反応度、制御棒による反応度、炉心内温度分布、炉心入口出口冷却材

温度であり、炉外については、改質器では温度分布、水蒸気およびメタンの反応量、蒸気発生器では温度分布およびクオリティ、配管系では温度分布がそれぞれ出力される。又同時に指定時間間隔毎に冷却材流量が出力される。

4. 計 算 例

LOFTYコードを用いて多目的高温ガス実験炉体系での計算を行った。この場合に使用されたプラント構成をFig. 4.1*に示す。外乱として循環機の揚程が時定数10秒でコーストダウンして0%まで変化した場合を想定し、原子炉スクラムは事故発生と同時に起こされると仮定した。改質器、蒸気発生器の二次側流量は初期定格値に保たれるとした。この結果をFig. 4.2に示す。この結果によると循環機揚程の低下とともに一次冷却材流量も急激に低下し約40秒で逆流現象が生じ、約60秒で定格流量の約10%の逆流量となるが、その後、ループ中の温度分布の平坦化が進むにつれその流量も減少し1%以下になることが認められる。一方、温度についてみると、逆流によって炉心上部へ移動した熱は上部反射体で吸収されるがその熱容量が大きい為温度上昇はゆるやかで、その量も大きくはない。したがって、逆流時の上部ノズルにおける冷却材温度の上昇もかなり緩慢で大きなものとならないことが認められる。

計算時間はFACOM 230-60で実時間の2倍の時間を要し、コア使用面積は約100K語である。

5. 結 び

多目的高温ガス炉の冷却材強制循環能力喪失事故時のプラント動特性を解析するためにコードFLOFTYの作成を行った。すなわち、冷却材流動特性を詳細に扱うことを目的として、プラントのエネルギーバランスを解く既存のプラント動特性解析コードICARUS1を修正し、これに冷却材の一次元の運動量保存則を解くサブコードを新たに付け加えることによって本コードの作成を行った。本コードではまず第一段階の解析手法として外部冷却ループを一系統で模擬し、また、循環機の特性格化を時間の関数で入力する方法により強制循環能力喪失の状態を扱った。

現段階までに得られた計算結果によると冷却材強制循環能力喪失事故時のプラント動特性の概要を把握する目的は満たされており、数値計算についても安定した解となっており、今後、実験炉の事故解析に用いる予定である。

しかしながら、本コードにおいて少々粗い近似を用いた点があることは否めない。次のような点で更に改良を加えるべき余地が残されている。

- (1) 異なる特性をもつ複数の外部冷却ループを模擬する。
- (2) 多数の冷却材通路より構成されている炉心内の自然対流に伴う熱伝達効果を取り入れる。
- (3) 循環機の特性格化方法を改良する。

* Fig. 4.1は第2次予備設計で考えられた構成である。図中に記載された数値は各構成要素(配管系を含む)の寸法(m)を示している。

温度であり、炉外については、改質器では温度分布、水蒸気およびメタンの反応量、蒸気発生器では温度分布およびクオリティ、配管系では温度分布がそれぞれ出力される。又同時に指定時間間隔毎に冷却材流量が出力される。

4. 計算例

LOFTYコードを用いて多目的高温ガス実験炉体系での計算を行った。この場合に使用されたプラント構成をFig. 4.1*に示す。外乱として循環機の揚程が時定数10秒でコーストダウンして0%まで変化した場合を想定し、原子炉スクラムは事故発生と同時に起こされると仮定した。改質器、蒸気発生器の二次側流量は初期定格値に保たれるとした。この結果をFig. 4.2に示す。この結果によると循環機揚程の低下とともに一次冷却材流量も急激に低下し約40秒で逆流現象が生じ、約60秒で定格流量の約10%の逆流量となるが、その後、ループ中の温度分布の平坦化が進むにつれその流量も減少し1%以下になることが認められる。一方、温度についてみると、逆流によって炉心上部へ移動した熱は上部反射体で吸収されるがその熱容量が大きい為温度上昇はゆるやかで、その量も大きくはない。したがって、逆流時の上部ノズルにおける冷却材温度の上昇もかなり緩慢で大きなものとならないことが認められる。

計算時間はFACOM 230-60で実時間の2倍の時間を要し、コア使用面積は約100K語である。

5. 結 び

多目的高温ガス炉の冷却材強制循環能力喪失事故時のプラント動特性を解析するためにコードLOFTYの作成を行った。すなわち、冷却材流動特性を詳細に扱うことを目的として、プラントのエネルギーバランスを解く既存のプラント動特性解析コードICARUS1を修正し、これに冷却材の一次元の運動量保存則を解くサブコードを新たに付け加えることによって本コードの作成を行った。本コードではまず第一段階の解析手法として外部冷却ループを一系統で模擬し、また、循環機の特性格化を時間の関数で入力する方法により強制循環能力喪失の状態を扱った。

現段階までに得られた計算結果によると冷却材強制循環能力喪失事故時のプラント動特性の概要を把握する目的は満たされており、数値計算についても安定した解となっており、今後、実験炉の事故解析に用いる予定である。

しかしながら、本コードにおいて少々粗い近似を用いた点があることは否めない。次のような点で更に改良を加えるべき余地が残されている。

- (1) 異なる特性をもつ複数の外部冷却ループを模擬する。
- (2) 多数の冷却材通路より構成されている炉心内の自然対流に伴う熱伝達効果を取り入れる。
- (3) 循環機の特性格化方法を改良する。

* Fig. 4.1は第2次予備設計で考えられた構成である。図中に記載された数値は各構成要素(配管系を含む)の寸法(m)を示している。

温度であり、炉外については、改質器では温度分布、水蒸気およびメタンの反応量、蒸気発生器では温度分布およびクォリティ、配管系では温度分布がそれぞれ出力される。又同時に指定時間間隔毎に冷却材流量が出力される。

4. 計算例

LOFTYコードを用いて多目的高温ガス実験炉体系での計算を行った。この場合に使用されたプラント構成をFig. 4.1*に示す。外乱として循環機の揚程が時定数10秒でコーストダウンして0%まで変化した場合を想定し、原子炉スクラムは事故発生と同時に起こされると仮定した。改質器、蒸気発生器の二次側流量は初期定格値に保たれるとした。この結果をFig. 4.2に示す。この結果によると循環機揚程の低下とともに一次冷却材流量も急激に低下し約40秒で逆流現象が生じ、約60秒で定格流量の約10%の逆流量となるが、その後、ループ中の温度分布の平坦化が進むにつれその流量も減少し1%以下になることが認められる。一方、温度についてみると、逆流によって炉心上部へ移動した熱は上部反射体で吸収されるがその熱容量が大きい為温度上昇はゆるやかで、その量も大きくはない。したがって、逆流時の上部ノズルにおける冷却材温度の上昇もかなり緩慢で大きなものとならないことが認められる。

計算時間はFACOM 230-60で実時間の2倍の時間を要し、コア使用面積は約100K語である。

5. 結 び

多目的高温ガス炉の冷却材強制循環能力喪失事故時のプラント動特性を解析するためにコードFLOFTYの作成を行った。すなわち、冷却材流動特性を詳細に扱うことを目的として、プラントのエネルギーバランスを解く既存のプラント動特性解析コードICARUS1を修正し、これに冷却材の一次元の運動量保存則を解くサブコードを新たに付け加えることによって本コードの作成を行った。本コードではまず第一段階の解析手法として外部冷却ループを一系統で模擬し、また、循環機の特性格化を時間の関数で入力する方法により強制循環能力喪失の状態を扱った。

現段階までに得られた計算結果によると冷却材強制循環能力喪失事故時のプラント動特性の概要を把握する目的は満たされており、数値計算についても安定した解となっており、今後、実験炉の事故解析に用いる予定である。

しかしながら、本コードにおいて少々粗い近似を用いた点があることは否めない。次のような点で更に改良を加えるべき余地が残されている。

- (1) 異なる特性をもつ複数の外部冷却ループを模擬する。
- (2) 多数の冷却材通路より構成されている炉心内の自然対流に伴う熱伝達効果を取り入れる。
- (3) 循環機の特性格化方法を改良する。

* Fig. 4.1は第2次予備設計で考えられた構成である。図中に記載された数値は各構成要素(配管系を含む)の寸法(m)を示している。

謝 辞

本報告の計算コード作成に当って種々の示唆と援助を賜った動力炉開発管理室の方々に深く感謝の意を表します。またコーディングにあたってはCRD社の源田健寿氏の御協力を得たことをここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 生井成文, "送風機と圧縮機"
- (2) "Fort St. Vrain Nuclear Generating Station Final Safety Analysis Report", DOCKET 50267
- (3) 江崎正弘ほか, "ICARUS. 1: 多目的高温ガス冷却プラント動特性解析コード", JAERI-M 5058, (1972)
- (4) M. Merrill and M. Troost, "BLOOST-5: A Combined Reactor Kinetics-Heat Transfer Code for The IBM7044", GAMD-6444, (1965)
- (5) J. L. Hobbs "Pressure Loss Computations in Incompressible Fluid Flow", APEX-754 (1961)
- (6) Ronald P. Rose etc., "Hydrodynamics Describing Acoustic Phenomena During Reactor Coolant System Blowdown", IDO-17254 (1967)

謝 辞

本報告の計算コード作成に当って種々の示唆と援助を賜った動力炉開発管理室の方々に深く感謝の意を表します。またコーディングにあたってはQRC社の源田健寿氏の御協力を得たことをここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 生井成文, "送風機と圧縮機"
- (2) "Fort St. Vrain Nuclear Generating Station Final Safety Analysis Report", DOCKET 50267
- (3) 江崎正弘ほか, "ICARUS. 1: 多目的高温ガス冷却プラント動特性解析コード", JAERI-M 5058, (1972)
- (4) M. Merrill and M. Troost, "BLOOST-5: A Combined Reactor Kinetics-Heat Transfer Code for The IBM7044", GAMD-6444, (1965)
- (5) J. L. Hobbs "Pressure Loss Computations in Incompressible Fluid Flow", APEX-754 (1961)
- (6) Ronald P. Rose etc., "Hydrodynamics Describing Acoustic Phenomena During Reactor Coolant System Blowdown", IDO-17254 (1967)

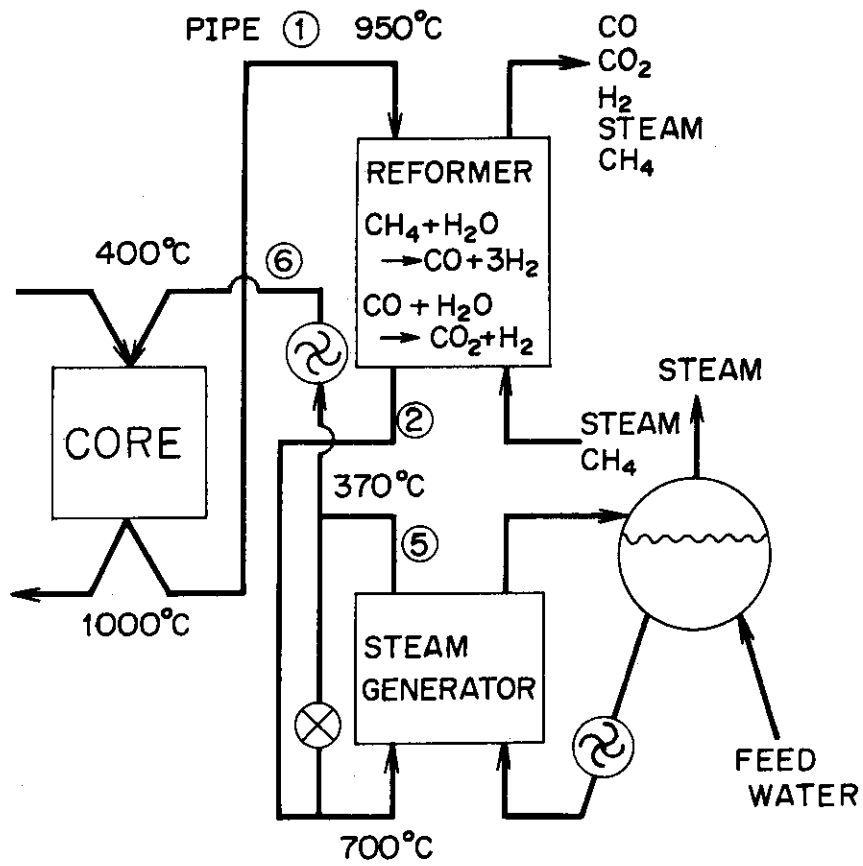


Fig.2.1 Simulation model of reactor plant.

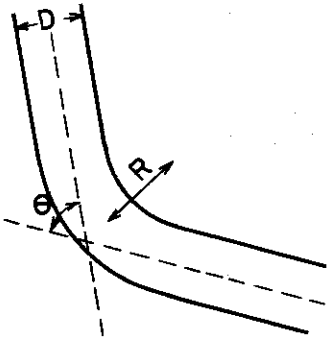


Fig.2.2(a) Bend.

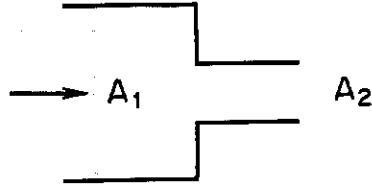


Fig.2.2(b) Abrupt contraction.

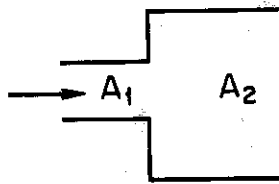


Fig.2.2(c) Abrupt expansion.

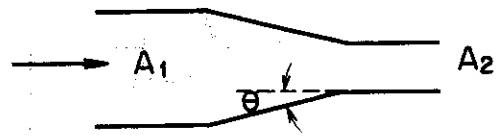


Fig.2.2(d) Contraction.

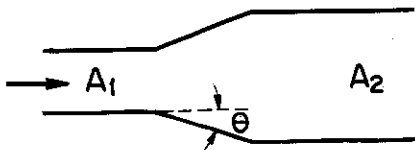


Fig.2.2(e) Expansion.

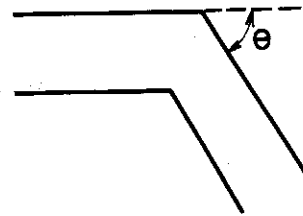


Fig.2.2(f) Elbow.

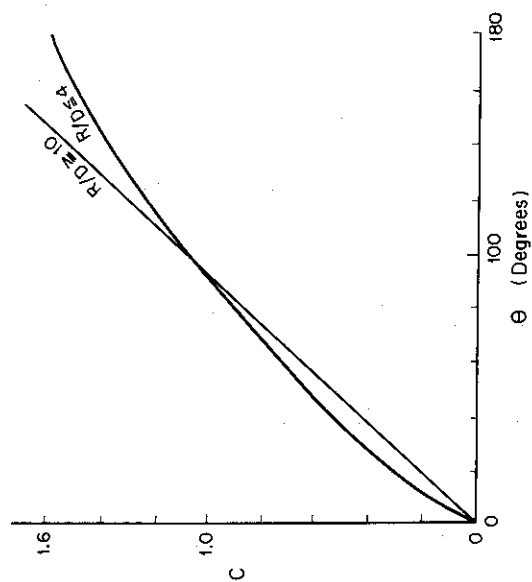


Fig.2.3(b) Pressure loss coefficient of bend.

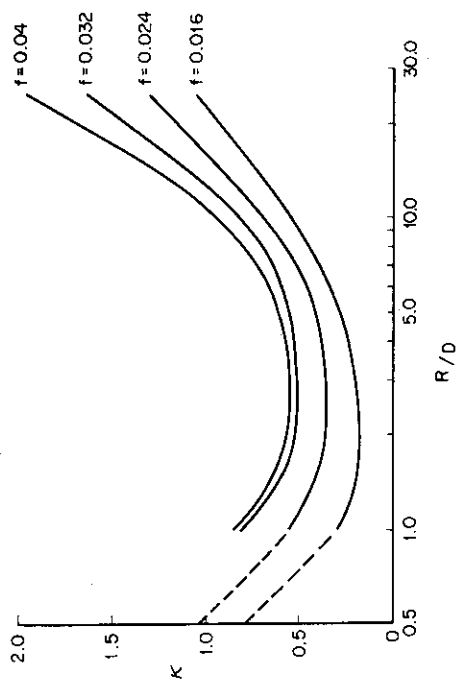


Fig.2.3(a) Pressure loss coefficient of bend.

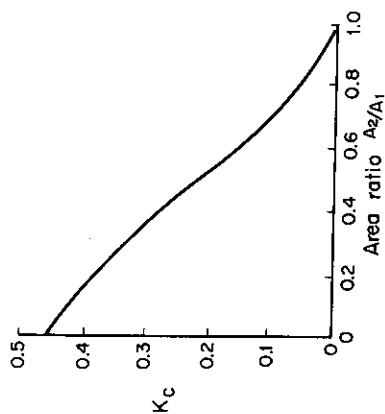


Fig.2.3(c) Pressure loss coefficient of abrupt contraction.

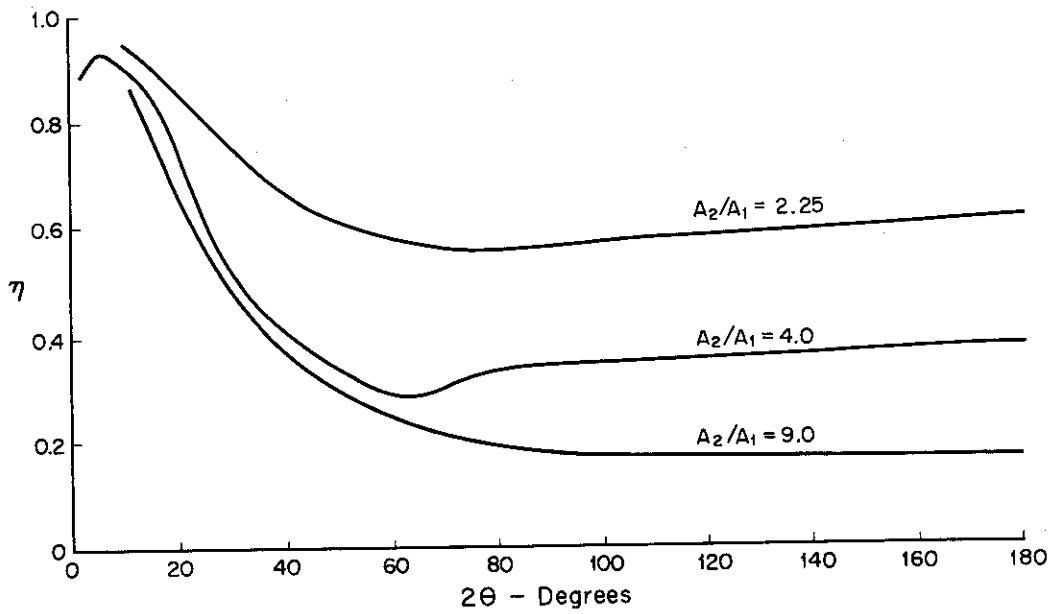


Fig.2.3(d) Pressure loss coefficient of expansion.

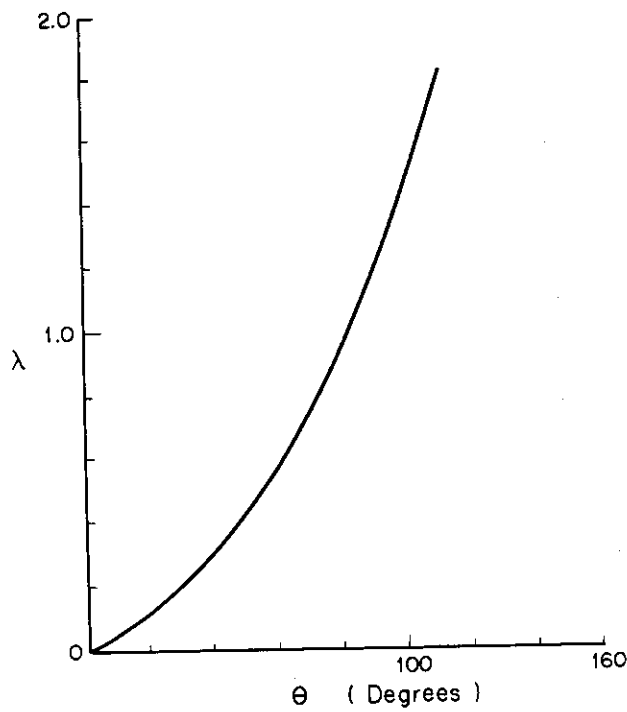


Fig.2.3(e) Pressure loss coefficient of elbow.

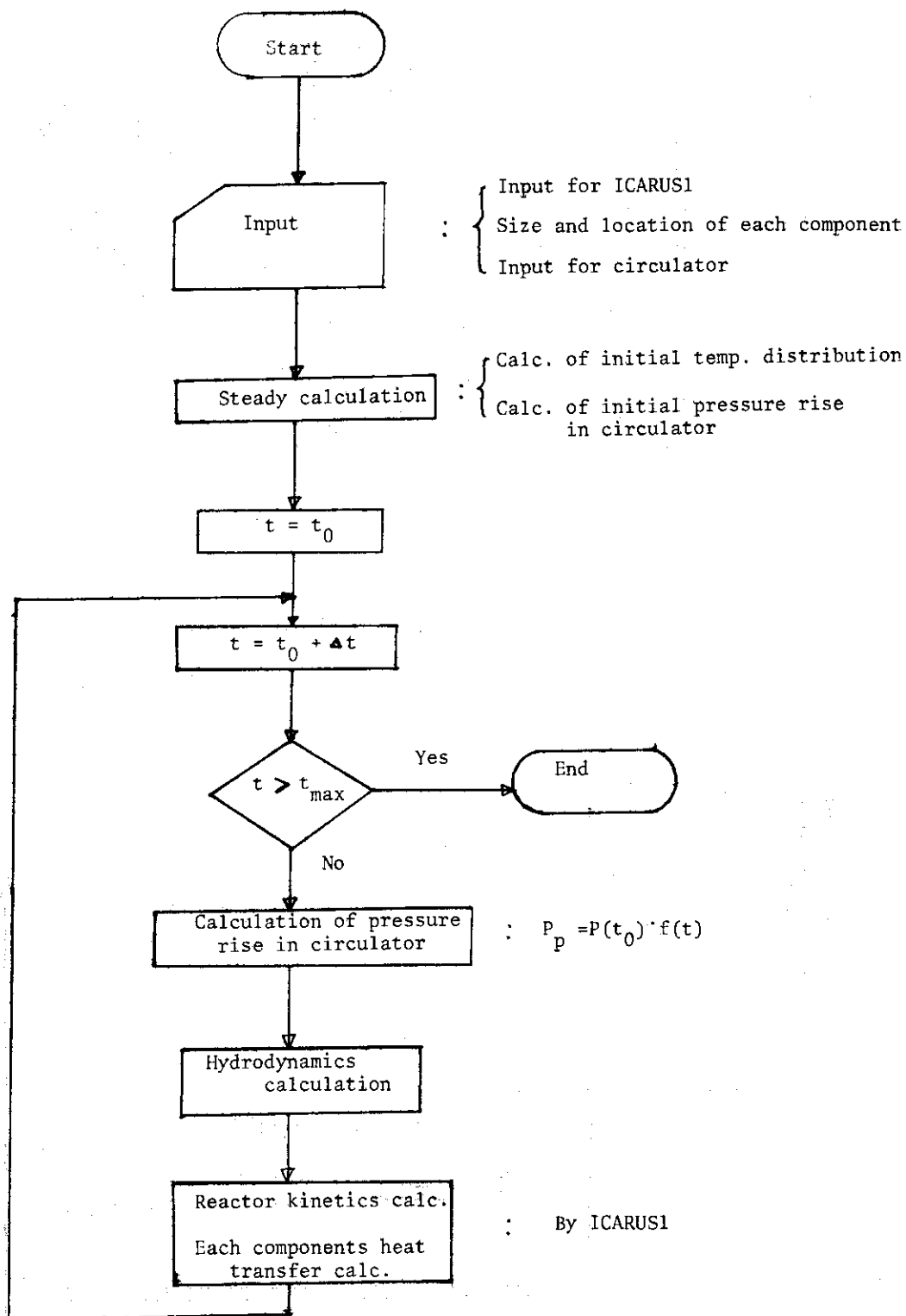


Fig.3.1 Flow chart of calculation (LOFTY).

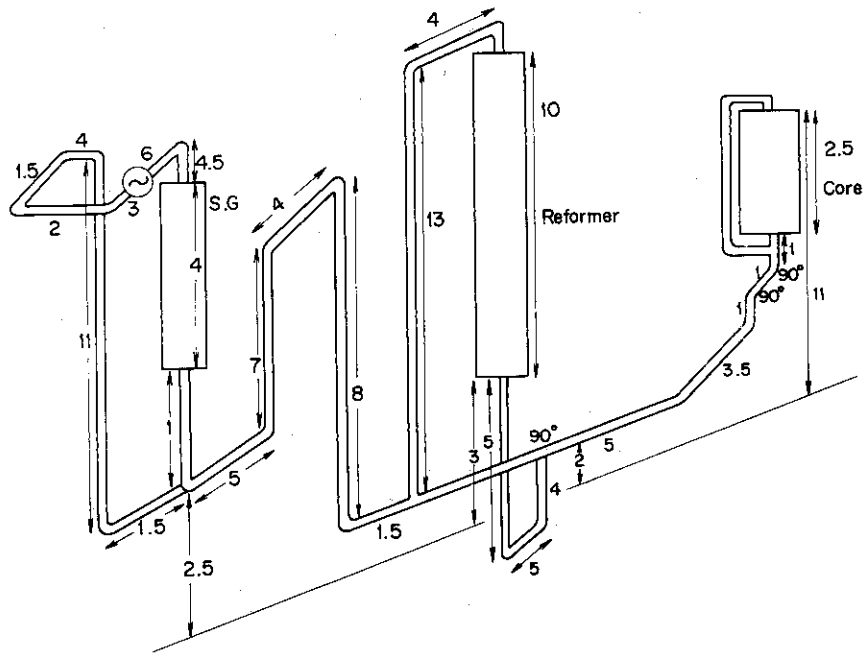


Fig.4.1 Plant model for test calculation.

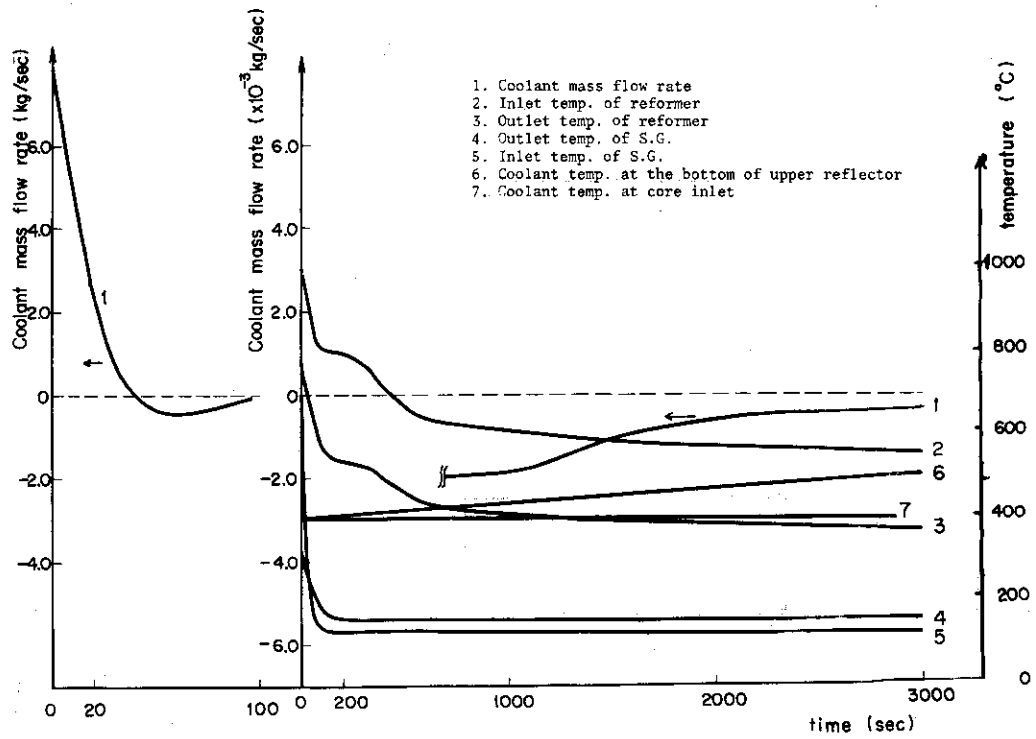


Fig.4.2 Temperature and coolant mass flow transients of test calculation.

Appendix A : Input Format

The input data are supplied by cards and the inputs are grouped in six as follows:

1. General data for the reactor plant
2. The data for the piping system
3. The data for the circulator
4. The data for the steam generator
5. The data for the steam reformer
6. The data for core

Initial temperature data are computed by following method: for cases where the initial temperature distribution is not known, it is possible to run the ICARUS.1 code with arbitrary initial temperatures as a pure heat transfer code omitting any disturbance input to the kinetics section, and obtain a temperature distribution appropriate to the initial power conditions for which kinetics problems will be done later.

1. General data for the reactor plant

The reactor plant model is based upon four components as follows: the core, the reformer, the steam generator and the recuperator. The order of components from the core outlet is specified by ILAY. The format for this group is (2I10).

Card type No.	Columns	Fortran name	Description
1.1	1-10	ILAY	Must be input -1
	11-20	ISGTYP	Must be input 1
1.2	1-10	NLOOP	Number of cooling loops
	11-20	NFUEL	Number of fuel pins
Eight blank cards must be supplied here			

2. The data for the piping systems

(1) Flow conditions data

Card type No.	Column	Fortran name	Description
2.1	1-12	ZEROM	This card is supplied in format (4E12.5, I12) Steady state total primary coolant flow rate in Kg/sec

Card type No.	Column	Fortran name	Description
	13-24	PZERO	Steady state pressure of the primary coolant in Kg/cm ²
	25-36	TSTART	Current time to restart the problem in sec
	37-48	PZEROP	Pressure head of circulator in Kg/m ² (if IRSTT=0, this data need not to be supplied)
	49-60	IRSTT	Enter 1 for the calculation of the steady state pressure head of circulator

(2) Data for the system 1 and 2.

(i) No. of segments.

Card type No.	Column	Fortran name	Description
2.2.1	1.6	NSECP1	This card is supplied in format (2I6) Number of mesh points along the flow direction in piping 1 (no. of segments=NSECP1-1)
	7-12	NSECP2	Number of mesh points along the flow direction in piping 2 (no. of segments=NSECP2-1)

(ii) Type and dimensions of segments in system 1.

2.2.2 First card group : ((ITYPE1(I), DELTL1(I), THETL1(I), R1(I), I=1, NSEC1-1))

ITYPE1(I) : Type no. Ith segment specification in piping 1

=1 straight type

=2 elbow type

=3 bend type

=4 expansion type

=-4 contraction type

=5 abrupt expansion type

=-5 abrupt contraction type

DELT1(I) : Length of Ith segment in piping 1 in m

THET1(I) : Angle (θ) of Ith segment in piping 1 in degree

R1(I) : Radius (r) of Ith segment in piping 1 in m

This card is supplied in format (I10, 3F10.0, I10, 3F10.0)

2.2.3 Second card group : ((PIAA1(J,I), HZ1(J,I)), I=1, NSECP1-1), J=1,2)

PIAA1(1,I) : Inlet cross sectional area of Ith segment in piping 1 in m^2

PIAA1(2,I) : Outlet cross sectional area of Ith segment in piping 1 in m^2

HZ1(1,I) : Relative height at the inlet of Ith segment in piping 1 in m

HZ1(2,I) : Relative height at the outlet of Ith segment in piping 1 in m

This card is supplied in format (8F10.0)

2.2.4 Thid card group : ((DE1(J,I), I=1, NSECP1-1), J=1,2)

DE1(1,I) : Equivalent diameter at the inlet of Ith segment in piping 1 in m

DE1(2,I) : Equivalent diameter at the outlet of Ith segment in piping 1 in m

(iii) Type and dimensions of segments in the system 2.

2.2.5

2.2.6 These data are supplied in the same manner as the piping 1

2.2.7

(iv) Previously punched temperature cards or arbitrary initial temperature cards.

All of this input is supplied in 5 word, 12 column format (5E12.5)

2.2.8 First card group : (TMP1(J), J=1, NSECP1)

Data input of initial temperature distribution in piping 1

2.2.9 Second card group : (TMP2(J), J=1, NSECP2)

Data input of initial temperature distribution in piping 2

Three blank cards must be supplied.

(3) Data for the system 5 and 6.

Data input for the piping 5, 6 are here in the same manner as the piping 1, 2. Label of the pipings are showed in Fig. 2.1.

3. Data input for the circulator

3.1 First card : NSTEP in format (I10)

Number of entries in the circulator pressure head table.

3.2 Second cards group : (TP(I), I=1, NSTEP) in format (8F10.0)

The circulator pressure head table. Enter in sequence $t_1, \Delta P_p, t_2, \Delta P_p,$ etc. Where t is in sec and ΔP_p is relative value to initial circulator pressure head.

4. The data for the steam generator and turbine.

(1) No. of segments and dimensions.

Card type No.	Column	Fortran name	Description
4.1.1	1-10	HSI	Relative height at the inlet of the S.G.
	11-20	HSO	Relative height at the outlet of the S.G.
4.1.2			Two cards are supplied in format (6I5, 5E10.5)
	1-5	NSEC1	Number of mesh points along the flow direction in the evaporator
	6-10	NSEC2	Number of mesh points along the flow direction in the superheater (zero if no superheater is used)
	11-15	NSEC3	Number of mesh points along the flow direction in the reheater (zero if no reheater is used)
	16-20	NEPIPE	Number of the evaporator tubes
	21-25	NSPIPE	Number of the superheater tubes (zero if no superheater is used)
	26-30	NRPIPE	Number of the reheater tubes (zero if no superheater is used)
	31-40		Not used
	41-50		Not used
	51-60	EL	Length of the evaporator tube
	61-70	SL	Length of the superheater tube
	71-80	RL	Length of the reheater tube

4.1.3	1-10		Not used
	11-15	II2	Number of entries in the data input table of disturbance for feed water, maximum number =100. (If this table is not used, enter 0.)
	16-70		Not used
	71-80		Ratio of the bypass flow rate to the total flow rate in the primary coolant flow.

(2) Disturbance data input table for feed water.

(TIM1(I), ZTCIN1(I), FLOWC(I), PHC1(I), I=1, II2) These cards are supplied in format (4E10.5). If II2 is not zero, enter the data in sequence TIM1(1), ZTCIN1(1), FLOWC(1), PHC1(1), TIM1(2), ZTCIN1(2), FLOWC(2), PHC2(2), etc.. If II2 is zero, these cards are not required.

where

TIM1 = time in sec

ZTCIN1 = inlet temperature of feed water in °C

FLOWC = total flow rate of feed water in kg/sec

PHC1 = pressure of steam in the header in kg/cm²

If this table is not used, the steady state values must be supplied.

All of the input on following cards is supplied in format (8E10.5).

If data does not require the total value, each data input on the following cards is specified for one unit cell.

(3) The data input for the evaporator.

4.3.1	1-10	EAH	Hydraulic cross-sectional area in the primary coolant region in m ² .
	11-20	ESH	Linear surface area along the primary coolant boundary associated with one point in m ² .
	21-30	EDH	Hydraulic equivalent diameter of the primary coolant in m.
	31-40	ELAM	Radial thermal conductivity of the metal tube in kcal/m·sec. °C.
	41-50	ECM	Specific heat of the metal tube in kcal/kg.

	51-60	ERM	Density of the metal tube in kg/m^3 .
	61-70	EAM	Cross-sectional area in the metal region of tube in m^2 .
	71-80	EDM	Thickness of the metal tube in m.
4.3.2	1-10	EAC	Hydraulic cross-sectional area in water (steam) region in m^2 .
	11-20	EDC	Hydraulic equivalent diameter of water (steam) region in m.
	21-30	ESD	Linear surface area along water boundary associated with one mesh point in m^2 .
	31-40	SSE	Steady state slip ratio.
	41-80		Not used
4.3.3	1-10		Not used
	11-20	EPCO	Steady state pressure in header in kg/cm^2 .
	21-30		Not used
	31-40	EWCO	Steady state total feed water flow rate in kg/sec .
	41-50		Not used
	51-60		Steady state feed water inlet temperature in $^{\circ}\text{C}$.
	61-80		Not used

Previously punched temperature cards or arbitrary initial temperature cards

4.3.4 First card group: (ETH1(J), J=1, NSEC1)

Initial temperature distribution in the primary coolant region in $^{\circ}\text{C}$.

4.3.5 Second card group: (ETM1(J), J=1, NSEC1)

Initial temperature distribution in the metal region in $^{\circ}\text{C}$.

4.3.6 Third card group: (ETC1(J), J=1, NZSEC1)

Initial temperature distribution in the water (steam) region in $^{\circ}\text{C}$.

4.3.7 Fourth card group: (EX1(J), J=1, NZSEC1)

Initial steam quality distribution.

(4) The data input for the superheater.

Data input for the superheater are in the same manner as ascending sequence. If no superheater is used, three blank cards must be supplied.

(5) The data input for the steam generator header.

4.5.1			Only this card is supplied in format (I5, 7E10.5)
	1-5	NOPHEd	If 1.0: Steam flow rate at the header outlet is specified by input WOUHE. If 2.0: Steam flow rate at the header outlet is equal to the value at header inlet.
	6-15	WOUHE	Steady state total steam flow rate at header outlet in kg/sec.
	16-25	TOUHEd	Steady state steam outlet temperature in °C.
	26-35	VHE	Volume of the header in m ³ .
	36-45	PHO	Steady state pressure in the header in kg/cm ² .
	46-55	THEd	Steady state mean steam temperature in the header in °C.
	56-65	POUHE	Steady state pressure at the header outlet in kg/cm ² .
66-75	TINHEO	Steady state steam temperature at the header inlet in °C.	
4.5.2	1-10	WINHE1	Steady state total steam flow rate at the header inlet in kg/sec.
	11-20	PINHE	Steady state steam pressure at the header inlet in kg/cm ² .
	21-80		Not used.

If no header is used, two blank cards must be supplied.

(6) The data input for the steam turbine.

4.6.1	1-10	ETB	Steady state power of turbine in kcal/sec.
	11-20	DELPT	Steady state pressure drop in turbine in kg/cm ² .
	21-30	TINTB	Steady state steam inlet temperature in °C.
	31-40	PINTB	Steady state steam inlet pressure in kg/cm ² .
	41-50	TOUTB1	Steady state steam outlet temperature in °C.
	51-80		Not used

If no steam turbine is used, one blank card must be supplied.

(7) The data input for the reheater.

Data input for the reheater are in the same manner as the evaporator data input sequence. If no reheater is used, three blank cards must be supplied.

5. The data input for the reformer.

All of the input on following cards is supplied in format (8E10.5)

Card Type No.	Column	Fortran name	Description
5.1	1-10	HZI	Relative height at the inlet of the reformer
	11-20	HZO	Relative height at the outlet of the reformer.
5.2			Only this card is supplied in format (6I5)
	1-5	NZSECR	Number of the mesh points along the coolant flow direction.
	6-25		Not used.
	26-30	NNPIPE	Number of the elements.
5.3	1-10	ZLR	Length of the element tube in m.
	11-20		Not used
	21-30	DT	Inside diameter of element tube in m. (Equivalent diameter in case of annular tube.)
	31-40	DP	Average diameter of the catalyst pellet in m.

	41-50	ROCAT	Density of the catalyst in kg/m^3 .
	51-60	CCAT	Specific heat of the catalyst in kcal/kg .
	61-80		Not used.
5.4	1-10	CH4M	Molecular weight of methane.
	11-20	HZOM	Molecular weight of steam.
	21-30	COM	Molecular weight of carbon monoxide.
	31-40	H_2M	Molecular weight of hydrogen.
	41-50	CO2M	Molecular weight of carbon dioxide.
	51-60	CH4SU	Sutherland constant of methane.
	61-70	H2OSU	Sutherland constant of steam.
	71-80	COSU	Sutherland constant of carbon monoxide.
5.5	1-10	H2SU	Sutherland constant of hydrogen.
	11-20	CO2SU	Sutherland constant of carbon dioxide.
	21-80		Not used.

If data does not require the total value, data input on the following cards are specified for one unit cell.

5.6	1-10	ZALR	Cross-sectional area in the guide sleeve region in m^2 .
	11-20	ZLAML	Radial thermal conductivity of the guide sleeve in $\text{kcal}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{sec}$.
	21-30	ZROD	Density of the guide sleeve in kg/m^3 .
	31-40	ZCML	Specific heat of the guide sleeve in kcal/kg .
	41-50	ZDLR	Thickness of the guide sleeve in m.
	51-60	ZSO	Linear surface along the primary coolant boundary associated with one point in guide sleeve in m^2 .
	61-80		Not used.
5.7	1-10	ZAMR	Cross-sectional area in the outer tube in m^2 .

	11-20	ZLAMM	Radial thermal conductivity of the outer tube in kcal/m. ^o C.sec.
	21-30	ZROM	Density of the outer tube in kg/m ³ .
	31-40	ZCMR	Specific heat of the outer tube in kcal/kg.
	41-50	ZDMR	Thickness of the outer tube in m.
	51-80		Not used.
5.8	1-10	ZAN	Cross-sectional area of the inner tube in m ² .
	11-20	ZLAMN	Radial thermal conductivity of the inner tube in kcal/m. ^o C.sec.
	21-30	ZRON	Density of the inner tube in kg/m ³ .
	31-40	ZCN	Specific heat of the inner tube in kcal/kg.
	41-50	ZDN	Thickness of the inner tube in m.
	51-80		Not used.
5.9	1-10	ZA1	Hydraulic cross-sectional area in the primary coolant region in m.
	11-20	ZS1	Linear surface area along the primary coolant boundary associated with one point in outer tube in m ² .
	21-30	ZWHOR	Steady state total flow rate of the primary coolant in kg/sec.
	31-40	ZDEH	Hydraulic equivalent diameter of the primary coolant in m.
	41-50	TIN1	Steady state primary coolant inlet temperature in ^o C.
	51-80		Not used.
5.10	1-10	ZA2	Hydraulic cross-sectional area in the gaseous mixture region in m ² .
	11-20	ZS2	Linear surface along the gaseous mixture boundary associated with one mesh point in outer tube in m ² .

	21-30	ZS3	Linear surface area along gaseous mixture boundary associated with one point in inner tube in m^2 .
	31-40	ZWC02	Flow rate of gaseous mixture in kg/sec element.
	41-50	ZDEC1	Hydraulic equivalent diameter in the gaseous mixture region in m.
	51-60		Not used.
	61-70	CAP	1.0 - R: R=packing fraction of catalyzer.
	71-80	TIN2	Gaseous mixture inlet temperature in $^{\circ}C$.
5.11	1-10		Not used.
	11-20	ZWINC	Flow rate of feed methane in kg/sec element.
	21-30	ZWINH	Flow rate of feed steam in kg/sec element.
	31-40	GMOLC	Flow rate of feed methane in gmol/sec element.
	41-50	GMOLH	Flow rate of feed steam in gmol/sec element.
	51-60	P2	Pressure of gaseous mixture in kg/cm^2 .
	61-70	GPA	A bugger factor which multiplies all values of four feed gas flow rates mentioned above. Enter 1.0 to use the above original value.
	71-80		Not used.
5.12	1-10	ZA3	Hydraulic cross-sectional area in the return region of producted gas in m^2 .
	11-20	ZS4	Linear surface along producted gas boundary associated with one point in inner tube in m.
	21-30	ZWC03	Flow rate of producted gas in kg/sec element.
	31-40	ZDEM	Hydraulic equivalent diameter in the return region of producted gas in m.
	41-50	P3	Pressure of producted gas in kg/cm^2 .
	51-80		Not used.

Previously punched temperature cards or arbitrary initial temperature cards.

- 5.13 First card group: (TB1(J), J=1, NZSEC)
Initial temperature distribution in the primary coolant region in °C.
- 5.14 Second card group: (TB3(J), J=1, NZSEC)
Initial temperature distribution in the reaction bed region of gaseous mixture in °C.
- 5.15 Third card group: (TB3(J), J=1, NZSEC)
Initial temperature distribution in the return region of produced gas in °C.
- 5.16 Fourth card group: (TLB(J), J=1, NZSEC)
Initial temperature distribution in the guide sleeve in °C.
- 5.17 Fifth card group: (TMB(J), J=1, NZSEC)
Initial temperature distribution in the outer tube in °C.
- 5.18 Sixth card group: (TNB(J), J=1, NZSEC)
Initial temperature distribution in the inner tube in °C.
- 5.19 Seventh card group: (BETA(J), J=1, NZSEC)
Initial extent distribution of methane and steam reforming reaction in reaction bed region.

6. The data input for core

(1) The heat transfer data input

All of this input is supplied in 6 word, 12 column format (6E12.4). Blank cards are used between sets of data to indicate the last of particular type of card. Dimensions are supplied in inches, temperatures in degrees F, and heat transfer coefficients to sinks in Btu/hr.ft².F. The order of the cards is as follows;

Card type No.	Column	Description
Blank card		
6.1	1	<u>Title cards</u> The integer 2 must be supplied on the first card. (This code is applicable only to problems for RZ geometry.)

	2(1)-72	At least one or as many title as desired may be supplied. Each title card may contained any information.
Blank card		
6.2		<p><u>Radial gridline cards</u></p> <p>Supply radii in inches in ascending sequence. At least 5 gridlines must be given and 2 grindlines must be given outside the higher radial gridline of intermediate coolant region, so 2 radial temperature points must be given within outer moderator area. Initial radius is zero unless annular fuel element is used, in which case the first radius to be entered. Maximum number is 14.</p>
Blank card		
6.3		<p><u>Axial gridline cards</u></p> <p>Same requirements as for radial. Maximum number is 19.</p>
Blank card		
ADD.1	1-10	Cross-sectional area of coolant in m^2
	11-20	Equivalent diameter of coolant in m
ADD.2		<p><u>Relative height cards</u></p> <p>Supply relative height of each mesh point in core. Dimension is m, and, format is (8F10.0)</p>
6.4		<p><u>Region specification cards</u></p> <p>Two cards are required per region.</p>
6.4.1	1-12	Lower radial boundary-inches
	13-24	Higher radial boundary-inches
	25-36	Lower axial boundary-inches
	37-48	Higher axial boundary-inches
	49-60	Solid material number
		<u>Second card</u> (which is required even if there is no gap)
6.4.2	1-12	Radial gap width on high index side of region-inches. May be left blank if there is no gap.

	13-24	Radial gap gas material number. May be left blank if is no gap.
	25-36	Axial gap width on high index side of region-inches.
	37-48	Axial gap gas material number. (Repeat this sequence for each region.)

Blank card

6.5	<p><u>Initial temperature distribution cards</u></p> <p>Each card specifies an area of constant temperature bounded by 2 radial and two axial gridlines. At least one card must be given. There is no upper limit to these cards and subsequent cards may overlay previous ones. These cards are also used to specify constant temperature sinks as a boundary conditions. To do this the two radial gridlines given are equal and correspond to an outside boundary. The specified temperature is then assigned to the sink and the heat transfer coefficient supplied is assigned. These assignments apply over the axial range specified on the same cards.</p>	
	1-12	Lower radial temperature region boundary-inches.
	13-24	Higher radial temperature region boundary-inches.
	25-36	Lower axial temperature region boundary-inches.
	37-48	Higher axial temperature region boundary-inches.
	49-60	Temperature of the region or sink (^o F)
	61-72	Heat transfer coefficient to sink if required Btu/hr.ft ² . ^o F.

Blank card

6.6	<p><u>Coolant data cards</u></p> <p>Three cards are required for each outside boundary having heat removal by a coolant flow.</p> <p><u>First card</u></p>	
	1-12	Coolant number (1.0 for intermediate, 2.0 for inner)

13-24	1st Reynolds number limit RE1	$H_A(X)$ is used $H_B(X)$ is used $H_C(X)$ is used
25-36	2nd Reynolds number limit RE2	
37-48	3rd Reynolds number limit RE3	
49-60	4th Reynolds number limit RE4	
Supply two blank cards.		

Blank card

6.7	<u>Fuel region designation card</u>	
	<p>This card specifies the area within the temperature map to be considered as fuel for purposes of temperature averaging. Averaging is by volume assuming uniform moderator density outside the fuel region which is specified by a ratio. The area specified must be continuous but may include several RAT regions if all of them have the same density.</p>	
1-12	Number of lowest axial temperature point within fuel area.	
13-24	Number of highest axial temperature point within fuel area.	
25-36	Number of innermost radial temperature point within fuel area.	
37-48	Number of outermost radial temperature point within fuel area.	
49-60	Ratio of moderator density in fuel region to moderator density in non-fuel regions. (Not that temperature point numbers are to be specified and not gridline numbers.)	

Blank card

6.8	<u>Previously punched temperature cards</u>	
	<p>The preliminary run for the calculation of the initial temperature distribution will punch on cards a set of temperatures which are inserted at this point when running kinetics problems.</p>	

(These cards are also punched at the end of a kinetics problem.)

Blank card

(This one must be supplied only if no previously punched temperatures are used.)

6.9

Function parameter cards

Three cards are supplied here giving parameters which may be used in defining the functions in the DATA subroutine.

6.9.1

First card

1-72

Numerical values of A1 through A6, 6 words/card.

6.9.2

Second card

1-72

1-72

Same for A7-A12.

6.9.3

Third card

1-72

Same for A13-A18.

(If no parameters are needed, three blank cards must be supplied.)

(2) The kinetics data input

All quantities are given fixed addresses by means of location numbers.

The format is as follows:

Col. 1 Blank (except for last card of kinetics set which has a 1 punch).

Col.2-5 Location number of first word on card.

Col. 7 Number of words on this cards.

Col.8-71 Up to seven words in 9 column field (7E9.4).

The data required is the following. The horizontal lines indicate convenient groupings on the cards.

Location Number	Fortran Name	Description
1	PB	Initial power level of entire reactor-megawatts
2	SOURCE	Constant source term if present-megawatts/sec (Units of PB and SOURCE must be consistent).

3	TEND	Time to end the problem-secs.
4	POWDEN	Average power density in fuel region of average fuel element-Btu/hr ft ³ (Must be consistent with PB supplied above.)
5	GENTIM	Prompt neutron generation time-secs (Λ in equation 1)
6-11	ALAM(I)	Delayed neutron precursor decay constants λ_i -sec ⁻¹ i = 1-6
12-17	BETA(I)	Delayed neutron yield β_i for i = 1-6
18	H	Initial time step to use in Runge-Kutta integration-secs (.001 sec is typical).
19	SMALLH	Minimum time step to use Runge-Kutta integration-secs (.00001 sec is typical).
20	Q1	Runge-Kutta accuracy criteria.
21	Q2	Runge-Kutta accuracy criteria.
22	DELTMX	Maximum ΔT fuel to be allowed before calling RAT-°C.
23		Not used.
24	TEMPTI	Number of entries in longest temperature coefficient table. By entry is meant a pair of associated numbers.
25-84	TABA	Fuel temperature coefficient table. Enter in sequence $T_1, \Delta\rho_1, T_2, \Delta\rho_2,$ etc where T is in °C and $\Delta\rho_i = \int_{T_1}^{T_i} \text{Fuel}(T) dT$. After the initial average fuel temperature is computed by RAT, the table supplied is renormalized so that $\Delta\rho = 0.0$ at this initial temperature. Subsequent reactivity exchanges are measured relative to this temperature. The table supplied should cover the entire range of temperature possible (exceeding the range of this or any other table can be an expensive error). The code subtracts values of $\Delta\rho$ in the kinetic equation so that positive table entries should be given for a negative temperature coefficient.

85-144	TABD	Moderator temperature coefficient table. $\Delta\rho$ to be entered for T_i is $\Delta\rho_i = \int_{T_1}^{T_i} \frac{d\rho}{dT} dT$.
145-333	AVAIL(1)	This is a block of numbers available in the kinetics Common BLI for use as either input variables or internal variables for future modifications. The ones presently in use are listed here.
146	AVAIL(2)	Ratio of inner flow rate to total flow rates: only needed for annular fuel elements with internal coolant.
147	AVAIL(3)	Temperature map print index. Map of all fuel element and coolant temperatures is printed every time the number of RAT time steps exceeds AVAIL(3).
148-150	AVAIL(4-6)	Time point at which to start using the next time step Δt_i .
152-155	AVAIL(8-11)	Time steps Δt_i . These have two uses. The first use is in calling the RAT heat transfer routines. During the intervals of time specified in AVAIL (4-6) the corresponding Δt_i will be used for XMTIME (see text) and RAT will be called at least every Δt_i seconds. (It may be called more often as a result of the temperature test DELTMX). The second use is to specify the time mesh to be used when running the code as a steady state heat transfer problem.
159	AVAIL(15)	Enter 1.0 for steady state temperature calculation.
160	AVAIL(16)	A bugger factor which multiplies all values of $\Delta\rho_i$ supplied in the fuel temperature coefficient table. A value of 1.0 is used if input value is not supplied. Very useful to make parameter surveys and if one forgets to use correct algebraic sign in a table.
161	AVAIL(17)	Same thing for moderator coefficient table.

162	AVAIL(18)	If problem is to be run from a power table enter number of table entries here. (The first card punched for a power table provides this number).
163	AVAIL(19)	Enter 1.0 to suppress punching of power table.
300	AVAIL(156)	Number of entries in the fuel coefficient table.
301	AVAIL(157)	Not used.
302	AVAIL(158)	Number of entries in the moderator coefficient table.
303	AVAIL(159)	Number of entries in the ramp table.
304	AVAIL(160)	Number of entries in the scram table.
305	AVAIL(161)	Number of entries in the coolant inlet temperature table.
306	AVAIL(162)	Number of entries in the coolant flow rate table. (Information on this card is used to cause an error stop if the range of a table is exceeded.)
334	RAMPI	Number of entries in RAMP table or SCRAM table, whichever is longer.
335	TRAMP	Last time to look up in RAMP table-secs.
336	ENDRAM	If ENDRAM = 0.0 RAMP continues after scram starts. If ENDRAM = 1.0 RAMP stops after scram starts.
337-396	TABC	Ramp reactivity table. Enter in sequence time, $\Delta\rho$, time, $\Delta\rho$ etc. Time is in secs. If it is desired to insert a precise amount of reactivity an additional entry should continue the ramp at this constant value for a short time interval and the last time to look up in the table (TRAMP) should be specified within this interval. This is because of the variable time step the code uses.*
397	TENDSC	Last time to look up in SCRAM table.

*This comment also applies to scram, flow rate, and inlet temperature tables.

398	POWRAT	Power level at which to initiate scram.
399	TDELAY	Time delay after power reaches POWRAT after which scram is started.
400-459	TABB	Scram reactivity table. Enter in sequence time, $\Delta\rho$, time, $\Delta\rho$, etc. Enter positive values of since scram term is subtracted in kinetics equation.
460	TINL	Steady state coolant gas inlet temperature- $^{\circ}$ F.
461	FSTAN	Steady state total coolant flow rate lbs/hr-element.
462-481	WSTAN(J)	P/P: axial power distribution function. Values given at points at which temperatures will be computed (not at axial gridlines). Should be properly normalized to axial average of 1.0.
482	PBI	Number of entries in flow rate table.
483	ENDCOL	Last time to look up in flow rate table.
484-543	TABE	Flow rate table. Enter in sequence time, flow rate, time, flow rate, etc. Flow is in lbs/hr-element for total coolant. If inner coolant is used, the code will multiply the table values by AVAIL(2) specified above. If table is used, the steady state value FSTAN need not be supplied.
544	EXPI	Number of entries in inlet temperature table.
545	ENDINL	Last time to look up in inlet temperature table.
546-605	TABG	Inlet temperature table. Enter in sequence time, temperature, time, temperature, etc. Temperature in $^{\circ}$ F. If table is used, the steady state value TIML need not be supplied. Same inlet temperature assumed for inner and outer flows.

The last card of this set must have a 1 punch in Column 1. This can be a separate otherwise blank card if desired.

Power Table

If problem is to be run from a power table, insert the punched cards here, except for the first punched card which contains AVAIL(18) and goes any where before the last card with the 1 punch mentioned above.