

JAERI-M

5 0 5 8

ICARUS.1 : 多目的高温ガス冷却炉
プラント動特性解析コード

1 9 7 2 年 1 1 月

江崎正弘, 川村博章, 篠田 度, 三竹 晉

日 本 原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

ICARUS.1: 多目的高温ガス冷却炉プラント動特性解析コード

日本原子力研究所動力炉開発管理室

江崎正弘, 篠田 度*, 三竹 晋
川村博章**

本コードは現在日本原子力研究所で開発中の多目的高温ガス冷却炉(MHTGR)のプラント動特性を解析する為に開発された。このコードは、基本的には核熱結合の炉心動特性解析コード, 改質器の動特性解析コード, 蒸気発生器の動特性解析コード, 再生熱交換器の動特性解析コードおよび配管系の輸送遅れを模擬したコードより構成されている。

本コードは現在, 多目的高温ガス炉のプラント動特性の解析に使用され, 設計の検討, 工学的安全系の評価, 計装の検討およびプラント運転方法の確立に寄与している。

本コードの内容を以下に列記する。

- (1) 本コードは各プラント構成要素の単位セルについて時間依存の2次元熱平衡式を差分法にて解く。また核特性は1群1点近似であり, 外部冷却ループはひとつである。
- (2) 全物性値は定数として取り扱いか, または温度, 圧力, 時間および位置の関数として取り扱うことができる。
- (3) 冷却材流量および圧力(内部の分布を含む)は入力によって与えられる。
- (4) 過渡特性として考慮できる外乱入力は挿入反応度, 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。
- (5) 崩壊熱の影響を原子炉停止後において取り入れることができる。

本コードは日本原子力研究所のFACOM230-60を使用機種としている。使用コア面積は約90Kilo wordsであり, 計算時間は標準の問題で約20分である。

*現在は日本原子力発電株式会社

**日本アイ・ビー・エム 東京第1データセンター

ICARUS.1: A Computer Code for Transient
Analysis of the Multi-purpose High-Temperature
Reactor Plant Performance

Masahiro EZAKI, Wataru SHINODA* and Susumu MITAKE

Office of Power Reactor Project, JAERI

Hiroaki KAWAMURA

TDCS No.1, IBM Japan, Ltd.

(Received November 10, 1972)

Code ICARUS.1, written in FORTRAN-IV language, is for transient analysis of the plant performance of the multi-purpose high-temperature gas cooled reactor (MHTGR) which is being developed in JAERI. It is a combination of combined reactor kinetics-heat transfer code, heat transfer codes for reformer, steam generator and recuperator, and codes for simulating the transport lag in piping systems. It is used for analysis of the safety of MHTGR plant in design and safety engineering, and for provision of the transient information in selection of the instruments and in plant operation strategy.

Features of the code are as follows.

- (1) The two-dimensional time-dependent heat conduction equation is solved by the finite difference method in R-Z geometry for the average unit cell of each plant element. The reactor kinetics equation is space-independent, and all of the cooling loops is simplified in one loop.
- (2) Thermal properties of each region in the core, heat exchangers and piping systems are taken as constant, or as a function of the temperature, pressure, time and location.
- (3) The pressure and flow-rate of coolant must be given as input, since the pressure distribution in coolant region is not calculated.
- (4) In the transient characteristics, reactivity, primary-coolant, feed-water and feed-gas flow rates are the input disturbances.
- (5) The thermal effect of the fission-product decay power after reactor shut-down is taken into consideration.

The code is for use with JAERI's digital computer FACOM 230-60. The core area required is about 90 Kilo-words, and computing time is about 20 min. per standard problem.

* Presently at the Japan Atomic Power Company, Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 解析モデルおよび解法	2
2.1 解析モデルの範囲	2
2.2 炉心の模擬および解法	3
2.3 改質器の模擬および解法	4
2.3.1 改質器とその伝熱解析モデル	4
2.3.2 メタン・スチーム反応の解析	5
2.3.3 熱伝達率の計算	7
2.3.4 混合物の物性値の計算	9
2.3.5 解 法	10
2.3.5.1 熱平衡式の解法	10
2.3.5.2 格子点における発熱(吸熱)量	14
2.3.5.3 各格子点における各成分ガスの流量	17
2.4 蒸気系の模擬の範囲	18
2.4.1 蒸気系の模擬の範囲	18
2.4.2 熱交換部の模擬	18
2.4.3 熱伝達率の計算	22
2.4.4 ヘッダーまたはドラム部の模擬	24
2.4.4.1 ヘッダー部の模擬	24
2.4.4.2 ドラム部の模擬	26
2.4.5 蒸気タービンの模擬	27
2.5 再生熱交換器の模擬および解法	30
2.6 配管系の輸送遅れの模擬および解法	30
3. コードの使用法とその使用経験	36
4. 結 び	37
謝 辞	37
参考文献	37
Appendix A Peaceman Rachford iteration による2次元熱計算	39
Appendix B 流体領域における格子点の温度の定常近似計算	41
Appendix C 使用物性値の計算式	42
Appendix D Input Format	46
Appendix E A sample listing of output	68

1. はじめに

本コードは多目的高温ガス実験炉の設計に伴ない、プラント動特性解析を行なう為に製作された。この原子炉のプラント構成要素としては、現段階の設計案では原子炉、改質器、蒸気発生器（蒸気タービンを含む）、再生熱交換器、還元ガス加熱器、ガスタービン（1次冷却器を含む）および配管系があり、これ等に計装・制御系が加えられる。これらのプラント構成要素の任意な組合せが可能な多目的高温ガス炉プラント動特性解析コードの製作を目指し、その第一段階として最も重要な構成要素である改質器、蒸気発生器および再生熱交換器を含む多目的高温ガス炉プラントの動特性解析コードを製作し、これを ICARUS . 1 と称し基本コードとした。

多目的高温ガス炉のプラント構成要素は前述のように、従来の原子炉プラントと較べて複雑である。したがって、動特性解析を行なうための原子炉プラントの模擬をハイブリッド・コンピュータで行なうには大容量の機種が必要である。一方、デジタル・コンピュータで全原子炉プラントの模擬を行なうにはコア使用面積および計算時間に多くを必要とする。これ等の方法のうち、現状において実現可能なのは後者であると判断して本コードが製作された。従って本コードは原研の計算センターに設置されている FACOM230-60 においてコア使用面積および計算時間が日常的に常時使用出来る範囲に納まるように製作されている。

本コードの作業経過は 45 年度に蒸気発生器および再生熱交換器の動特性解析コードの製作を行ない、46 年度に改質器の動特性解析コードおよび配管系の輸送遅れ模擬コードの製作を行なっている。その後、これ等のコードを 1 群 1 点近似の炉心動特性解析コード BLOOST と結合して ICARUS . 1 コードとしている。現在進行中の作業としては、ガスタービンを含むループの模擬を行なっている。このループを ICARUS . 1 コードに結合することにより 2 ループ模擬のコードの製作を目指している。なお、その他の作業として制御系の導入を行なっている。

ICARUS . 1 コードは現在、日本原子力研究所・東海研究所の計算センターに設置されている FACOM230-60 機の第 2 号機の永久ファイルに RB (Relocatable Binary) の形式で保存されている。

2. 解析モデルおよび解法

2.1 解析モデルの範囲

ICARUS・1コードにおいて取り扱われているプラント構成要素は原子炉，改質器，蒸気発生器（蒸気タービンを含む），再生熱交換器および配管系である。このプラント構成要素の組合せはFig. 2.1に示されている。プラントの構成において基準となるのは炉心を出た高温の冷却材の流れからみたプラントの配置である。Fig. 2.1に示されるように，炉心を出た高温の1次冷却材（定格運転時に約1000℃）は最初に改質器に入る。その後，改質器を出た1次冷却材（約700℃）は蒸気発生器に向うが，途中に再生熱交換器が設置されている場合（CASE 1）と直接に蒸気発生器に入る場合（CASE 2）の2通りの案がある。蒸気発生器を出た1次冷却材はCASE 1の場合，循環機を通して昇圧された後，再生熱交換器に入り，昇温されて原子炉入口（約400℃）に達して一巡する。CASE 2の場合には，蒸気発生器を出た後に循環機に入り，その後に原子炉に達して一巡する。CASE 1の場合の再生熱交換器の使用目的は循環機的设计温度を原子炉入口温度と較べて低くしなければならない場合において，循環機的设计温度まで下げた1次冷却材温度を所定の原子炉入口冷却材温度まで上昇することである。

2次冷却材としては，改質器においては原料ガス（水蒸気およびメタン）があり，蒸気発生器においては水がある。これ等の流れの向きは，改質器においては1次冷却材に対して対向流となっており，蒸気発生器においては対向流および並行流のいずれの場合も考えられている。1次冷却材間の熱交換を行なう再生熱交換器は互に並行流となっている。

多目的高温ガス炉の主なプラント構成要素としては以上のような組合せを仮定したが，動特性解析コードの製作に当っては最初に個々のプラント構成要素を模擬するコードを開発しなければならない。

このコードの開発に当っては次のような基本項目を仮定する。

- (1) 冷却ループの模擬は1ループにより取り扱う。したがって，複数冷却ループにより構成される原子炉プラントは同一の応答をもつ複数の冷却ループにより構成されると仮定する。
- (2) 1次および2次冷却材の圧力レベルおよび分布の計算，および流量の計算は行わず，任意の一定値を使用する。しかし，蒸気発生器の2次側の圧力レベルの計算は行なう。
- (3) 炉心および熱交換器の模擬は全て燃料ピン1本または伝熱管1本とし，集中定数系として取り扱う。集中定数系を設定するための分割の最大数は，炉心では軸方向20分割，径方向15分割であり，各熱交換器では軸方向は50分割，径方向は同一物質よりなる範囲を1領域として，1領域1点である。また配管系においては流れの方向の最大分割数は99である。
- (4) 炉心およびプラント構成物質の物性値は温度および圧力依存として取り扱う。
- (5) 初期温度分布は最初に一樣な温度分布を与え，くり返し計算を収束するまで行なうことにより求める。なお，収束した時点における各要素の温度分布をカード出力することが出来るようにする。

(6) 取り扱える外乱は反応度外乱，1次冷却材流量外乱，1次冷却材圧力外乱，各種の熱交換器の2次側流量外乱および温度外乱とする。これらの外乱を組合せることにより仮想した事故を模擬する。

なお炉心の動特性解析コードとしては既に開発されたコードBLOOST⁽⁴⁾を使用し，その他の部分が新しく開発された。各々のプラント構成要素の解析モデルおよび解法について次に述べる。

2.2 炉心の模擬および解法

炉心の模擬は既に製作した高温ガス冷却炉用炉心動特性解析コードBLOOST.2CM^{(1),(2),(3),(4)}を基礎にしている。このコードの内容は次の通りである。

- (1) 1群1点近似の中性子動特性方程式を使用し，解法はRunge-Kutta法により行なっている。
- (2) 熱計算は二次元の熱平衡式をPeaceman-Rachford Iteration*により解く。熱伝導は半径方向および軸方向への双方について考慮し，ヘリウム・ギャップは熱抵抗として取り扱い，輻射伝熱の効果も考慮している。
- (3) 計算モデルは燃料ピン1本 (Fig. 2.2参照) であり，物質の種類とその分布により任意の領域に分けられ，最大36領域である。用いる物質の種類は最大15種類である。燃料ピンのメッシュ点の数の最大値は径方向15点，軸方向20点である。
- (4) 出力分布は，径方向においては燃料ピンの各領域の出力密度として取り扱い，軸方向においてはメッシュ点の係数として取り扱う。ただし，どの径方向でのメッシュ点においても軸方向の出力分布は同じ形である。
- (5) 反応度フィードバックは温度変化によるもののみを考慮し，各反応度温度係数で取り扱う。この効果は燃料領域および減速材領域の各々について，各メッシュ点に含まれる体積により重みをもたせた各々の領域の平均温度の変化に依存している。なお，燃料領域に含まれている減速物質 (グラファイト・マトリックスなど) の量をその重量比によって算出し，減速材領域の平均温度の計算にとり入れている。
- (6) スクラム特性および1次冷却材流量変化はそれぞれ時間一挿入反応度特性および時間一1次冷却材流量特性としてテーブルの形式で入力する。また原子炉停止後の崩壊熱特性としてはShureの式を使用し，出力が崩壊熱レベルに達した後にオプションにて使用する。

多目的高温ガス冷却炉の炉心動特性を解析するに当っては被覆燃料粒子 (cfp) の効果を考慮しなければならぬが，本コードはプラント動特性の解析を目指しているため燃料ピンは cfp とボンディング材の黒鉛とが均一に混合したモデルとして取り扱っている。この効果の検討は炉心動特性解析の報告書^{(2),(3)}に委ねることとする。

*Appendix A 参照

2.3 改質器の模擬および解法

2.3.1 改質器とその伝熱解析モデル

改質器はメタンとスチームを高温に熱し、触媒の助けによりリフォーミング反応を起し、還元ガスを製造することを目的とする。このリフォーミング反応は大きな熱量を吸収する吸熱反応である。したがって、この反応に必要な熱量を1次冷却材から供給する構造になっている。改質器はFig. 2.3に示されているように、所定の本数の反応管がガイド・スリーブ内に設置されている。この反応管は2重管の構造であり、ガイド・スリーブと反応管の間を高温の1次冷却材が流れる。反応管内の中間の領域はリフォーミング反応を行なう触媒層であり、この領域を水蒸気およびメタンの混合ガスが流れメタン・スチーム反応を起す。製造された還元ガスは最も内側の管内を流れて出口へ向う。

伝熱管における基本的な熱平衡式は次式で示される。

$$\nabla \cdot K \nabla T + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

ここで、

T = temperature [°C]

t = time [sec]

C_p = isobaric specific heat [kcal/kg °C]

q = heat generation [kcal/m³ sec]

ρ = density [kg/m³]

K = thermal conductivity in each dimension [kcal/m sec °C]

(2.1) 式を体積積分し、Gauss の定理により面積分に変換すると次式になる。

$$\int_{\Delta S} (\mathbf{n} \cdot K \nabla T) ds + \int_{\Delta V} q dv = \int_{\Delta V} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (2.2)$$

ここで、

\mathbf{n} = unit normal vector

この(2.2)式に $\mathbf{n} \cdot \nabla T = \frac{\partial T}{\partial n}$ なる関係を代入すると次式になる。

$$\int_{\Delta S} K \frac{\partial T}{\partial n} ds + \int_{\Delta V} q dv = \int_{\Delta V} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (2.3)$$

(2.3) 式の解法として、平板モデルを仮定し、平均温度 T についての集中定数系の解析モデルを取り入れる。したがって、非流体領域においては $K \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_c - T)$ として、各格子点の平均温度 T についての熱平衡式は次式になる。

$$\rho C_p V \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_j \alpha_j S_j (T_j - T) + qV \quad (2.4)$$

ここで,

α_j = artificial heat transfer coefficient between a point and the adjacent point j [kcal/m² sec °C]

V = volume associated with the mesh point [m³]

S_j = surface area associated with the mesh point [m²]

流体領域の格子点においても固定点を仮定し, 流量は時間依存方程式ではないと仮定すると, (2.4) 式に代り次の熱平衡式が成り立つ。

$$\rho C_p V \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_j \alpha_j S_j (T_j - T) + \sum_j C_p S_j W_j (T_j - T) + qV \quad (2.5)$$

$$\sum_j W_j = 0 \quad (2.6)$$

ここで,

W_j = mass velocity from a point to the adjacent point j
[kg/m²·sec]

改質器の解析モデルにおいて, ガイド・スリーブ領域, 外側反応管の金属領域および内側反応管の金属領域には非流体領域の式(2.4)が適用される。一方, 1次冷却材の領域, 反応領域および還元ガス帰還領域には流体領域の式(2.5)式が使用される。

集中定数化のために, 径方向の各領域に1点を考慮して流れ方向に任意の等分割をおこない, 格子点を定める。なお, 流れの方向への熱伝導は非常に小さいと考えられるので, 解析モデルにおいてはこの効果を無視し, (2.5)式の右辺第一項の $\sum_j \alpha_j S_j (T_j - T)$ を零とする。

(2.4) および (2.5) 式における発熱量の項 qV は, 反応領域において吸熱量を表わし, 他の領域においては零である。したがって, 反応領域の qV の値は, 吸熱反応を表わして, 負の値である。

2.3.2. メタン・スチーム反応の解析

改質器の触媒層には水蒸気およびメタンの混合物が流入し, 触媒層を流れる間に1次冷却材から熱吸収することにより次の反応をする。



ここで,

ΔH = heat of reaction [kcal/gmol]

γ_c = rate of methane-steam reaction [gmol/m³sec]

このメタン・スチーム反応速度 γ_c はスチーム過剰域ではメタンに関して一次とみなし, 次式で表わすことができる。

$$\gamma_c = -C^\circ \cdot A \cdot \exp \{-E/R(T+273.15)\} (1-x/x_e) \quad (2.9)$$

ここで,

C^0 = initial mole concentration of methane [gmol/m³]

A = frequency factor dependent on the catalyst geometry and activity (≈ 1111.1) [sec⁻¹]

E = activation energy (≈ 228) [kcal/gmol]

T = reaction temperature [°C]

R = molar gas constant [kcal/gmol °K]

x = extent of reforming reaction, gmoles of methane reacted / gmoles of feed

x_e = equilibrium extent of reforming reaction, gmoles of methane in equilibrium state / gmoles of feed

反応式 (2.8) の反応速度は反応式 (2.7) の反応に較べて大であり, 瞬間的に平衡に達する逐次反応とみなすことができる。

この反応の反応熱は構成物質の比熱変化に伴う温度補正を加えて次式で与えられる。

$$\Delta H_1 = -49.3 - (-0.452 \times 10^{-5} T^2 + 0.010 \times T - 0.17) \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_2 = & 9.84 + 0.32 \times 10^{-3} (T-18) - 3.16 \times 10^{-6} (T-18)^2 \\ & + 1.11 \times 10^{-9} (T-18)^3 \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここで,

ΔH_1 = heat of reaction of methane-steam reaction [kcal/gmol]

ΔH_2 = heat of reaction of carbon monoxide-steam reaction [kcal/gmol]

反応式 (2.7) における反応速度 r_c を得るために, メタン平衡反応率 x_e および一酸化炭素平衡反応率 y_e を求める。

このために, 先ず平衡定数 K_p を次の Nernst の近似式により定める。

$$\log K_p = - \frac{\Delta H_{298}^0 \times 10^3}{4.575 (T+273.15)} + \Delta \nu (1.75) \log (T+273.15) + \Delta i \quad (2.12)$$

ここで,

K_p = equilibrium constant

ΔH_{298}^0 = heat of reaction at 18°C [kcal/gmol]

$\Delta \nu$ = mole increment between reactants and products [gmol]

Δi = summation of conventional chemical constants

一方, メタン・スチール反応式 (2.7) において転化したメタンの mol 数を x , 反応式 (2.8) によって転化した一酸化炭素の mol 数を y で表わすと, 次の関係式が成り立つ。

$$\text{CH}_4 : N_{\text{CH}_4} - x = n_{\text{CH}_4} \quad (2.13)$$

$$\text{H}_2\text{O} : N_{\text{H}_2\text{O}} - x - y = n_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.14)$$

$$\text{CO} : x - y = n_{\text{CO}} \quad (2.15)$$

$$\text{H}_2 : 3x + y = n_{\text{H}_2} \quad (2.16)$$

$$\text{CO}_2 : 3y = n_{\text{CO}_2} \quad (2.17)$$

ここで、

$$x = \text{methane moles reacted by the reforming reaction} \quad (2.7)$$

$$y = \text{carbon monoxide moles reacted by the reaction} \quad (2.8)$$

$$n_i = \text{moles of the } i\text{-th component}$$

$$N_{\text{CH}_4} = \text{initial moles of methane}$$

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = \text{initial moles of steam}$$

したがって、式(2.12)より求めたメタン・スチーム反応式(2.7)および(2.8)の平衡定数 K_{CH_4} および K_{CO} は、平衡状態のメタン反応率 x_e および一酸化炭素反応率 y_e についての各成分の量と、次の気体反応平衡関係式で結びつけられる。

$$K_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}} n_{\text{H}_2}^3}{n_{\text{CH}_4} n_{\text{H}_2\text{O}}} \left[\frac{\pi}{n_{\text{CH}_4} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2} + n_{\text{CO}_2}} \right]^{-2} \quad (2.18)$$

$$K_{\text{CO}} = \frac{n_{\text{CO}_2} n_{\text{H}_2}}{n_{\text{CO}} n_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (2.19)$$

ここで、

$$K_{\text{CH}_4} = \text{equilibrium constant for methane and steam reaction}$$

$$K_{\text{CO}} = \text{equilibrium constant for carbon monoxide and steam reaction}$$

$$\pi = \text{total pressure [atm]}$$

この連立方程式(2.18)および(2.19)に(2.13)~(2.17)式を代入(x および y は、それぞれ x_e および y_e と書きかえて)して解くことにより、平衡状態における反応率 x_e および y_e を求める。これ等の値の計算は各格子点において各タイム・ステップ毎に行なわれる。

2.3.3 熱伝達率の計算

改質器の解析モデルはFig. 2.4に示した通りである。このモデルにおいて、流体と金属壁間の熱伝達は5箇所ある。これ等の熱伝達を、触媒が充填されていない領域とされている領域に分類して、それぞれの熱伝達係数の計算を行なう。熱伝達係数の定義はFig. 2.4のモデルに示されている通り、各格子点において各タイム・ステップ毎に計算される。

(1) 触媒が充填されていない領域の熱伝達係数の計算

ガイド・スリーブ表面と1次冷却材の間、1次冷却材と外側反応管の外側の間、および製造された還元ガスが戻って行く内側反応管の内面と還元ガスとの間の熱伝達があり、気体-金属壁間の熱伝達として取り扱われる。使用する物性値は、1次冷却材についてはヘリウム単体の

値でよいが、3次側の流体（製造された還元ガス）の場合には混合気体（メタン、水蒸気、一酸化炭素、二酸化炭素、および水素）の物性値として取り扱わなければならない。混合気体の物性値の計算法は次の2.3.4（混合物の物性値の計算）において示される。

熱伝達率の計算は平板モデルを仮定しているので、胴側および管側による差は考慮されていない。したがって、気体-金属壁間の熱伝達係数 α [kcal/m²·°C·sec]は次式で示される。

$$\alpha = Nu \lambda / d_e$$

$$Nu = 0.0023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$Re = v d_e / \nu$$

$$Pr = C_p g \eta / \lambda$$

ここで、

$$\alpha = \text{heat transfer coefficient [kcal/m}^2 \text{ }^\circ\text{C sec]}$$

$$Nu = \text{Nusselt number}$$

$$Re = \text{Reynolds number}$$

$$Pr = \text{Prandtl number}$$

$$\lambda = \text{heat conductivity of fluid [kcal/m }^\circ\text{C sec]}$$

$$d_e = \text{equivalent diameter [m]}$$

$$C_p = \text{specific heat of fluid [kcal/kg]}$$

$$\eta = \text{dynamic viscosity of fluid [kg}\cdot\text{sec/m}^2\text{]}$$

$$\nu = \text{kinematic viscosity of fluid [m}^2\text{/sec]}$$

$$v = \text{average velocity of fluid [m/sec]}$$

(2) 触媒が充填されている領域の熱伝達係数の計算

メタン・スチーム反応を促進させる触媒が反応管の中間領域に充填されている。したがって、この領域の熱伝達係数 α は次に示す円柱型触媒充填層の熱伝達係数の計算式（八田、前田の式⁽¹¹⁾による）によって得る。

$$Re < 100:$$

$$\alpha = 123 \frac{\lambda_g}{D_t} \left(\frac{d_p G}{g \eta} \right)^{0.4} \exp \left(-2.2 \frac{d_p}{D_t} \right) \quad (2.20)$$

$$Re \geq 100:$$

$$\alpha = 4.90 \frac{\lambda_g}{D_t} \left(\frac{d_p G}{g \eta} \right)^{0.6} \exp \left(-2.2 \frac{d_p}{D_t} \right) \quad (2.21)$$

ここで、

$$\lambda_g = \text{heat conductivity of gaseous mixture [kcal/m }^\circ\text{C sec]}$$

$$D_t = \text{diameter of reactor tube [m]}$$

(Equivalent diameter is used in case of annular tube)

$$d_p = \text{average diameter of catalyst [m]}$$

$$G = \text{mass velocity [kg/m}^2\text{}\cdot\text{sec]}$$

g = acceleration of gravity [m/sec²]

式(2.20)および(2.21)における物性値は全て混合ガス(メタン, 水蒸気, 一酸化炭素, 二酸化炭素, および水素)の値を使用する。この混合ガスの組成は各格子点毎, 各タイム・ステップ毎に計算される。この計算については2.3.5(改質器のモデルおよび解法)において述べる。なお, 混合物の物性値の計算方法については次の2.3.4において述べる。

2.3.4 混合物の物性値の計算

(1) 混合物の熱伝導率: λ_m (Lindsay-Bromeley の理論式による)

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{1 + \frac{1}{x_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_j A_{ij}} \quad (2.22)$$

$$A_{ij} = \frac{1}{4} \left[1 + \left\{ \frac{\eta_i}{\eta_j} (M_j/M_i)^{3/4} \frac{(1+S_i/T)^{1/2}}{(1+S_j/T)} \right\}^2 \frac{1+S_{ij}/T}{1+S_i/T} \right]$$

$$S_{ij} = 0.733 \sqrt{S_i \cdot S_j}$$

ここで,

λ_m = heat conductivity of gaseous mixture [kcal/m·sec °C]

n = number of components of gas

λ_i = heat conductivity of the i -th component [kcal/m·sec·°C]

x_i = volume ratio of the i -th component

η_i = dynamic viscosity of the i -th component [kg sec/m²]

M_i = molecular weight of the i -th component

T = absolute temperature [°K]

S_i = Sutherland constant of the i -th component

$$(S \div T_c / 1.12 \div 1.47 T_B)$$

$$\text{CH}_4 : 164, \text{H}_2\text{O} : 534, \text{CO} : 119, \text{H}_2 : 72, \text{CO}_2 : 286$$

T_c = critical temperature [°K]

T_B = boiling point at 1 atm [°K]

(2) 混合物の粘性係数: η_m (Bromley-Wilke の理論式による)

$$\eta_m = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{1 + \frac{1}{x_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_j \phi_{ij}} \quad (2.23)$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_i}{\eta_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\frac{4}{\sqrt{2}} \left[1 + \frac{M_i}{M_j} \right]^{1/2}}$$

ここで、

η_m = dynamic viscosity of gaseous mixture [kg·sec/m²]

η_i = dynamic viscosity of the i-th component [kg·sec/m²]

(3) 混合物の比熱： C_m および密度： ρ_m

重量比により平均化する

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot \bar{M}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{M}_i} \quad (2.24)$$

$$\rho_m = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \bar{M}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{M}_i} \quad (2.25)$$

ここで、

C_m = specific heat of gaseous mixture [kcal/ky]

ρ_m = density of gaseous mixture [kg/m³]

C_i = specific heat of the i-th component [kcal/kg]

ρ_i = density of the i-th component [kg/m³]

\bar{M}_i = mass ratio of the i-th component

2.3.5 解法

2.3.5.1 熱平衡式の解法

反応管についての熱平衡式は 2.3.1 に示した如くであるが、その数値解析モデルは Fig. 2.4 に示したごとく、格子点により示される集中定数系である。集中定数系としての格子点は軸方向には任意な等分割 (≤ 50) により、径方向には各冷却材領域および各金属壁領域により決定される。集中定数系の数値解析モデルによる各格子点における熱平衡式は軸方向（流れの方向）の熱伝導を無視すると、(2.4) および (2.5) 式より次のようになる。

ガイド・スリーブ領域

$$C_{L,j,i} M_{L,j,i} \frac{\partial T_{L,j,i}}{\partial t} = S_o h_{c,j,i} (T_{1,j,i} - T_{L,j,i}) \quad (2.26)$$

1 次冷却材領域

$$C_{L,j,i} M_{L,j,i} \frac{\partial T_{L,j,i}}{\partial t} = S_0 h_{o,j,i} (T_{L,j,i} - T_{b,j,i}) + S_1 h_{1,j,i} (T_{M,j,i} - T_{b,j,i}) \\ + C_{1,j,i} W_{1,j,i} (\theta_{b,j,i} - \theta_{1,j+1,i}) \quad (2.27)$$

外側反応管領域

$$C_{M,j,i} M_{M,j,i} \frac{\partial T_{M,j,i}}{\partial t} = S_1 h_{1,j,i} (T_{1,j,i} - T_{M,j,i}) + S_2 h_{2,j,i} (T_{2,j,i} - T_{M,j,i}) \quad (2.28)$$

反応領域

$$C_{2,j,i} M_{2,j,i} \frac{\partial T_{2,j,i}}{\partial t} = S_2 h_{2,j,i} (T_{M,j,i} - T_{2,j,i}) + C_{2,j,i} W_{2,j,i} (\theta_{2,j+1,i} - \theta_{2,j,i}) \\ + S_3 h_{3,j,i} (T_{N,j,i} - T_{2,j,i}) + Q \quad (2.29)$$

内側反応管領域

$$C_{N,j,i} M_{N,j,i} \frac{\partial T_{N,j,i}}{\partial t} = S_3 h_{3,j,i} (T_{2,j,i} - T_{N,j,i}) + S_4 h_{4,j,i} (T_{3,j,i} - T_{N,j,i}) \quad (2.30)$$

還元ガス帰還領域

$$C_{3,j,i} M_{3,j,i} \frac{\partial T_{3,j,i}}{\partial t} = S_4 h_{4,j,i} (T_{N,j,i} - T_{3,j,i}) + C_{3,j,i} W_{3,j,i} (\theta_{3,j,i} - \theta_{3,j+1,i}) \quad (2.31)$$

ここで、

T = temperature at mesh point [°C]

θ = temperature on grid line [°C]

C = specific heat [kcal/kg °C]

M = mass associated with one mesh point [kg]

S = surface area along coolant boundary associated with one point [m²]

Q = heat generation rate associated with one mesh point [kcal/sec]

h = artificial heat transfer coefficient between a point and the adjacent point [kcal/m² °Csec]

W = flow rate [kg/sec]

subscripts

j : in the axial direction

1, 2, 3 : in fluid region

L, M, N : in solid region

i : time step

これらの熱平衡式中のグリッド・ライン上の温度 θ は格子点の温度 T と次の近似式を用いて結びつけることができる。

$$\begin{aligned} \theta_{1,j+1,i} = & T_{1,j,i} - \frac{h_{1,j,i} S_1}{2W_{1,j,i} C_{1,j,i}} (T_{1,j,i} - T_{M,j,i}) \\ & - \frac{h_{0,j,i} S_0}{2W_{1,j,i} C_{1,j,i}} (T_{1,j,i} - T_{L,j,i}) \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \theta_{2,j,i} = & T_{2,j,i} - \frac{h_{2,j,i} S_2}{2W_{2,j,i} C_{2,j,i}} (T_{2,j,i} - T_{M,j,i}) \\ & - \frac{h_{3,j,i} S_3}{2W_{2,j,i} C_{2,j,i}} (T_{2,j,i} - T_{N,j,i}) + \frac{Q(T_{2,j,i})}{2W_{2,j,i} C_{2,j,i}} \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\theta_{s,j+1,i} = T_{s,j,i} - \frac{h_{4,j,i} S_4}{2W_{s,j,i} C_{s,j,i}} (T_{s,j,i} - T_{N,j,i}) \quad (2.34)$$

これらの関係式を用い、時間微分項を差分形式として、(2.26)~(2.31)式を解くと次のようになる。

$$T_{L,j,i} = \frac{S_0 h_{0,j,i} \Delta t T_{1,j,i} + C_{L,j,i} M_{L,j,i} T_{L,j,i-1}}{C_{L,j,i} M_{L,j,i} + S_0 h_{0,j,i} \Delta t} \quad (2.35)$$

$$T_{1,j,i} = \frac{C_{1,j,i} W_{1,j,i} \Delta t \theta_{1,j,i} + 0.5 \Delta t (S_0 h_{0,j,i} T_{L,j,i} + S_1 h_{1,j,i} T_{M,j,i}) + C_{1,j,i} M_{1,j,i} T_{1,j,i-1}}{C_{1,j,i} M_{1,j,i} + 0.5 \Delta t (S_0 h_{0,j,i} + S_1 h_{1,j,i}) + C_{1,j,i} W_{1,j,i} \Delta t} \quad (2.36)$$

$$T_{M,j,i} = \frac{S_1 h_{1,j,i} \Delta t T_{1,j,i} + S_2 h_{2,j,i} \Delta t T_{2,j,i} + C_{M,j,i} M_{M,j,i} T_{M,j,i-1}}{C_{M,j,i} M_{M,j,i} + S_1 h_{1,j,i} \Delta t + S_2 h_{2,j,i} \Delta t} \quad (2.37)$$

$$T_{2,j,i} = \frac{C_{2,j,i} W_{2,j,i} \Delta t \theta_{2,j+1,i} + 0.5 \Delta t \{ S_3 h_{2,j,i} + S_3 h_{3,j,i} + Q(T_{2,j,i}) \} + C_{2,j,i} M_{2,j,i} T_{2,j,i-1}}{C_{2,j,i} M_{2,j,i} + 0.5 \Delta t (S_2 h_{2,j,i} + S_3 h_{3,j,i}) + C_{2,j,i} W_{2,j,i} \Delta t} \quad (2.38)$$

$$T_{N,j,i} = \frac{S_3 h_{3,j,i} \Delta t T_{2,j,i} + S_4 h_{4,j,i} \Delta t T_{3,j,i} + C_{N,j,i} M_{N,j,i} T_{N,j,i-1}}{C_{N,j,i} M_{N,j,i} + S_3 h_{3,j,i} \Delta t + S_4 h_{4,j,i} \Delta t} \quad (2.39)$$

$$T_{3,j,i} = \frac{C_{3,j,i} W_{3,j,i} \Delta t \theta_{3,j,i} + 0.5 S_4 h_{4,j,i} \Delta t T_{N,j,i} + C_{3,j,i} M_{3,j,i} T_{3,j,i-1}}{C_{3,j,i} M_{3,j,i} + 0.5 S_4 h_{4,j,i} \Delta t + C_{3,j,i} W_{3,j,i} \Delta t} \quad (2.40)$$

また、境界条件として次式が与えられる。

$$\theta_{1,1,i} = T_{1,in}(t_i)$$

$$\theta_{2,n+1,i} = T_{2,in}(t_i)$$

$$\theta_{3,1,i} = \theta_{2,1,i}$$

ここで、

t_i = current time [sec]

subscripts

n : number of axial mesh points

in : inlet point of reformer

以上の熱平衡式により改質器の動特性を求める場合には、(2.35)~(2.40)式を同時に解かねばならない。しかし、同時に解くのは困難である為次に次のような近似解法を用いる。すなわち、任意のタイム・ステップにおける計算で、時間 Δt 前の金属壁の温度 $T_{L,j,i-1}$ 、 $T_{M,j,i-1}$ および $T_{N,j,i-1}$ を近似的に $T_{L,j,i}$ 、 $T_{M,j,i}$ および $T_{N,j,i}$ として(2.36)、(2.38)および(2.40)式に代入して $T_{1,j,i}$ 、 $T_{2,j,i}$ および $T_{3,j,i}$ を求め、その後、その結果と(2.35)、(2.37)および(2.39)式により $T_{L,j,i}$ 、 $T_{M,j,i}$ および $T_{N,j,i}$ を計算する方法である。

熱平衡式(2.35)~(2.40)式を解くに当って、解媒ペレットのもつ熱容量を考慮しなければならない。触媒ペレットは反応管の中間領域に充填され、絶えず2次冷却材である混合ガスに接している。そこで、混合ガスと触媒ペレット間の熱伝達は触媒ペレットおよび混合ガスの熱容量と較べて十分に大きく、両者間の熱伝達の遅れは無視出来る程小さいとする。したがって、触媒ペレットのもつ熱容量は2次冷却材である混合ガスの熱容量に等価的に含まれる。この方法は、触媒ペレットの熱容量を混合ガスの熱容量と完全にまぜ合せて、等価的な熱容量を定義することである。したがって、2次冷却材の格子点当りの熱容量 $C_{2,j,i} M_{2,j,i}$ は次式により与えられる。

$$C_{2,j,i} M_{2,j,i} = C_{g,j,i} M_{g,j,i} + C_{cata,j,i} M_{cata,j,i} \quad (2.41)$$

$$M_{g,j,i} = \bar{A}_2 \rho_{g,j,i} (1.0-R) \Delta y$$

$$M_{cata,j,i} = \bar{A}_2 \rho_{cata,j,i} R \Delta y$$

ここで、

$C_{g, j, i}$ = mean specific heat of gaseous mixture [kcal/kg °C]

$C_{cata, j, i}$ = specific heat of catalyst [kcal/kg °C]

$\rho_{g, j, i}$ = mean density of gaseous mixture [kg/m³]

\bar{A}_2 = superficial cross-sectional area of tube in secondary fluid region [m²]

R = packing fraction of catalyzer (≈ 0.6)

Δy = height increment along flow direction per mesh point [m]

触媒ペレットの熱容量の動特性に及ぼす効果はこの(2.41)式の関係をも(2.38)式に代入することにより近似的に考慮される。

2.3.5.2 格子点間の等価熱伝達率の計算

格子点間の等価熱伝達率 h の計算は流体と金属壁面間の薄膜抵抗と金属壁の半分の肉厚による熱抵抗より求める。薄膜部分の熱伝達係数 α はそれぞれの境界面において(2.19)および(2.20)、(2.21)式により既に求められているから、平板モデルを仮定すると、次式で示される。

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{(\lambda/0.5 d_M)} \quad (2.42)$$

ここで、

α = heat transfer coefficient between fluid and solid [kcal/m² °C·sec]

d_M = thickness of solid [m]

λ = thermal conductivity of solid [kcal/m·°C·sec]

この(2.42)式により求めた h の値を(2.35)~(2.40)式に使用する。

2.3.5.2 格子点における発熱(吸熱)量

反応熱の一般的を計算式は(2.10)および(2.11)式にて与えられる。この計算式より各格子点での発熱量(吸熱量) Q を求め(2.38)式に代入しなければならない。

メタン・スチーム反応は(2.7)および(2.8)式で示されるが、近似的には(2.7)式による1次反応とみなすことができる。したがって、メタン・スチーム反応によるメタンの転化量は次式で表わすことができる。

$$\frac{dM_{CH_4}}{dt} = -r_c M_{CH_2} \quad (2.43)$$

ここで、

M_{CH_4} = mean moles present of methane associated with one point [gmol]

r_c = specific reaction rate constant of the reforming reaction [sec⁻¹]

このメタン転化量の式 (2.43) を解くと、

$$M_{CH_4} = M_{CH_4}(0) \exp(-r_c \cdot t) \quad (2.44)$$

となり、反応量を表わす基本式となる。

2次冷却材(原料の混合ガス)通路上の各格子点におけるメタン残留量 $M_{CH_4, j, i}$ はメタンの流れを考慮して近似的に次式で示される。

$$\frac{dM_{CH_4, j, i}}{dt} = X_{j+1, i} - X_{j, i} - r_{c, j, i} M_{CH_4, j, i} \quad (2.45)$$

ここで、

$X_{j, i}$ = methane flow rate on grid line [gmol/sec]

メタン流量 $X_{j, i}$ は (2.44) 式を用いて次のように表わすことができる。

$$X_{j, i} = M_{CH_4, j, i} \frac{v_{2, j, i}}{\Delta y} \exp(-0.5 \Delta \tau_{j, i} r_{c, j, i}) \quad (2.46)$$

ここで、

Δy = height increment associated with one point [m]

$\Delta \tau_{j, i}$ = staying period of gaseous mixture flow per mesh point [sec]

$v_{2, j, i}$ = velocity of gaseous mixture [m/sec]

したがって、(2.45.) および (2.46) 式により残留メタンを差分で解くと、次式のようになる。

$$\begin{aligned} M_{CH_4, j, i} = & X_{j+1, i} \left[1.0 - \exp\left\{-\frac{v_{2, j, i}}{\Delta y} \exp(-0.5 r_{c, j, i} \Delta \tau_{j, i}) + r_{c, j, i}\right\} \Delta t \right] \\ & + M_{CH_4, j, i-1} \exp\left[-\left\{\frac{v_{2, j, i}}{\Delta y} \exp(-0.5 r_{c, j, i} \Delta \tau_{j, i}) + r_{c, j, i}\right\} \Delta t \right] \end{aligned} \quad (2.47)$$

境界条件として、

$$X_{n+1, i} = X_{CH_4, in, i}$$

ここで、

$$X_{CH_4, in, i} = \text{flow rate of feed methane [gmol/sec} \cdot \text{element]}$$

残留メタン分布計算式 (2.47.) に入口のメタン流量および時間 Δt 前の残留メタン分布を与えれば、各格子点における平均メタン残留量 $M_{CH_4, j, i}$ が $j = N \rightarrow 1$ (N : 流れの方向最大分割数) の逐次計算により求まる。また、同時にメタン流量 $X_{j, i}$ も (2.46) 式により求まる。

各格子点における発熱(吸熱)量 $Q_{j, i}$ は既に求まっているメタン流量 $X_{j, i}$ を用いて近似的に次式で示される。

$$Q_{j,i} = X_{j+1,i} \{ 1.0 - \exp(-r_{c,j,i} \Delta\tau_{j,i}) \} (\Delta H_1 + y_{e,j,i} \Delta H_2) \quad [\text{kcal/sec}] \quad (2.48)$$

ここで、

$Q_{j,i}$ = heat generation rate per mesh point [kcal/sec]

ΔH_1 = heat of methane-steam reaction [kcal/gmol]

ΔH_2 = heat of carbon monoxide-steam reaction [kcal/gmol]

$y_{e,j,i}$ = equilibrium extent of carbon monoxide-steam reaction

以上の式から $Q_{j,i}$ を求めるためには、予め各格子点における滞在時間 $\Delta\tau_{j,i}$ を決めておかなければならない。したがって、各格子点におけるメタン転化率 $x_{j,i}$ を求め、その後、体積流量 $V_{j,i}$ を求める。この $V_{j,i}$ より $\Delta\tau_{j,i}$ を求める。

$$x_{j,i} = 1.0 - \frac{X_{j+1,i} \exp(-0.5 r_{c,j,i} \cdot \Delta\tau_{j,i})}{X_{\text{CH}_4, \text{in}, i}} \quad (2.49)$$

ここで、

$x_{j,i}$ = extent of methane-steam reforming reaction, gmoles of methane reacted / gmoles of feed methane

なお、過渡特性の計算では、(2.49)式の右辺の第2項の分母の $X_{\text{CH}_4, \text{in}, i}$ には、入口から格子点 j までの輸送遅れ時間分だけ以前の時刻における値を用いなければならない。しかしながら、このような計算は複雑となるので、本計算コードでは定常近似解法により定めている。このメタン転化率 $x_{j,i}$ を用い、体積量 $V_{2,j,i}$ および滞在時間 $\Delta\tau_{j,i}$ を求めるのであるが、その時刻での温度分布およびメタン転化率はまだ定っていないので、これらの値には近似的に時間 Δt 前の値を用いる。この近似は、反応管に大きな熱容量があり、急激な流量の変動がない（原料ガスが反応管を通り抜けるに要する時間と比して短時間のうちに流量が大きく変化することがない）と考えられるため十分に受け入れられる。したがって、体積流量 $V_{2,j,i}$ および滞在時間 $\Delta\tau_{j,i}$ は、蒸気以外の物質を理想気体と仮定して、次式で表わされる。

$$V_{2,j,i} = \frac{2.24 \times 10^{-3} \left(1.0 + \frac{T_{2,j,i-1}}{273.15} \right)}{\pi_{2,j,i}} \left\{ (1.0 - x_{j,i}) X_{\text{CH}_4, \text{in}, i} + 3 x_{j,i} X_{\text{CH}_4, \text{in}, i} \right. \\ \left. + x_{j,i} (1.0 + y_{e,j,i}) X_{\text{CH}_4, \text{in}, i} \right\} + 0.018 V_{s,j,i} \left\{ X_{\text{H}_2\text{O}, \text{in}, i} \right. \\ \left. - x_{j,i} X_{\text{CH}_4, \text{in}, i} - x_{j,i} y_{e,j,i} X_{\text{CH}_4, \text{in}, i} \right\} \quad (2.50)$$

$$\Delta\tau_{j,i} = \frac{\bar{A}_2 \Delta y}{V_{2,j,i}} \quad (2.51)$$

ここで、

$V_{2,j,i}$ = volume flow rate of gaseous mixture associated with one point [m^3/sec]

$\pi_{2,j,i}$ = total pressure of gaseous mixture [kg/cm^2]

$X_{\text{H}_2\text{O},in,i}$ = flow rate of feed steam [$\text{gmole}/\text{sec}\cdot\text{element}$]

$V_{s,j,i}$ = specific volume of steam [m^3/kg]

2.3.5.3 各格子点における各成分ガスの流量

既知の値を使用して、各格子点における各成分ガスの流量は定常近似計算法により次のように表わされる。

$$W_{\text{CH}_4,j,i} = (1.0 - x_{j,i}) X_{\text{CH}_4,j,i} \quad (2.52)$$

$$W_{\text{H}_2\text{O},j,i} = X_{\text{H}_2\text{O},in,i} - (1.0 + y_{e,j,i}) x_{j,i} X_{\text{CH}_4,in,i} \quad (2.53)$$

$$W_{\text{CO},j,i} = (1.0 - y_{e,j,i}) x_{j,i} X_{\text{CH}_4,in,i} \quad (2.54)$$

$$W_{\text{CO}_2,j,i} = y_{e,j,i} x_{j,i} X_{\text{CH}_4,in,i} \quad (2.55)$$

$$W_{\text{H}_2,j,i} = (3.0 + y_{e,j,i}) x_{j,i} X_{\text{CH}_4,j,i} \quad (2.56)$$

ここで、

W = flow rate of the element gas indicated in subscript
[gmol/sec. element]

したがって、この値に質量数を掛け単位を整えれば各成分物質の重量流量を得る。

$$\bar{W}_{\text{CH}_4,j,i} = W_{\text{CH}_4,j,i} \times 0.016$$

$$\bar{W}_{\text{H}_2\text{O},j,i} = W_{\text{H}_2\text{O},j,i} \times 0.018$$

$$\bar{W}_{\text{CO},j,i} = W_{\text{CO},j,i} \times 0.028$$

$$\bar{W}_{\text{CO}_2,j,i} = W_{\text{CO}_2,j,i} \times 0.044$$

$$\bar{W}_{\text{H}_2,j,i} = W_{\text{H}_2,j,i} \times 0.002$$

ここで、

\bar{W} = mass flow rate of the element gas indicated in subscript
[kg/sec. element]

熱平衡式 (2.38) 式に現れている混合ガスの総流量 $W_{2,j,i}$ および各格子点が保有する混合ガスの重量 $M_{2,j,i}$ はそれぞれ次式で示される。

$$\bar{W}_{2,j,i} = \bar{W}_{\text{CH}_4,j,i} + \bar{W}_{\text{H}_2\text{O},j,i} + \bar{W}_{\text{CO},j,i} + \bar{W}_{\text{CO}_2,j,i} + \bar{W}_{\text{H}_2,j,i} \quad (2.57)$$

$$M_{2,j,i} = \bar{W}_{2,j,i} \triangle \tau_{j,i} \quad (2.58)$$

以上の過程により、改質器の熱平衡式 (2.35) ~ (2.40) 式を解くために必要な各格子点での反応に伴う発熱 (吸熱) 量 $Q_{j,i}$ 、混合ガスの重量流量 $W_{2,j,i}$ および各格子点の保有する混合ガスの重量 $M_{2,j,i}$ を近似的に計算することができる。なお、物性値を計算するために必要な温度等は近似的に時間 Δt 前の値を使用することとする。

2.4 蒸気系の模擬および解法

2.4.1 蒸気系の模擬の範囲

蒸気系の構成は Fig. 2.5 に示したように、貫流形蒸気発生器を基本モデルとしている。この系は蒸発器、過熱器および再熱器の3領域の熱交換部分と蒸気ヘッダーおよび蒸気タービンの部分から成り立っている。このモデルにて汽水ドラム型の蒸気発生器の模擬を行なう場合には近似的に蒸発器とヘッダー（汽水ドラムにあてはめる）のコードを用いて行なう。したがって、各熱交換部分を基本的な要素に整理し、これ等の組合せにより種々の蒸気発生器の模擬が可能となるモデルを組み立てることとする。この基本的な要素については次に示す種類があげられる。なお、解析モデルは全て直管型の伝熱管である。

Type	流体の流れ	2次側の相変化
1	対向流	水, 蒸気 of 二相流
2	対向流	蒸気 of 单相流
3	並行流	水, 蒸気 of 二相流
4	並行流	蒸気 of 单相流

この4つの基本の熱交換要素を組合せることにより任意の蒸気発生器を模擬することができる。なお、单相流を別途のタイプとしたのは計算時間の節約を目指すためである。他の要素としてはヘッダー又はドラム、および蒸気タービン等があるが、これ等は2次冷却材（蒸気）のループの要素であるから、1次冷却ループの模擬に重点をおく本コードでは計算時間上の制約を考慮して、詳細な模擬は省略し、原則として1点近似程度の模擬とする。また、1次冷却材圧力のレベルおよび分布は計算せず、入力により定めることとする。一方、2次冷却材である蒸気（水）の圧力レベルは、蒸発器および過熱器においてはヘッダー（又はドラム）内の蒸気圧力を、また再熱器においては蒸気タービン前段の出口蒸気圧力を用いることとする。したがって、伝熱管内の蒸気圧力分布は計算しない。

2.4.2 熱交換部の模擬

流体の流れの方向（対向流又は並行流）により熱平衡式は異なる。解析は伝熱管1本を対象とし、これを近似的に平板モデルでとりあつかう。伝熱計算は二次元の熱平衡式を集中定数系として、差分法にて解く。ただし、熱容量の非常に小さい流体領域については時間依存でない熱平衡式を用いる。

熱平衡の基本式は改質器における(2.1)式と同様である。温度計算格子点を、径方向の構成物質の軸方向に任意に等分割した各領域毎に与えると、(2.4)および(2.5)式より固体領域および流体領域それぞれに次式がなりたつ。

(1) 対向流の場合

1次側

$$C_{1,j,i} M_{1,j,i} \frac{\partial T_{1,j,i}}{\partial t} = S_{1,j,i} h_{1,j,i} (T_{M,j,i} - T_{1,j,i}) + C_{1,j,i} W_{1,j,i} (\theta_{1,j,i} - \theta_{1,j+1,i})$$

(2.59)

金属壁領域

$$C_{M,j,i} M_{M,j,i} \frac{\partial T_{M,j,i}}{\partial t} = S_1 h_{1,j,i} (T_{1,j,i} - T_{M,j,i}) + S_2 h_{2,j,i} (T_{2,j,i} - T_{M,j,i}) \\ + S_H h_{H,j,i} (T_{M,j-1,i} - T_{M,j,i}) + S_L h_{L,j,i} (T_{M,j+1,i} - T_{M,j,i}) \quad (2.60)$$

2次側

$$C_{2,j,i} M_{2,j,i} \frac{\partial T_{2,j,i}}{\partial t} = S_2 h_{2,j,i} (T_{M,j,i} - T_{2,j,i}) + C_{2,j,i} W_{2,j,i} (\theta_{2,j+1,i} - \theta_{2,j,i}) \quad (2.61)$$

(2) 並行流の場合

この場合には(2.59)式が下記の式に置き換わる。

$$C_{1,j,i} M_{1,j,i} \frac{\partial T_{1,j,i}}{\partial t} = S_1 h_{1,j,i} (T_{M,j,i} - T_{1,j,i}) + C_{1,j,i} W_{1,j,i} (\theta_{1,j+1,i} - \theta_{2,j,i}) \quad (2.62)$$

ここで、

- T = temperature at mesh point [°C]
- θ = temperature on grid line [°C]
- C = specific heat [kcal/kg °C]
- M = mass associated with one mesh point [kg]
- t = time [sec]
- S = surface area associated with one point [m²]
- h = artificial heat transfer coefficient between a point and the adjacent point [kcal/m² sec °C]
- W = flow rate of fluid [kg/sec element]

subscripts

1, 2 : fluid region

M : solid region

H.L : the surface in the flow direction in solid region

j : in the flow (axial) direction

i : a time step

以上の熱平衡式を差分で解くに当り、炉心部の熱計算に使用した Peaceman Rachford iteration を適用する。なお、2次側の計算においては、水の熱容量が大きく、無視できない大きさの時定数をもっているため、定常熱平衡式による近似計算方向を採用することはでき

ない。また、改質器にて採用した近似計算は、二相流領域および蒸気領域では非常に小さなタイム・メッシュ中で計算をすすめねばならないため蒸気発生器に採用できない。したがって、2次側(水)についてはより改良した計算方法を工夫しなければならない。一方、1次側の計算ではヘリウムのもつ熱容量は金属壁とくらべて小さいので、次のタイム・ステップでの金属壁の温度に依存した定常近似計算*を用いることができる。

2次側の熱計算を次のように考える。まず、流体の格子点滞在時間 $\Delta\tau_{2,j,i}$ を用いて、(2.61)式を書きなおすと、

$$C_{2,j,i} W_{2,j,i} \Delta\tau_{2,j,i} \frac{\partial T_{2,j,i}}{\partial t} = S_2 h_{2,j,i} (T_{M,j,i} - T_{2,j,i}) + C_{2,j,i} W_{2,j,i} (\theta_{2,j+1,i} - \theta_{2,j,i}) \quad (2.63)$$

ここで、

$$\Delta\tau_{2,j,i} = \text{staying period of water flow per mesh point [sec]}$$

となる。この(2.63)式を解くには、 $\Delta\tau_{2,j,i}$ と $\theta_{2,j,i}$ の値が得られていなければならない。ここで、 $\Delta\tau_{2,j,i}$ には時間 Δt 前の値を使用し、 $\theta_{2,j,i}$ を近似的に次式により与えることとする。

$$\theta_{2,j,i} = T_{2,j,i} + \frac{S_2 h_{2,j,i}}{2W_{2,j,i} C_{2,j,i}} (T_{M,j,i} - T_{2,j,i}) \quad (2.64)$$

この2つの近似により(2.63)式は近似的に解け、各格子点の温度は次のようになる。

$$T_{2,j,i} = \frac{0.5 S_2 h_{2,j,i} \Delta t T_{M,j,i} + C_{2,j,i} W_{2,j,i} \Delta t \theta_{2,j+1,i} + C_{2,j,i} W_{2,j,i} \Delta\tau_{2,j,i} T_{2,j,i-1}}{C_{2,j,i} W_{2,j,i} (\Delta\tau_{2,j,i} + \Delta t) + 0.5 S_2 h_{2,j,i} \Delta t + C_{2,j,i} W_{2,j,i} \Delta t} \quad (2.65)$$

ここで、

$$\Delta t = \text{time mesh [sec]}$$

この(2.65)式を解くには同じタイム・ステップにおける金属壁の温度 $T_{M,j,i}$ が必要である。ここで、次の関係を導入する。

$$T_{M,j,i} = T'_{M,j,i} - H_{M,j,i} T_{2,j,i} \quad (2.66)$$

この(2.66)式に使用されている $H_{M,j,i}$ および $T'_{M,j,i}$ はAppendix A (Peaceman Rachford iterationによる二次元熱計算)にのべるように、(A.8)および(A.9)式により求めることができる値である。

* Appendix B 参照

(2.66)式を(2.65)式に代入して整理すると次式になる。

$$T_{2,j,i} = \frac{0.5 S_2 h_{2,j,i} \Delta t T'_{M,j,i} + C_{2,j,i} W_{2,j,i} \Delta t \theta_{2,j+1,i} + C_{2,j,i} W_{2,j,i} \Delta \tau_{2,j,i} T_{2,j,i-1}}{C_{2,j,i} W_{2,j,i} (\Delta \tau_{2,j,i} + \Delta t) + 0.5 S_2 h_{2,j,i} \Delta t (1 + H_{M,j,i})} \quad (2.67)$$

この(2.67)式により、 $T_{M,j,i}$ が未だ求められていない段階において $T_{2,j,i}$ が求まり、逐次温度計算が可能になる。すなわち、Peaceman Rachford iterationで金属壁の領域の温度を二次元で解く場合、径方向のiterationにおいて2次側の流体領域の温度領域の温度計算は(2.67)式で行なり。一方、軸方向でのiterationにおいては、金属壁の温度の真値はその時点での流体の温度に依存せずに計算*できるから、求まっている金属壁温度 $T_{M,j,i}$ を使用して(2.65)式は解ける。

以上の計算方法では、滞在時間 $\Delta \tau_{2,j,i}$ は未定なので、 $\Delta \tau_{2,j,i-1}$ の値を近似的に使用しているが、この誤差を避けるには、近似的に使用した滞在時間と、その結果による温度から計算される滞在時間とが一致するまでiterationを行えばよい。しかし、この方法は計算時間の増加をきたすため実用的ではない。(2.67)式において、二相流領域および過熱蒸気領域では $\Delta \tau_{2,j,i} \ll \Delta t$ の状態になる格子点が発生する。このような格子点では定常近似計算を適用し、計算時間の節約を期する。この定常近似計算は金属壁の温度に新しい時刻での値を使用して、次のように解く。すなわち、流体の熱平衡式は、

$$C_2 W_2 dy dT_2 = S_2 h_2 (T_M - T_2) dy \quad (2.68)$$

ここで、

dy = height increment along the flow direction [m]

であり、これを格子点についての差分で解くと次式のようになる。

$$T_{2,j,i} = T_{M,j,i} \{ 1 - \exp(-0.5 S_2 h_{2,j,i} / C_{2,j,i} W_{2,j,i}) \} + \theta_{c,j+1,i} \exp(-0.5 S_2 h_{2,j,i} / C_{2,j,i} W_{2,j,i}) \quad (2.69)$$

$$\theta_{c,j+1,i} = T_{M,j+1,i} \{ 1 - \exp(-0.5 S_2 h_{2,j+1,i} / C_{2,j+1,i} W_{2,j+1,i}) \} + T_{c,j+1,i} \exp(-0.5 S_2 h_{2,j+1,i} / C_{2,j+1,i} W_{2,j+1,i}) \quad (2.70)$$

この定常近似の方法は流速の大きな領域または流体の熱容量の小さい格子点に適用する。

2次冷却材である水は加熱されるにしがたい、水から蒸気へ相変化をして行く。したがって二相流領域では温度計算と並行して各格子点の蒸気のエンタルピの計算を行ない、このエンタルピにより各格子の蒸気重量率が求まる。水の温度が飽和温度に達した後の二相流領域(格子点の蒸気重量率 x が $0 < x \leq 1.0$ の範囲)においては格子点の温度は飽和温度にとどまる。二相流領域および過熱蒸気領域においては流速が急激に増大するので $\Delta \tau_{2,j,i} \ll \Delta t$ となり近

*Appendix A 参照

似的に滞在時間は無視し得る程小さい。したがって、二相流領域のエンタルピの計算は定常近似計算によって行ない、数値計算上の不安定が生ずるのを避ける。

定常近似計算によるエンタルピの計算の基本式は次式で示される。

$$W dA = S_2 h_2 (T_M - T_2) dy \quad (2.71)$$

この(2.71)式に(2.66)式の関係代入すると、

$$A_{2,j,i} = \frac{S_2 h_{2,j,i}}{2W} (T'_{M,j,i} - H_{M,j,i} T_{2,j,i} - T_{2,j,i}) \Delta y + A'_{2,j+1,i} \quad (2.72)$$

$$A'_{2,j+1,i} = \frac{S_2 h_{2,j+1,i}}{2W} (T'_{M,j+1,i} - H_{M,j+1,i} T_{2,j+1,i} - T_{2,j+1,i}) \Delta y + A_{2,j+1,i} \quad (2.73)$$

ここで、

A = specific enthalpy at mesh point [kcal/kg]

A' = specific enthalpy on grid line [kcal/kg]

Δy = height increment along flow direction per point [m]

となる。各格子点の温度計算においては、温度が飽和点に達した後の比エンタルピの増加量が蒸発潜熱を越えれば再び温度上昇が始まり、流体は蒸気の単相流として取り扱われる。二相流領域の各格子点における蒸気重量率 $x_{j,i}$ は次式で示される。

$$x_{j,i} = \frac{A_{2,j,i} - A_s}{A_r} \quad (2.74)$$

ここで、

A_s = specific enthalpy of saturated water [kcal/kg]

A_r = heat of vapourization [kcal/kg]

なお、ここで使われている比エンタルピおよび蒸発潜熱は全て圧力依存の値として取り扱う。

2.4.3 熱伝達率の計算

1次側の熱伝達率の計算は改質器の場合と同様である。一方、2次側の熱伝達率の計算においては2次冷却材の相変化を考慮しなければならない。したがって、水の単相流の領域、水・蒸気の二相流の領域および過熱蒸気の単相流の領域に分け、それぞれ異なった計算式を使用する。相変化を蒸気重量率 x で表わすと2次側の熱伝達率 α は次のようにする。

$$(1) \quad 0 \leq x < 0.03$$

$$\alpha = Nu \lambda / De \quad (2.75)$$

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} (\eta_b / \eta_w)^{0.14}$$

$$\eta_b = \eta (T_{2,j,i}, P_{2,j,i})$$

$$\eta_w = \eta (T_{M,j,i}, P_{2,j,i})$$

$$Re = v_{2,j,i} De / \nu$$

$$Pr = C_p g \eta / \lambda$$

ここで、

x = quality of steam

α = heat transfer coefficient [kcal/m² °C sec]

Nu = Nusselt number

Re = Reynolds number

Pr = Prandtl number

λ = thermal conductivity of fluid [kcal/m sec °C]

De = hydraulic equivalent diameter [m]

η = dynamic viscosity of fluid [kg sec/m²]

ν = kinematic viscosity of fluid [m²/sec]

C_p = isobaric specific heat capacity [kcal/kg °C]

(2) $0.03 \leq x < 0.6$

Collier の式を適用する。

$$\alpha = 0.0498 \frac{\lambda \ell}{De} Re_{\ell}^{0.8} Pr_{\ell}^{0.4} X_{tt}^{-0.699} \quad (2.76)$$

$$X_{tt} = (\eta_{\ell} / \eta_g)^{0.1} (V_{\ell} / V_g)^{0.5} \left(\frac{1}{x} - 1 \right)^{0.9}$$

$$V_g = \frac{W_g}{f_g \bar{A}_2 \rho_g}$$

$$v_{\ell} = \frac{W_{\ell}}{(1-f_g) \bar{A}_2 \rho_{\ell}}$$

$$f_g = \frac{x V_g}{S(1-x) V_{\ell} + x V_g}$$

$$W_g = W x$$

$$W_{\ell} = W(1-x)$$

$$\bar{v} = v_g x + v_{\ell} (1-x)$$

ここで、

v = velocity [m/sec]

\bar{v} = mean velocity of gas-liquid mixture [m/sec]

V = specific volume [m³/kg]

\bar{A} = cross-sectional area along the flow direction [m²]

S = slip ratio (input)

subscripts

l = indicates a state of liquid

g = indicates a state of gas

(3) $0.6 \leq x \leq 1$

$$\alpha = \frac{0.00136}{De} \left[\frac{G De}{g \eta_l} \left(\frac{1-x}{x} \right) \right]^{0.853} \left(\frac{x}{1-x} \right) \left(\frac{v_g}{v_l} \right)^{\frac{2}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} \lambda \quad (2.77)$$

ここで、

G = mass velocity [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ sec}$]

蒸気重量率 x が 1.0 以上の場合 (過熱蒸気の単相流) には気体の単相流として取り扱い、熱伝達率の計算は (2.19) 式を使用する。なお、等価熱伝達率 h への変換は改質器において述べた方法 (2.3.5.2 を参照) を用いる。

2.4.4. ヘッダーまたはドラム部の模擬

2.4.4.1 ヘッダー部の模擬

ヘッダー部においては蒸気温度および圧力レベルの計算を行なう。ヘッダーの模擬は実効体積における完全混合モデルを 1 点近似にて解く。ヘッダー内部の温度を 1 点で表わすと次の熱平衡式が成立つ。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_{he} \rho_{he} V_{he}} (C_{in} W_{in} T_{in} - C_{out} W_{out} T_{out}) \quad (2.78)$$

ここで、

T = mean temperature of steam in header [$^{\circ}\text{C}$]

V_{he} = effective volume of header [m^3]

C = specific heat of steam [$\text{kcal}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$]

ρ = density of steam [kg/m^3]

W = flow rate of steam [kg/sec]

subscripts

he = indicates at mean point in header region

in = indicates at inlet of header

out = indicates at outlet of header

ヘッダー内において瞬時に完全混合すると仮定すると、次式が成立つ。

$$T = T_{out} \quad (2.79)$$

したがって、(2.78) 式に (2.79) 式の関係を入れて、時間 Δt 前における温度 $T(t - \Delta t)$ を用いて解くと次式を得る。

$$T(t) = \frac{C_{in} W_{in}}{C_{out} W_{out}} \left\{ 1.0 - \exp \left(- \frac{C_{out} W_{out}}{C_{he} \rho_{he} V_{he}} \Delta t \right) \right\} T_{in}$$

$$+ T(t-\Delta t) \exp\left(-\frac{C_{out} W_{out}}{C_{he} \rho_{he} V_{he}} \Delta t\right) \quad (2.80)$$

前述の(2.78)式がヘッダー内の温度計算の基本式であるが、ヘッダー内に蒸気温度制御用の注水系が設置されているならば、(2.78)式を次式で置き換えねばならない。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_{he} \rho_{he} V_{he}} (C_{in} W_{in} T_{in} + C_s W_s T_s - W_s A_r - C_{out} W_{out} T_{out}) \quad (2.81)$$

ここで、

T_s = inlet temperature of spray water [°C]

W_s = flow rate of spray water [kg/sec]

A_r = heat of vapourization [kcal/kg]

C_s = specific heat of spray water [kcal/kg °C]

この(2.81)式を同様に解くと、

$$T(t) = \frac{C_{in} W_{in} T_{in} + C_s W_s T_s - W_s A_r}{C_{out} W_{out}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{C_{out} W_{out}}{C_{he} \rho_{he} V_{he}} \Delta t\right) \right\} + T(t-\Delta t) \exp\left(-\frac{C_{out} W_{out}}{C_{he} \rho_{he} V_{he}} \Delta t\right) \quad (2.82)$$

となる。温度計算の式(2.82)を計算するためには、物性値を計算するためのヘッダー内の圧力レベルおよび流出流量 W_{out} の値が必要である。流出流量の計算は蒸気発生器、蒸気タービン、復水器までの特性によって定まるものであるが、これ等の部分はとりあつかわれていない。したがって、この計算コードでは、ヘッダー出口の流量調節弁により所定の値に調節されていると仮定して、流出流量を入力により定めることとする。

ヘッダー内の圧力レベルの計算は、ヘッダーが保有する蒸気重量 M_{he} と蒸気温度 T より計算する。ヘッダーが保有する蒸気重量 M_{he} は次式で求められる。

$$M_{he}(t) = (W_{in} - W_{out} + W_s) \Delta t + M_{he}(t-\Delta t) \quad (2.83)$$

ここで、

M_{he} = mass of steam in header [kg]

この $M_{he}(t)$ より、ヘッダー内の蒸気密度 $\rho_{he}(t)$ は次式で示される。

$$\rho_{he}(t) = M_{he}(t) / V_{he} \quad (2.84)$$

この蒸気密度および温度より、ヘッダー内の圧力レベルを求める。しかしながら、このタイム・ステップにおけるヘッダー内の蒸気温度はまだ求まっていないので、時間 Δt 前の値を近似的に使用する。温度に時間 Δt 前の値を使用し、圧力計算を優先させた理由は、水の流れは大き

な熱容量を持ち温度の急激な変化は考えられないが、圧力レベルは早い応答を示すものと考えられるためである。

2.4.4.2 ドラム部の模倣

ドラム部においては蒸気と水との熱伝達は無視し、蒸気温度は蒸発器からの蒸気温度に依存する。ドラム内の熱平衡式は液相と気相に分けると次のように示される。

(1) 液相の領域

$$\frac{\partial T_{\ell}}{\partial t} = \frac{1}{C_{d,R} M_{d,\ell}} \{ C_f W_f T_f + C_{e,\ell} W_c T_e (1-x) - C_{d,\ell} W_c T_{\ell} \} \quad (2.85)$$

$$\frac{\partial M_{d,\ell}}{\partial t} = W_f - W_c + W_c (1-x) \quad (2.86)$$

(2) 気相の領域

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{1}{C_{d,g} M_{d,g}} \{ C_{e,g} W_c T_e x - C_{d,g} W_{out} T_g \} \quad (2.87)$$

$$\frac{\partial M_{d,g}}{\partial t} = W_c x - W_{out} \quad (2.88)$$

(2.85)~(2.86)式を解くとき、時間 Δt 前の値 $T_{\ell}(t-\Delta t)$ 、 $M_{d,\ell}(t-\Delta t)$ 、 $T_g(t-\Delta t)$ および $M_{d,g}(t-\Delta t)$ を用いて表わすと、次式を得る。

$$T_{\ell}(t) = \frac{C_f W_f T_f + C_{e,\ell} W_c T_e (1-x)}{C_{d,\ell} W_c} \{ 1 - \exp(-\frac{C_{d,\ell} W_c}{C_{d,\ell} M_{he,\ell}} \Delta t) \} + T_{\ell}(t-\Delta t) \exp(-\frac{C_{d,\ell} W_c}{C_{d,\ell} M_{he,\ell}} \Delta t) \quad (2.89)$$

$$M_{he,\ell}(t) = \{ W_f - W_c + W_c (1-x) \} \Delta t + M_{d,\ell}(t-\Delta t) \quad (2.90)$$

$$T_g(t) = \frac{C_{e,g} W_c T_e x}{C_{d,g} W_{out}} \{ 1 - \exp(-\frac{C_{d,g} W_{out}}{C_{d,g} M_{d,g}} \Delta t) \} + T_g(t-\Delta t) \exp(-\frac{C_{d,g} W_{out}}{C_{d,g} M_{d,g}} \Delta t) \quad (2.91)$$

$$M_{d,g}(t) = (W_c x - W_{out}) \Delta t + M_{d,g}(t-\Delta t) \quad (2.92)$$

ここで、

- T = mean temperature in drum [°C]
 M_d = mass of water or steam in drum [kg]
 W_f = flow rate of feed water [kg/sec]
 T_f = inlet temperature of feed water [°C]
 W_c = flow rate of circulating water [kg/sec]
 T_e = temperature at evaporator outlet [°C]
 x = steam quality at evaporator outlet

subscripts

- l : a state of water
 g : a state of steam

給水流量 W_f および温度 T_f 、蒸発器の循環流量 W_c 、出口温度 T_e および蒸気重量率 x 、ドラム流出流量 W_{out} などを知れば、(2.89)~(2.92)式を計算することが出来る。蒸発器出口の温度 T_e を求めるためには、同時刻でのドラム内の水の温度 T_l の値が必要であるが、近似的に時間 Δt 前の値を使用する。この仮定はドラム内の水の量は大きく、大きな熱容量を持つと考えられるから充分受け入れられる。

以上の計算により、ドラム内の水および蒸気の温度および保有重量が求まる。したがって、これらの値を用いて、ドラム内の蒸気密度を求め、この値を用いてドラム内の圧力レベルを求めることとする。

ドラム内の蒸気密度 $\rho_g(t)$ は次式で示される。

$$\rho_g(t) = \frac{M_{d,g}(t)}{V_d - \frac{M_{d,l}(t)}{\rho_l(t)}} \quad (2.93)$$

ここで、

- ρ_g = density of steam in drum [kg/m³]
 ρ_l = density of water in drum [kg/m³]
 V_d = effective volume of drum [m³]

この式において、ドラム内の水の密度 $\rho_l(t)$ は温度 $T_l(t)$ が求まっているから、蒸気テーブルより求まり、 $\rho_g(t)$ は(2.93)式により計算される。したがって、 $\rho_g(t)$ および $T_g(t)$ が既知の値になり、蒸気テーブルにより圧力レベルは求まる。

以上の計算において、物性値の計算に使用する温度および圧力は近似的に時間 Δt 前の値を使用している。

2.4.5 蒸気タービンの模擬

蒸気タービンは1点近似にて模擬する。蒸気タービンの模擬は、蒸気発生器に再熱器が設置されている場合の過熱器と再熱器間を結ぶ範囲内、すなわち、タービン前段のみにとどめる。また、蒸気タービンは全体の系からみて2次系に位置していること、および計算時間の節約を計ることを考慮して、現段階では比較的簡単な検討を行なうこととして、次の仮定を設ける。

- (1) 応答は定常近似によりおこなう。ただし、輸送遅れを考慮する。
- (2) 蒸気タービンの出力はエンタルピーの変化として取りあつかう。
- (3) 蒸気は過熱蒸気の範囲を取り扱い、完全ガスとする。
- (4) タービン内の変化は断熱変化とする。

蒸気タービンの蒸気の入口と出口のエンタルピーの関係は次式で与えられる。

$$A_{out} = A_{in} - \overline{P}_T / W_T \quad (2.94)$$

ここで、

A = specific enthalpy of steam [kcal/kg]

W_T = flow rate of steam [kg/sec]

P_T = output power of high-pressure turbine [kcal/sec]

蒸気の定積比熱 C_v および定圧比熱 C_p を下記のように温度 T に関して一次近似をする。

$$C_v = a_v + bT$$

$$C_p = a_p + bT$$

ここで、

C_v = specific isochoric heat capacity [kcal/kg °C]

C_p = specific isobaric heat capacity [kcal/kg °C]

T = temperature [°C]

この比熱の近似式と前述の仮定(2)により、タービン出力 P_T は次式で表わされる。

$$P_T = \frac{0.002343}{K_0 - 1} (P_{in} V_{in} - P_{out} V_{out}) \left[1 + \frac{\lambda}{2} (T_{in} + T_{out}) \right] W_T \quad (2.95)$$

ここで、

$$K_0 = a_p / a_v$$

$$\lambda = b / a_v$$

P = pressure of steam [kg/m²]

V = specific volume of steam [m³/kg]

タービン出力 P_T を式(2.95)によって求めるのに、蒸気の状態式に H.L. Callender の断熱変化における近似式¹³⁾を使用する。この式は過熱蒸気の範囲に適用でき、次式で示される。

$$PV^k = \text{CONST.} \quad (2.96)$$

$$k = 1.3$$

したがって、タービン出口圧力 P_{out} が求まれば、(2.96)式により、比容積 V_{out} が求まる。また、特性式 $PV = RT$ よりタービン出口温度 T_{out} も求まる。したがって、タービン出力 P_T を求めるためにはタービン出口圧力 P_{out} が与えられなければならない。

タービン内における圧力降下を求めるのに、次の仮定を設ける。

- (1) タービン内の圧力降下 ΔP は蒸気流量の2乗に比例する。
- (2) 定常運転時の圧力降下 ΔP_0 および蒸気流量 $W_{T,0}$ は詳細な設計計算によって与えられているものとする。

この仮定に基づくと、一般の運転時における圧力降下 ΔP は、*

$$\Delta P = \Delta P_0 \frac{\frac{T_{in}}{P_T}}{\frac{T_{in,0}}{P_{T,0}}} \left(\frac{W_T}{W_{T,0}} \right)^2 \quad (2.97)$$

ここで、

ΔP = drop of steam pressure in steam turbine [kg/m²]

subscript 0 indicates a steady state operation

で示される。

蒸気タービン内における輸送遅れはヘッダー部の模擬と同様に完全混合による一次遅れとして取り扱う。再熱器における蒸気の圧力はタービン出口の圧力を用いる。

*参考文献(14) 参照

2.5 再生熱交換器の模擬および解法

再生熱交換器は1次冷却材間の高温部と低温部との熱交換であり、Fig. 2.1に示した位置に在る。流れの形式は並行流である。模擬は1本の伝熱管について行ない、その解析モデルは平板モデルとし、軸方向（流れ方向）の熱伝導は無視する。格子点を径方向の各物質区分について1点、軸方向には任意の等分割により定めると次の熱平衡式が成り立つ。

高温側冷却材領域

$$C_{1,j,i} M_{1,j,i} \frac{\partial T_{1,j,i}}{\partial T} = S_1 h_{1,j,i} (T_{1,j,i} - T_{M,j,i}) + C_{1,j,i} W (\theta_{1,j,i} - \theta_{1,j+1,i}) \quad (2.98)$$

金属壁領域

$$C_{M,j,i} M_{M,j,i} \frac{\partial T_{M,j,i}}{\partial T} = S_1 h_{1,j,i} (T_{1,j,i} - T_{M,j,i}) + S_2 h_{2,j,i} (T_{2,j,i} - T_{M,j,i}) \quad (2.99)$$

低温側冷却材領域

$$C_{2,j,i} M_{2,j,i} \frac{\partial T_{2,j,i}}{\partial T} = S_2 h_{2,j,i} (T_{M,j,i} - T_{2,j,i}) + C_{2,j,i} W (\theta_{2,j,i} - \theta_{2,j+1,i}) \quad (2.100)$$

この熱平衡式の解法は2.3に示した改質器の場合と同様である。なお、再生熱交換器を設けるか否かは入力により与える。

2.6 配管系の輸送遅れの模擬および解法

配管系のモデルをFig. 2.7に示す。流体の温度は距離と時間の関数として表わせる。

$$T = f(x, t)$$

流体をスラグ流と仮定し、配管（パイプ）との間には熱の授受がないと仮定すると次式が成り立つ。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.102)$$

dx/dt は流速であるから、

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{W}{A\rho} \quad (2.103)$$

ここで、

T = temperature of fluid [°C]

t = time [sec]

dx = height increment along flow direction [m]

A = cross-sectional area of pipe [m²]

ρ = density of fluid [kg/m³]

W = flow rate of fluid [kg/sec]

偏微分 $\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial t$ は次のように差分で表わせる。

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-T_{j,i-1} - T_{j,i} + T_{j+1,i-1} + T_{j+1,i}}{2 \Delta x} \quad (2104)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{j+1,i} - T_{j+1,i-1}}{\Delta t} \quad (2105)$$

(2104) および (2105) 式を (2102) 式に代入して、 $T_{j+1,i}$ について解くと次式になる。

$$T_{j+1,i} = \frac{2A\rho\Delta x - W\Delta t}{2A\rho\Delta x - W\Delta t} T_{j+1,i-1} + \frac{W\Delta t}{2A\rho\Delta x + W\Delta t} (T_{j,j+1} + T_{j,i}) \quad (2106)$$

この (2106) 式により流れの方向に逐次計算して、配管内の温度分布を求める。

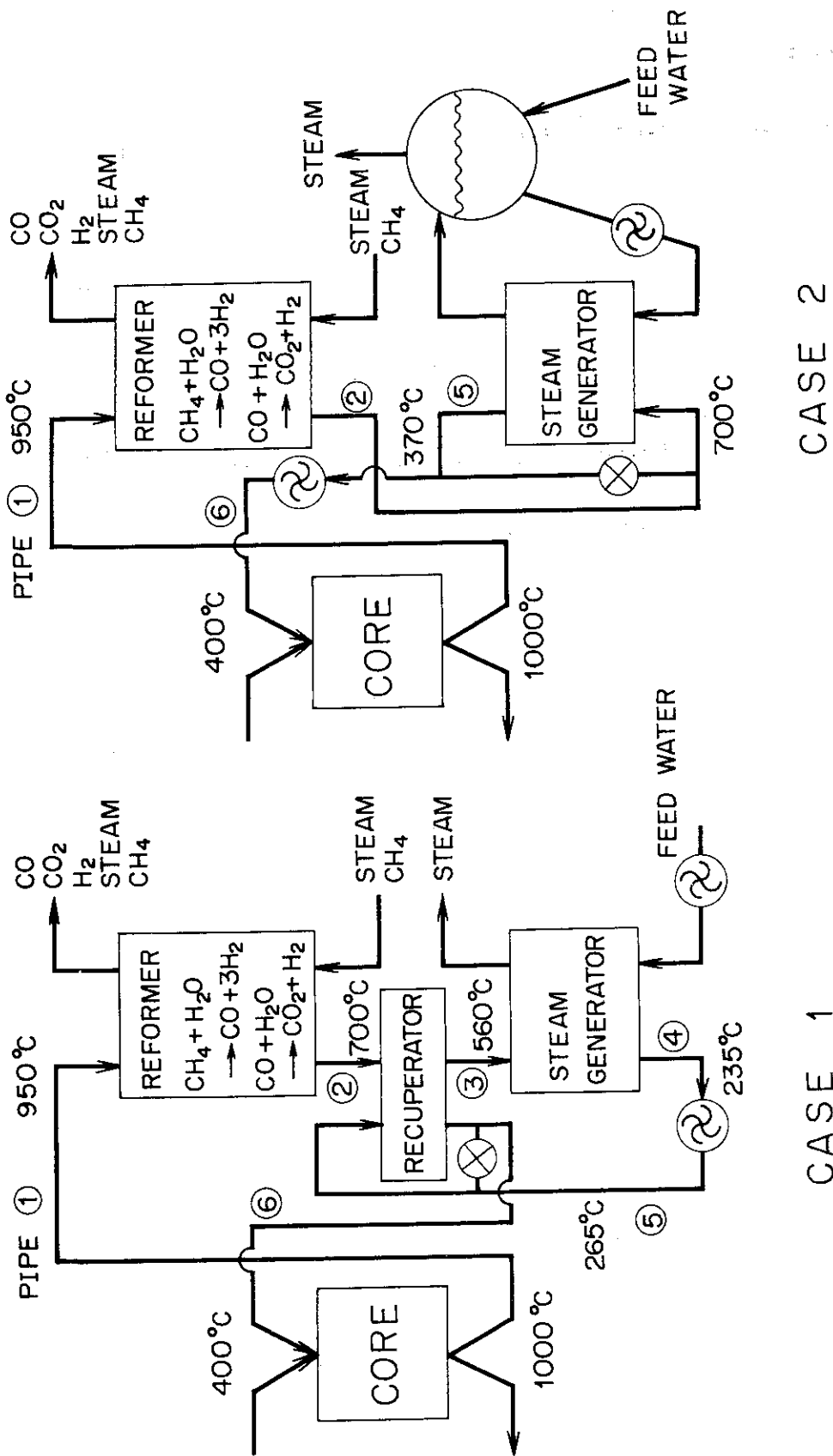


Fig. 2.1 Simulation model of the reactor plant.

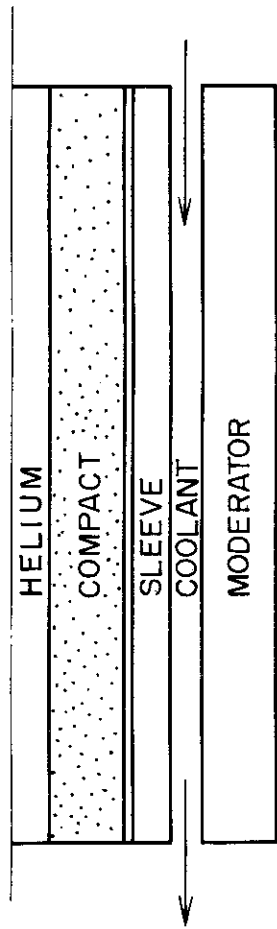


Fig. 2.2 Simplified model of fuel pin.

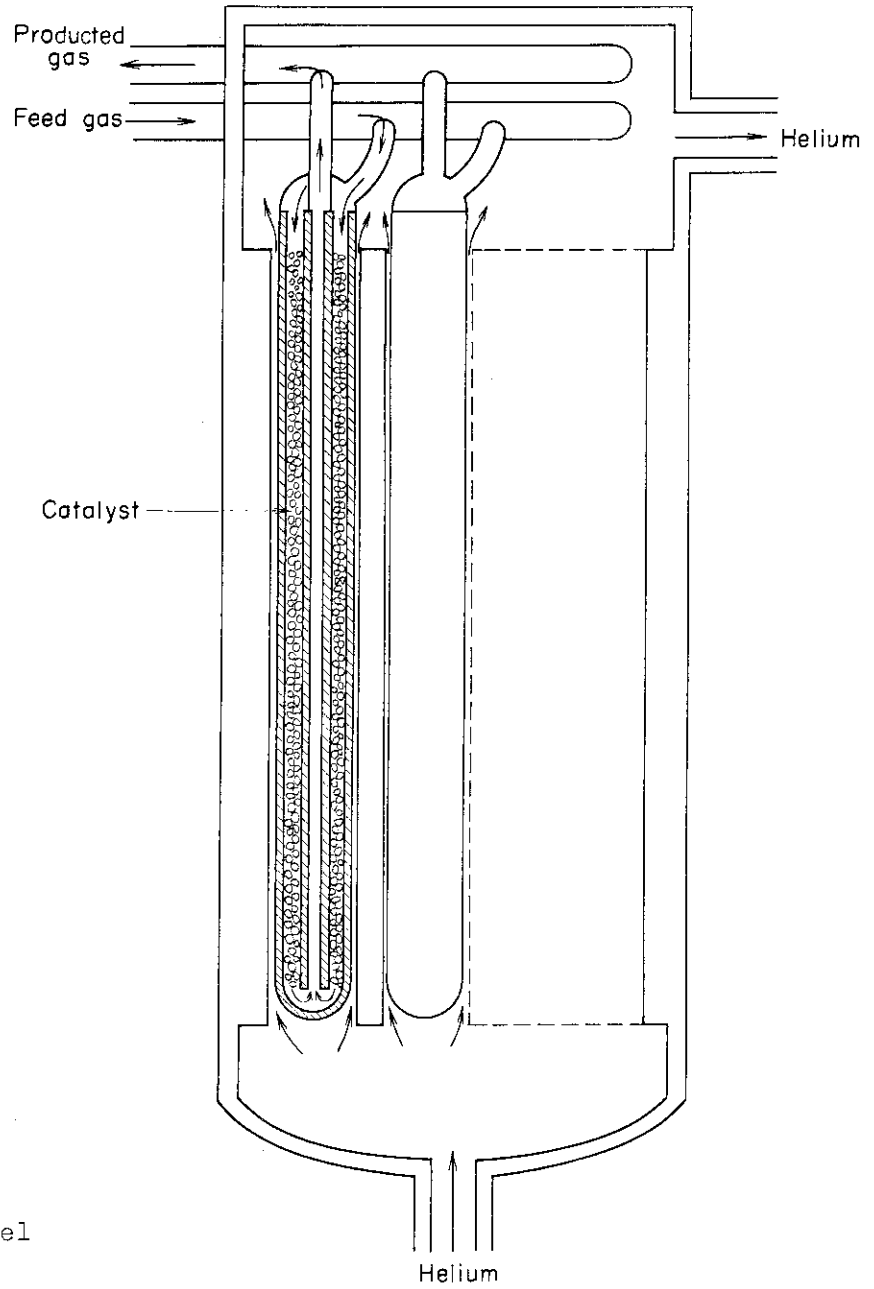


Fig. 2.3 Steam reformer.

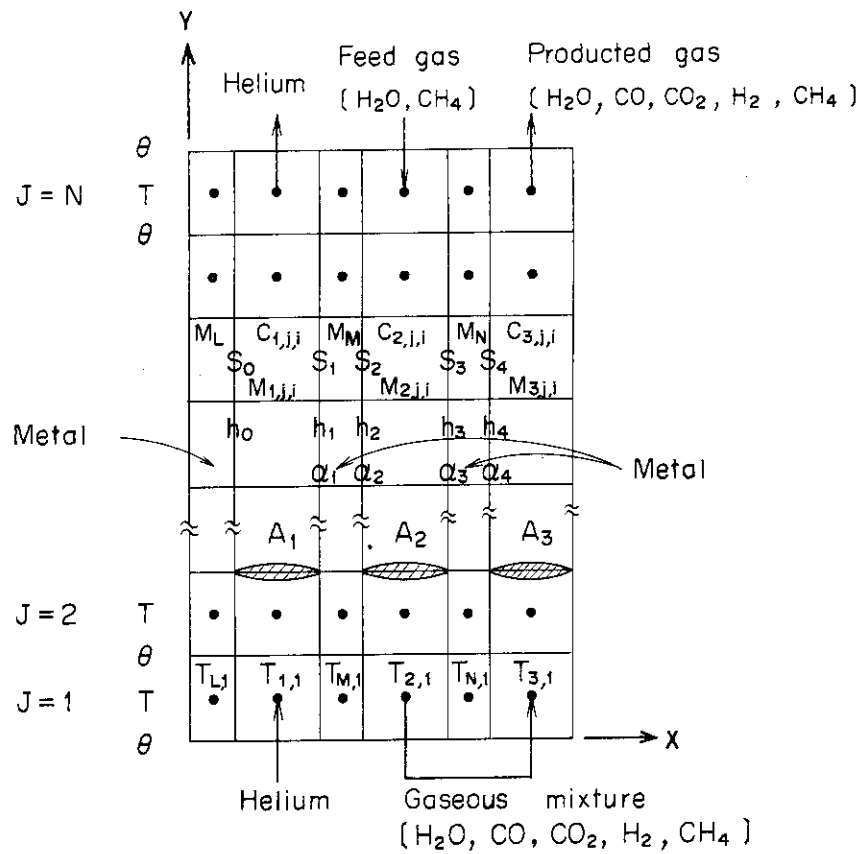


Fig. 2.4 Unit cell simulation model of reformer.

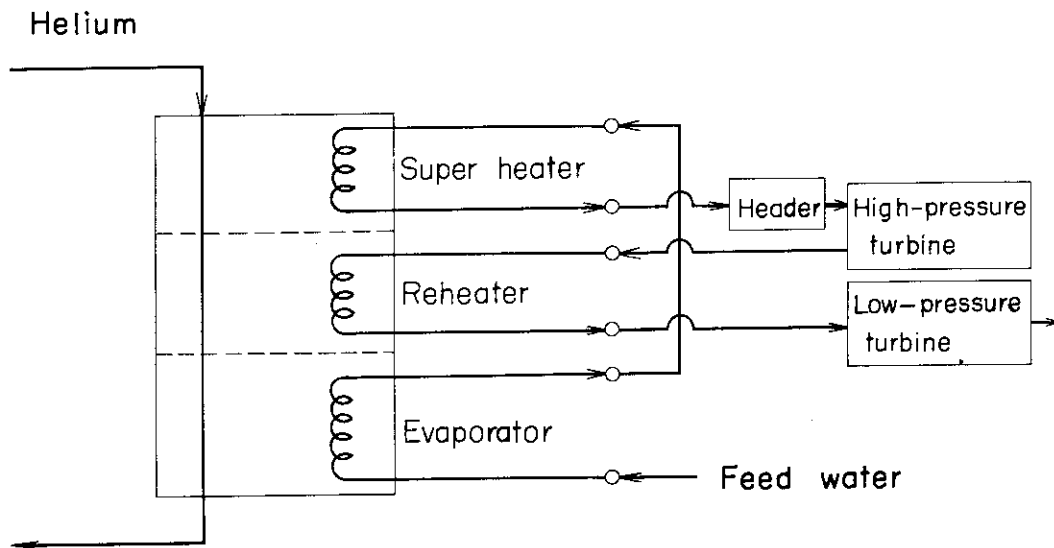


Fig. 2.5 Simplified model of steam generator.

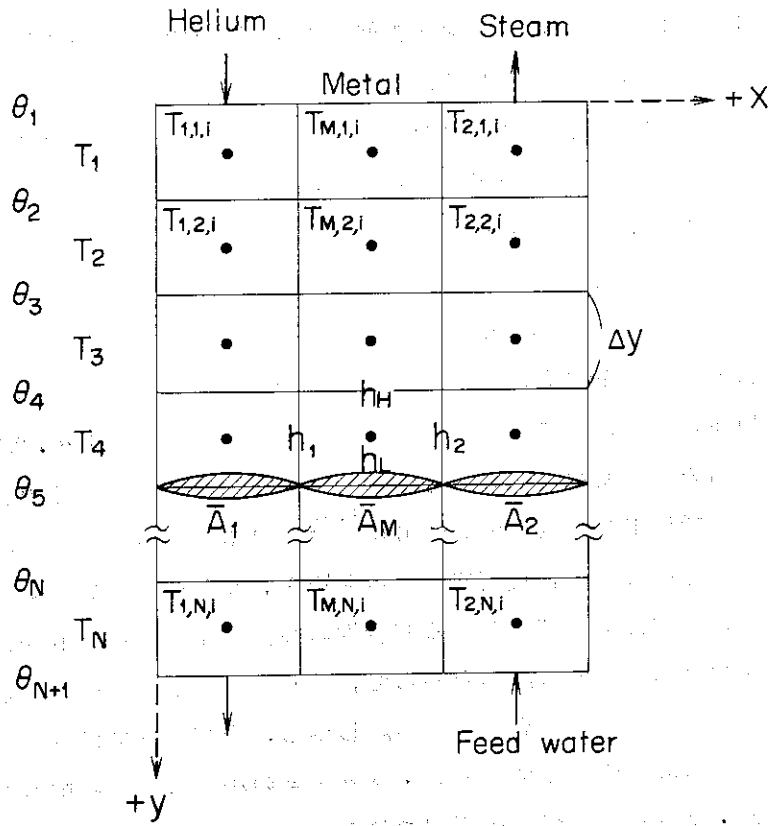


Fig. 2.6 Simulation model of steam generator unit cell.

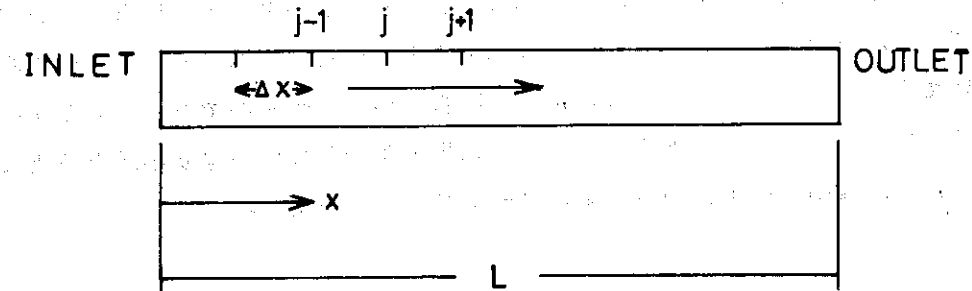


Fig. 2.7 Simplified model of piping system.

3. コードの使用方法和その使用経験

本コード ICARUS .1 は現在、日本原子力研究所・東海研究所の電子計算機 FACOM 230-60 第2の永久ファイルにRBの形式で保存されている。したがって、使用物性値等の変更が必要なときには物性値計算のサブルーチンのみを入れ換えることが可能である。入力として必要な初期温度は任意の温度分布等を入力し、外乱のない状態で温度分布が時間的变化をしなくなるまで計算して、この結果を初期温度分布として入力する。したがって、本コードにおいては任意の時点において全温度分布等をカード出力することが可能であり、初期値の準備および過渡時における継続計算が簡単に行なえる。

原研にて設計を行なっている多目的高温ガス実験炉のプラント動特性解析を例にあげ、本コードの使用経験を以下に示す。このときの原子炉プラントの構成は Fig. 2.1 における CASE 2 のモデルについて行なったものである。この解析モデルにおいて、約10分間の現象を解析するのに必要な計算時間は FACOM 230-60 機で約20~30分である。この計算時間は外乱の内容により大きく異なるが、反応度外乱において、相対的に長い計算時間が必要である。

タイム・メッシュの決定は炉心部における核特性の解法に用いている Runge-Kutta iteration により行なわれている。したがって、炉心部に外乱が発生する現象の解析については、数値解法上の問題はほとんど発生しない。しかし、冷却ループに外乱が発生した場合には外乱の影響が炉心部へ波及するまでタイム・メッシュの決定に外乱の影響は考慮されない。したがって、タイム・メッシュの粗さが原因で熱交換部の計算に不安定性が現われることがある。また、計算の出発点を原子炉入口温度としているために、冷却ループにて外乱が発生する現象の解析においては一巡した計算から求まる新しい原子炉入口温度と計算の出発点で使った古い原子炉入口温度に数%程度の差が発生する。これ等の不安定性および誤差を解消するために、入力によりタイム・メッシュの上限を時間依存で定めている。この方法により上記のトラブルは完全に解消した。

本コードの精度のチェックは総合的には行なわれていないが、改質器については日本揮発油株式会社により行なわれた設計および改質器単体の動特性解析の結果との照合において十分なる一致を得ている。また蒸気発生器については川崎重工業株式会社により行なわれた設計と定常状態において十分なる一致を得ているが、過渡応答については不明である。したがって、総合的な精度の評価は実際のプラントの特性試験の結果と照合しないかぎり早計な評価は避けねばならないが、設計段階では十分満足出来るコードであると考えられる。

4. 結 び

多目的高温ガス冷却炉のプラント動特性解析コードとして外部冷却ループのひとつを模擬したコードの製作は本コードにより一応目的を達した。現在すすめている作業はガスタービンを含むテストループの模擬であり、この作業を終えると2ループ模擬の解析が可能になる。また並行して、原子炉制御系を組み込む作業を行なっている。

本コードでは冷却材圧力レベルおよび分布の計算は取り扱わず、入力による一定値またはテーブルによる時間依存の値として取り扱っている。したがって、冷却材圧力分布および冷却材流量計算を行なうコードを開発する必要があり、これらの影響を考慮できるコード開発を熱中性子炉設計班において進めている。

本コードによる解析例としては多目的高温ガス実験炉第2次予備設計⁽¹⁴⁾におけるプラント動特性解析があるので、参考にしていただきたい。

謝 辞

多目的高温ガス炉のプラント構成要素は従来の原子炉と比較して、改質器等の新しい要素が網込まれているために多くの人の御協力をいただきました。改質器の模擬に当っては日本揮発油株式会社：山口尙氏、松岡誠一氏、加畑長昭氏および棟上宏男氏に御指導いただきました。また、蒸気テーブルについては原子炉工学部伝熱流動第一研究室：佐野川好母氏に、熱交換器の模擬の手法については同部原子炉制御研究室；井爪昭忠氏に御指導いただきました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) M.Merrill and M.Troost, "BLOOST-5: A COMBINED REACTOR KINETICS-HEAT TRANSFER CODE FOR THE IBM-7044", GAMD-6644 (1965)。
- 2) R.C.Dahlberg and M.H.Merrill, "BLOOST-6: A KINETICS CODE CONTAINING A THERMODYNAMIC MODEL OF COATED PARTICLES FOR HTGR APPLICATIONS", GAMD-8119 (1967)。
- 3) M.H.Merrill, "BLOOST-6: A COMBINED REACTOR KINETICS-HEAT TRANSFER PROGRAM", GA-8416 (1967)。
- 4) 江崎正弘ほか, "BLOOST.2CM: ガス冷却炉炉心動特性解析コード", JAERI-memo 4768, (unpublished), (1972)。
- 5) Suzanne S.Clark and M.Troost, "RAT-3D: A GENERAL THREE-DIMENSIONAL HEAT TRANSFER CODE", GAMD-7346 (1966)。
- 6) Suzanne S.Clark and etc., "TAC 3D: A GENERAL PURPOSE THREE-DIMENSIONAL HEAT TRANSFER COMPUTER CODE", GA-9264

4. 結 び

多目的高温ガス冷却炉のプラント動特性解析コードとして外部冷却ループのひとつを模擬したコードの製作は本コードにより一応目的を達した。現在すすめている作業はガスタービンを含むテストループの模擬であり、この作業を終えると2ループ模擬の解析が可能になる。また並行して、原子炉制御系を組み込む作業を行なっている。

本コードでは冷却材圧力レベルおよび分布の計算は取り扱わず、入力による一定値またはテーブルによる時間依存の値として取り扱っている。したがって、冷却材圧力分布および冷却材流量計算を行なうコードを開発する必要があり、これらの影響を考慮できるコード開発を熱中性子炉設計班において進めている。

本コードによる解析例としては多目的高温ガス実験炉第2次予備設計⁽¹⁴⁾におけるプラント動特性解析があるので、参考にしていただきたい。

謝 辞

多目的高温ガス炉のプラント構成要素は従来の原子炉と比較して、改質器等の新しい要素が組み込まれているために多くの人の御協力をいただきました。改質器の模擬に当っては日本揮発油株式会社：山口尚氏、松岡誠一氏、加畑長昭氏および棟上宏男氏に御指導いただきました。また、蒸気テーブルについては原子炉工学部伝熱流動第一研究室：佐野川好母氏に、熱交換器の模擬の手法については同部原子炉制御研究室；井爪昭忠氏に御指導いただきました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) M.Merrill and M.Troost, "BLOOST-5: A COMBINED REACTOR KINETICS-HEAT TRANSFER CODE FOR THE IBM-7044", GAMD-6644 (1965).
- 2) R.C.Dahlberg and M.H.Merrill, "BLOOST-6: A KINETICS CODE CONTAINING A THERMODYNAMIC MODEL OF COATED PARTICLES FOR HTGR APPLICATIONS", GAMD-8119 (1967).
- 3) M.H.Merrill, "BLOOST-6: A COMBINED REACTOR KINETICS-HEAT TRANSFER PROGRAM", GA-8416 (1967).
- 4) 江崎正弘ほか, "BLOOST.2CM: ガス冷却炉炉心動特性解析コード", JAERI-memo 4768, (unpublished), (1972).
- 5) Suzanne S.Clark and M.Troost, "RAT-3D: A GENERAL THREE-DIMENSIONAL HEAT TRANSFER CODE", GAMD-7346 (1966).
- 6) Suzanne S.Clark and etc., "TAC 3D: A GENERAL PURPOSE THREE-DIMENSIONAL HEAT TRANSFER COMPUTER CODE", GA-9264

4. 結 び

多目的高温ガス冷却炉のプラント動特性解析コードとして外部冷却ループのひとつを模擬したコードの製作は本コードにより一応目的を達した。現在すすめている作業はガスタービンを含むテストループの模擬であり、この作業を終えると2ループ模擬の解析が可能になる。また並行して、原子炉制御系を組み込む作業を行なっている。

本コードでは冷却材圧力レベルおよび分布の計算は取り扱わず、入力による一定値またはテーブルによる時間依存の値として取り扱っている。したがって、冷却材圧力分布および冷却材流量計算を行なうコードを開発する必要がある、これらの影響を考慮できるコード開発を熱中性子炉設計班において進めている。

本コードによる解析例としては多目的高温ガス実験炉第2次予備設計⁽¹⁴⁾におけるプラント動特性解析があるので、参考にしていただきたい。

謝 辞

多目的高温ガス炉のプラント構成要素は従来の原子炉と比較して、改質器等の新しい要素が組み込まれているために多くの人の御協力をいただきました。改質器の模擬に当っては日本揮発油株式会社：山口尙氏、松岡誠一氏、加畑長昭氏および棟上宏男氏に御指導いただきました。また、蒸気テーブルについては原子炉工学部伝熱流動第一研究室：佐野川好母氏に、熱交換器の模擬の手法については同部原子炉制御研究室；井爪昭忠氏に御指導いただきました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) M.Merrill and M.Troost, "BLOOST-5: A COMBINED REACTOR KINETICS-HEAT TRANSFER CODE FOR THE IBM-7044", GAMD-6644 (1965)。
- 2) R.C.Dahlberg and M.H.Merrill, "BLOOST-6: A KINETICS CODE CONTAINING A THERMODYNAMIC MODEL OF COATED PARTICLES FOR HTGR APPLICATIONS", GAMD-8119 (1967)。
- 3) M.H.Merrill, "BLOOST-6: A COMBINED REACTOR KINETICS-HEAT TRANSFER PROGRAM", GA-8416 (1967)。
- 4) 江崎正弘ほか, "BLOOST.2CM: ガス冷却炉炉心動特性解析コード", JAERI-memo 4768, (unpublished), (1972)。
- 5) Suzanne S.Clark and M.Troost, "RAT-3D: A GENERAL THREE-DIMENSIONAL HEAT TRANSFER CODE", GAMD-7346 (1966)。
- 6) Suzanne S.Clark and etc., "TAC 3D: A GENERAL PURPOSE THREE-DIMENSIONAL HEAT TRANSFER COMPUTER CODE", GA-9264

(1969)。

- 7) C.W.Savery and etc., "TAP-A FORTRAN W PROGRAM FOR THE TRANSIENT ANALYSIS OF THE HTGR POWERPLANT PERFORMANCE," GAMD-7248 (1966)。
- 8) Shansher S. Grover, "Optimize Hydrogen Production by Model", HYDROCARBON PROCESSING, Vol. 49, No.4, 109-111 (1970)。
- 9) 橋本弁彦か, "メタン・スチーム改質炉のシミュレーション", 46年4月化学工学協会予稿集, 109-111 (1971)。
- 10) George E.Forsythe and Woll R.Wasow, "Finite Difference Methods for Partial Differential Equations", (John Wiley & Sons, Inc., New York) (1960)。
- 11) 大竹伝雄, "化学工学シリーズII 反応装置の設計", (科学技術社, 金沢) (1955)。
- 12) 江崎正弘ほか, "多目的高温ガス実験炉予備設計炉心の動特性解析", JAERI-M 4523 (1971)。
- 13) 菅原菅雄, "改稿 工業熱力学", (岩波全書 60, 東京) (1964)。
- 14) 動力炉開発管理室, "多目的高温ガス実験炉第2次予備設計)", JAERI-memo 4852, (unpublished), (1972)。
- 15) K.Bannert and G.Krey, "Dynamic Behavior and control of Single-Shaft Closed-Cycle Gas Turbines", Journal of Engineering for Power, Vol.93, No.4, 447-457 (1971)。

Appendix A : Peaceman Rachford iteration による2次元熱計算

Peaceman Rachford iteration においては, 2つの作用素 L_1 および L_2 を導入し, 次のように定める。

$$L_1 T(x, y, t) = D_t T(x, y, t) - \delta_x^2 T(x, y, t+k) - \delta_y^2 T(x, y, t) \quad (A.1)$$

$$L_2 T(x, y, t) = D_t T(x, y, t) - \delta_x^2 T(x, y, t) - \delta_y^2 T(x, y, t+k) \quad (A.2)$$

ここで,

$$D_u \phi(u) = k^{-1} [\phi(u+k) - \phi(u)]$$

$$\delta_u \phi(u) = h^{-1} [\phi(u+h/2) - \phi(u-h/2)]$$

一般的な二次元の熱伝導計算において格子点における熱平衡式は次式で表わされる。

$$CM \frac{\partial T}{\partial t} = S_i h_i \{T(x-\Delta x, y, t) - T(x, y, t)\} + S_{i+1} h_{i+1} \{T(x+\Delta x, y, t) - T(x, y, t)\} + S_j h_j \{T(x, y-\Delta y, t) - T(x, y, t)\} + S_{j+1} h_{j+1} \{T(x, y+\Delta y, t) - T(x, y, t)\} \quad (A.3)$$

ここで,

T = temperature [°C]

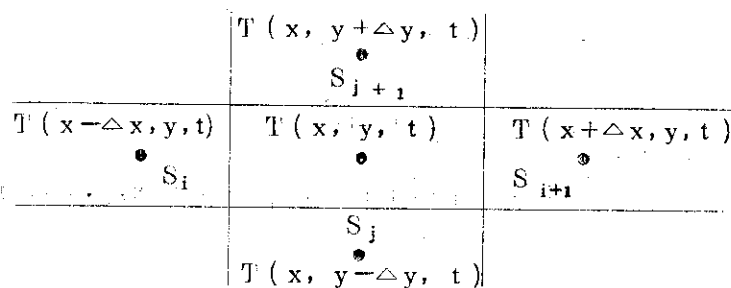
t = time [sec]

C = specific heat [kcal/kg]

M = mass in mesh point [kg]

S_i, S_j = surface area associated with one mesh point [m²]

h_i, h_j = artificial heat transfer coefficient [kcal/m² °C sec]



$\Delta x =$ distance between points in x direction [m]

$\Delta y =$ distance between points in y direction [m]

まず、最初の計算は x 方向でおこなう。(A.1)式より $L_1(t) = 0$ とすると、t 段階で T がすでに知られていれば格子線 $y =$ 一定上の格子点の $t + \Delta t$ における T の値が求められる。すなわち、(A.3)式は次のように表わされる。

$$T(x, y, t + \Delta t) = \left[[S_{i+1} h_{i+1} T(x + \Delta x, y, t + \Delta t) + S_i h_i T(x - \Delta x, y, t + \Delta t) + S_{j+1} h_{j+1} \{T(x, y + \Delta y, t) - T(x, y, t)\} - S_j h_j \{T(x, y, t) - T(x, y - \Delta y, t)\}] \right] \frac{\Delta t}{CM} + T(x, y, t) \quad (A.4)$$

(A.4)式において問題となる値は、 $T(x + \Delta x, y, t + \Delta t)$ および $T(x - \Delta x, y, t + \Delta t)$ であるが、これらは x 方向の境界条件によって求めることが出来る。境界条件としては、両端の断熱面または温度があげられる。任意の格子点の真値をえるためには、x 方向の隣接格子点のどちらか1つの真値が得られているものと仮定しなければならぬ。

したがって、高次側の格子点の真値を得ているものと仮定し、低次側の格子点からの要素による温度成分を $T'(x, y, t + \Delta t)$ 、高次側の格子点の真値との結合係数を $H(x, y, t + \Delta t)$ とすると次式の関係が成り立つ。

$$T(x, y, t + \Delta t) = T'(x, y, t + \Delta t) - H(x, y, t + \Delta t) T(x + \Delta x, y, t + \Delta t) \quad (A.5)$$

$$T(x - \Delta x, y, t + \Delta t) = T'(x - \Delta x, y, t + \Delta t) - H(x - \Delta x, y, t + \Delta t) T(x, y, t + \Delta t) \quad (A.6)$$

(A.4)式の低次側の格子点の温度 $T(x - \Delta x, y, t + \Delta t)$ を消去するために (A.6)式を使用すると、(A.4)式は次式のように整理される。

$$T(x, y, t + \Delta t) = \left[[S_{i+1} h_{i+1} T(x + \Delta x, y, t + \Delta t) + S_i h_i T'(x - \Delta x, y, t + \Delta t) + S_{j+1} h_{j+1} \{T(x, y + \Delta y, t) - T(x, y, t)\} - S_j h_j \{T(x, y, t) - T(x, y - \Delta y, t)\}] \right] \frac{\Delta t}{CM} + T(x, y, t) \quad (A.7)$$

したがって、(A.5)式と (A.7)式を照合すると、

$$H(x, y, t + \Delta t) = \frac{S_{i+1} h_{i+1}}{\frac{CM}{\Delta t} + S_i h_i + S_{i+1} h_{i+1} + S_i h_i H(x - \Delta x, y, t + \Delta t)} \quad (A.8)$$

$$T'(x, y, t + \Delta t) = \frac{S_i h_i T'(x - \Delta x, y, t + \Delta t) + S_{j+1} h_{j+1} \{T(x, y + \Delta y, t) - T(x, y, t)\} - S_j h_j \{T(x, y, t) - T(x, y - \Delta y, t)\}}{\frac{CM}{\Delta t} + S_i h_i + S_{i+1} h_{i+1} + S_j h_j} H(x - \Delta x, y, t + \Delta t)$$

となる。したがって、 x 軸方向への前進を境界面から出発すれば、(A.8)式により逐次高次側への $H(x, y, t + \Delta t)$ を得ると同時に (A.9) 式により $T'(x, y, t + \Delta t)$ の値も得る。高次側の境界面に到達した後には、(A.5)式を使用して折り返せば格子点の真の温度を高次側から低次側へ逐次得ることが出来る。

作用素 L_2 による方程式 $L_2(T) = 0$ を次の段階で解くことになる。すなわち、 y 軸方向の計算を行なう。 x 軸の場合と同様に (A.3) 式は次のように表わされる。

$$T(x, y, t + \Delta t) = \left[[S_{i+1} h_{i+1} \{T(x + \Delta x, y, t) - T(x, y, t)\} - S_j h_j \{T(x, y, t) - T(x - \Delta x, y, t)\} + S_{j+1} h_{j+1} T(x, y + \Delta y, t + \Delta t) + S_j h_j T(x, y - \Delta y, t + \Delta t)] \frac{\Delta t}{CM} + T(x, y, t) \right] / \left\{ 1 + (S_j h_j + S_{j+1} h_{j+1}) \frac{\Delta t}{CM} \right\} \quad (A.10)$$

(A.10) 式においては問題になる値は $T(x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ および $T(x, y - \Delta y, t + \Delta t)$ であるが、これらは y 軸方向の境界条件によって、 x 軸の場合と同様の方法により求まり、(A.10) 式により y 軸方向の計算ができる。

時間経過にしたがって、差分方程式 $L_1(T) = 0$ と $L_2(T) = 0$ を交互に使用して解を得る。

Appendix B: 流体領域における格子点の温度の定常近似計算

定常近似計算においては流体の格子点の温度計算は新しいタイム・ステップの金属壁の温度について行なわれる。流体についての熱平衡式は次式で表わされる。

$$W C dF = \sum_i h_i S'_i (T_i - F) dy \quad (B.1)$$

ここで、

W = flow rate [kg/sec]

C = specific heat [kcal/kg °C]

F = coolant temperature [°C]

T_i = solid temperature [°C]

h_i = artificial heat transfer coefficient [kcal/m² sec °C]

S'_i = linear surface along coolant boundary associated with one point [m²]

dy = height increment along flow direction [m]

(B.1)式を整理し、グリッド・ライン(B)から次のグリッド・ライン(T)まで積分すると、

$$F_T = \frac{\sum_i h_i S_i T_i}{\sum_i h_i S_i} \{1 - \exp(-\sum_i h_i S_i / WC)\} + F_B \exp(-\sum_i h_i S_i / WC) \quad (B.2)$$

ここで、

S_i = surface along coolant boundary associated with one point [m^2]
となり、逐次グリッド・ラインまたは格子点の温度を求めることが出来る。

Appendix C: 使用物性値の計算式

1. ヘリウム

1.1 比重量; ρ

$$\rho = \frac{10}{1 + 0.00351T} \times \frac{P}{60} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

ここで、

T ; 温度 [$^{\circ}\text{C}$]

P ; 圧力 [kg/cm^2]

1.2 熱伝導率; λ

$$0 \leq T < 400^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda = (6.25 \times 10^{-4} T + 0.35) \times 10^{-4} \quad [\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

$$400 \leq T < 600^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda = (5.5 \times 10^{-4} T + 0.38) \times 10^{-4} \quad [\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

$$600 \leq T < 800^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda = (5.25 \times 10^{-4} T + 0.395) \times 10^{-4} \quad [\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

$$800 \leq T$$

$$\lambda = (4.25 \times 10^{-4} T + 0.475) \times 10^{-4} \quad [\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

1.3 比熱; C

$$0 \leq T < 100^{\circ}\text{C}$$

$$C = (-0.28 \times 10^{-4} T + 1.252) + (P - 50) (400 - T) \times 10^{-7} \quad [\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

$$100 \leq T < 200^{\circ}\text{C}$$

$$C = 1.2492 + (P - 50) (400 - T) \times 10^{-7} \quad [\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

$$200 \leq T < 400^{\circ}\text{C}$$

$$C = (0.15 \times 10^{-4} T + 1.2462) + (P - 50) (400 - T) \times 10^{-7} \quad [\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

$$400 \leq T < 800^{\circ}\text{C}$$

$$C = (0.178 \times 10^{-4} T + 1.2451) + K (T - 400) \times |P - 50| \times 10^{-7}$$

[$\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$]

$$800 \leq T$$

$$C = (0.135 \times 10^{-4} T + 1.2485) + K (T - 400) \times |P - 50| \times 10^{-7} \quad [\text{kcal/kg} \cdot \text{C}]$$

ここで、

$$P \leq 50; \quad K = 0.9$$

$$P > 50; \quad K = 0.3$$

1.4 粘性係数 η [kg·sec/m²]

$$\eta = \left\{ \frac{1.799}{g \times 10^6} \times 0.8779 \times \left(\frac{T + 273.15}{6.03} \right)^{0.646} \right\}$$

ここで、

$$g; \quad \text{重力加速度 [m}^2\text{/sec}^2\text{]} \quad 98$$

1.5 動粘性係数 ν [m²/sec]

$$\nu = \frac{\eta \cdot g}{\rho}$$

2. 水および蒸気

2.1 比容積; V, 比熱; Cおよびエンタルピ; A

蒸気テーブル (液相; サブルーチン CWATER, 気相; STEAM) を使用する。すなわち、水の領域においては CWATER に温度 T および圧力 P を与え、比容積 V [m³/kg] エンタルピ A [kcal/kg] を得る。また、水の比熱 $C_{p,l} \doteq 1$ [kcal/kg] とする。

蒸気の領域については STEAM に T および P を与え、V および A の他に比熱 $C_{p,g}$ [kcal/kg] およびエンタルピ S [kcal/kg °K] を得る。

2.2 比重量: ρ [kg/m³]

前述の方法により求まる比容積 V [m³/kg] を使用して次式より求める。

$$\rho = 1/V \quad [\text{kg/m}^3]$$

2.3 粘性係数: η [kg·sec/m²]

$$(1) \quad \eta_g = [35.30 \times 10^{-8} \rho + 6765 (10^{-3} \rho)^2 + 102.1 (10^{-3} \rho)^3 + \eta_0] \times 10^{-6} \times 0.0102 \quad [\text{kg} \cdot \text{sec/m}^2]$$

$$\eta_0 = 0.407T + 80.4$$

(2) 水の領域および三相領域の η_l

$$\eta_l = [29.3 / (T + 1)] \times 10^{-4} \quad [\text{kg} \cdot \text{S/m}^2]$$

2.4 動粘性係数： ν [m^2/sec]

(1) 過熱蒸気および超臨界圧蒸気の領域

STEAMに T , P を与えて, V [m^3/kg]を得て次式で得る。

$$\rho = 1/V \quad \text{kg/m}^3$$

$$\nu = \frac{\eta \cdot g}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{sec}]$$

(2) 水および二相流領域

CWATERに P , T を与えて V を得て次式で得る。

$$\rho = 1/V$$

$$\nu = \frac{\eta \cdot g}{\rho} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{sec}]$$

となる。

2.5 熱伝導率： λ [$\text{kcal}/\text{m sec } ^\circ\text{C}$](1) 過熱蒸気および超臨界圧蒸気の領域； λ_g

$$\lambda_g = \left[\{ 103.51 + 0.4198T - 2.771 \times 10^{-5} T^2 \} \times 10^{-3} \rho \right. \\ \left. + \frac{2.1482 \times 10^8}{T^{4.2}} \rho^2 + \lambda_1 \right] \times 10^{-3} \times 0.85985 \div 3600.0 \quad [\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{sec } ^\circ\text{C}]$$

$$\lambda_1 = 17.6 + 5.87 \times 10^{-2} T + 1.04 \times 10^{-4} T^2 - 4.51 \times 10^{-8} T^3$$

(2) 水および二相流領域； λ_L

$$\lambda_L = (-0.00622T^2 + 1.82T + 585.) (4.46 \times 10^{-4} P + 0.909) \\ \times 0.239 \times 10^{-6} \quad [\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{sec } ^\circ\text{C}]$$

3. メタン ($T=300^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$, $P=1 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$)

$$C_p = -0.3429 \times 10^{-6} T^2 + 0.11 \times 10^{-2} T + 0.452 \quad [\text{kcal}/\text{kg } ^\circ\text{C}]$$

$$\rho = 0.7167 P / (1.0 + T/273.15) \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$$\eta = 2.04 \times 10^{-9} T + 1.326 \times 10^{-6} \quad [\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2]$$

$$\lambda = 0.4778 \times 10^{-7} T + 0.5278 \times 10^{-5} \quad [\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}]$$

$$\nu = \eta / (\rho / g) \quad [\text{m}^2/\text{sec}]$$

$$g = 9.8 \quad [\text{m}/\text{sec}^2]$$

4. 一酸化炭素 ($T=400 \sim 800^\circ\text{C}$, $P=1 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$)

$$C_p = 0.247 + 0.04855 \times 10^{-3} T \quad [\text{kcal}/\text{kcal } ^\circ\text{C}]$$

$$\rho = 1.2501 P / (1.0 + T/273.15) \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$$\eta = 2.693 \times 10^{-9} T + 2.142 \times 10^{-6} \quad [\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2]$$

$$\lambda = 0.132 \times 10^{-7} T + 0.6667 \times 10^{-5} \quad [\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}]$$

$$\nu = \eta / (\rho / g) \quad [\text{m}^2/\text{sec}]$$

5. 水素 ($T=400\sim 800^{\circ}\text{C}$, $P=1\sim 100\text{ kg/cm}^2$)

$$C_p = 0.392 \times 10^{-3} T + 3.313 \quad [\text{kcal/kg } ^{\circ}\text{C}]$$

$$\rho = 0.0898 P / (1.0 + T/273.15) \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\eta = 1.4076 \times 10^{-9} T + 1.02 \times 10^{-6} \quad [\text{kg}\cdot\text{sec/m}^2]$$

$$\lambda = 0.719 \times 10^{-7} T + 0.461 \times 10^{-4} \quad [\text{kcal/m}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

$$\nu = \eta / \left(\frac{\rho}{g} \right) \quad [\text{m}^2/\text{sec}]$$

6. 二酸化炭素 ($T=400\sim 800^{\circ}\text{C}$, $P=1\sim 100\text{ kg/cm}^2$)

$$C_p = 0.246 + 0.65 \times 10^{-4} T + 0.8 \times 10^{-4} P \quad [\text{kcal/kg } ^{\circ}\text{C}]$$

$$\rho = 1.912 P / (1.0 + T/273.15) \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\eta = 0.413 \times 10^{-8} T + 1.41 \times 10^{-6} \quad [\text{kg}\cdot\text{sec/m}^2]$$

$$\lambda = (0.34 + 0.0023 T + 0.21 \times 10^{-3} P) \times 10^{-5} \quad [\text{kcal/m}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

$$\nu = \eta / \left(\frac{\rho}{g} \right) \quad [\text{m}^2/\text{sec}]$$

Appendix D : 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 heat transfer data for the recuperator
3. The data for the piping system
4. The heat transfer data for the steam generator
5. The heat transfer data for the 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	Input data of the order of plant components. If ILAY=1: core → reformer → recuperator → steam generator → recuperator → core If ILAY=-1: core → reformer → steam generator → core If ILAY=10: core → steam generator → core
	11-20	ISGTYP	Coolant flow direction in evaporator of steam generator. If ISGTYP=1: co-current type

			If ISGTYP=-1: counter current type
1.2	1-10	NLOOP	Number of cooling loops
	11-20	NFUEL	Number of fuel pins

2. The heat transfer data for the recuperator.

Card Type No.	Column	Fortran name	Description
2.1			This card is supplied in format (2I6, 4E12.5)
	1-6	NZSEC	Number of temperature mesh points along coolant flow direction, not more than 49.
	7-12	NZPIPE	Number of reformer tubes.
	13-24		Not used
	25-36	ZL	Length of reformer tube in m.
	37-48		Steady state inlet temperature of the hot side coolant in °C.
	49-60		Steady state inlet temperature of the cold side coolant in °C.
2.2	Blank card		

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

2.3			This card is supplied in format (5E12.5) This card is required for the hot coolant side.
	1-12	ZAH	Hydraulic cross-sectional area in m ² .
	13-24	ZSH	Linear surface area along coolant boundary associated with one mesh point in m ² .
	25-36	ZDH	Hydraulic equivalent diameter in m.
	37-48	ZWHO	Steady state total coolant flow rate in kg/sec.

	49-60	ZPHO	Steady state pressure of the coolant in kg/cm^2 .
2.4	1-12	ZLAM	This card is supplied in format (5E12.5) Radial thermal conductivity of the solid tube in $\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{sec } ^\circ\text{C}$.
	13-24	ZCM	Specific heat of the solid tube in kcal/kg .
	25-36	ZDH	Density of the solid tube in kg/m^3 .
	37-48	ZAM	Cross-sectional area in the solid region of tube in m^2 .
	49-60	ZDM	Thickness of solid tube in m.

2.5			This card is supplied in format (6E12.5) This card is required for the cold coolant side.
	1-12	ZAC	Hydraulic cross-sectional area in m^2 .
	13-24	ZSC	Linear surface area along coolant boundary associated with one mesh point in m^2 .
	25-36	ZDC	Hydraulic equivalent diameter in m.
	37-48	ZWCO	Steady state total coolant flow rate in kg/sec .
	49-60	ZPCO	Steady state pressure of the coolant in kg/cm^2 .
	61-72	ZZRECU	Ratio of bypass flow rate to total flow rate

Previously punched temperature cards or arbitrary initial temperature cards

These cards consist of three groups.

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

First card group: (ZTH(J), J=1, NZSEC)

Data input of initial temperature distribution in the hot side coolant region in $^\circ\text{C}$.

Second card group: (ZTM(J), J=1, NZSEC)

Data input of initial temperature distribution in the solid region in °C.

Third card group: (ZTC(J), J=1, NZSEC)

Data input of initial temperature distribution in the cold side coolant region in °C.

3. The data for the piping system

Card type No.	Column	Fortran name	Description
3.1			This card is supplied in format (2I6, 4E12.5)
	1-6	NSECP1	Number of mesh points along the flow direction in piping 1
	7-12	NSECP2	Number of mesh points along the flow direction in piping 2
	13-24	PIAA1	Cross-sectional area of the piping 1 in m ² .
	25-36	PIPL1	Length of the piping 1 in m.
	37-48	PIAA2	Cross-sectional area of the piping 2 in m ² .
	49-60	PIPL2	Length of the piping 2 in m.

Previously punched temperature cards or arbitrary initial temperature cards

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

First card group: (TMP1(J), J=1, NSECP1)
Data input of initial temperature distribution in piping 1

Second card group: (TMP2(J), J=1, NSECP2)
Data input of initial temperature distribution in piping 2

Data input for the other piping (3 ~ 6) area in the same manner as ascending sequence. Labels of the pipings are specified in Fig. 2.1.

4. The heat transfer data for the steam generator

Card type No.	Column	Fortran name	Description
4.0.1			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
4.0.2	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	ZZ	Ratio of the bypass flow rate to the total flow rate in the primary coolant flow.

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.

(1) The heat transfer data input for the evaporator

4.1.1	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.
4.1.2	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.

4.1.3	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
	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 $^{\circ}C$.
	61-80		Not used

Previously punched temperature cards or arbitrary initial temperature cards

First card group: (ETH1(J), J=1, NSECL)

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

Second card group: (ETM1(J), J=1, NSECL)

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

Third card group: (ETC1(J), J=1, NZSECL)

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

Fourth card group: (EX1(J), J=1, NZSECL)

Initial steam quality distribution.

(2) The heat transfer 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.

(3) Data input for the header

4.3.1			Only this card is supplied in format (I5, 7E10.5)
	1-5	NOPHE	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	TOUHE	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	THE	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	TINHE	Steady state steam temperature at the header inlet in °C.	
4.3.2	1-10	WINHE	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.

(4) Data input for steam turbine

4.4.1	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	TOUTBI	Steady state steam outlet temperature in °C.
51-80		Not used

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

(5) The heat transfer 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 heat transfer 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	1-5	NZSECR	Only this card is supplied in format (6I5) Number of the mesh points along the coolant flow direction.
	6-25		Not used.
	26-30	NNPIPE	Number of the elements.
5.2	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.
5.3	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 ₂ M	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.
5.4	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.

5.5	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 kcal/m.°C.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.
5.6	1-10	ZAMR	Cross-sectional conductivity of the outer tube in kcal/m.°C.sec.
	11-20	ZLAMM	Radial thermal conductivity of the outer tube in kcal/m.°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.
5.7	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. $^{\circ}$ 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.
5.8	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 $^{\circ}$ C.
	51-80		Not used.
5.9	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	ZWCO2	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 °C.
5.10	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.
5.11	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.

First card group: (TBI(J), J=1, NZSEC)

Initial temperature distribution in the primary coolant region in °C.

Second card group: (TB2(J), J=1, NZSEC)

Initial temperature distribution in the reaction bed region of gaseous mixture in °C.

Third card group: (TB3(J), J=1, NZSEC)

Initial temperature distribution in the return region of produced gas in °C.

Fourth card group: (TLB(J), J=1, NZSEC)

Initial temperature distribution in the guide sleeve in °C.

Fifth card group: (TMB(J), J=1, NZSEC)

Initial temperature distribution in the outer tube in °C.

Sixth card group: (TNB(J), J=1, NZSEC)

Initial temperature distribution in the inner tube in °C.

Seventh card group: (BETA(J), J=1, NZSEC)

Initial extent distribution of methane and steam reforming reaction in reaction bed region.

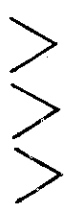
6. The data input for core

(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		
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> <p>1-12 Lower radial temperature region boundary-inches.</p> <p>13-24 Higher radial temperature region boundary-inches.</p> <p>25-36 Lower axial temperature region boundary-inches.</p> <p>37-48 Higher axial temperature region boundary-inches.</p> <p>49-60 Temperature of the region or sink (°F)</p> <p>61-72 Heat transfer coefficient to sink if required Btu/hr.ft².°F.</p>
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> <p>1-12 Coolant number (1.0 for intermediate, 2.0 for inner)</p> <p>13-24 1st Reynolds number limit RE1</p> <p>25-36 2nd Reynolds number limit RE2</p> <p>37-48 3rd Reynolds number limit RE3</p> <p>49-60 4th Reynolds number limit RE4</p> <p>Supply two blank cards.</p> <p style="margin-left: 150px;">  H_A(X) is used H_B(X) is used H_C(X) is used </p>

Blank card		
6.7		<p><u>Fuel region designation card</u></p> <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> <p>1-12 Number of lowest axial temperature point within fuel area.</p> <p>13-24 Number of highest axial temperature point within fuel area.</p> <p>25-36 Number of innermost radial temperature point within fuel area.</p> <p>37-48 Number of outermost radial temperature point within fuel area.</p> <p>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.)</p>
Blank card		
6.8		<p><u>Previously punched temperature cards</u></p> <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. (These cards are also punched at the end of a kinetics problem.)</p>
Blank card		
(This one must be supplied only if no previously punched temperatures are used.)		

6.9		<u>Function parameter cards</u> Three cards are supplied here giving parameters which may be used in defining the functions in the DATA subroutine.
6.9.1		<u>First card</u>
	1-72	Numerical values of A1 through A6, 6 words/card.
6.9.2		<u>Second card</u>
	1-72	Same for A7-A12.
6.9.3		<u>Third card</u>
	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 colum 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 $\Delta\rho_i = \int_{T_1}^{T_i} \alpha_{\text{Fuel}}(T) dT$. 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 changes 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 $\Delta\rho_i = \int_{T_1}^{T_i} \alpha_{\text{mod}}(T) dT$.
145-333	AVAIL(1)	This is a block of numbers available in the kinetics Common BL1 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- °F.
461	FSTAN	Steady state total coolant flow rate lbs/hr-element.
462-481	WSTAN(J)	P/\sqrt{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 °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.

Appendix E : A Sample Listing of Output

(This sample case is for the analysis of reactivity insertion accident.)

BLOOST-5 ... A COMBINED REACTOR KINETICS AND HEAT TRANSPORT CODE (2D-RAT64)

BLOOST 5 CASE 1 INITIAL GUESS EVALUATION DATA INPUT
0 GWD/T BURN UP

PRINT OF THE INPUT

BLOCK NUMBER	PROPERTIES OF THE BLOCKS									
	LOW RADIAL BOUNDARY	HIGH RADIAL BOUNDARY	LOW AXIAL BOUNDARY	HIGH AXIAL BOUNDARY	SOLID MATERIAL NUMBER	RADIAL GAP THICKNESS	RADIAL GAP MATERIAL	AXIAL GAP THICKNESS	AXIAL GAP MATERIAL	
1	0.0 IN.	0.157 IN.	0.0 IN.	98.425 IN.	1	0.0 IN.	0	0.0 IN.	0	
2	0.157 IN.	0.472 IN.	0.0 IN.	98.425 IN.	2	0.0039 IN.	1	0.0 IN.	0	
3	0.472 IN.	0.669 IN.	0.0 IN.	98.425 IN.	3	0.0 IN.	0	0.0 IN.	0	
4	0.669 IN.	0.728 IN.	0.0 IN.	98.425 IN.	1	0.0 IN.	0	0.0 IN.	0	
5	0.728 IN.	1.032 IN.	0.0 IN.	98.425 IN.	3	0.0 IN.	0	0.0 IN.	0	

RADIAL BOUNDARY ASSIGNMENTS

POINT NUMBER	POINT LOCATION	BOUNDARY LOCATION	GAP NUMBER
1	0.0 IN.	0.0 IN.	1
2	0.079 IN.	0.157 IN.	2
3	0.177 IN.		
4	0.217 IN.		
5	0.256 IN.		
6	0.295 IN.		
7	0.349 IN.		
8	0.405 IN.		
9	0.450 IN.	0.472 IN.	3
10	0.531 IN.		
11	0.630 IN.	0.669 IN.	4
12	0.699 IN.	0.728 IN.	5
13	0.797 IN.		
14	0.949 IN.	1.032 IN.	6
15	1.032 IN.		

AXIAL BOUNDARY ASSIGNMENTS

POINT NUMBER	POINT LOCATION	BOUNDARY LOCATION	GAP NUMBER
1	0.0 IN.	0.0 IN.	1
2	2.953 IN.		
3	8.858 IN.		
4	14.764 IN.		
5	20.669 IN.		
6	26.575 IN.		
7	32.480 IN.		
8	38.386 IN.		
9	44.291 IN.		
10	50.197 IN.		
11	56.102 IN.		
12	62.008 IN.		
13	67.913 IN.		
14	73.819 IN.		
15	79.724 IN.		
16	85.630 IN.		
17	91.535 IN.		
18	96.457 IN.	98.425 IN.	2
19	98.425 IN.		

HEAT TRANSFER COEFFICIENTS SPECIFIED IN THE INITIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION (BTU/HR.F.FT.FT)

POINT NUMBER	INNER RADIAL BOUNDARY	OUTER RADIAL BOUNDARY	TOP AXIAL BOUNDARY	BOTTOM AXIAL BOUNDARY
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0

SPECIFICATIONS FOR FLOW ALONG THE HIGH RADIAL BOUNDARY
 THE REYNOLDS NUMBER LIMITS ARE 0.0 0.2200E 04 0.1500E 05 0.1000E 07
 NO STEP CHANGES IN FLOW
 NO STEP CHANGES IN INLET TEMPERATURE

FUEL REGIO.	BOUNDS	FUEL REGION	NON-FUEL	EFFECTIVE	MOD. FRAC.
		VOLUME	VOLUME	MOD.VOL.(FT3)	IN FUEL
2	18	3	9	0.1130E-01	0.4931E-01
				0.4931E-01	0.0

INITIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION

THE CURRENT TIME IS 0.0 HR. OR 0.0 MIN. OR 0.0 SEC. 0 ITERATIONS HAVE BEEN PERFORMED

TEMPERATURE GRID
 THE RADIAL DIRECTION IS HORIZONTAL
 THE AXIAL DIRECTION IS VERTICAL
 THE TEMPERATURES ARE IN DEGREES FAHRENHEIT

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1720	1720	1713	1701	1684	1655	1613	1574	1376	1353	803	811	811	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1706	1706	1700	1689	1674	1648	1609	1574	1396	1375	891	895	896	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1746	1746	1740	1730	1715	1690	1653	1619	1448	1428	973	977	977	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1814	1814	1809	1798	1783	1758	1721	1688	1516	1496	1054	1058	1058	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1898	1898	1893	1882	1867	1841	1804	1769	1595	1574	1135	1139	1139	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1984	1984	1978	1967	1951	1925	1887	1852	1674	1653	1218	1222	1222	0	0	0	0	0	0	0
8	0	2042	2042	2037	2026	2011	1985	1948	1913	1739	1718	1301	1305	1305	0	0	0	0	0	0	0
9	0	2044	2044	2039	2029	2015	1992	1958	1927	1769	1750	1378	1382	1382	0	0	0	0	0	0	0
10	0	2055	2055	2050	2042	2029	2008	1977	1948	1803	1786	1449	1453	1453	0	0	0	0	0	0	0
11	0	2117	2117	2112	2103	2090	2069	2038	2009	1864	1847	1517	1521	1521	0	0	0	0	0	0	0
12	0	2165	2165	2160	2151	2139	2118	2088	2060	1918	1902	1585	1588	1588	0	0	0	0	0	0	0
13	0	2212	2212	2208	2199	2187	2167	2137	2110	1972	1955	1650	1653	1653	0	0	0	0	0	0	0
14	0	2258	2258	2254	2245	2234	2214	2185	2158	2023	2007	1714	1717	1717	0	0	0	0	0	0	0
15	0	2289	2289	2285	2277	2266	2247	2220	2195	2066	2051	1776	1779	1779	0	0	0	0	0	0	0
16	0	2305	2305	2301	2294	2283	2266	2241	2217	2099	2085	1834	1836	1836	0	0	0	0	0	0	0
17	0	2289	2289	2286	2280	2271	2256	2234	2214	2112	2100	1885	1887	1887	0	0	0	0	0	0	0
18	0	2272	2272	2269	2264	2256	2243	2224	2206	2117	2107	1921	1921	1921	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

THE FUNCTION PARAMETERS

.185000E 000.482400E 010.159800E 020.0 0.0 0.185000E 00
 .482400E 010.159800E 020.0 0.0 0.0 0.996500E 00
 .350000E-020.0 0.152100E 000.528880E 020.528300E 020.0

KINETICS INPUT

INITIAL POWER LEVEL (MW) ----- 5.00000E 01
 FUEL REGION POWER FRACTION ----- 1.00000E 00
 FUEL REGION HEAT GENERATION RATE (BTU/HR CU-FT)----- 2.53500E 06
 (KW/LITER) ----- 2.62296E 01
 CONSTANT SOURCE (MW/SEC) ----- 0.0

PROBLEM TERMINATION TIME (SEC) ----- 2000.00
 INITIAL TIME STEP (SEC) ----- 0.00100
 MINIMUM TIME STEP (SEC) ----- 0.00001
 TEMPERATURE MAP PRINT FREQUENCY (SEC) ----- 5.00

ACCURACY CRITERIA	FROM (SEC.)	TO (SEC.)	@1	@2	MAX FUEL TEMP CHANGE (DEG C)	MAX TIME BETWEEN RAT CALC(SEC)
	0.0	1.000	5.000E-04	5.000E-03	2.00	1.000E-01
	1.000	10.000	5.000E-04	5.000E-03	2.00	1.000E 00
	10.000	100.000	5.000E-04	5.000E-03	2.00	1.000E 01
	100.000	2000.000	5.000E-04	5.000E-03	2.00	5.000E 01

KINETIC PARAMETERS

PROMPT NEUTRON LIFETIME(SEC) = 4.46000E-04

DELAY GROUP	BETA	LAMBDA (SEC-1)
1	2.26800E-04	2.92000E 00
2	6.04800E-04	1.14000E 00
3	2.09000E-03	3.07000E-01
4	1.06900E-03	1.15000E-01
5	1.22600E-03	3.10000E-02
6	1.83600E-04	1.25000E-02
TOTAL BETA = 5.4002E-03		

TEMPERATURE COEFFICIENT TABLES

FUEL COEFFICIENT			MODERATOR COEFFICIENT		
ADJ FACTOR = 1.00			ADJ FACTOR = 1.00		
TEMP(DEG C)	DELTA RHO		TEMP(DEG C)	DELTA RHO	
1	450.00	0.0	450.00	0.0	
2	550.00	3.76000E-03	550.00	-5.00000E-04	
3	650.00	7.52000E-03	650.00	-1.00100E-03	
4	750.00	1.12800E-02	750.00	-1.50100E-03	
5	850.00	1.50400E-02	850.00	-2.00100E-03	
6	950.00	1.88000E-02	950.00	-2.50200E-03	
7	1050.00	2.25600E-02	1050.00	-3.00200E-03	
8	1150.00	2.63200E-02	1150.00	-3.50200E-03	
9	1250.00	3.00800E-02	1250.00	-4.00200E-03	
10	1350.00	3.38400E-02	1350.00	-4.50300E-03	
11	1450.00	3.76000E-02	1450.00	-5.00300E-03	
12	1550.00	4.13600E-02	1550.00	-5.50300E-03	
13	1650.00	4.51200E-02	1650.00	-6.00400E-03	
14	1750.00	4.88800E-02	1750.00	-6.50400E-03	
15	1850.00	5.26400E-02	1850.00	-7.00400E-03	
16	1950.00	5.64000E-02	1950.00	-7.50500E-03	
17	2050.00	6.01600E-02	2050.00	-8.00500E-03	
18	2150.00	6.39200E-02	2150.00	-8.50500E-03	

SCRAM AND ACCIDENT

POWER LEVEL FOR SCRAM INITIATION = MW 70.00

DELAY TIME 1.3600 SEC

SCRAM			ACCIDENT		
	TIME SEC	DELTA K		TIME SEC	DELTA K
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.0000E 01	3.5900E-02	1.0000E 01	2.0800E-03	
3	2.0000E 01	7.1800E-02	2.0000E 01	4.1600E-03	
4	3.0000E 01	1.0780E-01	3.0000E 01	6.2400E-03	
5	4.0000E 01	1.4370E-01	4.0000E 01	8.3200E-03	
6	5.0000E 01	1.7960E-01	5.0000E 01	1.0400E-02	
7	1.0000E 02	3.5920E-01	1.0000E 02	2.0800E-02	
8	1.0000E 03	3.5920E-01	1.0000E 03	2.0800E-02	
9	2.0000E 03	3.5920E-01	2.0000E 03	2.0800E-02	

RAMP CONTINUES AFTER SCRAM BEGINS

AXIAL POWER DISTRIBUTION DATA

MESH POINT	P/P AVERAGE (INPUT)	P/P AVERAGE (RENORMALIZED)	BTU/HR CU.FT. (IN FUEL)	AXIAL WT.FACTOR
1	1.758	1.758	4.45653E 06	1.000
2	1.287	1.287	3.26254E 06	1.000
3	1.158	1.158	2.93553E 06	1.000
4	1.115	1.115	2.82652E 06	1.000
5	1.115	1.115	2.82652E 06	1.000
6	1.137	1.137	2.88229E 06	1.000
7	1.158	1.158	2.93553E 06	1.000
8	1.137	1.137	2.88229E 06	1.000
9	1.029	1.029	2.60852E 06	1.000
10	0.944	0.944	2.39304E 06	1.000
11	0.944	0.944	2.39304E 06	1.000
12	0.922	0.922	2.33727E 06	1.000
13	0.901	0.901	2.28403E 06	1.000
14	0.879	0.879	2.22826E 06	1.000
15	0.836	0.836	2.11926E 06	1.000
16	0.772	0.772	1.95702E 06	1.000
17	0.665	0.665	1.68578E 06	1.000
18	0.579	0.579	1.46776E 06	1.000
19	0.665	0.665	1.68578E 06	1.000
20	0.0	0.0	0.0	1.000

COOLANT INLET TEMPERATURE (DEG F) ----- 752.00
 (DEG C) ----- 400.00
 TOTAL FLOW RATE (LB/HR ELEMENT) ----- 59.45
 OUTER FLOW RATE (LB/HR ELEMENT) ----- 59.45
 INNER FLOW RATE (LB/HR ELEMENT) ----- 0.0
 INNER FLOW FRACTION (INNER/TOTAL) ----- 0.0

RESULTS

COOLANT TEMPERATURES		FLOW (LB/HR)
INLET	OUTLET	
INNER RADIAL	0	0
OUTER RADIAL	400	59
UPPER AXIAL	0	0
LOWER AXIAL	0	0

THE CURRENT TIME IS 0.0 HR. OR 0.0 MIN. OR 0.0 SEC. 1 ITERATIONS HAVE BEEN PERFORMED

TEMPERATURE GRID

THE RADIAL DIRECTION IS HORIZONTAL
 THE AXIAL DIRECTION IS VERTICAL

THE TEMPERATURES ARE IN DEGREES CENTIGRADE

1	0	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	400	-17	-17	0		
2	-17	938	938	934	927	918	901	878	856	746	734	428	433	433	-17
3	-17	930	930	926	920	912	898	876	856	758	746	477	479	480	-17
4	-17	952	952	949	943	935	921	900	881	786	775	523	525	525	-17
5	-17	990	990	987	981	973	959	938	920	824	813	567	570	570	-17
6	-17	1036	1036	1034	1028	1019	1005	984	965	868	856	613	615	615	-17
7	-17	1084	1084	1081	1075	1066	1051	1030	1011	912	900	659	661	661	-17
8	-17	1116	1116	1114	1108	1099	1085	1064	1045	948	936	705	707	707	-17
9	-17	1118	1118	1115	1109	1101	1089	1070	1053	965	954	748	750	750	-17
10	-17	1124	1124	1121	1116	1109	1098	1080	1064	984	974	787	789	789	-17
11	-17	1158	1158	1155	1150	1143	1131	1114	1098	1018	1008	825	827	827	-17
12	-17	1185	1185	1182	1177	1170	1159	1142	1126	1048	1039	862	864	864	-17
13	-17	1211	1211	1209	1204	1197	1186	1169	1154	1078	1068	899	900	900	-17
14	-17	1236	1236	1234	1229	1223	1212	1196	1181	1106	1097	934	936	936	-17
15	-17	1254	1254	1251	1247	1241	1230	1215	1201	1130	1121	969	970	970	-17
16	-17	1263	1263	1260	1256	1250	1241	1227	1214	1148	1140	1001	1002	1002	-17
17	-17	1254	1254	1252	1249	1244	1235	1223	1212	1155	1149	1029	1030	1030	-17
18	-17	1244	1244	1243	1240	1235	1228	1218	1208	1158	1153	1049	1049	1049	-17
19	0	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	0

TIME = 0.0 FLOW. MOT= 0.16611E-01COLD= 0.12624E-01

HOT INLET TEMP=	700.0	OUTLET TEMP=	566.1	RECUPERATOR OUTLET TEMP=	400.0	BYPASS RATIO=	0.24			
COLD INLET TEMP=	265.0	OUTLET TEMP=	442.7							
HOTLEG TEMPERATURE DISTRIBUTION	694.3	683.1	672.6	662.8	653.6	645.0	636.9	629.3	622.2	615.6
	609.3	603.5	598.0	592.8	587.9	583.4	579.1	575.1	571.4	567.8
METAL TEMPERATURE DISTRIBUTION	372.5	380.6	388.3	395.5	402.4	408.8	414.9	420.7	426.1	431.2
	436.0	440.6	444.8	448.9	452.7	456.2	459.6	462.8	465.7	468.5
COLDLEG TEMPERATURE DISTRIBUTION	272.7	287.5	301.5	314.5	326.7	338.2	348.9	359.0	368.4	377.2
	385.5	393.3	400.6	407.4	413.8	419.8	425.5	430.8	435.7	440.4
PIPE-1-TEMPERATURE DISTRIBUTION	950.9	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0
PIPE-2-TEMPERATURE DISTRIBUTION	699.8	700.0	700.0	700.0	700.0	700.0	700.0	700.0	700.0	700.0
PIPE-3-TEMPERATURE DISTRIBUTION										

TIME= 1.02300E 00
 EVAPORATOR REGION

HELIUM INLET 566.1 OUTLET 194.6
 STEAM OUTLET 250.6 INLET 132.8
 QUALITY OF OUTLET 0.79826 S.G OUTLET TEMP. 235.4 BYPASS RATIO 0.110
 ** EVAPORATOR REGION **

NODAL TEMPERATURE OF 1

552.5	521.2	487.3	457.6	431.8	409.4	390.0	373.1	358.5	345.8
334.8	323.3	317.2	310.4	304.8	300.1	296.0	292.2	288.5	284.6
280.8	276.8	272.8	268.8	264.7	260.5	256.3	252.0	247.7	243.4
238.9	234.4	229.9	225.3	220.7	216.1	211.3	206.6	201.8	197.0

WEIGHT FLUX OF 1

7.02228E 00

NODAL TEMPERATURE OF 2

250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6
250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	248.7	244.2	239.7
235.1	230.4	225.7	220.9	216.0	211.1	206.1	201.0	195.9	190.7
185.5	180.2	174.8	169.4	163.9	158.4	152.8	147.2	141.6	135.8

WEIGHT FLUX OF 2

7.43000E 00

METAL TEMPERATURE

369.0	271.5	264.1	261.9	261.0	260.3	259.7	259.4	259.3	259.4
259.9	260.7	262.1	264.1	267.2	268.4	266.9	264.3	260.1	255.9
251.5	247.2	242.7	238.2	233.7	229.1	224.5	219.8	215.0	210.2
205.4	200.5	195.6	190.6	185.6	180.6	175.5	170.4	165.3	160.2

X DISTRIBUTION OF 2

0.75	0.66	0.57	0.48	0.40	0.34	0.28	0.23	0.19	0.15
0.12	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TRANSMIT COEF OF 1

0.168	0.169	0.168	0.166	0.165	0.164	0.163	0.162	0.161	0.160
0.160	0.159	0.158	0.158	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.156
0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.155	0.155	0.155	0.155
0.155	0.155	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.153

TRANSMIT COEF OF 2

0.217	3.585	11.604	14.817	10.722	7.865	5.808	4.283	3.142	2.283
1.634	1.143	0.774	0.504	0.311	0.236	0.236	0.236	0.235	0.234
0.234	0.233	0.232	0.230	0.229	0.228	0.226	0.224	0.223	0.221
0.218	0.216	0.214	0.211	0.208	0.205	0.202	0.199	0.196	0.192

VELOCITY OF 1

12.533	12.066	11.559	11.114	10.728	10.393	10.102	9.849	9.630	9.440
9.276	9.135	9.013	8.911	8.827	8.757	8.696	8.639	8.582	8.525
8.467	8.408	8.348	8.288	8.226	8.164	8.101	8.037	7.973	7.907
7.841	7.774	7.706	7.637	7.569	7.498	7.429	7.357	7.286	7.213

VELOCITY OF 2

0.717	0.636	0.547	0.467	0.397	0.337	0.284	0.238	0.199	0.164
0.134	0.108	0.086	0.068	0.053	0.024	0.024	0.024	0.024	0.023
0.023	0.023	0.023	0.023	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022
0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.020

0.217	4.026	12.069	14.439	10.458	7.675	5.666	4.181	3.071	2.234
1.599	1.121	0.762	0.497	0.307	0.236	0.236	0.236	0.235	0.234
0.234	0.233	0.232	0.230	0.229	0.228	0.226	0.224	0.222	0.221
0.218	0.216	0.214	0.211	0.208	0.205	0.202	0.199	0.196	0.192

VELOCITY OF 1

12.533	12.066	11.559	11.114	10.728	10.393	10.102	9.849	9.631	9.441
9.276	9.135	9.014	8.911	8.827	8.758	8.697	8.638	8.583	8.525
8.468	8.408	8.348	8.288	8.227	8.164	8.101	8.037	7.972	7.908
7.841	7.775	7.706	7.638	7.568	7.499	7.429	7.357	7.285	7.213

VELOCITY OF 2

0.715	0.631	0.541	0.461	0.392	0.332	0.280	0.235	0.196	0.162
0.133	0.107	0.086	0.067	0.052	0.024	0.024	0.024	0.024	0.023
0.023	0.023	0.023	0.023	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022
0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.020

TEMPERATURE AND HEAT-TRANSFER-COEFFICIENT

	T1	TM	T2	TN	T3	H1	H2	H3	H4
EDGE	699.8		550.0		641.2				
	704.5	661.5	572.1	609.5	644.6	0.2535	0.1612	0.2065	0.2753
	713.2	676.5	602.0	626.8	650.8	0.2537	0.1655	0.2137	0.2758
	721.2	684.8	612.3	634.0	655.6	0.2538	0.1688	0.2192	0.2761
	729.3	691.2	616.6	638.2	660.1	0.2540	0.1718	0.2243	0.2765
	737.8	697.6	620.2	642.1	664.8	0.2542	0.1749	0.2296	0.2768
	746.9	704.4	624.1	646.2	669.7	0.2544	0.1780	0.2351	0.2772
	756.4	711.6	628.2	650.5	674.7	0.2546	0.1813	0.2408	0.2776
	766.5	719.1	632.6	655.0	679.8	0.2548	0.1846	0.2467	0.2780
	777.2	727.1	637.2	659.7	685.2	0.2551	0.1880	0.2527	0.2784
	788.5	735.6	642.2	664.6	690.6	0.2553	0.1915	0.2591	0.2788
	800.5	744.6	647.6	669.8	696.1	0.2556	0.1950	0.2656	0.2792
	813.1	754.0	653.5	675.2	701.6	0.2557	0.1986	0.2723	0.2796
	826.4	764.1	659.9	680.9	707.2	0.2559	0.2023	0.2793	0.2800
	840.5	774.8	666.8	687.0	712.7	0.2561	0.2060	0.2864	0.2804
	855.3	786.2	674.5	693.4	718.0	0.2562	0.2098	0.2937	0.2808
	870.9	798.3	683.0	700.1	723.0	0.2564	0.2136	0.3013	0.2812
	887.2	811.2	692.5	707.3	727.6	0.2566	0.2174	0.3089	0.2815
	904.3	825.0	703.2	714.9	731.5	0.2568	0.2212	0.3167	0.2818
	922.2	839.7	715.3	723.1	734.4	0.2570	0.2250	0.3245	0.2820
	940.6	855.6	729.1	731.9	736.1	0.2573	0.2288	0.3324	0.2822
EDGE	950.0		736.6		736.6				

VOLUME RATIO

	CH4	H2O	CO	H2	CO2	RATIO CH4	RATIO H2O
INLET	0.9513	4.7559					
	0.9483	4.7510	0.0010	0.0108	0.0020	1.00	1.00
	0.9365	4.7338	0.0074	0.0517	0.0074	0.98	1.00
	0.9156	4.7025	0.0178	0.1246	0.0178	0.96	0.99
	0.8906	4.6650	0.0303	0.2123	0.0303	0.94	0.98
	0.8639	4.6248	0.0437	0.3059	0.0437	0.91	0.97
	0.8357	4.5825	0.0578	0.4046	0.0578	0.88	0.96
	0.8059	4.5379	0.0727	0.5087	0.0727	0.85	0.95
	0.7746	4.4909	0.0883	0.6183	0.0883	0.81	0.94
	0.7416	4.4415	0.1048	0.7337	0.1048	0.78	0.93
	0.7070	4.3895	0.1221	0.8549	0.1221	0.74	0.92
	0.6706	4.3350	0.1403	0.9823	0.1403	0.70	0.91
	0.6324	4.2776	0.1594	1.1160	0.1594	0.66	0.90
	0.5923	4.2175	0.1795	1.2563	0.1795	0.62	0.89

566.1	566.0	566.0	566.0	566.0	566.0	566.0	566.0	566.0	566.0
PIPE-4-TEMPERATURE DISTRIBUTION									
235.4	235.0	235.0	235.0	235.0	235.0	235.0	235.0	235.0	235.0
PIPE-5-TEMPERATURE DISTRIBUTION									
265.0	265.0	265.0	265.0	265.0	265.0	265.0	265.0	265.0	265.0
PIPE-6-TEMPERATURE DISTRIBUTION									
400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

RESULTS

COOLANT TEMPERATURES
 INLET OUTLET FLOW (LB/HR)
 INNER RADIAL 0 0 0
 OUTER RADIAL 400 1026 59
 UPPER AXIAL 0 0 0
 LOWER AXIAL 0 0 0

THE CURRENT TIME IS 0.0003 HR. OR 0.0170 MIN. OR 1.02300 SEC. 6 ITERATIONS HAVE BEEN PERFORMED

TEMPERATURE GRID
 THE RADIAL DIRECTION IS HORIZONTAL
 THE AXIAL DIRECTION IS VERTICAL
 THE TEMPERATURES ARE IN DEGREES CENTIGRADE

1	0	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	400	-17	-17	0
2	-17	938	938	934	927	918	902	878	857	747	734	428	432	433	433	-17	-17
3	-17	930	930	927	921	912	898	876	857	758	746	477	479	480	480	-17	-17
4	-17	952	952	949	943	935	921	901	882	787	775	522	525	525	525	-17	-17
5	-17	990	990	987	981	973	959	938	920	824	813	567	570	570	570	-17	-17
6	-17	1037	1037	1034	1028	1019	1005	984	965	868	857	612	615	615	615	-17	-17
7	-17	1084	1084	1081	1075	1066	1052	1030	1011	912	900	659	661	661	661	-17	-17
8	-17	1117	1117	1114	1108	1099	1085	1064	1045	948	937	705	707	707	707	-17	-17
9	-17	1118	1118	1115	1109	1102	1089	1070	1053	965	954	748	750	750	750	-17	-17
10	-17	1124	1124	1121	1116	1109	1098	1080	1064	984	974	787	789	789	789	-17	-17
11	-17	1158	1158	1155	1150	1143	1132	1114	1098	1018	1008	825	827	827	827	-17	-17
12	-17	1165	1185	1182	1177	1170	1159	1142	1127	1048	1038	862	864	864	864	-17	-17
13	-17	1211	1211	1209	1204	1197	1186	1169	1154	1077	1068	899	900	900	900	-17	-17
14	-17	1237	1237	1234	1230	1223	1212	1196	1181	1106	1097	934	936	936	936	-17	-17
15	-17	1254	1254	1252	1247	1241	1231	1215	1201	1130	1121	969	970	970	970	-17	-17
16	-17	1263	1263	1260	1256	1251	1241	1227	1214	1148	1140	1001	1002	1002	1002	-17	-17
17	-17	1254	1254	1252	1249	1244	1235	1223	1212	1155	1149	1029	1030	1030	1030	-17	-17
18	-17	1244	1244	1243	1240	1235	1228	1218	1208	1158	1152	1049	1049	1049	1049	-17	-17
19	0	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	0	0

TIME = 0.10230E 01 FLOW. HOT= 0.16611E-01 COLD= 0.12624E-01

HOT INLET TEMP. =	700.0	OUTLET TEMP. =	566.1	RECUPERATOR OUTLET TEMP. =	400.0	BYPASS RATIO =	0.24
COLD INLET TEMP. =	265.0	OUTLET TEMP. =	442.7				
HOTLEG TEMPERATURE DISTRIBUTION							
	694.3	683.1	672.6	662.8	653.6	645.0	636.9
	609.3	603.5	598.0	592.8	587.9	583.4	576.1
METAL TEMPERATURE DISTRIBUTION							
	372.5	380.6	388.3	395.5	402.4	408.8	414.9
	436.0	440.6	444.8	448.9	452.7	456.2	459.6
COLDLEG TEMPERATURE DISTRIBUTION							
	272.7	287.5	301.5	314.5	326.7	338.2	348.9
	365.5	393.3	400.6	407.4	413.8	419.8	425.5
PIPE-1 TEMPERATURE DISTRIBUTION							
	950.8	950.8	950.8	950.8	950.8	950.8	950.8
PIPE-2 TEMPERATURE DISTRIBUTION							
	699.7	699.7	699.7	699.7	699.7	699.7	699.7
PIPE-3 TEMPERATURE DISTRIBUTION							
	566.1	566.1	566.1	566.1	566.1	566.1	566.1
PIPE-4 TEMPERATURE DISTRIBUTION							
	235.4	235.4	235.4	235.4	235.4	235.4	235.0
PIPE-5 TEMPERATURE DISTRIBUTION							
	265.0	265.0	265.0	265.0	265.0	265.0	265.0
PIPE-6 TEMPERATURE DISTRIBUTION							
	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

TIME= 0.0
EVAPORATOR REGION

MELIUM INLET 566.0 OUTLET 194.6
STEAM OUTLET 250.6 INLET 132.8
QUALITY OF OUTLET 0.80188 S.G OUTLET TEMP. 255.4 BYPASS RATIO 0.110
** EVAPORATOR REGION **

NODAL TEMPERATURE OF 1

552.4	521.1	487.4	457.6	431.8	409.4	390.0	373.1	358.5	345.8
334.8	325.3	317.3	310.5	304.8	300.1	298.1	292.3	288.4	284.7
280.7	276.9	272.8	268.7	264.7	260.5	256.3	252.0	247.7	243.3
239.0	234.4	230.0	225.3	220.8	216.0	211.4	206.6	201.8	197.0

WEIGHT FLUX OF 1

7.02228E 00

NODAL TEMPERATURE OF 2

250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6
250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	250.6	248.7	244.2	239.7
235.1	230.4	225.7	220.9	216.0	211.1	206.1	201.0	195.9	190.7
185.5	180.2	174.8	169.4	163.9	158.4	152.8	147.2	141.6	135.8

WEIGHT FLUX OF 2

7.43000E 00

METAL TEMPERATURE

369.0	271.2	264.1	262.0	261.1	260.3	259.8	259.5	259.4	259.5
259.9	260.8	262.1	264.1	267.2	268.4	266.9	264.3	260.1	255.9
251.5	247.2	242.7	238.2	233.7	229.1	224.5	219.8	215.0	210.2
205.4	200.3	195.6	190.6	185.6	180.6	175.5	170.4	165.3	160.2

X DISTRIBUTION OF 2

0.76	0.67	0.57	0.48	0.40	0.34	0.28	0.23	0.19	0.15
0.12	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TRANSMIT COEF OF 1

0.168	0.169	0.168	0.166	0.165	0.164	0.163	0.162	0.161	0.160
0.160	0.159	0.158	0.158	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.156
0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.155	0.155	0.155	0.155
0.155	0.155	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.153

TRANSMIT COEF OF 2

0.5505	4.1547	0.2004	1.4028	0.2004	0.58	0.87
0.5069	4.0894	0.2222	1.5553	0.2222	0.53	0.86
0.4617	4.0216	0.2448	1.7136	0.2448	0.49	0.85
0.4150	3.9516	0.2681	1.8767	0.2681	0.44	0.83
0.3673	3.8800	0.2920	2.0439	0.2920	0.39	0.82
0.3189	3.8074	0.3162	2.2132	0.3162	0.34	0.80
0.2706	3.7350	0.3403	2.3822	0.3403	0.28	0.79
0.2465	3.6988	0.3524	2.4667	0.3524	0.2591	0.7777

UTLET TIME SECS	FUEL TEMP DEG C	MOD TEMP DEG C	GAS OUT DEG F	POWER MW	PERIOD SECS	NET	ACCIDENT	REACTIVITY	TFUEL TERM	TMOD TERM	SCRAM	TOT MW SEC
0.0	1090.51	828.89	1933.87	5.000E 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.00E-03	1090.51	828.88	1933.87	5.000E 01	4.242E 03	2.081E-07	2.0800E-07	-1.1757E-10	-5.4675E-12	0.0	0.0	5.00E-02
3.00E-03	1090.51	828.88	1933.87	5.000E 01	1.135E 03	6.014E-07	6.2400E-07	-1.1757E-10	2.2730E-08	0.0	0.0	1.50E-01
7.00E-03	1090.51	828.88	1933.87	5.000E 01	4.516E 02	1.433E-06	1.4560E-06	-1.1757E-10	2.2730E-08	0.0	0.0	3.50E-01
1.50E-02	1090.51	828.88	1933.87	5.000E 01	2.107E 02	3.097E-06	3.1200E-06	-1.1757E-10	2.2730E-08	0.0	0.0	7.50E-01
3.10E-02	1090.51	828.88	1933.87	5.001E 01	1.077E 02	6.425E-06	6.4480E-06	-1.1757E-10	2.2730E-08	0.0	0.0	1.55E 00
6.30E-02	1090.51	828.88	1933.87	5.004E 01	6.031E 01	1.308E-05	1.3104E-05	-1.1757E-10	2.2730E-08	0.0	0.0	3.15E 00
1.27E-01	1090.51	828.88	1933.85	5.012E 01	3.817E 01	2.639E-05	2.6416E-05	-1.1757E-10	2.2730E-08	0.0	0.0	6.38E 00
2.55E-01	1090.51	828.88	1933.84	5.035E 01	2.841E 01	5.296E-05	5.3040E-05	5.0371E-08	2.4790E-08	0.0	0.0	1.28E 01
5.11E-01	1090.54	828.88	1933.82	5.088E 01	2.436E 01	1.060E-04	1.0629E-04	2.2019E-07	2.4561E-08	0.0	0.0	2.57E 01

----- TEMPERATURE AND HEAT-TRANSFER-COEFFICIENT

----	T1	TM	T2	TN	T3	H1	H2	H3	H4
EDGE	699.7		550.0		640.9				
	704.4	661.5	572.1	609.5	644.6	0.2535	0.1612	0.2065	0.2753
	713.1	676.5	602.0	626.8	650.8	0.2337	0.1655	0.2137	0.2758
	721.1	684.8	612.3	634.0	655.5	0.2338	0.1688	0.2192	0.2761
	729.2	691.2	616.6	638.2	660.1	0.2540	0.1718	0.2243	0.2765
	737.8	697.6	620.2	642.1	664.8	0.2542	0.1749	0.2296	0.2768
	746.8	704.4	624.1	646.2	669.7	0.2544	0.1780	0.2351	0.2772
	756.4	711.6	628.2	650.5	674.7	0.2546	0.1813	0.2408	0.2776
	766.5	719.1	632.6	655.0	679.9	0.2548	0.1846	0.2467	0.2780
	777.2	727.1	637.2	659.7	685.2	0.2551	0.1880	0.2528	0.2784
	788.5	735.6	642.2	664.8	690.6	0.2553	0.1915	0.2591	0.2788
	800.4	744.6	647.7	669.8	696.1	0.2556	0.1950	0.2656	0.2792
	813.1	754.0	653.5	675.2	701.6	0.2557	0.1986	0.2723	0.2796
	826.4	764.1	659.9	680.9	707.2	0.2559	0.2023	0.2793	0.2800
	840.5	774.8	666.8	687.0	712.7	0.2561	0.2060	0.2864	0.2804
	855.4	786.2	674.5	693.4	718.0	0.2562	0.2098	0.2938	0.2808
	871.0	798.3	683.0	700.1	723.0	0.2564	0.2136	0.3013	0.2812
	887.5	811.2	692.5	707.3	727.6	0.2566	0.2174	0.3089	0.2815
	904.7	825.0	703.2	714.9	731.5	0.2568	0.2212	0.3167	0.2818
	922.7	839.7	715.3	723.1	734.4	0.2570	0.2250	0.3245	0.2820
	941.4	855.6	729.1	731.9	736.1	0.2573	0.2288	0.3324	0.2822
EDGE	950.8		736.5		736.5				

----- VOLUME RATIO

----	CH4	H2O	CO	H2	CO2	RATIO CH4	RATIO H2O				
INLET	0.9513	4.7559									
	0.9483	4.7510	0.0010	0.0108	0.0020	1.00	1.00				
	0.9365	4.7338	0.0074	0.0517	0.0074	0.98	1.00				
	0.9156	4.7025	0.0178	0.1247	0.0178	0.96	0.99				
	0.8906	4.6649	0.0303	0.2124	0.0303	0.94	0.98				
	0.8638	4.6248	0.0437	0.3060	0.0437	0.91	0.97				
	0.8356	4.5825	0.0578	0.4048	0.0578	0.88	0.96				
	0.8059	4.5379	0.0727	0.5088	0.0727	0.85	0.95				
	0.7746	4.4909	0.0883	0.6184	0.0883	0.81	0.94				
	0.7416	4.4415	0.1048	0.7337	0.1048	0.78	0.93				
	0.7070	4.3895	0.1221	0.8550	0.1221	0.74	0.92				
	0.6705	4.3348	0.1404	0.9826	0.1404	0.70	0.91				
	0.6323	4.2775	0.1595	1.1164	0.1595	0.66	0.90				
	0.5922	4.2174	0.1795	1.2566	0.1795	0.62	0.89				
	0.5504	4.1546	0.2004	1.4031	0.2004	0.58	0.87				
	0.5068	4.0892	0.2222	1.5557	0.2222	0.53	0.86				
	0.4615	4.0214	0.2449	1.7140	0.2449	0.49	0.85				
	0.4149	3.9514	0.2682	1.8771	0.2682	0.44	0.83				
	0.3672	3.8799	0.2920	2.0441	0.2920	0.39	0.82				
	0.3189	3.8074	0.3162	2.2132	0.3162	0.34	0.80				
	0.2706	3.7350	0.3403	2.3821	0.3403	0.28	0.79				
UTLET	0.2465	3.6988	0.3524	2.4666	0.3524	0.2591	0.7777				
TIME	FUEL TEMP	MOD TEMP	GAS OUT	PERIOD	NET	ACCIDENT	TFUEL TERM	TMOD TERM	SCRAM	TOT	
SECS	DEG C	DEG C	DEG F	MW	SECS	NET	ACCIDENT	TFUEL TERM	TMOD TERM	SCRAM	MW SEC
1.02E 00	1090.65	828.89	1933.80	5.209E 01	2.174E 01	2.117E-04	2.1278E-04	1.0785E-06	2.3112E-08	0.0	5.21E 01
2.05E 00	1091.15	828.91	1933.81	5.502E 01	1.872E 01	4.206E-04	4.2578E-04	5.1308E-06	7.7002E-09	0.0	1.07E 02
3.07E 00	1092.09	828.96	1933.84	5.854E 01	1.650E 01	6.148E-04	6.3877E-04	2.4090E-05	1.0178E-07	0.0	1.65E 02
4.10E 00	1093.51	829.05	1933.92	6.264E 01	1.513E 01	7.928E-04	8.5176E-04	5.9286E-05	3.5782E-07	0.0	2.27E 02
5.12E 00	1095.48	829.19	1934.06	6.739E 01	1.429E 01	9.526E-04	1.0648E-03	1.1293E-04	8.0292E-07	0.0	2.94E 02
5.25E 00	1095.48	829.19	1934.06	6.739E 01	8.716E 01	9.058E-04	1.0914E-03	1.8711E-04	1.4929E-06	0.0	3.02E 02
5.38E 00	1095.48	829.19	1934.06	6.790E 01	1.714E 01	9.324E-04	1.1180E-03	1.8711E-04	1.4929E-06	0.0	3.11E 02
5.63E 00	1095.48	829.19	1934.06	6.932E 01	1.236E 01	9.856E-04	1.1712E-03	1.8711E-04	1.4929E-06	0.0	3.29E 02