

J A E R I - M
82-106

強制循環式蒸気発生器の動特性解析コード：HT4

1982年8月

岡本 政治・田所 啓弘

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

強制循環式蒸気発生器の動特性解析コード：HT 4

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

岡本政治・田所啓弘⁺

(1982年7月28日受理)

本コードは、大型構造機器実証試験装置（HENDEL）の高温機器実証試験部（T₄）の構成機器の一つである蒸気発生器について、その動特性を解析するために作成したものである。

本報は、蒸気発生器の解析モデル化、基本方程式の展開、非線形連立方程式の数値解析方法及びアウトプットデータの図形処理の方法について検討した結果をまとめたものである。

計算対象である蒸気発生器は、システム総合設計で計画された、直管・切り欠きバッフル型式の強制循環方式である。

本コードは、FACOM、M-200を使用機種とし、計算時間は time step 当り約1.5秒であり、標準の問題で約40秒である。

JAERI-M 82-106

Forced circulation type steam generator
simulation code : HT4

Masaharu OKAMOTO, Yoshihiro TADOKORO⁺

Division of High Temperature Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 28, 1982)

The purpose of this code is a understanding of dynamic characteristics of the steam generator, which is a component of High-temperature Heat Transfer Components Test Unit. This unit is a number 4th test section of Helium Engineering Demonstration Loop (HENDEL).

Features of this report are as follows, modeling of the steam generator, a basic relationship for the continuity equation, numerical analysis techniques of a non-linear simultaneous equation and computer graphics output techniques.

Forced circulation type steam generator with strait tubes and horizontal cut baffles, applied in this code, have be designed at the Over All System Design of the VHTReX.

The code is for use with JAERI's digital computer FACOM M200. About 1.5 sec required for each time step reiteration, then about 40 sec cpu time required for a standard problem.

Keywords: Heat Transfer, Steam Generator, HTGR, Heat Exchanger, Helium, Computer Code, Numerical Analysis

+ Division of Power Reactor Projects, JAERI

目 次

| | |
|---------------------------|----|
| 1.はじめに..... | 1 |
| 2.高温機器実証試験部(T_4)..... | 1 |
| 3.蒸気発生器モデル化..... | 4 |
| 3.1 蒸気発生器仕様..... | 4 |
| 3.2 基本方程式..... | 6 |
| 3.2.1 マスバランス..... | 6 |
| 3.2.2 ヒートバランス..... | 8 |
| 3.2.3 圧力バランス..... | 10 |
| 3.3 仮定及び式の展開..... | 11 |
| 3.4 未知数..... | 13 |
| 3.5 熱伝達率計算式..... | 13 |
| 4.数値解法..... | 15 |
| 4.1 概要..... | 15 |
| 4.2 Newton 法 | 16 |
| 4.3 数値例..... | 20 |
| 5.計算コード..... | 24 |
| 5.1 構成概要..... | 24 |
| 5.2 INPUT DATA | 25 |
| 5.3 OUTPUT DATA | 27 |
| 6.計算結果..... | 32 |
| 7.図形処理..... | 45 |
| 7.1 概要..... | 45 |
| 7.2 図形処理サブルーチン..... | 45 |
| 7.3 実行の方法..... | 49 |
| 8.今後の問題..... | 52 |
| 9.おわりに..... | 55 |
| 参考文献..... | 55 |

CONTNETS

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Introduction | 1 |
| 2. | High-temperature Heat Transfer Component Test Unit | 1 |
| 3. | Steam Generator Model | 4 |
| 3.1 | Specifications of the Steam Generator | 4 |
| 3.2 | The Model Equations | 6 |
| 3.2.1 | The Continuity Equation | 6 |
| 3.2.2 | The Energy Equation | 8 |
| 3.2.3 | The Momentum Equation | 10 |
| 3.3 | Model Development & Assumption | 11 |
| 3.4 | Unknown Variable | 13 |
| 3.5 | Heat Transfer Correlations | 13 |
| 4. | Numerical Analysis | 15 |
| 4.1 | General | 15 |
| 4.2 | NEWTON Method | 16 |
| 4.3 | Example | 20 |
| 5. | Structure of the Code | 24 |
| 5.1 | General | 24 |
| 5.2 | Input Data | 25 |
| 5.3 | Output Data | 27 |
| 6. | Result | 32 |
| 7. | Graphics | 45 |
| 7.1 | General | 45 |
| 7.2 | Graphics Subroutine | 45 |
| 7.3 | Execution | 49 |
| 8. | Pending Items | 52 |
| 9. | Summary | 55 |
| | References | 55 |

1. はじめに

HT コード自体は、 HENDEL T₄ ループ全体の動特性解析コードシステムの開発を目的に作成しているものである。T₄ ループは多目的高温ガス実験炉の高温熱輸送機器・系統の実証試験部で、中間熱交換器、蒸気発生器、高温配管などにより構成される。

本報告書は、 HT 4 コードシステム開発の一環として、 T₄ の主要機器の一つである、蒸気発生器について、伝熱流動のモデル化、基本方程式の展開、非線形方程式の数値解法、及びFACOM M-200 機のグラフィックライブラリーを用いたアウトプットデータの図形処理の方法について検討した結果をまとめたものである。

蒸気発生器の動特性解析モデルは、時間微分項を含む 10 本の連立方程式で構成され、数値解法に当って、微分項はオイラー法により展開し、非線形連立方程式はNewton 法により収れん計算した。

計算対象である蒸気発生器は、多目的高温ガス実験炉・システム総合設計で計画された、直管・切り欠きバッフル型強制循環方式である。

本コードによる動特性計算は、第一段階で定常状態の計算を行ない、その状態からステップ状の過渡条件を加えその応答を各時間ステップごとに数値計算しシミュレーションするものである。

本コードによる計算結果から、蒸気発生器の動特性は水側が沸騰伝熱状態で熱伝達率が大きいため伝熱管温度は水側支配となり、外乱が入ってから定常状態に達するまでの時間は速く、10 秒以内であるということが解った。

2. 高温機器実証試験部 (T₄)

蒸気発生器の検討の前に高温機器実証試験部 (T₄) についてその概要を示す。

T₄ 試験部は実温炉の一次及び二次冷却系の構成機器を模擬したモデルであり、実験炉の中間熱交換器、蒸気発生器、高温配管及び高温隔離弁等の熱輸送性能と構造健全性確認データを得ることを目的として設置するものである。

現在計画されている T₄ 試験部の系統を Fig. 2.1 に従って説明する。高温のヘリウムガス (約 1000 °C) は、マザーアダプターセクション (既に建設完了) から供給され、高温二重配管試験部を通り中間熱交換器へ導びかれる。中間熱交換器では、一次ヘリウムから二次ヘリウムへ熱交換され、一次ヘリウムは 377 °C まで冷却されマザーアダプターセクションへ戻る。

中間熱交換器で熱交換し、加熱された二次系高温ヘリウム (930 °C) は中間熱交換器から、高温隔離弁試験部を通り蒸気発生器に導びかれる。蒸気発生器では二次ヘリウムと水の間で熱交換がなされ、冷却された二次ヘリウムは二充系ヘリウム循環機により昇圧され再び中間熱交換器へ送られる。

1. はじめに

HT コード自体は、 HENDEL T₄ ループ全体の動特性解析コードシステムの開発を目的に作成しているものである。T₄ ループは多目的高温ガス実験炉の高温熱輸送機器・系統の実証試験部で、中間熱交換器、蒸気発生器、高温配管などにより構成される。

本報告書は、 HT 4 コードシステム開発の一環として、 T₄ の主要機器の一つである、蒸気発生器について、伝熱流動のモデル化、基本方程式の展開、非線形方程式の数値解法、及びFACOM M-200 機のグラフィックライブラリーを用いたアウトプットデータの図形処理の方法について検討した結果をまとめたものである。

蒸気発生器の動特性解析モデルは、時間微分項を含む 10 本の連立方程式で構成され、数値解法に当って、微分項はオイラー法により展開し、非線形連立方程式はNewton 法により収れん計算した。

計算対象である蒸気発生器は、多目的高温ガス実験炉・システム総合設計で計画された、直管・切り欠きバッフル型強制循環方式である。

本コードによる動特性計算は、第一段階で定常状態の計算を行ない、その状態からステップ状の過渡条件を加えその応答を各時間ステップごとに数値計算しシミュレーションするものである。

本コードによる計算結果から、蒸気発生器の動特性は水側が沸騰伝熱状態で熱伝達率が大きいため伝熱管温度は水側支配となり、外乱が入ってから定常状態に達するまでの時間は速く、10 秒以内であるということが解った。

2. 高温機器実証試験部 (T₄)

蒸気発生器の検討の前に高温機器実証試験部 (T₄) についてその概要を示す。

T₄ 試験部は実温炉の一次及び二次冷却系の構成機器を模擬したモデルであり、実験炉の中間熱交換器、蒸気発生器、高温配管及び高温隔離弁等の熱輸送性能と構造健全性確認データを得ることを目的として設置するものである。

現在計画されている T₄ 試験部の系統を Fig. 2.1 に従って説明する。高温のヘリウムガス (約 1000 °C) は、マザーアダプターセクション (既に建設完了) から供給され、高温二重配管試験部を通り中間熱交換器へ導びかれる。中間熱交換器では、一次ヘリウムから二次ヘリウムへ熱交換され、一次ヘリウムは 377 °C まで冷却されマザーアダプターセクションへ戻る。

中間熱交換器で熱交換し、加熱された二次系高温ヘリウム (930 °C) は中間熱交換器から、高温隔離弁試験部を通り蒸気発生器に導びかれる。蒸気発生器では二次ヘリウムと水の間で熱交換がなされ、冷却された二次ヘリウムは二充系ヘリウム循環機により昇圧され再び中間熱交換器へ送られる。

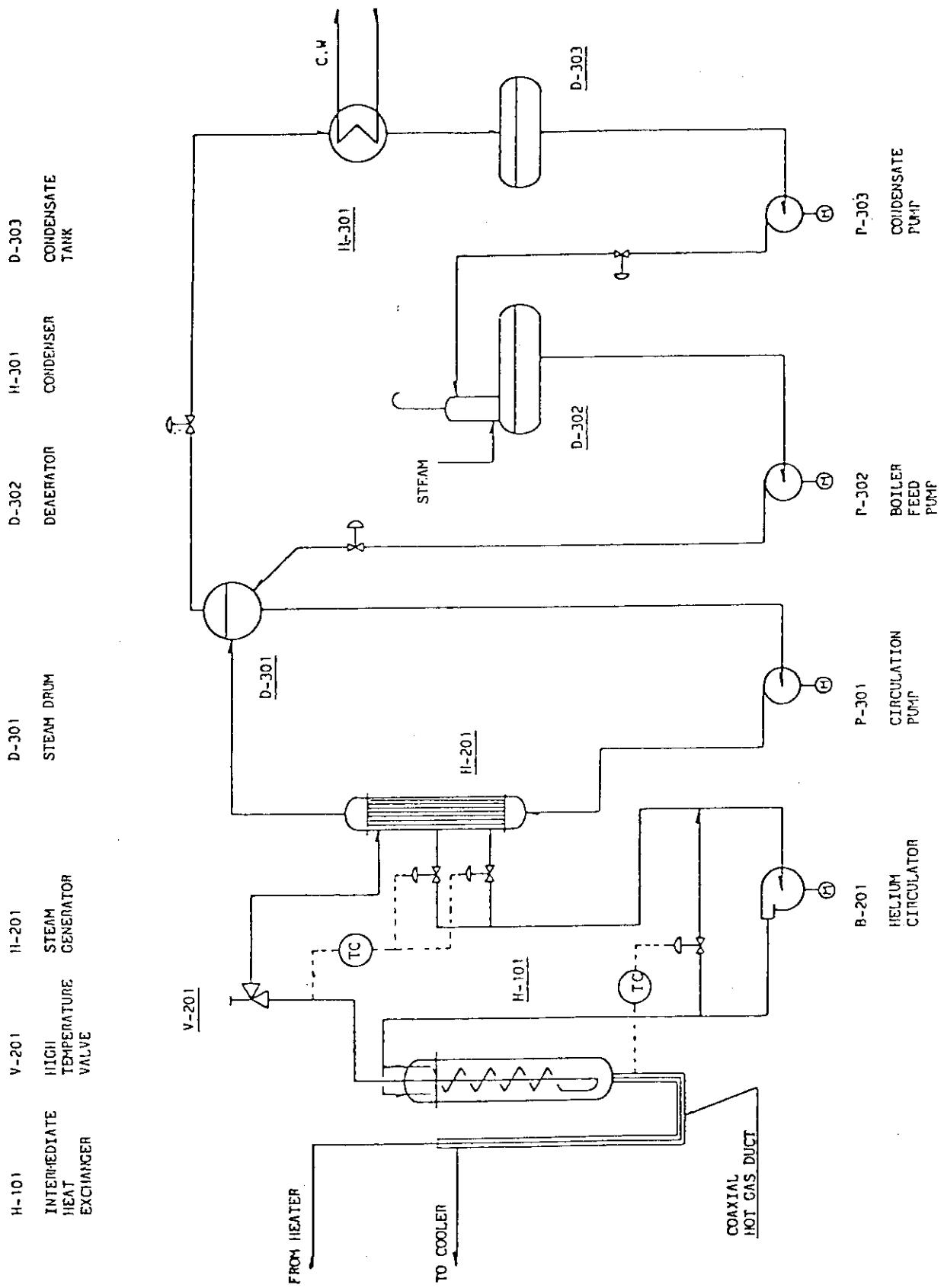


Fig.2.1 FLOW DIAGRAM OF TEST SECTION NO. 4

水蒸気系は蒸気発生器、スチームドラム、循環ポンプからなるループと、スチームドラム、コンデンサ、ディアレータからなるループで構成される。蒸気発生器からのスチームはスチームドラムで気液分離され、スチームは流量制御弁により減圧されコンデンサーへ導びかれる。コンデンサーで冷却された水はポンプによりディアレータへ送られる。ディアレータでガス抜きされたボイラー給水はポンプにより再び昇圧されスチームドラムへ供給され蒸気発生器の循環ループにもどる。

各系統仕様についてはTable 2.1 系統主要目に示す。Table 2.1 に示す通り、T₄の規模は実験炉の約1/3で計画されている。

Table 2.1 T₄ 系統主要目

| 系 統 | 系統条件 | |
|-------------|------|----------------------|
| 1. 1次ヘリウム系統 | | |
| 1) ヘリウム流量 | 2.8 | kg/s |
| 2) 運転温度 | | |
| M+A 加熱器出口 | 1000 | °C |
| IHX 入口 | 986 | °C |
| IHX 出口 | 377 | °C |
| 3) 運転圧力 | 40 | kg/cm ² G |
| 2. 2次ヘリウム系統 | | |
| 1) ヘリウム流量 | 2.73 | kg/s |
| 2) 運転温度 | | |
| IHX 出口 | 930 | °C |
| S G 入口 | 910 | °C |
| S G 出口 | 279 | °C |
| IHX 入口 | 310 | °C |
| 3) 運転圧力 | 43 | kg/cm ² G |
| 4) IHX 熱交換量 | 8.8 | MW |
| 3. 水蒸気系統 | | |
| 1) 水蒸気流量 | 36.7 | kg/s |
| 2) 蒸気温度 | 233 | °C |
| 3) 蒸気圧力 | 29 | kg/cm ² G |
| 4) 蒸発量 | 4.1 | kg/s |
| 5) SG 熱交換量 | 8.9 | MW |

3. 蒸気発生器モデル化

3.1 蒸気発生器仕様

現時点ではT 4用の蒸気発生器（以下SGと略す）仕様が明らかではないので、実験炉のシステム総合設計におけるSG¹⁾を対象に解析モデル及び計算式を組み立てた。T 4用SGについては、仕様が明らかになれば、inputデータの変更により容易に計算が可能である。

システム統合設計のSG概略構造図をFig. 3.1に、設計条件及び主要目をTable 3.1に示す。図に示す通り、IHXからの高温ヘリウムは、SG上部からシェル側に入りチューブ内水・蒸気と熱交換しながら下部より循環機へ送られる。なおSGの伝熱面積制御の為にもう1つの出口ノズルが設置されており、このバイパス流量を制御することにより、全体の熱交換量が制御される。一方水側は、下部水室から管板により各伝熱管に分配され、約7mの直管伝熱で加熱され上部水室から蒸気ドラムへ送られる。

Table 3.1 蒸気発生器仕様

設計条件

| | シェル側 | チューブ側 |
|------|---------------------------|-----------------------------|
| 流 体 | ヘリウム | 水・蒸気 |
| 入口温度 | 914 °C | 223.6 °C |
| 出口温度 | 281 °C | 232.8 °C |
| 流 量 | 27550 kg/h | 372600 kg/h |
| 圧 力 | 42.6 kg/cm ² G | 29.0 kg/cm ² G |
| 蒸発量 | 41.400 kg/h | |
| 伝熱量 | | 2.15×10 ⁷ kcal/h |

蒸気発生器主要目

| | |
|------|---|
| 型 式 | 多管式熱交換器 切り欠きバッフル型 |
| 伝熱管 | 外 径 25.4 mm 肉 厚 2.3 mm 長 さ 9500 mm 有効伝熱部長さ 7130 mm 管本数 265 本 管配列 50.8 mm ピッチ, 正三角形配列 |
| 胴 | 内 径 1000 mm |
| バッフル | 25%切り欠きバッフル バッフルスペース 310 mm |
| 伝熱面積 | 152 m ² |

| 熱交換器計画図 | | Fig. 3.1 蒸気発生器 | | |
|-------------------|------------------------------|---|-----------|-----------|
| 顧客 | | 機器番号 | 製番 | |
| 建設場所 | | ユニット名称 | | |
| 機器名称 | 蒸気発生器 | 伝熱面積 | 152 | |
| 形 式 | | 基 数 | / | |
| | | 設計条件 | | |
| | | 適用法規 | 規 格 | |
| | | 1基当りチューブ本数 | 265 | |
| | | チューブ寸法 $25.4^{O.D.} \times 2.3^{I.D.} \times 1.0$ | | |
| | | チューブ配列 □ ピッチ 50.8 | mm | |
| | | バッフル間隔 | 310 | |
| | | バッフルカット 水平 垂直 | % | |
| | | インピングメントバッフル 要否 | | |
| | | 保温 要 シエル側 | 要否 | |
| | | シエル側 チューブ側 | | |
| | | 流体名称 | | |
| | | 設計圧力 | Kg/cm^2 | Kg/cm^2 |
| | | 設計温度 | °C | °C |
| | | 水圧試験圧力 | Kg/cm^2 | Kg/cm^2 |
| | | 気密試験圧力 | Kg/cm^2 | Kg/cm^2 |
| | | 応力除去 要否 | 要否 | 要否 |
| | | 放射線検査 | | |
| | | 継手効率 % | % | % |
| | | 腐れ代 | xx | xx |
| | | バス数 | | |
| | | 重量 | | |
| | | ノズルおよびマンホール | | |
| | | 符号 個数 呼び径 形式 接面 備考 | | |
| | | A / He Inlet | | |
| | | B / He Outlet | | |
| | | C / By-pass Outlet | | |
| | | D / Water Inlet | | |
| | | E / Steam Outlet | | |
| 材質 | | | | |
| シエル・シエルカバー | 一チャンネルノズル | | | |
| チャンネル | ボルト - シエル側 | | | |
| チャンネル カバー | 一チャンネル側 | | | |
| チューブ | 一 シエルノズル | | | |
| チューブ シート | 一チャンネルノズル | | | |
| バッフルねじおよびサポートプレート | ガスケット - シエル側 | | | |
| タイロッド | 一チャンネル側 | | | |
| バッフルスペーサー | 一 シエルノズル | | | |
| サドル | 一チャンネルノズル | | | |
| ノズルネック - シエル側 | | | | |
| - チャンネル側 | | | | |
| フランジ - シエル側 | | | | |
| - チャンネル側 | | | | |
| - シエルノズル | | | | |
| 付属品 | | | | |
| タイロッド | 保温クリップ | | | |
| バッフルスペーサー | アンカーボルト スライディングプレート | | | |
| サドル | 相フランジ ガスケット ボルト・ナット | | | |
| ノズルネック - シエル側 | テスリング 予備品 ガスケット(%) ボルトナット(%) | | | |
| - チャンネル側 | | | | |
| フランジ - シエル側 | | | | |
| - チャンネル側 | | | | |
| - シエルノズル | | | | |
| 改 正 | | | | |
| △ | | | 承認 | |
| △ | 日付 | | 点検 | |
| △ | 仕様書番号 | | 作成 国本 | |

3.2 基本方程式

SG の数値解析モデルは、水蒸気側の伝熱状態から、economizer と evaporator の領域に分割され、各領域のマスバランス、ヒートバランス、運動量バランスの関係式により構成される。解析モデルを Fig. 3.2 に示す。各領域の容積は、過渡条件及び運転条件によって境界が移動するから、それにつれて変化する。

この境界の移動状態を考慮し、微分方程式²⁾を定義すれば、下式となる。Fig. 3.3に式の説明図を示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{L_1(t)}^{L_2(t)} F(t, z) dz &= \int_{L_1(t)}^{L_2(t)} \frac{\partial F(t, z)}{\partial t} dz + F(t, L_2(t)) \frac{\partial L_2(t)}{\partial t} \\ &\quad - F(t, L_1(t)) \frac{\partial L_1(t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.1)$$

つまり境界の移動速度と管壁から見た流速との関係で左辺は、領域内の状態変化を移動する境界上から見た項で、右辺第1項は、静止する管壁から見た項であるから、第2項第3項の境界移動速度を考慮し左辺と等しくなる。

解析モデルはこの定義に従って、伝熱管長さ方向の積分を行ない時間だけの微分方程式とする。

3.2.1 マスバランス

水・蒸気側のマスバランスは下式となる。

(滞留量の変化速度) = (流入量) - (流出量)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial G}{\partial z} \quad (3.2)$$

ここで ρ : 密度 (kg/m^3)

G : 流量 ($\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2$)

z : 入口からの管長さ (m)

(3.2) 式を各領域について積分する。

economizer 部については、

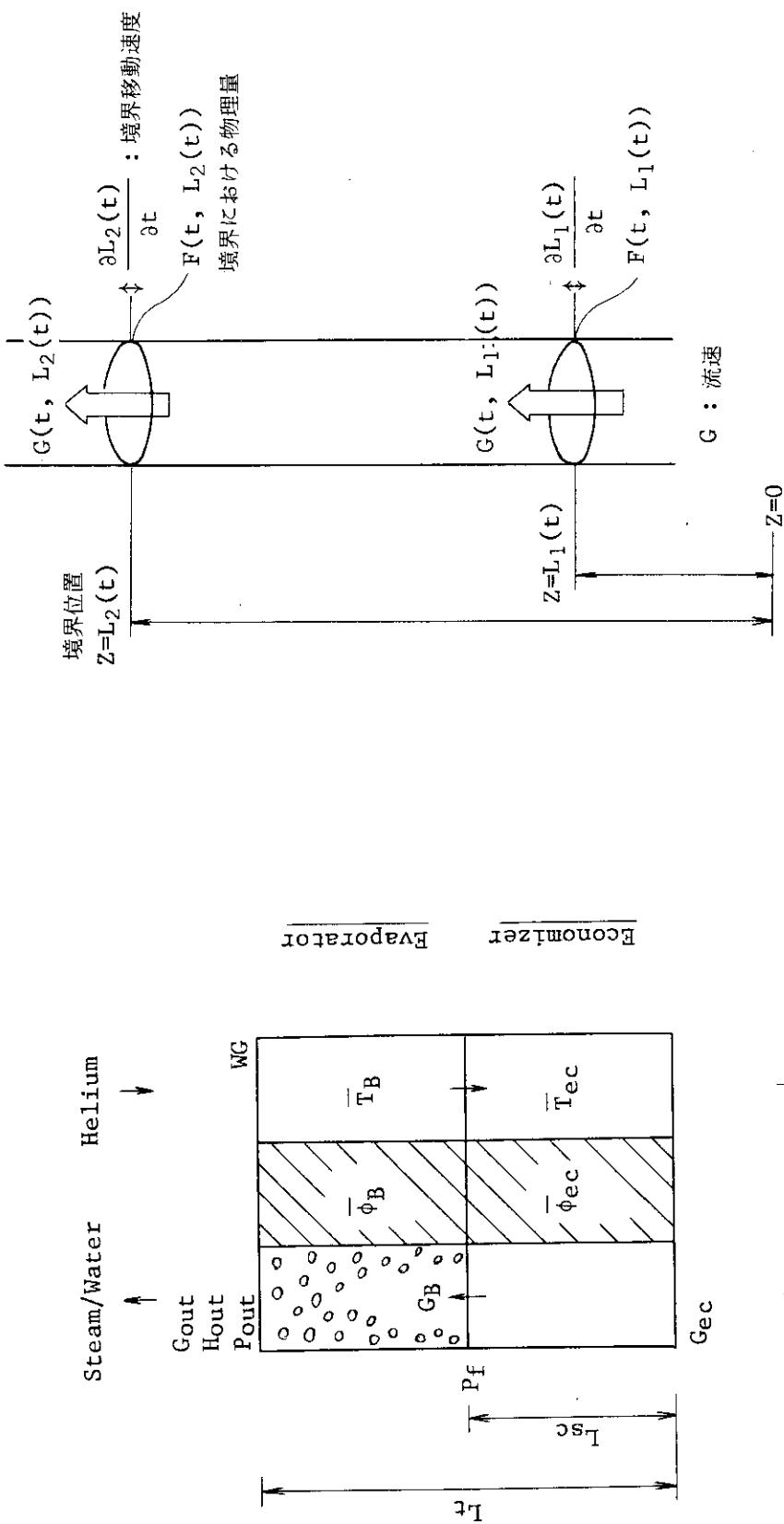
$$\int_0^{L_{st}} \frac{\partial \rho}{\partial t} dz = - \int_0^{L_{st}} \frac{\partial G}{\partial z} dz = G_{ec}(t) - G_B(t) \quad (3.3)$$

(3.3) 式に (3.1) 式を適用すれば、

$$\frac{d}{dt} \int_0^{L_{sc}} \rho_{ec}(z) dz - \rho_f \frac{d L_{sc}}{dt} = G_{ec} - G_B \quad (3.4)$$

ここで ρ_f : 鮎和水の密度 (kg/m^3)

G_{ec} : economizer 入口の流量 ($\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2$)



$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{L_1(t)}^{L_2(t)} F(t, Z) dZ = \int_{L_1(t)}^{L_2(t)} \frac{\partial F(t, Z)}{\partial t} dZ + F(t, L_2(t)) \frac{\partial L_2(t)}{\partial t} - F(t, L_1(t)) \frac{\partial L_1(t)}{\partial t}$$

Fig. 3.2 Steam Generator Model

Fig. 3.3 解析モデル

G_B : evaporator 入口の流量 ($\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2$)

$\rho_{ec}(z)$: economizer 内の流れ方向各位置での密度 (kg/m^3)

L_{sc} : economizer 長さ (m)

evaporator 部についても同様に,

$$\int_{L_{sc}}^{L_t} \frac{\partial \rho}{\partial t} dz = - \int_{L_{sc}}^{L_t} \frac{\partial G}{\partial z} dz = G_B(t) - G_{out}(t) \quad (3.5)$$

(3.1) 式を適用し,

$$\frac{d}{dt} \int_{L_{sc}}^{L_t} \rho_B(z) dz + \rho_f \frac{d L_{sc}}{dt} = G_B - G_{out} \quad (3.6)$$

ここで $\rho_B(z)$: evaporator 内の流れ方向各位置での密度 (kg/m^3)

G_{out} : evaporator 出口の流量 ($\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2$)

L_t : 伝熱部長さ (m)

ヘリウム側のマスバランスについては温度による密度変化分は流量に比べて小さいので無視し、各位置での流量は入口で一定である。

3.2.2 ヒートバランス

1) 水・蒸気側

(帶留熱量の変化速度) = (流入熱) - (流出熱) - (流出伝熱量)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) = - \frac{\partial}{\partial z} (GH) + q_i \quad (3.7)$$

ここで H : エンタルピー (kcal/kg)

q_i : 伝熱量 ($\text{kcal}/\text{s} \cdot \text{m}^3$)

マスバランスと同様に (3.7) 式を各領域について積分し、(3.1) 式を適用する。

economizer 部については,

$$\int_0^{L_{sc}} \frac{\partial (\rho H)}{\partial t} dz = - \int_0^{L_{sc}} \frac{\partial (GH)}{\partial z} dz + \int_0^{L_{sc}} q_i dz \quad (3.8)$$

$$\frac{d}{dt} \int_0^{L_{sc}} \rho_{ec}(z) \cdot H_{ec}(z) dz - \rho_f \cdot H_f \frac{d L_{sc}}{dt}$$

$$= G_{ec} \cdot H_{ec} - G_B \cdot H_f + L_{sc} \cdot \bar{q}_{ec} \quad (3.9)$$

ここで $H_{ec}(z)$: economizer 流れ方向各位置でのエンタルピー (kcal/kg)

H_{ec} : economizer 入口のエンタルピー (kcal/kg)

H_f : 飽和水のエンタルピー (kcal/kg)
 \bar{q}_{ec} : economizer 平均伝熱量 (kcal/s·m³)

evaporator 部についても同様に、

$$\frac{d}{dt} \int_{L_{sc}}^{L_t} \rho_B(z) \cdot H_B(z) dz + \rho_f \cdot H_f \frac{dL_{sc}}{dt} = G_B \cdot H_f - G_{out} \cdot H_{out} + L_B \cdot \bar{q}_B \quad (3.10)$$

ここで $H_B(z)$: evaporator 内の流れ方向各位置でのエンタルピー (kcal/kg)
 H_{out} : evaporator 出口のエンタルピー (kcal/kg)
 \bar{q}_B : evaporator 平均伝熱量 (kcal/s·m³)
 L_B : evaporator 長さ (m)

2) 伝熱管部

(滞留熱量の変化速度) = (ヘリウム側からの伝熱量) - (水側への伝熱量)
 伝熱管の長さ方向への伝熱は無視する。

economizer 部については、

$$\begin{aligned} \frac{d \overline{HM}_{ec}}{dt} &= \left(\frac{\overline{HM}_B - \overline{HM}_{ec}}{2 \times L_{sc}} \right) \frac{dL_{sc}}{dt} \\ &= \frac{h_o \cdot A_o}{V_{sc} \cdot \rho M} (\bar{T}_{ec} - \bar{\theta}_{ec}) - \frac{h_i \cdot A_i}{V_{sc} \cdot \rho M} (\bar{\phi}_{ec} - \bar{\theta}_{ec}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

ここで V_{sc} : economizer 部の伝熱管体積 (m³)
 ρM : 伝熱管密度 (kg/m³)
 h_o, h_i : 管外側, 管内側熱伝達率 (kcal/m²·s·°C)
 A_o, A_i : " " 伝熱面積 (m²)
 HM_{ec} : economizer 部伝熱管平均エンタルピー (kcal/kg)
 HM_B : evaporator 部 " (kcal/kg)
 $\bar{\theta}_{ec}$: economizer 部水の平均温度 (°C)
 $\bar{\phi}_{ec}$: " 伝熱管 " (°C)
 \bar{T}_{ec} : " ヘリウム " (°C)

evaporator 部についても同様に、

$$\frac{d HM_B}{dt} + \left(\frac{HM_{ec} - HM_B}{2 \times L_B} \right) \frac{dL_{sc}}{dt}$$

$$= \frac{h_o \cdot A_o}{V_B \cdot \rho M} (\bar{T}_B - \bar{\phi}_B) - \frac{h_i \cdot A_i}{V_B \cdot \rho M} (\bar{\phi}_B - \bar{\theta}_B) \quad (3.12)$$

ここで V_B : evaporator 部の伝熱管体積 (m^3)

$\bar{\theta}_B$: evaporator 部水の平均温度 ($^\circ C$)

$\bar{\phi}_B$: " 伝熱管 " ($^\circ C$)

\bar{T}_B : " ヘリウム " ($^\circ C$)

3) ヘリウム側

水・蒸気側と同様にして,

economizer 部については,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_0^{L_{sc}} \rho_{hec}(z) \cdot H_{hec}(z) dz &= \rho_{h2} \cdot H_2 \frac{d L_{sc}}{dt} \\ &= WG (H_2 - H_1) - L_{sc} \cdot \bar{q}_{hec} \end{aligned} \quad (3.13)$$

ここで $\rho_{hec}(z)$: economizer 内の流れ方向各位置での密度 (kg/m^3)

$H_{hec}(z)$: economizer 内流れ方向各位置でのエンタルピ ($kcal/kg$)

ρ_{h2} : 境界位置の密度 (kg/m^3)

H_2 : 境界位置のエンタルピ ($kcal/kg$)

H_1 : 出口のエンタルピ ($kcal/kg$)

WG : ヘリウム流量 ($kg/s \cdot m^2$)

\bar{q}_{hec} : economizer 平均伝熱量 ($kcal/s \cdot m^3$)

evaporator 部については,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{L_{sc}}^{L_t} \rho_{hB}(z) \cdot H_{hB}(z) dz + \rho_{h2} \cdot H_2 \frac{d L_{sc}}{dt} \\ = WG (H_3 - H_2) - L_B \cdot \bar{q}_{hB} \end{aligned} \quad (3.14)$$

ここで $\rho_{hB}(z)$: evaporator 内の流れ方向各位置での密度 (kg/m^3)

$H_{hB}(z)$: evaporator 内の流れ方向各位置でのエンタルピ ($kcal/kg$)

H_3 : evaporator 入口のエンタルピ ($kcal/kg$)

\bar{q}_{hB} : evaporator 平均伝熱量 ($kcal/s \cdot m^3$)

3.2.3 圧力バランス

ヘリウム側については、圧力損失等長さ方向の圧力変動程度では、熱計算に影響しないため、圧力バランスの関係式は必要ない。

水・蒸気側については静的状態つまり、水頭によるものと圧力損失のみを考慮し、加速による

ものは無視した。

economizer 部では

$$P_o - P_f = \lambda \cdot \frac{L_{sc}}{D} \cdot \frac{G_{ec}^2}{2 \cdot g \cdot \bar{\rho}_{ec}} + L_{sc} \cdot \bar{\rho}_{ec} \quad (3.15)$$

ここで P_o : 入口圧力 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{A}$)

P_f : 鮎和圧力 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{A}$)

λ : 摩擦損失係数

D : 管内径 (m)

g : 重力加速度 (m/s^2)

evaporator 部では

$$P_f - P_{out} = \lambda \cdot \frac{L_B}{D} \cdot \frac{G_B^2}{2 \cdot g \cdot \bar{\rho}_B} + L_B \cdot \bar{\rho}_B \quad (3.16)$$

3.3 仮定及び式の展開

前節の基本方程式に適当な仮定により積分を行い微分方程式に導びく。

(3.4) 式を例にすれば,

$$\frac{d}{dt} \int_0^{L_{sc}} \rho_{ec}(z) dz - \rho_f \frac{dL_{sc}}{dt} = G_{ec} - G_B \quad (3.4)$$

ここで, economizer 部では,

$$\rho_{ec}(z) = \rho_o + (\rho_f - \rho_o) \cdot \frac{z}{L_{sc}} \quad (3.17)$$

が成り立つとし (つまり economizer 内の密度は入口 (ρ_o) から出口 (ρ_f) まで直線的に変化する) 積分すれば,

$$\frac{d}{dt} \int_0^{L_{sc}} (\rho_o + (\rho_f - \rho_o) \cdot \frac{z}{L_{sc}}) dz - \rho_f \frac{dL_{sc}}{dt} = G_{ec} - G_B \quad (3.18)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_o \cdot L_{sc} + (\rho_f - \rho_o) \cdot \frac{L_{sc}}{2}) - \rho_f \cdot \frac{dL_{sc}}{dt} = G_{ec} - G_B \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{2} \cdot (\rho_o - \rho_f) \cdot \frac{dL_{sc}}{dt} - G_{ec} + G_B = 0 \quad (3.20)$$

(3.4) 式を (3.17) 式の仮定により (3.20) 式を得たが, 同様に他の 9 個の式も整理すれば下記となる。

(1) 水蒸気側マスバランス

$$f_1 = \frac{1}{2} (\rho_o - \rho_f) \frac{dL_{sc}}{dt} - G_{ec} + G_B = 0 \quad (3.20)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} (\rho_f - \rho_{out}) \frac{dL_{sc}}{dt} - G_B + G_{out} = 0 \quad (3.21)$$

(2) 水蒸気側ヒートバランス

$$f_3 = \frac{1}{6} (2\rho_o \cdot H_o + \rho_o \cdot H_f + \rho_f \cdot H_o - 4 \cdot \rho_f \cdot H_f) \cdot \frac{dL_{sc}}{dt} - G_{ec} \cdot H_o + G_B \cdot H_f - L_{sc} \cdot \bar{q}_{ec} = 0 \quad (3.22)$$

$$f_4 = \frac{1}{6} (4 \cdot \rho_f \cdot H_f - \rho_f \cdot H_{out} - \rho_{out} \cdot H_f - 2 \cdot \rho_{out} \cdot H_{out}) \cdot \frac{dL_{sc}}{dt} - G_B \cdot H_f + G_{out} \cdot H_{out} - L_B \cdot \bar{q}_B = 0 \quad (3.23)$$

(3) 伝熱管のヒートバランス

$$f_5 = \frac{d\overline{HM}_{ec}}{dt} - \left(\frac{\overline{HM}_B - \overline{HM}_{ec}}{2 \times L_{sc}} \right) \cdot \frac{dL_{sc}}{dt} - \frac{h_o \cdot A_o}{V_{sc} \cdot \rho M} (\bar{T}_{ec} - \bar{\phi}_{ec}) + \frac{h_i \cdot A_i}{V_{sc} \cdot \rho M} (\bar{\phi}_{ec} - \bar{\theta}_{ec}) = 0 \quad (3.11)$$

$$f_6 = \frac{d\overline{HM}_B}{dt} + \left(\frac{\overline{HM}_{ec} - \overline{HM}_B}{2 \times L_B} \right) \frac{dL_{sc}}{dt} - \frac{h_o \cdot A_o}{V_B \cdot \rho M} (\bar{T}_B - \bar{\phi}_B) + \frac{h_i \cdot A_i}{V_B \cdot \rho M} (\bar{\phi}_B - \bar{\theta}_B) = 0 \quad (3.12)$$

(4) ヘリウム側ヒートバランス

$$f_7 = \frac{1}{6} (2\rho_1 H_1 + \rho_1 H_2 + \rho_2 H_1 - 4 \cdot \rho_2 \cdot H_2) \cdot \frac{dL_{sc}}{dt} - WG (H_2 - H_1) + L_{sc} \cdot \bar{q}_{hec} = 0 \quad (3.24)$$

$$f_8 = \frac{1}{6} (4 \cdot \rho_2 \cdot H_2 - \rho_2 H_3 - \rho_3 H_2 - 2 \cdot \rho_3 H_3) \cdot \frac{dL_{sc}}{dt} - WG (H_3 - H_2) + L_B \cdot \bar{q}_{hB} = 0 \quad (3.25)$$

(5) 水蒸気側圧力バランス

$$f_9 = P_o - P_f - \lambda \cdot \frac{L_{sc}}{D} \cdot \frac{G_{ec}^2}{2 \cdot g \cdot \bar{\rho}_{ec}} - L_{sc} \cdot \bar{\rho}_{ec} = 0 \quad (3.15)$$

$$f_{10} = P_f - P_{out} - \lambda \cdot \frac{L_B}{D} \cdot \frac{G_B^2}{2 \cdot g \cdot \bar{\rho}_B} - L_B \cdot \bar{\rho}_B = 0 \quad (3.16)$$

3.4 未知数

前節(3.3節)にて整理した $f_1 \sim f_{10}$ が SG モデルの関係式であり、その未知数 10 個を下記に整理する。

- | | | |
|---------------------|------------------------|--|
| ① L_{sc} | : economizer 部管長さ | |
| ② G_B | : evaporator 入口流量 | |
| ③ G_{out} | : evaporator 出口流量 | |
| ④ P_f | : evaporator 入口圧力 | |
| ⑤ P_{out} | : evaporator 出口圧力 | |
| ⑥ H_{out} | : evaporator 出口エンタルピー | |
| ⑦ $\bar{\phi}_{ec}$ | : economizer 部伝熱管平均温度 | |
| ⑧ $\bar{\phi}_B$ | : evaporator 部伝熱管平均温度 | |
| ⑨ \bar{T}_{ec} | : economizer 部ヘリウム平均温度 | |
| ⑩ \bar{T}_B | : evaporator 部ヘリウム平均温度 | |

以上が $f_1 \sim f_{10}$ 式に対する未知数であり、式中の全ての変数は $\rho_f = g_1(P_f)$, $\rho_{out} = g_2(P_{out}, H_{out})$ のように 10 個の未知数の関数で表現し整理しなければならない。

3.5 熱伝達率計算式

(1) チューブ側サブクール域

Dittus-Boelter の式

$$\alpha = 0.023 \left(\frac{\lambda}{d} \right) (R_e)^{0.8} \cdot P_r^{0.4} \quad (3.26)$$

適用範囲 $10^4 < R_e < 1.2 \times 10^5$

ここで α : 熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}$)

λ : 流体の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}$)

d : 管内径 (m)

R_e : レイノルズ数

P_r : プラントル数

(2) チューブ側強制対流沸騰域

Shrock-Grossmanの式³⁾

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} \cdot 170 (B_o + 1.5 \times 10^{-4} \chi_{tt})^{-\frac{2}{3}} \times \left(\frac{d G' (1-\chi)}{\eta} \right)^{0.8} \left(\frac{C_p \eta}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$B_o = \frac{q}{G' r}$$

$$\frac{1}{\chi_{tt}} = \left(\frac{\eta_g}{\eta_f} \right)^{0.1} \left(\frac{\gamma_f}{\gamma_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\chi}{1-\chi} \right)^{0.9} \quad (3.27)$$

ここで B_o : ボイリング数 χ_{tt} : ロックハルト・アルチネリパラメータ G' : 重量速度 χ : 蒸気重量率 η : 粘性係数 C_p : 比熱 (kcal/kg · °C) r : 蒸発熱 (kcal/kg) γ : 密度 (kg/m³)

subscripts f, g : 液体および蒸気

(3) シェル側管群

Kern の式⁴⁾

$$\alpha = 0.36 \left(\frac{\lambda}{D_e} \right)^{0.55} \cdot R_e^{1/3} \cdot P_r^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3.28)$$

適用範囲 $2000 < R_e < 1.0 \times 10^6$ ここで D_e : 管群の相当直径

4. 数 値 解 法

4.1 概 要

前章で検討したモデル化、及び本章で検討する数値解法を通し、解を求めるまでの全体を Fig. 4.1 に示す。前章までの検討により、蒸気発生器モデルは 10 個の非線形連立方程式に展開された。

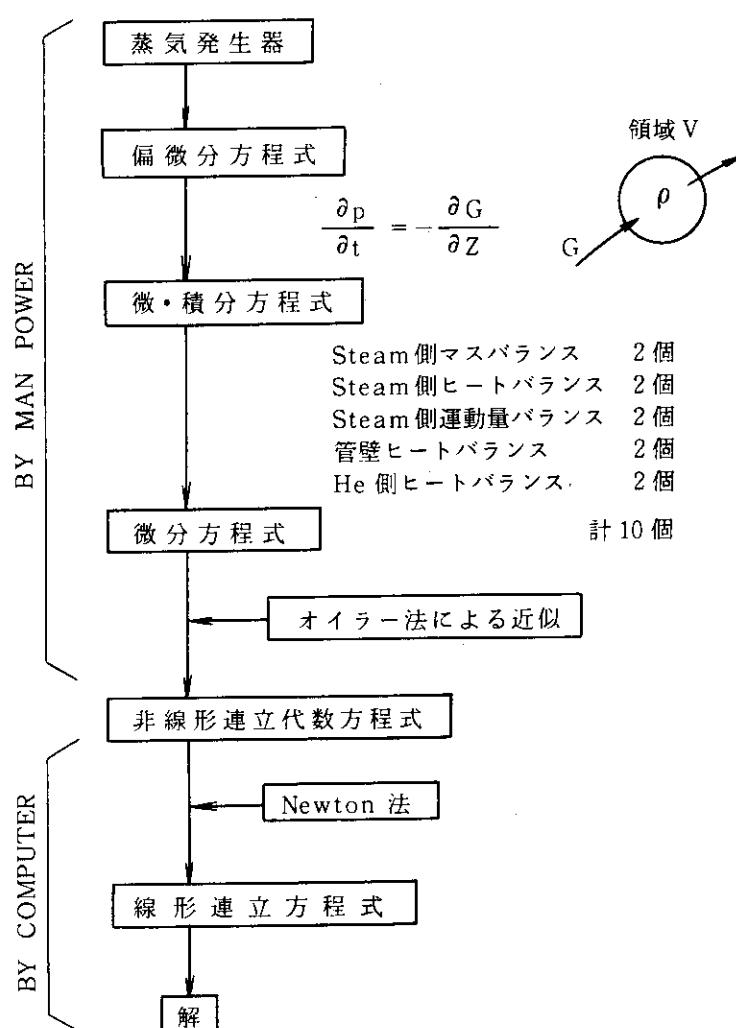


Fig. 4.1 モデル化及び式の展開

$$\left. \begin{array}{l} f_1 (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_{10}) = 0 \\ f_2 (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_{10}) = 0 \\ \vdots \\ f_{10} (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_{10}) = 0 \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

f_1, f_2, \dots はそれぞれマスバランス、ヒートバランス、圧力バランスの関係式で、 χ_1, χ_2, \dots は流量、温度等 10 個の未知数である。関係式中の微分項は下記近似で計算するから

$$\frac{dL_{sc}}{dt} = \frac{L_{sc}(t + \Delta t) - L_{sc}(t)}{\Delta t} \quad (4.2)$$

動特性のシミュレーションは、 Δt 時間ステップについて (4.1) の連立方程式を解き、その解を次の時間ステップの入力値とし次々と計算を進めることである。

非線形方程式 ($f(x) = 0$) を逐次近似法 (successive approximation) によって解くということは、根 α に収束する数列 x_1, x_2, \dots を与える近似的な式を見出し、それを用いて次々と x_1, x_2, \dots を計算し、その極限値として根 α を求める方法である。Fig. 4.2 に代表的な逐次近似法による非線形方程式の解法を示す。また Fig. 4.3 には、それぞれの解法の反復計算の様子を示したグラフである。

本コードで採用した解法は、非線形連立方程式の Newton 法による解法で、これは、多変数関数の 1 次までの Taylor 展開に基づき、Newton-Raphson 法を連立方程式の解法に拡張したものである。

4.2 Newton 法

Newton-Raphson 法により方程式 $f(x) = 0$ を解く場合、実根の近似値を x_i とし、 $x = x_i$ における $f(z)$ の 1 次までの Taylor 展開によって表わす。

$$f(x) = f(x_i) + f'(x_i)(x - x_i) \quad (4.1)$$

この接線方程式と x 軸との交点を $(x_{i+1}, 0)$ とし、この x_{i+1} を求めると、

$$f(x_i) + f'(x_i)(x_{i+1} - x_i) = 0 \quad (4.2)$$

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (4.3)$$

(4.2) 式が Newton-Raphson 法の基本的表現であり、この繰り返し計算により方程式 $f(x) = 0$ の近似解を求める。

次に Newton-Raphson 法を連立方程式の解法に拡張した、Newton 法について説明する。

2 変数関数 $f(x, y)$ の Taylor 展開は (4.4) 式である

$$\begin{aligned} f(x, y) &= f(a, b) + \frac{1}{1!} \left\{ (x-a) \frac{\partial}{\partial x} + (y-b) \frac{\partial}{\partial y} \right\} f(a, b) \\ &\quad + \frac{1}{2!} \left\{ (x-a) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + (y-b) \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right\} f(a, b) \\ &\quad + \dots \end{aligned} \quad (4.4)$$

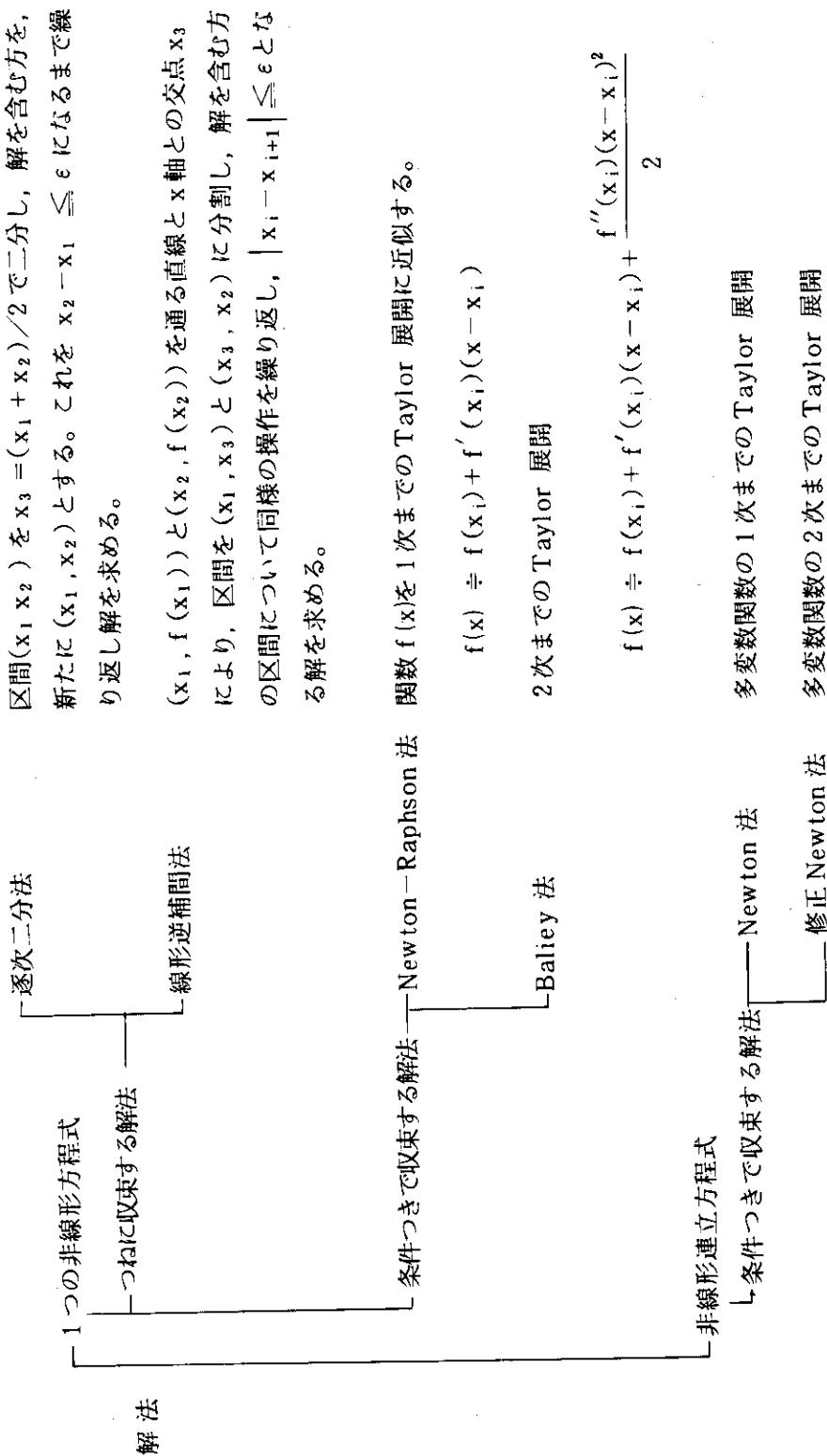
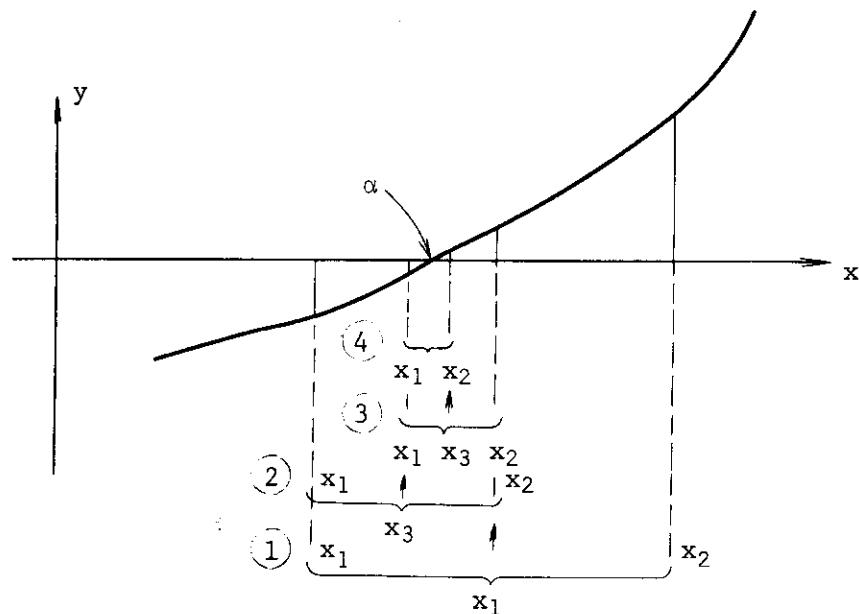
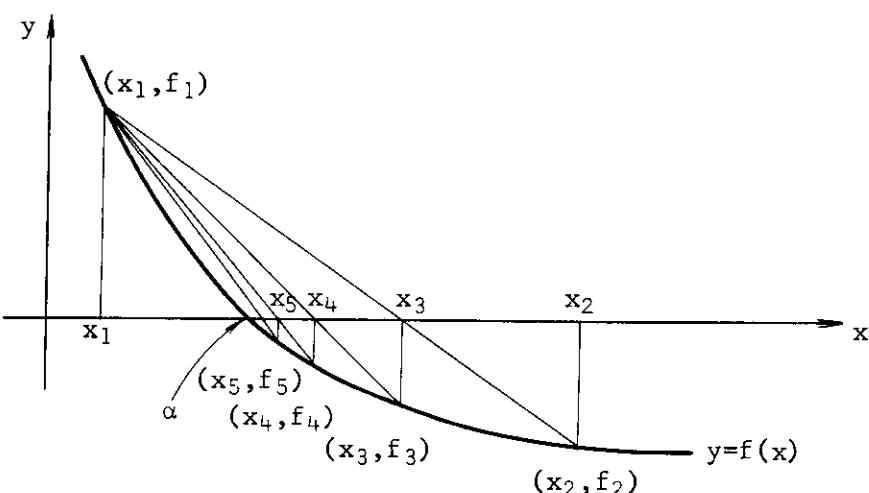


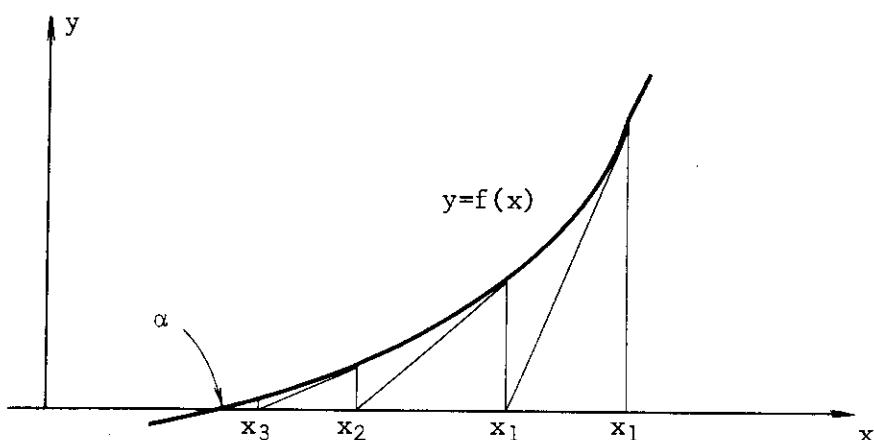
Fig. 4.2 非線形方程式の解法



逐次二分法 ○印の数字は反復回数を示す



線形逆補間法



Newton - Raphson 法

Fig. 4.3 非線形方程式の解法

Newton 法では 1 次までの Taylor 展開で近似する。

$$f(x, y) = 0 \quad g(x, y) = 0 \quad (4.5)$$

連立方程式(4.5)式を初期推定値 (x_0, y_0) において 1 次の泰勒展開について近似する。

$$\left. \begin{aligned} f(x, y) &= f(x_0, y_0) + \delta x \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial x} + \delta y \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial y} \\ g(x, y) &= g(x_0, y_0) + \delta x \frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial x} + \delta y \frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

$$\text{ここで } \delta x = x - x_0 \quad \delta y = y - y_0$$

(4.6) 式右辺は線形の方程式で、両方の右辺を 0 として $\delta x, \delta y$ について解く

$$\left. \begin{aligned} \delta x \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial x} + \delta y \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial y} &= -f(x_0, y_0) \\ \delta x \frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial x} + \delta y \frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial y} &= -g(x_0, y_0) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

(4.7) 式は線形方程式で $\delta x, \delta y$ について直接解くことができる。もし、この Taylor 展開で十分正確であるなら $(x_0 + \delta x, y_0 + \delta y)$ が連立方程式(4.5)式の解の非常によい近似になっており、収束判定が $\delta x > \varepsilon, \delta y > \varepsilon$ ならば、 x_0 を $x_0 + \delta x$ に、 y_0 を $y_0 + \delta y$ に置きかえて、同様の操作を繰り返せば十分正確な値が求められる。

この方法を、 n 個の変数を含む n 個の方程式の解法に拡張したものが Newton 法であり、一般的表現は下記となる。

方程式を

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ \dots & \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

とする。初期推定値 $\{x^{(0)}\}$ を適当にとり、 $k = 1, 2, \dots$ に対し

$$\{x^{(k+1)}\} = \{x^{(k)}\} - [J]^{-1} \{f^{(k)}\} \quad (4.9)$$

として精度を改良する。

ここで

$$\{x^{(k)}\} = \begin{Bmatrix} x_1^{(k)} \\ \vdots \\ x_n^{(k)} \end{Bmatrix} \quad \{f^{(k)}\} = \begin{Bmatrix} f_1(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \end{Bmatrix}$$

また $[J]^{-1}$ は、ヤコビ行列

$$[J] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{Bmatrix}$$

の逆行列である。

実際の計算手順を図に表わせば Fig. 4.4 となる。

4.3 数値例

Newton 法による連立非線形方程式の数値解法例を次に示す。

$$\begin{aligned} f(x, y) &= x^2 + y^2 - 1 = 0 \\ g(x, y) &= y - \sin x = 0 \end{aligned} \tag{4.10}$$

前節 (4.7) 式に示す連立方程式を、各反復ごとに計算し、 δx 、 δy で求め、 $x_0 + \delta x$, $y_0 + \delta y$ を x_0 , y_0 に置きかえて、 δx , $\delta y < \epsilon$ なるまで反復計算をする。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial x} & \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial y} \\ \frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial x} & \frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f(x_0, y_0) \\ -g(x_0, y_0) \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

$$\text{ここで } \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = 2x \quad \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = 2y$$

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} = -\cos x \quad \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} = 1$$

STEP 1. 初期推定値を $(x_0, y_0) = (1, 0.9)$ とおけば (4.7) 式は

$$\begin{bmatrix} 2.0 & 1.8 \\ -0.540 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.810 \\ -0.0585 \end{bmatrix}$$

となる。これを解いて

$$\delta x = -0.237 \quad x_0 + \delta x = 0.763 \rightarrow x_0$$

$$\delta y = -0.187 \quad y_0 + \delta y = 0.713 \rightarrow y_0$$

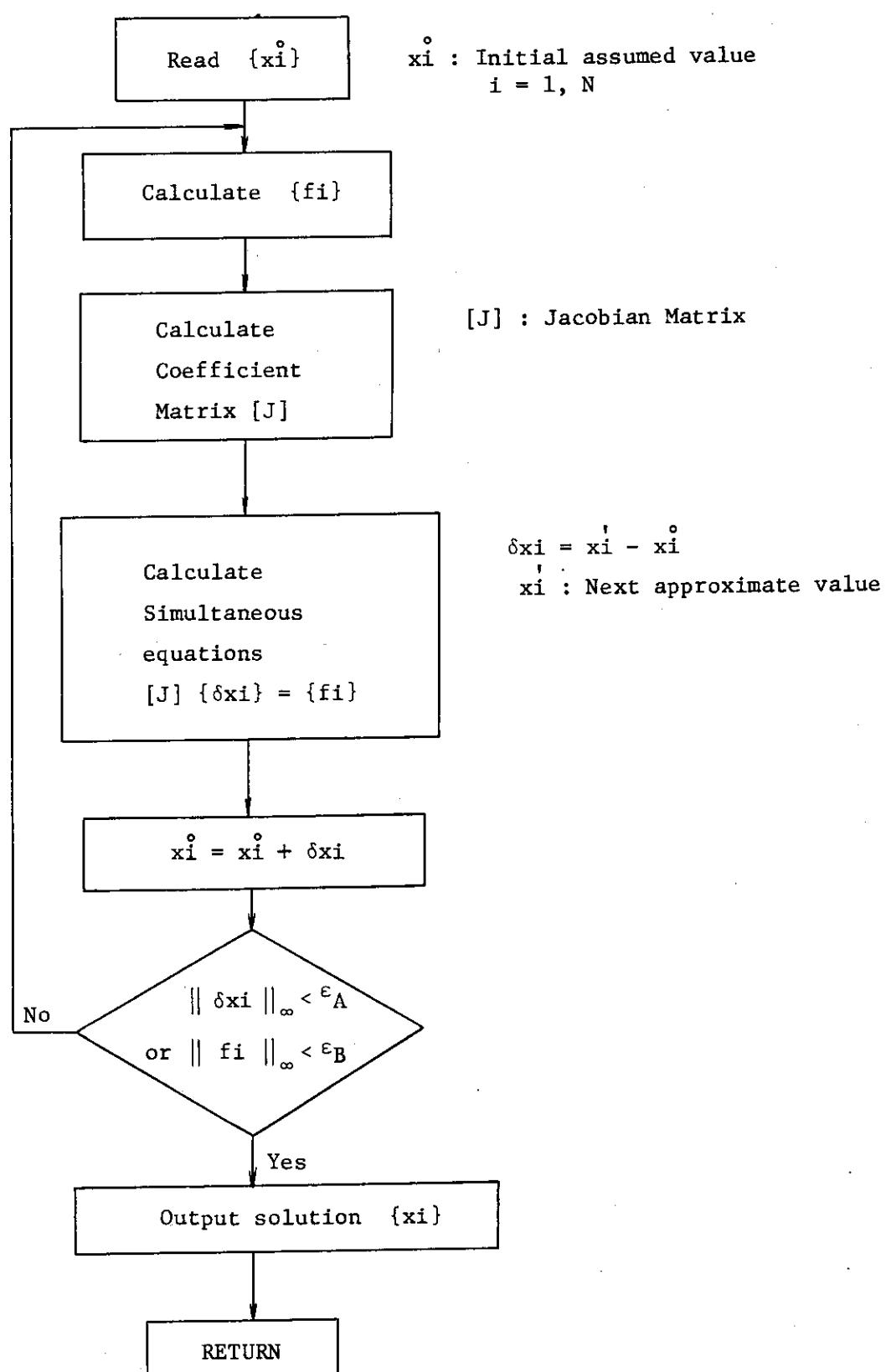


Fig. 4.4 Flow diagram for the NEWTON method

STEP 2 改めて, $x_0 = 0.763$, $y_0 = 0.713$ とおけば

$$\begin{bmatrix} 1.526 & 1.427 \\ -0.723 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0910 \\ -0.0223 \end{bmatrix}$$

となる。これを解いて

$$\delta x = -0.0231 \quad x_0 + \delta x = 0.740 \rightarrow x_0$$

$$\delta y = -0.0391 \quad y_0 + \delta y = 0.674 \rightarrow y_0$$

STEP 3 改めて, $x_0 = 0.7398$, $y_0 = 0.6743$ とおけば

$$\begin{bmatrix} 1.480 & 1.349 \\ -0.739 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00206 \\ -0.000183 \end{bmatrix}$$

となる。これを解いて

$$\delta x = -0.000732 \quad x_0 + \delta x = 0.7391 \rightarrow x_0$$

$$\delta y = -0.000724 \quad y_0 + \delta y = 0.6736 \rightarrow y_0$$

STEP 4 改めて, $x_0 = 0.7391$, $y_0 = 0.6736$ とおけば

$$f(x_0, y_0) = (0.7391)^2 + (0.6736)^2 - 1 \neq 0$$

$$g(x_0, y_0) = 0.6736 - \sin 0.7391 \neq 0$$

となるから, x_0, y_0 の最後の値は解のよい近似値である。

この例は幾何学的には, $x^2 + y^2 = 1$ と三角関数, $y = \sin x$ の交点を求めるに当つている。

Fig. 4.5 (1/3) ~ (3/3) には, それぞれの初期推定値からの収束・発散の様子を示した。

(1/3), (2/3) は収束した例, (3/3) は発散した例である。

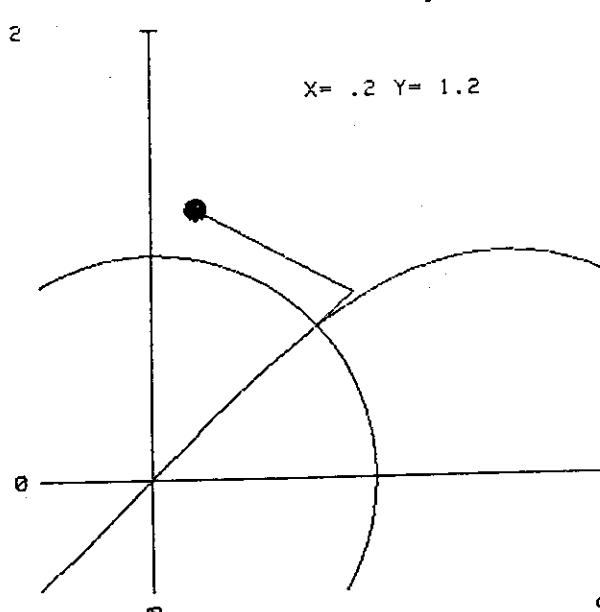


Fig. 4.5 円と SIN 曲線の交点の計算 (1/3)
(収束の例)

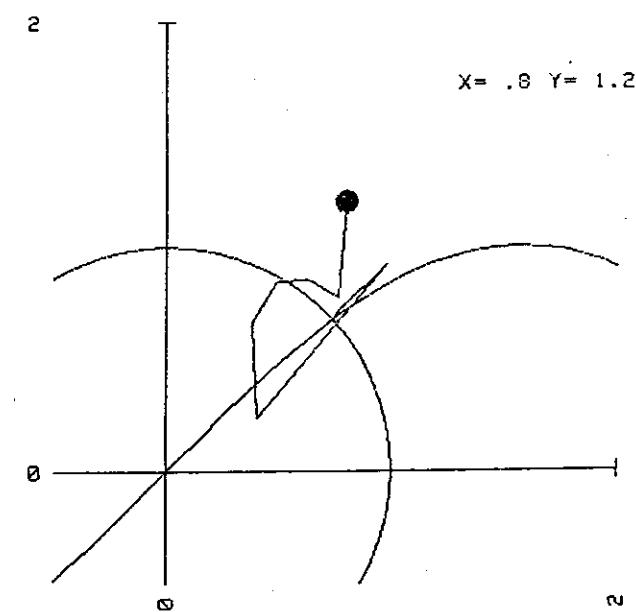


Fig. 4.5 円と SIN 曲線の交点の計算 (2/3)
(収束の例)

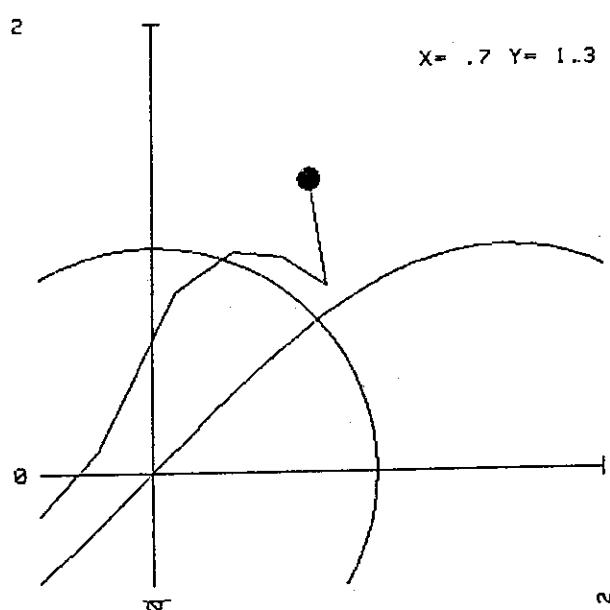


Fig. 4.5 円と SIN 曲線の交点の計算 (3/3)
(発散の例)

5. 計算コード

5.1 構成概要

本計算コードの構成を Fig. 5.1 に示す。計算は SG の仕様の計算、定常状態の計算、そして過渡条件に対する動特性の計算の 3 段階で実行される。

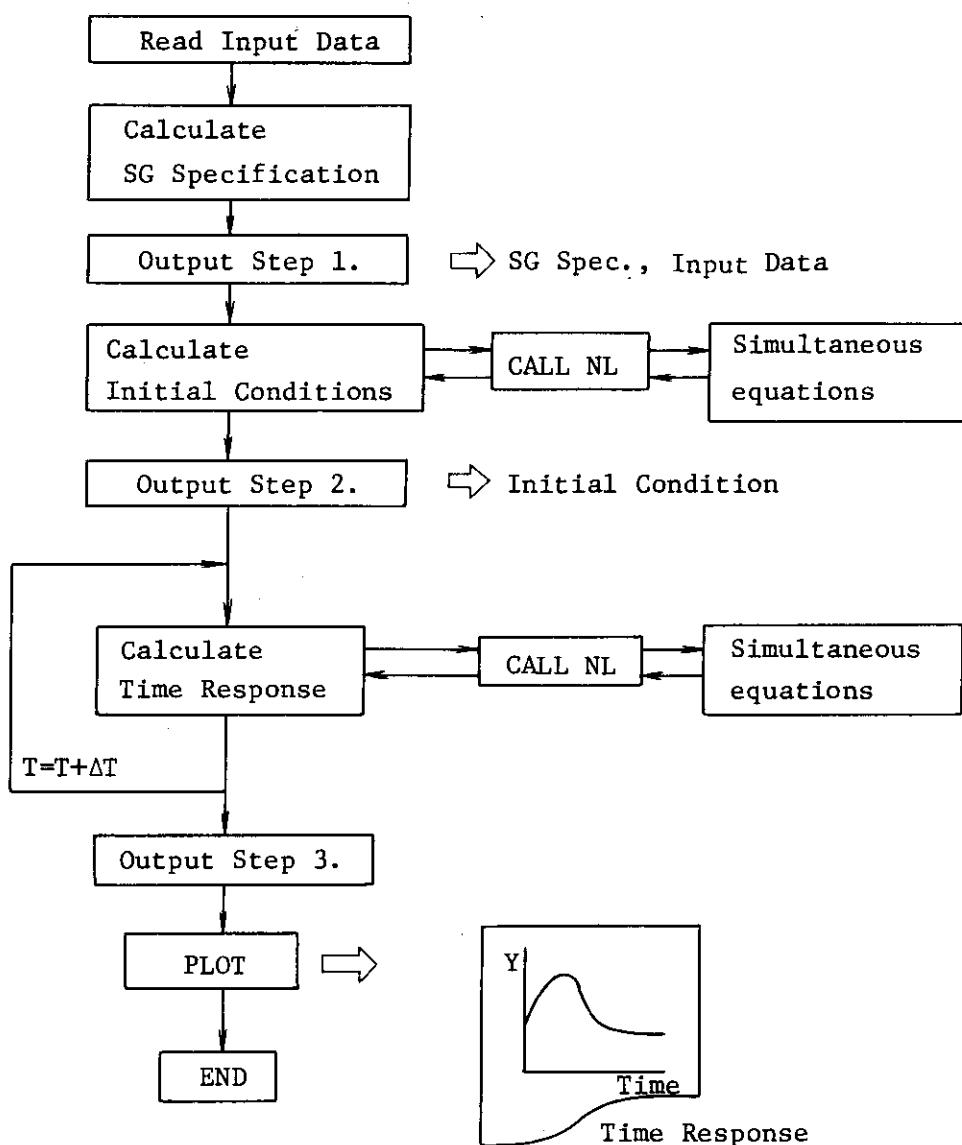


Fig. 5.1 Block diagram for HT4

Step 1. では, INPUT DATA (管径, 本数, ピッチ etc) から SG の流路条件, 伝熱管の体積等が計算される。

Step 2. では, 初期条件の計算であるが解法は Step 3. と同様に前節で説明した Newton 法 (Call NL) により収れん計算を行う。ただし, 連立方程式 (Simultaneous equations) 中の時間微分項を常に零として計算を行う。

Step 3. が動特性の計算であるが, Time Step 1回ごとに Newton 法 (Call NL) により収れん計算し, その計算結果を次の Time Step の Input Data として計算を繰り返し, 各状態値 (温度, 流量 etc) の時間応答を計算する。そしてこの計算結果は後節に説明する図形処理サブルーチンによりグラフとして出力される。

5.2 INPUT DATA

システム統合設計の SG をモデルとし, INPUT DATA の例を下記に示す。また Table 5.1 に入口ガス温度が上昇した場合の実際の INPUT DATA を示す。

Table 5.1 Input data

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7-R |
|-------|----------------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 00100 | (1) 223.0 | 200.0 | (3) 372600.0 | | | | |
| 00200 | (2) 1096.8 | 543.6 | (3) 27550.0 | | | | |
| 00300 | (2) 26 (6) 1.0E-70 (9) 0.0 | | (4) 100.0 | (4) 200 | | | |
| 00400 | (2) 1.0 | (1) 7.2 | (4) 0.0208 | (4) 0.0254 | (4) 0.3 | (4) 0.0508 | (4) 265.0 |
| 00500 | (2) 223.6 | 200.0 | (3) 372600.0 | | | | |
| 00600 | (2) 914.0 | 543.6 | (3) 27550.0 | | | | |
| 00700 | 0.2 (5) | | | | | | |
| 00800 | (2) 93.96 (4) | | | | | | |
| 00900 | (2) 3.0 | 1150.0 | 1150.0 | 266.6 | 300000.0 | | |
| 01000 | 300000.0 | 370.0 | 600.0 | 38.0 | 26.27 | | |
| 01100 | 833.3 | 157.1 | 3527.0 | 2.14 | 2.67 | | |
| 01200 | 0.1781E+060 | 0.9254E+04 | 8.02 | 30.66 | 1.073 | | |
| 01300 | 1.805 E-6 | 14.7 | 0.1 | 9.83 E-05 | 1.58 E-4 | | |
| 01400 | 232.8 | 238.8 | 1150.0 | 0.119 E-4 | 300000.0 | | |
| 01500 | 0.91 | 232.8 | 670.0 | 300.0 | 0.0012 | | |
| 01600 | 0.068 | 234.3 | 50.0 | 0.13 | 232.0 | | |
| 01700 | 63.44 | 400.0 | 0.24 | 0.24 | 0.137 E-4 | | |
| 01800 | 0.91 | 1.58 E-4 | 7.24 E-5 | 2.3 | 2.485 E-3 | | |
| 01900 | 5.31 E-6 | 350.0 | 0.3689E-05 | 2.26 E-50 | 0.3306E-04 | | |
| 02000 | 0.2980E-04 | 0.72 | 72.73 | 0.1858 | 88.81 | | |
| 02100 | 700.0 | 0.2601 | 0.254 | 0.8457E-04 | 2.3 | | |
| 02200 | 2.485 E-3 | 5.31 E-6 | 600.0 | 0.4279E-05 | 2.26 E-5 | | |
| 02300 | 0.4193E-040 | 0.3615E-04 | 0.3314 | 0.3763E-01 | 870.0 | | |
| 02400 | 0.012 | 1.0 E6 | 1.1600E-040 | 0.1184E-040 | 0.9171E+02 | | |
| 02500 | 0.3187E+01 | 2.485 E-3 | 5.3 E-6 | 2.3 | 2.485 E-3 | | |
| 02600 | 5.3 E-6 | 350.0 | 620.0 | 0.4533E+04 | 0.45 | | |
| 02700 | 0.9064E+04 | 0.63 | (4) 225.7 | | | | |
| 02800 | 5.0 (4) | | | | | | |
| 02900 | HELIUM GAS TEMP. 20% UP CASE (2) | | | | | | |
| | -----1----- | -----2----- | -----3----- | -----4----- | -----5----- | -----6----- | -----7-R----- |

U

(1) 過渡条件

初期状態に対し変動値を INPUT する。下記例は, 入口ガス温度が, 914°C から 20 % 上昇し 1096.8 °C になった場合である。

- | | |
|------------|-----------------------------|
| (1) 水側入口温度 | 223 (°C) |
| (2) 水側入口圧力 | 30 (kg/cm ² a) |

| | |
|------------|-----------------|
| ③ 水側入口流量 | 372600 (kg/h) |
| ④ ヘリウム入口温度 | 1096.8 (°C) |
| ⑤ ヘリウム入口圧力 | 43.6 (kg/cm² a) |
| ⑥ ヘリウム入口流量 | 27550 (kg/h) |

(2) 収れん計算の判定値等

| | |
|--|----------------------|
| ⑦ SG の連立方程式の係数の数 | 26 |
| ⑧ 連立 1 次方程式の計算での入力, ピボットの相対 零判定値である | 1.0×10^{-7} |
| ⑨⑩⑪ 意味なし。 (traces) | |

(3) SG 仕様

| | |
|------------|-----------|
| ⑫ 腸内径 | 1.0 (M) |
| ⑬ 伝熱管有効長さ | 7.2 (M) |
| ⑭ 伝熱管内径 | 20.8 (MM) |
| ⑮ 伝熱管外径 | 25.4 (MM) |
| ⑯ バッフルスペース | 300 (MM) |
| ⑰ 管ピッチ | 50.8 (MM) |
| ⑱ 管本数 | 265 (本) |

(4) 初期条件及び計算条件

| | |
|-----------------|-----------------|
| ⑲ 水側入口温度 | 223 (°C) |
| ⑳ 水側入口圧力 | 30 (kg/cm² a) |
| ㉑ 水側入口流量 | 372600 (kg/h) |
| ㉒ ヘリウム入口温度 | 914 (°C) |
| ㉓ ヘリウム入口圧力 | 43.6 (kg/cm² a) |
| ㉔ ヘリウム入口流量 | 27550 (kg/h) |
| ㉕ 計算する時間ステップ巾 | 0.2 (sec) |
| ㉖ 連立方程式の数(定常計算) | 93 (本) |
| ㉗ 連立方程式の数(動特性) | 96 (本) |

(5) 連立方程式の解の初期推定値

前節(3.6) SG モデルにて整理した未知数の初期推定値 (x_1, x_2, \dots, x_n) に適当な値を INPUT する。

Table 5.1 の ㉘ ~ ㉚ の 93 個のデータは、前節(3)の SG 仕様及び(4)の初期条件に対し適合する初期推定値である。後述の問題点の節でも説明する通り、この初期推定値の値次第で Newton 法による計算が発散する場合が生ずる。

(6) その他

| | |
|-----------------------------|-----------|
| ㉛ 計算の打ち切り時間 | 5.0 (sec) |
| ㉜ 図形出力への計算条件のコメント文 (40 文字内) | |

5.3 OUTPUT DATA

本コードの計算結果は、下記 3 段階に出力される。

Step 1 SG 仕様及び計算条件

Step 2 定常状態（過渡条件が入る前）の計算結果

Step 3 動特性（経過時間と状態の関係）の計算結果を図形出力する。

1) Step 1

Step 1 の出力例を Table 5.2 に示す。

SG の仕様及び初期状態（過渡条件が入る前）のプロセス条件が出力される。

2) Step 2

Step 2 の出力例を Table 5.3 に示す。ここでは Step 1 の初期状態に対する過渡条件及び初期状態の計算結果が出力される。

3) Step 3

Step 3 では、過渡条件に対する時間応答が図形出力される。Fig. 5.2(1/6)～(6/6) にその出力例を示す。

出力例は下記に示す過渡条件、流入ガスの温度が 20 % 上昇した後 5 秒間の各状態値をプロセットしたものである。

| | | 初期条件 | 過渡条件 |
|----------|-----|---------------------------|-----------|
| 管側（水） | 温 度 | 223 °C | → |
| | 压 力 | 30 kg/cm ² a | → |
| | 流 量 | 372.6 TON/H | → |
| 胴側（ヘリウム） | 温 度 | 914 °C | 1096.8 °C |
| | 压 力 | 43.6 kg/cm ² a | → |
| | 流 量 | 27.55 TON/H | → |

出力値は下記 6 点である。

No. 1. ECONOMIZER LENGTH

伝熱管の入口から沸騰開始点までの長さが出力される。この例では時間経過に従って伝熱量が増大し、沸騰開始点が早まって来たことを示す。

No. 2. OUTLET STEAM/WATER FLOW RATE

出口での水蒸気の流量が出力される。この例では、入口流量は一定であるがEVAPORATOR 長さが長くなることで、伝熱管内に滞留する水蒸気量が減少する為一時的に出口流量が増大し、その後徐々にもとの流量にもどることを示す。

No. 3. OUTLET STEAM/WATER ENTALPY

出口での水蒸気のエンタルピーが出力される。この例では伝熱量が増大する分、出口エンタルピーが上昇することを示している。つまり水蒸含有率が大きくなる。

No. 4. OUTLET GAS TEMPERATURE

出口でのガス温度が出力される。

Table 5.2 Output Data Step 1

```
*****+
* STEAM GENERATOR SPECIFICATION *
*****+
(1) SHELL INNER DIAMETER          1.00   (M)
(2) TUBE LENGTH                   7.20   (M)
(3) TUBE INNER DIAMETER          20.80   (MM)
(4) TUBE OUTER DIAMETER          25.40   (MM)
(5) BAFFLE SPACE                 300.00   (MM)
(6) TUBE PITCH                   50.80   (MM)
(7) TUBE NUMBER                  265.00   (-)
(8) SURFACE AREA                 152.17   (M2)
```



```
*****+
* PROCESS CONDITION *
*****+
*** TUBE SIDE (INLET WATER) ***
(1) TEMPERATURE                  223.60   (DEG C)
(2) PRESSURE                      30.00   (KG/CM2A)
(3) FLOW RATE                     372600.00   (KG/H)
```



```
*** SHELL SIDE (INLET HELIUM) ***
(4) TEMPERATURE                  914.00   (DEG C)
(5) PRESSURE                      43.60   (KG/CM2A)
(6) FLOW RATE                     27550.00   (KG/H)
```

Table 5.3 Output Data Step 2

```
*****+
* TRANSIENT CONDITION *
* * * *
* HELIUM GAS TEMP. 20% UP CASE *
*****+
*** TUBE SIDE (INLET WATER) ***
(1) TEMPERATURE                  223.00   (DEG C)
(2) PRESSURE                      30.00   (KG/CM2A)
(3) FLOW RATE                     372600.00   (KG/H)
```



```
*** SHELL SIDE (INLET HELIUM) ***
(4) TEMPERATURE                  1096.80   (DEG C)
(5) PRESSURE                      43.60   (KG/CM2A)
(6) FLOW RATE                     27550.00   (KG/H)
```



```
*****+
* CALCULATION RESULT *
* INITIAL CONDITION *
*****+
(1) ECONOMIZER LENGTH            4.05   (M)
(2) OUTLET GAS TEMP.             320.62   (DEG C)
(3) GAS TEMP. AT ECONOMIZER INLET 488.28   (DEG C)
(4) OUTLET STEAM TEMP.           232.10   (DEG C)
(5) OUTLET STEAM ENTHALPY        278.00   (KCAL/KG)
(6) TUBE SKIN TEMP. (ECONOMIZER MEAN) 235.01   (DEG C)
(7) TUBE SKIN TEMP. (EVAPORATOR MEAN) 255.07   (DEG C)
(8) INSIDE HEAT TRANSFER COEFFICIENT (ECONOMIZER) 9972.34   (KCAL/M2*H*C)
(9) OUTSIDE HEAT TRANSFER COEFFICIENT (ECONOMIZER) 535.22   (KCAL/M2*H*C)
(10) INSIDE HEAT TRANSFER COEFFICIENT (EVAPORATOR) 16537.39   (KCAL/M2*H*C)
(11) OUTSIDE HEAT TRANSFER COEFFICIENT (EVAPORATOR) 593.96   (KCAL/M2*H*C)
(12) HEAT TRANSFER RATE (ECONOMIZER) 488.47   (KCAL/M2*H*C)
(13) HEAT TRANSFER RATE (EVAPORATOR) 551.32   (KCAL/M2*H*C)
(14) HEAT DUTY                   0.203E+08   (KCAL/H)
```

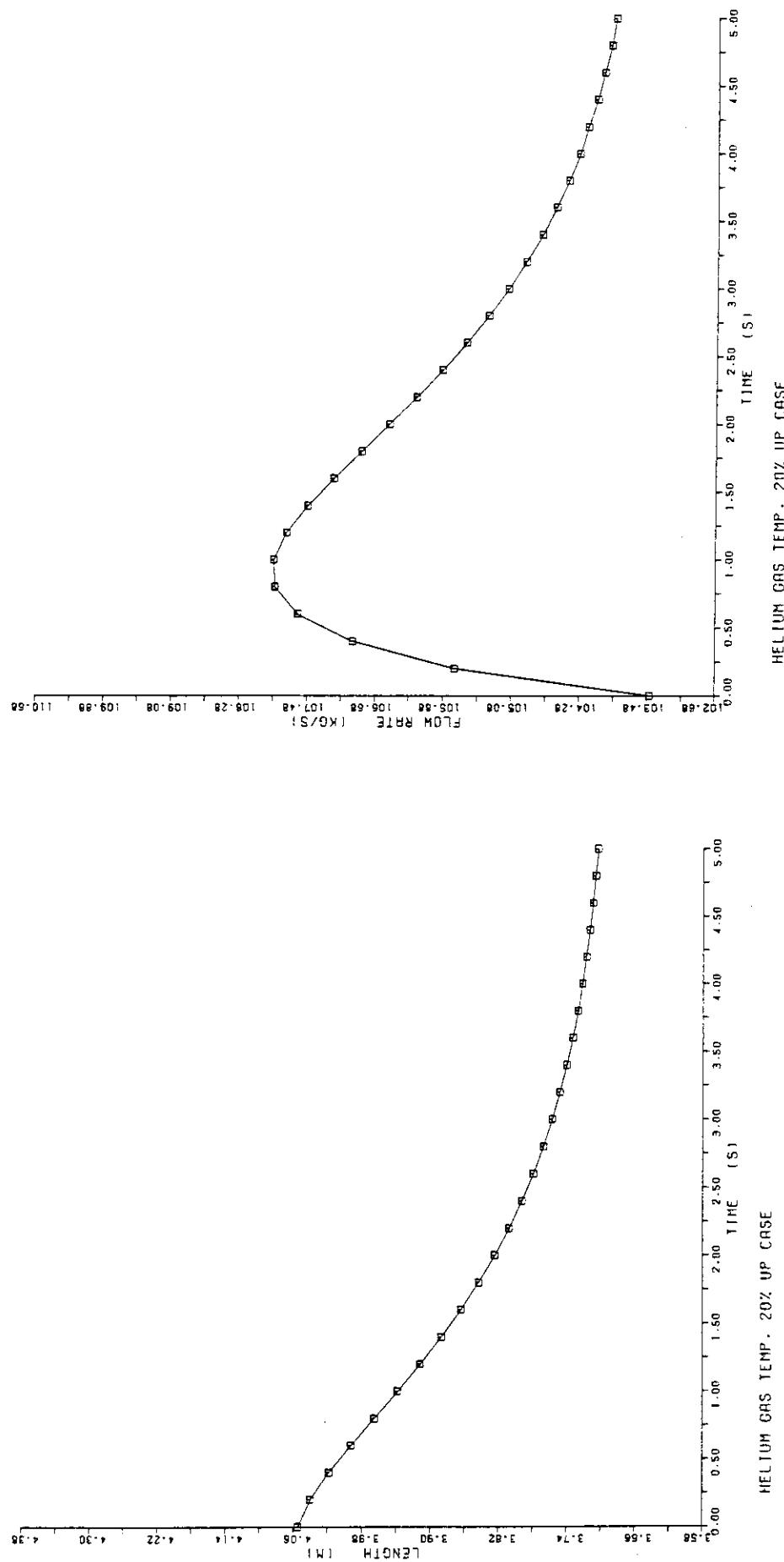


Fig.5.2 Output Data Step 3 (1/6)

Fig.5.2 Output Data Step 3 (2/6)

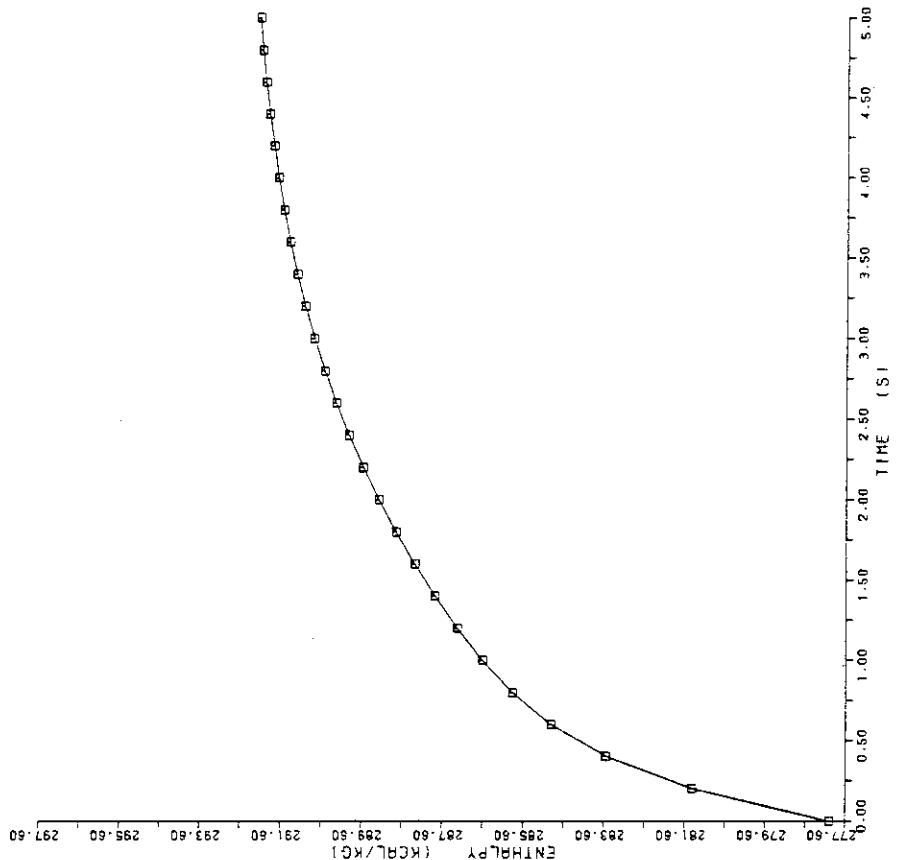


Fig.5.2 Output Data Step 3 (3/6)

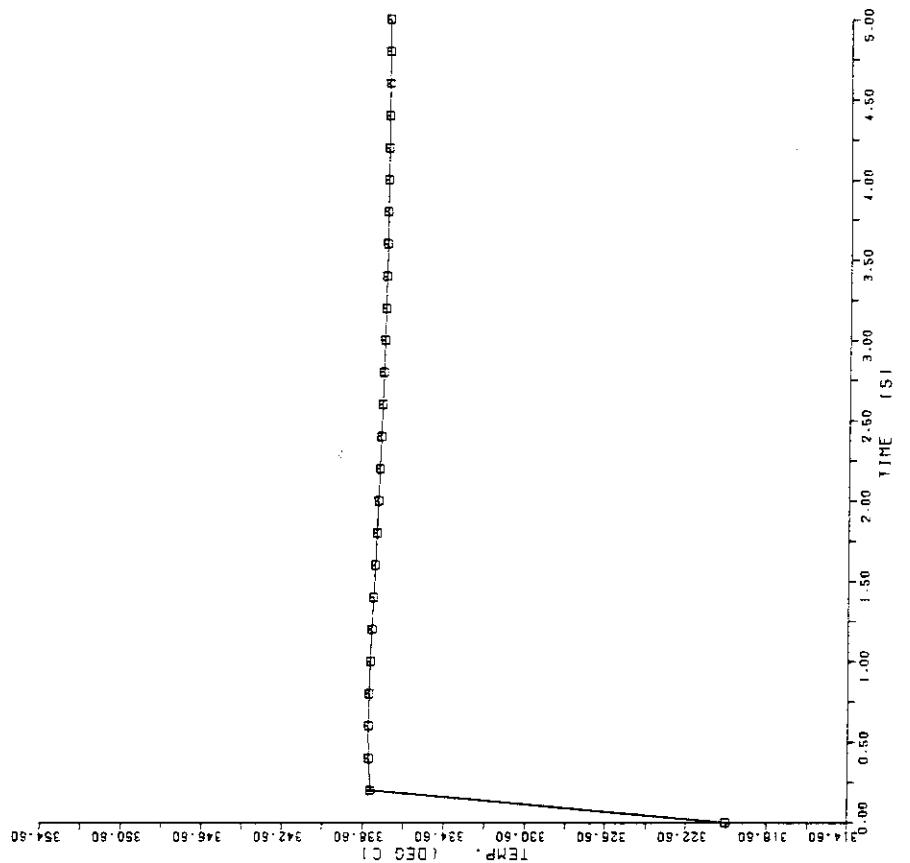


Fig.5.2 Output Data Step 3 (4/6)

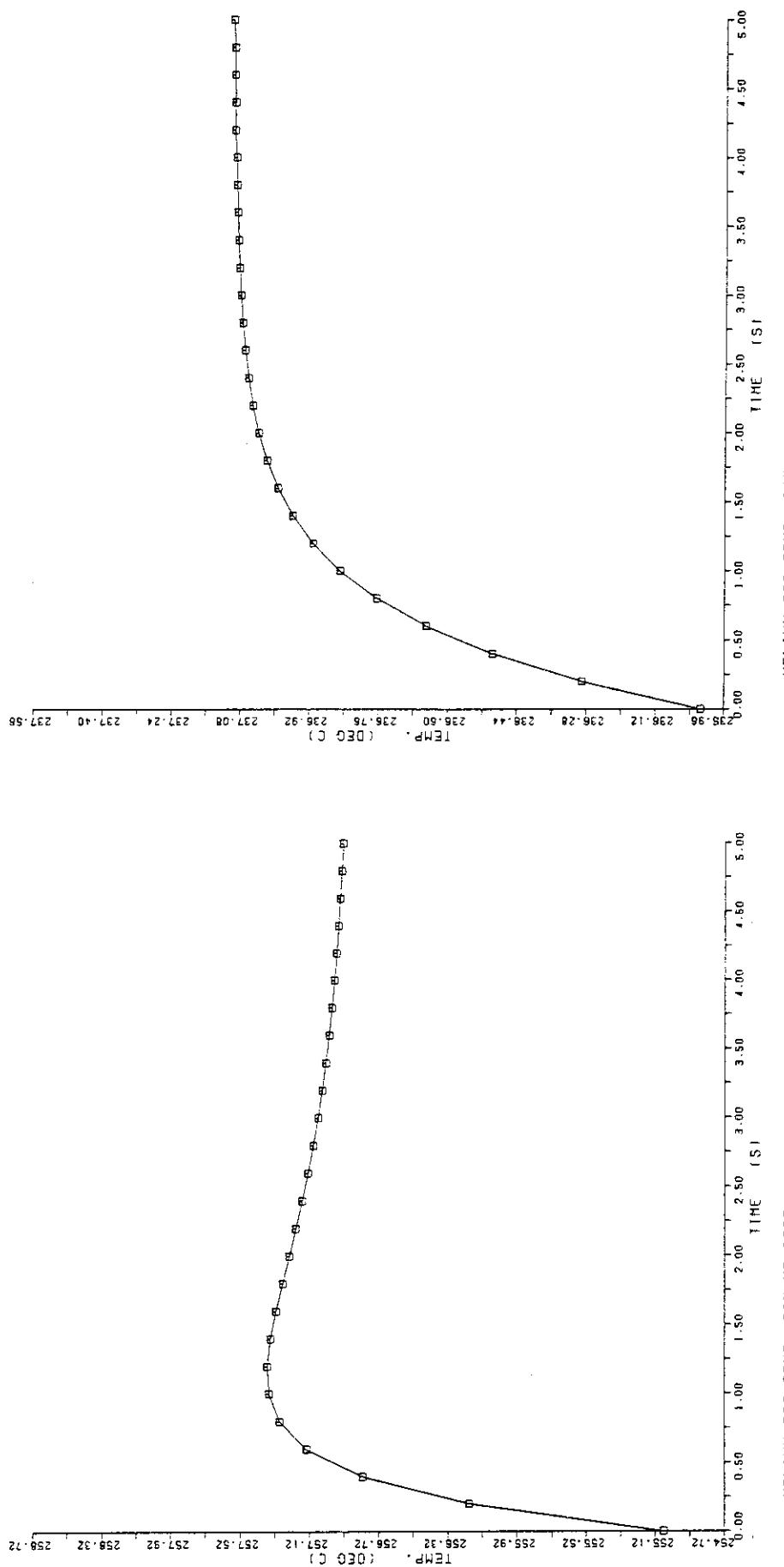


Fig. 5.2 Output Data Step 3 (5/6)

Fig. 5.2 Output Data Step 3 (6/6)

この例では入口温度の上昇に、ほとんど同時に応答し上昇することを示す。

No.5. TUBE SKIN TEMPERATURE (ECONOMIZER MEAN)

ECONOMIZER部の平均伝熱管温度が出力される。ガス側の温度上昇に約1秒遅れて上昇していることを示す。

No.6. TUBE SKIN TEMPERATURE (EVAPORATOR MEAN)

EVAPORATOR部の平均伝熱管温度が出力される。ガス側の温度上昇に約2秒遅れて上昇していることを示す。

6. 計 算 結 果

下記過渡条件による動特性の計算結果を示す。

(1) 流入 He ガス温度の変動 (Fig. 6.1)

$$914^{\circ}\text{C} \rightarrow 1005.4^{\circ}\text{C} \quad (10\% \text{ up case})$$

(2) 流入 He ガス流量の変動 (Fig. 6.2)

$$27550 \text{ kg/h} \rightarrow 24795 \text{ kg/h} \quad (10\% \text{ down case})$$

(3) 水側の圧力変動 (Fig. 6.3)

$$30 \text{ kg/cm}^2 \text{ a} \rightarrow 27 \text{ kg/cm}^2 \text{ a} \quad (10\% \text{ down case})$$

(4) 水側の温度変動 (Fig. 6.4)

$$223^{\circ}\text{C} \rightarrow 200.7^{\circ}\text{C} \quad (10\% \text{ down case})$$

この例では入口温度の上昇に、ほとんど同時に応答し上昇することを示す。

No.5. TUBE SKIN TEMPERATURE (ECONOMIZER MEAN)

ECONOMIZER部の平均伝熱管温度が出力される。ガス側の温度上昇に約1秒遅れて上昇していることを示す。

No.6. TUBE SKIN TEMPERATURE (EVAPORATOR MEAN)

EVAPORATOR部の平均伝熱管温度が出力される。ガス側の温度上昇に約2秒遅れて上昇していることを示す。

6. 計 算 結 果

下記過渡条件による動特性の計算結果を示す。

(1) 流入 He ガス温度の変動 (Fig. 6.1)

$$914 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 1005.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (10\% up case)}$$

(2) 流入 He ガス流量の変動 (Fig. 6.2)

$$27550 \text{ kg/h} \rightarrow 24795 \text{ kg/h} \text{ (10\% down case)}$$

(3) 水側の圧力変動 (Fig. 6.3)

$$30 \text{ kg/cm}^2 \text{ a} \rightarrow 27 \text{ kg/cm}^2 \text{ a} \text{ (10\% down case)}$$

(4) 水側の温度変動 (Fig. 6.4)

$$223 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 200.7 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (10\% down case)}$$

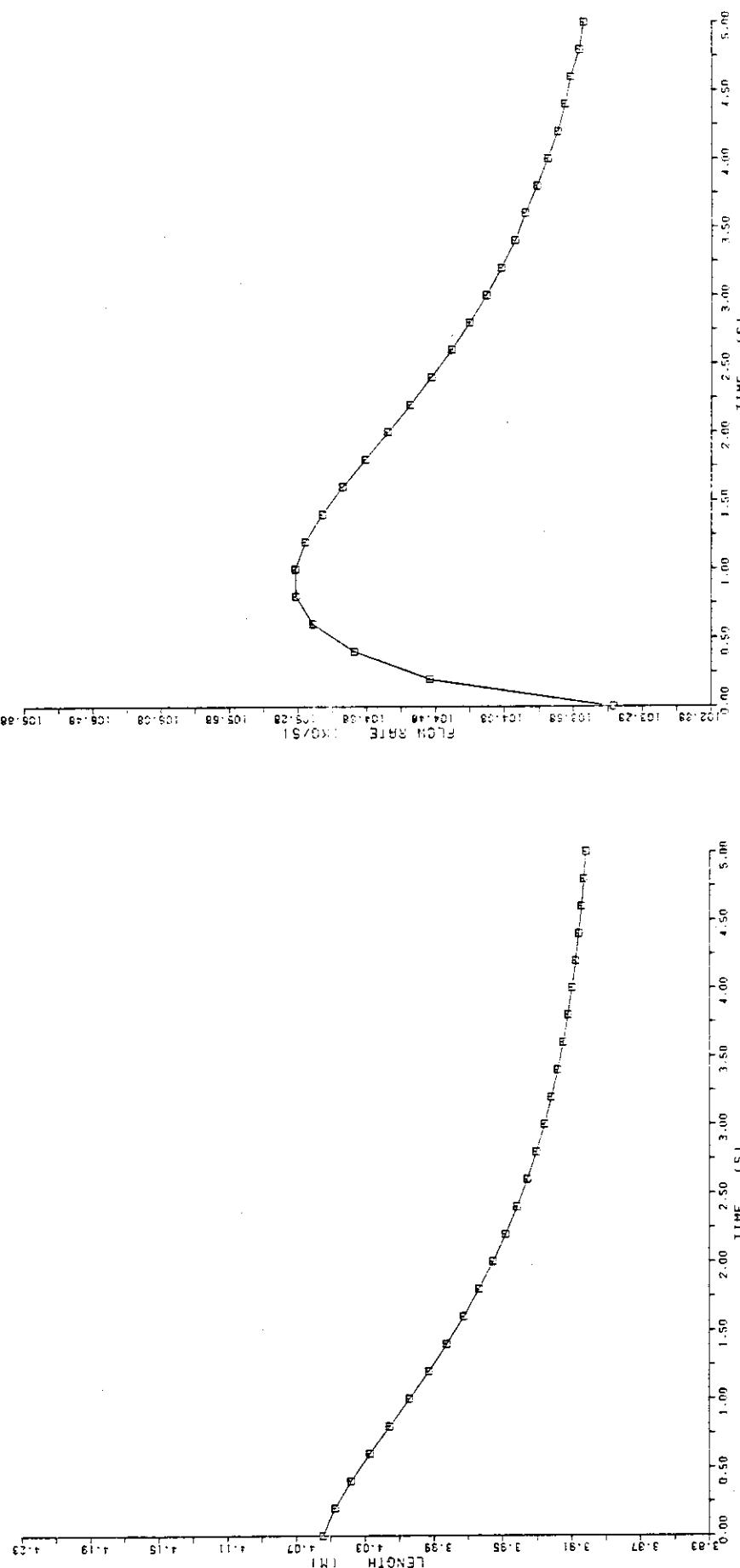


FIG. 6.1 HELIUM GAS TEMP. 10% UP CASE
NO.1 ECONOMIZER LENGTH

FIG. 6.1 HELIUM GAS TEMP. 10% UP CASE
NO.2 OUTLET STREAM/INLET FLOW RATE

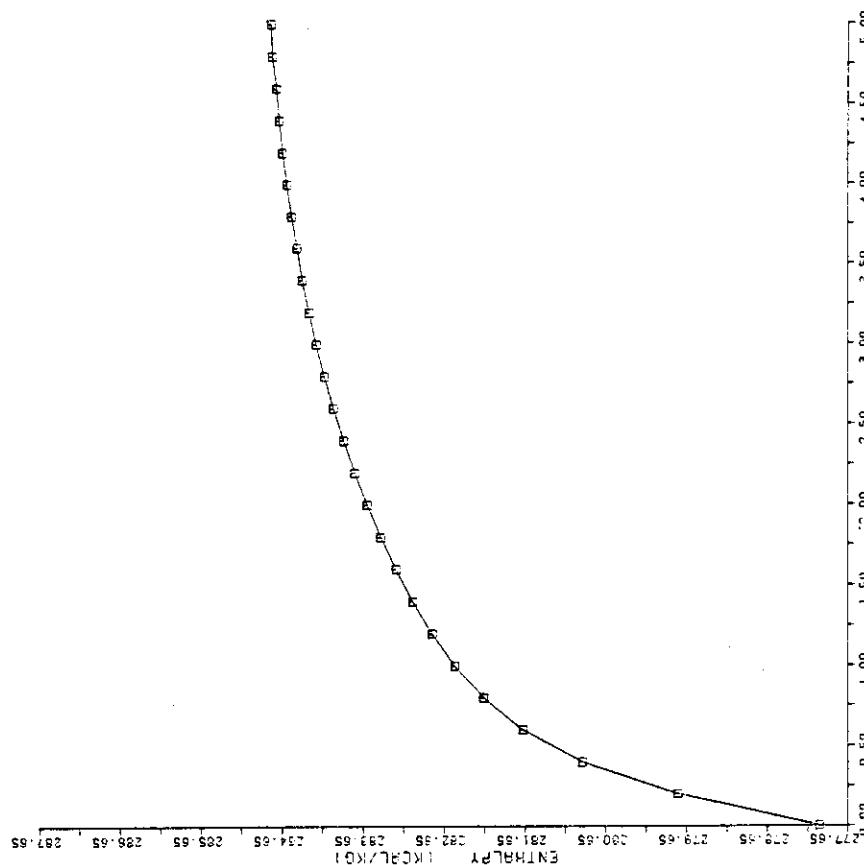


FIG. 6.1 HELIUM GAS TEMP. 10% UP CASE
NO. 3 OUTLET STREAM/WATER ENTHALPY

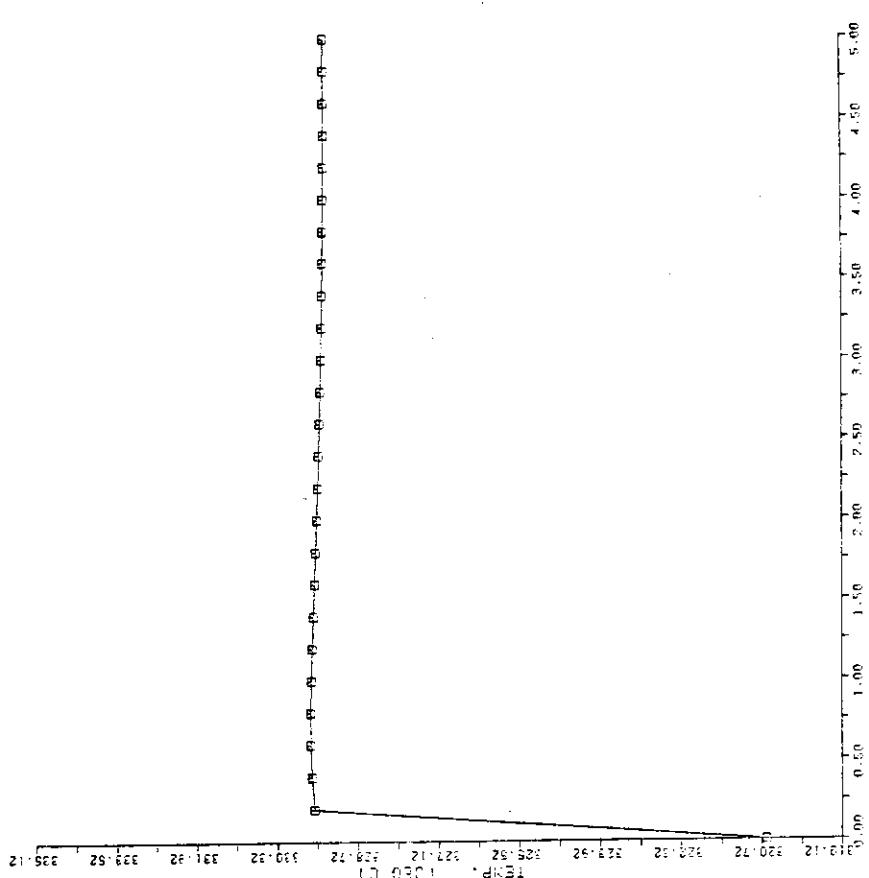


FIG. 6.1 HELIUM GAS TEMP. 10% UP CASE
NO. 4 OUTLET GAS TEMPERATURE

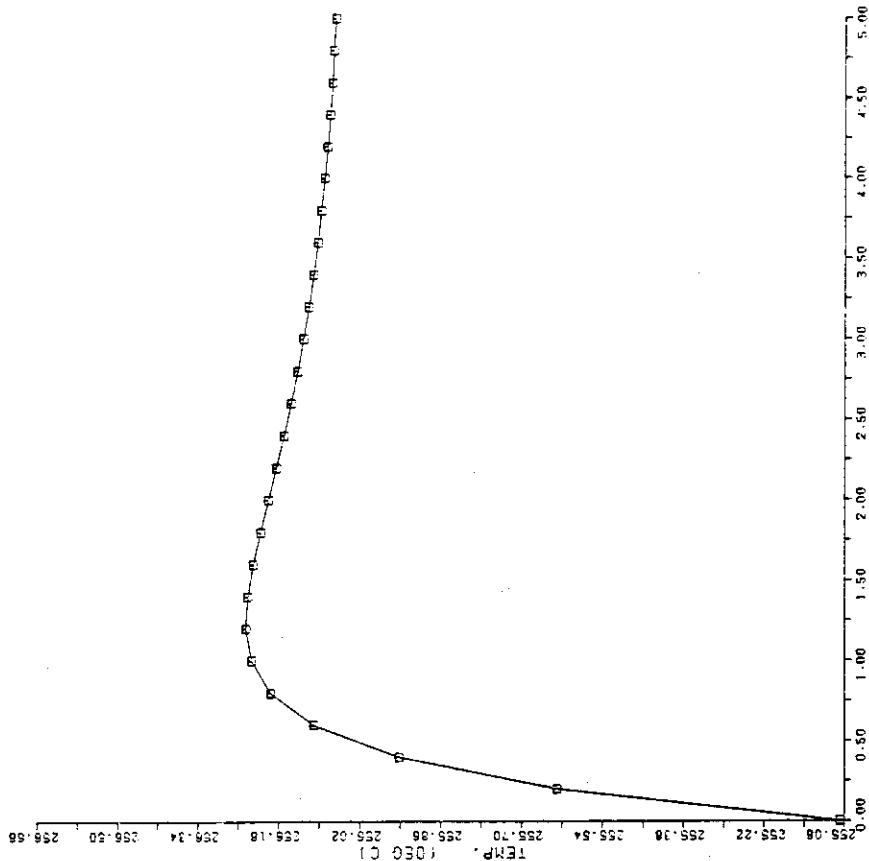


FIG 6.1 HELIUM GAS TEMP. 10% UP CASE
NO.5 TUBE SKIN TEMPERATURE ECONOMIZER MFLAN

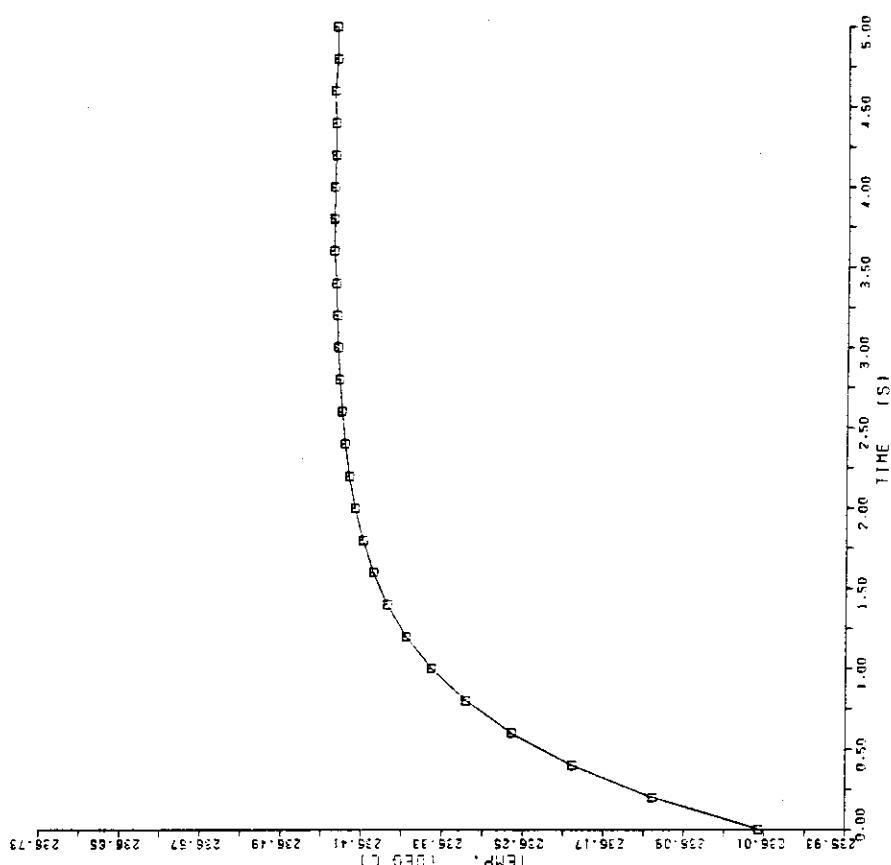
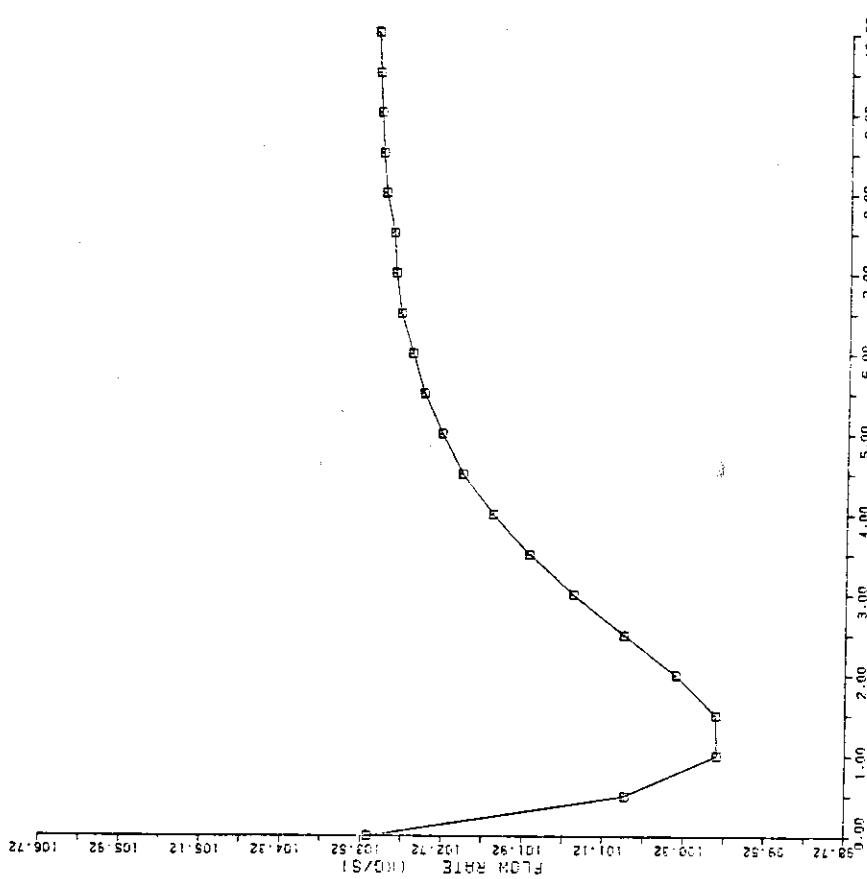
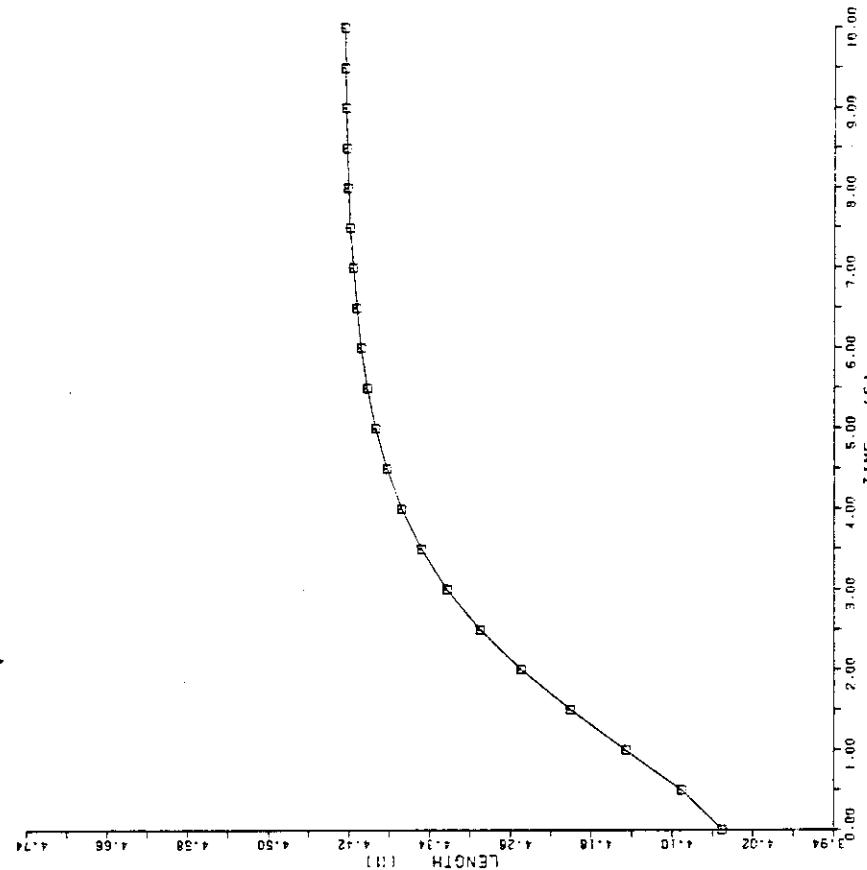
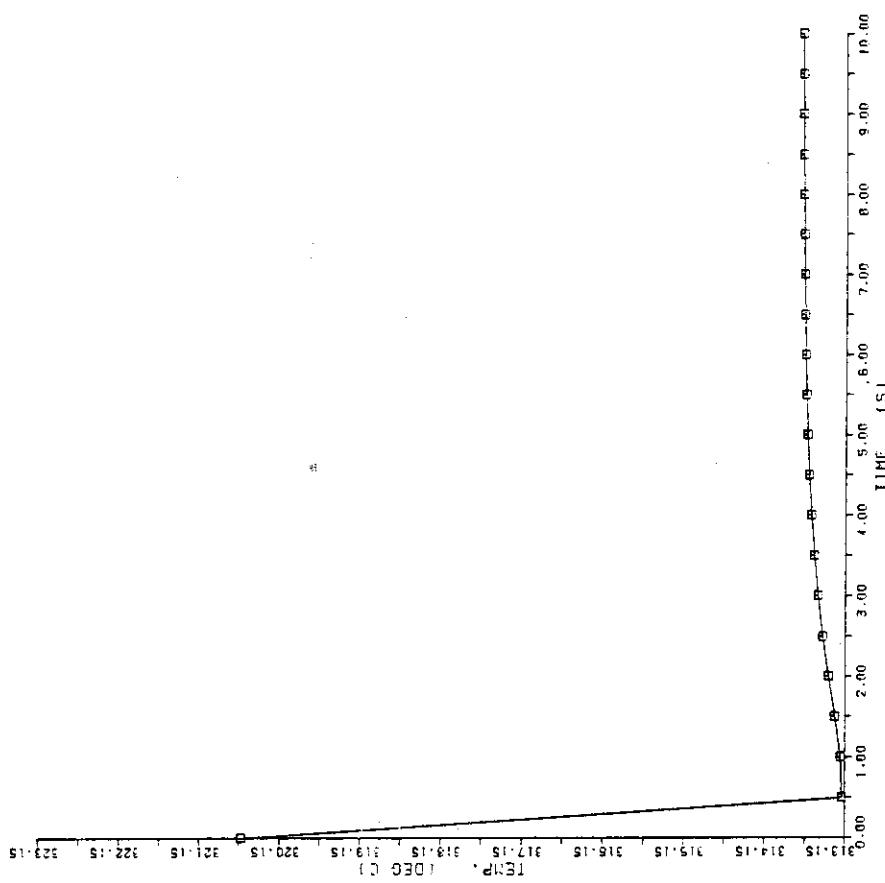
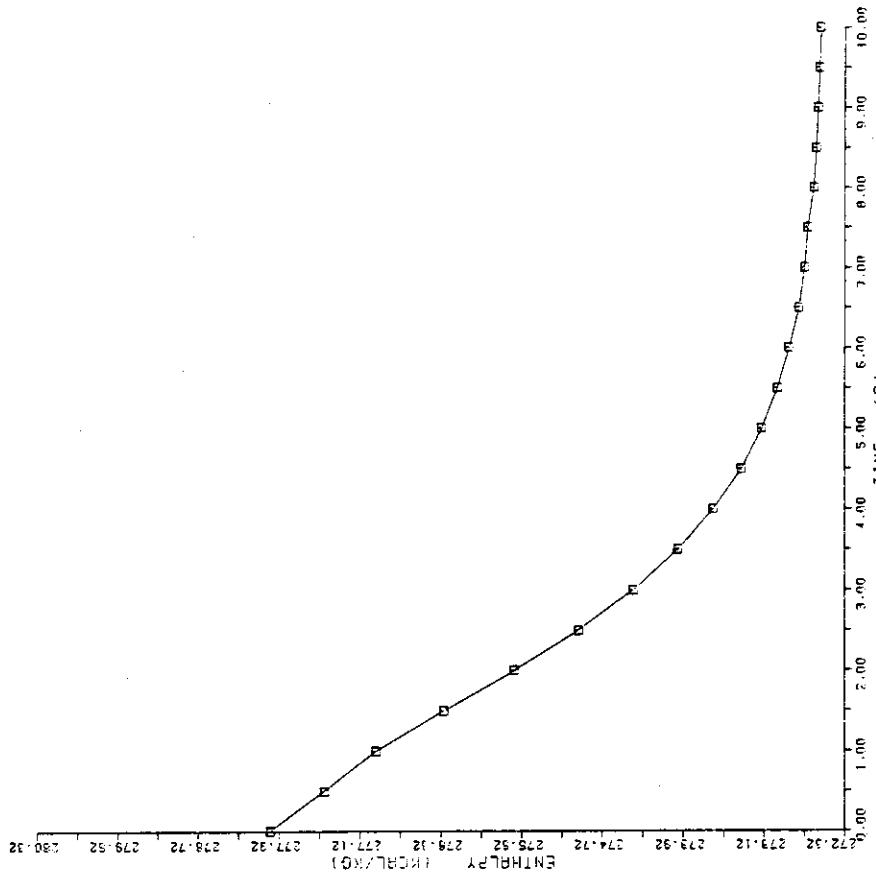


FIG 6.1 HELIUM GAS TEMP. 10% UP CASE
NO.6 TUBE SKIN TEMPERATURE (EVAPORATOR MFLAN)





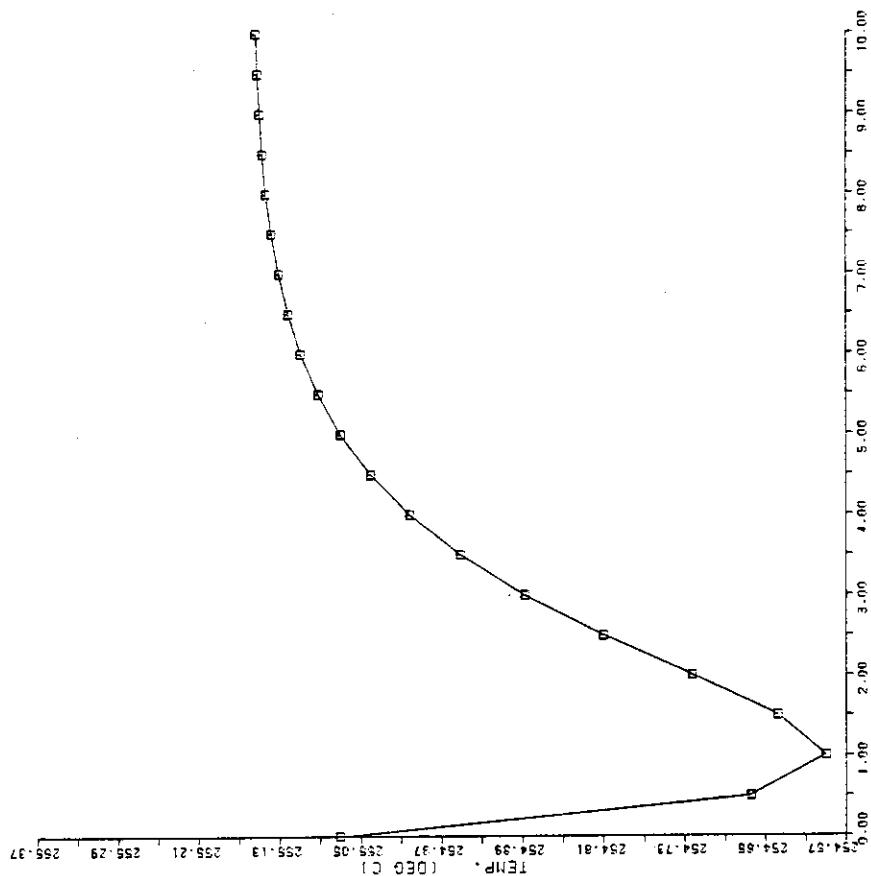


FIG 6.2 HELIUM FLOW RATE 10Z DOWN CASE
NO.5 TUBE SKIN TEMPERATURE (THERMOMETER MEAN)

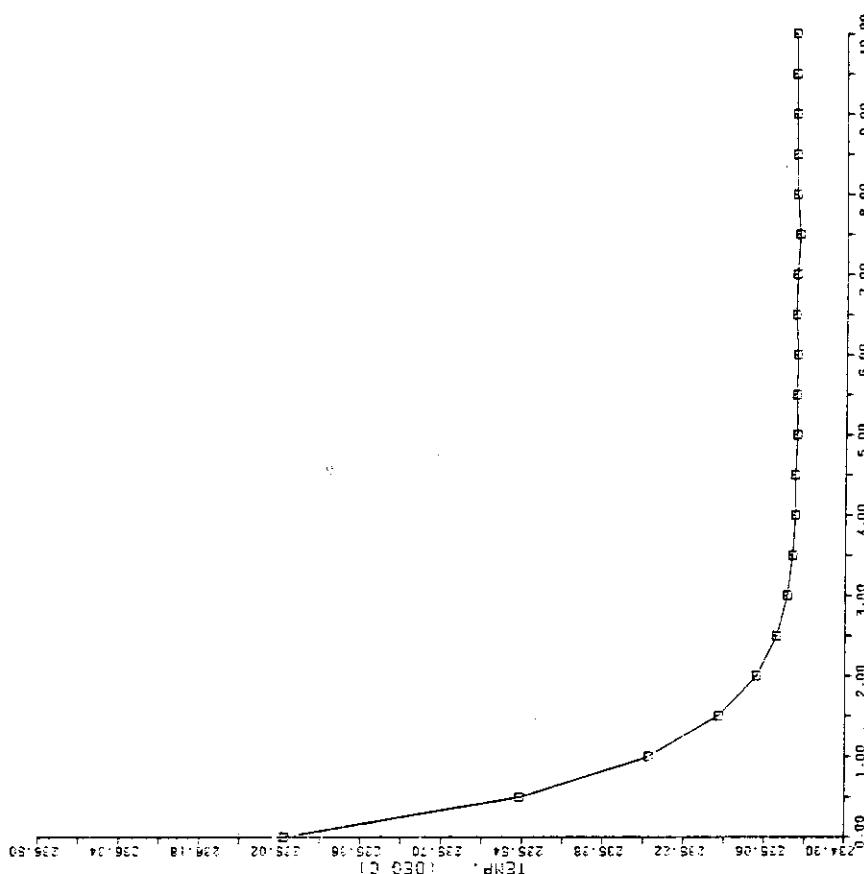


FIG 6.2 HELIUM FLOW RATE 10% DOWN CASE
NO.5 TUBE SKIN TEMPERATURE (EVAPORATOR MEAN)

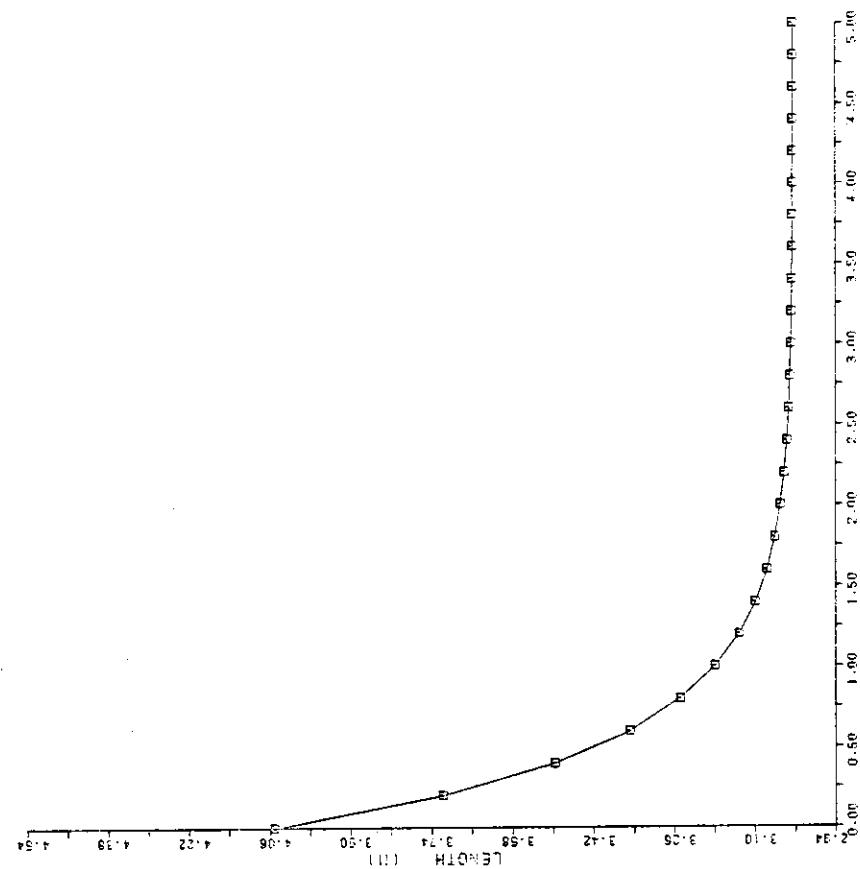


FIG 6.3 WATER PRESS. 10% DOWN CASE
NO.1 ECONOMIZER LENGTH

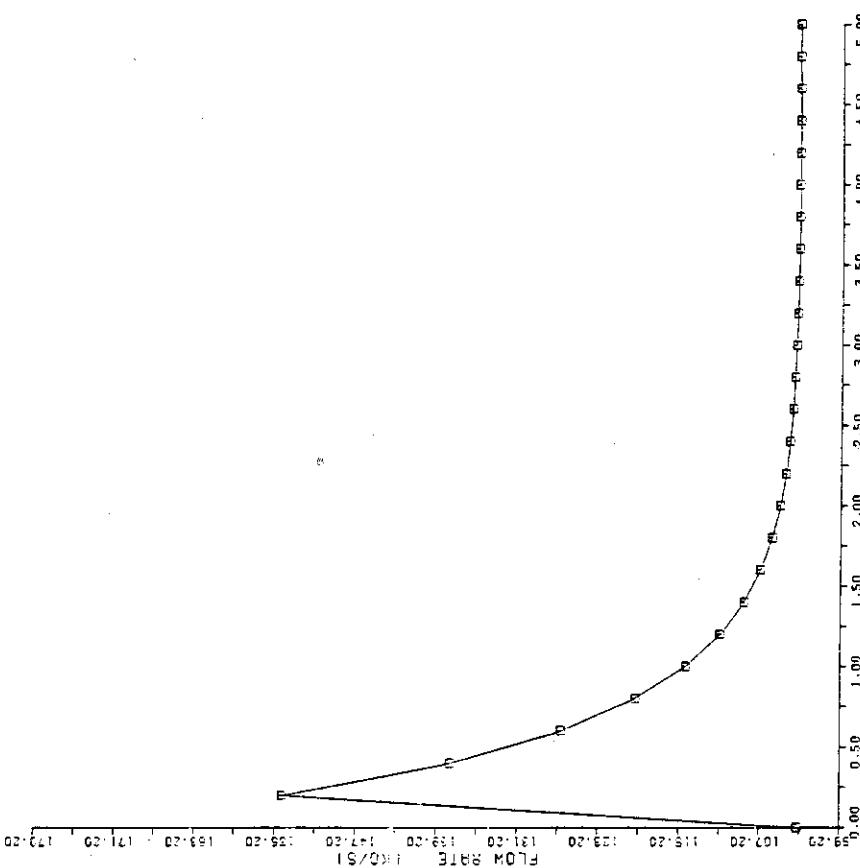


FIG 6.3 WATER PRESS. 10% DOWN CASE
NO.2 OUTLET STEAM/WATER FLOW RATE

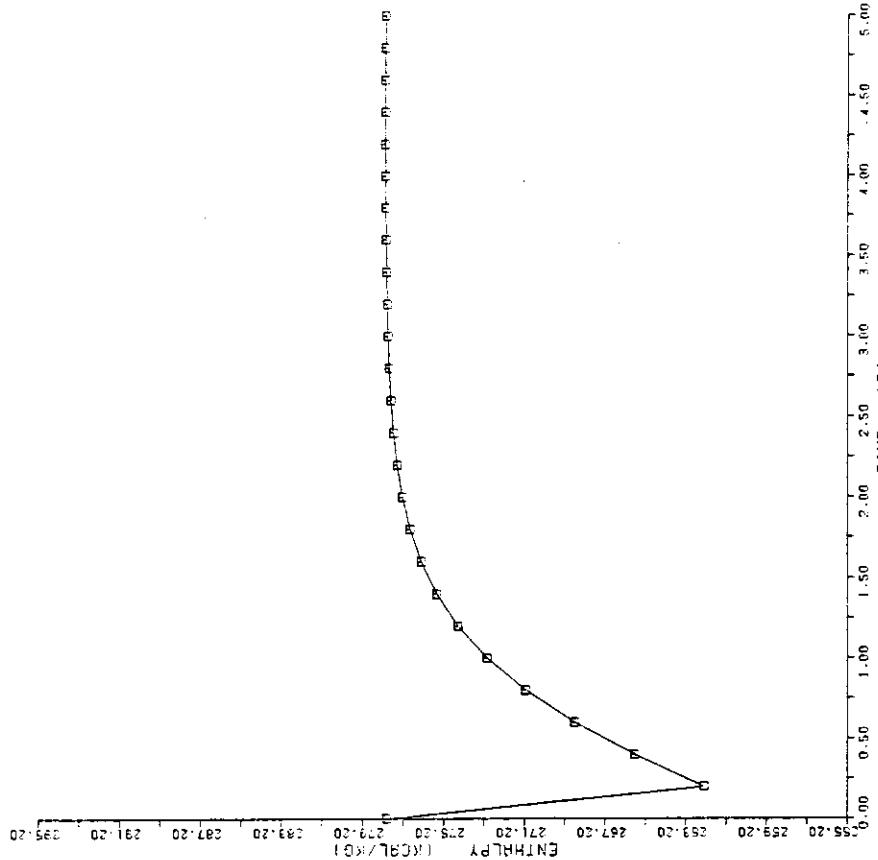


FIG. 6.3 WATER PRESS. 10% DOWN CASE
NO. 3 OUTLET STEAM/WATER ENTHALPY

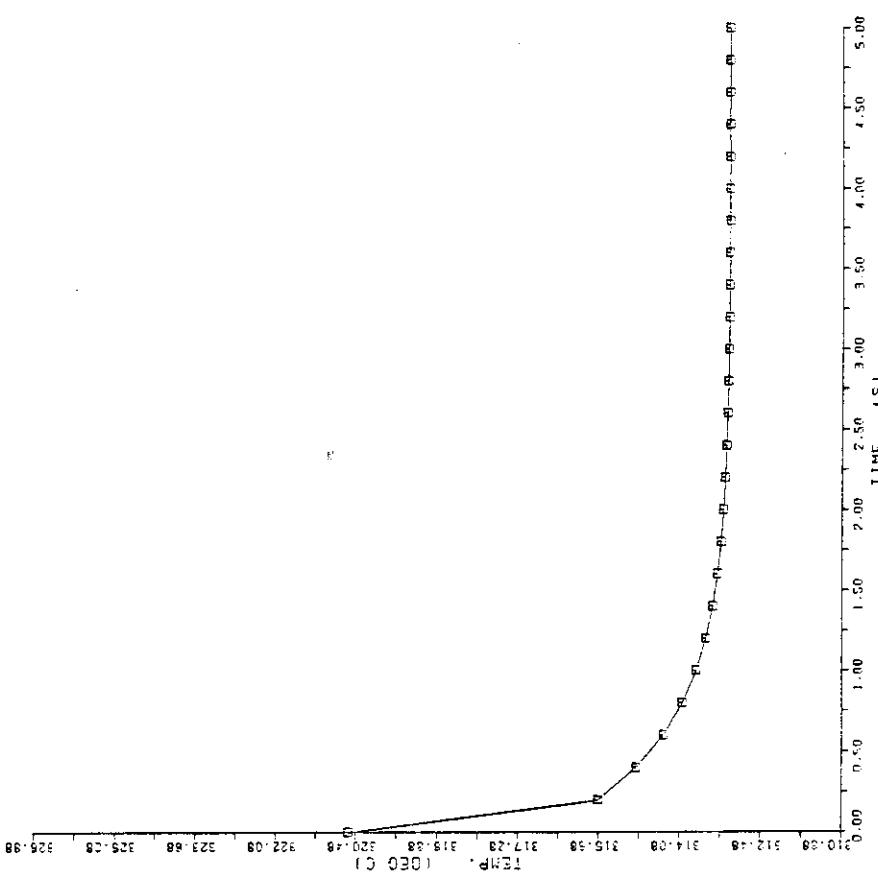
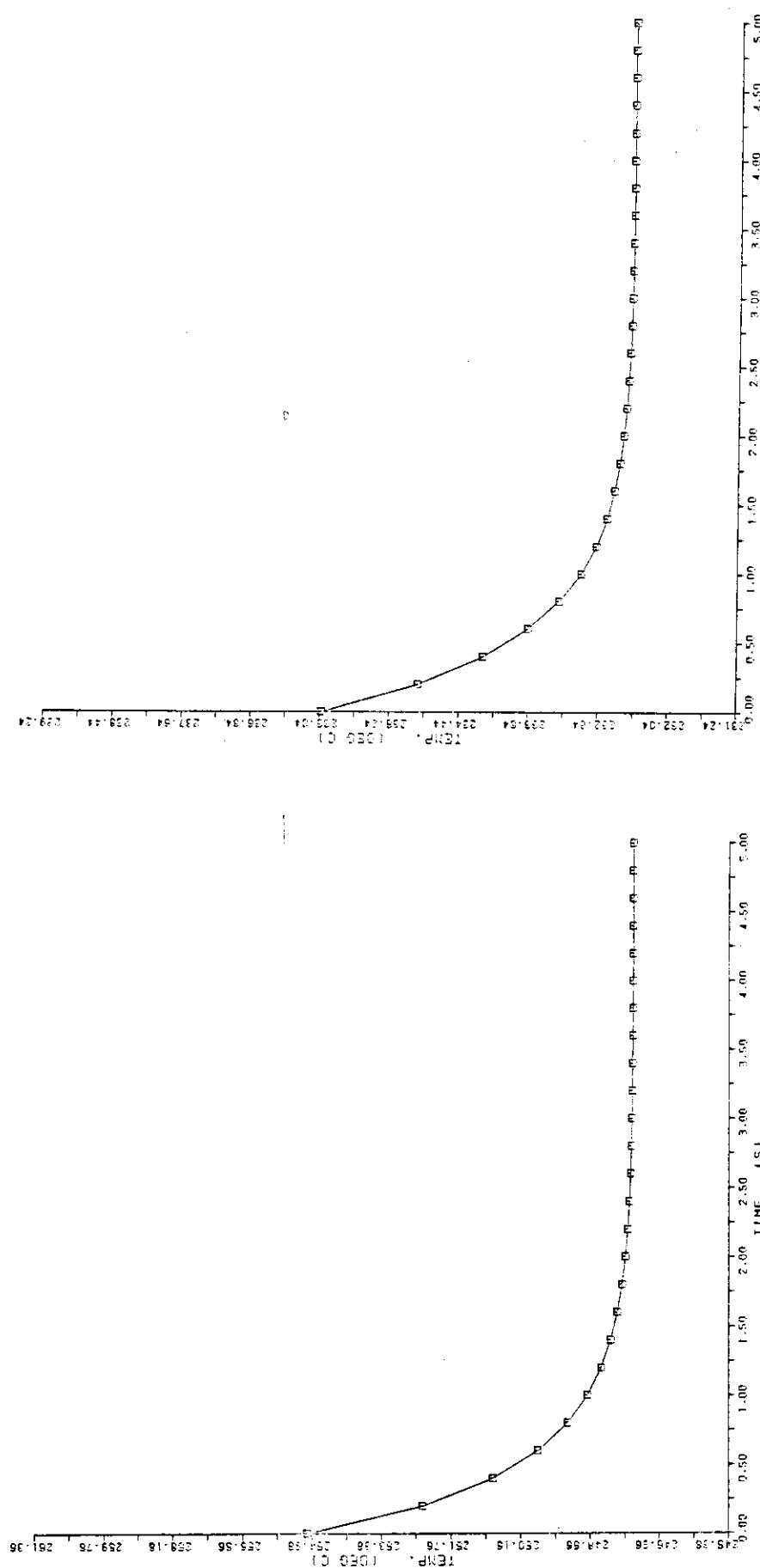


FIG. 6.3 WATER PRESS. 10% DOWN CASE
NO. 4 OUTLET GAS TEMPERATURE



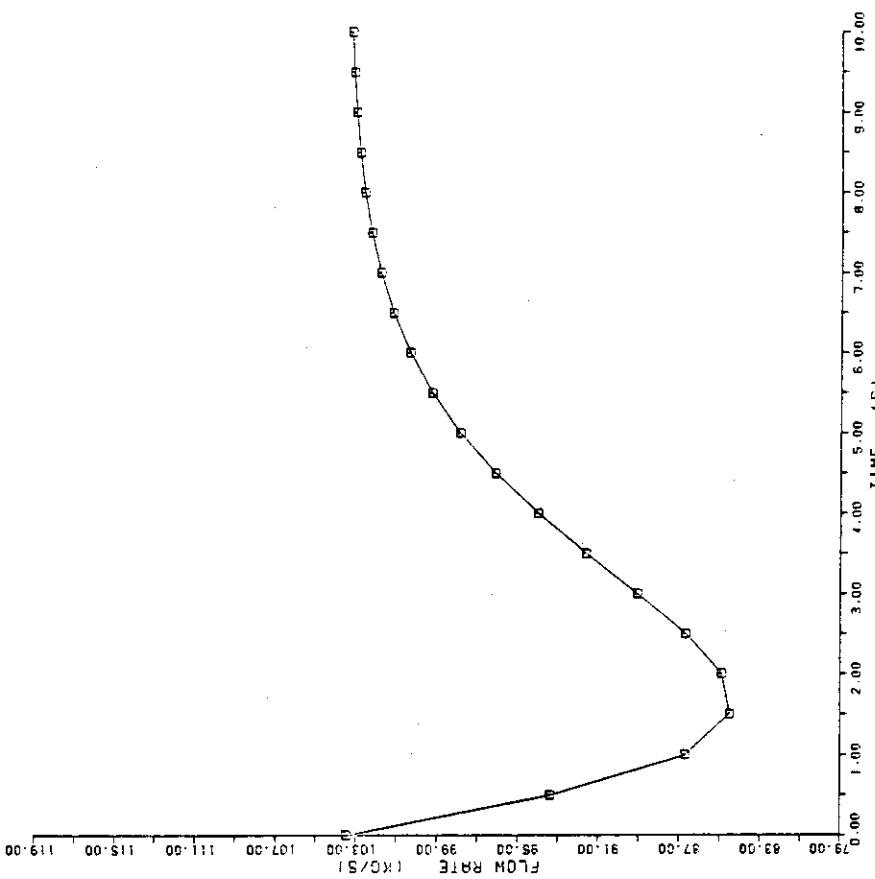


FIG 6.4 INLET WATER TEMP. 10% DOWN CASE
NO.2 OUTLET STEAM/WATER FLOW RATE

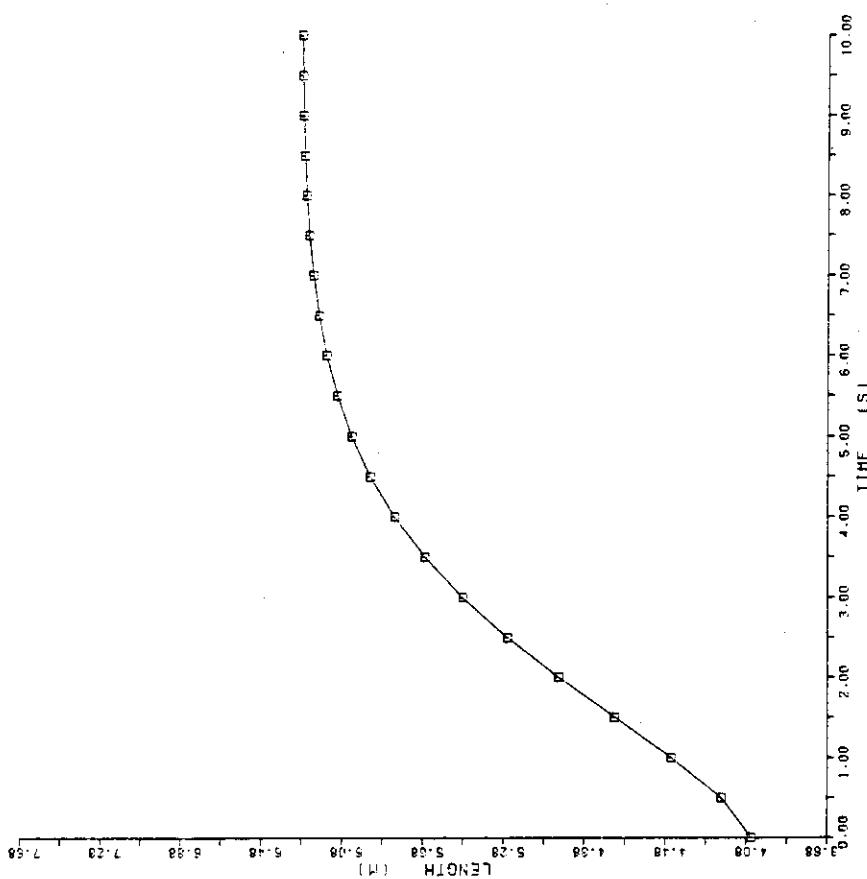


FIG 6.4 INLET WATER TEMP. 10% DOWN CASE
NO.1 ECONOMIZER LENGTH

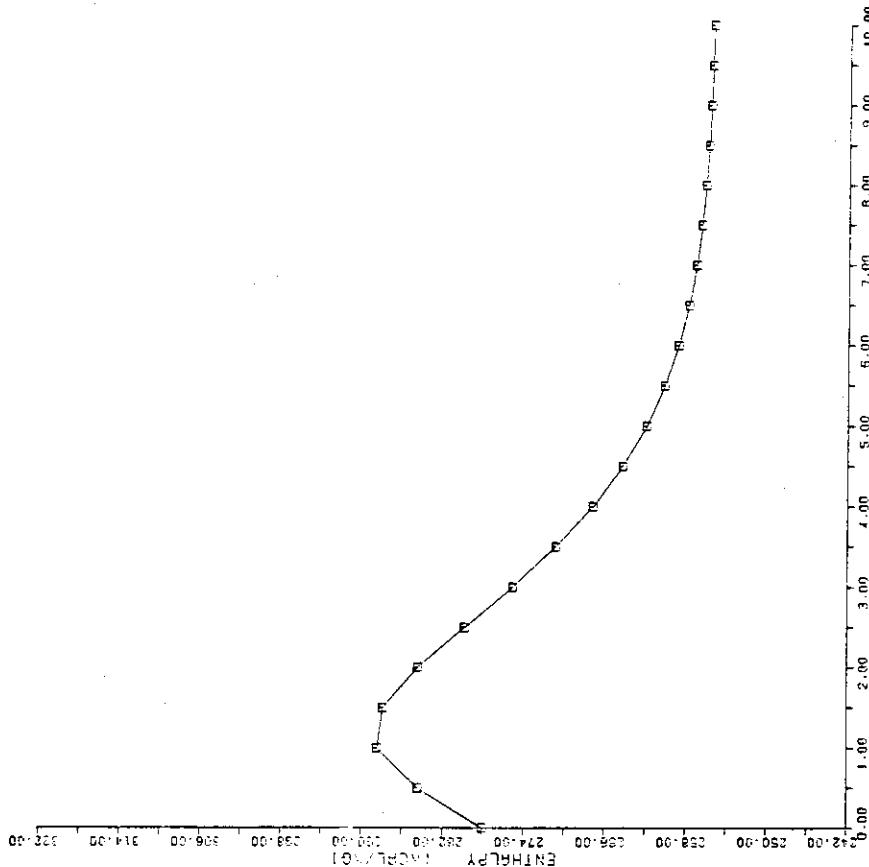


FIG. 6.4 INLET WATER TEMP. NO.3 DOWN CASE
NO.3 OUTLET GAS INTERFACE

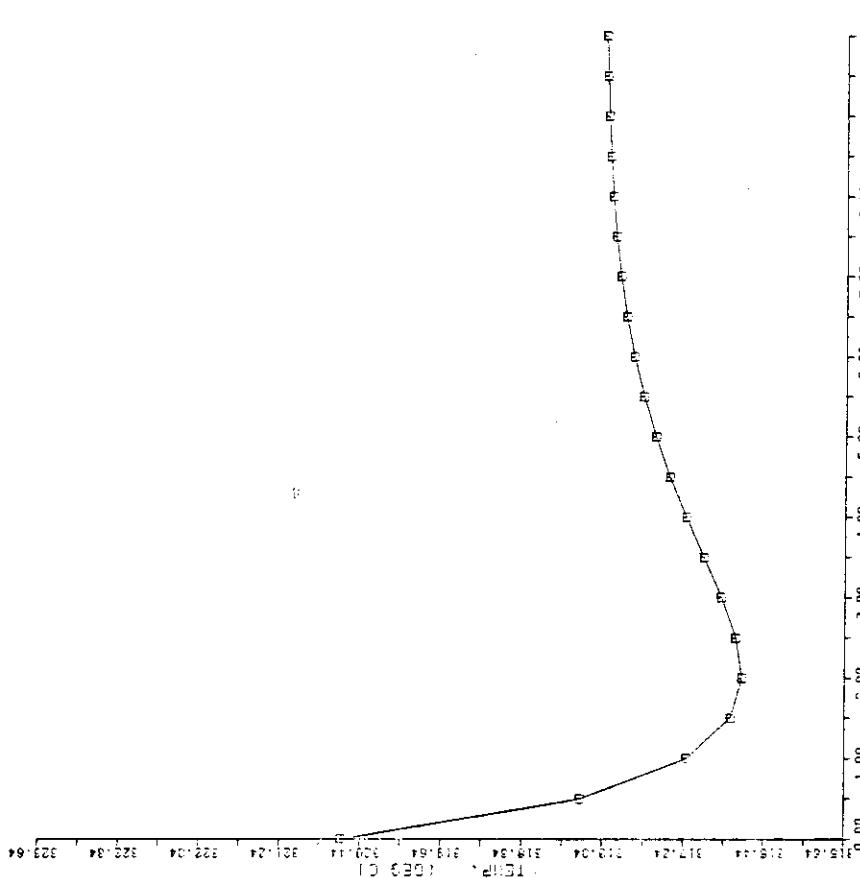


FIG. 6.4 INLET WATER TEMP. 10% DOWN CASE
NO.4 OUTLET GAS INTERFACE

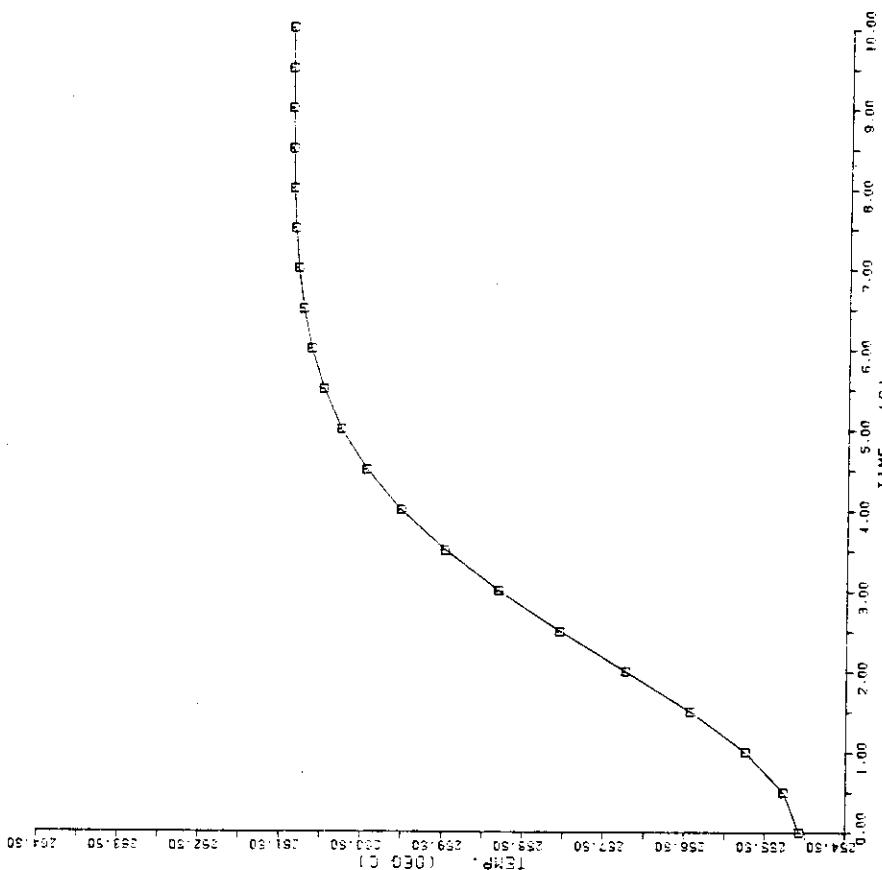


FIG. 6.4 INLET WATER TEMP. 10% DOWN CASE
NO. 5 TURE SKIN TEMPERATURE (ECONOMIZER HEATIN)

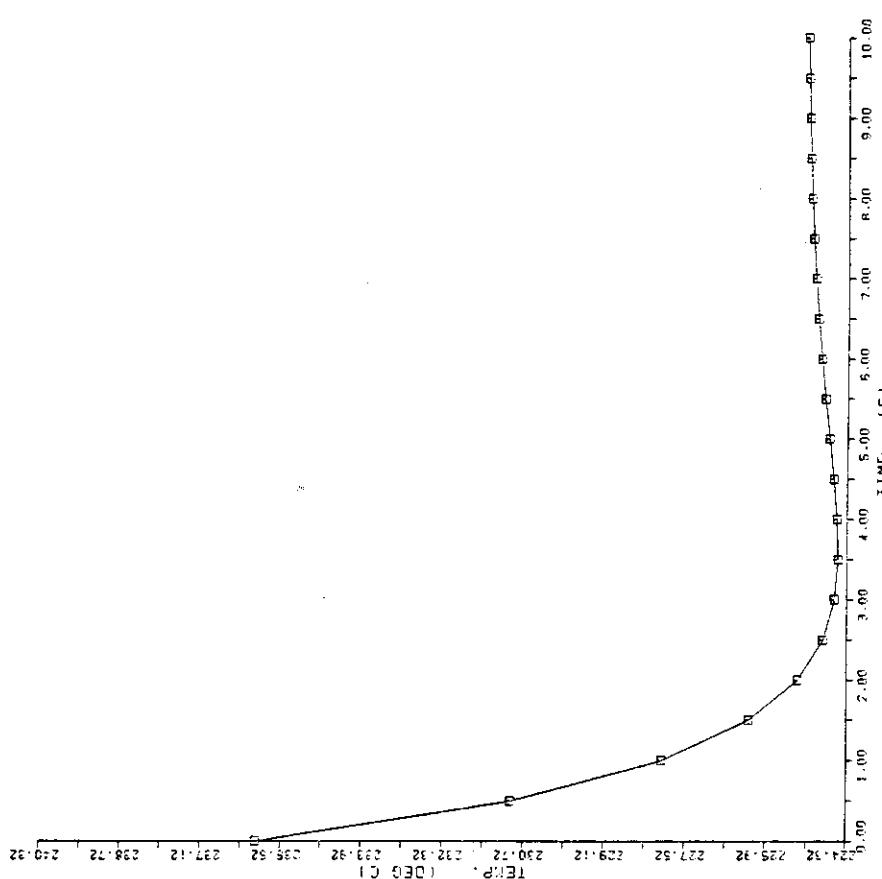


FIG. 6.4 INLET WATER TEMP. 10% DOWN CASE
NO. 6 TURE SKIN TEMPERATURE (EVAPORATOR HEATIN)

7. 図形処理

7.1 概要

動特性のシミュレーションに類する、経過時間に対する各状態量の変化を判断する場合には、計算結果を経過時間と状態量とでグラフに整理するのが最も便利である。ここでは、本コードの図形処理のサブルーチン、及び実行の方法（ジョブ制御文、TSSによる作図）について説明する。

7.2 図形処理サブルーチン

Fig. 7.1 に本コードの図形処理サブルーチンの一部を示す。SUBROUTINE SUB 1によって No. 1 のグラフ (ECONOMIZER LENGTH) が作図されるのであるが、この例に従って各図形作成のためのコマンドの使用方法を説明する。またこれらのコマンドは各種図形出力機種によって意味が異なるもの、また無視されるものがあるが、ここでは、PTS ライブラリー (Plotter-compatible TEKTRONIX Graphics Subroutine Library, つまり TEKTRONIX 端末出力用) での意味についてのみ説明する。

① CALL PLOTS (DUMMY, N)

PTS を初期化するための命令である。PTS 命令 (CALL SCALE, CALL, AXIS 等) 使用に先立って必ず 1 回呼び出す必要がある。

DUMMY : 文字定数 "BCPY" を指定した場合は中間コマンド・ファイルを作成する。その他の場合はダミーパラメータとして意味をもたない。

N : 整数型の定数または変数で $N > 0$ で実行中にキーインにより端末に対しハードコピーのとり方等の指定ができる。 $N < 0$ ではキーインの要求はなく、次の処理へ進む。

② CALL SCALE (Y, HEIGHT, N, INC, DIV)

データのプロッティングに先立ち、データの表示範囲を指定する命令である。AXIS と LINE 命令との組み合わせで使用される。

Y : スクーリングされるデータの配列。

HEIGHT : データを展開しようと思う巾 (mm)。

N : データの数。

INC : データを取り出す間隔。

DIA : つねに 10.0

この例では②の命令により、ECONOMIZER 長さのプロッティングが 150.0 mm の巾におさまるように、Y (N+1), Y (N+2) に下記値が入る。

$$Y(N+1) = \min Y$$

JAERI-M 82-106

```

FACOM OSIV/F4 GEM VU2L32 DATE 82.07.12 TIME 14.42.44 LIB=J3673.HHH.FORT      MOD=PLOT
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-R-----8
NO.2 MODULE NAME PLOT      BLOCKS 5      DATE 81.05.19 TIME 16.40.18

***** APPOINTED MODULE INFORMATION *****
LEVEL 110      DATE 82.07.12 TIME 17.00.05

C   PLOTER SUBROUTINE
SUBROUTINE SSSAA(IP,TEND,X,Y1,Y3,Y4,Y7,Y27,Y37)      00000100 102
DIMENSION X(200),Y1(200),Y3(200),Y4(200),
*           Y7(200),Y27(200),Y37(200)      00000200 101
*           ,XS(200)      00000300 100
*           ,XORG=2.0      00000400 100
*           ,YORG=4.0      00000500 106
N=IP-1      00000600 103
XS(N+1)=0.0      00000700 110
XS(N+2)=TEND/200.0      00000800 101
SLX=XORG*XS(N+2)      00000900 109
DO 10 I=1,N      00001000 109
XS(I)=X(I)+SLX      00001100 109
10 CONTINUE      00001200 108
          00001300 106
          00001400 103
          00001500 103
C   CALL SUB1(XS,Y1,N,XORG,YORG)      00001600 107
CALL SUB2(XS,Y3,N,XORG,YORG)      00001700 107
CALL SUB3(XS,Y4,N,XORG,YORG)      00001800 107
CALL SUB4(XS,Y7,N,XORG,YORG)      00001900 107
CALL SUB5(XS,Y27,N,XORG,YORG)      00002000 107
CALL SUB6(XS,Y37,N,XORG,YORG)      00002100 107
STOP      00002200 85
END      00002300 85

```

Fig. 7.1 図形処理サブルーチン (1/3)

```

FACOM OSIV/F4 GEM VU2L32 DATE 82.07.12 TIME 14.42.44 LIB=J3673.HHH.FORT      MOD=SUB
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-R-----8
NO.6 MODULE NAME SUB      BLOCKS 8      DATE 82.03.24 TIME 18.20.59

***** APPOINTED MODULE INFORMATION *****
LEVEL 55      DATE 82.07.12 TIME 19.24.39

C   FIG.1
C   SUBROUTINE SUB1(X,Y,N,XP,YP)
COMMON/COND1/C(10)      00000100 28
DIMENSION X(200), Y(200), YS(200)      00000200 28
CALL PLOTS(BUFF,1024)      00000300 28
CALL SCALE(Y,150.,N,1,10.0)      00000400 49
*           ①      00000500 45
*           ②      00000600 50
*           00000700 6
*           00000800 42
*           00000900 50
*           00001000 51
*           00001100 50
*           00001200 50
*           00001300 52
*           00001400 52
*           00001500 49
*           00001600 53
*           00001700 49
*           00001800 43
*           00001900 50
*           00002000 54
*           00002100 27
*           00002200 53
*           00002300 40
*           00002400 26
*           00002500 18
*           00002600 27
*           00002700 28
*           00002800 28
*           00002900 28
*           00003000 49
*           00003100 46
*           00003200 53
*           00003300 42
*           00003400 53
*           00003500 53
*           00003600 53
*           00003700 53
*           00003800 53
*           00003900 53
*           00004000 49
*           00004100 53
*           00004200 49
*           00004300 43
*           00004400 53
*           00004500 54
*           00004600 40
*           00004700 53
*           00004800 40
*           00004900 28
*           00005000 28
C   FIG.2
C   SUBROUTINE SUB2(X,Y,N,XP,YP)
COMMON/COND1/C(10)      00000100 49
DIMENSION X(200), Y(200), YS(200)      00000200 46
CALL SCALE(Y,150.,N,1,10.0)      00000300 53
*           00000400 42
*           00000500 53
*           00000600 53
*           00000700 53
*           00000800 53
*           00000900 53
*           00001000 49
*           00001100 53
*           00001200 49
*           00001300 49
*           00001400 49
*           00001500 49
*           00001600 49
*           00001700 49
*           00001800 49
*           00001900 49
*           00002000 49
*           00002100 49
*           00002200 49
*           00002300 49
*           00002400 49
*           00002500 49
*           00002600 49
*           00002700 49
*           00002800 49
*           00002900 49
*           00003000 49
*           00003100 49
*           00003200 49
*           00003300 49
*           00003400 49
*           00003500 49
*           00003600 49
*           00003700 49
*           00003800 49
*           00003900 49
*           00004000 49
*           00004100 49
*           00004200 49
*           00004300 49
*           00004400 49
*           00004500 49
*           00004600 49
*           00004700 49
*           00004800 49
*           00004900 49
*           00005000 49

```

Fig. 7.1 図形処理サブルーチン (2/3)

```

FACOM OSIV/F4 GEN   V02L32  DATE 82.07.13  TIME 14.42.44  LIB=J3673.HHH.FORT      MOD=SUB
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-R-----8
      DO 10 I=1,N
      YS(I)=Y(I)+SLY
10  CONTINUE
      YS(N+1)=Y(N+1)
      YS(N+2)=Y(N+2)
      CALL AXIS(XP,YP,15HTEMP. (DEG C),
      * 15,200.,90.,YS(N+1),YS(N+2),10.0)
      CALL AXIS(XP,YP,10HTIME (S),
      * -10,200.,0.,X(N+1),X(N+2),10.0)
      CALL LINE(X,YS,N,1,1,0)
      CALL SYMBOL(60.,10.,3.0,
      * 44HND.5 TUBE SKIN TEMPERATURE (ECONOMIZER MEAN),D.0,44)
      CALL PLOT(30.,20.,3.0,C,0.0,40)
      CALL PLOT(0.,0.,777)
      CALL PLOT(0.,0.,666)
      RETURN
      END
C
C FIG.6
C
      SUBROUTINE SUB6(X,Y,N,XP,YP)
      COMMON/COND1/C(10)
      DIMENSION X(200) , Y(200),YS(200)
      CALL SCALE(Y,150.,N,1,10.0)
      SLY=YP*Y(N+2)
      DO 10 I=1,N
      YS(I)=Y(I)+SLY
10  CONTINUE
      YS(N+1)=Y(N+1)
      YS(N+2)=Y(N+2)
      CALL AXIS(XP,YP,15HTEMP. (DEG C),
      * 15,200.,90.,YS(N+1),YS(N+2),10.0)
      CALL AXIS(XP,YP,10HTIME (S),
      * -10,200.,0.,X(N+1),X(N+2),10.0)
      CALL LINE(X,YS,N,1,1,0)
      CALL SYMBOL(60.,10.,3.0,
      * 44HND.6 TUBE SKIN TEMPERATURE (EVAPORATOR MEAN),D.0,44)
      CALL SYMBOL(30.,20.,3.0,C,0.0,40)
      CALL PLOT(0.,0.,777)
      CALL PLOT(0.,0.,666)
      CALL PLOT(0.,0.,999) ⑦
      RETURN
      END
C
C SYMBOL ANGLE
C
      SUBROUTINE SYMBOL(X,Y,H,IBCD,A,N)
      CALL SYMB4(X,Y,H,IBCD,A,N) ⑧
      RETURN
      END

```

Fig. 7.1 図形処理サブルーチン (3/3)

$$Y(N+2) = \Delta Y = \frac{\max Y - \min Y}{HEIGHT}$$

注) X 軸方向の展開巾は、SCALE 命令によらず

SUBROUTINE SSSAA にて、常に 0 ~ 200 mm の巾にプロットするように、X(N+1) = 0.0, X(N+2) = TEND / 200.0 を入力している。

③ CALL AXIS (X, Y, TITLE, NC, W, ANG, DMIN, DD, DIV)

線形の座標軸、目盛、タイトルを表示する命令である。

X, Y : 表示する座標軸の出発点の座標。

TITLE : タイトルを文字定数または配列名で指定する。

NC : タイトルの文字数と表示位置を指定する。

NC > 0 座標軸に対して反時計側。

NC < 0 座標軸に対して時計側。

W : 軸の長さ。

ANG : X 軸となす角。

DMIN, DD : SCALE の説明参照のこと。

DIV : つねに 10.0。

この例では、③の命令により原点 (0.0) から 200 mm の長さで、Y 軸が表示され、ラベル (LENGTH (M)) が表示される。

④ では同様に X 軸が表示される。

⑤ CALL LINE (X, Y, N, INC, LT, IC)

あらかじめスケーリングされた N 個の点 (X(i), Y(i)) を結んで曲線を描く。この命令の前に X(N+1), X(N+2), Y(N+1), Y(N+2) にそれぞれのスケーリング値が入力されなければならない。

X, Y : X 方向および Y 方向のデータの配列。

N : データの個数。

INC : データを取り出す間隔。

LT : データのプロット方法。シンボルの表示など)

IC : シンボルのコード番号。

⑥ CALL SYMBOL (X, Y, H, TITLE, ANG, NC)

ラベルを表示する命令である。

X, Y : 表示するラベルの出発点の座標。

H : 表示するラベルの高さ。

TITLE : 表示するラベルを文字定数または配列名で指定する。

ANG : X 軸となす角。

NC : 文字数。

この例では、グラフの上部に No.1 ECONOMIZER LENGTH のラベルが表示される。

⑦ この SYMBOL 命令では、FORMAT (10A 4) の書式で C(10) の文字定数に入っている 40 文字が、表示される。

(8) CALL PLOT (0., 0., 777)

PTS 用命令であり、コメントの入力が可能となる。

キーボード上のつまみを操作して、コメント入力位置へカーソルを移動する。コメント文字サイズは1～4のキーインにより選択できる。

プログラムは、一旦停止の状態になるから、この時点でCOPYボタンの操作により、ハードコピーを取ることが可能である。次のステップに進むには、CRをキーインする。

(9) CALL PLOT (0., 0., 666)

画面を消去し、次のグラフの作図へ進む。

(10) CALL PLOT (0., 0., 999)

この命令は、PTS をクローズするための命令で、コーナープログラムの最後で1回呼ばれる。

(11) CALL SYMB 4 (X, Y, H, IBCD, A, N)

この命令がなければ、SYMBOL 及びAXISでの文字は角度0度しか表示できない。ラベルの傾斜角に合わせる為にはこのサブルーチンを付加する。

7.3 実行の方法

(1) グラフィック端末での実行

グラフィック端末(TEKTRONIN 4014)での実行の方法をFig. 7.2に示す。

```

READY
① .FORTHECL HHH ELM('SO,PLOT,OUTPUT,SUB') GRLIB(PTS) LM(AA)
HE-COMPILER ENTERED

END OF COMPILATION
**MEMBER NAME** TEMPNAME WAS NOT FOUND BUT HAS BEEN ADDED TO LIBRARY.
*** .FORTHECL PROCEDURE TERMINATED. ***
READY
LISTC
IN CATALOG:USAMUSR2
J3673.aaaaaaaa.OBJ
J3673.AA.LOAD ロードモジュールが作成される。
J3673.CCC.LOAD
J3673.DDD.DATA
J3673.H.DATA
J3673.H.FORT
J3673.HEDELE01.FORT
J3673.HE1.FORT
J3673.HE4.FORT
J3673.HHH.FORT
J3673.JCL.CNTL
J3673.PPP.LOAD
J3673.QQQ.LOAD
J3673.TEST.FORT
J3673.TS40.LOAD
READY
② .PTSI0
READY
③ ATLOC F(FT05F001) DACH.DATA(S0100)
DATA SET J3673.H.DATA NOT ALLOCATED, FILE IN USE
ENTER 'FREE' OR 'END'+-
FREE
READY
④ CALL AA

```

Fig. 7.2 グラフィック端末での実行

- ① FORTHECL コマンドにより、PTS 図形処理ライブラリーを結合し、ロードモジュール（AA）を作成する。

H H H : データセット名

E L M : 翻訳するモジュール名

- ② PTSIO

グラフィック端末を図形出力用に割り当てるコマンドである。

- ③ データセット（H, DADA）のモジュール（SO 100）をINPUTデータに割り当てる。

- ④ ロードモジュール（AA）を実行する。

以後作図が開始される。

(2) バッチジョブによるレーザプリンタへの出力

レーザプリンタへの出力の場合には、ロードモジュールの作成とロードモジュールの実行の2段階で実行する。

Fig. 7.3 に LKEDCT コマンドによりロードモジュールを作成するジョブ制御文の例を示す。

レーザプリンタ用には PNL 図形処理ライブラリーを使用する。

Fig. 7.4 は前の作業により作成されたロードモジュールを実行するジョブ制御文の例である。

レーザプリンタへ図形出力を行うために、GRPOPN 及び GRNLP の EXPAND 文が必要である。

```

J3673.TS40.LOAD
READY

00100 //JCLG JOB
00200 // EXEC JCLG
00300 //SYSIN DD DATA,DLM='++'
00400 // JUSER 71083673,MA.OKAMOTO,0423.100
00500   T.3 W.00 C.00 I.3 SRP
00600   OOPTP PASSWORD-TTT4440K
00700 // EXEC FORTHE,SO-'J3673.HHH',
00800 //      A-'ELM(SO,PLOT,SUB,OUTPUT)',DISP-SHR
00900 // EXEC LKEDCT,LM-J3673.QQQ,[GRLIB-PNL]
01000 ++
01100 //
END OF MODULE.
U
SUBMIT
JOB JCLG(JOB01566) SUBMITTED
U
EOM,END
      1567 F3673070     JOB    ACCEPTED          CN(02)
READY
ST
JOB J3673(J3673) EXECUTING
JOB J3673(F3673070) ON OUTPUT QUEUE
READY
LISTC
IN 'CATALOG:USAMUSR2
J3673.0000000.0BJ
J3673.AA.LOAD
J3673.DDD.DATA
J3673.H.DATA
J3673.H.FORT
J3673.HENDEL01.FORT
J3673.HE1.FORT
J3673.HE4.FORT
J3673.HHH.FORT
J3673.JCL.CNTL
J3673.QQQ.LOAD'      ロードモジュールが作成される
J3673.TEST.FORT

```

Fig. 7.3 レーザプリンタ用ロードモジュールの作成

```

00100 //JCLG JOB
00200 // EXEC JCLG
00300 //SYSIN DD DATA,DLM='++'
00400 // JUSER 71083673,MA.OKAMOTO,0423.100
00500   T.4
00600   W.0
00700   C.0
00800   [GRPOPN]
00900   .OOPTP PASSWORD-TTT4440K
01000 // EXEC LMQ0,LM-J3673.QQQ
01100 // EXPAND GRNLP
01200 //SYSIN DD DSN=J3673.H.DATA(S0100),DISP-SHR
01300 ++
01400 //
END OF MODULE.
U
SUBMIT

```

Fig. 7.4 レーザプリンタへの出力

8. 今後の問題

(1) 計算値の信頼性

定常状態の計算結果をシステム総合設計の結果と比較し下記に示す。またFig. 8.1に温度条件の説明図を示す。

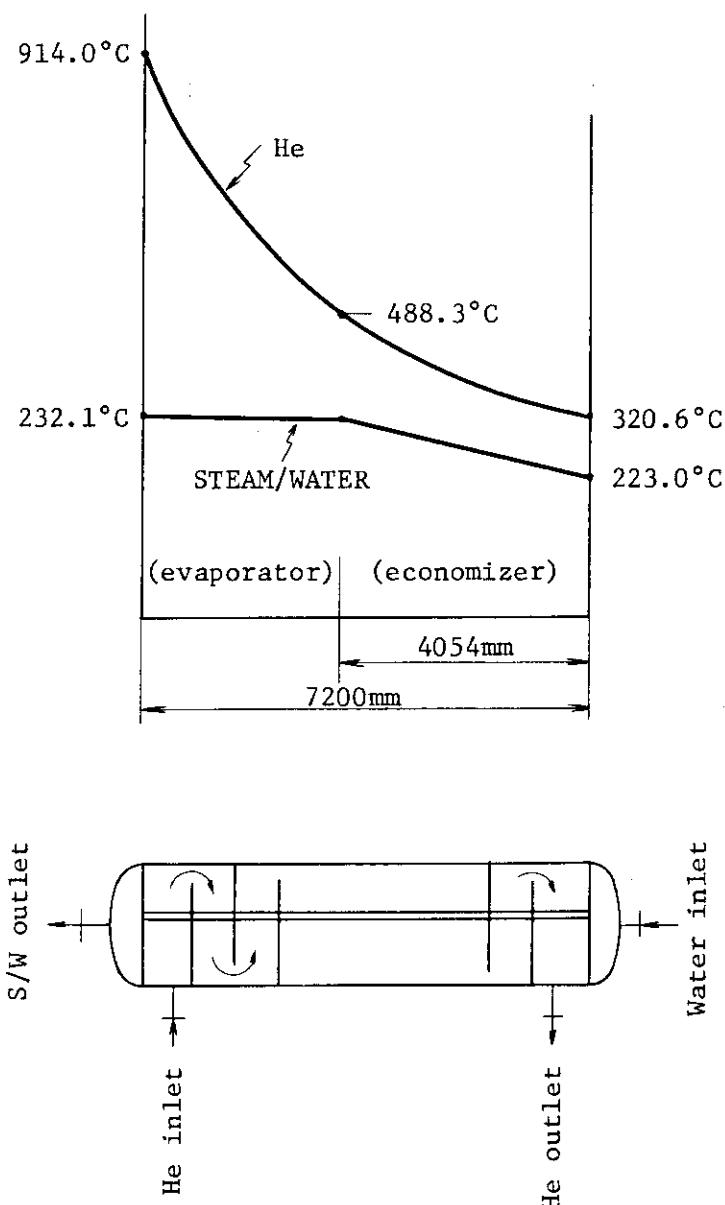


Fig. 8.1 蒸気発生器温度条件
(定常状態)

| | 計算値 | シス総の結果 |
|--------|--------------------|-----------------------------|
| 伝熱量 | 20.5×10^6 | 21.5×10^6 (kcal/h) |
| 出口ガス温度 | 320.6 | 281 (°C) |
| 出口蒸気温度 | 232.1 | 232.8 (°C) |
| 蒸発量 | 38527 | 49977 (kg/h) |

上記に示す通り、シス総の結果に比較し伝熱量が少ない計算結果となっている。この原因としては、近似式の問題、平均値の問題及び熱伝達率の式の違いによるものと考えられる。これについては今後定常状態のみの計算でモデルの分割数を増した、別の計算コードによりチェックする必要がある。

(2) 解析法の問題（収れん性）

本コードで採用した、多変数関数の1次までのTaylor展開によるNewton法は、4章の数値例に示す通り、解の収束・発散は初期推定値に影響される。本コードのように変数が96個もある場合には、適当な初期推定値を得る作業が大変である。本コードでは、試行錯誤により適当な初期推定値を得たのであるが、変数の数が多い場合には、初期推定値の如何にかかわらず常に収束する解法（逐次二分法、線形逆補間法等）との併用により（但し計算時間は増大する）この作用を合理化するのが適当である。

(3) 系統全体のシミュレーションへの展開

先にも述べた通り、本コードはT₄系統全体のシミュレーションへと展開し、T₄の実験データとの照合を目的としている。以下に系統全体を連結する第一段階として機器と機器の連結について検討する。

計算コードの使用方法を考えた場合、連結した場合にも、個々の単体としての計算機能は、ブロックのまま残した方が有利である。システム全体の特性計算の場合には、全体を一つの連立方程式として同時にNewton法により収れんさせるのであるが、各機器の分割なしに式を構成すると、機器の仕様変更等に対応しコードを修正する場合に困難である。また系統全体の計算コードで单一機器だけの計算を行う様な使用方法を考えた場合にも各機器毎の計算機能を残しておいた方が有利である。

以上のことから、系統全体は、各機器毎に連立方程式ブロックを構成し、全体計算の場合にはそれを一つに集約し同時にNewton法により解を求めるという方法になる。

(A) 連結の方法

Fig. 8.2に示す様な熱交換器と2重管の連結の場合を例に検討する。

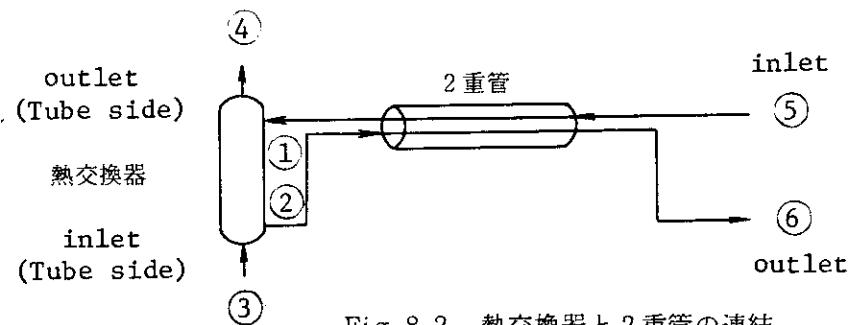


Fig. 8.2 热交換器と2重管の連結

熱交換器単体の場合には、Shell 側 Inlet 条件①は定数として取り扱ったが、二重管を連結した場合は変数の取り扱いになる。連結した場合の inlet 条件は二重管の inlet ⑤と tube 側 inlet ③となり、その他②④⑥は全て連立方程式の変数となる。

(B) プログラムの構成

系統全体としての計算では各機器毎の連立方程式群はまとめて一つの連立方程式として、同時に Newton 法により収れんさせなければならない。以下に集約の要点を示す。

- 各機器毎に連立方程式群を構成する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{熱交換器} \\ \left\{ \begin{array}{l} f_1(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{二重管} \\ \left\{ \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ g_{n-i}(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

- ヤコビアン行列の計算

$$[J] = \left[\begin{array}{ccc|c} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \\ \hline \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_{n-i}}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_{n-i}}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial g_{n-i}}{\partial x_n} \end{array} \right]$$

すなわち追加機器に従って行列を拡張することによりシステム全体の計算を実行する。図に示せば Fig. 8.3 となる。

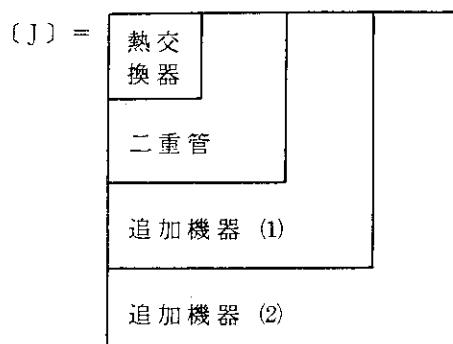


Fig. 8.3 系統全体連結の構想

(4) SG バイパス制御のモデル化

実験炉の SG は Fig. 3.1 に示す通り、Shell 側ヘリウムの一部を伝熱部途中でバイパスし、伝熱量の制御を行う計画である。本コードのモデル化においては、現段階ではこの条件が入っていないが、バイパス制御の特性を調べるにはこの解析モデル化（具体的にはバイパス部で領域を区切って関係式を立てる）が必要である。

9. おわりに

HENDEL の高温機器実証試験部 (T_4) の構成機器の一つである蒸気発生器の動特性解析コードの開発は本コードにより第一段階の目的を達した。本コードは、今後、 T_4 データとの照合ができるように整備する必要がある。

最後に本コードの作成にあたり、蒸気発生器のモデル化・数値計算の手法など有益な助言を賜わった高温工学部 岡本芳三部長に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) “多目的高温ガス実験炉システム総合設計”，設計報告書，(1980)
- 2) Secken, P. A. and Gilbent, J. S. : “Status of CHAP : Composite HTGR Analysis Program,” Los Alamos Scientific Laboratory report LA-NUREG-6329-SR (May 1976)
- 3) Shrock, V. E. and Grossman, L. M. : Nuclear Sci., & Engng., 12, 474 (1962)
- 4) Kern, D. Q. : “Process Heat Transfer,” Mc Graw-Hill, New York, 1950
- 5) Mc Calla, T. R. : “数値計算法概論,” (1972)

(4) SG バイパス制御のモデル化

実験炉の SG は Fig. 3.1 に示す通り、Shell 側ヘリウムの一部を伝熱部途中でバイパスし、伝熱量の制御を行う計画である。本コードのモデル化においては、現段階ではこの条件が入っていないが、バイパス制御の特性を調べるにはこの解析モデル化（具体的にはバイパス部で領域を区切って関係式を立てる）が必要である。

9. おわりに

HENDEL の高温機器実証試験部 (T_4) の構成機器の一つである蒸気発生器の動特性解析コードの開発は本コードにより第一段階の目的を達した。本コードは、今後、 T_4 データとの照合ができるように整備する必要がある。

最後に本コードの作成にあたり、蒸気発生器のモデル化・数値計算の手法など有益な助言を賜わった高温工学部 岡本芳三部長に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) “多目的高温ガス実験炉システム総合設計”，設計報告書，(1980)
- 2) Secken, P. A. and Gilbent, J. S. : "Status of CHAP : Composite HTGR Analysis Program," Los Alamos Scientific Laboratory report LA-NUREG-6329-SR (May 1976)
- 3) Shrock, V. E. and Grossman, L. M. : Nuclear Sci., & Engng., 12, 474 (1962)
- 4) Kern, D. Q. : "Process Heat Transfer," Mc Graw-Hill, New York, 1950
- 5) Mc Calla, T. R. : "数値計算法概論," (1972)

(4) SG バイパス制御のモデル化

実験炉の SG は Fig. 3.1 に示す通り、Shell 側ヘリウムの一部を伝熱部途中でバイパスし、伝熱量の制御を行う計画である。本コードのモデル化においては、現段階ではこの条件が入っていないが、バイパス制御の特性を調べるにはこの解析モデル化（具体的にはバイパス部で領域を区切って関係式を立てる）が必要である。

9. おわりに

HENDEL の高温機器実証試験部 (T_4) の構成機器の一つである蒸気発生器の動特性解析コードの開発は本コードにより第一段階の目的を達した。本コードは、今後、 T_4 データとの照合ができるように整備する必要がある。

最後に本コードの作成にあたり、蒸気発生器のモデル化・数値計算の手法など有益な助言を賜わった高温工学部 岡本芳三部長に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) “多目的高温ガス実験炉システム総合設計”，設計報告書，(1980)
- 2) Secken, P. A. and Gilbent, J. S. : “Status of CHAP : Composite HTGR Analysis Program,” Los Alamos Scientific Laboratory report LA-NUREG-6329-SR (May 1976)
- 3) Shrock, V. E. and Grossman, L. M. : Nuclear Sci., & Engng., 12, 474 (1962)
- 4) Kern, D. Q. : “Process Heat Transfer,” Mc Graw-Hill, New York, 1950
- 5) Mc Calla, T. R. : “数値計算法概論,” (1972)