

2次元流動伝熱解析プログラム「NAGARE-2D」

1984年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

2次元流動伝熱解析プログラム「NAGARE-2D」

古橋一郎* 中西征二**

青木忠雄**

要 旨

2次元流動伝熱解析コード「NAGARE」，「NAGARE-T」を実験データと比較検討した結果を反映し，これらのプログラムをベースとし，より汎用性のある2次元流動伝熱解析コード「NAGARE-2D」を新たに開発した。従来のコードから見た主な改良および機能追加は次の通りである。

- 1) 運動方程式における圧損項の導入
- 2) 壁面境界条件の自動処理
- 3) エンタルピー式における壁の熱容量および壁面熱伝達係数の導入，対流熱輸送計算式の変更
- 4) $K-\epsilon$ 乱流モデルによる乱流動粘性係数 (ϵ_M) の自動計算機能追加
- 5) 熱流量プリント追加
- 6) 計算ステップ最短化による計算効率の改善

これらの改善によりコードの対象範囲が広まり，より一般的な問題に適用できるようになった。

* (現) 原子力技術サービス 技術開発部

** 大洗工学センター 構造物強度試験室

NAGARE-2D — Two Dimensional Computer Code
for Thermal-Hydraulic Analysis

Ichiro Furuhashi*, Seiji Nakanishi**
and Tadao Aoki**

Abstract

A two-dimensional thermal-hydraulic analysis code "NAGARE-2D" has been developed based on the existing codes and the results of comparative validation against experimental data.

Major improvements and capabilities added to the conventional codes are as follows:

- 1) Introduction of pressure drop term to the momentum equation.
- 2) Automatic treatment of boundary conditions at walls.
- 3) Introduction of thermal capacity of wall and heat transfer coefficient at wall surface to the enthalpy formula, and change in the convection heat transfer equation.
- 4) Addition of automatically calculating function of turbulent kinematic viscosity coefficient in K- ϵ turbulent model.
- 5) Addition of heat flux print out function.
- 6) Improvement on calculation efficiency by minimizing calculation steps.

From these improvements, the application of the code can be extended to wider range of engineering problems.

* Presently at Development Division of ATS.

** Structural Engineering Section, FBR Components Development Division, OEC.

目 次

1. 緒 言	1
2. 基礎方程式	4
2.1 質量輸送方程式	4
2.2 運動量輸送方程式	4
2.3 エンタルピー輸送方程式	5
2.4 乱流 ($K - \epsilon$) 輸送方程式	6
3. NAGARE-2Dの内容	8
3.1 NAGARE-2Dの全体構成	8
3.2 メインプログラム	10
3.3 サブルーチン VUPDTE	11
3.4 サブルーチン PUPDTE	16
3.5 サブルーチン PSET	19
3.6 サブルーチン DTVEL	20
3.7 サブルーチン DTTEMP	21
3.8 サブルーチン DLOVCT	22
3.9 サブルーチン TURB	24
3.10 サブルーチン QWALL	29
3.11 サブルーチン SETAB	32
3.12 サブルーチン QPRINT	32
3.13 ユーザーサブルーチン SETIJ	32
3.14 ユーザーサブルーチン ABIN	34
3.15 ユーザーサブルーチン INV	37
3.16 ユーザーサブルーチン BCVEL	38
3.17 ユーザーサブルーチン TNUIN	39
3.18 ユーザーサブルーチン TURBBC	40
3.19 ユーザーサブルーチン BCTEMP	42
3.20 ユーザーサブルーチン QHEAT	43
3.21 ユーザーサブルーチン OUTTMP	44

4. 結 言	66
5. 謝 辞	67
参考文献	68
付録1 ポストプログラム	69
1.1 ポストプリントプログラム PRINT2D	69
1.2 ポストプログラム TRANS2D	69
1.3 プロットプログラム NAPS	71
付録2 解析例	96
2.1 解析例1 (炉容器上部プレナムのストラティフィケーション試験～1/10 スケール水流動試験)	96
2.2 解析例2 (炉容器バケット周辺の熱過度解析)	124
2.3 解析例3 (炉容器上部プレナムのストラティフィケーション試験～1/10 スケールNa流動試験, フローホール無し, 2.5 l/sec, $\Delta T = 194^{\circ}\text{C}$)	139
2.4 解析例4 (炉容器上部プレナムのストラティフィケーション試験～1/10 スケールNa流動試験, フローホール有り, 2.5 l/sec, $\Delta T = 180^{\circ}\text{C}$)	154
2.5 解析例5 (炉容器上部プレナムのストラティフィケーション試験～1/6 スケールNa流動試験)	167

1. 緒 言

LMFBR (Liquid Metal Cooling Fast Breeder Reactor) では熱輸送特性に優れた液体ナトリウムを熱輸送流体として用いるために熱応力評価が設計上重要不可欠である。炉容器、配管コンポーネントなど構造物の熱応力評価を正確に行なうためには熱応力発生の主原因である流動伝熱現象をより正確に把握することが必要である。現在では有限要素法を用いた構造解析コードが普及し、その利用技術も十分に蓄積され、構造物の受ける荷重条件（静荷重、地震荷重、熱荷重等）を与えれば構造物の受ける損傷（疲労損傷、クリープ損傷等）を構造解析により評価し得るレベルにあると云える。構造解析（特に熱応力解析）の入力条件である熱荷重についても構造物の熱的境界条件（周囲の流体温度、熱伝達係数など）を与えれば熱伝導解析（理論解析あるいは有限要素法による数値解析）により充分精度良く求めることができる。しかるに構造物の熱的境界条件を求めるための流動伝熱現象については未だ大部分を実験に頼らざるを得ない現状であり流動伝熱解析コードおよびその利用技術は、必要性が認識されつつも、未だ十分に確立されていない。

以上の背景から当室では一連の過渡時の流動伝熱試験^{1)~5)}を実施し、また試験と並行して解析コード「NAGARE」⁶⁾（2次元流動解析）、「NAGARE-T」⁷⁾（2次元流動伝熱解析）、「NAGARE-3D」⁸⁾（3次元流動伝熱解析）を作成し、実験データをもとに検証作業を行なった。解析コードはサーマルストラティフィケーション現象（温度差による密度差のために流体が成層化する現象）などを十分に表現できることが確認され現象解明に有力であることが示されたがまた次のような問題も明らかになった。

- A) 炉容器上部プレナムを模擬した1/6スケールのストラティフィケーション試験において、低流量では実験データと良く合うが、高流量になるに従い実験データとの差が大きくなること。この原因は主に乱流によるものと推察された。
 - B) 整流板、フロホール等を模擬する上で圧力損失をどのように考慮するかで計算結果に大きな影響を与える。
 - C) 浮力効果を Boussinesq 近似で考慮する手法 (NAGARE-3D) と、連続式を厳密に解く手法 (NAGARE-T) とではその結果にほとんど差がなかった。
 - D) 壁の熱容量、壁と流体との熱伝達等をどのように考慮すべきかは今後の課題である。
- これらの課題を解決するため新たに2次元流動伝熱解析コード「NAGARE-2D」を開発した。従来コードとの対応、改良点、機能追加点は次のとおりである。

- 1) 物性値は一定とし浮力効果は Boussinesq 近似により考慮する。(NAGARE-3Dと同様)
- 2) 連続式, Navier-Stokes の運動方程式においては流体密度(定数)を消去した形で解く。(NAGARE-3Dと同様)
- 3) 運動方程式を, 圧力損失を考慮した形式で解くように改良した。これにより整流板やフローホールなどの流路面積の急減少, 急拡大部等の圧力損失, 流路急曲折部の圧力損失等を適正に考慮できるようになった。流路がいく通りもある場合の適正な流量配分(例えば炉容器上部プレナムにおける内筒フローホールの流量配分など)を予測することができる。
- 4) 従来コードでダミー流速を入力して壁面でのスリップ条件を実現していたが, コード内で自動処理するように改良した。スリップ係数 S_1 ($0.0 \leq S_1 \leq 1.0$) を入力することにより Non Slip (0.0) ~ Full Slip (1.0) までのスリップ条件が実現できる。
- 5) 圧力勾配および重力による加速度項を断面積を考慮したより適正なものに改良した。これにより部分開口面での流量をより適正に評価できる。
- 6) 流体の体積占有率を導入することにより部分流体セルの概念を取り入れた。
(NAGARE-Tと同様)
前項(5)の部分開口面と合わせて用いれば, 直交メッシュ系であっても, 複雑な形状をモデル化できる。
- 7) 固体セルを導入し壁の熱容量を考慮できる様に機能追加した。
- 8) 壁と流体間の熱伝達係数を考慮できる様に機能追加した。前項7)と合わせて使用し構造材中の熱過渡温度分布を直接計算することができる。
- 9) 発流量, 特殊熱通過を考慮できるよう機能追加した。
- 10) 乱流モデル(2-equation K- ϵ モデル)を用いて乱流効果(ϵ_M, ϵ_H)を速度場の関数として求める機能を追加した。
- 11) 流体部の温度計算において流体セル内に対流により蓄積される熱量を従来の直接積分法 $\{ q_D = - \int \int_{\Delta S} (\rho c \vec{u} T)_n dS \}$ から風上温度勾配法 $\{ q_D = - \rho c \vec{u}^* \cdot (\text{grad } T)^* \Delta V \}$ に改良した。これは Gauss 積分等を用いてセル内の温度分布を考慮しない場合, 直接積分法はセル中心にてセル代表温度を定義する現在の体系では誤差が大きくなり, メッシュ体系に大きく左右されることが実験データによる検証の結果明らかに

なったからである。前記(A)における高流量での誤差も乱流効果による以外に、この q_D の誤差がかなりの割合を占めていたものとする。

- 12) 熱流量のプリント機能を追加した。これにより熱移送において対流や伝導などがそれぞれ占める割合などを比較することができ、ある特定の流体領域において温度場が対流混合支配的であるか、あるいは熱伝導支配的であるか、などを推定できるものと思われる。
- 13) 壁で仕切られた最大3種類の流体を取扱える様に機能追加した。
- 14) 最大3種類の壁材質を取扱える様に機能追加した。前項13)と合わせて使用することにより、伝熱壁と異種流体を含む熱交換器の解析など、広範囲の現象を解析できるようにした。
- 15) サブルーチン内でひんばんに使用される各種不変マトリクスはメインプログラムで最初に計算し記憶しておく様にし、また全サブルーチンにおいて計算ステップが最小となるように努めた。これにより計算効率の向上を図った。

本報告はNAGARE-2Dの内容および使用方法を記した。付録1にはポストプリントプログラムPRINT2D、ポストプロットプログラムTRANS2DおよびプロットプログラムNAPSの使用方法を記した。付録2には解析例を記した。大洗工学センターのFACOM-M200システムを使用する場合のジョブカード(JCL)の作成方法も記した。プロッタ出力についてはバーサテック(静電式ベクトルプロッタ)とNLP(日本語ラインプリンタ)を使用する場合の2通りについてJCLを示した。

2. 基礎方程式

2.1 質量輸送方程式

密度(ρ)一定の非圧縮性粘性流体の質量輸送方程式は連続式と呼ばれる次式で表わされる。

$$\text{div}(\rho \vec{u}) = \rho \cdot \text{div}(\vec{u}) = \rho (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0 \dots\dots\dots (2-1)$$

$\vec{u} = (u, v)$ は速度ベクトル, $\vec{\nabla}$ は発散演算子ベクトルであり次式で表わされる。

$$\vec{\nabla} = \begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (x, y) \text{ Cartesian 座標系} \\ \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (r, z) \text{ 円筒座標系} \end{cases}$$

Cartesian 座標系, 円筒座標系を共通に (r, z) で表現するために座標系選択変数 ξ を次のように定める。

$$\xi = \begin{cases} 0 \dots\dots \text{Cartesian 座標系} \\ 1 \dots\dots \text{円筒座標系} \end{cases} \dots\dots\dots (2-2)$$

$\vec{\nabla}$ は次のように表現できる。

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial r} + \xi \frac{1}{r}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (2-3)$$

(2-1) 式は次のように書ける。

$$\text{div}(\vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \xi \frac{u}{r} = 0 \dots\dots\dots (2-4)$$

(2-1) 式を微小領域 (体積 ΔV , 表面積 ΔS) 内にて体積積分し Green の公式を用いると次式が得られる。

$$\iiint_{\Delta V} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) dV = \iint_{\Delta S} u_n dS = 0 \dots\dots\dots (2-5)$$

$\iiint_{\Delta V} dV$ は体積積分, $\iint_{\Delta S} dS$ は表面積積分を表わす。 u_n 微小表面積 dS に垂直外向きの速度成分である。

2.2 運動量輸送方程式

非圧縮性粘性流体の運動量輸送方程式は Navier-Stokes の方程式により次のように表わされる。

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + g_r^* + (\nu + \epsilon_M) \left(\nabla^2 u - \xi \frac{u}{r^2} \right) \dots (2-6)$$

↑ ↑ ↑ ↑ ↓ ↑

(実質) (固定点の) (対流による) (圧力差による) (外力による) (粘性力による)

(加速度) (速度変化) (速度変化) (速度変化) (速度変化) (速度変化)

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + g_z^* + (\nu + \epsilon_M) \nabla^2 v \dots (2-7)$$

Pは静圧ヘッド， (g_r^*, g_z^*) は外力による加速度， ν は動粘性係数， ϵ_M は乱流粘性係数である。ここで， $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial r} + v \frac{\partial}{\partial z}$ は実質時間微分と呼ばれ，空間内の固定点において観測される見かけの時間変化 $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)$ と，流体運動に伴なり時間変化 $\left(u \frac{\partial}{\partial r} + v \frac{\partial}{\partial z}\right)$ との和である。 ∇^2 はLaplacion演算子と呼ばれ次式で表わされる。

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\xi}{r} \frac{\partial}{\partial r} \dots (2-8)$$

密度差(温度差)に起因する浮力効果を考慮するには Boussinesq 近似を用いて \vec{g}^* を次のように表現すれば良い。

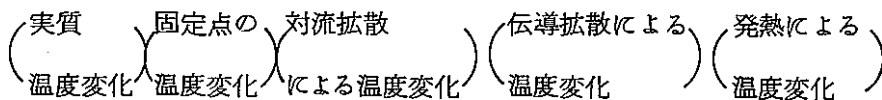
$$\vec{g}^* = \{ 1 - \beta (T - T_0) \} \vec{g} \dots (2-9)$$

ここに $\vec{g} = (g_r, g_z)$ は重力などによる基準外力加速度， β は流体の体膨張係数， T_0 は基準温度， T は \vec{u} 定義点の温度である。

2.3 エンタルピー輸送方程式

エンタルピー保存則は次の温度拡散方程式により表わされる。

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \left(\frac{\lambda}{\rho c} + \epsilon_H \right) \nabla^2 T + \frac{q_s^*}{\rho c} \dots (2-10)$$



λ は熱伝導率， c は定圧比熱， ϵ_H は乱流温度拡散係数， q_s^* は単位体積あたりの発熱量である。

(2-10)式を微小領域 ΔV 内で体積積分し，Greenの公式を用いると次式を得る。

$$\Delta V \frac{\partial T}{\partial t} = - \iiint_{\Delta V} \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \left(\frac{\lambda}{\rho c} + \epsilon_H \right) \iint_{\Delta S} \frac{\partial T}{\partial n} dS + \frac{q_s}{\rho c} \dots\dots\dots (2-11)$$

ここに $\frac{\partial T}{\partial n}$ は微小表面 dS に垂直外向き方向の温度勾配である。 $q_s = q_s^* \cdot \Delta V$ は ΔV 内の全発熱量である。

(2-11) 式の右辺第 1 項は次のように 2 通りの方法で求めることができる。第 1 の方法は

$$\begin{aligned} \text{div}(\vec{u}T) &= \vec{r} \cdot (\vec{u}T) = \frac{\partial}{\partial r}(uT) + \frac{\partial}{\partial z}(vT) + \xi \frac{uT}{r} \\ &= T \left(\underbrace{\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \xi \frac{u}{r}} \right) + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned}$$

連続式 (2-4) より 0

を用いて

$$\iiint_{\Delta V} \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV = \iiint_{\Delta V} \text{div}(\vec{u}T) dV = \iint_{\Delta S} (\vec{u}T)_n dS \dots\dots\dots (2-12)$$

により求める方法であり，従来の NAGARE-T, NAGARE-3D はこの方法を用いている。

第 2 の方法は，

$$\iiint_{\Delta V} \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV \doteq \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right)^* \Delta V \quad (2-13)$$

により求める方法である。ここで $\left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right)^*$ は ΔV に流入する面での値を採用する (風上法)。本報告の NAGARE-2D はこの方法を用いている。

2.4 乱流 (K-ε) 輸送方程式

乱流運動エネルギーヘッド (K), 運動エネルギーヘッド散逸率 (ε) に対する Launder-Spalding の 2 方程式モデル^{9),10),11)} は次のように表わされる。

$$\frac{DK}{Dt} = \frac{\partial K}{\partial t} + \underbrace{u \frac{\partial K}{\partial r} + v \frac{\partial K}{\partial z}}_{\text{(対流拡散)}} = \underbrace{\left(\frac{\nu + \epsilon_M}{\sigma_K} \right)}_{\text{(粘性拡散)}} \nabla^2 K + \underbrace{G - C_D \epsilon}_{\text{(生成項)}} \dots\dots (2-14)$$

↑ (実質変化) ↑ (固外点の変化) ↑ (対流拡散) ↑ (粘性拡散) ↑ (生成項)

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{(実質変化)} & \text{(固定点)} & \text{(対流拡散)} & & \text{(粘性拡散)} & & \text{(生成項)} \\
 & \text{(の変化)} & & & & & \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + u\frac{\partial\varepsilon}{\partial r} + v\frac{\partial\varepsilon}{\partial z} = \left(\frac{\nu + \varepsilon_M}{\sigma_\varepsilon}\right) \nabla^2\varepsilon + C_1\frac{\varepsilon}{K}G - C_2\frac{\varepsilon^2}{K} & & & & & & (2-15)
 \end{array}$$

ここにGは乱流運動エネルギーヘッドの生成を表わし

$$G = \varepsilon_M G^*, \quad G^* = \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (2-16)$$

で与えられる。乱流動粘性係数 ε_M は K, ε の関数として次式で与えられる。

$$\varepsilon_M = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (2-17)$$

(2-15) 式の右辺 $C_1\frac{\varepsilon}{K}G$ は (2-16), (2-17) 式を代入すると

$$C_1\frac{\varepsilon}{K}G = C_1 C_\mu K G^* \quad (2-18)$$

と表わすことができる。

$C_D, C_1, C_2, \sigma_K, \sigma_\varepsilon, C_\mu$ は実験的に求まる定数であり, 分子拡散効果が無視できる程度 ($\varepsilon_M \gg \nu$) に Reynolds 数が十分大きい場合は次のように与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} C_D = 1.0, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \\ \sigma_K = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad C_\mu = 0.09 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (2-19)$$

3. NAGARE-2Dの内容

3.1 NAGARE-2Dの全体構成

NAGARE-2D はメインプログラム, 10個の内蔵サブルーチンプログラム, 9個のユーザーサブルーチンプログラムから構成される。Fig 1 にNAGARE-2Dの構成図を示す。

メインプログラムは以下の機能を有する。

- 入力データの読み込みとプリント出力
- 不変定数, 各種不変マトリクスの計算
- 初期値セット
- サブルーチンのコントロール
- 時間進行のカウント
- 計算結果の標準的プリント出力
- 計算結果の外部記憶装置への出力, その情報をプリント出力

10個の内蔵サブルーチンプログラムとその機能は以下のとおりである。

- (1) VUPDTE …… Navier-Stokes の運動方程式を解き速度場を更新する。(速度更新の第1段階)
- (2) PUPDTE …… くり返し過緩和法 (Successive Over Relaxation Method ~ S.O.R法) により, 連続式を満たすように静圧場, 速度場を修正する。(速度更新の第2段階)
- (3) PSET …… 縮流, 拡大流等の静圧ヘッド損失を計算し, 静圧場を修正する。
- (4) DTVEL …… 速度場計算のための最適時間増分を求める。
- (5) DTTEMP …… 温度場計算のための最適時間増分を求める。
- (6) DLOVCT …… 流体内の対流熱輸送, 伝導熱流束を計算し流体の温度変化を求める。
- (7) TURB …… 流体内の $K - \epsilon$ 輸送方程式を差分形式で解き乱流動粘性係数 ϵ_M を求める。
- (8) SETAB …… 固体セルの全側面の面積開口率を 0.0 にセットする。
- (9) QWALL …… 固体・流体間の熱伝達, 固体中の熱伝導による熱流束を計算し固体の温度変化を求める。

(10) QPRINTセル側面からの伝導(達)による入熱量, 対流によるセル内への総入熱量, セル内での総発熱量をプリント出力する。

9 個のユーザーサブルーチンプログラムとその機能は以下のとおりである。

- (11) SETIJ各セルの構成物質(固体 1, 2, 3, 流体 1, 2, 3, ダミー)を定義する。
- (12) ABINセル側面の面積開口率, セル側面通過時の静圧ヘッド損失係数, セルの流体占有率, セル側面の熱伝達係数を定義する。
- (13) BCVEL流体入口部, 出口部の速度境界条件を定義する。
- (14) INV流体入口部の体積流量の時間変化を定義する。
- (15) TNUIN各流体セルの乱流動粘性係数を空間時間依存の形で定義する。
- (16) TURBBC流体入口部, 出口部の $K-\epsilon$ 境界条件を定義する。
- (17) BCTEMP流体入口部, 出口部, その他の温度境界条件を定義する。
- (18) QHEAT発熱量, 特殊熱通過を定義する。
- (19) OUTTMP流体出口部の(体積流)平均温度, 特定断面の等価線形温度分布などを定義しプリント出力する。

大洗工学センターの FACOM-M200 システムを用いて NAGARE-2D を RUN する場合の JCL は次のように作成する。(ユーザー ID~U#### の場合)

```
//U####***-JOB-(PASSWORD),MSGCLASS=A,MSGLEVEL=(2,0),NOTIFY=U####,
//ATTR=(T,C2,W) (計算時間,プリント出力量に応じて定める。)
//EXEC FORTXCLG,
//      PARM.FORT='BYNAME,G0STMT,ISN(D),N0STATIS',
//      PARM.LKED='LET,LIST'
//FORT.SYSIN DD *
    {
        ユーザーサブルーチン
    }
//LKED.OLDLM DD DSN=Q3021.NAGARE.LOAD,DISP=SHR
//LKED.SYSIN DD *
INCLUDE OLDFM(NAGARE)
ENTRY MAIN
NAME MAIN(R)
//G0.SYSIN DD *
&DATA
    {
        入力カードデータ
    }
&END (MSS上にスタートファイルを新規作成)
//G0.FT10F001 DD DSN=U####.POST,DISP=(NEW,CATLG),
//      UNIT=MSS,MSUGP=MSU####
//
```

この場合はユニット 10 に MSS を使用してリスタート用のファイル (U####.POST) を新規作成し計算結果を格納する。2 回目以降のリスタート計算では DISP=SHR (リスタートファイル既存) とし計算結果を追加格納する。

3.2 メインプログラム

メインプログラムでは、前章で記した機能以外に、コメント文によりコードの概略説明を行なっている。コードの適用範囲およびバージョンアップ履歴を記したコメント文を List. 1 に示す。サブルーチンの概略機能説明のコメントおよび NAMELIST による入力データ変数名の定義を List. 2 に示す。入力データ変数の意味を説明したコメント文を List. 3 に示す。

入力データ変数の説明 (和文) および本報告書で用いる対応する記号を Table. 1 に示す。主な変数の説明および本報告書で用いる対応する記号を Table. 2 に示す。

Fig 2 にメッシュ符番方法を示す。Fig 3 に主な変数の定義位置を示す。

Fig 4 にメインプログラムのフローチャートを示す。

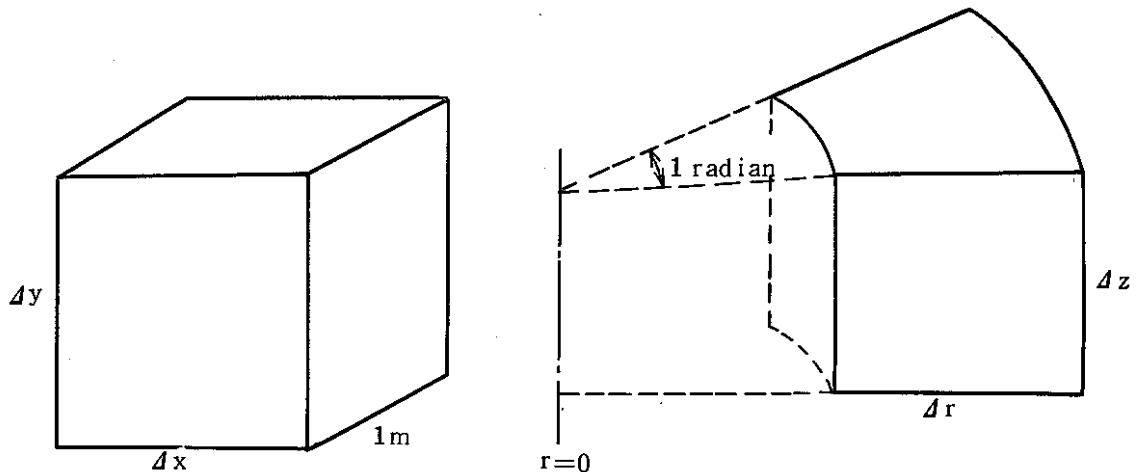
メインプログラム内で計算される各種不変マトリクスは次の様なものであり他のサブルーチンで引用される。

- $0.5 (\Delta r_i + \Delta r_{i+1}), 0.5 (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})$ ……セル中心間距離
- $\Delta S_{r_{i,j}} = r_{Ni} \cdot \Delta z_j, \Delta S_{z_i} = r_{Gi} \cdot \Delta r_i$ ……セル側面積
- $\frac{\alpha_{s_{i,j}}}{0.5 (\Delta r_i + \Delta r_{i+1})}, \frac{\beta_{s_{i,j}}}{0.5 (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})}$ ……面平均有効拡散係数
- $AKF_{ij} = \iint_{\Delta S_{i,j}} (\text{拡散係数}) dS$ ……セル平均有効拡散係数
- $\Delta V_{i,j} = \Delta S_{z_i} \cdot \Delta z_j$ ~セル体積
- r_{Ni}, r_{Gi} ……円筒系では半径を表わす。平面系では $r_{Ni} = r_{Gi} = 1.0$ とされる。

セル体積, セル側面積は

$$\begin{cases} \text{円筒系} (\xi=1) \dots\dots\dots 1 (\text{radian}) \text{円周セル} \\ \text{平面系} (\xi=0) \dots\dots\dots 1 (\text{m}) \text{深さセル} \end{cases}$$

を仮定している。(次図参照)



平面系 ($\xi = 0$)

円筒系 ($\xi = 1$)

入力データ変数の中でデフォルト値が設定されているものは次の通りである。

ITERL=100, GZ=-9.8, EPSI=0.001, UPVEL=0.9, OMG=1.8,
ALPH=0.9, ITURB=1, IDSK=1, ITPRI=1, IQPRI=1,
IDELT=5, DELT=0.01, MODE=1

入力データでこれらの変数を省略すると上記の値がとられる。上記以外の入力データ変数については省略した場合は0がとられる。

3.3 サブルーチンVUPDTE

Navier-Stokes の方程式 (2-6), (2-7) を差分形式で解き速度場を更新する。主な特徴は以下のとおりである。

- (1) 浮力効果は Boussinesq 近似 (2-9) 式を用いる。
- (2) 対流項は風上差分法を用いる。
- (3) 壁面でのスリップ条件はプログラム内で処理される。
 - 複雑なダミー速度境界条件を入力する必要がない。
 - 入力データ S_s (0.0~1.0) に応じ Non Slip ($S_s=0.0$) から Full Slip ($S_s=1.0$) まで自在のスリップ条件がプログラム内で自動的に実現される。
- (4) 縮流, 拡大流による静圧ヘッド損失を次式により考慮できる。

$$\Delta P = f \cdot \frac{1}{2} \bar{u}^2 \quad (3-1)$$

ΔP は静圧ヘッド損失, f は静圧ヘッド損失係数, \bar{u} は f 定義断面の実効面積に対する実効流速である。

(2-6)式を差分形式で次のように表わす。

$$U_{i,j}^{(n+1)} = U_{i,j} + \Delta t \{ F_r - \alpha_p (UUR + VUZ) + \nu^* V I S U \} \quad (3-2)$$

ここに添字 (n+1) は時刻 $t + \Delta t$ における値を示す。 F_r は外力および静圧ヘッド差による加速度であり次式で表わされる。

$$F_r = \left\{ \frac{P_{T_{i,j}} - P_{T_{i+1,j}} - f_{r_{i,j}} \frac{\bar{u}_{i,j} |\bar{u}_{i,j}|}{2}}{0.5 (\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} + g_r \{ 1 - \beta (\bar{T}_{i,j} - T_o) \} \right\} \alpha_{S_{i,j}} \quad (3-3)$$

ここで $\bar{u}_{i,j}$ は $u_{i,j}$ 定義断面の実効面積に対する平均流速であり, $\bar{u}_{i,j} = u_{i,j} / \alpha_{S_{i,j}}$ となる。 $\bar{T}_{i,j}$ は $u_{i,j}$ 定義断面の平均温度であり補間法により

$$\bar{T}_{i,j} = \frac{\Delta r_i T_{i+1,j} + \Delta r_{i+1} T_{i,j}}{\Delta r_i + \Delta r_{i+1}} \quad (3-4)$$

となる。 α_p は緩和定数であり以下の範囲でなければならない。

$$1 \geq \alpha_p > \max \left\{ \left| \frac{u_{i,j} \Delta t}{\Delta r} \right|, \left| \frac{v_{i,j} \Delta t}{\Delta z} \right| \right\} \quad (3-5)$$

経験的に $\alpha_p = 0.8 \sim 0.9$ 位が良い。

$UUR \{ (2-6) \text{式} \text{の} u \frac{\partial u}{\partial r} \}$ は次式で表わされる。

$$UUR = u_{i,j} \left\{ \frac{1 + \beta_M}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_1 + \frac{1 - \beta_M}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_2 \right\} \quad \left(\begin{array}{l} \text{正負号は } u_{i,j} > 0 \text{ で上} \\ u_{i,j} < 0 \text{ で下} \end{array} \right) \quad (3-6)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_1 = \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta r_i}, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_2 = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta r_{i+1}}$$

ここに β_M は風上差分率であり $\beta_M = 0.0$ で中央差分, $\beta_M = 1.0$ で完全風上差分である。経験的に $\beta_M = 0.5 \sim 1.0$ 位が良い。 $VUZ \{ (2-6) \text{式} \text{の} v \frac{\partial u}{\partial z} \}$ は次式で表わされる。

$$VUZ = \bar{v} \left\{ \frac{1 \pm \beta_M}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_1 + \frac{1 \mp \beta_M}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_2 \right\} \left(\begin{array}{l} \text{正負号は } \bar{v} > 0 \text{ で上} \\ \bar{v} < 0 \text{ で下} \end{array} \right) \quad (3-7)$$

\bar{v} は $u_{i,j}$ 定義断面における z 方向平均流速であり補間法により次式で与えられる。

$$\bar{v} = \frac{\Delta r_{i+1} (v_{i,j} + v_{i,j-1}) + \Delta r_i (v_{i+1,j} + v_{i+1,j-1})}{2 (\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} \quad (3-8)$$

$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_1$ は次のように与えられる。

(a) 下側セルが固体の時 ($IJF_{i,j-1} < 0$) ……スリップ条件

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_1 = \frac{(1 - S_1) u_{i,j}}{0.5 \Delta z_j} \quad (3-9a)$$

(b) 下側セルがダミーの時 ($IJF_{i,j-1} = 0$) ……Full Slip

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_1 = 0 \quad (3-9b)$$

(c) 下側セルが流体の時 ($IJF_{i,j-1} > 0$)

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_1 = R_1 \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{0.5 (\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)} + (1 - R_1) \frac{(1 - S_1) u_{i,j}}{0.5 \Delta z_j} \quad (3-9c)$$

ここに R_1 は下側の平均面積開口率であり

$$R_1 = \frac{\beta_{S_{i,j-1}} + \beta_{S_{i+1,j-1}}}{2}$$

と与えられる。

$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_2$ は同様に次のように与えられる。

(a) 上側セルが固体の時 ($IJF_{i,j+1} < 0$) ……スリップ条件

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_2 = \frac{(S_1 - 1) u_{i,j}}{0.5 \Delta z_j} \quad (3-10a)$$

(b) 上側セルがダミ-の時 (I J F_{i,j+1} = 0) …… Full Slip

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_2 = 0 \tag{3-10b}$$

(c) 上側セルが流体の時 (I J F_{i,j+1} > 0)

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_2 = R_2 \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{0.5 (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} + (1-R_2) \frac{(S_i - 1) u_{i,j}}{0.5 \Delta z_j} \tag{3-10c}$$

ここに R₂ は上側の平均面積開口率であり $R_2 = \frac{\beta_{S_{i,j}} + \beta_{S_{i+1,j}}}{2}$ と与えられる。

ν* は次式で与えられる。

$$\nu^* = \nu (M) + \epsilon_{M_{i,j}}, \quad M = I J F_{i,j} \tag{3-11}$$

VISU { (2-6) 式の ∇² u } は次式で表わされる。

$$VISU = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_2 - \left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_1}{0.5 (\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} + \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_2 - \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_1}{\Delta z_j} + \xi \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{\Delta r_i + \Delta r_{i+1}} - \xi \frac{u_{i,j}}{r_{Ni}^2} \tag{3-12}$$

同様にして v に関する差分式は

$$v_{i,j}^{(n+1)} = v_{i,j} + \Delta t \{ F_z - \alpha_P (UVR + VVZ) + \nu^* VISV \} \tag{3-13}$$

F_z は

$$F_z = \left[\frac{P_{T_{i,j}} - P_{T_{i,j+1}} - f_{Z_{i,j}} \frac{v_{i,j} |v_{i,j}|}{2}}{0.5 (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} + g_z \{ 1 - \beta (\bar{T}_{i,j} - T_0) \} \right] \beta_{S_{i,j}} \tag{3-14}$$

ここに $\bar{v}_{i,j} = v_{i,j} / \beta_{S_{i,j}}$, $\bar{T}_{i,j} = \frac{\Delta z_j T_{i,j+1} + \Delta z_{j+1} T_{i,j}}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}}$ である。

$$VVZ = v_{i,j} \left[\frac{1 \pm \beta_M}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_1 + \frac{1 \mp \beta_M}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_2 \right] \left(\begin{array}{l} \text{正負号は } v_{i,j} > 0 \text{ で上} \\ v_{i,j} < 0 \text{ で下} \end{array} \right) \tag{3-15}$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_1 = \frac{v_{i,j} - v_{i,j-1}}{\Delta z_j}, \quad \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_2 = \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{\Delta z_{j+1}}$$

$$UVR = \bar{u} \left\{ \frac{1 + \beta_M}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_1 + \frac{1 - \beta_M}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_2 \right\} \quad \left(\begin{array}{l} \text{正負号は } \bar{u} > 0 \text{ で上} \\ \bar{u} < 0 \text{ で下} \end{array} \right) \quad (3-16)$$

$$\bar{u} = \frac{\Delta z_{j+1}(u_{i-1,j} + u_{i,j}) + \Delta z_j(u_{i-1,j+1} + u_{i,j+1})}{2(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} \quad (3-17)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_1 \text{ は}$$

(a) 左側セルが固体 ($I J F_{i-1,j} < 0$)

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_1 = \frac{(1 - S_i) v_{i,j}}{0.5 \Delta r_i} \quad (3-18a)$$

(b) 左側セルがダミ ($I J F_{i-1,j} = 0$)

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_1 = 0 \quad (3-18b)$$

(c) 左側セルが流体 ($I J F_{i-1,j} > 0$)

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_1 = R_1 \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{0.5(\Delta r_{i-1} + \Delta r_i)} + (1 - R_1) \frac{(1 - S_i) v_{i,j}}{0.5 \Delta r_i} \quad (3-18c)$$

$$\text{ここに } R_1 = \frac{\alpha_{S_{i-1,j}} + \alpha_{S_{i-1,j+1}}}{2} \text{ である。}$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_2 \text{ は}$$

(a) 右側セルが固体 ($I J F_{i+1,j} < 0$)

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_2 = \frac{(S_i - 1) v_{i,j}}{0.5 \Delta r_i} \quad (3-19a)$$

(b) 右側セルがダミ ($I J F_{i+1,j} = 0$)

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_2 = 0 \quad (3-19b)$$

(c) 右側セルが流体 ($I J F_{i+1,j} > 0$)

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_2 = R_2 \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{0.5(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} + (1-R_2) \frac{(S_i - 1)v_{i,j}}{0.5\Delta r_i} \quad (3-19c)$$

$$\text{ここに } R_2 = \frac{\alpha_{S_{i,j}} + \alpha_{S_{i,j+1}}}{2} \text{ である。}$$

VISVは次式で与えられる。

$$VISV = \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_2 - \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_1}{\Delta r_i} + \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_2 - \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_1}{0.5(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} + \xi \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_1 + \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_2}{2} \quad (3-20)$$

$u_{i,j}^{(n+1)}$ の計算に必要な変数およびその定義位置を Fig. 5 に示す。 $v_{i,j}^{(n+1)}$ の計算に必要な変数およびその定義位置を Fig. 6 に示す。最外周セルは流動非計算領域であり、流体入口部および出口部（最外周に位置する）の流速計算は実行されず、流動境界条件 (BCVEL) で与えられる。

3.4 サブルーチンPUPDTE

前章VUPDTEにより更新された速度場は連続式を満足しない。連続式と修正運動方程式を連立させて解き静圧場，速度場を修正する（速度場更新の第2段階）。手法はくり返し過緩和法 (S.O.R)を用いる。

Navier-Stokes の方程式を解いて得られた速度場を連続式 (2-5) の左辺に代入し (I, J)セルから流出する誤差体積 $\Delta V_{i,j}^*$ を次のように求める。

$$\Delta V_{i,j}^* = \iint_{\Delta S} u_n dS = \Delta S_{r_{i,j}} u_{i,j} - \Delta S_{r_{i-1,j}} u_{i-1,j} + \Delta S_{z_i} (v_{i,j} - v_{i,j-1}) \quad (3-21)$$

(I, J)セルの静圧ヘッドを

$$P_{i,j} \rightarrow P_{i,j} + \Delta P^* \quad (3-22)$$

と修正することにより，修正運動方程式

$$\delta \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = -\delta \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right), \quad \delta \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) = -\delta \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (3-23)$$

を解き，セル4側面の流速を修正する。修正された速度が連続式(3-21)を満足する($\Delta V_{i,j}^* \rightarrow 0$)ように最適 ΔP^* を決定する。修正運動方程式はNavier-Stokesの運動方程式において静圧ヘッド勾配が変化するとした場合の加速度変化として変分法により得られる。実効面積を考慮して(3-23)を(I, J)セル4側面に適用し差分表示すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{i,j} &= \frac{\alpha_{Si,j} \Delta P^* \Delta t}{0.5(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})}, & \Delta u_{i-1,j} &= \frac{-\alpha_{Si-1,j} \Delta P^* \Delta t}{0.5(\Delta r_{i-1} + \Delta r_i)} \\ \Delta v_{i,j} &= \frac{\beta_{Si,j} \Delta P^* \Delta t}{0.5(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})}, & \Delta v_{i,j-1} &= \frac{-\beta_{Si,j-1} \Delta P^* \Delta t}{0.5(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)} \end{aligned} \right\} \quad (3-24)$$

修正された速度($u_{i,j}^* = u_{i,j} + \Delta u_{i,j}$ など)を連続式に代入し流出誤差体積 $\Delta V_{i,j}^*(next)$ を求めると

$$\Delta V_{i,j}^*(next) = \Delta V_{i,j}^* + AKF_{i,j} \cdot \Delta P^* \cdot \Delta t \quad (3-25)$$

$$\begin{aligned} AKF_{i,j} &= \frac{\alpha_{Si,j} \Delta S_{r_i,j}}{0.5(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} + \frac{\alpha_{Si-1,j} \Delta S_{r_{i-1},j}}{0.5(\Delta r_{i-1} + \Delta r_i)} + \frac{\beta_{Si,j} \Delta S_{z_i}}{0.5(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} \\ &\quad + \frac{\beta_{Si,j-1} \Delta S_{z_i}}{0.5(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)} \end{aligned}$$

となる。従って $\Delta V_{i,j}^*(next) = 0$ を期待するには静圧ヘッド修正量を，

$$\Delta P^* = \frac{-\Delta V_{i,j}^*}{AKF_{i,j} \cdot \Delta t} \quad (3-26)$$

とすれば良い。S.O.R法では収束を早めるために過緩和定数 ω を乗じて

$$\Delta P^* = \frac{-\omega \Delta V_{i,j}^*}{AKF_{i,j} \cdot \Delta t} \quad (3-27)$$

とする。ωのとり得る範囲は

$$0 < \omega \leq 2.0 \quad (3-28)$$

であり、経験的に ω=1.7~1.9 位が良い。

これらの修正を全流体セルに対して行なう (1 iteration)

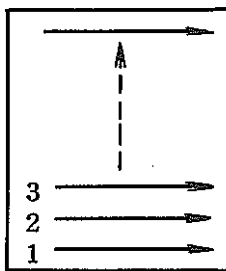
○全流体セルが次の収束判定条件

$$\frac{\text{誤差体積}}{\text{セル体積}} = \frac{\Delta V_{i,j}^*}{\Delta V_{i,j}} \begin{cases} > \epsilon_{\text{CON}} \text{ (満足しない)} \\ \leq \epsilon_{\text{CON}} \text{ (満足する)} \end{cases} \quad (3-29)$$

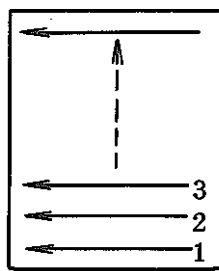
を満足するまでくり返し修正する。一般に解析開始当初 (t=0) は時間増分 1 ステップでは容易に収束解が得られないのが通常であり修正くり返しを無制限に行うのは無意味である。くり返し数の上限 (ITERL) を設定し、上限に達したらくり返しをやめ次の時間ステップに移る方が良い。通常 ITERL=100~200 位が適当である。一般に時間ステップ更新数サイクルで収束解が得られる。一度収束した後は時間ステップ更新ごとに収束に至るまでのくり返し数は徐々に減少し 10~20 回位で安定する。過渡変化が大きい時は 30~50 回位に増加する。

収束判定条件 ε_{CON} は、温度計算なしの場合 0.005~0.01 位が経済的であり、温度計算ありの場合は 0.001~0.002 位に精度を上げると良い。連続式の誤差がエンタルピー輸送方程式の対流成分 $(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z})$ の誤差となるからである。

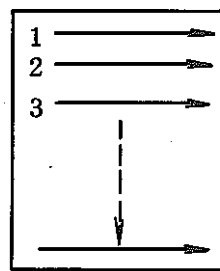
全流体セルに対する修正の順番は流体入口境界近辺から開始する方がくり返し数がいく分有利である。修正順番は入力データ MODE により指定する。MODE=1~4 に対し次図のような順番でくり返し計算がなされる。



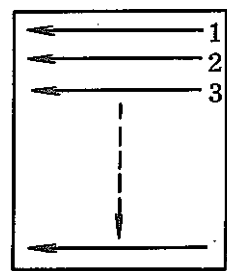
MODE=1



MODE=2



MODE=3



MODE=4

MODEのデフォルト値は1である。(I, J)セルの静圧ヘッド, 4側面の流速を修正するのに必要な変数をFig.7に示す。最外周セルは計算しない。

3.5 サブルーチンPSET

前章PUPDTEにより得られた新しい速度場を用いて静圧ヘッド損失 $\Delta P_{i,j}$ を計算し, 実効静圧ヘッド $P_{Ti,j}$ を求める。計算手順は以下のとおりである。

- (1) (I, J)セルの静圧ヘッドロス $\Delta P_{i,j}$ を0セットする。

$$\Delta P_{i,j} = 0 \quad \text{for all (I, J) cell}$$

- (2) r方向断面(I, J)での静圧ヘッド損失を計算する。

$$\text{if } f_{r,i,j} > 0, \text{ then } \Delta P_r = f_{r,i,j} \frac{1}{2} \bar{u}_{i,j}^2 \quad (3-30)$$

ここに $\bar{u}_{i,j}$ は平均実効流速($u_{i,j}/\alpha_{Si,j}$)である。

$$\text{if } u_{i,j} > 0, \text{ then } \Delta P_{i+1,j} \rightarrow \Delta P_{i+1,j} + \Delta P_r$$

$$\text{if } u_{i,j} < 0, \text{ then } \Delta P_{i,j} \rightarrow \Delta P_{i,j} + \Delta P_r$$

これをr方向全断面についてくり返す。

- (3) z方向断面(I, J)での静圧ヘッド損失を計算する。

$$\text{if } f_{z,i,j} > 0, \text{ then } \Delta P_z = f_{z,i,j} \frac{1}{2} \bar{v}_{i,j}^2 \quad (3-31)$$

ここに $\bar{v}_{i,j}$ は平均実効流速($v_{i,j}/\beta_{Si,j}$)である。

$$\text{if } v_{i,j} > 0, \text{ then } \Delta P_{i,j+1} \rightarrow \Delta P_{i,j+1} + \Delta P_z$$

$$\text{if } v_{i,j} < 0, \text{ then } \Delta P_{i,j} \rightarrow \Delta P_{i,j} + \Delta P_z$$

これをz方向全断面についてくり返す。

- (4) (I, J)セルの実効静圧ヘッドを求める。

$$P_{Ti,j} = P_{Di,j} - \Delta P_{i,j} \quad \text{for all (I, J) cell} \quad (3-32)$$

3.6 サブルーチンDTVEL

速度場に対する最適時間増分 Δt_1 を求める。一般に流体セル (r 方向メッシュ巾 Δr , z 方向メッシュ巾 Δz) に対して時間増分 Δt は次式を満足しなければならない。

$$|u| \Delta t < \Delta r, |v| \Delta t < \Delta z \quad (3-33)$$

計算手順は以下のとおりである。

(1) Δt 初期セット ($\Delta t = 10.0$)

(2) if $v_{i,j-1} > 0$, then $TM = \frac{\Delta z_j \cdot r_{i,j}}{v_{i,j-1}}$

if $TM < \Delta t$, then $\Delta t = TM$

(3) if $v_{i,j} < 0$, then $TM = \frac{\Delta z_j \cdot r_{i,j}}{-v_{i,j}}$

if $TM < \Delta t$, then $\Delta t = TM$

(4) if $u_{i-1,j} > 0$, then $TM = \frac{\Delta r_i \cdot r_{i,j}}{-u_{i,j}}$

if $TM < \Delta t$, then $\Delta t = TM$

(5) if $u_{i,j} < 0$, then $TM = \frac{\Delta r_i \cdot r_{i,j}}{-u_{i,j}}$

if $TM < \Delta t$, then $\Delta t = TM$

(2)~(5)を全流体セル ($IJJF_{i,j} > 0$)に対してくり返す。 $\Delta r_i \cdot r_{i,j}$ は r 方向実効メッシュ巾, $\Delta z_j \cdot r_{i,j}$ は z 方向実効メッシュ巾である。 Δt に安全率 0.75 を乗じ $\Delta t_1 = 0.75 \Delta t$ として RETURN する。

3.7 サブルーチンDTTEMP

温度場に対する最適時間増分 Δt_2 を求める。一般に流体セル (体積 ΔV , 表面積 ΔS) に対して時間増分 Δt は次式を満足しなければならない。

$$\Delta V_{EX} \cdot \Delta t < \Delta V \quad (3-34)$$

ΔV_{EX} は温度の体積拡散速度であり次式で与えられる。

$$\Delta V_{EX} = \iint_{\Delta S} u^{(+)} dS + \left(\frac{\lambda}{\rho c} + \epsilon_H \right) \iint_{\Delta S} \frac{dS}{\Delta x} \quad (3-35)$$

ここに $u^{(+)}$ は微小表面 dS に垂直外向きの速度 u_n が正の場合に $u^{(+)} = u_n$ であり $u_n \leq 0$ の時, $u^{(+)} = 0$ である。 Δx は dS 面の両隣のセル中心点 (温度定義点) 間距離である。

計算手順は以下のとおりである。

- (1) Δt 初期セット ($\Delta t = 1.0$)
- (2) (I, J)セルの ΔV_{EX} を 0 セット ($DV_{i,j} = 0.0$)
- (3) if $u_{i-1,j} < 0$, then $DV_{i,j} \rightarrow DV_{i,j} - u_{i-1,j} \cdot \Delta S_{r_{i-1,j}}$
- (4) if $u_{i,j} > 0$, then $DV_{i,j} \rightarrow DV_{i,j} + u_{i,j} \cdot \Delta S_{r_{i,j}}$
- (5) if $v_{i,j-1} < 0$, then $DV_{i,j} \rightarrow DV_{i,j} - v_{i,j-1} \cdot \Delta S_{z_{i,j}}$
- (6) if $v_{i,j} > 0$, then $DV_{i,j} \rightarrow DV_{i,j} + v_{i,j} \cdot \Delta S_{z_{i,j}}$
- (7) $DV_{i,j} \rightarrow DV_{i,j} + \left\{ \frac{\lambda(M)}{\rho(M) \cdot c(M)} + r_E(M) \epsilon_{M,i,j} \right\} AKF_{i,j}$

ここで M は流体種類番号であり $M = I J F_{i,j}$ である。

- (8) $TM = \Delta V_{i,j} \cdot r_{i,j} / DV_{i,j}$
- (9) if $TM < \Delta t$ then $\Delta t = TM$

(2)~(9)を全流体セル ($M = I J F_{i,j} > 0$) に対してくり返す。 $\Delta V_{i,j} \cdot r_{i,j}$ は実効体積である。 Δt に安全率 0.75 を乗じ $\Delta t_2 = 0.75 \Delta t$ として RETURN する。

3.8 サブルーチンDLOVCT

流体セル内に対流により流入する熱量

$$q_D = -\rho c \cdot \Delta V \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3-36)$$

および伝導により隣りの流体セルから流入する熱量

$$q_{COND} = (\lambda + \rho c \epsilon_H) \iiint_{\Delta V} \nabla^2 T \, dV = (\lambda + \rho c \epsilon_H) \iint_{\Delta S} \frac{\partial T}{\partial n} \, dS \quad (3-37)$$

を求め、既に計算されている固体セルからの伝達熱量、ユーザーサブルーチンにより定義された特殊熱通過および発熱量を考慮して温度拡散方程式(2-10)を解き、流体セルの温度変化を求める。

r 方向 (I, J) 断面を伝導および伝達により右から左 { (I+1, J) → (I, J) セル } に流れる熱量を $q_{r,i,j}$, z 方向 (I, J) 断面を上から下 { (I, J+1) → (I, J) セル } に流れる熱量を $q_{z,i,j}$ とする。サブルーチンDLOVCT に受け渡される以前に特殊熱通過によるものはユーザーサブルーチンQHEAT で与えられ、固体壁からの熱伝達によるものはQWALLで計算されて $q_{r,i,j}$, $q_{z,i,j}$ に加えられている。流体セル間の熱伝導量を次式により計算し $q_{r,i,j}$, $q_{z,i,j}$ に加える。(for all $M=IJF_{i,j} > 0$)

$$\left. \begin{aligned} q_{r,i,j} \rightarrow q_{r,i,j} + \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{0.5(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} \Delta S_{r,i,j} \cdot \alpha_{s,i,j} \lambda_f^* \\ q_{z,i,j} \rightarrow q_{z,i,j} + \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{0.5(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} \Delta S_{z,i} \beta_{s,i,j} \lambda_f^* \end{aligned} \right\} \quad (3-38)$$

ここに λ_f^* は実効熱伝導率であり次式で与えられる。

$$\lambda_f^* = \lambda_f(M) + \rho_f(M) \cdot c(M) \cdot r_E(M) \cdot \epsilon_{M,i,j} \quad (3-39)$$

対流により流体セルに流入する熱量を次式により計算する。

(for all $M=IJF_{i,j} > 0$)

(1) $u \frac{\partial T}{\partial r}$ を求める。

$$UTR = \begin{cases} u_{i-1,j} \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{0.5(\Delta r_{i-1} + \Delta r_i)} & (\bar{u} > 0) \\ u_{i,j} \frac{T_{i+1,j} + T_{i,j}}{0.5(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} & (\bar{u} < 0) \end{cases} \quad (3-40)$$

$$\bar{u} = \frac{u_{i-1,j} + u_{i,j}}{2} \quad (3-41)$$

(2) $v \frac{\partial T}{\partial r}$ を求める。

$$VTZ = \begin{cases} v_{i,j-1} \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{0.5(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)} & (\bar{v} > 0) \\ v_{i,j} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{0.5(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} & (\bar{v} < 0) \end{cases} \quad (3-42)$$

ここに $\bar{v} = \frac{v_{i,j-1} + v_{i,j}}{2}$ である。

(3) $q_{D i,j}$ を次式により求める。

$$q_{D i,j} = -(UTR + VTZ) \rho_f(M) \cdot c_f(M) \cdot \Delta V_{i,j} \quad (3-43)$$

流体セルの温度変化を次式により求める。

$$\left. \begin{aligned} T_{i,j}^{(n+1)} &= T_{i,j} + \frac{\Delta t \cdot \Sigma q}{\rho_f(M) \cdot c_f(M) \cdot \Delta V_{i,j} \cdot r_{i,j}} \\ \Sigma q &= q_{r i,j} - q_{r i-1,j} + q_{z i,j} - q_{z i,j-1} + q_{D i,j} + q_{S i,j} \end{aligned} \right\} \quad (3-44)$$

ここで $q_{S i,j}$ は (I, J)セル内の発熱量でありユーザーサブルーチン QHEAT で定義される。

流体セルの温度変化計算に必要な変数を Fig. 8 に示す。最外周の流体セル（入口および出口部）の計算は実行しない。温度境界条件（BCTEMP）により与えられる。

3.9 サブルーチンTURB

乱流（ $K-\epsilon$ ）輸送方程式（2-14）～（2-16）を差分形式で解き、（2-17）式を用いて乱流動粘性係数 ϵ_M を各時間ステップごとに修正する。

（2-14）式を差分形式で書くと次の様になる。

$$K_{i,j}^{(n+1)} = K_{i,j} + \Delta t \left(-UKR - VKZ + \frac{\nu + \epsilon_{Mi,j}}{\sigma_K} VISK + G - C_D \epsilon_{i,j} \right) \quad (3-45)$$

（2-15）式を差分形式で次式の様に表わす。

$$\epsilon_{i,j}^{(n+1)} = \epsilon_{i,j} + \Delta t \left\{ -VER - VEZ + \frac{\nu + \epsilon_{Mi,j}}{\sigma_\epsilon} VISE + F \right\} \quad (3-46)$$

F は（2-17）式を考慮した $K-\epsilon$ 連立頂であり次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \text{if } K_{i,j}^{(n+1)} > 0, \text{ then } F &= C_1 C_\mu K_{i,j}^{(n+1)} G^* - C_2 \frac{\epsilon_{i,j}^2}{K_{i,j}^{(n+1)}} \\ \text{if } K_{i,j}^{(n+1)} = 0, \text{ then } F &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3-47)$$

$K_{i,j}^{(n+1)}$, $\epsilon_{i,j}^{(n+1)}$ を用いて $\epsilon_{Mi,j}^{(n+1)}$ を次式により求める。

$$\left. \begin{aligned} \text{if } \epsilon_{i,j}^{(n+1)} > 0, \text{ then } \epsilon_{Mi,j}^{(n+1)} &= C_\mu \frac{K_{i,j}^{(n+1)2}}{\epsilon_{i,j}^{(n+1)}} \\ \text{if } \epsilon_{i,j}^{(n+1)} = 0, \text{ then } \epsilon_{Mi,j}^{(n+1)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3-48)$$

計算の手順は次の様になされる。

(1) (I, J)セル中心点の平均流速を求める。

$$\bar{u} = 0.5 (u_{i-1,j} + u_{i,j}), \quad \bar{v} = 0.5 (v_{i,j-1} + v_{i,j}) \quad (3-49)$$

(2) $\left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_1, \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right)_1$, セル左側ダミ一流速 v_1^* を求める。

(a) 左側セルが固体 ($IJF_{i-1,j} < 0$) …… Slip 条件

$$v_1^* = S_t \cdot \bar{v}, \quad \left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_1 = \frac{K_{i,j}}{0.5 \Delta r_i}, \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right)_1 = \frac{\varepsilon_{i,j}}{0.5 \Delta r_i} \quad (3-50a)$$

(b) 左側セルがダミ - ($IJF_{i-1,j} = 0$) …… Full Slip

$$v_1^* = \bar{v}, \quad \left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_1 = \frac{K_{i,j}}{0.5 \Delta r_i}, \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right)_1 = \frac{\varepsilon_{i,j}}{0.5 \Delta r_i} \quad (3-50b)$$

(c) 左側セルが流体 ($IJF_{i-1,j} > 0$)

$\alpha_{Si-1,j} = 0$ (閉) の時, (a) の式 (左側固体) を用いる。

$\alpha_{Si-1,j} > 0$ (開) の時

$$\left. \begin{aligned} v_1^* &= \frac{0.5 (v_{i-1,j-1} + v_{i-1,j}) \Delta r_i + \bar{v} \Delta r_{i-1}}{\Delta r_{i-1} + \Delta r_i} \\ \left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_1 &= \frac{K_{i,j} - K_{i-1,j}}{0.5 (\Delta r_{i-1} + \Delta r_i)}, \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right)_1 = \frac{\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i-1,j}}{0.5 (\Delta r_{i-1} + \Delta r_i)} \end{aligned} \right\} (3-50c)$$

(3) $\left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_2, \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right)_2$, セル右側ダミ一流速 v_2^* を求める。

(a) 右側セルが固体 ($IJF_{i+1,j} < 0$) …… Slip 条件

$$v_2^* = S_t \cdot \bar{v}, \quad \left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_2 = \frac{-K_{i,j}}{0.5 \Delta r_i}, \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right)_2 = \frac{-\varepsilon_{i,j}}{0.5 \Delta r_i} \quad (3-51a)$$

(b) 右側セルがダミ - ($IJF_{i+1,j} = 0$) …… Full Slip

$$v_2^* = \bar{v}, \quad \left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_2 = \frac{-K_{i,j}}{0.5 \Delta r_i}, \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right)_2 = \frac{-\varepsilon_{i,j}}{0.5 \Delta r_i} \quad (3-51b)$$

(c) 右側セルが流体 ($IJF_{i+1,j} > 0$)

$\alpha_{Si,j} = 0$ (閉) の時, (a) の式 (右側固体) を用いる。

$\alpha_{Si,j} > 0$ (開) の時

$$\left. \begin{aligned} v_2^* &= \frac{0.5(v_{i+1,j-1} + v_{i+1,j}) \Delta r_i + \bar{v} \Delta r_{i+1}}{\Delta r_i + \Delta r_{i+1}} \\ \left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_2 &= \frac{K_{i+1,j} - K_{i,j}}{0.5(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})}, \quad \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial r}\right)_2 = \frac{\epsilon_{i+1,j} - \epsilon_{i,j}}{0.5(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} \end{aligned} \right\} (3-51c)$$

(4) $\frac{\partial v}{\partial r}$ を求める。

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{v_2^* - v_1^*}{\Delta r_i} \quad (3-52)$$

(5) 風上差分法により $UKR (= u \frac{\partial K}{\partial r})$, $UER (= u \frac{\partial \epsilon}{\partial r})$ を求める。

(a) $\bar{u} \geq 0$ の時 $UKR = \bar{u} \left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_1$, $UER = \bar{u} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial r}\right)_1$ (3-53a)

(b) $\bar{u} < 0$ の時 $UKR = \bar{u} \left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_2$, $UER = \bar{u} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial r}\right)_2$ (3-53b)

(6) $\left(\frac{\partial K}{\partial z}\right)_1$, $\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right)_1$, セル下側ダミ - 流速 u_1^* を求める。

(a) 下側セルが固体 ($IJF_{i,j-1} < 0$) …… Slip 条件

$$u_1^* = S_s \cdot \bar{u}, \quad \left(\frac{\partial K}{\partial z}\right)_1 = \frac{K_{i,j}}{0.5 \Delta z_j}, \quad \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right)_1 = \frac{\epsilon_{i,j}}{0.5 \Delta z_j} \quad (3-54a)$$

(b) 下側セルがダミ - ($IJF_{i,j-1} = 0$) …… Full Slip

$$u_1^* = \bar{u}, \quad \left(\frac{\partial K}{\partial z}\right)_1 = \frac{K_{i,j}}{0.5 \Delta z_j}, \quad \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right)_1 = \frac{\epsilon_{i,j}}{0.5 \Delta z_j} \quad (3-54b)$$

(c) 下側セルが流体 ($IJF_{i,j-1} > 0$)

$\beta_{Si,j-1} = 0$ (閉) の時, (a) の式 (下側固体) を用いる。

$\beta_{Si,j-1} > 0$ (開) の時

$$\left. \begin{aligned} u_1^* &= \frac{0.5 (u_{i-1,j-1} + u_{i,j-1}) \Delta z_j + \bar{u} \Delta z_{j-1}}{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j} \\ \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_1 &= \frac{K_{i,j} - K_{i,j-1}}{0.5 (\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}, \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)_1 = \frac{\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i,j-1}}{0.5 (\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)} \end{aligned} \right\} (3-54c)$$

(7) $\left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_2, \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)_2$, セル上側ダミ流速 u_2^* を求める。

(a) 上側セルが固体 ($IJF_{i,j+1} < 0$) …… Slip 条件

$$u_2^* = S_1 \cdot \bar{u}, \quad \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_2 = \frac{-K_{i,j}}{0.5 \Delta z_j}, \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)_2 = \frac{-\varepsilon_{i,j}}{0.5 \Delta z_j} \quad (3-55a)$$

(b) 上側セルがダミ ($IJF_{i,j+1} = 0$) …… Full Slip

$$u_2^* = \bar{u}, \quad \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_2 = \frac{-K_{i,j}}{0.5 \Delta z_j}, \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)_2 = \frac{-\varepsilon_{i,j}}{0.5 \Delta z_j} \quad (3-55b)$$

(c) 上側セルが流体 ($IJF_{i,j+1} > 0$)

$\beta_{Si,j} = 0$ (閉) の時, (a) の式 (上側固体) を用いる。

$\beta_{Si,j} > 0$ (開) の時

$$\left. \begin{aligned} u_2^* &= \frac{0.5 (u_{i-1,j+1} + u_{i,j+1}) \Delta z_j + \bar{u} \cdot \Delta z_{j+1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}} \\ \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_2 &= \frac{K_{i,j+1} - K_{i,j}}{0.5 (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})}, \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)_2 = \frac{\varepsilon_{i,j+1} - \varepsilon_{i,j}}{0.5 (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} \end{aligned} \right\} (3-55c)$$

(8) $\frac{\partial u}{\partial z}$ を求める。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_2^* - u_1^*}{\Delta z_j} \quad (3-56)$$

(9) 風上差分法により $VKZ (=v \frac{\partial K}{\partial z})$, $VEZ (=v \frac{\partial \epsilon}{\partial z})$ を求める。

(a) $\bar{v} \geq 0$ の時 $VKZ = \bar{v} \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_1$, $VEZ = \bar{v} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right)_1$ (3-57a)

(b) $\bar{v} < 0$ の時 $VKZ = \bar{v} \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_2$, $VEZ = \bar{v} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right)_2$ (3-57b)

(10) $VISK (=v^2 K)$, $VISE (=v^2 \epsilon)$ を求める。

$$\left. \begin{aligned} VISK &= \frac{\left(\frac{\partial K}{\partial r} \right)_2 - \left(\frac{\partial K}{\partial r} \right)_1}{\Delta r_i} + \frac{\left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_2 - \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_1}{\Delta z_j} + \xi \frac{\left(\frac{\partial K}{\partial r} \right)_1 + \left(\frac{\partial K}{\partial r} \right)_2}{2 r_{Gi}} \\ VISE &= \frac{\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right)_2 - \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right)_1}{\Delta r_i} + \frac{\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right)_2 - \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right)_1}{\Delta z_j} + \xi \frac{\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right)_1 + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right)_2}{2 r_{Gi}} \end{aligned} \right\} (3-58)$$

(11) (2-16) 式により G^* , G を求める。

$$G^* = \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2, \quad G = \epsilon_{M,i,j} \cdot G$$

(12) (3-45) 式より $K_{i,j}^{(n+1)}$ を求める。

(13) (3-46), (3-47) 式より $\epsilon_{i,j}^{(n+1)}$ を求める。

(14) (3-48) 式より $\epsilon_{M,i,j}^{(n+1)}$ を求める。

(1)~(14) を全流体セルについてくり返した後に時間更新する。

$$K_{i,j} \rightarrow K_{i,j}^{(n+1)}, \quad \epsilon_{i,j} \rightarrow \epsilon_{i,j}^{(n+1)}$$

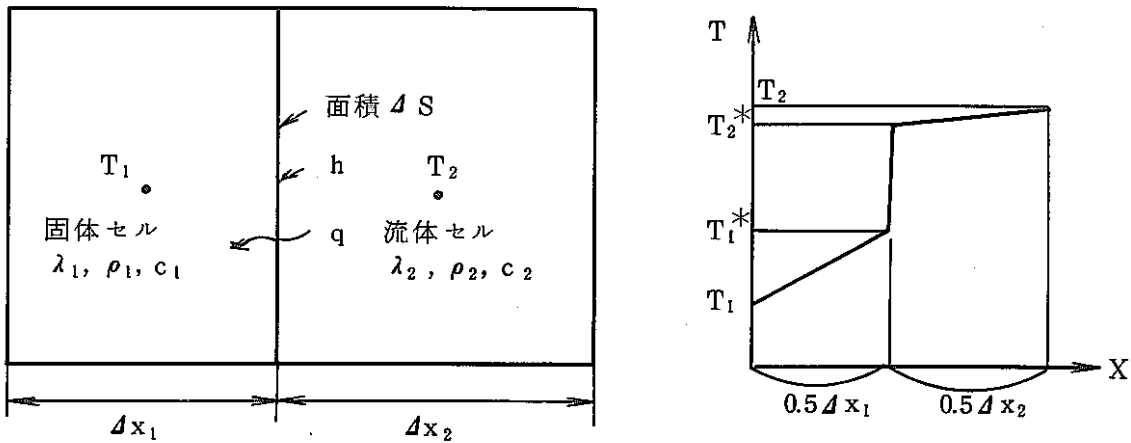
(I, J)セルの K , ϵ , ϵ_M の計算に必要な変数を Fig.9 に示す。最外周の流体セル

(入口および出口)の計算は実行しない。乱流モデル境界条件(TURBBO)で与えられる。

3.10 サブルーチンQWALL

固体セル↔流体セル間の熱伝達量, 固体セル間の熱伝導量を求め, ユーザーサブルーチンにより定義された特殊熱通過量および発熱量を考慮して温度拡散方程式(2-10)を解き固体セルの温度変化を求める。

下図の様な面積 ΔS で仕切られた固体セル(巾 Δx_1), 流体セル(巾 Δx_2)を考える。 ΔS 面の熱伝達係数を h とする。



セル内での温度分布を線形と仮定すると右から左への熱流量 q は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 q &= \lambda_1 \iint_{\Delta S} \left(\frac{\partial T}{\partial x_1} \right) ds = h \cdot \Delta T^* \cdot \Delta S = \lambda_2 \iint_{\Delta S} \left(\frac{\partial T}{\partial x_2} \right) ds \\
 &= \lambda_1 \frac{T_1^* - T_1}{0.5 \Delta x_1} \Delta S = h (T_2^* - T_1^*) \Delta S = \lambda_2 \frac{T_2 - T_2^*}{0.5 \Delta x_2} \Delta S \quad (3-59)
 \end{aligned}$$

ここに T_1^* は固体セル側の ΔS 表面温度, T_2^* は流体セル側の ΔS 表面温度である。

(3-59)式から T_1^* , T_2^* を消去すると次式が得られる。

$$q = \frac{2 h \lambda_1 \lambda_2 (T_2 - T_1) \Delta S}{h (\Delta x_1 \lambda_2 + \Delta x_2 \lambda_1) + 2 \lambda_1 \lambda_2} \quad (3-60)$$

左右とも固体セルの場合は(3-60)式において $h \rightarrow \infty$ とすれば良いから次式を得る。

$$q = \frac{2\lambda_1\lambda_2(T_2 - T_1)\Delta S}{\Delta x_1\lambda_2 + \Delta x_2\lambda_1} \quad (3-61)$$

r方向(I, J)断面の右から左への発熱量 $q_{ri,j}$, z方向(I, J)断面の上から下への熱流量 $q_{zi,j}$ のうち特殊熱通過による分はユーザーサブルーチンQHEATですでに与えられている。固体セルの温度変化を求めるのに必要な変数をFig. 10に示す。計算手順は次の様に行なわれる。

(1) r方向熱流量の計算

- ① $\Delta x_1 = \Delta r_i$, $\Delta x_2 = \Delta r_{i+1}$ とする。
- ② $M1 = IJF_{i,j}$, $M2 = IJF_{i+1,j}$, $\Delta S = \Delta S_{ri,j}$, $h = h_{ri,j}$ とする。
- ③ 左側セルが固体($M1 < 0$)の時, $\lambda_1 = \lambda_w(-M1)$ とし,
 - (a) 右側セルが固体($M2 < 0$)ならば

$$\lambda_2 = \lambda_w(-M2) \text{ とし (3-61) 式により } q \text{ 計算}$$
 - (b) 右側セルが流体($M2 > 0$)ならば, 乱流温度拡散効果をセル平均値 $r_E \cdot \epsilon_M$ の0.5倍とし(壁近傍)

$$\lambda_2 = \lambda_f(M2) + 0.5 \rho_f(M2) c_f(M2) r_E(M2) \epsilon_{M_{i+1,j}} \quad (3-62)$$

として(3-60)式によりq計算

- ④ 左側セルが流体($M1 > 0$)の時

$$\lambda_1 = \lambda_f(M1) + 0.5 \rho_f(M1) c_f(M1) r_E(M1) \epsilon_{M_{i,j}} \text{ とし,}$$
 - (a) 右側セルが固体($M2 < 0$)ならば $\lambda_2 = \lambda_w(-M2)$ とし(3-61)式によりq計算
 - (b) 右側セルが流体($M2 > 0$)であり, $\alpha_{S_{i,j}} = 0.0$ (すなわち板厚0の壁に仕切られている)ならば(3-62)式により λ_2 を定め(3-60)式によりq計算
- ⑤ $q_{ri,j} \rightarrow q_{ri,j} + q$ とする。
- ②~⑤をすべてのjについてくり返す。(j=1, JMAX) ①以下をすべてのiについてくり返す。(i=1, IM1)

(2) z 方向熱流量の計算

① $\Delta x_1 = \Delta z_j$, $\Delta x_2 = \Delta z_{j+1}$

② $M1 = IJF_{i,j}$, $M2 = IJF_{i,j+1}$, $\Delta S = \Delta S_{zi}$, $h = h_{zi,j}$

③ if $M1 < 0$, then $\lambda_1 = \lambda_w(-M1)$

(a) if $M2 < 0$, then $\lambda_2 = \lambda_w(-M2)$ and compute q by (3-61)

(b) if $M2 > 0$, then

$$\lambda_2 = \lambda_f(M2) + 0.5 \rho_f(M2) c_f(M2) r_E(M2) \epsilon_{Mi,j+1} \quad (3-63)$$

and compute q by (3-60)

④ if $M1 > 0$, then $\lambda_1 = \lambda_f(M1) + 0.5 \rho_f(M1) c_f(M1) r_E(M1) \epsilon_{Mi,j}$

(a) if $M2 < 0$, then $\lambda_2 = \lambda_w(-M2)$ and compute q by (3-61)

(b) if $M2 > 0$ and $\beta_{Si,j} = 0.0$, then define λ_2 by (3-63)

and compute q by (3-60)

⑤ $q_{zi,j} \rightarrow q_{zi,j} + q$

for $i=1, IMAX$ from ② to ⑤

for $j=1, JM1$ from ① to ⑤

(3) 固体セルの温度変化を次式により求める。

$$\left. \begin{aligned} T_{i,j}^{(n+1)} &= T_{i,j} + \frac{\Delta t \Sigma q}{\rho_w(M) c_f(M) \Delta V_{i,j}} \text{ for all } M = -IJF_{i,j} > 0 \\ \Sigma q &= q_{ri,j} - q_{ri-1,j} + q_{zi,j} - q_{zi,j-1} + q_{si,j} \end{aligned} \right\} (3-64)$$

ここで $q_{Si,j}$ は発熱量でありユーザーサブルーチン QHEAT で定義される。

3.1.1 サブルーチンSETAB

固体セル，ダミーセルの4側面の面積開口率を0にする。周囲のセルは固体またはダミーと仮定され面積開口率は0になっている。ここでは内部の固体およびダミーセルの4側面の面積開口率を0にする。

$IJFi,j \leq 0$ ($2 \leq i \leq IMAX-1$, $2 \leq j \leq JMAX-1$) に対して

$$\text{左側面} \quad \alpha_{Si-1,j} = 0$$

$$\text{右側面} \quad \alpha_{Si,j} = 0$$

$$\text{下側面} \quad \beta_{Si,j-1} = 0$$

$$\text{上側面} \quad \beta_{Si,j} = 0$$

とする。

3.1.2 サブルーチンQPRINT

熱伝導(達)により4側面からセル内に流入する熱流量，対流によりセル内に流入する熱流量，セル内の発熱量およびセル内に蓄積される総熱量をプリント出力する。単位はすべて kcal/SEC である。入力データで ITEMP=1 (温度計算あり) および IQPRI=1 (熱流量プリント指示) の時のみ，プリント出力指定時刻に CALL されて機能する。プリントタイトルは次のように対応している。

I, J	出力 (I, J) セル
R1 (COND)	左側面からの入熱流量 ($q_{ri-1,j}$)
R2 (COND)	右側面からの入熱流量 ($q_{ri,j}$)
Z1 (COND)	下側面からの入熱流量 ($-q_{zi,j-1}$)
Z2 (COND)	上側面からの入熱流量 ($q_{zi,j}$)
DIVERGENCE	対流による入熱流量 ($q_{Di,j}$)
SOURCE	発熱量 ($q_{Si,j}$)
TOTAL	(I, J) セル内での全熱量増分 ($q_{Ti,j}$)

3.1.3 ユーザーサブルーチンSETIJ

各セルの構成物質を定義するサブルーチンであり，デフォルト値に対して変更ヶ所がある時は定義する必要がある。(I, J)セルの構成物質を IJF(I, J) で定義する。IJFのとり得る値は $-3 \leq IJF \leq 3$ の範囲であり次の意味を有する。

- 3 (固体3) ~ -1 (固体1), 0 (ダミー), 1 (流体1) ~ 3 (流体3)
 ダミーセルは断熱および表面で完全スリップが適用される。

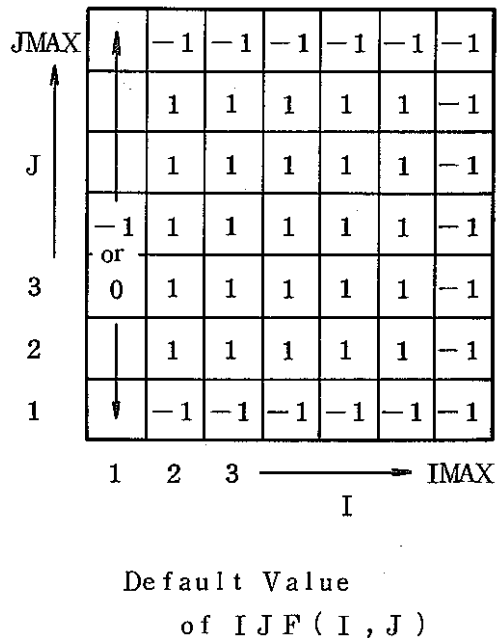
(1) 形式

```

SUBROUTINE SETIJ
COMMON/BL2/IJF(30,35)
    {
        デフォルト値に対する
        変更ヶ所を定義する。
    }
RETURN
END
    
```

(2) デフォルト値

解析対象領域 ($I=1 \sim I_{MAX}$,
 $J=1 \sim J_{MAX}$) に対して右図に示
 す様に内部セルは流体1, 左側 (I
 $=1$) セルを除く周囲のセルは固体
 1が与えられている。左側セルは
 Cartesian座標系 ($\xi=0$)
 では固体1が, 円筒座標系 ($\xi=1$)
 ではダミーが与えられている。これ
 は軸対象中心線が左側セルの右側に
 設定されているためである。



(3) 定義方法

デフォルト値に対して変更すべきセルの I J F 値を定義して RETURN すれば
 良い。例えば

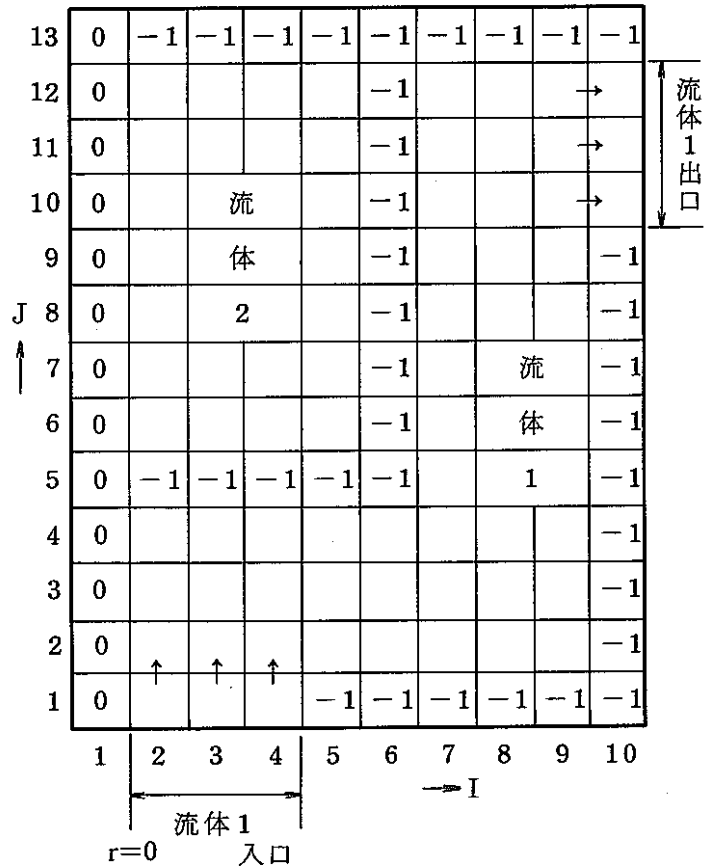
- 流体入口, 出口セル (固体1 → 流体に変更)
- 内部固体壁追加 (流体1 → 固体に変更)
- 流体2, 3の追加

などである。

右図のような解析対象（円筒系）に対して次のように定義すれば良い。

```

SUBROUTINE SETIJ
COMMON/BL2/IJF(30,35)
D0 10 I=2,6
10 IJF(I,5)=-1
D0 20 J=6,12
20 IJF(6,J)=-1
D0 30 I=2,4
30 IJF(I,1)=1
D0 40 J=10,12
40 IJF(10,J)=1
D0 50 J=6,12
D0 50 I=2,5
50 IJF(I,J)=2
RETURN
END
    
```



Model Example

3.1 4 ユーザーサブルーチン ABIN

セル側面の面積開口率，静圧ヘッド損失係数および熱伝達係数と流体セルの流体体積占有率（Porosity）を定義する。デフォルト値に対して変更ヶ所がある場合は定義しなければならない。

(1) 形式

```

SUBROUTINE ABIN
COMMON/BL9/HR(30,35),HZ(30,35)
COMMON/BL12/AL(30,35),BL(30,35),ALF(30,35),BLF(30,35),G(30,35)
    
```

デフォルト値に対する変更ヶ所を定義する。

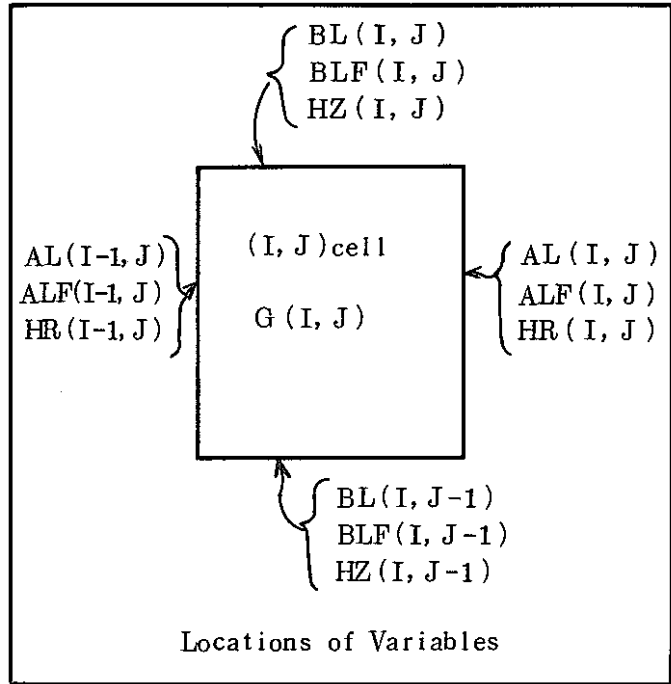
```

RETURN
END
    
```

(2) 定義位置，デフォルト値

各変数の定義位置を右図に示す。解析対象領域（ $I=1 \sim I_{MAX}$, $J=1 \sim J_{MAX}$ ）に対してデフォルト値は次のように与えられている。

- 静圧ヘッド損失係数
 $ALF(I, J) = 0.0,$
 $BLF(I, J) = 0.0$
- 熱伝達係数
 $HR(I, J) = 0.0,$
 $HZ(I, J) = 0.0$
- 流体体積占有率
 $G(I, J) = 1.0$
- 面積開口率
 個体セルおよびダミーセル $\{ IJF(I, J) \leq 0 \}$ の4側面に対し



て $AL(I-1, J) = AL(I, J) = BL(I, J-1) = BL(I, J) = 0.0$

その他の流体セル間境界面に対して $AL(I, J) = BL(I, J) = 1.0$

(3) 定義方法

前章 SET I Jにて各セルの構成物質を定義した解析対象に対して上記のデフォルト値が設定されている。また固体およびダミーセルでは計算アルゴリズムの中に流体体積占有率Gが含まれないので $G = 1$ (デフォルト値) $\rightarrow G = 0.0$ と再定義する必要がない。

熱伝達係数は固体セルと流体セルの境界でのみ意味を有するアルゴリズムを用いているので固体セル間境界、ダミーセル表面で熱伝達係数を定義しても無意味であり計算上無視される。計算エラーは生じない。

面積開口率は流体セル間境界でのみ意味を有する。計算アルゴリズム上は流体セルの境界面(4方向)の面積開口率 > 0.0 の場合、境界面をはさむ相手側セルは同一流体であると判断される。従って固体セルおよびダミーセル表面の面積開口率 > 0.0 と誤定義した場合計算エラーを生じる。

板厚 = 0.0 の壁により流体を仕切る場合は境界面の面積開口率 0.0 を定義すれば良い。流動計算アルゴリズム上では相手側セルは固体と判断されて固体壁面と同一のスリップ条件が適用される。伝熱解析アルゴリズム上では熱伝達面と見なされるので熱伝達係数を定義することができる。板厚および熱容量は無視できる

が熱伝達係数（熱通過率）が無視できない伝熱壁のモデル化等に利用できる。熱伝達係数の単位は $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{C}$ である。

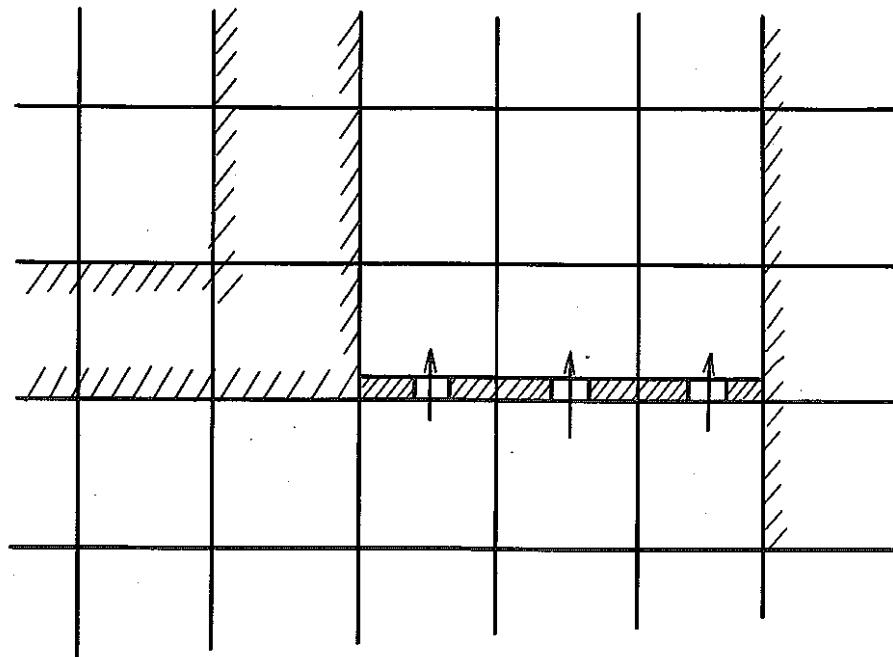
流体入口部，出口部セルは解析対象領域の最外周に位置し，面積開口率 0.0 がデフォルト値として与えられている。これは入口および出口部を非計算領域とし速度境界条件（BCVEL）および温度境界条件（BCTEMP）により入口および出口部の流速，温度を指定するためである。本サブルーチンにおいて入口および出口部の面積開口率 > 0.0 を定義してはならない。誤まって面積開口率 > 0.0 を定義した場合は，エラーとはならないが連続方程式（PUPDTE）の速度修正により速度境界条件が若干変動を受け収束くり返し数が増加することになる。

例えば前節の例題において（ $I=7,9$ ， $J=4$ ）面に整流バッフル板があり面積開口率 0.3 および静圧ヘッドロス $\Delta P = \zeta \frac{\bar{v}^2}{2}$ ， $\zeta=1.2$ を考慮し，さらに（ $I=7,9$ ， $J=5$ ）セルの流体体積占有率 0.8 を考慮する。又固体 1 表面の熱伝達係数 $0.5 \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{C}$ を考慮する。次のように定義すれば良い。

```

SUBROUTINE ABIN
COMMON/BL9/HR(30,35),HZ(30,35)
COMMON/BL12/AL(30,35),BL(30,35),ALF(30,35),BLF(30,35),G(30,35)
D0 10 I=7,9
BL(I,4)=0.3
BLF(I,4)=1.2
10 G(I,5)=0.8
D0 20 J=1,12
D0 20 I=2,9
HR(I,J)=0.5
20 HZ(I,J)=0.5
RETURN
END
    
```

熱伝達係数は壁面でのみ有効となり，他の場合は無視されるのでこのように全側面に対して定義してもかまわない。



3.15 ユーザーサブルーチン I NV

流体の流量時間変化を定義する。単位は体積流量 Q (m^3/sec) である。円筒系では 1 radian セルであるから実際の流量 Q_T に対して $Q = \frac{Q_T}{2\pi}$ を定義する。平面系では深さ 1 m セルであるから実際の流量に対し $Q = \frac{Q_T}{\text{実際の深さ (m)}}$ を定義する。

(1) 形式

```

SUBROUTINE INV(VIN, TIME, TLAG)
DIMENSION VIN(3)
)
RETURN
END

```

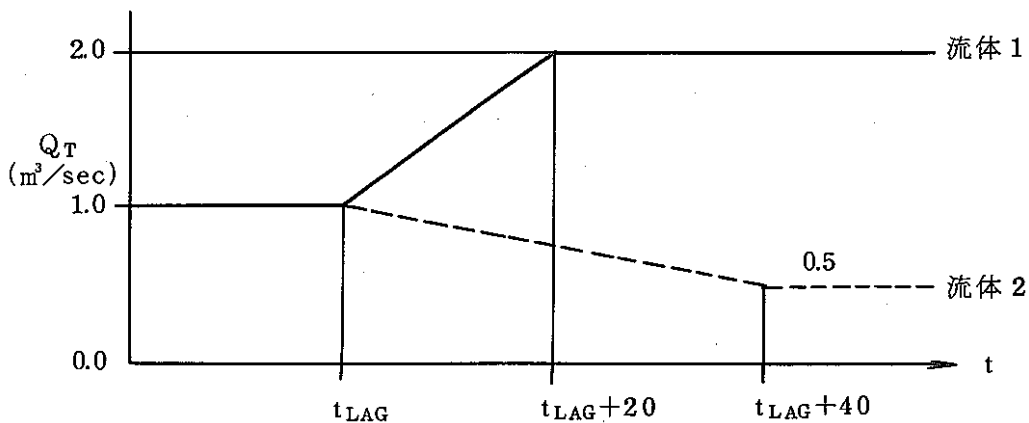
(2) 定義方法

TIME ~ 解析開始後の実時間 ; t (sec)

TLAG ~ 流量あるいは入口温度等が過渡変化を開始する時刻 ; t_{LAG} (sec)

VIN(M) ~ 流体 M の時刻 t における流量, $M = 1 \sim 3$

例) 下図のような流量時間変化をするケース (円筒系)



```

SUBROUTINE INV(VIN,TIME,TLAG)
DIMENSION VIN(3)
T=TIME-TLAG
IF(T) 10,10,20
10 VIN(1)=1.0/6.2832
   VIN(2)=1.0/6.2832
   RETURN
20 IF(T.GT.20.0) GO TO 30
   VIN(1)=(1.0+T/20.0)/6.2832
   GO TO 40
30 VIN(1)=2.0/6.2832
40 IF(T.GT.40.0) GO TO 50
   VIN(2)=(1.0-T/80.0)/6.2832
   RETURN
50 VIN(2)=0.5/6.2832
   RETURN
END

```

なお次節の例で示すように解析対象領域内の閉じた流体系に対しては入口が無いので定義する必要がない。

またデフォルト値は $VIN(M) = 1.0$, $M = 1, 3$ であり、このままで良い時は定義する必要がない。

3.16 ユーザーサブルーチンBCVEL

流体の速度境界条件を定義する。流体入口、出口部の流速を与える。入口、出口部のない閉じた系（例えば自然対流解析など）に対しては定義する必要がない。

(1) 形式

```

SUBROUTINE BCVEL(TIME,TLAG)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL8/SR(30,35),SZ(30),DUMMY(4200)
DIMENSION VIN(3)
(
CALL INV(VIN,TIME,TLAG) .....入口体積流量を
                               参照する場合
)
RETURN
END

```

(2) 定義方法

3.13 節の例題においては

- イ) 流体1の入口流速 $V_{i,1}$ ($i=2, 4$) を与えねばならない。
- ロ) 流体1の出口流速 $U_{9,j}$ ($j=10, 12$) を与えねばならない。

サブルーチン INV を CALL して体積流量を参照すると便利である。次のように定義すれば良い。最外周セル (流体非計算領域) との境界面で定義する。

```

SUBROUTINE BCVEL(TIME,TLAG)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL8/SR(30,35),SZ(30),DUMMY(4200)
DIMENSION VIN(3)
SIN=SZ(2)+SZ(3)+SZ(4) ..... 入口断面積
SOUT=SR(9,10)+SR(9,11)+SR(9,12) ..... 出口断面積
CALL INV(VIN,TIME,TLAG)
VMEAN=VIN(1)/SIN ..... 入口平均流速
UMEAN=VIN(1)/SOUT ..... 出口平均流速
DO 10 I=2,4
10 V(I,1)=VMEAN
DO 20 J=10,12
20 U(9,J)=UMEAN
RETURN
END
    
```

3.17 ユーザーサブルーチン TNUIN

流体セルの乱流による粘性効果増大を表わす乱流動粘性係数 $\epsilon_{M i, j}$ を空間 (I, J), 時間 (t), 流量, 速度場等の関数として定義する。入力データで ITURB = 1 (ϵ_M 入力モデル) および ITNU = 1 (ϵ_M 空間時間等に依存) とした時に定義する。

(1) 形式

```

SUBROUTINE TNUIN(TIME,TLAG)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL7/TNU(30,35),ANU(3),DUMMY(6)
DIMENSION VIN(3)
(
CALL INV(VIN,TIME,TLAG) ..... 入口体積流量を
参照する場合
)
RETURN
END
    
```

(2) 定義方法

3.13節の例題について例えば

流体 2 では $\epsilon_M = 10 \nu_2$ とし
 流体 1 では初期流量 $Q_0 = 1/2\pi \text{ (m}^3/\text{sec)}$ に対して
 { 下方 ($J \leq 4$) で $\epsilon_M = 1000 \nu_1$
 { 上方 ($J \geq 5$) で $\epsilon_M = 100 \nu_1$
 とし, さらに流量 Q の 2 乗に比例する。

とした場合は次のようになる。

```

SUBROUTINE TNUIN(TIME,TLAG)
COMMON/BL7/TNU(30,35),ANU(3),DUMMY(6)
DIMENSION VIN(3)
Q0=1.0/6.2832
CALL INV(VIN,TIME,TLAG)
QX=(VIN(1)/Q0)**2
D0 30 J=5,12
D0 10 I=2,5
10 TNU(I,J)=10.0*ANU(2)
D0 20 I=7,9
20 TNU(I,J)=100.0*ANU(1)*QX
30 CONTINUE
D0 40 J=2,4
D0 40 I=2,9
40 TNU(I,J)=1000.0*ANU(1)*QX
RETURN
END
  
```

3.18 ユーザーサブルーチンTURBBC

流体の $K-\epsilon$ 境界条件を定義するサブルーチンである。入力データで ITURB=2 ($K-\epsilon$ モデル使用) とした時に定義しなければならない。流体入口部セルの $K-\epsilon$ 値を与える。流体出口部での流出方向の $K-\epsilon$ の勾配を 0 とする。

(1) 形式

```

SUBROUTINE TURBBC(TIME,TLAG)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL3/DR(30),DZ(35),RN(30),RG(30),DUM1(65)
COMMON/BL6/AK(30,35),DUM2(1050),E(30,35),DUM3(1050)
COMMON/BL3/SR(30,35),SZ(30),DUM4(4200)
DIMENSION VIN(3)
}
CALL INV(VIN,TIME,TLAG) .....人口体積流量を
}                                     参照する場合

RETURN
END
  
```

(2) 定義方法

流体入口部の形状および局所 Reynolds 数を考慮してより適切なモデルを選択し入口部の $K - \epsilon$ を定義すると良い。

Prandtl の混合長理論¹²⁾から Spalding のモデル⁹⁾に至るまで多種の乱流モデルが提案され、実験検証がなされている。

乱流運動エネルギーヘッド K (m^2/sec^2), および混合距離 l_m (m) を用いて乱流動粘性係数 (乱流による運動量拡散係数) ϵ_M (m^2/sec) は

$$\epsilon_M = \sqrt{K} l_m \quad (3-65)$$

と表わされる。(2-17) 式の $\epsilon_M = C_\mu K^2 / \epsilon$ を用いて ϵ を求めると

$$\epsilon = C_\mu K^{3/2} / l_m \quad (3-66)$$

となる。混合距離 l_m は乱流領域巾 δ に対して

$$l_m / \delta = F_2 \quad (3-67)$$

となる。 F_2 は形状により異なるが平面混合流では 0.07 位となる¹⁰⁾。直管の乱流試験によると直管断面内の平均 K は平均流速 \bar{v} に対して

$$\bar{K} = F_1 \cdot \bar{v}^2 \quad (3-68)$$

と与えられる。 F_1 は発達した乱流域では 0.02 位¹⁰⁾となる。

3.13 節の例題で入口直管部全域 (δ ; 内径 $2r_{N4}$) に発達した乱流が予想される場合次のようになる。

```

SUBROUTINE TURBBC(TIME,TLAC)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL3/DR(30),DZ(35),RN(30),RG(30),DUM1(65)
COMMON/BL6/AK(30,35),DUM2(1050),E(30,35),DUM3(1050)
DATA CM/0.09/
DATA F1/0.02/
DATA F2/0.07/
VB=V(2,1)
AKIN=F1*VB*VB
ALM=F2*2.0*RN(4)
EIN=CM*AKIN**1.5/ALM
DØ 10 I=2,4
AK(I,2)=AKIN
10 E(I,2)=EIN
DØ 20 J=10,12
AK(10,J)=AK(9,J)
20 E(10,J)=E(9,J)
RETURN
END

```

K, ε はセル中心点で定義されているため入口条件は最外周入口セル（流体非計算）に連続する流体セル（ここでは $j=2, i=2, 4$ ）で与える必要がある。

3.19 ユーザーサブルーチン BCTEMP

系の温度境界条件を定義するサブルーチンである。入力データ ITEMP=1（温度計算あり）の場合に定義しなければならない。流体入口部セルの温度を定義し、流体出口部での流出方向温度勾配を 0 にすれば良い。特定セル温度を指定する規定温度条件もここで定義する。

(1) 形式

```
SUBROUTINE BCTEMP(TIME, TLAG)
COMMON/BL5/T(30,35), DUMMY(1050)
)
RETURN
END
```

(2) 定義方法

例えば 3.13 節の例題で流体 1 入口温度が初期温度 500℃, $t = t_{LAG}$ から $-10^\circ\text{C}/\text{sec}$ で 20 秒間温度低下し以後 300℃ 一定となる場合は次のようになる。

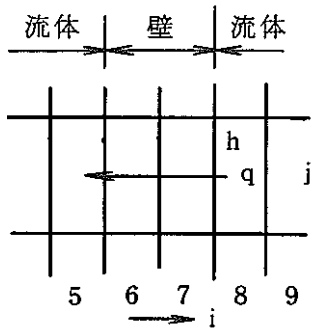
```
SUBROUTINE BCTEMP(TIME, TLAG)
COMMON/BL5/T(30,35), DUMMY(1050)
SEC=TIME-TLAG
IF(SEC) 10,10,20
10 TIN=500.
   GO TO 40
20 IF(SEC.GT.20.) GO TO 30
   TIN=500.-10.*SEC
   GO TO 40
30 TIN=300.
40 DO 50 I=2,4
50 T(I,1)=TIN .....入口流体セル温度
   DO 60 J=10,12
60 T(10,J)=T(9,J) .....出口流体セル温度
RETURN
END
```

最外周流体セル（入口，出口）の温度を与える。

3.20 ユーザーサブルーチン QHEAT

特殊熱通過および発熱量を定義するユーザーサブルーチンである。入力データ ITEMP=1 (温度計算あり) および IQHEAT=1 (特殊熱通過, 発熱量あり) の場合に定義しなければならない。固体 ↔ 流体間の熱伝達や板厚 0 の熱伝達壁はサブルーチン ABIN の中で熱伝達係数を定義すれば良い。ここで定義する特殊熱通過は次のような場合である。

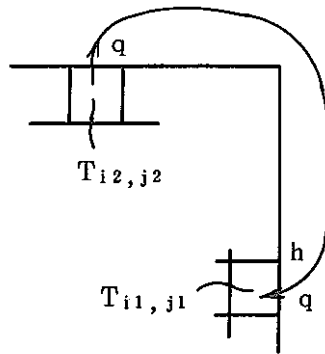
- 1) 固体壁の温度変化計算を省略 (IQWALL=0) して固体壁両側の流体間温度差による熱通過を定義したい場合 (下図 a)
- 2) ヒートパイプ, ふく射などにより遠く離れた面同士の熱通過を考慮したい場合 (下図 b)
- 3) 解析体系外部との熱通過を考慮したい場合 (下図 c)



$$q = h(T_{8,j} - T_{5,j}) \Delta S_{r7,j}$$

$$q_{r7,j} = q_{r5,j} = q$$

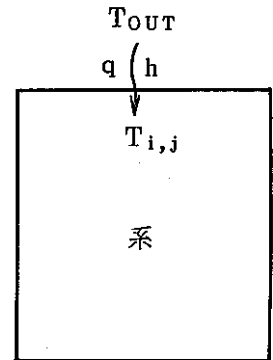
(a)



$$q = h(T_{i2,j2} - T_{i1,j1}) \Delta S_{r i1,j1}$$

$$q_{r i1,j1} = -q_{z i2,j2} = q$$

(b)



$$q = h(T_{OUT} - T_{i,j}) \Delta S_{z i}$$

$$q_{z i,j} = q$$

(c)

(1) 形式

```

SUBROUTINE QHEAT(TIME, TLAG, TUNI)
COMMON/BL5/T(30,35), DUMMY1(1050)
COMMON/BL8/SR(30,35), SZ(30), DUMMY2(3150), DV(30,35)
COMMON/HEAT/QR(30,35), QZ(30,35), QS(30,35), DUMMY3(2100)
)
RETURN
END
    
```

(2) 定義方法

熱通過量については熱通過率 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$) \times 面積 (m^2) \times 温度差 ($^\circ\text{C}$)
 $=$ (kcal/sec) の形で定義する。発熱量については発熱密度 ($\text{kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{sec}$) \times
 セル体積 (m^3) の形か又はセル内全発熱量 (kcal/sec) の形で定義する。熱通過
 方向は r については中心 (左) 向き, z については下向きを正としている。

3.1.3 節の例題において流体 1, 2 を仕切る固体 1 の壁 ($I=6, J=6, 12$ の部分) を通過する熱通過率を 0.5 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$) として両隣のセル間温度差 ($T_{7,j} - T_{5,j}$) による熱通過量, および ($I=7, 9, J=2$) セルで発熱密度 1000 ($\text{kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$) を考慮したい場合は次のようになる。

```

SUBROUTINE QHEAT(TIME, TLAG, TUNI)
COMMON/BL5/T(30,35), DUM1(1050)
COMMON/BL8/SR(30,35), SZ(30), DUM2(3150), DV(30,35)
COMMON/HEAT/QR(30,35), QZ(30,35), QS(30,35), DUM3(2100)
DO 10 J=6,12
FLUX=0.5*SR(6,J)*(T(7,J)-T(5,J))
QR(6,J)=FLUX
10 QR(5,J)=FLUX
DO 20 I=7,9
20 QS(I,2)=1000.0*DV(I,2)
RETURN
END

```

3.2.1 ユーザーサブルーチン OUTTMP

流体出口部の流出体積平均温度, あるいはユーザーが独自に定義したい温度 { 特定断面の平均温度, 特定断面の温度分布を (線形成分) + (ピーク成分) に分解した時の成分など } をプリント出力する時に用いる。入力データで $ITEMP=1$ (温度計算あり) および $IOUTM=1$ (出口平均温度等の定義あり) とした場合に定義しなければならない。

(1) 形式

```

SUBROUTINE OUTTMP
COMMON/BL1/U(30,35), V(30,35)
COMMON/BL3/DR(30), DZ(35), DUMMY1(125)
COMMON/BL5/T(30,35), DUMMY2(1050)
COMMON/BL8/SR(30,35), SZ(30), DUMMY3(4200)

RETURN
END

```

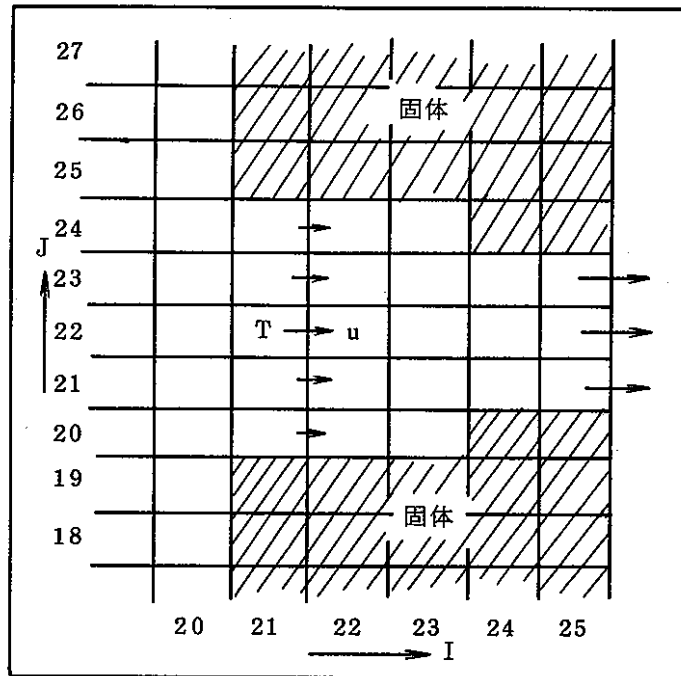
(2) 定義方法

例えば下図のような解析体系の一部（ノズル部）においてノズル入口部メッシュ（ $I=21, J=20, 24$ ）の断面積平均温度 $TB1$ ，およびノズルに流入する流人体積平均温度 $TB2$ を定義しプリント出力する場合次のようになる。

$$TB1 = \frac{\int T dS}{\int dS} = \frac{\int T \cdot r \cdot dz}{\int r \cdot dz} = \frac{\int T dz}{\int dz}$$

$$TB2 = \frac{\int T dV}{\int dV} = \frac{\int T \cdot u \cdot r \cdot dz}{\int u \cdot r \cdot dz} = \frac{\int T \cdot u \cdot dz}{\int u \cdot dz}$$

を用いる。



```

SUBROUTINE OUTTMP
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL3/DR(30),DZ(35),DUM1(125)
COMMON/BL5/T(30,35),DUM2(30,35)
S=0.0
TS=0.0
VØL=0.0
TVØL=0.0
DO 10 J=20,24
S=S+DZ(J)
TS=TS+T(21,J)*DZ(J)
VØL=VØL+U(21,J)*DZ(J)
10 TVØL=TVØL+T(21,J)*U(21,J)*DZ(J)
TB1=TS/S
TB2=TVØL/VØL
WRITE(6,20) TB1,TB2
20 FORMAT(1H ,10X,'TB1=',E12.5,10X,'TB2=',E12.5)
RETURN
END

```

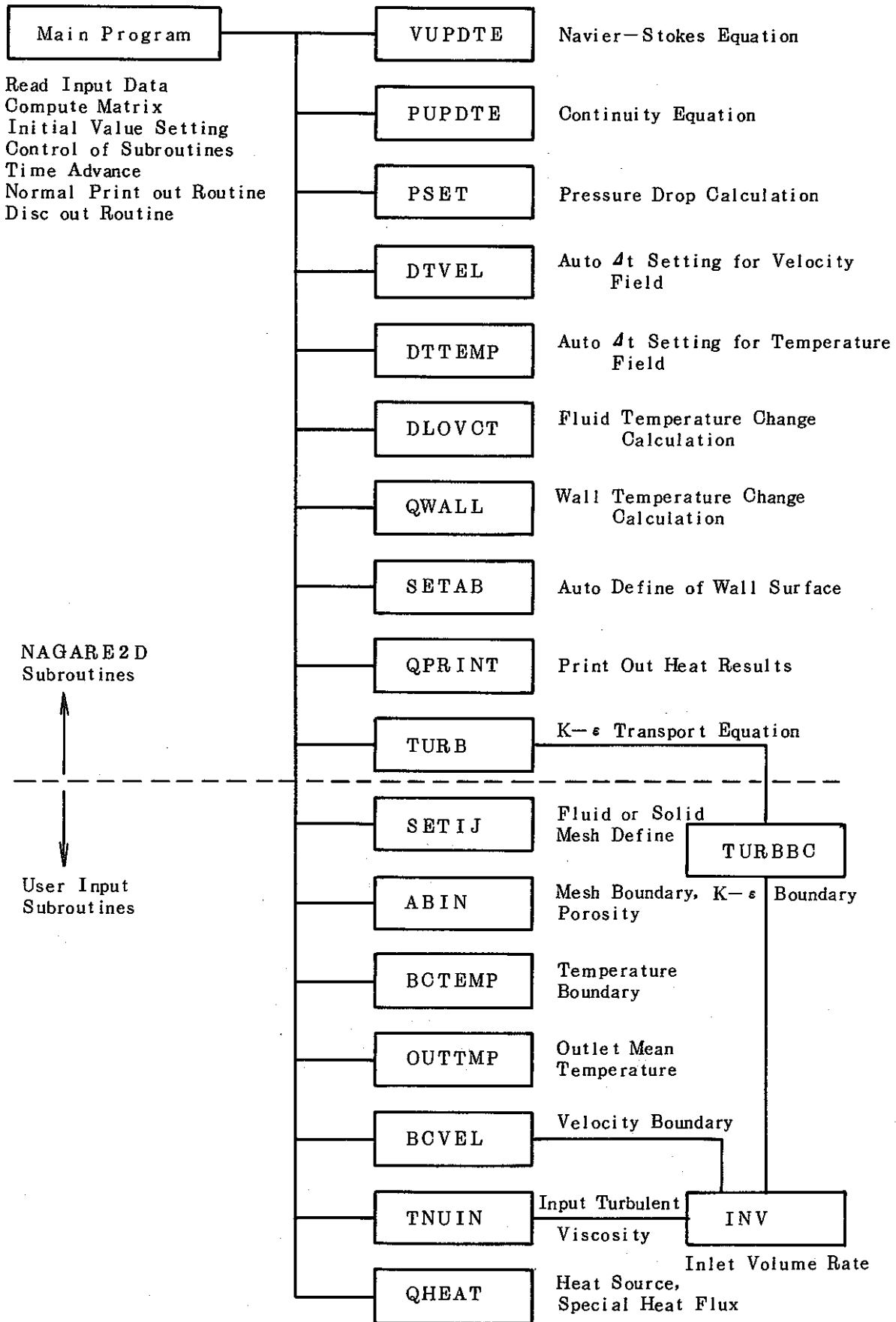


Fig. 1 Construction of NAGARE-2D

List. 1 Code Availability and Version up history of NAGARE-2D

```

C*****
C* NAGARE2D * 2DIMENSION FLOW AND HEAT ANALYSIS COMPUTER PROGRAM *
C* VERSION9 * DEVELOPPED BY I.FURUHASHI FROM 1982/6 TO 1983/01 *
C* 83/01/25 * ORIGINAL REFERENTIAL CODE NAGARE3D BY S.NORIMATSU *
C*****
C* CODE AVAILABILITY *****
C*****
C* 1. SINGLE PHASE GAS OR LIQUID FLOW AND HEAT TRANSFER *
C* 2. LAMINAR AND TURBULENT FLOW *
C* 3. HEAT CONVECTION AND CONDUCTION IN FLUID *
C* 4. HEAT TRANSFER OF FLUID TO SOLID WALL *
C* 5. HEAT CONDUCTION IN SOLID WALL *
C* 6. HEAT GENERATION SOURCE *
C* 7. K-E MODEL * 2-EQUATION TURBULENCE TRANSPORT MODEL *
C* 8. BUOYANCY EFFECT * BOUSSINESQ APPROXIMATION *
C* 9. STATIC PRESSURE HEAD LOSS OF NARROW OR EXPANTION FLOW *
C* 10. CYLINDRICAL(R,Z) OR CARTESIAN(X,Y) CO-ORDINATE SYSTEM *
C* 11. FLUID1,2,3 AND SOLID1,2,3 AVAILABLE *
C* 12. FLUID(GAS OR LIQUID)--WALL--FLUID HEAT EXCHANGER *
C* 13. GENERAL DIFFUSION ANALYSYS (TEMPERATURE OR OTHER) *
C* 14. STEADY OR UNSTEADY FLOW AND HEAT ANALYSIS *
C*****
C* CODE VERSION UP HISTORY ***** YEAR/MONTH/DATE ***
C*****
C* 1. OPTIMIZATIN 1 PERFORMED FOR FAST COMPUTER RESPONSE 1982/6/21*
C* MODIFICATION 1 PERFORMED FOR EASY INPUT DATA 6/28*
C* 2. OPTION ADDED - HEAT CONDUCTIVE WALL ,MESH OPEN RATE(AL,BL) 7/10*
C* 3. MODIFICATION 2 PERFORMED FOR AUTO DUMMY VELOCITY SETTING, 8/20*
C* AND WALL BOUNDARY SET AUTOMATICLY 9/01*
C* 4. OPTION ADDED - STATIC HEAD LOSS COEFFICIENT - ALF,BLF 11/11*
C* 5. OPTION ADDED - VOLUME OCCUPANCY RATE ( OR POROSITY) 11/15*
C* 6. MODIFICATION 3,4 - MORE ACCURATE MODEL FOR MOMENTUM, PRES. 11/20*
C* OPTIMIZATION 2 PERFORMED FOR NAVIER STOKES EQUATION *
C* 7. MODIFICATION 5 - MORE FLEXIBLE MODEL FOR WALL HEAT - HR,HZ 12/01*
C* AND HEAT FLUX PRINT OPTION ,SLIP COEFFI. OPTION ADDED 12/10*
C* 8. MODIFICATION 6 - MORE ACCURATE MODEL FOR DIV(L0*V*C*T) 12/15*
C* MODIFICATION 7 - MORE ACCURATE K-E TRANSPORT EQUATION - 12/20*
C* OPTIMIZATION 3 PERFORMED FOR WALL HEAT AND K-E TRANSPORT *
C* 9. MODIFICATION 8 - UPWIND FACTOR FOR CONVECTION TERM 1983/1/25*
C*****

```

List. 2 Outlines of Subroutines and Namelist of Input data

```

C*****
C** MAIN PROGRAM ** INPUT,OUTPUT,AND CONTROL OF SUBROUTINES *
C*****
C* SUBROUTINE * COMMON BLOCK * INFORMATION *
C*****
C* VUPDTE * 1,1D,2,3,5,7,* SOLVE NAVIER-STOKES EQUATION *
C*-----* 12,PRS,GRAV *----- AND UPDATE VELOCITY FIELD ----- *
C*****
C* PUPDTE-----* 1,2,4,8,PRS * SOLVE CONTINUITY EQUATION & UPDATE U,P *
C*****
C* PSET-----* 1,12,PRS----- * STATIC HEAD LOSS COMPUTE & PT SETTING *
C*****
C* DTVEL-----* 1,2,3,12----- * AUTO DELT SETTING FOR VELOCITY FIELD *
C*****
C* DTTEMP-----* 1,2,7,8,12---- * AUTO DELT SETTING FOR TEMPERAT. FIELD *
C*****
C* DLQVCT-----* 1,2,3,5,7,8,-- * DIV(L0*V*C*T),GRAD(T) CALCULATION *
C* * * * * 12,HEAT,HC0N * AND SOLVE TEMPERATURE CHANGE IN FLUID *
C*****
C* TURB * 1,2,3,6,7,12 * SOLVE K-E TURBULENT TRANSPORT EQUATION *
C*****
C* QWALL * 2,3,5,7,8,9, * HEAT FLUX & TEMPERATURE CHANGE COMPUTE *
C*-----* HEAT,HC0N----- *----- FOR CONDUCTIVE WALL----- *
C*****
C* SETAB-----* 2,12----- * WALL BOUNDARY DEFINE AUTOMATICALLY----- *
C*****
C* QPRINT-----* 10,HEAT----- * PRINT HEAT(FLUX,SOURCE,DIV(L0*V*C*T)) *
C*****
C* USER INPUT SUBROUTINES ARE FOLLOWINGS *****
C*****
C* NAME * COMMON * INFORMATION (INPUT FLAG)*
C*****
C* SETIJ * 2 * MATERIAL IDENTIFICATION DEFINE (BY CASE)*
C* ABIN * 9,12 * OPEN RATE,HEAD LOSS COEFF,VOLUME RATE (BY CASE)*
C* * * * * , FLUID TO WALL HEAT CONVECTION COEFF. *
C* BCVEL * 1,8 * VELOCITY BOUNDARY DEFINE (BY CASE)*
C* INV * * INLET VOLUME RATE HISTORY DEFINE (BY CASE)*
C* TNUIN * 1,7 * TURB. VISCOSITY EPM(I,J,TIME) (ITURB,ITNU=1)*
C* TURBBC * 1,3,6,8 * TURBULENCE K-E BOUNDARY DEFINE (ITURB=2)*
C* BCTEMP * 5 * TEMPERATURE HISTORY AT INLET DEFINE (ITEMP=1)*
C* QUTTMP * 1,3,5,8 * OUTLET MEAN TEMP DEFINE (ITEMP,IQUTM=1)*
C* QHEAT * 5,8,HEAT * HEAT SOURCE ,SPECIAL HEAT FLUX (ITEMP,IQHEAT=1)*
C*****
NAMelist/DAta/IBAR,JBAR,DELT,EPsi,GR,GZ,DELR,DELZ
1 ,OMG,ITERL,CWPRT,TPRT,TDSK,UPVEL
2 ,IRSRT,CWDSK,IQWALL,IQHEAT,IDTPRI
3 ,ALPH,WTK,WAL0,WC,TK,AL0,C,SLIP
4 ,TUNI,NRESRT,EPM,ERATE,ITPRI
5 ,ANU,IDATA,IQPRI,IQUTM,MODE
6 ,ABETA,NWRITE,IW,JW,ICYL,ITNU
7 ,IDSK,ITEMP,IDELT,ITURB,TEMPD,TIMED,TLAG

```

List. 3 Input data Information

```

C*****
C** INPUT DATA INFORMATION ** NO NUMBERING FORMATTED ** NAMELIST/DATA/*
C*****
C* NAME *** INFORMATION *****
C*****
C IBAR      X(R) DIRECTION MESH NUMBER EXCEPT OUTER DUMMY MESH  MAX.28
C JBAR      Y(Z) DIRECTION                                     MAX.33
C MODE      SCANNING MODE FOR (U,V,P) MODIFICATION BY CONTINUITY EQUAT.
C DELT      INITIAL TIME INCREMENT (SEC)
C EPSI      (DISAGREE OF CONTINUITY)/DELV ( EPSI, THEN NEXT TIME STEP
C GR        X(R) DIRECTION ACCELLATION COEFFICIENT
C GZ        Y(Z) DIRECTION
C SLIP      SLIP COEFFI. AT WALL SURFACE 0.0(NON SLIP) TO 1.0(SLIP)
C UPVEL     UPWIND FACTOR FOR NAVIER-STOKES CONVECTION TERM
C           0.0(CENTRAL DIFFERENTIAL) TO 1.0(FULL UPWIND DIFFERENTIAL)
C DELR(30)  X(R) DIRECTION MESH WIDTH (METER)
C DELZ(35)  Y(Z) DIRECTION MESH WIDTH
C OMG       SUCCESSION OVER RELAXATION CONSTANT FOR CONTINUITY EQUATION
C ITERL     MAXIMUM ITERATION NUMBER FOR CONTINUITY EQUATION
C CWPRT     TOTAL PRINT OUT STEPS (INTEGER)          MAX.50
C CWDSK     TOTAL DISC OUT STEPS (INTEGER)          MAX.50
C TPRT(50)  PRINT OUT TIME (SEC)
C TDSK(50)  DISC OUT TIME (SEC)
C IRSRT     RESTART FLAG  IRSRT=0(NO RESTART) , IRSRT=1(RESTART CALCUL.)
C NRESRT    RECORD NUMBER FOR RESTART CALCULATION
C IQWALL    WALL HEAT FLUX FLAG  =0(ADIABATIC WALL), =1(CONDUCTIVE WALL)
C IQHEAT    HEAT SOURCE , SPECIAL HEAT FLUX DEFINE FLAG =0(NO),=1(YES)
C ALPH      RELAXATION CONSTANT FOR NAVIER-STOKES MOMENTUM EQUATION
C TK(3)     THERMAL CONDUCTIVITY OF FLUID (KCAL/METER/SEC/DEG.C)
C ALD(3)    DENSITY OF FLUID (KG/METER**3)
C C(3)      SPECIFIC HEAT OF FLUID (KCAL/KG/DEG.C)
C ANU(3)    KINETIC VISCOSITY OF FLUID (METER**2/SEC)
C EPM(3)    (EDDY DIFFUSIVITY OF MOMENTUM)/ANU -- TURBULENT EFFECT
C ERATE(3)  EPH/EPM  EPH(EDDY DIFFUSIVITY OF TEMPERATURE)
C ABETA(3)  MEAN BODY EXPANSION COEFFICIENT (1/DEG.C)
C WTK(3)    THERMAL CONDUCTIVITY OF SOLID WALL
C WALD(3)   DENSITY OF SOLID WALL
C WC(3)     SPECIFIC HEAT OF SOLID WALL
C ICYL      CO-ORDINATE FLAG  =0(CARTESIAN X,Y) , =1(CYLINDRICAL R,Z )
C ITURB     TURBULENT MODEL FLAG =1(EPM,ERATE), =2(K-E MODEL)
C ITNU      EPM FLAG =0(EPM CONSTANT), =1(TIME,POSITION DEPEND EPM)
C ITEMP     HEAT ANALYSIS FLAG =0(NO HEAT CALCUL), =1(HEAT CALCULATION)
C IDELT     DELT OPTIMIZATION FLAG =0(NO OPTIMIZATION ,DELT INPUT)
C           =N( AUTO DELT , ONCE IN N CYCLES )
C IDSK      DISC OUT FLAG =0(DISC OUT SAME REGION, AND UPDATE FILE )
C           =1(DISC OUT NEXT REGION, NEXT RECORD NUMBER)
C TUNI      INITIAL CONSTANT TEMPERATURE (DEG.C)
C TLAG      TIME LAG FOR THERMAL TRANSIENT START (SEC)
C ITPRI     ITERATION RESULT PRINT FLAG =0(NO PRINT EXCEPT FINAL BLOCK)
C           1BLOCK=500CYCLE, =1(PRINT OUT ALL BLOCKS)
C NWRITE    PRINT OUT FLAG FOR VELOCITY AND TEMPERATURE RESULTS
C           =0(ALL MESH PRINT), =1(SELECTED I,J MESH PRINT)
C IW(30)    PRINT OUT I MESH NUMBER
C JW(35)    PRINT OUT J MESH NUMBER
C IQPRI     PRINT OUT HEAT FLUX FLAG =0(NO PRINT), =1(PRINT)
C IOUTM     OUTLET MEAN TEMP DEFINE FLAG =0(NO DEFINE), =1(DEFINE)
C IDATA     DATA CHECK FLAG =0(CALCULATION), =1(DATA CHECK ONLY)
C IDTPRI    AUTO DELT PRINT FLAG =0(NO PRINT), =1(PRINT)
C*****

```

Table.1 Explanation of Input Data Variable and Sign used in this Report

変数名	記号	内容説明
IBAR		r (X) 方向メッシュ数 (両端を除く)。最大 28
JBAR		z (Y) 方向メッシュ数 (両端を除く)。最大 33
MODE		連続方程式の計算モード。
DELT	Δt	初期時間増分 (sec)。
EPSI	ϵ_{CON}	連続方程式の収束判定条件。
GR	g_r	r (X) 方向重力加速度 (m/sec ²)。
GZ	g_z	z (Y) 方向重力加速度 (m/sec ²)。
SLIP	S_ϵ	壁面スリップ係数。0.0 (Non Slip) $\leq S_\epsilon \leq 1.0$ (Full Slip)
DELR (I)	Δr_i	r (X) 方向メッシュ巾 (m)。I = 1 ~ IMAX, IMAX = IBAR + 2
DELZ (J)	Δz_j	z (Y) 方向メッシュ巾 (m)。J = 1 ~ JMAX, JMAX = JBAR + 2
OMG	ω	連続方程式 (S.O.R 法) の過緩和定数。1.0 $\leq \omega \leq 2.0$
ITERL		連続方程式の最大くり返し数。
CWPRT		プリント出力回数。最大 50
CWDSK		ディスク出力回数。最大 50
TPRT (K)		プリント出力時刻 (sec)。
TDSK (K)		ディスク出力時刻 (sec)。
IRSRT		リスタート計算の判定。= 0 (No Restart), = 1 (Restart)
NRESRT		リスタート計算の初期値とする計算結果レコード番号。
IQWALL		壁面熱伝達の判定。= 0 (熱伝達なし), = 1 (熱伝達あり)
IQHEAT		発熱源, 特殊熱通過の判定。= 0 (なし), = 1 (あり)
ALPH	α_p	Navier - Stokes 方程式の対流項に乗ずる緩和定数。 $\alpha_p \leq 1.0$
TK (M)	$\lambda_f (M)$	流体 (M) の熱伝導率 (kcal / m · sec · °C)。M = 1 ~ 3
ALO (M)	$\rho_f (M)$	流体 (M) の密度 (kg / m ³)。M = 1 ~ 3
C (M)	$C_f (M)$	流体 (M) の比熱 (kcal / kg · °C)。M = 1 ~ 3
ANU (M)	$\nu (M)$	流体 (M) の動粘性係数 (m ² / sec)。M = 1 ~ 3
EPM (M)	$\epsilon_M (M) / \nu (M)$	流体 (M) の乱流動粘性係数 $\epsilon_M (M) / \nu (M)$ M = 1 ~ 3

変数名	記号	内容説明
ERATE(M)	$r_E(M)$	流体(M)の乱流温度拡散係数 $\epsilon_H(M)/\epsilon_M(M)$ M=1~3
ABETA(M)	$\beta(M)$	流体(M)の体膨張係数(1/°C)。 M=1~3
WTK(M)	$\lambda_W(M)$	固体(M)の熱伝導率(kcal/m・sec・°C)。 M=1~3
WALO(M)	$\rho_W(M)$	固体(M)の密度(kg/m ³)。 M=1~3
WC(M)	$c_W(M)$	固体(M)の比熱(kcal/kg・°C)。 M=1~3
ICOYL	ξ	座標系の選択。 = 0 (X, Y平面系), = 1 (r, z円筒系)
IBUOY		浮力効果の判定。 = 0 (浮力なし), = 1 (浮力あり)
ITURB		乱流モデルの判定。 = 1 (ϵ_M 入力), = 2 (K- ϵ モデル)
ITNU		ϵ_M 入力方法の判定。 = 0 (ϵ_M 定数), = 1 (ϵ_M 空間時間依存)
ITEMP		温度計算の判定。 = 0 (温度計算なし), = 1 (温度計算あり)
IDELT		Δt 設定方法の判定。 = 0 (Δt 一定), > 0 (Δt 自動設定)
IDSK		ディスク出力形式の判定。 = 0 (最終出力のみ新領域), = 1 (全出力とも)
TUNI	T_0	系の初期温度(°C)。
TLAG	t_{LAG}	過渡事象(流量, 温度変化)の開始時刻(sec)。
ITPRI		連続方程式のくり返し数の出力判定。 = 0 (最終ブロックのみ出力), = 1 (全ブロック出力)
NWRITE		プリント出力選択判定。 = 0 (全メッシュ出力), = 1 (指定メッシュのみ)
IW(I)		NWRITE=1の時。 r (X)方向の出力メッシュ番号。
JW(J)		NWRITE=1の時。 Z (Y)方向の出力メッシュ番号。
IQPRI		熱流束プリント出力判定。 = 0 (出力しない), = 1 (出力する)
IOUTM		流体出口平均温度の判定。 = 0 (定義しない), = 1 (定義する)
IDATA		計算実行の判定。 = 0 (計算実行), = 1 (入力データチェックプリントのみ)

変数名	記号	内容説明
UPVEL	β_M	対流成分（運動量）の風上差分係数 { 0.0（中央差分） ～ 1.0（完全風上差分） }
IDTPRI		Δt 自動設定値のプリント出力判定。 = 0 (No PRINT), = 1 (PRINT)

Table.2 Explanation of Main Variable and Sign used in this Report

変数名	記号	内容説明
U(I, J)	$u_{i,j}^{(n+1)}$	r(X)方向(I, J)面の平均r(X)方向流速。 (m/sec) 時刻 t + Δt
UN(I, J)	$u_{i,j}^{(n)}$	r(X)方向(I, J)面の平均r(X)方向流速。 (m/sec) 時刻 t
V(I, J)	$v_{i,j}^{(n+1)}$	z(Y)方向(I, J)面の平均z(Y)方向流速。 (m/sec) 時刻 t + Δt
VN(I, J)	$v_{i,j}^{(n)}$	z(Y)方向(I, J)面の平均z(Y)方向流速。 (m/sec) 時刻 t
IJFLG(I, J)	IJFi,j	(I, J)セルの構成物質。-M(固体M), 0(ダミー), M(流体M)
RR(I)	r_{Ni}	r(X)方向(I, J)面の半径。(m)
RS(I)	r_{Gi}	(I, J)セル重心の半径。(m)
P(I, J)	PDi,j	(I, J)セルの平均ダミー静圧ヘッド。(m ² /sec ²) 相対値。
PT(I, J)	PTi,j	(I, J)セルの平均静圧ヘッド。(m ² /sec ²)相対値。
T(I, J)	$T_{i,j}^{(n)}$	(I, J)セルの平均温度。(℃) 時刻 t
TN(I, J)	$T_{i,j}^{(n+1)}$	" 時刻 t + Δt
AK(I, J)	$K_{i,j}^{(n)}$	(I, J)セルの平均乱流運動エネルギーヘッド。 (m ² /sec ²) 時刻 t
AKN(I, J)	$K_{i,j}^{(n+1)}$	(I, J)セルの平均乱流運動エネルギーヘッド。 (m ² /sec ²) 時刻 t + Δt
E(I, J)	$\epsilon_{i,j}^{(n)}$	(I, J)セルの平均運動エネルギーヘッド散逸率。 (m ² /sec ³) 時刻 t
EN(I, J)	$\epsilon_{i,j}^{(n+1)}$	(I, J)セルの平均運動エネルギーヘッド散逸率。 (m ² /sec ³) 時刻 t + Δt
TNU(I, J)	$\epsilon_{Mi,j}$	(I, J)セルの平均乱流動粘性係数。(m ² /sec)

変数名	記号	内容説明
SS1(I, J)	$\Delta S_{r,i,j}$	r (X) 方向 (I, J) 面の面積。 (m^2)
SS2(I)	$\Delta S_{z,i}$	z (Y) 方向 (I, J) 面の面積。 (m^2)
AKF(I, J)	$AKF_{i,j}$	(I, J) セルの (拡散体積) \leftrightarrow (離散化変数) の変換係数。 (m)
DELV(I, J)	$\Delta V_{i,j}$	(I, J) セルの体積。 (m^3)
AL(I, J)	$\alpha_{s,i,j}$	r (X) 方向 (I, J) 面の面積開口率。
BL(I, J)	$\beta_{s,i,j}$	z (Y) 方向 (I, J) 面の面積開口率。
ALF(I, J)	$f_{r,i,j}$	r (X) 方向 (I, J) 面を通過する際の静圧ヘッド損失係数。
BLF(I, J)	$f_{z,i,j}$	z (Y) 方向 (I, J) 面を通過する際の静圧ヘッド損失係数。
G(I, J)	$\gamma_{i,j}$	(I, J) セルの流体体積占有率。
HR(I, J)	$hr_{i,j}$	r (X) 方向 (I, J) 面の熱伝達係数。 ($kcal/m^2 \cdot sec \cdot ^\circ C$)
HZ(I, J)	$hz_{i,j}$	z (Y) 方向 (I, J) 面の熱伝達係数。 ($kcal/m^2 \cdot sec \cdot ^\circ C$)
QR(I, J)	$q_{r,i,j}$	熱伝導および熱伝達により r (X) 方向 (I, J) 面を通過する熱流量 ($kcal/sec$)
QZ(I, J)	$q_{z,i,j}$	熱伝導および熱伝達により z (Y) 方向 (I, J) 面を通過する熱流量 ($kcal/sec$)
QS(I, J)	$q_{s,i,j}$	(I, J) セル内の発熱量。 ($kcal/sec$)
DIV(I, J)	$q_{D,i,j}$	対流により (I, J) セル内に流入する熱流量 ($kcal/sec$)
QRES(I, J)	$q_{T,i,j}$	(I, J) セル内の全蓄積熱量 ($kcal/sec$)

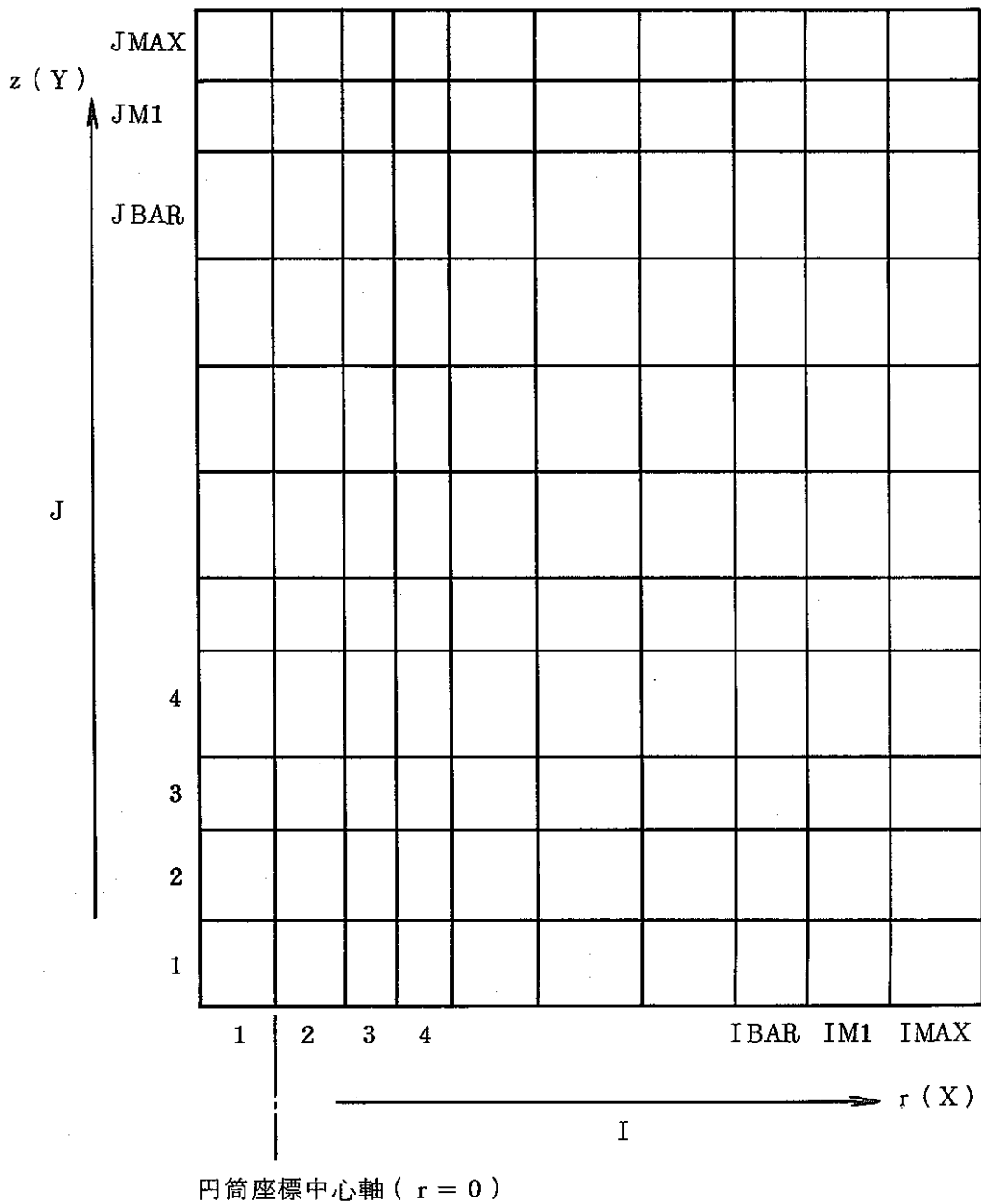


Fig. 2 Mesh Numbering

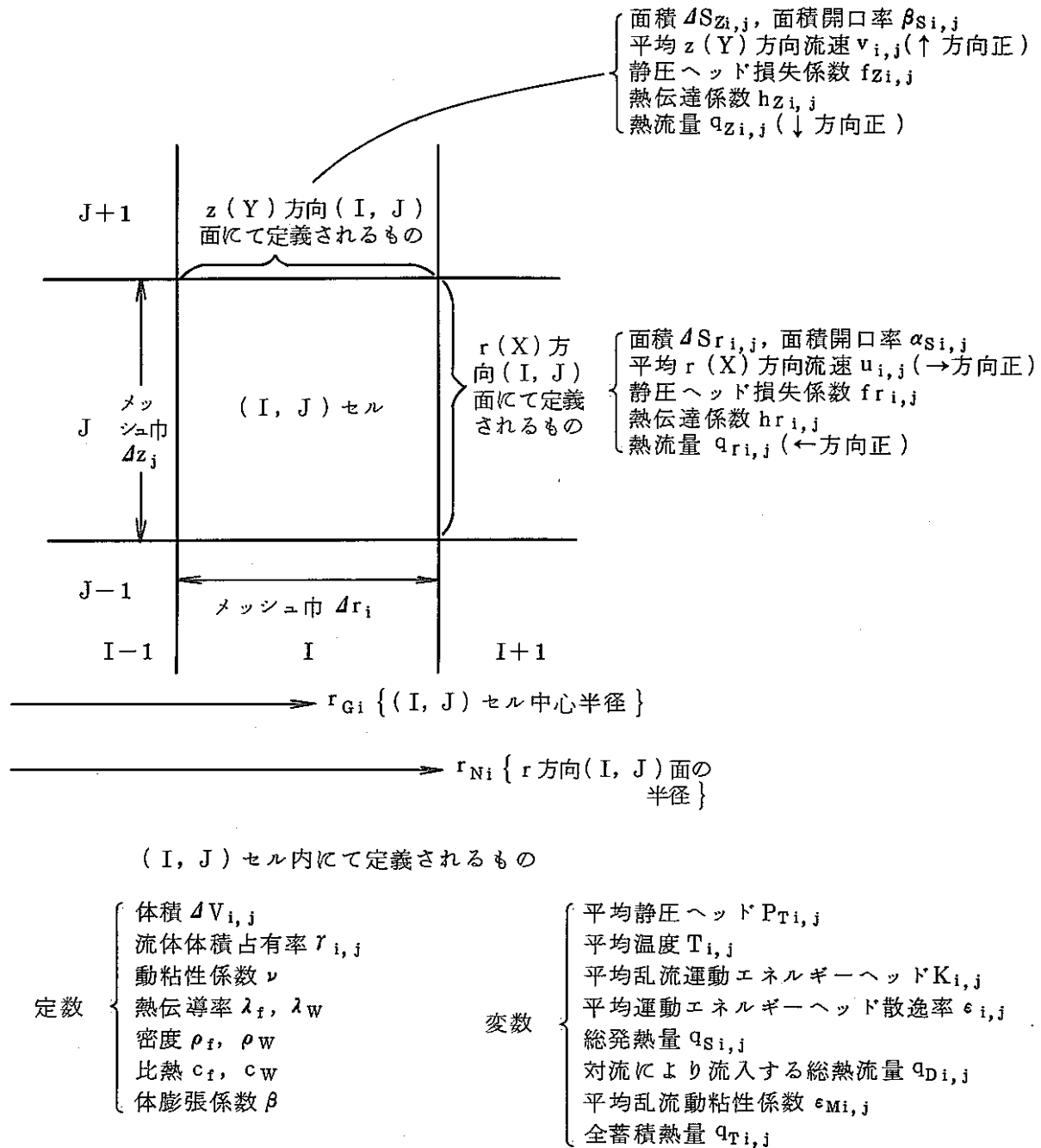


Fig. 3 Locations of Variables

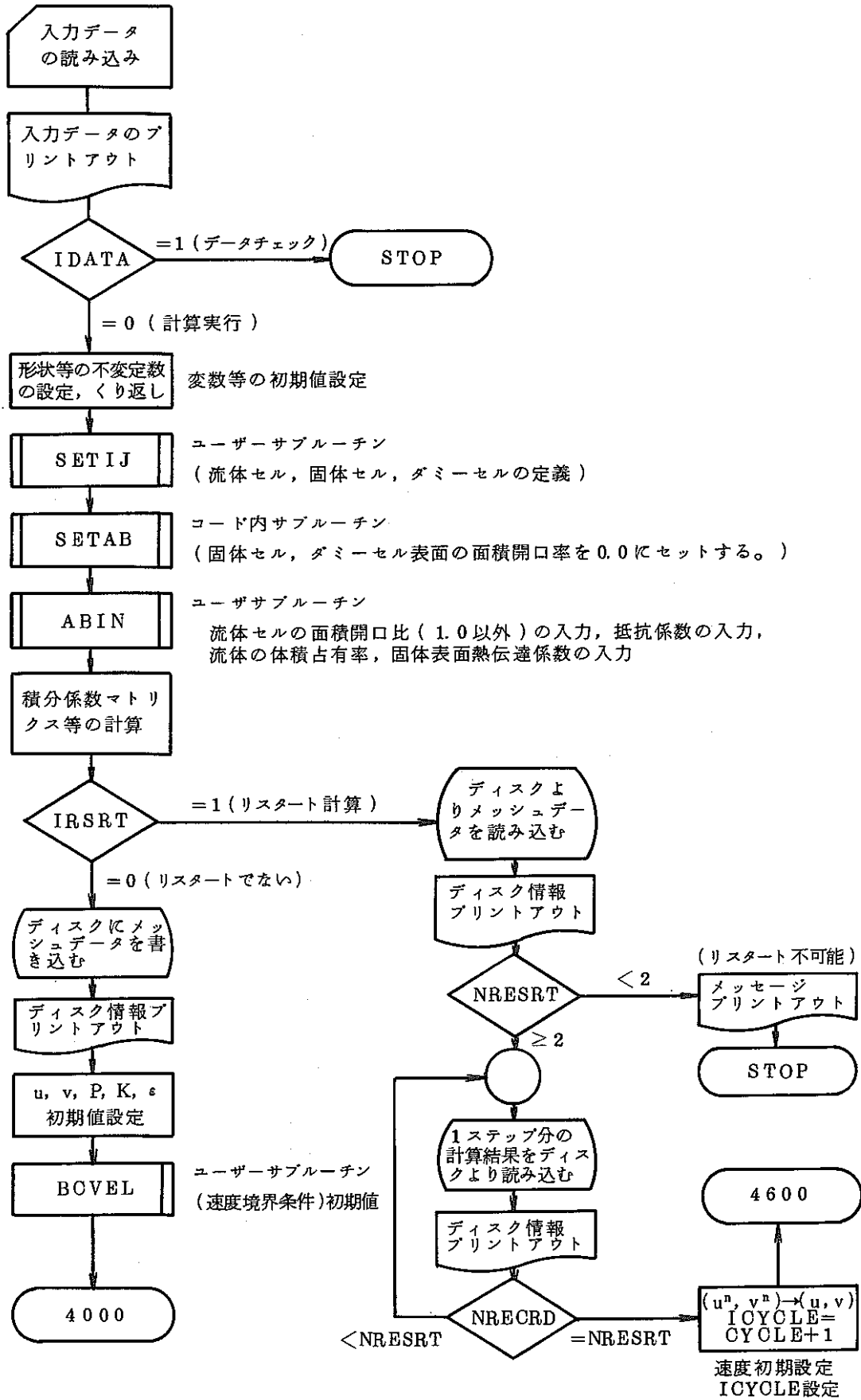
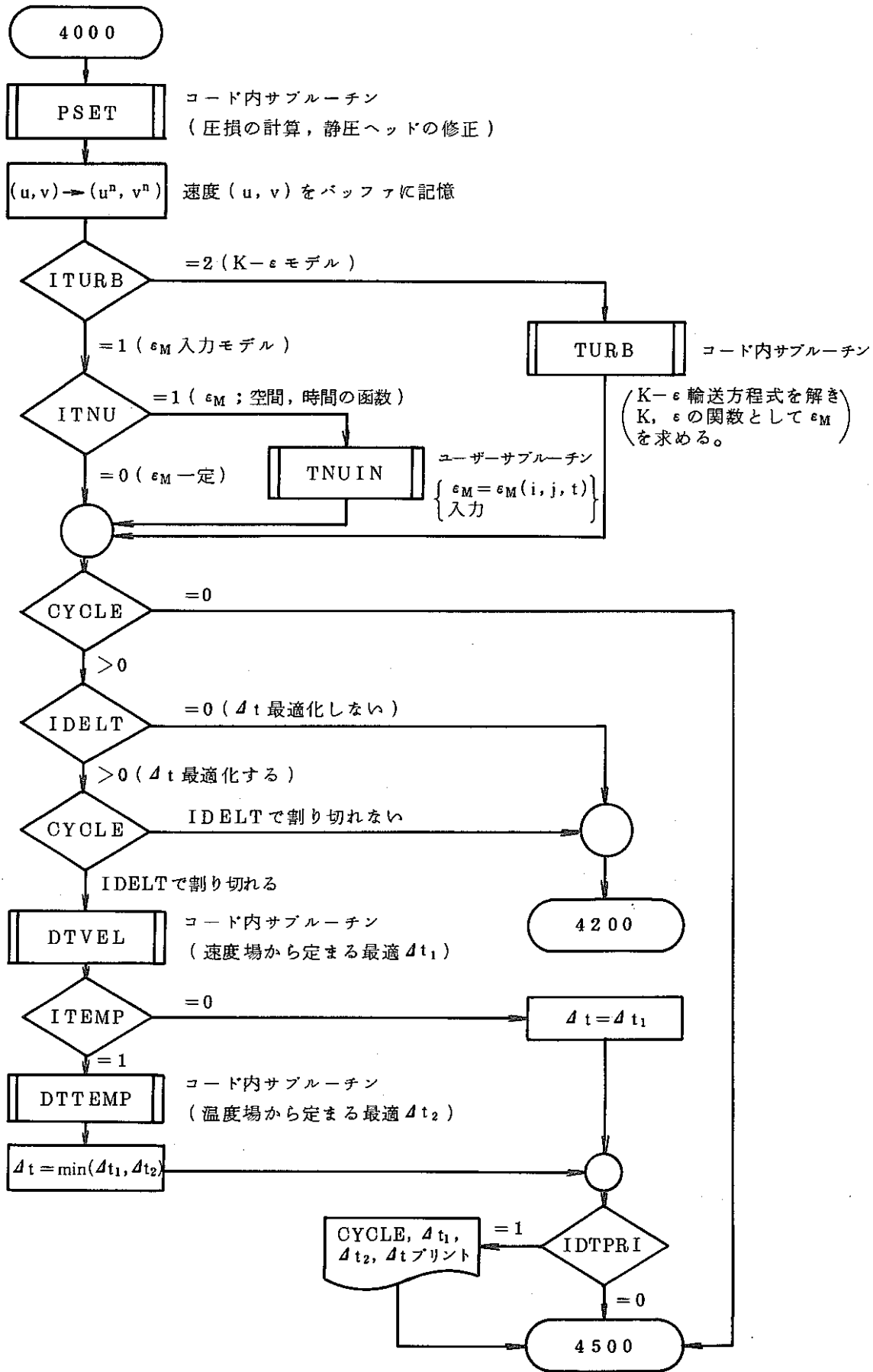
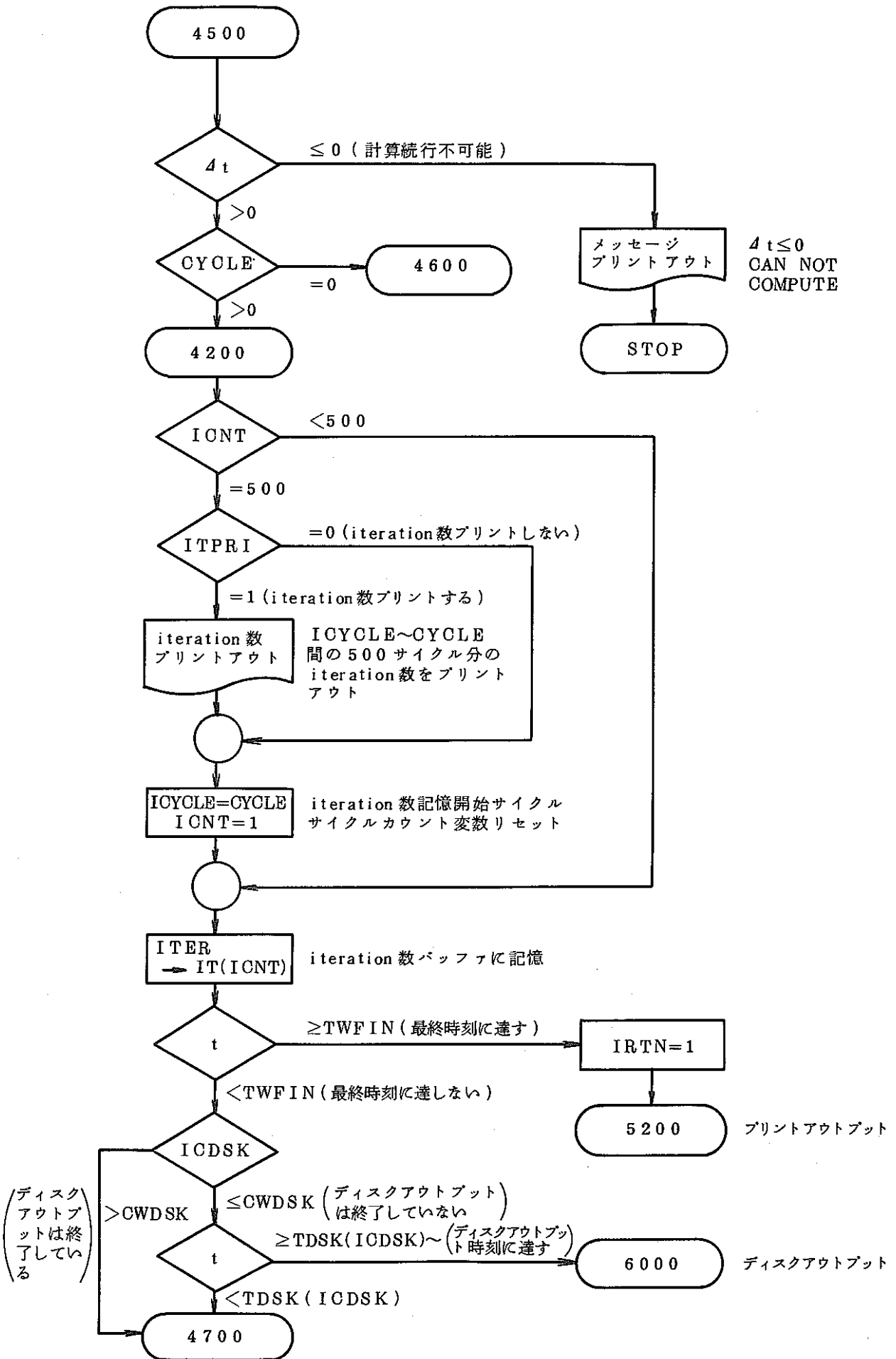
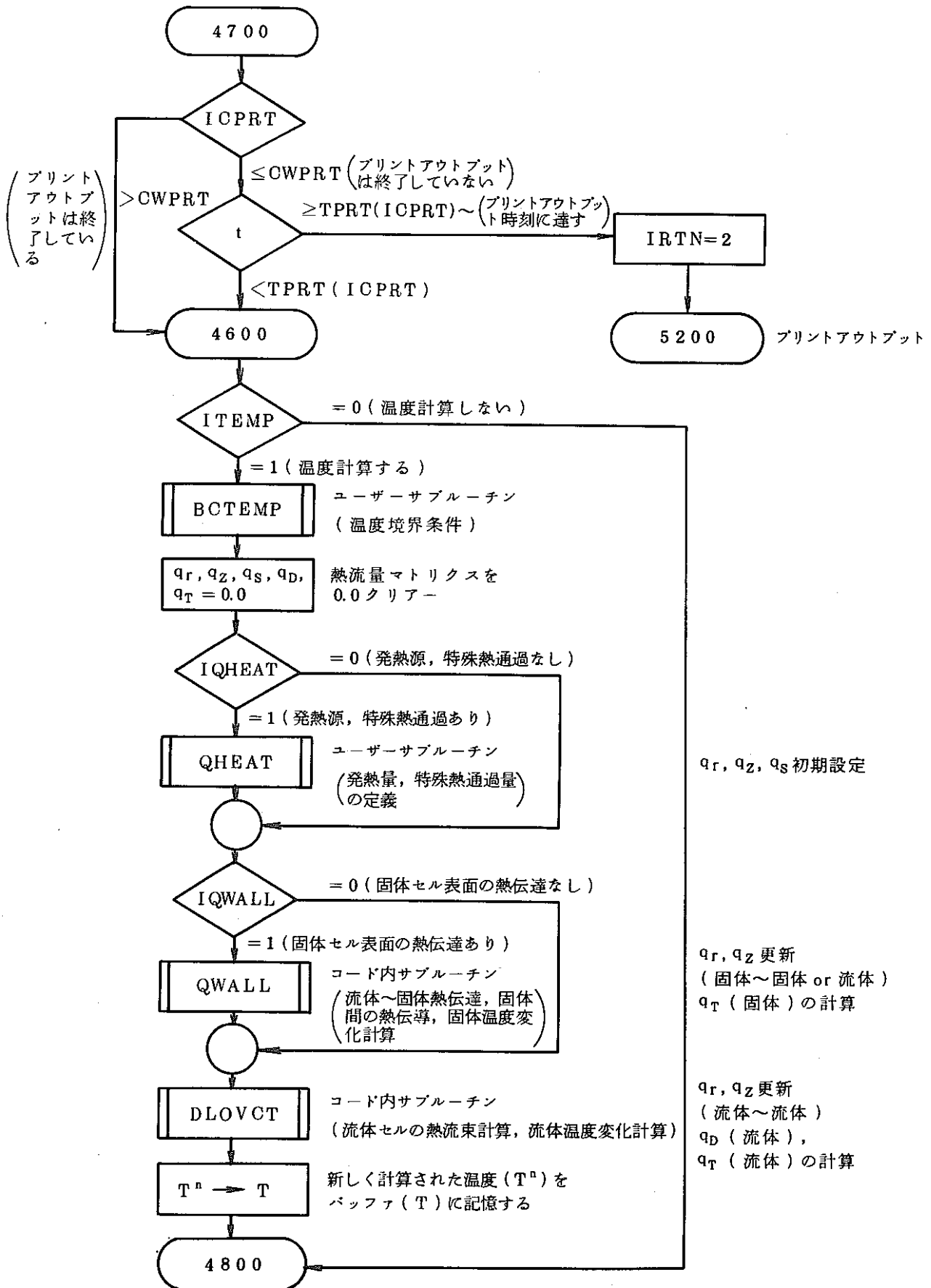
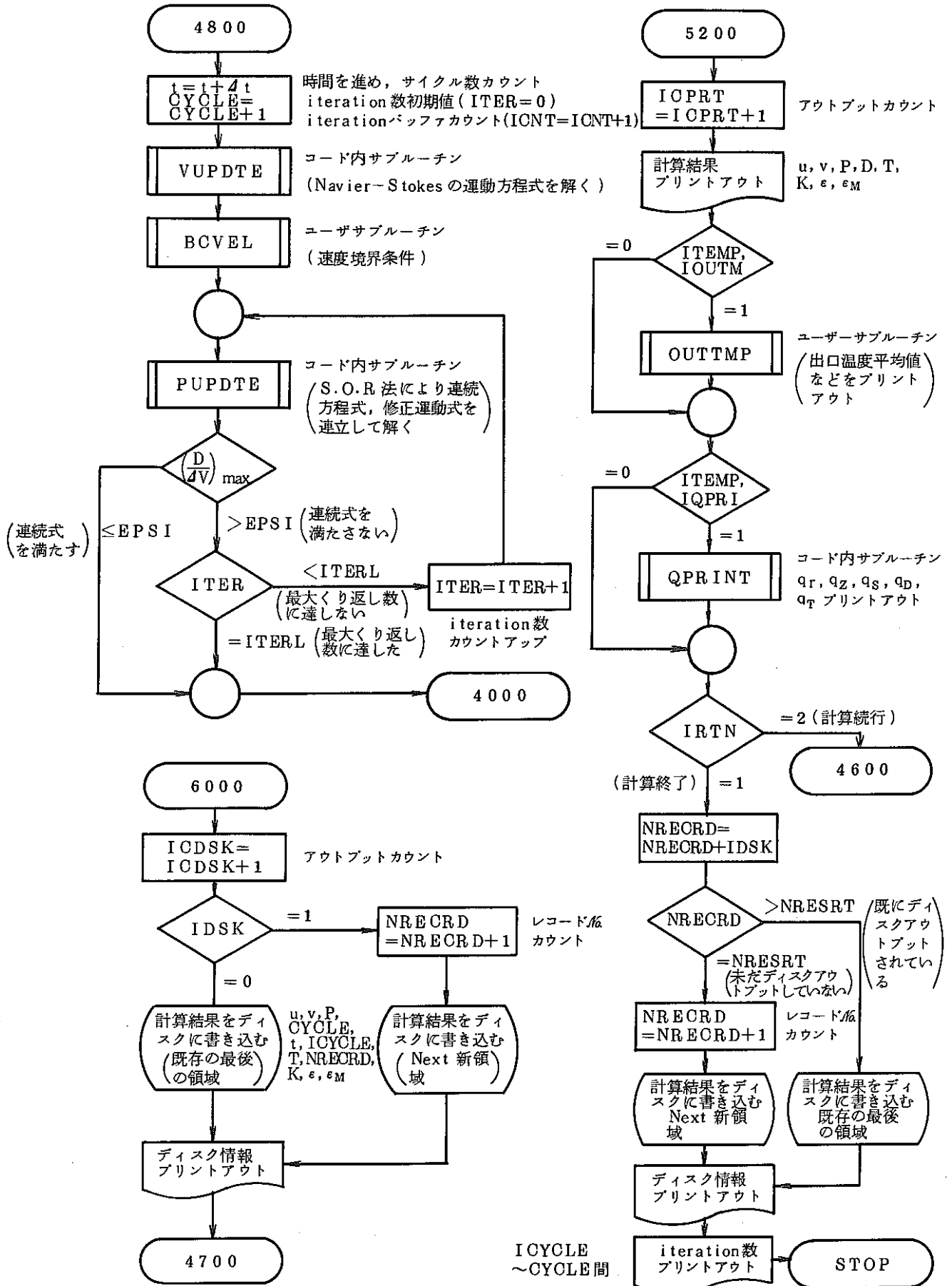


Fig. 4 Flow Chart of Main Program









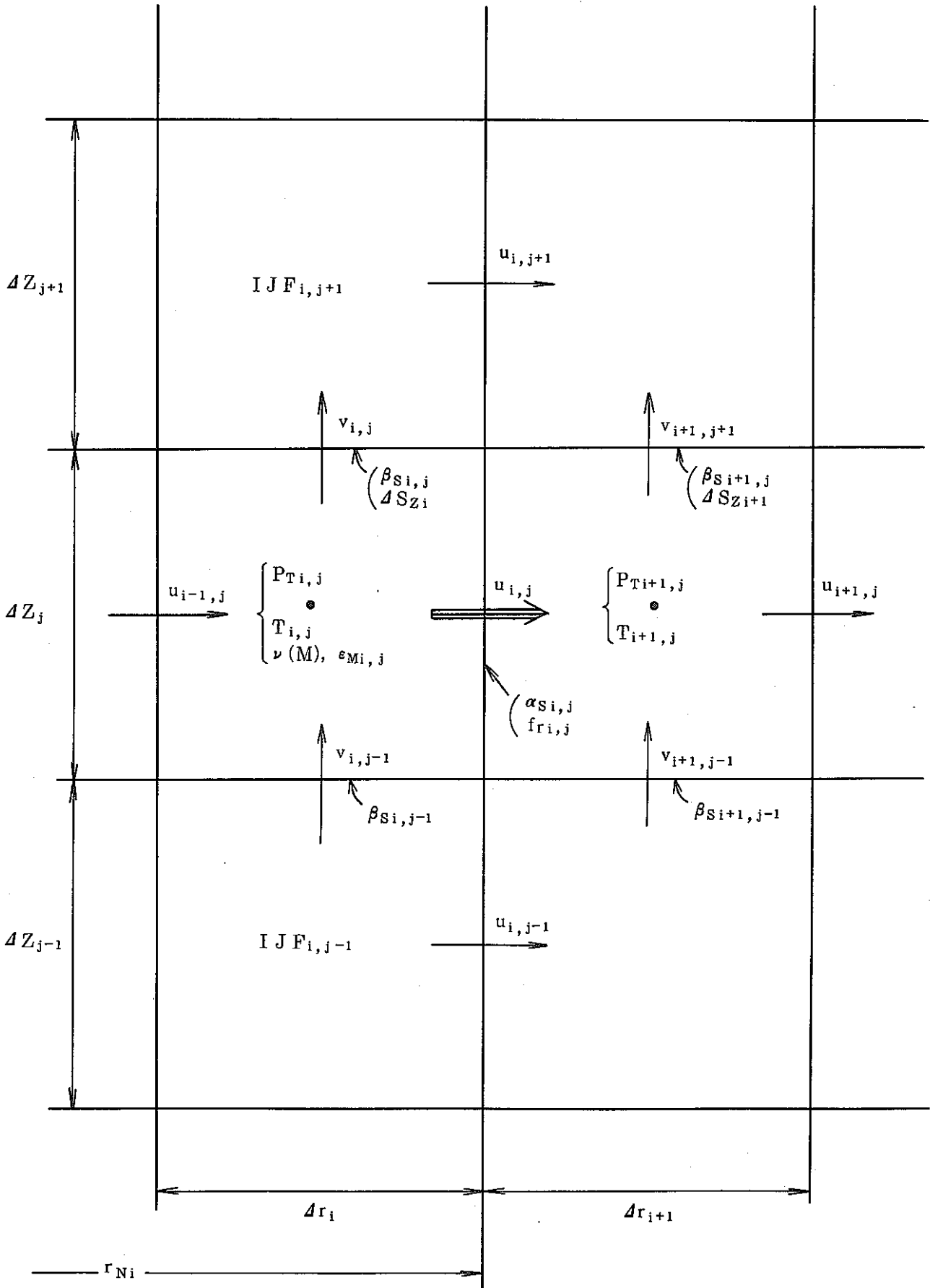


Fig. 5 Variables required to update $u_{i,j}$ by Navier-Stokes momentum transport equation.

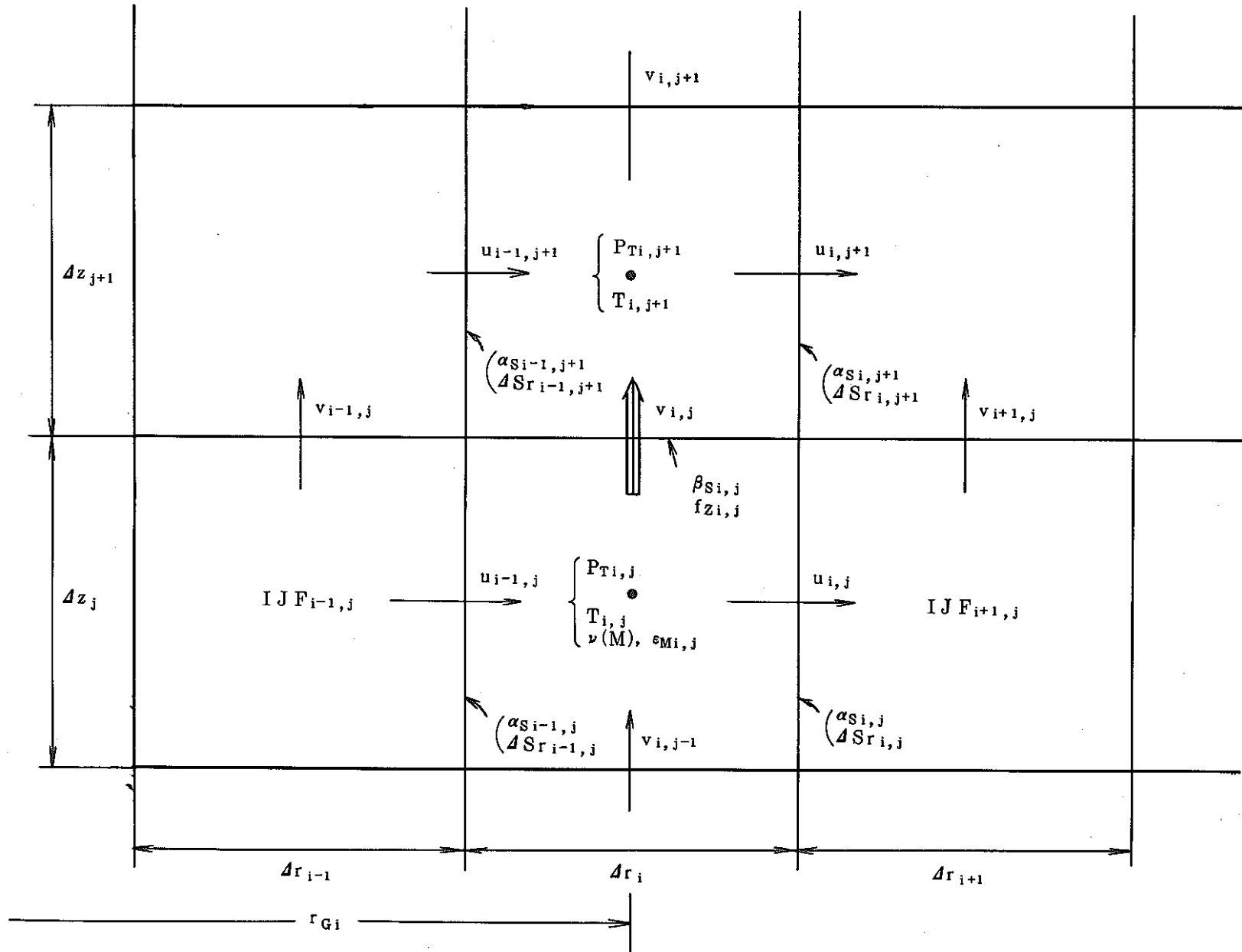


Fig. 6 Variables required to update $v_{i,j}$ by Navier-Stokes momentum transport equation

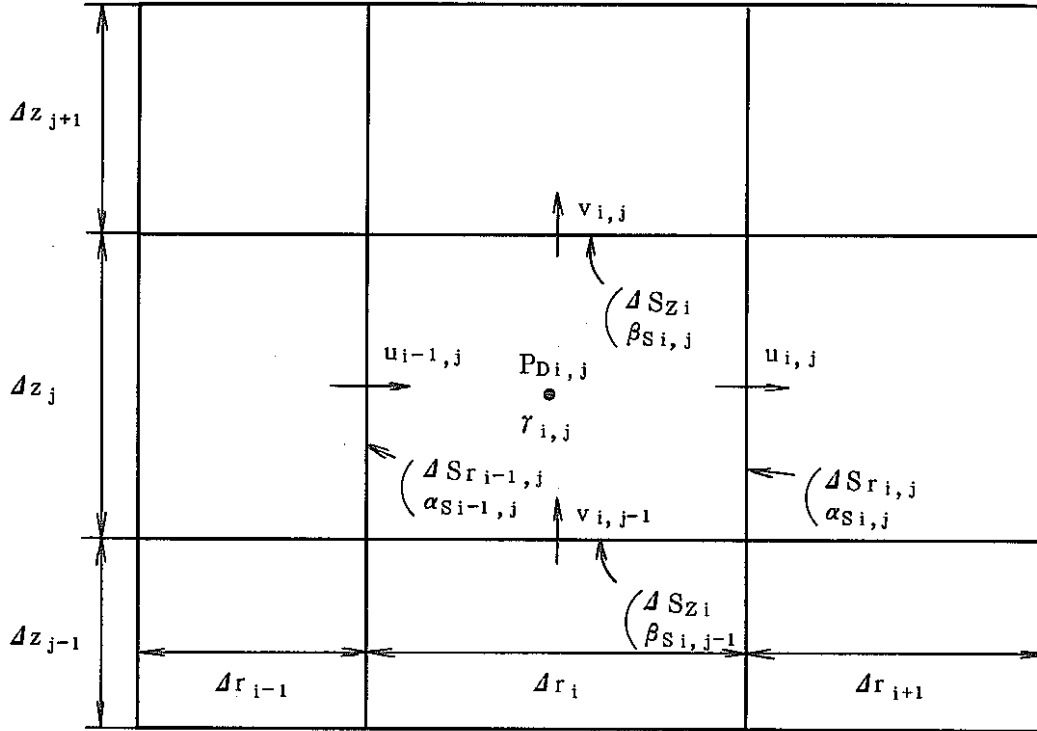


Fig. 7 Variables required to update pressure head and velocities by continuity equation

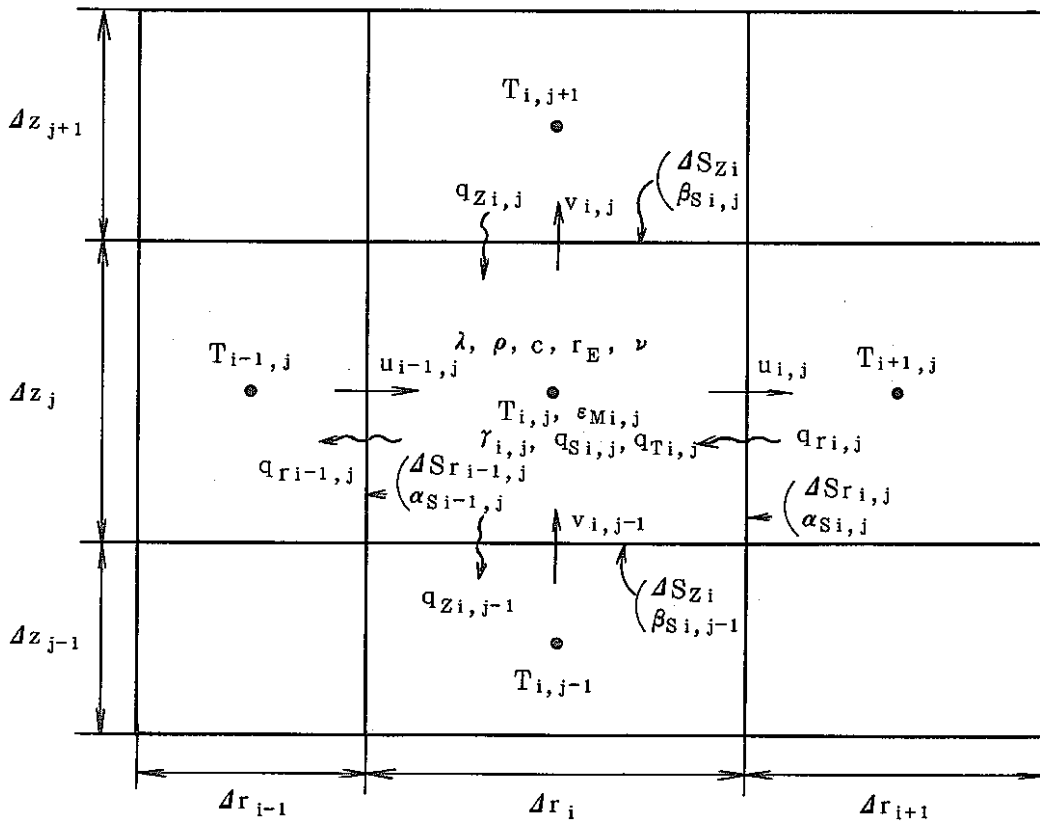


Fig. 8 Variables required to update fluid temperature by enthalpy transport equation

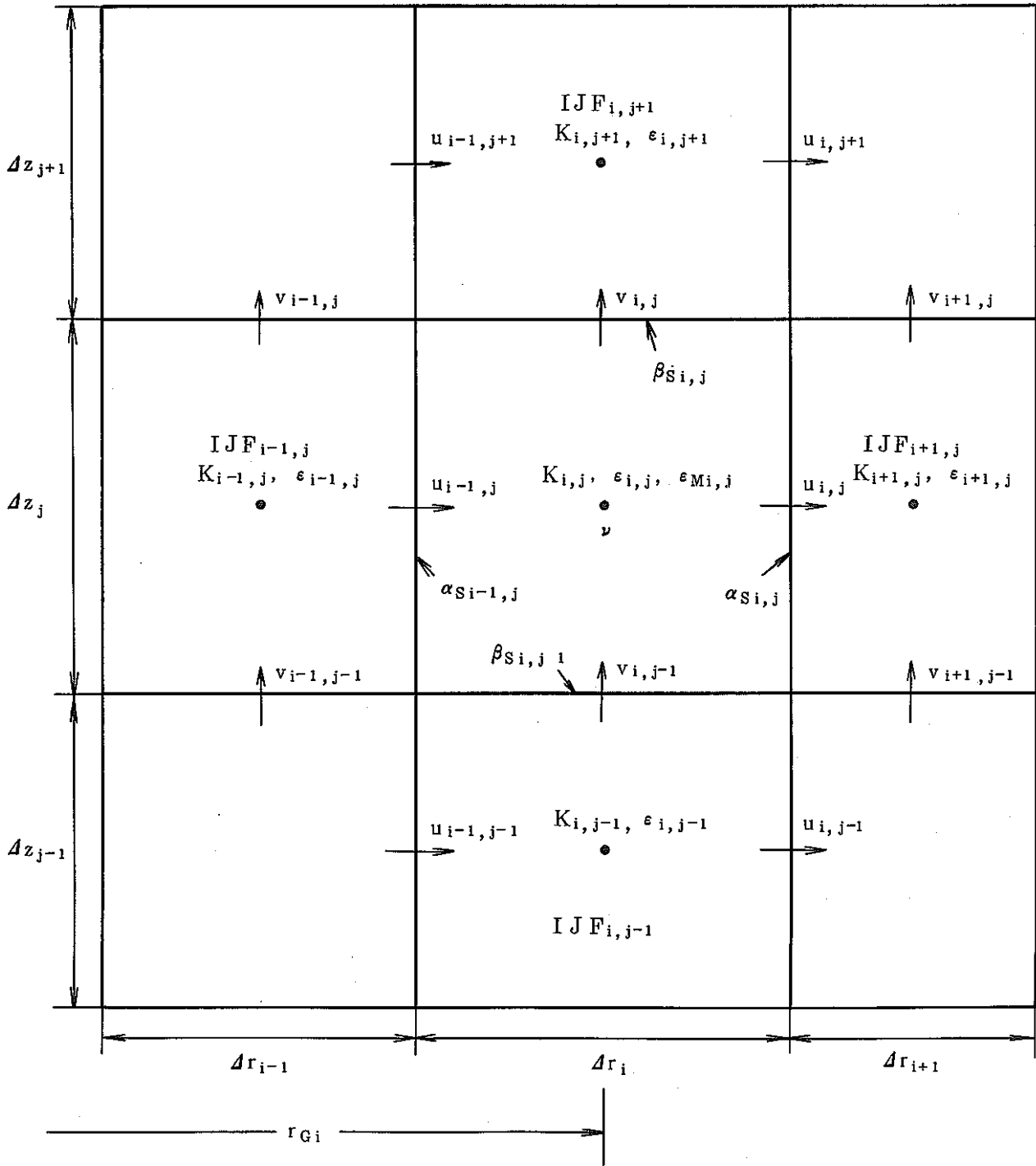


Fig. 9 Variables required to update K , ϵ , ϵ_M by $K-\epsilon$ turbulence transport equation

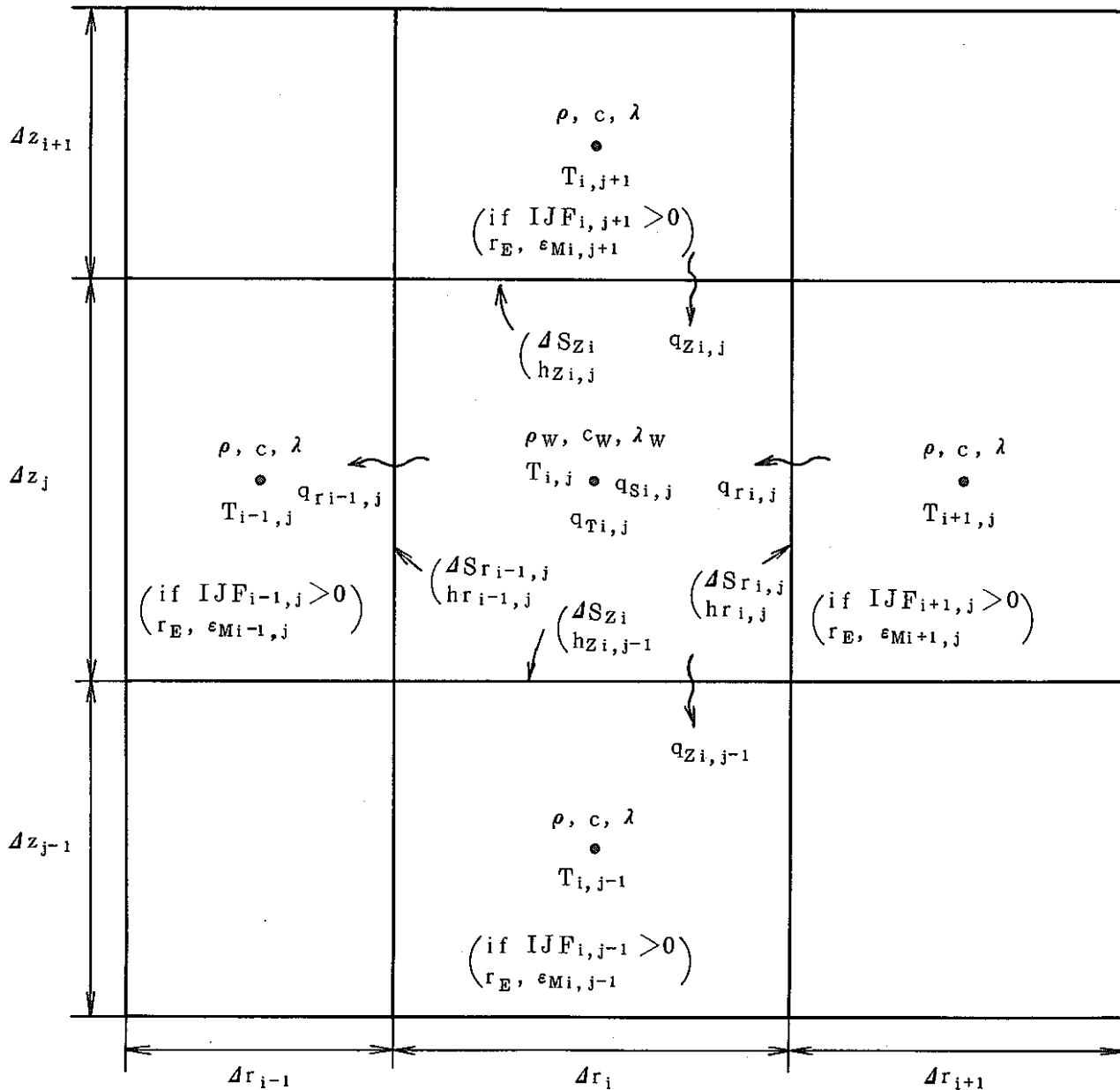


Fig. 10 Variables required to update solid temperature by enthalpy transport equation

4. 結 言

既存のコード (NAGARE, NAGARE-T, NAGARE-3D) をベースに, 実験データとの比較検証により得られた成果を反映させて新たに 2次元流動伝熱解析コード「NAGARE-2D」を開発した。「NAGARE-2D」により「炉容器上部プレナムのストラティフィケーション試験」などをより精度良く経済的に解析できるようになった。またコードの適用範囲が広まりより一般的な問題を解析できるようになった。

5. 謝 辞

NAGARE-2D のベースとなった多次元流動伝熱解析コードNAGARE シリーズの開発に着手され、その後FBR本部高速炉工学グループに在席中、本作業について御指導頂いた則松新二氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 則松, 他 ; 「もんじゅ」炉容器出口ノズルの熱衝撃試験(1) PNC SN941 77-01
- (2) 門前, 他 ; 「もんじゅ」炉容器出口ノズルの熱衝撃試験(2) PNC SN941 77-87
- (3) 則松, 他 ; 「もんじゅ」1/6試験体によるプレナムストラティフィケーション試験 PNC SN941 82-154
- (4) 青木, 他 ; 「もんじゅ」1/6試験体によるプレナムストラティフィケーション試験(2) 執筆中
- (5) 奥村, 他 ; 「もんじゅ」1/10試験体によるプレナムストラティフィケーション試験 執筆中
- (6) 則松, 他 ; 流動解析プログラム "NAGARE" PNC SN941 77-187
- (7) 家田, 他 ; 2次元伝熱流動解析プログラム「NAGARE-T」 PNC SN941 82-95
- (8) 則松, 他 ; 3次元伝熱流動解析プログラム「NAGARE-3D」 執筆中
- (9) B. E. Launder and D. B. Spalding ; The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289. 1974.
- (10) B. E. Launder and D. B. Spalding ; Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press. 1972.
- (11) B. E. Launder, A. Morse, W. Rodi and D. B. Spalding ; The prediction of free shear flows—a comparison of the performance of six turbulence models. NASA Conference on Free Shear Flows, Langley, Hampton, Virginia. 1972.
- (12) L. Prandtl ; Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. Nachrichten von der Akad. der Wissenschaft in Göttingen. 1945.

付録 1. ポストプログラム

1.1 ポストプリントプログラム PRINT2D

計算結果格納ファイル（ユニット番号10，MTまたはディスク）の内容を標準プリント出力するプログラムである。入力データ（ユニット5）は

NAMELIST/DATA/IRECS，IRESE，IWMIN，IWMAX，JWMIN，JWMAX，
ANU

で定義され以下の意味を有する。

IRECS，IRESE……IRECS ≤ レコード番号 ≤ IRECE を出力する。

レコード番号1はメッシュデータであり，計算結果はレコード番号2以降であるから，IRECS ≥ 2 でなければならない。

IWMIN，IWMAX，JWMIN，JWMAX……IWMIN ≤ i ≤ IWMAX，

JWMIN ≤ j ≤ JWMAX の範囲の $u_{i,j}$ ， $v_{i,j}$ ， $P_{T_{i,j}}$ ， $T_{i,j}$ ，

$K_{i,j}$ ， $\epsilon_{i,j}$ ， $\epsilon_{M_{i,j}}$ ， $\nu_{M_{i,j}}$ をプリント出力する。

ANU……配列(3)，流体Mの動粘性係数 ν (M) (m^2/sec)，M = 1，3

JOLは次のように作成する。

```
//U####** JOB (&&&&&&),USERNAME,      ジョブカード
// ATTR=(TO,C1,W?)   プリント出力量に応じて定める
// EXEC FORTCLG
//FORT.SYSPRINT DD DUMMY
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3021.PRINT2D.FORT,DISP=SHR
//G0.SYSIN DD *
&DATA
IRECS=?? ,IRECE=?? ,IWMIN=?? ,IWMAX=?? ,
JWMIN=?? ,JWMAX=?? ,ANU=??,??,??
&END
//G0.FT10F001 DD DSN=U####.POST,DISP=SHR
//
```

} カード
} 入力データ

計算結果格納ファイル名

1.2 ポストプログラム TRANS2D

「NAGARE-T」の計算結果をプロット出力するために作成されたプロットプログラム「NAPS」を共通に使用するために計算結果格納ファイル（ユニット10）の内容を一部修正してポストプロットファイル（ユニット12）を作成するプログラムである。入力データ（ユニット5）は，

NAMELIST/DATA/IR1，ID，ANU，CYL

で定義され以下の意味を有する。

- IR1 配列(2), プロットしたいレコード番号 ≥ 2 を入力する。
- ID ユニット 1 2 の変数 T (30, 35) に何を格納するか？
- ID = 1 温度 $T_{i,j}$ を格納
- ID = 2 乱流運動エネルギーヘッド $K_{i,j}$ を格納
- ID = 3 $K_{i,j}$ の散逸率 $\epsilon_{i,j}$ を格納
- ID = 4 $\epsilon_{M_{i,j}} / \nu$ を格納
- ID = 5 相対静圧ヘッド $P_{T_{i,j}}$ を格納
- ANU 配列(3), 流体 M の動粘性係数 $\nu (M)$, $M = 1, 3$
- CYL 座標系識別変数。CYL = 0.0 (平面 X, Y 系), CYL = 1.0 (円筒 R-Z 系), デフォルト値 0.0

温度コンター, 温度時間変化などをプロットしたい時は ID = 1 を, 相対静圧ヘッド P_{RT} のコンターを出力したい時は ID = 5 を入力すれば良い。

「NAPS」では流体セルは全て IJF = 1, 固体セルおよびダミーセルは全て IJF = 0 を仮定している。従って「NAGARE-2D」における IJF 値は以下のように変換されてユニット 1 2 に出力される。

IJF > 0 (流体) \longrightarrow IJF = 1

IJF \leq 0 (固体, ダミー) \longrightarrow IJF = 0

また「NAPS」ではセル平均流整ベクトルをセル中心点にプロットする様になっているので NAGARE-2D の解析結果 (セル側面での流速) はセル平均流速に変換されてユニット 1 2 に出力される。

JCL は次のように作成する。(ユニット 1 2 に MSS を使用する場合)

```
//U####** JOB (&&&&&&), USERNAME,   ジョブカード
// ATTR=(TO,C1,WO)
// EXEC FORTCLG
//FORT.SYSPRINT DD DUMMY
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3021.TRANS2D.FORT,DISP=SHR
//G0.SYSIN DD *
  &DATA
  ID=? ,IR1=??,??,??,??, }   カード入力データ
  ANU=??,??,??, CYL=??
  &END
//G0.FT10F001 DD DSN=U####.POST,DISP=SHR   計算結果格納ファイル名
//G0.FT12F001 DD DSN=U####.PLOT,DISP=(NEW,CATLG),
//                               UNIT=MSS,MSVGP=U####
//                               MSS上にプロッタ用ファイルを
//                               新規作成
```

1.3 プロットプログラム NAPS

1. 機能及び特徴

NAPSでは次の図形処理が可能である。

- 1) メッシュ図
- 2) 速度ベクトル図
- 3) 温度コンター図
- 4) X-Yプロット図

時間変化図

断面内分布図

機種は Cal Comp のプロットイング・システムに適用可能である。

各プロット図をとおして共通の特徴として次の事があげられる。

- 用紙のサイズはユーザが指定したサイズである。
- タイトルはユーザが与えたタイトルをプロットする。
- 実際の図のプロット可能な範囲は、次に示す長さだけ小さくなる。

用紙の横が縦より長い時

横方向 8 cm

縦方向 4 cm

用紙の縦が横より長い時

横方向 3 cm

縦方向 8 cm

- 図のタイトルはユーザの指定した図のタイプに応じて、プロットする。
- データに誤りがある場合、プロットは無視される。
- 単位についてはプロットしない。
- チェック・プリントの機能

ポスト・ファイルの内容をプリントする。ユーザはプリントする成分及びステップを指定できる。またチェック・プリントの機能には次の3とおりがある。

	チェック・プリント	プロット
①	×	○
②	○	×
③	○	○

この3種は、C1、C2及びC3カードにおいて、それぞれNGRAP、NVALの値により決定する。

NGRAP or NVAL	タイプ
= n	①のタイプ
= - n	②のタイプ
= 100+n	③のタイプ

* n = 1, 2 or 3

1a) メッシュ図

- メッシュ図には2とおりのタイプがある。
 - ① すべてのメッシュのラインをプロットし、メッシュの中央にIJFLGの値(0 or 1)をプロットする。(Fig.A1-1)
 - ② IJFLG=1のメッシュのラインをプロットする。(Fig.A1-2)
- オプションによりメッシュのI番号、J番号をプロットする。
- 座標系の種類をプロットする。座標系に応じて(X, Y)または、(R, Z)をプロットする。
- メッシュのスケールはユーザの指定した用紙のサイズ及び実際の座標データにより自動的に行なわれる。
- スケール・ファクターはプロット上で2cmの実際の値としてプロットされる。
- プロットするメッシュの範囲を指定できる。無指定の場合は、最小から最大までの番号メッシュをプロットする。

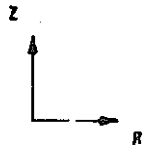
1b) 速度ベクトル図

- 速度ベクトルはメッシュ図上にプロットされるが、このメッシュ図には2とおりのタイプがある。
 - ① IJFLG=1のメッシュのラインをプロットする。
 - ② IJFLG=1のメッシュの外形のラインのみプロットする。(Fig.A1-3)
- オプションによりメッシュのI番号、J番号をプロットする。
- 座標系の種類をプロットする。座標系に応じて(X, Y)または、(R, Z)をプロットする。

PLOT NO. 1

CHECK RUN FOR NAPS

9	0	0	1	0	0	1	0	0
7	0	1	1	0	0	1	0	0
6	0	1	1	1	1	1	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1	0
	1	2	3	4	5	6	7	8



MESH SCALE $\frac{1.}{0.} \text{---} 1.33 \times 10$

Fig.A1-1 Example of Mesh Arrangement

PLOT NO. 2

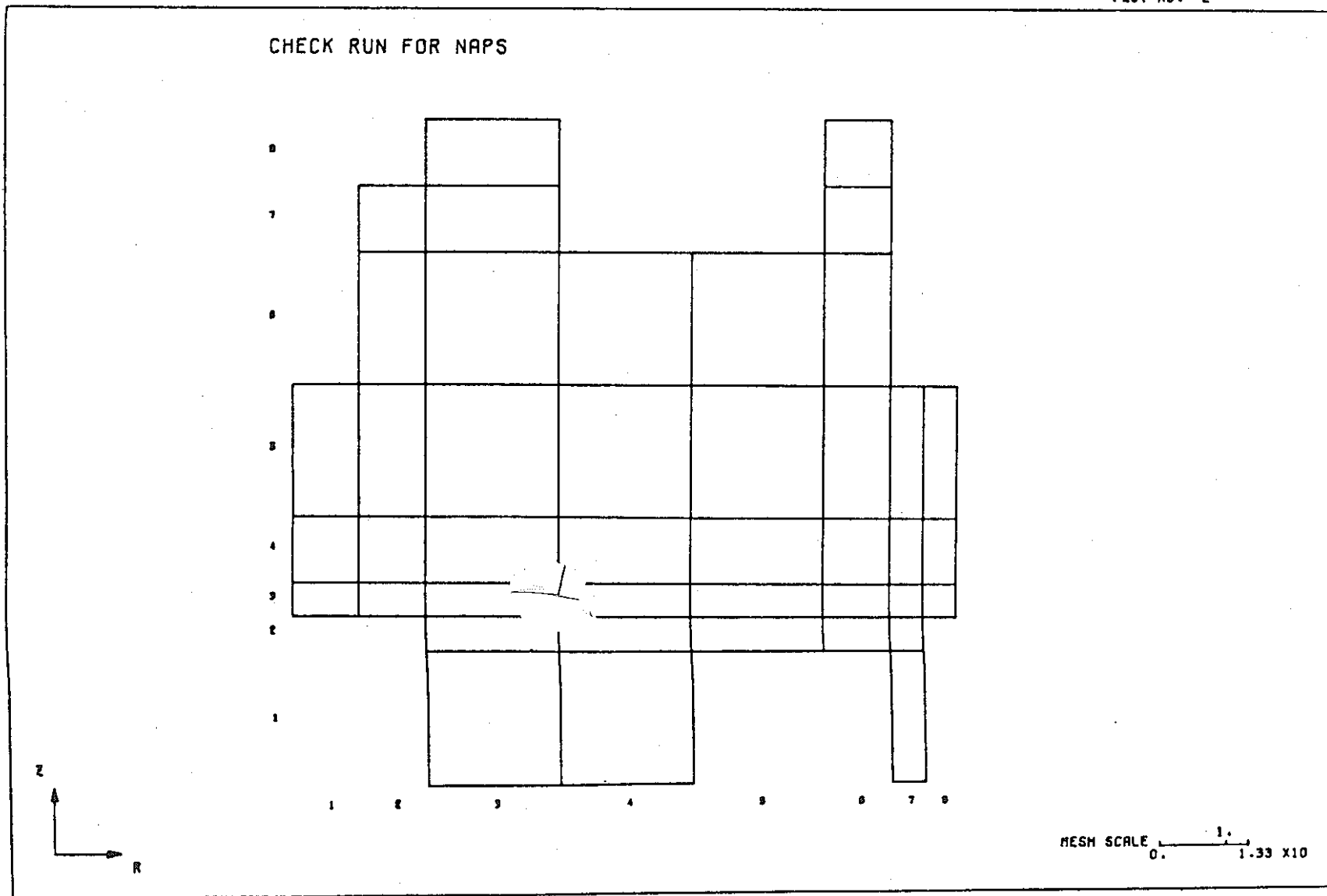


Fig.A1-2 Example of Mesh Arrangement

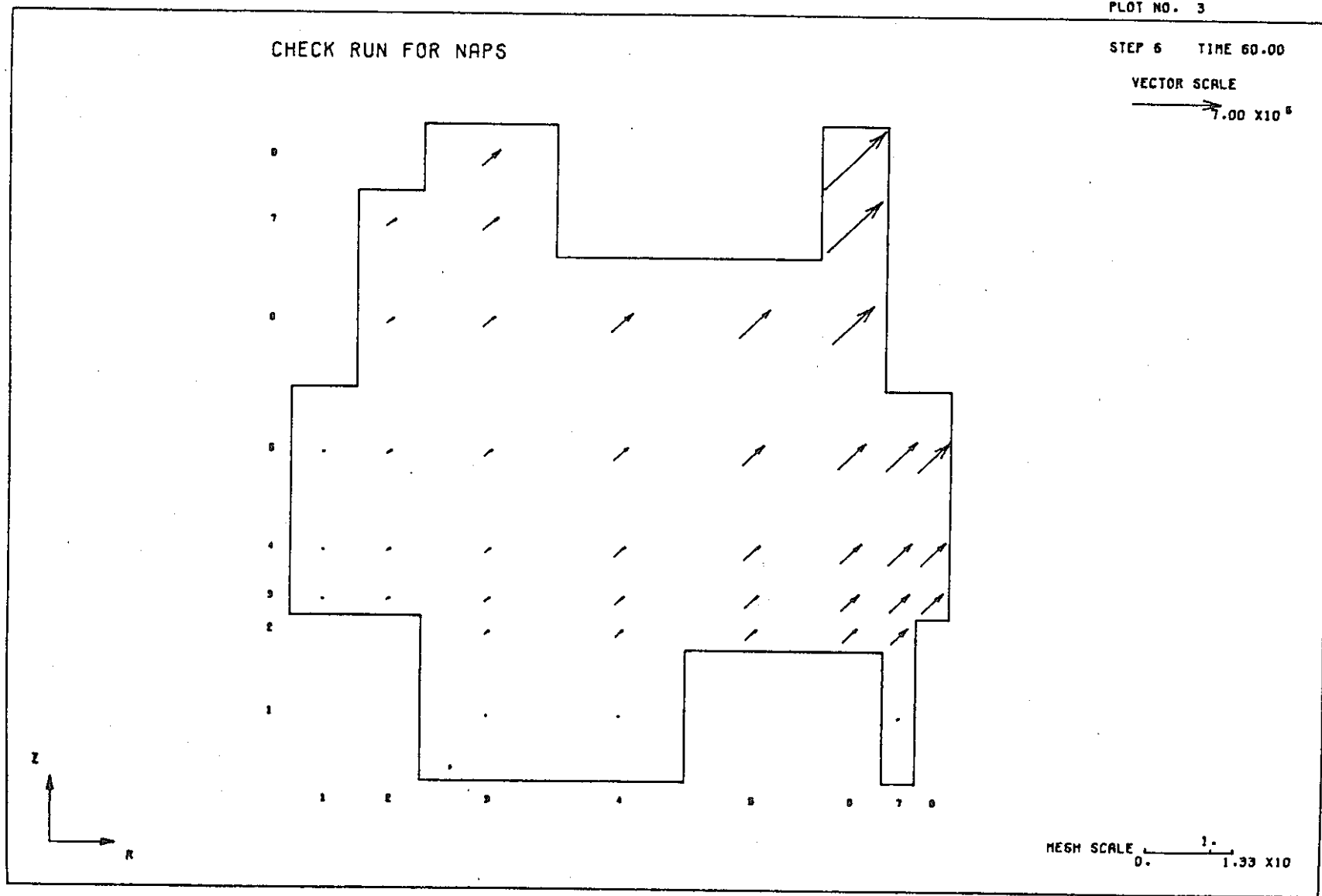
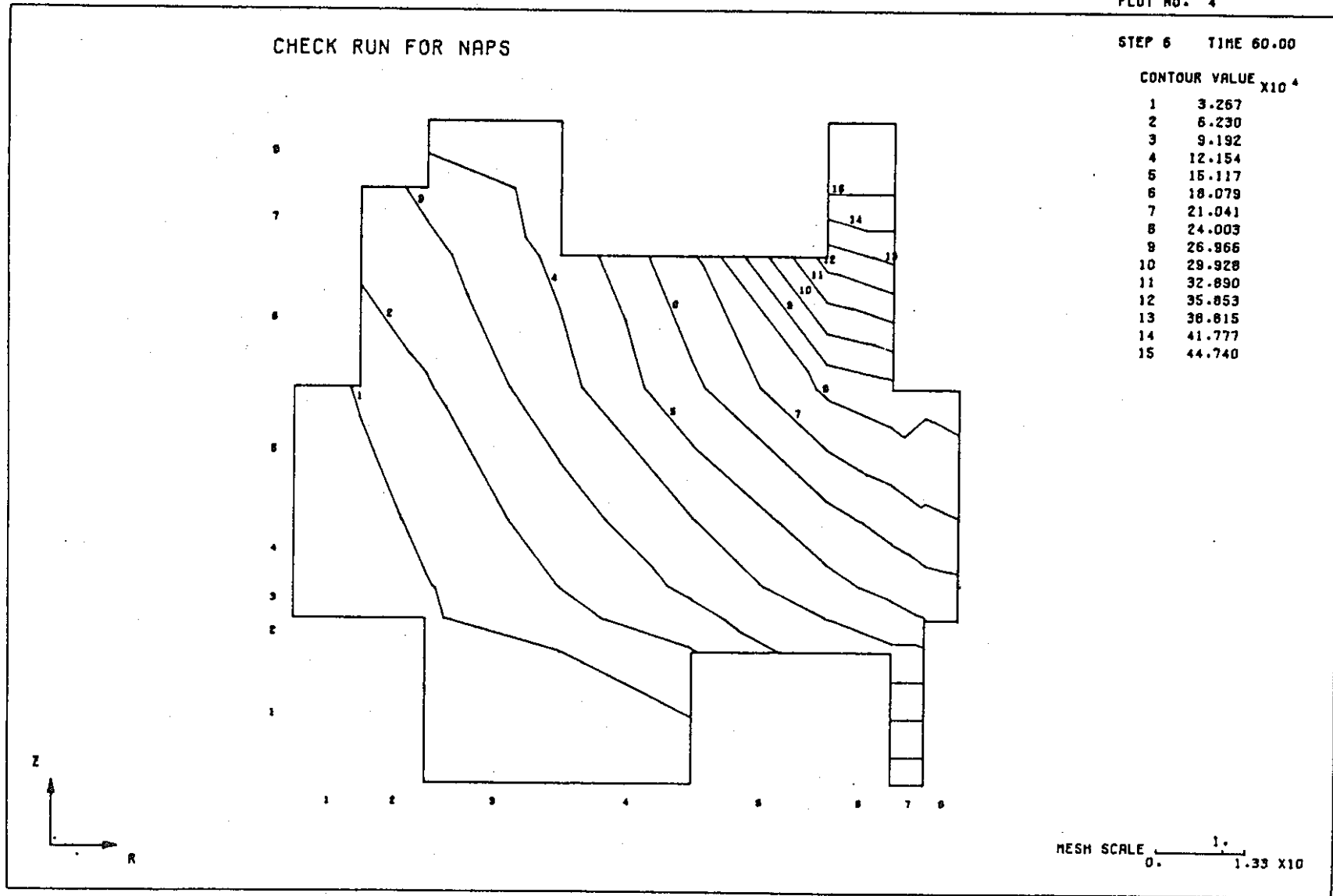


Fig.A1-3 Example of Velocity Vector Field

- メッシュのスケールはユーザの指定した用紙のサイズ及び実際の座標データにより自動的に行なわれる。
- メッシュのスケール・ファクターはプロット上で2 cmの実際値としてプロットされる。
- プロットするメッシュの範囲を指定できる。無指定の場合は、最小から最大までの番号のメッシュをプロットする。
- ベクトルの矢印のスケールはユーザの指定した値が1 cmとなるように行なわれる。無指定の場合は最大値を2 cmとしてスケールされる。
- ベクトルのスケール・ファクターはプロット上で2 cmの実際の値がプロットされる。
- ベクトル図をプロットするステップ番号はユーザが指定したステップである。最大10ステップまで指定できる。

1c) 温度コンター図

- 温度コンターはメッシュ図上にプロットされるが、このメッシュ図には2とおりのタイプがある。
 - ① I J F L G = 1 のメッシュのラインをプロットする。
 - ② I J F L G = 1 のメッシュの外形のラインのみプロットする。(Fig.A1-4)
- オプションによりメッシュのI番号、J番号をプロットする。
- 座標系の種類をプロットする。座標系に応じて(X, Y)または、(R, Z)をプロットする。
- メッシュのスケールはユーザの指定した用紙のサイズ及び実際の座標データにより自動的に行なわれる。
- メッシュのスケール・ファクターはプロット上で2 cmの実際の値としてプロットされる。
- プロットするメッシュの範囲を指定できる。無指定の場合は、最小から最大までの番号のメッシュをプロットする。
- コンター・ラインの本数はユーザが指定した本数である。無指定の場合は12本である。最大は20本である。
- コンター・バリューは最大値と最小値の差を(コンター・ラインの本数+1)等分して決定される。コンター・バリューはプロットされる。



-77-

Fig.A1-4 Example of Temperature Contour Line

- コンター・ライン上にコンター・バリューの番号がプロットされる。
- 温度コンター図をプロットするステップ番号はユーザが指定したステップである。最大10ステップまで指定できる。

1d) X-Yプロット図 (Fig.A1-5)

- X方向, Y方向の格子の本数は, ユーザが指定したデータの最大値, 最小値, 及び1目盛りの値により決定される。したがって, (最大値-最小値) / 1目盛りの値=整数となるようにユーザは指定する必要がある。
- 図の大きさは(格子の数×1目盛りの長さ)cmとなる。この大きさが用紙の作図可能範囲をこえるとプロットされない。作図可能範囲は, ユーザの指定した用紙サイズより

横長の用紙サイズの時

横 (×) 方向 8 cm 縦方向 4 cm

縦長の用紙サイズの時

横 (×) 方向 3 cm 縦方向 8 cm

小さくなる。

- プロットするラインは最大5本である。
- ユーザの指定によりペン3本まで使用可能である。
- ユーザの指定によりシンボル5種類がラインごとにプロットされる。
- ラインの説明及びラインの種類がプロットされる。
- データがユーザの指定した範囲をこえた場合はプロットされない。

2 入力データ

入力カードの構成はA, B, C, ENDの4種類よりなる。(Fig.A1-6)

A タイトルを入力する。(Fig.A1-7)

B プロットする図のタイプ及び用紙のサイズの指定を行なう。(Fig.A1-8)

C Bカードにより指定された図のタイプによりC1, C2, C3の3種類のカードに分かれる。Bカード上で

I P L O T (1) = 1 の時 C1カード

I P L O T (2) = 1 の時 C2カード

I P L O T (3) = 1 の時 C3カード

が必要である。

PLOT NO. 8

CHECK RUN FOR NAPS

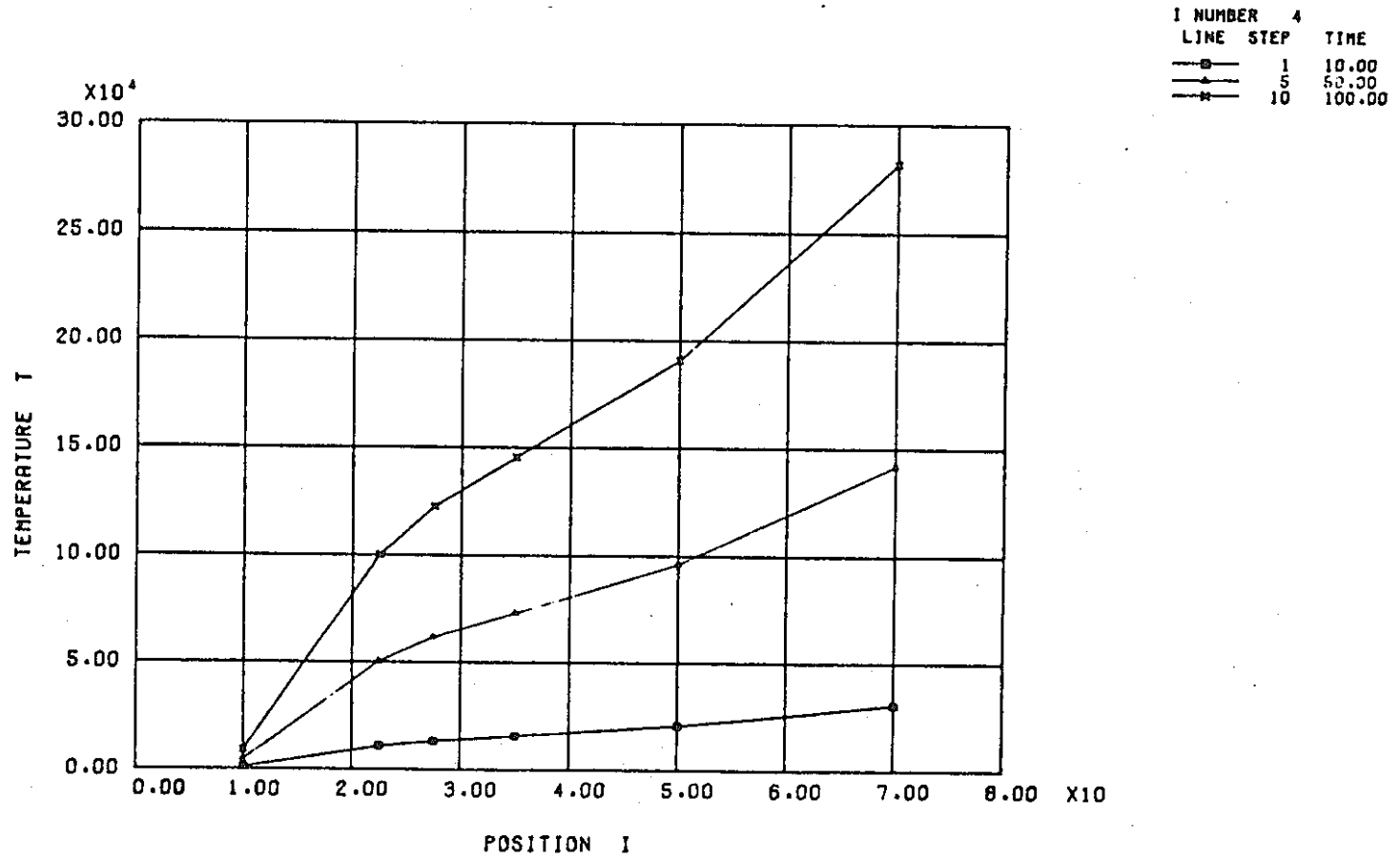


Fig.A1-5 Example of X-Y Plot

- C 1 メッシュ図，ベクトル図，コンター図のプロットの指示を行なう。(Fig.A1-9)
 C 1 カードは常に 2 枚 1 組であり，この組が繰り返される。
 C 1 カードの終りは $NGRAP = 0$ である。
- C 2 時間変化図のプロットの指示を行なう。(Fig.A1-10)
 C 2 カードはプロットするラインの数により 1 組が 2 枚から 6 枚である。
 この組は繰り返される。
 C 2 カードの終りは， $NVAL = 0$ である。
- C 3 断面内分布図のプロットの手順を行なう。(Fig.A1-11)
 C 3 カードはプロットするラインの数により 1 組が 2 枚から 6 枚である。
 この組は繰り返される。
 C 3 カードの終りは， $NVAL = 0$ である。
- END プロットの終りを指示する。(Fig.A1-12)
 A～C のカードの組は END がくるまで繰り返される。
 C 1 ， C 2 ， C 3 カードはこの順番でなければならない。

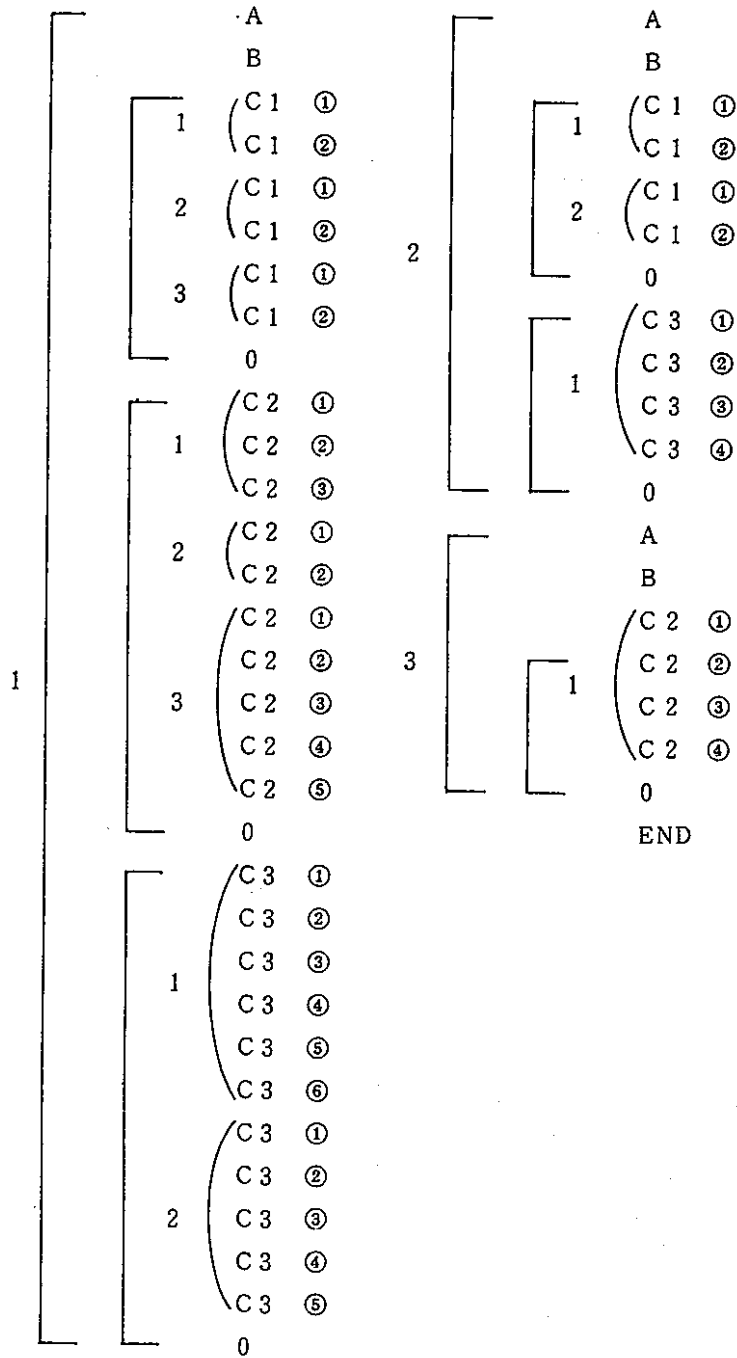


Fig.A1-6 Construction Example of Cards

INPUT DATA SHEET

PAGE OF

PROBLEM	JOB No.	JOB NAME	PROGRAMMER	DATE
				19 . .
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
01 ITITL		(10 A 4)		
02				
03		ITITL : タイトル (40文字以内)		
04				
05				
06				
07				
08				
09				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
1	2	3	4	5

Fig.A1-7 A Card

INPUT DATA SHEET

PAGE OF

PROBLEM	JOB No.	JOB NAME	PROGRAMMER	DATE
				19 . . .
01	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
02	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
03	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
04	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
05	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
06	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
07	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
08	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
09	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
11	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
13	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
14	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
15	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
16	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
17	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
18	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
19	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
20	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

Fig.A1-8 B Card

INPUT DATA SHEET

PAGE _____ OF _____

PROBLEM	JOB No.	JOB NAME	PROGRAMMER	DATE
				19 . . .
01	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
02	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
03				
04				
05				
06				
07				
08				
09				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Fig.A1-9 C1 Card

INPUT DATA SHEET

PAGE OF

PROBLEM	JOB No.	JOB NAME	PROGRAMMER	DATE
				19 . . .
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
01				
02		NOUTL = 0	NGRAP = 1	の時
03				すべてのメッシュのラインをプロットし、メッシュの中央に
04			NGRAP = 2 or 3	の時
05				I J F L G = 1 のメッシュのラインをプロットする。
06		= 1	NGRAP = 1	の時
07			NGRAP = 2 or 3	の時
08				I J F L G = 1 のメッシュの外形ラインのみをプロットする。
09		NNUM = 0		グリッド番号 I, J をプロットしない。
10		= 1	"	プロットする。
11				
12		NCONT = n		温度コンターの本数、最高温度と最低温度を (n + 1) 等分する。NGRAP = 3 を指定した場
13				合のみ必要である。
14				
15		VECT = α		ベクトルの矢印の長さ 1 cm に対する値。α = 0. の時は最大値を 2 cm としてスケールする。
16				
17		NSTEP = n		速度ベクトル図、温度コンター図をプロットするステップの総数
18				
19		IST i = n		速度ベクトル図、温度コンター図をプロットするステップ番号 (1 ≤ i ≤ NSTEP)
20				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
1	2	3	4	5

INPUT DATA SHEET

PAGE OF

PROBLEM	JOB No.	JOB NAME	PROGRAMMER	DATE
				19 . .
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
01	* チェック・プリントの機能			
02				
03	NGRAP	= - 1	座標値をプリントする。メッシュ図はプロットしない	
04		= - 2	ベクトルの絶対値、方向をプリントする。ベクトル図はプロットしない。	
05		= - 3	温度をプリントする。コンター図はプロットしない。	
06		= 1 0 1	座標値をプリントする。メッシュ図もプロットする。	
07		= 1 0 2	ベクトルの絶対値、方向をプリントする。ベクトル図もプロットする。	
08		= 1 0 3	温度をプリントする。コンター図もプロットする。	
09				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

C 2カード

INPUT DATA SHEET

PAGE OF

PROBLEM										JOB No.										JOB NAME										PROGRAMMER										DATE									
																																								19 . .									
01	NVAL	NLINE	IS1	IS2											(415)																																		
02	XMAX		XMIN		XDATA		XLENG		YMAX		YMIN		YDATA		YLENG																																		
03	INUM	JNUM	IPEN	ILIN						(5X, 415)										(8F10.0)																													
04																																																	
05																																																	
06																																																	
07																																																	
08																																																	
09																																																	
10																																																	
11	1, 2, 3のうちでプロットする図のタイプ番号を記入する。NVAL=0のカードがくるまでC2カードはくり返される。																																																
12	NVAL=0の時、2枚以降のカードは不要である。																																																
13																																																	
14																																																	
15																																																	
16																																																	
17																																																	
18																																																	
19																																																	
20																																																	

Fig.A1-10 C2 Card

INPUT DATA SHEET

PAGE OF

PROBLEM	JOB No.	JOB NAME	PROGRAMMER	DATE 19 . . .
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
01				
02		XMAX (YMAX)	X (Y) 方向の座標軸の値の最大値	
03		XMIN (YMIN)	" 最小値	
04		XDATA (YDATA)	" 1目盛りの座標値	
05		XLENG (YLENG)	" " 長さ (単位: cm)	
06				
07		I NUM: i)プロットするグリッドのI, J番号	
08		J NUM: i		
09				
10		I PEN: i	= 0 1番ペンを使用する。	
11			= 1 2番ペン "	
12			= 2 3番ペン "	
13				
14		I LINE: i	= 0 実線によりラインをプロットする。	
15			= 1 " プロットし, マークを入れる。	
16				
17				
18				
19				
20				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

INPUT DATA SHEET

PAGE OF

PROBLEM	JOB No.	JOB NAME	PROGRAMMER	DATE
				19 . .
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
01	* チェック・プリントの機能			
02				
03	NVAL	=-1	温度Tをプリントする。プロットはしない。	
04		=-2	速度Uを	" "
05		=-3	速度Vを	" "
06		=10 1	温度Tを	プロットも行なう。
07		=10 2	速度Uを	" "
08		=10 3	速度Vを	" "
09				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

INPUT DATA SHEET

PAGE OF

PROBLEM	JOB No.	JOB NAME	PROGRAMMER	DATE
				19 . . .
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
01				
02	XMAX (YMAX)	X (Y) 方向の座標軸の値の最大値		
03	XMIN (YMIN)	" " 最小値		
04	XDATA (YDATA)	" 1目盛りの座標値		
05	XLENG (YLENG)	" " 長さ (単位: cm)		
06				
07	ISTEP <i>i</i>	プロットするステップの番号		
08				
09	IPEN <i>i</i>	= 0 1番ペンを使用する。		
10		= 1 2番ペン "		
11		= 2 3番ペン "		
12				
13	ILINE <i>i</i>	= 0 実線によりラインをプロットする		
14		= 1 " プロットし、マークを入れる。		
15				
16				
17				
18				
19				
20				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
1	2	3	4	5

INPUT DATA SHEET

PAGE OF

PROBLEM	JOB No.	JOB NAME	PROGRAMMER	DATE
				19 . . .
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
01	* チェック・プリントの機能			
02				
03	NVAL	=-1	温度Tをプリントする。プロットはしない。	
04		=-2	速度Uを " "	
05		=-3	速度Vを " "	
06		=101	温度Tを " プロットも行なう。	
07		=102	速度Uを " "	
08		=103	速度Vを " "	
09				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
1	2	3	4	5

ENDカード

INPUT DATA SHEET

PAGE Of

PROBLEM										JOB No.										JOB NAME										PROGRAMMER										DATE																																																																																																														
																																								19 . . .																																																																																																														
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0										1 2 3 4 5 6 7 8 9 0										1 2 3 4 5 6 7 8 9 0										1 2 3 4 5 6 7 8 9 0										1 2 3 4 5 6 7 8 9 0										1 2 3 4 5 6 7 8 9 0										1 2 3 4 5 6 7 8 9 0										1 2 3 4 5 6 7 8 9 0																																																																																
01	END			(A3)																																																																																																																																																		
02																																																																																																																																																						
03																																																																																																																																																						
04											END										1 カラムめから										END と記入する。																																																																																																																							
05																																																																																																																																																						
06																																																																																																																																																						
07																																																																																																																																																						
08																																																																																																																																																						
09																																																																																																																																																						
10																																																																																																																																																						
11																																																																																																																																																						
12																																																																																																																																																						
13																																																																																																																																																						
14																																																																																																																																																						
15																																																																																																																																																						
16																																																																																																																																																						
17																																																																																																																																																						
18																																																																																																																																																						
19																																																																																																																																																						
20																																																																																																																																																						
										1										2										3										4										5										6										7										8																																																																						

Fig.A1-12 END Card

3. JCL

大洗工学センターのバーサテックにプロッタ出力する場合のJCLは次のように作成する。

```

-//U#####*-*JOB <PASSWORD>,MSGCLASS=A,MSGLEVEL=(2,0),NOTIFY=U####,
//          ATTR=(T1,C2,W6)      (出力量に応じて定める)
//          EXEC PGM=NAPS
//STEPLIB DD DSN=Q3021.PLOT2D.LOAD,DISP=SHR
-//FT01F001 DD DSN=U#####.PLOT,DISP=SHR      (プロッタ用ファイル名)
//FT04F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
-//FT05F001 DD *
)      カード入力データ
-//FT06F001 DD SYSOUT=A
//FT11F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
-//FT12F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT13F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
-//FT14F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT21F001 DD DUMMY
-//VECTR1 DD DSN=&&VECTR1,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(3,1)),DISP=(,PASS)
//VECTR2 DD DSN=&&VECTR2,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,5)),DISP=(,PASS)
-//PLOTLOG DD SYSOUT=A
//PLOTPRM DD *
-&PLOT-XMAX=2000.0-&END-      (プロット量に応じて必要紙長さ (cm) を入力する。)
//PLOT EXEC PGM=VTPL0T
//STEPLIB DD DSN=SYS9.VTECLIB,DISP=SHR
//PLOTLOG DD SYSOUT=A
-//VECTR1 DD DSN=&&VECTR1,UNIT=WORK,DISP=(OLD,DELETE)
//VECTR2 DD DSN=&&VECTR2,UNIT=WORK,DISP=(OLD,DELETE)
//SYSVECTR DD SYSOUT=V
//

```

プロッタ用ファイルをTRANS2Dにより作成する際に、ID=2~5を指定することにより変数T (通常はID=1で温度)にK, e, ϵ_M/ν , P_T を格納しプロッタ出力することができる。

大洗工学センターのNLPにプロッタ出力する場合のJCLは次のように作成する。

```

-//U#####*-*JOB <PASSWORD>,MSGCLASS=A,MSGLEVEL=(2,0),NOTIFY=U####,
//          ATTR=(T1,C4,W6)      (出力量に応じて定める)
//          EXEC PGM=NAPS
//STEPLIB DD DSN=Q3021.NLPL0T.LOAD,DISP=SHR
//PLOTPRM DD DUMMY
//PLOTLOG DD SYSOUT=A
//GDFILE DD SYSOUT=(N,KNGWTR),DEST=CENTRAL-
-//FT01F001 DD DSN=U#####.PLOT,DISP=SHR      (プロッタ用ファイル名)
//FT04F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT05F001 DD *

```

(カード入力データ

```
//FT06F001 DD SYSOUT=A
//FT11F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT12F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT13F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT14F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT21F001 DD DUMMY
//
```

TRANS 2Dによりワーク領域上にプロッタ用ファイルを作成し、次にステップ
でNAPSによりプロット出力し、ジョブ終了後プロッタ用ファイルを消す1ジョ
ブ2ステップのJCLは次のように作成する。(NLP装置使用の時)

```
//U####** JOB (PASSWORD),MSGCLASS=A,MSGLEVEL=(2,0),NOTIFY=U####,
// ATTR=(T1,C4,W6)
//TRNS EXEC FORTCLG
//FORT.SYSPRINT DD DUMMY
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3021.TRANS2D.FORT,DISP=SHR
//G0.FT10F001 DD DSN=U####.POST,DISP=SHR (ポストファイル)
//G0.FT12F001 DD DSN=&&TRANS,SPACE=(CYL,(3,1),RLSE),DISP=(NEW,PASS),
// UNIT=WORK,DCB=(RECFM=VBS,LRECL=X,BLKSIZE=6160,DSORG=PS)
//G0.SYSIN DD * (ワーク領域にプロッタ用ファイル作成)
&DATA
  ID=1,ANU=0.33E-6,CYL=1.0,
  IR1=2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,
&END } TRANS 2D用
      カード入力データ
//NAPS EXEC PGM=NAPS
//STEPLIB DD DSN=Q3021.NLPL0T.L0AD,DISP=SHR
//PL0TPRM DD DUMMY
//PL0TL0G DD SYSOUT=A
//GDFILE DD SYSOUT=(N,KNGWTR),DEST=CENTRAL
//FT01F001 DD DSN=&&TRANS,UNIT=WORK,DISP=(OLD,DELETE)
//FT04F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT05F001 DD *
```

(NAPS用
カード入力データ

```
//FT06F001 DD SYSOUT=A
//FT11F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT12F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT13F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT14F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
//FT21F001 DD DUMMY
//
```

付録 2 解 析 例

2.1 解析例 1 (炉容器上部プレナムのストラティフィケーション試験～1/10スケール水流动試験)

試験体形状を Fig. A2-1, Fig. A2-2 に示す。試験体はアクリル製であり流動状況を観察できる。無色の高温水 ($T_H = 50^\circ\text{C}$) が NSL レベルまで満たされ静止している状態で、青色に着色された冷水 ($T_C = 24^\circ\text{C}$) を流し始めた。流量 1 l/sec に到達後一定流量を保持した。試験中水面高さはほぼ NSL レベルに保たれた (最大 10 mm 程度の変動幅)。冷水注入開始後の流量時間変化および炉心出口部 (プレナムへの入口部) 温度時間変化を Fig. A2-3 に示す。図中の点線は NAGARE-2D による解析に用いた入力条件である。解析では冷水注入開始後 5 sec 時点をも $t = 0.0\text{ sec}$ として、流量は最初から一定値 1 l/sec であるとした。解析パラメータは次の通りである。

$$\circ \text{水の物性} \quad \begin{cases} \lambda = 0.15 \times 10^{-8} \text{ kcal/m} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}, \quad \rho = 992.3 \text{ kg/m}^3, \\ c = 1.0 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}, \quad \beta = 0.38 \times 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}, \\ \nu = 0.668 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec} \end{cases}$$

○ 壁面スリップ条件～半スリップ ($S_\ell = 0.5$)

○ 乱流パラメータ～ $\varepsilon_M = \varepsilon_H = 0$

○ 温度境界条件～断熱条件

○ フローホールのモデル化～部分開口メッシュを用いて実面積を与える。圧損 $\Delta P =$

$$\zeta \frac{\rho}{2} u_f^2, \quad \zeta = 1.9 \text{ を考慮する。}$$

使用したユーザーサブルーチンを List A2-1 に、入力データ (初期解析) を List A2-2 に示す。メッシュ図 (流体領域) を Fig. A2-4 に示す。炉心出口部の温度変化開始時刻 $t = t_{\text{LAG}} = 10\text{ sec}$ を $t^* = 0$ として無次元時間 t^* を次のように定める。

$$t = \frac{1}{V} \int_{t_{\text{LAG}}}^t Q dt = \frac{Q(t - t_{\text{LAG}})}{V}$$

Q ; 流量 1 l/sec

V ; 内筒内側のプレナム容量 270 l

$t = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ における内筒内側プレナム内の軸方向温度分布の実験値と解析値の比較を Fig. A2-5(a)～(e) に示す。内筒内側のフローホール近傍と内筒上端近傍

の温度時間変化の実験値と解析値の比較をFig. A 2-6(a)に示す。内筒上端とフローホール
 の中間位置における内筒の内と外の温度時間変化の比較をFig. A 2-6(b)に示す。UCS近
 傍の温度時間変化の比較をFig. A 2-6(c)に示す。出口ノズル部の温度時間変化の比較（実
 験値はノズル上下2点，解析は平均体積流量温度）をFig. A 2-6(d)に示す。解析により得
 られたフローホール通過割合（ Q_f/Q ）の時間変化をFig. A 2-7に示す。図中の実験結
 果はフローホールでの圧損がアニュラス部とブレナム内側との密度差による位置エネルギー
 差に等しいものとして，次式，

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho}{2} u_f^2 = g \cdot h \cdot \Delta \rho$$

$\zeta = 1.9$ ， $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ ， $h = 0.3367 \text{ m}$ ～フローホールから内筒頂までの
 高さ， $\Delta \rho$ ～アニュラス部とブレナム内側との密度差

により推定したものである。ストラティフィケーション界面高さの時間変化をFig. A 2-8
 に示す。図中の実験結果は目視観察により，解析結果は温度範囲が40～45℃の領域の
 高さである。

解析は4回に分けて実施した。その概要は次のとおりである。

① 初期解析（ $t = 0 \sim 10 \text{ sec}$ ）～CPU 11 sec（M-200使用）

流動解析のみ（ITEMP=0，IRSRT=0）

ディスク出力時刻 $t = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ sec}$

レコード番号1にメッシュデータ，2～6に計算結果が書き込まれる。

② リスタート解析1（ $t = 10 \sim 280 \text{ sec}$ ）～CPU 4 min 20 sec

流動伝熱解析（ITEMP=1，IRSRT=1，NRESRT=6）

ディスク出力時刻 $t = 37, 64, 91, 145, 172, 199, 226, 253,$

280 sec

レコード番号7～16に計算が書き込まれる。

③ リスタート解析2（ $t = 280 \sim 550 \text{ sec}$ ）～CPU 2 min 56 sec

流動伝熱解析（ITEMP=1，IRSRT=1，NRESRT=16）

ディスク出力時刻 $t = 307, 334, 361, 388, 415, 442, 469, 496,$

523, 550 sec

レコード番号17～26に計算結果が書き込まれる。

④ リスタート解析 3 ($t = 550 \sim 1090 \text{ sec}$) ~ CPU 4min12 sec

流動伝熱解析 (ITEMP=1, IRSRT=1, NRESRT=26)

ディスク出力時刻 $t = 685, 820, 955, 1090 \text{ sec}$

レコード番号 27 ~ 30 に計算結果が書き込まれる。

M200による計算時間は合計 11min39 secであった。レコード番号 6 ($t^* = 0$) ~ 22 ($t^* = 1.6$), 24 ($t^* = 1.8$), 26 ($t^* = 2.0$) の結果を TRANS2D により処理しプロッタ用ファイルを作成し NAPS にてプロッタ出力した。TRANS2D 入力データおよび NAPS 入力データを List A2-3 に示す。プロッタ出力結果を Fig. A2-9 に示す。レコード番号 6 ~ 22, 24, 26 の計算結果は TRANS2D による処理でステップ 1 ~ 19 としてプロッタ用ファイルに書き込まれる。

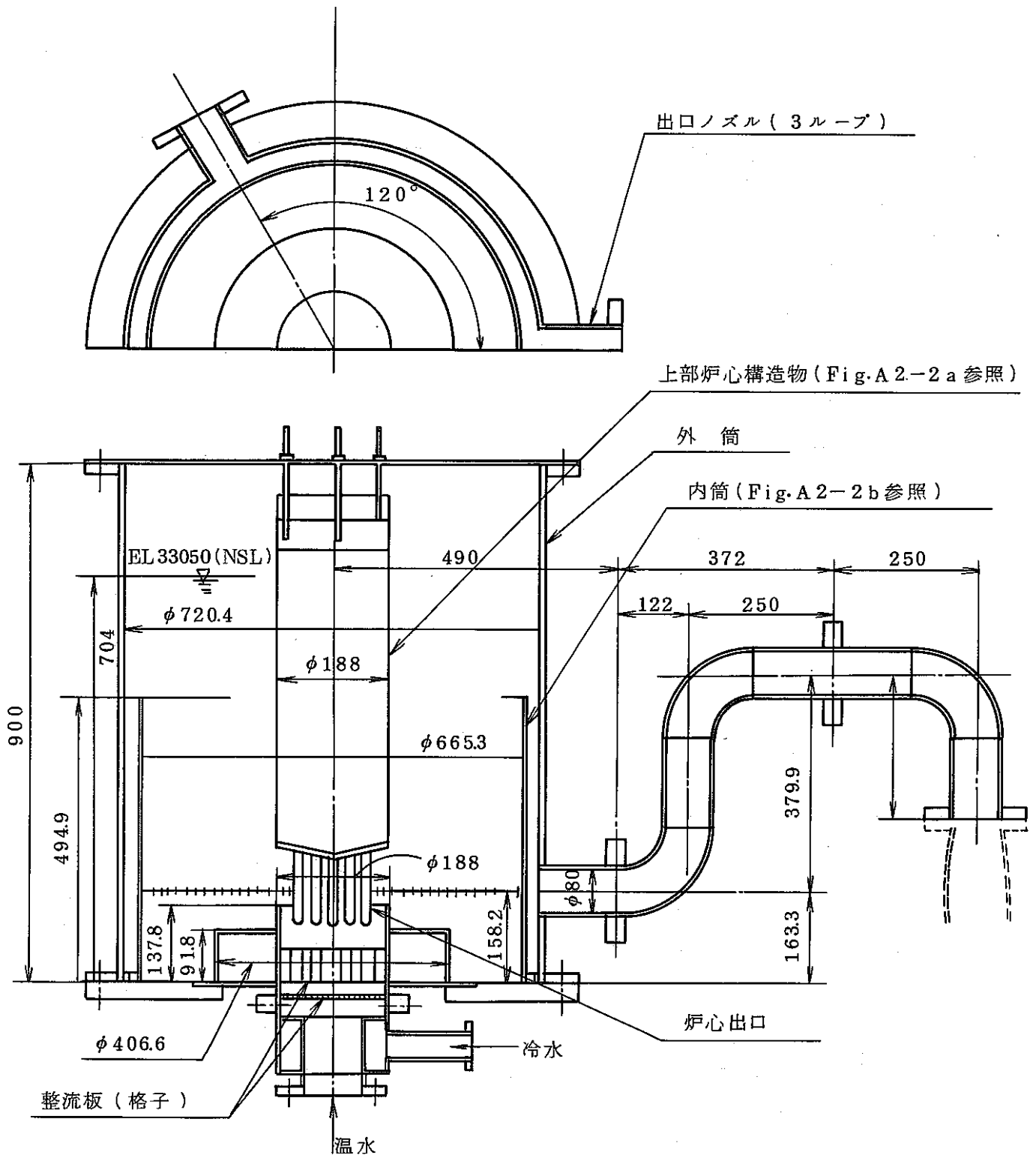
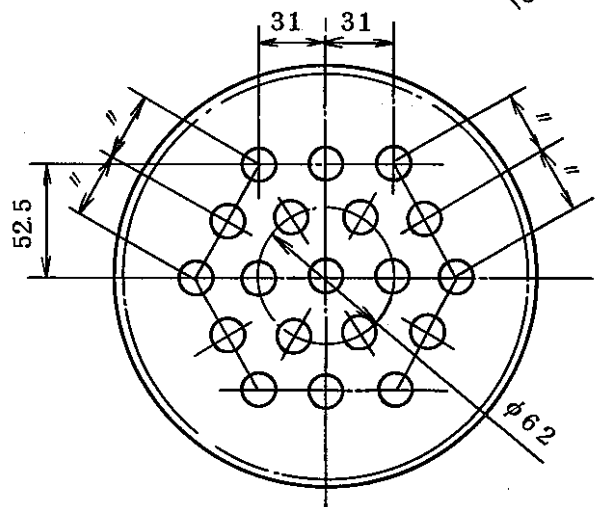
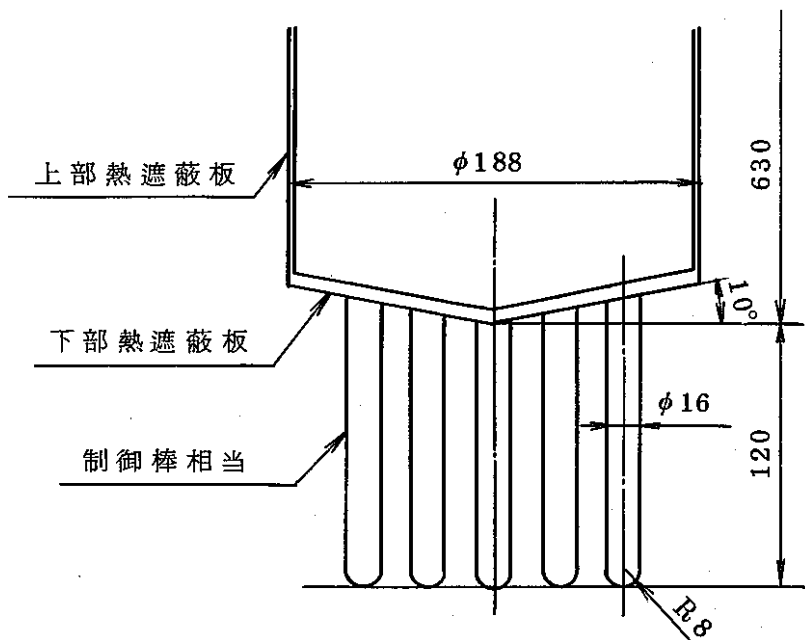
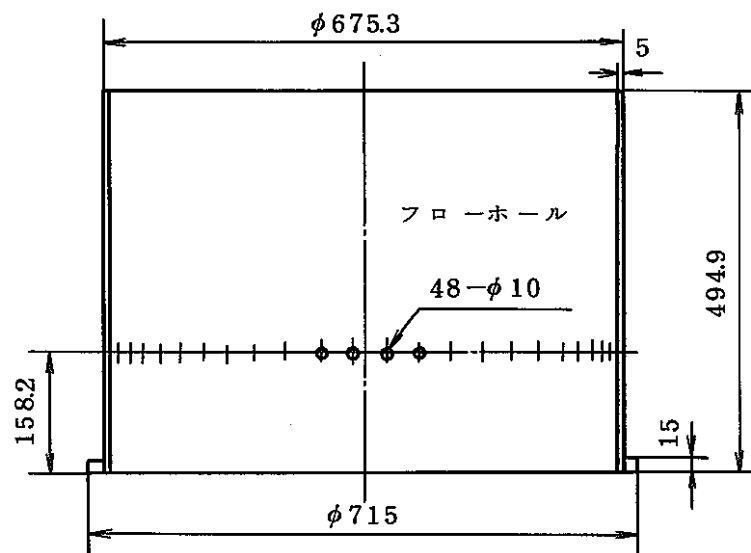
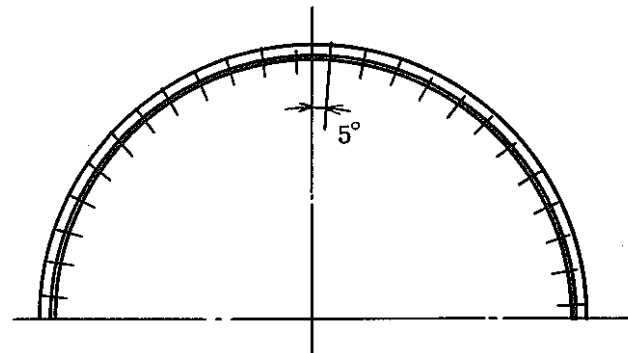


Fig. A2-1 Configuration of R/V outlet plenum



a. 炉心上部構造物



b. 内筒

Fig.A2-2 Configuration of UCS and inner Barrel

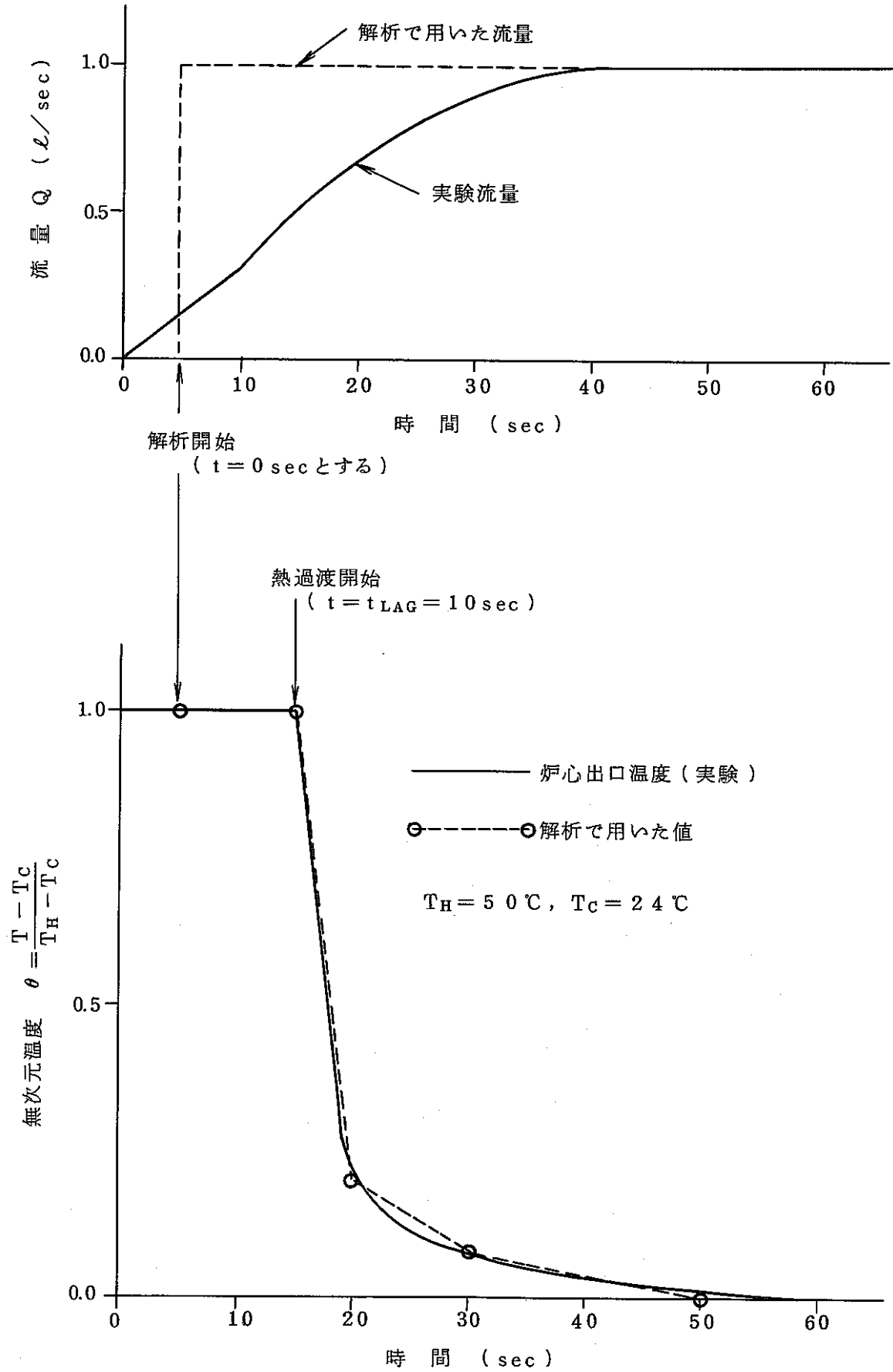


Fig.A2-3 Time-rate Change of Temperature and Flow Rate at Core Outlet

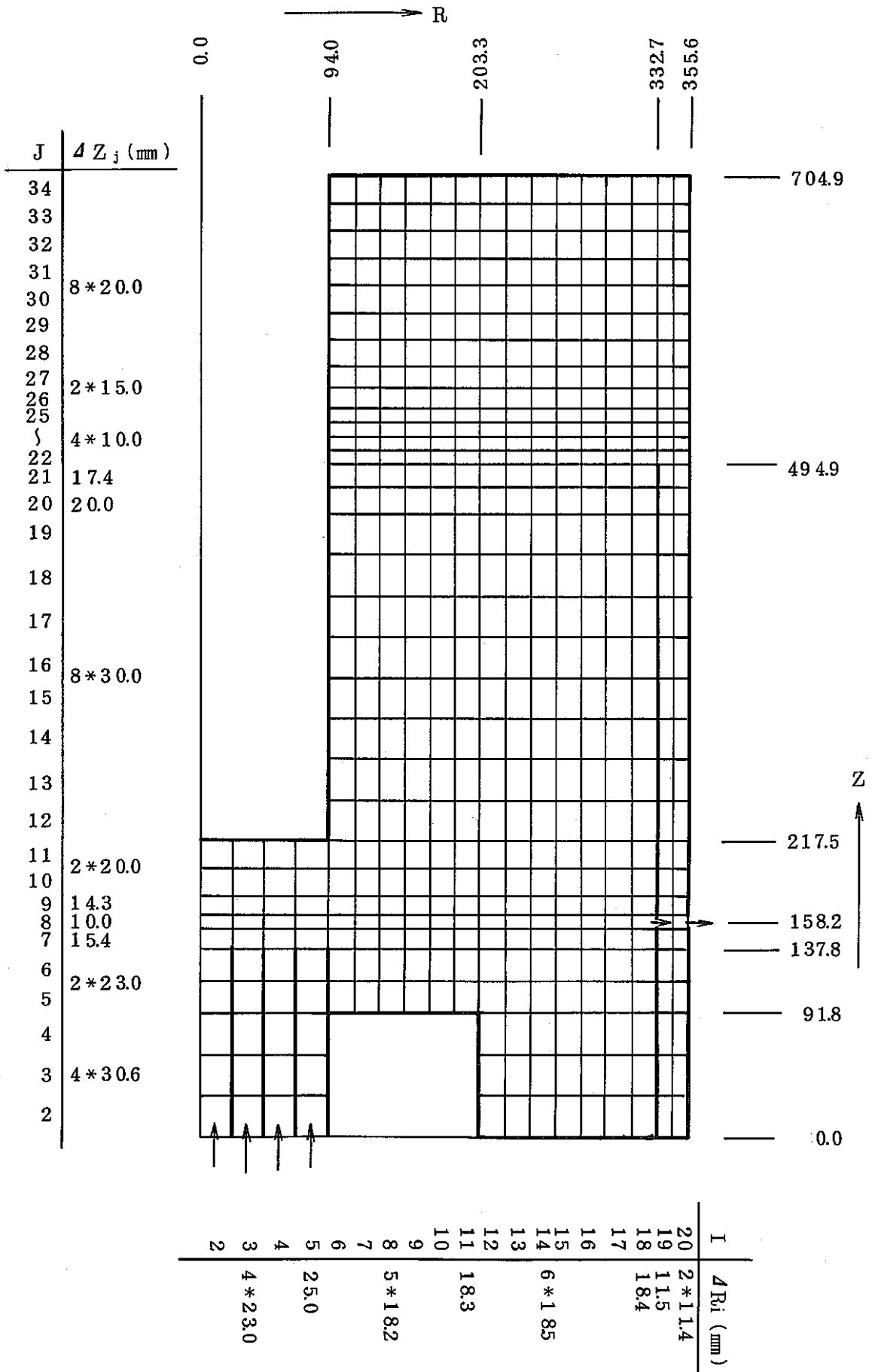


Fig.A2-4 Mesh Arrangement (Liquid Region)

List A2-1 User Subroutine of Analysis Example 1

```

SUBROUTINE SETIJ
COMMON/BL2/IJF(30,35)
DO 10 J=12,34
DO 10 I=2,5
10 IJF(I,J)=-1
DO 20 J=2,4
DO 20 I=6,11
20 IJF(I,J)=-1
DO 30 I=2,5
30 IJF(I,1)=1
IJF(21,8)=1
RETURN
END

SUBROUTINE ABIN
COMMON/BL9/HR(30,35),HZ(30,35)
COMMON/BL12/AL(30,35),BL(30,35),ALF(30,35),BLF(30,35),G(30,35)
C** INLET DIFFUSER
DO 10 I=2,5
DO 15 J=2,6
15 AL(I,J)=0.0
10 CONTINUE
C** INNER BARREL SETTING
DO 20 J=2,21
20 AL(18,J)=0.
C** FLOW HOLE OPEN RATE & PRESSURE DROP COEFF.
AL(18,8) =0.18
ALF(18,8)=1.9
RETURN
END

SUBROUTINE INV(VIN,TIME,TLAG)
DIMENSION VIN(3)
VIN(1)=1.0E-3/6.2832
RETURN
END

SUBROUTINE BCVEL(TIME,TLAG)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL8/SR(30,35),SZ(30),DUM1(3150),DUM2(2100)
DIMENSION VIN(3)
CALL INV(VIN,TIME,TLAG)
SIN=0.
DO 10 I=2,5
10 SIN=SIN+SZ(I)
V1=VIN(1)/SIN
DO 20 I=2,5
20 V(I,1) =V1
U(20,8)=VIN(1)/SR(20,8)
RETURN
END

```

ListA2-1 User Subroutine of Analysis Example 1 (continued)

```

SUBROUTINE BCTEMP(TIME,TLAG)
COMMON/BL5/T(30,35),DUMMY(1050)
DIMENSION TIN(4),TM(4)
DATA TM/0.,5.,15.,35./
DATA TIN/50.,29.2,26.,24./
  TI=TIME-TLAG
  IF(TI.LE.0.) GO TO 100
  IF(TI.GE.35.) GO TO 200
  N=0
10  N=N+1
   IF(TI.GT.TM(N))GO TO 10
   TT=TIN(N-1)+(TIN(N)-TIN(N-1))*(TI-TM(N-1))/(TM(N)-TM(N-1))
   GO TO 150
100 TT=50.
   GO TO 150
200 TT=24.
150 DO 220 I=2,5
   T(I,1) =TT
220 CONTINUE
C** TEMPERATURE GRADIENT =0 AT OUTLET FLOW
   T(21,8)=T(20,8)
  RETURN
  END

```

List A2-2 Input Data of Analysis Example 1 (Initial Analysis, t=0~10 sec)

```

&DATA
IBAR=19, JBAR=33, ICYL=1, ITURB=1, ITNU=0, UPVEL=1.0,
DELR=4*0.023, 0.025, 5*0.0182, 0.0183, 6*0.0185, 0.0184, 0.0115, 2*0.0114,
DELZ=4*0.0306, 2*0.023, 0.0154, 0.01, 0.0143, 2*0.02, 8*0.03, 0.02, 0.0174,
      4*0.01, 2*0.015, 8*0.02, OMG=1.8,
TK=1.5E-4, AL0=992.3, C=1.0, ANU=0.668E-6, ABETA=3.8E-4, SLIP=0.5,
ITERL=100, EPSI=0.001, GZ=-9.8, ALPH=0.9, TUNI=50.0, EPM=0.0,
DELT=0.1, IDELT=5, IDSK=1, TLAG=10.0, IQPRI=1,
NWRITE=1, IW=6, 12, 18, 19, 20, JW=2, 8, 12, 16, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 34,
IRSRT=0, NRESRT=0, ITEMP=0, ITPRI=0, CWDSK=5, CWPRT=5,
TPRT=2., 4., 6., 8., 10.,
TDSK=2., 4., 6., 8., 10.,
&END

```

リスタート解析時に
変更を要する。

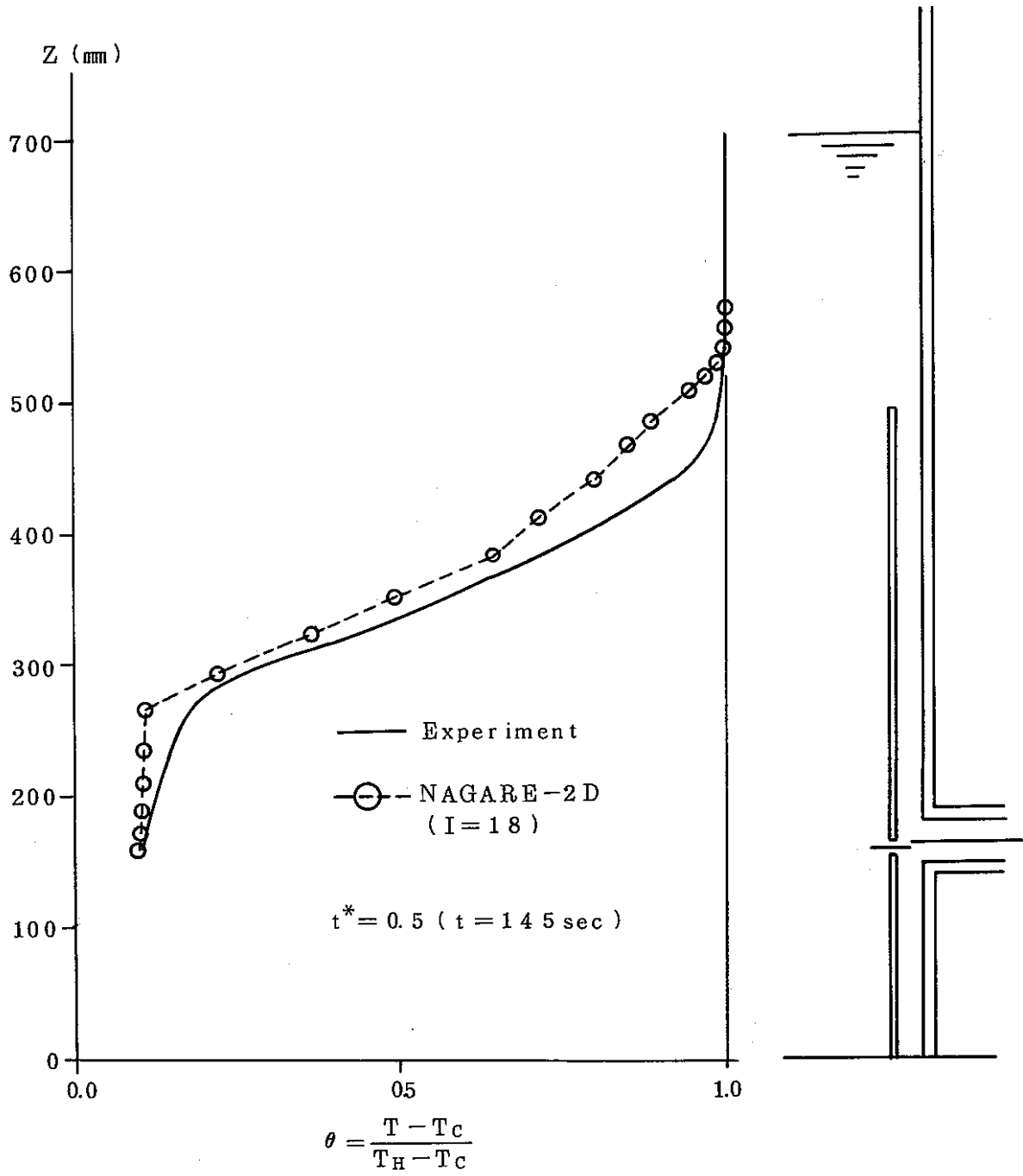


Fig.A2-5(a) Axial Temperature Distribution ($t^*=0.5$)

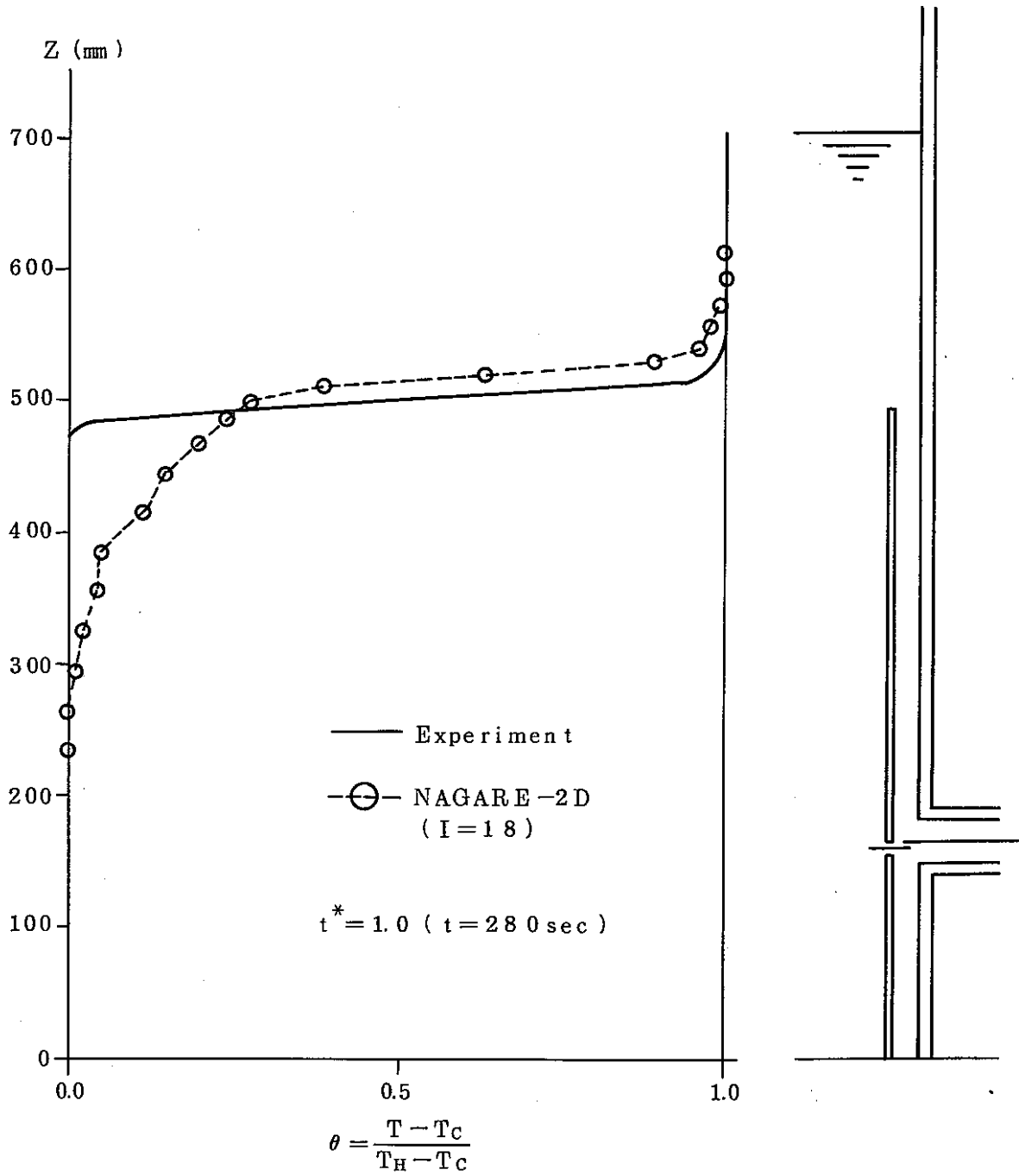


Fig. A2-5(b) Axial Temperature Distribution ($t^*=1.0$)

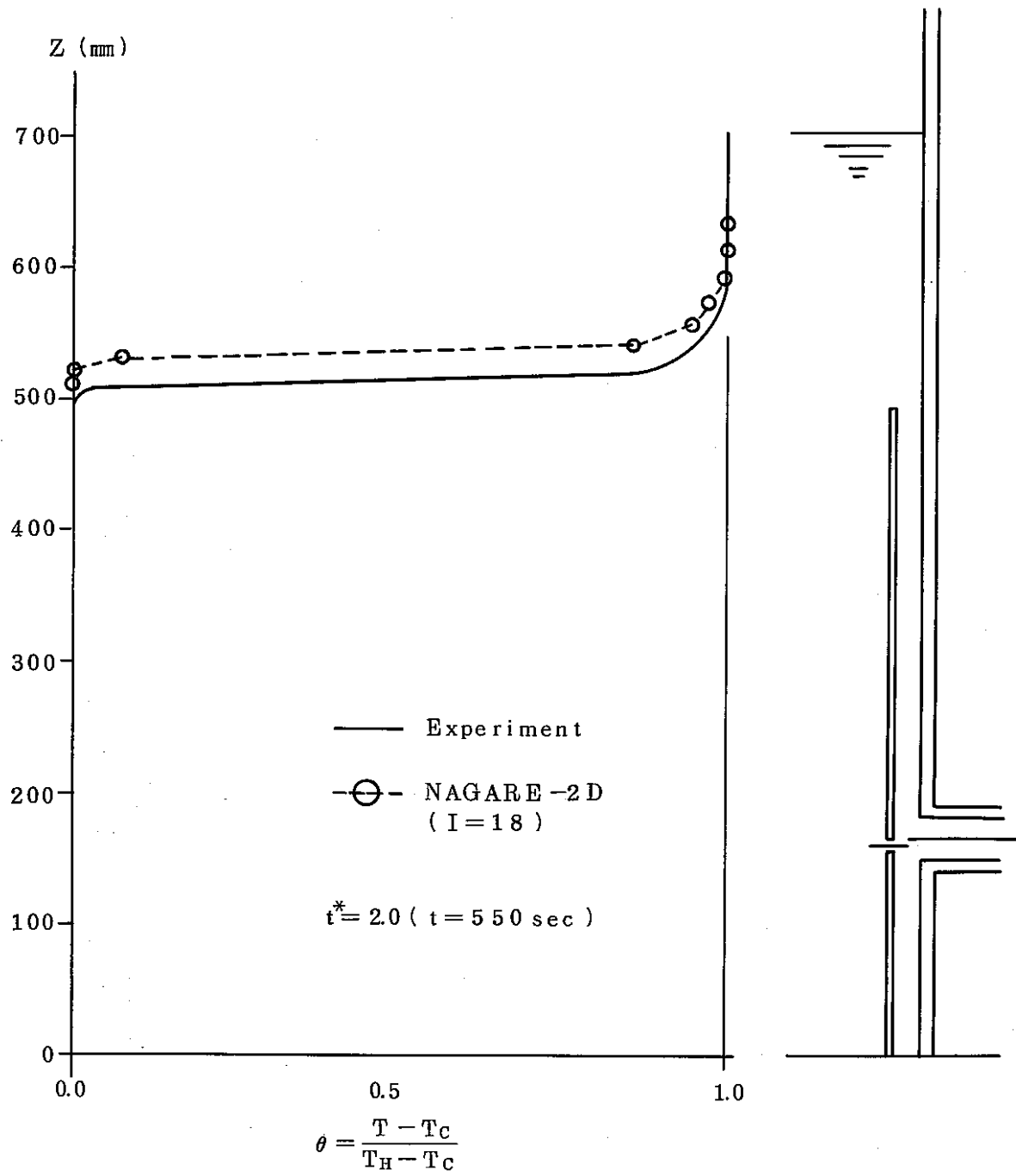


Fig. A2-5(c) Axial Temperature Distribution ($t^* = 2.0$)

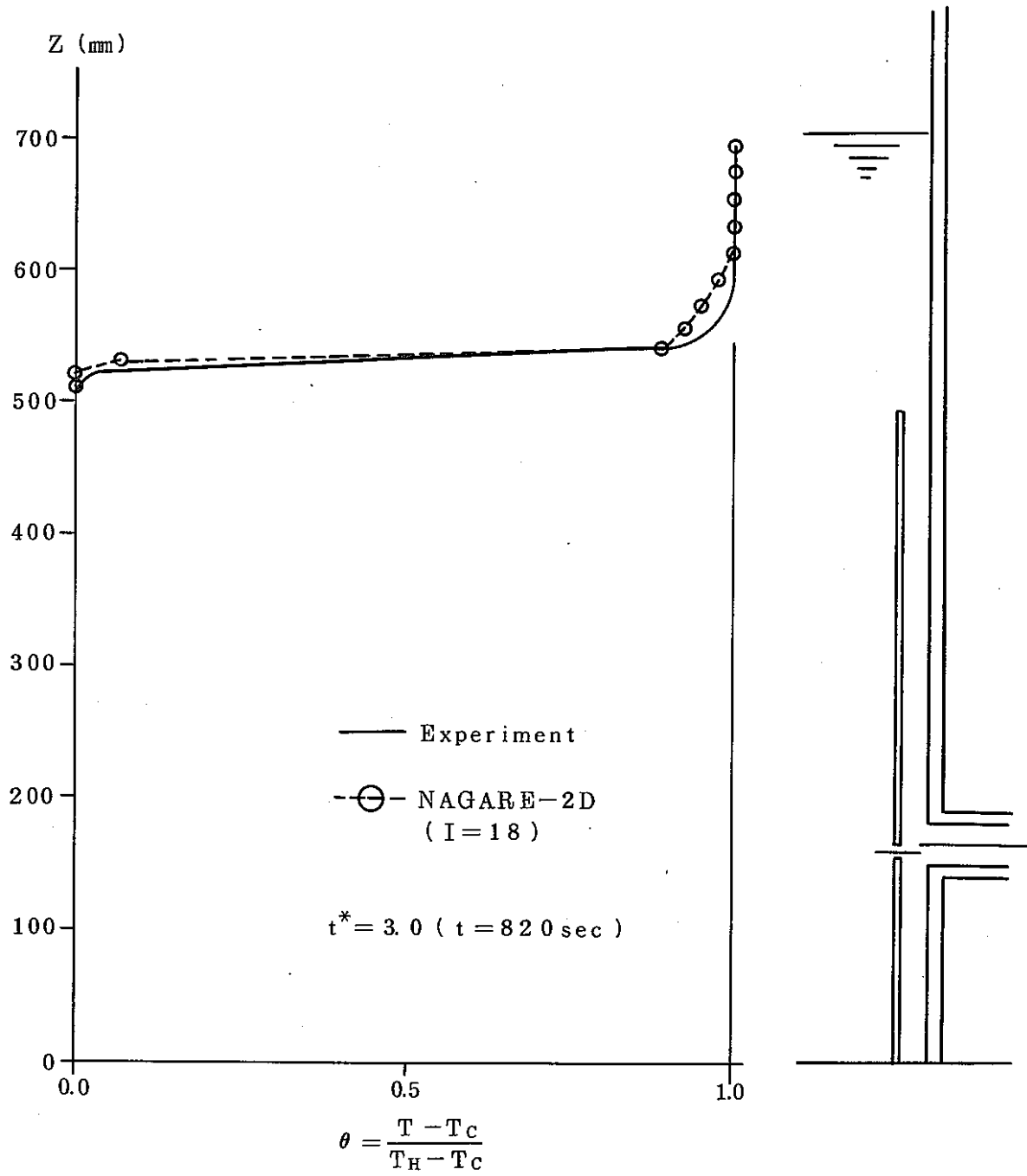


Fig. A2-5(d) Axial Temperature Distribution ($t^*=3.0$)

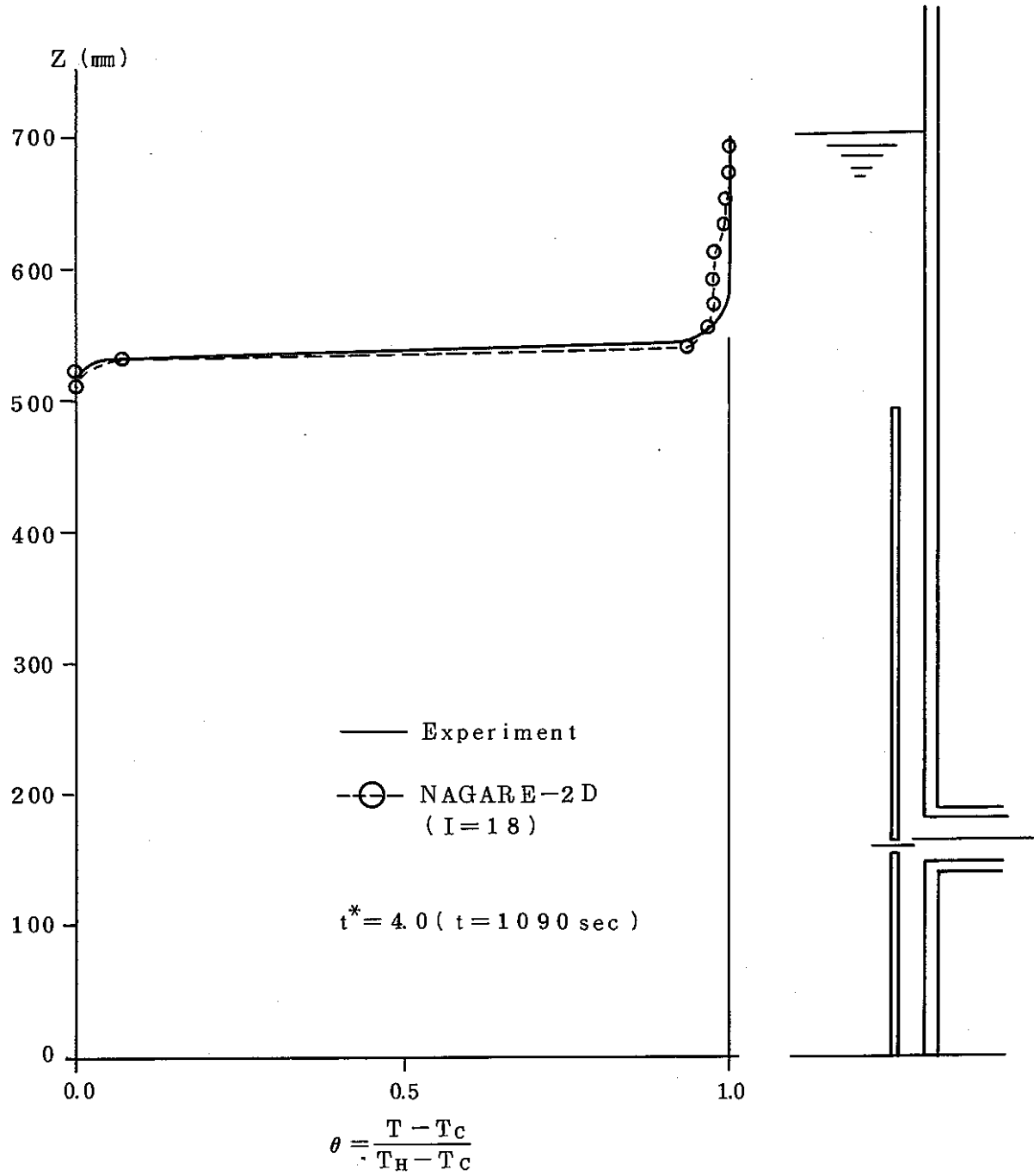
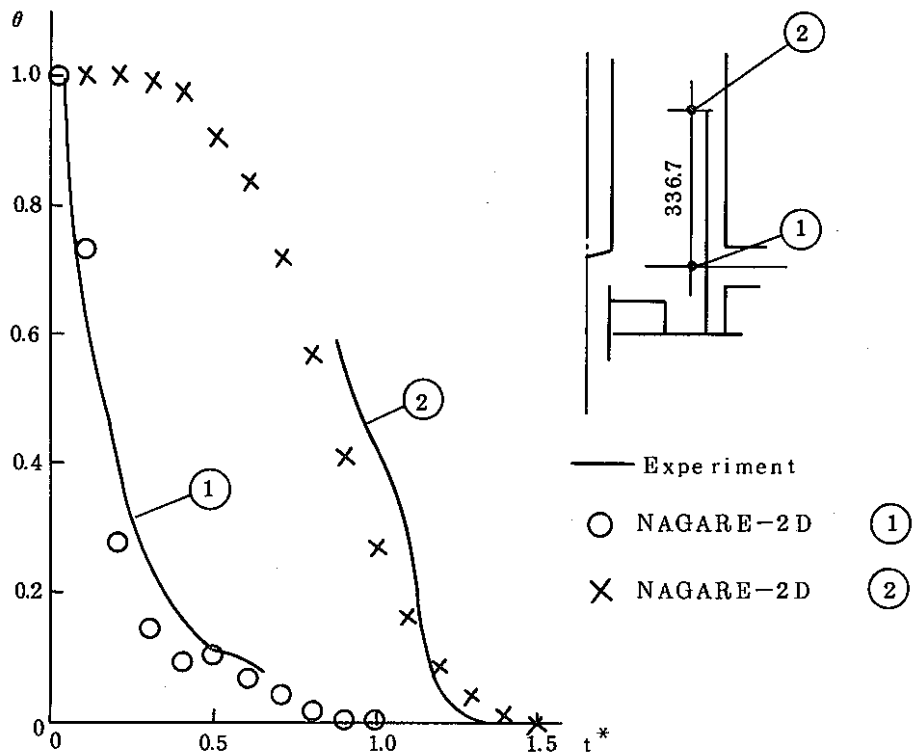
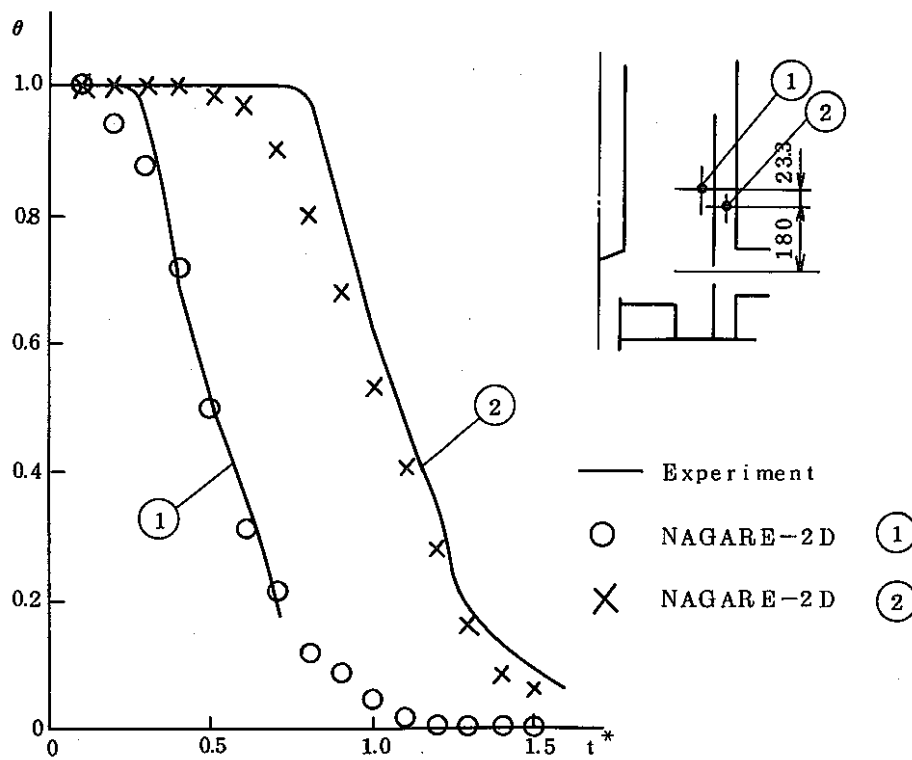


Fig. A2-5(e) Axial Temperature Distribution ($t^*=4.0$)

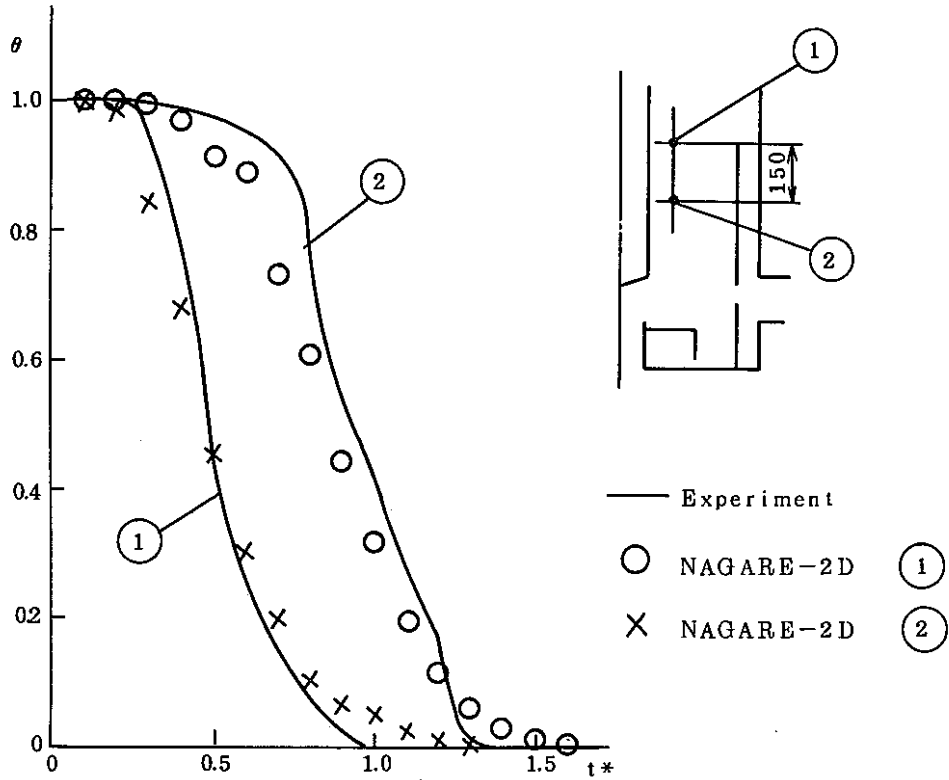


(a) 内筒内側 (フローホール近傍, 上端近傍)

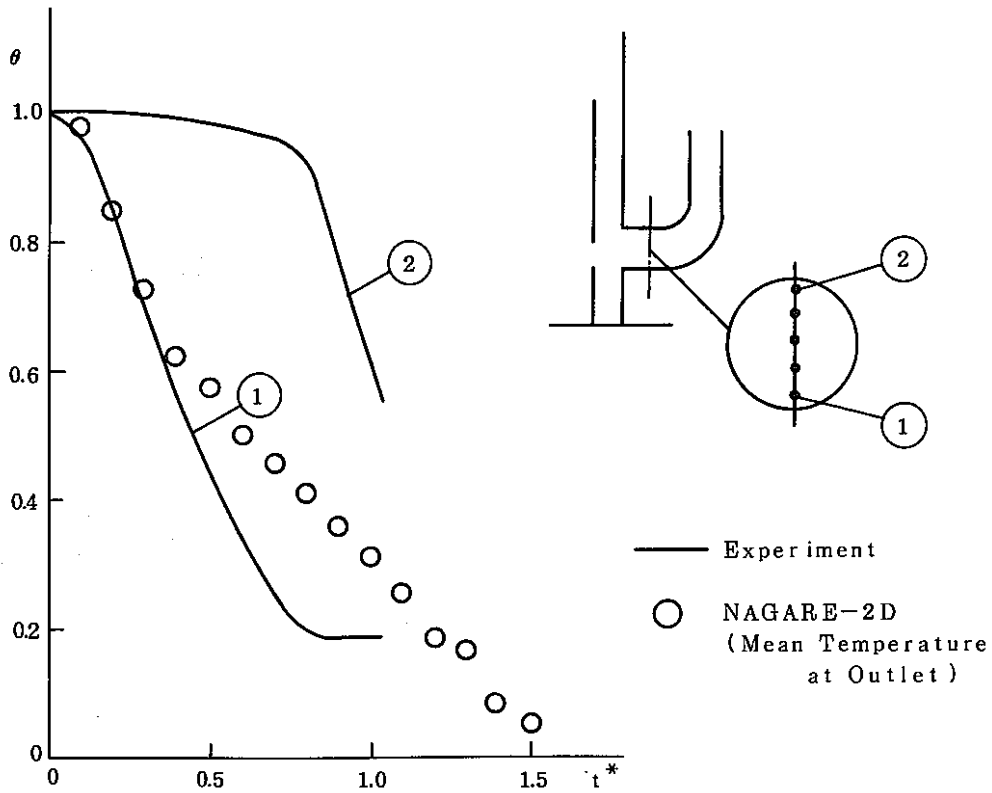


(b) 内筒上端とフローホールの中間位置

Fig.A2-6 Time-rate Change of Temperature at Points of Interest



(c) UCS 近傍



(d) 出口ノズル部

Fig.A2-6 Time-rate Change of Temperature at Points of Interest

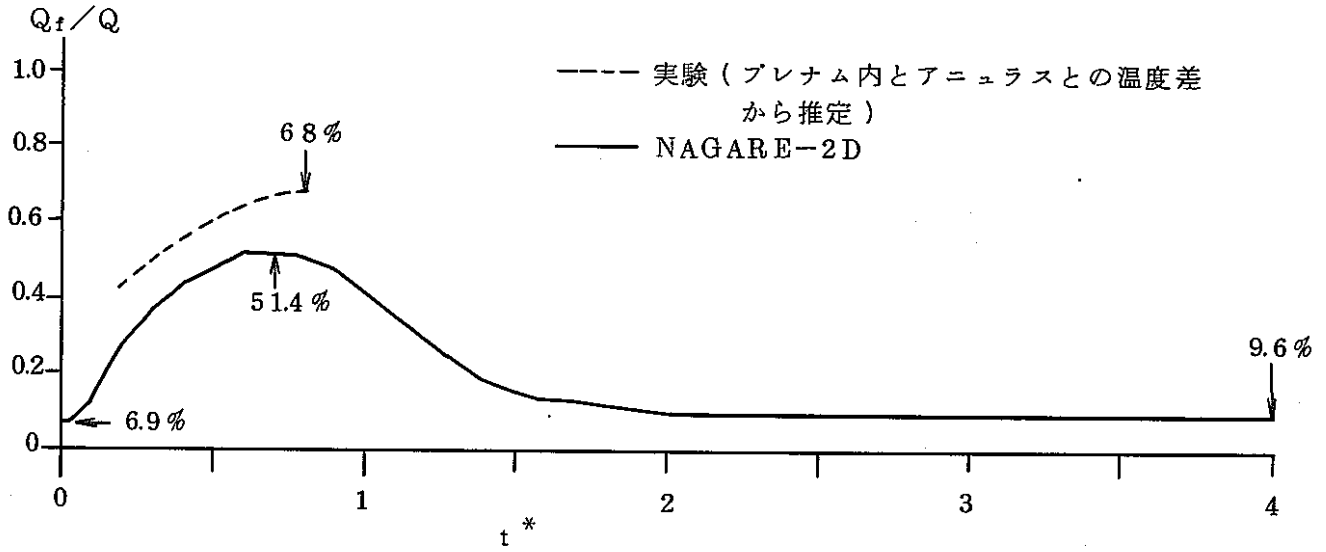


Fig.A2-7 Time-rate Change of Flow Rate through Flow Holes

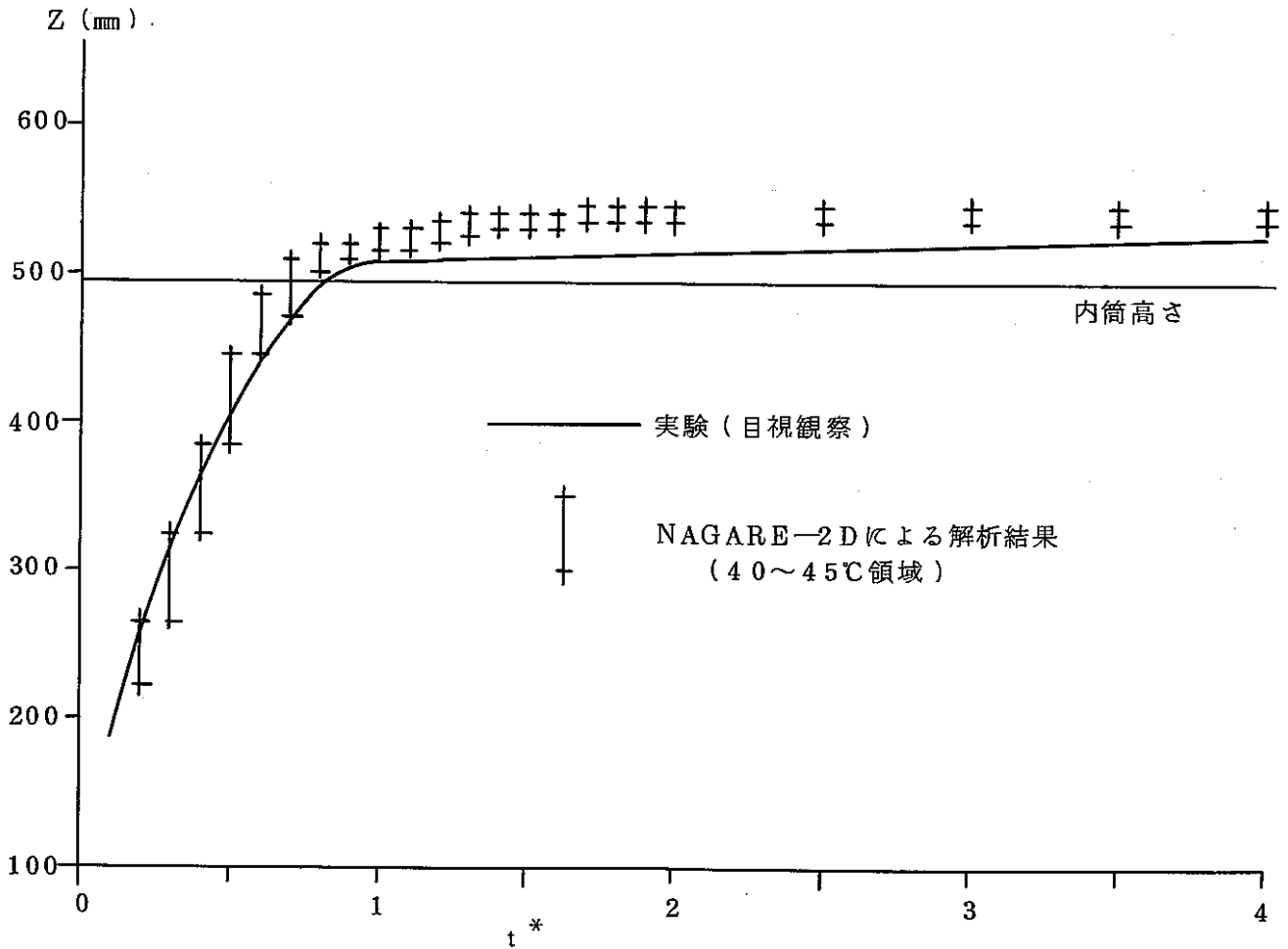


Fig.A2-8 Density Interface Height of Stratification

List A2-3 Input Data of TRANS 2D and NAPS

TRANS 2D入力データ

```

&DATA
ID=1,ANU=0.668E-6,
IR1=6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,24,26,
&END
    
```

NAPS入力データ

	カラム数 →									
	10	20	30	40	50	60	70			
1/10 STRATIFICATION -- WATER										
1	1	1	23.0	26.0						
1				1	1					
(ブランクカード1枚)										
2									1	
3	7	1	4	6	8	11	16	19		
3					1	1	10			
0	6	4	6	8	11	16	19			
1	4	1	19							
685.	10.		135.	2.5	52.6	21.4	2.6	1.		
	18	8	1	1						
	18	16	1	1						
	20	16	1	1						
	18	22	1	1						
1	2	1	19							
685.	10.		135.	2.5	52.6	21.4	2.6	1.		
	7	16	1	1						
	7	22	1	1						
0										
1	4	18								
0.8	0.0		0.1	2.0	52.6	21.4	2.6	1.		
	6	1	1							
	11	1	1							
	16	1	1							
	19	1	1							
0										
END										

1/10 STRATIFICATION -- WATER

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 1 TIME 10.05

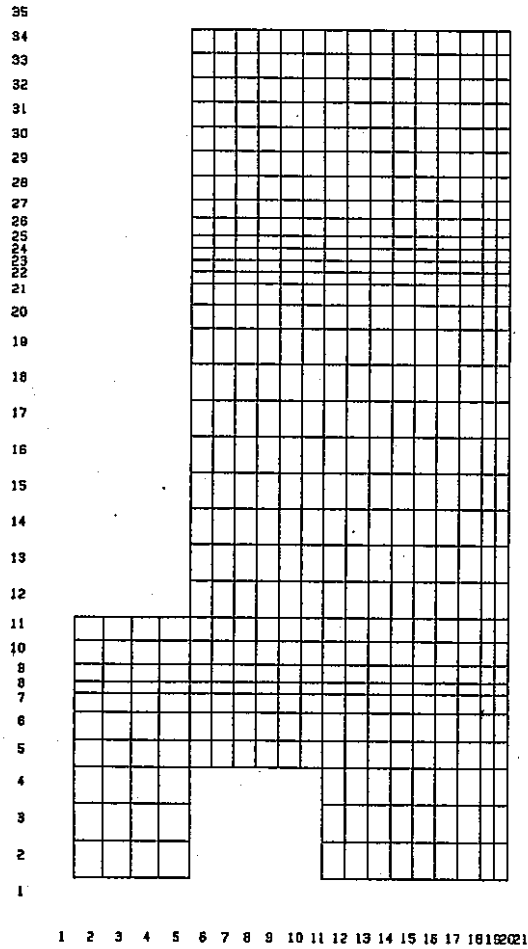
VECTOR SCALE

→ 4.00 X 10⁻²

PNC TN941 84-50

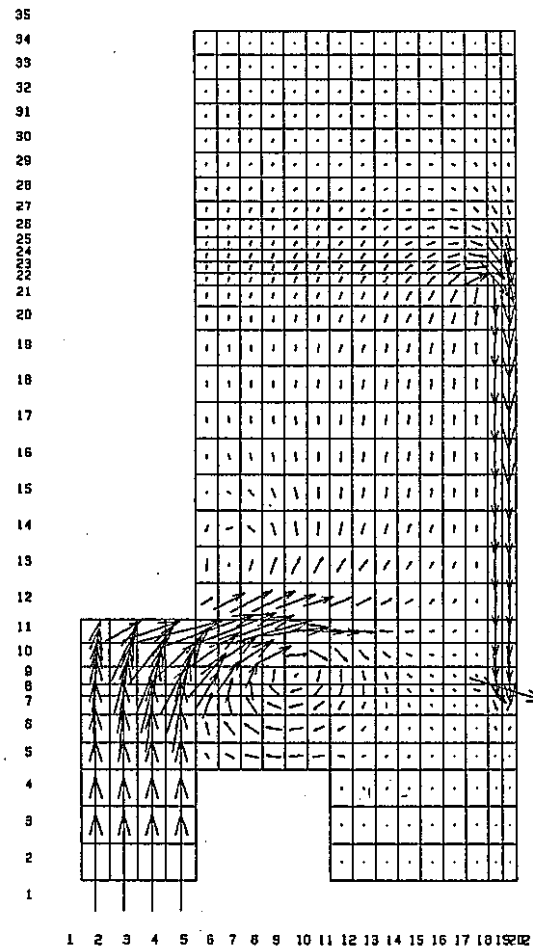
t* = 0.0 (炉心出口温度变化开始)

- 115 -



MESH ARRANGEMENT

MESH SCALE $\frac{8.}{0.} 8.89 \times 10^{-2}$



VELOCITY VECTOR FIELD

MESH SCALE $\frac{8.}{0.} 8.89 \times 10^{-2}$

Fig. A2-9 NAPS Plotter Output (1)

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 4 TIME 91.17

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 6 TIME 145.06

VECTOR SCALE

→ 4.00 X 10⁻²

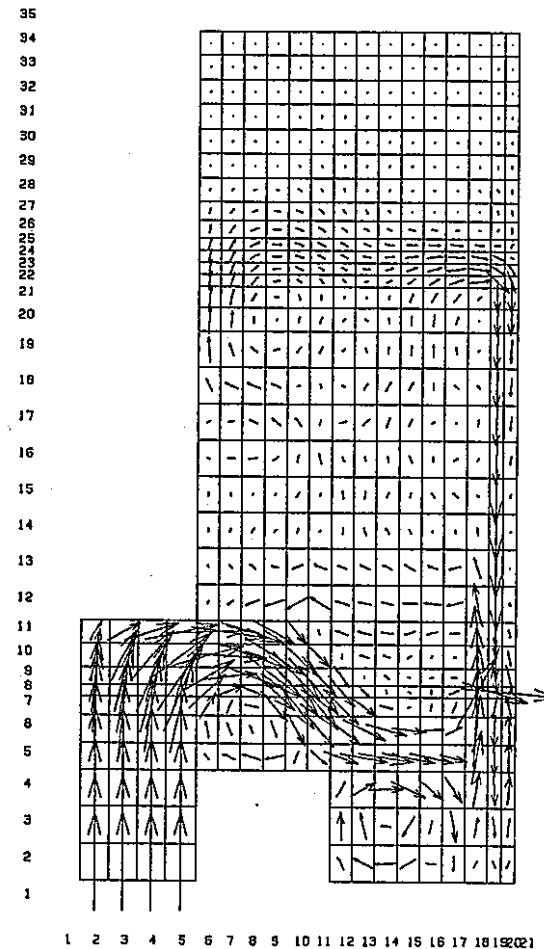
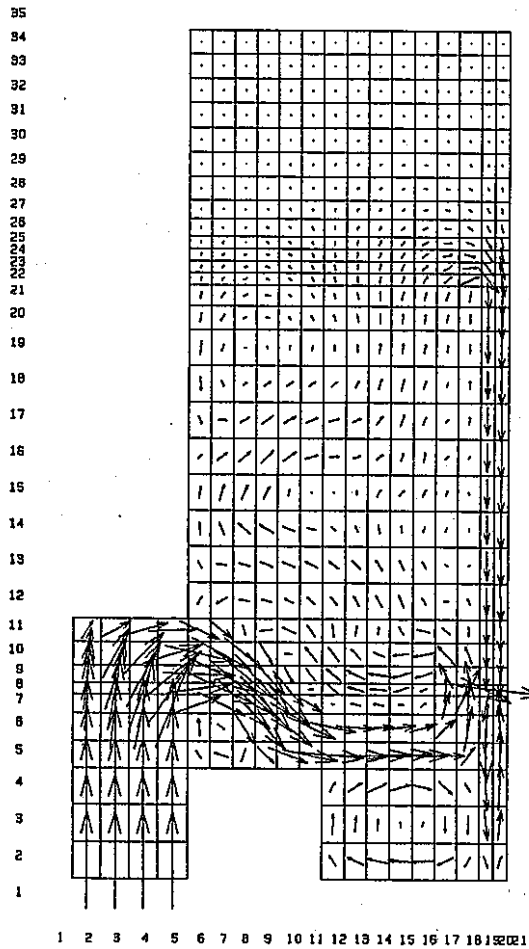
VECTOR SCALE

→ 4.00 X 10⁻²

t* = 0.3

t* = 0.5

- 116 -



VELOCITY VECTOR FIELD

MESH SCALE 0. $\frac{8.}{8.89 \times 10^{-2}}$

VELOCITY VECTOR FIELD

MESH SCALE 0. $\frac{8.}{8.89 \times 10^{-2}}$

Fig.A2-9 NAPS Plotter Output (2)

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 8 TIME 199.15

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 11 TIME 280.08

VECTOR SCALE

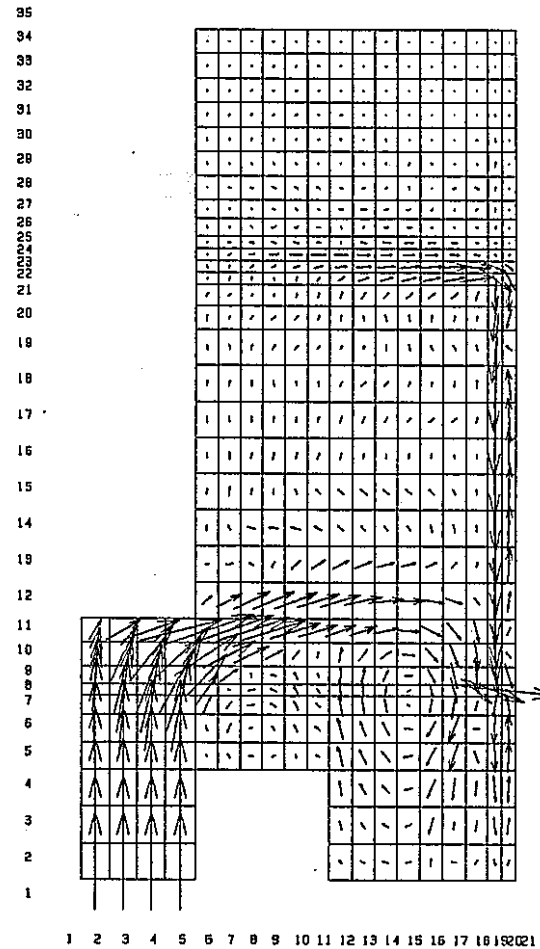
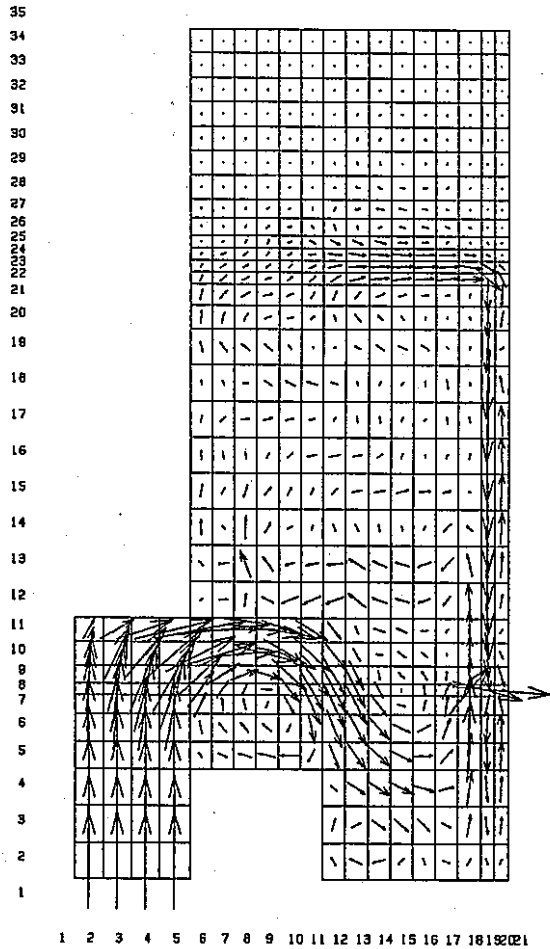
→ 4.00 X 10⁻²

VECTOR SCALE

→ 4.00 X 10⁻²

t* = 0.7

t* = 1.0



VELOCITY VECTOR FIELD

MESH SCALE $\frac{8.}{0.} \times 10^{-2}$

VELOCITY VECTOR FIELD

MESH SCALE $\frac{8.}{0.} \times 10^{-2}$

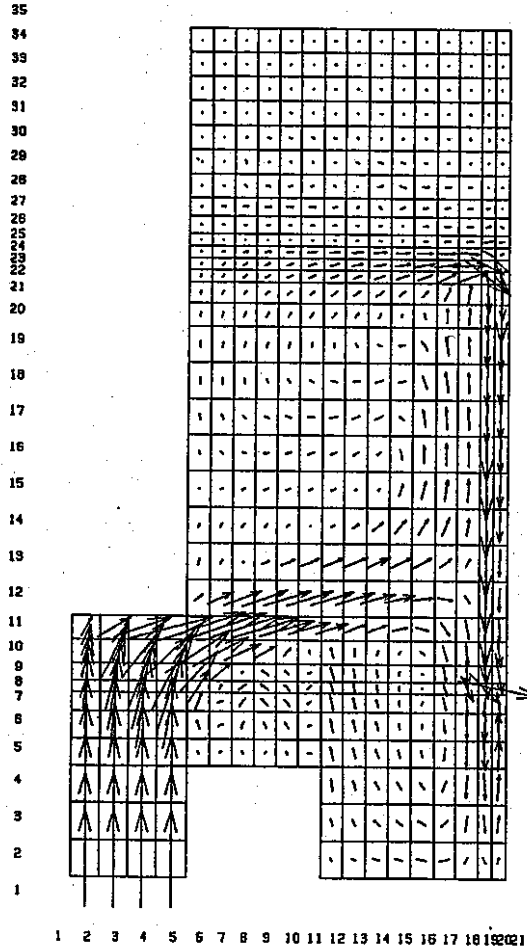
Fig. A2-9 NAPS Plotter Output (3)

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 16 TIME 415.00

VECTOR SCALE
→ 4.00 X10⁻²

t* = 1.5



VELOCITY VECTOR FIELD

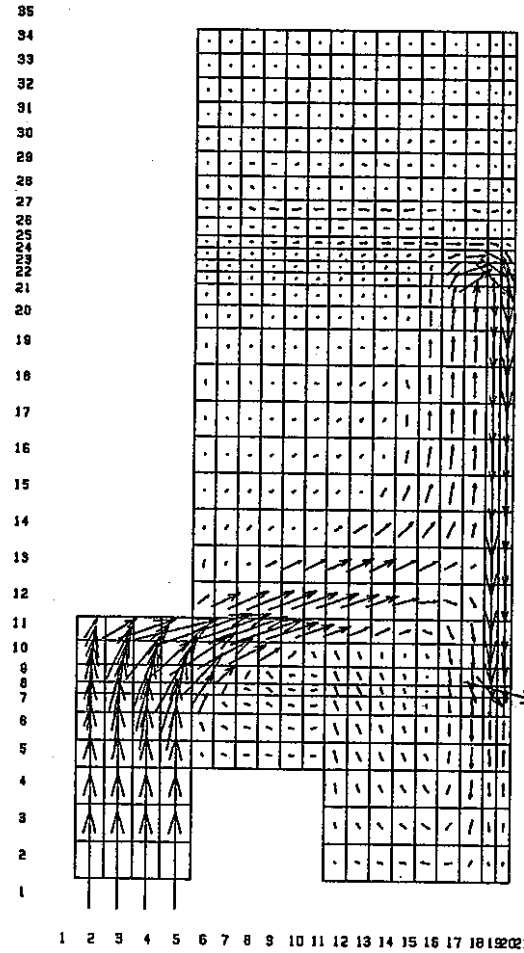
MESH SCALE 0. $\frac{8.89}{8.89} \times 10^{-2}$

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 19 TIME 550.18

VECTOR SCALE
→ 4.00 X10⁻²

t* = 2.0



VELOCITY VECTOR FIELD

MESH SCALE 0. $\frac{8.89}{8.89} \times 10^{-2}$

Fig. A2-9 NAPS Plotter Output (4)

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 4 TIME 91.17

1/10 STRATIFICATION -- WATER

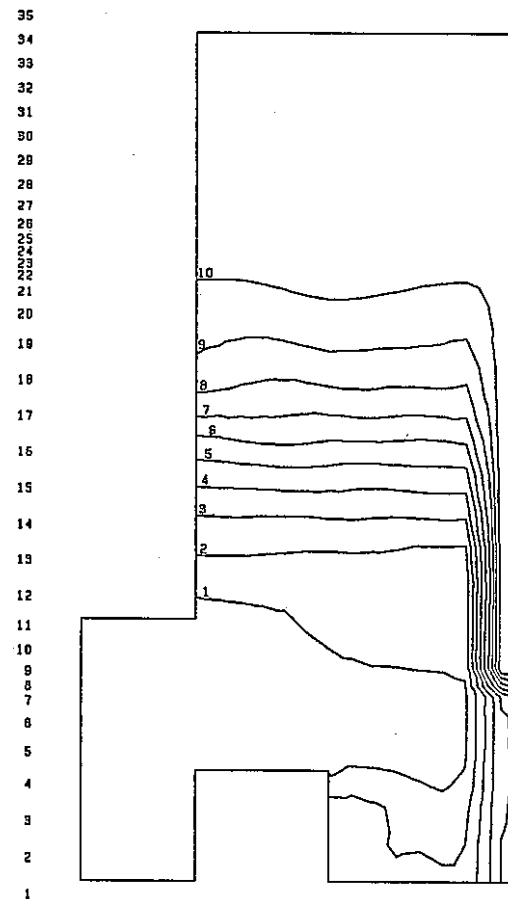
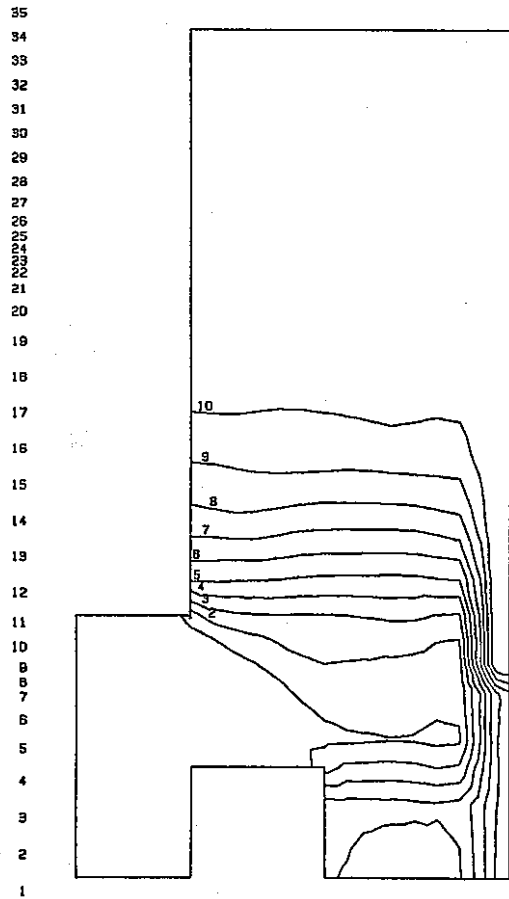
STEP 6 TIME 145.06

CONTOUR VALUE	X10
1	2.636
2	2.873
3	3.109
4	3.345
5	3.582
6	3.818
7	4.055
8	4.291
9	4.527
10	4.764

CONTOUR VALUE	X10
1	2.636
2	2.873
3	3.109
4	3.345
5	3.582
6	3.818
7	4.055
8	4.291
9	4.527
10	4.764

$t^* = 0.3$

$t^* = 0.5$



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

TEMPERATURE CONTOUR LINE

TEMPERATURE CONTOUR LINE

MESH SCALE $\frac{8.1}{0.89 \times 10^{-2}}$

MESH SCALE $\frac{8.1}{0.89 \times 10^{-2}}$

Fig. A2-9 NAPS Plotter Output (5)

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 8 TIME 199.15

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 11 TIME 280.08

CONTOUR VALUE $\times 10$

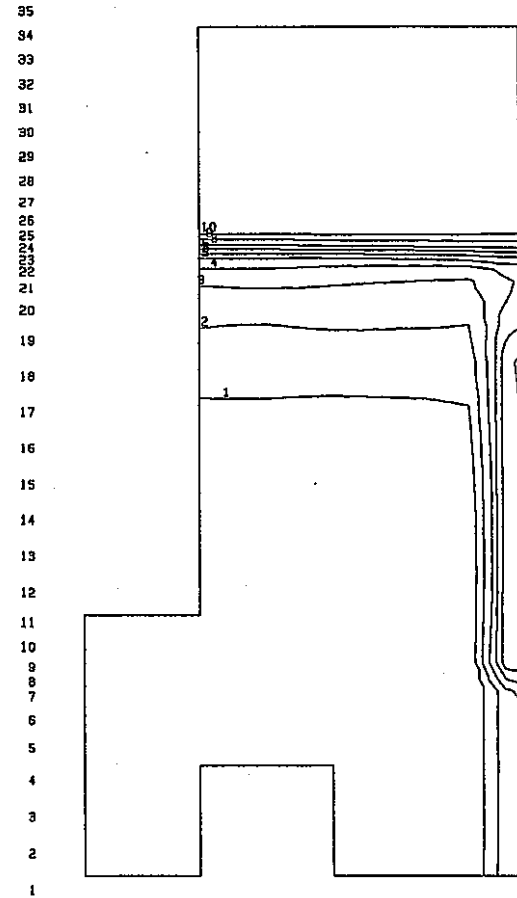
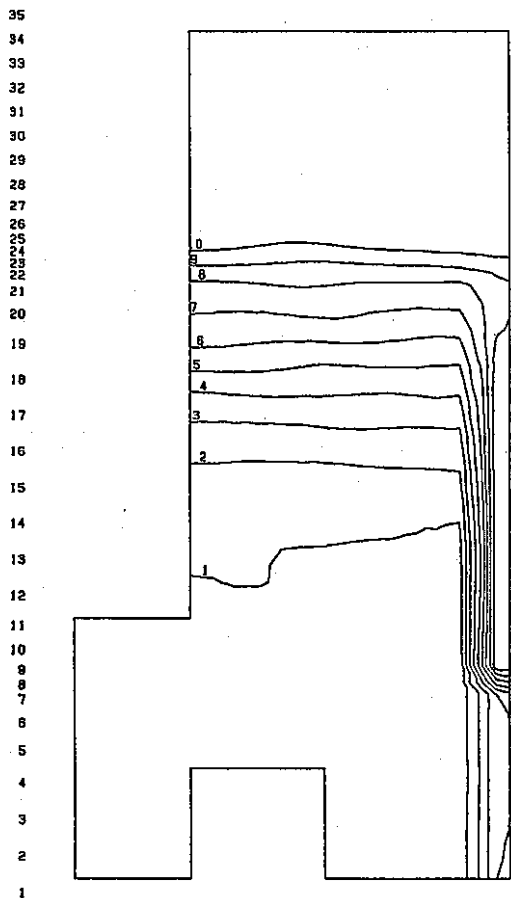
1	2.636
2	2.873
3	3.109
4	3.345
5	3.582
6	3.818
7	4.055
8	4.291
9	4.527
10	4.764

CONTOUR VALUE $\times 10$

1	2.636
2	2.873
3	3.109
4	3.345
5	3.582
6	3.818
7	4.055
8	4.291
9	4.527
10	4.764

$t^* = 0.7$

$t^* = 1.0$



-120-

TEMPERATURE CONTOUR LINE

TEMPERATURE CONTOUR LINE

MESH SCALE $0. \overbrace{8.}^{\text{8.}} 8.89 \times 10^{-2}$

MESH SCALE $0. \overbrace{8.}^{\text{8.}} 8.89 \times 10^{-2}$

Fig.A2-9 NAPS Plotter Output (6)

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 16 TIME 415.00

1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 19 TIME 550.18

CONTOUR VALUE X10

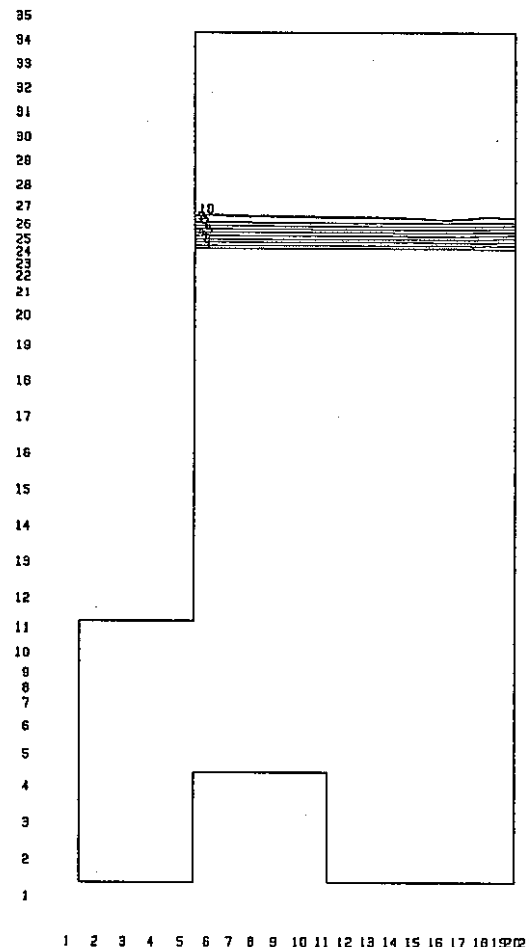
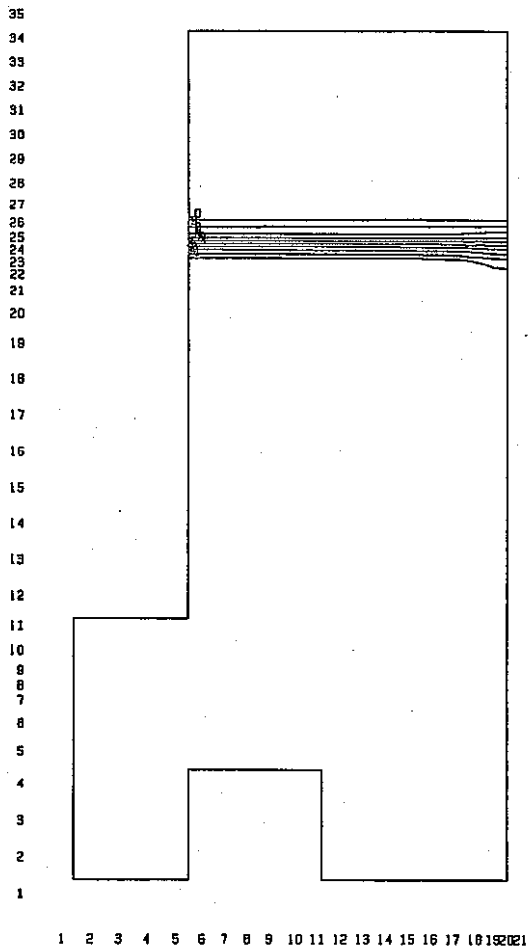
1	2.635
2	2.871
3	3.108
4	3.344
5	3.581
6	3.817
7	4.054
8	4.290
9	4.527
10	4.763

CONTOUR VALUE X10

1	2.635
2	2.871
3	3.108
4	3.344
5	3.581
6	3.817
7	4.054
8	4.290
9	4.527
10	4.763

$t^* = 1.5$

$t^* = 2.0$



-121-

TEMPERATURE CONTOUR LINE

TEMPERATURE CONTOUR LINE

MESH SCALE $\frac{8.1}{0.} \times 10^{-2}$

MESH SCALE $\frac{8.1}{0.} \times 10^{-2}$

Fig. A2-9 NAPS Plotter Output (7)

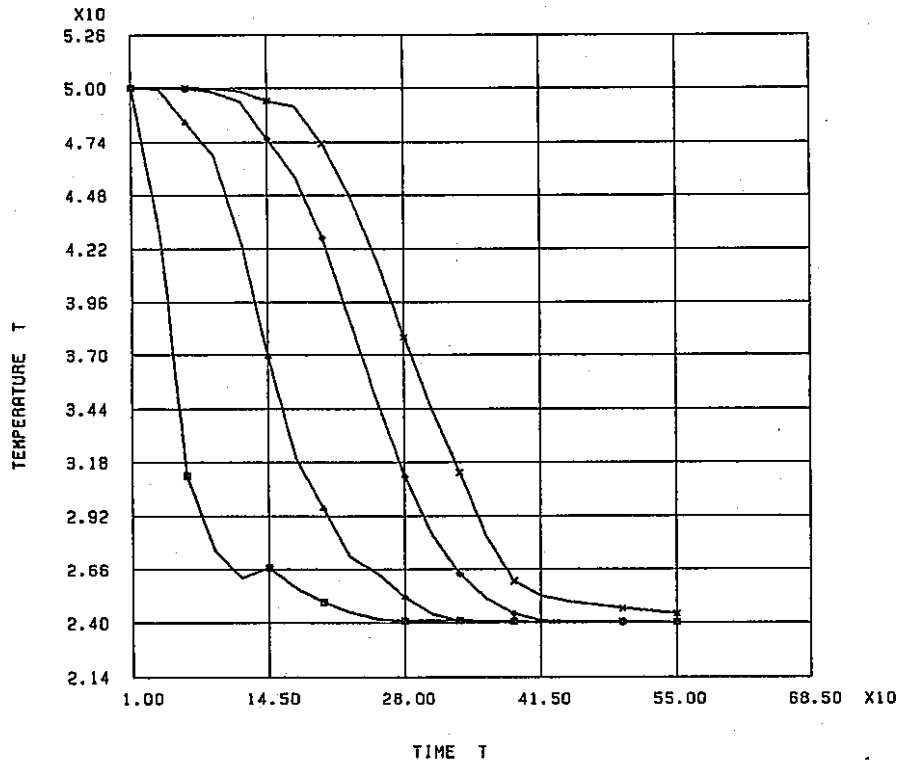
1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 1	TO STEP 19	
LINE	I	J
□	18	8
▲	18	18
×	20	16
◇	18	22

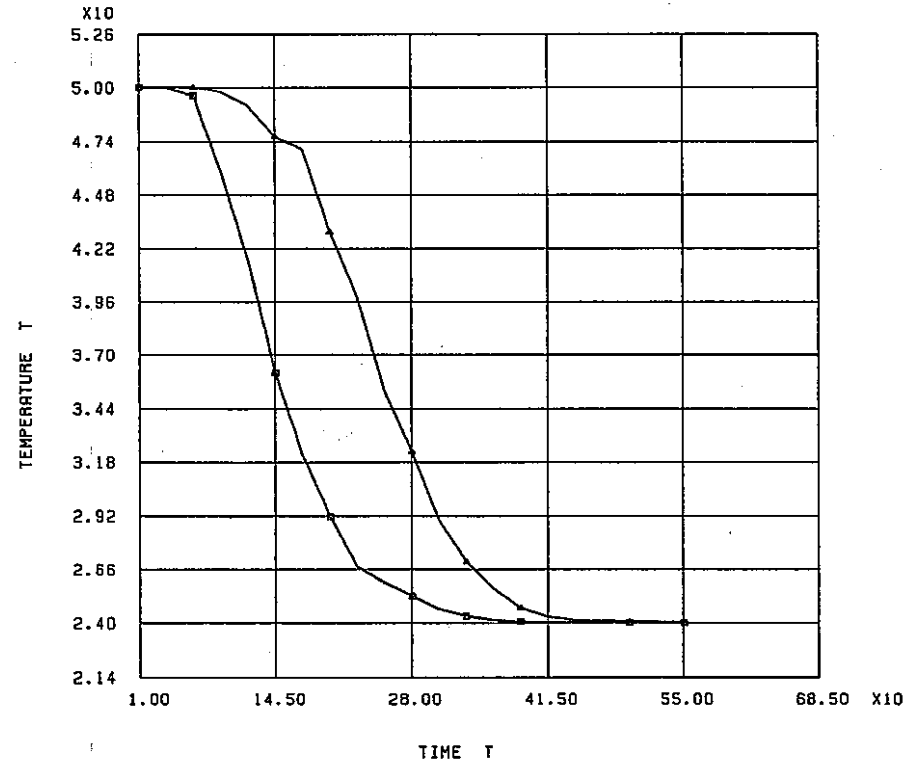
1/10 STRATIFICATION -- WATER

STEP 1	TO STEP 19	
LINE	I	J
□	7	16
▲	7	22

-122-



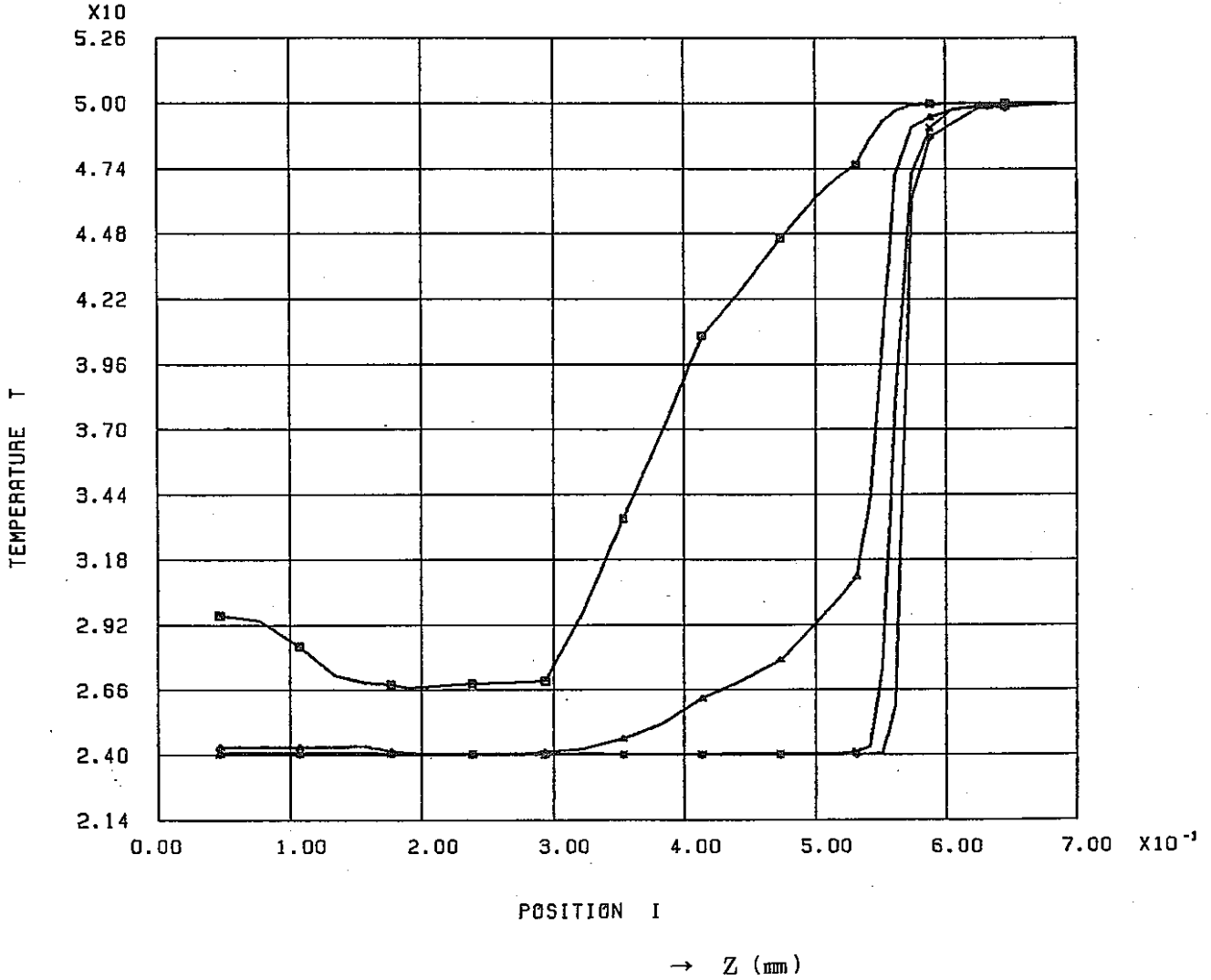
TIME VARIATION OF T



TIME VARIATION OF T

Fig. A2-9 NAPS Plotter Output (8)

I NUMBER 18		
LINE	STEP	TIME
—□—	6	145:06
—△—	11	280:08
—x—	16	415:00
—◇—	19	550:18



軸方向温度分布 (I = 18)

DISTRIBUTION OF T

Fig.A2-9 NAPS Plotter Output (9)

2.2 解析例 2 (炉容器バケット周辺の熱過度解析)

高速増殖原型炉「もんじゅ」において、冷却材流量低下を伴うスクラムが生じた場合、原子炉出力は崩壊熱レベルまで急速に低下し、同時に炉内流量も通常運転時の10%程度まで急速に低下する。このような場合、浮力効果により炉容器上部プレナム内にストラティフィケーション現象が生じ、大きな軸方向温度勾配を生じるものと思われる。またプレナム内ナトリウム液面高さもかなり低下するものと考えられる。このような状況下では炉容器バケット周辺もきびしい熱過度を受けると考えられる。プレナム内において推定される現象を、別途解析評価結果を参考にして、次のように近似する。

- (1) 原子炉スクラム開始。(プレナム内529℃一定)
- (2) プレナム内下方から温度低下し、低温層が上昇し、内筒上端近傍が温度低下を開始する。(t=0 sec)
- (3) 内筒上端近傍は-204℃/hrで温度低下し、その上方に0.25℃/mmの軸方向温度勾配を生じる。
- (4) プレナム内ナトリウム液面が通常レベル(NSL)から低下開始する。(t=1200sec)
- (5) 内筒上端近傍は最低温度(325℃)に達し、ナトリウム液面は最低レベル(NSL-0.94m)に達する。(t=3600 sec)
- (6) 内筒上端上方の軸方向温度分布が0.3m/hrで上昇する。
- (7) 軸方向温度分布の上端がほぼ液面レベルに達する。(t=4800 sec)
- (8) 液面レベルの温度が低下しカバーガス温度も低下する。

バケット周辺の寸法図をFig.A2-10に示す。これを次のようにモデル化する。

- (a) プロテクションヨイナー内側のバッフルを除外する。
- (b) バケット内バッフルは炉容器壁と一体化する。
- (c) 構造物表面熱伝達係数はナトリウム中で $0.5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{C}$ 、カバーガス中で $0.005 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{C}$ とする。
- (d) カバーガス中温度分布はFig.A2-11に示すSITR試験装置の計測データを参考にしてFig.A2-12のようにモデル化する。ナトリウム液面の温度低下に伴ってカバーガス中温度分布も平行に温度低下するものとする。

解析メッシュ図を Fig. A2-13 に示す。軸方向温度分布入力条件を Fig. A2-14 に示す。解析パラメータは次の値を用いる。

- 物 性 ナトリウム ($\rho=856\text{kg/m}^3$, $c=0.305\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$, $\lambda=1.7\times 10^{-2}\text{kcal/m}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$, $\nu=0.33\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$, $\beta=2.74\times 10^{-4}1/^\circ\text{C}$)
- 構造材 (SUS304 $\rho=7860\text{kg/m}^3$, $c=0.132\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$, $\lambda=4.7\times 10^{-3}\text{kcal/m}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$)
- 壁面スリップ条件 $S_L=0.5$ (半スリップ)
- 乱流パラメータ $\epsilon_M=\epsilon_H=0$

ユーザーサブルーチンを List A2-4 に、入力データを List A2-5 に示す。最初から伝熱計算を行なう。初期流動場は静止状態であり、流体中に温度分布が生じることにより流動が開始される自然対流現象である。

$t=900, 1200, 1800, 2400, 3600, 4800, 6000, 7200\text{sec}$ におけるバケット内の流動ベクトル図および温度コンターを Fig. A2-15 に示す。最大流速は $t=3600\text{sec}$ で 8mm/sec 程度であり大きな自然対流は生じない。プレナム内、プロテクションライナー、バケット内、炉容器の軸方向分布を Fig. A2-16 に示す。構造材各部の板厚方向温度分布を Fig. A2-17 に示す。

解析結果をまとめると次のようになる。

- $t=3600\text{sec}$ で最大流速 8mm/sec 程度の自然対流が予想される。
- バケット周辺の水素中および構造材中ではプレナム内の軸方向温度分布と同じ位の軸方向温度分布が生じると予想される。水素中では半径方向の温度差はほとんどなく軸方向の温度成層化現象 (ストラティケーション) が生じるものと予想される。
- Yピース部では $t=3600\text{sec}$ で最大 $\Delta T=70^\circ\text{C}$ 程度の板厚内外面温度差が予想される。
- プロテクションライナーと炉容器との温度差は $t=3600\text{sec}$ で最大 50°C 程度と予想される。

FACOM-M200による cpu time は $8\text{min}10\text{sec}$ であった。

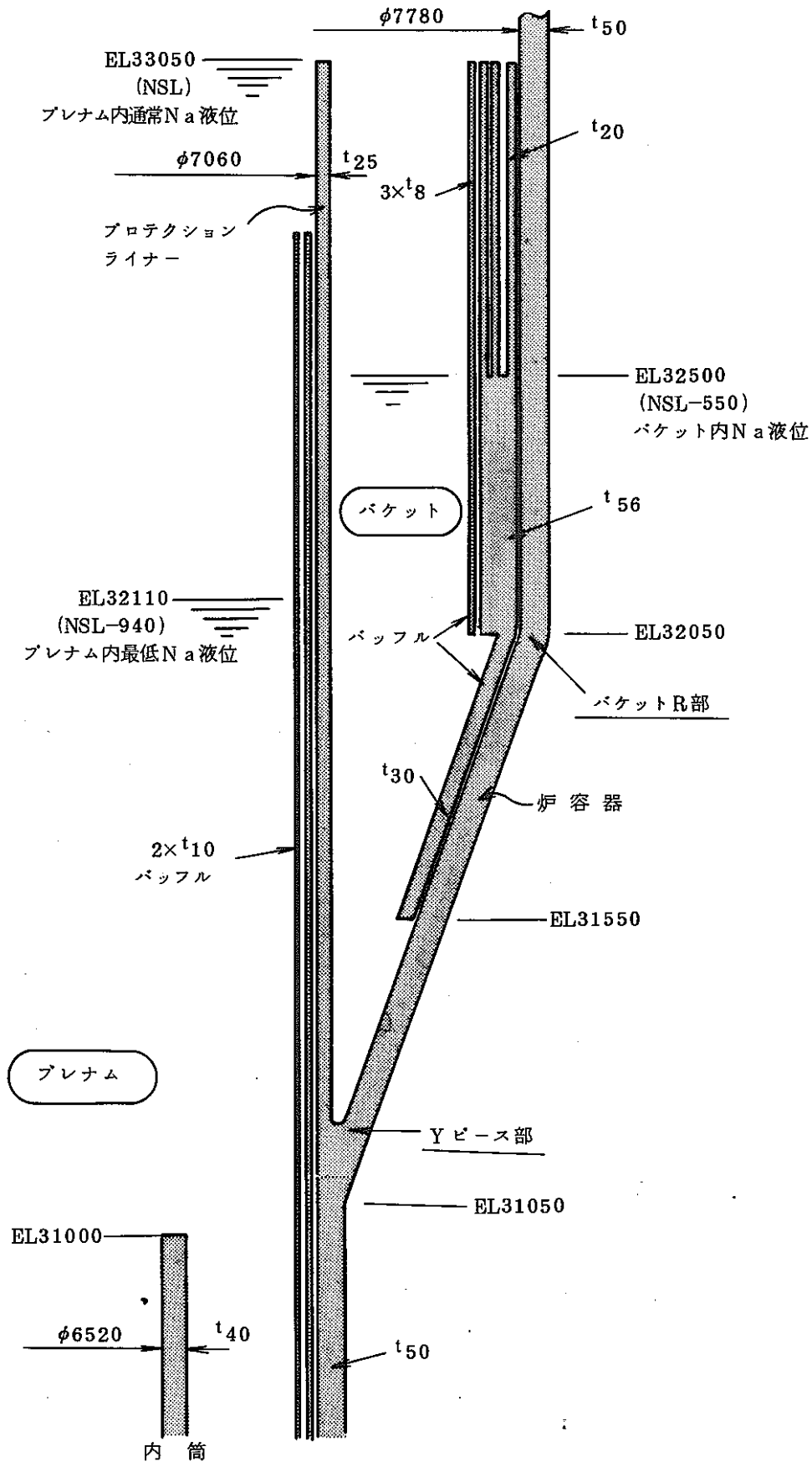


Fig.A2-10 Configuration and size of R/V Bucket

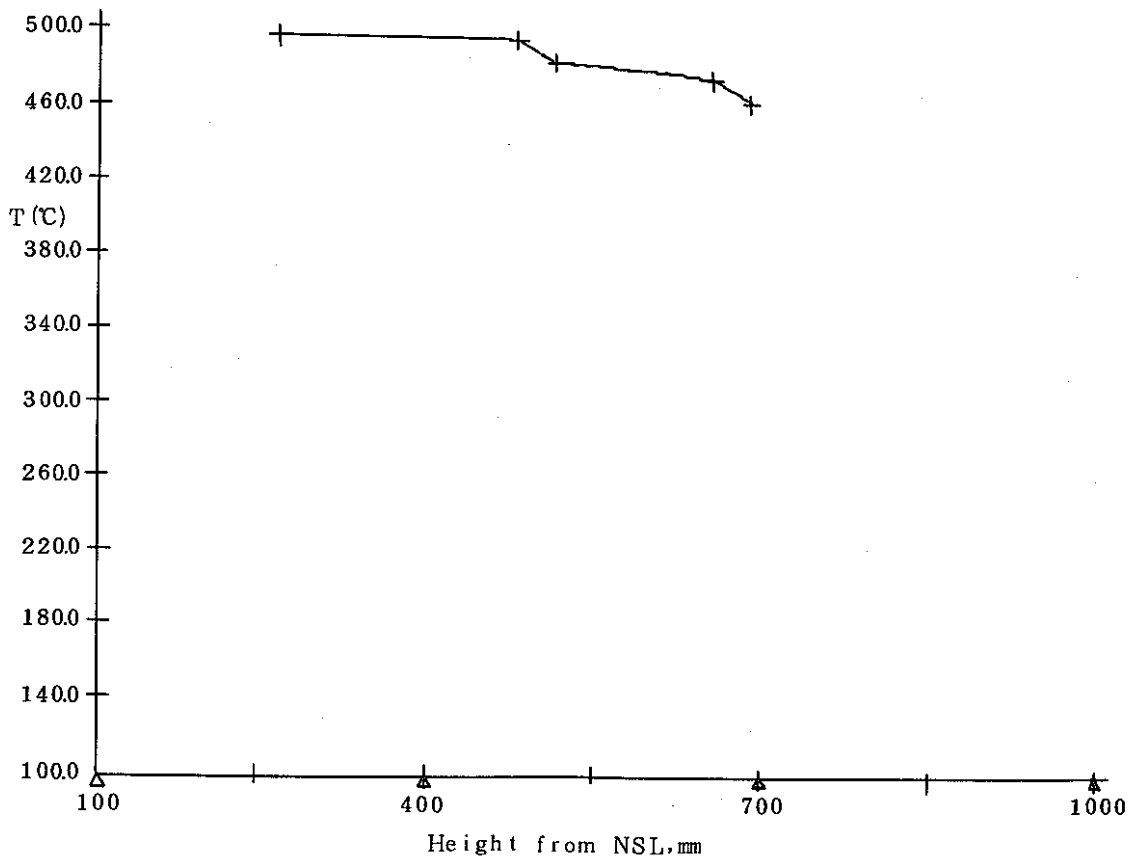
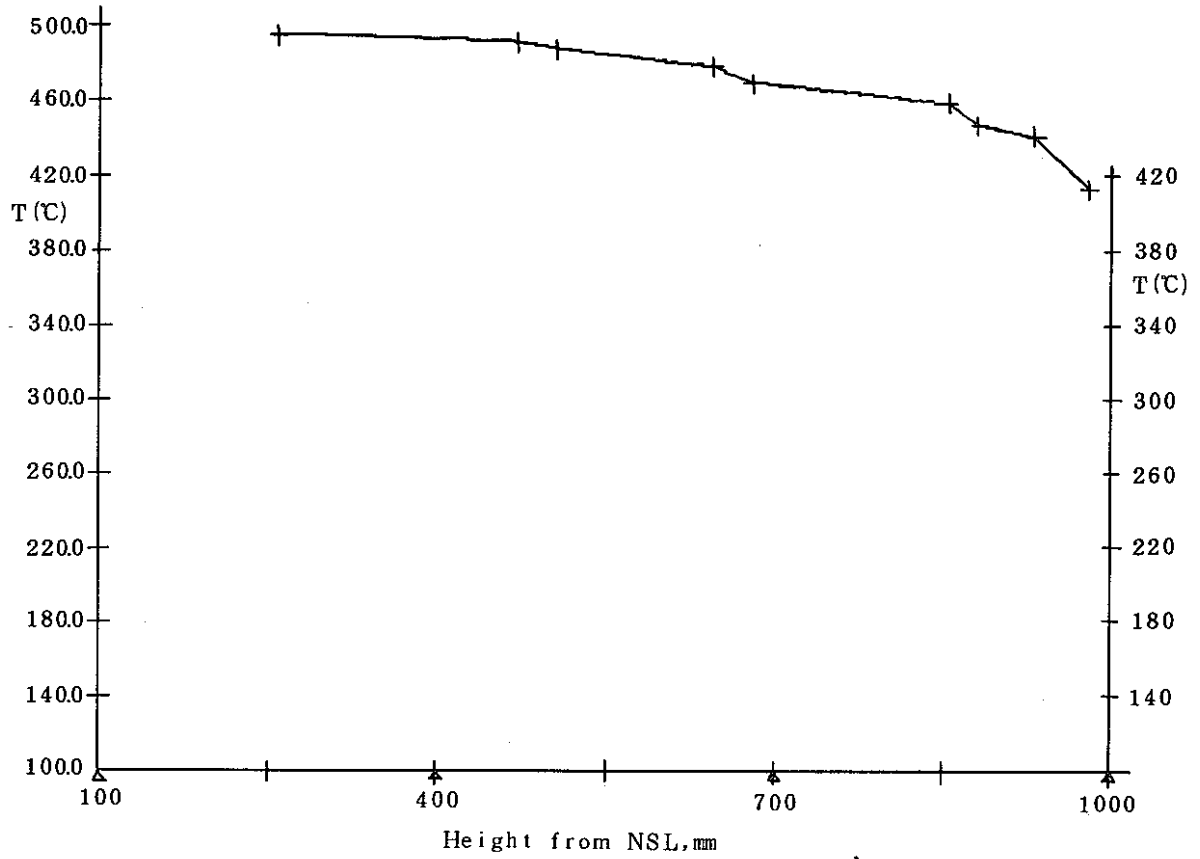


Fig.A2-11 Axial Temperature Distribution Data in Cover Gas
(PNC, OEC, SITR)

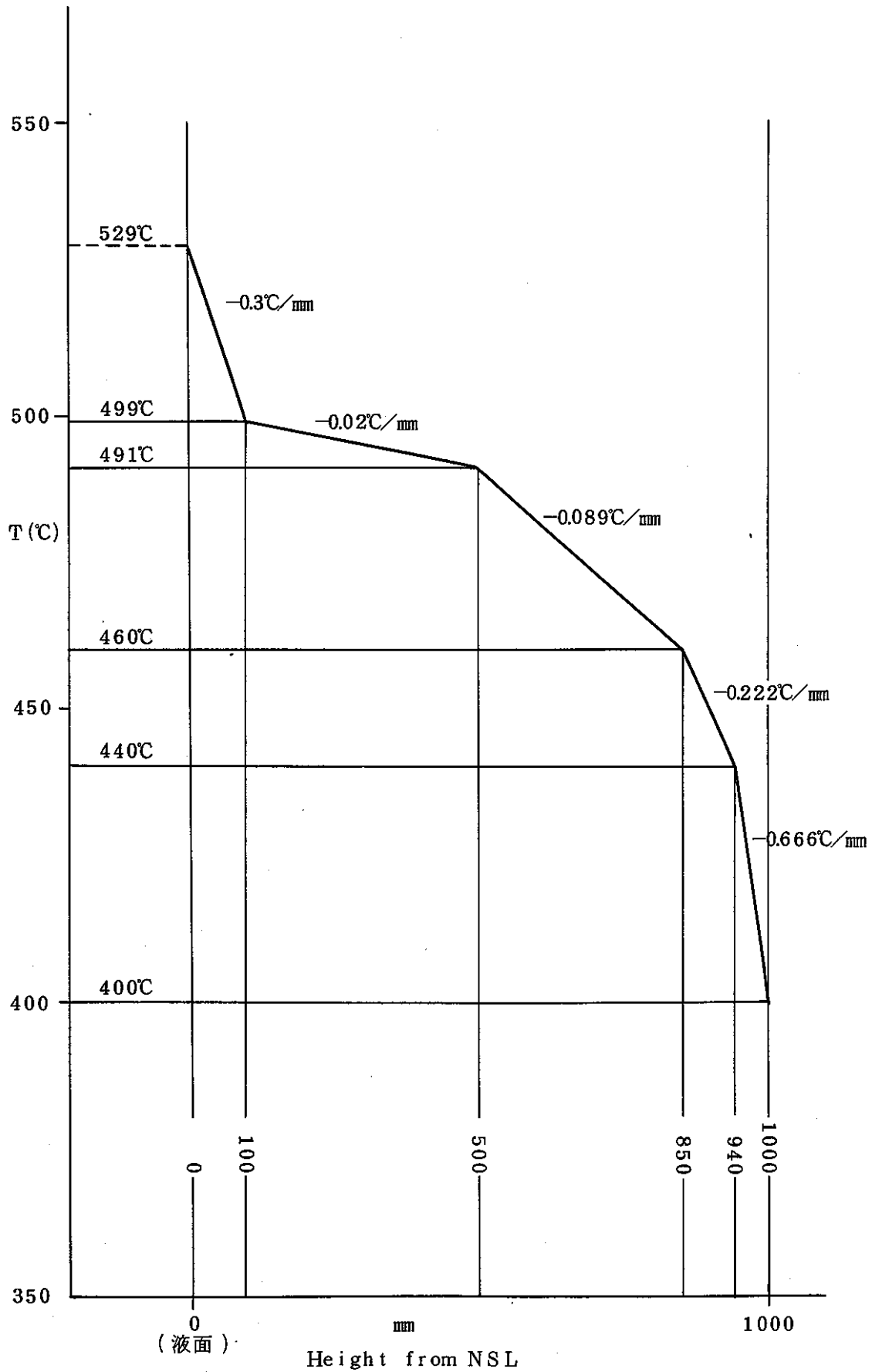


Fig.A2-12 Multi Line Modeling of Axial Temperature Distribution in Cover Gas

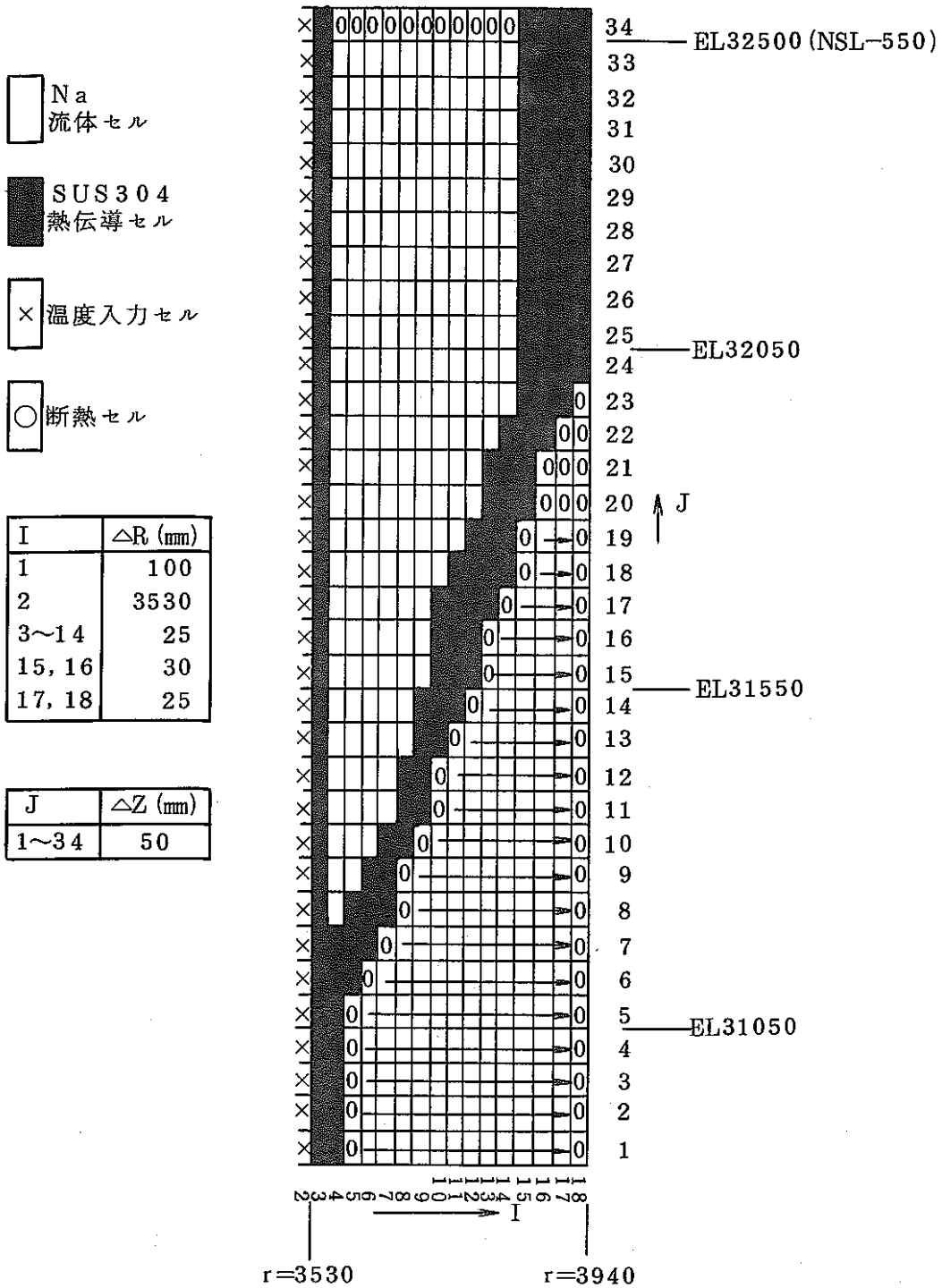


Fig.A2-13 Mesh Arrangement

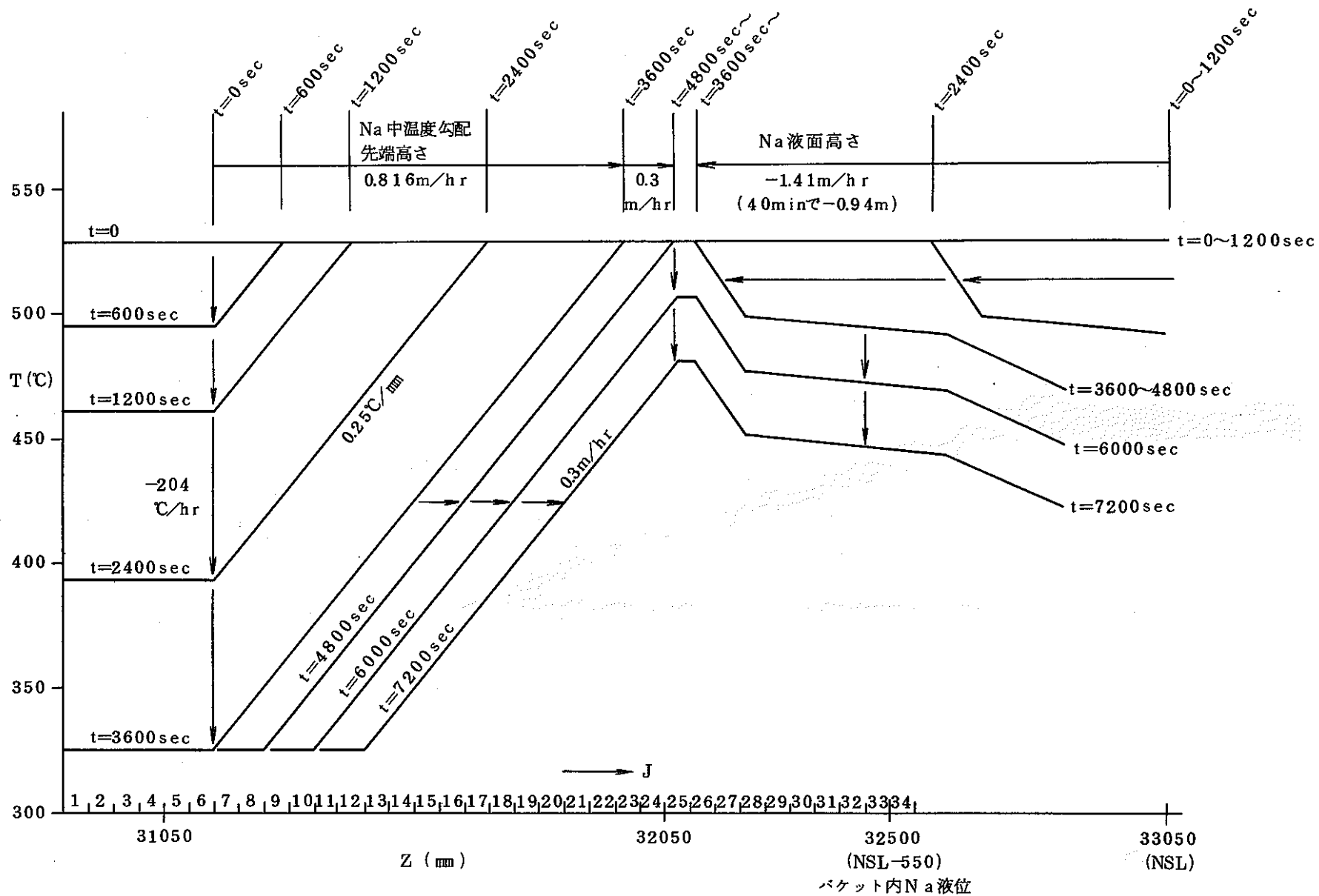


Fig.A2-14 Input Condition of Axial Temperature Distribution

ListA2-4 User Subroutine of Analysis Example 2

```

SUBROUTINE SETIJ
COMMON/BL2/IJF(30,35)
D0 10 I=2,18
10 IJF(I,34)=0
D0 20 J=1,34
IJF(2,J)=0
20 IJF(3,J)=-1
D0 30 J=1,7
30 IJF(4,J)=-1
D0 40 I=5,7
D0 41 J=1,I
41 IJF(I,J)=0
D0 42 J=I+1,I+3
42 IJF(I,J)=-1
40 CONTINUE
D0 50 I=8,9
D0 51 J=1,I+1
51 IJF(I,J)=0
D0 52 J=I+2,I+4
52 IJF(I,J)=-1
50 CONTINUE
IJF(9,14)=-1
D0 60 I=10,12
D0 61 J=1,I+2
61 IJF(I,J)=0
D0 62 J=I+3,I+7
62 IJF(I,J)=-1
60 CONTINUE
D0 70 I=13,14
D0 71 J=1,I+3
71 IJF(I,J)=0
D0 72 J=I+4,I+8
72 IJF(I,J)=-1
70 CONTINUE
D0 81 J=1,19
81 IJF(15,J)=0
D0 82 J=20,34
82 IJF(15,J)=-1
D0 90 I=16,18
D0 91 J=1,I+5
91 IJF(I,J)=0
D0 92 J=I+6,34
92 IJF(I,J)=-1
90 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE ABIN
COMMON/BL9/HR(30,35),HZ(30,35)
COMMON/BL12/AL(30,35),BL(30,35),ALF(30,35),BLF(30,35),G(30,35)
D0 10 J=7,33
D0 10 I=3,15
HR(I,J)=0.5
10 HZ(I,J)=0.5
RETURN
END
SUBROUTINE BCTEMP(TIME,TLAG)
COMMON/BL5/T(30,35),DUMMY(1050)
S=TIME-TLAG
IF(S.GT.3600.) G0 T0 10
Z1=0.
T1=529.-204.*S/3600.
G0 T0 20
10 Z1=(S-3600.)/12.
T1=325.
20 D0 30 J=1,6
30 T(2,J)=T1
D0 40 J=7,25
Z=25.+50.*(J-7)
IF(Z.GT.Z1) G0 T0 45
T(2,J)=T1
G0 T0 40
45 T2=T1+0.25*(Z-Z1)
IF(T2.GT.529.) T2=529.
T(2,J)=T2
40 CONTINUE
Z2=- (S-1200.)*940./2400.
IF(Z2.LT.-940.) Z2=-940.
D0 50 J=26,34
Z=-575.+(J-33)*50.
IF(Z.GT.Z2) G0 T0 51
T3=T2
G0 T0 53
51 IF(Z.GT.Z2+100.) G0 T0 52
T3=T2-0.3*(Z-Z2)
G0 T0 53
52 T3=T2-30.-0.02*(Z-Z2-100.)
53 T(2,J)=T3
50 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE QHEAT(TIME,TLAG,TUNI)
COMMON/BL5/T(30,35),DUM1(1050)
COMMON/BL8/SR(30,35),SZ(30),DUM2(4200)
COMMON/HEAT/QR(30,35),DUM3(4200)
D0 10 J=1,25
10 QR(2,J)=0.5*SR(2,J)*(T(3,J)-T(2,J))
D0 20 J=26,34
20 QR(2,J)=0.005*SR(2,J)*(T(3,J)-T(2,J))
RETURN
END

```

ListA2-5 Input Data of Analysis Example 2

```
&DATA
IBAR=16,JBAR=32,ICYL=1,ITURB=1,ITNU=0,IQWALL=1,IQHEAT=1,
DELR=0.1,3.53,12*0.025,2*0.03,2*0.025
DELZ=34*0.05,
TK=1.7E-2,AL0=856.,C=0.305,ANU=0.33E-6,ABETA=2.74E-4,
WTK=4.7E-3,WAL0=7.86E3,WC=0.132,SLIP=0.5,UPVEL=0.8,
ITERL=100,EPSI=0.001,GZ=-9.8,ALPH=0.8,OMG=1.8,TUNI=529.,EPM=0.0,
DELT=0.2, IDELT=10,IDSK=1,ERATE=0.0,NWRITE=0,TLAG=0.,
IRSRT=0,NRESRT=0, ITEMP=1, ITPRI=1,CWPRT=10, CWDSK=10,IQPRI=0,
TPRT=300.,600.,900.,1200.,1800.,2400.,3600.,4800.,6000.,7200.,
TDSK=300.,600.,900.,1200.,1800.,2400.,3600.,4800.,6000.,7200.,
&END
```

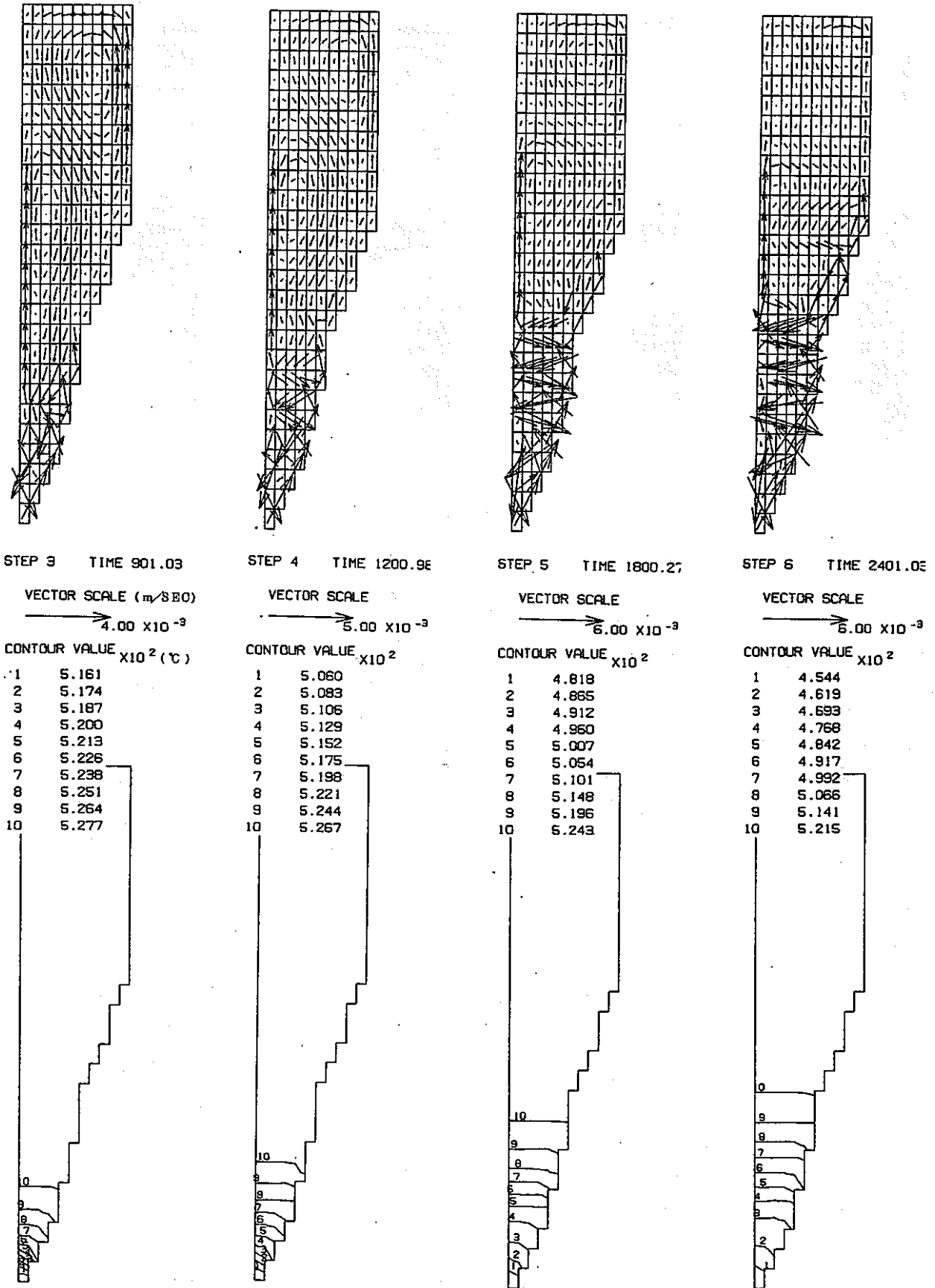


Fig.A2-15 Velocity Vectors and Iso-thermal Lines in the Bucket(1)

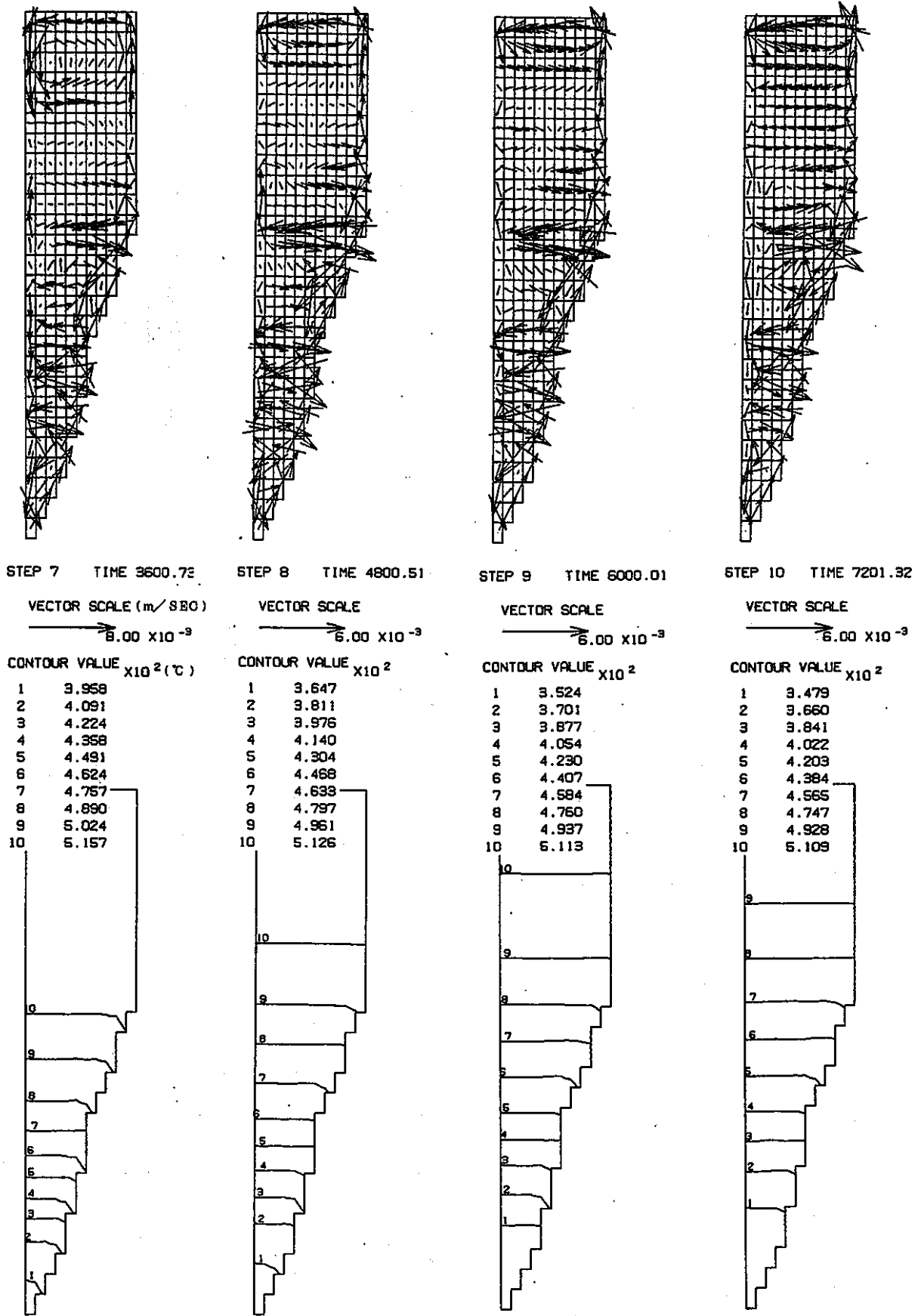


Fig.A2-15 Velocity Vectors and Iso-thermal Lines in the Bucket (2)

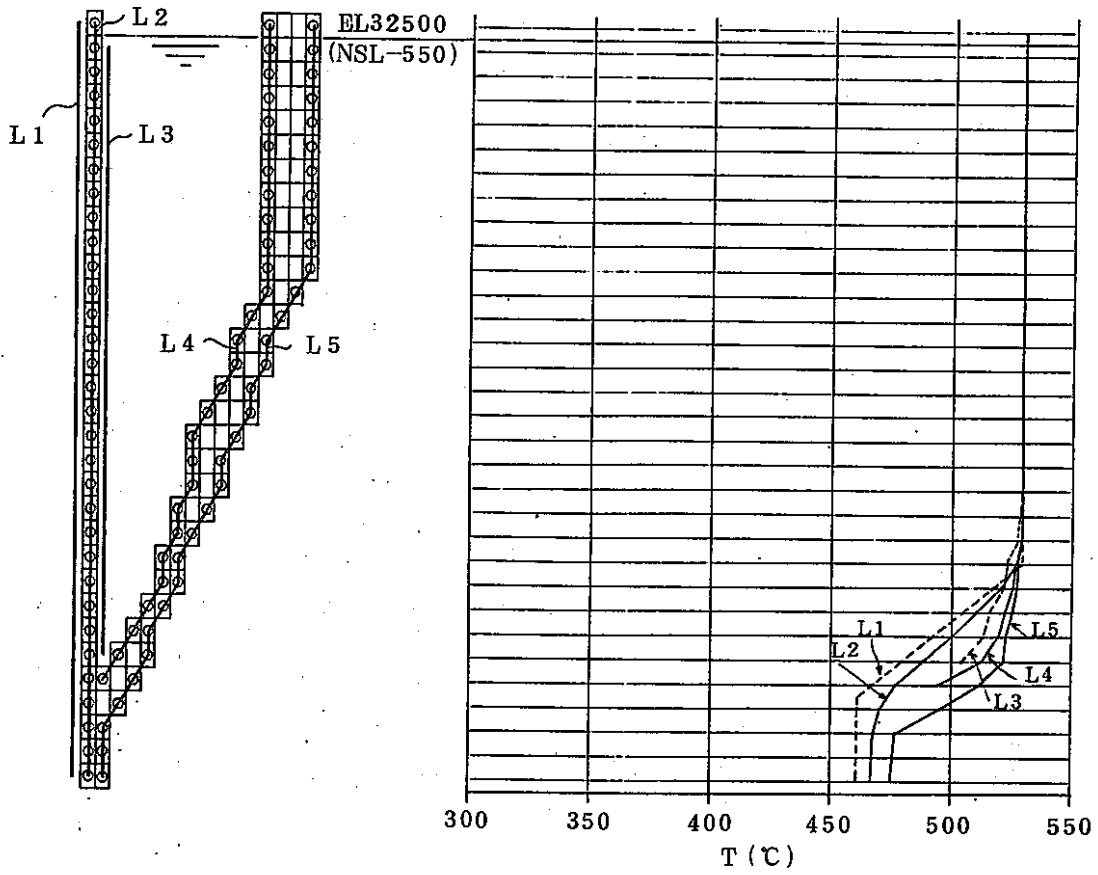


Fig.A2-16 Axial Temperature Distribution (t=1200sec)(1)

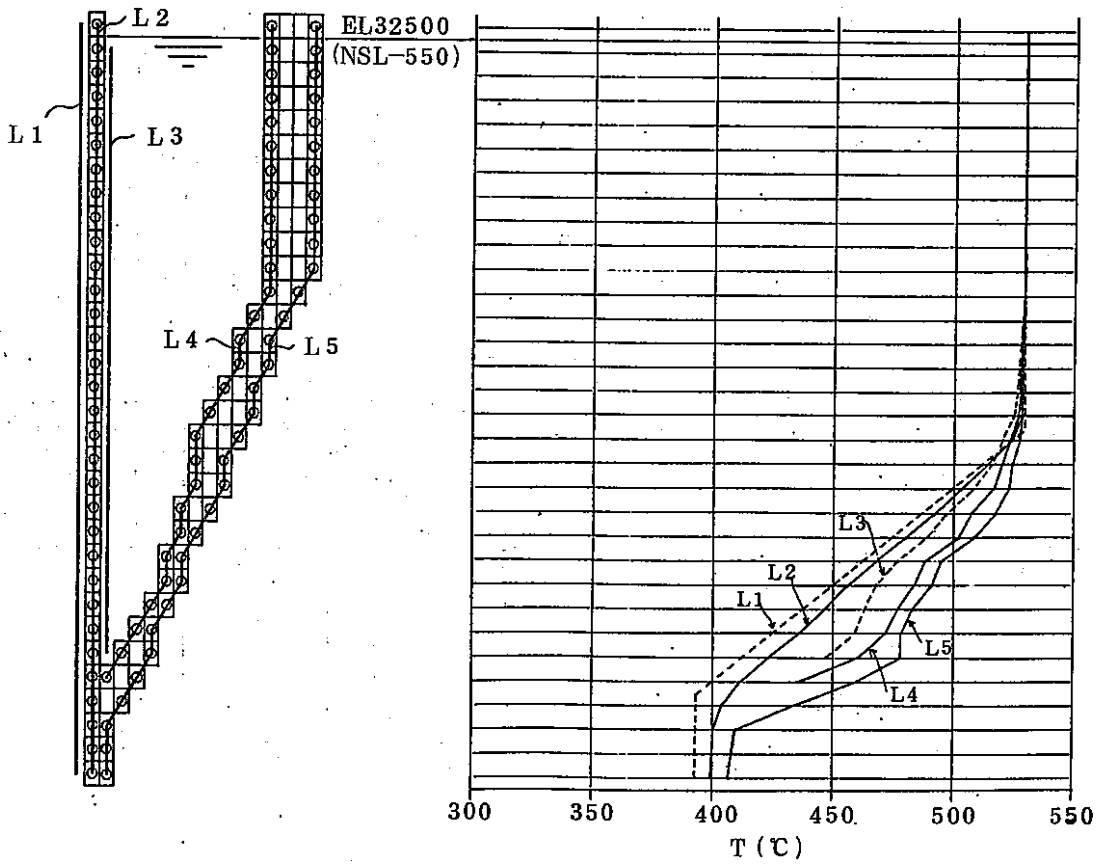


Fig.A2-16 Axial Temperature Distribution (t=2400sec)(2)

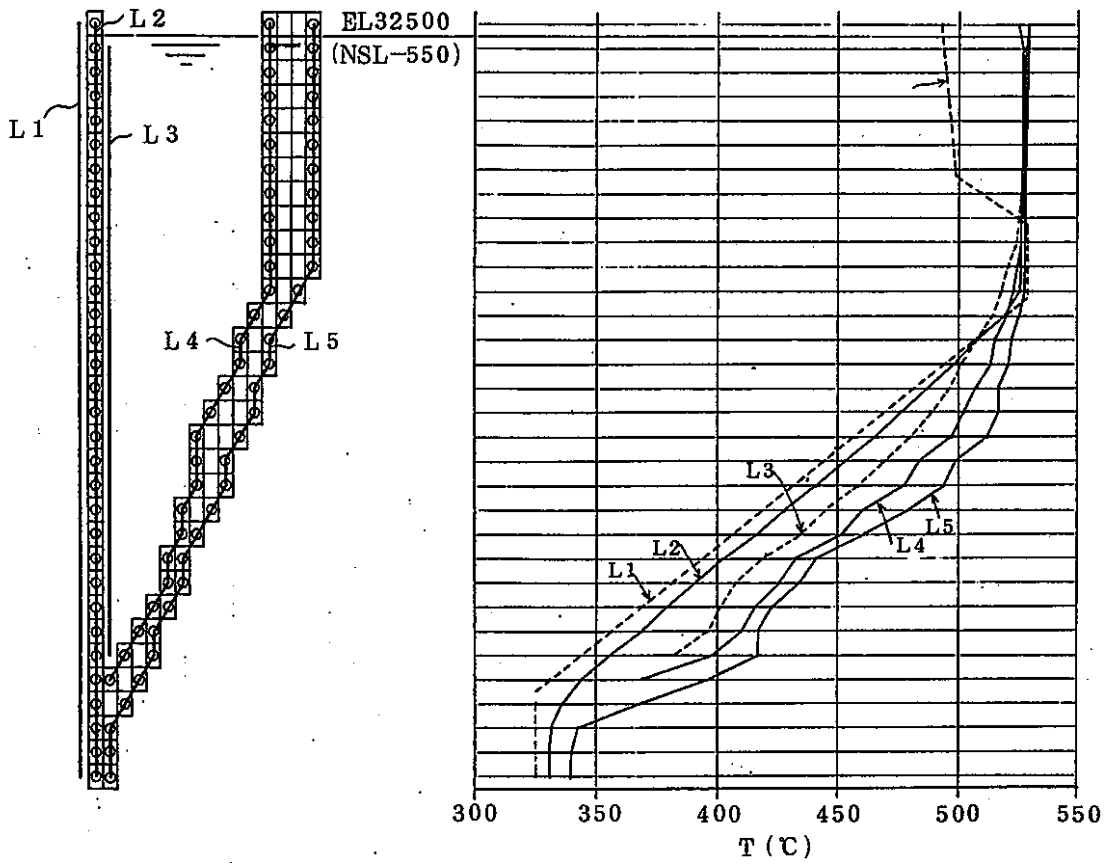


Fig.A2-16 Axial Temperature Distribution (t=3600sec)(3)

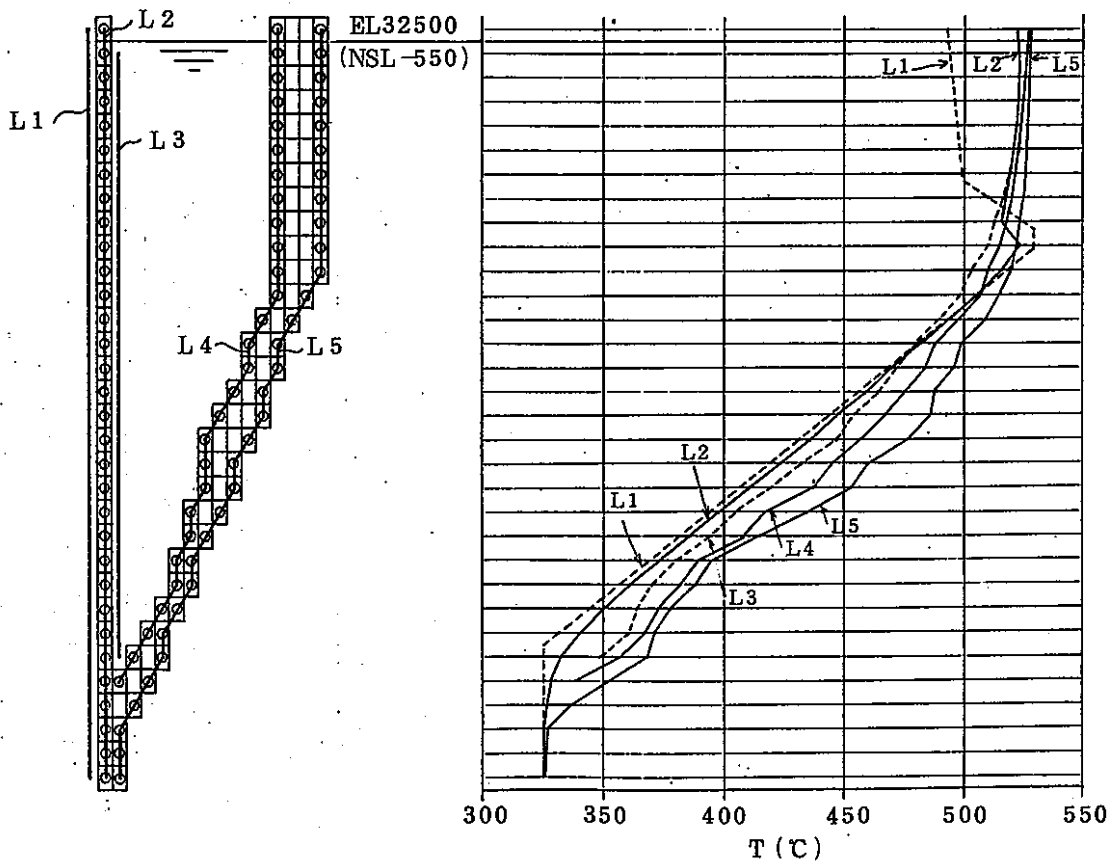


Fig.A2-16 Axial Temperature Distribution (t=4800sec)(4)

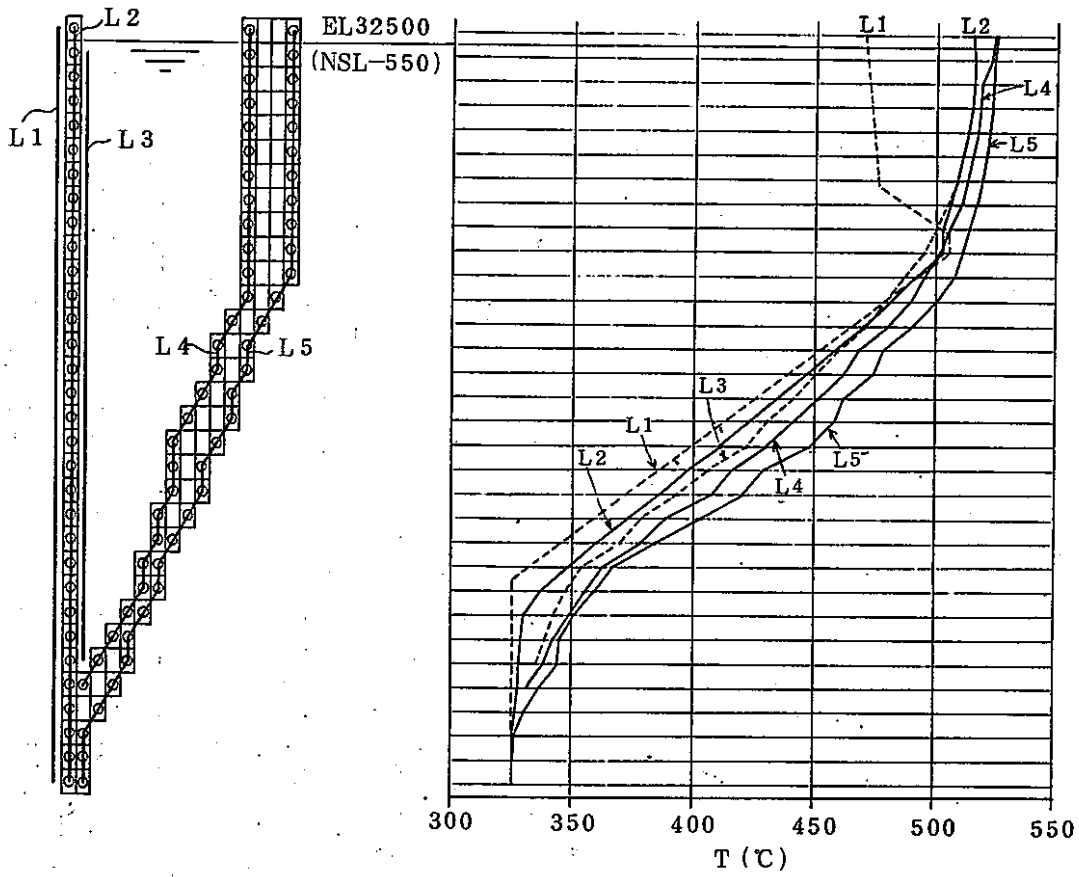


Fig.A2-16 Axial Temperature Distribution (t=6000sec) (5)

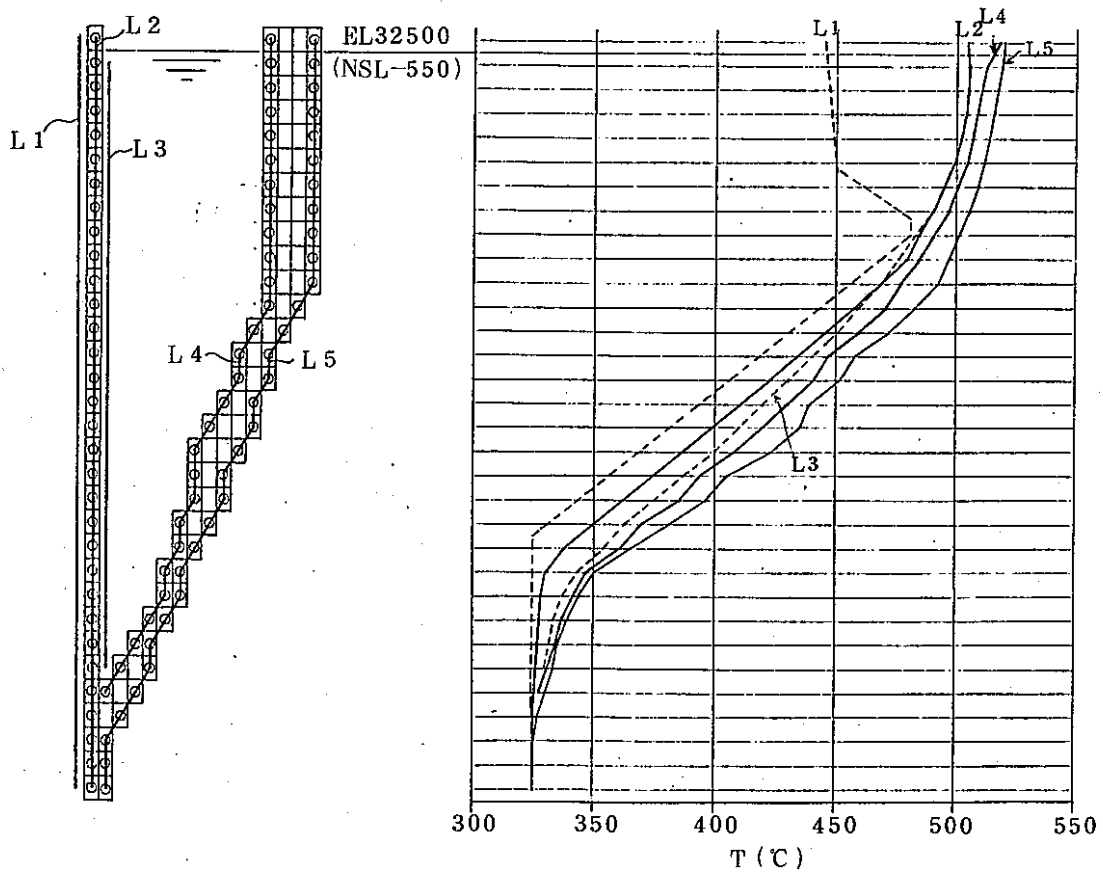
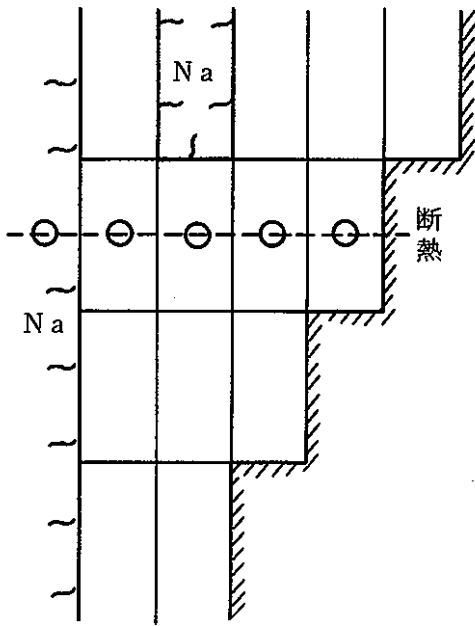
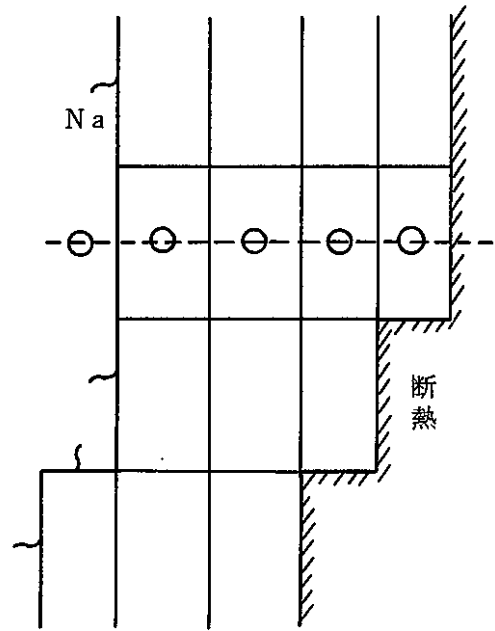


Fig.A2-16 Axial Temperature Distribution (t=7200sec) (6)



(a) Yピース部



(b) バケットR部

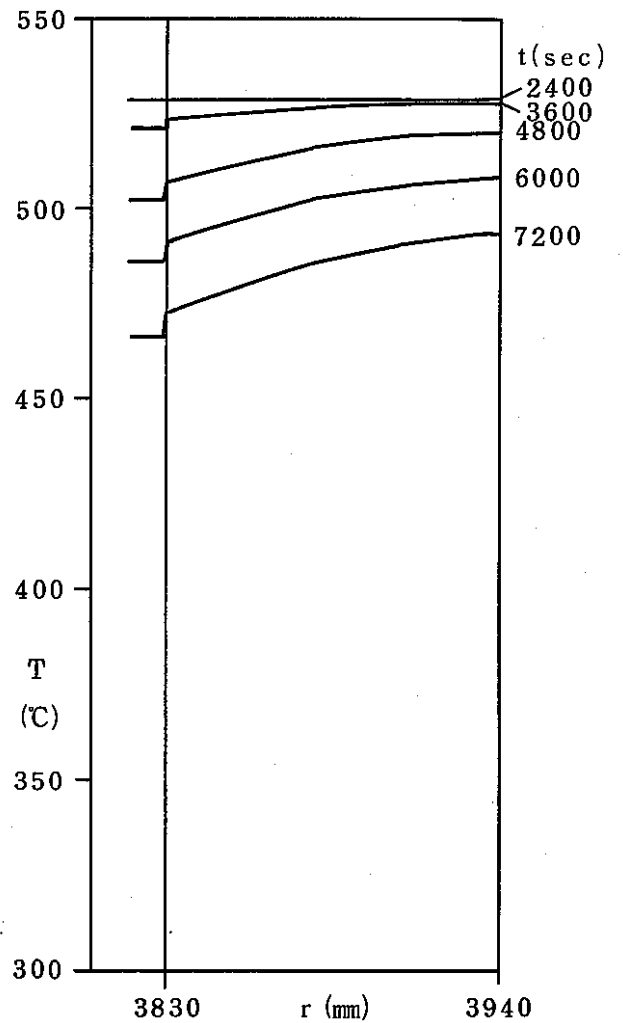
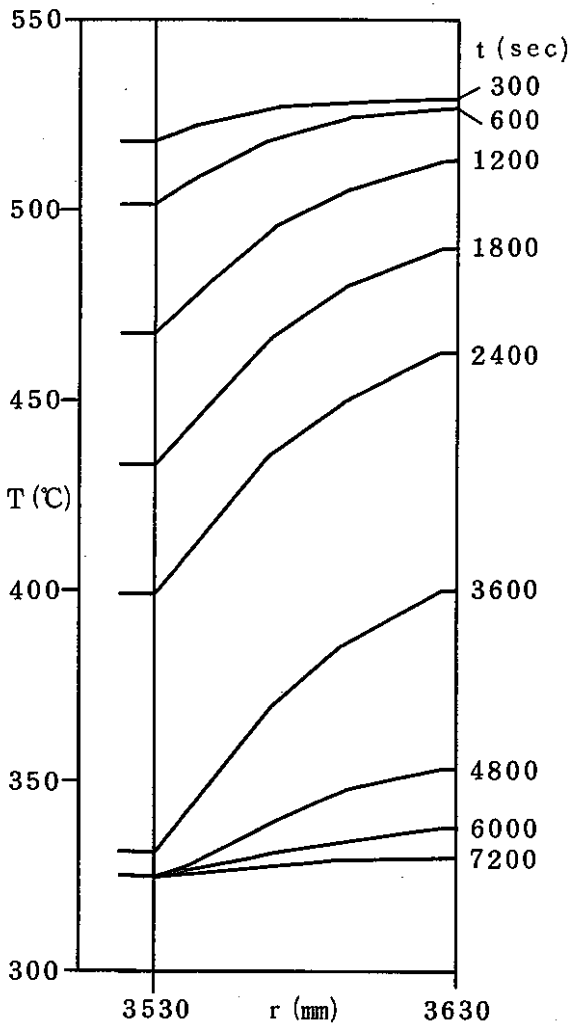


Fig.A2-17 Thickness sectional Temperature Distribution of the structure

2.3 解析例3 (炉容器上部プレナムのストラティフィケーション試験～1/10スケール Na流動試験, フローホール無し, 2.5ℓ/sec, ΔT=194℃)

試験形状をFig.A2-18に示す。内筒材質はSS41, 内筒以外はSUS304である。本試験では内筒フローホール(48-φ10)外側に1mm厚さのSUS304薄板を張り付けフローホールをめくらにした。試験体に高温ナトリウムをチャージした入口出口バルブを閉じて一定時間保持し試験体内部が一様温度(450℃)となってから入口出口バルブを開けて低温ナトリウムの注入を開始した(t=0 sec)。試験中ナトリウム流量は一定値2.5ℓ/secに保たれた。炉心出口部におけるナトリウム温度時間変化(多直線近似)をFig.A2-19に示す。解析パラメータは次の通りである。

$$\circ \text{ Naの物性} \left\{ \begin{array}{l} \lambda = 1.771 \times 10^{-2} \text{ kcal/m} \cdot \text{sec} \cdot \text{°C}, \rho = 868.1 \text{ kg/m}^3, \\ c = 0.308 \text{ kcal/kg} \cdot \text{°C}, \nu = 0.3584 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}, \\ \beta = 2.74 \times 10^{-4} \text{ 1/°C} \end{array} \right.$$

- 壁面スリップ条件～半スリップ ($S_\ell = 0.5$)
- 乱流パラメータ～ $\epsilon_M = \epsilon_H = 0$
- 温度境界条件～炉容器, UCS等の外部境界は断熱。内筒の熱通過率0.2 kcal/m²・sec・°C(フローホール部のみ0.4 kcal/m²・sec・°C)。内筒の熱容量は考慮しない。

解析メッシュ図(流体領域)をFig.A2-20に示す。内筒および炉心出口部円筒は板厚0の壁としてモデル化した。ユーザーサブルーチンをListA2-6に, 初期解析の入力データをListA2-7に示す。t=10, 50, 100, 200, 600, 1200, 1800, 3600, 7200 secの流動ベクトル図および温度コンターをFig.A2-21に示す。出口ノズル部における温度時間変化の実験値と解析値の比較をFig.A2-22に示す。UCS近傍の内筒上端高さおよびその0.5m上方における温度時間変化の実験値と解析値の比較をFig.A2-23に示す。内筒上端より1.2m, 1.95m上方の温度時間変化の実験値と解析値の比較をFig.A2-24に示す。t=300, 600, 900, 1200, 2400, 3600, 5400, 7200, 9000 secにおける炉容器近傍の軸方向温度分布の実験値と解析値の比較をFig.A2-25に示す。実験値と解析値は良く一致している。内筒上端付近傍の(9, 11)セルおよびその上方175mmの(9, 14)セルの温度T, 対流による入熱流量 q_D , 熱伝導による入熱流量 q_C を時間tをパラメータとしてTableA2-1に示す。TableA2-1から次のようなことが推察できる。

1. 内筒上端近傍では

- 温度降下の激しい $t=100$ sec 位までは下方からの低温ナトリウム層の上昇流による q_D が大きな割合を占めている。～対流 $>$ 熱伝導
- $t=200$ sec 以降は低温層領域は内筒上端近傍まで達しており内筒上端近傍はストラティフィケーション界面の直下に位置すると推定される。 q_D と q_C は符号が逆で絶対値は同程度となり熱伝導により上方から入熱する q_C が速度により運び去られて(対流)いるものと解釈される。～対流 \approx 熱伝導

2. 内筒上端より 175 mm 上方は

- ストラティフィケーションによる軸方向温度分布領域の中ごろに位置すると推定される。 q_D と q_C はほぼ同程度で q_C が若干大きい。～熱伝導 \geq 対流

参考までに FACOM-M200 による cpu time を以下に示す。

	cpu time
○ 初期解析 ($t=0\sim 10$ sec)	4sec
○ リスタート解析 1 ($t=10\sim 600$ sec)	3min31sec
○ リスタート解析 2 ($t=600\sim 1800$ sec)	5min42sec
○ リスタート解析 3 ($t=1800\sim 3600$ sec)	8min30sec
○ リスタート解析 4 ($t=3600\sim 9000$ sec)	24min48sec
	計42min35sec

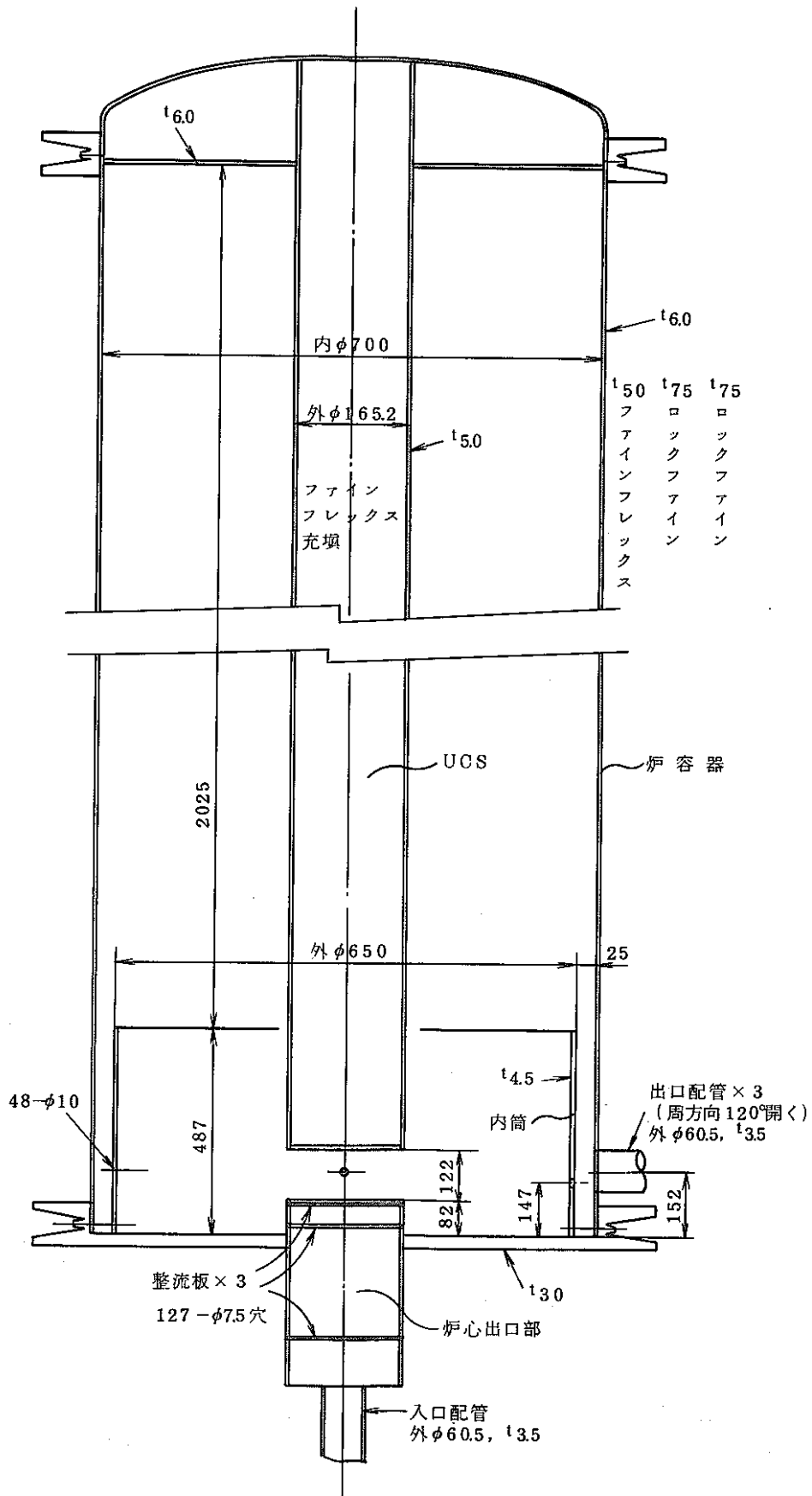


Fig.A2-18 Configuration of Test Model

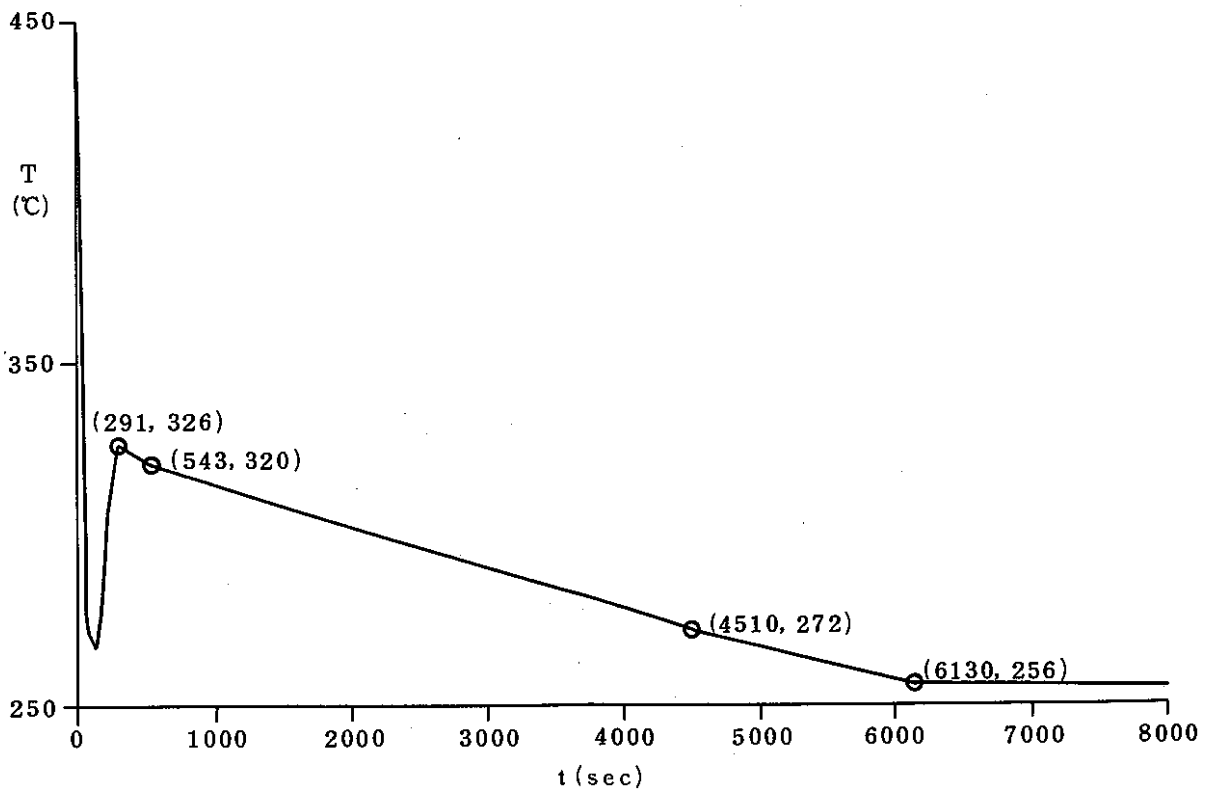
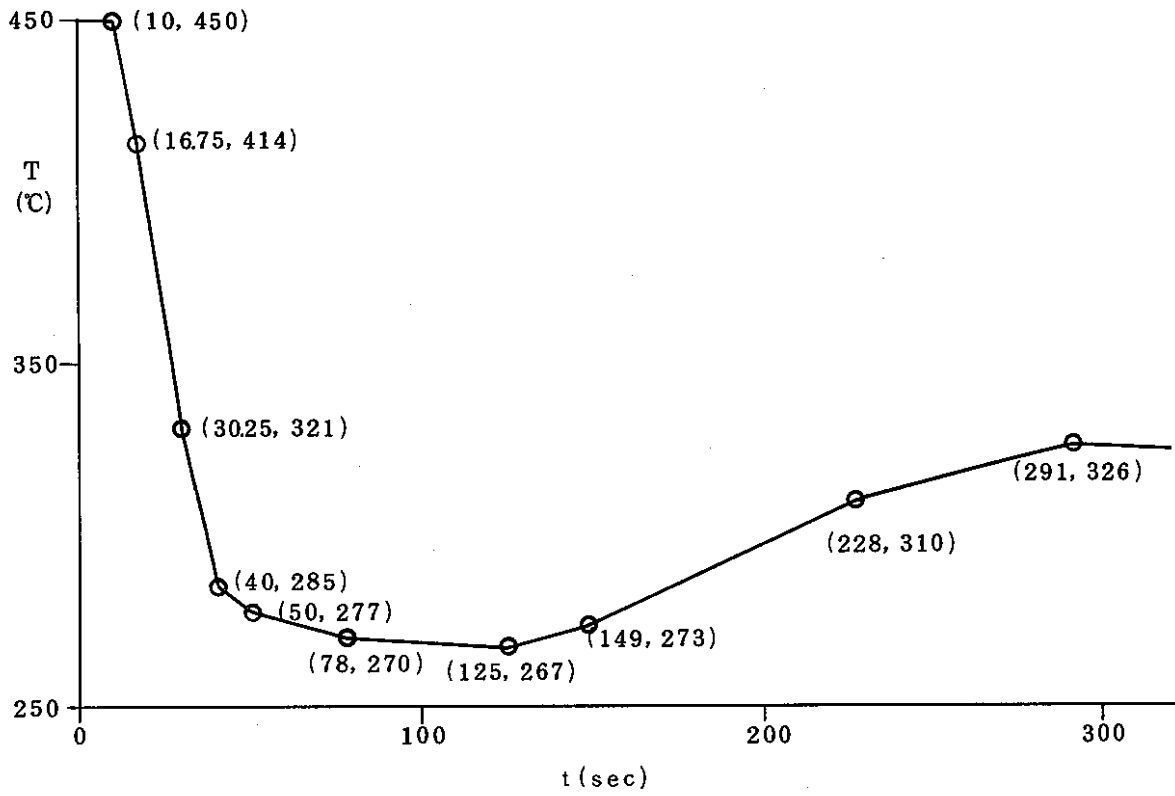


Fig. A2-19 Time-rate Change of Sodium Temperature at core Outlet

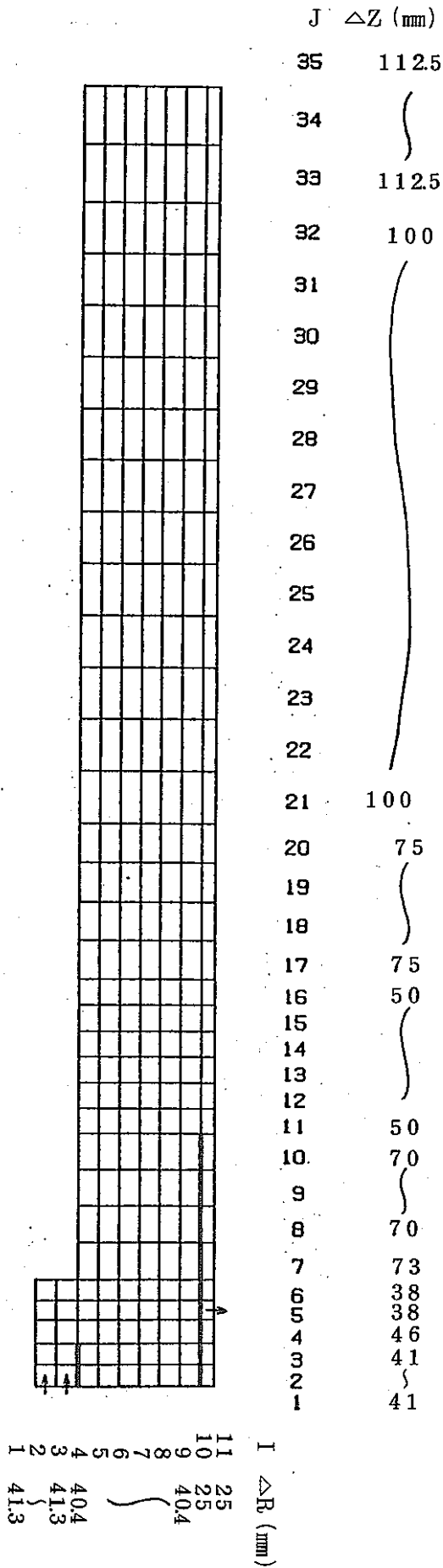


Fig. A2-20 Mesh Arrangement (Liquid Region)

ListA2-6 User Subroutine of Analysis Example 3

```

SUBROUTINE SETIJ
COMMON/BL2/IJF(30,35)
DO 10 I=2,3
DO 10 J=7,34
10 IJF(I,J)=-1
IJF(2,1)=1
IJF(3,1)=1
IJF(11,5)=1
RETURN
END
SUBROUTINE ABIN
COMMON/BL9/HR(30,35),HZ(30,35)
COMMON/BL12/AL(30,35),BL(30,35),ALF(30,35),BLF(30,35),G(30,35)
AL(3,2)=0.
AL(3,3)=0.
DO 10 J=2,10
AL(9,J)=0.
10 HR(9,J)=0.2
HR(9,5)=0.4
RETURN
END
SUBROUTINE INV(VIN,TIME,TLAG)
DIMENSION VIN(3)
VIN(1)=2.5E-3/6.2832
RETURN
END
SUBROUTINE BCVEL(TIME,TLAG)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL8/SR(30,35),SZ(30),DUM1(3150),DUM2(2100)
DIMENSION VIN(3)
SIN=SZ(2)+SZ(3)
SOUT=SR(10,5)
CALL INV(VIN,TIME,TLAG)
V(2,1)=VIN(1)/SIN
V(3,1)=VIN(1)/SIN
U(10,5)=VIN(1)/SOUT
RETURN
END
SUBROUTINE BCTEMP(TIME,TLAG)
COMMON/BL5/T(30,35),DUMMY(1050)
DIMENSION SD(13),TD(13)
DATA SD/0.,6.75,20.25,30.,40.,68.,115.,139.,218.,281.,
1 533.,4500.,6120./
DATA TD/450.,414.,321.,285.,277.,270.,267.,273.,310.,326.,
1 320.,272.,256./
S=TIME-TLAG
IF(S) 10,10,20
10 TIN=TD(1)
GO TO 100
20 N=1
30 N=N+1
IF(N.EQ.14) GO TO 90
IF(SD(N).GT.S) GO TO 40
GO TO 30
40 TIN=TD(N-1)+(TD(N)-TD(N-1))*(S-SD(N-1))/(SD(N)-SD(N-1))
GO TO 100
90 TIN=TD(13)
100 T(2,1)=TIN
T(3,1)=TIN
T(11,5)=T(10,5)
RETURN
END

```

ListA2-7 Input Data of Analysis Example3

(Initial Analysis t=0~10sec)

&DATA

IBAR=9, JBAR=33, ICYL=1, ITURB=1, ITNU=0, IQWALL=1, ...
 DELR=3*.0413, 6*.0404, 2*.025,
 DELZ=3*.041, .046, 2*.038, .073, 3*.07, 6*.05, 4*.075, 12*.1, 3*.1125, ...
 TK=1.771E-2, AL0=868.1, C=0.308, ANU=0.3584E-6, ABETA=2.74E-4,
 WTK=1., WAL0=1., WC=1., SLIP=0.5, UPVEL=1.,
 ITERL=100, EPSI=0.001, GZ=-9.8, ALPH=0.8, 0MG=1.8, TUNI=450., EPM=0.0,
 DELT=0.1, IDELT=10, IDSK=1, ERATE=0.0, NWRITE=1, TLAG=10.0,
 IW=4, 9, 10, JW=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,
 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34,

IRSRT=0, NRESRT=0, ITEMP=0, ITPRI=1, CWPRT=1, CWDSK=1,
 TPRT=10.,
 TDSK=10.,

リスタート解析時
 に変更を要する。

&END

Fig. A2-21 Velocity Vectors and Iso-thermal Lines (1)

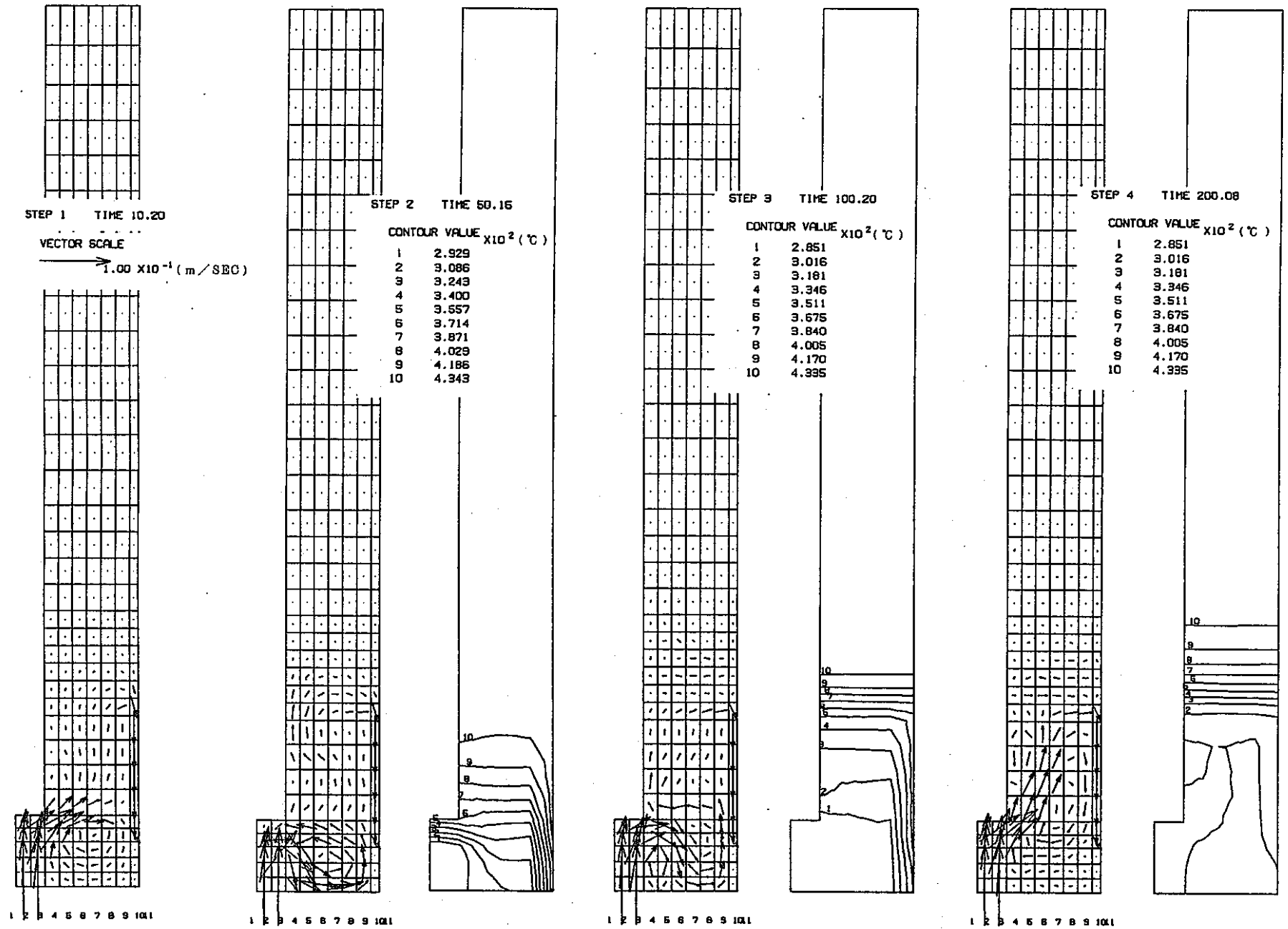


Fig. A2-21 Velocity Vectors and Iso-thermal Lines (2)

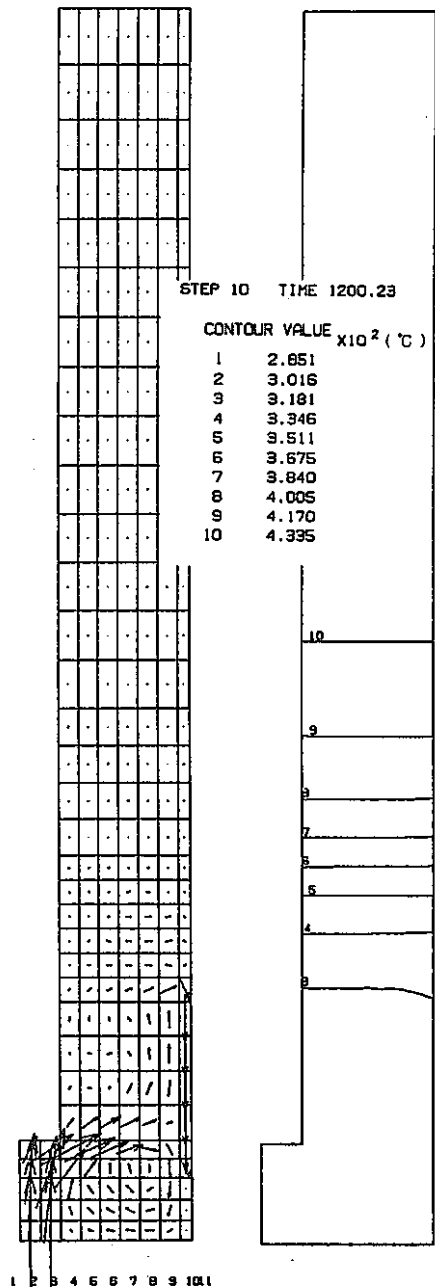
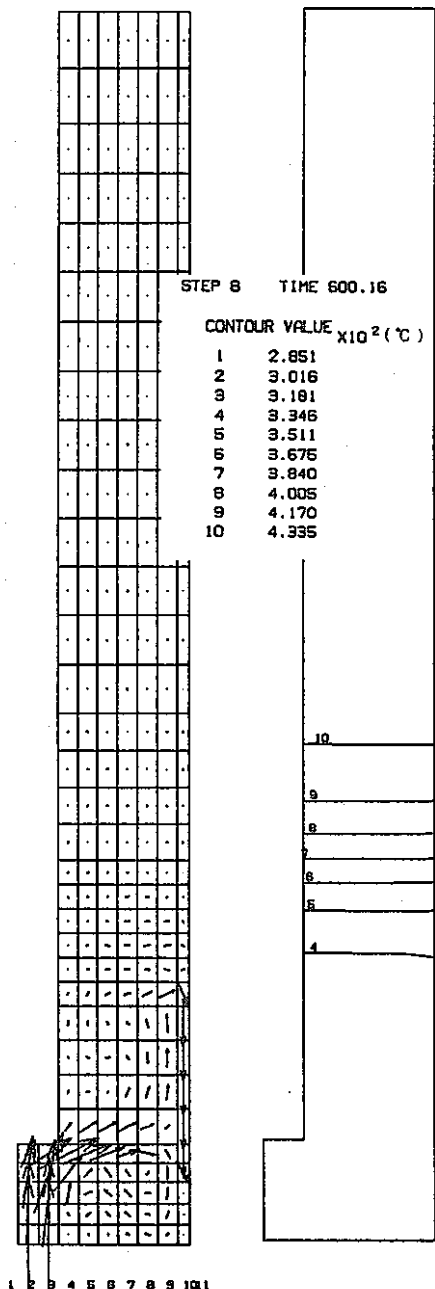
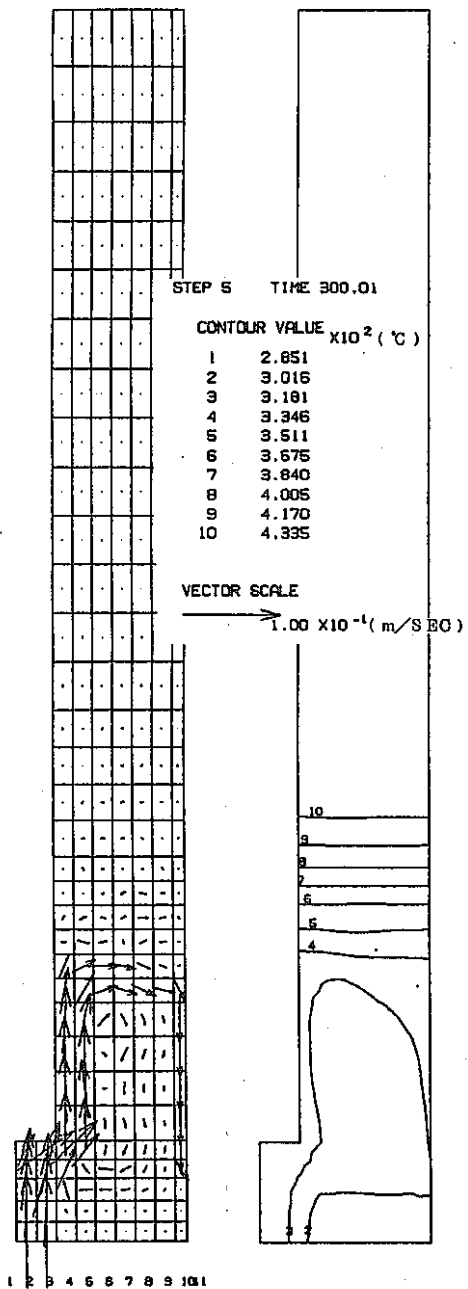
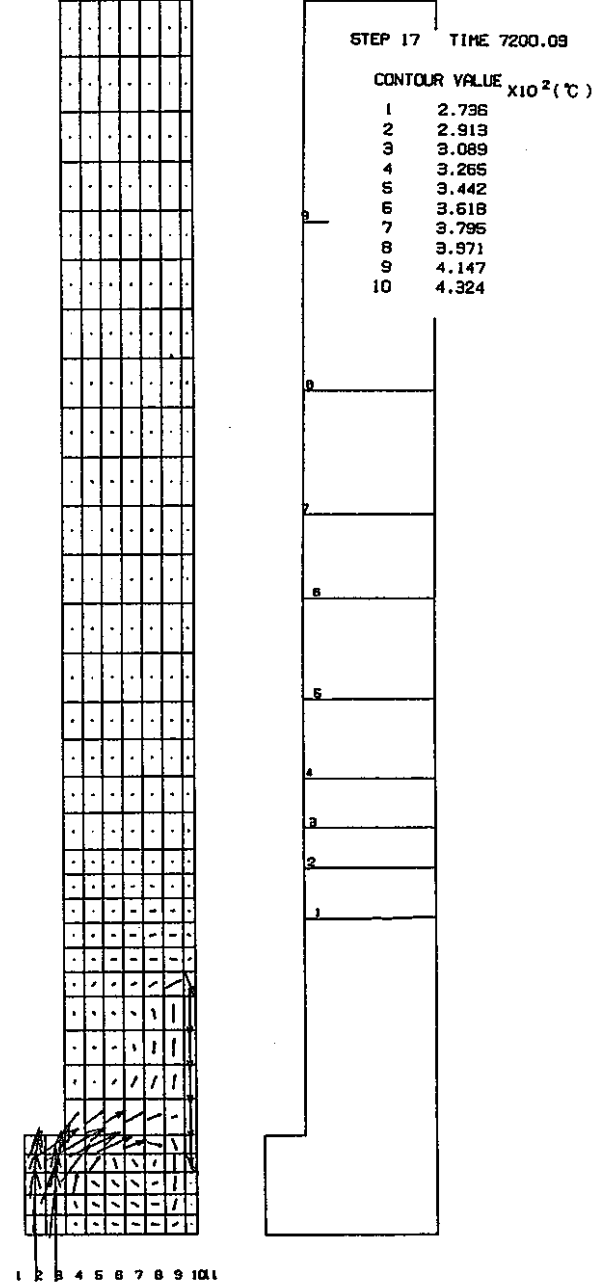
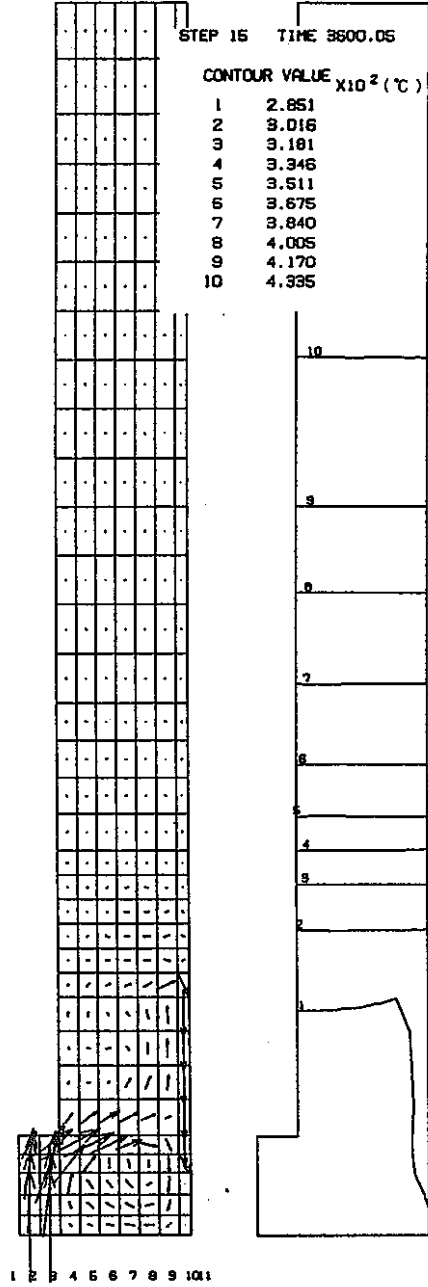
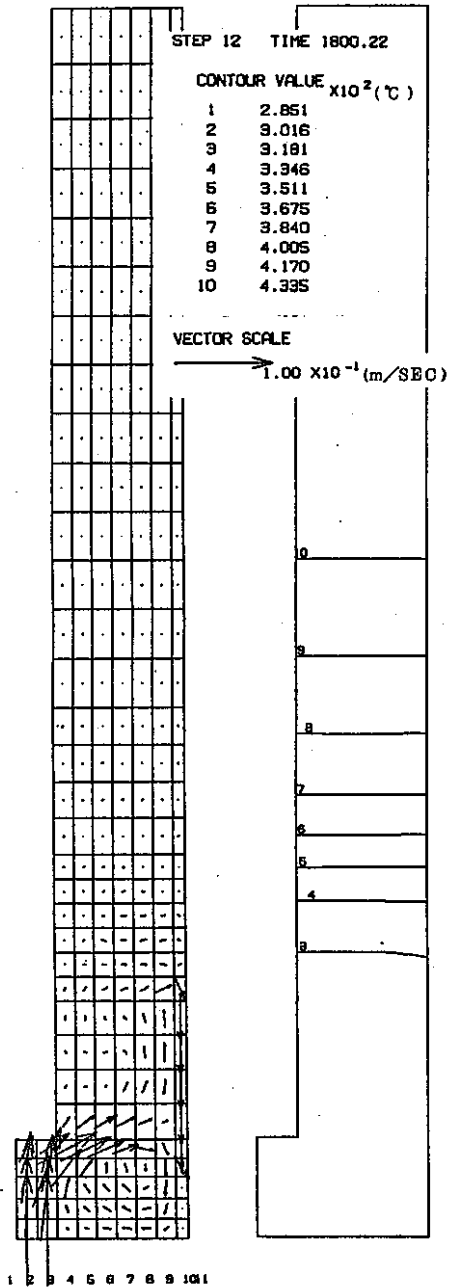


Fig. A2-21 Velocity Vectors and Iso-thermal Lines (3)



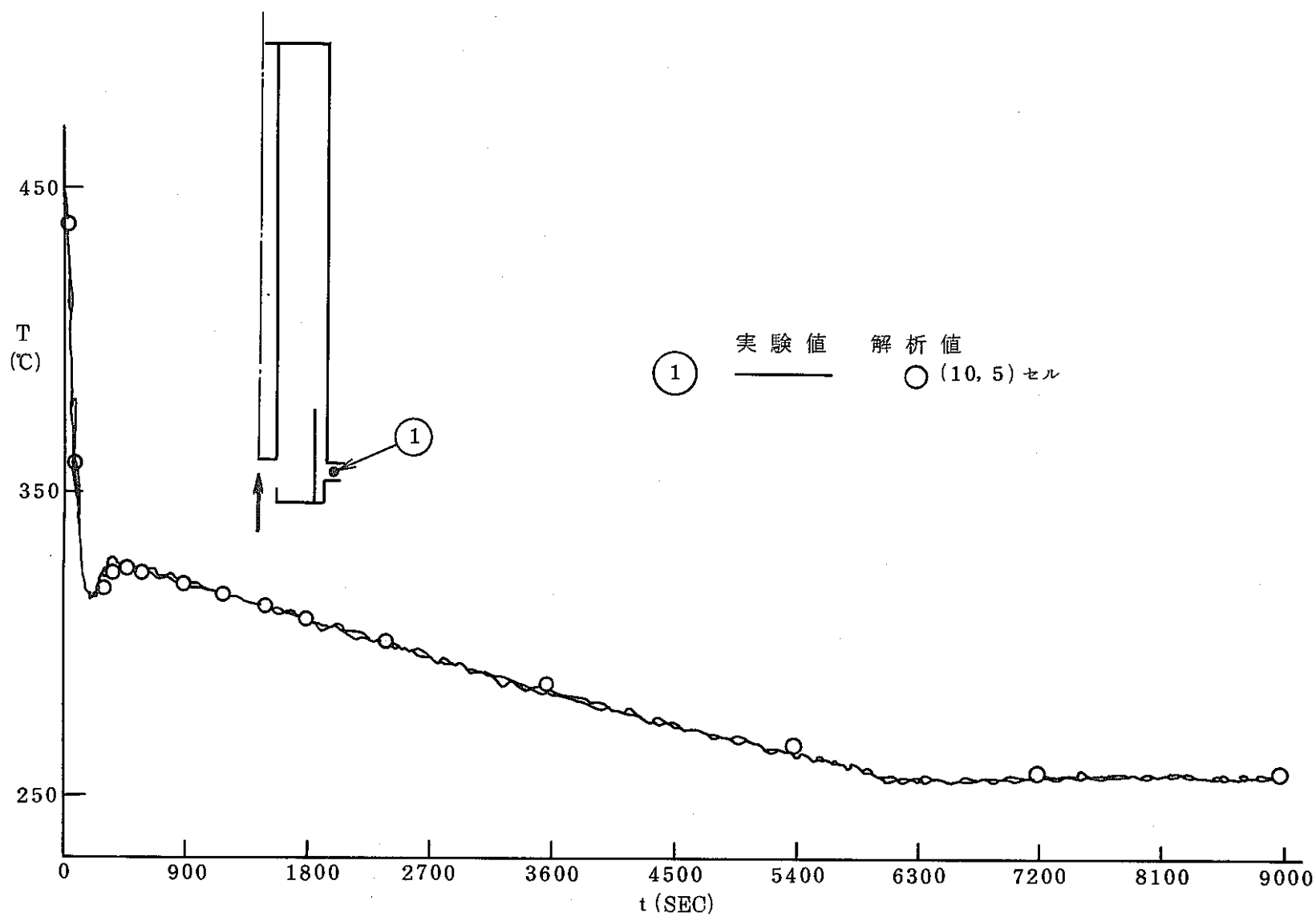


Fig. A2-22 Time-rate Change of Temperature at the Outlet Nozzle

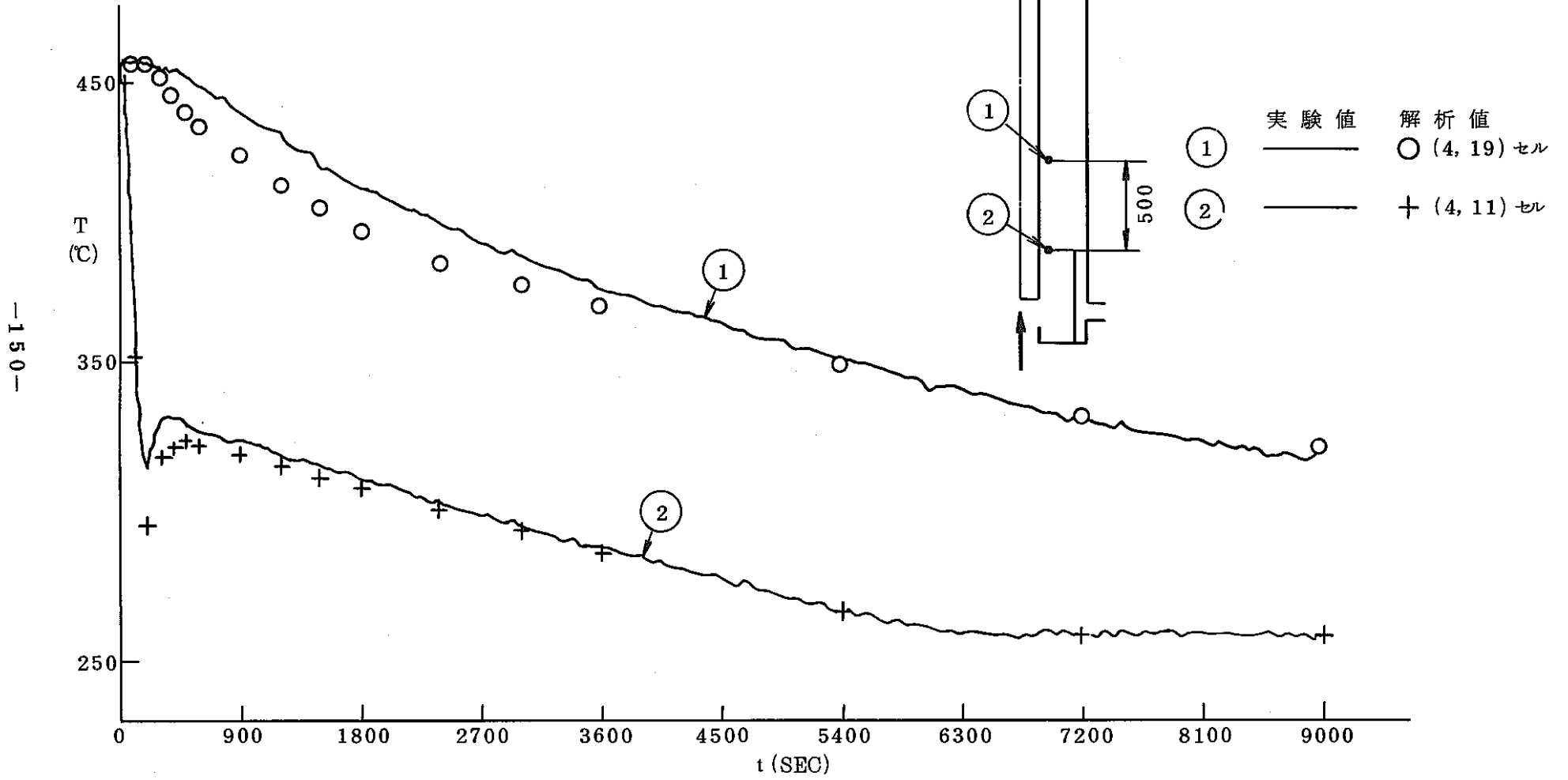


Fig. A2-23 Time-rate Change of Temperature near the UCS

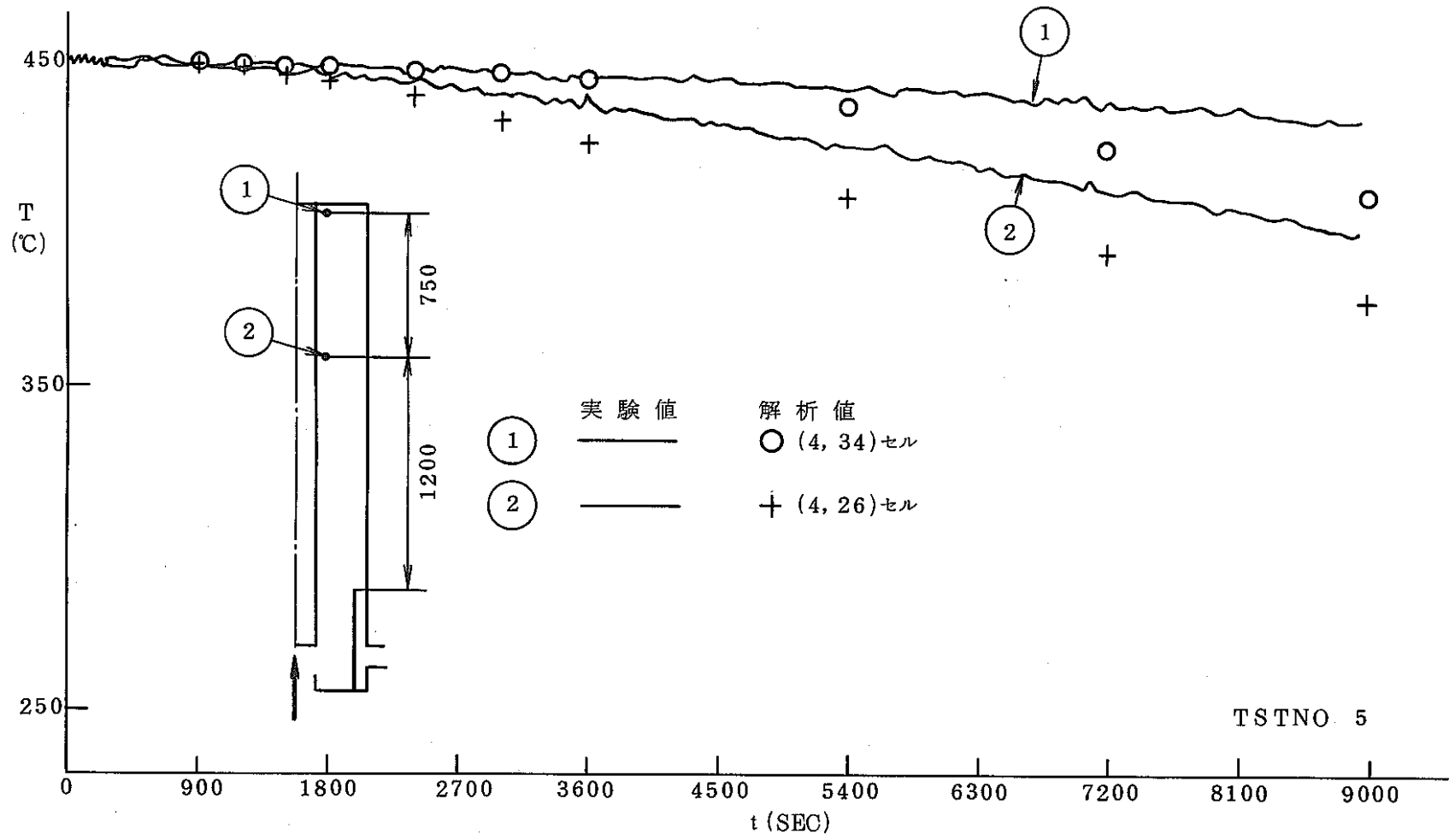


Fig. A2-24 Time-rate Change of Temperature near the UCS

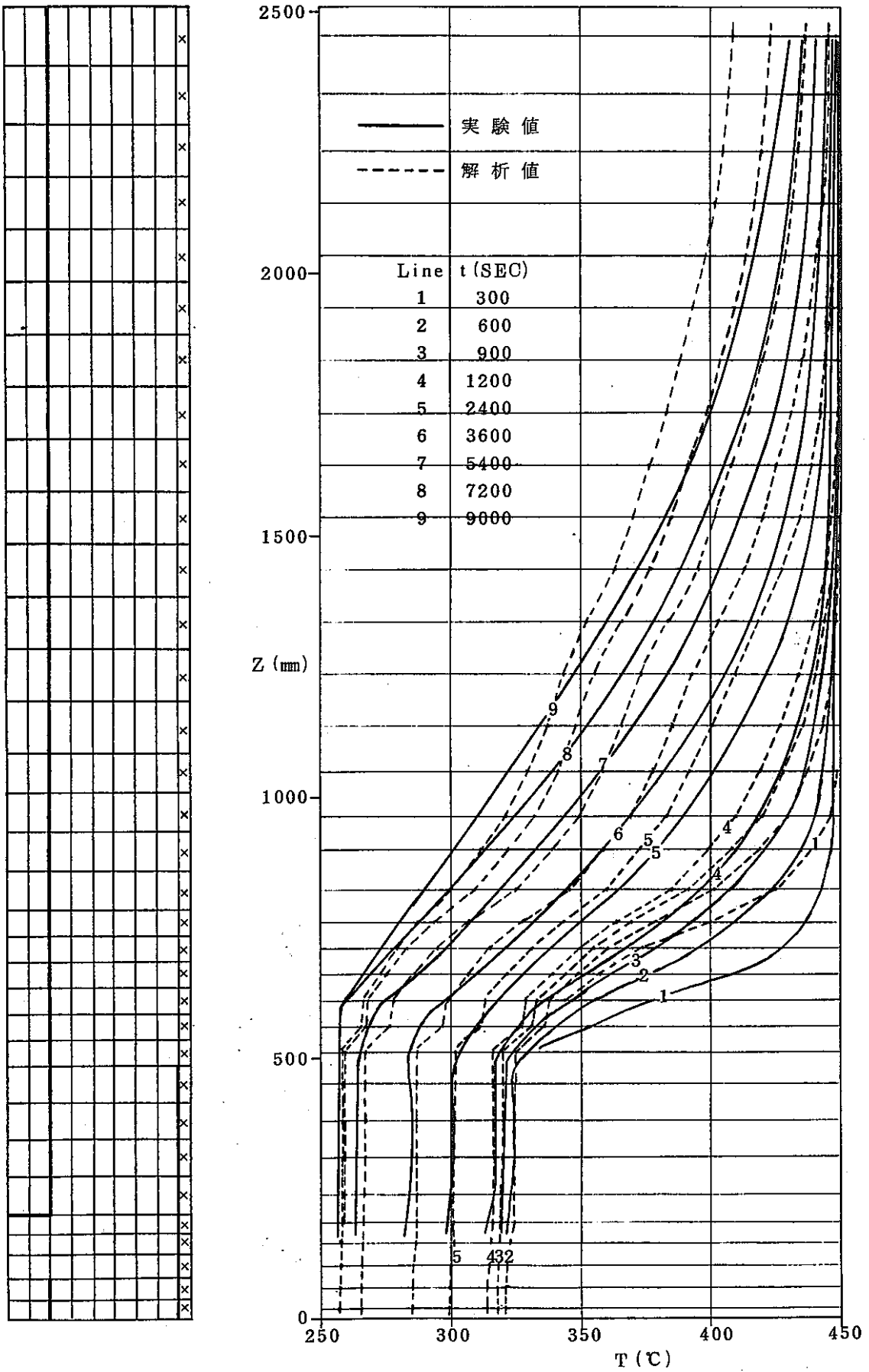


Fig. A2-25 Axial Temperature Distribution at R/V

TableA2-1 Heat Flux at Upper part of Inner Barrel

t (SEC)	内筒上端～(9, 11)セル			175mm上方～(9, 14)セル		
	T (°C)	q _D (kcal/sec)	q _C (kcal/sec)	T (°C)	q _D (kcal/sec)	q _C (kcal/sec)
50	442.54	-8.111×10 ⁻²	2.369×10 ⁻²	449.93	1.315×10 ⁻⁵	-1.258×10 ⁻³
100	350.54	-5.579×10 ⁻¹	2.246×10 ⁻¹	444.84	2.685×10 ⁻²	-4.129×10 ⁻²
200	291.48	-1.947×10 ⁻¹	2.980×10 ⁻¹	407.44	-1.837×10 ⁻²	-6.121×10 ⁻²
300	320.69	2.420×10 ⁻²	1.119×10 ⁻²	357.06	-3.547×10 ⁻²	8.110×10 ⁻⁴
400	322.24	-4.649×10 ⁻²	2.055×10 ⁻²	349.94	-1.399×10 ⁻³	-7.723×10 ⁻³
500	323.17	-4.924×10 ⁻²	4.840×10 ⁻²	348.55	-2.913×10 ⁻³	3.495×10 ⁻³
600	322.03	-5.514×10 ⁻²	5.701×10 ⁻²	347.97	-3.013×10 ⁻³	-1.349×10 ⁻³
900	318.59	-5.580×10 ⁻²	5.380×10 ⁻²	343.91	3.872×10 ⁻⁴	-4.084×10 ⁻⁴
1200	314.91	-5.473×10 ⁻²	5.674×10 ⁻²	339.94	5.547×10 ⁻⁴	-3.711×10 ⁻³
1500	311.19	-5.281×10 ⁻²	5.086×10 ⁻²	334.73	1.613×10 ⁻³	-3.423×10 ⁻³
1800	307.49	-5.128×10 ⁻²	4.930×10 ⁻²	330.24	1.261×10 ⁻³	-3.537×10 ⁻³
2400	300.14	-4.949×10 ⁻²	4.752×10 ⁻²	321.93	2.714×10 ⁻³	-4.045×10 ⁻³
3000	292.85	-4.877×10 ⁻²	4.691×10 ⁻²	314.34	2.556×10 ⁻³	-4.206×10 ⁻³
3600	285.59	-4.888×10 ⁻²	4.701×10 ⁻²	307.14	2.362×10 ⁻³	-4.783×10 ⁻³
5400	265.63	-4.749×10 ⁻²	4.592×10 ⁻²	286.77	2.704×10 ⁻³	-3.956×10 ⁻³
7200	257.52	-3.871×10 ⁻²	3.890×10 ⁻²	275.65	3.461×10 ⁻³	-4.091×10 ⁻³
9000	257.26	-3.313×10 ⁻²	3.318×10 ⁻²	272.81	3.630×10 ⁻³	-3.890×10 ⁻³

2.4 解析例4 (炉容器上部プレナムのストラティフィケーション試験～1/10スケールNa流動試験, フローホール有り, 2.5ℓ/sec, ΔT=180℃)

解析例3と異なるのはフローホール外側のSUS304薄板を取り外しナトリウムが通過できるようにした事である。解析においてはフローホール断面積の等しい円筒スリットでモデル化し, フローホール通過時の圧損 $\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} u_f^2$, $\zeta = 1.9$ を考慮した。炉心出口部のナトリウム温度時間変化 (多直線近似) を Fig. A2-26 に示す。解析パラメータは解析例3と同一である。ユーザーサブルーチンを List A2-8 に, 入力データ (初期解析) を List A2-9 に示す。流動ベクトル図および温度コンターを Fig. A2-27 に示す。出口ノズル部の温度時間変化の解析値と実験値の比較を Fig. A2-28 に示す。UCS近傍の温度時間変化の解析値と実験値の比較を Fig. 2A-29, Fig. 2A-30 に示す。炉容器近傍の軸方向温度分布の解析値と実験値の比較を Fig. A2-31, Fig. A2-32 に示す。フローホール通過割合の時間変化 (解析値) を Fig. A2-23 に示す。

FACOM-M200によるCPU timeは1h 5min 47secであった。

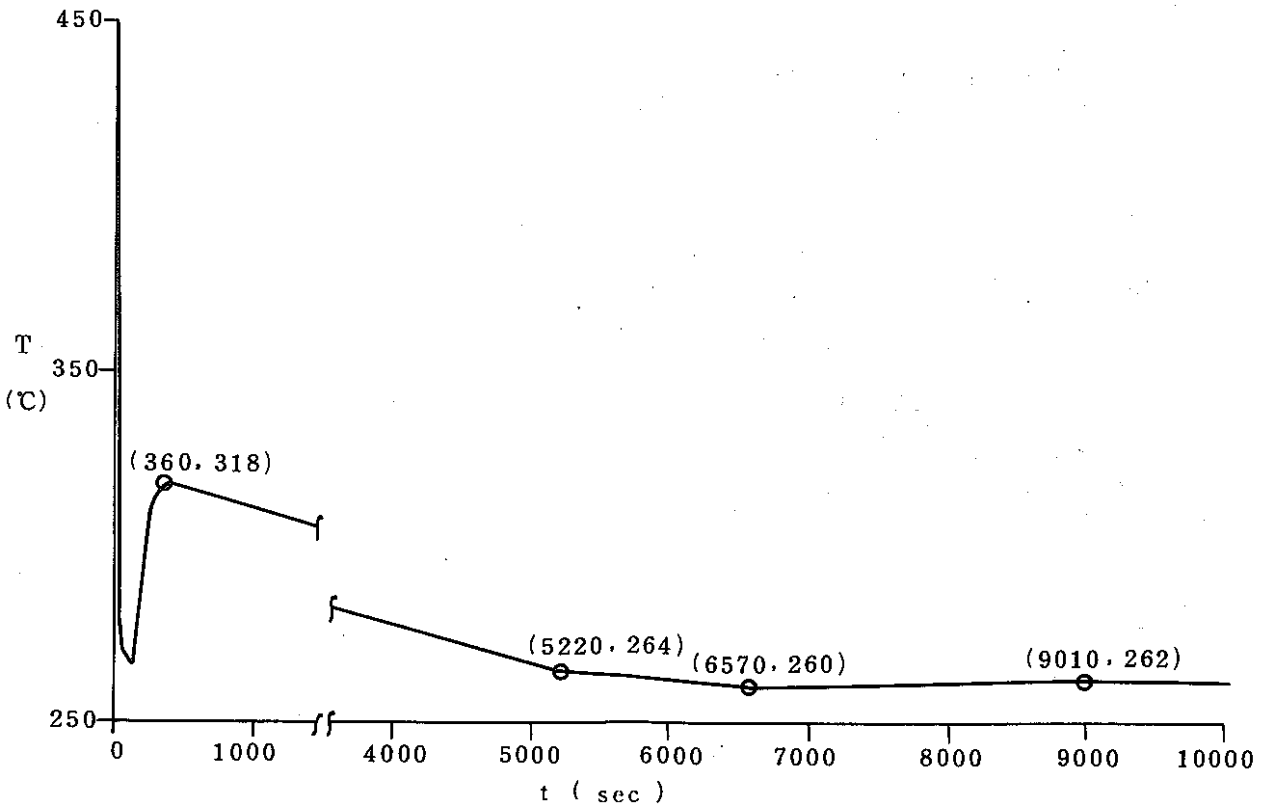
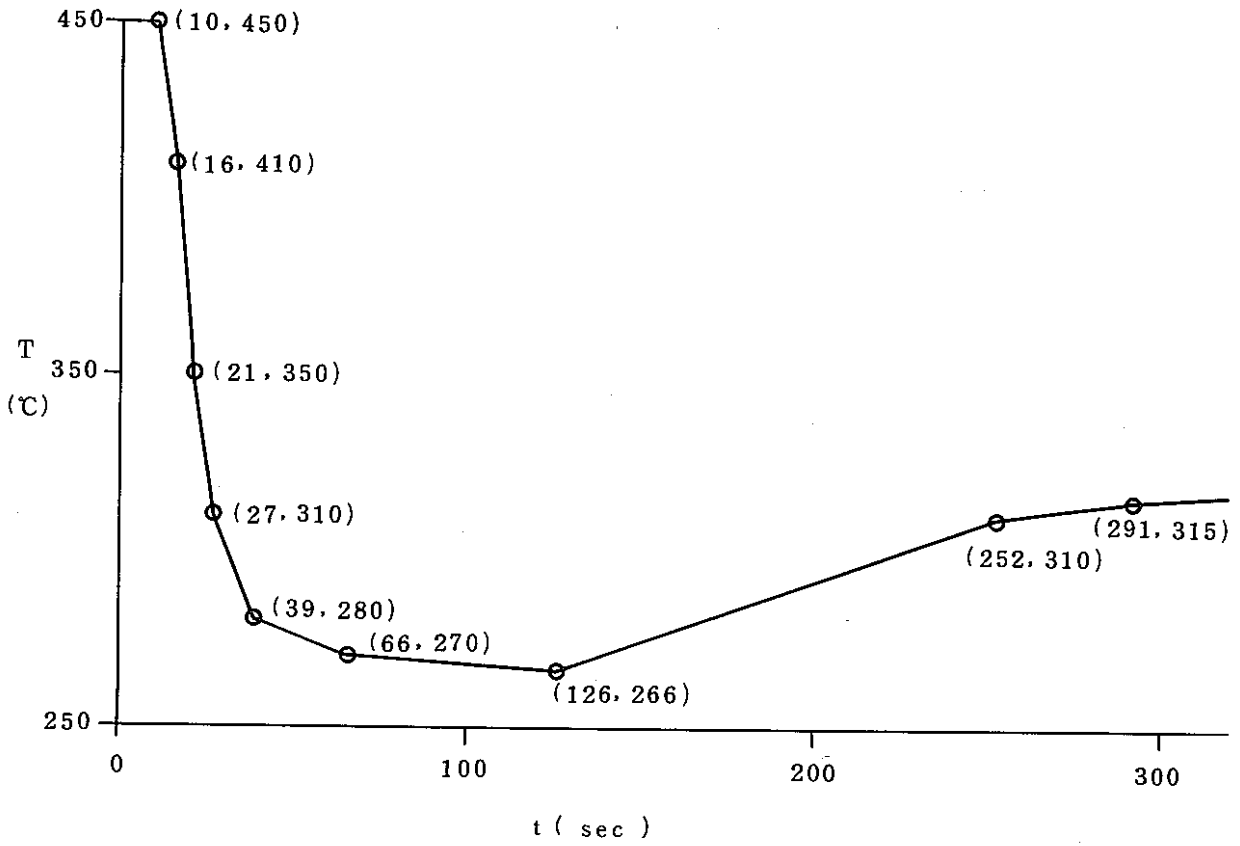


Fig. A2-26 Time-rate Change of Sodium Temperature at Core Outlet

List A 2-8 User Subroutine of Analysis Example 4

```

SUBROUTINE SETIJ
COMMON/BL2/IJF(30,35)
DO 10 I=2,3
DO 10 J=7,34
10 IJF(I,J)=-1
IJF(2,1)=1
IJF(3,1)=1
IJF(11,5)=1
RETURN
END
SUBROUTINE ABIN
COMMON/BL9/HR(30,35),HZ(30,35)
COMMON/BL12/AL(30,35),BL(30,35),ALF(30,35),BLF(30,35),G(30,35)
AL(3,2)=0.
AL(3,3)=0.
DO 10 J=2,10
AL(9,J)=0.
10 HR(9,J)=0.2
AL(9,5)=0.0486
ALF(9,5)=1.9
RETURN
END
SUBROUTINE INV(VIN,TIME,TLAG)
DIMENSION VIN(3)
VIN(1)=2.5E-3/6.2832
RETURN
END
SUBROUTINE BCVEL(TIME,TLAG)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL8/SR(30,35),SZ(30),DUM1(3150),DUM2(2100)
DIMENSION VIN(3)
SIN=SZ(2)+SZ(3)
SOUT=SR(10,5)
CALL INV(VIN,TIME,TLAG)
V(2,1)=VIN(1)/SIN
V(3,1)=VIN(1)/SIN
U(10,5)=VIN(1)/SOUT
RETURN
END
SUBROUTINE BCTEMP(TIME,TLAG)
COMMON/BL5/T(30,35),DUMMY(1050)
DIMENSION SD(13),TD(13)
DATA SD/0.,6.,11.,17.,29.,56.,116.,242.,281.,350.,
1 5210.,6560.,9000./
DATA TD/450.,410.,350.,310.,280.,270.,266.,310.,315.,318.,
1 264.,260.,262./
S=TIME-TLAG
IF(S) 10,10,20
10 TIN=TD(1)
GO TO 100
20 N=1
30 N=N+1
IF(N.EQ.14) GO TO 90
IF(SD(N).GT.S) GO TO 40
GO TO 30
40 TIN=TD(N-1)+(TD(N)-TD(N-1))*(S-SD(N-1))/(SD(N)-SD(N-1))
GO TO 100
90 TIN=TD(13)
100 T(2,1)=TIN
T(3,1)=TIN
T(11,5)=T(10,5)
RETURN
END

```

List A2-9 Input Data of Analysis Example (Initial Analysis)

&DATA

IBAR=9, JBAR=33, ICYL=1, ITURB=1, ITNU=0, IQWALL=1,

DELR=3*.0413, 6*.0404, 2*.025,

DELZ=3*.041, .046, 2*.038, .073, 3*.07, 6*.05, 4*.075, 12*.1, 3*.1125,

TK=1.771E-2, AL0=868.1, C=0.308, ANU=0.3584E-6, ABETA=2.74E-4,

WTK=1., WAL0=1., WC=1., SLIP=0.5, UPVEL=1.,

ITERL=100, EPSI=0.001, GZ=-9.8, ALPH=0.8, 0MG=1.8, TUNI=450., EPM=0.0,

DELT=0.1, IDELT=5, IDSK=1, ERATE=0.0, NWRITE=1, TLAG=10.0,

IW=4, 9, 10, JW=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,

21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34,

IRSRT=0, NRESRT=0, ITEMP=0, ITPRI=1, CWPRT=1, CWDSK=1,

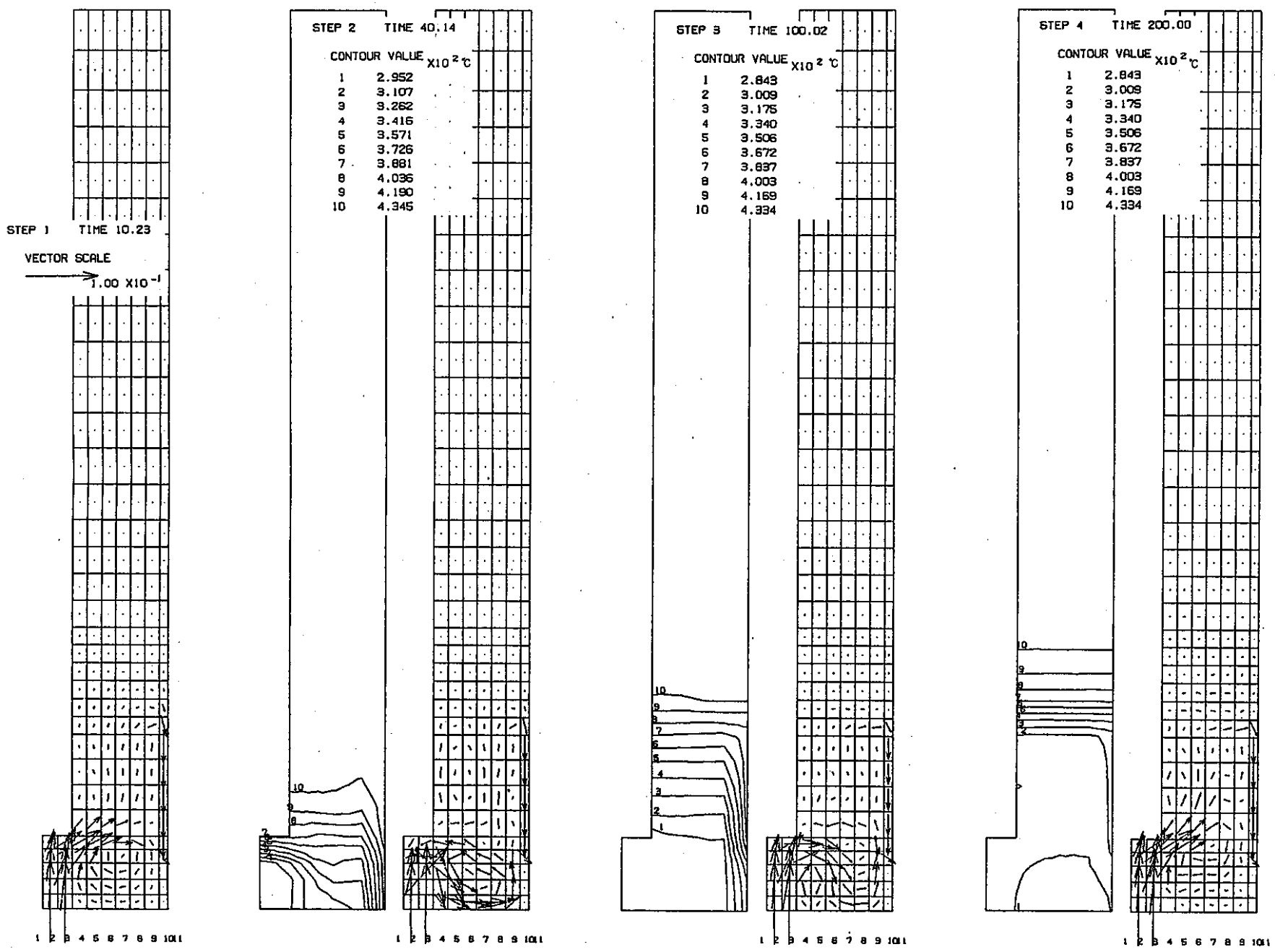
TPRT=10.,

TDSK=10.,

&END

リスタート解析時
に変更を要する。

Fig. A2-27 Velocity Vectors and Iso-thermal Lines



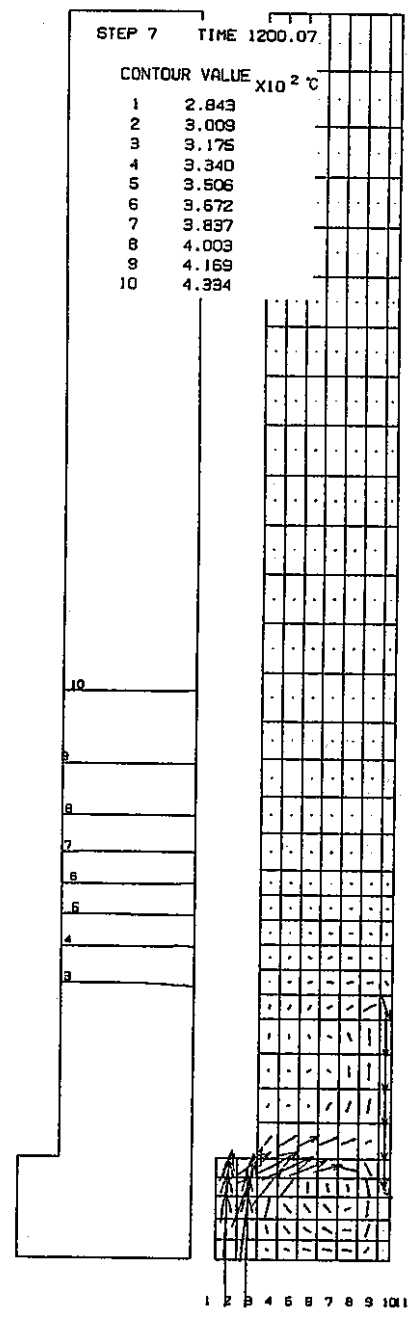
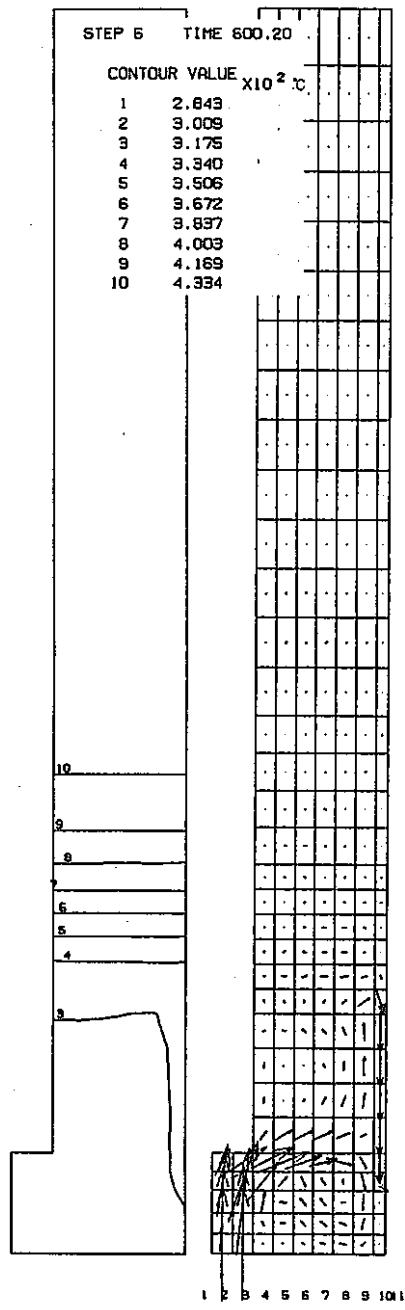
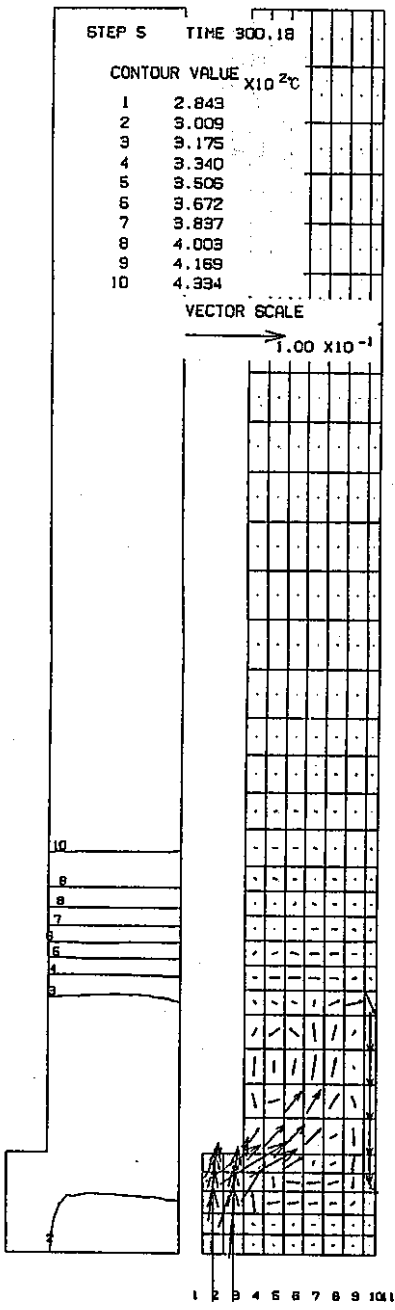


Fig. A2-27 Velocity Vectors and Iso-thermal Lines

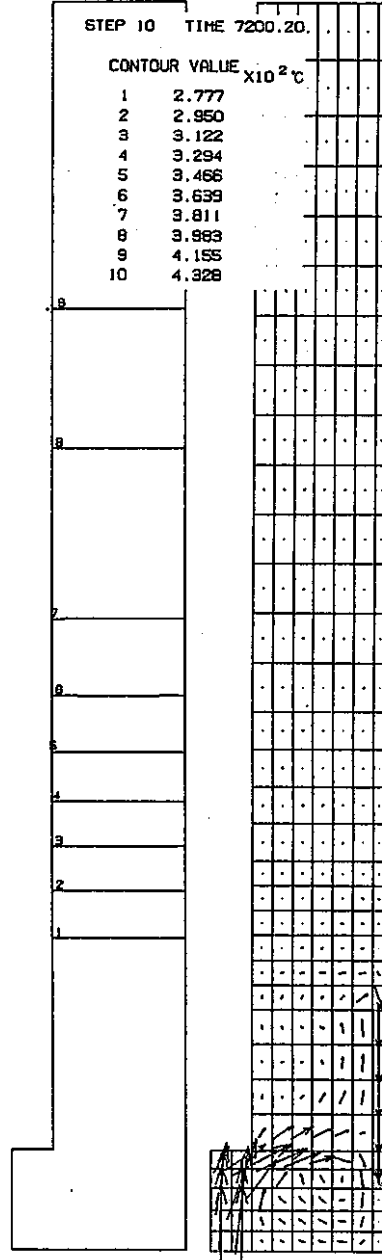
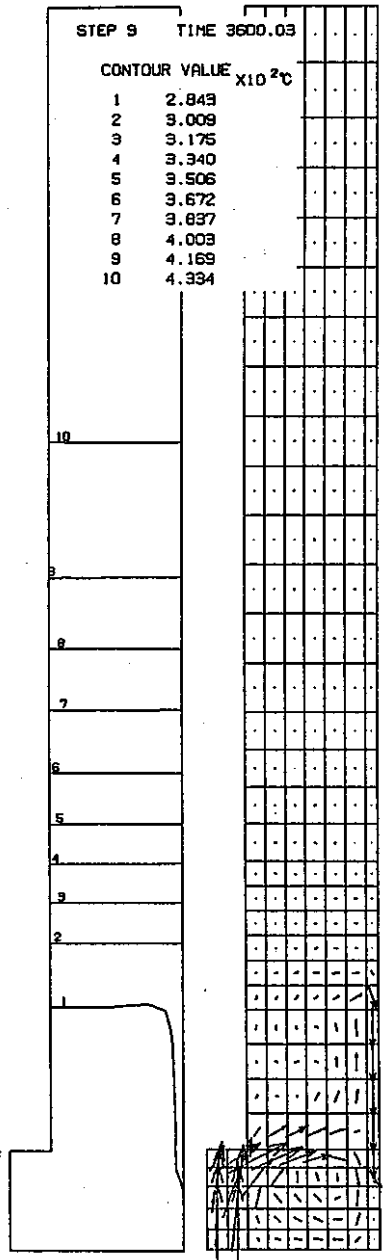
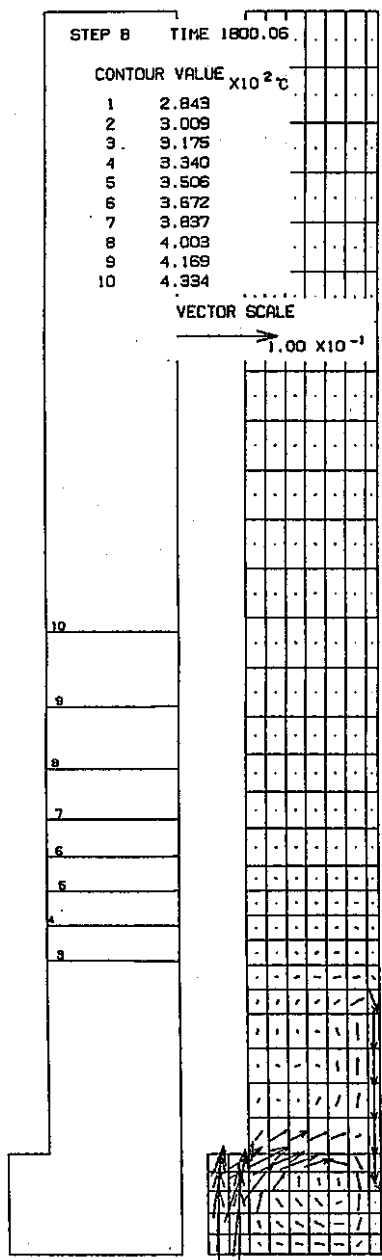


Fig. A2-27 Velocity Vectors and Iso-thermal Lines

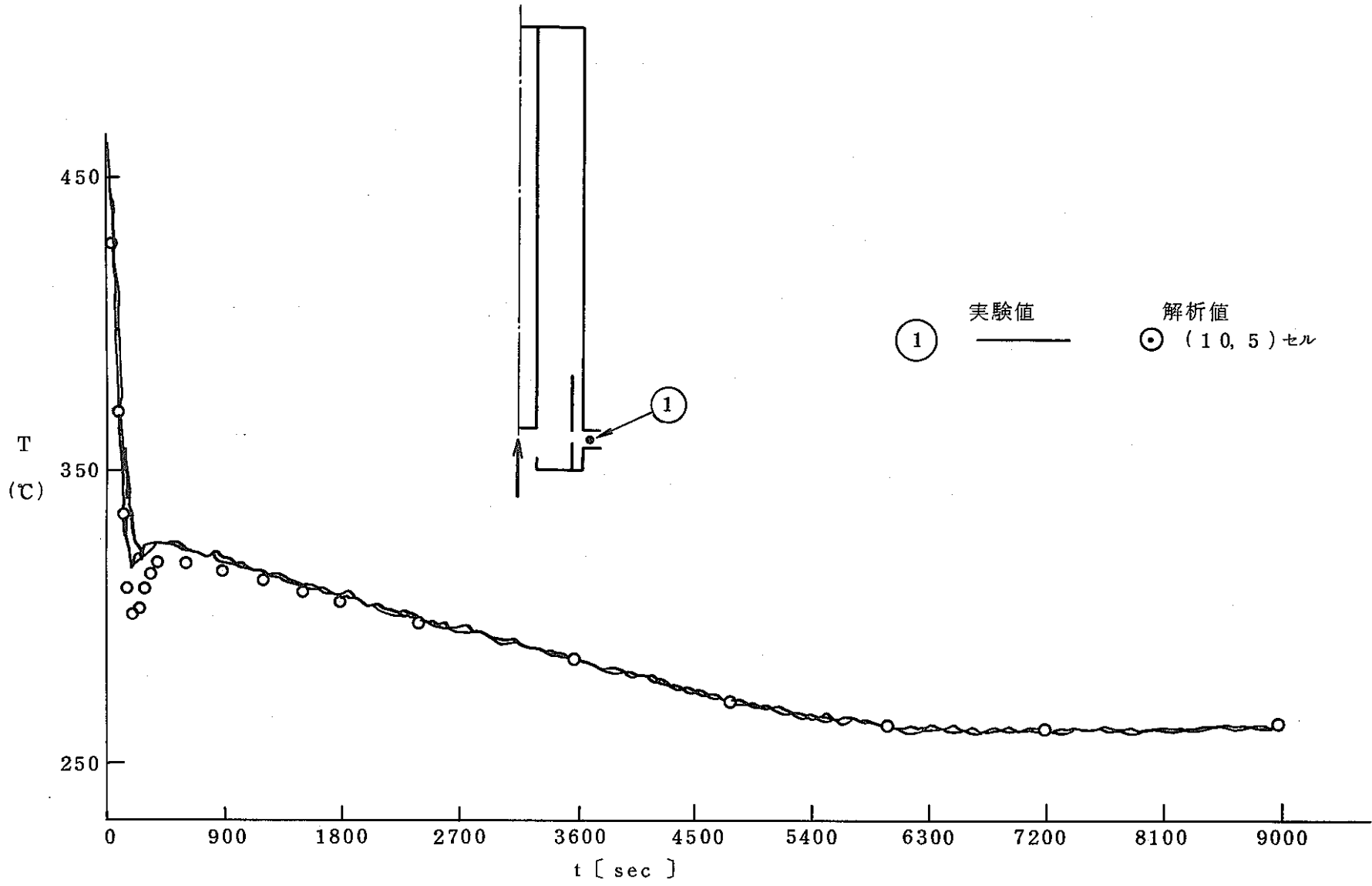


Fig. A2-28 Time-rate Change of Temperature at the Outlet Nozzle

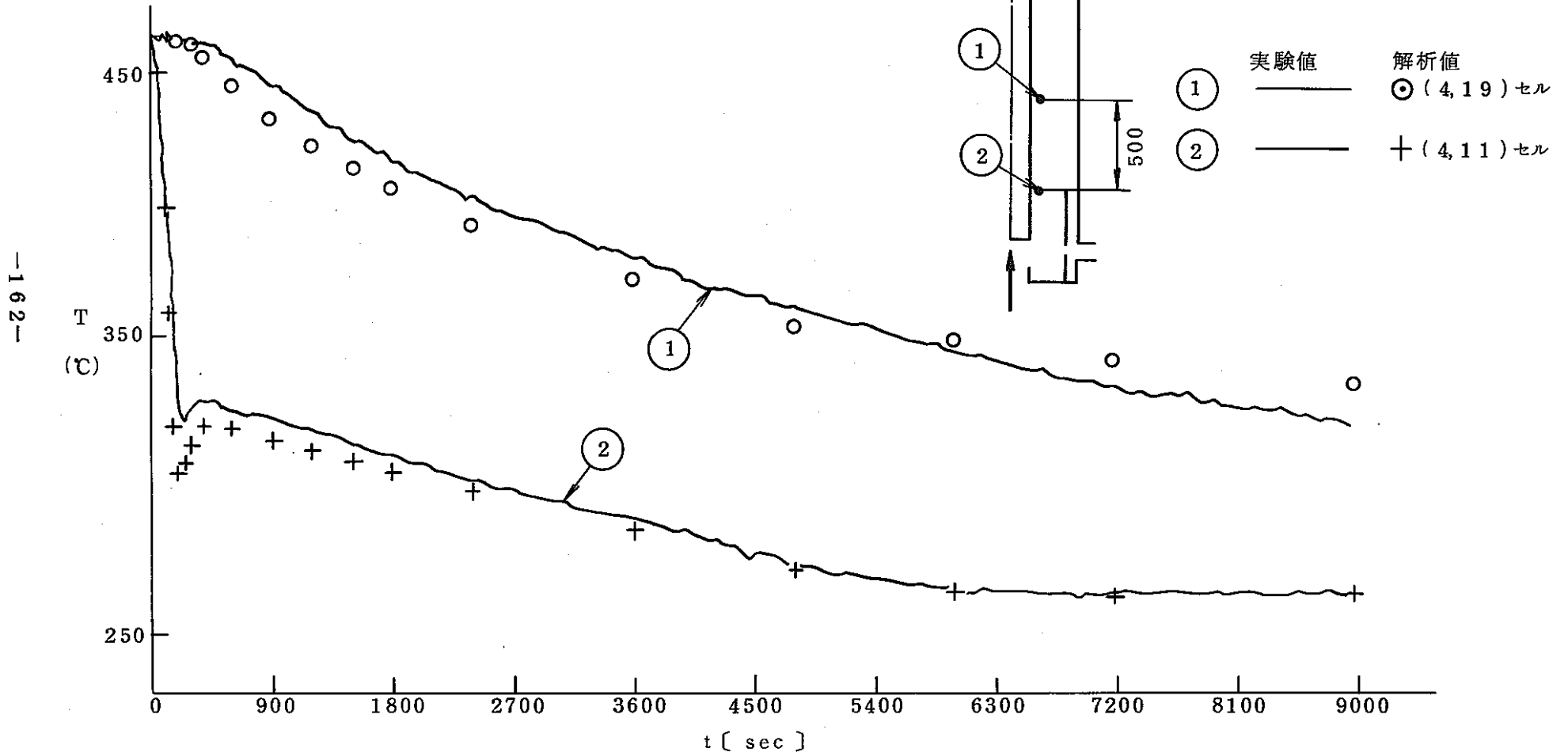


Fig. A2-29 Time-rate Change of Temperature near the UCS(1)

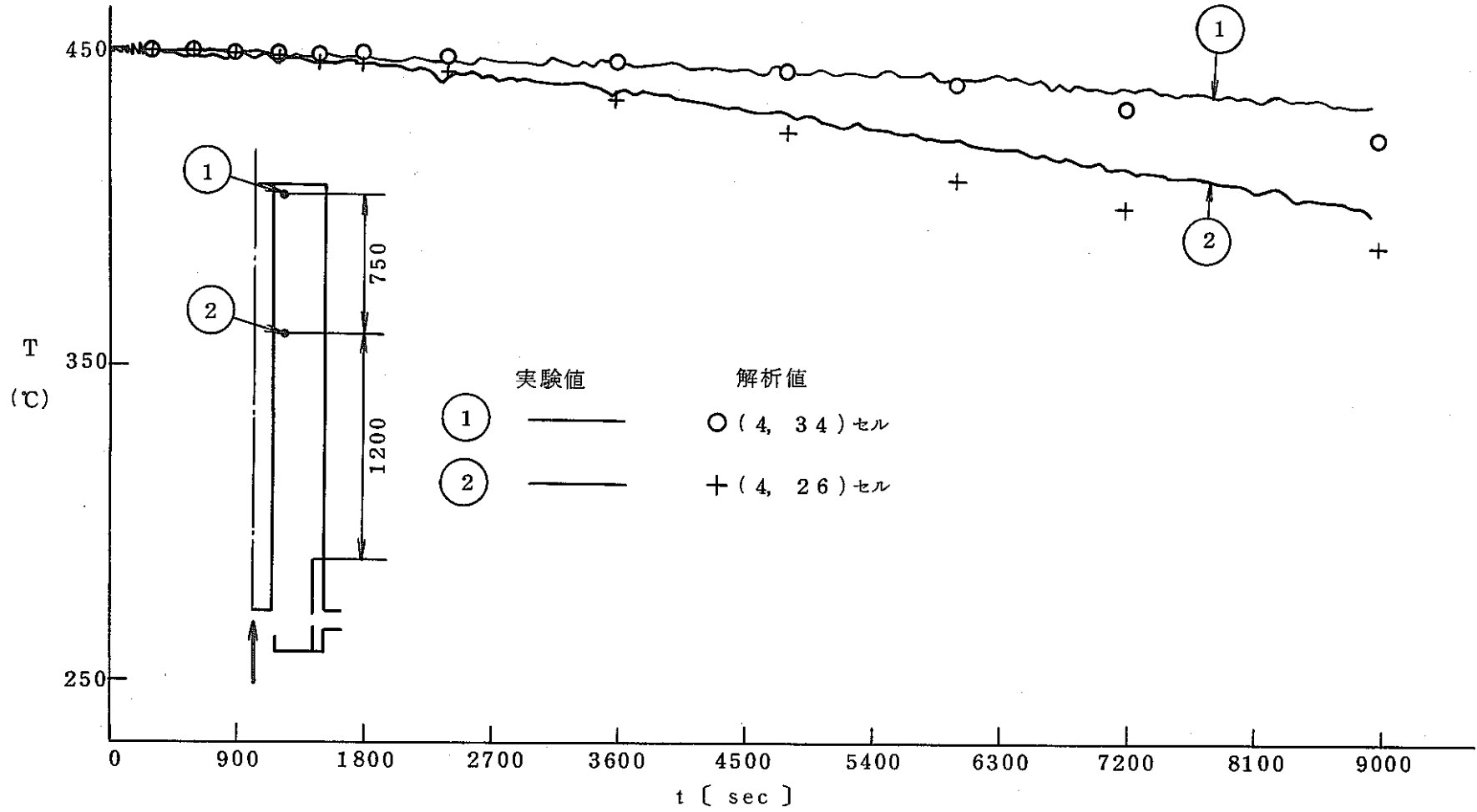


Fig. A2-30 Time-rate Change of Temperature near the UCS

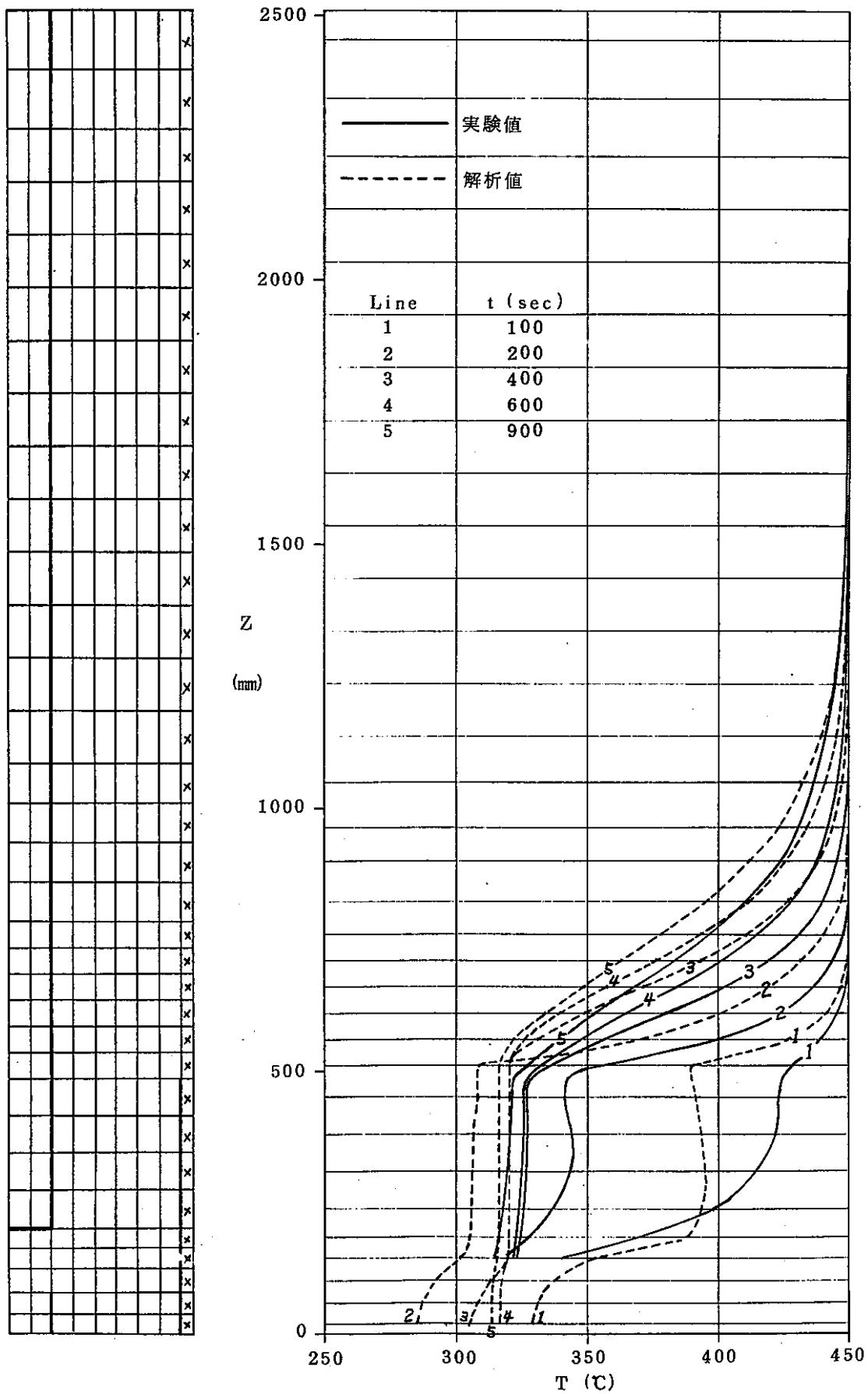


Fig. A2-31 Axial Temperature Distribution of R/V

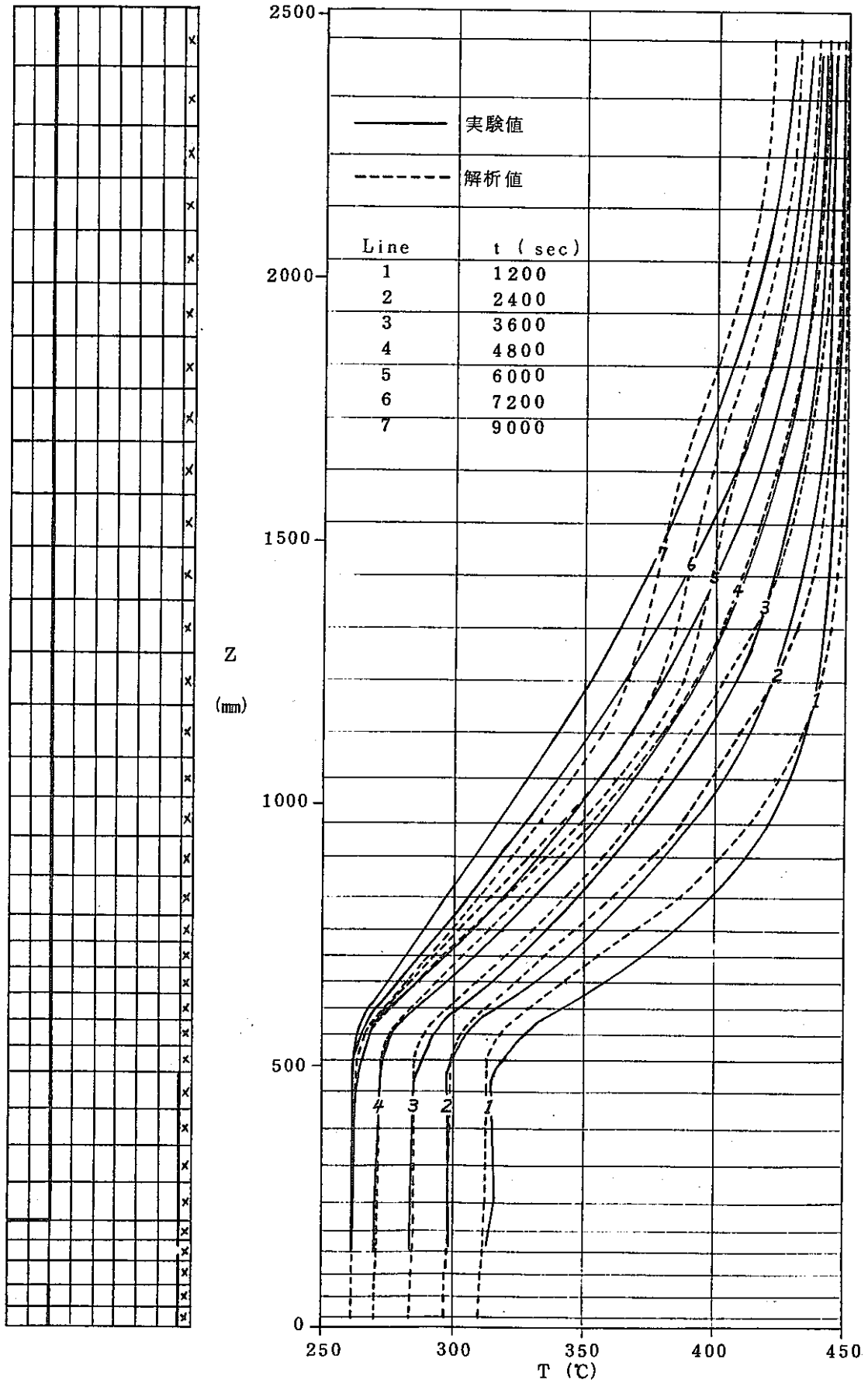


Fig. A2-32 Axial Temperature Distribution of R/V

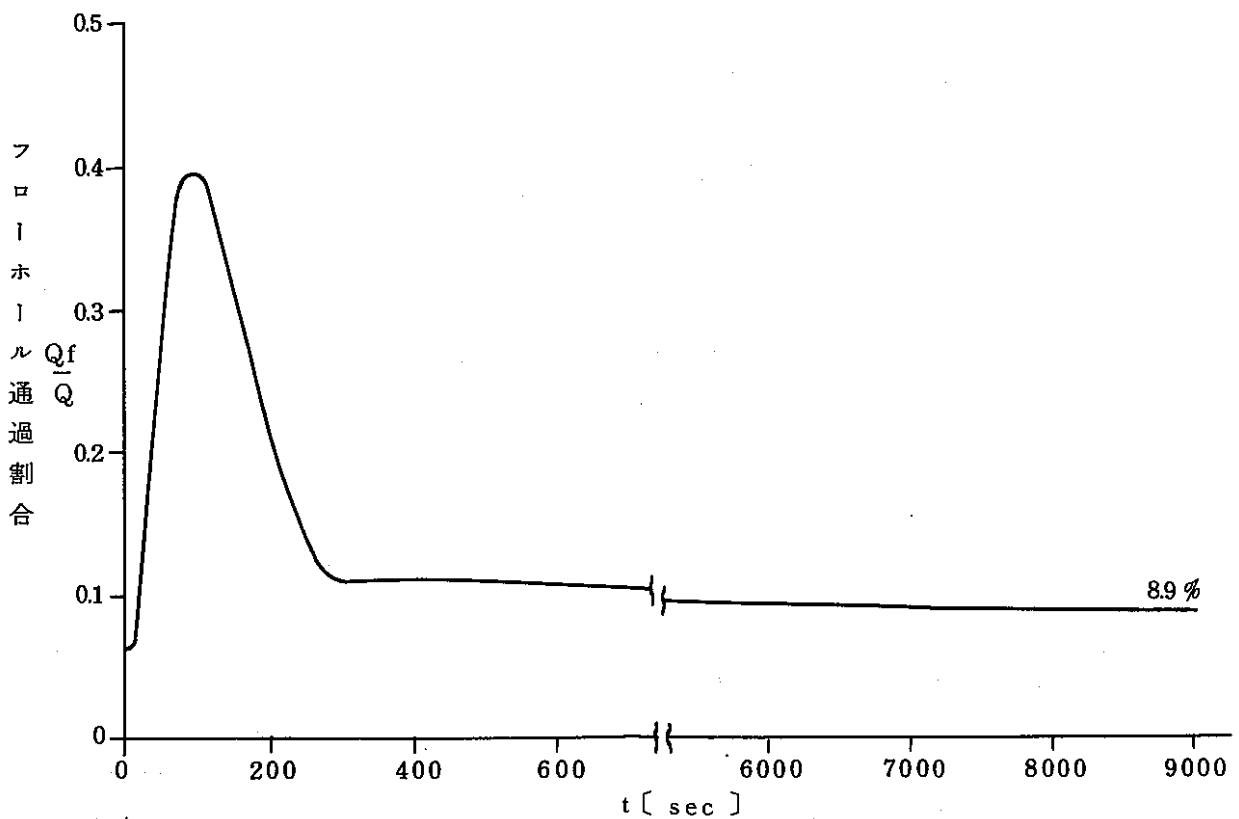
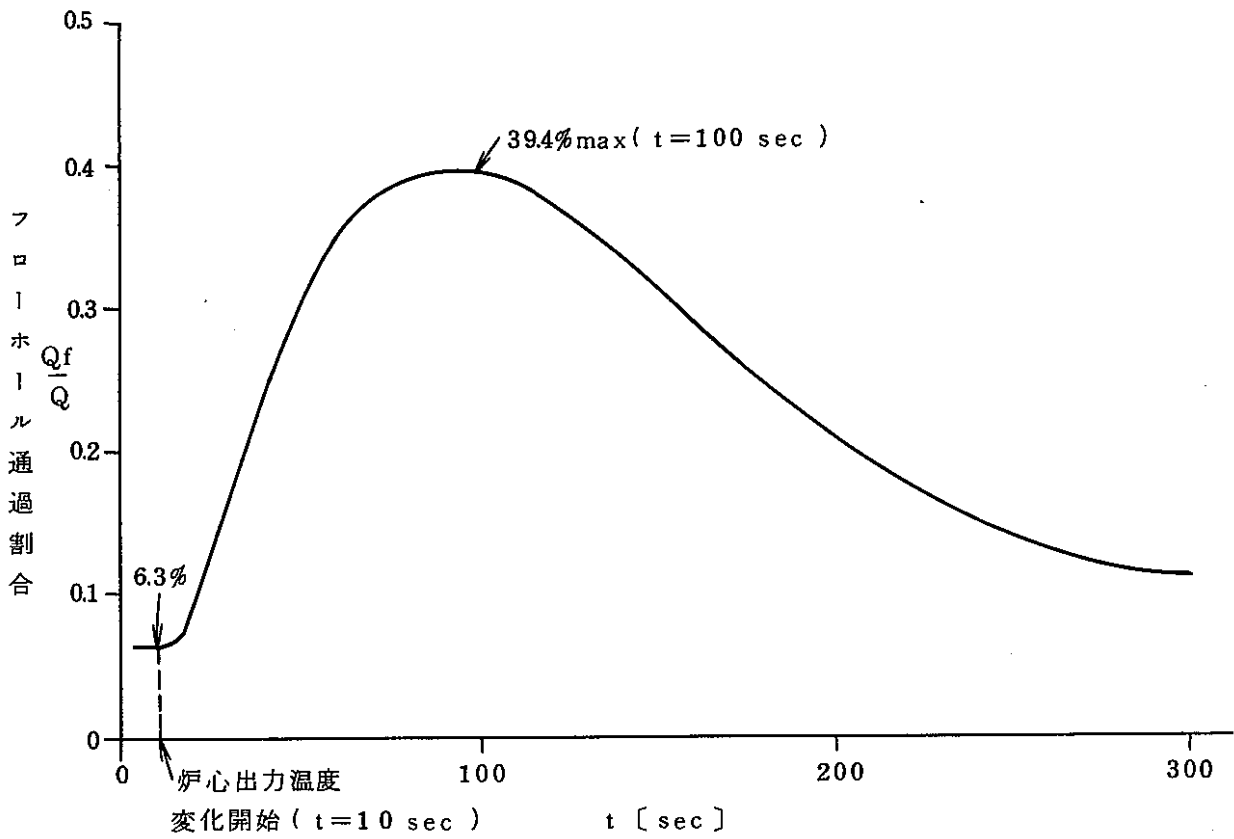


Fig. A 2-33 Time-rate Change of Flow Volume through the Flow Holes (Analysis)

2.5 解析例5 (炉容器上部プレナムのストラティフィケーション試験～1/6スケールNa流動試験)

試験体断面形状をFig. A2-34に示す。炉心出口温度および流量の時間変化をFig. A2-35に示す。初期温度420℃、初期流量47ℓ/secの定常状態から炉心出口温度および流量が同時に低下開始する(t=50 sec)。解析はt=20 secから開始し、以下の様にモデル化した。

- (1) 構造物の熱容量は無視する。但し熱通過率を考慮する。
- (2) 下部プレナム内のNa領域は自然対流領域とする。上部プレナムとの仕切り板の熱通過率はFig. A2-36に示す別途簡易解析評価を参考に $U=2000\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{hr}\cdot\text{C}$ とする。
- (3) UCS内部のNa領域は自然対流領域とする。熱通過率は上下面で $200\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{hr}\cdot\text{C}$ 、側面で $500\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{hr}\cdot\text{C}$ とする。側面のUを大きくしたのは熱電対取り出し口での若干のNaリークを考慮したからである。
- (4) ディッププレートより上部のNa領域は下方から冷却され自然対流を生じにくいので固体として取り扱う。 ρ, c, λ はNaの値を用いる。下面の熱伝達係数は $200\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{hr}\cdot\text{C}$ とした。
- (5) フローホール、出口ノズルは実面積をスリットモデル化し部分開口メッシュを用いた。フローホール通過時の圧力損失を $\Delta P=\zeta\frac{\rho}{2}u_f^2$ 、 $\zeta=1.5$ により考慮する。
- (6) K-ε乱流モデルを用いて ϵ_M をコード内で求める。 $\epsilon_H=0.5\epsilon_M$ とする。
- (7) 壁面スリップ条件はNon Slipとする。
- (8) Na物性 $\rho=868.1\text{kg}/\text{m}^3$, $c=0.308\text{kcal}/\text{kg}\cdot\text{C}$, $\lambda=1.771\times 10^{-2}\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{sec}\cdot\text{C}$, $\nu=0.3584\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$, $\beta=2.74\times 10^{-4}1/\text{C}$

解析モデル図をFig. A2-37に示す。使用したユーザーサブルーチンをList A2-10に示す。初期解析入力データをList A2-11に示す。解析メッシュ図をFig. A-38に示す。

t=50, 60, 70, 80, 90, 110, 150, 250, 350, 550 sec の速度ベクトル図(\vec{u})、温度コンター(T)、静圧ヘッドコンター(P_T)、乱流ヘッドコンター(K)、 ϵ_M/ν のコンターをFig. A2-39に示す。上部プレナム内6点の温度時間変化の実験値と解析値の比較をFig. A2-40に示す。

FACOM-M200による計算時間は、

インターバル	CPU time
t= 30~ 50sec	38 sec
t= 50~ 70sec	44 sec
t= 70~170sec	1min 0 sec
t=170~450sec	3min 0 sec
t=450~550sec	2min 9 sec
	計 7min 31 sec

であった。

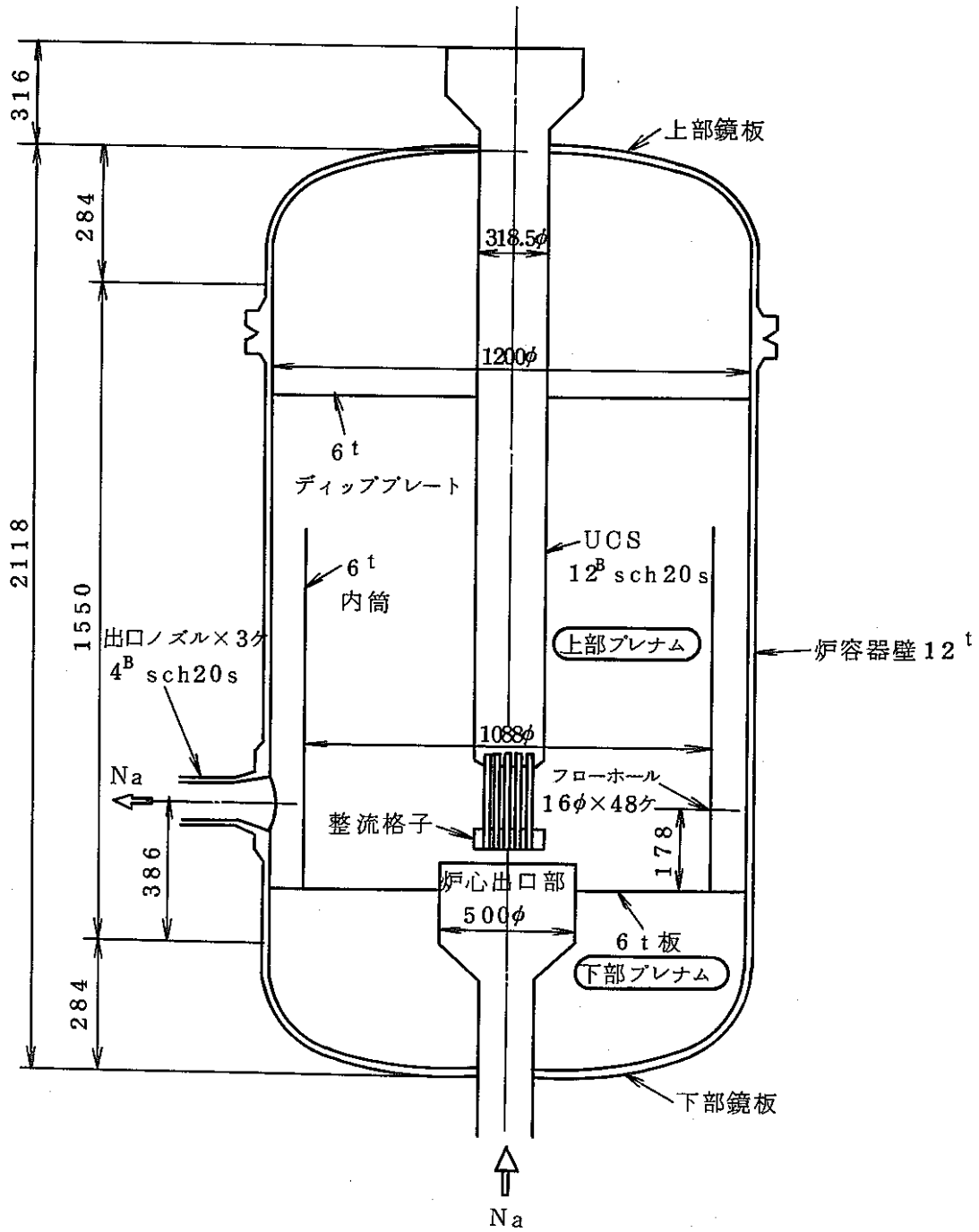


Fig. A2-34 Configuration of the Test Model

-170-

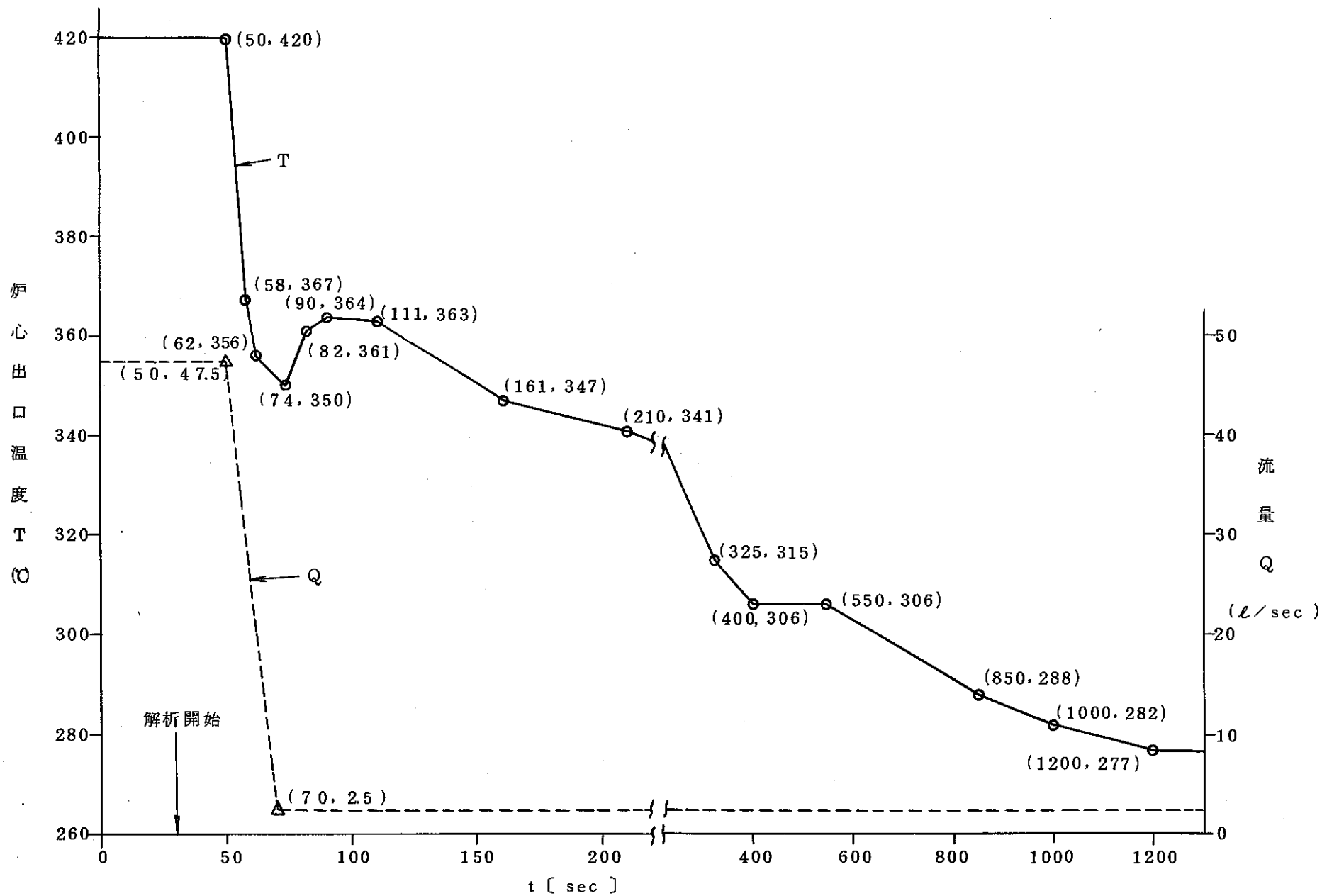


Fig. A 2-35 Time-rate Change of Temperature and Flow Rate at the Core Outlet

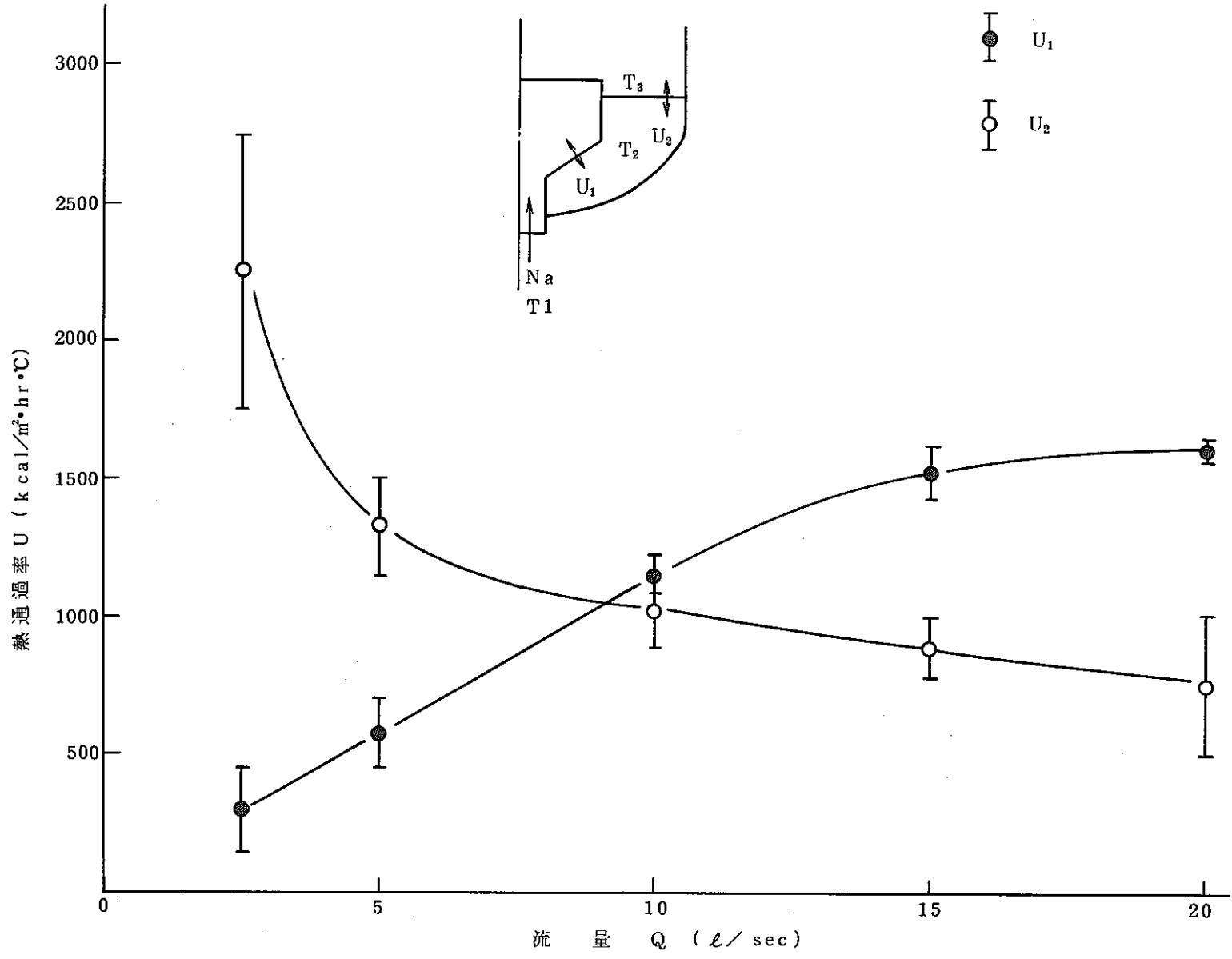


Fig. A2-36 Over All Heat Transfer Coefficient through Lower Plenum (by Simple Analysis Evaluation)

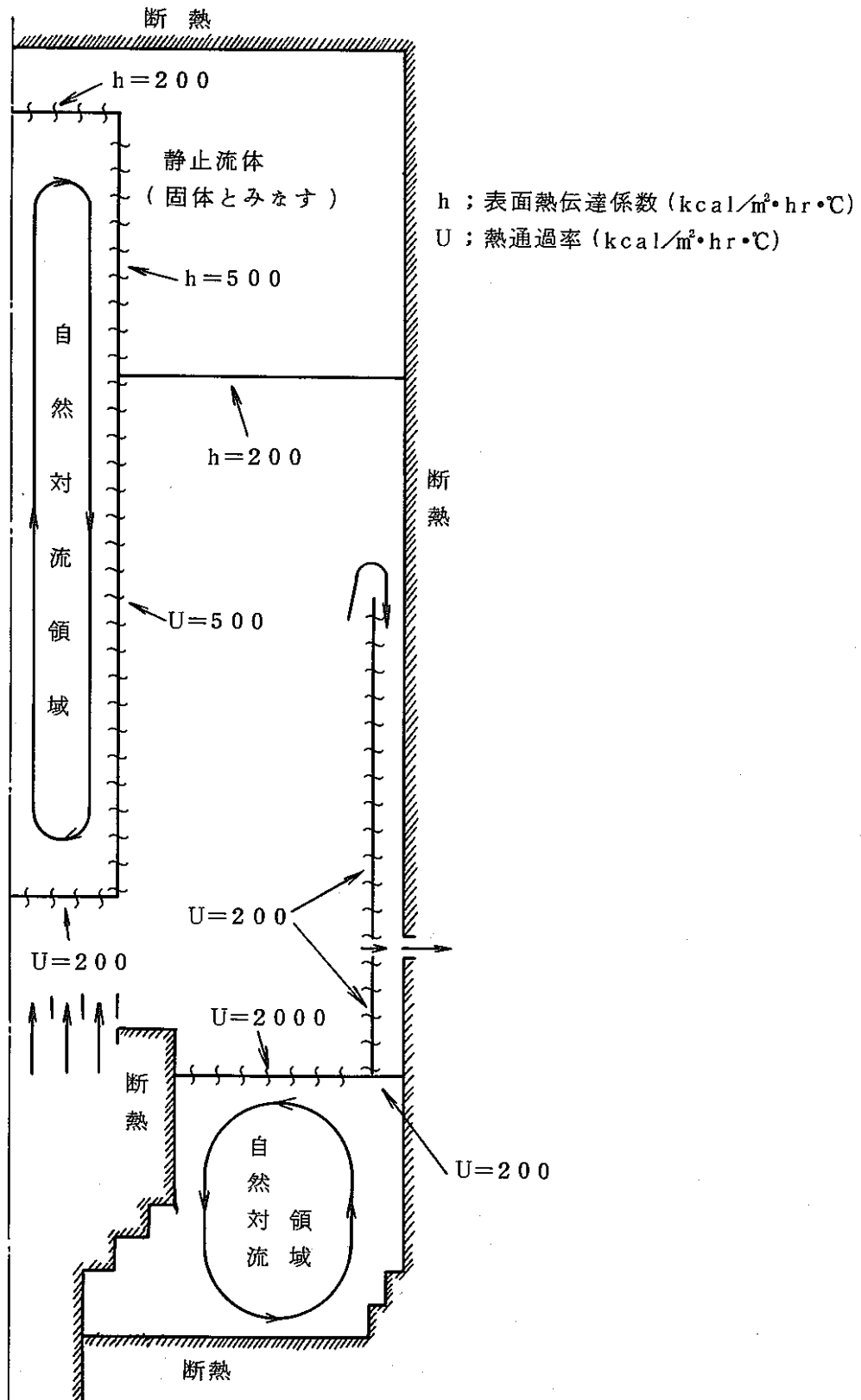


Fig. A2-37 Analysis Model

List A 2-10 User Subroutine of Analysis Example 5

```

SUBROUTINE SETIJ
COMMON/BL2/IJF(30,35)
DO 1 J=2,11
1 IJF(2,J)=0
  IJE(3,2)=-1
  IJF(3,3)=-1
DO 2 J=4,11
2 IJF(3,J)=0
  IJE(4,4)=-1
DO 3 J=5,11
3 IJF(4,J)=0
  IJF(5,5)=-1
DO 4 J=6,10
4 IJF(5,J)=0
  IJE(5,11)=-1
DO 5 J=6,11
5 IJF(6,J)=-1
  IJF(14,2)=-1
  IJF(15,2)=-1
  IJF(15,3)=-1
  IJE(16,14)=1
DO 7 I=2,15
7 IJF(1,35)=-2
DO 8 J=31,34
DO 8 I=5,15
8 IJF(1,J)=-2
DO 9 J=31,35
9 IJF(16,J)=0
RETURN
END
SUBROUTINE ABIN
COMMON/BL9/HR(30,35),HZ(30,35)
COMMON/BL12/AL(30,35),BL(30,35),ALF(30,35),BLE(30,35),G(30,35)
DO 1 J=10,24
AL(13,J)=0.
1 HR(13,J)=200./3600.
  AL(13,14)=0.093
  ALF(13,14)=1.5
DO 2 I=7,15
BL(I,9)=0.
2 HZ(I,9)=2000./3600.
  HZ(14,9)=200./3600.
  HZ(15,9)=200./3600.
DO 3 I=2,4
AL(I,12)=0.2
BL(I,16)=0.
HZ(I,16)=200./3600.
3 HZ(I,34)=200./3600.
DO 4 J=17,34
AL(4,J)=0.
4 HR(4,J)=500./3600.
DO 5 I=5,15
HZ(I,30)=200./3600.
RETURN
END
SUBROUTINE INV(VIN,TIME,TLAG)
DIMENSION VIN(3)
S=TIME-TLAG
IF(S) 1,1,2
1 VIN(1)=47./6.2832E3

```

List A2-10 User Subroutine of Analysis Example 5
(Continued)

```

RETURN
2 IF(S.GT.20.) GO TO 3
VIN(1)=(47.-44.5*S/20.)/6.2832E3
RETURN
3 VIN(1)=2.5/6.2832E3
RETURN
END
SUBROUTINE BCVEL(TIME,TLAG)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL8/SR(30,35),SZ(30),DUM1(3150),DUM2(2100)
DIMENSION VIN(3)
SIN=SZ(2)+SZ(3)+SZ(4)
CALL INV(VIN,TIME,TLAG)
VMIN=VIN(1)/SIN
VMOUT=VIN(1)/SR(15,14)
DO 1 I=2,4
1 V(I,11)=VMIN
U(15,14)=VMOUT
RETURN
END
SUBROUTINE TURBBC(TIME,TLAG)
COMMON/BL1/U(30,35),V(30,35)
COMMON/BL3/DR(30),DZ(35),RN(30),RG(30),DUM1(65)
COMMON/BL6/AK(30,35),DUM2(1050),E(30,35),DUM3(1050)
DATA CM,F1,F2/0.09,0.02,0.07/
VB=V(2,11)
AKIN=F1*VB*VB
ALM=2.*F2*RN(4)
EIN=CM*AKIN**1.5/ALM
DO 1 I=2,4
AK(I,12)=AKIN
1 E(I,12)=EIN
AK(16,14)=AK(15,14)
E(16,14)=E(15,14)
RETURN
END
SUBROUTINE BCTEMP(TIME,TLAG)
COMMON/BL5/T(30,35),DUMMY(1050)
DIMENSION SD(15),TD(15)
DATA SD/0.,8.,12.,24.,32.,40.,61.,111.,160.,
1 275.,350.,500.,800.,950.,1150./
DATA TD/420.,367.,356.,350.,361.,364.,363.,347.,341.,
1 315.,306.,306.,288.,282.,277./
S=TIME-TLAG
IF(S) 10,10,20
10 TIN=TD(1)
GO TO 100
20 N=1
30 N=N+1
IF(N.EQ.16) GO TO 90
IF(SD(N).GT.S) GO TO 40
GO TO 30
40 TIN=TD(N-1.)+(TD(N)-TD(N-1.))*(S-SD(N-1.))/(SD(N)-SD(N-1.))
GO TO 100
90 TIN=TD(15)
100 DO 50 I=2,4
50 T(I,12)=TIN
T(16,14)=T(15,14)
RETURN
END

```

List A2-11 Input Data of Analysis Example 5
(Initial Analysis)

```

-&DATA-
IBAR=14, JBAR=33, ICYL=1, ITURB=2, ERATE=0.5, IQWALL=1,
-DELR=2*.05925, 3*.05, .04075, 4*.05, .04, 2*.03, 3*.025,
DELZ=9*.05, 2*.035, .05, .043, .03, .037, .04, .058,
      5*.06, 4*.05, .056, 3*.06, 5*.1
TK=1.771E-2, AL0=868.1, C=0.308, ANU=0.3584E-6, ABETA=2.74E-4,
-WTK=1., 1.771E-2, WAL0=1., 868.1, WC=1., 0.308, TUNI=420., GZ=-9.8,
ITERL=100, EPSI=0.001, ALPH=0.8, OMC=1.8, UPVEL=0.8, SLIP=0.0,
-DELT=0.01, IDELT=5, IDSK=1, NWRITE=1, TLAG=20.0,
IW=5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, JW=10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19,
---20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30,
IRSRT=0, NRESRT=0, ITEMP=0, ITPRI=1, CWPRT=4, CWDSK=4,
-TPRT=5., 10., 15., 20.,
TDSK=5., 10., 15., 20.,
-&END-

```

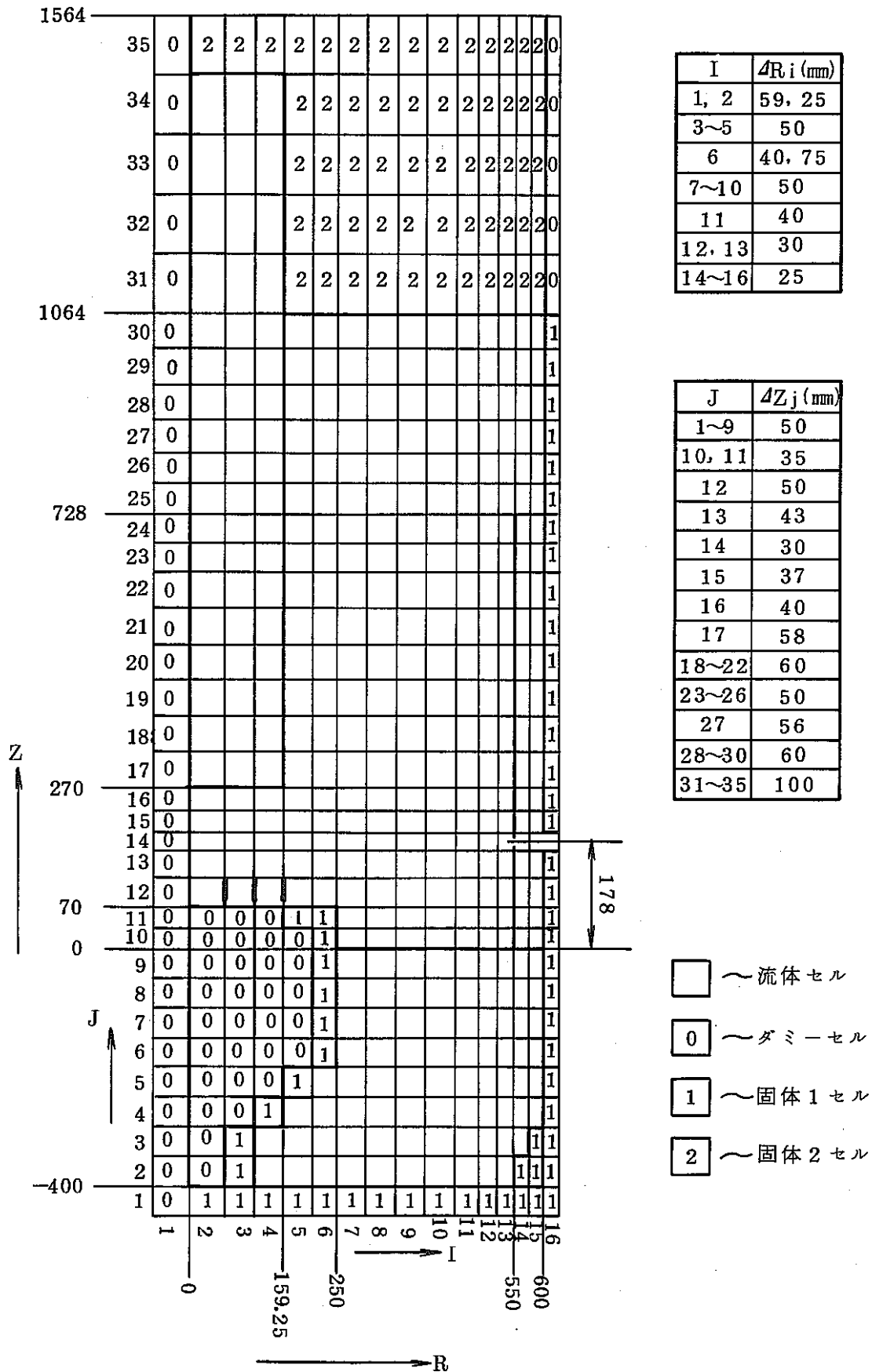


Fig. A2-38 Mesh Arrangement

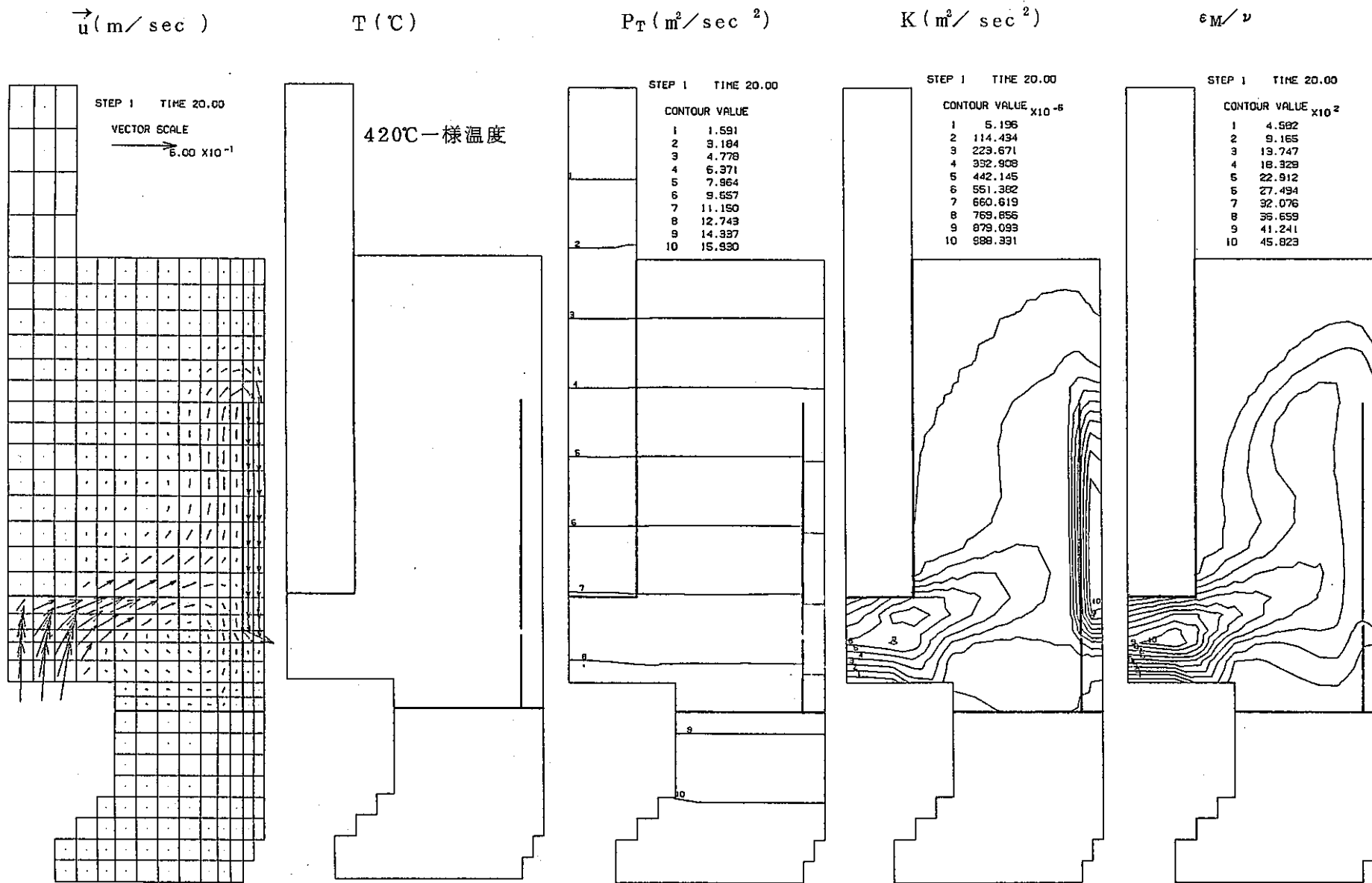


Fig. A2-39 \vec{u} , T, P_r , K, ϵ_M/ν at t=50 sec

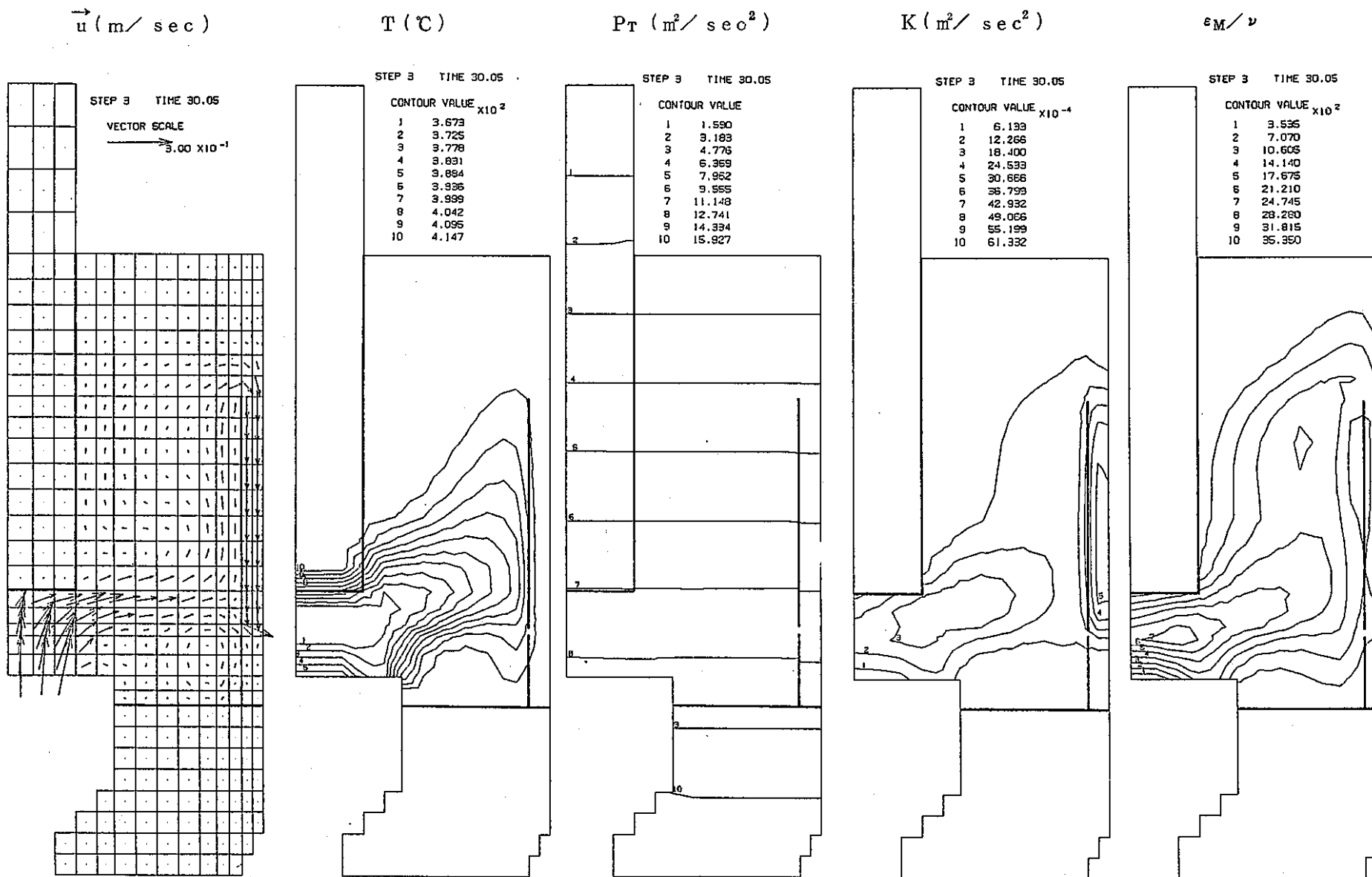


Fig-A2-39 \vec{u} , T, P_r , K, ϵ_M/ν at $t=60$ sec

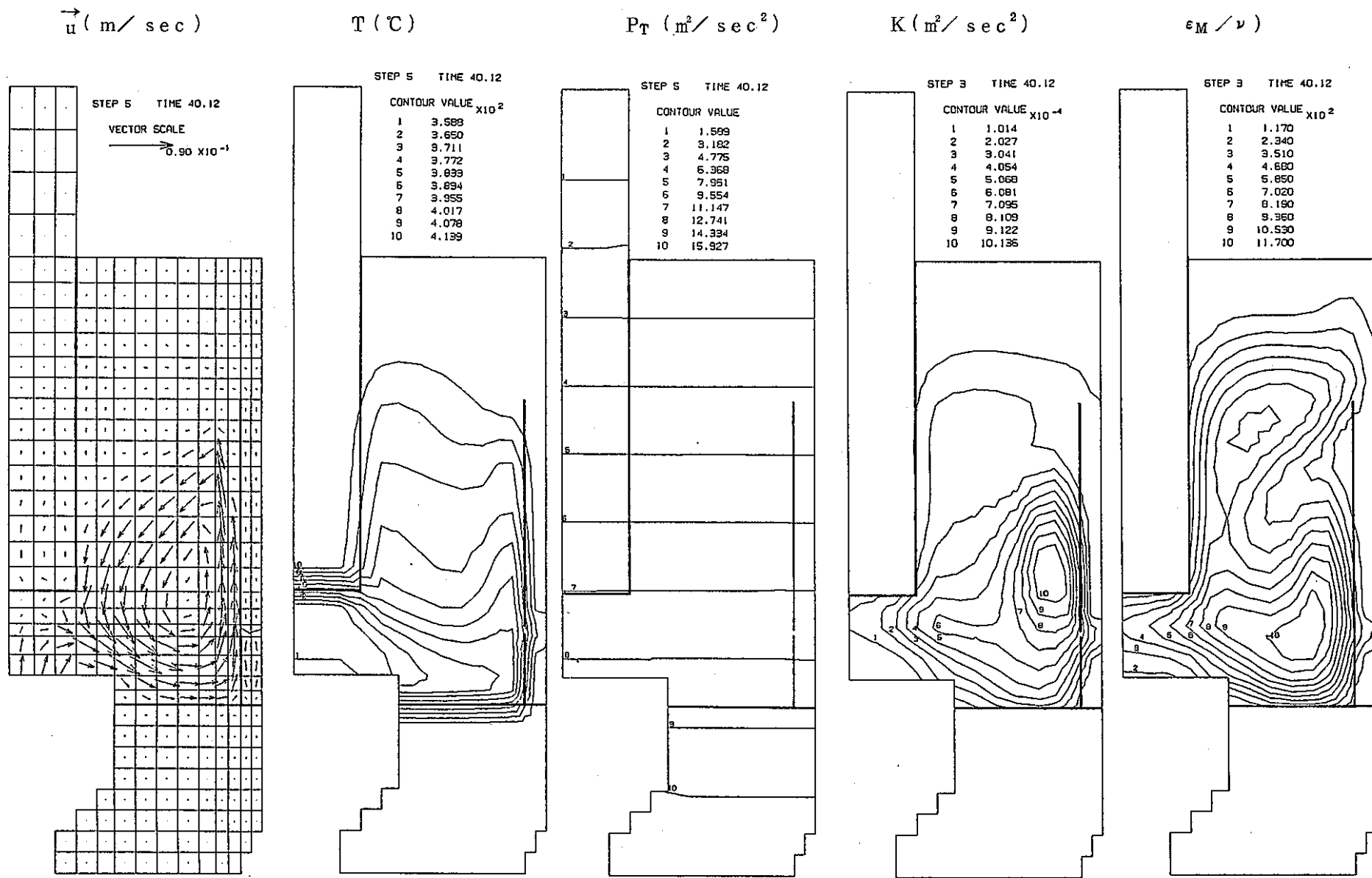


Fig. A2-39 \vec{u} , T , P_T , K , ϵ_M / ν at $t=70$ sec

-180-

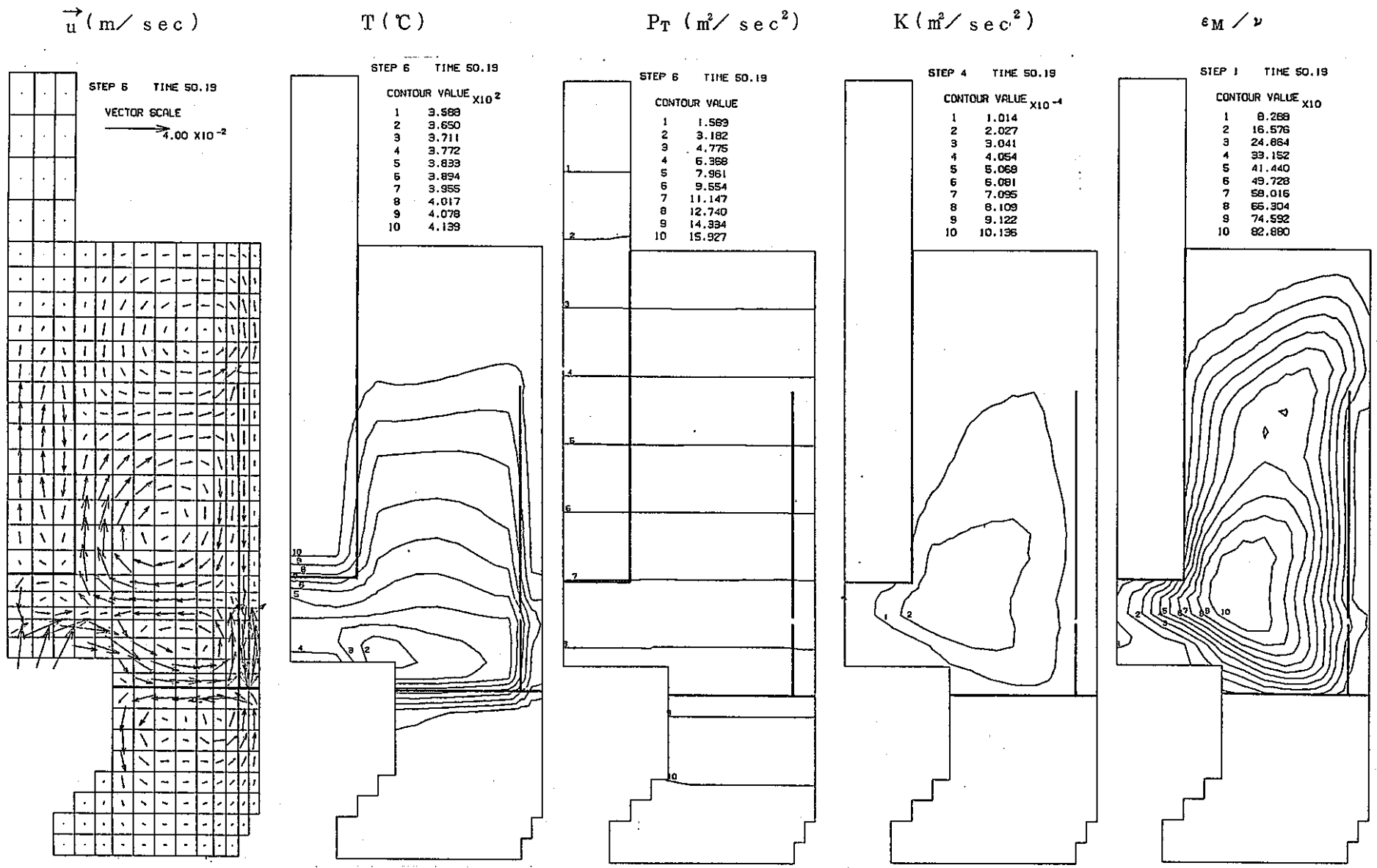


Fig. A2-39 \vec{u} , T , P_T , K , ϵ_H/ν at $t=80$ sec

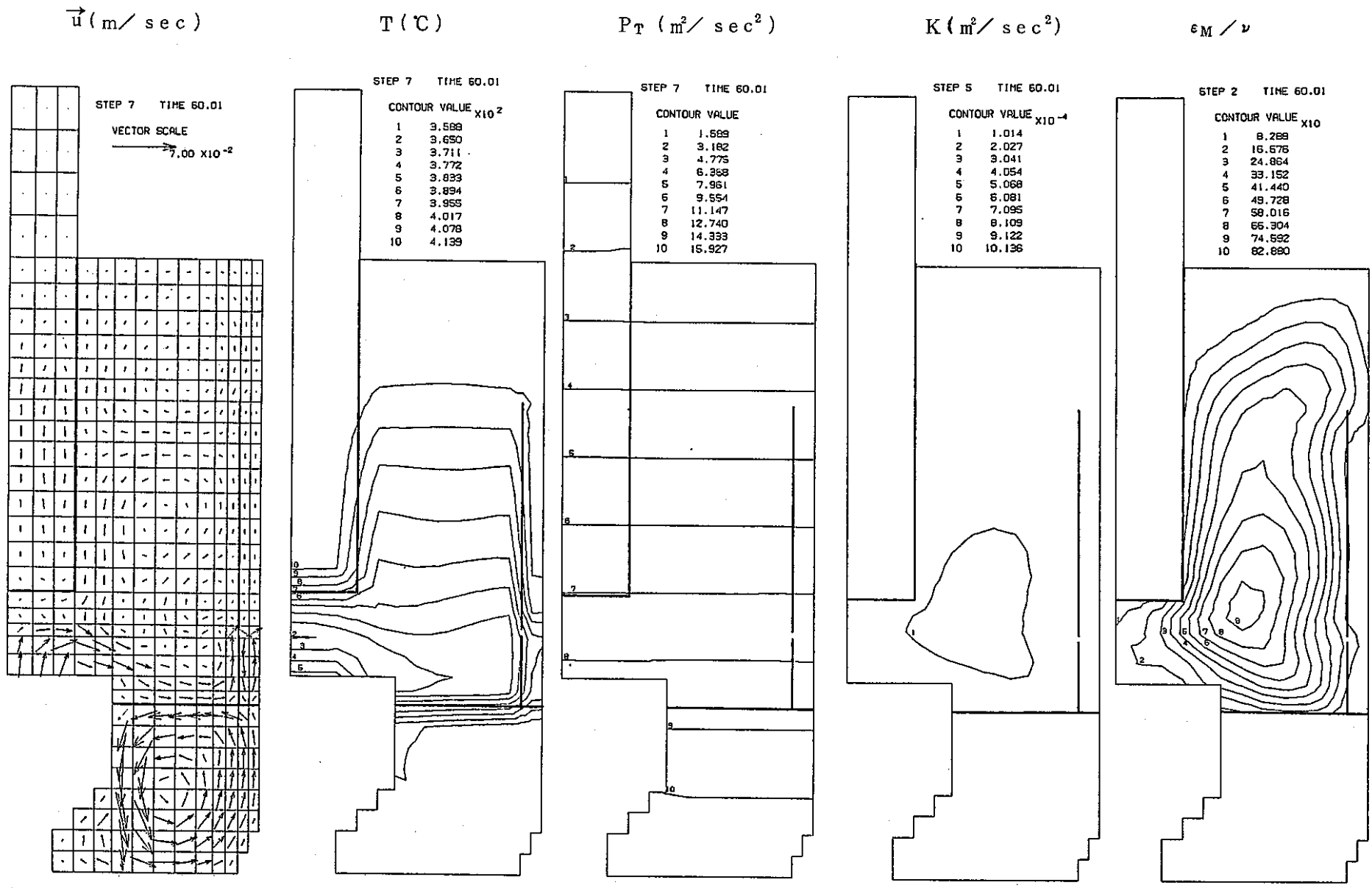


Fig. A2-39 \vec{u} , T , P_T , K , ϵ_M / ν at $t=90$ sec

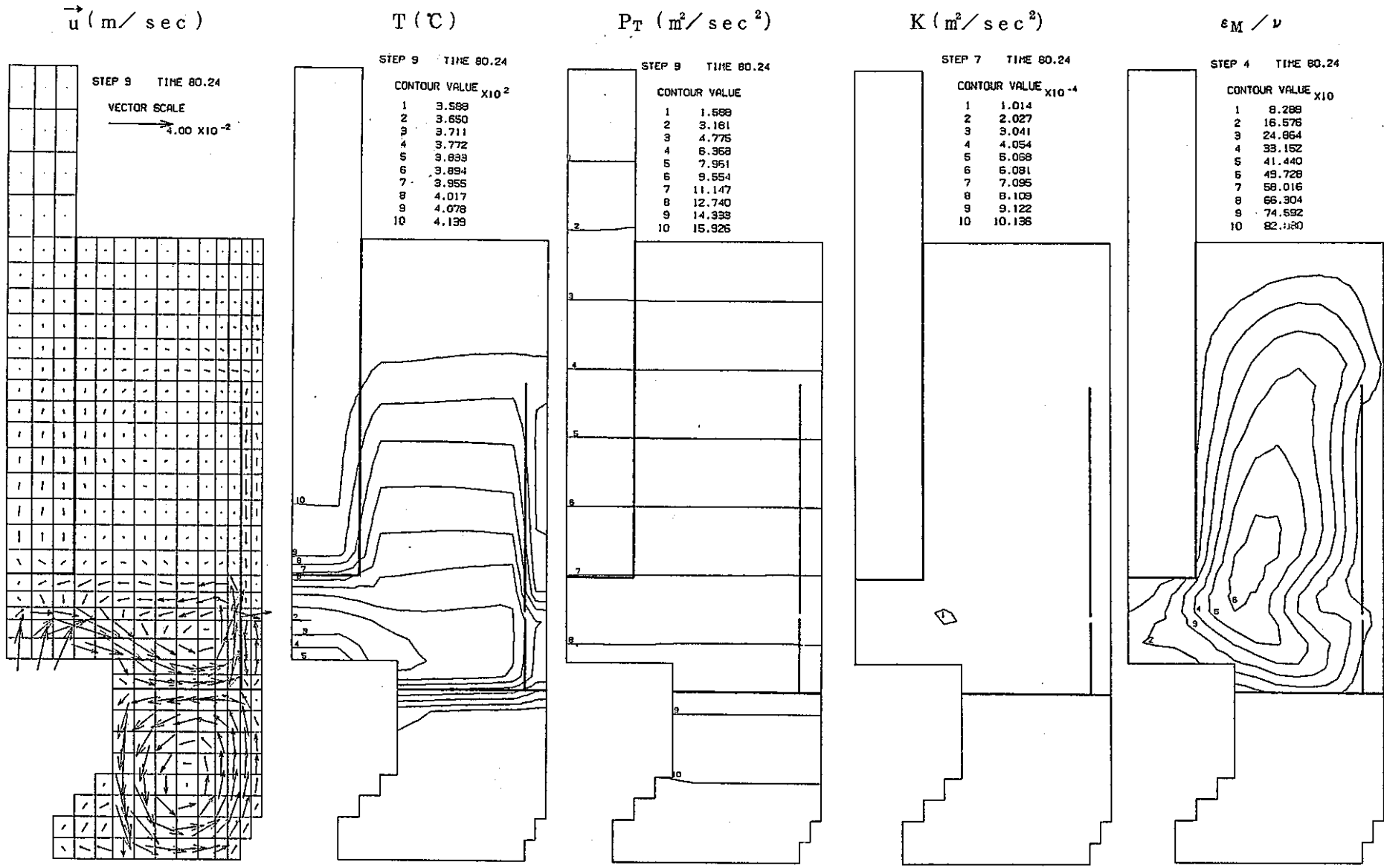


Fig. A2-39 \vec{u} , T , P_T , K , ϵ_M / ν at $t=110$ sec

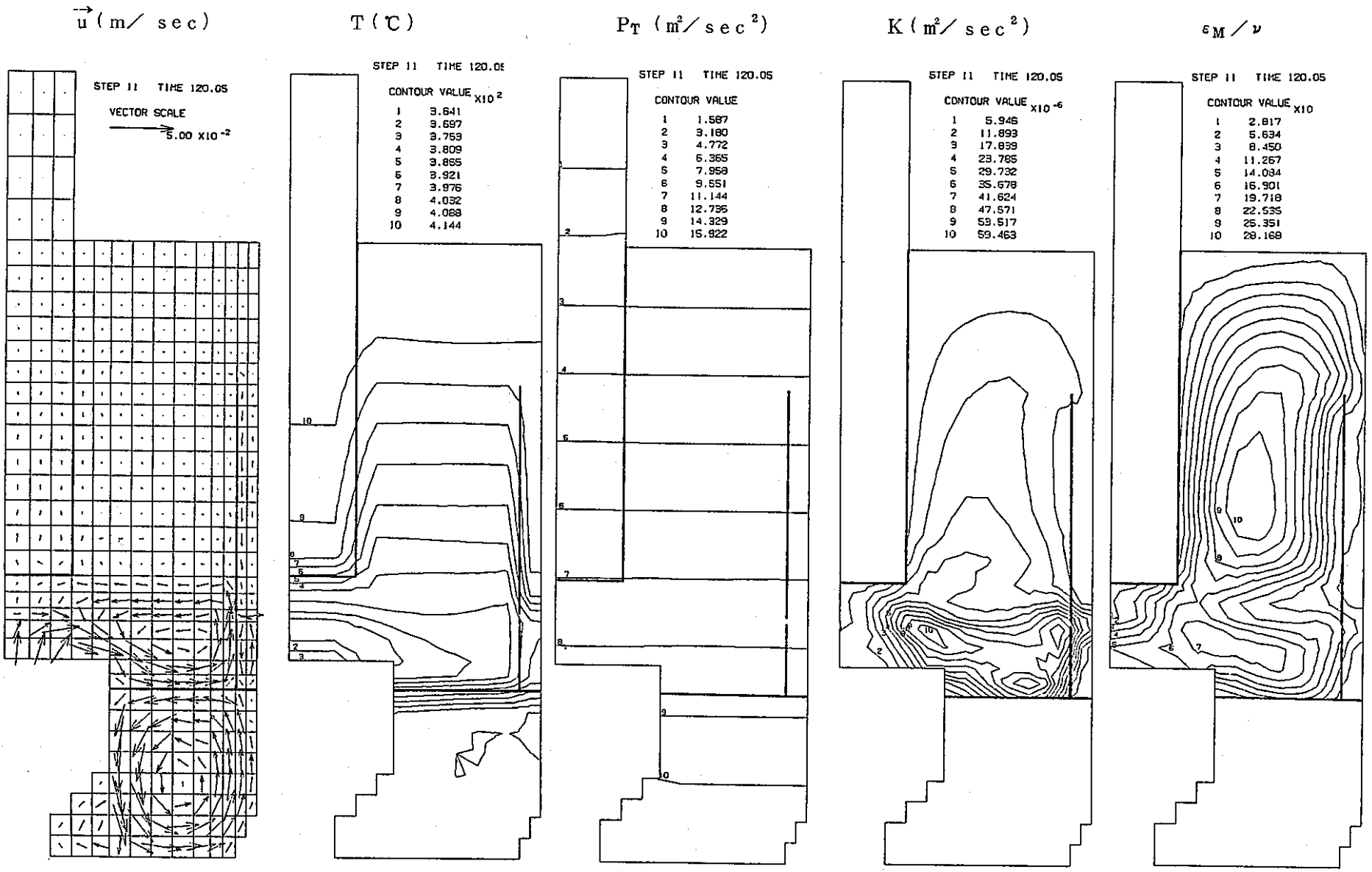


Fig. A2-39 \vec{u} , T , P_T , K , ϵ_H/ν at $t=150$ sec

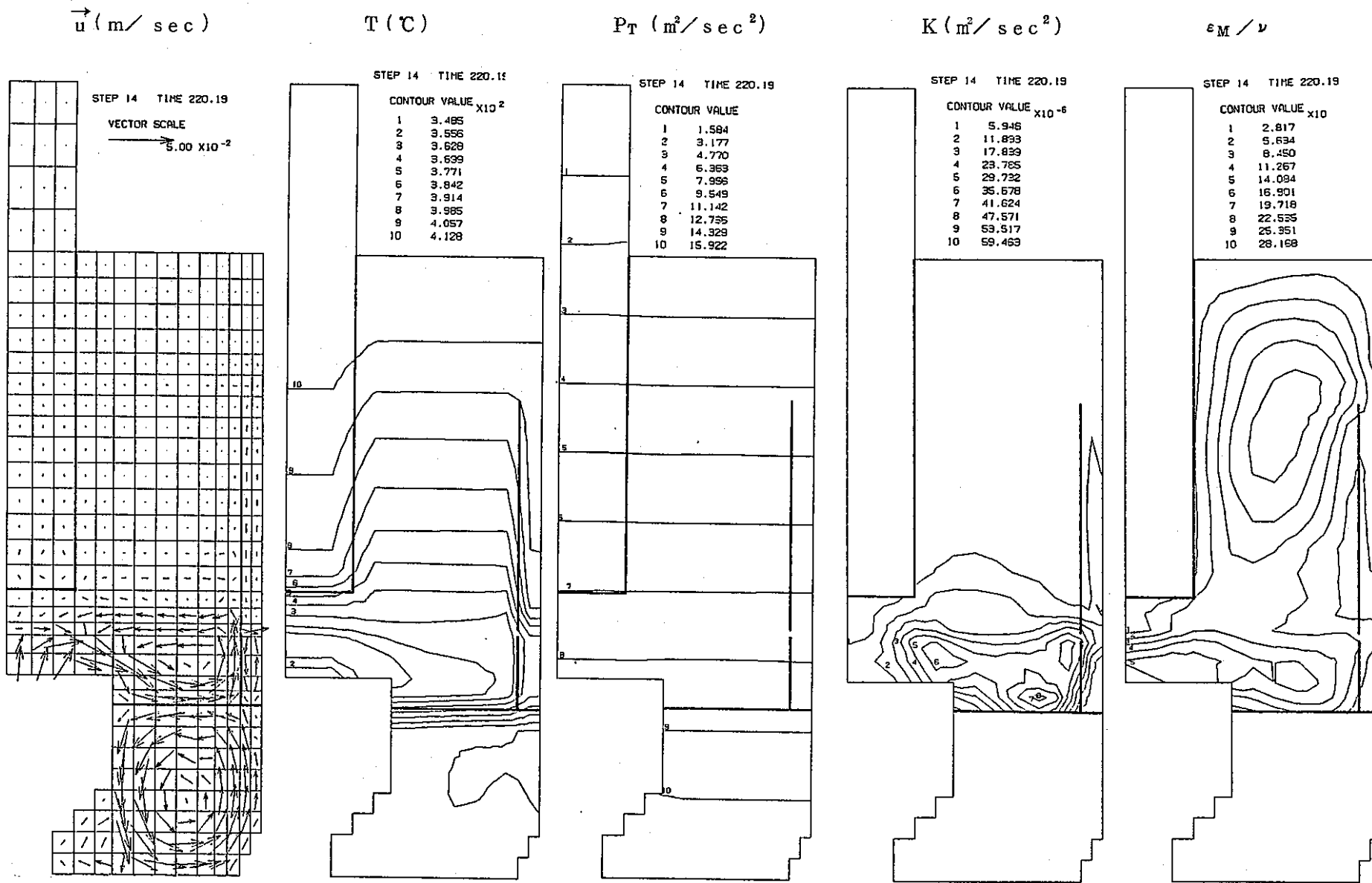


Fig. A2-39 \vec{u} , T , P_T , K , ϵ_H/ν at $t=250$ sec

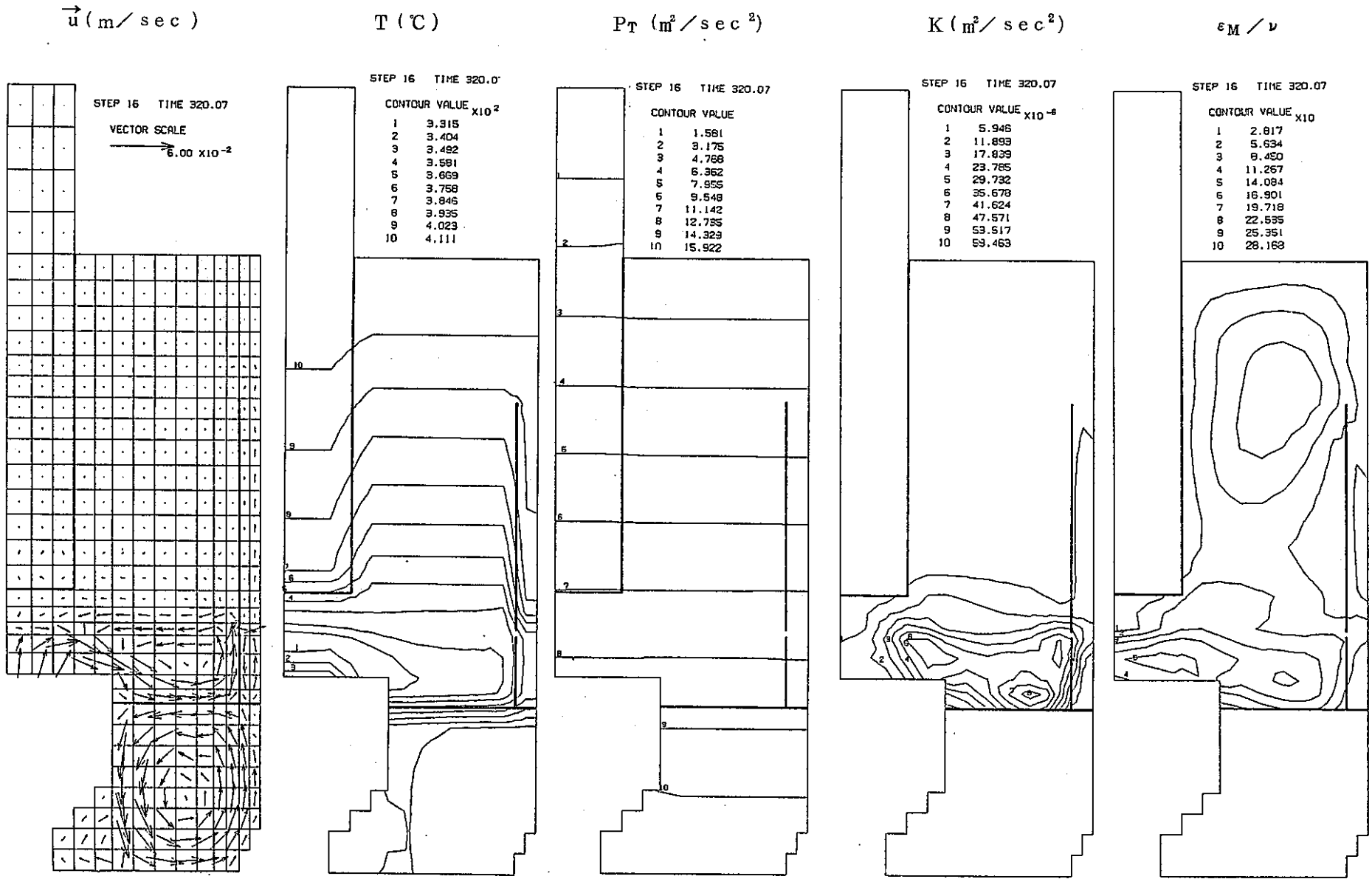


Fig. A2-39 \vec{u} , T, P_T , K, ϵ_M / ν at $t=350$ sec

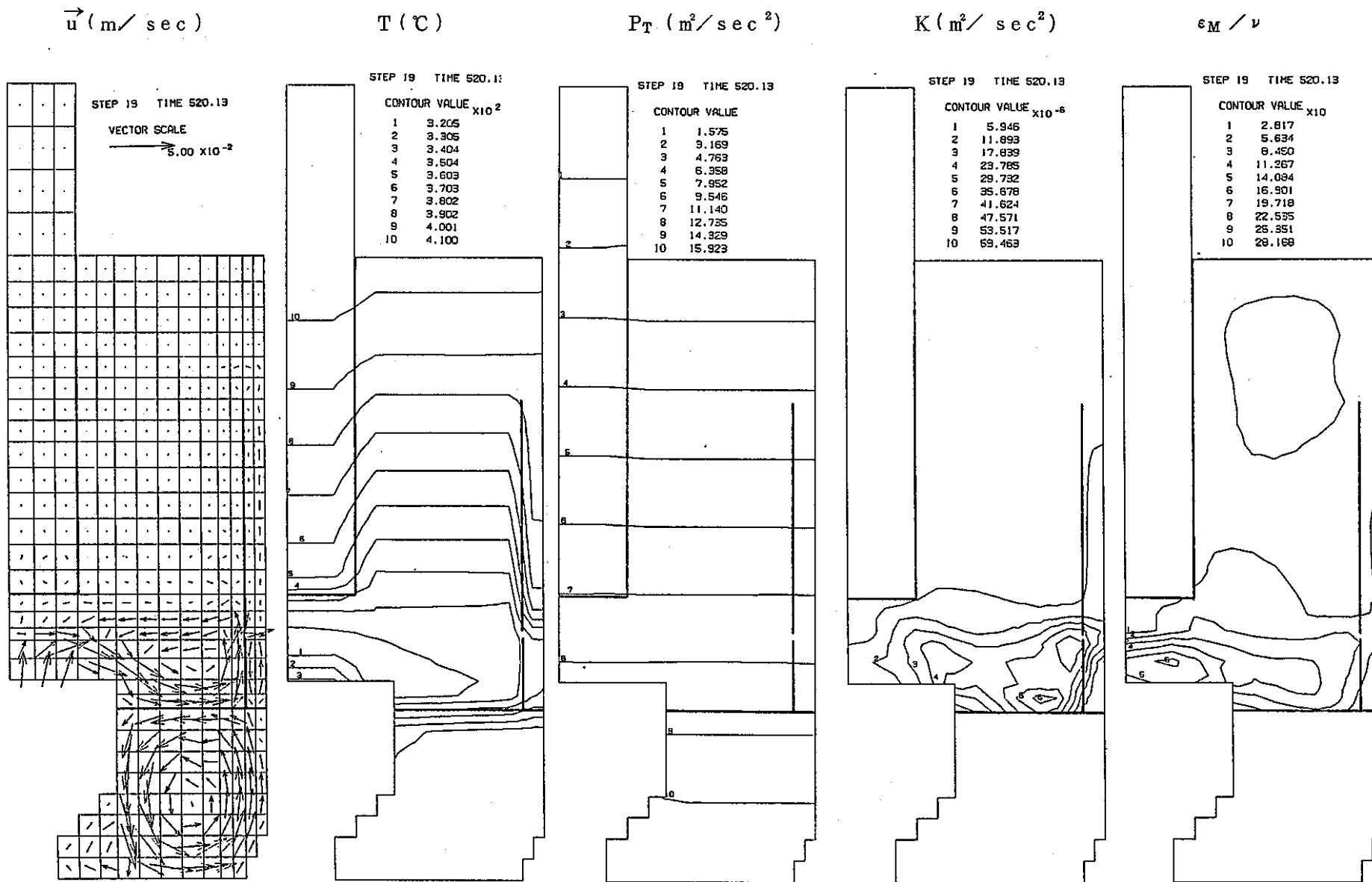
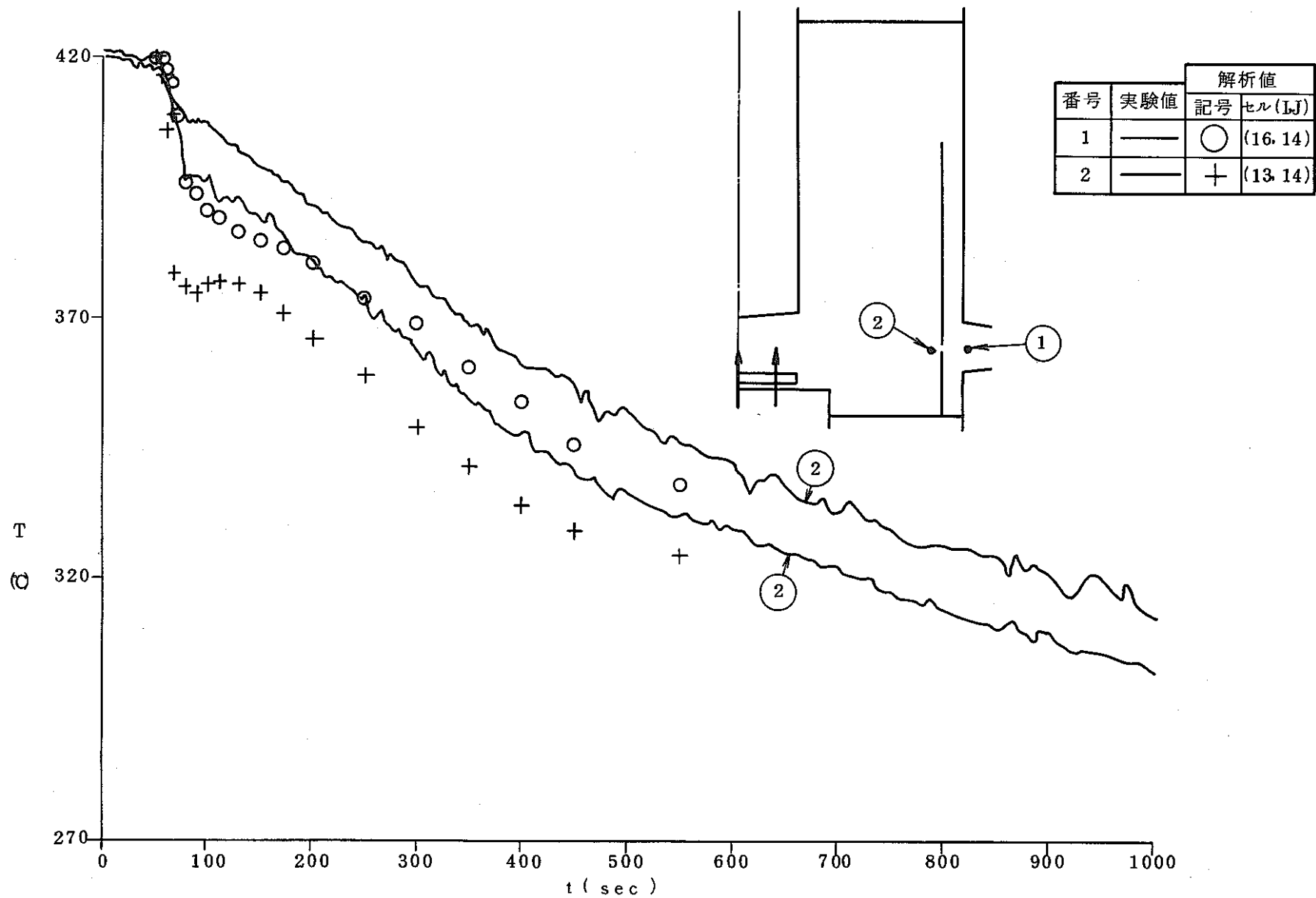


Fig. A2-39 \vec{u} , T, P_T , K, ϵ_M/ν at $t=550$ sec



-187-

Fig. A2-40 Time-rate Change of Temperature at the Flow Holes

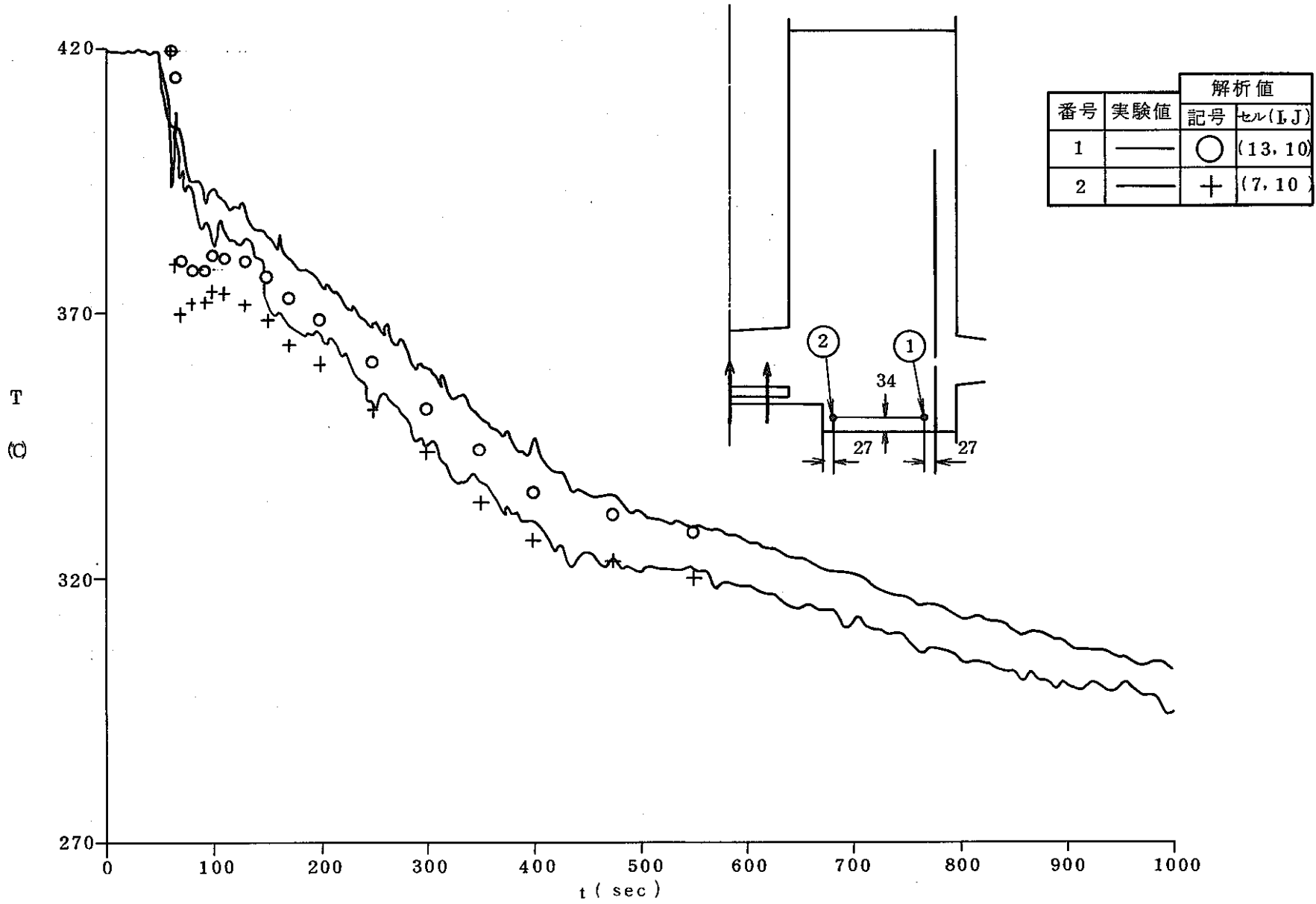


Fig. A2-40 Time-rate Change of Temperature at Lower Part of Plenum

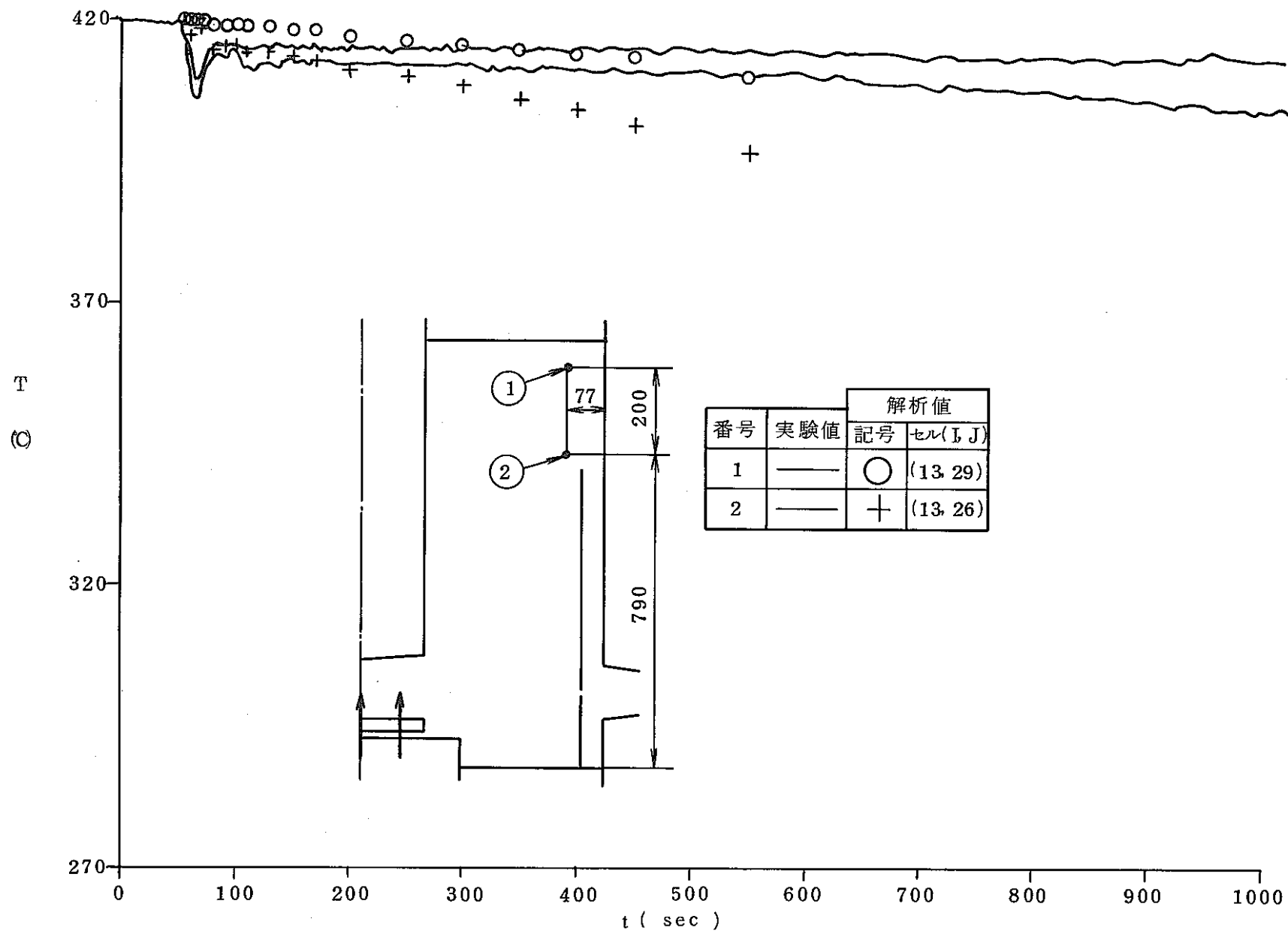


Fig. A2-40 Time-rate Change of Temperature at Upper Part of Plenum