

# 冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発( I )

## 温度ゆらぎ強度評価手法の開発

1990年4月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討及び周知を目的とする社内資料です。刊行物に引用する場合には、事業団の承認が必要です。

## 冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発（Ⅰ）

## — 温度ゆらぎ強度評価手法の開発 —

村松 寿晴, 二ノ方 寿

## 要 旨

高速増殖炉の炉心出口近傍では、熱流力特性の異なる集合体からの冷却材同志の混合によって、不規則な温度ゆらぎ現象（サーマルストライピン）が発生する。本研究では、ナトリウムによる温度ゆらぎモックアップ実験を多次元コードAQUAに導入されている応力代数式乱流モデルを用いて解析し、温度ゆらぎ強度 $\theta'^2$ 分布を解析評価する場合の当該乱流モデルの有効性と限界を明らかにした。

温度ゆらぎモックアップ実験の解析により、以下の結果を得た。

- (1) 高速原型炉「もんじゅ」の内側炉心領域第1列およびブランケット領域第2列に相当する実験条件の解析では、温度ゆらぎ強度を多少大き目に評価するものの、平均温度については実験結果を良好に模擬する。
- (2) 内側炉心領域に後備炉停止棒を含む実験条件の解析では、温度ゆらぎ強度を全体的に大き目に評価する。

また、乱流のモデル化に関して、以下の知見を得た。

- (1) 温度ゆらぎ強度に関する定性的特徴は、AQUAに導入されている応力代数式乱流モデルによって推定することが可能である。
- (2) 応力代数式乱流モデル導入に際して用いた「温度ゆらぎ挙動は乱流現象の一つとして扱うことができる」との仮定は、現象の定性的評価を行なう上では妥当である。
- (3) 乱流2次モーメントを直接評価する応力代数式乱流モデルを使用することにより、渦粘性概念を用いた場合に発生する温度ゆらぎ強度の過小評価傾向は排除される。

Development of Analytical Model for Evaluating Coolant  
Temperature Fluctuation Phenomena ( I )

— Development of Analytical Model for Intensity of Temperature Fluctuation —

Toshiharu Muramatsu, Hisashi Ninokata

Abstract

A thermal striping phenomenon characterized by a random temperature fluctuation occurs in the region immediately above the FBR core due to the temperature difference of the core outlet coolant between sub-assemblies. In this study, we have investigated the thermal striping phenomena in sodium through implementing the algebraic stress turbulence model (ASM) in AQUA.

From the analysis based on the ASM, the following analytical results have been obtained:

- (1) A calculated intensity of the temperature fluctuation was slightly overestimated by the ASM in the 1st row of the inner core region and the 2nd row of the radial blanket region, whereas a calculated mean temperature has agreed well with the experiment.
- (2) For a geometry with a back-up control rod in the inner core region, the calculated intensity of the temperature fluctuation was larger than that of the above two cases.

The following information on turbulence modeling has been obtained:

- (1) A qualitative characteristics of the intensity of temperature fluctuation can be estimated by the ASM.
- (2) An assumption that the temperature fluctuation phenomena can be considered one of the turbulence phenomena, has been confirmed in evaluating the qualitative characteristics.
- (3) In order to evaluate the intensity of the temperature fluctuation, it is more appropriate to use the ASM that includes second order momentum of turbulence, than to use the  $k-\epsilon$  turbulence model.

## 冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (I)

## — 温度ゆらぎ強度評価手法の開発 —

## 目 次

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第1章 緒 言 .....              | 1  |
| 第2章 応力代数式乱流モデル .....       | 2  |
| 2.1 基礎式 .....              | 2  |
| 2.2 レイノルズ応力 .....          | 3  |
| 2.3 乱流熱流束 .....            | 4  |
| 第3章 モデル検証 .....            | 5  |
| 3.1 浮力噴流実験解析 .....         | 5  |
| 3.1.1 実験の概要 .....          | 5  |
| 3.1.2 計算条件 .....           | 6  |
| 3.1.3 解析結果と検討 .....        | 7  |
| 第4章 原型炉7集合体ナトリウム実験解析 ..... | 9  |
| 4.1 実験の概要 .....            | 9  |
| 4.2 計算条件 .....             | 10 |
| 4.3 解析結果と検討 .....          | 11 |
| 第5章 結 言 .....              | 16 |
| 謝 辞 .....                  | 17 |
| 参考文献 .....                 | 18 |
| 付録A 模擬燃料集合体水流動実験解析 .....   | 19 |

## List of Tables

Table 3.1 Experimental Condition of the Two-Dimensional Heated Jet

Table 4.1 Experimental Condition of the 7 Sub-Assemblies Mock-Up Test

## List of Figures

Fig. 3.1 Overall Experimental Set-Up for the Two-Dimensional Heated Jet

Fig. 3.2 Perspective View of the Chamber of the Emerging Jet

Fig. 3.3 Typical Mesh Arrangement for the Two-Dimensional Heated Jet Analysis

Fig. 3.4 Typical Distributions for Mean Velocity, Mean Temperature and Temperature Fluctuation of Turbulent Jet (JUNE-7)

Fig. 3.5 Mean Temperature Profiles for Turbulent Jet (JUNE-7)

Fig. 3.6 Typical Distributions for Mean Velocity, Mean Temperature and Temperature Fluctuation of Turbulent Plume (JUNE-28)

Fig. 3.7 Mean Temperature Profiles for Turbulent Plume (JUNE-28)

Fig. 3.8 Temperature Fluctuation Profiles for Turbulent Jet (JULY-3)

Fig. 3.9 Temperature Fluctuation Profiles for Turbulent Plume (JUNE-26)

Fig. 3.10 Mean Velocity Profiles for Turbulent Jet (PLVT-2)

Fig. 3.11 Mean Velocity Profiles for Turbulent Plume (PLVT-1)

Fig. 4.1 Schema of 7 Sub-Assemblies Mock-Up Test for MONJU

Fig. 4.2 Temperature Instrumentation Position in the Test Section without Control Rod Assmbly

Fig. 4.3 Temperature Instrumentation Position in the Test Section with Control Rod Assmbly

Fig. 4.4 Mesh Arrangement for the Analytical Region wihtout C/R Assembly

Fig. 4.5 Mesh Arrangement for the Analytical Region wiht C/R Assembly

Fig. 4.6 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature Fluctuation Distribution for X-Z Plane(J=1) under  $\beta=1.0$  of Normal Configuration (without C/R Assembly)

Fig. 4.7 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature Fluctuation Distribution for Various X-Y Planes under  $\beta=1.0$  of Normal Configuration without C/R Assembly (S/A Outlet Plane)

- Fig. 4.7 (Continued, Flow Guide Bottom Plane)
- Fig. 4.7 (Continued, Instrumentation Well Top Plane)
- Fig. 4.7 (Continued, Flow Guide Middle Plane)
- Fig. 4.7 (Continued, Flow Guide Top Plane)
- Fig. 4.7 (Continued, Flow Guide Upper Plane)
- Fig. 4.8 Radial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions  
for Various Axial Levels under  $\beta=1.0$  of Normal Configuration  
without C/R Assembly
- Fig. 4.9 Axial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions  
for Various Radial Levels under  $\beta=1.0$  of Normal Configuration  
without C/R Assembly
- Fig. 4.10 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature  
Fluctuation Distribution for X-Z Plane(J=1) under  $\beta=0.6$  of Normal  
Configuration (without C/R Assembly)
- Fig. 4.11 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature  
Fluctuation Distribution for Various X-Y Planes under  $\beta=0.6$  of  
Normal Configuration without C/R Assembly (S/A Outlet Plane)
- Fig. 4.11 (Continued, Flow Guide Bottom Plane)
- Fig. 4.11 (Continued, Instrumentation Well Top Plane)
- Fig. 4.11 (Continued, Flow Guide Middle Plane)
- Fig. 4.11 (Continued, Flow Guide Top Plane)
- Fig. 4.11 (Continued, Flow Guide Upper Plane)
- Fig. 4.12 Radial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions  
for Various Axial Levels under  $\beta=0.6$  of Normal Configuration  
without C/R Assembly
- Fig. 4.13 Axial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions  
for Various Radial Levels under  $\beta=0.6$  of Normal Configuration  
without C/R Assembly
- Fig. 4.14 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature  
Fluctuation Distribution for X-Z Plane(J=1) under  $\beta=0.2$  of  
Configuration with C/R Assembly
- Fig. 4.15 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature  
Fluctuation Distribution for Various X-Y Planes under  $\beta=0.2$  of  
Configuration with C/R Assembly (S/A Outlet Plane)

- Fig. 4.15 (Continued, Flow Guide Bottom Plane)
- Fig. 4.15 (Continued, Instrumentation Well Top Plane)
- Fig. 4.15 (Continued, Flow Guide Middle Plane)
- Fig. 4.15 (Continued, Flow Guide Top Plane)
- Fig. 4.15 (Continued, Flow Guide Upper Plane)
- Fig. 4.16 Radial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions  
for Various Axial Levels under  $\beta=0.2$  of Configuration with  
C/R Assembly
- Fig. 4.17 Axial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions  
for Various Radial Levels under  $\beta=0.2$  of Configuration with  
C/R Assembly
- Fig.A. 1 Handling Head Geometry of MONJU Fuel Assembly and Analytical Region
- Fig.A. 2 Velocity Distribution at Outlet Region of MONJU S/A (Water Expts)
- Fig.A. 3 Comparison of Radial Velocity Distributions at Outlet of S/A  
Between Experiments and Calculations (Water Expts)
- Fig.A. 4 Radial Distributions of Turbulent Kinetic Energy  $k$  and Dissipation  
Rate  $\epsilon$  at Outlet of S/A
- Fig.A. 5 Radial Distributions of Reynolds Stresses  $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{w'w'}$  and  $-\overline{u'w'}$   
at Outlet of S/A

## 第1章 緒 言

高速増殖炉の炉心出口近傍では、炉心構成要素毎の熱流力特性（出力分布、流量分布）の違いから、炉心燃料集合体間あるいは炉心燃料集合体－制御棒集合体間等で冷却材に温度差が生じ、それらが混合する過程で不規則な温度ゆらぎ現象（サーマルストライピング）が発生する。この温度ゆらぎを伴った冷却材が、炉心上部機構各部（整流筒、制御棒駆動機構延長管、燃料集合体出口温度計装ウエル等）の表面近傍を通過する際に、冷却材中の不規則な温度ゆらぎが構造材中に伝えられ、その材料は高サイクル熱疲労を受ける。この為、高速原型炉「もんじゅ」では、水およびナトリウムを用いた当該部のモックアップ実験<sup>1)~4)</sup>を実施し、その結果を受けて炉心出口下流側に位置する炉心上部機構各部をインコネル718で覆う対策が施されている。

一方、上記の不規則な冷却材温度ゆらぎ挙動の解析的評価に関しては、温度ゆらぎ挙動が乱流現象の一つとして取扱えるとの仮定に基づいて実施されてきている<sup>5)~7)</sup>。この解析的評価手法では、温度ゆらぎ強度 $\overline{\theta'^2}$ に関する輸送方程式を $k-\varepsilon$  2方程式乱流モデルと連立して解く方法が採用されている。しかし、乱流現象の解析において特に重要となる非等方性効果は考慮せず、ブジネスクの渦粘性概念（等方性仮定）を導入して方程式系を閉じている。文献5)では、この渦粘性概念の導入に起因して、温度ゆらぎ強度を実験結果に対して過小評価することが報告されている。また、炉容器内温度成層化現象の解析評価においては、渦粘性概念の導入が解析精度を劣化させ、特にナトリウムを作動流体とした場合に顕著であることが報告されている<sup>8)~9)</sup>。

本研究では、単相多次元熱流動解析コードAQUAに導入済みの乱流現象の非等方性を考慮した応力代数式乱流モデル<sup>6)</sup>を用いて、ナトリウムを作動流体とした温度ゆらぎ実験<sup>10)</sup>の解析を行ない、同乱流モデルの有効性および限界を明らかにした。

## 第2章 応力代数式乱流モデル

2.1 基礎式<sup>1)</sup>

応力代数式乱流モデル(Algebraic Stress Model, ASM)において基本となる乱流輸送方程式は、乱流運動エネルギー $k$ とその散逸率 $\varepsilon$ および温度ゆらぎ強度 $\overline{\theta'^2}$ の3式である。

各輸送方程式の基礎式を以下に示す。ここで、記述は、アインシュタインの総和規約に従う。

[乱流運動エネルギー $k$ ]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i k) &= P + G - \rho \varepsilon \\ \text{非定常項} \quad & \quad \text{対流項} \quad \quad \text{生成項} \quad \text{散逸項} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_m} \left\{ C_s \frac{k}{\varepsilon} (\overline{u'_i u'_n} \frac{\partial}{\partial x_n} \overline{u'_i u'_n} + \overline{u'_m u'_n} \frac{\partial k}{\partial x_n}) \right\} \quad (2.1) \\ & \quad \quad \quad \text{拡散項} \end{aligned}$$

[乱流運動エネルギー散逸率 $\varepsilon$ ]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i \varepsilon) &= C_1 \frac{\varepsilon}{k} (P+G) \cdot (1-C_3 \frac{G}{P+G}) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ \text{非定常項} \quad & \quad \text{対流項} \quad \quad \quad \text{生成項} \quad \quad \quad \text{散逸項} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_m} (C_D \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_m u'_n} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_n}) \quad (2.2) \\ & \quad \quad \quad \text{拡散項} \end{aligned}$$

[温度ゆらぎ強度 $\overline{\theta'^2}$ ]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{\theta'^2}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i \overline{\theta'^2}) &= -2 \rho \overline{u'_i \theta'} \frac{\partial T}{\partial x_i} - 2C_{z1} \frac{k}{\varepsilon} \rho \overline{\theta'^2} \\ \text{非定常項} \quad & \quad \text{対流項} \quad \quad \quad \text{生成項} \quad \quad \quad \text{散逸項} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (C_z \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\overline{\theta'^2}}{\partial x_j}) \quad (2.3) \\ & \quad \quad \quad \text{拡散項} \end{aligned}$$

ここで,

$t$  : 時 間

$\rho$  : 流体密度

$X$  : 座 標

$U$  : 平均流速

$T$  : 平均温度

$P$  : 剪断応力による乱流エネルギー生成量  $(= -\rho \overline{u'_i u'_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_i})$

$G$  : 浮力による乱流エネルギー生成量  $(= -\beta g_i \rho \overline{u'_i \theta'})$

$i, j, l, m, n$ : 座標インデックス

' : ゆらぎ成分

— : 時間平均値

である。また、 $C_S, C_1, C_2, C_3, C_D, C_{z1}, C_z$  はモデル定数であり、次の値を持つ<sup>11)</sup>。

| $C_S$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_D$ | $C_{z1}$ | $C_z$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 0.11  | 1.44  | 1.90  | 0.70  | 0.15  | 0.62     | 0.13  |

## 2.2 レイノルズ応力<sup>11)</sup>

レイノルズ応力評価式は、レイノルズ応力輸送方程式<sup>12)</sup> から対流項と拡散項とを高乱流場条件の下で排除した代数式である。以下にレイノルズ応力代数式を示す。

$$\overline{-u'_i u'_j} = \frac{k}{C_{R1} \varepsilon} \frac{(C_{R2}-1)P_{ij} + (C_{R3}-1)P_{ij,b} - 2\delta_{ij}(C_{R2}P + C_{R3}G + (C_{R1}-1)\varepsilon)/3}{1 + ((P+G)/\varepsilon - 1) / C_{R1}} \quad (2.4)$$

ここで,

$$P_{ij} = -\overline{(u'_i u'_j \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + u'_j u'_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i})} \quad (2.5)$$

$$P_{ij,b} = -\beta (g_i \overline{u'_j \theta'} + g_j \overline{u'_i \theta'}) \quad (2.6)$$

$\delta_{ij}$  : クロネッカーのデルタ

である。また、 $C_{R1}$ ,  $C_{R2}$ ,  $C_{R3}$ はモデル定数で、以下の値を持つ<sup>11)</sup>。

| $C_{R1}$ | $C_{R2}$ | $C_{R3}$ |         |
|----------|----------|----------|---------|
| 2.3      | 0.5      | 0.4      | AQUA使用値 |
| 1.8~2.8  | 0.4~0.6  | 0.3~0.5  | 推奨値     |

### 2.3 乱流熱流束<sup>11)</sup>

使用する乱流熱流束評価式は、レイノルズ応力代数式の場合と同様なアナロジーを用いて誘導した代数式である。以下に乱流熱流束代数式を示す。

$$\overline{-u'_i \theta'} = \frac{k}{C_{T1} \varepsilon} \frac{-P_{i,T} - (1 + C_{T3}) \beta g_i \overline{\theta'^2} - C_{T2} \overline{u'_m \theta'} (\partial U_i / \partial X_m)}{1 + ((P+G)/\varepsilon - 1) / C_{T1}} \quad (2.7)$$

ここで、

$$P_{i,T} = - \overline{(u'_i u'_j)} \frac{\partial T}{\partial X_j} + \overline{u'_j \theta'} \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad (2.8)$$

である。また、 $C_{T1}$ ,  $C_{T2}$ ,  $C_{T3}$ はモデル定数で、以下の値を持つ<sup>11)</sup>。

| $C_{T1}$ | $C_{T2}$ | $C_{T3}$ |         |
|----------|----------|----------|---------|
| 3.20     | 0.50     | 0.50     | AQUA使用値 |
| 3.20     | 0.50     | 0.50     | 推奨値     |

## 第3章 モデル検証

### 3.1 浮力噴流水実験解析

#### 3.1.1 実験の概要

検証に用いた実験は、カリフォルニア工科大学が行なった浮力噴流水実験<sup>13)</sup>である。実験の目的は、海岸立地発電プラント等において、温排水塔から放出された温水が海中でどのような希釈過程（連行および混合）を辿るかを確認することにある。このための基礎実験として、スリット状の噴流口を有する体系（2次元性模擬）を用いて、その基本特性が測定された。

使用された実験装置の全体図および噴流口の寸法図をFig. 3.1およびFig. 3.2にそれぞれ示す。実験は、4 m × 4 m × 深さ 1 m の水槽内に噴流口を設置し、定圧タンクより噴流流体を供給する。噴流口は、スリット間隔を2.0 mm ~ 2.0 cm の範囲で調整できる構造を持つと同時に、Jones & Bell 式の整流装置を持つ。実験条件は、水槽内流体温度と噴出流体温度とから規定されるクローバルなりチャードソン数  $Ri$  をパラメータとして、 $5 \times 10^{-5} \sim 0.423$  の範囲で行なわれた。

実験における温度測定には、トラバース可能な先端径 0.35 mm のサーミスタ 6 本（時定数 27 ms）が使用され、ブリッジ回路にて物理量に変換（サンプリング間隔 10 samples/sec, カットオフ周波数 20 Hz）される。一方、流速測定には、He-Ne レーザーを用いるドップラー流速計が使用され、データは 40 samples/sec で 10 分間測定される。

Table 2.1 に、今回のモデル検証に用いた実験条件を示す。実験は、等温噴流 (Turbulent Jet) と浮力噴流 (Turbulent Plume) の 2 種類に大きく分けられている。さらに、単一実験における複数の物理量の同時計測に係わる困難さから、噴流それぞれについて平均温度計測実験 (JUNE-7, JUNE-28)、温度ゆらぎ強度計測実験 (JULY-3, JULY-26) および平均流速計測実験 (PLVT-2, PLVT-1) に分けられている。

## 3.1.2 計算条件

解析に用いたメッシュ分割図をFig. 3.3に示す。解析領域は、噴流の2次元性から、噴流領域の片側（右半分）のみとした。計算条件を以下に列記する。

座 標 : X-Z 2次元

メッシュ分割 :  $50^i \times 50^k$ , 総計2500セル

メッシュ幅 : 5mm ( $I = 3 \sim 50$ )

6mm ( $I = 1 \sim 50$ )

(噴流口スリット幅位置に相当する  $I = 1$  および2のメッシュ幅は実験条件でのDの値に従って変化する)

時間積分法 : 修正ICE法, 過渡計算

(水槽内の平均温度は、時間の経過と共に上昇を続ける為、純粋な定常解を得ることは困難\*である。この為、非定常項を含む過渡計算により時間を進行させ、各物理量の相対変動率が $10^{-5}$ に到達した時点を定常解として採用する)

対流項差分法 : 運動量式 ..... QUICK法

エネルギー式 ..... QUICK-FRAM法

乱流量式 ..... 1次風上差分法

固体壁条件 : 運動量 ..... No-Slip (除, 中心軸)

エネルギー ..... Adiabatic (除, 入口)

流入条件 : 流速・温度 ..... Table 3.1 参照

乱流諸量 ..... 実験において測定されていない為、乱流運動エネルギー $k_B$ およびその散逸率 $\varepsilon_B$ のみ局所平行条件から以下の様に与え、乱流2次モーメント量 ( $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{v'v'}$ , etc.) は $1.0 \cdot 10^{-16}$ の微小値を与えた。

$$k_B = 0.001 \cdot u^2, \quad \varepsilon_B = C\mu^{3/2}/D$$

ここで、 $u$ は噴流吹出し速度、 $D$ は噴流口スリット幅、 $C\mu$ は0.09の値を持つ経験定数である。

流出条件 : 自由流出

\* : 実験においては、水槽の容積を噴流流量が無視し得る程度に大きく取った。

### 3.1.3 解析結果と検討

#### ① 平均温度分布

[Turbulent Jet]

Fig. 3. 4 に乱流噴流実験条件 (JUNE-7) の解析から得られた平均温度・平均流速分布および温度ゆらぎ強度分布を示す。噴流口スリットから流出した流体は、周辺の流体を巻き込みながら流速が減速し、この位置では強い剪断混合領域が発生する。Fig. 3. 5 に軸方向 4 断面における横方向温度の実験値との比較を示す。図中○印が実験結果を、実線が解析結果をそれぞれ示す。また、縦軸は、各位置での温度から水槽内初期温度を差引いた温度差として示してある。全体的に、実験値との一致傾向は良好である。ただし、下流に向うに従い、剪断混合領域近傍での一致度が悪化している。これは、前項でも述べた様に、水槽内の平均温度が時間の経過と共に上昇し、噴流に巻き込まれる流体の温度が上昇したためであると解釈できる。実験においては、水槽の容積を噴流流量が無視し得る程度に大きく取ってあるため、この影響は小さいものと推測される。

[Turbulent Plume]

Fig. 3. 6 に、浮力噴流実験条件 (JUNE-28) の解析から得られた平均温度・平均流速分布および温度ゆらぎ強度分布を示す。噴流口スリットから流出した流体は、乱流噴流実験条件で得られた結果と相似挙動を示すが、横方向への温度の拡散距離が乱流噴流条件でのものよりも減少しているのが特徴である。これは、浮力効果の増大により、乱流挙動そのものが押さえられ乱流拡散効果が減少したことで軸方向運動量が増加したことが、その原因として考えられる。Fig. 3. 7 に軸方向 2 断面における横方向温度の実験結果とに比較を示す。解析により得られた温度分布は、実験結果によるものと良好に一致している。この解析においては、噴流に巻き込まれる流体の温度が上昇したことによる不一致誤差の混入は少ない。これは、前記した様に、軸方向運動量が増加したことによって巻き込み渦の強度が減少し、噴流に巻き込まれる流量が減少したためであると考えられる。これによって、横方向の何れの位置においても、解析結果は実験結果を良好に模擬している。

#### ② 温度ゆらぎ強度分布

[Turbulent Jet]

Fig. 3. 8 に乱流噴流実験条件 (JULY-3) の解析から得られた軸方向 3 断面における横方向温度ゆらぎ強度分布の実験結果との比較を示す。図中の○印は実験結果を、また実線は解析結果を示す。実験結果では、噴流中心軸近傍で温度ゆらぎ強度が大きく減衰しているのが特徴である ( $Z/D=6.0, 14.0$ )。解析結果においてもこの傾向は良く再現されている。ただし、各軸方向断面での温度ゆらぎ強度絶対値は、全体的に若干の過大評価の傾向を持つ。

## 〔Turbulent Plume〕

Fig. 3.9に、浮力噴流実験条件(JUNE-26)の解析から得られた軸方向3断面における横方向温度ゆらぎ強度分布の実験結果との比較を示す。この浮力噴流条件では、乱流噴流条件で見られた程の、噴流中心軸近傍での温度ゆらぎ強度の大きな減衰傾向は見られない。これは、解析結果についても同様である。実験結果と解析結果の絶対値の比較に関しては、 $Z/D=6.0$ の噴流中心軸近傍を除けば、良好な一致を示していると解釈できる。

## ③ 平均流速分布

## 〔Turbulent Jet〕

Fig. 3.10に乱流噴流実験条件(PLVT-2)の解析から得られた軸方向4断面における横方向流速分布の実験結果との比較を示す。解析による各断面での流速分布は、実験による流速分布を極めて良好に模擬している。

## 〔Turbulent Plume〕

Fig. 3.11に、浮力噴流実験条件(PLVT-1)の解析から得られた軸方向4断面における横方向流速分布の実験結果との比較を示す。解析により得られた各断面での流速分布は、 $Z/D=28.8$ の剪断領域近傍を除けば比較的实验結果を良好に再現していると言える。この不一致は、噴流に巻込まれる渦の強度を実験でのそれよりも大きく評価していることに起因しているものと考えられる。

以上を示した各物理量の実験結果との比較結果から、今回の乱流非等方性を考慮する応力代数式乱流モデルが、温度ゆらぎ強度の解析において十分な妥当性を有していることが確認された。

## 第4章 原型炉7集合体ナトリウム実験解析

### 4.1 実験の概要

解析の対象としたナトリウム実験は、大洗工学センター機器システム開発室で行なわれたものである<sup>10)</sup>。高速炉においては、集合体局所事故発生時の異常監視計装として、炉上部温度計装が炉心から最も近く、異常を早期に検出できるとの観点から有望視されている。しかし、出力運転時の熱膨張を逃がす為、燃料集合体と整流筒との間に50mmの間隙を設けている。この為、隣合う集合体間の圧力バランスによっては、この間隙間で流動干渉（クロスフロー）が発生し、炉心上部機構下端・整流筒内に設置されるプロセス計装（温度および流速計）の出力信号に影響を及ぼす可能性があると考えられる。実験では、炉心上部機構の構造および隣接集合体の種類によって、集合体間で発生するクロスフローの効果がどの程度計装系の出力信号に影響するかが確認された。

Fig. 4.1に、高速原型炉「もんじゅ」の7体の集合体を実寸大で取出したモックアップ試験装置の全体図を示す。試験装置は、集合体入口流量を計測する永久磁石式電磁流量計、砲弾型上部中性子遮蔽体、ハンドリングヘッドおよび炉心上部機構から構成され、中心集合体とその周囲の集合体6体との間で、流量および温度を別々に設定できる機能を有している。

さらに、炉心上部機構は、制御棒集合体を中心位置に配する構造を模擬できる様にするため、取替え可能な構造となっている。制御棒集合体を中心位置に配置した場合には、中央整流筒の替わりに、模擬制御棒延長管および制御棒案内管が設置される。

Fig. 4.2およびFig. 4.3に、制御棒集合体を含まない正常配列条件での温度計装位置および制御棒集合体を含んだ条件での温度計装位置をそれぞれ示す。温度測定には、外径1.0mmの非接地型CA熱電対が用いられた。さらに、実機での炉心上部計装と同様に、整流筒内に外径1.6mmの接地型CA熱電対および渦電流式温度流速計（MK-III）が収納されている。

Table 4.1に、今回解析の対象とした実験の条件を示す。解析の対象とした実験は、合計3ケースであり、この内2ケースは制御棒集合体を含まない正常配列条件でのものである。

この2ケースは、中心集合体流量と周辺集合体流量の比率 $\beta$ を1.0および0.6に設定した条件であり、それぞれ内側炉心領域第1列およびブランケット領域第2列の条件に相当する。残り1ケースは、制御棒集合体を含むケースであり、これは内側炉心領域に後備炉停止棒が存在する条件（ $\beta=0.2$ ）に相当する。

## 4.2 計算条件

解析に用いたメッシュ分割図をFig. 4.1（制御棒集合体を含まない正常配列条件）およびFig. 4.2（制御棒集合体を含む配列条件）に示す。計算条件を以下に列記する。

座 標 : X-Y-Z 3次元

メッシュ分割 :  $32^i \times 14^j \times 45^k$ , 総計20160セル

メッシュ幅 : i方向; =  $8 * 1.0$ ,  $4 * 0.8725$ ,  $8 * 1.0$ ,  $4 * 0.8725$ ,  $8 * 1.0$

j方向; =  $4 * 1.0$ ,  $2 * 1.5112$ ,  $8 * 1.0$

k方向; =  $5 * 1.0$ ,  $10 * 2.3000$ ,  $30 * 2.0$

時間積分法 : 修正ICE法, 定常計算

対流項差分法 : 運動量式 ..... QUICK法

エネルギー式 ..... QUICK-FRAM法

乱流量式 ..... 1次風上差分法

固体壁条件 : 運動量 ..... No-Slip (除, 中心軸)

エネルギー ..... Adiabatic (除, 入口)

流入条件 : 流速 ..... 付録A参照

(「もんじゅ」燃料集合体ハンドリングヘッド内には、砲弾型上部中性子遮蔽体が存在し、冷却材はこの遮蔽体とラップ管との間を縫うように流れる。このため、燃料束部で形成された流速分布はこの形状によって乱される事が予想される。今回の解析での入口条件設定とも関連するため、水流動単体実験結果を用いて、解析を行なった)

温度 ..... Table 4.1 参照

乱流諸量 ..... 付録A参照

流出条件 : 自由流出

### 4.3 解析結果と検討

#### 4.3.1 正常配列体系 ( $\beta = 1.0$ )

Fig. 4.6 に、 $J = 1$  断面での温度・流速分布および温度ゆらぎ強度分布を示す。各燃料集合体ハンドリングヘッドより流出した冷却材は、その吹き上げ効果（自由噴流）によって、各燃料集合体に対応する整流筒内に流入しており、顕著なクロスフロー挙動は見られない。これにより冷却材の混合が促進されないため、整流筒内以外（整流筒上下領域）の領域に大きな温度勾配が混合されないまま存在している。これに対応して、温度ゆらぎ強度も同領域で大きな値を示し、整流筒下端領域で  $12.0^{\circ}\text{C}^2$  および整流筒上端領域で  $8.0^{\circ}\text{C}^2$  の値が計算されている。

Fig. 4.7 に、軸方向 6 断面（燃料集合体出口部、整流筒下端部、計装ウェル先端部、整流筒中間部、整流筒上端部および整流筒上部）における温度・流速分布および温度ゆらぎ強度分布を示す。まず、燃料集合体出口部（ハンドリングヘッド直上 5.0mm）においては、各集合体からの吹き上げ効果が顕著なため横方向の流速は小さいものの、集合体間隙を流れる様な若干のクロスフローが存在している。これによって、中心集合体より流出した冷却材の平均温度分布は、歪んだ分布を示す。温度ゆらぎ強度分布では、中心集合体出口部近傍で最大  $9.0^{\circ}\text{C}^2$  の値が計算されている。整流筒下端断面においては、さらにクロスフローが顕著となり、中心集合体より流出した冷却材は横方向に大きく拡散し、これに伴って冷却材平均温度も混合が促進されている。温度ゆらぎ強度分布についても、等強度線の間隔が広がり、周囲に拡散してゆく様子が伺える。計装ウェル先端断面においては、ハンドリングヘッド上端と整流筒下端のギャップ領域で発生していたクロスフローが、整流筒の存在によって大きく減衰している。中心燃料集合体に対応する整流筒内の平均温度は出口部での温度  $508^{\circ}\text{C}$  が保存されており、燃料集合体出口温度計装によってこの冷却材平均温度が的確に測定されることが予想される。温度ゆらぎ強度分布については、整流筒内では、小さく、むしろ整流筒同志を連結する支持板によって形成される領域で大きな値が計算されている ( $7.0^{\circ}\text{C}^2$ )。整流筒中間断面および上端断面においては、計装ウェル断面での冷却材平均温度が混合によって平坦化している以外は、ほぼ同様な傾向が得られている。整流筒上部断面（整流筒上端から 1.0 cm）においては、各整流筒内に存在していた冷却材同志が急激に混合を開始するため、冷却材平均温度は横方向に大きく広がる。これに対応して、温度ゆらぎ強度の分布についても  $8.0^{\circ}\text{C}^2$  の値が部分的に計算されている。

Fig. 4.8 に、軸方向 6 断面 ( $X'$ ,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $Z'$ ,  $Z''$ ) における冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度の横方向分布 ( $J = 1$ ) を示す。この内、3 断面については、実験により平均温度および温度ゆらぎ強度が測定されており、図中の○印が冷却材平均温度、Φ印が温度ゆらぎ強度を表す。一方、実線が今回の解析により得られた冷却材平均温度であり、2 本の破線により囲まれた領域が解析による温度ゆらぎ強度である。この解析による温度ゆらぎ強度を表

わす破線は、下式によって計算し、冷却材平均温度のまわりで統計的に一様にゆらいているものと仮定した。

$$\pm \overline{\theta'} = (\overline{\theta'^2})^{1/2} / 2.0 \quad (4.1)$$

なお、図中の縦軸は、以下の式によって規格化されている。

$$T_N = \frac{T - T_P}{T_c - T_P} \quad (4.2)$$

まず、整流筒下端断面(X)位置での実験結果と解析結果との比較では、冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度共に両者の一致は極めて良好である。また、計装ウェル断面(Y)位置についても、両者はほぼ一致している。ただし、中心燃料集合体に対応する整流筒内の壁面近傍については、解析による冷却材平均温度は実験結果と比較して若干低めの温度を示している。また、整流筒以外の領域での温度ゆらぎ強度は、解析によるものの方が大き目の値を示している。整流筒中央断面(Z)位置では、整流筒以外の領域で冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度共に、解析結果が実験結果を過大評価する傾向を与える。これらの差を発生させる要因としては、実験での体系を今回の解析モデル(X-Y-Z直交座標系)が再現しきれておらず、ハンドリングヘッド上端と整流筒下端との間で発生するクロスフロー効果を精度良く模擬できていないことに起因すると考えられる。

Fig. 4.9に、横方向4断面(I=8, 9, 12, 13)における冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度の軸方向分布(J=1)を示す。図中のシンボルおよび線種の意味については、先の図と同様である。横方向4断面の内、最も大きな温度ゆらぎ強度を示す断面は、中心燃料集合体に対応する整流筒の外側面上である。実験結果との比較に関しては、全体的な傾向は再現されているものの、各点での温度ゆらぎ強度は過大評価の傾向が強い。

4.3.2 正常配列体系 ( $\beta=0.6$ )

Fig. 4.10に、 $J=1$ 断面における温度・流速分布および温度ゆらぎ強度分布を示す。結果より分かる様に、中心燃料集合体流量と周辺燃料集合体流量との比率 $\beta$ が0.6の条件においても、各燃料集合体から流出する冷却材は、吹き上げ効果によって対応する整流筒内に流入している。温度ゆらぎ強度分布に関しては、 $\beta=1.0$ の場合と同様に整流筒下端領域においてその最大値を持ち、 $9.0^{\circ}\text{C}^2$ の値が計算されている。

Fig. 4.11に、軸方向6断面についての温度・流速分布および温度ゆらぎ強度分布を示す。各断面における冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度分布の傾向は、 $\beta=1.0$ の条件で得られたものと酷似している。

Fig. 4.12に、軸方向6断面における冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度の横方向分布( $J=1$ )を示す。図中のシンボルおよび線種の意味は、Fig. 4.8で用いたものと同じである。まず、整流筒下端断面(X)位置での実験結果と解析結果との比較では、 $\beta=1.0$ の場合と同様に冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度共に両者の一致は極めて良好である。計装ウェル断面(Y)位置については、冷却材平均温度に関しては実験結果を良好に再現しているものの、温度ゆらぎ強度については過大評価の傾向が強い。整流筒中間断面(Z)位置での傾向は、 $\beta=1.0$ の場合と比較して、冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度共に実験結果との一致傾向は向上している。ただし、温度ゆらぎ強度に関しては、過大評価傾向が依然として残る。

Fig. 4.13に、横方向4断面における冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度の軸方向分布( $J=1$ )を示す。横方向4断面の内、最も大きな温度ゆらぎ強度を示す断面は、 $\beta=1.0$ の場合と同様に、中心燃料集合体に対応する整流筒の外側面上である。実験結果との比較に関しては、 $\beta=1.0$ の場合と比較して、冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度共に一致傾向は向上している。ただし、軸方向断面での結果と同様に、温度ゆらぎ強度に関して、過大評価の傾向を与える。

$\beta=1.0$ の結果も含めて、今回の解析結果が実験結果に対して過大評価傾向を与える要因は、先にも述べた様にハンドリングヘッド上端と整流筒下端との間で発生するクロスフロー効果を精度良く模擬できていないことに起因すると考えられる。この他、今回の応力代数式乱流モデル内で使用している多くのモデル定数群(文献11 記載値, 乱流水実験より導出)が、ナトリウムを作動流体とした場合に妥当であるか否かといった問題が考えられる。これに関しては、より簡略なモデル実験を通して、ナトリウムを作動流体とした場合の最適値を導出しておくことが早期に望まれる。

### 4.3.3 制御棒配列体系 ( $\beta=0.2$ )

Fig. 4.14に、 $J=1$ 断面における温度・流速分布および温度ゆらぎ強度分布を示す。結果より分かる様に、模擬制御棒集合体より流出する冷却材流量が周囲のものに比べて極度に小さい為、制御棒上部案内管内の流れは圧力勾配による吸い出し効果によって微小な逆流が生じている。これによって、有意な大きさを持つ温度ゆらぎが、制御棒上部案内管下端領域のみならず、模擬制御棒集合体の延長管近傍にまで達している。この様な傾向は、前項までに述べた正常配列体系では確認されなかったものであり、制御棒延長管は顕著な高サイクル熱疲労を受けるものと推測される。当該断面における最大温度ゆらぎ強度としては、 $20.0^{\circ}\text{C}^2$ が計算されている。

Fig. 4.15に、軸方向6断面におけるの温度・流速分布および温度ゆらぎ強度分布を示す。まず、燃料集合体（制御棒集合体）出口部での断面においては、制御棒上部案内管と整流筒間の圧力勾配によって、制御棒上部案内管内の冷却材が吸い出しされ、大きなクロスフローが発生している。これによって、冷却材平均温度は周囲に広く拡散し、温度ゆらぎ強度分布は正常配列体系では見られなかった様な複雑な分布形を示す。特徴的な点としては、有意な大きさを持つ温度ゆらぎが、模擬制御棒集合体周辺のみならず周囲に存在する模擬燃料集合体近傍にまで見られることである。整流筒下端断面においては、冷却材平均温度の周囲への拡散がさらに進行し、最大温度ゆらぎ強度を示す領域が制御棒上部案内管周辺から整流筒近傍に変化している。ここでの最大温度ゆらぎ強度は、 $12.0^{\circ}\text{C}^2$ である。計装ウェル先端断面、整流筒中間断面および整流筒上端断面においては、制御棒上部案内管を下降する均一温度の冷却材に起因して、その内部の冷却材平均温度は空間的に均一な値となっている。ただし、乱流非等方性効果による温度ゆらぎ強度の下部からの拡散挙動によって、その内部には大きな値が計算されている。一方、制御棒上部案内管外の領域においては、クロスフローによって発生した有意な大きさを持つ温度ゆらぎ強度が下流に向かって減衰しながら輸送されている。整流筒上部断面においては、整流筒位置に相当する領域に有意な温度ゆらぎが存在している。

Fig. 4.16に、軸方向6断面における冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度の横方向分布 ( $J=1$ )を示す。冷却材平均温度の実験結果との比較に関しては、整流筒下端断面を除いて良好である。一方、温度ゆらぎ強度に関する比較では、体系内の何れの領域についても解析結果は実験結果を過大に評価する傾向にある。

Fig. 4.17に、横方向3断面における冷却材平均温度および温度ゆらぎ強度の軸方向分布 ( $J=1$ )を示す。全体的傾向として、冷却材平均温度は実験結果をほぼ良好に再現するものの、温度ゆらぎ強度に関しては大きく過大評価する。

以上に示した解析結果の過大評価傾向は、正常配列体系で想定された要因に加えて、制御棒上部案内管からの冷却材の吸い出し挙動が、ハンドリングヘッド上端と整流筒下端間に生じるクロスフローの影響に強く依存していることが考えられる。すなわち、制御棒集合体内を流れる冷却材流量が周囲のものに比べて極度に低く ( $\beta=0.2$ )、上部案内管内の流況 (順流・逆流) はクロスフロー発生領域での微妙な圧力バランスによって変動すると同時に、今回の解析結果では現れなかった複雑な 3 次元的挙動が実際には発生しているものと推定される。このような微妙な現象を再現する為には、解析モデル体系の正確な記述が不可欠であると共に、今回採用したメッシュ幅以上のより微細な解析体系の使用が求められる。

以上得られた結果より、温度ゆらぎ現象を解析的評価手法によって定量的に精度良く再現するためには、膨大な計算セルと多くの計算時間が必要であると考えられるが、今回の温度ゆらぎ実験の解析を通して、当該現象を定性的には再現できることが確認された。これは、今回の乱流解析モデル導入に際して使用した「温度ゆらぎ挙動が乱流現象の一つとして取扱える」との仮定が妥当であったことが裏付けられたことを示している。また、文献 5) において報告された様な過小評価傾向が、乱流 2 次モーメント量を直接的に評価する応力代数式乱流モデルの導入によって排除され、一連の乱流解析モデルの高度化の方向が妥当であったことも合わせて示している。これによって、プラント設計側から、評価対象領域の形状および当該部での温度・流速条件が与えられれば、有意な高サイクル熱疲労がいかなる場所で発生し、いかなる対策を施すべきかが解析的に提示可能であると考えられる。

## 第5章 結 言

高速増殖炉の炉心出口近傍では、熱流力特性の異なる集合体からの冷却材同志の混合によって、不規則な温度ゆらぎ現象（サーマルストライピング）が発生する。本研究では、ナトリウムによる温度ゆらぎモックアップ実験を多次元コードAQUAに導入されている応力代数式乱流モデルを用いて解析し、温度ゆらぎ強度 $\theta'^2$ 分布を解析評価する場合の当該乱流モデルの有効性と限界を明らかにした。

温度ゆらぎモックアップ実験の解析により、以下の結果を得た。

- (1) 高速原型炉「もんじゅ」の内側炉心領域第1列に相当する実験条件の解析では、実験による平均温度分布および温度ゆらぎ強度分布を極めて良好に再現する。
- (2) ブランケット領域第2列に相当する実験条件の解析については、温度ゆらぎ強度絶対値を若干過大評価するものの、その空間分布および平均温度分布は実験結果と良好に一致する。
- (3) 内側炉心領域に後備炉停止棒を含む実験条件の解析では、平均温度分布は実験結果を良好に再現するものの、温度ゆらぎ強度については全体的に過大評価する。

また、以上の解析結果より、乱流モデル化に関する以下の知見を得た。

- (1) 実験による温度ゆらぎ強度絶対値およびその空間分布の定性的特徴は、多次元コードAQUAに導入されている応力代数式乱流モデルによって推定することが可能である。
- (2) 応力代数式乱流モデル導入に際して使用した「温度ゆらぎ挙動は乱流現象の一つとして取扱うことができる」との仮定は、現象の定性的評価を行なう上では妥当である。
- (3) 乱流2次モーメントを直接的に評価する応力代数式乱流モデルを使用することによって、ブジネスクの渦粘性概念を用いた場合に問題となる温度ゆらぎ強度絶対値の過小評価傾向は排除される。
- (4) 温度ゆらぎ強度を定量的かつ高精度で解析評価するためには、ナトリウムを作動流体とした場合のモデル定数を特に正確に把握しておく必要がある。

## 謝 辞

本研究を進めるに当たって、終始有益なコメントを頂いた機器構造開発部・機器システム開発室、中本香一郎室長および大山信美研究員に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 馬渡他；“炉心上部周辺水流動試験”，PNC SJ201 80-39, 1980年7月
- (2) 馬渡他；“炉心上部周辺水流動試験(Ⅱ)”，PNC SJ201 81-25, 1980年7月
- (3) 馬渡他；“サーマルストライピング水流動試験(もんじゅ)”，  
PNC SJ201 84-20, 1984年7月
- (4) 河原他；“「もんじゅ」炉心上部機構のサーマルストライピング試験”，  
PNC SN9410 86-081, 1986年7月
- (5) 村松他；“高速炉燃料集合体出口部温度ゆらぎ量の解析手法の開発”，  
PNC SN941 84-98, 1984年7月
- (6) 太田他；“燃料集合体冷却材温度ゆらぎ伝播解析”，PNC SJ965 84-01, 1984年
- (7) 吉行他；“燃料集合体冷却材温度ゆらぎ伝播解析(Ⅱ)”，PNC SJ965 85-01, 1985年
- (8) 村松他；“原子炉容器内冷却材の温度成層化の評価(第4報)，応力代数式乱流モデルの  
検討，PNC N9410 89-132, 1989年9月
- (9) T. Muramatsu, et al.: “Turbulent Analysis of the Thermal Stratification  
Interface, (Ⅱ) Refinement of Analytical Capability”, J. Nucl. Sci. Tech.,  
to be submitted.
- (10) 大山他；“燃料集合体出口冷却材温度および流量の計測に関する試験(2), 7 集合体試験部  
(モデル 2A, 2B, 2C)による試験”，PNC SN941 85-33, 1985年4月
- (11) Rodi, W., “A New Algebraic Relation for Calculating the Reynolds Stresses”,  
ZAMM 56, T219-T221, 1976
- (12) Launder, B.E., “Turbulence Models and Their Experimental Verification:  
11. Scalar Property Transport by Turbulence”, Imperial College Mech. Eng.  
Dept. Rep. HTS/73/26, 1973
- (13) Kotsovinos, N.E., “A Study of the Entrainment and Turbulence in a Plane  
Buoyant Jet”, California Institute of Technology, Ph.D., 1975
- (14) 池田他；“炉心上部機構局所モデル水流動試験”，PNC SJ201 77-47, 1977年11月

## 付録A 模擬燃料集合体水流動実験解析

### 1. 模擬燃料集合体水流動実験の解析

高速原型炉「もんじゅ」の燃料集合体ハンドリングヘッド内には、砲弾型中性子遮蔽体が組込まれており、冷却材はこの遮蔽体とラッパー管との間隙を縫う様に流れる。このため、燃料ピン束部で形成された径方向流速分布および空間的な乱流情報等は、この複雑な流路形状によって乱された後、ハンドリングヘッドを経て燃料集合体外へ流出する。ここでは、炉心上部計装単体水流動試験<sup>14)</sup>の検証解析を通して、第4章の解析で使用するハンドリングヘッド上端での境界条件を規定する。

Fig. A. 1に、実験に用いられたハンドリングヘッドの断面形状と対応するメッシュ分割図を示す。計算は、 $r$ - $z$  2次元体系を用いて、以下の4ケースを実施した。

- (a)  $0.4\text{m}^3/\text{min}$
- (b)  $0.8\text{m}^3/\text{min}$
- (c)  $1.2\text{m}^3/\text{min}$
- (d)  $1.5\text{m}^3/\text{min}$

得られた4ケースそれぞれの流速ベクトル図を、Fig. A. 2に示す。また、ハンドリングヘッド直上での径方向流速分布を実験結果と比較してFig. A. 3に示す。各ケースでの流速分布は、砲弾型中性子遮蔽体の影響によって鞍型形状を示し、流速最大値を示す径方向位置は集合体中心から外れる。解析結果は、集合体中心部で若干の過大評価、周辺部で若干の過小評価傾向を示すが、全体的な傾向はよく再現されている。ハンドリングヘッド直上での乱流運動エネルギー $k$ とその散逸率 $\varepsilon$ の径方向分布をFig. A. 4に示す。また、レイノルズ応力 $\overline{u'u'}$ 、 $\overline{w'w'}$ および $-\overline{u'w'}$ の系径方向分布をFig. A. 5に示す。これら乱流情報については、実験において計測されていない。

以上に示した流速分布および乱流情報分布は、集合体流量に依存してほぼ線形に変化していることから、ナトリウムを対象とした同種解析を行ない、第4章の解析に用いる径方向流速分布および径方向乱流情報分布を、内外挿することによって与えることとする。

Table 3.1 Experimental Condition of the Two-Dimensional Heated Jet

| R u n   | D<br>(cm) | u<br>(cm/s) | T o<br>(°C) | T a<br>(°C) | R e     | R i     | N o t e         |
|---------|-----------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|-----------------|
| JUNE-7  | 0.50      | 30.58       | 26.45       | 19.85       | 1767.87 | 0.00094 | Turbulent Jet   |
| JULY-3  | 1.00      | 13.00       | 26.50       | 21.40       | 1769.99 | 0.00580 |                 |
| PLVT-2  | 0.24      | 54.20       | 33.00       | 22.00       | 1777.09 | 0.00005 |                 |
| JUNE-28 | 1.00      | 6.11        | 42.20       | 21.30       | 977.70  | 0.216   | Turbulent Plume |
| JULY-26 | 2.00      | 7.60        | 43.50       | 21.65       | 2445.06 | 0.294   |                 |
| PLVT-1  | 1.00      | 4.55        | 33.00       | 22.00       | 610.99  | 0.369   |                 |

Table 4.1 Experimental Condition for the 7 Sub-Assemblies Mock-Up Test

| No.      | T p<br>(°C) | T c<br>(°C) | Q p<br>l/min | Q c<br>l/min | $\beta$ | L<br>(mm) | l<br>(mm) | x<br>(mm) | N o t e     |
|----------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 3 - 3(a) | 500         | 508         | 299          | 298          | 1.0     | 50        | 600       | 50        | without C/R |
| 3 - 3(b) | 499         | 506         | 300          | 178          | 0.6     | 50        | 600       | 50        | without C/R |
| 3 - 9(c) | 498         | 508         | 300          | 45           | 0.2     | 50        | 600       | 50        | with C/R    |

T<sub>p</sub> : Peripheral Channel TemperatureT<sub>c</sub> : Central Channel TemperatureQ<sub>p</sub> : Peripheral Channel Flow RateQ<sub>c</sub> : Central Channel Flow Rate $\beta$  : Flow Ratio(Q<sub>c</sub>/Q<sub>p</sub>)L : Gap Distance between S/A Handling  
Head and Flow Guide Bottoml : Distance between Flow Guide  
Bottom and T/C Wellx : Distance between Flow Guide  
Top and Thermal Shield Plate

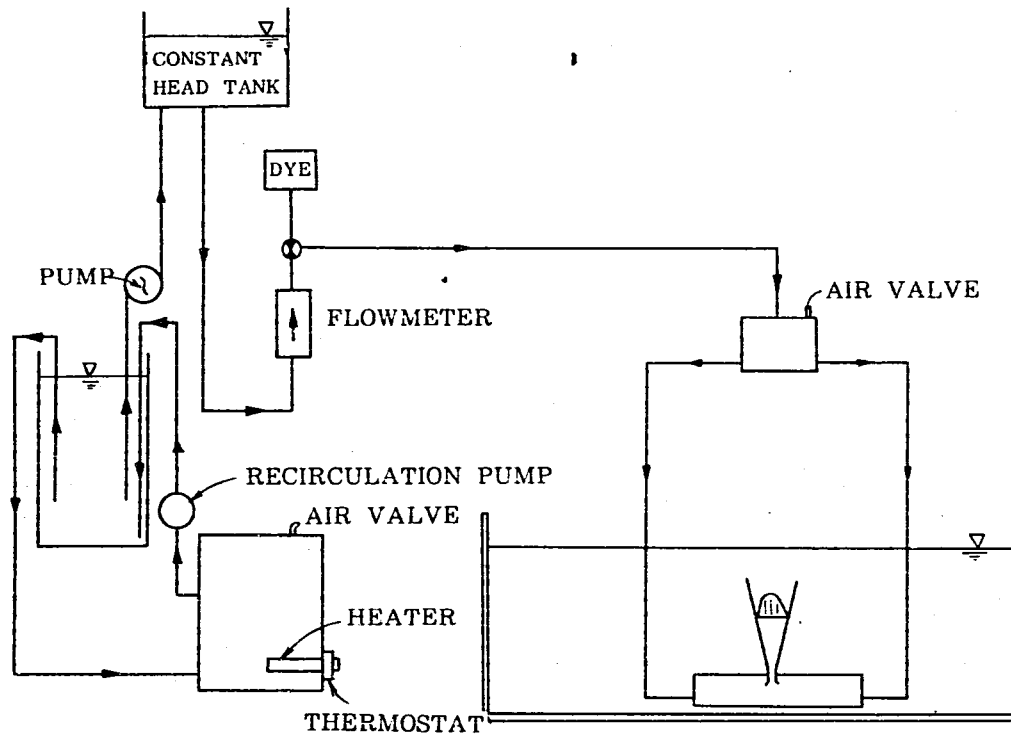


Fig.3.1 Overall Experimental Set-Up for the Two-Dimensional Heated Jet

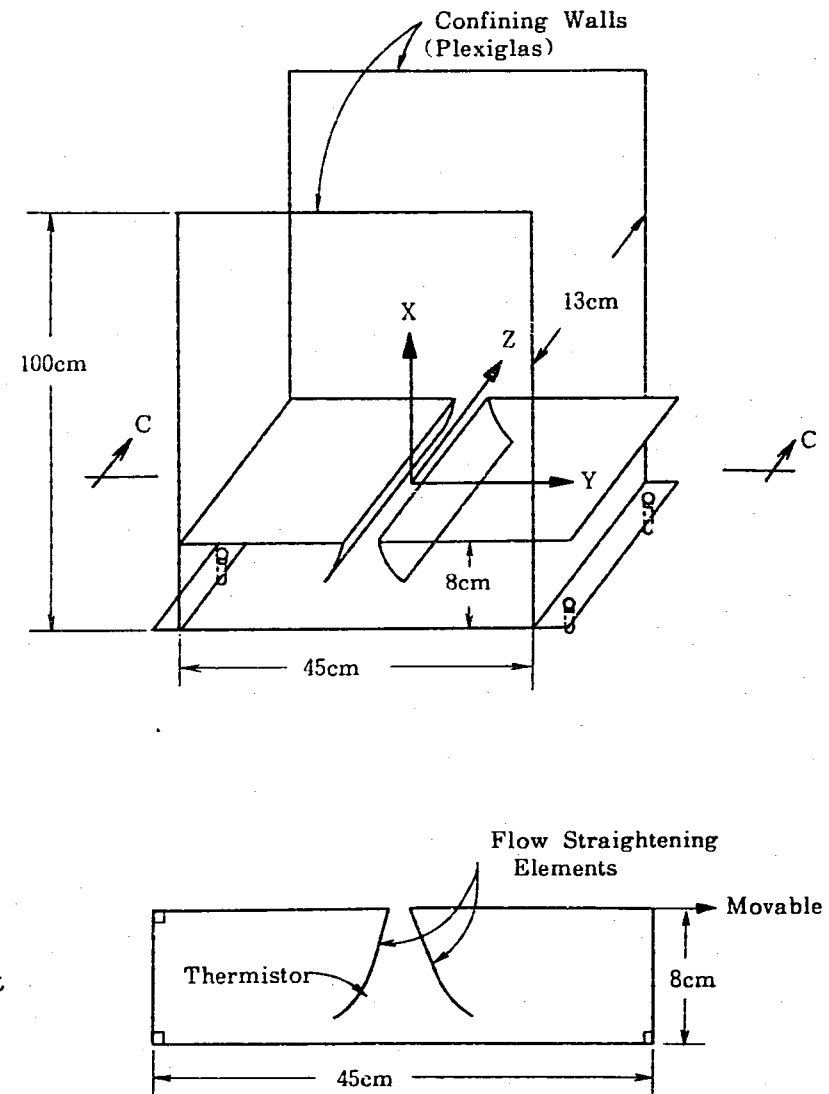


Fig.3.2 Perspective View of the Chamber of the Emerging Jet

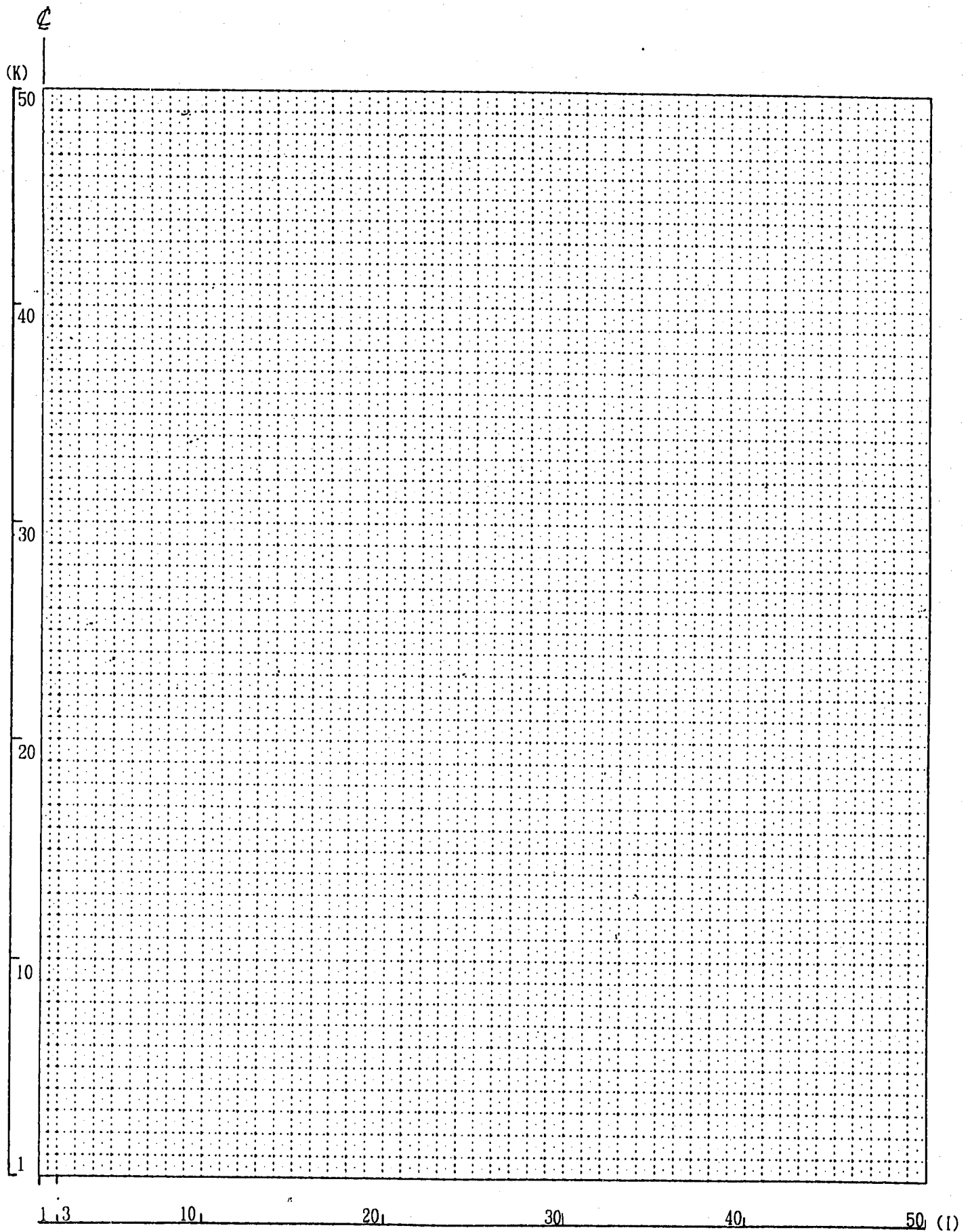
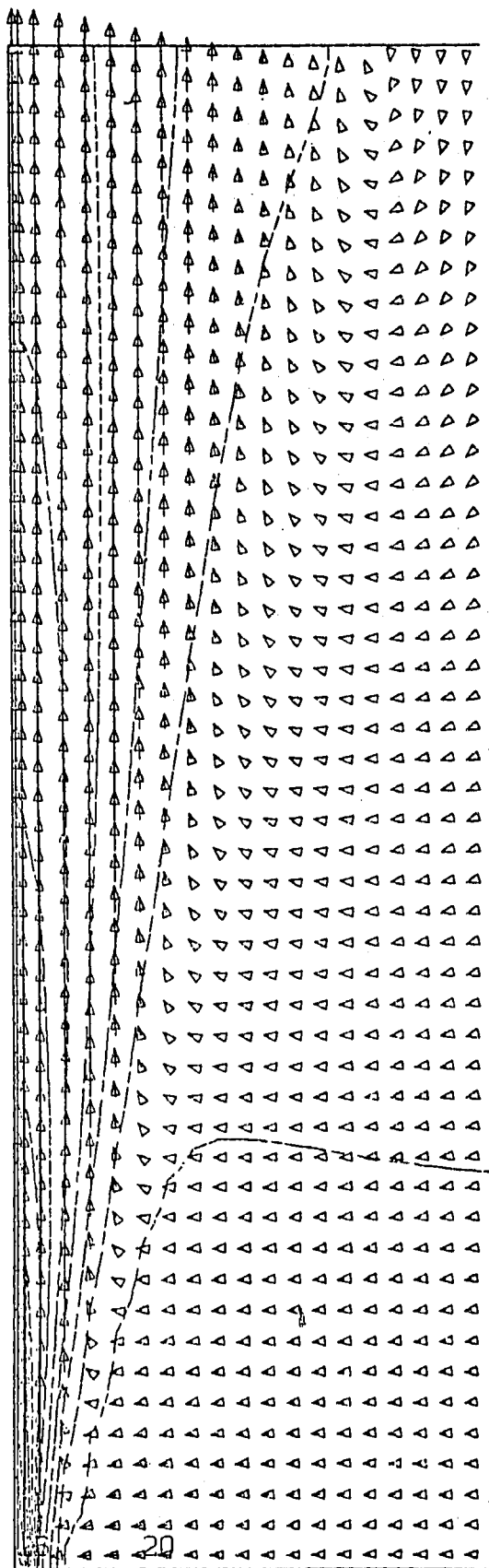
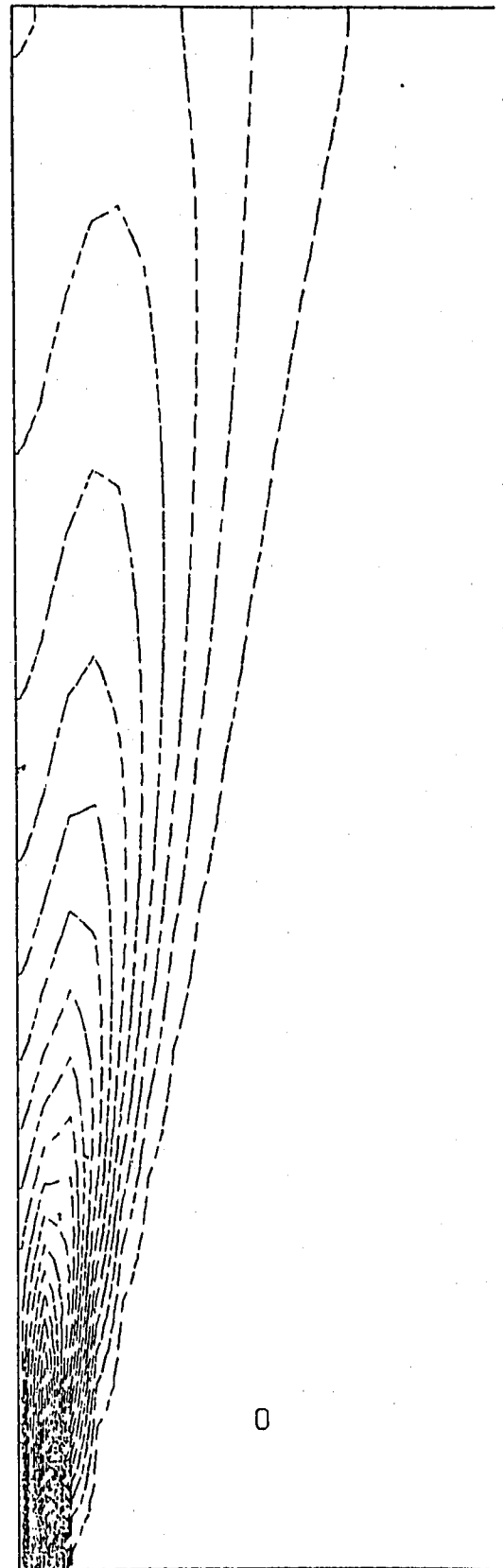


Fig. 3.3 Typical Mesh Arrangement for the Two-Dimensional Heated Jet Analysis



[Mean Temperature and Velocity Distribution]



[Temperature Fluctuation Distribution]

Fig. 3.4 Typical Distributions for Mean Velocity, Mean Temperature and Temperature Fluctuation of Turbulent Jet (JUNE-7)

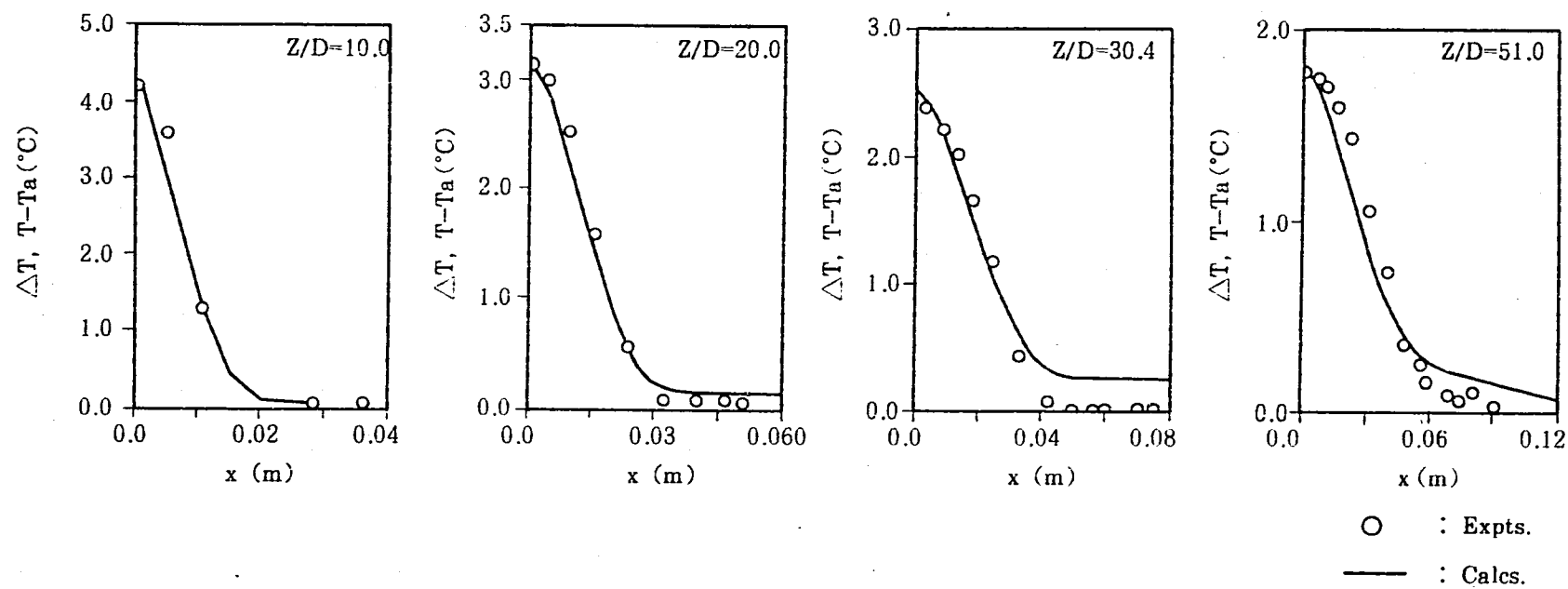
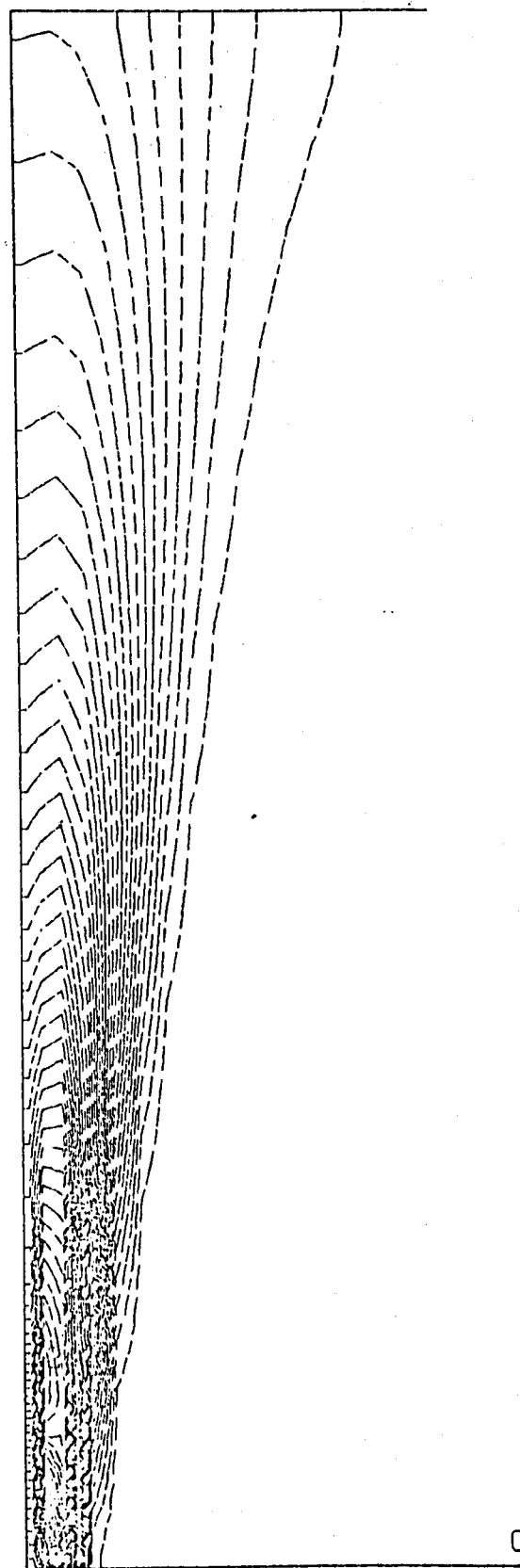
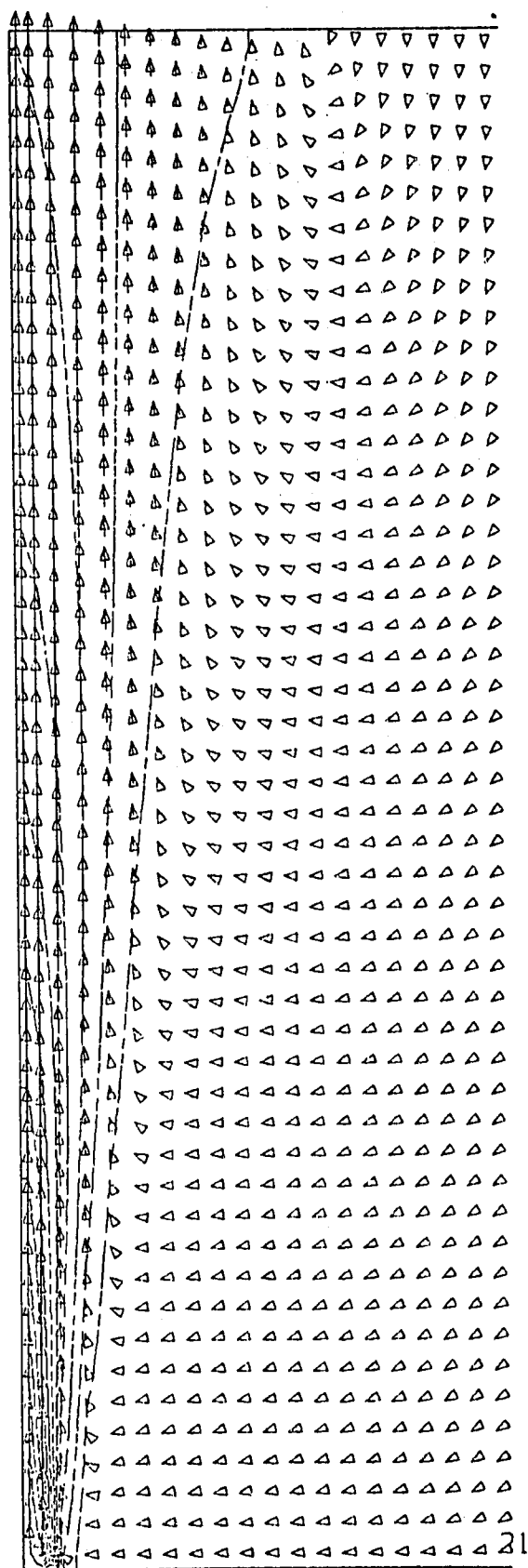


Fig.3.5 Mean Temperature Profiles for Turbulent Jet (JUNE-7)



[Mean Temperature and Velocity Distribution]

[Temperature Fluctuation Distribution]

Fig. 3.6 Typical Distributions for Mean Velocity, Mean Temperature and Temperature Fluctuation of Turbulent Plume (JUNE-28)

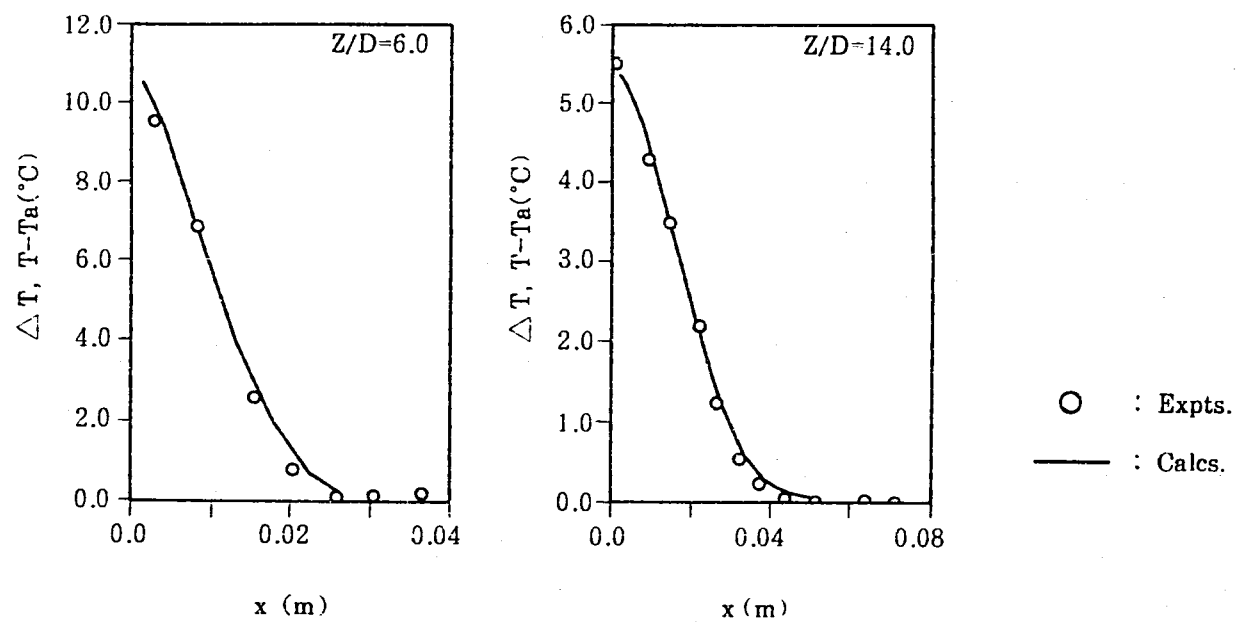


Fig.3.7 Mean Temperature Profiles for Turbulent Plume (JUNE-28)

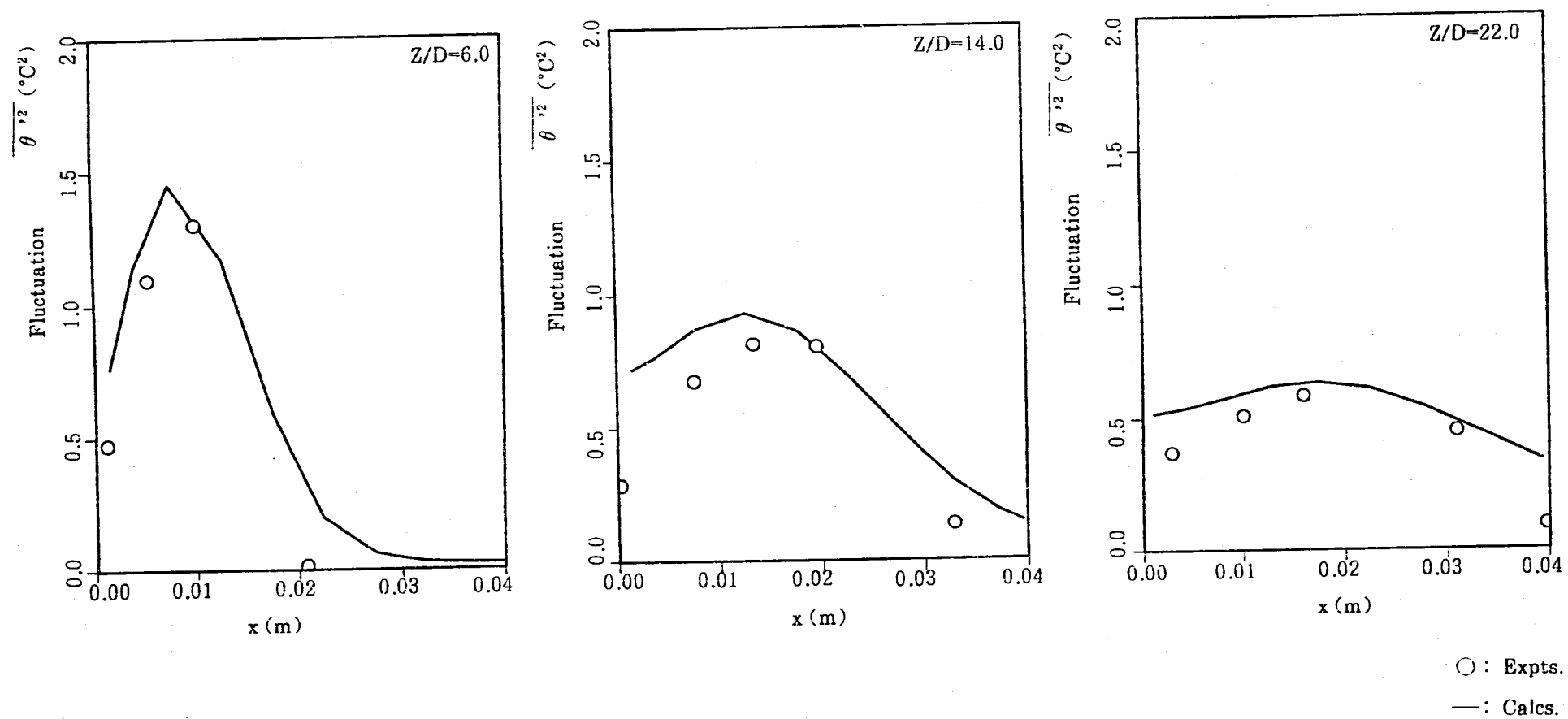


Fig.3.8 Temperature Fluctuation Profiles for Turbulent Jet (JULY-3)

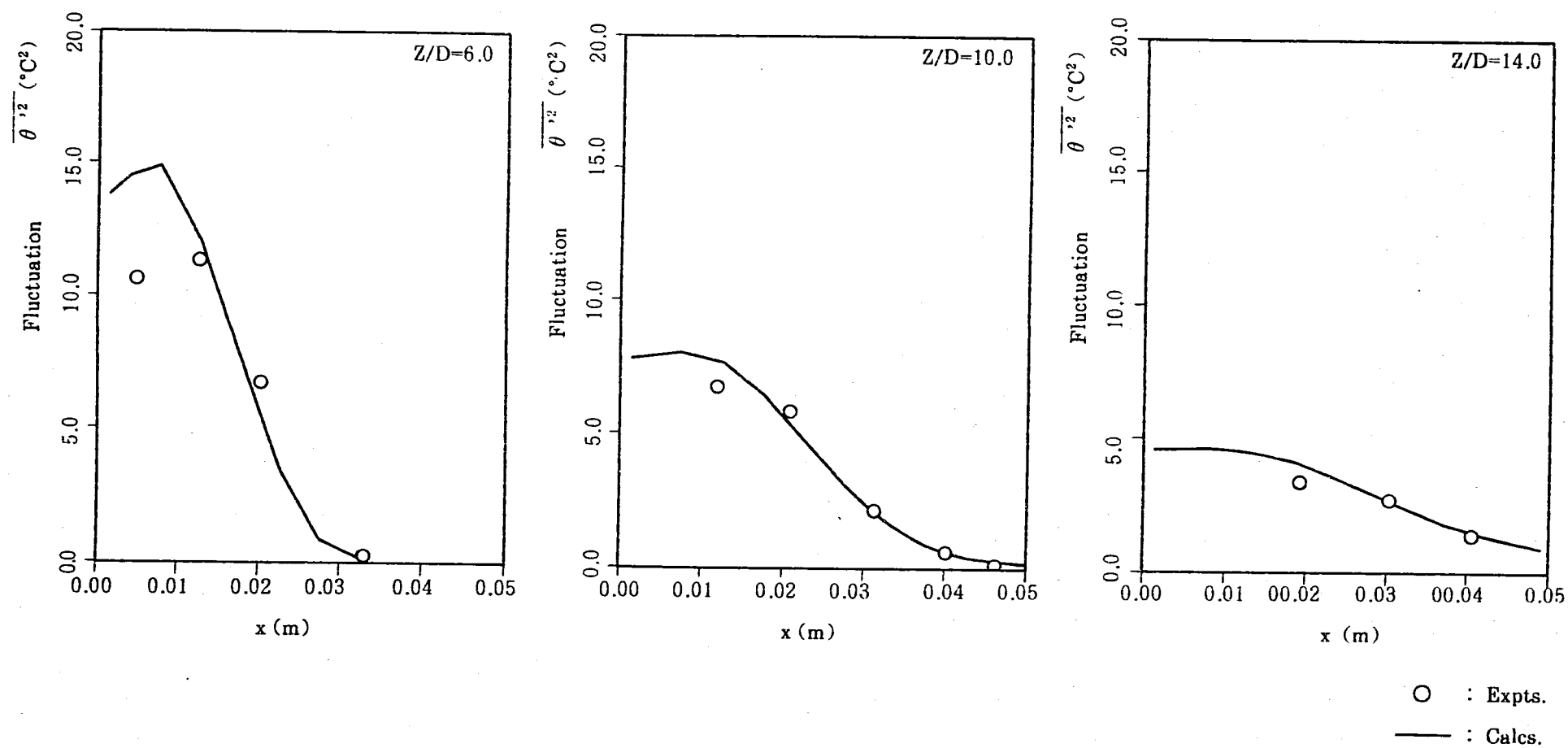
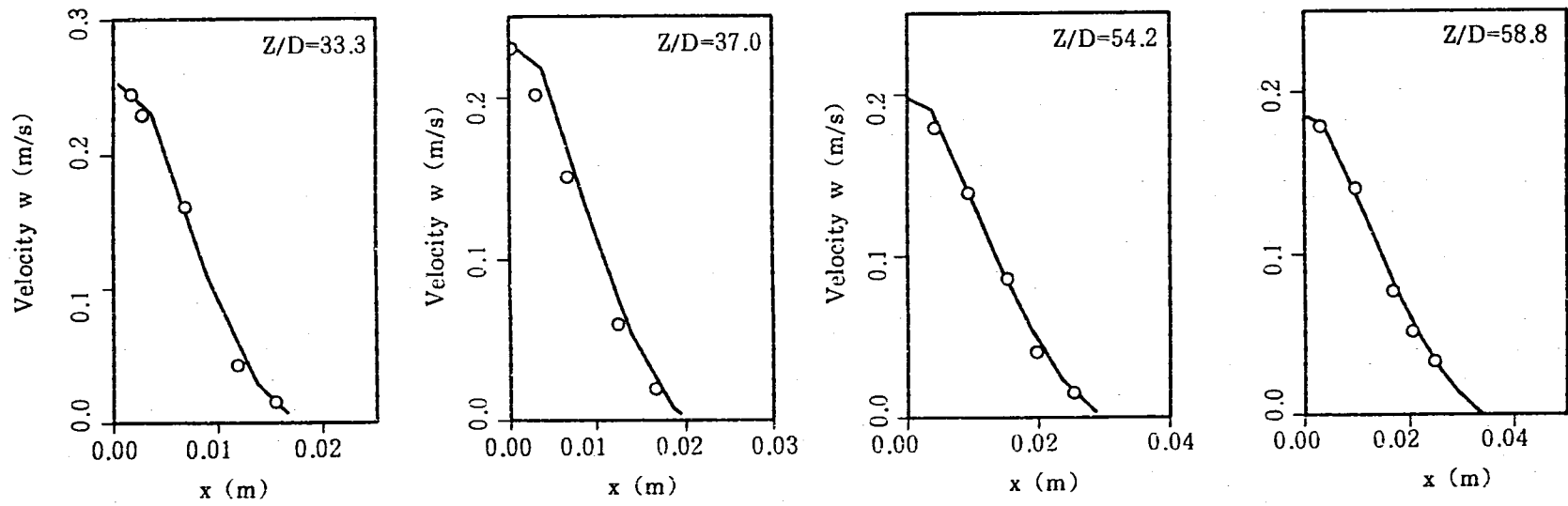


Fig.3.9 Temperature Fluctuation Profiles for Turbulent Plume (JUNE-26)



: Expts.

: Calcs.

Fig.3.10 Mean Velocity Profiles for Turbulent Jet (PLVT-2)

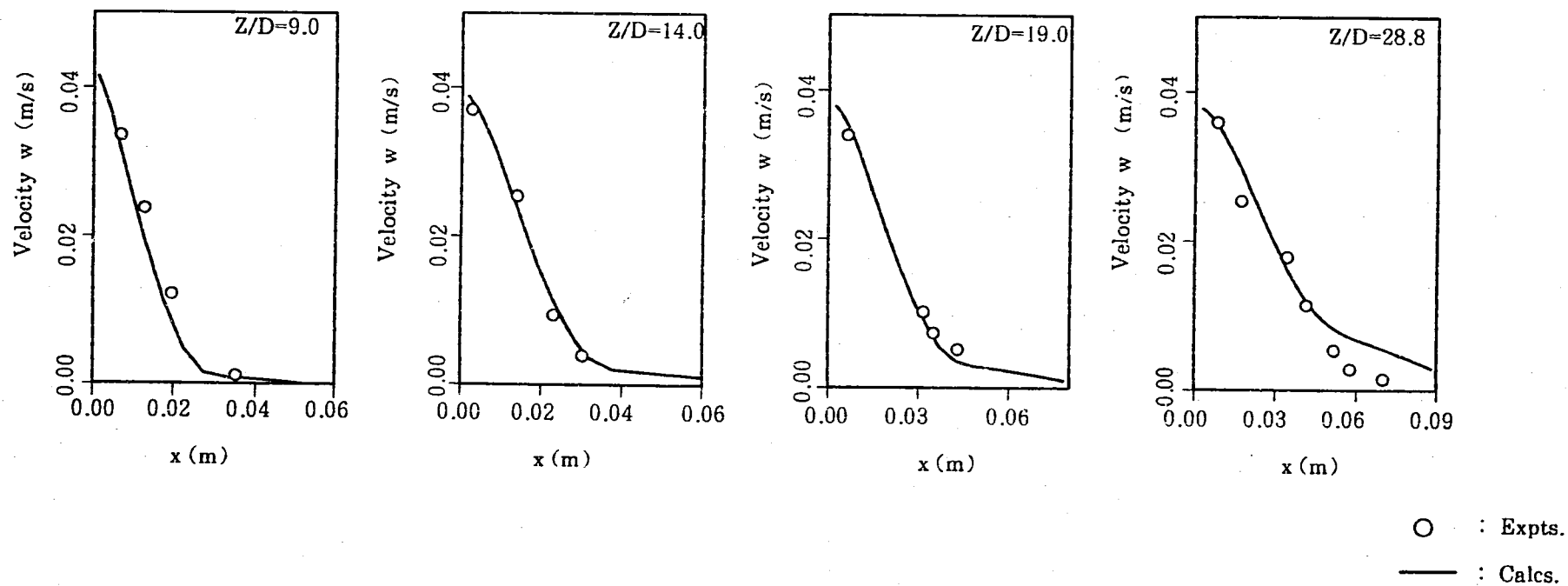


Fig.3.11 Mean Velocity Profiles for Turbulent Plume (PLVT-1)

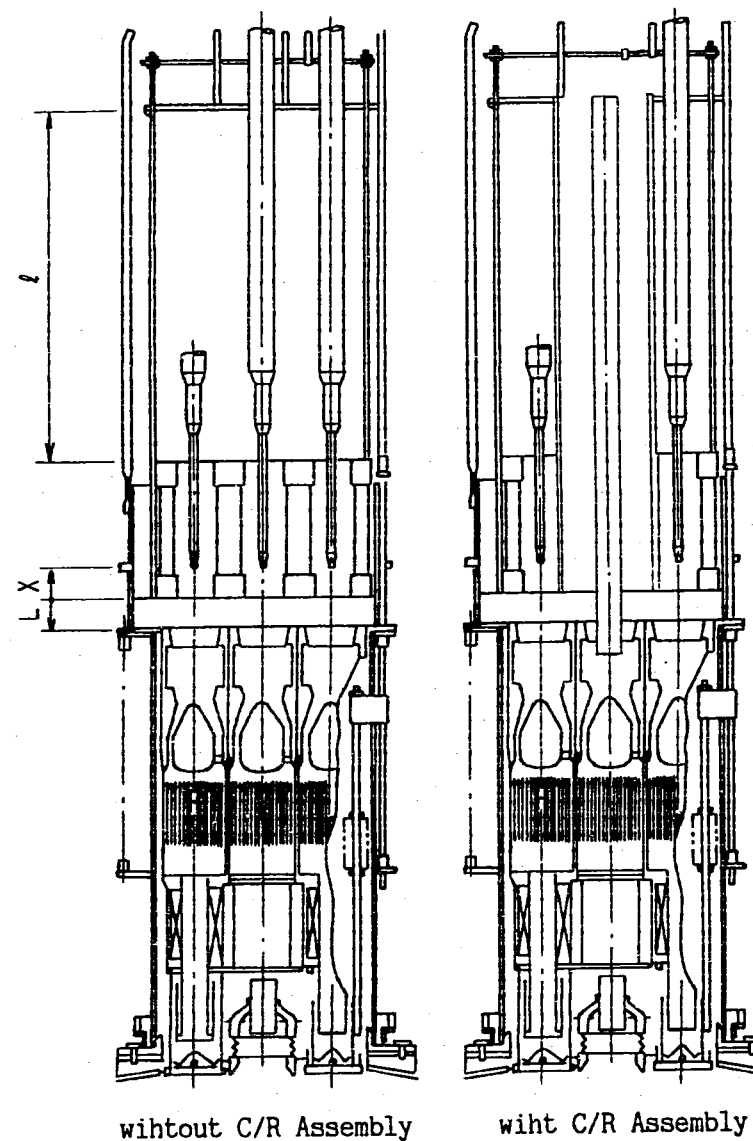
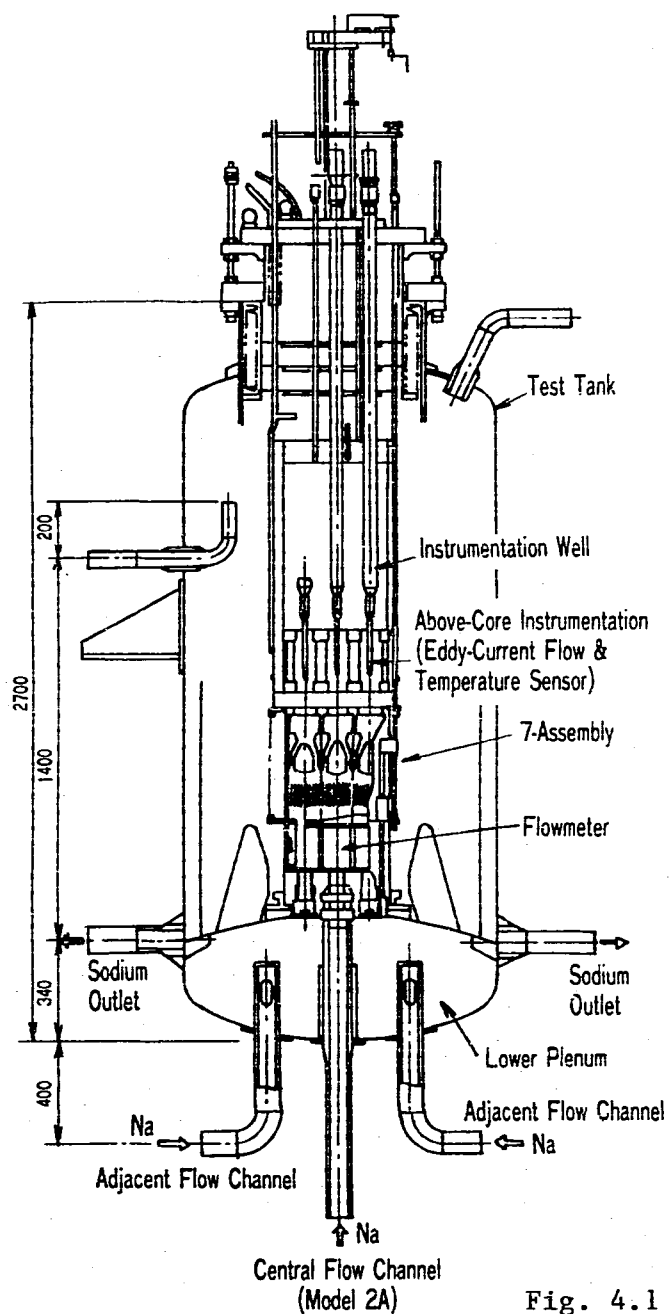


Fig. 4.1 Schema of 7 Sub-Assemblies Mock-Up Test for MONJU

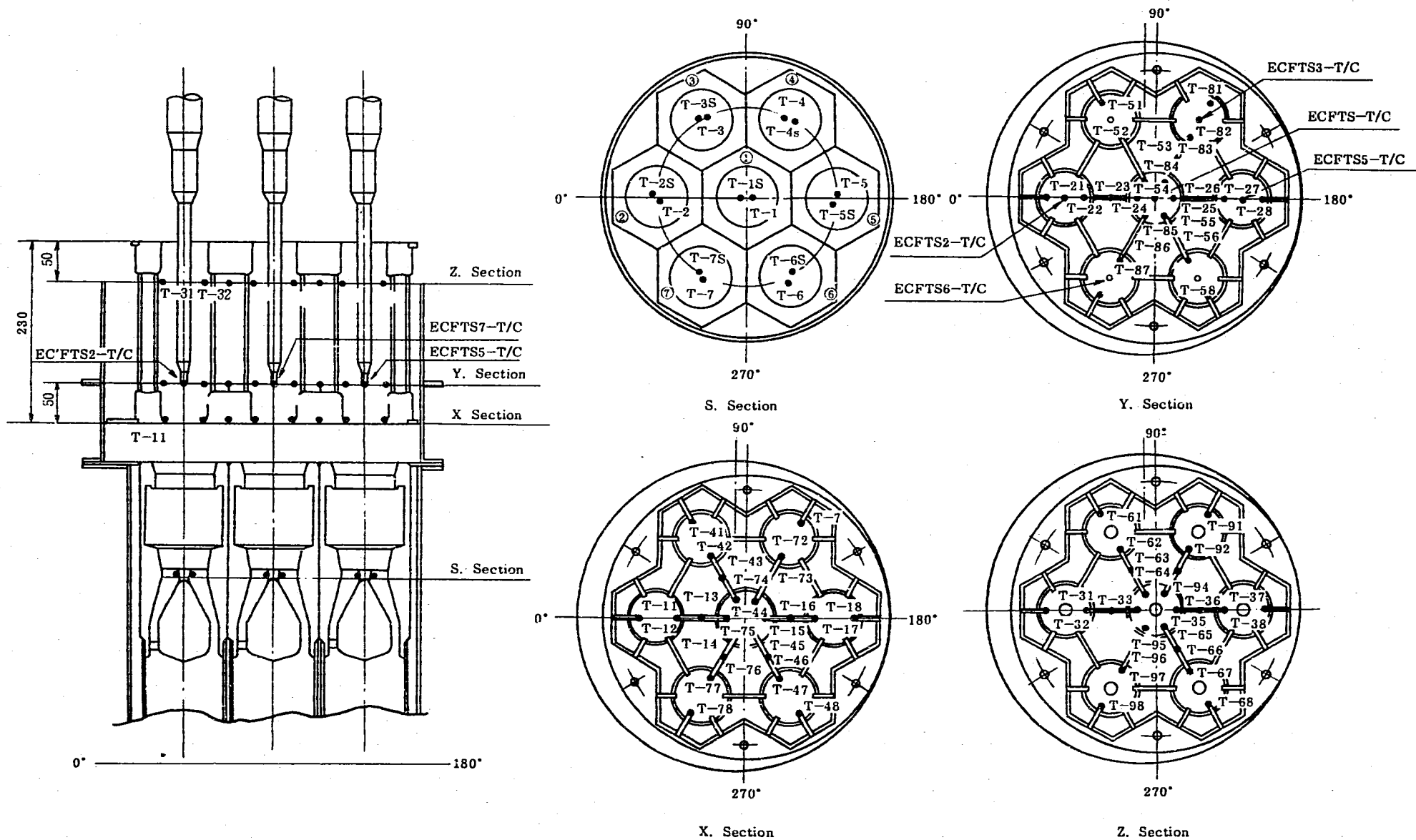


Fig.4.2 Temperature Instrumentation Position in the Test Section without Control Rod Assmbly

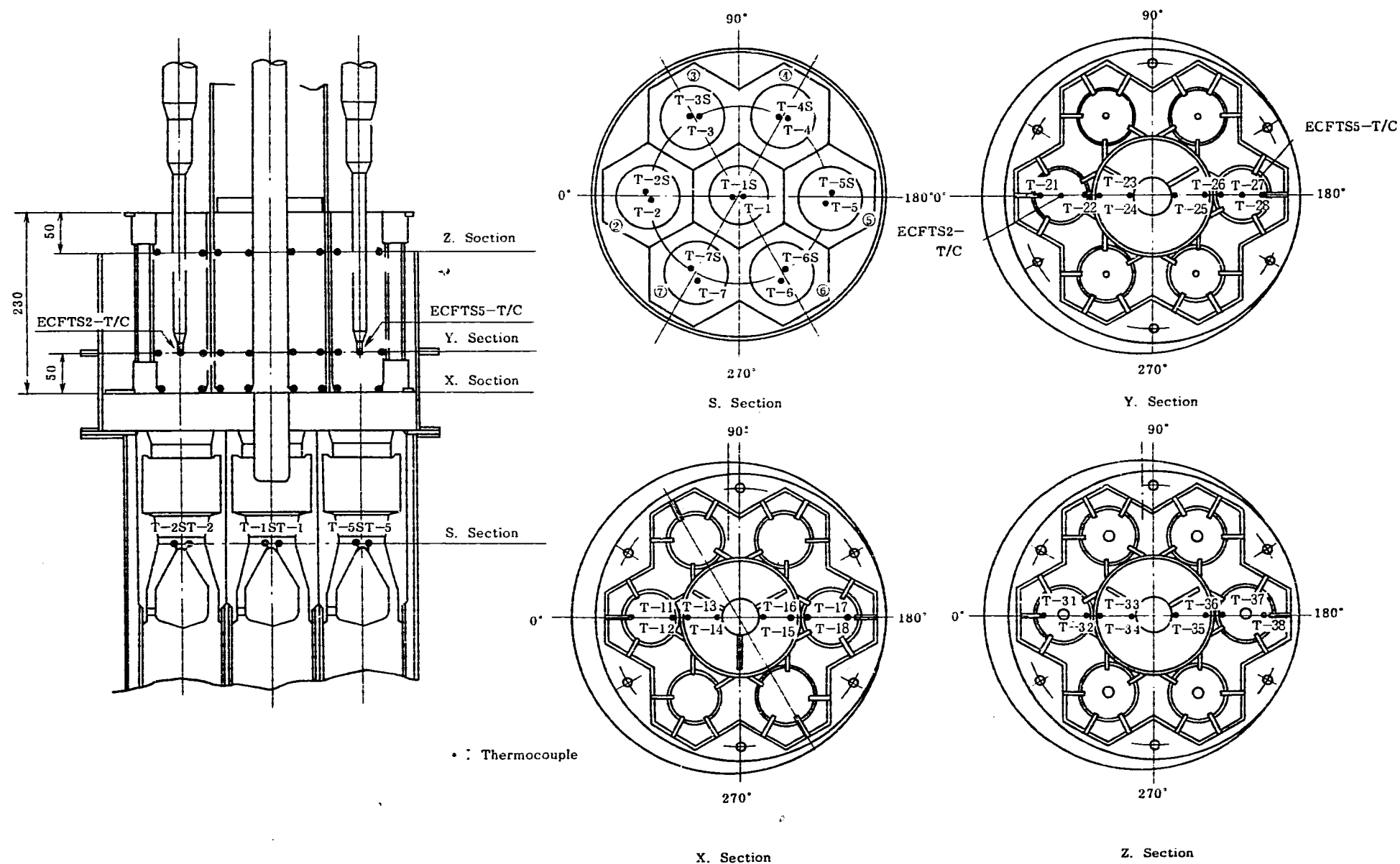


Fig.4.3 Temperature Instrumentation Position in the Test Section with Control Rod Assembly

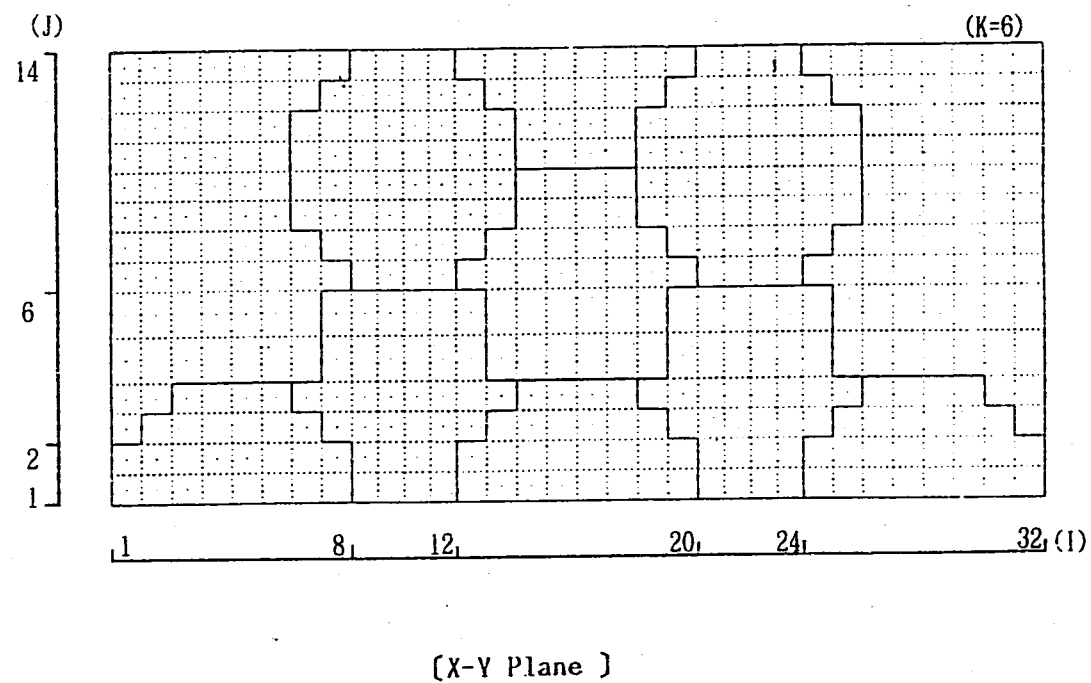
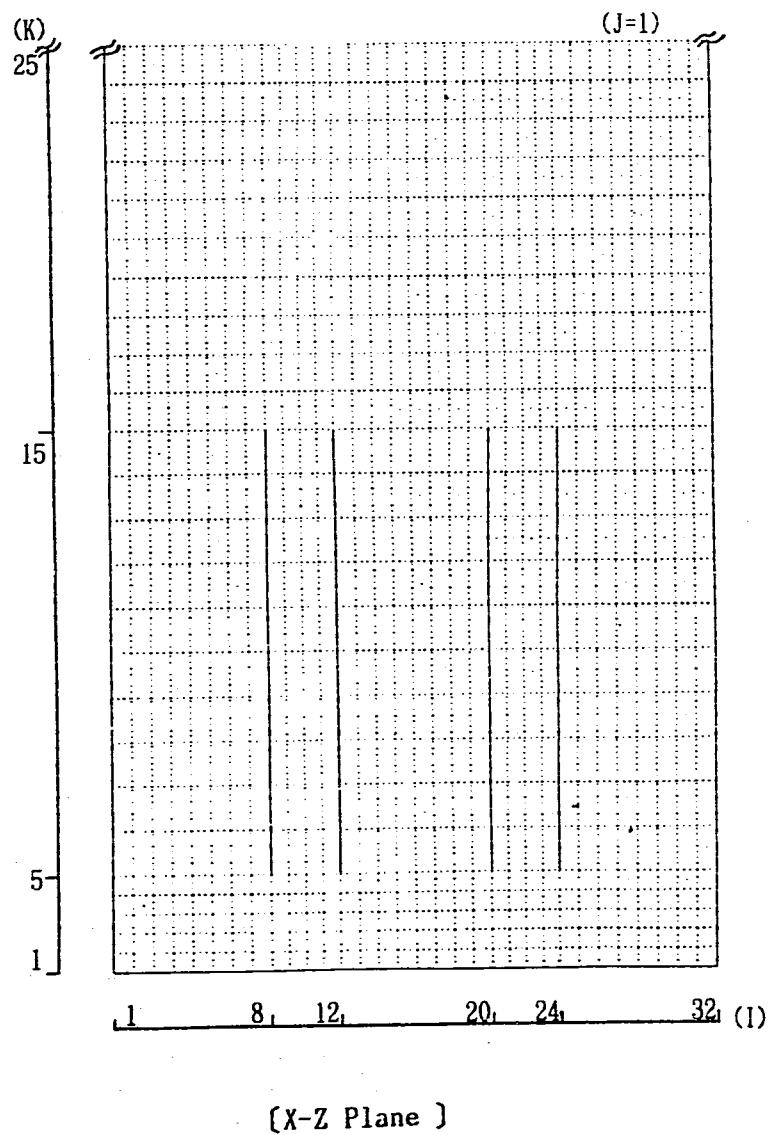
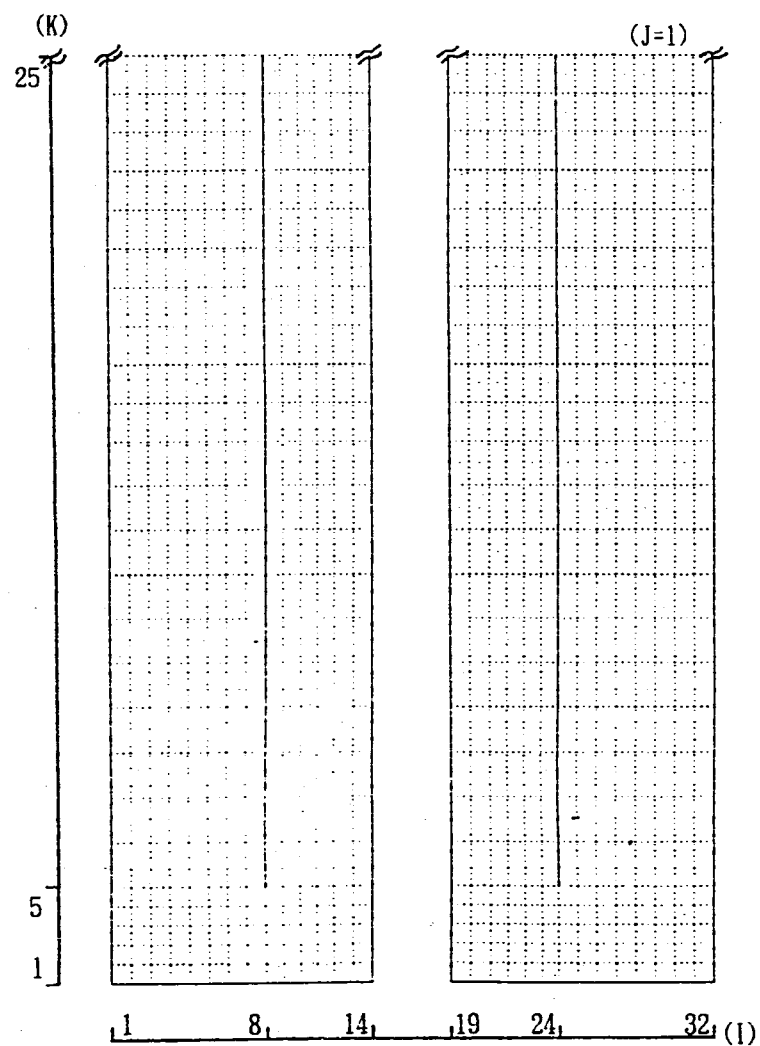
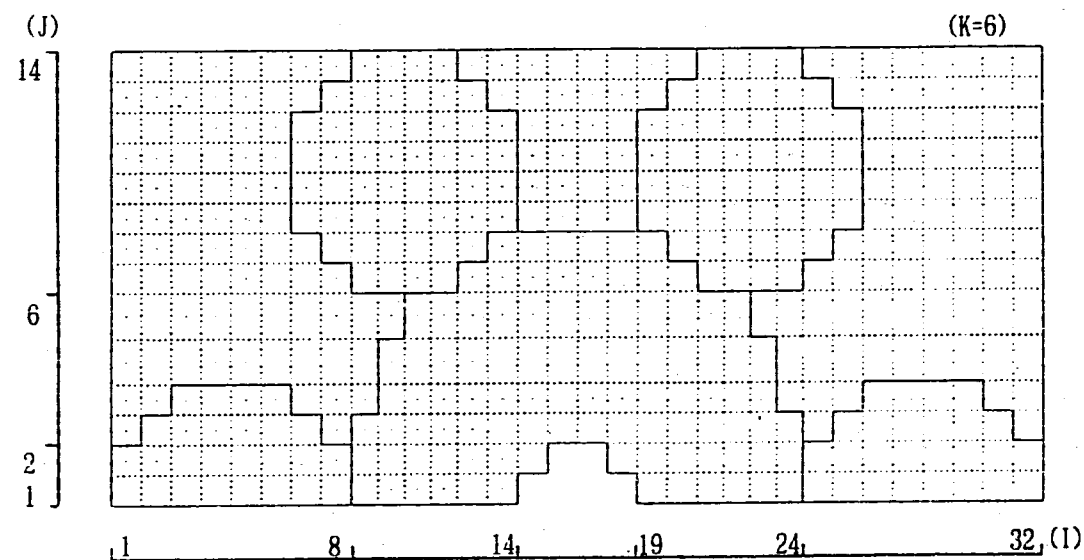


Fig. 4.4 Mesh Arrangement for the Analytical Region without C/R Assembly

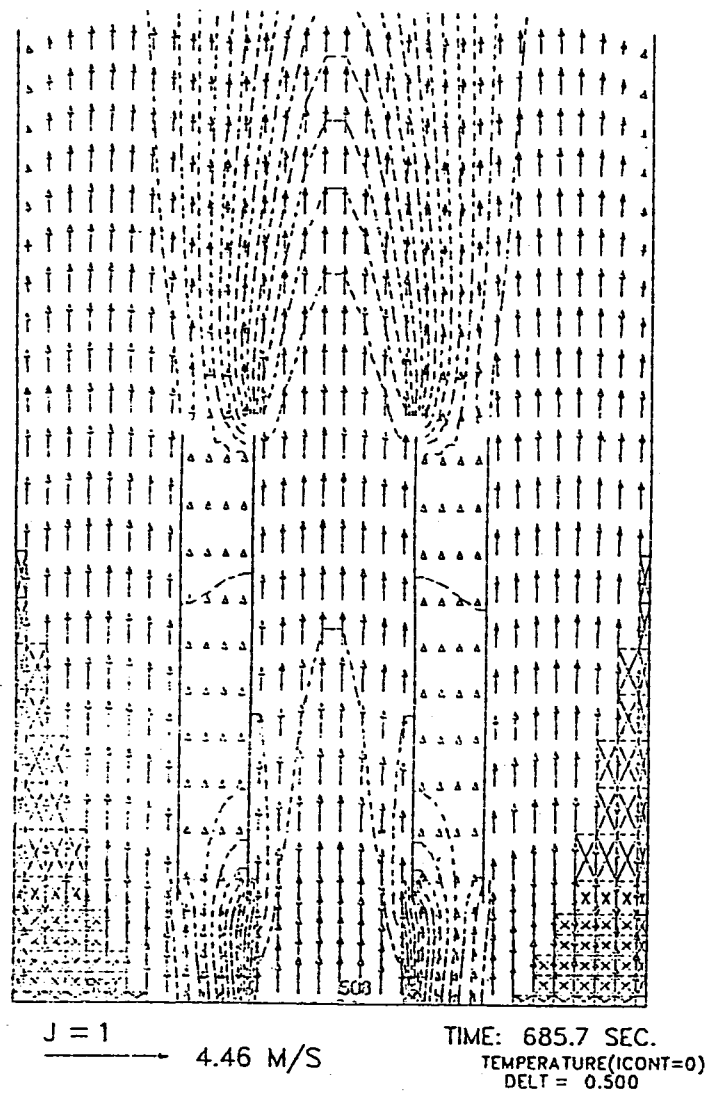


[X-Z Plane]

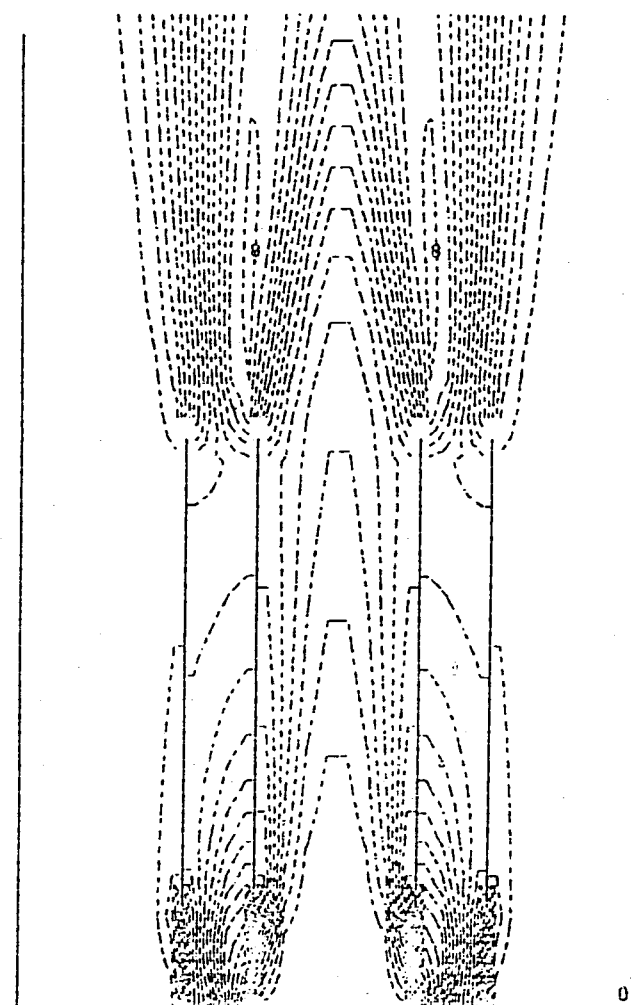


[X-Y Plane]

Fig. 4.5 Mesh Arrangement for the Analytical Region with C/C Assembly

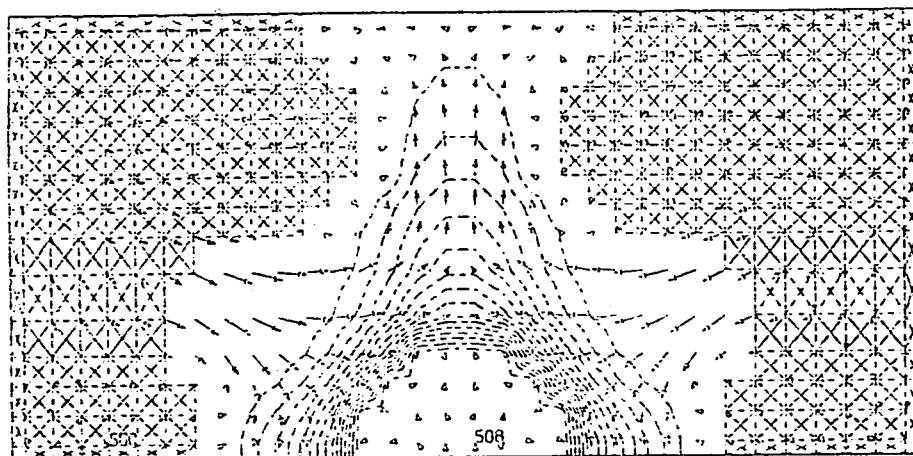


[Mean Temperature and Velocity Field ]



[Temperature Fluctuation Field ]

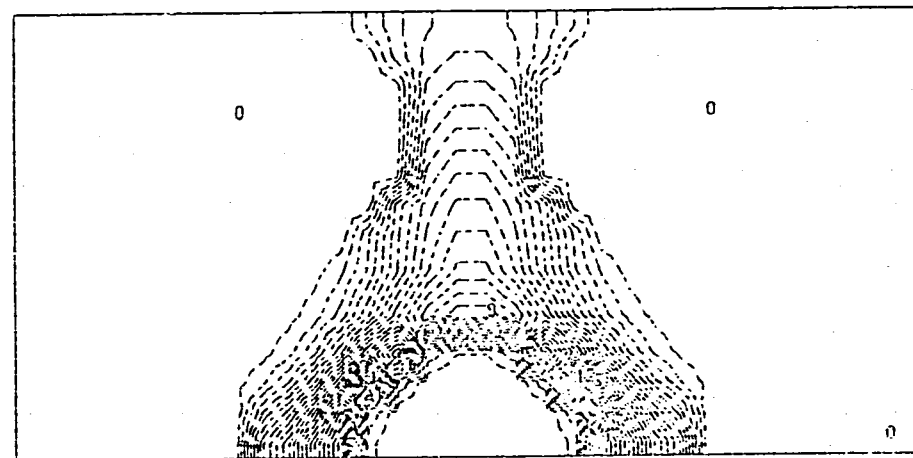
Fig. 4.6 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature Fluctuation Distribution for X-Z Plane (J=1) under  $\beta=1.0$  of Normal Configuration (without C/R Assembly)



$K = 1$  → 1.35 M/S

TIME: 685.7 SEC.  
TEMPERATURE(ICONT=0)  
DELT = 0.500

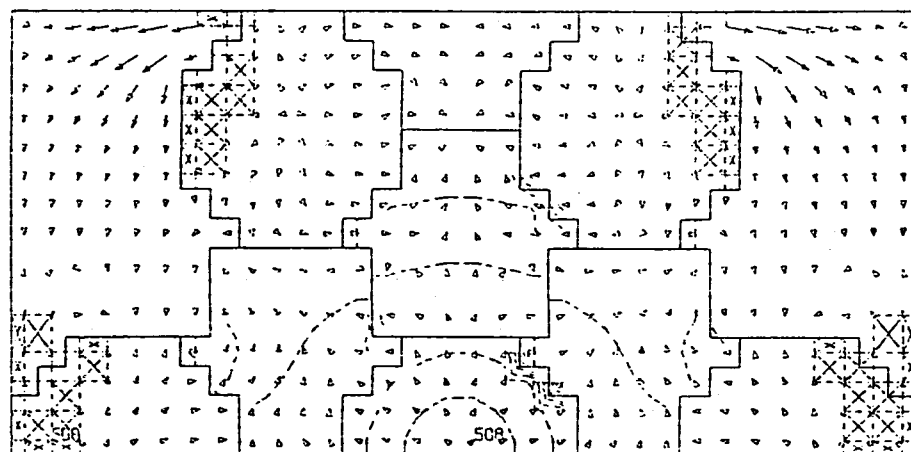
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 685.7 SEC.  $K = 1$

[Temperature Fluctuation Field]

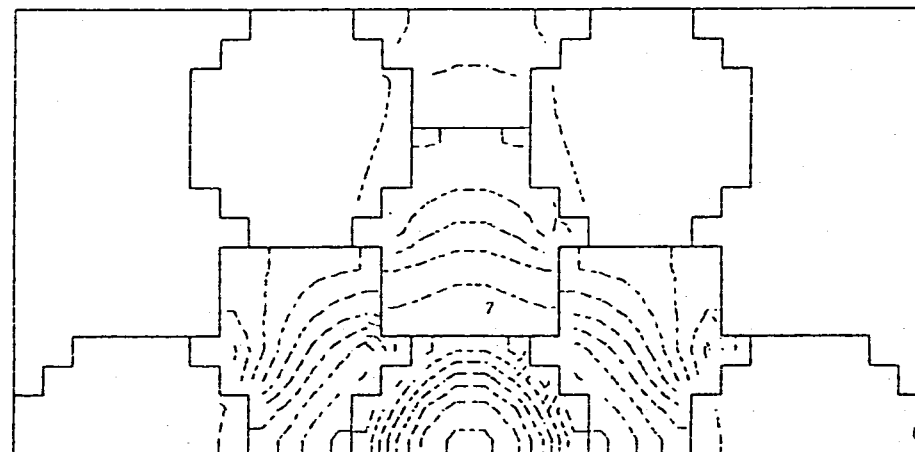
Fig. 4.7 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature Fluctuation Distribution for Various X-Y Planes under  $\beta=1.0$  of Normal Configuration without C/R Assembly (S/A Outlet Plane)



$K = 8 \rightarrow 0.31 \text{ M/S}$

TIME: 685.7 SEC.  
TEMPERATURE(ICONI=0)  
DELT = 0.500

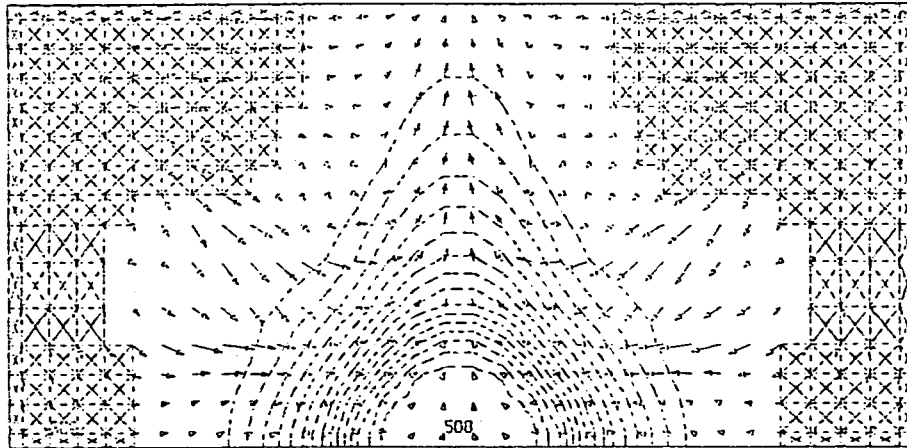
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 685.7 SEC.  $K = 8$

[Temperature Fluctuation Field]

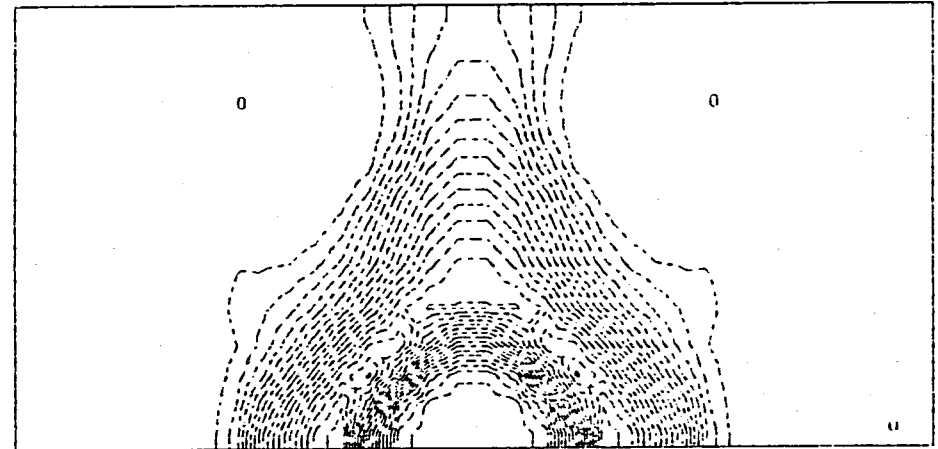
Fig. 4.7 (Continued, Instrumentation Well Top Plane)



K = 5 → 0.66 M/S

TIME: 685.7 SEC.  
TEMPERATURE(ICONF=0)  
DELTA = 0.500

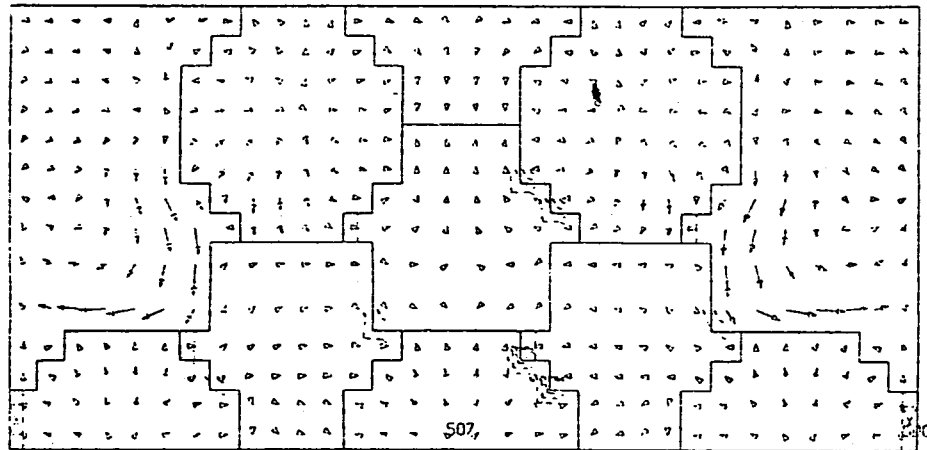
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 685.7 SEC. K = 5

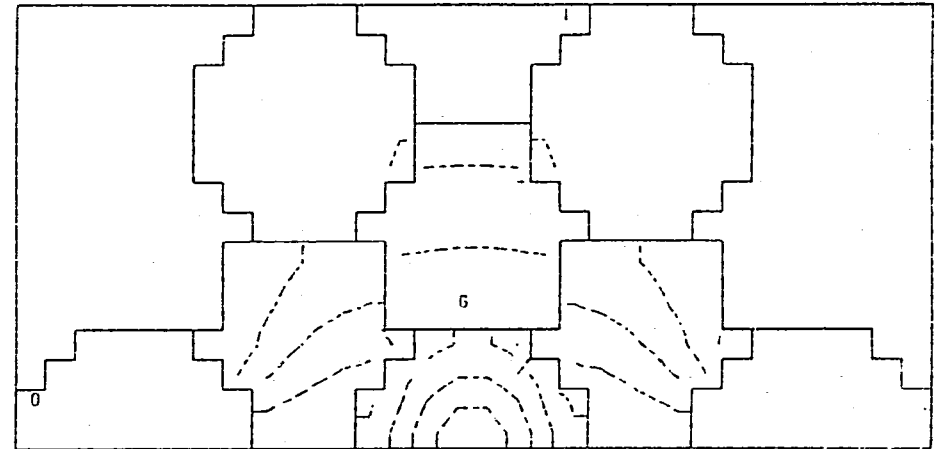
[Temperature Fluctuation Field]

Fig. 4.7 (Continued, Flow Guide Bottom Plane)



K = 13  
 $9.80 \times 10^{-2}$  M/S  
 TIME: 685.7 SEC.  
 TEMPERATURE(ICOHT=0)  
 DELT = 0.500

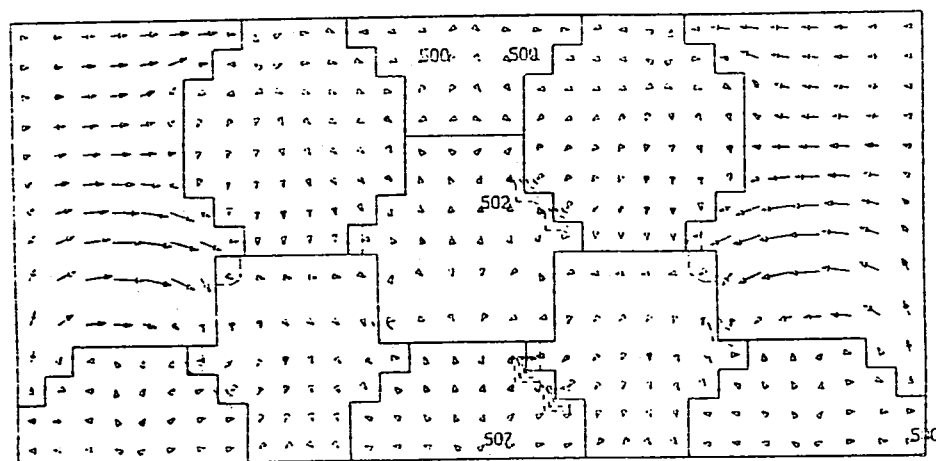
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 685.7 SEC. K = 13

[Temperature Fluctuation Field]

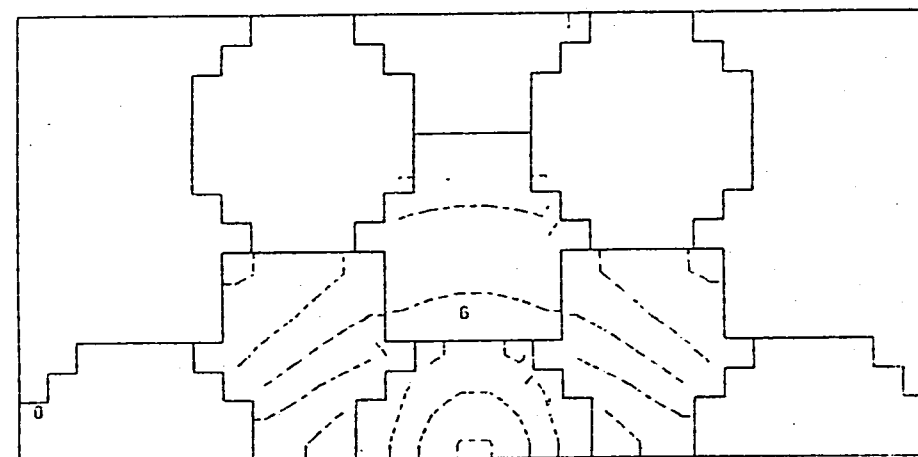
Fig. 4.7 (Continued, Flow Guide Middle Plane)



$K = 15$   
 $\longrightarrow 0.53 \text{ M/S}$

TIME: 685.7 SEC.  
 TEMPERATURE(ICONT=0)  
 DELT = 0.500

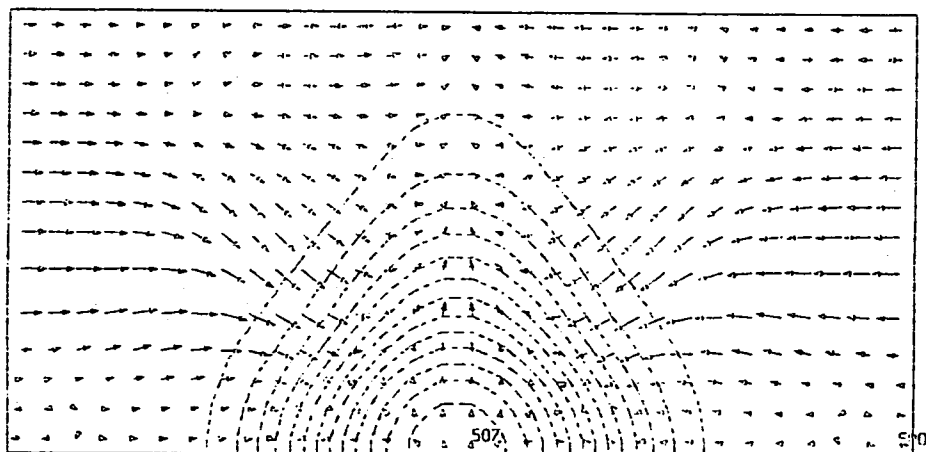
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 685.7 SEC.  $K = 15$

[Temperature Fluctuation Field]

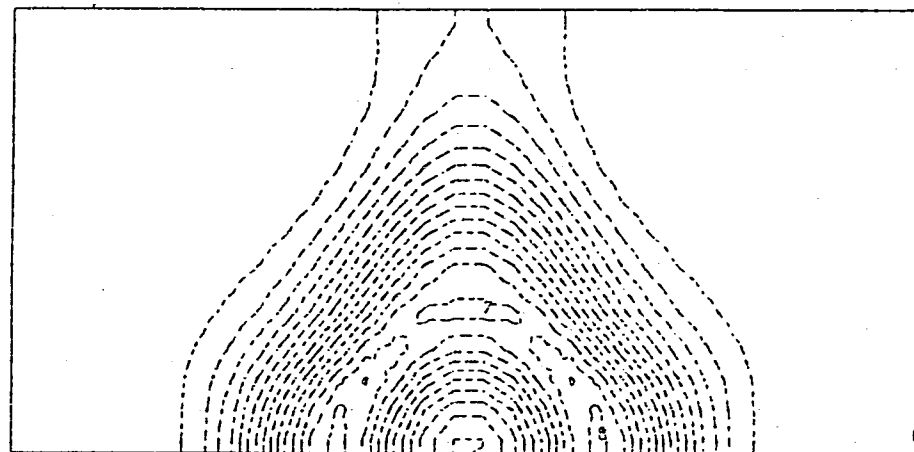
Fig. 4.7 (Continued, Flow Guide Top Plane)



$K = 20$   
→ 0.49 M/S

TIME: 685.7 SEC.  
TEMPERATURE(ICONT=0)  
DELT = 0.500

[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 685.7 SEC.  $K = 20$

[Temperature Fluctuation Field]

Fig. 4.7 (Continued, Flow Guide Upper Plane)

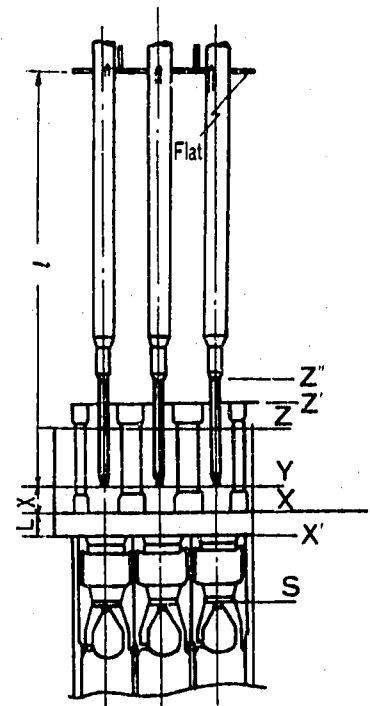
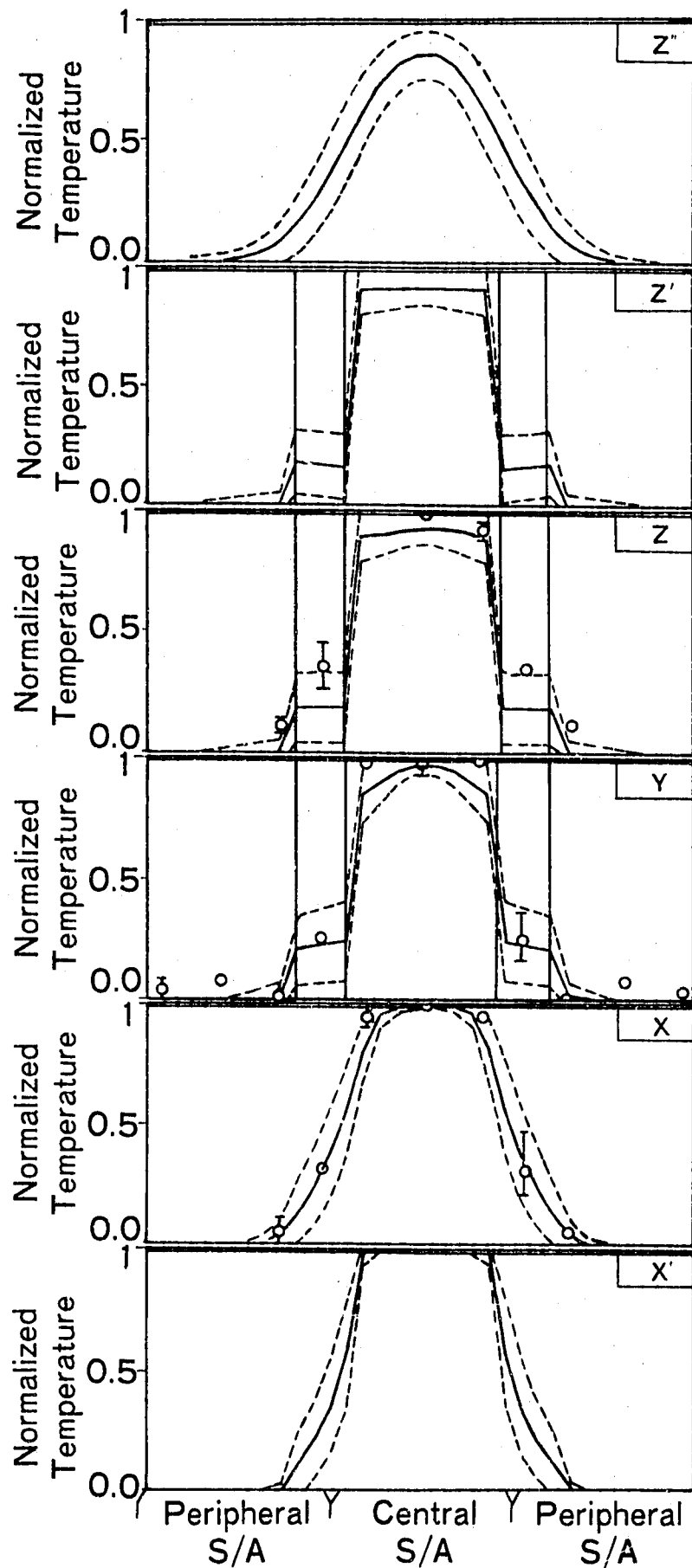


Fig. 4.8 Radial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions for Various Axial Levels under  $\beta=1.0$  of Normal Configuration without C/R Assembly

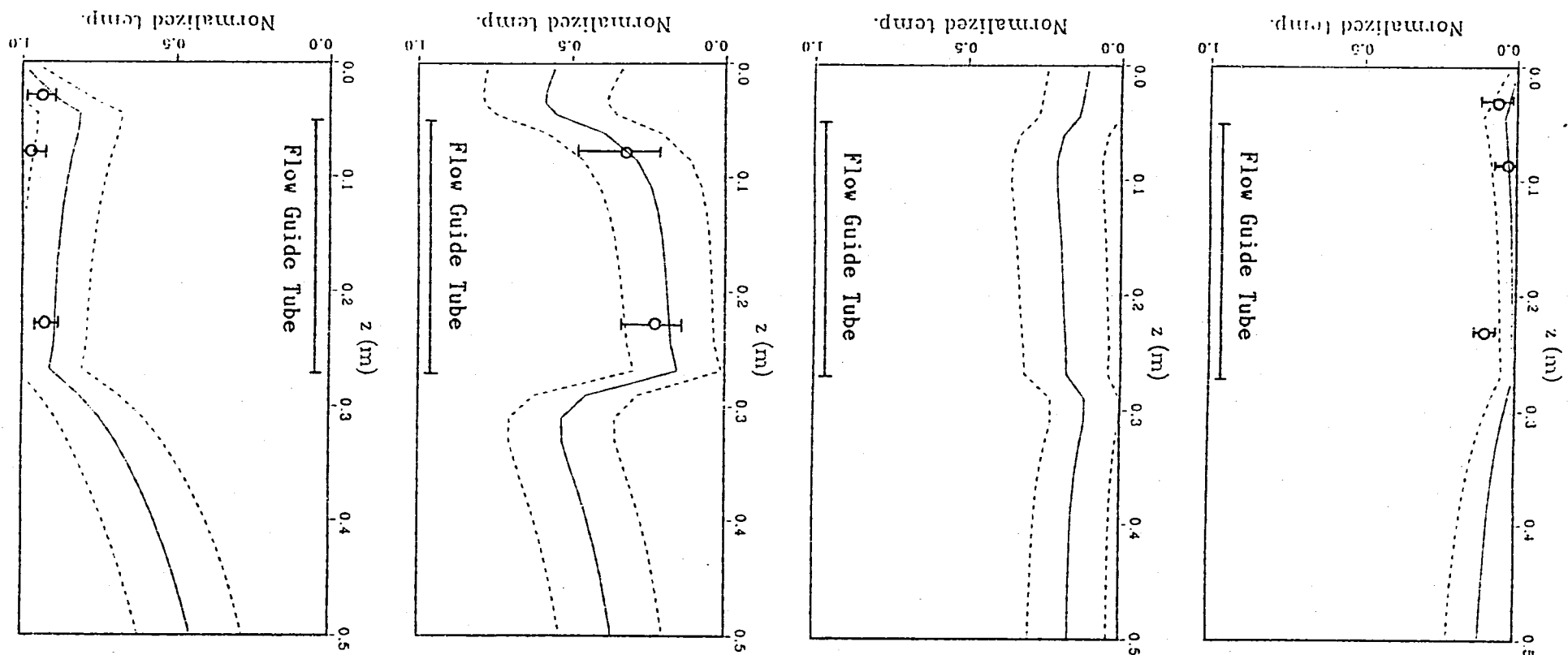
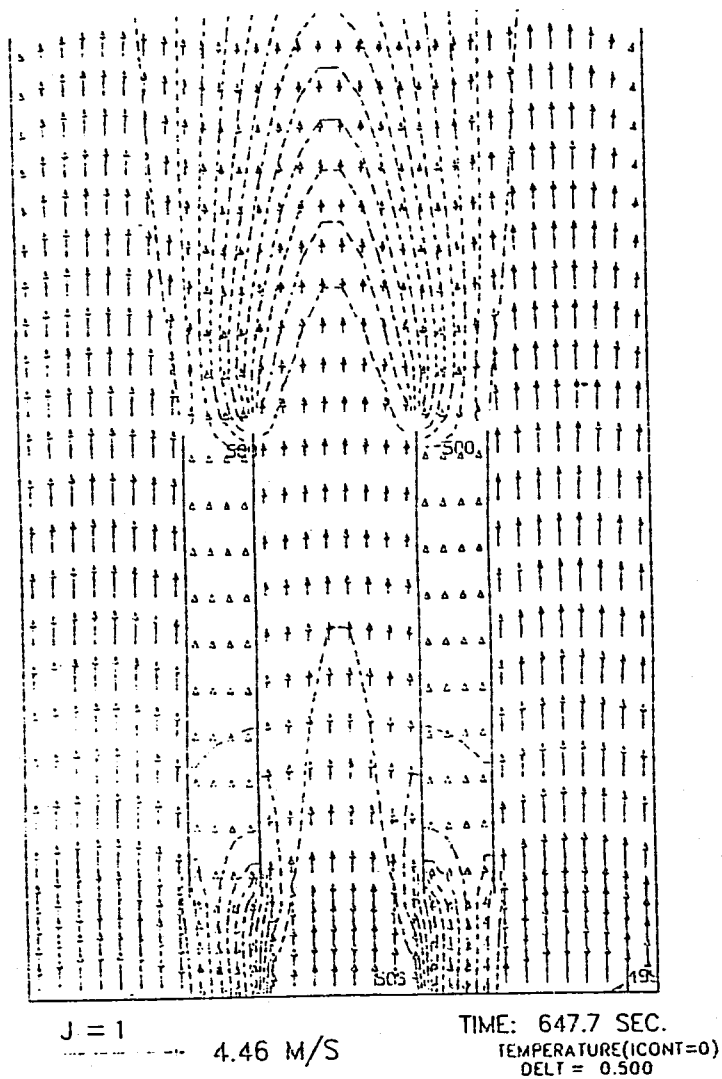
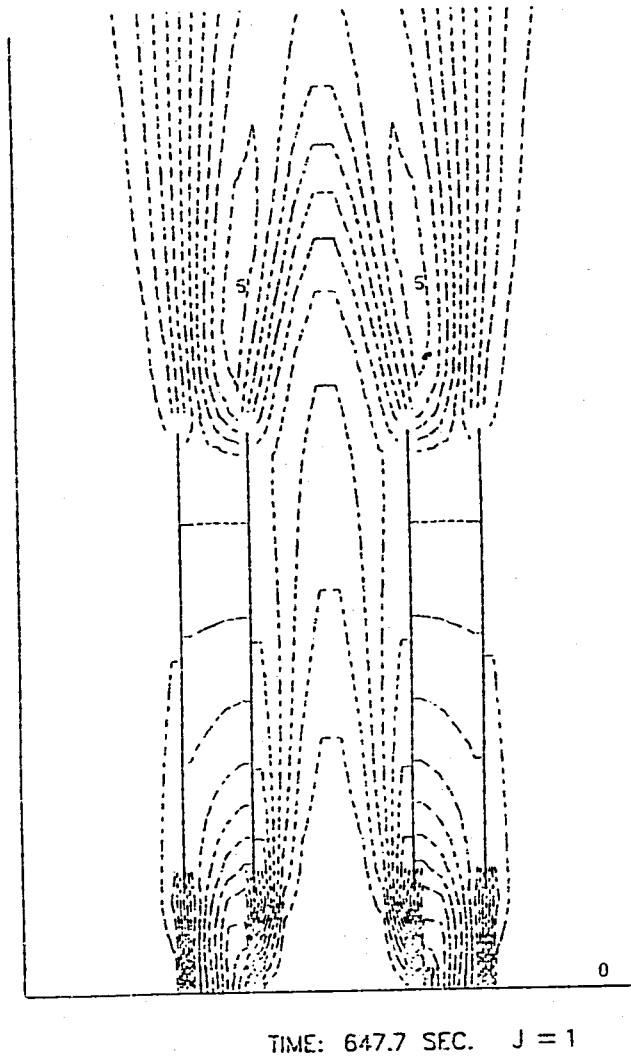


Fig. 4.9 Axial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions for Various Radial Levels under  $\beta=1.0$  of Normal Configuration without C/R Assembly

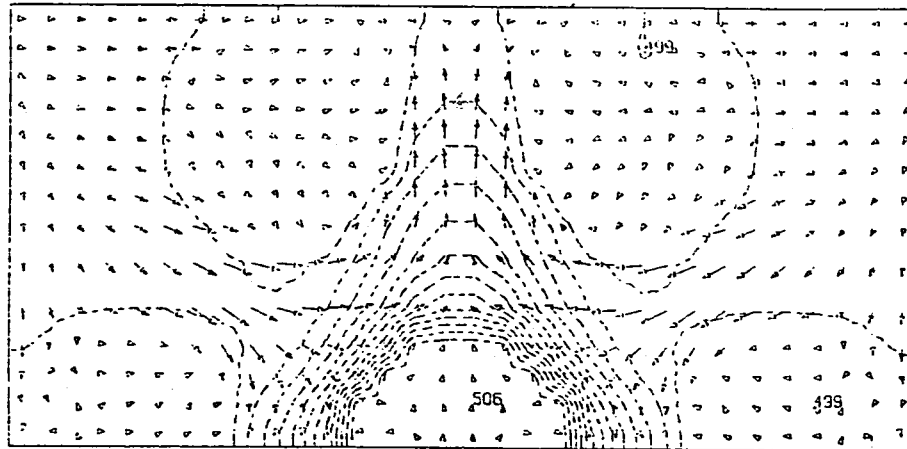


[Mean Temperature and Velocity Field]

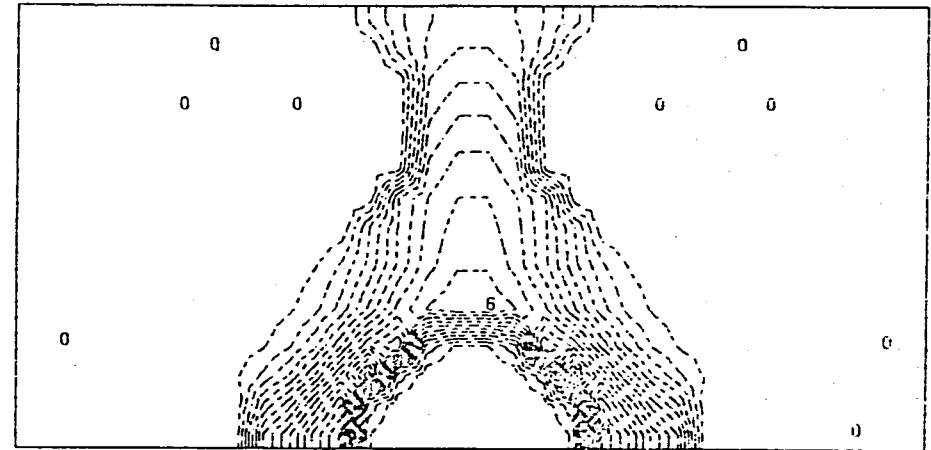


[Temperature Fluctuation Field]

Fig. 4.10 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature Fluctuation Distribution for X-Z Plane (J=1) under  $\beta=0.6$  of Normal Configuration (without C/R Assembly)

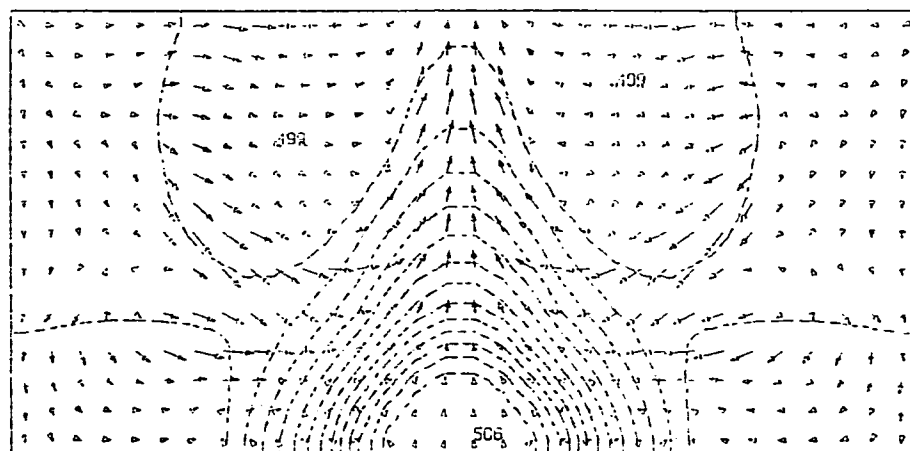


[Mean Temperature and Velocity Field]



[Temperature Fluctuation Field]

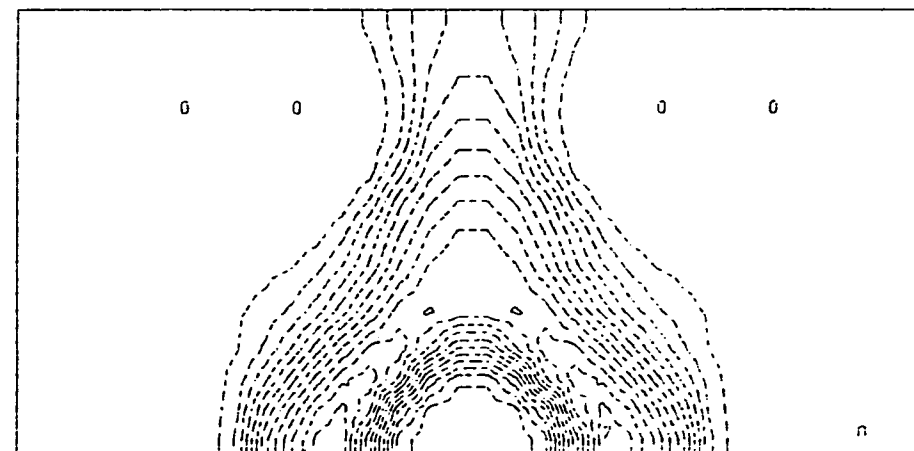
Fig. 4.11 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature Fluctuation Distribution for Various X/Y Planes under  $\beta=0.6$  of Normal Configuration without C/R Assembly (S/A Outlet Plane)



$K = 5$  → 0.52 M/S

TIME: 647.7 SEC.  
TEMPERATURE(ICONF=0)  
DELT = 0.500

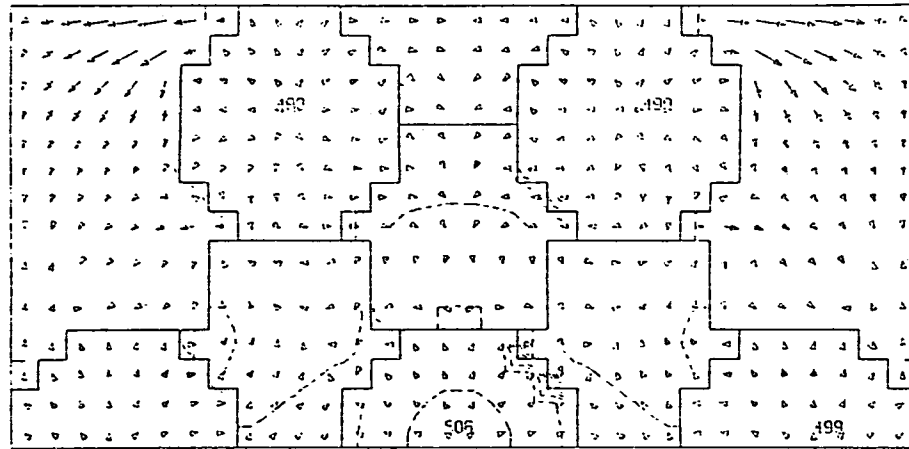
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 647.7 SEC.  $K = 5$

[Temperature Fluctuation Field]

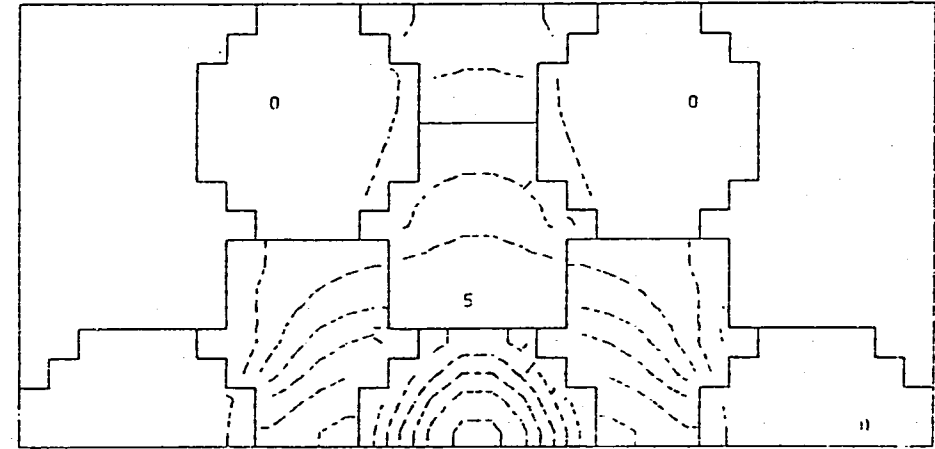
Fig. 4.11 (Continued, Flow Guide Bottom Plane)



K = 8  
 → 0.28 M/S

TIME: 547.7 SEC.  
 TEMPERATURE(ICONT=0)  
 DELT = 0.500

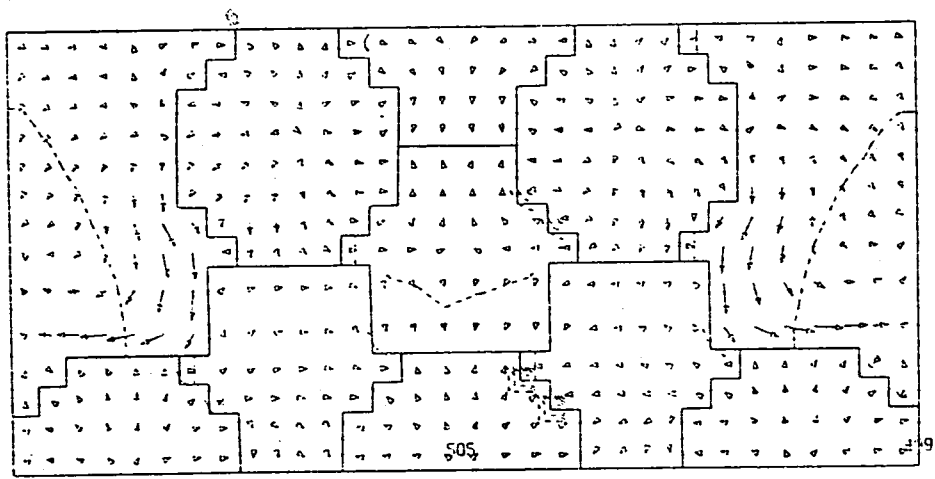
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 647.7 SEC. K = 8

[Temperature Fluctuation Field]

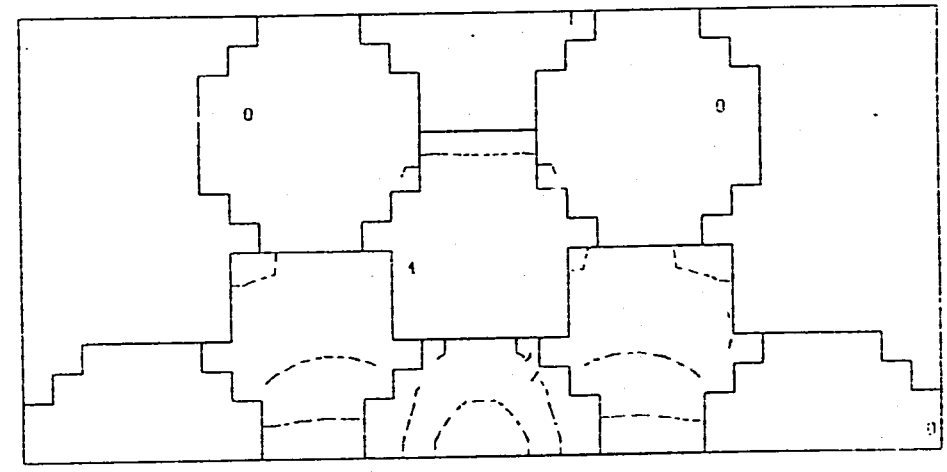
Fig. 4.11 (Continued, Instrumentation Well Top Plane)



K = 13  
→ 0.11 M/S

TIME: 647.7 SEC.  
TEMPERATURE(ICONT=0)  
DELT = 0.500

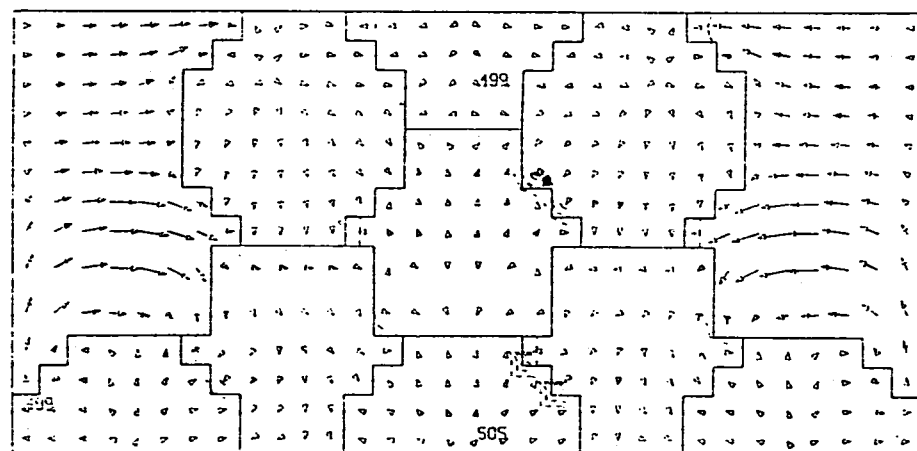
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 647.7 SEC. K = 13

[Temperature Fluctuation Field]

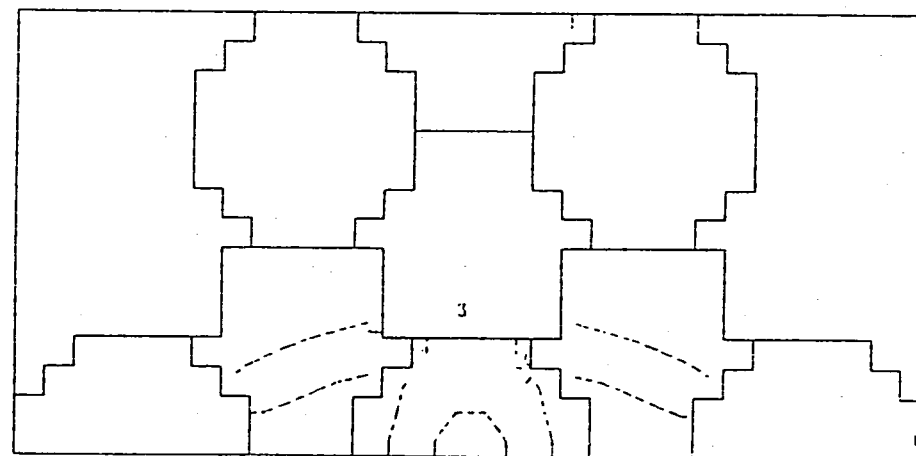
Fig. 4.11 (Continued, Flow Guide Middle Plane)



K = 15  
→ 0.52 M/S

TIME: 647.7 SEC.  
TEMPERATURE(ICON=0)  
DELTA = 0.500

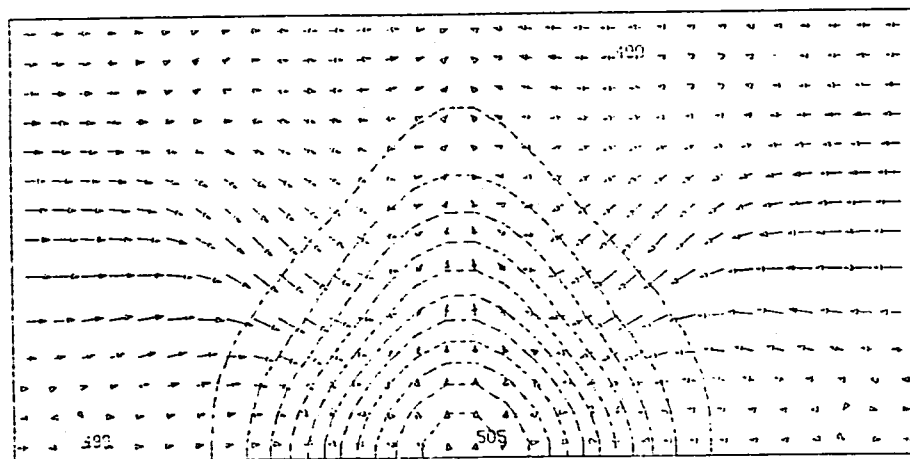
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 647.7 SEC. K = 15

[Temperature Fluctuation Field]

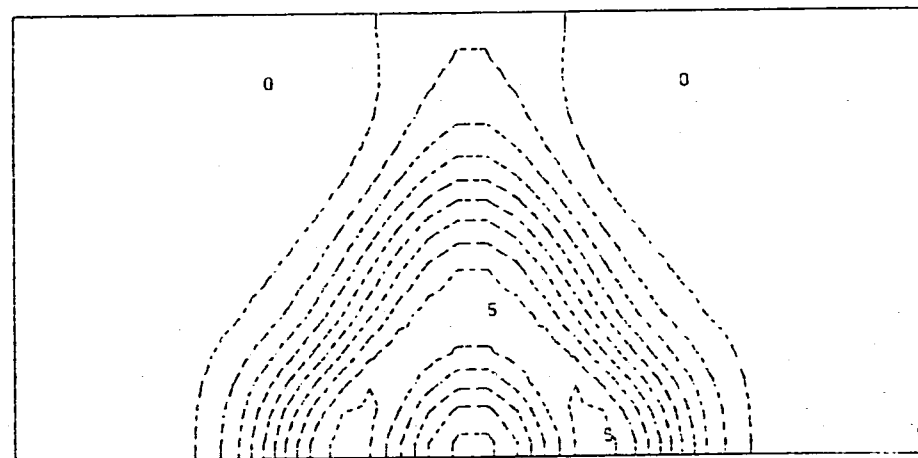
Fig. 4.11 (Continued, Flow Guide Top Plane)



$K = 20$   
 $\rightarrow 0.49 \text{ M/S}$

TIME: 647.7 SEC.  
 TEMPERATURE(ICOHIT=0)  
 DELT = 0.500

[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 647.7 SEC.  $K = 20$

[Temperature Fluctuation Field]

Fig. 4.11 (Continued, Flow Guide Upper Plane)

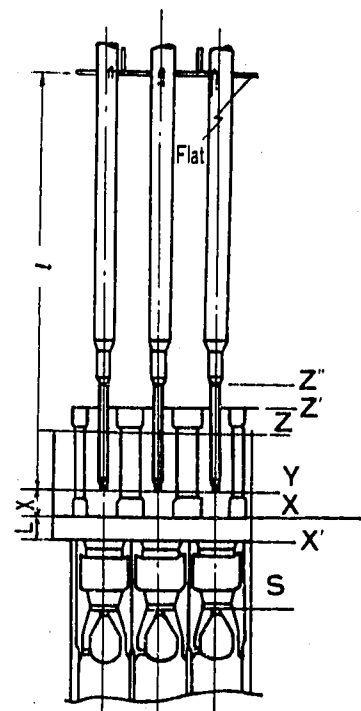
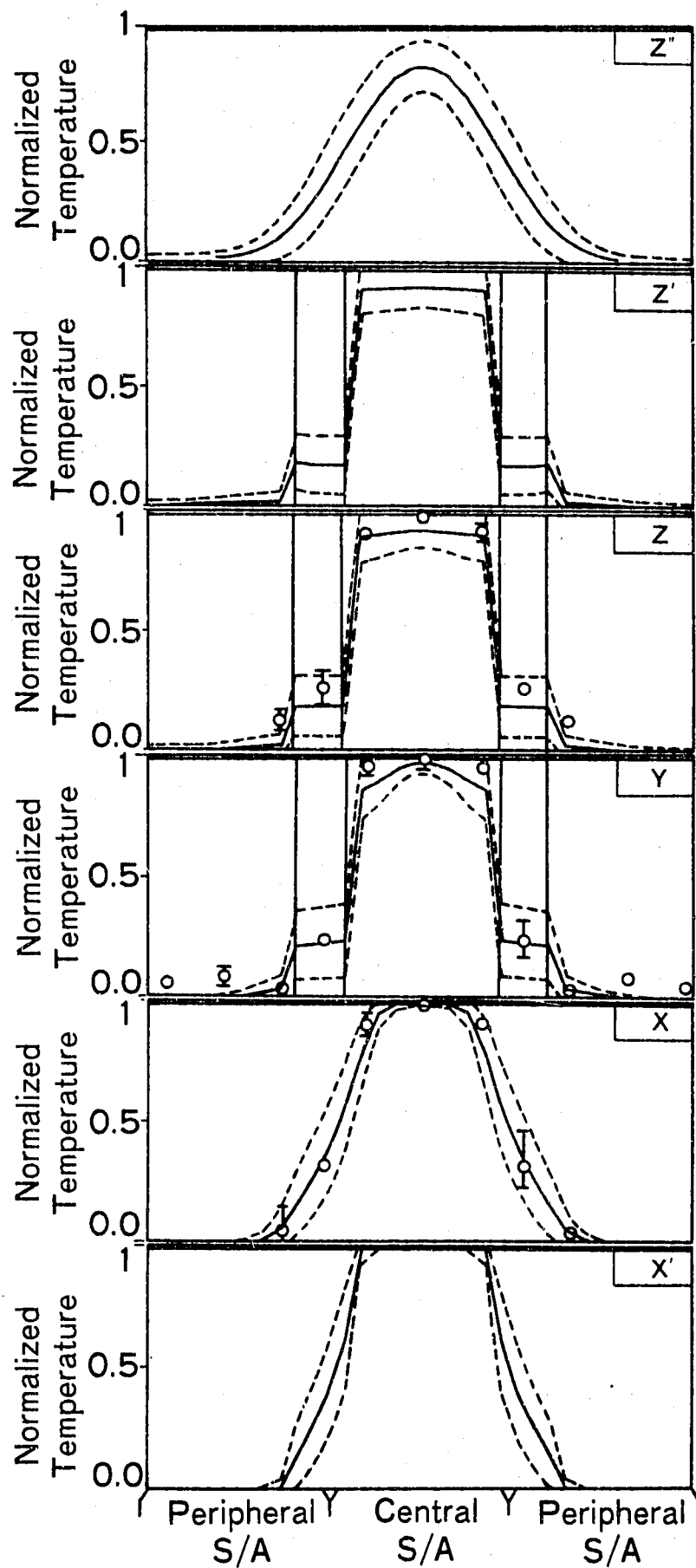


Fig. 4.12 Radial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions for Various Axial Levels under  $\beta=0.6$  of Normal Configuration without C/R Assembly

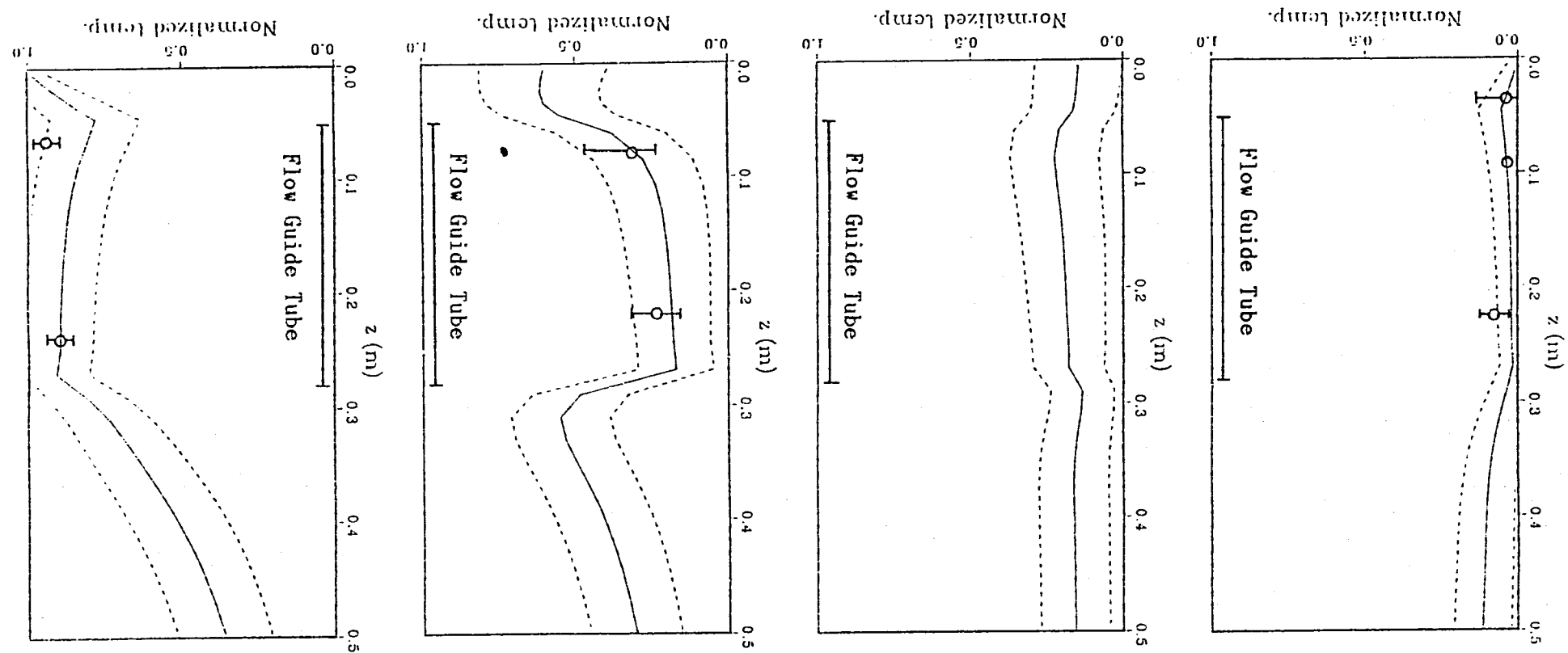
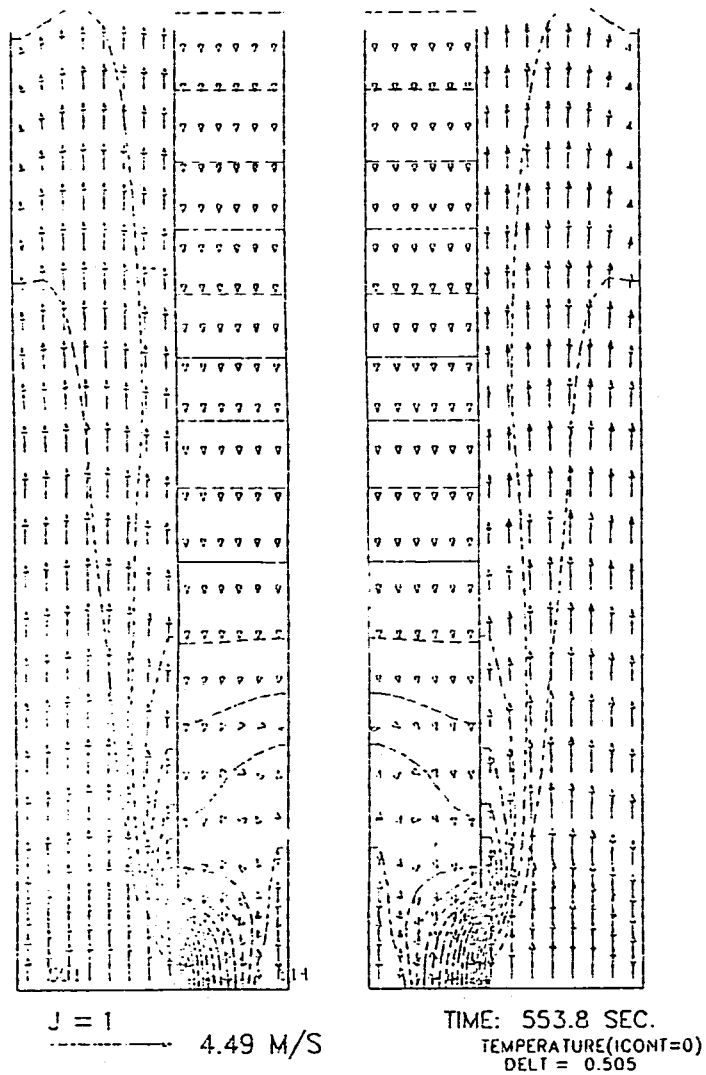
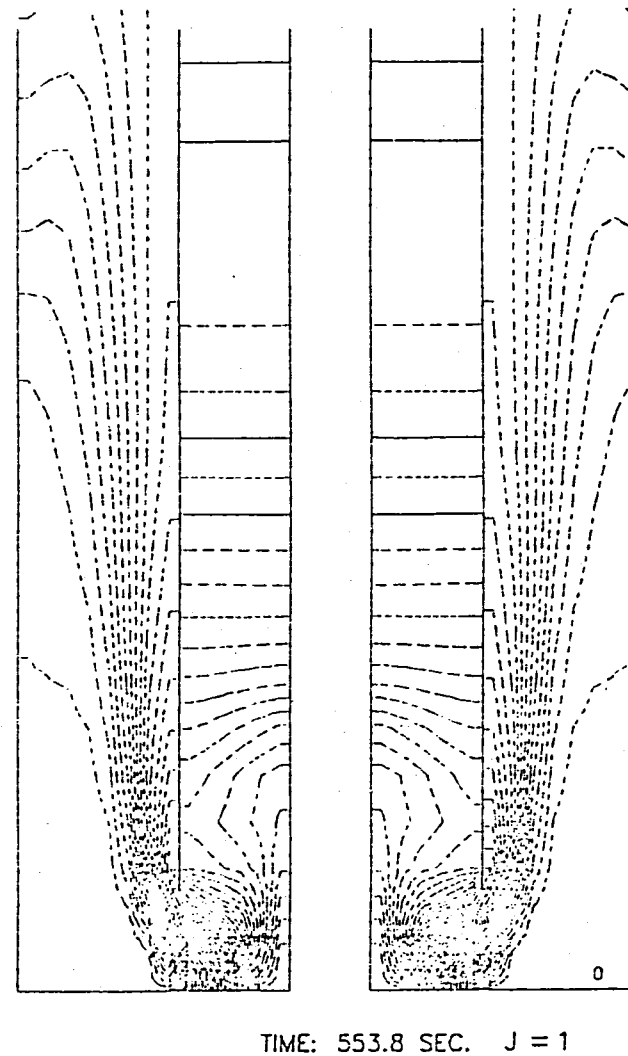


Fig. 4.13 Axial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions for Various Radial Levels under  $\beta=0.6$  of Normal Configuration without C/R Assembly

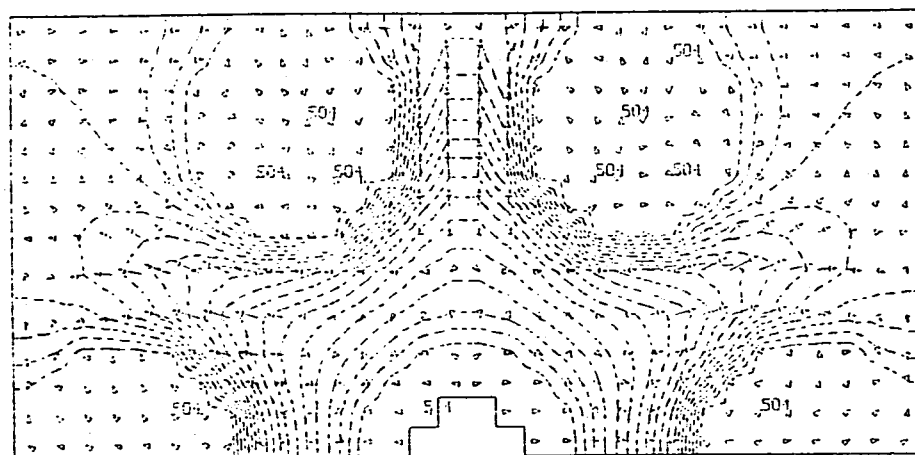


[Mean Temperature and Velocity Field]



[Temperature Fluctuation Field]

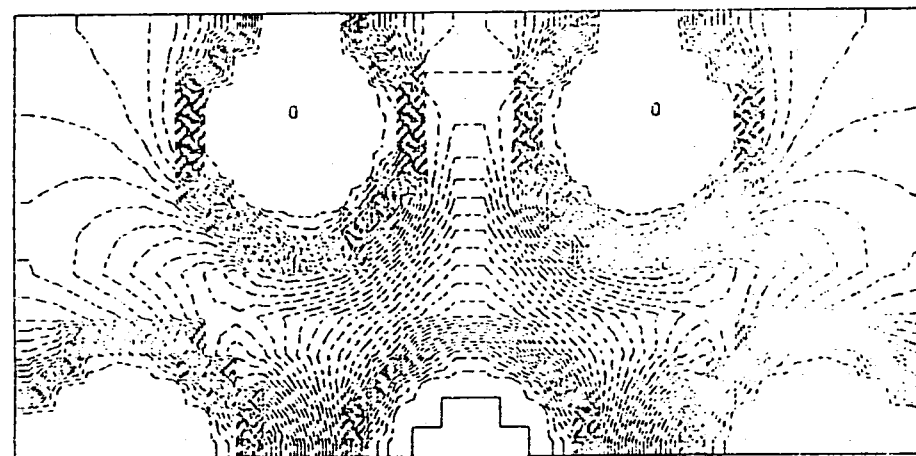
Fig. 4.14 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature Fluctuation Distribution for X-Z Plane (J=1) under  $\beta=0.2$  of Configuration with C/R Assembly



K = 1  
1.49 M/S

TIME: 553.8 SEC.  
TEMPERATURE(ICONT=0)  
DELT = 0.505

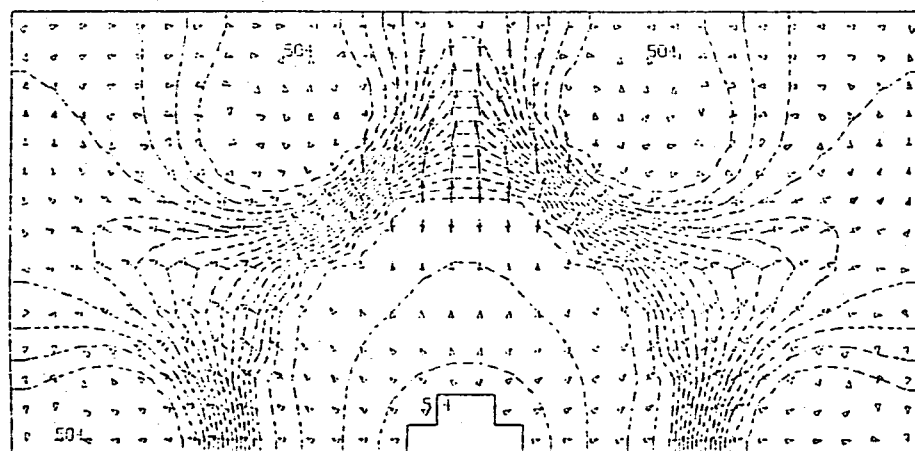
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 553.8 SEC. K = 1

[Temperature Fluctuation Field]

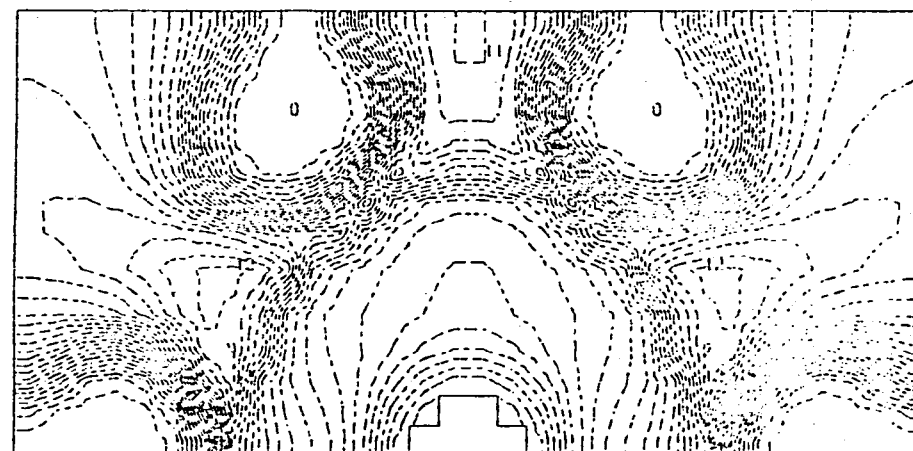
Fig. 4.15 Mean Temperature and Velocity Distribution and Temperature Fluctuation Distribution for Various X/Y Planes under  $\beta=0.2$  of Configuration with C/R Assembly (S/A Outlet Plane)



K = 5  
→ 1.17 M/S

TIME: 553.8 SEC.  
TEMPERATURE(ICONT=0)  
DELT = 0.505

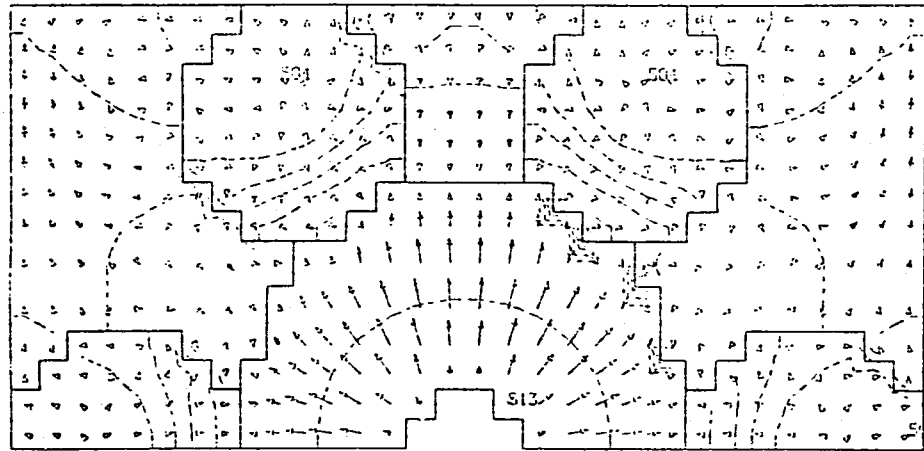
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 553.8 SEC. K = 5

[Temperature Fluctuation Field]

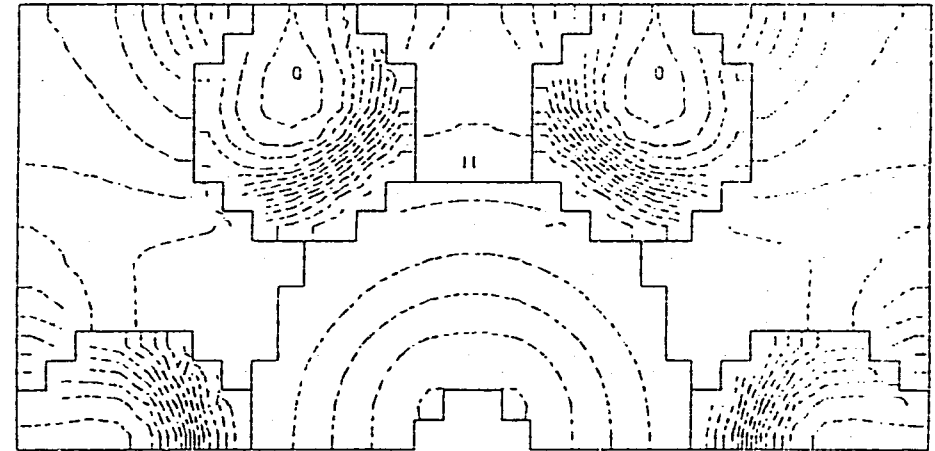
Fig. 4.15 (Continued, Flow Guide Bottom Plane)



$K = 8$   $0.41 \text{ M/S}$

TIME: 553.8 SEC.  
TEMPERATURE(ICONT=0)  
DELT = 0.505

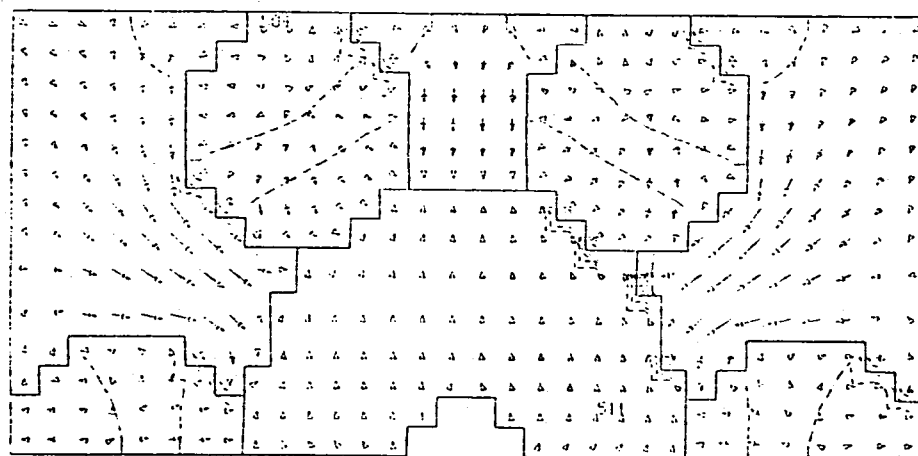
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 553.8 SEC.  $K = 8$

[Temperature Fluctuation Field]

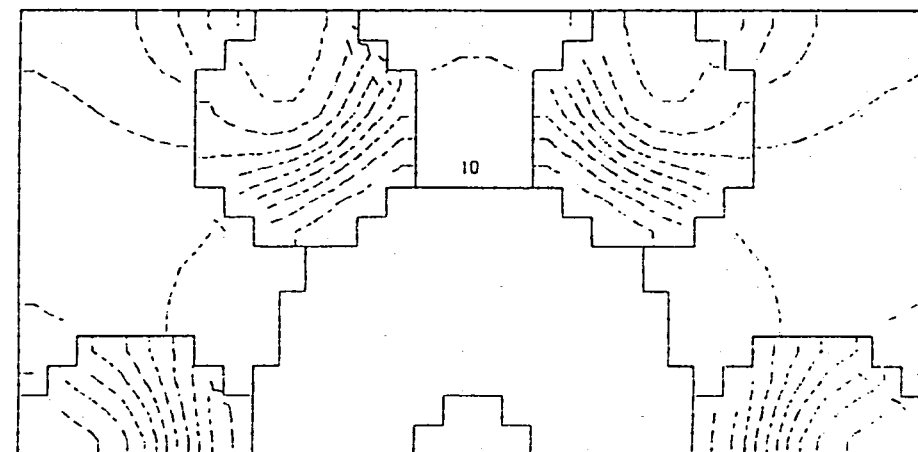
Fig. 4.15 (Continued, Instrumentation Well Top Plane)



$K = 13$   
 → 0.13 M/S

TIME: 553.8 SEC.  
 TEMPERATURE(ICON=0)  
 DELT = 0.505

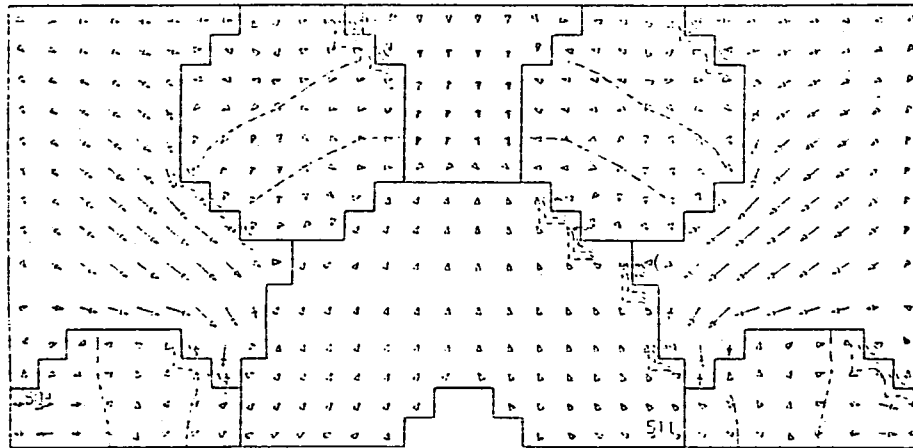
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 553.8 SEC.  $K = 13$

[Temperature Fluctuation Field]

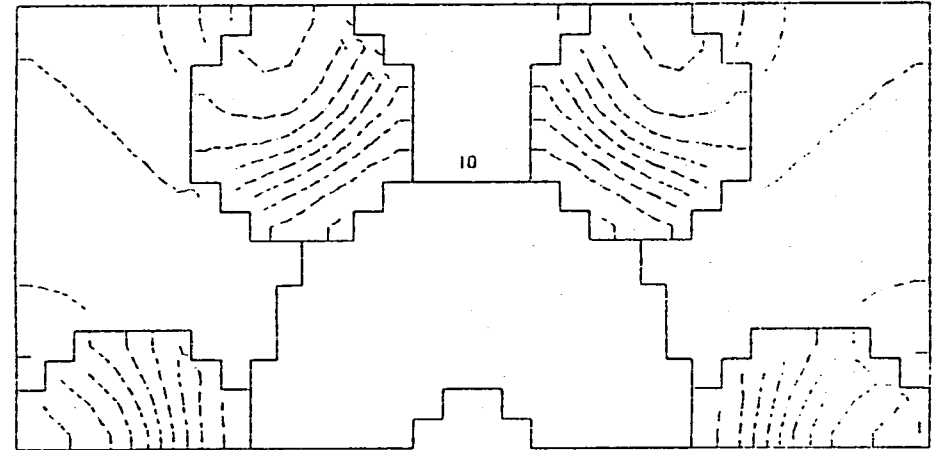
Fig. 4.15 (Continued, Flow Guide Middle Plane)



K = 15  
 → 0.25 M/S

TIME: 553.8 SEC.  
 TEMPERATURE(ICONT=0)  
 DELT = 0.505

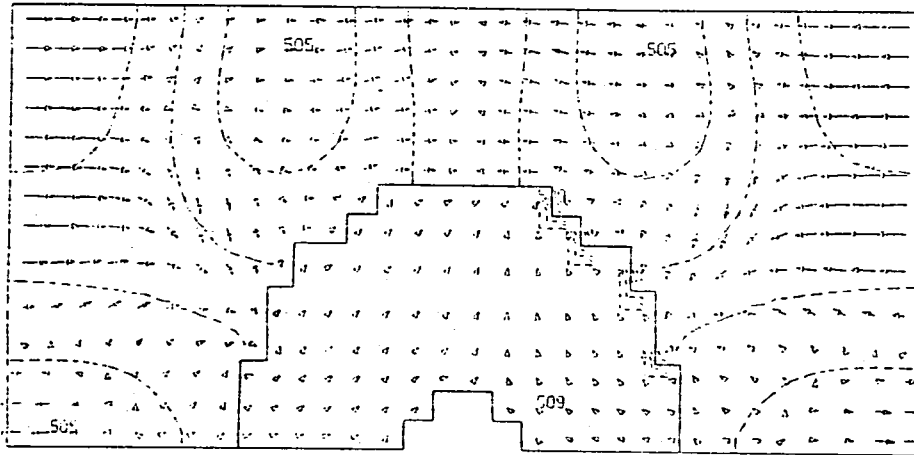
[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 553.8 SEC. K = 15

[Temperature Fluctuation Field]

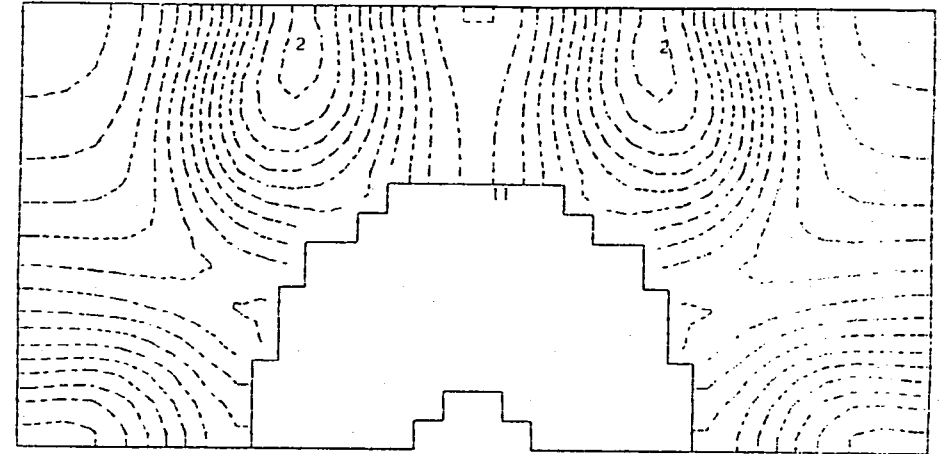
Fig. 4.15 (Continued, Flow Guide Top Plane)



$K = 20$   
 $\rightarrow 0.29 \text{ M/S}$

TIME: 553.8 SEC.  
 TEMPERATURE(ICONT=0)  
 DELT = 0.505

[Mean Temperature and Velocity Field]



TIME: 553.8 SEC.  $K = 20$

[Temperature Fluctuation Field]

Fig. 4.15 (Continued, Flow Guide Upper Plane)

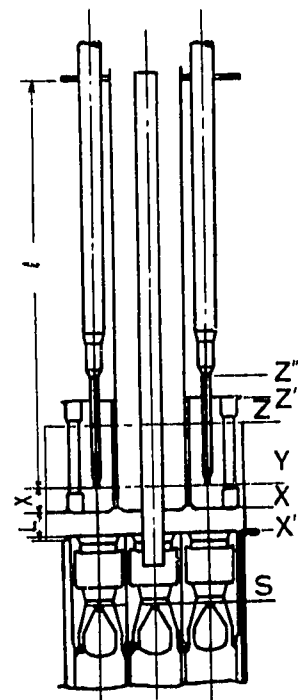
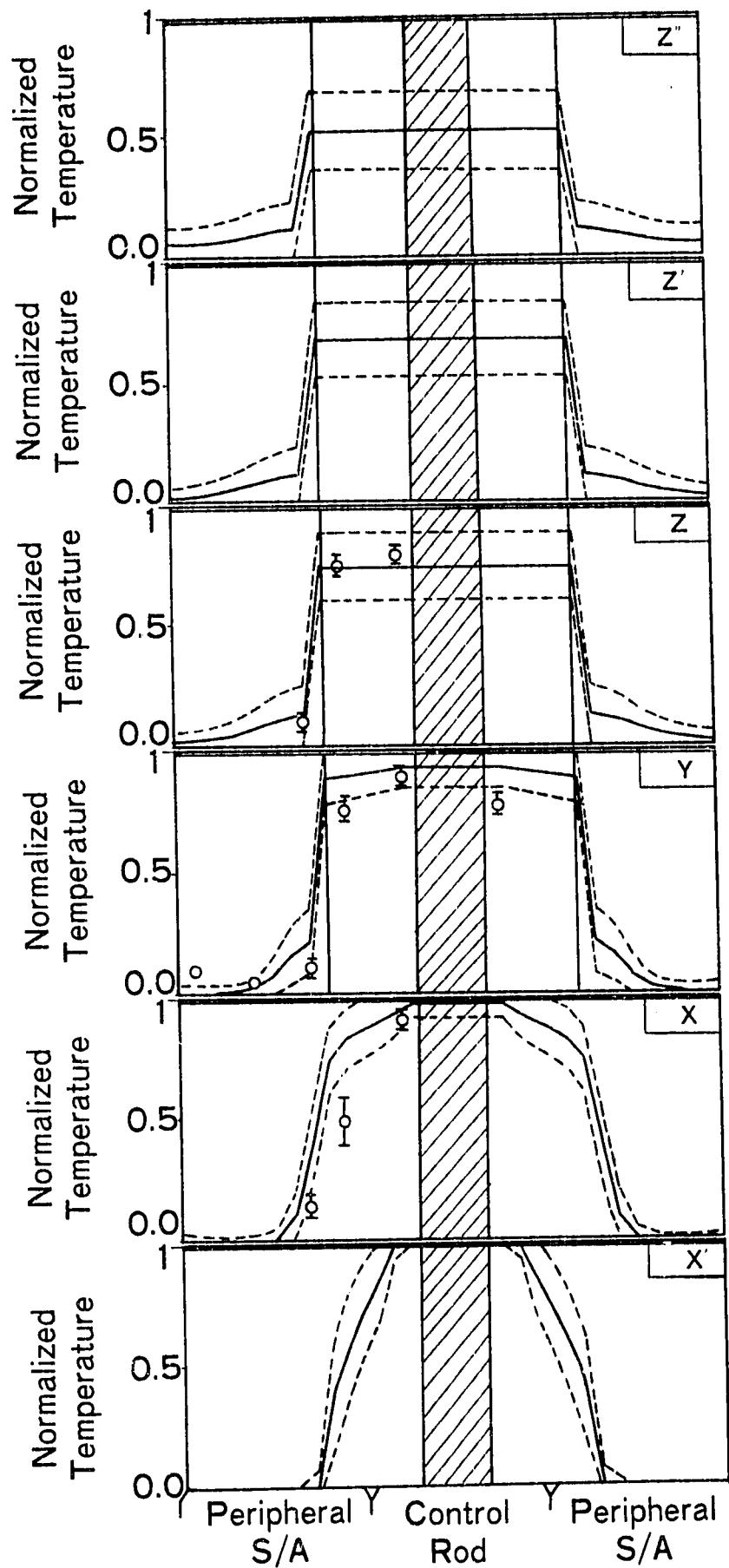


Fig. 4.16 Radial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions for Various Axial Levels under  $\beta=0.2$  of Configuration with C/R Assembly

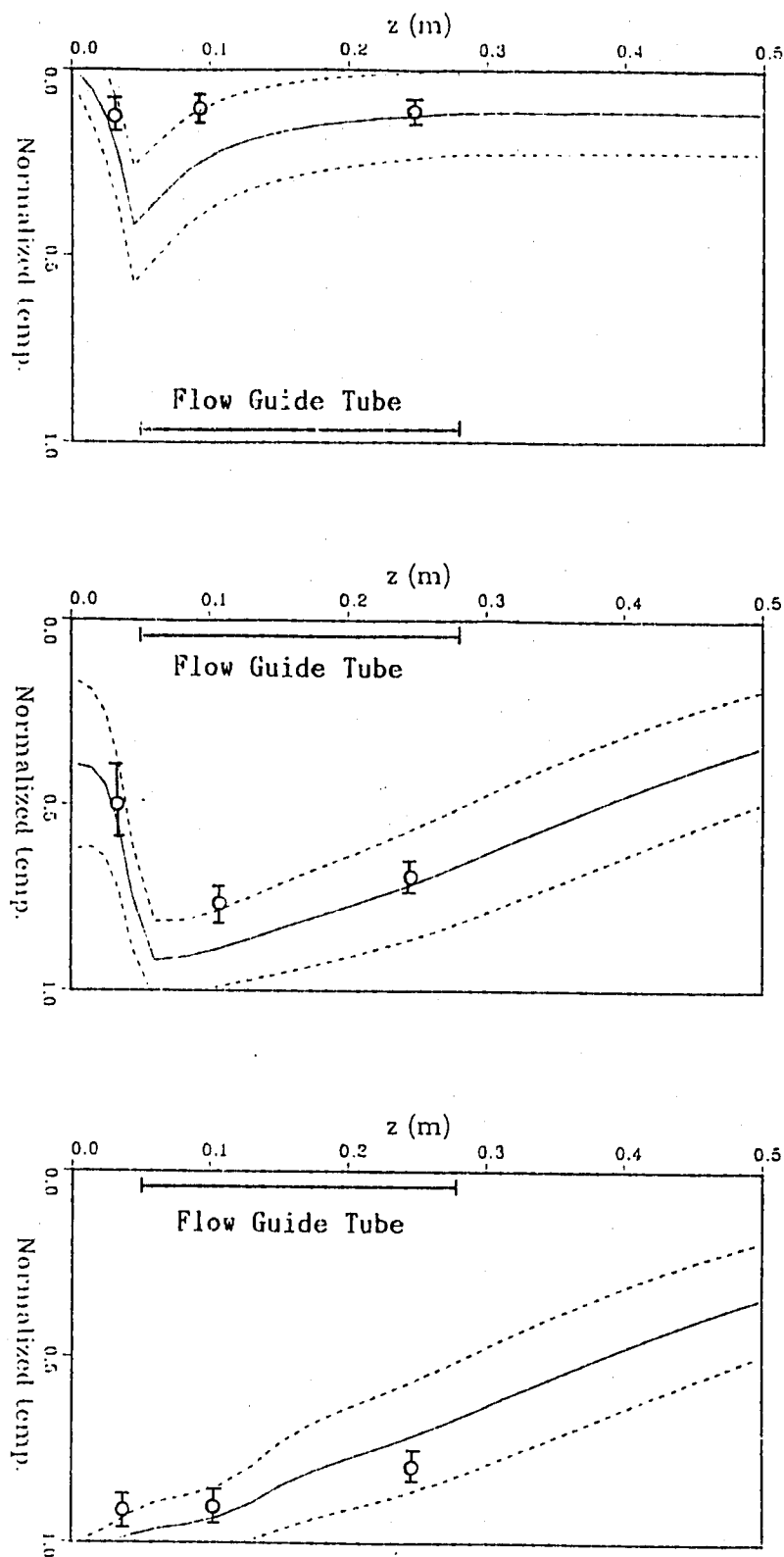


Fig. 4.17 Axial Mean Temperature and Temperature Fluctuation Distributions for Various Radial Levels under  $\beta=0.2$  of Configuration with C/R Assembly

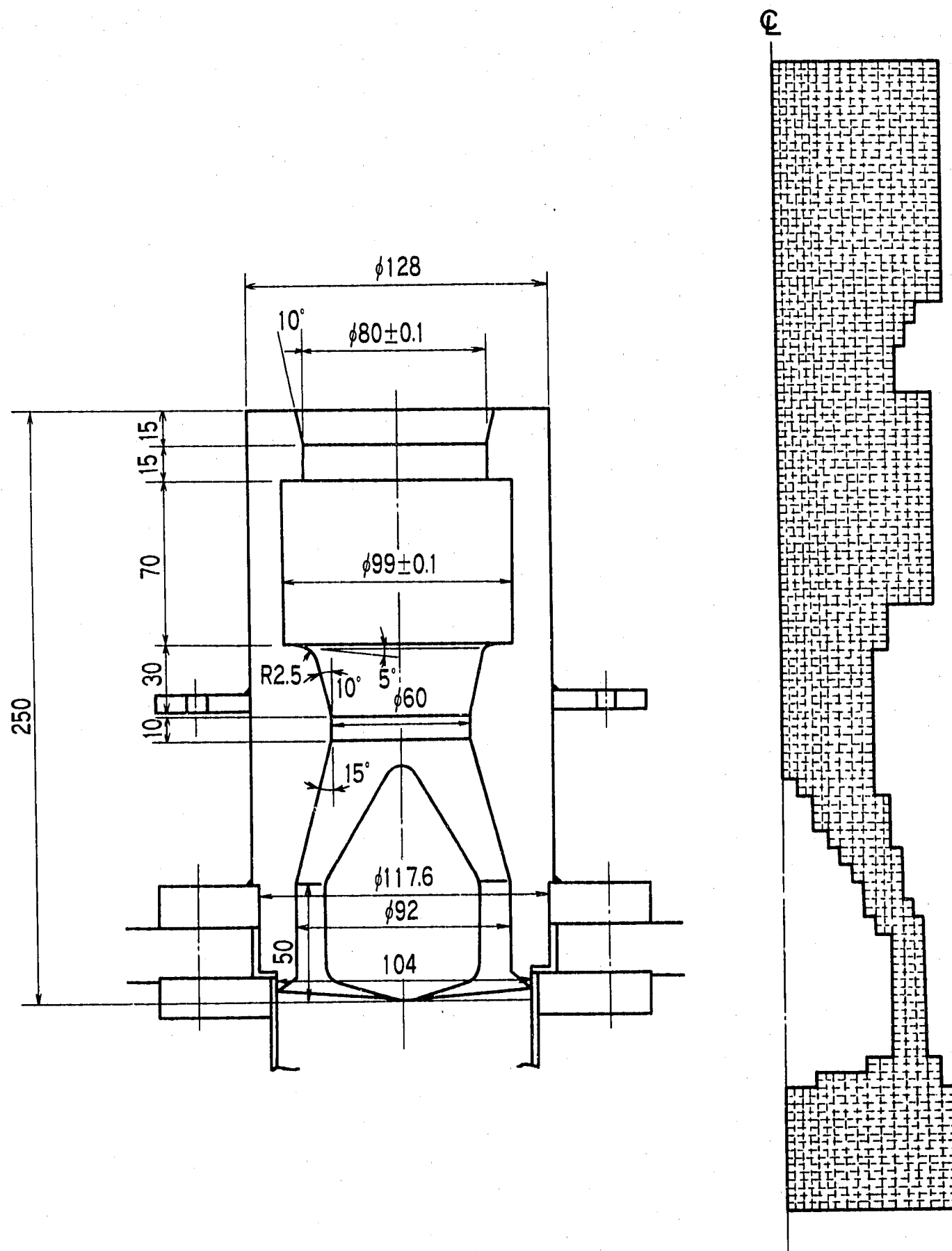


Fig. A.1 Handling Heat Geometry of MONJU Fuel Assembly and Analytical Region

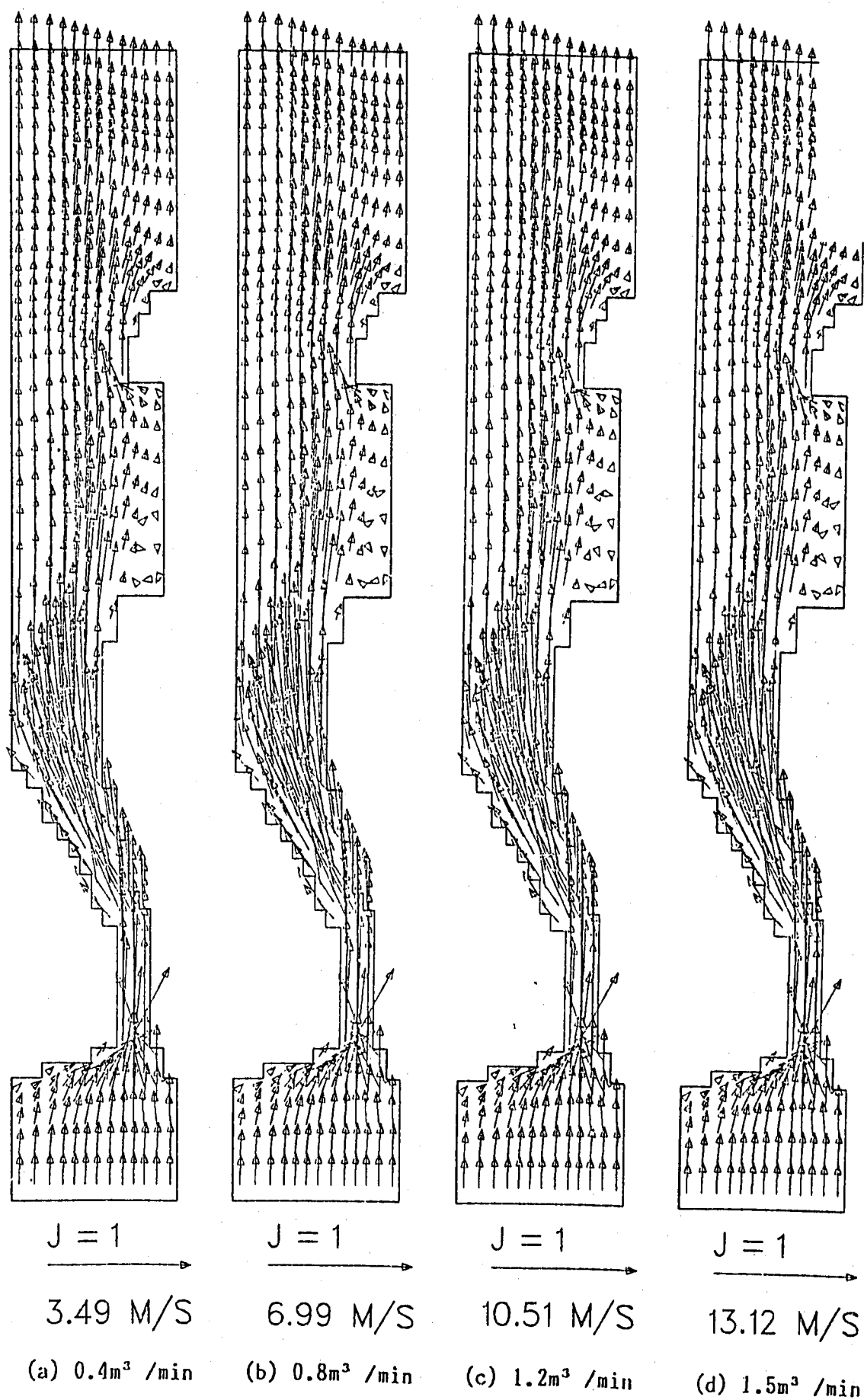


Fig. A.2 Velocity Distribution at Outlet Region of MONJU S/A  
(Water Experiments)

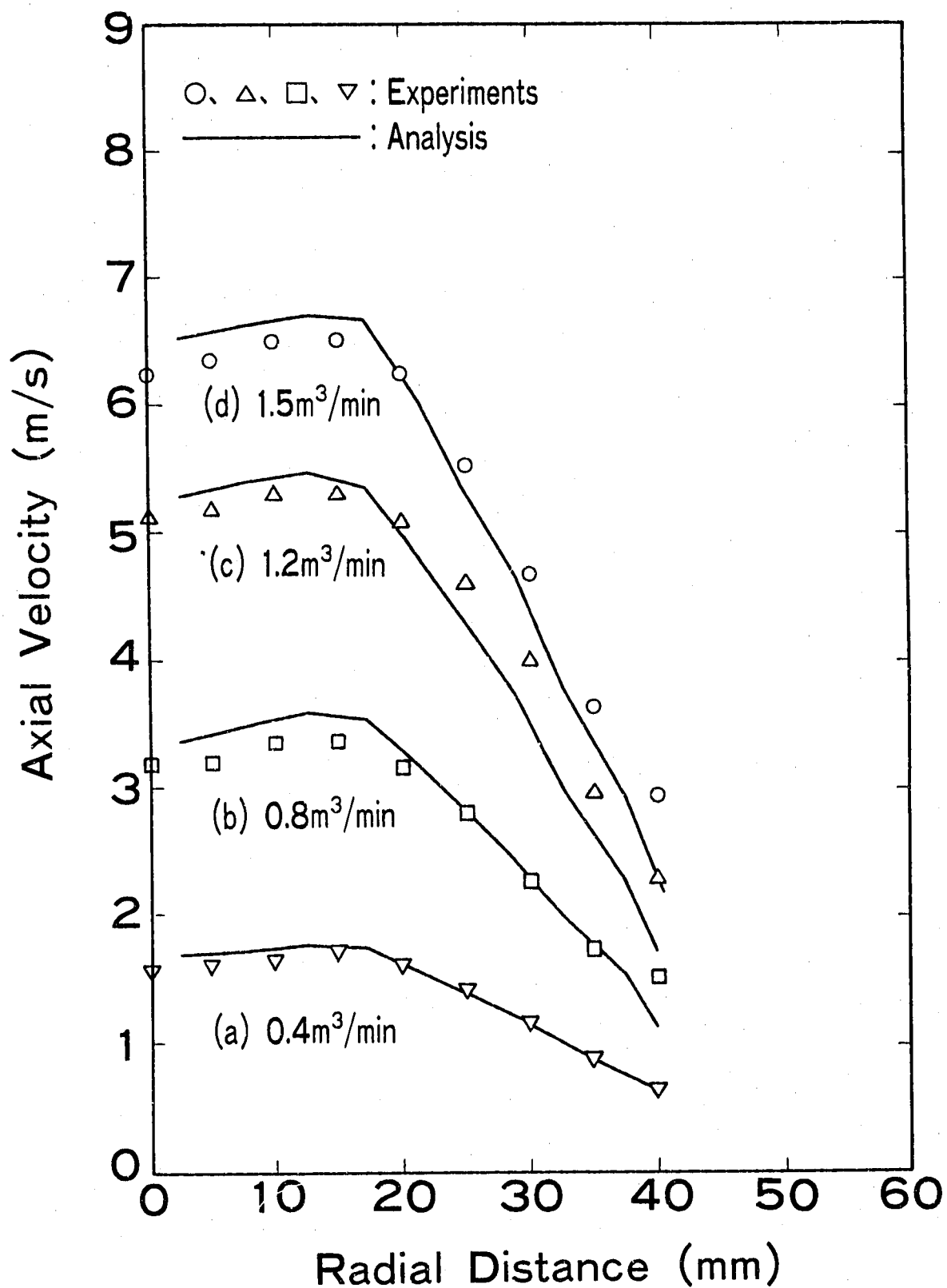
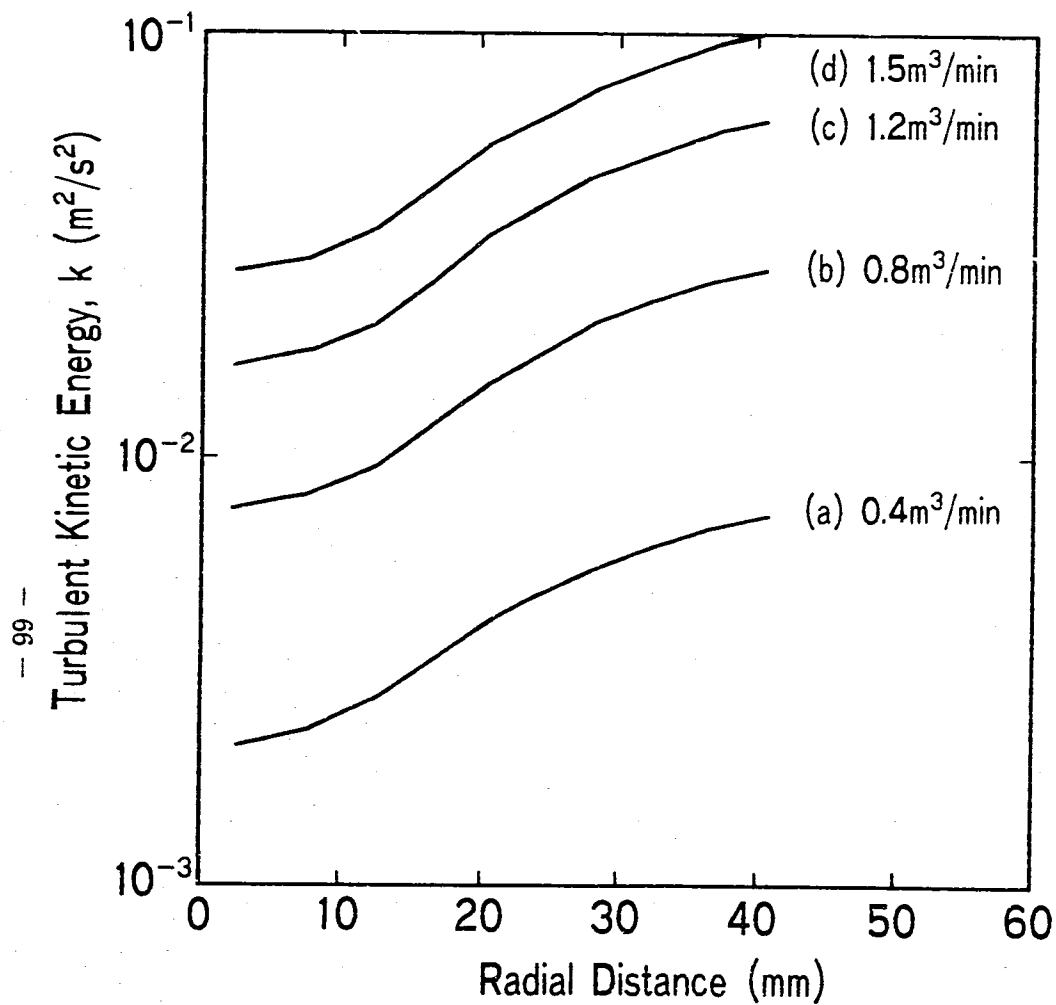
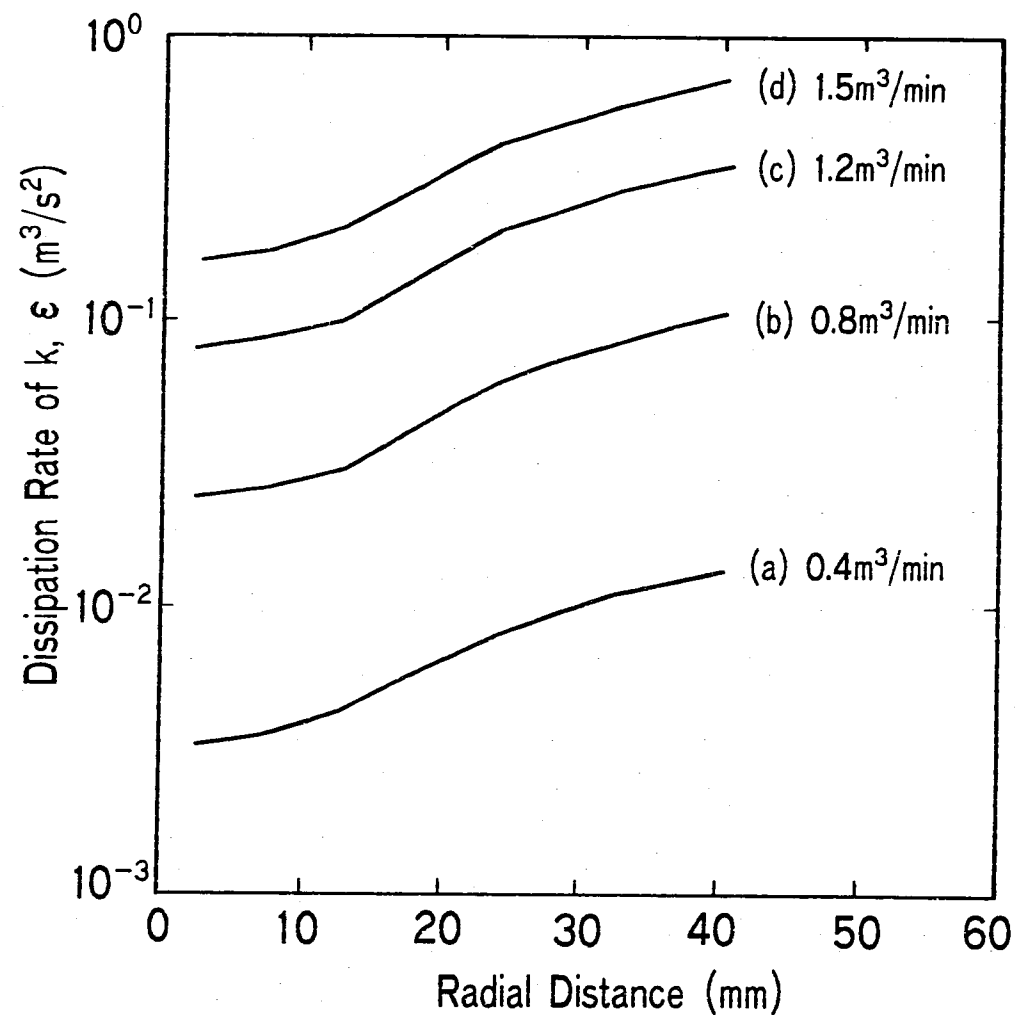


Fig. A.3 Comparison of Radial Velocity Distributions at Outlet of S/A Between Experiments and Calculations (Water Experiments)



(a) Turbulent Kinetic Energy,  $k$



(b) Dissipation Rate of  $k$ ,  $\epsilon$

Fig. A.4 Radial Distributions of Turbulent Kinetic Energy  $k$  and Dissipation Rate  $\epsilon$  at Outlet of S/A

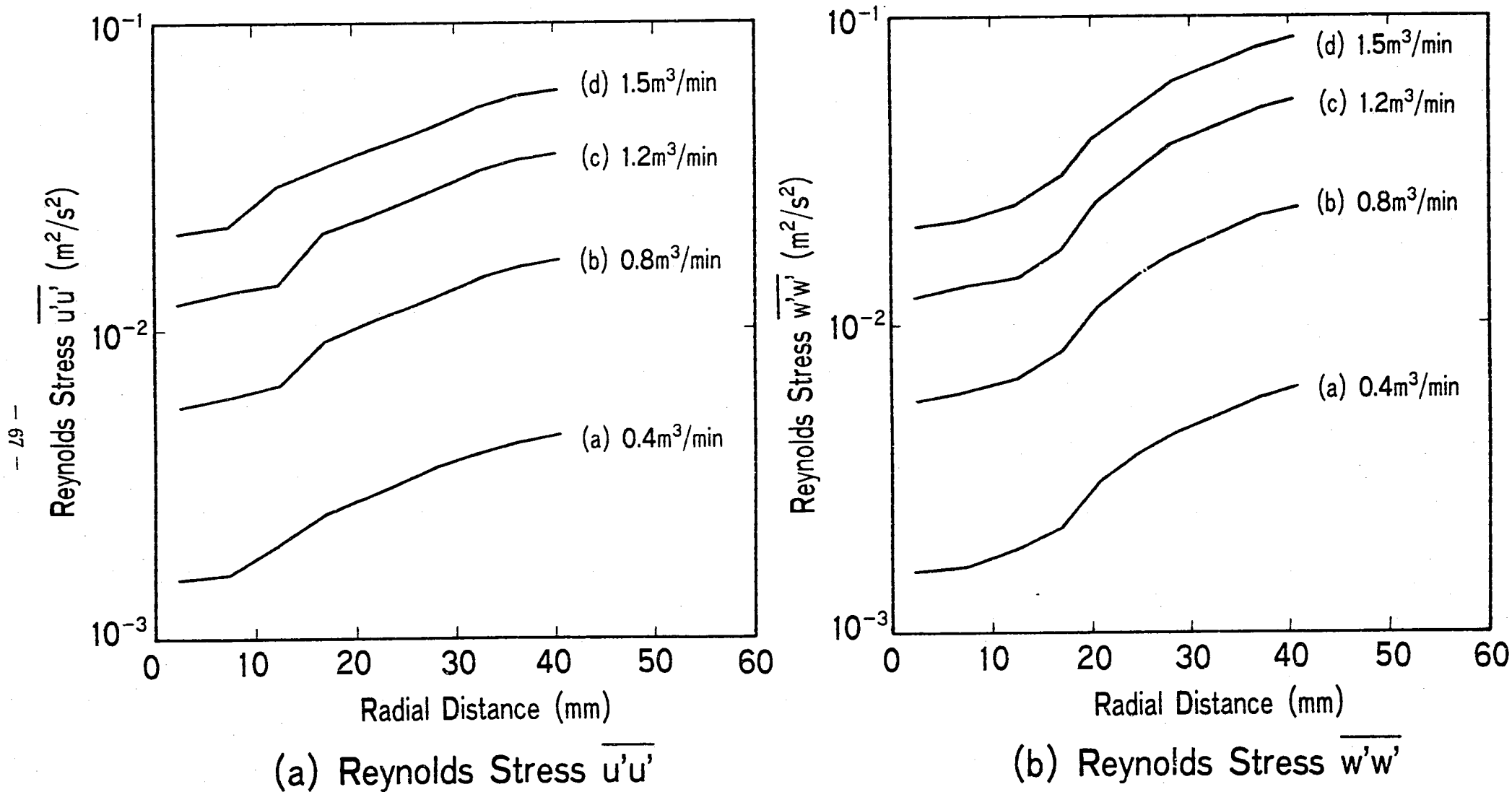
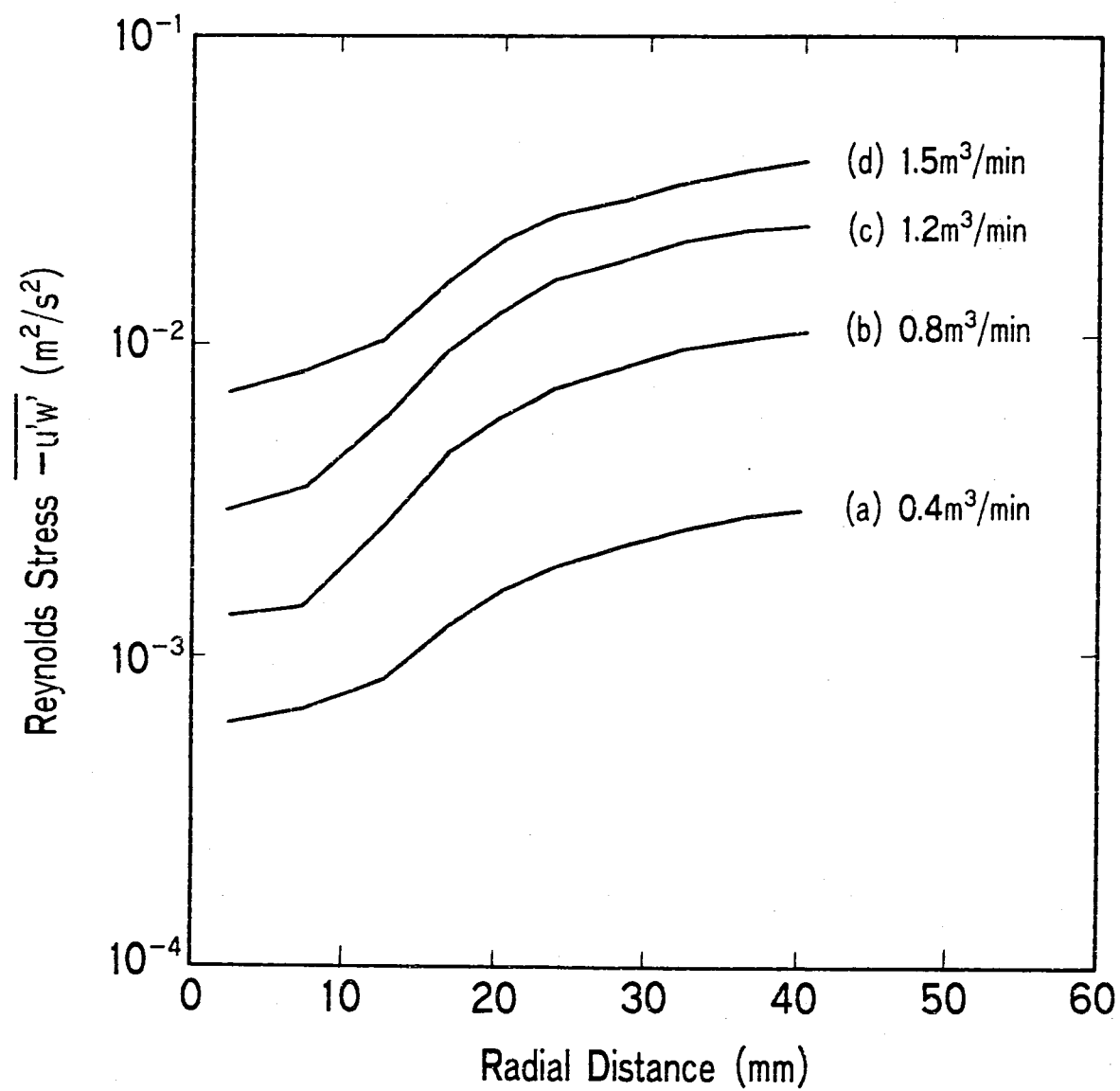


Fig. A.5 Radial Distributions of Reynolds Stresses  $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{w'w'}$  and  $-\overline{u'w'}$  at Outlet of S/A



(c) Reynolds Stress  $-\overline{u'w'}$

Fig. A.5 (Continued)