

「もんじゅ」遮蔽プラグ部ガスブローダウン試験(第2報)

COMMIX-PNC Ver. MTの検証および実機解析

1987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)

「もんじゅ」遮蔽プラグ部ガスブローダウン試験(第2報)

COMMIX-PNC Ver. MTの検証および実機解析

村松 寿晴*, 前川 勇*, 佐藤和二郎*
上出 英樹*, 村上 隆典*

要 旨

炉上部プラグ貫通部でのカバーガスの上昇に伴うFPガスの輸送現象を解析的に評価するため、質量輸送方程式を組んだ汎用多次元熱流動解析コード COMMIX-PNC の質量輸送版 (Ver. MT) を開発した。この Ver. MT の検証が、濃度拡散基礎実験およびモックアップ実験を用いて実施された。

濃度拡散基礎実験は、500 mm×500 mm×50 mm の平行平板モデルの下面左端から水を流入し、右面上端から流出させるもので、混入物質は希薄な KCl が用いられた。実験モデル内各位置で計測された濃度結果との比較では、主流位置でのその挙動は良好な一致を示した。

モックアップ実験を用いた検証は、実験シリーズのうち、ブローダウン流量が 0.05 m³/min、0.02 m³/min および 0.10 m³/min の 3 流量条件のケースを選定して実施した。

0.05 m³/min、0.10 m³/min のケースではアニュラス部への Xe の進入は計算されず、0.02 m³/min のケースでは、アニュラス部上端まで Xe が上昇する結果が得られた。この解析結果は、実験結果と良く一致した。

実機でのブローダウン効果については、解析の結果以下の点が明らかとなった。

- (1) 定格ブローダウン条件では、FP ガスのアニュラス部内への進入は全く認められなかった。
- (2) 1/2 定格ブローダウン条件では、FP ガスが固定プラグ上部 3905 mm まで上昇するが、その濃度はカバーガス中濃度の約 10⁻⁴ % 程度である。
- (3) 定格ブローダウン中にブローダウンが停止した場合には、停止後 1000 秒でドアバルブ位置濃度はカバーガス中濃度の約 13 % まで上昇する。
- (4) モックアップ試験から得られたブローダウン効果評価式が実機体系においてもほぼ適用できることが確かめられた。

March, 1987

MONJU Shield Plug Gas Blow-Down Test (II)

Validation of COMMIX-PNC ver. MT and Application to MONJU

Toshiharu Muramatsu*, Isamu Maekawa*,
Kazujiro Satoh*, Hideki Kamide*,
and Takanori Murakami*

Abstract

The mass transport version (ver. MT) of three-dimensional thermal-hydraulic analysis code, COMMIX-PNC, has been developed to evaluate gas blow-down effects in the annulus between the MONJU closure head and plug port.

The ver. MT has been validated through the analysis of the fundamental experiment of KCl transport and gas blow-down mock-up experiment.

The fundamental experiments were carried out using a water cavity with 500mm × 500mm × 50mm in size. The experiments began pouring KCl solution into the inlet of the cavity. The calculated histories of the KCl concentration transient agreed well with the experiment.

For the mock-up gas blow-down experiment, three gas flowrate cases, 0.05m³/min, 0.02m³/min and 0.1m³/min were calculated. Noble gas were predicted to reach the top part of the annulus only in the case with 0.1m³/min flowrate.

Through the application of the code to the MONJU configuration, the following have been effects of gas blow-down as obtained :

[Normal gas blow condition]

F.P. gases didn't enter into the annulus.

[Half gas blow condition]

The gases with 10⁻⁴% concentration reached the location of 3905^mm above the bottom of shielding plug, and

[Gas blow trip condition]

The gases with 13% concentration reached the door valve in 1000sec. simulation.

From the above results and their consistency with the evaluation of gas blow-down effects by the experimental correlation derived from the gas blow-down experiments, the correlation can be applicable to a complicated annulus like that of the MONJU.

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 質量輸送方程式と計算手法	2
2.1 基礎式	2
2.2 離散化	3
2.2.1 1次風上差分法による離散化	3
2.2.2 QUICK-FRAM法による離散化	6
2.3 計算手法	8
2.4 テスト計算	8
第3章 コード検証	9
3.1 濃度拡散基礎実験	9
3.1.1 実験装置	9
3.1.2 実験結果	9
3.2 濃度拡散基礎実験解析	12
3.2.1 解析体系および解析条件	12
3.2.2 比較および検討	12
3.3 モックアップ実験解析	14
3.3.1 解析体系および解析条件	14
3.3.2 比較および検討	14
第4章 高速原型炉「もんじゅ」実機適用解析	19
4.1 解析対象領域	19
4.2 解析体系および解析条件	19
4.3 解析結果および検討	20
第5章 結 言	25
参考文献	26

List of Tables

- Table 3.1 Analytical Condition for Fundamental Experiment of
Concentration Diffusion
- Table 4.1 Analytical Condition for Gas Blow-Down Effect of MONJU
- Table 4.2 Calculated Results of Dimensionless Parameters for Gas
Blow-Down Effect

List of Figures

- Fig. 2.1 Scalar Quantity ϕ and Velocity Definitions in Computational Cells
- Fig. 2.2 Overall Flow Chart of COMMIX-PNC
- Fig. 2.3 General Flow Chart of Concentration Calculation
- Fig. 2.4 Gas Diffusion Problem
- Fig. 2.5 Concentration Distribution in Each Time Step
- Fig. 3.1 Schematic of the Test Apparatus
- Fig. 3.2 Arrangement of the Conductivity Sensors in the Test Model
- Fig. 3.3 Details of Conductivity Sensor
- Fig. 3.4 Photograph of Flow Pattern for 9.8cm/s Inlet Velocity
- Fig. 3.5 Photograph of Flow Pattern for 4.9cm/s Inlet Velocity
- Fig. 3.6 Photographs of Flow Showing the Recirculation and Diffusion Pattern in the Model for 9.8cm/s Inlet Velocity
- Fig. 3.7 Velocity Distribution in the Square Cavity Model for 9.3cm/s Inlet Velocity
- Fig. 3.8 Velocity Distribution in the Square Cavity Model for 5.2cm/s Inlet Velocity
- Fig. 3.9 Normalized Concentration History at the Each Measurement Point for 9.5cm/s Inlet Velocity
- Fig. 3.10 Normalized Concentration History at the Each Measurement Point for 5.2cm/s Inlet Velocity
- Fig. 3.11 Normalized Concentration Distributions for 9.5cm/s Inlet Velocity
- Fig. 3.12 Mesh Arrangement for Fundamental Experiment of Concentration Diffusion
- Fig. 3.13 Check Planes for Velocity Distribution of Experiments and Calculations
- Fig. 3.14 Comparison of Velocity Profiles between Experiments and Calculations
- Fig. 3.15 Comparison of Flow Pattern between Experiments and Calculations
- Fig. 3.16 Distribution of Turbulent Viscosity μ_t
- Fig. 3.17 Concentration Transient in the Test Plenum
- Fig. 3.18 Mesh Arrangement and Boundary Conditions for Analysis of Mock-up Experiment
- Fig. 3.19 Measured Circumferential Temperature Distribution at Inner

- Surface of Annulus Outside Tube for Each Blow Down Flowrate
- Fig. 3.20 Comparison of Normalized Concentration Distribution under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.21 Calculated Concentration Radial Profiles in Lower Plenum under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition
- Fig. 3.22 Comparison of Axial Temperature Distribution under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.23 Comparison of Radial Temperature Distribution under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.24 Comparison of Circumferential Temperature Distribution at $Z=1990^{\text{m}}$ under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.25 Comparison of Axial Velocity Profiles in the Annulus under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Upwind and QUICK Scheme
- Fig. 3.26 Estimated Axial Temperature Distribution at Annulus Inner Side under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition
- Fig. 3.27 Comparison of Radial Temperature Distribution under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Cases of Adiabatic and with Conduction for Inner Cylinder
- Fig. 3.28 Comparison of Circumferential Temperature Distribution under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Cases of Adiabatic and with Conduction for Inner Cylinder
- Fig. 3.29 Comparison of Normalized Concentration Distribution under $0.02\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.30 Calculated Concentration Radial Profiles in Lower Plenum under $0.02\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition
- Fig. 3.31 Estimated Axial Temperature Distribution at Annulus Inner Side under $0.02\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition
- Fig. 3.32 Comparison of Axial Temperature Distribution under $0.02\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.33 Comparison of Radial Temperature Distribution under $0.02\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.34 Comparison of Circumferential Temperature Distribution at $Z=1990^{\text{m}}$ under $0.02\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

- Fig. 3.35 Calculated Axial Velocity Profiles in the Annulus under $0.02\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition
- Fig. 3.36 Comparison of Normalized Concentration Distribution under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.37 Calculated Concentration Radial Profiles in Lower Plenum under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition
- Fig. 3.38 Estimated Axial Temperature Distribution at Annulus Inner Side under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition
- Fig. 3.39 Comparison of Axial Temperature Distribution under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.40 Comparison of Radial Temperature Distribution under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.41 Comparison of Circumferential Temperature Distribution at $Z=1990^{\text{m}}$ under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data
- Fig. 3.42 Calculated Axial Velocity Profiles in the Annulus under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition
- Fig. 4.1 Structure of Shield Plug of MONJU
- Fig. 4.2 Analytical Region of Gas Blow-Down Effect for MONJU
- Fig. 4.3 Axial Temperature Distribution of R/P in 40hr after Reactor Shut Down
- Fig. 4.4 Mesh Arrangement for Analysis of Gas Blow-Down Effect of MONJU
- Fig. 4.5 Calculated Concentration Distribution under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition
- Fig. 4.6 Calculated Circumferential Temperature Distribution at $Z=1875^{\text{m}}$ under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition
- Fig. 4.7 Calculated Radial Temperature Distribution at $Z=1875^{\text{m}}$ under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition
- Fig. 4.8 Calculated Axial Temperature Distribution at annulus Inner Side under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition
- Fig. 4.9 Calculated Axial Temperature Distribution at annulus Center under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition
- Fig. 4.10 Calculated Axial Temperature Distribution at annulus Outer under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition
- Fig. 4.11 Calculated Radial Velocity Distribution at $Z=1875^{\text{m}}$ under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

- Fig. 4.12 Calculated Circumferential Temperature Distribution at $Z=3905^m$ under $0.1m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.13 Calculated Radial Temperature Distribution at $Z=3905^m$ under $0.1m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.14 Calculated Axial Temperature Distribution at annulus Center under $0.1m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.15 Calculated Radial Velocity Distribution at $Z=3905^m$ under $0.1m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.16 Calculated Concentration Distribution under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.17 Calculated Circumferential Temperature Distribution at $Z=1875^m$ under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.18 Calculated Radial Temperature Distribution at $Z=1875^m$ under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.19 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Inner Side under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.20 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Center under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.21 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Outer Side under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.22 Calculated Radial Velocity Distribution at $Z=1875^m$ under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.23 Calculated Circumferential Temperature Distribution at $Z=3905^m$ under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.24 Calculated Radial Temperature Distribution at $Z=3905^m$ under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.25 Calculated Axial Temperature Distribution at ANnulus Center under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.26 Calculated Radial Velocity Distribution at $Z=3905^m$ under $0.047m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.27 Calculated Concentration Transients in Each Annulus Position under $0.0m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.28 Calculated Ar Gas Temperature Transients in Each Annulus Position under $0.0m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.29 Calculated Axial Velocity Transients in Each Annulus Position under $0.0m^3/min$ Blow Condition
- Fig. 4.30 Calculated Ar Gas Radial Temperature at $Z=1875^m$ under $0.0m^3/min$ Blow Condition

Fig. 4.31 Calculated Axial Velocity at $Z=1875^m$ m under $0.0m^3/min$
Blow Condition

Fig. 4.31 Calculated Axial Velocity at $Z=1875^m$ m under $0.0m^3/min$
Blow Condition

Fig. 4.32 Velocity Profile on θ -Z plane at 1000sec.

第1章 緒 言

燃料交換時に原子炉容器上部に据付けられる燃料交換機器類の炉上部プラグ貫通部内へ炉上部のカバーガスが進入することを防止するため、新鮮なアルゴンガスが炉上部プラグの上部からブローされる。この新鮮ガスのブローによる炉上部カバーガスの進入抑制効果を解析的に評価可能とするため、単相多次元熱流動解析コード COMMIX-PNC^{1)~3)}に質量輸送方程式を新たに追加し、希薄濃度物質の対流および拡散解析機能を付加したバージョン(Ver. MT: Mass Transfer)を開発する。このバージョンでは、質量輸送方程式を最も一般的に使用されている1次風上差分法と数値拡散による解の劣化を低減し得る QUICK-FRAM 法で離散化し、必要に応じて選択使用可能な構造としている。開発されたバージョンは、実験解析により検証を行なう。

検証に用いた実験の1つは、水槽(500 mm×500 mm×50 mm)の左面下部から水を流入させ、右面上部から流出させている体系に、混入させた希薄な KCl 溶液の拡散濃度を測定したものである。他の1つは、燃料交換機のアニュラス形状の体系に対する解析能力の検証を行なうため、モックアップを用いて行なったガスブローダウン効果模擬実験⁷⁾である。

最後に、これらの検証解析の結果を踏まえて、ブローダウン流量をパラメータとして高速原型炉「もんじゅ」実機適用解析を行なう。この実機適用解析の目的は、アニュラスギャップ幅一定のモックアップ試験から得られたブローダウン効果評価式が、実機のようにギャップ幅が変化する体系においても適用できるか否かを解析コードを通して確認すること、および実機における設計ガスブローダウン流量が妥当であることを確認することにある。

第 2 章 質量輸送方程式と計算手法

2.1 基礎式⁴⁾

拡散溶質の濃度は、重力の影響が無視できる程度に希薄であり、その密度は溶媒物質のそれと等しいと仮定した場合の質量輸送現象を支配する対流および拡散の基礎式は以下の通りとなる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \phi) + \text{div}(\rho \cdot u \cdot \phi) = \text{div}(D \text{ grad } \phi) \quad (2.1)$$

ここで、

ϕ : 拡散溶質体積濃度

ρ : 溶媒濃度

u : 溶媒流速

D : 拡散係数

t : 時間

である。

(2.1)式は、以下に示す質量保存式、溶媒運動方程式およびエネルギー方程式と連立して解かれる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho u u) = \text{div}(\mu \text{ grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + B_x + V_x \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho v v) = \text{div}(\mu \text{ grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + B_y + V_y \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \text{div}(\rho w w) = \text{div}(\mu \text{ grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + B_z + V_z \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \text{div}(\rho u h) = \text{div}(k \text{ grad } T) + S_h \quad (2.6)$$

ここで

μ : 粘性係数

U : x方向流速成分

V : y " "

W : z " "

P : 圧力

x, y, z : 座標

B_x, B_y, B_z : 体積力
 V_x, V_y, V_z : 粘性応力項
 h : エンタルピ
 k : 熱伝導度
 T : 温度
 S_h : 発熱生成項

である。

2.2 離散化

COMMIX-PNC ver. MTにおいては、(2.1)式の対流項の離散化は標準として最も一般的に使用されている1次風上差分法で行ない、オプションとして数値拡散の低減を実現し得るQUICK-FRAM法も選択できる様にした。(2.3)~(2.6)式については、COMMIX-PNC本体のものを使用しているため、今回新たに離散化は行なっていない。

2.2.1 1次風上差分法による離散化

(2.1)式の離散化は、Fig. 2.1に示すコントロール・ボリュームのうち、注目セル(i, j, k)に直接隣接するセルのみ((i, j, k)セルに対し、(i-1, j, k), (i+1, j, k), (i, j-1, k), (i, j+1, k), (i, j, k-1), (i, j, k+1))を用いて行なった。ここでi, j, kはそれぞれ座標軸x, y, z方向のメッシュインデックスを示す。

〔時間項〕

(2.1)式内の時間項をセル(i, j, k)回りで体積積分すると、

$$\int_v \frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) dv = V_o \left[\rho_o^i \frac{\phi_o - \phi_o^n}{dt} + \phi_o \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)^i \right] \quad (2.7)$$

で表わされる。ここで、

V_o : セル実効体積 (= $r_v dx_i dy_j dz_k$)

dt : 時間ステップ幅

r_v : ボリュームポロシティ

dx, dy, dz : x, y, z方向のメッシュ幅

であり、また添字として、

O : 注目セル

I : 前 iteration の値

n : 前 time step の値

である。

〔対流・拡散項〕

(2.1) 式内へ対流および拡散項を3次元表示すると,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \phi) - \frac{\partial}{\partial x_k} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right) \equiv \frac{\partial}{\partial x_\ell} (J_\phi)_\ell \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる。ただし、(2.8) 式中の x は、座標軸3方向 x, y, z を、また U は座標軸3方向の流速 U, V, W を示す。ここで、(2.8) 式をセル (i, j, k) 回りで体積積分すると、

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{\partial}{\partial x_\ell} (J_\phi)_\ell dV \\ & = \{(\rho U_2 A_2 \phi_{20}) - (\rho U_1 A_1 \phi_{10})\} - \left\{ \left(DA_2 \frac{\partial \phi_{20}}{\partial x_{20}} \right) - \left(DA_1 \frac{\partial \phi_{10}}{\partial x_{10}} \right) \right\} \\ & + \{(\rho V_4 A_4 \phi_{40}) - (\rho V_3 A_3 \phi_{30})\} - \left\{ \left(DA_4 \frac{\partial \phi_{40}}{\partial y_{40}} \right) - \left(DA_3 \frac{\partial \phi_{30}}{\partial y_{30}} \right) \right\} \\ & + \{(\rho W_6 A_6 \phi_{60}) - (\rho W_5 A_5 \phi_{50})\} - \left\{ \left(DA_6 \frac{\partial \phi_{60}}{\partial z_{60}} \right) - \left(DA_5 \frac{\partial \phi_{50}}{\partial z_{50}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.9)$$

となる。ここで、 A は断面積を示し、添字の意味は以下の通りである。

- 1 注目セルに対し、 $-x$ 側セル
- 2 " " $+x$ "
- 3 " " $-y$ "
- 4 " " $+y$ "
- 5 " " $-z$ "
- 6 " " $+z$ "
- 10 注目セルと $-x$ 側セルのスカラー情報の平均
- 20 " " $+x$ "
- 30 " " $-y$ "
- 40 " " $+y$ "
- 50 " " $-z$ "
- 60 " " $+z$ "

(2.9) 式のうち、座標軸 x について風上差分を行なうと、

$$\begin{aligned} & (\rho U_2 A_2 \phi_{20}) - (\rho U_1 A_1 \phi_{10}) - \left(D_{20} A_2 \frac{\partial \phi_{20}}{\partial x_{20}} \right) - \left(D_{10} A_1 \frac{\partial \phi_{10}}{\partial x_{10}} \right) \\ & = [0, F_2] \phi_0 - [0, -F_2] \phi_2 - [0, F_1] \phi_1 - [0, -F_1] \phi_0 \\ & - D_2 (\phi_2 - \phi_0) + D_1 (\phi_0 - \phi_1) \\ & = \phi_0 \{ [0, F_2] + D_2 + [0, -F_1] + D_1 \} - \phi_2 \{ [0, -F_2] + D_2 \} \\ & - \phi_1 \{ [0, F_1] + D_1 \} \end{aligned} \quad (2.10)$$

となる。式中の $[A, B]$ は A と B のうちから大きな値を取り出す操作を意味する。

同様に、他座標についても風上差分を行ない、まとめると、

$$\begin{aligned}
 & \int_V \frac{\partial}{\partial x_\ell} (J_\phi)_\ell dV \\
 & = \phi_0 \{ [0, F_2] + D_2 + [0, -F_1] + D_1 \\
 & \quad + [0, F_4] + D_4 + [0, -F_3] + D_3 \\
 & \quad + [0, F_6] + D_6 + [0, -F_5] + D_5 \} \\
 & \quad - \left(\phi_2 \{ [0, -F_2] + D_2 \} + \phi_1 \{ [0, F_1] + D_1 \} \right. \\
 & \quad + \phi_4 \{ [0, -F_4] + D_4 \} + \phi_3 \{ [0, F_3] + D_3 \} \\
 & \quad \left. + \phi_6 \{ [0, -F_6] + D_6 \} + \phi_5 \{ [0, F_5] + D_5 \} \right) \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

になる。

(2.10)式および(2.11)式中で用いた記号は以下の意味である。

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \langle \rho_1 \rangle u_1 A_1 & D_1 &= A_1 / \left(\frac{dx_{i-1}}{2D_1} + \frac{dx_i}{2D_0} \right) \\
 F_2 &= \langle \rho_2 \rangle u_2 A_2 & D_2 &= A_2 / \left(\frac{dx_1}{2D_0} + \frac{dx_{i+1}}{2D_2} \right) \\
 F_3 &= \langle \rho_3 \rangle V_3 A_3 & D_3 &= A_3 / \left(\frac{dx_{j-1}}{2D_3} + \frac{dx_j}{2D_0} \right) \\
 F_4 &= \langle \rho_4 \rangle V_4 A_4 & D_4 &= A_4 / \left(\frac{dx_j}{2D_0} + \frac{dx_{j+1}}{2D_4} \right) \\
 F_5 &= \langle \rho_5 \rangle W_5 A_5 & D_5 &= A_5 / \left(\frac{dx_{k-1}}{2D_5} + \frac{dx_k}{2D_0} \right) \\
 F_6 &= \langle \rho_6 \rangle W_6 A_6 & D_6 &= A_6 / \left(\frac{dx_k}{2D_0} + \frac{dx_{k+1}}{2D_6} \right)
 \end{aligned}$$

であり、 $\langle \rho_\ell \rangle$ は上流側密度である。

以上を総合し、まとめると ϕ の方程式は

$$A_0 \phi_0 = \sum_{\ell=1}^6 A_\ell \phi_\ell + B_0 \quad (2.12)$$

となる。ここで、

$$A_0 = \frac{1}{\omega} \{ V_0 \rho_0 / \Delta t + a_0 \} \quad (2.13)$$

$$a_0 = \sum_{\ell=1}^6 \{ [0, (-1)^{\ell+1} F_\ell] + D_\ell \} \quad (2.14)$$

$$A_\ell = [0, (-1)^{\ell+1} F_\ell] + D_\ell \quad (2.15)$$

$$B_0 = \frac{\rho_0 V_0}{\Delta t} \phi_0^n + (1 - \omega) A_0 \phi_0^1 \quad (2.16)$$

ω : 緩和係数

である。

2.2.2 QUICK-FRAM 法²⁾による離散化

QUICK-FRAM 法は、B. P. Leonard が提案した QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) 法に、M. Chapman が提案した FRAM (Filtering Remedy and Methodology) 法を適用するものである。QUICK 法は、上流 2 点、下流 1 点の 3 点より 2 次曲線 (曲面) 内挿によって計算セル面の ϕ 値を求める。また、FRAM 法は、まず注目する計算セルを含む周辺セル (3 次元の場合 7 セル) で ϕ に関する輸送方程式を Lagrangian 座標系で解くことによって、対流項の計算をなくし、求まる ϕ の値の最大値、最小値を Filter の上下限值とし、この範囲内に Eulerian 座標系での解が入っていれば QUICK 法を使用し、解が外れる時のみ 1 次風上差分法を導入する。この手法は、1 次風上差分法を局所的に使用して、高次差分法で発生し易い非現実的な振動を防止する巧妙な手法である。

離散化式は、以下に示す通りである。

$\phi_{i,j,k}$ の $n+1$ ステップ目の値は、以下の様に表わされる。

$$\begin{aligned} \phi_{i,j,k}^{n+1} = & \left\{ \frac{1}{\Delta x_i} (F_2 U_2 - F_1 U_1) + \frac{1}{\Delta y_j} (F_4 V_4 - F_3 V_3) \right. \\ & + \frac{1}{\Delta z_k} (F_6 W_6 - F_5 W_5) \\ & + D_0 \frac{1}{\Delta x_i} (GRD_2 - GRD_1) + \frac{1}{\Delta y_j} (GRD_4 - GRD_3) \\ & \left. + D_0 \frac{1}{\Delta z_k} (GRD_6 - GRD_5) \right\} \Delta t + \phi_{i,j,k}^n \end{aligned} \quad (2.17)$$

ここで、

$$\begin{aligned} U_2 &= 0.5(U_{i,j,k} + U_{i-1,j,k}) & U_1 &= 0.5(U_{i,j,k} + U_{i+1,j,k}) \\ V_4 &= 0.5(V_{i,j,k} + V_{i,j-1,k}) & V_3 &= 0.5(V_{i,j,k} + V_{i,j+1,k}) \\ W_6 &= 0.5(W_{i,j,k} + W_{i,j,k-1}) & W_5 &= 0.5(W_{i,j,k} + W_{i,j,k+1}) \\ GRD_2 &= \frac{1}{\Delta x_i} (\phi_{i,j,k} - \phi_{i-1,j,k}) & GRD_1 &= \frac{1}{\Delta x_i} (\phi_{i+1,j,k} - \phi_{i,j,k}) \\ GRD_4 &= \frac{1}{\Delta y_j} (\phi_{i,j,k} - \phi_{i,j-1,k}) & GRD_3 &= \frac{1}{\Delta y_j} (\phi_{i,j+1,k} - \phi_{i,j,k}) \\ GRD_6 &= \frac{1}{\Delta z_k} (\phi_{i,j,k} - \phi_{i,j,k-1}) & GRD_5 &= \frac{1}{\Delta z_k} (\phi_{i,j,k+1} - \phi_{i,j,k}) \end{aligned}$$

(2.17) 式中の $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ は、コントロール・ボリューム各面における ϕ 値を示す。また、他の変数の意味は、以下に示す通りである。

$$\begin{aligned}
 F_{1,Q} &= \begin{cases} \frac{1}{2}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i-1,j,k}) - \frac{1}{8}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i-2,j,k} - 2\phi_{i-1,j,k}) & U_{i-1,j,k} \geq 0 \\ \frac{1}{2}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i-1,j,k}) - \frac{1}{8}(\phi_{i-1,j,k} + \phi_{i+1,j,k} - 2\phi_{i,j,k}) & U_{i-1,j,k} < 0 \end{cases} \\
 F_{2,Q} &= \begin{cases} \frac{1}{2}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i+1,j,k}) - \frac{1}{8}(\phi_{i+1,j,k} - \phi_{i-1,j,k} - 2\phi_{i,j,k}) & U_{i,j,k} \geq 0 \\ \frac{1}{2}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i+1,j,k}) - \frac{1}{8}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i+2,j,k} - 2\phi_{i+1,j,k}) & U_{i,j,k} < 0 \end{cases} \\
 F_{3,Q} &= \begin{cases} \frac{1}{2}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i,j-1,k}) - \frac{1}{8}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i,j-2,k} - 2\phi_{i,j-1,k}) & V_{i,j-1,k} \geq 0 \\ \frac{1}{2}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i,j-1,k}) - \frac{1}{8}(\phi_{i,j-1,k} + \phi_{i,j+1,k} - 2\phi_{i,j,k}) & V_{i,j-1,k} < 0 \end{cases} \\
 F_{4,Q} &= \begin{cases} \frac{1}{2}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i,j+1,k}) - \frac{1}{8}(\phi_{i,j+1,k} + \phi_{i,j-1,k} - 2\phi_{i,j,k}) & V_{i,j,k} \geq 0 \\ \frac{1}{2}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i,j+1,k}) - \frac{1}{8}(\phi_{i,j,k} + \phi_{i,j+2,k} - 2\phi_{i,j+1,k}) & V_{i,j,k} < 0 \end{cases} \\
 F_w &= \begin{cases} F_{w,u} & \text{if } \max(FLG_{i,j}, FLG_{i-1,j}) = 1 \\ F_{w,q} & \text{if } \max(FLG_{i,j}, FLG_{i-1,j}) = 0 \end{cases} \\
 F_E &= \begin{cases} F_{E,u} & \text{if } \max(FLG_{i,j}, FLG_{i+1,j}) = 1 \\ F_{E,q} & \text{if } \max(FLG_{i,j}, FLG_{i+1,j}) = 0 \end{cases} \\
 F_s &= \begin{cases} F_{s,u} & \text{if } \max(FLG_{i,j}, FLG_{i,j-1}) = 1 \\ F_{s,q} & \text{if } \max(FLG_{i,j}, FLG_{i,j-1}) = 0 \end{cases} \\
 F_N &= \begin{cases} F_{N,u} & \text{if } \max(FLG_{i,j}, FLG_{i,j+1}) = 1 \\ F_{N,q} & \text{if } \max(FLG_{i,j}, FLG_{i,j+1}) = 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

添字の意味は

U : 風上差分法による値

Q : QUICK 法による値

であり、

また

$$\begin{aligned}
 FLG_{i,j} &= \begin{cases} 0 & \min(\phi^*) \leq \tilde{\phi}_{i,j} \leq \max(\phi^*) \\ 1 & \max(\phi^*) < \tilde{\phi}_{i,j} \text{ or } \tilde{\phi}_{i,j} < \min(\phi^*) \end{cases} \\
 \min(\phi^*) &= \min(\phi_{i,j}^*, \phi_{i-1,j}^*, \phi_{i+1,j}^*, \phi_{i,j-1}^*, \phi_{i,j+1}^*) \\
 \max(\phi^*) &= \max(\phi_{i,j}^*, \phi_{i-1,j}^*, \phi_{i+1,j}^*, \phi_{i,j-1}^*, \phi_{i,j+1}^*) \\
 \tilde{\phi}_{i,j} &: \text{QUICK 法での解} \\
 F_{w,u} &: \text{Upwind 法による } F_w \\
 F_{w,q} &: \text{QUICK 法による } F_w \\
 F_E, F_s, F_N & \text{も同様}
 \end{aligned}$$

$$\phi_{i,j}^* : \frac{D}{Dt} \phi_{i,j}^* = \phi_{i,j} \cdot V_u + DV \cdot \phi^2 \quad \text{の解}$$

である。

2.3 計算手法

Fig. 2.2 に今回追加した質量輸送量計算部を含めた COMMIX-PNC 全体のフローチャートを示す。質量輸送量の計算は Subroutine TIMSTP で制御された各時間ステップにおいて、運動量、乱流パラメータおよびエネルギーの計算が完了した後に計算される。Fig. 2.3 に質量輸送量計算部のフローチャートを示す。Subroutine COLOOP は、質量輸送量計算のための Subroutine 群の制御を行なう部分である。Subroutine CODIST は(2.11)式の連立1次方程式の係数群を導出し、Subroutine SOLVEN でこの連立1次方程式を S. O. R. 法で解く。

2.4 テスト計算

実験検証に移る前段階として、Fig. 2.4 に示す様な矩形体系中の Ar-He ガスの相互拡散問題⁵⁾を用いチェック計算を行なった。問題は、x 方向 4 cm、y 方向 8 cm の密閉容器内に He ガスを満し、かつ A 領域に Ar ガス 50 ppm を与えて、時間の経過とともに A 領域の Ar ガスが B 領域に拡散してゆく様子をシミュレートしようというものである。計算は、20°C 等温状態とし、相互拡散係数は $0.621 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ を使用した。また、1次風上差分法を用い Δt は 1 秒とした。

Fig. 2.5 に、y 方向 Ar ガス濃度分布の時間的変化の様子を解析的求積法で求めた理論値と比較して示した。この結果より分かる通り、COMMIX-PNC ver. MT による計算値と理論値との一致は、極めて良好である。

第3章 コード検証

3.1 濃度拡散基礎実験

3.1.1 実験装置

COMMIX-PNC, MTバージョンの質量輸送現象に対する解析機能を検証するため、水を作動流体として単純形状モデルによる濃度拡散実験をおこなった。

検証実験に用いた実験装置をFig. 3.1に示す。装置は実験模型①、冷却器②、水タンク③、ヘッドタンク④、ポンプ⑤、流量計⑥およびトレーサポット⑦などで構成されている。作動流体はオーバーフローノズルで水位を一定に保たれたヘッドタンクから、500 mm(横幅)×500 mm(高さ)×50 mm(奥行)の矩形形状をした実験模型内に導びかれ、水タンクに流出する。水タンク内の作動流体はポンプによりヘッドタンクに汲み上げられ、一部はオーバーフローノズルを介して水タンクに戻る。水タンク内の水温は冷却器により、周囲の気温と同じになるように調節している。

実験模型は可視化のため透明アクリル製としている。作動流体は模型の左側下部に設けた幅25 mmの入口ノズルから模型内に流入し、右側面上部に設けた出口ノズルから流出する。なお、入口ノズルと出口ノズルは同じ寸法としている。模型内を通過する流量は定常流状態を作った後、模型を流出する恐れが容量500 ccのメスシリンダを満たす時間を測定することにより求めた。

実験では流況および濃度拡散の可視化写真撮影、流速分布測定および濃度拡散測定をおこなった。ここで、流速は一定の露出時間で撮影された流跡写真から読み取る方法、濃度拡散は微量のKC ℓ 溶液の注入による流体の電気伝導度の変化を検出する方法を用いて測定した。伝導度センサはFig. 3.2に示す29箇所(29箇所)の模型内各位置に取付けた。センサは直径5 mm、長さ10 mmの2個の電極から成り(Fig. 3.3)、模型の裏側から流路の中心と電極間の距離が互いに等しくなるように差し込んでいる。

3.1.2 実験結果

(1) 流況観察

模型流入部の平均流速を9.8 cm/sec および4.9 cm/secにおける流跡写真を、それぞれFig. 3-4 および3-5に示す。写真はトレーサ粒子にアルミ粉を用い、出力2 KWのクセノンランプのスリット光(幅5 mm)を、模型の左側側壁から流路の中心部へ入射して撮影した。シャッター時間は9.8 cm/sec および4.9 cm/secの流速条件で、それぞれ0.5 sec および1 secとし

た。

流跡写真によれば、模型の下部から流入した流れは側壁に沿い、約 7° の広がりをもって上昇している。この上昇流は模型の上部に衝突後、流出側に向きを変えるが、左上のコーナ部には小さな過流状の2次流れが形成されている。模型の上面に沿って右側上部側壁の流出部に向う主流は、それほど拡がらずにはほぼ一定の幅で、そのまま模型外へ流出する流れと、側壁に沿って下降する循環流とに分かれる。循環流は側壁から下面に沿う方向にゆるやかに向きを変え、前述の流入部の上昇流に巻き込まれる。循環流と上昇流との合流部や主流部には、アルミ粉の動きが活発であるため、雲状に明るくなっている部分が所々に見られる。この雲状の部分は、流速が速い 9.8 cm/sec の場合の方が流れの乱れが大きいため、数多く観察される。なお、実験におけるレイノルズ数を、入口ノズル部の等価直径および平均流速で求めると、 9.8 cm/sec および 4.9 cm/sec の場合でそれぞれ $Re = 2490$ および $Re = 1250$ となっており、流入部の流れは乱流状態を作っているといえる。模型中央部は非常に遅い流れになっており、流れの乱れはなく、全体的にはゆるやかな循環流が形成されている。しかし、流況は一定ではなく、小さなスケールの渦が発生したり、消滅したりする複雑な流況を呈している。

(2) 色素による拡散雲の観察

入口ノズルの上流側から微量の蛍光染料（ウラニン）溶液を注入し、染料が輸送・拡散される様子を4秒間隔で写真撮影した。入口ノズル部平均流速 9.8 cm/sec の条件において、ウラニン雲を時間経過とともに撮影した結果をFig. 3-6に示す。

ウラニン雲の先端は流入開始から約8秒後には模型の上壁に、約18秒後には出口ノズル部に到達している。さらに、約38秒後は右側側壁を下降する循環流の先端が模型の底面に到達し、約60秒で模型内を1巡して、入口ノズル部流れと合流している。その後は中心部の未拡散領域が次第に小さくなっていき、写真には示していないが、最終的には模型内全領域に染料が広がる。流況写真で述べた局所的な渦流により、循環流の主流部から時折り模型の中心領域に染料が輸送される様子も見られる。

(3) 流速分布

一定の露出時間で撮影した流跡写真のアルミ粉の描く軌跡の長さから流速分布を求めた。アルミ粉は鱗片状をなしているため、反射光が輝いたり消えたりすることがあり、軌跡の読み取りは困難であるといわれている。しかし、せん断流れ場においてはその平らな面を流れに平行に近づける性質があるため、本実験から得られた流跡写真には、軌跡が明瞭で、かつ、読み取りのためメッシュ分割した1要素内に同じ長さの軌跡が数多くあらわれており、その読み取りは比較的容易にできた。

入口ノズル部平均流速 9.3 cm/sec および 5.2 cm/sec の条件の流跡写真から、模型内の流速分布をあらわす速度ベクトル図を求めた結果を、それぞれFig. 3-7および3-8に示す。流れは前述の流況および拡散雲の観察で述べた様子を良くあらわす特徴を示している。流速は

出口ノズル付近において入口流速の約 $1/2$ となり、主流領域の循環下降流では約 $1/7$ 、合流部付近では約 $1/10$ に減少している。循環流の中央部では非常に遅い流れになっており、2つ以上の渦流が形成されているのがわかるが、この流れは一定せず時間および空間的に変動している。

(4) 過渡濃度変化

入口ノズルの上流側から微量の KC ℓ 溶液を注入し、模型内流体の電気伝導度の過渡変化を測定することにより、KC ℓ 濃度拡散の過渡変化を求めた。KC ℓ 溶液の注入量は模型内流れに影響を与えないように、模型への流入流量の約 $1/1000$ とした。また、濃度については作動流体と KC ℓ 混合流体との密度差による重力の効果が無視できるように、0.0025～0.0037% の非常に希薄なものとした。濃度については、可視化実験において上記の濃度の10倍の条件でも模型内流況に影響しないことを確認して決めた。この濃度条件における模型内流体の電気伝導度の上昇は約 $20 \sim 30 \mu\text{v}/\text{cm}$ で、センサの測定レンジ $1000 \mu\text{v}/\text{cm}$ に対しては許容感度限界に近い。このため低濃度条件におけるセンサの校正を実験前におこない、実験精度を確保するようにした。

Fig. 3-9 および 3-10 に、入口ノズル部平均流速がそれぞれ $9.5 \text{ cm}/\text{sec}$ および $5.2 \text{ cm}/\text{sec}$ の条件における濃度過渡変化の測定結果を示す。測定データのサンプリング周期は、 $9.5 \text{ cm}/\text{sec}$ の場合で 1 sec および $5.2 \text{ cm}/\text{sec}$ で 2 sec とした。図の縦軸の濃度は Fig. 3-2 に示した測定位置図の模型流入部センサ No. 1 における濃度 ϕ_{in} で規格化して示している。

模型内流れの主流は、 $1 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 11 \rightarrow 17 \rightarrow 23 \rightarrow 24 \rightarrow 25 \rightarrow 26 \rightarrow 27 \rightarrow 28 \rightarrow 29$ の番号順にセンサを通過していく。これらの位置の濃度は注入開始後約 $80 \sim 100$ 秒において、ステップ状に上昇し、その後同様な周期で小さく濃度上昇していることがわかる。これは模型内を一巡した流れと流入部上昇流とが合流したことによる濃度変化を示すものである。下降流領域の 22, 16 では注入開始から約 25 秒で濃度が立ち上がり始める。この領域までの立ち上がり時間については、前述のウラン雲による可視化写真と対応した変化を示している。一方、模型の底部領域 3, 2, 6 では、可視化写真のウラン雲の先端が約 $46 \sim 66$ 秒でセンサ位置に到達しているのに対して、約 20 秒程度の時間遅れが見られる。この領域の濃度変化は濃い濃度のウラン雲の到達と対応しており、拡散雲先端の非常に希薄な濃度に対してはセンサが応答していないようである。模型の中心領域や強いせん断流が存在する領域では、流れの巻き込みやそれにとまなう渦の発生によって、主流領域より周期が長く振幅の大きいセンサ信号の変動が見られる。

模型内濃度分布の過渡変化を見るため、センサの出力信号を平滑化処理して、濃度分布図を作成した結果を Fig. 3-11 ($9.5 \text{ cm}/\text{sec}$) に示す。これから模型の壁面から中央部へと順に濃度上昇していく様子がわかるが、これはウランによる拡散雲の進行状況の写真と非常に良く一致した特徴を示している。

3.2 濃度拡散基礎実験解析

3.2.1 解析体系および解析条件

実験解析に使用したメッシュ分割図を Fig. 3.12 に、また解析条件一覧を Table 3.1 に示す。解析は、 $X-Z$ 直交座標系 2次元で実施し、総計算セル数は 2601 個である。解析流速条件は、実験における 2 ケースのうち、 9.8 cm/s のケースを選定した。境界条件としては、固体壁境界につき全て No-Slip 条件を適用し、出口については連続流境界を使用した。注入希薄物質 KCl の入口部での濃度は 10 p.p.m とした。また、 KCl 溶液の水中での拡散係数は 20°C 水温での値 $0.722 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^*$ を使用した。計算ケースは、以下に示す 4 種である。

- (1) 1次風上差分法 + 層流モデル
- (2) + $k-\epsilon$ 乱流モデル
- (3) QUICK-FRAM 法 + 層流モデル
- (4) + $k-\epsilon$ 乱流モデル

ただし、(3)および(4)に於ける運動量計算については QUICK 法、 k および ϵ の乱流パラメータ計算については 1 次風上差分法を使用した。

計算結果と実験結果との流速分布の比較は、Fig. 3.13 に示した垂直および水平断面で行なう。計算手順は、次に示す通りである。まず、流体静止状態から運動量について定常計算を開始し、定常流動解を求める。次に過渡計算において濃度輸送計算を行ない、500 秒までをシミュレーションする。この濃度過渡計算は、後述する流速分布の定常計算における実験値との比較結果から、QUICK-FRAM 法^{**} + $k-\epsilon$ 乱流モデルのケースのみとする。

3.2.2 比較および検討

Fig. 3.13 に示した流速分布計測面での実験値と計算値 (Case 1 ~ Case 4) の比較を Fig. 3.14 に示す。まず、1 次風上差分法における層流モデル解と $k-\epsilon$ 乱流モデル解との比較については、入口から左壁に沿って上昇する流れおよび出口に向って上壁に沿う流れで顕著な差が見られる。これは、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを使用したことによる乱流拡散によるものである。一方、QUICK-FRAM 法における層流モデル解と $k-\epsilon$ 乱流モデル解との比較については、流れの様相自体が大きく変化している。層流モデルでは、各所で不安定な流動が計算された。一方、 $k-\epsilon$ 乱流モデル解では、この不安定な流動が消滅している。この層流モデル解での不安定流動の発生原因としては、QUICK 法による数値計算不安定性からくるものと考えられる。すなわち実験における流動様相自体が遷移領域 ($Re \approx 2490$) にあり、これを乱流モデル等の物理

* 化学便覧 pp. 495, 丸善 1966, その他水の物性値は COMMIX-PNC 内蔵のものを使用。

** ただし、運動量計算には QUICK 法、 k および ϵ の乱流パラメータには 1 次風上差分法を使用する。

モデル無しに解こうとする場合には、計算メッシュを限りなく細分化する必要がある。本計算ケースでは、まだ空間メッシュが大きく、その結果として数値計算上の不安定性が引き起こされていると考えられる。

実験結果と計算結果との一致度は、1次風上差分法における $k-\epsilon$ 乱流モデル解および QUICK-FRAM 法における $k-\epsilon$ 乱流モデル解が良い一致を示している。しかし、実験結果における計測面1のU成分の不安定性は、いずれの計算値も模擬することはできていない。また、左壁に沿う上昇流の流速分布形状を精度良く再現している計算方法も存在しない。この原因については明らかではないが、特にコーナー部でその差が大きくなっていることを考えると乱流境界条件として使用している壁関数（対数則分布）モデルを見直す必要があるかもしれない。Fig. 3.15 に実験および各計算値のフローパターンを示す。前記した通り、QUICK FRAM 法における層流モデル解では、相当激しい不安定流動が見られる。Fig. 3.16 に、QUICK-FRAM法+ $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて計算したプレナム内乱流粘性係数の等値図を示す。最大値を示す領域は、流入により発生する壁噴流側面であり、 $1.0 \times 10^{-1} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ の値を示す。

Fig. 3.17 にプレナム内各位置における濃度拡散推移の実験値と計算値の比較を示す。まず、流入直後の⑦の位置での比較では、濃度の立ち上がり時間の一致は良好である。しかし、20秒～200秒付近では計算結果が若干高目である。これは、⑦の検出器位置が壁噴流の混合領域内に当り、Fig. 3.14 に示した流速分布の差異がそのまま濃度の差となって現われていると考えられる。実際、計算結果での混合領域幅（壁噴流の拡散）は、実験におけるそれよりも大きい。⑩の位置での比較でも同様の事が言え、かつ⑦での差異が下流側に伝播していることによるものと思われる。⑩の位置での比較では、計算値が低目の値を示しているが、傾向は良く一致している。⑩の位置では、若干高めの傾向を示しているが300秒以降の一致度は良好である。プレナム内で循環を形成し始める⑩の位置での比較では、濃度の立ち上がり時間および濃度にかかなりの違いが見られる。しかし、濃度の立ち上がり時間については、Fig. 3.6の可視化写真から確認できる通り、ウラン雲は約30秒で⑩の濃度センサに到達しており、計算値と良い一致を示している。これは、前述で述べた実験値にセンサ感度上の問題による応答遅れが存在していることを裏付けるものである。⑩、③および⑬での比較では、実験値と計算値で大きな差が見られるが、Fig. 3.4で見られるこれら検出器付近の複雑な流動挙動を計算値が再現できないことが発生しているものと考えられる。また、立ち上がり時間については⑥と同様に濃度検出器の検出感度不足により相当な誤差が実験値側に含まれているものと考えられる。

以上、濃度拡散基礎実験解析結果について述べてきたが、結論として次の2点が言える。

- 1) 流速分布については、1次風上差分法+ $k-\epsilon$ 乱流モデル解あるいは QUICK-FRAM法^{*}+ $k-\epsilon$ 乱流モデル解が実験値との良い一致を示す。

* 運動量計算は QUICK 法である。

2) プレナム内主流位置での濃度分布の比較において、計算値と実験値は良い一致を示す。

3.3 モックアップ実験解析

ブローダウン効果実験結果を用いて、アニュラス形状場における ver. MT の解析能力の検証を行なった。

3.3.1 解析体系および解析条件

解析は、ブローダウン流量をパラメータとし、以下の3ケースを実施した。

- i) $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ (PARA-11^{*}, 定格流量条件)
- ii) $0.02 \text{ m}^3/\text{min}$ (PARA-02^{*})
- iii) $0.10 \text{ m}^3/\text{min}$ (PARA-22^{*})

解析に使用したメッシュ分割および境界条件を Fig. 3.18 に示す。メッシュ数は、R方向22、Z方向81、 θ 方向6であり、総計算セル数は3558個である。境界条件は、アニュラス部外壁(⑥～③⑨)、下部加熱板(⑨)、Xe注入口(④)および空気注入口(①)を除いてNo-Slip、断熱条件とした。表面番号④からのXe注入は、実験条件から温度189℃、流速16.9 cm/s、濃度 3.62×10^4 p.p.m.とした。アニュラス部内壁は、管内が真空状態であることから基本的に断熱と仮定した。但し、この仮定については、定格流量条件のケース($0.05 \text{ m}^3/\text{min}$)について検証(断熱条件で計算した結果と一定温度を与えて計算した結果とを比較)し、実験結果と良い一致を示した条件を用いて残りの計算ケースを行なう。アニュラス部外壁加熱部の軸方向および周方向温度分布は、Fig. 3.19 に示した軸方向および周方向に離散的に得られている実験値を用い、最小自乗法2次内挿によって各セル表面温度を与えた。

以上の計算は、乱流モデルは使用せず^{**}、i)のケースについては1次風上差分法およびQUICK-FRAM法を用い、この両者の実験値との比較結果から良好な差分法を用いて残りのii)およびiii)のケースの計算を行なう。

使用した物性値群(粘性係数温度依存性、密度温度依存性等)は、化学便覧(丸善、1966)記載のものを使用した。

3.3.2 比較および考察

(a) ブローダウン流量 $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$

Fig. 3.20 に解析体系各位置における規格化濃度分布^{***}を示す。実験値との一致は、1次風上差分法およびQUICK-FRAM法による計算結果とも良好であり、かつ、両計算手法による

* 文献7)中の試験ケース番号

** 定格流量の2倍の解析ケースにおいても、アニュラス部内Reが2800程度と小さいため適用しなかった。

*** $\phi_N = (\phi_A / \phi_{IN}) * 100$

ϕ_N 規格比濃度 ϕ_A 計算濃度 ϕ_{IN} 入力濃度

結果に大きな差が見られないことより、アニュラス形状場での濃度計算へは QUICK-FRAM 法の高次差分効果は顕著には現われないことが分かる。Fig. 3.21 に、下部加熱容器内の径方向規格化濃度分布を示す。Xe 注入口レベル ($K=13$) での径方向濃度分布は、ノズルを Xe が出た直後から急速に濃度が減衰し始め、アニュラス部間隙端 (径方向距離で中心から 10 mm 位置) で約 10^{-2} % 濃度に達するような指数関数的な形を示す。この様な傾向は、 $K=9$ 付近の軸方向レベルまで同様で、これ以下のレベルでは $K=5$ の結果に見られる様な径方向にほぼ均一な濃度分布状態に至る。ここに示した傾向は、他の周方向角度 ($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ$) についても同様である。

今回の Ver. MT に用いている質量輸送方程式 (2.1) によるモデル化では、拡散溶質の運動は拡散溶媒の運動に全く支配されるという仮定に則っている。したがって拡散溶媒の挙動を決定づける慣性力および浮力のバランスをきめる流速分布と温度分布について、計算と実験の比較する事により、より詳細な検証が行えると考えられる。

このような観点から以下の考察は、アニュラス部での濃度対流拡散現象を支配するアニュラス部内の温度および流速に関するものであり、1次風上差分法と QUICK-FRAM 法による計算結果の差異に着目したものである。

Fig. 3.22 にアニュラス部中心位置 ($I=6$) における軸方向温度分布を実験値とともに示す。まず、1次風上差分法による結果と QUICK-FRAM 法による結果との比較では、有意な差は認められない。一方、実験値との比較については、軸方向位置 250~1000 mm および 1500~2000 mm の範囲で差が認められる。この差の原因については、以下に順を追って考察する。Fig. 3.23 にアニュラス部径方向温度分布を各軸方向位置について実験値とともに示す。この結果についても、1次風上差分法による結果と QUICK-FRAM 法による結果とで有意な差は認められない。実験値との比較では、各軸方向断面で加熱管側から内管側に移るに従いがい、その差が大きくなっていることが判かる。これは、加熱管壁に温度測定値を与え、内管壁は断熱として取扱ったことが原因である。すなわち、測定温度が内壁近くで高くなる傾向から考えると、内管壁軸方向熱伝導効果は無視できず、解析上この断熱壁設定は不適切であることが結論づけられる。この解析的検証は、以下で述べる。次に、Fig. 3.24 に $Z=1990$ mm 位置における周方向温度分布を実験値とともに示す。この結果についても、先の結果と同様に差分法の違いによる結果への影響は認められない。実験値との比較では、いずれの位置においても計算値が低目の値を示しているが、実験における温度分布の傾向と良く一致している。この差の原因についても以下で述べる。Fig. 3.25 に $Z=1990$ mm 位置におけるアニュラス部径方向流速分布を示す。各周方向位置での流速分布とも下に凸の分布を示し、かつ加熱管側で浮力の効果により若干持ち上げられ歪んだ分布となっているが、逆流 (上昇) を起こすまでには至っておらずローダウン効果は十分である。1次風上差分法による結果と QUICK-FRAM 法による結果との比較では、周方向位置 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ で QUICK-FRAM 法が大き目、 $240^\circ, 300^\circ$

位置で小さい目の結果を与えているのが判かる。この結果の差は、QUICK-FRAM法の特徴の1つである数値拡散低減効果によるものと思われ、数値的拡散（粘性）誤差が減少したことにより全体的な流速分布がシャープになっている。しかし、この両者の差は、最大で約7%（ $\theta = 300^\circ$, 3 mm 位置）であり、下降流が上昇流に転ずるといった傾向の逆転までは起きていない。これらのことから、アニュラス部の様な狭間隙な体系では、流れが1次元的となり QUICK-FRAM 法の有利性はそれ程顕著には現われず、1次風上差分法による結果で十分に代用できることが確認できる。

以下に内管壁の温度を実験値から内外挿し、一定温度境界として計算した結果（1次風上差分法）について述べる。内管壁温度の実験値は、アニュラス下端より、200 mm, 1000 mm, 1850 mm 位置の3点のみであり、温度勾配の激しいアニュラス下端から約500 mm 上部の温度分布は全く不明である。ここでは、簡単のため、内管壁軸方向温度分布勾配が外管壁軸方向温度分布勾配（Fig. 3.19）に従うものとし、実験値3点を用いて軸方向全域に渡って最小自乗法により内外挿を行なった。内外挿結果を Fig. 3.26 に示す。周方向については、内管壁測定点が 300° の1点のみのため、他の角度については、 300° 位置における内管壁温度と外管壁温度の差が保たれるとして Fig. 3.19 の結果から完全な推定を行なった。

Fig. 3.27 に内管壁を断熱とした場合の結果と一定温度境界とした場合の結果をアニュラス部径方向温度分布について示す。この結果から、内管壁の温度を考慮して計算した場合の方が実験値とは一致度は良好であるが、アニュラス部中心付近での実験値よりも低目の傾向は依然として残っている。Fig. 3.28 に $Z = 1990$ mm 位置での周方向温度分布の比較を示す。この比較では、 $0^\circ \sim 180^\circ$ 位置での温度は実験値に近づいてはいるものの、 $240^\circ \sim 300^\circ$ 位置での温度に大きな改善は見られない。これらの差異は、アニュラス壁面からの入熱量の過少評価等が第1に考えられるが、Nusselt 数を垂直二重円管内における実験式から 5.0 に再設定（上述してきた結果は $Nu = 1.0$ での結果）して計算したが、温度結果への影響は最大で 0.8°C で微小であった。また、他の影響因子として、径方向および周方向のメッシュ効果（偏流の過少評価等）が考えられるが、径方向については、温度分布が流体中でなだらかであることから影響は小さいと考えられる。周方向メッシュ分割については、計算上の記憶領域および計算時間に制約があるため細メッシュでの計算は避けたが、より細かいメッシュ分割が必要であろうと考えられる。

以上述べてきた様に、アニュラス部形状を有する本モックアップ実験解析では、以下に示す点が明らかとなった。

- 1) 1次風上差分法で十分代用できる。
- 2) 内管壁温度の考慮が必要である。
- 3) 周方向メッシュの細分化が必要である。

以上を踏まえて、残りのブローダウン流量条件の解析を行なう（但し、3）は未考慮）。

(b) ブローダウン流量 $0.02 \text{ m}^3/\text{min}$

以降の計算は、全て1次風上差分法によるものである。Fig. 3.29 に解析体系各位置での規格化濃度分布を示す。実験値との比較では、下部加熱容器内で良好な一致を示しているが、アニユラス部内では実験値測に N.D. (Not Detected, 未検出, 検出限界以下) を示す位置があるため数値同志の比較はできない。検出器 No. 9 位置では、計算値が実験値の約 2 倍の値を示しているが、実験値の測定精度を考えると計算値は実験値を良く再現していると言える。Fig. 3.30 に、下部加熱容器内の径方向規格化濃度分布を示す。Xe 注入口ノズルからの濃度の減衰挙動は (a) に示した $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ ブローダウン流量条件の場合のそれとほぼ同様であるが、アニユラス部間隙 10 mm 位置での濃度はかなり大きな値を示している。これは、アニユラス部から下部加熱容器内へ吹き出す噴流強度がブローダウン流量の減少とともに弱まったためであり、アニユラス部間隙 10 mm 中の濃度は径方向についてほぼ均一な値となっている。

以下は、3.3.2 節と同じ観点に基づき、アニユラス部内の温度および流速について実験値との比較を考察したものである。

Fig. 3.31 にアニユラス部内外管壁軸方向温度分布を示す。各内外挿方法は、 $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ ブローダウン流量の場合と同様である。ここで、アニユラス部内外壁温度がほぼ等しいのは、この流量条件に於ては高温の下部プレナムガスがアニユラス部に進入しているためであり、詳しくは以下で述べる。

Fig. 3.32 にアニユラス部径方向中心位置 ($I = 6$) における軸方向温度分布を実験値とともに示す。両者の一致度は $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ ブローダウン流量条件の場合よりも良好で、ほぼ 2°C 以内で一致している。Fig. 3.33 にアニユラス部径方向温度分布を軸方向各位置について実験値とともに示す。各軸方向位置についても、加熱管側から内管側に移るに従がい実験値と計算値の差は大きくなっているが、その程度は、 $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ ブローダウン流量条件の場合よりもはるかに小さく、良く一致していると言える。Fig. 3.34 に $Z = 1990 \text{ mm}$ 位置における周方向温度分布を示す。実験値と計算値の一致度は、 $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ ブローダウン流量条件での結果よりも良好ではあるが、いずれの周方向位置についても計算値が実験値よりも低目である傾向は依然として残っている。Fig. 3.35 に $Z = 1990 \text{ mm}$ 位置におけるアニユラス部径方向流速分布を周方向 6 点について示す。この結果では、 $0^\circ, 240^\circ, 300^\circ$ の周方向 3ヶ所で上昇流、また $60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ の周方向 3ヶ所で下降流を示し、全周で一循の循環流が形成されていることが分かる。この様に、下部加熱容器内の高温ガスがアニユラス部に進入するため、アニユラス部内ガス温度は加熱壁からの入熱よりもアニユラス部内に進入してくる高温ガス温度の挙動に依存することになる。すなわち、Fig. 3.31 ~ Fig. 3.34 で示した各温度分布が実験結果と良く一致する傾向は、壁温依存型の挙動（不確かな壁温情報による計算解）から進入ガス温度依存型の挙動に移行したことによるためと考えられる。

(c) ブローダウン流量 $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$

Fig. 3.36 に解析体系各位置における規格化濃度分布を示す。下部加熱容器内での実験値との一致は良好であり、また、アニュラス部内へ Xe ガスが進入していない傾向も一致している。Fig. 3.37 に下部加熱容器内の径方向濃度分布を示す。各軸方向レベルでの傾向は、(b)に示した $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ ブローダウン流量条件でのものと同様である。

Fig. 3.38 にアニュラス部内外壁温度の軸方向温度分布を示す。同軸方向位置でのアニュラス部内外壁間の温度差は、かなり大きくなっている。

Fig. 3.39 にアニュラス部径方向中心位置 ($I = 6$) における軸方向温度分布を示す。この結果も、 $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ ブローダウン流量条件での結果と同様に、アニュラス部下端位置付近

($1000 \sim 2000 \text{ mm}$) で計算値が低目の傾向を示している。Fig. 3.40 にアニュラス部径方向温度分布を軸方向各位置について示す。この結果についても他の 2 ケースでの結果と同様に、アニュラス部中心付近で計算値が低目の傾向を示している。Fig. 3.41 に $Z = 1990 \text{ mm}$ 位置での周方向温度分布を示す。結果は、 $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ ブローダウン流量条件での結果と同様で、いずれの周方向位置についても計算値が実験値よりも低目である。Fig. 3.42 に $Z = 1990 \text{ mm}$ 位置におけるアニュラス部径方向流速分布を示す。このブローダウン流量条件では、いずれの周方向位置についても下降流であり、周方向での流速差および径方向での流速分布の歪みは $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ ブローダウン流量条件での結果よりも減少している。これは、ブローダウン流量が増加したことによりアニュラス部内流速が増し、単位質量当りのエンタルピ上昇量（加熱壁からの入熱）が減少したためである。このため、周方向および径方向各位置間の温度差が小さくなり、浮力効果がブローダウンによる下向きの慣性力よりも小さくなったことによるものと解釈できる。

第4章 高速原型炉「もんじゅ」実機適用解析

4.1 解析対象領域

Fig. 4.1 に高速原型「もんじゅ」炉容器の炉心部から上の構造および構成を示す。炉心上部は、固定プラグ、炉心上部機構および回転プラグ等の機器から構成される。燃料交換時には、固定プラグ上面に燃料交換器および燃料出入機が設置され、燃料集合体等の炉心構成要素はそれぞれ燃料交換孔、燃料出入孔を通して取り扱いがなされる。

今回評価の対象とした領域は、燃料出入孔近傍であり、軸方向に Na 液面より炉内中継装置用接続筒上端までの約 11m、半径方向に約 3.7m の領域とした。

4.2 解析体系および解析条件

前節で示した解析領域を抜き出し、Fig. 4.2 に示す。燃料出入孔プラグは、固定プラグ下端位置より 1900mm 引き抜かれている状態を想定し、炉停止後 40hr 経過時の各温度条件を用いて解析評価するものとする。

Fig. 4.3 に炉停止後 40hr 経過後の炉内中継装置胴側の軸方向温度分布⁶⁾を示す。図中に示した 0° および 180° は原子炉基準方位を示し、180° は炉心上部機構側に相当する。

Fig. 4.4 にメッシュ分割図をまた、解析条件一覧を Table 4.1 に示す。解析は 3 次元体系で実施し、各方向のメッシュ数は、 $39^i \times 6^j \times 37^k$ で、総計算セル数は 4500 個である。境界条件として、流れについては全て No-Slip とし、新鮮 Ar ガス注入位置 ($i=23, j=1, k=31$) に一定流速規定、カバーガス空間の径方向側 ($i=39, j=1 \sim 6, k=1 \sim 3$) は連続流境界とした。温度については、炉内中継装置胴側軸方向に Fig. 4.3 に示した温度を温度一定境界（但し、同方向については、0° および 180° の値を用いて内挿により同方向 6 点の値を軸方向それぞれについて計算）として与え、Na 液面境界は 200°C 一定温度境界とした。その他の境界については、全て断熱条件とした。濃度境界については、カバーガス空間を一定濃度境界として規定し、1000 ppm* を与え、他は零 (No Diffusivity) 境界とした。

計算ケースは、以下の 3 種類とする。

- (1) 定格ブローダウン条件 (0.1m³/min)
- (2) 1/2 定格ブローダウン条件 (0.047m³/min)
- (3) ブローダウン無し条件

(1) および (2) の計算ケースは、定格あるいは定格の 1/2 のブローダウン流量を与えた場合に

* 計算結果に対する評価は、全て入力濃度に対する割合で行なうため、この値に意味は無い。

放射性カバーガスが燃料出入孔内に進入するか否かを確認するものである。(3)の計算ケースは、定格ブローダウン中に、機器の故障でブローダウンが停止した場合の、燃料出入孔内の各位置での濃度推移を確認するものである。

(1)および(2)での計算手順は、まず流体(ガス)静止状態から、運動量、エンタルピーおよび濃度の計算を同時に開始し、各物理量の時間ステップ間での相対変動量が 5×10^{-5} に到達するまで定常計算を行なう。

(3)の計算は、(1)の定常解を用い、過渡計算開始とともにブローダウン流量をトリップさせて条件を模擬する。

この過渡計算は、トリップ後1000秒まで行なう。

以上の計算は、1次風上差分法を使用し、かつ乱流モデルは用いない条件で行なう。これは、前章に示した様に、アニュラス部等の狭間隙部においては高次差分の効果は無視し得る程度に小さく、またアニュラス部内では流れが層流であるとの根拠に基づくものである。

以上の計算で使用した物性値群は、化学便覧(丸善、1966)記載の値を使用した。

4.3 解析結果および考察

(a) 定格ブローダウン流量(0.1m³/min)条件

Fig. 4.5 に各軸方向位置での規格濃度分布(a)とプラグ貫通部内軸方向濃度分布(b)を示す。(a)図より、固定プラグ下端から3905mm位置までは放射性カバーガスは進入していないことが分かる。また(b)図より、プラグ貫通部壁に近づく(I=1→I=15)に従いがい濃度が減少してゆく様子が理解できる。これは、ガスブローダウンによる慣性力が温度分布による浮力に勝っていることを表わすものであり、ブローダウン効果が十分であることを示している。

3.2.2節に述べた観点に基づきアニュラス部内での温度および流速分布について以下に考察する。これから実機体系での特徴が明確に示される。

Fig. 4.5 に固定プラグ下端位置より1875mmの位置(K=11)に於ける周方向温度分布をアニュラス部内側、中心および外側の3位置について示す。この結果から判かる通り、各位置とも周方向に大きな温度分布は見られない。また、アニュラス外側セルでの温度が他の2つの位置のものよりも高く、カバーガス空間の高温流体が上昇してきている様子は見られない。

Fig. 4.7 に軸方向同位置での径方向温度分布を周方向6点について示す。この結果からも判かる通り、アニュラス部内側から外側に向うに従がって温度が上昇しており、カバーガス空間中の高温流体の上昇の様子は見られない。

Fig. 4.8～Fig. 4.10にアニュラス部径方向3位置における軸方向温度分布を示す(固定プラグ下端位置を零として、1.93m～3.93mの区間)。アニュラス部外側で若干の軸方向温度勾配が見られるものの、他の位置ではほぼ平坦な温度分布を示していることが判かる。

Fig. 4.11に固定プラグ下端位置より1875mmの位置(K=11)に於ける径方向流速分布を周

方向6位置について示す。この結果では、いずれの周方向位置においても下に凸の流速分布を示し、上昇流の存在は認められない。周方向で流速分布に差が現われていることの原因は、新鮮Arガスの吹き込み角度(0°)および周方向温度分布による浮力と吹き込みガスの慣性力の均り合いによるものであると考えられる。

Fig. 4.12に固定プラグ下端位置より3905mmの位置(K=16)に於ける周方向温度分布をアニュラス部内側、中心および外側の3位置について示す。この軸方向位置での結果は、Fig. 4.6に示した1875mm(K=11)での結果よりも温度が全体に渡り低下しているとともに、周方向での温度分布もさらに減少している事が判る。

Fig. 4.13に軸方向同位置における径方向温度分布を周方向6点について示す。この結果についても、Fig. 4.6に示した1875mm(K=11)での結果に比べ、アニュラス部外側セルでの温度上昇も微小となっている事が判る。

Fig. 4.14に固定プラグ上部4.03m~6.03mの軸方向温度分布をアニュラス部中心位置(I=12)について示す。この結果から、軸方向温度分布は微小であることが判る。

Fig. 4.15に固定プラグ下端位置より3905mmの位置(K=16)における径方向流速分布を周方向6点について示す。この結果でも、いずれの周方向位置においても下に凸の流速分布を示している。また、アニュラス部間隙の縮小により、径方向に流速分布が歪んだ形となっている。

(b) 1/2 定格ブローダウン流量(0.047m³/min)

Fig. 4.16に軸方向各位置での規格化濃度分布を示す。放射性カバーガスは、固定プラグ上部3905mm位置(K=16)まで上昇するが、その濃度はカバーガス中濃度の約10⁻⁴%以下であり、かなり希薄である。(b)図より、プラグ貫通孔内はかなり高濃度のカバーガスで満たされるが、アニュラス部に近づくにつれ急激な減少を示す。

Fig. 4.17に固定プラグ下端位置より1875mmの位置(K=11)に於ける周方向温度分布をアニュラス部内側、中心および外側の3位置について示す。まず、径方向位置での比較では、アニュラス部内側からアニュラス部外側に向うに従って全体的に温度が上昇してゆくのが判る。一方、周方向位置での比較では、180°位置をピークとするコサイン分布形を各アニュラス部位置で示している。この周方向温度分布形は、Fig. 4.3に示した炉内中継装置胴側の入力周方向温度分布形に従ったものである。

Fig. 4.18に軸方向同位置に於ける径方向温度分布を周方向6点について示す。この結果からも、アニュラス部内側からアニュラス部外側に向うに従って温度が上昇し、かつ180°位置での断面が最も高い温度分布を示しているのが分かる。また、アニュラス部最外周位置(I=15)での温度が入力壁温値(60°C)に対して高く、アニュラス部内側に向うに従って温度が低下してゆく挙動は、カバーガスからの浮力流がアニュラス部外側壁に沿って上昇してゆく様子を示している。

Fig. 4.19～Fig. 4.21にアニュラス部径方向3位置における軸方向温度分布を示す（固定プラグ下端位置を零として、1.93m～3.93mの区間）。ここに示した結果は、定格グロウダウン条件での結果とは明らかに違い、軸方向温度勾配が周方向各位置で大きくなっていると同時に、周方向6点間でも明らかに温度差が現われている。この温度差の程度はアニュラス部外側位置（I=15）が最も大きく、かつ180°位置が最大温度差約130°Cを持つ。

Fig. 4.22に固定プラグ下端位置より1875mm位置（K=11）における径方向流速分布を周方向6点について示す。この結果から、120°、180°、240°の周方向位置で上昇流、0°、60°、300°の周方向位置で下降流を示し、全周で1ペアの循環流が形成されていることが判かる。

Fig. 4.23に固定プラグ下端位置より3905mm位置（K=16）における周方向温度分布をアニュラス部内側、中心および外側の3位置について示す。この結果から、Fig. 4.17の1875mm位置で見られた周方向温度分布は解消していることが判かる。また、アニュラス部径方向各位置での温度も接近している。

Fig. 4.24に軸方向同位置における径方向温度分布を周方向6点について示す。この結果から判かる通り、径方向温度分布はほぼ平坦となっているが、アニュラス部間隙が12.5mmから35.0mmに拡大する付近で温度の若干の上昇が見られる。

Fig. 4.25に固定プラグ上部4.03m～6.03mの軸方向温度分布をアニュラス部中心位置（I=12）について示す。ここでも、1.93m～3.93mの区間で見られた温度勾配が解消していることが判かる。

Fig. 4.26に固定プラグ下端位置より3905mmの位置（K=16）における径方向流速分布を周方向6点について示す。この結果では、いづれの周方向位置についても浮力による上昇流は認められない。

(b) 評価式に関する検討

ここでは、モックアップ実験⁷⁾により得られている慣性力と浮力との平衡条件に関する評価式の比較検討を行なう。モックアップ実験結果から、以下に示す自然対流発生条件式が提案されている。

- (i) $Gr^*/Re > 10$ 自然対流支配領域
- (ii) $10 > Gr^*/Re > 3$ 混合対流域
- (iii) $Gr^*/Re < 3$ 強制対流支配領域

ここで、

$$Gr^* = \frac{g \beta D_e^4}{\nu^2} \cdot \frac{dT}{dZ}$$

$$Re = \frac{V \cdot D_e}{\nu}$$

D_e : 等価直径

g : 重力加速度

β : 体積膨張率

ν : 動粘性係数

V : 流速

dT/dZ : 温度勾配 (dZ は固定プラグ上部 1.93m~3.93mの約2m, ΔT はアニュラス部中心温度)

定格ブローダウン条件および1/2定格ブローダウン条件の2種の解析結果を用い、上記判定条件の確認を行なった。軸方向評価位置は、固定プラグ下端位置上部の1.93m~3.93mの区間である。評価に使用したアニュラス部流速は、体積流量とアニュラス部断面積より計算した平均値を用い、温度分布は周方向6点の解析結果そのものを用いた。

評価結果を Table 4.1 に示す。同 Table中最下欄が Gr^*/Re であり、定格ブローダウン条件の $0.1\text{m}^3/\text{min}$ のケースでは、いずれの周方向位置においても $Gr^*/Re=1.15$ となり、先に示した強制対流支配領域に入る。一方、1/2定格ブローダウン条件の $0.047\text{m}^3/\text{min}$ のケースでは、 180° 位置における $Gr^*/Re=14.78$ を最大に、いずれの周方向位置についても $Gr^*/Re=3.0$ 以上の混合対流域あるいは自然対流支配領域に入る。

この両者の一致傾向は、濃度分布計算 (Fig. 4.15 および 4.26) から裏付けられ、これによりモックアップ実験から得られた評価式が実機においても適用できることが確認された。

(d) ブローダウン無し条件

Fig. 4.27にブローダウン流量トリップ後1000秒間のアニュラス部2箇所での濃度推移を示す。この濃度値は、カバーガス空間に与えた濃度1000ppm、で規格化したものである。アニュラス部下端 (15^i , 4^j , 11^k)での濃度は、トリップ後300秒間で10%濃度まで急激に上昇し、その後ゆるやかに上昇を続け1000秒経過時に60%濃度に到達する。一方、ドアバルブ位置 (12^i , 4^j , 29^k)では、ほぼ直線的に増加し、1000秒経過で13%濃度まで上昇する。1000秒以降は計算は行っていないが、Fig. 4.31で示した通りアニュラス部下部から上部へ常にカバーガス空間内ガスが吹き抜けていることを考慮すると、図中に示した濃度曲線の延長として100%濃度へ漸近すると予想される。

Fig. 4.28にブローダウン流量トリップ後1000秒間のアニュラス部各部のArガス温度推移を示す。アニュラス部下端 (15^i , 4^j , 11^k)*でのガス温度は、トリップ後150秒間で 66°C から 164°C へ急激に上昇し、その後850秒かけて 240°C までゆるやかに上昇する。一方、同位置での軸方向ガス流速は、Fig. 4.29に示す様にトリップ後約50秒ではほぼ零になり、その後徐々に上昇する。この初期の急激な温度の上昇は、アニュラス部下端での軸方向流速がトリップと共に急激に零に近づくため、アニュラス部外壁からの入熱が効き出すと共にアニュラス

* 周方向中、 180° 位置 ($j=4$) が最も高い温度および流速を示す。

部下部の高温ガスがアニュラス部に進入し始めることが原因と解釈できる。この詳細については、後で触れる。

同シミュレーション結果のうち、ドアバルブ位置 (12^i , 4^j , 29^k)*での温度および流速の挙動は、Fig. 4.28, Fig. 4.29内に「□」印で示した通りである。この位置での挙動は、入熱も少なく流速も小さいため大きな変化は見られないが、600秒辺りから対流輸送により流速および温度が上昇し始める。

Fig. 4.30およびFig. 4.31に各時間断面におけるアニュラス部下端の径方向温度・流速分布を示す。温度分布については、時間の進行に従って下に凸の分布形状から上に凸の分布形状に遷移し、これはカバーガス空間内の高温ガスの上昇を明確に示している。また、流速分布については、100秒経過後から径方向全体について上昇に転じていることが判かる。但し、I方向セル15（アニュラス部外壁隣接セル）については、 $t=20$ 秒の段階で微少な上昇流を示し、アニュラス部径方向について上昇流と下降流が混在した複雑な流況となっていることがうかがえる。トリップ後1000秒経過した時点では、径方向全体に渡り上昇流を示すとともに、そのピーク位置はI方向セル13（アニュラス部中央付近）近傍に移動している。このことは、アニュラス部外壁から入熱による浮力流から、カバーガス空間内の高温ガス流体による浮力流に移行したことを示し、完全な自然対流場が形成されつつあることを表わしている。

Fig. 4.32にアニュラス部全域についての θ -Z断面における流速プロットを示す。(a)図は、最も幅の狭いアニュラス部 ($K=11\sim 15$)での中心断面 ($I=12$)での結果であり、(b)図は、同アニュラス部外壁隣接セル断面 ($I=15$)での結果である。各断面での結果とも、 0° 位置での下降流および 180° 位置での上流ともその絶対値は他の角度での値に比べ極端に大きい。これは、解析における周方向メッシュ分割数の不足が主に原因していると考えられる。

* 周方向中、 180° 位置 ($j=4$)が最も高い温度および流速を示す。

第5章 結 話

高速原型炉「もんじゅ」の燃料出入孔におけるガスブローダウン効果を確認するため、質量輸送方程式を新たに組み込んだ汎用多次元熱流動解析コード COMMIX-PNCの質量輸送版 (Ver. MT) を開発した。Ver. MT の検証は、濃度拡散基礎実験およびガスブローダウンモックアップ実験を用いて行なった。

濃度拡散基礎実験を用いた検証では、以下の項目が明らかにされた。

- (1) 流動が乱流領域にある当該実験解析ケースでは、QUICK-FRAM 法+k- ϵ 乱流モデルを使用した解析解が実験値 (流速, 濃度) との良い一致を示す。

また、モックアップ実験を用いた検証については、以下に示す項目が明らかにされた。

- (1) アニュラス部のような3次元効果が無視し得る領域の解析では、QUICK-FRAM 法による数値粘性低減の効果は微少であり、計算時間の短い1次風上差分法による解析解で十分実験結果を再現できる。
- (2) アニュラス部での濃度挙動は、実験における挙動と良い一致傾向を示し、アニュラス形状での濃度挙動の解析に適用出来る。

上記実験検証を踏まえ、高速原型「もんじゅ」実機におけるブローダウン効果の解析を行なった結果、以下の確認が得られた。

- (1) アニュラス部ギャップ幅が一定のモックアップ試験から得られたブローダウン効果評価式が、実機のようにギャップ幅が変化する体系においても適用できる。
- (2) 実機における設計ガスブローダウン流量は妥当である。

参 考 文 献

- 1) 村松他 “多次元熱流動解析コードの整備・改良(Ⅱ)
タスク 1 : COMMIX-1A への $k-\epsilon$ 2 方式乱流モデルの追加 ”
PNC 資料 SN941 85-14, 1985
- 2) 前川他 “多次元熱流動解析コードの整備・改良(Ⅱ)
タスク 2 : 数値拡散防止差分法の検討 ”
PNC 資料 N9410 86-022, 1986
- 3) 村松他 “多次元熱流動解析コードの整備・改良(Ⅱ)
タスク 3 : PCG 法の検討 ”
PNC 資料 SN941 85-90, 1985
- 4) R.B.Bird, ed. “Transport Phenomena ”
John Wiley & Sons, Inc. 1960
- 5) 伝熱工学資料 第 2 版 p.111, 日本機械学会
- 6) 鈴木 “ブローダウン実機解析モデルに係る温度条件について”, 東芝, 技術連絡票
ECS-FS-21400
- 7) 佐藤他 “「もんじゅ」しゃへいプラグ部ガスブローダウン試験 (第 1 報) ブローダウン効果実験 ”
PNC 資料

Table 3.1 Analytical Condition for Fundamental Experiment of Concentration Diffusion

Items	Conditions	Note
Geometry	Box 2D X-Z	
Mesh No. in X	51	
" in Y	1	
" in Z	51	
Mesh Size in X	0.005, 49 × 0.01, 0.005 (m)	
" Y	0.05 (m)	
" Z	0.005, 49 × 0.01, 0.005 (m)	
Inlet Velocity	10.0 (cm/s)	
Solid Boundary	No-Slip	
Outlet Boundary	Continuative Velocity Outlet	
Water Temperature	20°C Isothermal	
Inlet Concentration	10 (p.p.m)	
Diffusivity	0.722×10^{-4} (m ² /s)	
FDM Scheme	1st Order Upwind, QUICK-FRAM	
Turbulence Model	Laminar, k-ε Model	
ε ₁	10 ⁻⁴	default
ε ₃	5 × 10 ⁻⁵	default
ε ₅	10 ⁻⁵	default

Table 4.1 Analytical Condition for Gas Blow-Down
Effect of MONJU

Items	Conditions	Notes
Geometry	Cylindrical R- θ -Z	
Mesh No. in R	39	
" θ	6	
" Z	37	
Mesh Size in R		
" in θ		
" in Z		
Blow-Down Flow rate	0.1m ³ /min, 0.047m ³ /min, 0.0m ³ /min	
Temperature of Blow-Down Gas	20°C	
Solid Boundary	No-Slip	
Outlet Boundary	Continuative Velocity Outlet	
Input Concentration	1000 p.p.m. in Cover Gas Space	
Diffusivity	0.5 × 10 ⁻⁴ (m ² /s) at 300°C	Ar Self diffusivity
FDM Scheme	1st Order Upwind	
Turbulence Model	OFF, Laminar	
ϵ_1	10 ⁻⁴	default
ϵ_3	5 × 10 ⁻⁵	default
ϵ_5	10 ⁻⁵	default

Table 4.2 Calculated Results of Dimensionless Parameters for Gas Blow-Down Effect

Items	Blow Condition Angle		0.1 m ³ /min						0.047 m ³ /min					
	0	60	120	180	240	300	0	60	120	180	240	300		
De (m)	0.025						←							
ΔZ (m)	2.03						←							
W _{AV} (m/s)	0.184						0.087							
Re	324						157							
ν (m ² /s)	0.1422·10 ⁻⁴ at 40°C						0.2002·10 ⁻⁴ at 90°C							
β (1/°C)	0.3190·10 ⁻² at 40°C						0.2750·10 ⁻² at 90°C							
g (m/s ²)	-9.807						-9.807							
ΔT/ΔZ (°C/m)	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	36.95	34.48	40.39	61.08	51.72	36.95		
Gr*	372	372	372	372	372	372	971	906	1061	1605	1359	971		
Gr*/Re	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	8.94	8.34	9.77	14.78	12.51	8.94		

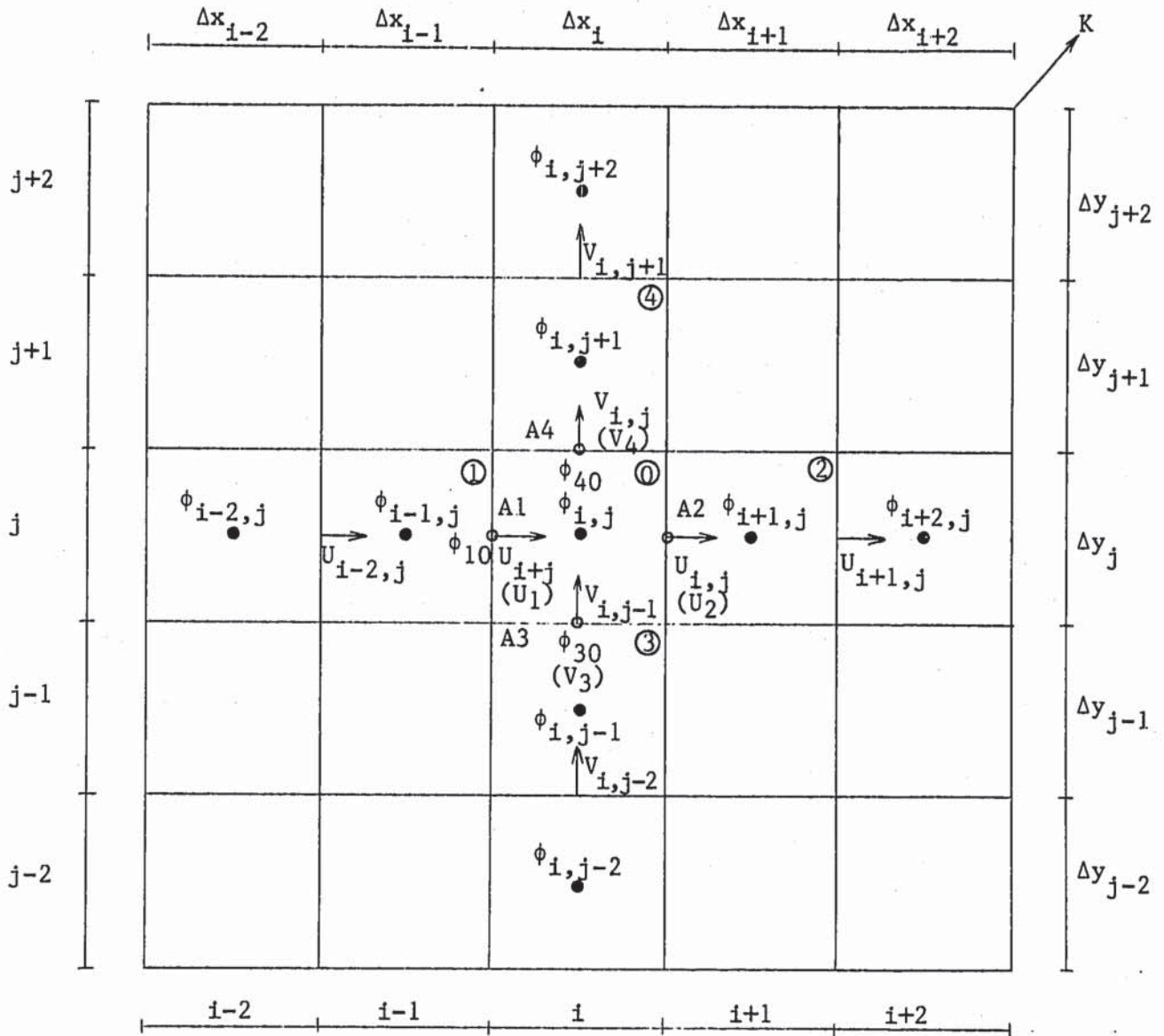


Fig. 2.1 Scalar Quantity ϕ and Velocity Definitions in Computational Cells

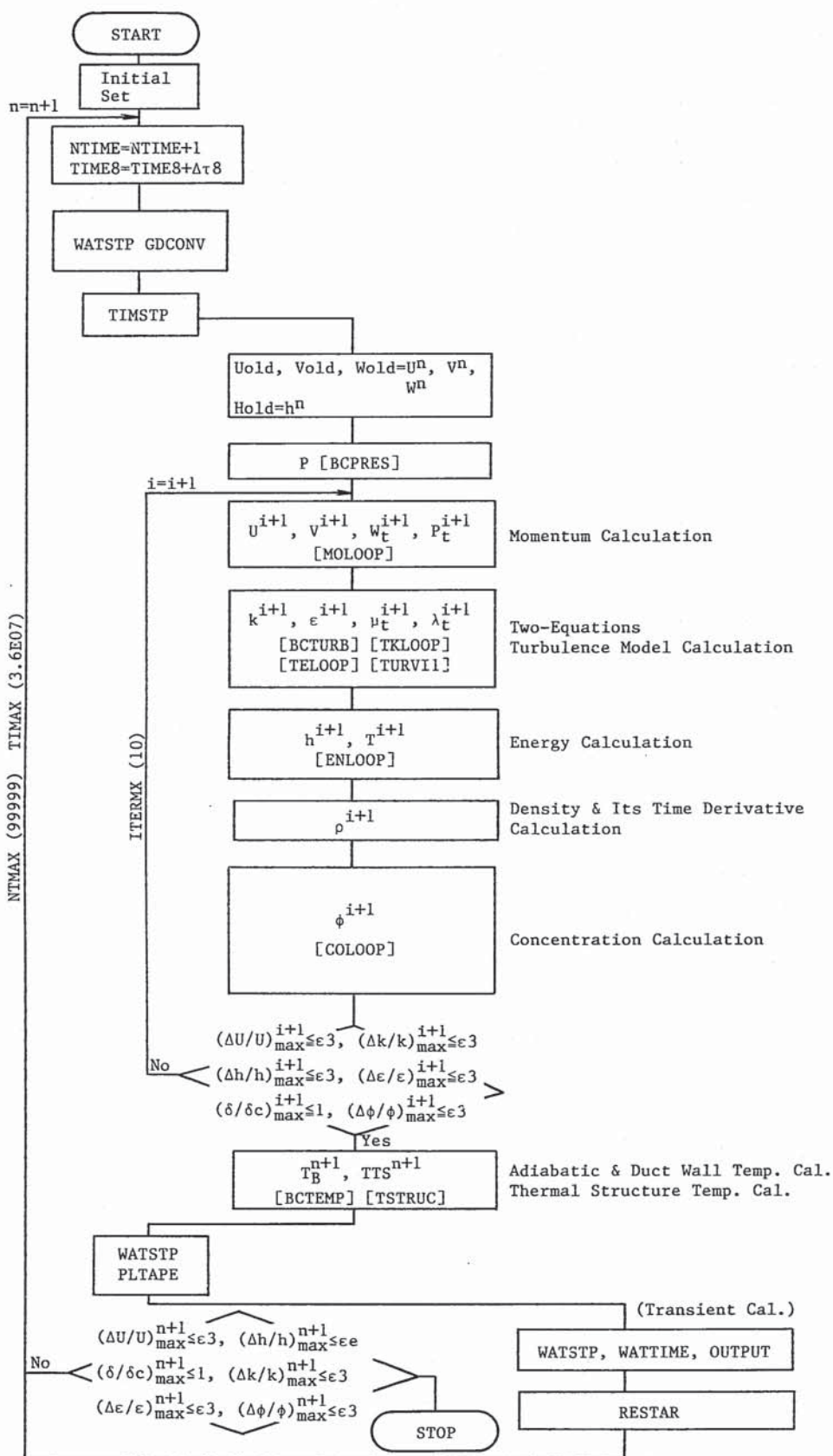


Fig. 2.2 Overall Flow Chart of COMMIX-PNC

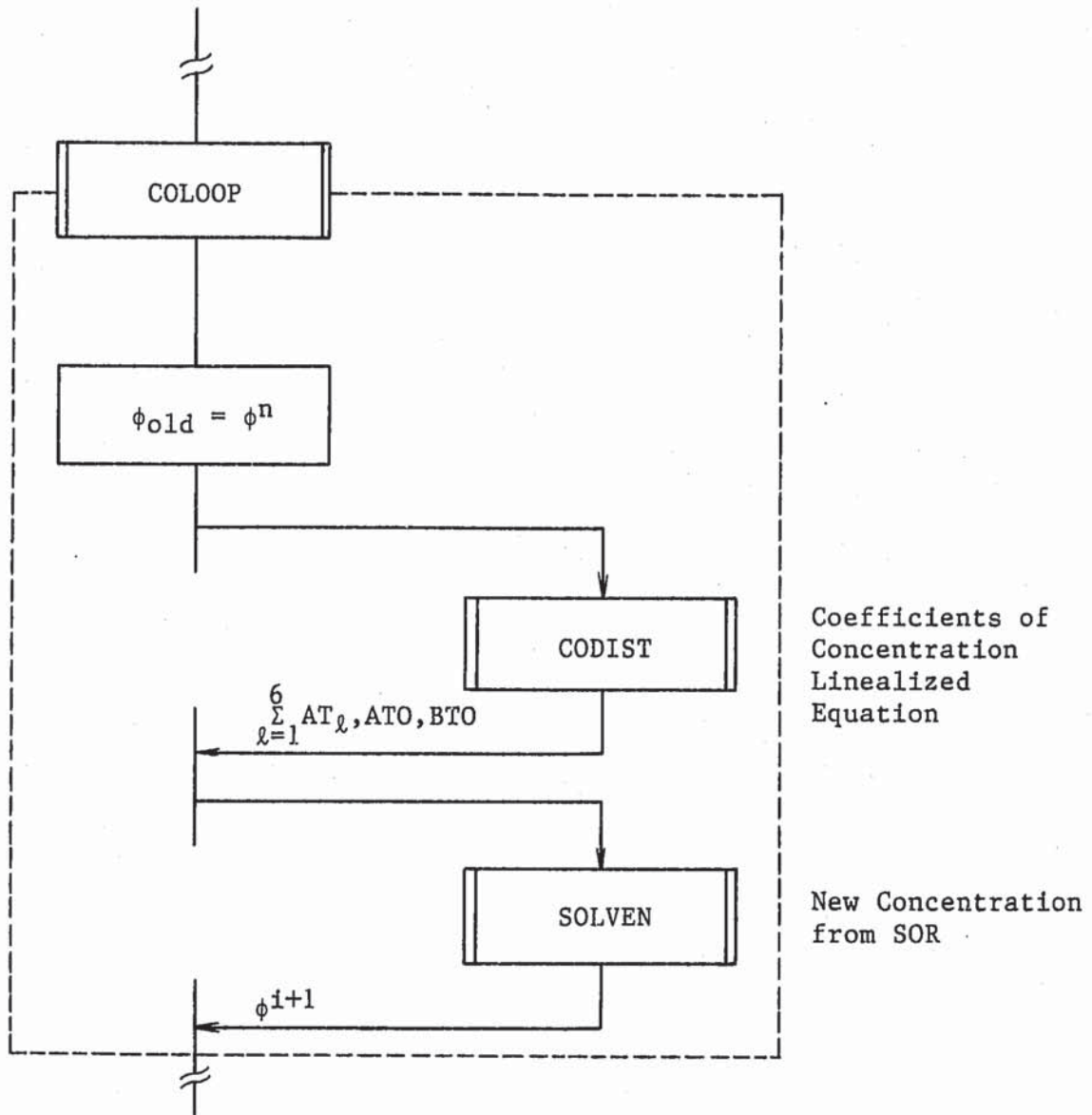
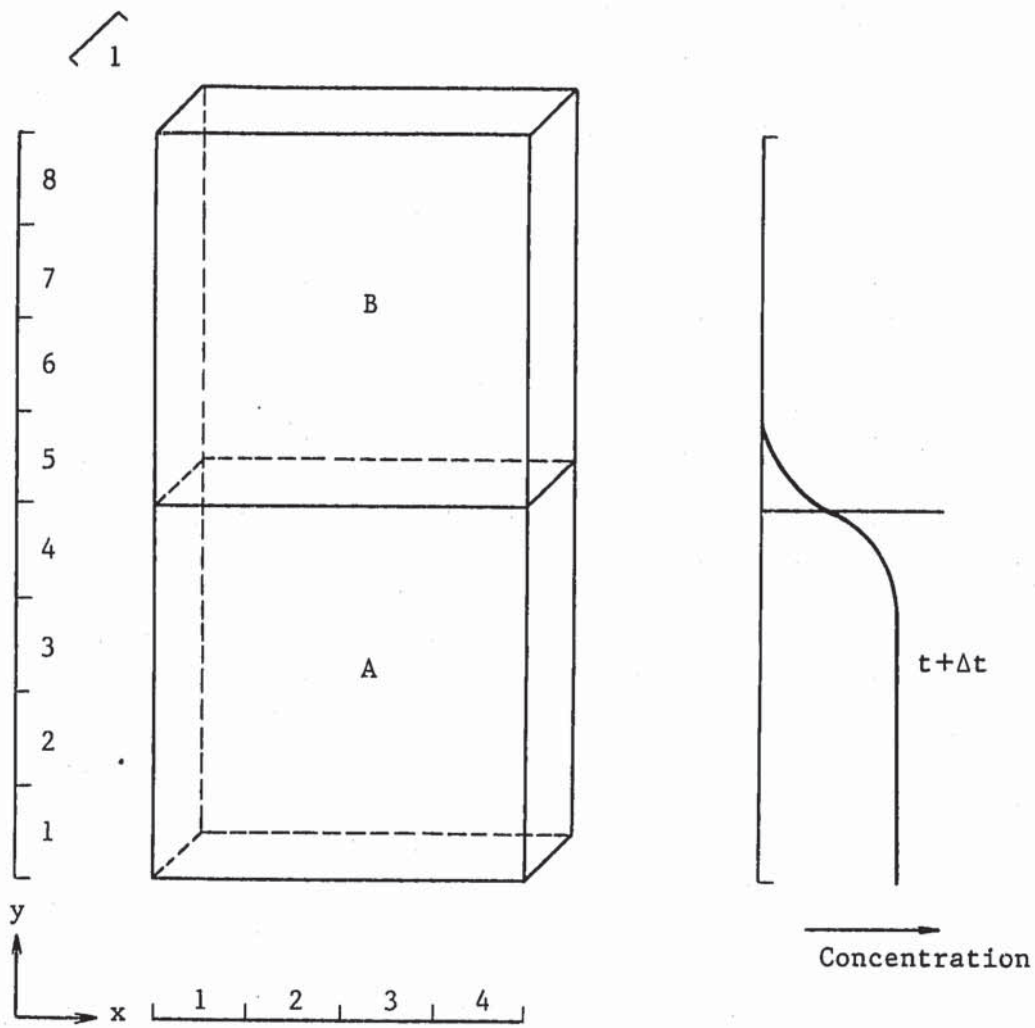


Fig. 2.3 General Flow Chart of Concentration Calculation



$\Delta x, \Delta y = 1\text{cm}$

Carrier Gas : He

Region A : Ar 50ppm

Region B : Ar 0ppm

$D_{AB} : 0.621 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
at 20°C

Fig. 2.4 Gas Diffusion Problem

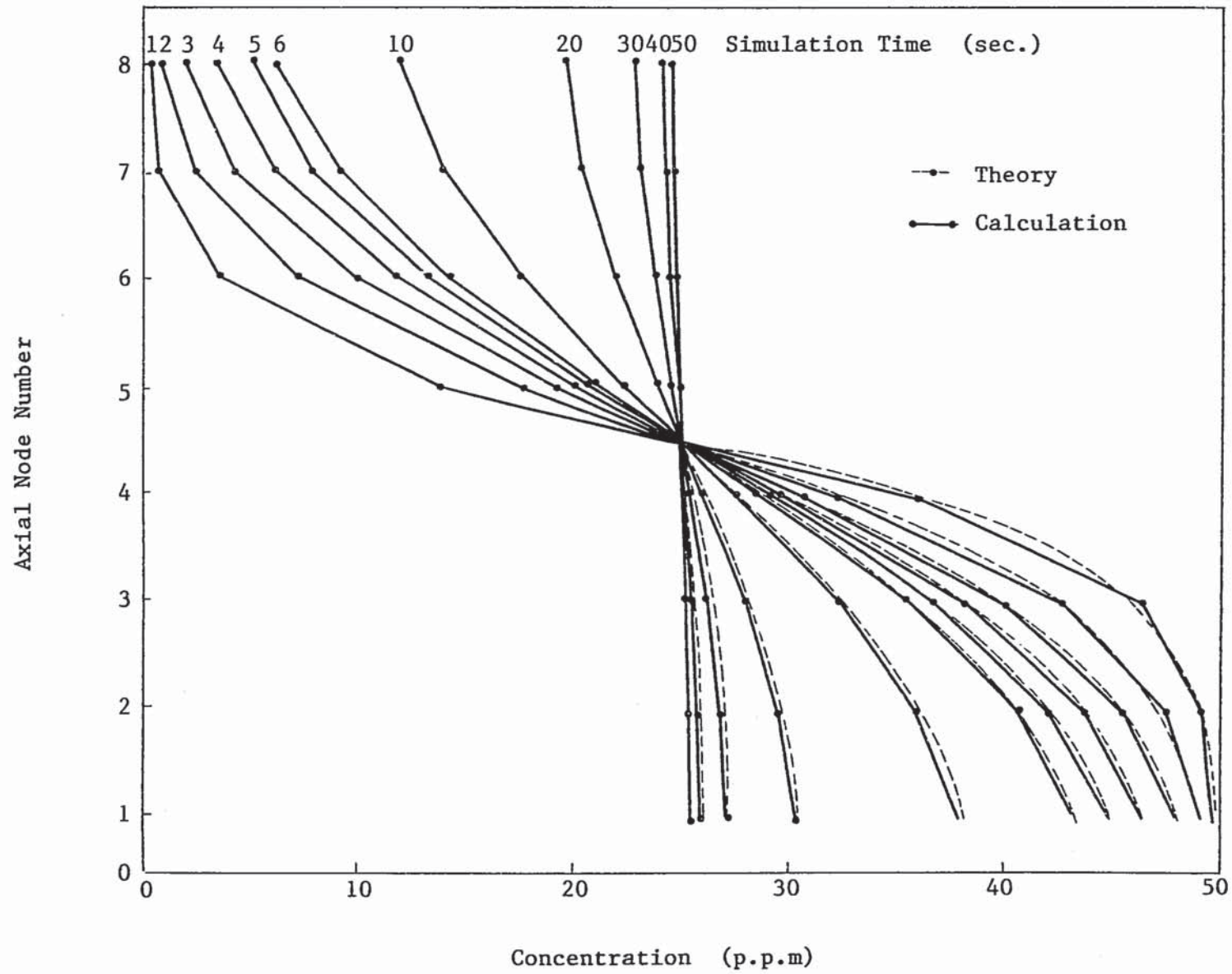


Fig. 2.5 Concentration Distribution in Each Time Step

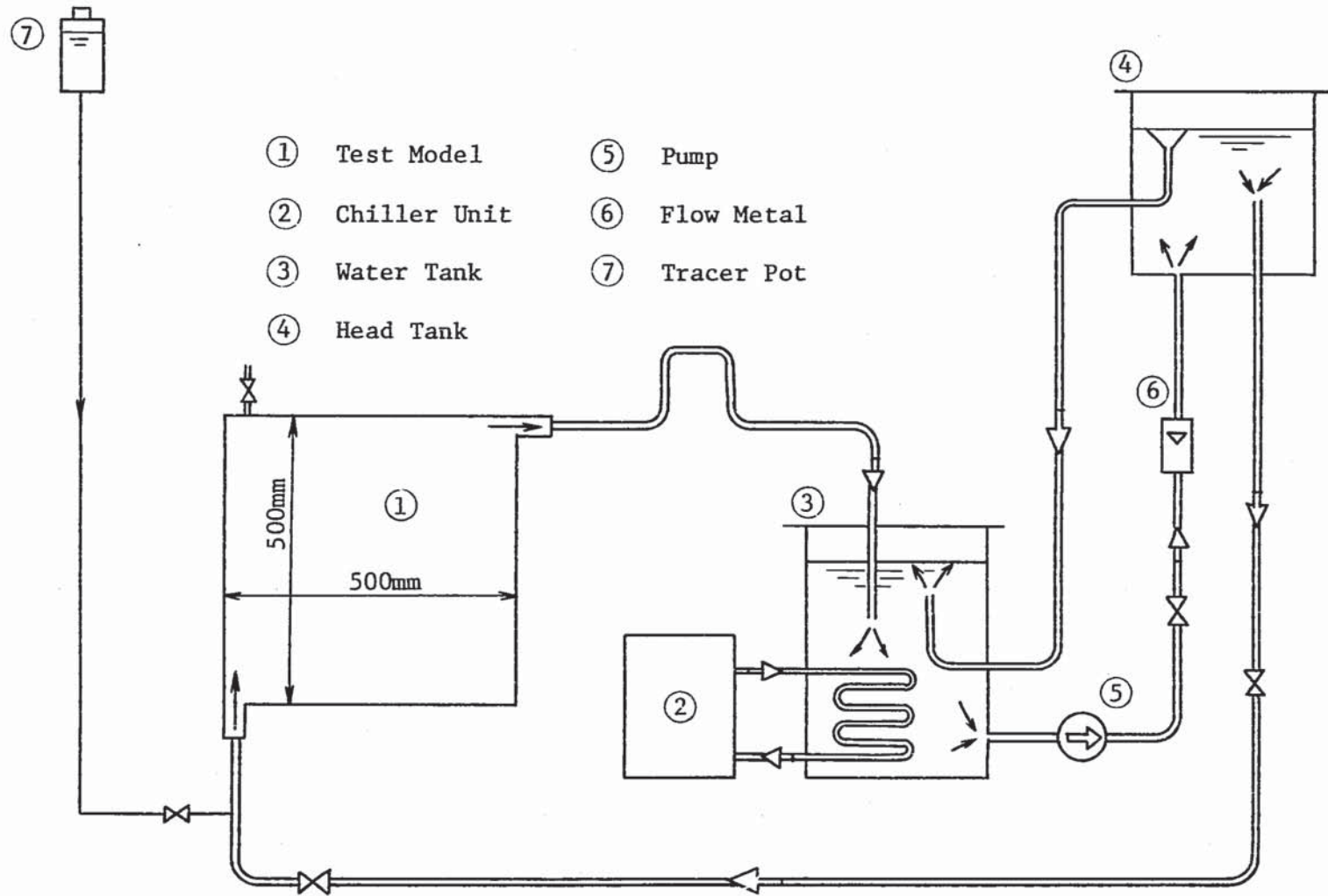


Fig. 3.1 Schematic of the Test Apparatus

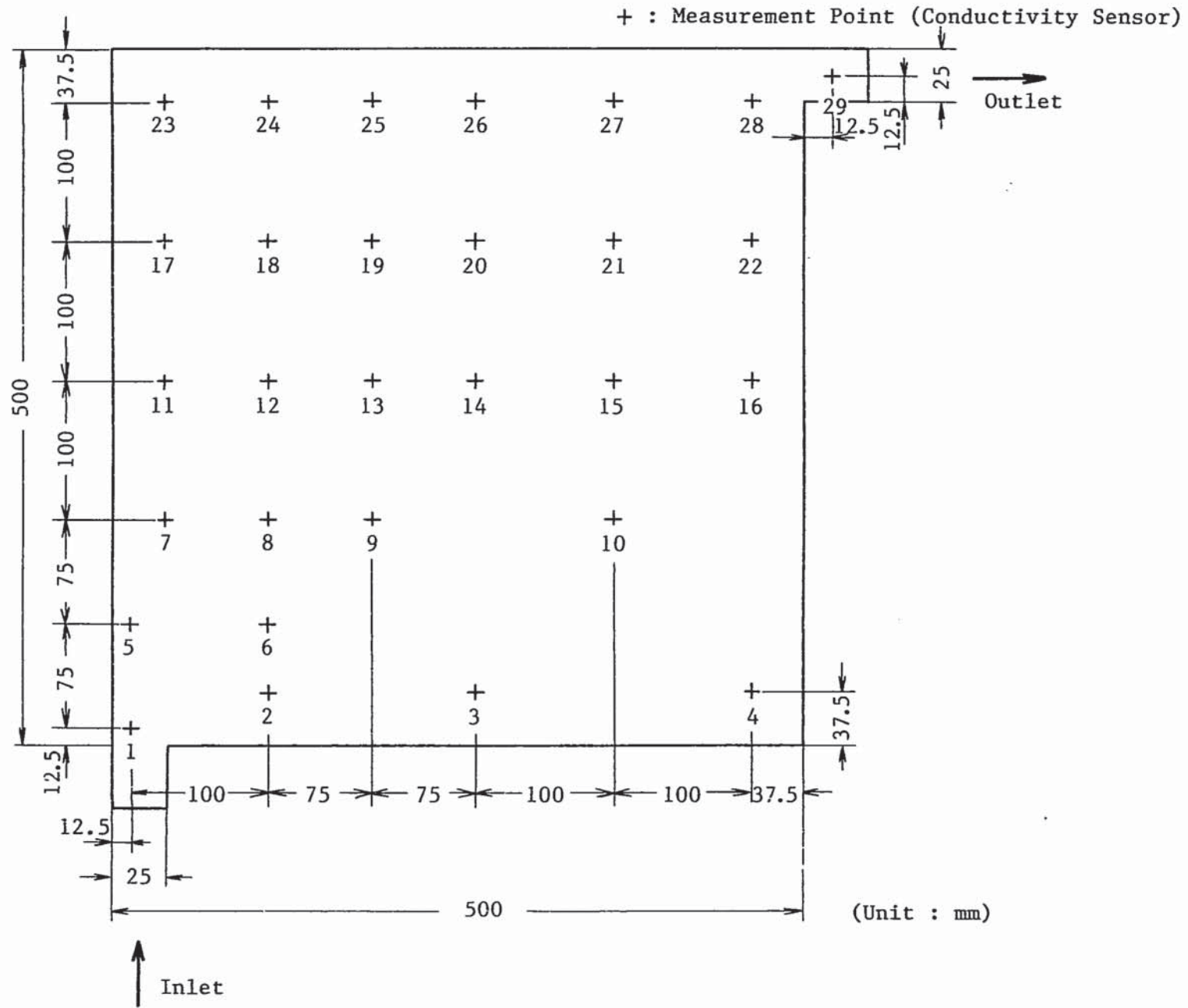


Fig. 3.2 Arrangement of the Conductivity Sensors in the Test Model

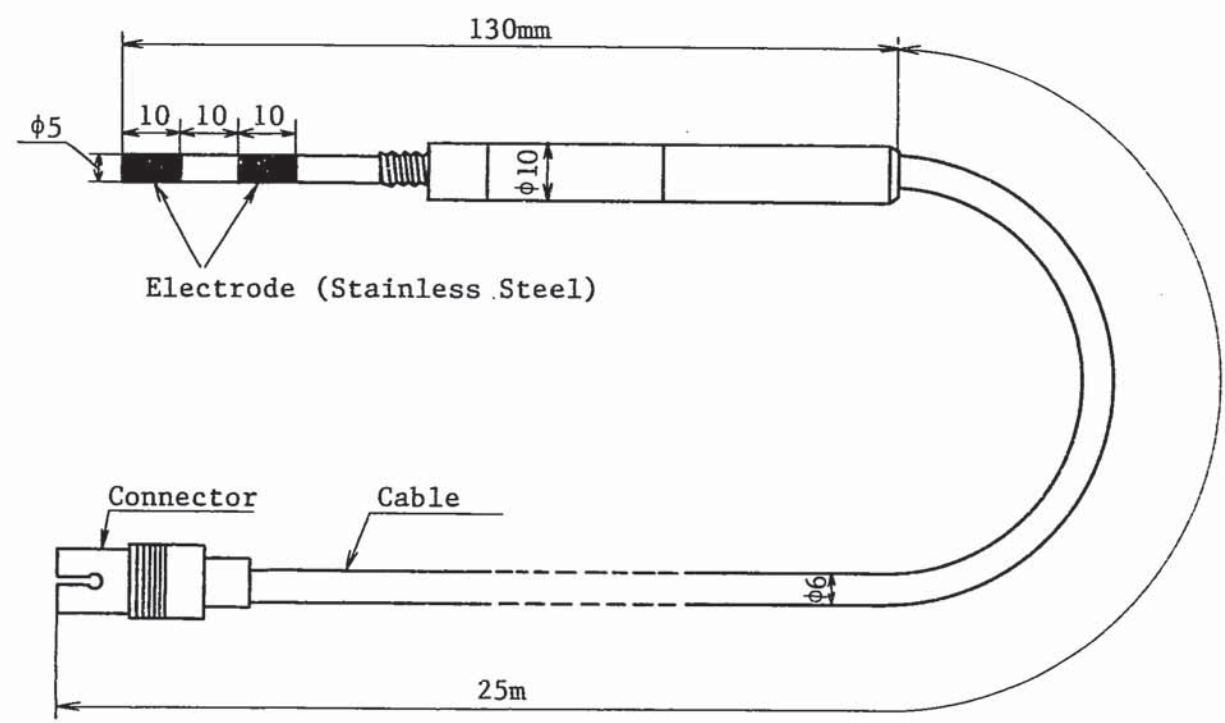
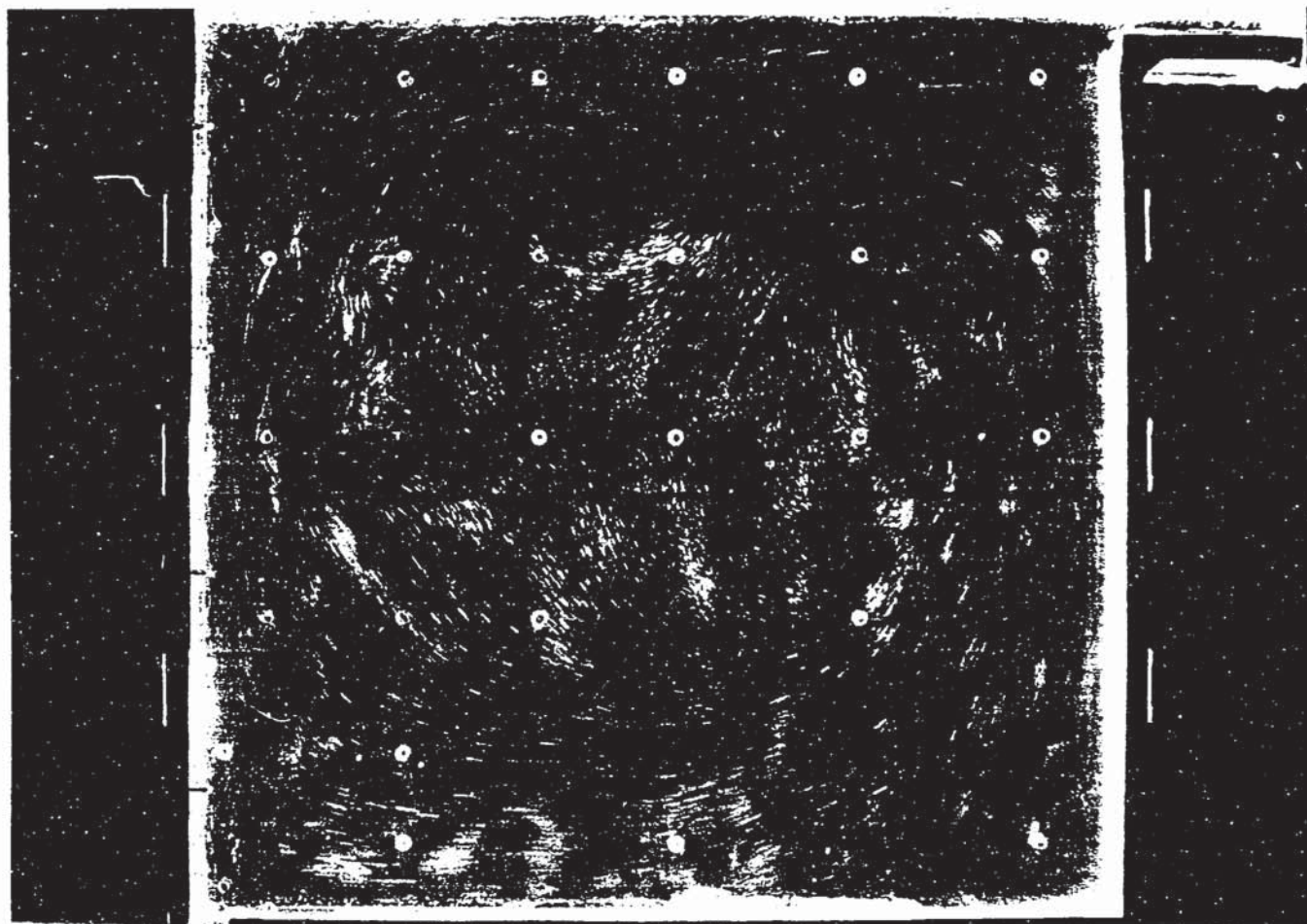
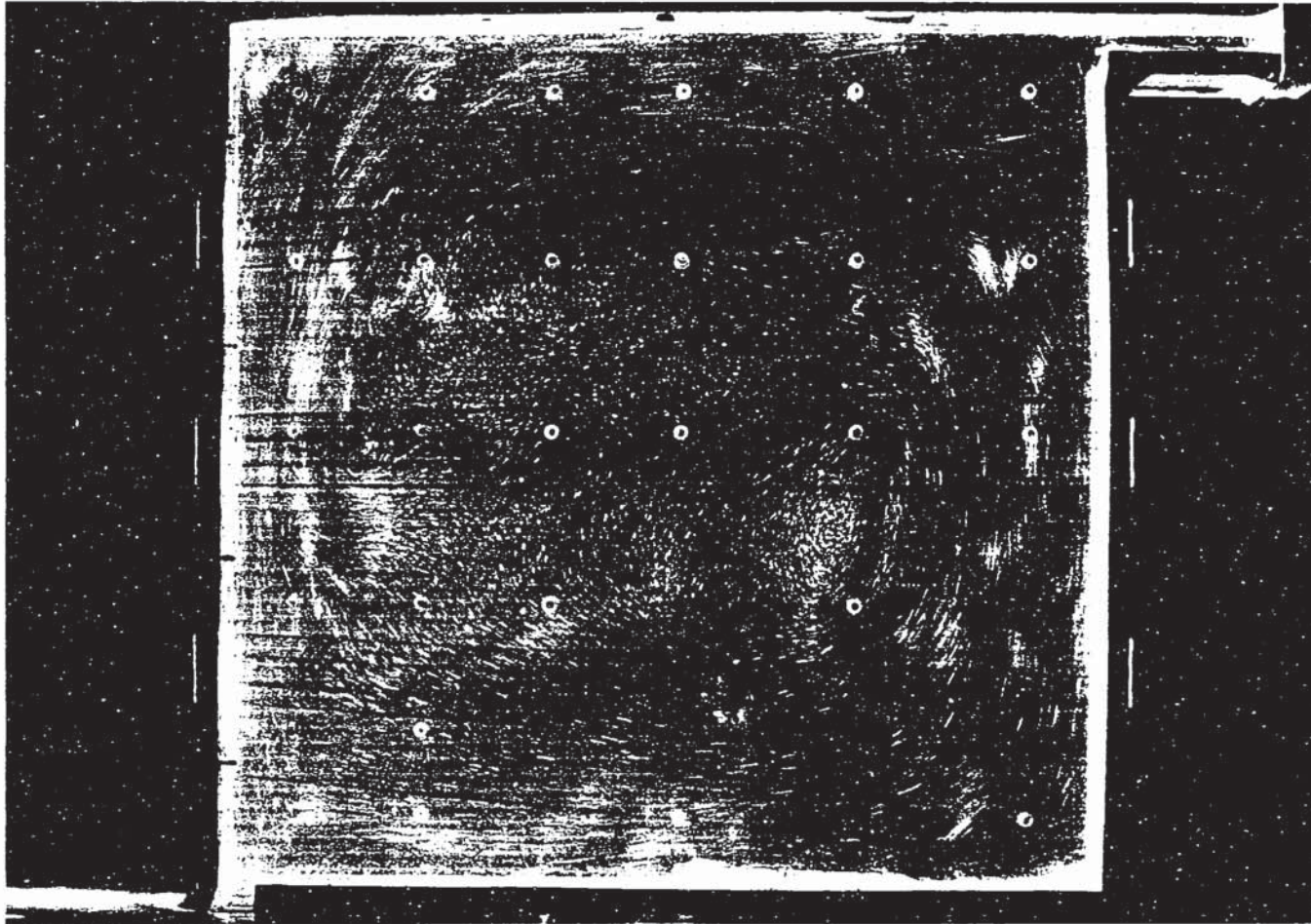


Fig. 3.3 Details of Conductivity Sensor



- Test Conditions
- Average Inlet Velocity
9.8 cm/sec
 - Fluid Temperature
10°C
 - Flow Tracer
Aluminum Powder
 - Shutter Speed
0.5 sec

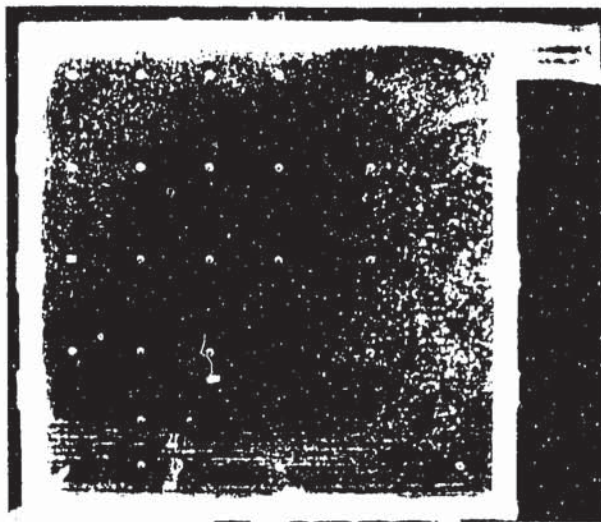
Fig. 3-4 Photograph of Flow Pattern for 9.8 cm/sec Inlet Velocity.



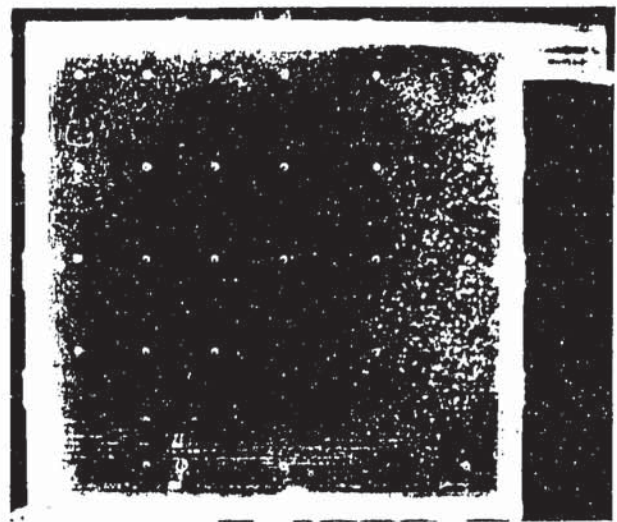
Test Conditions

- Average Inlet Velocity
4.9 cm/sec
- Fluid Temperature
10°C
- Flow Tracer
Aluminum Powder
- Shutter Speed
1 sec

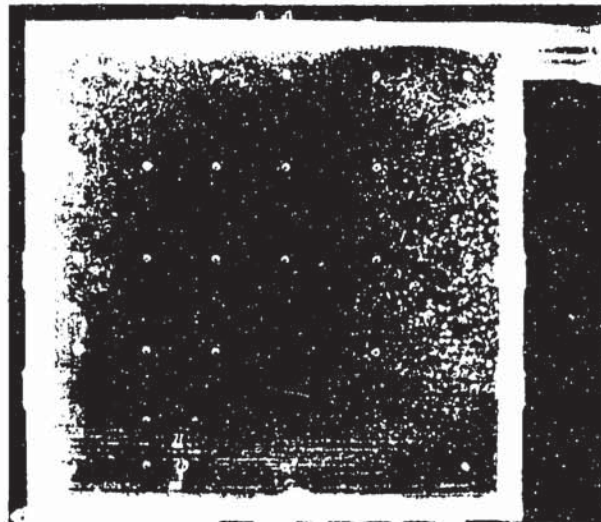
Fig. 3-5 Photograph of Flow Pattern for 4.9 cm/sec Inlet Velocity.



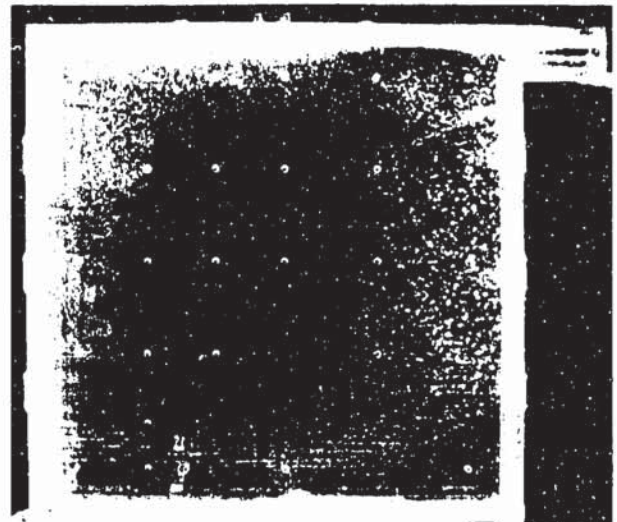
(2 sec)



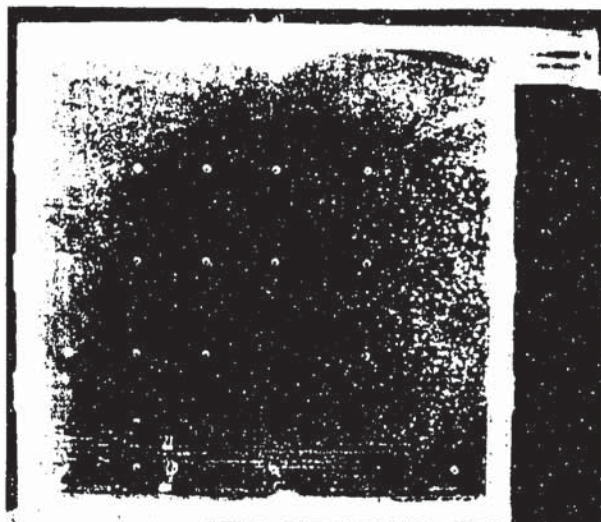
(6 sec)



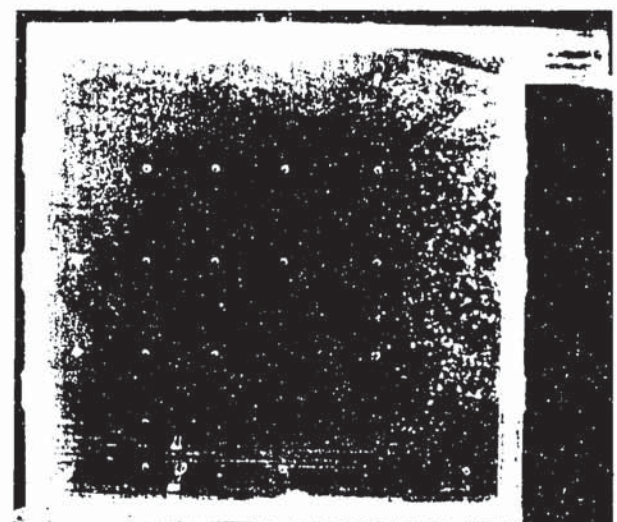
(10 sec)



(14 sec)



(18 sec)

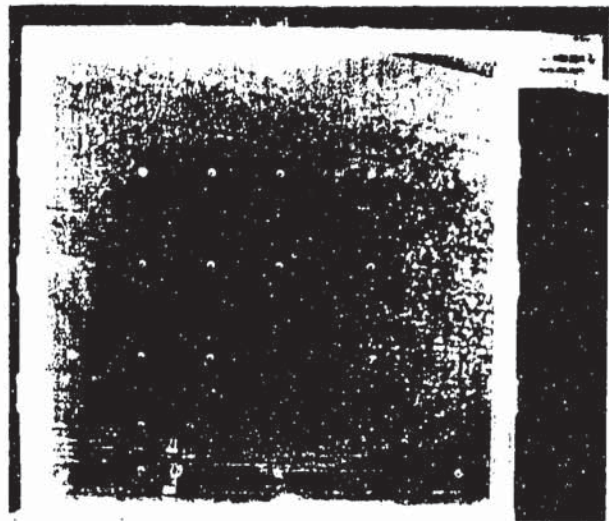


(22 sec)

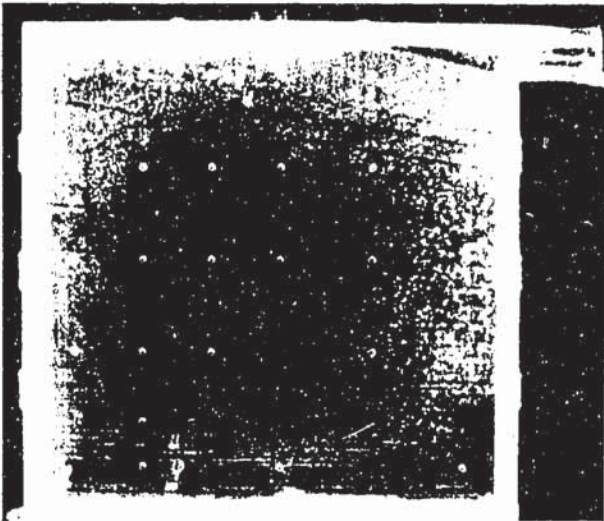
Fig. 3-6 Photographs of Flow Showing the Recirculation and Diffusion Pattern in the Model for 9.8 cm/sec Inlet Velocity.



(26 sec)



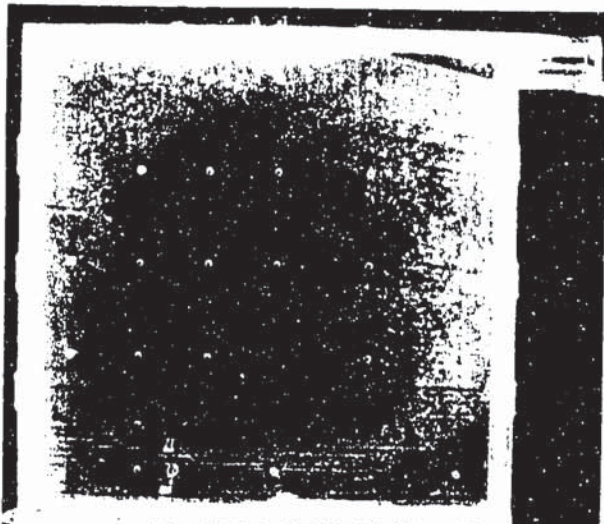
(30 sec)



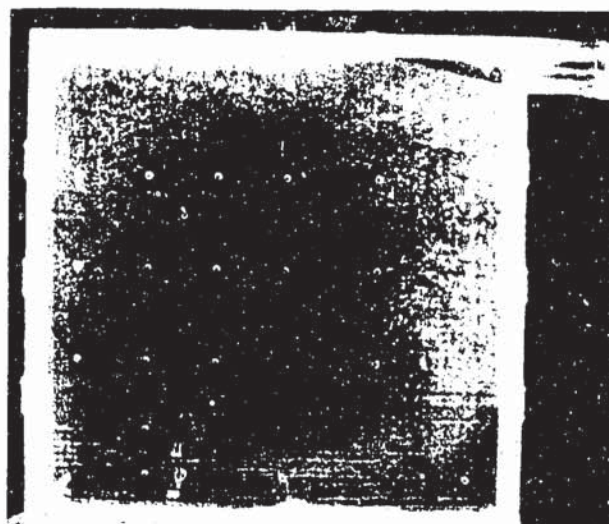
(34 sec)



(38 sec)



(42 sec)

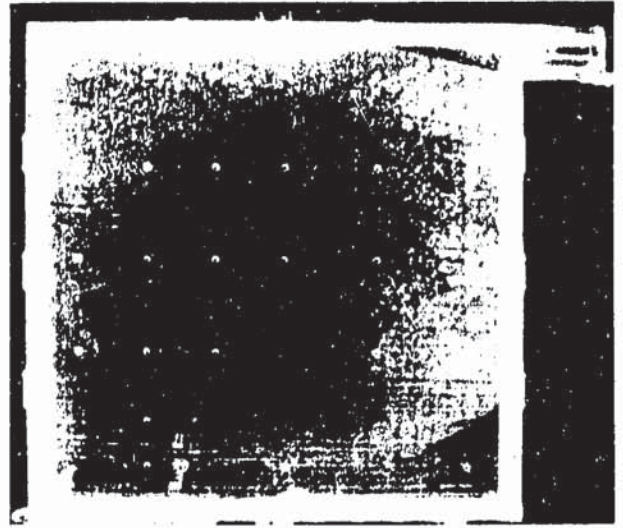


(46 sec)

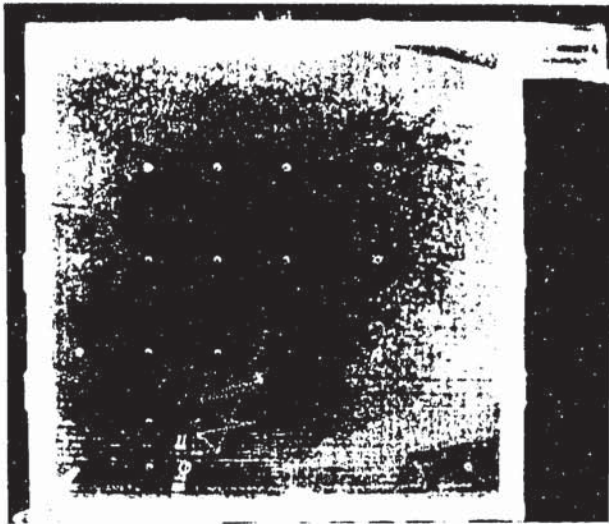
Fig. 3-6 Continued.



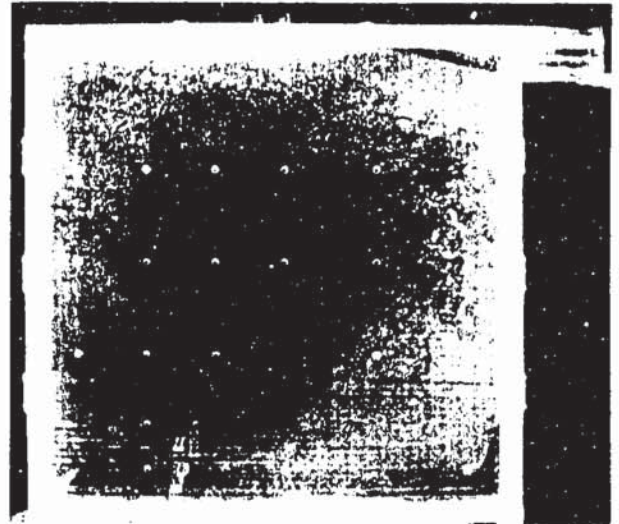
(50 sec)



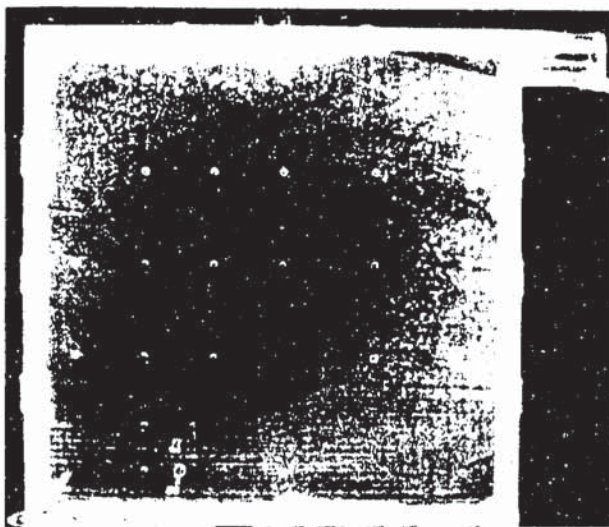
(54 sec)



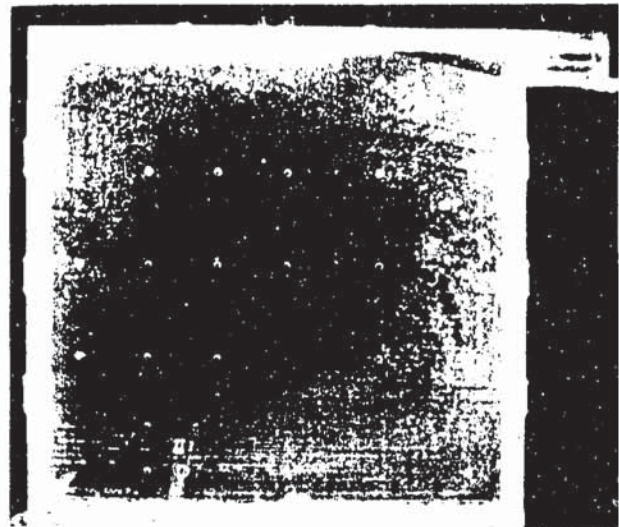
(58 sec)



(62 sec)

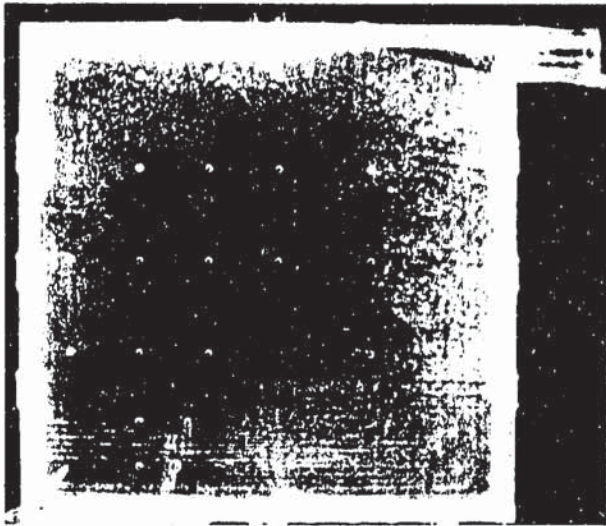


(66 sec)

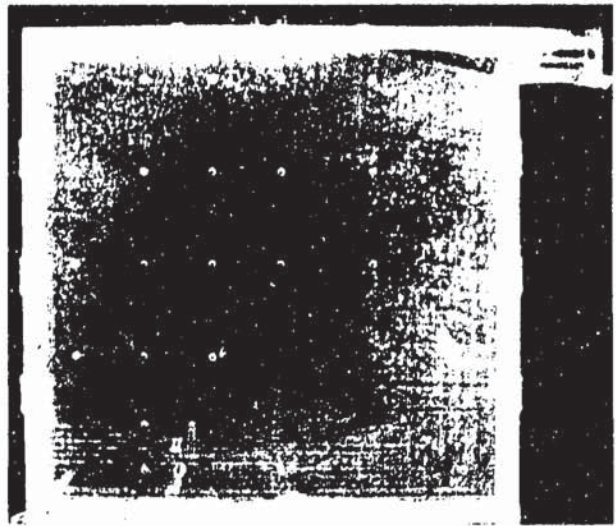


(70 sec)

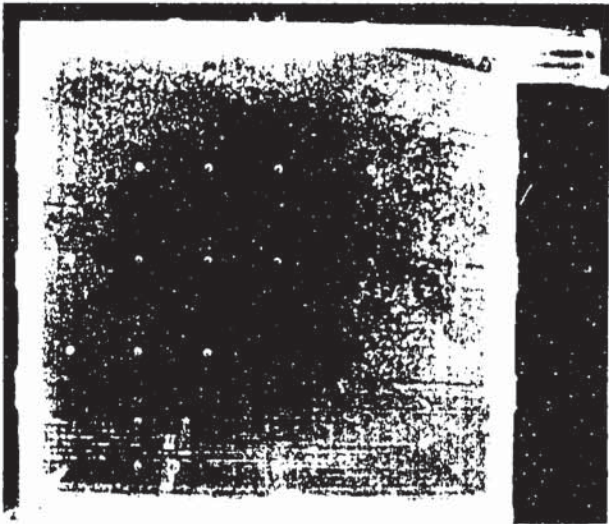
Fig. 3-6 Continued.



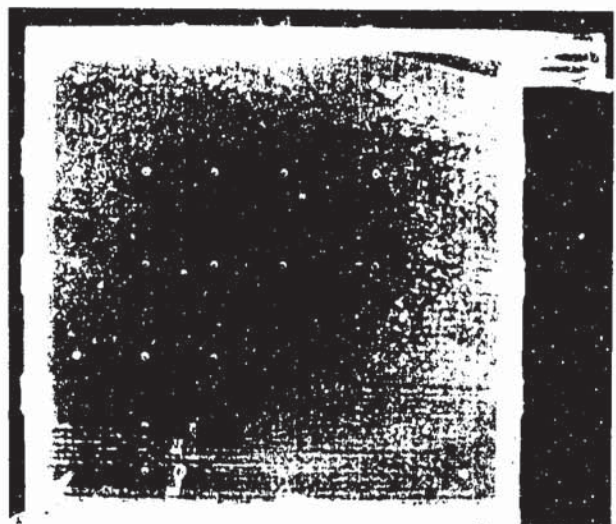
(78 sec)



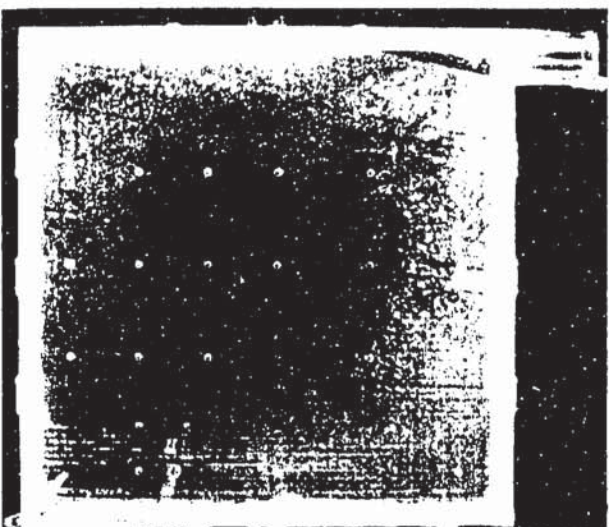
(86 sec)



(94 sec)



(106 sec)



(122 sec)



(146 sec)

Fig. 3-6 Continued.

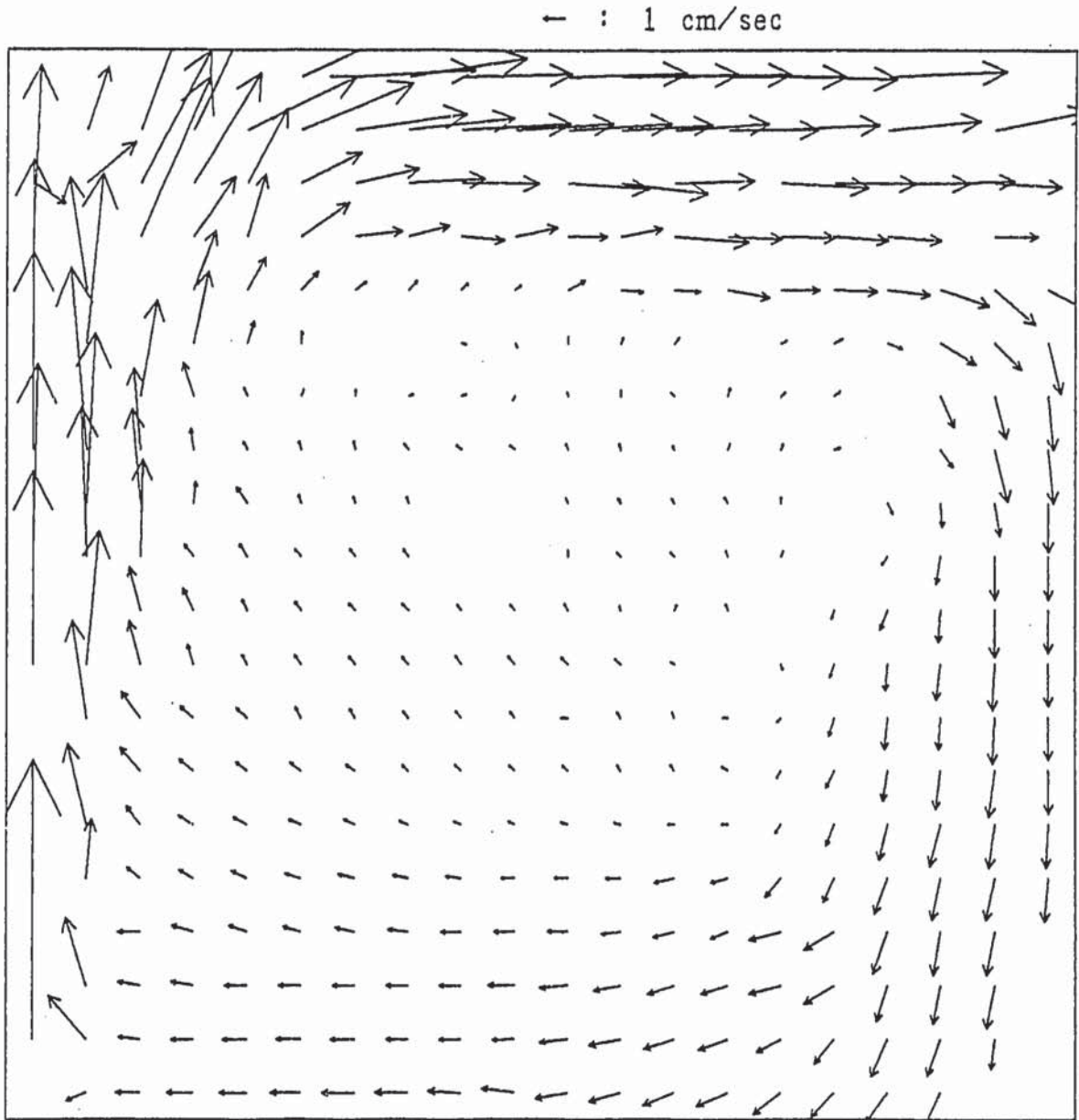


Fig. 3-7 Velocity Distribution in the Square Cavity Model for 9.3 cm/sec Inlet Velocity.

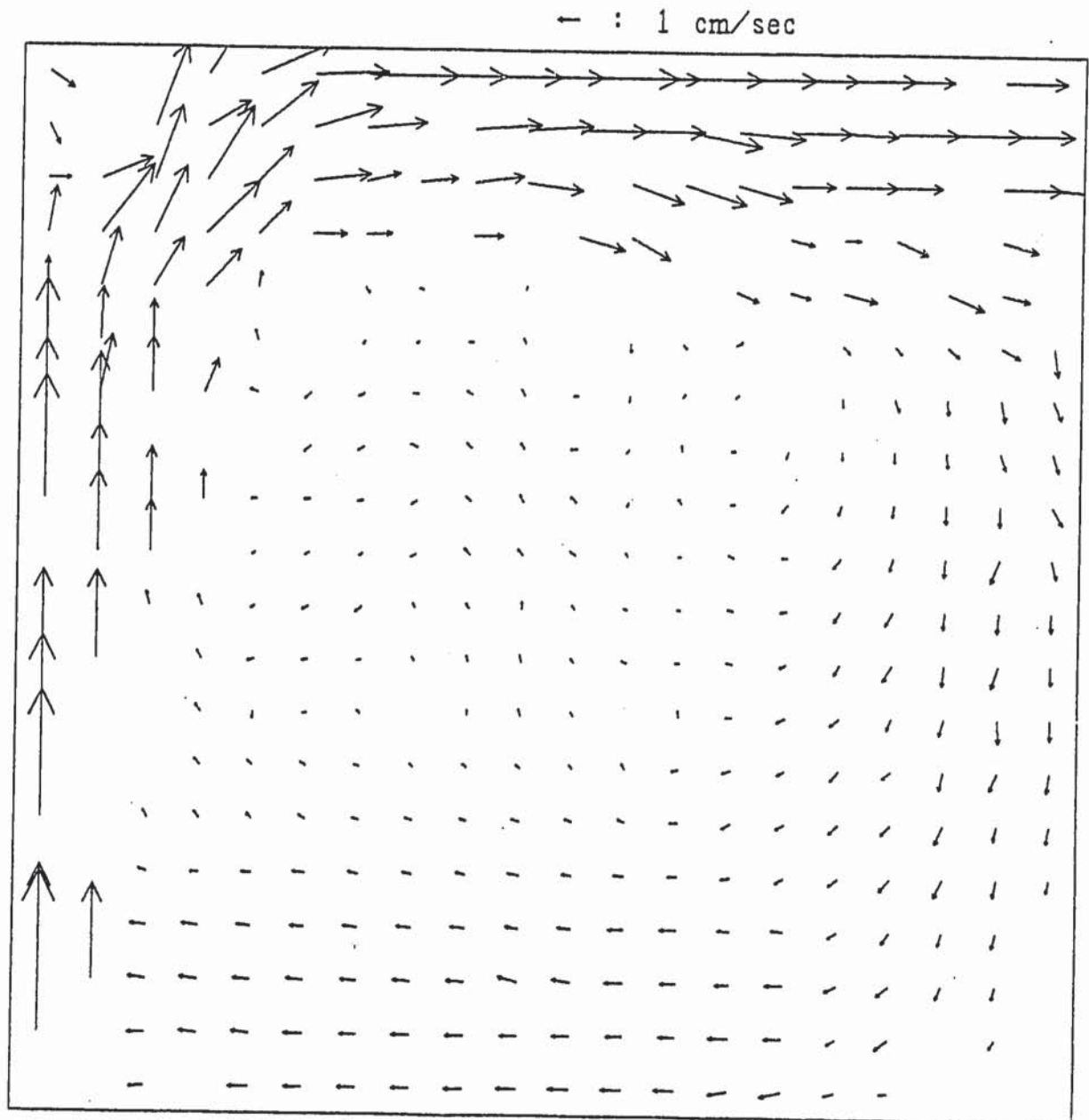


Fig. 3-8 Velocity Distribution in the Square Cavity Model for 5.2 cm/sec Inlet Velocity.

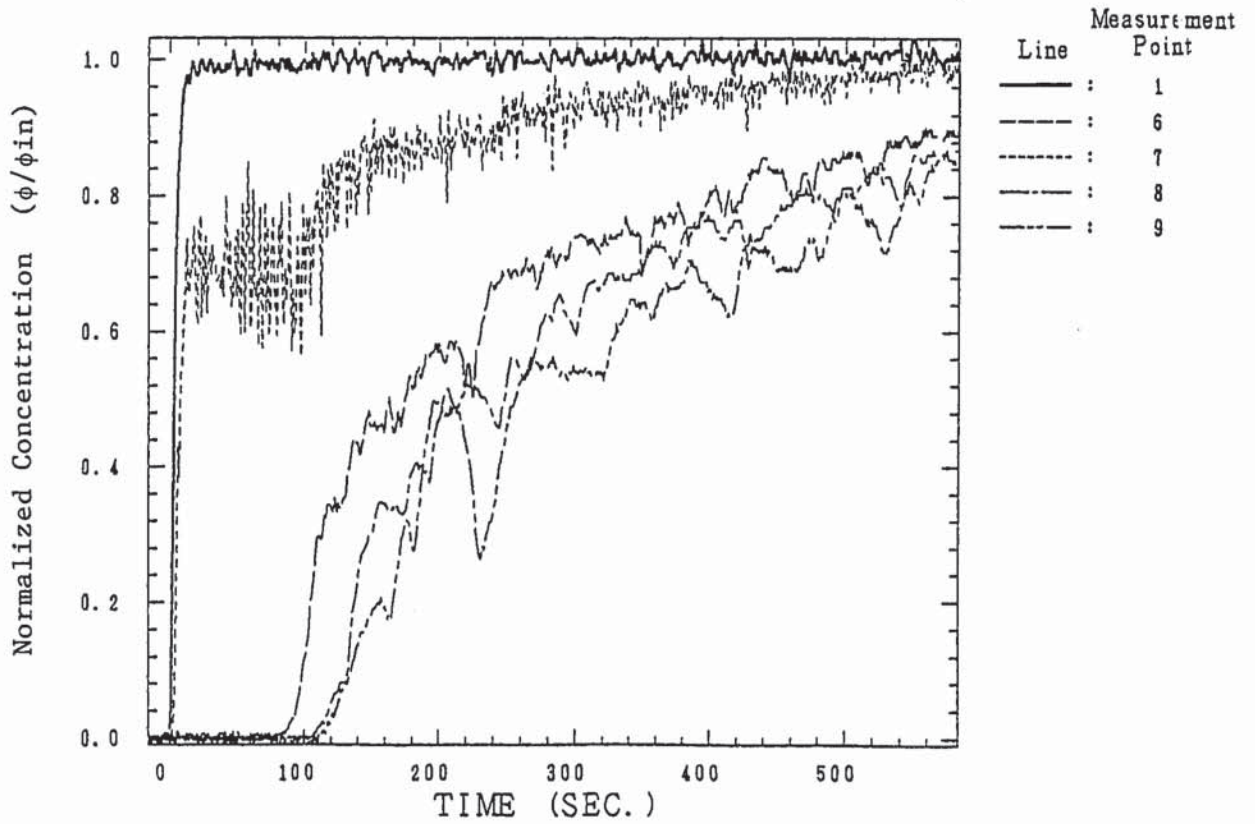
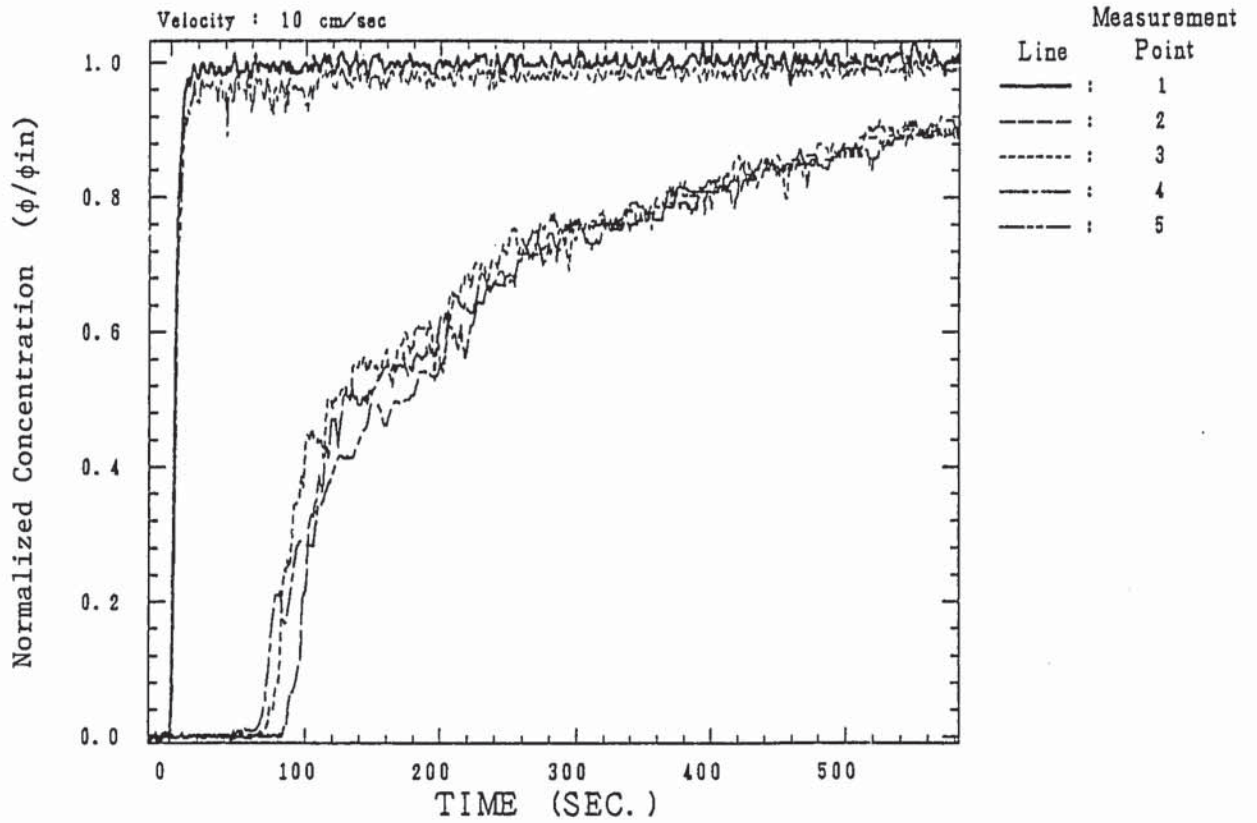


Fig. 3-9 Normalized Concentration History at the Each Measurement Point for 9.5 cm/sec Inlet Velocity.

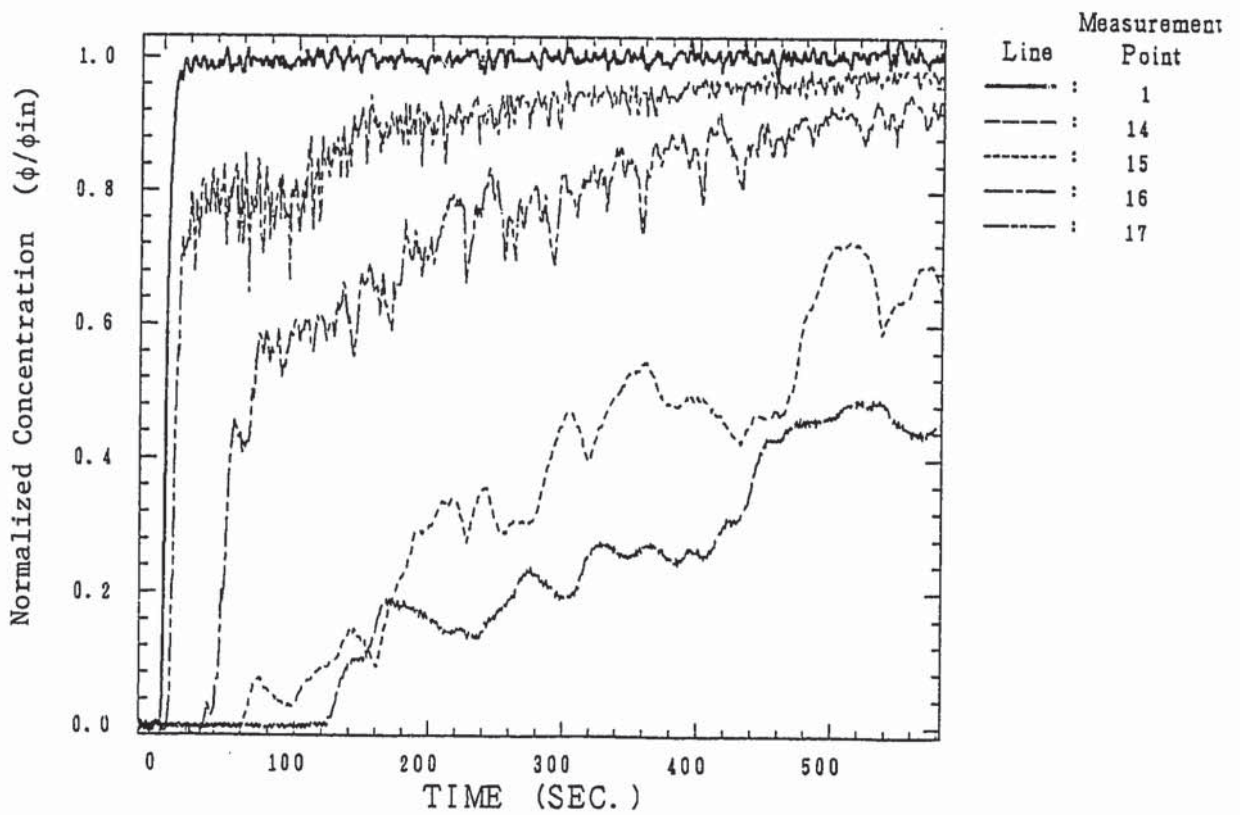
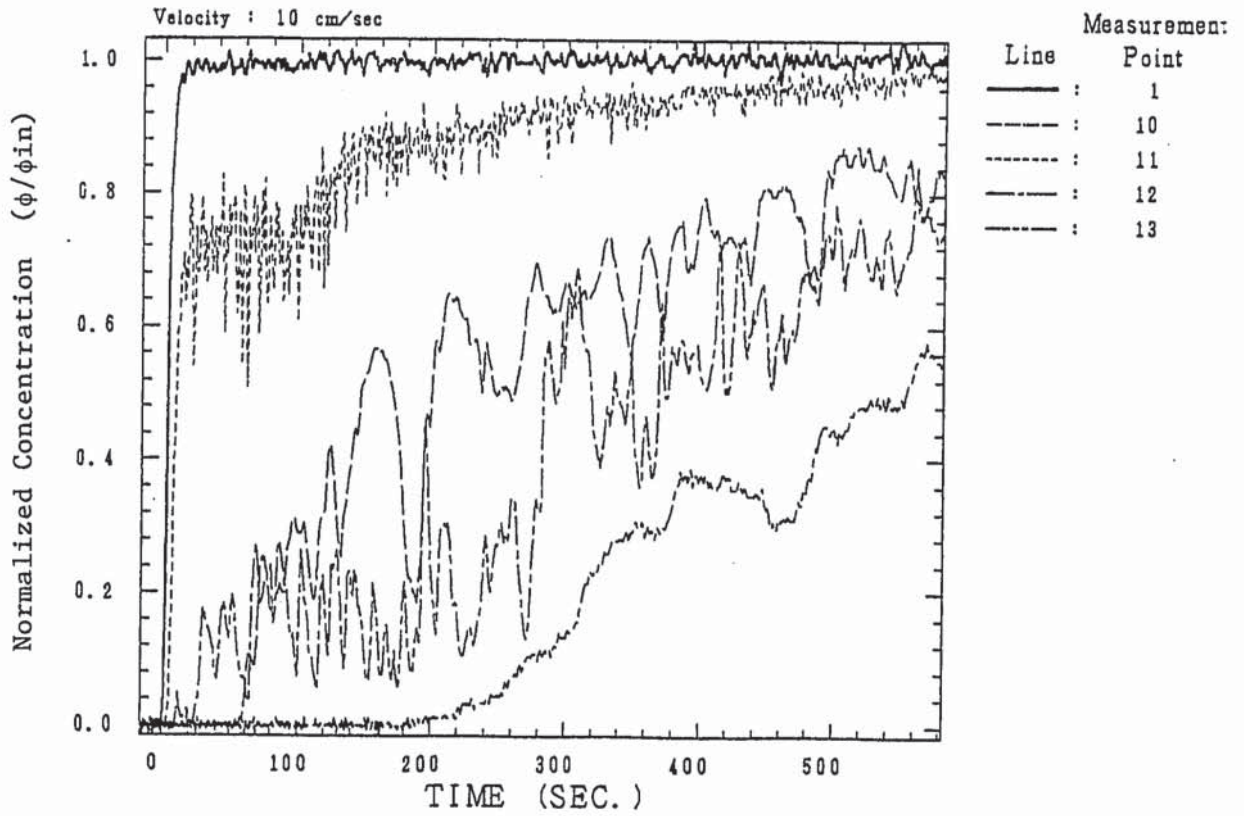


Fig. 3-9 Continued.

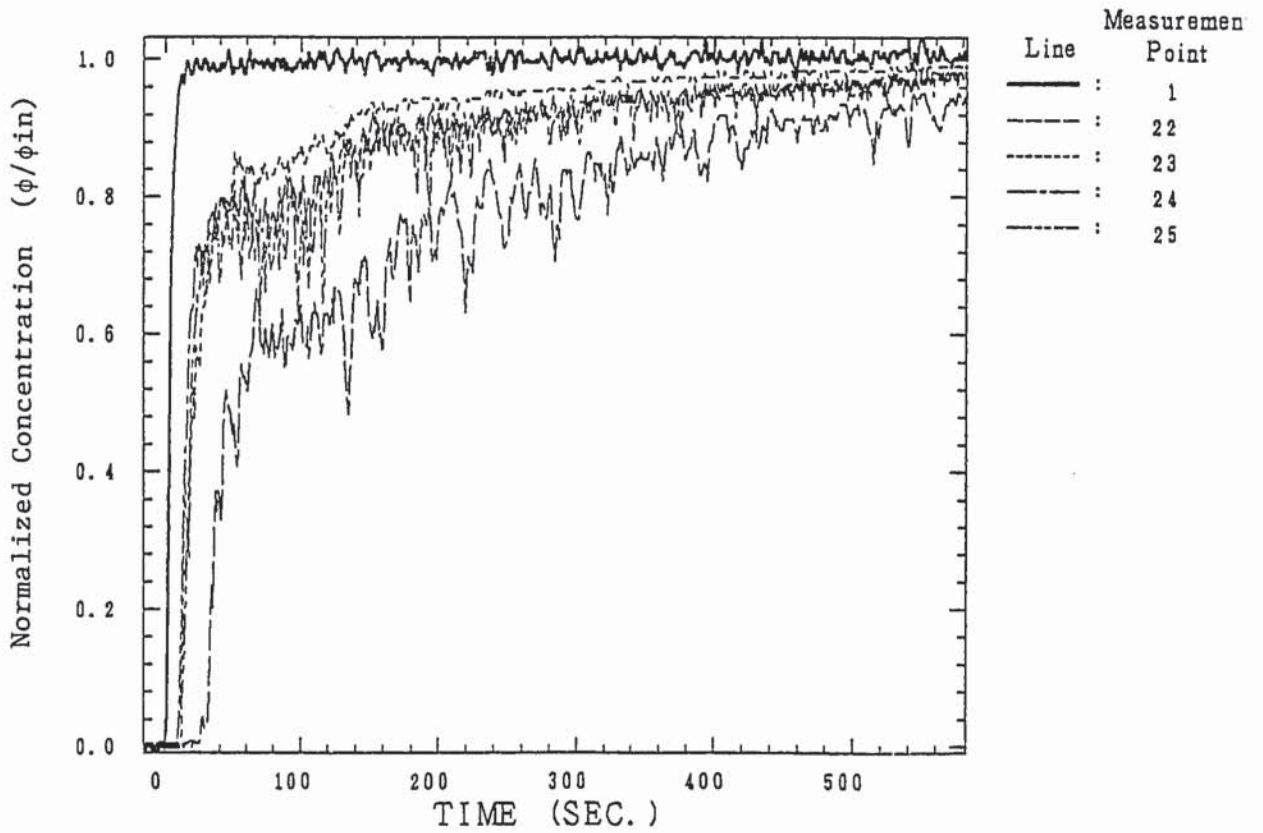
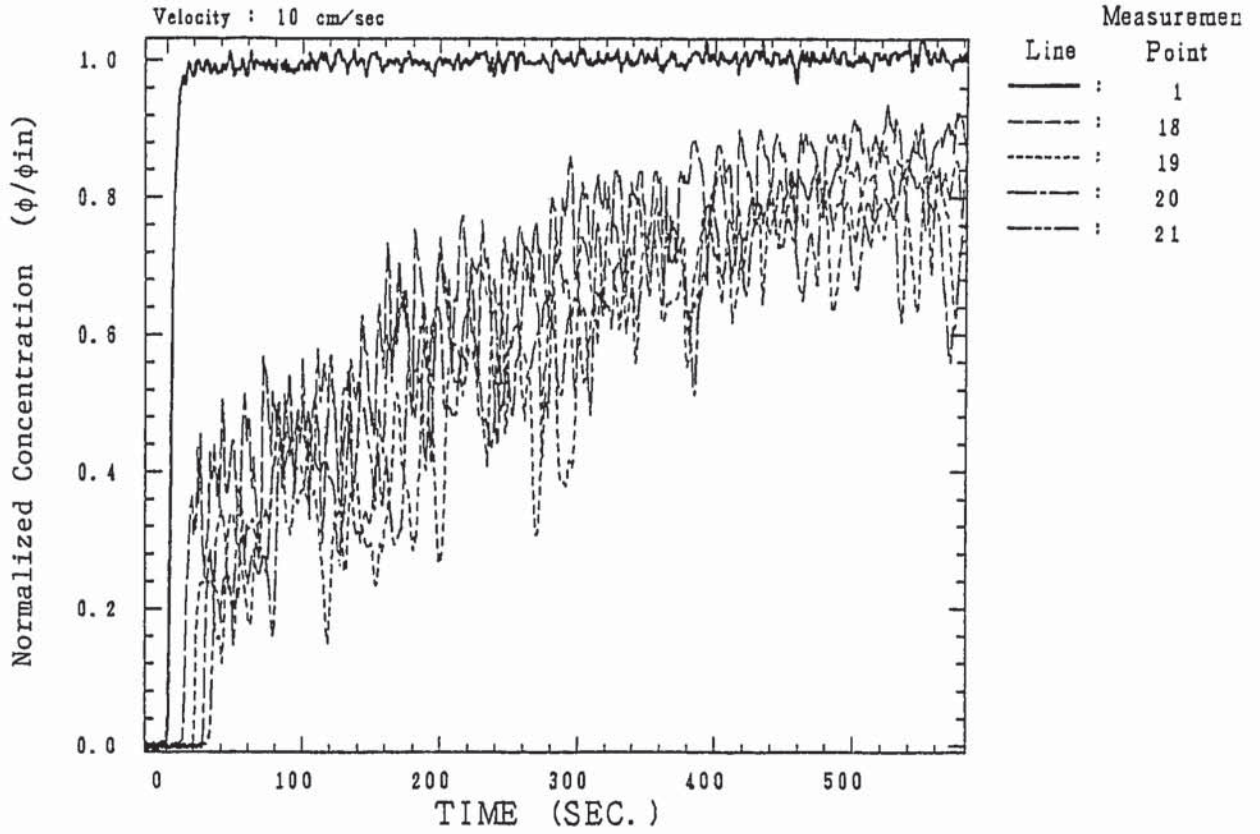


Fig. 3-9 Continued.

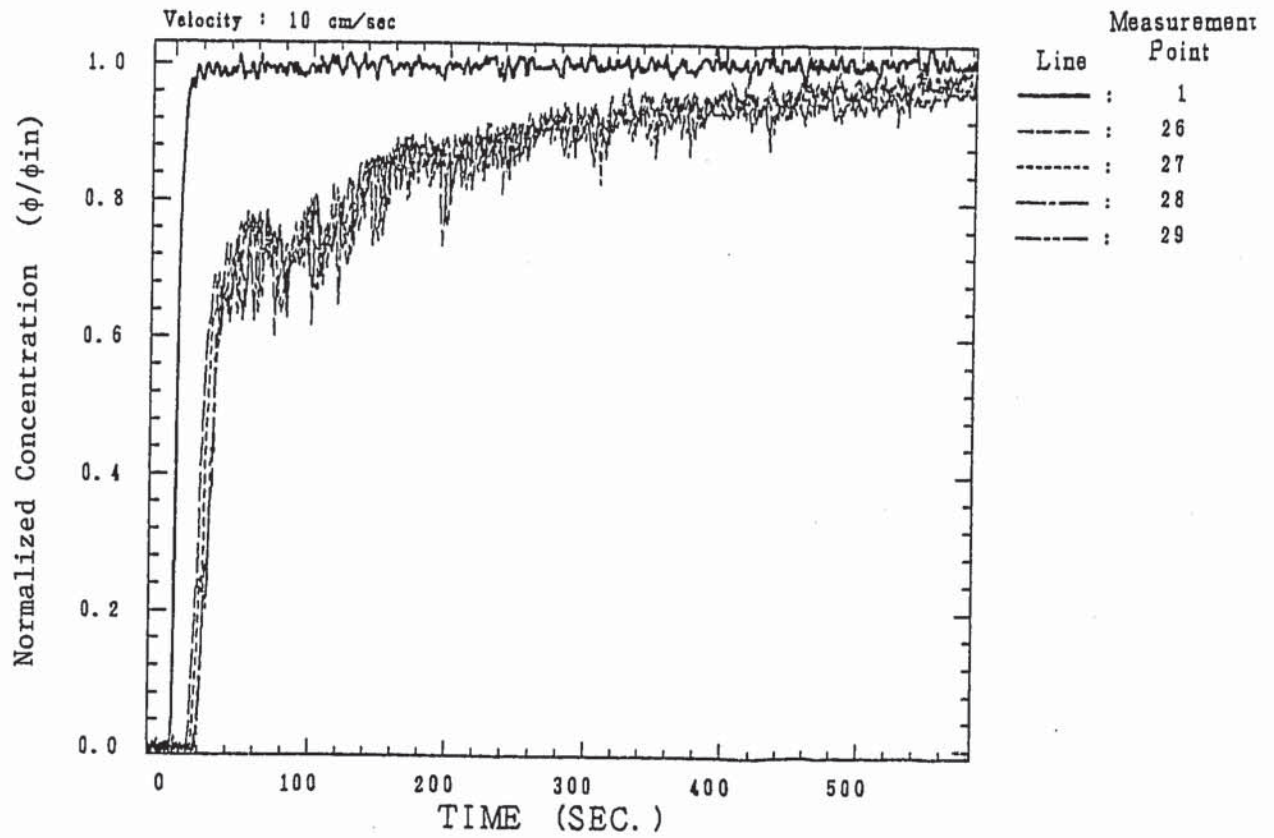


Fig. 3-9 Continued.

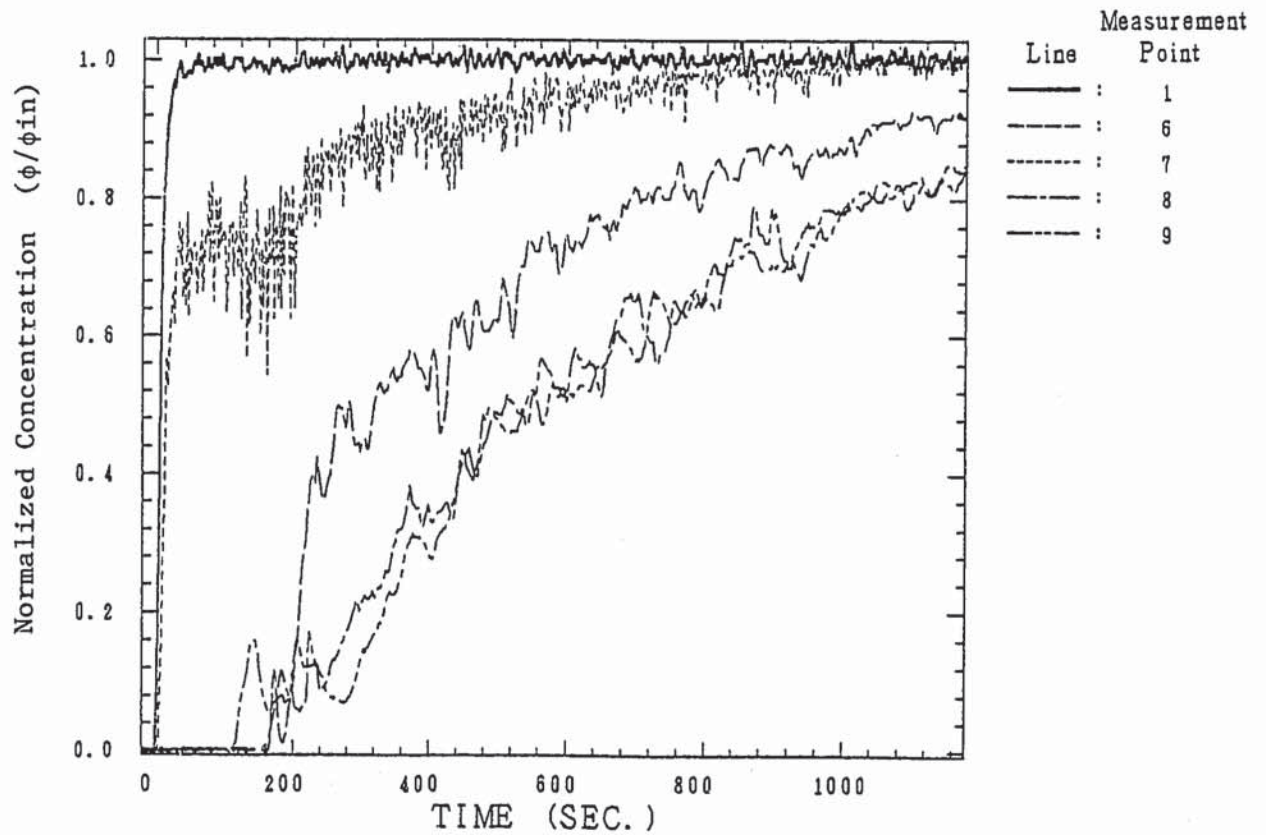
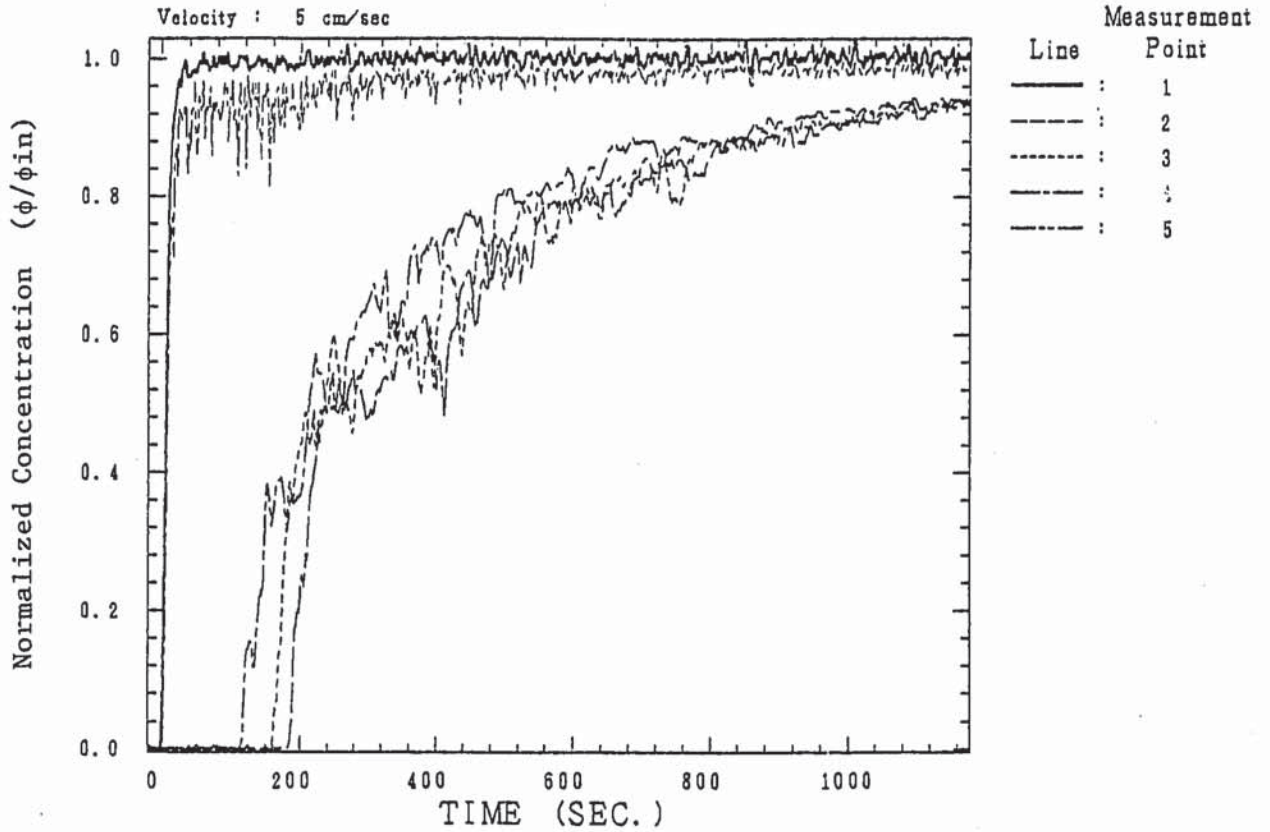


Fig. 3-10 Normalized Concentration History at the Each Measurement Point for 5.2 cm/sec Inlet Velocity.

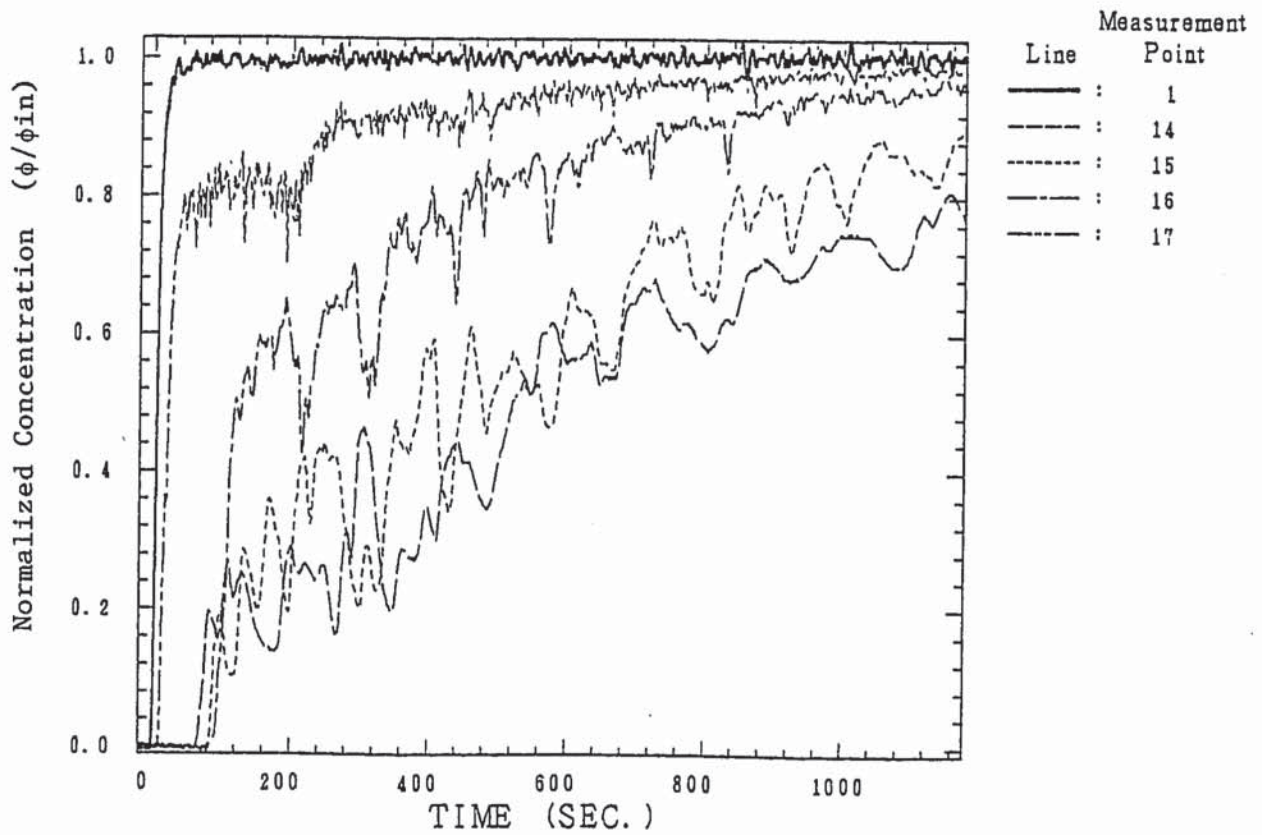
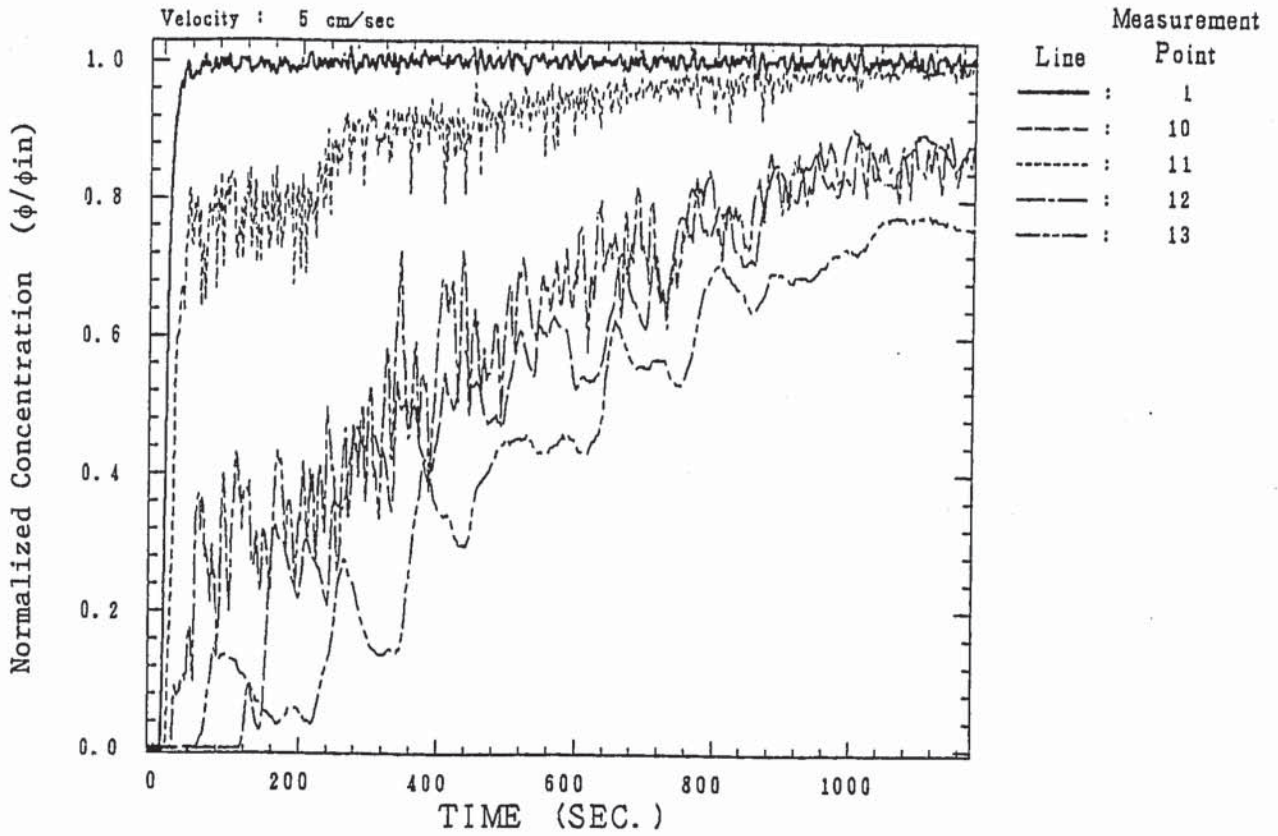


Fig. 3-10 Continued.

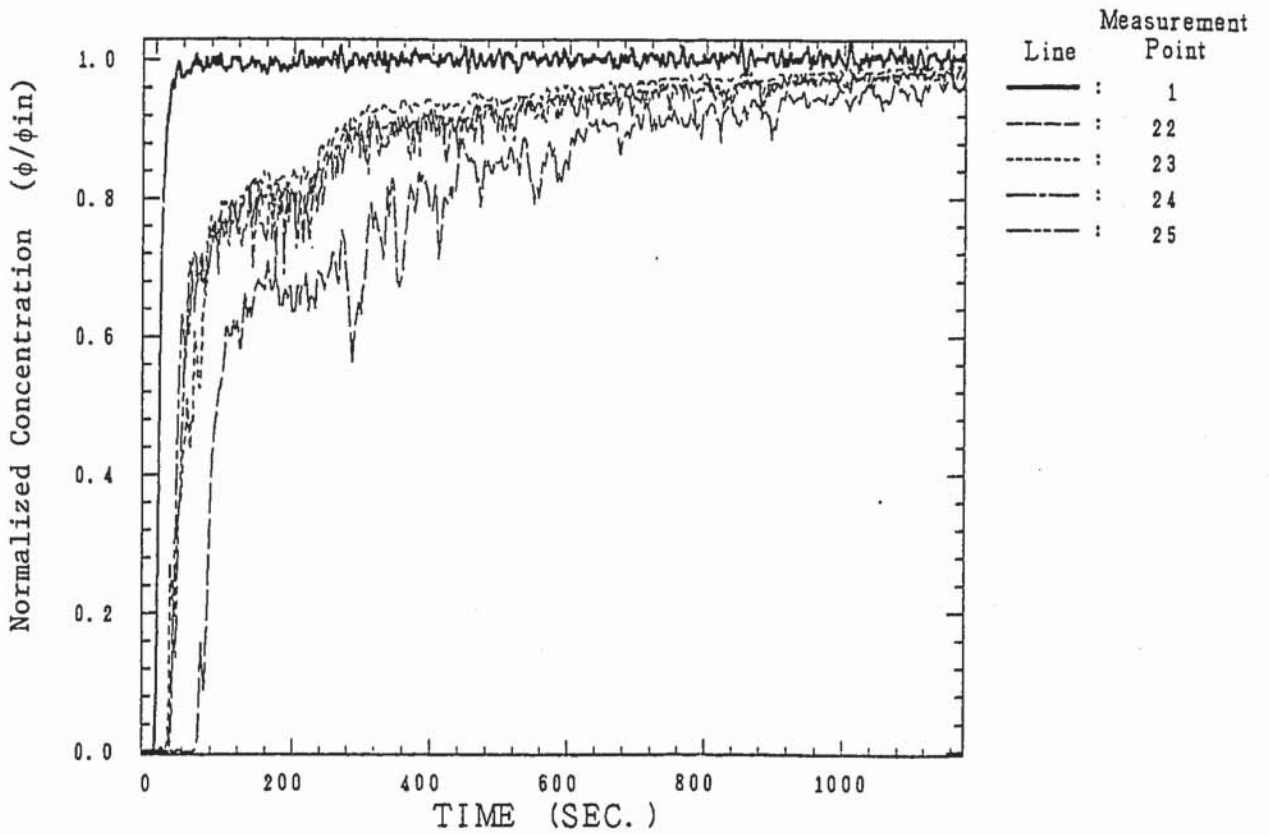
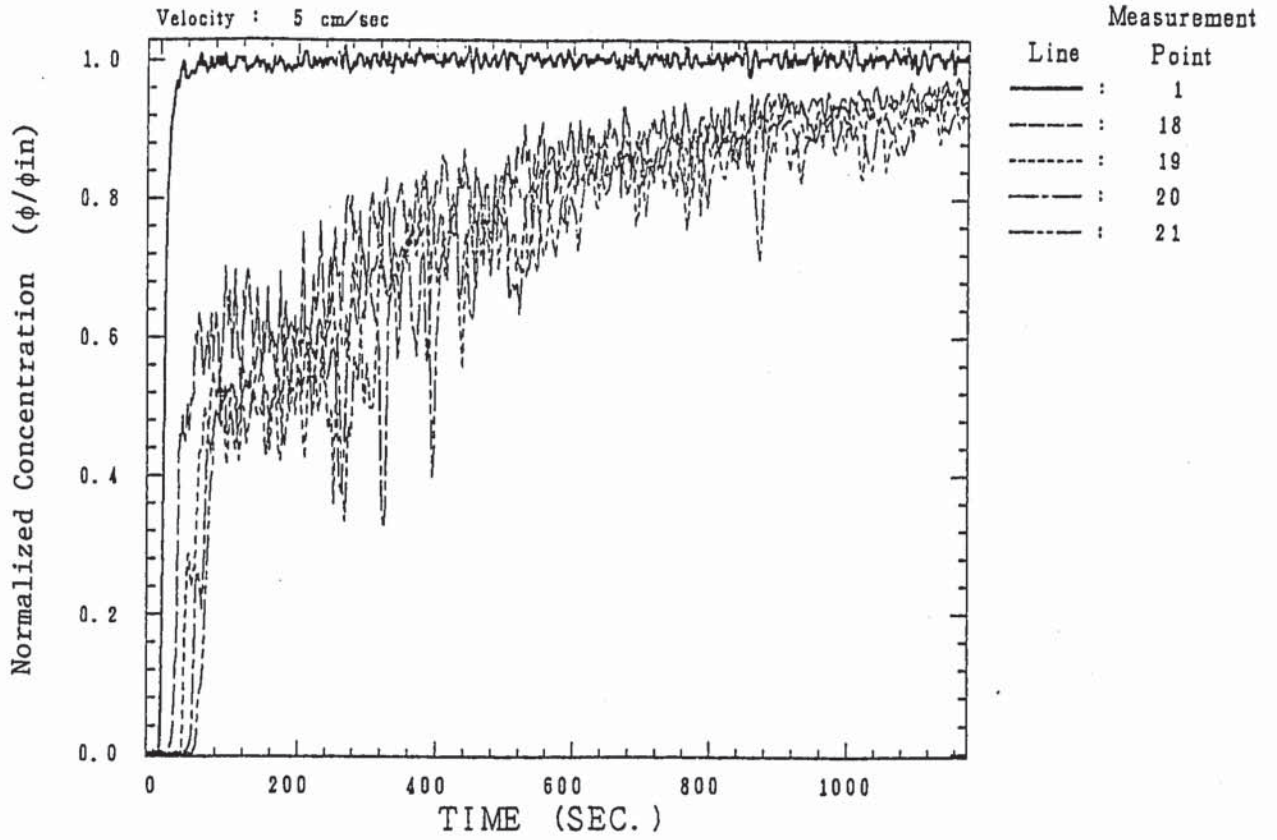


Fig. 3-10 Continued.

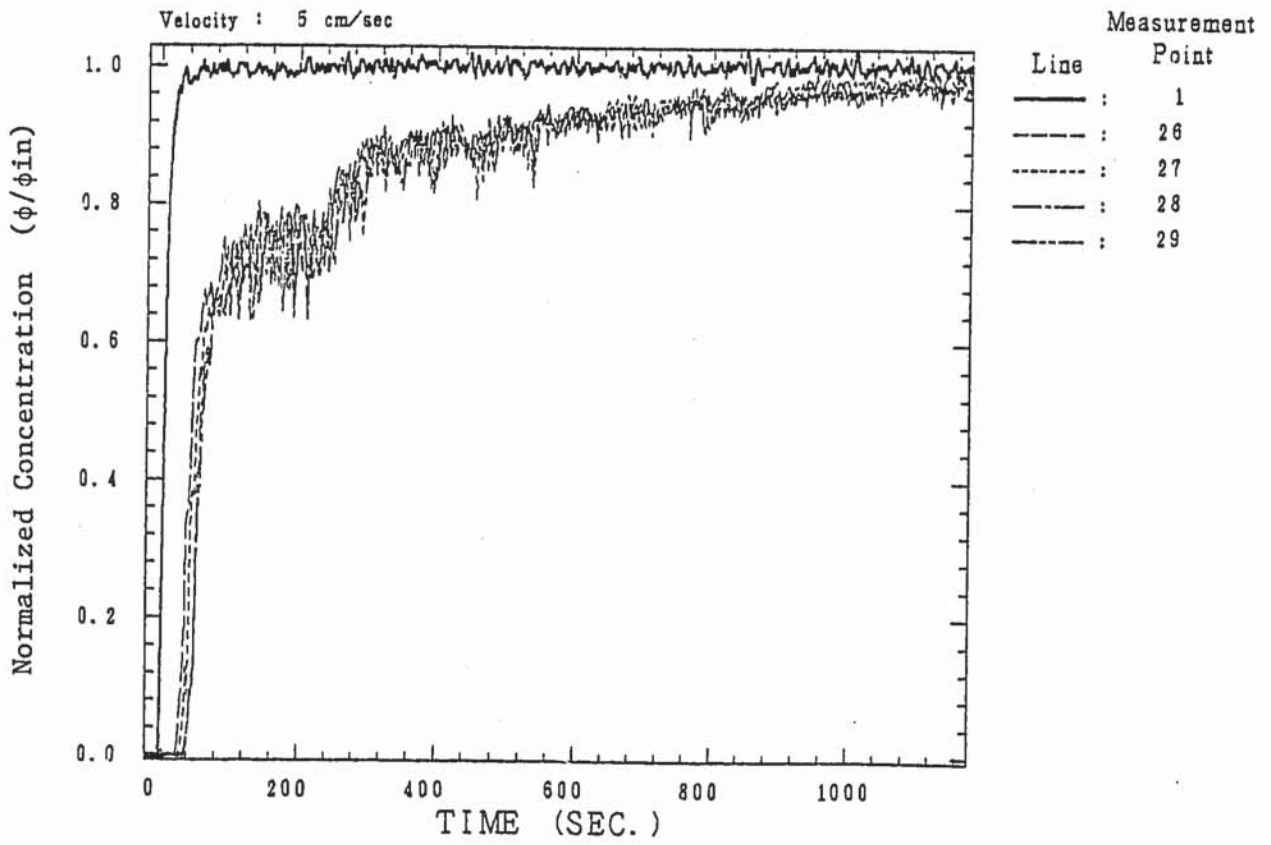


Fig. 3-10 Continued.

+ : Measurement Point

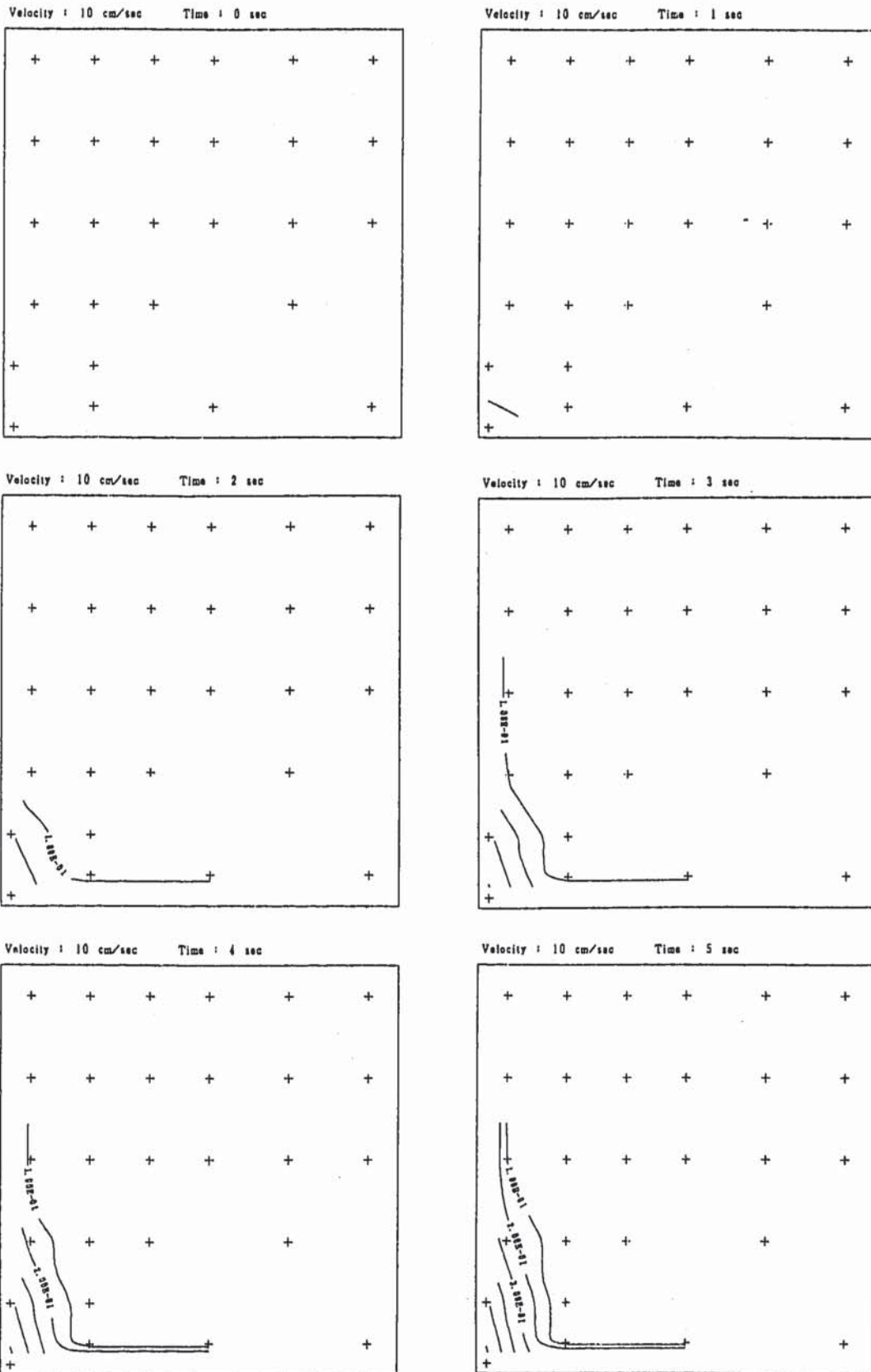


Fig. 3-11 Normalized Concentration Distributions for 9.5 cm/sec Inlet Velocity.

+ : Measurement Point

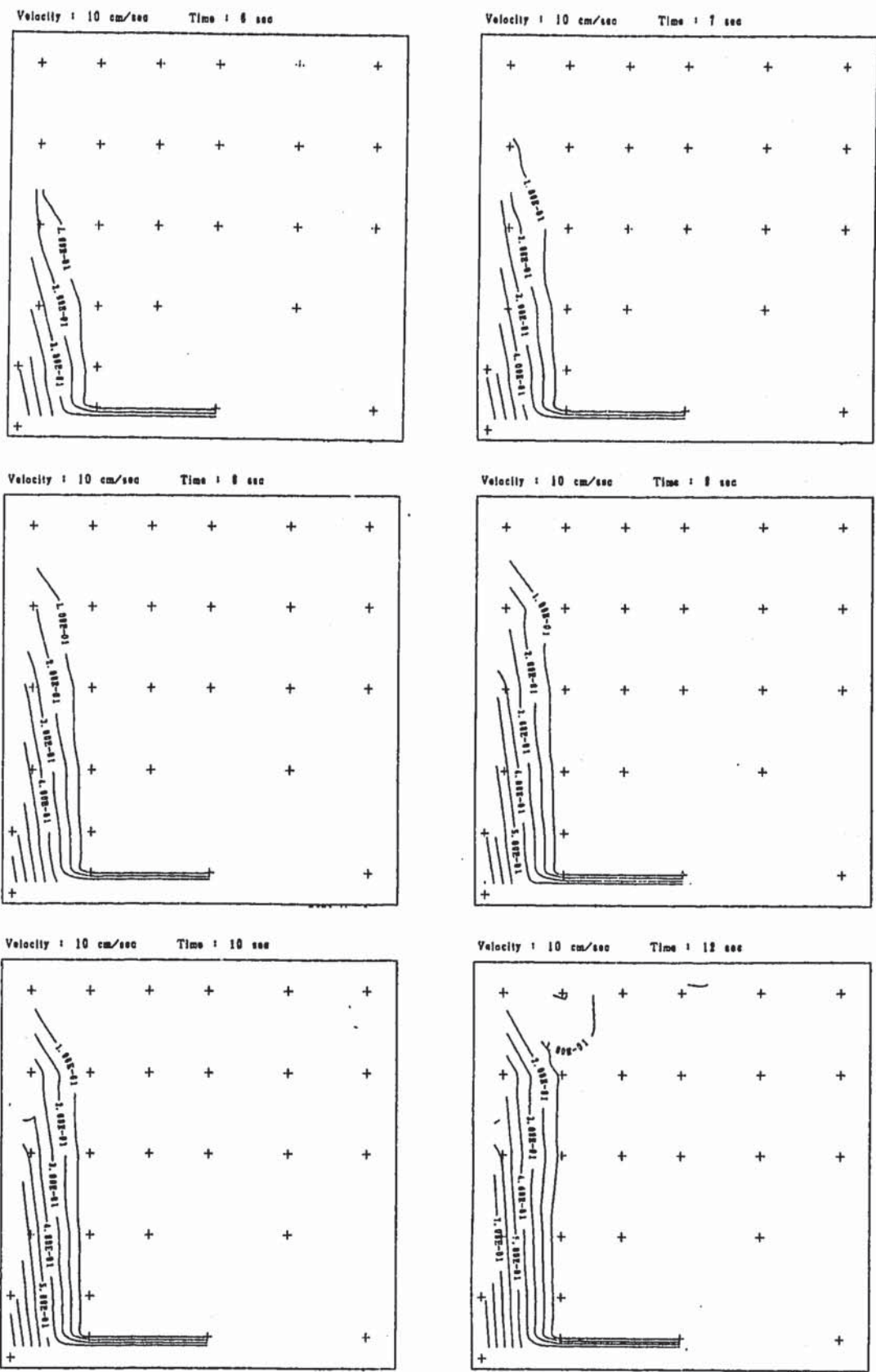


Fig. 3-11 Continued.

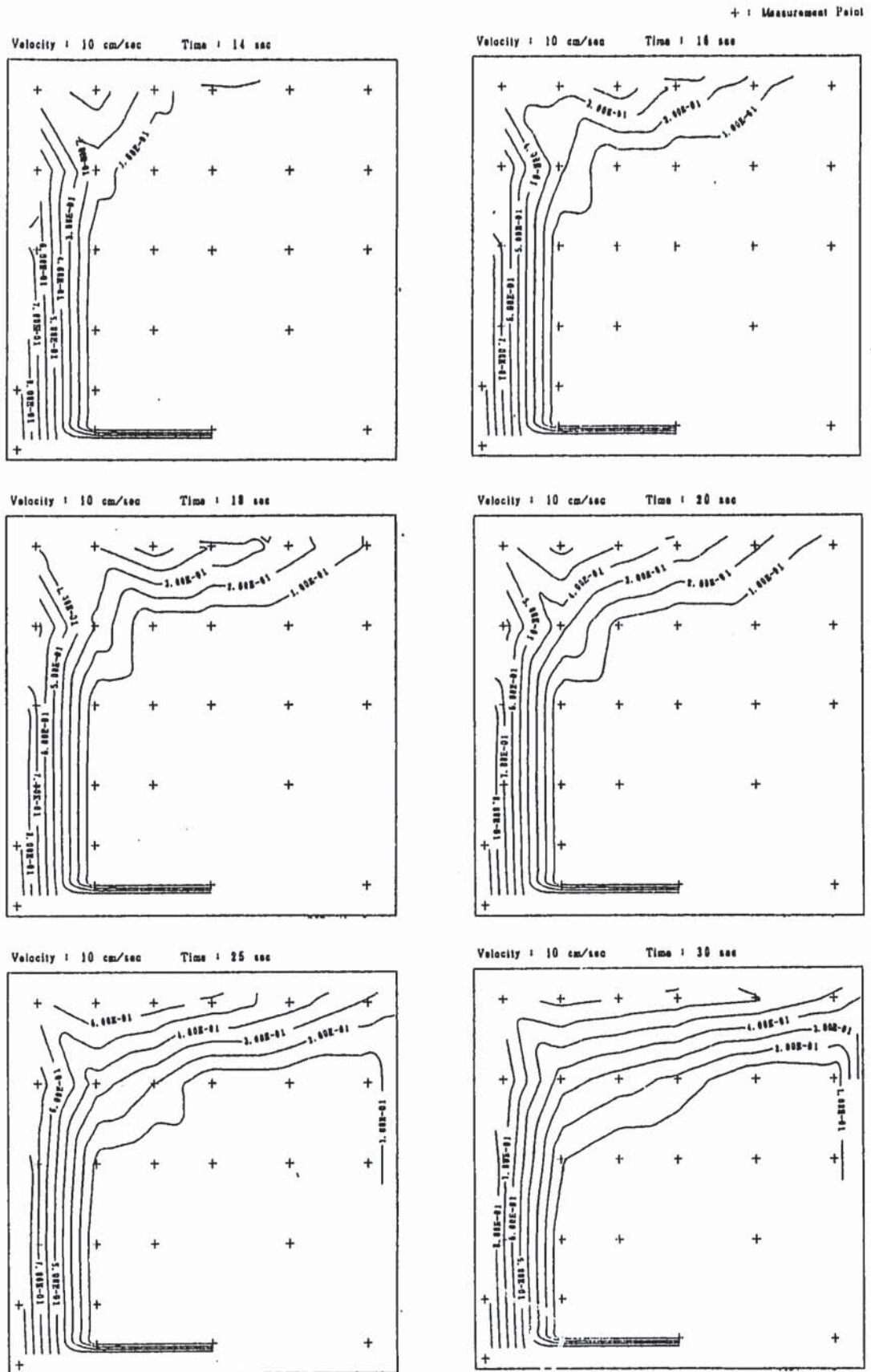


Fig. 3-11 Continued.

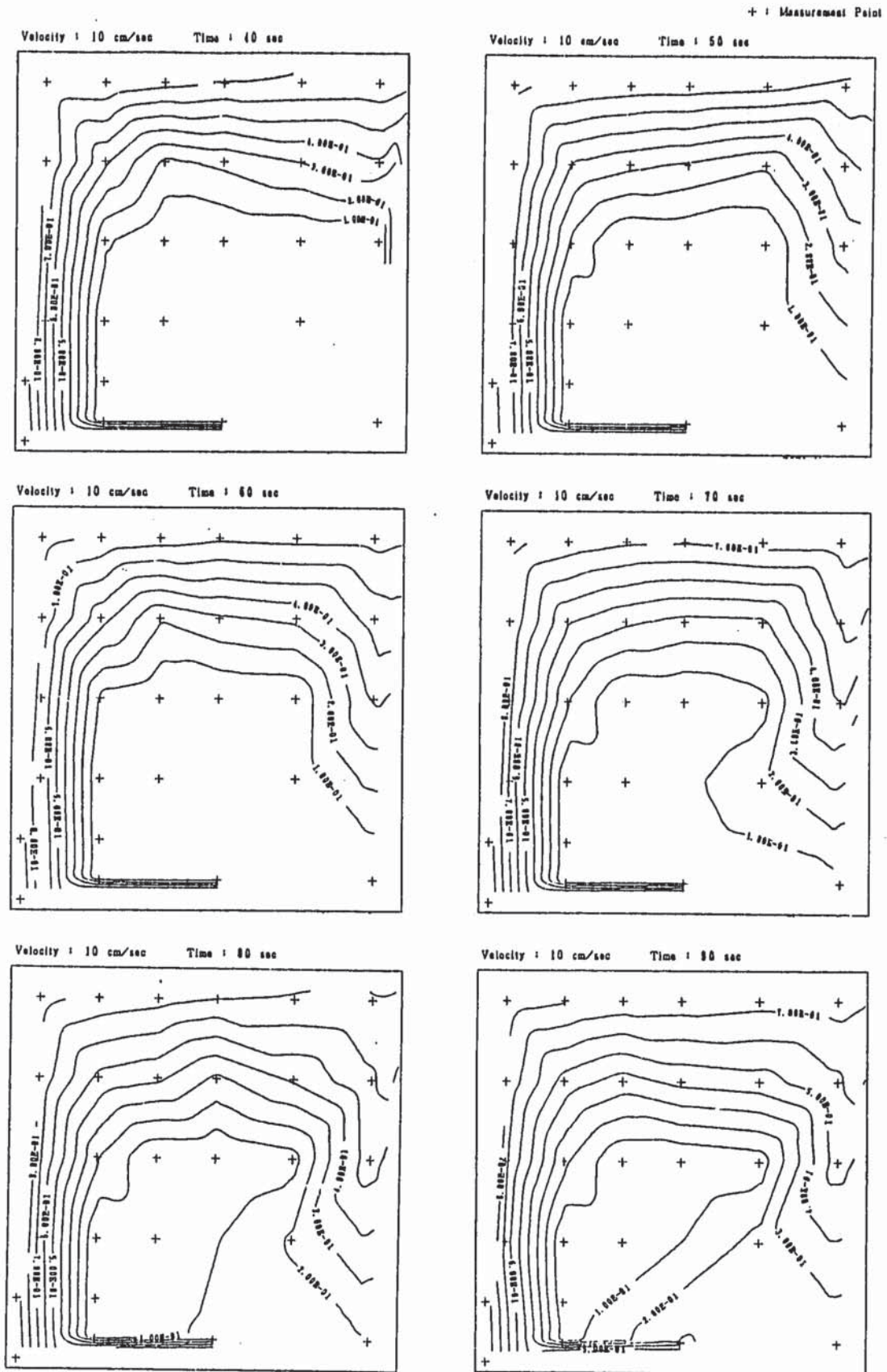


Fig. 3-11 Continued.

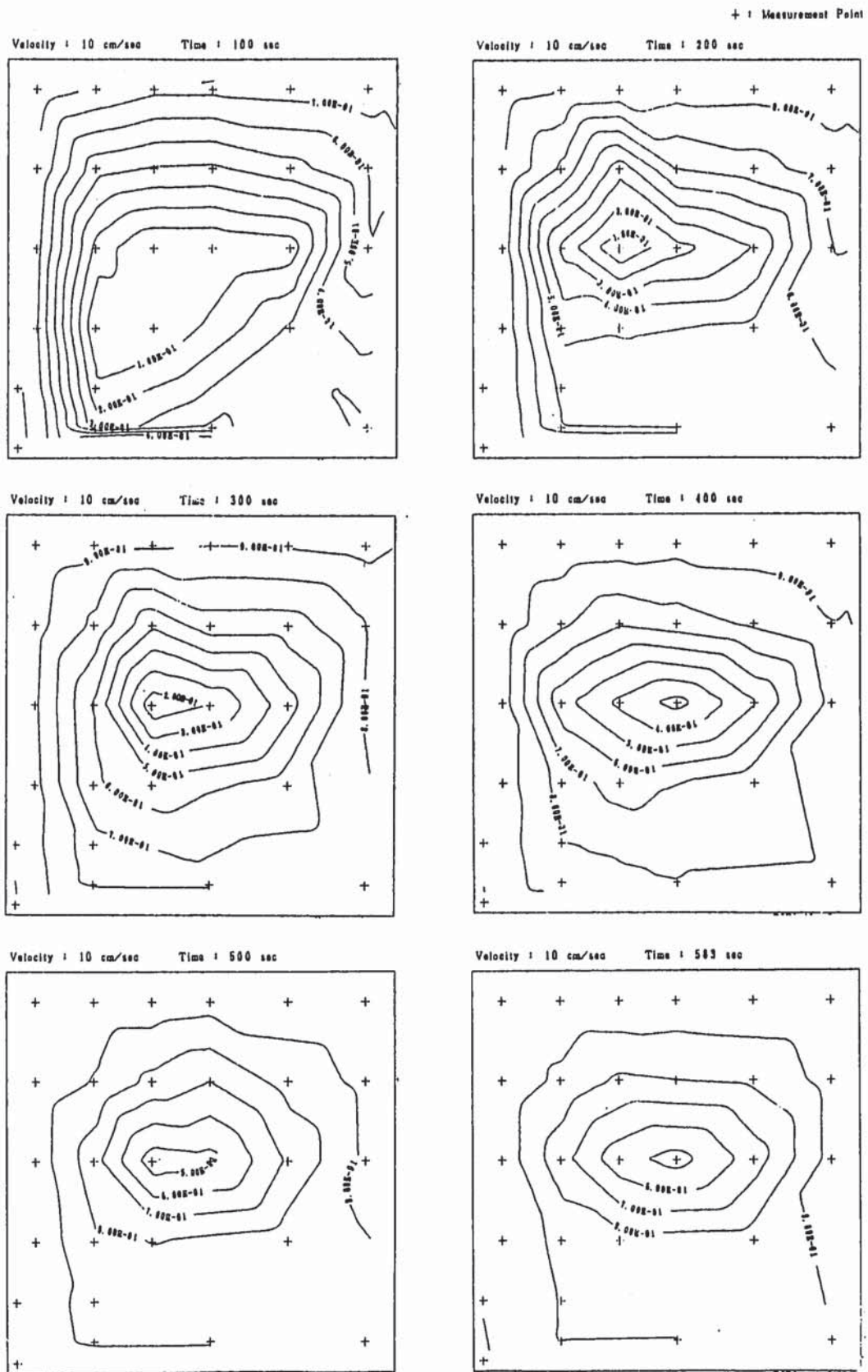


Fig. 3-11 Continued.

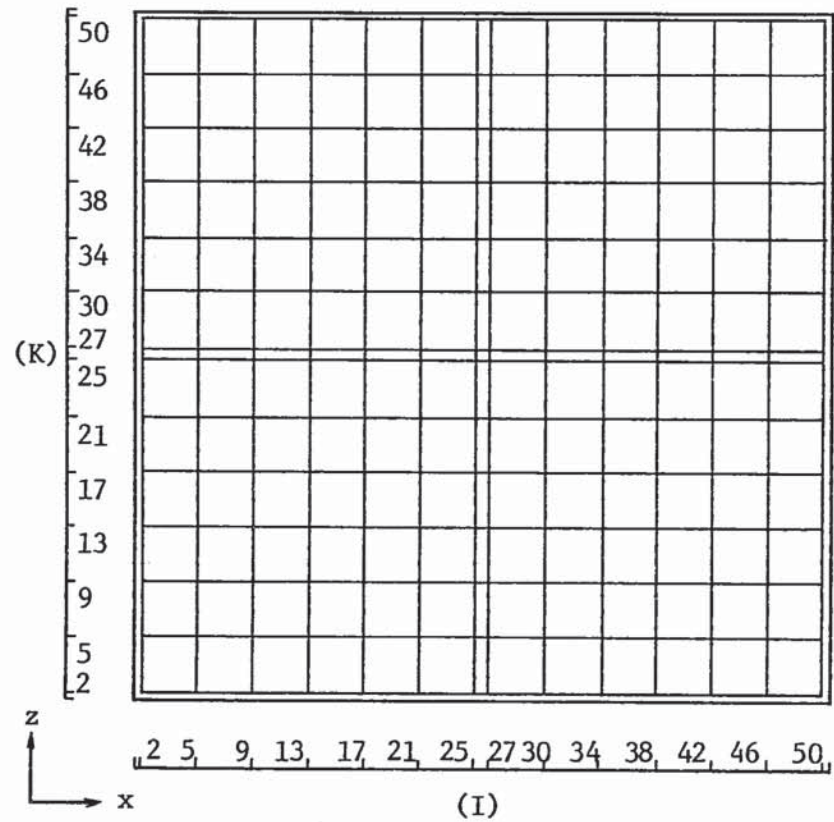


Fig. 3.12 Mesh Arrangement for Fundamental Experiment of Concentration Diffusion

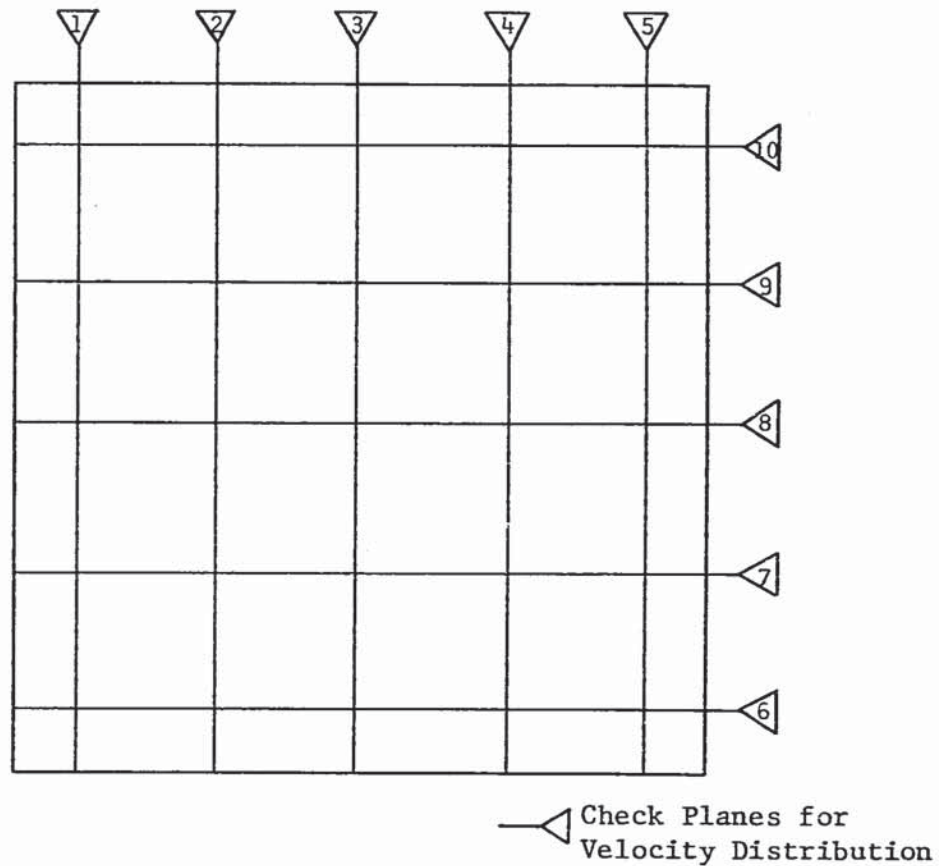


Fig. 3.13 Check Planes for Velocity Distribution of Experiments and Calculations

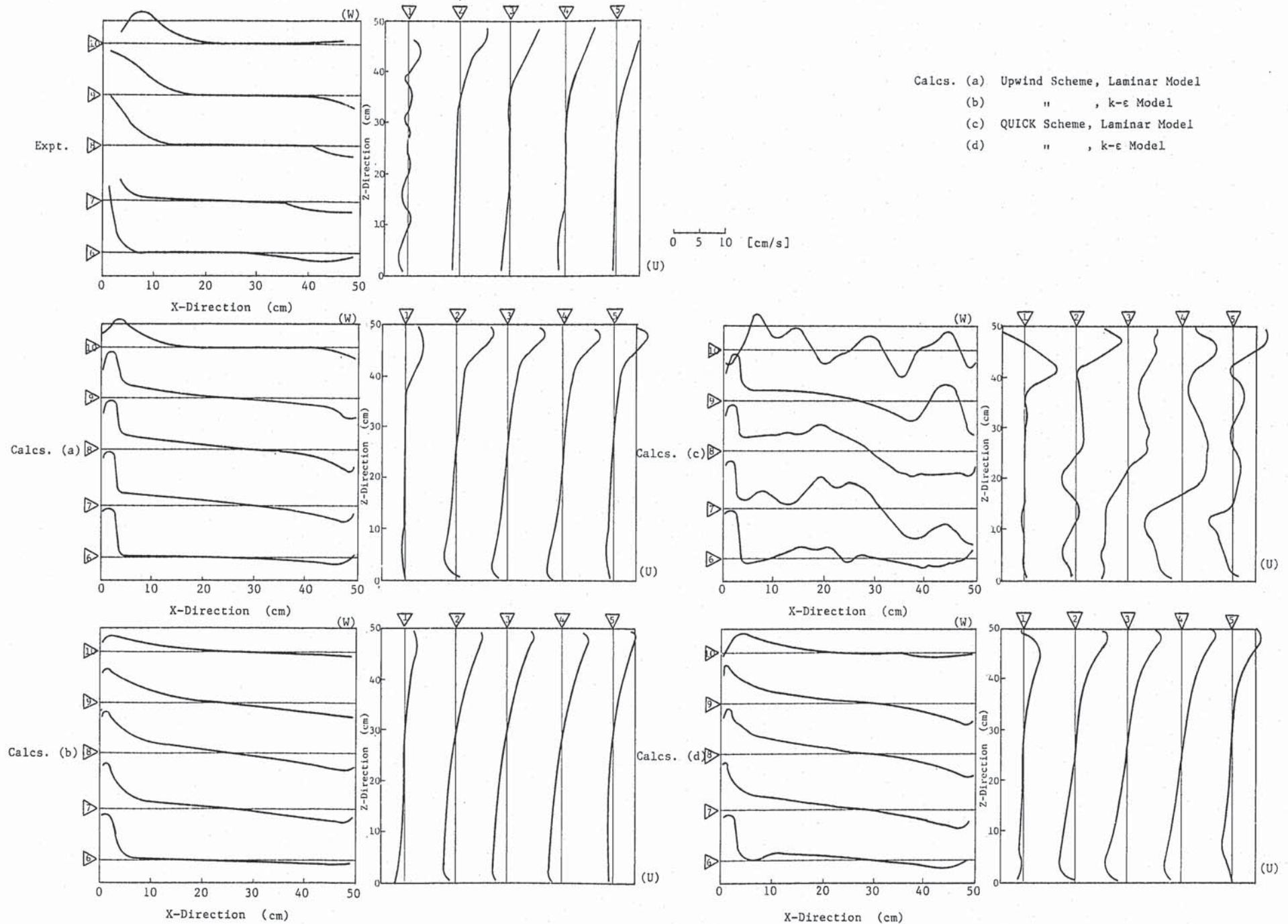
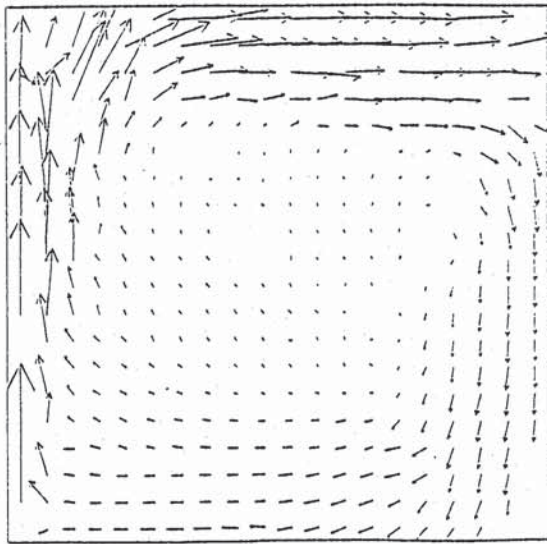
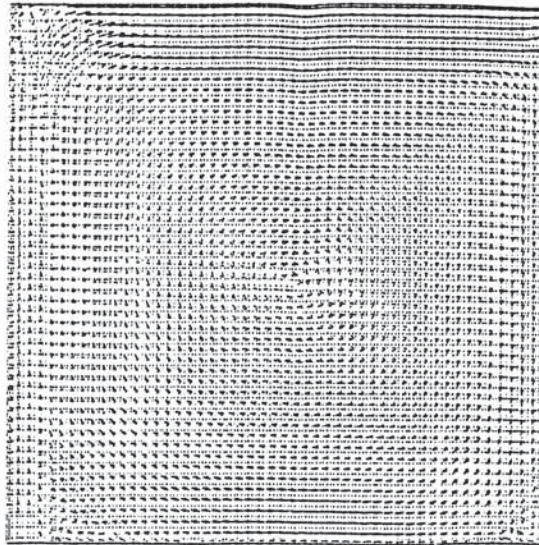


Fig. 3.14 Comparison of Velocity Profiles between Experiments and Calculations

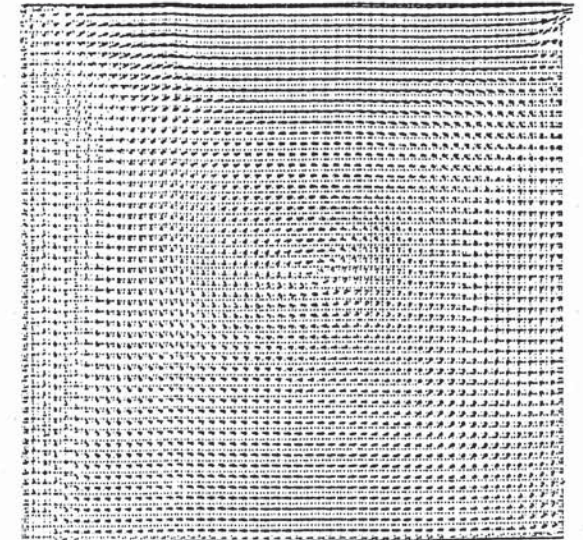


- : 1 cm/sec

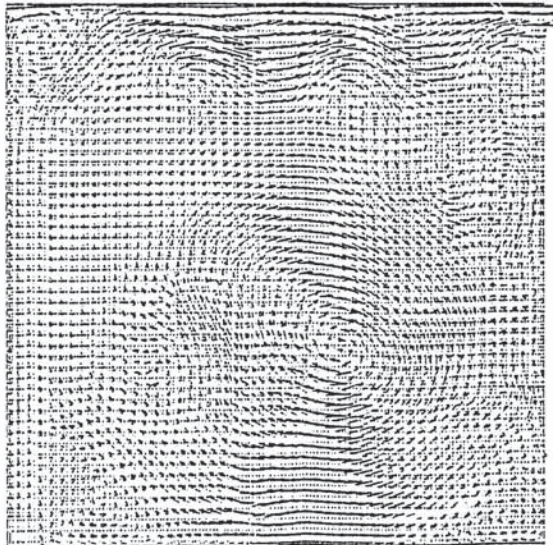
Expt.



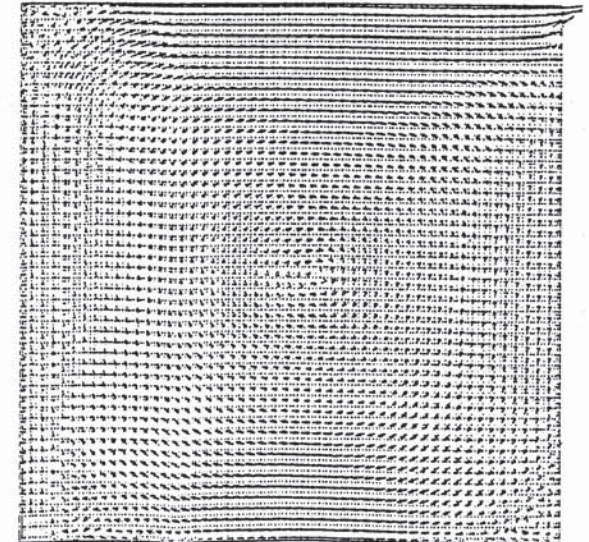
Calcs. (a)



Calcs. (b)



Calcs. (c)



Calcs. (d)

- Calcs. (a) Upwind scheme, Laminar model
- (b) " , k-ε model
- (c) QUICK scheme, Laminar model
- (d) " , k-ε model

————— 0.21 M/S

Fig. 3-15 Comparison of Flow Pattern between Experiments and Calculations.

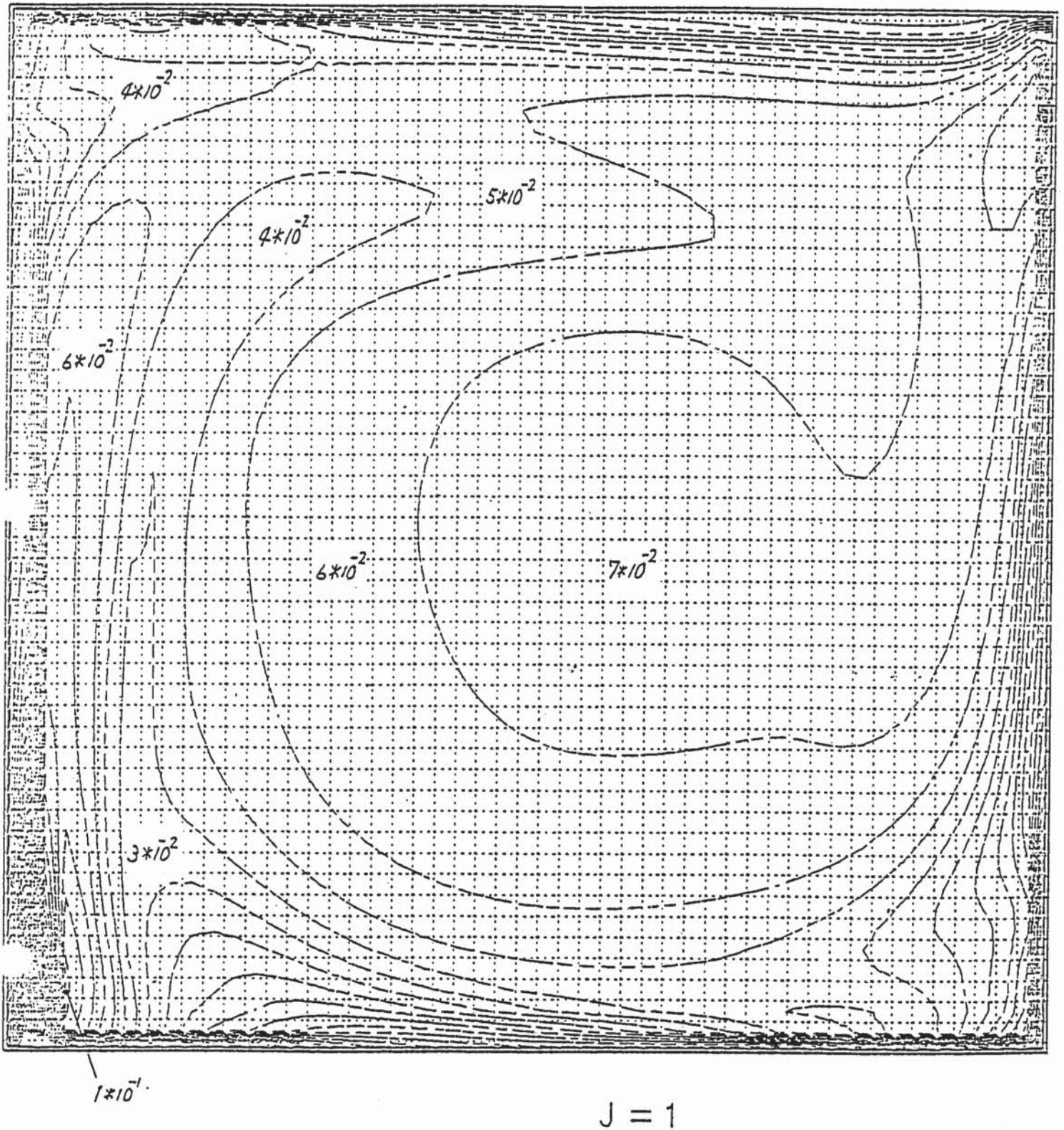
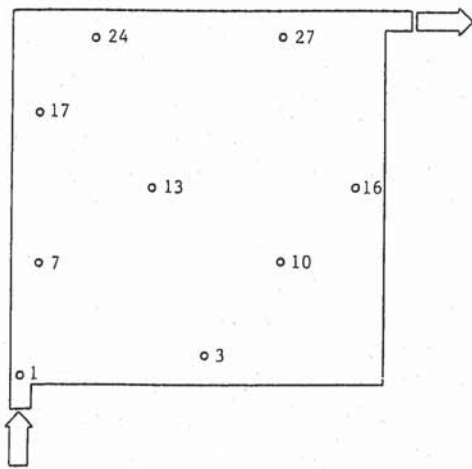


Fig. 3-16 Distribution of Turbulent Viscosity μ_t

Momentum : QUICK

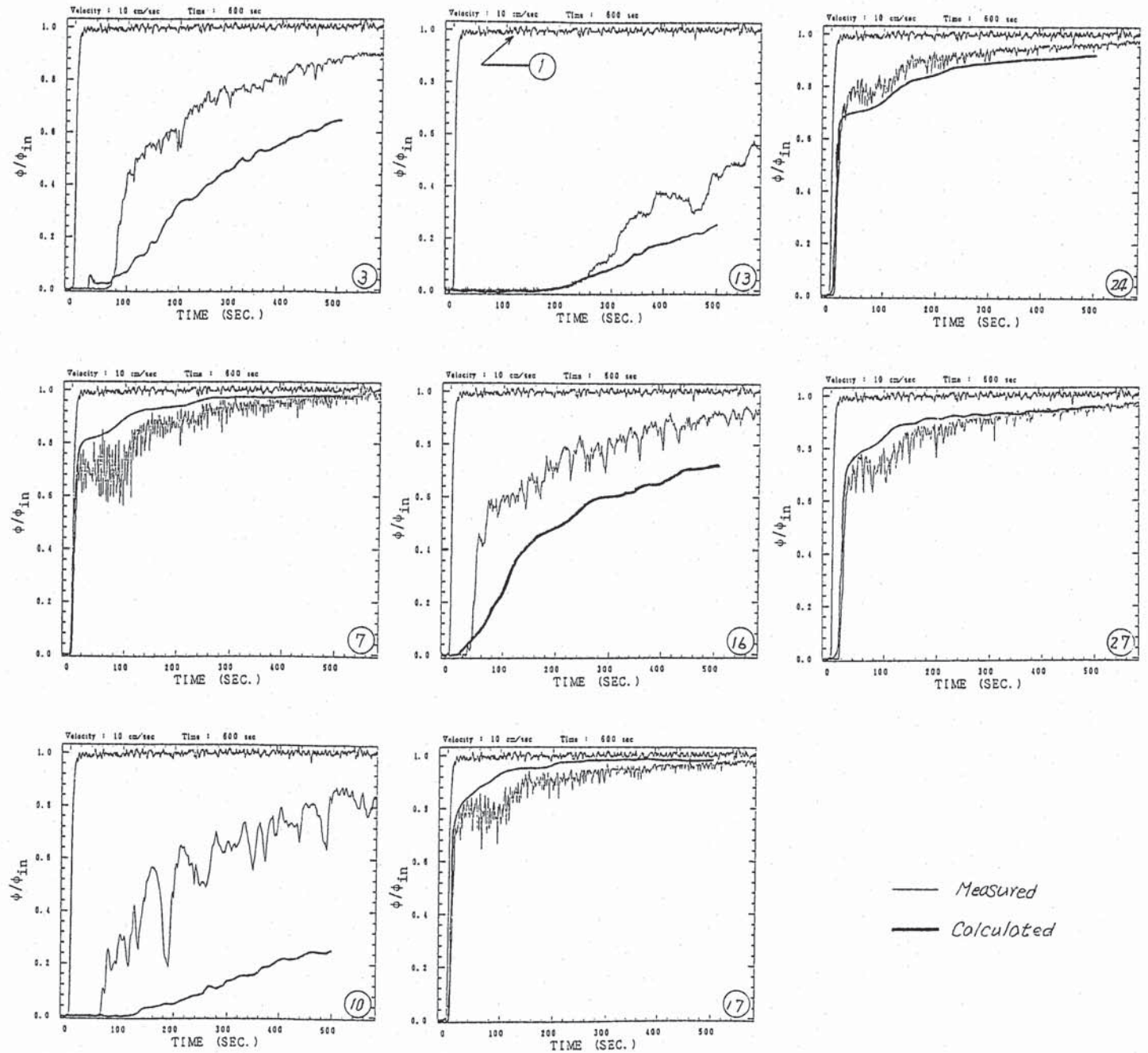
Turbulence : Upwind



Locations of Compared Points

Momentum : QUICK
 Turbulence : Upwind
 Concentration : QUICK-FRAM

Fig. 3.17 Concentration Transient in the Test Plenum



— Measured
 - - - Calculated

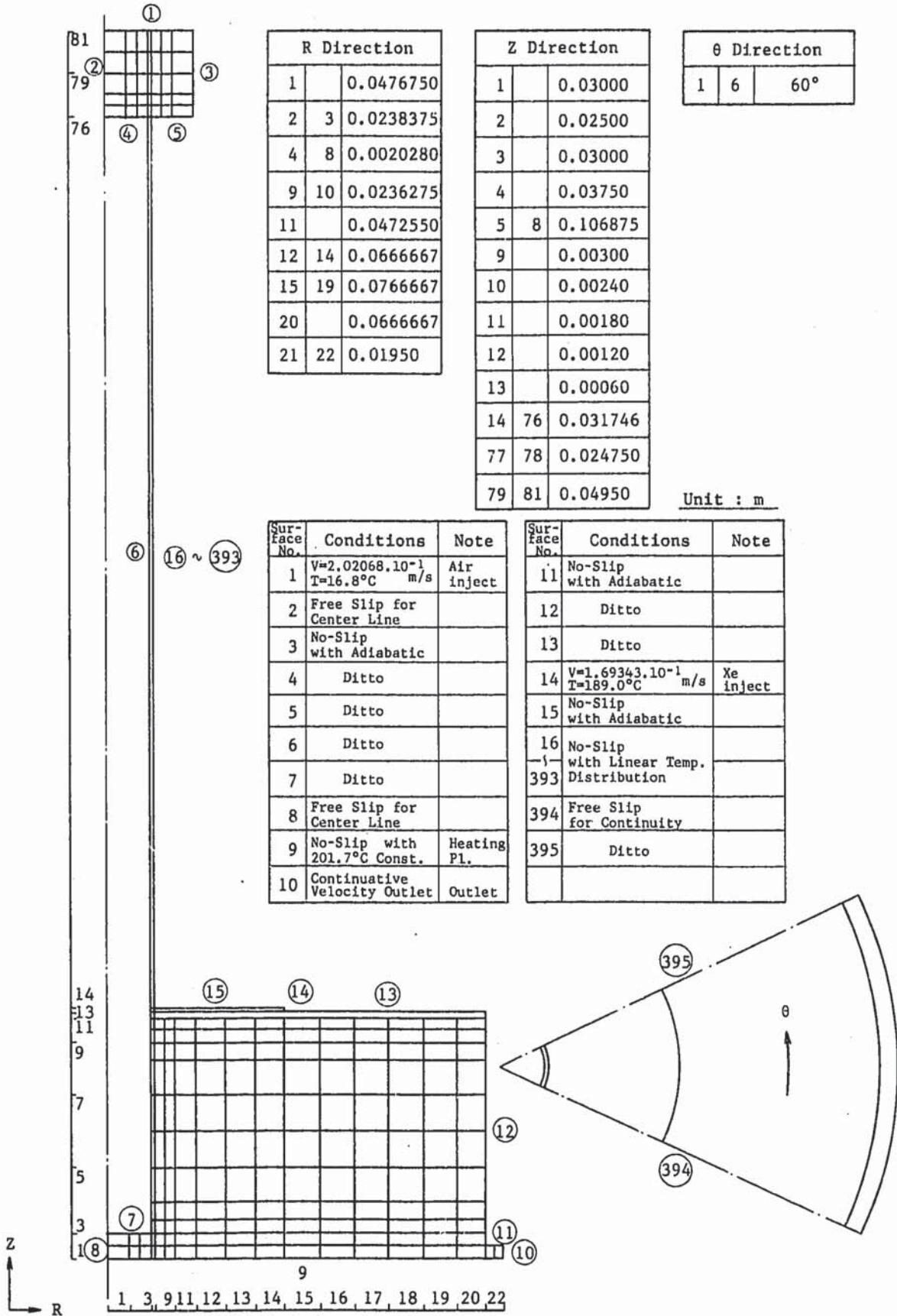


Fig. 3.18 Mesh Arrangement and Boundary Conditions for Analysis of Mock-up Experiment

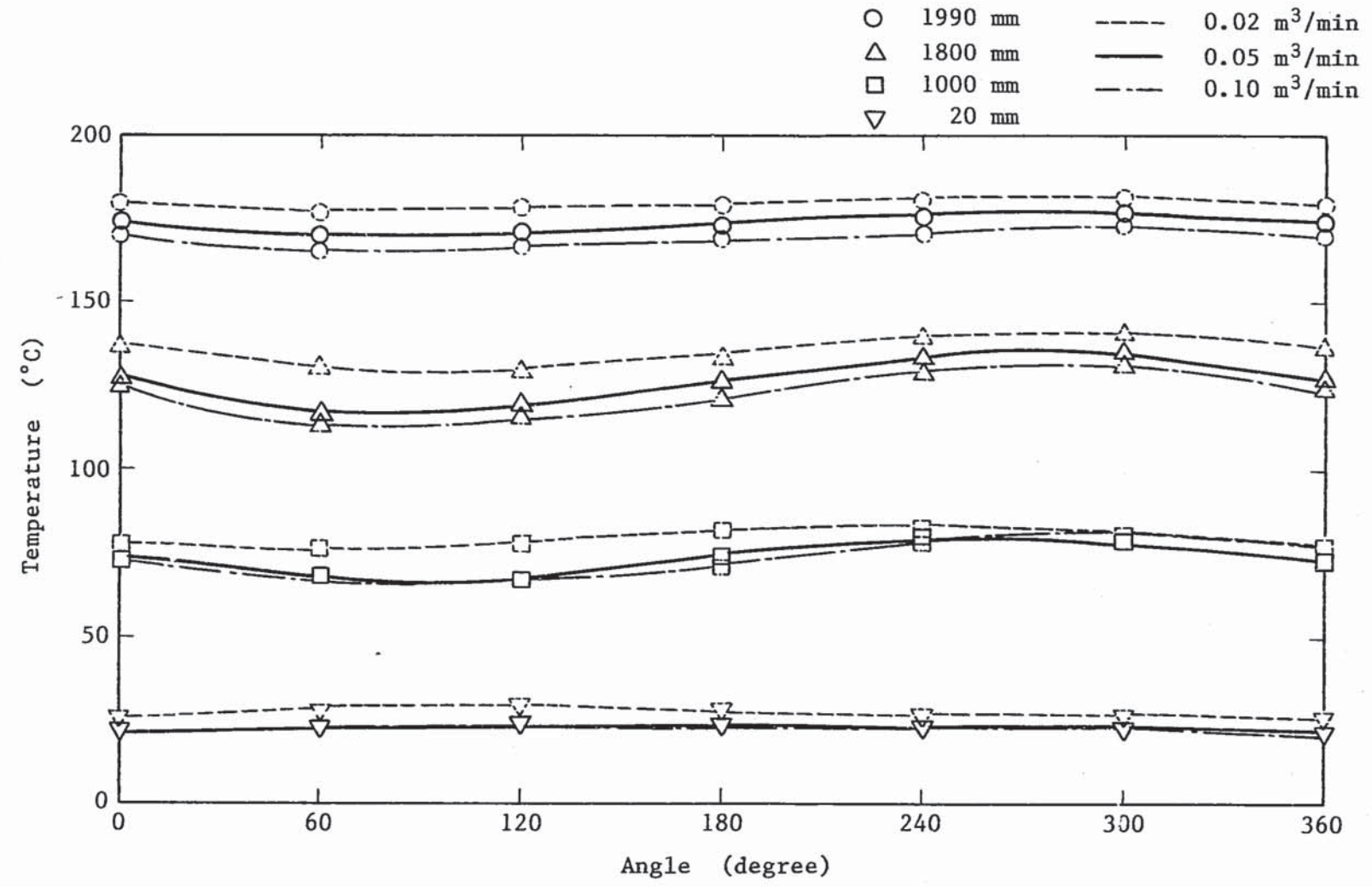


Fig. 3.19 Measured Circumferential Temperature Distribution at Inner Surface of Annulus Outside Tube for Each Blow Down Flowrate

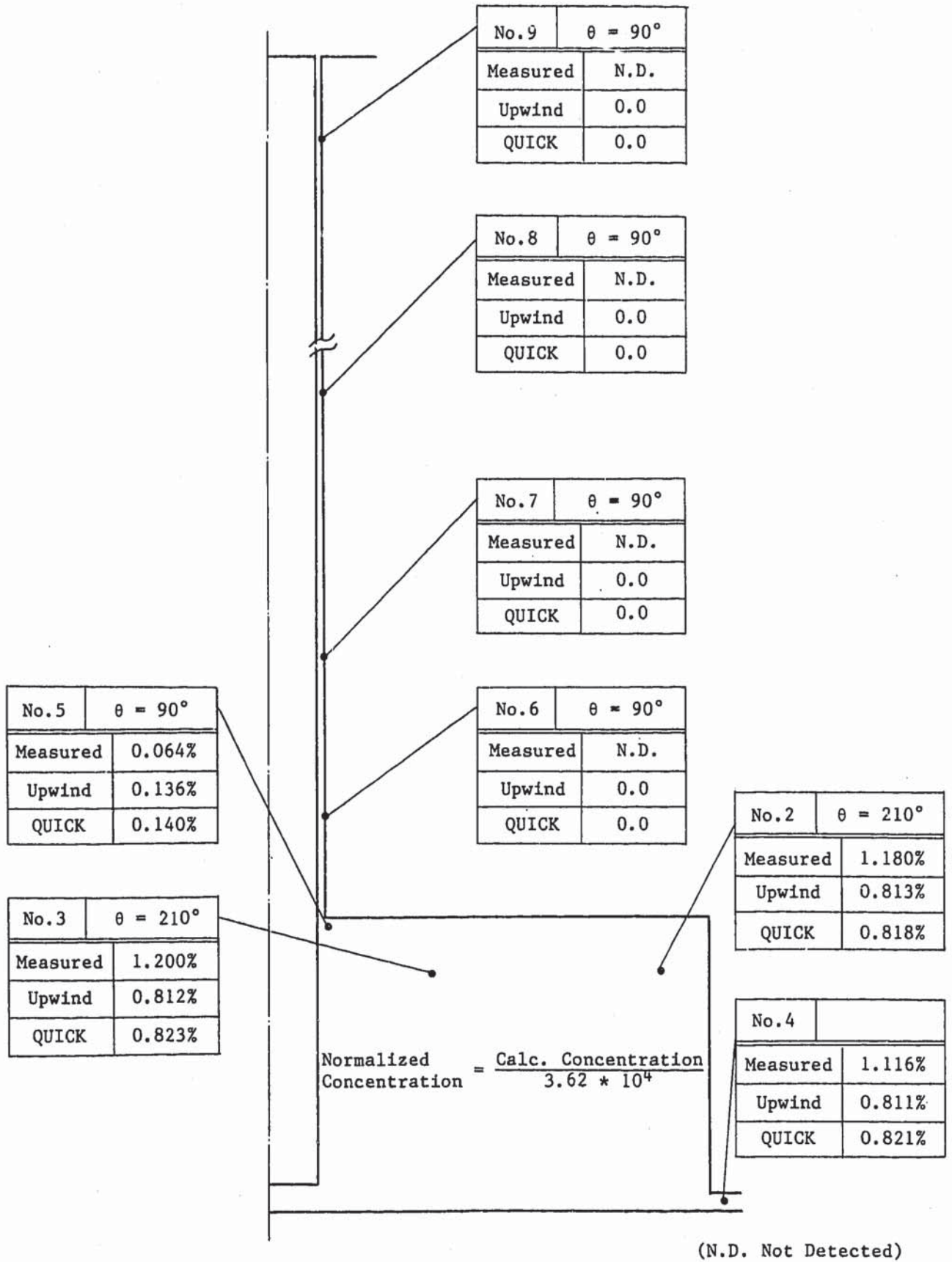


Fig. 3.20 Comparison of Normalized Concentration Distribution under 0.05m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

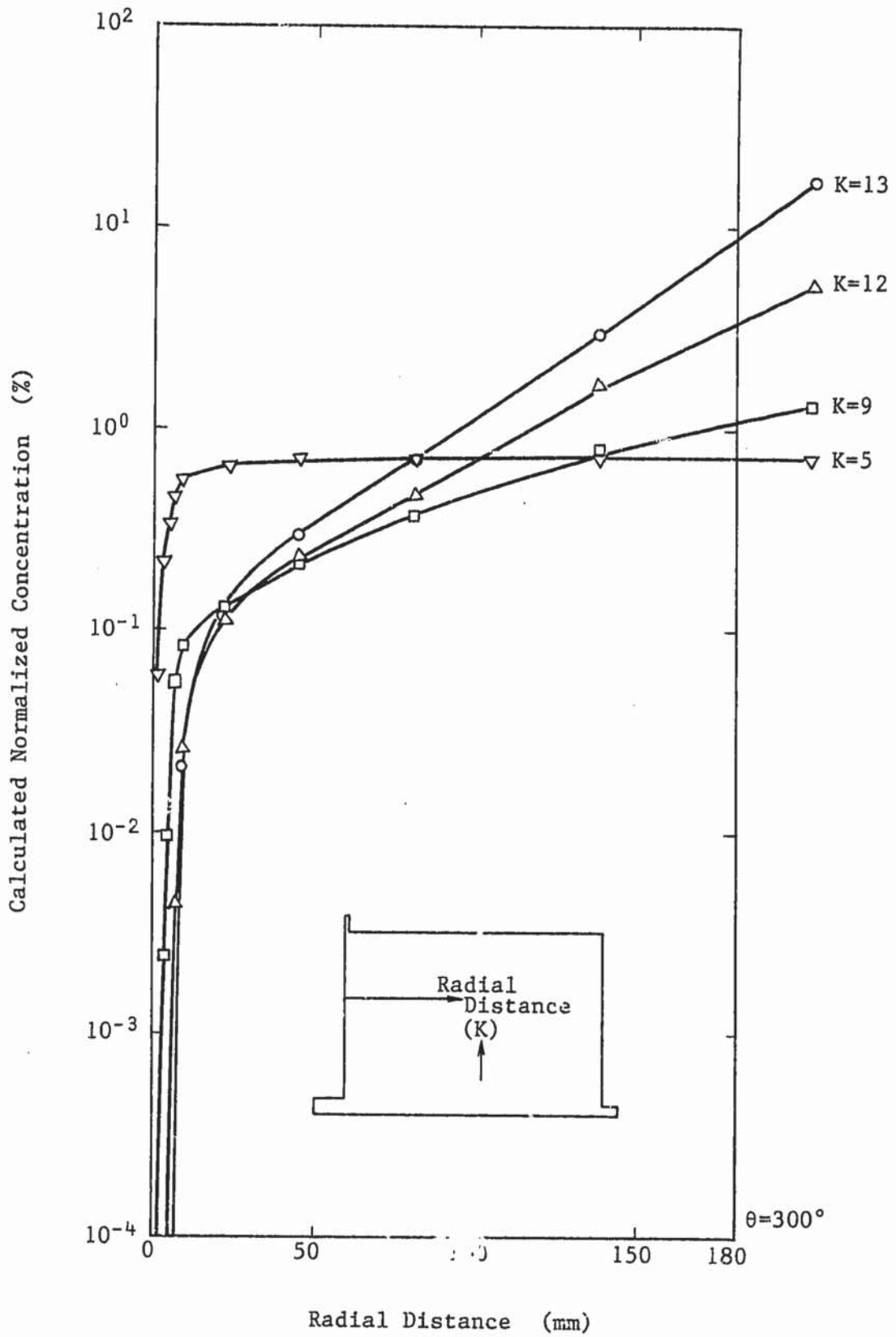


Fig. 3.21 Calculated Concentration Radial Profiles in Lower Plenum under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition

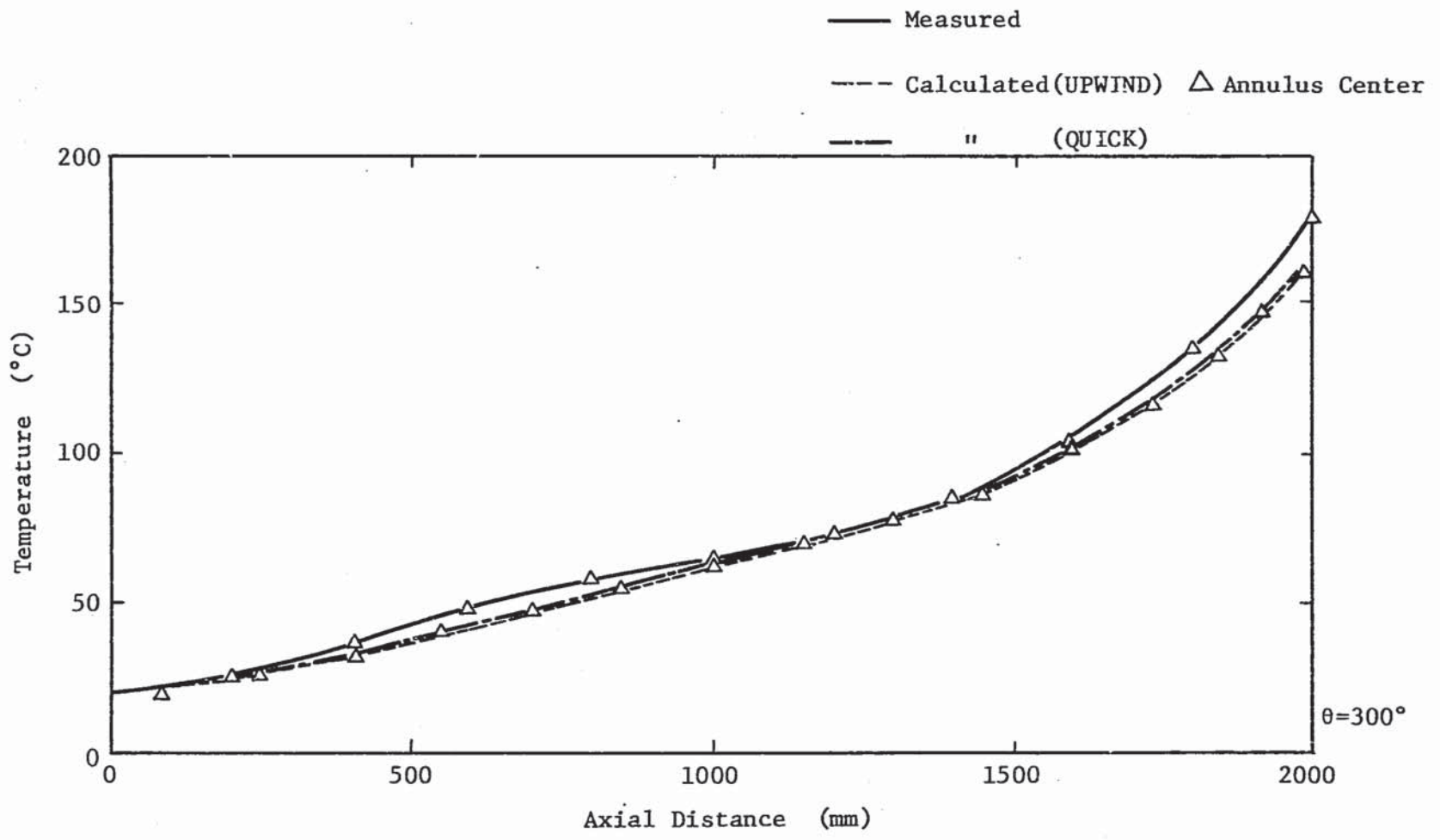


Fig. 3.22 Comparisons of Axial Temperature Distribution under 0.05 m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

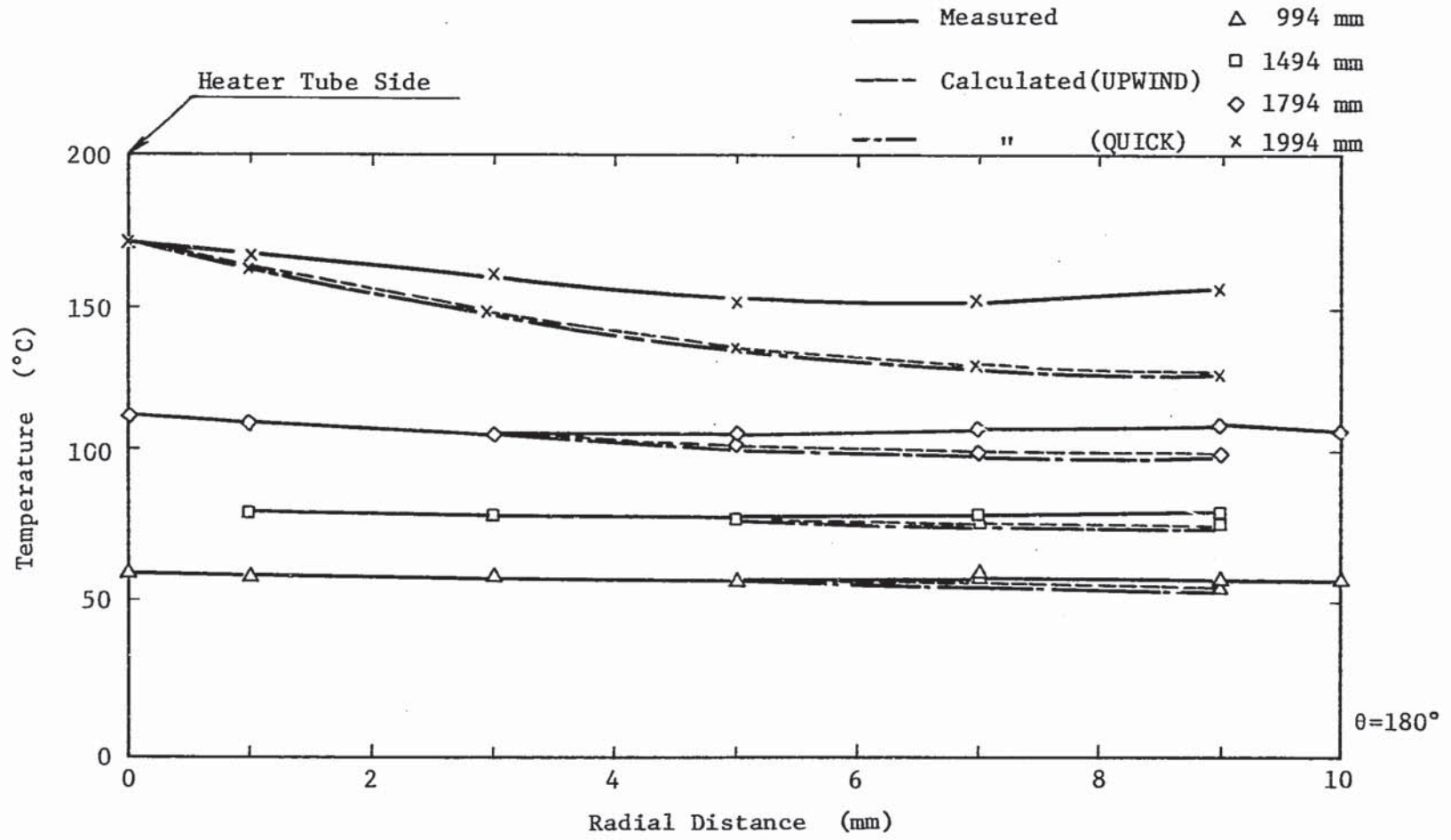


Fig. 3.23 Comparisons of Radial Temperature Distribution under 0.05 m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

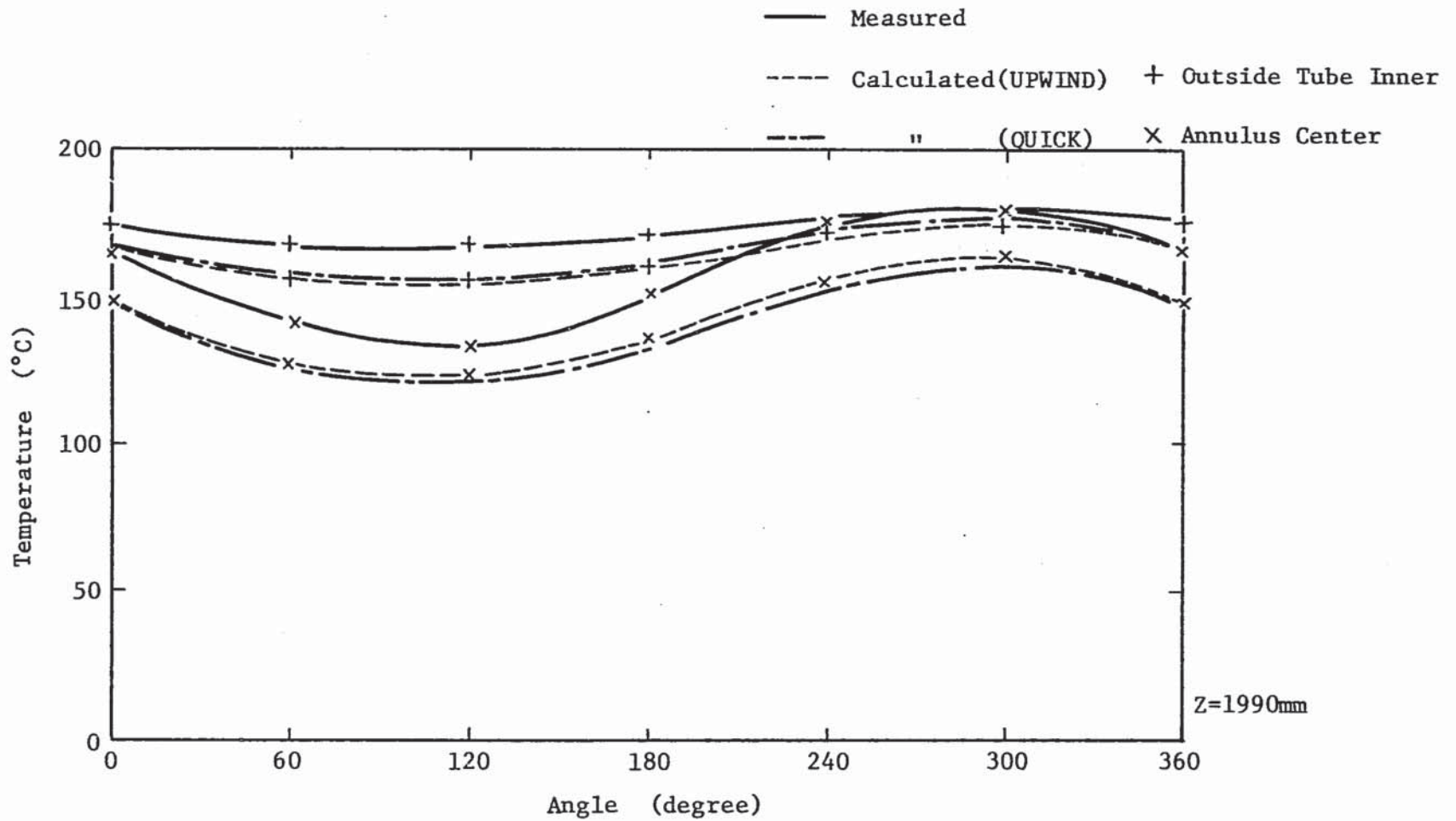


Fig. 3.24 Comparison of Circumferential Temperature Distribution at Z=1990mm under 0.05 m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

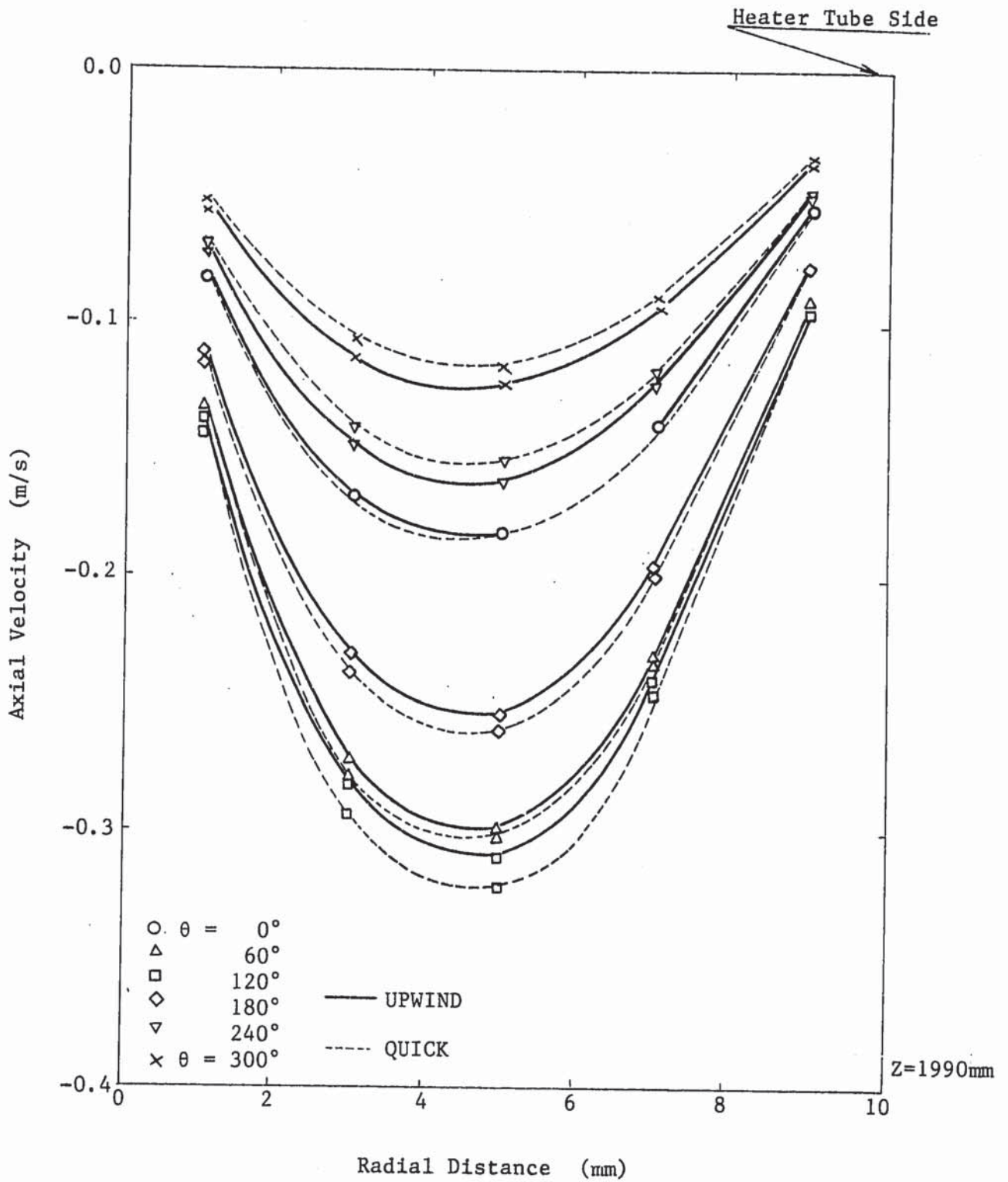


Fig. 3.25 Comparison of Axial Velocity Profiles in the Annulus under $0.05\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition

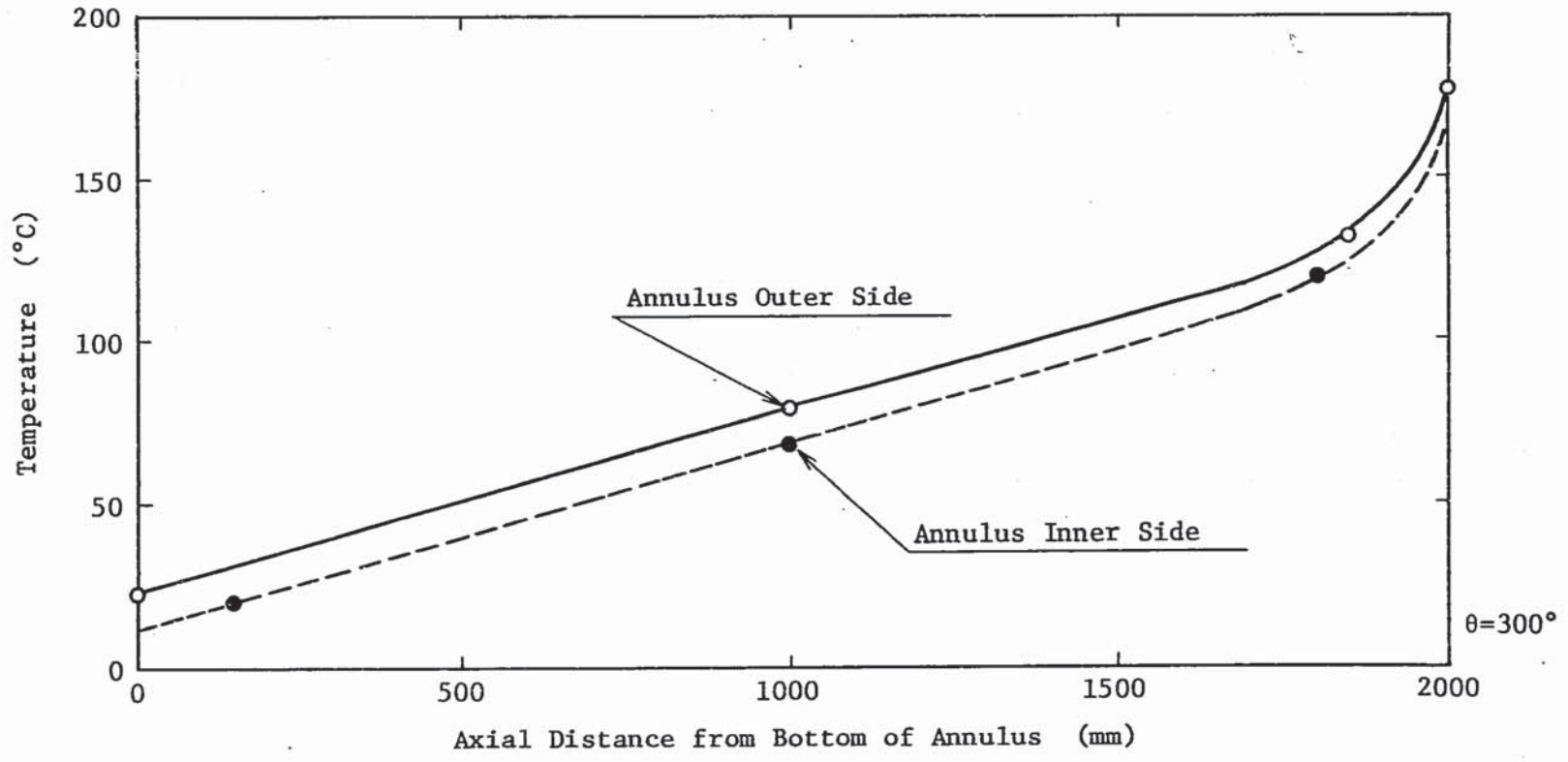


Fig. 3.26 Estimated Axial Temperature Distribution at Annulus Inner Side under $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition

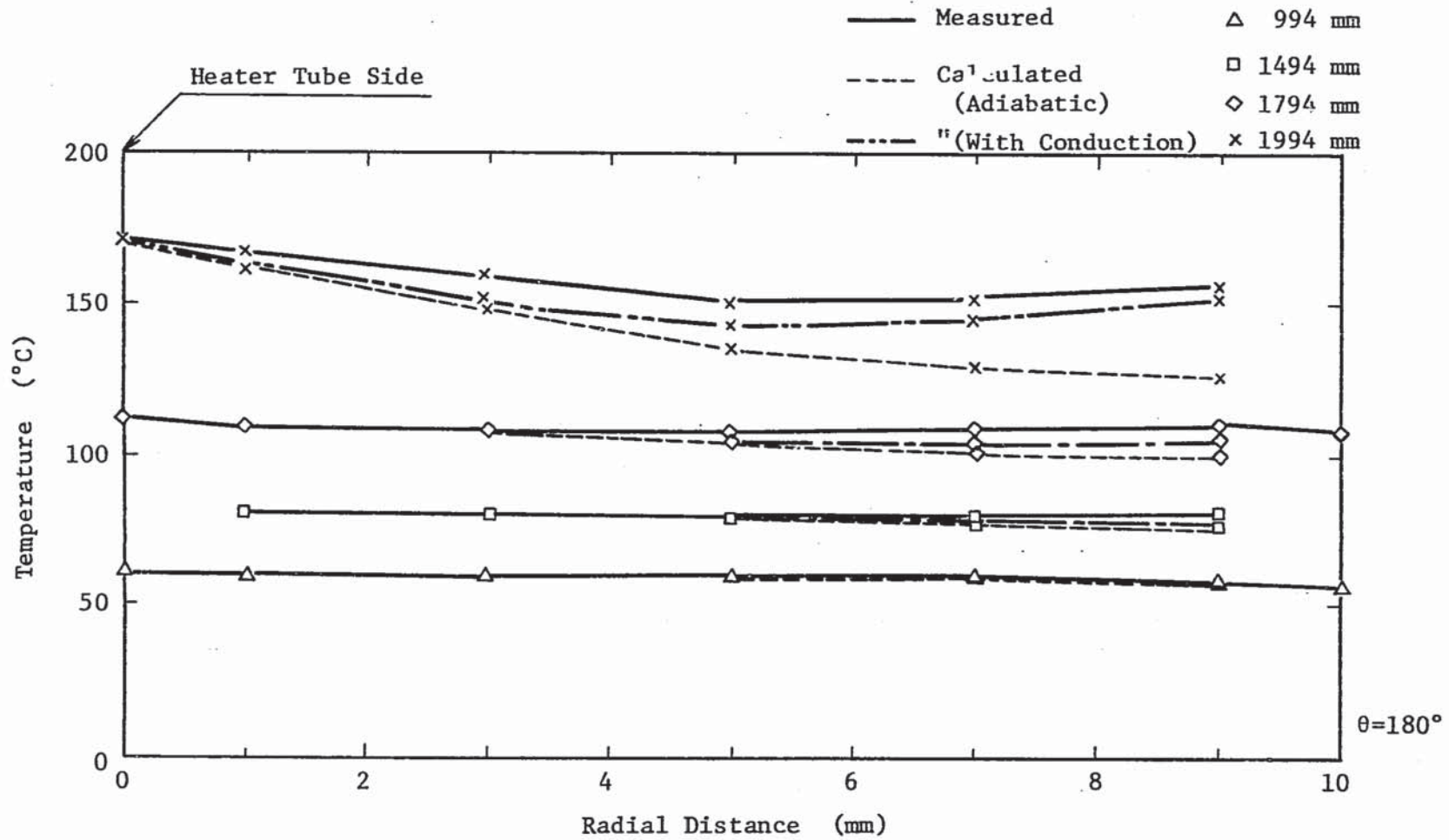


Fig. 3.27 Comparison of Radial Temperature Distribution under 0.05 m³/min Blow Down Condition between Cases of Adiabatic and With Conduction for Inner Cylinder

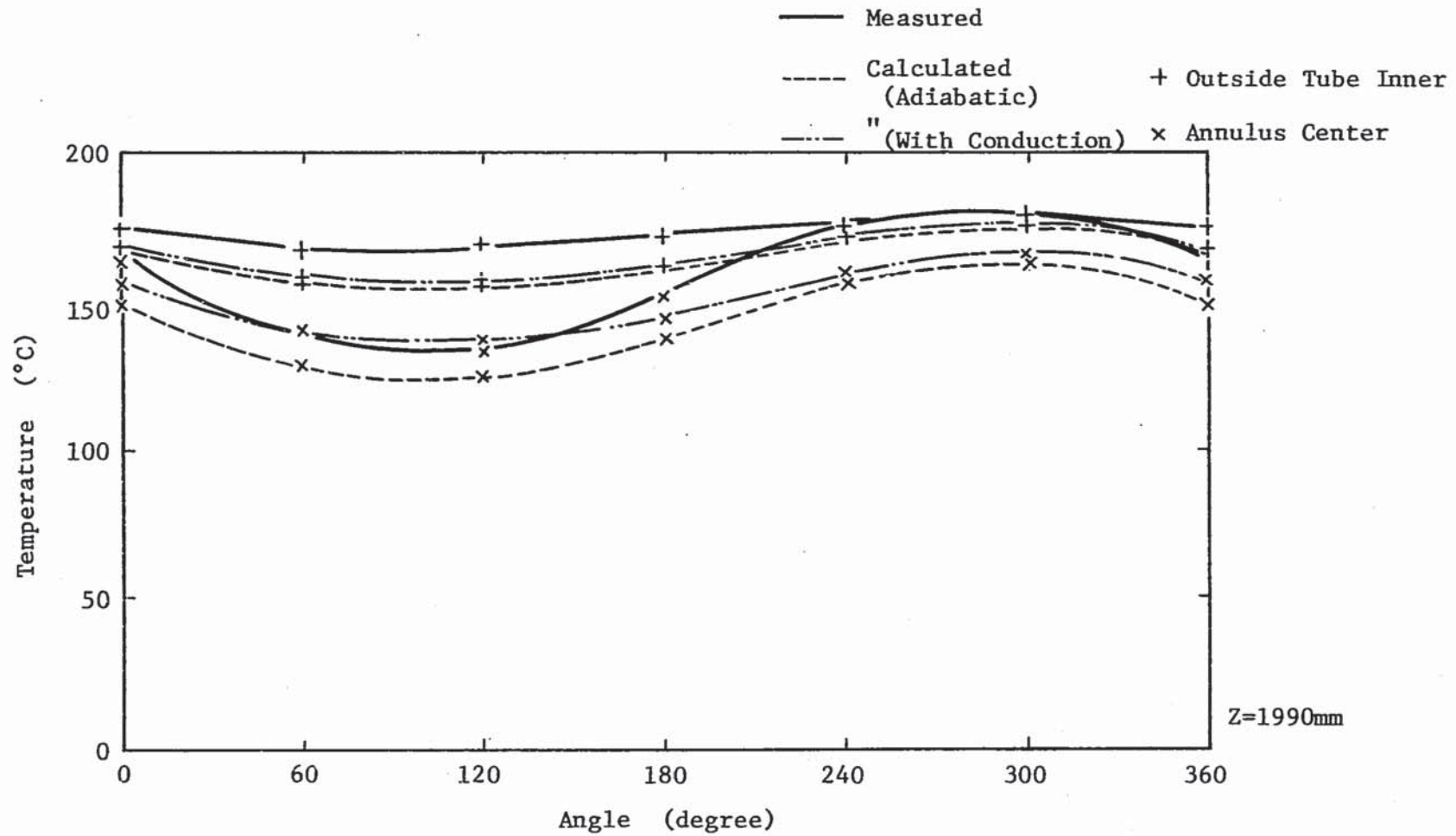


Fig. 3.28 Comparison of Circumferential Temperature Distribution under $0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Cases of Adiabatic and With Conduction for Inner Cylinder

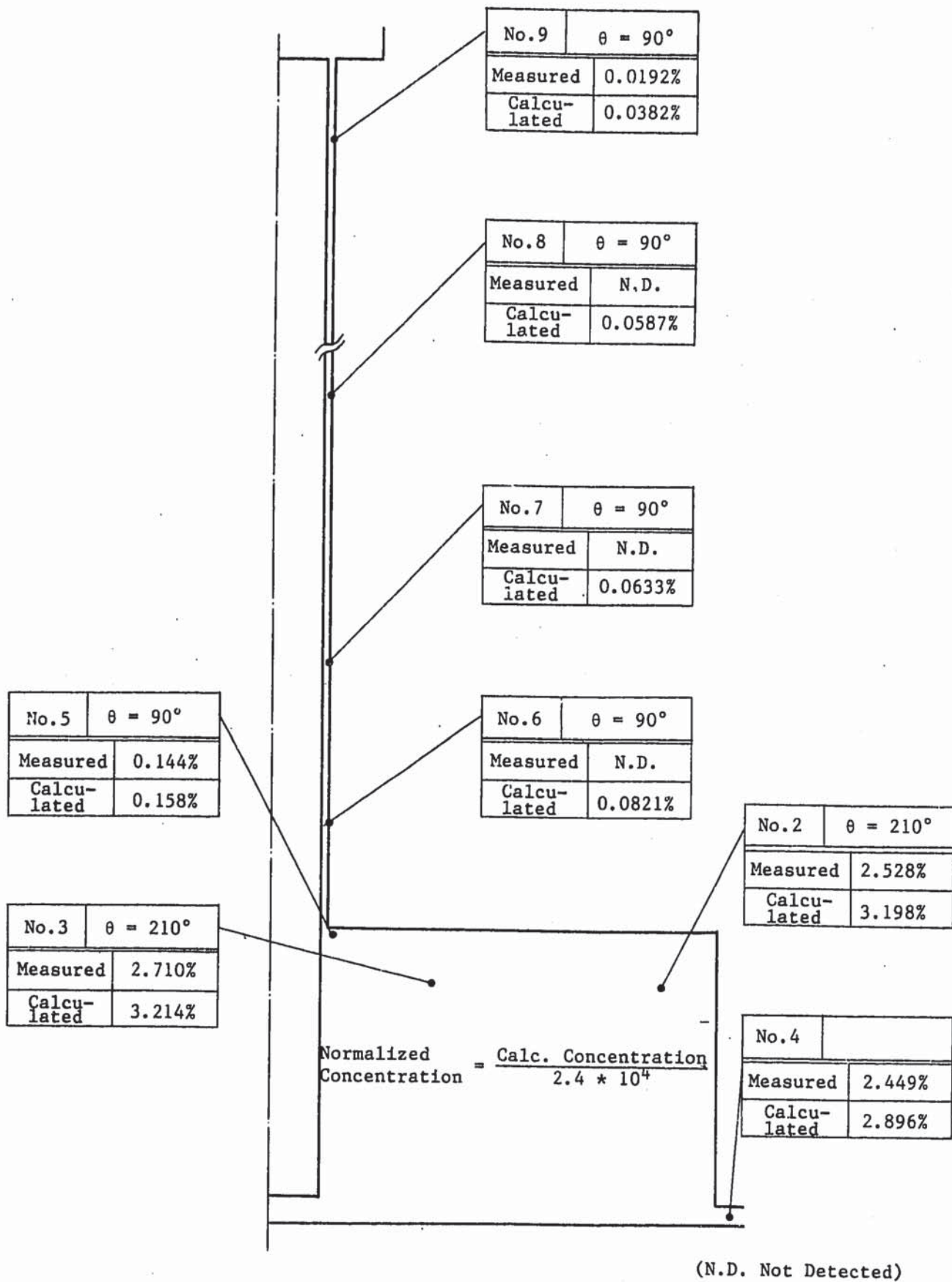


Fig. 3.29 Comparison of Normalized Concentration Distribution under 0.02m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

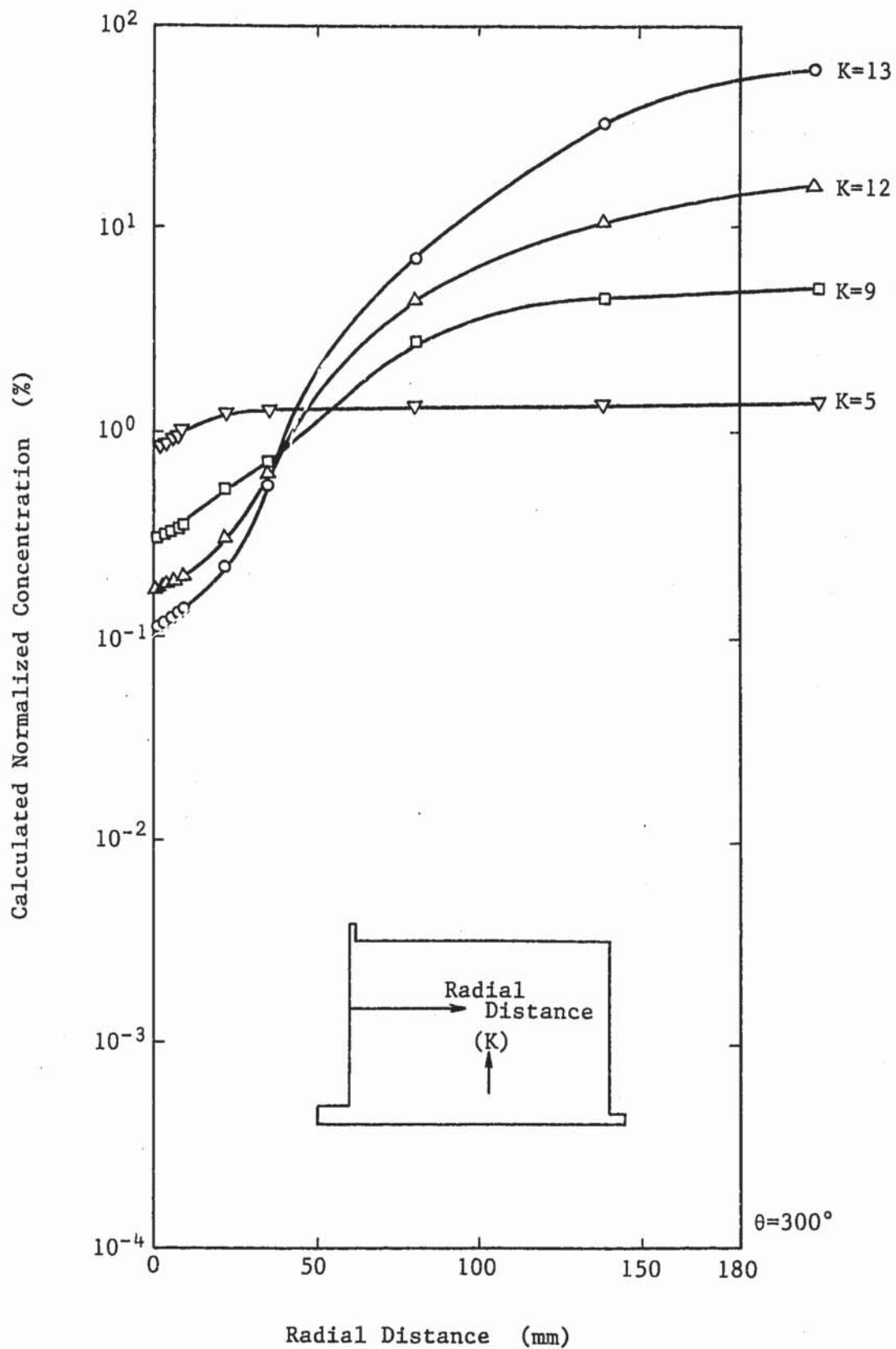


Fig. 3.30 Calculated Concentration Radial Profiles in Lower Plenum under $0.02\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition

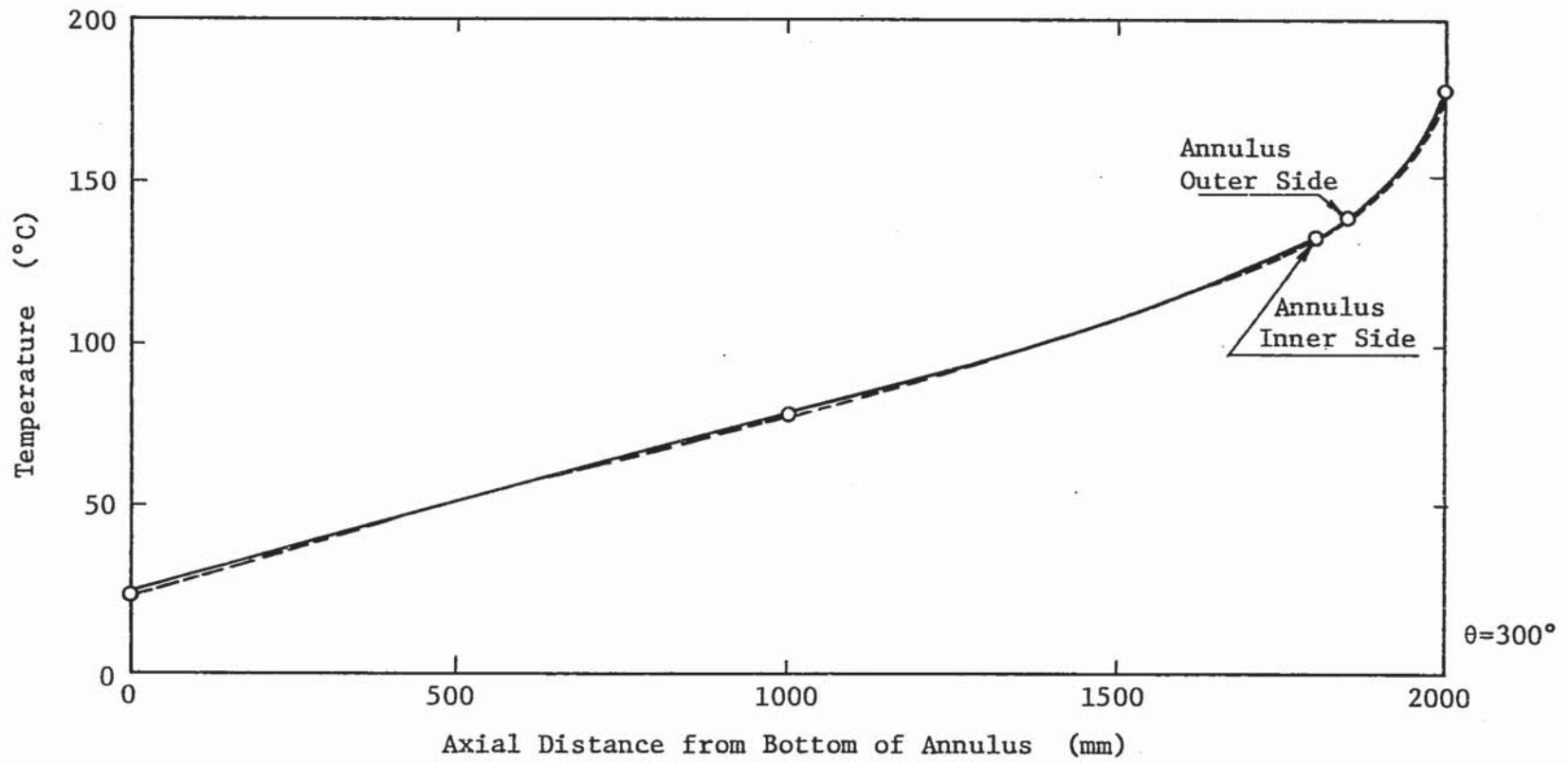


Fig. 3.31 Estimated Axial Temperature Distribution at Annulus Inner Side under $0.02 \text{ m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition

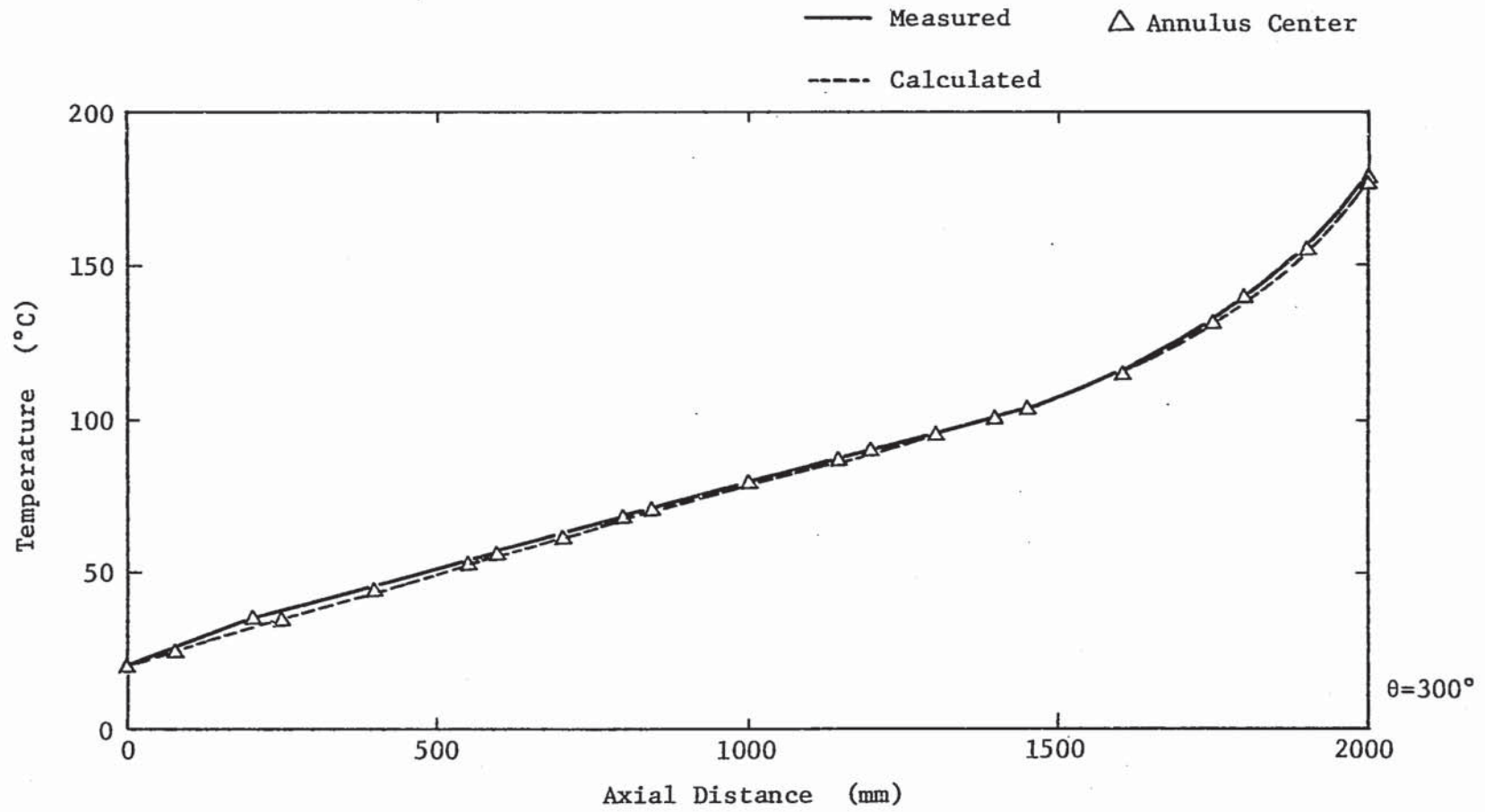


Fig. 3.32 Comparison of Axial Temperature Distribution under $0.02 \text{ m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

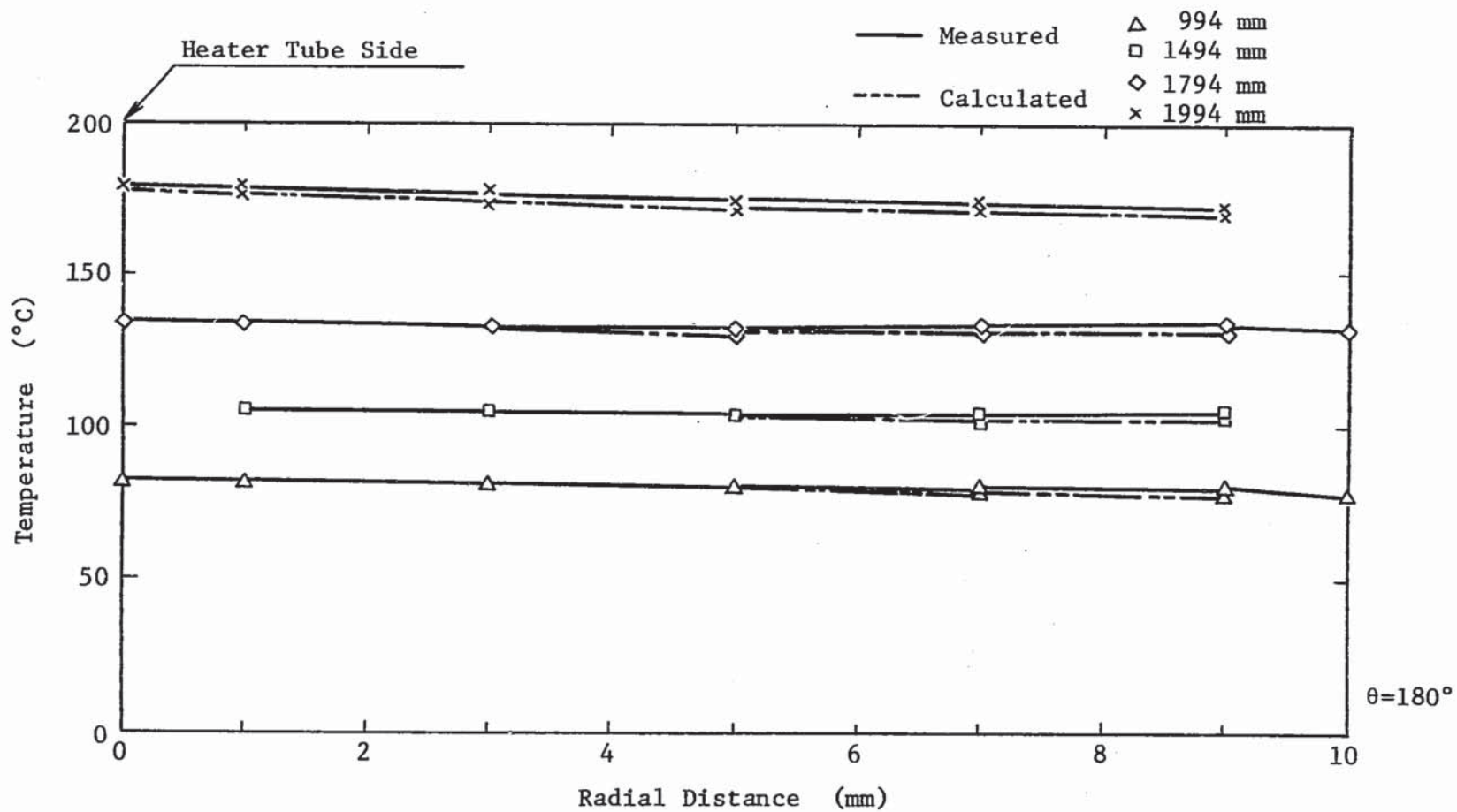


Fig. 3.33 Comparison of Radial Temperature Distribution under 0.02 m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

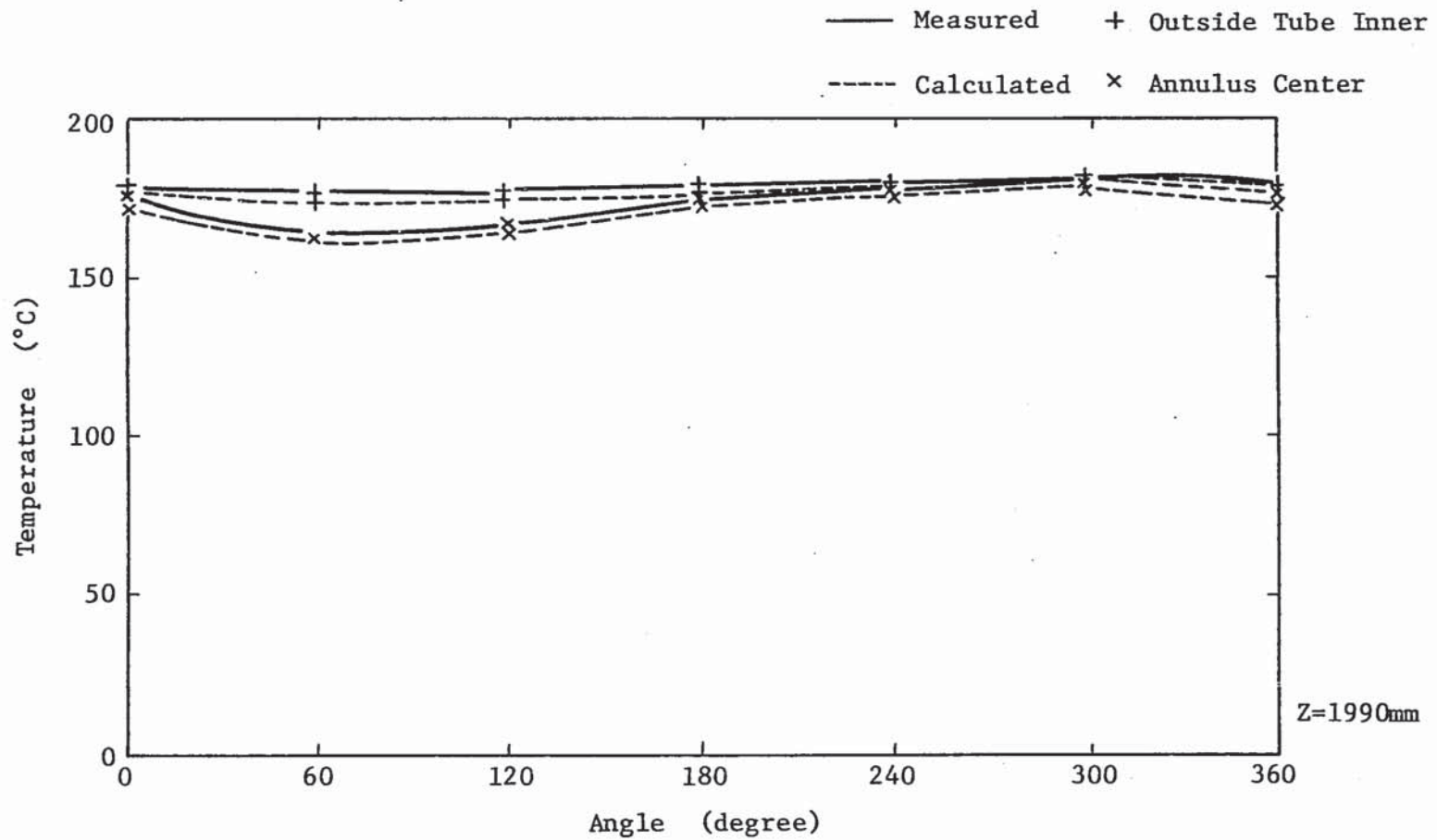


Fig. 3.34 Comparison of Circumferential Temperature Distribution at Z=1990mm under 0.02 m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

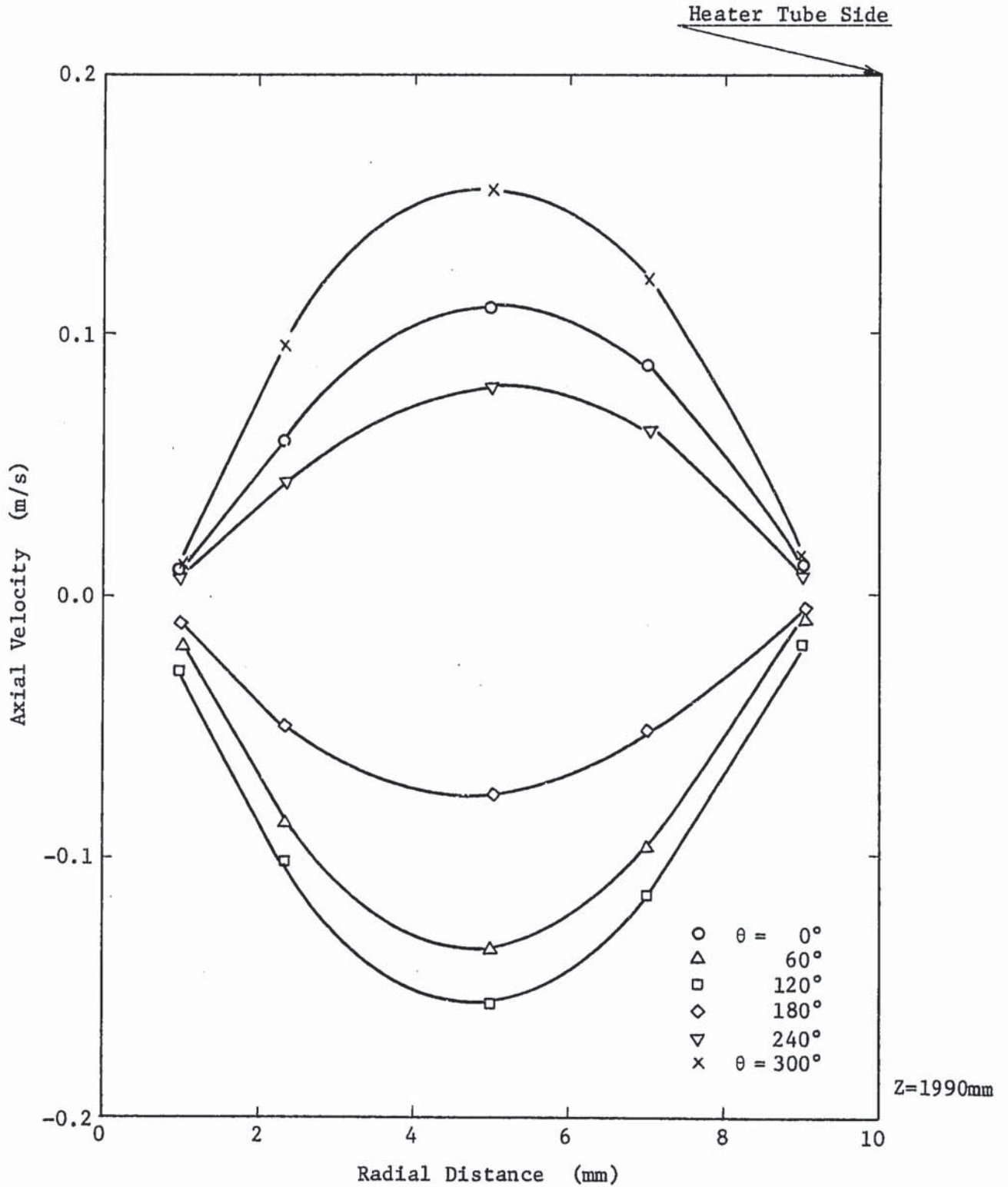


Fig. 3.35 Calculated Axial Velocity Profiles in the Annulus under 0.02 m³/min Blow Down Condition

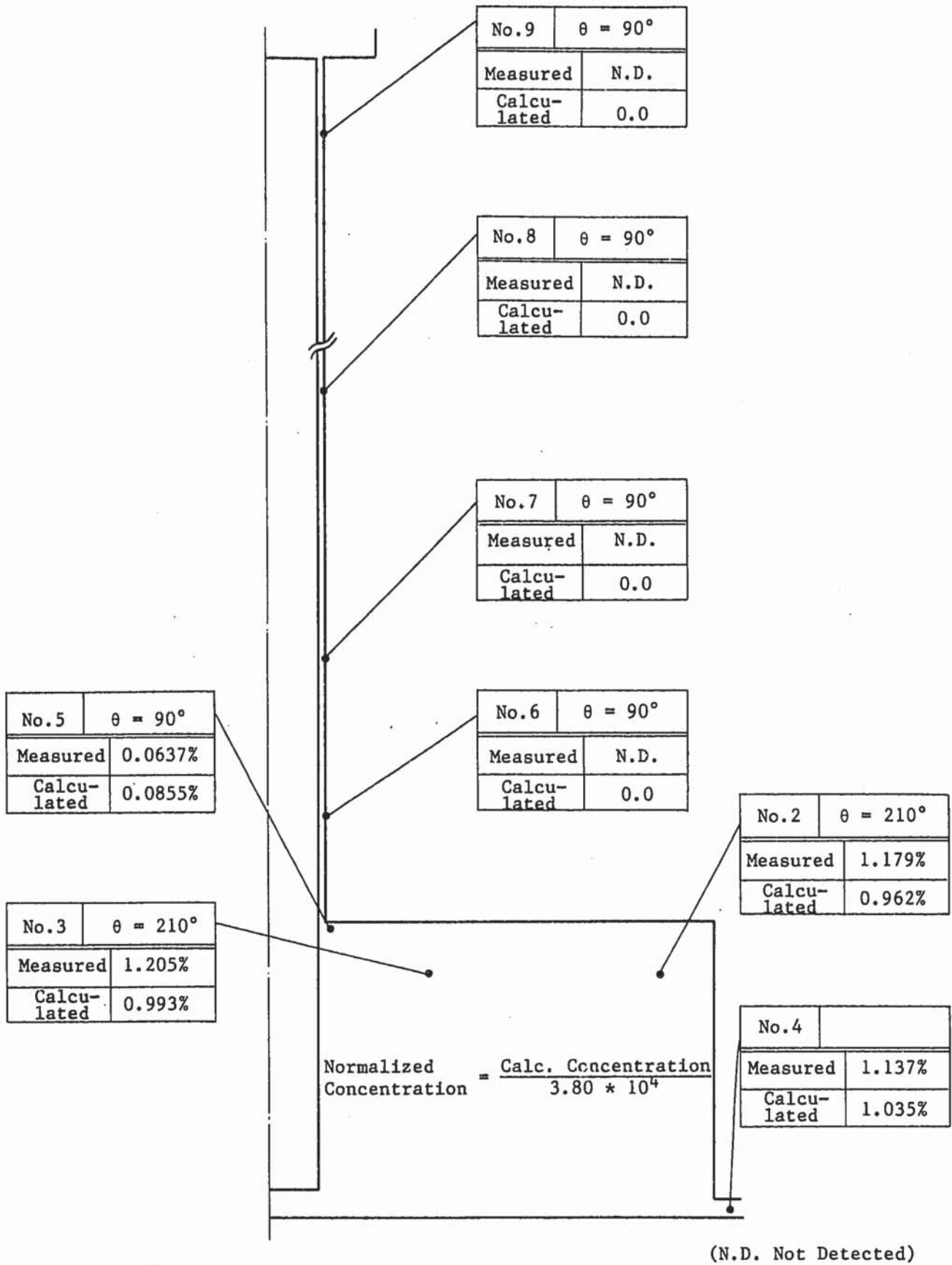


Fig. 3.36 Comparison of Normalized Concentration Distribution under 0.1m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

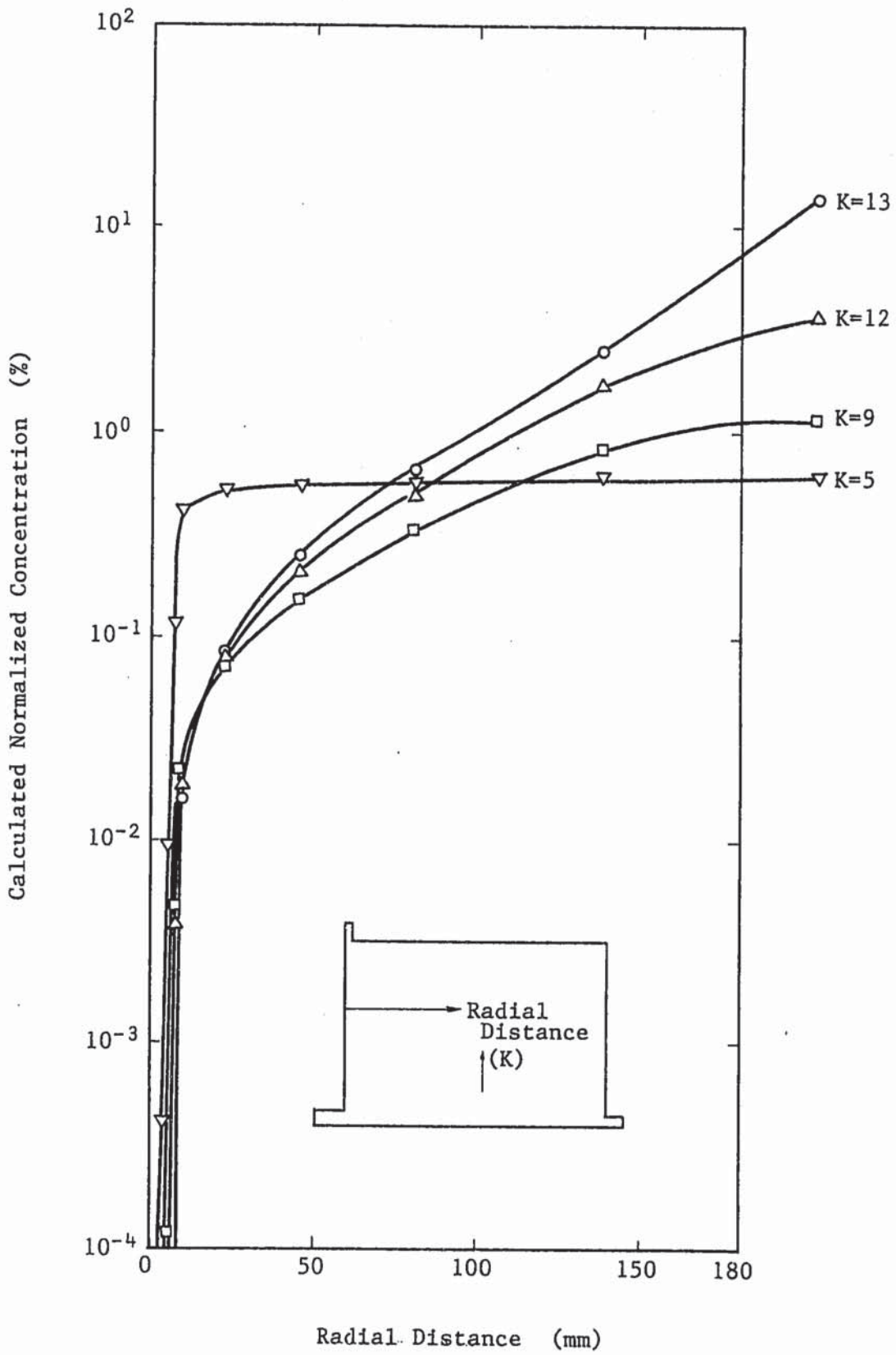


Fig. 3.37 Calculated Concentration Radial Profiles in Lower Plenum under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition

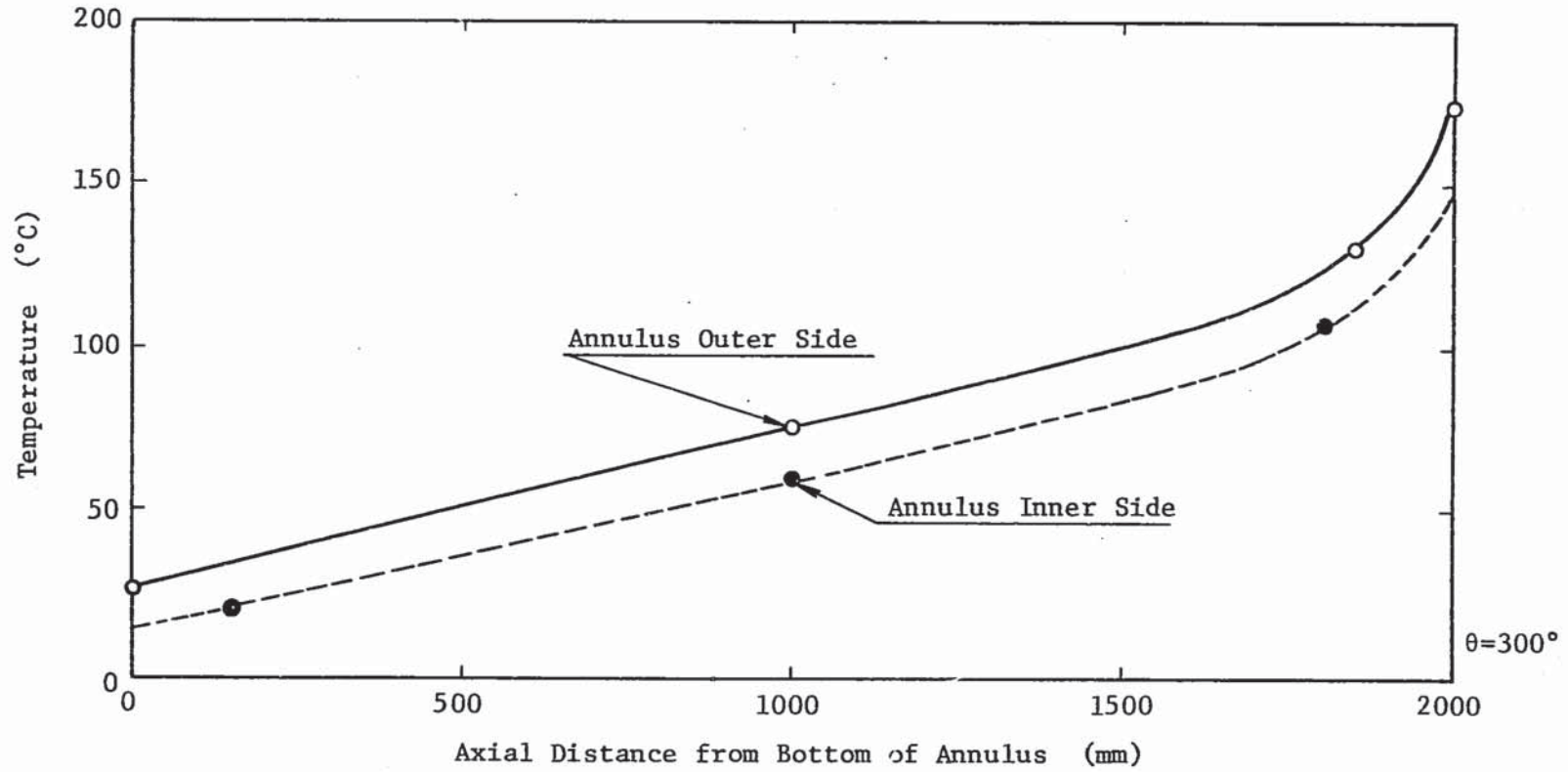


Fig. 3.38 Estimated Axial Temperature Distribution at Annulus Inner Side under $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition

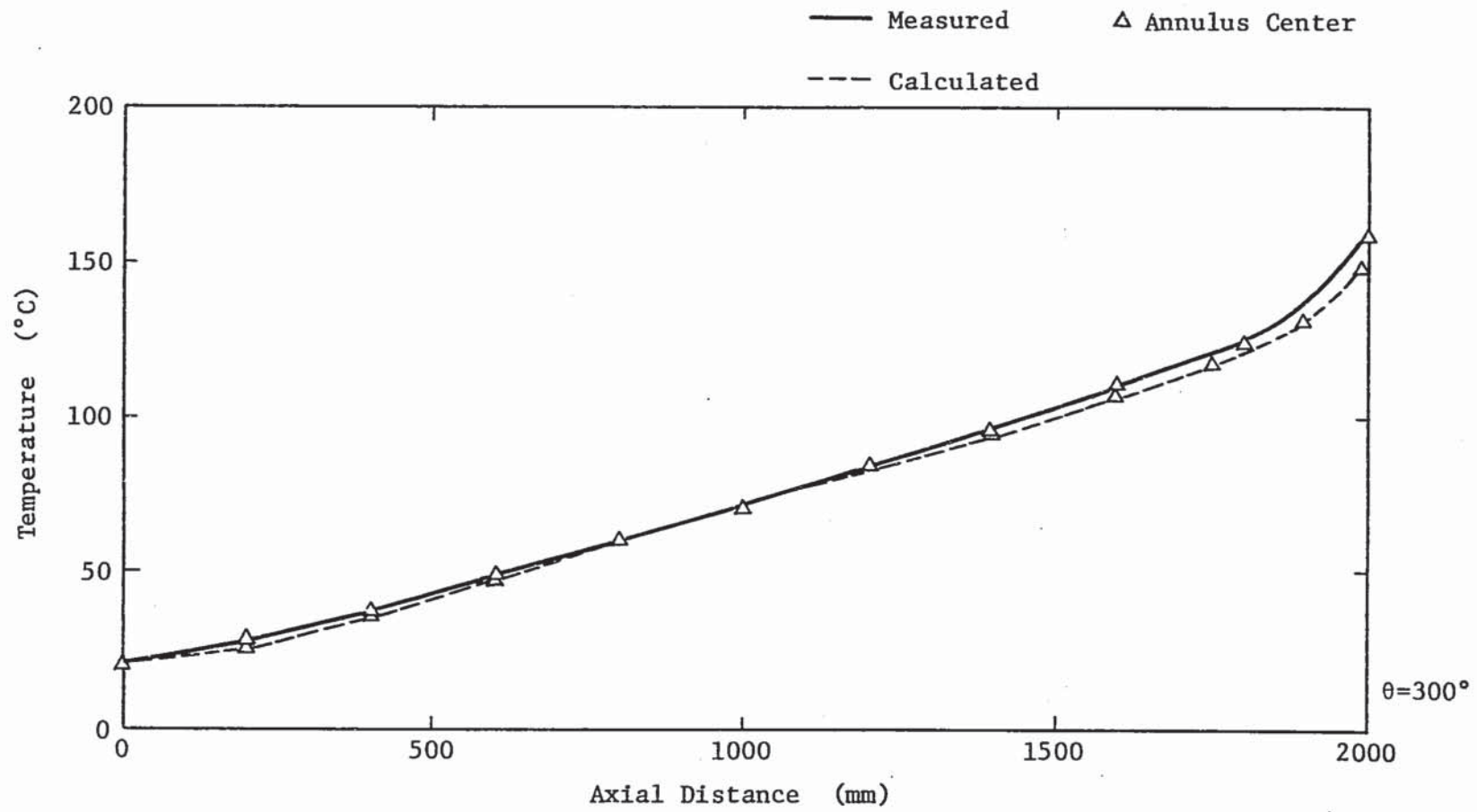


Fig. 3.39 Comparison of Axial Temperature Distribution under $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$ Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

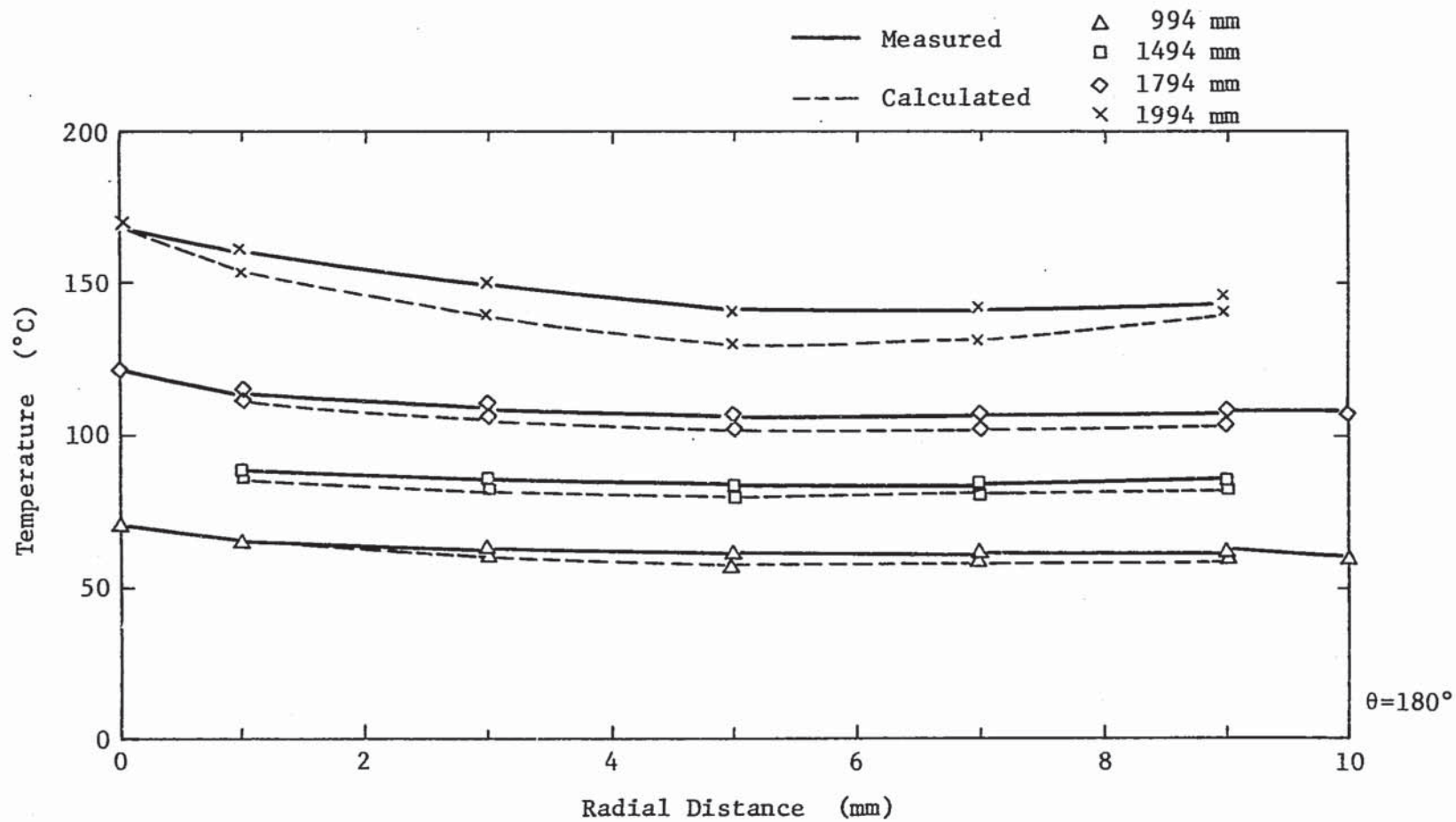


Fig. 3.40 Comparison of Radial Temperature Distribution under 0.1 m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

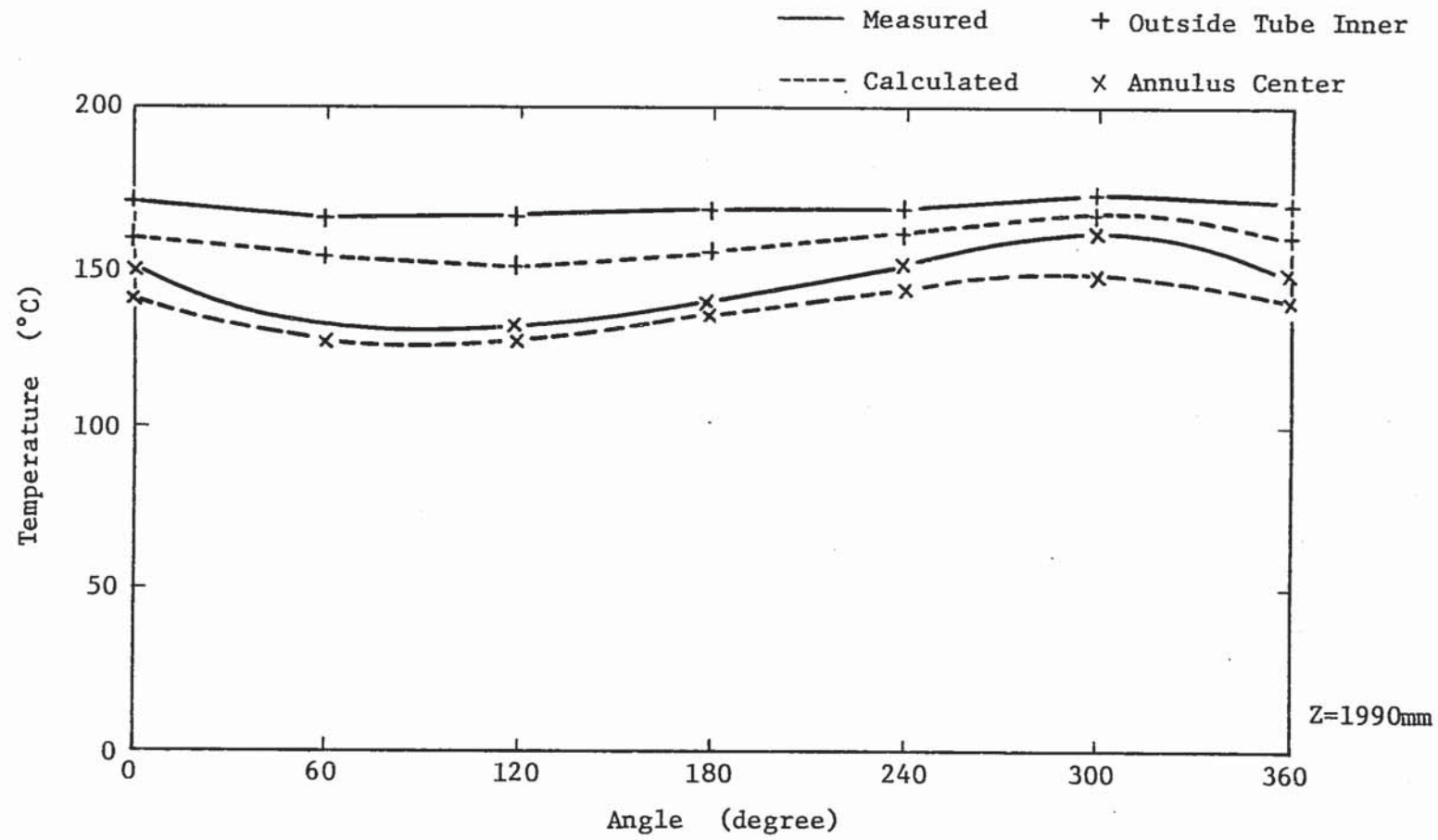


Fig. 3.41 Comparison of Circumferential Temperature Distribution at Z=1990mm under 0.1 m³/min Blow Down Condition between Measured and Calculated Data

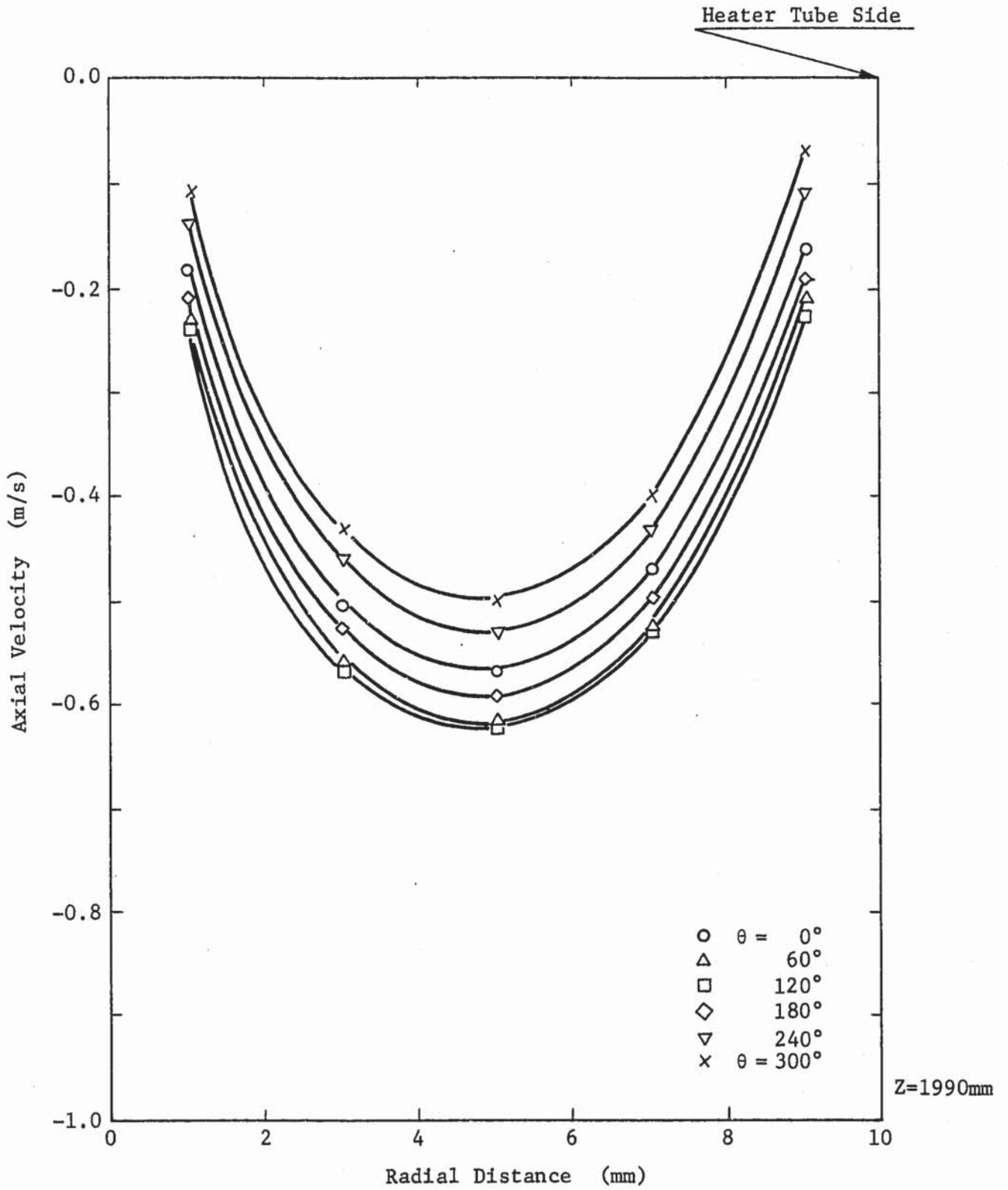


Fig. 3.42 Calculated Axial Velocity Profiles in the Annulus under 0.1 m³/min Blow Down Condition

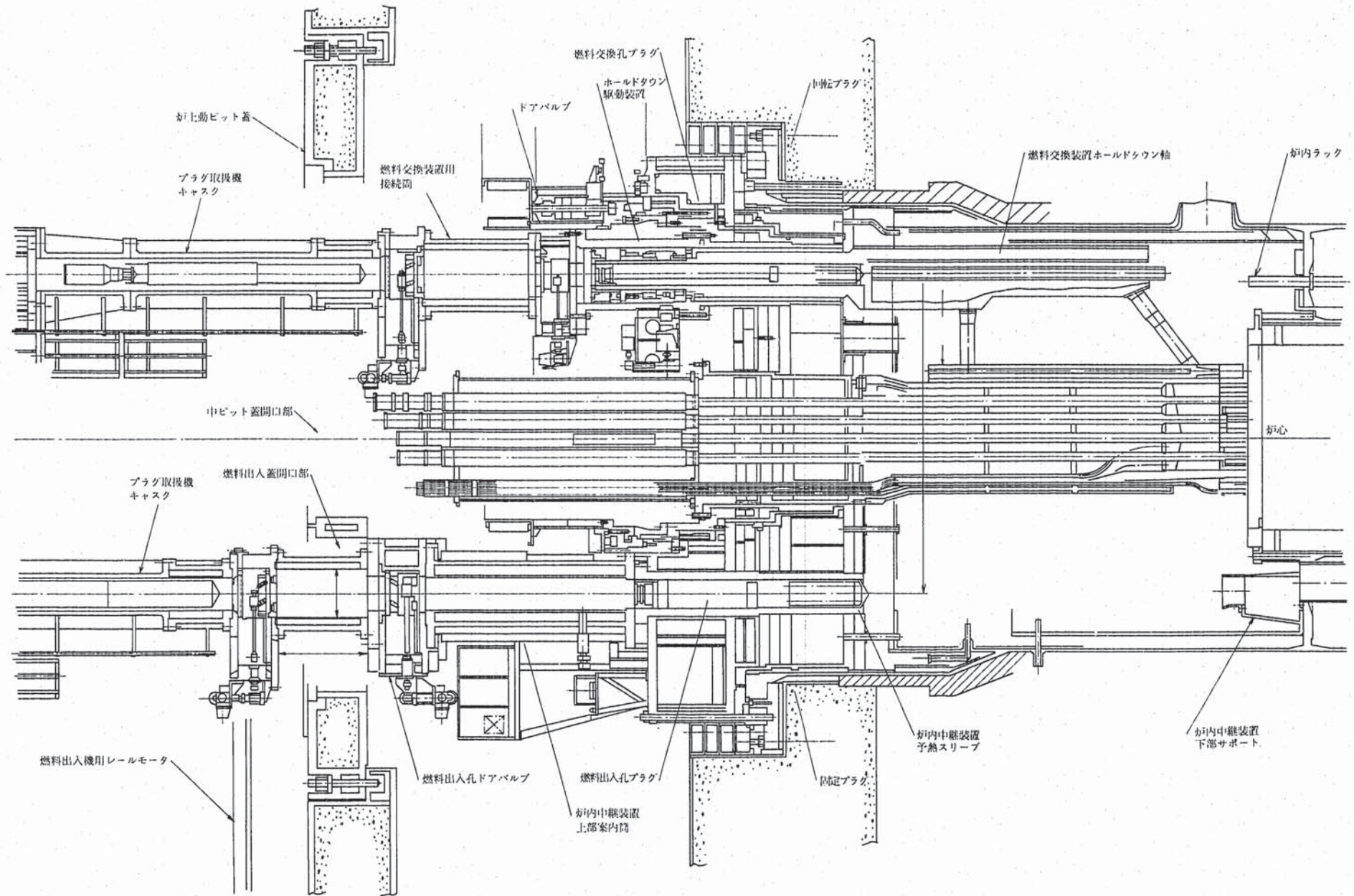


Fig. 4.1 Structure of Shield Plug of MONJU

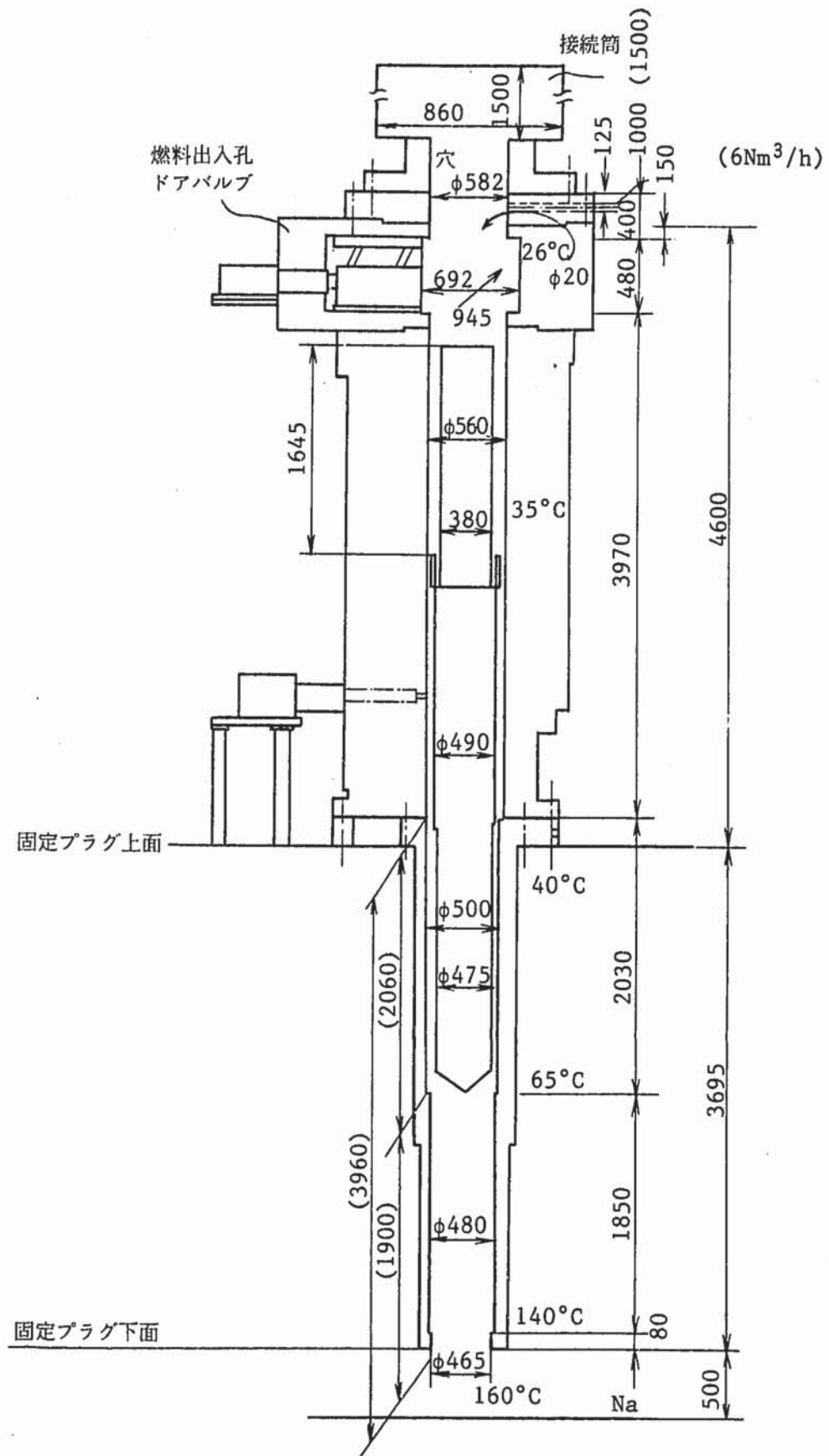


Fig. 4.2 Analytical Region of Gas Blow-Down Effect for Monju

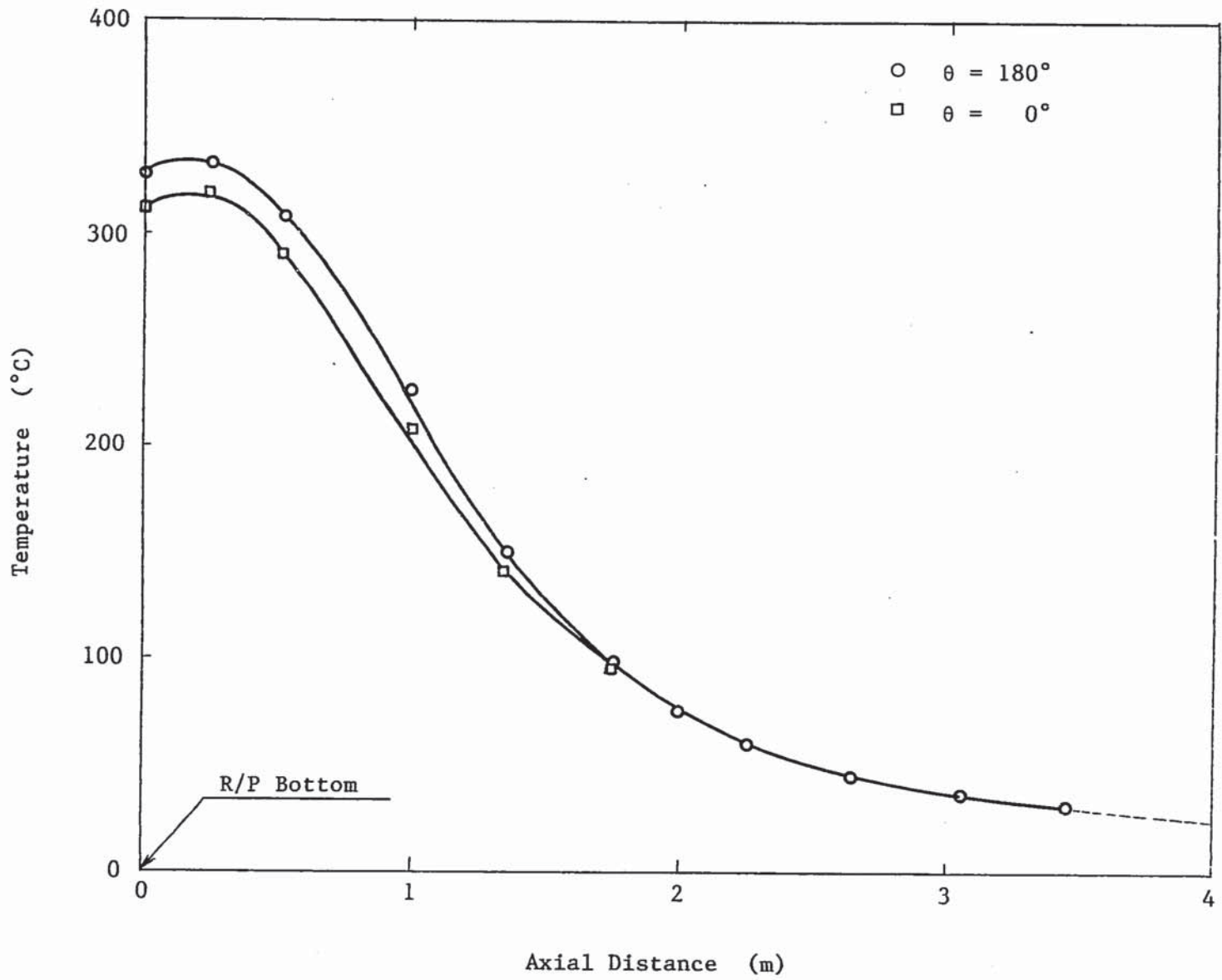


Fig. 4.3 Axial Temperature Distribution of R/P in 40hr after Reactor Shut Down

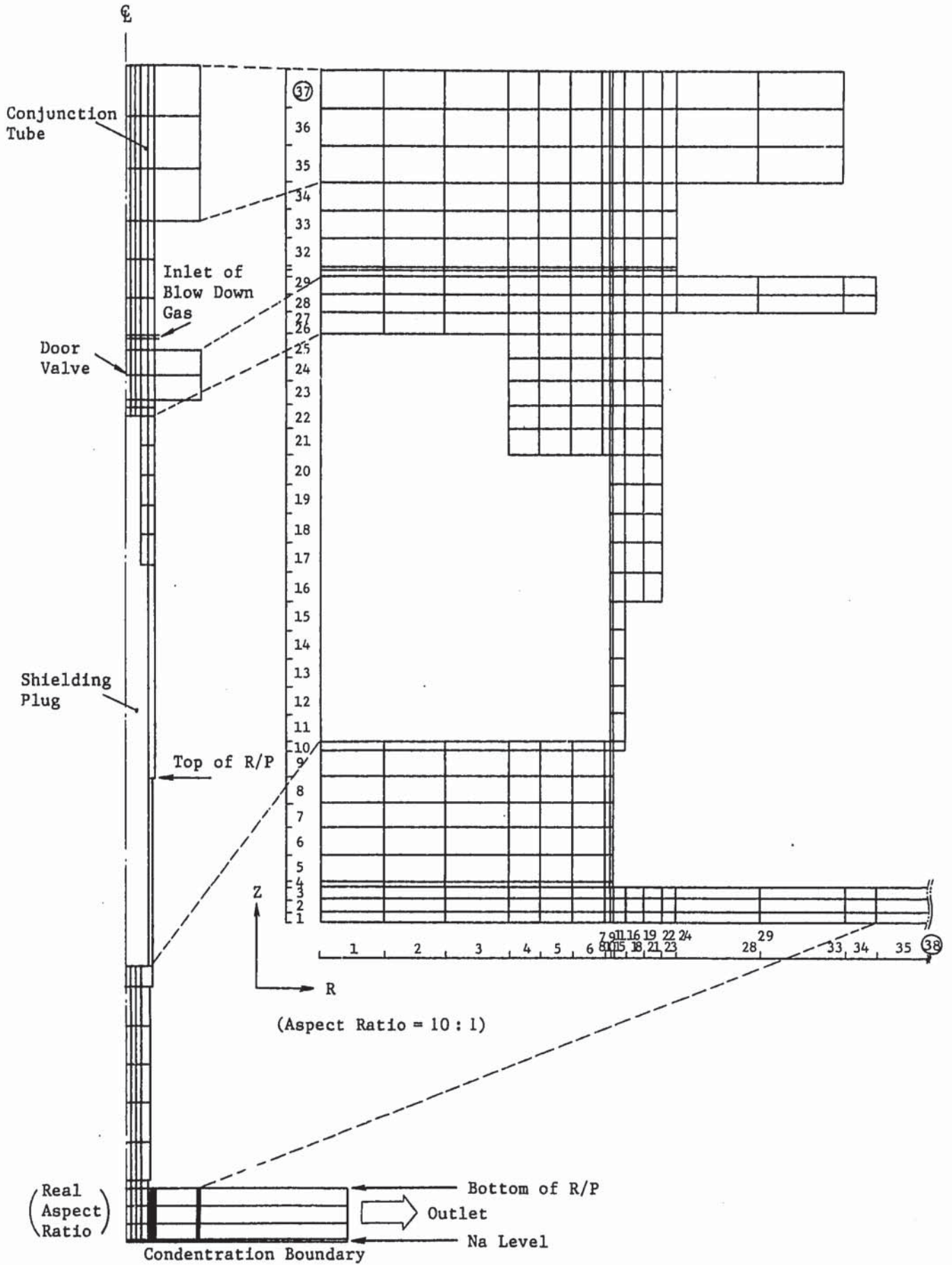
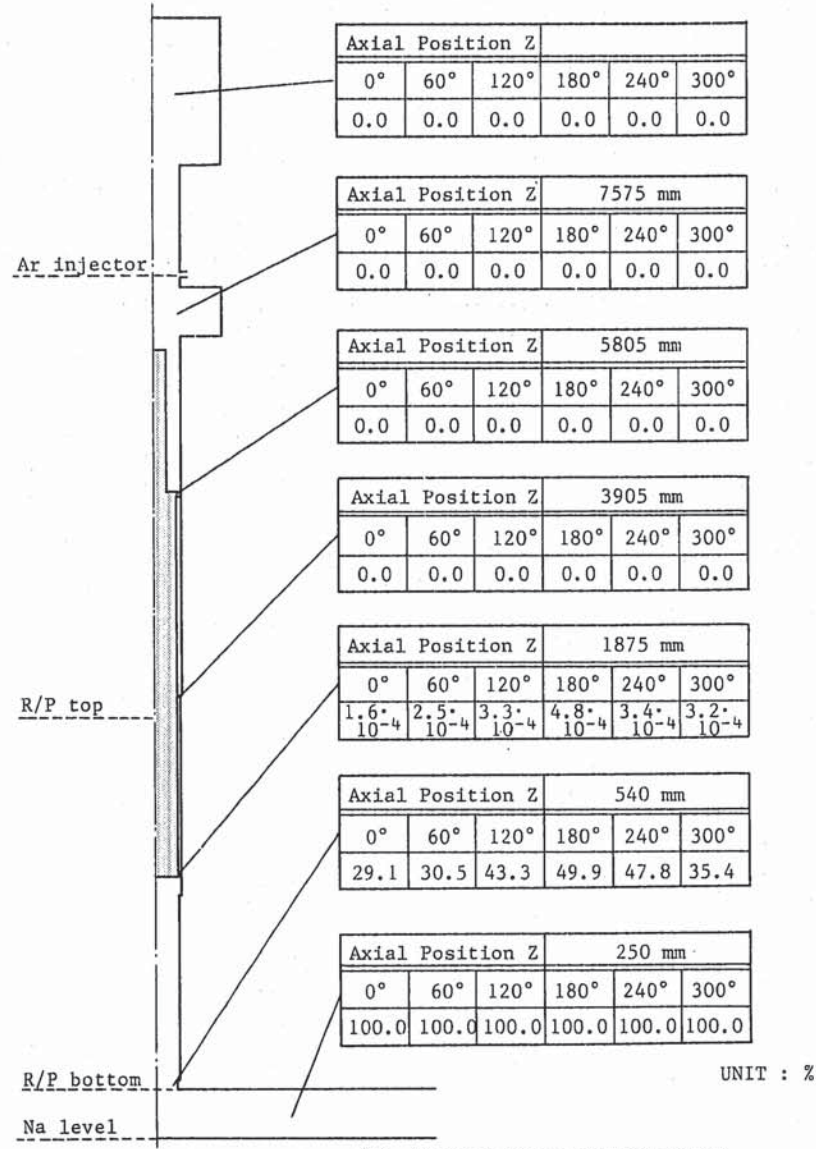
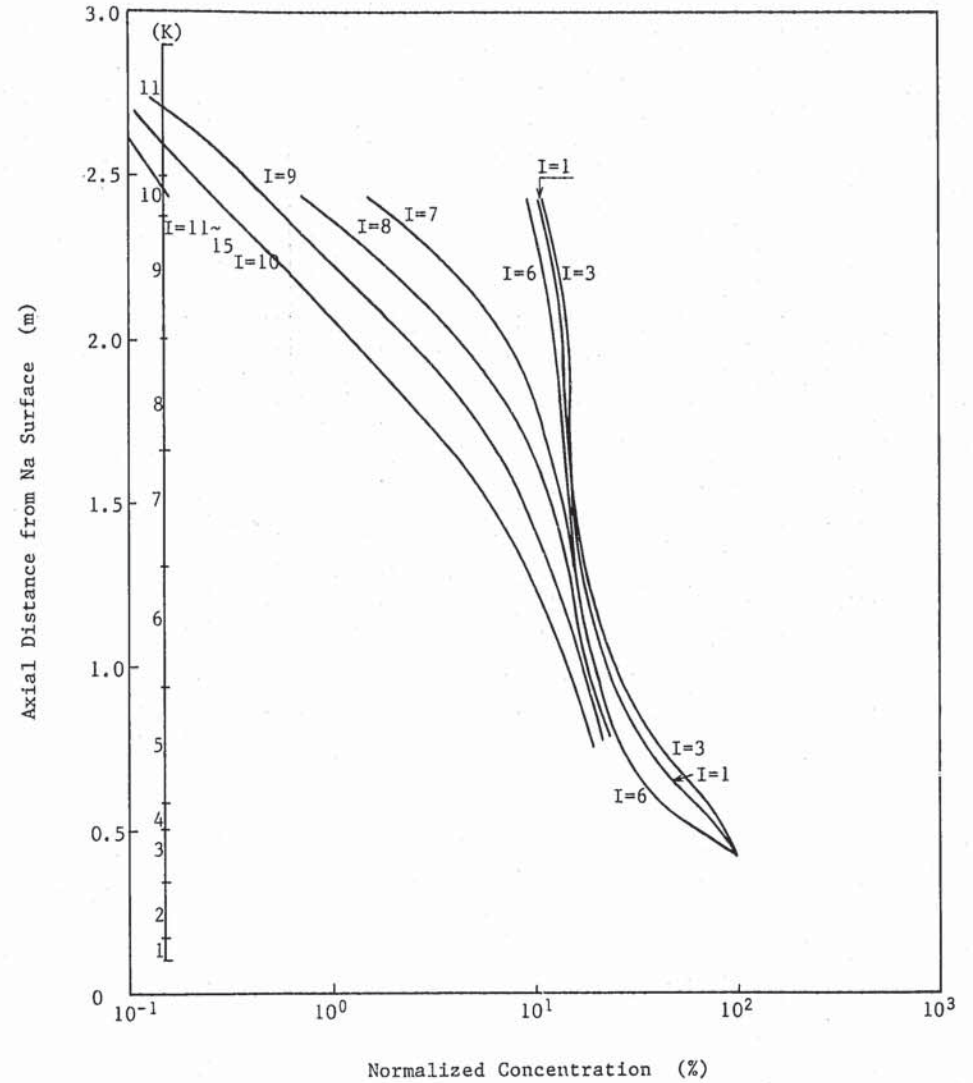


Fig. 4.4 Mesh Arrangement for Analysis of Gas Blow-Down Effect of MONJU



(a) Concentration Distribution



(b) Concentration Axial Profiles in the Plug Port hole

Fig. 4.5 Calculated Concentration Distribution under 0.1m³/min Blow Condition

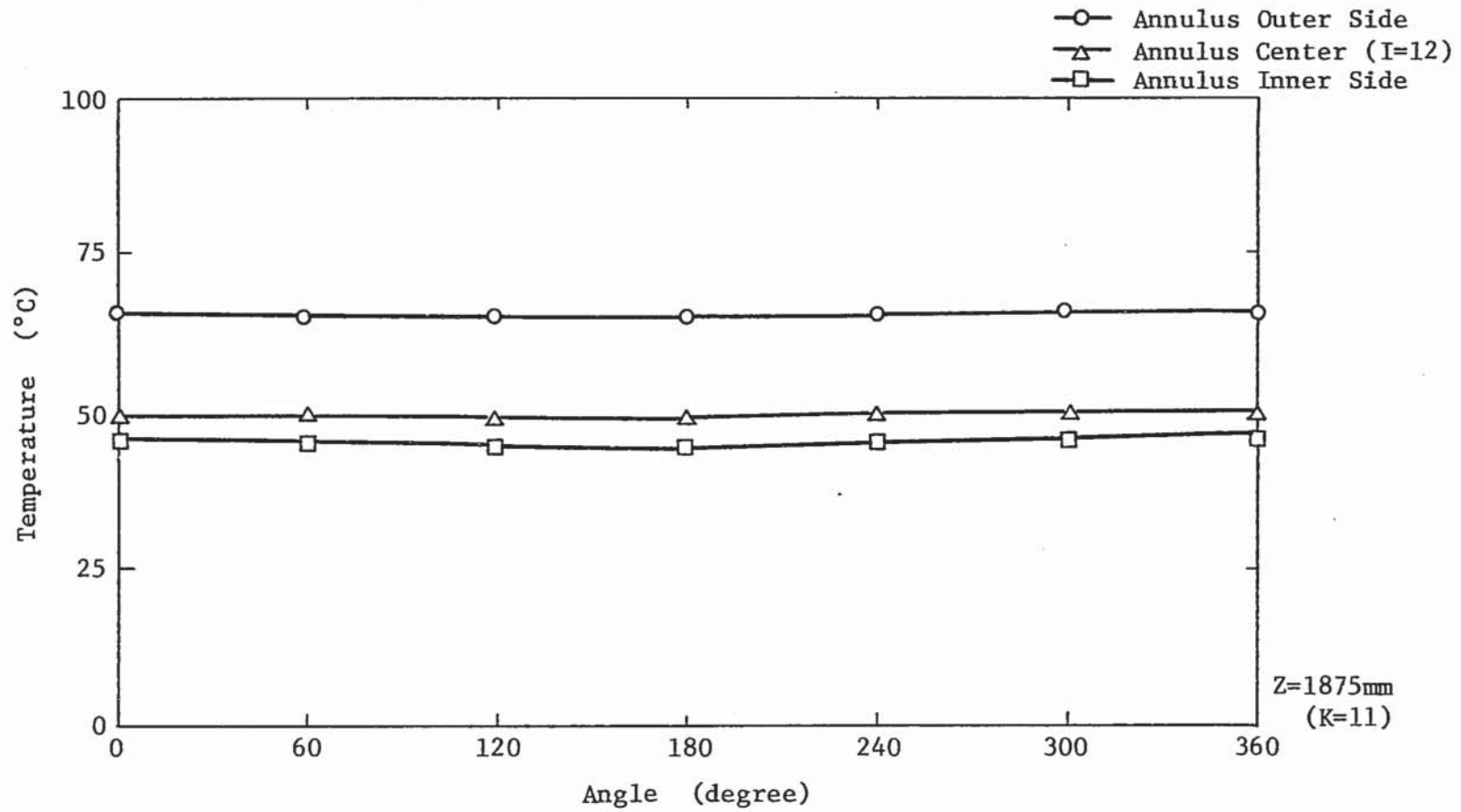


Fig. 4.6 Calculated Circumferential Temperature Distribution at Z=1875mm under 0.1 m³/min Blow Condition

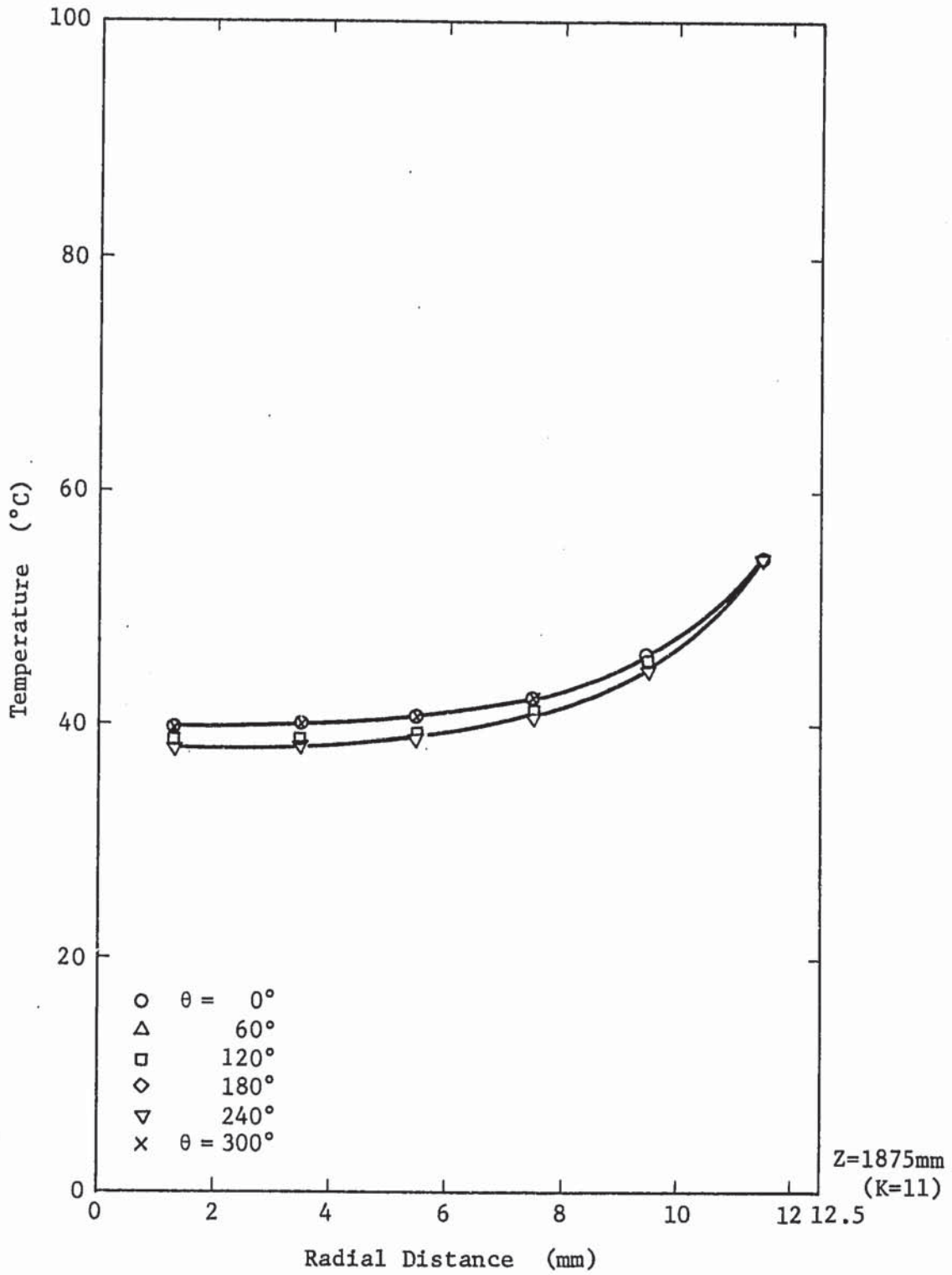


Fig. 4.7 Calculated Radial Temperature Distribution at Z=1875mm under 0.1 m³/min Blow Condition

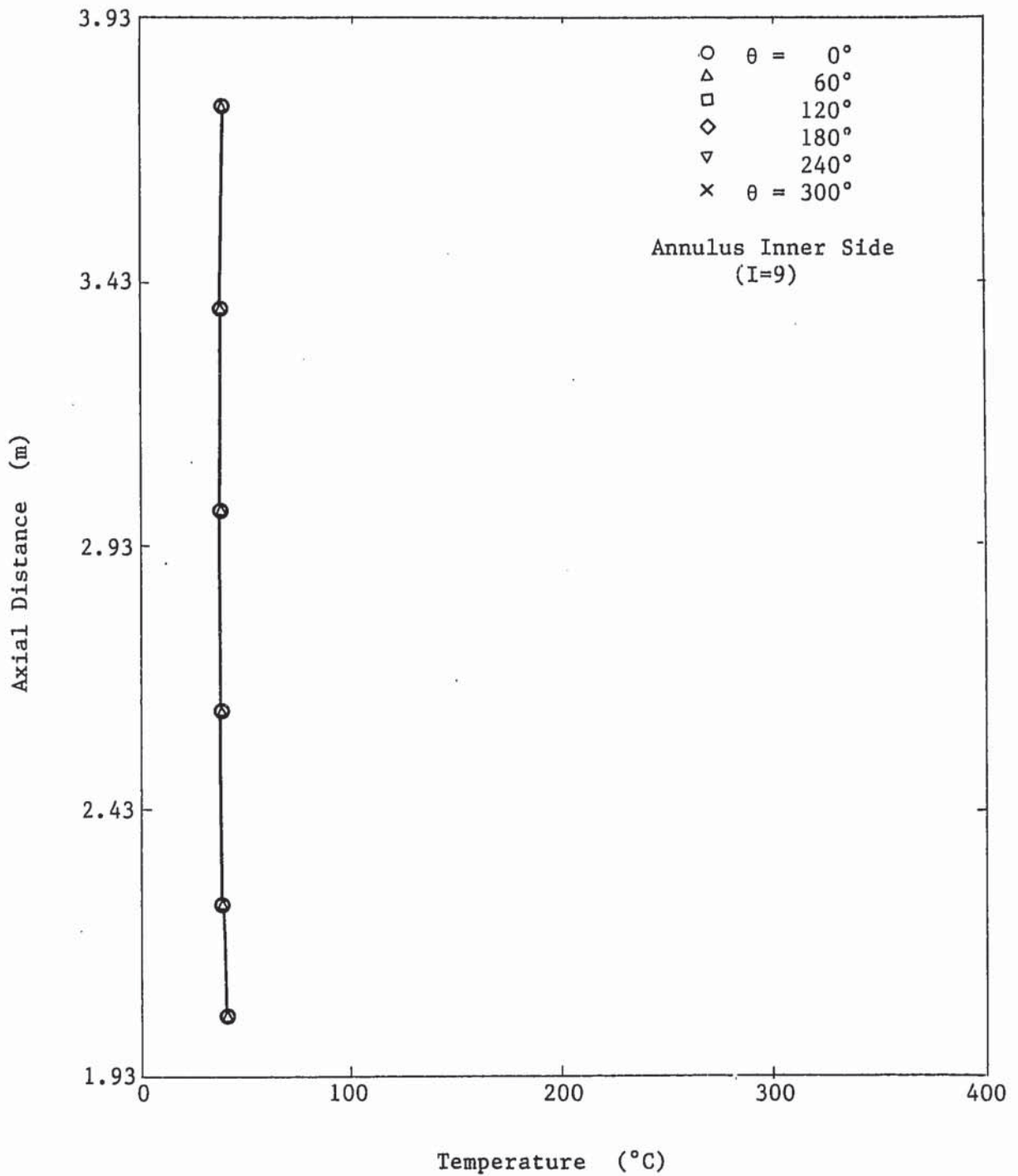


Fig. 4.8 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Inner Side under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

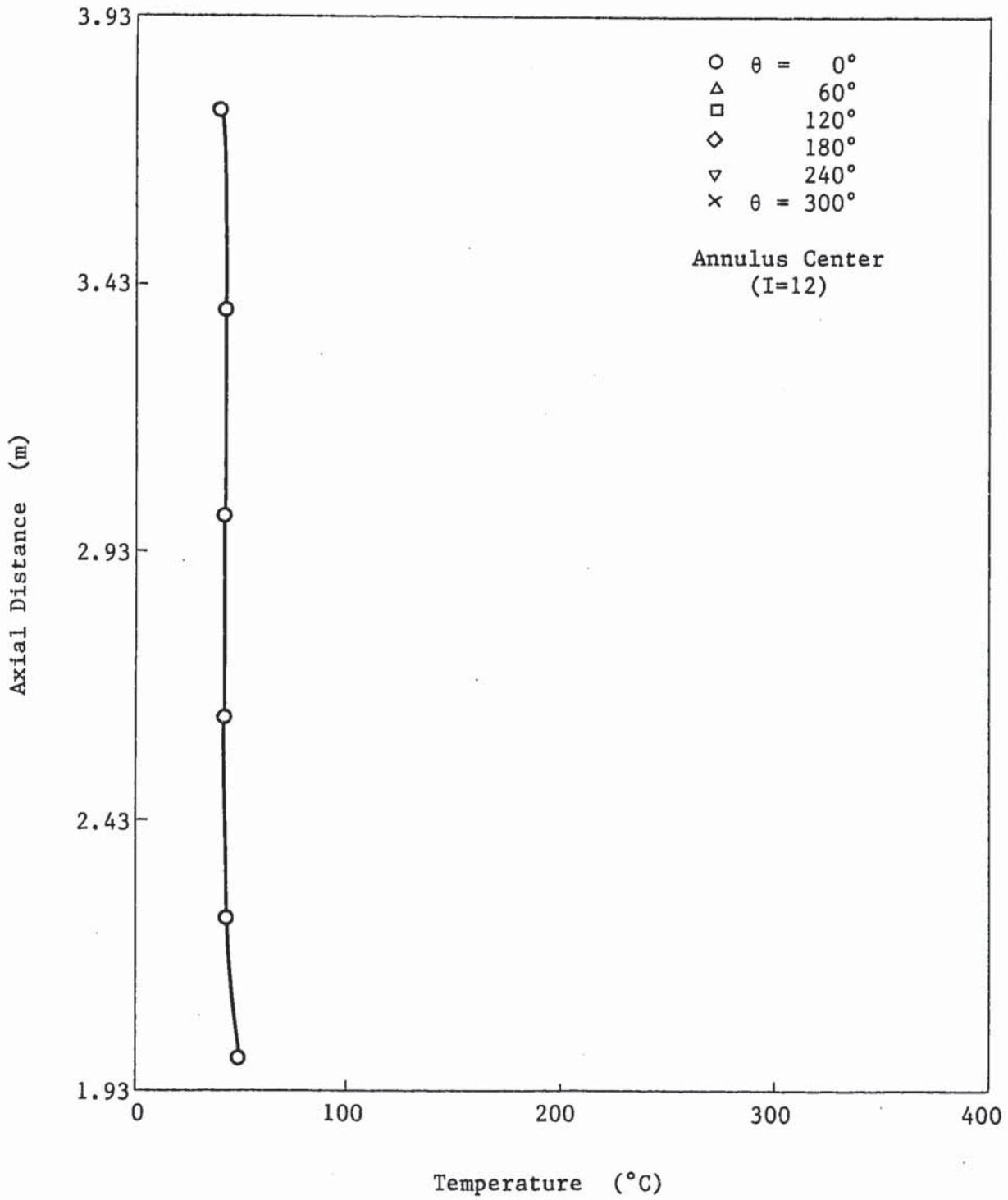


Fig. 4.9 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Center under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

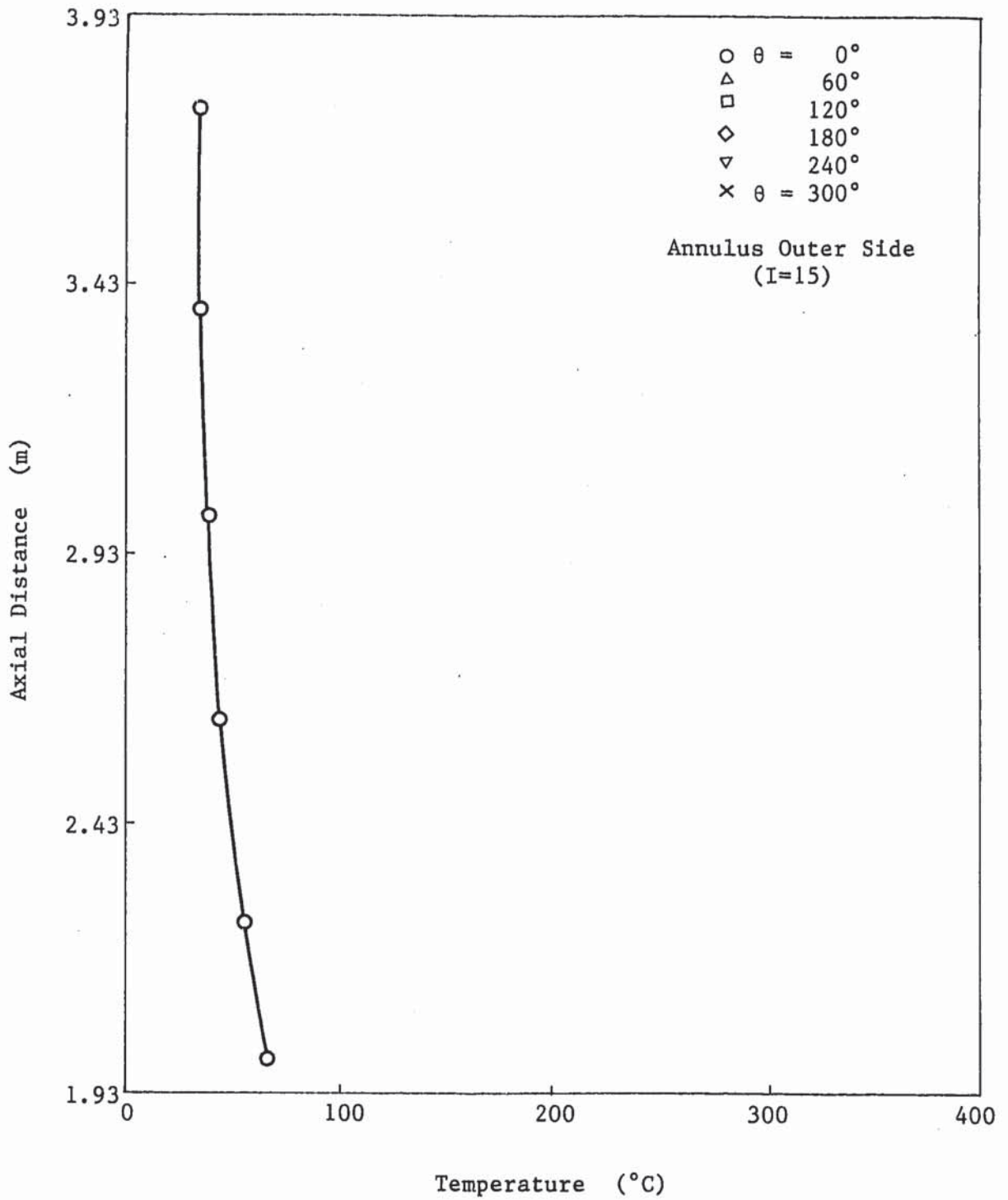


Fig. 4.10 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus outer Side under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

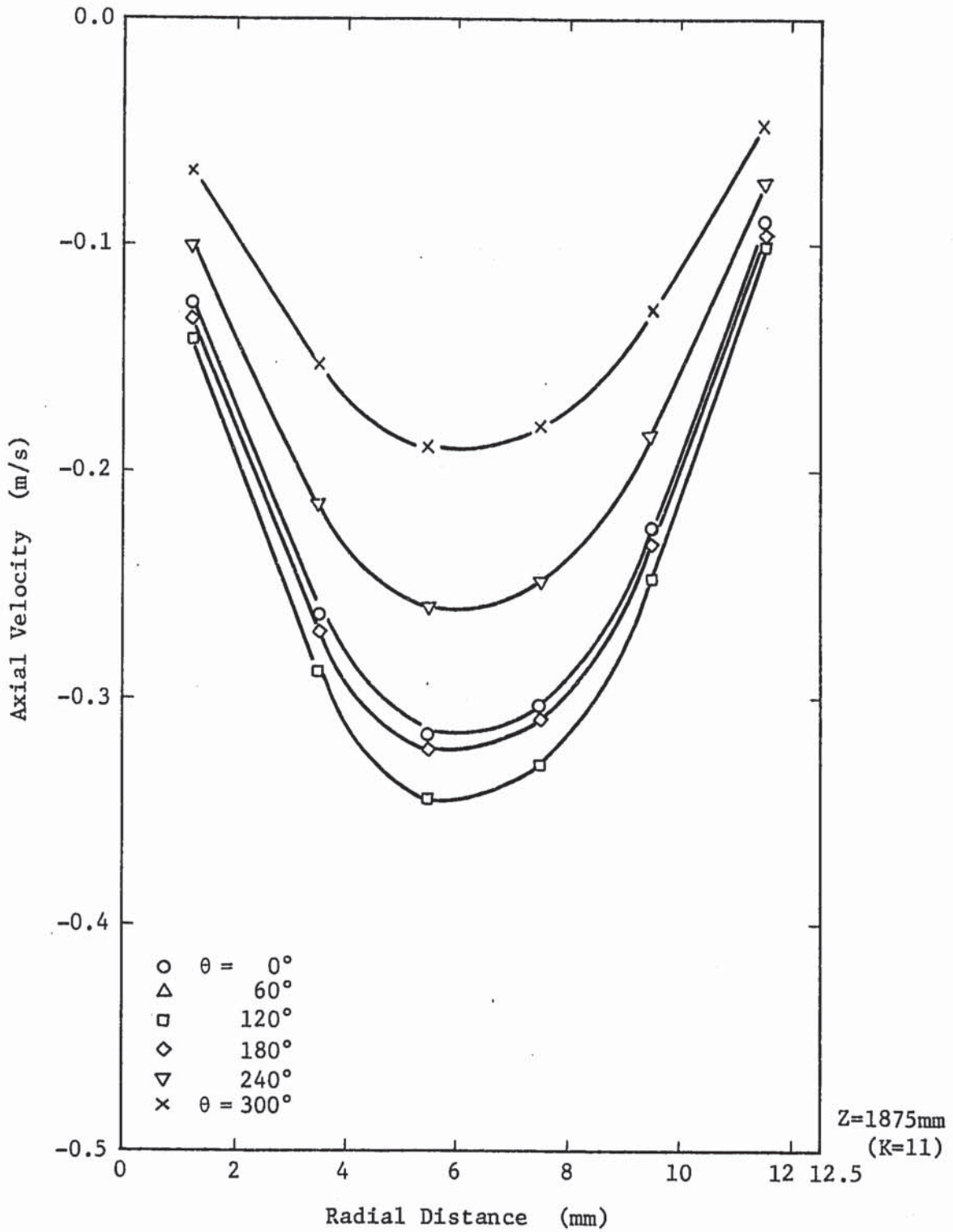


Fig. 4.11 Calculated Radial Velocity Distribution at $Z=1875\text{mm}$ under $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$ Blow Condition

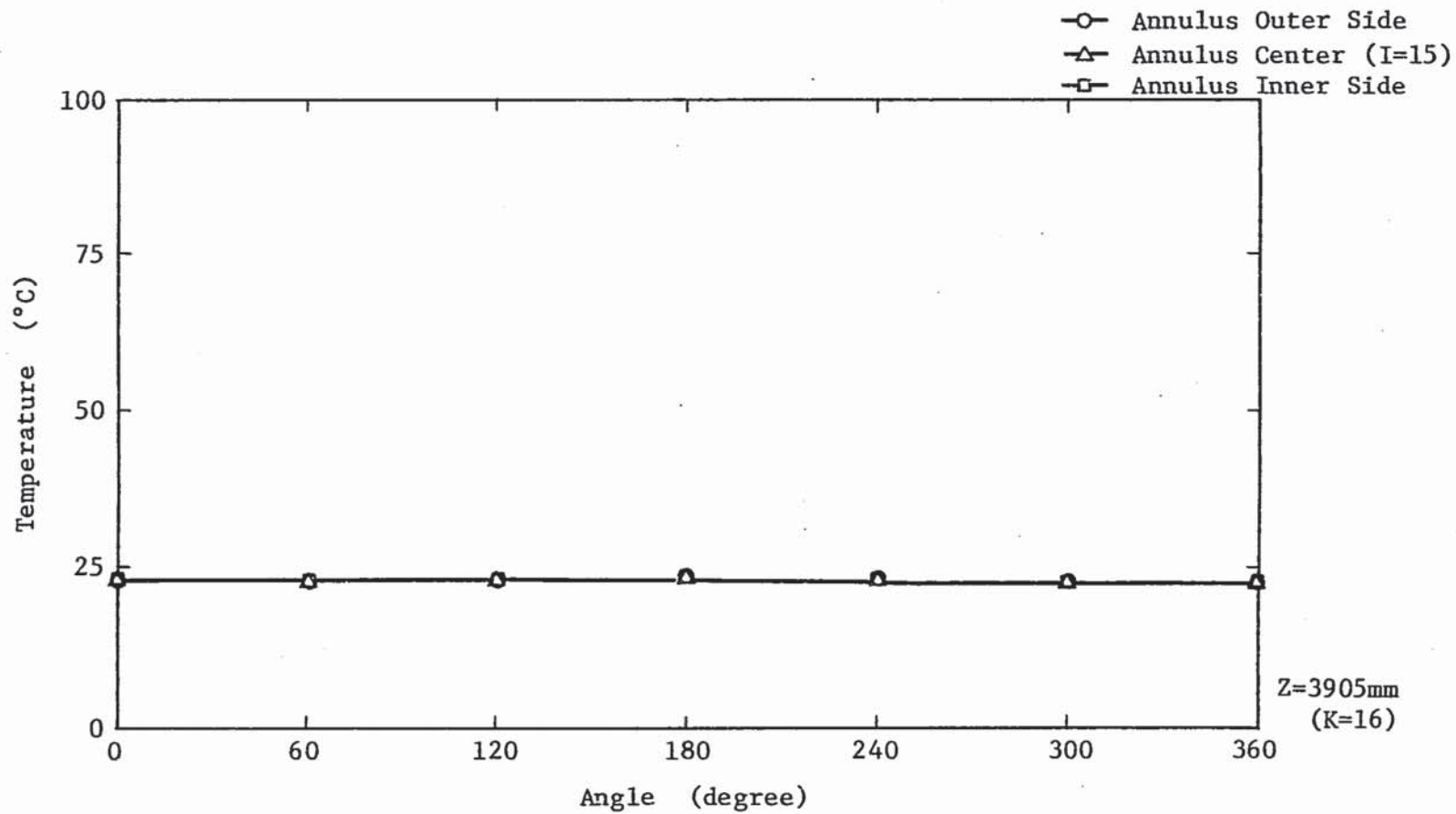


Fig. 4.12 Calculated Circumferential Temperature Distribution at Z=3905mm under 0.1 m³/min Blow Condition

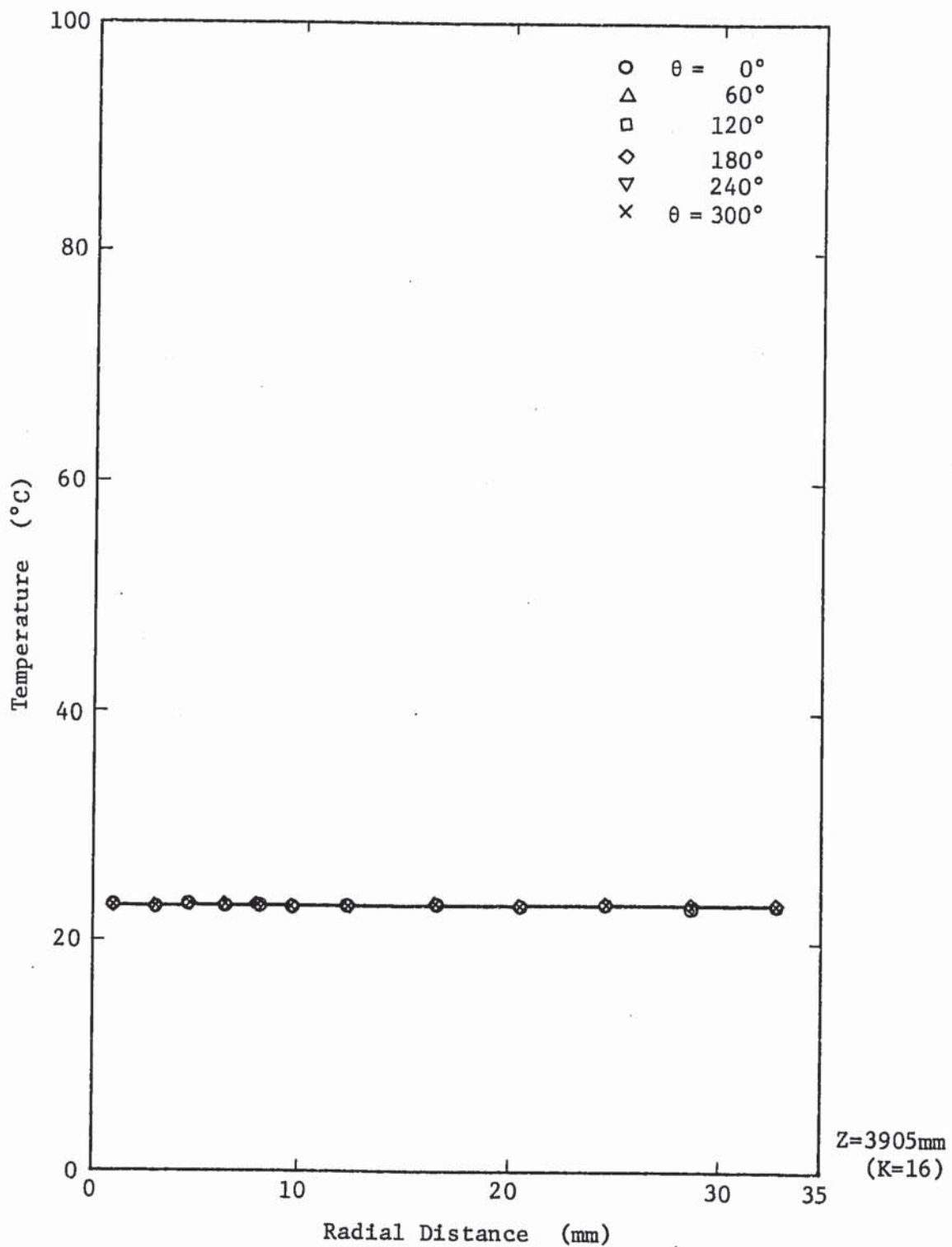


Fig. 4.13 Calculated Radial Temperature Distribution at $Z=3905\text{mm}$ under $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$ Blow Condition

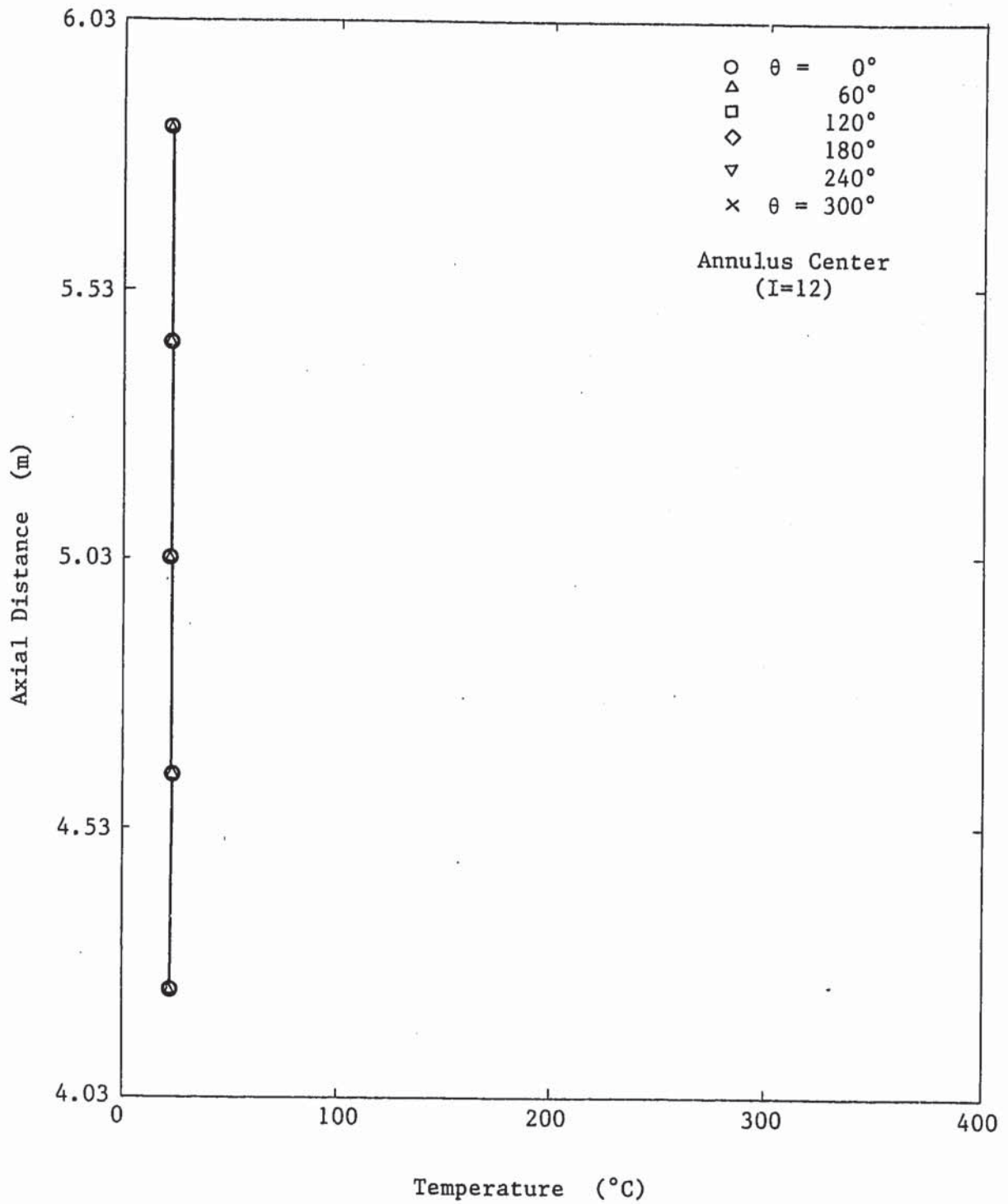


Fig. 4.14 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Center under $0.1\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

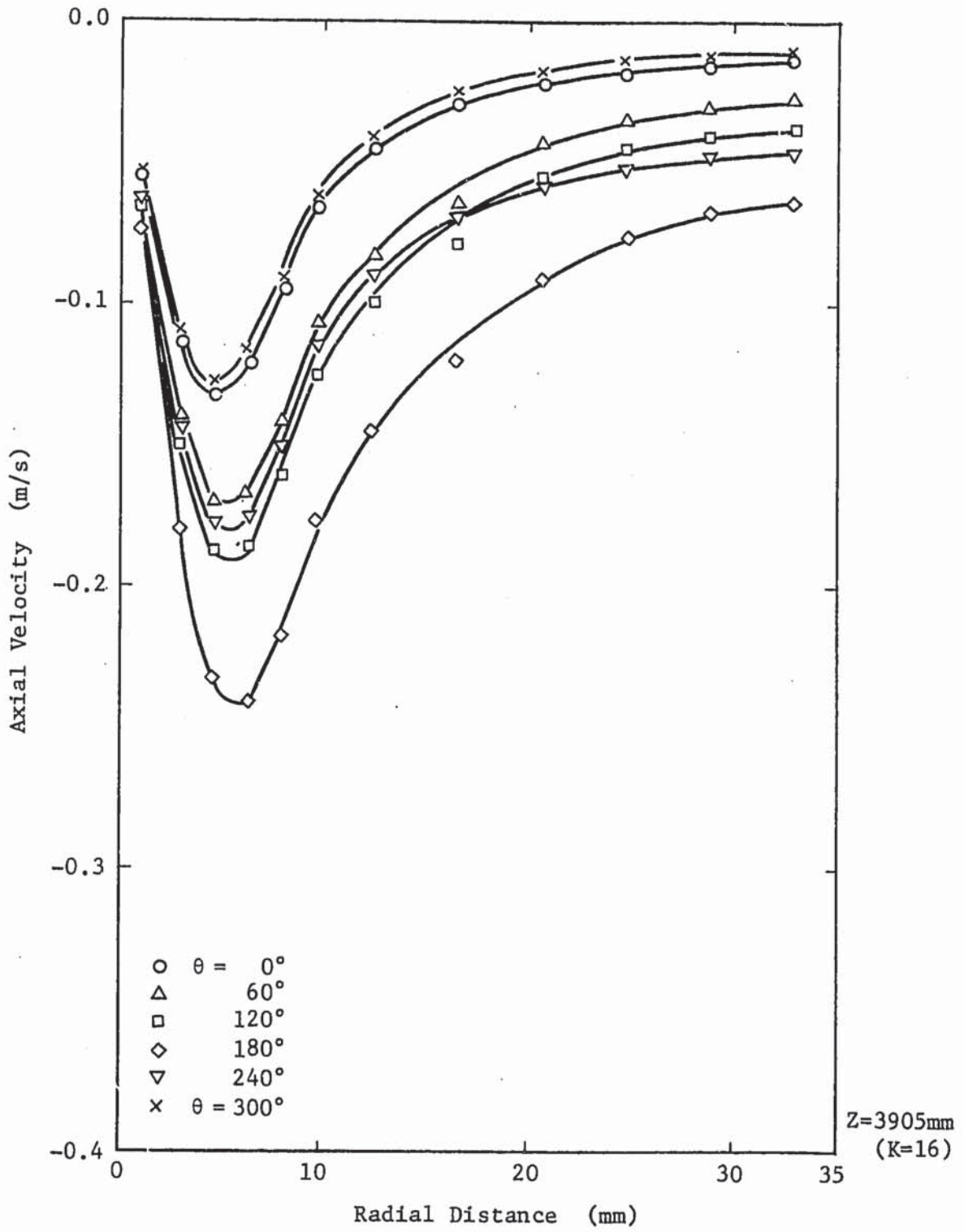
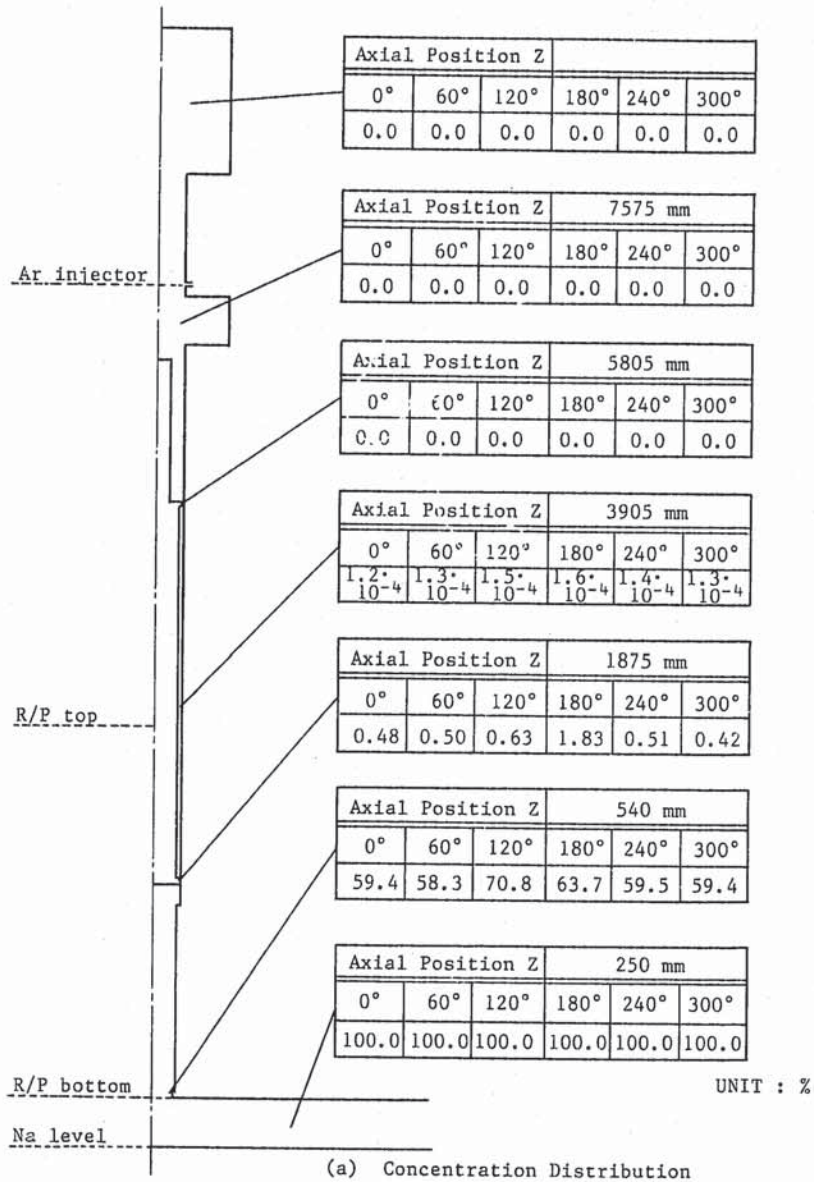
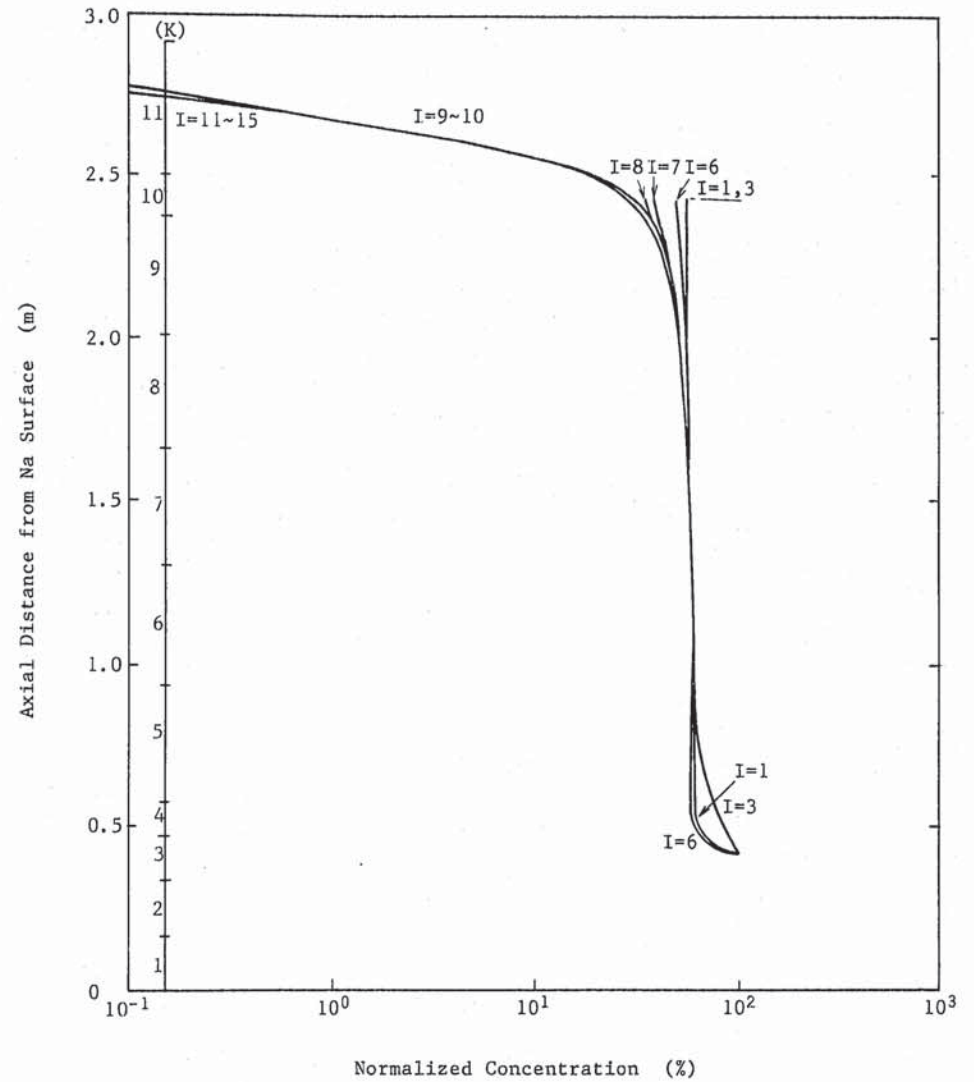


Fig. 4.15 Calculated Radial Velocity Distribution at $Z=3905\text{mm}$ under $0.1\text{ m}^3/\text{min}$ Blow Condition



(a) Concentration Distribution



(b) Concentration Axial Profiles in the Plug Port hole

Fig. 4.16 Calculated Concentration Distribution under $0.047\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

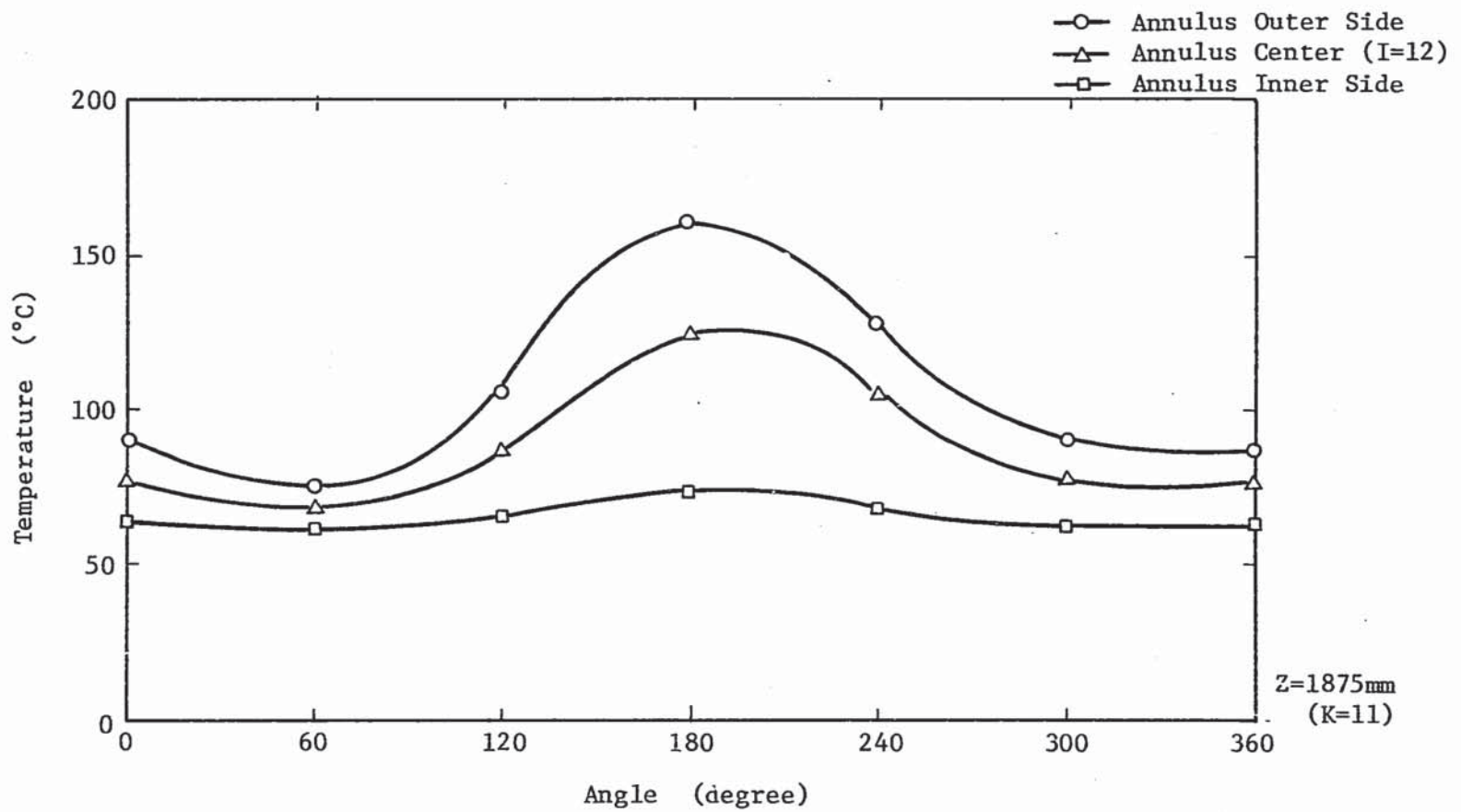


Fig. 4.17 Calculated Circumferential Temperature Distribution at Z=1875mm under 0.047 m³/min Blow Condition

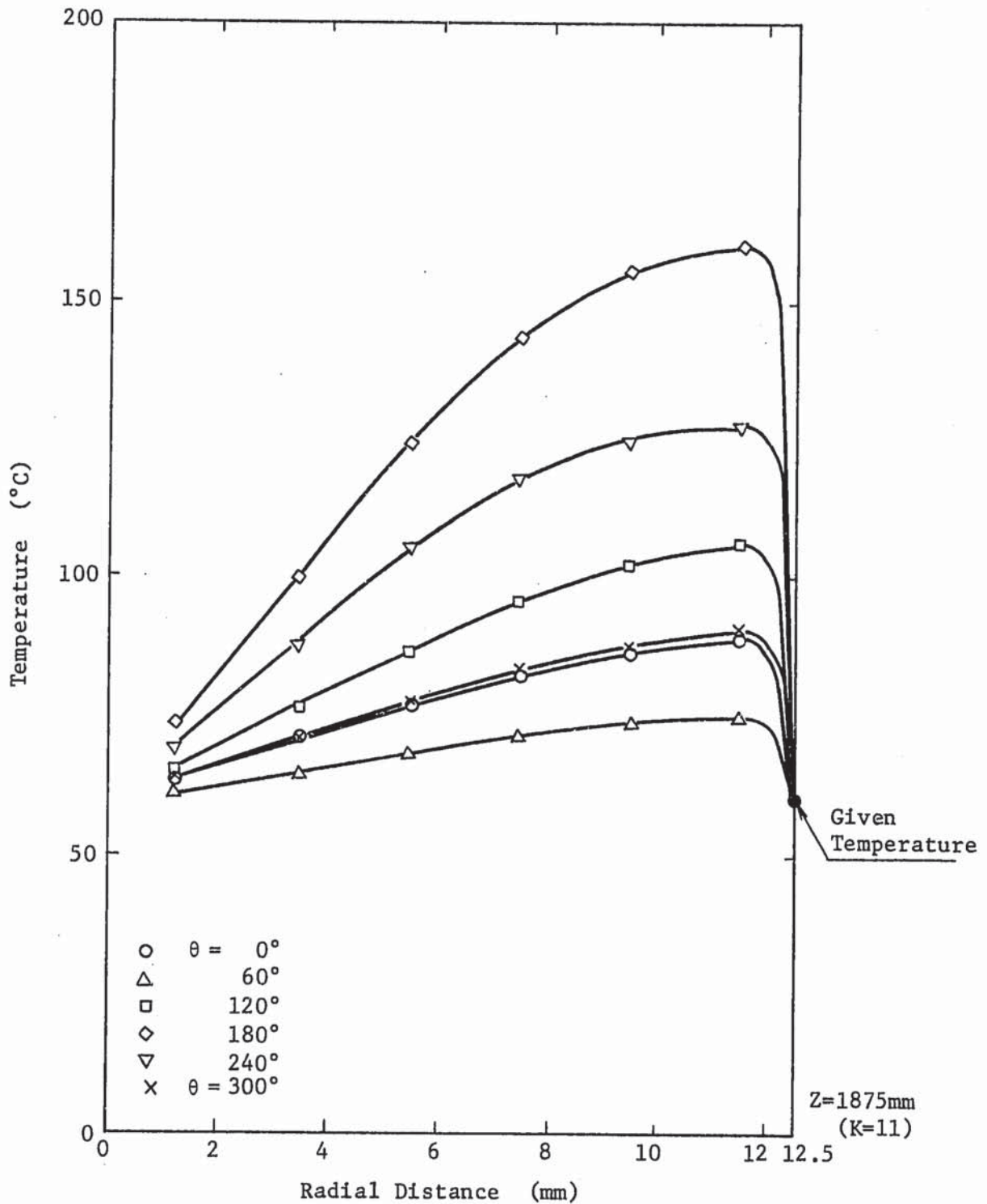


Fig. 4.18 Calculated Radial Temperature Distribution at Z=1875mm under 0.047 m³/min Blow Condition

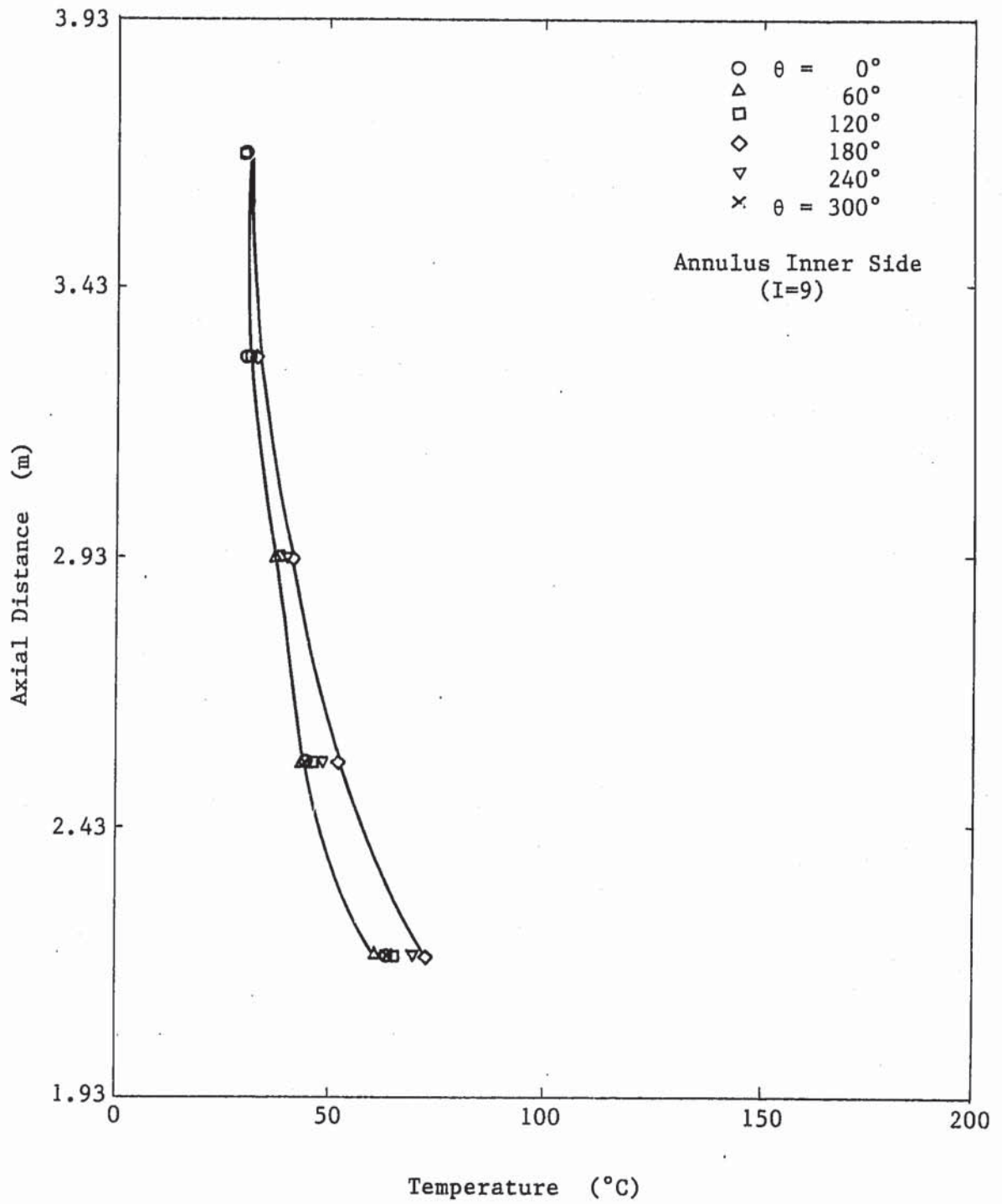


Fig. 4.19 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Inner Side under $0.047\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

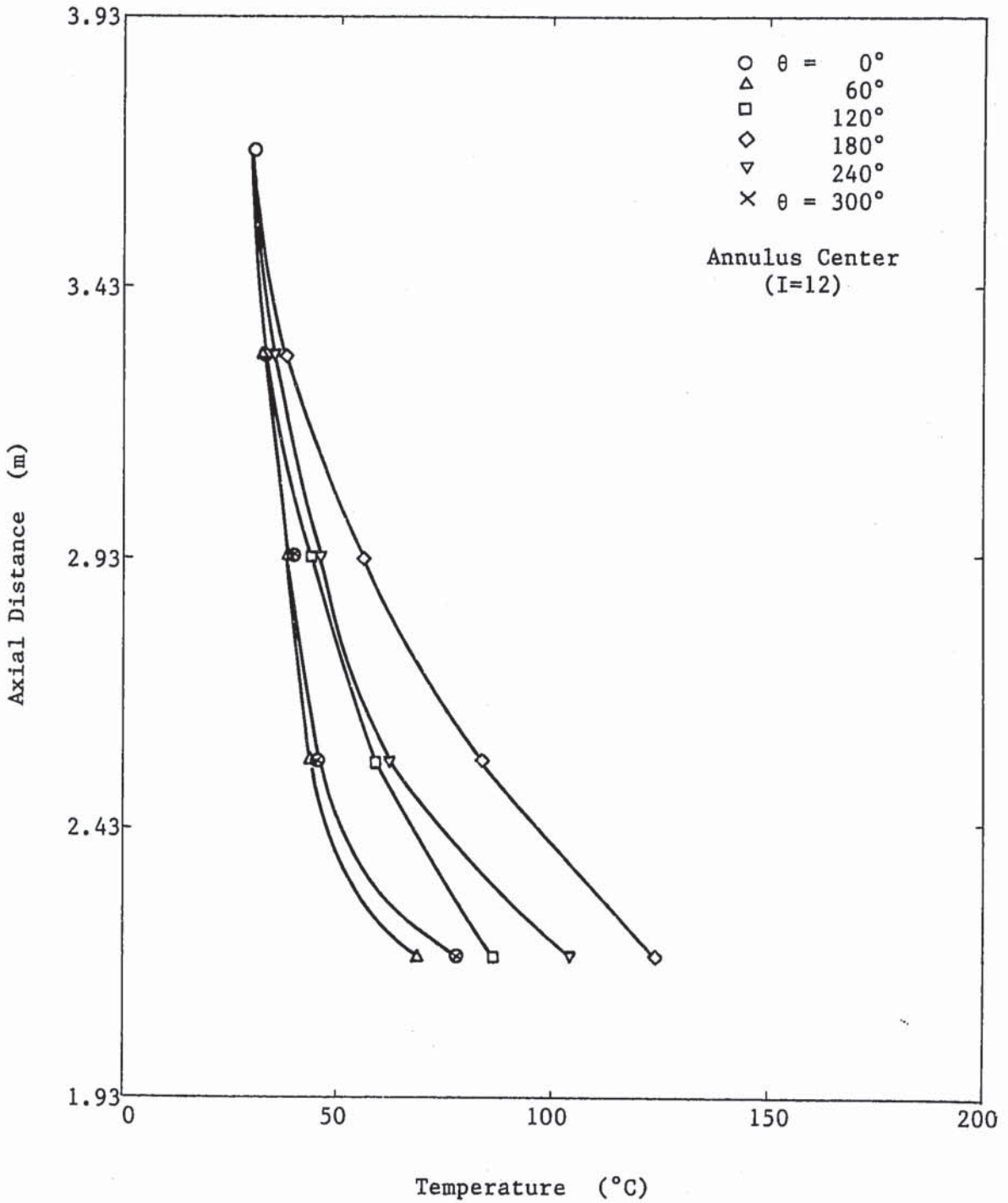


Fig. 4.20 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Center under $0.047\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

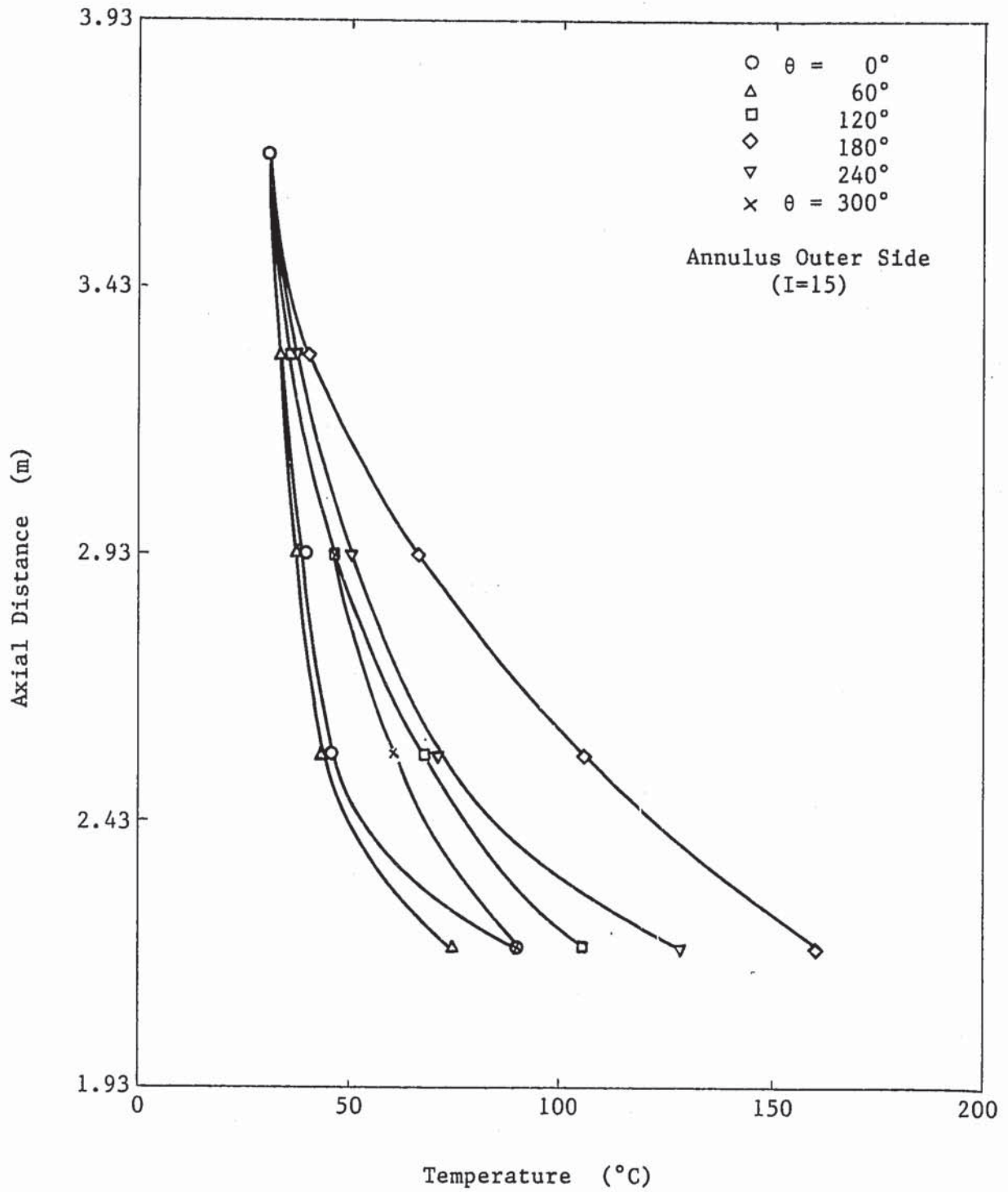


Fig. 4.21 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Outer Side under $0.047\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

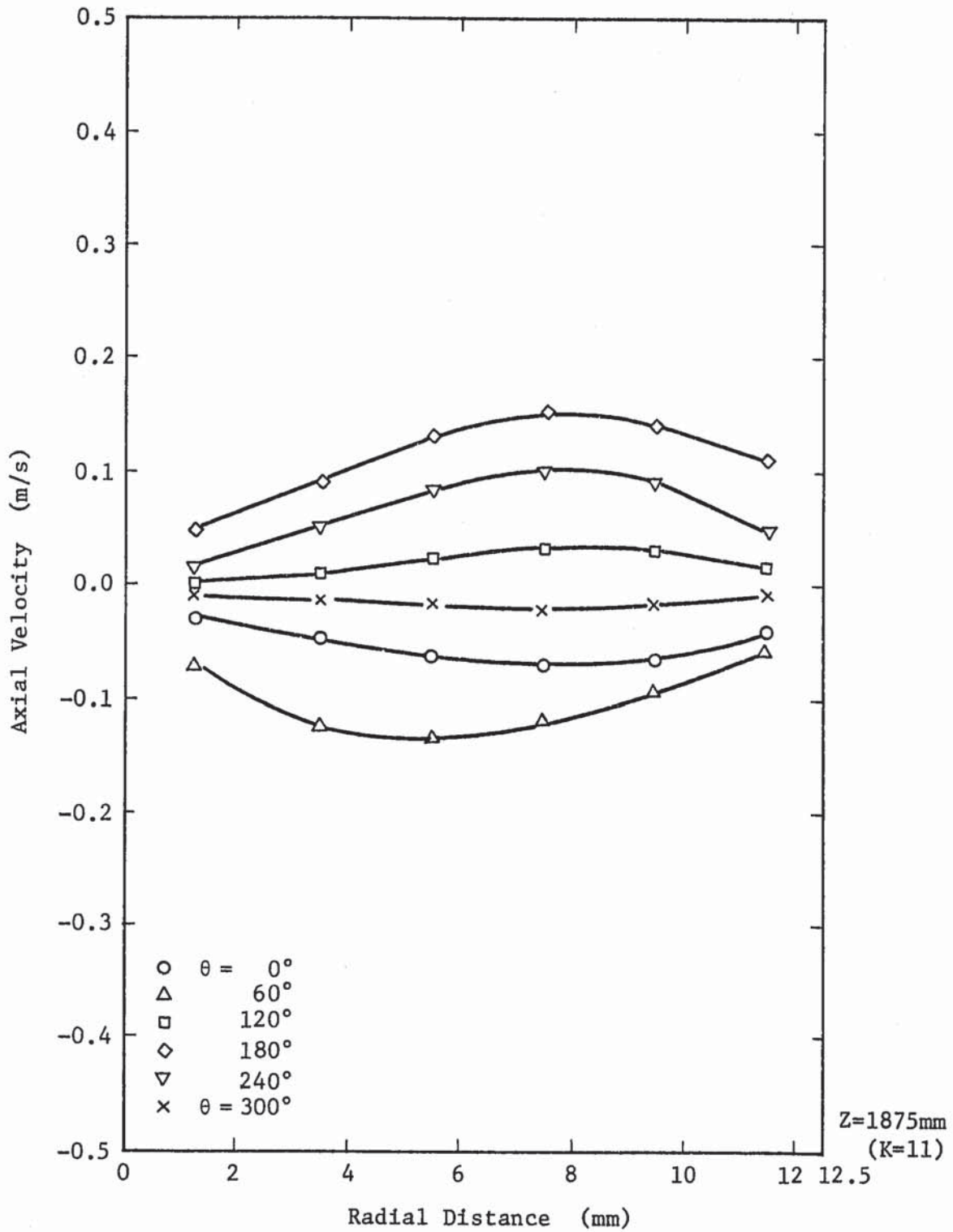


Fig. 4.22 Calculated Radial Velocity Distribution at Z=1875mm under 0.047 m³/min Blow Condition

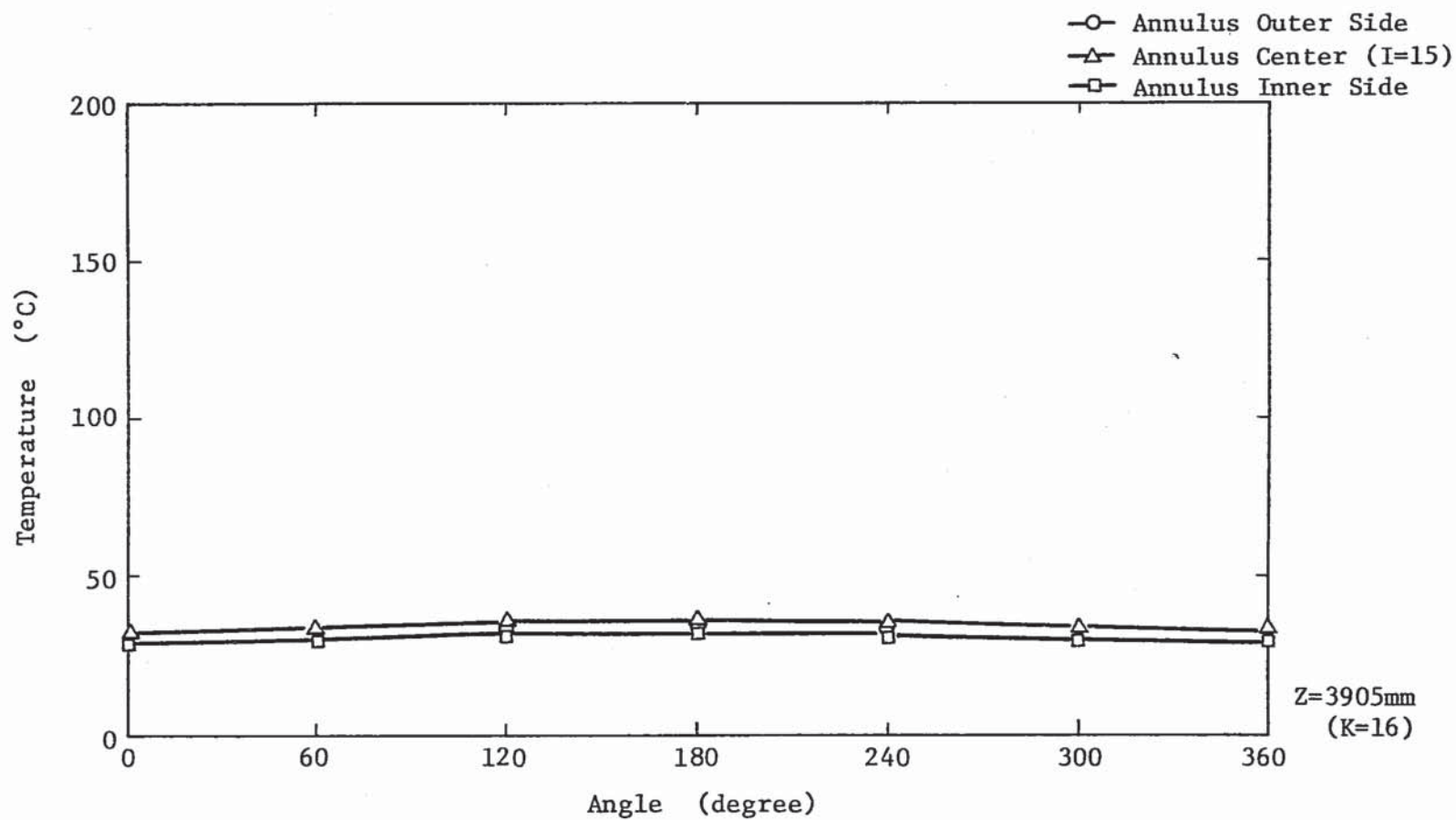


Fig. 4.23 Calculated Circumferential Temperature Distribution at Z=3905mm under 0.047 m³/min Blow Condition

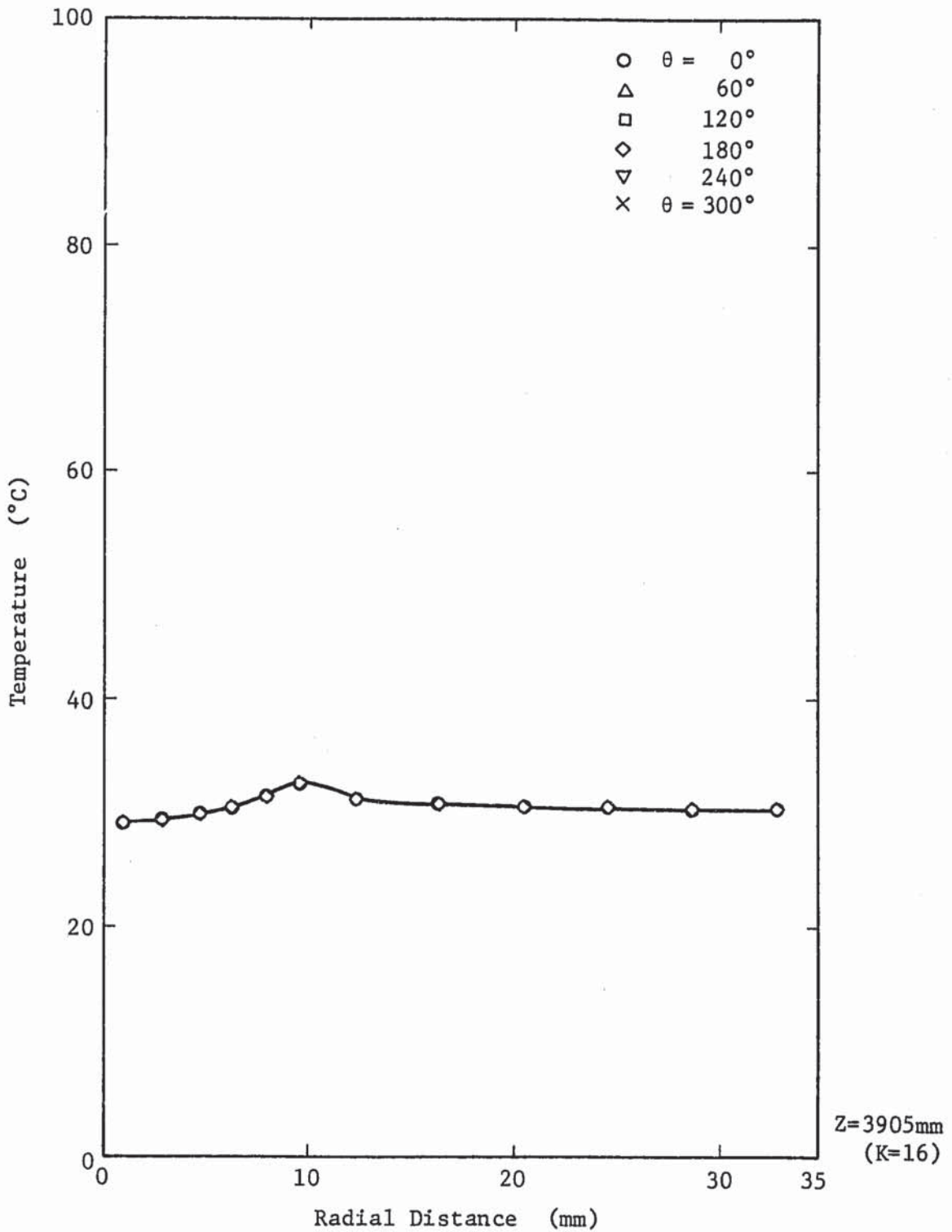


Fig. 4.24 Calculated Radial Temperature Distribution at Z=3905mm under 0.047 m³/min Blow Condition

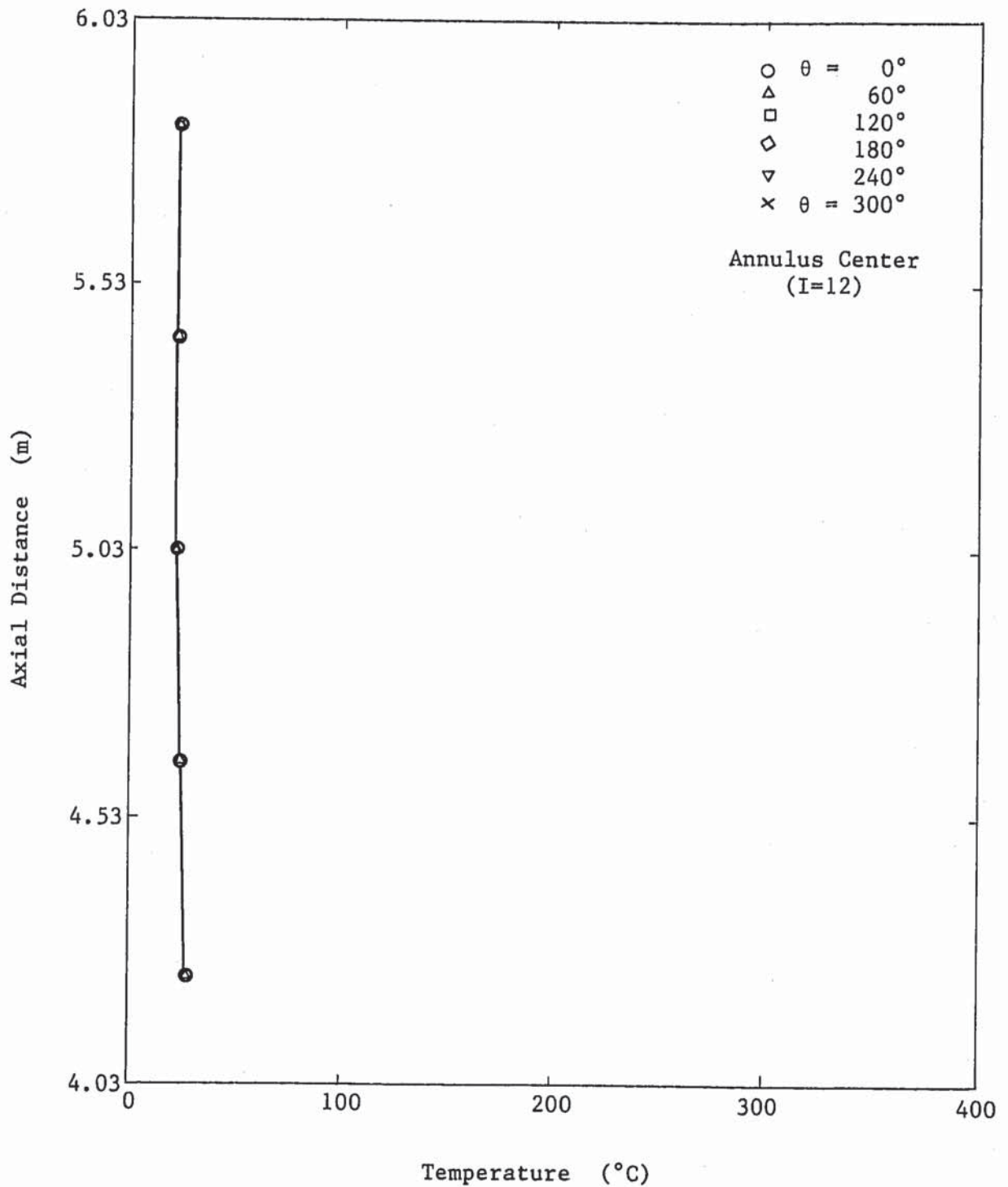


Fig. 4.25 Calculated Axial Temperature Distribution at Annulus Center under $0.047\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

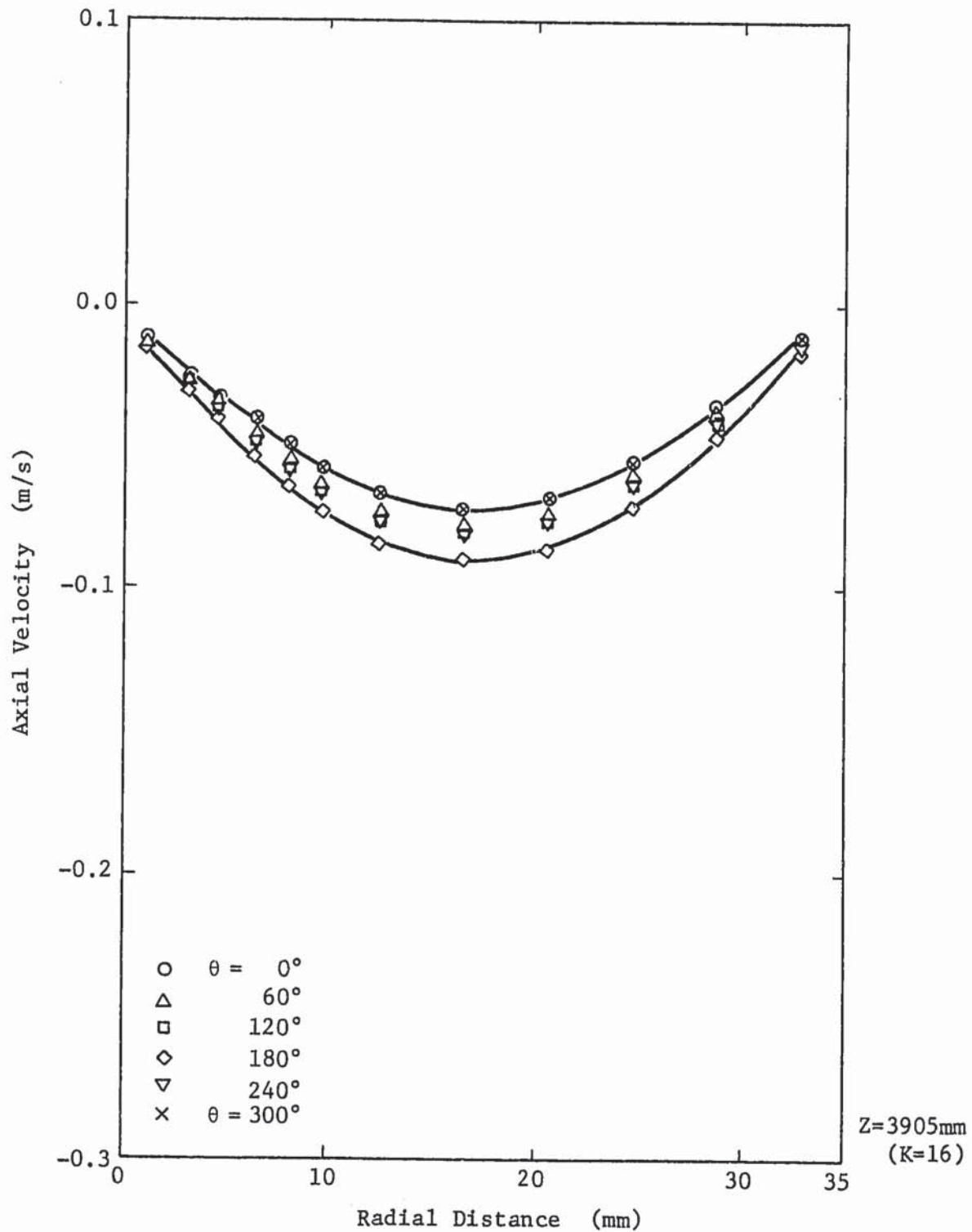


Fig. 4.26 Calculated Radial Velocity Distribution at $Z=3905\text{mm}$ under $0.047 \text{ m}^3/\text{min}$ Blow Condition

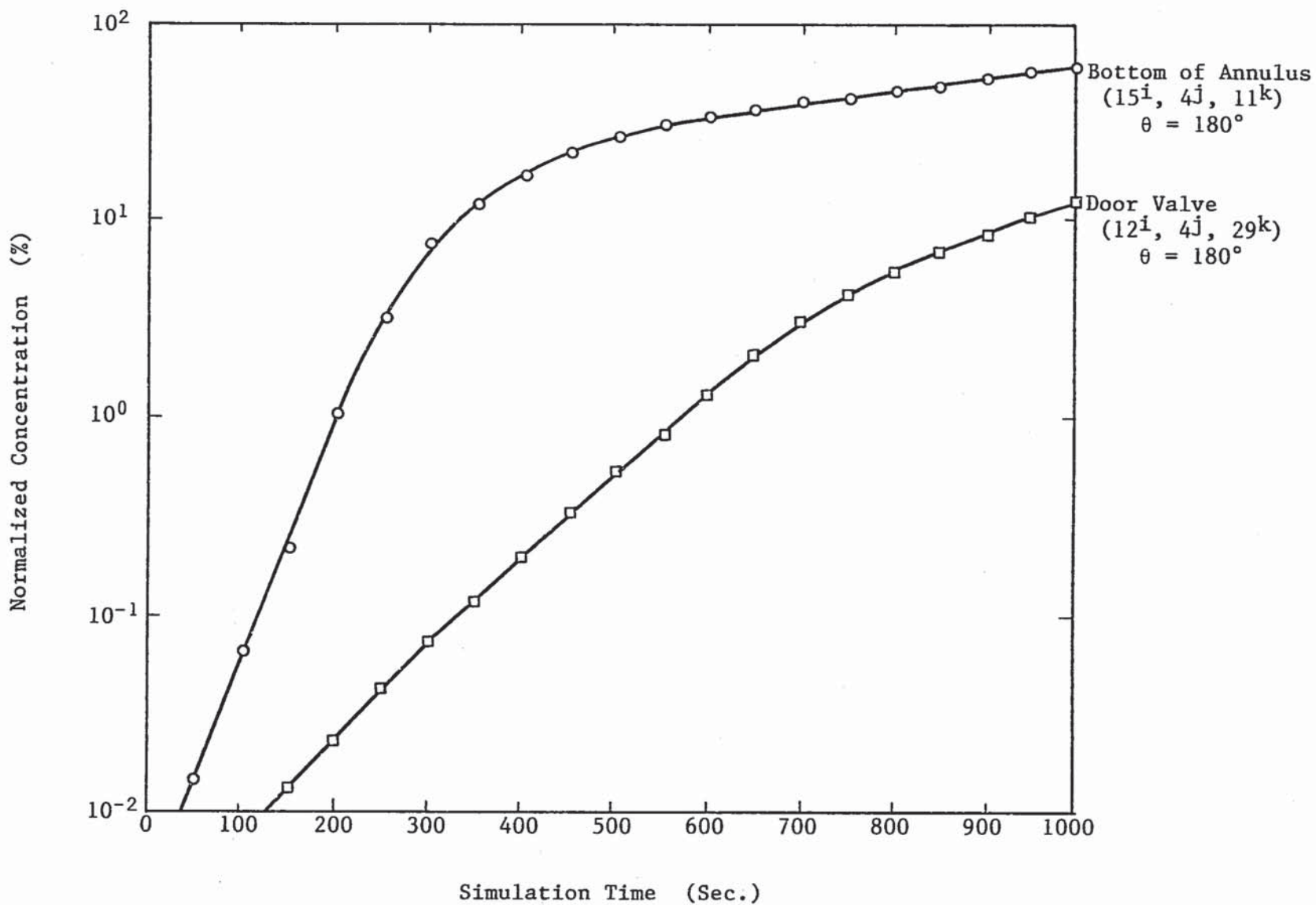


Fig. 4.27 Calculated Concentration Transients in Each Annulus Position under 0.0m³/min Blow Condition

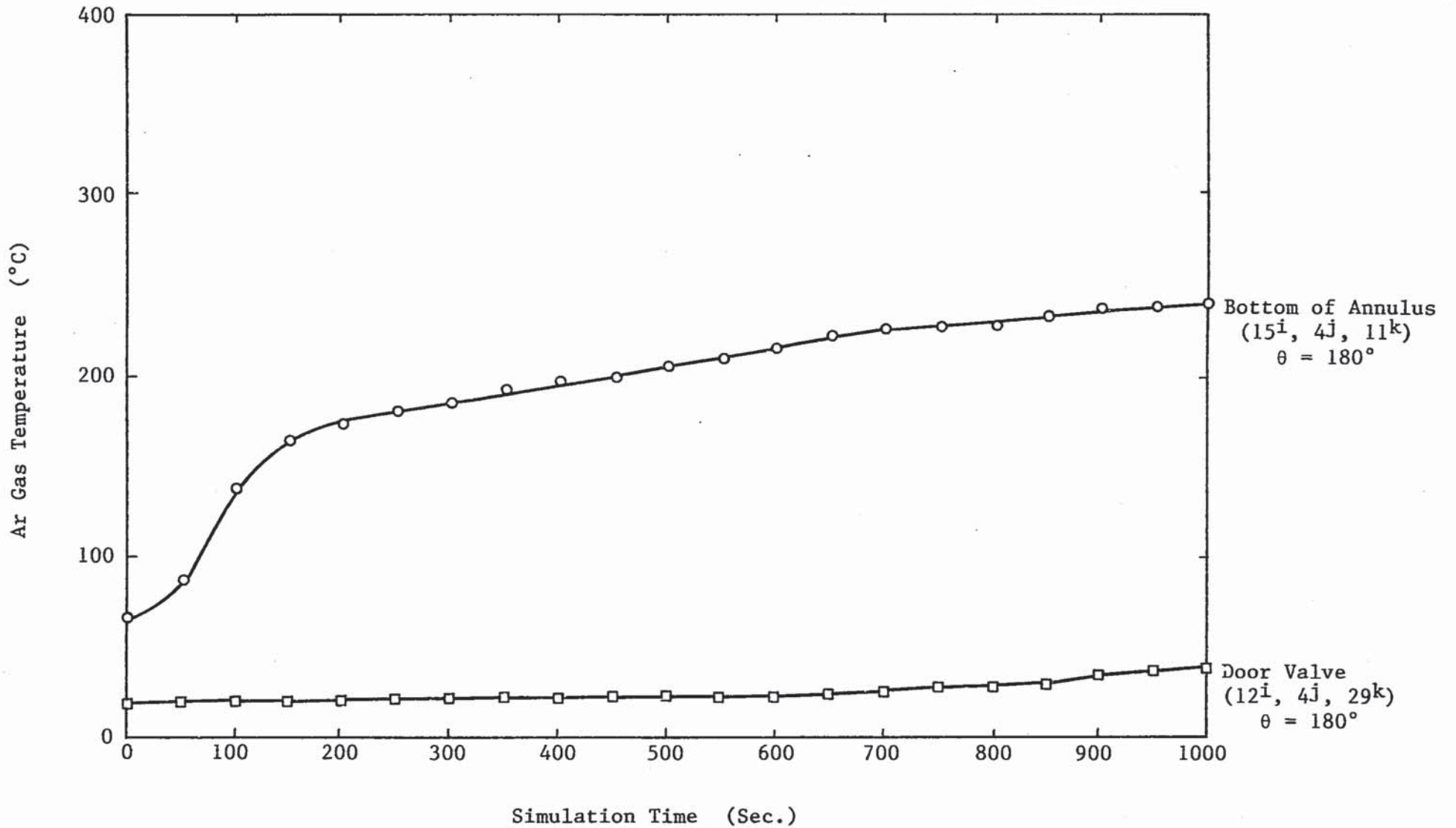


Fig. 4.28 Calculated Ar Gas Temperature Transients in Each Annulus Position under $0.0\text{m}^3/\text{min}$ Blow Condition

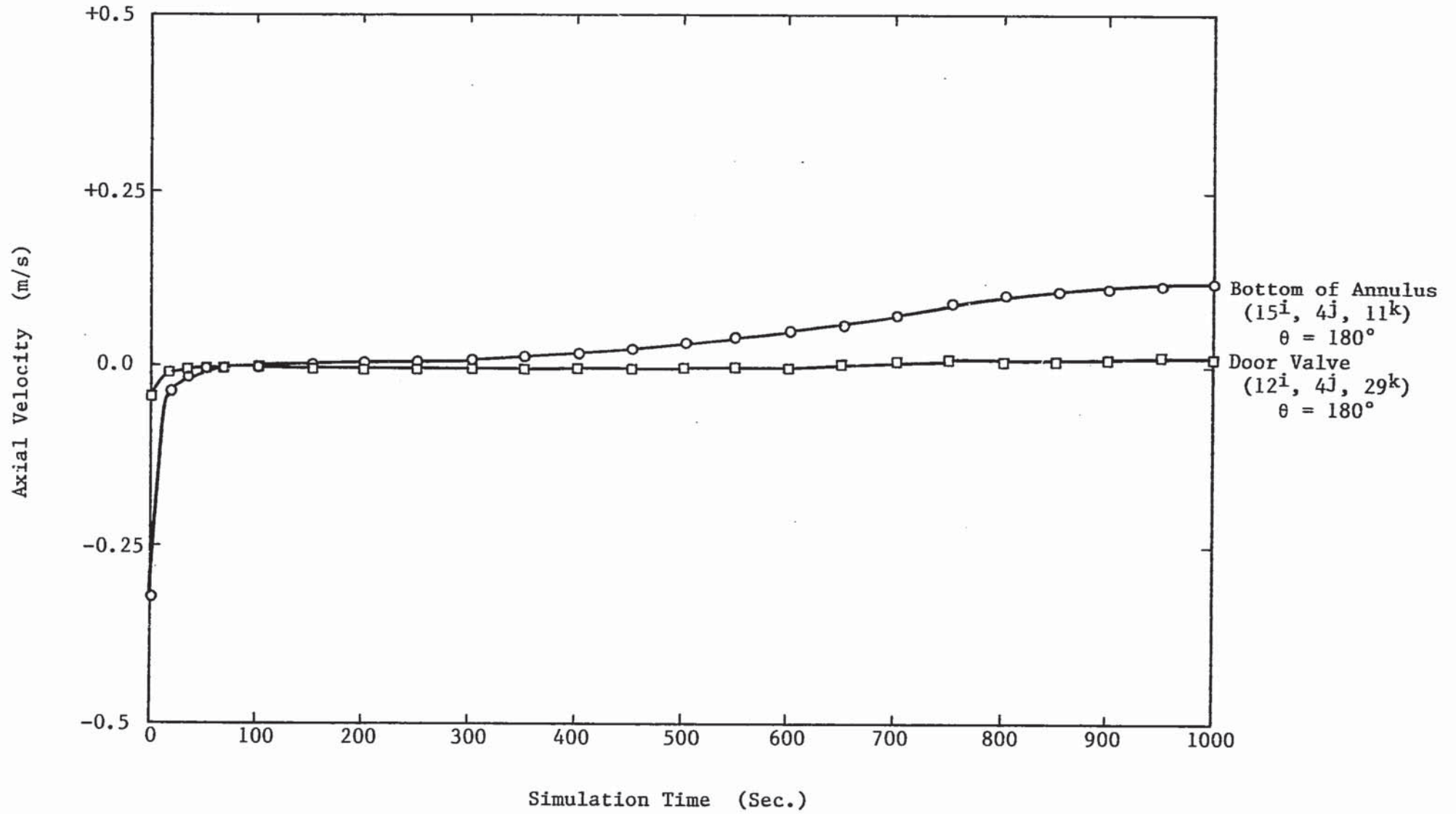


Fig. 4.29 Calculated Axial Velocity Transients in Each Annulus Position under 0.0m³/min Blow Condition

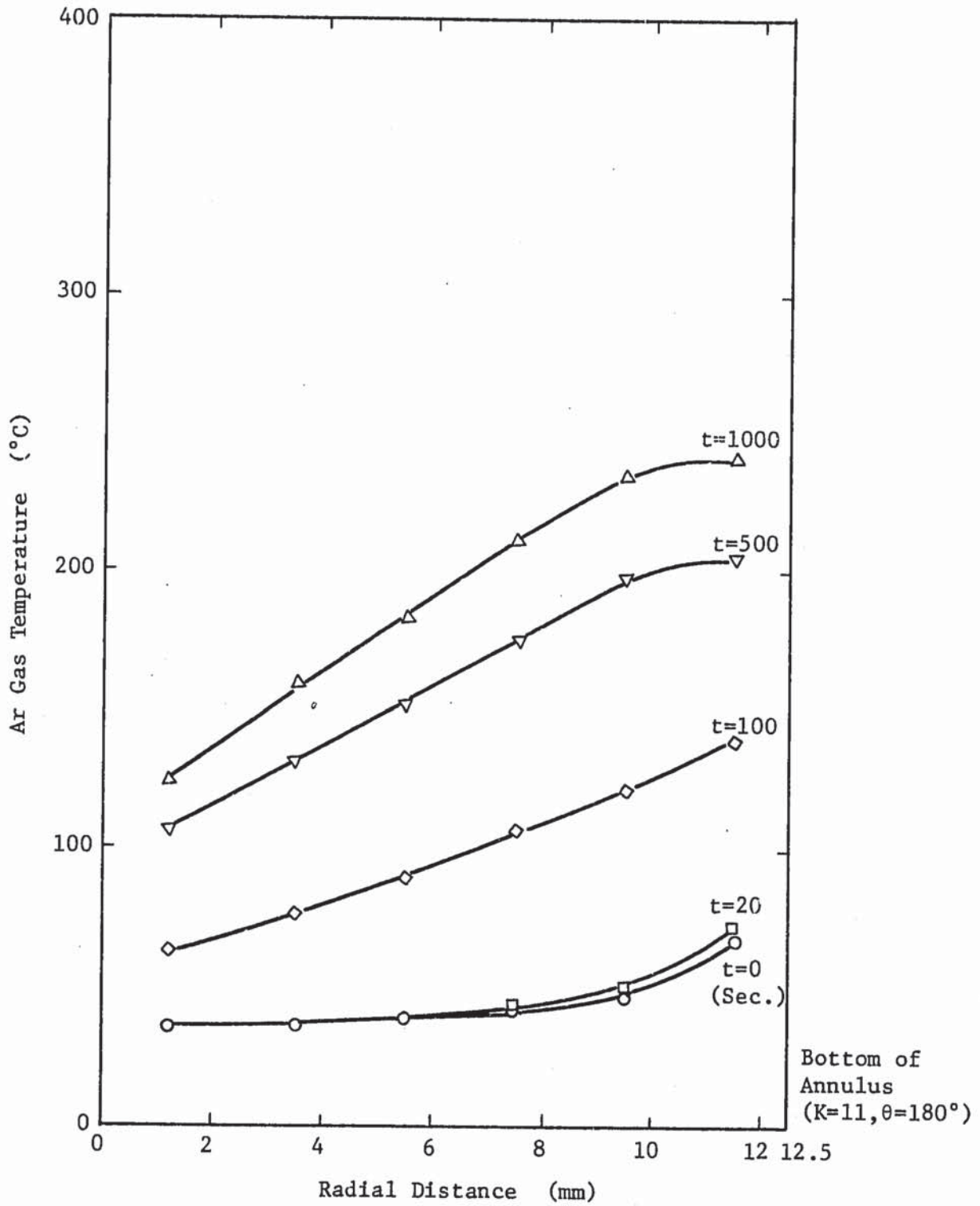


Fig. 4.30 Calculated Ar Gas Radial Temperature at Z=1875mm under 0.0 m³/min Blow Condition

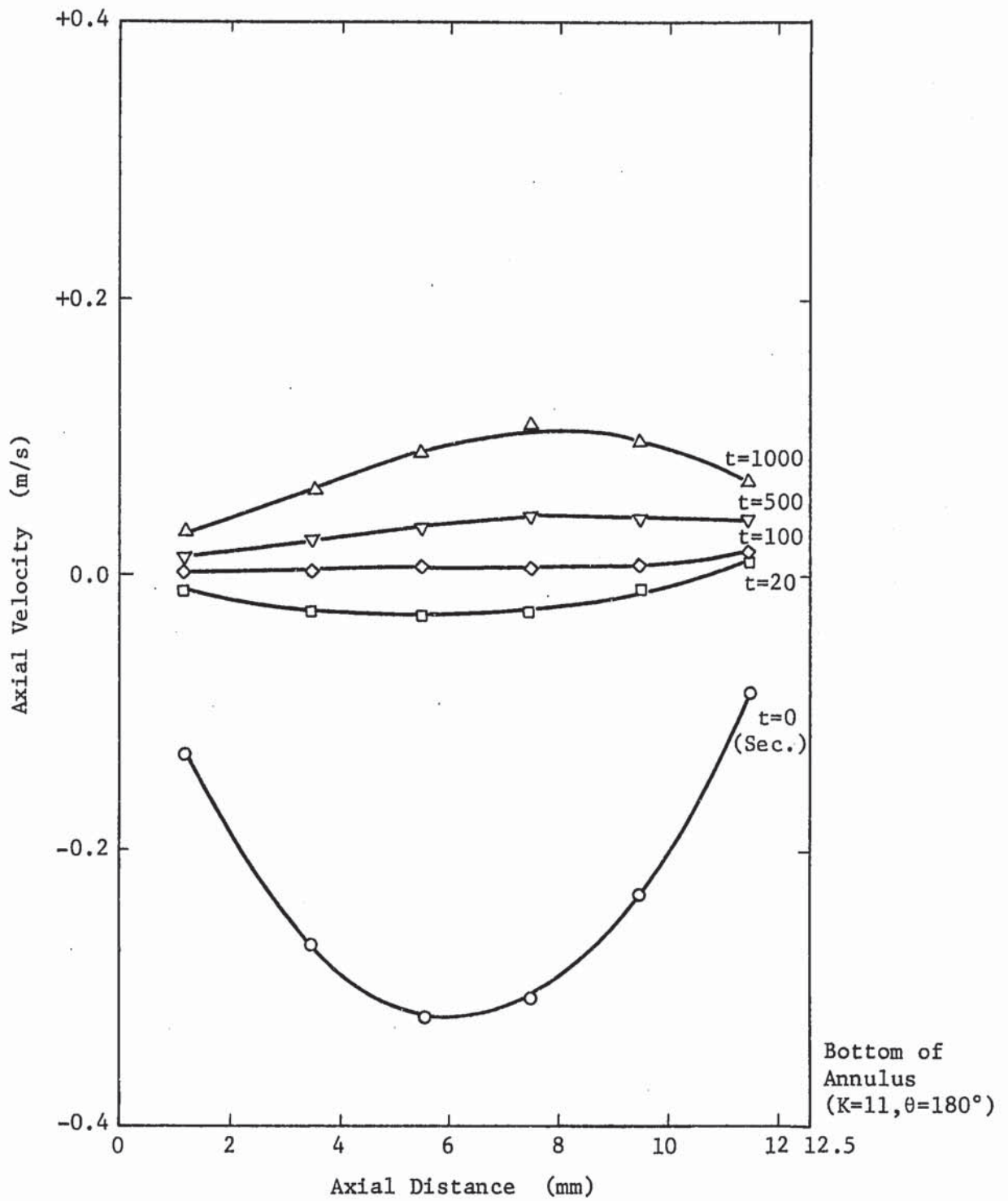


Fig. 4.31 Calculated Axial Velocity at Z=1875mm under 0.0 m³/min Blow Condition

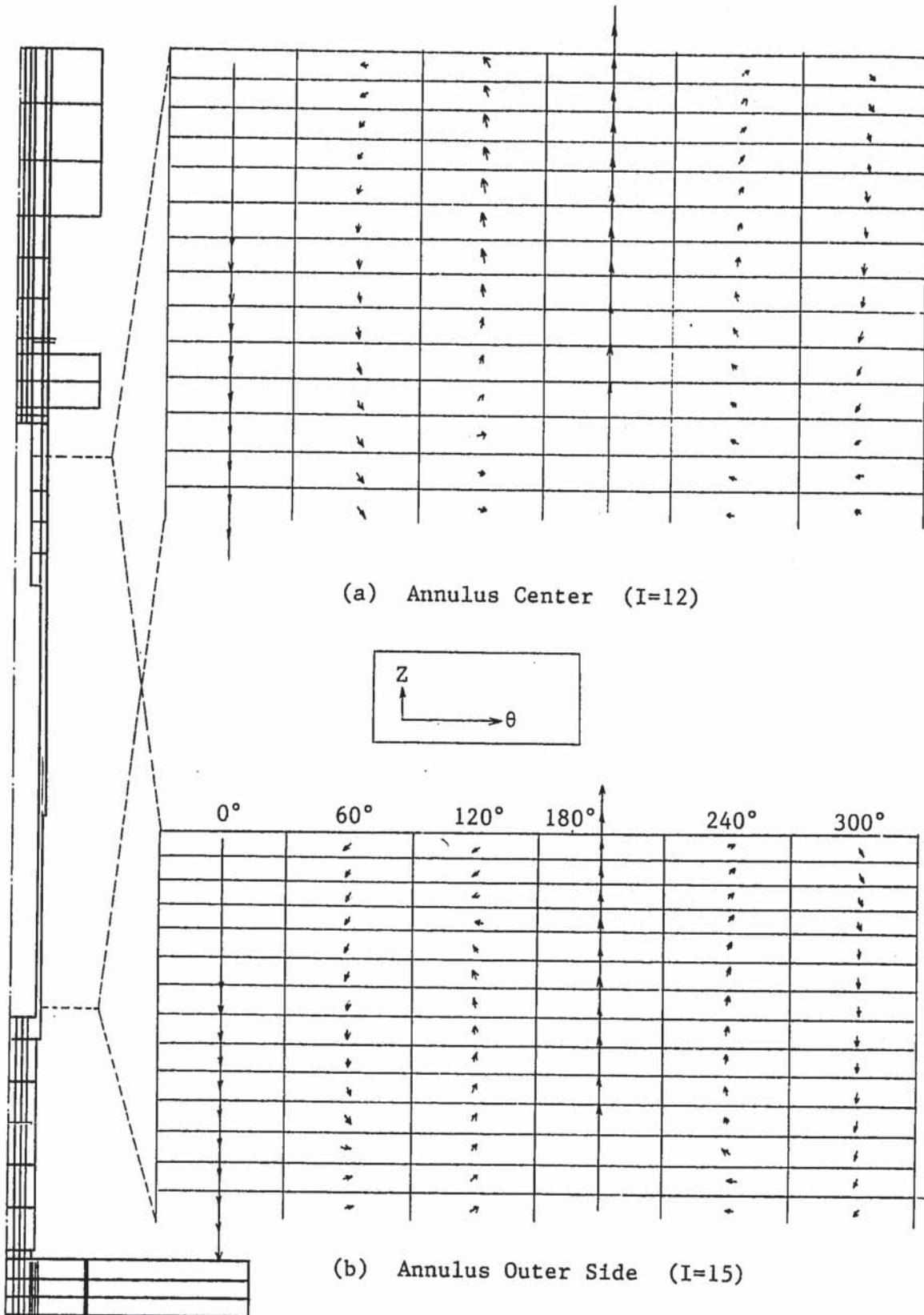


Fig. 4.32 Velocity Profile on θ -Z Plane at 1000 sec.