

JAERI-M
91-002

HTTR炉床部内の冷却材混合試験
(第2報：ミキシングプロモータ無し)

1991年2月

稲垣 嘉之・宮本 喜晟

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

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

HTTR 炉床部内の冷却材混合試験
(第2報：ミキシングプロモータ無し)

日本原子力研究所東海研究所高温工学部
稲垣 嘉之・宮本 喜晟

(1991年1月5日受理)

高温工学試験研究所(HTTR)炉床部内の冷却材の混合及び流動特性を調べるため、炉床部の約1/7スケールモデルのプレナム温度混合試験装置を製作して混合実験を行った。作動流体は水、試験条件は試験部入口での水の温度差が20~40℃、出口管基準のレイノルズ数が43,000~83,000である。

本試験では、プレナム内にある円盤状のミキシングプロモータの混合促進効果を定量的に評価するため、ミキシングプロモータを取り外して試験を行い、ミキシングプロモータを設置した状態の試験結果と比較を行ってその効果を検討した。その結果、HTTRでは、ミキシングプロモータの有無にかかわらず、加圧水冷却器や中間熱交換器等の周辺機器は、ホットストリークの影響をほとんど受けないことが明らかになった。また、3次元熱流体解析コードSTREAMを用いて解析を行い、解析結果が実験結果とよく一致することを確認した。

Study for Thermal Mixing of Coolant in Core Bottom
Structure of HTTR
(2nd Report: without Mixing Promoter)

Yoshiyuki INAGAKI and Yoshiaki MIYAMOTO

Department of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1991)

Numerical and experimental studies were conducted to clarify the thermal mixing performance of coolant in the core bottom structure of HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor). The experimental study was carried out using a one-seventh scale model of the core bottom structure without a mixing promoter and water as testing fluid. The experimental conditions were as follows: the temperature differences between hot and cold water at the inlet of the test section were 20~40°C, and Reynolds numbers defined with a diameter of the outlet nozzle were 43,000~83,000. The experimental results were compared with the experimental ones with the mixing promoter obtained previously to clarify the effect of the mixing promoter. The comparison revealed that the hot streak of coolant had little effect on the pressurized water cooler and the intermediate heat exchanger of the HTTR whether the mixing promoter was installed or not. Also, the numerical study was made using a three dimensional time-dependent flow and heat transfer code named STREAM. The experimental and numerical results were in good agreement.

Keywords: HTTR, Core Bottom Structure, Coolant Flow, Hot Streak,
Thermal Mixing, Turbulence, Mixing Promoter

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験方法	1
3. 解析モデル	2
4. 実験および解析結果	3
4.1 解析結果	3
4.2 実験結果と解析結果の比較	4
4.3 ミキシングプロモータの効果についての検討	5
5. 結 言	6
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental method	1
3. Numerical model	2
4. Experimental and numerical results	3
4.1 Numerical results	3
4.2 Comparison between experimental and numerical results	4
4.3 Discussion of the effect of the mixing promoter	5
5. Concluding remarks	6
Acknowledgements	7
References	7

1. 緒 言

高温工学試験研究炉（HTTR）の高温プレナム、出口管等の炉床部で冷却材（ヘリウムガス）を均一温度に混合することは、中間熱交換器や加圧水冷却器でのホットスポットの発生防止や、原子炉出口の冷却材温度（混合平均温度）を測定するうえで重要な課題である。試験研究炉では、冷却材の混合を促進するためにプレナム内に円盤状のミキシングプロモータを設置する予定であり、このミキシングプロモータは試験研究炉の炉床部を模擬したHENDEL 炉内構造物実証試験部（T₂）^(1,2)にも用いられている。

高温プレナム及び出口管内のヘリウムガスの混合特性を詳細に調べるため、試験研究炉およびT₂試験部の高温プレナム、出口管の1/7スケールモデルの試験装置を製作して水を試験流体とした混合実験を行うと共に、3次元熱流体解析コードSTREAM^(3,6)を用いて解析を行い、ミキシングプロモータを設置した状態での炉床部における冷却材の基本的な混合特性を解明した^(4,5,6,7)。その結果、中心の入口管に高温水を、他の入口管に低温水を流した時にはプレナム内で混合が十分に行われ、出口管に入る時点で混合した水の温度はほぼ均一となった。また、周辺の入口管1本のみで高温水を流した時は、プレナム内での混合が不十分で出口管内の混合水に温度差が生じ、出口管入口部から15直径分下流ではほぼ均一な温度（出口管内での混合水の温度差が、入口管での温度差に対して約3%）となった。

今回の試験では、ミキシングプロモータの混合促進効果を定量的に把握するために、ミキシングプロモータを取り外して試験を行い、前回に実施したミキシングプロモータを設置した状態での試験結果との比較検討を行った。また、3次元熱流体解析コードSTREAMを用いて解析を行い、試験結果と比較検討した。前回と同様に試験流体は水、試験条件は試験部入口の水の温度差が20～40℃、出口管基準のレイノルズ数が43,000～83,000である。

2. 試験方法

試験部はHTTR及びT₂試験部の炉床部をほぼ忠実に縮小した1/7スケールモデルであり、その入口部（HTTR及びT₂試験部の各領域に相当）は、中心に1本、周辺は同心円状に6本の計7本の円管流路（入口管）から構成されており、そこから試験部へ流入した水はプレナム内で混合され、その後出口管という1本の円管流路に集約されて試験部を出る。プレナム内には、混合を促進するための円盤状のミキシングプロモータ、プレナムの上部にある高温プレナムブロックを支持するための円柱状のサポートポスト等の乱れを促進する構造物がある。試験部の構造図をFig. 2.1に示す。試験体の中心には入口管①があり、周辺には60°間隔で6個の入口管②～⑦がある^(4,5,6,7)。

試験部のプレナム内には、プレナムの底面から垂直方向へトラバース可能な熱電対を設けており、プレナム内の水の温度分布を測定することができる。熱電対の周方向の位置は入口管①と③

1. 緒 言

高温工学試験研究炉（HTTR）の高温プレナム、出口管等の炉床部で冷却材（ヘリウムガス）を均一温度に混合することは、中間熱交換器や加圧水冷却器でのホットスポットの発生防止や、原子炉出口の冷却材温度（混合平均温度）を測定するうえで重要な課題である。試験研究炉では、冷却材の混合を促進するためにプレナム内に円盤状のミキシングプロモータを設置する予定であり、このミキシングプロモータは試験研究炉の炉床部を模擬したHENDEL 炉内構造物実証試験部（T₂）^(1,2)にも用いられている。

高温プレナム及び出口管内のヘリウムガスの混合特性を詳細に調べるため、試験研究炉およびT₂試験部の高温プレナム、出口管の1/7スケールモデルの試験装置を製作して水を試験流体とした混合実験を行うと共に、3次元熱流体解析コードSTREAM^(3,6)を用いて解析を行い、ミキシングプロモータを設置した状態での炉床部における冷却材の基本的な混合特性を解明した^(4,5,6,7)。その結果、中心の入口管に高温水を、他の入口管に低温水を流した時にはプレナム内で混合が十分に行われ、出口管に入る時点で混合した水の温度はほぼ均一となった。また、周辺の入管1本のみで高温水を流した時は、プレナム内での混合が不十分で出口管内の混合水に温度差が生じ、出口管入口部から15直径分下流ではほぼ均一な温度（出口管内での混合水の温度差が、入口管での温度差に対して約3%）となった。

今回の試験では、ミキシングプロモータの混合促進効果を定量的に把握するために、ミキシングプロモータを取り外して試験を行い、前回に実施したミキシングプロモータを設置した状態での試験結果との比較検討を行った。また、3次元熱流体解析コードSTREAMを用いて解析を行い、試験結果と比較検討した。前回と同様に試験流体は水、試験条件は試験部入口の水の温度差が20～40℃、出口管基準のレイノルズ数が43,000～83,000である。

2. 試験方法

試験部はHTTR及びT₂試験部の炉床部をほぼ忠実に縮小した1/7スケールモデルであり、その入口部（HTTR及びT₂試験部の各領域に相当）は、中心に1本、周辺は同心円状に6本の計7本の円管流路（入口管）から構成されており、そこから試験部へ流入した水はプレナム内で混合され、その後出口管という1本の円管流路に集約されて試験部を出る。プレナム内には、混合を促進するための円盤状のミキシングプロモータ、プレナムの上部にある高温プレナムブロックを支持するための円柱状のサポートポスト等の乱れを促進する構造物がある。試験部の構造図をFig. 2.1に示す。試験体の中心には入口管①があり、周辺には60°間隔で6個の入口管②～⑦がある^(4,5,6,7)。

試験部のプレナム内には、プレナムの底面から垂直方向へトラバース可能な熱電対を設けており、プレナム内の水の温度分布を測定することができる。熱電対の周方向の位置は入口管①と③

を結ぶ線上（90°方向）、径方向位置はほぼミキシングプロモータの外周部である。試験部の出口管には、出口管入口部から $L/D_0 = 2, 5, 10, 15, 20$ （ L ；出口管入口部からの距離， D_0 ：出口管内径）の位置に、径方向にトラバース可能な熱電対が出口管の周方向に60°間隔で取り付けられており、これにより出口管内の水の温度分布を測定することができる。出口管では、熱電対1本当り径方向にトラバースして11点、出口管1断面には3本の熱電対があるので、出口管1断面当り33点計測した。熱電対の配置図をFig. 2.2に示す。今回の試験では、ミキシングプロモータが無い状態で試験を行った。

試験は、中心の入口管①又は周辺の入管③に高温水を、残りの入口管に低温度を流して行った。

試験条件を以下に示す。

流 体	：	水
圧 力	：	0.3 MPa
低温水温度	：	10～25℃
高温水温度	：	30～60℃
流 量	：	5.6～14.0 m ³ /hr
レイノルズ数	：	43,000～83,000
(出口管換算)		

HTTR及びT 試験部の冷却材がヘリウムガスであるのに対して、本試験では試験流体を水とした。ヘリウムガスと水では混合特性が異なることが考えられるが、エネルギー保存式による考察により、本試験条件の範囲内では、水でヘリウムガスの混合特性を十分模擬できることを確認している^(5,7)。

3. 解析モデル

解析モデルは、炉床部を模擬した1/7スケールモデルの試験部を3次元デカルト座標系（ x_1, x_2, x_3 ）で分割した。そのメッシュ分割数は $41 \times 41 \times 30$ （総数50,430）である。解析モデルをFig. 3.1に示す。解析の初期条件は、実験とほぼ同じ流速（0.11m/s）および温度（高温水：55℃，低温水：25℃）を与えた。この時、7本の入口管の流量は均等で、出口管基準のレイノルズ数は45,000である。壁面との境界条件は、温度に対しては断熱，速度に対しては出口管内壁対数壁法則を、他の面には滑り条件を適用した。なお、STREAMの概要については文献を参照されたい^(3,6)。

を結ぶ線上（90°方向）、径方向位置はほぼミキシングプロモータの外周部である。試験部の出口管には、出口管入口部から $L/D_0 = 2, 5, 10, 15, 20$ （ L ；出口管入口部からの距離， D_0 ：出口管内径）の位置に、径方向にトラバース可能な熱電対が出口管の周方向に60°間隔で取り付けられており、これにより出口管内の水の温度分布を測定することができる。出口管では、熱電対1本当り径方向にトラバースして11点、出口管1断面には3本の熱電対があるので、出口管1断面当り33点計測した。熱電対の配置図をFig. 2.2に示す。今回の試験では、ミキシングプロモータが無い状態で試験を行った。

試験は、中心の入口管①又は周辺の入管③に高温水を、残りの入口管に低温度を流して行った。

試験条件を以下に示す。

流 体	：	水
圧 力	：	0.3 MPa
低温水温度	：	10～25℃
高温水温度	：	30～60℃
流 量	：	5.6～14.0 m ³ /hr
レイノルズ数	：	43,000～83,000
(出口管換算)		

HTTR及びT 試験部の冷却材がヘリウムガスであるのに対して、本試験では試験流体を水とした。ヘリウムガスと水では混合特性が異なることが考えられるが、エネルギー保存式による考察により、本試験条件の範囲内では、水でヘリウムガスの混合特性を十分模擬できることを確認している^(5,7)。

3. 解析モデル

解析モデルは、炉床部を模擬した1/7スケールモデルの試験部を3次元デカルト座標系（ x_1, x_2, x_3 ）で分割した。そのメッシュ分割数は $41 \times 41 \times 30$ （総数50,430）である。解析モデルをFig. 3.1に示す。解析の初期条件は、実験とほぼ同じ流速（0.11m/s）および温度（高温水：55℃，低温水：25℃）を与えた。この時、7本の入口管の流量は均等で、出口管基準のレイノルズ数は45,000である。壁面との境界条件は、温度に対しては断熱、速度に対しては出口管内壁対数壁法則を、他の面には滑り条件を適用した。なお、STREAMの概要については文献を参照されたい^(3,6)。

4. 実験および解析結果

4.1 解析結果

解析で得られたプレナム内の流体の流れの様子および温度分布を Fig. 4.1 ~ Fig. 4.12 に示す。解析条件は入口管の高温水と低温水の温度差 $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 、出口管基準のレイノルズ数 $Re_0 = 45,000$ である。なお、温度分布については次式に示す無次元温度 θ_i で評価した。

$$\theta_i = \frac{T_i - T_{\text{out m}}}{\Delta T} \quad (4.1)$$

ここで、

$$T_{\text{out m}} = \frac{\sum_{i=1}^7 F_{\text{in } i} T_{\text{in } i}}{\sum_{i=1}^7 F_{\text{in } i}} \quad (4.2)$$

T_i : 各部の温度

$T_{\text{out m}}$: 出口管内の水の平均温度

ΔT : 入口管における高温水と低温水の温度差

$F_{\text{in } i}$: 各入口管における水の流量

$T_{\text{in } i}$: 各入口管における水の温度

(4.1) 式で温度を表すと、無次元最高温度（入口管高温水の温度： 55°C ）は $\theta_i = 0.86$ 、無次元最低温度（同低温水の温度： 25°C ）は $\theta_i = -0.14$ 、無次元の出口管平均温度（各入口管で均等流量の場合： 29.3°C ）は $\theta_i = 0.0$ となる。

Fig. 4.1 ~ Fig. 4.3 は、試験部縦断面（ $90-270^\circ$ 方向）の流速ベクトルと温度分布を示したもので、Fig. 4.2 は流速ベクトルの分布、Fig. 4.2 は中心の入口管①に高温水を、Fig. 4.3 は周辺の入口管③に高温水を流した時の温度分布である。また、Fig. 4.4 ~ Fig. 4.12 は、試験部横断面の流速ベクトルと温度分布を示したものである。このうち Fig. 4.4 ~ Fig. 4.6 は入口管の出口部近傍を示し、Fig. 4.4 は Fig. 4.1 の A-A 断面、Fig. 4.5 は Fig. 4.2 の D-D 断面、Fig. 4.6 は Fig. 4.3 の G-G 断面を示す。Fig. 4.7 ~ Fig. 4.9 はプレナムのほぼ中心部を示し、Fig. 4.7 は B-B 断面、Fig. 4.8 は E-E 断面を、Fig. 4.9 は H-H 断面を示す。Fig. 4.10 ~ Fig. 4.12 は出口管入口部を示し、Fig. 4.10 は C-C 断面、Fig. 4.11 は F-F 断面を、Fig. 4.12 は I-I 断面を示す。

各図の流速ベクトルに示されているように、入口管①を流れる水は、直接出口管へ向かって周囲の流体を巻き込みながら流れている。

各図の温度分布に示されているように、中心の入口管①に高温水を流した場合、高温水はプレナム内で低温水とある程度混合するが、出口管に入る時にはまだ中心部に高温水の影響がある。しかし、出口管内での混合によりわずかな距離でほぼ均一な温度になることが分かる。また、周

辺の入口管③に高温水を流した場合、プレナム内での混合が不十分であり、高温水が出口管の内壁に沿って流れ、かなり遠距離まで出口管内の水に温度差を生じている。

4.2 実験結果と解析結果の比較

プレナム内及び出口管内の水の温度分布の実験と解析の比較検討を以下に述べる。但し、プレナム内及び出口管内の水の温度については(4.1)式で定義された無次元温度 θ_1 を使用し、プレナム内の計測点の距離は、 z/H (z :プレナムの底から天井への鉛直方向の移動距離, H :プレナムの高さ)、また、出口管内の距離は、 y/D_0 (y :出口管の管壁から径方向の移動距離, D_0 :出口管内径)の無次元数で整理した。

1) 中心の入口管①に高温水を流した場合

実験条件は、入口管における高温水と低温水の温度差 $\Delta T = 20 \sim 40^\circ\text{C}$ 、出口管換算のレイノルズ数 $Re_0 = 43,000 \sim 83,000$ 、解析条件は、 $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ および $Re_0 = 45,000$ である。出口管長手方向の温度の計測位置は、 $L/D_0 = 2, 5, 10, 15, 20$ である。また、ミキシングプロモータの効果を確認するために、実験結果については、ミキシングプロモータを設置して行った実験結果($\Delta T = 30^\circ\text{C}$ および $Re_0 = 44,000$)と比較している。

Fig. 4.13は、プレナム内の水の温度分布を示したものである。ミキシングプロモータ無しの場合、中心の入口管①を流れた高温水は、そのまま出口管へ向かって流れるため、本試験部のプレナム内の温度計測点(混合促進板の外周付近)では高温水の影響を受けず、実験結果及び解析結果とも低温水の温度($\theta = -0.14$)を示している。

Fig. 4.14~Fig. 4.18は、出口管内の水の温度分布($90 \sim 270^\circ$ 方向)を示したものである。ミキシングプロモータが有る場合は、 $L/D_0 = 2$ の位置で既にほぼ均一な温度分布を示しているが、ミキシングプロモータ無しの場合には、 $L/D_0 = 2$ の位置で出口管中央部の温度が高温水の影響のために高くなっており、 $L/D_0 = 5$ の位置でもその影響がわずかながら見られる。しかし、出口管内での乱流混合により $L/D_0 = 10$ の位置ではほぼ均一な温度(混合平均温度 $\theta_1 = 0.0$)になっている。この傾向は、 ΔT 及び Re_0 を変えても同じである。解析結果は、実験結果の傾向をよく示しているが、 $L/D_0 = 2$ の位置で中央部の温度が実験結果よりもやや低くなっている。

Fig. 4.19は、出口管内の混合水の無次元温度差 $\Delta\theta$ と出口管長手方向の距離 L/D_0 の関係を示したもので、図中の実線は解析結果による $\Delta\theta$ を示したものである。無次元温度差 $\Delta\theta$ は、以下の式で定義した。

$$\Delta\theta = \theta_{\text{out,max}} - \theta_{\text{out,min}} \quad (4.3)$$

ここで、

$\theta_{\text{out,max}}$: 各 L/D_0 における θ の最大値

$\theta_{\text{out,min}}$: 各 L/D_0 における θ の最小値

ミキシングプロモータ無しの場合の出口管内の温度差は、入口管での温度差に対して $L/D_0 = 2$ で約20%、 $L/D_0 = 5$ で約4%、 $L/D_0 = 10 \sim 20$ で約1%となっている。但し、 $L/D_0 = 2 \sim 5$ では、出口管の中央部で温度が高く、管壁部で温度が低いという規則性が見られるが、 $L/D_0 = 10$ 以上ではその規則性はなく、高温部と低温部がばらばらの位置にあり、測定誤差の

範囲内と考えられる。ミキシングプロモータ有りの場合には、 $L/D_0=2\sim 20$ で約1%の温度差であり、既に出口管の入口管の入口部でよく混合している。以上の結果より、ミキシングプロモータ無しの場合でも、出口管内での乱流混合により $L/D_0=10$ の距離で均一な温度になることがわかった。

2) 周辺の入口管③に高温水を流した場合

実験条件は、入口管における高温水と低温水の温度差 $\Delta T=20\sim 40^\circ\text{C}$ 、出口管換算のレイノルズ数 $Re=43,000\sim 83,000$ 、解析条件は、 $\Delta T=30^\circ\text{C}$ および $Re=45,000$ である。また、ミキシングプロモータの効果を確認するために、実験結果については、ミキシングプロモータを設置して行った実験結果($\Delta T=30^\circ\text{C}$ および $Re=44,000$)と比較している。

Fig. 4.20は、プレナム内の水の温度分布を示したものである。周辺の入口管③に高温水を流した場合は、解析結果(Fig. 4.3)に示しているように、プレナムの底面に沿って出口管の方向に流れ、高温水の温度はかなり保存される。また、ミキシングプロモータ有りの場合と比較すると、無しの場合には、プレナム内における低温水との混合が減少するため、高温水の温度が保存される割合が大きい。解析結果は、実験結果と比較して、鉛直方向の温度変化が小さい結果が得られた。

Fig. 4.21~Fig. 4.25は、出口管内の水の温度分布(90-270°方向)を示したものである。入口管③に高温水を流した場合、高温の水は出口管内壁に沿って流れ、出口管内の水に温度差が生じた。しかし、温度差は混合により下流に進むにしたがって減少している。解析結果は、実験で得られた出口管内の温度分布をよく再現していた。但し、壁に最も接近した格子点では温度が急激に変化しており、それ以外の格子点における温度分布と比べると不連続な形状となっているが、これは、出口管内壁面との境界条件に対数壁法則を適用したためと考えられる。その詳細については、文献を参照されたい(5.6.7)。

Fig. 4.26は、出口管内の混合水の無次元温度差 $\Delta\theta$ と出口管長手方向の距離 L/D_0 の関係を示したもので、図中の実線は解析結果による $\Delta\theta$ を示したものである。ミキシングプロモータ無しの場合、有りの場合に比較して混合の程度が低く、入口管での温度差に対し、 $L/D_0=20$ の位置で約4~8% (有りの場合は、約2%)であった。また、解析結果は、実験結果の傾向をよく再現しているが、実験結果の方が、解析結果よりも温度差の減少割合が大きい。これは、ミキシングプロモータ有りの実験結果と解析結果の比較でもみられた現象である。また、無次元温度分布は ΔT 、 Re_0 が変化しても同じ傾向を示し、本実験の範囲内ではこれらのパラメータに対する依存性は見られなかった。

4.3 ミキシングプロモータの効果についての検討

ここでは、原子炉炉床部で生じた冷却材のホットストリークが、高温配管や加圧水冷却器及び中間熱交換器等の機器に及ぼす影響を考慮して、HTTRのミキシングプロモータの混合効果について考察する。

Fig. 4.27は、本試験の出口管内の $L/D_0=2$ の位置における径方向の乱流エネルギー k の分布(解析結果)を示したものである。図に示しているようにミキシングプロモータ有りの場合と無

しの場合と無しの場合を比較すると、前者が後者よりも約40%大きい。この差はミキシングプロモータにより乱れが生成されたもので、このために出口管内の混合は、前者の方が促進される。なお、出口管内壁近傍で乱流エネルギーが大きく減少しているが、これは対数壁法則を適用したことによる(5,6,7)。

HTTRで中心領域に高温の冷却材が流れた時(現在の設計では、中心領域と周辺領域の温度差を最大で約60℃と想定)、ミキシングプロモータ有りの場合には、プレナム内で十分混合される。無しの場合、本試験結果に示されているようにプレナム内での混合が不十分であり、出口管入口部付近で出口管流路の中央部に高温の冷却材が流れる。しかし、出口管のライナー部(金属構造物)に接触する部分は、周辺領域を流れた低温の冷却材であるため、ホットストリークが出口管に影響を及ぼすことはない。また、冷却材は出口管内で混合され、 $L/D_0=10$ の位置ではほぼ均一な温度になる。原子炉の炉床部から加圧水冷却器や中間熱交換器までの距離は、 $L/D_0>30$ であり、高温の冷却材がこれらの機器に影響を及ぼす可能性は非常に小さい。

周辺領域に高温の冷却材が流れた場合は、ミキシングプロモータの有無に関わらず、プレナム内での混合が不十分であるが、Fig. 4.26に示しているように、ミキシングプロモータにより、出口管内で混合促進の効果がわずかながら見られる。しかし、HTTRの周辺6領域の炉心は、構造及び燃料の装荷状態が同じであり、現在の設計で想定している領域間の温度差は最大で約20℃と小さいため、ホットストリークは、原子炉周辺機器にほとんど影響を及ぼさないといえる。

以上に述べたように、現状のHTTRの運転状態を考慮すると、ミキシングプロモータが無い場合でもプレナム及び出口管内で冷却材は混合され、高温配管や加圧水冷却器及び中間熱交換器等の機器に及ぼすホットストリークの影響は小さい。なお、HTTRの炉心改造又は新型炉の設計等で、周辺領域間の温度差が拡大するようなことがあれば、現状のミキシングプロモータのほか、プレナム内で各領域ごとにミキシングプロモータを設けてプレナム内での混合を促進させる方法、或は、出口管内での混合を促進させる方法、例えば出口管入口部の近傍で、出口管内壁部にかくはんリングを設けて内壁に沿って流れる高温の冷却材をはく離させ、低温の冷却材と混合させる等の対策が必要であろう。

5. 結 言

本実験及び解析により、ミキシングプロモータが無い場合の炉床部内の冷却材混合特性、およびミキシングプロモータの効果について以下のことが分かった。

- (1) 中心の入口管に高温の流体が流れた場合、出口管内の流体は $L/D_0=2$ の位置ではその影響により中心部の温度が高くなるが、 $L/D_0=10$ の位置で混合によりほぼ均一な温度になった。
- (2) 周辺の入口管に高温の流体が流れた場合、プレナム内および出口管内での混合が不十分であり、下流に進に従って出口管内の流体の温度差は減少するが、 $L/D_0=20$ の位置でもわずかながら温度差が生じた。
- (3) 上記の特性は、入口管における高温水と低温水の温度差 ΔT および出口管換算のレイノルズ数 Re 。等の試験パラメータに対して依存性が無かった。

しの場合と無しの場合を比較すると、前者が後者よりも約40%大きい。この差はミキシングプロモータにより乱れが生成されたもので、このために出口管内の混合は、前者の方が促進される。なお、出口管内壁近傍で乱流エネルギーが大きく減少しているが、これは対数壁法則を適用したことによる(5,6,7)。

HTTRで中心領域に高温の冷却材が流れた時(現在の設計では、中心領域と周辺領域の温度差を最大で約60℃と想定)、ミキシングプロモータ有りの場合には、プレナム内で十分混合される。無しの場合には、本試験結果に示されているようにプレナム内での混合が不十分であり、出口管入口部付近で出口管流路の中央部に高温の冷却材が流れる。しかし、出口管のライナー部(金属構造物)に接触する部分は、周辺領域を流れた低温の冷却材であるため、ホットストリークが出口管に影響を及ぼすことはない。また、冷却材は出口管内で混合され、 $L/D_0=10$ の位置ではほぼ均一な温度になる。原子炉の炉床部から加圧水冷却器や中間熱交換器までの距離は、 $L/D_0>30$ であり、高温の冷却材がこれらの機器に影響を及ぼす可能性は非常に小さい。

周辺領域に高温の冷却材が流れた場合は、ミキシングプロモータの有無に関わらず、プレナム内での混合が不十分であるが、Fig. 4.26に示しているように、ミキシングプロモータにより、出口管内で混合促進の効果がわずかながら見られる。しかし、HTTRの周辺6領域の炉心は、構造及び燃料の装荷状態が同じであり、現在の設計で想定している領域間の温度差は最大で約20℃と小さいため、ホットストリークは、原子炉周辺機器にほとんど影響を及ぼさないといえる。

以上に述べたように、現状のHTTRの運転状態を考慮すると、ミキシングプロモータが無い場合でもプレナム及び出口管内で冷却材は混合され、高温配管や加圧水冷却器及び中間熱交換器等の機器に及ぼすホットストリークの影響は小さい。なお、HTTRの炉心改造又は新型炉の設計等で、周辺領域間の温度差が拡大するようなことがあれば、現状のミキシングプロモータのほか、プレナム内で各領域ごとにミキシングプロモータを設けてプレナム内での混合を促進させる方法、或は、出口管内での混合を促進させる方法、例えば出口管入口部の近傍で、出口管内壁部にかくはんリングを設けて内壁に沿って流れる高温の冷却材をはく離させ、低温の冷却材と混合させる等の対策が必要であろう。

5. 結 言

本実験及び解析により、ミキシングプロモータが無い場合の炉床部内の冷却材混合特性、およびミキシングプロモータの効果について以下のことが分かった。

- (1) 中心の入口管に高温の流体が流れた場合、出口管内の流体は $L/D_0=2$ の位置ではその影響により中心部の温度が高くなるが、 $L/D_0=10$ の位置で混合によりほぼ均一な温度になった。
- (2) 周辺の入口管に高温の流体が流れた場合、プレナム内および出口管内での混合が不十分であり、下流に進に従って出口管内の流体の温度差は減少するが、 $L/D_0=20$ の位置でもわずかながら温度差が生じた。
- (3) 上記の特性は、入口管における高温水と低温水の温度差 ΔT および出口管換算のレイノルズ数 Re 。等の試験パラメータに対して依存性が無かった。

- (4) 高温配管や加圧水冷却器及び中間熱交換器等の機器に及ぼすホットストリークの影響を考慮すると、これらの機器が原子炉よりも十分下流にあるため、中心および周辺の入口管に高温の冷却材が流れた場合とも、ミキシングプロモータの効果が小さいことが分かった。
- (5) 解析結果は実験結果とよく一致し、解析によりH T T R 炉床部内の冷却材の熱流動を予測することが可能である。

謝 辞

本試験の実施およびまとめにあたり御助言を頂いた高温工学部次長若山直昭氏、同部 H E N D E L 管理室長下村寛昭氏、高温工学試験研究炉開発部H T T R 計画室長数土幸夫氏、東京理科大学教授河村洋氏に感謝致します。

また、実験に御協力頂いた㈱原子力エンジニアリングの菊地亮紀氏、飛田正浩氏、照沼孝志氏、関山勝博氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 国富ほか：原子力学会誌， vol.30, No.4, 333 (1988)
- (2) 稲垣ほか：原子力学会誌， vol.30, No.5, 427 (1988)
- (3) 功刀ほか：JAERI-M 88-119 (1988)
- (4) 稲垣ほか：日本機械学会， The 1st Inertial Symposium on Supercomputers for Mechanical Engineering 講演論文集， 38 (1988)
- (5) 稲垣ほか：JAERI-M 88-142 (1988)
- (6) 稲垣ほか：日本機械学会論文集 B編， 第55巻 第514号 (1989) pp.1692-1697
- (7) Y. Inagaki et. al., Nucl. Engrg. Des. 123 (1990) pp.76-85

- (4) 高温配管や加圧水冷却器及び中間熱交換器等の機器に及ぼすホットストリークの影響を考慮すると、これらの機器が原子炉よりも十分下流にあるため、中心および周辺の入口管に高温の冷却材が流れた場合とも、ミキシングプロモータの効果が小さいことが分かった。
- (5) 解析結果は実験結果とよく一致し、解析によりH T T R炉床部内の冷却材の熱流動を予測することが可能である。

謝 辞

本試験の実施およびまとめにあたり御助言を頂いた高温工学部次長若山直昭氏，同部 H E N D E L 管理室長下村寛昭氏，高温工学試験研究炉開発部H T T R計画室長数土幸夫氏，東京理科大学教授河村洋氏に感謝致します。

また，実験に御協力頂いた㈱原子力エンジニアリングの菊地亮紀氏，飛田正浩氏，照沼孝志氏，関山勝博氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 国富ほか：原子力学会誌， vol.30, No4, 333 (1988)
- (2) 稲垣ほか：原子力学会誌， vol.30, No5, 427 (1988)
- (3) 功刀ほか：JAERI-M 88-119 (1988)
- (4) 稲垣ほか：日本機械学会， The 1st International Symposium on Supercomputers for Mechanical Engineering 講演論文集， 38 (1988)
- (5) 稲垣ほか：JAERI-M 88-142 (1988)
- (6) 稲垣ほか：日本機械学会論文集 B編， 第55巻 第514号 (1989) pp.1692-1697
- (7) Y. Inagaki et. al., Nucl. Engrg. Des. 123 (1990) pp.76-85

- (4) 高温配管や加圧水冷却器及び中間熱交換器等の機器に及ぼすホットストリークの影響を考慮すると、これらの機器が原子炉よりも十分下流にあるため、中心および周辺の入口管に高温の冷却材が流れた場合とも、ミキシングプロモータの効果が小さいことが分かった。
- (5) 解析結果は実験結果とよく一致し、解析により H T T R 炉床部内の冷却材の熱流動を予測することが可能である。

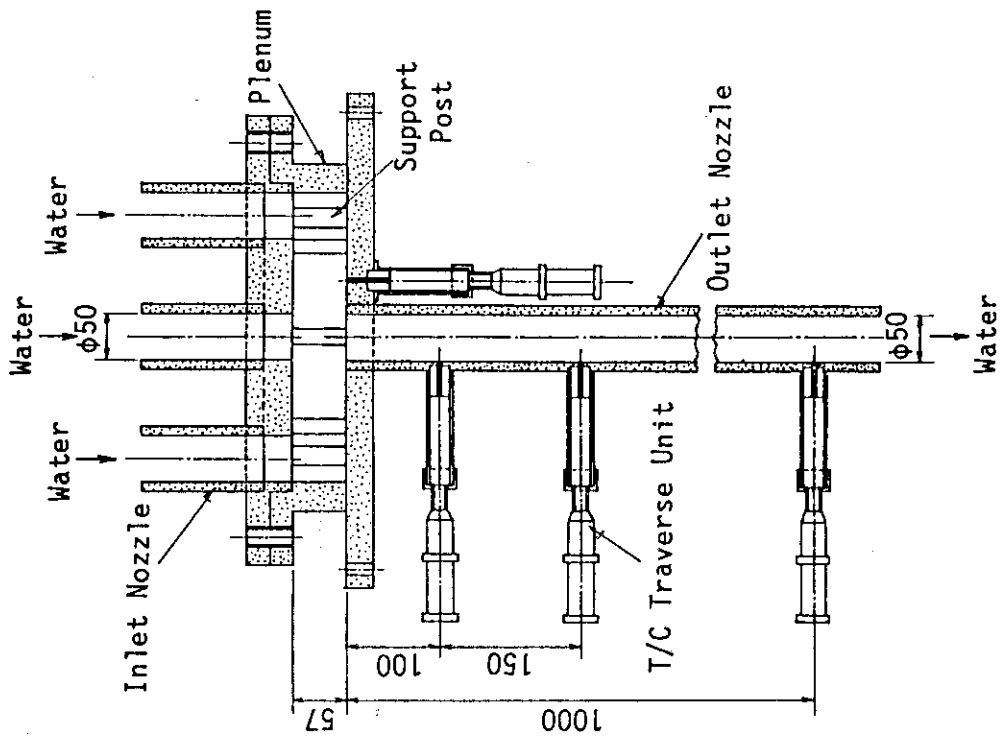
謝 辞

本試験の実施およびまとめにあたり御助言を頂いた高温工学部次長若山直昭氏、同部 H E N D E L 管理室長下村寛昭氏、高温工学試験研究炉開発部 H T T R 計画室長数土幸夫氏、東京理科大学教授河村洋氏に感謝致します。

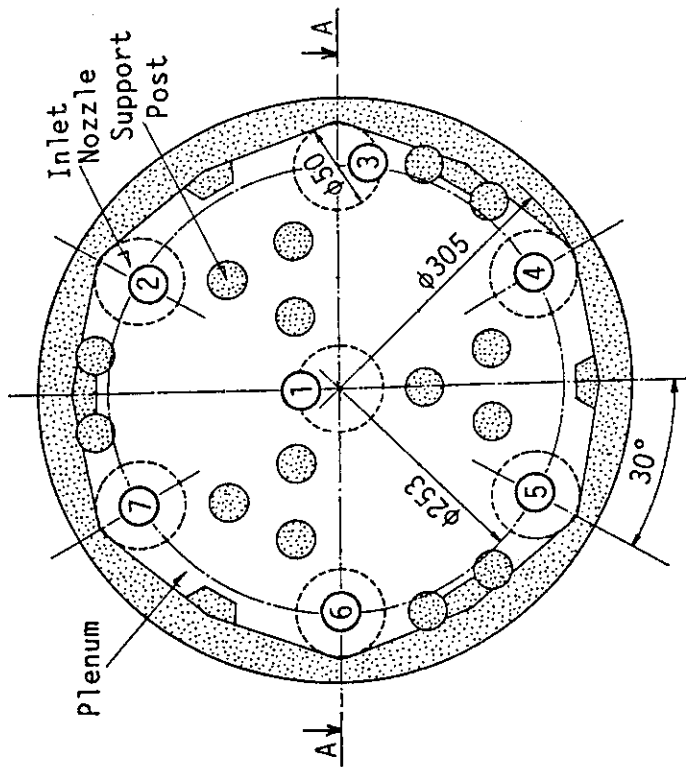
また、実験に御協力頂いた㈱原子力エンジニアリングの菊地亮紀氏、飛田正浩氏、照沼孝志氏、関山勝博氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 国富ほか：原子力学会誌， vol.30, No.4, 333 (1988)
- (2) 稲垣ほか：原子力学会誌， vol.30, No.5, 427 (1988)
- (3) 功刀ほか：JAERI-M 88-119 (1988)
- (4) 稲垣ほか：日本機械学会， The 1st International Symposium on Supercomputers for Mechanical Engineering 講演論文集， 38 (1988)
- (5) 稲垣ほか：JAERI-M 88-142 (1988)
- (6) 稲垣ほか：日本機械学会論文集 B編， 第55巻 第514号 (1989) pp.1692-1697
- (7) Y. Inagaki et. al., Nucl. Engrg. Des. 123 (1990) pp.76-85



b) Longitudinal view (A-A cross section)



a) Plane view

Fig. 2.1 One-seventh scale test model of core bottom structure

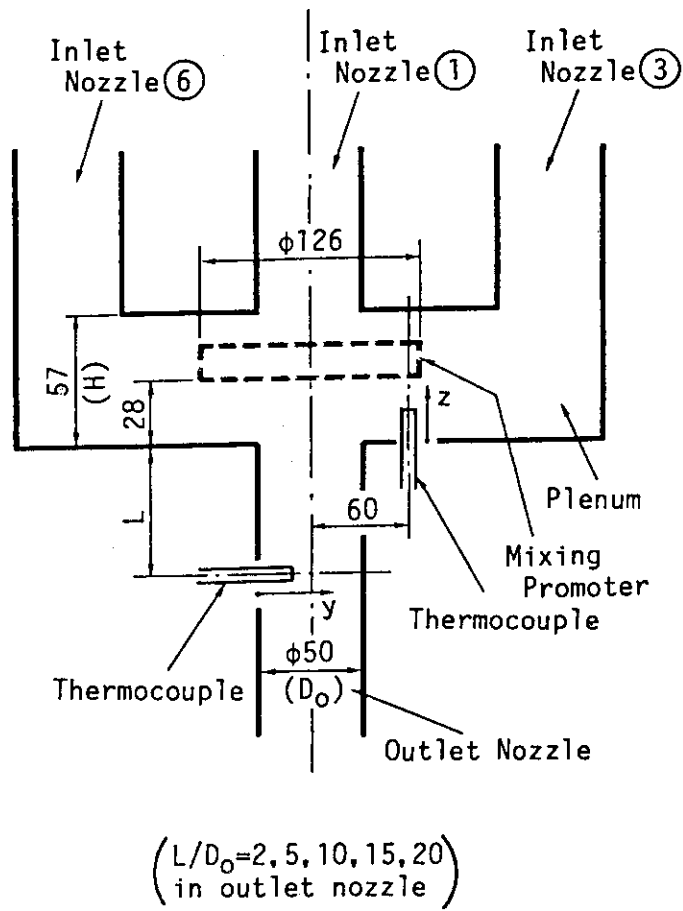
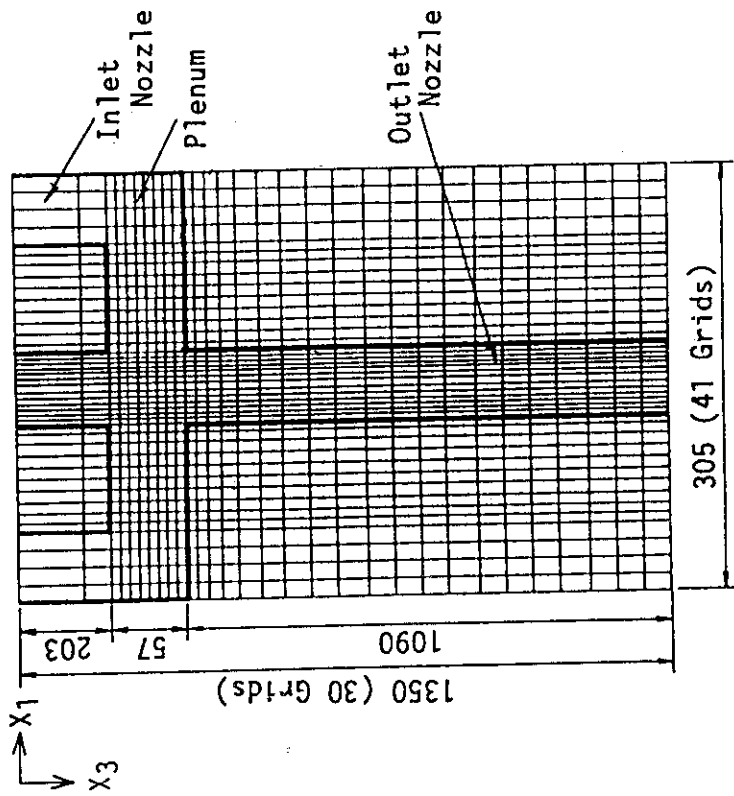
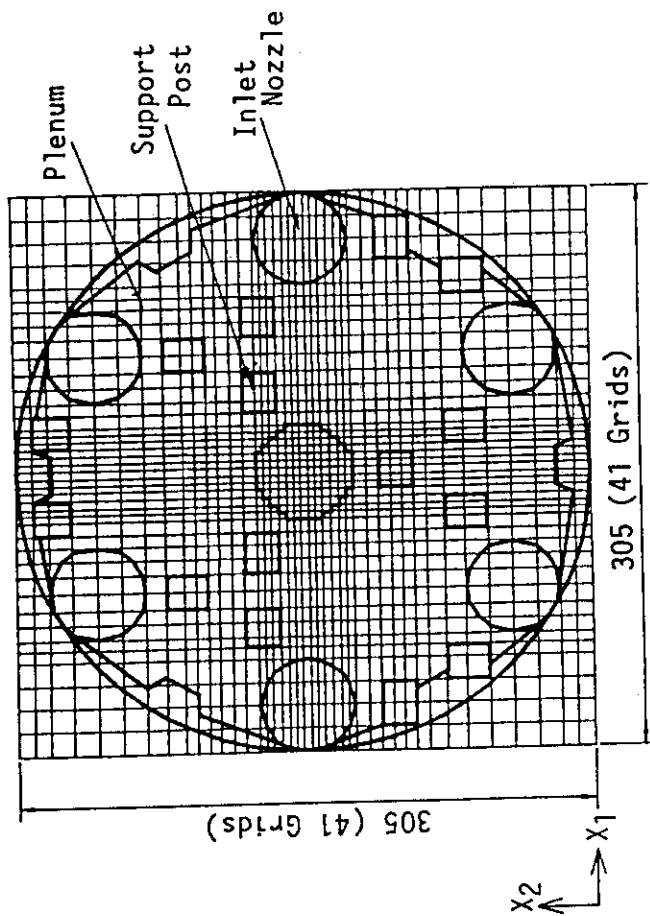


Fig. 2.2 Temperature measuring position in test model



b) Longitudinal section (X_1 - X_3 direction)



a) Cross section (X_1 - X_2 direction)

Fig. 3.1 Numerical model of test section

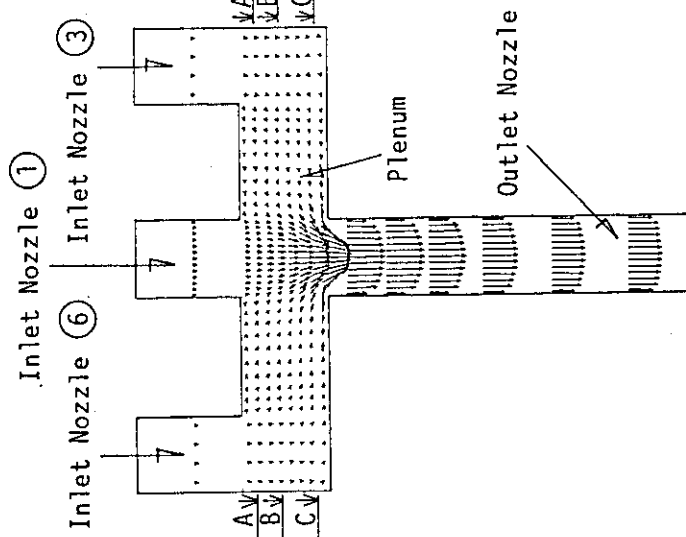


Fig. 4.1 Velocity vector
(X_1 - X_3 direction)

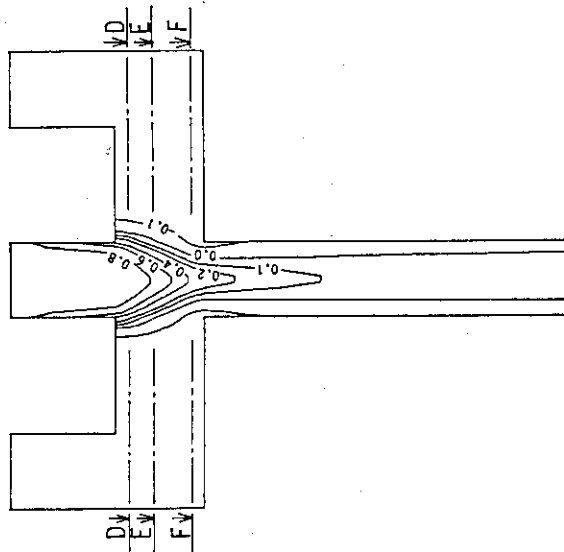


Fig. 4.2 Temperature profile
hot water in inlet
nozzle (1) X_1 - X_3
direction

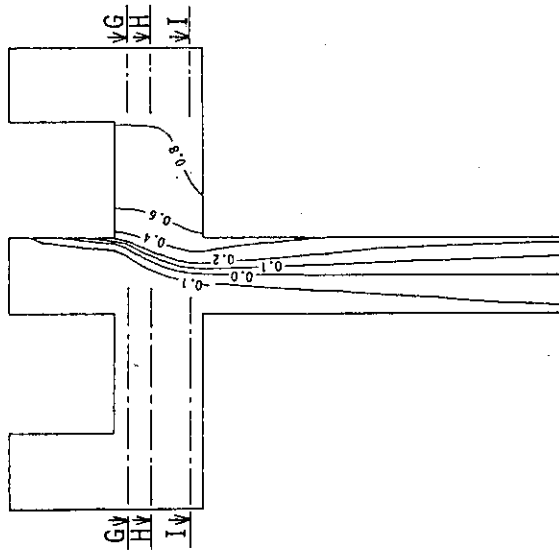


Fig. 4.3 Temperature profile
hot water in inlet
nozzle (3) X_1 - X_3
direction

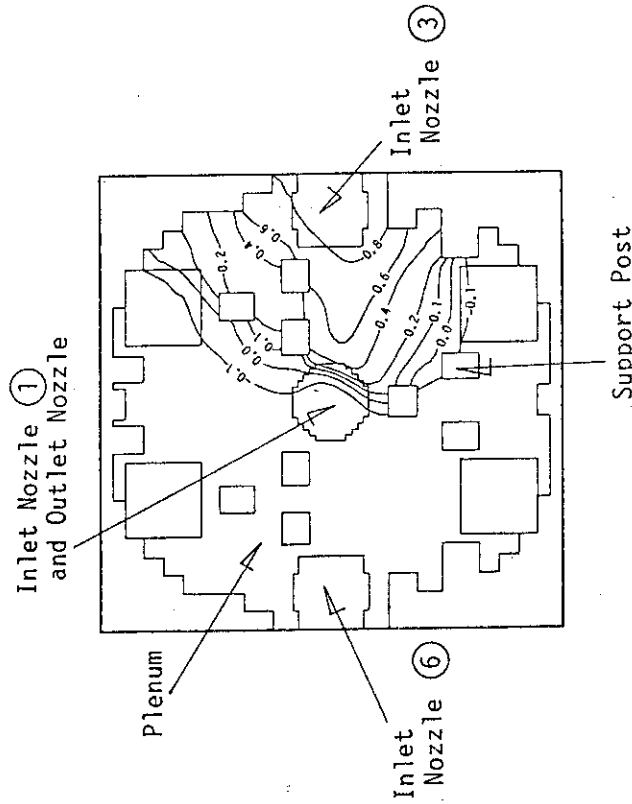


Fig. 4.4 Velocity vector in plenum (X_1 - X_2 direction) (A-A cross section)

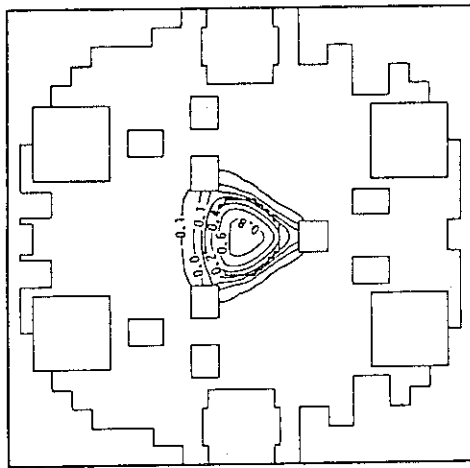


Fig. 4.5 Temperature profile in plenum (hot water in inlet nozzle ① X_1 - X_2 direction, D-D cross section)

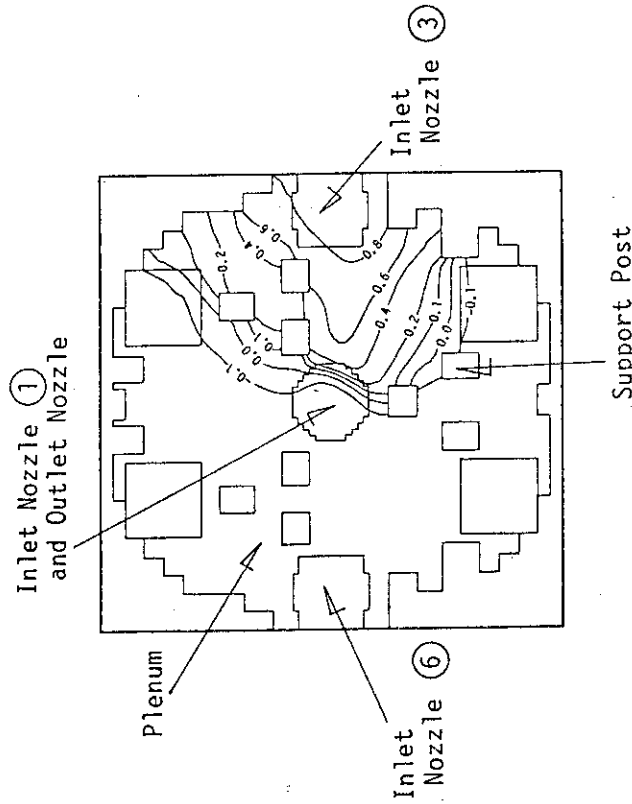


Fig. 4.6 Temperature profile in plenum (hot water in inlet nozzle ③ X_1 - X_2 direction, G-G cross section)

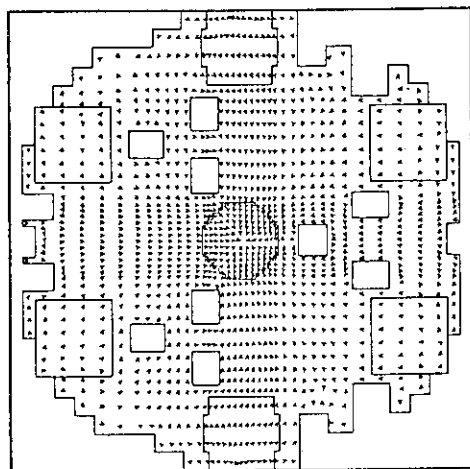


Fig. 4.7 Velocity vector in plenum
(X_1 - X_2 direction)
(B-B cross section)

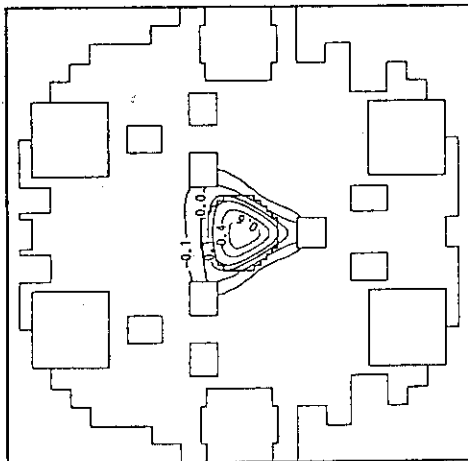


Fig. 4.8 Temperature profile
in plenum
hot water in inlet
nozzle ① X_1 - X_2
direction, E-E
(cross section)

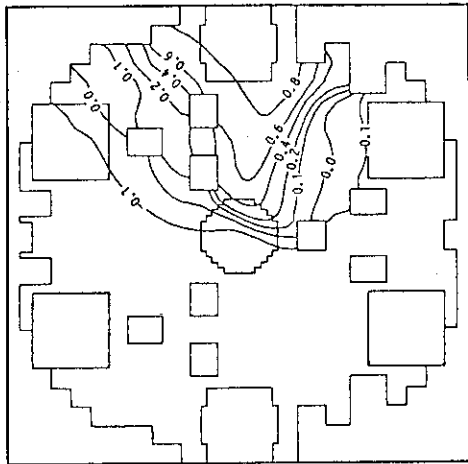


Fig. 4.9 Temperature profile
in plenum
hot water in inlet
nozzle ③ X_1 - X_2
direction, H-H
(cross section)

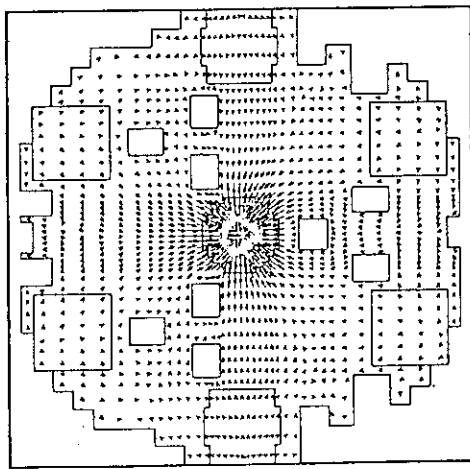


Fig. 4.10 Velocity vector in plenum
(X_1 - X_2 direction)
(C-C cross section)

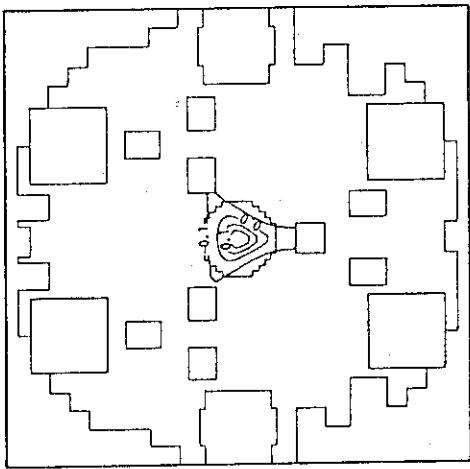


Fig. 4.11 Temperature profile
in plenum
hot water in inlet
nozzle ① X_1 - X_2
direction, F-F
cross section

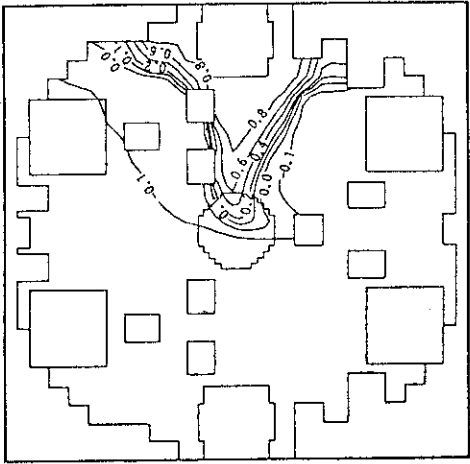


Fig. 4.12 Temperature profile
in plenum
hot water in inlet
nozzle ③ X_1 - X_2
direction, I-I
cross section

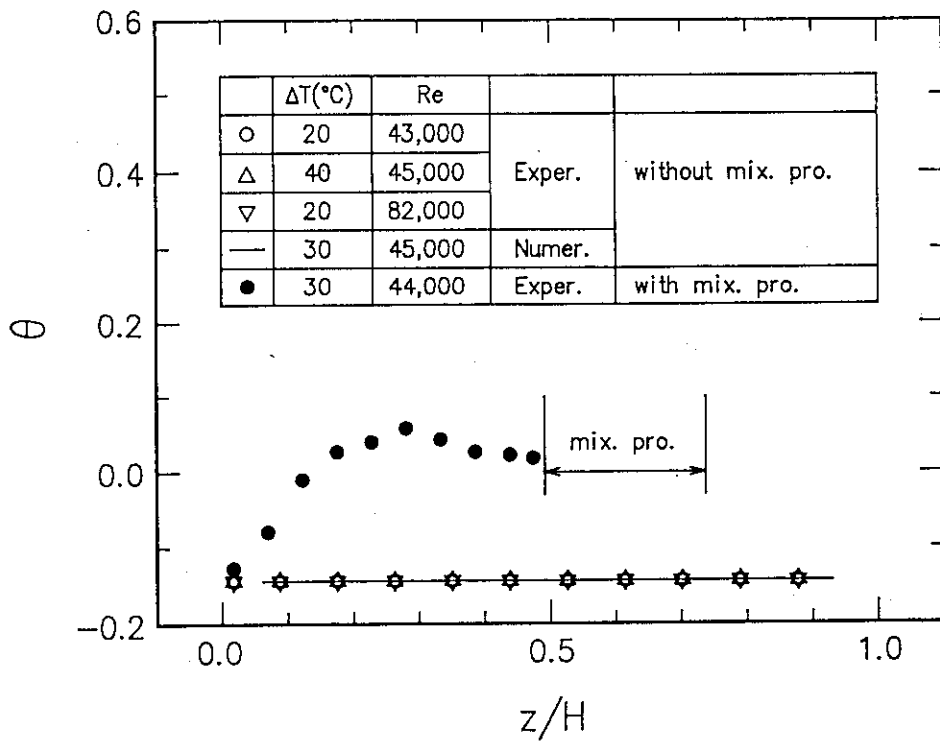


Fig. 4.13 Temperature distribution across vertical direction in plenum (hot water in inlet nozzle ①)

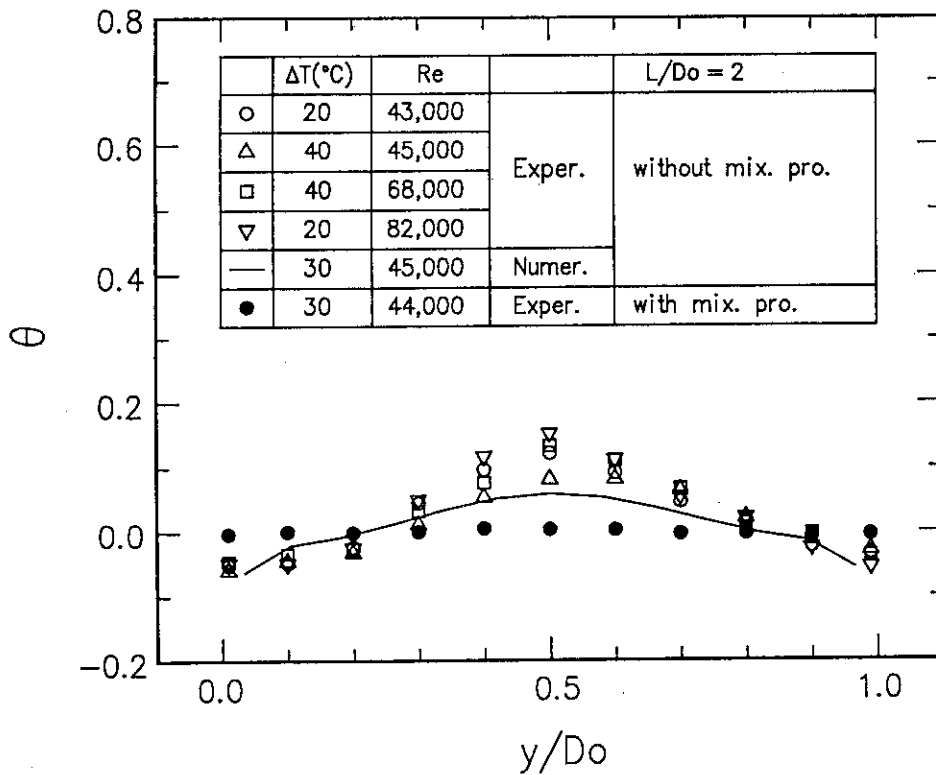


Fig. 4.14 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ①)

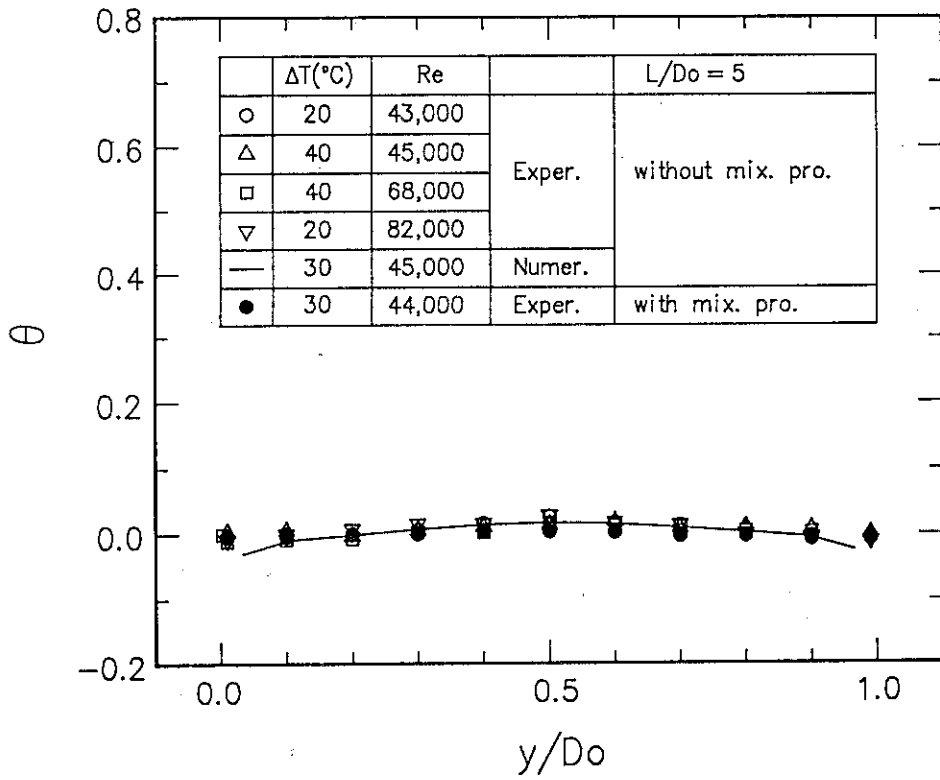


Fig. 4.15 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ①)

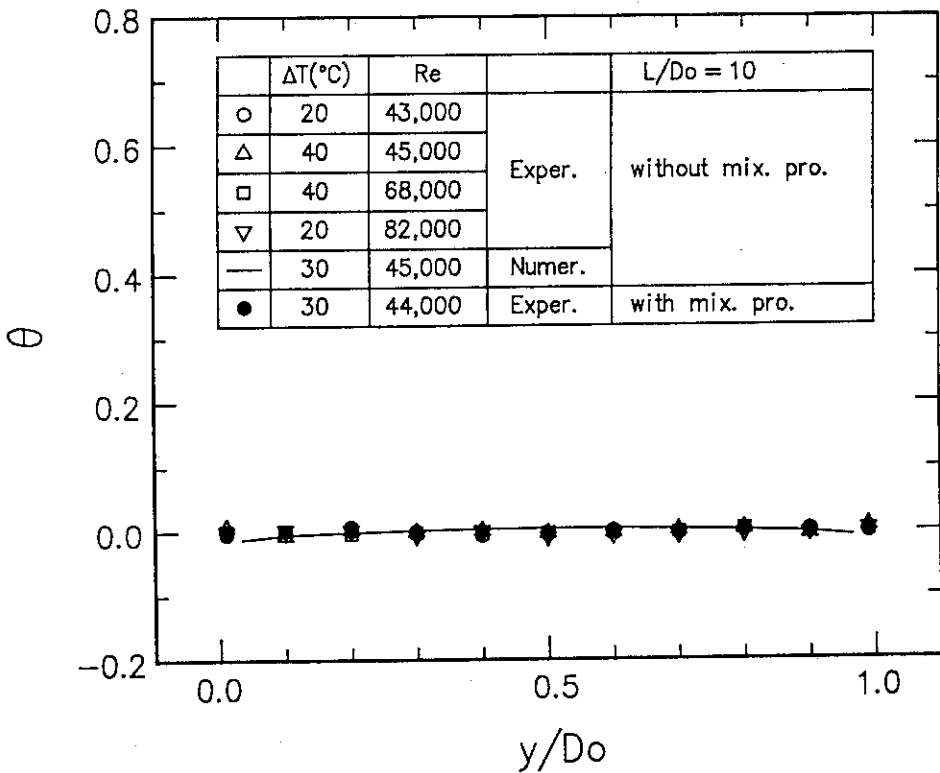


Fig. 4.16 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ①)

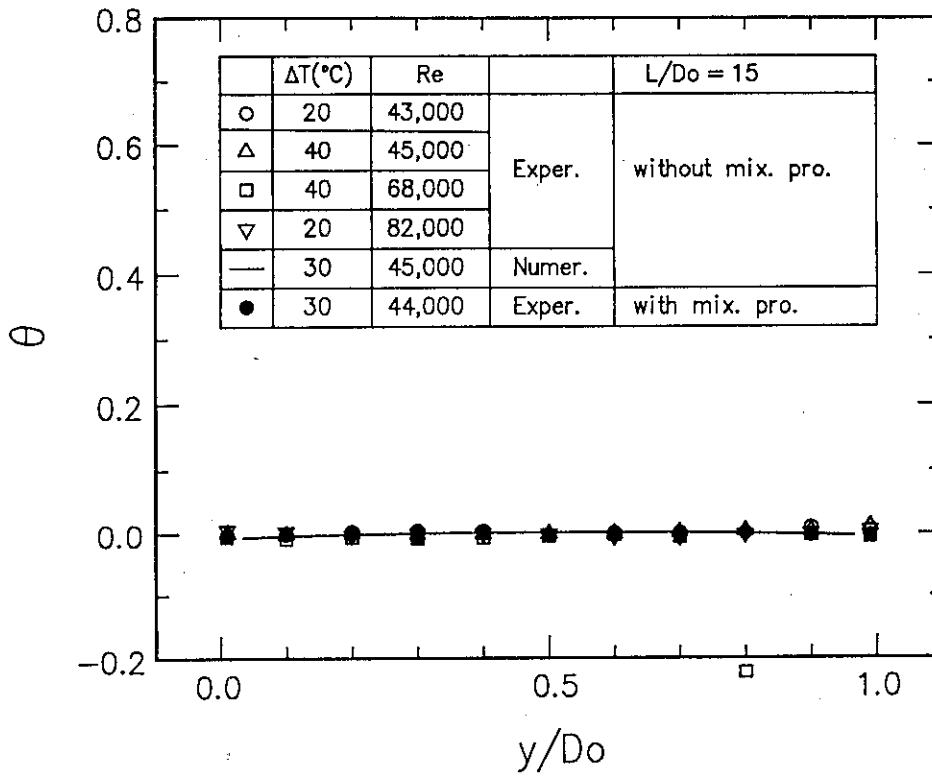


Fig. 4.17 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ①)

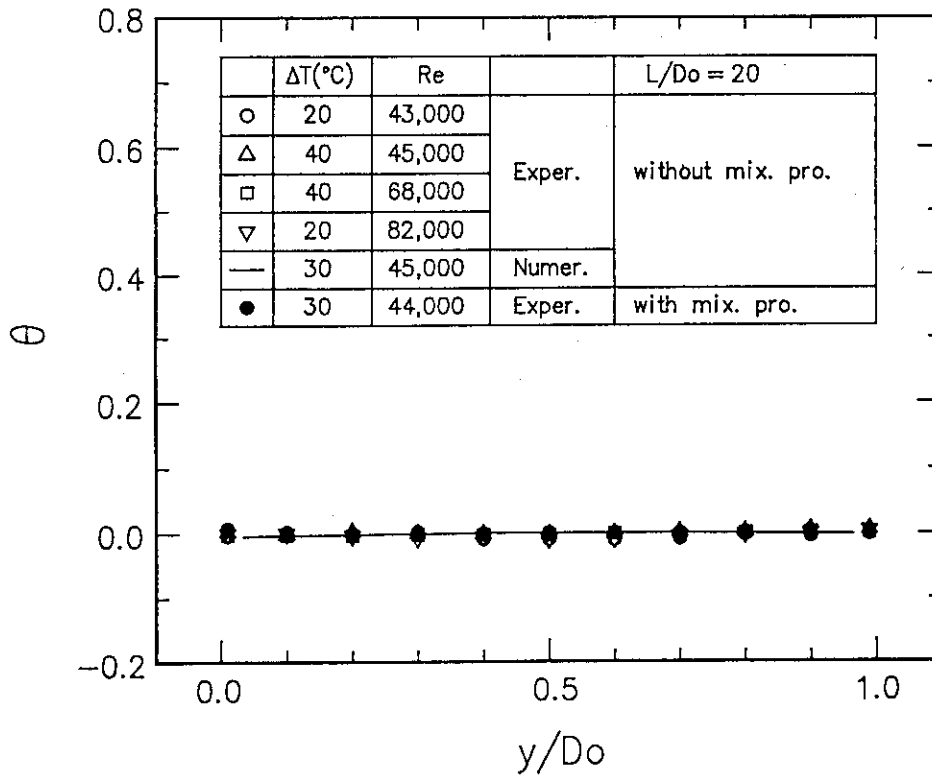


Fig. 4.18 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ①)

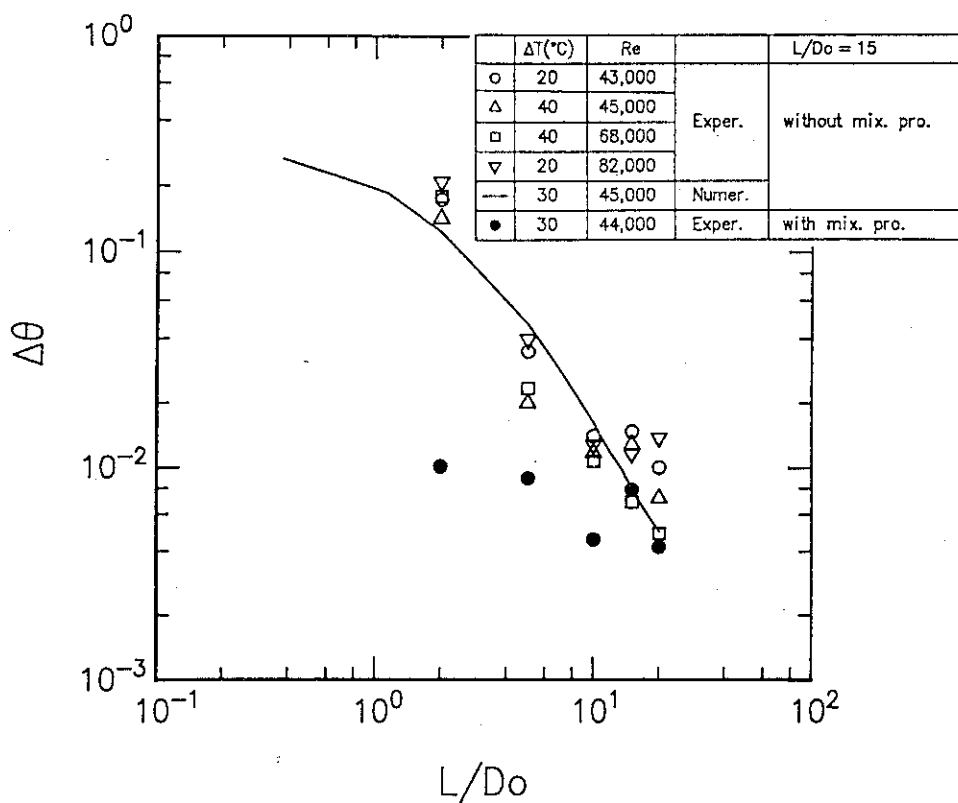


Fig. 4.19 Radial temperature difference in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ①)

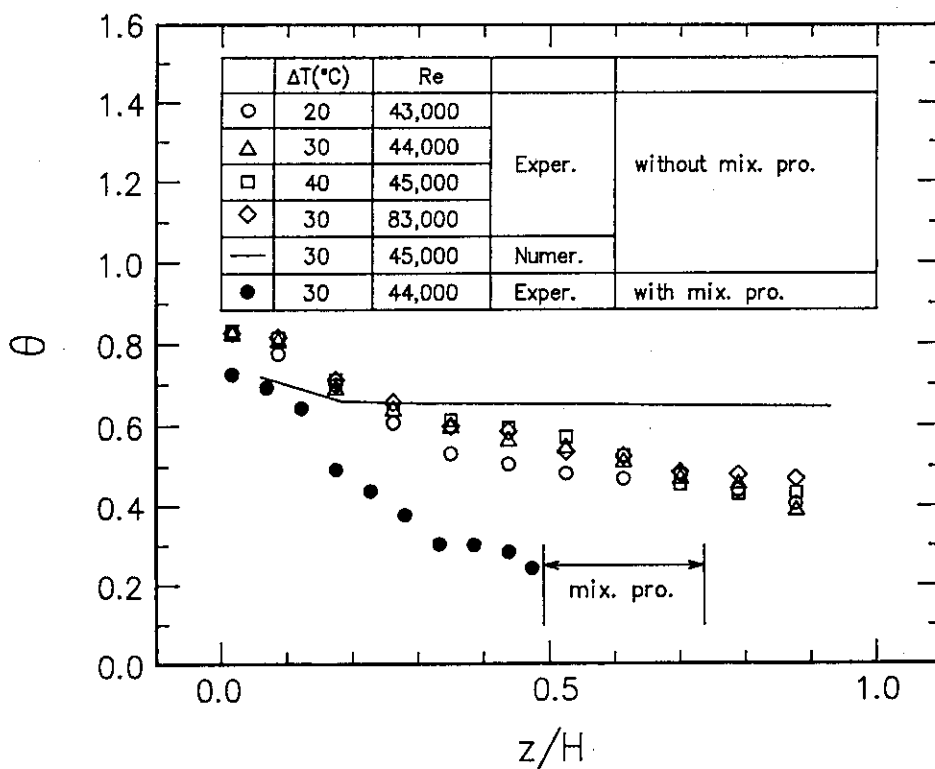


Fig. 4.20 Temperature distribution across vertical direction in plenum (hot water in inlet nozzle ③)

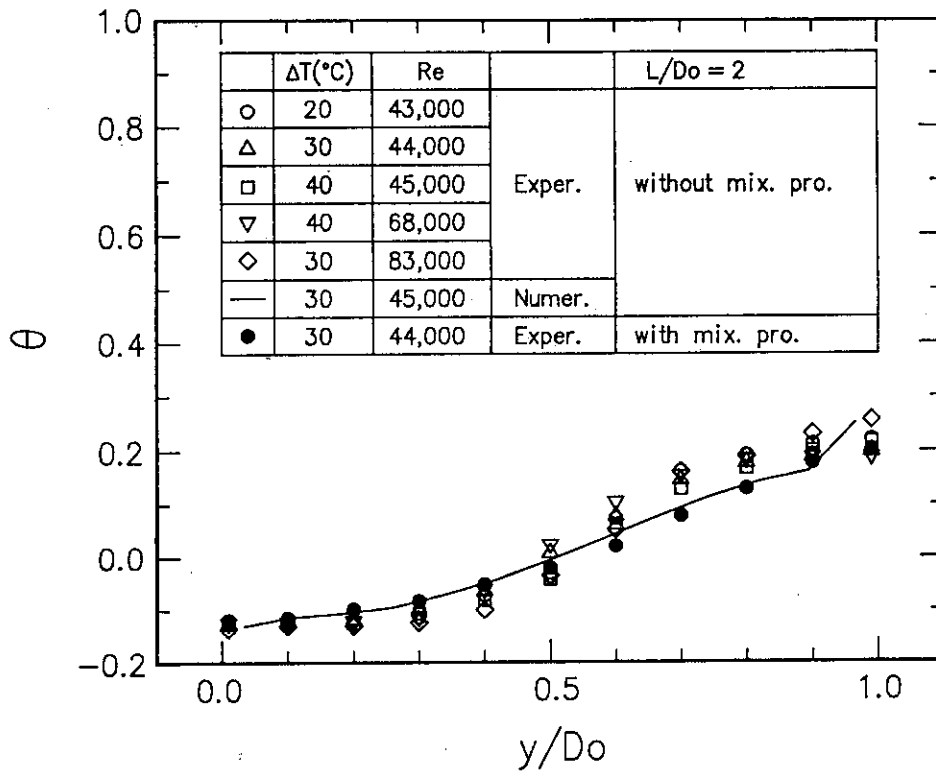


Fig. 4.21 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ③)

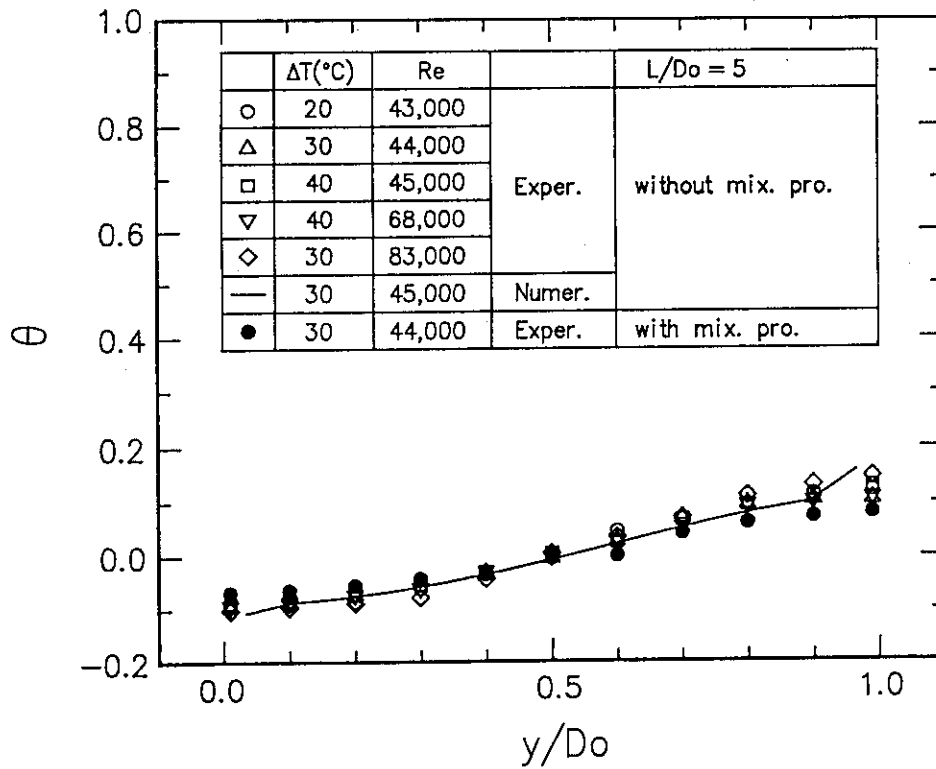


Fig. 4.22 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ③)

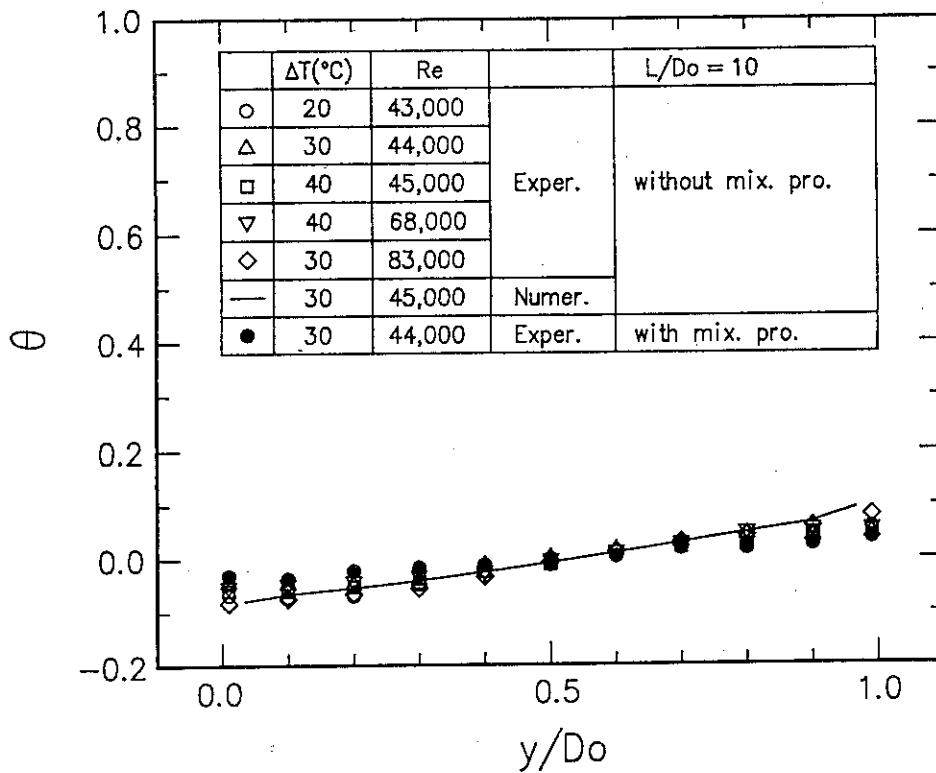


Fig. 4.23 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ③)

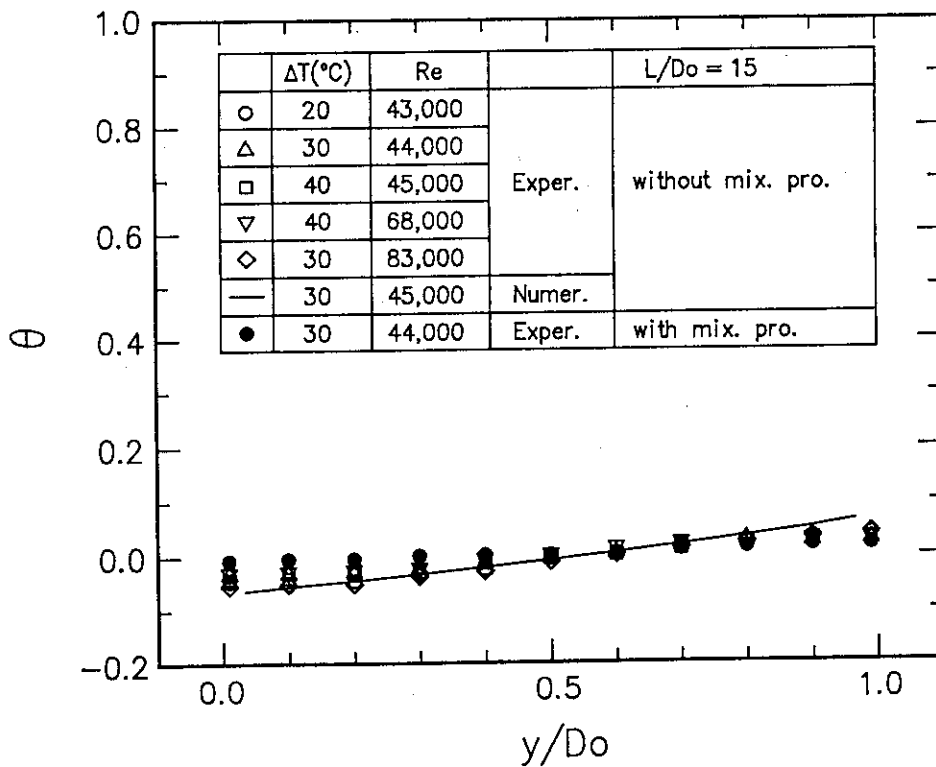


Fig. 4.24 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ③)

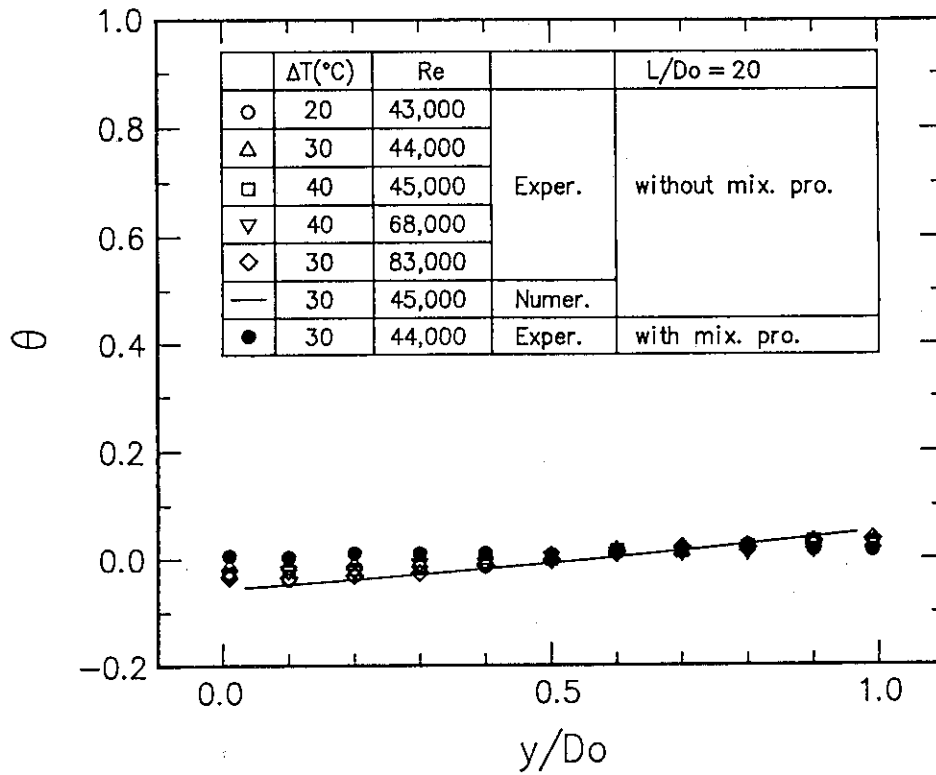


Fig. 4.25 Radial temperature distribution in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ③)

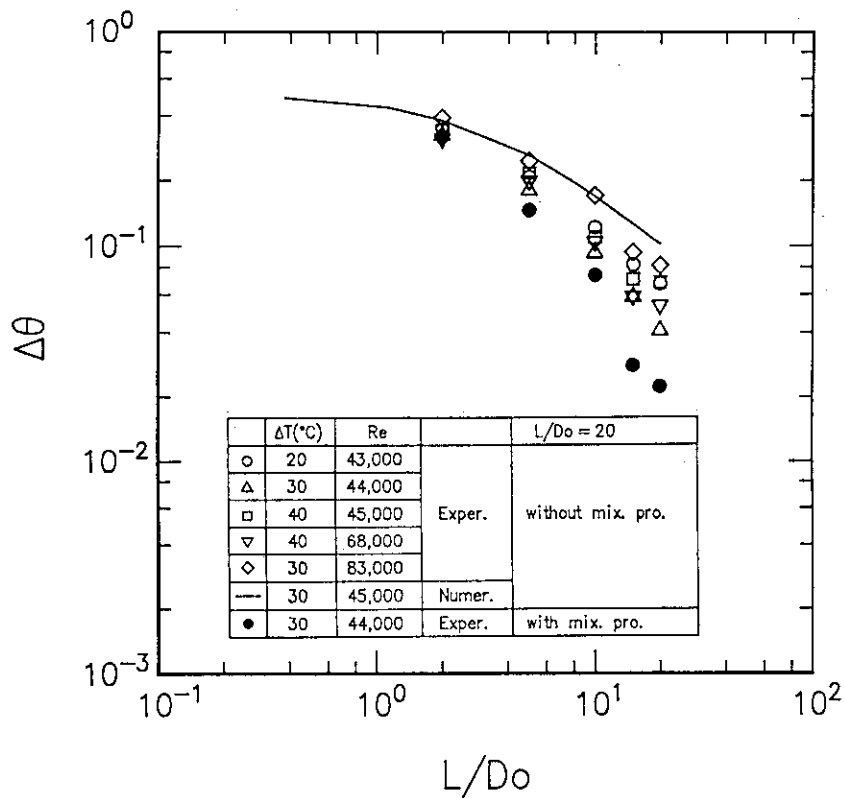


Fig. 4.26 Radial temperature difference in outlet nozzle (hot water in inlet nozzle ③)

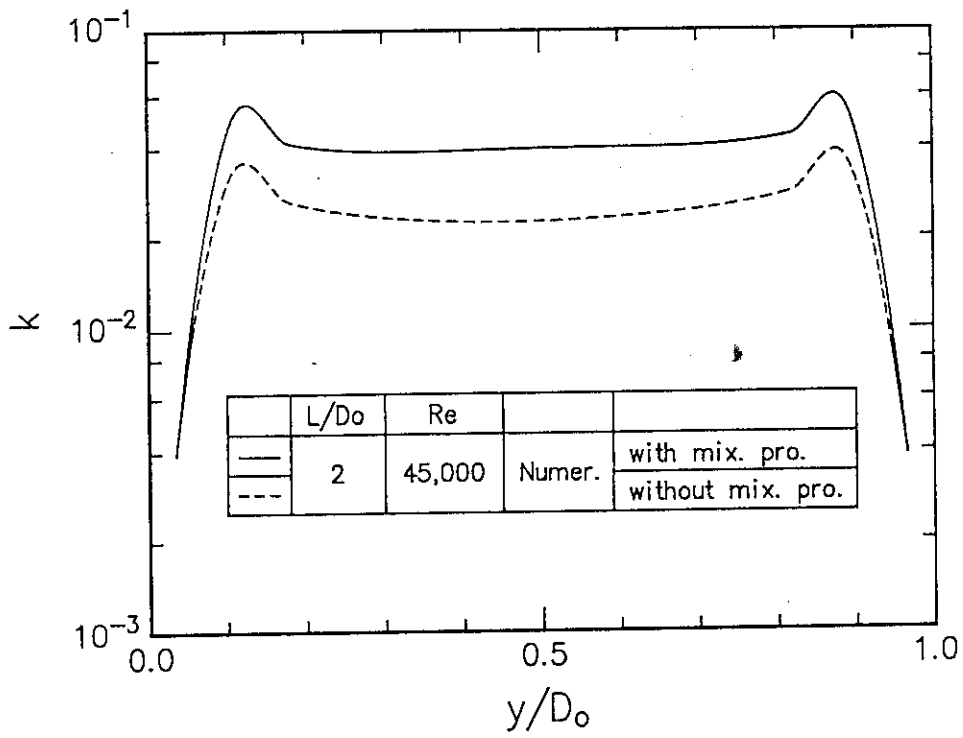


Fig. 4.27 Radial distribution of kinetic energy in outlet nozzle