

区分変更	
変更後資料番号	111
決裁年月日	平成 13 年 7 月 31 日



「もんじゅ」炉外燃料貯蔵槽自然循環試験(第1報)

—— 1/10縮尺全周モデル試験 ——



1985年10月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	N 941 85-152
<p>この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室</p>	

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

「もんじゅ」炉外燃料貯蔵槽自然循環試験(第1報)

——1/10縮尺全周モデル試験——



宮越 博幸* 林 謙二*
村上 隆典* 佐藤和二郎

要 旨

「もんじゅ」炉外燃料貯蔵槽内における自然循環熱流動特性を把握するため、水を作動流体として、単純形状の縮少モデル試験を実施した。試験では、モデル内の温度分布測定、冷却コイル近傍の流速測定および流況観察により、定常状態における自然循環時の熱流動特性に関するデータを得た。また、ここで得られたデータと COMMIX-DRACS コードによる解析結果とを比較し、自然循環流れに対するコードの解析機能およびモデル化の検討を行った。

モデル内の流れは極めて複雑で、不規則な周期で変動しているが、周方向の温度不均一はなく流れはほぼ軸対称であることが確認できた。モデルの軸方向温度分布および流況に関する解析結果と実験結果とは比較的よく一致した。よって、COMMIX-DRACS コードは本報で検討した冷却コイル部のモデル化や数値解析手法により、実機の除熱性能の評価に適用できる。

* 大洗工学センター，安全工学部，高速増殖炉工学室



OFFICIAL USE ONLY
PCN N941 85-152
Oct., 1985

Decay Heat Removal by Natural Circulation in the Monju
Ex-Vessel Storage Tank (I)

- 1/10-Scale Simple Geometry Model Test -

H. Miyakoshi*, K. Hayashi*
T. Murakami* and K. Satoh*

Abstract

A simple geometry model test was performed to study natural circulation thermohydraulics in the Monju Ex-Vessel Storage Tank (EVST), using water as a working fluid. Thermohydraulic data in steady state natural circulation were obtained from measurements of temperature, velocity and flow pattern profiles. Also, analytical results by COMMIX-DRACS were compared with experiments to examine applicability of the code to the buoyancy dominated flow.

The flow in the model is extremely complex and varies in space and time, however, it is confirmed that temperature variations in circumferential directions are nearly uniform.

COMMIX-DRACS results indicate relatively good agreement with the basic physical effects shown by the experimental data. Both analytical flow and temperature profiles match with experiments.

Thus, the COMMIX-DRACS code is capable of predicting thermohydraulics in the Monju EVST by the use of the proposed analytical model in the present paper.

* FBR Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division.
O-arai Engineering Center, PNC.

List of Tables

Table 3-1	Results of Temperature Distribution Measurements at $\theta = 0^\circ$ Cross Section	16
Table 3-2	Results of Circumferential Temperature Distributions	17
Table 3-3	Results of Velocity Distribution Measurements	18

List of Figures

Fig. 2-1	Peclet Number Ratio between a Scaled Water Model and the Monju EVST	19
Fig. 2-2	Monju Ex-Vessel Storage Tank	20
Fig. 2-3	1/10-Scale EVST Test Model	21
Fig. 2-4	Schematic of Test Apparatus	22
Fig. 2-5	Locations of Thermocouples at $\theta = 0^\circ$ Cross Section	23
Fig. 2-6	Locations of Thermocouples in Circumferential Directions ..	24
Fig. 2-7	Velocity Measurement Locations	25
Fig. 2-8	LDV (Laser Doppler Velocimeter) System	26
Fig. 3-1	Flow Pattern in the Upper Region with Shutter Speed 2 sec..	27
Fig. 3-2	" " " 4 sec..	28
Fig. 3-3	" " " 8 sec..	29
Fig. 3-4	" Middle Region " 2 sec..	30
Fig. 3-5	" " " 4 sec..	31
Fig. 3-6	" " " 8 sec..	32
Fig. 3-7	" Lower Region " 1 sec..	33
Fig. 3-8	" " " 2 sec..	34
Fig. 3-9	" " " 4 sec..	35
Fig. 3-10	" " " 8 sec..	36
Fig. 3-11	Temperature Distribution	37
Fig. 3-12	Circumferential Temperature Distributions	38
Fig. 3-13	Velocity Distribution in the Outer Annulus at the Upper Section	39
Fig. 3-14	Velocity Distribution in the Outer Annulus at the Middle Section	40
Fig. 3-15	Velocity Distribution in the Outer Annulus at the Lower Section	41
Fig. 4-1	Mesh Partitionings of Analytical Models	42
Fig. 4-2	Modelings of Cooling Coils	43
Fig. 4-3	Analitical Temperature Patterns for Case 1 and Case 2	44
Fig. 4-4	Analitical Velocity Vector Plots for Case 1 and Case 2	45
Fig. 4-5	Temperature Profile in the Each Analytical Model	46
Fig. 4-6	Flow Pattern in the Each Analytical Model	47
Fig. 4-7	Comparisons of Analytical and Experimental Axial Temperature Distributions in the Test Model	48

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置および試験方法	2
2.1 試験装置の相似性	2
2.2 試験装置	3
2.3 試験方法	4
(1) 流況観察	4
(2) 温度分布測定	4
(3) 流速測定	4
3. 試験結果	6
3.1 流況観察	6
3.2 温度分布測定	7
3.3 流速測定	8
4. 解 析	9
4.1 解析体系	9
4.2 解析条件	10
4.3 解析結果	10
5. ま と め	13
謝 辞	14
参考文献	15

1. 緒 言

「もんじゅ」炉外燃料貯蔵槽（以下、EVSTと記す）は使用済燃料の崩壊熱減衰を目的とする貯蔵設備である。「もんじゅ」EVSTの冷却方式は従来、1次・2次冷却系からなる強制循環方式であったが、合理化設計により1次冷却系を削除し、2次冷却系のみによる直浸コイル冷却方式に変更された。直浸コイル冷却方式では、EVST内の使用済燃料発熱部と冷却コイル間の冷却材密度差によって起こる自然循環現象により発熱部の除熱を行う。しかし、このような低熱流束下における自然循環現象は他にあまり例がなく、EVSTの構造を考えると冷却材の流れも複雑な様相を呈することが予想される。したがって、このような条件下における冷却材の熱流動現象を実験的に確認し、解析コードの検証および適切なモデル化の検討を行うことは、実機EVSTの除熱特性を評価するうえで重要である。

本試験はEVST内の基本的な流況の把握を目的として、単純形状の1/10スケールモデルにより、内部の温度分布測定、レーザによる流速測定および流況観察を実施したものである。本試験結果は多次元熱流力解析コードCOMMIX-DRACSによる解析結果と比較され、解析コードの適用性を検討することにより、実機EVSTの除熱特性の評価に反映される。

2. 試験装置および試験方法

2.1 試験装置の相似性

容器内の自然循環流量は単純な自然循環ループを仮定すると、自然循環ヘッド $\phi \rho g dL$ とループの圧力損失 $\phi f \frac{\rho U^2}{2} \frac{dL}{D}$ とのバランスにより決まる。これらは L の関数であるが、ループ内の温度 T を知るにより求まる。よって、自然循環流れにおいては温度分布の相似性が重要なパラメータになる。そこで、ここでは温度分布についてモデルに要求される縮尺比と熱入力との関係を検討する。

水とナトリウム体系における平均質量流量比 M_R (添字 R は比率を表わす) は、

$$M_R = (u_o \rho g L^2)_R \quad (1)$$

により表わせる。このとき u_o は自然循環流れにおける基準流速であるが、これは浮力による駆動力から導かれる。⁷⁾

$$u_o = (g \beta \Delta T L)^{1/2} \quad (2)$$

また、水とナトリウム体系における流速および温度の比は、それぞれ次式で表わせる。

$$(u_o)_R = \frac{M_R}{g \rho_R L_R^2} \quad (3)$$

$$\Delta T_R = \frac{Q_R}{M_R \cdot C_R} \quad (4)$$

温度分布の相似性については、エネルギー式の無次元表示式から得られるペクレ数 ($Pe = \frac{UL}{a}$; 対流と伝導によるエネルギー輸送の比) を一致させる必要があるので、

$$(Pe)_R = \frac{U_R L_R}{a^2} \quad (5)$$

が相似条件となる。上式の(2)~(4)式を用いると $(Pe)_R$ は以下のように表わせる。

$$(Pe)_R = \frac{(\beta_R \rho_R^2 C_R^2)^{1/3}}{\lambda_R} \cdot (L_R^2 Q_R)^{1/3} \quad (6)$$

水およびナトリウムの温度を、それぞれ 220°C および 15°C とし、それらの温度における物性値から(6)式は、

$$(Pe)_R = 278 \cdot (L_R^2 Q_R)^{1/3} \quad (7)$$

と書き直せる。(7)式から実機 EVST の定格運転における出力を 660 kw とし、縮小水試験モデルの熱出力がそれぞれ 0.01 , 0.1 および 1.0 kw のときの水試験モデルの縮尺比と $(Pe)_R$ との

関係を求めると、Fig. 2-1 が得られる。この図から、モデルの縮尺比とみては $1/10 \sim 1/20$ 、熱出力は 0.01 kw 程度で相似条件を満足できることがわかる。

上記の検討結果から、本試験のモデルの縮尺比は $1/10$ 、ヒータの最大加熱容量は 1.5 kw とした。試験は、モデル内の流速をある程度測定可能な数 mm/sec 程度にする必要があるため、最終的には装置の最大加熱容量で実施した。Fig. 2-1 によれば、この条件の時の $(P_e)_R$ は約 8 となるが、装置はあらかじめ伝熱中心差が実機より小さくなるように設計したので、試験は $(P_e)_R \approx 3$ 程度の条件で実施できた。よって、本モデル内の温度分布（特に、冷却コイル近傍）はほぼ実機に近い条件になっていると考えられる。

〔記号表〕

a : 温度伝導度 $(= \frac{\lambda}{\rho g C})$

C : 比熱

D : 直径

f : 摩擦損失係数

g : 重力加速度

L : 長さ

M : 質量流量

Q : 発熱量

P_e : ペクレ数 $(= \frac{UD}{a})$

ΔT : 温度差

U : 流速

ρ : 密度

λ : 熱伝導率

添字 R : 実機とモデルの比率

2.2 試験装置

試験装置は実機 EVST (Fig. 2-2) を約 $1/10$ の縮尺で模擬した試験部および冷却系から構成されている。試験部は可視化による流況観察およびレーザによる流速測定を行うため、透明アクリル製としている。その内部には Fig. 2-3 に示すように、EVST を簡略に模擬した内筒、外筒、ヒータおよび冷却コイルが設置されている。ヒータはマイクロヒータをコイル状に巻き付けたもので、スライダックにより電力供給量を調節する。冷却コイルは外径 12.7 mm 、厚さ 0.8 mm の銅管で、コイルの試験部出入口には除熱量を測定するための熱電対を取り付けている。これらのヒータと冷却コイルは外筒で仕切られている。試験容器は正方形断面の水ジャケットで囲み、円筒形状試験容器のレンズ効果を補正している。容器全体は放熱を防ぐため厚さ 50 mm のグラスウールで断熱した。

Fig. 2-4 に試験装置のフローシートを示す。冷却系は冷却器、循環ポンプ、流量計および冷却タンクから構成されている。冷却器は 2,000 kcal/h の冷却能力を有し、ON-OFF制御で冷却タンク内の温度調節を行うことにより、冷却コイル入口温度を一定に保つようになっている。

2.3 試験方法

試験装置に蒸留水を補充した後、下記条件で運転を開始し、定常状態における温度分布測定、流速分布測定および流況観察を行った。なお、温度分布測定時は断熱効果を上げるため、水ジャケット内の水は抜くようにした。

<試験条件>

ヒータ電圧	137.5	V
ヒータ電流	10.85	A
加熱容量	1,492	W
冷却タンク設定温度	10.0	°C
冷却水流量	0.90	m ³ /h
冷却コイル入口測定温度	11.04	°C
冷却コイル出口測定温度	12.40	°C
除熱容量	1,425	W
ヒートバランス	95.5	%

(1) 流況観察

流況観察に先だちトレーサの選択を行い取扱いが容易で反射光の強いアルミ粉を用いることにした。アルミ粉は水中に混入しにくいいため、アルコールと混ぜ合わせ試験部上部より注入した。流況の観察はアルミ粉の重力による沈降の影響を小さくするため、注入後一定時間を置き、粒子径の大きなアルミ粉が沈殿した後に行うようにした。流況は試験部側面よりスリット光（5 mm幅）を入射し、目視による観察および写真撮影により確認した。写真撮影時のシャッター時間は、1、2、4 および 8 秒の 4 ケースとした。

(2) 温度分布測定

試験容器内の半径方向温度分布は Fig. 2-5 に示す 40 箇所固定したケース型熱電対（CA、外径 0.5 または 1.0 mm）で測定した。また、周方向温度分布については、Fig. 2-6 に示す移動可能な 10 本の熱電対（同上）により測定した。これらの温度データはデータ収録システム（YODAC-80）を用い、温度分布およびヒートバランスから試験容器内の流れが定常状態であることを確認後採取した。

(3) 流速測定

流速測定は Fig. 2-7 に示す 105 箇所について実施した。測定の際、保温材は測定に必要な部分のみを切り取り、放熱の影響をできるだけ小さくした。

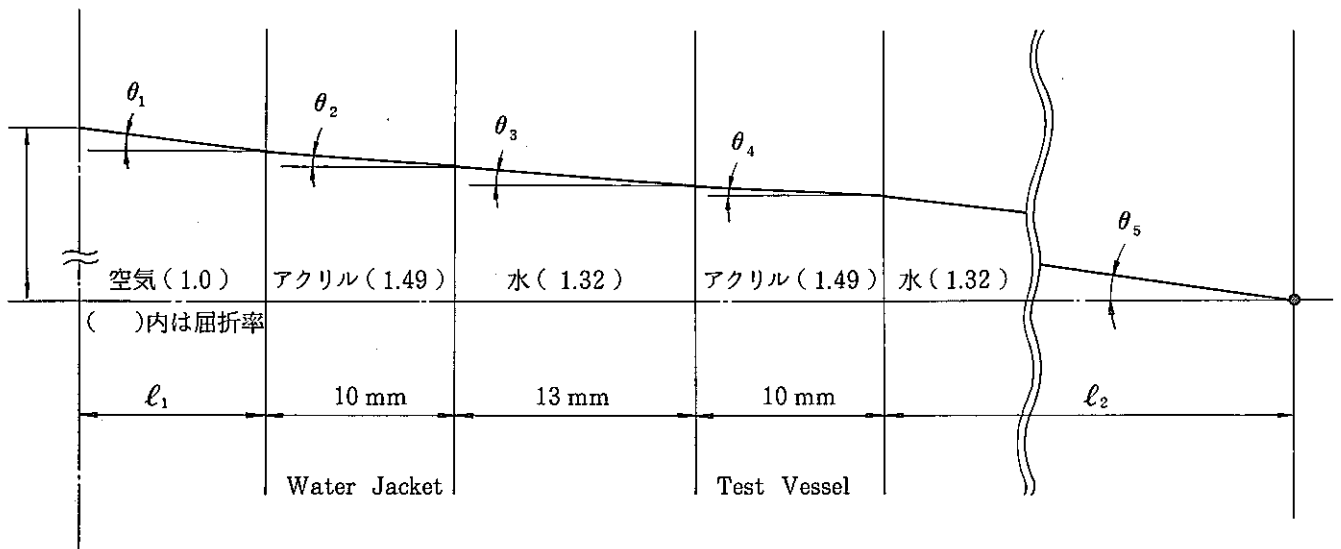
計測は Fig. 2-8 に示す計測システムを用いて実施し、計測された散乱光の周波数から流速を算出した。この散乱光の周波数と流速 (V : m/sec) には次式の関係が成立する。

$$V = \frac{\lambda \cdot f_d}{2 \sin(\phi/2)} \quad (1)$$

λ : レーザ光波長 0.6328×10^{-6} (m)
 ϕ : ビーム交差角 8.93°
 f_d : ドップラ周波数

なお、上記の測定部におけるビーム交差角 ϕ は空気中での集光レンズの交差角 ϕ' と水やアクリルの屈折率から以下に示すように算出した。

<ビーム交差角修正法>



$$\begin{aligned} \mu_1 \cdot \sin \theta_1 &= \mu_2 \cdot \sin \theta_2 & \mu_1 &: \text{空気屈折率} \\ \theta_1 &= \phi' / 2 & \mu_2 &: \text{アクリル屈折率} \\ \theta_2 &= \sin^{-1} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \sin \frac{\theta_1}{2} \right) & \phi' &: \text{ビーム交差角 } 11.796^\circ \\ & & & \text{(空气中)} \\ &= \sin^{-1} \left(\frac{1.0}{1.49} \cdot \sin \frac{11.796}{2} \right) \\ &= 3.935^\circ \end{aligned}$$

以下、同様に θ_3 , θ_4 および θ_5 を求めると、

$$\begin{aligned} \theta_3 &= 4.465^\circ \\ \theta_4 &= 3.955^\circ \\ \theta_5 &= 4.465^\circ = \phi / 2 \end{aligned}$$

となり、補正後のビーム交差角 ϕ (8.93°) が算出される。

計測は各測定点につき 2 回以上実施し、データの再現性および分散を確認しながら行った。

3. 試験結果

3.1 流況観察

試験容器の上部領域について、シャッタ時間を2、4および8秒として写真撮影した結果をFig. 3-1, 3-2 および3-3 にそれぞれ示す。これらの写真によれば、内側アニュラスの高温流体は外筒をオーバーフローするように、外筒壁に沿って外側アニュラス部に流入している。この流れは外筒壁に沿って下降した後、冷却コイルの上から1段目と2段目の間を通過し、その後も蛇行しながらコイルの間を通り下降している。

試験容器の中部領域について、シャッタ時間を2、4および8秒として写真撮影した結果をFig. 3-4, 3-5 および3-6 にそれぞれ示す。内側アニュラス部ではヒータ近傍の流れが比較的速い。シャッタ時間を長くした写真には、ヒータと外筒との空間に比較的大きな渦が見える。この渦は不安定で、時間および空間的に不規則に変動している。外側アニュラス部の流体は冷却コイル間を蛇行しながら下降している。冷却コイル近傍の流れはほとんど剥離しないので、コイル部にカルマン渦は発生していないようである。しかし、流れの蛇行によって、コイルと壁面の間で時折りコイルと同じぐらいの大きさの渦の発生が見られる。また、壁面近傍の流れは非常に遅く、目視ではほとんど静止しているように観察された。

試験容器の下部領域について、シャッタ時間を1、2、4および8秒として写真撮影した結果をFig. 3-7～3-10 にそれぞれ示す。外側アニュラスを下降した冷却材は容器の底に達する前に上昇流となり、外筒の内壁に沿って、内側アニュラスに流入する。この下降流が容器底面に達しないのは、底部からのわずかの放熱により、温度成層界面が生じるためである。温度界面の生成を防ぐにはガードヒータが必要とされるが、本報ではモデルがアクリルであることもあり、ヒータは設置しなかった（なお、温度界面が存在する場合には、解析結果にも同じような流況が生じることは確認した）。内側アニュラスに流入した冷却材はアニュラス中心で下降流となり、ヒータ近傍で再び上昇するという複雑な流況を呈している。容器下部プレナム内の流れは非常に遅くシャッタ時間1秒の撮影では、ほとんど滞留している。しかし、シャッタ時間8秒の撮影では流跡が確認でき、非常にゆっくりした循環流のあることがわかる。

流況の観察では、時間および空間的に変動する複雑な3次元の流れは存在するが容器内の自然循環を阻害する大きな周方向の流れは見られず、流れはほぼ軸対称であることが確認できた。

3.2 温度分布測定

周方向位置 0° 断面における定常温度分布測定結果を Table 3-1 および Fig. 3-11 に示す。

ヒータで加熱された流体は試験容器内を上昇し、容器の上部温度を約 20°C にする。この加熱流体は容器内外側アニュラス部の冷却コイルで冷やされ、アニュラス部を下降する。容器の下部温度は約 15°C まで低下するので、容器の軸方向には約 5°C の温度差が生じている（放熱による底部の温度界面を考慮すると約 $4.5 \sim 4^\circ\text{C}$ となる）。

この軸方向温度差（ここでは、 5°C とした）から次式によりアニュラス部の下降平均流速および容器内の自然循環流量を求めるとそれぞれ $1.01 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ および $6.82 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$ となる。

〔計算式〕

$$\text{流速} : v = \frac{Q}{C_p \gamma A \Delta T}$$

$$\text{流量} : w = vA$$

ここに、 Q : 総伝熱量 (kcal/h)

C_p : 比熱 (kcal/kg $^\circ\text{C}$)

γ : 比重量 (kg/m 3)

A : 流路面積 (m 2)

ΔT : 温度差 ($^\circ\text{C}$)

これからアニュラス部および冷却コイル部のレイノズル数は、それぞれ $[Re]_A = 94.4$ および $[Re]_c = 12.0$ と求められる。よって、流れはほぼ層流とすることができる。

内側アニュラスの温度分布を見ると、加熱ヒータ部は熱流束一定であるので、ヒータ部近傍の軸方向温度分布はほぼ等間隔になっている。冷却コイル部についても最上段領域の温度降下がわずかに大きい傾向はあるが、それ以降はほぼ等間隔に近い温度分布を示している。これはコイル部の自然対流熱伝達率に関する冷却コイル間の相互作用が小さく各段のコイル間の熱流束分布も一定に近いことを示しているものと考えられる。

加熱部上端および冷却部下端の下流側以降にも軸方向温度分布があるのは、加熱・冷却領域の高温または低温流体の拡散によるものと考えられる。これにより、加熱・冷却域近傍には比較的大きな温度分布があることがわかる。

試験容器下部の外筒下端近傍の温度分布は、外筒内側の温度が低く、内側アニュラス部の中心が高くなっている。これは、外筒内側に沿って上昇した流れが、アニュラス部中心で下降し、ヒータ近傍で再び上昇するという流況に対応した温度分布である。容器の中段部にはヒータおよび冷却コイル側ともに半径方向温度分布は小さく、この領域に見られる渦による温度拡散が比較的大きいことがわかる。容器上部はヒータ下流側の温度がやや高く、加熱された流体が上昇していることを示している。外筒上端近傍の温度はヒータ側より低く、上昇する加熱流体と入れ換わり

に、外筒内側の流体が外筒上端を乗り越える流況に対応した温度分布を示している。

Table 3-2 および Fig. 3-12 に周方向温度分布測定結果を示す。周方向温度分布は冷却コイルの上部近傍を除き、ほぼ均一な温度分布となっている。冷却コイル上部で温度の低下が見られるのは、測定部附近に設置されている冷却コイル入口配管による影響と考えられる。よって、試験容器内に問題となるような周方向の流れはなく、容器内の温度場も軸対称であることが確認できた。

以上のように、容器内温度分布は流況観察結果に対応した特徴を示している。

3.3 流速測定

流速測定結果を Table 3-3 に、流速分布図を Fig. 3-13 (冷却コイル上段部)、3-14 (冷却コイル中段部) および Fig. 3-15 (容器下部) に示す。冷却コイル上段部では、冷却材が外筒に沿って、3~5 mm/sec で外側アニュラス部に流入している。流況を見るとこの流れは上から1段目と2段目の冷却コイル間を通り、マニュラスの外側に回り込んでいる。このため、コイルの2段目から3段目の流れはアニュラスの外側の流れが速く、内側にはほとんど流れがなくなっている。マニュラス外側の流速は3~4 mm/sec である。冷却コイル中段部 (Fig. 3-14) の流速分布は流れが蛇行しているもののコイル上段部に見られるような、極端な流れの片寄りはなくなっている。流速はコイル近傍が比較的速く、5~6 mm/sec で流れている。

試験容器下部の外側アニュラス流出部 (Fig. 3-15) は流路の中心部の流速が4.5 mm/sec で流速分布は冷却コイルの中段部より小さくなっている。この断面については5 mm間隔で比較的密に測定したので、壁面流速=0 m/sec として、外部アニュラス部を下降する平均流速および流量を求めると、それぞれ $1.11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ および $7.49 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$ となる。これらは温度分布測定で求めた値とほぼ一致している。容器の下部プレナム内流速は非常に小さく流れは滞留しているが、流況の可視化写真からわかるように完全に滞留しているわけではなく、非常にゆっくりした循環流が形成されている。しかし、流速測定では速度の絶対値が非常に小さいため、測定誤差による速度の変動が大きく、循環流を示すような有意のある結果は得られなかった。外筒内側近傍には可視化で確認された外筒に沿って上昇する流れに対応する流速が測定された (約 2 mm/sec)。

4. 解 析

多次元熱流動解析コード“COMMIX-DRACS”を用い、本試験の実験解析を実施し、解析体系のモデル化および自然循環現象に対するコードの適用性について検討を行った。容器内の温度場および速度場は軸対称であるので、解析はR-Zの2次元体系で実施した。

4.1 計算体系

(1) メッシュ分割数

メッシュ分割はFig. 4-1に示す 19×46 （ケース1）および 36×91 （ケース2）の2種類とし、メッシュサイズ効果を調べた。これらの冷却コイル部は、後述するケース5と同じモデルを用いた。

(2) 冷却コイルのモデル化

冷却コイル部のモデル化については、Fig. 4-2に示すケース3～6の4ケースの計算を行い検討した。

○ケース3

冷却コイルに接する6セルで冷却を行うとともに、コイル部を通過する軸方向流れが生じないようにセルの境界面を閉じる（境界面はFree Slip）ことにより、冷却コイル部をモデル化している。

○ケース4

冷却コイルに接する6セルのうち冷却割合の大きい2セルで冷却を行っている。ケース3で与えたセルの境界面をSurface Permeabilityモデル⁴⁾を用いて閉じるモデルはケース4では削除し、流速測定で観察された冷却コイル直下部での比較的速度の大きい流れを実現するようにした。

○ケース5

冷却コイルのモデル化に表面要素⁴⁾（Surface Element）を用い、速度境界条件をNo Slipとした表面要素に囲まれた長方形のセルでコイルを模擬した。コイルとセル間の熱伝達は、実験結果を考慮し、コイル下部の1セルで行っている。なお、このケース5のモデルは、前述のケース1および2においてメッシュサイズの検討を行ったモデルである。

○ケース6

ケース2のFine Meshと同様なモデルであるが、冷却コイル部をコイル断面積相当の正方形の表面要素で囲まれたセルで模擬した。冷却はコイル下部の1セルとしたので、比較的狭い領域となっている。また、このケースでは加熱ヒータ部についてもNo Slip表面を規定した。

4.2 解析条件

ケース1～5では以下に示す条件を、ケース6ではコイル部流動抵抗を与える Force Structure を削除し、それ以外は同一条件を入力し計算を行った。Force Structure を削除したのは、コイルの境界条件により考慮されているためで、かつ、本解析では Force Structure は解析結果にほとんど影響しないことが明らかとなったためである。各解析では内筒内側を断熱とし、計算時間の短縮を図った。

- ① 温度境界条件……外筒部を除き断熱
- ② 速度境界条件……接線速度成分は零 (No Slip)
- ③ 熱伝達式

外筒部	$Nu = 1$ (伝導)
ヒータ部	$Nu = 0.27 Re^{0.63} Pr^{0.36}$ (1)
冷却コイル内側	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ (1)
冷却コイル外側	$Nu = 0.53 (Gr \cdot Pr)^{0.25}$ (1)

- ④ 圧力損失 (ケース6は削除)

アニュラス部摩擦損失係数	$\lambda = 96 / Re$ (2)
--------------	-------------------------

冷却コイル部圧力損失係数	$\zeta = 1.15 Cx \frac{\frac{Sm}{Fo}}{\left(1 - \frac{Sm}{Fo}\right)^3} \left(1 - \frac{2y}{Do}\right)^{1/3}$ (3)
--------------	---

Cx : 係数

Fo : m² 流路面積

Sm : m² 断路面積

Do : m 流路幅

y : m 流路中心とコイル中心との距離

4.3 解析結果

解析は初期温度一定として、発熱量と冷却コイルによる除熱量がバランスするまで継続し、バランスした時点で定常に達したものとして計算を打ち切った。これは後述する速度ベクトル図に見られる渦状の流れが不安定で、定常計算では完全には収束しないと判断されたためである。よって、厳密には非定常計算を行う必要がある。しかし、熱バランスが達成された後計算を継続しても、渦の発生位置や方向が若干変化するのみで、解析結果はほとんど変わらないので、本解析では定常計算で打ち切るものとした。なお、実験で観察された流況も解析と同様に完全な意味では定常でなく、渦の流れの発生位置が時間および空間的に変化している。

解析メッシュ分割数の効果を検討するために実施した、ケース1および2に関する温度分布図を Fig. 4-3 に、速度ベクトル図を Fig. 4-4 に示す。ヒータ部で加熱された流体は容器の内側

アニュラスを上昇し、外側アニュラスの冷却コイルで冷却され、容器内には図に示すような時計回りの自然循環が形成されている。容器上部および下部温度はそれぞれ約 20.5 および 17 °C で、軸方向には約 3.5 °C の温度差が生じている。この軸方向温度差はケース 2 (Fine Mesh) の方がわずかに大きい傾向があるが、メッシュ分割数による顕著な差は認められない。よって、後述する解析モデルの検討は、主にケース 1 (Coarse Mesh) のメッシュ・サイズで実施するものとした。

ケース 3～6 の解析モデルに関する温度分布図および速度ベクトル図を、それぞれ Fig. 4-5 および 4-6 に示す。各モデルの解析結果の特徴をまとめると次のようになる。

(1) ケース 3 (6 セル冷却モデル)

軸方向温度差は約 1.9 °C でモデルの中では最も小さい。コイル下部の流速は、コイルの存在を考慮してセル境界を閉じたため比較的遅い。また、外側アニュラスの壁面に沿う流速が他のモデルより大きくなっている。この流速分布の特徴は、Table 3-3 および Fig. 3-13～3-15 の測定結果との相違が大きい。

(2) ケース 4 (2 セル冷却モデル)

ケース 3 を改良したモデルで、流速分布は冷却コイル近傍の比較的速い流れが実現されており、実験結果に近づいている。軸方向温度差についても約 2.5 °C とケース 3 より大きい。実験結果の約 4.5～5 °C と比較すると約 1/2 で、容器内の自然循環流量についてはかなりの過大評価となっている。よって、このモデルにより冷却コイル部の圧力損失係数の値をパラメータとした解析を実施し、必要な自然循環流量が得られる流動抵抗を検討した。その結果は、4.2 節④項の⁴⁾の約 100 倍で、物理的に評価し難いものであった。

(3) ケース 5 (1 セル冷却モデル)

ケース 4 の結果から、Force Structure モデル⁴⁾では冷却コイル部の流動抵抗の評価は困難であることが明らかとなった。よって、ケース 5 では冷却コイル表面を No Slip 境界とし、コイル近傍の流れの加速とそれともなう流動抵抗を、解析コード内で評価することを試みた。なお、コイル近傍の流れは層流であるので、メッシュ分割はこのモデルでもそれほど細分化する必要はないと考えられる。

Fig. 4-7 に各モデルの軸方向温度分布解析値と実験値とを比較した結果を示す。実験値は Table 3-2 の各周方向の値を平均して求めた。図によれば、容器の底部近傍を除き、ケース 5 および後述するケース 6 のモデルは比較的实验結果と一致する傾向を示している。容器底部において実験値と解析値の差が大きい原因の一つとしては、底部からのわずかな放熱の影響により、この領域に低温の温度成層界面が発生していることが考えられる。(放熱量のチェック計算によれば、約 6 W [総発熱量の約 0.4 %] の放熱により、 $\Delta T = 0.2$ °C の温度成層界面が発生していると考えられる)。

このケースの流況は比較的实验結果と一致した傾向を示し、冷却コイルまわりの蛇行する流

れも生じている。また、冷却コイルおよび加熱ヒータ近傍には径方向に1～1.5℃の温度分布があるが、ある程度それらから距離が離れると、径方向には均一な温度分布となる。これは、容器内に生じる比較的大きな渦の混合効果であるが、この渦状の流れは前述したように可視化試験でも観察されている。

(4) ケース6 (1セル冷却モデル, Force Structure無し)

このモデルはケース5において比較的良好な結果が得られたので、解析メッシュを細かくして、加熱ヒータ部も表面要素を用いてモデル化したものである。軸方向温度差に関する解析結果は4.15℃で、各モデルの中では最も実験値(約4.5～5℃)に近い結果が得られた。

以上の結果から、「もんじゅ」EVST体系のような、容器内の自然循環ヘッドと流動抵抗とのバランスを解析的に評価するモデルとしては、ケース5やケース6の解析モデルが最も有効であるとの結論が得られた。これから、今後実施が予定されている、実機形状を模擬した1/3スケール・モデル試験および実機評価の解析に、COMMIX-DRACSコードを適用できることが明らかとなった。

5. ま と め

「もんじゅ」EVSTを簡略に模擬した縮小モデルを用いて温度分布、流速分布の測定および流況観察を行い、容器内部の流動・伝熱現象を確認した。容器内の流動現象は複雑であるが、機器の運転上問題となるような周方向に非均一な熱流力学動は認められず、直浸コイル冷却方式による自然循環除熱が可能であることを明らかにした。また、これらの結果をもとに多次元熱流力学コードCOMMIX-DRACSの検証を行い、冷却コイルモデル化の検討や数値解析手法等の改善により、実機EVSTの除熱特性評価に、COMMIXコードを適用できることを示した。

謝 辞

本試験の推進にあたり、計画と実施面で御協力いただいた動力炉研究開発本部、安全研究グループ 服部直三主任研究員、動力炉建設運転本部、原子炉二課 坂井茂副主任研究員に謝意を表わす。また、COMMIX-DRACSコードの開発の担当者として、本解析の実施にあたり多大な助言と便宜を図っていただいた当室解析グループ、前川勇研究員、長谷川安茂氏に謝意を表わす。

参 考 文 献

- (1) 伝熱工学資料(改訂第3版), 日本機械学会(1975)。
- (2) 管路・ダクトの流体抵抗, 日本機械学会(1974)。
- (3) I. E. Idel'chik, "Handbook of Hydraulic Resistance,"
AEC-tr-6630(1960)。
- (4) H. M. Domanus, "COMMIX-1A: A Three-Dimensional Transient Single-
Phase Computer Program for Thermal Hydraulic Analysis of Single and
Multicomponent Systems," ANL Draft Report Sep., 1982
- (5) 高橋他, "单相多次元熱流動解析コード COMMIX-1A 入力マニュアル,"
PNC N952 84-08(1984)。
- (6) 前川, "COMMIX-DRACS Input Data Description," 動燃内技術資料(1985)。
- (7) S. Grewal and E. Gluekler, "Water Simulation of Sodium Reactors," Chem.
Eng. Commun. Vol.17, pp. 343-360(1982)。

Table 3 - 1 Results of Temperature Distribution Measurements at $\theta = 0^\circ$ Cross Section

[Unit : °C]

Transverse Location		Inner Barrel		Heater		Outer Barrel		Cooling Coil			
Axial High (mm)	Radial Distance (mm)	80	105	125	145	175	195	205	215	225	235
	445					20.36	19.50			19.06	
425						20.80			20.86		
395		20.60	20.22	19.82	19.76	19.74	19.90		20.08		20.06
295			19.16		18.90	19.00					
245							17.70	17.70	18.40	18.00	17.88
155			16.62	16.68	16.96	16.84					
65		14.88	15.00	14.98	15.80	15.26	15.40	15.48	15.08	15.34	15.26
35						14.84					
5			14.40			14.62			14.84		

Table 3 - 2 Results of Circumferential Temperature Distribution

Axial Location (mm) \ Angle (deg.)		0	60	120	180	240	300
		Heater Side					
	395	20.80	20.42	20.56	20.60	20.40	20.36
	295		19.94	19.94	20.14	20.08	19.80
	235		18.92	18.92	18.86	18.76	18.80
	155	17.32	17.48	17.74	17.92	17.86	17.54
	65	15.82	16.30	16.12	16.18	16.18	15.84
Cooling Coil Side							
	395		20.40	20.52	21.08	20.90	20.94
	295		20.38	20.50	20.52	20.22	20.22
	235	18.76	18.52	18.66	18.66	18.70	18.66
	155		17.26	17.44	17.30	17.20	17.18
	65	16.46	15.84	16.26	16.44	16.12	16.16

Table 3 - 3 Results of Velocity Distribution Measurements

Axial Location	Radial Distance Axial Hight (mm)	Heater					Outer Barrel					Cooling Coil								
		5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135					
												90	100	110	120	130				
Velocity (mm/sec)																				
Upper Section	400										-0.30	-1.74	0.59	-0.58	0.29					
Outer Annulus Inlet	395									-2.27	-2.90	-0.30	0.12	1.08	0.01					
Cooling Coil 1	385													1.85	-0.22					
" 1	375													-0.18	-0.78					
" 1~2	365													-5.39	-1.82	-1.04	-1.92	-1.46		
" 2	355													-3.28	-1.83					
" 2	345													-2.84	-3.12					
" 2~3	335													0.03	0.28	-3.87	-4.53	-4.15		
Cooling Coil 4~5	275													-3.27	-3.53	-5.64	-0.15	0.62		
" 5	270															-1.33	0.65			
" 5	265															-3.03	0.39			
" 5	260															-4.71	-0.28			
" 5	255															-2.79	0.19			
" 5	250															-1.04	-0.53			
" 5~6	245															-2.35	-1.67	-5.94	-0.98	-1.10
Outer Annulus Outlet	70													0.02	-0.45	-4.51	-1.07	-0.25		
														-1.82	-1.42	-2.12	-0.10			
Lower Section	50	-0.25	0.53	-0.35	0.10	-0.06	-0.26	-0.61	0.17	2.16	-0.55	-1.87	-0.77	-0.87	-0.68					
"	30	-0.18	0.25	0.34	0.15	0.19	0.37	-0.07	-0.24	0.09	0.24	0.19	-0.71	-1.77	-1.76					
"	10	0.05	0.04	0.21	0.02	0.08	0.11	-0.89	-0.03	-0.07	0.12	-0.10	0.24	0.27	0.65					

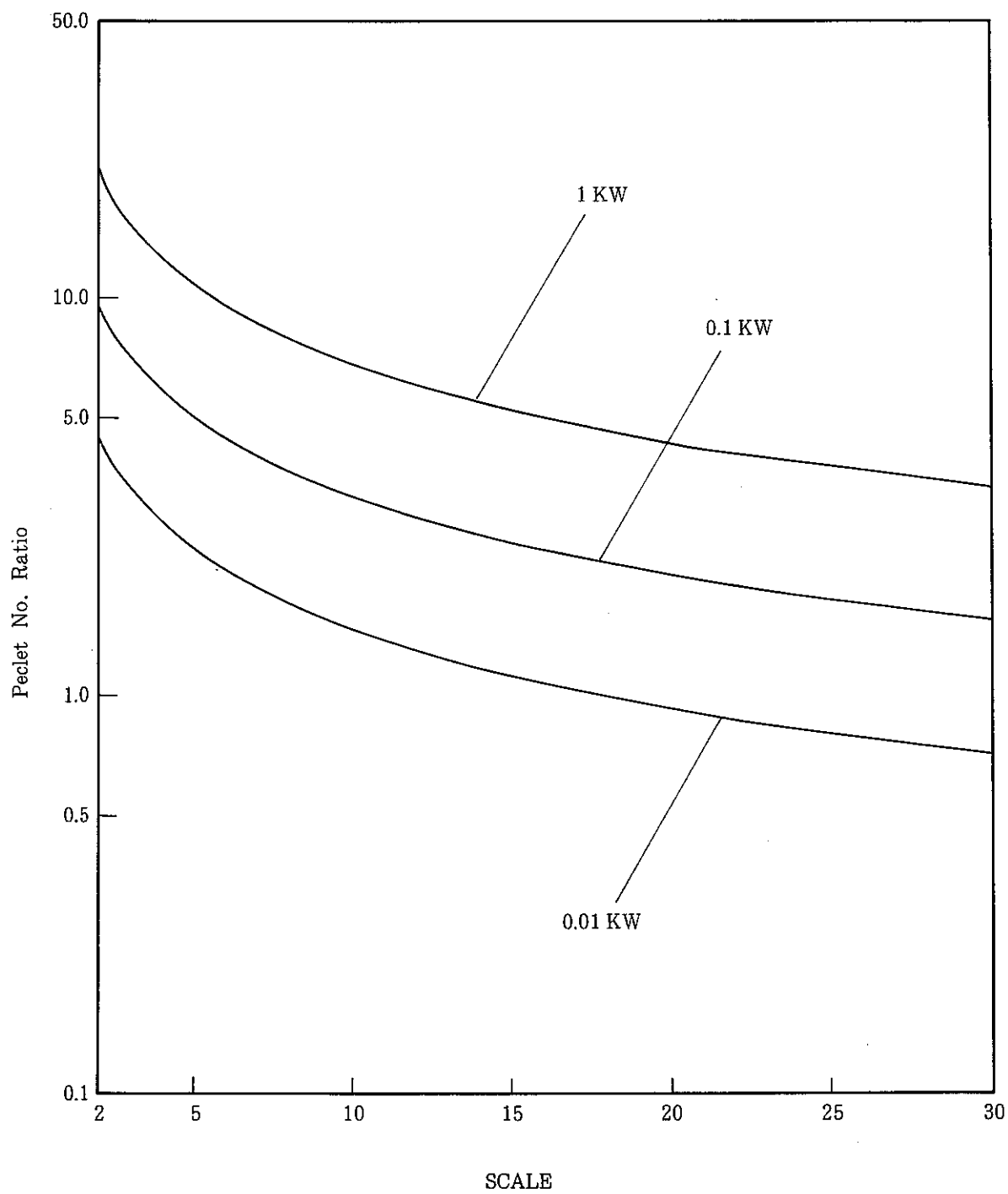
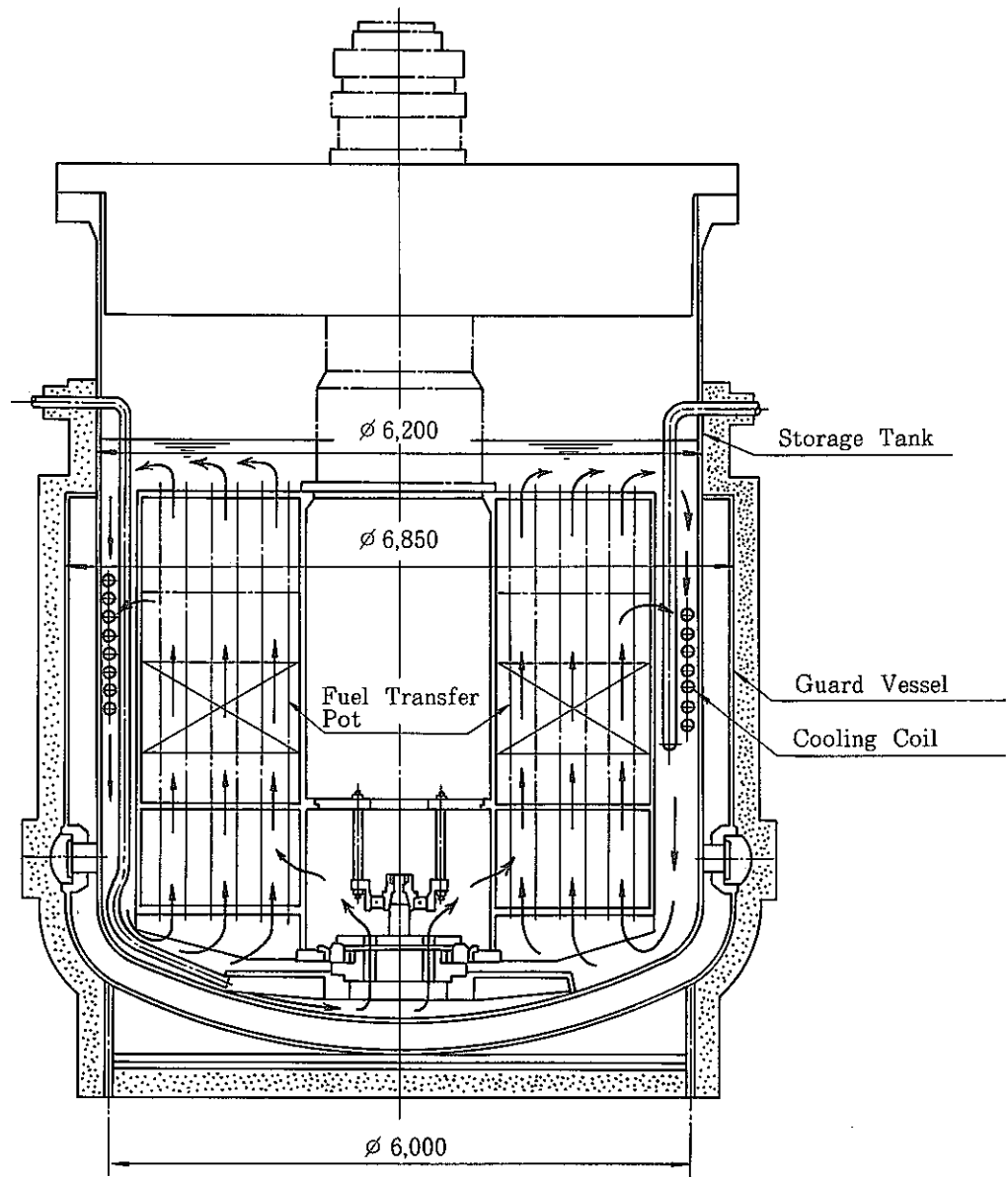


Fig.2 - 1 Peclet Number Ratio between a Scaled Water Model and the Monju EVST



Schematic of Flow Pass
(Decay Heat Removal by Natural Circulation)

Fig.2 - 2 Monju Ex - Vessel Storage Tank

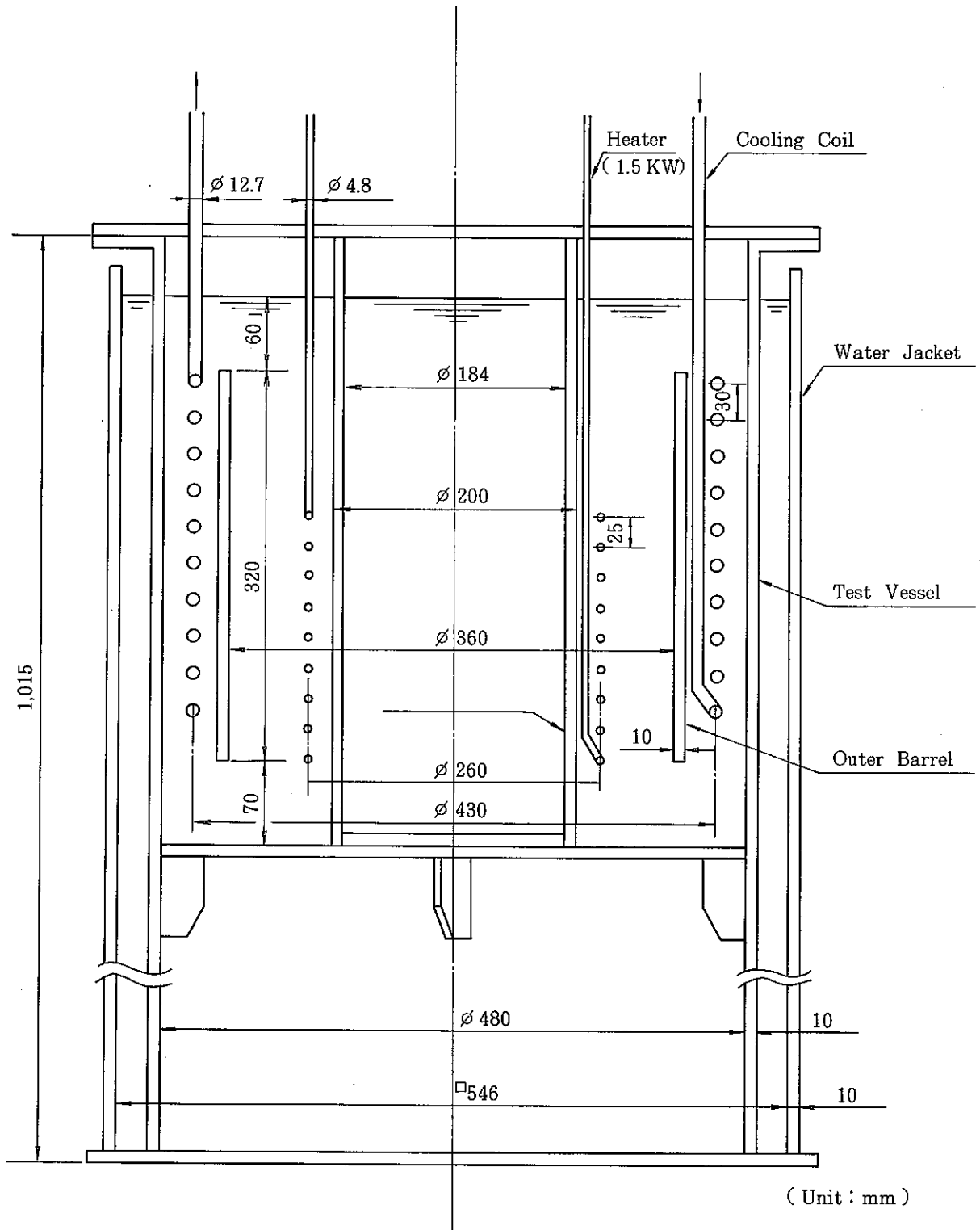


Fig. 2 - 3 1/10 - Scale EVST Test Model

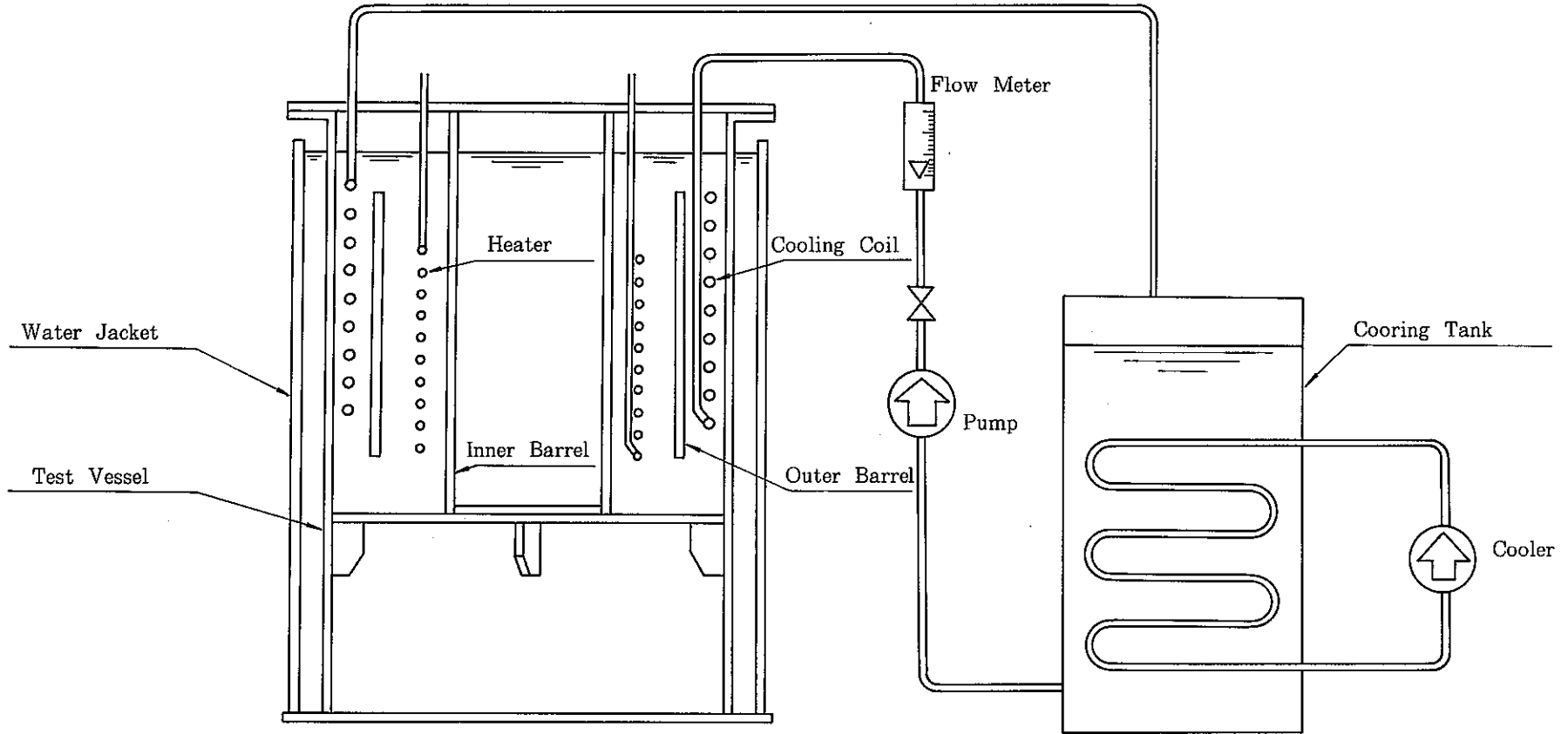


Fig.2 - 4 Schematic of Test Apparatus

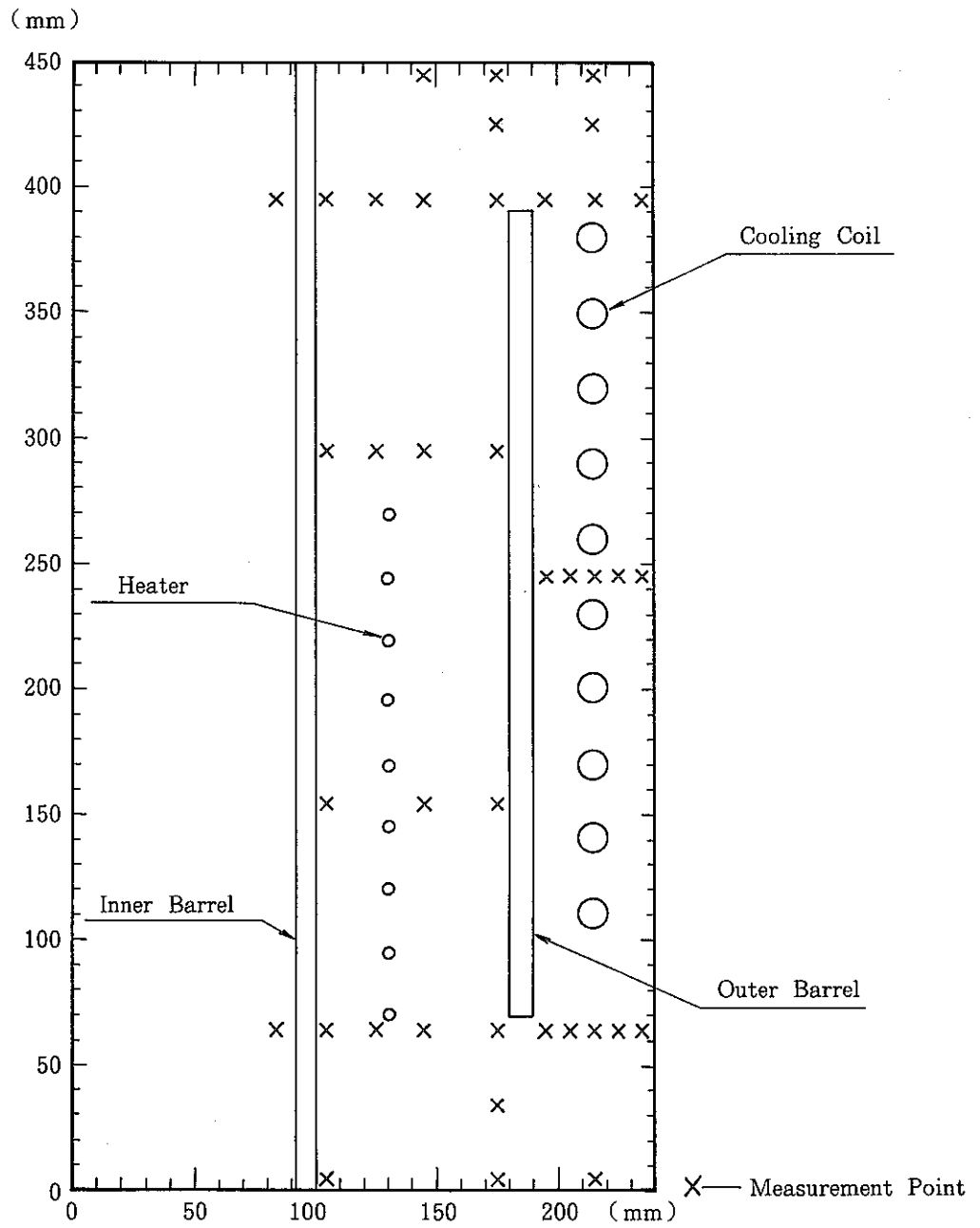


Fig.2 - 5 Locations of Thermocouples at $\theta = 0^\circ$ Cross Section

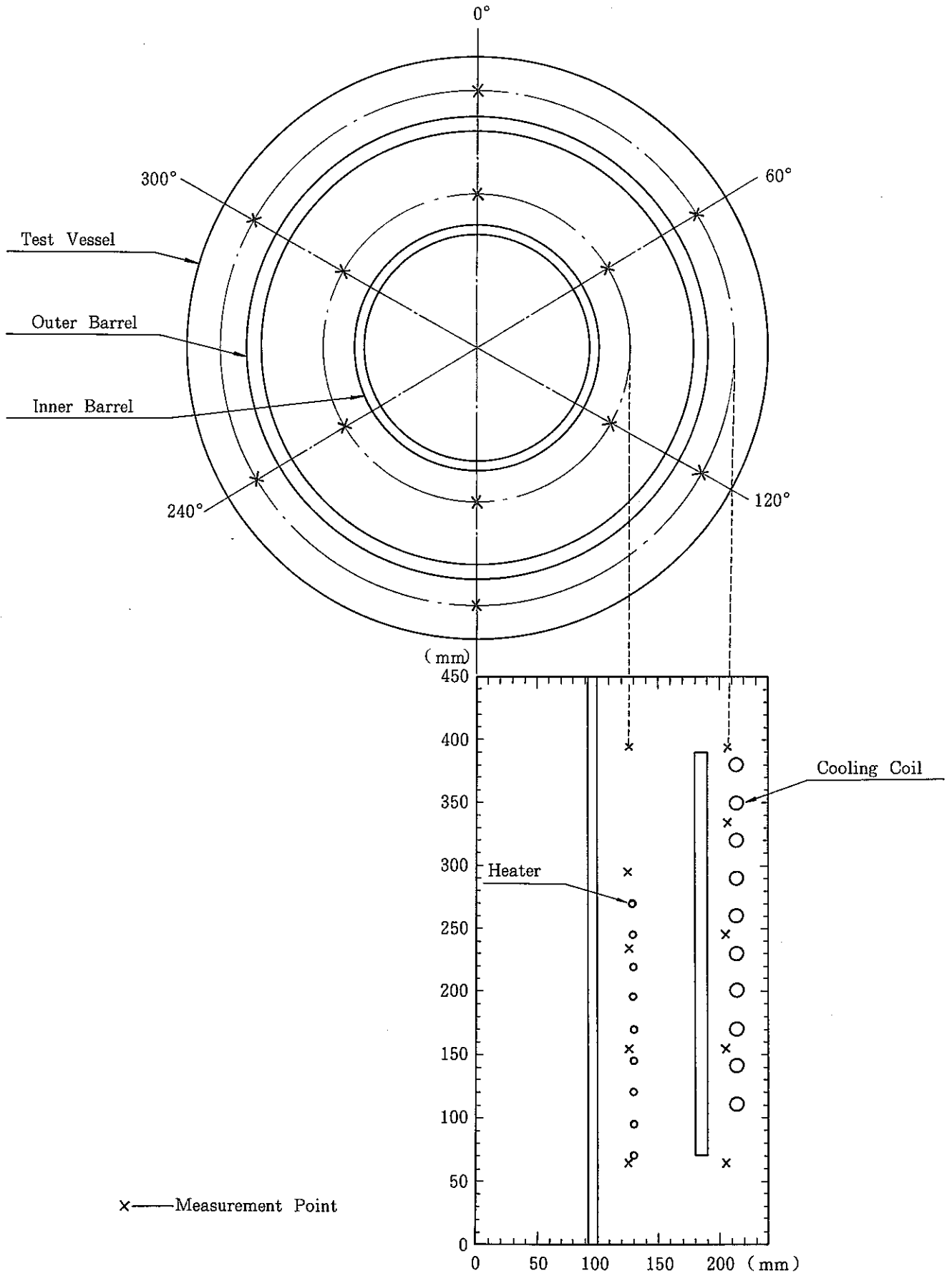


Fig.2 - 6 Locations of Thermocouples in Circumferential Directions

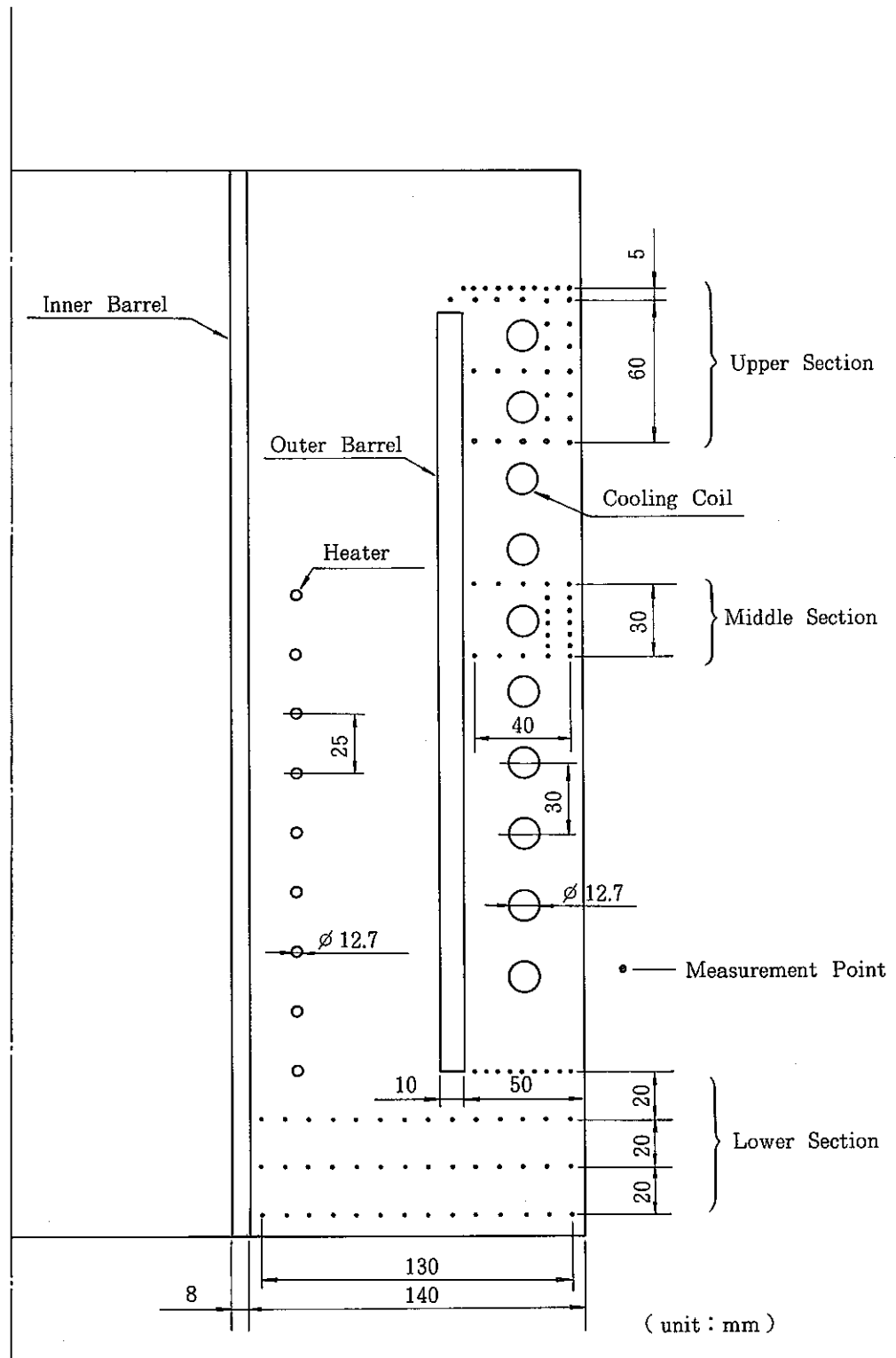


Fig.2 - 7 Velocity Measurement Locations

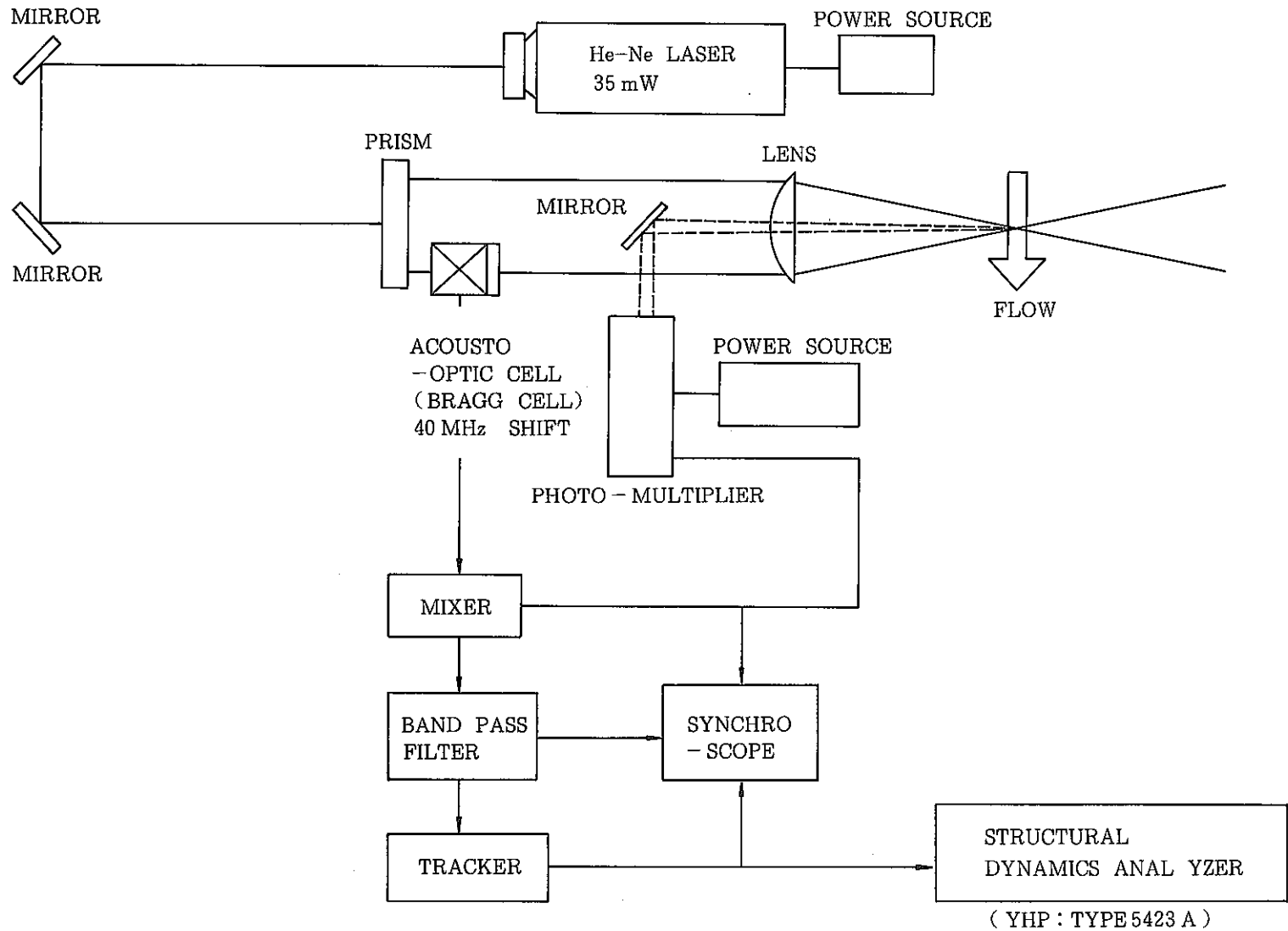


Fig.2 - 8 LDV (Laser Doppler Velocimeter) System



Fig.3 - 1 Flow Pattern in the Upper Region with
Shutter Speed 2 sec.



Fig.3 - 2 Flow Pattern in the Upper Region with
Shutter Speed 4 sec.

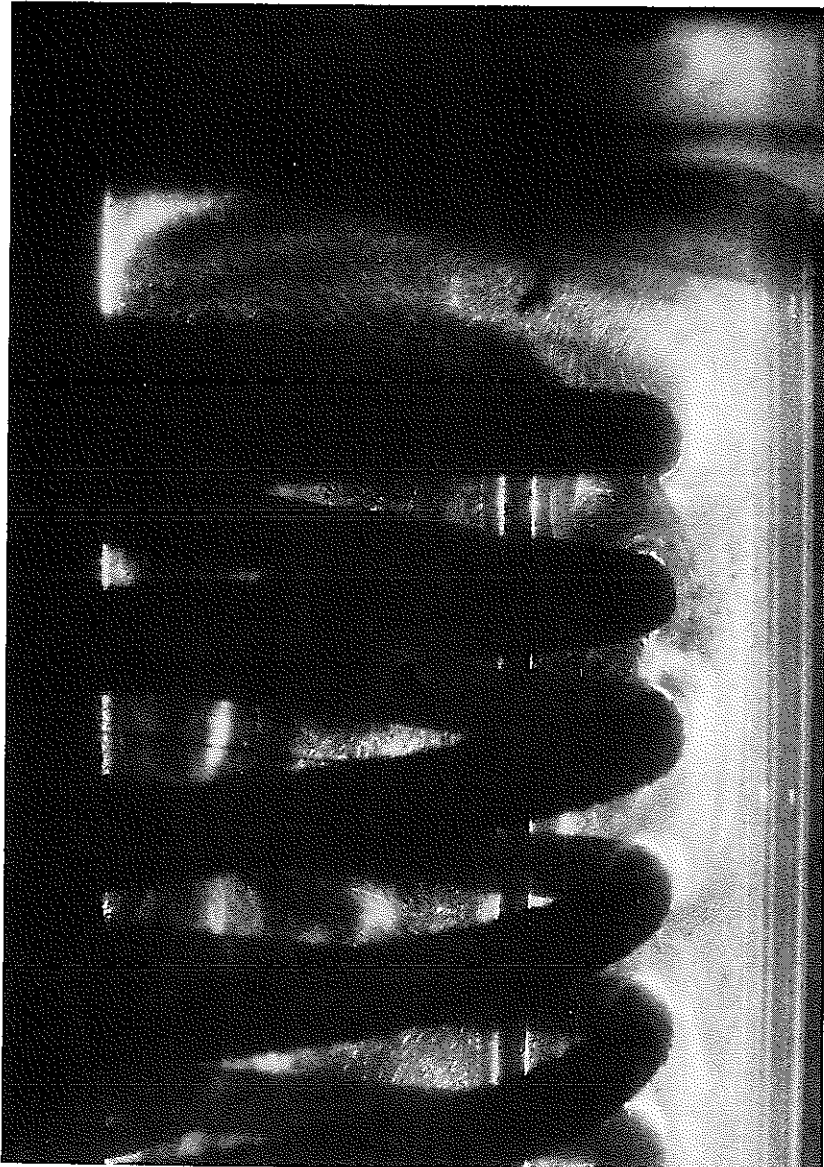


Fig.3 - 3 Flow Pattern in the Upper Region with
Shutter Speed 8 sec.

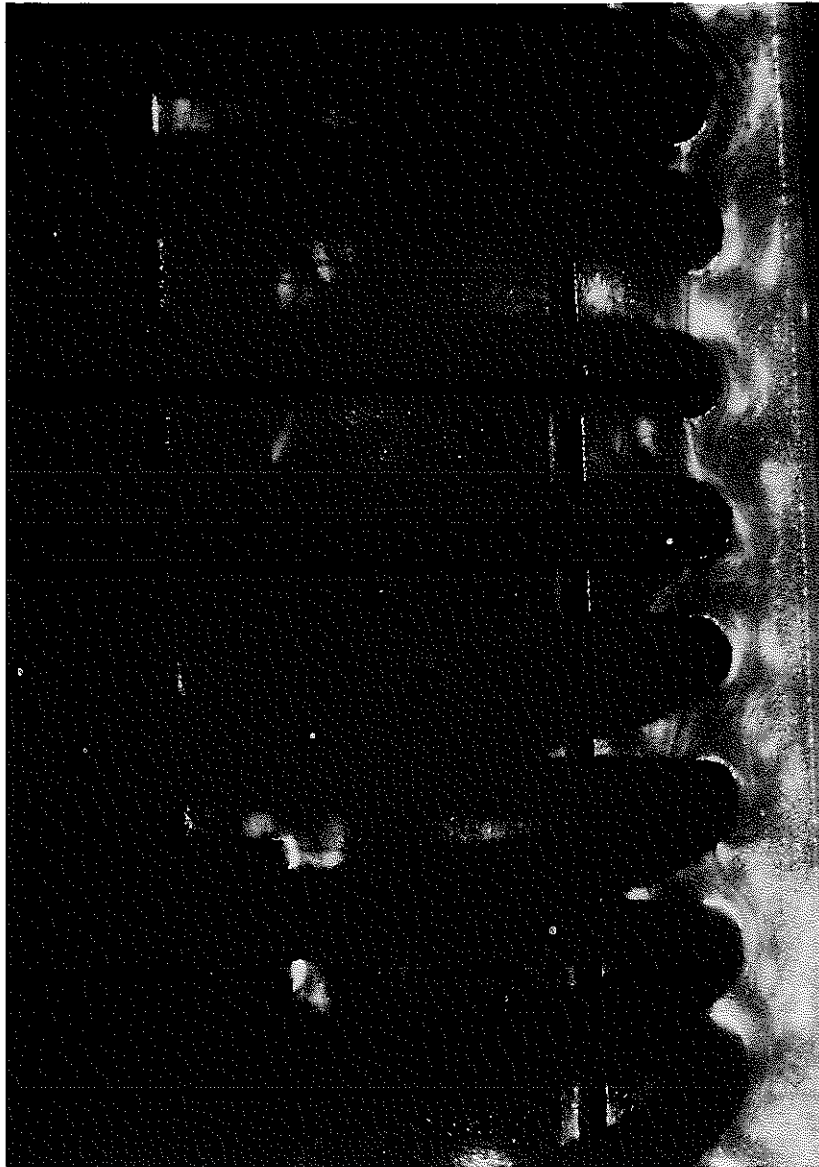


Fig. 3 - 4 Flow Pattern in the Middle Region with
Shutter Speed 2 sec.

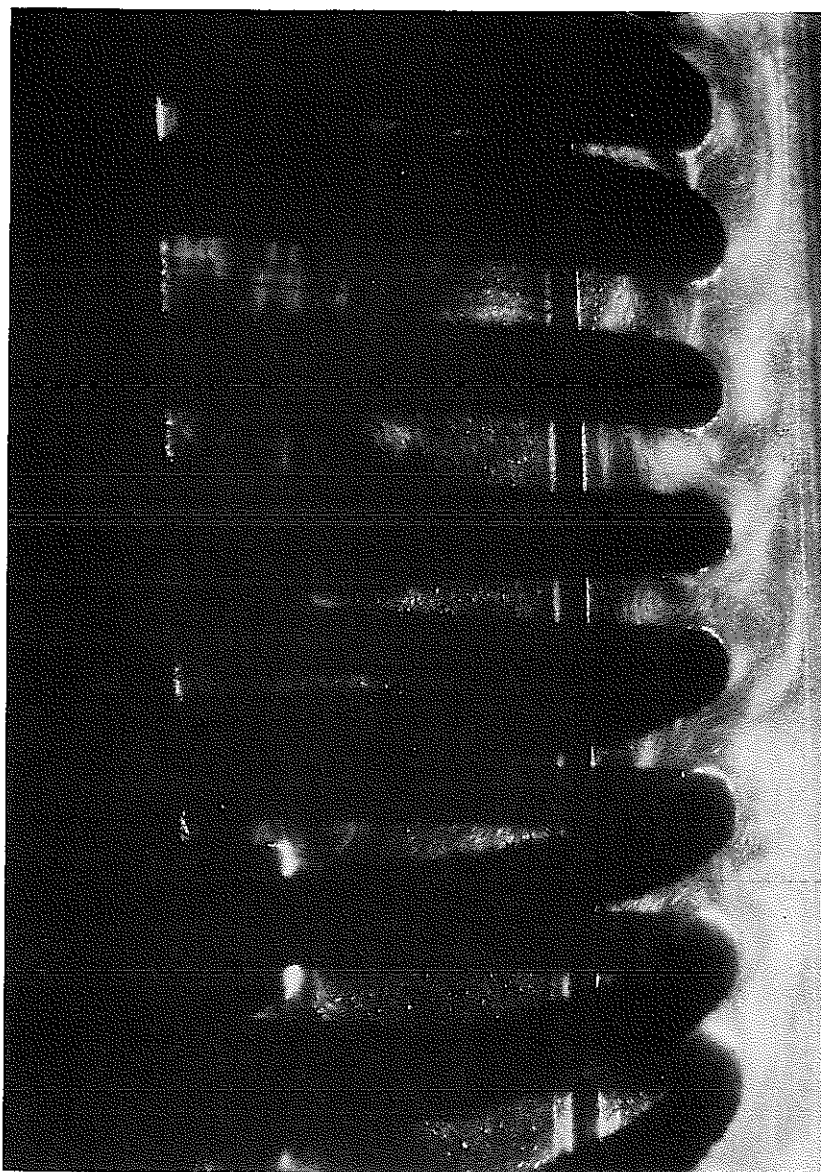


Fig. 3 - 5 Flow Pattern in the Middle Region with
Shutter Speed 4 sec.

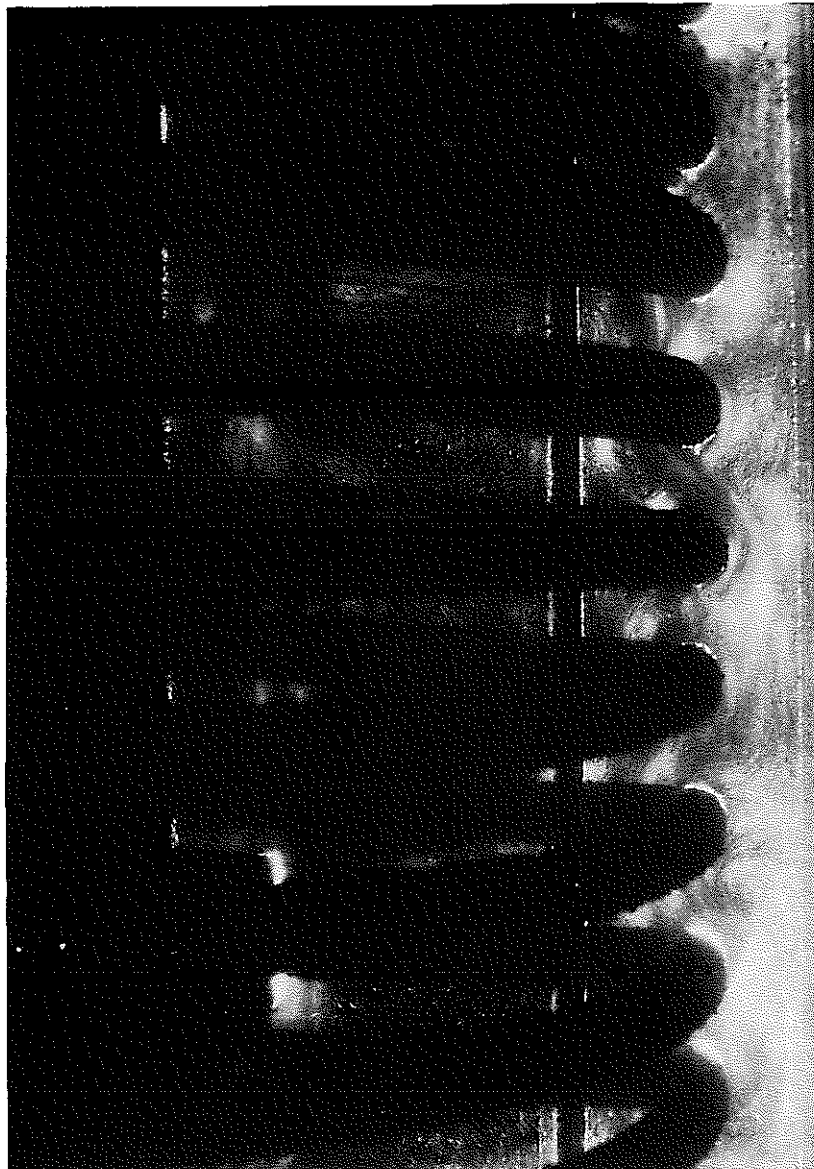


Fig.3 - 6 Flow Pattern in the Middle Region with
Shutter Speed 8 sec.

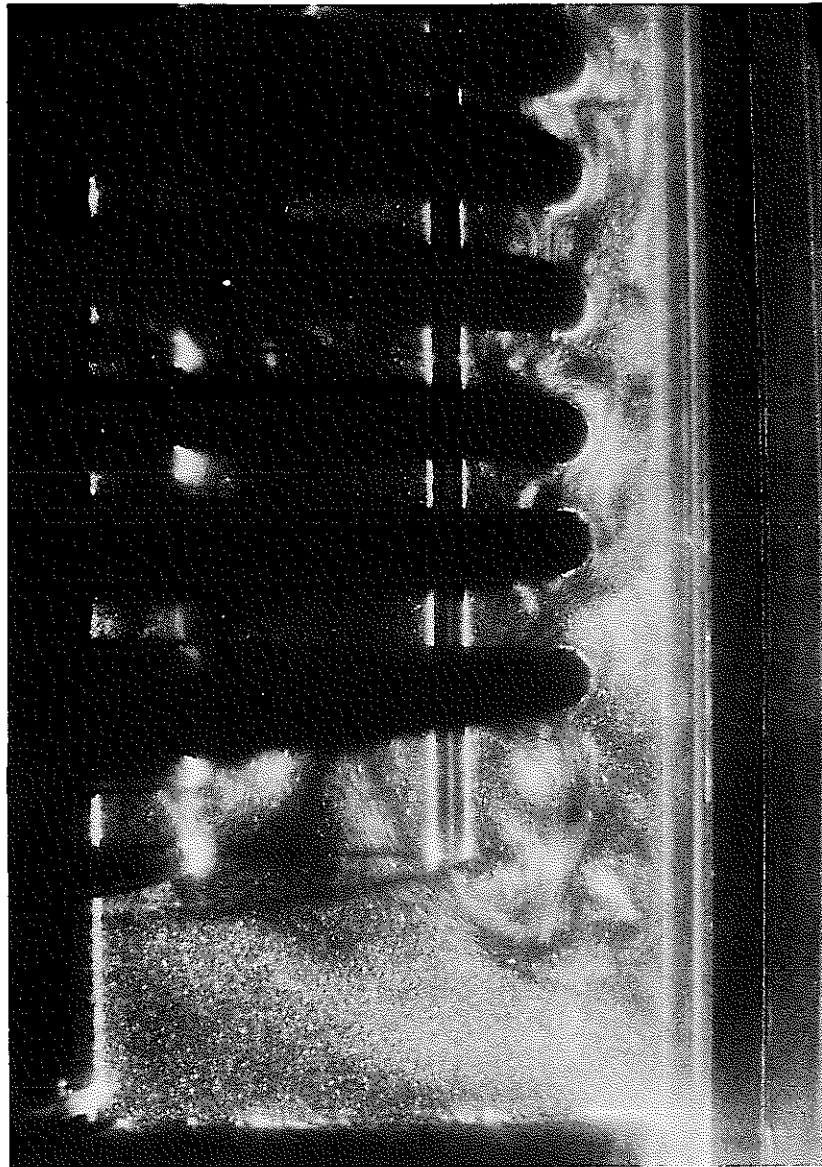


Fig.3 - 7 Flow Pattern in the Lower Region with
Shutter Speed 1 sec.



Fig.3 - 8 Flow Pattern in the Lower Region with
Shutter Speed 2 sec.



Fig. 3 - 9 Flow Pattern in the Lower Region with
Shutter Speed 4 sec.

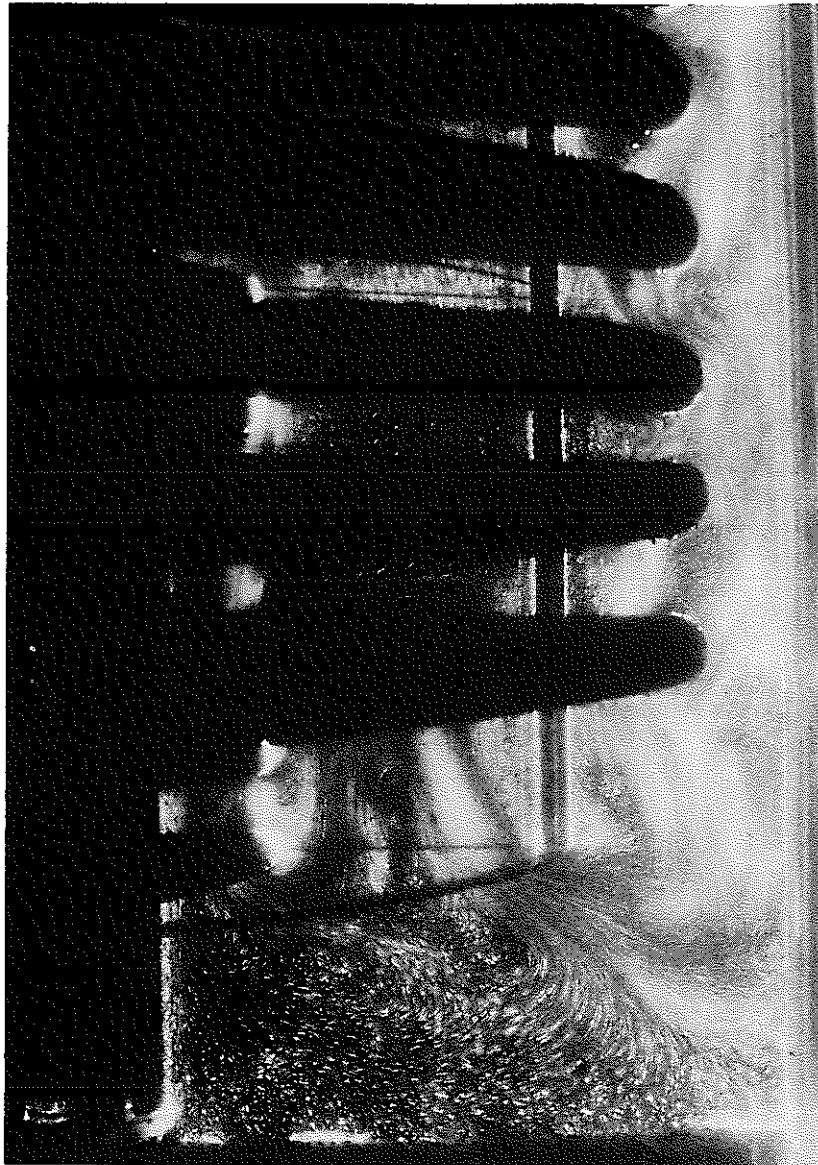


Fig. 3 - 10 Flow Pattern in the Lower Region with
Shutter Speed 8 sec.

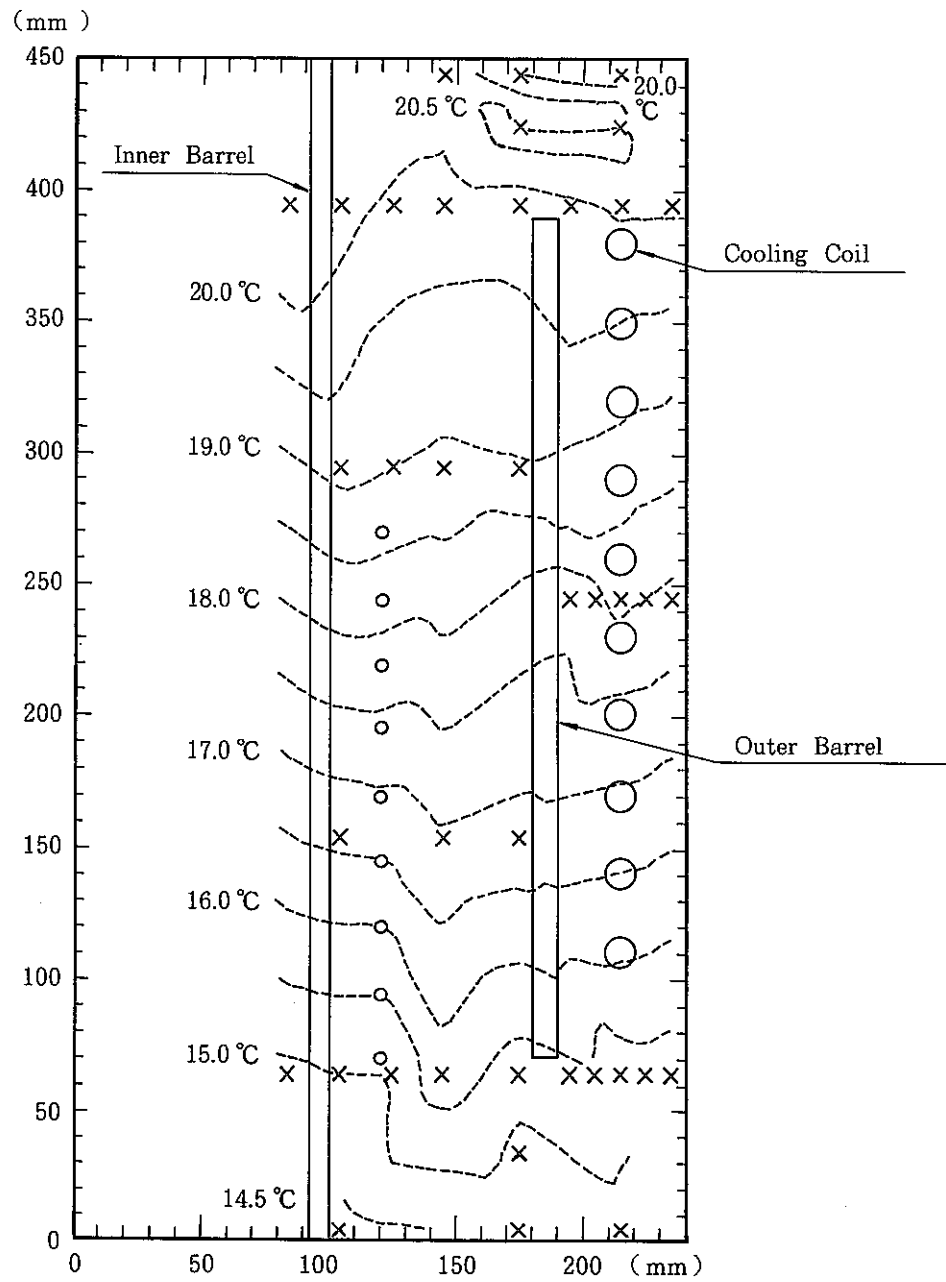


Fig.3 - 11 Temperature Distribution

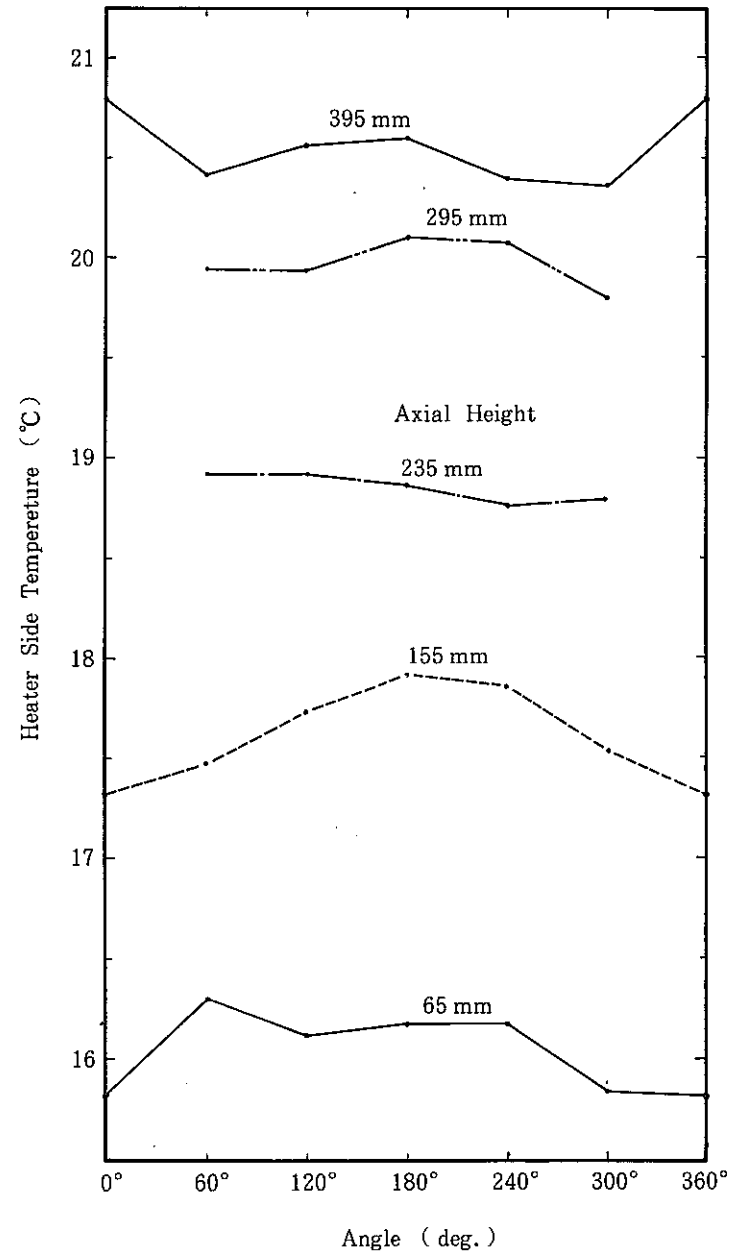
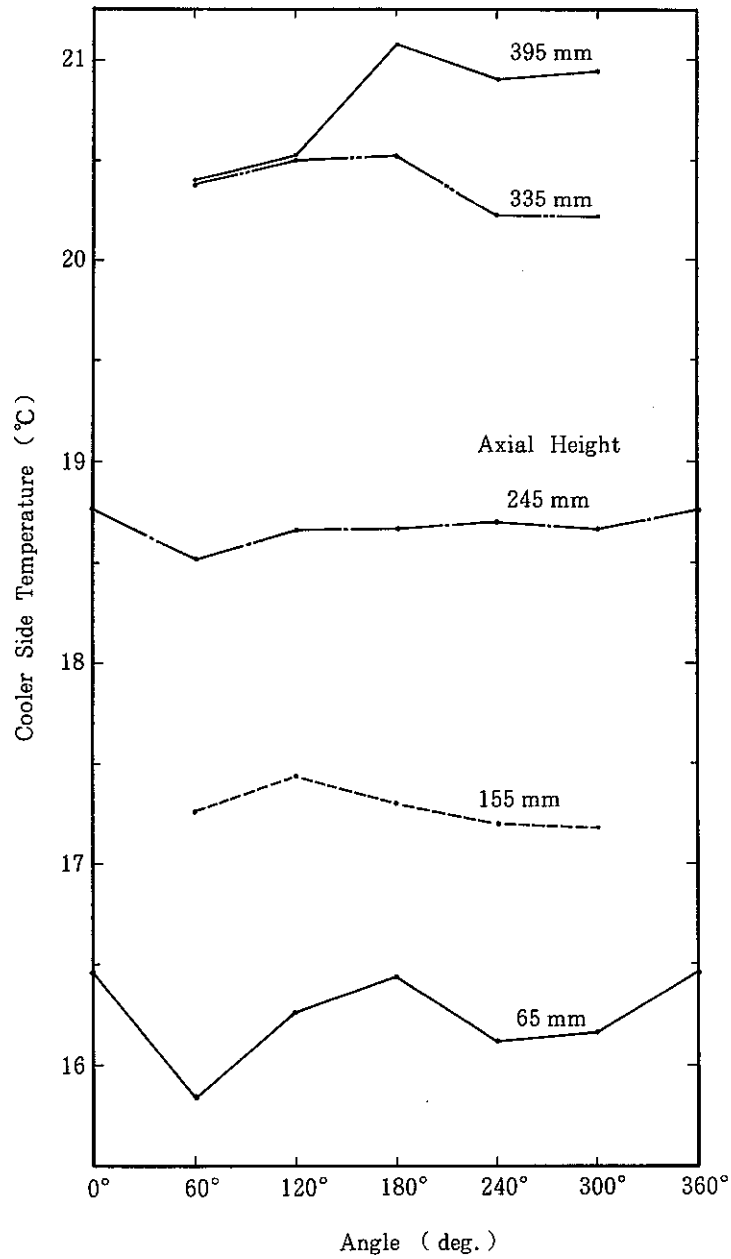


Fig. 3 - 12 Circumferential Temperature Distributions

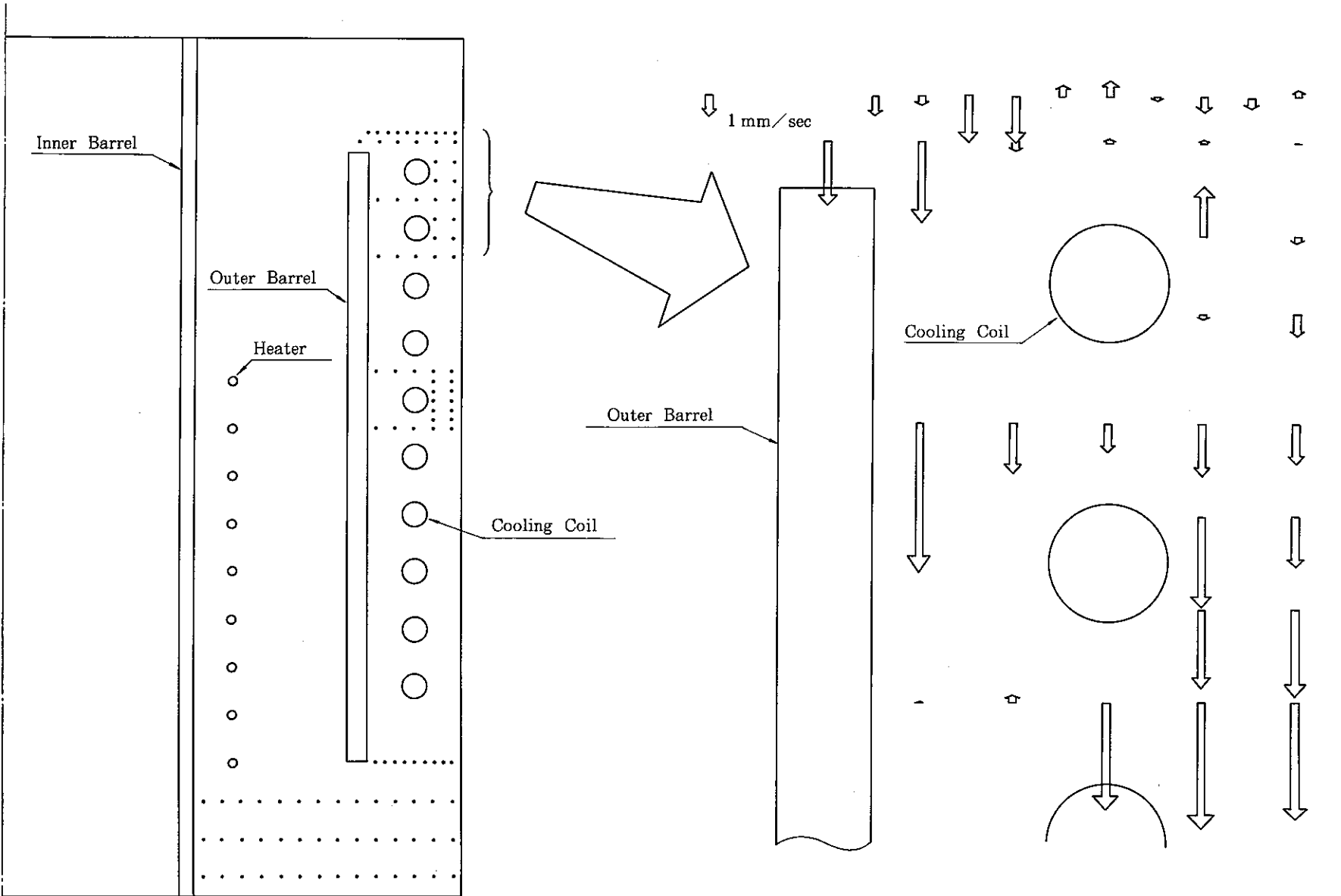


Fig. 3 - 13 Velocity Distribution in the Outer Annulus at the Upper Section

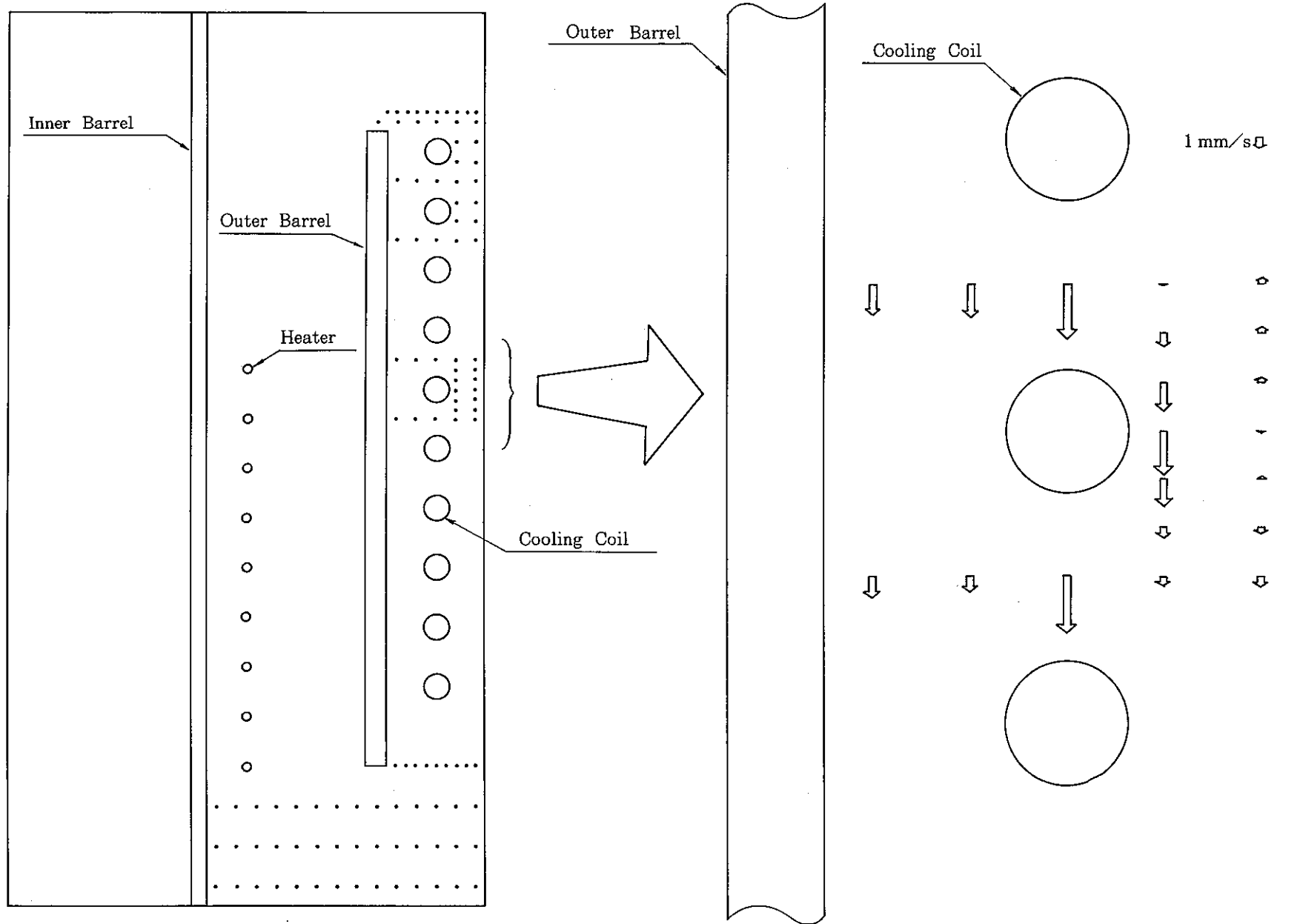


Fig.3 - 14 Velocity Distribution in the Outer Annulus at the Middle Section

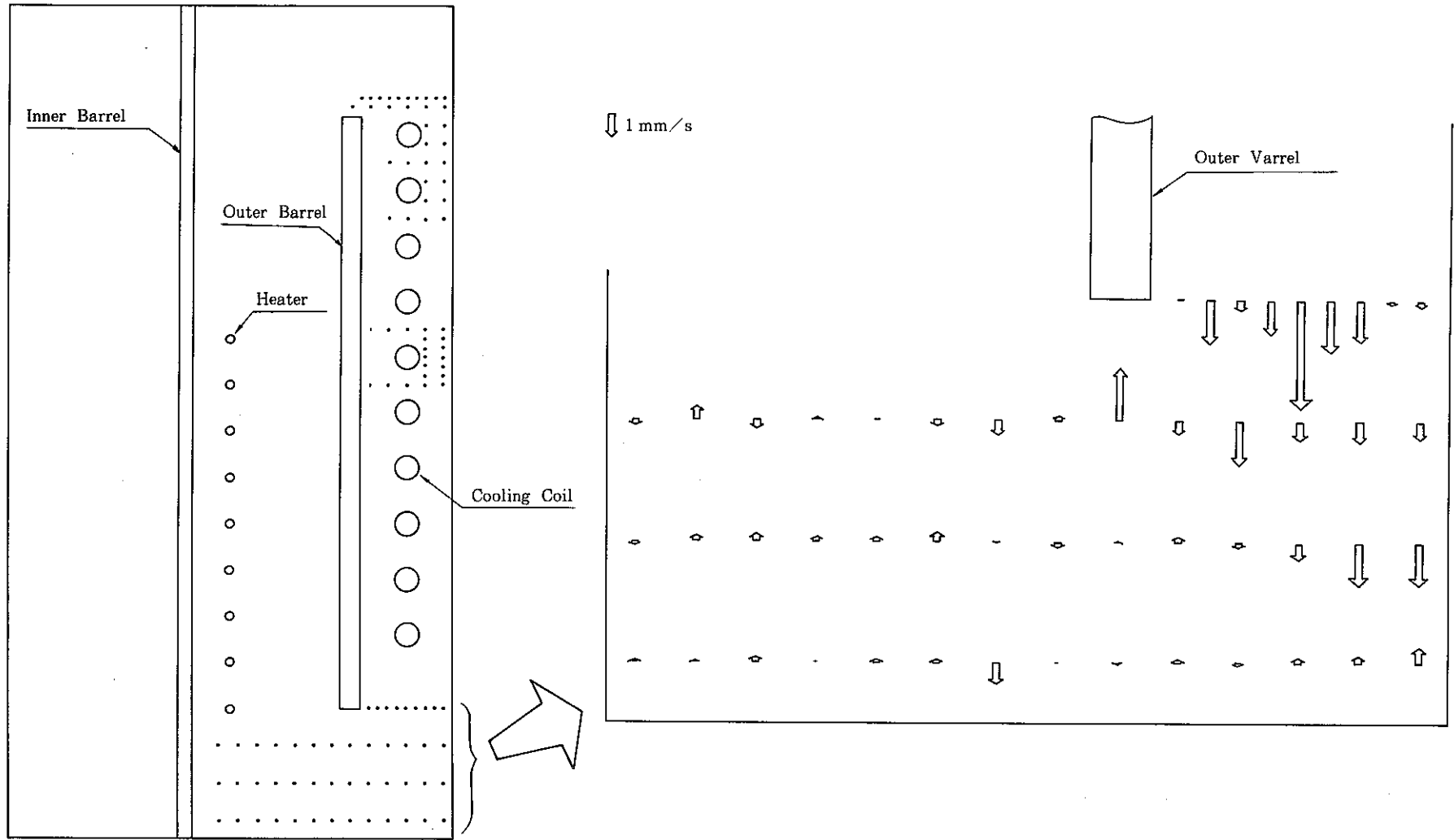


Fig.3 - 15 Velocity Distribution in the Outer Annulus at the Lower Section

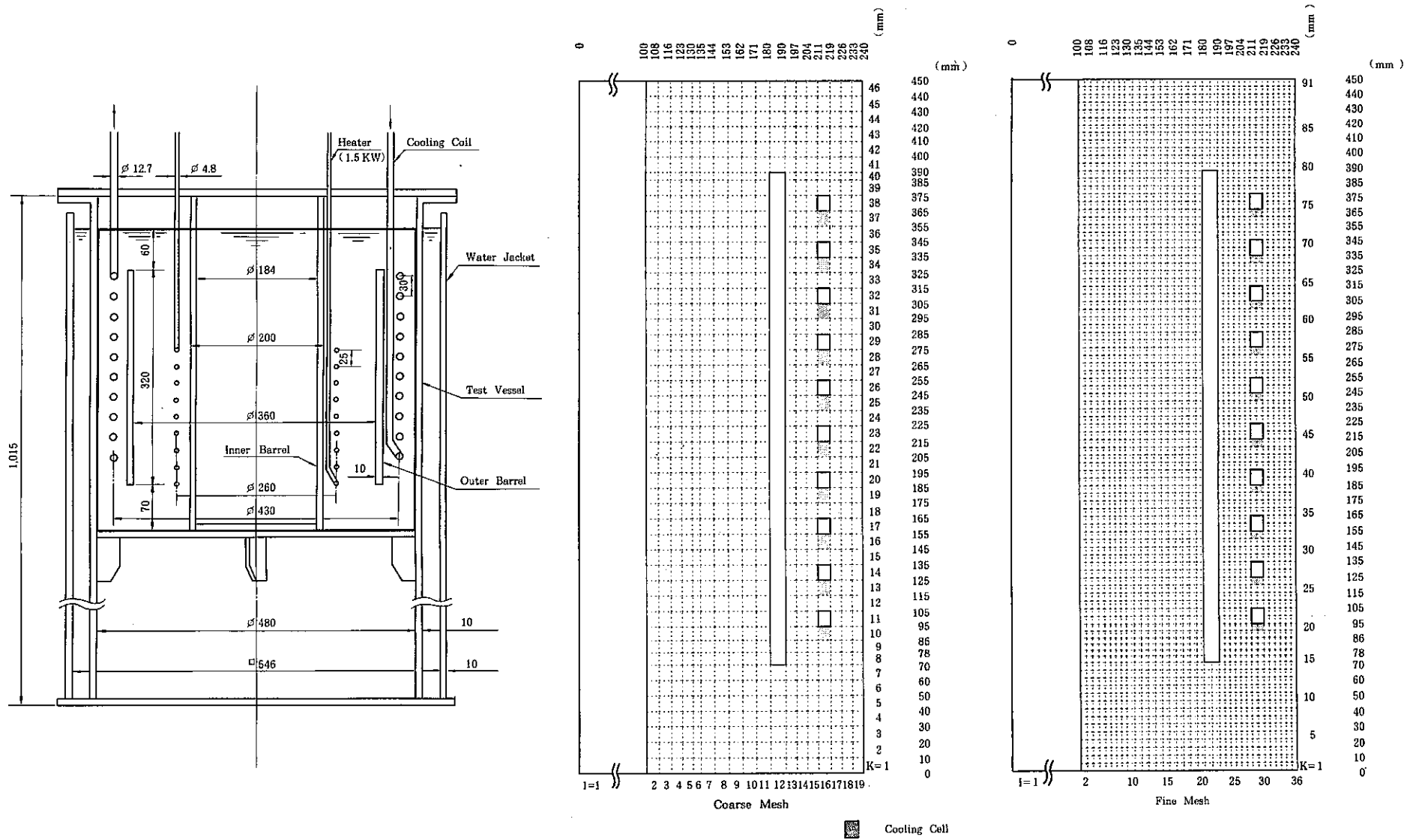


Fig.4 - 1 Mesh Partitionings of Analytical Models

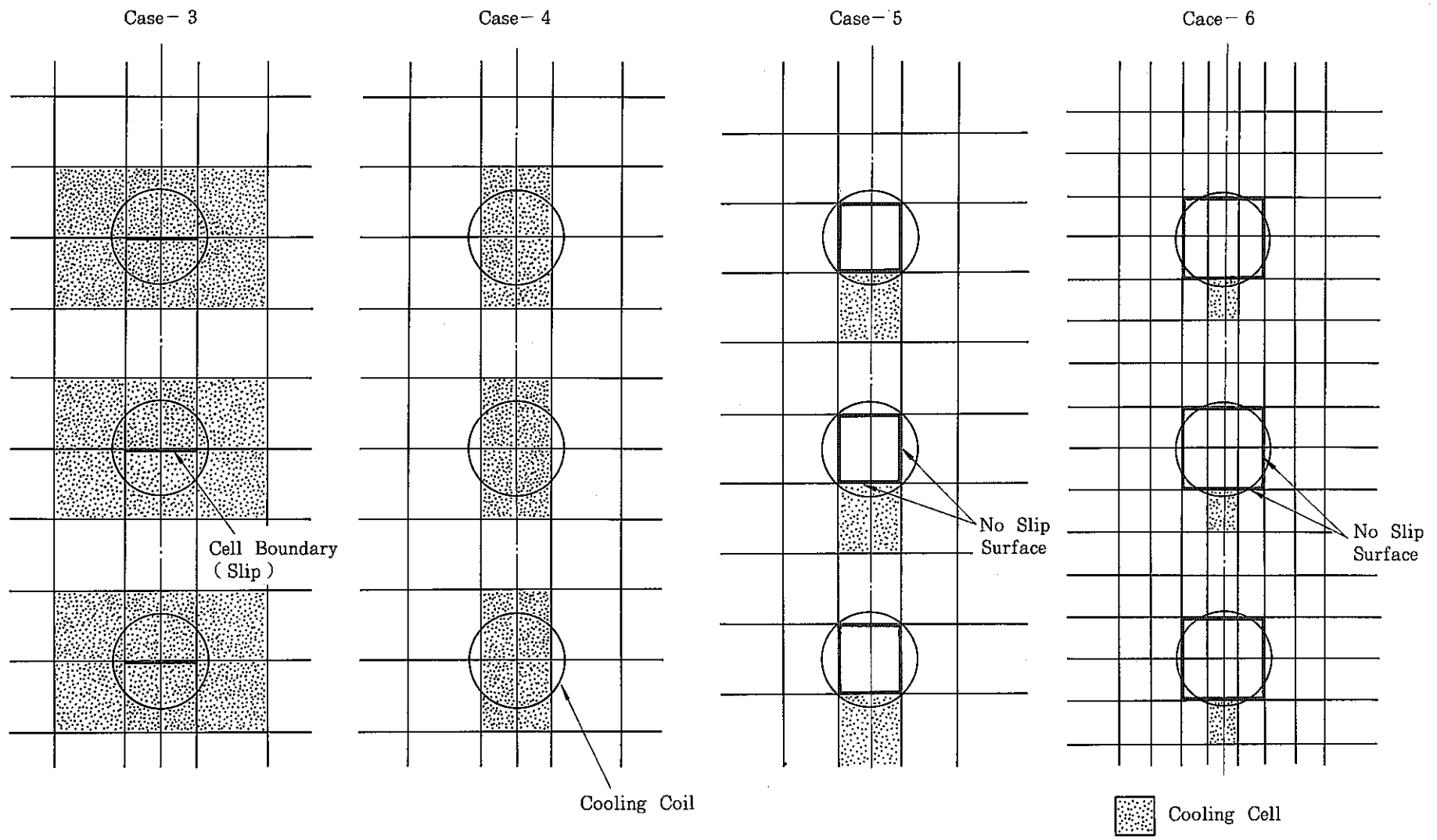
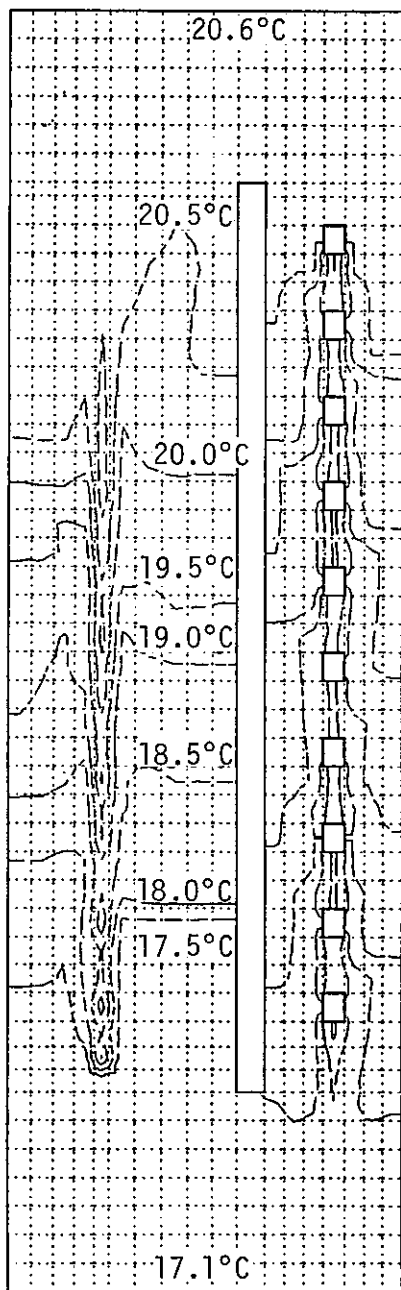
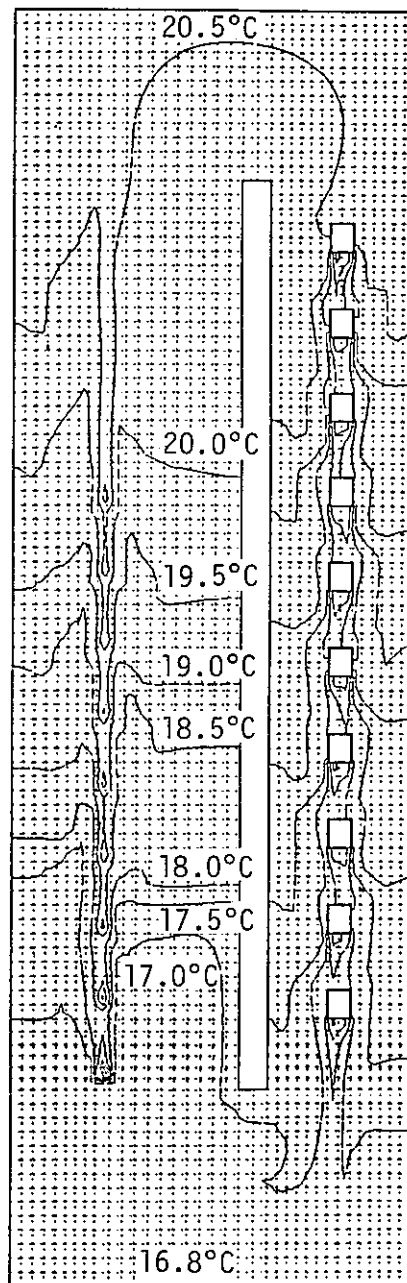


Fig.4 - 2 Modelings of Cooling Coils



Case 1 (Coarse Mesh)



Case 2 (Fine Mesh)

Fig. 4 - 3 Analytical Temperature Patterns for Case 1 and Case 2

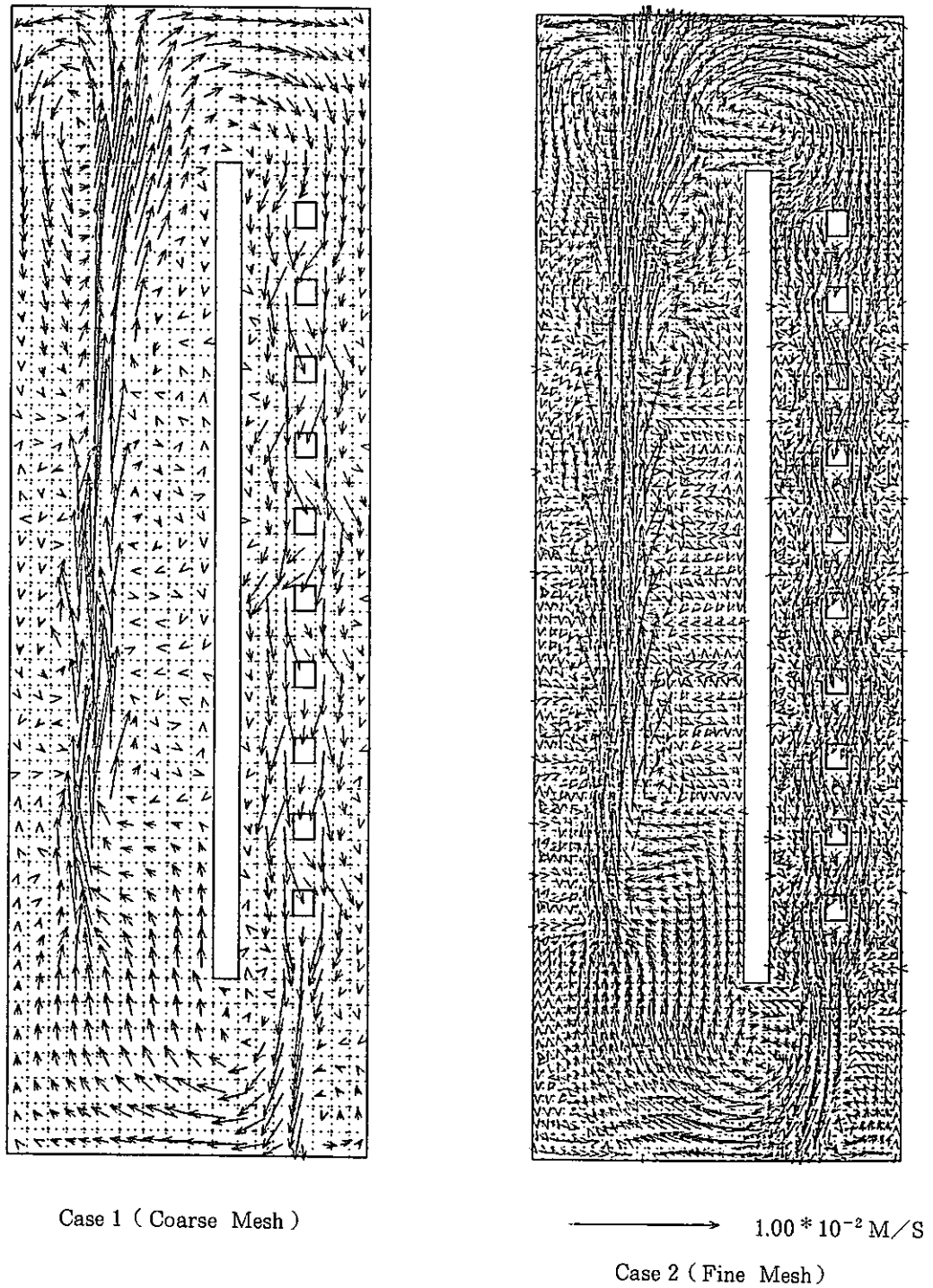


Fig. 4 - 4 Analytical Velocity Vector Plots for Case 1 and Case 2

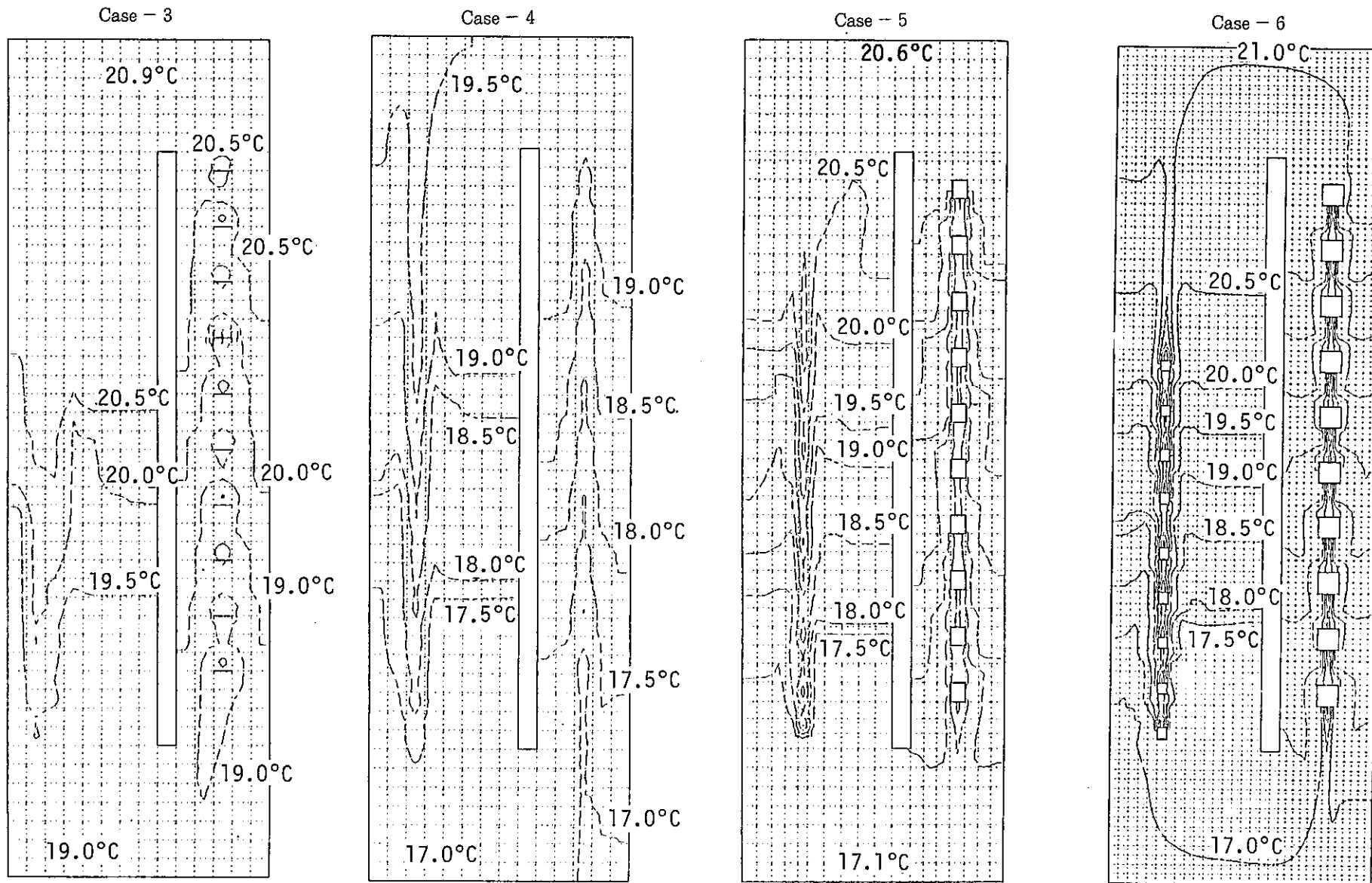


Fig. 4 - 5 Temperature Profile in the Each Analytical Model

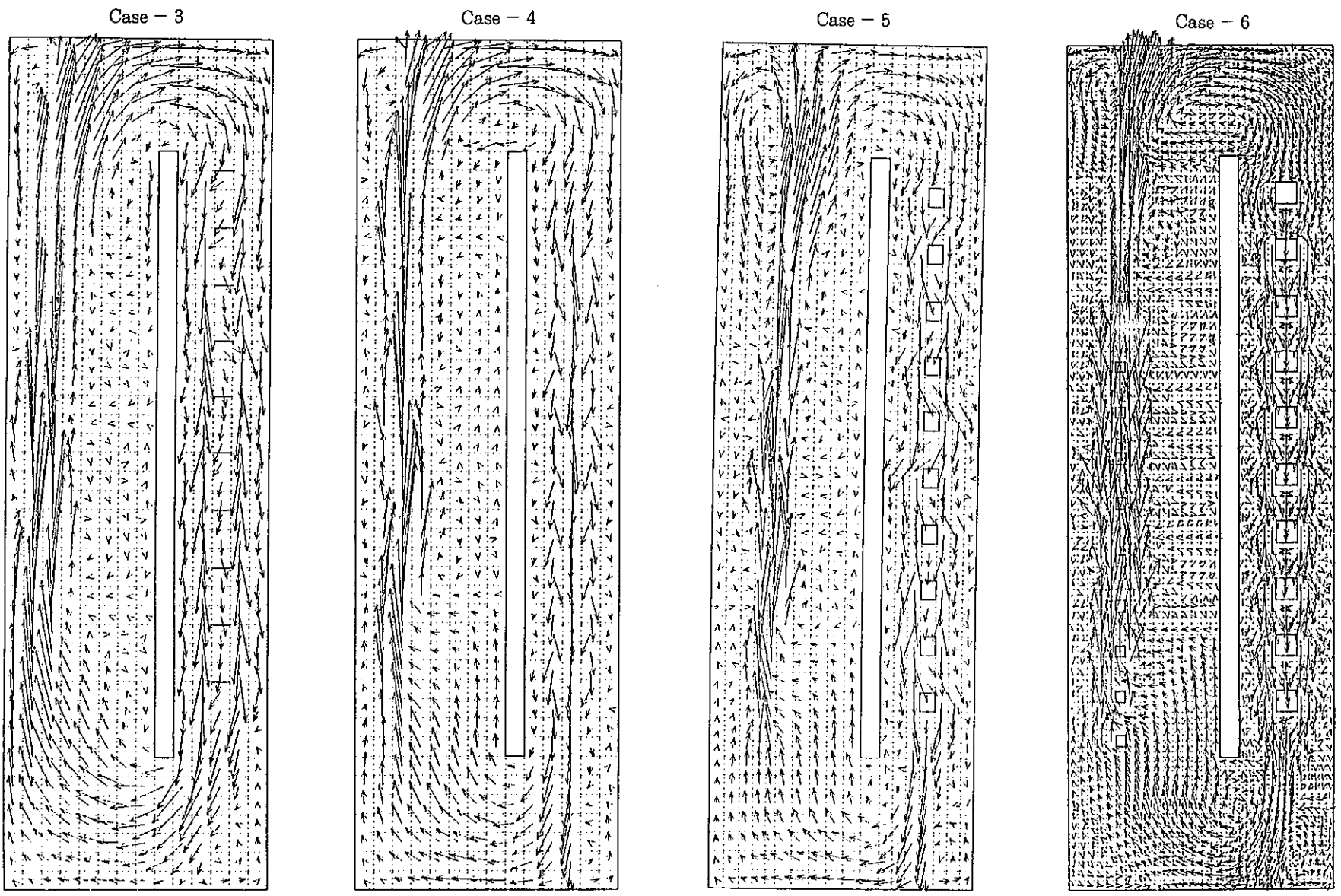


Fig. 4 - 6 Flow Pattern in the Each Analytical Model

→ $1.00 * 10^{-2} M/S$

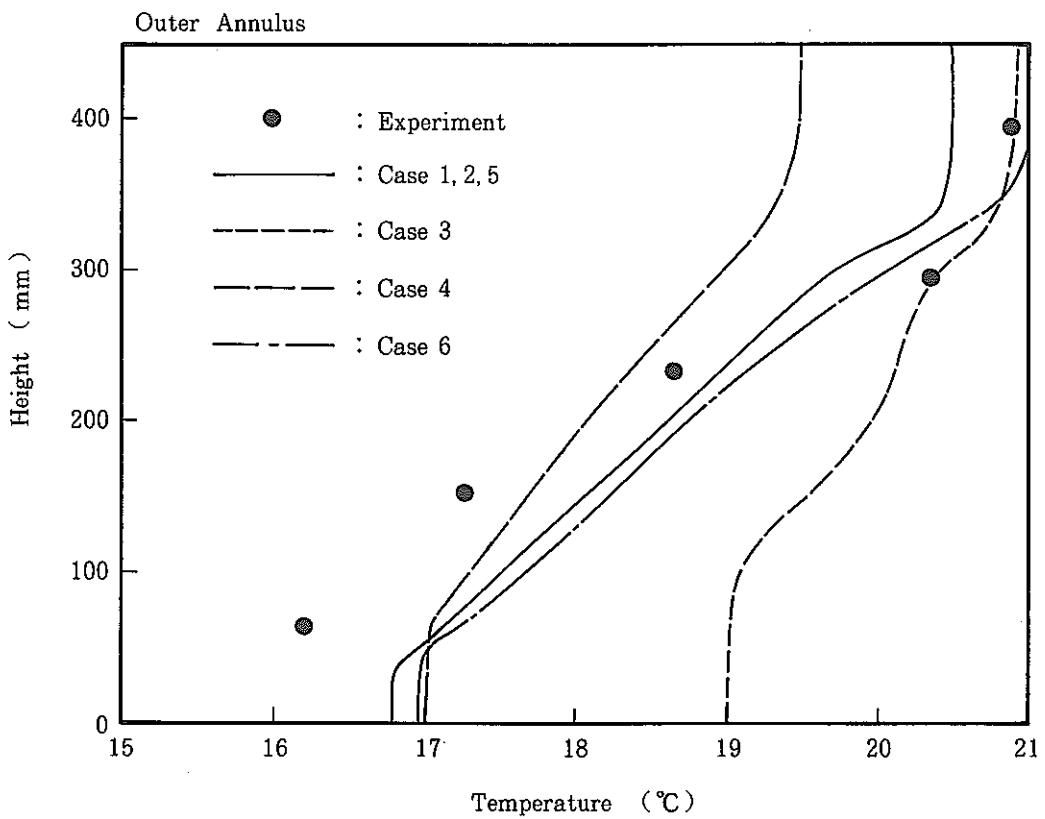
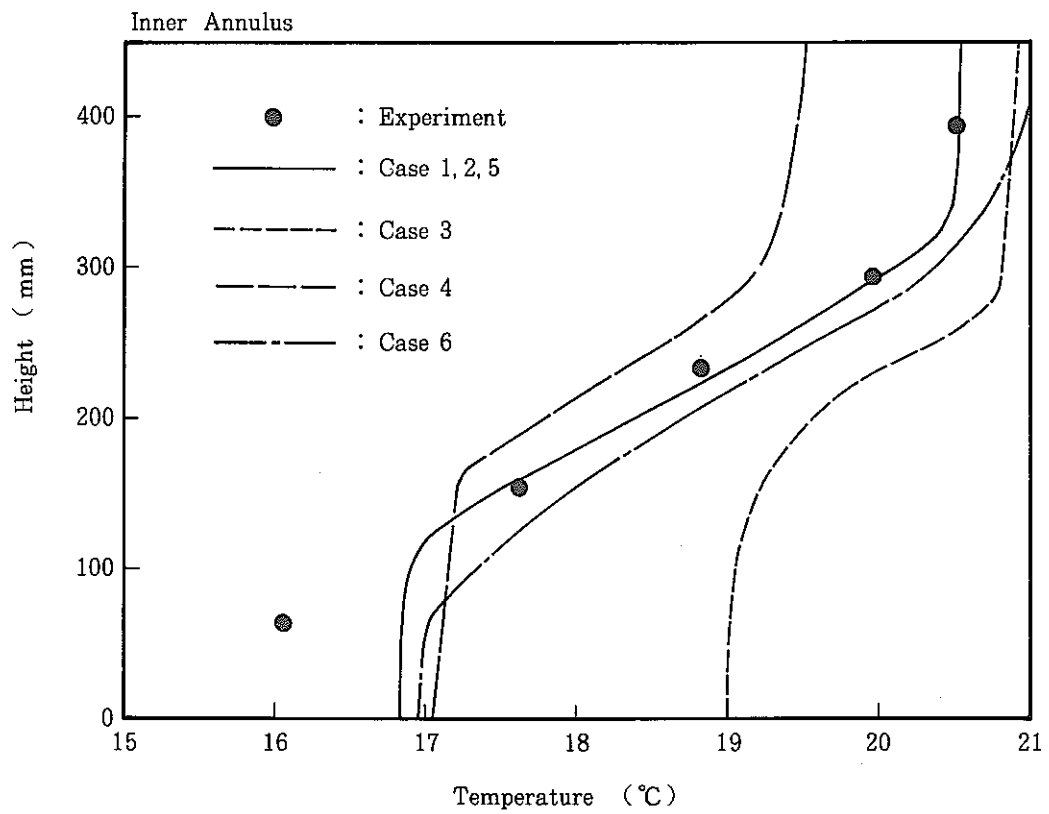


Fig.4 - 7 Comparisons of Analytical and Experimental Axial Temperature Distributions in the Test Model