

FBR実証炉基本仕様選定に係る検討(回転プラグの検討)

多次元熱流動解析コードAQUAのNaミスト輸送解析能力の評価

1988年6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)

FBR実証炉基本仕様選定に係る検討(回転プラグの検討)

多次元熱流動解析コードAQUAのNaミスト輸送解析能力の評価

村松 寿晴*, 松本 雅彦**

要 旨

回転プラグアニュラス部でのNa蒸着防止対策に関し、当該部における自然対流挙動の把握を行うために過去に報告されたデータを基にレビューを行なった。結果を総合するとその要点は、

- (1) アニュラス部間隙が狭いほど、周方向全域に渡る自然対流は発生しにくい。
- (2) アニュラス部に侵入するNaミストの評価に関しては、ミスト自体の重力による沈降現象は考慮に入れる必要は無く、自然対流に付随した対流輸送現象として捉えることが可能である。
- (3) Naミスト輸送現象を支配する因子は、アニュラス部壁の軸方向および周方向の温度分布であり、これを厳密に与えることにより精度の良い解析が可能となる。

である。以上の知見に基づき、単相多次元熱流動解析コードAQUAの質量輸送版によって、対流抑制板に関する実験解析を行なった。その結果、アニュラス部上端に到達するNaミスト濃度を±15%以内で模擬できることが確認された。

* 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

** コンピュータ・サービス株式会社

June, 1988

Investigation to Select Standard Specification
for Demonstration FBR (Rotating Plug)

Evaluation of Analytical Capability for Sodium Mist Transport
of Thermal-Hydraulic Analysis Code AQUA

Toshiharu Muramatsu^{*} and Masahiko Matsumoto^{**}

Abstract

The existed experimental data for natural convection in an annulus between a reactor vessel and a rotating plug were reviewed to understand its phenomena for a prevention measure of sodium mist deposition.

The generalized keypoints are as follows;

- (1) Natural convection in overall circumference of the annulus is decreased by reducing the annulus gap width.
- (2) In evaluation of sodium mist into the annulus, the effect of sedimentation by gravity for its transport can be neglected, and
- (3) Sodium mist transport due to natural convection was dominated by axial and circumferential temperature distributions in the annulus.

A calculation using the mass transport version of three-dimensional thermal-hydraulic analysis code, AQUA was carried out for the experiments of convection barrier. In the calculation results, sodium mist concentration at the top of annulus agrees well with the experiments.

* Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC, PNC.

** CSK Co., Ltd.

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 実験的研究	2
2.1 制御棒駆動機構メカニカルシール試験	2
2.2 「もんじゅ」遮蔽プラグ部ガスブローダウン試験	5
第3章 解析的研究	7
3.1 ナトリウム蒸着に関する試験研究	7
3.2 「もんじゅ」遮蔽プラグ部ガスブローダウン評価	9
3.3 ナトリウムミスト輸送評価の解析的アプローチの妥当性	10
第4章 単相多次元熱流動解析コード AQUA の解析能力	11
4.1 検証実験の概要	11
4.2 解析条件	11
4.3 計算結果	12
4.4 実験結果との比較および解析能力の評価	15
第5章 結 言	17
謝 辞	18
参考文献	19

List of Figures

- Fig. 2.1 Schematic of Test Section for the Ar-He Gases Experiment
- Fig. 2.2 Locations of Thermo-Couples and Gas Sampling Holes
- Fig. 2.3 Details of Thermo-Couple and Gas Sampling Holes
- Fig. 2.4 Re number VS. Gr number under Run 1 of Gap Size Effect Test
- Fig. 2.5 Re number VS. Gr number under Run 2 of Gap Size Effect Test
- Fig. 2.6 Re number VS. Gr number under Run 3 of Gap Size Effect Test
- Fig. 2.7 Re number VS. Gr number under Run 4 of Gap Size Effect Test
- Fig. 2.8 Vertical Temperature Profiles of Annulus Wall
- Fig. 2.9 Re number VS. Gr number under Temperature Distribution Effect Test
- Fig. 2.10 Schematic of Test Section for the Ar-Na Experiment
- Fig. 2.11 Positions of Thermocouples and Sampling Gas Nozzles in the Annulus
- Fig. 2.12 Re number VS. Gr number in the Case of Annulus Gap=8mm
- Fig. 2.13 Re number VS. Gr number in the Case of Annulus Gap=4mm
- Fig. 2.14 Experimental Threshold of Detection for Active Gases
- Fig. 2.15 Schematic of Test Section for the Gas Blow-Down Experiment
- Fig. 2.16 Circumferential Temperature Distribution of Flowrate=0.05m³/min.
- Fig. 2.17 Experimental Threshold of Detection for Tracer Gases
- Fig. 3.1 Schematic of Test Section for the Test of Sodium Vapor Condensation
- Fig. 3.2 Analytical Region of Numerical Analysis
- Fig. 3.3 Mesh Arrangement for Numerical Analysis
- Fig. 3.4 Analytical Results of Temperature, Vapor Fraction, Stream Function and Vorticity Distribution
- Fig. 3.5 Comparison of Condensation Rate Between The Data and The Numerical Solutions
- Fig. 3.6 Analytical Region of Gas Blow-Down Experiment and Temperature Distribution in Z-Axis
- Fig. 3.7 Velocity Distribution in The Annulus under Nominal Flow Rate
- Fig. 3.8 Relation of Experimental Threshold and Numerical Solutions
- Fig. 4.1 Test Tank and Model RSPs
- Fig. 4.2 Surface Temperature Distributions of the Annulus
- Fig. 4.3 Mist Concentration Against Cover Gas Space Roof Temperature
- Fig. 4.4 Mist Concentrations at Different Locations within the Annulus

- Fig. 4.5 Dependent of Mist Concentration C_i Upon Gap Clearance
- Fig. 4.6 Mesh Arrangement for the Analysis Region
- Fig. 4.7 Axial Concentration Distribution for Various Circumferential Positions at the Lower Region of Annulus
- Fig. 4.8 Axial Concentration Distribution for Various Radial Positions at the Lower Region of Annulus
- Fig. 4.9 Radial Concentration Distribution for Various Circumferential Positions at the Lower Region of Annulus
- Fig. 4.10 Concentration Contour Plot for θ -Z Planes at the Lower Region of Annulus
- Fig. 4.11 Axial Concentration Distribution for Various Radial Positions at the Upper Region of Annulus
- Fig. 4.12 Axial Concentration Distribution for Various Circumferential Positions at the Upper Region of Annulus
- Fig. 4.13 Radial Concentration Distribution for Various Circumferential Positions at the Upper Region of Annulus
- Fig. 4.14 Concentration Contour Plot for θ -Z Planes at the Upper Region of Annulus
- Fig. 4.15 Axial Temperature Distribution for Various Circumferential Positions at the Lower Region of Annulus
- Fig. 4.16 Axial Temperature Distribution for Various Radial Positions at the Lower Region of Annulus
- Fig. 4.17 Radial Temperature Distribution for Various Axial Positions at the Lower Region of Annulus
- Fig. 4.18 Temperature Contour Plot for θ -Z Planes at the Lower Region of Annulus
- Fig. 4.19 Axial Temperature Distribution for Various Radial Positions at the Upper Region of Annulus
- Fig. 4.20 Axial Temperature Distribution for Various Circumferential Positions at the Upper Region of Annulus
- Fig. 4.21 Radial Temperature Distribution for Various Axial Positions at the Upper Region of Annulus
- Fig. 4.22 Temperature Contour Plot for θ -Z Planes at the Upper Region of Annulus
- Fig. 4.23 Radial Velocity w Distribution for Various Axial Positions at the Lower Region of Annulus
- Fig. 4.24 Velocity Vector Plot for R-Z Planes at the Lower Region of Annulus

Fig. 4.25 Velocity Vector Plot for θ -Z Planes at the Lower Region of Annulus

Fig. 4.26 Radial Velocity w Distribution for Various Axial Positions at the Upper Region of Annulus

Fig. 4.27 Velocity Vector Plot for R-Z Planes at the Upper Region of Annulus

Fig. 4.28 Velocity Vector Plot for θ -Z Planes at the Upper Region of Annulus

Fig. 4.29 Comparison of Mist Concentration between Measured and Calculated Data

第1章 緒 言

回転プラグと炉容器により形成される垂直アニュラス部の様な、軸方向距離 [L] が大きく等価直径 [De] が比較的小さく (すなわち、 L/De が大きい) かつ軸方向に温度勾配を有する垂直環状流路体系の自然対流に関しては、「もんじゅ」の制御棒駆動機構試験¹⁾を始めとする多くの実験的研究が行なわれている。これらの実験では、可視化技術などによって、ナトリウムミストまたは蒸気を含む炉上部カバーガスの上昇メカニズムが、サーモサイフォンによるものであることを確認し、物質の濃度差による拡散効果の寄与は無視できることを示している。また、これらの現象支配因子の分析に基づき、グラスホフ数 [Gr]、レイノルズ数 [Re]、フルード数 [Fr] および上記の形状係数 [L/De] を用いて、炉上部カバーの上昇侵入の有無を判別する実験式が求められている。

また、燃料交換機器類の炉上部プラグ貫通部に発生する自然対流の抑制のために、必要な新鮮アルゴンガスのブローダウン流量をモックアップ実験で確認された試験もある。その試験では、実機のほぼ実寸大環状流路模型 (ただし、軸方向距離は約 1/2) を用いて、新鮮アルゴンガスの吹き込みが行なわれ従来の判別式で考慮していなかった軸方向温度分布の効果が詳細に検討され、勾配グラフオフ数 [Gr*] およびレイノルズ数 [Re] により浮力と慣性力との平衡条件を表わす判別式が提案されている。

一方、このような現象に関する解析的アプローチの例は、比較的少ない。その1つとして、姫野らが実施したナトリウム蒸着に関する試験研究がある³⁾。この研究では、円筒間隙蒸着実験データ解析のためにグラスホフ数が 10^4 以上の自然対流領域で使用可能な計算コードが作成され、アルゴンカバーガスの自然対流挙動が解析的に調べられた。

また、最近では先の新鮮アルゴンガスのブローダウン流量を解析的に評価するために、汎用多次元解析コードに質量輸送方程式を附加した新バージョンが開発され、実験検証および実機評価が実施されている⁴⁾。

本報では、実験的研究により明らかにされた現象論的考察結果と解析コードの現象模擬性能の評価結果をレビューする。

第2章 実験的研究

2.1 制御棒駆動機構メカニカルシール試験¹⁾

本試験は、制御棒駆動機構と遮蔽プラグにより形成される垂直環状空間において放射性カバーガス、ナトリウム蒸気およびミストの拡散および自然対流挙動を実験的に評価する目的で行われた。試験は、Ar-He系、Ar-ナトリウム蒸気の2種類に分けられる。この両者の試験結果から、下部空間に存在するHeあるいはナトリウム蒸気が環状空間に侵入するか否かを判定する共通の判別式が得られている。

2.1.1 Ar-He系ガス試験

(1) 試験概要

試験の対象となる垂直環状空間は、下部になるほど温度が高く、したがって自然対流が発生しやすい。そこで自然対流による環状空間へのHeガスの対流輸送を抑止するため新鮮Arガスのブローダウンを行なっているが、ブローダウンの効果を評価するためには次の諸点を明らかにする必要がある。

- (i) 温度差により生じる自然対流に打ち勝つため、強制対流はどの程度必要か。
 - (ii) 強制対流域において、速度境界層を逆拡散するHe又はナトリウム量はどの程度か。
- これらに関する知見を得るために、次の試験が実施された。

(i) 寸法形状効果試験

環状空間の寸法形状が、逆拡散にどのような影響を与えるかを把握する。

(ii) 壁温度分布効果試験

環状空間壁の温度分布が現象にどのように影響するかを把握する。

(2) 試験装置

Fig. 2.1 に試験装置の概略図を示す。試験装置は、流れを十分発達した層流とするための上部ハウジング、環状空間を形成する外筒と棒（制御棒模擬）および拡散ガスとブローダウンガスが混合を起す下部ハウジングより成る。ハウジングと環状空間部外筒とは、フランジで連結されており、外筒およびフランジ部にはガスサンプリングおよび外筒温度およびガス温度の測定のためにそれぞれ直径1mm および2mm の孔があけられている。棒の温度は、外壁に埋め込まれている4本の熱電対が用いられる。また、外筒には600Wのヒータが4本ほぼ均等に巻き付けられており、必要に応じて加熱することが出来る。環状空間内の詳細を Fig. 2.2 ~ Fig. 2.3 に示す。

(3) 寸法形状効果試験

寸法形状効果試験は、2種類の環状空間部の長さ(800mm, 400mm)、2種類の環状空間部の間隙(8mm, 4mm)を組合せた4ケースについて実施された。試験結果を Fig. 2.4～Fig. 2.7 に示す。図中の横軸が Re 数、縦軸が Gr 数であり、それぞれ下式で定義されている。

$$Re = \frac{V \cdot De}{\nu}, \quad Gr = \frac{De^3 g \beta \Delta T}{\nu^2}$$

ここで、

- V : 平均軸方向ブローダウン流速
- ν : 動粘性係数
- De : 水力等価直径
- g : 重力加速度
- β : 体積膨張係数
- ΔT : 環状空間部上下端温度

である。

図中に示した実線は、濃度分布より判定した自然対流効果の有無に関するしきい値を表わしており、ブローダウンによって垂直方向に発生する自然対流を抑制することのできる条件式は、以下の様になった。

- ① De = 16 mm の場合

$$Gr / Re^{1.43} \leq 12.2$$

- ② De = 8 mm の場合

$$Gr / Re^{1.43} \leq 24.8$$

これらの式は、環状空間部間隙が狭いほど、ブローダウン流量が少なくて済むことを示しており、慣性力と重力の効果を表わす Fr 数 ($=V^2/g \cdot De$) を用いて整理すると以下の様になる。

$$Gr / Re^{1.43} \leq 32.5 Fr^{0.35}$$

すなわち、

$$Gr \cdot Fr^{-0.35} / Re^{1.43} \leq 32.5$$

を満足することになる。

(4) 壁温分布効果試験

壁温分布効果試験は、環状空間部の長さ 800 mm、環状空間部の間隙 8 mm の組合わせで環状空間部外筒にはほぼ均等に 4 本の電気ヒータを配置して実施された。試験時の軸方向温度分布を Fig. 2.8 に示す。また、Fig. 2.9 に Re 数と Gr 数とにより整理した結果を示す。この結果より、壁に垂直方向温度分布が存在する場合の方が無い場合に比べ、ブローダウン効果が現われ易いことが理解できる。この知見は自然対流発生条件と矛盾するが、軸方向に温度分布が生

じることによって環状空間内の流況が相対的に大きな渦から小さな渦（セルコンベクション）に移行することを表わしているものと文献で述べられている。

2.1.2 Ar-Na 蒸気系試験

(1) 試験概要

この試験は、ナトリウムの蒸気およびミストを対象として、軸方向温度差に起因する浮力に打ち勝つ慣性力を実験的に求め、Ar-He系ガス試験において得られた判定条件式がAr-Na蒸気系においても共通して使用できるかを確認する目的で実施された。試験パラメータは、以下の3項目である。

- (i) 寸法形状
- (ii) ナトリウム温度
- (iii) 壁温度分布

(2) 試験装置

Fig. 2.10 に試験装置の概略図を示す。試験装置は、獣状部にブローダウンガスを均等に流すための上部ハウジング、環状部を形成する外筒、棒（内筒）よりなり、これらがナトリウム精製系を持つナトリウムポットの上部にフランジを介して取り付けられている。棒は、上部ハウジング部とシール機構を介して連結されており、上下動ができ引き上げると下端部で外筒と接し、ナトリウムポットカバーガス空間から環状空間を隔離できる様になっている。芯出しは、シール部と周方向3箇所にて設けた突起物で行なう。外筒には、温度計測のために直径1mm、2mmの孔があり、熱電対を挿入することにより、内筒表面、環状部、外筒の温度測定する。なお、外筒上下端には、ナトリウムの存在の有無を計測するSID用のサンプリング孔が周方向に4箇所設けられている。また、外筒表面には電気ヒータが取り付けられており、必要に応じて加熱できる様になっている。環状部の詳細を、Fig. 2.11 に示す。

(3) 試験結果と検討

環状寸法8mmおよび4mmでのRe数とGr数との関係をFig. 2.12～2.13に示す。環状寸法が8mmの場合には、全てのデータがAr-He系から得られた判定条件を満足しているが、環状部長さが長い場合にはブロー流量を過大評価をしている。環状寸法が4mmの場合の結果は、Ar-He系での試験ではカバーできていないRe数領域であるが、ほぼ判定条件式が適用できる結果となっている。Fig. 2.14は、Ar-He系試験で得られた判定式がAr-Na系での試験結果にも適用できるかを確認するために、 $Re^{1.43} Fr^{0.35}$ とGrの関係に変換して表示したものである。この結果から、Ar-He系試験により得られた判定条件がAr-Na系試験結果にも適用可能であることが確認できる。

2.2 「もんじゅ」遮蔽プラグ部ガスブローダウン試験

2.2.1 試験概要

燃料交換時に原子炉容器上部に据え付けられた遮蔽プラグ機器類の慣通部(垂直環状流路)には、軸方向温度分布により自然対流が発生する。この自然対流は、炉容器内の放射性カバーガスを燃料交換機器類の内部へ輸送され、そこで新鮮アルゴンガスと置換されて、気体廃棄物として原子炉外へ排出される。高速増殖炉「もんじゅ」ではこの気体廃棄物量の減少を図るため、遮蔽プラグ上部より新鮮アルゴンガスを吹き込み、上記の自然対流の発生を抑制する。本試験は、この吹き込み(ブローダウン)効果に対する軸方向温度分布の影響を実験的に解明し、環状流路へのブローダウン流量を適切な裕度で評価する手法を開発するために実施された。

2.2.2 実験装置

Fig. 2.15 に実機の炉内燃料移送機の代表的な環状流路部を実寸大で模擬したブローダウン試験装置を示す。装置の作動流体には、ブローアで送風する空気を用いている。また、環状流路内の軸方向、周方向および径方向の詳細な温度分布を測定するために、総数 171 本の熱電対が設置されている。環状流路への加熱容器内流体の上昇は、容器にトレーサガス(Xe)を注入し、流路から採取した作動流体中のトレーサ濃度を分析して確認した。

2.2.3 実験結果

銅加熱板(heating plate)の表面温度および軸方向温度差をそれぞれ実機燃料交換時に相当する 200℃ および約 120℃ として、ブローダウン流量を定格流量 0.1 m³/min の 20~300% の範囲で変化させ、環状流路内の温度分布特性およびトレーサガス濃度が測定された。Fig. 2.16 に 1 例として、ブローダウン流量 0.05 m³/min (実機定格流量の 50%)、外管(outside tube heating cylinder)加熱量 64.2 W/m² における周方向温度分布測定結果を示す。この結果から、周方向温度分布は、ブローダウン流の下流側になるほど増大していることが分かる。外管の加熱量は周方向一様であるので、この温度分布はブローダウン流の周方向不均一性に基づくものである。周方向温度分布と軸方向温度分布との関係に着目すると、流れの不均一性を表わす周方向温度分布は、流路の全長に渡る温度差に対するよりは、局所的な軸方向温度勾配に依存することが理解できる。

Fig. 2.17 に勾配グラスホフ数 [Gr^{*}] とレイノルズ数 [Re] により整理したトレーサガス検出の有無の結果を示す。ここで、勾配グラスホフ数 [Gr^{*}] とレイノルズ数 [Re] はそれぞれ以下の定義式に従う。

$$Gr^* = \frac{g \beta de^4}{\nu^2} \frac{dT}{dZ}, \quad Re = \frac{V de}{\nu}$$

ここで、

- g : 重力加速度
- β : 体積膨張係数
- V : 軸方向平均流速
- d_e : 水力等価直径
- ν : 動粘性係数
- dT : アニュラス部下端軸方向温度差
- dZ : アニュラス部下端軸方向距離

である。これらのパラメータは、軸方向温度勾配による流れの偏流（自然対流効果）とブローダウンによる強制対流効果との平衡条件を表わすものである。この結果より、トレーサガス検出の有無は、 Gr^*/Re の比により3つの領域に分類できることがわかる。すなわち、 $Gr^*/Re > 10$ の領域においては流路内で常にトレーサガスが検出されており、ブローダウン効果は期待できない。一方、 $Gr^*/Re < 3$ の領域では、ブローダウン流れは強制対流支配となり、自然対流によるトレーサガスの上昇を十分抑制していることが分かる。

$3 < Gr^*/Re < 10$ の領域は、自然対流と強制対流の効果が相互に影響し合う不安定な領域と考えられ、ブローダウン効果は Gr^*/Re のみでは規定できず、他の支配因子の考慮が必要となる。

第3章 解析的研究

3.1 ナトリウム蒸着に関する試験研究³⁾

本研究では、ナトリウム蒸着現象解明のために取得された試験結果を解析的に評価する目的で二次元熱流動解析コードが開発されている。以下では、コードの概要と試験データによる検証結果について示す。

3.1.1 基礎式

(1) 質量保存式

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0$$

(2) 運動量保存式

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{K} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \nabla^2 \mathbf{v}$$

(3) エネルギー保存式

$$\frac{dT}{dt} + \operatorname{div} (T\mathbf{v}) = \kappa \nabla^2 T$$

(4) 物質輸送の式

$$\frac{dw}{dt} + \operatorname{div} (w\mathbf{v}) = D \nabla^2 w$$

ここで、

\mathbf{v} : 流速

\mathbf{K} : 外力

ρ : 密度

p : 圧力

ν : 動粘性係数

t : 時間

T : 温度

κ : 温度拡散率

w : 蒸気分率

D : 蒸気の Ar ガス中拡散係数

である。流体に関する仮定として、

(1) 非圧縮性粘性流体

(2) Boussinesq 近似

(3) ナトリウム蒸気は、飽和蒸気濃度で輸送される。
が用いられる。

3.1.2 数値計算法

(1) 空間の差分化

基礎式中の1階微分項には2点中心差分近似、2階微分項には3点中心差分近似を用いる。

(2) 時間の差分化

前進差分近似を用いる。

(3) 時間積分法

陽解法

(4) 圧力方程式解法

SOR 法

3.1.3 実験解析

Fig. 3.1 に示す試験装置を用いた実験を解析する。解析体系は、Fig. 3.2 に示す様に軸方向はナトリウム液面から環状流路上端までとし、2次元を仮定する。Fig. 3.3 にメッシュ分割を示す。また、以下に計算条件を列記する。

計算体系 : $r - z$ 2次元

r 方向メッシュ数 : 15

z 方向メッシュ数 : 16

加速係数 ω : 1.775747

収束判定条件 : 5×10^{-3}

時間刻み幅 Δt : 0.01 sec.

定常状態における温度分布、ナトリウム蒸気濃度分布、流線および温度分布を Fig. 3.5 に示す。また軸方向蒸着速度分布を Fig. 3.5 に示す。Fig. 3.5 の実験結果との比較では、計算結果が実験結果に比べ全体的に約2桁程度低めの値を示している。これは、蒸着が蒸気凝縮支配ではなくナトリウムミスト沈着支配であること、および周方向に渡る比較的大きな自然対流現象を2次元計算結果が模擬できていないためと述べられている。また、数値計算上における不一致要因として、数値拡散による誤差の可能性がある。すなわち、見掛け上の粘性効果が物理的粘性効果を覆い隠し、解を劣化させていると解釈できる。

3.2 「もんじゅ」遮蔽プラグ部ガスブローダウン評価⁴⁾

本研究は、第2.2節で述べた同試験の解析的研究に相当する。本研究では、単相多次元熱流動解析コード AQUA に質量輸送方程式を付加した新バージョンが開発され、実験検証および実機評価が実施されている。

3.2.1 基礎式

新たに付加された質量輸送方程式を、以下に示す。

$$\frac{d}{dt} (\rho \phi) + \text{div} (\rho \mathbf{u} \phi) = \text{div} (D \text{grad} \phi)$$

ここで、

ϕ : 拡散溶質体積濃度

ρ : 溶媒密度

\mathbf{u} : 溶媒流速

D : 拡散係数

t : 時間

である。流体に関する仮定として、拡散溶質の濃度は重力の影響が無視できる程希薄であり、その密度は溶媒物質のそれと等しいとした。

3.2.2 数値計算法

(1) 対流項の差分化

多次元熱流動解析コード AQUA では、1次風上差分法の他に数値拡散を防止するため空間に関して2次の正確度を持つ QUICK - FRAM 法(高次差分法)が使用できる。

(2) 時間積分法

時間刻み幅 Δt に関し無条件安定な完全陰解法の他に、高次差分法を使用する場合に用いられる半陰解法が選択できる。

(3) 圧力方程式解法

SOR 法の他に、大規模問題に最適な ICCG 法が使用できる。

3.2.3 実験解析

Fig. 2.15 に示した問題を解析する。解析体系を Fig. 3.6 に示す。解析は、3次元体系で行なう。以下に計算条件を列記する。

計算体系 : $r - \theta - z$

r 方向メッシュ : 22

θ 方向メッシュ : 6

z方向メッシュ数	: 81
下部加熱板	: 201.7°C一定
Xe注入濃度	: 3.62×10^4 p.p.m.
対流項差分法	: 1次風上差分法
ブローダウン流量	: 定格流量
環状空間壁温度分布	: 実験結果を入力(周方向に非一様, Fig. 3.6 に $\theta = 300^\circ$ における軸方向温度分布を示す)

Fig. 3.7 に環状流路下端における径方向流速分布を示す。周方向温度分布の非一様性により、周方向について流速分布が変化しているのが分かる。Fig. 3.8 にブローダウン流量を変化させた場合の、Xe ガスの検出の有無を示す。結果では、ブローダウン流量を定格の1/2に設定した場合のみXe ガスが環状流路上端で検出されている。ブローダウン流量が定格および定格の2倍の状態では、Xe ガスは検出されない。以上より、放射性カバーガスの上昇に関する実験判別条件を計算結果が満足していることが分かる。

3.3 ナトリウムミスト輸送評価の解析的アプローチの妥当性

第2.1節において記述したAr-He系ガス試験およびAr-Na蒸気系試験の知見から、以下に示す項目が明かになっている。

- (1) Ar-He系ガス試験により得られた放射性カバーガス上昇に関する判定式は、Ar-Na蒸気系においても適用可能である。
- (2) (1)の知見から、Arガス中へのNaミスト侵入評価に関しては、Naミスト自体の重力による沈降現象は考慮に入れる必要はなく、自然対流に付随した対流輸送現象として捉えることが可能である。

また、第2.2節より、軸方向温度分布を適切に評価することにより自然対流に伴う放射性カバーガスの上昇割合を良好に判定できることが明かとなっている。

一方、3.2節において述べた様に、解析的アプローチによっても実験により得られた放射性カバーガスの上昇に関する判定条件に従う結果が得られる。したがって、適切な境界条件(特に、軸方向温度分布)の下で計算コードを適用させることにより、ナトリウムミストの輸送を含む自然対流現象を正確に評価できると考えられる。

第4章 单相多次元熱流動解析コードAQUAの解析能力

4.1 検証実験の概要

環状空間内における Na ミストの浸入は、カバーガス空間から環状空間への自然対流によるガスの流入を対流抑制板によって制限することにより抑制される。文献5)の実験的研究では、環状空間下端部に円環状の対流抑制板を設け、この形状による Na ミスト流入の抑刷効果が検討された。

Fig. 4.1 に実験装置の概略図を示す。試験体は、「もんじゅ」の回転プラグと遮蔽プラグを高さ1:1、直径1:10の縮尺で模擬したもので、内部には内側と外側にそれぞれ1つつつ環状空間が設けられている。実験は、対流抑制板の形状を以下に示す様に変化させて実施された。また、実験における環状空間部の周方向および軸方向の温度分布は、Fig. 4.2 に示す様になった。

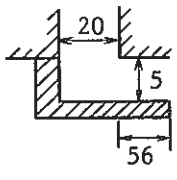
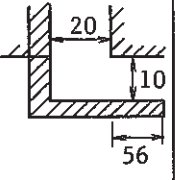
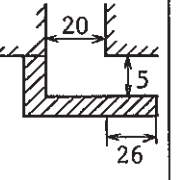
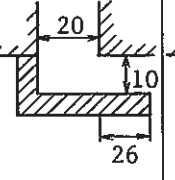
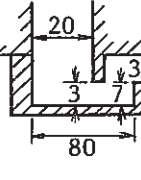
Run #	1	2	3	4	5
test duration (hrs)	116	50	50	50	50
the inner annulus					
	CB equipped	CB equipped	CB equipped	CB equipped	CB equipped

Fig. 4.3 に、カバーガス空間における Na ミストの濃度データを示す。同図中における◆印が、実験で対流抑制板の形状を変化させた場合の濃度結果である。Fig. 4.4 に、環状空間部の軸方向各位置における周方向濃度分布の実験結果を示す。得られた結果から、軸方向の高さと共に濃度は増加の傾向にあるが顕著ではなく、また周方向もほぼ均一で、環状空間内における濃度の偏在は認められない。Fig. 4.5 に、環状空間内 Na ミスト濃度と対流抑制板の間隙 δ (プラグ下端—対流抑制板間距離) との関係を示す。この結果から、間隙 δ を小さくするに従って、環状空間内への Na ミスト流入が効果的に低減されている様子が分かる。

4.2 解析条件

Fig. 4.1 に示した試験体内、内側環状空間のみに着目して解析を行なう。対流抑制板の形

状は、上記したケースの内 Run 3 を選定した。但し、今回の解析は、第 4.1 節で述べた様に重力沈降による Na ミストの挙動はモデル化していない為、輸送物質の空間的分布を解析的に評価するに止めた。すなわち、Na ミストは He ガスの分布に置き換え、Ar ガス空間中の He ガスの振る舞いを評価する問題とした。したがって、環状空間壁における Na ミストの蒸着量についても評価の対象から外した。

解析体系を Fig. 4.6 に示す。軸方向の解析範囲は、Na 液面から環状空間上端までとし、径方向の解析範囲は、容器外壁までとした。以下に、解析条件を列記する。

計算体系 : $r-\theta-z$ 3次元
 r 方向メッシュ : 32
 θ 方向メッシュ : 6
 z 方向メッシュ : 116
Na 液面温度 : 580°C 一定
Ar ガス濃度 : カバーガス空間 1000 p.p.m. 固定
容器壁温度境界 : 断熱
環状空間壁 : Fig. 4.2 に示す温度分布

なお、対流項差分法は、運動量式、エネルギー式および物質輸送量式ともに 1 次風上差分法を適用した。また、計算は定常計算とし、各相対変動率が 5×10^{-5} になった時点をもって定常状態とした。

4.3 計算結果

(1) 濃度分布

〔下側環状空間〕

Fig. 4.7 に軸方向濃度分布を径方向各位置について示す。結果より、何れの径方向位置においても環状空間入口部を除いては大きな軸方向分布は認められないことが分かる。また、周方向に対する濃度分布についても、大きな分布は認められない。但し、この濃度分布は、環状空間部外側に向かうに従って若干大きくなる。

Fig. 4.8 に軸方向濃度分布を周方向各位置について示す。この結果では、軸方向および径方向共に大きな濃度分布は認められないものの、 $J=1$ および $J=6$ の断面についてのみ若干の分布が存在する。この断面は、環状空間内において上昇流が存在する場所に該当する。詳細は、流速分布の検討で触れる。

Fig. 4.9 に環状空間間隙の径方向濃度分布を周方向各位置について示す。各周方向位置とも環状空間下端部で濃度分布が認められるが、環状空間上端部ではほぼ均一な分布となっている。

Fig. 4.10 に $\theta-z$ 面の等濃度線図を径方向各位置について示す。ここで等濃度線の間隙

は、0.1 p.p.m. である。結果より分かる通り、環状空間部外側に向かうに従って ($I = 12 \Rightarrow I = 15$ の順) 等濃度線が密になっており、内側に比べ大きな濃度勾配が存在していることが理解できる。また、周方向全周に渡る一対の対流セルが存在していることも理解できる。

〔上側環状空間〕

Fig. 4. 11 に軸方向濃度分布を径方向各位置について示す。この位置の結果についても上側環状空間部での結果と同様に、軸方向および周方向共に大きな分布は認められない。

Fig. 4. 12 に軸方向濃度分布を周方向各位置について示す。この位置については、径方向に全く濃度分布が認められないことが分かる。また、軸方向の濃度分布についても、大きな分布は認められない。

Fig. 4. 13 に環状空間間隙の径方向濃度分布を周方向各位置について示す。結果より、何れの周方向位置においても径方向に対する分布は認められないことが分かる。しかし、軸方向に対する分布は存在し、環状空間部上端で下端部より低い濃度値を示している。

Fig. 4. 14 に $\theta - Z$ 面の等濃度線図を径方向各位置について示す。この結果についても下側環状空間部での傾向と同様に、周方向全域に渡る濃度の分布が確認できる。

(2) 温度分布

〔下側環状空間〕

Fig. 4. 15 に軸方向温度分布を径方向各位置について示す。各径方向位置における軸方向温度分布の傾向は、環状空間壁に与えた境界条件と同様な分布となっている。周方向の温度分布の傾向は、環状空間中心部の方が環状空間周辺部よりも顕著である。

Fig. 4. 16 に軸方向温度分布を周方向各位置について示す。この結果から、環状空間下端部の温度に周方向各位置で差が現われていることが分かる。すなわち、 $J = 1$ 、 $J = 5$ および $J = 6$ の断面では、温度が 500°C に近い値を示し、 $J = 2$ 、 $J = 3$ および $J = 4$ の断面では、 300°C 近傍の値を示す。この差は、環状空間入口における流動の方向を示唆し、 $J = 1$ 、 $J = 5$ および $J = 6$ の断面ではカバーガス空間の高温ガスが環状空間へ流入し、 $J = 2$ 、 $J = 3$ および $J = 4$ の断面では環状空間内ガスのカバーガス空間への流出を表わしている。詳細は、流速分布の検討に譲る。

Fig. 4. 17 に環状空間間隙の径方向温度分布を周方向各位置について示す。この結果についても、2種類の分布に分類される。すなわち、前と同様に $J = 1$ 、 $J = 5$ および $J = 6$ の分布と $J = 2$ 、 $J = 3$ および $J = 4$ の分布である。この特徴としては、前者につき上に凸の分布、後者は下に凸の分布をそれぞれ示すことが挙げられる。これは、やはり環状空間入口における流動の方向に起因していると解釈できる。すなわち、環状空間にガスが流入する周方向断面においては、環状空間壁よりも高温の流体がカバーガス空間から補給されるため、環状空間内の熱量の流れの方向はガス相から環状空間壁となる。このため、環状空

間壁に隣接する計算セルの流体温度は低下し、上に凸の分布が形成される。一方、環状空間よりカバーガス空間に流出する周方向断面においては、上昇過程で冷却されるガス温度が環状空間壁よりも低温となる為、ガス下降部においては下に凸の温度分布が形成される。この断面における熱量の流れの向きは、環状空間壁からガス相となる。このような温度分布の特徴は、Na ミストの環状空間壁付着のメカニズムに大きな影響を与える。

Fig. 4. 18 に $\theta - Z$ 面の等温度線図を示す。間隙は、 10°C である。結果より分かる通り、環状空間内において下降流を示す周方向断面においては、上昇流を示す断面よりも低い温度を示す。

〔上側環状空間〕

Fig. 4. 19 に軸方向温度分布を径方向各位置について示す。この結果は、下側環状空間部での結果よりも温度分布がさらに減少している事が分かる。

Fig. 4. 20 に軸方向温度分布を周方向各位置について示す。この結果では、径方向全く温度分布は認められない。

Fig. 4. 21 に環状空間間隙の径方向温度分布を示す。何れの周方向位置においても、環状空間上端に近づくに従って温度は低下するものの、径方向の温度分布は均一のまま全く分布は示さない。これは、下側環状空間をガスが上昇する過程で、ガス温度と環状空間壁温度とが平衡状態に移行したためと考えられる。

Fig. 4. 22 に $\theta - Z$ 面の等温線図を示す。間隔は、 10°C である。周方向での温度分布は、下側環状空間でのものよりも鈍った傾向となっていることが分かる。

(3) 流速分布

〔下側環状空間〕

Fig. 4. 23 に環状空間間隙の径方向流速分布 (w 成分) を示す。この結果から、 $J = 1$, $J = 5$ および $J = 6$ の周方向断面で流体が上昇し、 $J = 2$, $J = 3$ および $J = 4$ の周方向断面で流体が下降していることが分かる。また、両者の流速分布は、環状空間中心で最大値を示している。

Fig. 4. 24 に $R - Z$ 面の流速ベクトル図を示す。また、Fig. 4. 25 に $\theta - Z$ 面の流速ベクトル図を示す。両結果より分かる通り、流動状況は 3 次元的に複雑なものとなっており、この結果から周方向のメッシュ分割が径方向・軸方向に比較して粗いことによる計算誤差が推測される。

〔上側環状空間〕

Fig. 4. 26 に環状空間間隙の径方向流速分布 (w 成分) を示す。この結果では、径方向にメッシュを 2 セルしか取らなかった為、径方向に分布は見られない。

Fig. 4. 27 に $R - Z$ 面の流速ベクトル図を示す。また、Fig. 4. 28 に $\theta - Z$ 面の流速ベクトル図を示す。

4.4 実験結果との比較および解析能力の評価

Fig. 4.3 に示された環状空間内 Na ミスト濃度測定値と計算結果との比較を行なうために、実験結果の加工を行なう。すなわち、実験結果における環状空間内 Na ミスト濃度をカバーガス空間における Na ミスト濃度で規格化する。実験におけるカバーガス空間の Na ミスト濃度は、 $3.0 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ である。この値を用いて、Fig. 4.3 の結果を Na ミスト侵入率（アニュラス内濃度/下部空間内濃度）で表わすと Fig. 4.29 の様になる。図中の□印が実験結果、○印が今回の AQUA による計算結果である。計算結果は、環状空間上端における周方向の濃度値を単純平均して代表値とした。実験結果の内、Na ミスト濃度が 100 % を越えているのは、Na 液面上の高温カバーガスが環状空間内に流入して冷却され、この時に Na 蒸気濃度差分に相当する新たな Na ミストが生成されたためである。今回の計算結果は、実験結果を近似した直線よりも約 13 % 過小評価の傾向にあるが、この原因として以下の項目が考えられる。

- (1) 環状空間壁の温度境界条件の不確かさ
- (2) Na 蒸気濃度差分に相当する Na ミスト生成モデルの不備
- (3) 対流項差分法として使用した 1 次風上差分法による解の劣化
- (4) 周方向メッシュ数の不足による解の劣化

(1) は、環状空間内の自然対流現象を支配する最も重要な項目である。今回の計算においても、環状空間内 Ar ガス濃度およびガス温度は環状空間内の流動により全体の挙動が支配され、明かに対流依存型の振る舞いが観測された。したがって、環状空間壁の温度境界条件は、対象とする現象の主要な支配因子となっている。このため、解析においては、温度境界条件を可能な限り厳密に与える必要がある。

(2) は、先に述べた解析モデルで考慮していない現象によるものである。この効果については、実験においても定量的に評価することは難しくこの原因による結果への効果は今後の課題であり、適宜解析モデルに反映させてゆく必要がある。

(3) は、数値計算法に関する問題である。先に示した解析結果を見ても、環状空間内の流動状況は 3 次元性を持った複雑な様相を呈し、このような流動場に 1 次風上差分法を適用させた場合には数値拡散による解の劣化が生じる。すなわち、物理的な拡散効果を覆い隠し、より拡散効果が強調された鈍った解となる。このため、この数値拡散の影響を低減させる為に空間に関し高次の対流項差分法を適用することが望ましいと考えられる。

(4) は、空間メッシュ数の不足による解の劣化に相当する。今回の問題では環状空間内の周方向全域に渡る流動パターンが観測され、この流動が環状空間内の現象を主に支配する。このため、周方向のメッシュ数については、径方向あるいは軸方向メッシュ数よりも解に及ぼす悪影響が大きいと考えられ、これらを勘案して解析を行なう必要がある。

以上、今回の計算において結果が過小評価の傾向を示した原因についてその主な項目を記したが、Fig. 4.5 に見られる実験における測定誤差 $\pm 12\%$ を考慮すると妥当な計算結果が得ら

れたと判断できる。これらの検討結果を考慮すると、第3.3節のNaミスト輸送評価における解析的アプローチの妥当性で述べた項目は、計算コードによる結果からも裏付けられる。すなわち、現象自体が対流支配であり、Naミスト自体の重力による沈降効果は考慮する必要はない。この効果よりもさらに重要な支配因子は、先に述べた通り環状空間壁の温度分布の与え方にあると言える。これは、第3.2節で述べた「もんじゅ」遮蔽プラグ部ガスブローダウン実験解析での経験からも明かとなっている。詳細については、文献4)を参照されたい。

第5章 結 言

回転プラグと炉容器等により形成される環状空間部での自然対流現象 (Na ミスト輸送) に関し、過去に報告された報告書を基にレビューを行った。このレビューでは、実験的研究と解析的研究との2種類に分けて実施し、また単相多次元熱流動解析コード AQUA の同現象に対する解析能力の評価も合わせて実施した。

過去に報告された結果を総合するとその要点は、

- (1) 環状空間部間隙が狭いほど、周方向全域に渡る自然対流は発生しにくい。
- (2) 環状空間部に侵入した Na ミストの挙動評価に対しては、ミスト自体の重力による沈降現象は考慮に入れる必要は無く、自然対流に付随した対流輸送現象として捉えることが可能である。
- (3) 自然対流現象を直接的に支配する項目は、環状空間壁の軸方向および周方向の温度分布であり、これを厳密に与えることにより精度の良い解析が可能となる。

である。この結果に基づき、単相多次元熱流動解析コードの質量輸送版によって、対流抑制板に関する一連の実験解析を行なった結果、Na ミストの環状空間部への輸送評価は実験結果を±15%以内の精度で模擬できることが確認された。

謝 辞

本評価作業に対し、終始貴重な助言を頂いた安全工学部プラント安全工学室 姫野嘉昭室長および原子炉工学室 佐藤和二郎副主任研究員に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 島, 飯田他, “制御棒駆動機構メカニカルシール試験”,
PNC Report SJ222 78-16, 1978 年 11 月
- (2) 佐藤, 村松, “「もんじゅ」遮蔽プラグウガスブローダウン試験 (第 1 報),
ブローダウン効果試験”,
PNC Report SN9410 87-119, 1987 年 7 月
- (3) 姫野, 石橋, “ナトリウム蒸着に関する試験研究 (II),
Ar カバーガス自然対流計算コードとデータ解析”,
PNC Report SN941 75-97, 1975 年 11 月
- (4) 村松, 前川他, “「もんじゅ」遮蔽プラグウ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”,
PNC Report SN9410 87-056, 1987 年 3 月
- (5) 姫野, 磯崎他, “回転プラグ用対流抑制板評価開発試験 (II),
対流抑制板とドリップレシーバのナトリウム試験”,
PNC Report SN941 82-87, 1982 年 4 月

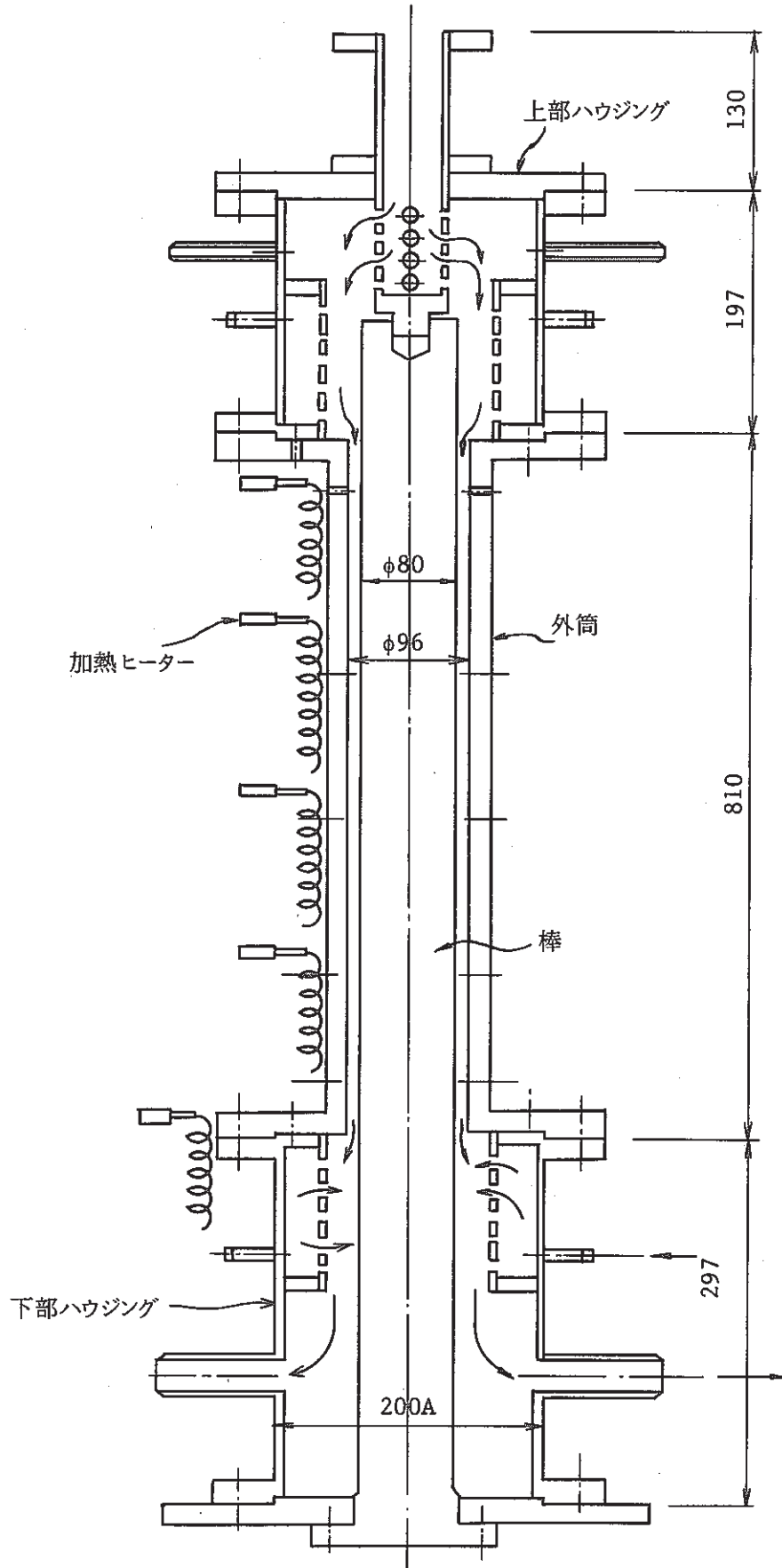


Fig. 2.1 Schematic of Test Section for the Ar-He Gases Experiment

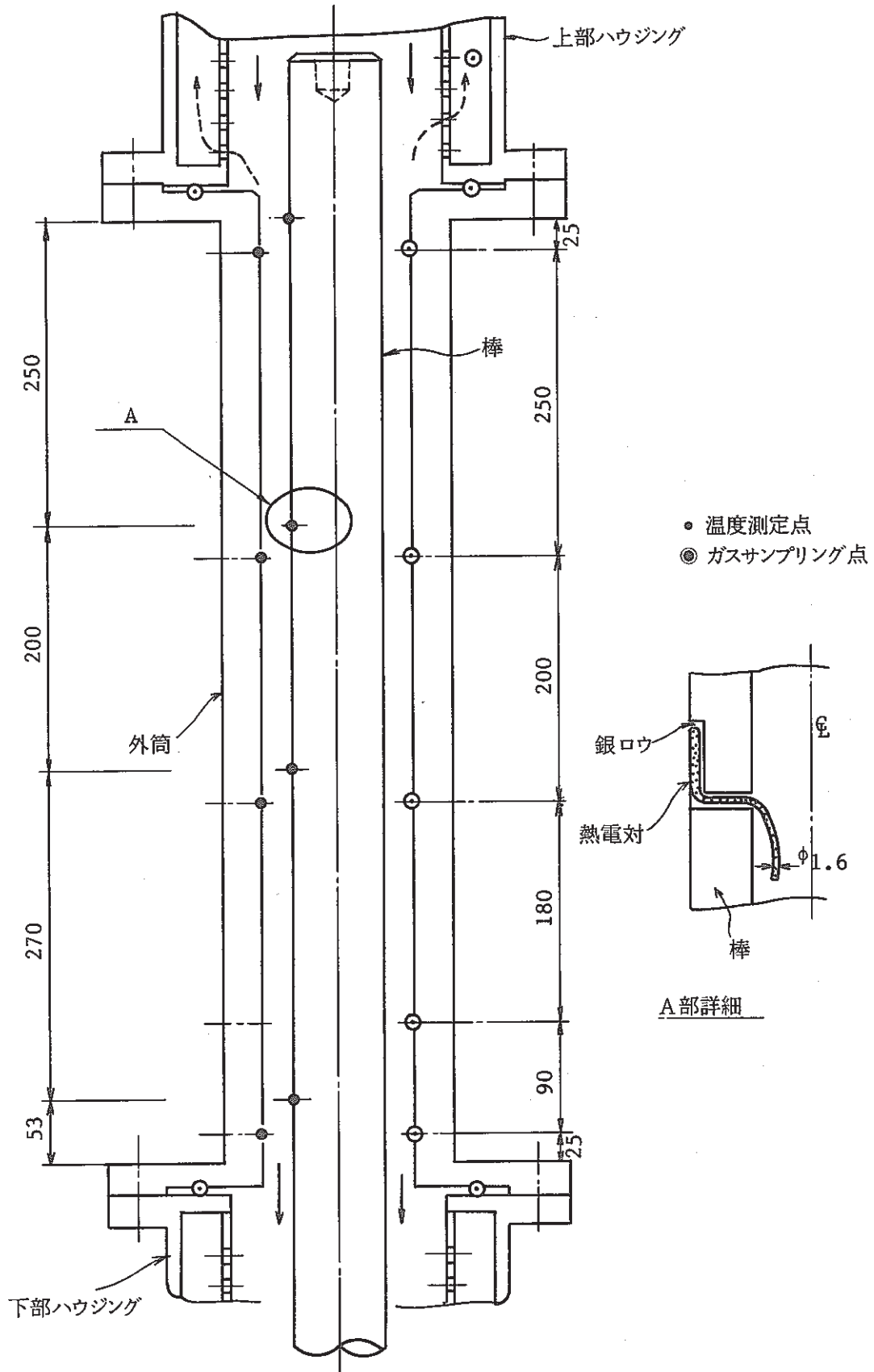


Fig. 2.2 Locations of Thermo-Couples and Gas Sampling Holes

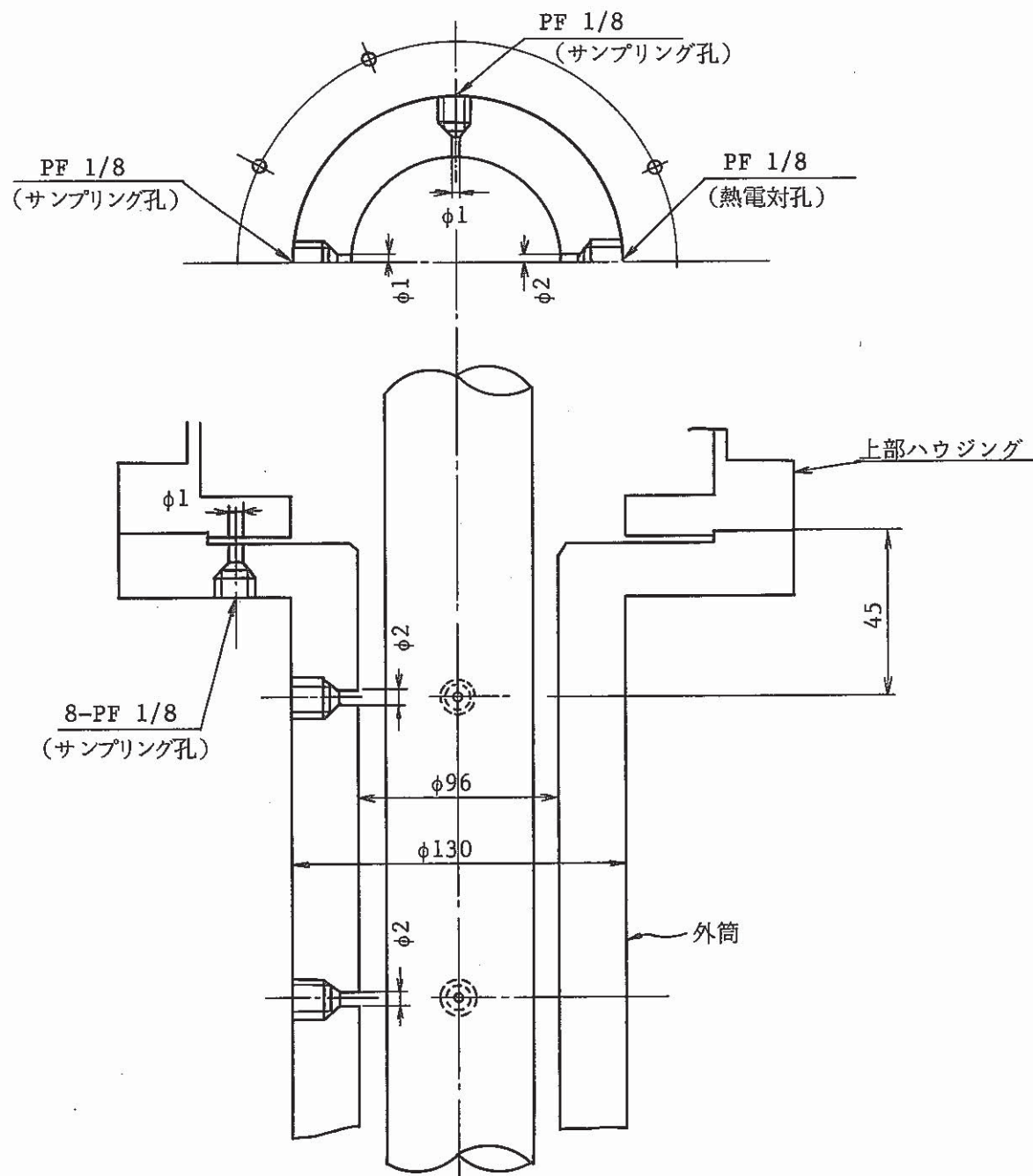


Fig. 2.3 Details of Thermo-Couple and Gas Sampling Holes

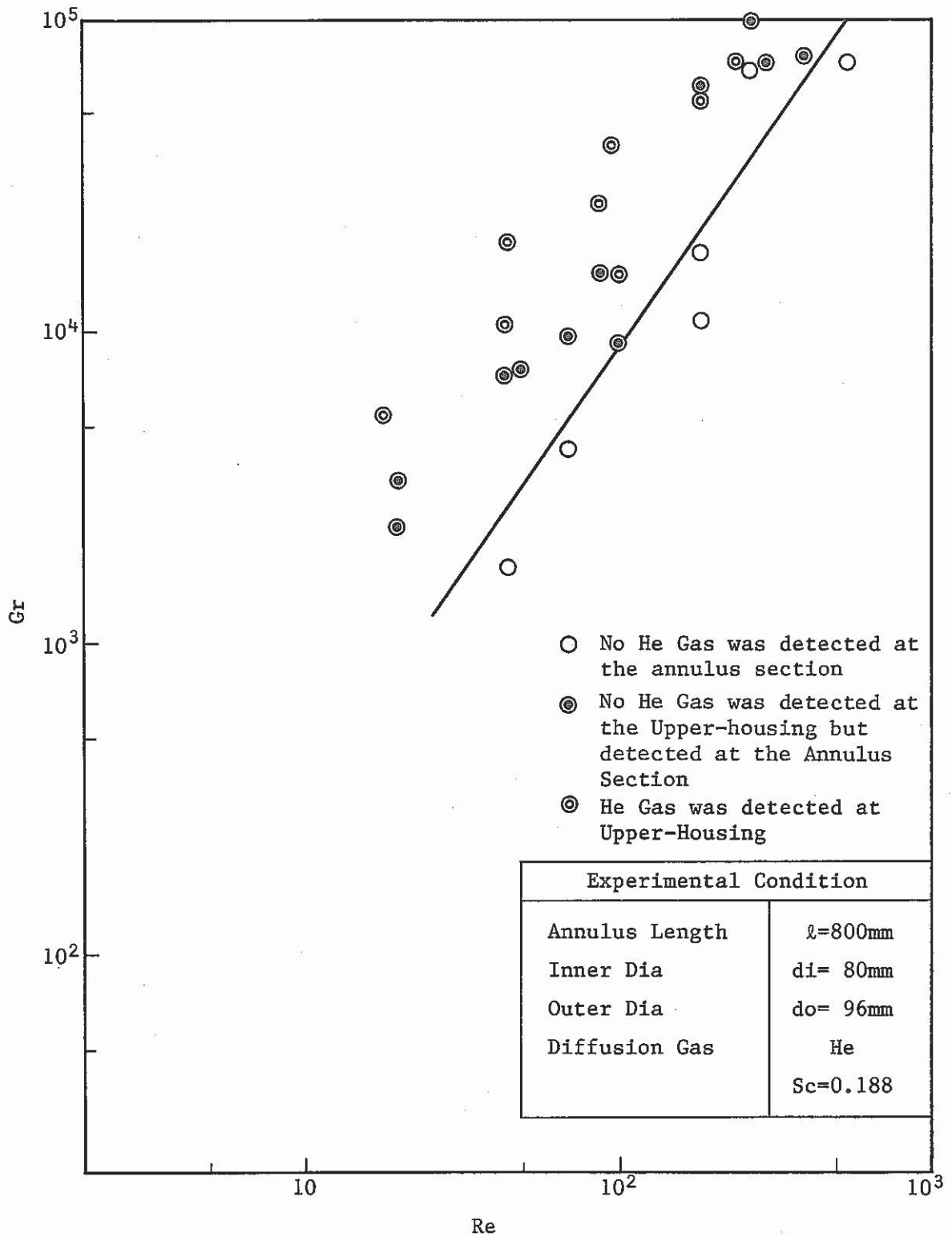


Fig. 2.4 Re number VS. Gr number under Run 1 of Gap Size Effect Test

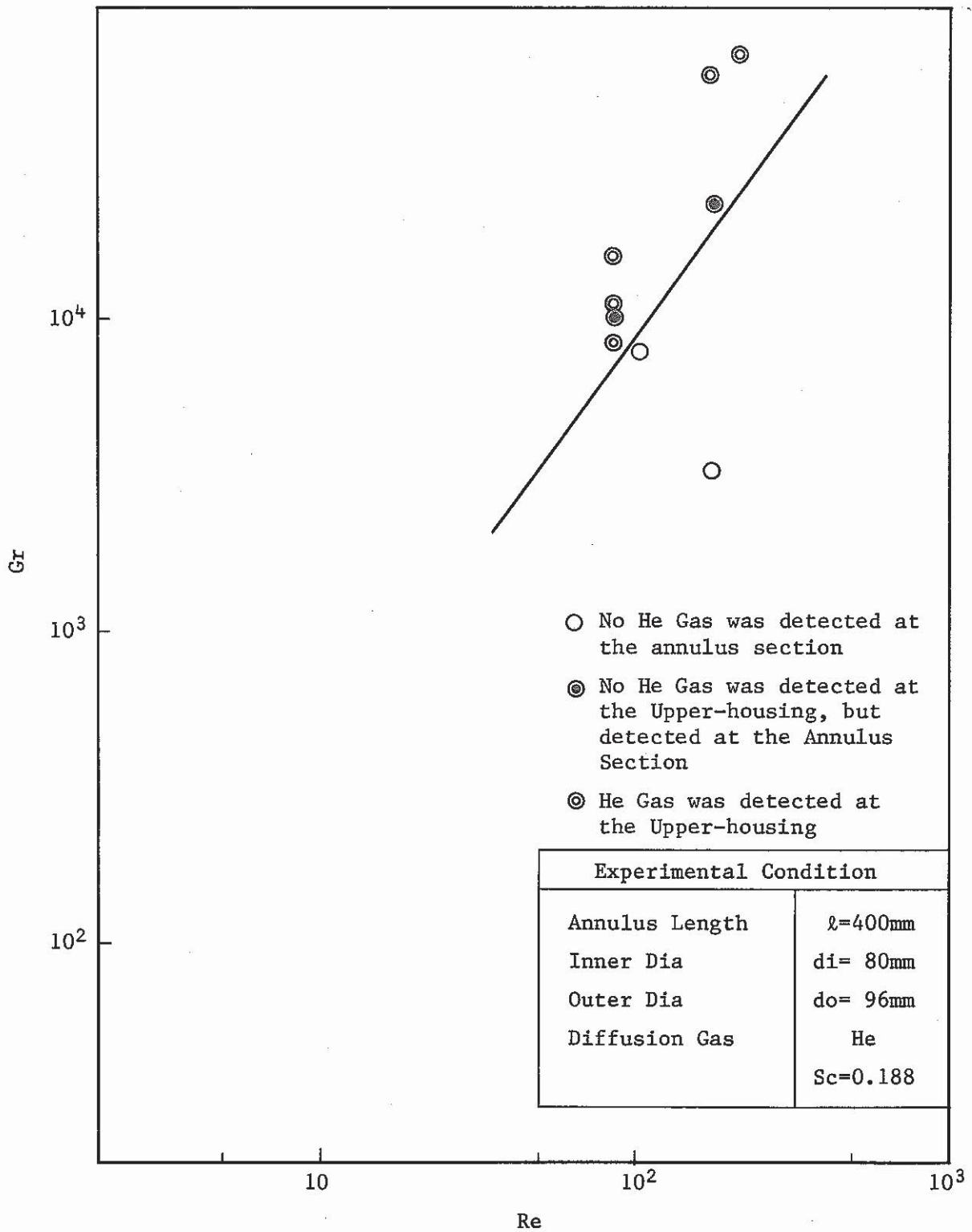


Fig. 2.5 Re number VS. Gr number under Run 2 of Gap Size Effect Test

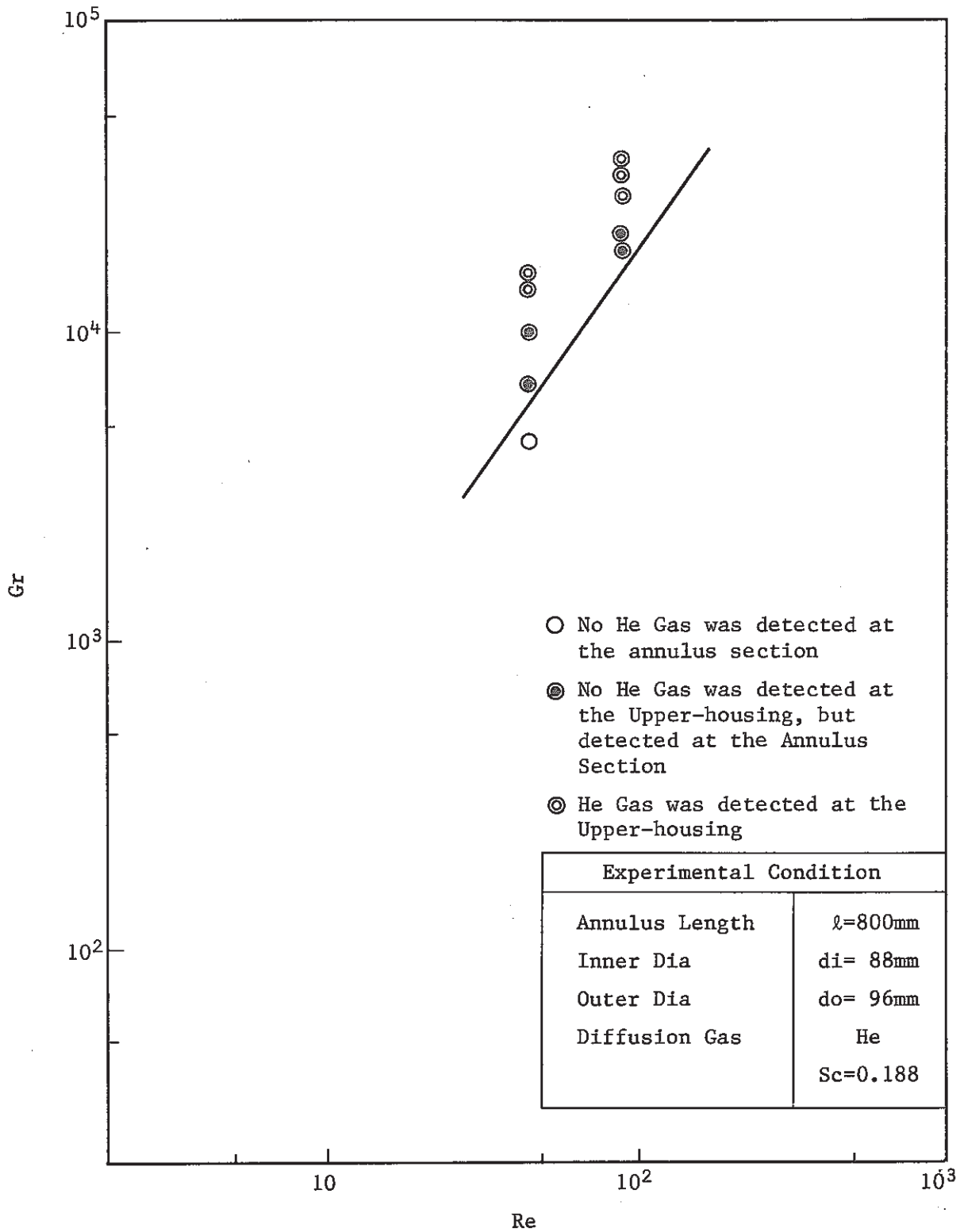


Fig. 2.6 Re number VS. Gr number under Run 3 of Gap Size Effect Test

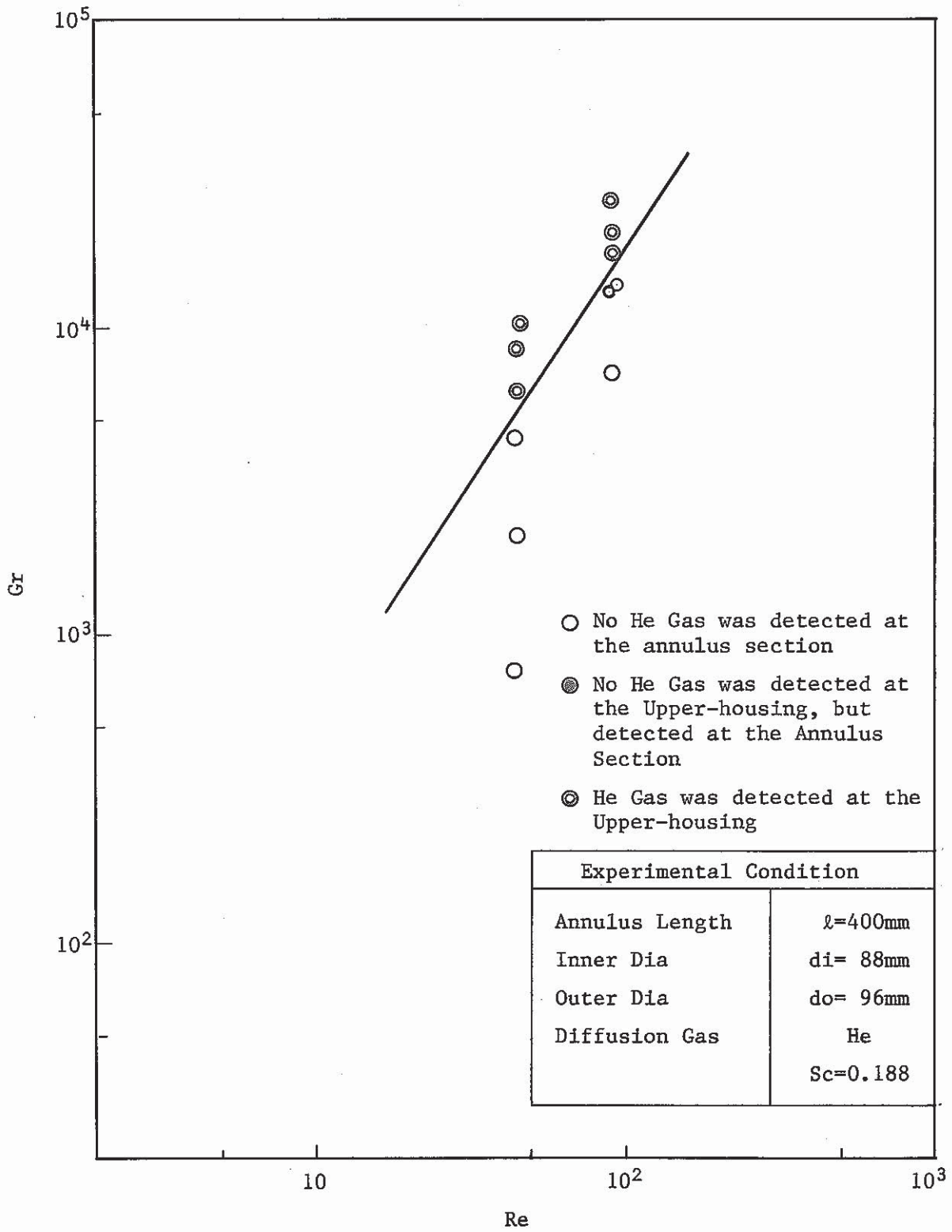


Fig. 2.7 Re number VS. Gr number under Run 4 of Gap Size Effect Test

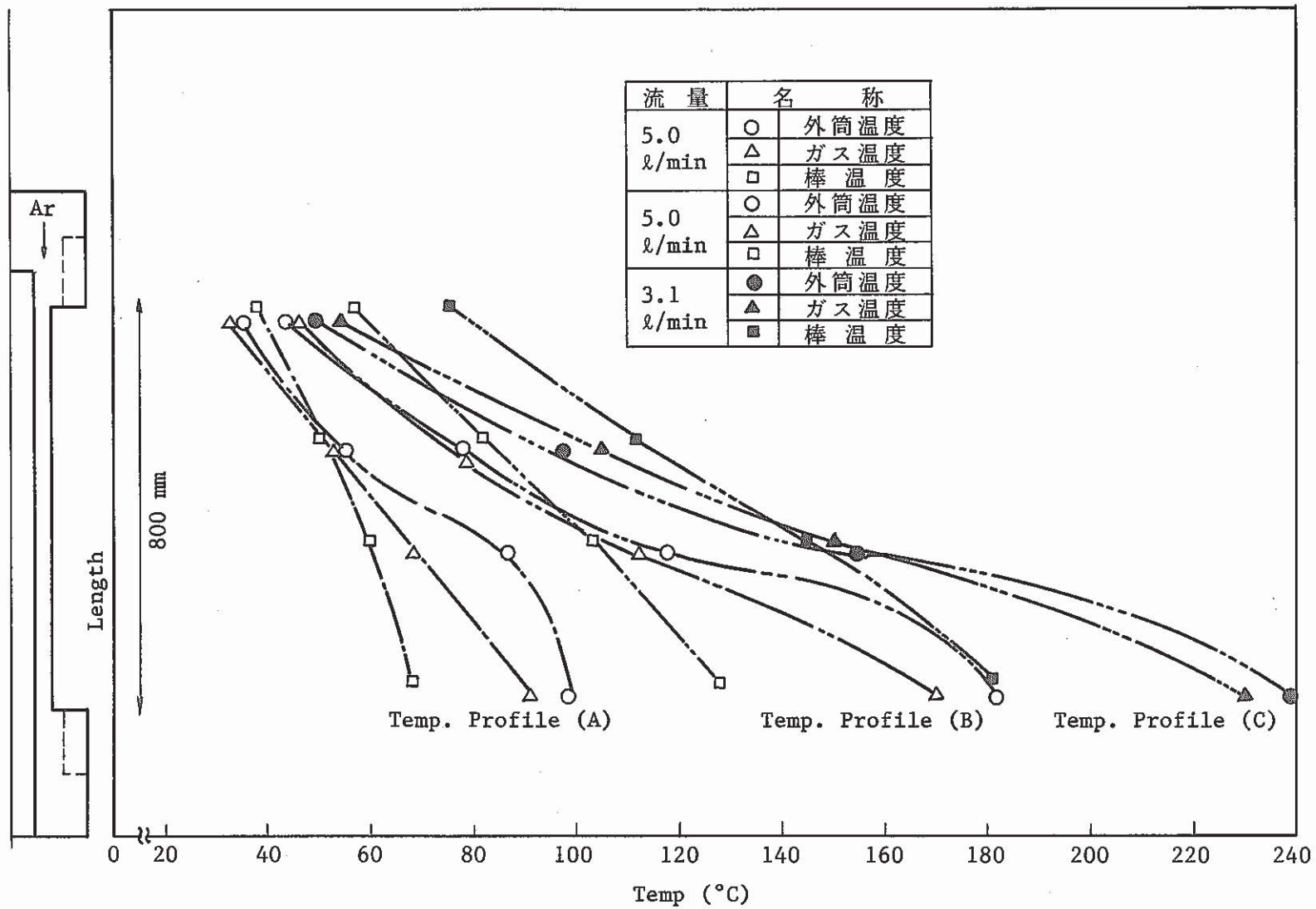


Fig. 2.8 Vertical Temperature Profiles of Annulus Wall

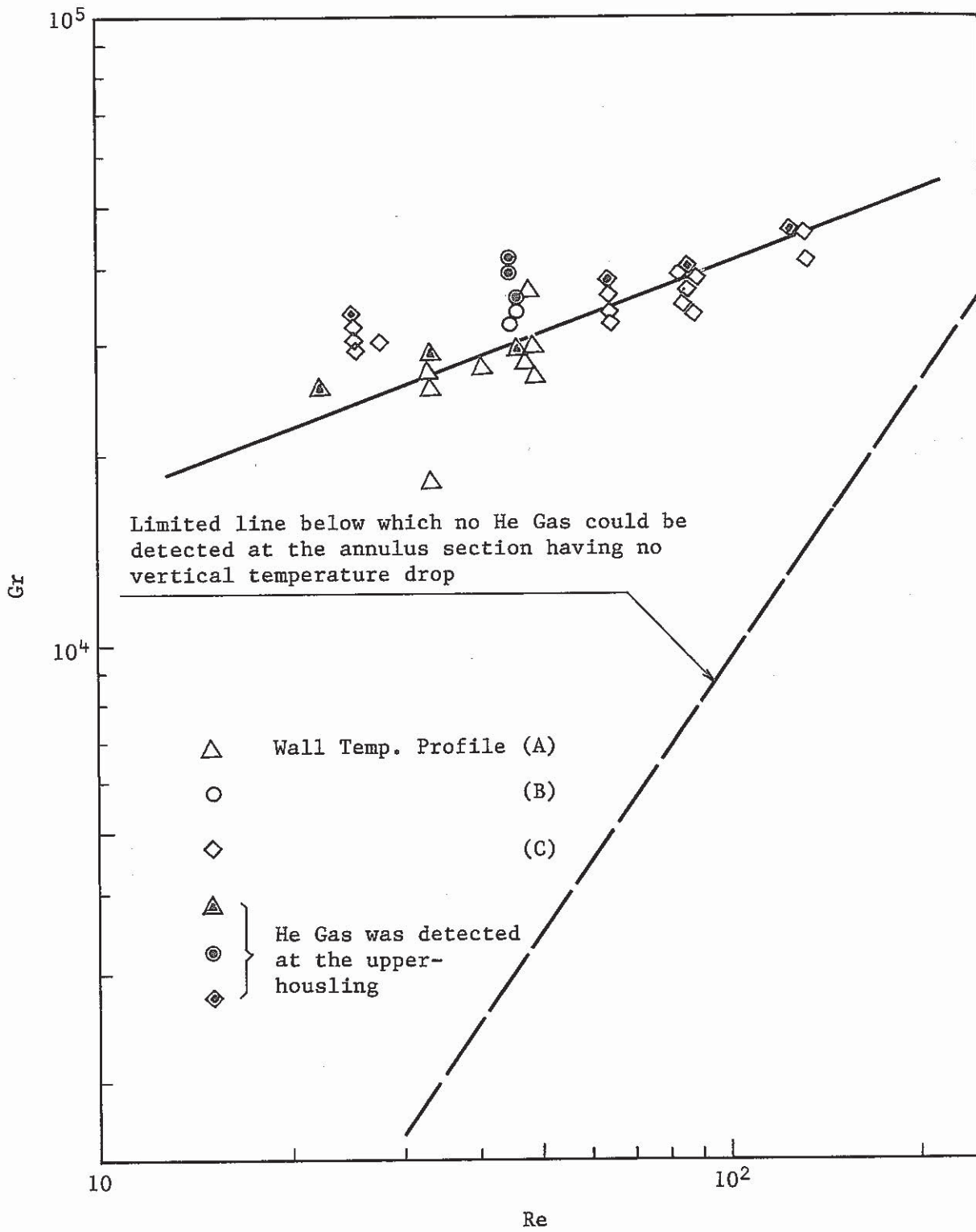


Fig. 2.9 Re number VS. Gr number under Temperature Distribution Effect Test

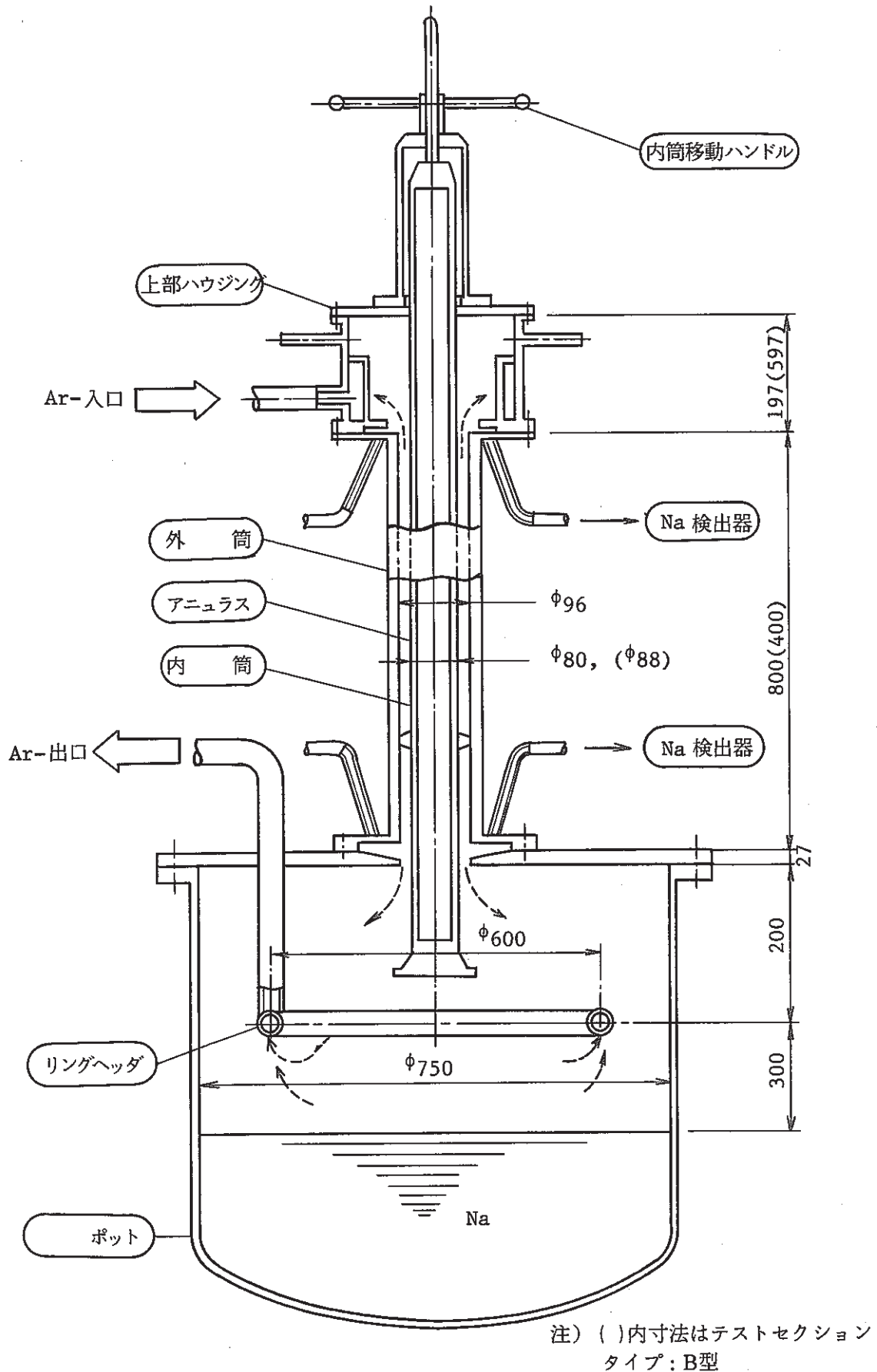


Fig. 2.10 Schematic of Test Section for the Ar-Na Experiment

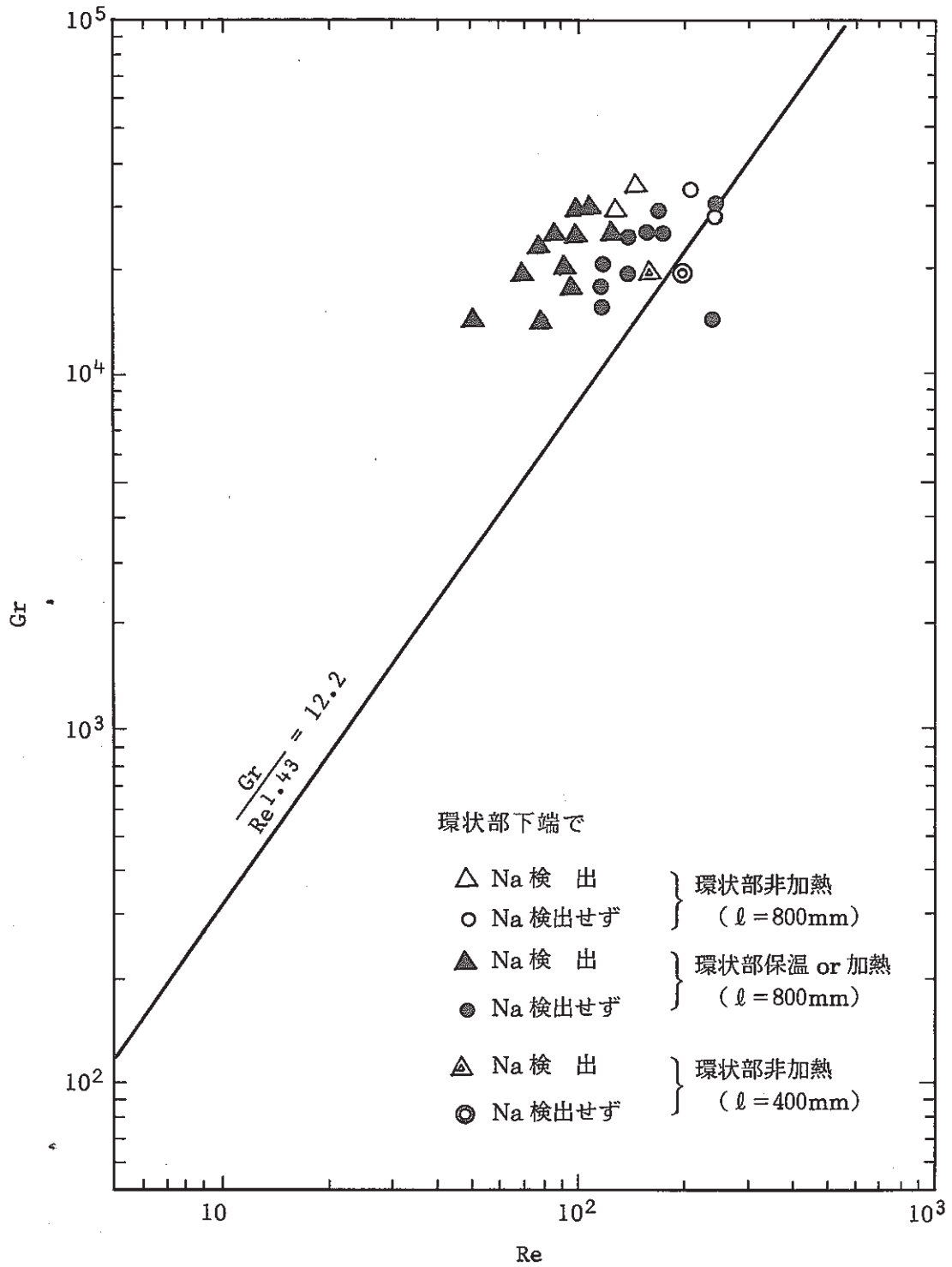


Fig. 2.12 Re number VS. Gr number in the Case of Annulus Gap=8mm

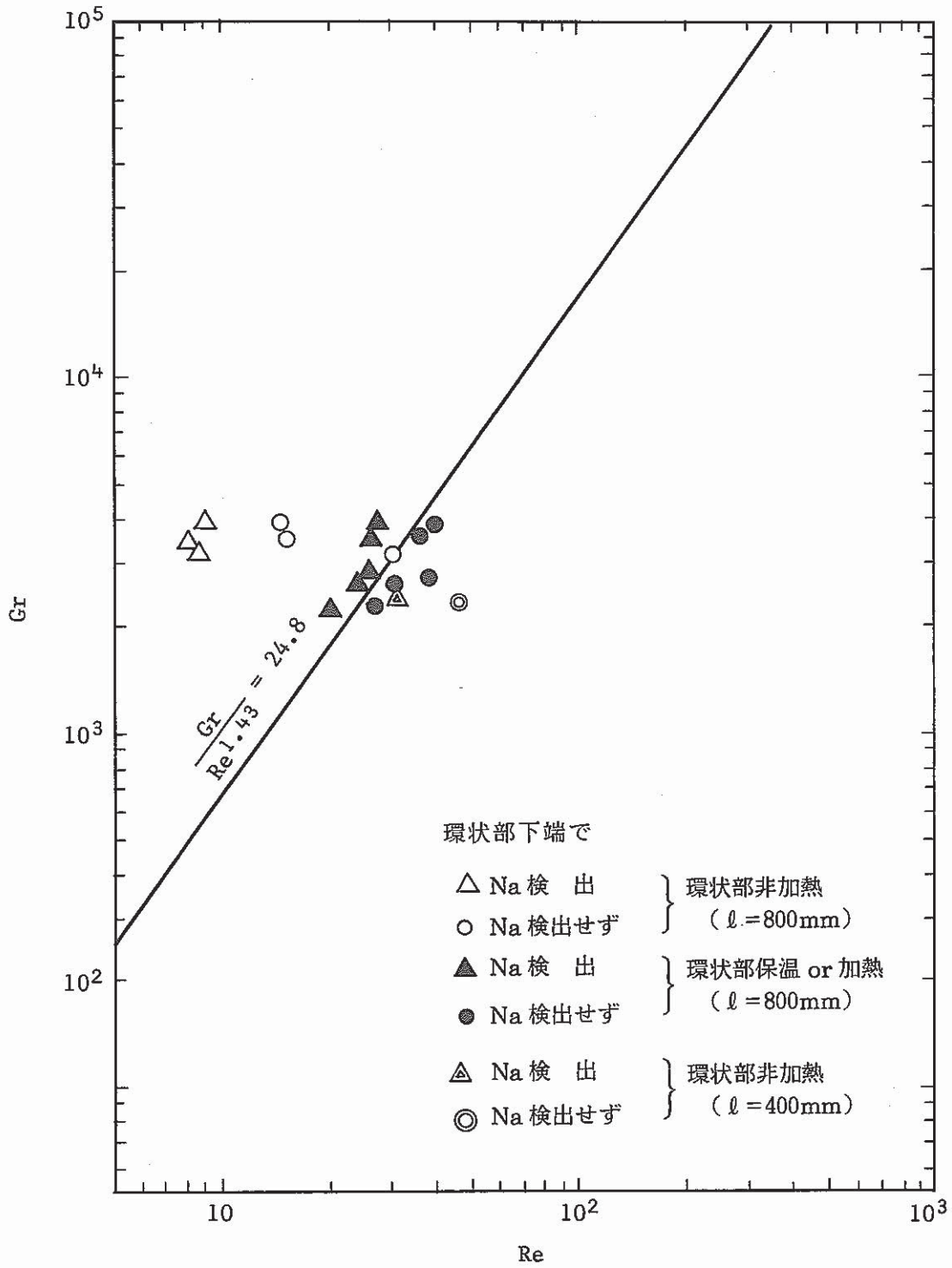


Fig. 2.13 Re number VS. Gr number in the Case of Annulus Gap=4mm

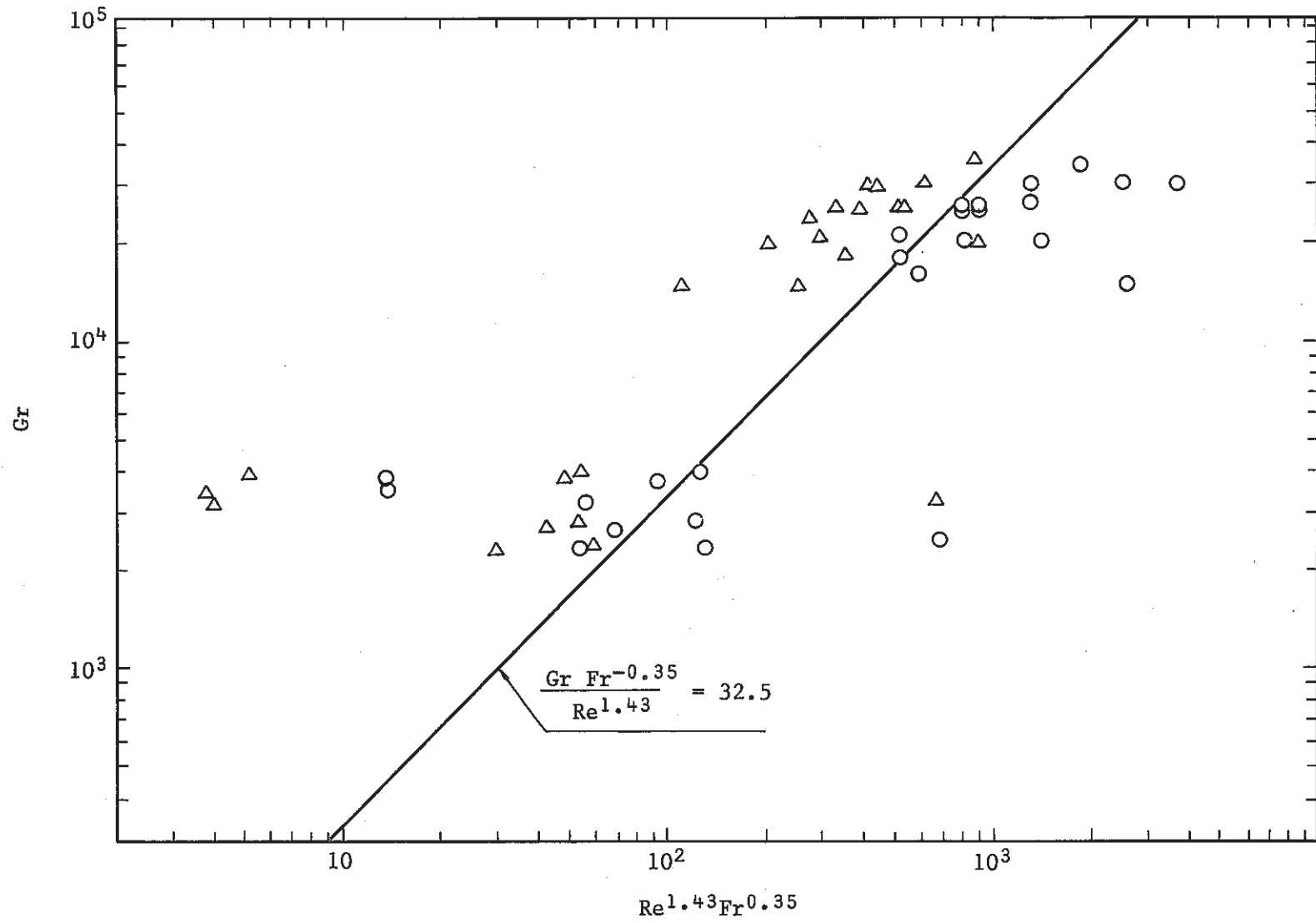


Fig. 2.14 Experimental Threshold of Detection for Active Gases

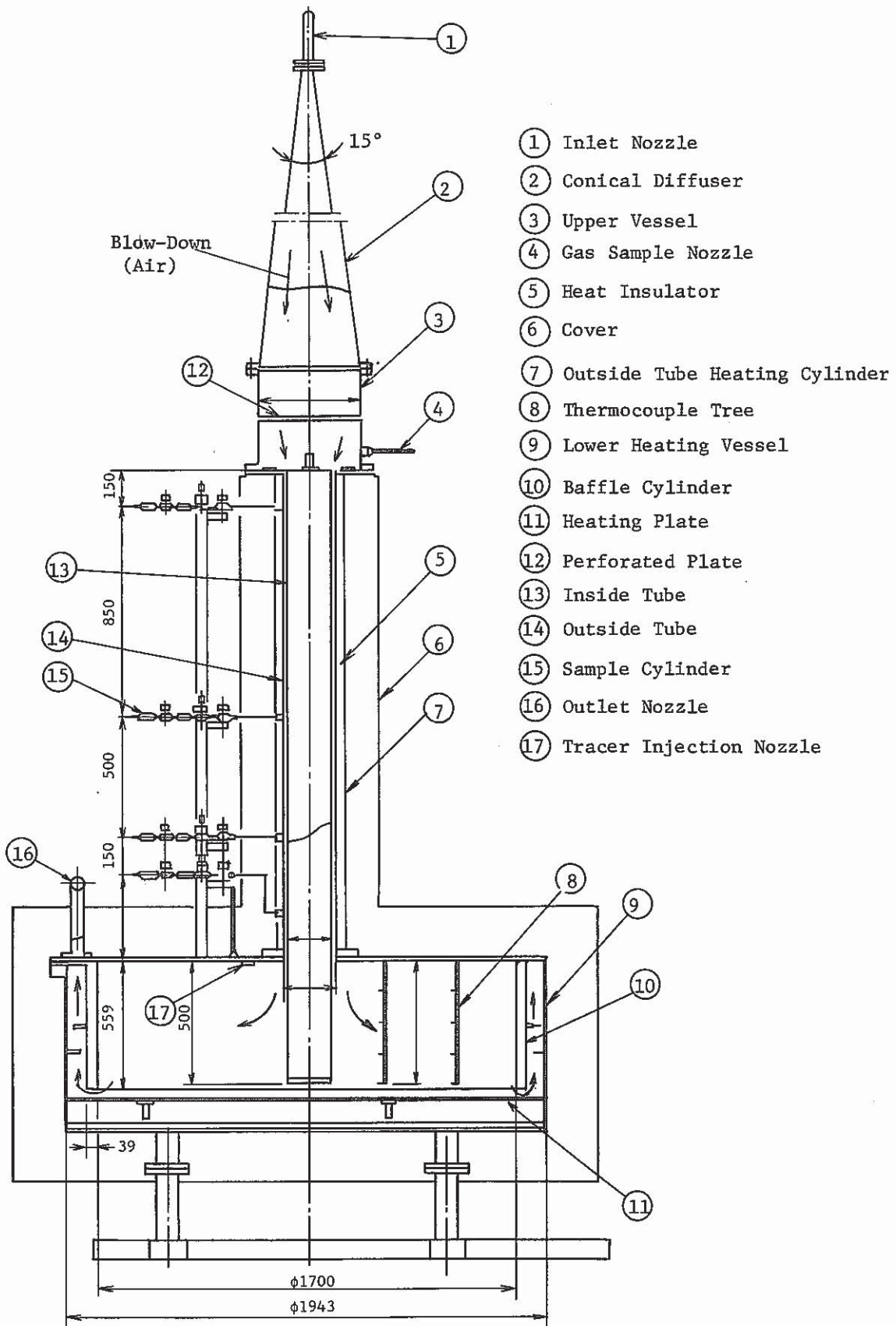


Fig. 2.15 Schematic of Test Section for the Gas Blow-Down Experiment

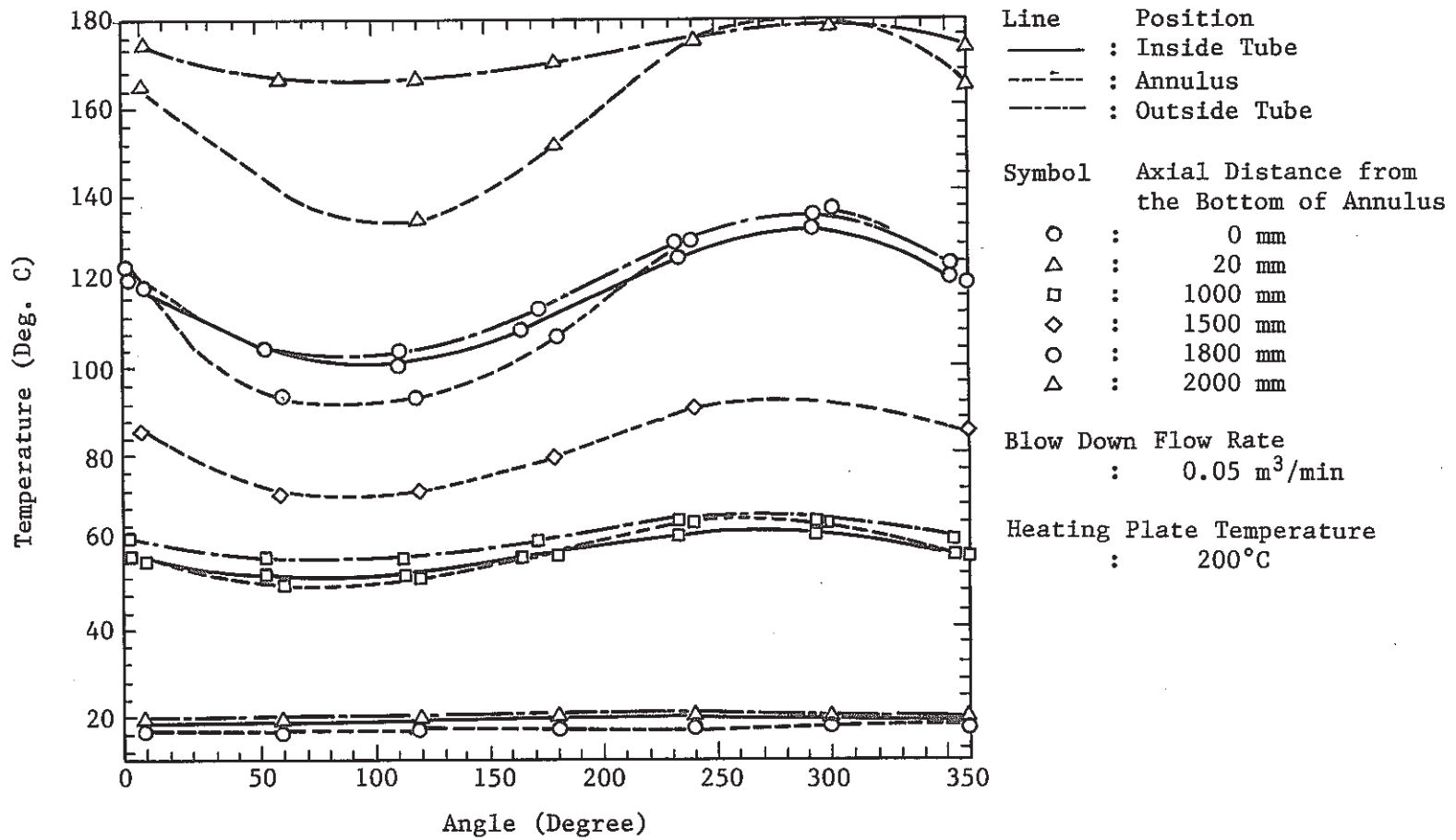


Fig. 2.16 Circumferential Temperature Distribution of Flowrate=0.05m³/min

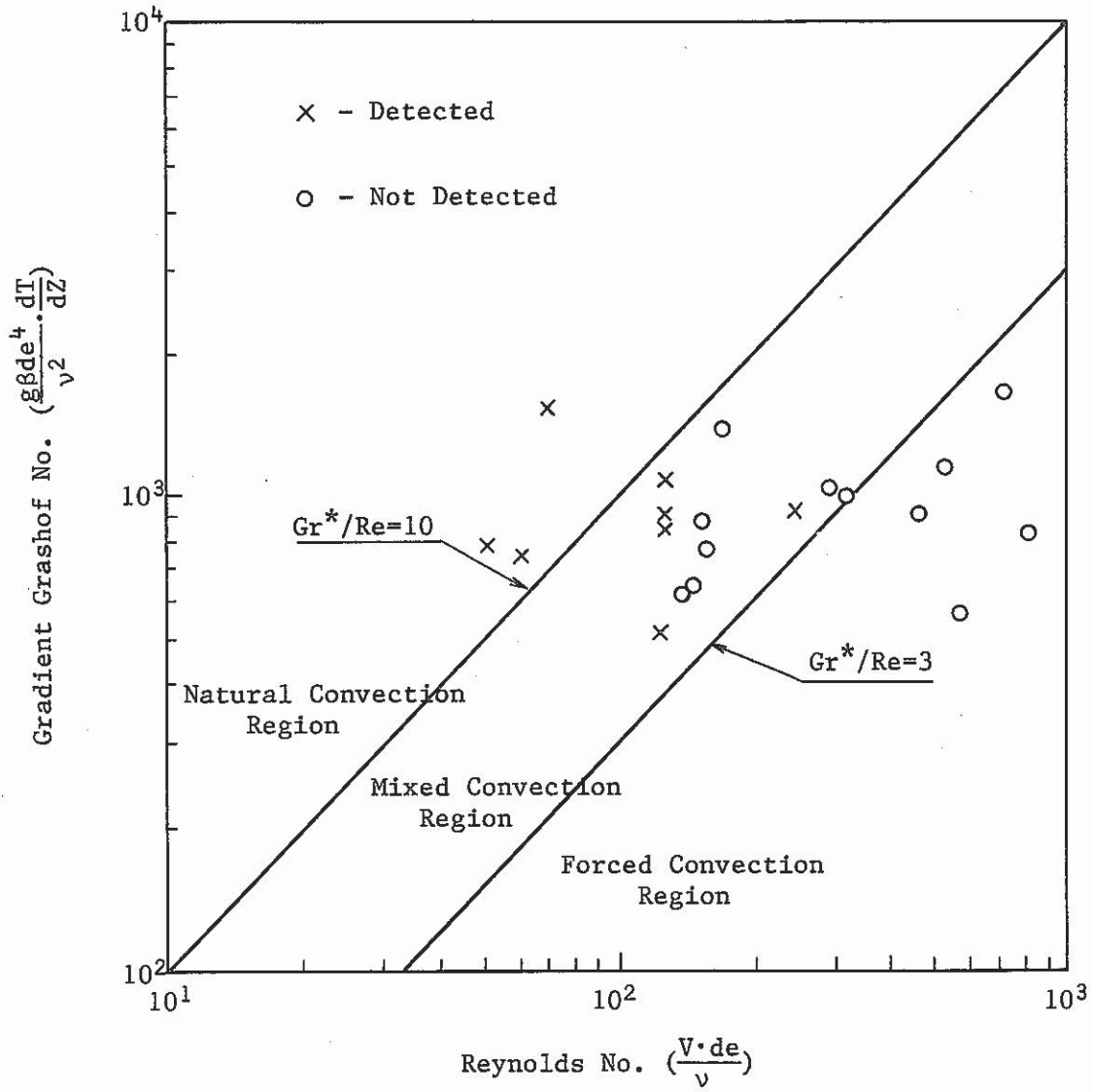


Fig. 2.17 Experimental Threshold of Detection for Tracer Gases

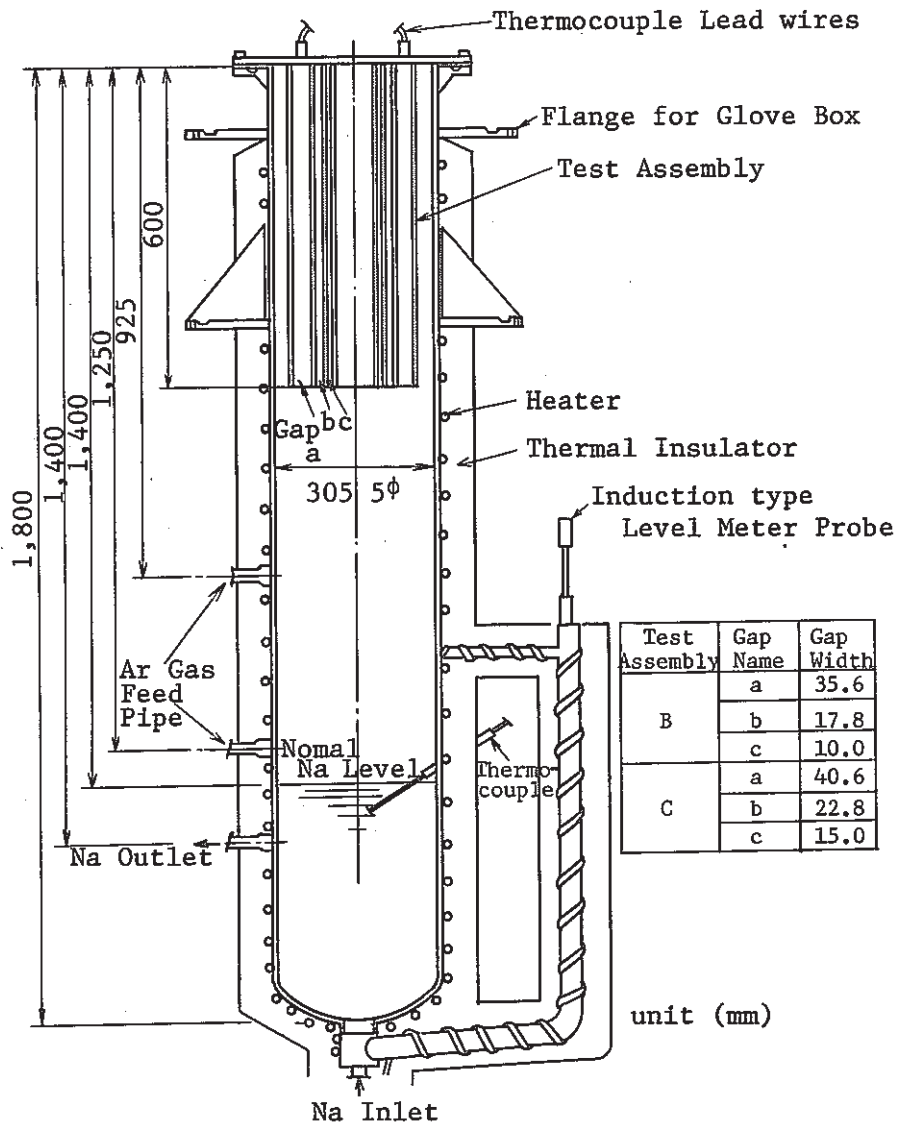


Fig. 3.1 Schematic of Test Section for the Test of Sodium Vapor Condensation

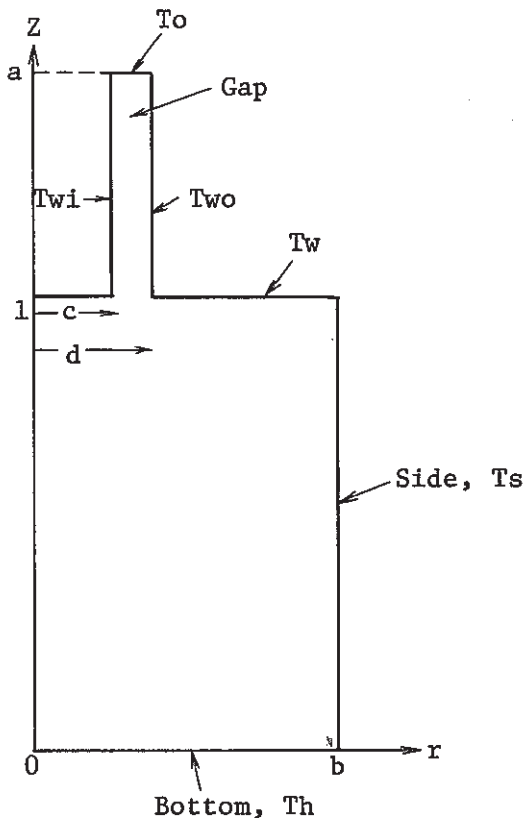


Fig. 3.2 Analytical Region of Numerical Analysis

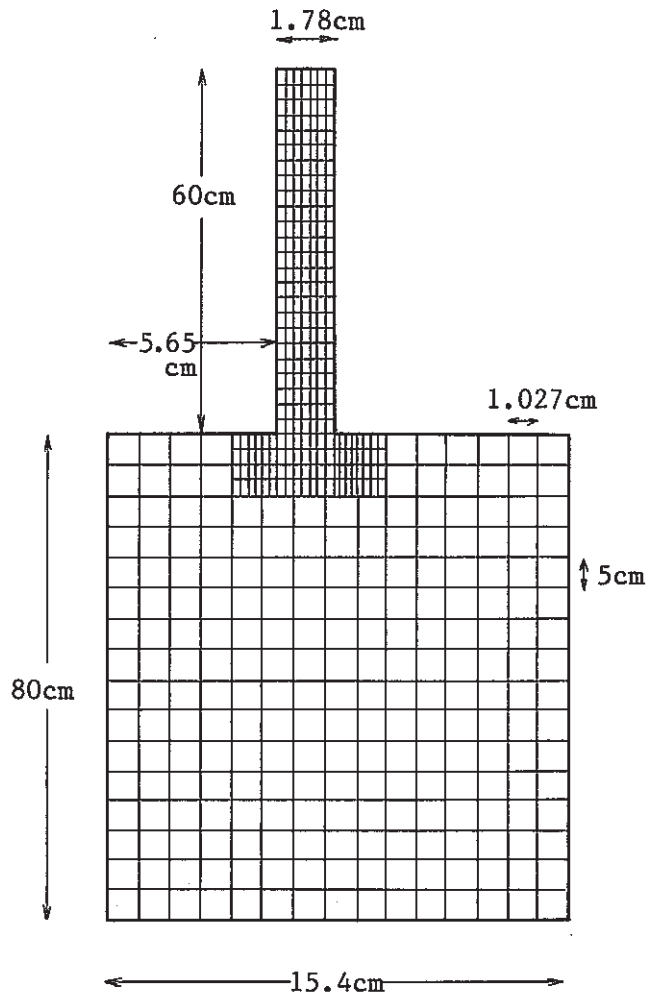
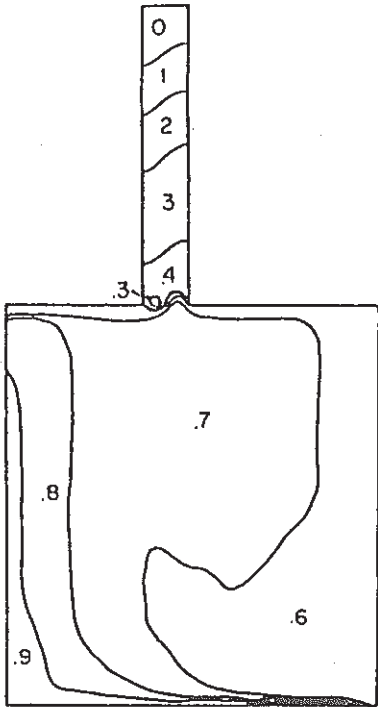


Fig. 3.3 Mesh Arrangement for Numerical Analysis

Temperature θ

$t = 14.7 \text{ sec}$

$\tau = 4.348 \times 10^{-4}$



Vapor Fraction
 $\tau = 4.348 \times 10^{-4}$ (2000 step)

Stream Function
 $\tau = 4.348 \times 10^{-4}$ (2000 step)

Vorticity
 $\tau = 4.348 \times 10^{-4}$ (2000 step)

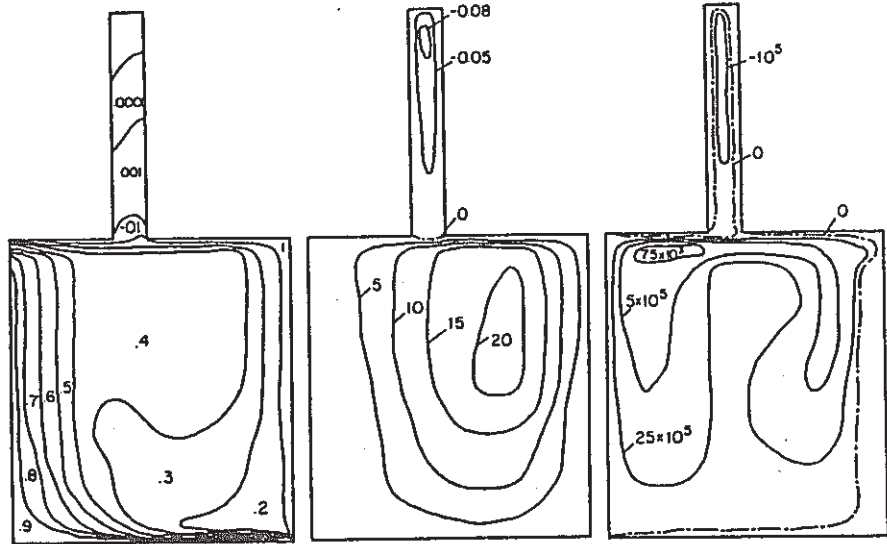


Fig. 3.4 Analytical Results of Temperature, Vapor Fraction, Stream Function and Vorticity Distributions

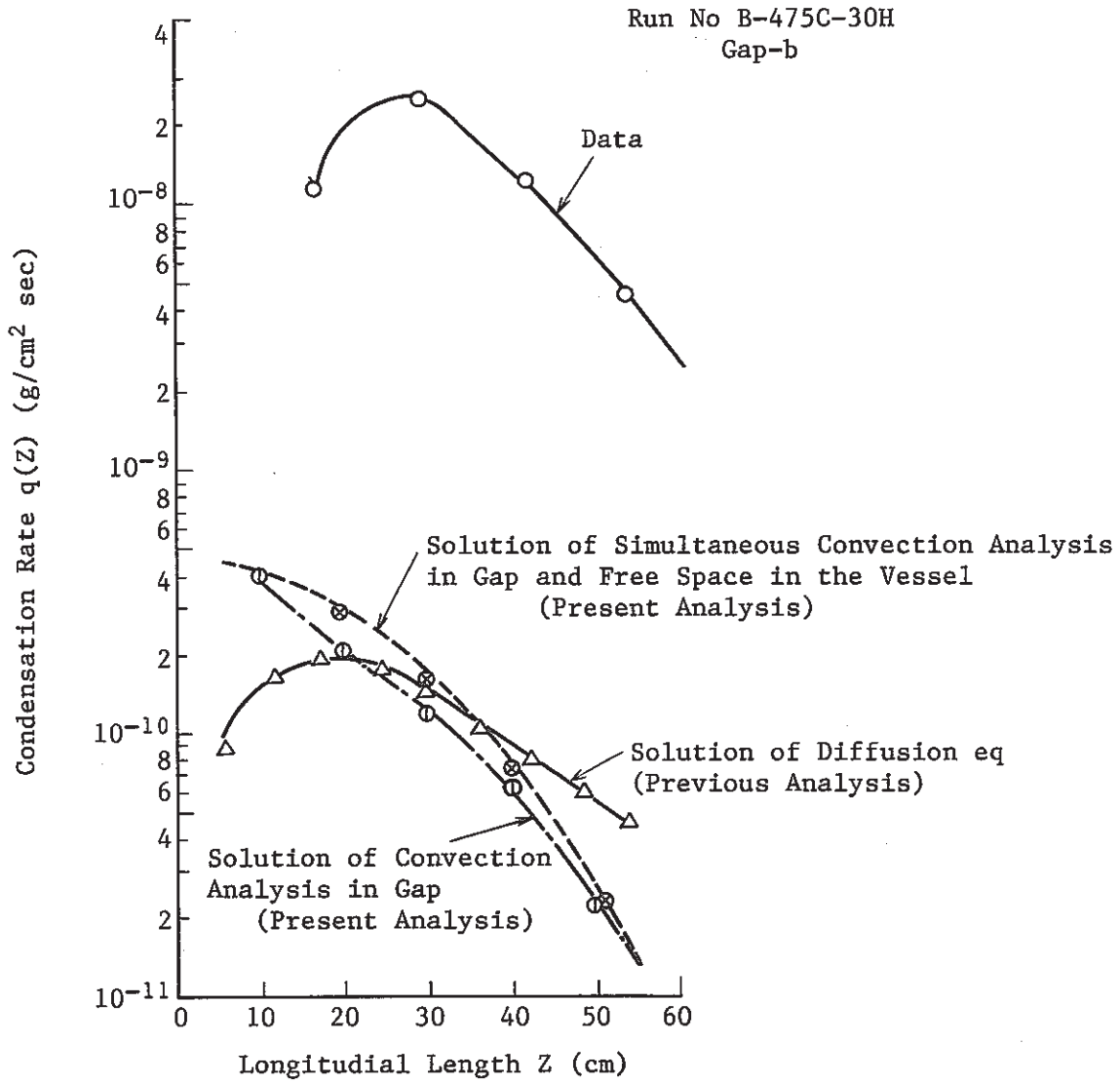


Fig. 3.5 Comparison of Condensation Rate between the Data and the Numerical Solutions

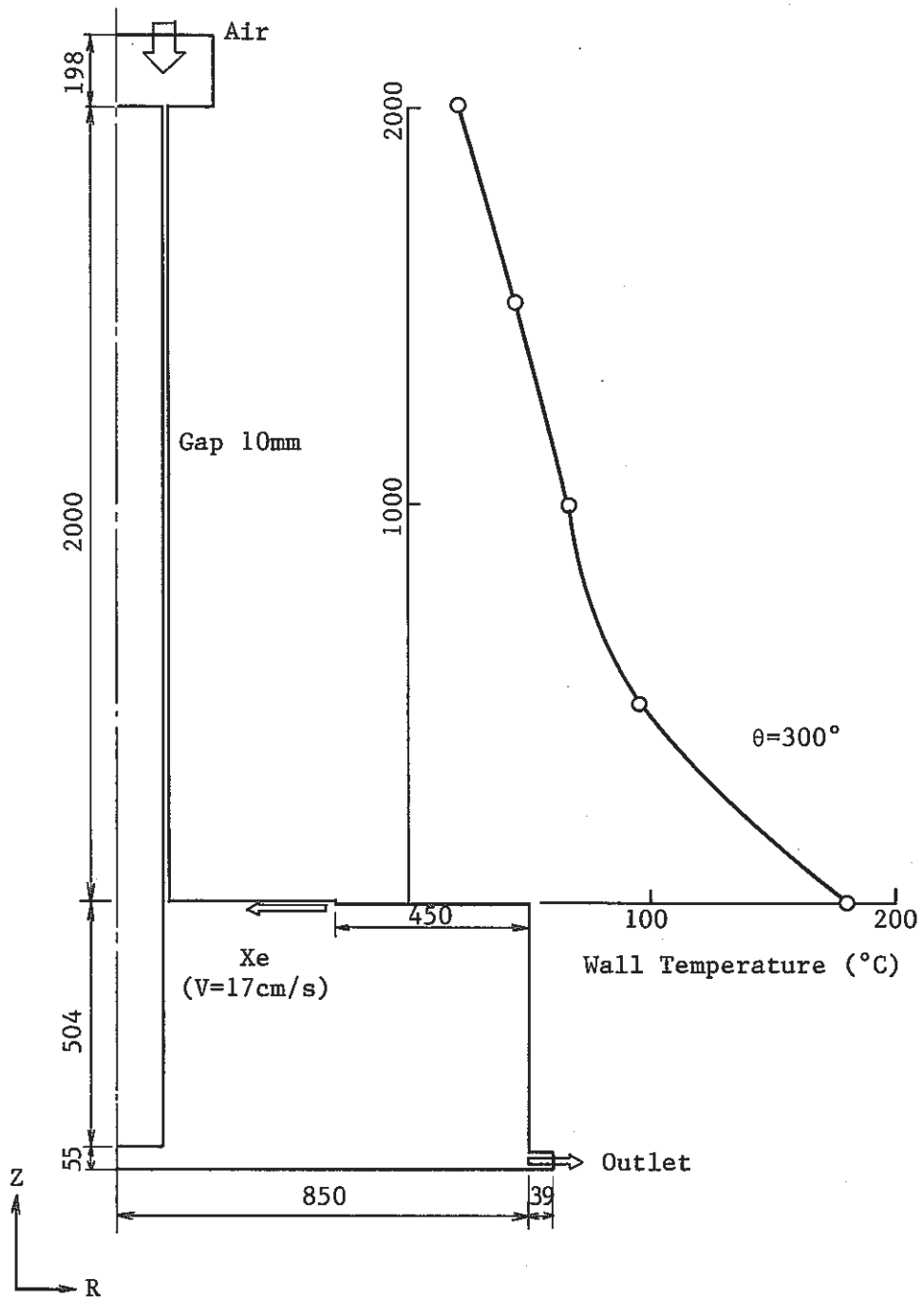


Fig. 3.6 Analytical Region of Gas Blow-Down Experiment and Temperature Distribution in Z-Axis

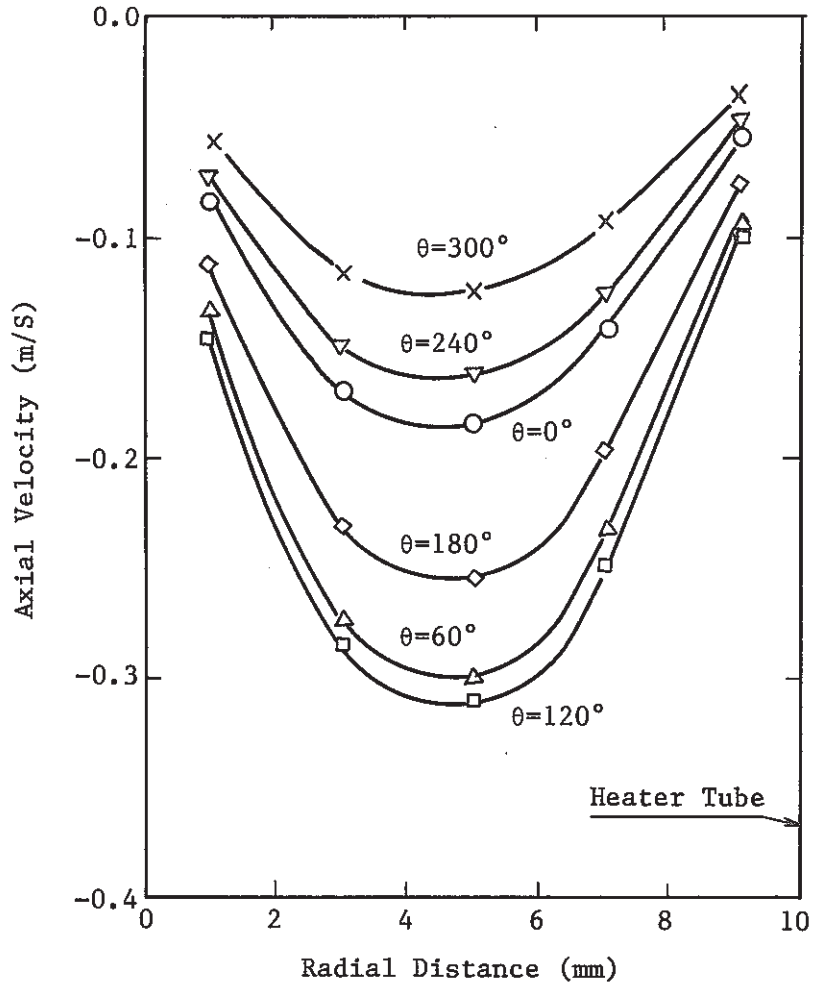


Fig. 3.7 Velocity Distribution in The Annulus under Nominal Flow Rate

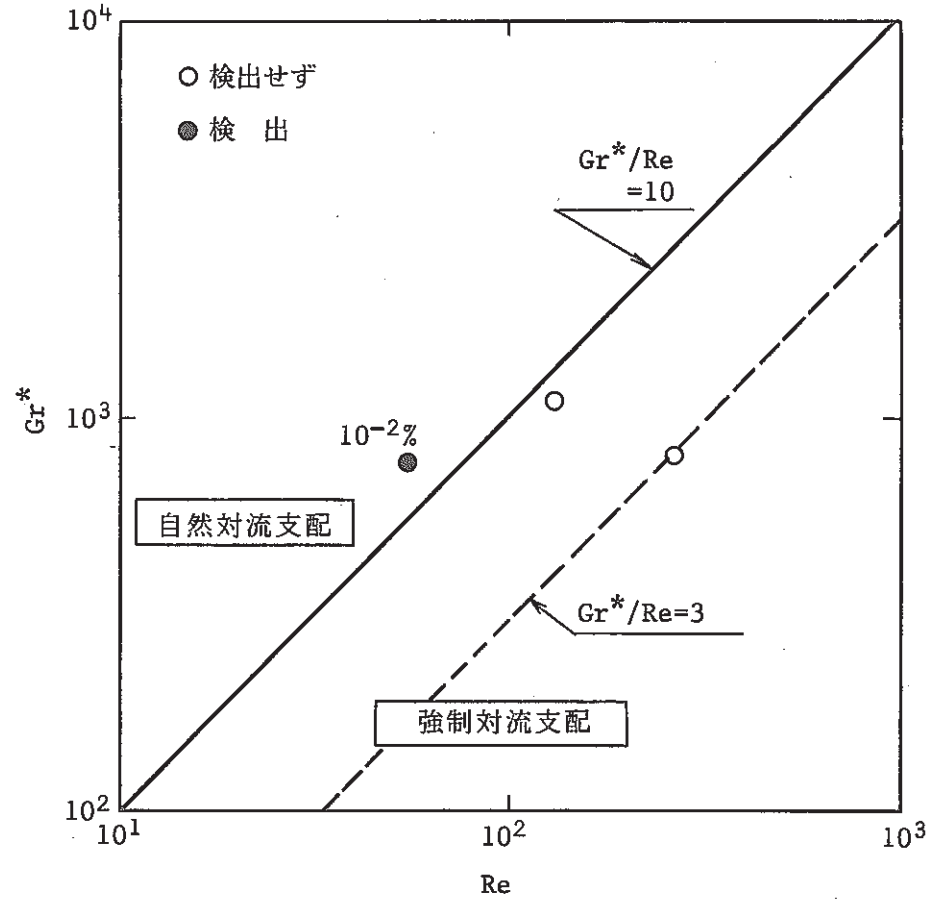


Fig. 3.8 Relation of Experimental Threshold (—, ---) and Numerical Solutions (O, ●)

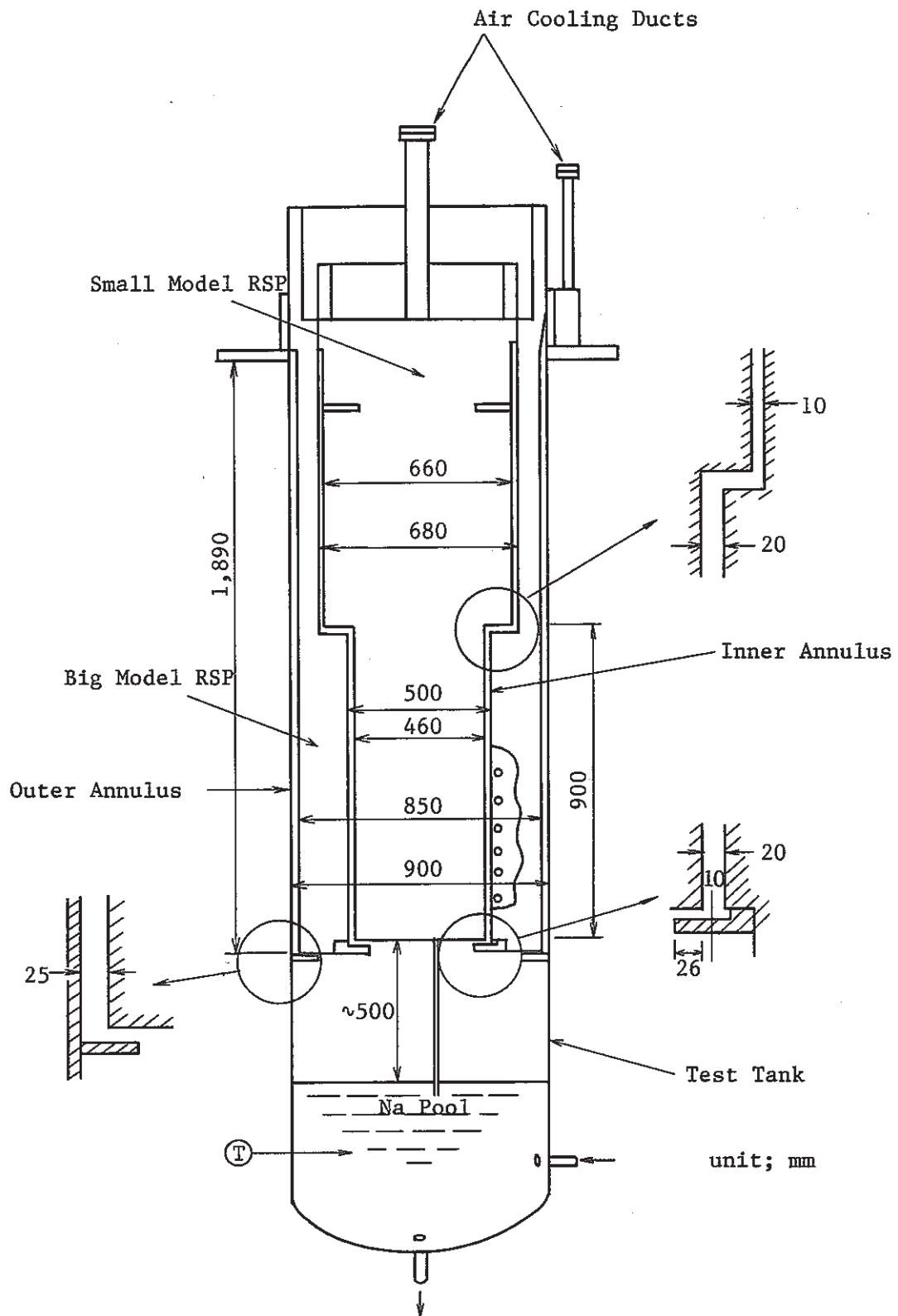


Fig. 4.1 Test Tank and Model RSPs.

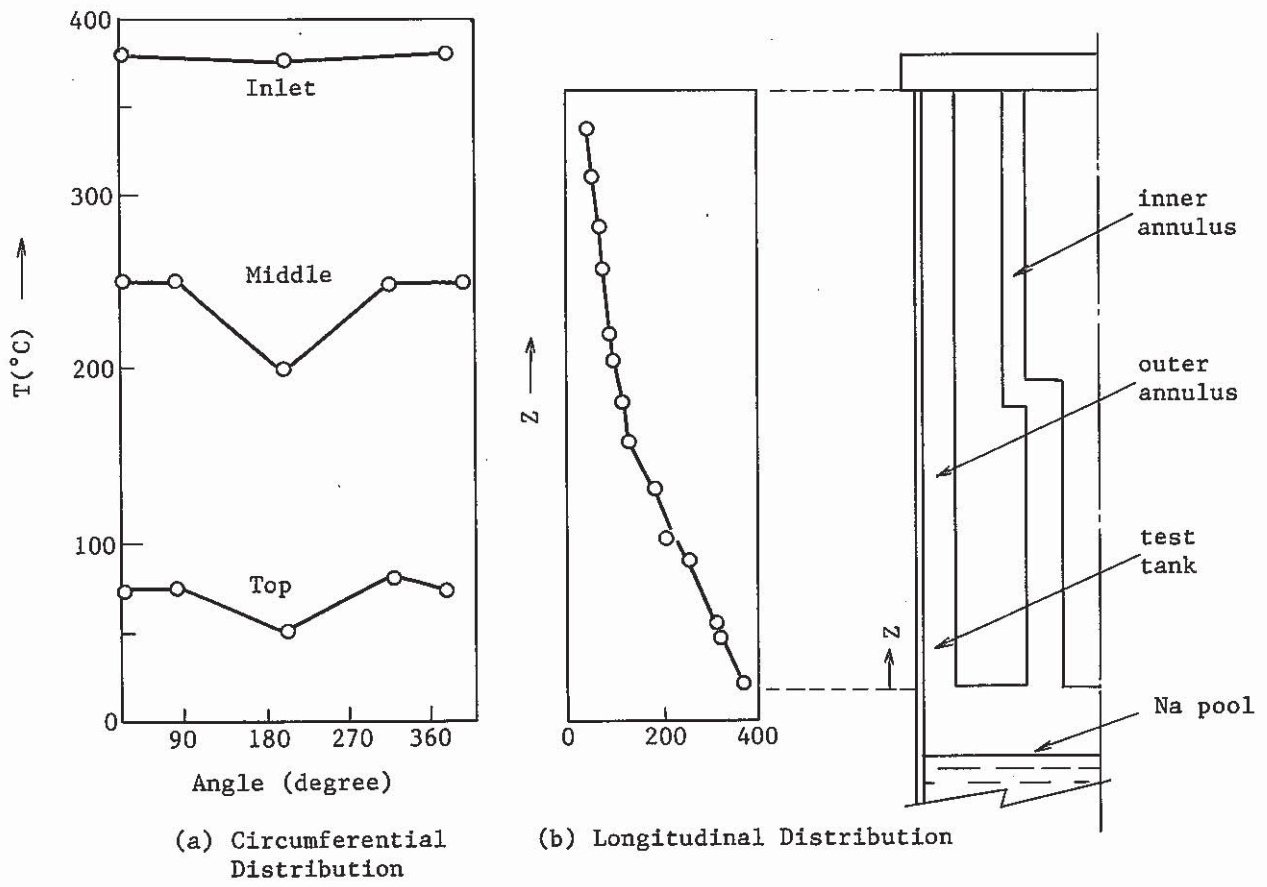


Fig. 4.2 Surface Temperature Distributions of the Annulus

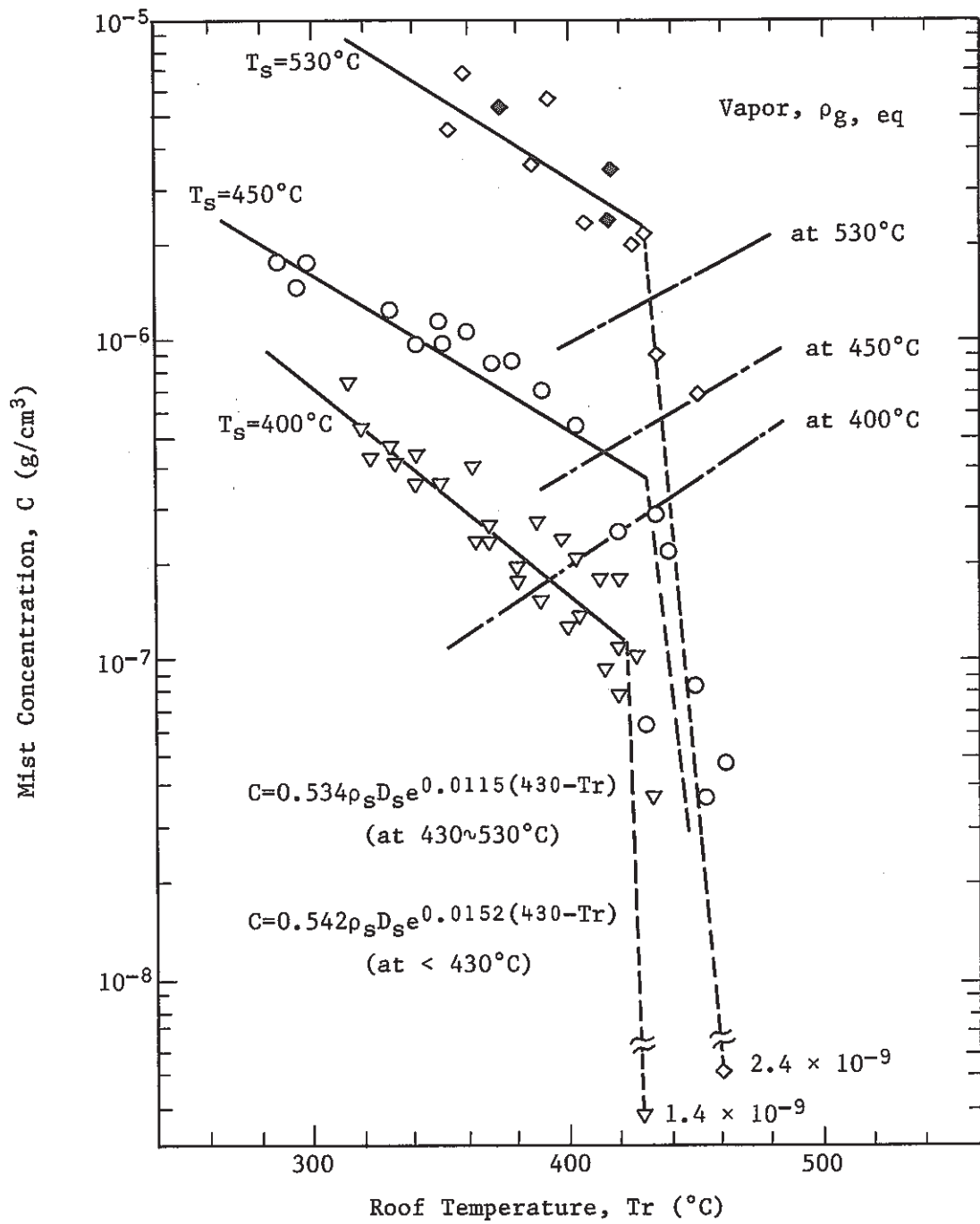


Fig. 4.3 Mist Concentration Against Cover Gas Space Roof Temperature

Run No : RSP-NA 3

T_S : 530°C, T_g : 0.2 kg/cm³·G.

T_O : 98°C,

T_B : 420°C,

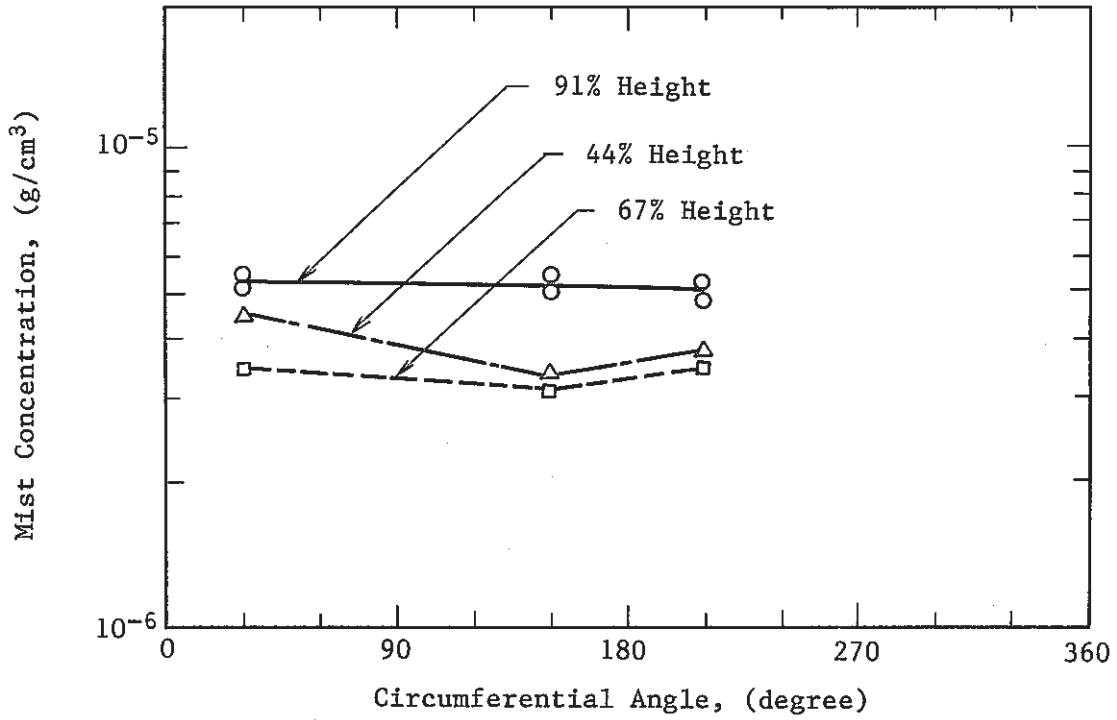


Fig. 4.4 Mist Concentrations at Different Locations within the Annulus

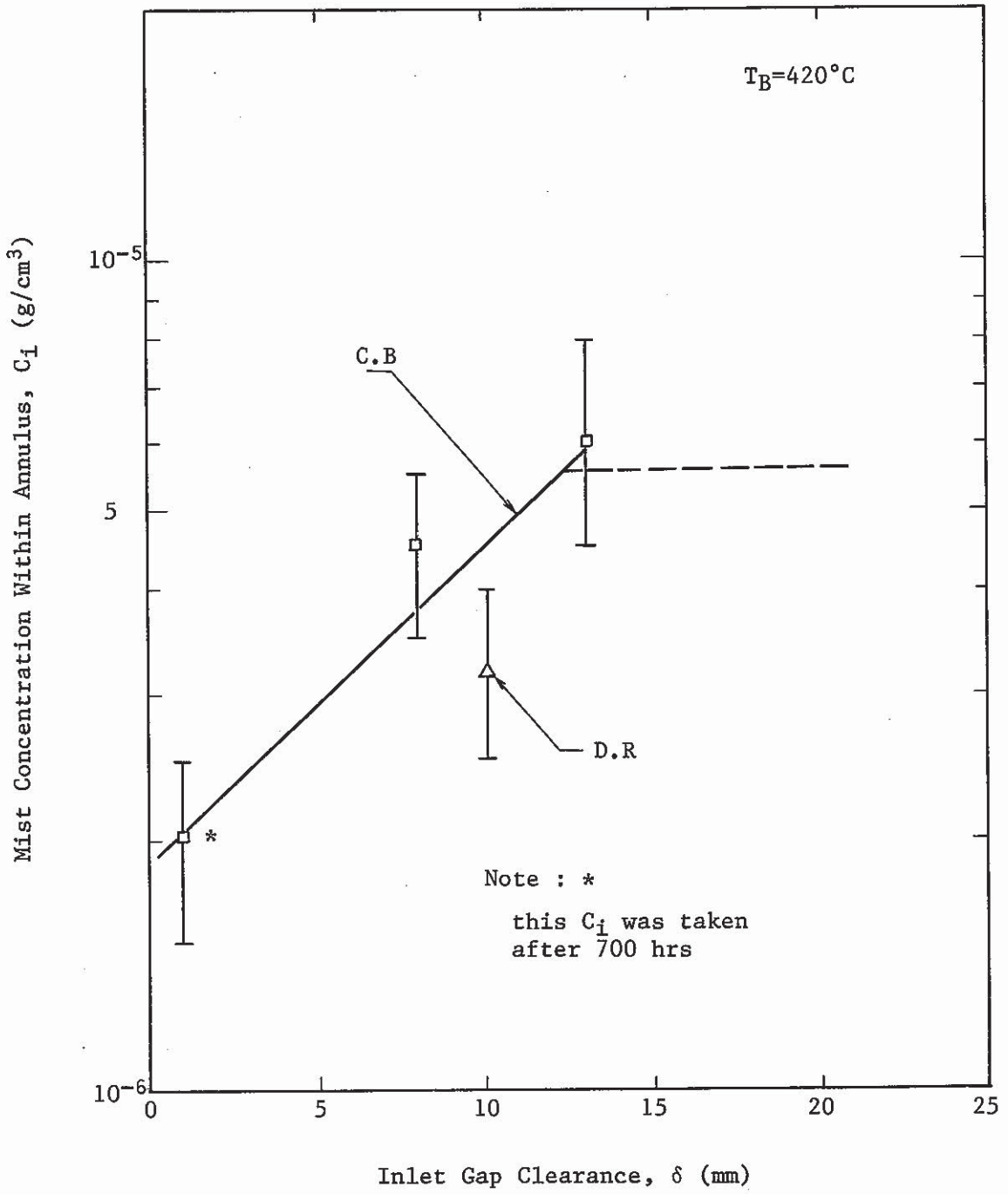


Fig. 4.5 Dependent of Mist Concentration C_i Upon Gap Clearance δ

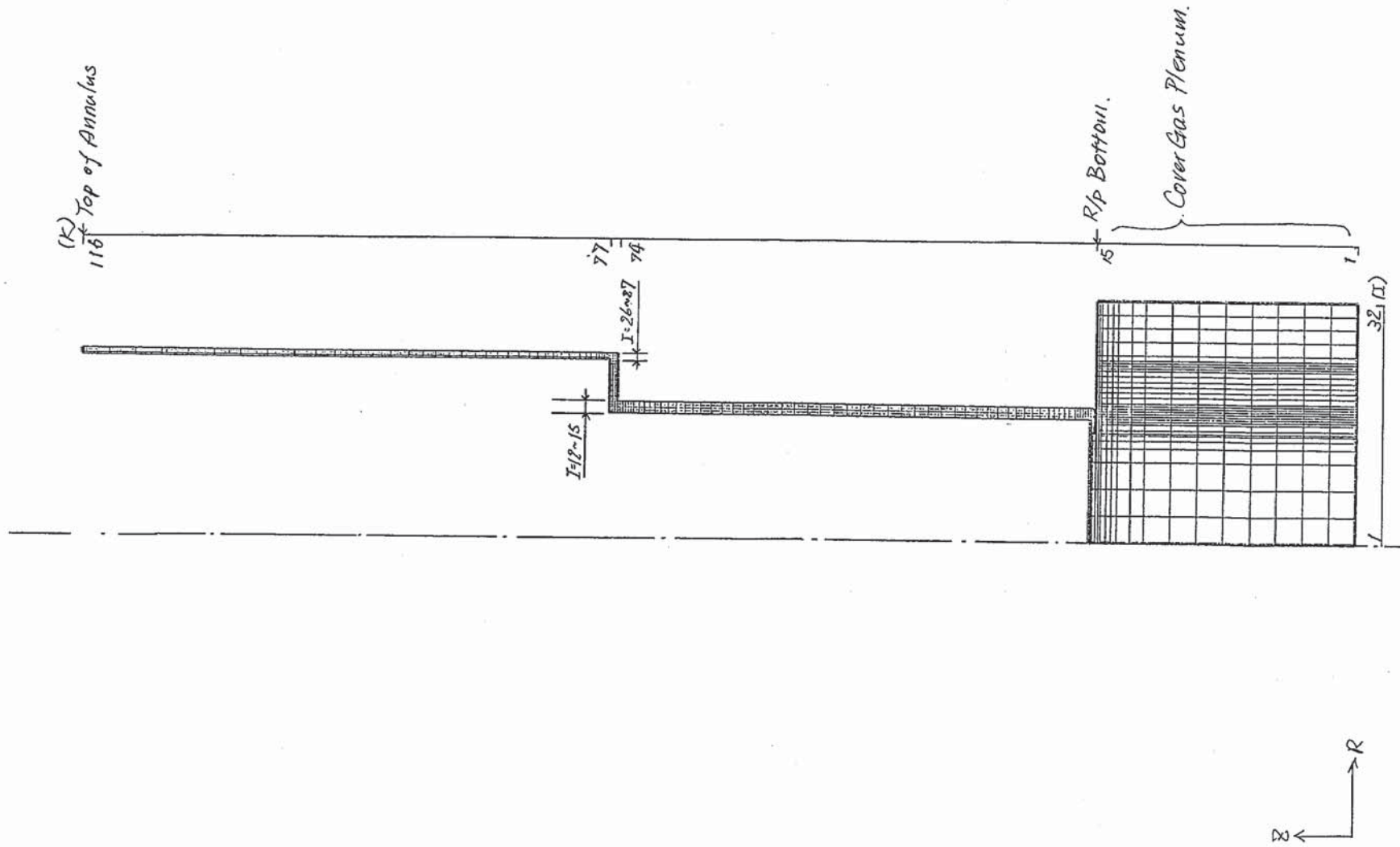


Fig. 4.6 Mesh Arrangement for the Analysis Region

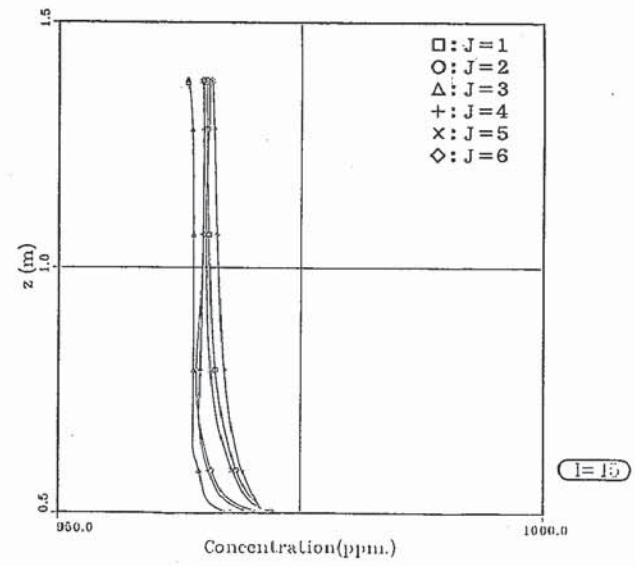
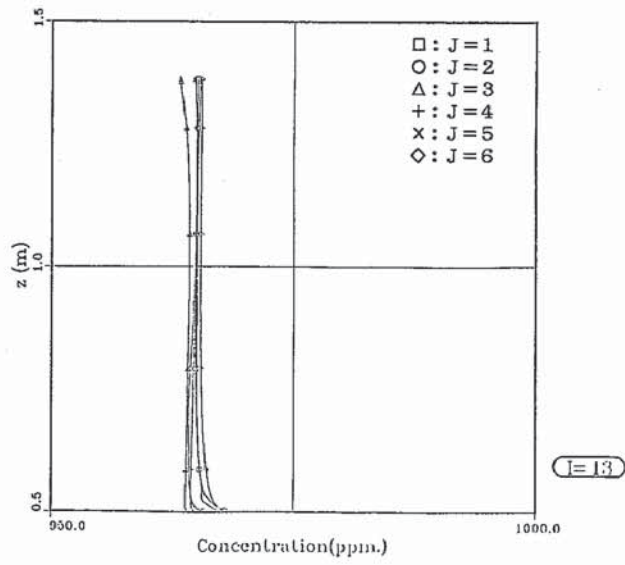
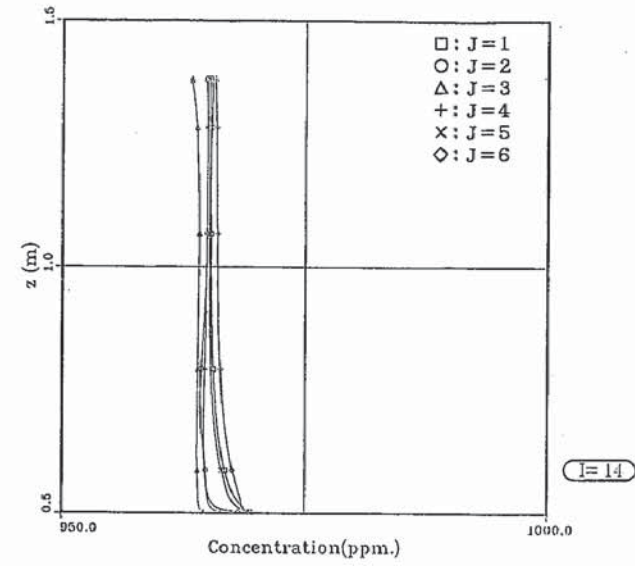
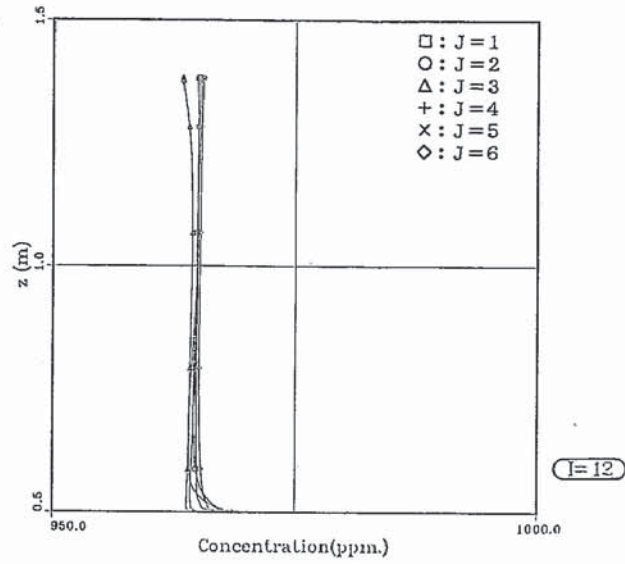


Fig. 4.7 Axial Concentration Distribution for Various Circumferential Positions at the Lower Region of Annulus

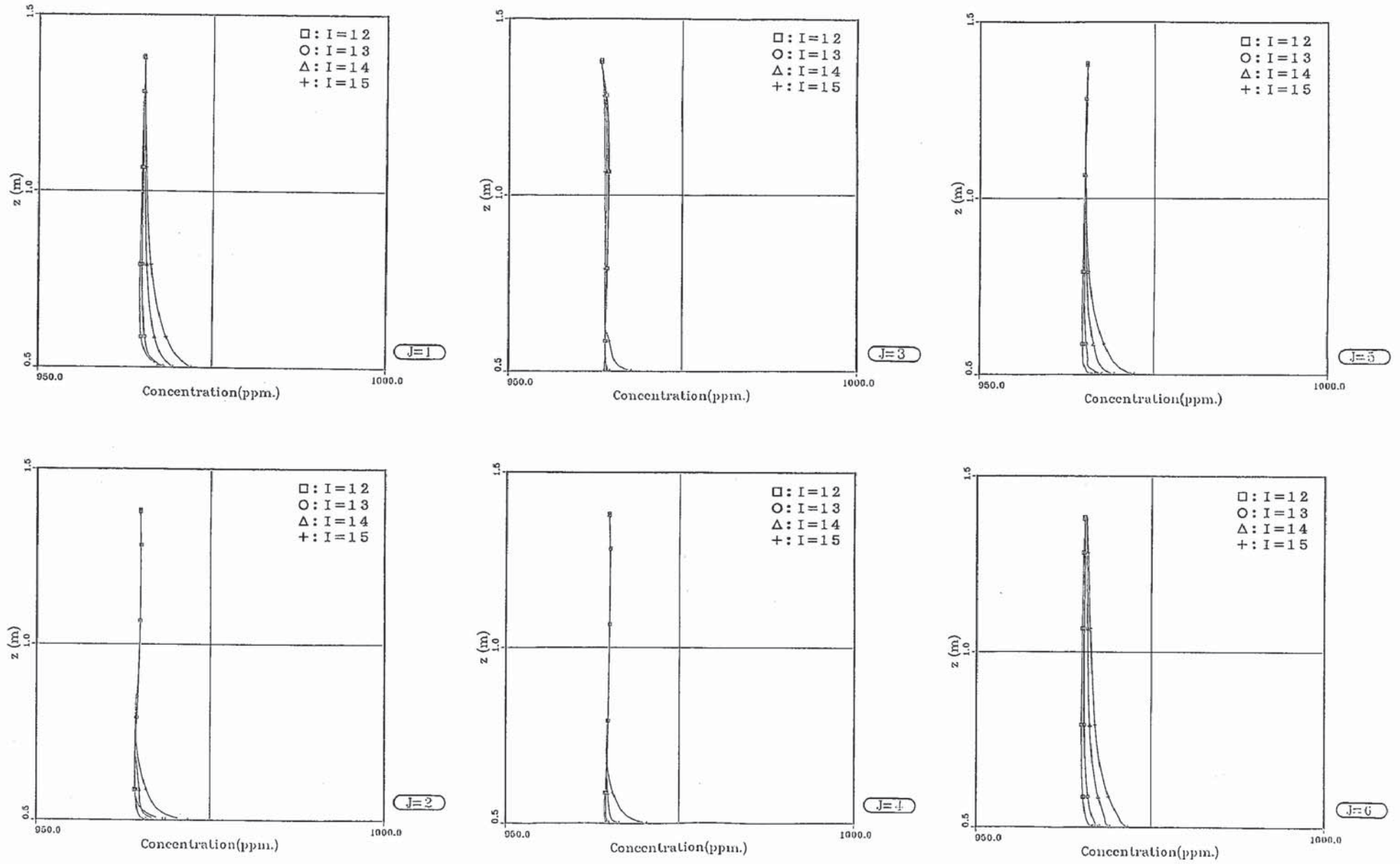


Fig. 4.8 Axial Concentration Distribution for Various Radial Positions at the Lower Region of Annulus

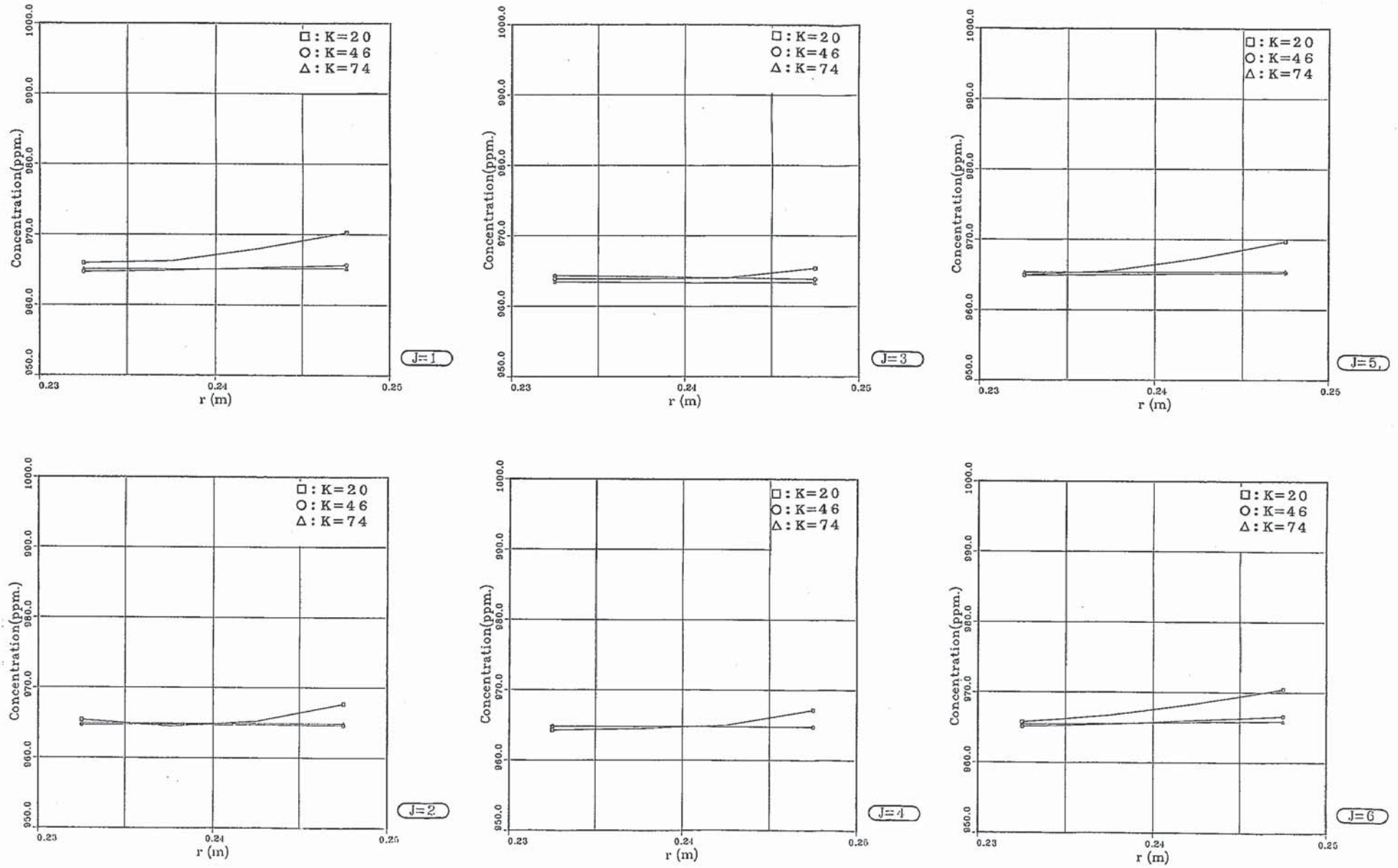
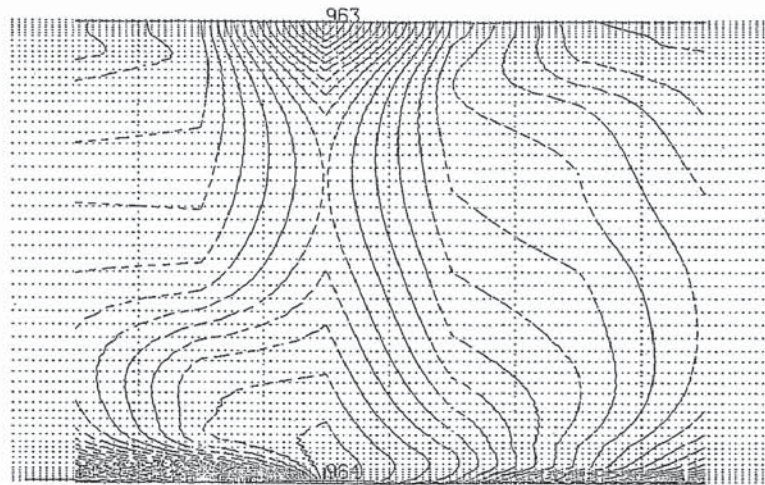
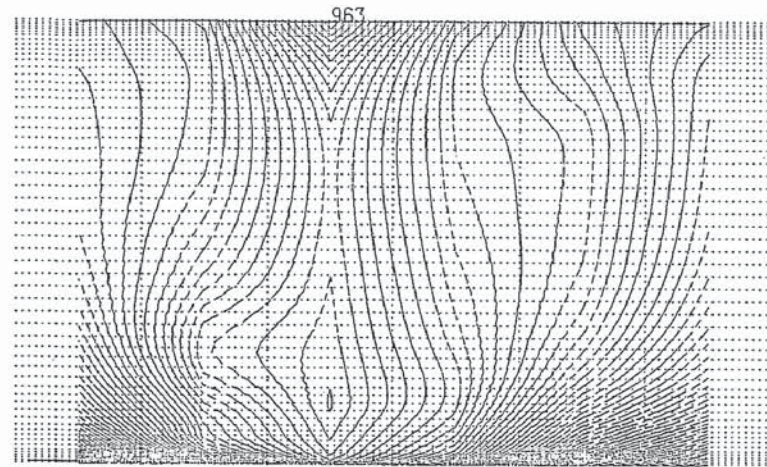


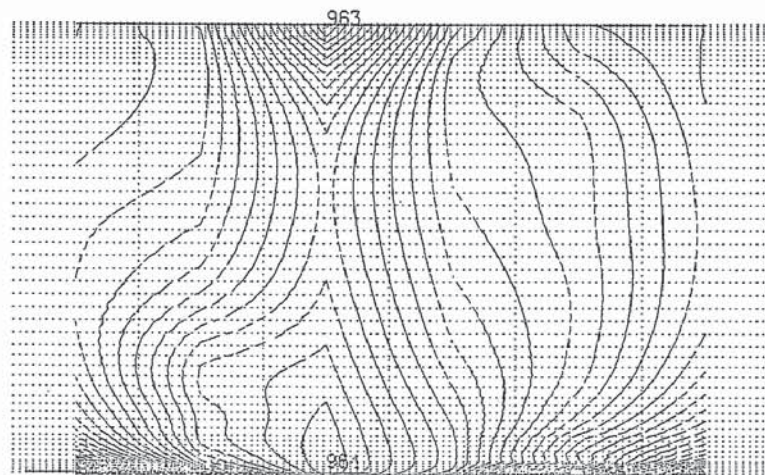
Fig. 4.9 Radial Concentration Distribution for Various Circumferential Positions at the Lower Region of Annulus



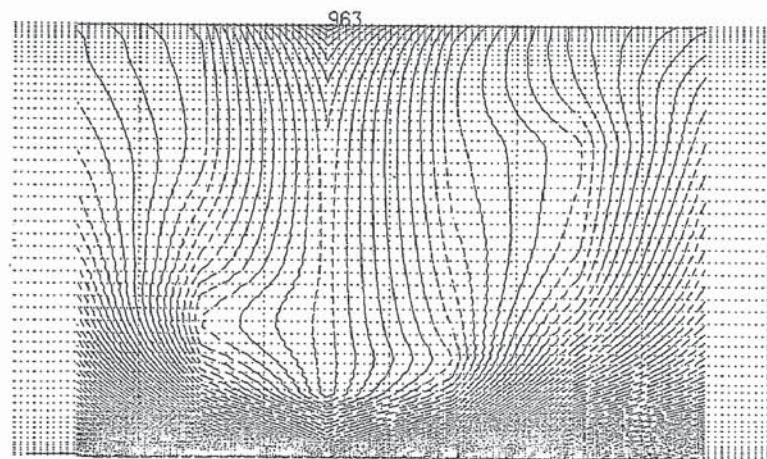
$l = 12$



$l = 14$



$l = 13$



$l = 15$

Fig. 4.10 Concentration Contour Plot for θ - Z Planes at the Lower Region of Annulus

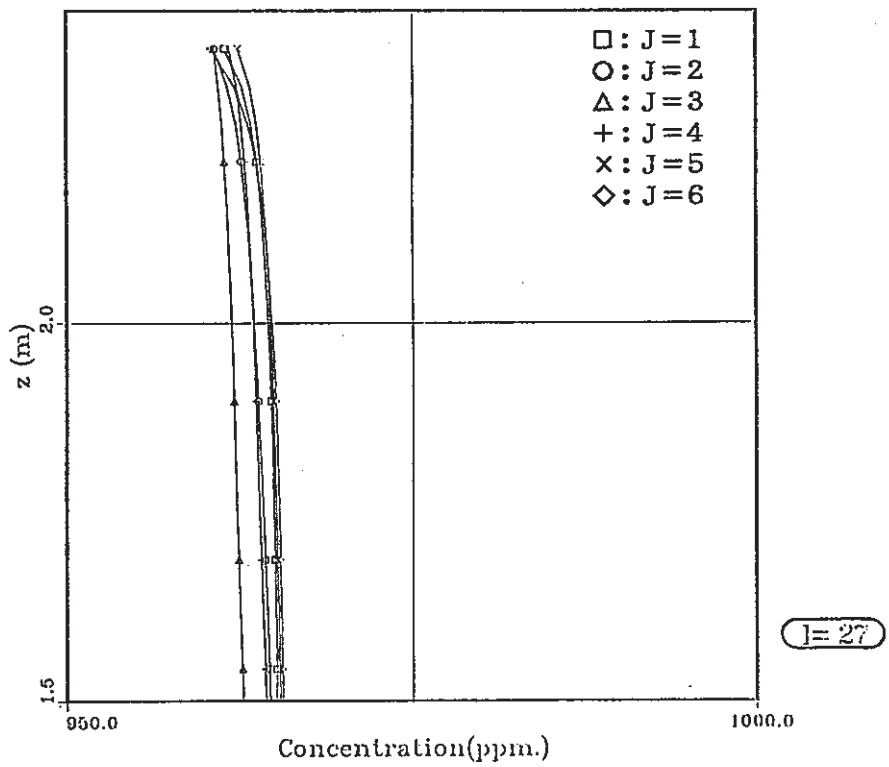
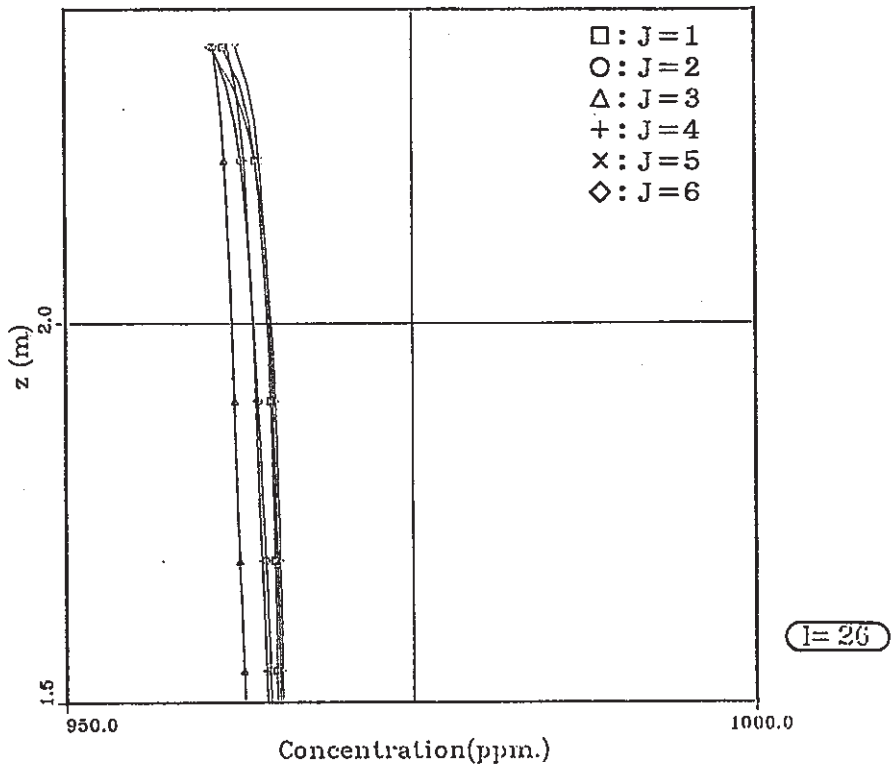


Fig. 4.11 Axial Concentration Distribution for Various Circumferential Positions at the Upper Region of Annulus

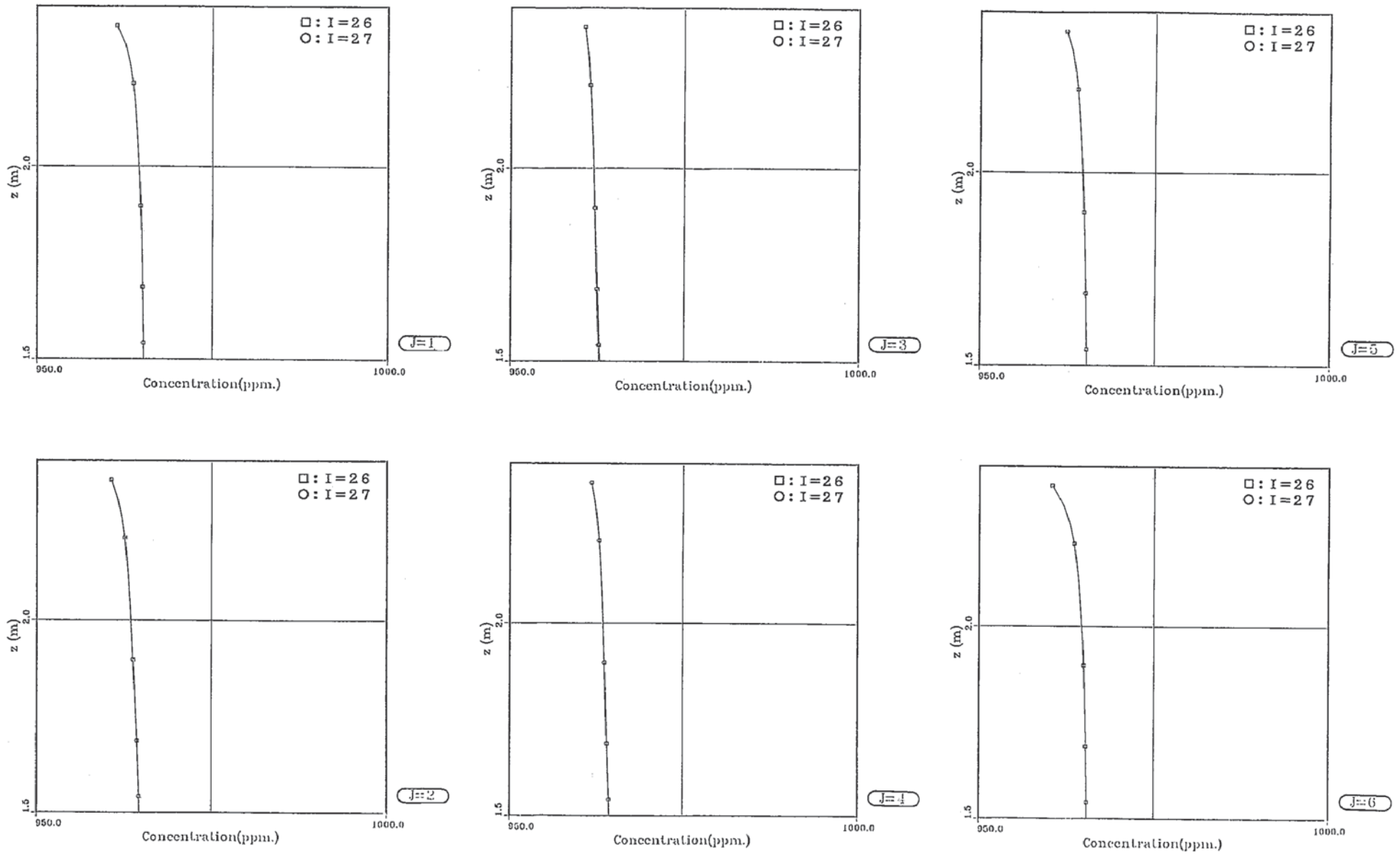


Fig. 4.12 Axial Concentration Distribution for Various Radial Positions at the Upper Region of Annulus

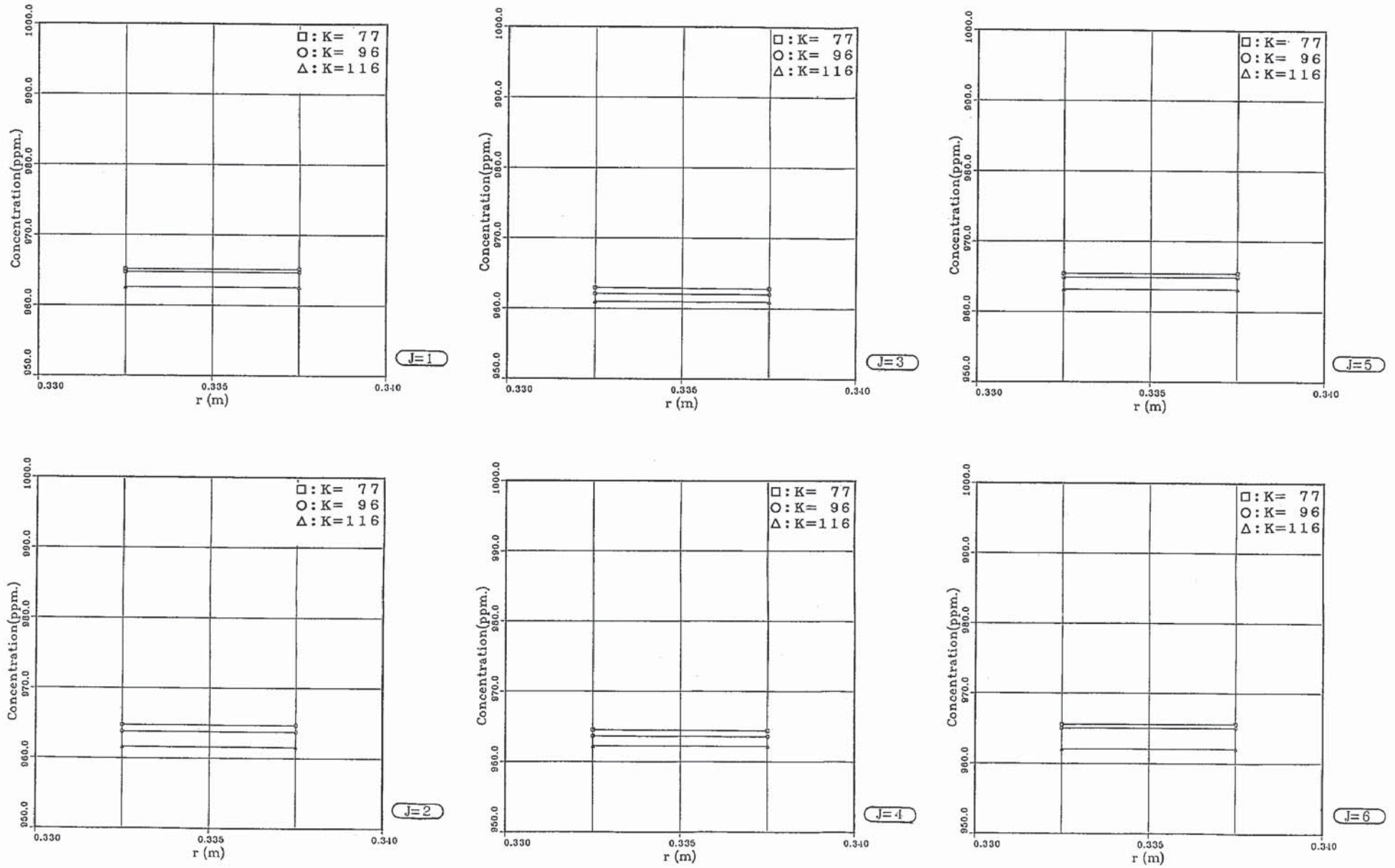
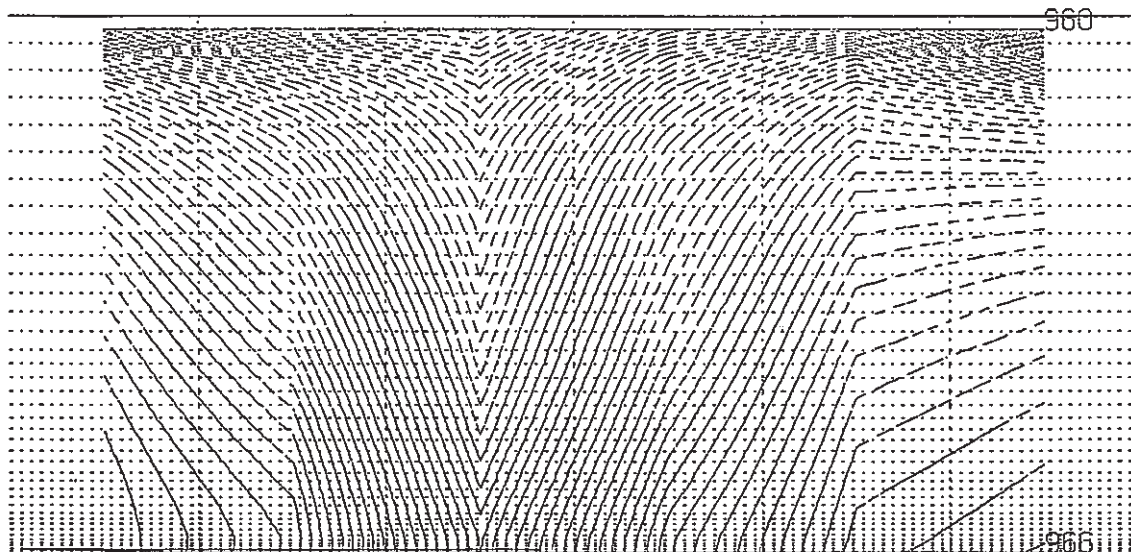
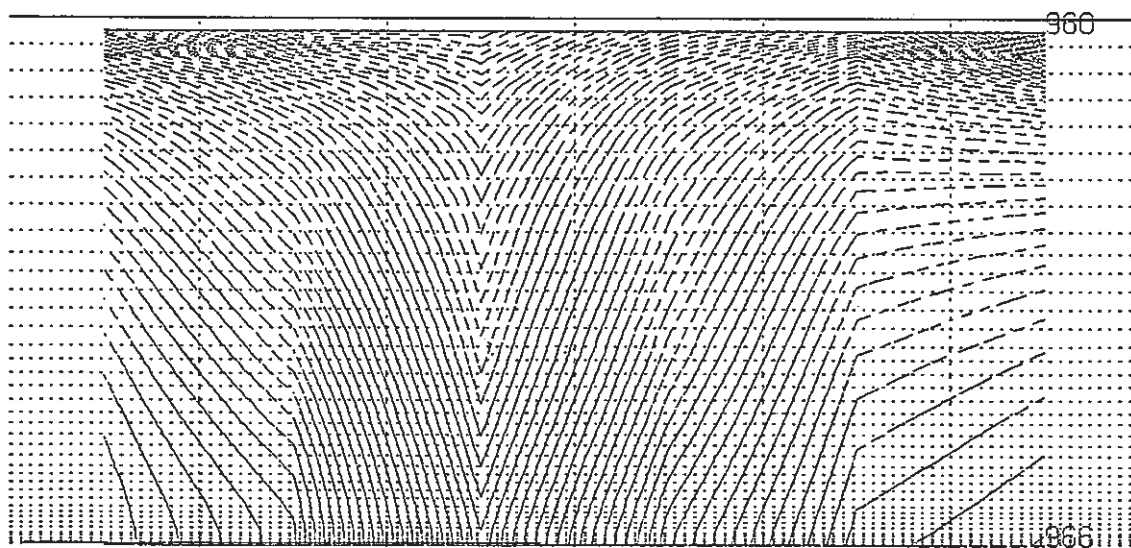


Fig. 4.13 Radial Concentration Distribution for Various Circumferential Positions at the Upper Region of Annulus

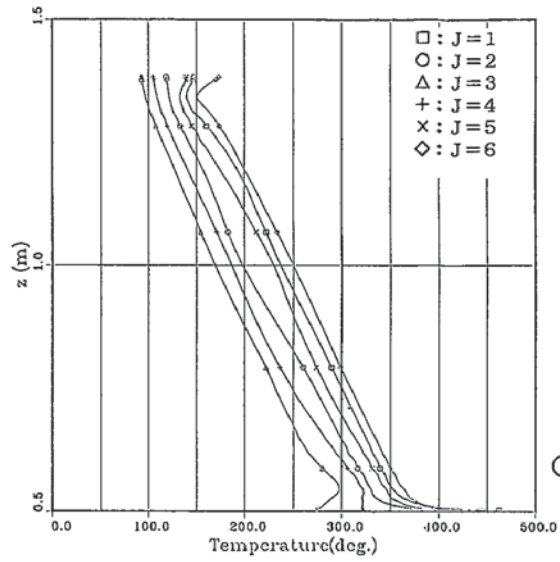


$l = 26$

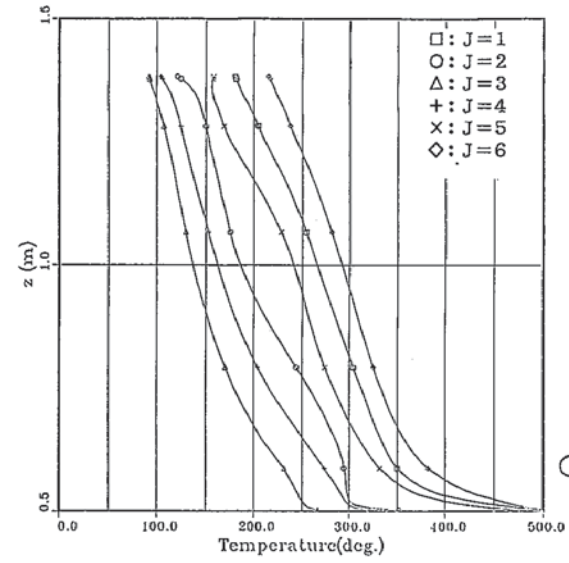


$l = 27$

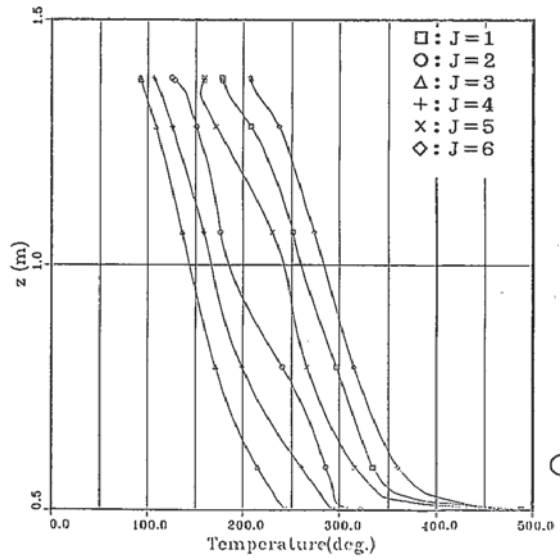
Fig. 4.14 Concentration Contour Plot for θ -Z Planes at the Upper Region of Annulus



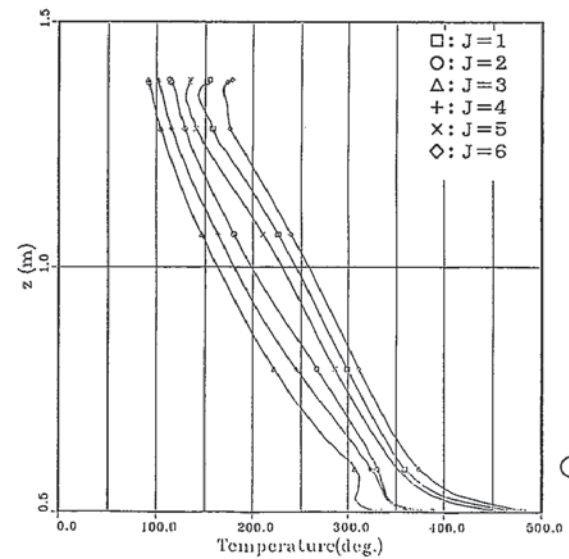
I=12



I=14



I=13



I=15

Fig. 4.15 Axial Temperature Distribution for Various Circumferential Positions at the Lower Region of Annulus

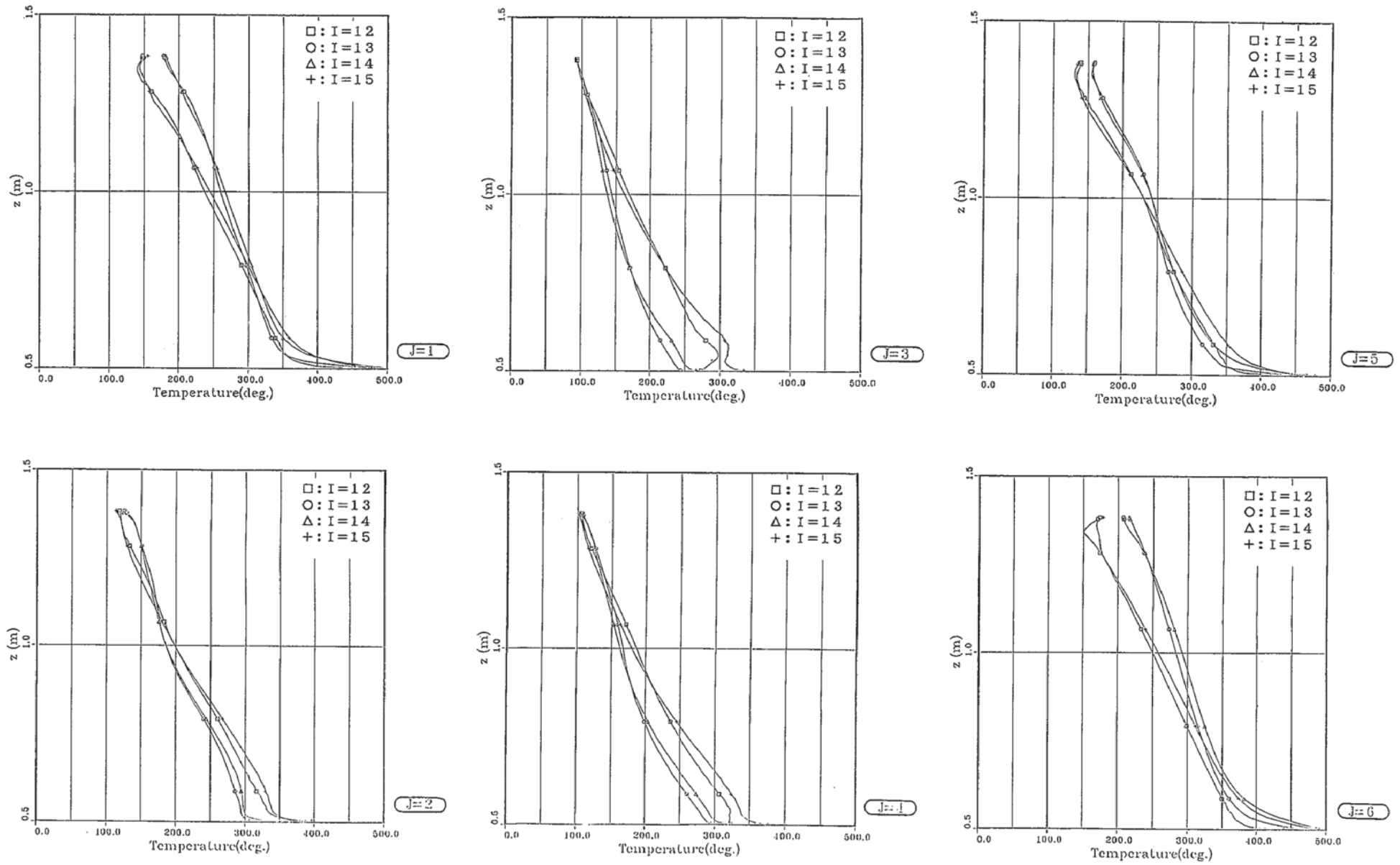


Fig. 4.16 Axial Temperature Distribution for Various Radial Positions at the Lower Region of Annulus

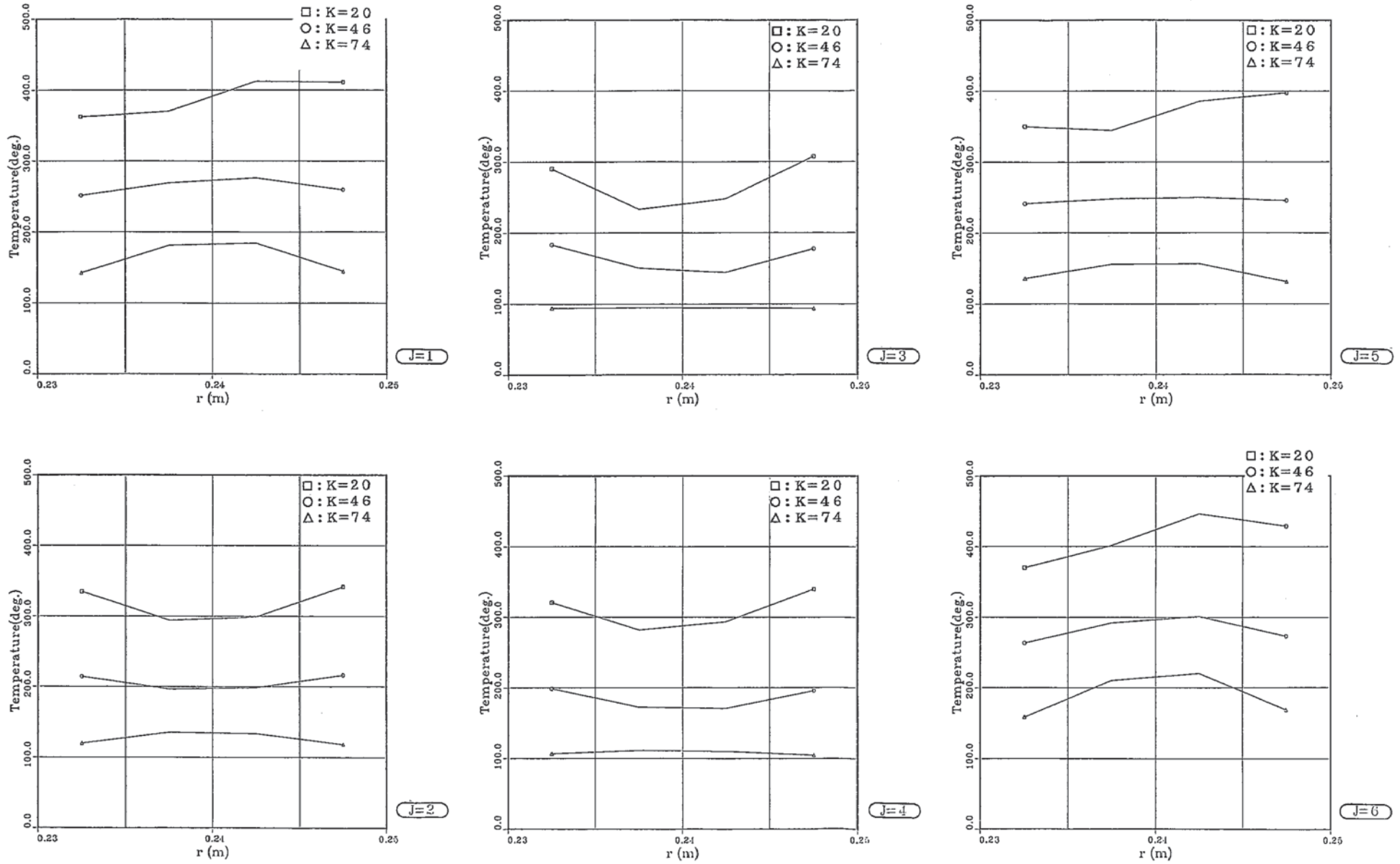
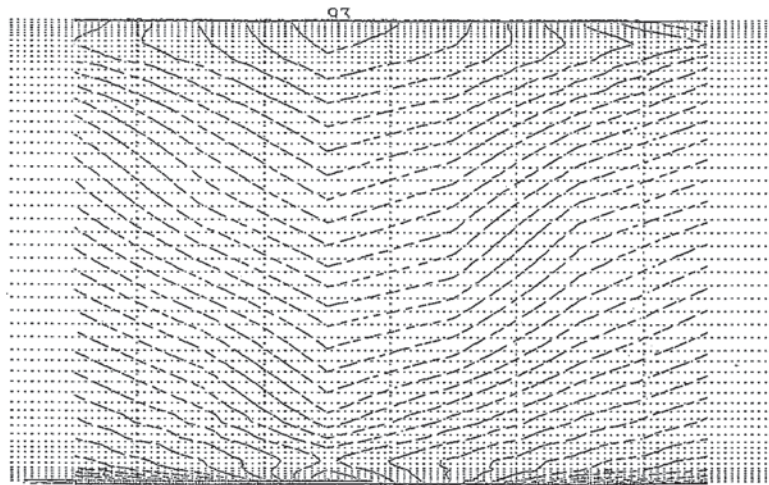
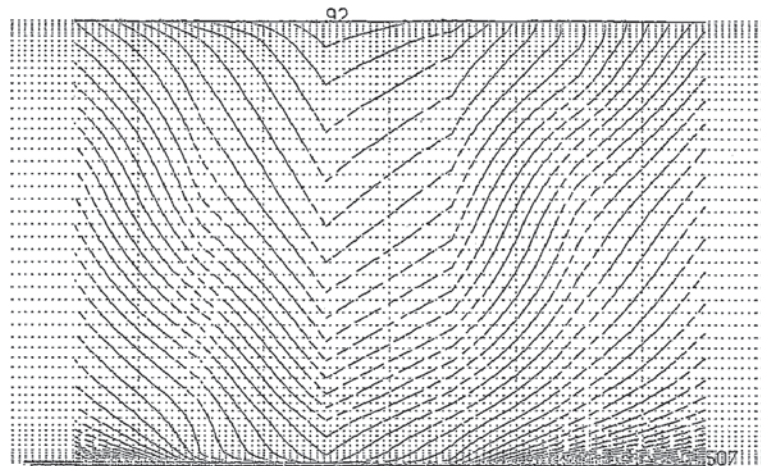


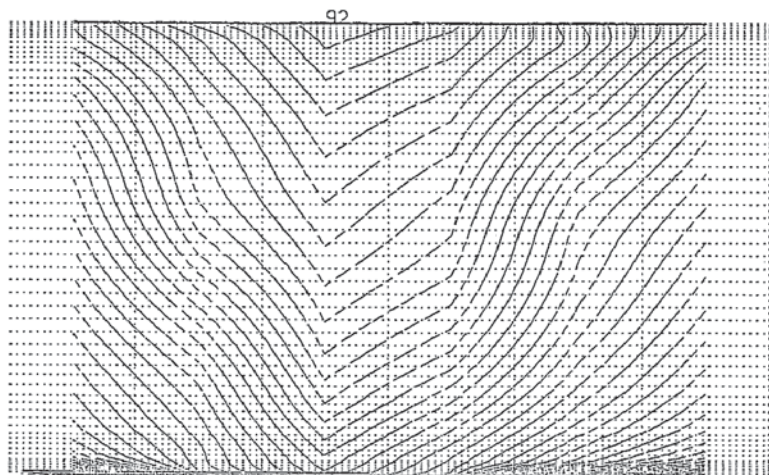
Fig. 4.17 Radial Temperature Distribution for Various Axial Positions at the Lower Region of Annulus



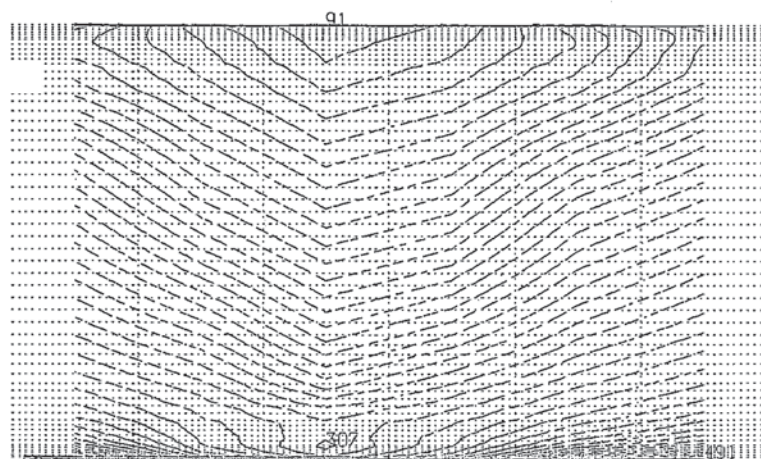
$l = 12$



$l = 14$



$l = 13$



$l = 15$

Fig. 4.18 Temperature Contour Plot for θ -Z Planes at the Lower Region of Annulus

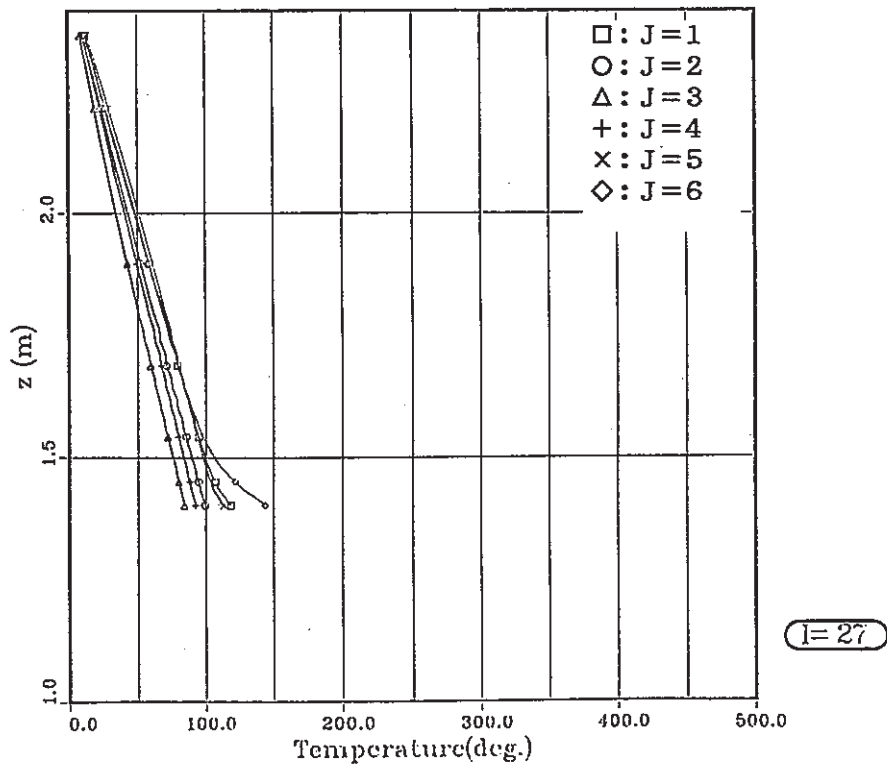
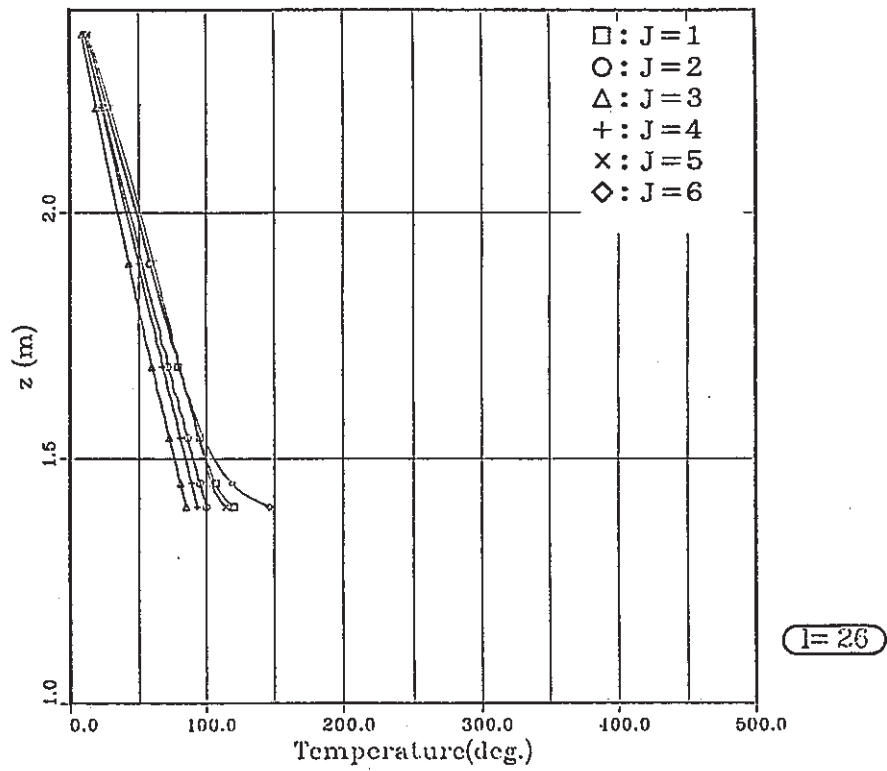


Fig. 4.19 Axial Temperature Distribution for Various Circumferential Positions at the Upper Region of Annulus

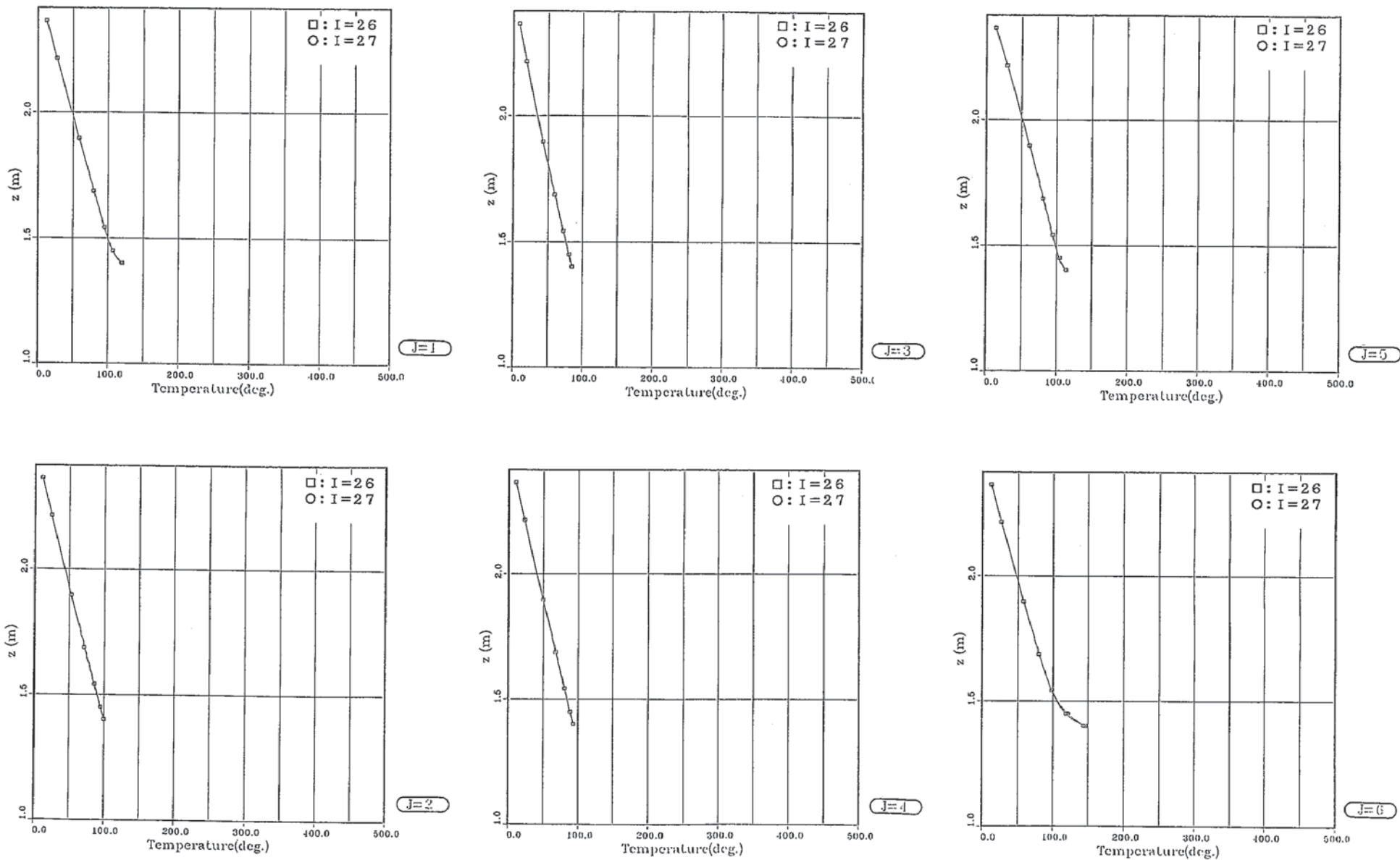


Fig. 4.20 Axial Temperature Distribution for Various Radial Positions at the Upper Region of Annulus

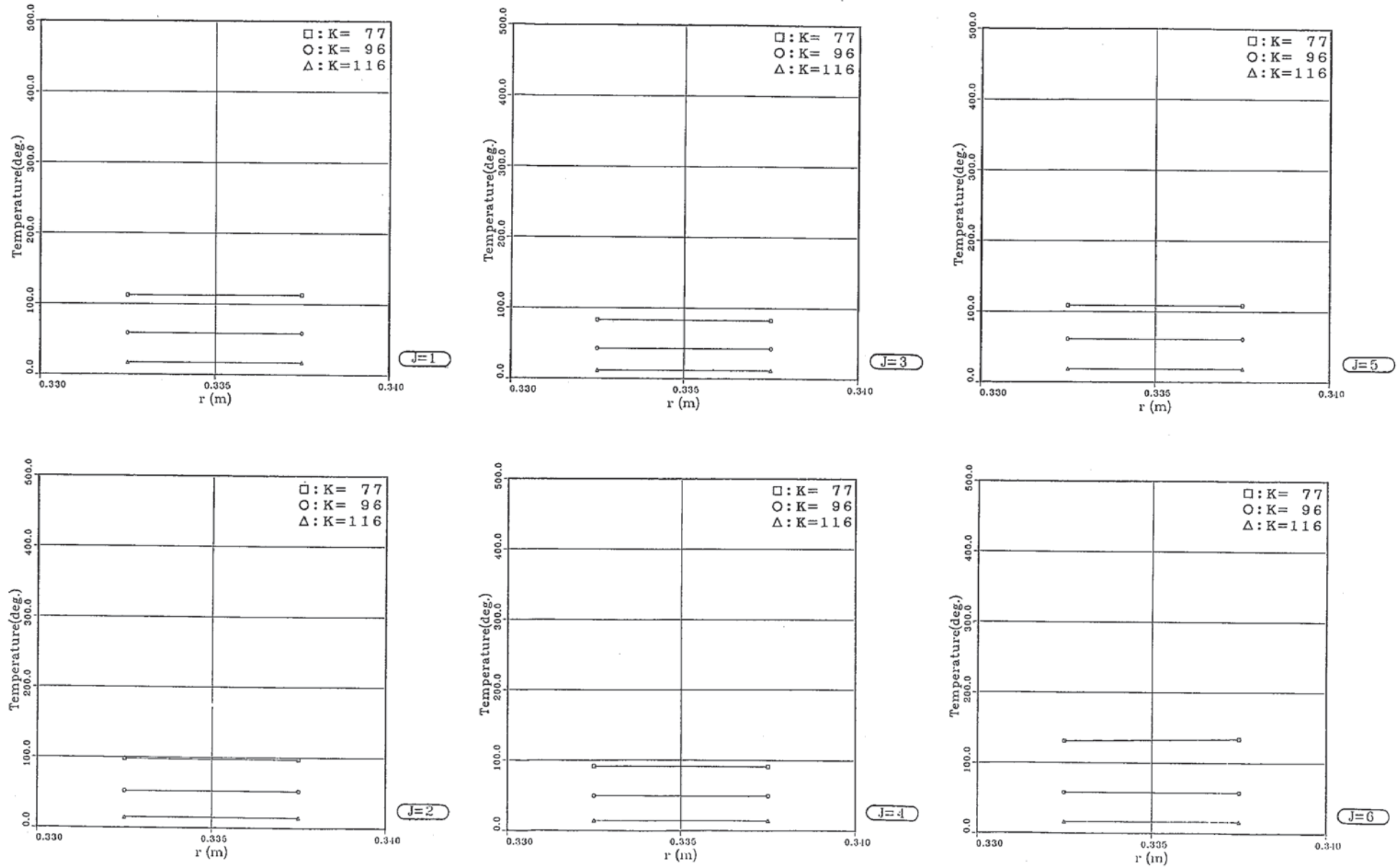
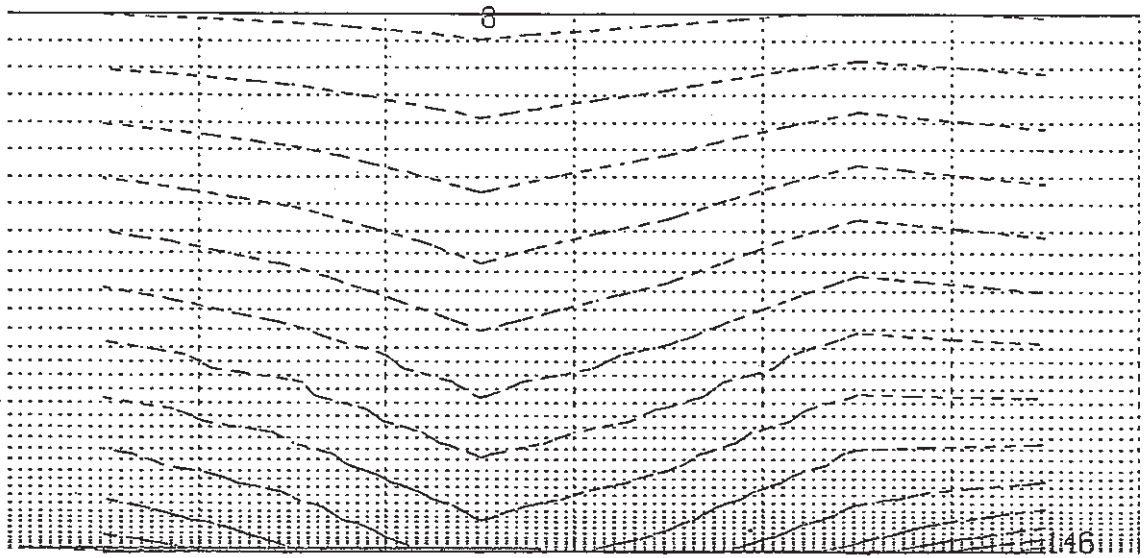
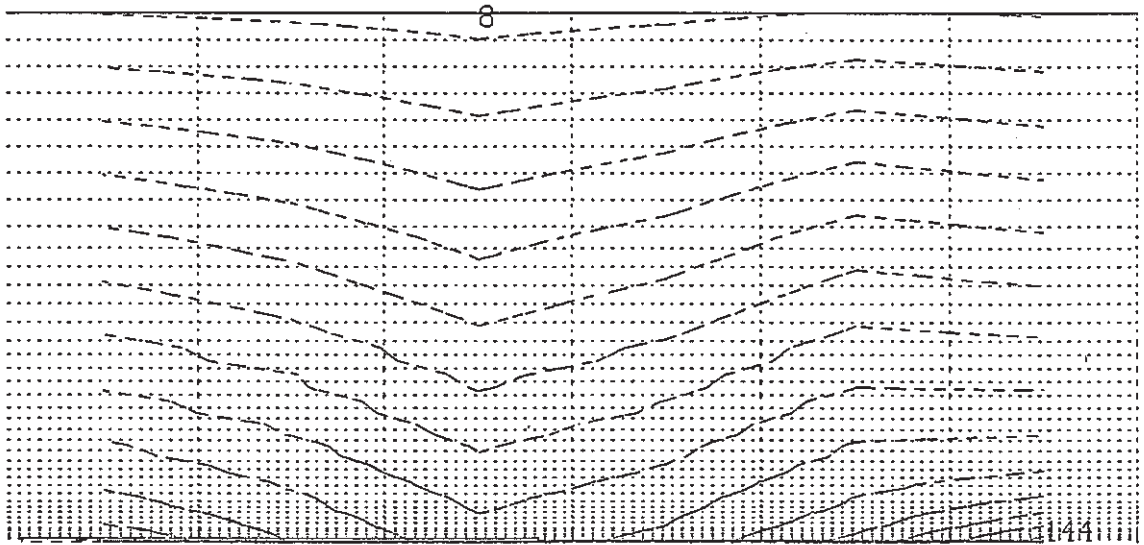


Fig. 4.21 Radial Temperature Distribution for Various Axial Positions at the Upper Region of Annulus



$l = 26$



$l = 27$

Fig. 4.22 Temperature Contour Plot for θ -Z Planes at the Upper Region of Annulus

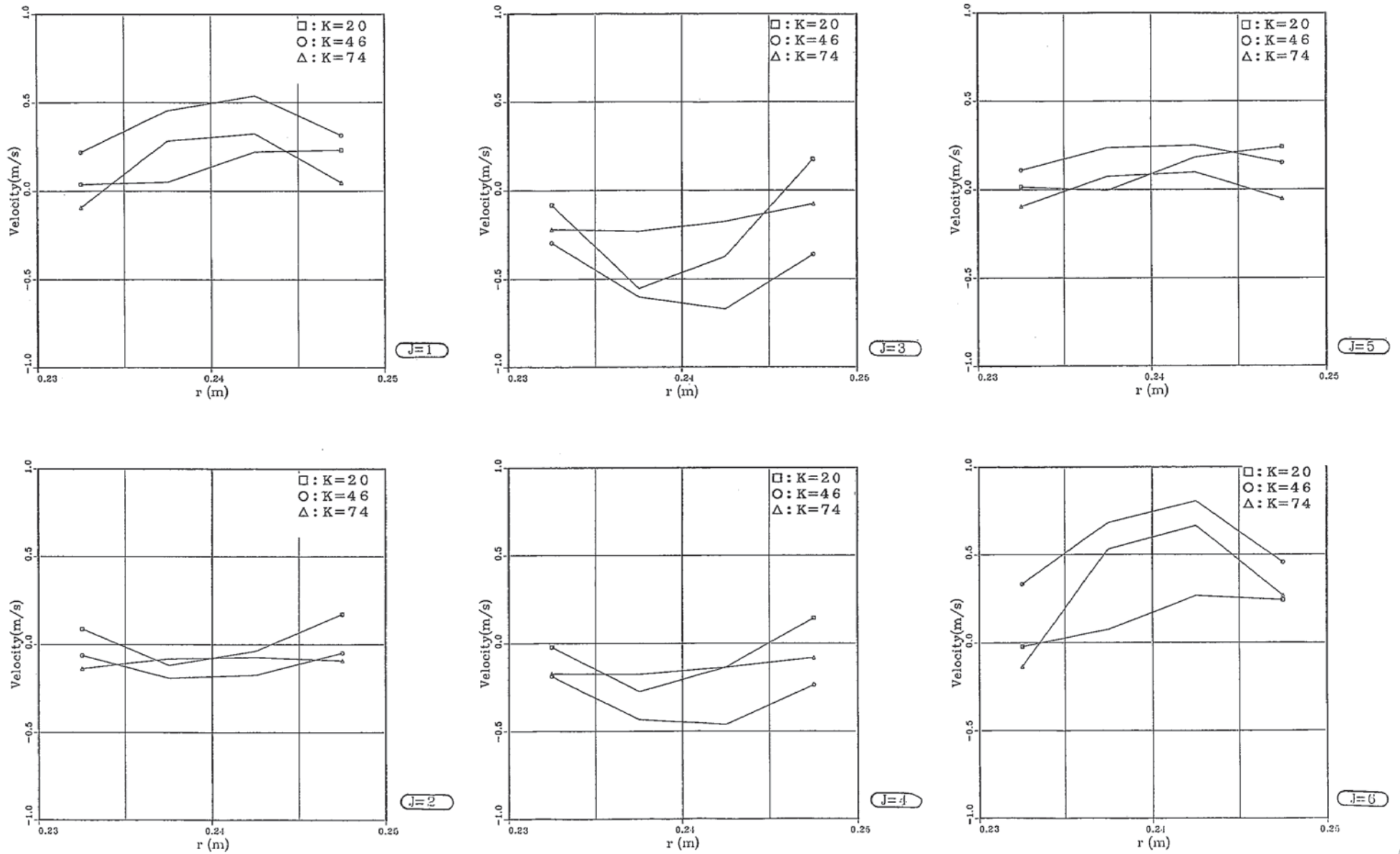


Fig. 4.23 Radial Velocity w Distribution for Various Axial Positions at the Lower Region of Annulus

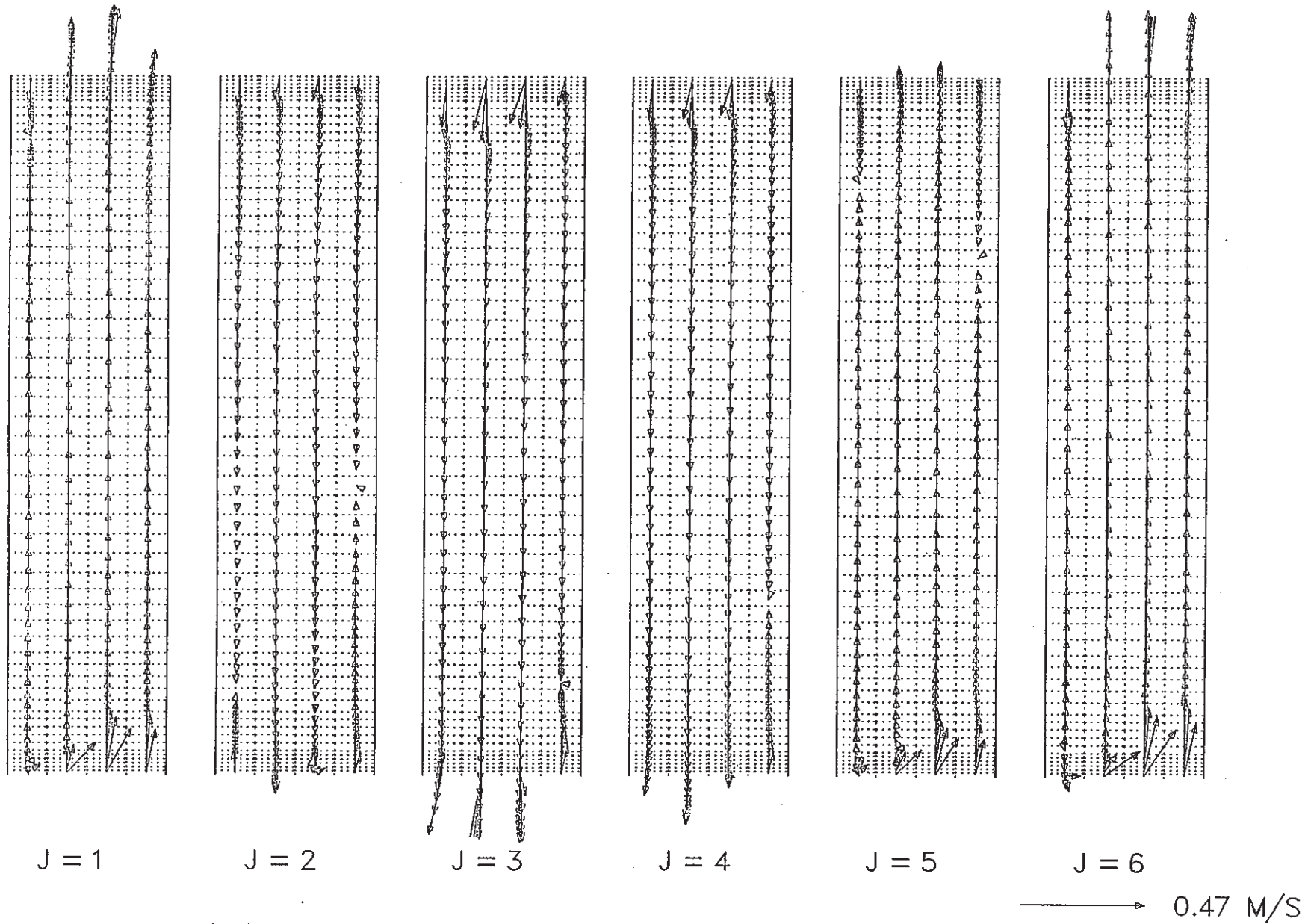


Fig. 4.24 Velocity Vector Plot for R-Z Planes at the Lower Region of Annulus

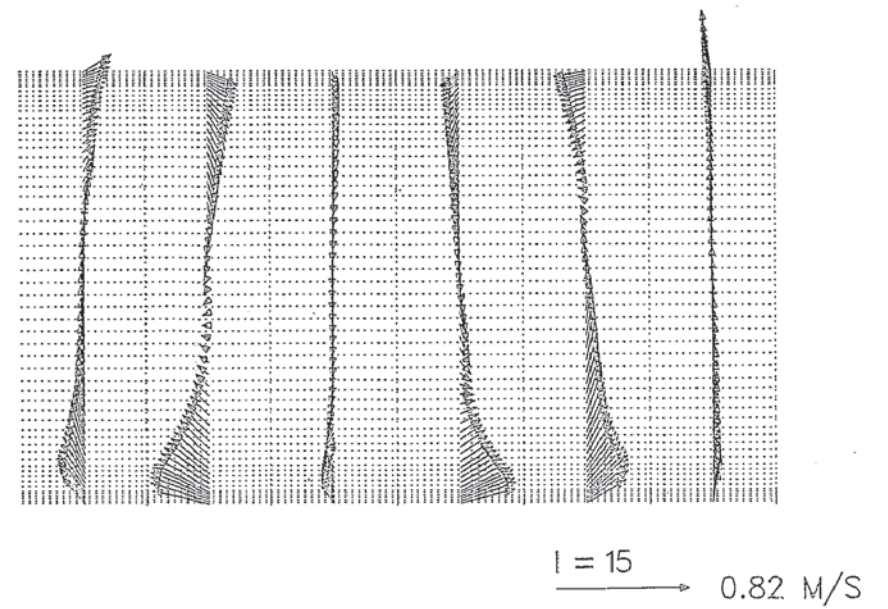
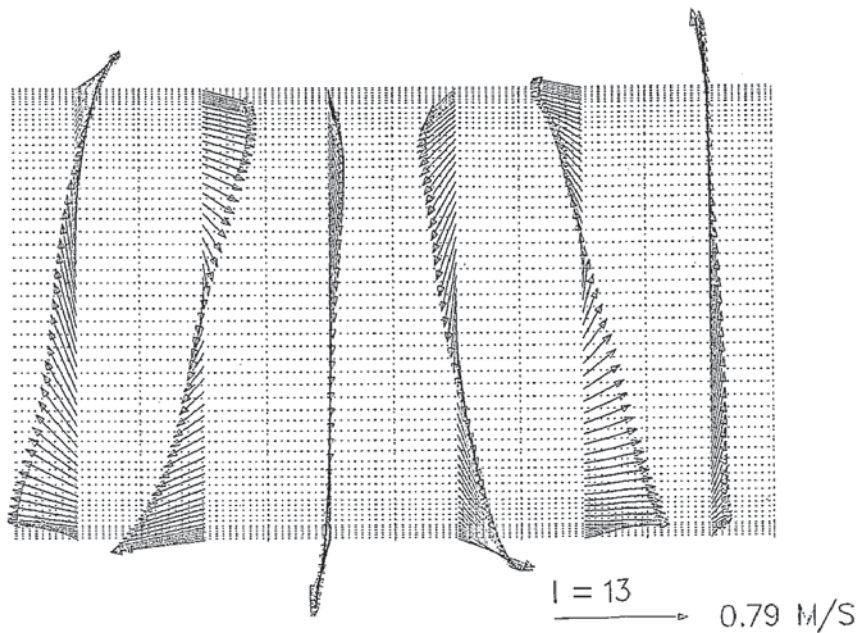
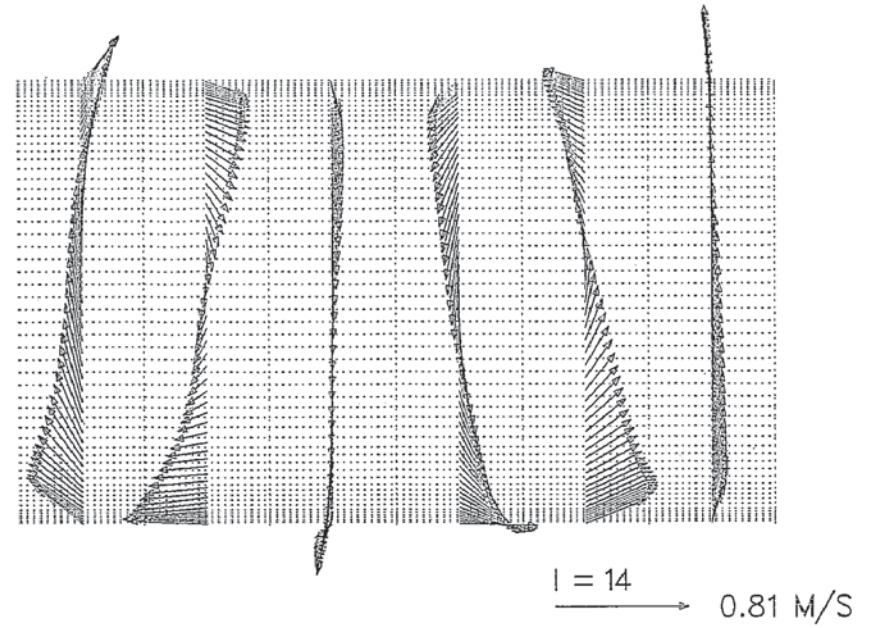
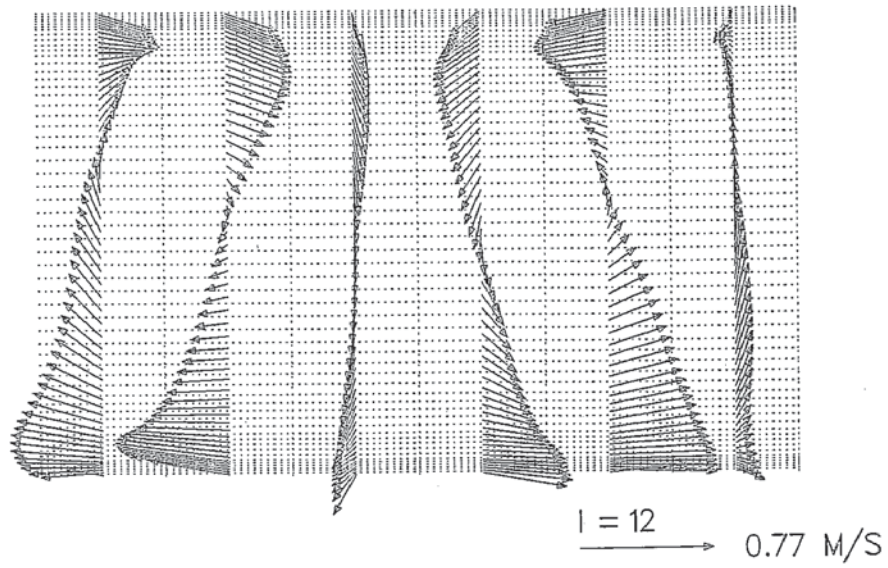


Fig. 4.25 Velocity Vector Plot for θ - z Planes at the Lower Region of Annulus

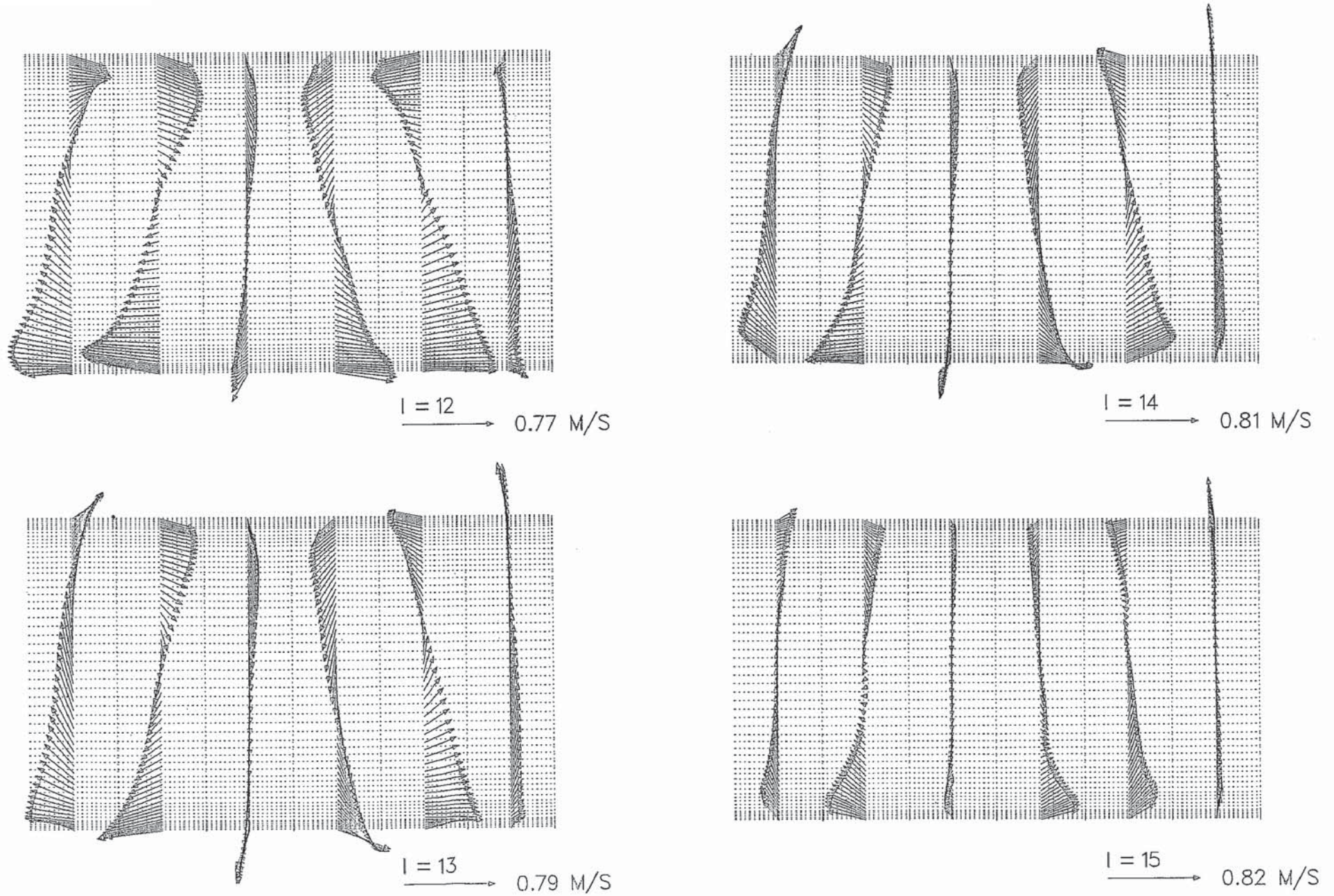
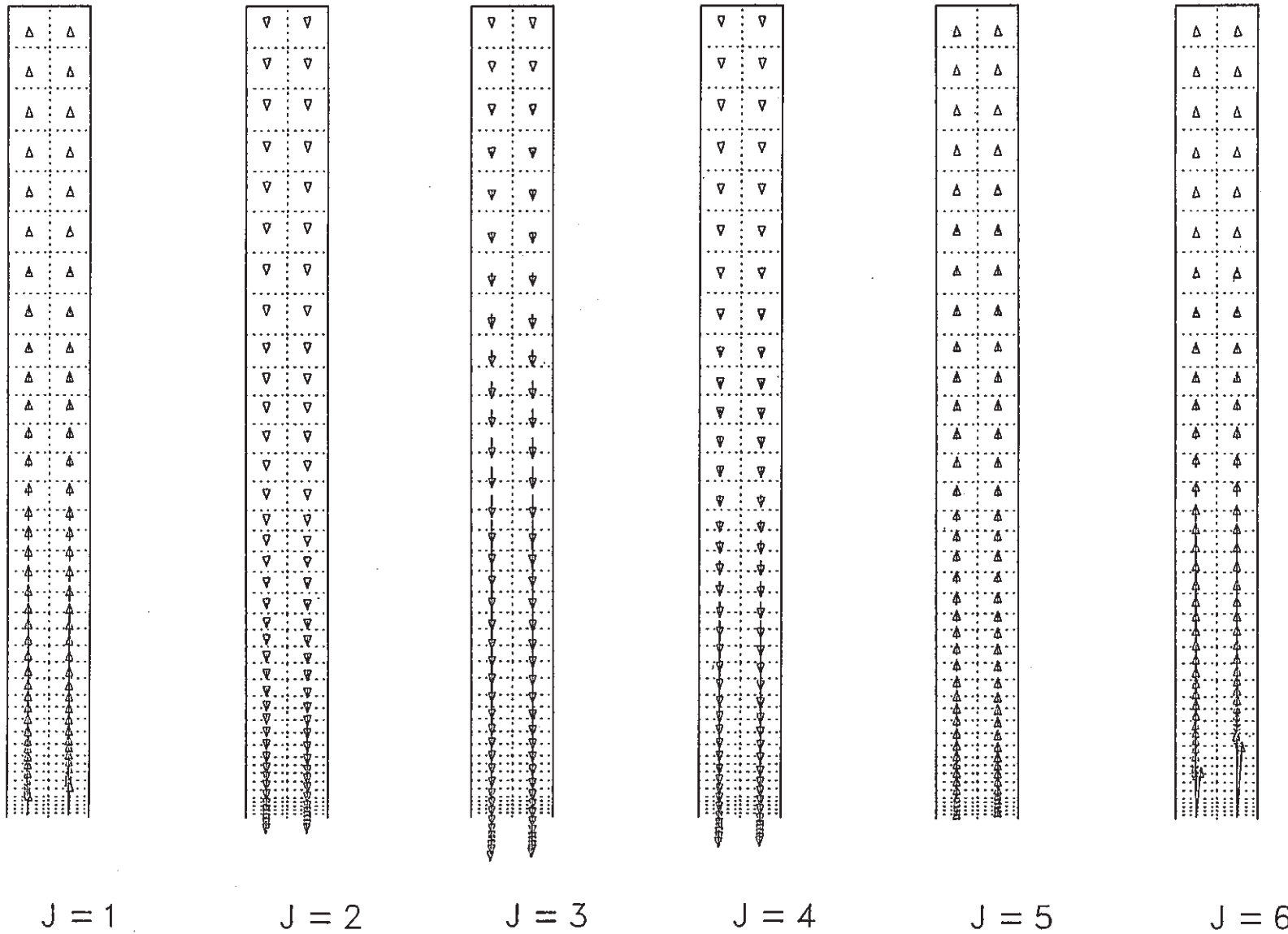


Fig. 4.26 Radial Velocity w Distribution for Various Axial Positions at the Upper Region of Annulus



→ 0.52 M/S

Fig. 4.27 Velocity Vector Plot for R-Z Planes at the Upper Region of Annulus

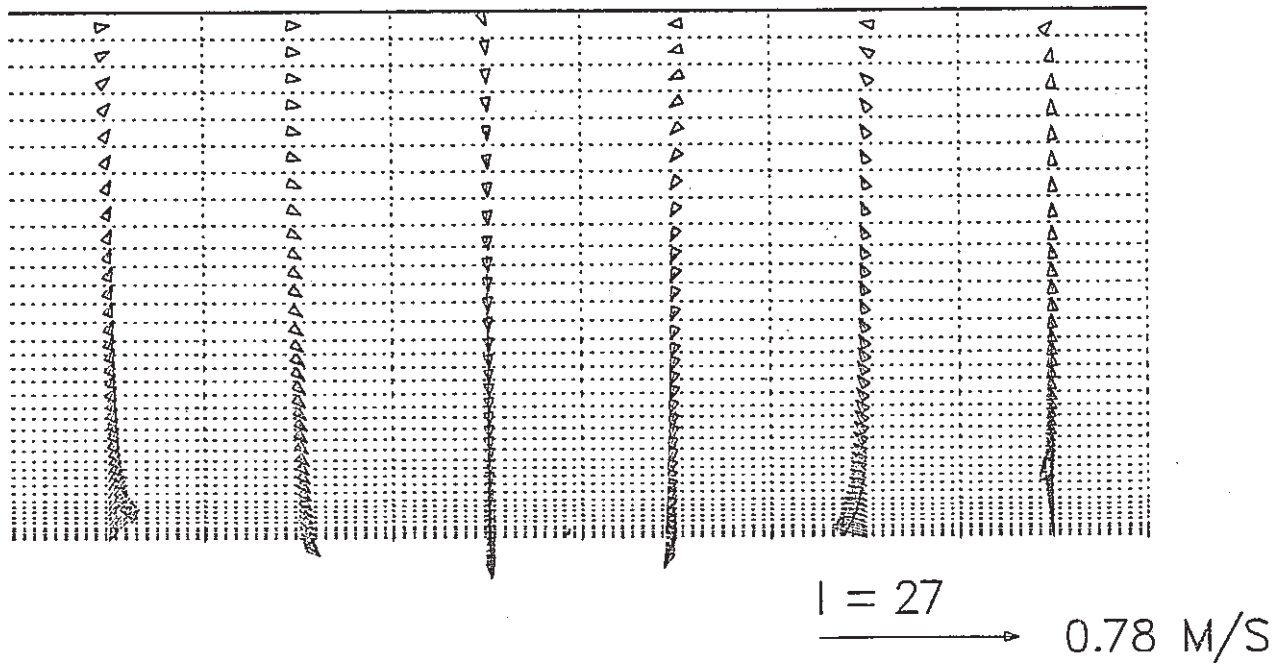
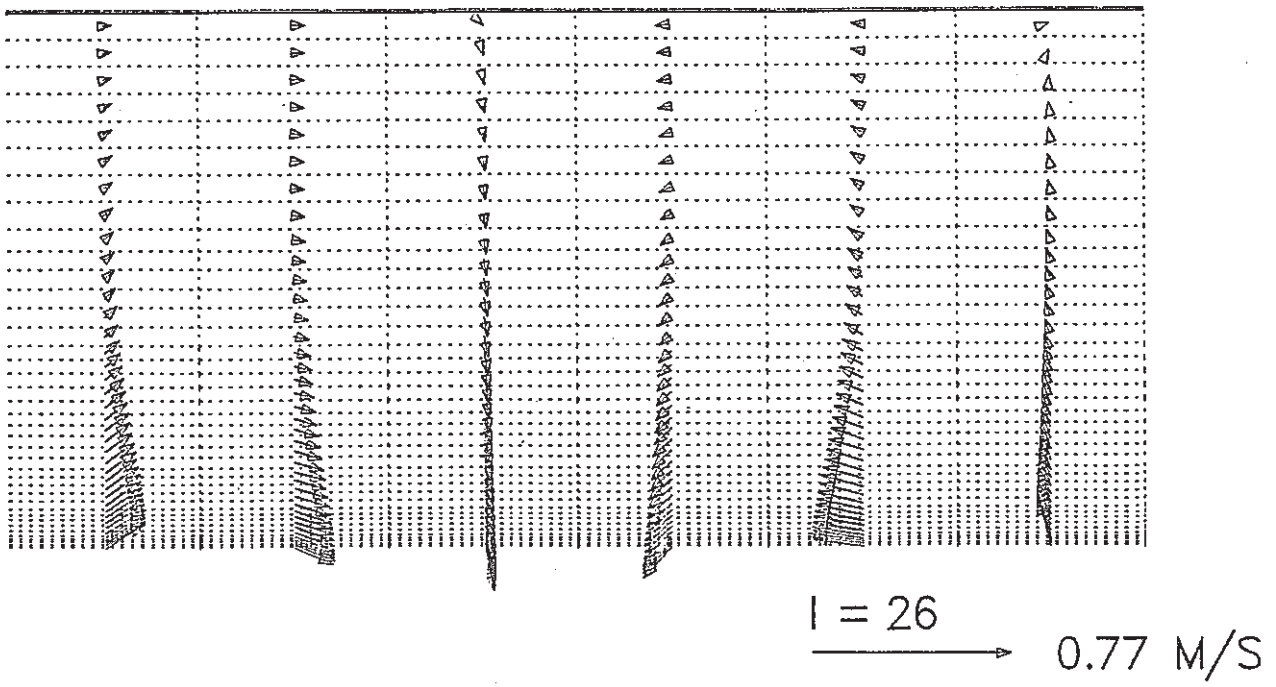


Fig. 4.28 Velocity Vector Plot for θ -Z Planes at the Upper Region of Annulus

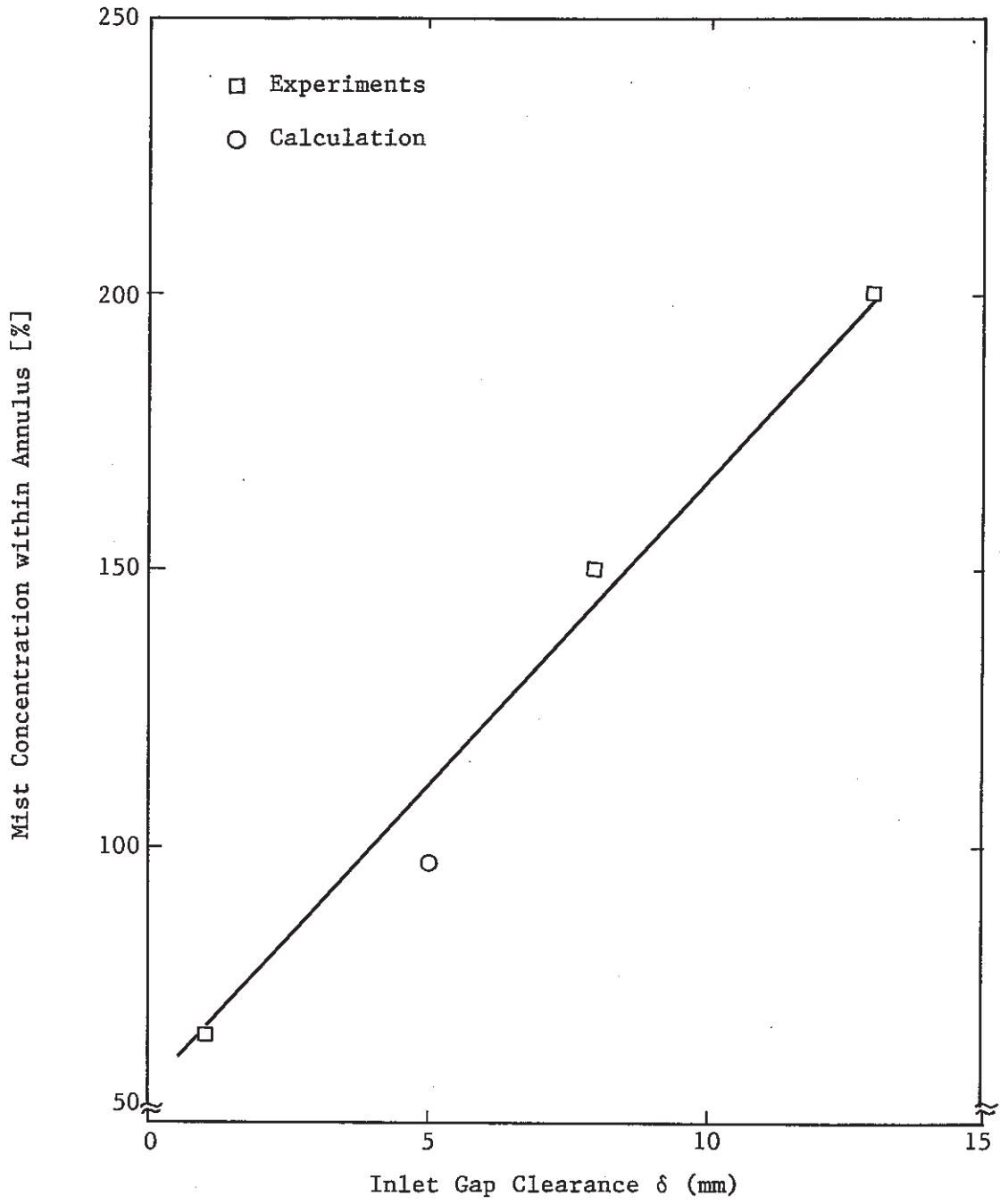


Fig. 4.29 Comparison of Mist Concentration between Measured and Calculated Data