



熱的流体-構造連成解析による  
しゃへいプラグ温度評価(I)  
FINASおよびAQUAによる予備解析

1995年11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)

1995年11月

## 熱的流体一構造連成解析によるしゃへいプラグ温度評価（I）

～FINAS および AQUA による予備解析～

土井 穎浩\* 大平 博昭\*

### 要　旨

高速炉のしゃへいプラグの温度分布を評価するため、熱的流体一構造連成解析コード「FLUSH」の開発が実施されている。本報告書は、「FLUSH」によるしゃへいプラグの温度評価に先立ち、しゃへいプラグとカバーガス空間それぞれの熱的特性を個別に解析評価した結果について示すものである。しゃへいプラグの構造温度分布の評価には汎用非線形構造解析システムコード「FINAS」を、カバーガス空間のアルゴンガス温度および流速分布の評価には多次元熱流動解析コード「AQUA」をそれぞれ使用した。

「FINAS」の解析結果から、Na液面としゃへいプラグ下面間に放射伝熱を考慮しない場合には、しゃへいプラグ下面温度は測定結果よりも約150°Cから200°C低い温度となり、放射伝熱を考慮すると、測定結果との差は約60°C以下に改善された。さらに、「AQUA」の解析結果からは、カバーガス空間内の自然対流により回転プラグ下面位置のカバーガス温度には約40°Cの周方向温度差を生じ、固定プラグと回転プラグ間のアニュラス部に周方向自然対流によって誘起される温度差約20°Cが生じた。

「もんじゅ」の予備試験で測定された回転プラグの周方向温度差は最大約100°Cであり、「FINAS」、「AQUA」のそれぞれの解析で得られた温度差よりも大きいものであった。このことから、しゃへいプラグの温度評価では、しゃへいプラグの熱伝導、カバーガス空間の自然対流および放射伝熱を考慮した熱的流体一構造連成解析が必要であることがわかった。

PNC TN9410 95-282

November, 1995

## Thermal Fluid-Structure Interaction Analysis of Shield Plug ( I )

~Preliminary analyses by FINAS and AQUA~

Yoshihiro Doi\* Hiroaki Ohira\*

### Abstract

A thermal fluid-structure interaction analysis is being conducted to develop numerical simulation method for the temperature distribution in the shield plug of LMFBRs. As for the preliminary analyses, the structural temperature distribution in the shield plug and the thermohydraulic characteristics in the cover gas region were calculated separately FINAS and AQUA, respectively.

The calculated temperature of FINAS at the bottom of the shield plug by the thermal conduction model was 150°C to 200°C lower compared to the data measured in MONJU during start-up tests. This large temperature discrepancy was improved to the order of 60°C by the implementation of the thermal radiation model. In addition, the thermohydraulic analysis in the cover gas region by AQUA showed that the azimuthal temperature differences induced by natural convection were about 40°C in the cover gas region and about 20°C in the inner annulus. However, the maximum temperature difference of about 100°C was observed in the inner annulus along the azimuthal direction. These facts indicate that the thermal fluid-structure interaction analysis is strongly expected to simulate the complex heat transfer phenomena in the shield plug induced by the mixture of conduction, radiation and natural convection.

---

\*Thermal hydraulic Research Section, Advanced Technology Division, OEC, PNC

## 目 次

第1章 緒言	1
第2章 「もんじゅ」測定結果の評価	2
第3章 「FINAS」解析結果	4
3.1 解析ケース	4
3.2 使用解析コード	4
3.3 メッシュ分割	4
3.4 解析条件	4
3.5 解析モデル	5
3.6 解析結果	5
第4章 「AQUA」解析結果	7
4.1 解析モデル	7
4.2 使用解析コード	7
4.3 メッシュ分割	7
4.4 解析条件	7
4.5 解析結果	8
第5章 考察	10
第6章 結言	13
参考文献	14
付録1 既往研究の調査	54
付録2 解析用入力データ	61

### List of Table

Table 4.1	Temperature of Reactor Vessel, FHM and IVTM .....	15
Table 4.2	Temperature of Fixed Plug and Rotating Plug .....	16
Table 4.3	Axial Temperature Distribution of Annulus .....	16
Table A.1	Test Condition and Sodium Mist density in Cover Gas (Ref.(3)) .....	59
Table A.2	Ratio of Radiation and Convective Heat Transfer (Ref.(4)) .....	59
Table A.3	Sodium Mist Density for Height of Cover Gas and Sodium Temperature (Ref.(6)) .....	59

### List of Figure

Fig. 2.1	Circumferential Temperature Distributions at Bottom of Fixed Plug .....	17
Fig. 2.2	Circumferential Temperature Distributions at Bottom of Rotating Plug .....	18
Fig. 2.3	Circumferential Temperature Distributions at Bottom of UCS .....	19
Fig. 2.4	Circumferential Temperature Distributions at Top of Rotating Plug .....	20
Fig. 3.1	Cut View of Shield Plug .....	21
Fig. 3.2	Element for FINAS Model .....	23
Fig. 3.3	Axial Temperature Distribution of Fixed Plug at 0 Deg. direction .....	24
Fig. 3.4	Axial Temperature Distribution of Rotating Plug at 0 Deg. direction .....	25
Fig. 3.5	Axial Temperature Distribution of UCS at 0 Deg. direction .....	26
Fig. 3.6	Circumferential Temperature Distribution of Fixed Plug (Bottom) .....	27
Fig. 3.7	Circumferential Temperature Distribution of Rotating Plug (Bottom) .....	28
Fig. 3.8	Circumferential Temperature Distribution of UCS (Bottom) .....	29
Fig. 3.9	Radial Temperature Distribution of Shield Plug .....	30
Fig. 4.1	Schema of Cover Gas .....	31
Fig. 4.2	Mesh Arrangement for Cover Gas .....	32
Fig. 4.3	Velocity Vector of r-z Section at 0 Deg. direction .....	34
Fig. 4.4	Velocity Vector of r-z Section at 90 Deg. direction .....	35
Fig. 4.5	Velocity Vector of r-z Section at 180 Deg. direction .....	36
Fig. 4.6	Velocity Vector of r-z Section at 270 Deg. direction .....	37
Fig. 4.7	Velocity Vector of r-θ Section (K=6) .....	38
Fig. 4.8	Velocity Vector of r-θ Section (K=15) .....	39
Fig. 4.9	Radial Velocity Distributions (I = 5) .....	40

Fig. 4.10 Circumferential Velocity Distributions (I = 5) .....	41
Fig. 4.11 Axial Velocity Distributions (I = 2) .....	42
Fig. 4.12 Axial Velocity Distributions (I = 16) .....	43
Fig. 4.13 Velocity Vector of $\theta$ -z Section (I=9) .....	44
Fig. 4.14 Temperature Fields of r-z Section at 0 Deg. direction .....	45
Fig. 4.15 Temperature Fields of r-z Section at 90 Deg. direction .....	46
Fig. 4.16 Temperature Fields of r-z Section at 180 Deg. direction .....	47
Fig. 4.17 Temperature Fields of r-z Section at 270 Deg. direction .....	48
Fig. 4.18 Temperature Fields of r- $\theta$ Section (K=6) .....	49
Fig. 4.19 Temperature Fields of r- $\theta$ Section (K=15) .....	50
Fig. 4.20 Axial Temperature Distributions (I = 5) .....	51
Fig. 4.21 Circumferential Temperature Distribution of Rotating Plug .....	52
Fig. 4.22 Circumferential Temperature Fields of Annulus .....	53
Fig. A.1 Axial Temperature Distribution of Cover Gas (Ref.(6)) .....	60

## 第1章 緒 言

高速炉のしゃへいプラグには、炉心上部機構、燃料交換機および炉内中継装置等の機器が搭載されており、放射線遮蔽および熱遮蔽機能が必要とされる。しゃへいプラグの熱による変形量の評価は、これら搭載機器の位置決め精度を確保する上で重要である。

しゃへいプラグは固定プラグ、回転プラグ等の機器により構成され、その内部には窒素ガスによる冷却部を有している。また、Na液面としゃへいプラグ間は、アルゴンガスのカバーガス空間を有し、その伝熱形態は自然対流伝熱と放射伝熱が共存する場であり、しゃへいプラグの温度分布特性の評価を複雑なものとしている。

本報告書は、高速原型炉「もんじゅ」しゃへいプラグの温度分布評価のために実施される流体一構造連成解析コード「FLUSH」による解析に先立ち、モデル作成上の課題を「もんじゅ」測定結果の評価、既往研究の調査、構造温度解析および熱流動解析により検討したものである。しゃへいプラグの構造温度分布は汎用非線形構造解析システムコード「FINAS」により解析し、カバーガス空間のアルゴンガス温度および流速分布は多次元熱流動解析コード「AQUA」により解析した。

## 第2章 「もんじゅ」測定結果の評価

「もんじゅ」プラント特性予備試験しやへいプラグ温度予備評価 (SST-PP-1-5)<sup>(1)</sup>によれば、平成5年3月11日時点では1次系Na温度が397°Cで安定し、窒素ガス冷却系による冷却も定常状態に至ったと報告されている。この時のしやへいプラグの温度分布測定結果を設計時に行った「原子炉上部総合温度分布解析結果（100%出力時）」<sup>(2)</sup>の結果と比較し、解析モデル作成上の課題を摘出する。

### (1) 測定結果と予備解析結果の温度差

Fig. 2.1 に固定プラグ遮蔽胴下胴下部の周方向温度分布について、測定結果と予備解析結果を比較した図を示す。図中の測定値補正は、予備解析がNa液面温度を529°Cとした条件（100%出力を仮定）で行われたのに対し、測定時のNa液面温度は397°Cであったため、Na液面からしやへいプラグ下面への熱流束がNa液面温度に比例すると仮定し、単純に397°C時の測定温度を1.3倍（529/397倍）したものである。この補正方法の妥当性については定格出力運転データ取得後に確認する予定である。

同図より、固定プラグ下面温度の測定結果は、Na液面温度が529°Cの場合に、予備解析結果よりも約80°C高めになっている。このことは、カバーガス空間では予備解析で予測したよりも対流熱輸送量が大きい、あるいは放射伝熱量が大きくカバーガス空間の熱抵抗が解析で予測したものより小さいことを示唆している。

Fig. 2.2 に回転プラグ遮蔽胴下部の周方向温度分布を示す。回転プラグの下面では測定結果と解析結果で周方向の分布は異なるものの、全体的に良い一致を示している。固定プラグ下面と回転プラグ下面の構造上の違いは、Fig. 2.3 に示すように固定プラグ遮蔽胴下胴下部の温度測定位置の下側に、カバーガス中熱遮蔽板が存在しないのに対し、回転プラグの同位置には熱遮蔽板が存在することである。カバーガス中熱遮蔽板が存在する領域では、熱遮蔽板とプラグ下面の間隙が160mmと狭いため、対流熱輸送は小さく、熱伝導と放射伝熱が主な伝熱形態になる。このことから、この予備評価における放射伝熱および熱伝導に関するモデル化の妥当性が確認できた。

Fig. 2.4 にUCS下部の温度分布を示す。測定結果と予備解析結果を比較すると両者は良く一致している。周方向に約30°Cの分布があるものの、固定プラグや回転プラグに見られる程の温度差はない。これは、UCSの温度分布がUCS構造内の熱伝導により決まるためであり、これから予備解析におけるUCS構造の等価熱伝導率の設定の妥当性が確認できた。

### (2) 測定結果と予備解析結果の温度分布比較

Fig. 2.1 の固定プラグ遮蔽胴下胴の下面における周方向温度分布については、予備解析では180度方向が低温となるが、測定結果では180度から270度の広い範囲に低温域

がある。また、Fig. 2.2 の回転プラグ遮蔽洞下胴の下面における周方向温度分布についても同様の傾向が見られる。予備解析結果は 0 度方向に最大値、180 度方向に最小値を持つが、測定結果は固定プラグと同様に 270 度方向に最小値を持つ比較的平坦な温度分布である。さらに、Fig. 2.4 に示す回転プラグ遮蔽洞下胴上部（放射線遮蔽体中央部）の温度分布を見ると、予備解析結果では 0 度方向に周方向平均より約 100°C 高いホットスポットがあるのに対し、測定結果は比較的平坦な温度分布を示している。

以上の測定結果と予備解析結果の比較から、しゃへいプラグの温度分布評価における解析モデル作成上の課題となる点としては以下が挙げられる。

- ① Na 液面としゃへいプラグ下面間の放射伝熱によるしゃへいプラグ温度分布への影響
- ② 固定プラグ、回転プラグの熱抵抗の偏りによるしゃへいプラグ温度分布への影響
- ③ カバーガス空間の自然対流によるしゃへいプラグ温度分布への影響
- ④ 固定／回転プラグ間アニュラス部対流によるしゃへいプラグ温度分布への影響
- ⑤ アルゴンガスの流入流出によるしゃへいプラグ温度分布への影響（原子炉容器側面の 140 度、270 度方向にアルゴンガスの流入、流出ノズルがある。）

### 第3章 「FINAS」 解析結果

本章では、Na 液面としゃへいプラグ下面間の放射伝熱、および固定プラグと回転プラグの熱抵抗の偏りによるしゃへいプラグ温度分布への影響を評価するために、汎用非線形構造解析システムコード「FINAS」<sup>(8)</sup>を用いて実施した解析の結果について示す。

#### 3.1 解析ケース

しゃへいプラグ解析モデルの範囲を Fig. 3.1 に示す。カバーガス空間の放射伝熱のモデル化においては、以下の 2 つの解析ケースを設定した。なお、しゃへいプラグ構造部のモデル化については両ケースで同じである。

##### (1) 解析ケース F-1

カバーガス空間のアルゴンガス領域を熱伝導モデルとする。本ケースではカバーガス空間内の Na 液面と構造間の放射伝熱はモデル化しない。

##### (2) 解析ケース F-2

カバーガス空間のアルゴンガス領域を解析ケース F-1 と同様の熱伝導モデルとともに、カバーガス空間内の Na 液面と構造間の放射伝熱および構造と構造間の放射伝熱を考慮する。

#### 3.2 使用解析コード

解析には汎用非線形構造解析システムコード「FINAS」 Version 12 を使用した。

#### 3.3 メッシュ分割

Fig 3.2 に今回の解析に使用したメッシュ分割図の 1/2 断面を示す。解析モデルの詳細は、「平成 6 年 12 月「もんじゅ」しゃへいプラグ温度解析用モデルの作成 (株)CRC 総合研究所」報告書<sup>(9)</sup>参照とする。

#### 3.4 解析条件

解析に使用した条件を以下に示す。

・座標	:	$r-\theta-z$ 、3 次元
・温度境界	:	Na 液面温度 $397^{\circ}\text{C}$
		原子炉容器室温度 $55^{\circ}\text{C}$
		運転床温度 $40^{\circ}\text{C}$
		ペデスタル側部温度 $50^{\circ}\text{C}$
		窒素ガス冷却系窒素ガス温度 $30^{\circ}\text{C}$
・放射伝熱の反復回数	:	1 回

### 3.5 解析モデル

#### (1) 放射率

放射率はNa液面、構造物表面とも一様に0.1とした。

#### (2) Naミストの扱い

しゃへいプラグ温度予備評価(SST-PP-1-5)<sup>(1)</sup>からNa液面温度は397°C、しゃへいプラグ下面温度は約320°Cで、温度差は約80°Cである。また、カバーガス空間の平均温度はNa液面温度としゃへいプラグ下面温度の平均値と推定すれば約360°Cである。この温度から文献(3)よりNaミスト濃度は低く、放射伝熱への影響は小さいと仮定し、ガス放射による影響は考慮しないこととした。

#### (3) 窒素ガス冷却系

窒素ガス冷却系は冷却系の流路の表面温度を指定する。冷却系の流路の表面温度は、ガスの熱伝達と熱流束により求めなければならないが、今回の解析では窒素ガス冷却系の温度は全て30°Cとした。熱伝達率は文献(2)で用いられた12[W/m<sup>2</sup>K]を使用した。

#### (4) 運転床表面熱伝達率

運転床の表面熱伝達率は、水平平板および垂直平板自然対流熱伝達の式を用いた。詳細については文献(9)参照とする。

### 3.6 解析結果

#### (1) 軸方向温度分布

Fig. 3.3 から 3.5 に固定プラグ、回転プラグおよびUCS の炉内中継装置設置側の軸方向温度分布を示す。Fig. 3.3 には、解析ケース F-1 (放射伝熱を考慮しない) と解析ケース F-2 (放射伝熱を考慮) の固定プラグ軸方向温度分布を測定結果と比較して示している。放射伝熱を考慮しない場合には、しゃへいプラグの下面温度は約100°Cであり、測定結果よりも約150°C低い。放射伝熱を考慮した解析ではしゃへいプラグ下面温度は約190°Cとなり、測定結果との温度差は約60°Cとなる。

Fig. 3.4 に解析ケース F-1 および F-2 の解析結果と測定結果とを、回転プラグ軸方向温度について比較して示す。放射伝熱を考慮しない場合にはプラグ下面温度は約140°Cであり、測定結果よりも約120°C低いが、放射伝熱を考慮した解析結果では測定結果との温度差は約10°Cとなる。Fig. 3.4 の放射伝熱を考慮した解析結果には、軸方向高さ500mm および 700mm 付近に変極点が見られるが、これはカバーガス中の熱遮蔽板に対して放射伝熱を考慮したためである。(同一レベルに3点存在するように見えるが各位置は熱遮蔽板の下側表面、板厚(5mm)軸方向中央および上側表面の温度を表わしている。)

Fig. 3.5 にUCS の軸方向温度分布を示す。UCS の軸方向温度分布は、その伝熱形態が主にUCS 内部構造物の熱伝導によると考えられるため、放射伝熱を考慮しない場合と考

慮した場合で生じる温度差は固定プラグや回転プラグの場合よりも小さい。

### (2) 周方向温度分布

Fig. 3. 6 から 3. 8 に固定プラグ、回転プラグおよびUCS のしゃへいプラグ下面（熱遮蔽層下部熱遮蔽板）の周方向温度分布をそれぞれ示す。Fig. 3. 6 の固定プラグ周方向温度分布では、0 度から 180 度の範囲で、解析結果の方が約 60°C から 70°C 温度が低くなっているが周方向の傾向は良く一致している。180 度から 270 度の範囲では、測定結果では温度低下するのに対し、解析結果では温度が上昇する逆の傾向となっている。この傾向は放射伝熱を考慮しない場合にも考慮した場合にも同様である。

Fig. 3. 7 の回転プラグ周方向温度分布では 0 度から 180 度の範囲で、固定プラグと同様の傾向を示している。180 度から 270 度方向で解析結果と測定結果が異なるのは、この領域に存在する長円形プラグの熱抵抗が他の領域と異なるためと推定される。

Fig. 3. 8 に UCS の軸方向温度分布では、UCS の伝熱が熱伝導によると考えられるため周方向温度差は小さい。

### (3) 径方向温度分布

Fig. 3. 9 にしゃへいプラグ下面（熱遮蔽層下部熱遮蔽板）の径方向温度分布を解析ケース F-1、解析ケース F-2 および測定結果で比較した図を示す。測定結果は放射伝熱を考慮しない F-1 の場合に比べて、約 150 度から 200°C 解析結果よりも高い温度であったが、放射伝熱を考慮した F-2 では、測定結果との差は約 60°C 以下に改善されている。

## 第4章 「AQUA」 解析結果

本章ではカバーガス空間内の自然対流、固定／回転プラグ間アニュラス部の対流およびアルゴンガスの流入流出によるしゃへいプラグ温度分布への影響を評価するために多次元熱流動解析コード「AQUA」<sup>(10)</sup>を用いて実施した解析の結果について示す。

### 4.1 解析モデル

「AQUA」による解析では、カバーガス空間の Fig. 4.1 に示す範囲を対象とした。カバーガス中に考慮する構造物は UCS、燃料交換機 (FHM)、炉内中継装置 (IVTM)、熱遮蔽板およびバケット部である。カバーガス空間内の原子炉容器、UCS、FHM および IVTM の表面を温度境界として解析を行い、構造間の放射伝熱およびガス放射は考慮していない。本解析では各機器の表面温度は「もんじゅ」の測定結果を使用するが、軸方向には分布を考慮し、周方向には分布を考慮しない。これは、周方向に温度差を設けない場合にも、周方向の偏流や局所的な流れが生じるかどうかを確認するためである。条件として使用した原子炉容器、FHM および IVTM の軸方向温度を Table 4.1 に示す。また Na 液面温度は 397°C、しゃへいプラグ下面温度および固定／回転プラグ間アニュラス部軸方向温度分布はそれぞれ Table 4.2 および Table 4.3 に示すように与える。

### 4.2 使用解析コード

解析には単層多次元コード「AQUA」Version 1.0 を使用した。

### 4.3 メッシュ分割

Fig 4.2 にメッシュ分割図を示す。

### 4.4 解析条件

解析に使用した条件を以下に示す。

- ・座標 :  $r - \theta - z$ 、3 次元
- ・メッシュ分割 : フルセクタモデル  $16r \times 18\theta \times 35z$  とする。  
このうち  $z=27$  から  $35$  は、固定プラグ／回転プラグ間のアニュラス空間を模擬している。ただし、アニュラス部の固定プラグ中心に対する偏心は模擬していない。
- ・差分法 : 高次差分法
- ・層流／乱流モデル : 層流モデル
- ・壁面条件 : スリップ条件、温度指定境界
- ・熱伝達率 :  $Nu = 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$        $Pr \geq 0.6$   
ただし  $Re_x = \frac{v \cdot L}{\nu}$  として  $v$ : 流速、 $L$ : 平板長さ、 $\nu$ : 動粘性係数

#### 4.5 解析結果

本解析は時間ステップを  $5.0 \times 10^{-3}$  sec とし、収束判定条件は速度成分の変化率が  $5.0 \times 10^{-4}$  以下で実施した。

##### (1) 速度分布

Fig. 4.3 から 4.6 に 0, 90, 180 および 270 度方向の r-z 面流速分布をそれぞれ示す。断面内に IVTM を有する面(0 度方向)と FHM を有する面(180 度方向)の r-z 面流速分布は、UCS 近傍で上昇流、IVTM あるいは FHM に沿って下降流となっている。90 度方向では原子炉容器近傍で上昇流であり、断面内に 2 つの渦が存在する。270 度方向では原子炉容器近傍で下降流であり、断面を一巡する大きな流れが見られる。r-z 面では Na 液面近傍および熱遮蔽板の下面近傍で径方向の流速が早く、中央付近では流速が遅い傾向はいずれの方向の断面についても同じである。

Fig. 4.7 および 4.8 にカバーガス空間の Na 液面近傍( $K=6$ )および熱遮蔽板下面( $K=15$ )の r-θ 面流速分布をそれぞれ示す。r-θ 面の流速分布は、Na 液面近傍では原子炉容器壁側面から UCS に向かって流れしており、熱遮蔽板の下面近傍では UCS から原子炉容器側面に向かって流れている。

Fig. 4.9 から 4.12 に径方向、周方向および軸方向速度分布を示す。Fig. 4.9 の径方向速度分布では、Na 液面近傍で、流れは UCS の方向(負の値)に向かい、熱遮蔽板近傍では炉容器壁の方向(正の値)に向かっており、その流速は最大で約 0.5m/s である。周方向流速の分布を Fig. 4.10 に示す。0 度および 180 度方向での周方向流れはほとんど見られず、また、90 度および 270 度方向での最大流速も 270 度方向で約 0.3m/s、90 度方向で約 0.2m/s である。

Fig. 4.11 および 4.12 に UCS 近傍( $I=2$ )と炉容器近傍( $I=16$ )の軸方向流速分布をそれぞれ示す。UCS 近傍では全ての方向で上昇流である。炉容器近傍の 0, 90 度側では上昇流(正の値)、180, 270 度側では下降流(負の値)となっている。これは炉容器壁近傍で周方向流れが生じていることを示すものである。

回転プラグ/固定プラグ間アニュラス部の流速分布を Fig. 4.13 に示す。周方向に自然対流による渦が見られるものの、下部が解放されている体系のため明確な渦を形成するには至っていない。

##### (2) 温度分布

Fig. 4.14 から 4.17 に 0, 90, 180 および 270 度方向の r-z 面温度分布をそれぞれ示す。温度分布は、Na 液面および熱遮蔽板近傍で温度勾配が大きく、中央付近では温度勾配が小さくなっている。

Fig. 4.18 および 4.19 に r-θ 面の Na 液面近傍と熱遮蔽板近傍の温度分布をそれぞれ示す。r-θ 面内の温度分布は、IVTM, FHM が存在するため同心円状とはならず、90 度方

向にはNa液面の近傍で局所的な低温域があり、熱遮蔽板の下面付近では90度方向に高温域が見られる。また、いずれの断面においても、温度勾配が急峻なのは構造物近傍のみであり、空間内の温度勾配は小さい。

Fig. 4.20 における軸方向温度分布を示す。0、180度方向ではカバーガス中央部の温度はNa液面近傍と熱遮蔽の中間程度であるが、90、270度方向では、周方向に生じる流れ (Fig. 4.10 参照) のために0、180度方向とは温度分布が異なっている。

Fig. 4.21 に回転プラグ下面位置近傍のカバーガス温度を示すが、解析結果では240度方向が150度方向付近に比べて約40°C高く、測定結果とは逆の傾向である。

Fig. 4.22 は回転プラグ／固定プラグ間アニュラス部の軸方向温度分布を周方向に示した図である。周方向に生じる自然対流のために周方向温度差が生じているが、各軸方向断面における周方向温度差は最大でも約20°Cである。

## 第5章 考 察

本章では第2章の測定結果と予備解析結果の比較から、しゃへいプラグの温度分布評価における解析モデル作成上の課題として摘出された以下の点について「FINAS」および「AQUA」の解析結果を参考しつつ考察する。

- ①Na液面としゃへいプラグ下面間の放射伝熱によるしゃへいプラグ温度分布への影響
- ②固定プラグ、回転プラグの熱抵抗の偏りによるしゃへいプラグ温度分布への影響
- ③カバーガス空間の自然対流によるしゃへいプラグ温度分布への影響
- ④固定／回転プラグ間アニュラス部対流によるしゃへいプラグ温度分布への影響
- ⑤アルゴンガスの流入流出によるしゃへいプラグ温度分布への影響

#### ①カバーガス空間の放射伝熱によるしゃへいプラグ温度分布への影響

「FINAS」の解析結果から、カバーガス空間に放射伝熱を考慮しない場合にはプラグ下面温度は約100°Cであり、測定結果よりも約150°Cから200°C低いのに対して、放射伝熱を考慮した場合には、測定結果との温度差は約60°C以下と大幅に改善された。これは放射伝熱を考慮することによりNa液面からしゃへいプラグ下面への熱輸送の模擬性が改良されたためである。

「FINAS」の解析結果から放射伝熱を考慮した場合のしゃへいプラグへの全熱輸送量は24.5kWである。このプラグへの入熱量に対し、窒素ガス冷却系からは17.9kW除熱され、運転床および原子炉容器室へ6.6kW放熱がある。一方、「もんじゅ」で測定された窒素ガス冷却系の出入口温度差およびガス流量から予測される除熱量は22.7kWであった。窒素ガス冷却系による除熱量を解析結果と計測結果で比較すると、解析結果は4.8kW小さいが、この差は解析モデルでは窒素ガス冷却系の温度を30°C一定としたのに対し、実測の平均は約15°Cであったためと考えられる。

解析結果から求められた放射伝熱量はNa液面から熱遮蔽板に対しては9.7kW、原子炉容器側面に対しては6.2kW、UIS、FHMおよびIVTMに対してはそれぞれ1.3、0.3および0.2kWで合計は17.7kWである。すなわち、しゃへいプラグへの全熱輸送量が24.5kWでの内訳は、放射伝熱量が17.7kW、カバーガス空間と構造の熱伝導を介しての熱輸送量が6.8kWとなる。

本解析結果から得られた放射伝熱量と熱伝導量の比は67%と33%であり、文献(4)の結果と比べ放射伝熱量の比率が高い。これは対流熱輸送を考慮していないためであると考えられる。対流熱輸送量を評価すると、しゃへいプラグ下面の温度が変わるために対流と放射による全熱輸送量は変化するが、両者の比率は文献(4)に近づくものと予測される。

### ②固定プラグ、回転プラグの熱抵抗の偏りによるしゃへいプラグ温度分布への影響

「FINAS」の解析結果から、固定プラグ周方向温度分布の傾向は0度から180度の範囲では測定結果と比較的良く一致している。一方、180度から360度方向では、解析結果では温度が上昇しており一致しない。この傾向は回転プラグについても同様であるが、回転プラグでは、わずかに180度から270度側に最小値がずれる傾向が見られる。この原因として、同領域の長円形プラグは等価熱伝導率が他の領域と異なることや窒素ガス冷却部での除熱量に差があることが考えられる。このため、解析モデルを作成する上で、長円形プラグの等価熱伝導率および窒素ガス冷却部を適切にモデル化することは、周方向の温度差を評価する上で重要であると考えられる。

### ③カバーガス空間の自然対流によるしゃへいプラグ温度への影響

「AQUA」の解析結果から、カバーガス空間内の自然対流により回転プラグ下面位置のカバーガス温度に約40°Cの周方向温度差を生じた。このことから、回転プラグの周方向温度差を評価するためには、多次元コードによる自然対流の評価が必要であることがわかった。この自然対流は構造の温度分布により、より顕著になることも考えられるため熱的に流体と構造を連成させた解析を行う必要があると考えられる。

### ④固定／回転プラグ間アニュラス部対流によるしゃへいプラグ温度分布への影響

文献(7)から周方向渦の発生臨界Ra数は、回転プラグ-固定プラグ間の各部の寸法および熱伝導率をL=1.075m, D=4.65m, δ=0.025m, λ=2.86E-2 W/m·k (275°C), λ<sub>w</sub>=16.5 W/m·k (127°C)としH<sub>2</sub>=43, H<sub>1</sub>=7.36×10<sup>-2</sup>とすれば、本体系では△l(壁厚)は非常に大きいためR→0の場合となり臨界Ra数はRa<sub>c</sub>=1.02(πH<sub>2</sub>)<sup>4</sup>=3.40×10<sup>8</sup>となる。

一方、解析結果から下部温度275°C、上部温度50°CとしてRa数は

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} Pr = \frac{9.8 \times 3.66 \times 10^{-3} \times 225 \times 1.075^3}{(4.15 \times 10^{-5})^2} \times 0.667 = 3.88 \times 10^9 \text{ となる。}$$

この値は臨界Ra数よりも大きく周方向自然対流の発生が予想される。

「AQUA」による解析結果から、本解析モデルでは固定／回転プラグ間アニュラスに周方向自然対流の発生が見られ周方向に約20°Cの温度差が生じることがわかった。この温度差が構造側の温度差を拡大し、より大きなガスの周方向温度差を誘起するかは現状明らかではなく、熱的な流体-構造連成による解析を行う場合にアニュラス部を含めたモデル化が必要あると考えられる。

⑤アルゴンガスの流入流出によるしゃへいプラグ温度分布への影響

「AQUA」の解析結果から、カバーガス空間の径方向流速は約0.5m/sであった。一方、しゃへいプラグ温度予備評価(SST-PP-1-5)<sup>(1)</sup>によれば、置換するアルゴンガス流量は4.6Nm<sup>3</sup>/h、カバーガス系連結ノズル径は6B(165.2mm)であるから、流速に換算して0.06m/sである。置換するアルゴンガスの流速は解析結果の径方向流速の約10%と小さいことから、置換アルゴンガスのしゃへいプラグ温度分布への影響は、カバーガス空間やアニュラス部の自然対流による影響よりも少ないと考えられる。

## 第6章 結 言

高速原型炉「もんじゅ」しゃへいプラグの温度分布を評価するため、流体一構造連成解析コード「FLUSH」を用いた解析を計画している。本報告書は、「FLUSH」による解析実施に先立ち、モデル作成上の課題を「もんじゅ」の測定結果の評価、構造温度解析および熱流動解析により検討したものである。しゃへいプラグの構造温度分布は汎用非線形構造解析システムコード「FINAS」により、カバーガス空間のアルゴンガス温度および流速分布は多次元熱流動解析コード「AQUA」により解析した。

得られた結果は以下の通りである。

### ① Na液面としゃへいプラグ下面間の放射伝熱によるしゃへいプラグ温度分布への影響

「FINAS」の解析結果から、放射伝熱を考慮した場合には、Na液面からしゃへいプラグ下面への熱輸送の模擬性が改良され、測定結果との温度差は約60°C以下と大幅に改善された。また、「FLUSH」コードでは多次元熱流動解析コードにより対流熱輸送量を評価することでしゃへいプラグ下面温度は測定結果に近づくと推定される。

### ② 固定プラグ、回転プラグの熱抵抗の偏りによるしゃへいプラグ温度分布への影響

「FINAS」の解析結果から、長円形プラグの等価熱伝導率および窒素ガス冷却部を適切にモデル化することは、周方向の温度差を評価する上で重要であると考えられる。

### ③ カバーガス空間内の自然対流によるしゃへいプラグ温度分布への影響

「AQUA」の解析結果から、カバーガス空間内の自然対流により回転プラグ下面位置のカバーガス温度に約40°Cの周方向温度差を生じた。このことから、回転プラグの周方向温度差を評価するためには、カバーガス空間内の自然対流と熱的連成を考慮し評価する必要がある。

### ④ 固定／回転プラグ間アニュラス部対流によるしゃへいプラグ温度分布への影響

「AQUA」による解析結果から、本解析モデルでは固定／回転プラグ間アニュラスに周方向自然対流の発生が見られ周方向に約20°Cの温度差が生じた。このガスの温度差が構造側の温度差を拡大するかは現状明らかではなく、熱的連成による解析を行う場合にアニュラス部を含めたモデル化が必要あると考えられる。

### ⑤ アルゴンガスの流入流出によるしゃへいプラグ温度分布への影響

「AQUA」の解析結果から、置換するアルゴンガスの流速は解析結果の径方向流速の約10%と小さいことから、置換アルゴンガスのしゃへいプラグ温度分布への影響は、カバーガス空間やアニュラス部の自然対流による影響よりも少ないと考えられる。

### 参考文献

- (1) Q63987PPP10500W0、性能試験成績書 しゃへいプラグ温度予備試験 (SST-PP-1-5)、  
1993年5月
- (2) (株) 東芝、原子炉上部総合定常温度分布解析結果 (100% 定格出力運転時)  
遮蔽プラグ熱計算書、1984年7月
- (3) 布留川 修 他、高速炉原子炉容器カバーガス空間の熱伝達、第19回日本伝熱シン  
ポジウム講演論文集、1982年5月
- (4) 木下 泉、LMFBR のカバーガス空間中におけるふく射伝熱、電力中央研究所報告  
283086、昭和59年7月
- (5) 橋口 功 他、高速炉カバーガスの伝熱流動と機器開発、日本原子力学会誌  
Vol.30, No.12(1988)
- (6) J.Minges et.al, NACOWA Experiments on LMFBR Cover Gas Aerosols, Heat Transfer,  
and Fission Product Enrichment, KfK 5250, Dezember 1993
- (7) 鳥居 卓爾 他、下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流（第3報、各種要因  
が対流発生に及ぼす影響）、日本機械学会論文集 (B偏)49巻 447号 (昭 58-11)
- (8) 汎用非線形構造解析システム FINAS VERSION 12.0 使用説明書、PNC TN9520 92-006、  
1993年3月
- (9) (株) CRC 総合研究所、「もんじゅ」遮蔽プラグ温度解析用モデルの作成、PNC PJ9270  
95-004、1995年10月
- (10) 村松 寿晴 他、単相多次元熱流動解析コード AQUA 入力マニュアル、PNC N9520  
87-011、1987年5月

Table 4.1 Temperature of Reactor Vessel, FHM and IVTM

カバーガス高さ (mm)	原子炉容器温度 (°C)	FHM, IVTM 温度 (°C)	備考
1360	280.0	280.0	
1320	284.0	286.0	
1280	287.0	292.0	
1240	291.0	298.0	
1218.75	293.0	-	熱遮蔽板
1216.25	293.0	-	"
1195	295.0	305.0	
1155	298.0	311.0	
1115	302.0	317.0	
1075	306.0	322.0	
1053.75	307.0	-	熱遮蔽板
1051.25	308.0	-	"
1025	310.0	330.0	
975	315.0	337.0	
925	319.0	345.0	
875	323.0	352.0	
825	328.0	360.0	
775	332.0	367.0	
725	337.0	375.0	
675	341.0	382.0	
625	346.0	390.0	
575	350.0	397.0	
495	358.0	-	バケット部
385	367.0	-	"
275	377.0	-	"
165	382.0	-	"
55	387.0	-	"

注) カバーガス高さはバケット内液面高さを0とする。

Table 4.2 Temperature of Fixed Plug and Rotating Plug

径方向位置 (mm)	温度 (°C)	備考
1170	279.0	
1370	278.0	
1570	277.0	
1770	276.0	
1970	275.0	
2170	274.0	
2297.5	273.0	
2337.5	-	アニュラス部
2450	272.0	
2650	271.0	
2850	269.0	
3050	268.0	
3250	268.0	
3452.5	267.0	
3722.5	265.0	

注) 径方向位置は固定プラグ中心を0とする。

Table 4.3 Axial Temperature Distribution of Annulus

軸方向位置 (mm)	温度 (°C)	備考
1423.75	280.0	
1542.5	252.0	
1692.5	217.0	
1842.5	182.0	
1992.5	148.0	
2142.5	113.0	
2292.5	78.0	
2411.25	50.0	アニュラス部頂部

注) 軸方向位置はバケット内液面高さを0とする。

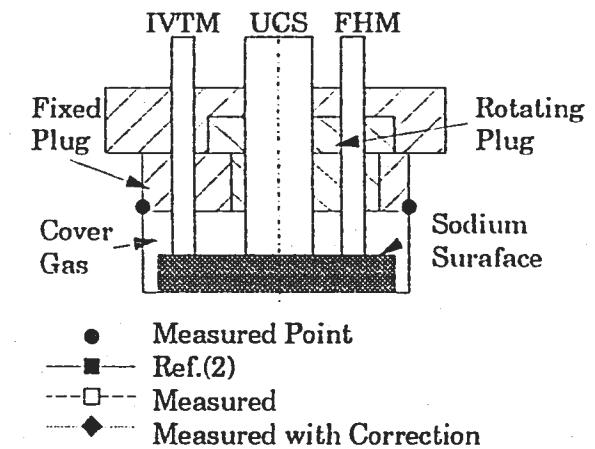
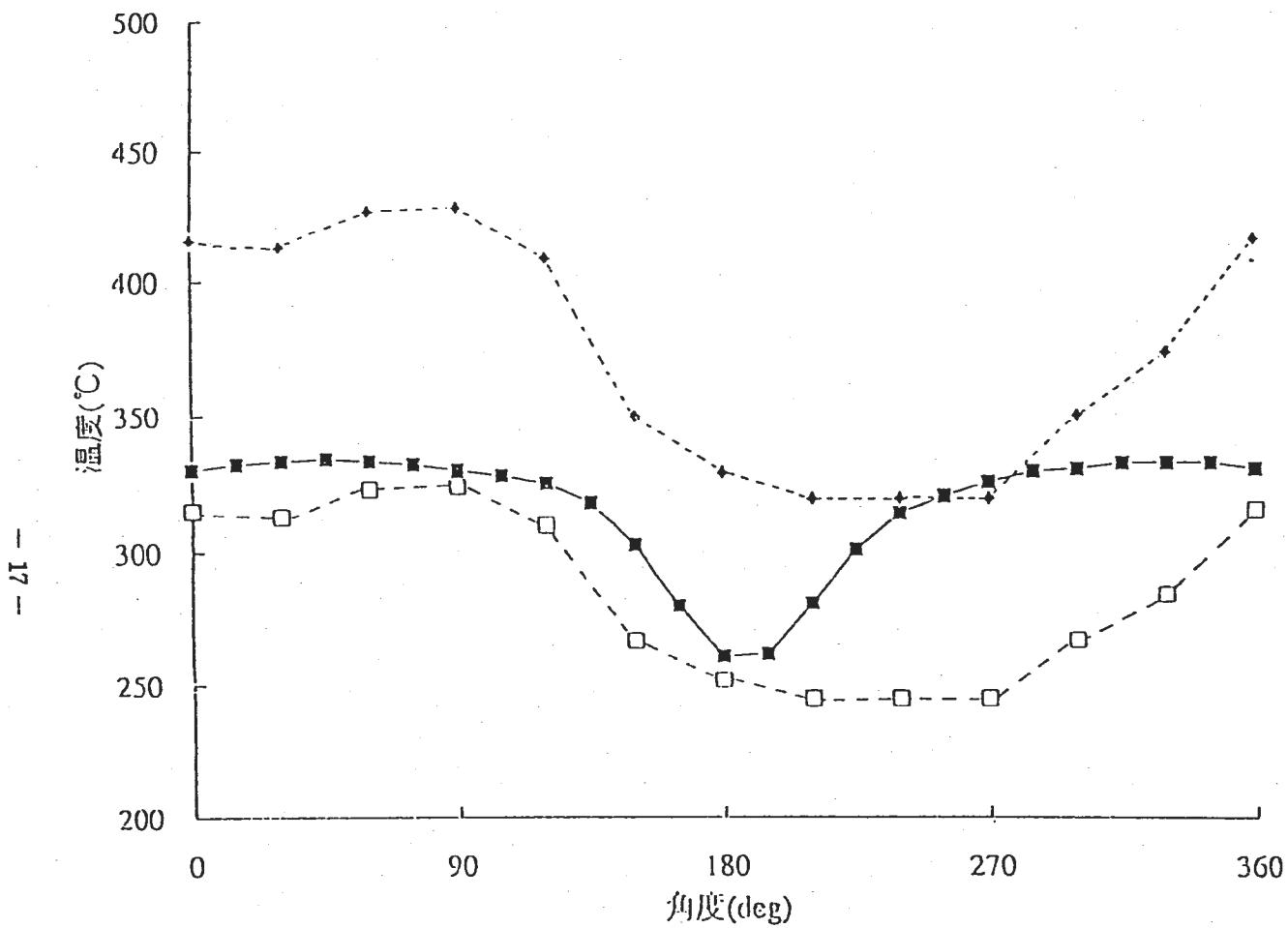


Fig. 2.1 Circumferential Temperature Distributions at Bottom of Fixed Plug

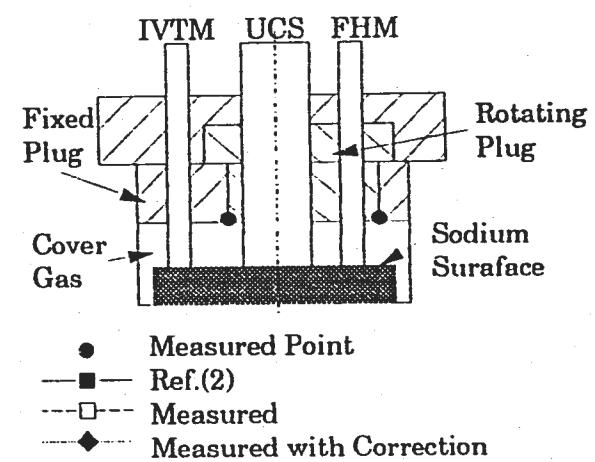
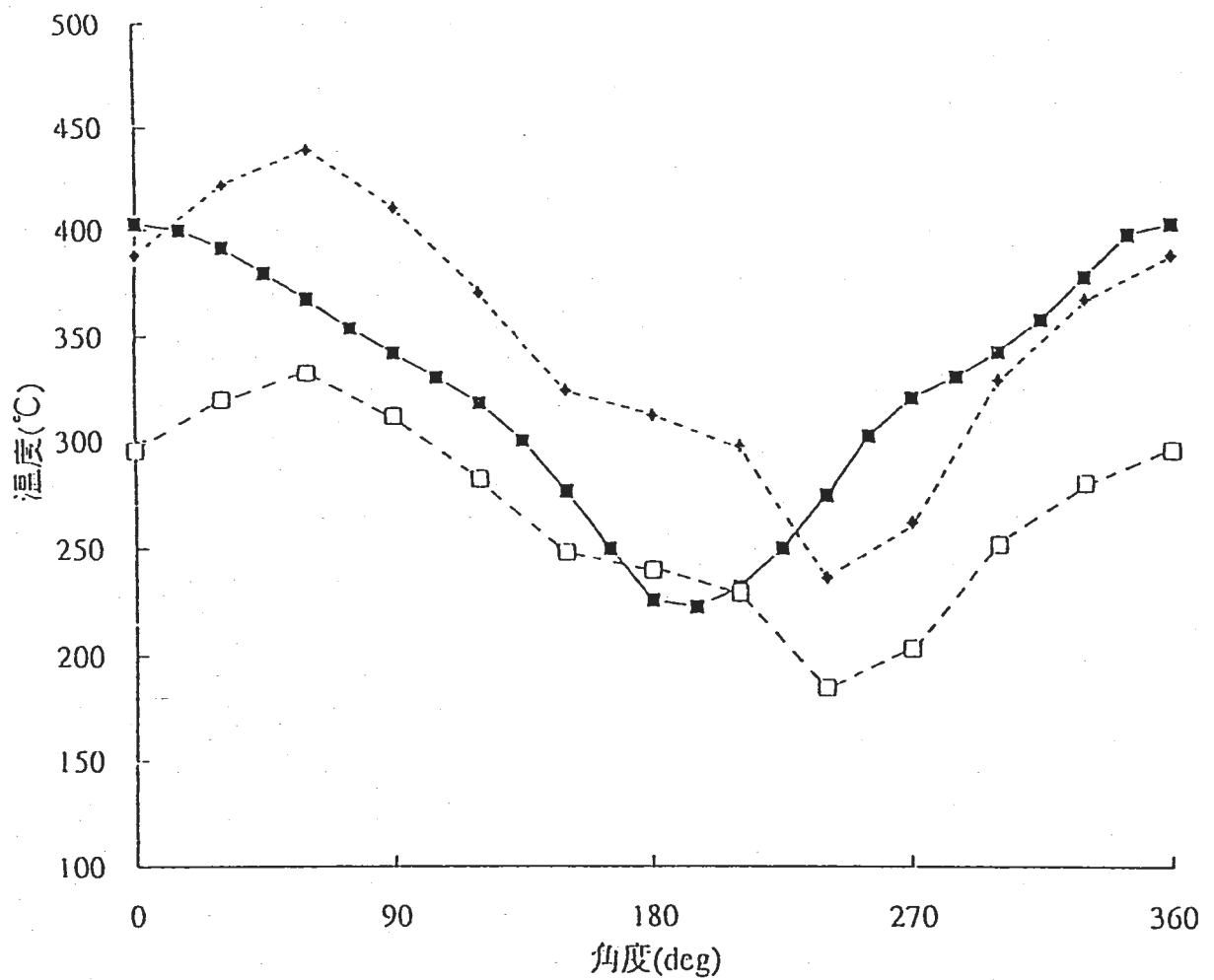


Fig. 2.2 Circumferential Temperature Distributions at Bottom of Rotating Plug

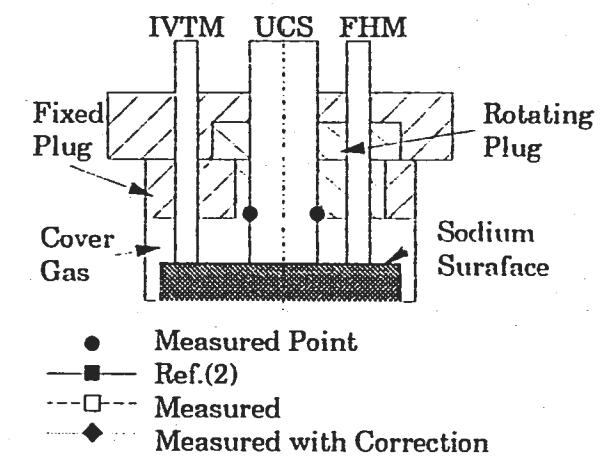
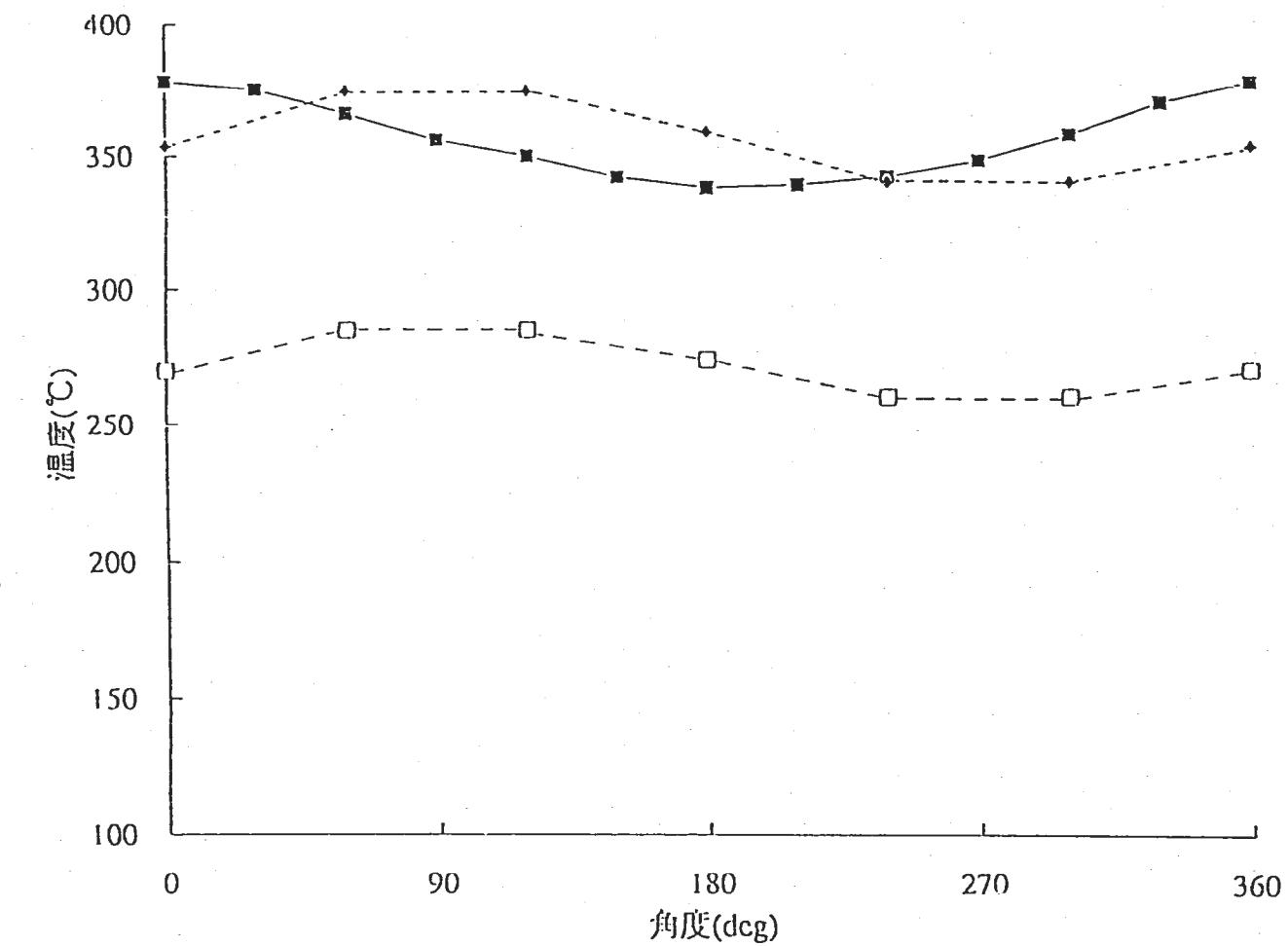


Fig. 2.3 Circumferential Temperature Distributions at Bottom of UCS

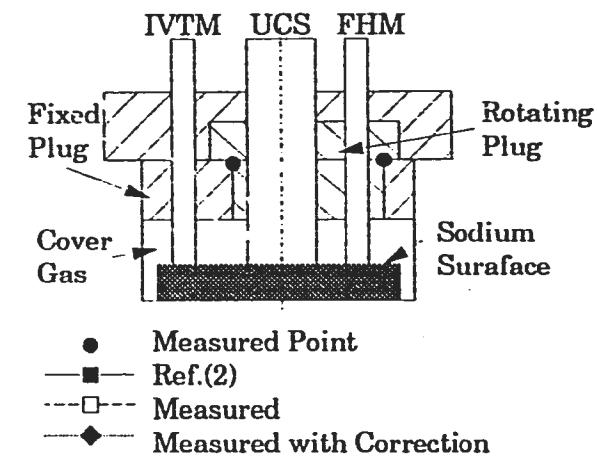
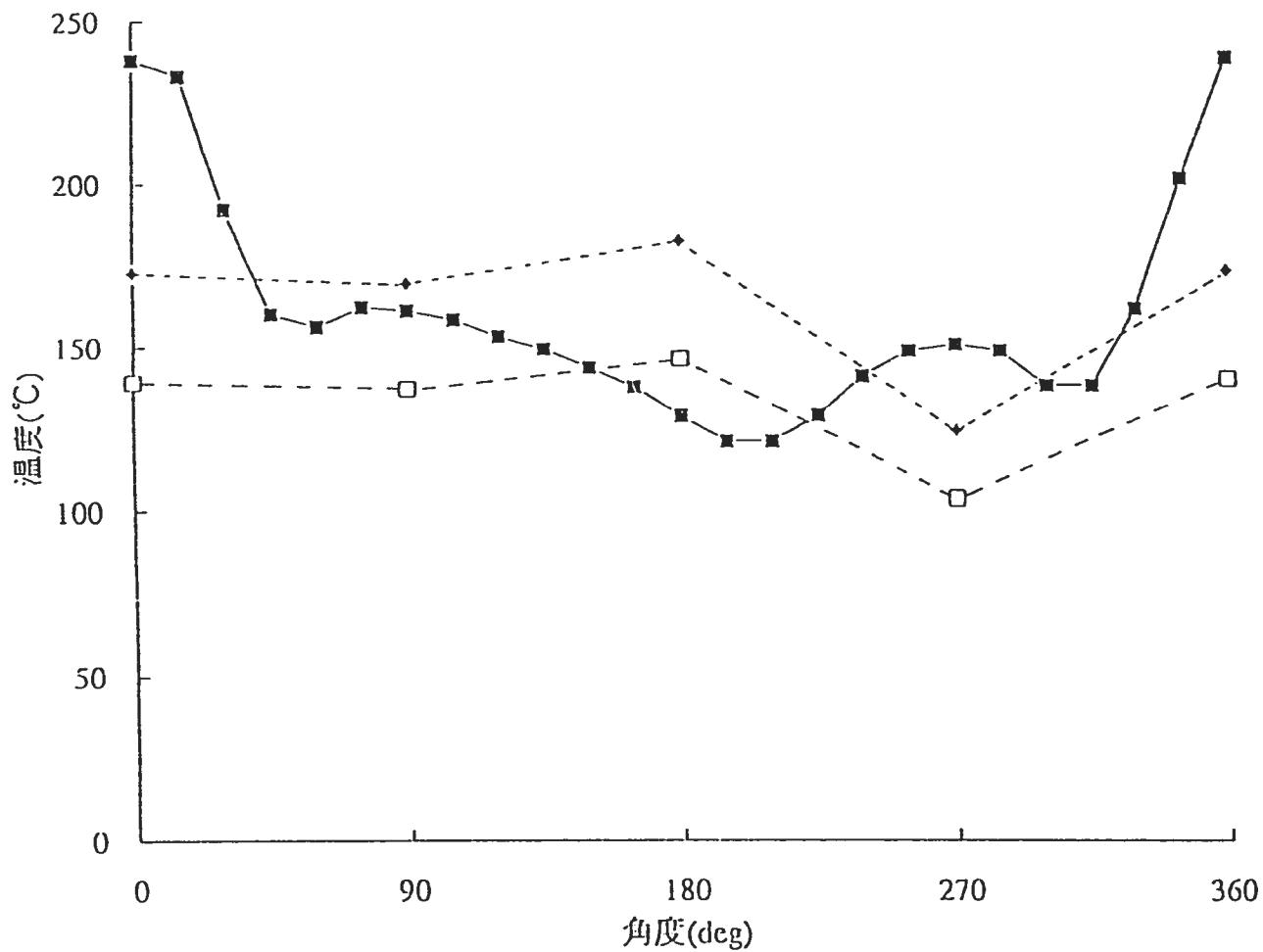


Fig. 2.4 Circumferential Temperature Distributions at Top of Rotating Plug

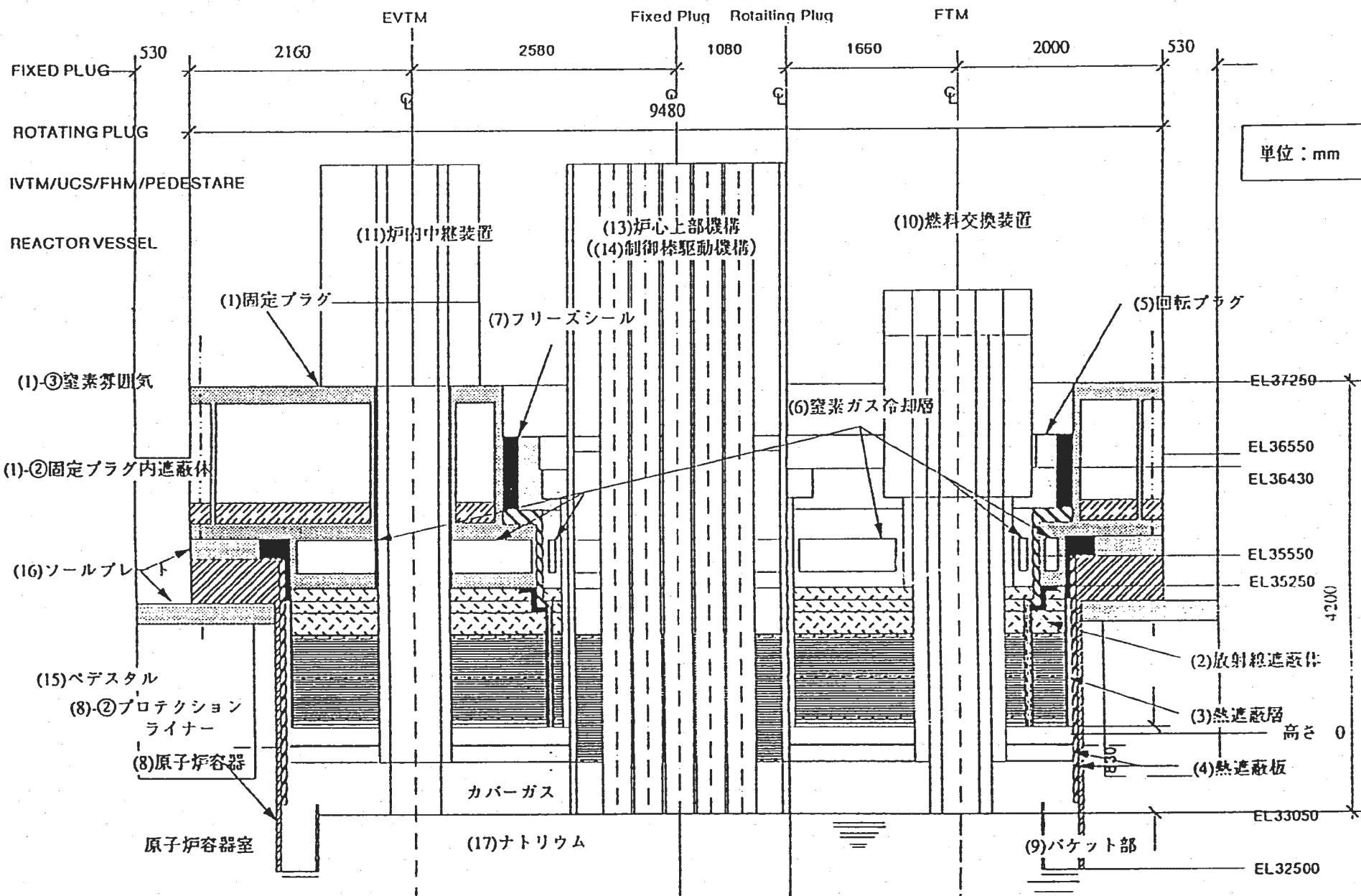


Fig. 3.1(1/2) Cut View of Shield Plug (0-180° Direction)

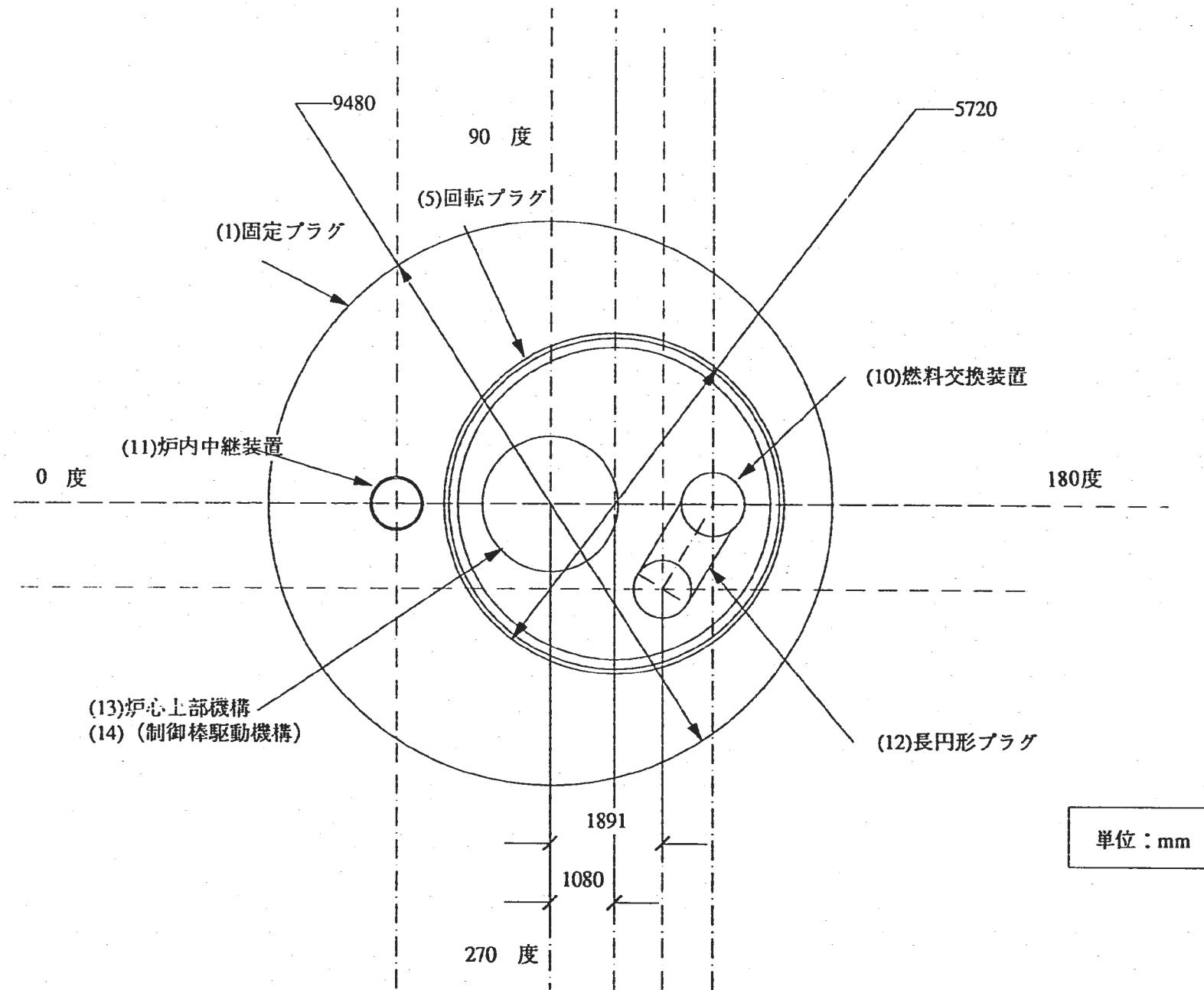


Fig. 3.1(2/2) Cut View of Shield Plug (Plane)

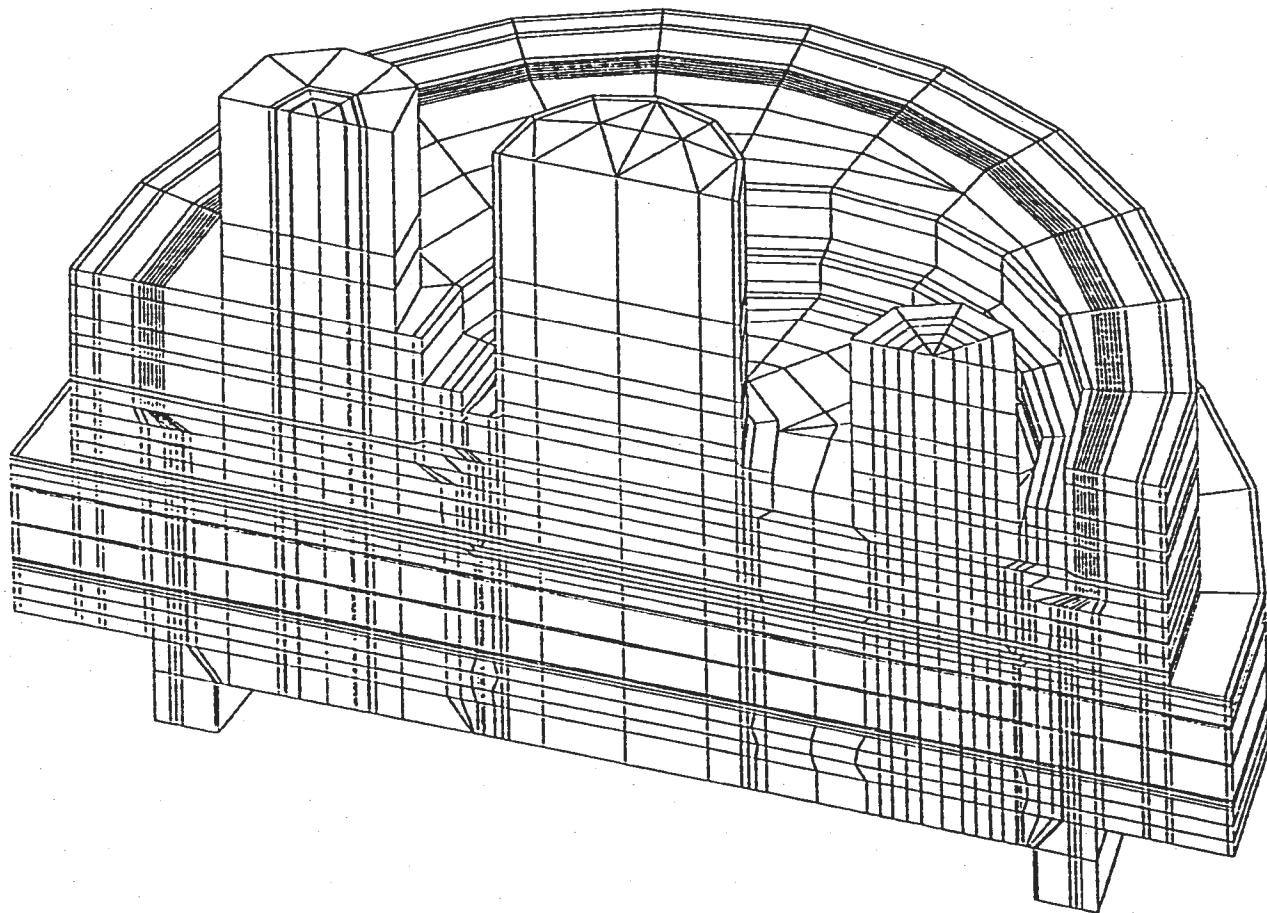


Fig. 3.2 Element for FINAS Model

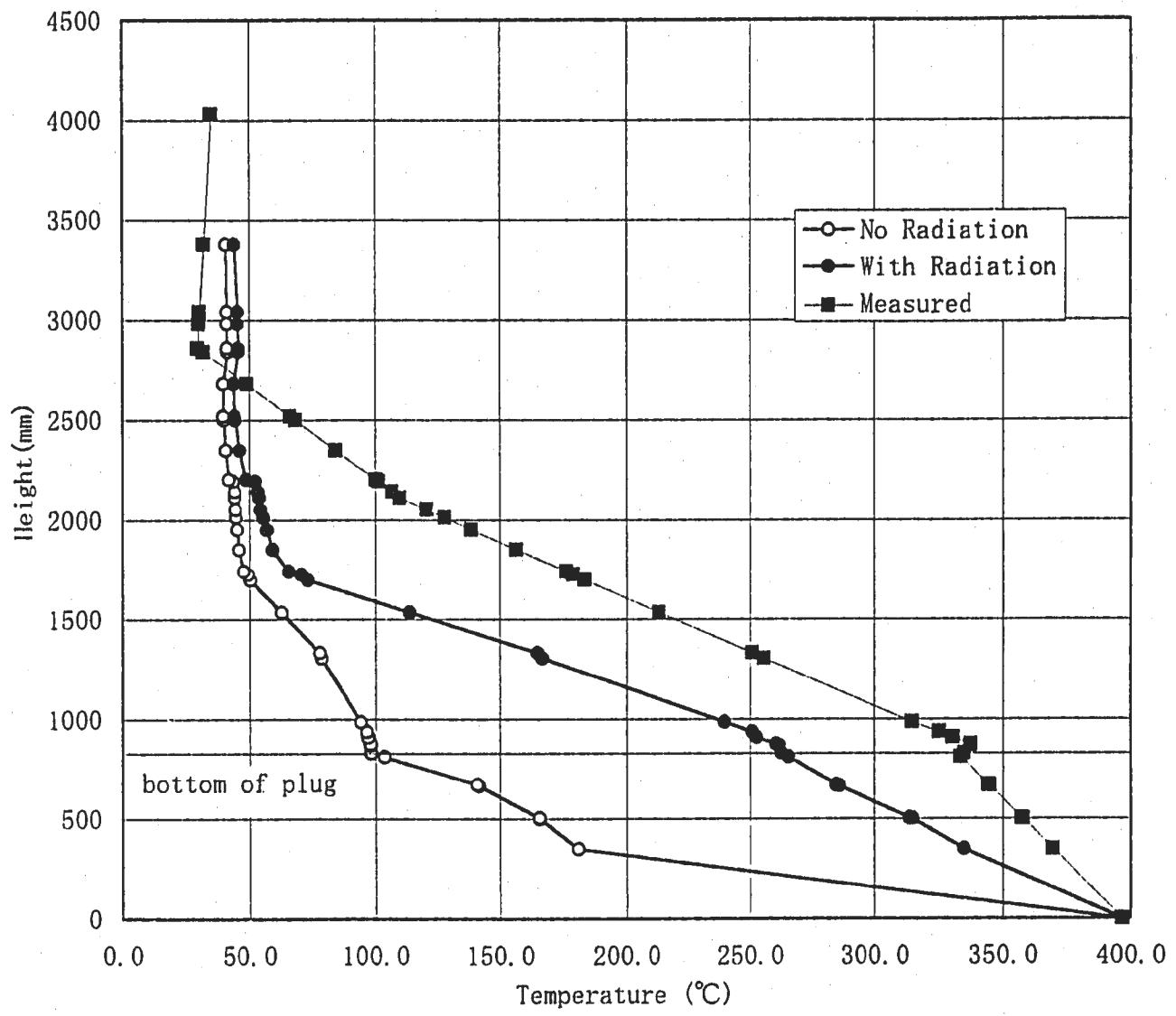


Fig. 3.3 Axial Temperature Distribution of Fixed Plug at 0 Deg. direction

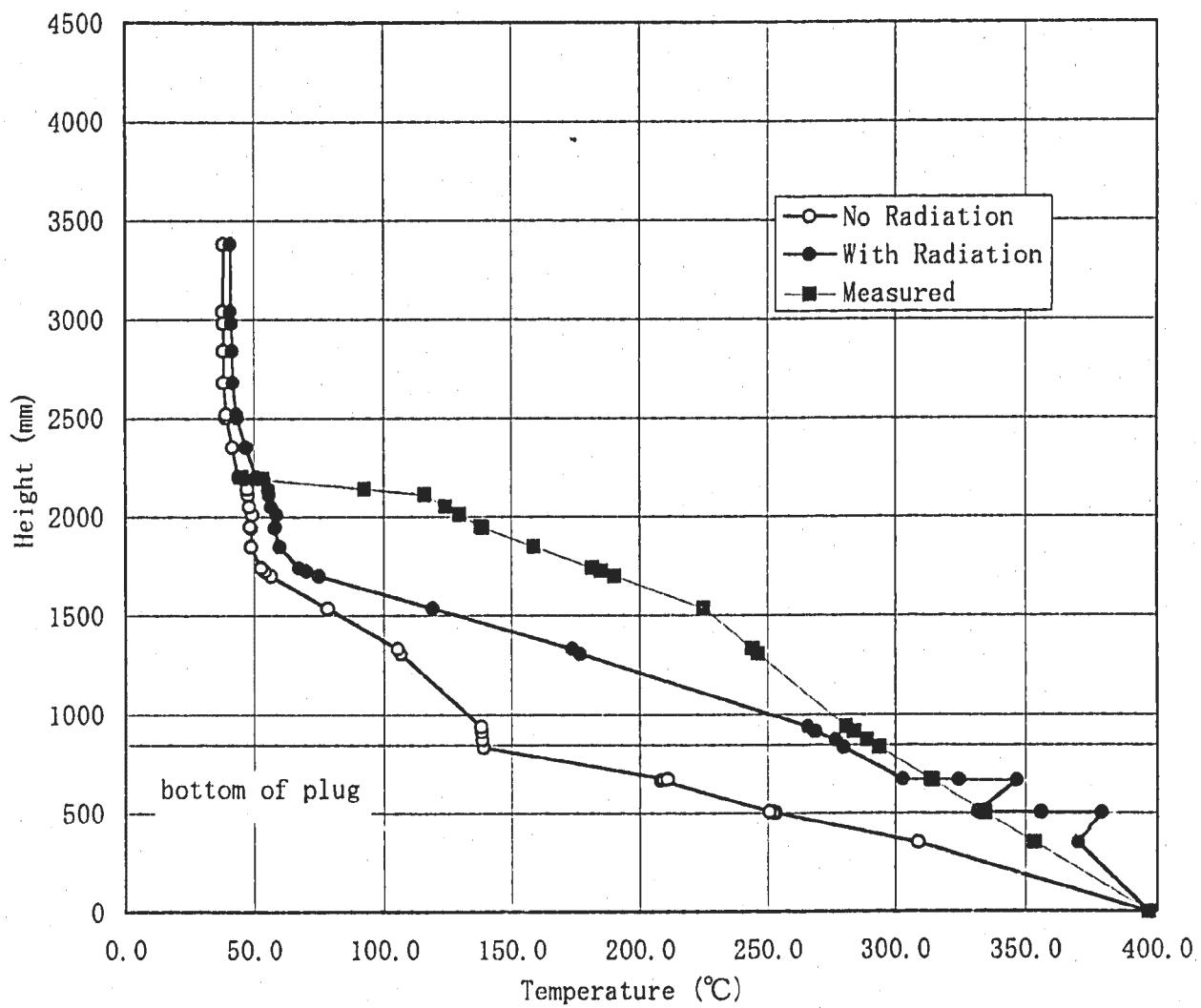


Fig. 3.4 Axial Temperature Distribution of Rotating Plug at 0 Deg. direction

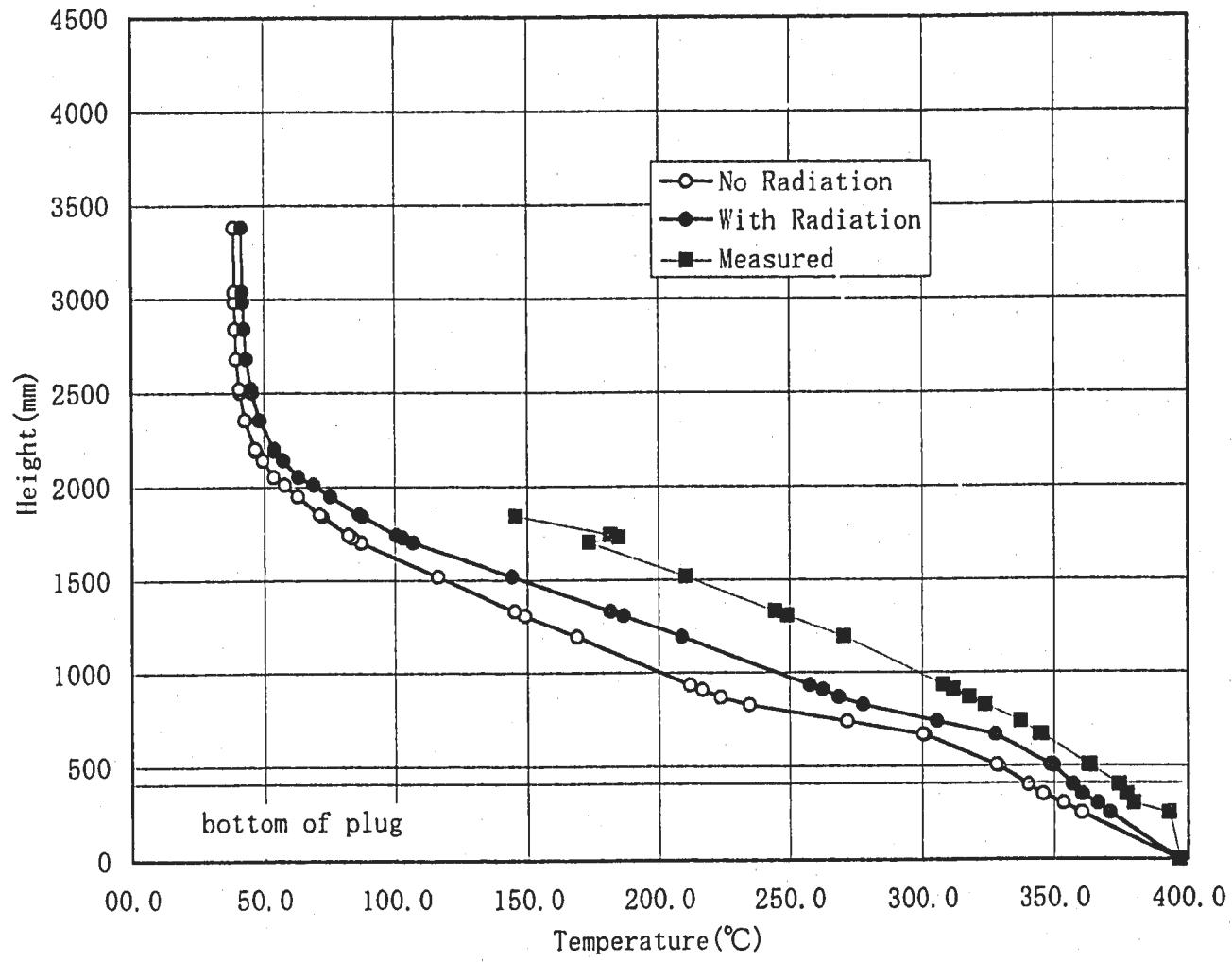


Fig. 3.5 Axial Temperature Distribution of UCS at 0 Deg. direction

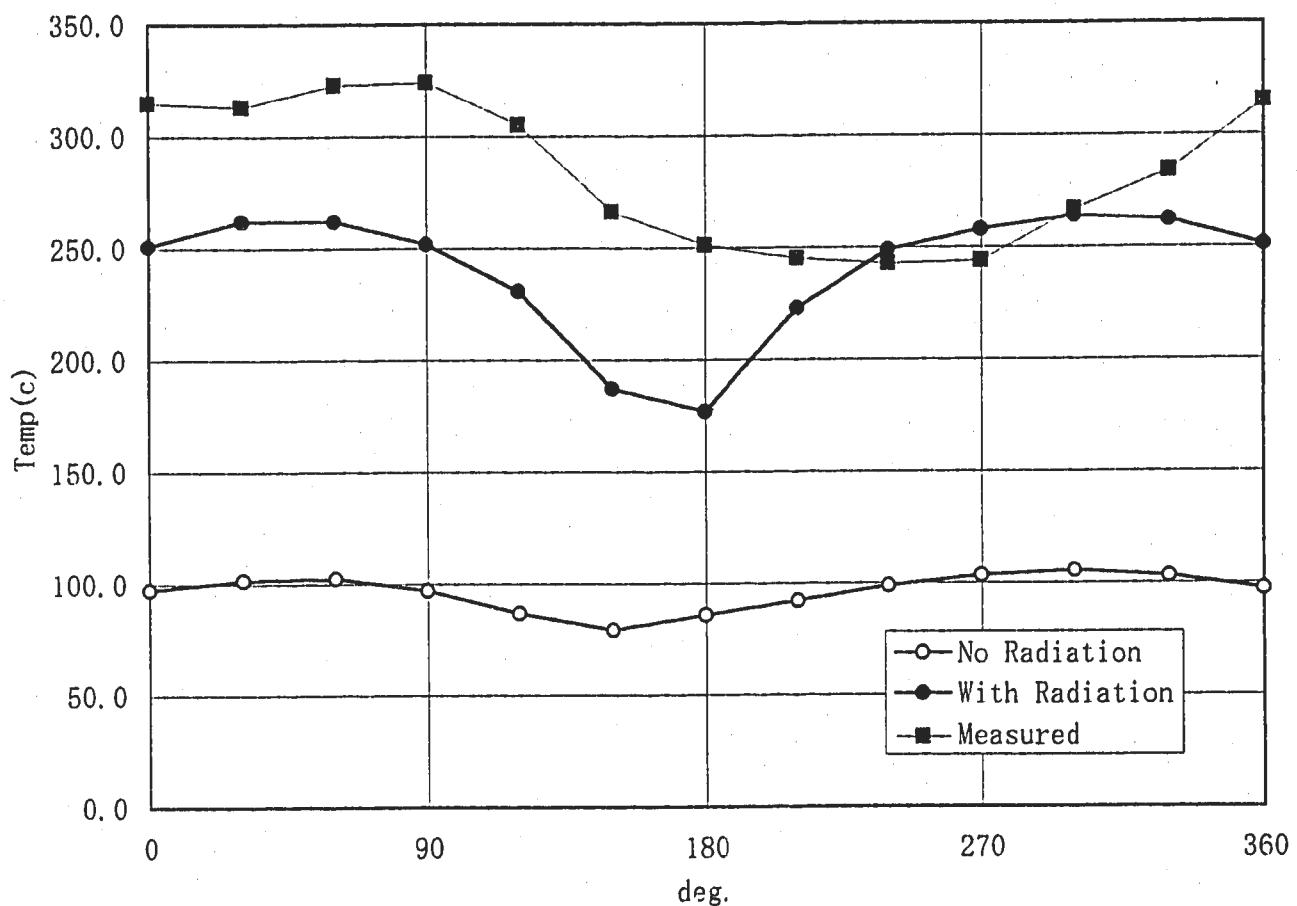


Fig. 3.6 Circumferential Temperature Distribution of Fixed Plug (Bottom)

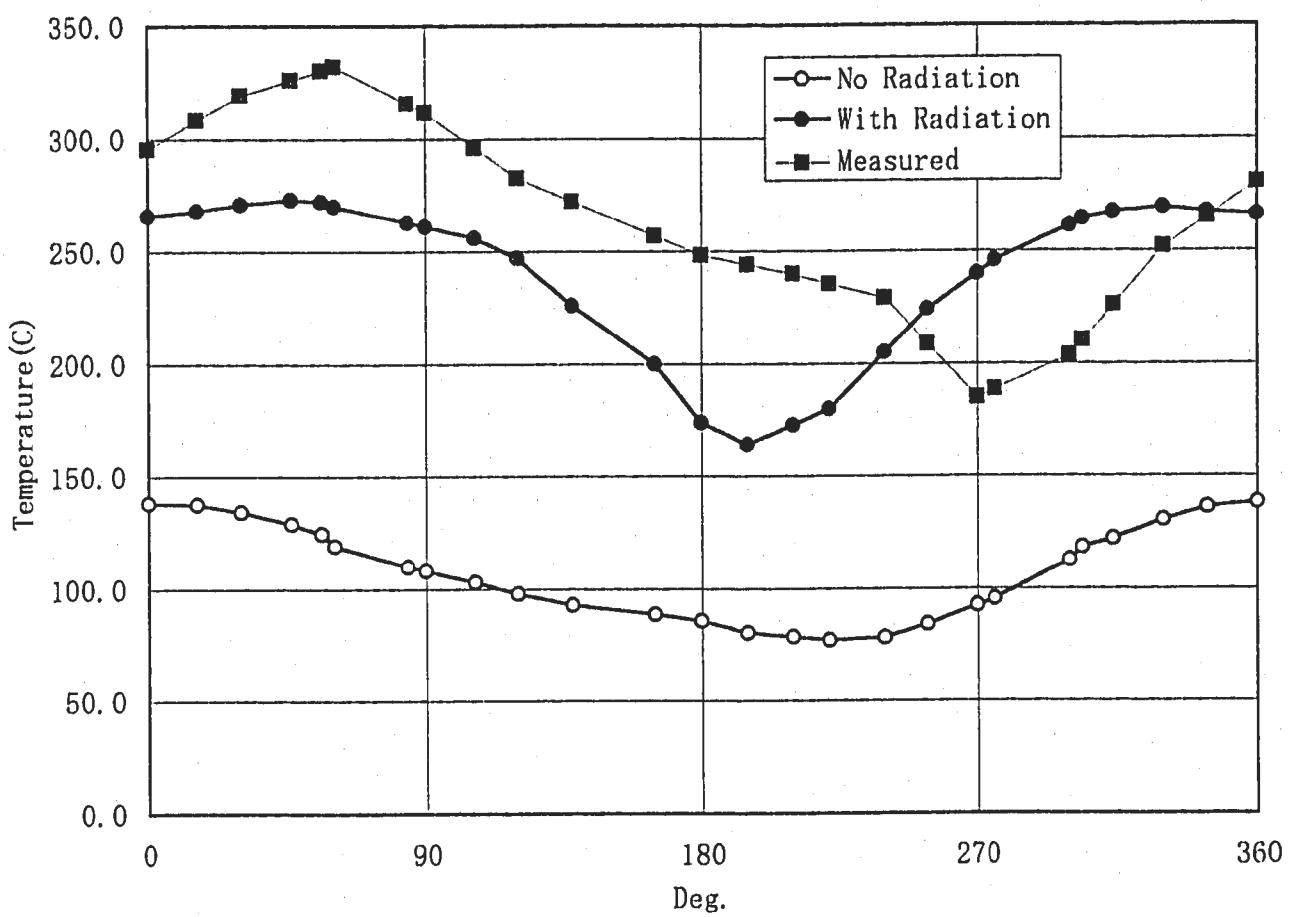


Fig. 3.7 Circumferential Temperature Distribution of Rotating Plug (Bottom)

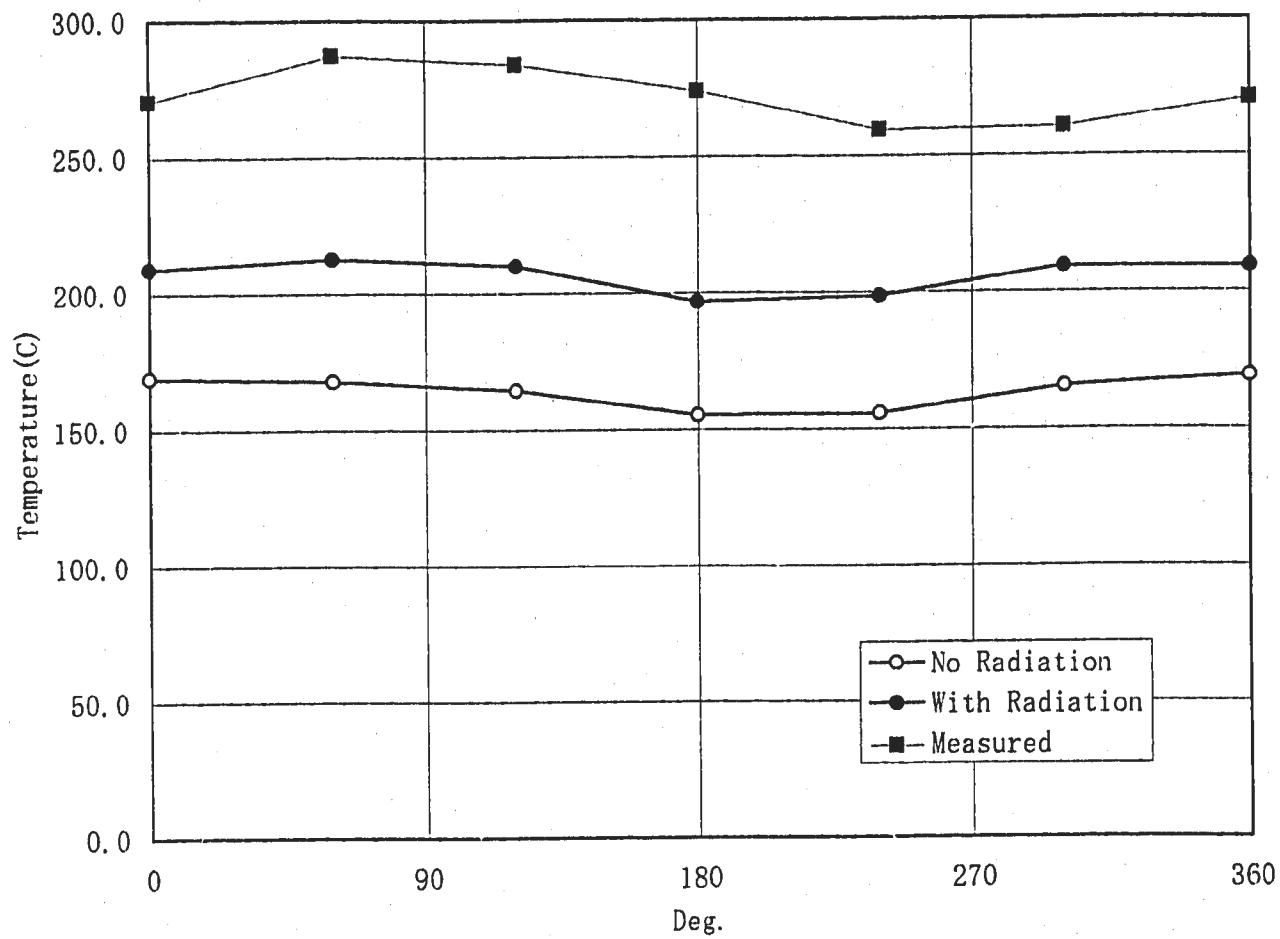


Fig. 3.8 Circumferential Temperature Distribution of UCS (Bottom)

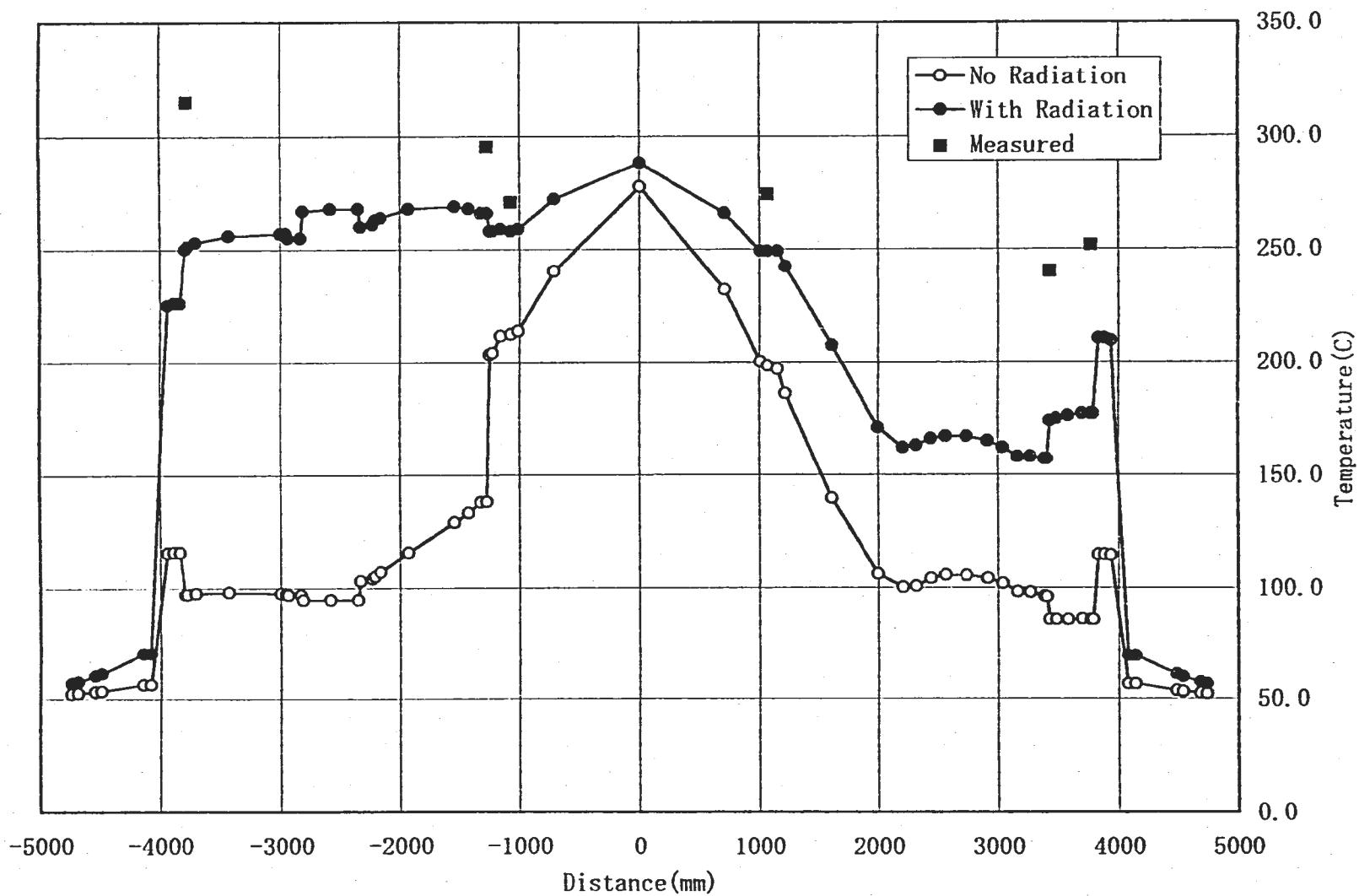


Fig. 3.9 Radial Temperature Distribution of Shield Plug

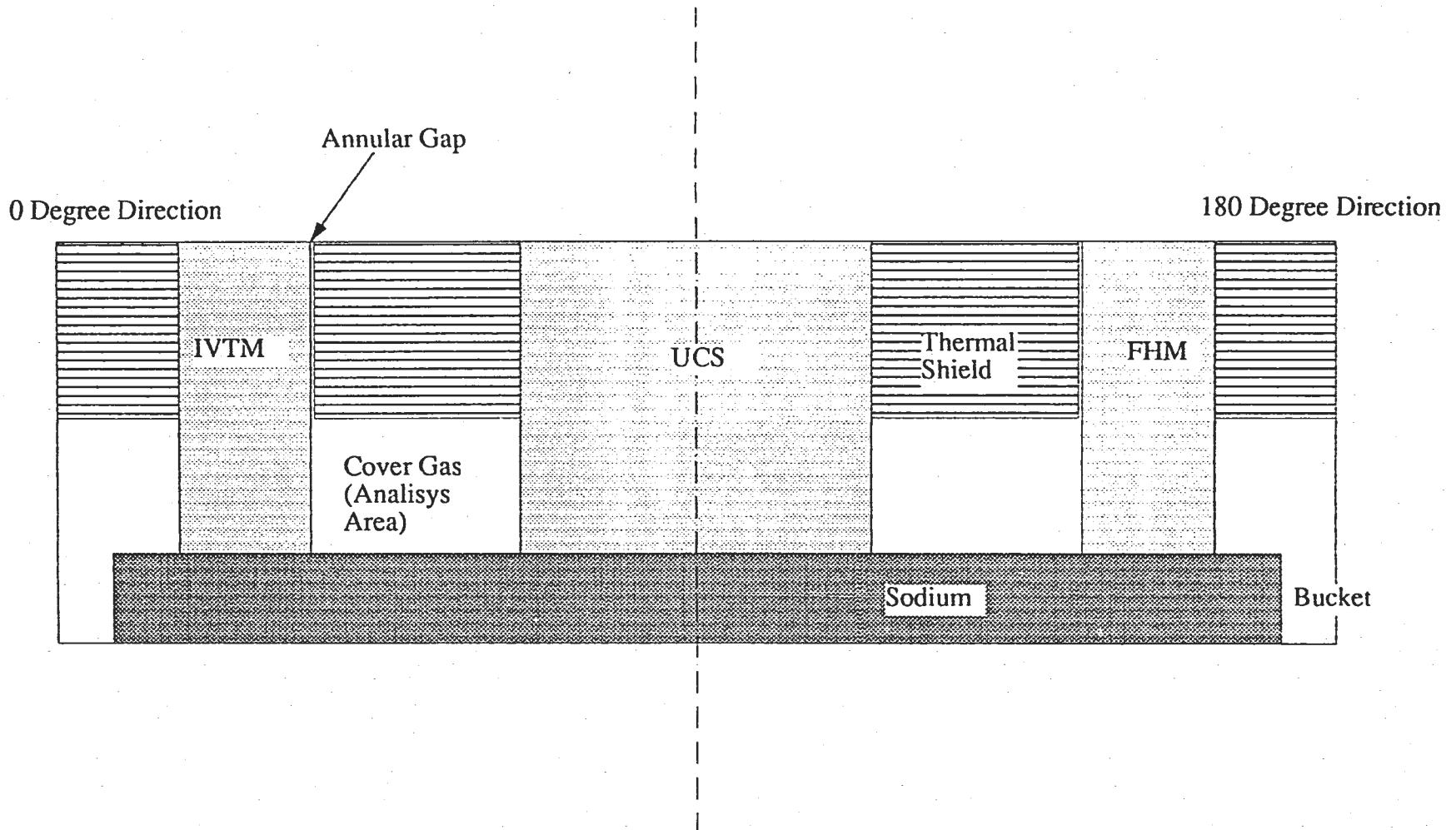


Fig. 4.1 Schema of Cover Gas

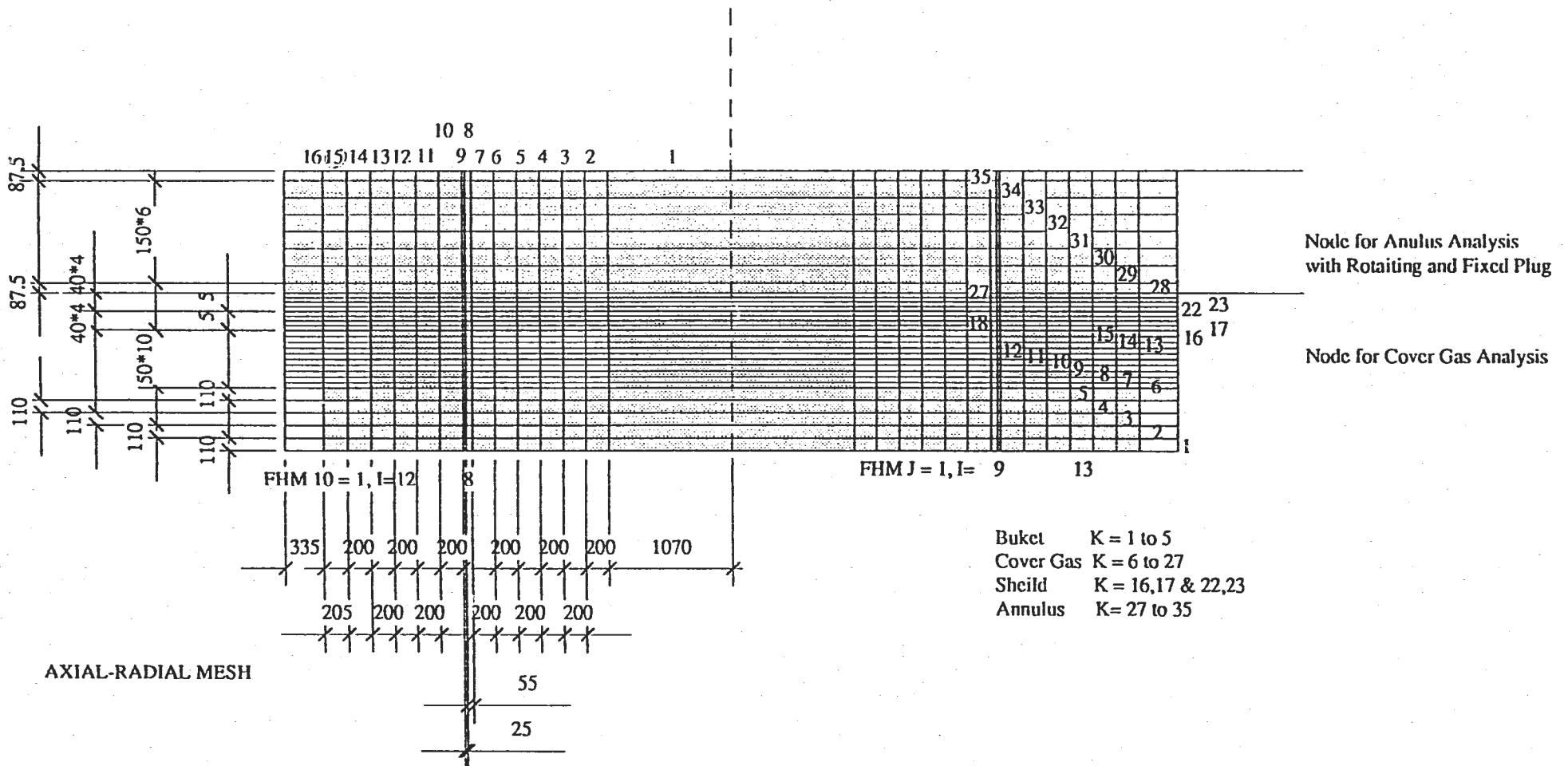


Fig. 4.2(1/2) Mesh Arrangement for Cover Gas (Elevation)

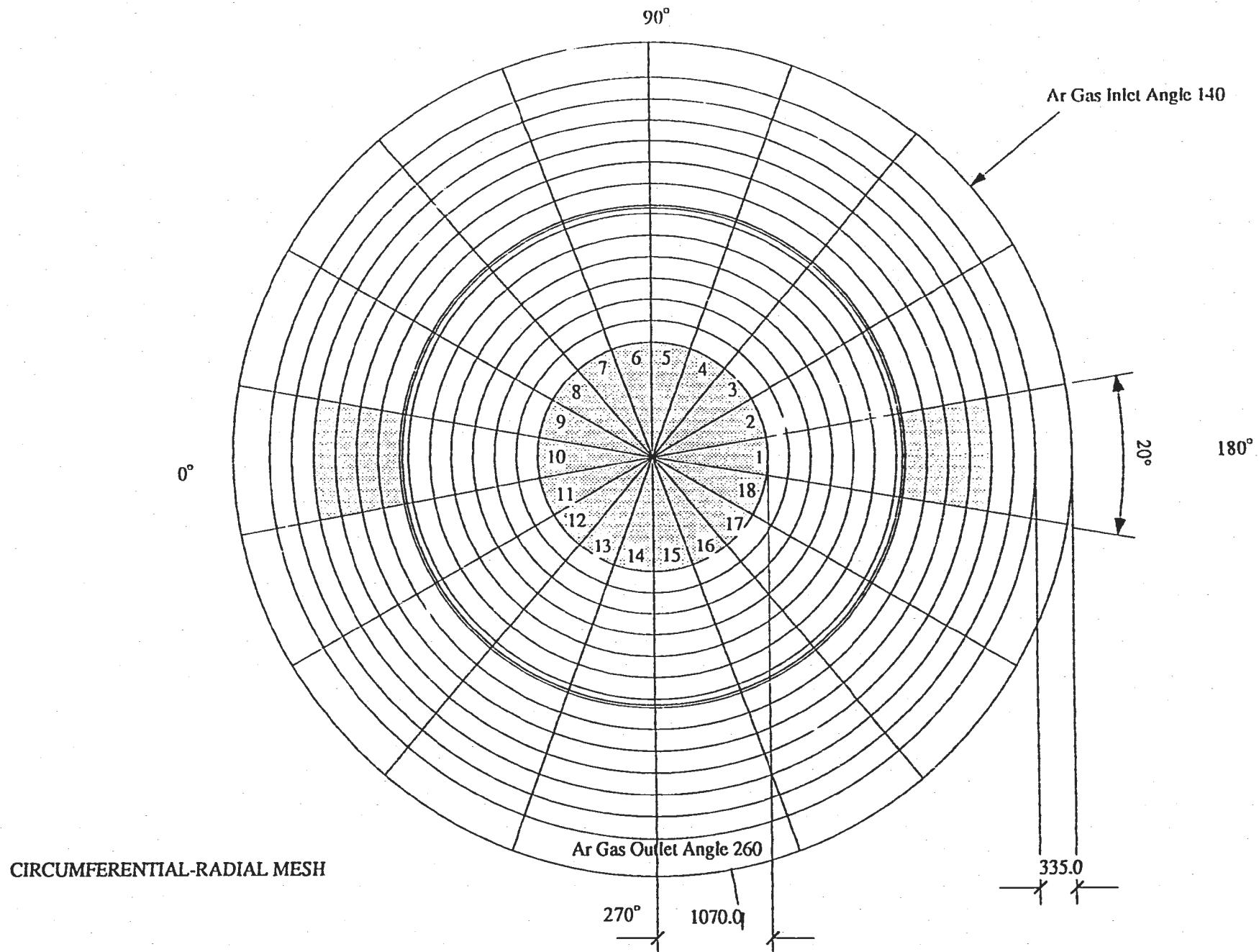
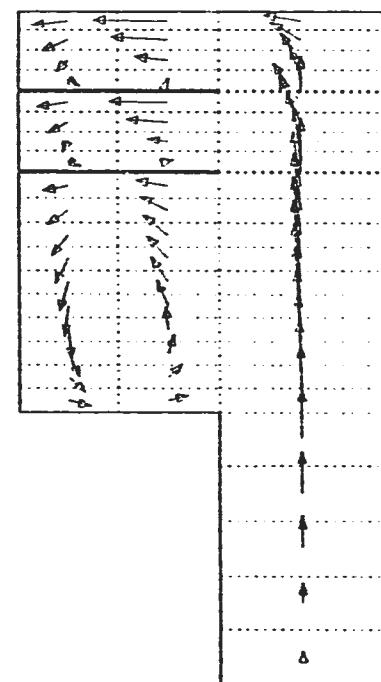
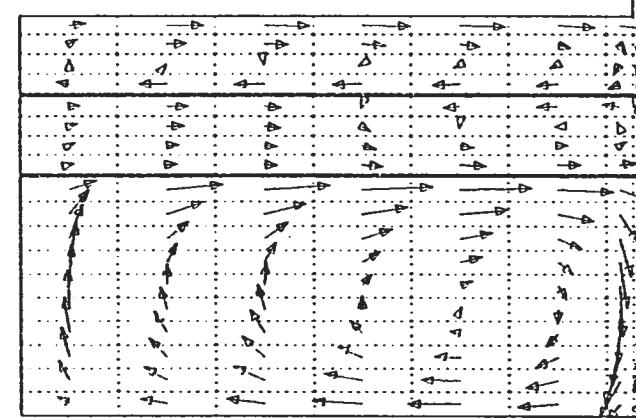
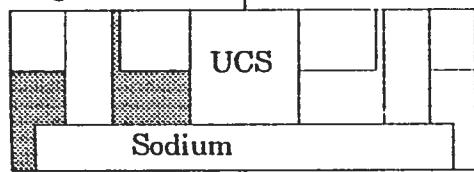


Fig. 4.2(2/2) Mesh Arrangement for Cover Gas (Plane)

0 Degree Section



→ 0.80 M/S

Fig. 4.3 Velocity Vector of r-z Section at 0 Deg. direction

90 Degree Section |

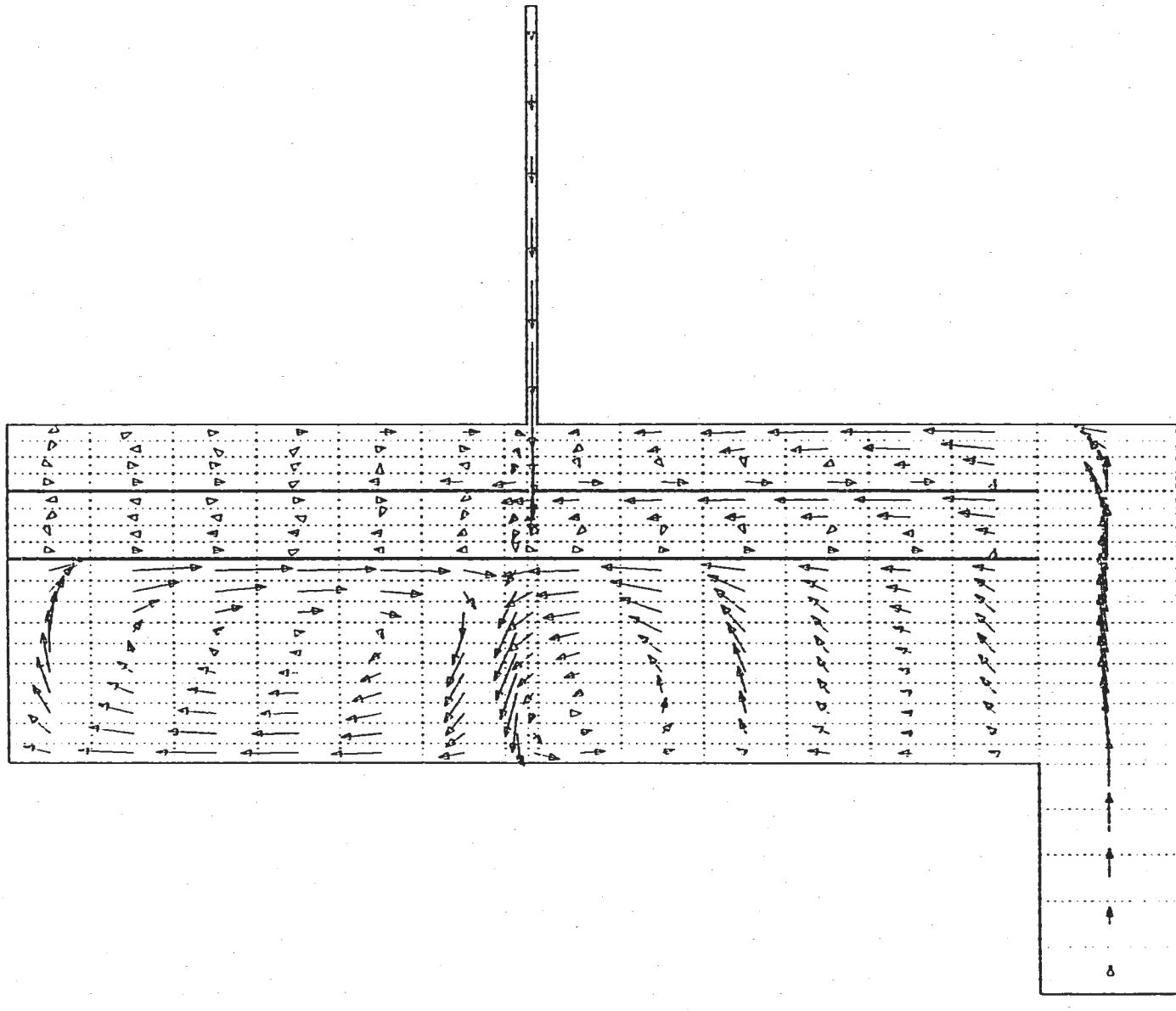
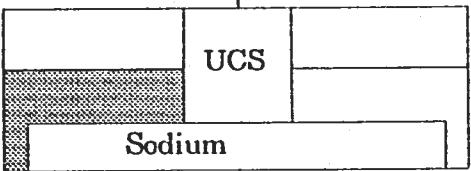


Fig. 4.4 Velocity Vector of r-z Section at 90 Deg. direction

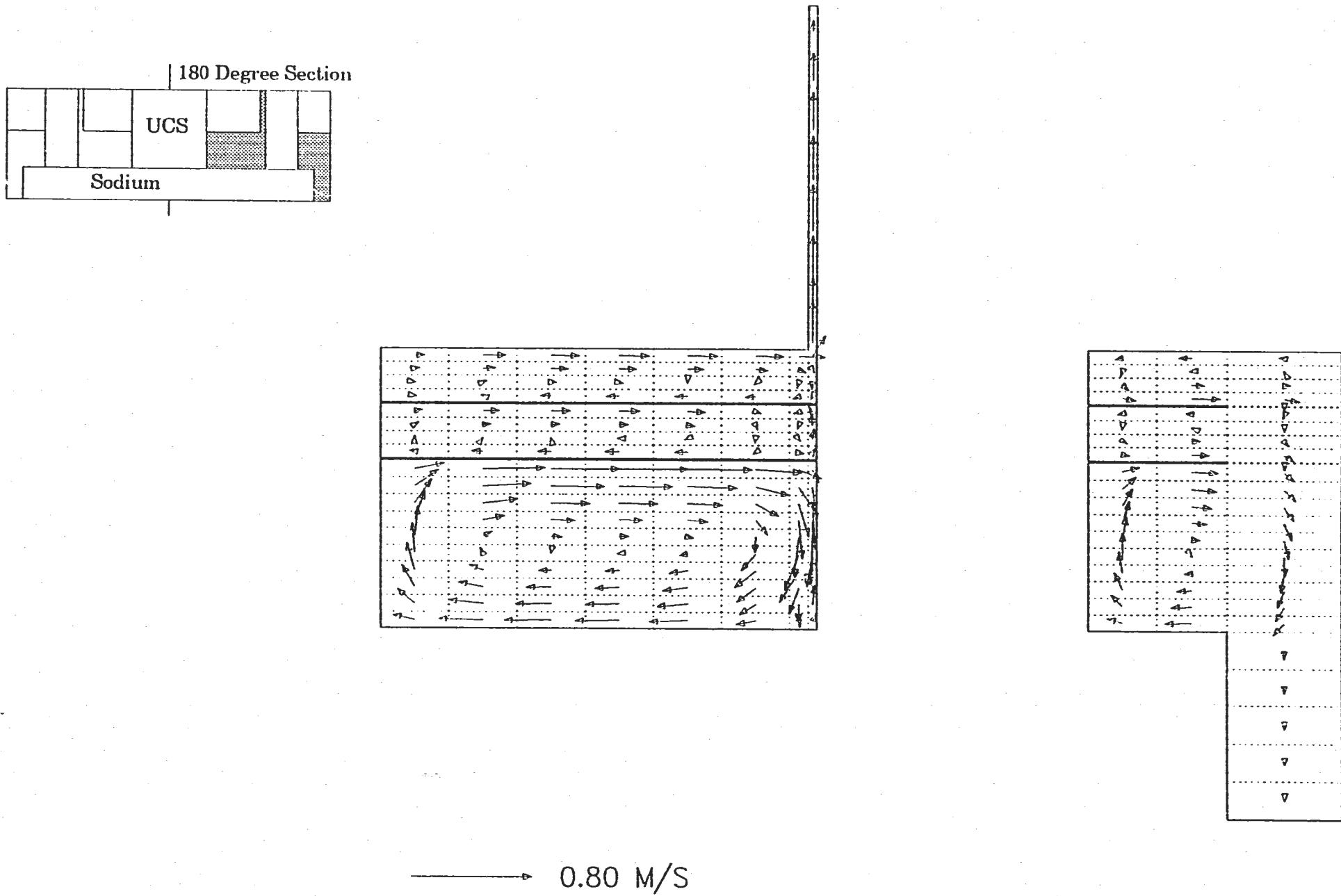


Fig. 4.5 Velocity Vector of r-z Section at 180 Deg. direction

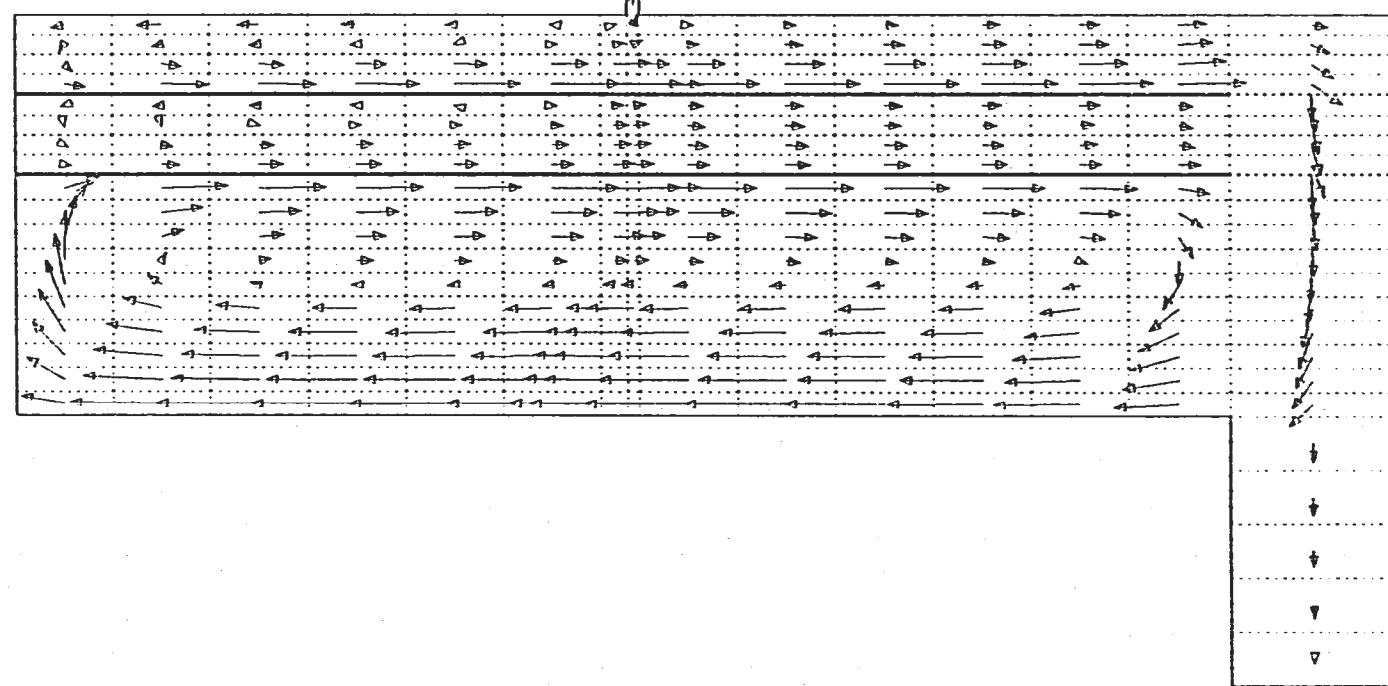
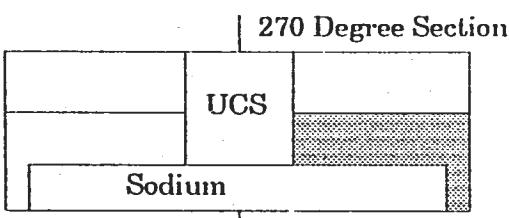


Fig. 4.6 Velocity Vector of r-z Section at 270 Deg. direction

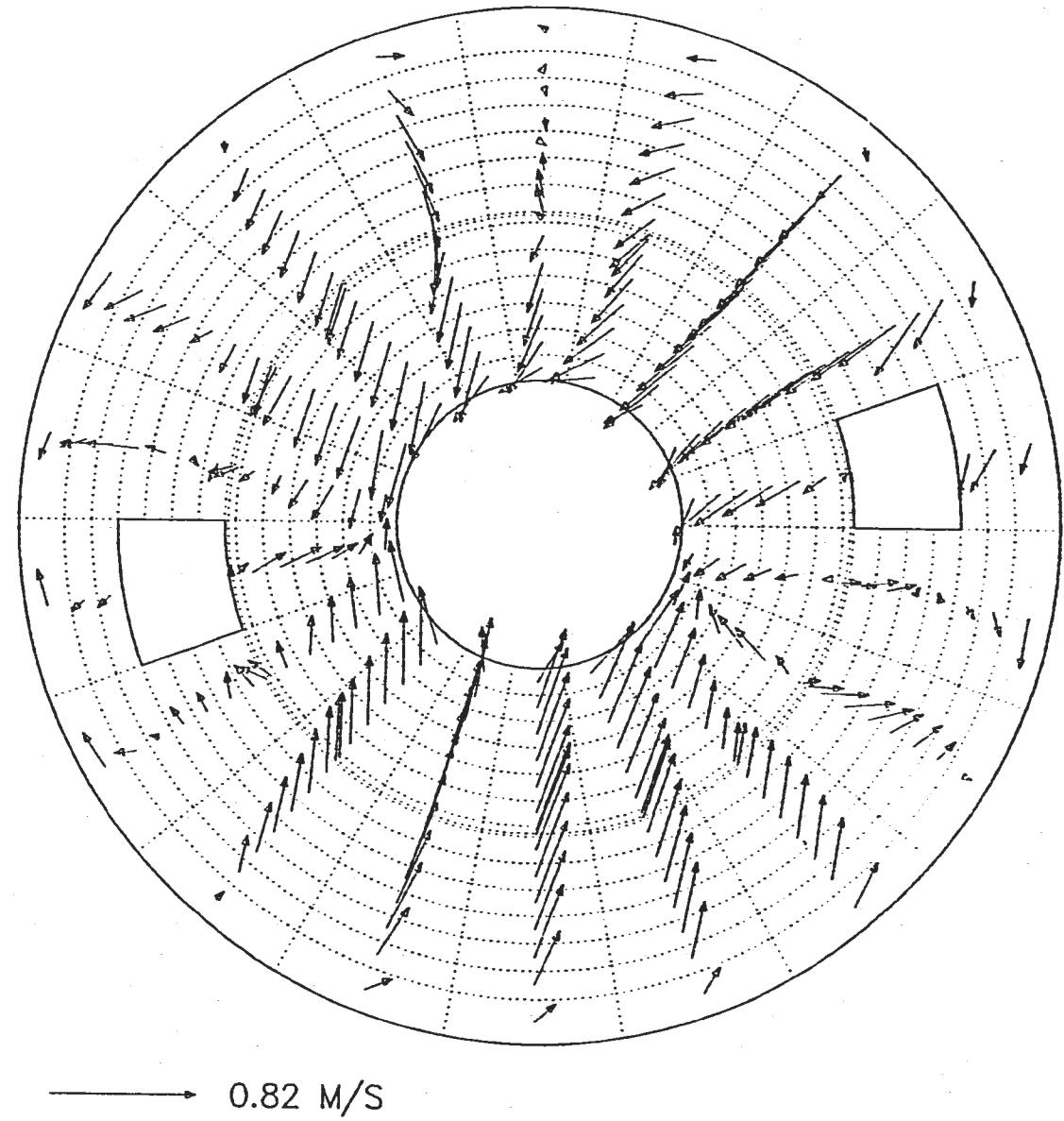
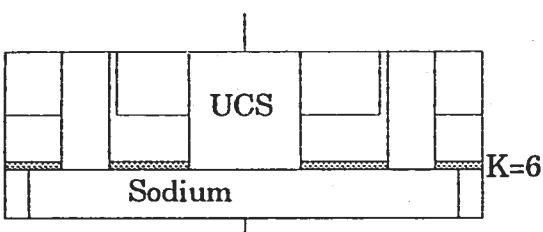


Fig. 4.7 Velocity Vector of  $r-\theta$  Section ( $K=6$ )

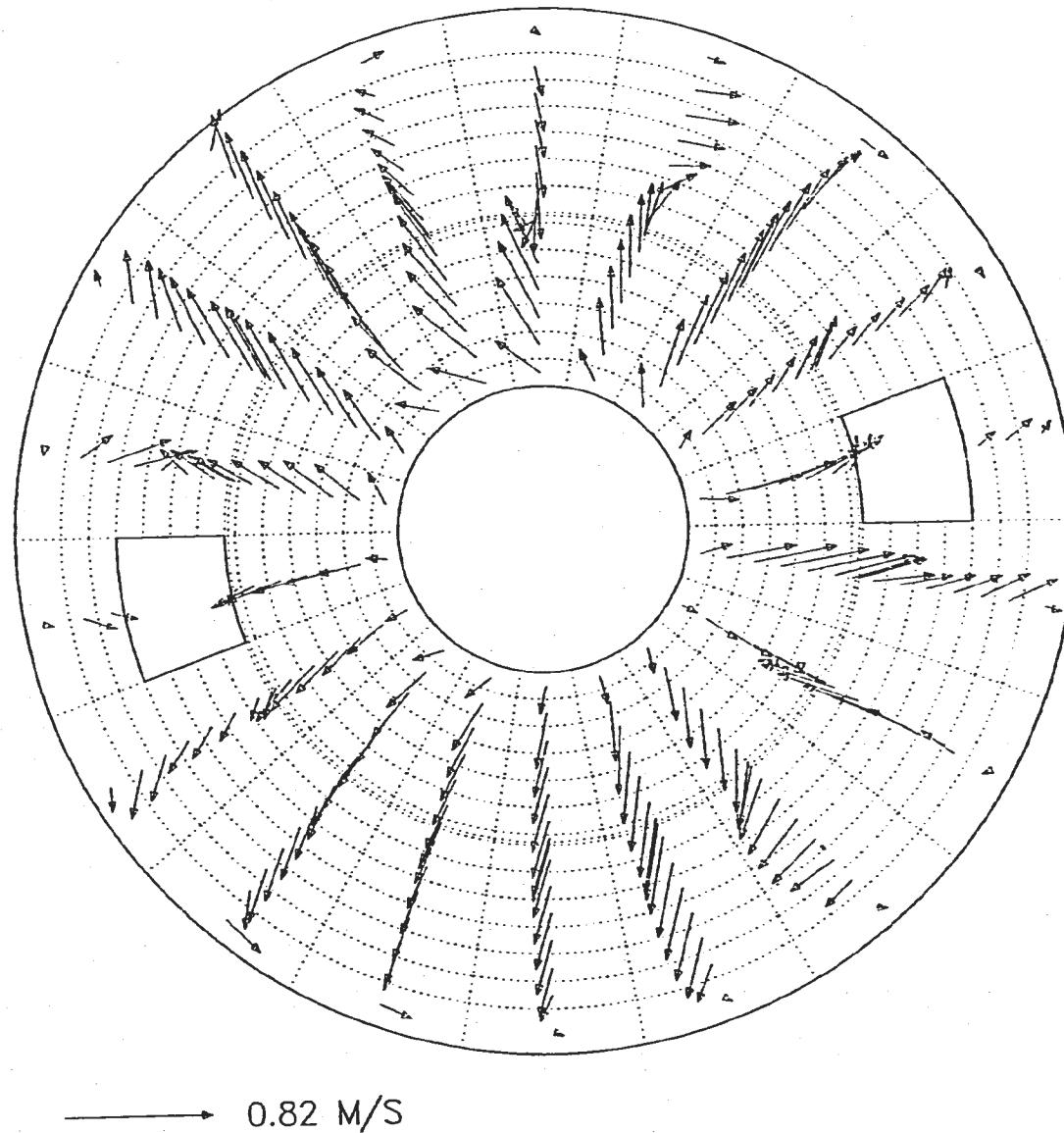
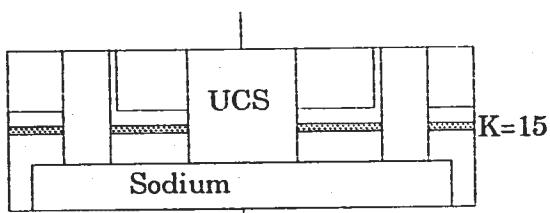


Fig. 4.8 Velocity Vector of  $r-\theta$  Section (K=15)

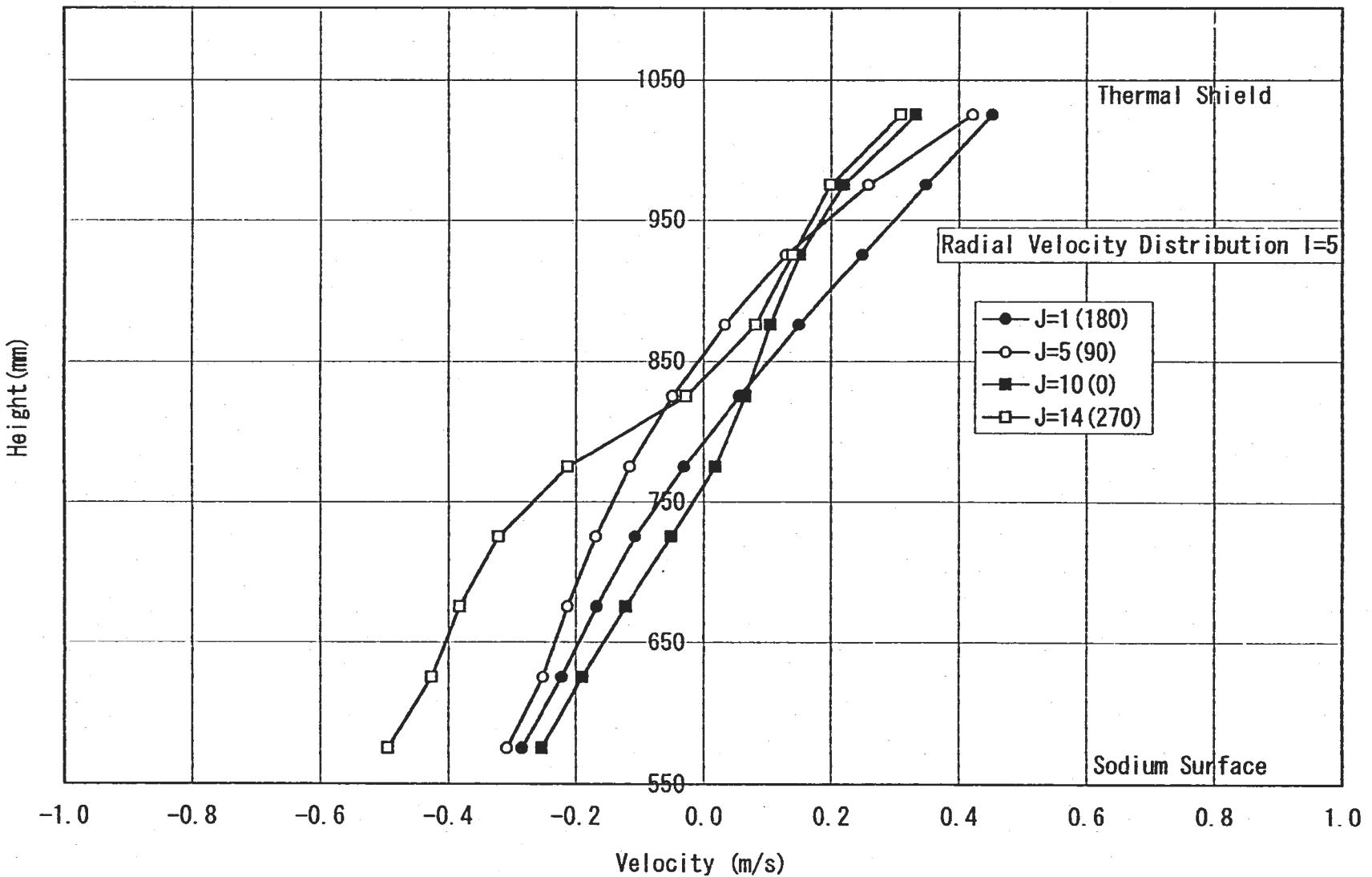
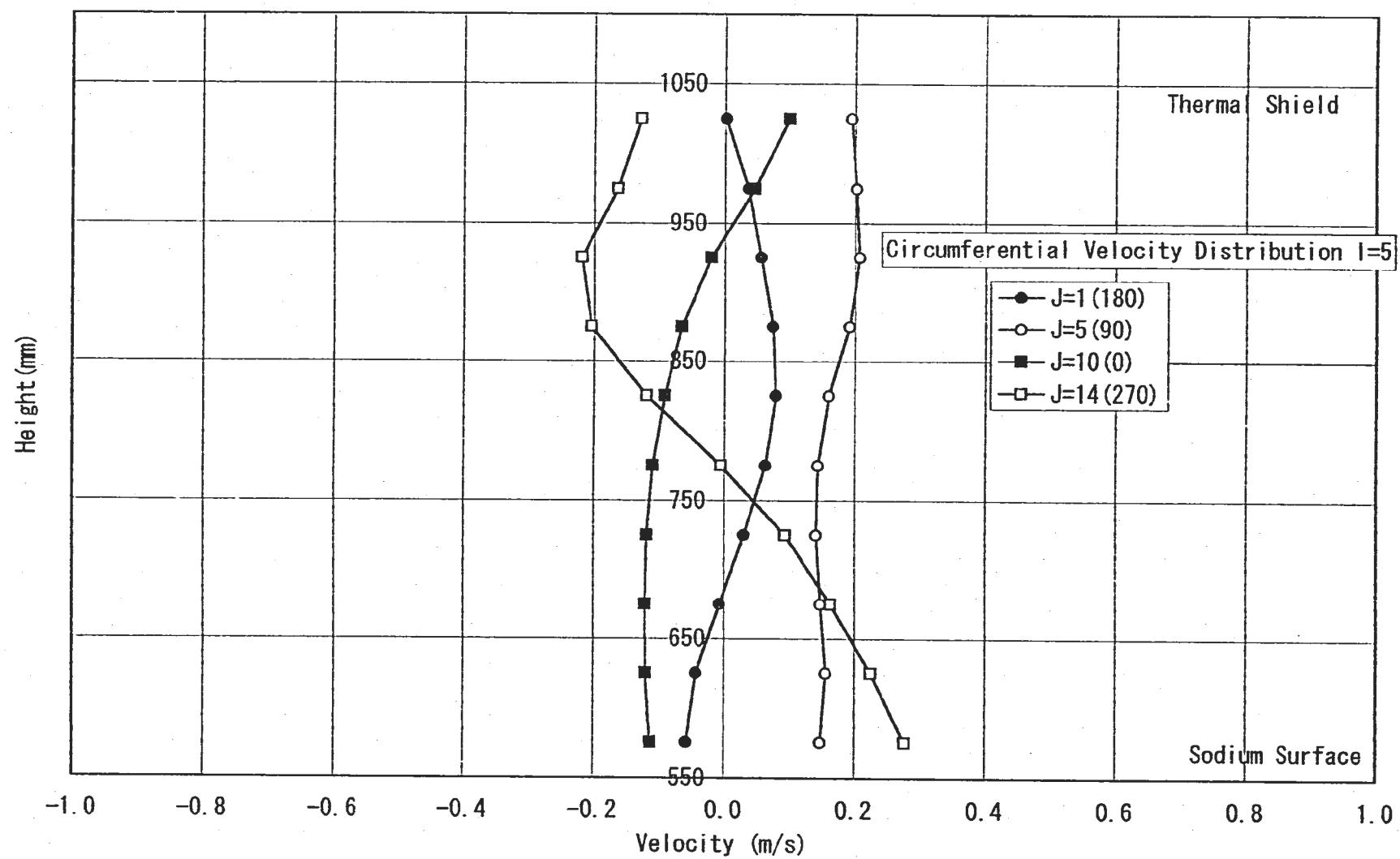
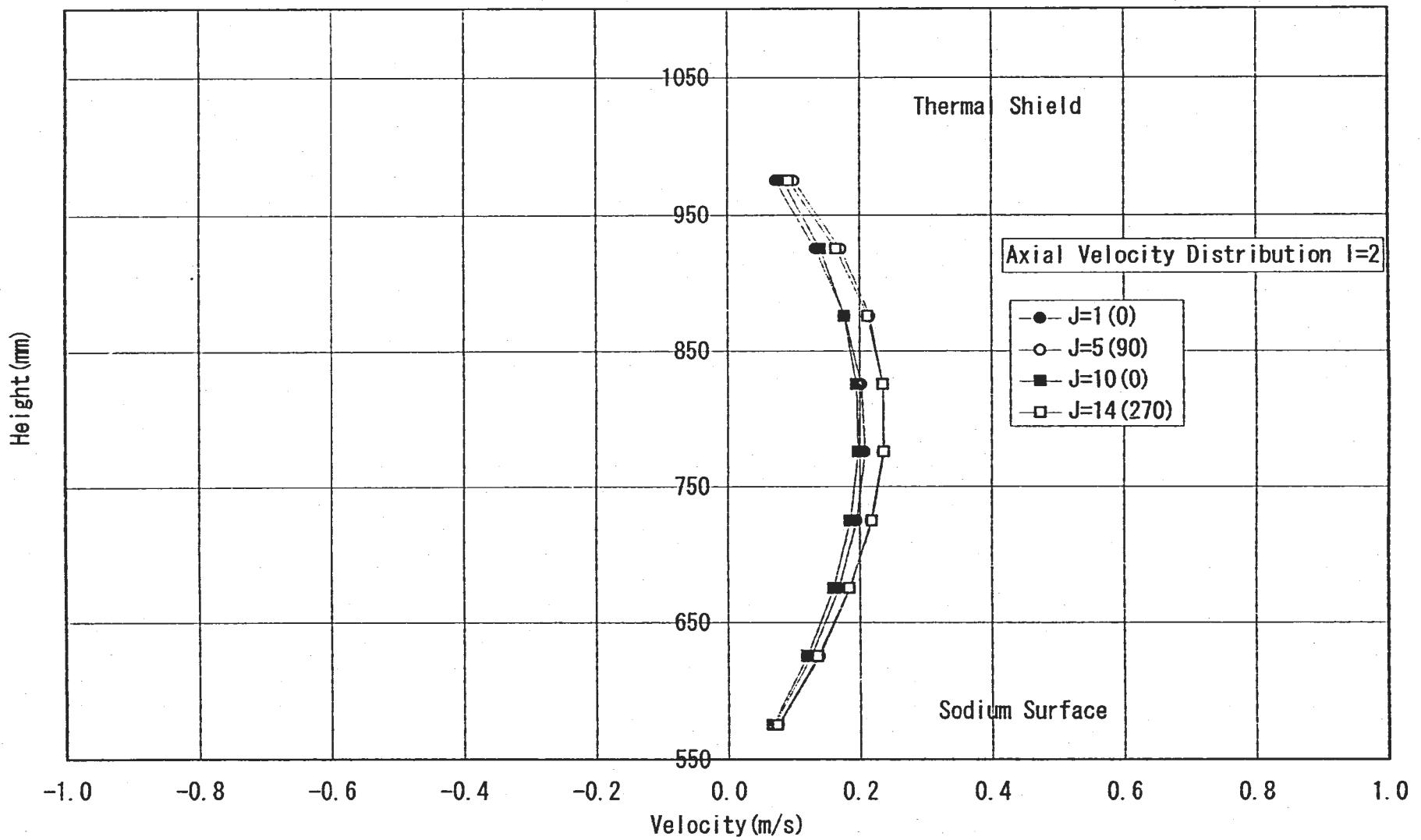
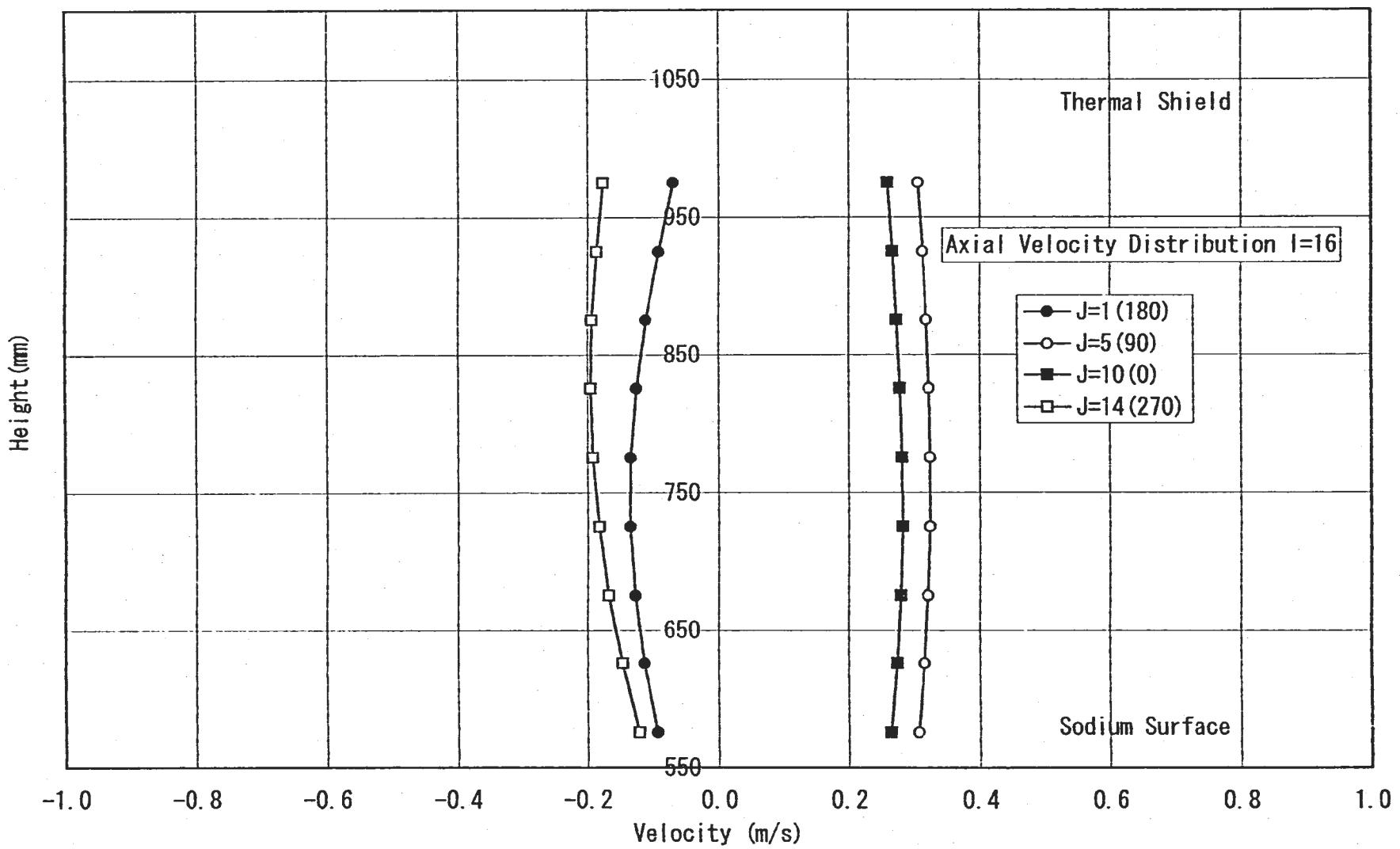


Fig. 4.9 Radial Velocity Distributions ( $I = 5$ )

Fig. 4.10 Circumferential Velocity Distributions ( $I = 5$ )

Fig. 4.11 Axial Velocity Distributions ( $I = 2$ )

Fig. 4.12 Axial Velocity Distributions ( $I = 16$ )

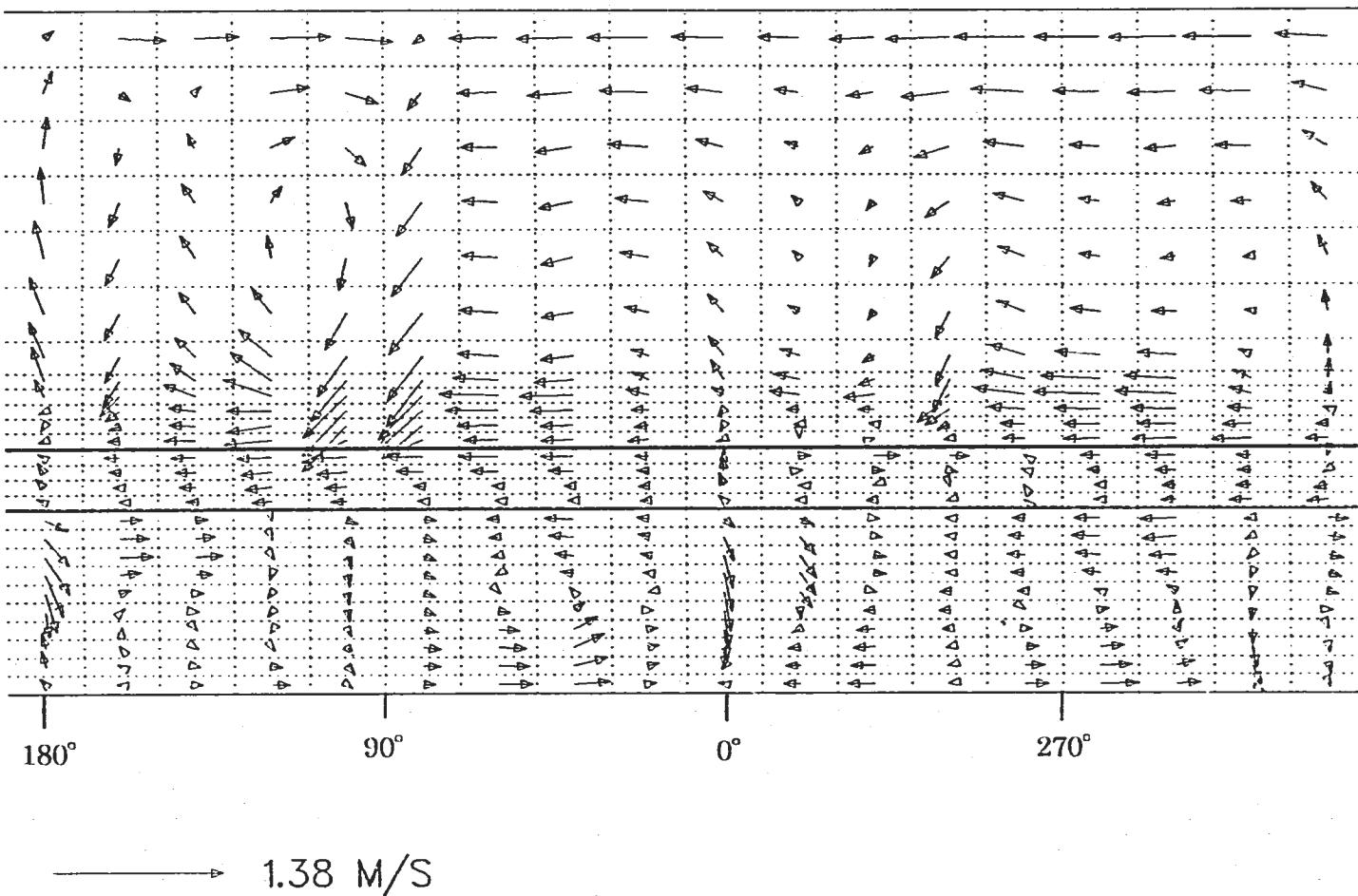


Fig. 4.13 Velocity Vector of  $\theta$ -z Section (I=9)

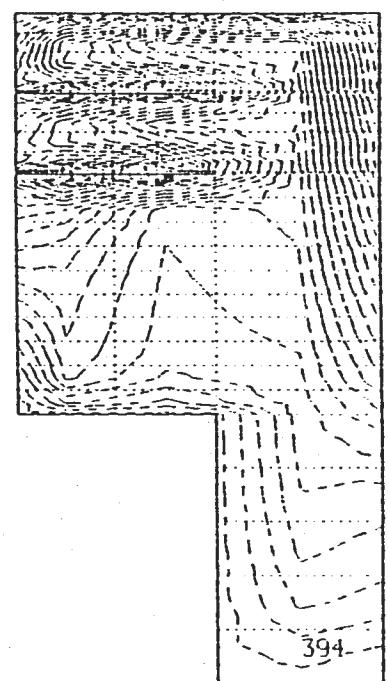
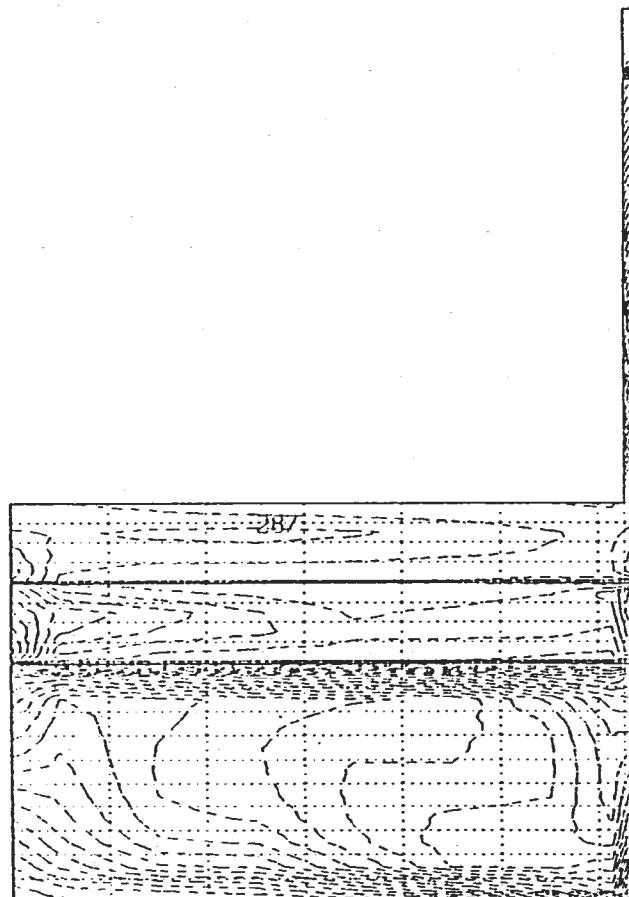
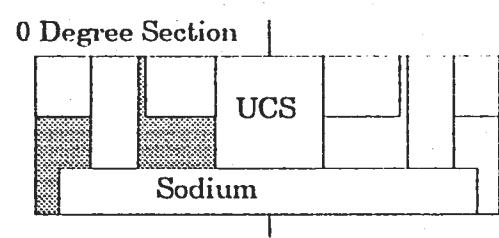
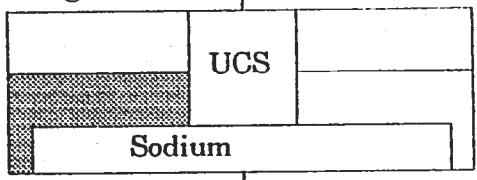


Fig. 4.14 Temperature Fields of r-z Section at 0 Deg. direction

90 Degree Section |



46

52

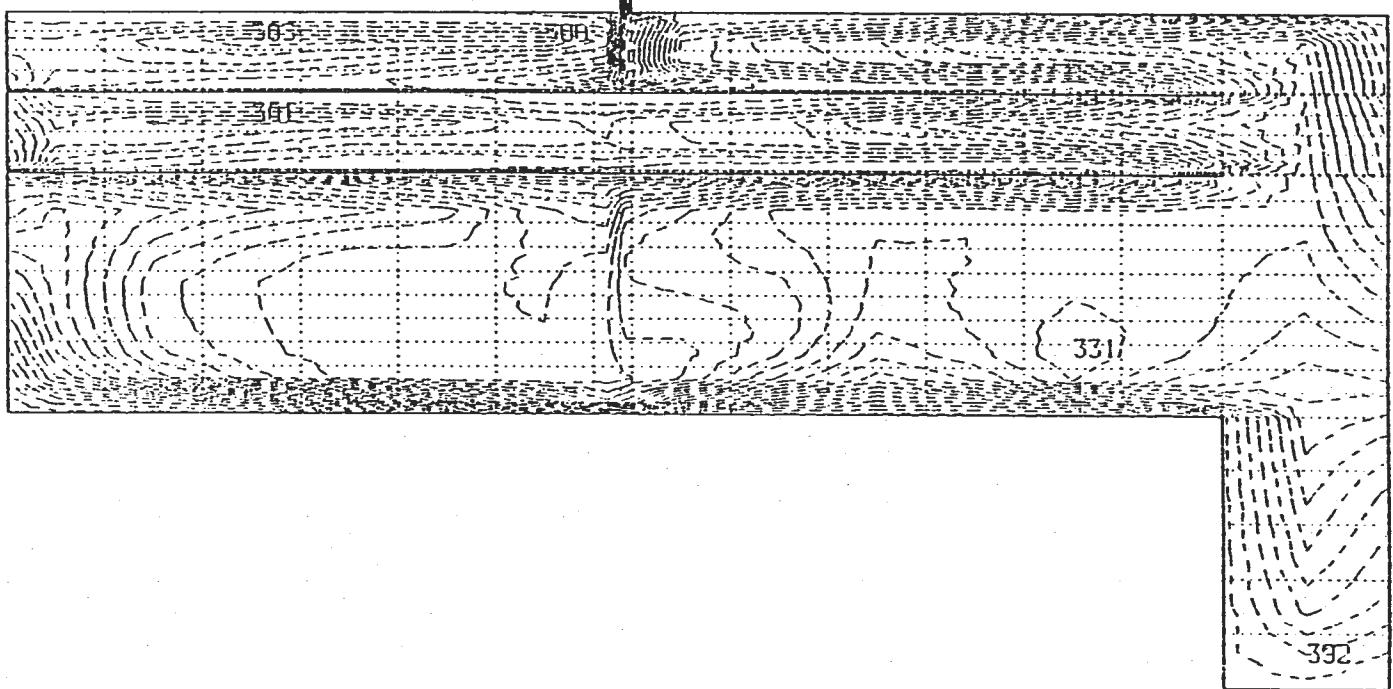


Fig. 4.15 Temperature Fields of r-z Section at 90 Deg. direction

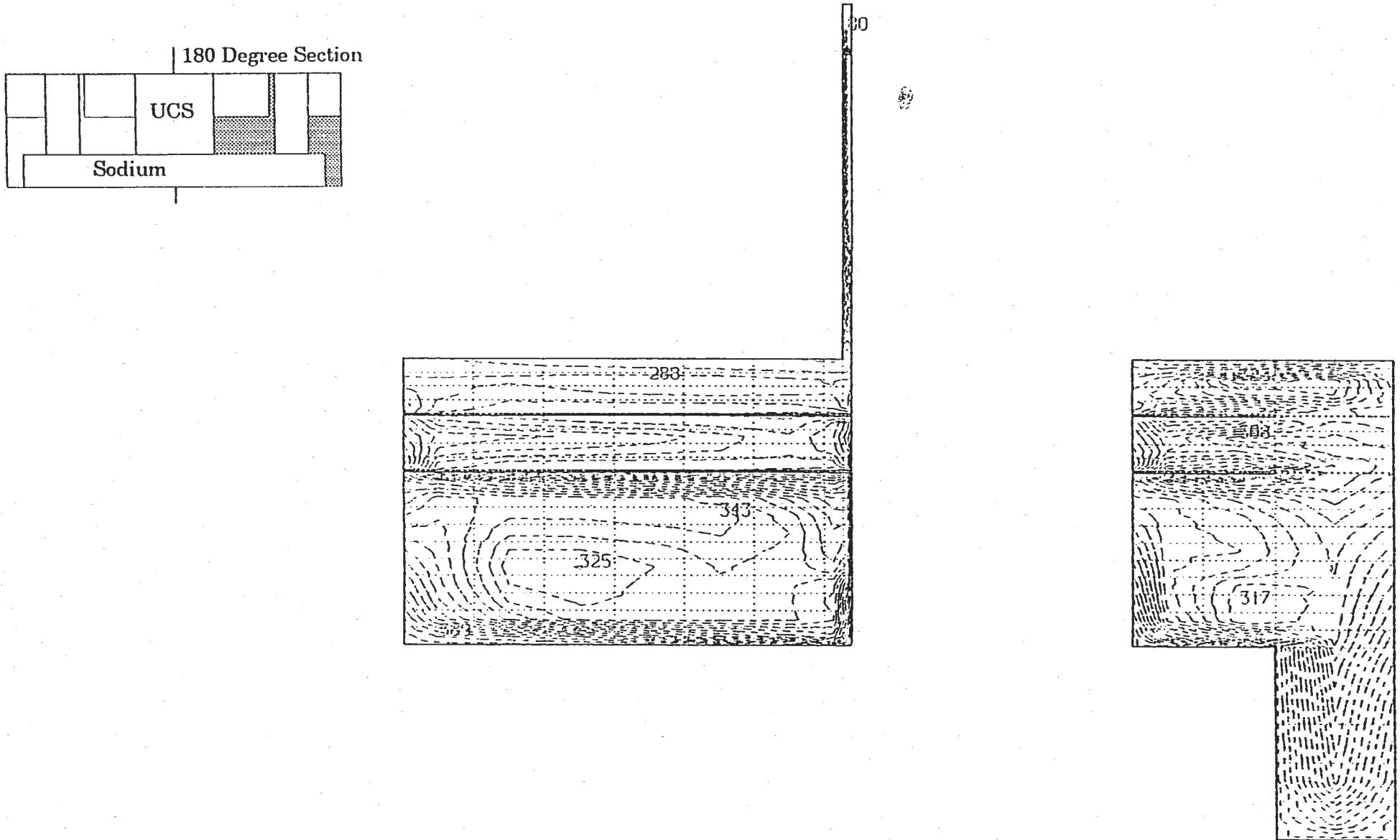


Fig. 4.16 Temperature Fields of r-z Section at 180 Deg. direction

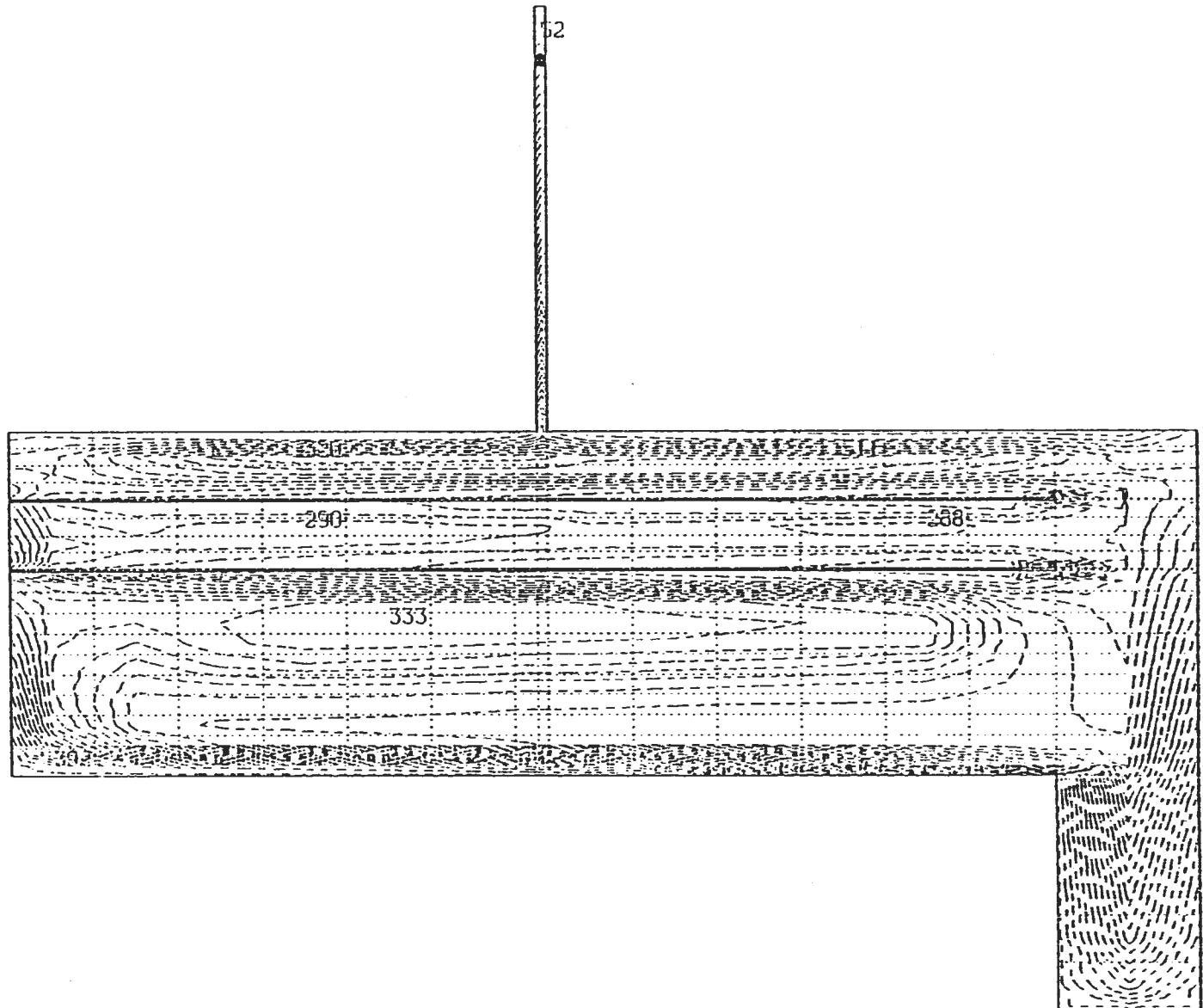
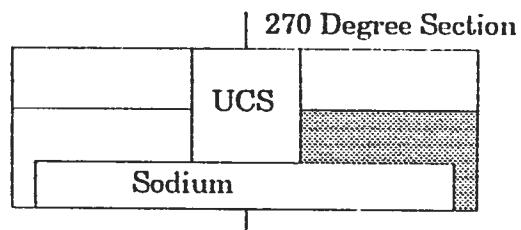


Fig. 4.17 Temperature Fields of r-z Section at 270 Deg. direction

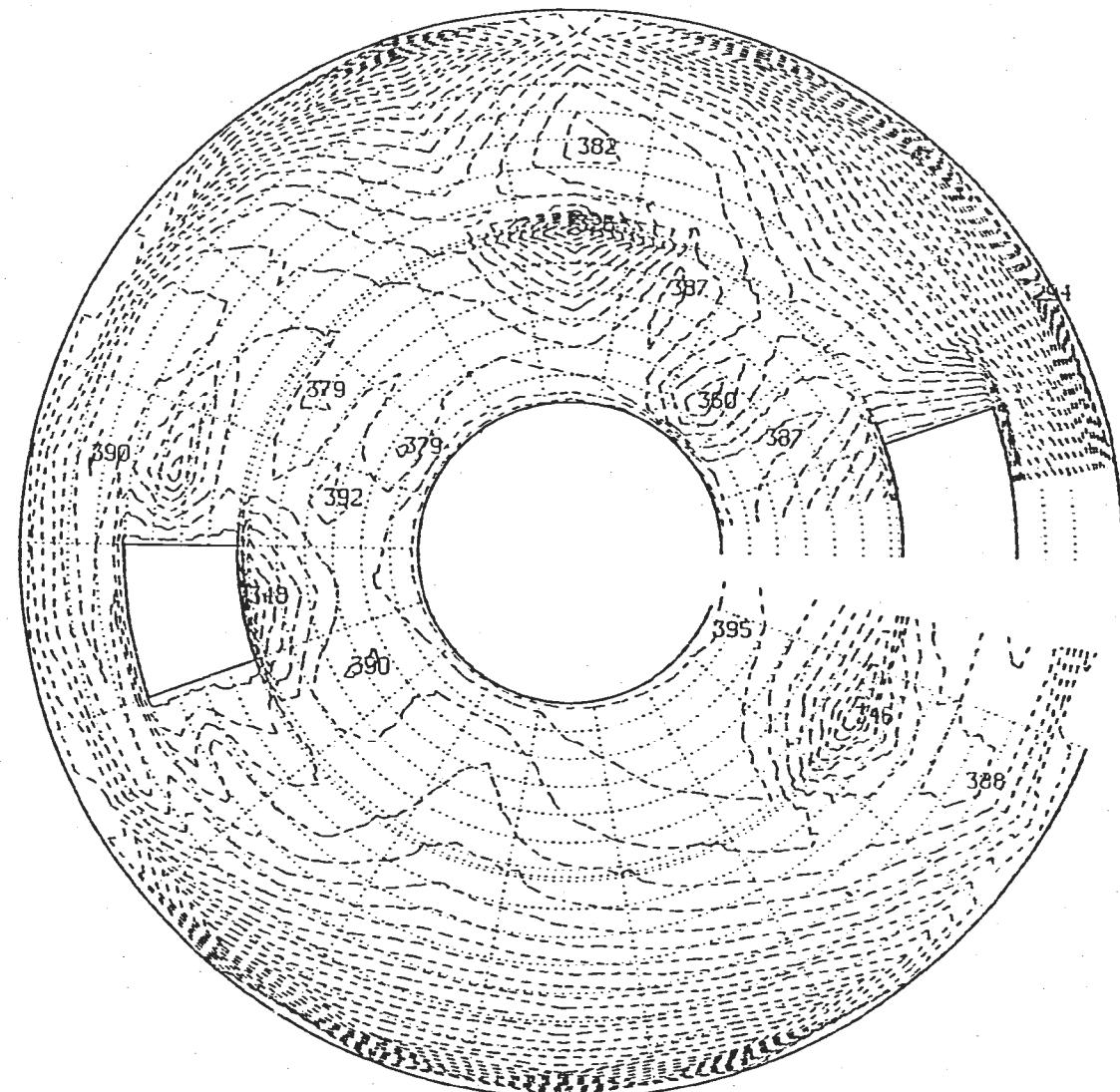
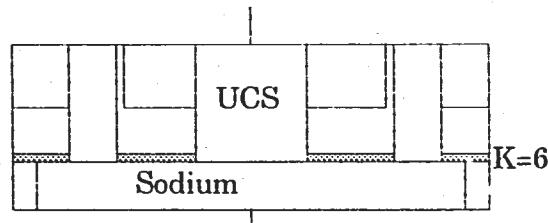


Fig. 4.18 Temperature Fields of  $r-\theta$  Section ( $K=6$ )

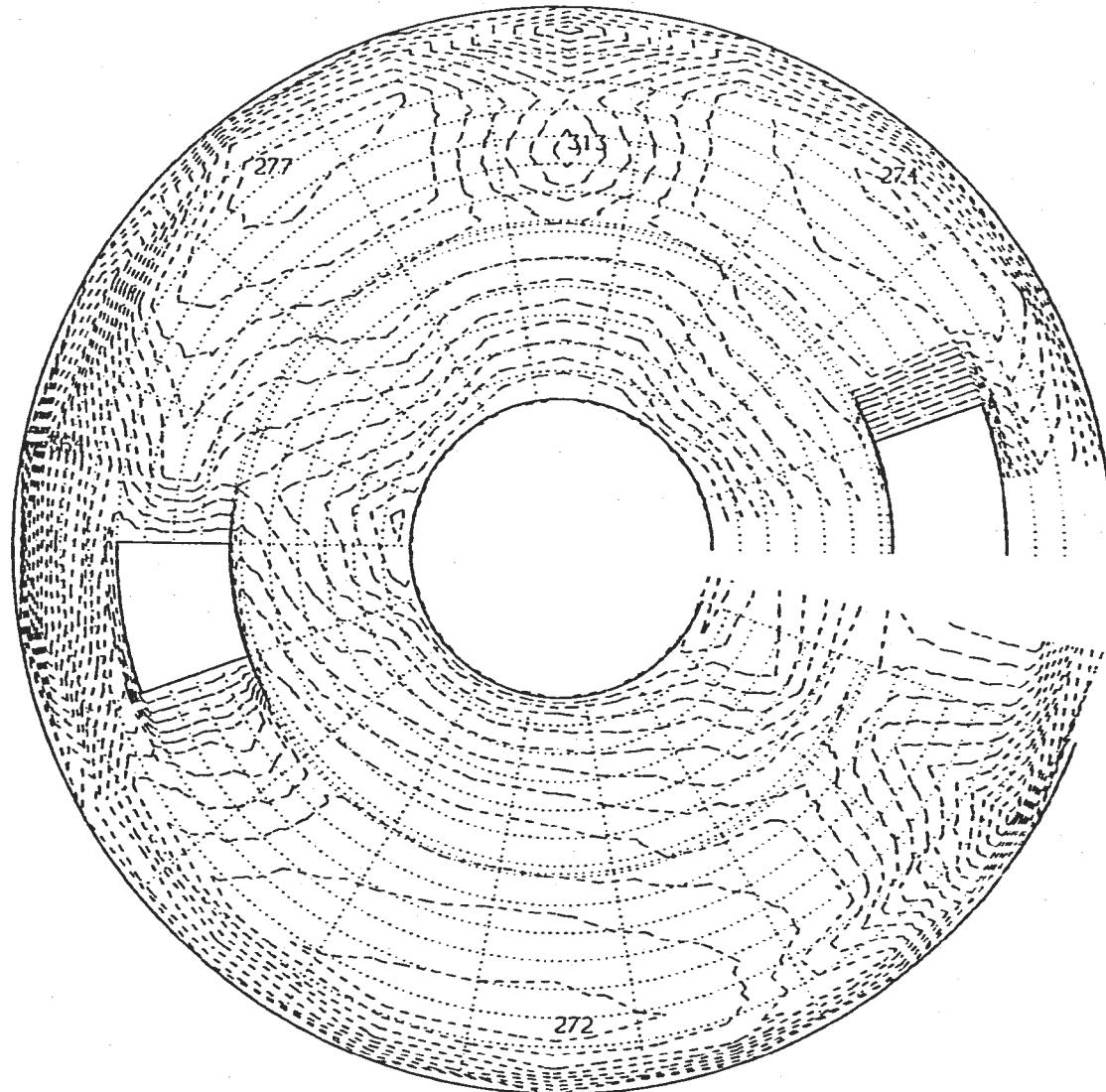
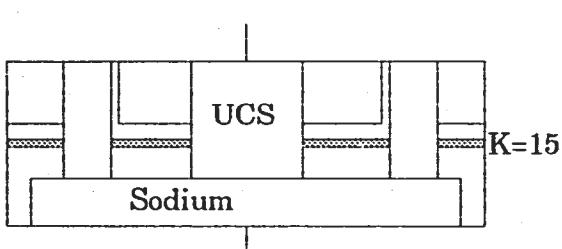
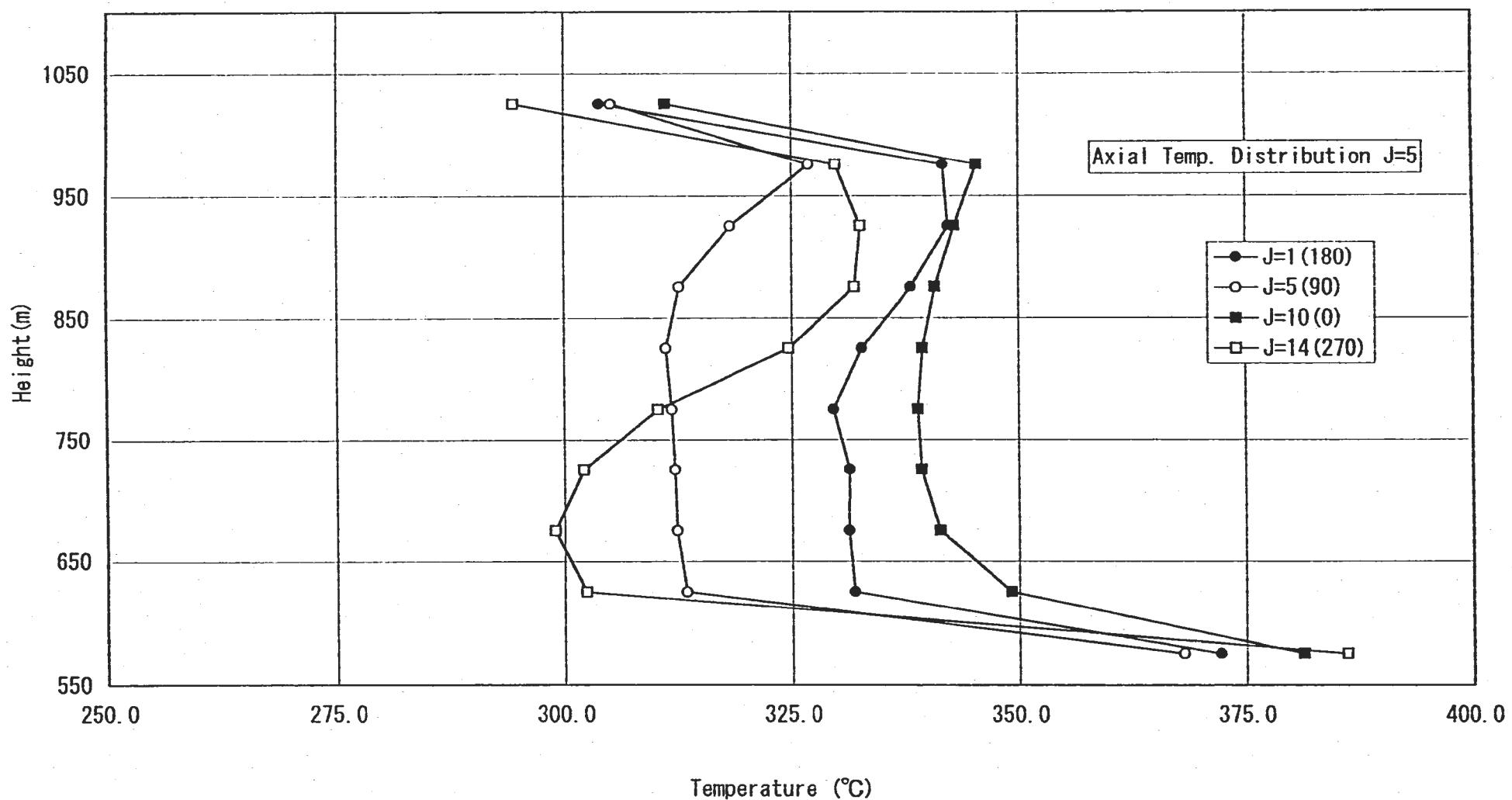
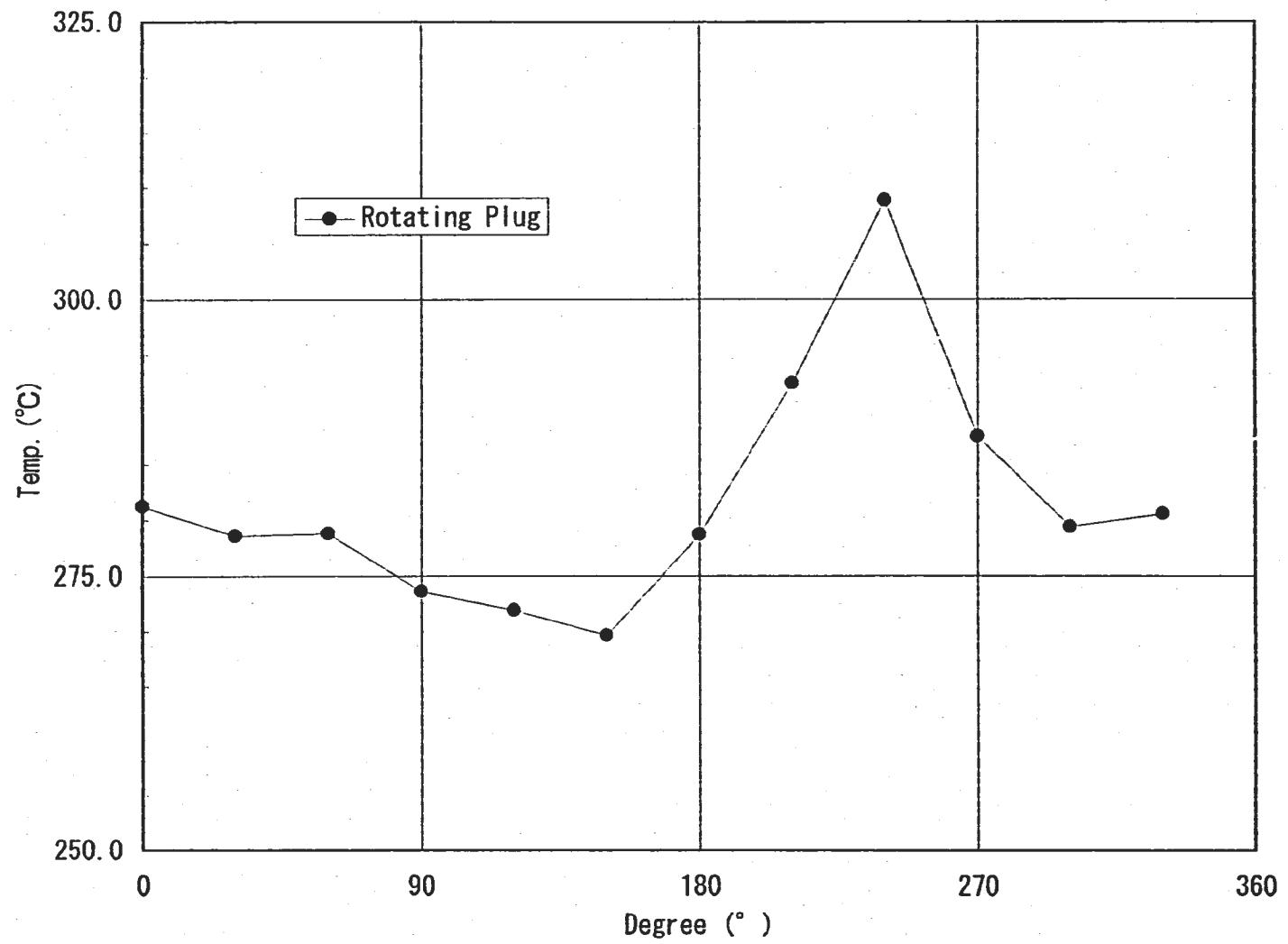


Fig. 4.19 Temperature Fields of  $r-\theta$  Section (K=15)

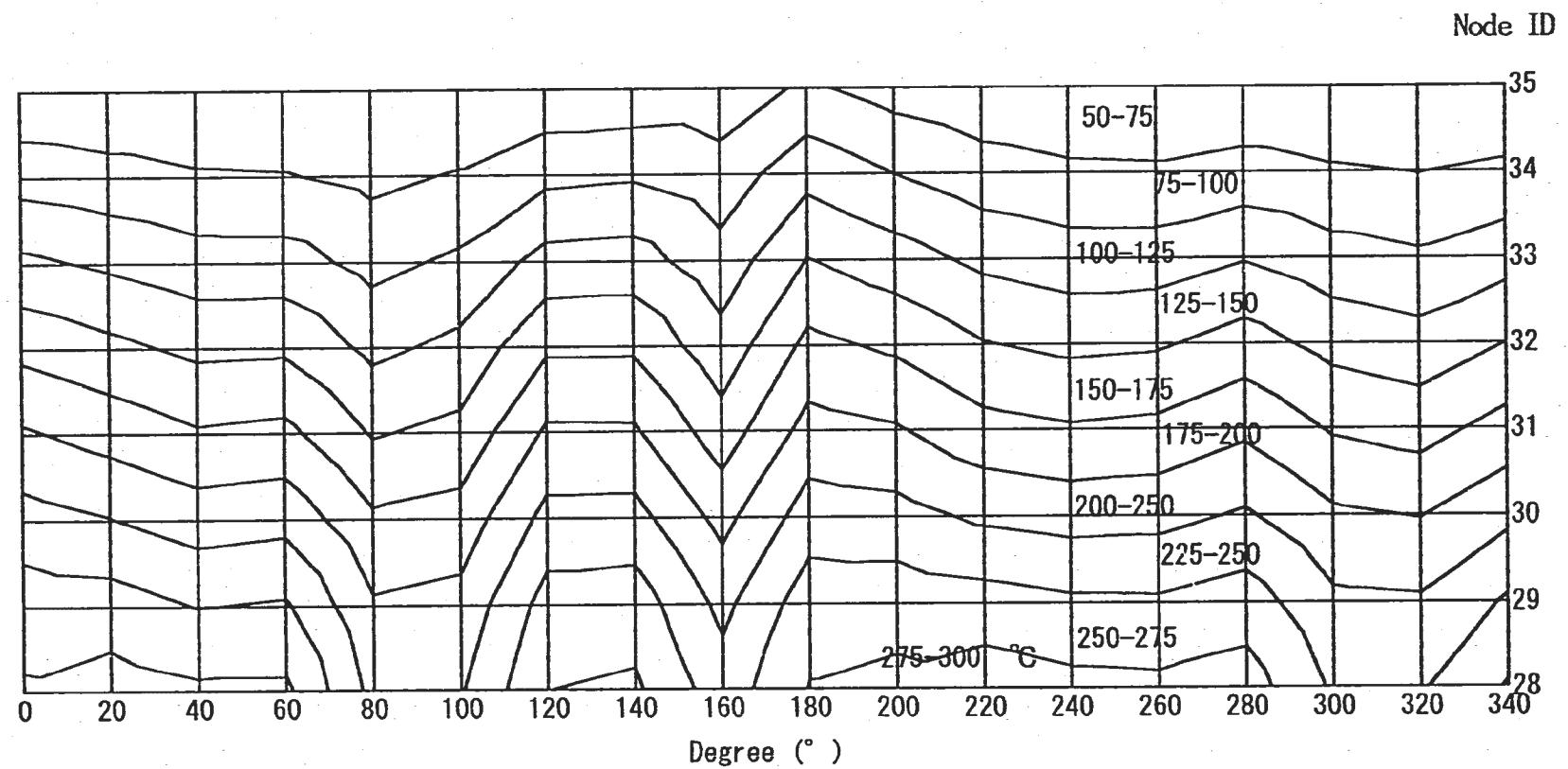
- 151 -

Fig. 4.20 Axial Temperature Distributions ( $I = 5$ )



Circumferential temperature Distribution for

Fig. 4.21 Circumferential Temperature Distribution of Rotating Plug



Circumferential Temperature Fields for Annular Gap (I=9)

Fig. 4.22 Circumferential Temperature Fields of Annulus

## 付録 1 既往研究の調査

本付録はしやへいプラグの解析を実施する際のモデル作成上の一助とするため、カバーガス空間の伝熱特性、Na および Na 付着面の放射率、Na ミストによる放射伝熱への影響および垂直環状空間の周方向自然対流について、以下の文献を調査したものである。

- (1) 高速炉原子炉容器カバーガス空間の熱伝達<sup>(3)</sup>
- (2) LMFBR のカバーガス空間中におけるふく射伝熱<sup>(4)</sup>
- (3) 高速炉カバーガスの伝熱流動と機器開発<sup>(5)</sup>
- (4) NACOWA Experiments on LMFBR Cover Gas Aerosols, Heat Transfer, and Fission Product Enrichment<sup>(6)</sup>
- (5) 下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流<sup>(7)</sup>

### (1) 高速炉原子炉容器カバーガス空間の熱伝達

#### ①概要

Na ミストを含む Ar ガスのカバーガス空間を通過する熱流束を、Na ミストが希薄な場合と濃厚な場合について測定し、簡易モデルによる解析値と比較した。

#### ②実験

実験には Na を使用し、カバーガスは Ar ガスである。試験装置の体系は、蒸発面（Na 液面）の直径が 60cm、蒸発面から水平壁までの高さが最大 21cm である。壁の材質は SUS304 である。Na ミスト濃度はカバーガスを系外に吸引し、フィルターに吸着させ測定した。実施された試験の条件を Table A. 1 に示す。

実験の結果、Na ミスト濃度は  $\Delta T$ ：(Na 液面温度) – (水平壁温度) が 150°C よりも大きい時には、10 から 20 g/m<sup>3</sup> であった。 $\Delta T$  が 50°C から 80°C の範囲では、Na ミストは急激に減少し、 $\Delta T$  が 50°C を下回ると Na ミストはほとんど発生しなかった。また、Na 温度が 250°C よりも低い場合にも Na ミストはほとんど発生しなかった。

カバーガスの軸方向温度分布は、Na ミストの有無による相違は見られず、自然対流の様相は Na ミストが希薄な場合と、濃厚な場合で同じと考えられるとしている。

#### ③解析

Na ミスト濃度が希薄な場合の伝熱形態は、凝縮熱流束が対流、放射に比べて無視できるとしている。Na ミストがない場合には、カバーガスと構造の熱伝達率は水平密閉流体層の自然対流熱伝達率と良く一致した。

Na ミスト濃度が濃厚な場合の伝熱形態は、凝縮熱流束が無視できない。このため、Sh(シャーワード数) / Nu = 1.5 と仮定して凝縮による熱輸送量を評価した。放射伝熱への影響の考慮は光学的厚さを 3.5 から 6.7 と推定して、拡散近似式を使用して評価している。拡散近似式を用いて行った解析結果は、実験結果で得られた熱流束を 20% 過大に評価するが近似解析には有効であるとしている。

## (2) LMFBR のカバーガス空間中におけるふく射伝熱

## ①概要

Na ミストを含む Ar ガスのカバーガス空間を通過する熱流束を、Na ミストによる放射性を考慮し、輻射の輸送方程式を厳密に解き算出した。輻射熱流束と自然対流による熱流束の比を、輻射の散乱に非等方性を考慮した場合としない場合について比較した。

## ②解析結果

輻射の輸送方程式に関し、各波長ごとの Na ミストによる輻射の吸收・射出・散乱を厳密に計算した。主な結果は以下のとおり。

- ・水平壁への放射伝熱量は Na 液面温度に強く依存する。
- ・水平壁への輻射熱流束は水平壁面がある温度の時、極大値を持つ(Na 液面温度が 500°C の場合には水平壁温度が 300 から 350°C で極大値となる)。極大値での温度差以上になると、Na ミストによる輻射遮蔽効果により水平壁への熱流束は減少する。
- ・散乱の非等方性による影響は、Na 液面温度が 500°C の場合には、等方性を仮定した場合よりも数%大きくなるが、Na 液面温度が 400°C の場合には、非等方性を考慮した場合としない場合で、熱流束にほとんど相違はない。
- ・水平壁への輻射熱流束は、ガス空間高さにはほとんど依存しない。
- ・Na 液面温度が 500°C の時の輻射伝熱量と対流熱輸送量の比率は Table A.2 に示す結果となった。

## (3) 高速炉カバーガスの伝熱流動と機器開発

## ①概要

高速炉のカバーガス空間における熱伝達、対流、Na ミストの生成、輸送および低温機器壁への付着などに関する研究の現状とこれまでの実プラントでの経験例をまとめたものである。以下に主な成果を示す。

## ・Na 液面、Na 付着面および Na 酸化物の熱放射率

Na 液面の放射率は、電磁理論による解析評価では 200°C で 0.025、500°C で 0.046 であった。測定結果の Na 液面の放射率は、温度にかかわらずほぼ一定で 0.05 であった。両者の違いは解析の理論に用いているハーゲンルーベンス相関の誤差および Na 液面の酸化皮膜形成が原因と考えられている。また、Na 付着面の放射率は酸化の度合により 0.3 から 0.9 の間で変化する。

## ・Na ミストの影響

放射率 0.1 のミストを間に含む 2 平板間の放射伝熱量は、ミストがない場合の伝熱量に比べて約 10% 小さくなる。

## ・カバーガス空間の熱伝達

固定／回転プラグ間のアニュラス部がないと仮定すれば、カバーガス空間の熱伝達率

は水平平板または密閉 2 平板間の場合の熱伝達率に近くなる。

- ・上部機器の熱伝達

多層板による熱遮蔽層は、多層板と側板の間に隙間があるため、温度や圧力の条件により熱遮蔽層内で自然対流が生じる場合があり、断熱性能が幾分低下すると考えられる。

- ・Na 蒸発速度

Na 蒸発速度は、境界層内での過飽和分の Na が全てミスト生成とした完全ミスト生成モデルと熱・物質移動のアナロジーモデルの中間となることが確認された。

- ・Na ミストの生成と濃度

Na ミスト生成過程の理論には、均一核生成モデルと不均一核生成モデルの 2 つがある。NaH の分解温度である 430°C を境にミスト濃度曲線の変化率が不連続を生じることから、NaH がミストの核生成に寄与していると推定している。Na ミストの粒径分布は、ほぼ対数正規分布しており、その重量平均径は数  $\mu\text{m}$  であり、エアロゾルとみなすことができる。

- ・Na の付着

水平壁の温度を下げるミスト濃度は上昇する。しかし、水平壁での Na 付着量はむしろ減少する。この理由は、Na 蒸気濃度の高い空間から境界層を通る物質移動は、壁面温度が高いときには凝縮が支配的であり、壁面温度が下がると Na ミスト濃度は増加するが、それと平衡な蒸気濃度は低下し、凝縮量も減少するためと考えられている。さらに壁面温度が低下した場合には、凝縮ではなく熱泳動により付着するものと考えられている。

#### (4) NACOWA Experiments on LMFBR Cover Gas Aerosols, Heat Transfer, and Fission Product Enrichment

##### ①概要

EPR（設計 Na 温度 545°C、しゃへいプラグ下面温度 120°C、カバーガス高さ 850mm を想定）の設計用データを得るために、直径 600mm、高さ 1140mm の円筒容器によりプラグ下面温度を 100°C から 450°C とした 15 ケースのカバーガス試験が実施された。

##### ②実験結果

以下に主な実験結果を示す。

- ・Na ミスト濃度

Na ミスト濃度はカバーガスを吸引捕獲して測定し、Na ミスト発生の有無は目視観察で実施した。プラグ下面温度を 120°C 一定とし、Na 液面温度を変化させると、Na 温度が約 350°C に達した時点から Na ミストが発生した。プラグ下面温度が 420°C で、Na 液面温度が 545°C の時の Na ミスト濃度は  $36\text{g}/\text{m}^3$ 、Na 液面温度が 500°C の時のミスト濃度は  $5\text{g}/\text{m}^3$  であった。カバーガス高さによるミスト濃度の相違を Table A.3 に示す。

・粒径分布

粒径分布は対数正規分布であり、平均粒径は壁面温度が 120°C から 150°C の範囲に対して、Na 温度が 400°C では  $4 \mu\text{m}$ 、500°C では  $8 \mu\text{m}$  であった。

・放射伝熱

Na 付着のない面での放射率は 0.4 であった。Na 液面での放射率は 300°C 時には 0.05、500°C 時には 0.03 と測定された。実験結果から計算により求められた側壁の放射率は 0.14、プラグ下面は 0.25 と推定された。また、エアロゾルの影響については、エアロゾルを考慮しない場合には Na 液面からプラグ下面への放射伝热量は、全伝熱量の 24.5% であるが、エアロゾルを考慮した場合には放射伝热量が 20% にまで低下する可能性がある。

・軸方向温度分布

カバーガス高さを 12.5cm と 33cm の場合の軸方向温度分布を Fig. A. 1 に合わせて示す。カバーガス高さが 33cm の場合にはプラグ下面で温度勾配が急峻であり、中央付近の温度は Na 液面温度とプラグ下面温度のほぼ平均値である。

・プラグへの熱輸送

本体系の熱輸送形態は対流、放射および凝縮であり、容器の熱伝導による輸送は極めて小さい。

・プラグへの Na 付着

Na 付着はプラグ下面温度が 120°C の時に均一な膜状付着で、液膜厚さは  $6 \mu\text{m}$  付着量は  $6\text{g}/\text{m}^2$  であった。ただし、ペネットレーション近傍では滴状に付着しており、その液滴径は直径 1 から 10mm、全付着量は約  $50\text{g}/\text{m}^2$  であった。

・ガスによるミスト濃度の相違

カバーガスに He を用いた試験では、Na ミストの濃度は Ar を用いた試験の 1/3 から 1/2 と推定される。

## (5) 下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流

### ①概要

下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流での周方向自然対流が生じる臨界 Ra 数は上下面ビオー数が無限大（上下の流体温度が上下の構造温度に同じ）の場合、

$$Ra_c = \min \left\{ 684 H_2^{3.067} R^b, 1.02 (\pi H_2)^4 \right\} \text{ で整理されることを示した。}$$

$$\text{ここに } b = -3.9 \times 10^{-9} H_2^3 + 3.97 \times 10^{-6} H_2^2 - 1.44 \times 10^{-6} H_2 - 7.76 \times 10^{-1}$$

$$R = \lambda L / \lambda_v \Delta l$$

$$H_2 = L / \delta.$$

ただし、 $H_1 = L / \pi D \leq 2$ 、 $100 \leq H_2 \leq 400$ 、 $R \leq 10$ 。

各変数は

$L$ :アニュラス部高さ  
 $D$ :環状空間中央直徑  
 $\delta$ :ギャップ幅  
 $\lambda$ :流体の熱伝導率  
 $\lambda_w$ :壁の熱伝導率  
 $\Delta t$ :壁厚

である。

Table A.1 Test Condition and Sodium Mist density in Cover Gas (Ref.(3))

ミスト濃度	希薄	濃厚
Na 液面温度 (°C)	250	530-580
プラグ下面温度 (°C)	100-140	210-480
ガス	Ar, He	Ar

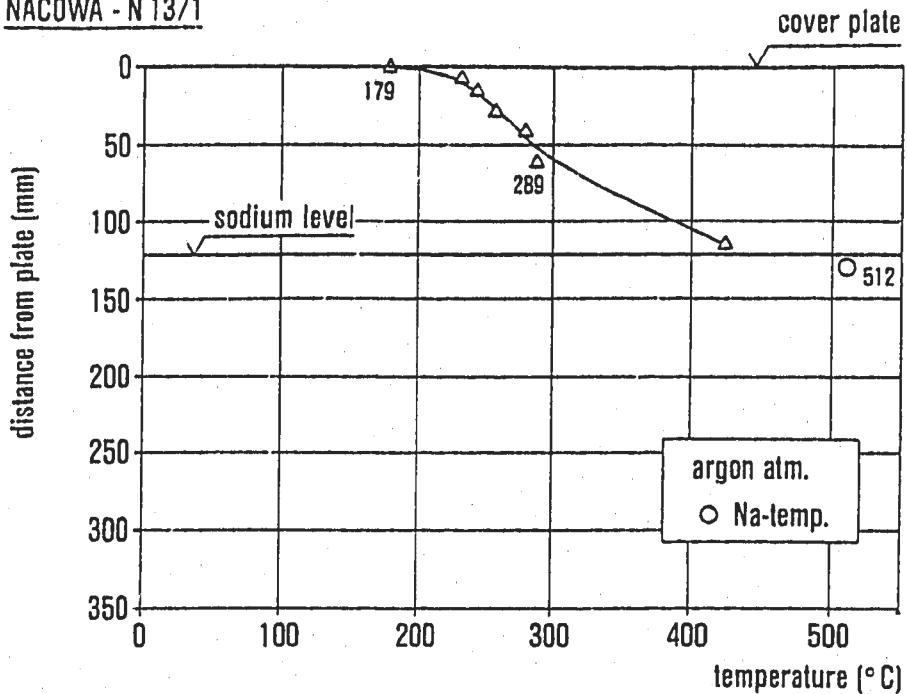
Table A.2 Ratio of Radiation and Convective Heat Transfer (Ref.(4))

カバーガス高さ (m)	壁面温度 (°C)	全熱流束 (W/m <sup>2</sup> )	輻射伝熱量の 比率	対流熱輸送量の 比率
0.5	450	198.3	52.7	47.3
	350	627.7	35.5	64.5
	300	817.9	27.3	72.7
	250	987.3	18.8	81.2
1.0	450	197.6	52.9	47.1
	350	619.1	35.1	64.9
	300	798.5	26.1	73.9
	250	967.4	17.6	82.4
1.5	450	197.1	53.0	47.0
	350	613.3	34.7	65.3
	300	787.3	25.4	74.6
	250	956.4	17.1	82.9

Table A.3 Sodium Mist Density for Height of Cover Gas and Sodium Temperature (Ref.(6))

カバーガス高さ (cm)	Na 温度 (°C)	プラグ下面温度 (°C)	ミスト濃度 (g/m <sup>3</sup> )
12.5	369	112	4.0
12.5	530	153	30.1
33	541	145	24.0

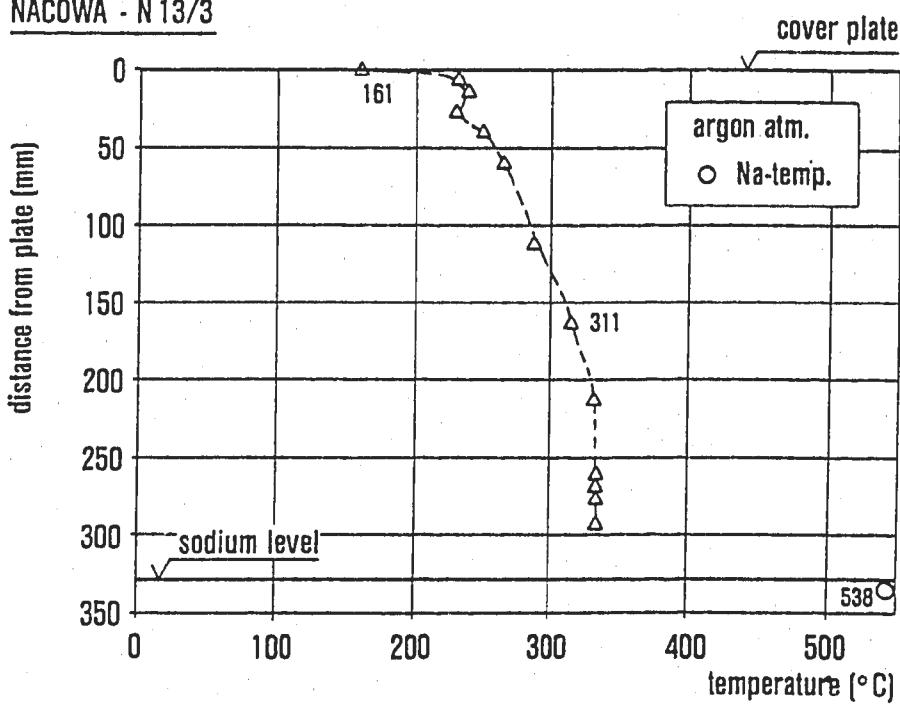
NACOWA - N 13/1



KfK

Fig. 9.1 Temperature profile across cover gas, argon, 12.5 cm.

NACOWA - N 13/3



KfK

Fig. 9.2 Temperature profile across cover gas, argon, 33 cm.

Fig. A.1 Axial Temperature Distribution of Cover Gas (Ref.(6))

## 付録2 解析用入力データ

本解析に使用した汎用非線形構造解析システムコード「FINAS」と多次元熱流動解析コード「AQUA」用の大型計算機（VP-2600）上の入力データ名を以下に示す

### 1. 汎用非線形構造解析システムコード「FINAS」

#### (1) 解析ケース F-1

POD1D12.FINAS.DATA(PNC01)

#### (2) 解析ケース F-2

POD1D12.FINAS2.DATA(PNC11)

#### (3) FLUSH 用解析データ

POD1D12.CRC.DATA(FLUSH)

### 2. 多次元熱流動解析コード「AQUA」

#### (1) イニシャルラン用

POD1D12.PLUG3.DATA(N11)

#### (2) リスタート用

POD1D12.PLUG3.DATA(C11)