

JAERI-M
93-215

高温工学試験研究炉のスタンドパイプ廻りの
冷却用空気流に関する検討

1993年10月

竹田 武司・國富 一彦・石原 啓介*

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division,
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　株原子力資料サービス

高温工学試験研究炉のスタンドパイプ廻りの冷却用空気流に関する検討

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

竹田 武司・國富 一彦・石原 啓介*

(1993年10月1日受理)

高温工学試験研究炉（HTTR）の制御棒スタンドパイプの内部には、クラッチ及びモータ機構により構成される制御棒駆動装置（CRDM）が収納されている。CRDMはヘリウムガス雰囲気であり、ヘリウムガス温度が60°Cを超える場合には、絶縁材の耐熱性が損なわれ、CRDMが正常に機能しないことが考えられる。そのため、縮尺1/2で全スタンドパイプを模擬し、スタンドパイプ廻りの空気流を表面タフト法により可視化した試験を行い、CRDMの冷却のために最適な空気の吹出口、吸込口の条件を求めた。試験の結果、全スタンドパイプを取り囲む1対のリングダクトに設ける空気の吹出口、吸込口は30°間隔で各々5箇所に選定した。さらに、解析コード'STREAM'及び'SSPHEAT'を用いて、本条件下におけるCRDM廻りのヘリウムガス温度分布を求めた。解析の結果、何れの制御棒スタンドパイプにおいてもCRDM廻りのヘリウムガス温度は、その制限温度である60°Cを満足した。

A Study on Cooling Air Flow around Stand-pipes for
the High Temperature Engineering Test Reactor

Takeshi TAKEDA, Kazuhiko KUNITOMI and Keisuke ISHIHARA*

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 1, 1993)

Control Rod Drive Mechanism (CRDM) is contained in control rod stand-pipes for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR). The CRDM, which consists of clutch and motor mechanism, is exposed to helium gas. If the temperature of helium gas around the CRDM exceeds 60 °C, the CRDM would malfunction because of the low heat resistance of the electrical insulator.

In experiments with an one-half scale model of all stand-pipes, the air flow around the stand-pipes was visualized by the surface tuft method and optimized condition for air flow inlet and outlet was chosen from a viewpoint of cooling performance for the CRDM. Experimental results show that a set of five air inlet and outlet at thirty degree intervals on a pair of ring-ducts surrounding the stand-pipes is selected as optimized condition.

In addition, the temperature distribution of helium gas around the CRDM was analyzed by two computational fluid dynamic codes 'STREAM' and 'SSPHEAT' under this condition. Analytical results show that the temperature of helium gas around the CRDM in any control rod stand-pipe is below the limit of 60 °C.

Keywords: Air Flow, Stand-pipe, Control Rod, HTTR, Surface Tuft Method, 'STREAM', 'SSPHEAT', Fluid Dynamic

* CRC Research Institute, Inc.

目 次

1. 緒 言	1
2. S/P室の構成	2
3. 試験条件	2
3.1 試験装置	2
3.2 試験方法	3
3.3 試験ケース	3
3.4 風速計測値の評価	3
4. 試験結果	4
4.1 吹出口、吸込口の位置の効果	4
4.2 吹き出しノズルの効果	4
5. 解析条件	5
5.1 基礎式	5
5.2 解析の流れ	6
5.3 解析モデル及び境界条件	6
5.4 S/P外表面熱伝達率の設定	8
6. 解析結果	8
6.1 解析モデルの検証	8
6.2 CRDM廻りのヘリウムガス温度	9
6.3 S/P廻りの空気温度に及ぼす自然対流の効果	9
6.4 S/P室内の乱流エネルギー分布	9
7. 結 言	10
謝 辞	11
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Configuration in Stand-pipe Room	2
3. Experimental Conditions	2
3.1 Experimental Apparatus	2
3.2 Experimental Procedure	3
3.3 Experimental Case	3
3.4 Evaluation of Measured Flow Velocity	3
4. Experimental Results	4
4.1 Effect of Positions of Air Flow Inlet and Outlet	4
4.2 Effect of Nozzle Attached to Air Flow Inlet	4
5. Analytical Conditions	5
5.1 Governing Equation	5
5.2 Analytical Procedure	6
5.3 Analytical Model and Boundary Conditions	6
5.4 Condition of Heat Transfer Coefficient on Outer Surface of Stand-pipe	8
6. Analytical Results	8
6.1 Validation of Analytical Model	8
6.2 Temperature of Helium Gas around CRDM	9
6.3 Natural Convection Effect on Temperature Distribution of Air around Stand-pipe	9
6.4 Turbulent Kinetic Energy Distribution of Air in Stand-pipe Room	9
7. Conclusions	10
Acknowledgements	11
References	11

【記号表】

- C_1 ; $k - \varepsilon$ 乱流モデルの経験定数 ($= 1.44$)
 C_2 ; $k - \varepsilon$ 乱流モデルの経験定数 ($= 1.92$)
 C_3 ; $k - \varepsilon$ 乱流モデルの経験定数 ($= 0$)
 C_H ; 热伝達率の補正係数 ($= 0.83$)
 C_t ; $k - \varepsilon$ 乱流モデルの経験定数 ($= 0.09$)
 C_p ; 定圧比熱
 d ; S/P 直径
 d_* ; 相当直径 ($= 458$ mm)
 E_i ; 度数ヒストグラムの i 番目のクラスに入る期待度数
 f_i ; 度数ヒストグラムの i 番目のクラスに入る観測度数
 g_i ; 加速度
 K ; 計測値のクラス分割数 ($= 24$)
 k ; 乱流エネルギー
 L ; 吹出口の等価直径
 Nu ; d_* を代表長としたヌセルト数 ($= \alpha d_* / \lambda$)
 n ; Grimson の実験式の指数 ($= 0.56$)
 P ; 流体圧力
 Pr ; プラントル数
 Q ; 単位体積当たりの発熱量
 Re ; d_* を代表長としたレイノルズ数 ($= v d_* / \nu$)
 R_f ; フラックス・リチャードソン数
 T ; 流体温度
 T_0 ; 流体基準温度
 t ; 時間
 u ; 吹出口の風速
 u_i ; x_i 方向の風速
 x_i ; 位置座標
 x_\perp ; 流れと直角方向のピッチ ($= 362\sqrt{3}$ mm)
 x_t ; 流れ方向のピッチ ($= 724$ mm)

α ; 热伝達率 β ; 体膨張率 ε ; 乱流消失率 κ ; Grimsonの実験式の定数 ($=0.54$) λ ; 热伝導率 ν ; 動粘性係数 ν_t ; 渦動粘性係数 ρ ; 流体密度 σ ; 標準偏差 σ_k ; k の拡散についての乱流プラントル数 ($=1.0$) σ_ε ; ε の拡散についての乱流プラントル数 ($=1.3$) v ; N-1のS/P廻りの風速 χ^2 ; χ^2 値

1. 緒 言

高温工学試験研究炉（以下、HTTRと称す。）⁽¹⁾は、高温ガス炉の技術的基盤の確立と、高温に関する先端的基礎研究を行うことを目的として、日本原子力研究所・大洗研究所に建設中である。HTTRの圧力容器上部に取り付けられる計31本のスタンドパイプ（以下、S/Pと称す。）は、制御棒駆動装置（以下、CRDMと称す。）を収納する16本の制御棒S/P等で構成される。Fig.1に示すように、円柱形状のS/P室にはS/Pの他、地震時のS/Pの振動を抑制する防振プレート、空気の吹出口と吸込口を設ける1対のリングダクト等が収納される。リングダクトには、通常運転時において原子炉格納容器内の空気を循環冷却する送風機から、ダクトを通して55 m³/minの空気が配分される。送風機は冷却コイルを内蔵し、冷却コイルの使用温度が5°Cであることから、リングダクトからの空気の吹き出し温度は24°Cになる。CRDMは、制御棒S/P内に設置され、発熱量がそれぞれ100W、50Wであるクラッチとモータ機構により構成する。CRDMの絶縁材としては、耐熱性を最も上げたH種^(*)である合成樹脂エナメル線（ポリイミド線、ポリエステルイミド線）を用いる。H種の最高使用温度は180°Cであることから、CRDMの温度が180°Cを超える場合には、絶縁材の耐熱性が損なわれ、CRDMが正常に機能しないことが考えられる。そこで、制御棒S/Pの廻りを流れる冷却用空気流の流動特性を明らかにし、CRDMの温度を知り、その健全性を確認する必要がある。

縮尺1/2で全S/Pを模擬したモデル試験は、CRDMの冷却のために最適な空気の吹出口、吸込口を選定するために行った。試験では、吹出口を通過する空気のレイノルズ数を実機と等価にするために風速と風量をそれぞれ実機の2倍と1/2倍に合わせた。空気流の観測は、表面タフト法⁽²⁾による可視化と熱線プローブを用いた多点計測によった。

さらに、解析コードSTREAM(Ver.2.3)⁽³⁾⁽⁴⁾及びSSPHEAT⁽⁵⁾を用いて、試験により得られた最適吹き出し、吸い込み条件下におけるCRDM廻りのヘリウムガス温度を求めた。ここで、CRDM廻りのヘリウムガス温度が60°Cの場合、CRDMの温度は180°C以下になることを別途 NASTRANコード⁽⁶⁾を用いたクラッチ廻りの温度解析により確認している⁽⁷⁾。したがって、CRDMを健全に保つためには、CRDM廻りのヘリウムガス温度が60°C以下であることを確認する必要がある。CRDM廻りのヘリウムガス温度は、STRTEAMコードを用いて得られたS/P室内の最高温度領域の空気温度分布を境界条件として、SSPHEATコードにより求めた。また、STRTEAMコードを用いた解析により、空気の鉛直方向温度差により生じる自然対流が、S/P廻りの空気温度に及ぼす効果も明らかにした。

(*) JIS C 4003 (1977) 「電気機器絶縁の種類」に従う。

2. S／P 室 の 構 成

S／P室は、内径 6600 mm, 高さ 3190 mmの円柱形状であり、上面は上部生体遮蔽体、側面は上部リング遮蔽体、下面是1次上部遮蔽体で囲まれている。本S／P室は、リングダクト、S／P、防振プレート、防振プレート支持梁から構成される (Fig.1参照)。Fig.2に示すように、350 mm×H300mmのリングダクトは、配置スペース上の制約から水平方向角度300°～0°～60°及び120°～180°～240°に、側面は上部リング遮蔽体、下面是1次上部遮蔽体に接するように設置する。N-1からN-16が制御棒用S／P、N-17～N-19,N-23,N-25が照射試験用S／P、N-20からN-22 が中性子検出用S／P、N-24、N-26が炉体計装用S／Pである。S／Pの頂部は、S／P固定装置で拘束することで、万一S／Pが破断した時にCRDMに連結した制御棒の浮き上がりを抑制する。また、N-17からN-19の照射試験用S／P、N-20からN-22の中性子検出用S／P、N-24、N-26の炉体計装用S／Pは、他のS／Pよりも短く、N-17～N-22,N-24,N-26のS／P固定装置と防振プレートの間に隙間がある。中でも、N-20からN-22のS／P固定装置と防振プレートの隙間は、他のS／Pとの間に生じる隙間より大きい。Table 1 に示す防振プレート上の貫通孔径とS／P (あるいはS／P固定装置) の直径との差が隙間の大きさになる。制御棒S／Pに対する固定装置は、2473mmからS／P室上面3190mmまで取り付けられている。防振プレートは、1890mmから1935mmの高さにあり、地震時のS／Pの振動を抑制すると共にS／P 室内の冷却用空気流の仕切り板になる。また、防振プレート支持梁を介して、S／P室側面 (上部リング遮蔽体) に支持される。

3. 試 験 条 件

3.1 試験装置

Fig.3 に示すように、S／P室を縮尺1／2で模擬した試験体は、全S／P、防振プレート、リングダクトから構成する。防振プレート支持梁については、S／P室側面付近の流れに対する抵抗が無視できるためモデル化せず、防振プレートとの隙間が生じないS／Pにより防振プレートを支持する。Fig.4, Fig.5に、試験体及び試験装置の全体写真をそれぞれ示す。防振プレートより鉛直上方のS／Pについては、モデル化しない。吹出口の条件として、各吹出口の風量は均一にした。吹き出し風量は、リングダクトの開口部面積と開口部中央近傍に設置した熱線プローブによる風速計測値を乗じることにより求めた。また、CRDM の冷却のためにS／P室の中央に位置する制御棒S／Pに向かせて空気を吹き出させた。空気は、送風機によりダクトを通してS／P室内に循環させ、

2. S／P 室 の 構 成

S／P室は、内径 6600 mm, 高さ 3190 mmの円柱形状であり、上面は上部生体遮蔽体、側面は上部リング遮蔽体、下面是1次上部遮蔽体で囲まれている。本S／P室は、リングダクト、S／P、防振プレート、防振プレート支持梁から構成される (Fig.1参照)。Fig.2に示すように、350 mm×H300mmのリングダクトは、配置スペース上の制約から水平方向角度300°～0°～60°及び120°～180°～240°に、側面は上部リング遮蔽体、下面是1次上部遮蔽体に接するように設置する。N-1からN-16が制御棒用S／P、N-17～N-19,N-23,N-25が照射試験用S／P、N-20からN-22 が中性子検出用S／P、N-24、N-26が炉体計装用S／Pである。S／Pの頂部は、S／P固定装置で拘束することで、万一S／Pが破断した時にCRDMに連結した制御棒の浮き上がりを抑制する。また、N-17からN-19の照射試験用S／P、N-20からN-22の中性子検出用S／P、N-24、N-26の炉体計装用S／Pは、他のS／Pよりも短く、N-17～N-22,N-24,N-26のS／P固定装置と防振プレートの間に隙間がある。中でも、N-20からN-22のS／P固定装置と防振プレートの隙間は、他のS／Pとの間に生じる隙間より大きい。Table 1 に示す防振プレート上の貫通孔径とS／P (あるいはS／P固定装置) の直径との差が隙間の大きさになる。制御棒S／Pに対する固定装置は、2473mmからS／P室上面3190mmまで取り付けられている。防振プレートは、1890mmから1935mmの高さにあり、地震時のS／Pの振動を抑制すると共にS／P 室内の冷却用空気流の仕切り板になる。また、防振プレート支持梁を介して、S／P室側面 (上部リング遮蔽体) に支持される。

3. 試 験 条 件

3.1 試験装置

Fig.3 に示すように、S／P室を縮尺1／2で模擬した試験体は、全S／P、防振プレート、リングダクトから構成する。防振プレート支持梁については、S／P室側面付近の流れに対する抵抗が無視できるためモデル化せず、防振プレートとの隙間が生じないS／Pにより防振プレートを支持する。Fig.4, Fig.5に、試験体及び試験装置の全体写真をそれぞれ示す。防振プレートより鉛直上方のS／Pについては、モデル化しない。吹出口の条件として、各吹出口の風量は均一にした。吹き出し風量は、リングダクトの開口部面積と開口部中央近傍に設置した熱線プローブによる風速計測値を乗じることにより求めた。また、CRDM の冷却のためにS／P室の中央に位置する制御棒S／Pに向かせて空気を吹き出させた。空気は、送風機によりダクトを通してS／P室内に循環させ、

その風量は手動弁により調節し、弁の上流側に設置したピトー式風量計により計測する。送風機の容量は $28 \text{ m}^3/\text{min}$ であり、静圧は 150 mmAq である。風量計の計測精度は2%以下である。

3.2 試験方法

タフトを計31本の全S/P表面に 90° 間隔で4方向に、また、 80mm , 290mm , 500mm (実機 160mm , 580mm , 1000mm 相当)の高さに取り付け、スケッチ及び試験体上面と側面からのビデオ撮影により記録する。ビデオ撮影時には、タフトを見易くかつ撮影し易くするための照明装置を設け、試験体の周囲には外部からの光の進入を防ぐために暗幕を張る。試験体の風速は、床パネルの挿入口より、多点式風速計に接続した熱線プローブを差し込んで計測する(Fig.3参照)。Fig.6に示すように、計測データは、風速計測センサーを経て、多点式風速計本体のコントローラに入力され、9インチCRTに表示される。風速は、S/P室中央のN-1のS/P廻りを重点的に5分間、5秒間隔で初期状態を含めて計61回計測する。試験手順をTable 2に示す。

3.3 試験ケース

1対のリングダクトに設ける空気の吹出口、吸込口の位置、ノズルの有無をパラメータとしてケーススタディを行った。試験ケースは、Table 3に示す通り3ケースである。試験ケース1は、Fig.7に示すように空気の吹き出しを 60° 間隔でA, C, Eの3箇所、空気の吸い込みを 60° 間隔でF, H, Jの3箇所で行うケースである。試験ケース2は、Fig.8に示すように空気の吹き出しを 30° 間隔でA, B, C, D, Eの5箇所、空気の吸い込みを 30° 間隔でF, G, H, I, Jの5箇所で行うケースである。試験ケース1と2は、空気の吹き出す向きをリングダクトの開口面積により調整したケースである。一方、試験ケース3は、Fig.9に示すように空気の吹出口のみにノズルを取り付け、ノズルの開口面積の絞り抵抗を大きくして風速を抑えるケースである。空気の吹き出し、吸い込み位置は、試験ケース2の方が試験ケース1に比べて流れの淀み領域を少なく抑えることができたことから、試験ケース2と同じ 30° 間隔で各々5箇所にした(4.1節参照)。

3.4 風速計測値の評価

風速の計測は、無指向性の熱線プローブを鉛直上方に立てて行っている。また、計測値が正規分布の場合、式(1)⁽⁸⁾から算出される χ^2 値は自由度K-1(K; 計測値のクラス分割数)の χ^2 分布に従うことがわかっている。そこで、計61回計測した風速値の正規性を 0.25σ (σ ; 標準偏差)の幅で24個にクラス分割し、自由度23の χ^2 分布から有意水準5%として検定した。

例として、試験ケース3における、N-1の制御棒S/P廻りの 750mm (実機 1500mm 相当)の高さの風速計測値に対する検定結果を示す。Fig.10は、時系列風速値と時間平均風速の差として示し

た風速変動である。また、Fig.11～Fig.14は、それぞれ計測点a～d (Fig.2 参照) における度数ヒストグラム及び累積度数折線である。計測点a～dにおける χ^2 値は、それぞれ12.5, 8.9, 17.5, 26.4となり、何れも自由度23の χ^2 分布の5%点である35.2を超えないことがわかった。したがって、N-1 の制御棒S/P廻りの風速のばらつきは、正規分布に従っている。それ故に、熱線プローブの計測精度は高く、風速計測値は時間平均値で評価する。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{K} \frac{(f_i - E_i)^2}{E_i} \quad (1)$$

4. 試験結果

4.1 吹出口、吸込口の位置の効果

リングダクトの開口面積を均一にした場合、リングダクトへの空気の流入口の中心が 157° であることから、Fig.15に示すように吹出口の法線方向に対して偏角した方向の速度成分を有する空気が吹き出す。したがって、空気をS/P室の中央に位置する制御棒S/Pに向けて吹き出させるためには、リングダクトの開口面積を絞る必要がある。Table 4, Table 5及びTable 6 に、試験ケース1, 2及び3の吹出口の開口面積、風速計測値、換算風量についてそれぞれ示す。その結果、試験ケース1と2において、風速の増加及び不均一化が生じた。つぎに、Fig.16, Fig.17及びFig.18に、試験ケース1, 2及び3の制御棒S/Pに取り付けたタフトのなびかない領域（流れの淀み領域）をそれぞれ示す。図中の●印はタフトのなびかない箇所を示し、流れの淀み領域を破線で囲んだ。その結果、500mm (実機1000mm相当) の高さでは、試験ケース1において、N-3, N-14, N-9, N-2のS/P間, N-5, N-12のS/P間に生じた流れの淀み領域が、試験ケース2ではN-3, N-14のS/P間, N-5, N-6, N-12のS/P間に抑えることができた。それ故に、制御棒S/P廻りの冷却を確実に行うための流れを確保する上で、1対のリングダクトに設ける最適な空気の吹出口、吸込口は30° 間隔で各々 5 箇所であることがわかった。

4.2 吹き出しノズルの効果

リングダクトの開口面積を絞ることから生じた風速の増加及び不均一化は、ノズルを取り付け、強制的に空気の吹き出す向きを設定することにより補うことができた (Table 5, Table 6参照)。つぎに、流れの淀み領域を試験ケース2と3について比較した。その結果、500mm (実機1000 mm相当) の高さでは、試験ケース2において、N-3, N-14 のS/P間, N-5, N-6, N-12のS/P間に生じた流れの淀み領域が試験ケース3ではN-3とN-5のS/P廻りのみに抑えることができた (Fig.17,

た風速変動である。また、Fig.11～Fig.14は、それぞれ計測点a～d (Fig.2 参照) における度数ヒストグラム及び累積度数折線である。計測点a～dにおける χ^2 値は、それぞれ12.5, 8.9, 17.5, 26.4となり、何れも自由度23の χ^2 分布の5%点である35.2を超えないことがわかった。したがって、N-1 の制御棒S/P廻りの風速のばらつきは、正規分布に従っている。それ故に、熱線プローブの計測精度は高く、風速計測値は時間平均値で評価する。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{K} \frac{(f_i - E_i)^2}{E_i} \quad (1)$$

4. 試験結果

4.1 吹出口、吸込口の位置の効果

リングダクトの開口面積を均一にした場合、リングダクトへの空気の流入口の中心が 157° であることから、Fig.15に示すように吹出口の法線方向に対して偏角した方向の速度成分を有する空気が吹き出す。したがって、空気をS/P室の中央に位置する制御棒S/Pに向けて吹き出させるためには、リングダクトの開口面積を絞る必要がある。Table 4, Table 5及びTable 6 に、試験ケース1, 2及び3の吹出口の開口面積、風速計測値、換算風量についてそれぞれ示す。その結果、試験ケース1と2において、風速の増加及び不均一化が生じた。つぎに、Fig.16, Fig.17及びFig.18に、試験ケース1, 2及び3の制御棒S/Pに取り付けたタフトのなびかない領域（流れの淀み領域）をそれぞれ示す。図中の●印はタフトのなびかない箇所を示し、流れの淀み領域を破線で囲んだ。その結果、500mm (実機1000mm相当) の高さでは、試験ケース1において、N-3, N-14, N-9, N-2のS/P間, N-5, N-12のS/P間に生じた流れの淀み領域が、試験ケース2ではN-3, N-14のS/P間, N-5, N-6, N-12のS/P間に抑えることができた。それ故に、制御棒S/P廻りの冷却を確実に行うための流れを確保する上で、1対のリングダクトに設ける最適な空気の吹出口、吸込口は30° 間隔で各々 5 箇所であることがわかった。

4.2 吹き出しノズルの効果

リングダクトの開口面積を絞ることから生じた風速の増加及び不均一化は、ノズルを取り付け、強制的に空気の吹き出す向きを設定することにより補うことができた (Table 5, Table 6参照)。つぎに、流れの淀み領域を試験ケース2と3について比較した。その結果、500mm (実機1000 mm相当) の高さでは、試験ケース2において、N-3, N-14 のS/P間, N-5, N-6, N-12のS/P間に生じた流れの淀み領域が試験ケース3ではN-3とN-5のS/P廻りのみに抑えることができた (Fig.17,

Fig.18参照)。それ故に、1対のリングダクトに設ける空気の吹出口、吸込口は30°間隔で各々5箇所、さらに、吹出口にノズルを取り付けることが最適であることがわかった。

5. 解析条件

5.1 基礎式

(1) STREAMコード

基礎式は、質量の保存式、Navier-Stokes方程式(以下、N-S方程式と称す)、エネルギーの保存式から構成される。また、乱流状態における熱流体挙動を解析するため、乱流エネルギー・乱流消失率の式($k-\varepsilon$ 方程式)⁽⁹⁾を組み込み、N-S方程式に連成させる。Boussinesq近似により、鉛直方向温度変化はN-S方程式の重力項にのみ作用するものと見なす。直交座標系を用いた基礎式を以下に示す。渦粘性係数 ν_t は、乱流エネルギー k と乱流消失率 ε により定義している。 G_s と G_T の項は、それぞれせん断力及び浮力による乱流エネルギーの発生を表す項であり、両者の比をフックス・リチャードソン数 R_f として浮力の効果を調節している。

(a) 質量の保存式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

(b) N-S方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - g_i \beta (T - T_0) \quad (3)$$

(c) エネルギーの保存式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4)$$

(d) $k-\varepsilon$ 方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_s + G_T - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$G_s = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$R_f = - \frac{G_T}{G_s + G_T} \quad (9)$$

$$\nu_t = C_\nu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

Fig.18参照)。それ故に、1対のリングダクトに設ける空気の吹出口、吸込口は30°間隔で各々5箇所、さらに、吹出口にノズルを取り付けることが最適であることがわかった。

5. 解析条件

5.1 基礎式

(1) STREAMコード

基礎式は、質量の保存式、Navier-Stokes方程式（以下、N-S方程式と称す）、エネルギーの保存式から構成される。また、乱流状態における熱流体挙動を解析するため、乱流エネルギー・乱流消失率の式 ($k - \varepsilon$ 方程式)⁽⁹⁾ を組み込み、N-S方程式に連成させる。Boussinesq近似により、鉛直方向温度変化はN-S方程式の重力項にのみ作用するものと見なす。直交座標系を用いた基礎式を以下に示す。渦粘性係数 ν_t は、乱流エネルギー k と乱流消失率 ε により定義している。 G_s と G_T の項は、それぞれせん断力及び浮力による乱流エネルギーの発生を表す項であり、両者の比をフラックス・リチャードソン数 R_f として浮力の効果を調節している。

(a) 質量の保存式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

(b) N-S方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = - \frac{\partial P}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - g_i \beta (T - T_0) \quad (3)$$

(c) エネルギーの保存式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4)$$

(d) $k - \varepsilon$ 方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_s + G_T - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$G_s = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$R_f = - \frac{G_T}{G_s + G_T} \quad (9)$$

$$\nu_t = C_t \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

(2) SSPHEATコード

流体の流れ方向の温度変化、熱輻射、内部発熱を考慮した解析コードであり、基礎式は、 Fourier の熱伝導法則を適用したエネルギー保存式である。直交座標系を用いた基礎式を式(11)に示す。解析手法としては、解析対象を有限な要素に分割し、要素内の温度分布をガラーキン法により定式化する。 Ω は、単位体積当たりの発熱量である。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial X_i} + \frac{\partial \Omega}{\partial t} \quad (11)$$

5.2 解析の流れ

SSPHEATコードとSTREAMコードによる解析の流れをFig.19に示す。手順①では、SSPHEATコードを用いて、1本の制御棒S/Pについてその外表面温度を求める⁽¹⁰⁾。解析条件として、制御棒S/P廻りの空気温度には、吹出口温度24°Cと、S/P室内の系統風量55 m³/minから推定した吸込口温度36°Cの算術平均温度30°Cを一様に与える。手順②では、STREAMコードを用いて、全S/P廻りの空気温度を求める。解析条件としては、手順①で求めた制御棒S/Pの外表面温度を全S/P一様に与える。手順③では、再度SSPHEATコードを用いて、制御棒S/Pの内部にあるCRDM廻りのヘリウムガス温度を求める。解析条件としては、手順②で求めたS/P室内の最高温度領域の鉛直方向空気温度分布を与える。

5.3 解析モデル及び境界条件

(1) STREAMコード（手順②）

試験モデルと同様、全S/P、防振プレート、リングダクトをモデル化する。Fig.20, Fig.21に、S/P室の水平方向断面とその解析モデルをそれぞれ示す。座標系は、X-Y-Zの3次元直交座標系である。実機では円柱形状であるS/Pを、体積を等価にした直方体でモデル化する。また、S/Pと防振プレートの隙間面積及びS/PとS/P間の流路面積は実機と等価にする。メッシュ分割の粗密は、S/P廻りの空気の温度分布及び速度分布を詳細に知るために、S/PとS/P間の空気流路に対して密にする(Fig.22参照)。

境界条件として、S/P室の全内表面の温度及び熱伝達率を与える(Fig.23参照)。CRDMは、発熱体となるクラッチとモータ機構により構成し、S/P室中央の制御棒S/P内に収納されていることから、S/P室側面温度は、制御棒S/P廻りの空気温度と同じ30°Cを与えた。また、CRDMの高さが1270mmであること、制御棒S/Pの鉛直方向2473mmからS/P室上面まではS/P固定装置であることから、S/P室上面温度として、S/P室側面温度と同じ30°Cを与えた。さらに、S/P室下面温度には、前節の手順①で得た75°Cを与えた。

つぎに、解析コードにおける境界条件数の制約から、手順①で得たS/P外表面温度の鉛直方向分布を全て与えることはできない。そこで、制御棒S/Pの外表面温度として、その温度勾配からS/Pを鉛直方向に3分割 (S/P室下面～476.6mm, 476.6mm～1006mm, 1006mm～2473mm) し、S/Pの表面積で平均化した64.3°C, 54.1°C, 49.7°Cをそれぞれ与えた。一方、制御棒S/P以外のS/Pには発熱は無いが、S/P廻りの空気温度を高めに評価するために、手順①で得たS/P外表面温度をS/Pの表面積で平均化した53.4°Cを鉛直方向一様に与えた。制御棒S/Pの固定装置のあるS/P鉛直方向 2473 mmからS/P室上面までと、防振プレートは断熱条件とする。S/P室の全内表面の熱伝達率は、S/P外表面熱伝達率 (5.4節参照) と同様に3.5 W/m²Kを与えた。

リングダクトの空気の吹出口、吸込口の境界条件としては、Table 7 の風速を与える (開口部の符号A～Jは、Fig.9 に従う)。流体と物体の接する面には、壁面での摩擦によるせん断応力が無い条件、すなわち、すべり壁の条件を用いる。リングダクトの各吹出口 (A～E) の乱流エネルギー k 及び乱流消失率 ϵ の初期値は、固体壁近傍で成り立つ壁法則に基づいた式(12)⁽¹¹⁾ 及び式(13) から、何れも0.8を一様に与えた。 u は吹出口の風速であり、 L は吹出口の等価直径である。

$$k=0.01u^2 \quad (12)$$

$$\epsilon=0.00016 \frac{u^3}{L} \quad (13)$$

(2) SSPHEATコード (手順①と③)

1本の制御棒S/P、S/P内部構造物 (クラッチ、モータ機構) 及び1次上部遮蔽体をモデル化する。座標系は、X-Zの2次元軸対称直交座標系である。伝熱機構としては、S/P内部構造物の発熱及び熱伝導、S/PとS/P廻りの空気との熱伝達、S/Pと1次上部遮蔽体の熱輻射を考慮している。手順①と③における境界条件を以下に示す。

(A) 手順①

S/P廻りの空気温度には、30°Cを一様に与える。S/P外表面熱伝達率には、3.5 W/m²Kを与えた。1次上部遮蔽体の下面温度は、S/P外表面温度を高めに評価するために60°Cを与えた。

(B) 手順③

S/P廻りの空気温度には、解析コードにおける境界条件数の制約から、手順②で求めたS/P室内の最高温度領域 (6.2 節参照) の鉛直方向空気温度分布を全て与えることはできない。そこで、その温度勾配からS/Pを鉛直方向に4分割 (S/P室下面～150mm, 150mm～742mm, 742mm～2025mm, 2025mm～2473mm) し、S/Pの表面積で平均化した 37°C, 36°C, 35°C, 32°Cをそれぞれ与えた。S/P外表面熱伝達率及び1次上部遮蔽体の下面温度は、手順①と同じ3.5W/m²K及び60°Cを与えた。

5.4 S/P外表面熱伝達率の設定

S/P室中央のS/P群は3段3列の千鳥配列である。よって、試験で得た1500mmの高さにおけるN-1の制御棒S/P廻りの風速 (Table 8参照) と、空気流に対して円管群の配列形状、寸法を考慮した実験式であるGrimsonの式(14)⁽¹²⁾からS/P外表面熱伝達率 α を設定する。風速は、レイノルズ数を実機と合わせたことから、計測値を1/2倍した。対象とするS/Pは、N-1のS/Pを中心N-9, N-10, N-12, N-13の計5本のS/Pである。本式で用いたパラメータは以下の通りである。Fig.24に示すように、流れ方向のピッチ x_t が724mm、流れと直角方向のピッチ x_L が $362\sqrt{3}$ mm、N-13のS/Pで代表させたS/P直径 d が460 mmであることから、代表長さとなる相当直径 d_e は式(15)により458 mmになる。また、10列未満の配列では、10列以上の配列の熱伝達率と比較して熱伝達率が減少するため、補正係数 C_H を乗じる。Table 9⁽¹²⁾から、千鳥配列3列の C_H は0.83となる。それ故に、S/P外表面熱伝達率には、3.5 W/m²Kを全S/P一様に与えた。ただし、STREAMコードを用いた解析(手順②)では、円柱形状であるS/Pを直方体で模擬していることから、S/PとS/P廻りの空気との熱流束を円柱形状のS/Pで得られる熱流束と等価にし、3.5 W/m²Kに($\sqrt{\pi}/2$)を乗じた補正值を与えた。

$$N_u \left(= \frac{\alpha d_e}{\lambda} \right) = C_H K R_e^n P_x^{0.33} \left(= C_H K \left(\frac{v d_e}{\nu} \right)^n P_x^{0.33} \right) \quad (14)$$

$$d_e = \frac{4(X_t - d) X_L}{\pi d} \quad (15)$$

6. 解析結果

6.1 解析モデルの検証

解析モデルの検証のために、S/P廻りの風速及び流れ方向について試験と解析結果の比較を行う。Table 8に、N-1の制御棒S/P廻りの1500mmの高さにおける風速について試験と解析結果の比較を示す(風速計測点a～dは、Fig.2 参照)。なお、試験結果は、レイノルズ数を実機と合わせたことから、計測値を1/2倍した。解析結果は、X方向、Y方向、Z方向の風速成分の2乗平均値で近似した。本表から、風速に対して何れの計測点においても試験結果の方が解析結果を上回ったが、両者の差は1 m/s以下であった。

つぎに、Fig.25, Fig.26にそれぞれ示す0°～180°軸上のS/Pに取り付けたタフトの挙動と解析結果から、N-17のS/P廻りの空気は、S/Pに沿って鉛直上方に流れ、続いて防振プレートに沿って水平(0°→180°方向)に流れ、最終的にS/P室下面への下降流となることがわかった。このような空気の循環により、渦がN-27のS/P付近に生じた。一方、流れに対してN-8のS/Pの後方に位置するN-1, N-11, N-15のS/P廻りの空気は、水平(180°→0°方向)に流れることが

5.4 S/P外表面熱伝達率の設定

S/P室中央のS/P群は3段3列の千鳥配列である。よって、試験で得た1500mmの高さにおけるN-1の制御棒S/P廻りの風速 (Table 8参照) と、空気流に対して円管群の配列形状、寸法を考慮した実験式であるGrimsonの式(14)⁽¹²⁾からS/P外表面熱伝達率 α を設定する。風速は、レイノルズ数を実機と合わせたことから、計測値を1/2倍した。対象とするS/Pは、N-1のS/Pを中心N-9, N-10, N-12, N-13の計5本のS/Pである。本式で用いたパラメータは以下の通りである。Fig.24に示すように、流れ方向のピッチ x_t が724mm、流れと直角方向のピッチ x_L が $362\sqrt{3}$ mm、N-13のS/Pで代表させたS/P直径 d が460 mmであることから、代表長さとなる相当直径 d_e は式(15)により458 mmになる。また、10列未満の配列では、10列以上の配列の熱伝達率と比較して熱伝達率が減少するため、補正係数 C_H を乗じる。Table 9⁽¹²⁾から、千鳥配列3列の C_H は0.83となる。それ故に、S/P外表面熱伝達率には、3.5 W/m²Kを全S/P一様に与えた。ただし、STREAMコードを用いた解析(手順②)では、円柱形状であるS/Pを直方体で模擬していることから、S/PとS/P廻りの空気との熱流束を円柱形状のS/Pで得られる熱流束と等価にし、3.5 W/m²Kに($\sqrt{\pi}/2$)を乗じた補正值を与えた。

$$N_u \left(= \frac{\alpha d_e}{\lambda} \right) = C_H K R_e^n P_r^{0.33} \left(= C_H K \left(\frac{v d_e}{\nu} \right)^n P_r^{0.33} \right) \quad (14)$$

$$d_e = \frac{4(X_t - d) X_L}{\pi d} \quad (15)$$

6. 解析結果

6.1 解析モデルの検証

解析モデルの検証のために、S/P廻りの風速及び流れ方向について試験と解析結果の比較を行う。Table 8に、N-1の制御棒S/P廻りの1500mmの高さにおける風速について試験と解析結果の比較を示す(風速計測点a～dは、Fig.2 参照)。なお、試験結果は、レイノルズ数を実機と合わせたことから、計測値を1/2倍した。解析結果は、X方向、Y方向、Z方向の風速成分の2乗平均値で近似した。本表から、風速に対して何れの計測点においても試験結果の方が解析結果を上回ったが、両者の差は1 m/s以下であった。

つぎに、Fig.25, Fig.26にそれぞれ示す0°～180°軸上のS/Pに取り付けたタフトの挙動と解析結果から、N-17のS/P廻りの空気は、S/Pに沿って鉛直上方に流れ、続いて防振プレートに沿って水平(0°→180°方向)に流れ、最終的にS/P室下面への下降流となることがわかった。このような空気の循環により、渦がN-27のS/P付近に生じた。一方、流れに対してN-8のS/Pの後方に位置するN-1, N-11, N-15のS/P廻りの空気は、水平(180°→0°方向)に流れることが

わかった。また、Fig.27, Fig.28 にそれぞれ示す $90^\circ - 270^\circ$ 軸上の S/P に取り付けたタフトの挙動と解析結果から、160mm, 580mm の高さにおいて、N-1 の S/P 方向に空気が流れ、一方、1000 mm の高さでは、流れが分散していることがわかった。それ故に、S/P 回りの空気の流れ方向について、試験と解析結果は良く一致している。

S/P 室中央に位置する N-1 の S/P 回りの風速に対して、試験と解析結果の差は 1m/s 以下であり、S/P 回りの空気の流れ方向については両者に良い一致が見られたことにより、本解析による S/P 回りの空気流の評価が妥当であることを確認できた。

6.2 CRDM 回りのヘリウムガス温度

S/P 室内の最高温度領域を明らかにし、本温度領域における CRDM 回りのヘリウムガス温度を求める。Fig.29 に、STREAM コードを用いた CRDM の高さ (1270mm) における S/P 回りの空気の等温線図を示す。Table 10 に、 34°C の等温線により囲まれた制御棒 S/P 回りの空気の温度を水平 90° 間隔 4 方向について示す。対象となる制御棒 S/P は、N-1, N-4, N-5, N-10, N-11, N-12, N-15 の計 7 本の S/P である。その結果、N-11 の制御棒 S/P の背面 (0° 方向) 回りが最高温度 34.8°C となり、S/P 室の中央にある N-1 の S/P 回りの温度 34.4°C より僅かに高くなった。

つぎに、N-11 の制御棒 S/P の背面回りの鉛直方向空気温度分布を境界条件として、SSPHEAT コードを用いて CRDM 回りのヘリウムガス温度を求めた。その結果、CRDM 回りのヘリウムガス温度は 57°C になった。本温度は、制御棒 S/P 外表面の熱伝達率に $3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ を与えて高めに評価した結果であり、CRDM 回りのヘリウムガス制限温度 60°C は満足した。それ故に、何れの制御棒 S/P においても CRDM 回りのヘリウムガス温度は 60°C 以下になり、CRDM の健全性を確認することができた。

6.3 S/P 回りの空気温度に及ぼす自然対流の効果

鉛直方向の空気温度差により生じる自然対流が、S/P 回りの空気温度に及ぼす効果を明らかにする。STREAM コードは自然対流と強制対流の共存対流下の評価に用いられることから、N-S 方程式(3) の重力項に対して体膨張率 β を零として自然対流を無視したケースを模擬した。S/P 室内の最高温度領域において自然対流を考慮したケースと無視したケースの鉛直方向空気温度分布を比較した結果、両者の温度差は最大 0.1°C であることから、自然対流による空気温度分布への影響は無視できる。それ故に、最高温度領域における S/P と S/P 回りの空気との熱伝達は、強制対流が支配的になることがわかった。

6.4 S/P 室内の乱流エネルギー分布

Fig.30 に、STREAM コードを用いた吹出口 (150mm), N-27 の S/P 付近に生じる渦の中心 (750 mm), CRDM (1270mm), 防振プレート近く (1800mm) の高さにおける S/P 室の $0^\circ - 180^\circ$ 軸の S

／P廻りの乱流エネルギー分布を示す。乱流エネルギーは、吹出口近傍における乱流エネルギー値との相対値である。乱流エネルギーの軸方向分布は、吹出口の高さ（150 mm）において、吹出口からの空気が直接衝突するN-27のS／P廻りに乱流エネルギーの第1ピーク点が生じる。また、Fig.31に示すように、N-27のS／P表面で剥離が生じ、N-27のS／Pとその下流にあるN-17のS／P間に後流が形成されることから、N-17のS／P廻りに乱流エネルギーの第2ピーク点が生じる。一方、他の高さでは、N-27とN-17のS／P間に生じる後流の影響により、N-17のS／P廻りのみにピーク値が生じる。また、N-1のS／P廻りから吸込口までの分布は相似形になる。乱流エネルギーの径方向分布は、N-17のS／P廻りのピーク点から流れ（ $180^\circ \rightarrow 0^\circ$ 方向）に沿って急激に減少する。中でも、CRDMの高さ（1270mm）において、N-11の制御棒S／Pの背面廻りの乱流エネルギーは、吹出口近傍における乱流エネルギーに比べて25%以下と小さくなり、最高温度領域になる原因として考えられる。

7. 結 言

縮尺1/2で全S／Pを模擬し、S／P廻りの空気流を表面タフト法により可視化した試験を行った。その結果、1対のリングダクトに設ける空気の吹出口、吸込口は 30° 間隔各々5箇所、さらに、吹出口にノズルを取り付けることがCRDMの冷却のために最適であることを明らかにした。

つぎに、空気の吹出口、吸込口の位置、数量を本条件にして、STREAMコードを用いて、全S／Pを3次元で模擬した解析により以下の知見を得た。

- (1) S／P室中央に位置するN-1のS／P廻りの風速に対して、試験と解析結果の差は1m/s以下であり、S／P廻りの空気の流れ方向については両者に良い一致が見られたことにより、本解析によるS／P廻りの空気流の評価が妥当であることを確認できた。
- (2) S／P廻りの空気温度については、N-11の制御棒S／Pの背面（ 0° 方向）廻りが最高温度領域になることがわかった。
- (3) 最高温領域における自然対流によるS／P廻りの空気温度分布への影響は無視でき、S／PとS／P廻りの空気との熱伝達は、強制対流が支配的になることがわかった。

さらに、SSPHEATコードを用いて1本の制御棒S／Pを2次元で模擬した解析により、最高温度領域におけるCRDM廻りのヘリウムガス温度はその制限温度60°Cを満足し、CRDMの健全性を確認することができた。

／P廻りの乱流エネルギー分布を示す。乱流エネルギーは、吹出口近傍における乱流エネルギー値との相対値である。乱流エネルギーの軸方向分布は、吹出口の高さ（150 mm）において、吹出口からの空気が直接衝突するN-27のS／P廻りに乱流エネルギーの第1ピーク点が生じる。また、Fig.31に示すように、N-27のS／P表面で剥離が生じ、N-27のS／Pとその下流にあるN-17のS／P間に後流が形成されることから、N-17のS／P廻りに乱流エネルギーの第2ピーク点が生じる。一方、他の高さでは、N-27とN-17のS／P間に生じる後流の影響により、N-17のS／P廻りのみにピーク値が生じる。また、N-1のS／P廻りから吸込口までの分布は相似形になる。乱流エネルギーの径方向分布は、N-17のS／P廻りのピーク点から流れ（ $180^\circ \rightarrow 0^\circ$ 方向）に沿って急激に減少する。中でも、CRDMの高さ（1270mm）において、N-11の制御棒S／Pの背面廻りの乱流エネルギーは、吹出口近傍における乱流エネルギーに比べて25%以下と小さくなり、最高温度領域になる原因として考えられる。

7. 結 言

縮尺1/2で全S／Pを模擬し、S／P廻りの空気流を表面タフト法により可視化した試験を行った。その結果、1対のリングダクトに設ける空気の吹出口、吸込口は 30° 間隔各々5箇所、さらに、吹出口にノズルを取り付けることがCRDMの冷却のために最適であることを明らかにした。

つぎに、空気の吹出口、吸込口の位置、数量を本条件にして、STREAMコードを用いて、全S／Pを3次元で模擬した解析により以下の知見を得た。

- (1) S／P室中央に位置するN-1のS／P廻りの風速に対して、試験と解析結果の差は $1\text{m}/\text{s}$ 以下であり、S／P廻りの空気の流れ方向については両者に良い一致が見られたことにより、本解析によるS／P廻りの空気流の評価が妥当であることを確認できた。
- (2) S／P廻りの空気温度については、N-11の制御棒S／Pの背面（ 0° 方向）廻りが最高温度領域になることがわかった。
- (3) 最高温領域における自然対流によるS／P廻りの空気温度分布への影響は無視でき、S／PとS／P廻りの空気との熱伝達は、強制対流が支配的になることがわかった。

さらに、SSPHEATコードを用いて1本の制御棒S／Pを2次元で模擬した解析により、最高温度領域におけるCRDM廻りのヘリウムガス温度はその制限温度 60°C を満足し、CRDMの健全性を確認することができた。

謝 辞

本報をまとめるに当り、有益な意見を戴いたHTTR原子炉開発室丸山 創氏及びHTTR計画室馬場 治室長、モデル試験の実施に関して御尽力戴いた新菱冷熱工業株式会社松田 博氏、吉田敏晴氏に深謝致します。

参 考 文 献

- (1) 日本原子力研究所：「高温工学試験研究の現状」(1991)
- (2) 流れの可視化学会編：“新版 流れの可視化ハンドブック”，朝倉書店 (1986)
- (3) 井川 雅博 他：“熱流体解析コードSTREAMを用いた容器内3次元流動解析”，JAERI-M 86-093 (1986)
- (4) 功刀 資彰 他：“3次元熱流体解析コード'STREAM'のベクトル化と高機能化”，JAERI-M 88-119 (1988)
- (5) 井岡 郁夫 他：“HENDEL炉内構造物実証試験部(T₂) 3次元熱伝導解析コード(SSPHEAT)”，JAERI-M 88-032 (1988)
- (6) MSC/NASTRAN Application Manual, The MacNeal-Schwendler Corp. (1981)
- (7) 東芝：“制御棒駆動装置の耐熱性検討”，私信(1989)
- (8) 藤沢 武久：“新編 確率・統計”，日本理工出版会(1983)
- (9) 吉沢 徹：“乱流解析における乱流モデルをめぐる諸問題”，日本原子力学会誌，32 [8] 780-786 (1990)
- (10) 大下 真一 他：“高温工学試験研究炉 原子炉圧力容器スタンドパイプの熱解析”，私信 (1993)
- (11) C.Aldham et al.: "Mathematical Modeling of Gas Injection Processes into Liquid Metals", Polymodel 5-Int. Conference (1982)
- (12) E.D.Grimson : Transactions of the ASME, 59 (1937)

謝 辞

本報をまとめるに当り、有益な意見を戴いたHTTR原子炉開発室丸山 創氏及びHTTR計画室馬場 治室長、モデル試験の実施に関して御尽力戴いた新菱冷熱工業株式会社松田 博氏、吉田敏晴氏に深謝致します。

参 考 文 献

- (1) 日本原子力研究所：「高温工学試験研究の現状」(1991)
- (2) 流れの可視化学会編：“新版 流れの可視化ハンドブック”，朝倉書店 (1986)
- (3) 井川 雅博 他：“熱流体解析コードSTREAMを用いた容器内3次元流動解析”，JAERI-M 86-093 (1986)
- (4) 功刀 資彰 他：“3次元熱流体解析コード'STREAM'のベクトル化と高機能化”，JAERI-M 88-119 (1988)
- (5) 井岡 郁夫 他：“HENDEL炉内構造物実証試験部(T_2) 3次元熱伝導解析コード(SSPHEAT)”，JAERI-M 88-032 (1988)
- (6) MSC/NASTRAN Application Manual, The MacNeal-Schwendler Corp. (1981)
- (7) 東芝：“制御棒駆動装置の耐熱性検討”，私信(1989)
- (8) 藤沢 武久：“新編 確率・統計”，日本理工出版会(1983)
- (9) 吉沢 徹：“乱流解析における乱流モデルをめぐる諸問題”，日本原子力学会誌，32 [8] 780-786 (1990)
- (10) 大下 真一 他：“高温工学試験研究炉 原子炉圧力容器スタンドパイプの熱解析”，私信 (1993)
- (11) C.Aldham et al.：“Mathematical Modeling of Gas Injection Processes into Liquid Metals”，Polymodel 5-Int. Conference (1982)
- (12) E.D.Grimson : Transactions of the ASME, 59 (1937)

Table 1 Each diameter of stand-pipe and its penetrating hole in support plate

Stand-pipe	Diameter of stand-pipe (mm)	Diameter of stand-pipe penetrating hole (mm)
N-1 ~ N-7	525	525
N-8 ~ N-16	460	460
N-17 ~ N-19	512 ^{*1}	640
N-20 ~ N-22	319 ^{*1}	614
N-23, N-25	216	216
N-24, N-26	216 ^{*1}	271
N-27 ~ N-29	267	267
N-30, N-31	140	140

*1 Diameter of stand-pipe fixing device

Table 2 Experimental procedure

- (1) Air is circulated by a blower, and the flow rate of $27.5 \text{ m}^3/\text{min}$ is adjusted by a manual flow control valve. Circulated air flow is measured by an airflow meter.
- (2) Each flow rate of inlet nozzles on the ring-ducts is adjusted uniformly. The flow area of the nozzle is also regulated in order to keep air flow around stand-pipes located at the center of the room.
- (3) Lighting used for videotaping is regulated and then experimental apparatus is blacked out.
- (4) The air flow is visualized by sketching and videotaping of tufts attached to the stand-pipes.
- (5) The flow velocity in the experimental apparatus is measured by using a hot-wire anemometer. The flow velocity is measured at five second intervals up to five minutes.

Table 3 Experimental case

CASE	Flow Inlet		Flow Outlet		Reference
	Number	Interval	Number	Interval	
1	3	60°	3	60°	Fig.7
2	5	30°	5	30°	Fig.8
3	5	30°	5	30°	Fig.9

Table 4 Experimental result of air at its flow inlet (CASE 1)

	Flow Inlet		
	A	C	E
Flow Area (cm ²)	38.5	55.0	38.5
Flow Velocity(m/s)	45.1	26.3	41.0
Flow Rate (m ³ /min)	10.4	8.7	9.5
	Flow Outlet		
	F	H	J
Flow Area (cm ²)	132.0	165.0	148.5
Flow Velocity(m/s)	12.4	10.6	9.3
Flow Rate (m ³ /min)	9.8	10.5	8.3

Table 5 Experimental result of air at its flow inlet (CASE 2)

	Flow Inlet				
	A	B	C	D	E
Flow Area (cm ²)	27.5	22.0	27.5	44.0	27.5
Flow Velocity(m/s)	36.8	44.7	32.5	21.7	35.8
Flow Rate (m ³ /min)	6.1	5.9	5.4	5.7	5.9
	Flow Outlet				
	F	G	H	I	J
Flow Area (cm ²)	110.0	110.0	110.0	132.0	132.0
Flow Velocity(m/s)	7.8	9.1	7.7	6.2	6.4
Flow Rate (m ³ /min)	4.6	4.9	5.1	4.9	5.1

Table 6 Experimental result of air at its flow inlet (CASE 3)

	Flow Inlet				
	A	B	C	D	E
Flow Area (cm ²)	49.5	55.0	55.0	44.0	55.0
Flow Velocity(m/s)	19.3	18.6	18.4	21.7	17.9
Flow Rate (m ³ /min)	5.7	6.1	6.1	5.7	5.9
	Flow Outlet				
	F	G	H	I	J
Flow Area (cm ²)	110.0	110.0	110.0	132.0	132.0
Flow Velocity(m/s)	7.5	9.4	7.8	6.3	6.4
Flow Rate (m ³ /min)	5.0	6.2	5.1	5.0	5.1

Table 7 Air flow velocity provided as boundary condition for
'STREAM' code

	Flow Inlet				
	A	B	C	D	E
Flow Area (cm ²)	210.8	214.4	219.8	120.5	203.8
Flow Velocity(m/s)	8.4	8.9	8.6	14.7	8.4
Flow Rate (m ³ /min)	10.7	11.4	11.3	10.6	10.9
	Flow Outlet				
	F	G	H	I	J
Flow Area (cm ²)	418.2	474.9	419.3	579.5	522.8
Flow Velocity(m/s)	4.1	4.5	4.3	3.0	3.4
Flow Rate (m ³ /min)	10.4	12.9	10.7	10.4	10.6

Table 8 Comparison of air flow velocity around stand-pipe N-1
at 1500mm level between experiment and analysis

Measuring Point	a	b	c	d
Experiment (m/s)	0.8	1.3	0.8	0.4
Analysis (m/s)	0.6	0.5	0.4	0.3

Table 9 Correction factor of C_H for heat transfer coefficient
for staggered arrangement in Grimson's equation

Number of row	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_H	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	1.0

Table 10 Air temperature around control rod stand-pipes at 1270mm
level of CRDM

Stand-pipe	Horizontal direction	Temperature (°C)	Stand-pipe	Horizontal direction	Temperature (°C)
N-1	0 °	34.4	N-11	0 °	34.8
	90 °	32.6		90 °	34.6
	180 °	32.2		180 °	34.5
	270 °	33.4		270 °	34.8
N-4	0 °	33.6	N-12	0 °	34.5
	90 °	34.8		90 °	32.9
	180 °	34.8		180 °	32.6
	270 °	34.0		270 °	34.0
N-5	0 °	33.8	N-15	0 °	33.1
	90 °	33.8		90 °	34.2
	180 °	34.5		180 °	34.8
	270 °	34.7		270 °	34.1
N-10	0 °	34.7			
	90 °	34.4			
	180 °	33.3			
	270 °	33.8			

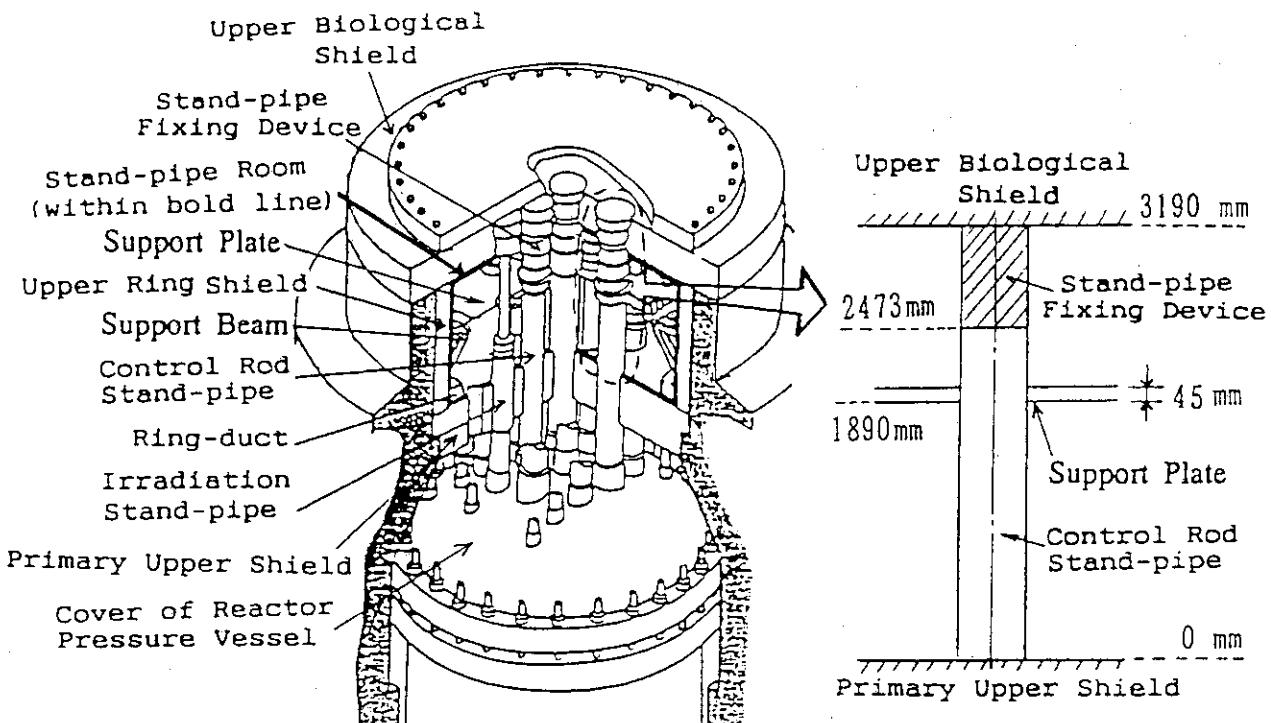
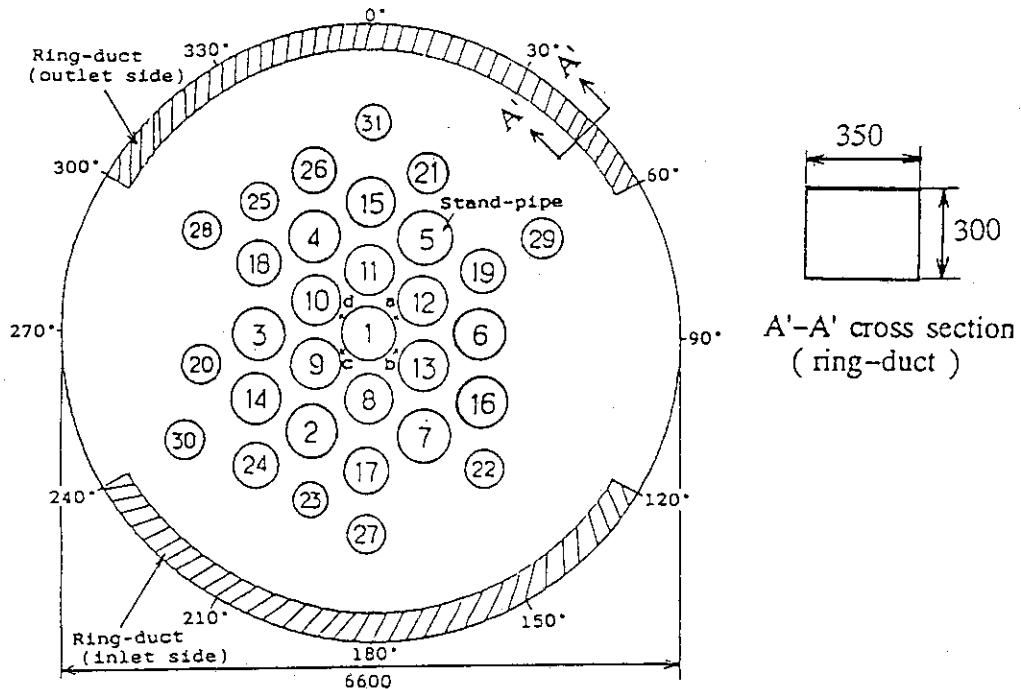


Fig.1 Configuration in stand-pipe room



From a to d correspond measuring points of flow velocity of air around stand-pipe N-1.

Fig.2 Horizontal cross section of stand-pipe room
at level below 1890mm

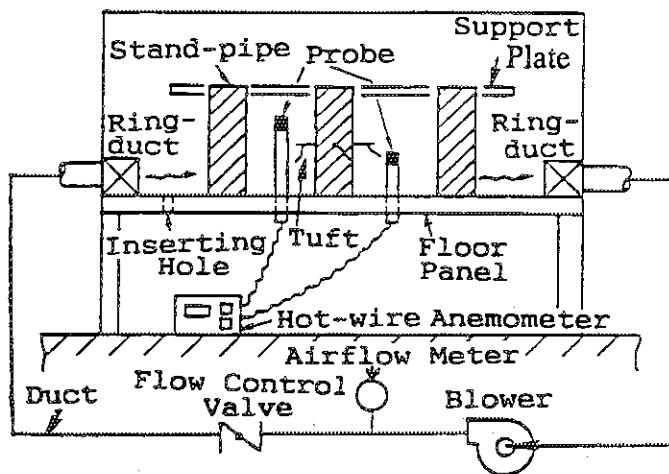


Fig.3 Schematic flow of experimental apparatus

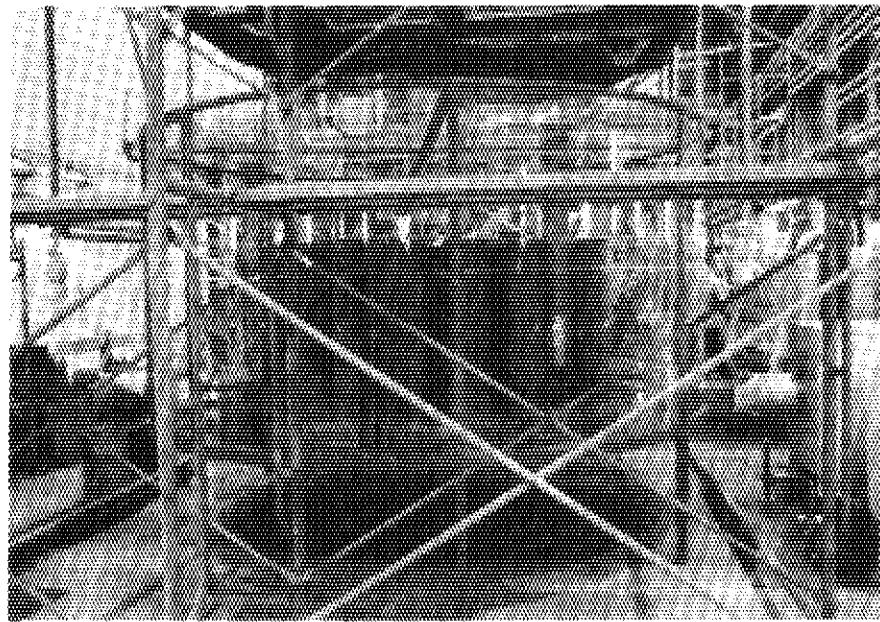


Fig.4 Experimental apparatus

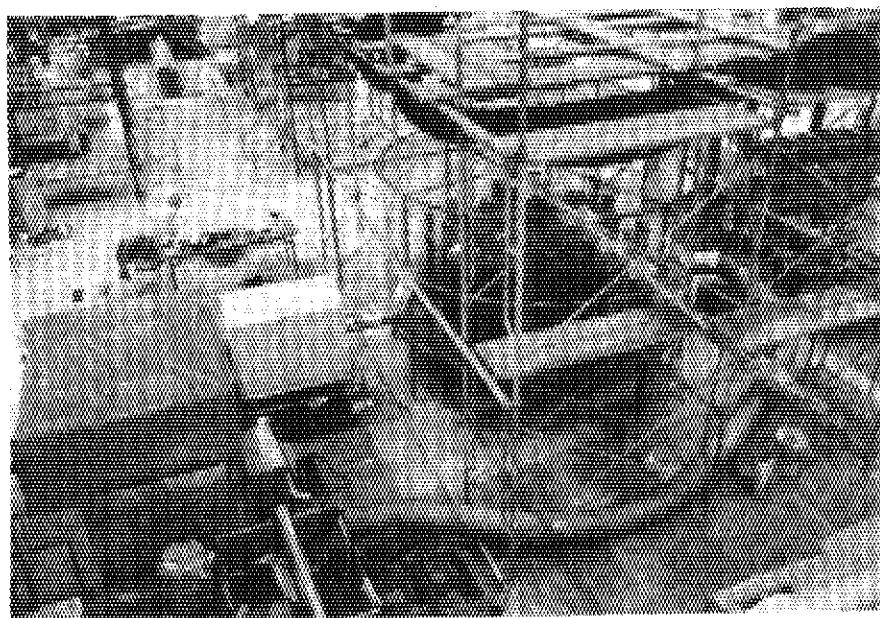


Fig.5 Overall view of experimental apparatus

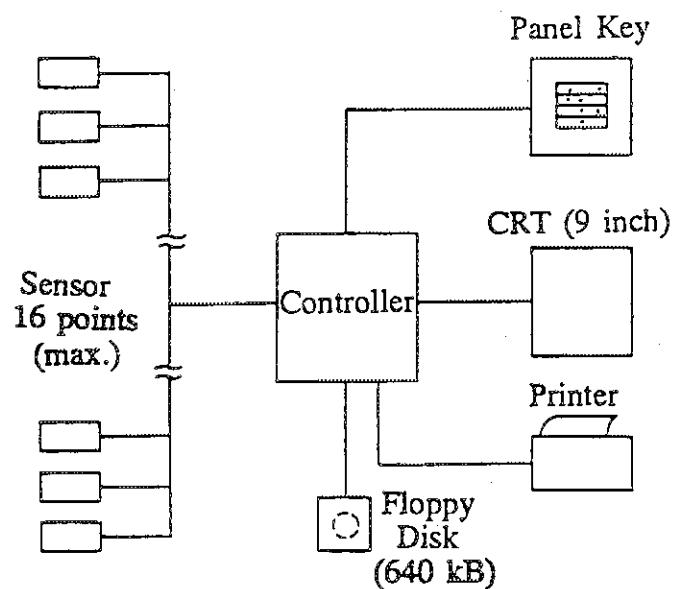


Fig.6 Recording flow of experimental apparatus

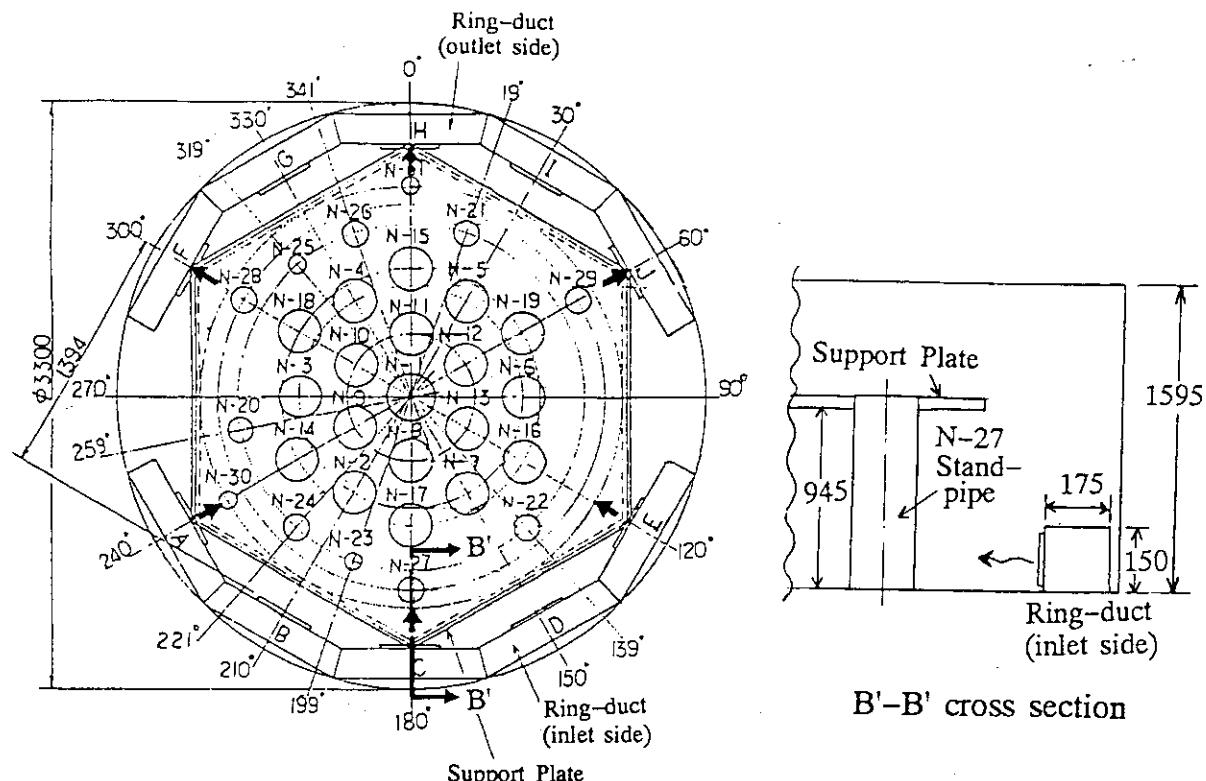


Fig.7 Experimental model in horizontal cross section (CASE 1)

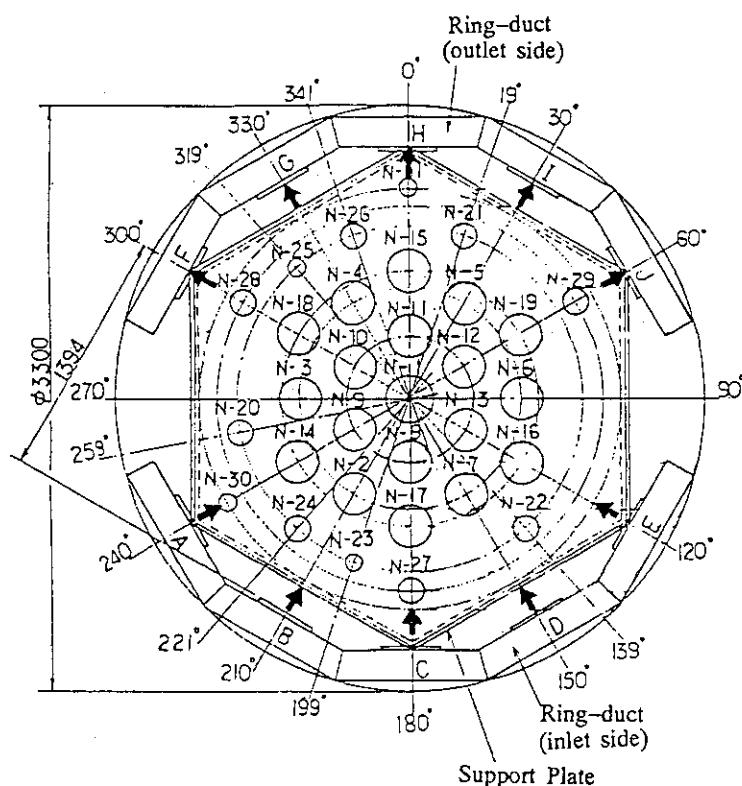


Fig.8 Experimental model in horizontal cross section (CASE 2)

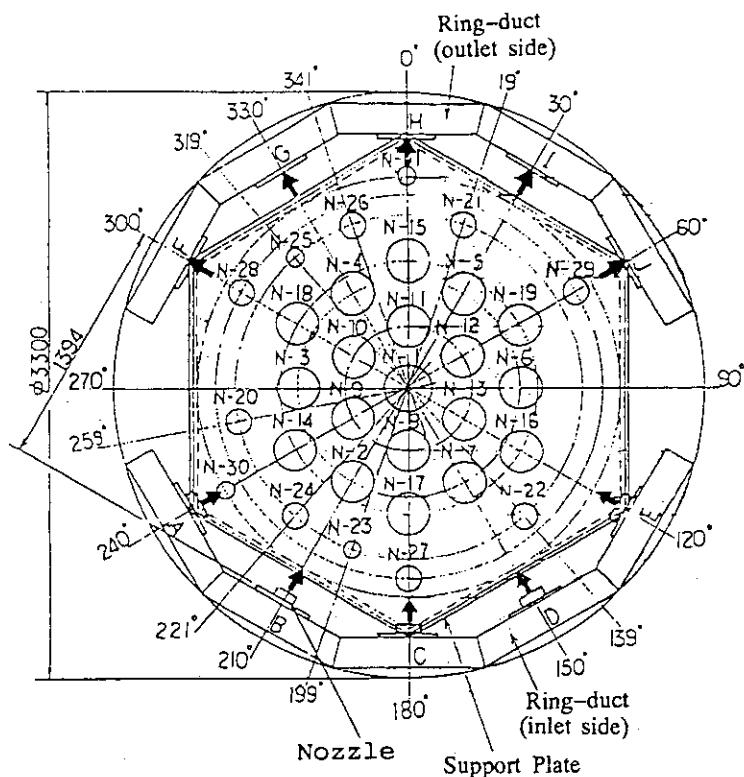


Fig.9 Experimental model in horizontal cross section (CASE 3)

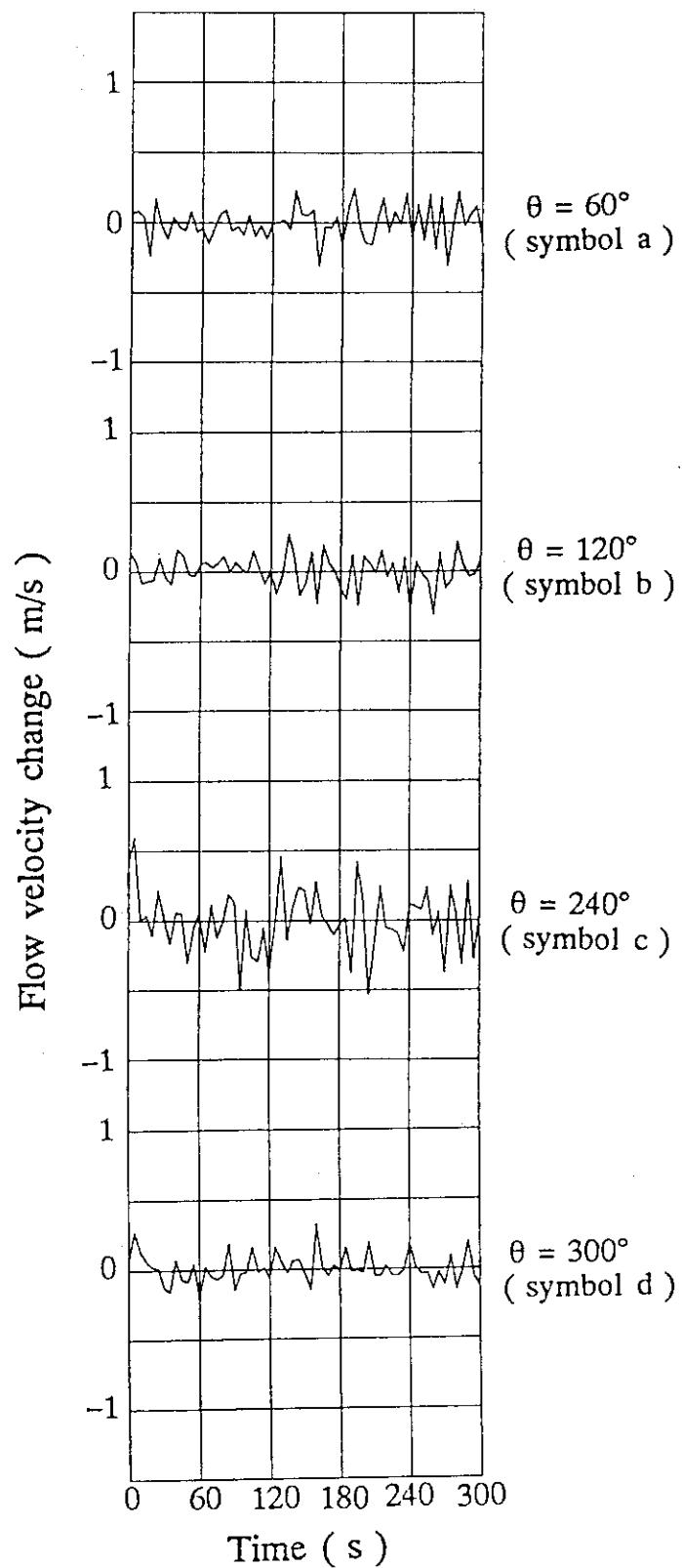


Fig.10 Air flow velocity transient of 750mm (1/2 scale) level
at its measuring points of a, b, c and d

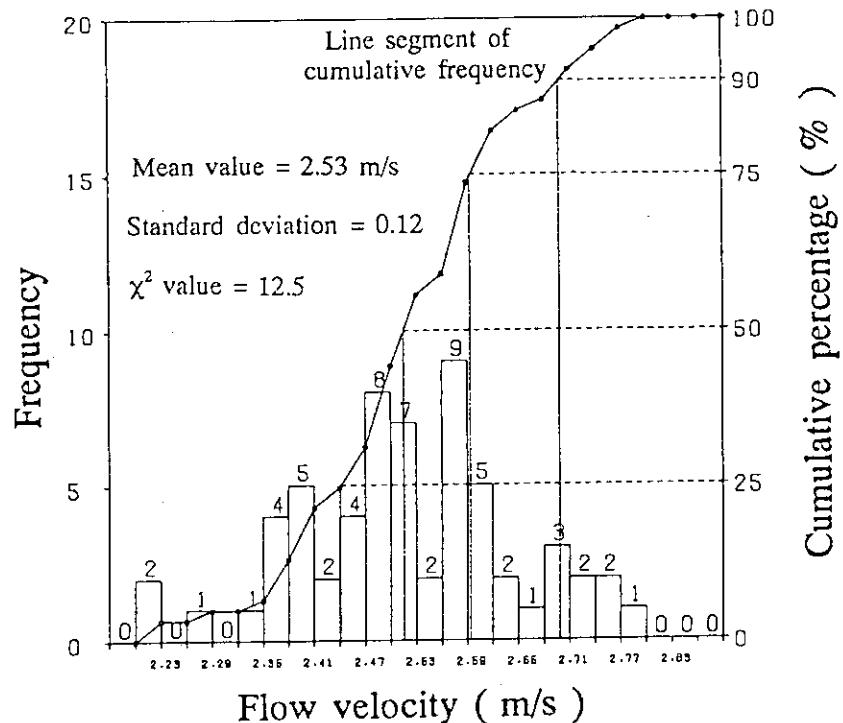


Fig.11 Frequency histogram and cumulative frequency diagram at measuring point of a

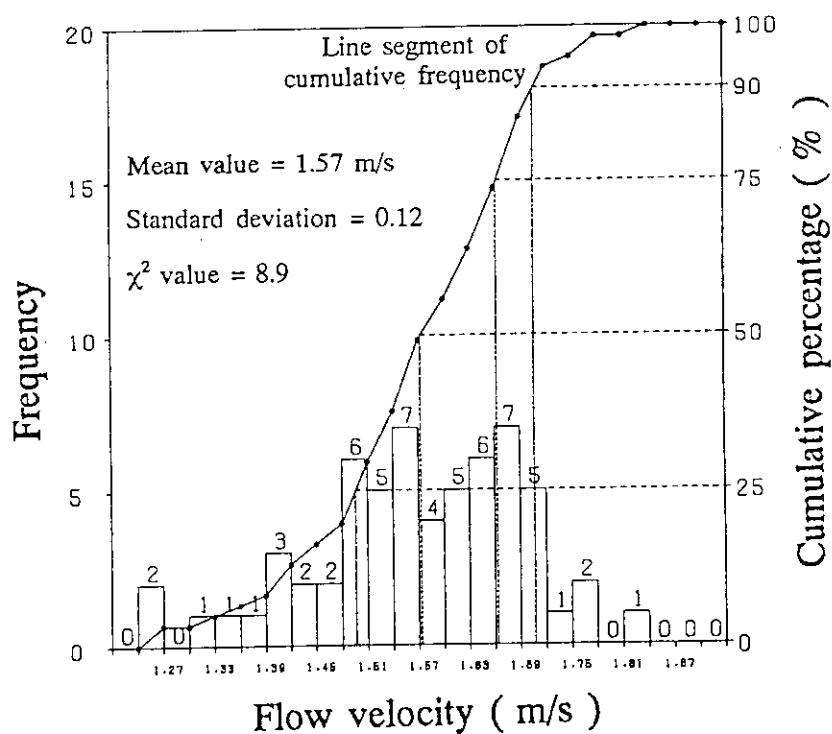


Fig.12 Frequency histogram and cumulative frequency diagram at measuring point of b

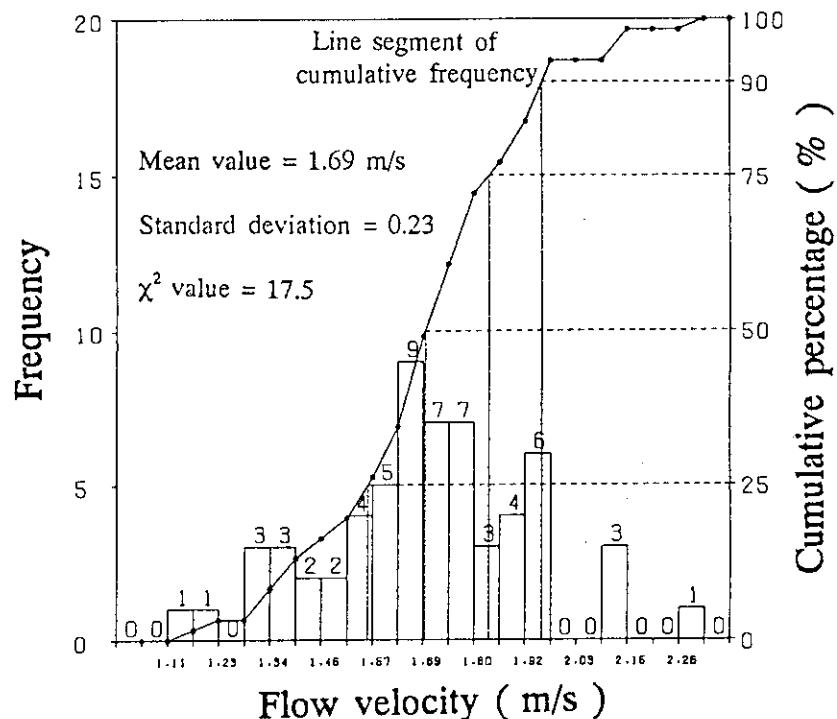


Fig.13 Frequency histogram and cumulative frequency diagram at measuring point of c

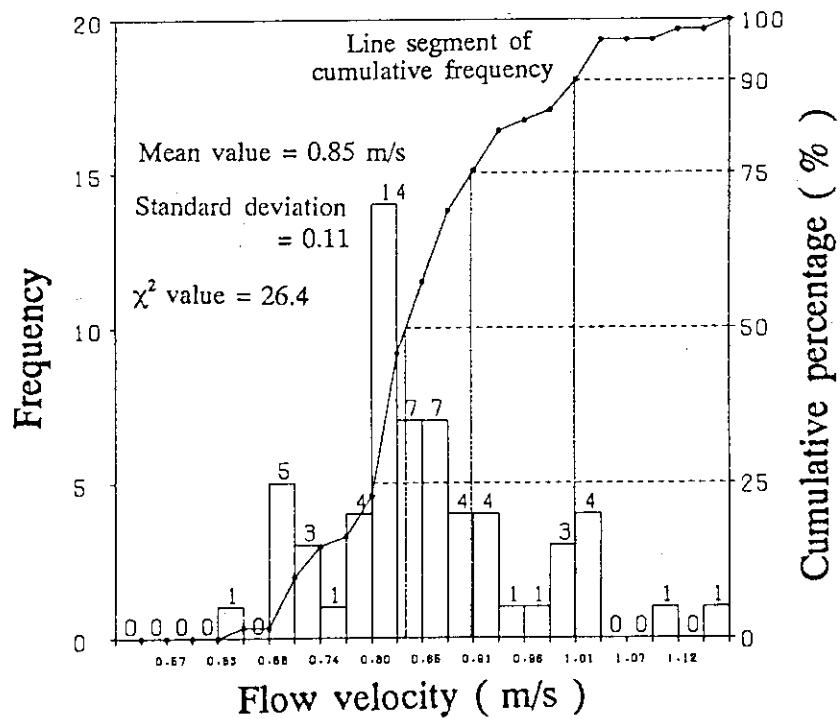


Fig.14 Frequency histogram and cumulative frequency diagram at measuring point of d

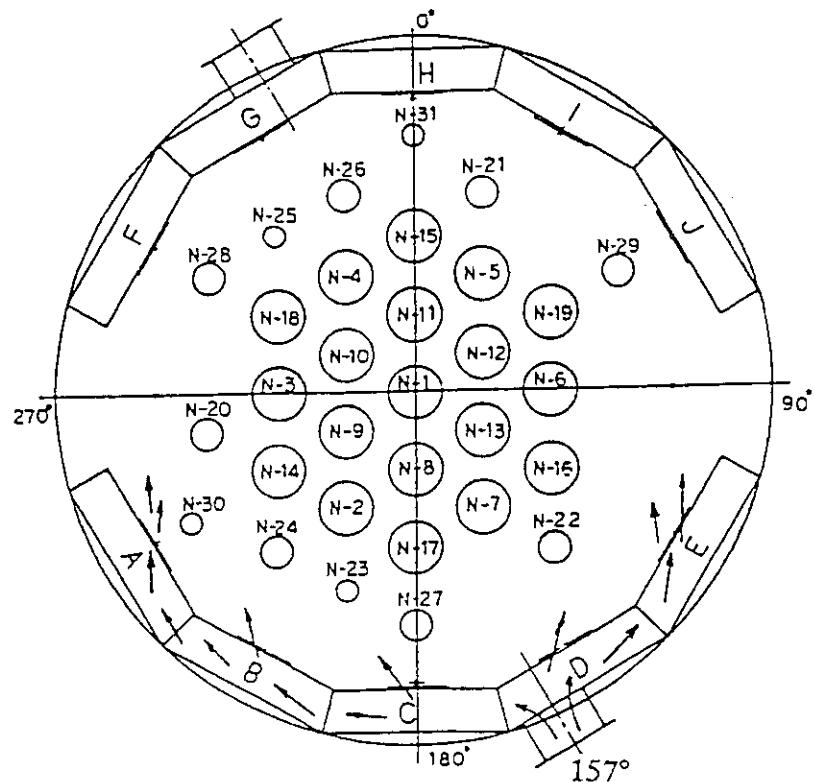


Fig.15 Characteristic of air flow direction at its inlet

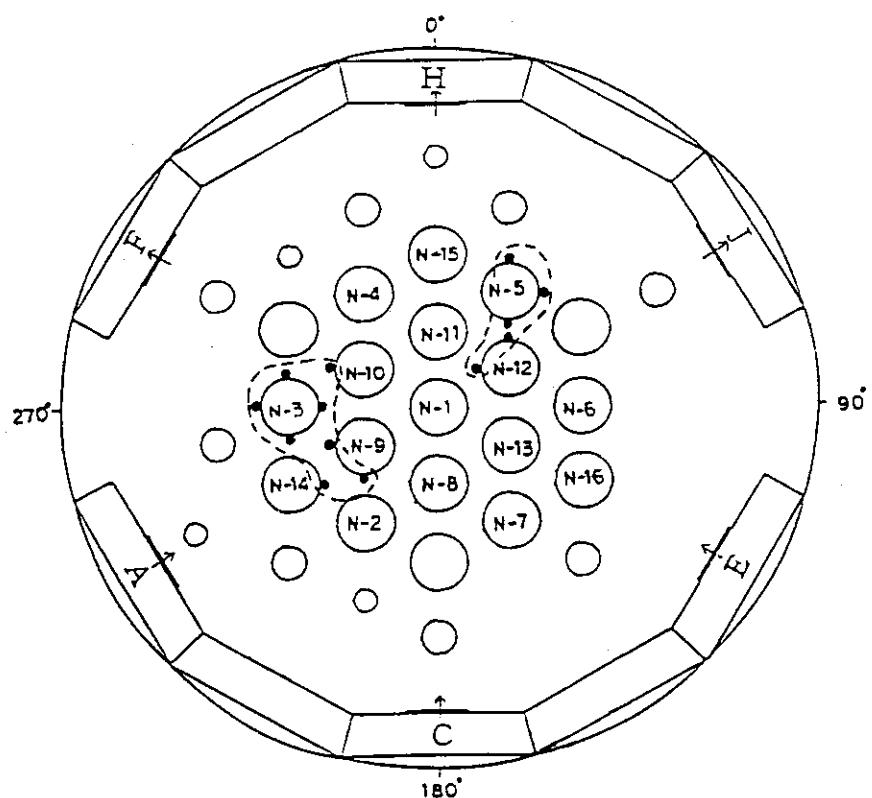


Fig.16 Air flow stagnation region around stand-pipes (CASE 1)

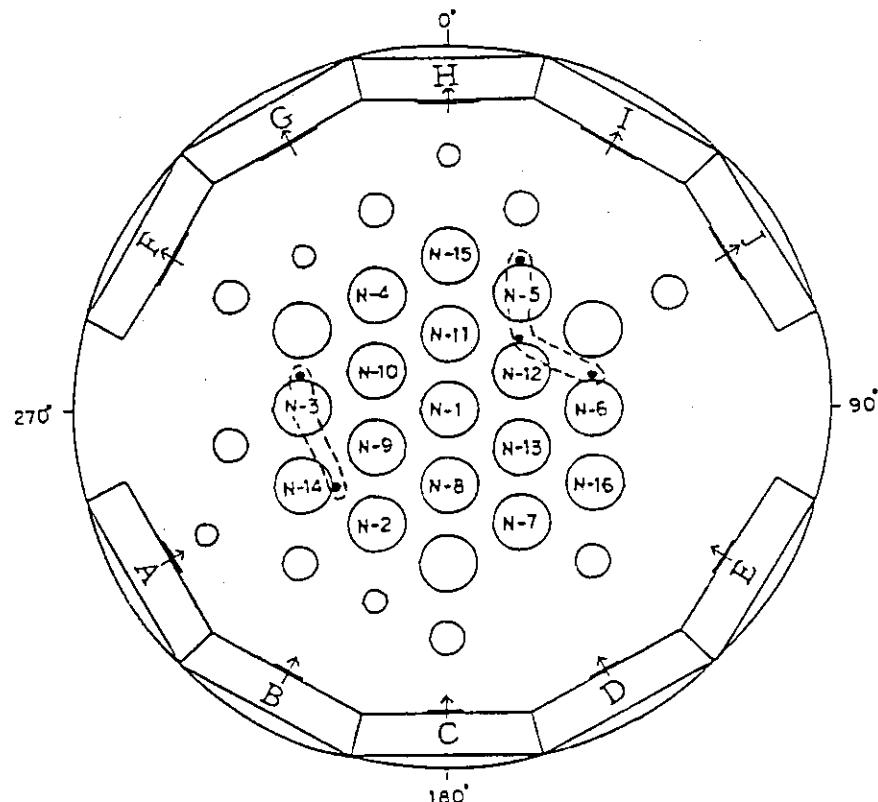


Fig.17 Air flow stagnation region around stand-pipes (CASE 2)

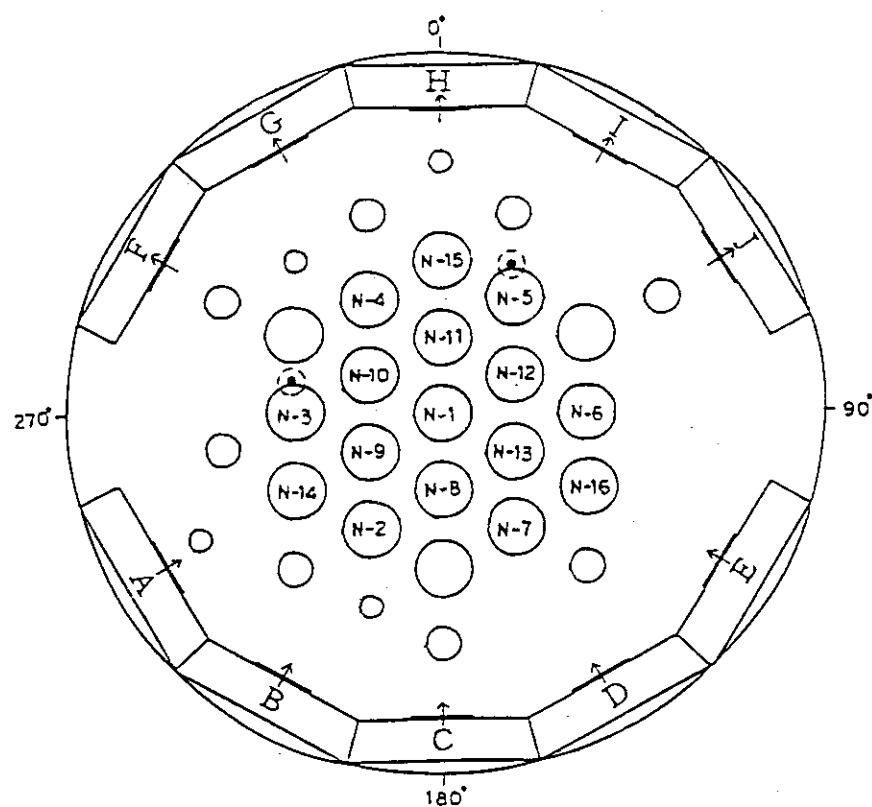


Fig.18 Air flow stagnation region around stand-pipes (CASE 3)

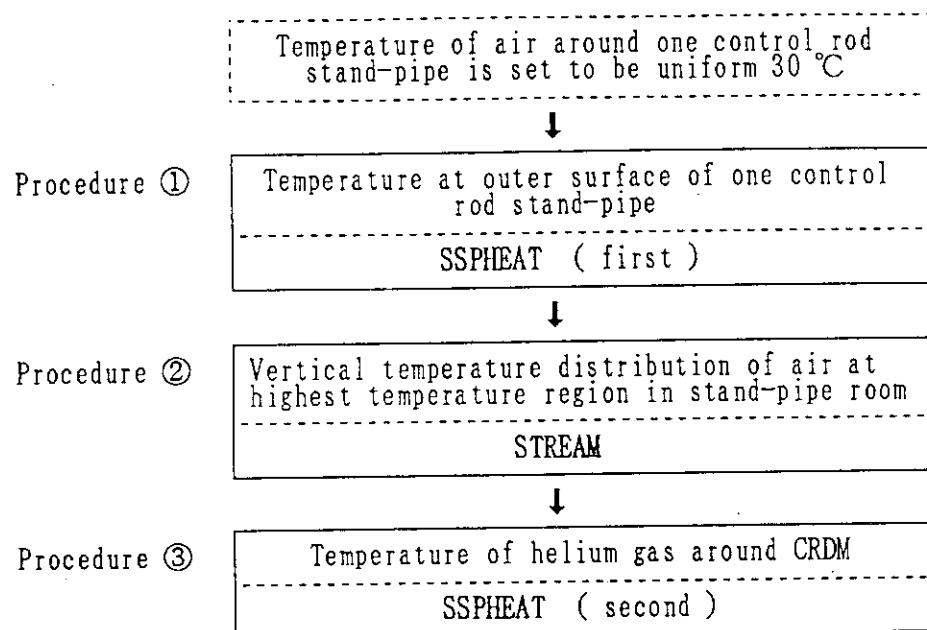


Fig.19 Analytical flow of 'SSPHEAT' and 'STREAM' codes

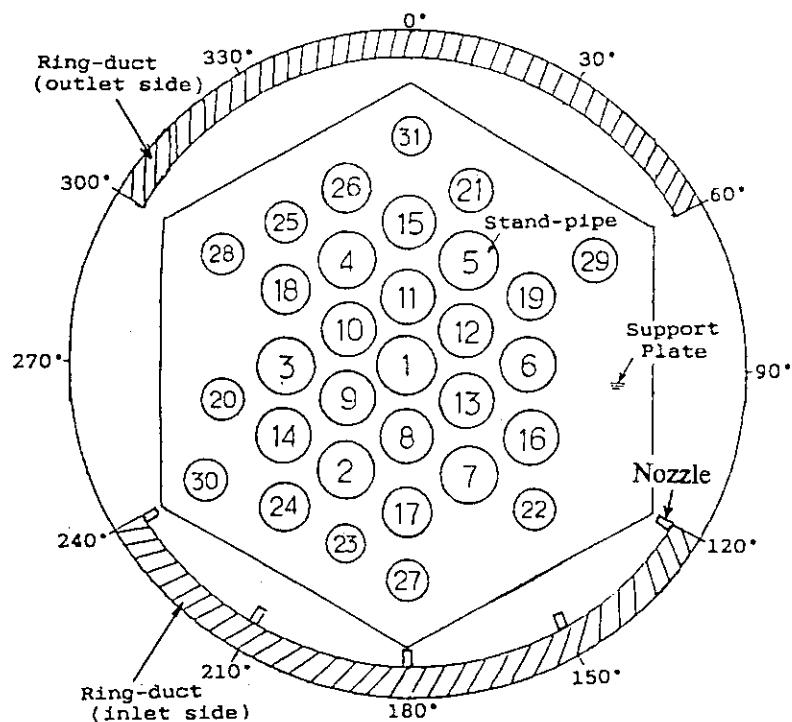


Fig.20 Horizontal cross section of stand-pipe room
at level above 1935mm

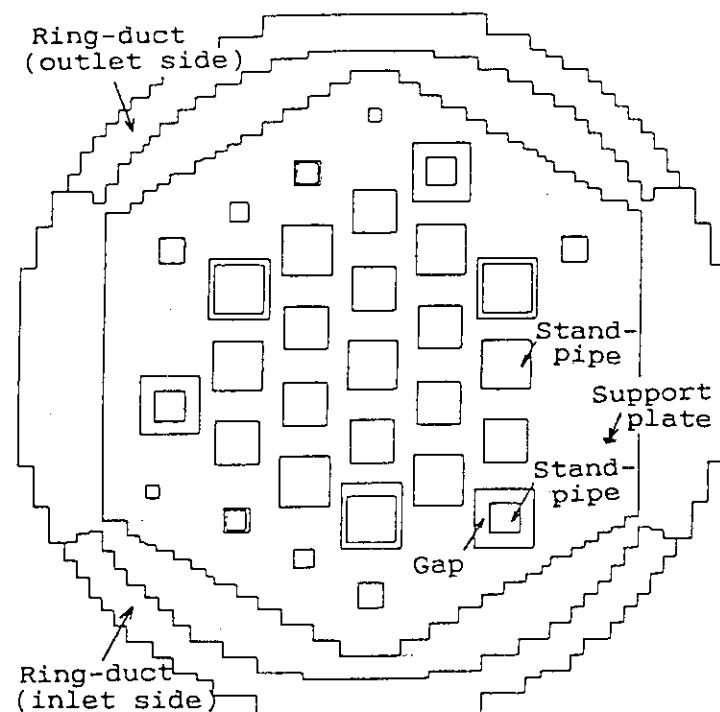


Fig.21 Analytical model of stand-pipe room in horizontal cross section

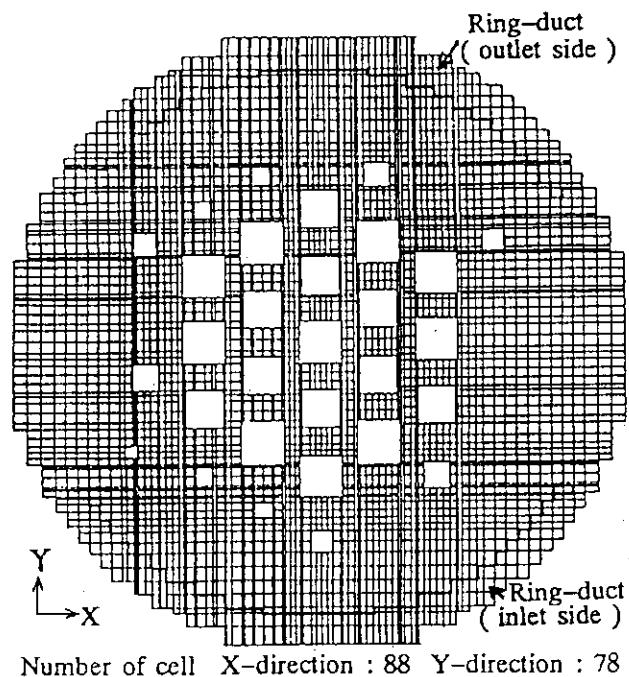


Fig.22 Analytical grids for air flow between stand-pipes in horizontal cross section

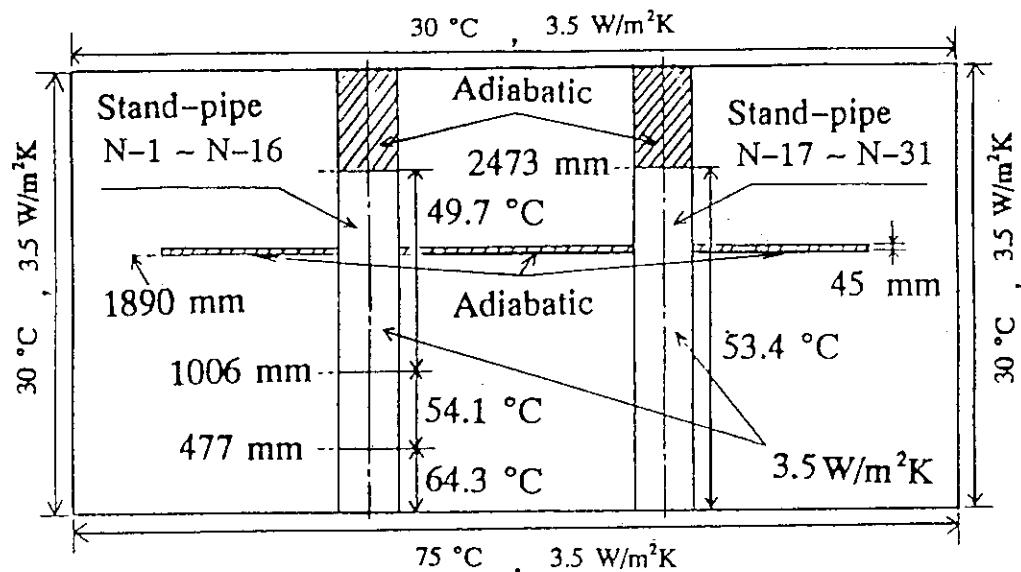


Fig.23 Temperature and heat transfer coefficient on inner surface of stand-pipe room as analytical condition

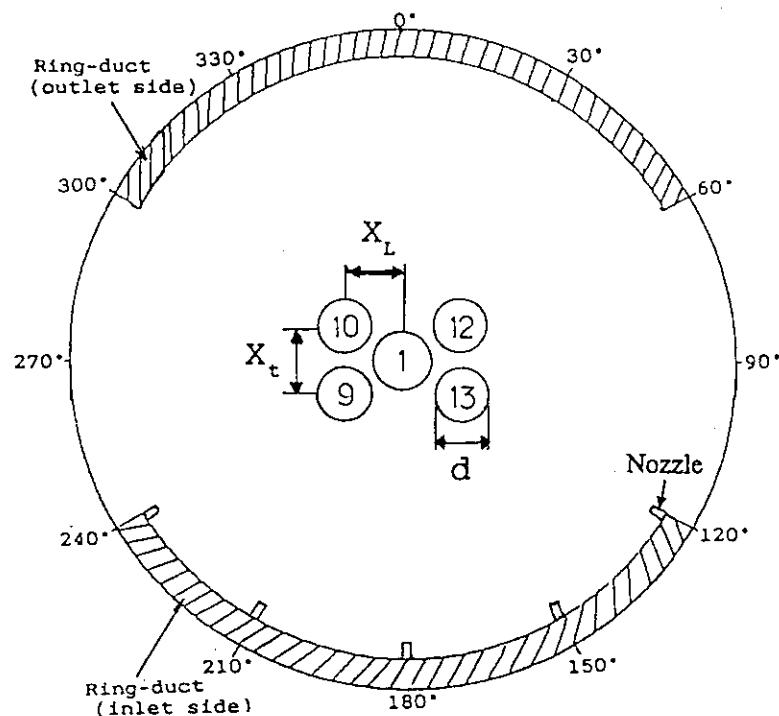


Fig.24 Staggered arrangement of stand-pipes N-1, N-9, N-10, N-12 and N-13

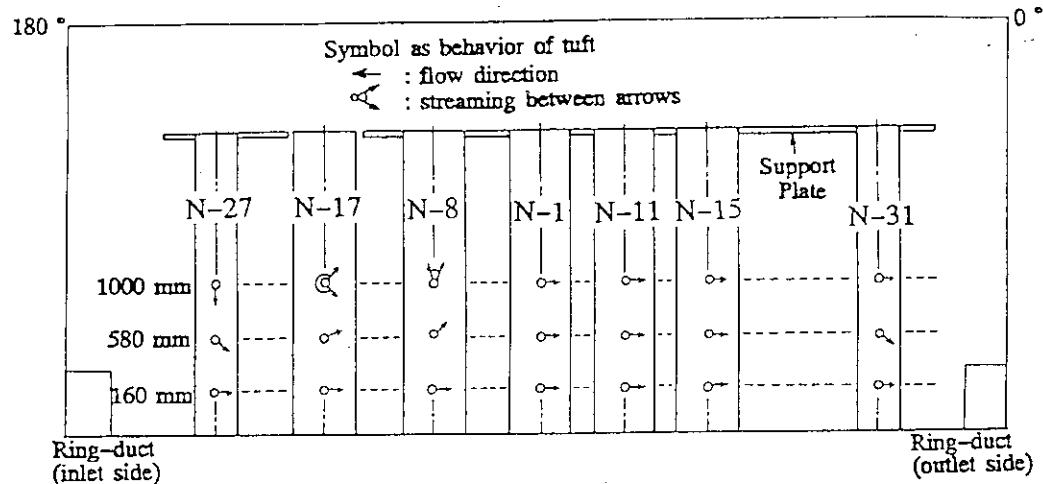


Fig.25 Behavior of tufts attached to stand-pipes arranged on 0° -180° axis

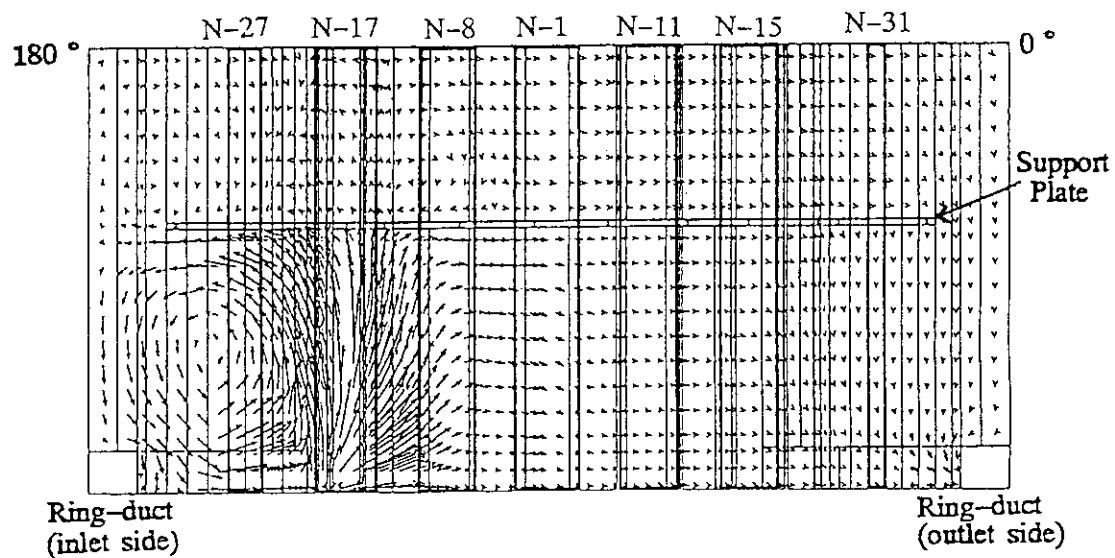


Fig.26 Flow distribution of air around stand-pipes arranged on 0° -180° axis by 'STREAM' code

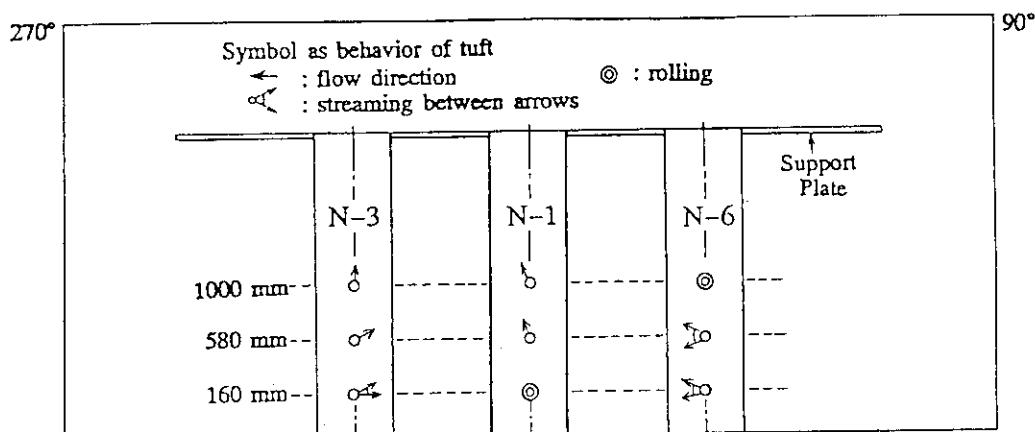


Fig.27 Behavior of tufts attached to stand-pipes arranged on 90° - 270° axis

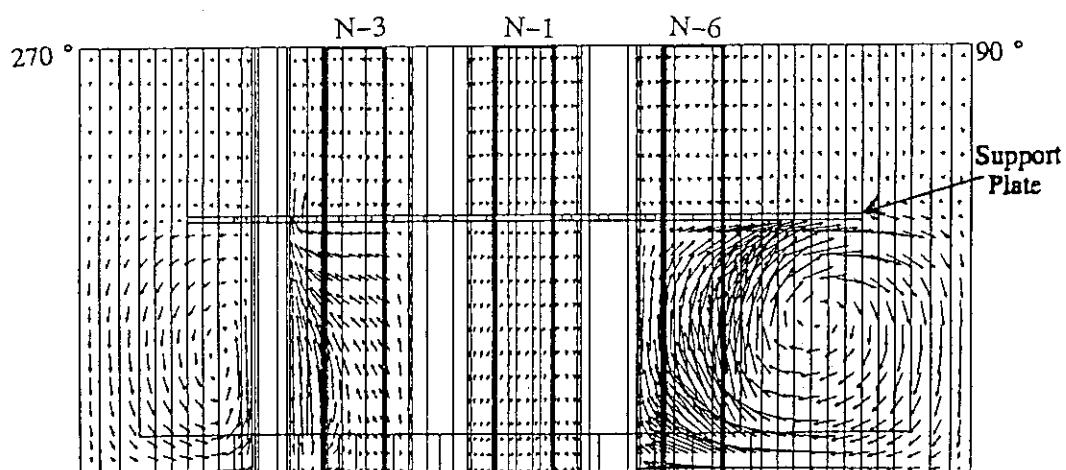


Fig.28 Flow distribution of air around stand-pipes arranged on 90° - 270° axis by 'STREAM' code

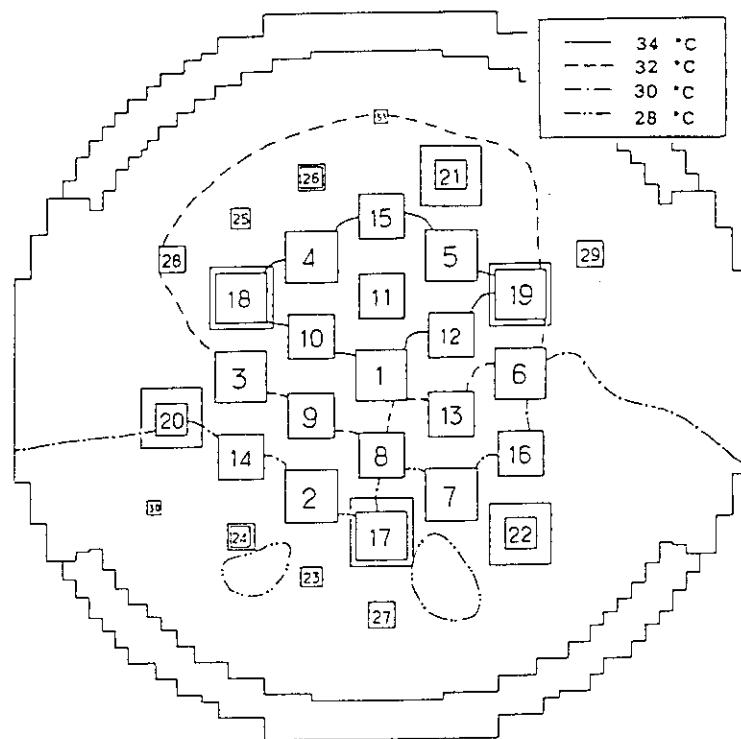


Fig.29 Temperature distribution of air around stand-pipes at 1270mm level of CRDM in horizontal cross section

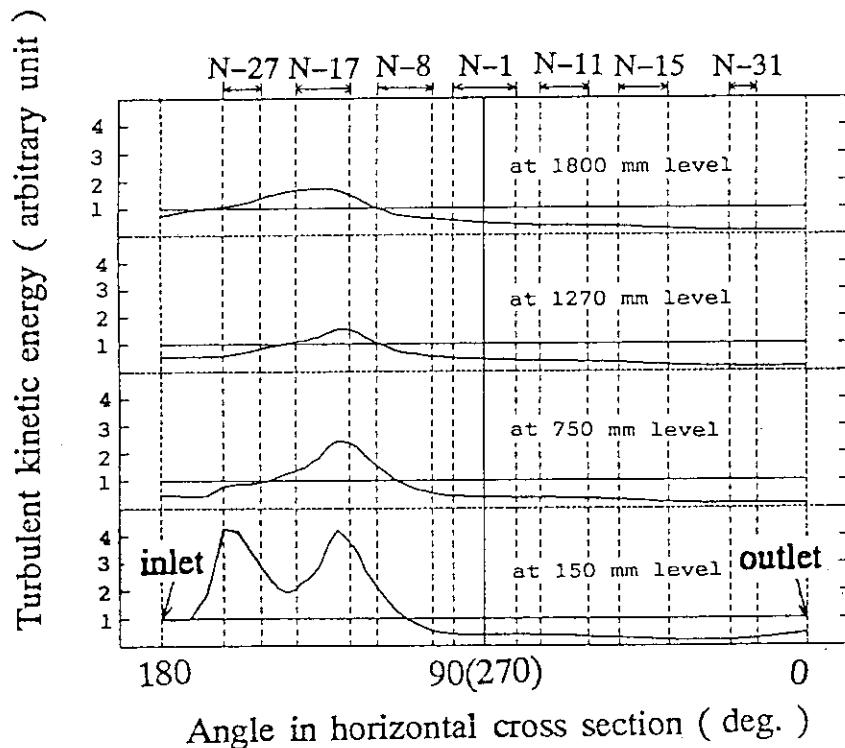


Fig.30 Turbulent kinetic energy distribution of air around stand-pipes arranged on 0° - 180° axis at levels of 150mm, 750mm, 1270mm and 1800mm

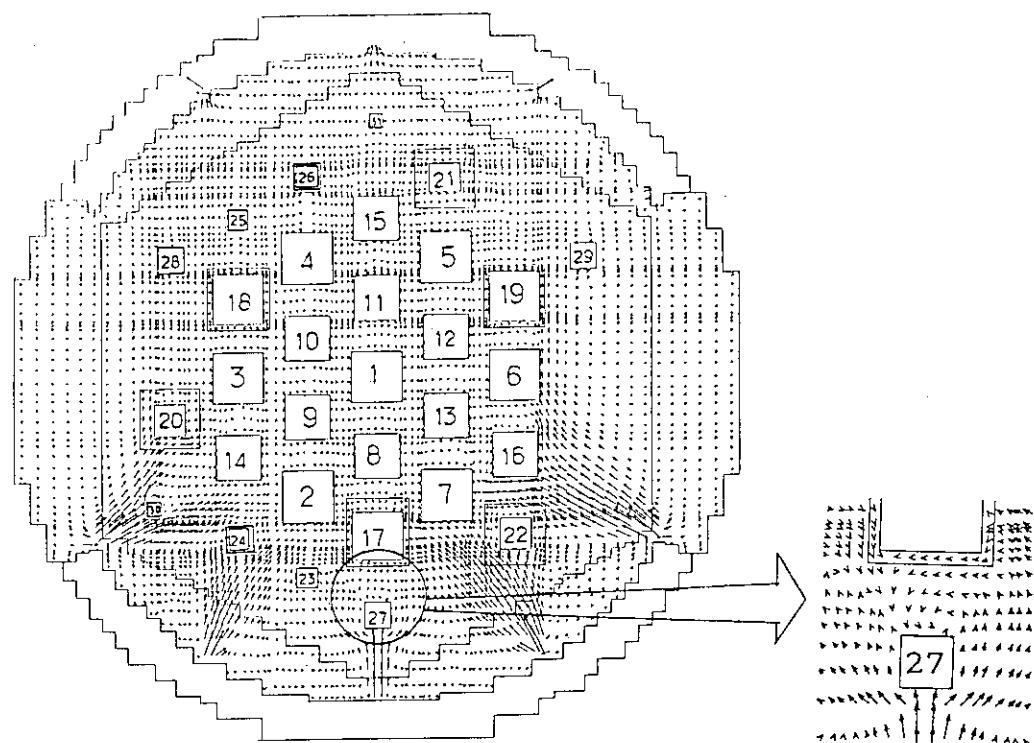


Fig.31 Flow distribution of air around stand-pipes at 150mm level of flow inlet nozzle in horizontal cross section