

単相多次元コードFAQUAによる原子炉冷却系 総合試験装置熱流動解析(I)

温度成層化および炉壁保護構造の熱流動解析

1995年10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)

単相多次元コード AQUA による原子炉冷却系総合試験装置熱流動解析 (I)

～温度成層化および炉壁保護構造の熱流動解析～

土井 禎浩*、 村松 寿晴*

要 旨

実証炉設計の妥当性確認ならびに実用化のための基盤技術検討に必要な熱流動に関する知見とこれに係わるデータの取得を目的として、原子炉冷却系総合試験の実施が計画されている。

本報告書は原子炉冷却系総合試験装置の概念構築のため、原子炉容器モデルに関し、フル (360°) セクタと 1/3 (120°) セクタの温度成層化現象を単相多次元コード AQUA により解析し、1/3 セクタモデルのフルセクタにおける熱流動特性の模擬性について検討したものである。また、炉壁保護構造の中間アニュラス部内熱流動挙動を同コードにより解析し、周方向渦の発生について評価を行い、当該構造部位を対象とした試験の必要性を含む試験計画の検討に反映した。温度成層化および炉壁保護構造の検討から得られた成果をそれぞれ以下に示す。

[上部プレナム内温度成層化現象の熱流動特性]

- (1) フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの比較では、手動トリップ時および自然循環移行時ともに、定格運転状態から約 40 秒後までは UCS 底面から上方のプレナム内において流況の相違が見られる。一方、炉心出口流速が低下したポニーモータ運転および自然循環状態では速度分布、温度分布ともに顕著な相違はない。
- (2) ポニーモータ運転あるいは自然循環状態に移行し、炉心出口流速が低下した後のホットレグ配管吸い込み部近傍の流況は、ホットレグ配管のない周方向領域での結果と大きな差はない。
- (3) (1) および (2) から、手動トリップ時および自然循環時の試験は、1/3 セクタモデルによりフルセクタでの熱流動挙動の模擬が可能と判断できる。

[炉壁保護構造の熱流動特性]

- (1) 堰を越えて中間アニュラス内へ落下する流入流速 (越流流速) に関し、定格流速から定格流速の 1% (1.53 m/s、0.153 m/s および 0.0153 m/sec) までの範囲では、中間アニュラス内に周方向自然対流は発生しない。
- (2) 越流流速が周方向に不均一な場合 (最大流速 1.53 m/s、最小流速 0.765 m/s として、最大最小間を線形補完) にも周方向自然対流は発生せず、実機の運転条件において周方向自然対流による温度分布が問題となる可能性は小さいことが確認できた。

*大洗工学センター基盤技術開発部熱流体技術開発室

Thermohydraulic Analyses with the AQUA Code for Basic Design of FBR Large-Scale Sodium Test Facility (I)

~Analyses for Thermal Stratification and Reactor Vessel Cooling System~

Yoshihiro Doi*, Toshiharu Muramatsu*

Abstract

Study of thermal hydraulics for Demonstration Fast Breeder Reactors (DFBRs) and Commercial FBRs has been planned to confirm the design and acceptability.

A one-third sector model of the reactor vessel was proposed for basic design concept of the test facility. Numerical analyses using a multi-dimensional code AQUA were conducted to evaluate the similarity of the model on thermal stratification phenomena in the upper plenum during a reactor trip event through the comparison of numerical analyses with a full sector model. In addition, thermohydraulic numerical analyses for a reactor vessel cooling system were carried out to estimate the on-set conditions of natural convection in a vertical narrow annular gap in the system.

[Analyses for Thermal Stratification in the Full and One-third Sector Reactor Models]

- (1) The comparison of the result of the one-third sector model with that of the full sector model showed the differences in temperature and velocity distributions at the period from the start of the transient to forty seconds. There were no differences after forty seconds because the velocity at the core outlet decreased.
- (2) After forty seconds, there was no apparent effect of intake from the hot leg piping on temperature and velocity distributions in the upper plenum.
- (3) The results of (1) and (2) indicated that the one-third sector model is applicable for the thermal hydraulic tests instead of the full sector model.

[Analyses for the reactor vessel cooling system]

- (1) No circumferential natural convection was found in the annulus under three different velocity conditions (1.53, 0.153 and 0.0153 [m/s]).
- (2) Asymmetric velocity distribution at the inlet of the annulus also caused no circumferential natural convection. Thus, it was confirmed that there is little or no possibility of circumferential natural convection in the annulus of the reactor cooling system under the actual reactor conditions.

*Thermalhydraulic Research Section, Advanced Technology Division, OEC, PNC

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 上部プレナム内温度成層化現象の熱流動解析	2
2.1 解析モデル	2
2.1.1 解析ケース	2
2.1.2 使用解析コード	2
2.1.3 メッシュ分割	2
2.1.4 解析条件	2
2.2 定格運転時解析	2
2.2.1 流入流出条件	2
2.2.2 解析結果	3
2.3 手動トリップ時解析	4
2.3.1 初期条件および過渡条件	4
2.3.2 解析結果	5
2.4 自然循環移行時解析	6
2.4.1 初期条件および過渡条件	6
2.4.2 解析結果	6
2.5 考察	8
2.5.1 定格運転時におけるフルセクタ、1/3セクタモデルの比較	8
2.5.2 自然循環移行時におけるフルセクタ、1/3セクタモデルの比較	8
2.5.3 手動トリップ時におけるフルセクタ、1/3セクタモデルの比較	10
第3章 炉壁保護構造熱流動解析	11
3.1 解析の着眼点	11
3.2 既往研究による検討	11
3.3 解析モデル	12
3.3.1 解析ケース	12
3.3.2 使用解析コード	12
3.3.3 メッシュ分割	12
3.3.4 解析条件	12
3.3.5 境界条件	12
3.4 解析結果	13
3.4.1 解析ケース1 (流入流速=1.53 m/s)	13
3.4.2 解析ケース2 (流入流速=0.153 m/s)	13

3.4.3	解析ケース3 (流入流速=0.0153 m/s)	13
3.4.4	解析ケース4 (流入流速=1.53 m/s から 0.765 m/s)	13
3.5	考察	14
3.5.1	越流流速による影響	14
3.5.2	周方向流速不均一による影響	14
第4章	結 言	15
謝 辞		16
参考文献		17

List of Table

Table 2.1.1	Analysis Case Number and Major Conditions	18
Table 2.2.1	Flow Rate and Temperature at Core outlet for Normal Operation	18
Table 2.3.1	Flow Rate and Temperature Transients at Core outlet for Manual Trip Event	19
Table 2.4.1	Flow Rate and Temperature Transients at Core outlet for Natural Circulation	20
Table 3.3.1	Analysis Case Number and Major Conditions	21
Table 3.3.2	Axial Temperature Distribution on Inner and Outer Walls	21

List of Figure

Fig.2.1.1	Mesh Arrangement for Upper Plenum Analysis	22
Fig.2.2.1	Velocity Vector at r-z Section of plenum under Steady-State Condition	24
Fig.2.2.2	Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping under Steady-State Condition	25
Fig.2.2.3	Temperature Fields at r-z Section of plenum under Steady-State Condition	26
Fig.2.2.4	Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping under Steady-State Condition	27
Fig.2.2.5	Velocity Vector at r- θ Lower UCS Section under Steady-State Condition	28
Fig.2.2.6	Velocity Vector at r- θ Section Lower Sodium Surface under Steady-State Condition	29
Fig.2.2.7	Temperature Fields at r- θ Lower UCS Section under Steady-State Condition	30
Fig.2.2.8	Temperature Fields at r- θ Lower Sodium Surface Section under Steady-State Condition	31
Fig.2.3.1	Flow Rate and Temperature Transients at Core outlet for analysis of Manual Trip Event	32

Fig.2.3.2	Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event	33
Fig.2.3.3	Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event	39
Fig.2.3.4	Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event	45
Fig.2.3.5	Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event	51
Fig.2.4.1	Flow Rate and Temperature Transients at Core outlet for analysis of natural Circulation	57
Fig.2.4.2	Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation	58
Fig.2.4.3	Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation	63
Fig.2.4.4	Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation	68
Fig.2.4.5	Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation	73
Fig.2.5.1	Radial Velocity Distribution in circumferential position under Steady State Condition	78
Fig.2.5.2	Radial Velocity Distribution in circumferential position during Transient of Manual Trip Event	79
Fig.2.5.3	Axial Temperature Distribution during Transient of Manual Trip Event for Full Sector Model	81
Fig.2.5.4	Axial Temperature Distribution during Transient of Manual Trip Event for One-Third Sector Model	81
Fig.2.5.5	Comparison of Axial Temperature Distribution with Full and One-Third Sector	82
Fig.2.5.6	Axial Temperature Distribution during Transient of Natural Circulation for Full Sector Model	83
Fig.2.5.7	Axial Temperature Distribution during Transient of Natural Circulation for One-Third Sector Model	83
Fig.3.3.1	Mesh Arrangement for Internal Annulus	84
Fig.3.3.2	Mesh Arrangement for Internal Annulus and Velocity Distribution for Analysis Case 4	85

Fig.3.4.1	Velocity Vector and Temperature Fields at r-z Section of Case 1 (velocity=1.53 m/s)	86
Fig.3.4.2	Velocity Vector and Temperature Fields at r- θ Section of Case 1 (velocity=1.53 m/s)	87
Fig.3.4.3	Velocity Vector and Temperature Fields at r-z Section of Case 2 (velocity=0.153 m/s)	88
Fig.3.4.4	Velocity Vector and Temperature Fields at r- θ Section of Case 2 (velocity=0.153 m/s)	89
Fig.3.4.5	Velocity Vector and Temperature Fields at r-z Section of Case 3 (velocity=0.0153 m/s)	90
Fig.3.4.6	Velocity Vector and Temperature Fields at r- θ Section of Case 3 (velocity=0.0153 m/s)	91
Fig.3.4.7	Velocity Vector and Temperature Fields at r-z Section of Case 4 (velocity=Max.1.53, Min. 0.765 m/s)	92
Fig.3.4.8	Velocity Vector and Temperature Fields at r- θ Section of Case 4 (velocity=Max.1.53, Min. 0.765 m/s)	93

第1章 緒 言

実証炉の設計妥当性確認ならびに実用化のための基盤技術検討に必要な熱流動に関する知見とデータの取得を目的として、冷却系総合試験の実施が計画されている。このため、平成5年度より試験計画および試験装置の具体化検討が開始され、熱流動に関する課題の抽出、試験計画および試験装置概念の検討が進められてきた。

本報告書は冷却系総合試験装置の概念構築のため、フル(360°)セクタと1/3(120°)セクタ原子炉容器モデルの温度成層化現象を、単相多次元コードAQUAにより解析し、1/3セクタモデルのフルセクタにおける熱流動特性の模擬性について検討した。また、炉壁保護構造の中間アニュラス部内熱流動挙動を同コードにより解析して、周方向渦の発生条件について検討を行い、試験装置の設計ならびに実機模擬性の評価を行った。

第2章 上部プレナム内温度成層化現象の熱流動解析

2.1. 解析モデル

2.1.1 解析ケース

原子炉冷却系総合試験装置⁽¹⁾の原子炉容器モデル上部プレナム（大型炉の1/2.5スケール）を対象とし、フル（360°）セクタモデルおよび1/3（120°）セクタモデルについて手動トリップ時および自然循環移行時の上部プレナムの温度成層化に着目した解析を行った。解析ケースの名称および主な解析条件をTable 2.1.1に示す。

2.1.2 使用解析コード

解析には「単相多次元解析コード AQUA」⁽²⁾を使用した。

2.1.3 メッシュ分割

Fig 2.1.1に今回の解析に使用したメッシュ分割図を示す。1/3セクタモデルの解析対象領域は、セクタ壁がホットレグ配管、コールドレグ配管に対して等しく距離を有するように、DHXをほぼ1/3セクタの中央位置となるよう設定した。

2.1.4 解析条件

解析に使用する条件を以下に示す。

- ・座標 : $r-\theta-z$ 、3次元
- ・メッシュ分割 : フルセクタモデル $27r \times 72 \theta \times 36z$
1/3セクタモデル $27r \times 24 \theta \times 36z$
- ・差分法 : 1次風上差分法⁽²⁾
- ・時間積分法 : SIMPLEST法⁽²⁾
- ・乱流モデル : $k-\varepsilon$ モデル⁽²⁾
 $C_1 = 1.44$ 、 $C_2 = 1.92$ 、 $C_3 = 0.70$
 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$

2.2. 定格運転時解析結果

2.2.1 流入流出条件

解析モデルの入口境界は、集合体ハンドリングヘッド上端面であり、ここでの冷却材温度および流速を流入条件とする。炉心部については内側炉心、外側炉心およびブランケットをモデル化する。各炉心部の流路断面積および定格運転時の流速並びに温度をTable 2.2.1に示す。本流入条件は大型炉で想定される定格運転条件に基づき、炉心出口流速に関してはRi数を大型炉と一致させるよう装置のスケール(1/2.5)の0.5乗倍、

炉心出口温度は大型炉と同一とした。また、流出条件はホットレグ配管出口に圧力一定（大気圧）条件を与える。

2.2.2 解析結果

Fig. 2.2.1 から Fig. 2.2.8 にフルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの定格運転時の速度分布および温度分布を示す。

(1) 垂直断面内速度分布

フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルのプレナム内速度分布を Fig. 2.2.1 に、ホットレグ配管を含む周方向断面での速度分布を Fig. 2.2.2 に示す。フルセクタモデルの $r-z$ 面における全体的な傾向としては、炉心部より流出した冷却材が UCS の底面に衝突し、半径方向の流れを形成することが挙げられる。このため、上部プレナム内には容器壁に沿う上昇流と UCS に沿う下降流による大きな循環渦が形成される。また、ブランケット部から流出した冷却材は、ハンドリングヘッド上端部をほぼ水平に流れ、上部プレナム内に流入して、UCS 底面よりも下側に循環渦を形成する。

1/3 セクタモデルの $r-z$ 面における全体的な傾向としては、フルセクタモデルでの結果と同様に、炉心部より流出した冷却材は UCS の底面に衝突し、半径方向の流れを形成することが挙げられる。しかし、上部プレナム内にはフルセクタモデルの場合に見られた大きな循環渦は形成されず、ホットレグ配管とセクタ壁間の $J=1$ から $J=12$ の領域で上昇流、コールドレグ配管とセクタ壁間の $J=13$ から $J=24$ の領域で下降流となっている。

フルセクタモデルの結果では容器壁面近傍の流れが上昇流であるのに対し、1/3 セクタモデルの結果では下降流となり、1/3 セクタモデルでは、フルセクタモデルのような容器壁に沿う上昇流と UCS に沿う下降流による大きな循環渦が形成されていない。なお、UCS 底面よりも下側にはフルセクタモデルでの結果と同様に循環渦が形成されている。

(2) 垂直断面内温度分布

フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルのプレナム内温度分布を Fig. 2.2.3 に、ホットレグ配管を含む周方向断面での温度分布を Fig. 2.2.4 に示す。フルセクタモデルの結果に関しては、UCS 底面付近より上部ではほぼ等温となっており、その下部ではブランケット部から流出した低温の冷却材が密度差によって上部プレナム下部領域に滞留しているが、顕著な温度成層化はみられない。また、ホットレグ配管を含む $r-z$ 面では、ホットレグ配管での吸い込みにより、配管の無い領域で見られたような上下2つの局所的な循環渦は存在しない。この領域の温度分布は、ブランケット部から流出した低温の冷却材が滞留せず、かつ循環渦が形成されないため、温度成層化も見られない。

1/3 セクタモデルに関しては、フルセクタモデルでの結果と同様に UCS 底面付近より

上部ではほぼ等温となっており、その下部に冷却材の滞留がみられるが、顕著な温度成層化は発生していない。また、ホットレグ配管を含む $r-z$ 面でも、フルセクタモデルでの結果と同様にホットレグ配管での吸い込みにより局所的な循環渦は存在せず、温度分布に関しても明瞭な温度成層化は見られない。

(3) 水平断面内速度分布

フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの UCS 底面近傍での速度分布を Fig. 2. 2. 5 に、Na 液面近傍での速度分布を Fig. 2. 2. 6 に示す。フルセクタの $r-\theta$ 面についての全体的な傾向では、炉心中心位置より容器壁に向かう放射状の流れが支配的であるが、その流れがコールドレグ配管および DHX に衝突することにより生じる周方向流れも見られ、フルセクタモデルでの $J=12$ から $J=22$ の DHX に挟まれた領域では局所的な循環渦が発生している。

1/3 セクタモデルでの $r-\theta$ 面についての全体的な傾向では、フルセクタモデルでの結果と同様に炉心中心位置より容器壁に向かう放射状の流れが支配的であるが、ホットレグ配管とセクタ壁間の $J=1$ から $J=12$ の領域では、コーナ部で生じる周方向流れによる循環渦が見られる。

(4) 水平断面内温度分布

フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの UCS 底面近傍での温度分布を Fig. 2. 2. 7 に、Na 液面近傍での温度分布を Fig. 2. 2. 8 に示す。フルセクタモデルでの傾向は、UCS 底面付近では周方向に、炉心出口から DHX およびコールドレグ配管にかけては径方向に温度分布が見られ、液面近傍には顕著な温度分布は見られない。

一方、1/3 セクタモデルの結果に関しては、UCS 底面付近では、炉心出口から DHX およびコールドレグ配管にかけて径方向に温度分布が見られ、液面近傍では顕著な温度分布は見られず、フルセクタモデルでの結果とほぼ同様の温度分布となっている。

2.3. 手動トリップ時解析結果

2.3.1 初期条件および過渡条件

手動トリップを模擬した解析の初期条件は、2.2 節の定格運転時解析で得られた定常状態である。手動トリップ時の炉心部出口流速および温度の時間変化は、実証炉の解析結果⁽¹⁾を参考に Ri 数が実証炉と一致するように流速はスケール(1/2.5)の 0.5 乗倍、温度は実証炉と同一とした。Table 2.3.1 と Fig. 2.3.1 に流速および温度の時間変化を示す。なお、各時刻は実スケールでの時刻であり、試験装置の挙動を対象とする場合には前記過渡条件の $1/2.5^{0.6}(=0.63)$ 倍となる。

2.3.2 解析結果

Fig. 2.3.2 から Fig. 2.3.5 にフルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの手動トリップ後の速度分布および温度分布を示す。

(1)速度分布

フルセクタモデルでの上部プレナム内の流況は、約 30 秒後までは、容器壁に沿う上昇流と UCS に沿う下降流とによる大きな循環渦および UCS 底面よりも下側に炉容器壁を下降する流れによる循環渦が継続して形成されている (Fig. 2.3.2(2/6) 参照)。その後は、炉心出口部の流速低下にともない、約 40 秒後から UCS 底面よりも下側位置に形成されていた循環渦は見られなくなり、容器壁と UCS 側面間を水平に蛇行する流れが形成される (Fig. 2.3.2(3/6) 参照)。この蛇行は手動トリップ後 800 秒まで継続している (Fig. 2.3.2(4/6)、2.3.2(5/6) および 2.3.2(6/6) 参照)。

ホットレグ配管を含む r-z 面では、約 40 秒後には、ポニーモータ運転に引き継がれ流れの慣性力が大きく低下するため、ホットレグ配管の吸い込みレベルよりも下側で循環渦の発生が見られるのみとなる (Fig. 2.3.3(2/6) 参照)。その後の流況はホットレグ配管の無い周方向領域での結果と同様の傾向を示している (Fig. 2.3.3(3/6)、Fig. 2.3.3(4/6)、Fig. 2.3.3(5/6) および 2.3.3(6/6) 参照)。

1/3 セクタモデルの上部プレナム内流況は、約 40 秒後までは、フルセクタモデルで見られた容器壁に沿う上昇流と UCS に沿う下降流とによる大きな循環渦は見られない (Fig. 2.3.2(1/6) 参照)。その後 UCS の中間高さ付近で複数の循環渦が形成され、ホットレグ配管吸い込み口よりも下側の領域で、容器壁と UCS 側面間を水平に蛇行する流れが形成される (Fig. 2.3.2(3/6) 参照)。この蛇行はフルセクタモデルの場合と同様に解析を実施した手動トリップ後 800 秒まで継続する (Fig. 2.3.2(4/6)、2.3.2(5/6) および 2.3.2(6/6) 参照)。

1/3 セクタモデルのホットレグ配管を含む r-z 面は、約 40 秒後以降、フルセクタモデルでの場合と同様の流速分布となっている (Fig. 2.3.3(2/6)、Fig. 2.3.3(4/6)、2.3.3(5/6) および 2.3.3(5/6) 参照)。

(2)温度分布

フルセクタモデルによる結果では、約 40 秒後から UCS 底面よりも下側の領域で温度成層が生じ (Fig. 2.3.4(2/6) および 2.3.4(3/6) 参照)、約 75 秒を経過した後に、温度成層の高温側がホットレグ配管の吸い込みレベルに達する (Fig. 2.3.4(3/6) 参照)。約 400 秒後には炉心出口温度の低下が終了して吸い込みレベル以下の温度はほぼ均一となり、この後の成層界面の上昇は連行現象支配となる (Fig. 2.3.4(5/6) および 2.3.4(6/6) 参照)。

ホットレグ配管を含む r-z 面では、約 40 秒後から UCS 底面よりも下側の領域で温度成層が生じ (Fig. 2.3.5(2/6) および 2.3.5(3/6) 参照)、約 75 秒を経過した後に、温度成層の高温側がホットレグ配管の吸い込みレベルに達する (Fig. 2.3.5 (3/6) 参照)。400 秒後からは連行現象による成層界面の上昇が見られ、同時刻以降はホットレグ配管の無い周方向領域での結果と同様の温度分布を示す。(Fig. 2.3.5(5/6) および 2.3.5(6/6) 参照)。

1/3 セクタモデルでは、約 40 秒後から、UCS 底面よりも下側の領域で温度成層が生じ (Fig. 2.3.4(2/6) および 2.3.4(3/6) 参照)、約 75 秒を経過した後に、フルセクタモデルでの結果と同様に温度成層の高温側がホットレグ配管の吸い込みレベルに達している (Fig. 2.3.4(3/6) 参照)。約 400 秒後以降も、フルセクタモデルの場合と同様に推移する (Fig. 2.3.4(5/6) および 2.3.4(6/6) 参照)。

ホットレグ配管を含む r-z 面では、ホットレグ配管の無い周方向領域での結果と同様に、約 40 秒後から UCS 底面よりも下側の領域で温度成層が生じ (Fig. 2.3.5(2/6) および 2.3.5 (3/6) 参照)、75 秒を経過した後に、温度成層の高温側がホットレグ配管の吸い込みレベルに達する (Fig. 2.3.5(3/6) 参照)。400 秒後以降も、ホットレグ配管の無い周方向領域での結果と同じく、また、フルセクタモデルでの結果と同様に推移する (Fig. 2.3.5(5/6) および 2.3.5 (6/6) 参照)。

2.4. 自然循環移行時解析結果

2.4.1 初期条件および過渡条件

自然循環移行時を模擬した解析の初期条件は、2.2 節の定格運転時解析で得られた定常状態である。炉心部出口流速および温度の時間変化は、実証炉で想定される定格運転条件から全電源喪失を想定した S-COPD による解析結果⁽³⁾を使用し、Ri 数を大型炉と一致するように流速はスケール(1/2.5)の 0.5 乗倍、温度は実証炉と同一とした。Table 2.4.1 および Fig. 2.4.1 に流速および温度の時間変化を示す。各時刻は、2.3 節の手動トリップ時解析と同様に、実スケールでの時刻であり、試験装置での挙動を対象とする場合には前記過渡条件の $1/2.5^{0.5}(=0.63)$ 倍となる。

2.4.2 解析結果

Fig. 2.4.2 から Fig. 2.4.5 にフルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの自然循環移行時の速度分布および温度分布を示す。

(1) 速度分布

フルセクタモデルでの上部プレナム内の流況は、約 20 秒後までは手動トリップ時と同様に、容器壁に沿う上昇流と UCS に沿う下降流による大きな循環渦および UCS 底面よりも下側に炉容器壁を下降する流れによる循環渦が継続して形成されている (Fig.

2.4.2(1/5)参照)。約30秒後から150秒後にかけてはホットレグ配管吸い込み口レベルより下側で、水平方向に蛇行する流れが見られる (Fig. 2.4.2(2/5) および2.4.2(3/5)参照)。

自然循環移行時には、約150秒を経過した後、崩壊熱により冷却材温度が上昇し、UCS側壁に沿って上向きに流れるため、UCSに沿う上昇流と炉容器壁に沿う下降流による大きな循環渦が再び形成される (Fig. 2.4.2(4/5)参照)。300秒後以降は炉心出口温度が再び低下し、ホットレグ配管吸い込みレベルより下側の領域で蛇行する流れが再度形成される (Fig. 2.4.2(5/5)参照)。

ホットレグ配管を含む $r-z$ 面では、約30秒後から冷却材の温度および流量が低下するためホットレグ配管の吸い込みレベルよりも下側で循環渦の発生が見られる (Fig. 2.4.3(2/5)参照)。約75秒後以降は容器壁とUCS側面間を蛇行する流れが形成され、(Fig. 2.4.3(3/5)参照)、150秒を経過した後の流況はホットレグ配管の無い周方向領域での結果と同様である (Fig. 2.4.3(4/5)およびFig. 2.4.3(5/5)参照)。

1/3セクタモデルの上部プレナム内流況は、約20秒後までは循環渦がみられず (Fig. 2.4.2(1/5)参照)、約40秒後からUCSの中間高さ付近で循環渦が生じ、複数の比較的小規模な渦が上部プレナム内に形成される (Fig. 2.4.2(3/5)参照)。その後は、ホットレグ配管吸い込み口レベルより下側で、フルセクタの場合と同様に水平方向に蛇行する流れが見られる。約150秒を経過した後はフルセクタモデルでの結果と同様の流況を示す (Fig. 2.4.2(4/5)およびFig. 2.4.2(5/5)参照)。

ホットレグ配管を含む $r-z$ 面についてもフルセクタモデルでの結果と同様の流況である (Fig. 2.4.3(2/5)、Fig. 2.4.3(3/5)、Fig. 2.4.3(4/5)およびFig. 2.4.3(5/5)参照)。

(2) 温度分布

フルセクタモデルによる結果では、約30秒後からUCS底面よりも下側の領域で温度成層が生じる (Fig. 2.4.4(2/5) および2.4.4(3/5)参照)。約150秒を経過した後、冷却材温度が上昇し、このUCS下側の温度成層は解消するが (Fig. 2.4.4(4/5)参照)、300秒後以降は冷却材温度が低下するため、再び温度成層が発生する (Fig. 2.4.4(5/5)参照)。この温度分布の変化の傾向はホットレグ配管を含む $r-z$ 面についても同様である。

1/3セクタモデルによる結果に関しても、フルセクタモデルでの結果と同様に約30秒後からUCS底面よりも下側の領域で温度成層が生じている (Fig. 2.4.4(2/5) および2.4.4(3/5)参照)。150秒を経過した後も、フルセクタモデルでの結果と同じく温度成層は解消し (Fig. 2.4.4(4/5)参照)、300秒後以降に再び温度成層の発生が見られる (Fig. 2.4.4(5/5)参照)。

2.5. 考察

2.5.1 定格運転時におけるフルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの比較

(1) 速度分布

1/3 セクタモデルを用いた解析では、セクタ壁により周方向流れがさえぎられるため、フルセクタモデルを用いた場合の結果と同一の流況とはならない。フルセクタモデルによる結果では、上部プレナム内に UCS 底面付近よりも上側と下側に 2 つの循環渦を形成するが、1/3 セクタでは UCS 底面付近よりも上側では循環渦を生じない。

フルセクタモデルでは、ホットレグ配管、コールドレグ配管および DHX 近傍以外の領域においては、容器壁面近傍で上昇流、UCS 側面で下降流であるのに対し、1/3 セクタモデルでは、ホットレグ配管とセクタ壁間の領域が上昇流、コールドレグ配管とセクタ壁間の領域が下降流となっている。この流況の相違は、1/3 セクタモデルのホットレグ配管側のセクタ壁とホットレグ配管領域に比較的大きな周方向の循環渦が生じるためと考えられる。

フルセクタモデルによる結果では、UCS 底面の領域からプレナム部への径方向流れは、Fig. 2.5.1 に示すように、配管および DHX により径方向への流れが遮られる領域が存在するため、周方向に一樣ではない。また、配管および DHX の配置が 1/3 領域で非対称性があるため、流況も非対称となる。

1/3 セクタモデルによる結果では、配管および DHX に衝突した流れは周方向へ向かうが、セクタ壁が周方向流れを遮り径方向流れに変わる。このため、径方向流速の周方向不均一がフルセクタの場合よりも大きく、セクタ壁とホットレグ配管の領域に周方向の比較的大きな循環渦が生じると考えられる。

(2) 温度分布

流速分布の相違が温度分布へ及ぼす影響は、UCS 底面と炉心上部間の領域に見られる。ただし、フルセクタモデルによる結果の高温領域が、1/3 セクタモデルの場合に比べわずかに広がっている程度であり、その違いは比較的小さい。UCS 底面よりも上側領域でのプレナム温度は、フルセクタモデルおよび 1/3 セクタモデルによる結果ともほぼ均一で、炉心出口部で急峻な温度勾配を示しており、基本的な温度分布に大きな相違はない。

2.5.2 手動トリップ時におけるフルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの比較

(1) 速度分布

手動トリップ時における、フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの速度分布の相違は、定格運転時から約 40 秒までにおいて顕著である。フルセクタモデルによる結果では、UCS 底面より上側の領域で循環渦を形成しているが、1/3 セクタモデルの結果

にこの循環渦は見られない。これは、Fig. 2.5.2 に示すように、定格運転時から手動トリップ後約 40 秒までは、セクタ壁の存在により UCS 底面からプレナム内への径方向流速成分の周方向分布が、フルセクタモデルによる結果と 1/3 セクタモデルによる結果とで異なるためと考えられる。

40 秒以降の速度分布は、フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルとで類似しており、150 秒後以降も両者に差異は見られない。これは、炉心出口流速が 0.3 m/s (約 30 秒後のポニーモータ運転 15% による炉心出口流速) を下回るようになると周方向の流速成分が小さくなり、Fig. 2.5.2 に示すように UCS 底面からプレナム内への径方向流速の周方向分布についてフルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの結果が類似するようになるためと考えられる。

(2) 温度分布

手動トリップ後 0~800 秒の上部プレナム軸方向温度分布の推移を、フルセクタモデルおよび 1/3 セクタモデルの結果について、それぞれ Fig. 2.5.3 および Fig. 2.5.4 に示す。手動トリップ後は炉心出口流量および温度の低下により、UCS 底面より下側の領域で温度成層化が起こり始め、約 75 秒後に温度成層域の高温側がホットレグ配管の吸い込み位置に到達する。その後、成層界面は上昇を続け、400 秒後には炉心出口温度の低下が終了し一定温度となるために、ホットレグ配管の吸い込み位置より下側の領域の温度が均一化する。それ以降、温度成層界面は連行現象により上昇し続けるが、熱伝導効果により温度勾配は徐々に緩やかになる。

この温度分布の時間推移はフルセクタモデルによる結果と 1/3 セクタモデルによる結果で大きな差はない。

(3) 成層界面上昇特性

成層界面上昇特性に関し、フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの結果を Fig. 2.5.5 に比較する。ここに示した軸方向温度勾配および上昇速度には、1 次風上差分法による数値拡散の影響および乱流効果の模擬に $k-\epsilon$ モデルを使用したことによる影響 (等方近似) があり、熱拡散を過大評価していると考えられる。しかし、1/3 セクタモデルによるフルセクタモデルの模擬性という観点からは、各時刻における両者の軸方向温度分布を直接比較することで、成層界面挙動の差を相対的に比較評価できると考えられる。

成層界面が形成され始める時刻 300 秒からは、フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルによる結果の軸方向温度分布に大きな差はなく、成層界面上昇特性は両者でほぼ同じである。本結果から 1/3 セクタモデルにより、手動トリップ事象に関する熱流動挙動の模擬が可能であると考えられる。

2.5.3 自然循環移行時におけるフルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの比較

(1) 速度分布

自然循環移行時におけるフルセクタモデルと 1/3 セクタモデルとの速度分布に関する解析結果の相違は、手動トリップの場合と同様に、定格運転時から約 40 秒までが顕著である。

40 秒以降から 150 秒までの間に、フルセクタモデルにおいて UCS 底面より上側の領域での循環渦が明瞭に見られなくなり、1/3 セクタモデルの場合と類似の速度分布となる。300 秒以降では上部プレナム内に UCS に沿う上昇流と炉容器壁に沿う下降流による大きな循環渦が再び形成され、この流況もフルセクタモデルによる結果と 1/3 セクタモデルによる結果で同様の傾向である。これは、手動トリップの場合と同じく、UCS 底面からプレナム内への径方向流速成分の周方向分布が両モデルで類似するためと考えられる。(UCS 底面からプレナム内への径方向流速成分の周方向分布時間変化は手動トリップと同様のため省略する。)

(2) 温度分布

原子炉スクラム後 0~500 秒間の上部プレナム軸方向温度分布の推移をフルセクタモデルおよび 1/3 セクタモデルについて、それぞれ Fig. 2.5.6 および Fig. 2.5.7 に示す。原子炉スクラム後は炉心出口流量および温度の低下により、UCS 底面より下側の領域で温度成層化が起こり始めるが、150 秒後では再び炉心出口温度が上昇することによって、温度成層は見られなくなる。約 200 秒後には、炉心出口温度が再度低下し、温度成層化が起こり始める。

これらの温度分布の推移はフルセクタモデルによる結果と 1/3 セクタモデルによる結果で大きな差がなく、本結果から 1/3 セクタモデルにより自然循環移行時に関する熱流動挙動の模擬が可能であると考えられる。

第3章 炉壁保護構造熱流動解析

3.1 解析の着眼点

炉壁冷却方式においては低温のナトリウムを低流速で狭い高温ナトリウムに接する間隙流路を通過させることから、当該領域での熱流動挙動は自然対流と強制対流が共存した複合対流場となる。実証炉における炉壁冷却部では、外側アニュラスから堰を越流して中間アニュラスに流入する流れが存在する。これが無い場合には狭い垂直環状空間内自然対流として、Ra数の条件により周方向に自然対流渦の生じることが知られており、それに起因した周方向温度分布によって構造健全性への影響が懸念されている。ここでは、越流の流速が周方向自然対流発生に及ぼす影響を解析的に定量化する。

3.2 既往研究による検討

既往研究^{(4), (5)}によれば越流のない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数は上下面ビオ一数(Bi)が無窮大(上下の流体温度が上下の構造温度に同じ)の場合、

$$Ra_c = \min\{684H_2^{3.067}R^b, 1.02(\pi H_2)^4\} \quad (3.1)$$

$$\text{ここに } b = -39 \times 10^{-9} H_2^3 + 3.97 \times 10^{-6} H_2^2 - 1.44 \times 10^{-6} H_2 - 7.76 \times 10^{-1}$$

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

$$H_2 = L / \delta$$

$$\text{ただし } H_1 = L / \pi D \leq 2, 100 \leq H_2 \leq 400, R \leq 10$$

各変数は、

L:アニュラス部高さ、D:環状空間中央直径、 δ :ギャップ幅、 λ :流体の熱伝導率、 λ_w :壁の熱伝導率および Δl :壁厚である。

大型炉の各部の寸法および熱伝導率をL=6.4m、D=10.16m、 δ =0.1m、 λ =68.9W/m·k、 λ_w =20.8W/m·k、 Δl =0.02mとすれば、

$$H_2 = 64$$

$$H_1 = 0.2$$

$$R = 1063$$

$$b = -0.853$$

となり、Rの値は予測式の適用範囲よりも100倍大きい(Rの値が大きくなれば、臨界Ra数は大きくなり、自然対流は生じにくくなる。)が、(3.1)式で評価すれば臨界Ra数は以下のようなになる。

$$Ra_c = \min\{6.21 \times 10^5, 1.66 \times 10^9\} = 6.21 \times 10^5 \quad (3.2)$$

一方、平成6年度の解析結果⁽⁶⁾から下部 Na 温度 467°C、上部 Na 温度 427°Cとして Ra 数は、 $Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} Pr = \frac{9.8 \times 2.71 \times 10^{-4} \times 40 \times 6.4^3}{(3.05 \times 10^{-7})^2} \times 0.00489 = 1.46 \times 10^{12}$

である。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が、R の値が大きく、既往の経験式では周方向自然対流の有無を評価できないため、AQUA を用いた 3次元解析による予備解析を行う。

3.3. 解析モデル

3.3.1 解析ケース

解析ケースを Table 3.3.1 に示す。実証炉炉壁保護構造中間アニュラス 360 度フルセクター（実寸）についての解析を、外側アニュラスからの越流流速をパラメータとする 3 ケースおよび越流流速が周方向に不均一な場合を想定した 1 ケースを実施する。

3.3.2 使用解析コード

解析には「単相多次元熱流動解析コード AQUA」⁽²⁾を使用する。

3.3.3 メッシュ分割

Fig. 3.3.1 および 3.3.2 に解析メッシュ図を示す。解析は炉壁保護構造の中間アニュラスについて着目し、外側アニュラスからの越流流速（以下 流入流速）および側面温度分布を境界条件とする。

3.3.4 解析条件

- ・座標 : r-θ-z、3次元
- ・メッシュ数 : 13r (フローホール 2 メッシュ、中間アニュラス 11 メッシュ)
*144 θ*20z
- ・差分法 : 運動量式；QUICK 法⁽²⁾、エネルギー式；QUICK-FRAM 法⁽²⁾
- ・時間積分法 : MICE 法⁽²⁾
- ・乱流モデル : ASM⁽⁷⁾

3.3.5 境界条件

(1) 流入流速および流入幅

平成6年度に実施した炉壁保護構造の 2次元解析結果⁽⁶⁾から、リファレンスケースとして流入流速を 1.53 m/s、流入幅を 5 mm とする。周方向の越流流速が不均一な場合を想定した解析ケース 4 は、0 度方向の流速を 1.53 m/s、180 度方向の流速をその 1/2 の 0.765 m/s とし、その間の領域の速度は Fig. 3.3.2 に示すように線形補間して

与える。

(2) 流出条件

フローホール 48 個 (ϕ 80 mm) を Fig. 3.3.2 に示すように周方向に等間隔に設ける。

(3) 側壁条件

平成 6 年度に実施した炉壁保護構造の 2 次元解析結果⁽⁶⁾から、Table 3.3.2 に示すように内側アニュラス側壁の軸方向温度分布を仮定し、また、外側アニュラス側壁温度は 395°C 一定と仮定する。

3.4. 解析結果

3.4.1 解析ケース 1 (流入流速=1.53 m/s)

Fig. 3.4.1 に r-z 面での速度および温度分布 (J=1) を、Fig. 3.4.2 に r- θ 面での速度および温度分布 (I=4) を示す。r-z 面での結果には上部に循環渦が見られるが、内壁近傍で上昇流となっている以外はほとんどの領域で下降流となっている。また、r- θ 面については周方向流れがみられるが、顕著な周方向温度差を生じさせるには至っていない。

3.4.2 解析ケース 2 (流入流速=0.153 m/s)

Fig. 3.4.3 に r-z 面での速度および温度分布 (J=1) を、Fig. 3.4.4 に r- θ 面での速度および温度分布 (I=4) を示す。流速分布および温度分布ともに解析ケース 1 の場合とほぼ同様であるが、r-z 面に関しては、内壁近傍の上昇流を示す範囲が拡大している。また、r- θ 面については周方向流れはみられない。

3.4.3 解析ケース 3 (流入流速=0.0153 m/s)

Fig. 3.4.5 に r-z 面での速度および温度分布 (J=1) を、Fig. 3.4.6 に r- θ 面での速度および温度分布 (I=4) を示す。解析ケース 1 および 2 の場合とほぼ同様の速度および温度分布である。内壁近傍の上昇流を示す範囲は、解析ケース 2 の場合よりもさらに拡大している。

3.4.4 解析ケース 4 (流入流速=1.53 m/s から 0.765 m/s)

Fig. 3.4.7 に r-z 面での速度および温度分布 (J=1) を、Fig. 3.4.8 に r- θ 面での速度および温度分布 (I=4) を示す。r-z 面では流入流速 1.53 m/s の断面においては、解析ケース 1 の r-z 面速度分布と類似しており温度分布についても同様である。また、r- θ 面については 180 度方向 (流入流速 0.765 m/s) の位置において上昇流が見られるものの、大きなセル対流を形成するには至っておらず、このため周方向に顕著な温度分布は生じていない。

3.5. 考察

3.5.1 越流流速による影響

解析ケース 1、2 および 3 の越流流速 (1.53、0.153 および 0.0153 m/s) のいずれにおいても周方向自然対流は生じなかった。解析ケース 1、2 および 3 の Ra 数はそれぞれ 1.06×10^{12} 、 1.94×10^{12} および 2.16×10^{12} である。いずれの解析ケースの Ra 数も 3.2 節の垂直環状空間に対する周方向自然対流発生の臨界 Ra 数 6.21×10^5 よりも大きい、周方向自然対流は生じなかった。軸方向に流入・流出がある本体系の場合には、3.2 節に示した既往研究の場合のような密閉環状空間で自然対流による上昇流が上部に衝突し周方向に流れる場合と異なり、Ra 数のみにより周方向自然対流の発生を予測することはできないと考えられる。

解析結果から越流流速が大きい場合 (1.53 m/s) には、強制対流が支配的な流れとなる。また、越流流速が小さい場合 (0.0153 m/s) は、自然対流により上昇する流れが越流に引き込まれ、越流による下降流が上昇流を反転させる流路パスとして働いている。このため、越流流速が大きい場合にも、小さい場合にも r-z 面内の流れは 2 次元的となっている。従って、現状の実機の運転条件において炉壁保護構造の設計は、周方向自然対流の発生に対して十分な余裕を持っていると考えられる。

3.5.2 周方向流速不均一による影響

周方向に流速を不均一に与えた場合にも、越流による強制対流が自然対流よりも支配的な流れであり、周方向自然対流は生じない。また、より流速を低下させた場合にも解析ケース 3 の低流速の場合から推定すれば、越流による下降流が上昇流を反転させるように作用すると考えられ、周方向自然対流は生じないと予測される。このため、周方向に越流流速の不均一がある場合においても、現状の炉壁保護構造の設計は、実機の運転条件で周方向自然対流の発生に対して十分な余裕を持っていると考えられる。

第4章 結 言

原子炉冷却系総合試験装置の概念構築のため、原子炉容器モデルに関し、フル (360°) セクタと 1/3 (120°) セクタにおける温度成層化現象を単相多次元コード AQUA により解析し、1/3 セクタモデルのフルセクタにおける熱流動特性の模擬性について検討した。また、炉壁保護構造の中間アニュラス部内熱流動挙動を同コードにより解析し、周方向自然対流渦の発生について評価を実施した。温度成層化および炉壁保護構造の検討から得られた成果をそれぞれ以下に示す。

[上部プレナム内温度成層化現象の熱流動特性]

- (1) フルセクタモデルと 1/3 セクタモデルの比較では、手動トリップ時および自然循環移行時ともに、定格運転状態から約 40 秒後までは流況の相違が見られる。一方、炉心出口流速が低下したポニーモータ運転および自然循環状態では速度分布および温度分布ともに顕著な相違はない。
- (2) 炉心出口流速が低下してからのホットレグ配管吸い込み部近傍の流況は、ホットレグ配管のない他の周方向領域の流況と大きな差はない。
- (3) (1) および (2) から、手動トリップ時および自然循環移行時の試験は、1/3 セクタモデルによりフルセクタの熱流動挙動の模擬が可能と判断できる。

[炉壁保護構造の熱流動特性]

- (1) 堰を越えて中間アニュラス内へ落下する流入流速に関し、定格流速から定格流速の 1% (1.53 m/s、0.153 m/s および 0.0153 m/sec) までの範囲では、中間アニュラス内に周方向自然対流は発生しない。
- (2) 越流流速が周方向に不均一な場合 (最大流速 1.53 m/s、最小流速 0.765 m/s として、最大最小間を線形補完) にも周方向自然対流は発生せず、実機の運転条件において周方向自然対流による温度分布が問題となる可能性は小さいことが確認できた。

謝 辞

本報告書の解析作業の実施にあたり、AQUA コードによる解析の実行および解析結果の
図形処理に関し協力して頂いた（株）CSK 松本 英一氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 戸田 他、冷却系総合試験装置の詳細化、PNC PJ9216 95-002、1995年7月
- (2) 前川 他、単相多次元熱流動解析コード-AQUA- 数値計算説明書、PNC N5920 87-012、1987年5月
- (3) 大滝、炉容器上部プレナム多次元解析用境界条件の提示、内部資料、1995年5月
- (4) 鳥居 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編）49巻447号（昭58-11）
- (5) H. Kawashima et. al, Analysis of Natural Convection in Narrow Annular Gaps of LMFBR, Journal of Nuclear Science and Technology, 23[5], pp. 451-460 (May 1986)
- (6) 戸田 他、炉内熱流動現象の予備解析、PNC PJ9055 95-003、1995年3月
- (7) 村松 他、原子炉容器内冷却材の温度成層化の評価（第4報）、応力代数式乱流モデルの検討、PNC N9410 89-132、1989年9月

Table 2.1.1 Case Number and Major Analysis Conditions

Analysis Case Number	Analysis Event	Full or 1/3 Sector Model
1	Normal Operation	Full Sector
2		1/3 Sector
3	Manual Trip Event	Full Sector
4		1/3 Sector
5	Natural Circulation	Full Sector
6		1/3 Sector

Table 2.2.1 Flow Rate and Temperature at Core outlet for Normal Operation

Region	Inner Core		Outer Core		Blanket	
Sectional Area (m ²)	0.736		0.812		1.915	
	Velocity (m/s)	Temp. (°C)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)
	1.8939	577.7	0.8473	544.8	0.0378	395.0

Table 2.3.1 Flow Rate and Temperature Transients
at Core outlet for Manual Trip Event

Region	Inner Core		Outer Core		Blanket	
Time (sec.)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)
0.0	1.8939	577.7	0.8473	544.8	0.0378	395.0
10.0	0.7640		0.3450		0.0141	
15.0	0.5720		0.2640		0.0079	
20.0	0.4640		0.2140		0.0046	
25.0	0.3910		0.1800		0.0027	
30.0	0.3373	525.1	0.1550	495.1	0.0018	395.0
35.0	0.2970		0.1430		0.0015	
40.0	0.2840		0.1370		0.0016	
60.0	0.2840	490.4	0.1370	462.5	0.0017	395.0
120.0	0.2840	462.1	0.1370	435.8	0.0018	395.0
220.0	0.2840	425.4	0.1370	410.0	0.0018	395.0
440.0	0.2840	395.1	0.1370	395.0	0.0018	395.0
590.0	0.2840	395.0	0.1370	395.0	0.0018	395.0

**Table 2.4.1 Flow Rate and Temperature Transients
at Core outlet for Natural Circulation**

Region	Inner Core		Outer Core		Blanket	
Time (sec.)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)
0.0	1.8939	577.7	0.8473	544.8	0.0378	395.0
10.0	0.6399	567.3	0.2936	537.0	0.0141	428.0
20.0	0.3341	533.2	0.1524	513.9	0.0079	431.7
30.0	0.1831	522.5	0.0820	505.2	0.0046	434.7
40.0	0.1002	524.3	0.0430	504.6	0.0027	436.9
50.0	0.0686	530.5	0.0278	506.9	0.0018	438.4
100.0	0.0656	604.6	0.0244	540.6	0.0015	441.6
150.0	0.0687	632.4	0.0266	568.4	0.0016	445.2
200.0	0.0675	598.2	0.0272	558.7	0.0017	451.0
250.0	0.0660	573.1	0.0270	544.1	0.0018	455.8
300.0	0.0651	560.3	0.0267	534.4	0.0018	458.5
350.0	0.0644	552.5	0.0265	527.9	0.0018	459.9
400.0	0.0635	547.6	0.0260	523.6	0.0018	460.5
450.0	0.0621	544.9	0.0254	520.7	0.0018	461.0
500.0	0.0604	543.6	0.0246	519.0	0.0017	461.4

Table 3.3.1 Case Number and Major Analysis Conditions

Analysis Case	Velocity of Flow Over Weir (m/s)	Symmetric or Asymmetric
1	1.53	Symmetric
2	0.153	Symmetric
3	0.0153	Symmetric
4	Max.1.53, Min.0.765	Asymmetric (Ref. Fig. 3.3.2)

Table 3.3.2 Axial Temperature Distribution on Inner and Outer Walls

Height (mm)	Temp. of Inner Wall (°C)	Temp. of Outer Wall (°C)
160	427.1	
480	427.4	
800	428.6	
1120	430.4	
1440	431.9	
1760	433.1	
2080	434.3	
2400	435.3	
2720	436.4	
3040	437.5	395.0
3360	438.8	
3680	440.2	
4000	441.9	
4320	444.0	
4640	446.4	
4960	449.3	
5280	452.8	
5600	456.8	
5920	461.5	
6240	467.0	

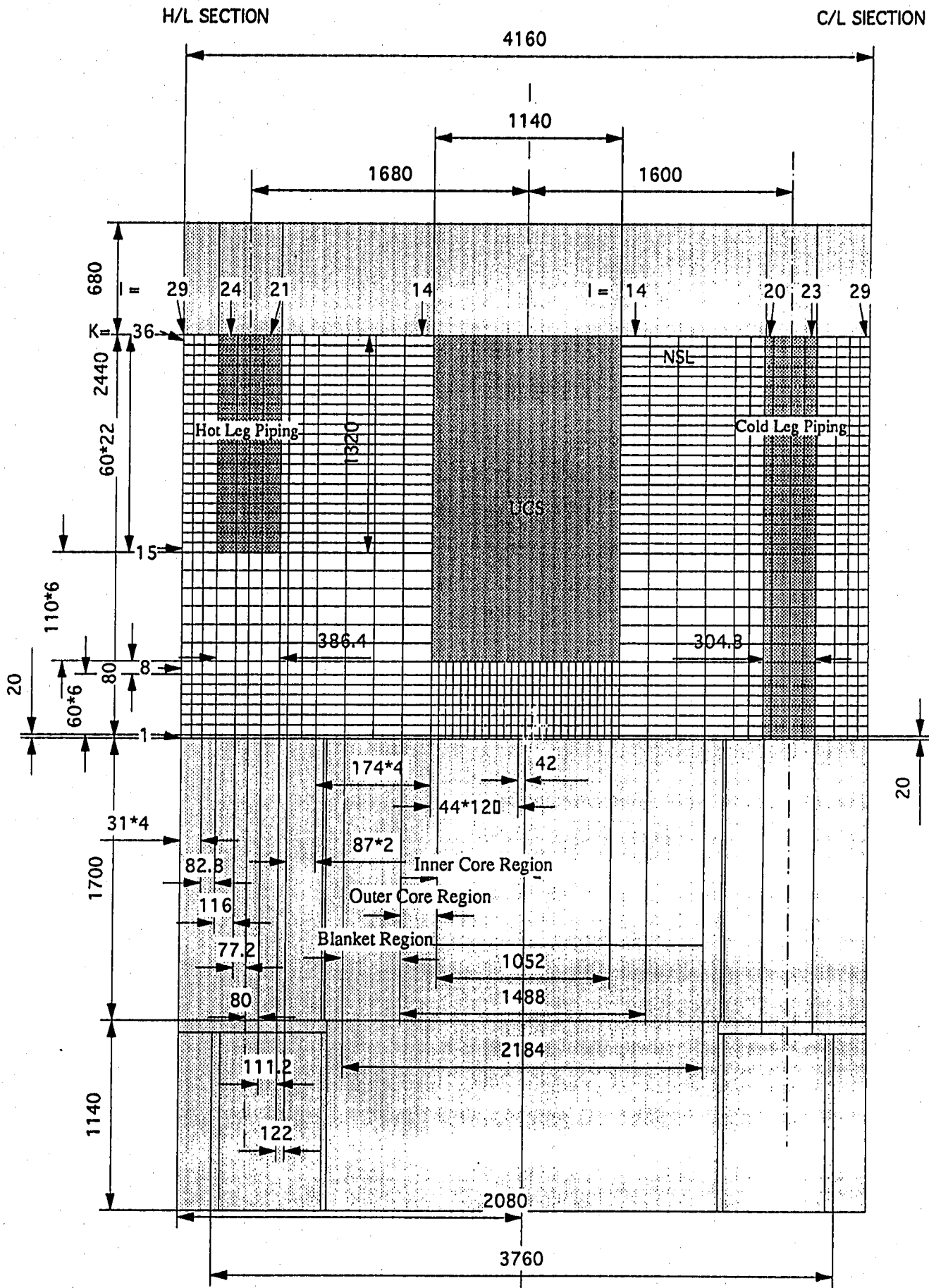


Fig.2.1.1 Mesh Arrangement for Upper Plenum Analysis (1/2)

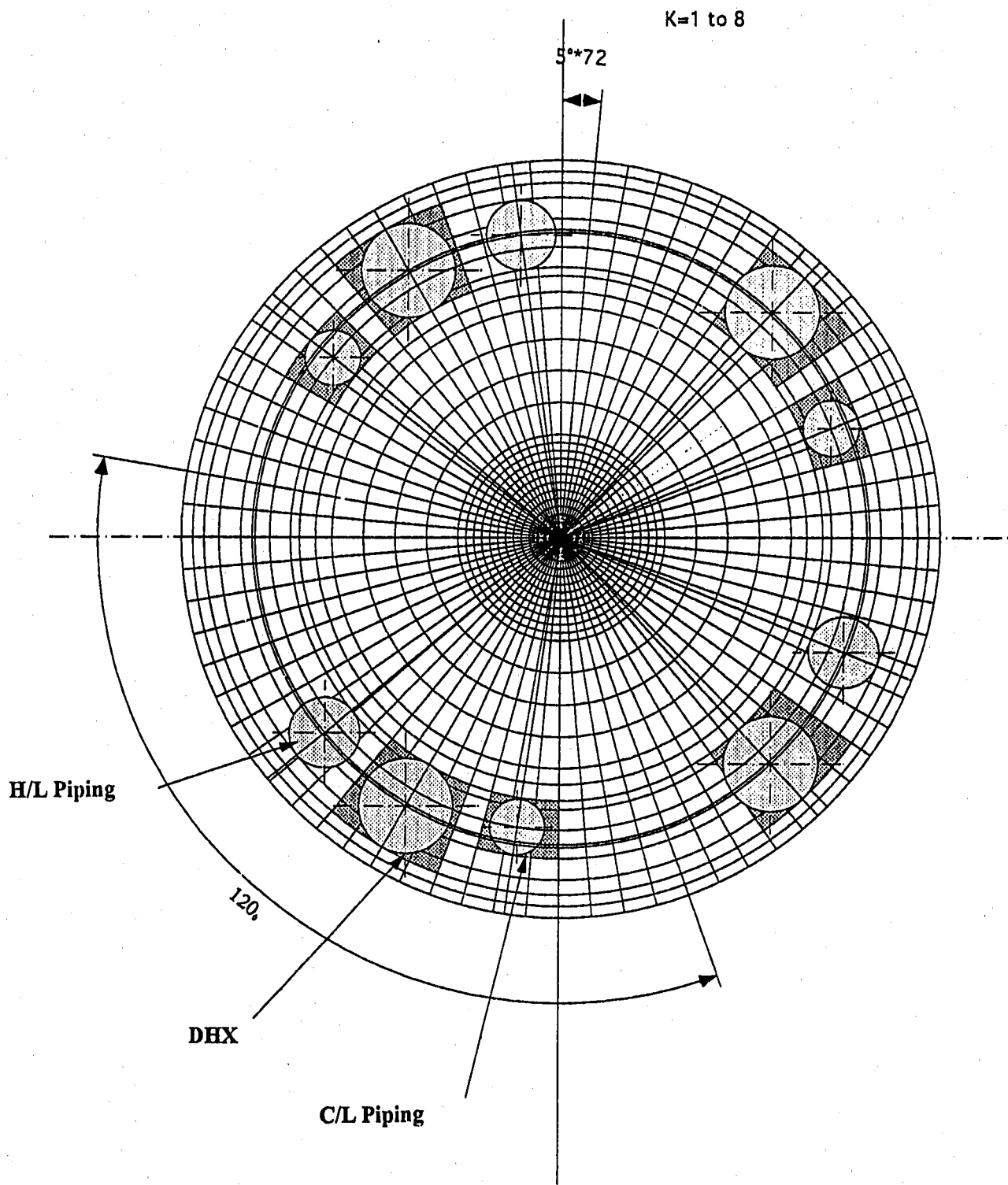
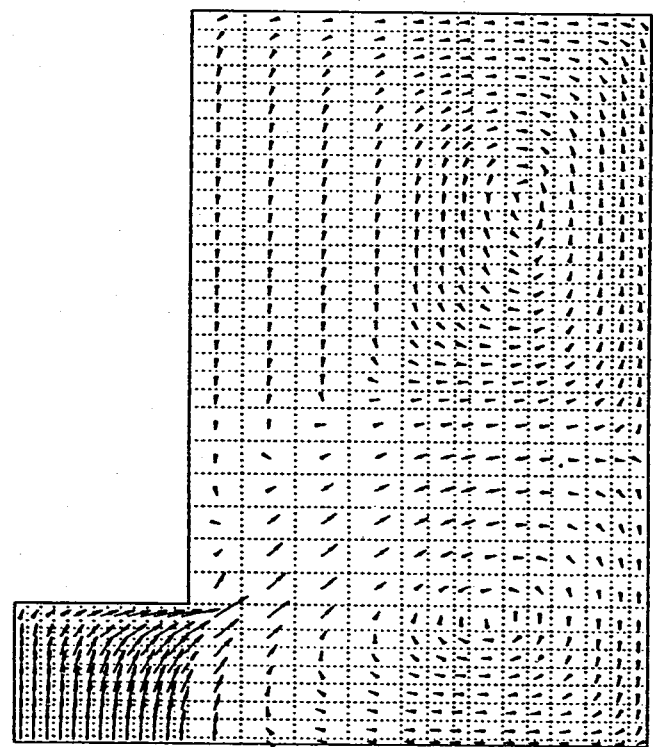
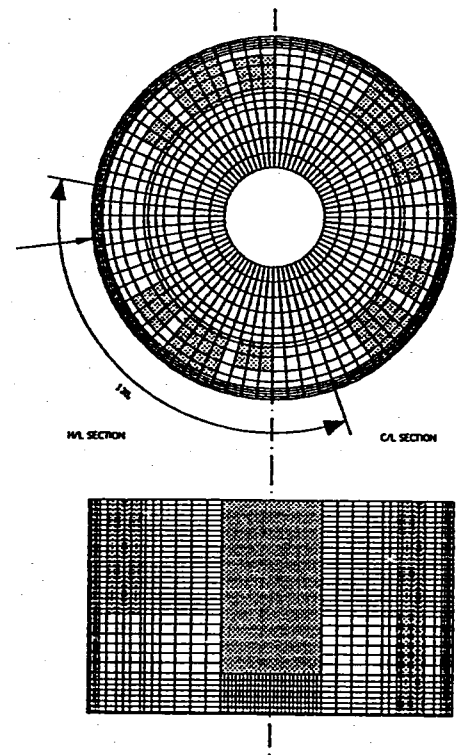


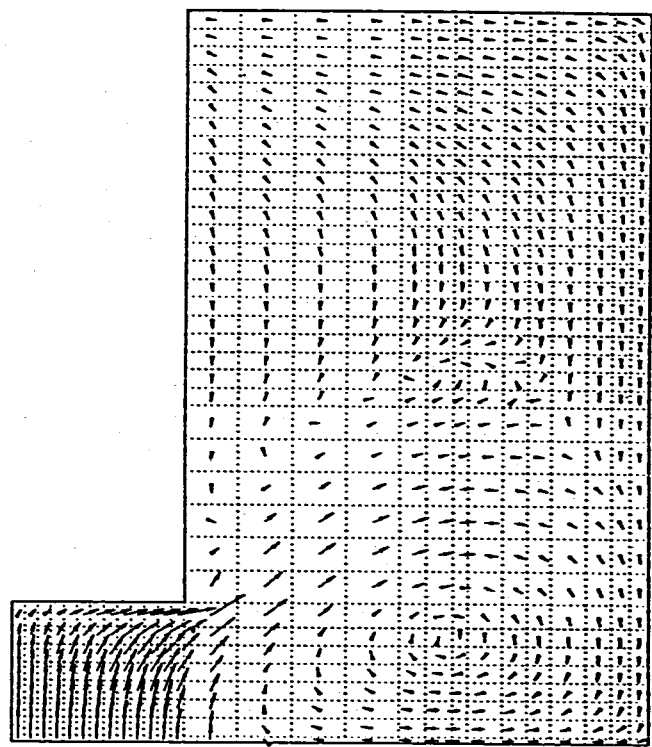
Fig.2.1.1 Mesh Arrangement for Upper Plenum Analysis (2/2)

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Thirds Sector Model)



J = 38
3.00 M/S

Full Sector Model

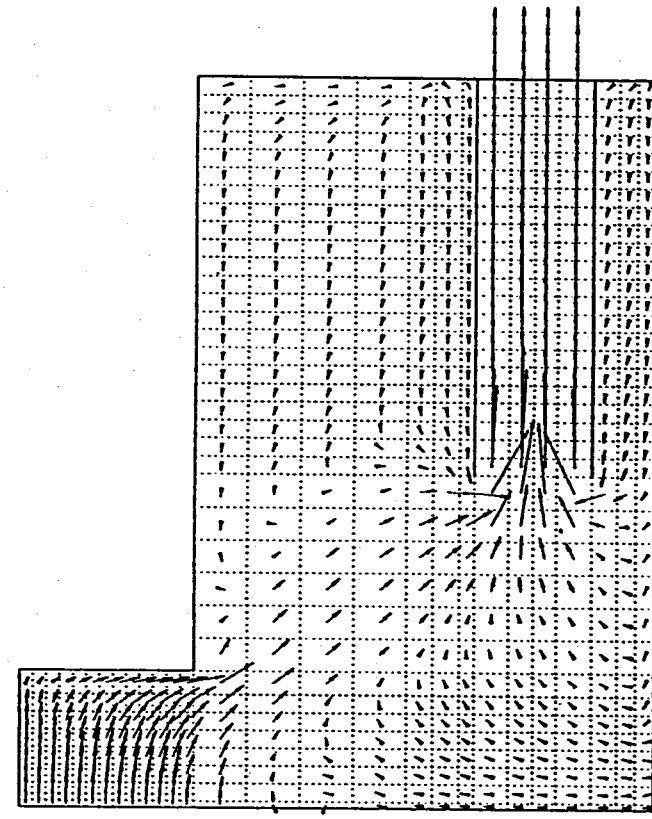
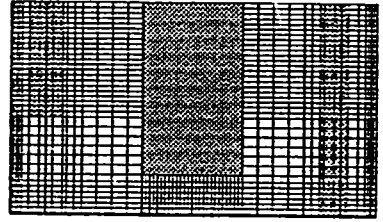
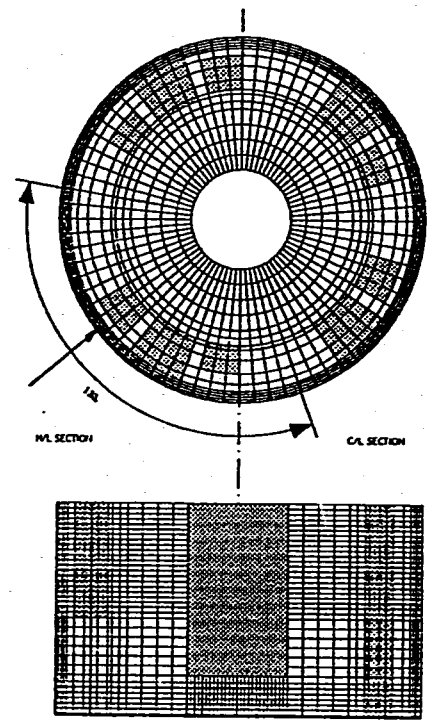


J = 4
3.00 M/S

One-Third Sector Model

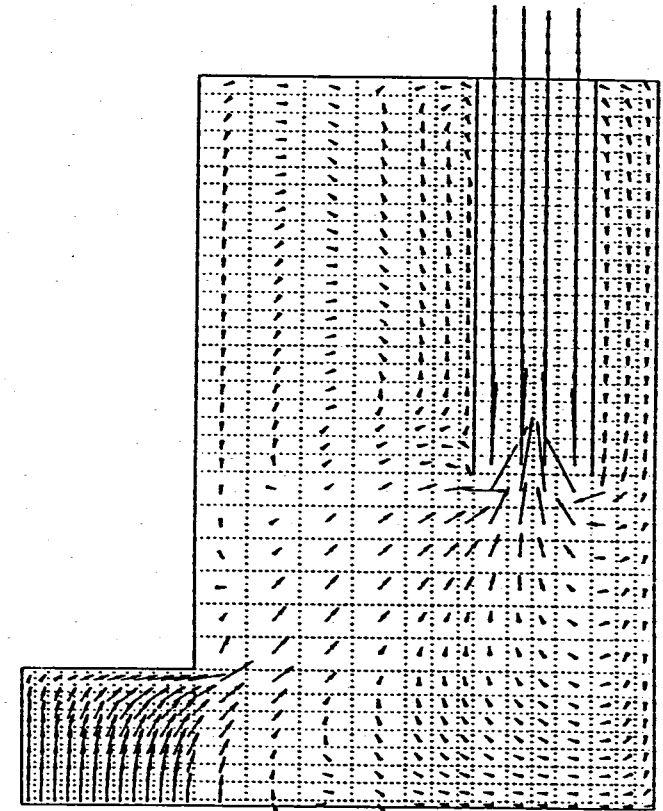
Fig.2.2.1 Velocity Vector at r-z Section of plenum under Steady-State Condition

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Thirds Sector Model)



J = 44
3.00 M/S

Full Sector Model

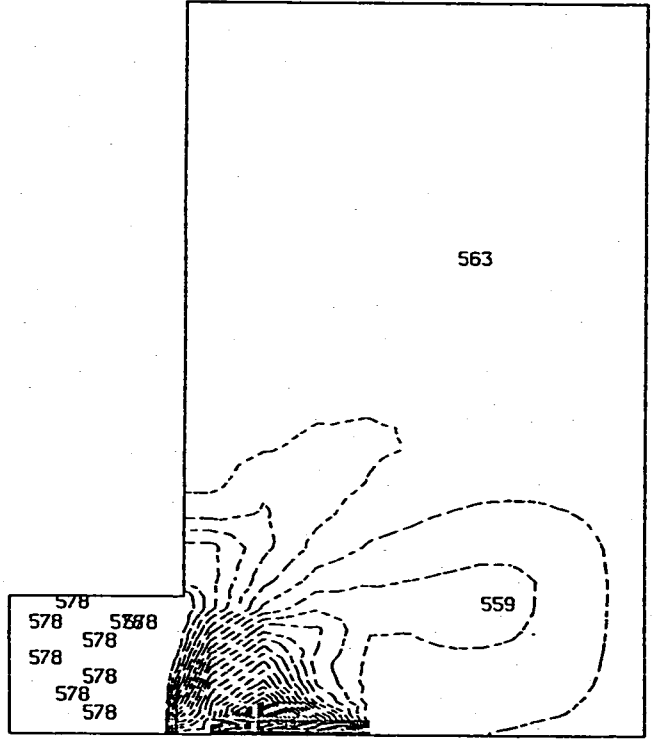
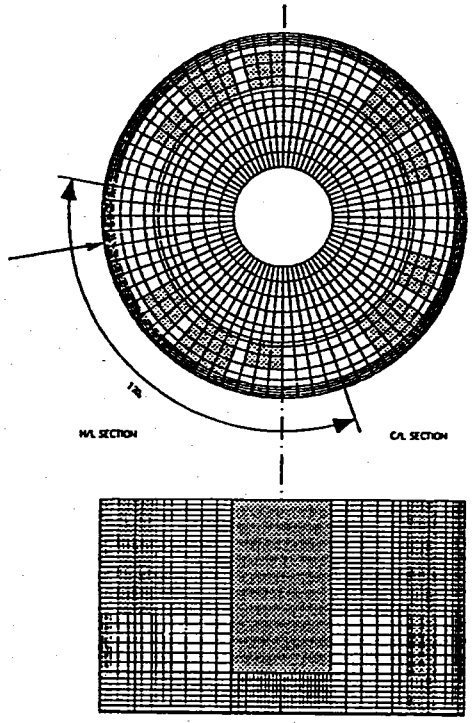


J = 10
3.00 M/S

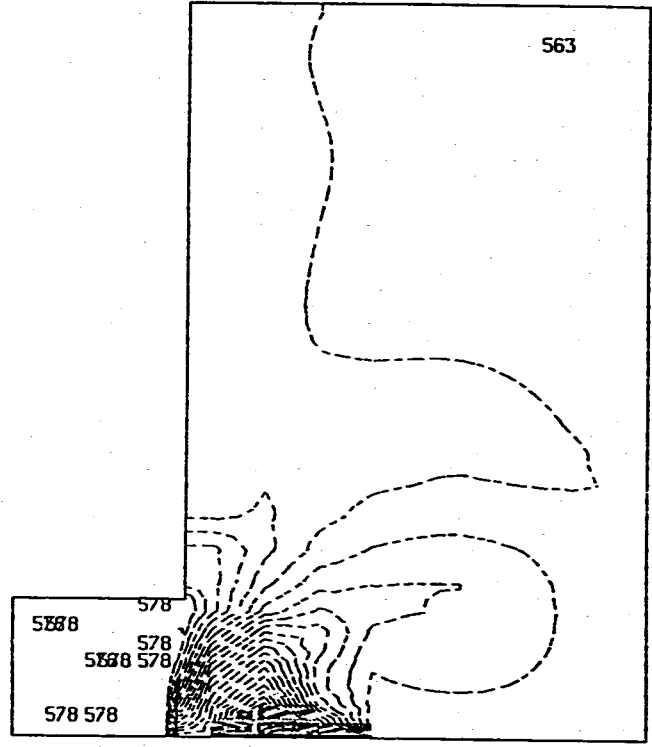
One-Third Sector Model

Fig.2.2.2 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping under Steady-State Condition

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Thirds Sector Model)



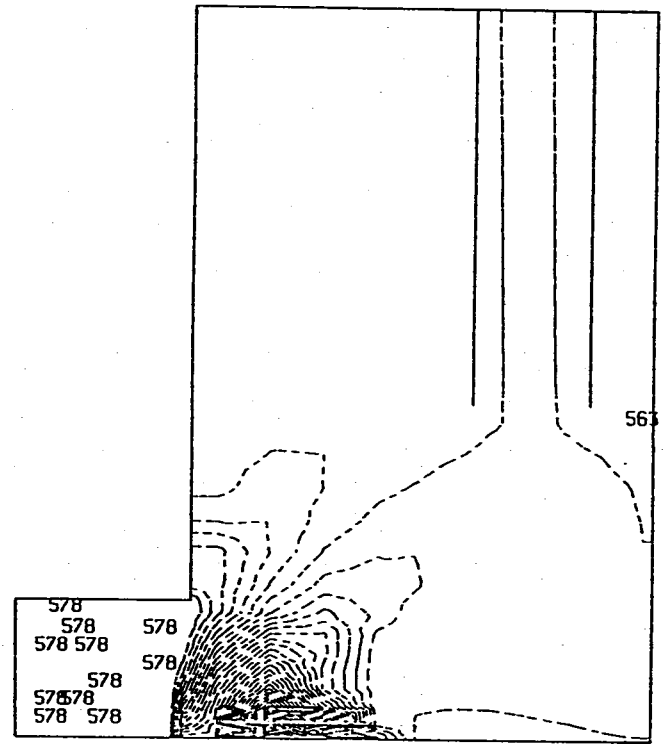
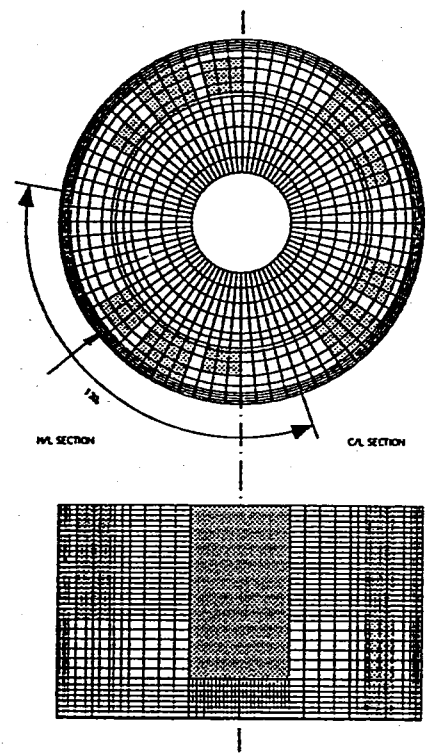
J = 38
Full Sector Model



J = 4
One-Third Sector Model

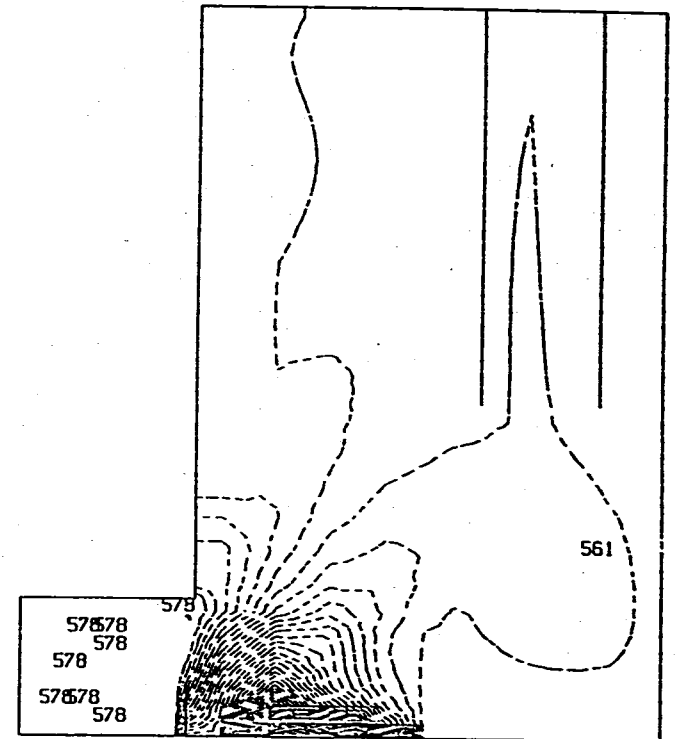
Fig.2.2.3 Temperature Fields at r-z Section of plenum under Steady-State Condition

J=44 (Full Sector Model)
 J=10 (One-Thirds Sector Model)



J = 44

Full Sector Model



J = 10

One-Third Sector Model

Fig.2.2.4 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping under Steady-State Condition

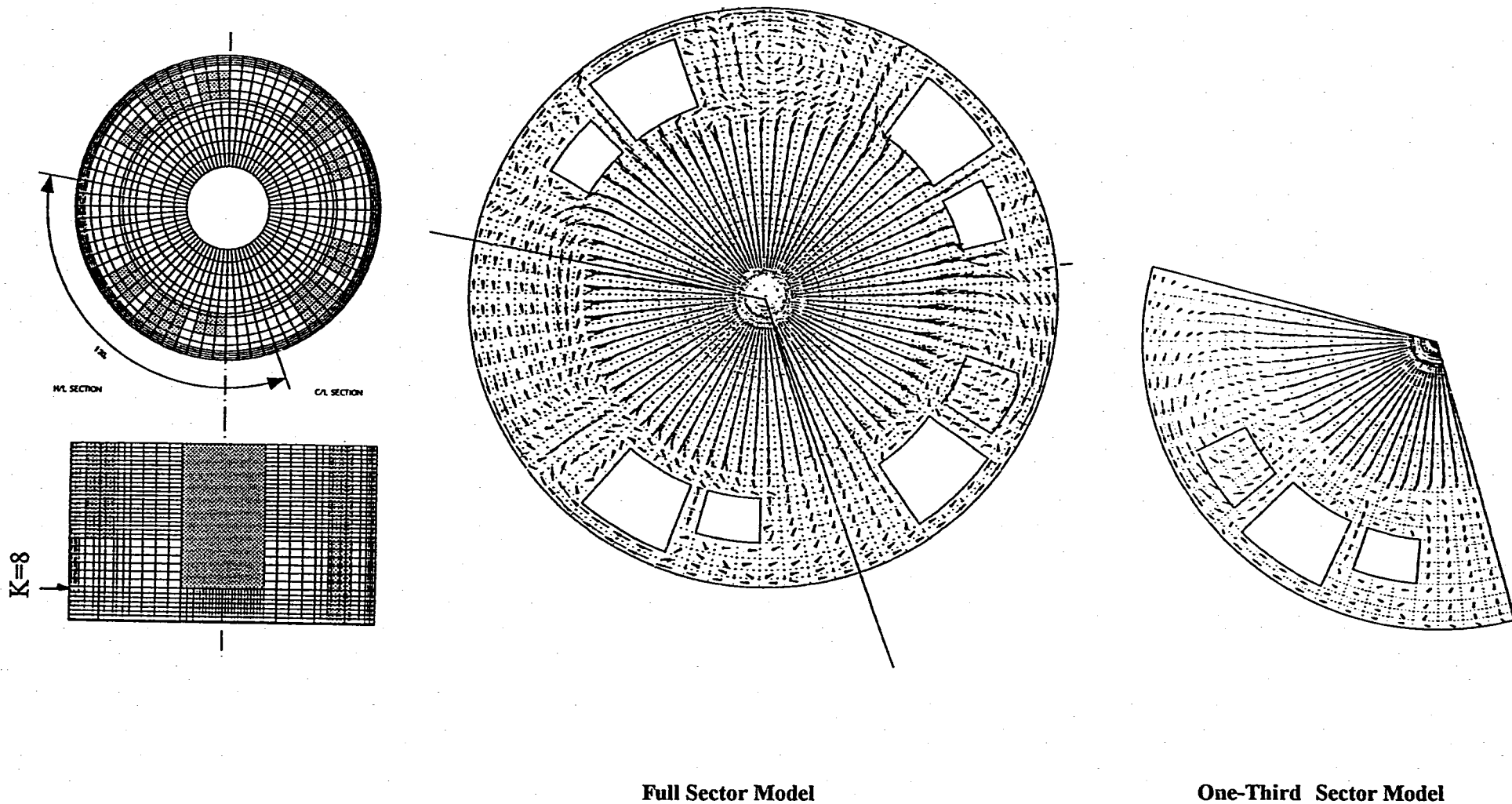


Fig.2.2.5 Velocity Vector at $r-\theta$ Lower UCS Section under Steady-State Condition

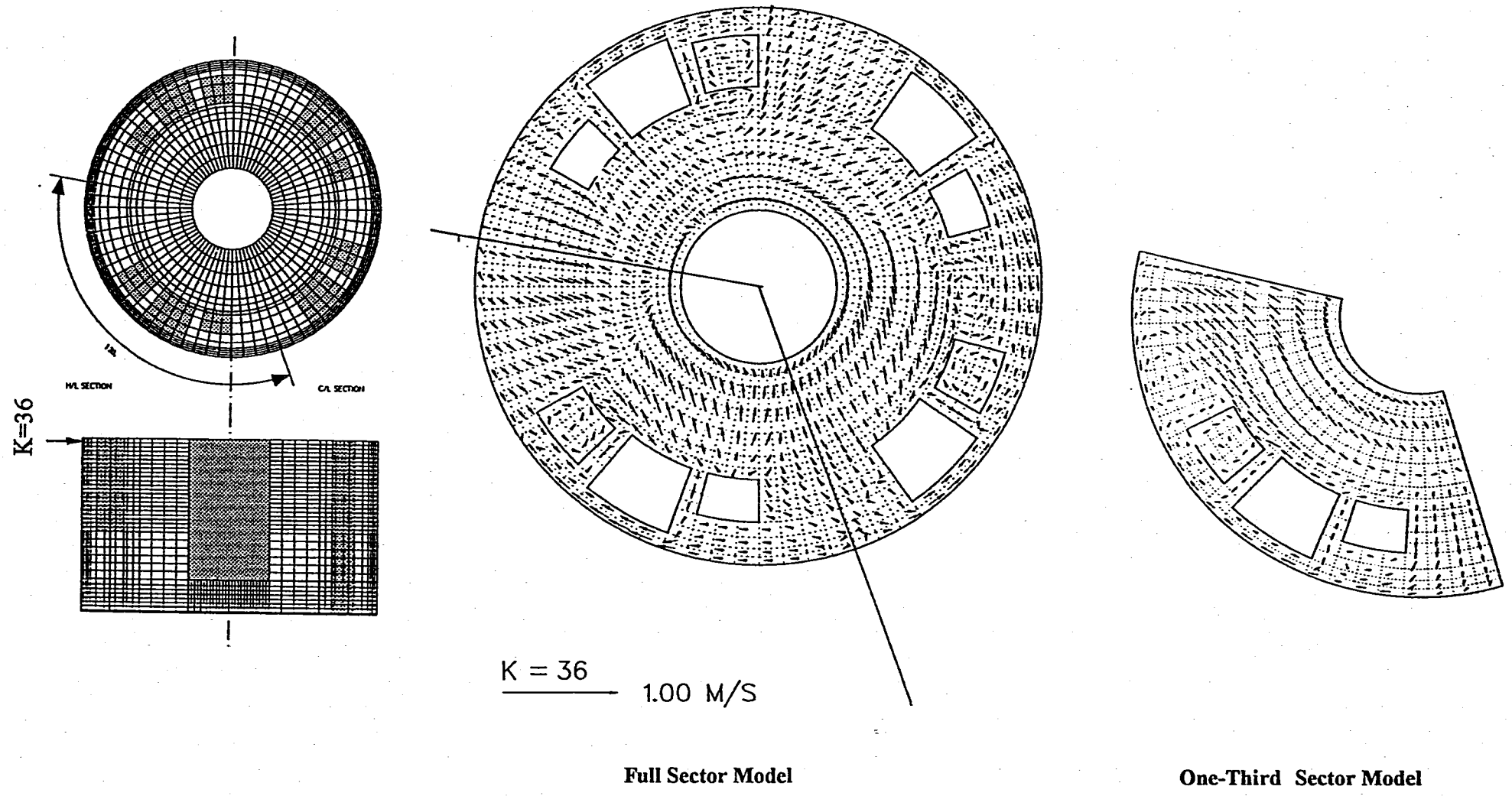


Fig.2.2.6 Velocity Vector at r- θ Section Lower Sodium Surface under Steady-State Condition

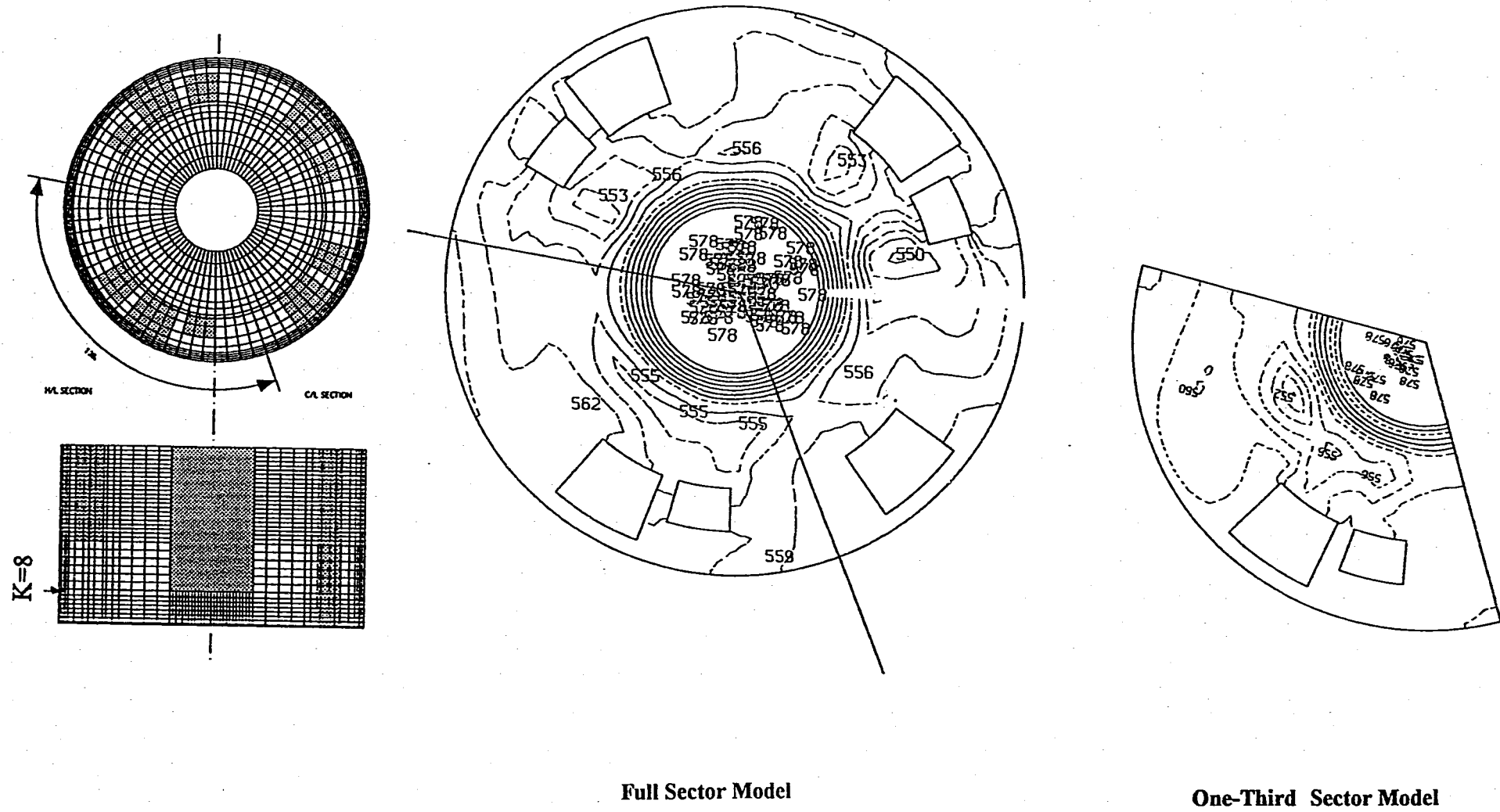


Fig.2.2.7 Temperature Fields at r- θ Lower UCS Section under Steady-State Condition

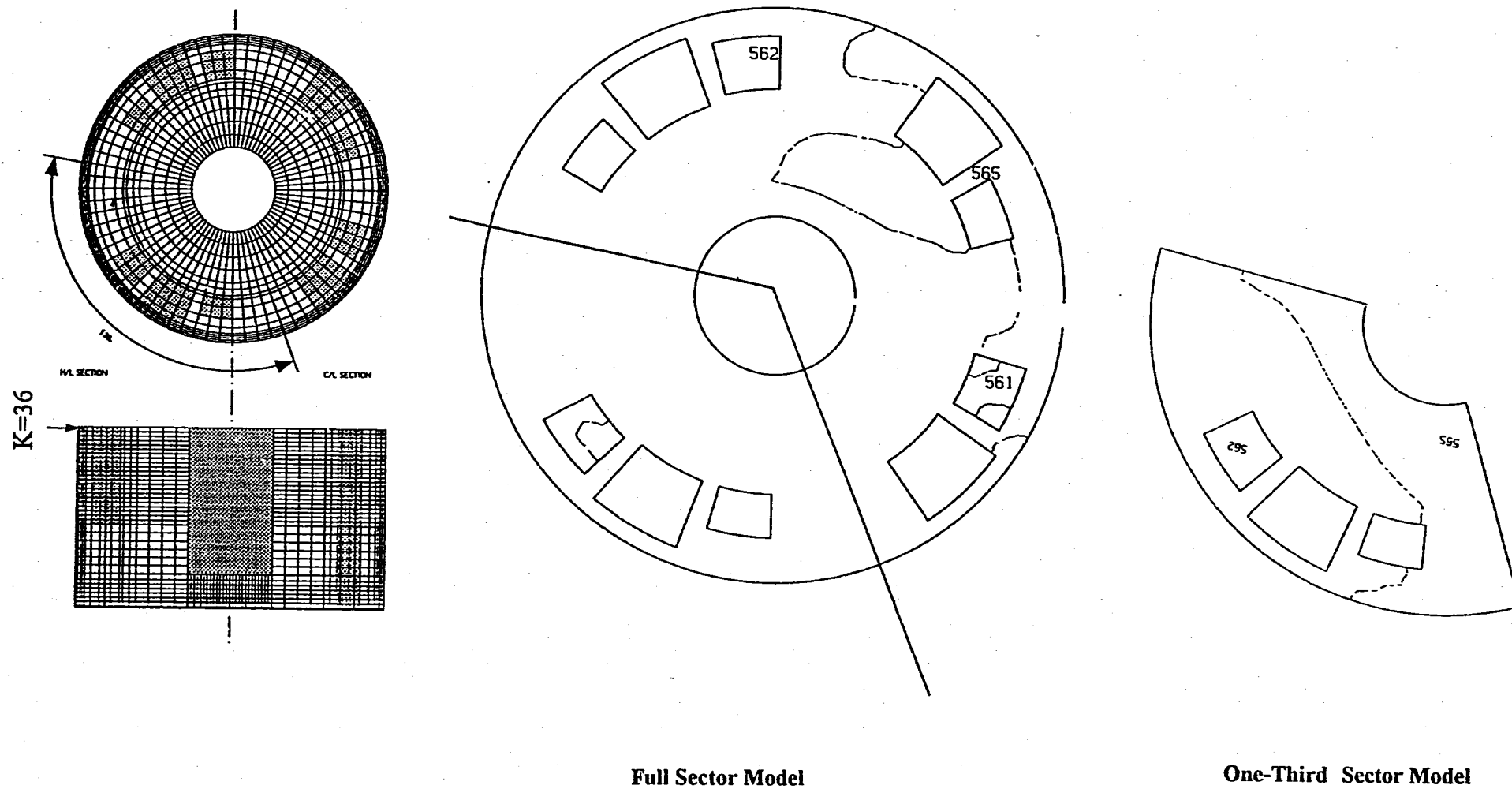


Fig.2.2.8 Temperature Fields at r-θ Lower Sodium Surface Section under Steady-State Condition

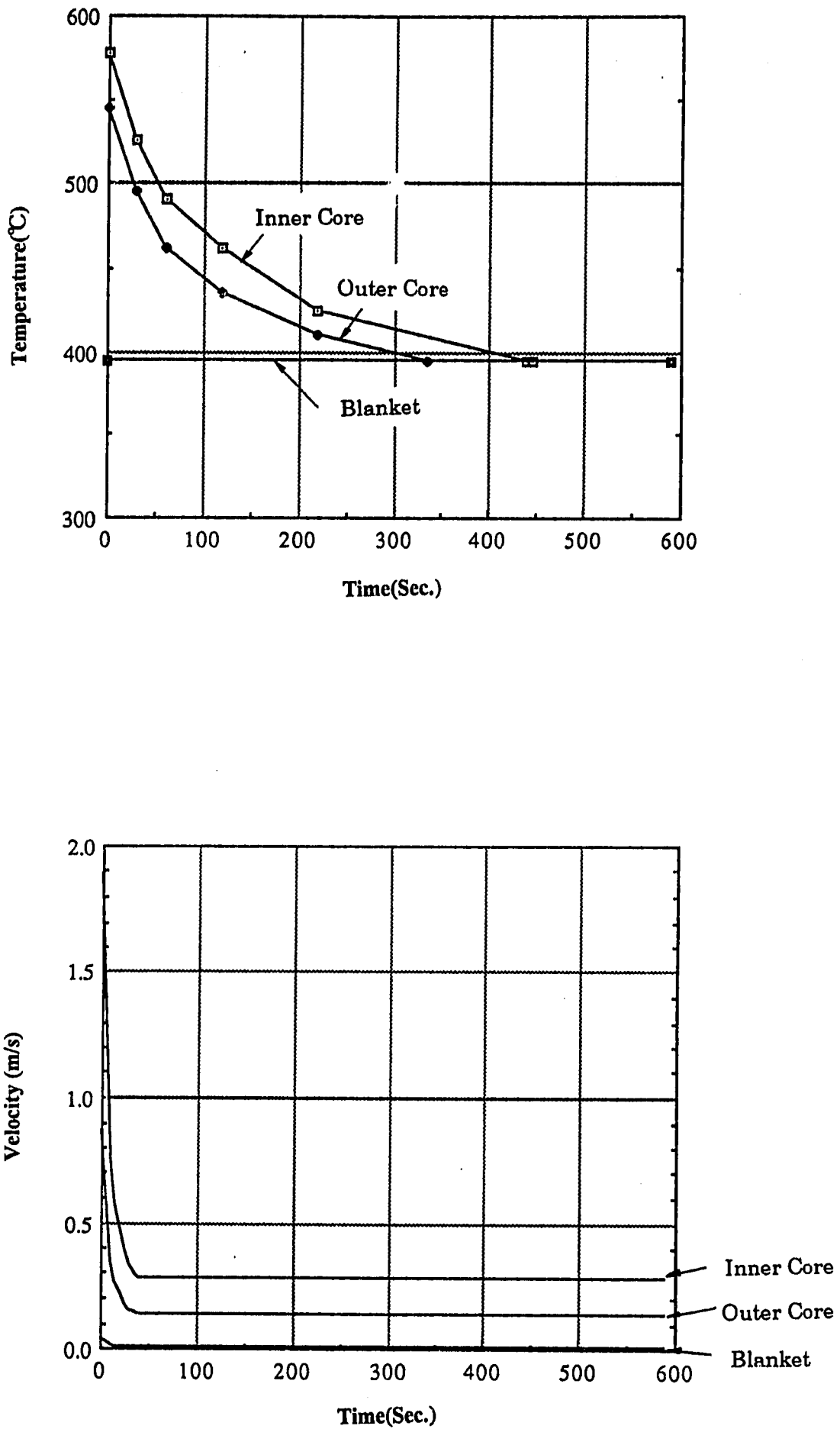
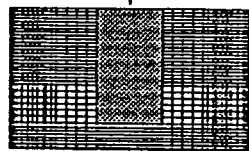
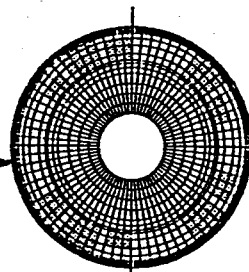


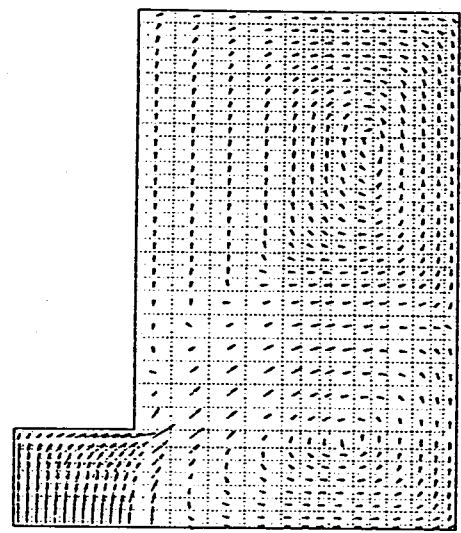
Fig.2.3.1 Flow Rate and Temperature Transients at Core outlet for Analysis of Manual Trip Event

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)

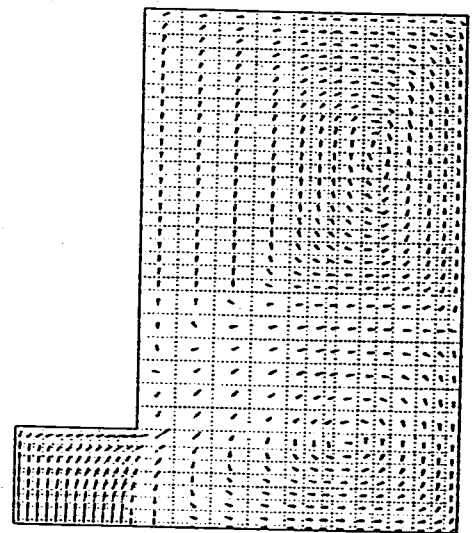
Full Sector Model



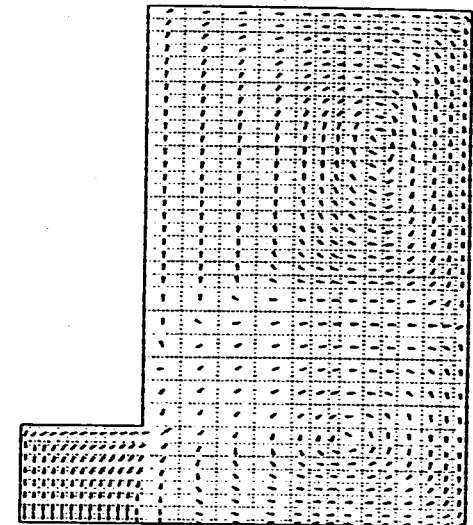
One-Third Sector Model



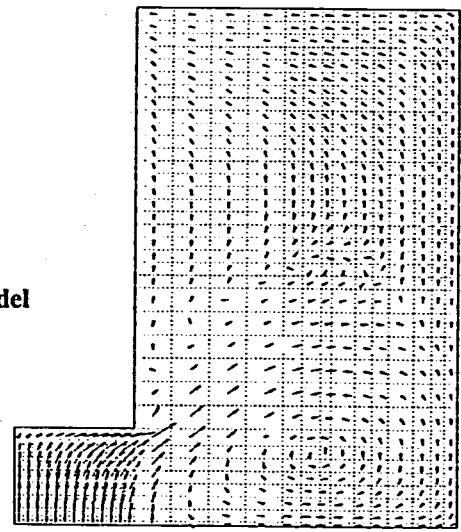
J = 38 3.00 M/S TIME 0.0 SEC.



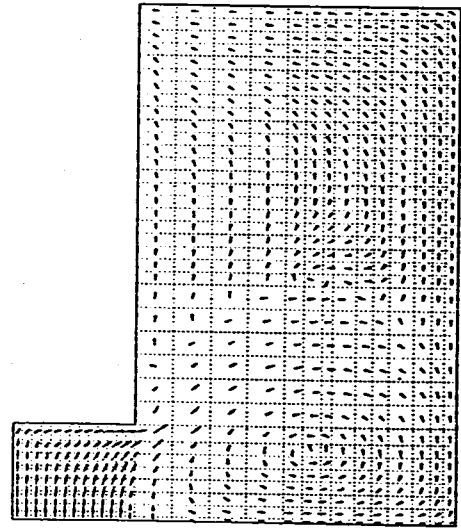
J = 38 3.00 M/S TIME 5.0 SEC.



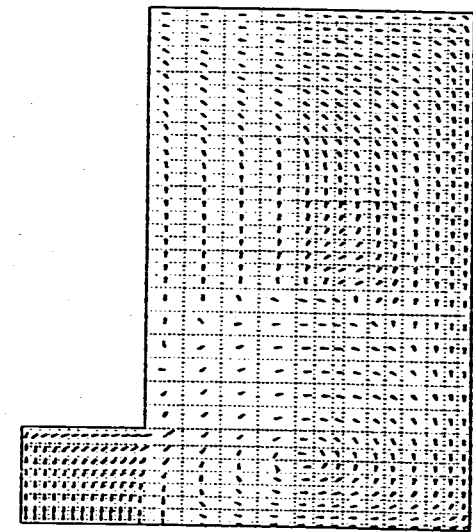
J = 38 3.00 M/S TIME 10.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 0.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 5.0 SEC.

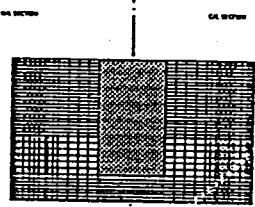
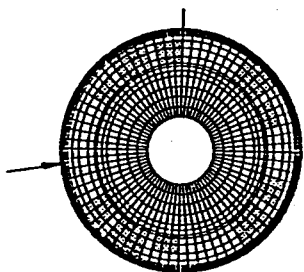


J = 4 3.00 M/S TIME 10.0 SEC.

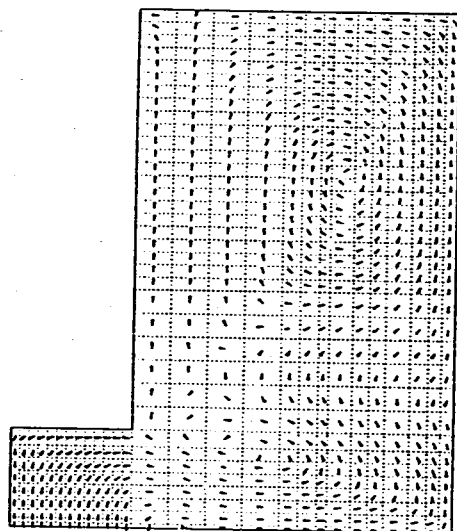
Fig.2.3.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (1/6)

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)

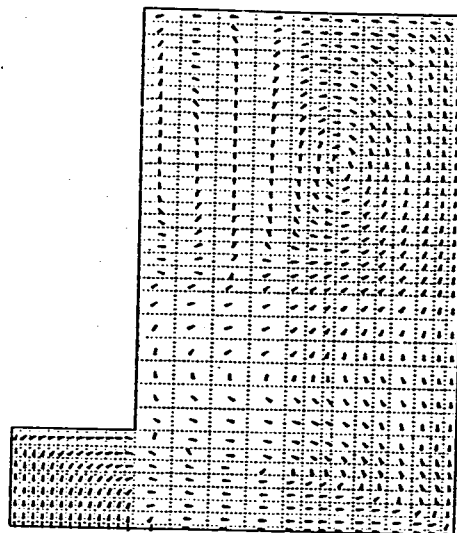
Full Sector Model



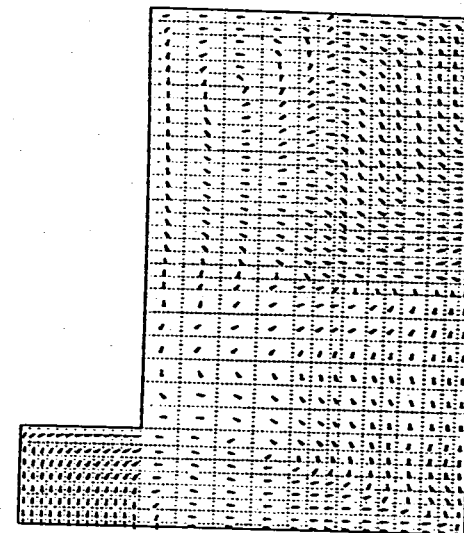
One-Third Sector Model



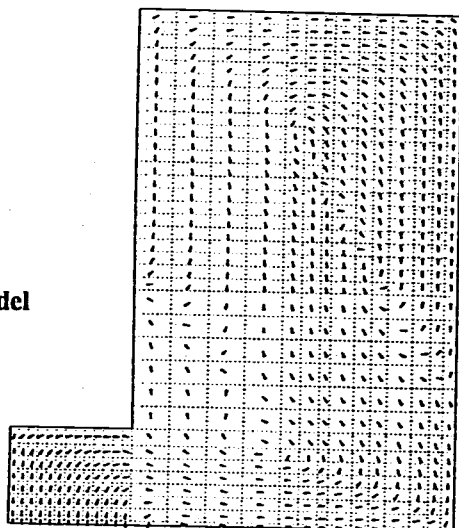
J = 38 3.00 M/S TIME 50.0 SEC.



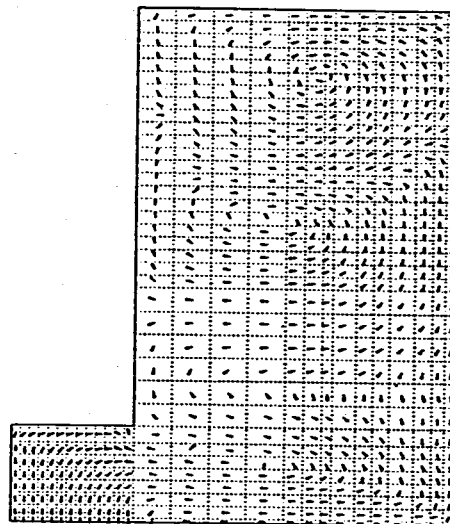
J = 38 3.00 M/S TIME 75.0 SEC.



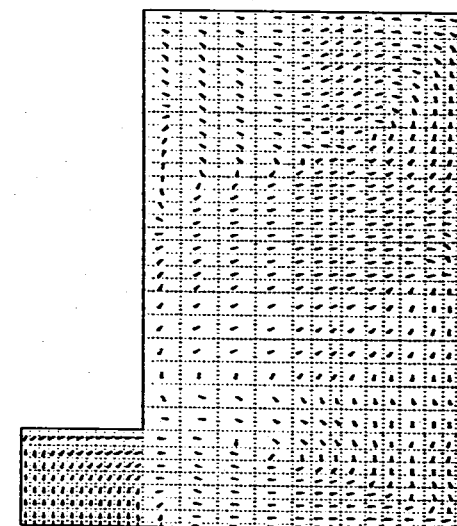
J = 38 3.00 M/S TIME 100.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 50.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 75.0 SEC.

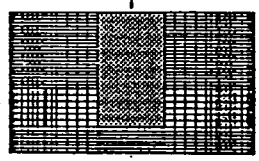
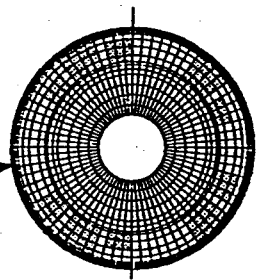


J = 4 3.00 M/S TIME 100.0 SEC.

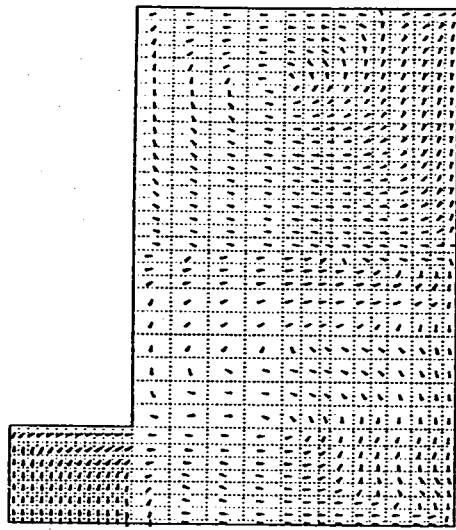
Fig.2.3.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (3/6)

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)

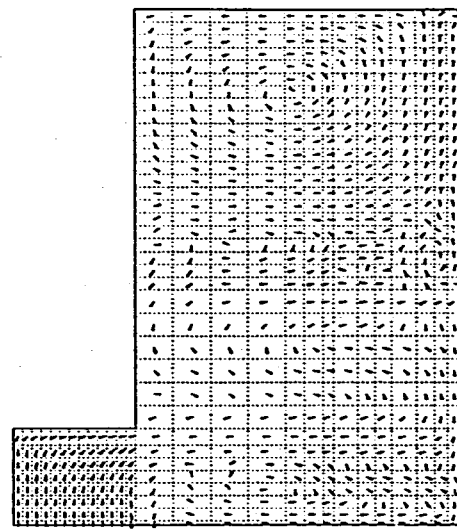
Full Sector Model



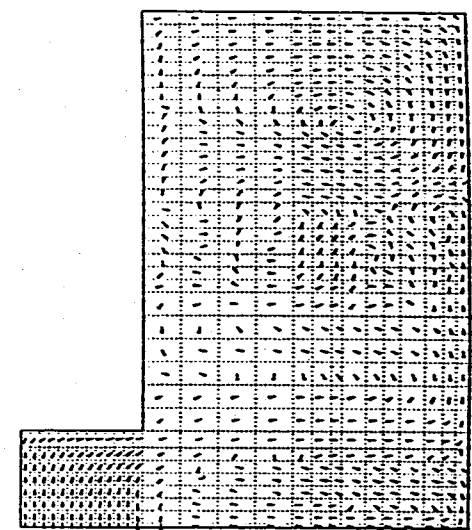
One-Third Sector Model



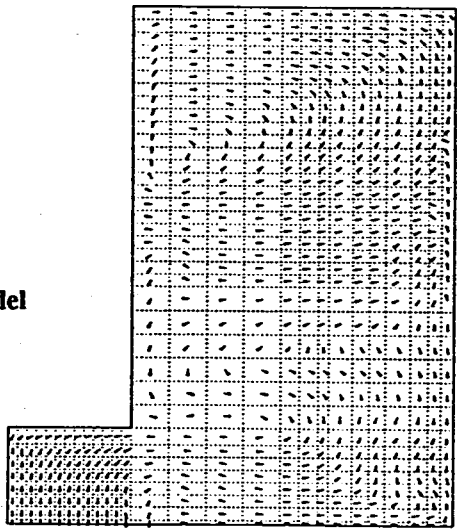
J = 38 3.00 M/S TIME 125.0 SEC.



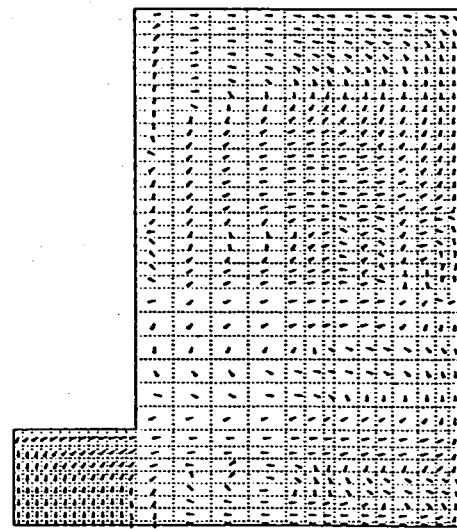
J = 38 3.00 M/S TIME 150.0 SEC.



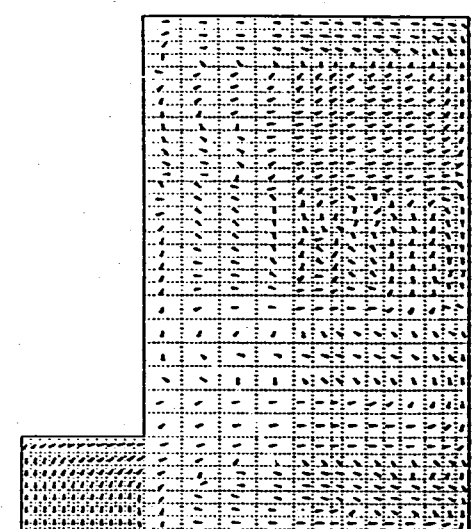
J = 38 3.00 M/S TIME 200.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 125.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 150.0 SEC.

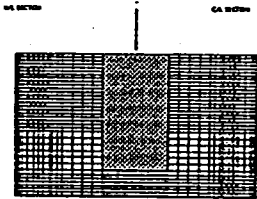
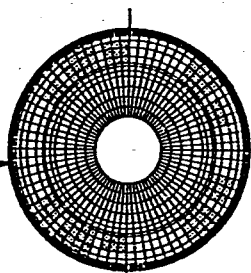


J = 4 3.00 M/S TIME 200.0 SEC.

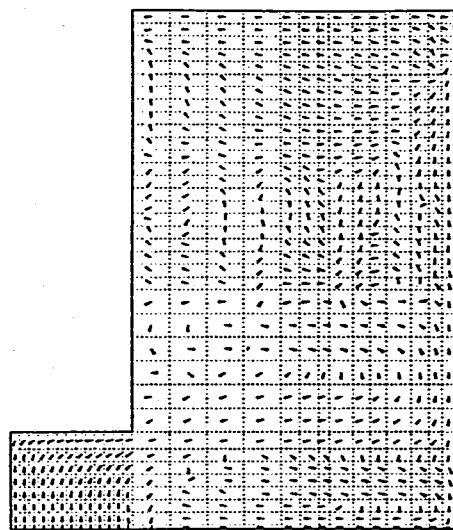
Fig.2.3.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (4/6)

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)

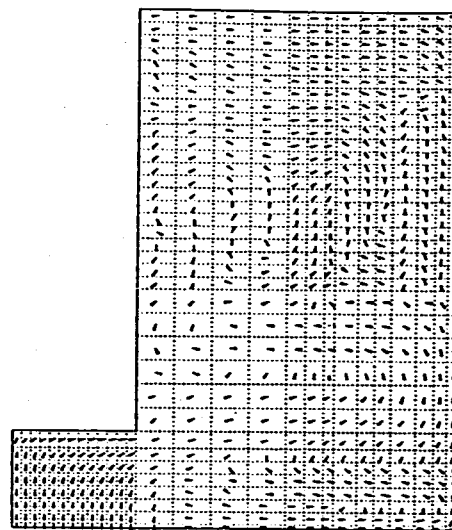
Full Sector Model



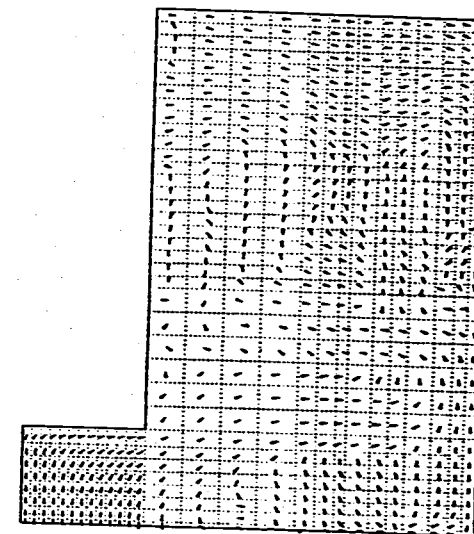
One-Third Sector Model



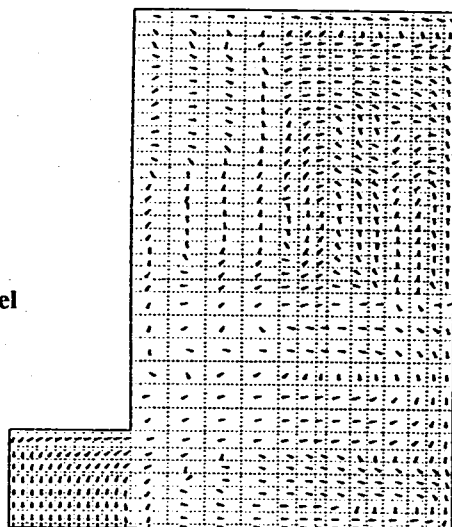
J = 38 3.00 M/S TIME 300.0 SEC.



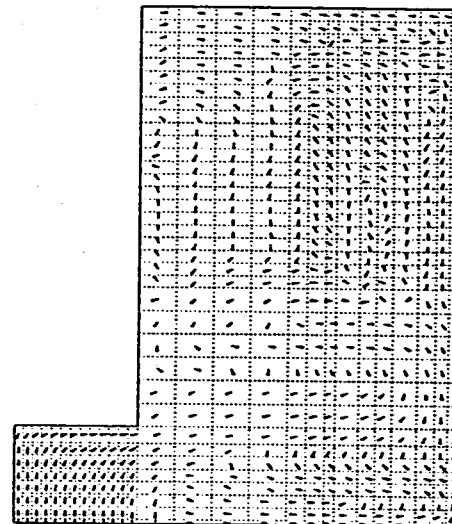
J = 38 3.00 M/S TIME 400.0 SEC.



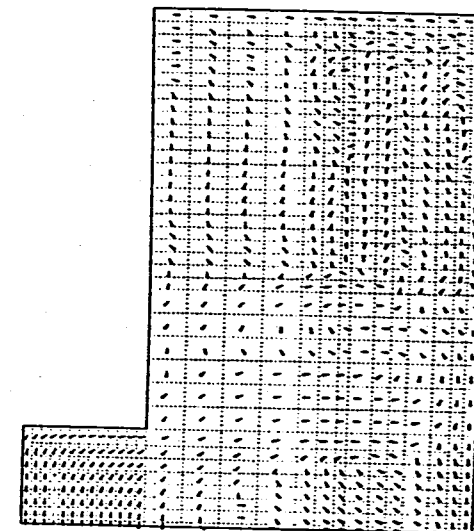
J = 38 3.00 M/S TIME 500.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 300.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 400.0 SEC.

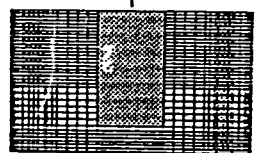
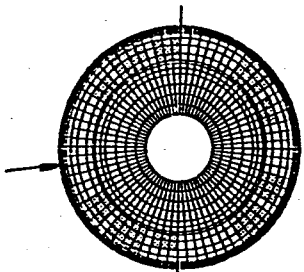


J = 4 3.00 M/S TIME 500.0 SEC.

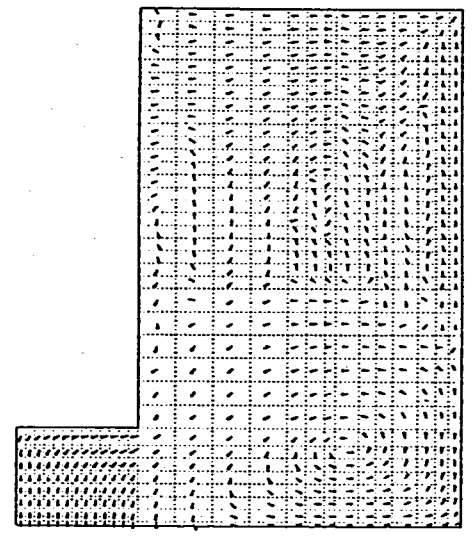
Fig.2.3.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Manual 'trip Event (5/6)

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)

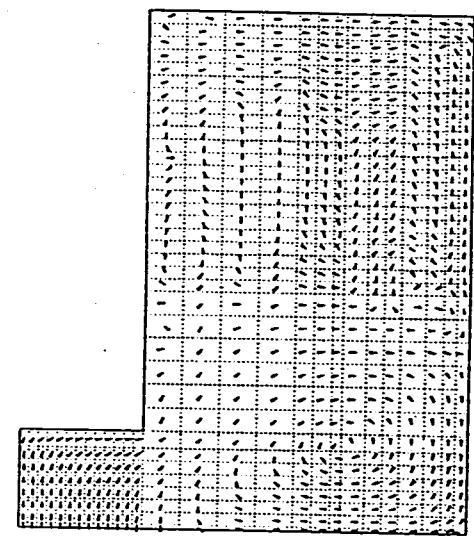
Full Sector Model



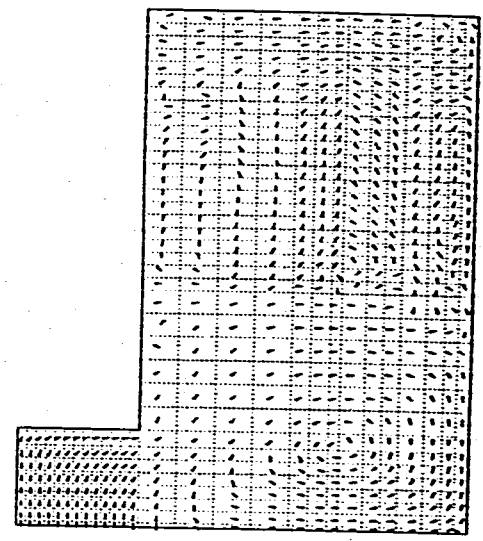
One-Third Sector Model



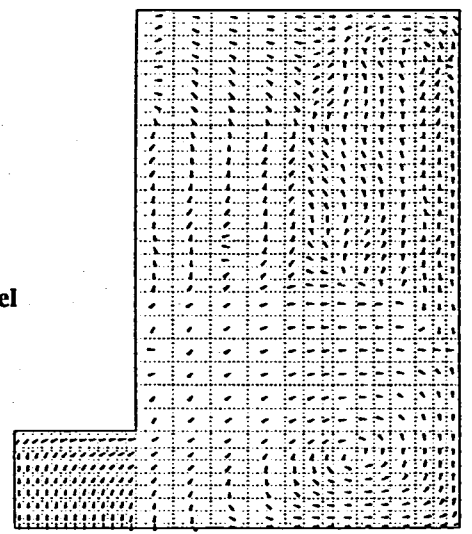
J = 38 3.00 M/S TIME 600.0 SEC.



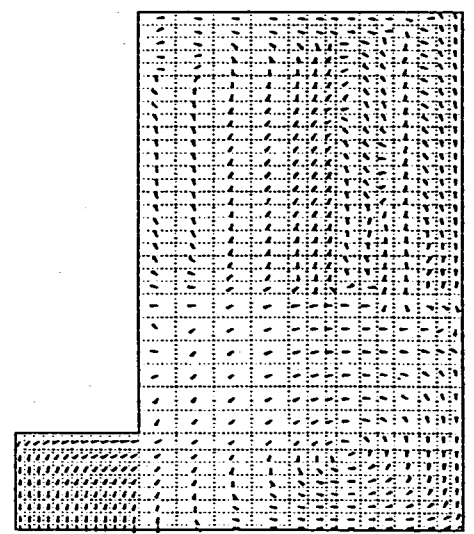
J = 38 3.00 M/S TIME 700.0 SEC.



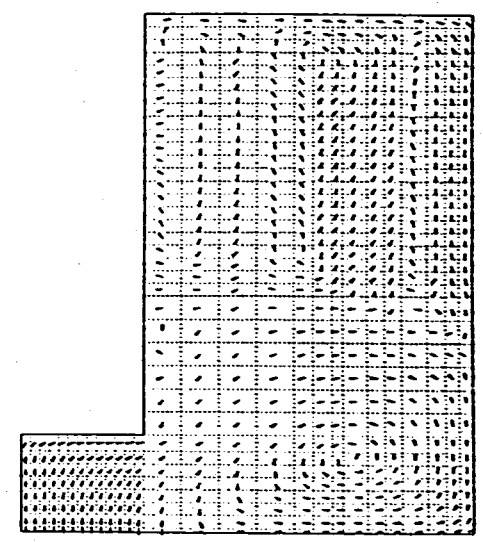
J = 38 3.00 M/S TIME 800.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 600.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 700.0 SEC.

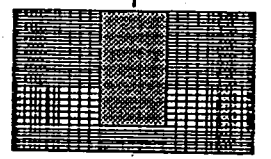
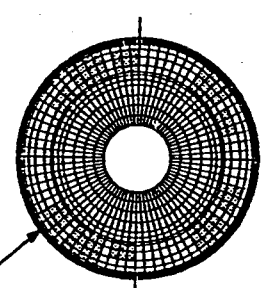


J = 4 3.00 M/S TIME 800.0 SEC.

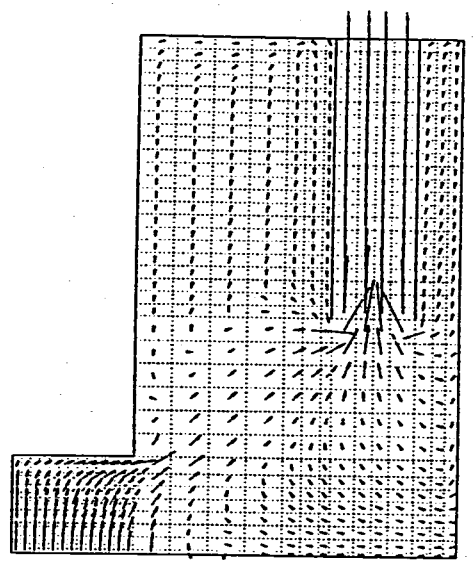
Fig.2.3.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (6/6)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

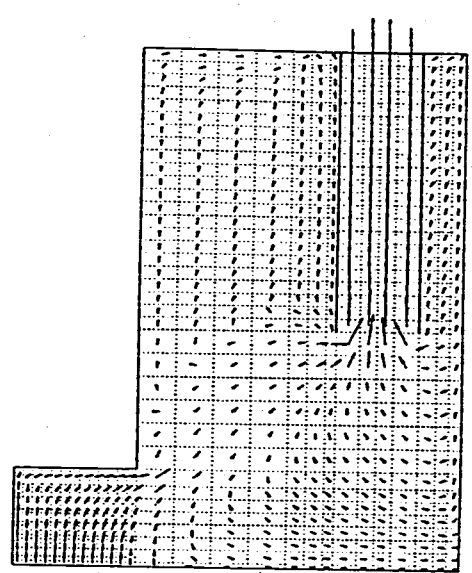
Full Sector Model



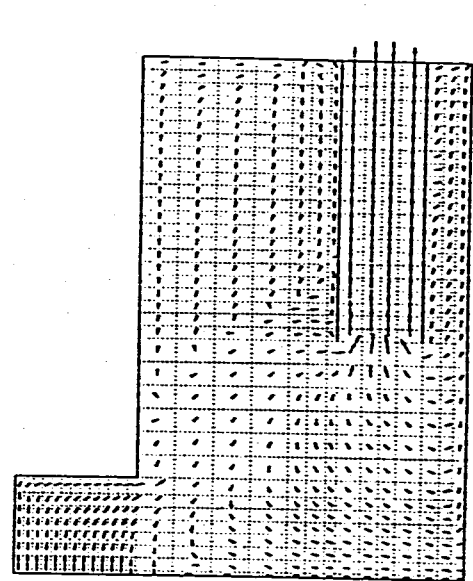
One-Third Sector Model



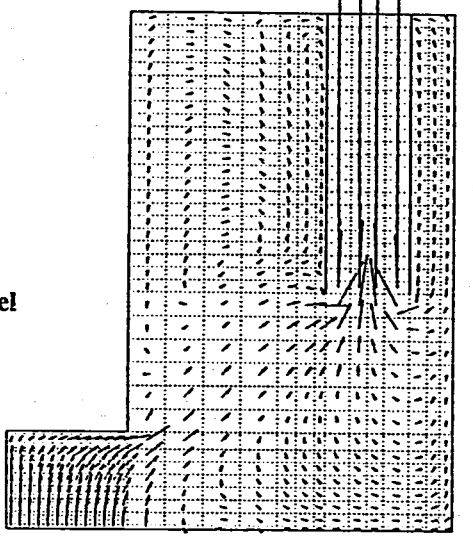
J = 44 3.00 M/S TIME 0.0 SEC.



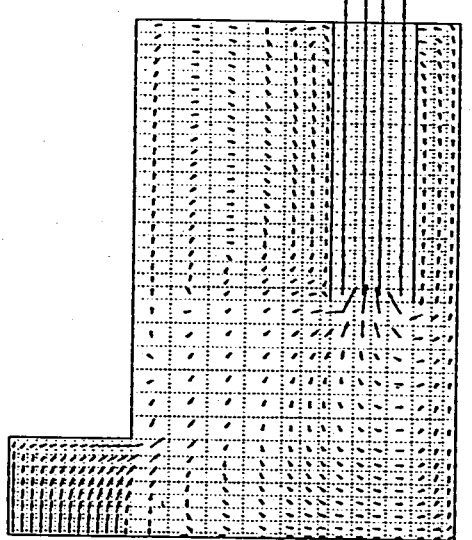
J = 44 3.00 M/S TIME 5.0 SEC.



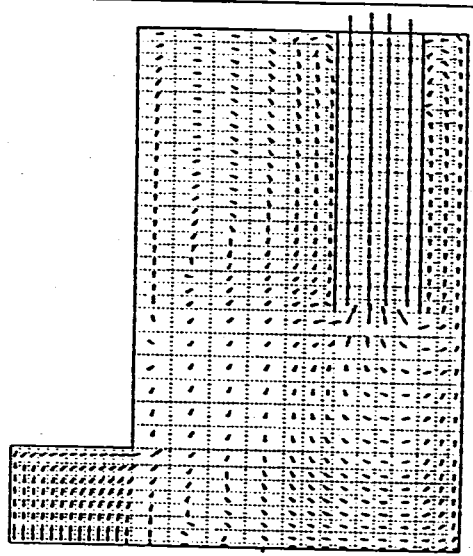
J = 44 3.00 M/S TIME 10.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 0.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 5.0 SEC.

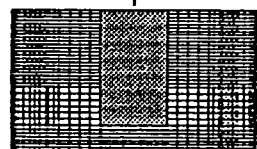
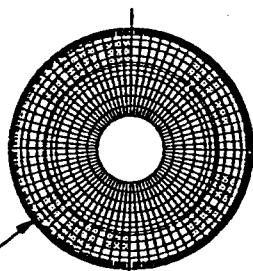


J = 10 3.00 M/S TIME 10.0 SEC.

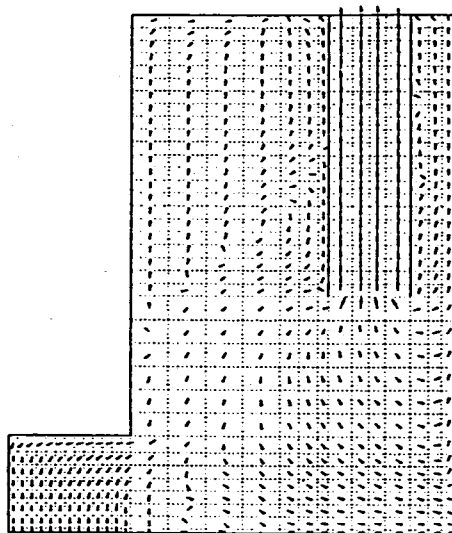
Fig.2.3.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (1/6)

J=44 (Full Sector Model)
 J=10 (One-Third Sector Model)

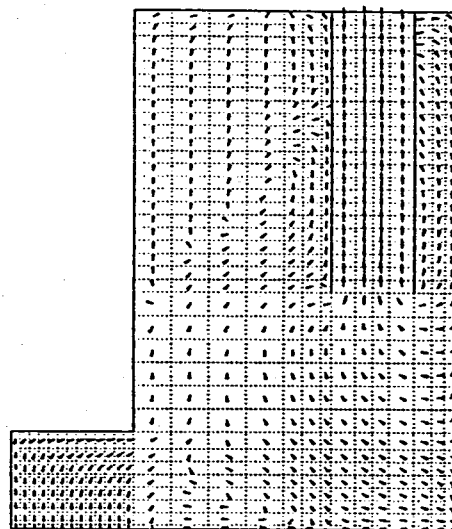
Full Sector Model



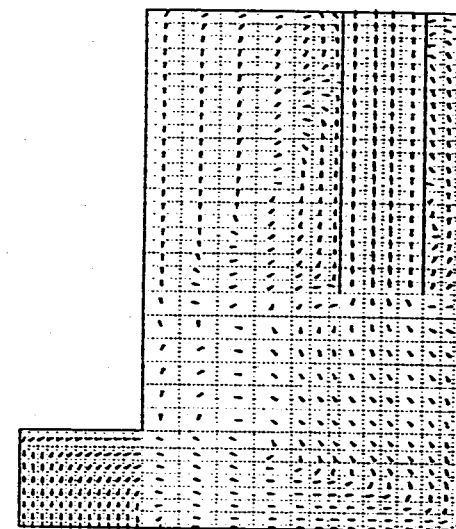
One-Third Sector Mode



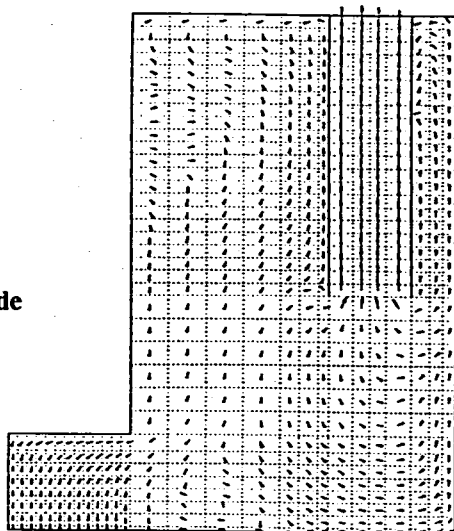
J = 44 3.00 M/S TIME
 20.0 SEC.



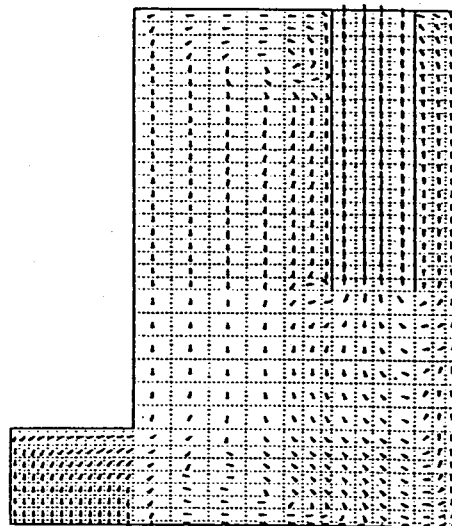
J = 44 3.00 M/S TIME
 30.0 SEC.



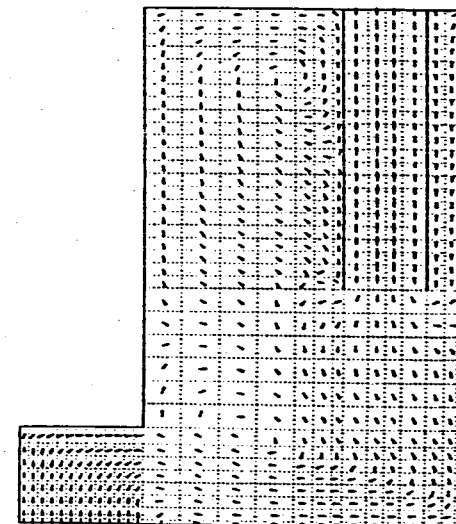
J = 44 3.00 M/S TIME
 40.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME
 20.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME
 30.0 SEC.

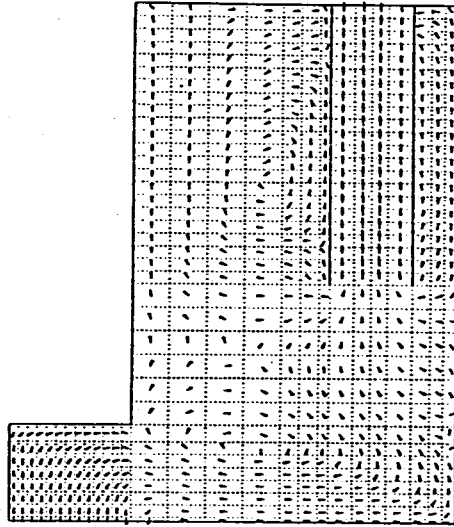
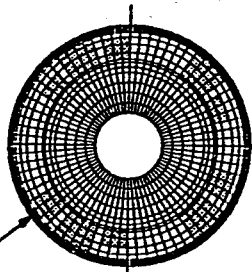


J = 10 3.00 M/S TIME
 40.0 SEC.

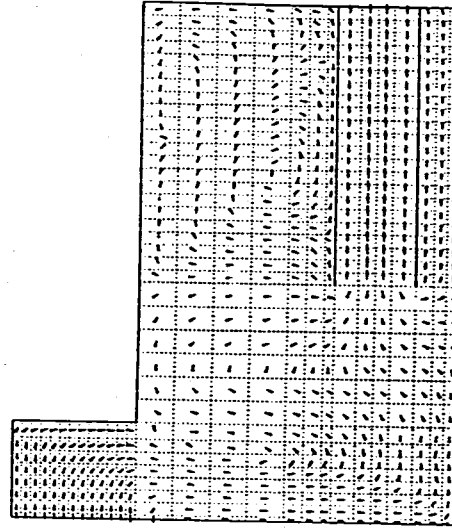
Fig.2.3.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (2/6)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

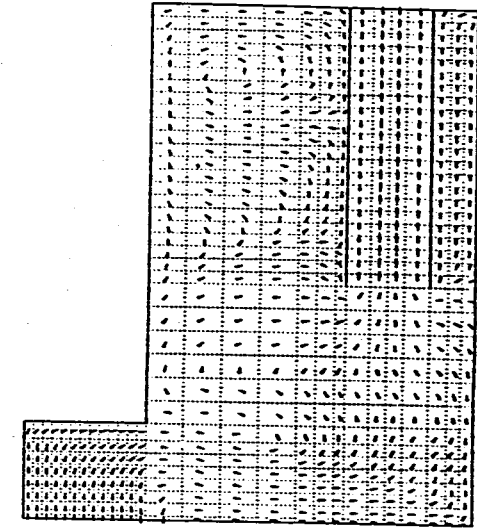
Full Sector Model



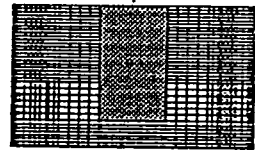
J = 44 3.00 M/S TIME 50.0 SEC.



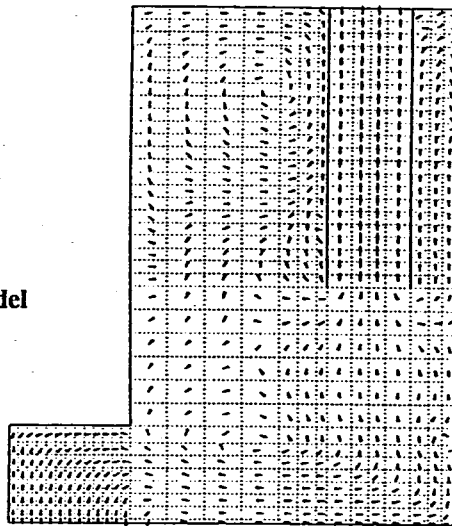
J = 44 3.00 M/S TIME 75.0 SEC.



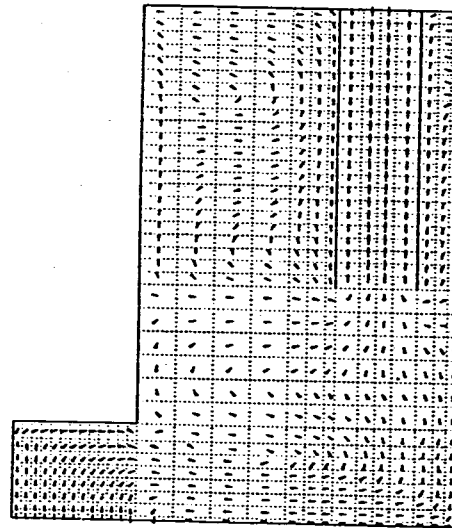
J = 44 3.00 M/S TIME 100.0 SEC.



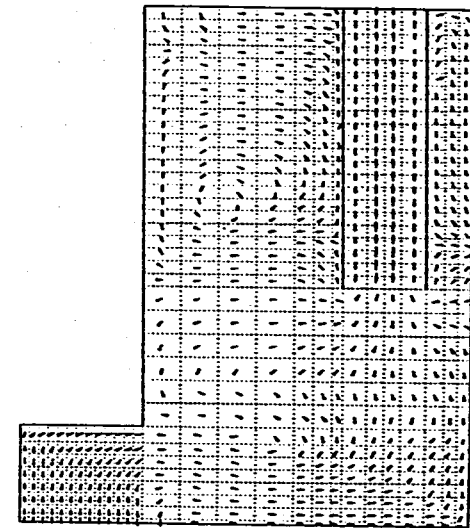
One-Third Sector Model



J = 10 3.00 M/S TIME 50.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 75.0 SEC.

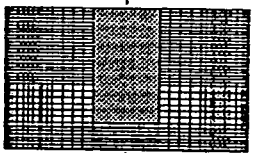
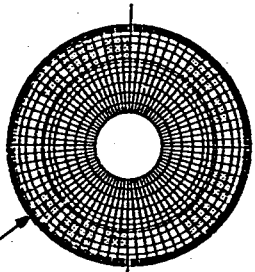


J = 10 3.00 M/S TIME 100.0 SEC.

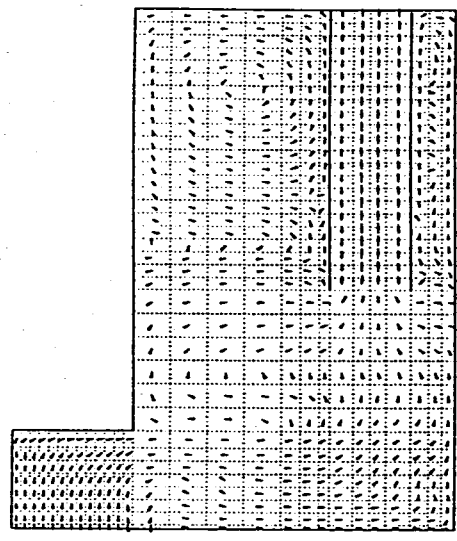
Fig.2.3.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (3/6)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

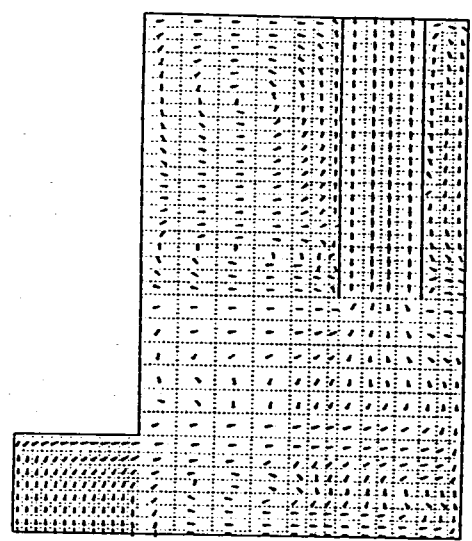
Full Sector Model



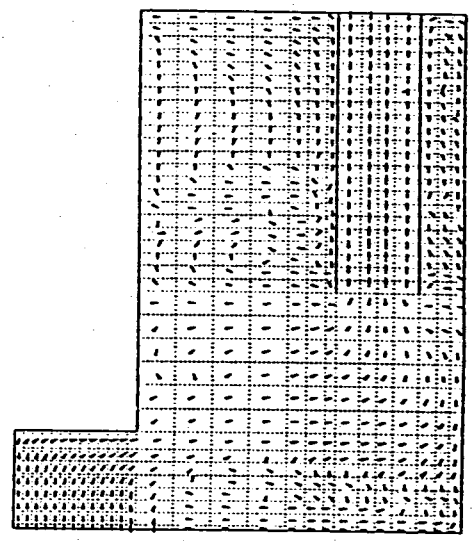
One-Third Sector Model



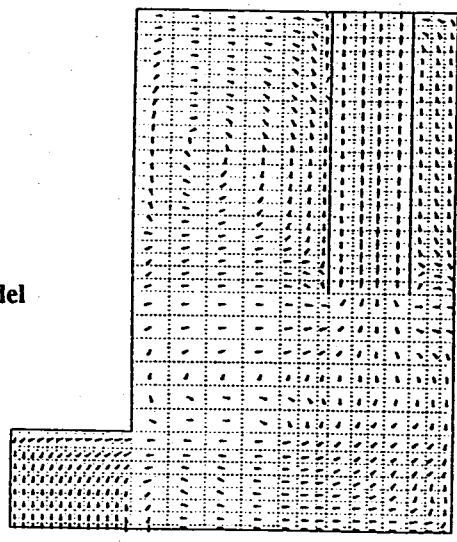
J = 44 3.00 M/S TIME 125.0 SEC.



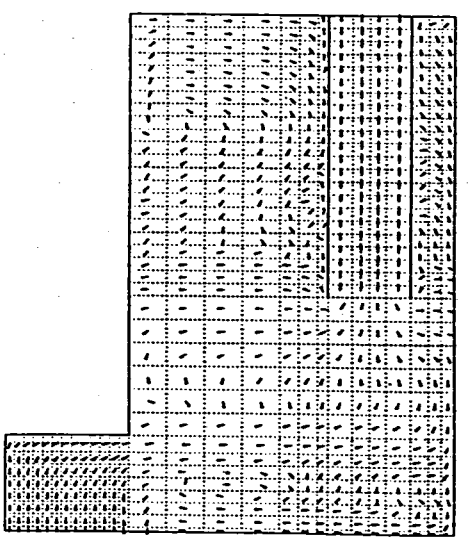
J = 44 3.00 M/S TIME 150.0 SEC.



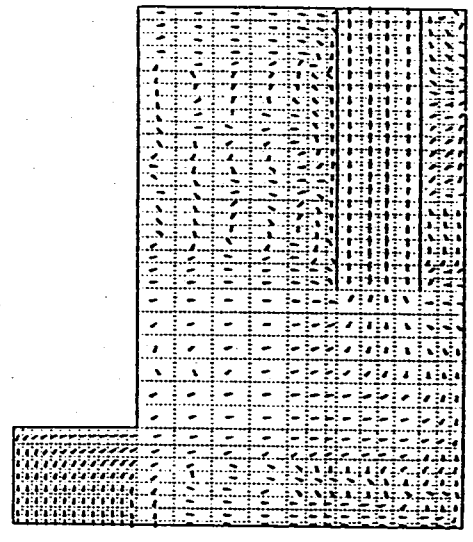
J = 44 3.00 M/S TIME 200.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 125.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 150.0 SEC.

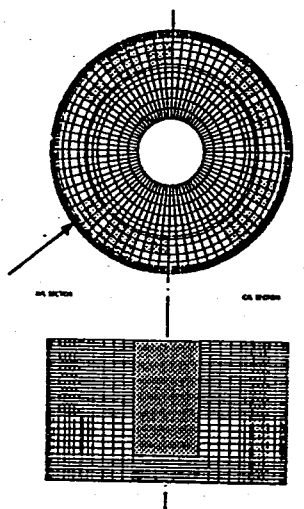


J = 10 3.00 M/S TIME 200.0 SEC.

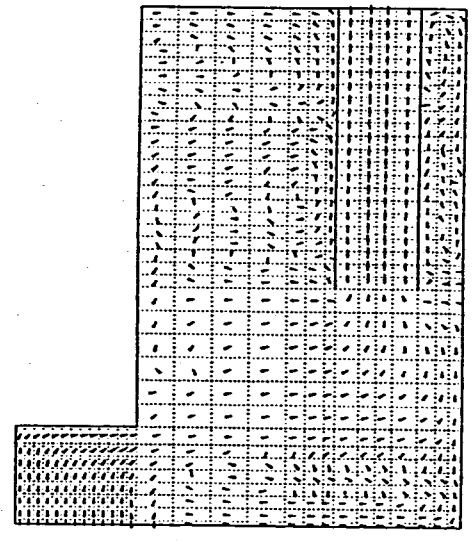
Fig.2.3.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (4/6)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

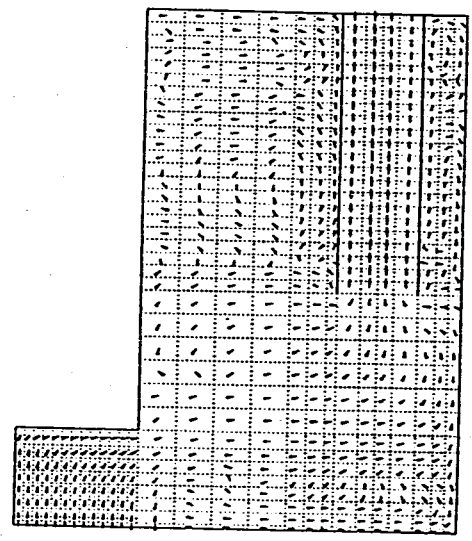
Full Sector Model



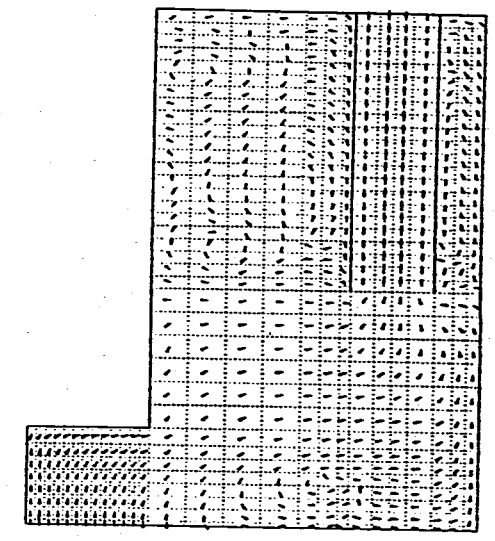
One-Third Sector Model



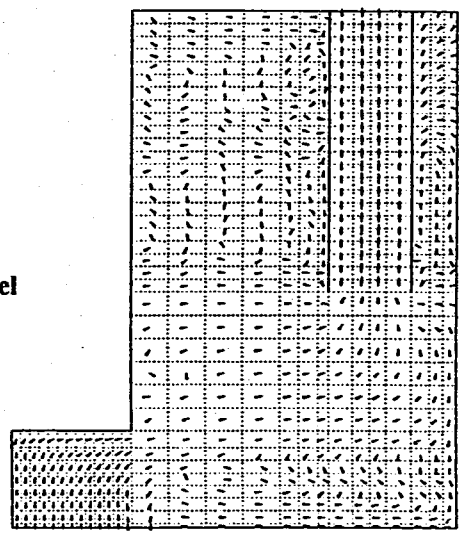
J = 44 3.00 M/S TIME 300.0 SEC.



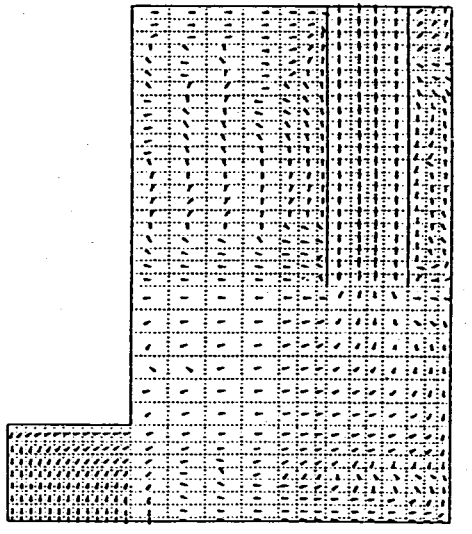
J = 44 3.00 M/S TIME 400.0 SEC.



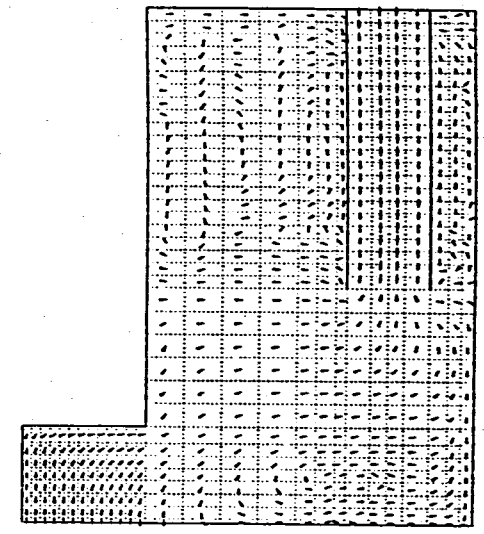
J = 44 3.00 M/S TIME 500.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 300.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 400.0 SEC.

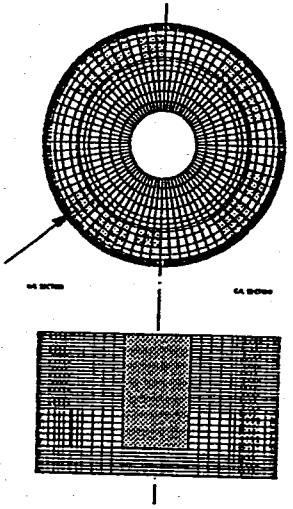


J = 10 3.00 M/S TIME 500.0 SEC.

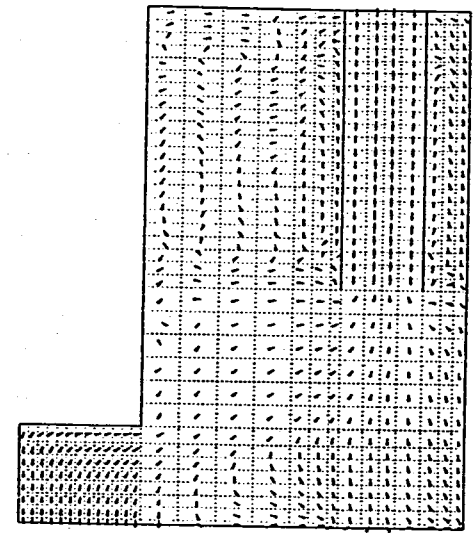
Fig.2.3.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (5/6)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

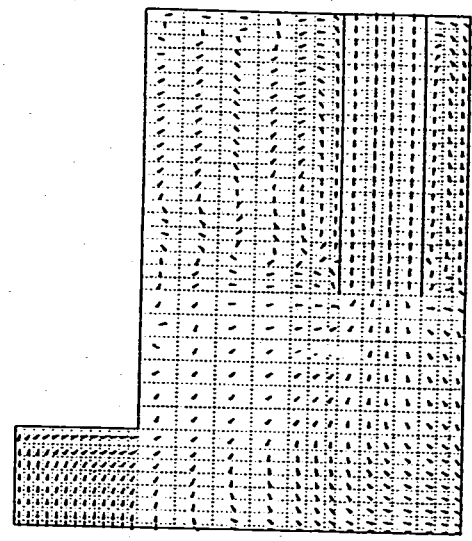
Full Sector Model



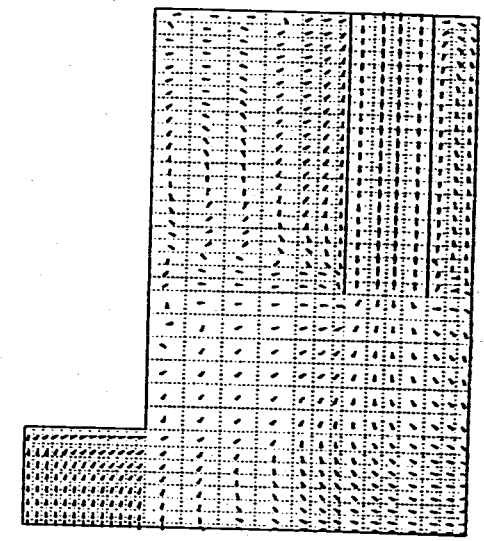
One-Third Sector Model



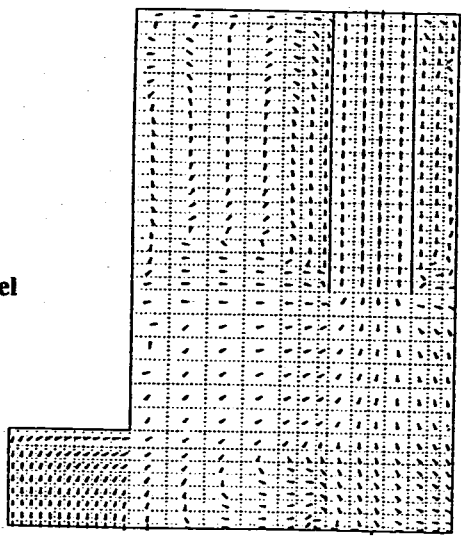
J = 44 3.00 M/S TIME 600.0 SEC.



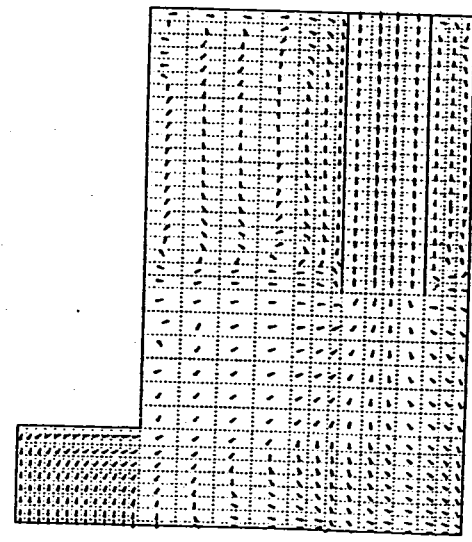
J = 44 3.00 M/S TIME 700.0 SEC.



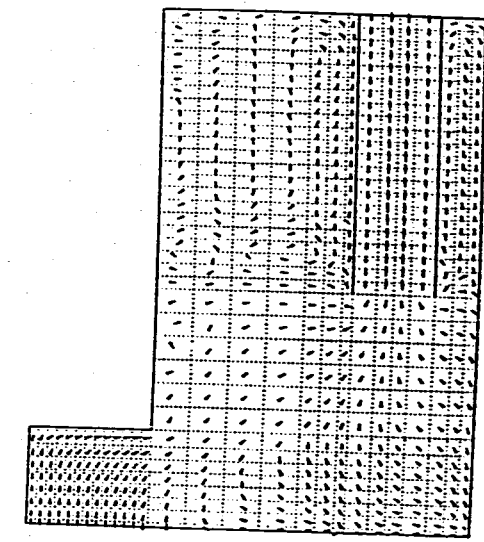
J = 44 3.00 M/S TIME 800.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 600.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 700.0 SEC.

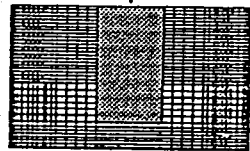
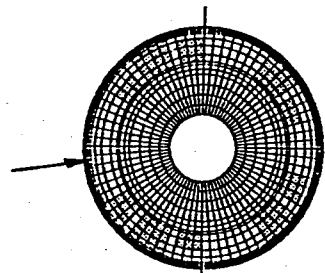


J = 10 3.00 M/S TIME 800.0 SEC.

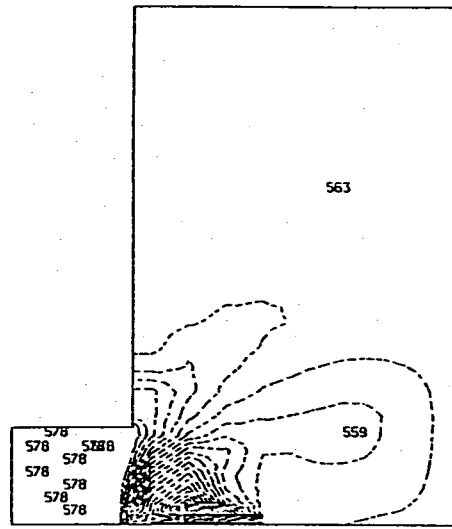
Fig.2.3.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (6/6)

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)

Full Sector Model

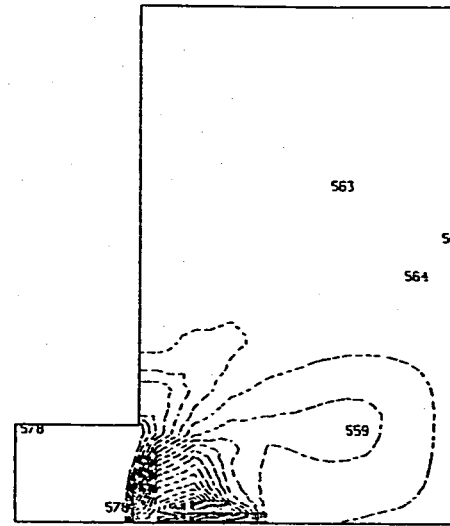


One-Third Sector Model



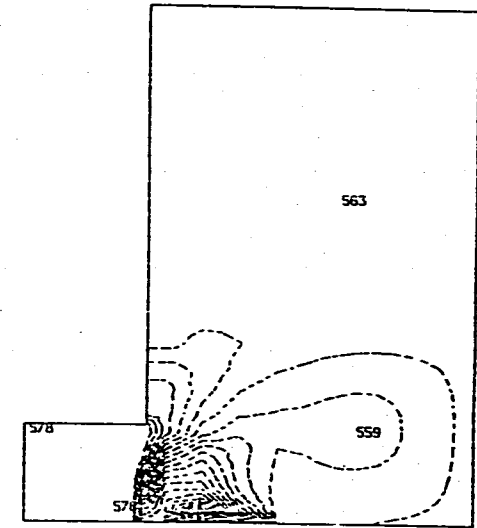
J = 38

TIME
0.0 SEC.



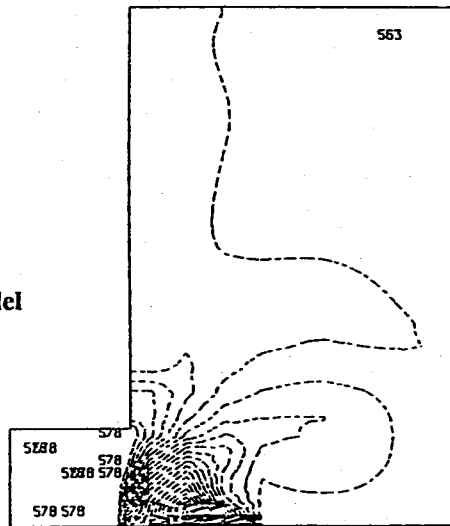
J = 38

TIME
5.0 SEC.



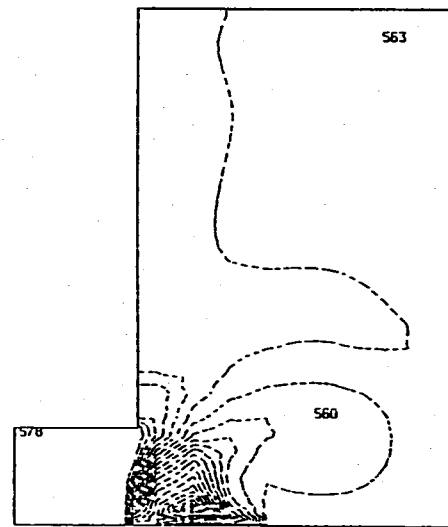
J = 38

TIME
10.0 SEC.



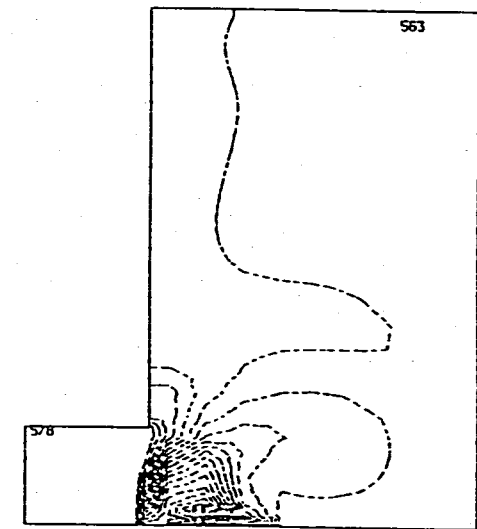
J = 4

TIME
0.0 SEC.



J = 4

TIME
5.0 SEC.



J = 4

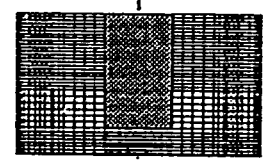
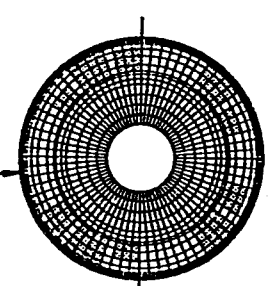
TIME
10.0 SEC.

Fig.2.3.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (1/6)

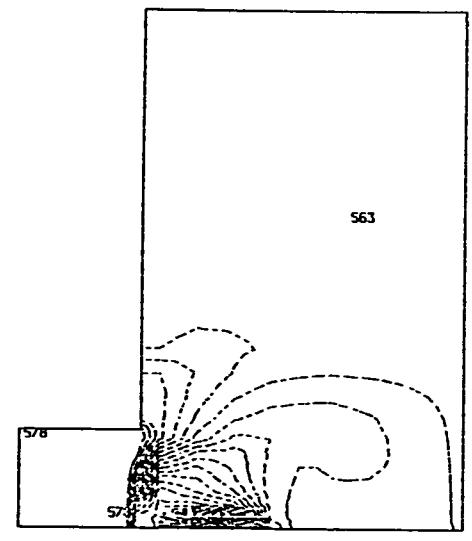
J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)

-46-

Full Sector Model

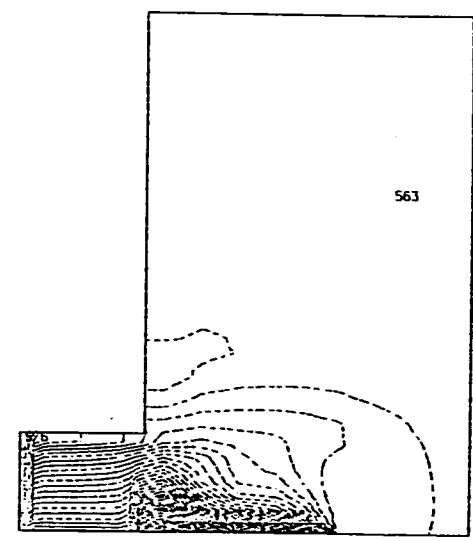


One-Third Sector Model



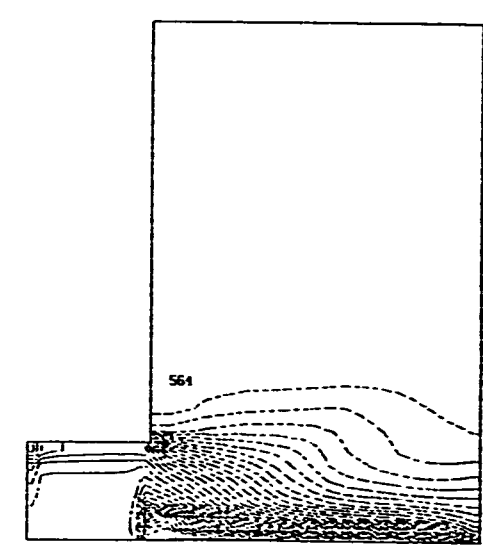
J = 38

TIME
20.0 SEC.



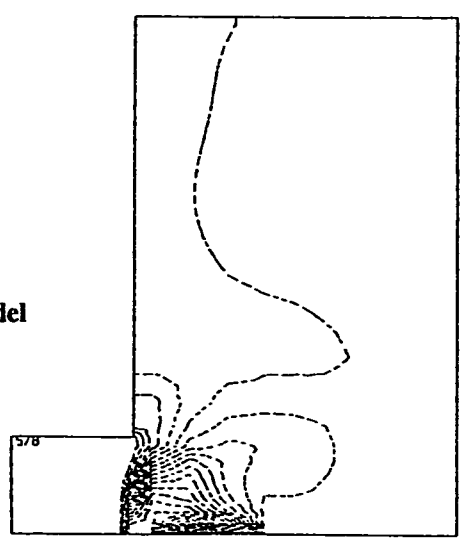
J = 38

TIME
30.0 SEC.



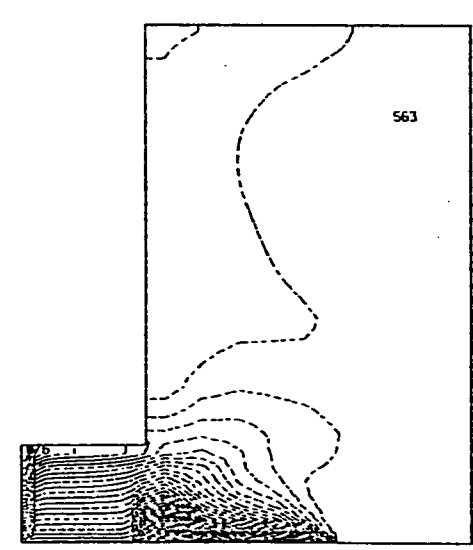
J = 38

TIME
40.0 SEC.



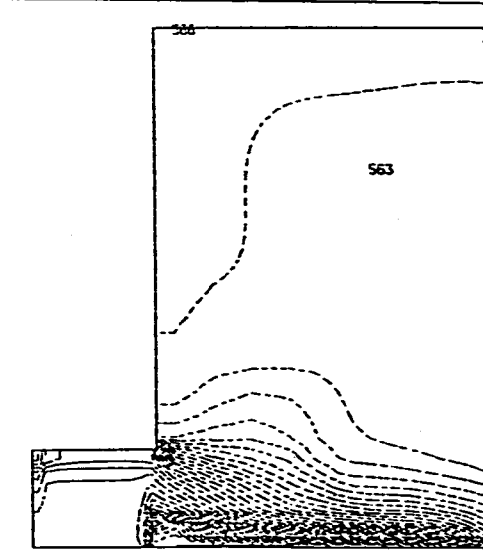
J = 4

TIME
20.0 SEC.



J = 4

TIME
30.0 SEC.



J = 4

TIME
40.0 SEC.

Fig.2.3.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (2/6)

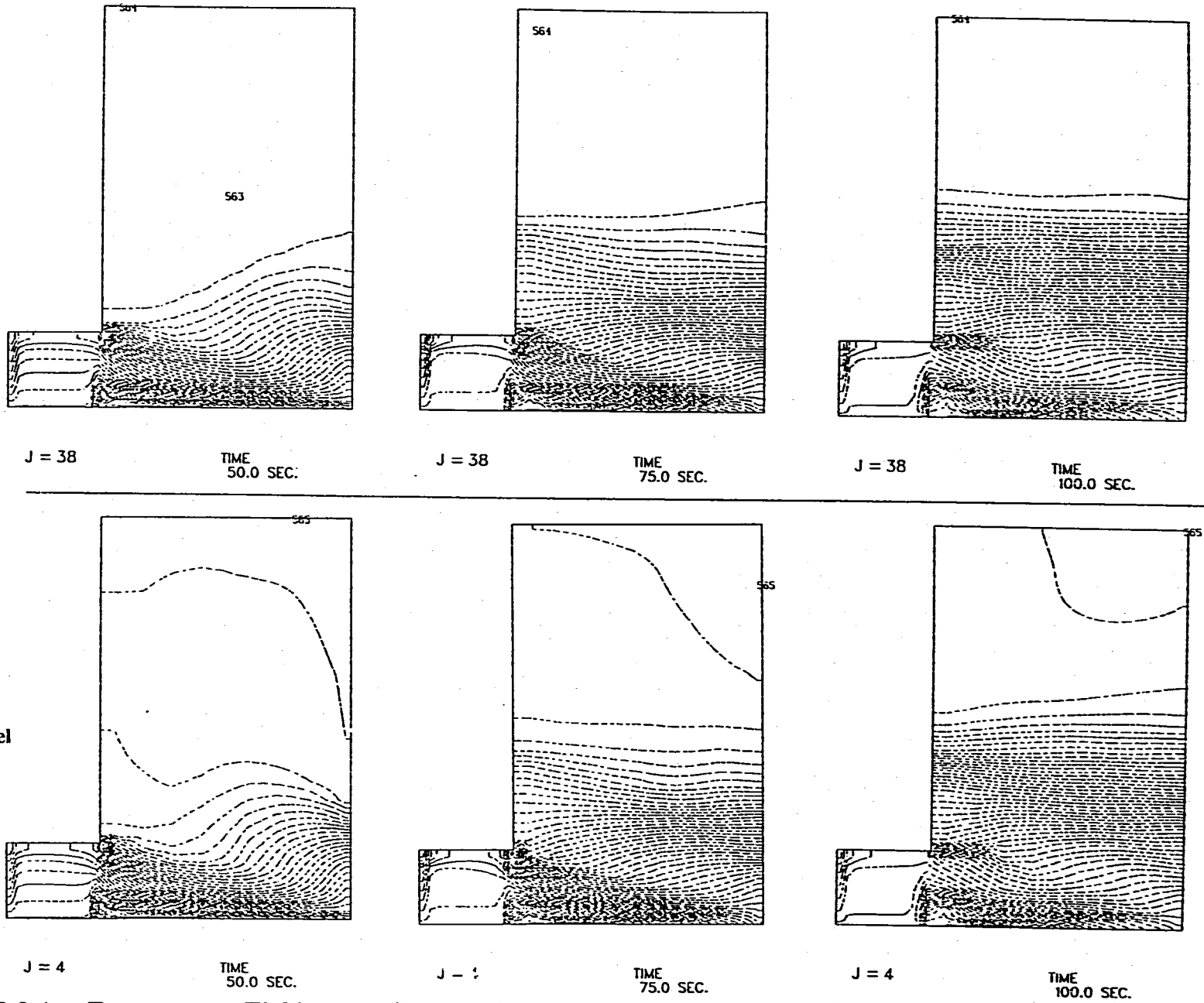
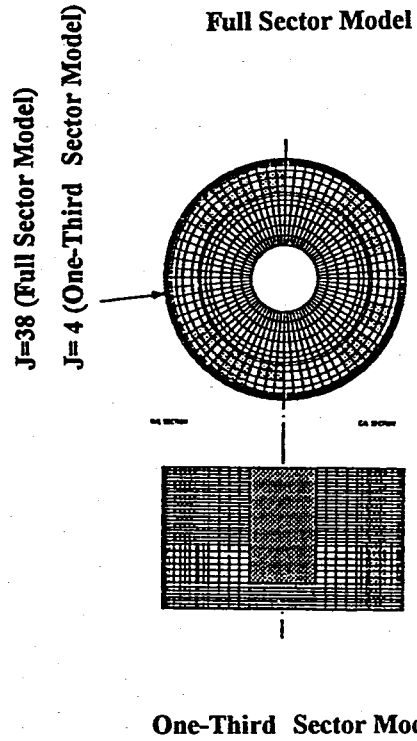


Fig.2.3.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (3/6)

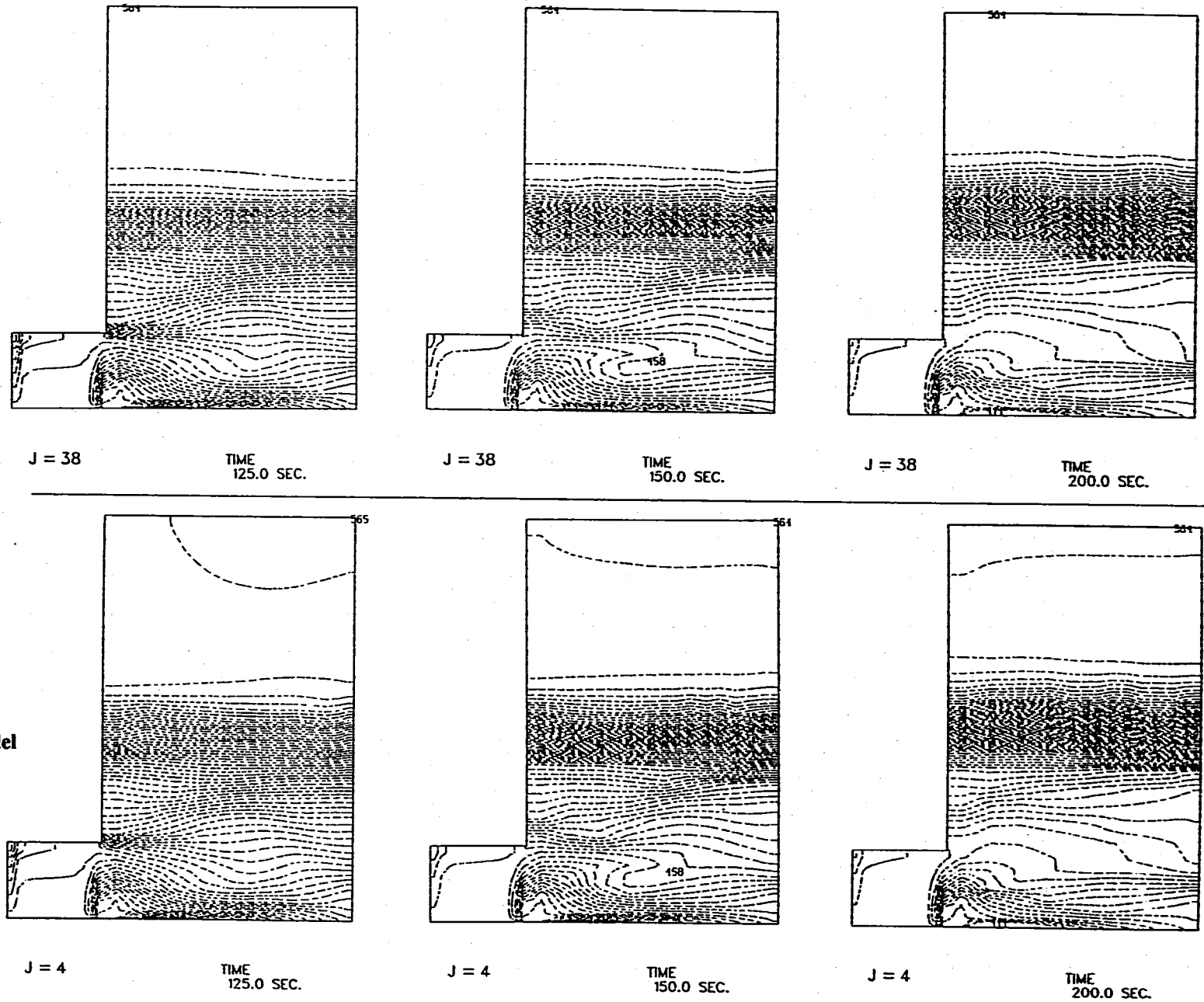
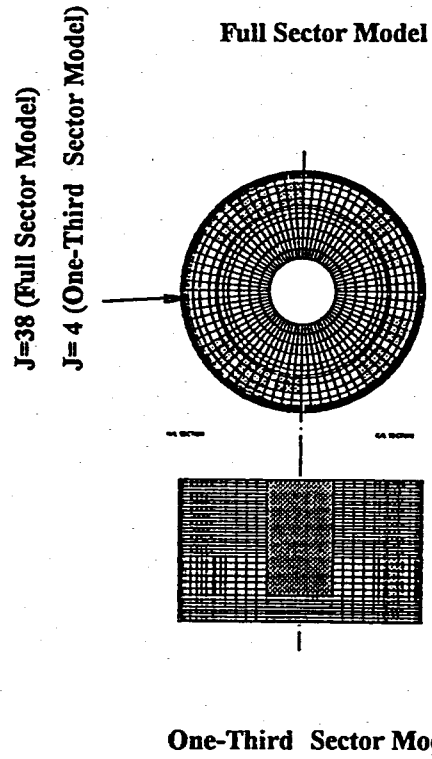
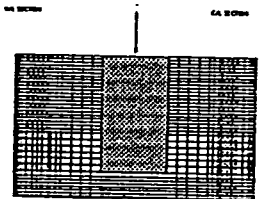
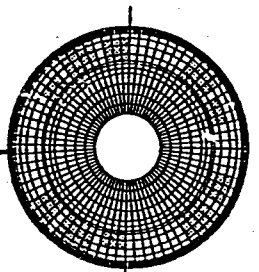


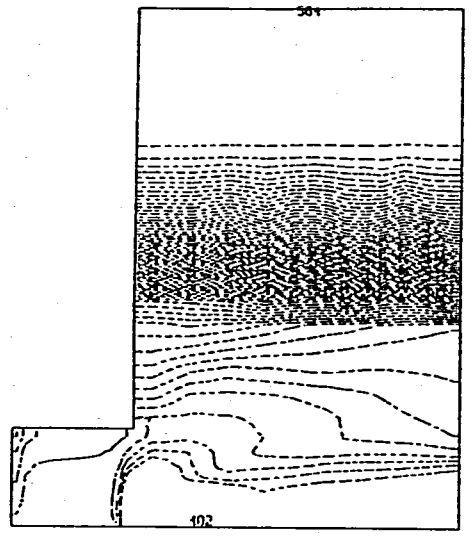
Fig.2.3.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (4/6)

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)

Full Sector Model

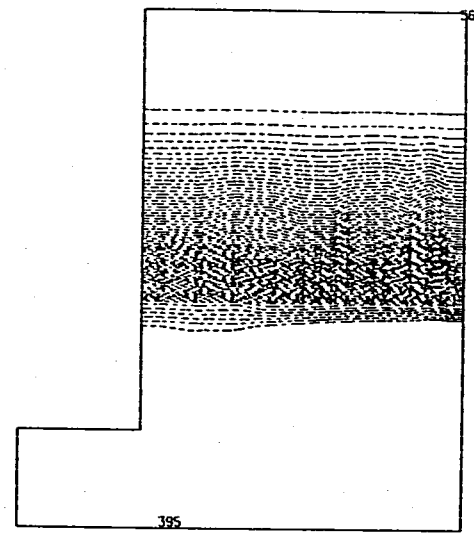


One-Third Sector Model



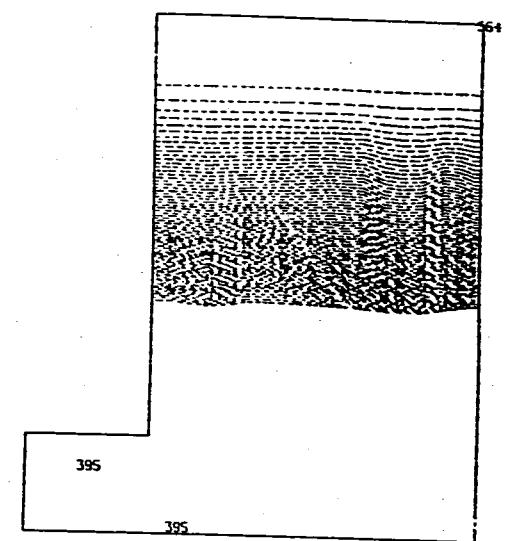
J = 38

TIME
300.0 SEC.



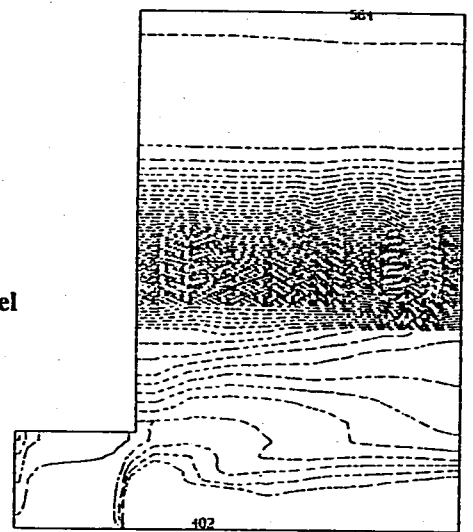
J = 38

TIME
400.0 SEC.



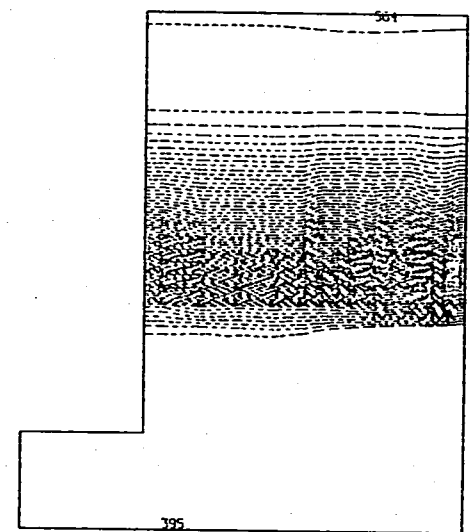
J = 38

TIME
500.0 SEC.



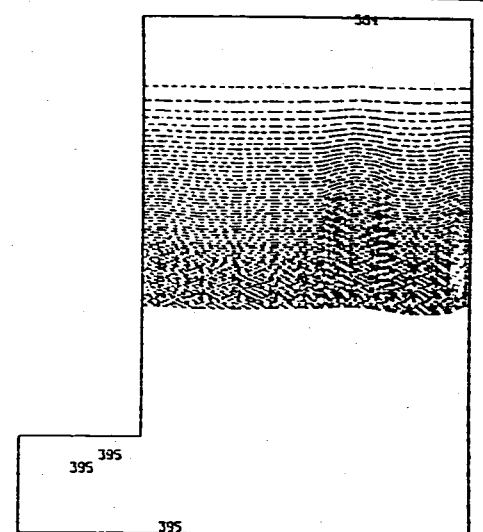
J = 4

TIME
300.0 SEC.



J = 4

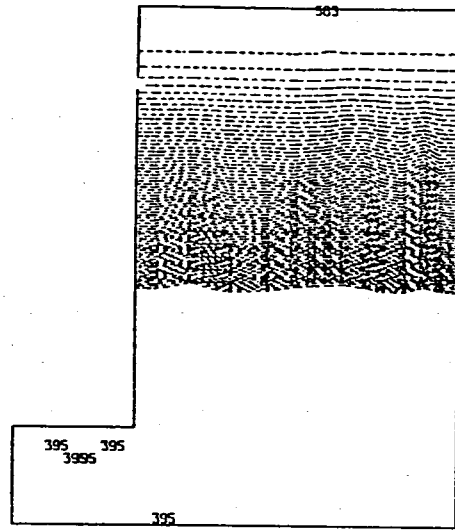
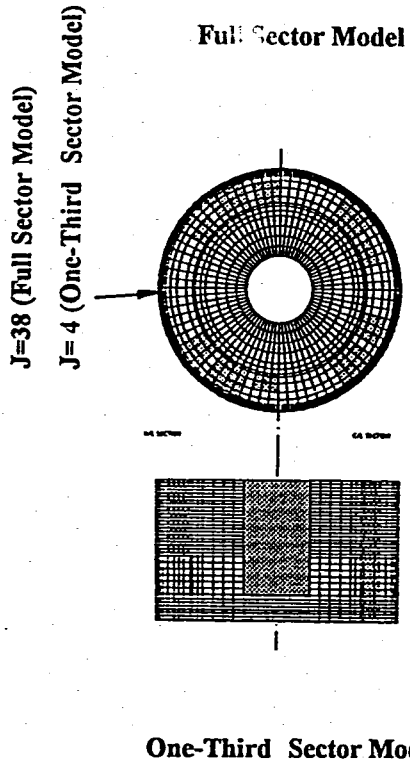
TIME
400.0 SEC.



J = 4

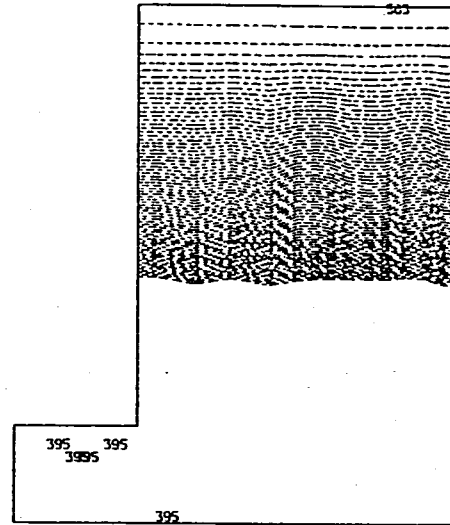
TIME
500.0 SEC.

Fig.2.3.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (5/6)



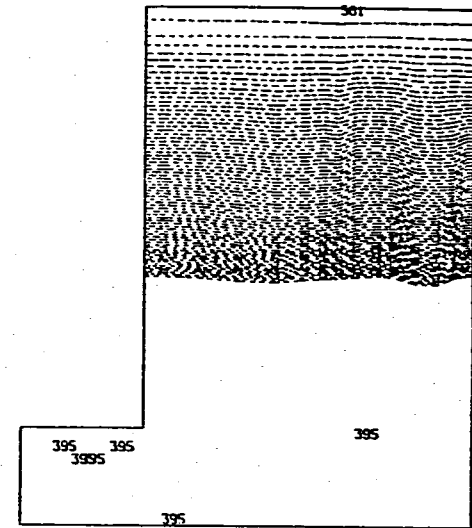
J = 38

TIME
600.0 SEC.



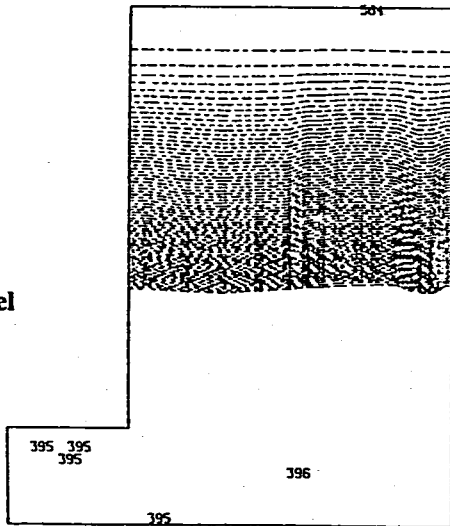
J = 38

TIME
700.0 SEC.



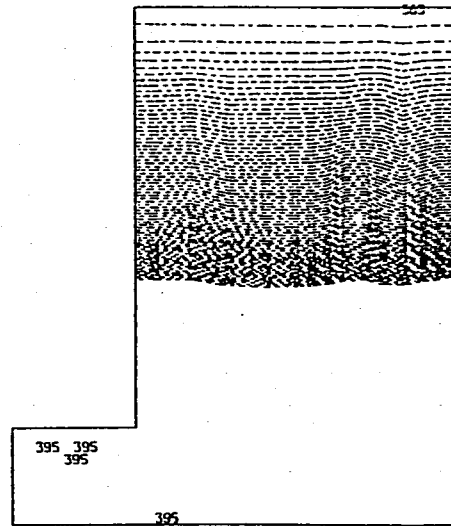
J = 38

TIME
800.0 SEC.



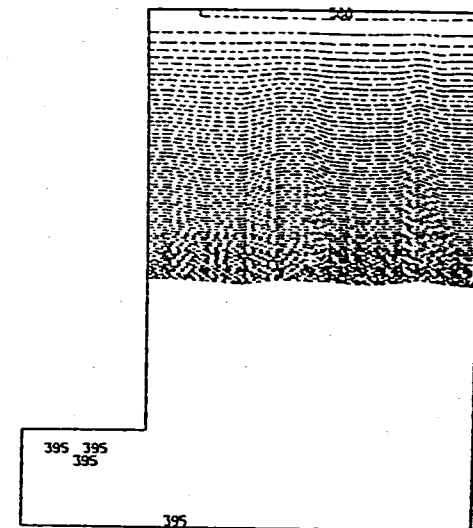
J = 4

TIME
600.0 SEC.



J = 4

TIME
700.0 SEC.



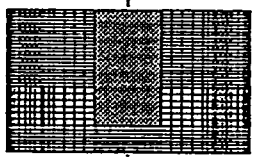
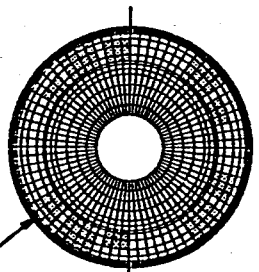
J = 4

TIME
800.0 SEC.

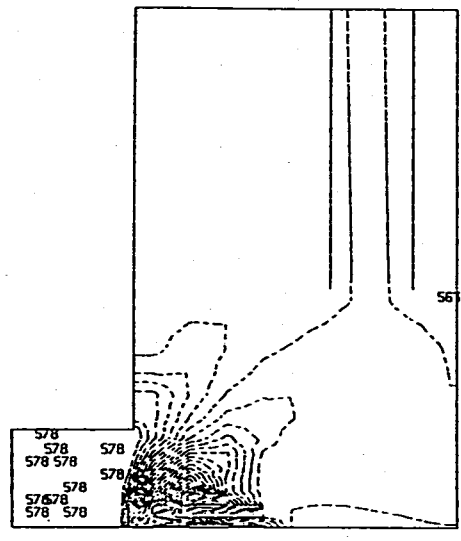
Fig.2.3.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Manual Trip Event (6/6)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

Full Sector Model

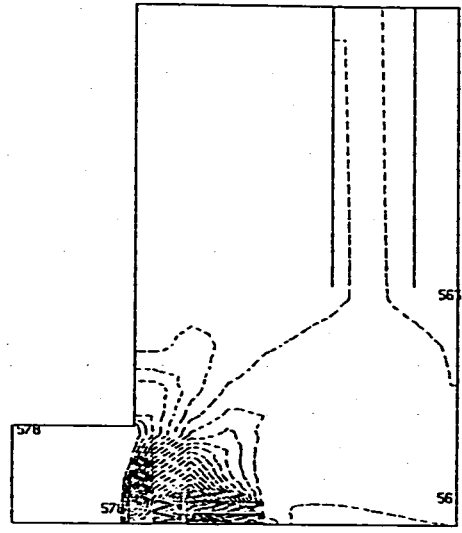


One-Third Sector Model



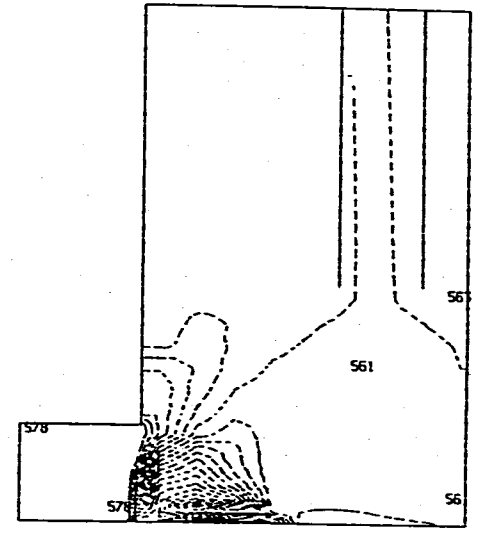
J = 44

TIME
0.0 SEC.



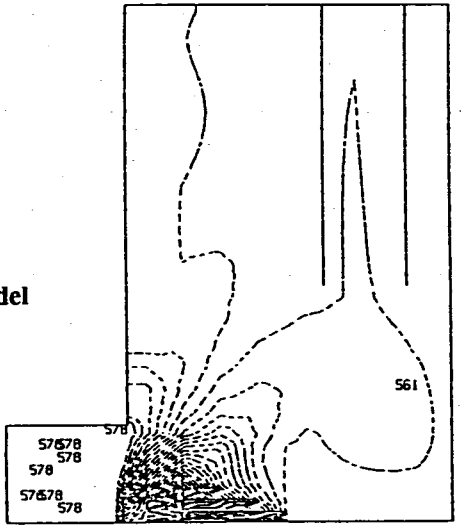
J = 44

TIME
5.0 SEC.



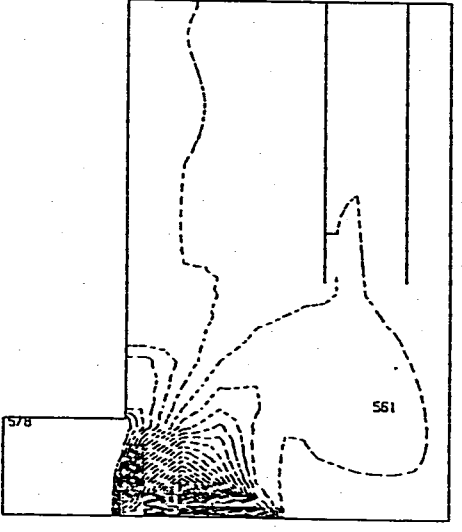
J = 44

TIME
10.0 SEC.



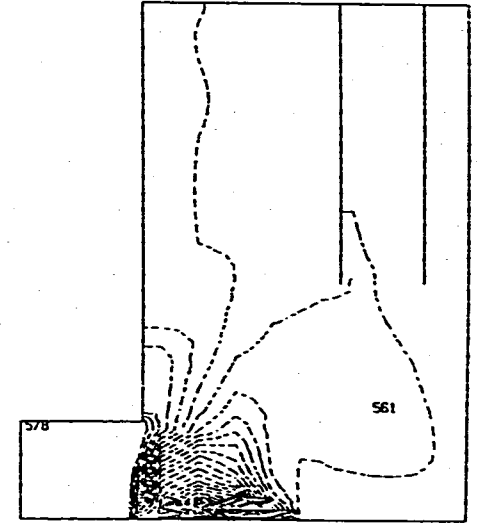
J = 10

TIME
0.0 SEC.



J = 10

TIME
5.0 SEC.



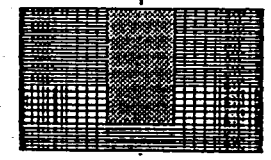
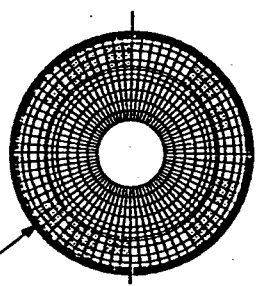
J = 10

TIME
10.0 SEC.

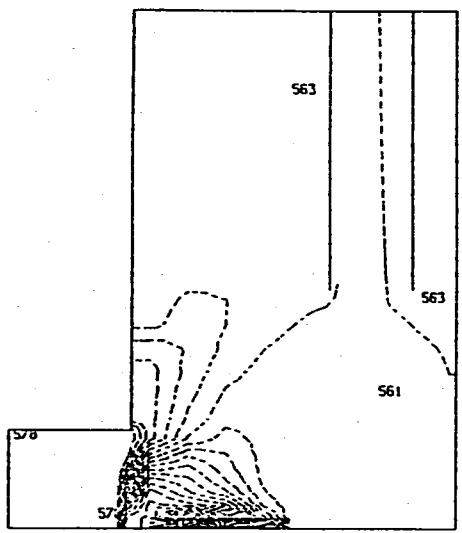
Fig.2.3.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (1/6)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

Full Sector Model

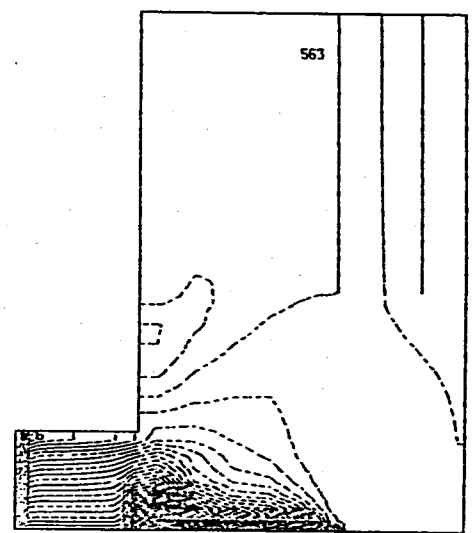


One-Third Sector Model



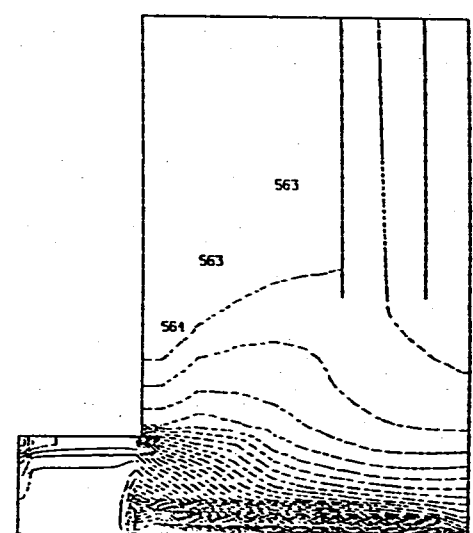
J = 44

TIME
20.0 SEC.



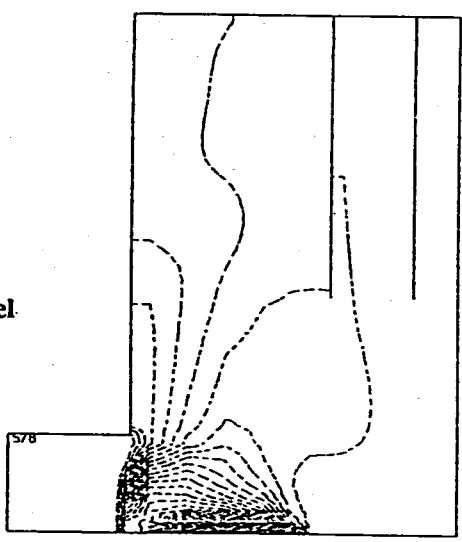
J = 44

TIME
30.0 SEC.



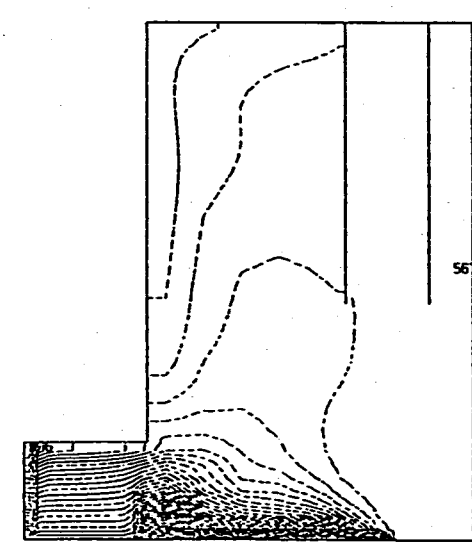
J = 44

TIME
40.0 SEC.



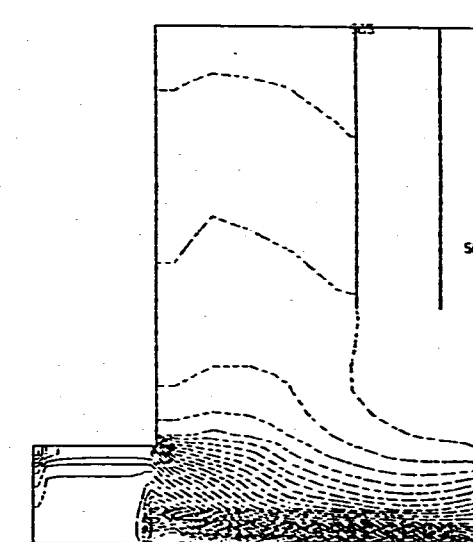
J = 10

TIME
20.0 SEC.



J = 10

TIME
30.0 SEC.



J = 10

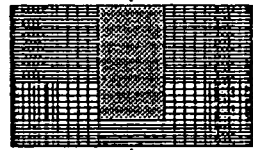
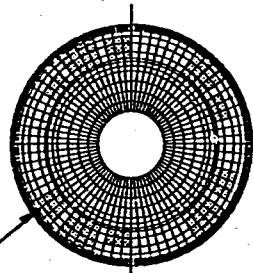
TIME
40.0 SEC.

Fig.2.3.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (2/6)

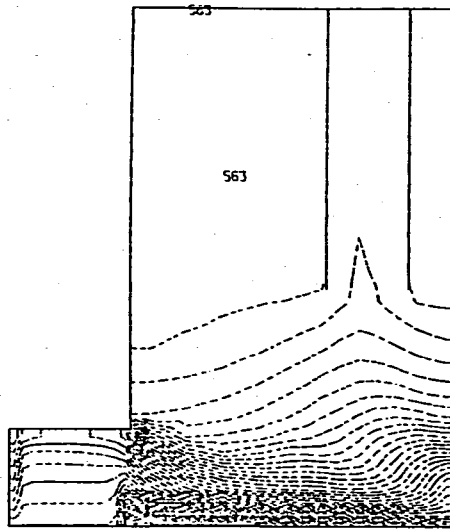
J=44 (Full Sector Model)

J=10 (One-Third Sector Model)

Full Sector Model

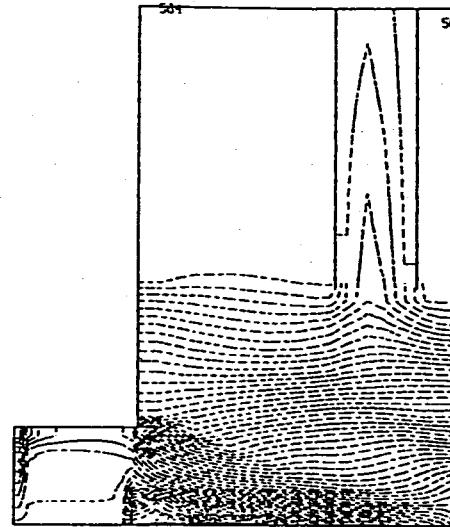


One-Third Sector Model



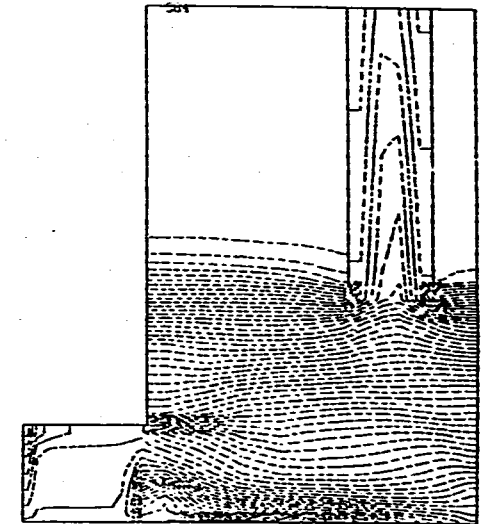
J = 44

TIME
50.0 SEC.



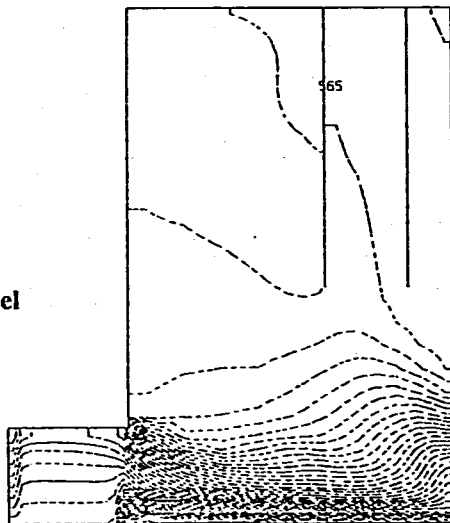
J = 44

TIME
75.0 SEC.



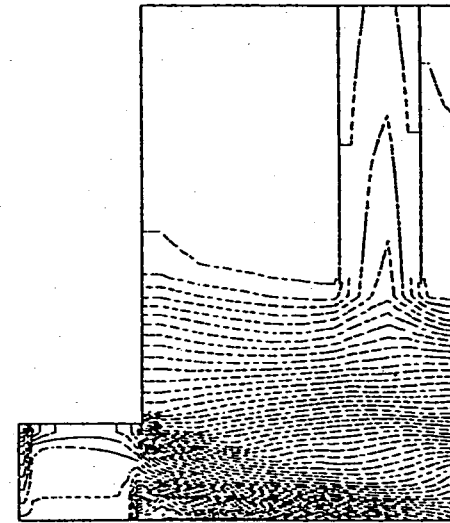
J = 44

TIME
100.0 SEC.



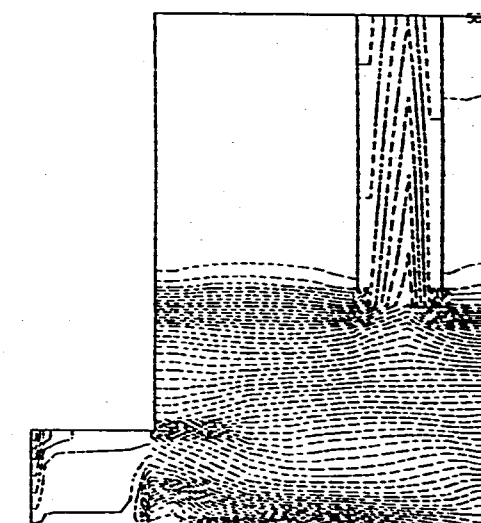
J = 10

TIME
50.0 SEC.



J = 10

TIME
75.0 SEC.



J = 10

TIME
100.0 SEC.

Fig.2.3.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (3/6)

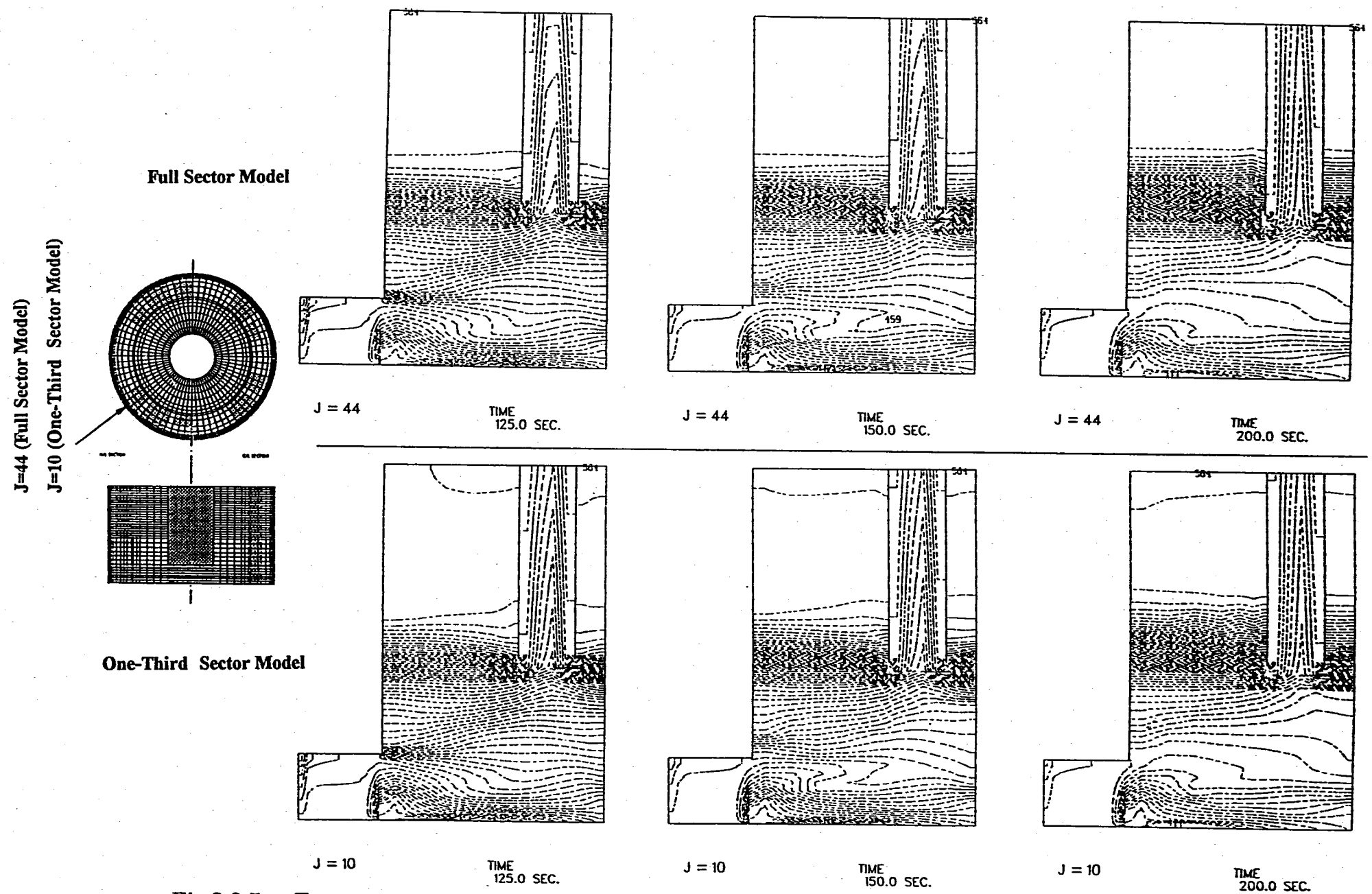
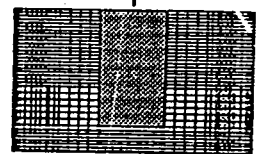
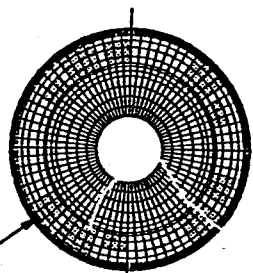


Fig.2.3.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (4/6)

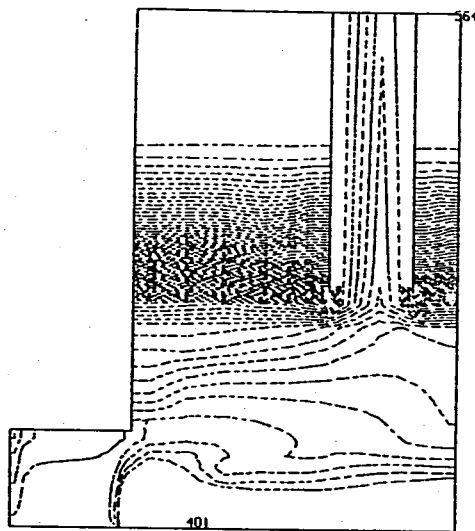
J=44 (Full Sector Model)

J=10 (One-Third Sector Model)

Full Sector Model

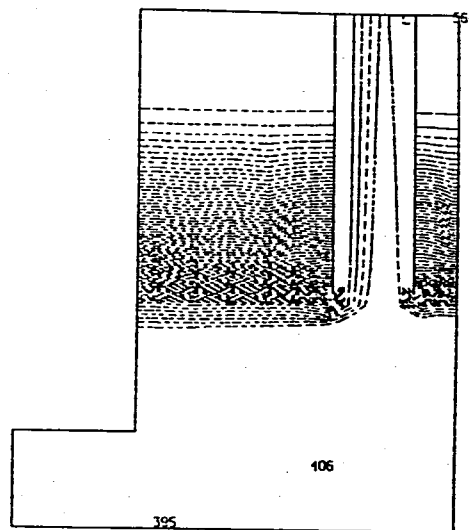


One-Third Sector Model



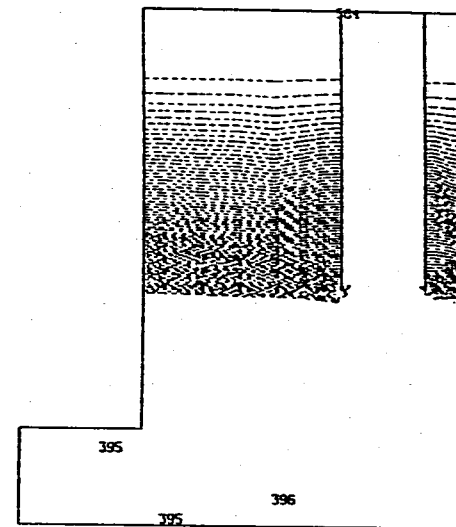
J = 44

TIME
300.0 SEC.



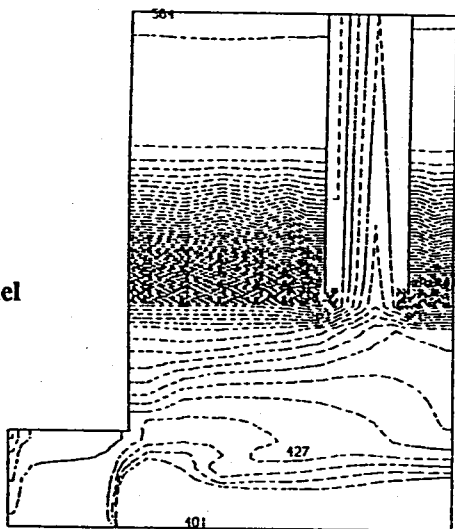
J = 44

TIME
400.0 SEC.



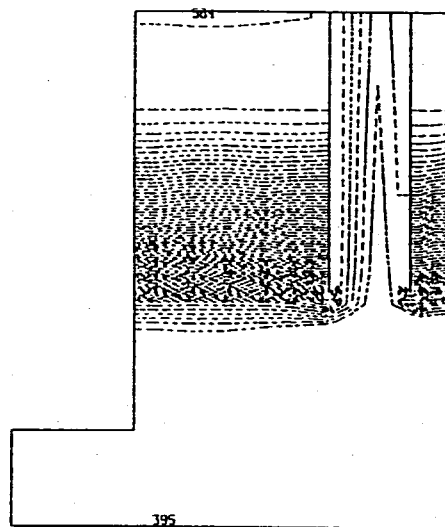
J = 44

TIME
500.0 SEC.



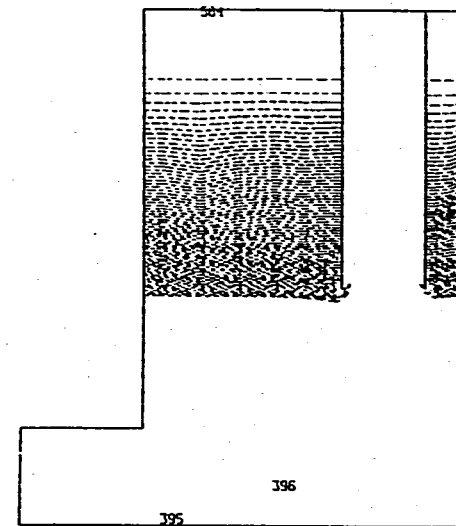
J = 10

TIME
300.0 SEC.



J = 10

TIME
400.0 SEC.



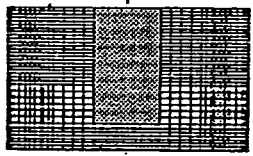
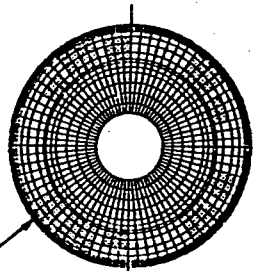
J = 10

TIME
500.0 SEC.

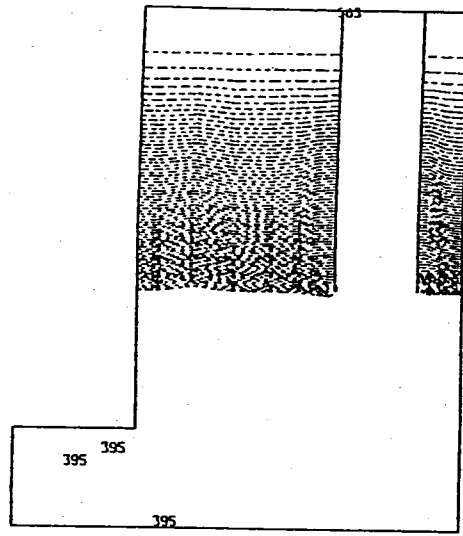
Fig.2.3.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (5/6)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

Full Sector Model

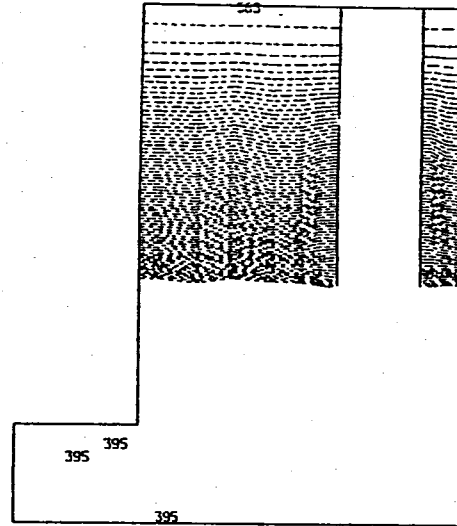


One-Third Sector Model



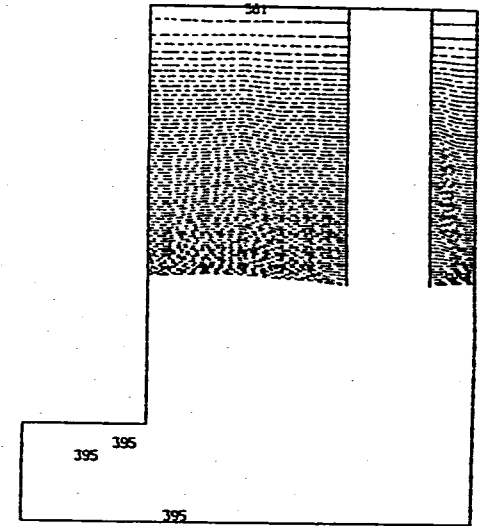
J = 44

TIME
600.0 SEC.



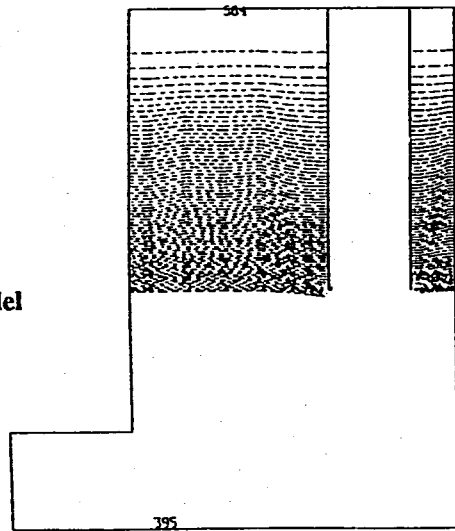
J = 44

TIME
700.0 SEC.



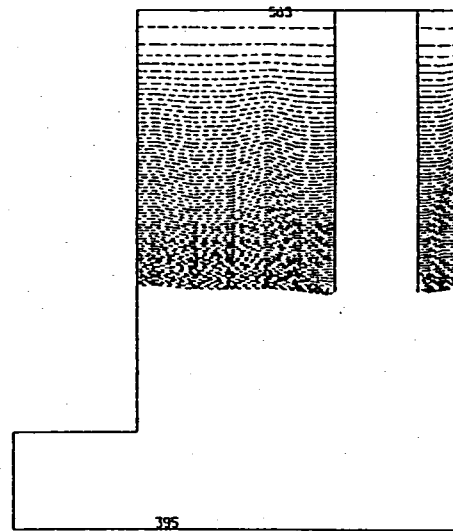
J = 44

TIME
800.0 SEC.



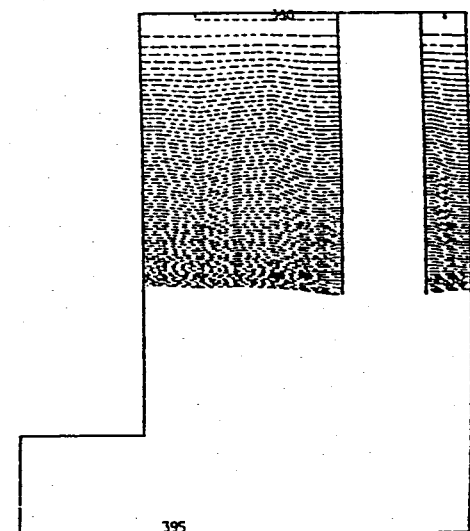
J = 10

TIME
600.0 SEC.



J = 10

TIME
700.0 SEC.



J = 10

TIME
800.0 SEC.

Fig.2.3.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Manual Trip Event (6/6)

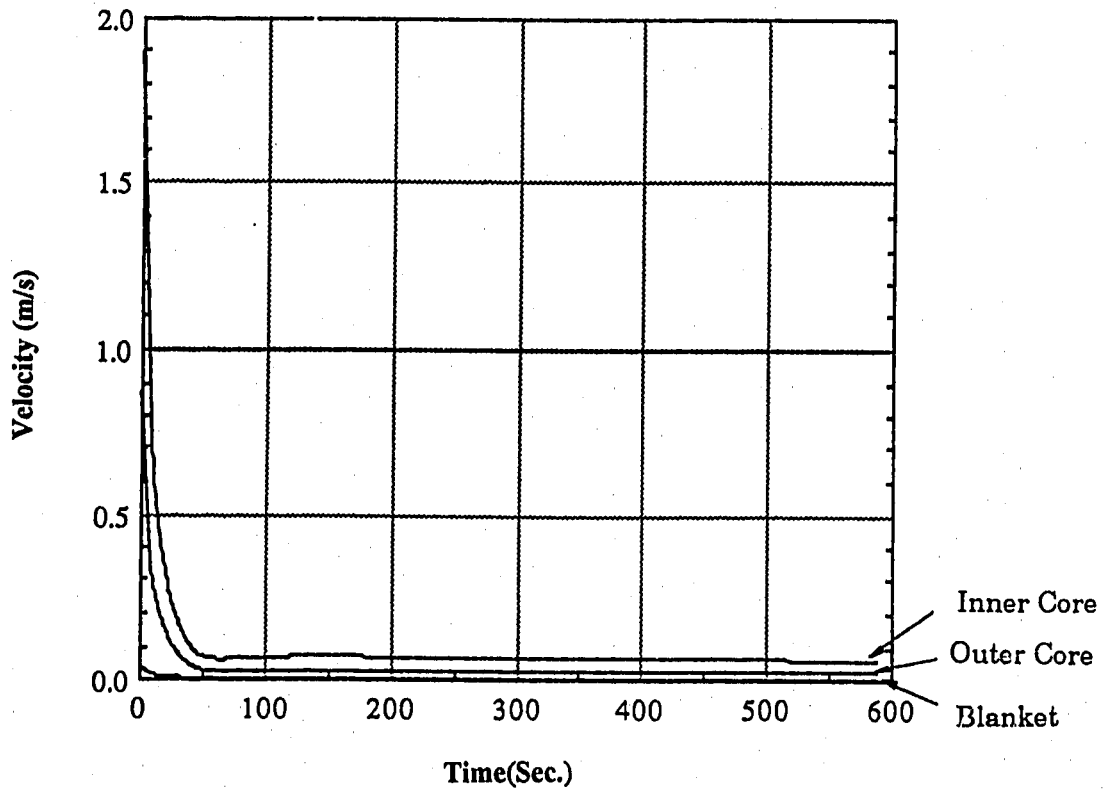
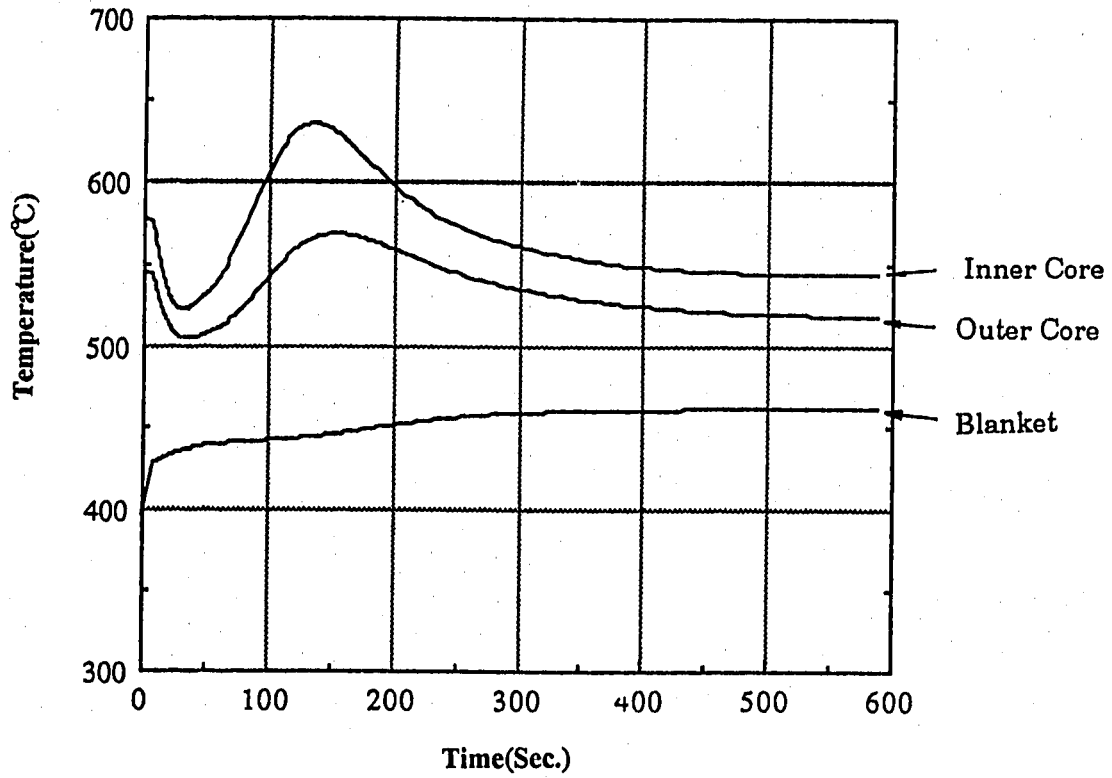


Fig.2.4.1 Flow Rate and Temperature Transients at Core outlet for analysis of natural Circulation

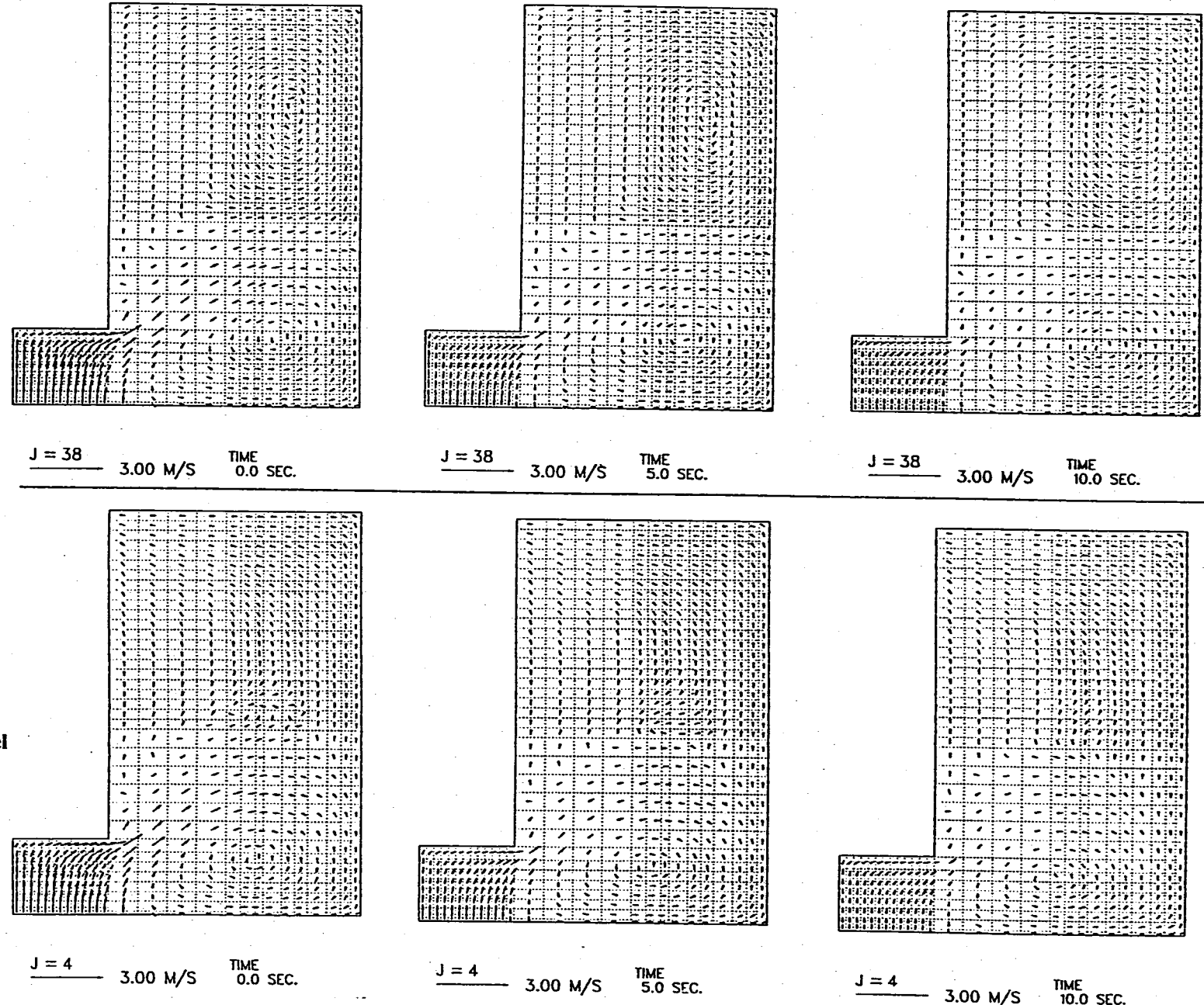
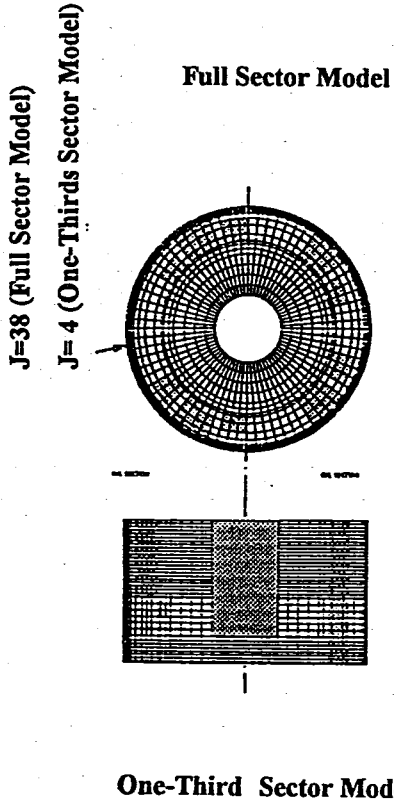
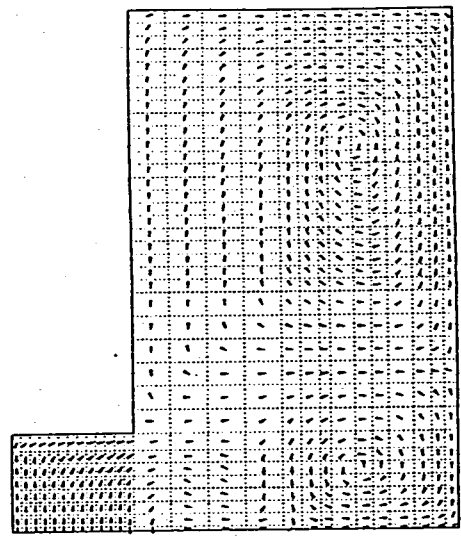
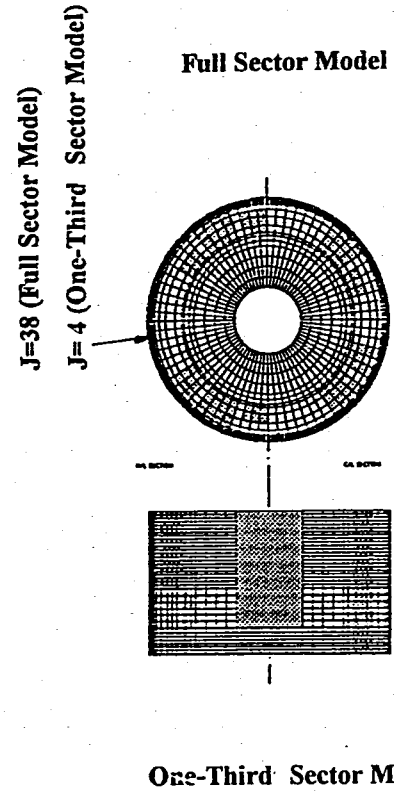
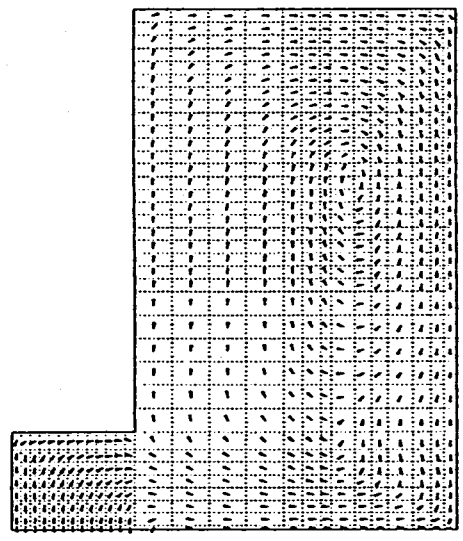


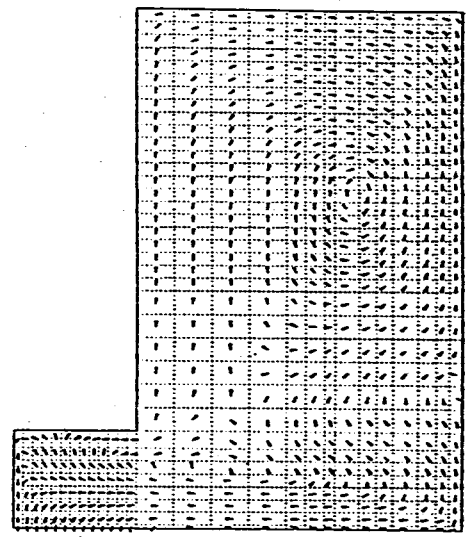
Fig.2.4.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (1/5)



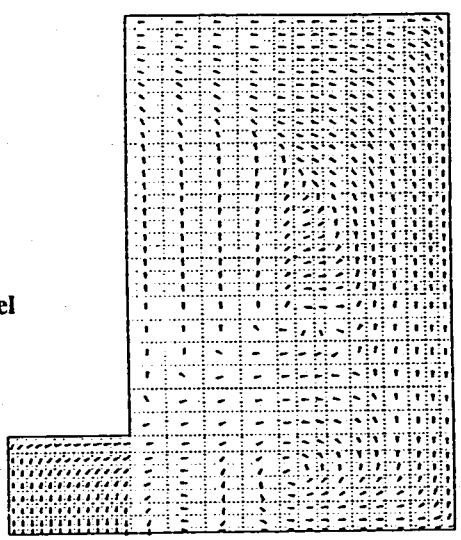
J = 38 3.00 M/S TIME 20.0 SEC.



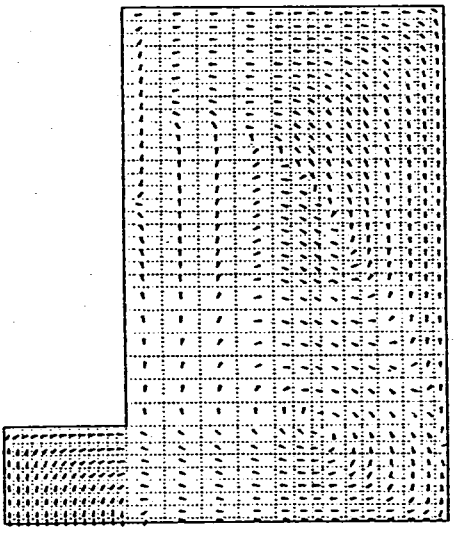
J = 38 3.00 M/S TIME 30.0 SEC.



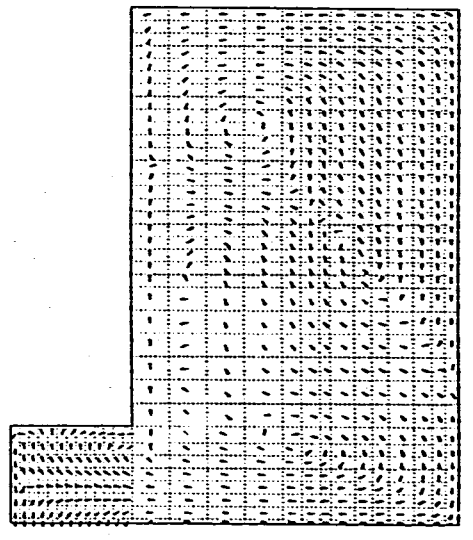
J = 38 3.00 M/S TIME 40.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 20.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 30.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 40.0 SEC.

Fig.2.4.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (2/5)

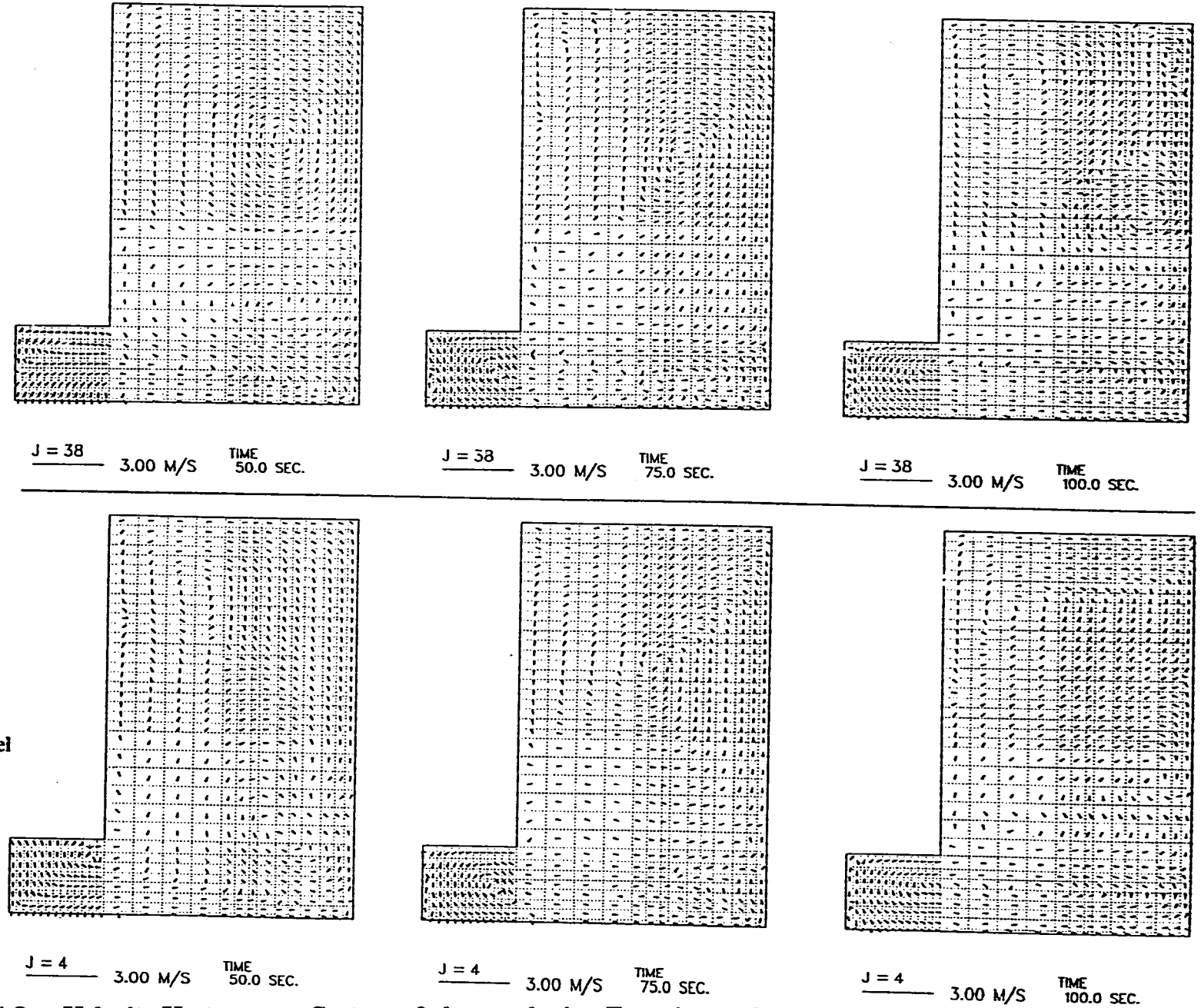
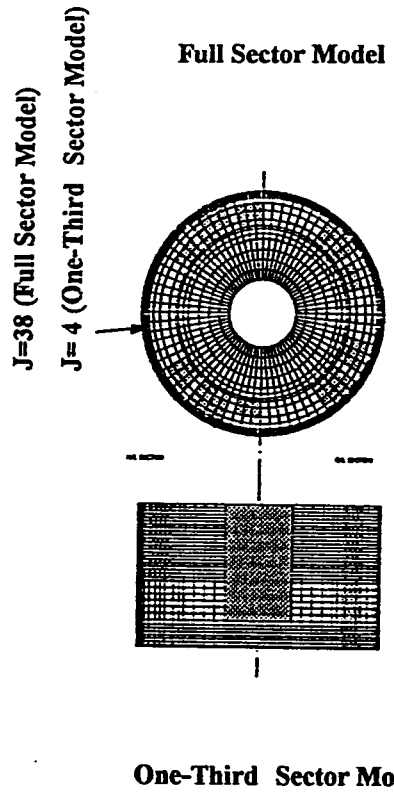
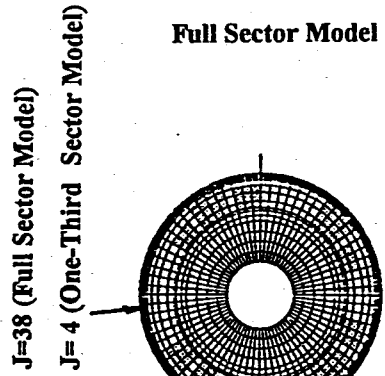
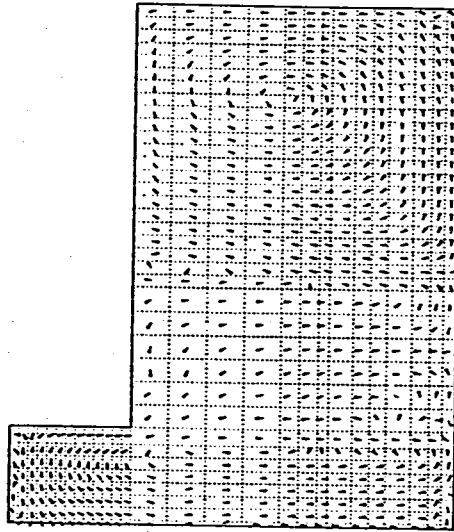


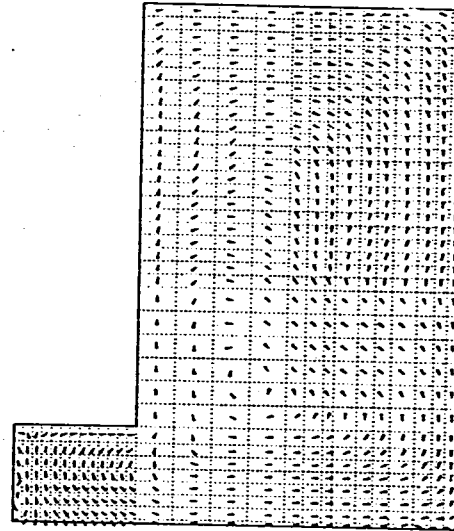
Fig.2.4.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (3/5)



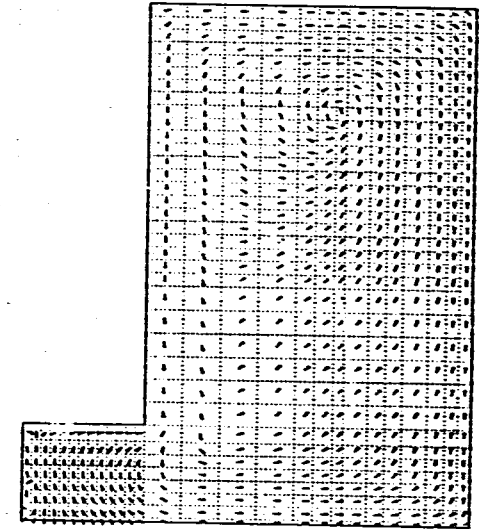
Full Sector Model



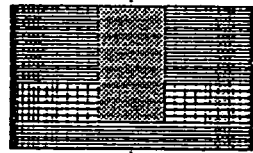
J = 38 3.00 M/S TIME 125.0 SEC.



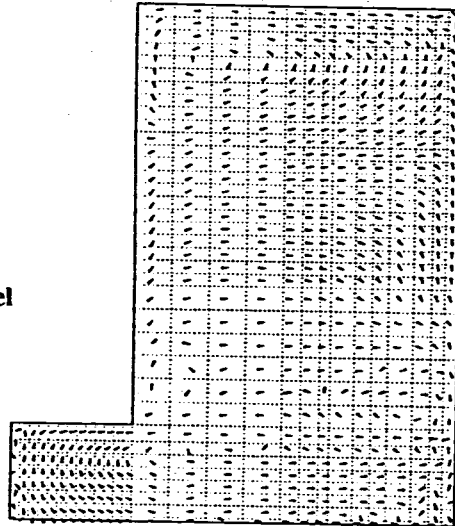
J = 38 3.00 M/S TIME 150.0 SEC.



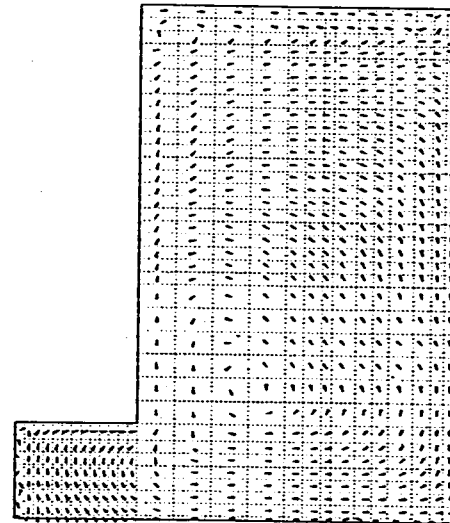
J = 38 3.00 M/S TIME 200.0 SEC.



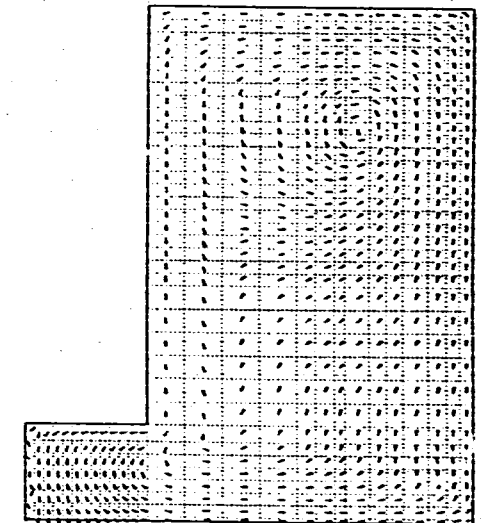
One-Third Sector Model



J = 4 3.00 M/S TIME 125.0 SEC.



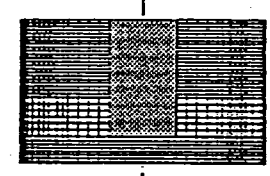
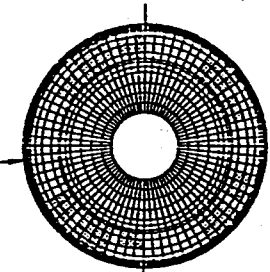
J = 4 3.00 M/S TIME 150.0 SEC.



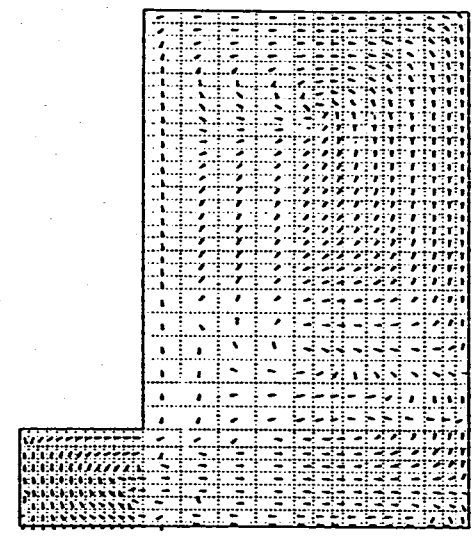
J = 4 3.00 M/S TIME 200.0 SEC.

Fig.2.4.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (4/5)

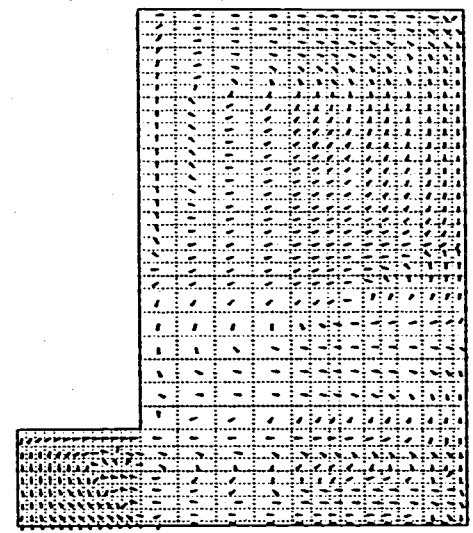
J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)



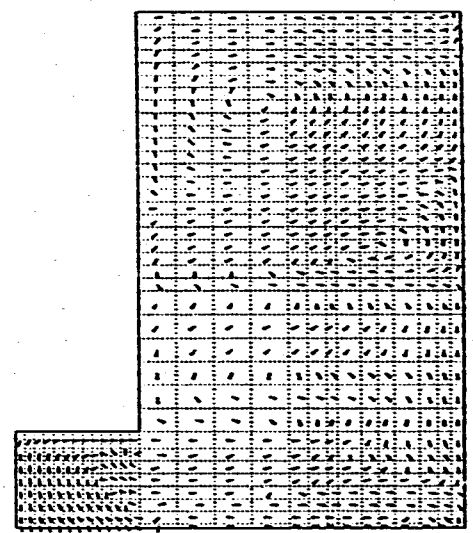
One-Third Sector Model



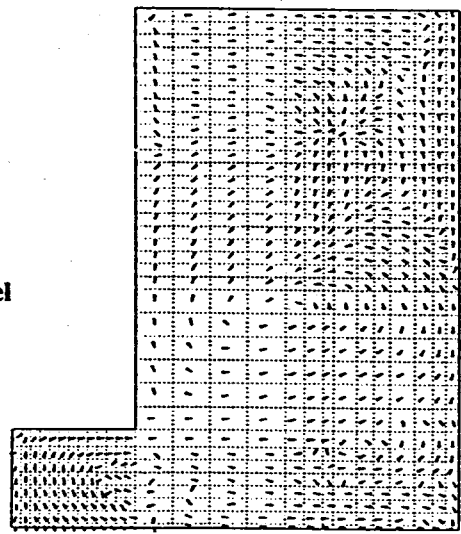
J = 38 3.00 M/S TIME 300.0 SEC.



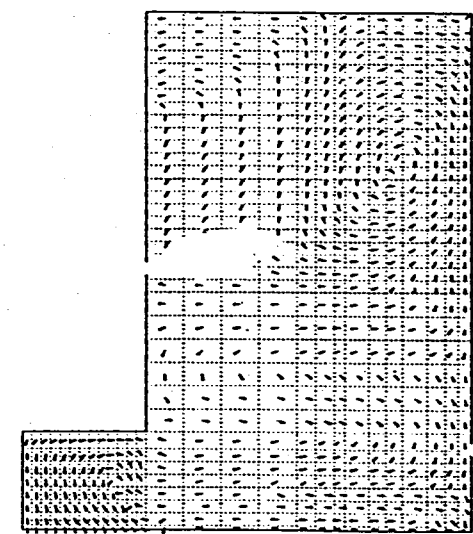
J = 38 3.00 M/S TIME 400.0 SEC.



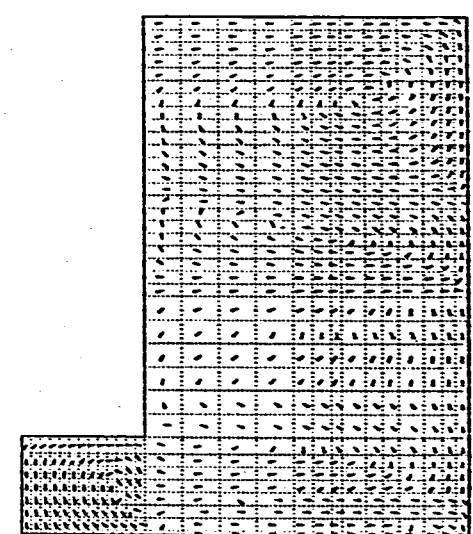
J = 38 3.00 M/S TIME 500.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 300.0 SEC.



J = 4 3.00 M/S TIME 400.0 SEC.

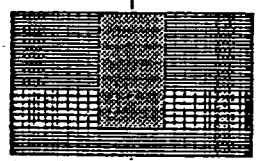
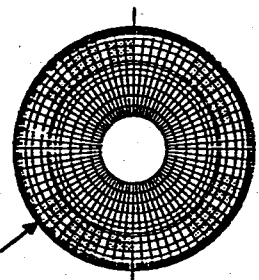


J = 4 3.00 M/S TIME 500.0 SEC.

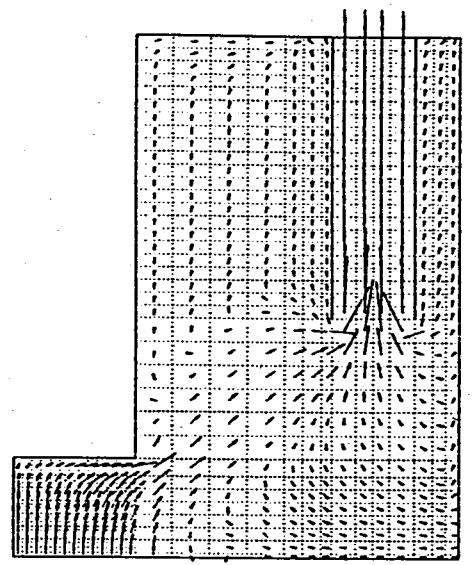
Fig.2.4.2 Velocity Vector at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (5/5)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

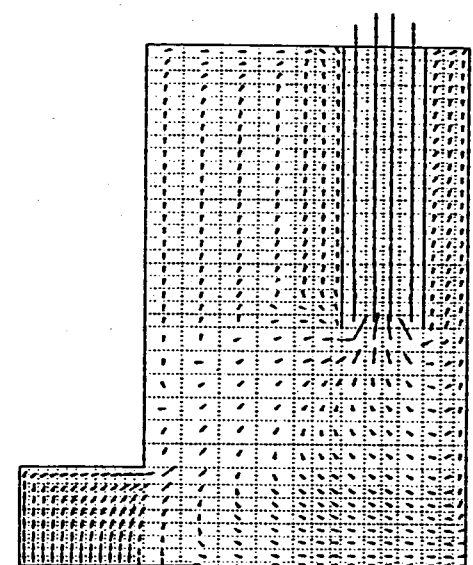
Full Sector Model



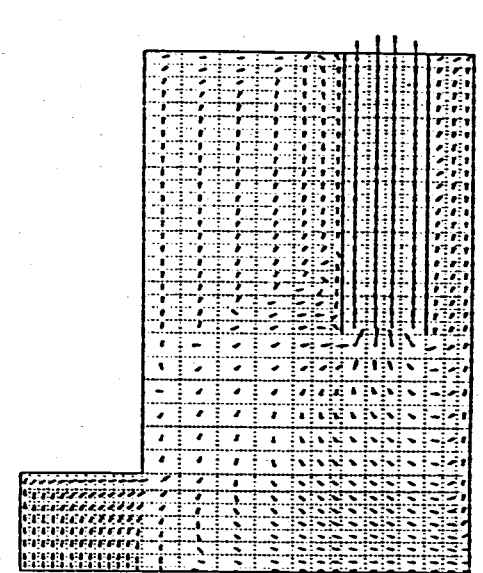
One-Third Sector Model



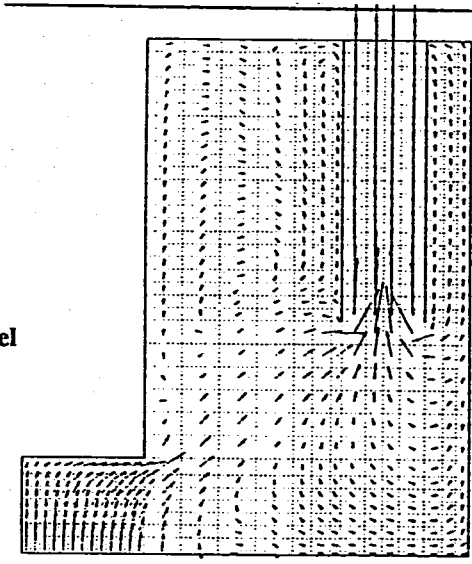
J = 44 3.00 M/S TIME 0.0 SEC.



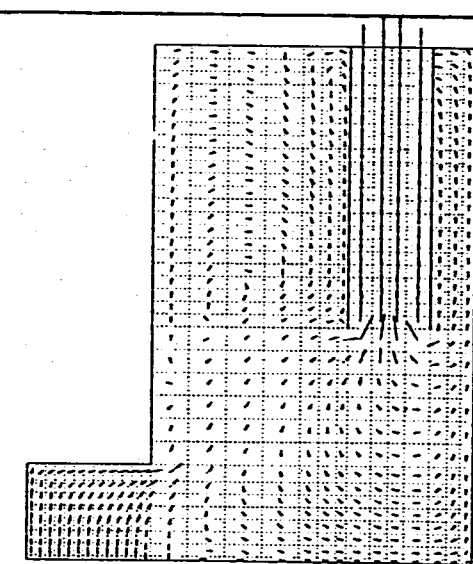
J = 44 3.00 M/S TIME 5.0 SEC.



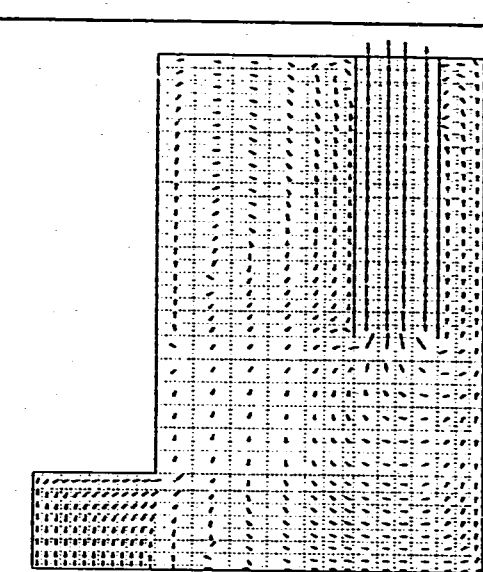
J = 44 3.00 M/S TIME 10.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 0.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 5.0 SEC.



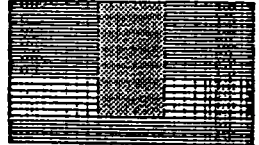
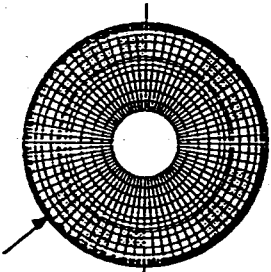
J = 10 3.00 M/S TIME 10.0 SEC.

Fig.2.4.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (1/5)

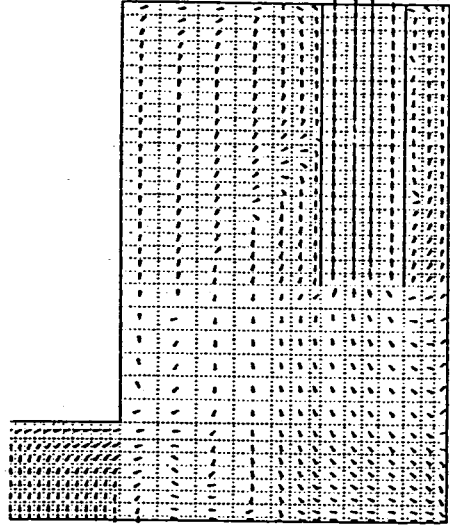
J=44 (Full Sector Model)

J=10 (One-Third Sector Model)

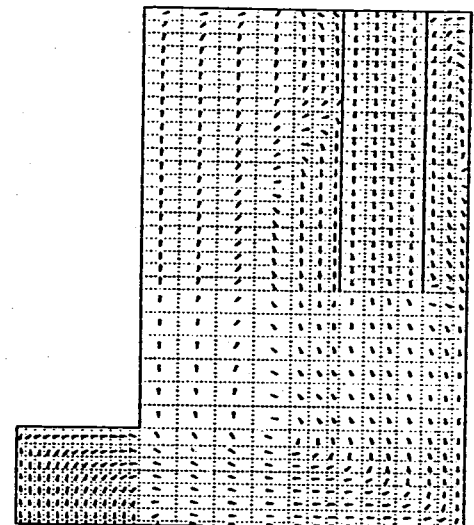
Full Sector Model



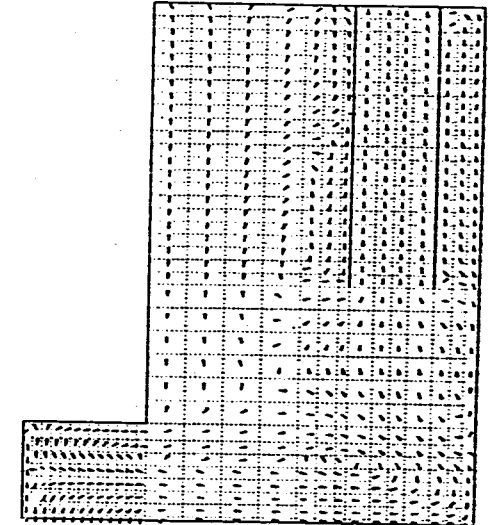
One-Third Sector Model



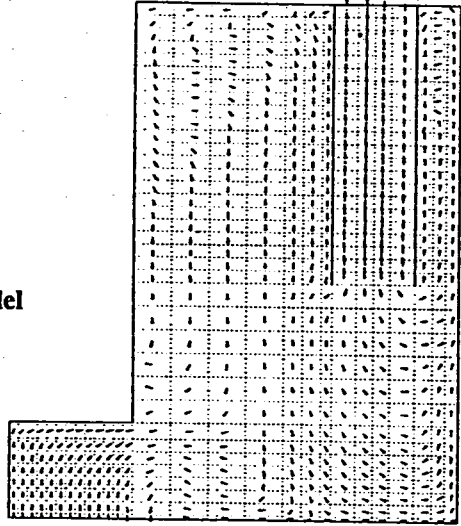
J = 44 3.00 M/S TIME 20.0 SEC.



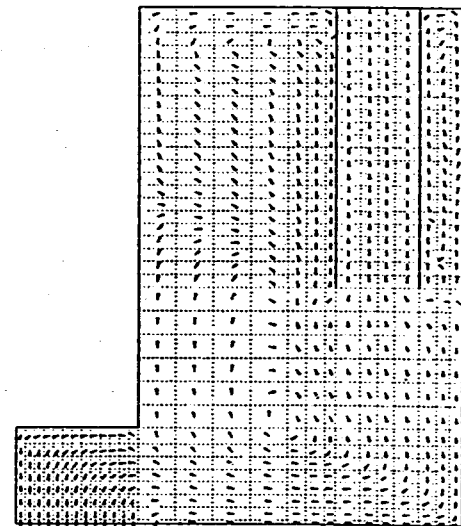
J = 44 3.00 M/S TIME 30.0 SEC.



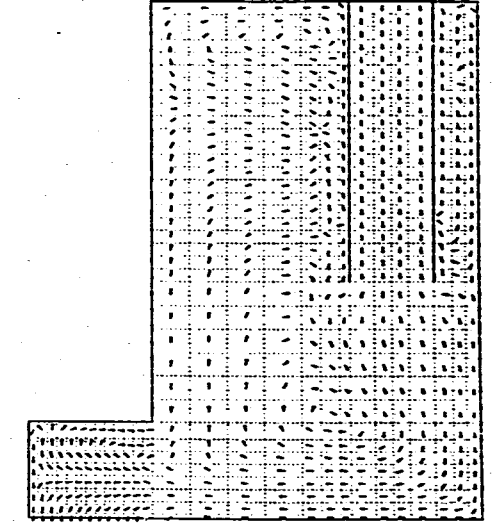
J = 44 3.00 M/S TIME 40.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 20.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 30.0 SEC.

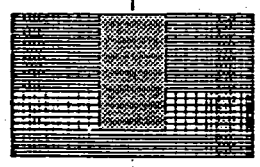
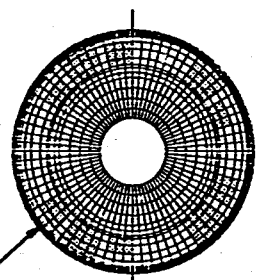


J = 10 3.00 M/S TIME 40.0 SEC.

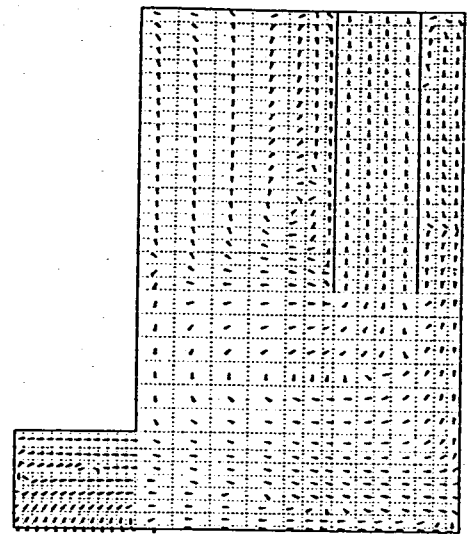
Fig.2.4.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (2/5)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

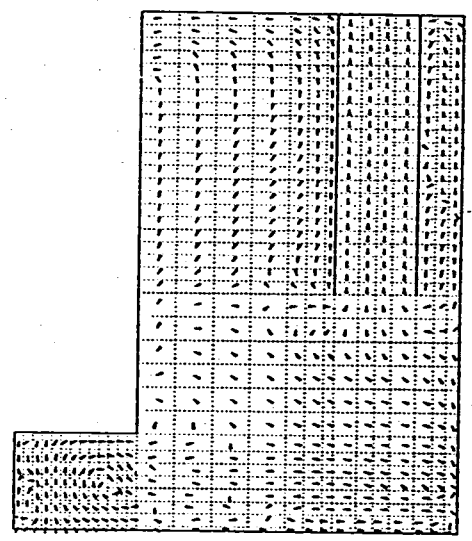
Full Sector Model



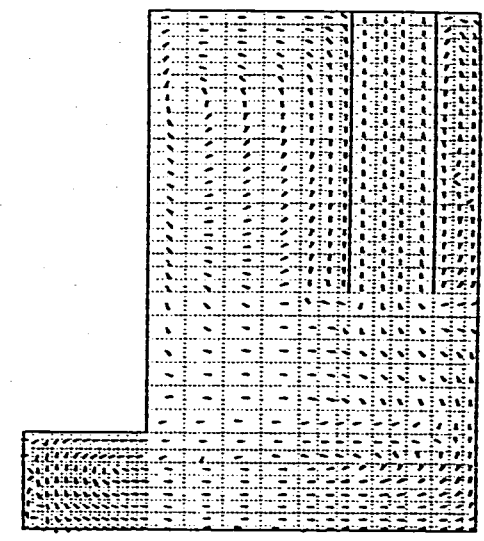
One-Third Sector Model



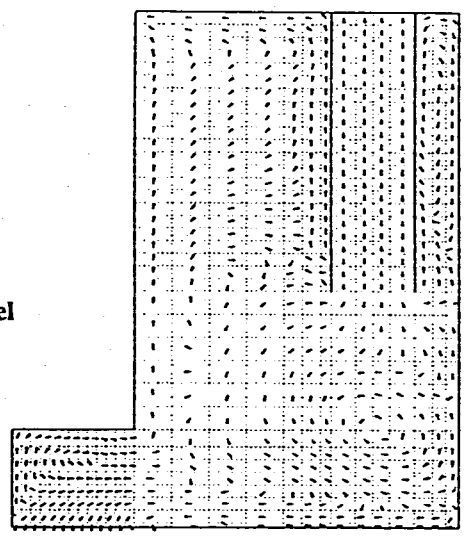
J = 44 3.00 M/S TIME 50.0 SEC.



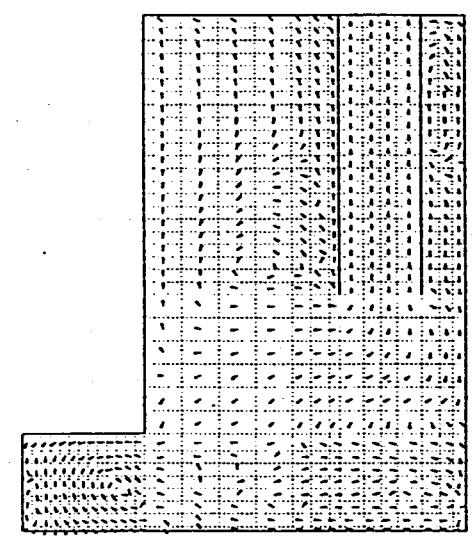
J = 44 3.00 M/S TIME 75.0 SEC.



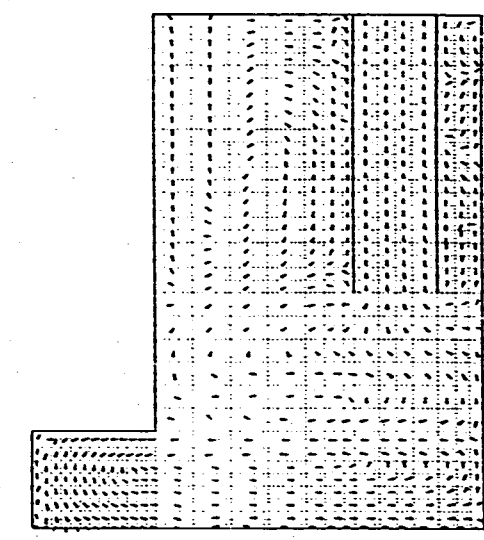
J = 44 3.00 M/S TIME 100.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 50.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 75.0 SEC.

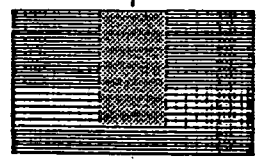
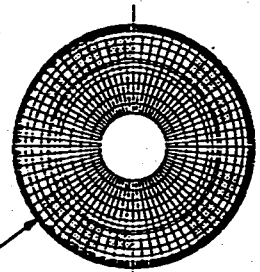


J = 10 3.00 M/S TIME 100.0 SEC.

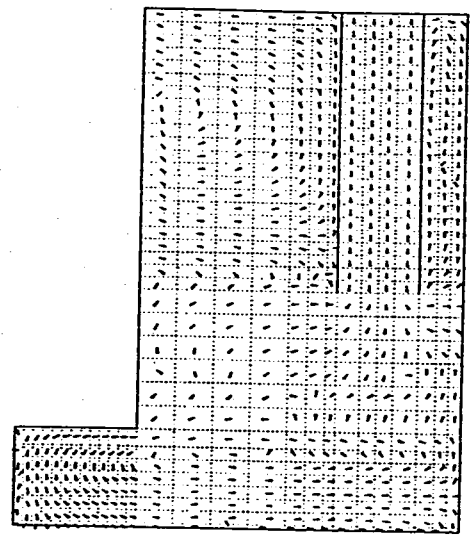
Fig.2.4.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (3/5)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

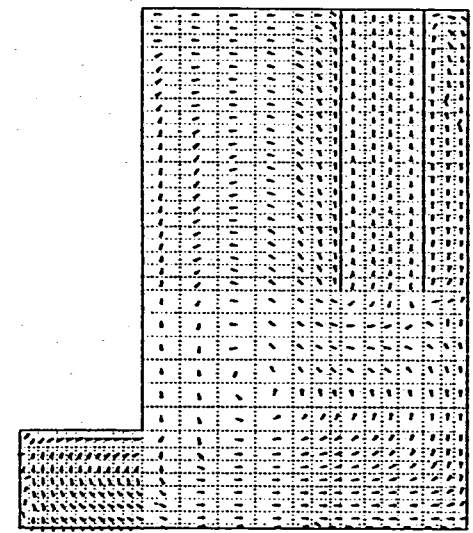
Full Sector Model



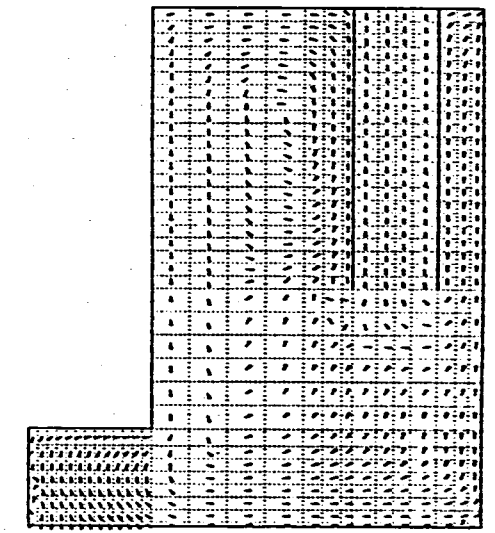
One-Third Sector Model



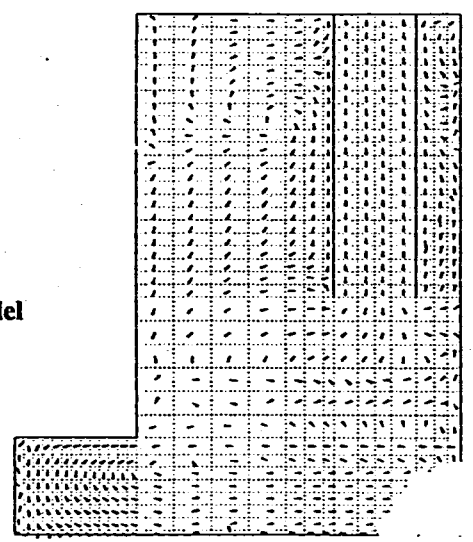
J = 44 3.00 M/S TIME 125.0 SEC.



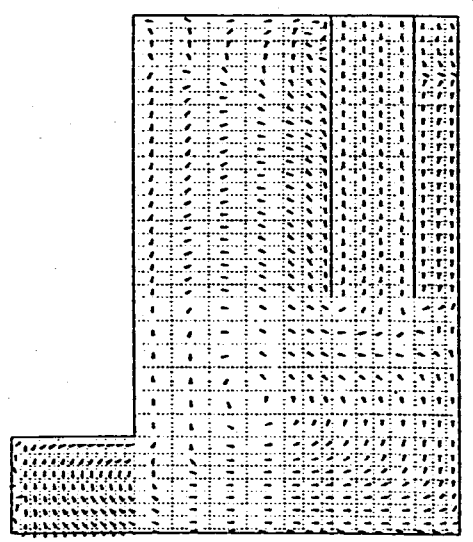
J = 44 3.00 M/S TIME 150.0 SEC.



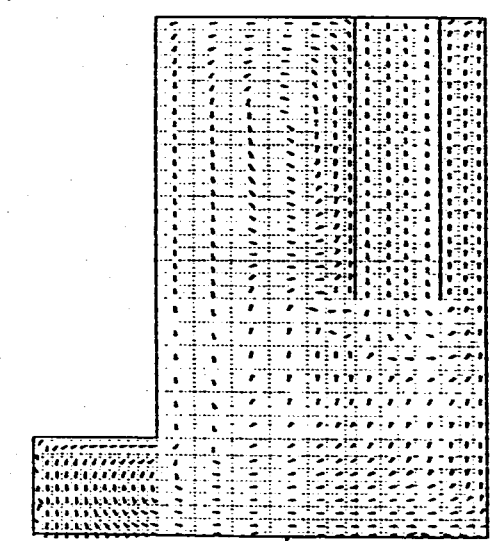
J = 44 3.00 M/S TIME 200.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 125.0 SEC.

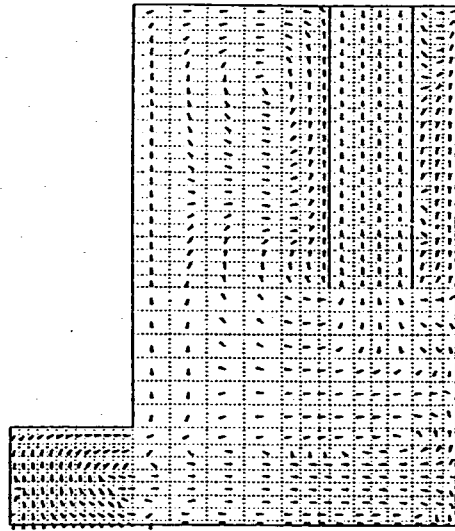
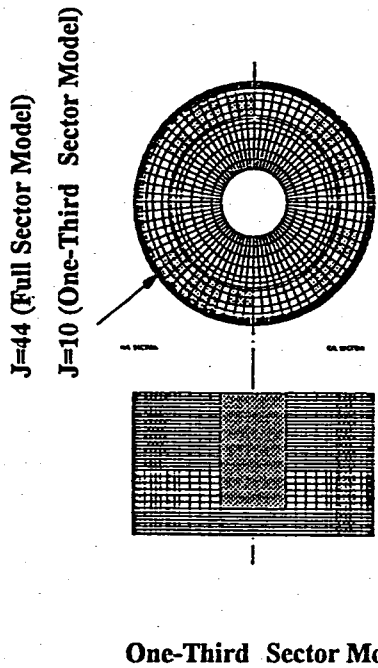


J = 10 3.00 M/S TIME 150.0 SEC.

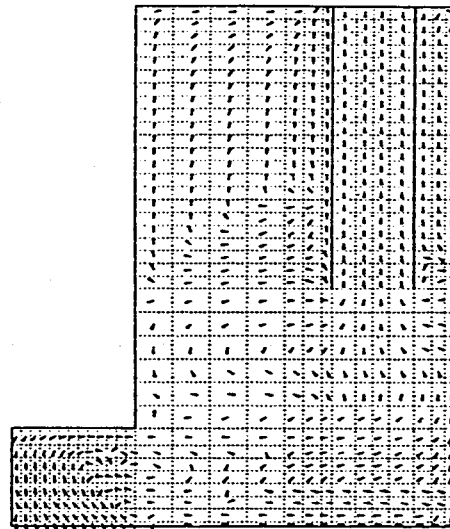


J = 10 3.00 M/S TIME 200.0 SEC.

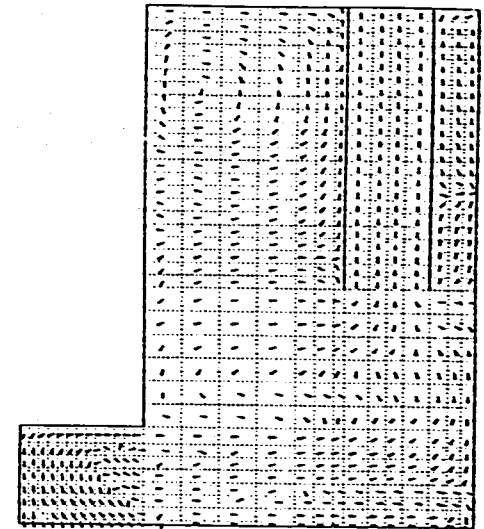
Fig.2.4.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (4/5)



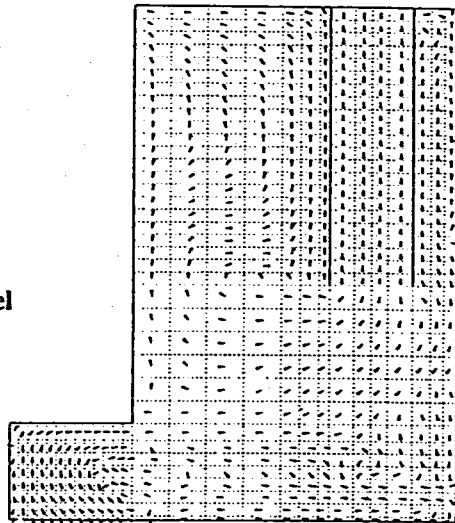
J = 44 3.00 M/S TIME 300.0 SEC.



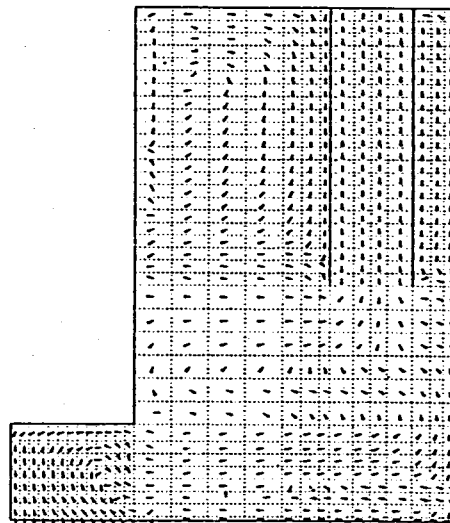
J = 44 3.00 M/S TIME 400.0 SEC.



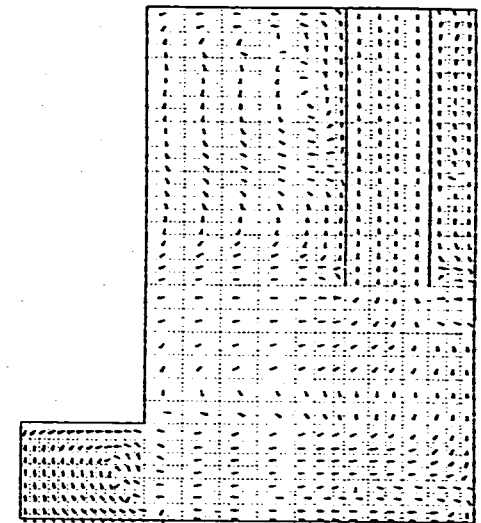
J = 44 3.00 M/S TIME 500.0 SEC.



J = 10 3.00 M/S TIME 300.0 SEC.

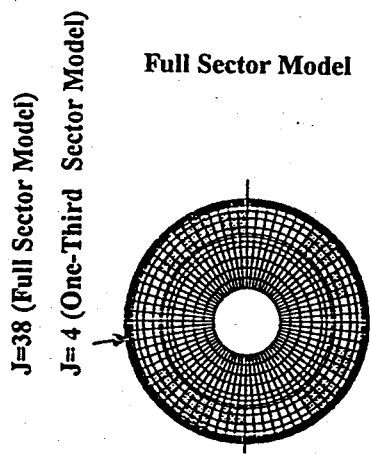


J = 10 3.00 M/S TIME 400.0 SEC.

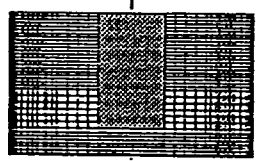


J = 10 3.00 M/S TIME 500.0 SEC.

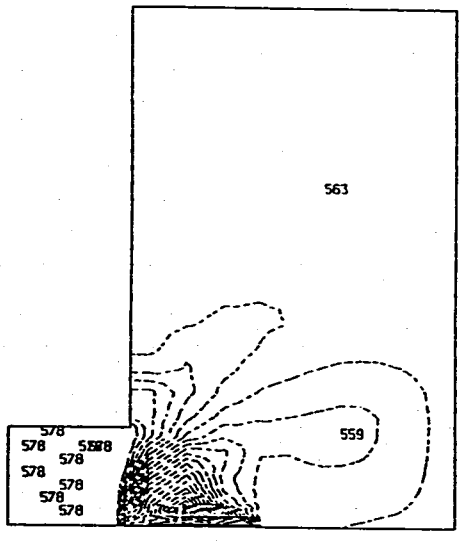
Fig.2.4.3 Velocity Vector at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (5/5)



Full Sector Model

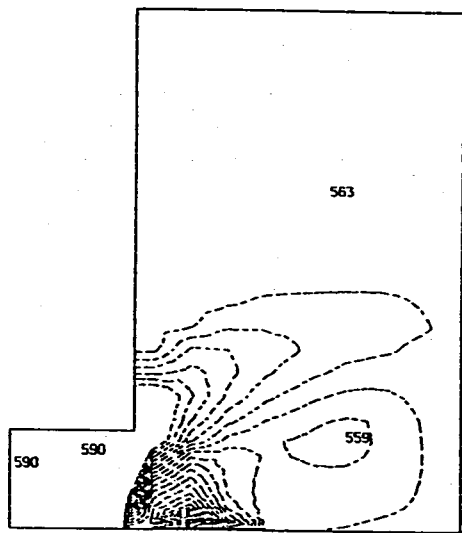


One-Thirds Sector Model



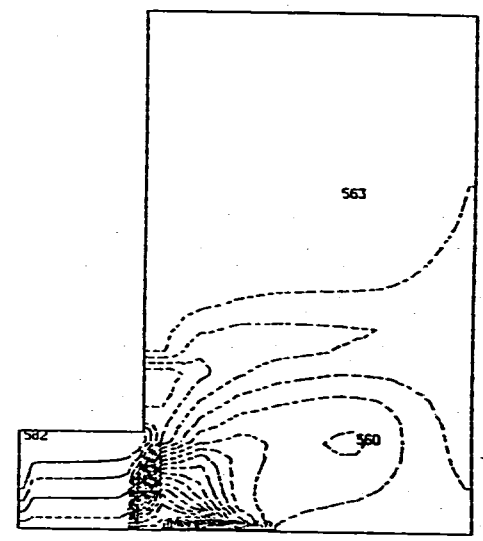
J = 38

TIME 0.0 SEC.



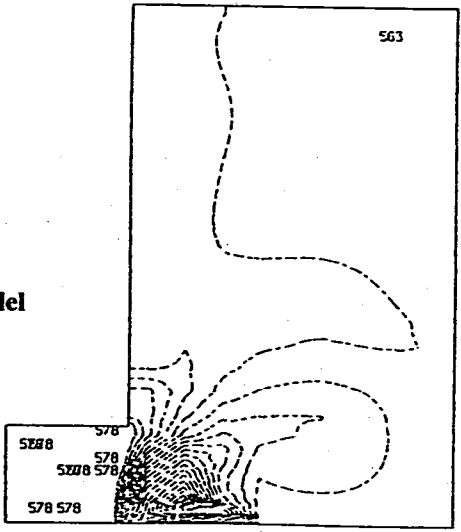
J = 38

TIME 5.0 SEC.



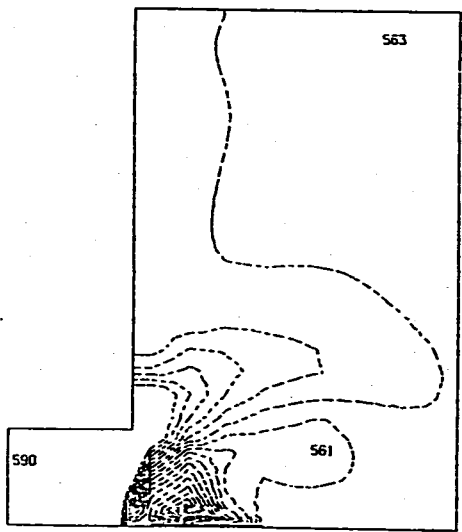
J = 38

TIME 10.0 SEC.



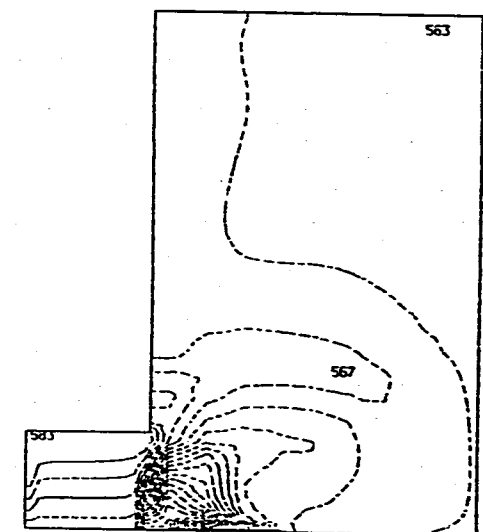
J = 4

TIME 0.0 SEC.



J = 4

TIME 5.0 SEC.



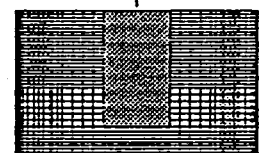
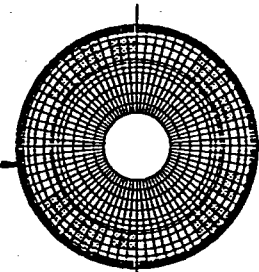
J = 4

TIME 10.0 SEC.

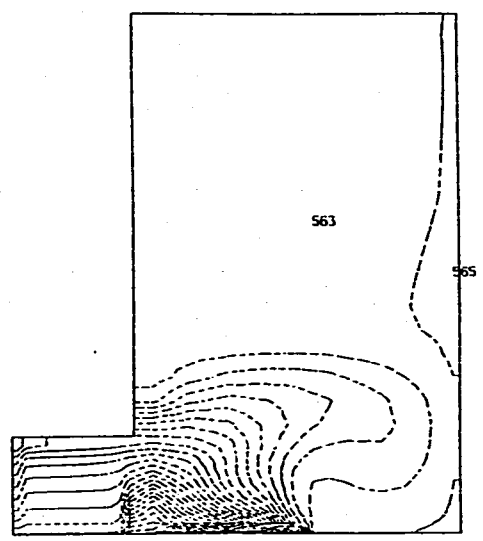
Fig.2.4.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (1/5)

J=38 (Full Sector Model)
J=4 (One-Third Sector Model)

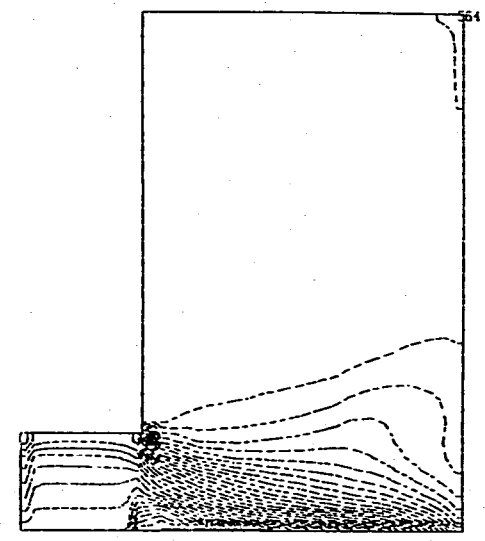
Full Sector Model



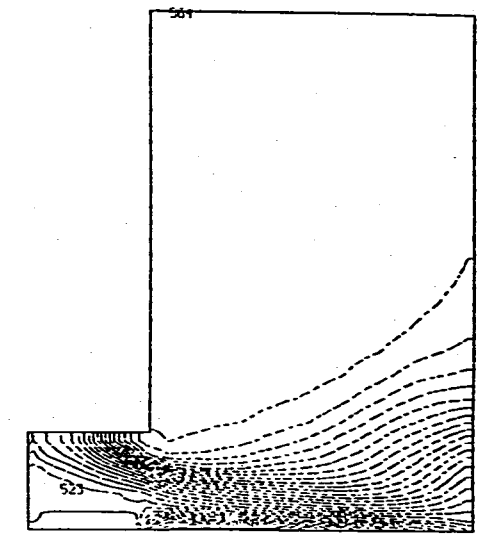
One-Third Sector Model



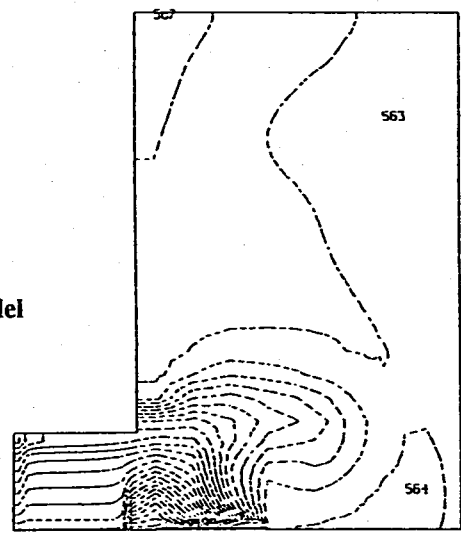
J = 38
TIME 20.0 SEC.



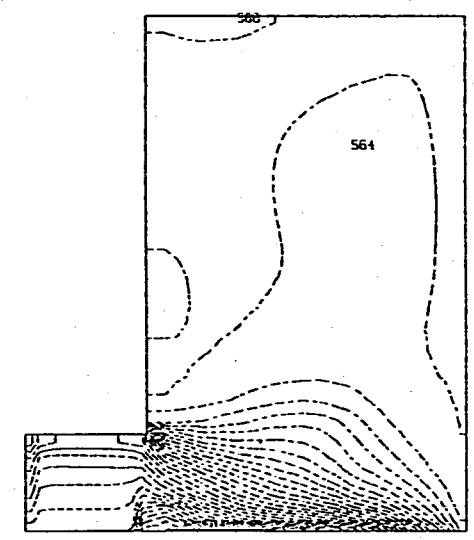
J = 38
TIME 30.0 SEC.



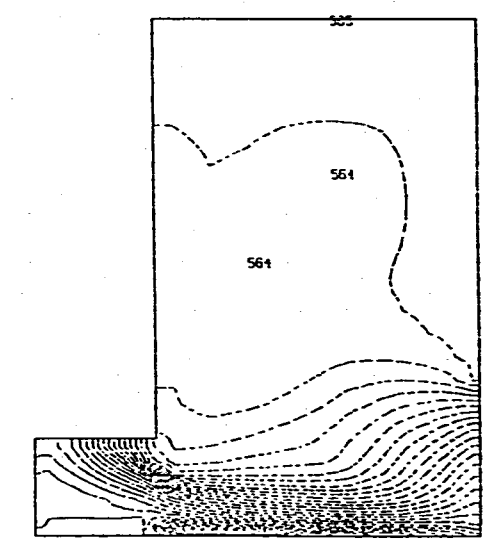
J = 38
TIME 40.0 SEC.



J = 4
TIME 20.0 SEC.

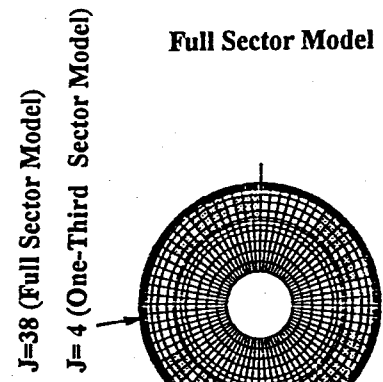


J = 4
TIME 30.0 SEC.

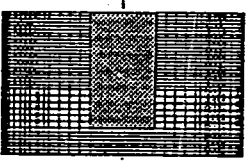


J = 4
TIME 40.0 SEC.

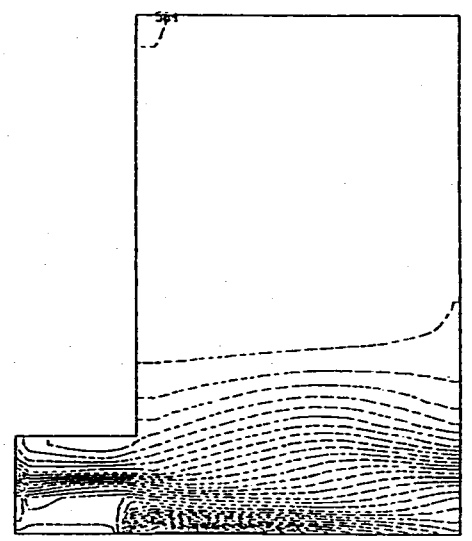
Fig.2.4.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (2/5)



Full Sector Model

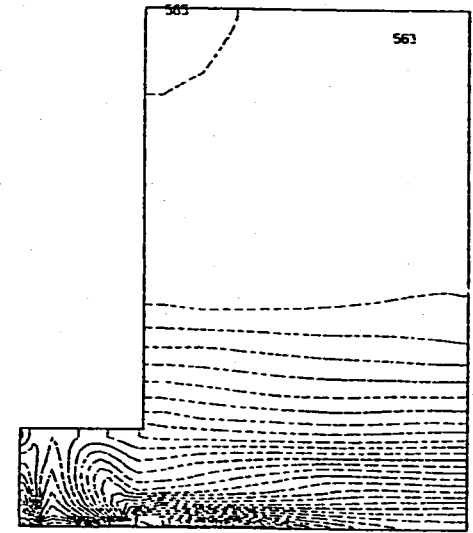


One-Third Sector Model



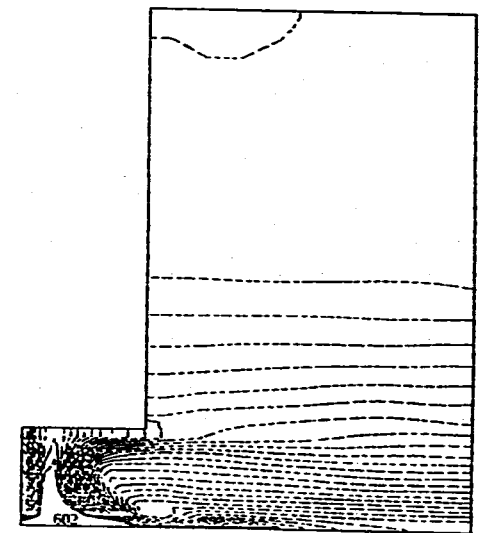
J = 38

TIME
50.0 SEC.



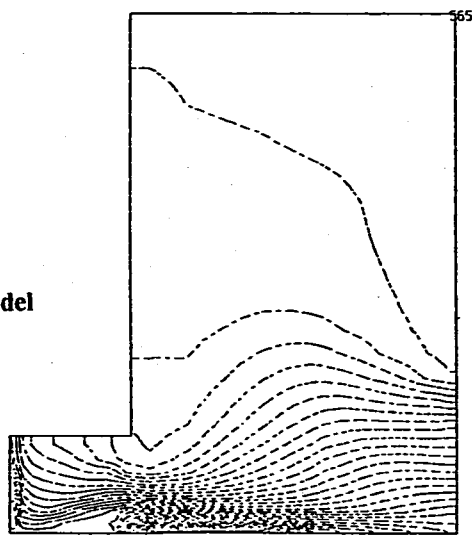
J = 38

TIME
75.0 SEC.



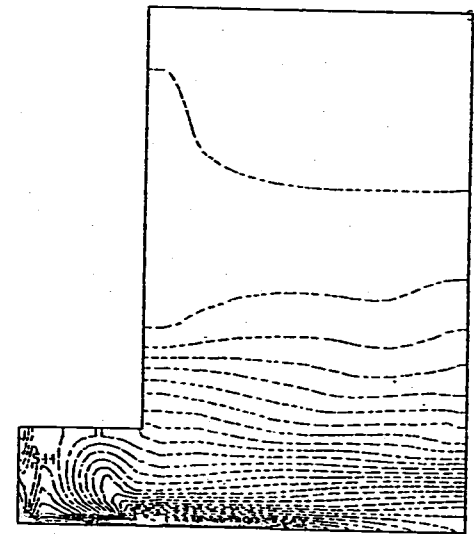
J = 38

TIME
100.0 SEC.



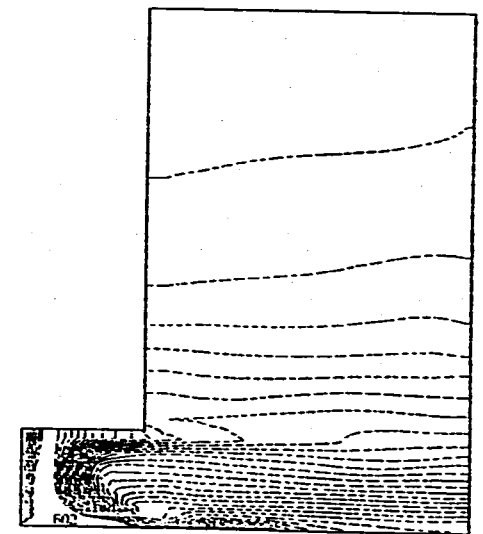
J = 4

TIME
50.0 SEC.



J = 4

TIME
75.0 SEC.



J = 4

TIME
100.0 SEC.

Fig.2.4.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (3/5)

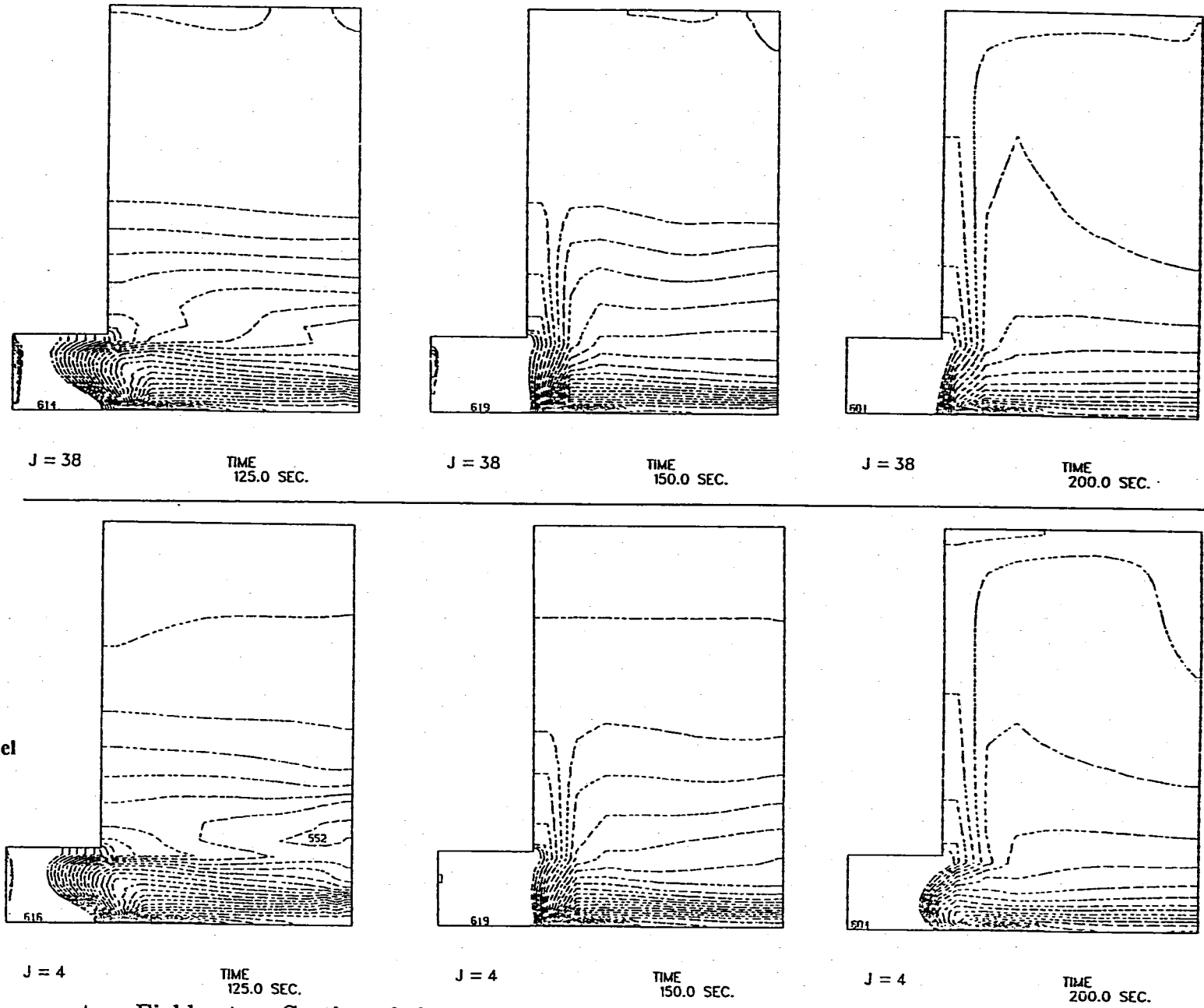
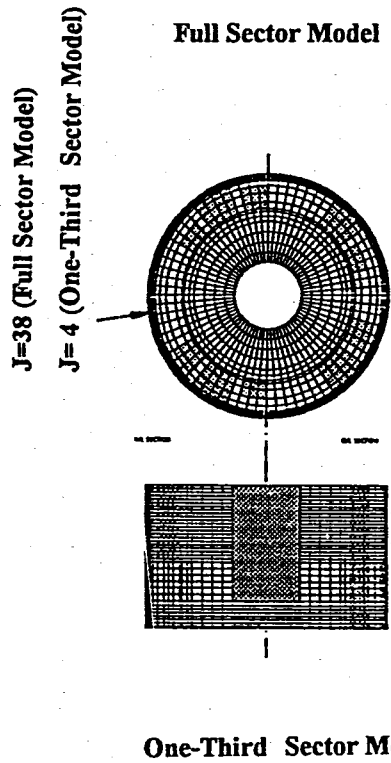
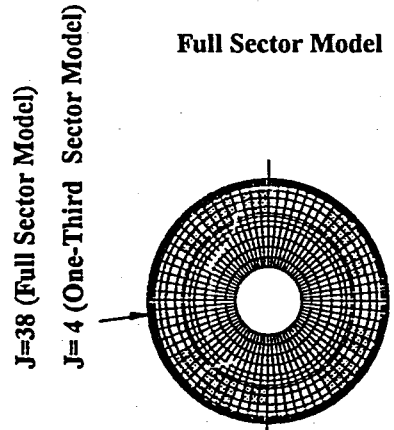
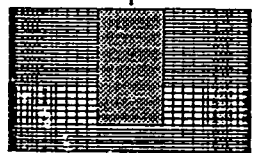


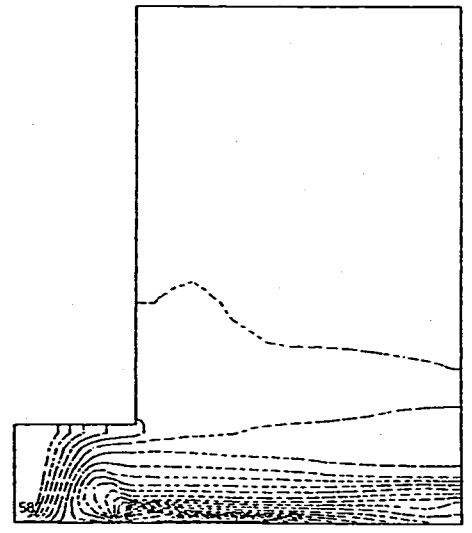
Fig.2.4.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (4/5)



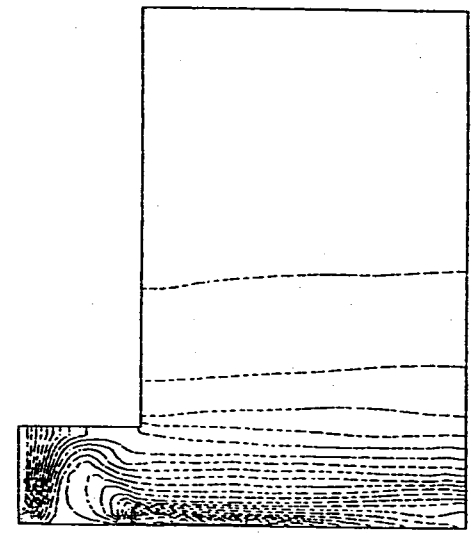
Full Sector Model



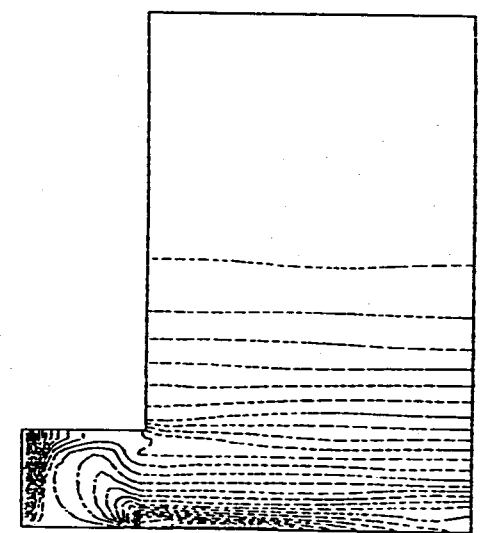
One-Third Sector Model



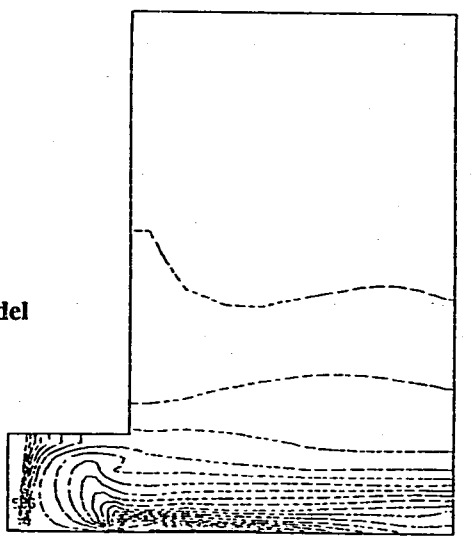
J = 38
TIME 300.0 SEC.



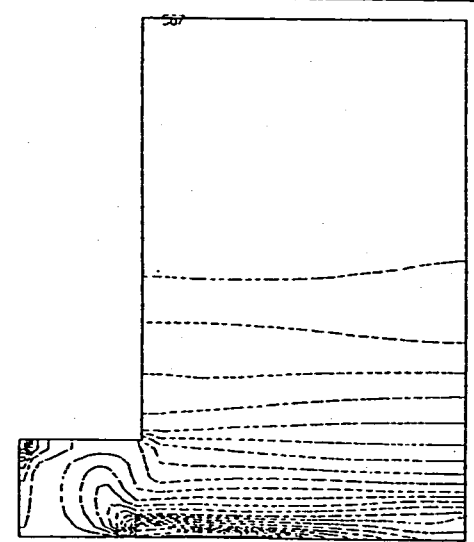
J = 38
TIME 400.0 SEC.



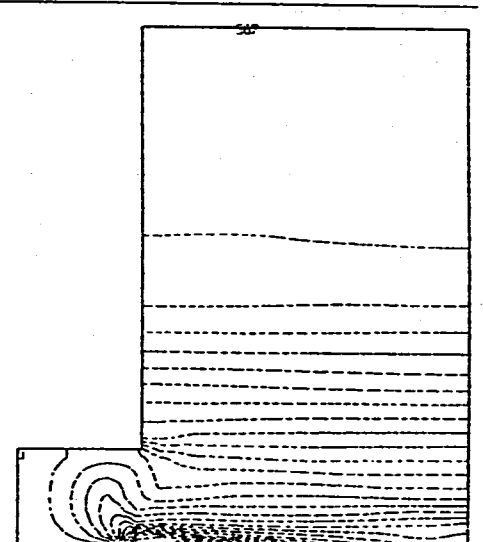
J = 38
TIME 500.0 SEC.



J = 4
TIME 300.0 SEC.



J = 4
TIME 400.0 SEC.



J = 4
TIME 500.0 SEC.

Fig.2.4.4 Temperature Fields at r-z Section of plenum during Transient of Natural Circulation (5/5)

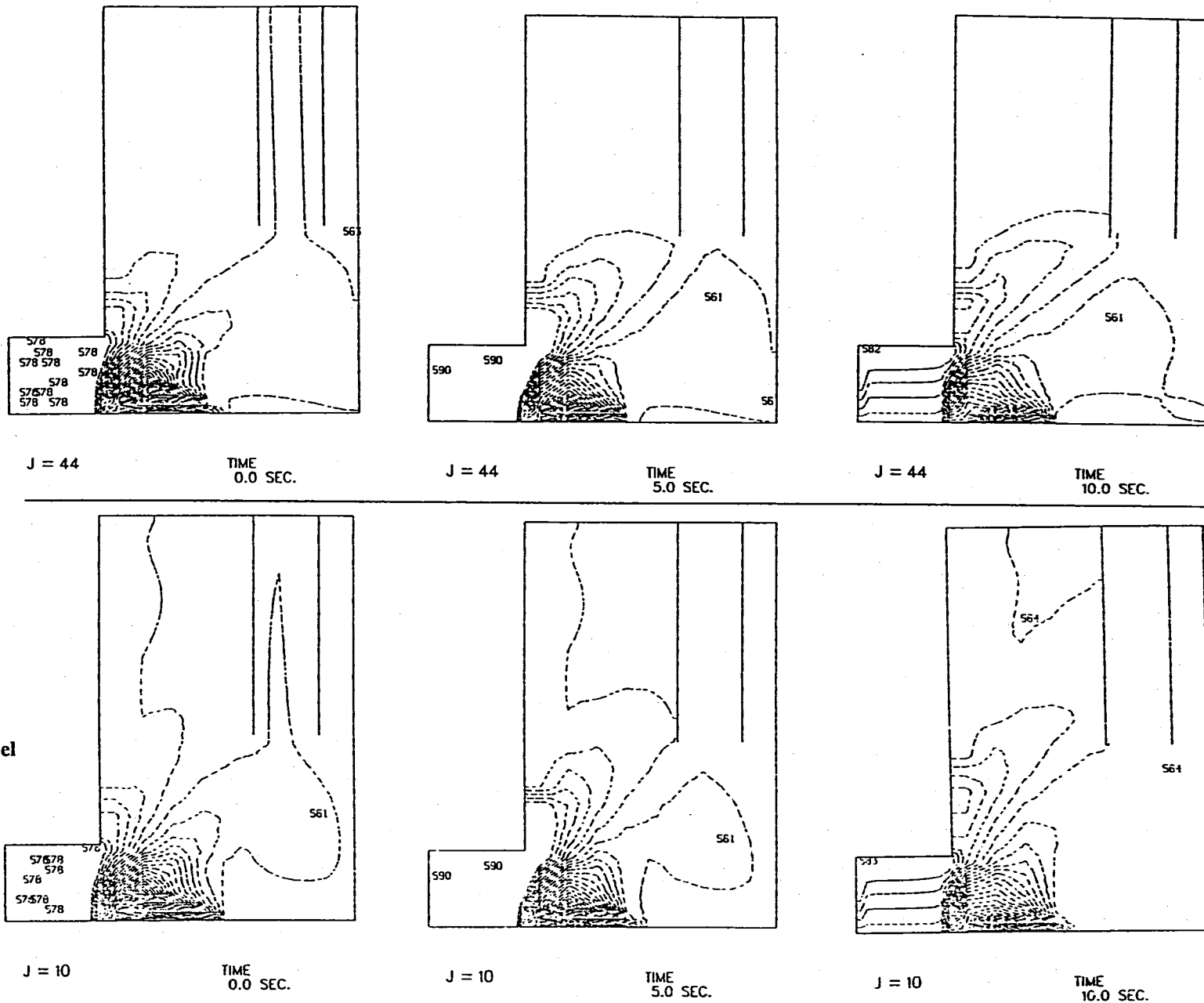
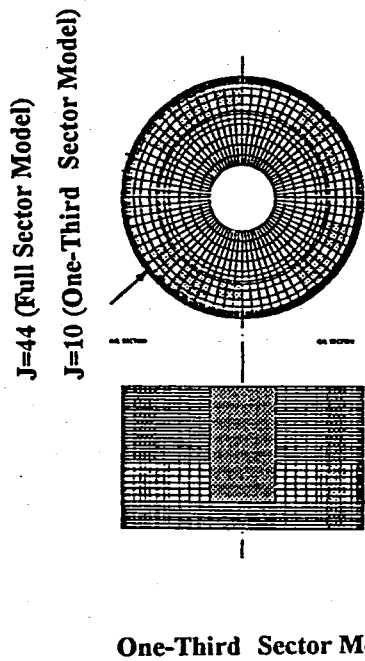


Fig.2.4.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (1/5)

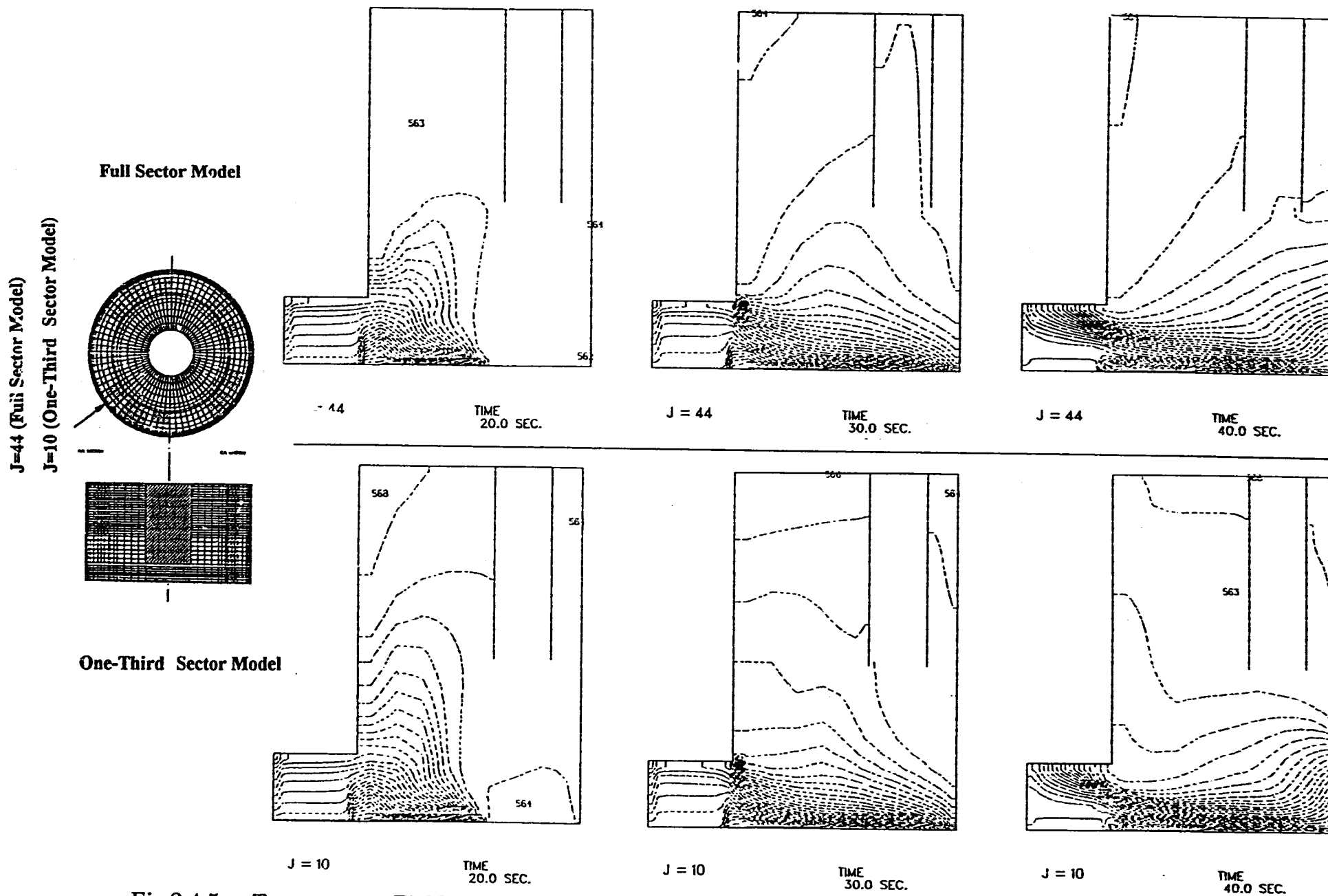
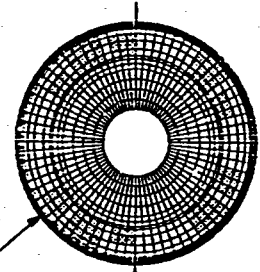


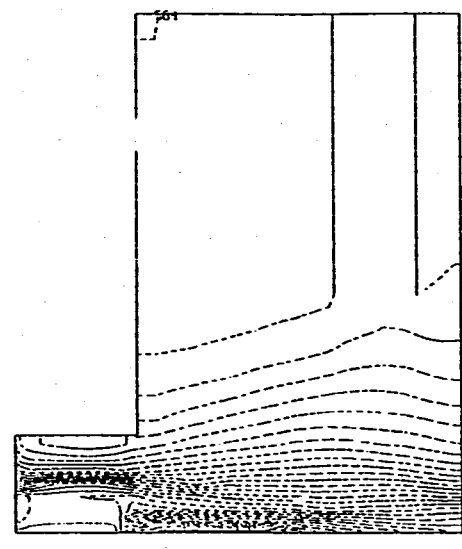
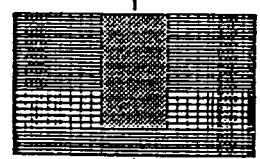
Fig.2.4.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (2/5)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

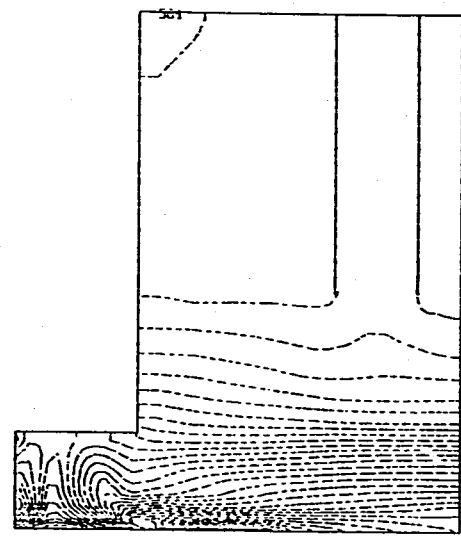
Full Sector Model



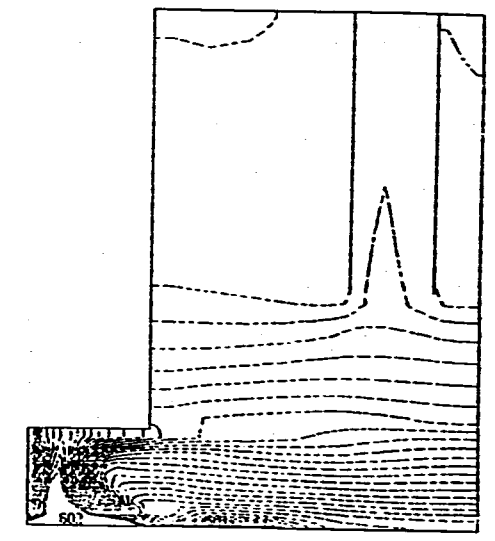
One-Third Sector Model



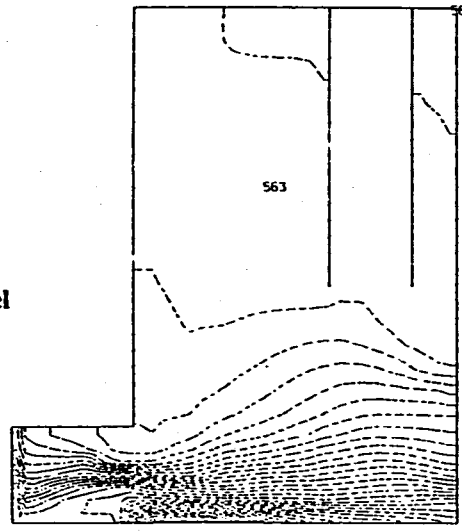
J = 44
TIME 50.0 SEC.



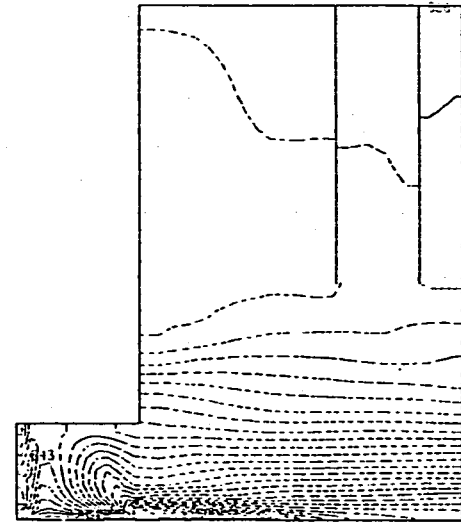
J = 44
TIME 75.0 SEC.



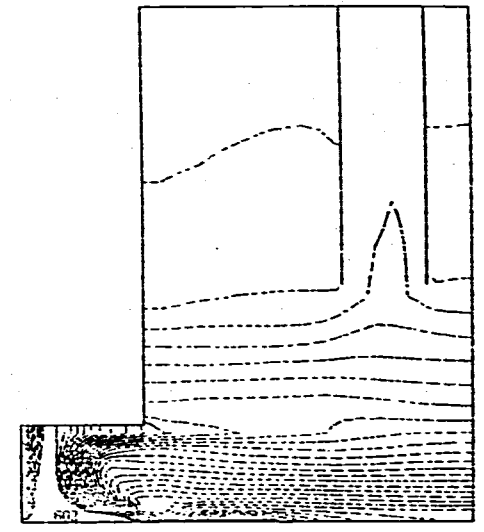
J = 44
TIME 100.0 SEC.



J = 10
TIME 50.0 SEC.



J = 10
TIME 75.0 SEC.

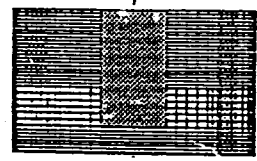
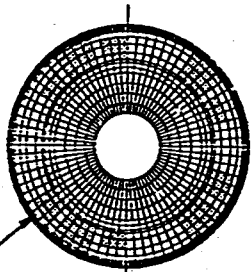


J = 10
TIME 100.0 SEC.

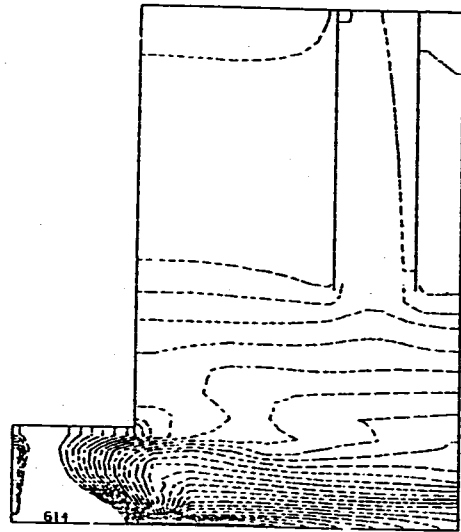
Fig.2.4.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (3/5)

J=44 (Full Sector Model)
 J=10 (One-Third Sector Model)

Full Sector Model

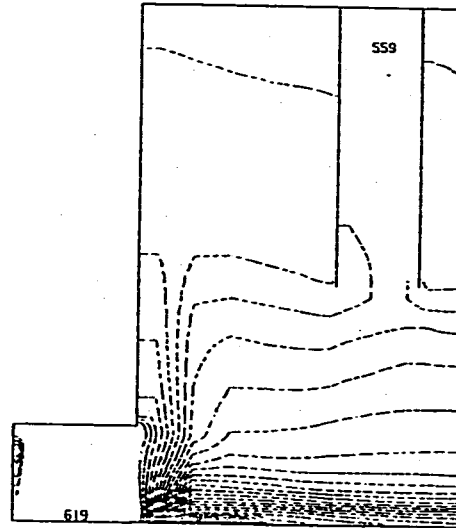


One-Third Sector Model



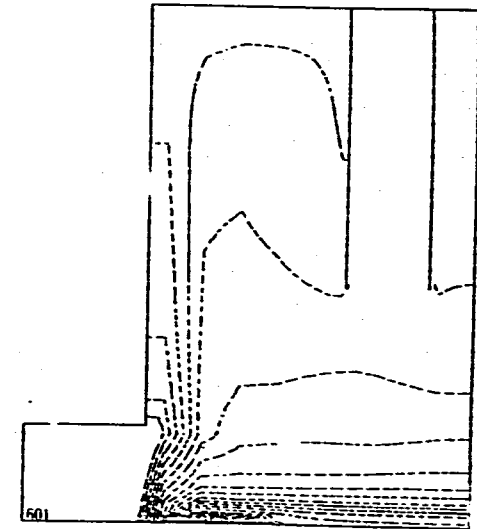
J = 44

TIME
125.0 SEC.



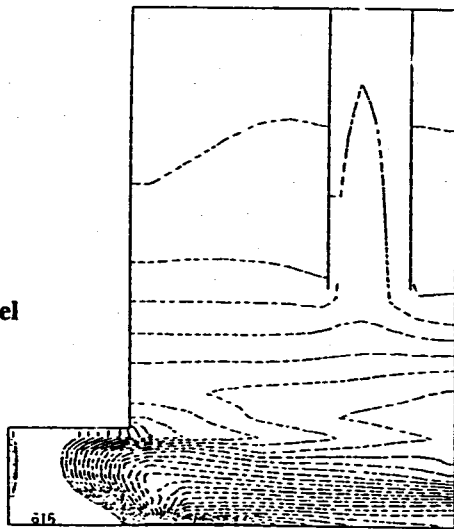
J = 44

TIME
150.0 SEC.



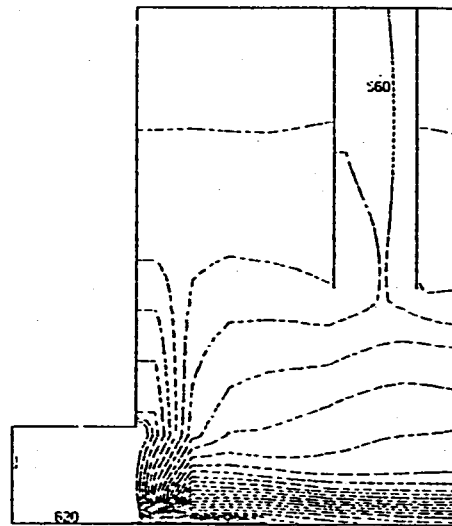
J = 44

TIME
200.0 SEC.



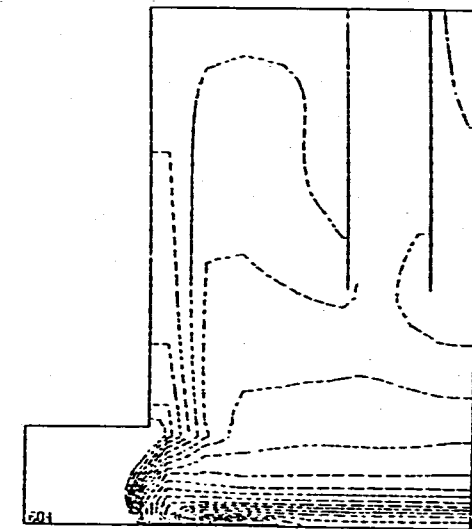
J = 10

TIME
125.0 SEC.



J = 10

TIME
150.0 SEC.



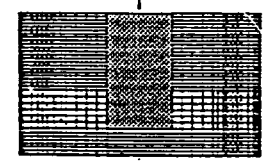
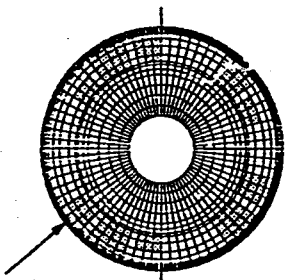
J = 10

TIME
200.0 SEC.

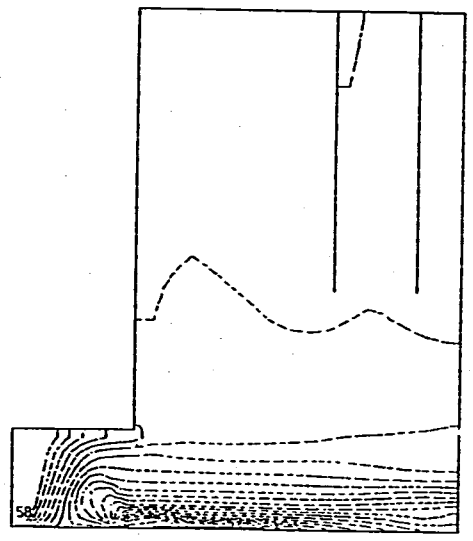
Fig.2.4.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (4/5)

J=44 (Full Sector Model)
J=10 (One-Third Sector Model)

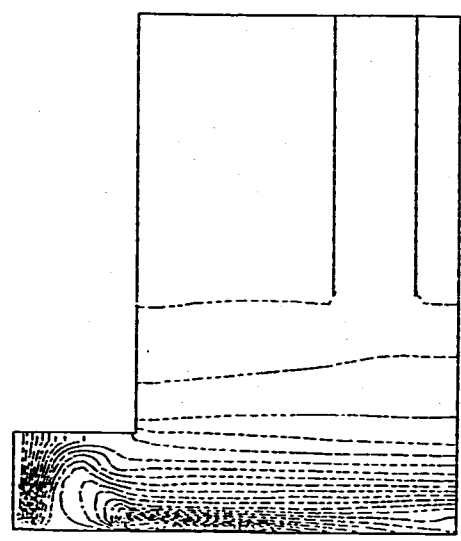
Full Sector Model



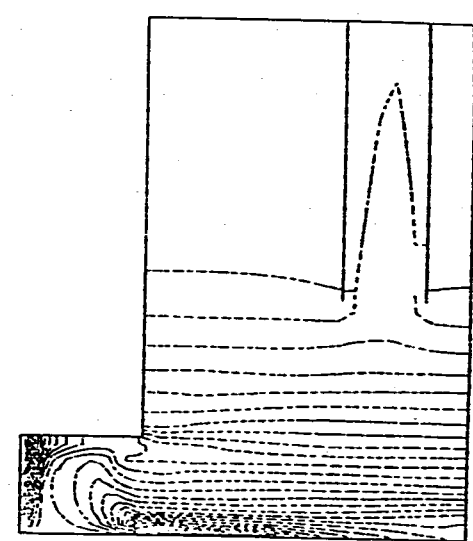
One-Third Sector Model



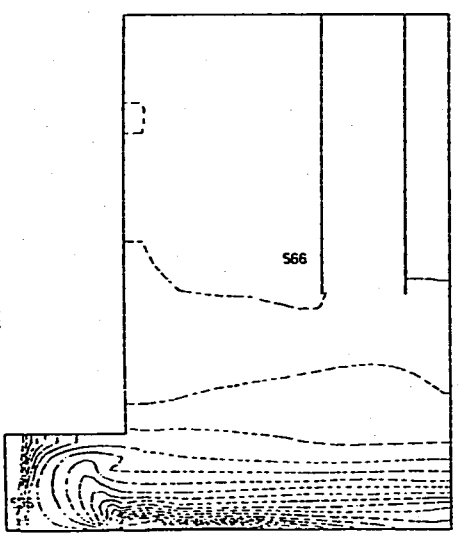
J = 44
TIME 300.0 SEC.



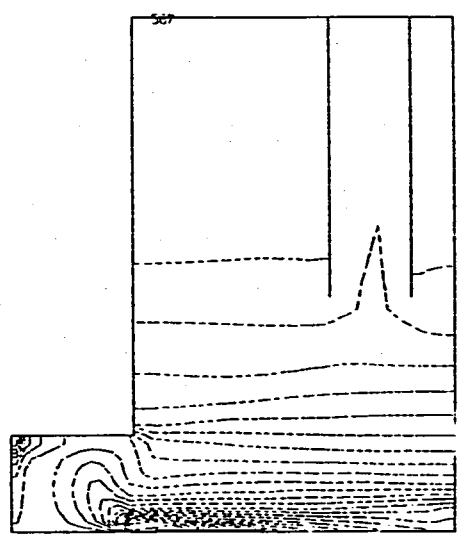
J = 44
TIME 400.0 SEC.



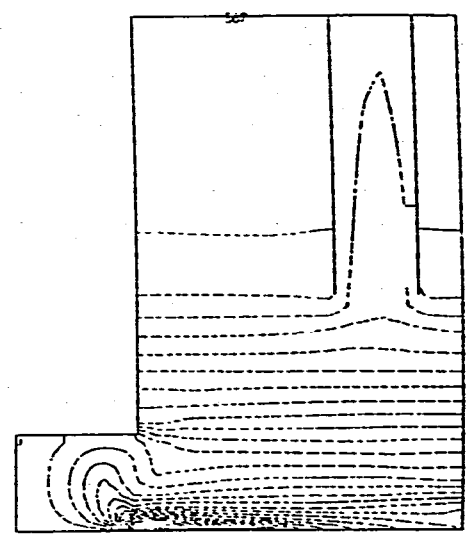
J = 44
TIME 500.0 SEC.



J = 10
TIME 300.0 SEC.



J = 10
TIME 400.0 SEC.



J = 10
TIME 500.0 SEC.

Fig.2.4.5 Temperature Fields at r-z Section of H/L Piping during Transient of Natural Circulation (5/5)

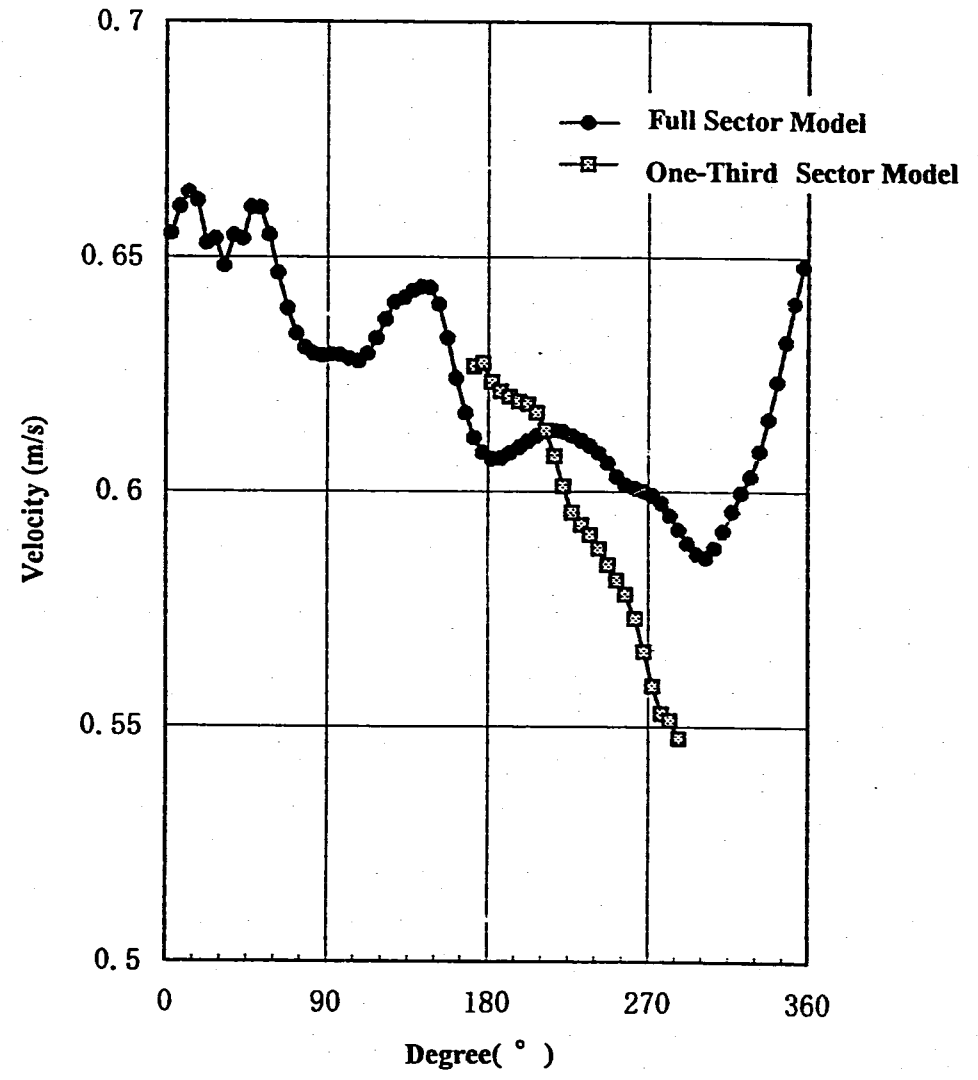
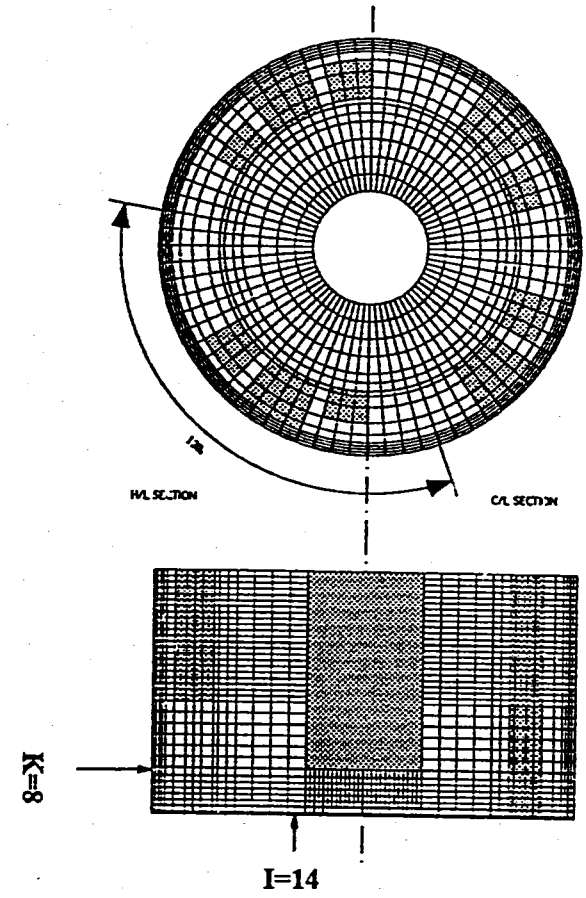


Fig.2.5.1 Radial Velocity Distribution in circumferential position under Steady State Condition

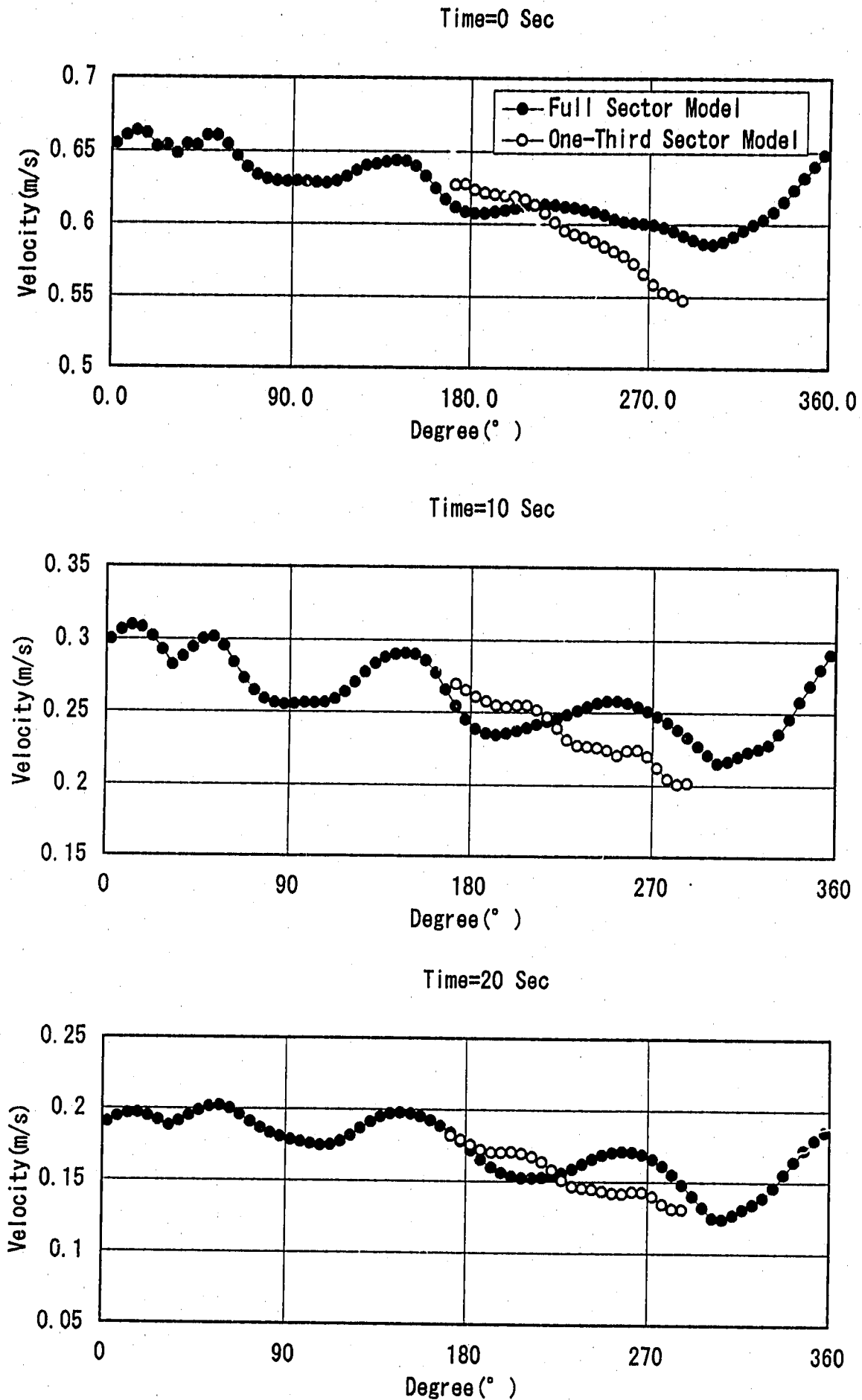
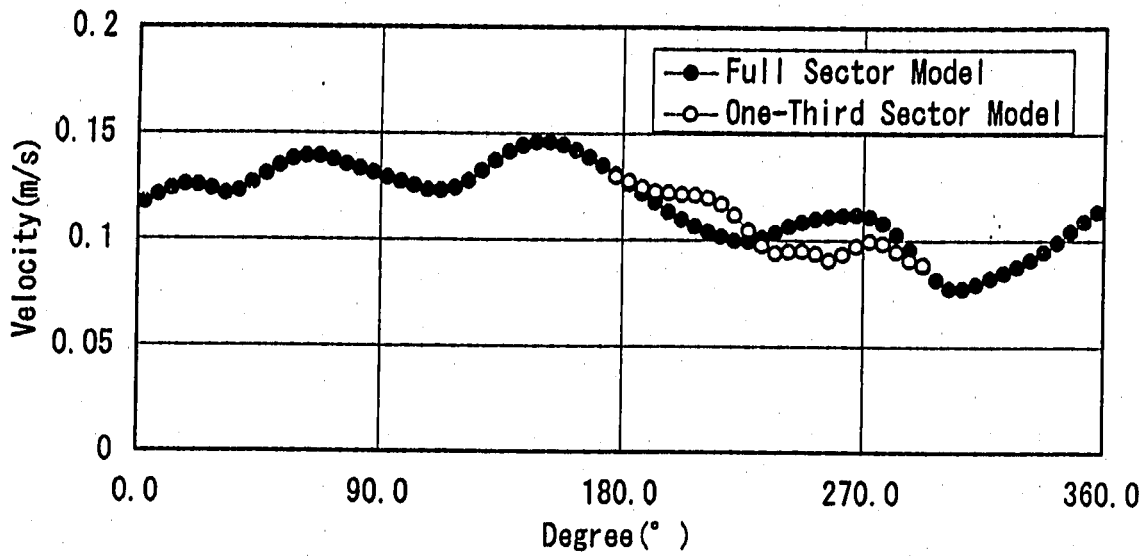


Fig.2.5.2 Radial Velocity Distribution in circumferential position during Transient of Manual Trip Event (1/2)

Time=30 Sec



Time=40 Sec

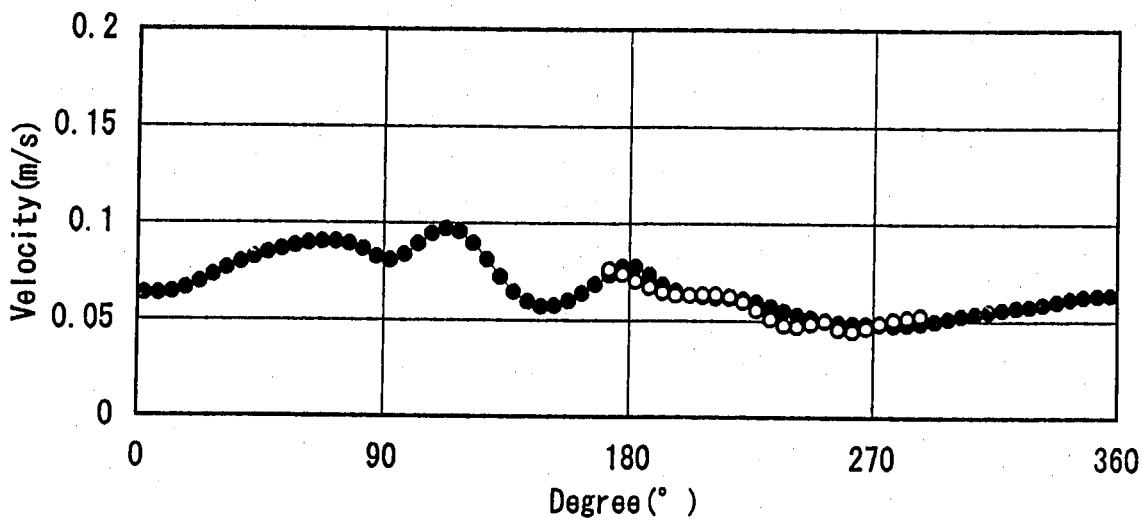


Fig.2.5.2 Radial Velocity Distribution in circumferential position during Transient of Manual Trip Event (2/2)

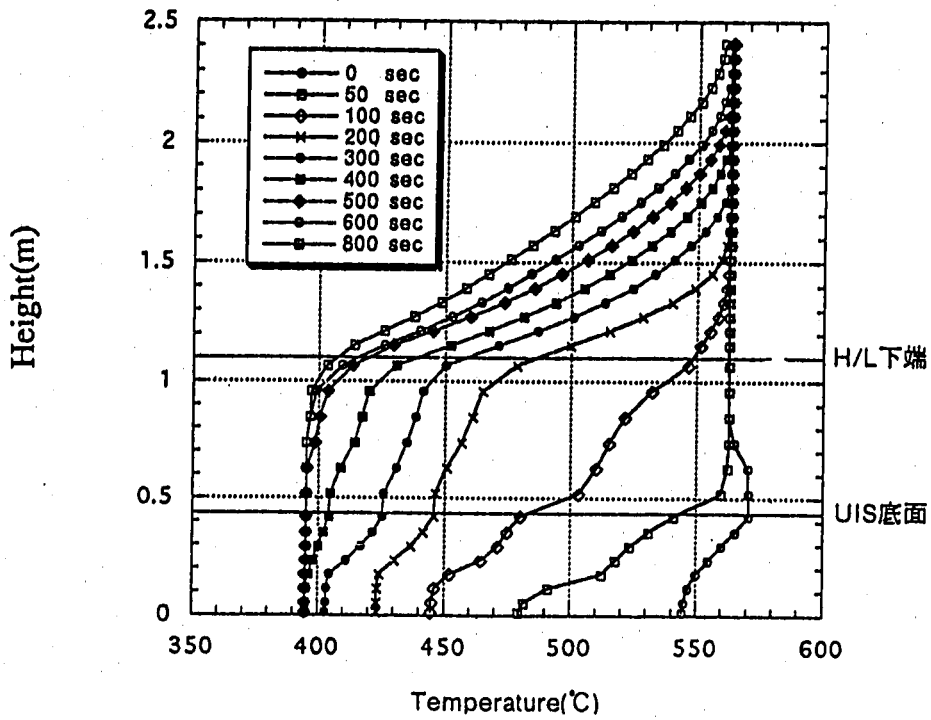


Fig.2.5.3 Axial Temperature Distribution during Transient of Manual Trip Event for Full Sector Model

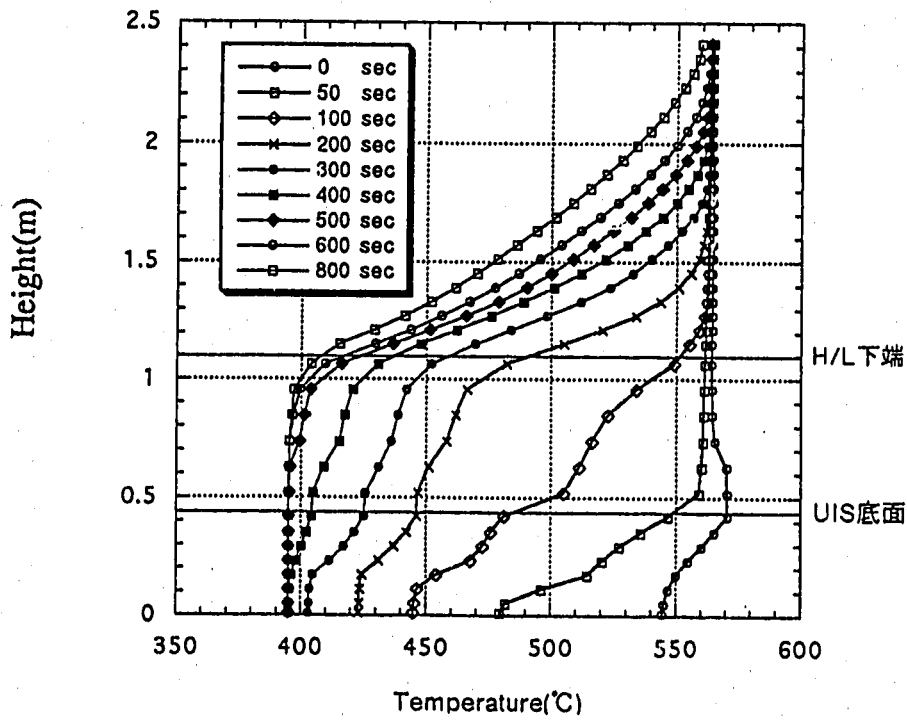


Fig.2.5.4 Axial Temperature Distribution during Transient of Manual Trip Event for One-Third Sector Model

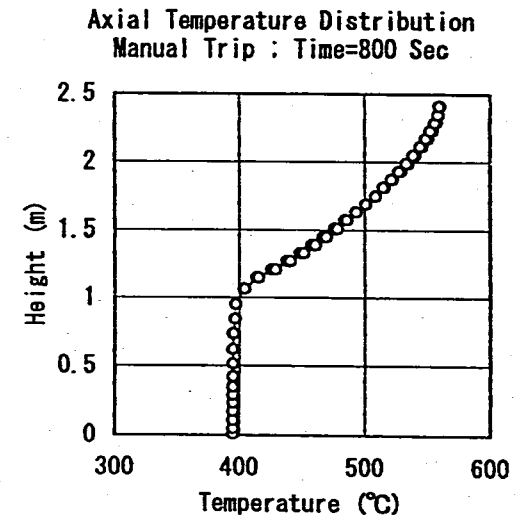
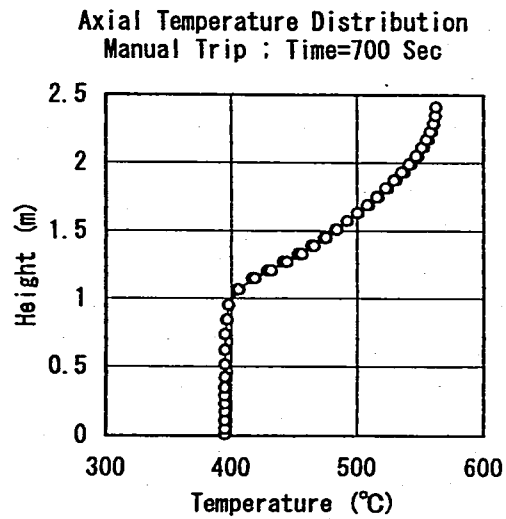
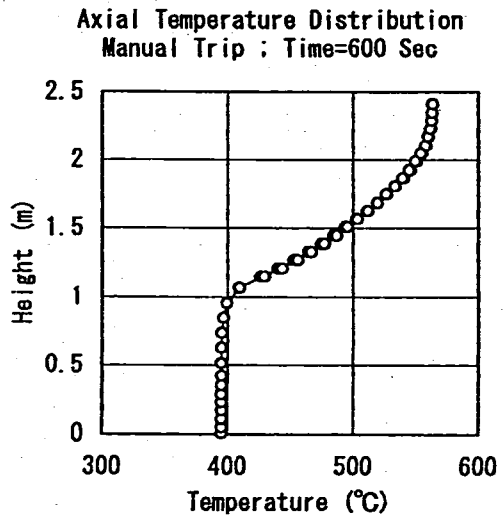
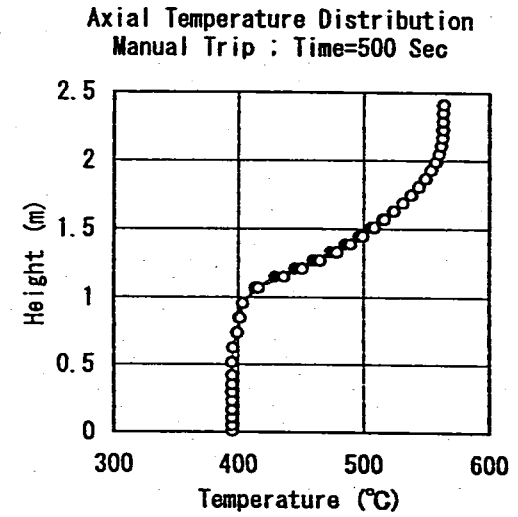
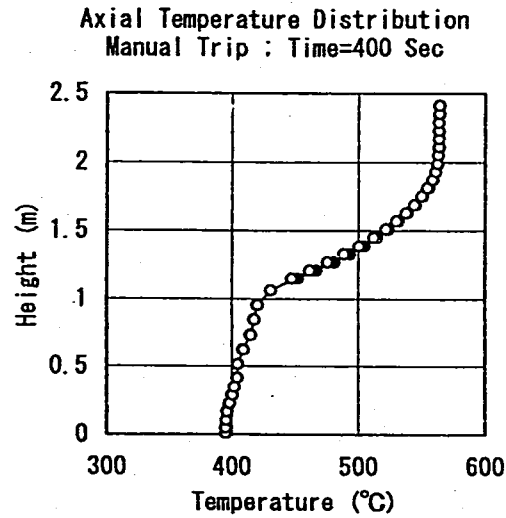
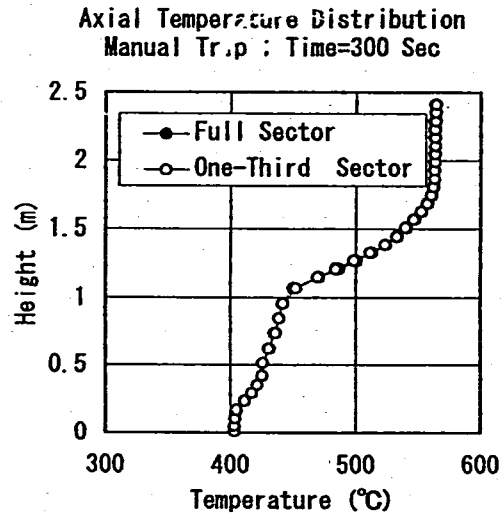


Fig.2.5.5 Comparison of Axial Temperature Distribution with Full and One-Third Sector

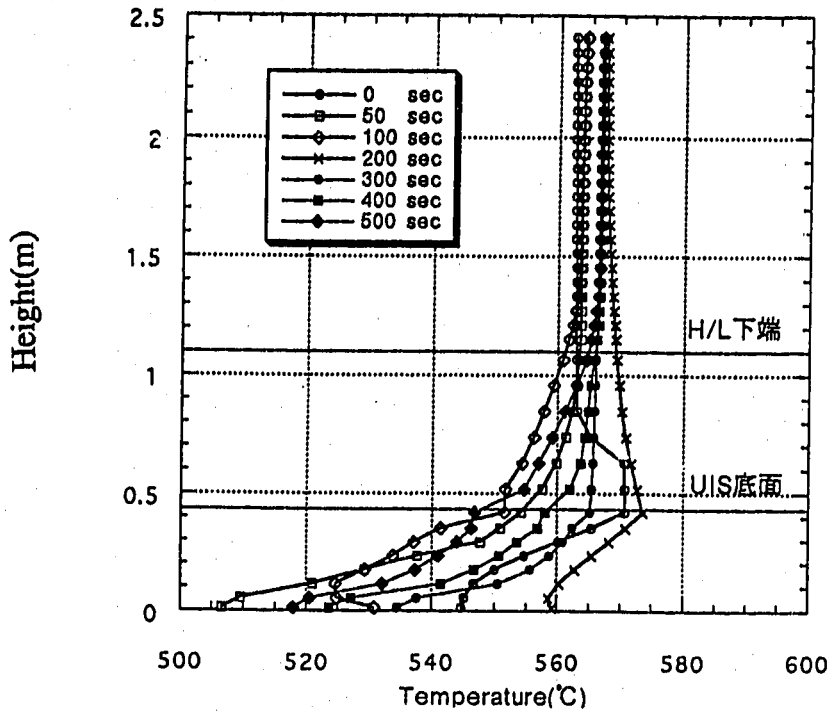


Fig.2.5.6 Axial Temperature Distribution during Transient of Natural Circulation for Full Sector Model

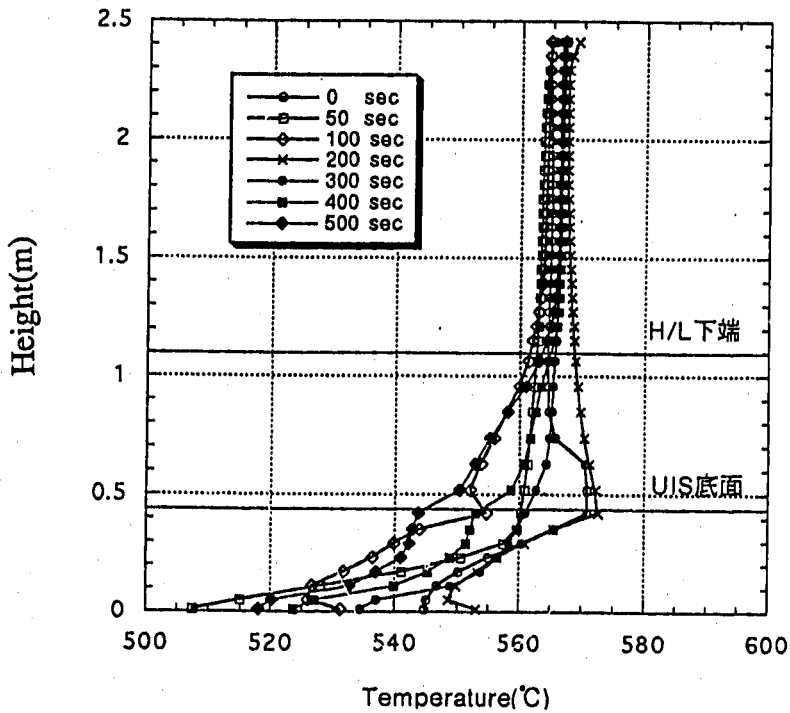


Fig.2.5.7 Axial Temperature Distribution during Transient of Natural Circulation for One-Third Sector Model

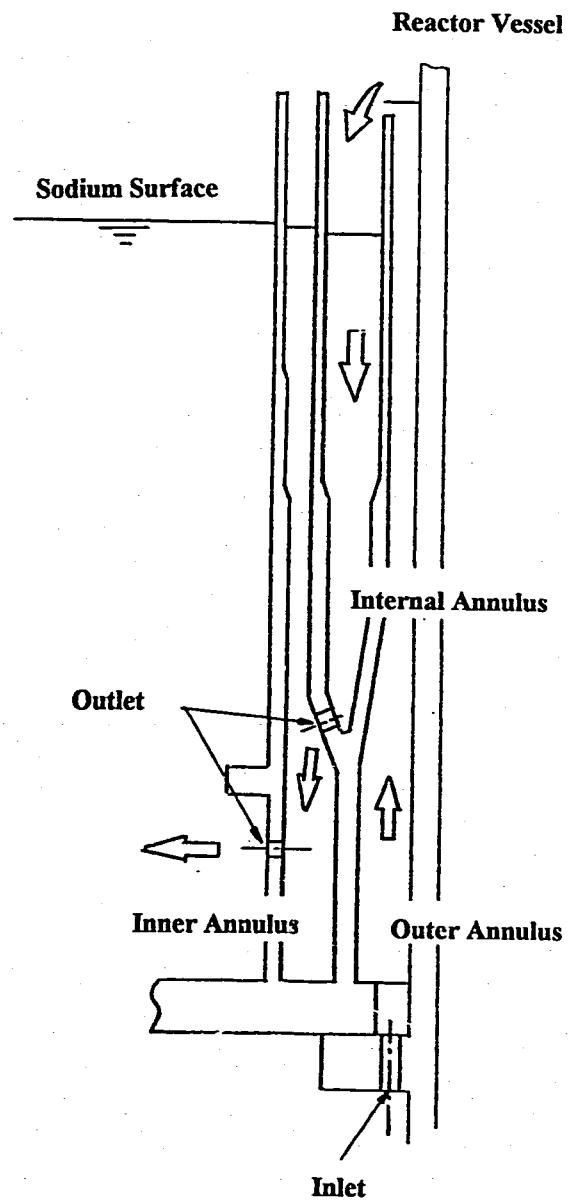


Figure of Reactor Vessel Cooling System

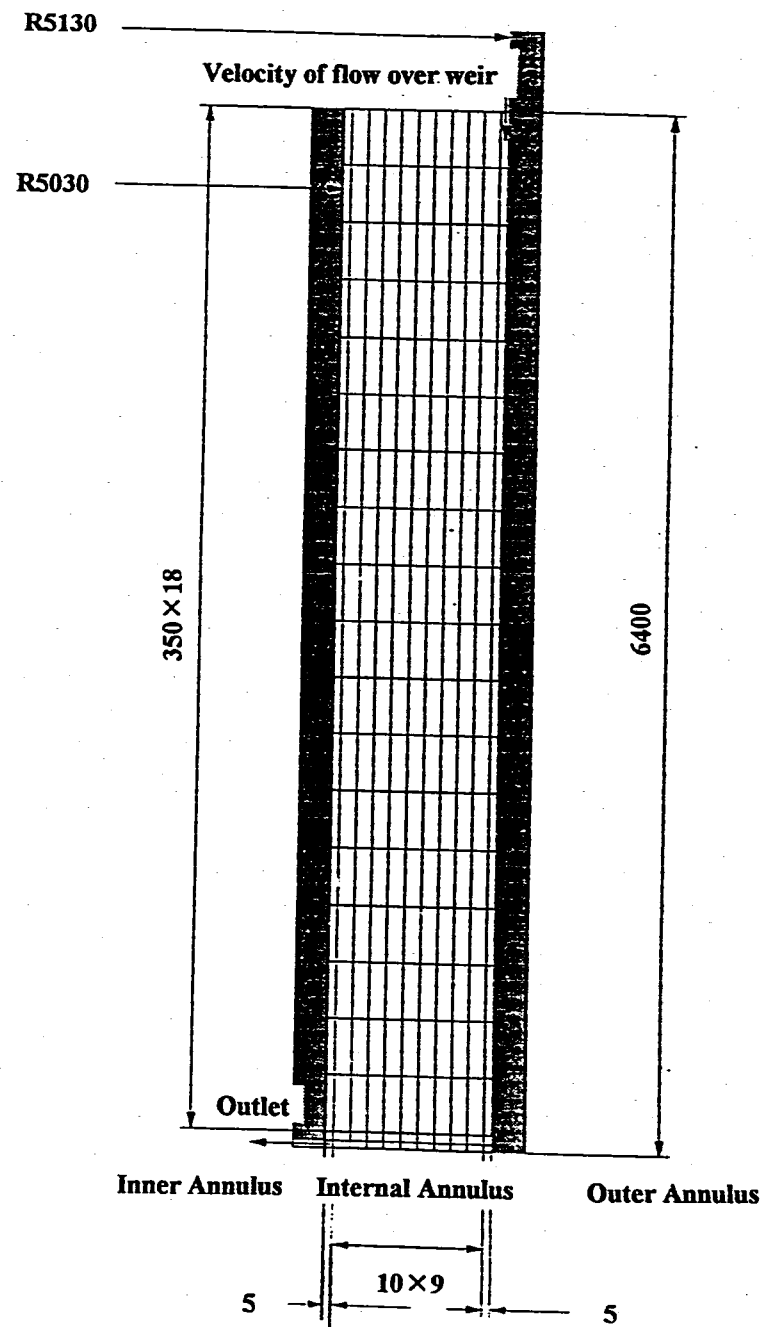


Fig. 3.3.1 Mesh Arrangement for Internal Annulus

Velocity Distribution for Analysis Case 4

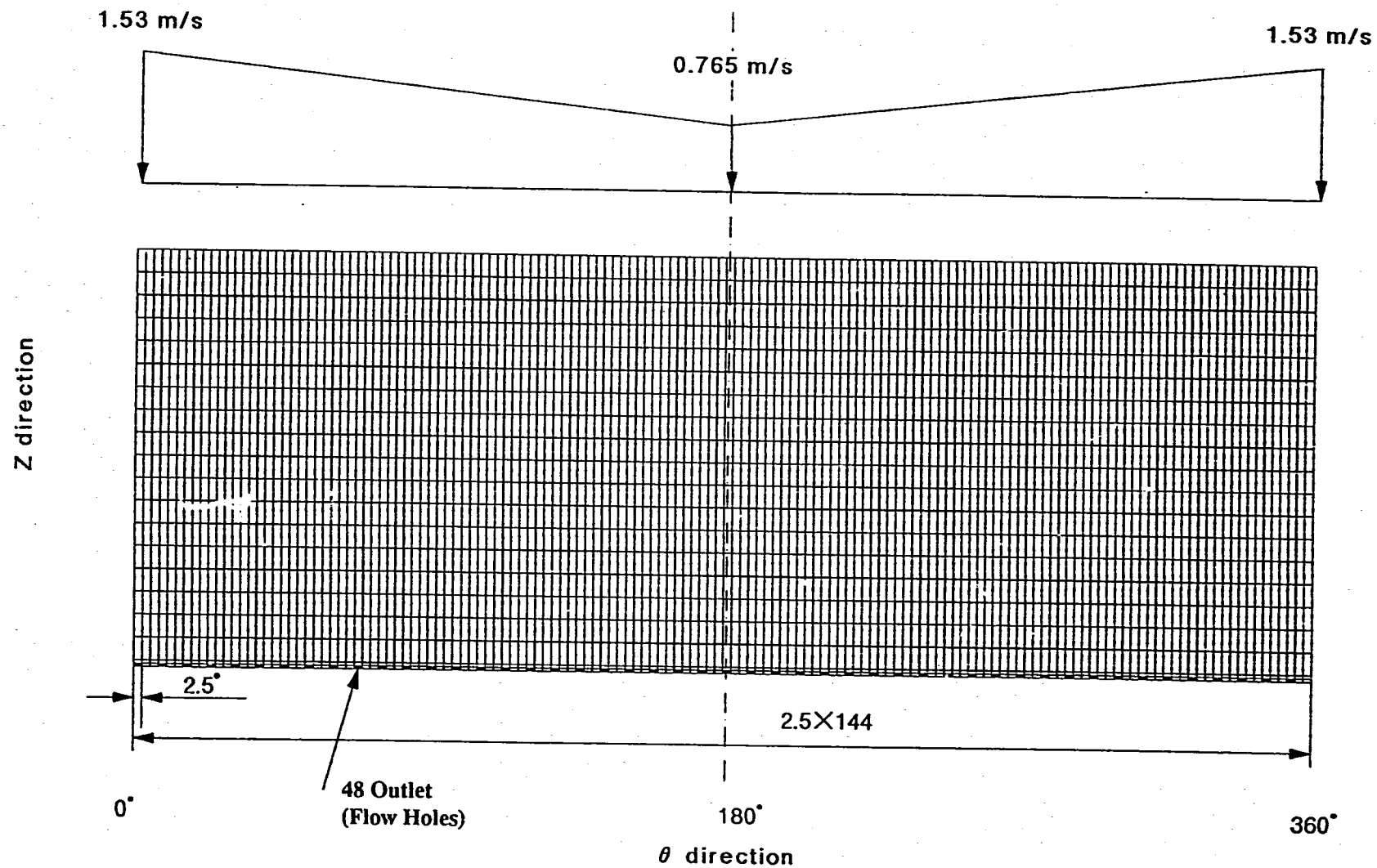


Fig. 3.3.2 Mesh Arrangement for Internal Annulus and Velocity Distribution for Analysis Case 4

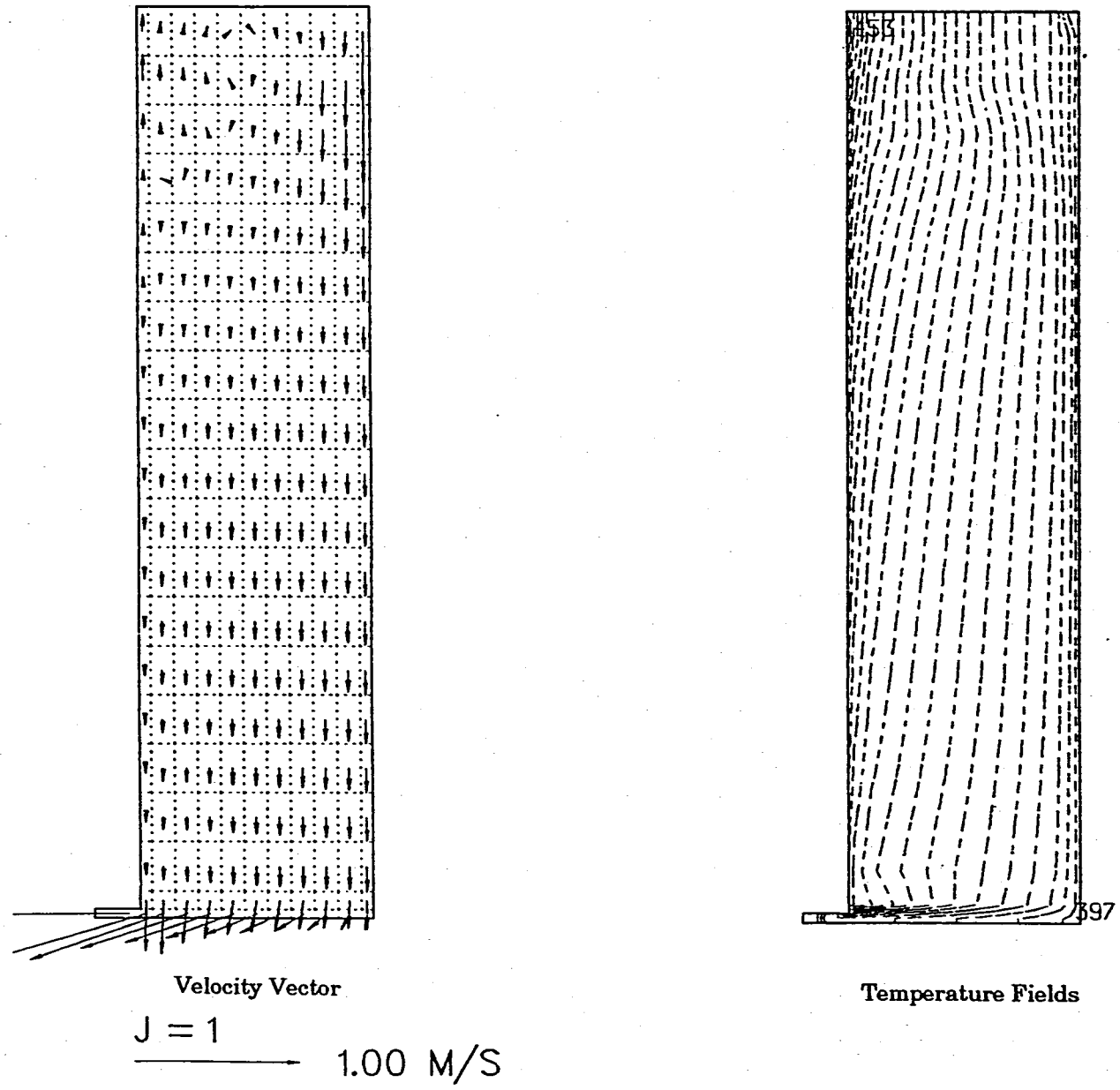
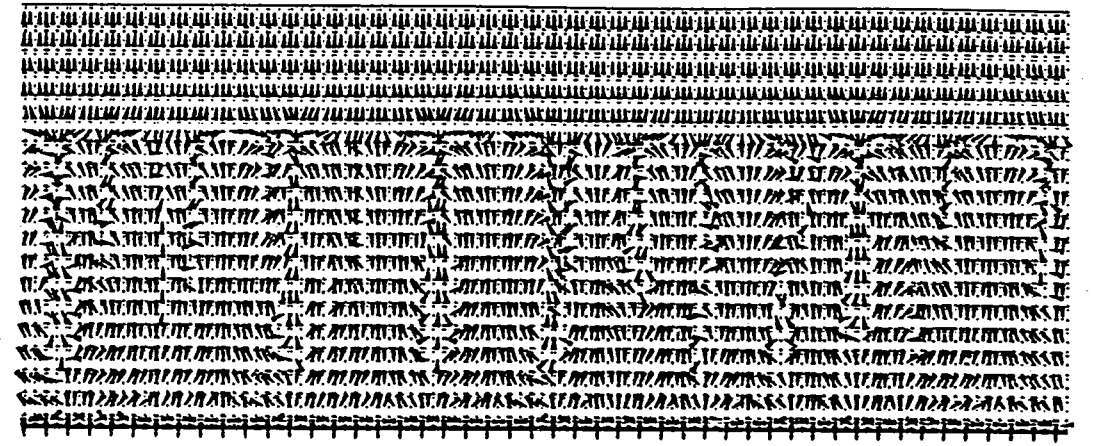
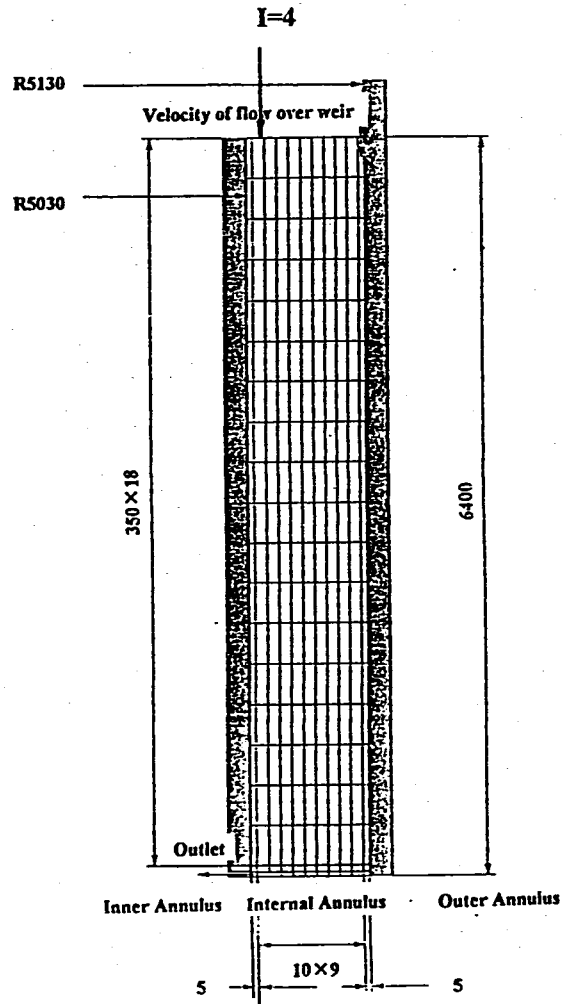
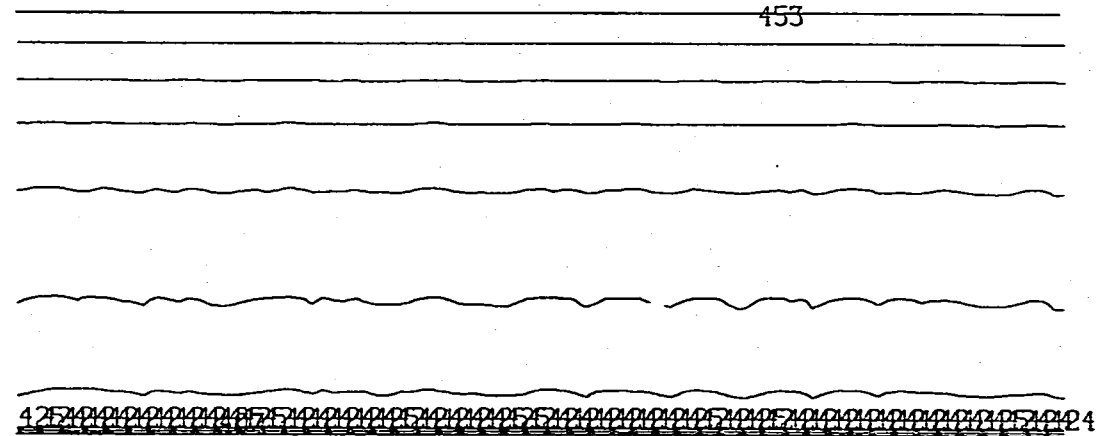


Fig.3.4.1 Velocity Vector and Temperature Fields at r-z Section of Case 1 (velocity=1.53 m/s)



Velocity Vector ($I=4$) \longrightarrow 5.00 M/S



Temperature Fields ($I=4$)

Fig.3.4.2 Velocity Vector and Temperature Fields at $r-\theta$ Section of Case 1 (velocity=1.53 m/s)

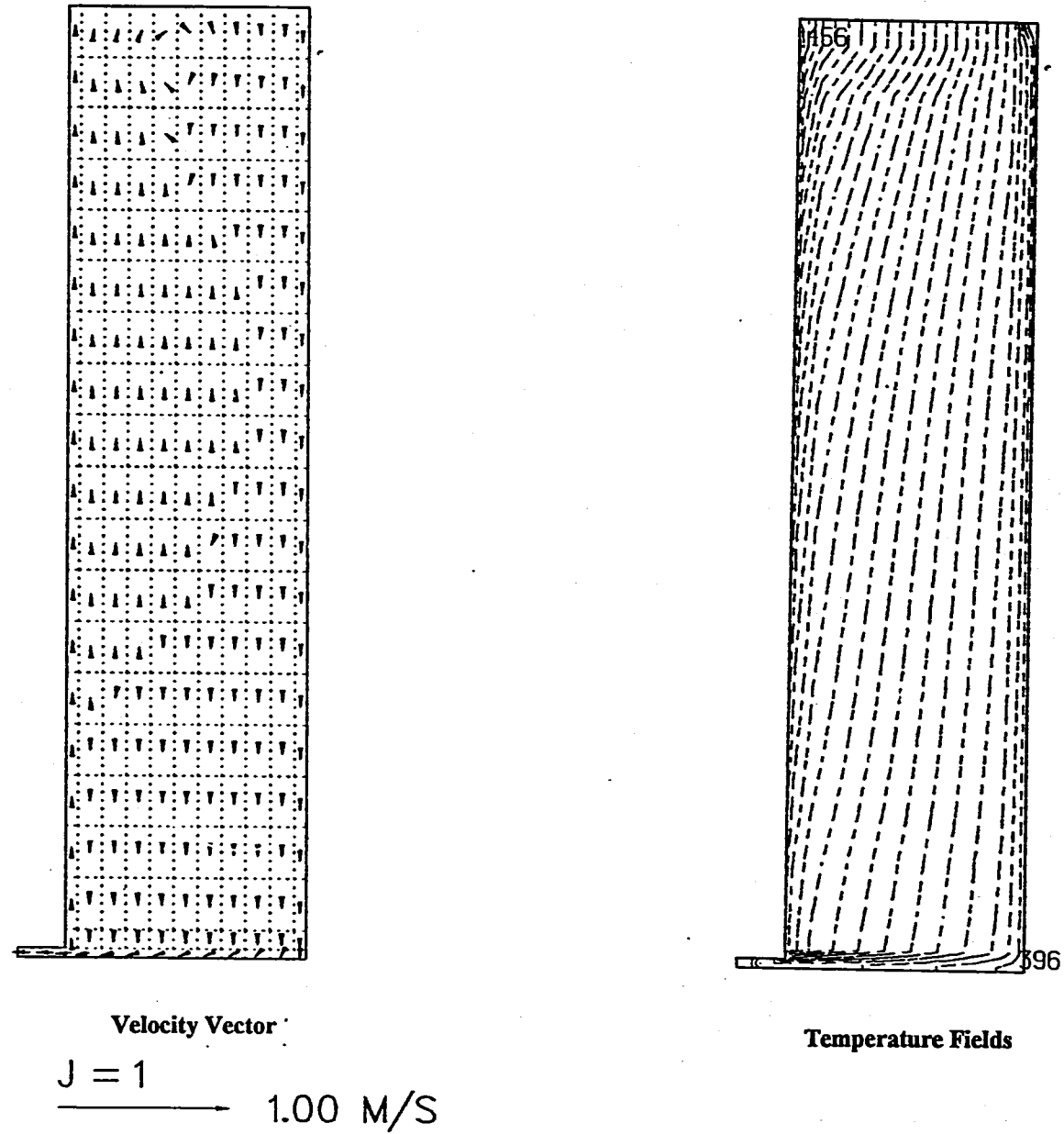
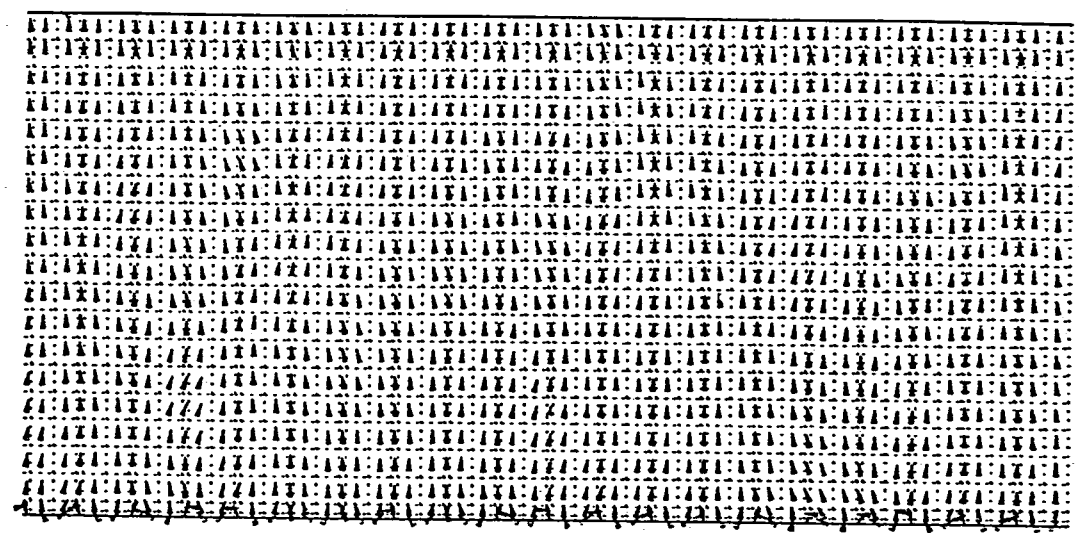
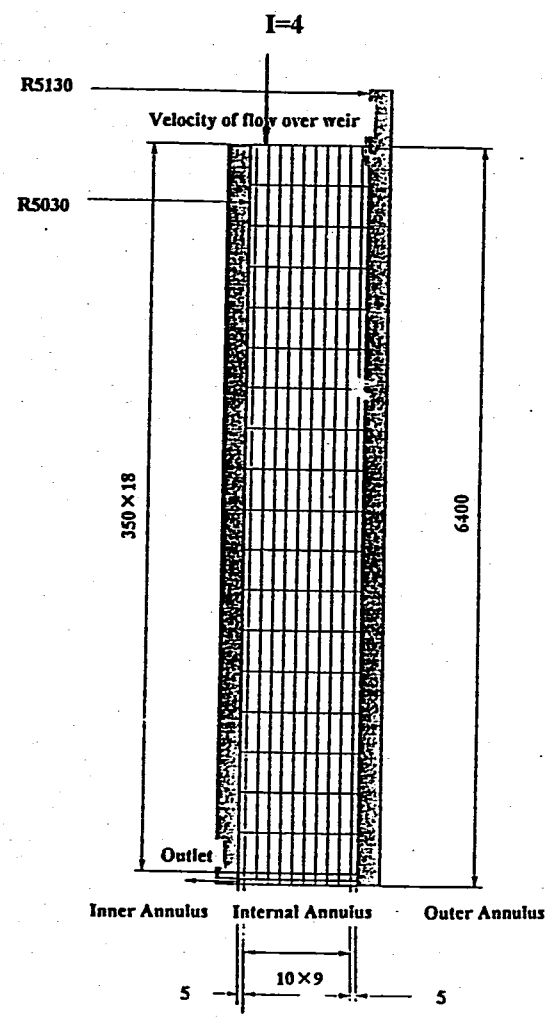
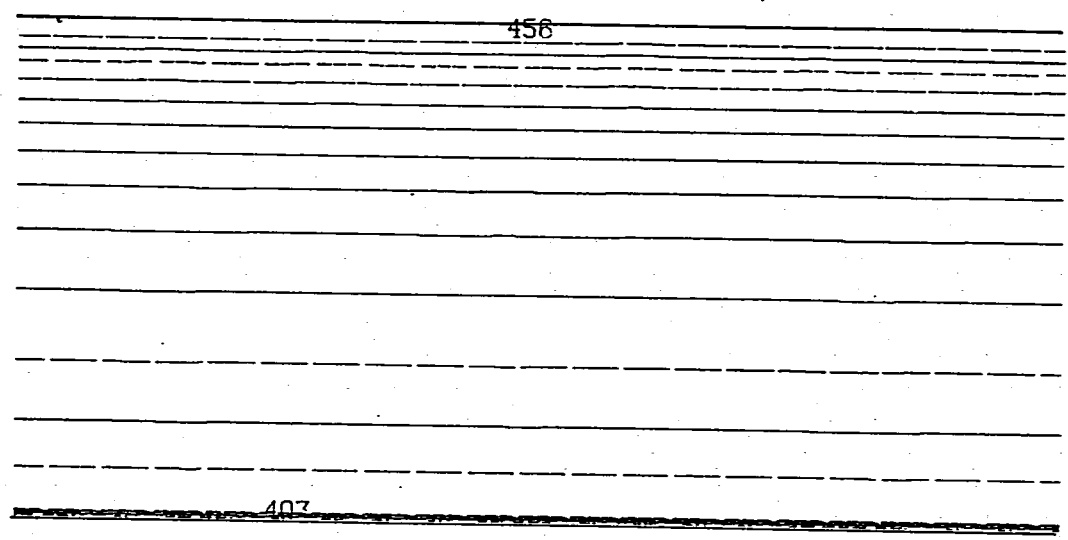


Fig.3.4.3 Velocity Vector and Temperature Fields at r-z Section of Case 2 (velocity=0.153 m/s)



Velocity Vector (I=4)

→ 1.00 M/S



Temperature Fields (I=4)

Fig.3.4.4 Velocity Vector and Temperature Fields at r-θ Section of Case 2 (velocity=0.153 m/s)

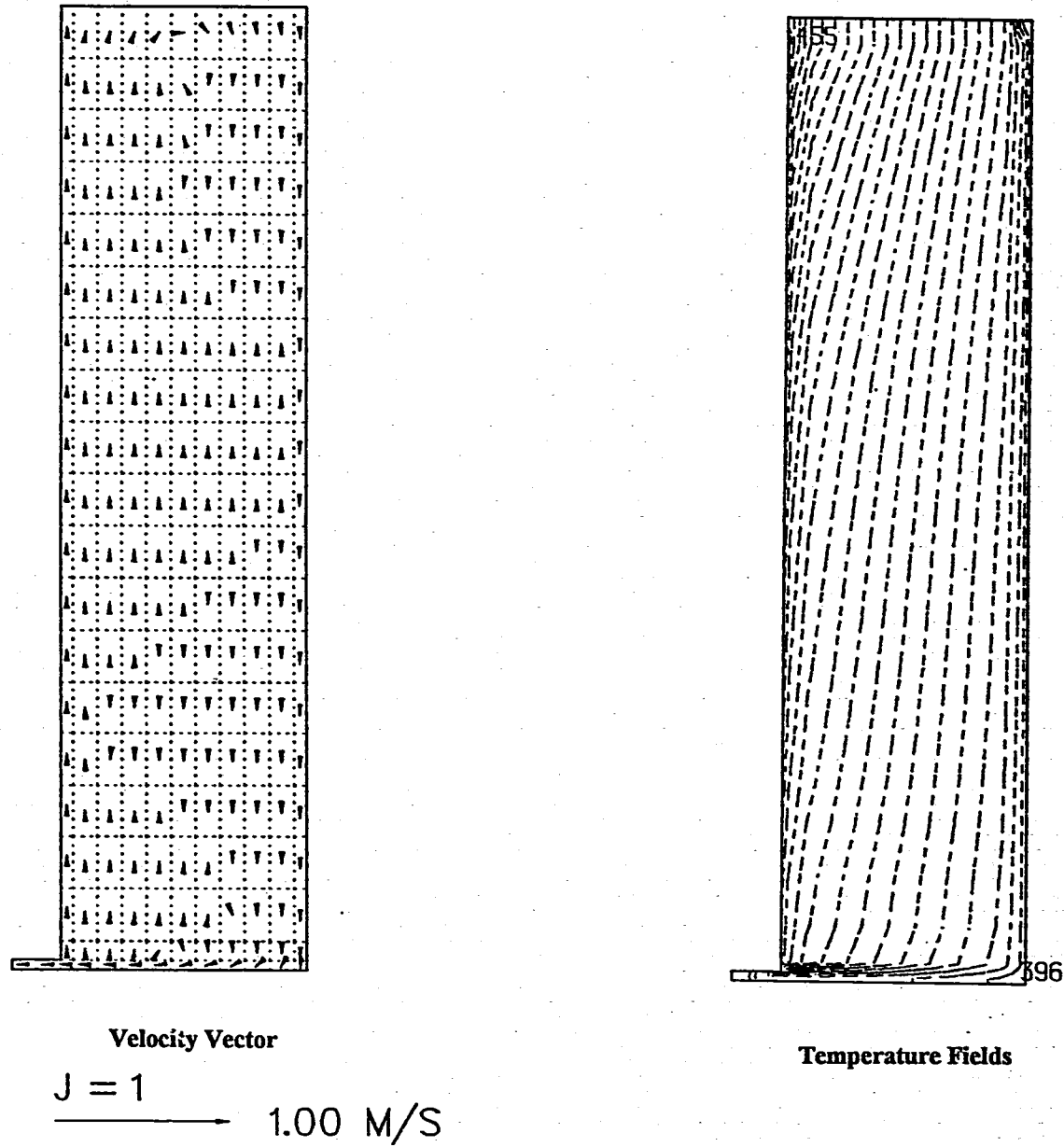
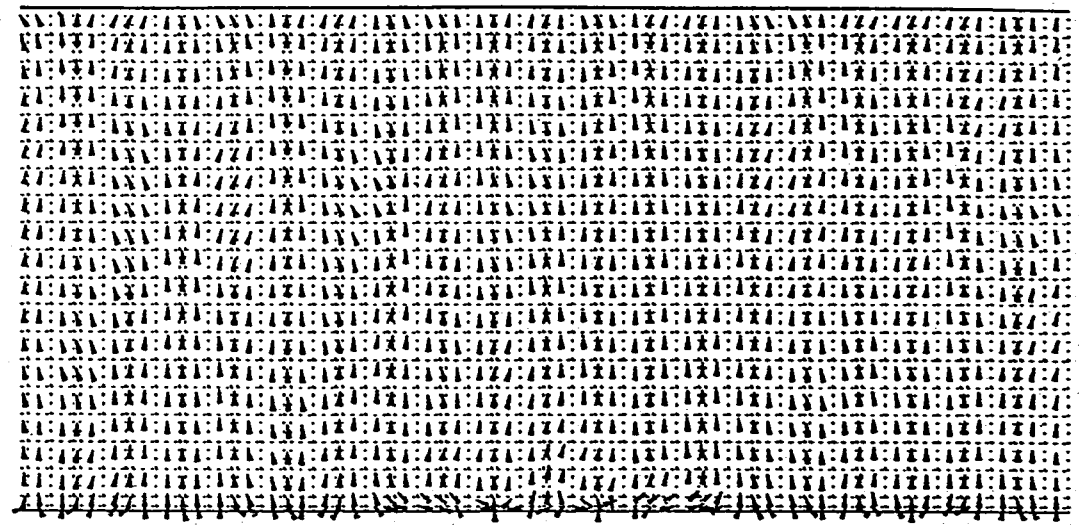
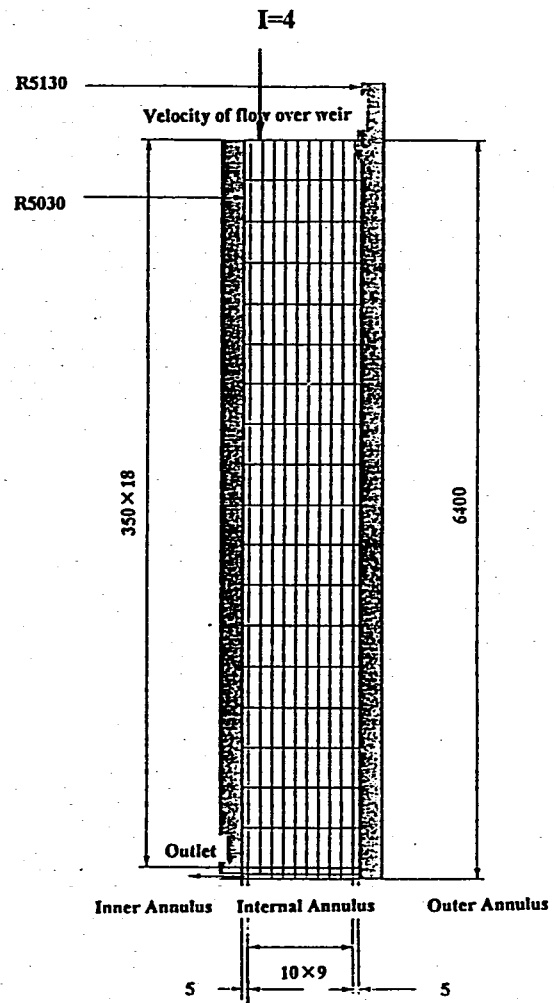


Fig.3.4.5 Velocity Vector and Temperature Fields at r-z Section of Case 3 (velocity=0.0153 m/s)



Velocity Vector (I=4) \longrightarrow 1.00 M/S

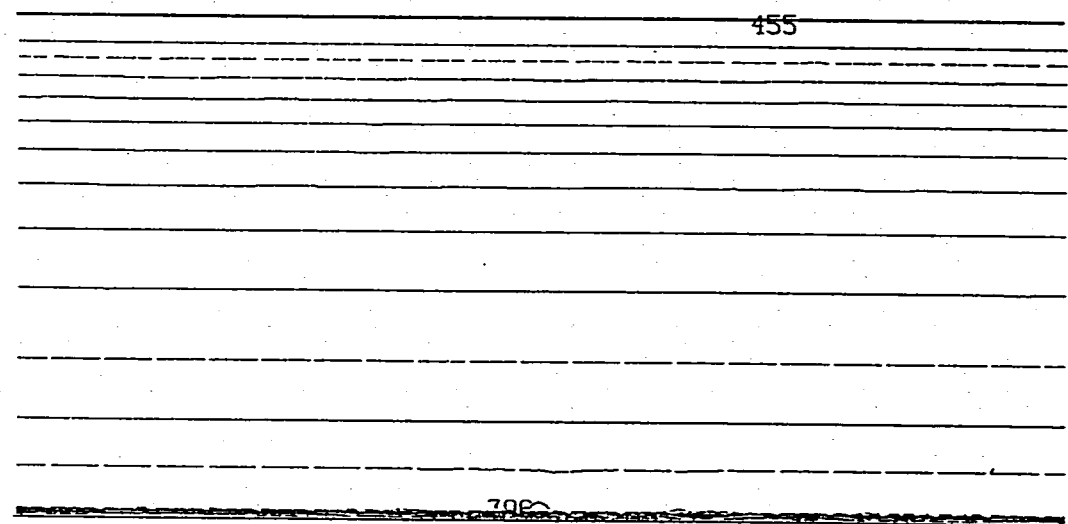


Fig.3.4.6 Velocity Vector and Temperature Fields at r- θ Section of Case 3 (velocity=0.0153 m/s)

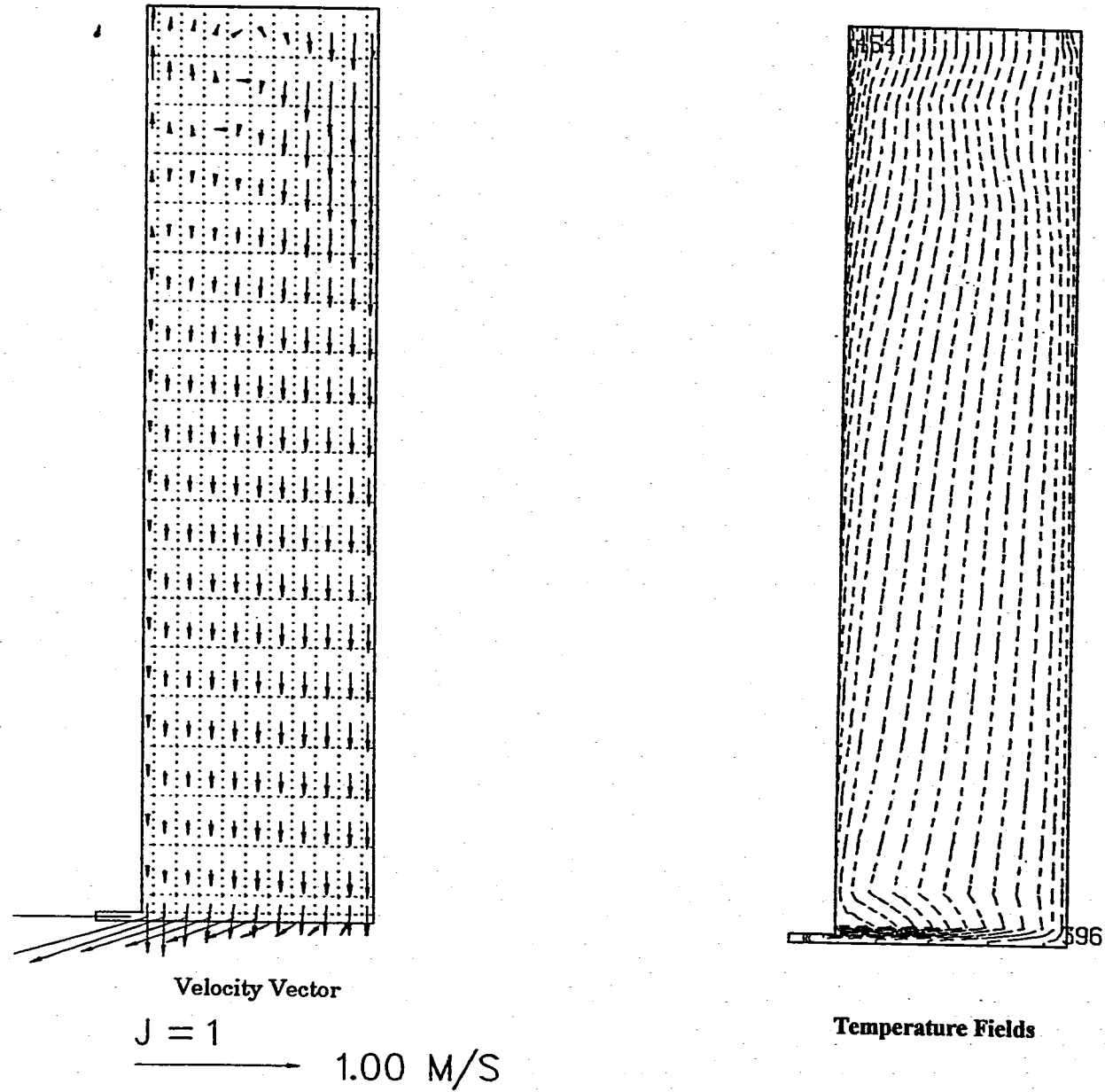


Fig.3.4.7 Velocity Vector and Temperature Fields at r-z Section of Case 4 (velocity=Max.1.53, Min. 0.765 m/s)

