

# 単相多次元コードAQUAによる高速原型炉 「もんじゅ」炉内熱流動解析( I )

UTOP時炉容器出口温度応答評価および遅発中性子先行核  
濃度輸送評価

1989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)

1989年10月

## 単相多次元コードAQUAによる高速原型炉「もんじゅ」 炉内熱流動解析（I）

～UTOP時炉容器出口温度応答評価および遅発中性子先行核濃度輸送評価～

村松 寿晴\*，松本 雅彦\*\*  
二ノ方 寿\*

### 要 旨

高速原型炉「もんじゅ」において、出力上昇型事故であるUTOPが発生した場合、炉心損傷に至る前までに原子炉出口温度計装によってスクラムが可能か否かを、また燃料ピンに破損が生じた場合、原子炉出口配管位置にどの程度の遅発中性子先行核濃度が到達するかを、確率論的リスク評価作業の検討に資するために、単相多次元熱流動解析コードAQUAを用いて定量評価した。

UTOP時の原子炉容器出口温度応答評価では、平衡炉心第10サイクル末期の定格負荷運転状態に対し、最大引抜き反応度を1.28\$とした条件の解析を行ない、以下の結果を得た。

- (1) 事象開始に伴い燃料集合体出口Na温度が上昇するため、炉心上部機構下端から上部プレナム内に放出されるジェットの流れが時間の経過と共に上向きに遷移し、高温冷却材の大半は内筒を乗り越えて原子炉出口配管位置に至る。
- (2) 原子炉容器出口部から約24m下流に位置する原子炉出口温度計装では、配管内での冷却材輸送遅れおよび熱電対の応答遅れを考慮すると、事象開始後約42秒で原子炉スクラム温度レベル(546℃)に到達する。当該事象に伴う燃料ピン破損発生が、事象開始後約50秒であると予測されることから、燃料ピン破損発生前に原子炉出口温度計装によるトリップ信号によって原子炉スクラムが可能であると推測される。

燃料ピン破損時の遅発中性子先行核濃度輸送の評価では、放出集合体の炉心内位置をパラメータに4ケースを解析した。遅発中性子先行核濃度の放出環境は、定格負荷運転の条件とし、放出形態は1000ppmの連続放出および $10^{10}$ ppmの1秒放出の2ケースを考慮した。解析により、以下の結果を得た。

- (1) 原子炉容器出口部に到達する遅発中性子先行核濃度は、単純に放出集合体の炉心内位置から出口配管までの距離に依存するのではなく、むしろ上部プレナム内に発生している流動状況に影響される。
- (2) 内側炉心領域の第1列燃料集合体から遅発中性子先行核が連続放出された場合、原子炉出口部には、60秒時点での全放出量の1.2%、300秒で1.5秒が到達する。
- (3) 外側炉心領域の第2列燃料集合体から遅発中性子先行核が連続放出された場合、原子炉出口部には、60秒時点で全放出量の0.7%が到達する。
- (4) 内側炉心領域の第1列燃料集合体から遅発中性子先行核が1秒間放出されたケースでは、親核種崩壊まで考慮した結果、全放出量の0.0064%の先行核が検出計のカウントに寄与する。

\* 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

\*\* (株)CSK

October, 1989

In-Vessel Thermohydraulic Analysis of MONJU with AQUA Code (I)

Evaluation of UTOP Accident and DN Precursor Concentration Transport

Toshiharu Muramatsu\*,  
Masahiko Matsumoto\*\*,  
and Hisashi Ninokata\*

Abstract

In-vessel thermohydraulic analysis for unprotected transient over-power (UTOP) accident and precursor concentration transport analysis were carried out by multi-dimensional thermohydraulic analysis code AQUA for prototype breeder reactor MONJU.

The analysis of UTOP accident was conducted for a transient simulating a reactivity insertion to a full-power operation condition (End of 10th equilibrium cycle) and the subsequent sodium temperature increase at S/As outlet, where C/R pull out rate and maximum insertion reactivity are 5 mm/sec and 1.28\$, the instrumentation position of reactor outlet reached the reactor trip level (546°C) in 42 sec after the onset of UTOP. Then it is estimated that the reactor will be tripped by the temperature instrumentation before a fuel pin failure (50 sec).

For the analysis of a fuel pin failure accident, four cases of different locations of the DN precursor release were calculated. From the analyses, the following results have been obtained:

- (1) In the case with the FP release from 1st row of inner core region, DN precursor concentration with 1.2% and 1.5% reached the outlet nozzle of R/V in 60 sec and 300 sec, respectively.
- (2) In the case with the FP release from 2nd row of outer core region, the concentration with 0.7% reached the outlet nozzle in 60 sec.

For the analysis of a fuel pin failure accident, four cases of different locations of the DN precursor release were calculated. From

---

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

\*\* CSK Co., Ltd.

the analyses, the following results have been obtained:

- (1) DN precursor concentration at the outlet nozzle of R/V is high due to the flow pattern in the upper plenum and independent of the locations of DN precursor release.
- (2) In the case with the FP release from 1st row of inner core region, DN precursor concentration with 1.2% and 1.5% reached the outlet nozzle of R/V in 60 sec and 300 sec, respectively.
- (3) In the case with the Fp release from 2nd row of outer core region, the concentration with 0.7% reached the outlet nozzle in 60 sec.

単相多次元コードAQUAによる高速原型炉「もんじゅ」炉内熱流動解析（I）

～UTOP時炉容器出口温度応答評価および遅発中性子先行核濃度輸送評価～

## 目 次

第1章 緒 言 .....	1
第2章 UTOP時炉容器出口温度応答評価解析 .....	2
2.1 概 要 .....	2
2.2 解析条件 .....	2
2.2.1 炉心燃料集合体出口Na温度 .....	2
2.2.2 ブランケット燃料集合体出口Na温度 .....	4
2.2.3 中性子遮蔽体出口Na温度 .....	4
2.2.4 制御棒および中性子源集合体の出口Na温度 .....	5
2.3 解析モデル .....	5
2.3.1 メッシュ分割 .....	5
2.3.2 圧力損失特性 .....	5
2.3.3 数値計算条件 .....	7
2.4 解析結果と検討 .....	7
2.4.1 定常計算結果 .....	7
2.4.2 過渡計算結果 .....	7
第3章 遅発中性子先行核濃度輸送評価 .....	10
3.1 概 要 .....	10
3.2 解析条件 .....	10
3.3 解析モデル .....	10
3.4 解析結果と検討 .....	11
3.4.1 一定連続放出条件 .....	11
3.4.2 ステップ状放出条件 .....	13
3.4.3 遅発中性子先行核強度評価 .....	14
第4章 結 言 .....	16
謝 辞 .....	17

参考文献	18
付録A 定格負荷運転時の上部プレナム熱流動特性	75
付録B UTOP事象開始10秒後の上部プレナム熱流動特性	97
付録C UTOP事象開始20秒後の上部プレナム熱流動特性	119
付録D UTOP事象開始30秒後の上部プレナム熱流動特性	141
付録E UTOP事象開始40秒後の上部プレナム熱流動特性	163
付録F 炉上部温度計装の検出特性	185
付録G DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性（ケース1）	197
付録H DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性（ケース2）	219
付録I DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性（ケース3）	241
付録J DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性（ケース4）	263
付録K DN先行核濃度ステップ状放出時の上部プレナム内拡散特性（ケース1）	285
付録L DN先行核濃度ステップ状放出時の上部プレナム内拡散特性（ケース2）	307
付録M DN先行核濃度ステップ状放出時の上部プレナム内拡散特性（ケース3）	329
付録N DN先行核濃度ステップ状放出時の上部プレナム内拡散特性（ケース4）	351

List of Figures

Fig. 2. 1	Event Tree of UTOP Accident .....	19
Fig. 2. 2	Initial Condition of UTOP Accident Analysis using SAS3D .....	20
Fig. 2. 3	Calculated Outlet Sodium Temperature of Core Fuel Assemblies .....	21
Fig. 2. 4	Reactivity Balance on UTOP Accident Condition .....	22
Fig. 2. 5	Normalized Power History on UTOP Accident Condition .....	22
Fig. 2. 6	Calculated History of Outlet Sodium Temperature of Core Fuel Assemblies .....	23
Fig. 2. 7	Calculated Outlet Sodium Temperature of Blanket fuel Assemblies fuel Assemblies .....	34
Fig. 2. 8	Calculated Outlet Sodium Temperature of C/A and N/S Assemblies .....	35
Fig. 2. 9	Mesh Arrangement for UTOP Accident Analysis using AQUA .....	36
Fig. 2.10	S/A Numbering and Relationship on Mesh Arrangement .....	37
Fig. 2.11	Typical Velocity and Temperature Fields on Steady- State Condition .....	38
Fig. 2.12	History of Velocity and Temperature Fields on Transient Calculation .....	39
Fig. 2.13	Calculated Temperature Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel .....	43
Fig. 2.14	Typical Velocity and Temperature Fields in the Annulus .....	45
Fig. 2.15	Temperature Transients at Thermocouple of Reactor Outlet on UTOP .....	46
Fig. 3. 1	Event Tree of Fuel Pin Failure Accident .....	47
Fig. 3. 2	Calculational Cases of Fuel Pin Failure Accident .....	48
Fig. 3. 3	Typical DN Concentration Fields on Case 1 of LF Analyses .....	49
Fig. 3. 4	Calculated DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-1 Condition .....	51
Fig. 3. 5	Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-1 Condition .....	53
Fig. 3. 6	Illustration of DN Concentration Transport in Upper Plenum .....	54
Fig. 3. 7	Typical DN Concentration Fields on Case 2 of LF Analyses .....	55



Fig. 3. 8	Calculated DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-2 Condition .....	57
Fig. 3. 9	Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-2 Condition .....	59
Fig. 3.10	Typical DN Concentration Fields on Case 3 of LF Analyses .....	60
Fig. 3.11	Calculated DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-3 Condition .....	61
Fig. 3.12	Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-3 Condition .....	63
Fig. 3.13	Typical DN Concentration Fields on Case 4 of LF Analyses .....	64
Fig. 3.14	Calculated DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-4 Condition .....	65
Fig. 3.15	Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-4 Condition .....	67
Fig. 3.16	Comparison of DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel .....	68
Fig. 3.17	Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-1 Condition (Release Mode : Step Profile) .....	69
Fig. 3.18	Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-2 Condition (Release Mode : Step Profile) .....	70
Fig. 3.19	Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-3 Condition (Release Mode : Step Profile) .....	71
Fig. 3.20	Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-4 Condition (Release Mode : Step Profile) .....	72
Fig. 3.21	DN Precursor Intensity at Instrumentation Position .....	73
Fig. A. 1	Vector and Temperature Field Plots in r-z Planes for Steady-State Condition .....	77
Fig. A. 2	Vector and Temperature Field Plots in r- $\theta$ Planes for Steady-State Condition .....	83

Fig. A. 3	Vector and Temperature Field Plots in $\theta$ -z Planes for Steady-State Condition .....	93
Fig. B. 1	Vector and Temperature Field Plots for r-z Planes in 10 seconds after UTOP Onset .....	99
Fig. B. 2	Vector and Temperature Field Plots for r- $\theta$ Planes in 10 seconds after UTOP Onset .....	105
Fig. B. 3	Vector and Temperature Field Plots for $\theta$ -z Planes in 10 seconds after UTOP Onset .....	115
Fig. C. 1	Vector and Temperature Field Plots for r-z Planes in 20 seconds after UTOP Onset .....	121
Fig. C. 2	Vector and Temperature Field Plots for r- $\theta$ Planes in 20 seconds after UTOP Onset .....	127
Fig. C. 3	Vector and Temperature Field Plots for $\theta$ -z Planes in 20 seconds after UTOP Onset .....	137
Fig. D. 1	Vector and Temperature Field Plots for r-z Planes in 30 seconds after UTOP Onset .....	143
Fig. D. 2	Vector and Temperature Field Plots for r- $\theta$ Planes in 30 seconds after UTOP Onset .....	149
Fig. D. 3	Vector and Temperature Field Plots for $\theta$ -z Planes in 30 seconds after UTOP Onset .....	159
Fig. E. 1	Vector and Temperature Field Plots for r-z Planes in 40 seconds after UTOP Onset .....	165
Fig. E. 2	Vector and Temperature Field Plots for r- $\theta$ Planes in 40 seconds after UTOP Onset .....	171
Fig. E. 3	Vector and Temperature Field Plots for $\theta$ -z Planes in 40 seconds after UTOP Onset .....	181
Fig. F. 1	Cross-Flow Characteristics at Flow Guide Region .....	189
Fig. F. 2	Handling head Geometry of Monju Fuel Assembly and Analytical Region .....	190
Fig. F. 3	Velocity Distribution at Outlet Region of Monju S/A (Water Experiment) .....	191
Fig. F. 4	Comparison of Radial Velocity Distribution at Outlet of S/A Between Experiments and Calculations (Water Experiment) .....	192

Fig. F. 5	Radial Velocity Distribution at Top of Pin Bundle .....	193
Fig. F. 6	Sodium Temperature Distribution at Top of Pin Bundle .....	194
Fig. F. 7	Velocity and Temperature Distribution at Outlet Region of Monju S/A .....	195
Fig. F. 8	Radial Velocity and Temperature Distributions at Outlet and T/C Level of S/A .....	196
Fig. G. 1	DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition .....	199
Fig. G. 2	DN Concentration Field Plots for r- $\theta$ Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition .....	205
Fig. G. 3	DN Concentration Field Plots for $\theta$ -z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition .....	215
Fig. H. 1	DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition .....	221
Fig. H. 2	DN Concentration Field Plots for r- $\theta$ Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition .....	227
Fig. H. 3	DN Concentration Field Plots for $\theta$ -z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition .....	237
Fig. I. 1	DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition .....	243
Fig. I. 2	DN Concentration Field Plots for r- $\theta$ Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition .....	249
Fig. I. 3	DN Concentration Field Plots for $\theta$ -z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition .....	259
Fig. J. 1	DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition .....	265
Fig. J. 2	DN Concentration Field Plots for r- $\theta$ Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition .....	271
Fig. J. 3	DN Concentration Field Plots for $\theta$ -z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition .....	281
Fig. K. 1	DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition (Release Mode : Step Profile) .....	287

Fig.K. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 293

Fig.K. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta-z$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 303

Fig.L. 1 DN Concentration Field Plots for  $r-z$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 309

Fig.L. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 315

Fig.L. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta-z$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 325

Fig.M. 1 DN Concentration Field Plots for  $r-z$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 331

Fig.M. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 337

Fig.M. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta-z$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 347

Fig.N. 1 DN Concentration Field Plots for  $r-z$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 353

Fig.N. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 359

Fig.N. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta-z$  Planes in 25  
seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition  
(Release Mode : Step Profile) ..... 369

## 第1章 緒 言

高速原型炉「もんじゅ」を対象とした安全性評価作業の一環として、確率論的リスク評価(PRA: Probabilistic Risk Assessment)手法を用いた多種多様な解析・評価作業が行われている。この作業では、システム解析(イベント・ツリー解析およびフォールト・ツリー解析)およびプラント応答解析等を通して、炉心損傷に至ると識別される主要事故のシーケンスの同定、発生頻度の定量化および事故カテゴリー等が評価・規定される。このうち、プラント応答解析では、システム解析結果を受けて、事故の起因事象の発生から燃料ピン破損までの初期過程のプラント応答挙動が解析・評価される。

主要事故シーケンスは、以下の4つのカテゴリーに分類される。

- (1) 出力上昇型 …… UTOP (Unprotected Transient Over Power)
- (2) 流量減少型 …… ULOF (Unprotected Loss of Flow)
- (3) 除熱源喪失型 …… ULOHS (Unprotected Loss of Heat Sink)
- (4) 局所異常型 …… PLOHS (Protected Loss of Heat Sink)

これら各事故の進展過程においては、多様な阻止要因(制御棒引抜き阻止、制御系応答、原子炉トリップ信号等)が存在するため、各事故についての起因確率および事象進展等の評価を現実的な立場で行う上ではこれらを考慮することが必要である。特に、原子炉トリップ信号の多様性と原子炉スクラム可否との関係は、事象進展の方向を左右する。

本研究では、以上の事故カテゴリーの内、出力上昇型事故であるUTOPと局所異常型事故について、炉容器内熱流動解析を単相多次元熱流動解析コードAQUAによって行い、原子炉トリップ信号によるスクラムの可能性を炉容器内熱流動特性の観点から検討する。出力上昇型事故におけるトリップ信号の多様性は、基本的には中性子計装と原子炉出口温度計装の2種類である。応答特性からすれば明らかに中性子計装に期待が持たれるが、校正・設定レベルのエラー等で正常に作動しない場合(UTOPの起因要因)を仮定すると、トリップ信号としては炉容器出口温度計装に期待がかかる。しかし、同トリップ信号によるスクラムを検討する上では、炉容器内および1次冷却系配管内での冷却材輸送遅れによる応答性を定量評価しておく必要がある。ここでは、AQUAによる熱流動計算結果に基づき、炉容器出口温度計装によるトリップ信号によって、原子炉スクラムが炉心損傷発生前までに可能か否かを定量化評価する。一方、燃料ピン破損を伴う局所異常型事故発生時の原子炉トリップ信号としては、遅発中性子検出計に期待が持たれるが、同様に炉容器内および1次冷却系配管内での輸送遅れを定量化しておく必要がある。ここでは、燃料集合体から遅発中性子先行核が放出されてから原子炉出口配管位置に到達するまでの冷却材輸送遅れを、熱流動特性の観点から定量評価する。

## 第2章 UTOP時炉容器出口温度応答評価解析

### 2.1 概要

UTOP事象は、正の反応度が投入された場合の原子炉トリップ失敗の事象として定義される。Fig. 2.1に、UTOP事象における代表的な推移のイベントツリー<sup>2)</sup>を示す。同事象は、プラント運転状態によって、定格負荷時からのものと部分負荷時からのものとに大きく分けられる。ここで、一般的に想定される炉心損傷の程度は、冷却材流量の違いから、部分負荷時からの事象開始の方が厳しくなると考えられる<sup>3)</sup>。従って、ここでは原子炉出口温度計装によるスクラム信号が有効となる可能性の高い、定格負荷運転時からのUTOP事象を検討の対象とする。

原子炉出力45%以上の定格負荷運転を含めたプラント条件下では、中性子計装信号および原子炉出口温度計装信号をフィードバック量とした微調整棒による出力自動追従制御モードによりプラントが運転され、この状態で正の異常反応度が投入されたとしても炉出力の上昇は小さく炉心損傷に至ることはない。しかし、Fig. 2.1から分かる様に、原子炉出口温度「高」によるトリップ信号発生の可否は、その後の事象進展に大きな影響を与える。すなわち、このトリップ信号が働いた場合には、事象は収束の方向に向い、一方、働かない場合には炉心の部分損傷に至る確率が高い。

ところで、原子炉出口温度の計装設備は、炉容器出口位置から24~25m下流側（1次系配管室）に設置されるため、その応答特性には炉容器内上部プレナム内での冷却材混合および配管輸送遅れによるそれぞれのむだ時間を定量化しておく必要がある。UTOP事象発生時における上部プレナム内の熱流動特性は、プレナム内部にフローホールを有する内筒が存在することと相俟って、冷却材温度の過渡的な上昇によって定格運転状態での浮力と慣性力とのバランスが時間的に変化し、3次元的且つ過渡的な複雑な挙動を示すことが予想される。

### 2.2 解析条件<sup>4)</sup>

#### 2.2.1 炉心燃料集合体出口Na温度

仮想的炉心崩壊事故（HCDA）解析コードSAS3Dを用いて、AQUA解析で入力値として使用するUTOP時の炉心燃料集合体出口Na温度変化が計算された。SAS3D解析で対象とした事象条件は、平衡炉心第10サイクル末期の定格負荷運転状態に対する最大引抜き反応度1.28\$に対応しており、ドップラー反応度の係数等はノミナル値が用いられている。

初期条件は、Fig. 2.2に示した33chモデルが使用された。また、定格運転時の全熱出力は714MWであるが、SAS3Dの解析対象となる炉心燃料集合体198体の熱出力はこの内の92.61%を

分担しているものと仮定された。

定常状態での各chの炉心燃料集合体出口Na温度の分布をFig. 2.3に示す。また、UTOP事象の過渡における反応度の変化をFig. 2.4に示す。反応度バランスでは、ドップラーおよび燃料膨張により反応度が負のフィードバックを与え、実効反応度はほぼ一定のレベルに保たれながら熱出力はFig. 2.5の様に除々に上昇してゆく。燃料ピン破損は、UTOP開始後約50秒で生ずるものと予測される。この間における各chの冷却材温度上昇推移をFig. 2.6に示す。これらの結果から、温度上昇の基本線は各chでほぼ共通であることが分かる。ただし、多くの中間以上の出力を持つチャンネルでは、燃料破損のやや手前でこの基準線から一時的に上方にシフトする。これは、燃料溶融領域の圧力形成により燃料ペレットと被覆管のギャップが閉じ、ギャップ・コンダクタンスがこの時期を境に上昇することから、ギャップ・コンダクタンスの差に相当する燃料の蓄積エネルギーが短時間に冷却材側に伝えられることに起因している。この様なギャップ・コンダクタンスの上昇は、現実のメカニズムとして十分妥当性を持つが、現在のSAS3Dモデルの様にある瞬間に一度に生ずるというよりも除々に生ずるというのが現実的なものと思われる。一方、燃料溶融を生じない低出力chでは、ギャップ・コンダクタンスの変化は小さく、規格化温度上昇は約5秒の遅れを持って出力履歴に追従する。

## 2.2.2 ブランケット燃料集合体出口Na温度

「もんじゅ」製作準備設計（Ⅱ）では、第9サイクル末期の値<sup>5)</sup>が示されているが、第10サイクル末期についての直接の記述は無い。一方、情報としては第9サイクルについては、各集合体の全出力と炉心高さ相当出力が与えられており、両者の比は以下の関係式で記述される。

$$P_T/P_C = 1.2564 + 5.343 \cdot 10^{-3}/P_C - 0.2657 P_C$$

ここで、 $P_T$ ：各ブランケット燃料集合体の全出力（MW）

$P_C$ ：各ブランケット燃料集合体の炉心高さ相当積分出力（MW）

また、第10サイクル末期の出力については、炉心高さ相当の値のみが示されている。そこで、以下に示す関係を仮定し、前述の情報から第10サイクル末期における集合体出口Na温度を推定する。

$$\Delta T_{10} = \Delta T_9 \cdot P_{T10}/P_{T9}$$

ここで、 $\Delta T_{10}$ ：第10サイクル末期の各ブランケット燃料集合体の温度上昇量（℃）

$\Delta T_9$ ：第9サイクル末期の各ブランケット燃料集合体の温度上昇量（℃）

$P_{T10}$ ：第10サイクル末期の各ブランケット燃料集合体の全出力（MW）

$P_{T9}$ ：第9サイクル末期の各ブランケット燃料集合体の全出力（MW）

上式において、 $\Delta T_9$ および $P_{T9}$ は既知であり、前式の $P_T$ および $P_C$ を $P_{T10}$ および $P_{C10}$ で置き換えれば、 $P_{C10}$ も既知であることから $\Delta T_{10}$ が求められる。以上より求めたブランケット燃料集合体出口Na温度分布を、Fig. 2.7に示す。ブランケット燃料集合体では、 $\gamma$ 発熱量が全出力の数10%を占めるが、この $\gamma$ 発熱を中性子束に比例するものと仮定すると、ブランケット燃料集合体についてもSAS3D解析による炉心燃料集合体の過渡中の温度上昇特性が適用できる。ただし、この場合、燃料溶融によるギャップ・コンダクタンスの変化が無いと考えられ、炉心燃料集合体の低出力チャンネルの温度上昇特性を過渡条件とする。

## 2.2.3 中性子遮蔽体出口Na温度

中性子遮蔽体での発熱は $\gamma$ 発熱が主体であるが、今回の調査の範囲では発熱の空間分布の直接的な情報が得られず、以下の情報のみ明らかとなった。

① 324体の全出力は、合計1.99MW<sup>6)</sup>

② 内側列の最大発熱中性子遮蔽体の出力は、26kW<sup>7)</sup>

ここでは、第1次近似として、全中性子遮蔽体を平均した温度上昇を与える方法を採用した。この場合、中性子遮蔽体全体の冷却材流量は49.6 [kg/s]であるから、以下の様に平均温度上昇量は31℃となる。

$$1.99 \cdot 10^6 \text{ [J/s]} / (49.6 \text{ [kg/s]} \cdot 1280 \text{ [J/kg/°C]}) = 31 \text{ [°C]}$$

なお、過渡時の温度変化については、ブランケット燃料集合体のそれと同様に、炉心燃料



集合体の内の低出力集合体の温度上昇特性を使用する。

#### 2.2.4 制御棒及び中性子源集合体の出口Na温度<sup>8)</sup>

制御棒及び中性子源集合体の定常時出口Na温度は、Fig. 2.8に示した平衡炉心第10サイクル末期の値を使用し、過渡変化は炉心燃料集合体の内の低出力集合体の温度上昇特性を使用する。

### 2.3 解析モデル

#### 2.3.1 メッシュ分割

今回の解析についてのメッシュ分割を行うに当たっては、後述する遅発中性子先行核濃度輸送解析への体系の流用を念頭に置いて、可能な限り炉心構成要素個々の炉心内位置とその熱流力特性を忠実にモデル化した。Fig. 2.9にメッシュ分割図を、またFig. 2.10に炉心燃料集合体とメッシュセルとの対応関係を示す。解析体系は、周方向の対称性を用いて1/3セクターモデルを採用し、計算総セル数は $30^i \times 24^i \times 39^k$ の17142セルである。

#### 2.3.2 圧力損失特性

##### 制御棒案内管近傍

軸方向には、案内管群に沿う摩擦損失を次式により与えた。

$$\Delta P = -fz \rho \frac{v_z^2}{2} \frac{\Delta z}{D}$$

$$fz = \begin{cases} 64/Re & (Re \leq 2000) \\ 0.3164/Re^{0.25} & (Re > 2000) \end{cases}$$

$$Re = v_z D / \nu$$

ここで、水力等価直径Dは、流路面積と濡れ縁長さから算出した。また、 $\Delta z$ は当該セルの軸方向長さである。

径方向については、案内管群を水平に横切る円柱回りの抗力を次式で与えた。

$$\Delta P = -\xi_r \rho \frac{v_r^2}{2}$$

$$\xi_r = C_D \cdot A_d / A$$

$$C_D = 1.0$$

ここで、 $A_d/A$ は、径方向全断面積に対する案内管の投影面積割合を表わしている。

##### 整流筒近傍

整流筒は、径方向の流れを抑制すると同時に、軸方向に次の様な縮流および拡流による圧

力損失を持つものとした。

$$\Delta P = -\xi_z \rho \frac{v_z^2}{2}$$

ここで、拡流による圧力損失係数には、次式を用いて計算した。

$$\xi_z = 1.058 - 2.044 \cdot A_{R1} + 0.986 \cdot A_{R1}^2$$

ここで、 $A_{R1}$ は拡流率である。また、縮流による圧力損失係数については、以下の値から内挿した<sup>9)</sup>。

$A_{R2}$	0.5	0.6	0.7	0.8
$\xi_z$	0.24	0.18	0.12	0.06

ここで、 $A_{R2}$ は縮流率である。

#### フローホール

内筒フローホールの圧力損失については、フローホール入口・出口面の縮流・拡流圧損により、次の様に与えた。

$$\Delta P = -\xi_z \rho \frac{v_r^2}{2}$$

ここで、縮流率および拡流率がほぼ零であることから、縮流圧損係数 $\xi_c=0.5$ 、拡流圧損係数 $\xi_d=1.0$ として圧力損失係数 $\xi_r$ を1.5とした。

#### アニュラス部近傍

内筒の上端では、流れの縮流が発生し、その縮流率はほぼ零であるため、圧力損失係数 $\xi_z=0.5$ により縮流損失を与えた。また、アニュラス部の内筒または炉容器壁と接するセルに対しては、次式により軸方向摩擦損失を与える。

$$\Delta P = -f_z \rho \frac{v_z^2}{2} \frac{\Delta z}{D}$$

$$f_z = \begin{cases} 64/Re & (Re \leq 2000) \\ 0.3164/Re^{0.25} & (Re > 2000) \end{cases}$$

$$Re = v_z D / \nu$$

ここで、 $D$ は水力等価直径であり、アニュラス部幅を与える。

### 2.3.3 数値計算条件

使用した数値計算条件を以下に列記する。

座 標	$r - z - \theta$	3次元
メッシュ分割	$30^i \times 24^j \times 39^k$ , 総計17142セル	
乱流モデル	$k - \epsilon$ 2方程式モデル	
対流項差分法	運動量式	QUICK
	エネルギー式	QUICK-FRAM
	乱流量式	1st Order Upwind
固体壁境界条件	No-Slip (ただし, 中心軸はFree Slip)	
乱流量入口条件	$k_B = 0.001 \cdot U_B^2$	
	$\epsilon_B = C\mu^{3/4} / k_B^{3/2} / 1m$	

(ここで,  $U_B$ はS/A出口流速,  $C\mu$ はモデル定数 (0.09),  $1m$ は混合長 ( $=\kappa \cdot y$ ),  $\kappa$ はカルマン定数 ( $=0.42$ ),  $y$ はS/A出口からの距離)

## 2.4 解析結果と検討

### 2.4.1 定常計算結果

UTOP事象開始の初期状態となる定格負荷運転時の定常計算結果の内, プレナム内の代表的な流速・温度分布をFig. 2.11に, また全断面の結果を付録Aに示す。Fig. 2.11に示した結果から分かる様に, 上部プレナム内における流速分布および温度分布は強い3次元性を持ち, 特に $r - \theta$ 面でこれが顕著である。これは, 炉心中心から放射状に広がる流路内において, 熱流力特性が著しく異なる領域 (制御棒等) を冷却材が通過するためである。さらに, 上部プレナム内では冷却材の混合が予想以上に悪いため, 高温領域と低温領域とがプレナム内に島上に点在するため極めて空間的に複雑な分布を示す。特に, 制御棒領域を通過せずに上部プレナム内に流入した周方向2つのジェット流は, 顕著な運動量の拡散も無く内筒壁に衝突する。この後,  $\theta - z$ 面での結果に見られる様に, 内筒壁に沿って上昇しアニュラス部に流入する。

以上の結果より, 熱流力特性が著しく異なる領域を冷却材が通過した場合, 複雑な流動状況を示すことが明かとなった。このことは, 炉上部温度計装によって温度測定を行う場合にも少なからぬ影響を与えるものと考えられるため, 付録Fで検討を行う。この温度計装は, 原子炉保護系には組み込まれておらず, トリップ信号としての役割は果たさないが, 炉心内の異常を把握する上では有力な情報源と期待されているものである。

### 2.4.2 過渡計算結果

UTOP開始後40秒までの過渡計算結果の内, 上部プレナム内の代表的な流速・温度分布を10

秒毎にFig. 2.12に、また全断面の結果を付録B～Eに示す。Fig. 2.12に示した結果では、時間の経過と共にプレナム内の流速・温度分布が大きく変化している。これは、UTOPにより各集合体出口Na温度が上昇するため、上部プレナム内における慣性力と浮力のバランスが時間と共に変化した結果である。すなわち、Fig. 2.12に示した  $r-z$  面での結果から分かる様に、ジェット流そのものの温度が各集合体出口Na温度の上昇に従って増加し、これがUTOP発生前に上部プレナム内を満たしていた低温冷却材中に流入するためである。この結果、炉心上部機構下端から上部プレナム内に放出されるジェット流の流向が時間の経過と共に上向きに遷移すると同時に、これによって上部プレナム内を反時計回りに循環する旋回流の強度が増している（炉心上部機構の側壁を下降する流速ベクトルが増大しており、また  $\theta-z$  面の結果からも明らかである）。また、この旋回流が顕在化することによって、上部プレナム内の温度分布も、一時的に垂直方向に層化する挙動を示す。一方、 $r-\theta$  断面の結果からは、時間の経過と共に、上部プレナム内に島状に点在していた高温領域と低温領域が解消する傾向を示すことが分かる。これは、上部プレナムを旋回する大規模な渦運動の成長によって、上部プレナム内での冷却材混合が促進された結果と考えることができる。

Fig. 2.13に、UTOP開始後40秒までの炉容器出口位置における温度の推移と各計算セルについて示す。同位置のメッシュ系は、 $\theta-z$  面をそれぞれ  $3 \times 5$  の総計15メッシュに分割している。結果に見られる様に、15メッシュ個々での温度履歴はそれぞれ個差が持つ。これは、Fig. 2.14に見られる様に、解析上の出口配管がセクターの中心位置から外れるために生ずるアニュラス部内の非対称な循環渦に起因する。

Fig. 2.15に、下式によって計算された質量流量による平均温度の推移を示す。

$$T_{AVE} = \frac{\sum \rho A \gamma_A U T}{\sum \rho A \gamma_A U}$$

ここで、

$T_{AVE}$  : 質量流量を用いた平均温度

$\rho$  : 流体密度

$A$  : セル断面積

$\gamma_A$  : 流体透過率

$U$  : 流速

$T$  : 流体温度

である。また、図中には、炉容器出口位置から約24m下流に位置する炉容器出口温度計装熱電対での冷却材輸送遅れを考慮した温度推移挙動および同熱電対の熱容量等による応答遅れ（時定数  $\tau = 20$  秒）を考慮した温度推移挙動を示す。まず、炉容器出口位置での温度推移では、事象開始後22秒までは大きな変化は見せない。これは、正に炉容器出口配管に向う主流の時間遅れによるものである。炉心上部機構下端から上部プレナム内放出された高温の冷却

材は、主に内筒を上昇し、炉容器壁とのアニュラス部を下降して出口配管位置に至る。この流路の最短距離は約12mであり、この領域での平均流速を0.5m/sとすると、高温冷却材の先端が出口配管部に到達するのに約24秒かかることになり、解析による結果とほぼ一致する。このことから、図に見られる22秒以降の急激な温度上昇は、アニュラス部を通過した主流によるものであり、フローホールを通過する高温流体の影響は小さいと解釈できる。同図中に示した点線は、炉容器出口部から熱電対位置までの配管長さ約24mによる冷却材輸送遅れを、流速3.5m/sとして計算した温度推移挙動である。この結果、熱電対位置での温度挙動は、冷却材輸送遅れ時間約7秒を持って推移することになる。一方、図中の一点鎖線は、熱電対の熱容量による応答遅れを1次遅れと仮定し、時定数20秒として算出した温度推移（計器指示値相当）である。ここで、原子炉出口温度「高」によるスクラムレベルは、定格運転時の529℃に対して+17℃の546℃であり、計器指示値がこの値に到達するのは事象開始後約42秒である。一方、SAS3Dによる燃料ピン破損発生は、事象開始後約50秒と予測され、今回の条件設定におけるUTOP事象は、燃料ピンが破損を生じる前までに、原子炉出口温度計装によって事象の検知およびこれによるトリップ信号によってスクラムが達成される可能性が高い。

## 第3章 遅発中性子先行核濃度輸送評価解析

### 3.1 概要

遅発中性子先行核の放出は、炉心構成要素内の一部に発生する局所異常に起因して生ずる。ここで、局所異常とは、炉心構成要素内の一部に生じた発熱量と除熱量との不整合による燃料ピン束内状態量の変動挙動を指し、この状態量の局所的变化から全炉心事故までの事象推移に関する安全評価の対象となる起因事象として定義される。Fig. 3.1に、燃料ピンランダム破損が発生した場合のイベントツリー<sup>10)</sup>を示す。同推移は、遅発中性子検出系による原子炉スクラムの可否によって左右される。

この遅発中性子検出系は、炉容器出口位置から約40m下流側に設置されるため、その検出応答性にはUTOP事象時の場合と同様に、炉容器内上部プレナム内および配管内での輸送遅れ時間を見積もっておく必要がある。

### 3.2 解析条件

ここで対象とする遅発中性子先行核の放出環境は、定格負荷運転の条件とし、事象推移中の温度場の変動は考慮しない。これは、第2.2節で述べた定常状態での熱流動環境がDN輸送解析の期間中保たれることに相当する。

ここでの解析では、DN先行核放出集合体から原子炉出口配管までの距離とDN先行核放出集合体の種類をパラメータとし、Fig. 3.2に示す4ケースを行う。

### 3.3 解析モデル

使用するメッシュ系および圧力損失特性に関するモデル化は、第2.3節で規定したものをそのまま流用する。このメッシュ系では、DN先行核放出集合体の炉心内位置を可能な限り忠実に模擬している。以下に数値計算条件を列記する。

座 標	$r - z - \theta$	3次元
メッシュ分割	$30^i \times 24^j \times 39^k$	総計17142セル
乱流モデル	$k - \varepsilon$	2方程式モデル
対流項差分法	運動量式	QUICK
	エネルギー式	QUICK-FRAM
	乱流量式	1st Order Upwind
	DN核輸送量式	QUICK-FRAM
固体壁境界条件	No-Slip	(ただし、中心軸はFree Slip)

$$\begin{aligned}
 \text{乱流量入口条件} \quad k_B &= 0.001 \cdot Ua^2 \\
 \varepsilon_B &= C \mu^{3/4} / k_B^{3/2} / l_m
 \end{aligned}$$

なお、ここで考慮したDN先行核濃度のナトリウム中への放出形態は、1000ppm 一定連続放出と $10^{10}$ ppm 1秒間ステップ状放出の2種類である。また、ナトリウム中でのDN先行核濃度の拡散は、零とした。

### 3.4 解析結果と検討

#### 3.4.1 一定連続放出条件

##### (1) ケース1

DN先行核放出後60秒時点の上部プレナム内の代表的なDN先行核濃度分布をFig. 3.3に、また全断面の結果を付録Gに示す。Fig. 3.3に示した結果から分かる様に、高濃度領域は、炉心中心から内筒壁方向に広がる放射上のジェットに付随して上部プレナム内を拡散してゆく。

Fig. 3.4に、原子炉出口配管位置に相当する計算セル個々での60秒間のDN先行核濃度の上昇特性を示す。出口配管断面において右下領域でDN先行核濃度の上昇割合が大きい理由は、第2.4.2項で述べた様に、アニュラス部内の出口配管近傍に非対象な吸い込み渦が発生していることに起因し、DN先行核濃度の挙動がこの流動に支配されていることを表わしている。この15セルの内、最も大きなDN先行核濃度値を示しているのは右下端で、60秒時点で全放出量(1000ppm)の約2%である。Fig. 3.5に、原子炉容器出口配管部での質量流量による平均DN先行核濃度の推移を示す。この平均量の計算には、下式を用いた。

$$\phi_{AVE} = \frac{\sum \rho A \gamma_A U \phi}{\sum \rho A \gamma_A U}$$

ここで、

$\phi_{AVE}$  : 質量流量を用いたDN先行核濃度平均値

$\rho$  : 流体密度

A : セル断面積

$\gamma_A$  : 流体透過率

U : 流速

$\phi$  : DN先行核濃度計算値

である。DN先行核濃度の上昇カーブがS字形を示している理由は、Fig. 3.6を用いて以下のように解釈できる。すなわち、集合体を流出したDN先行核は、図に示した様な3つの経路を辿って原子炉出口配管位置に到達する。その1つは、下部フローホールを通過する経路(Phase A)であり、2つ目は上部フローホールを通過する経路(Phase B)、3番目は内筒を乗り越えて出口配管に至る経路(Phase C)である。まず、Phase Aの段階では、下部フ

ローホールを通過したDN先行核のみが出口配管位置に到達するため、その上昇割合は小さい。一方、Phase Bの段階では、上部フローホールを通過したDN先行核が下部フローホールを通過したそれに合流するため、その上昇割合はPhase Aに比べて大きくなる。しかし、Phase Cの段階では、内筒を乗り越えて出口配管に向うDN先行核と、上部プレナム内を循環するDN先行核とに分離されるため、出口配管位置に到達するDN先行核の濃度はそれを程上昇しない。結果として、同位置で観測されるDN先行核の濃度の上昇割合は、Phase B段階に比べて緩慢なものとなる。Phase C以降の出口配管位置でのDN先行核濃度は、上部プレナム内の濃度が均質化され、全体的な濃度上昇に比例して増加する。

Fig. 3.5から分かる様に、このケースではDN先行核放出後300秒で、出口配管位置には全放出量の約1.5%が到達しているに過ぎない。

#### (2) ケース2

DN先行核放出後60秒時点の上部プレナム内の代表的なDN先行核濃度分布をFig. 3.7に、全断面の結果を付録Hに示す。また、原子炉出口配管位置に相当する15セルでの60秒間の推移をFig. 3.8に、原子炉容器出口配管部での質量流量による平均DN先行核濃度の推移をFig. 3.9に示す。このケースでのDN放出集合体は、内側炉心最外周位置に当たり、集合体流量がケース1でのものに比べて小さく積分放出量が少ないため、出口配管位置に到達するDN先行核の濃度は平均値で約1.1%と小さな値となっている。しかし、その上昇特性は、ケース1でのものと相似な傾向を示す。また、出口配管部15セル間での濃度推移の個差は、ケース1でのそれに比べて小さい。

#### (3) ケース3

DN先行核放出後60秒時点の上部プレナム内の代表的なDN先行核濃度分布をFig. 3.10に、全断面の結果を付録Iに示す。また、原子炉出口配管位置に相当する15セルでの60秒間の推移をFig. 3.11に、原子炉容器出口配管部での質量流量による平均DN先行核濃度の推移をFig. 3.12に示す。このケースでのDN先行核放出集合体は、外側炉心位置に当たり、集合体流量がケース1およびケース2に比べてさらに小さい。このため、原子炉出口配管位置に到達するDN先行核の濃度は、全放出量の約1.0%と極度に低い。

#### (4) ケース4

DN先行核放出後60秒時点の上部プレナム内の代表的なDN先行核濃度分布をFig. 3.13に、全断面の結果を付録Jに示す。また、原子炉出口配管位置に相当する15セルでの60秒間の推移をFig. 3.14に、原子炉容器出口配管部での質量流量による平均DN先行核濃度の推移をFig. 3.15に示す。このケースでのDN先行核放出集合体は、外側炉心位置に当たり、集合体流量は小さい。このため、出口配管位置に到達する濃度も小さな値となっている。

Fig. 3.16に、質量流量による平均DN先行核濃度の推移を4ケースについて比較する。ま



ず、DN先行核濃度放出集合体が共に内側炉心領域であるケース1および2の比較では、若干ではあるが原子炉出口配管までの距離の影響が、出口配管位置でのDN濃度の上昇特性に現れている。すなわち、ケース1および2それぞれのDN先行核濃度放出集合体は第2列および第6列であり、出口配管までの最短距離はケース2の方がケース1に比べて短い。この結果、出口配管位置でのDN先行核濃度の上昇は、ケース2での方が早く始まる。しかし、それぞれの集合体流量が19.56kg/s、16.15kg/sと若干の違いを持つため、DN先行核濃度積分値の違いから20秒以降においてはケース1の上昇が顕著となる。一方、DN先行核濃度放出集合体が共に外側炉心領域であるケース3および4の比較では、集合体流量が同一であることから純粋に出口配管までの距離の影響を評価することができる。出口配管までの距離の比較では、ケース3の方がケース4に比べてかなり短い。この結果、出口配管位置でのDN先行核濃度上昇は、ケース3の方が時間的に早く始まるが、40秒以降ではその絶対値が逆転する。これは、Fig. 3.10およびFig. 3.13の $r-\theta$ 面等濃度分布図から分かる様に、ケース3ではDN先行核放出集合体位置が、炉心中心から放射状に広がるジェット主流位置から外れるため、DN先行核濃度の上部プレナム内での広がり大きくなり、DN先行核濃度が希釈されるためである。一方、ケース4では、その位置が出口配管から遠いにも係わらず、ジェット主流領域に内包されるため、60秒経過時点でのDN先行核濃度はケース3に比べて大きくなる。この事実は、原子炉容器出口配管に到達する最終的なDN先行核濃度の絶対値が、単純に出口配管までの距離に依存するのではなく、むしろ上部プレナム内発生している流動状況に影響されるものであることを示唆している。

### 3.4.2 ステップ状放出条件

#### (1) ケース1

原子炉出口配管位置におけるDN先行核濃度の150秒間の推移をFig. 3.17に示す。また、付録Kに、DN先行核放出後25秒時点での全断面の等濃度線図を示す。Fig. 3.17に示した結果は、連続放出条件での結果と同様に、出口配管位置に至る大きな2つの経路によって特徴付けられる。すなわち、フローホールを通過して原子炉出口配管位置に到達するDN先行核濃度（A領域）と内筒上端を乗り越えて同位置に到達するDN先行核濃度（B領域）に分離される。この2領域による差は、炉容器内での輸送遅れ時間（核種崩壊時間）として、DN検出計位置でのDN先行核強度に影響する。炉容器内に滞留せずに直接出口配管部に至るDN先行核濃度（A領域）は、全放出濃度の約0.113%であり、内筒を乗り越えて出口配管部に至るDN先行核濃度（B領域）は、約0.064%である。DN検出計位置での強度に関する評価は、残りの3ケースを含めて、次項で行なう。

#### (2) ケース2

原子炉出口配管位置におけるDN先行核濃度の150秒間の推移をFig. 3.18に示す。また、

付録Lに、DN先行核放出後25秒時点での全断面の等濃度線図を示す。Fig. 3.18に示した結果では、内筒を乗り越えて出口配管に到達するDN先行核濃度（B領域）に、ケース1では見られなかった2次ピーク（40秒近傍）が見られる。これは、付録A.2から分かる様に、ケース2におけるDN先行核放出集合体が大きな2つのジェットの間中に位置し、ここでの流動状況が循環渦を伴った複雑な流れであることに起因している。すなわち、ここでの2次ピークは、DN先行核濃度の一部がこの循環渦にトラップされ、時間遅れを持って出口配管位置に到達したものであると解釈できる。ただし、フローホールを通過して出口配管に至るDN先行核濃度は、循環渦による影響よりも、フローホールそのものを通過する冷却材流量絶対値に強く依存するため、DN先行核濃度の絶対値には大きな変化は生じない。

### (3) ケース3

原子炉出口配管位置におけるDN先行核濃度の150秒間の推移をFig. 3.19に示す。また、付録Mに、DN先行核放出後25秒時点での全断面の等濃度線図を示す。Fig. 3.19に示した結果についても、ケース2と同様、内筒を乗り越えて出口配管に到達するDN先行核濃度（B領域）に2次ピークが見られる。ただし、B領域の1次ピークの絶対値は、集合体流量の違いに起因して、ケース2の場合よりも小さい。

### (4) ケース4

原子炉出口配管位置におけるDN先行核濃度の150秒間の推移をFig. 3.20に示す。また、付録Nに、DN先行核放出後25秒時点での全断面の等濃度線図を示す。Fig. 3.20に示した結果は、ケース3と同じ外側炉心燃料であるにもかかわらず、むしろケース1のそれに近い形状となっている。これは、ケース2および3の場合と異なり、DN先行核濃度輸送に影響を及ぼす循環渦が存在しないためである。この結果は、連続放出条件での解析により得られた知見、すなわち原子炉出口配管位置に到達するDN先行核濃度の絶対値が単純に出口配管までの距離に依存するのではなく、むしろ上部プレナム内に発生している流動状況に影響されるという解釈を裏付けている。

## 3.4.3 遅発中性子先行核強度評価

ここでは、解析から得られた結果を基に、遅発中性子検出計位置での先行核強度を簡易評価する。用いた評価式を以下に示す。

$$S = A * 0.04 * S_0 \exp(-\lambda_{Br}(t + t_{lag})) + B * 0.04 * S_0 \exp(-\lambda_{Br}(t + t_{lag})) \\ + A * 0.22 * S_0 \exp(-\lambda_I(t + t_{lag})) + B * 0.22 * S_0 \exp(-\lambda_I(t + t_{lag}))$$

ここで、

A : フローホール通過濃度割合

B : 内筒上端越流濃度割合

S<sub>0</sub> : 放出全遅発中性子先行核量

$\lambda$  : 崩壊定数

Br : 遅発中性子親核種  $^{87}\text{Br}$

I : 遅発中性子親核種  $^{137}\text{I}$

t : 経過時間

$t_{lag}$  : 主冷却系配管内輸送遅れ時間 (~11.4秒)

である。Fig. 3.21に、上式により求められた遅発中性子検出計位置での先行核強度の時間的推移を示す。まず、ステップ状放出条件の結果では、基本的に集合体流量の差に起因して、先行核強度の最大値が決定されていることが分かる。すなわち、内側炉心第2列目よりDN先行核を放出させたケース1が最もその値が大きい。外側炉心最外周位置よりDN先行核を放出させたケース3と4の比較では、検出計位置で指示されるその値はほぼ同等であるものの、ピークを示す時間に差が現れている。これは、前項でも述べた様に、放出されたDN先行核がプレナム内に存在する循環渦にトラップされた影響であると解釈できる。

DN先行核の連続放出条件の結果についても、ステップ状放出条件での結果と同様に、検出計位置で指示される先行核強度が、集合体流量の差に起因して決定されている様子が分かる。ケース3と4の比較では、DN先行核の一部が循環渦にトラップされた結果により、50秒以降で有意な差が現れている。これは、正にプレナム内でのDN先行核の滞留時間の違いによるものであり、ケース3の場合にはこの時間内に核種の崩壊が進んだ結果であると解釈できる。

以上の結果を基に、別な最確評価手法による線源強度が与えられれば、遅発中性子検出計位置での定量的強度レベルを求めることが可能となる。ただし、ケース3と4の比較結果からも分かる様に、同流量領域の集合体であっても検出計位置での応答が異なることから、プレナム内に発生する流動状況を踏まえたパラメトリックな評価が今後必要である。

## 第4章 結 言

高速原型炉「もんじゅ」を対象にUTOP時の原子炉容器出口温度応答および燃料ピン破損時の遅発中性子先行核濃度輸送の評価を、単相多次元熱流動解析コードAQUAを用いて実施した。

UTOP時の原子炉容器出口温度応答評価では、平衡炉心第10サイクル末期の定格負荷運転状態に対し、最大引抜き反応度を1.28\$とした条件の解析を行ない、以下の結果を得た。

- (1) 事象開始に伴い燃料集合体出口Na温度が上昇するため、炉心上部機構下端から上部プレナム内に放出されるジェットの流れが時間の経過と共に上向きに遷移し、高温冷却材の大半は内筒を乗り越えて原子炉出口配管位置に至る。
- (2) 原子炉容器出口部から約24m下流に位置する原子炉出口温度計装では、配管内での冷却材輸送遅れおよび熱電対の応答遅れを考慮すると、事象開始後約42秒で原子炉スクラム温度レベル(546°C)に到達する。当該事象に伴う燃料ピン破損発生が、事象開始後約50秒であると予測されることから、燃料ピン破損発生前に原子炉出口温度計装によるトリップ信号によって原子炉スクラムが可能であると推測される。

燃料ピン破損時の遅発中性子先行核濃度輸送の評価では、放出集合体の炉心内位置をパラメータに4ケースを解析した。遅発中性子先行核濃度の放出環境は、定格負荷運転の条件とし、放出形態は1000ppmの連続放出および $10^{10}$ ppmの1秒放出の2ケースを考慮した。解析により、以下の結果を得た。

- (1) 原子炉容器出口部に到達する遅発中性子先行核濃度は、単純に放出集合体の炉心内位置から出口配管までの距離に依存するのではなく、むしろ上部プレナム内に発生している流動状況に影響される。
- (2) 内側炉心領域の第1列燃料集合体から遅発中性子先行核が連続放出された場合、原子炉出口部には、60秒時点で全放出量の1.2%、300秒で1.5%が到達する。
- (3) 外側炉心領域の第2列燃料集合体から遅発中性子先行核が連続放出された場合、原子炉出口部には、60秒時点で全放出量の0.7%が到達する。
- (4) 内側炉心領域の第1列燃料集合体から遅発中性子先行核が1秒間放出されたケースでは、親核種崩壊まで考慮した結果、全放出量の0.0064%の先行核が検出計のカウントに寄与する。

## 謝 辞

本作業を進めるにあたり、終始有益なコメントを頂いた大洗工学センター・安全工学部炉心安全工学室・福沢義晴副担当役、野中信之副主任研究員、此村 守副主任研究員および佐藤一憲副主任研究員に感謝の意を表します。

また、AQUAコード運用に関して、多大なる配慮をして頂いた東海事業所・技術管理室・栢明室長、布施隆司担当役、笹島秀吉研究員、菅谷寿男氏および大洗工学センター・技術開発部技術管理室・中西征二室長、浜崎 栄氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 山口, “第182回FBR安全研究専門委員会資料, Ⅲ, プラント応答評価研究の現状” 182-5, 1987年2月
- (2) 野中, 佐藤, “もんじゅ PRA検討会資料”, 炉心安全工学室資料, SAG1-PRA-06/87, 1988年3月
- (3) 野中, “UTOP時プラント応答及び事象設定条件について”, 炉心安全工学室資料, SAG1-T- 14 (88), 1988年6月
- (4) 佐藤, “AQUA詳細解析用「もんじゅUTOP real stroke 1.28 \$」ケースのSAS3D解析結果”, 炉心安全工学室資料, SAG1-T-32(88), 1988年9月
- (5) 「もんじゅ」製作準備設計(Ⅱ), 第10分冊, A-1173-2
- (6) 「もんじゅ」製作準備設計(Ⅱ), 第10分冊, A-1171-1, 第2図
- (7) 「もんじゅ」製作準備設計(Ⅱ), 第1分冊, S-001, 第4.2.6.4表
- (8) 「もんじゅ」製作準備設計(Ⅱ), 第10分冊, A-1111, 第4～第6表
- (9) 日本機械学会, “管路・ダクトの流体抵抗”, 1979年
- (10) 福沢, “局所事故 PSA, 「燃料破損検出と内部流路閉塞」”, 炉心安全工学室資料, SAG4-G-36(87), 1987年
- (11) 村松, 田村他, “「常陽」渦電流式温度流速計の炉内特性試験(Ⅱ)”, PNC資料, N941-82-176, 1982年8月
- (12) 池田, 馬渡, “炉心上部機構局所モデル水流動試験”, PNC資料, SJ201 77-47, 1977年11月

Operation Condition	C/R Operation	F C R Auto-Compensation	Reactivity Insertion	Doppler Coefficient	Reactor Scram due to R/V Outlet Na Temp. High	Fuel Pin Failre	Accident Category
---------------------	---------------	-------------------------	----------------------	---------------------	---	-----------------	-------------------

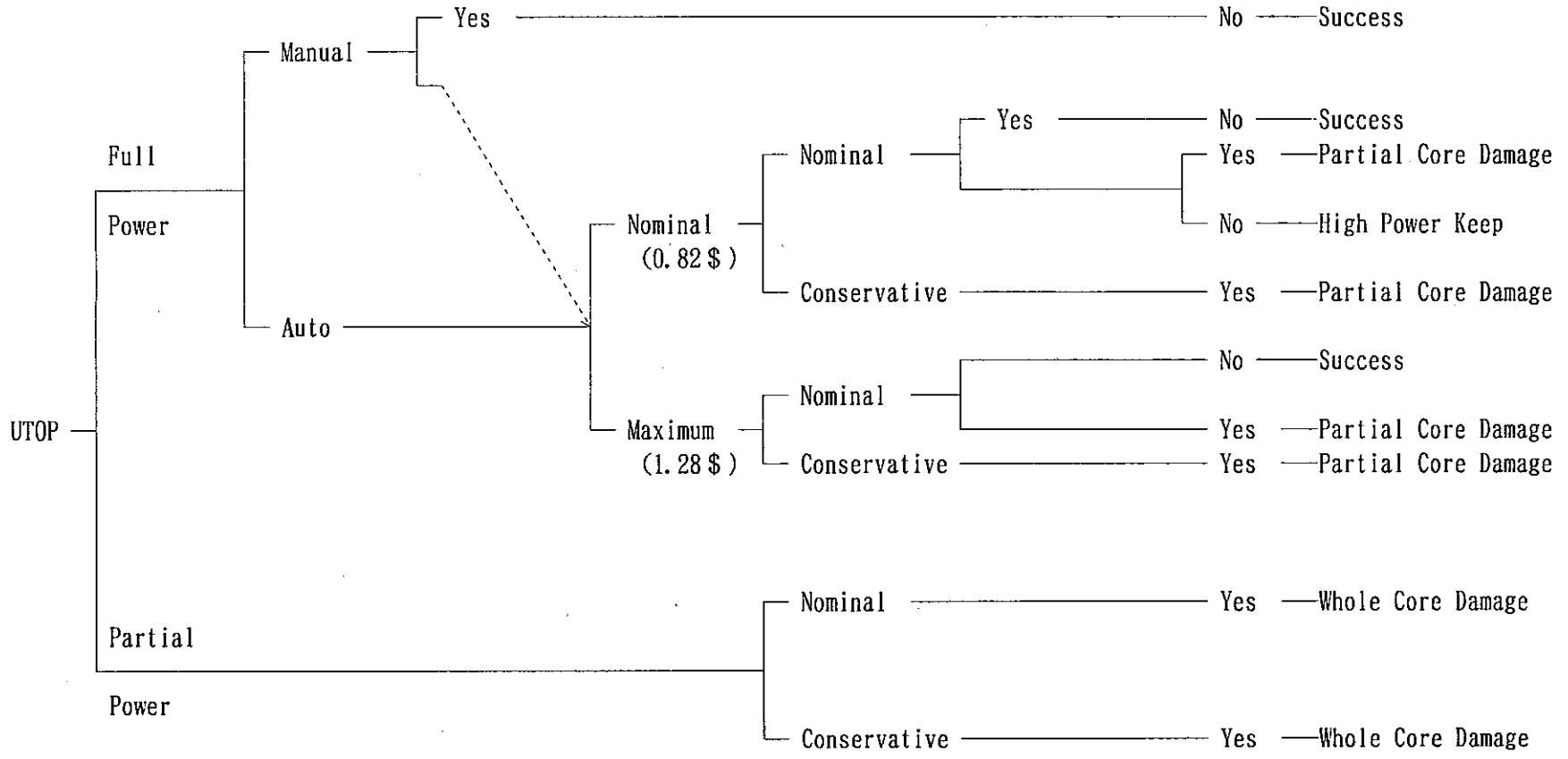


Fig. 2.1 Event Tree of UTOP Accident

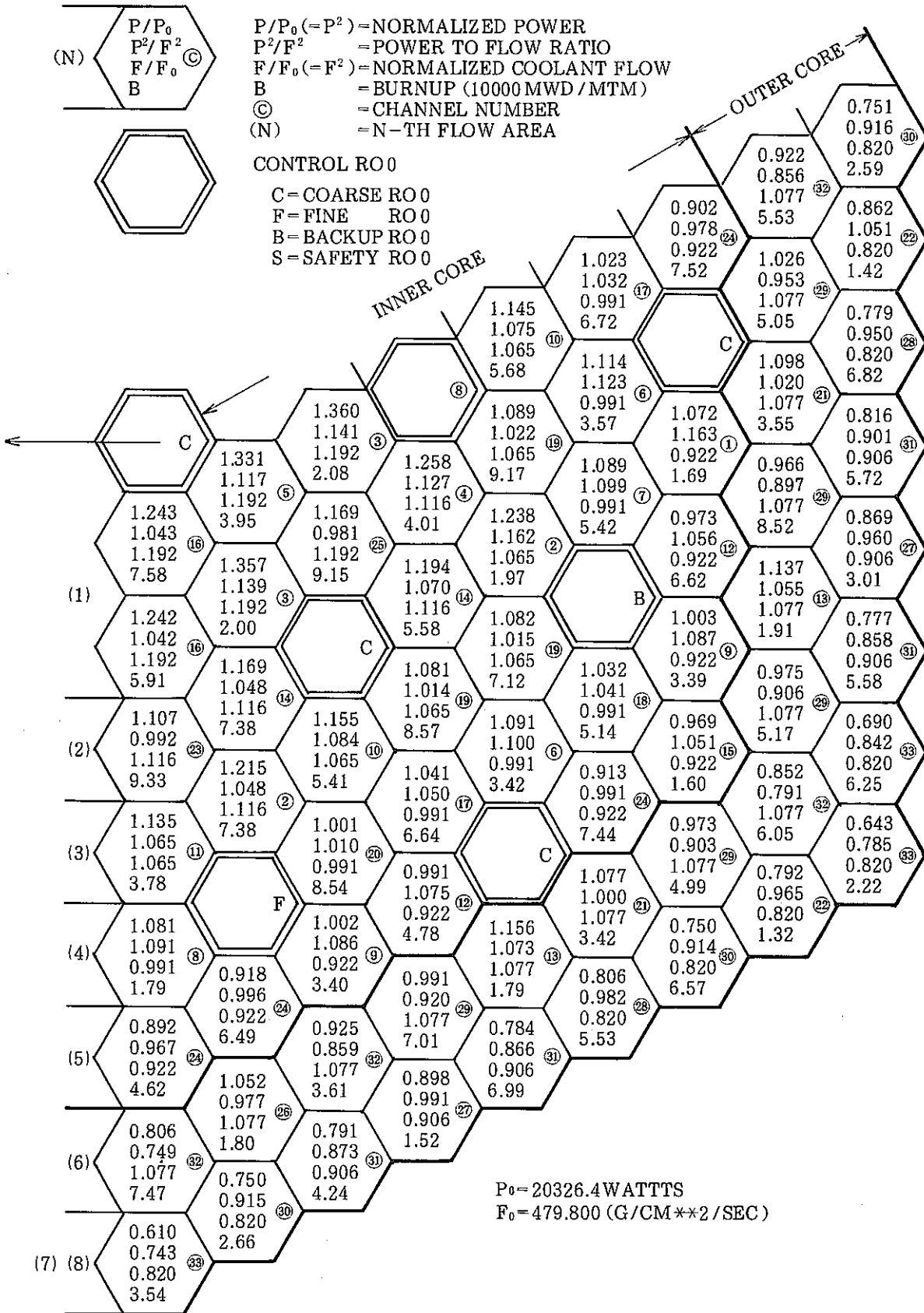


Fig. 2.2 Initial Condition of UTOP Accident Analysis using SAS3D



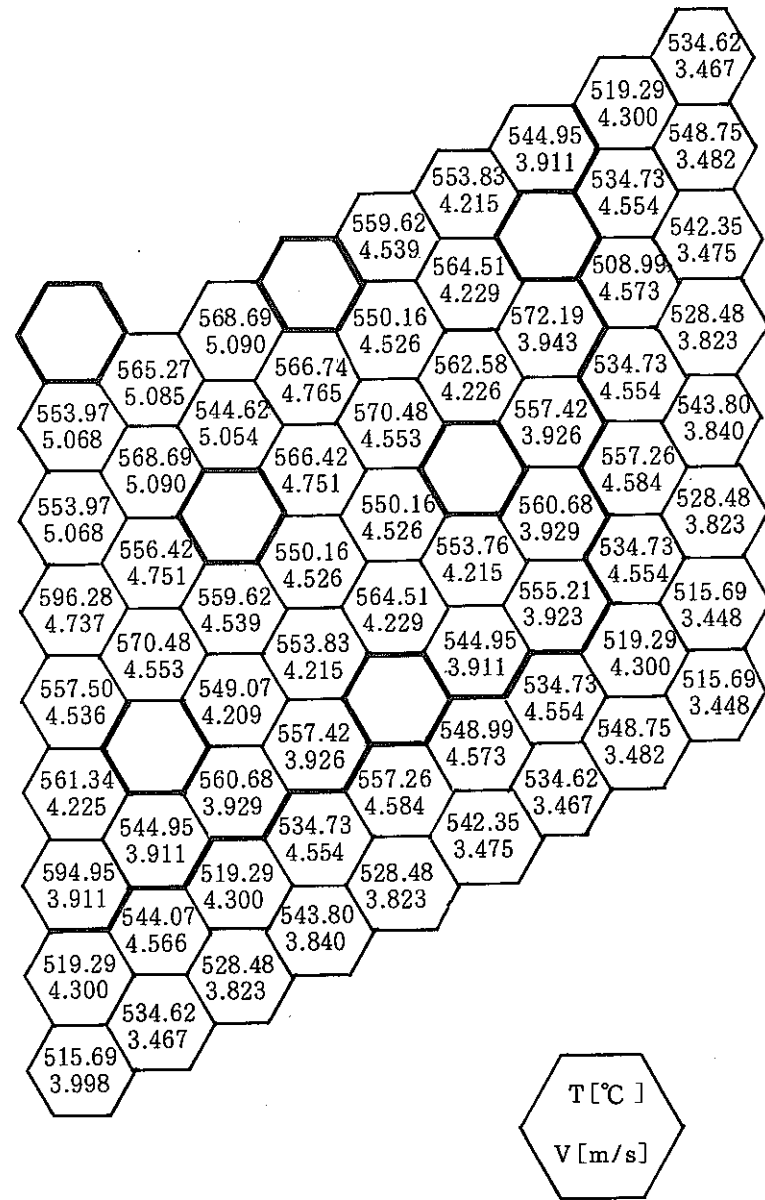


Fig. 2.3 Calculated Outlet Sodium Temperature of Core Fuel Assemblies

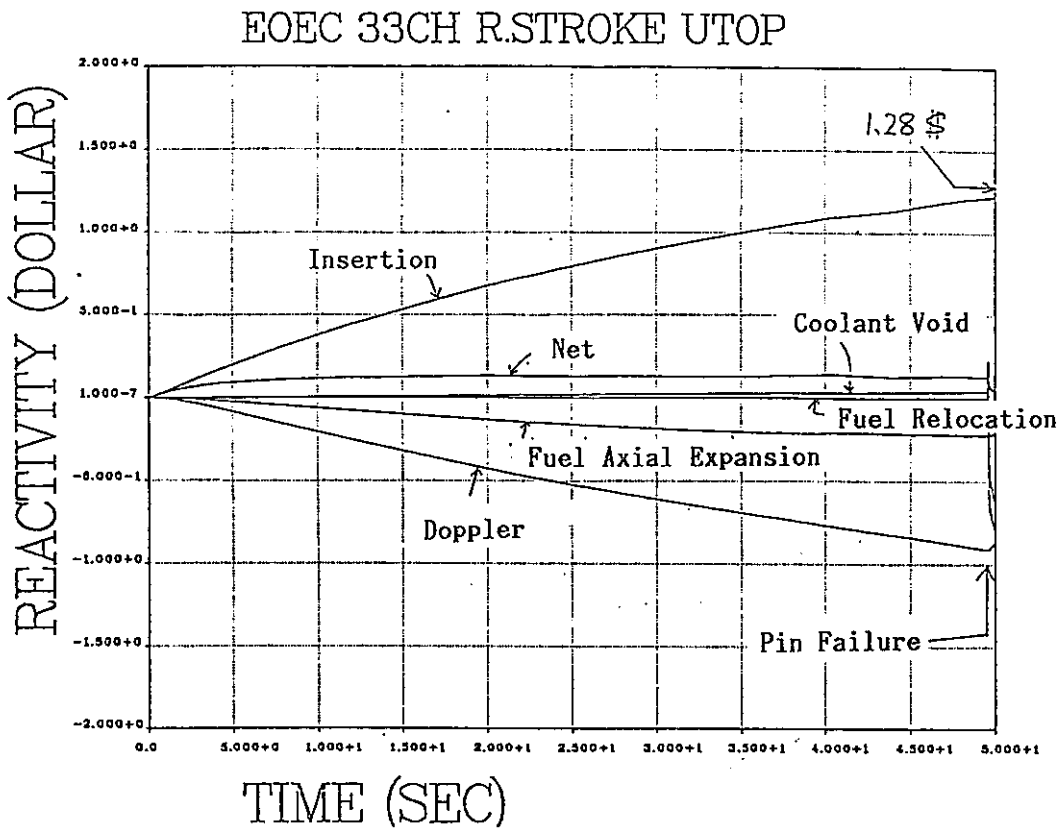


Fig. 2.4 Reactivity Balance on UTOP Accident Condition

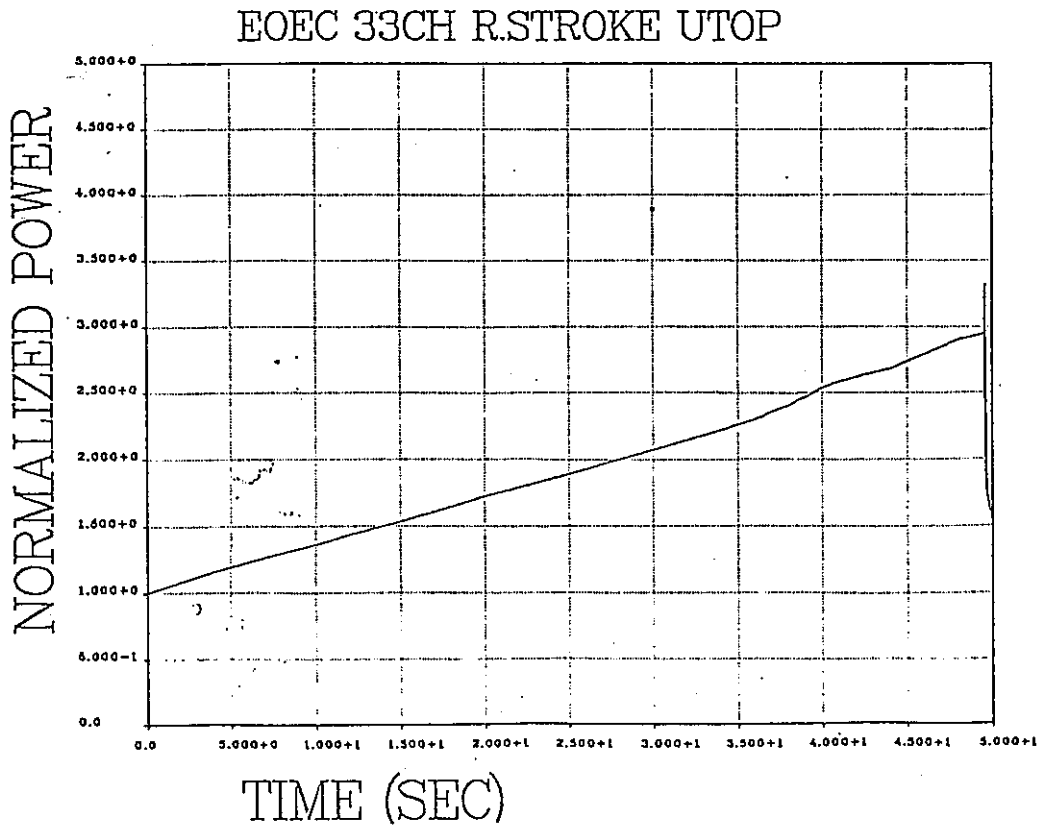


Fig. 2.5 Normalized Power History on UTOP Accident Condition

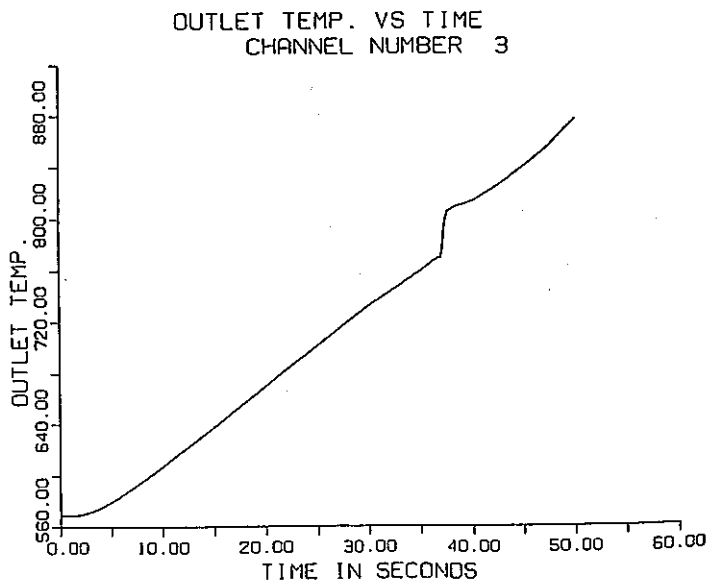
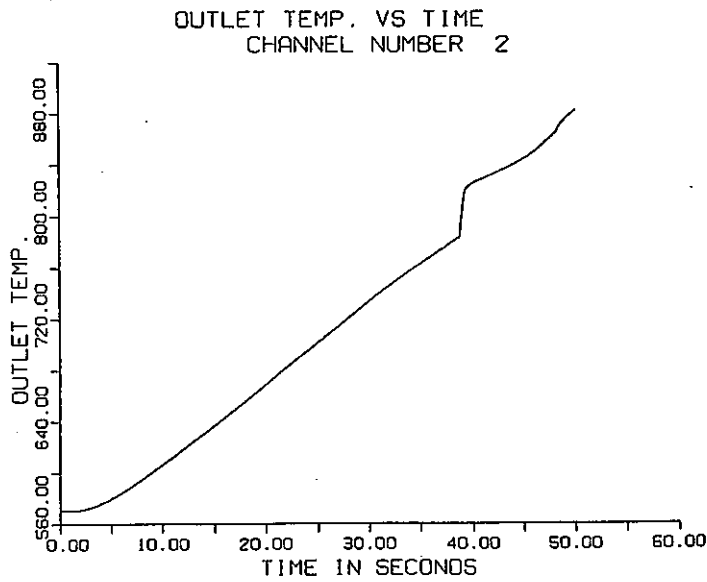
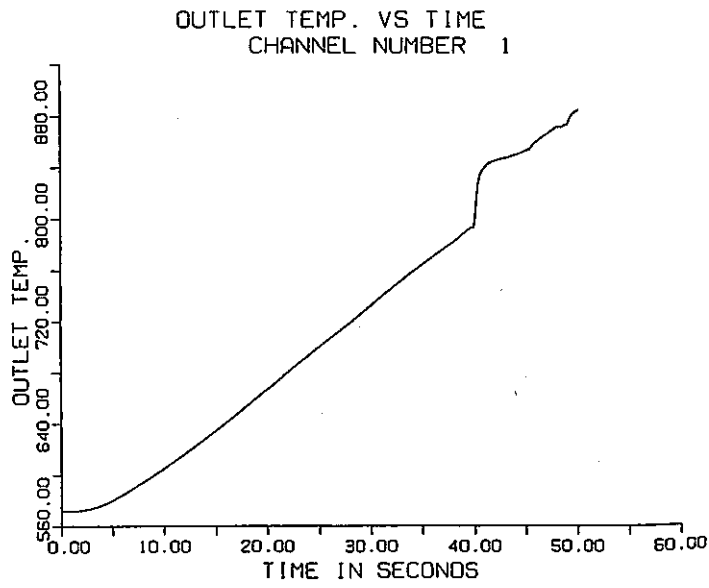


Fig. 2.6 Calculated History of Outlet Sodium Temperature of Core Fuel Assemblies

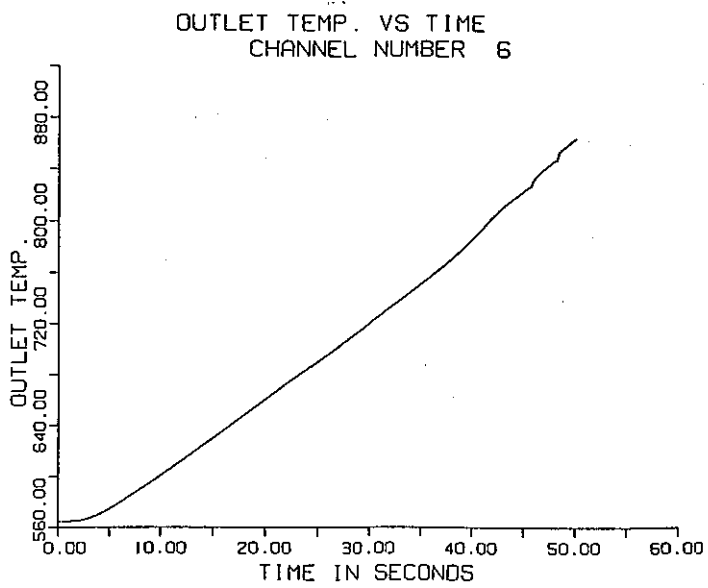
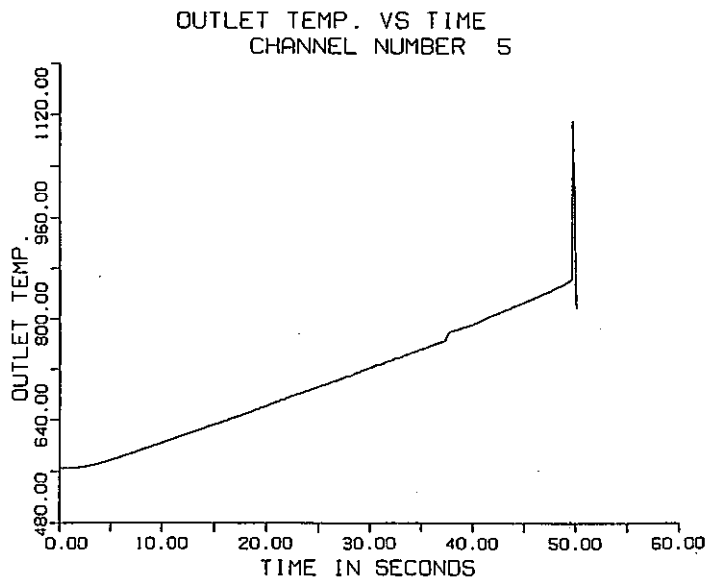
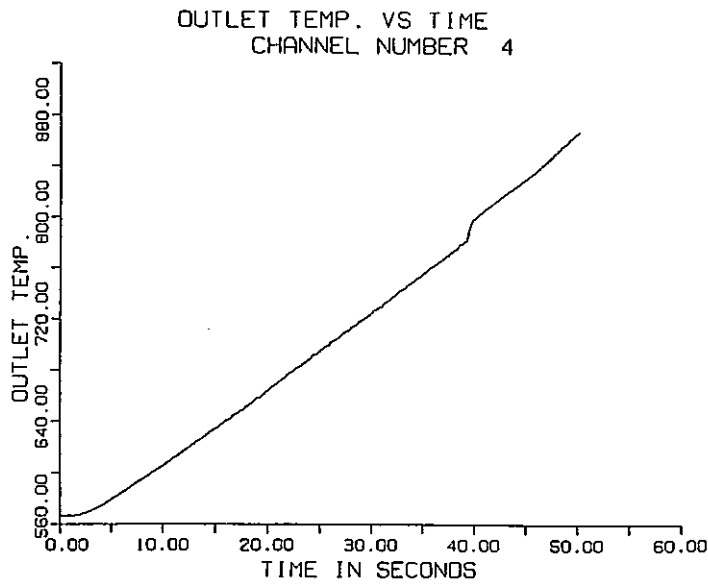
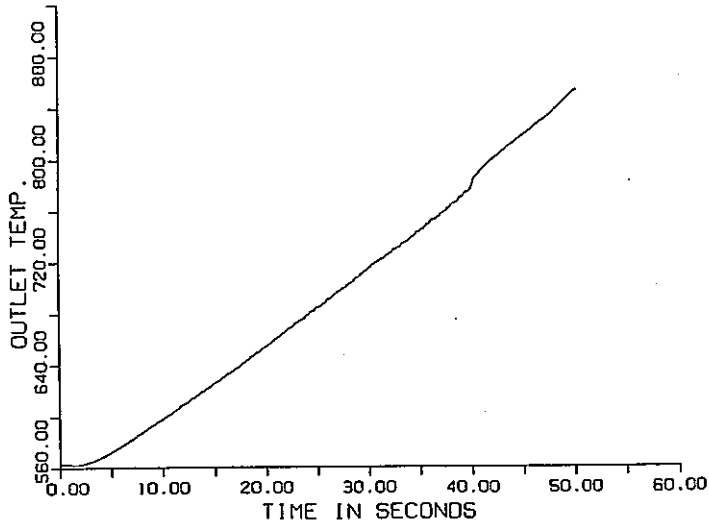
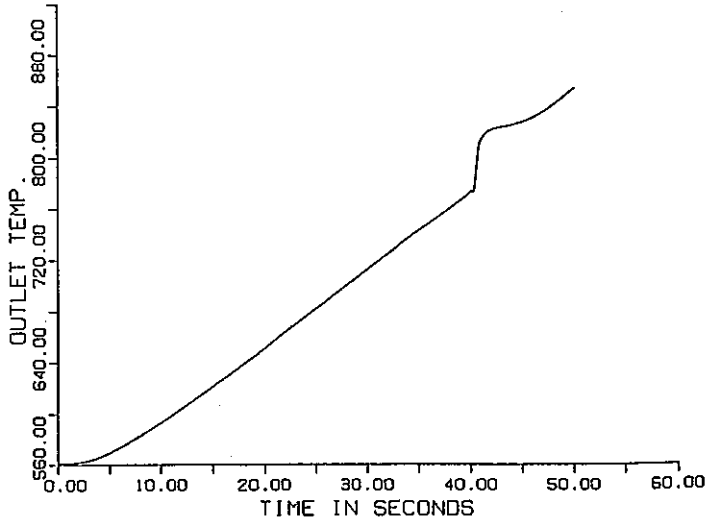


Fig. 2. 6 (Continued)

OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 7



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 8



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 9

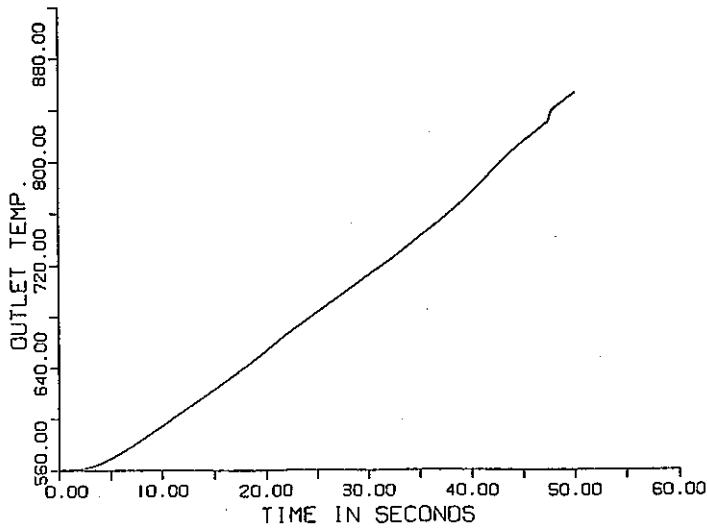
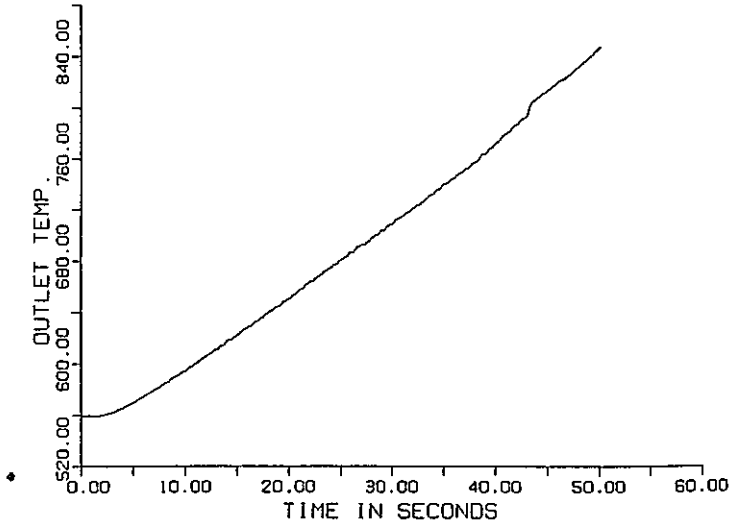
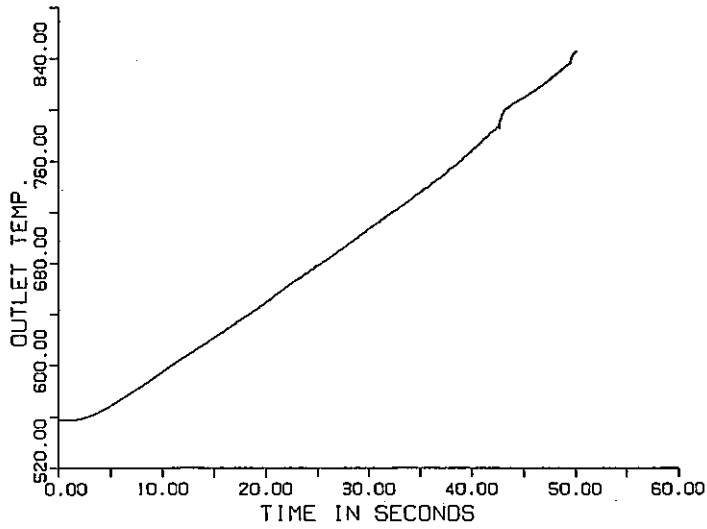


Fig. 2. 6 (Continued)

OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 10



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 11



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 12

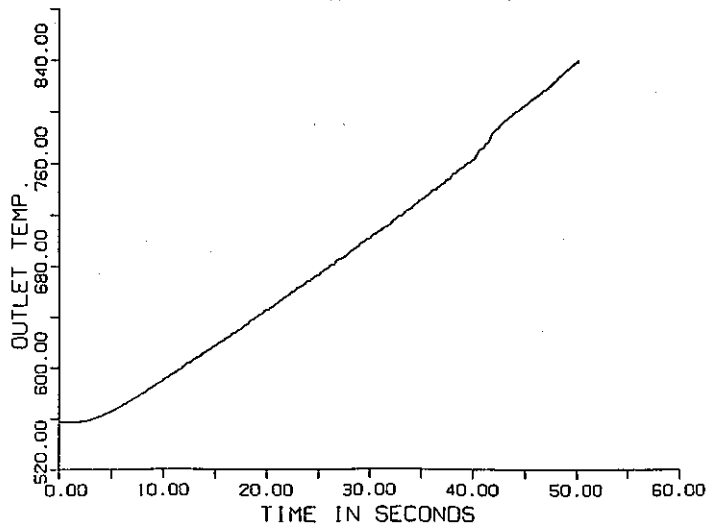


Fig. 2. 6 (Continued)

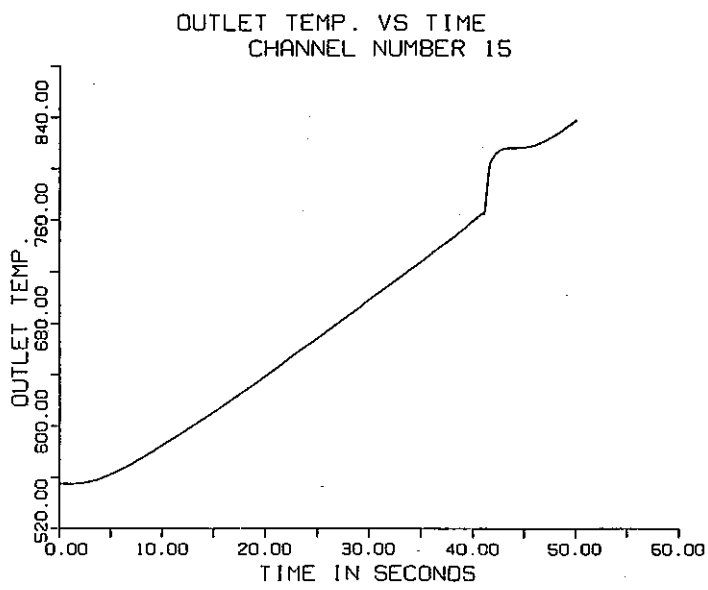
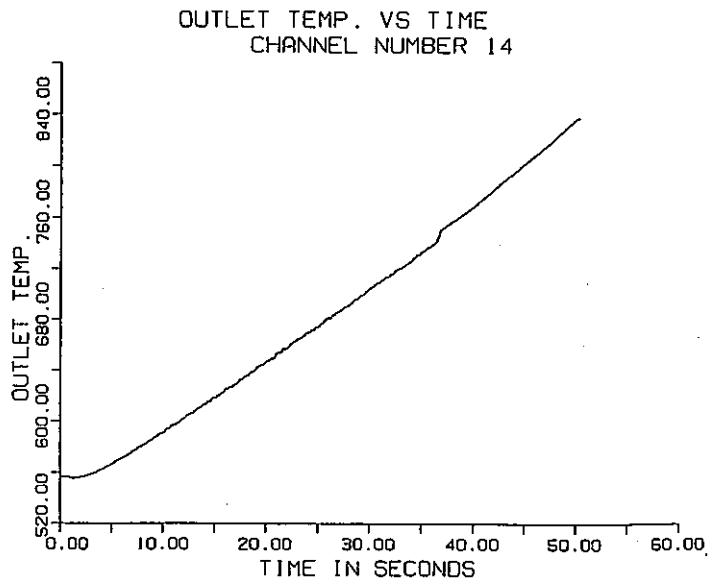
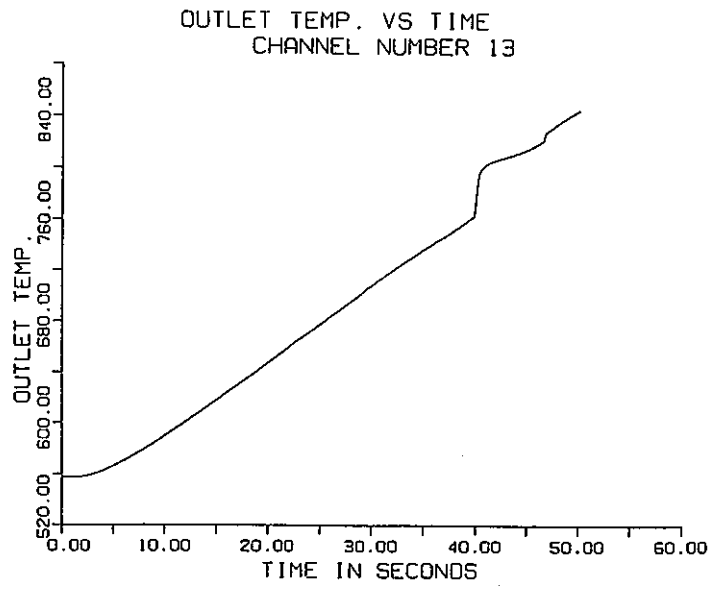


Fig. 2. 6 (Continued)

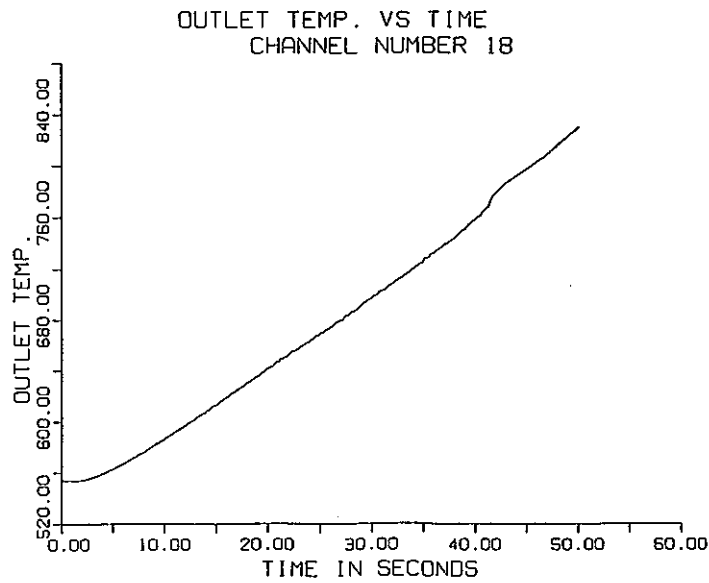
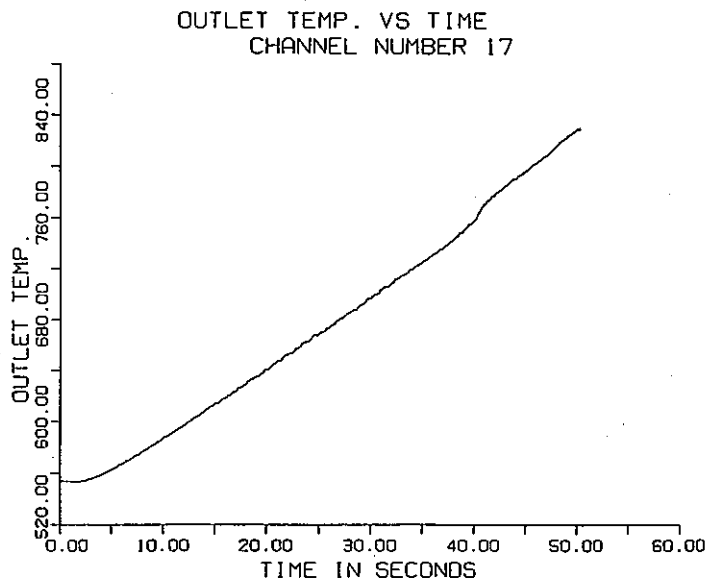
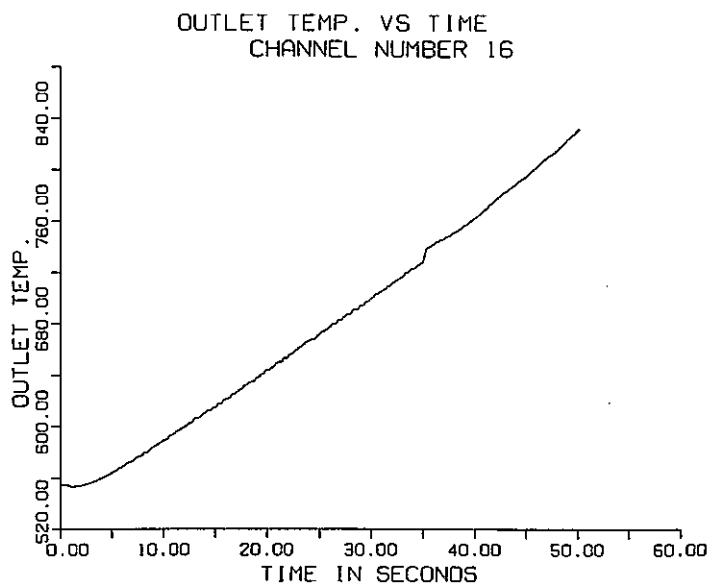
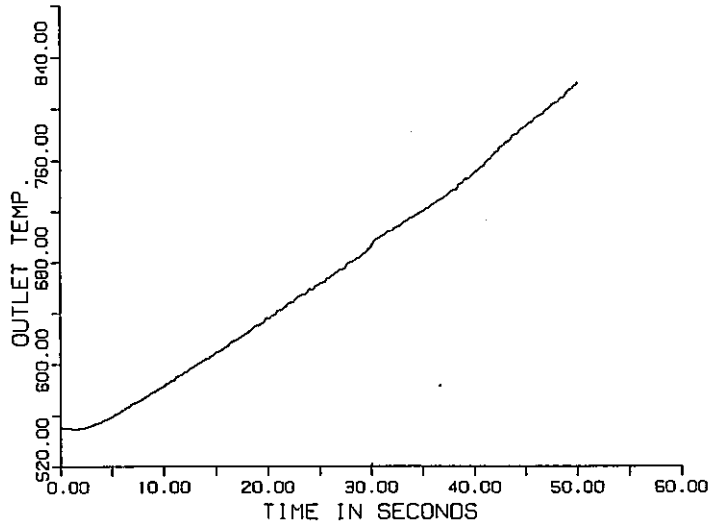


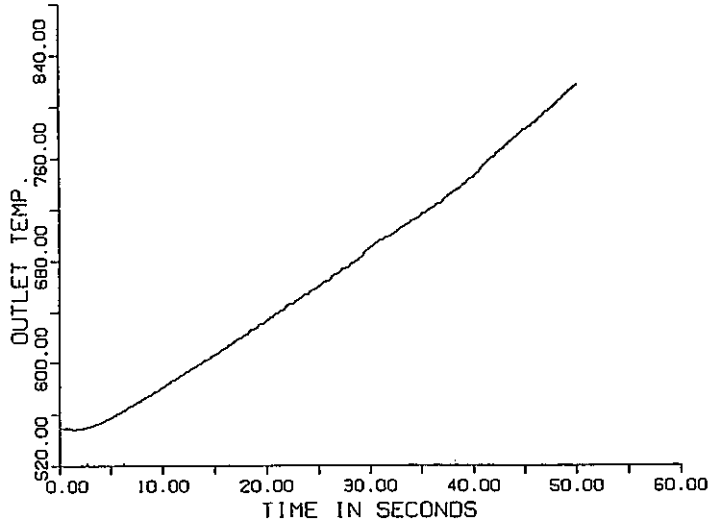
Fig. 2. 6 (Continued)



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 19



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 20



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 21

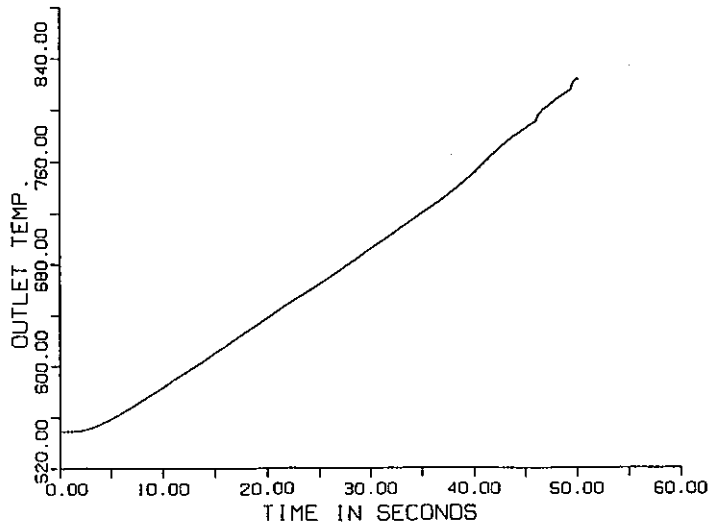
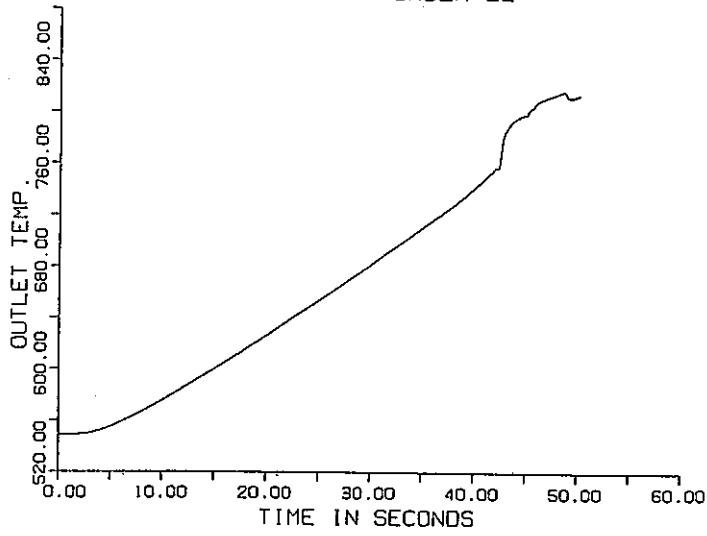
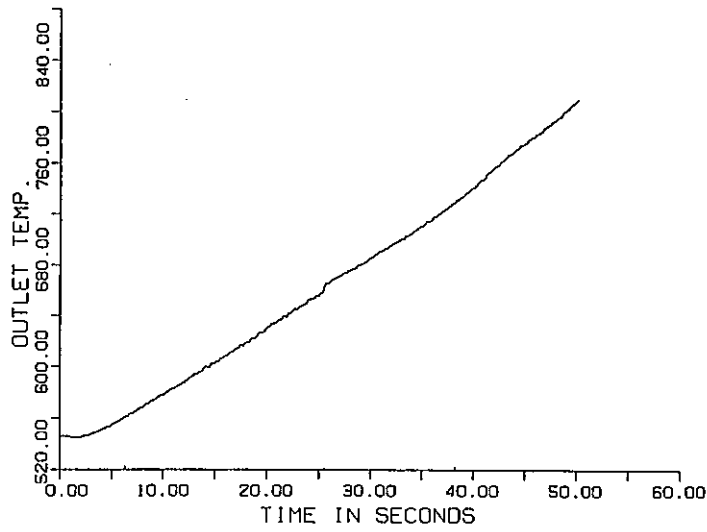


Fig. 2. 6 (Continued)

OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 22



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 23



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 24

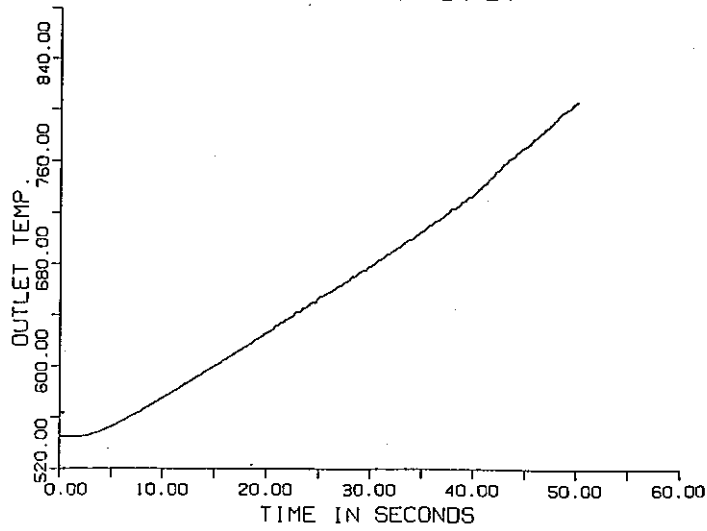
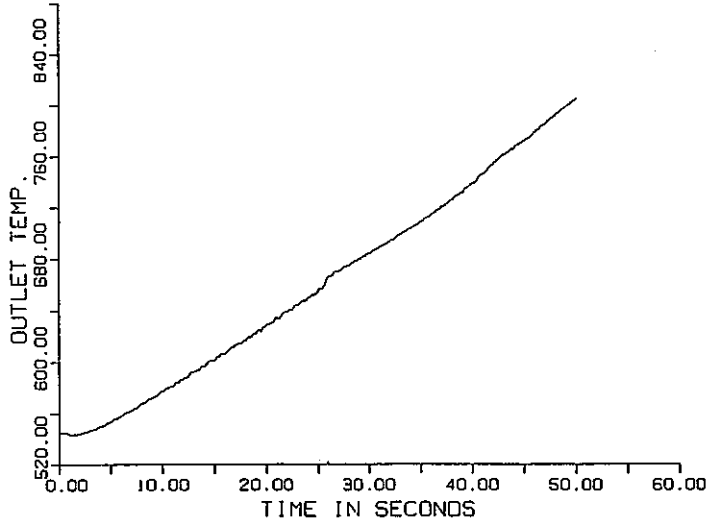
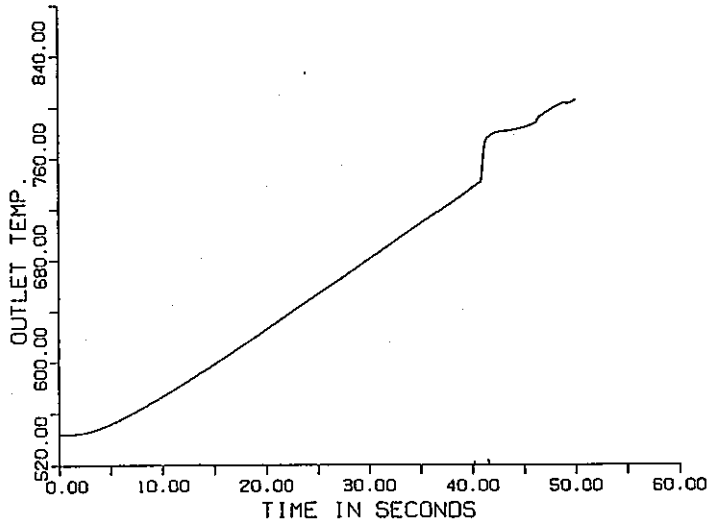


Fig. 2. 6 (Continued)

OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 25



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 26



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 27

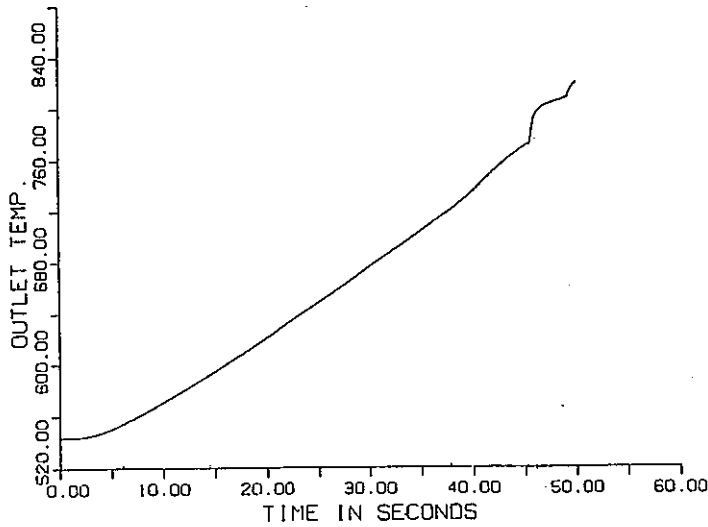
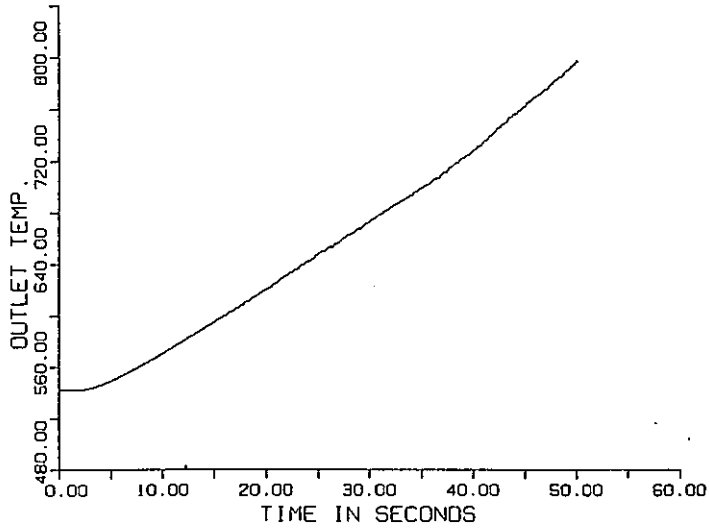
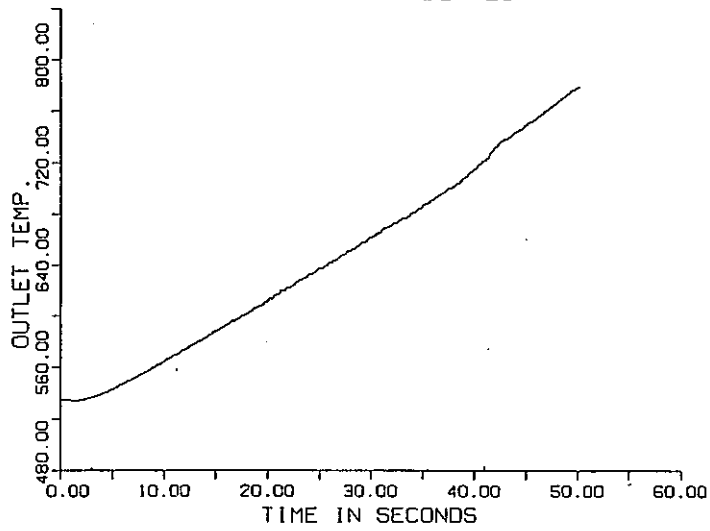


Fig. 2. 6 (Continued)

OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 28



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 29



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 30

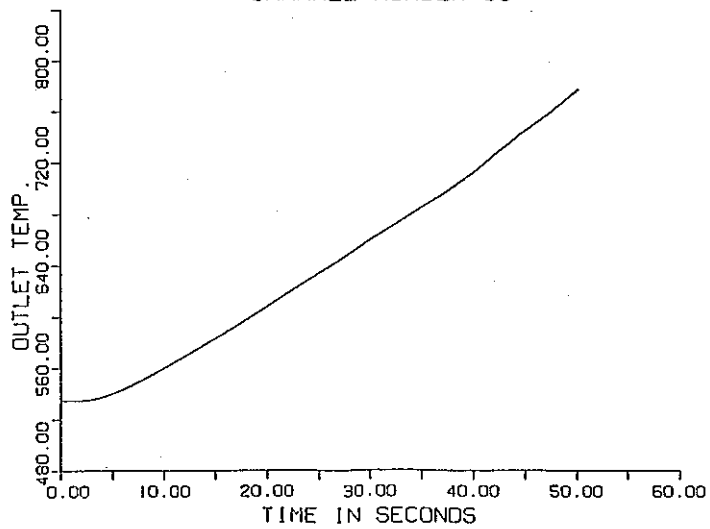
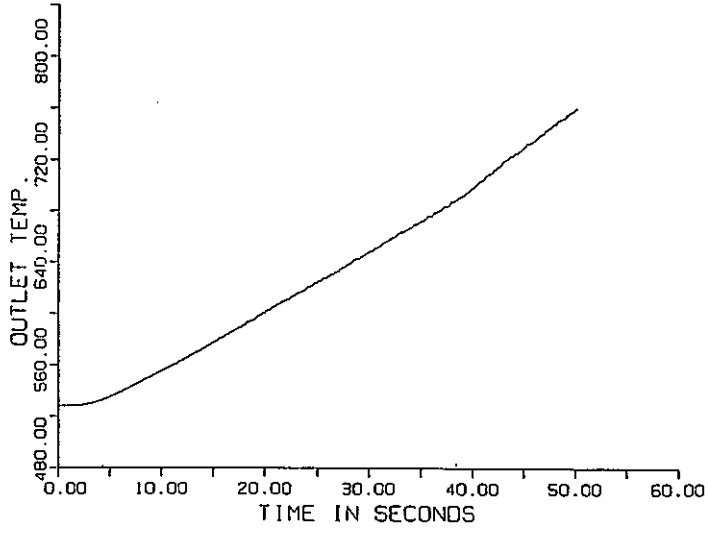
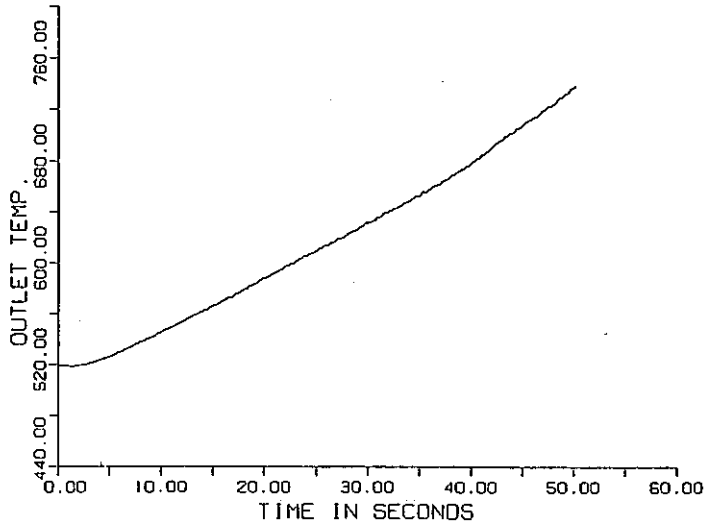


Fig. 2. 6 (Continued)

OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 31



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 32



OUTLET TEMP. VS TIME  
CHANNEL NUMBER 33

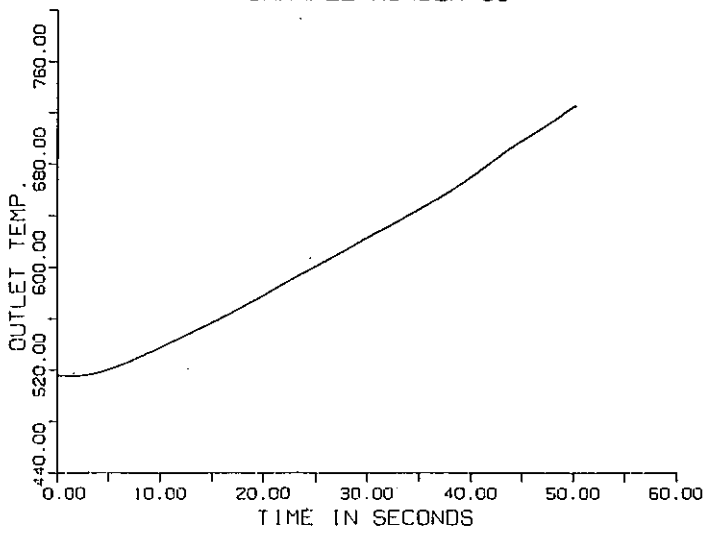


Fig. 2. 6 (Continued)

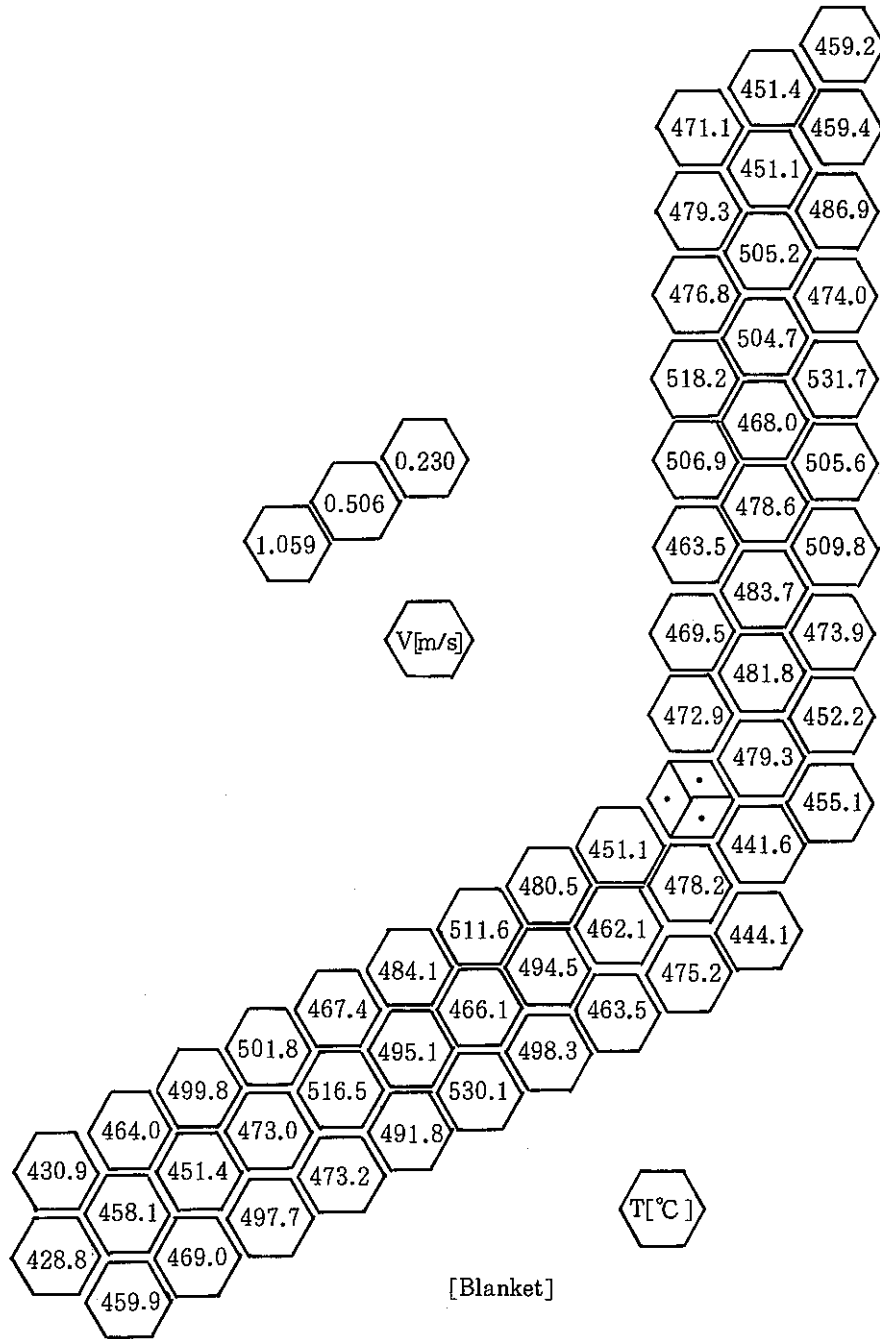


Fig. 2.7 Calculated Outlet Sodium Temperature of Blanket fuel Assemblies  
fuel Assemblies

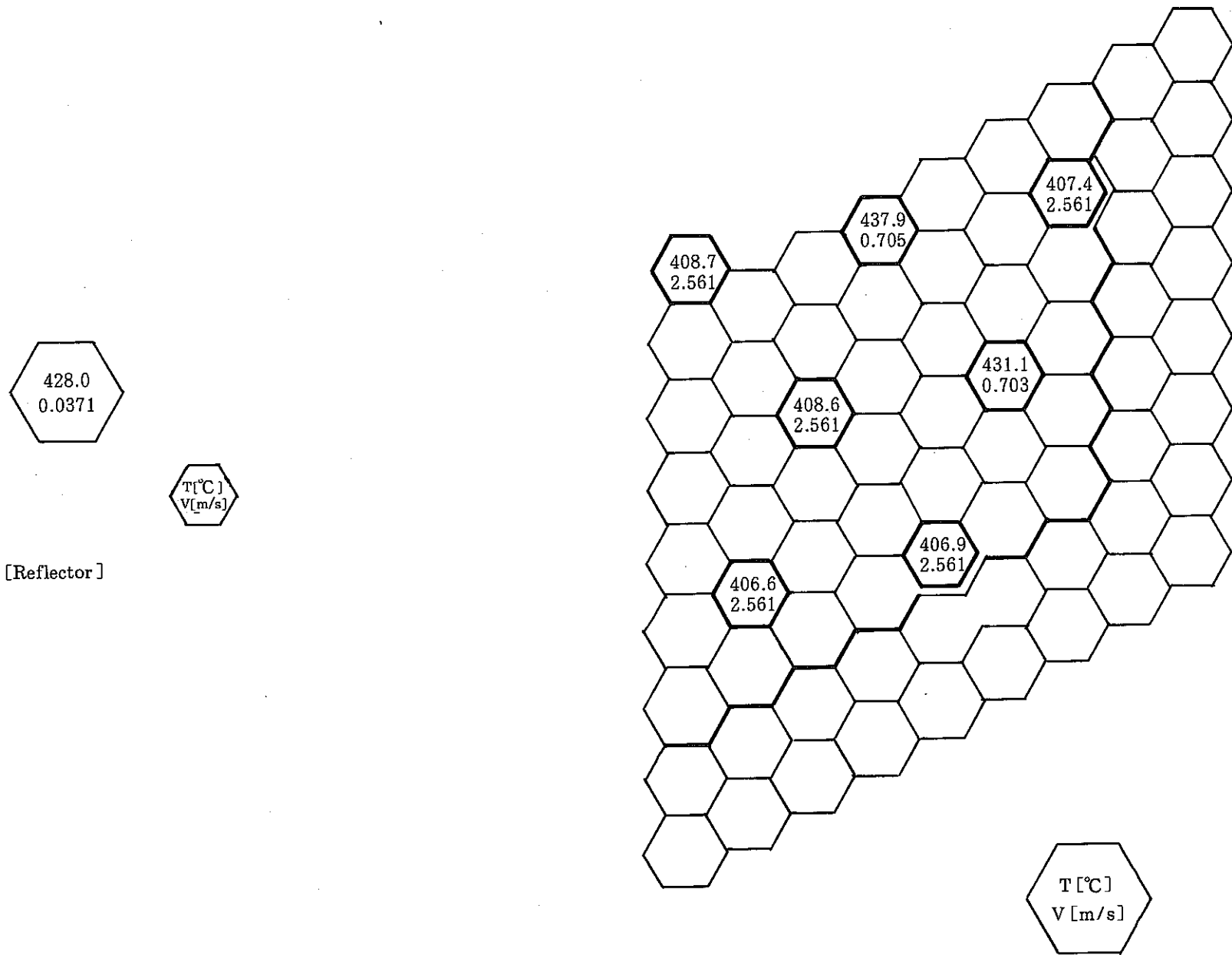


Fig. 2.8 Calculated Outlet Sodium Temperature of C/A and N/S Assemblies

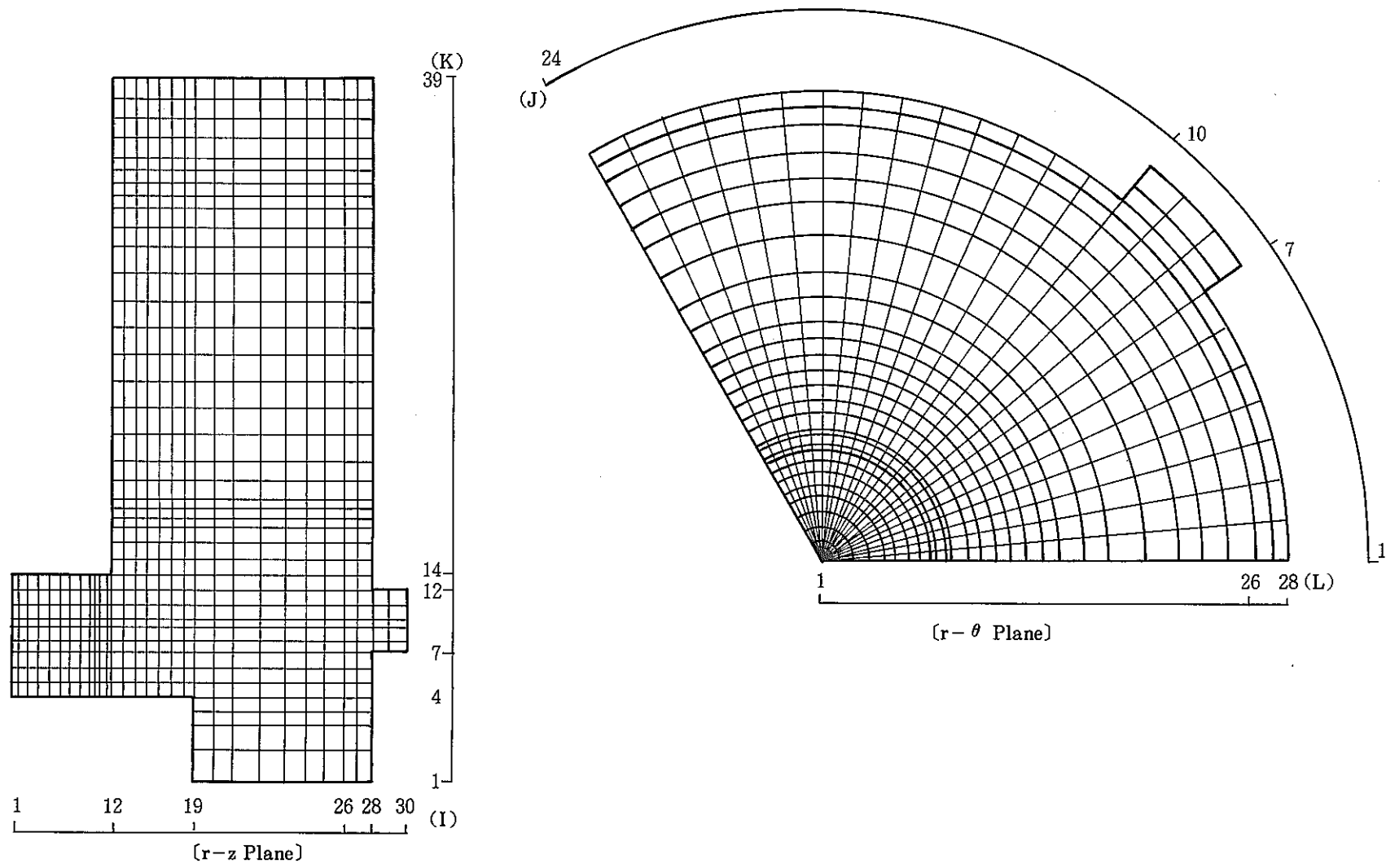


Fig. 2.9 Mesh Arrangement for UTOP Accident Analysis using AQUA





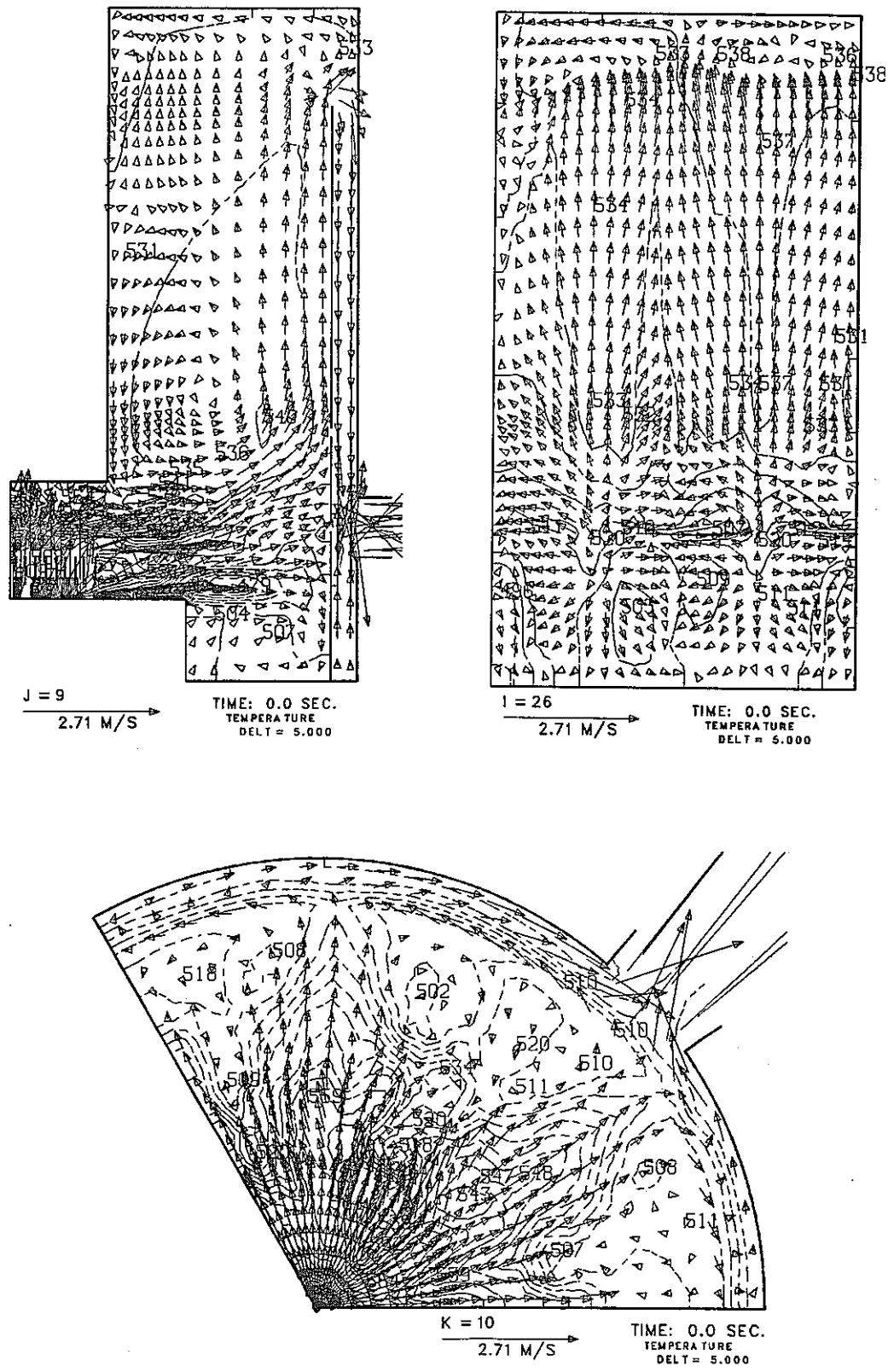


Fig. 2.11 Typical Velocity and Temperatuer Fields on Steady State Condition

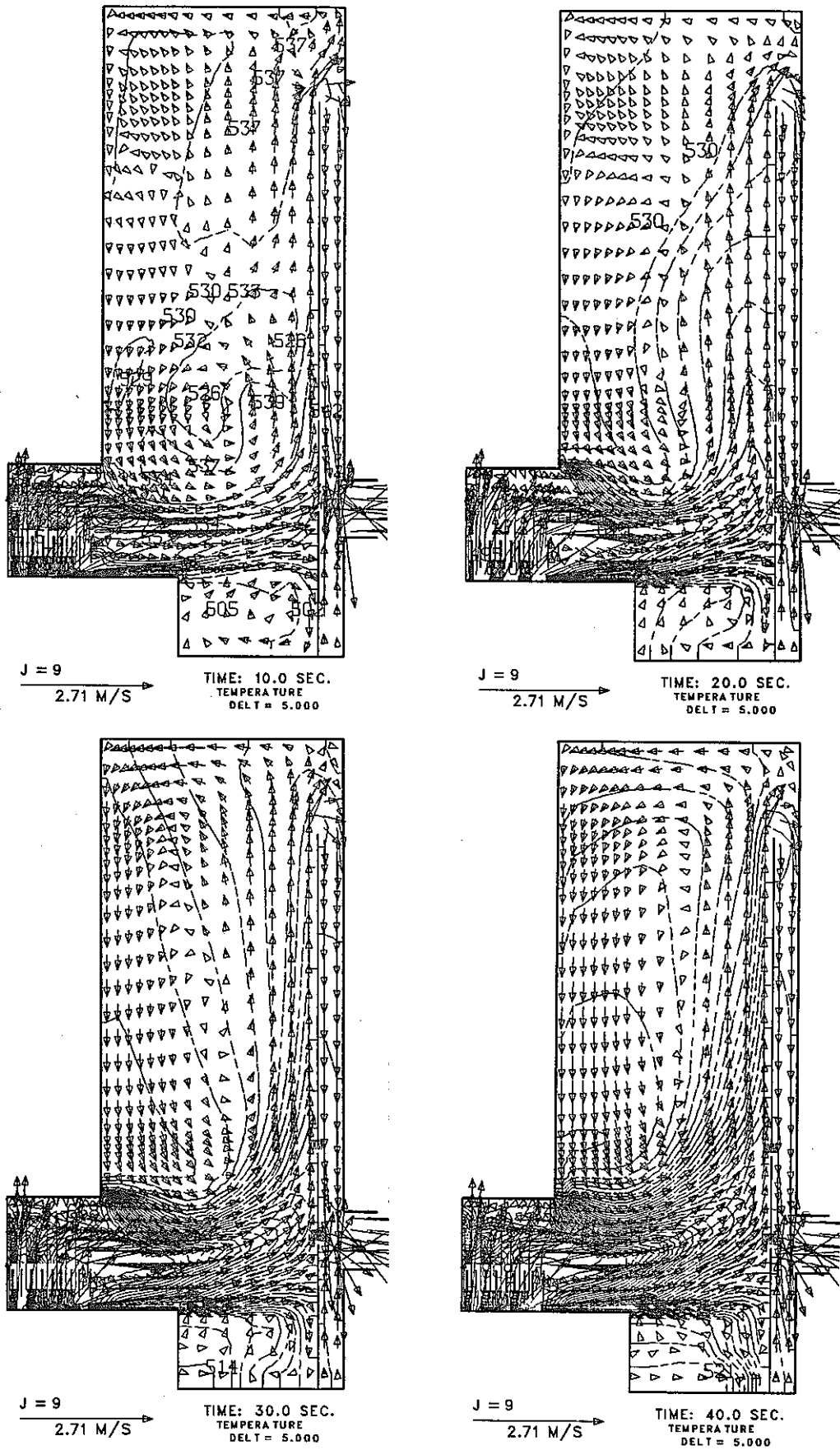


Fig. 2.12 Histoty of Velocity and Temperature Fields on Transient Calculation

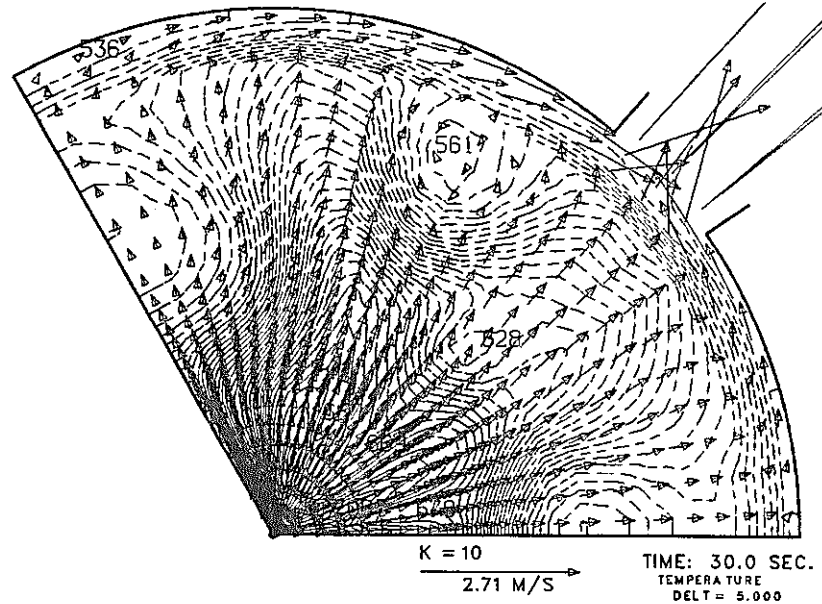
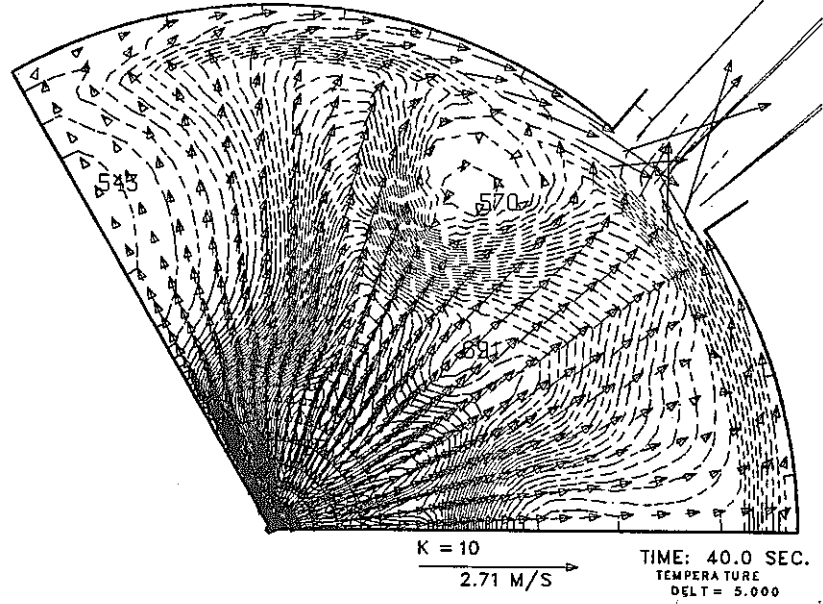
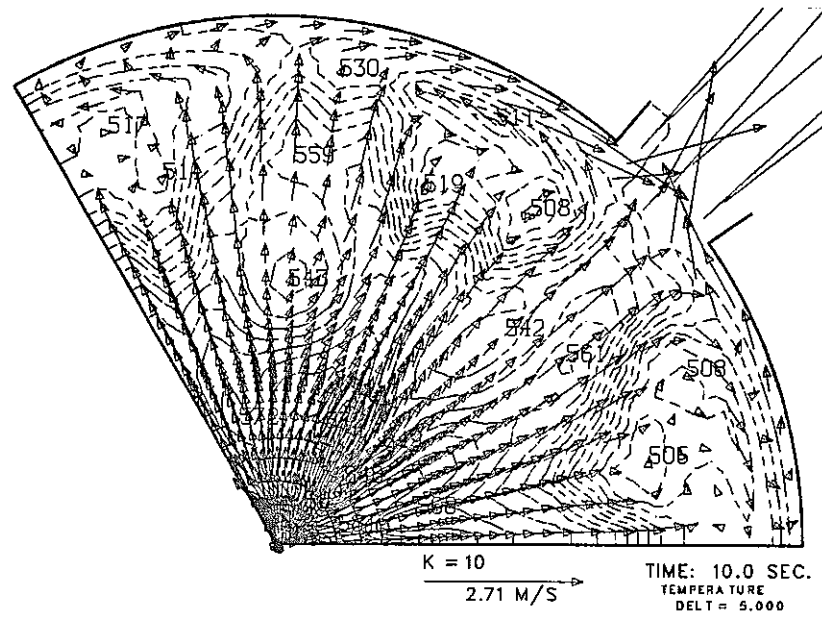
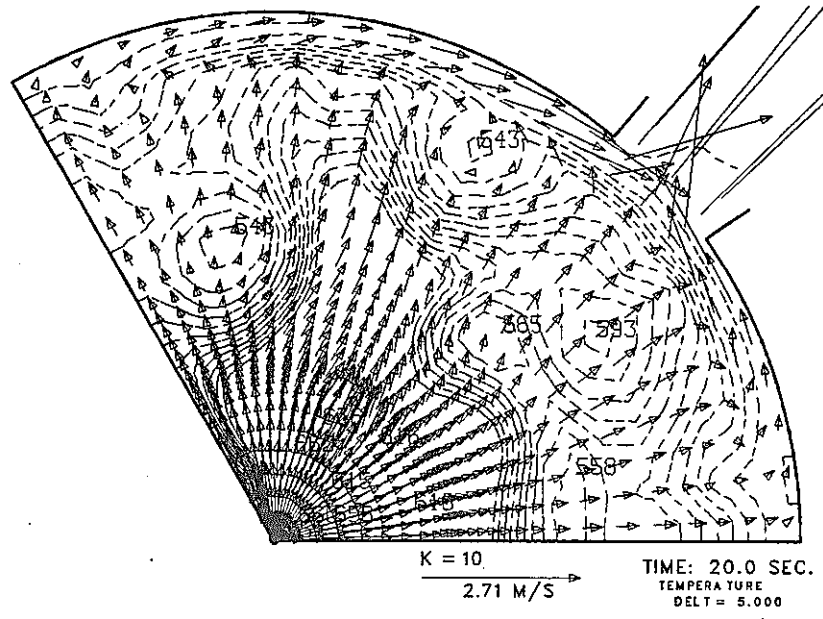
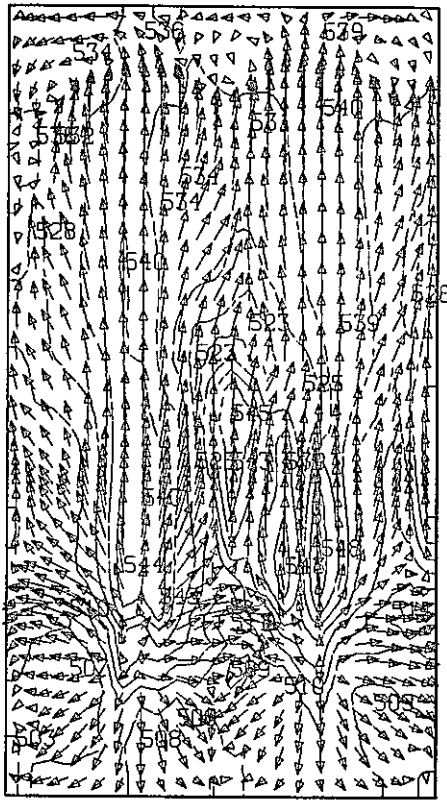
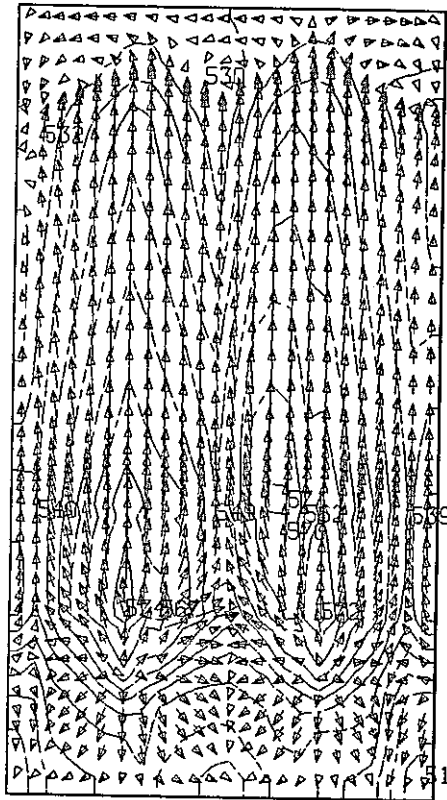


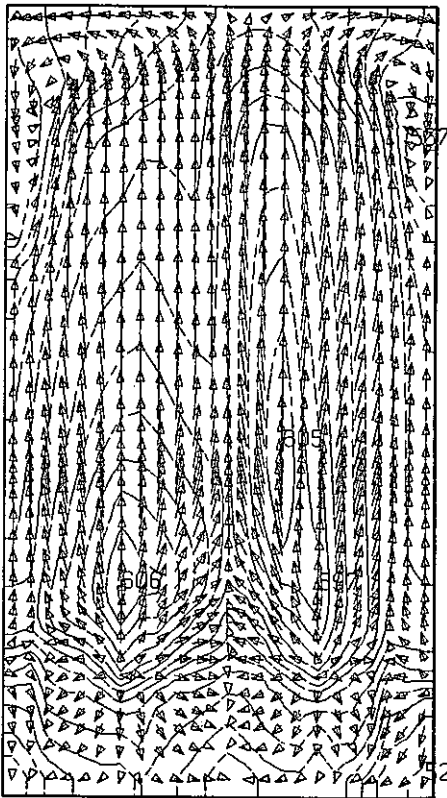
Fig. 2.12(Continued)



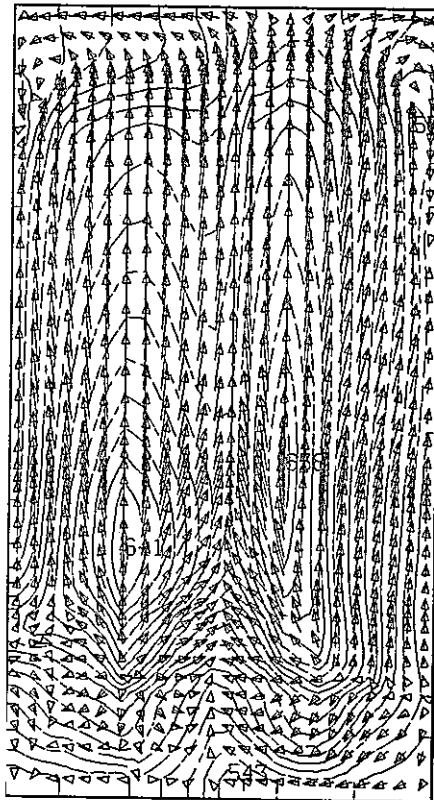
I = 26  
2.71 M/S  
TIME: 10.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DELTA = 5.000



I = 26  
2.71 M/S  
TIME: 20.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DELTA = 5.000



I = 26  
2.71 M/S  
TIME: 30.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DELTA = 5.000



I = 26  
2.71 M/S  
TIME: 40.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DELTA = 5.000

Fig. 2.12(Continued)

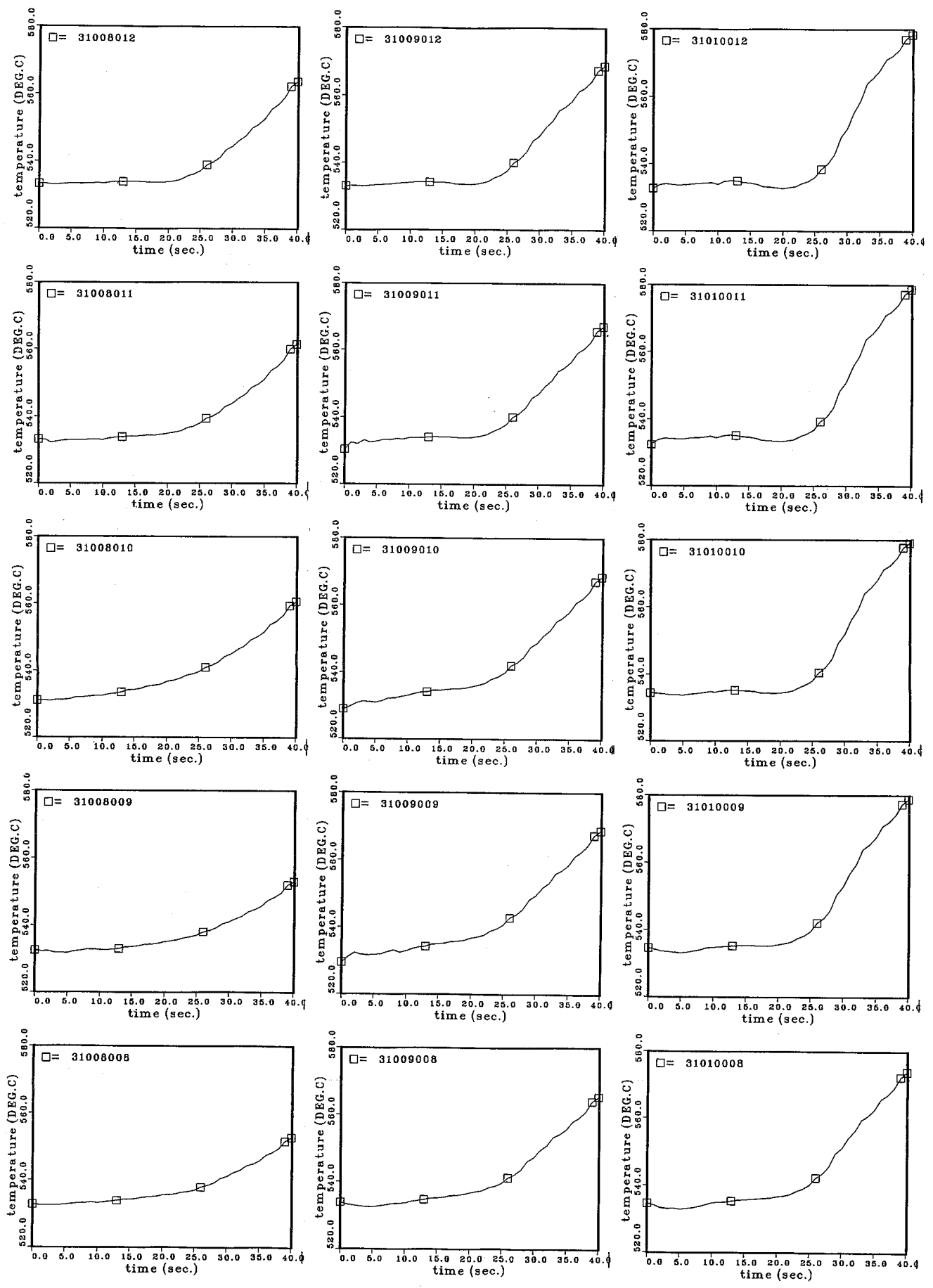


Fig. 2.13 Calculated Temperature Transients at Outlat Nozzle of Reactor Vessel

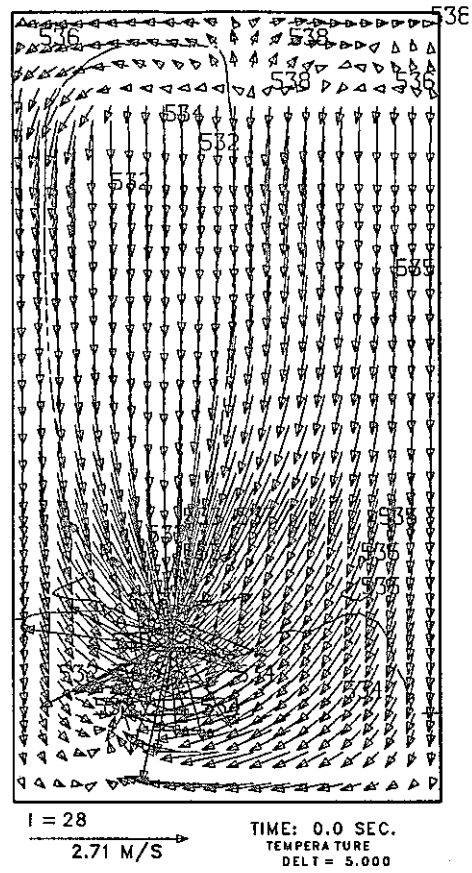


Fig. 2.14 Typical Velocity and Temperature Fields in the Annulus

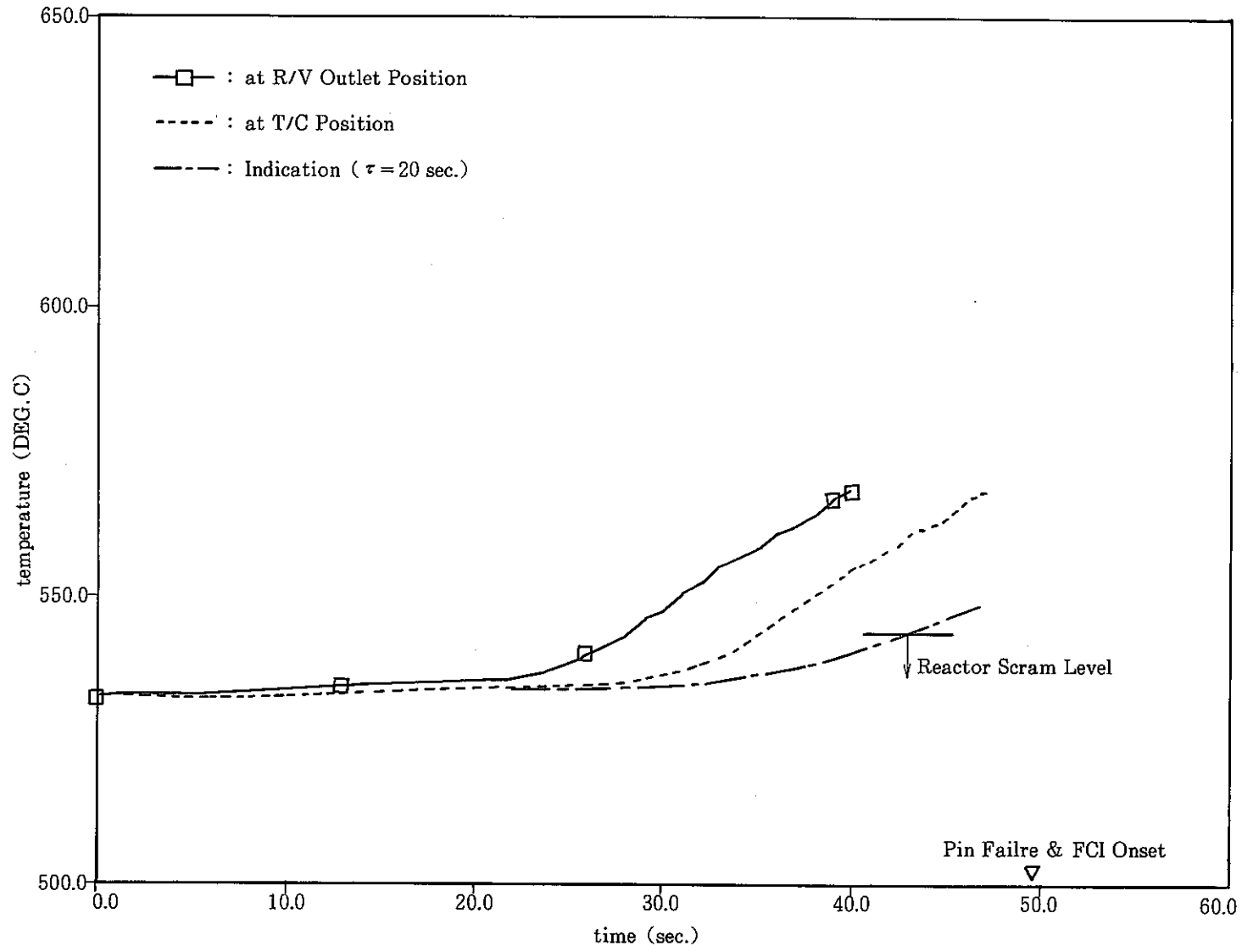


Fig. 2.15 Temperature Transients at Thermocouple of Reactor Outlet on UTOP



FCI Onset	Reactor Scram by DN Detector	1st Row Pin Failure due to Diameter increase by FCCI	Reactor Scram by DN Detector	2nd Row Pin Failure due to Diameter increase by FCCI	Accident Category
-----------	------------------------------	--	------------------------------	--	-------------------

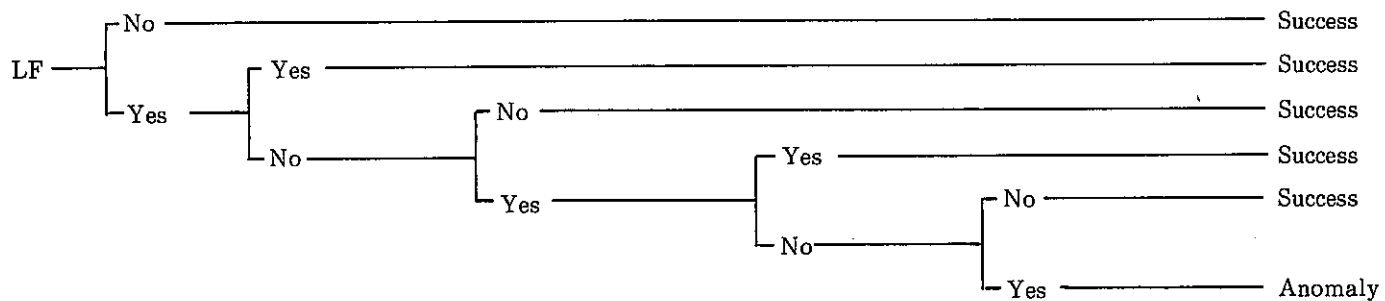


Fig. 3.1 Event Tree of Fuel Pin Failure Accident

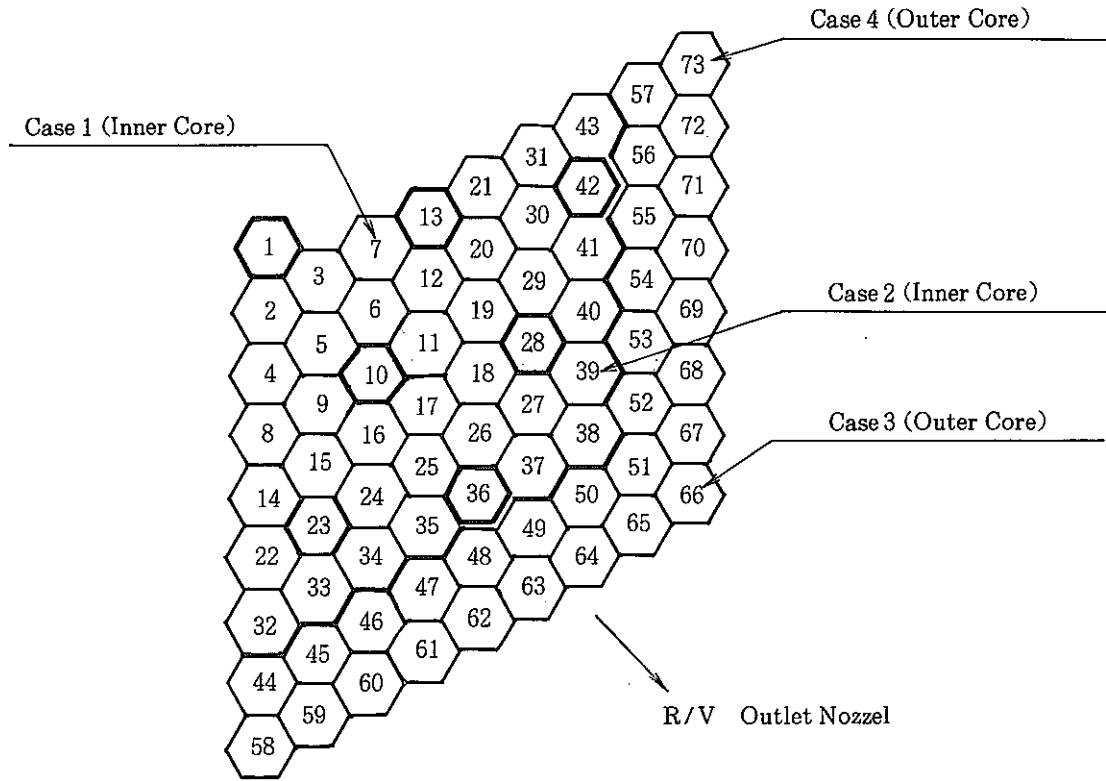


Fig. 3.2 Calculational Casses of Fuel Pin Failure Accident

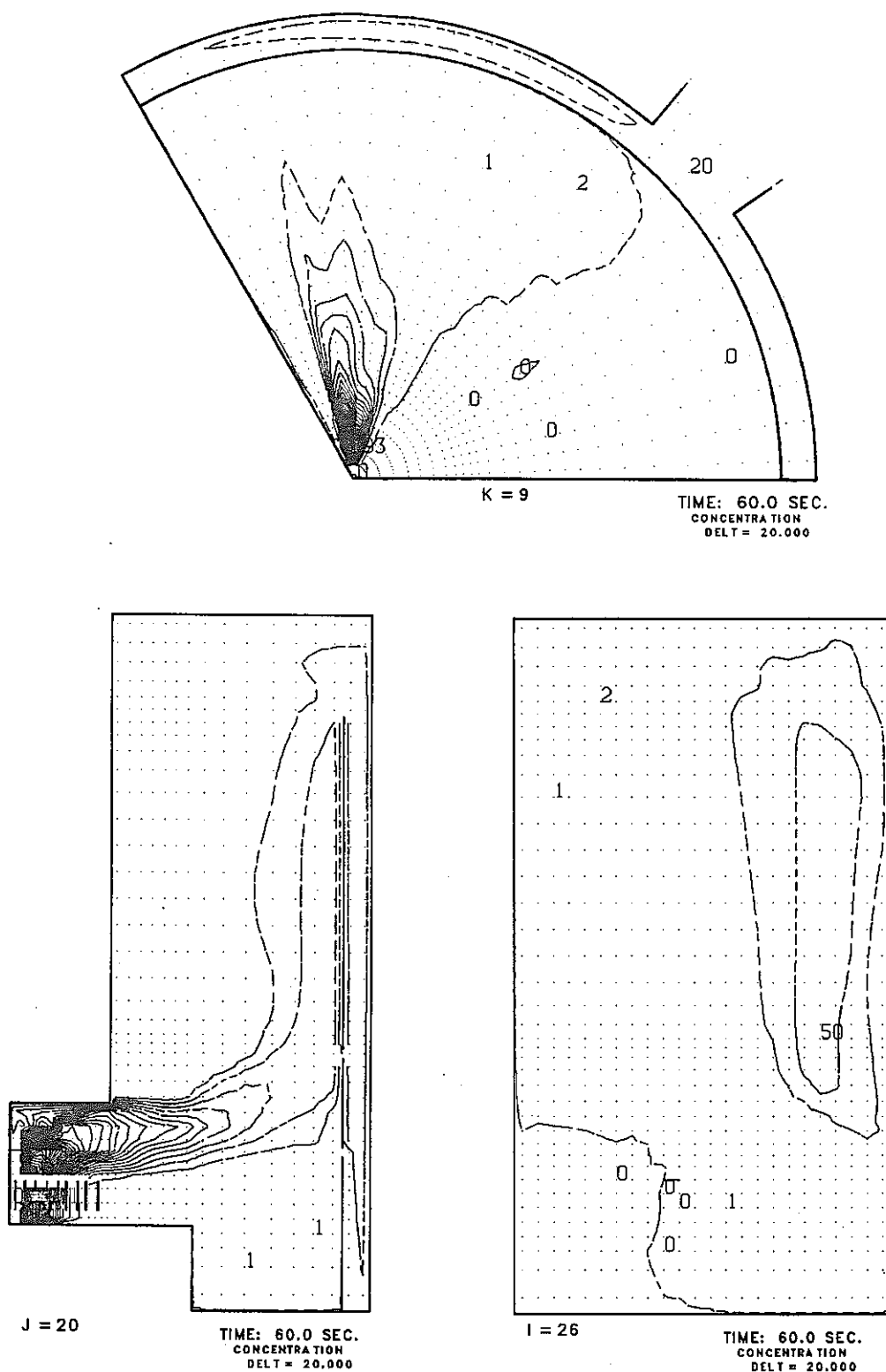


Fig. 3.3 Typical DN Concentration Fields on Case 1 of LF Analyses

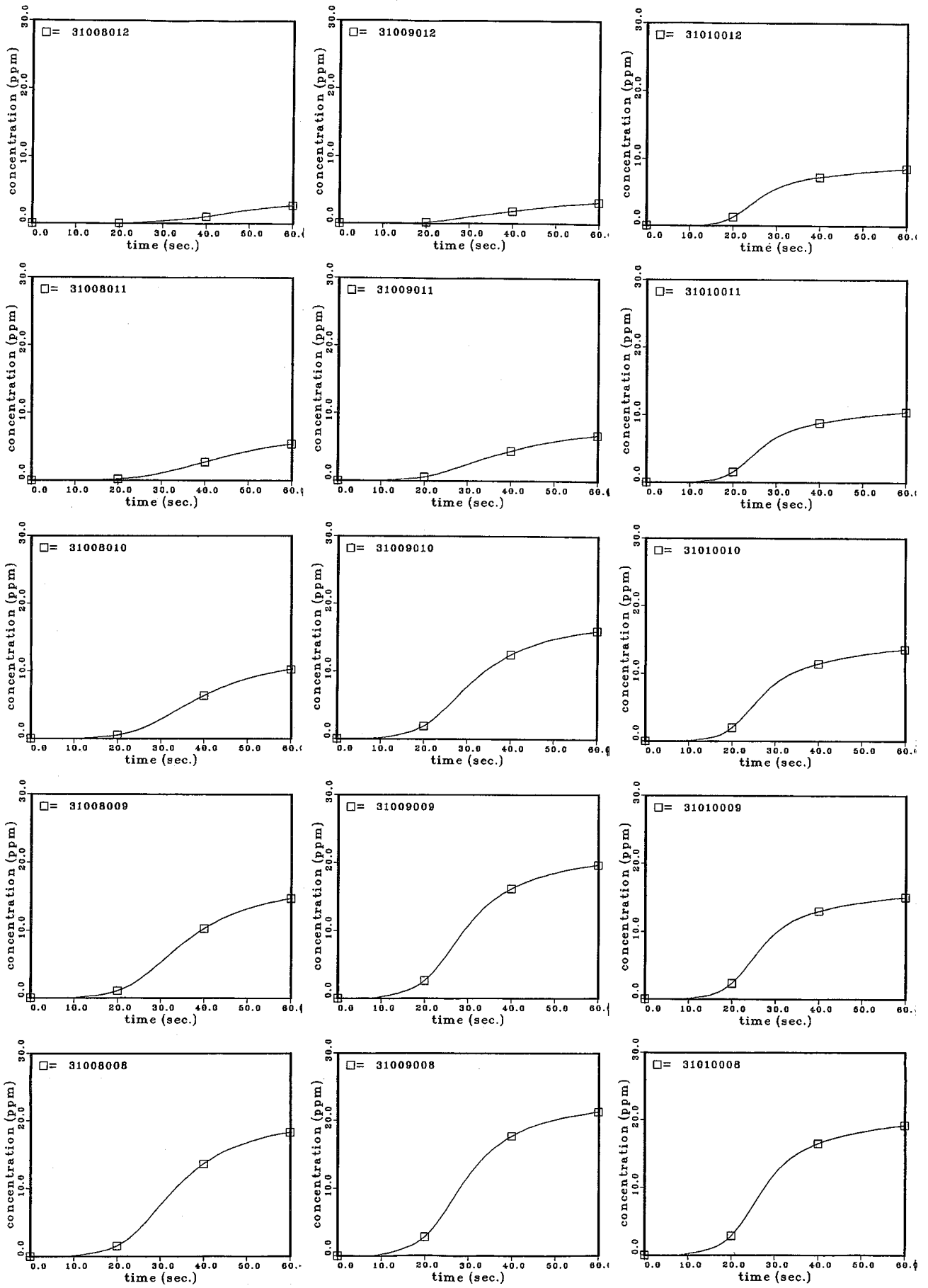


Fig. 3.4 Calculated DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-1 Condition

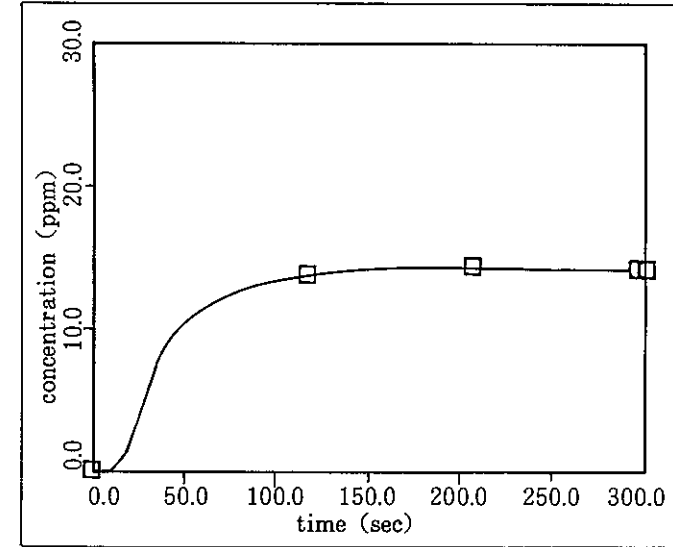
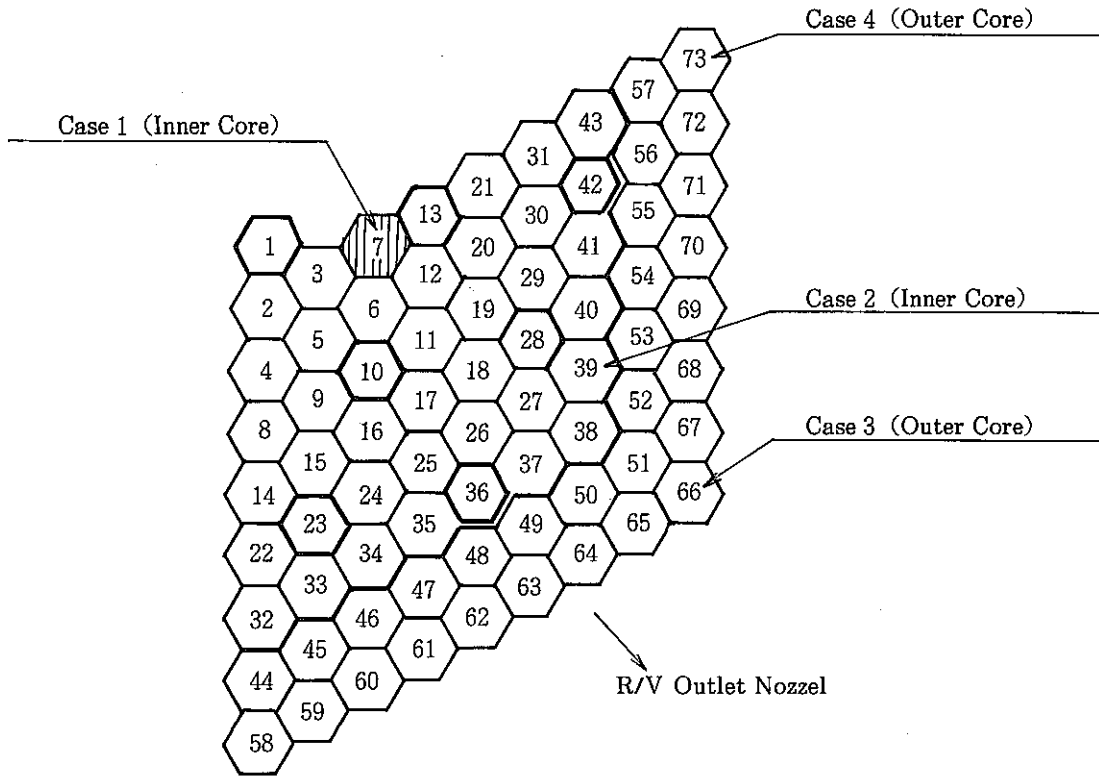


Fig. 3.5 Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzle Vessel under Case-2 Condition

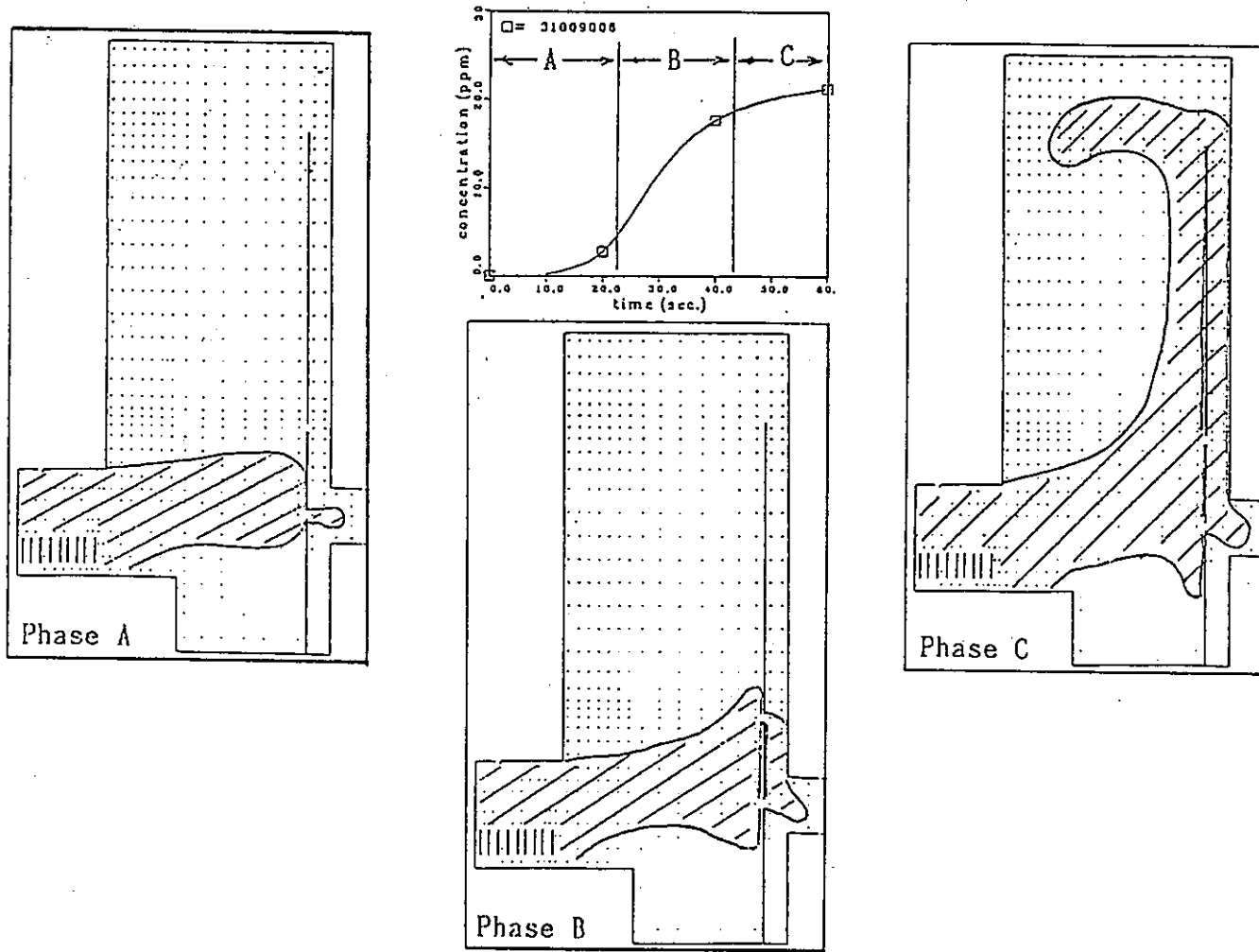


Fig. 3.6 Illustration of DN Concentration Transport in Upper Plenum

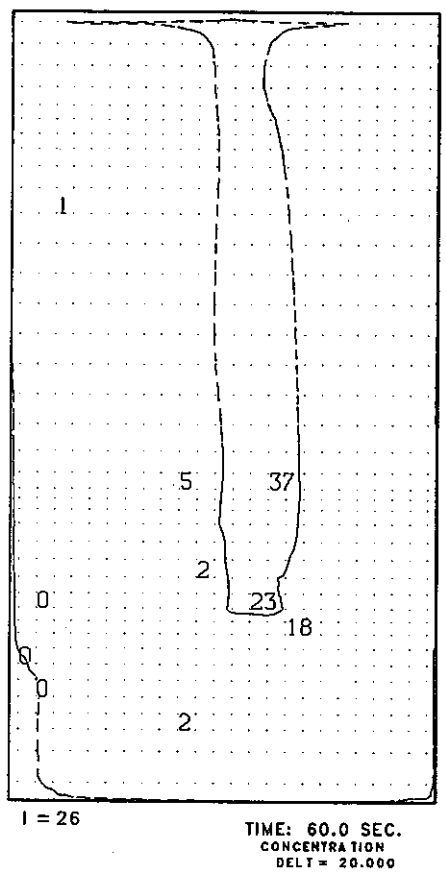
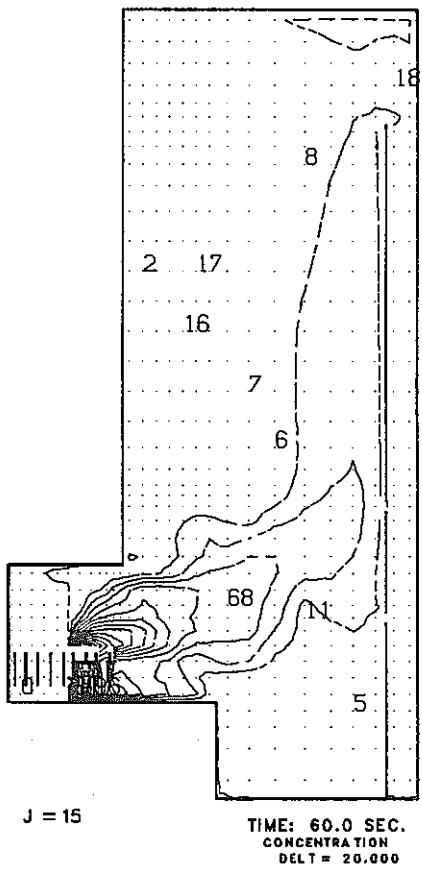
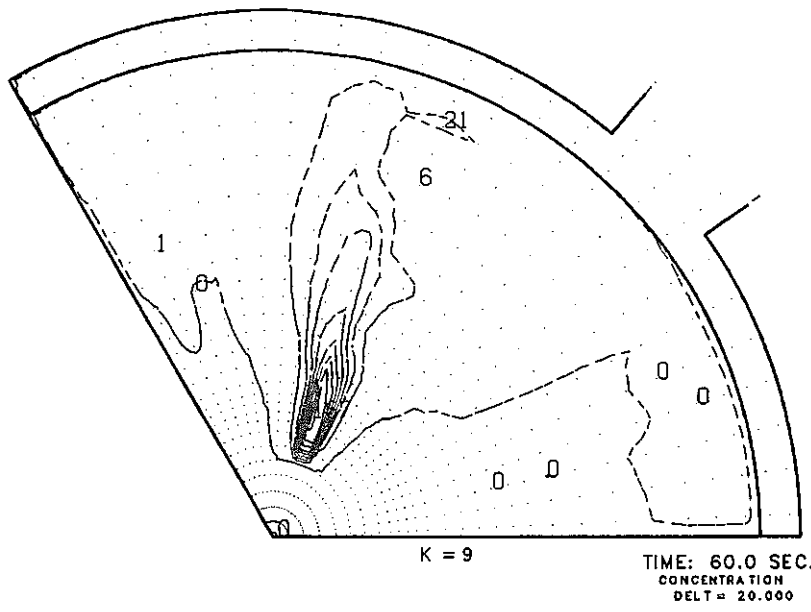


Fig. 3. 7 Typical DN Concentration Fields on Case 2 of LF Analyses

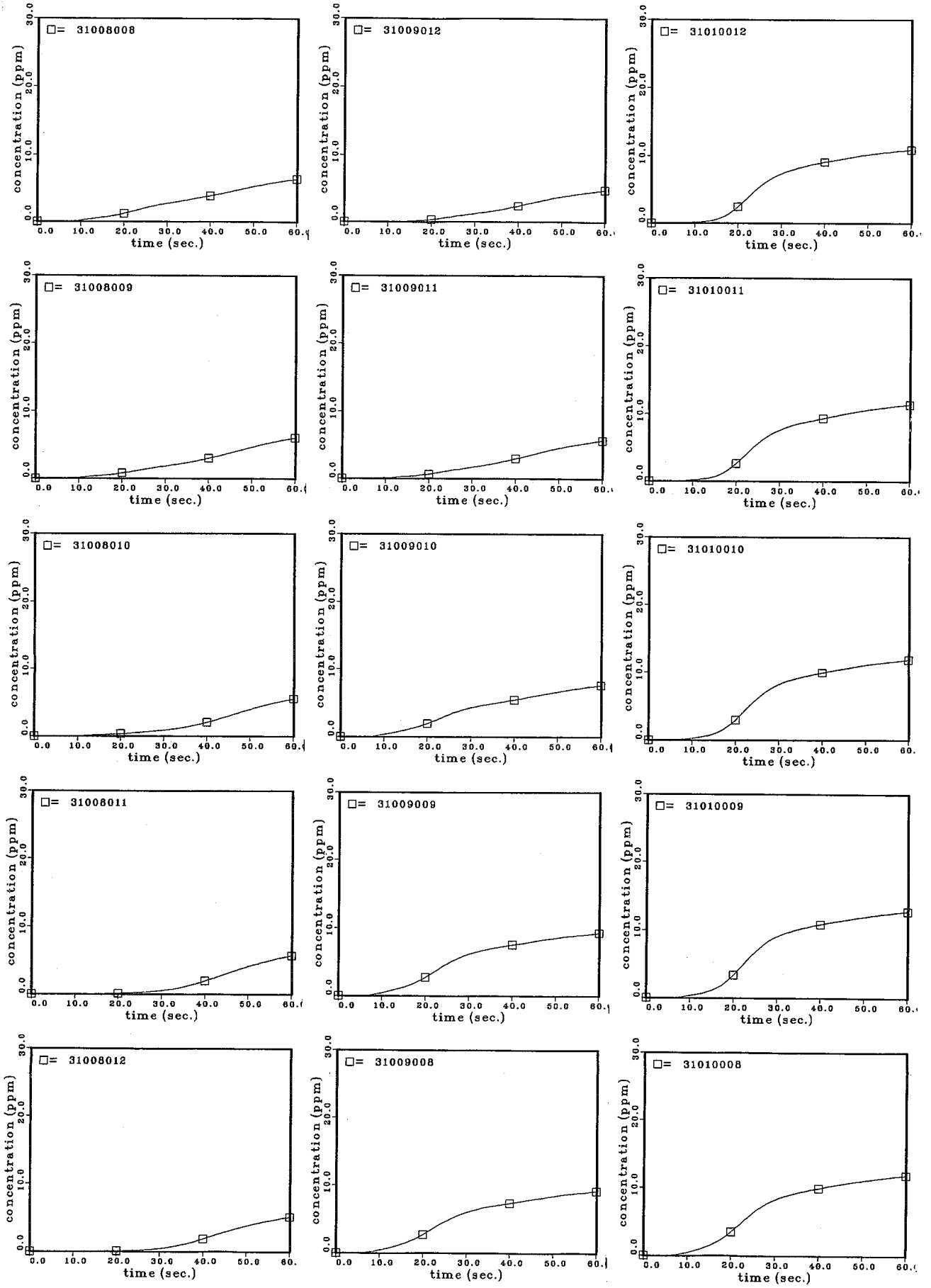


Fig. 3.8 Calculated DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-2 Condition



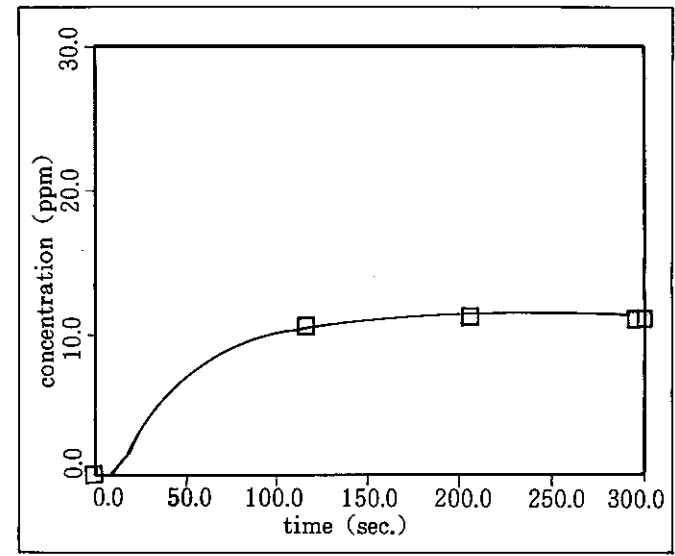
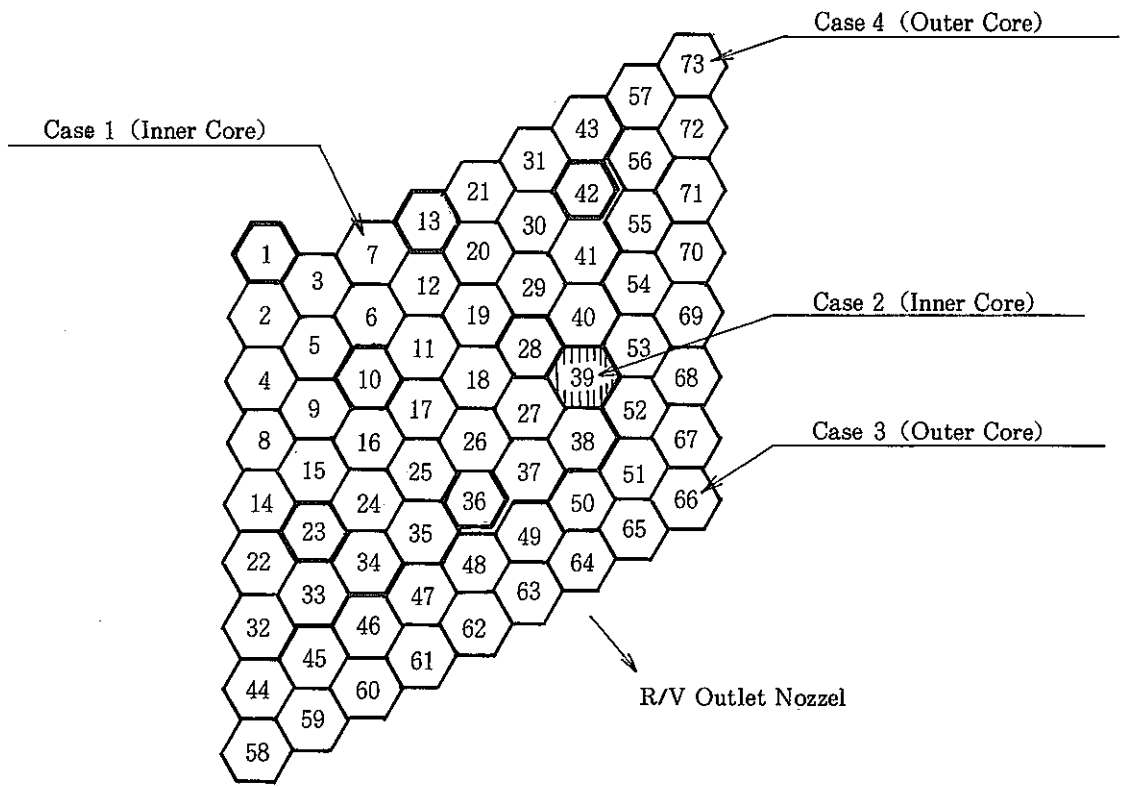


Fig. 3.9 Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzel of Reactor Vessel under Case-2 Condition

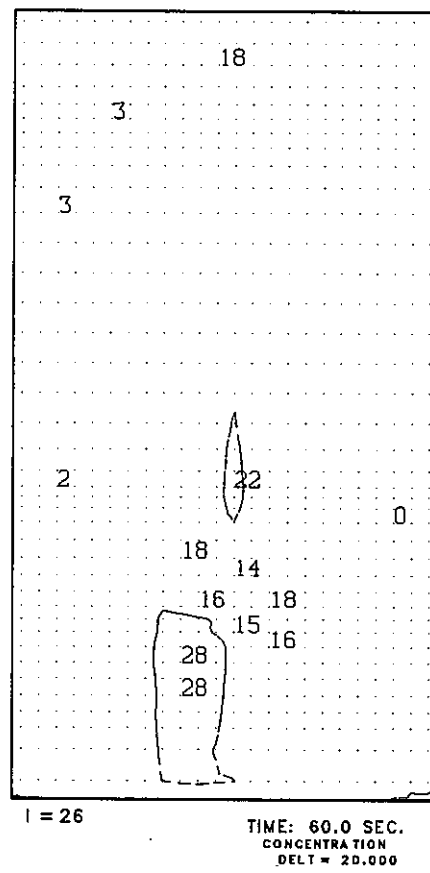
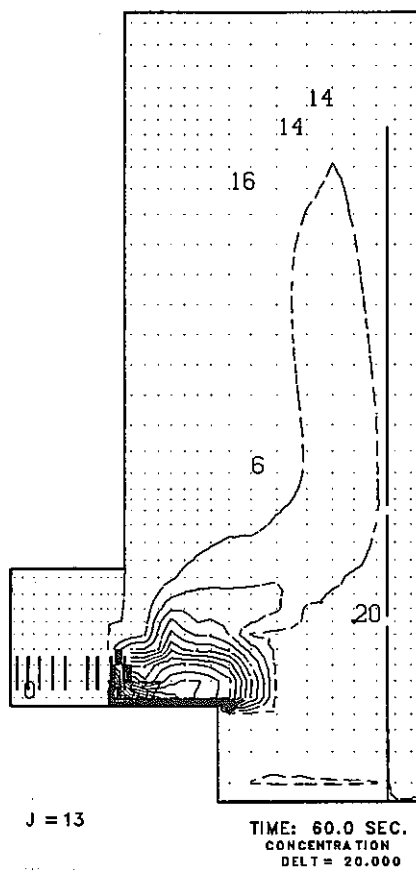
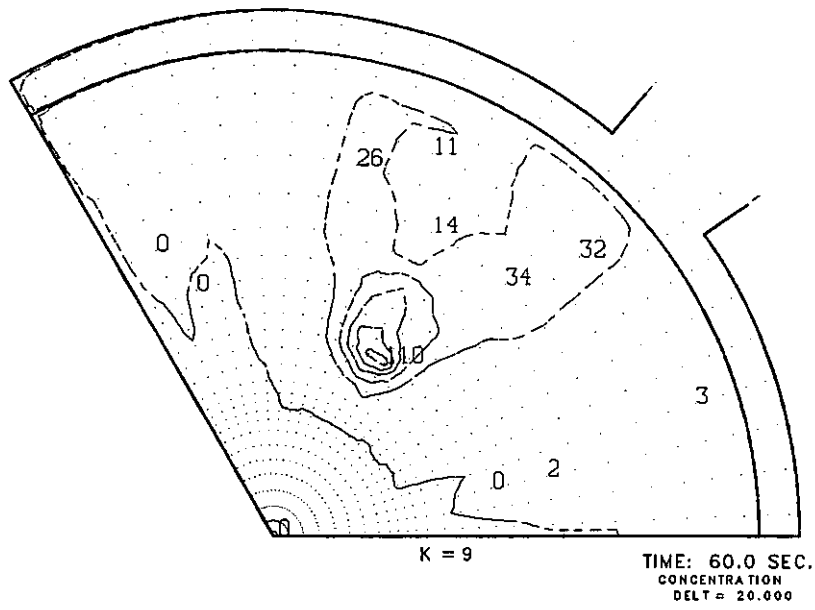


Fig. 3.10 Typical DN Concentration Fields on Case 3 of LF Analyses

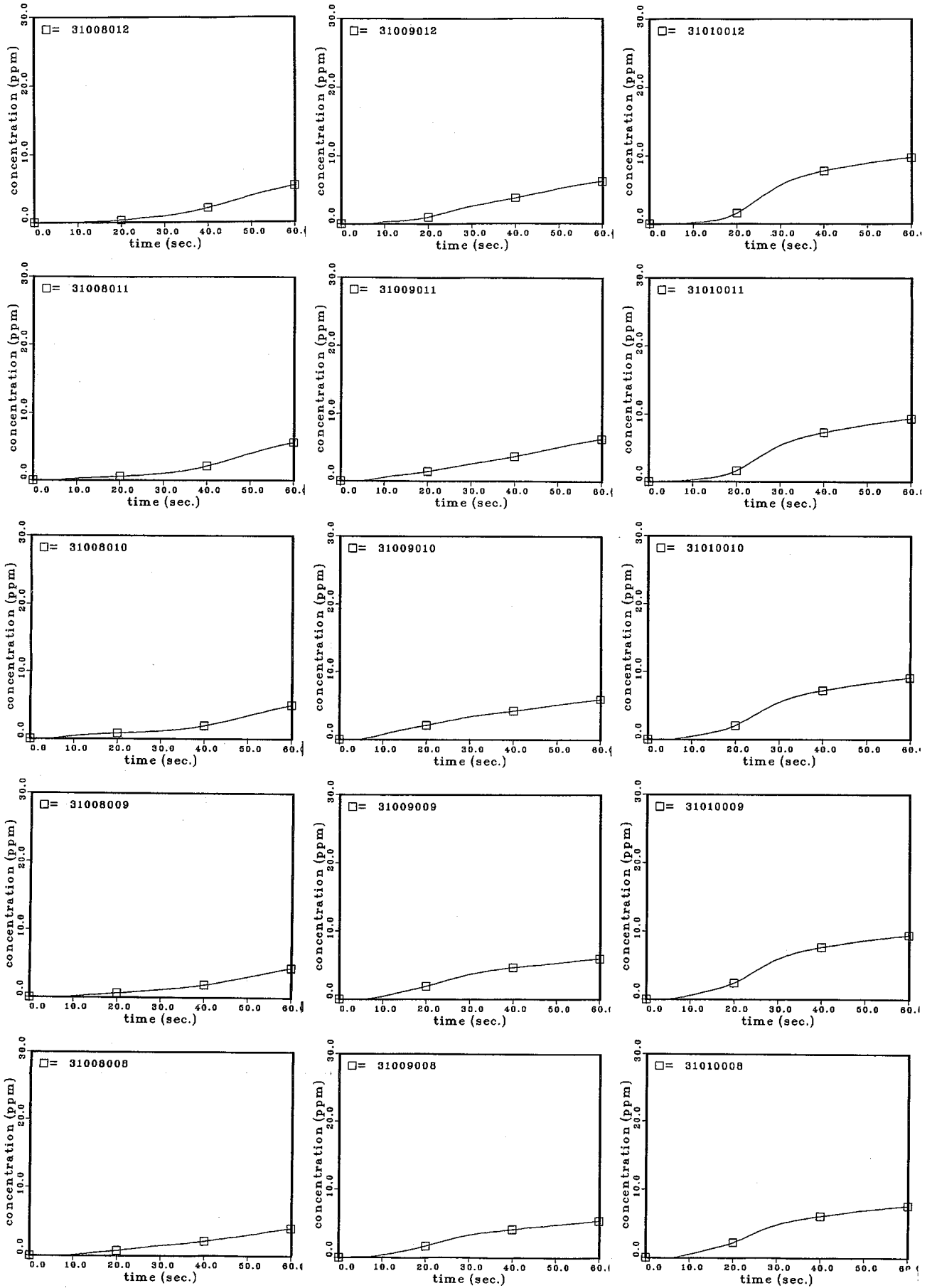


Fig. 3.11 Calculated DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-3 Condition

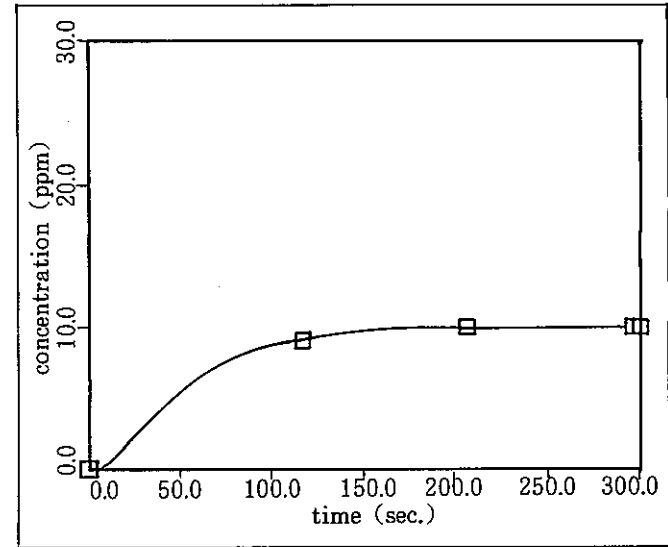
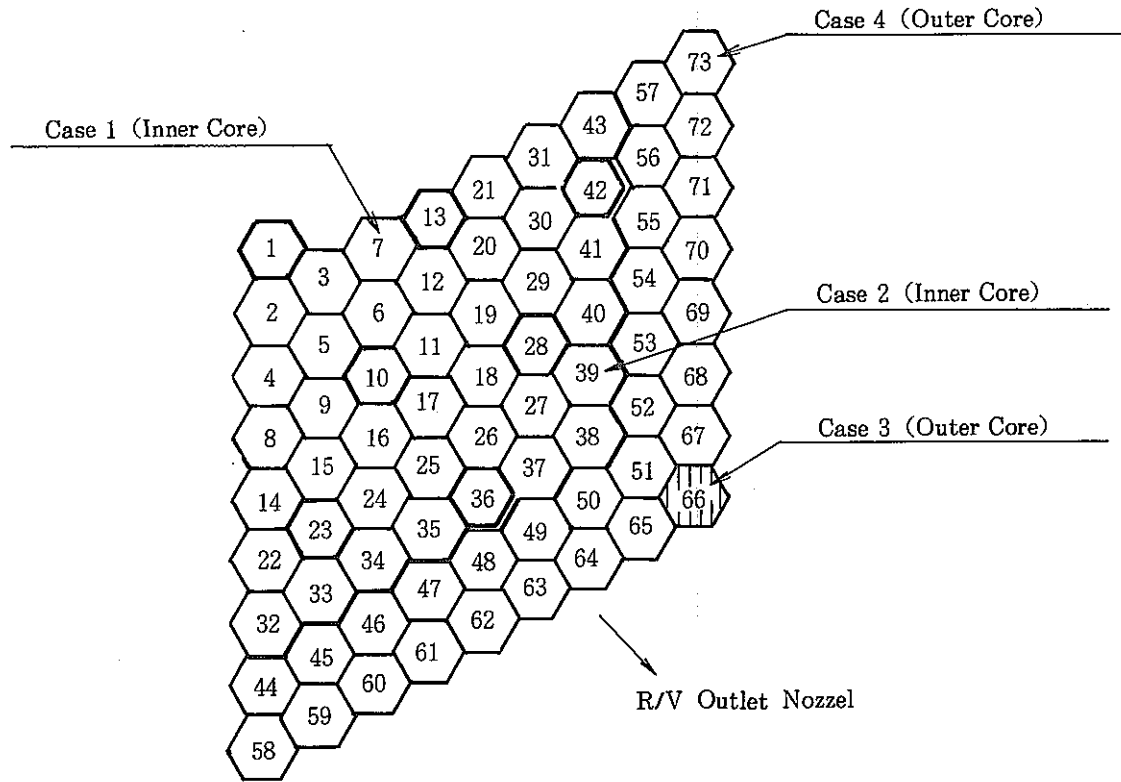


Fig. 3.12 Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzel of Reactor Vessel under Case-3 Condition

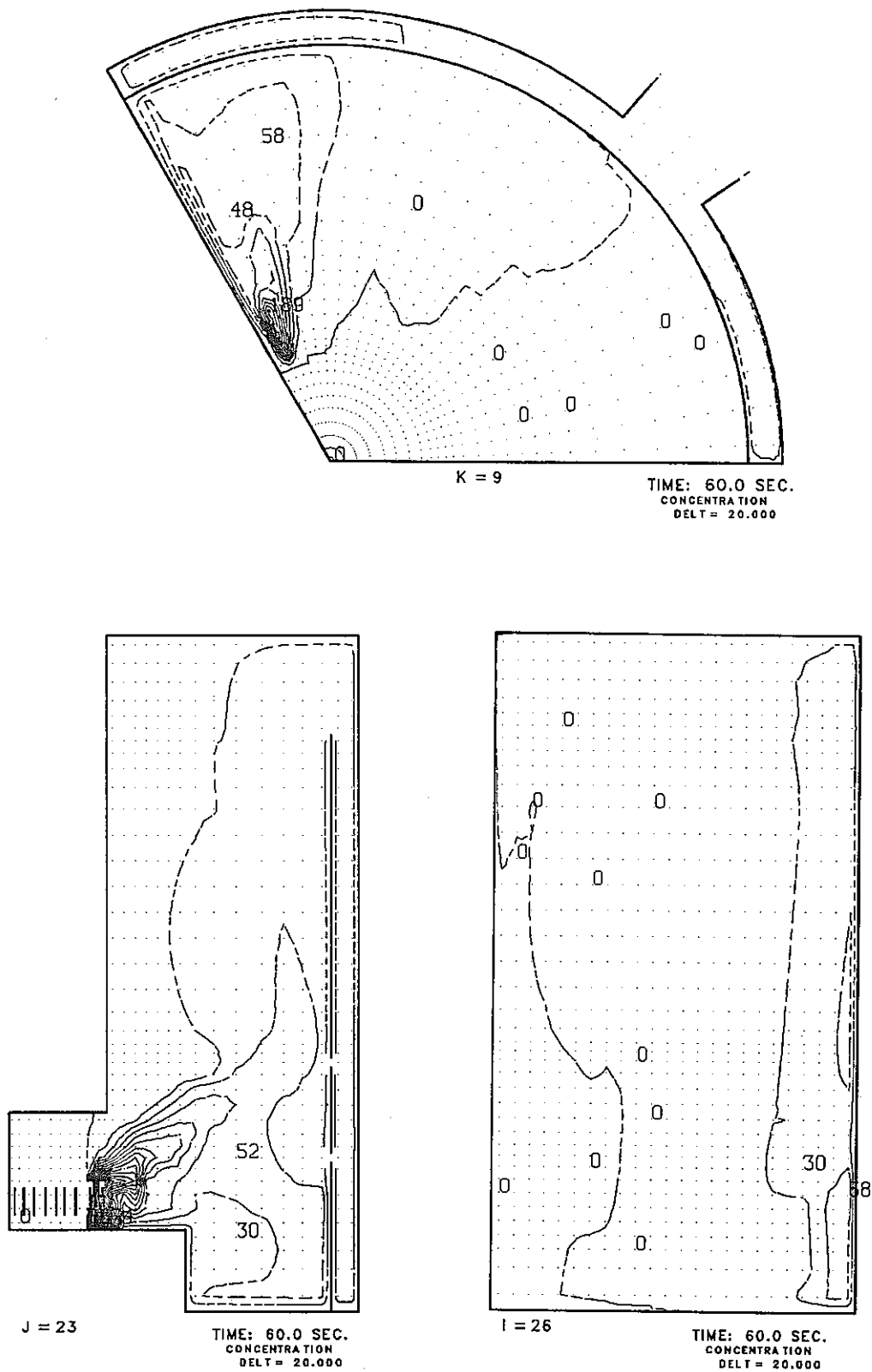


Fig. 3.13 Typical DN Concentration Fields on Case 4 of LF Analyses

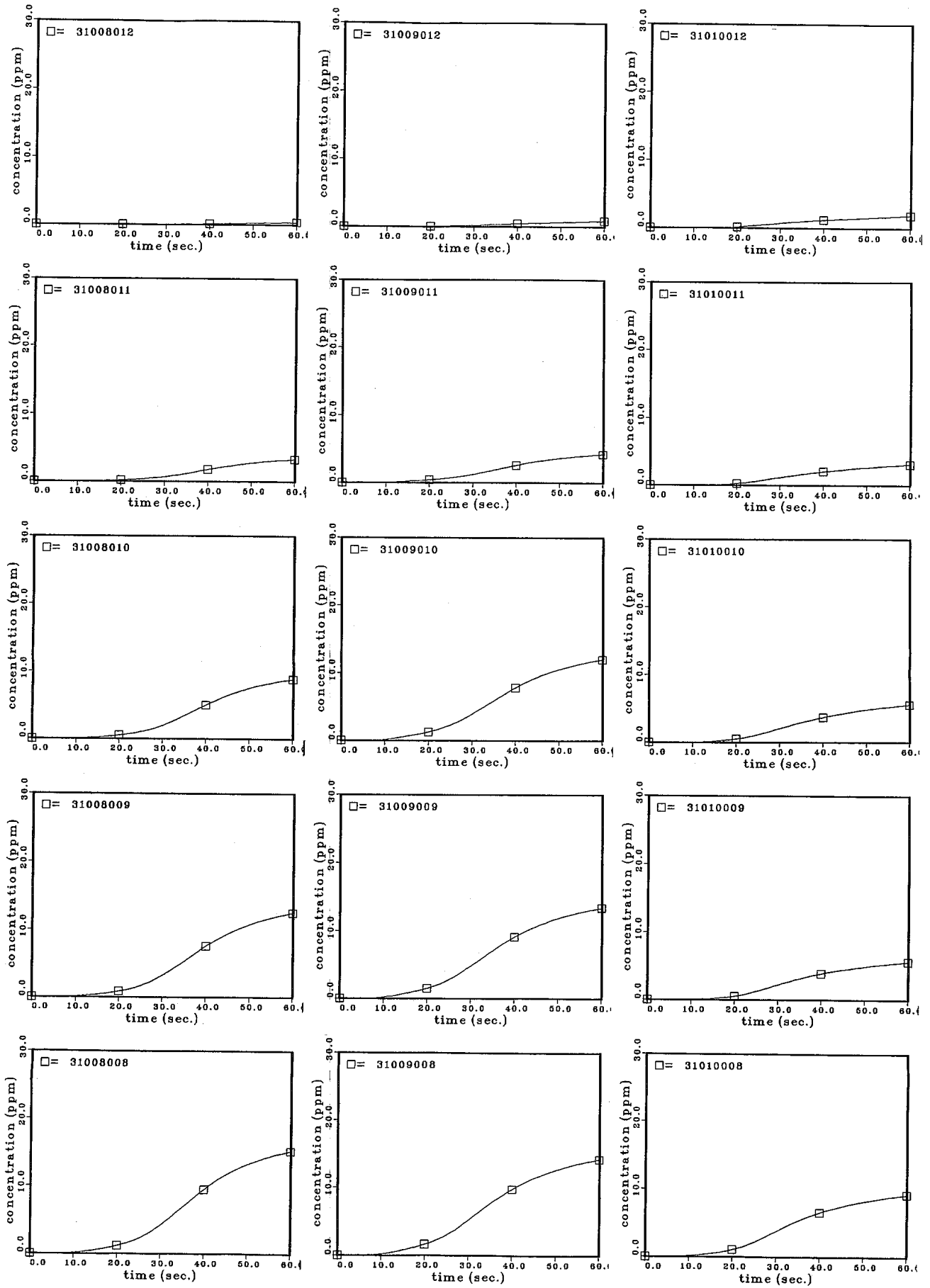


Fig. 3.14 Calculated DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel under Case-4 Condition

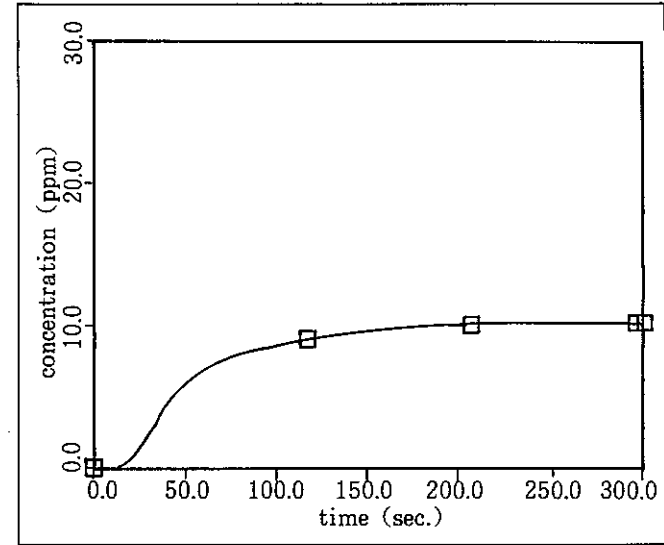
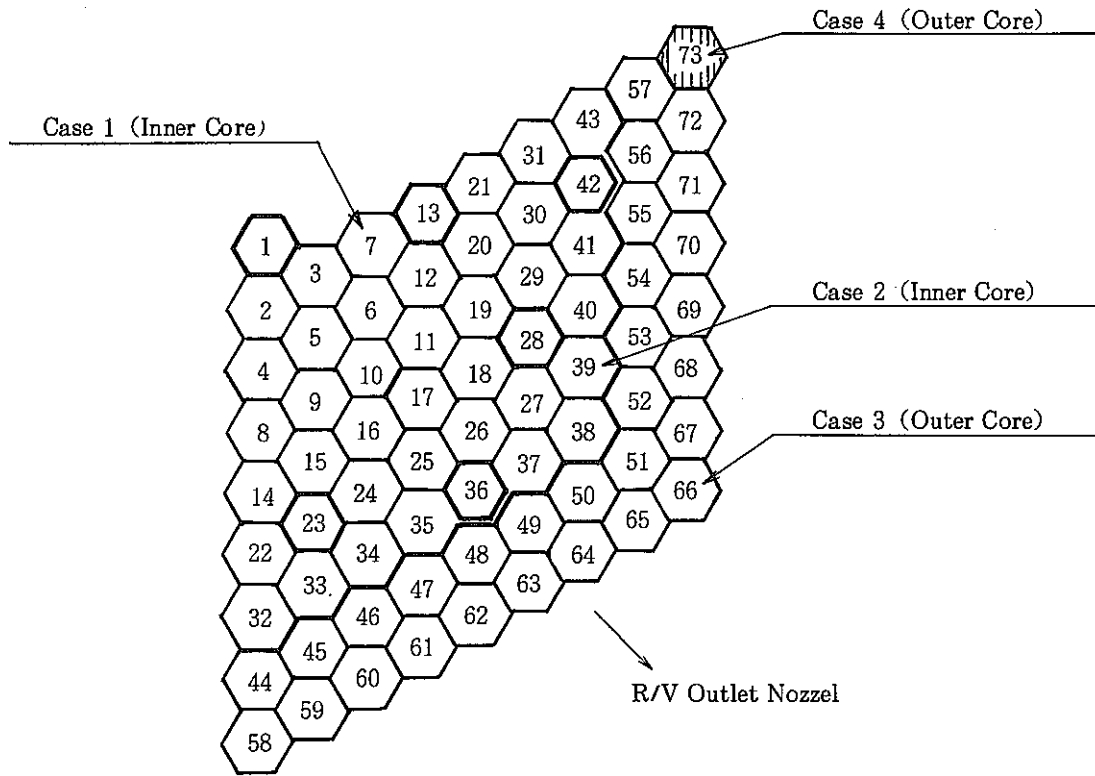


Fig. 3.15 Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzel of Reactor Vessel under Case-4 Condition

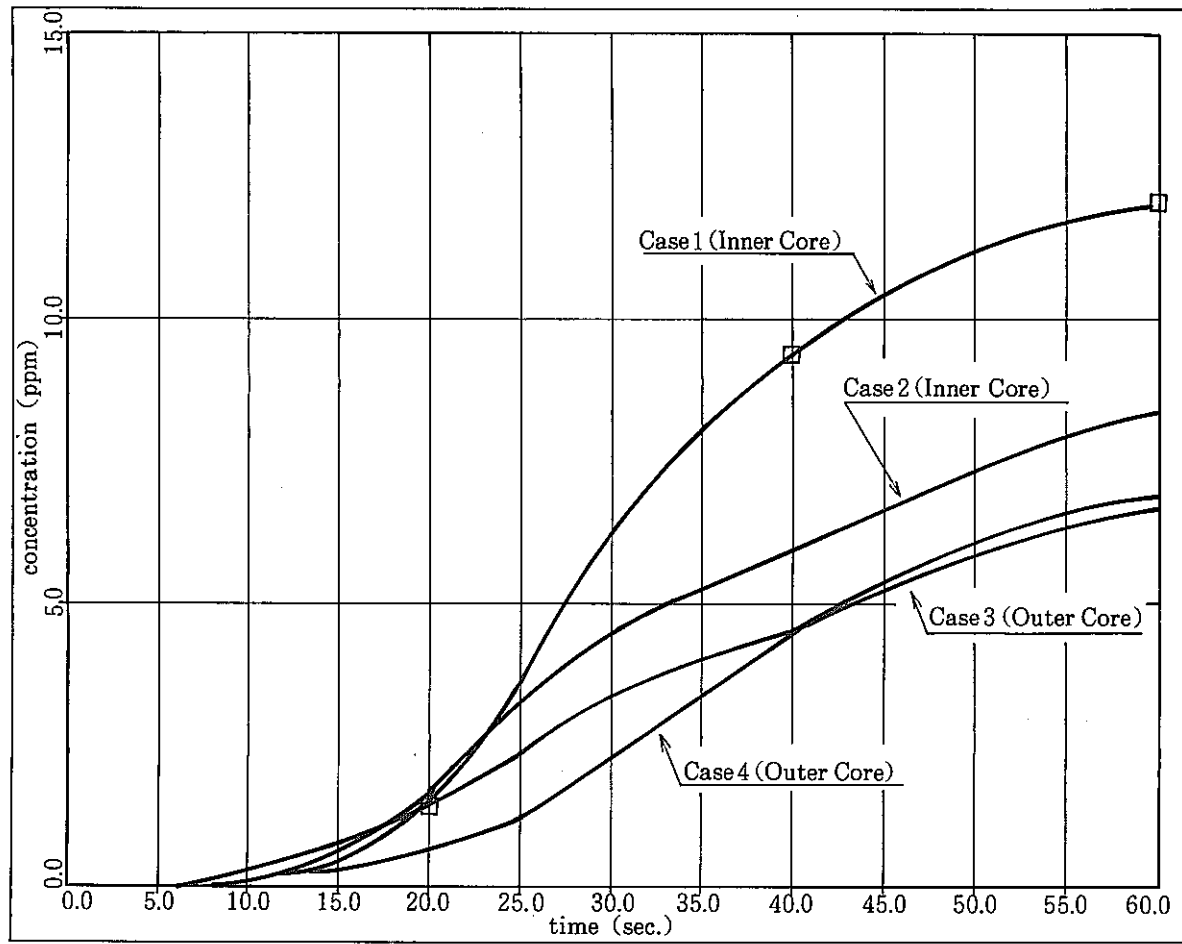
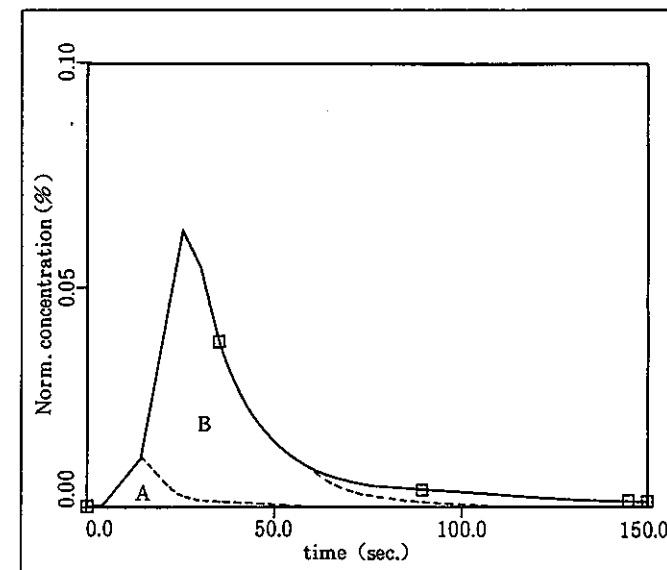
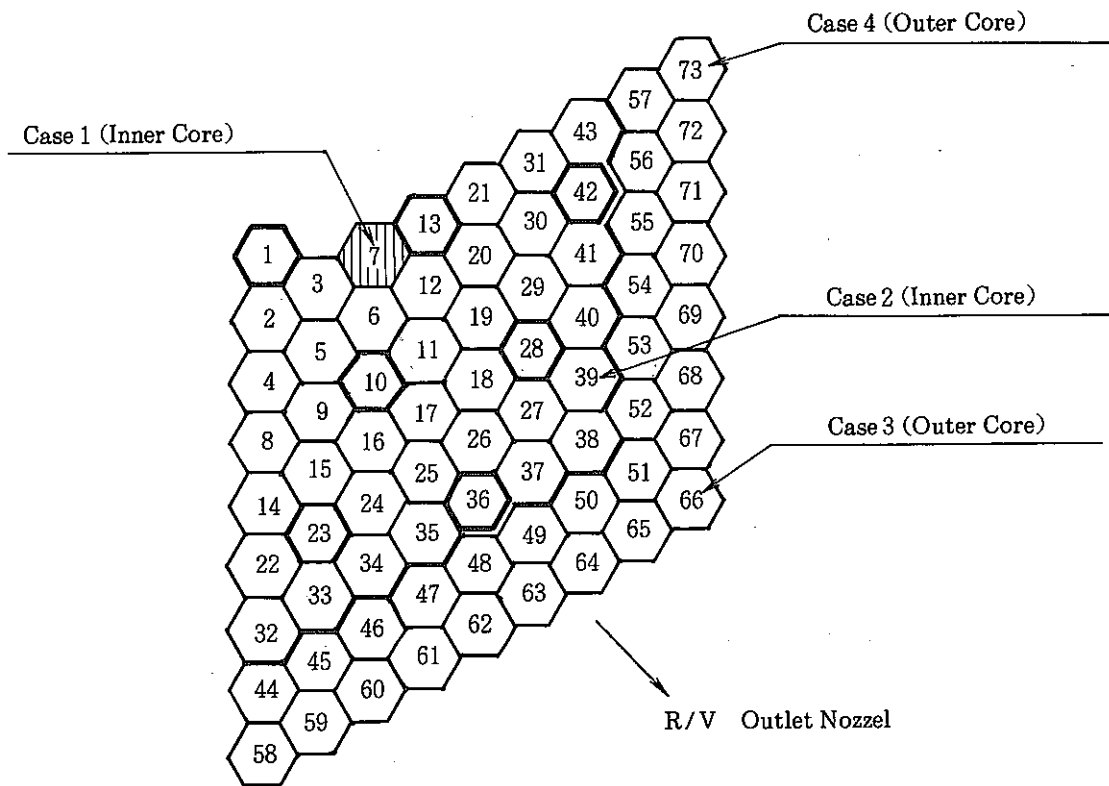


Fig. 3.16 Comparison of DN Concentration Transients at Outlet Nozzle of Reactor Vessel





A : Flow Hole Path  
 B : via Inner Barrel Top

Fig. 3.17 Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzel of Reactor Vessel under Case-1 Condition  
 (Release Mode : Step Profile)

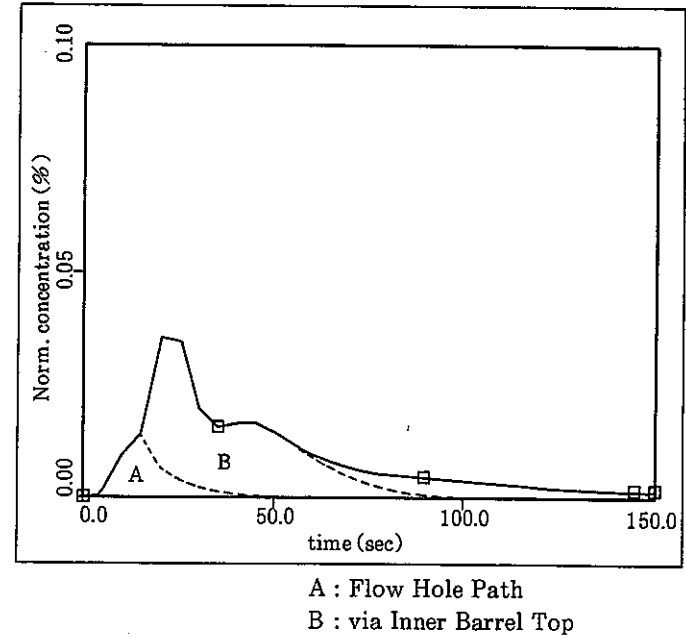
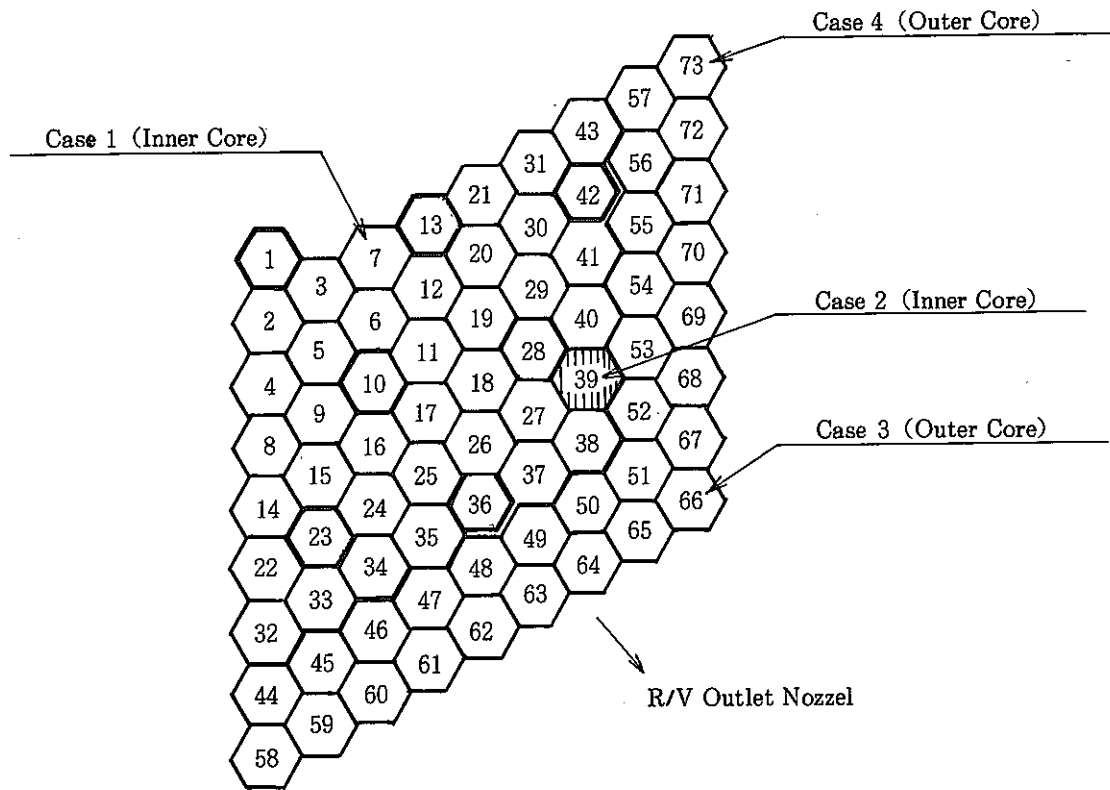


Fig. 3.18 Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzel of Reactor Vessel under Case-2 Condition  
(Release Mode : Step Profile)

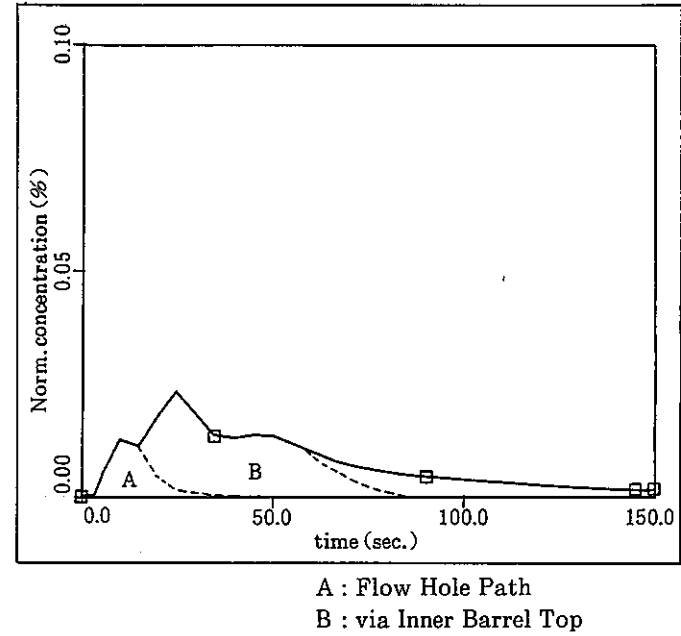
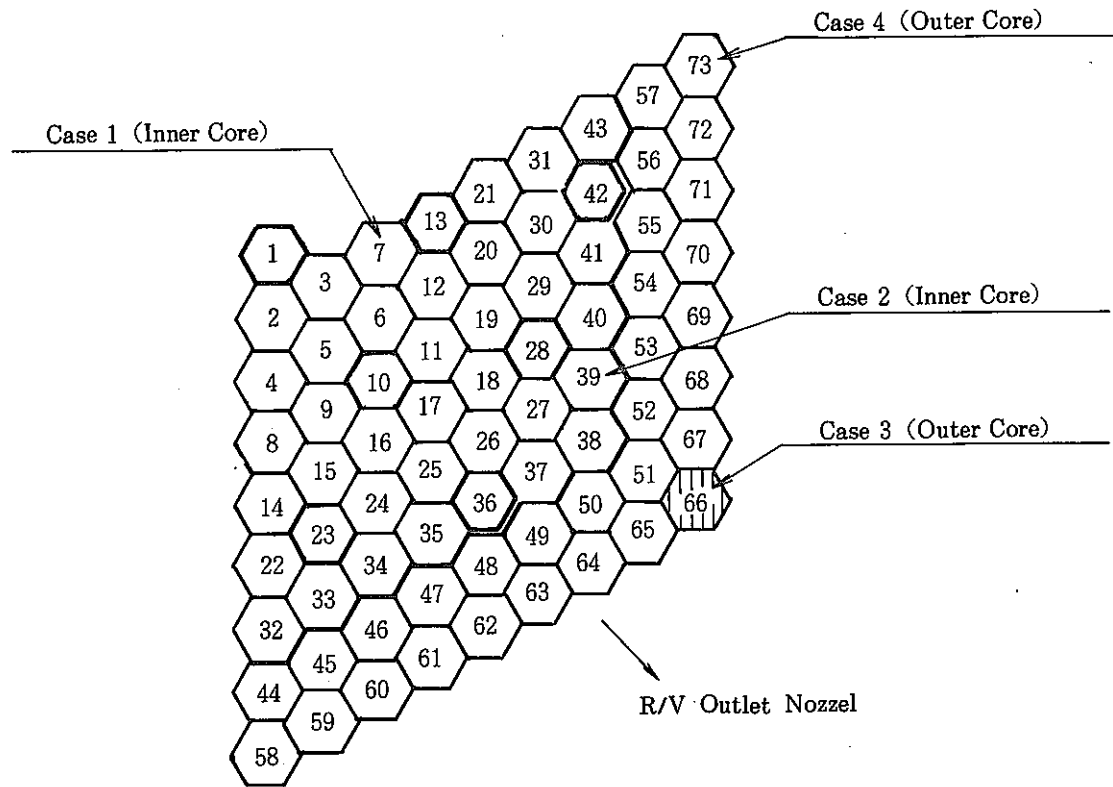


Fig. 3.19 Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzel of Reactor Vessel under Case-3 Condition  
(Release Mode : Step Profile)

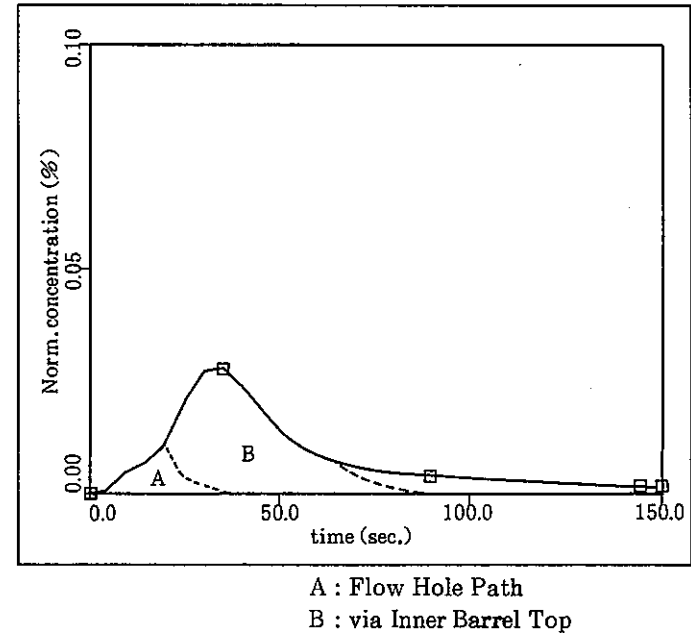
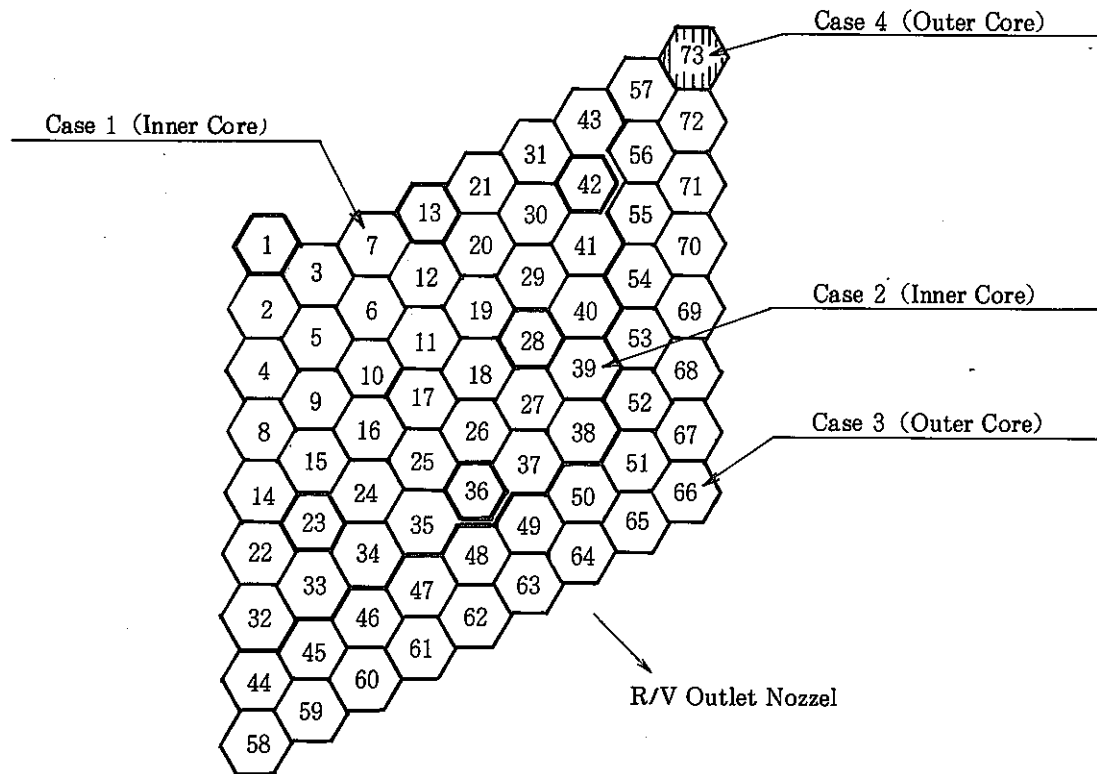


Fig. 3.20 Mass Weighted Average of Calculated DN Concentration at Outlet Nozzel of Reactor Vessel under Case-4 Condition (Release Mode : Step Profile)

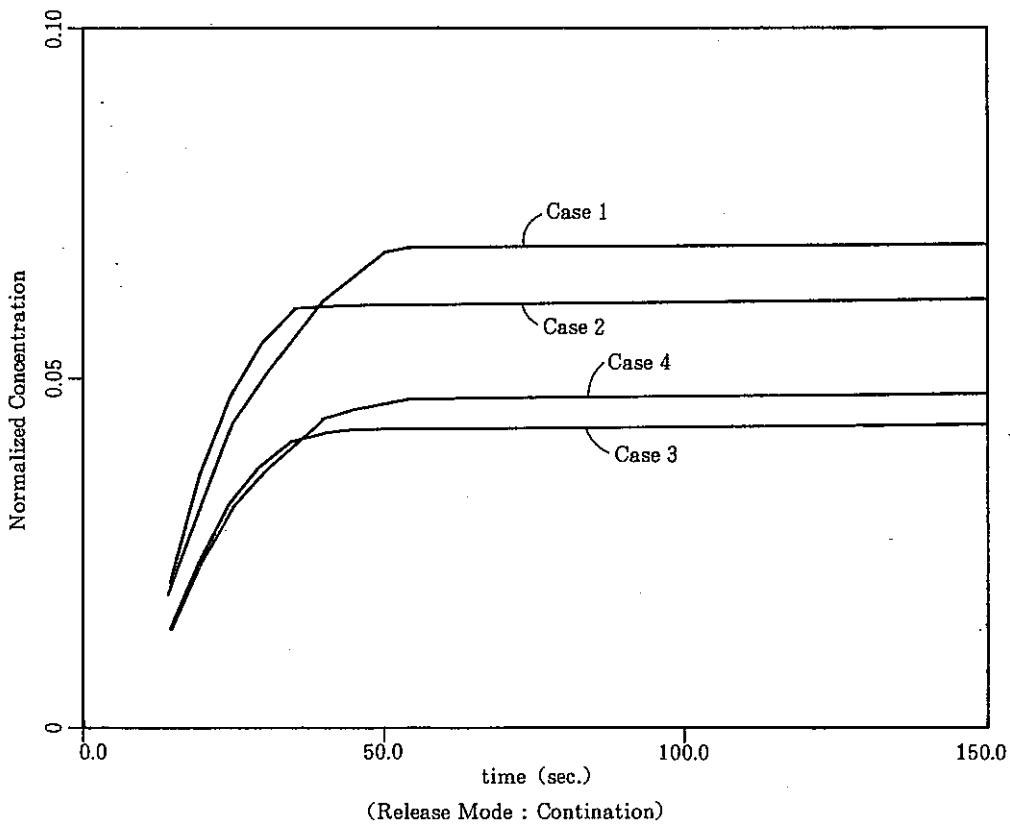
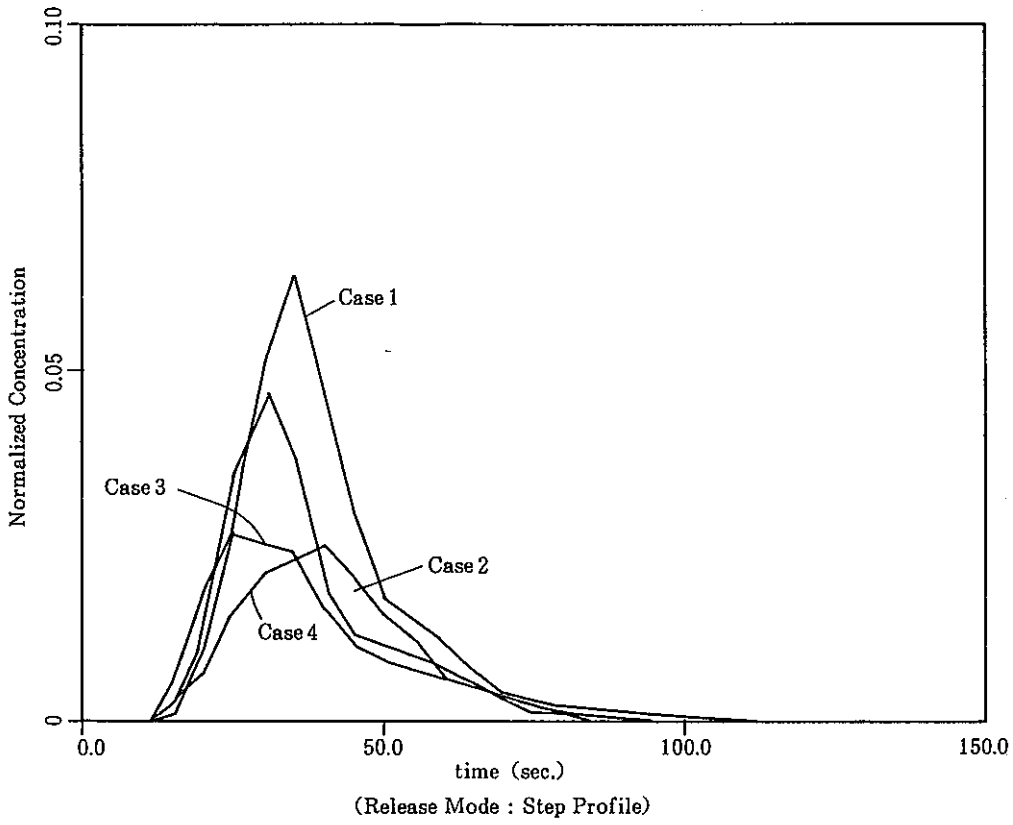


Fig. 3.21 DN Precursor Intensity at Instrumentation Position

付録A 定格負荷運転時の上部プレナム熱流動特性

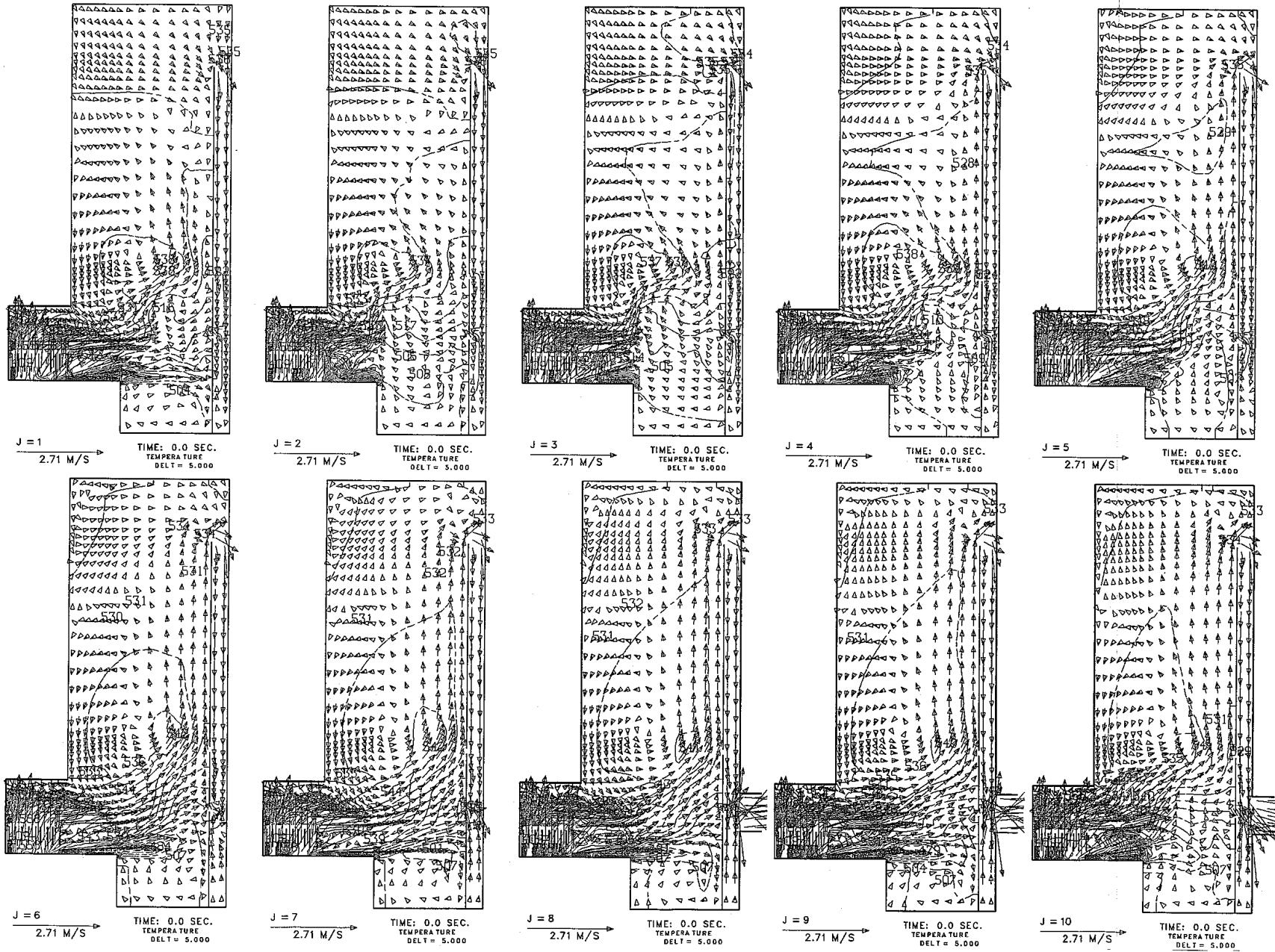


Fig. A.1 Vector and Temperature Field Plots in r-z Planes for Steady-State Condition

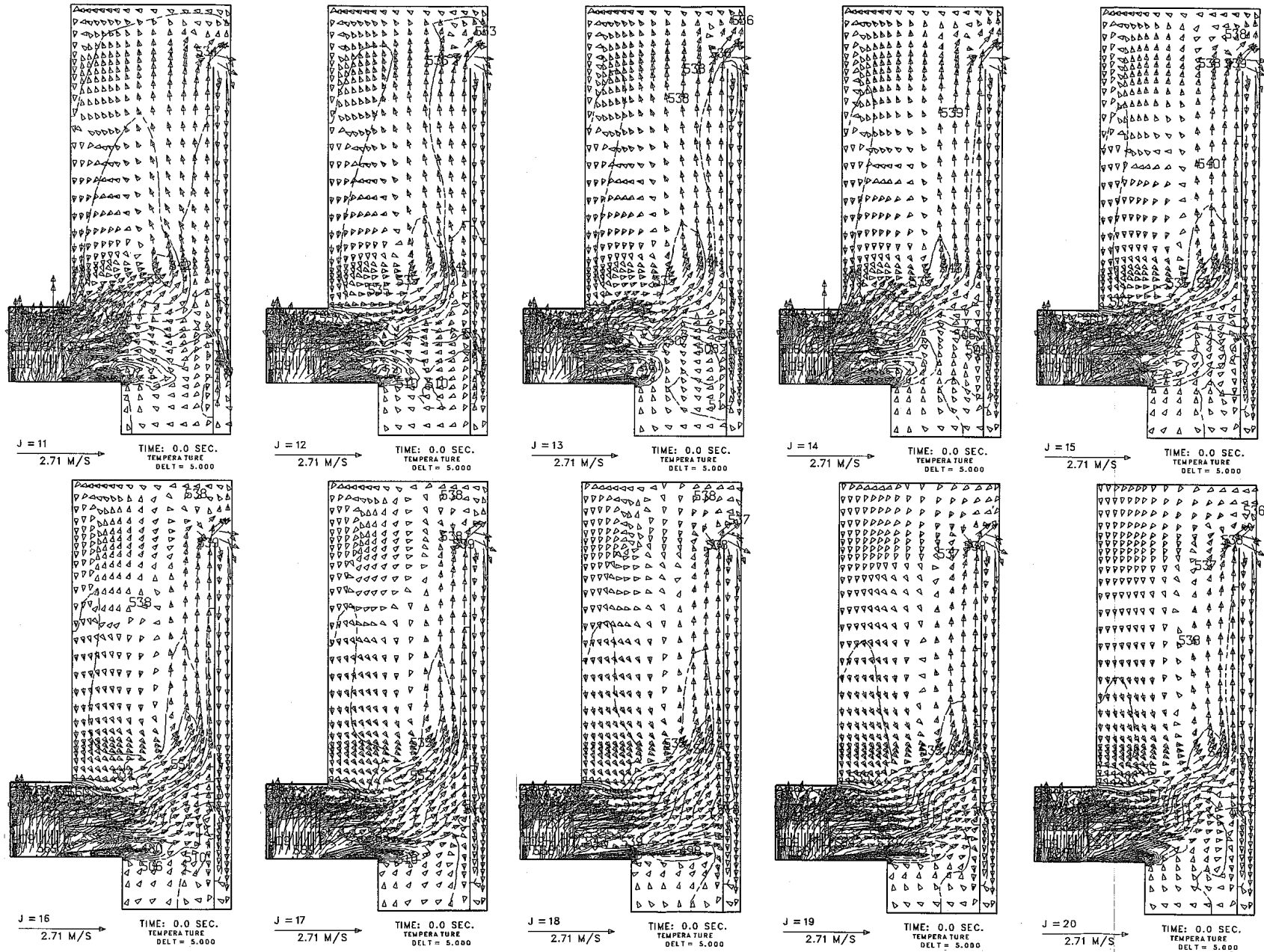


Fig. A. 1 (Continued)



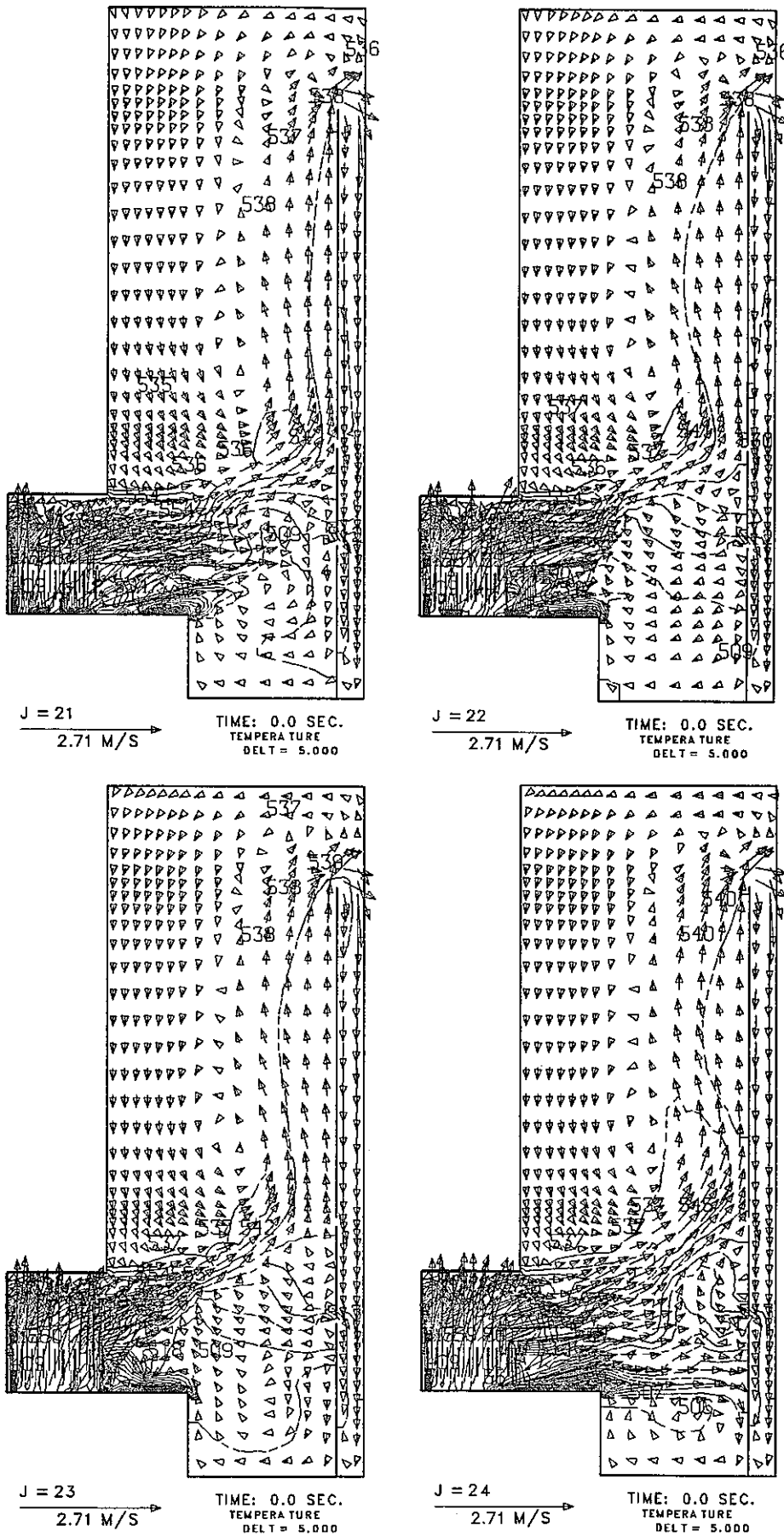


Fig. A. 1 (Continued)

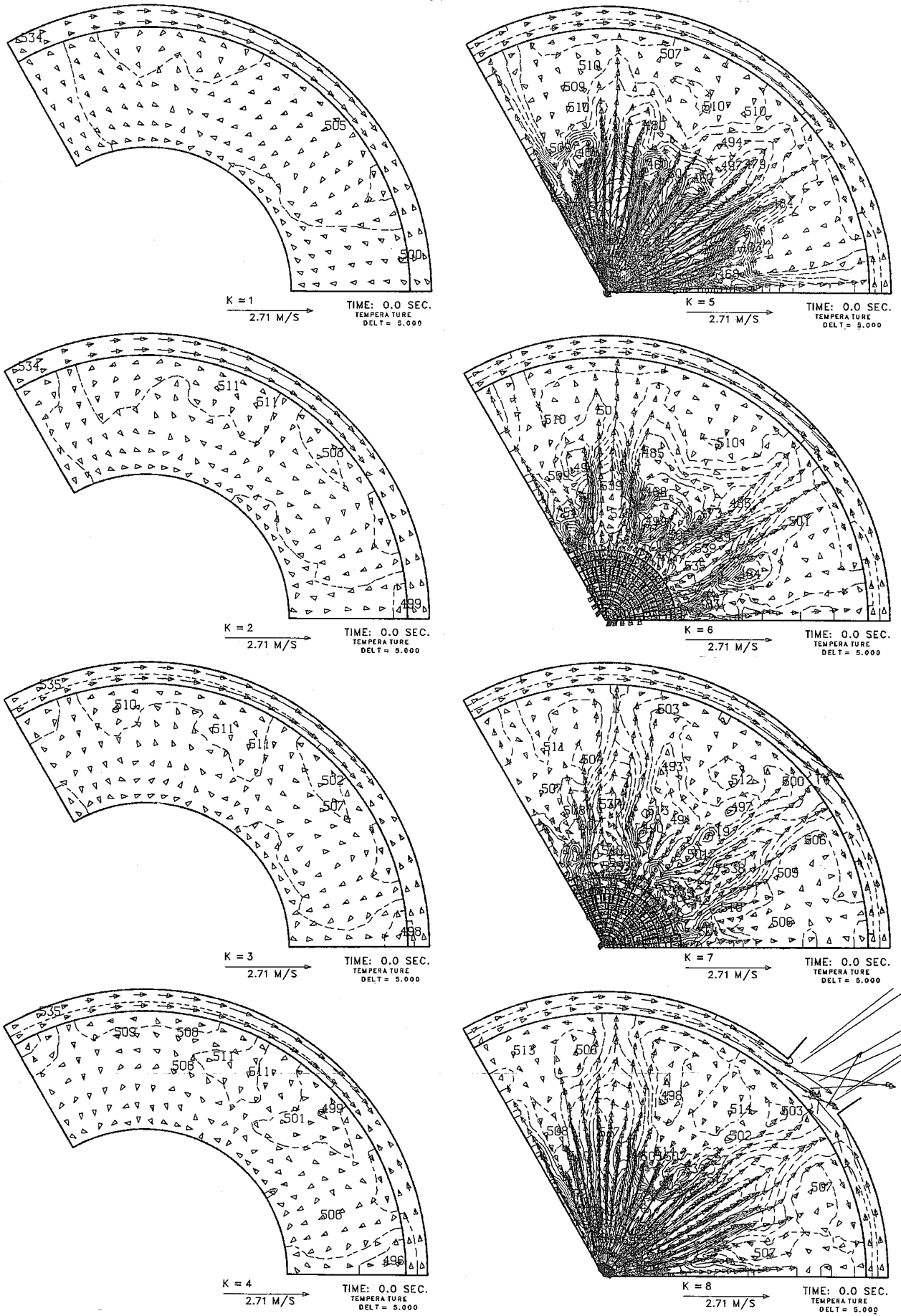


Fig. A. 2 Vector and Temperature Field Plots in  $r-\theta$  Planes for Steady-State Condition



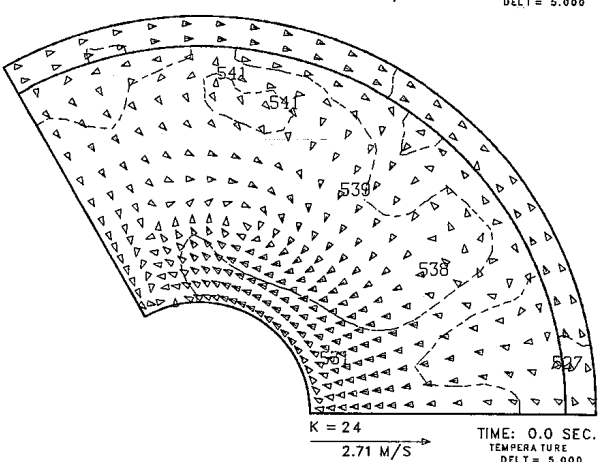
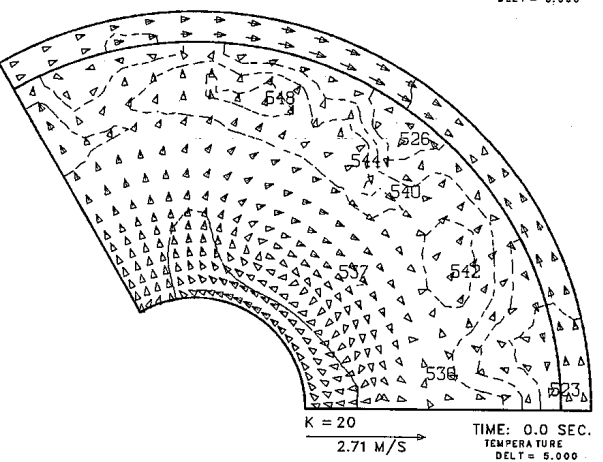
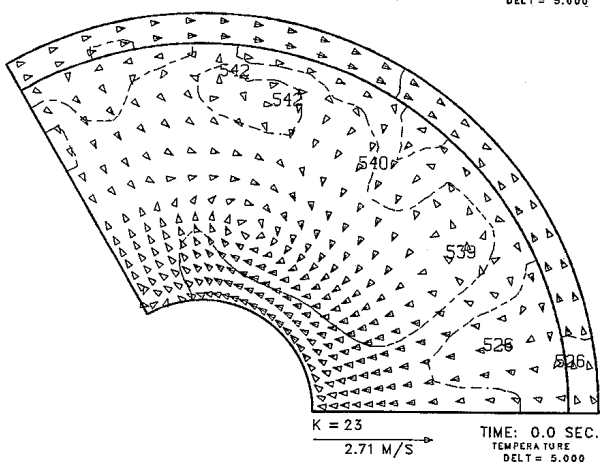
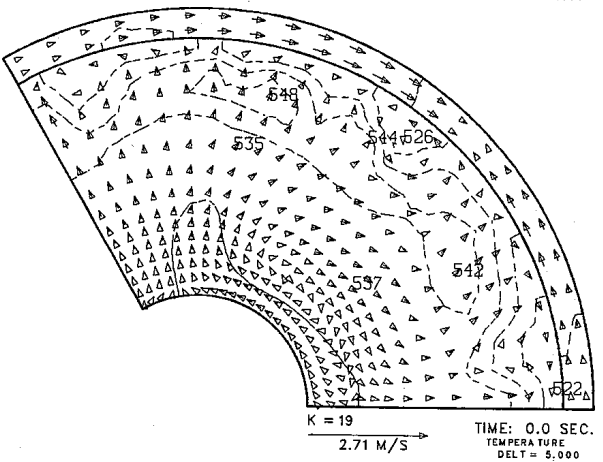
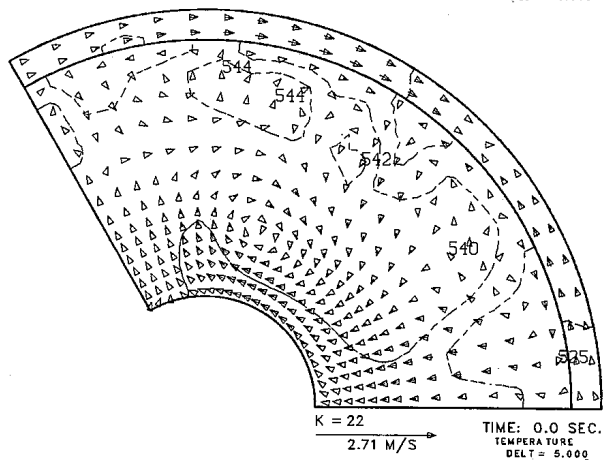
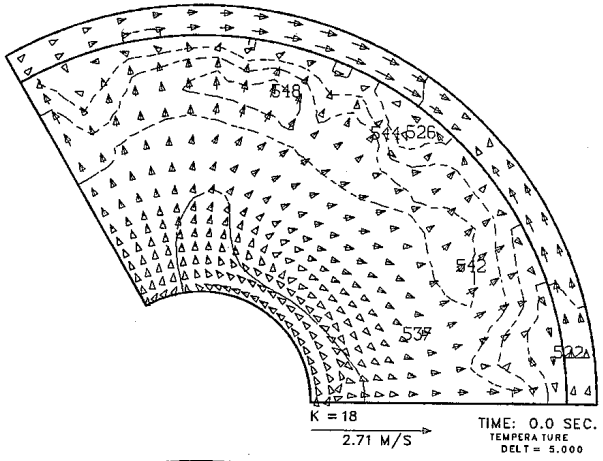
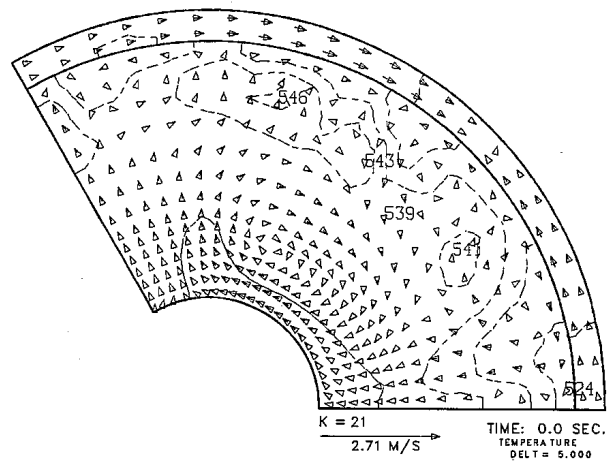
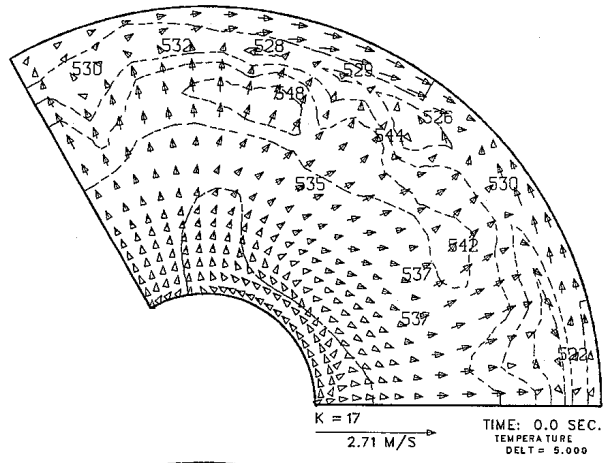


Fig. A. 2 (Continued)

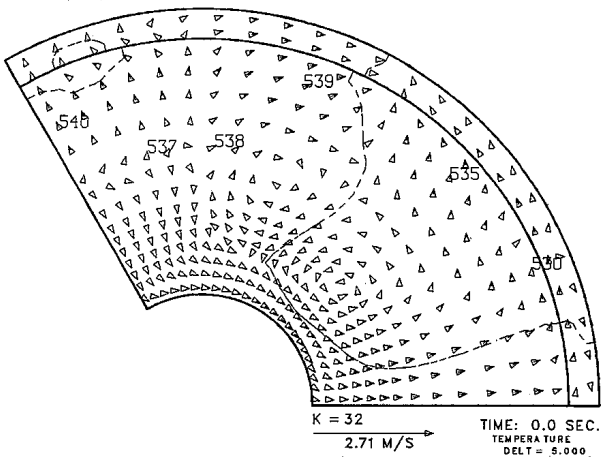
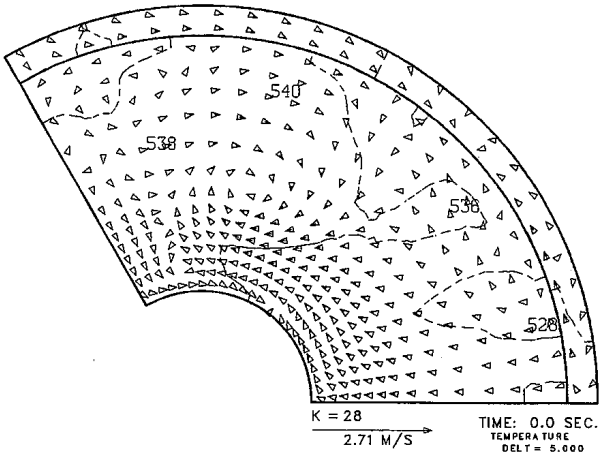
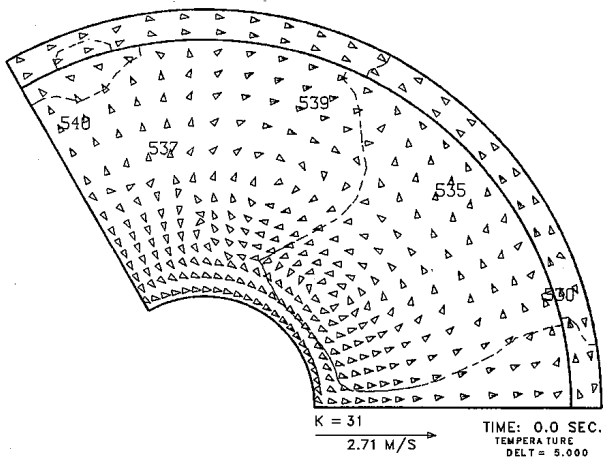
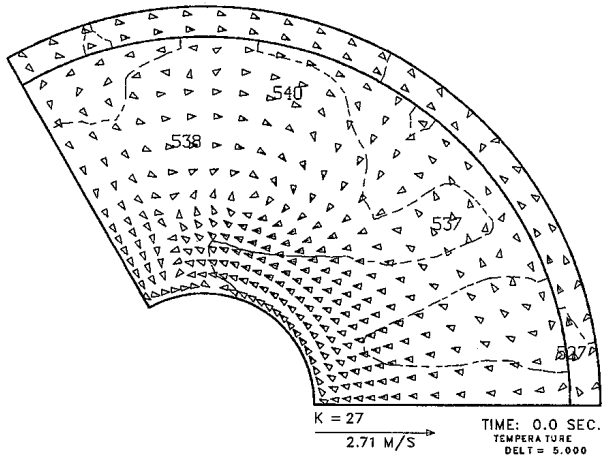
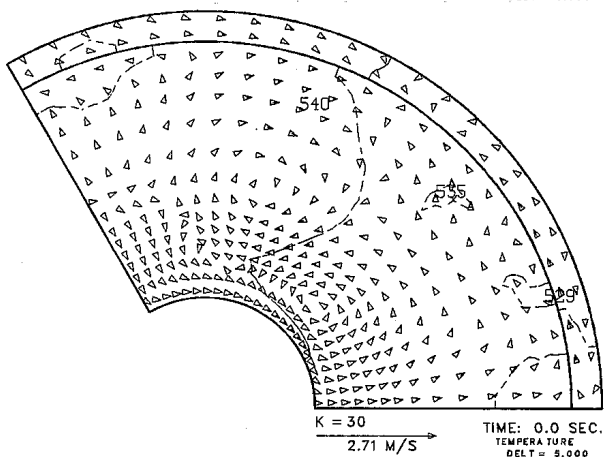
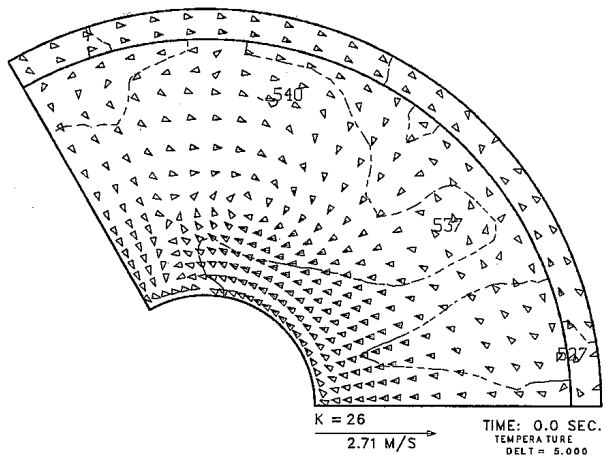
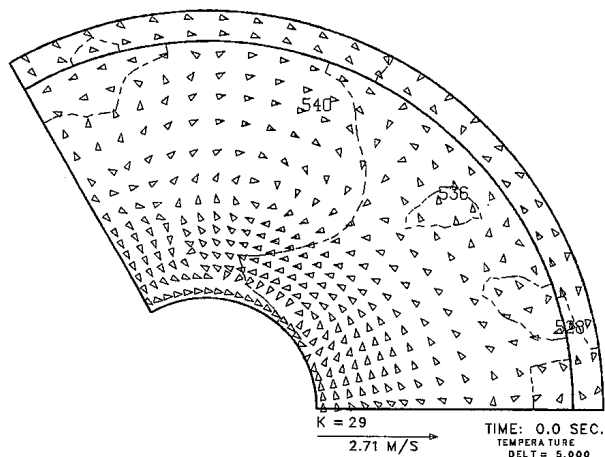
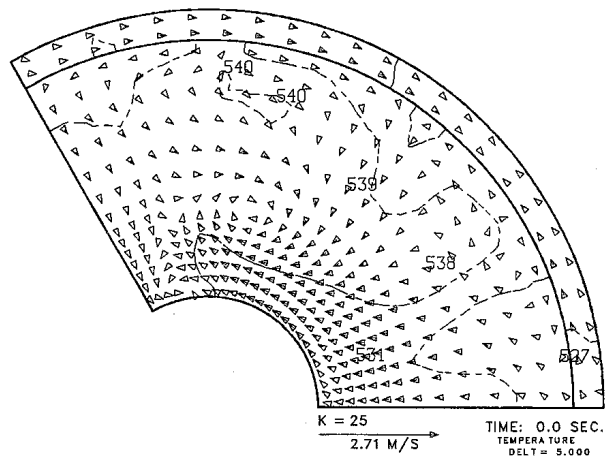


Fig. A. 2 (Continued)

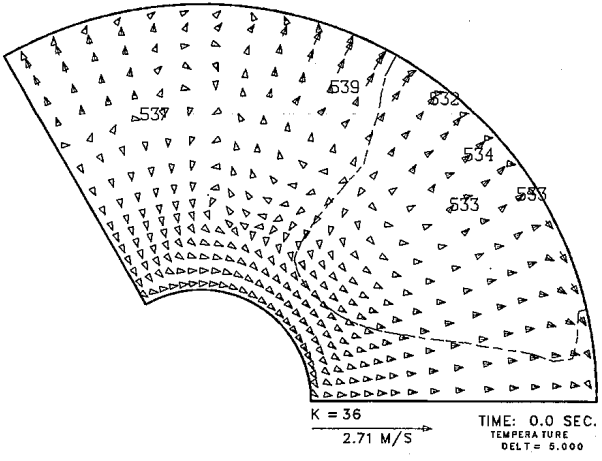
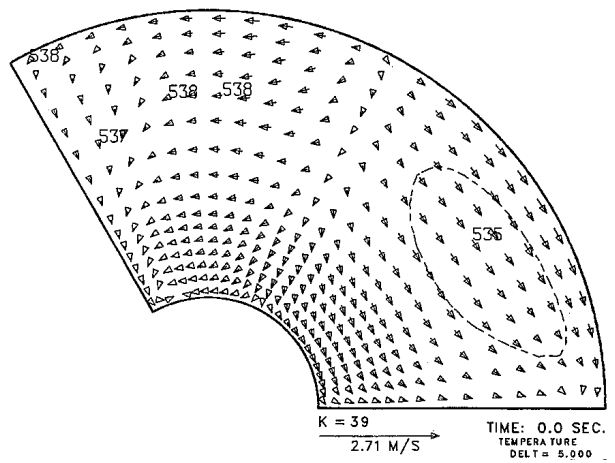
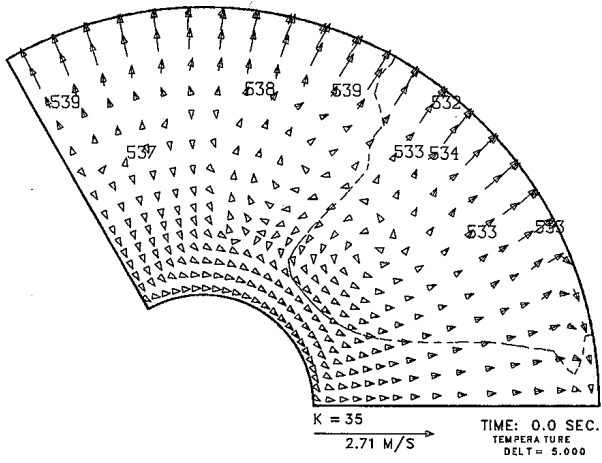
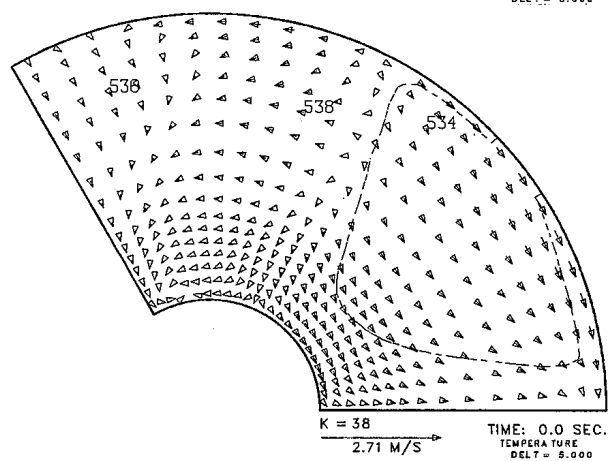
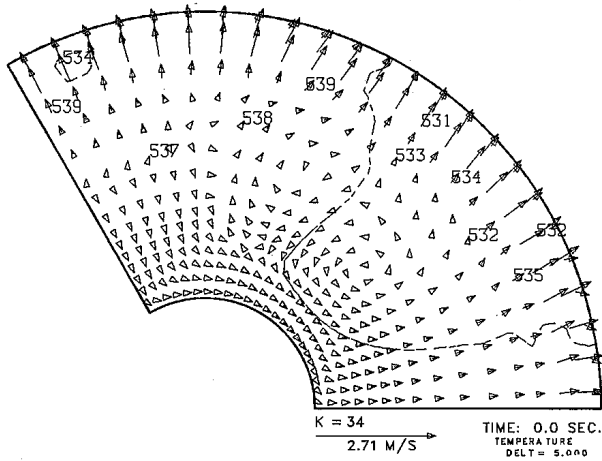
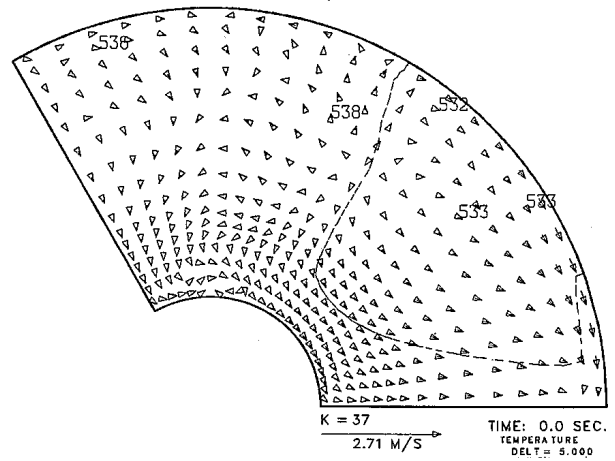
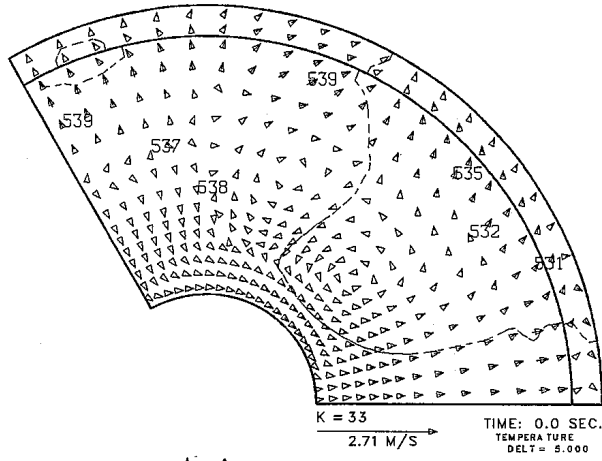


Fig. A. 2 (Continued)

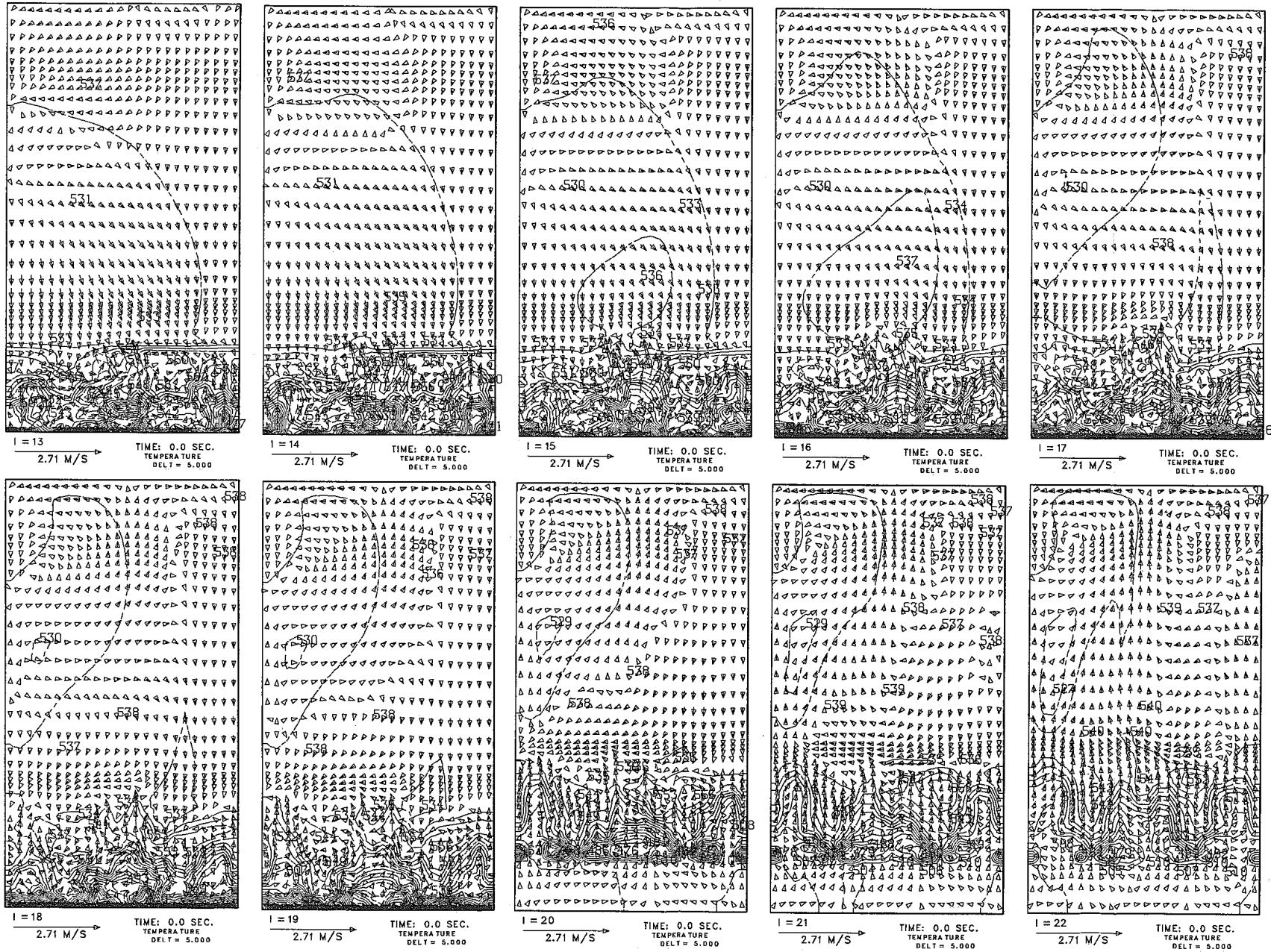


Fig. A. 3 Vector and Temperature Field Plots in  $\theta$ - $z$  Planes for Steady-State Condition

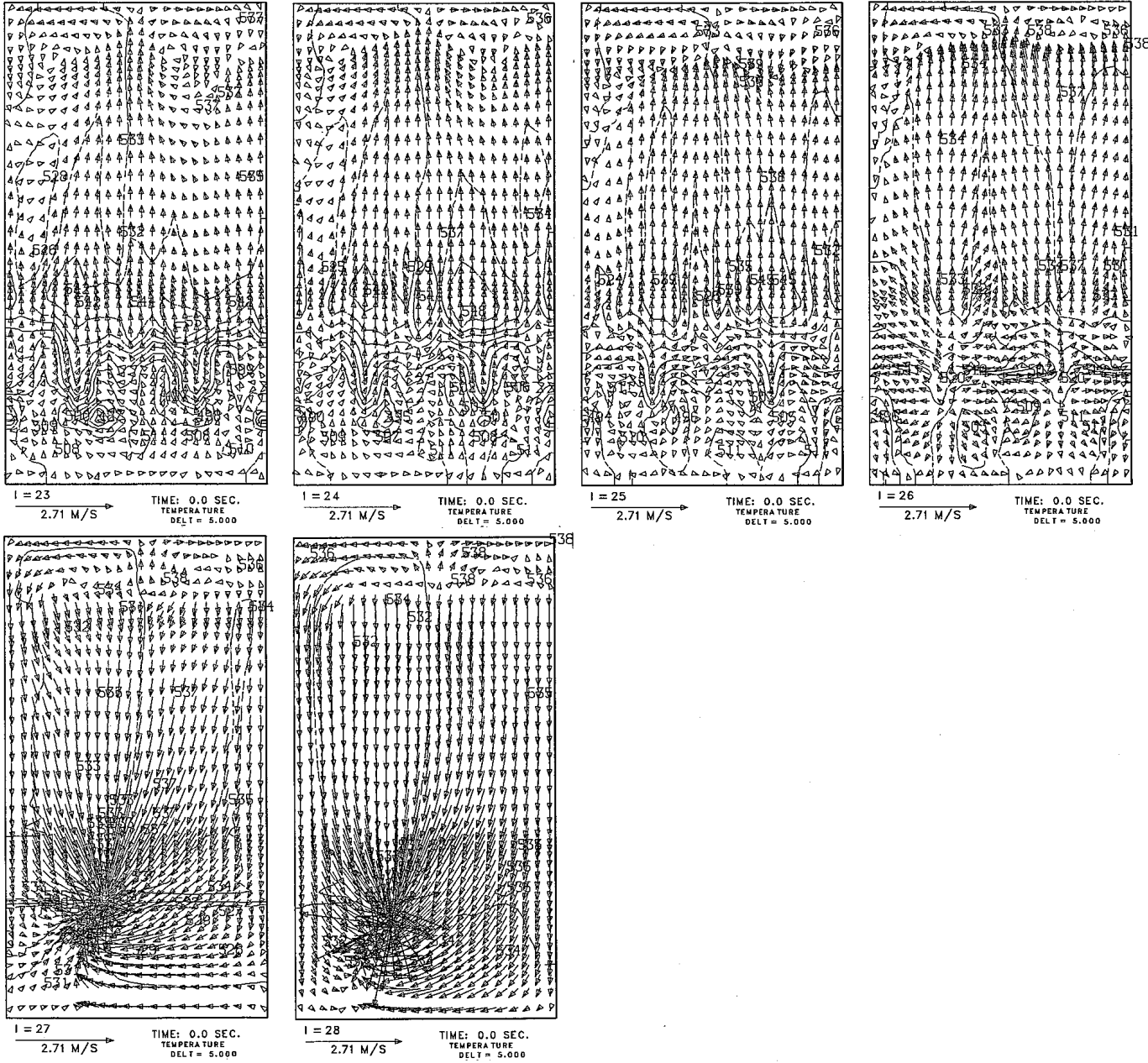


Fig. A. 3 (Continued)



付録B UTOP事象開始10秒後の上部プレナム熱流動特性

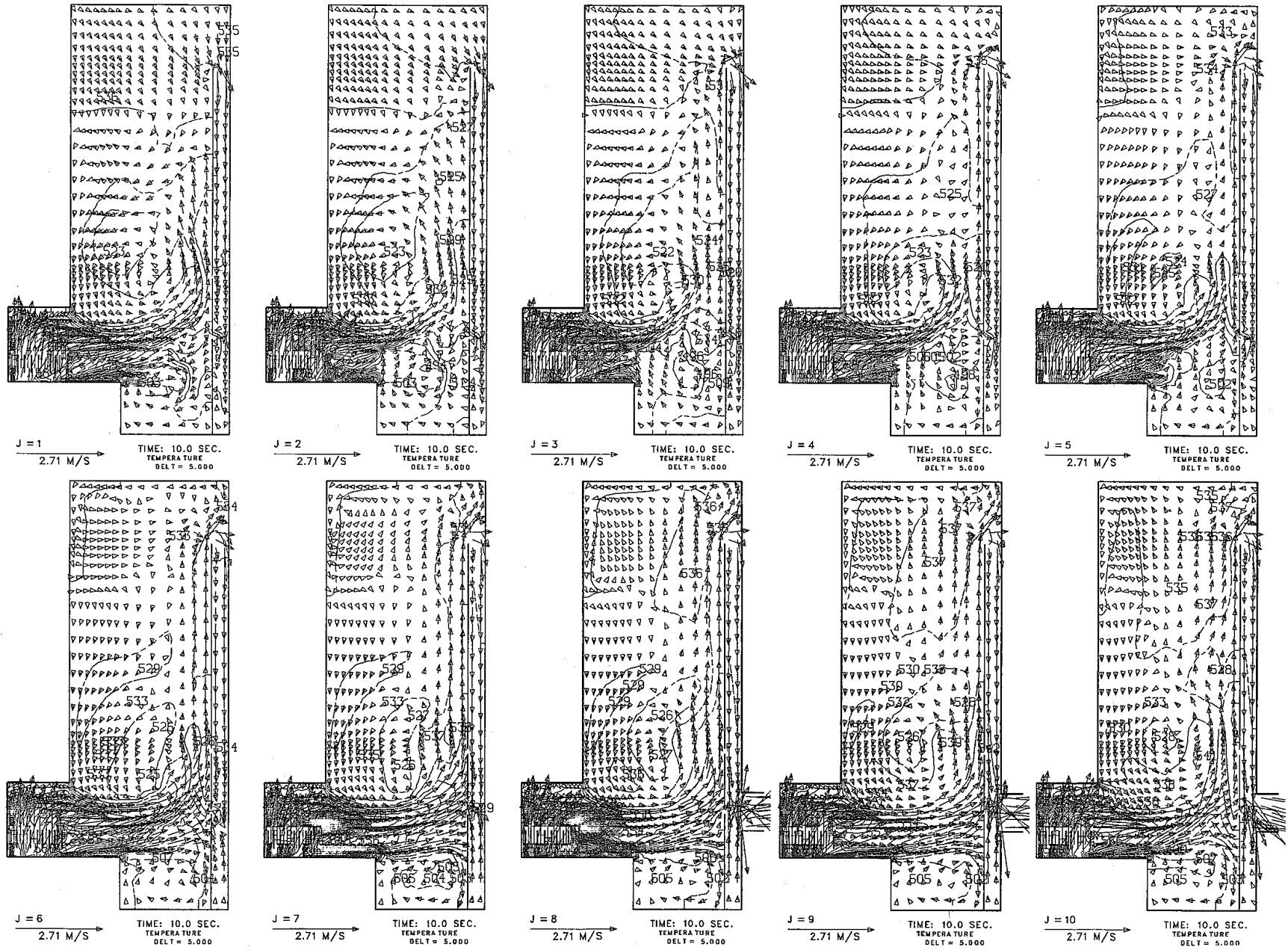


Fig. B. 1 Vector and Temperature Field Plots for r-z Planes in 10 seconds after UTOP Onset



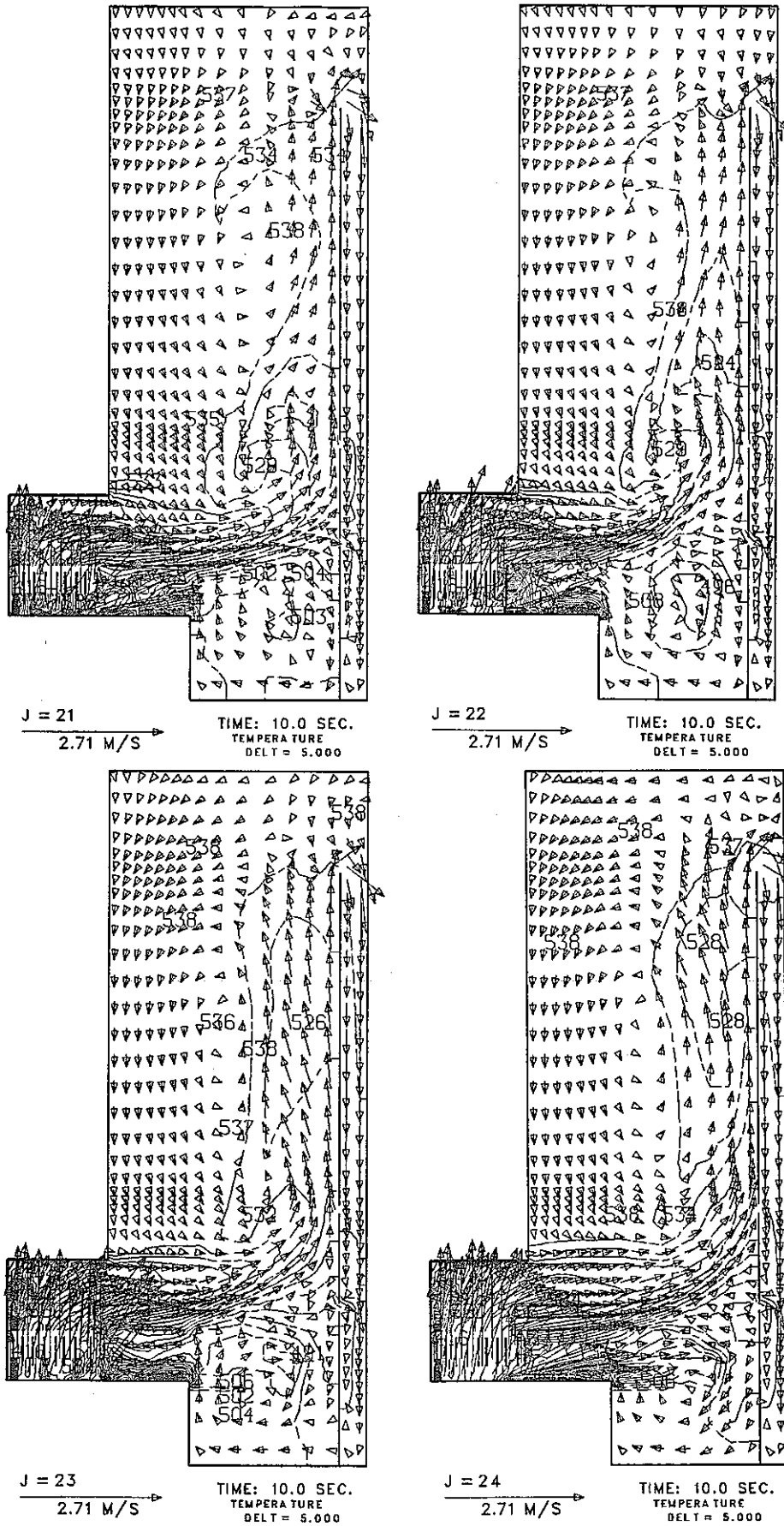


Fig. B. 1 (Continued)

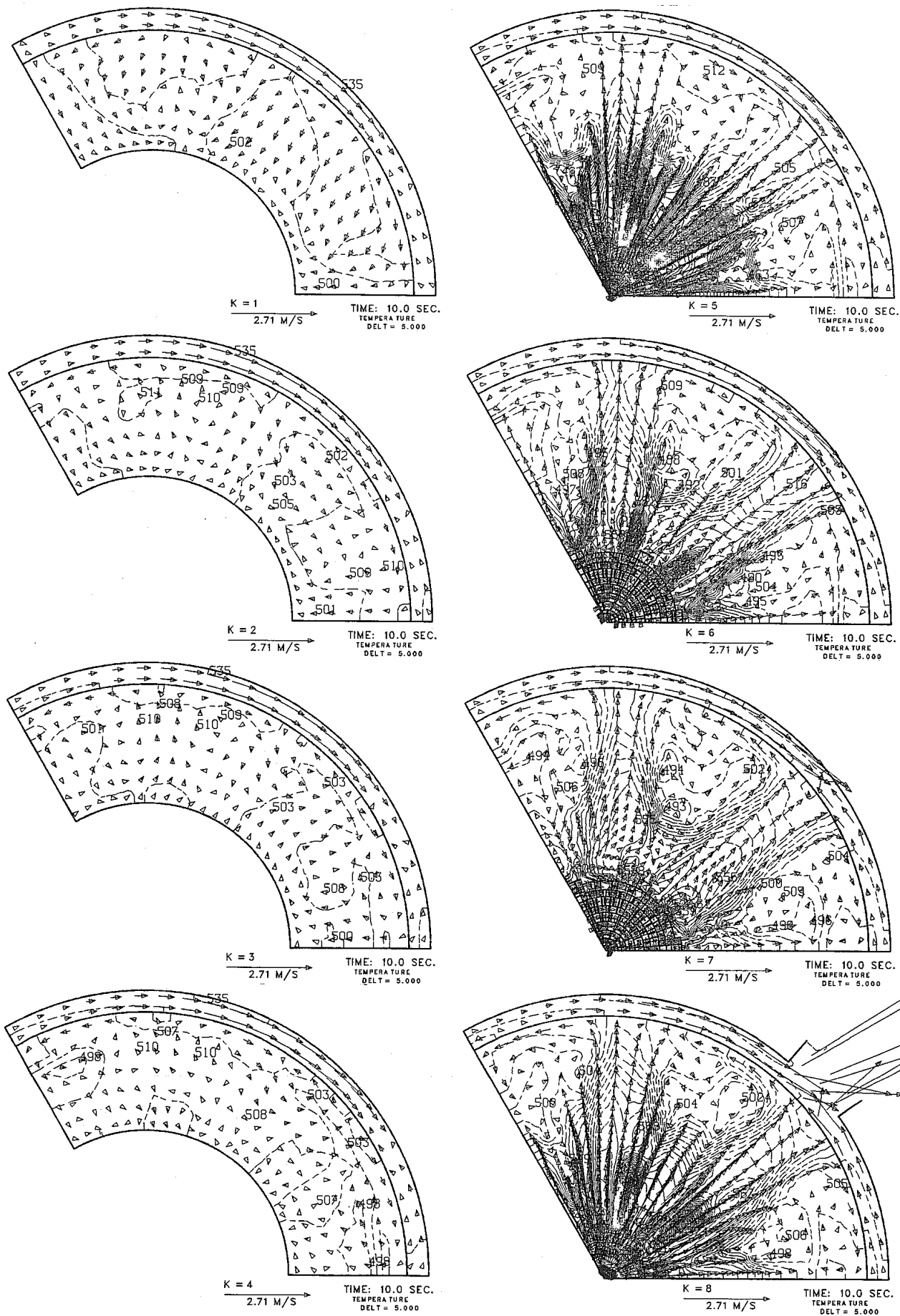


Fig. B. 2 Vector and Temperature Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 10 seconds after UTOP Onset

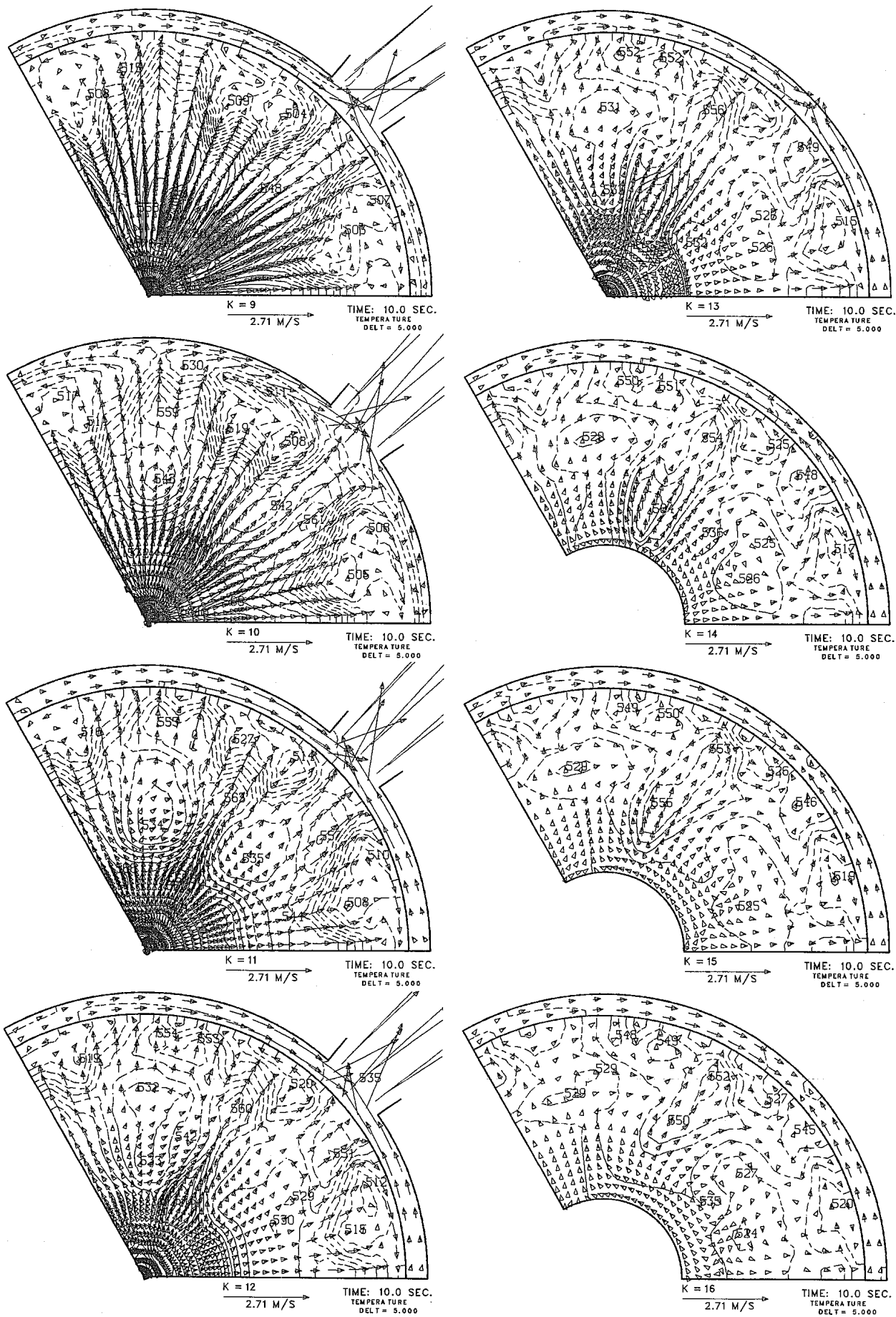


Fig. B. 2 (Continued)

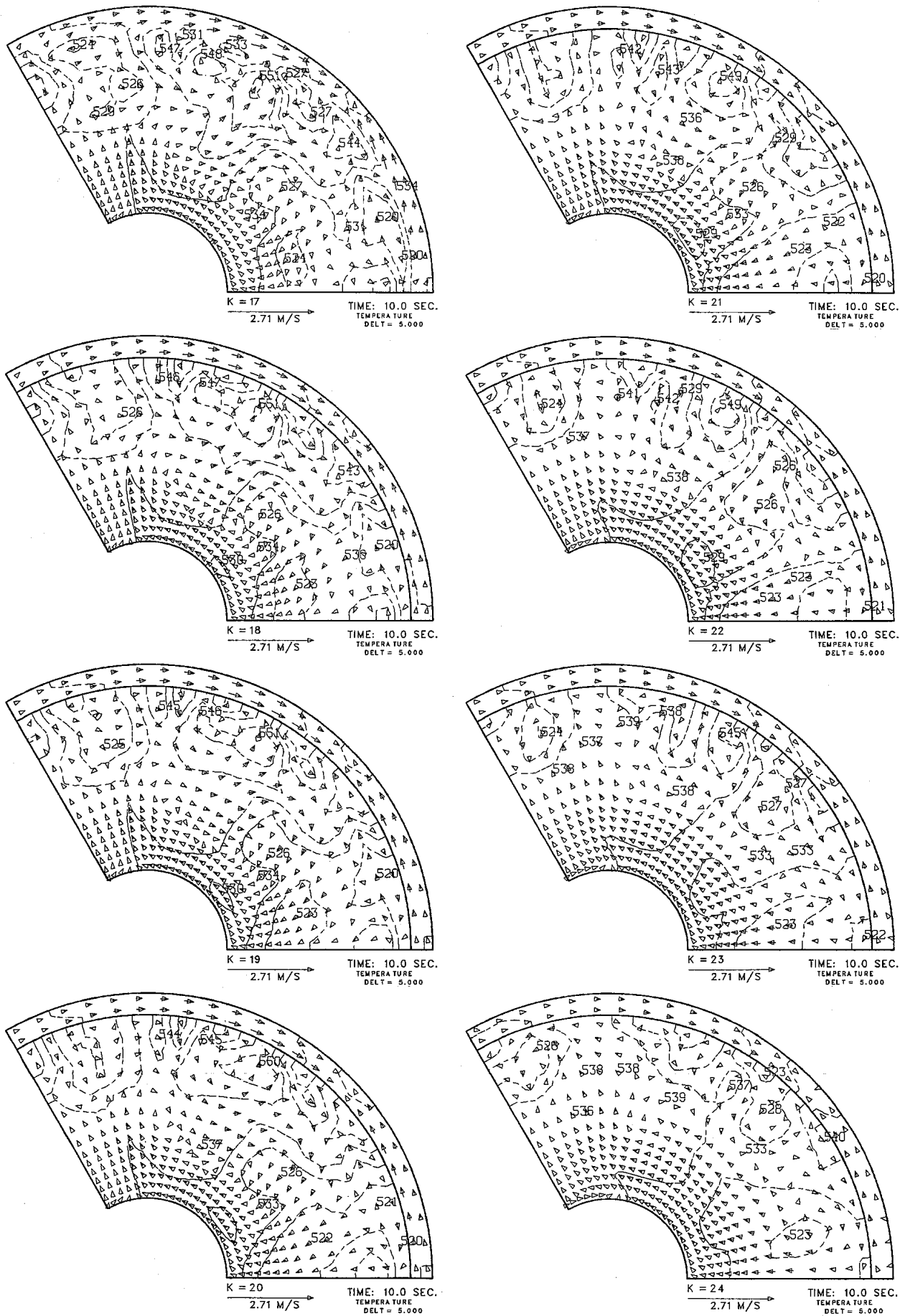


Fig. B. 2 (Continued)

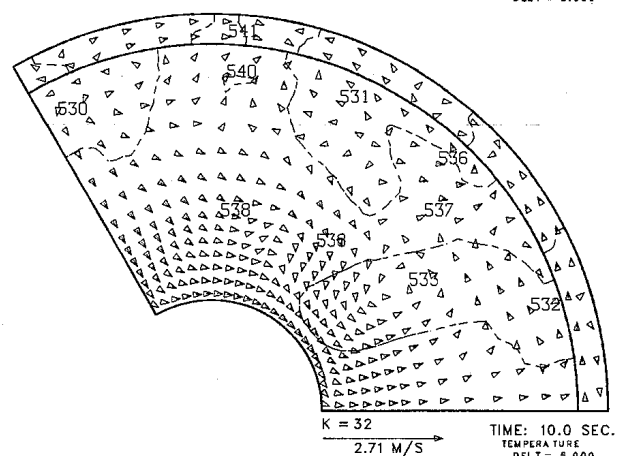
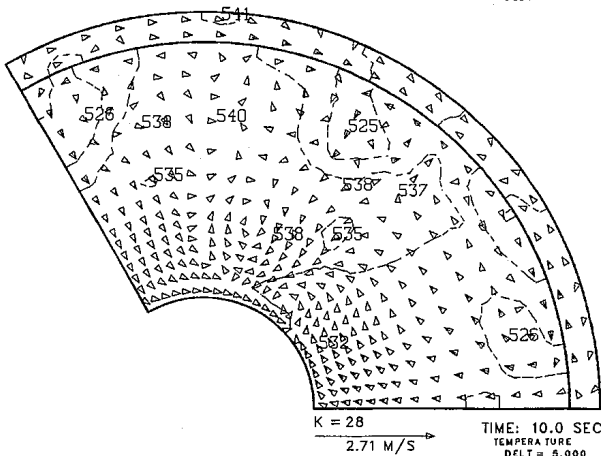
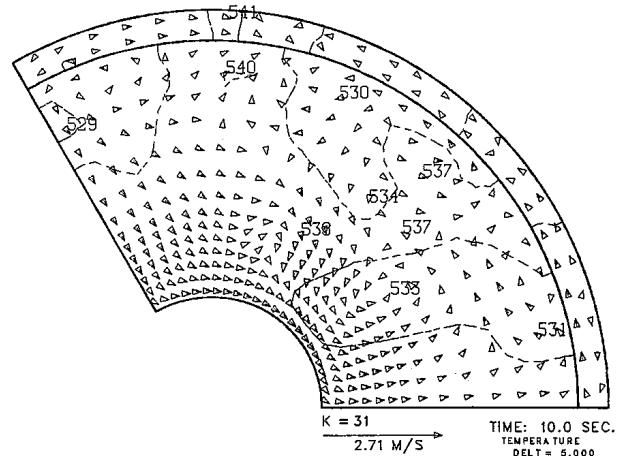
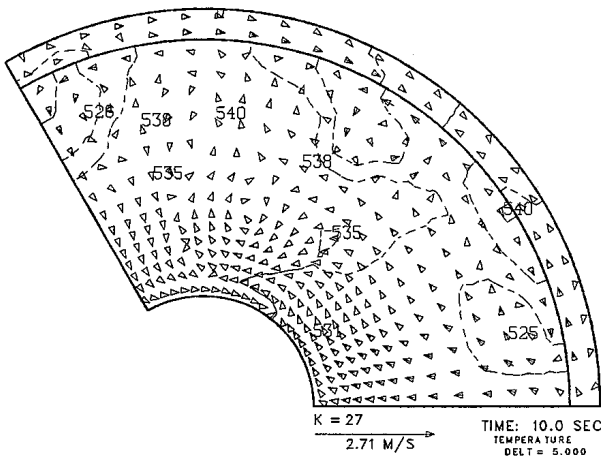
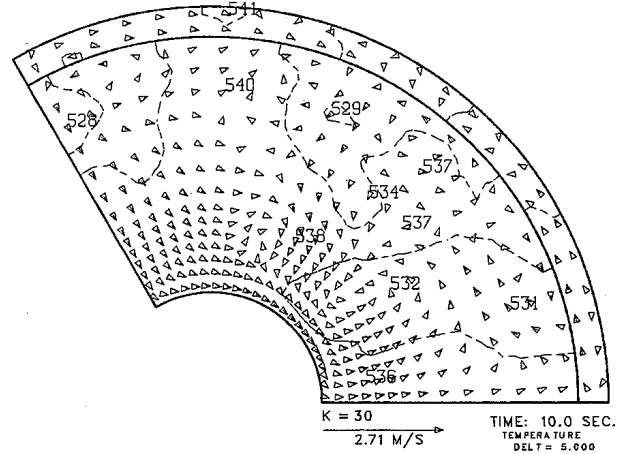
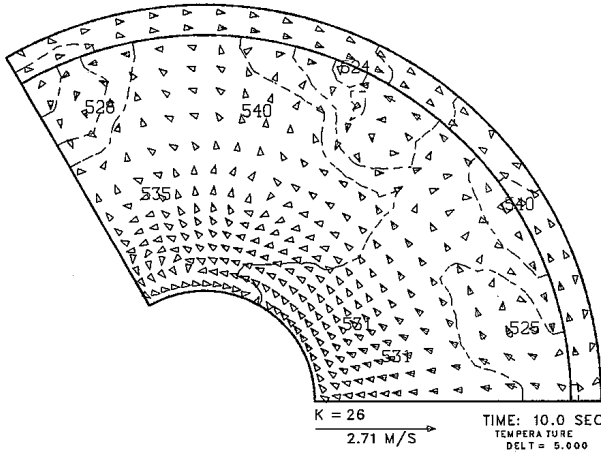
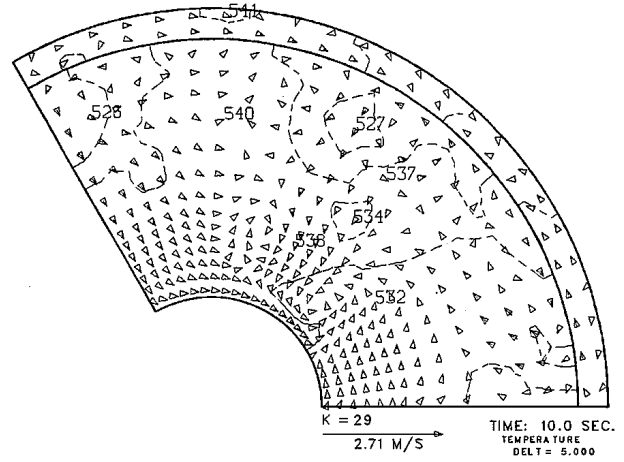
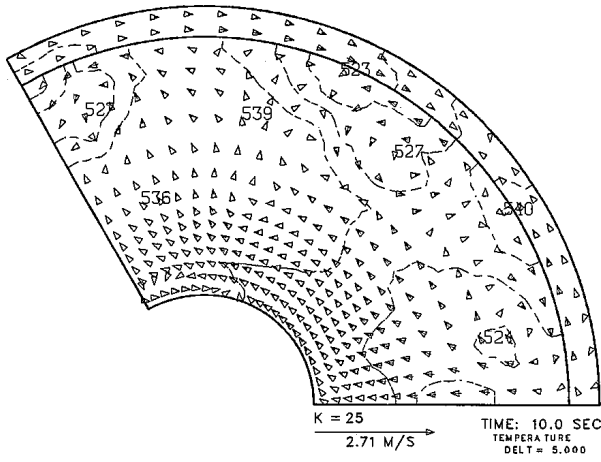


Fig. B. 2 (Continued)



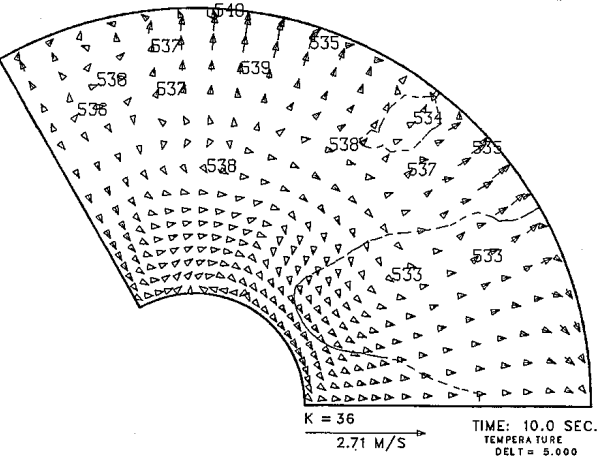
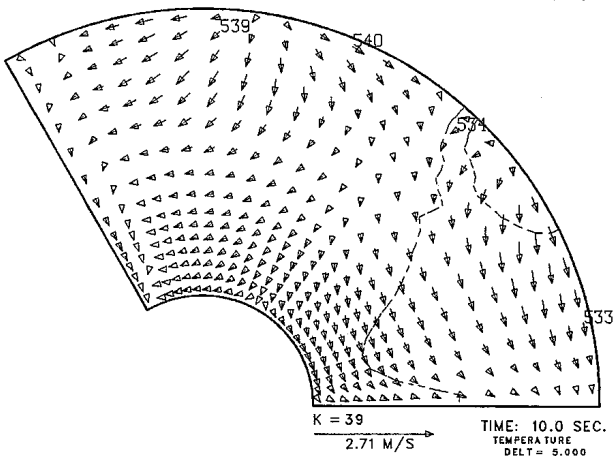
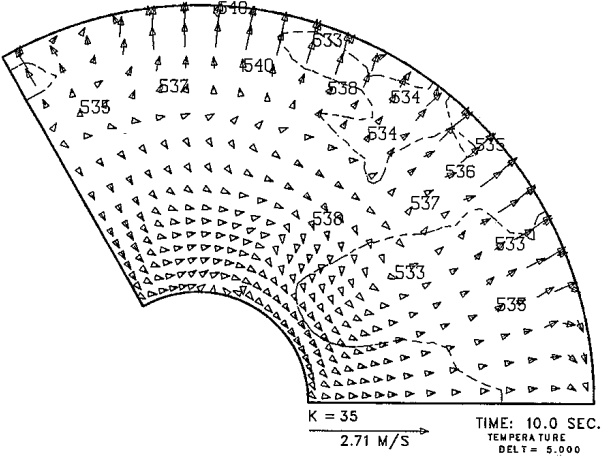
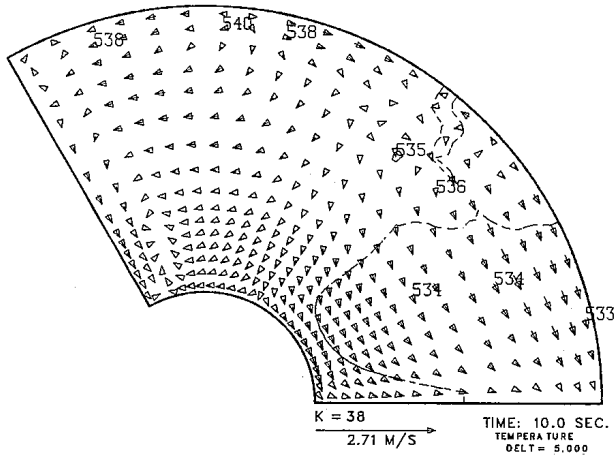
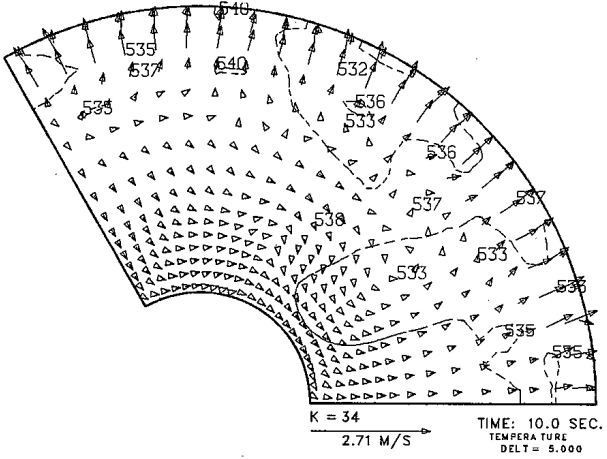
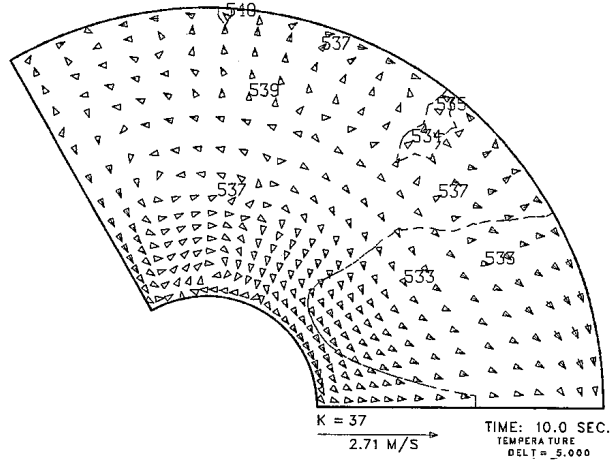
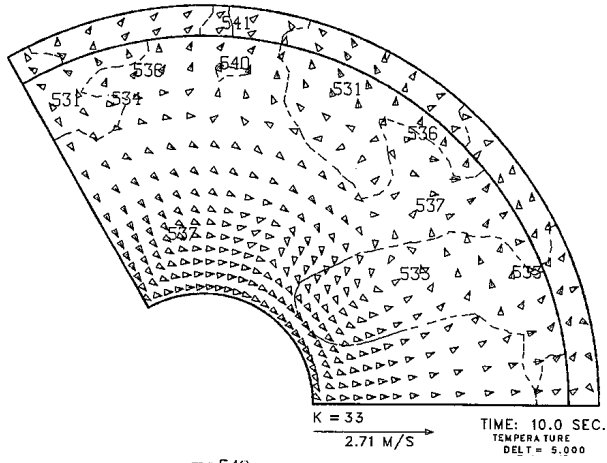


Fig. B. 2 (Continued)

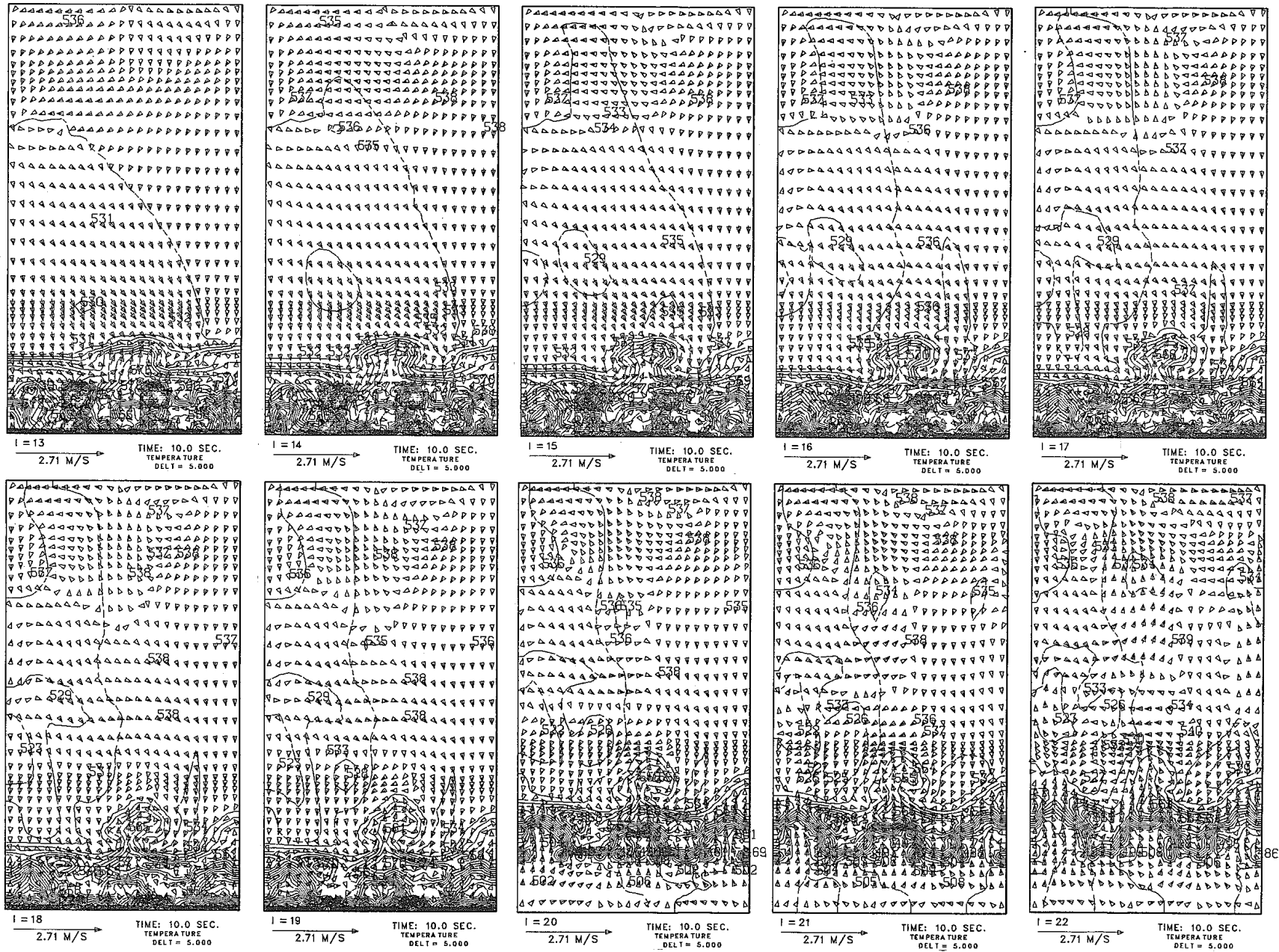


Fig. B.3 Vector and Temperature Field-Plots for  $\theta$ -z Planes in 10 seconds after UTOP Onset

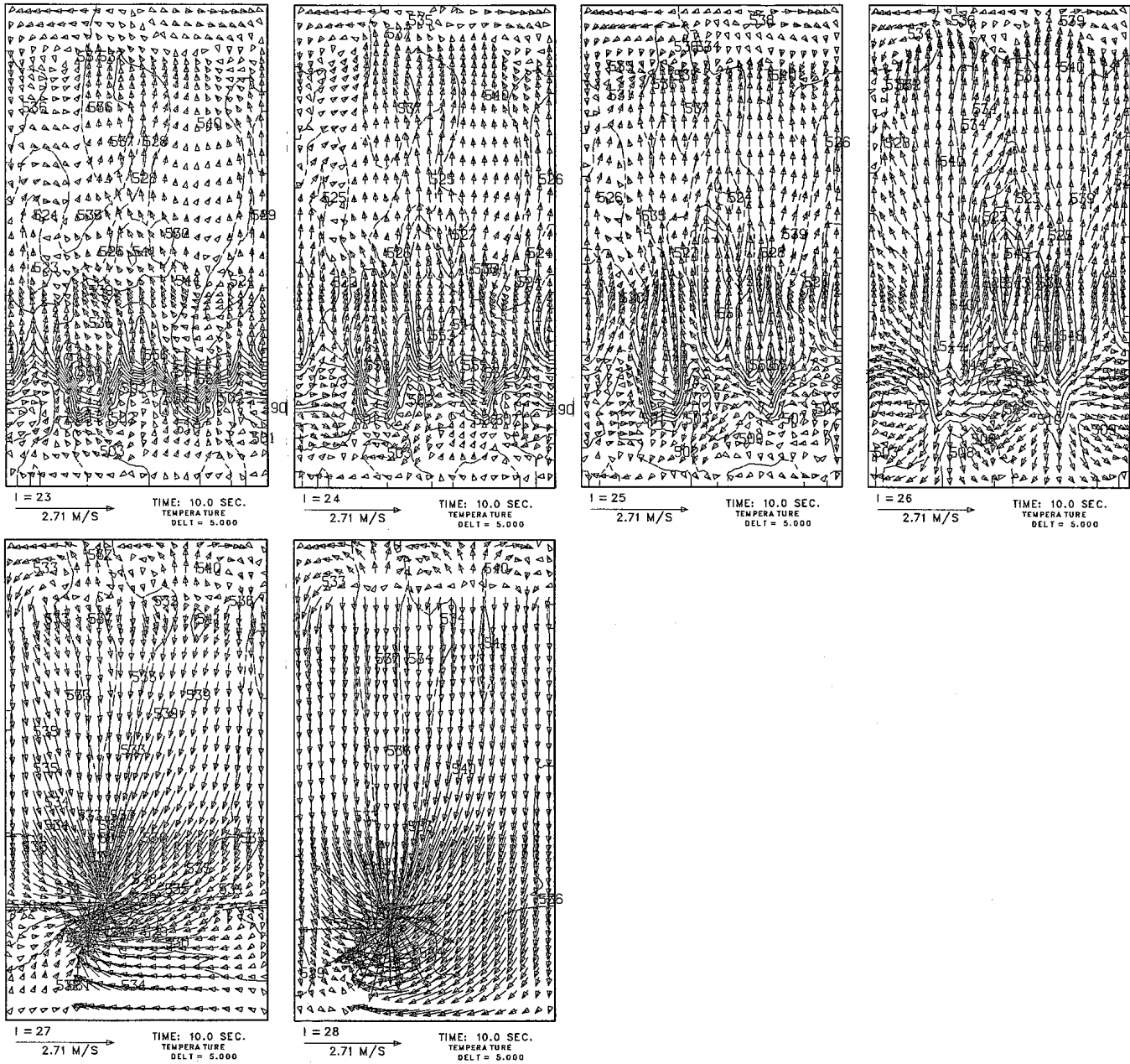


Fig. B. 3 (Continued)

付録C UTOP事象開始20秒後の上部プレナム熱流動特性

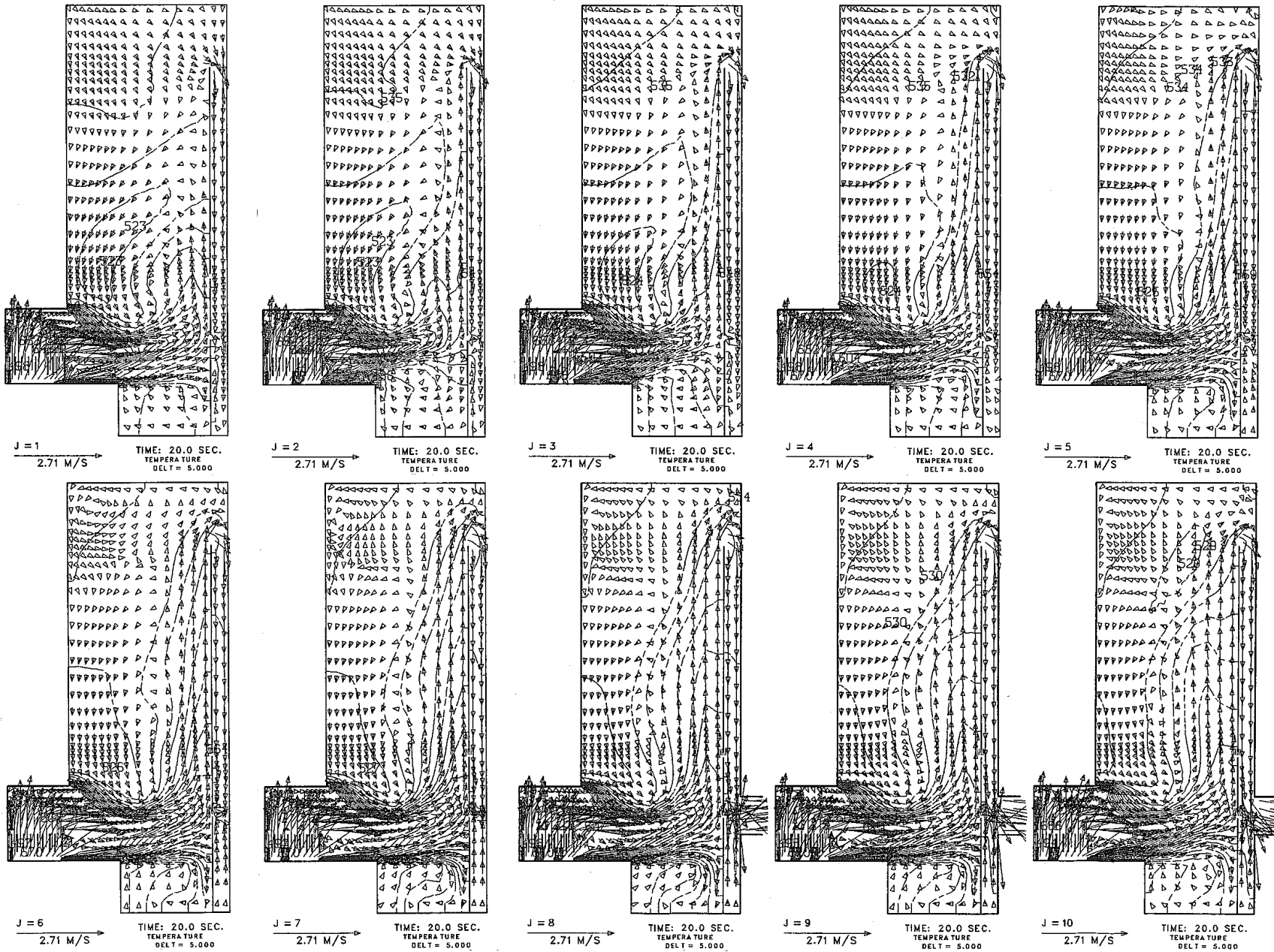


Fig. C. 1 Vector and Temperature Field Plots for r-z Planes in 20 seconds after UTOP Onset

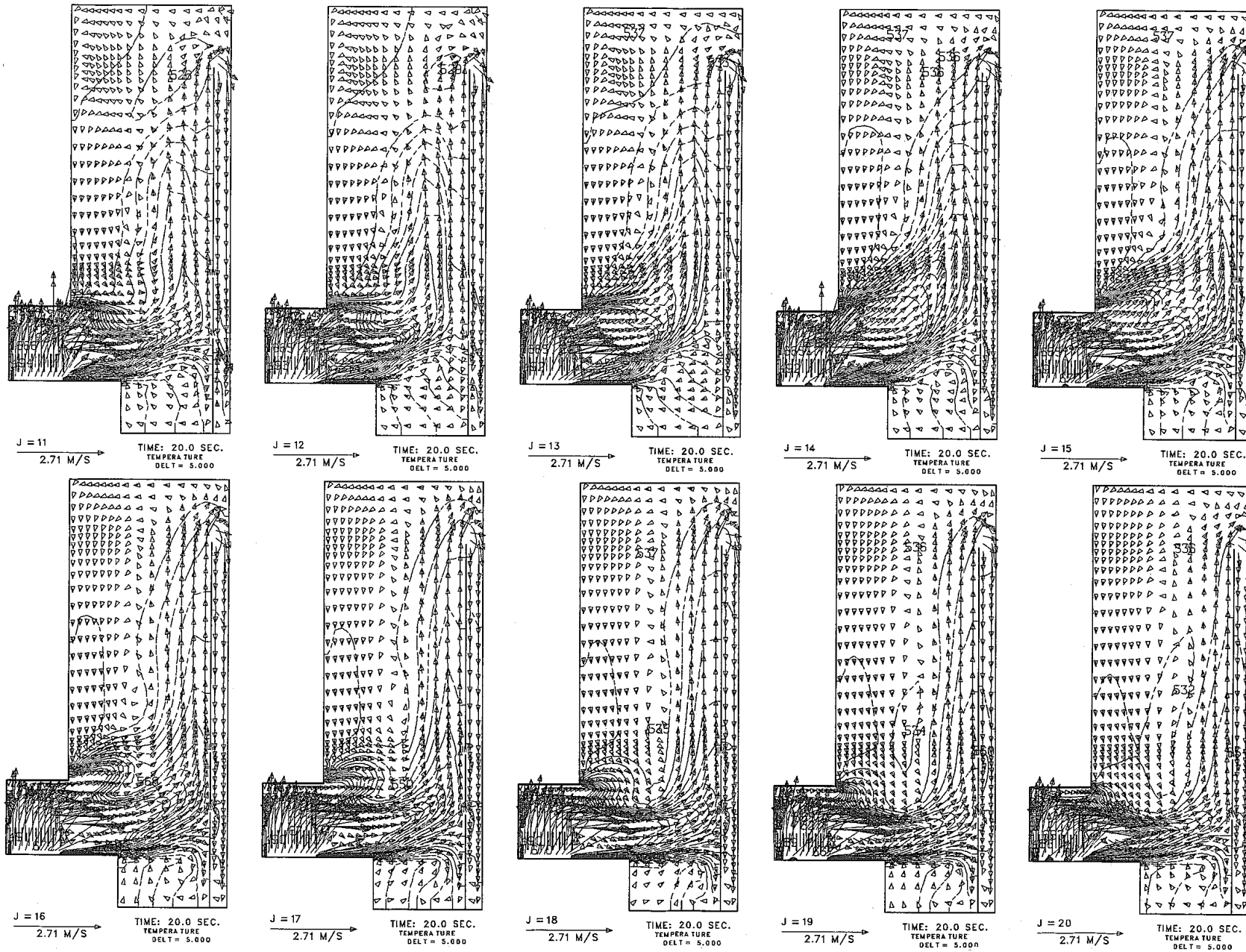
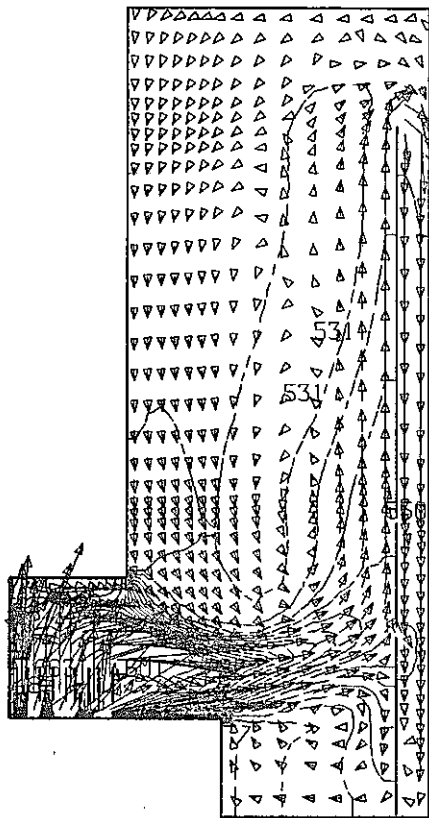
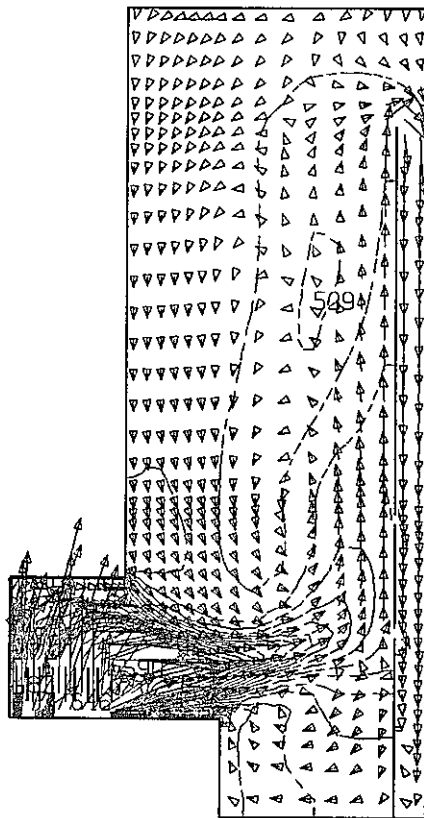


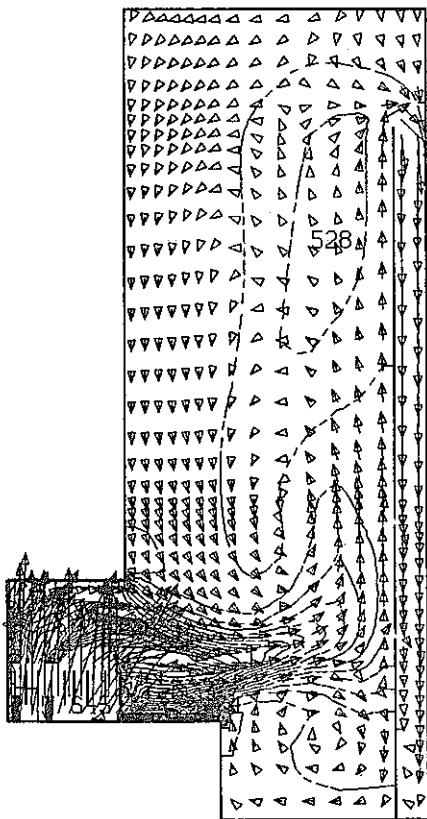
Fig. C. 1 (Continued)



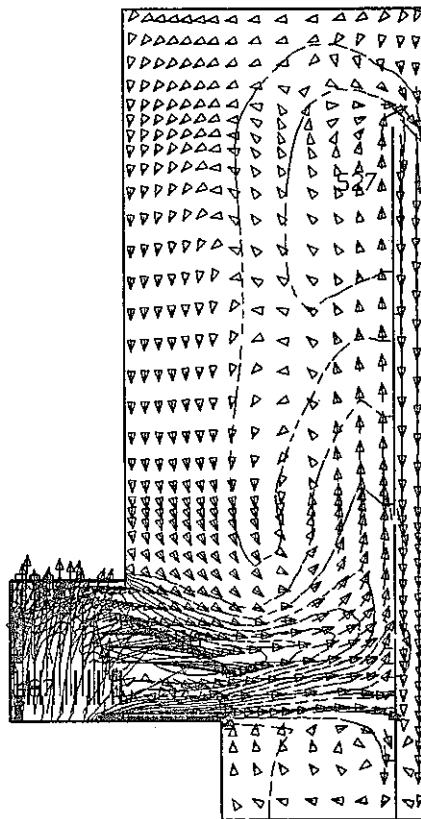
J = 21  
2.71 M/S  
TIME: 20.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DEL T = 5.000



J = 22  
2.71 M/S  
TIME: 20.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DEL T = 5.000



J = 23  
2.71 M/S  
TIME: 20.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DEL T = 5.000



J = 24  
2.71 M/S  
TIME: 20.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DEL T = 5.000

Fig. C. 1 (Continued)

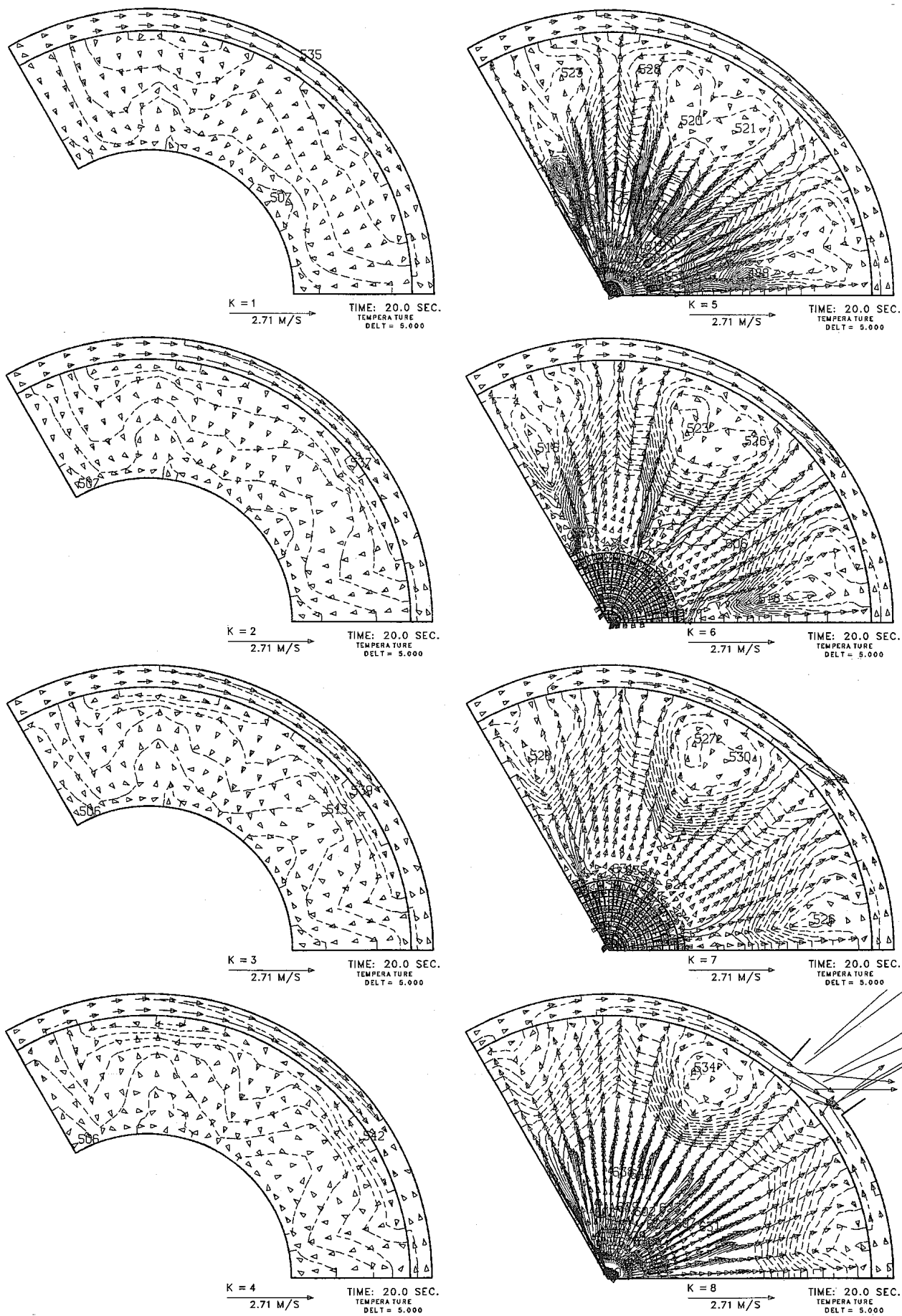


Fig. C. 2 Vector and Temperature Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 20 seconds after UTOP Onset



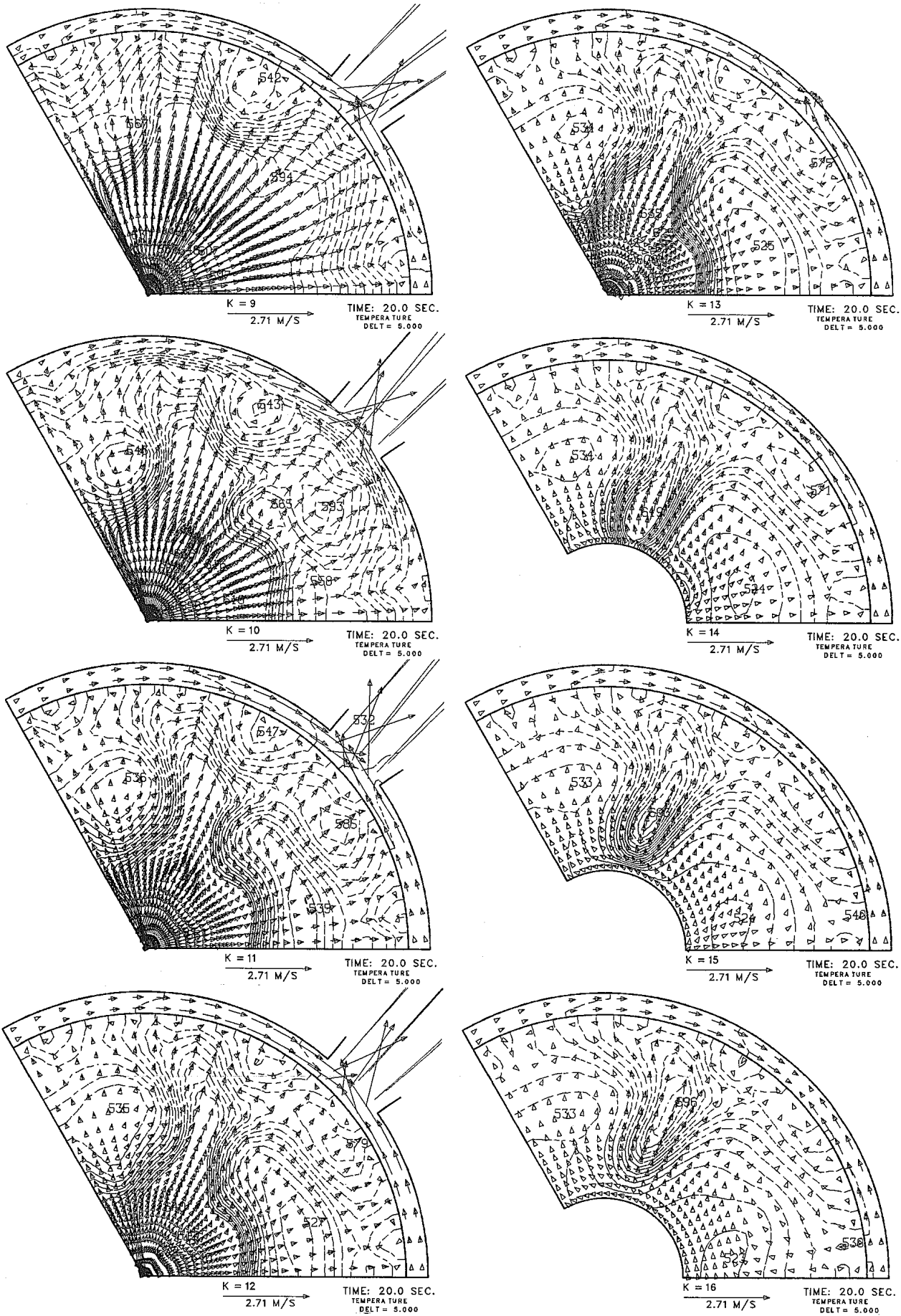


Fig. C. 2 (Continued)

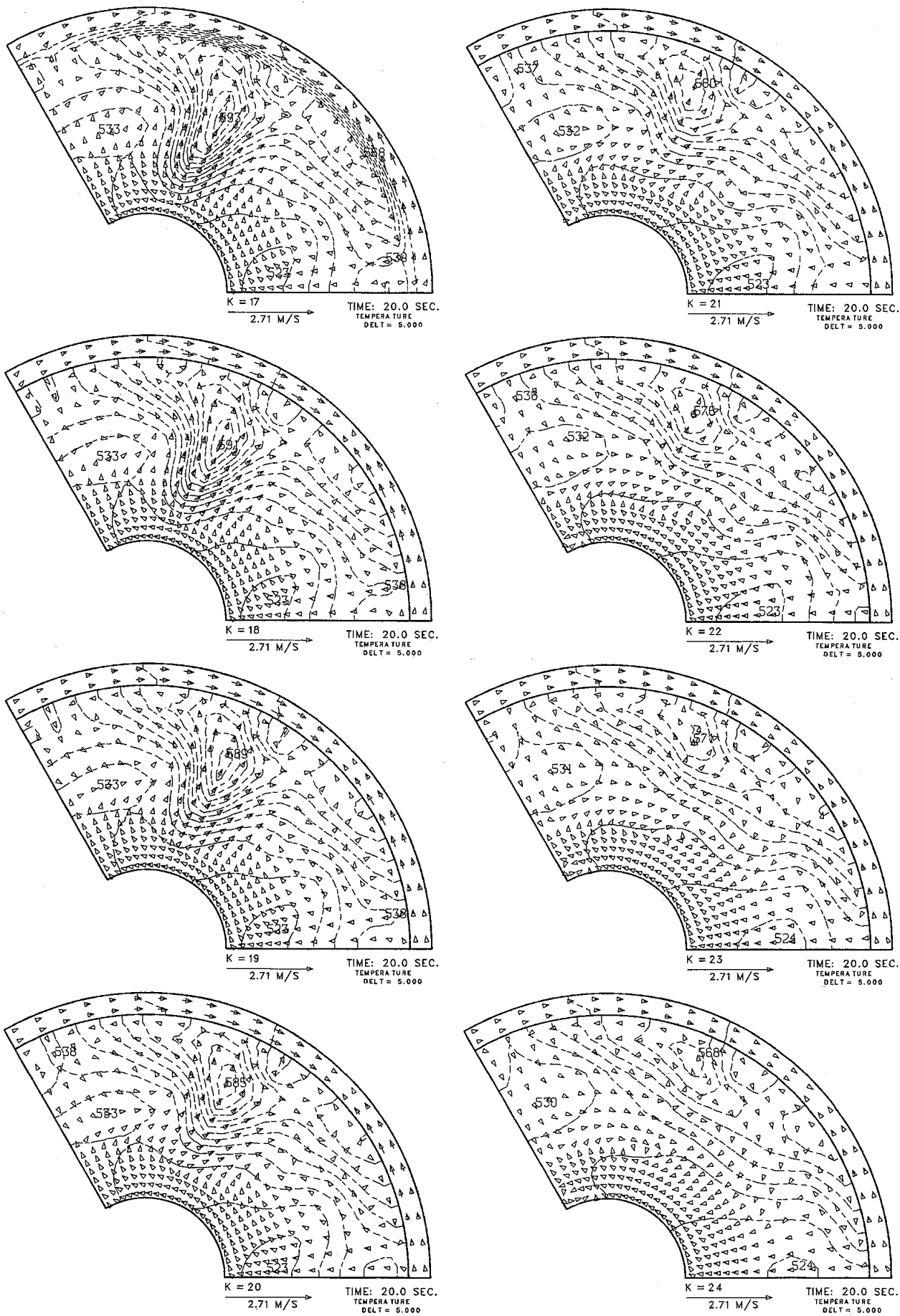


Fig. C. 2 (Continued)

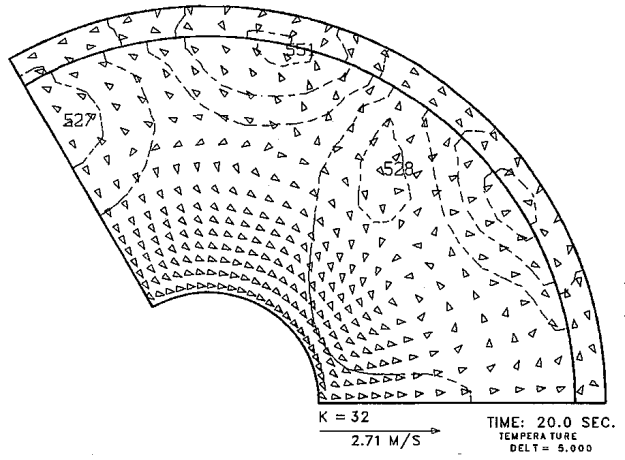
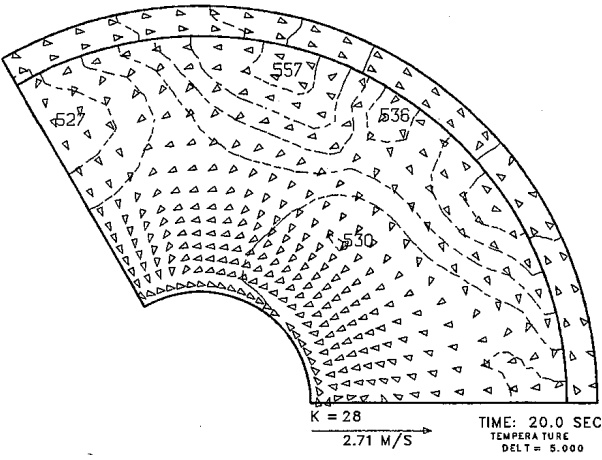
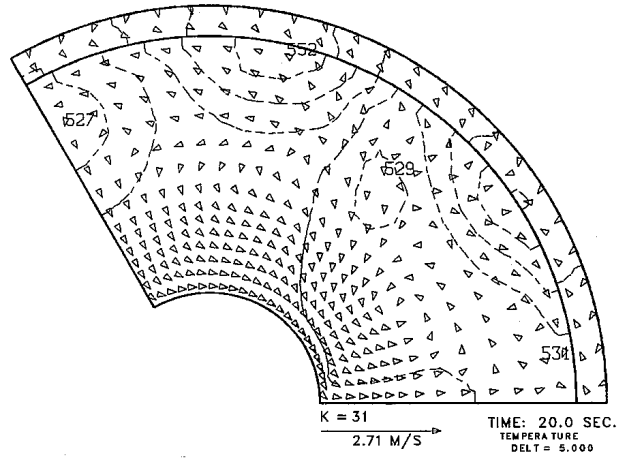
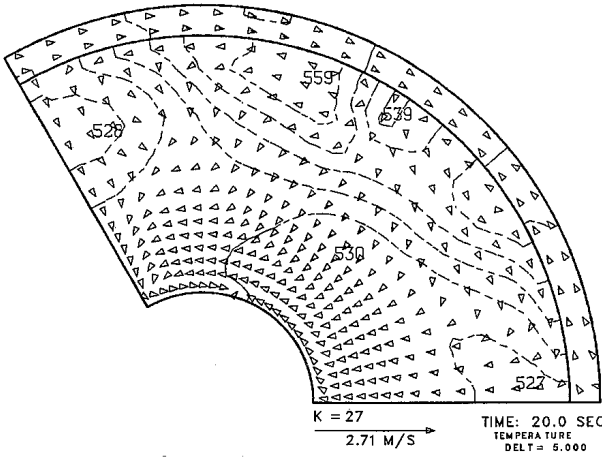
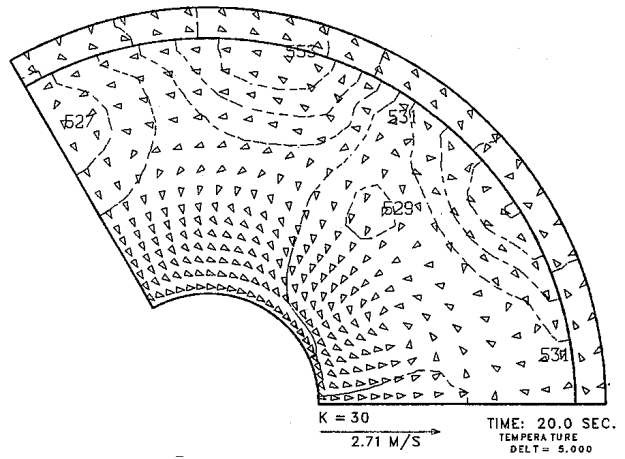
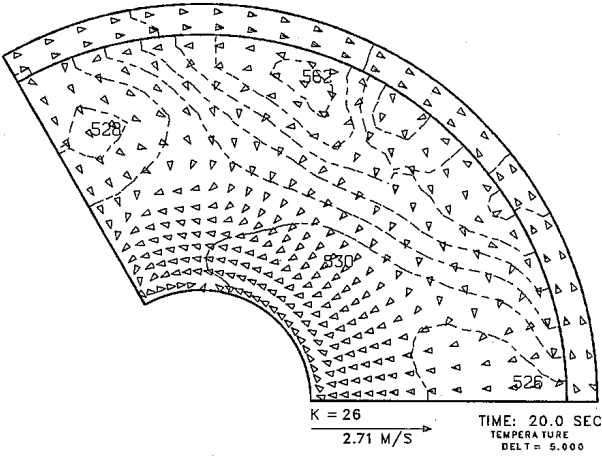
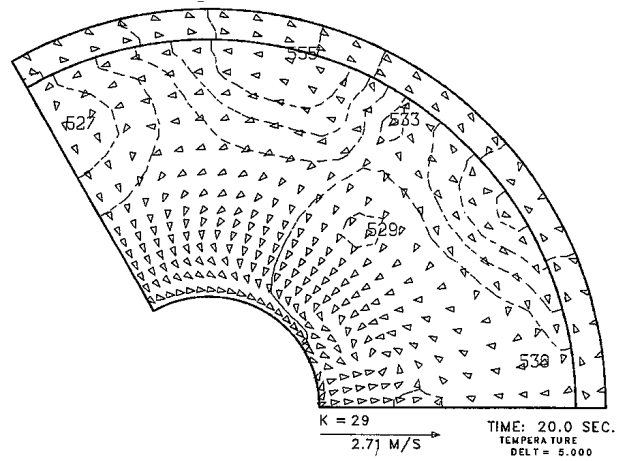
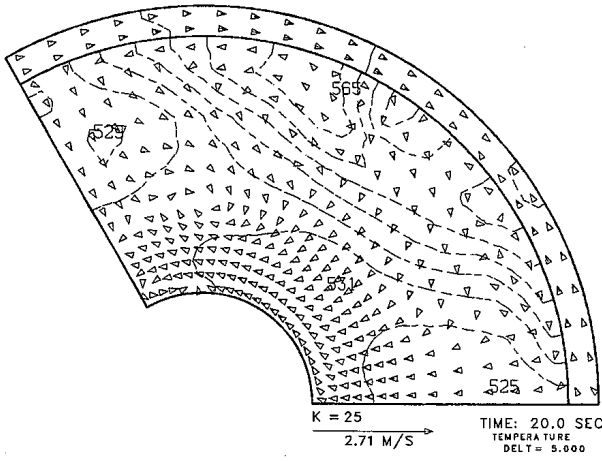


Fig. C. 2 (Continued)

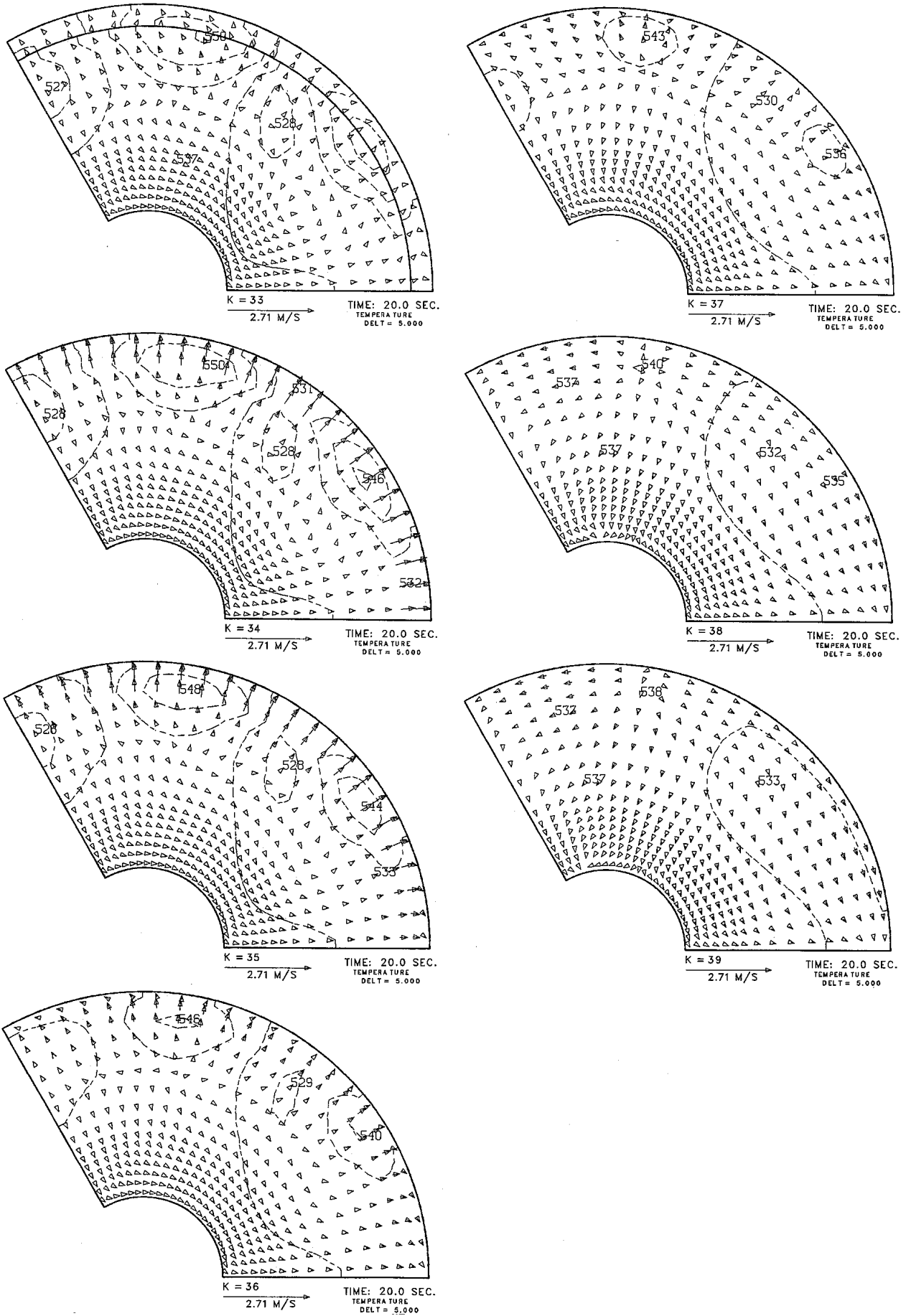


Fig. C. 2 (Continued)

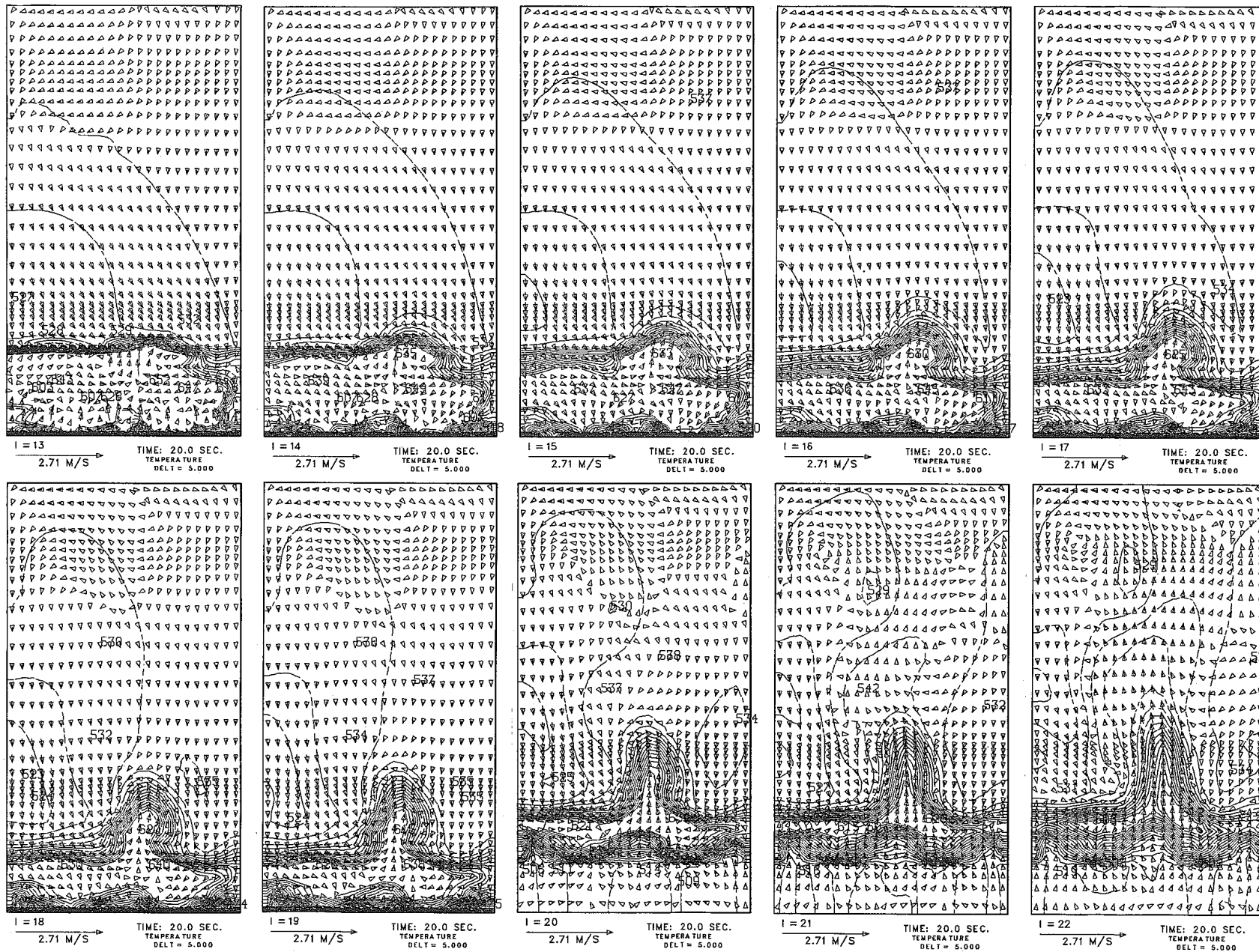


Fig. C. 3 Vector and Temperature Field Plots for  $\theta$ - $z$  Planes in 20 seconds after UTOP Onset

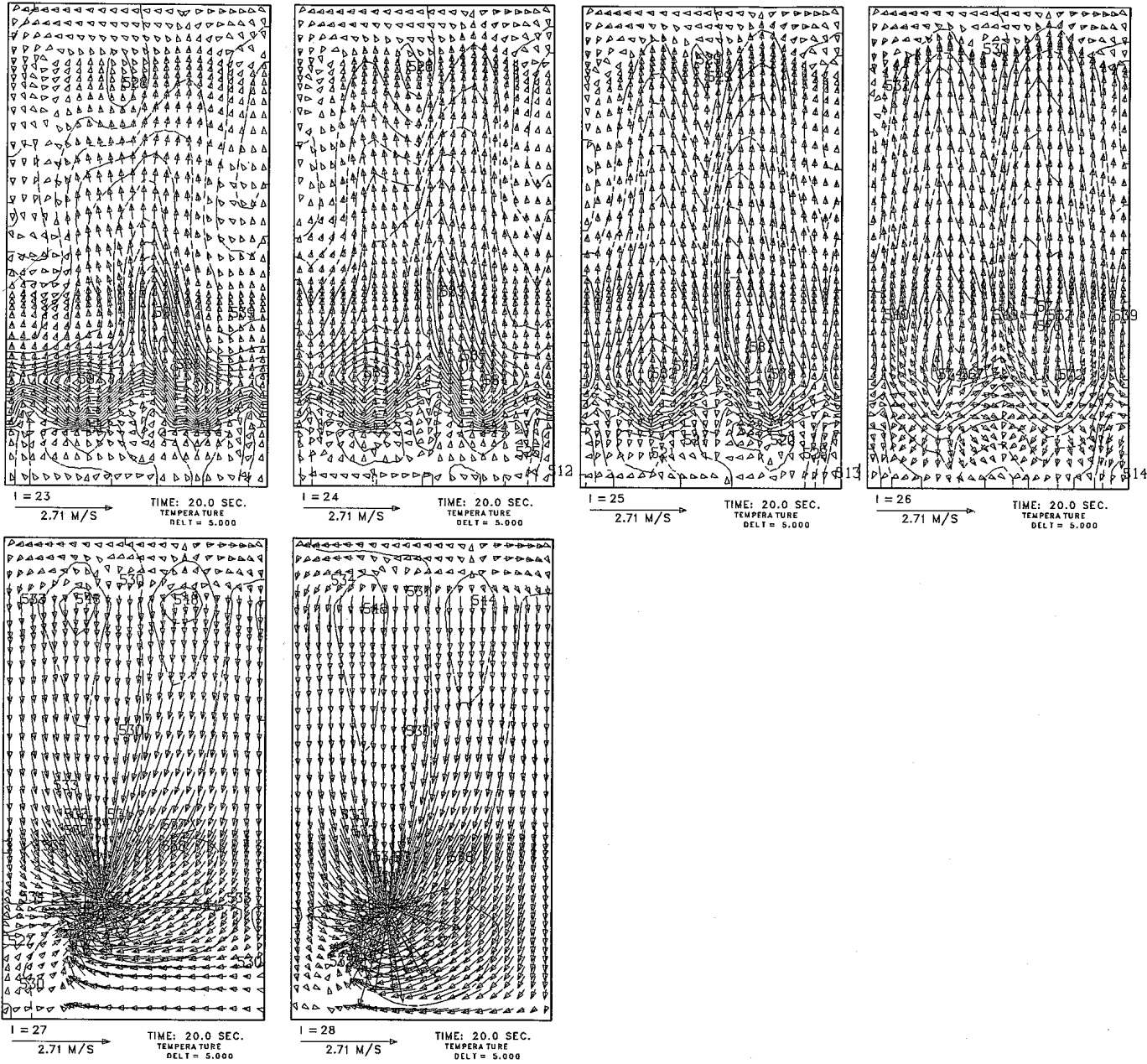


Fig. C. 3 (Continued)

付録D UTOP事象開始30秒後の上部プレナム熱流動特性

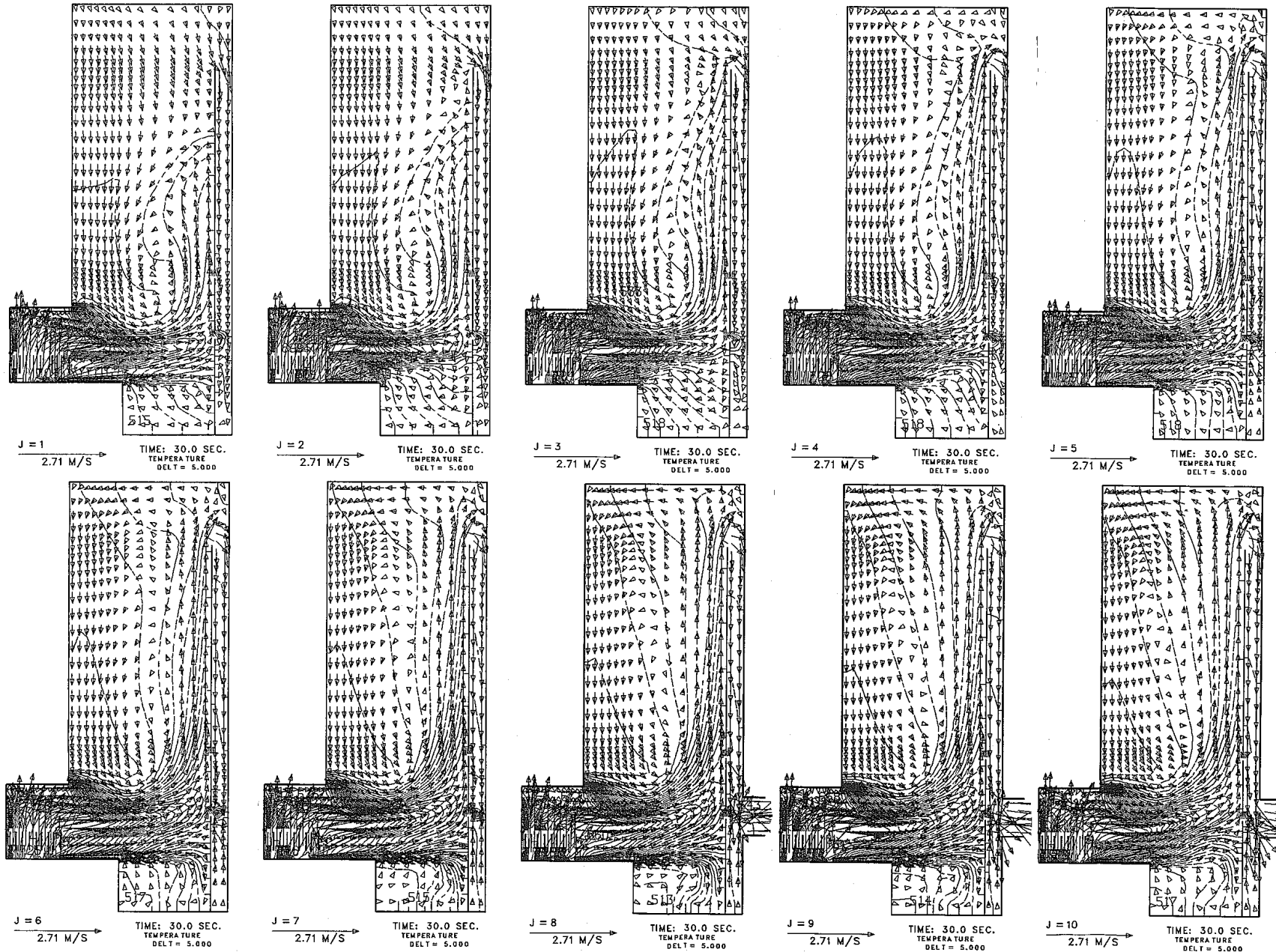


Fig. D. 1 Vector and Temperature Field Plots for r-z Planes in 30 seconds after UTOP Onset



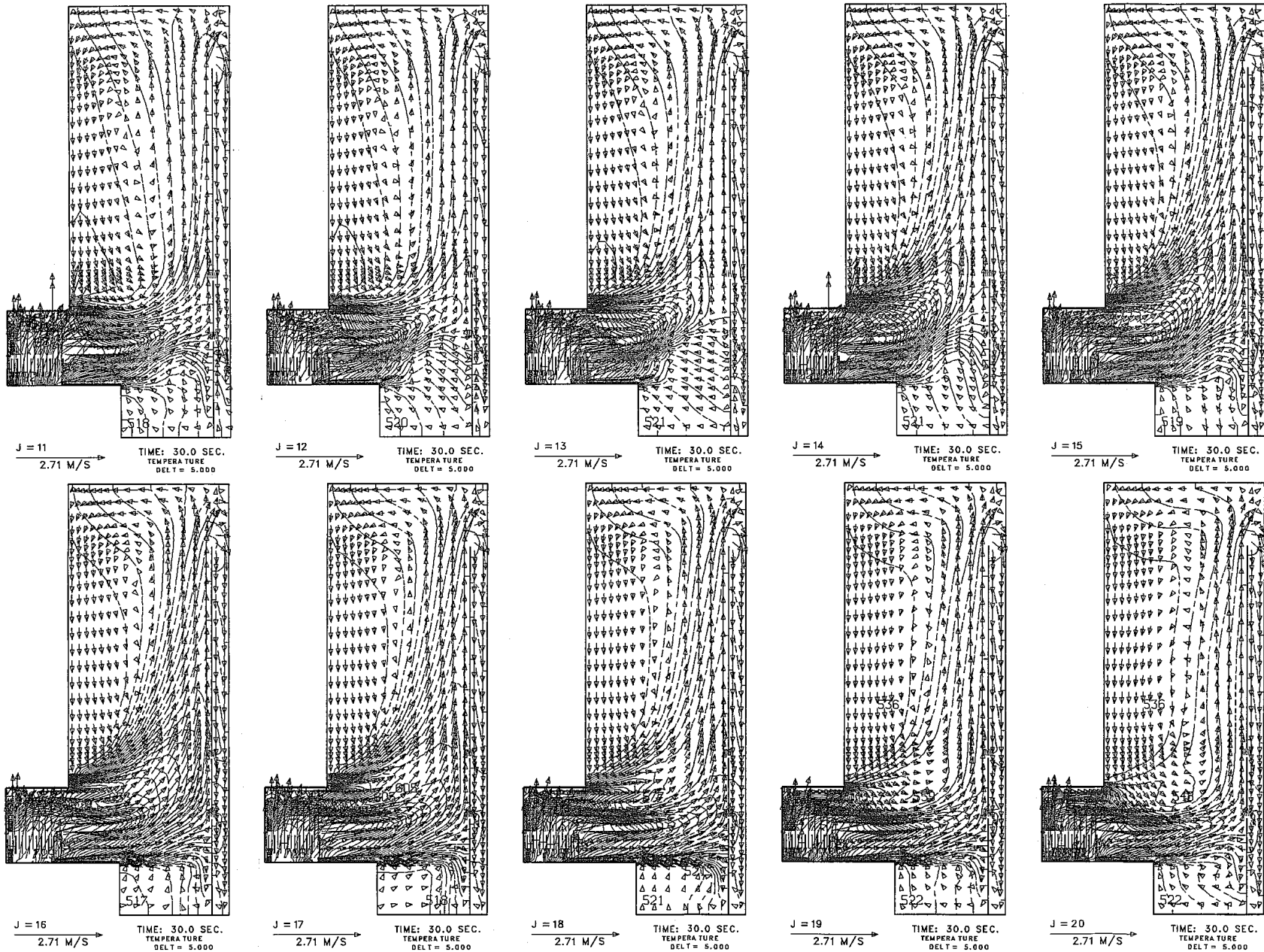
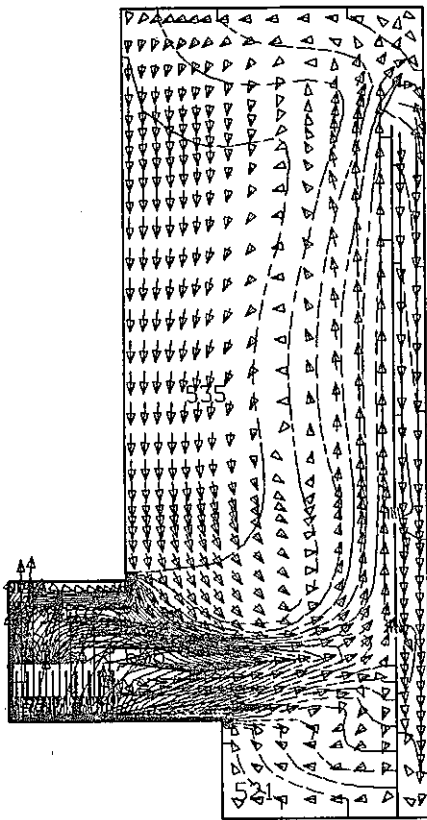
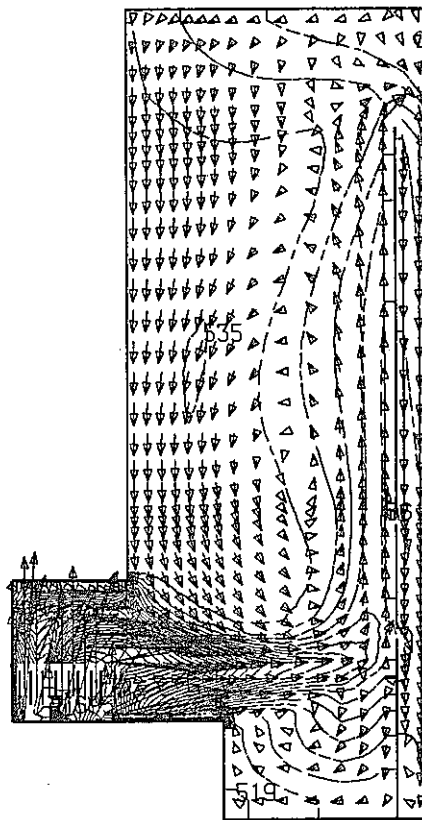


Fig. D. 1 (Continued)



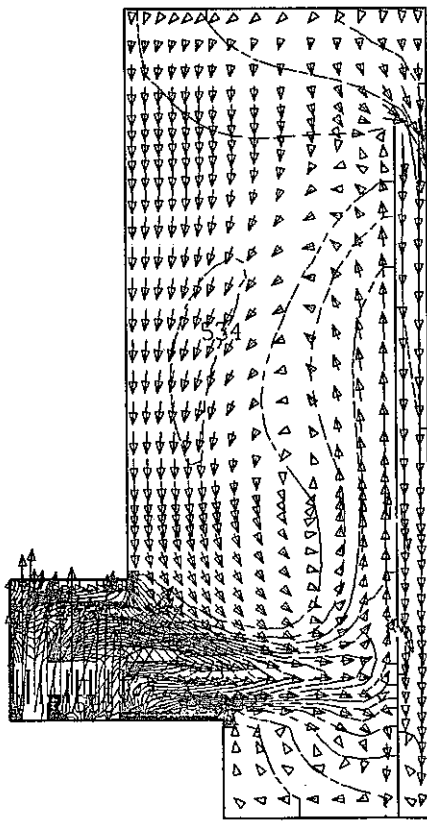
J = 21  
2.71 M/S

TIME: 30.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DELTA T = 5.000



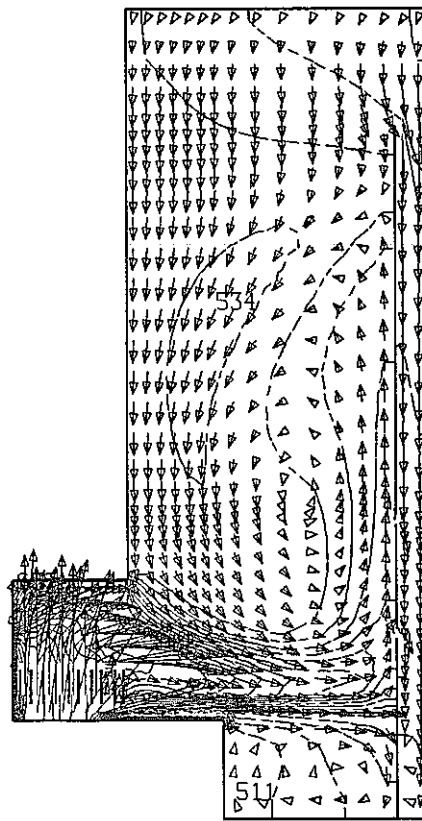
J = 22  
2.71 M/S

TIME: 30.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DELTA T = 5.000



J = 23  
2.71 M/S

TIME: 30.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DELTA T = 5.000



J = 24  
2.71 M/S

TIME: 30.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DELTA T = 5.000

Fig. D. 1 (Continued)

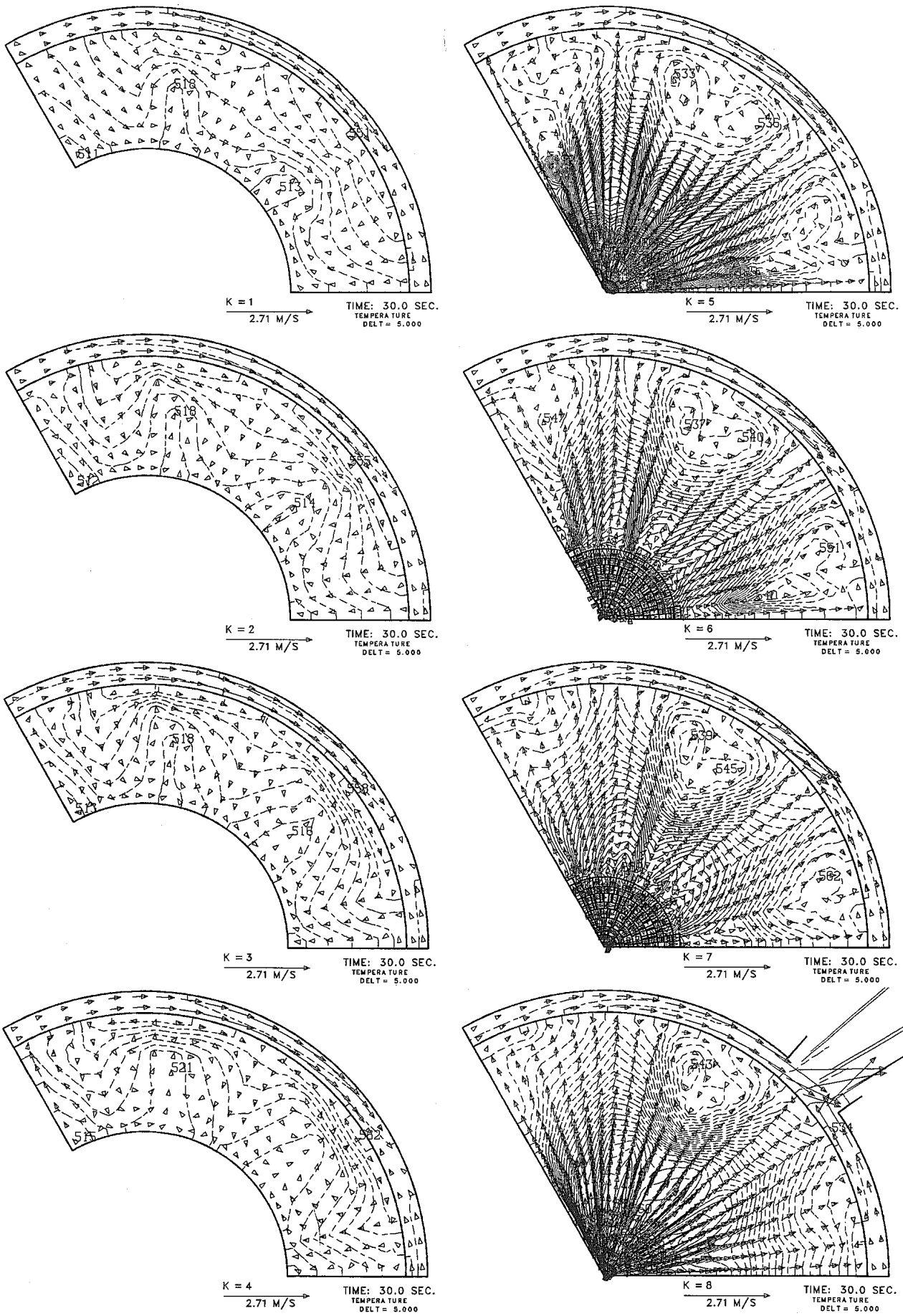


Fig. D. 2 Vector and Temperature Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 30 seconds after UTOP Onset

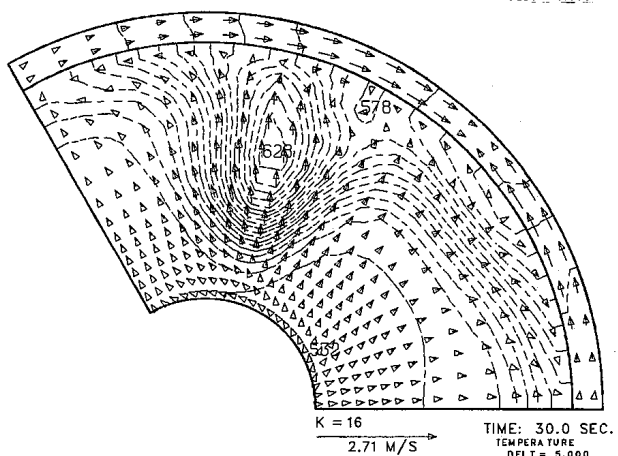
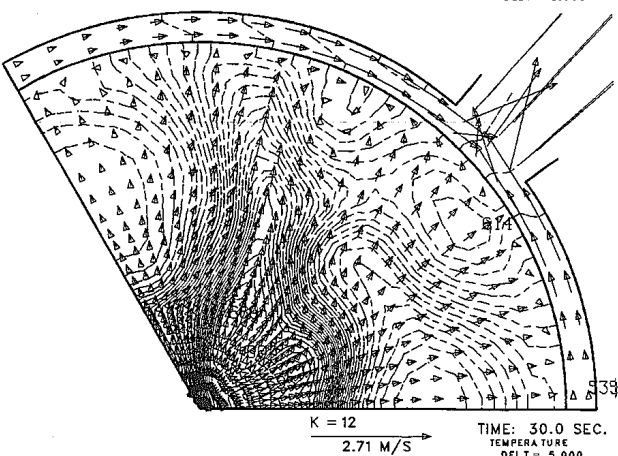
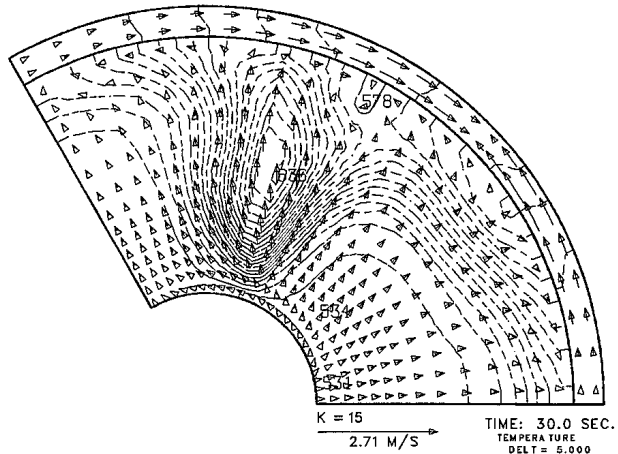
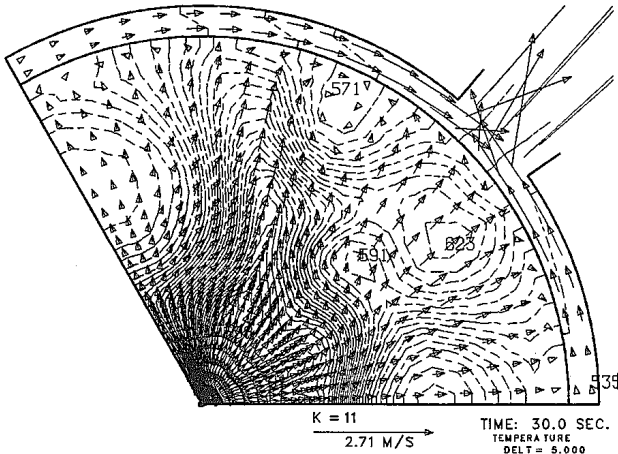
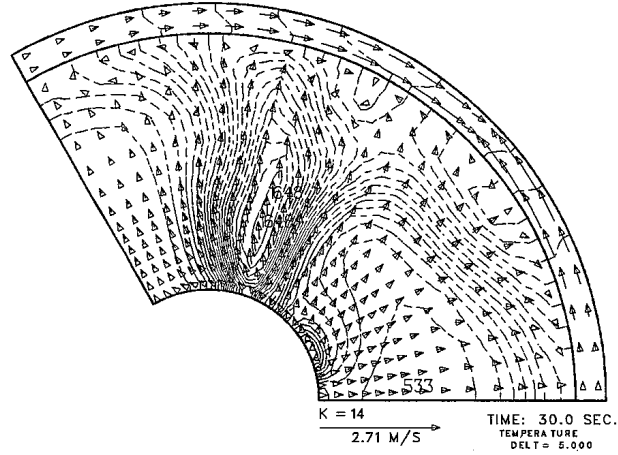
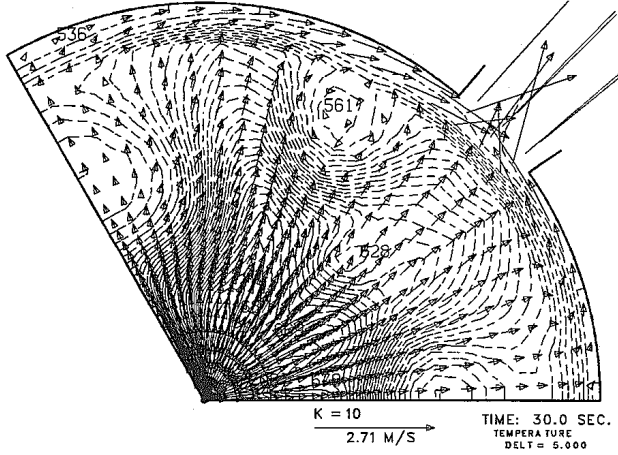
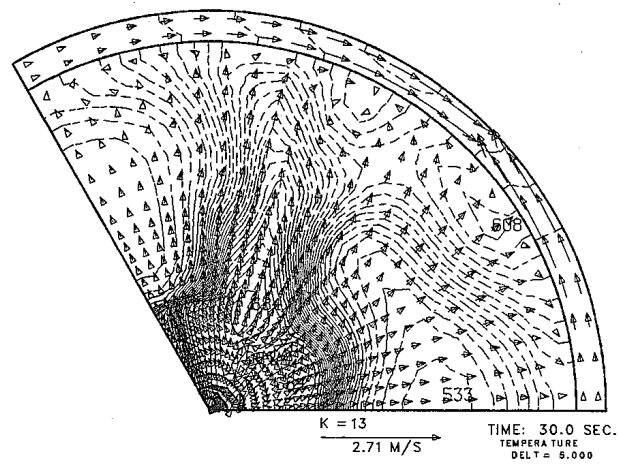
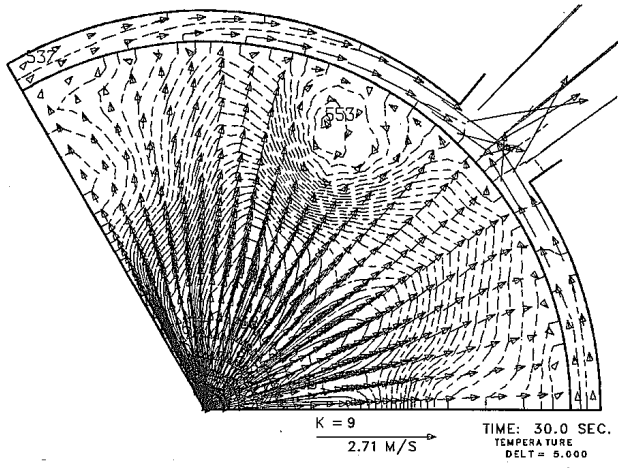


Fig. D. 2 (Continued)

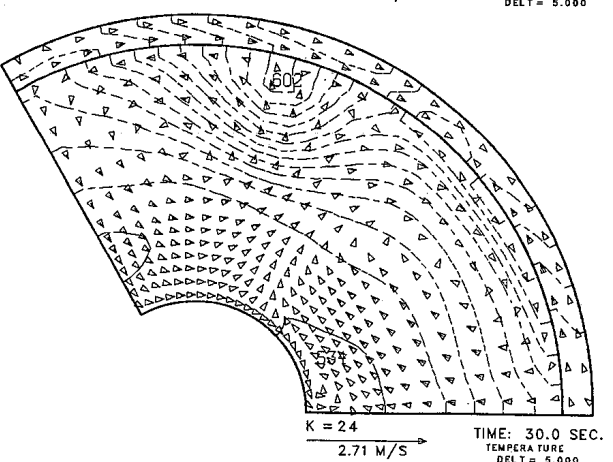
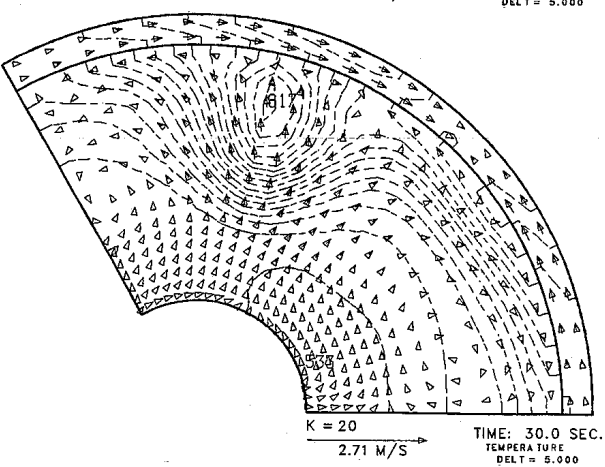
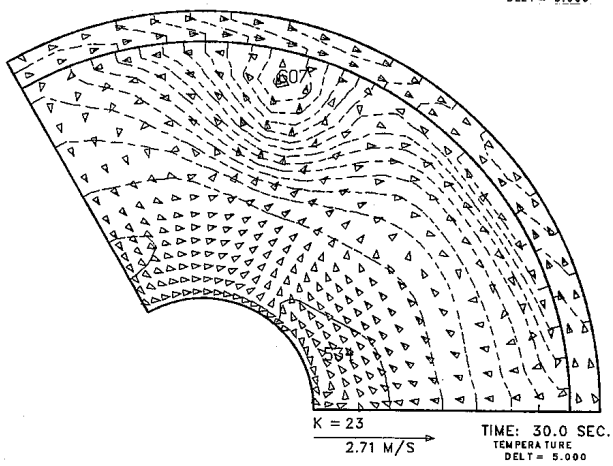
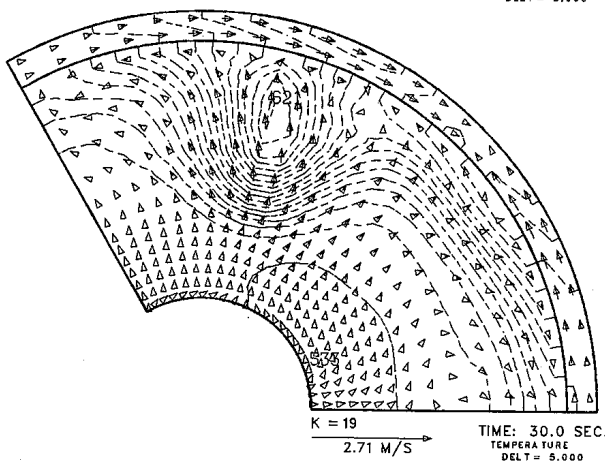
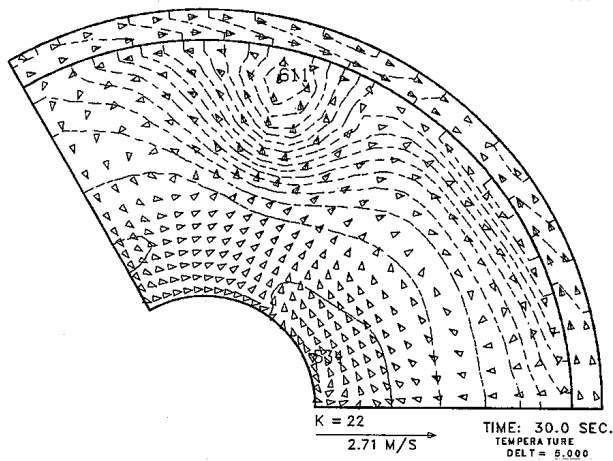
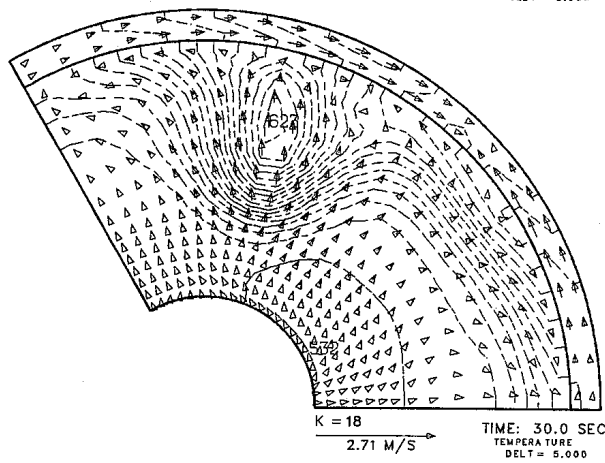
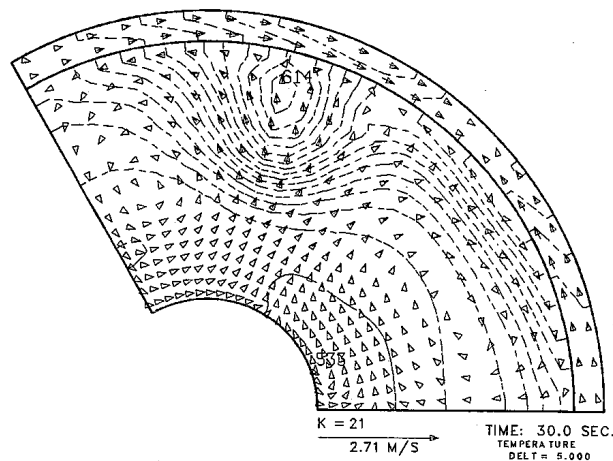
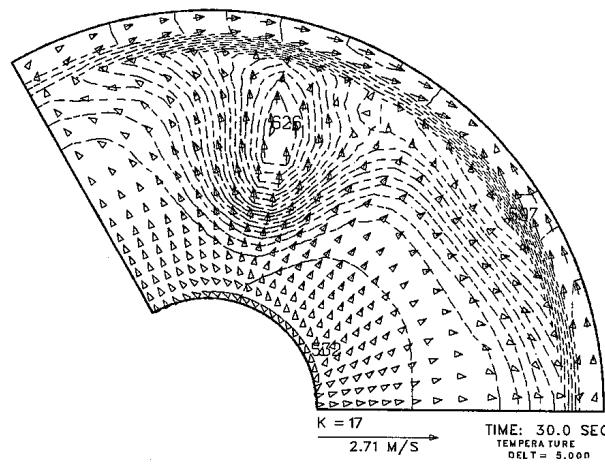


Fig. D. 2 (Continued)

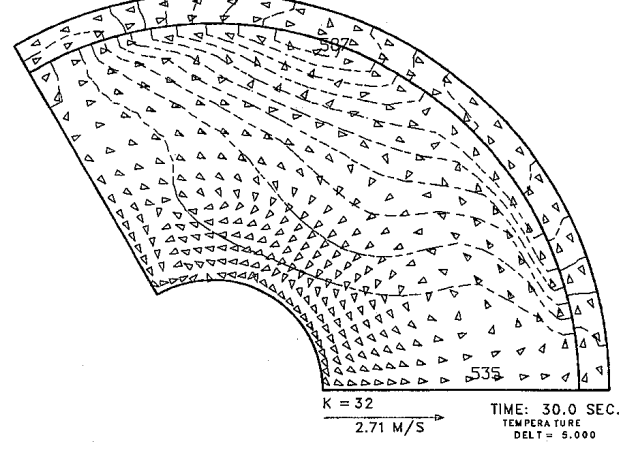
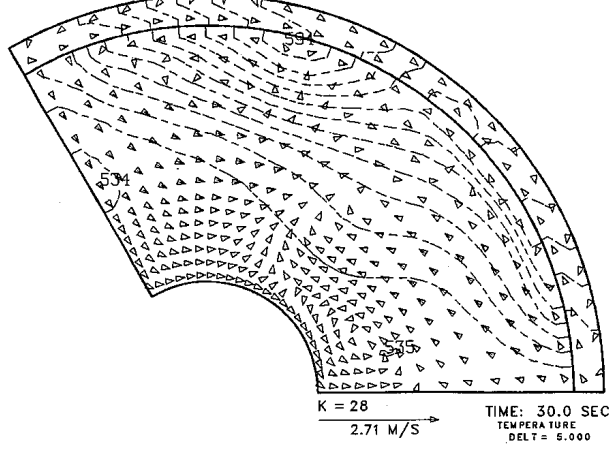
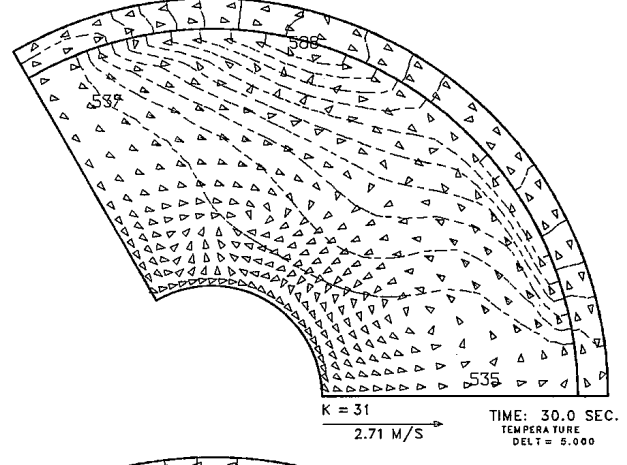
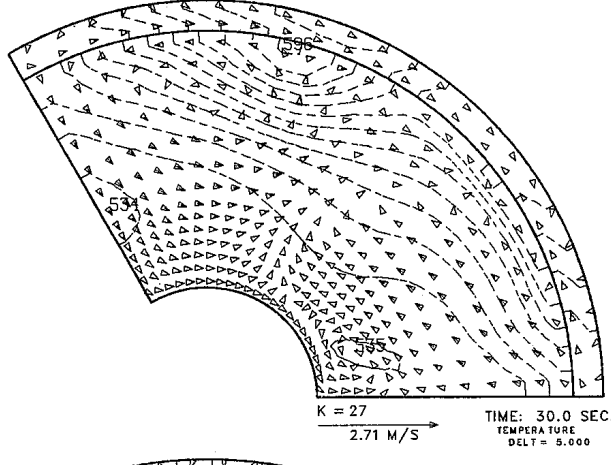
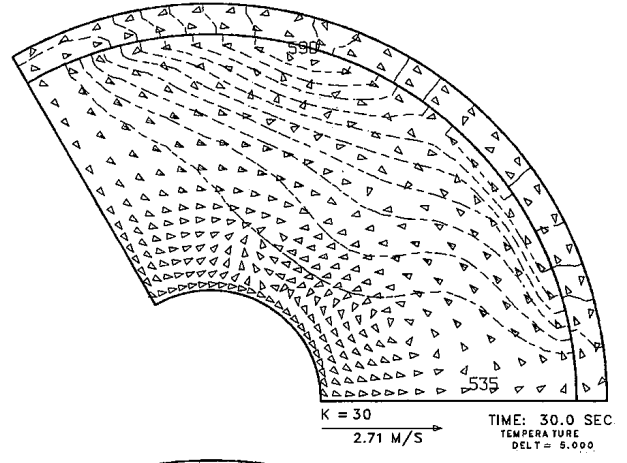
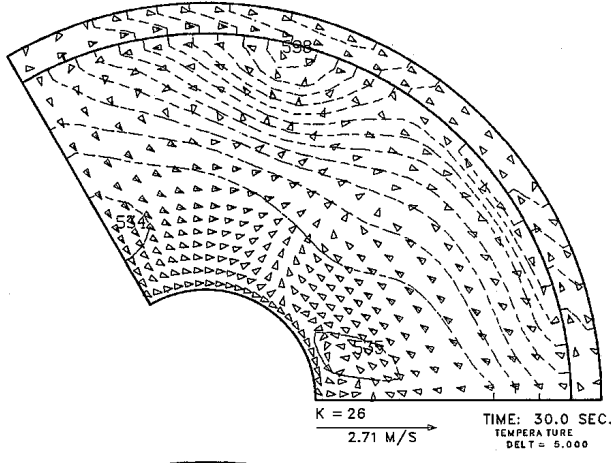
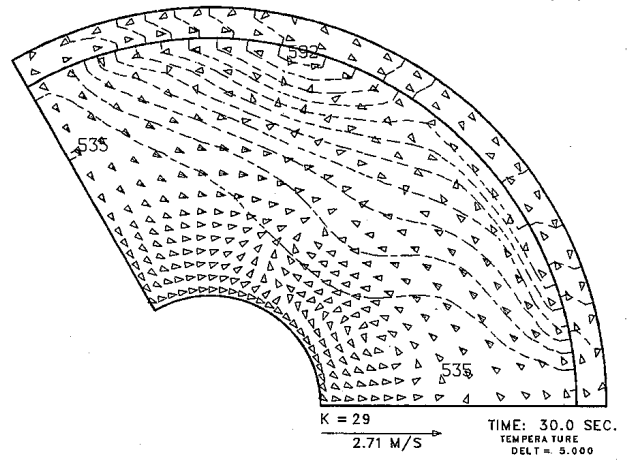
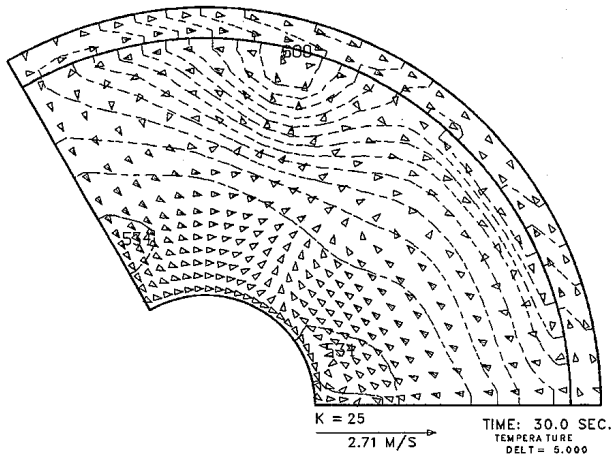


Fig. D. 2 (Continued)

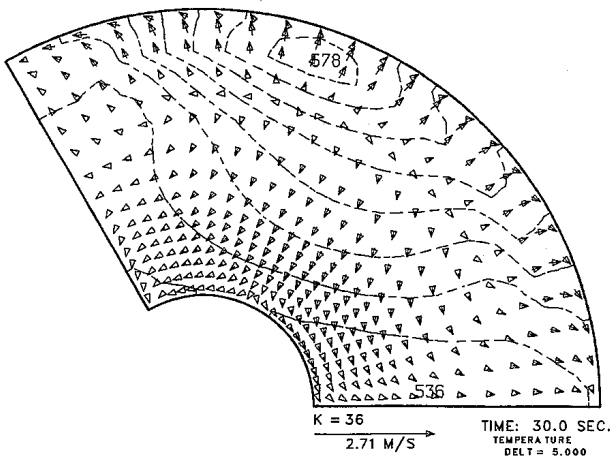
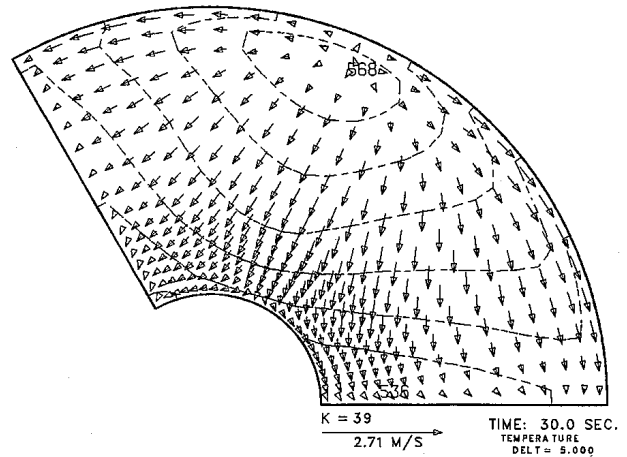
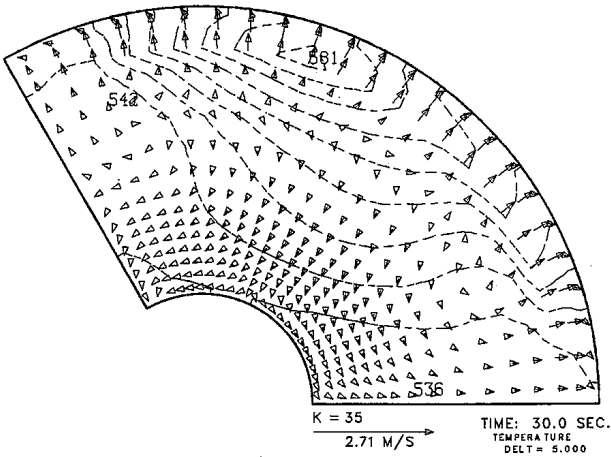
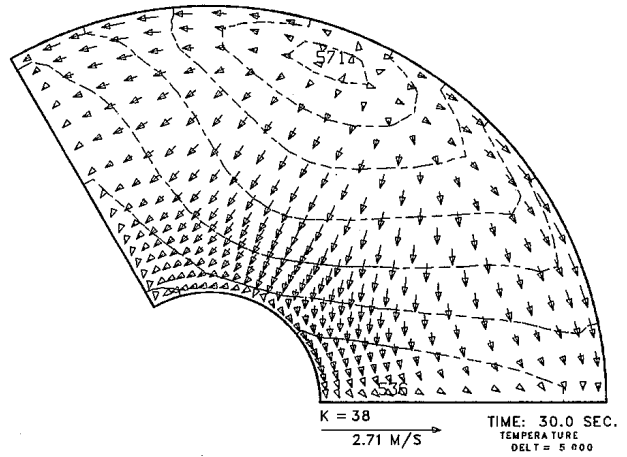
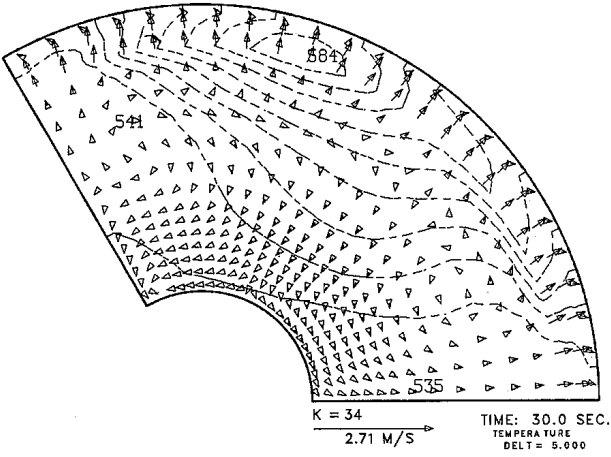
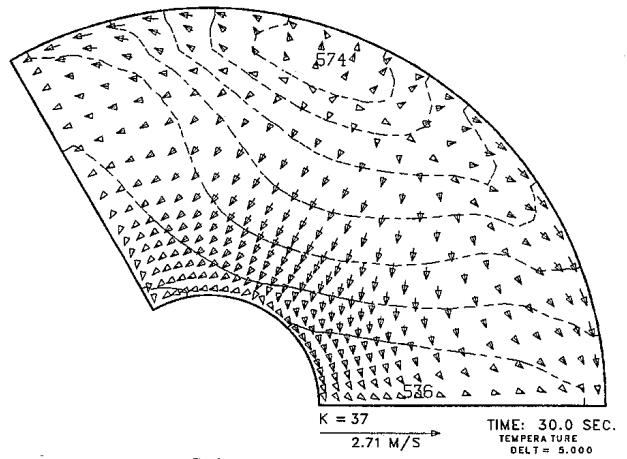
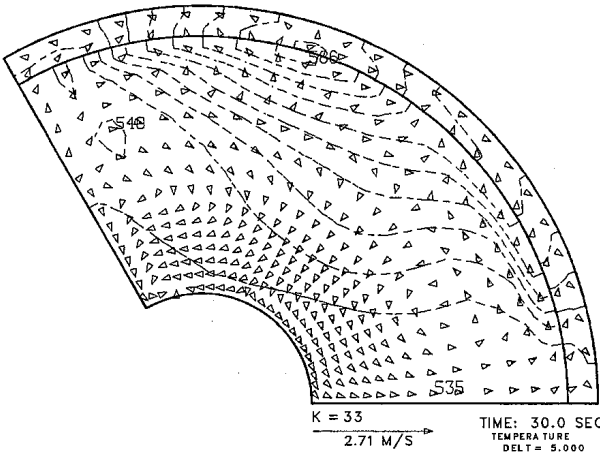


Fig. D. 2 (Continued)

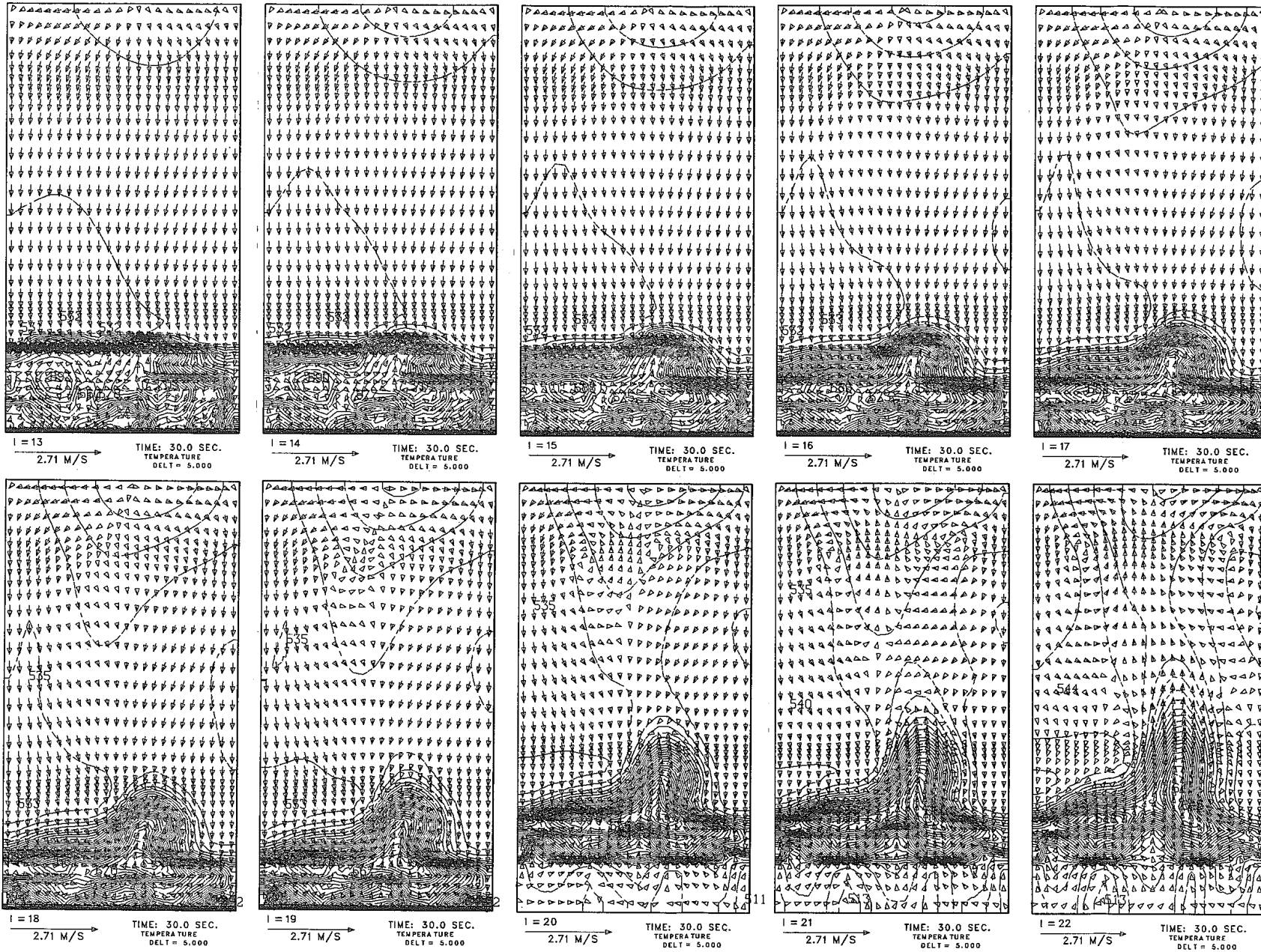


Fig. D. 3 Vector and Temperature Field Plots for  $\theta$ -z Planes in 30 seconds after UTOP Onset



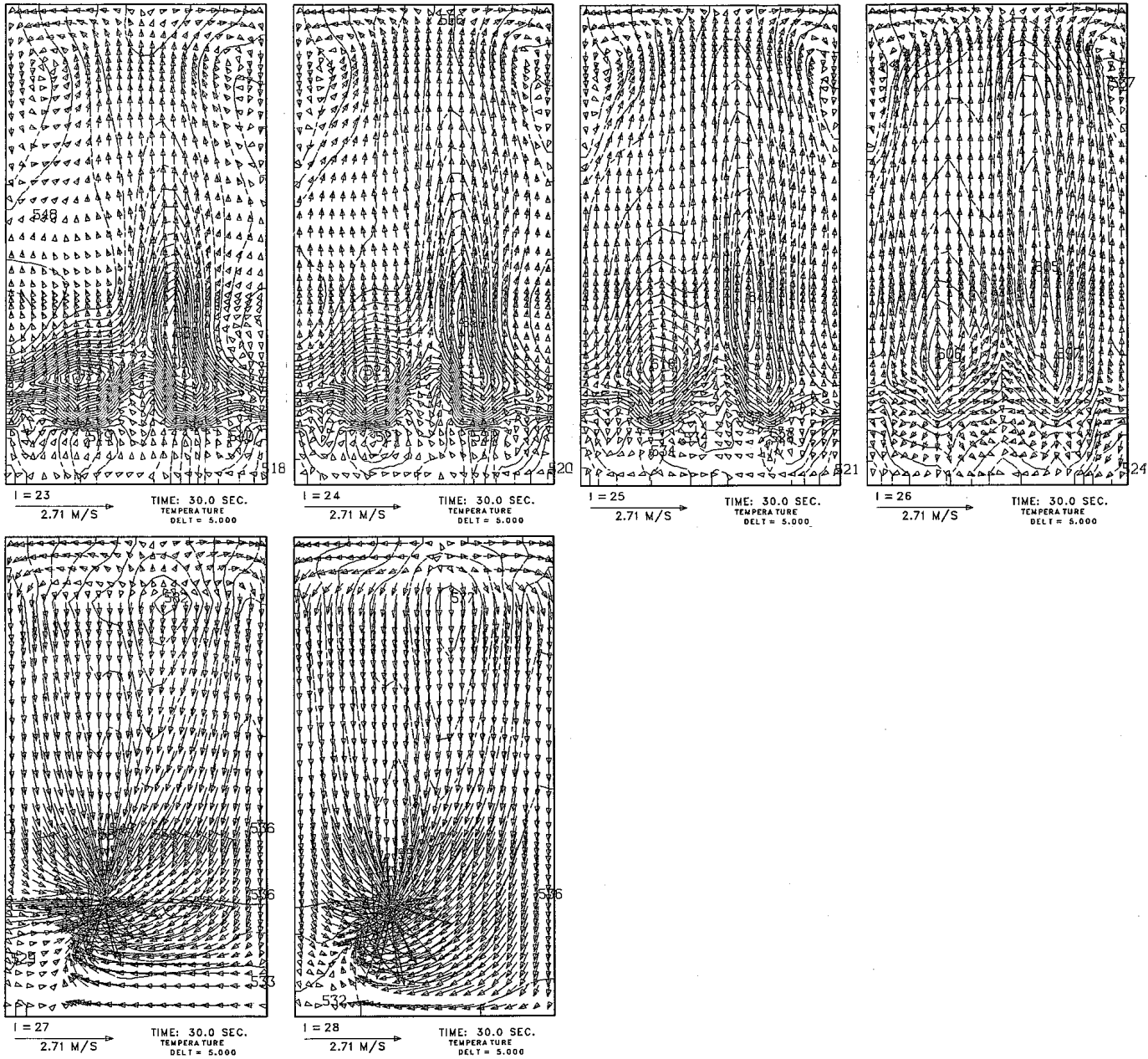


Fig. D. 3 (Continued)

付録E UTOP事象開始40秒後の上部プレナム熱流動特性

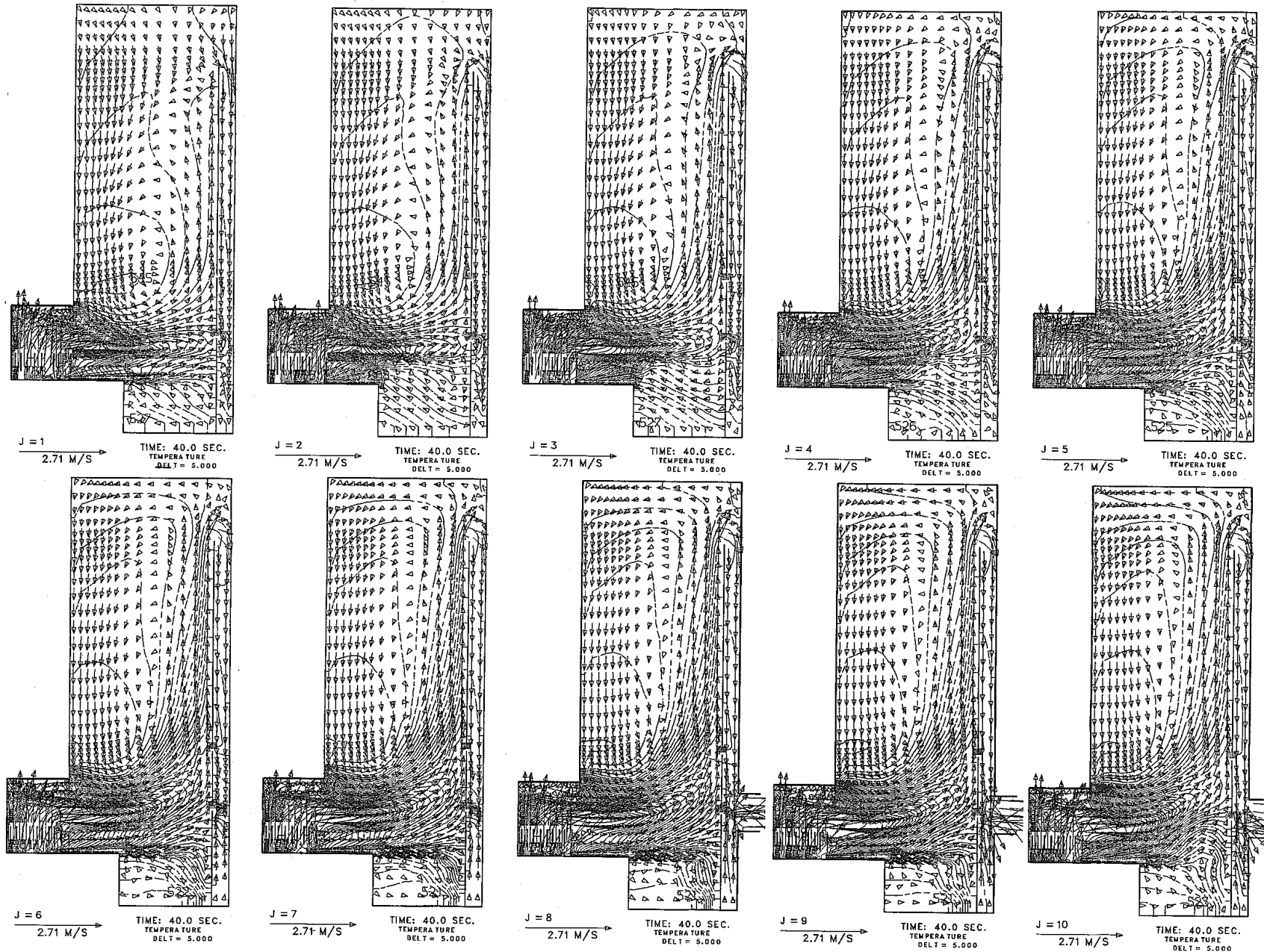


Fig. E. 1 Vector and Temperature Field Plots for r-z Planes in 40 seconds after UTOP Onset

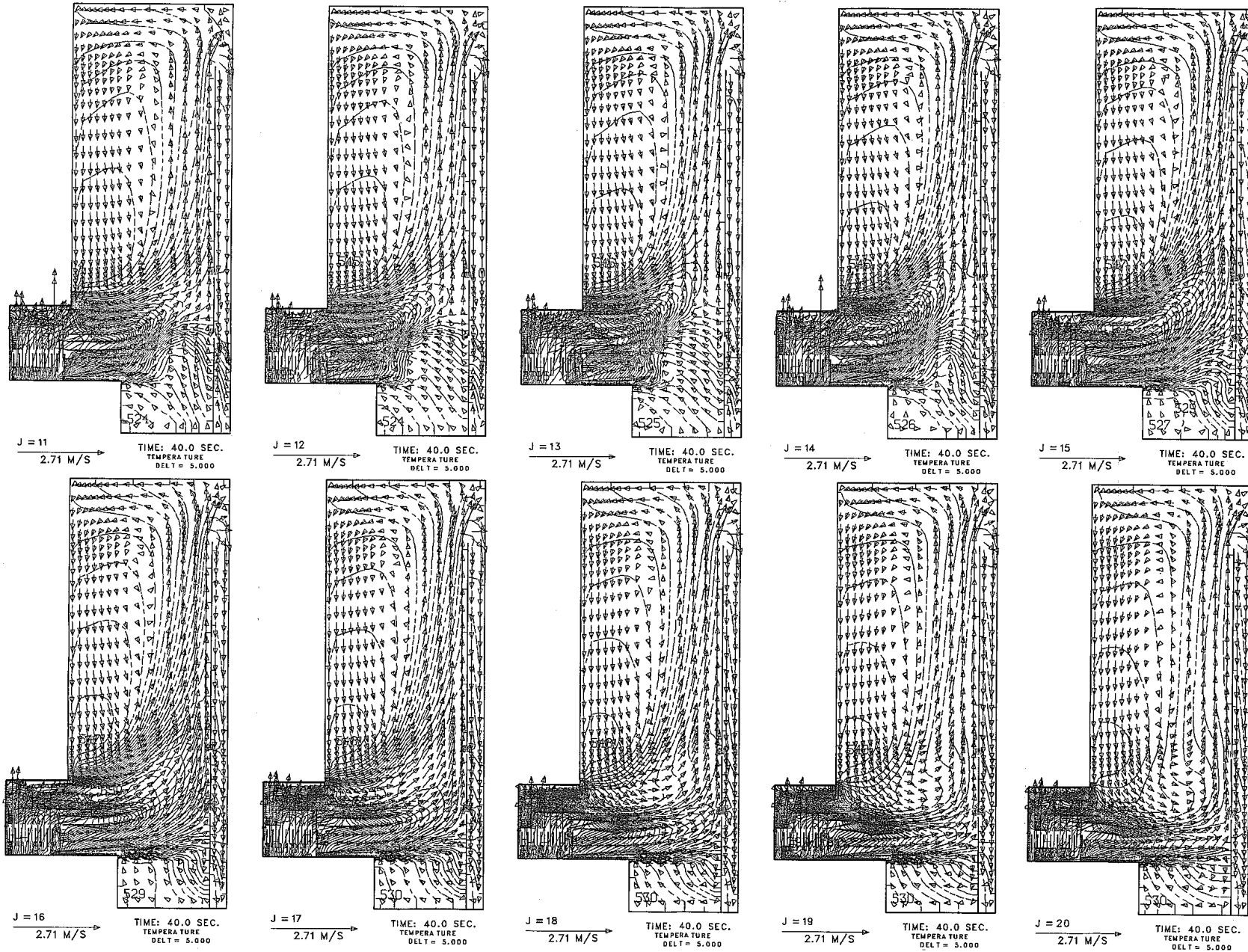
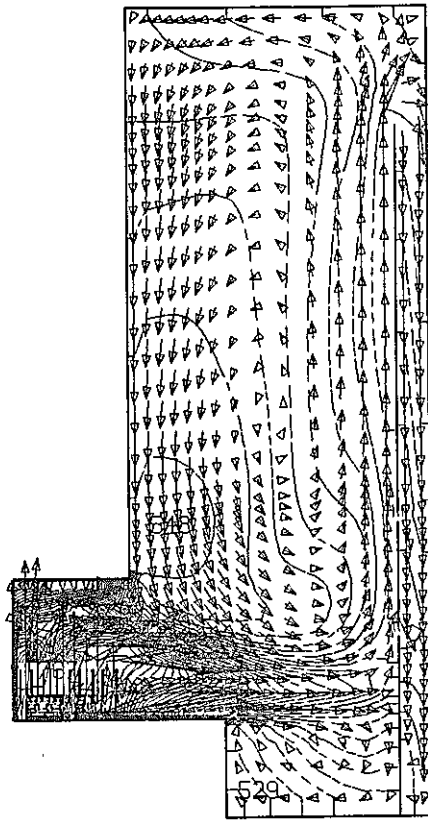
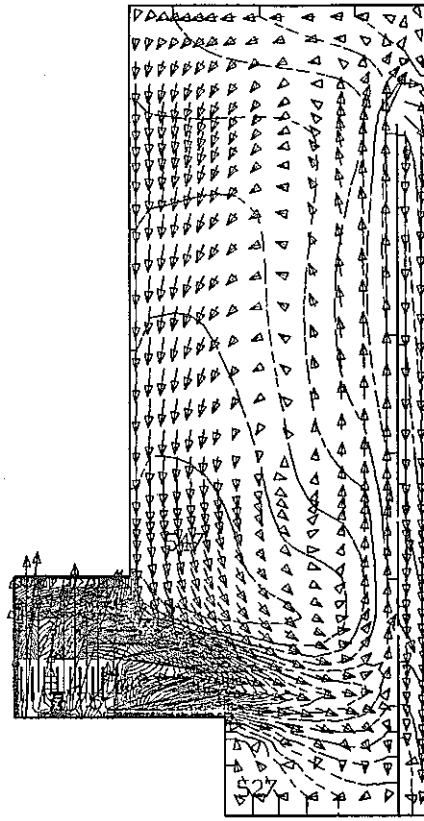


Fig. E. 1 (Continued)



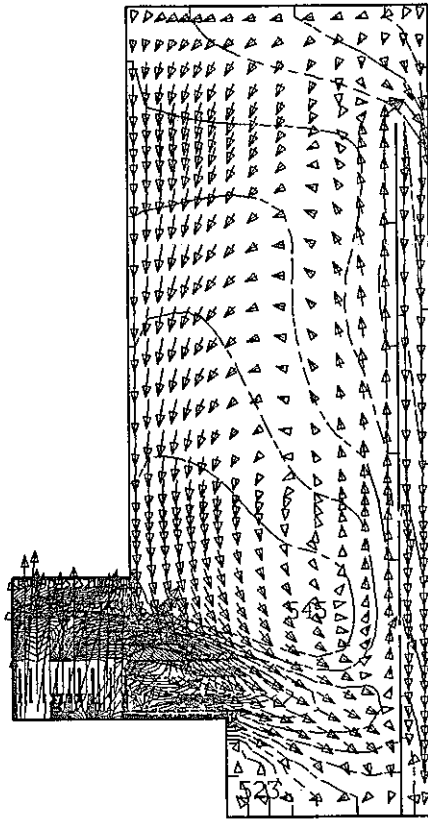
J = 21  
2.71 M/S

TIME: 40.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DEL T = 5.000



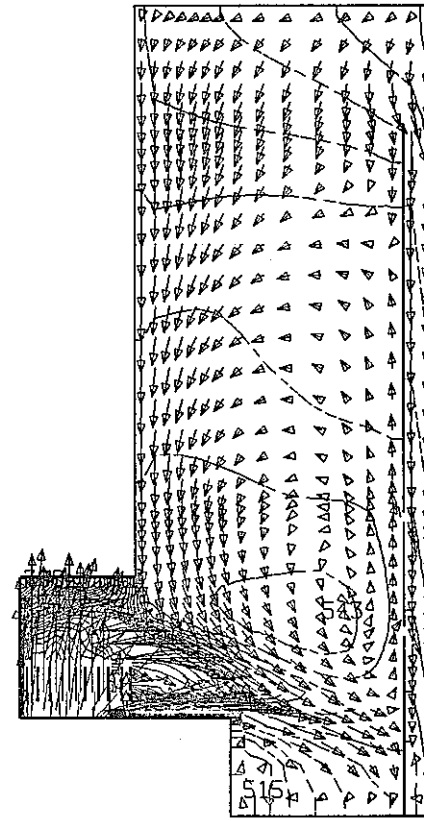
J = 22  
2.71 M/S

TIME: 40.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DEL T = 5.000



J = 23  
2.71 M/S

TIME: 40.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DEL T = 5.000



J = 24  
2.71 M/S

TIME: 40.0 SEC.  
TEMPERATURE  
DEL T = 5.000

Fig. E. 1 (Continued)

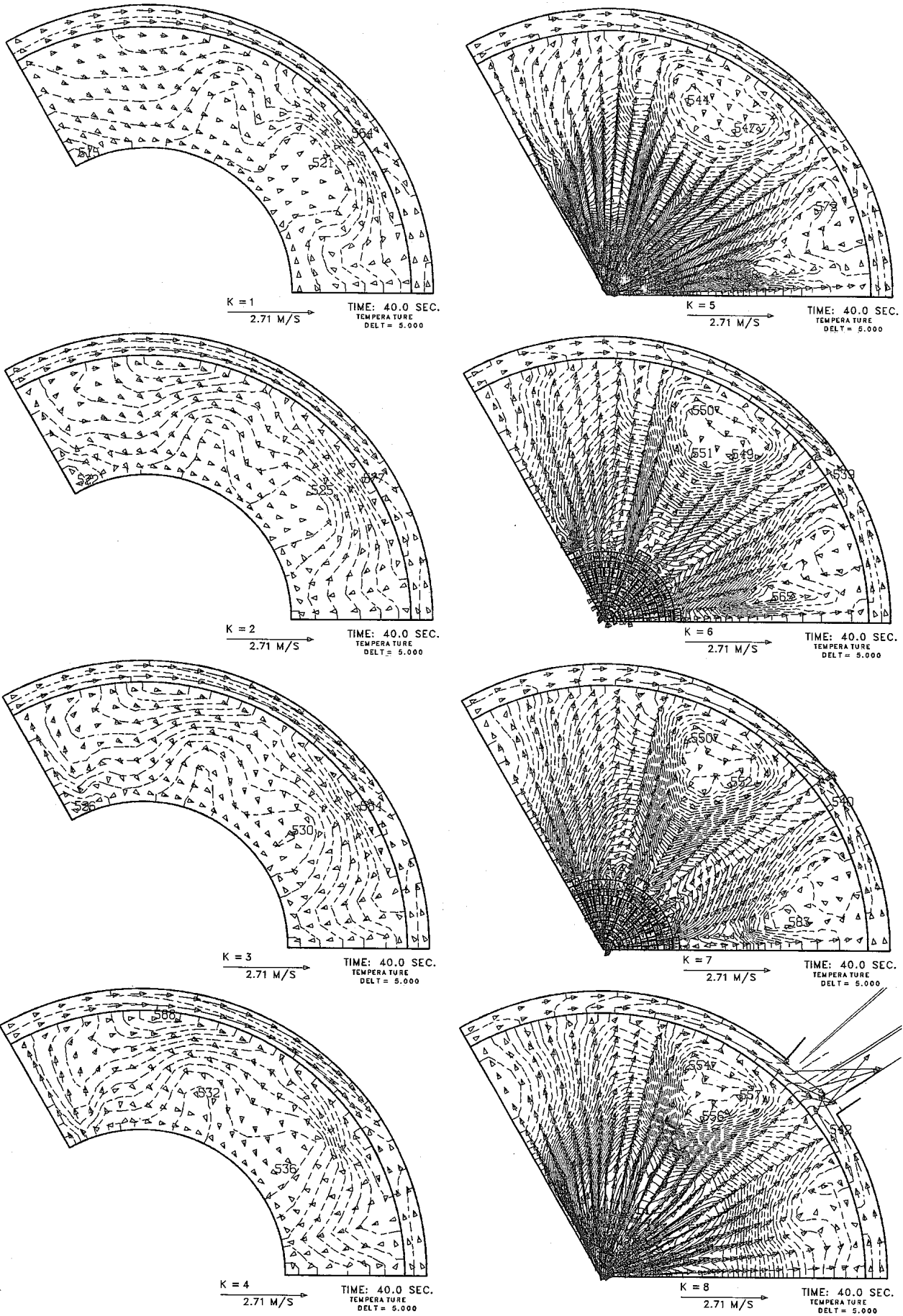


Fig.E. 2 Vector and Temperature Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 40 seconds after UTOP Onset

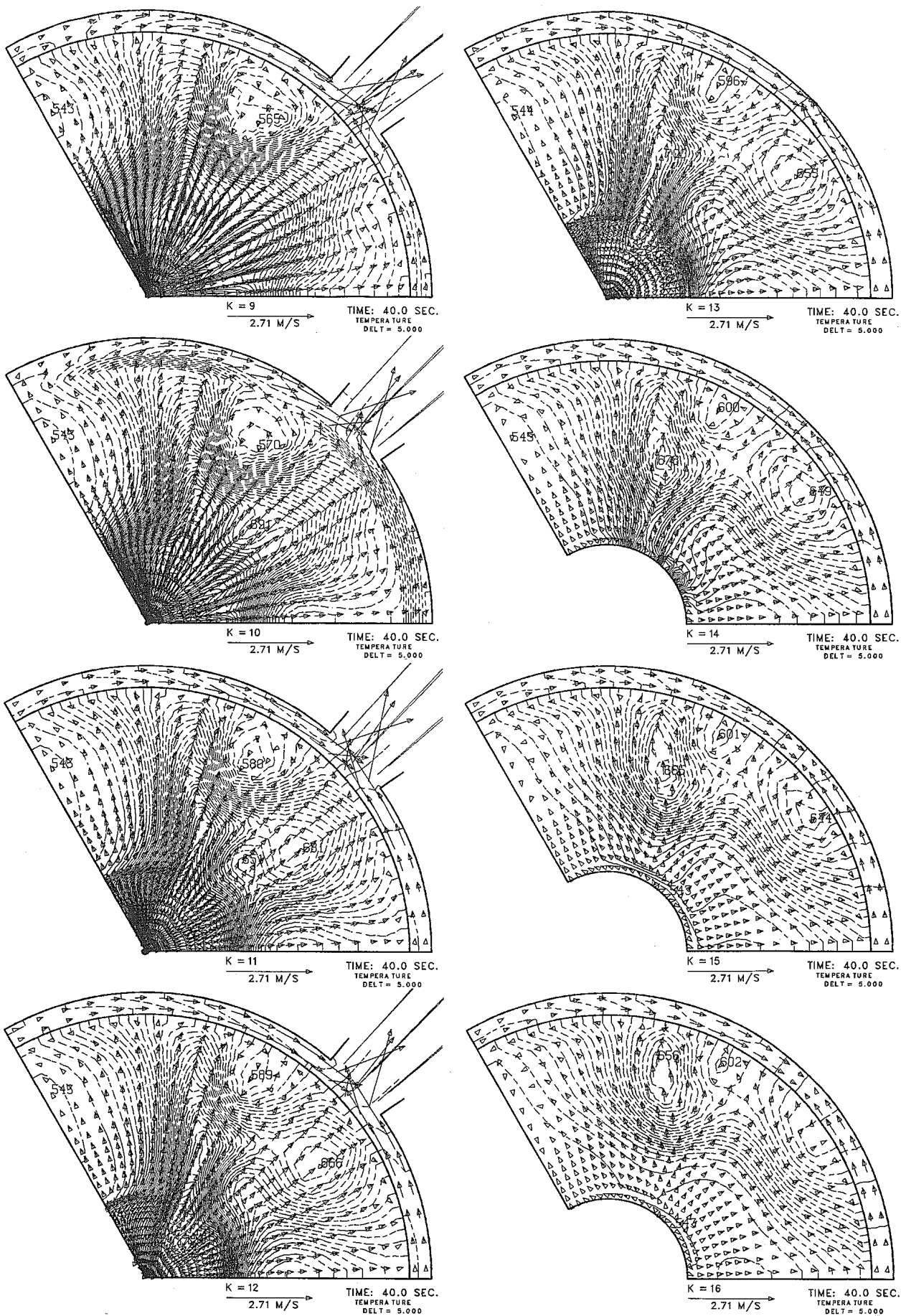


Fig. E. 2 (Continued)

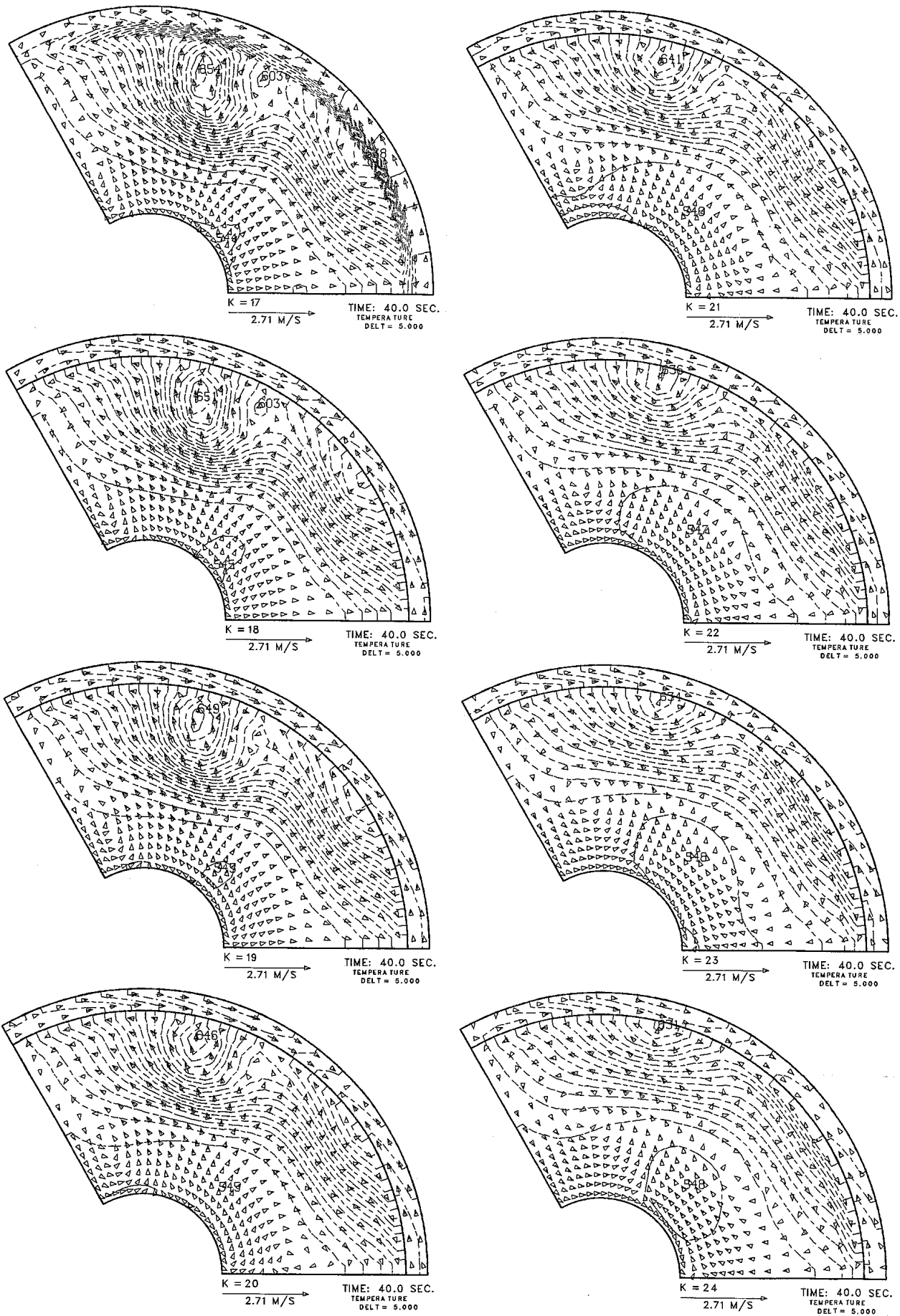


Fig. E. 2 (Continued)



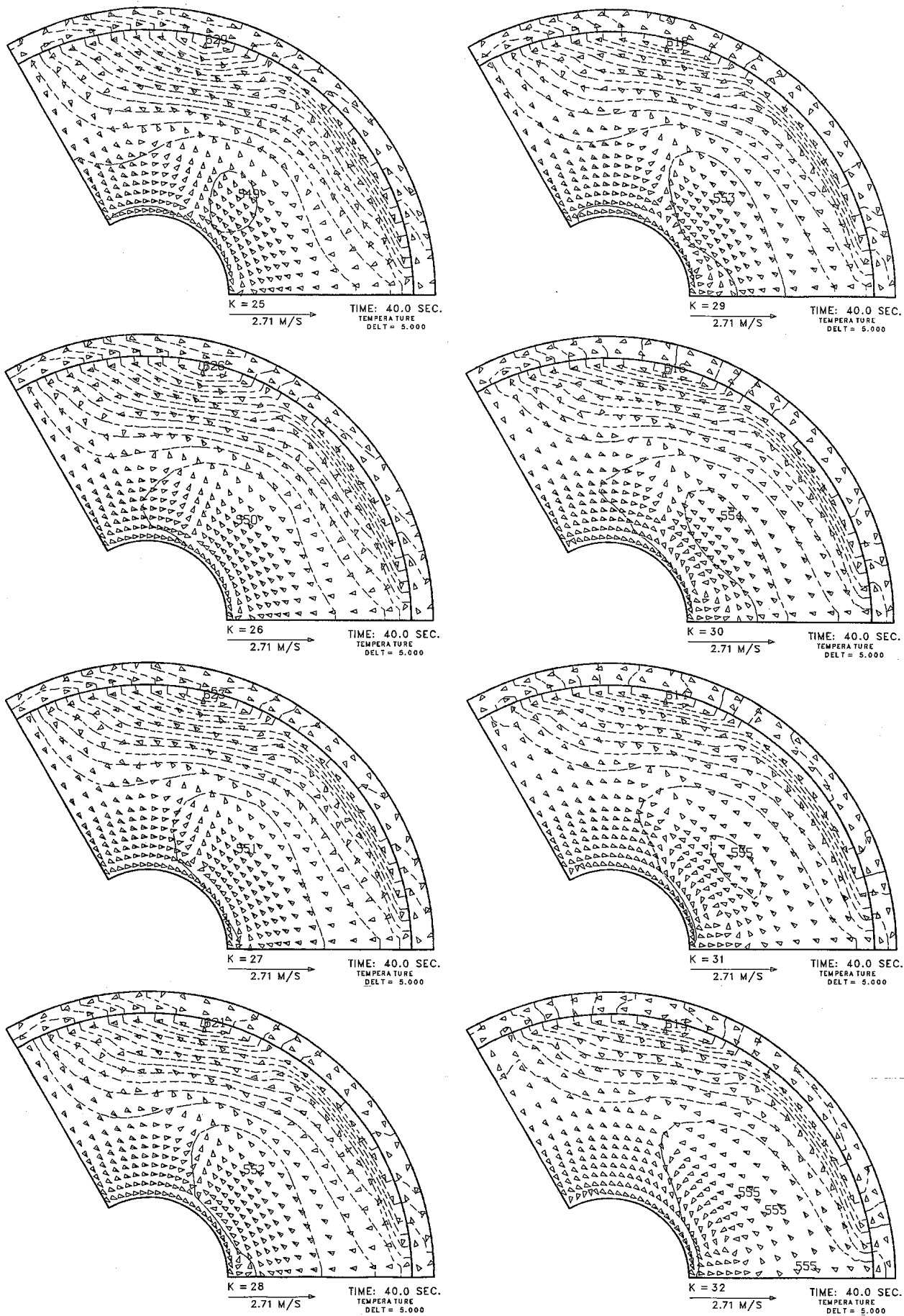


Fig. E. 2 (Continued)

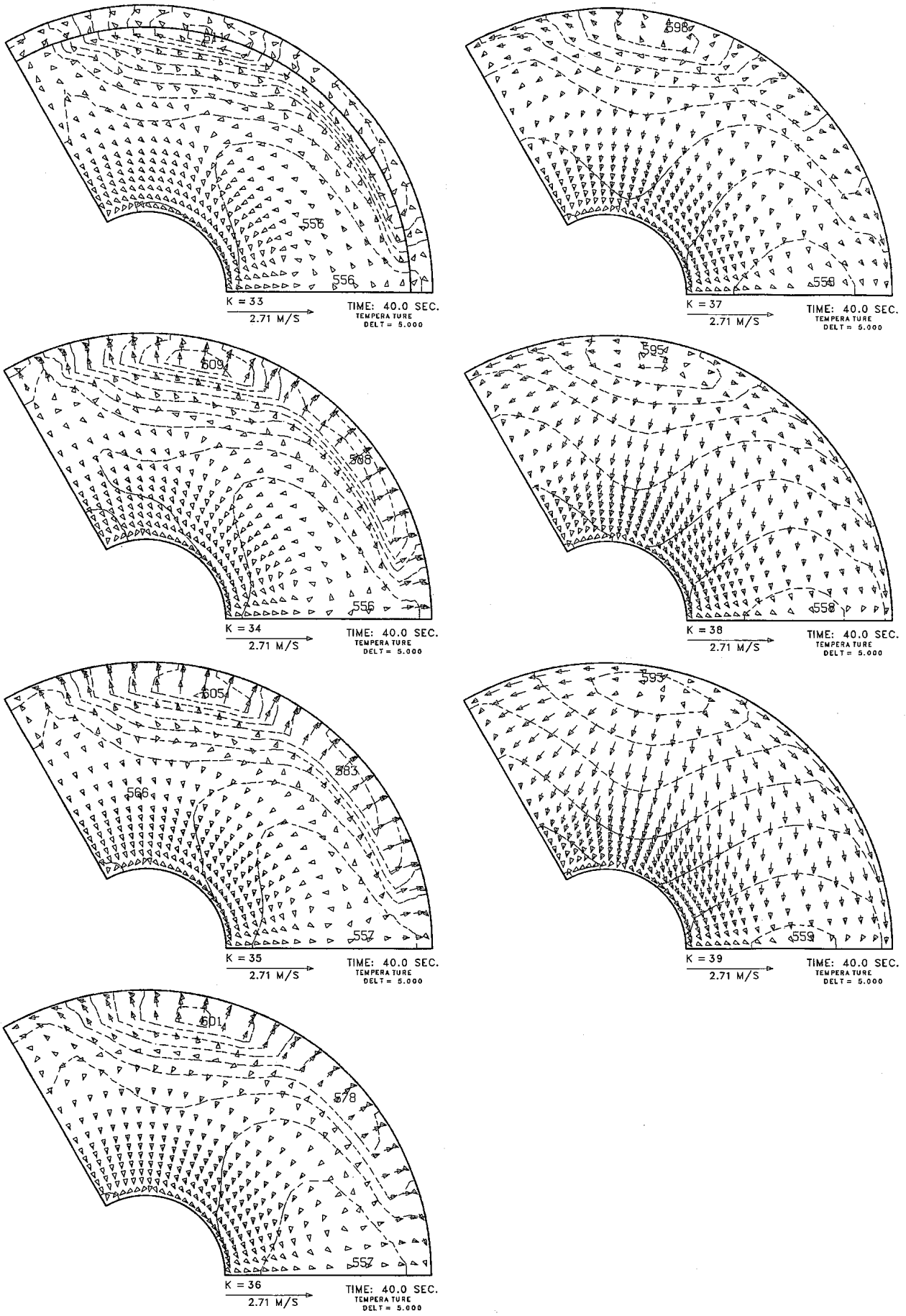


Fig. E. 2 (Continued)

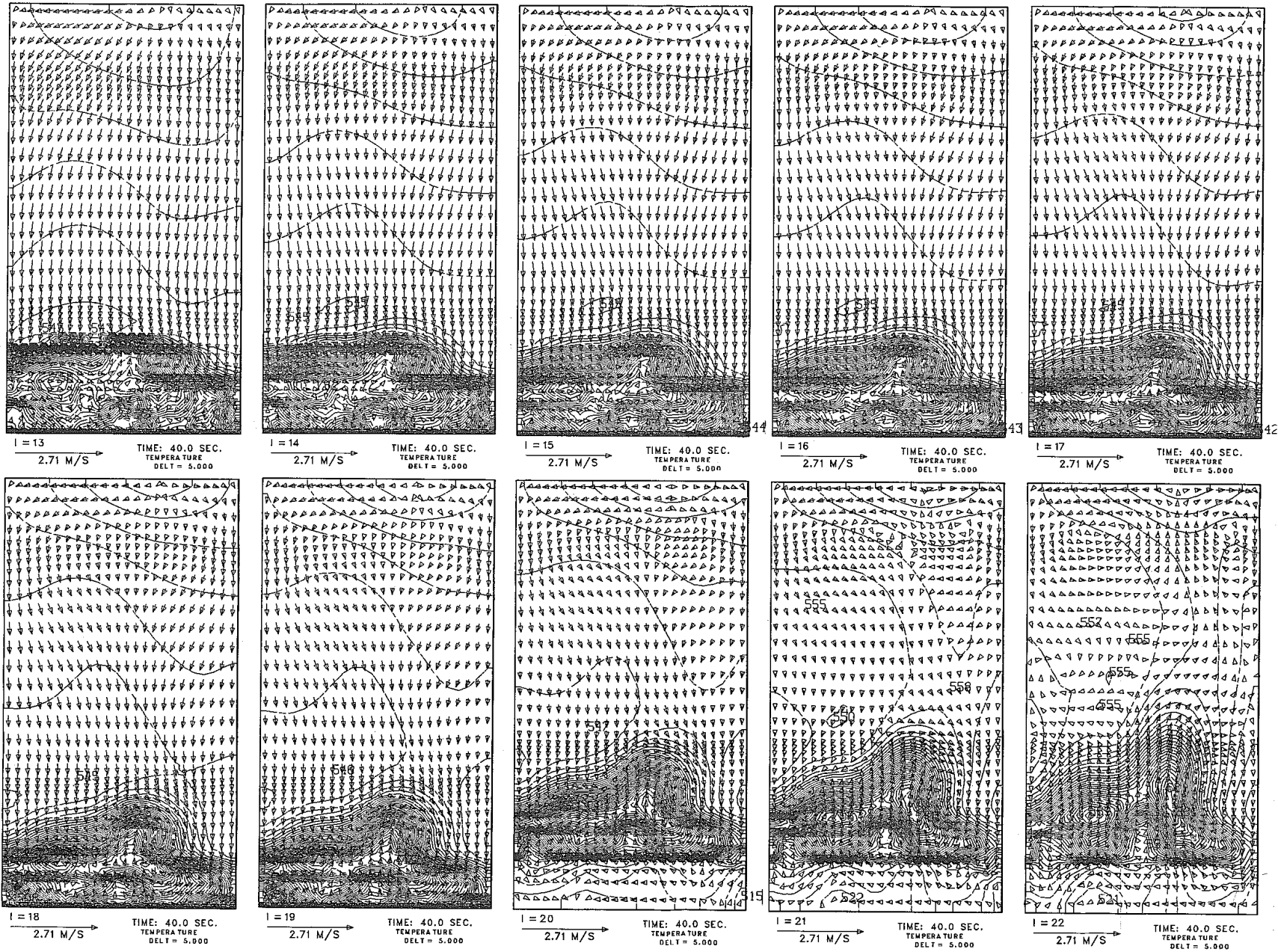


Fig. E. 3 Vector and Temperature Field Plots for  $\theta$ -z Planes in 40 seconds after UTOP Onset

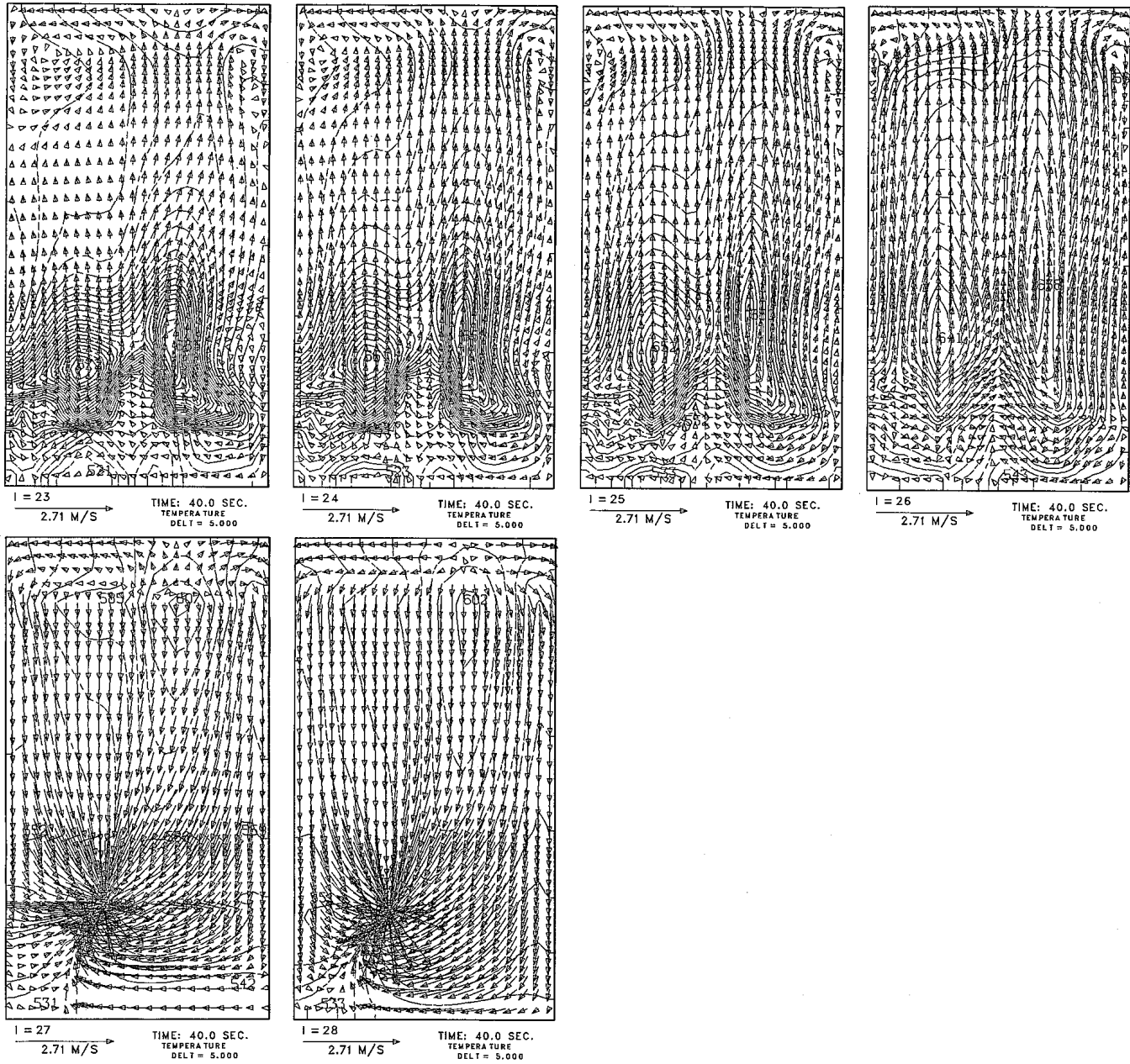


Fig. E. 3 (Continued)

付録F 炉上部温度計装の検出特性

## 1. クロスフロー効果

集合体局所事故発生時の異常監視計装系として、炉上部温度計装が炉心から最も近く、異常を早期に検出できるとの観点から有望視されている。しかし、出力運転時の熱膨張を逃がす為、燃料集合体ハンドリング・ヘッドと整流筒との間に50mmの間隙を設けている。このため、隣合う集合体間の圧力バランスによっては、この間隙間で流動干渉（クロスフロー）が発生し、各燃料集合体に対応する熱電対により異常情報を検出できない可能性が生じる。この様な観点から、UTOP解析において得られた定常状態結果の中から、各列で典型的な集合体（制御棒隣接集合体、ブランケット燃料隣接集合体等）を選び出し、入力値として規定した温度（集合体出口Na温度）と熱電対位置に相当するメッシュ温度との関係を調べた。この結果をFig. F. 1に示す。図中において、□印が入力値として規定した温度、○印が熱電対位置に相当するメッシュでの温度である。結果より分かる様に、入力値として規定した温度を熱電対位置でほぼ正確に捕らえている集合体は、11, 18, 27および38の集合体のみである。3の集合体に対応する熱電対の値は、入力値として与えた温度よりも低い値を示している。これは、この集合体の内側に粗調整棒が存在し、粗調整棒から流出した比較的低温の冷却材がクロスフローによって当該集合体に対応する整流筒内に流入した結果と解釈できる。また、6の集合体に対応する熱電対の値は、入力として与えた温度よりも高い値を示している。これは、3の集合体に粗調整棒からの冷却材が流入した為、その影響として3の集合体から流出した高温の冷却材が6の集合体に対応する整流筒内に流入したためであると考えられる。外側炉心領域の集合体に対応する熱電対（51, 66）の値も、入力値として規定した値よりも高い値よりも高い値を示している。これについても、先の解釈と同様に、クロスフローによって内側炉心領域の集合体から流出した高温の冷却材を外側炉心領域に対応する熱電対が捕らえている結果と考えられる。以上の結果から、熱流力特性が異なる集合体に接する熱電対の値を解釈する場合には、クロスフローの影響を考慮することが必要であると言える。しかし、実際には、出力運転時において、両者の間隙は熱膨張によって狭まる方向に向うため、これを考慮した詳細な検討が今後必要である。

## 2. 単一集合体の温度検出特性

「もんじゅ」燃料集合体のピン束上部には、砲弾型の中性子遮蔽体が組込まれており、冷却材はこの遮蔽体とラッパー管との間隙を縫うように流れる。したがって、ピン束発熱部で形成された径方向の温度分布は、この複雑な流路形状によって乱され、この後ハンドリング・ヘッドを経て炉上部計装位置に到達する。炉心内異常監視の観点からは、熱電対が指示する値の意味を、発熱部での温度と関連付けておくことが必要である。「常陽」での経験から言えば、集合体に上部中性子遮蔽体が存在しない為、発熱部で形成されたコサイン形状の温度分布がそのままの形で炉上部計装位置に到達し、完全混合温度よりも約3割程高めの温

度を計測していた。<sup>11)</sup>

## 2.1 模擬燃料集合体水流動実験の解析

ここで対象とした水流動実験は、炉心上部計装単体水流動試験<sup>12)</sup>である。解析の目的は、温度を考慮した計算に入る前に、流速分布についての解析模擬性を確認することにある。Fig. F. 2に、実験に用いられたハンドリング・ヘッドの断面形状と対応するメッシュ分割図を示す。計算は、 $r-z$  2次元形状を用いて、以下の4ケースを実施した。

- (a)  $0.4\text{m}^3/\text{min}$
- (b)  $0.8\text{m}^3/\text{min}$
- (c)  $1.2\text{m}^3/\text{min}$
- (d)  $1.5\text{m}^3/\text{min}$

4ケースそれぞれの流速ベクトル図を、Fig. F. 3に示す。また、ハンドリング・ヘッド直上での径方向流速分布を実験結果と比較してFig. F. 4に示す。各ケースでの流速分布は、中性子遮蔽体の影響によって鞍型形状を示し、流速最大値を示す位置は集合体中心から外れる。解析結果は、集合体中心部で若干の過大評価、周辺部で若干の過少評価傾向を示すが、全体的な傾向はよく模擬されている。

## 2.2 実機対象解析

対象とした解析条件は、平衡炉心第10サイクル末期における内側炉心第1列集合体である。ピン束上端での径方向流束および温度の分布をFig. F. 5およびFig. F. 6に示す。解析では、径方向発熱分布の周方向不均一性を排除するため、集合体中心からラッパー管6面に向う値の平均値を算出して、入口条件とした。使用したメッシュ分割は、上記水流動実験解析のものを流用した。

Fig. F. 7に、流速ベクトルおよび等温線図を示す。また、Fig. F. 8に、ハンドリング・ヘッド直上および熱電対位置での流速および温度の径方向分布を示す。流速分布については、ハンドリング・ヘッド直上で鞍型分布を示しているものの、熱電対位置では集合体中心軸上で最大値を示すコサイン分布に遷移している。一方、温度分布については何れの位置においても径方向に大きな分布を持たず、ほぼ完全に混合した状態でハンドリング・ヘッドを流出する。これは、上部中性子遮蔽体部での縮流による混合促進の結果であり、集合体内局所異常監視の観点からは望ましくない。すなわち、上部中性子遮蔽体部で生成される乱流挙動が直接的にハンドリング・ヘッド出口での温度挙動を支配することから、ピン束内部での局所異常によって生じる異常情報を打ち消す方向に働き、熱電対では平均化された情報のみが指示されることになる。しかし、逆にこの指示値が完全温度情報を表すことから、集合体個々の流量管理、集合体個々の燃焼管理等、プラント運用上必要となる情報を与えると考えられる。

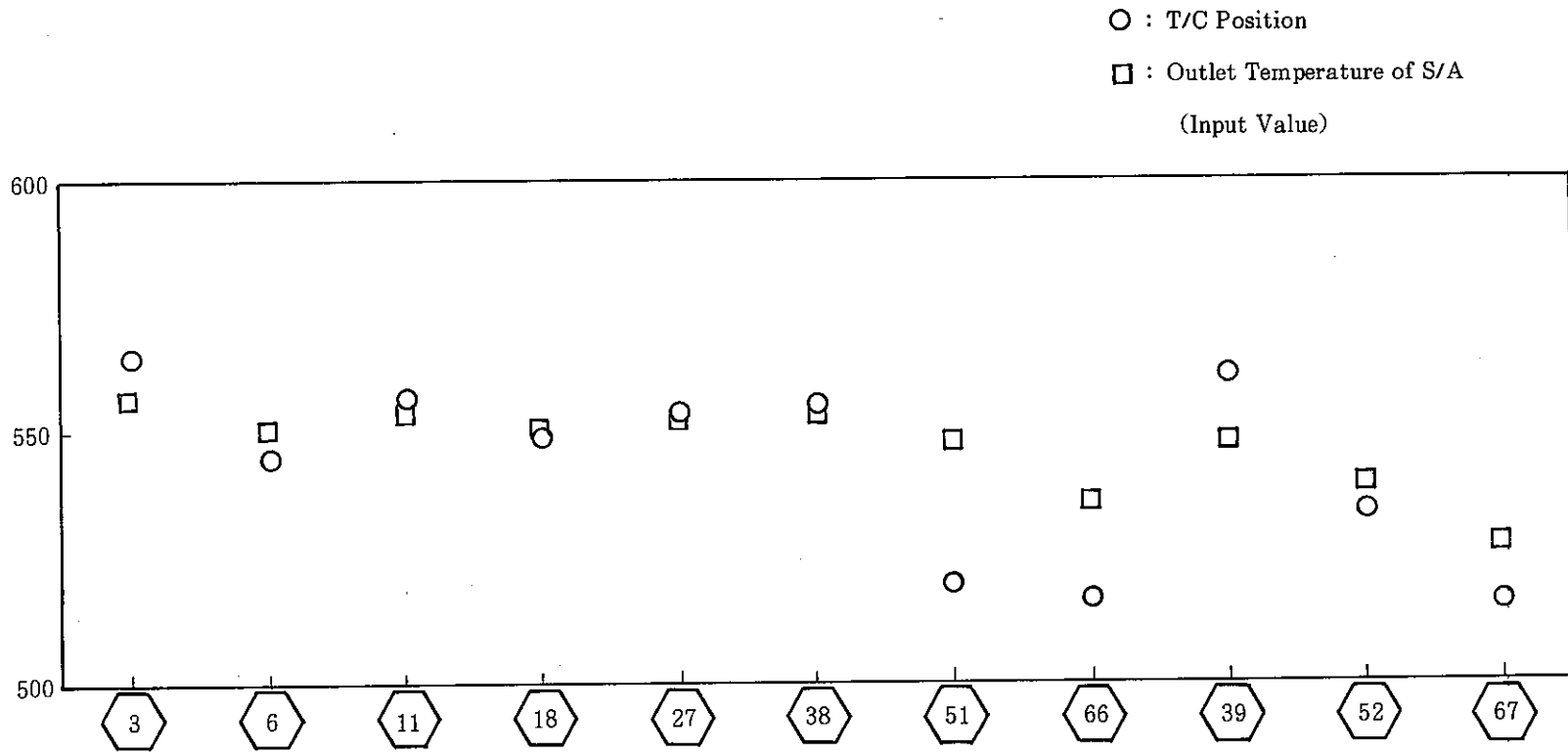


Fig. F. 1 Cross-Flow Characteristics at Flow Guide Region



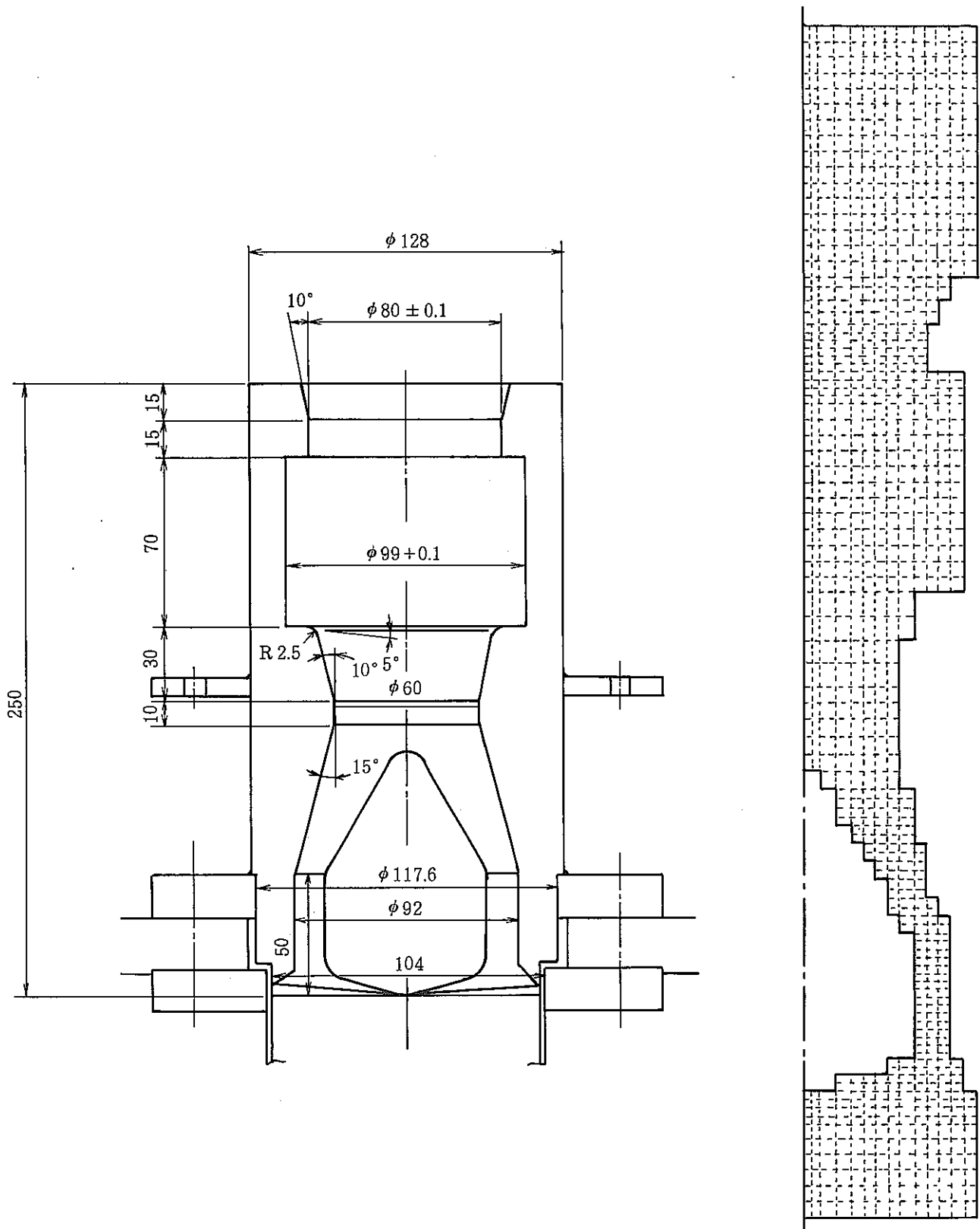


Fig.F. 2 Handling head Geometry of Monju Fuel Assembly and Analytical Region

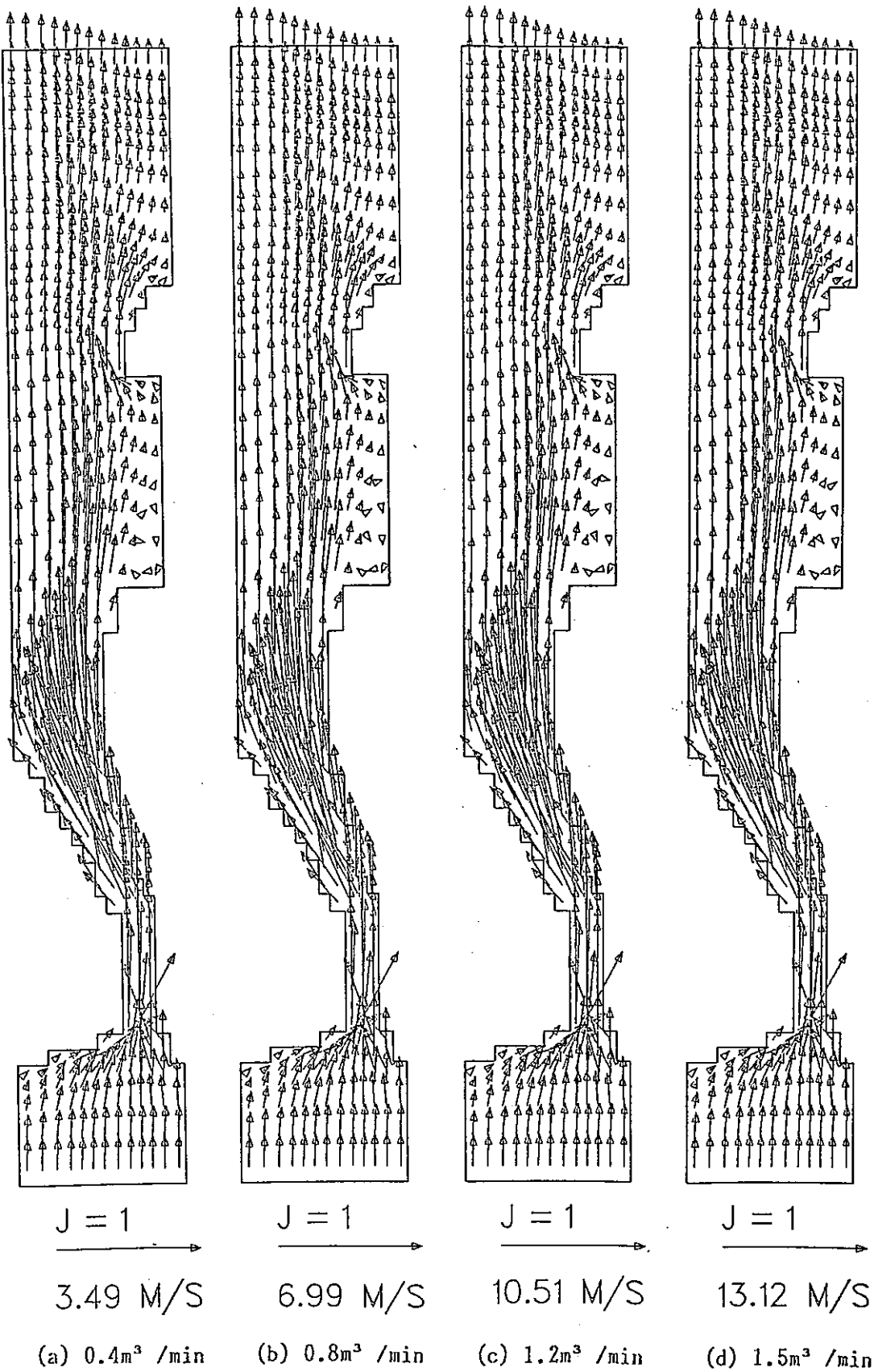


Fig. F. 3 Velocity Distribution at Outlet Region of Monju S/A (Water Experiment)

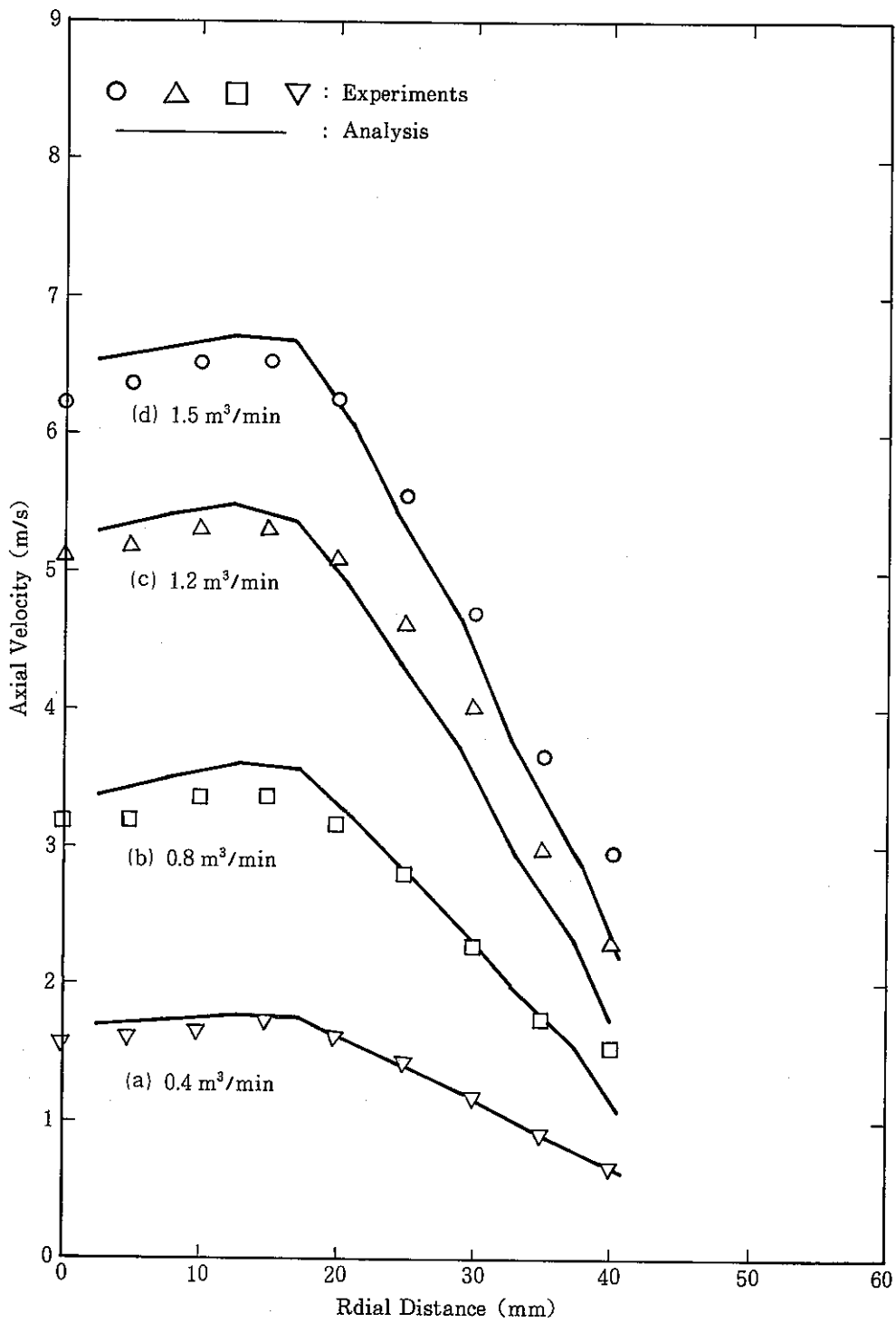


Fig. P. 4 Comparison of Radial Velocity Distribution at Outlet of S/A Between Experiments and Calculations (Water Experiment)





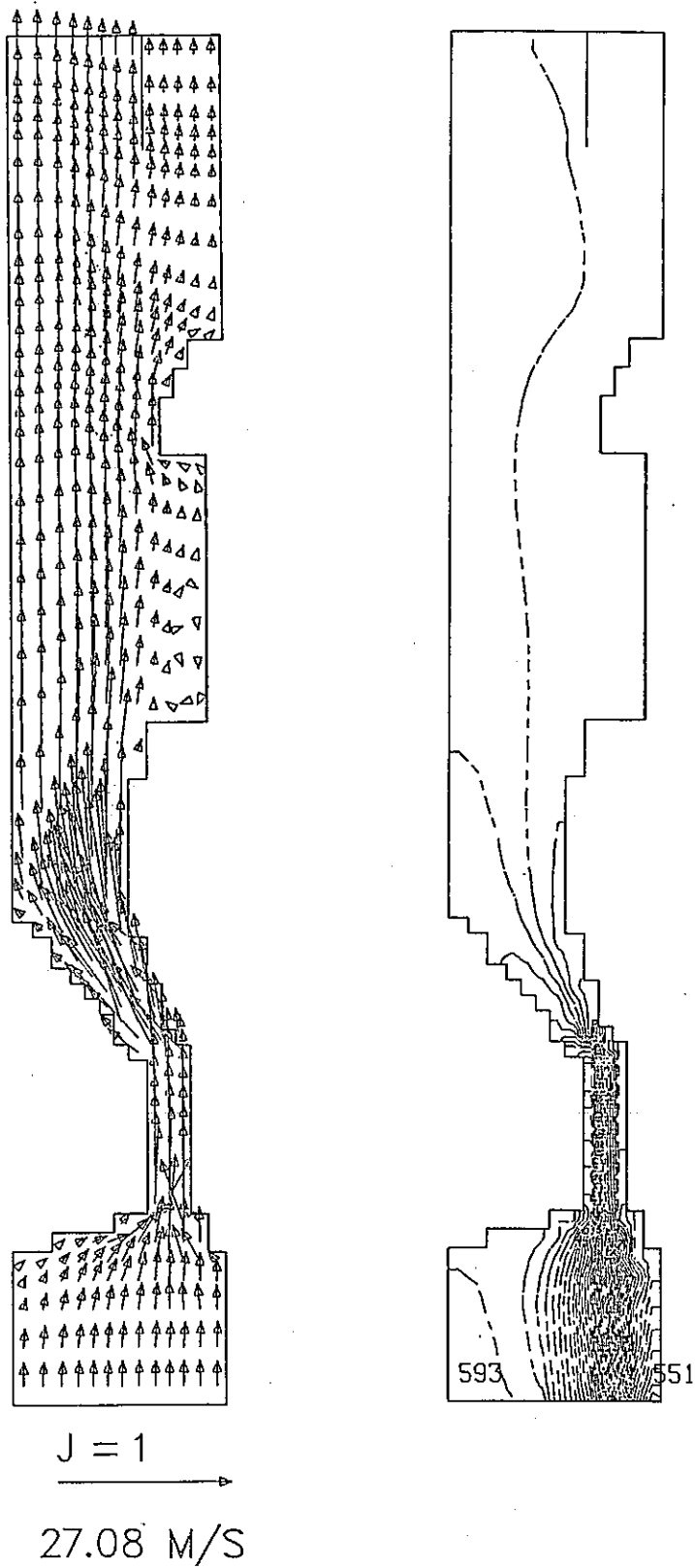


Fig. F. 7 Velocity and Temperature Distribution at Outlet Region of Monju S/A

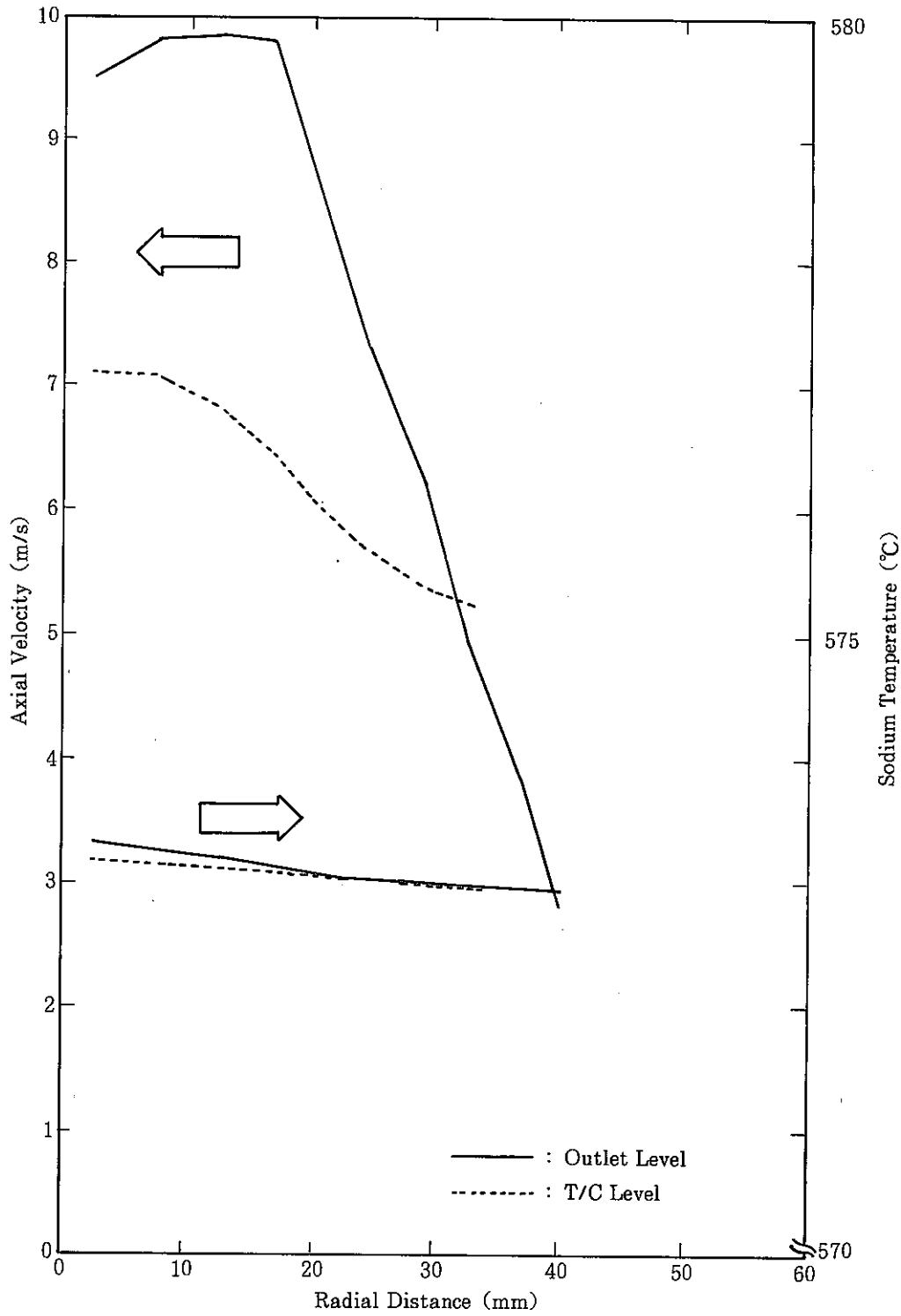


Fig. F. 8 Radial Velocity and Temperature Distributions at Outlet and T/C Level of S/A

付録G DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性  
(ケース 1)



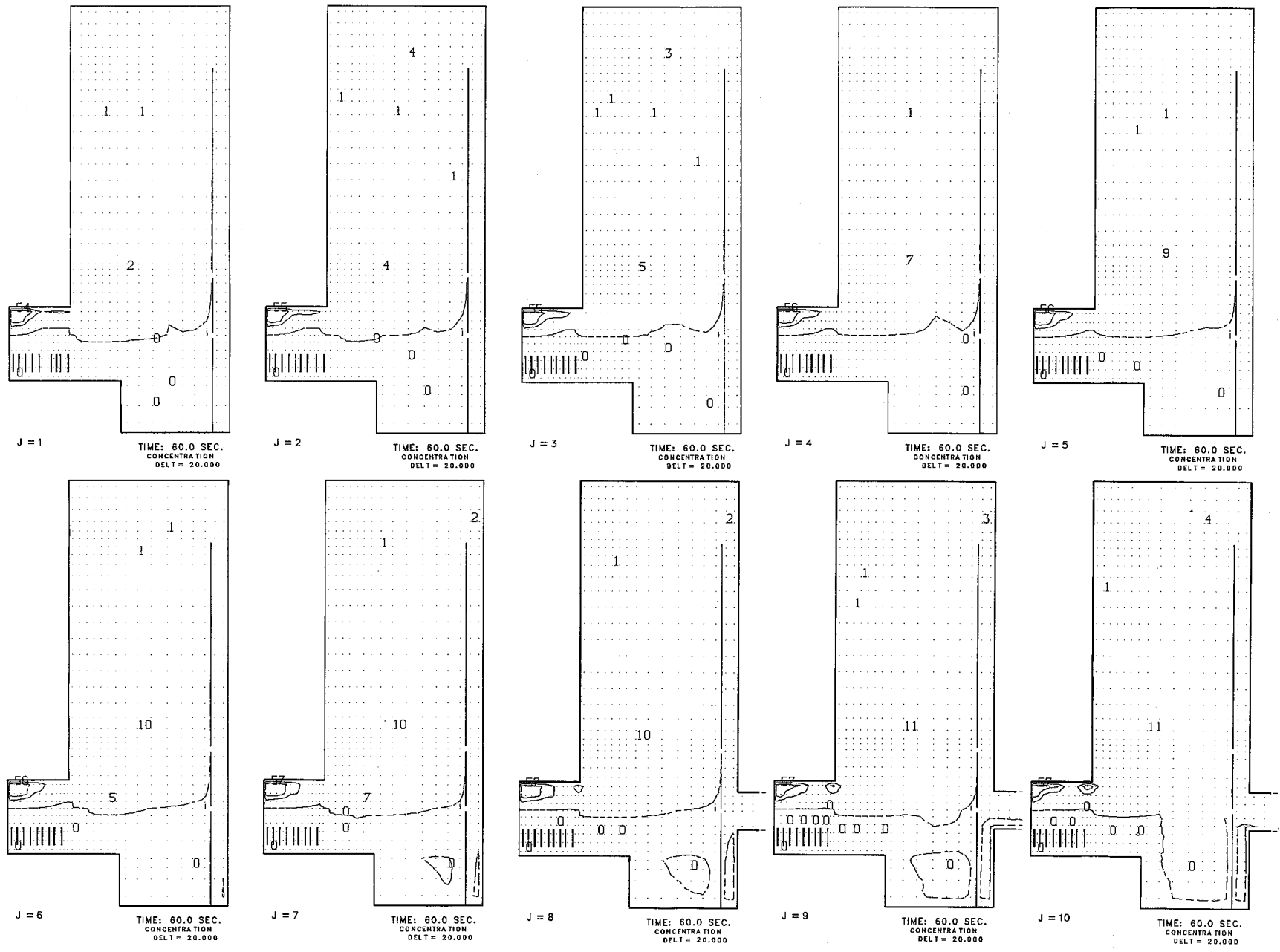
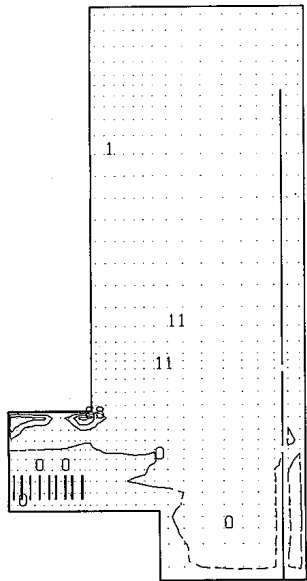
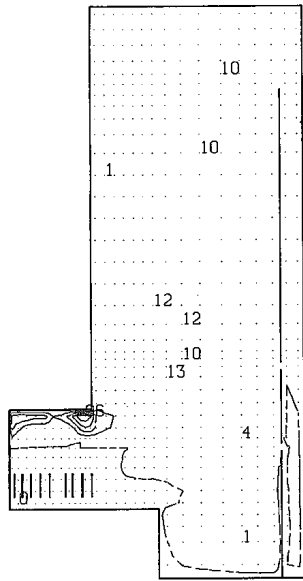


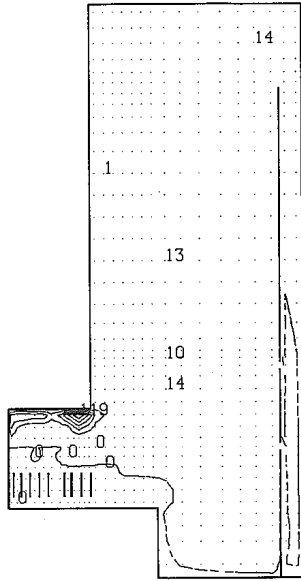
Fig. G. 1 DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition



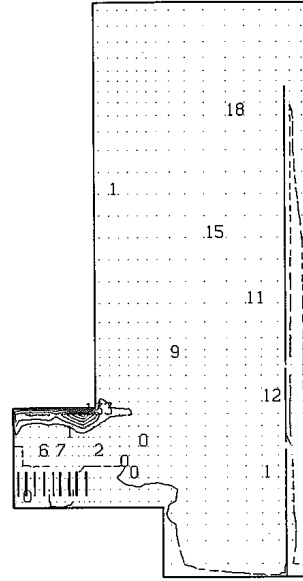
J = 11  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



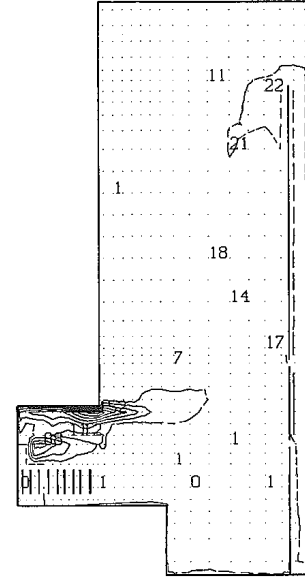
J = 12  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



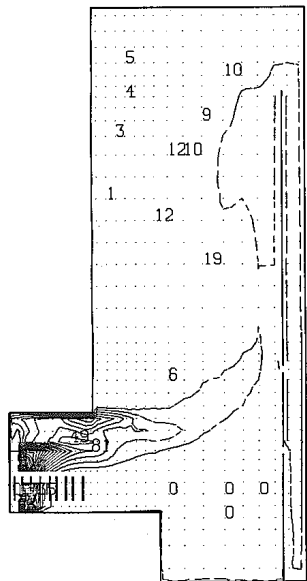
J = 13  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



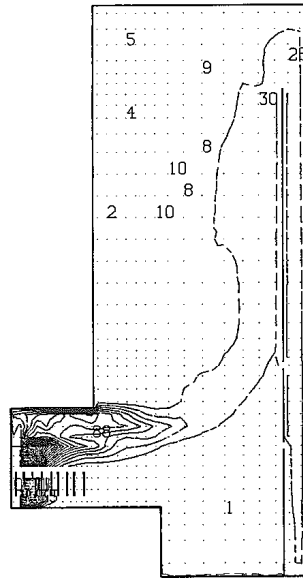
J = 14  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



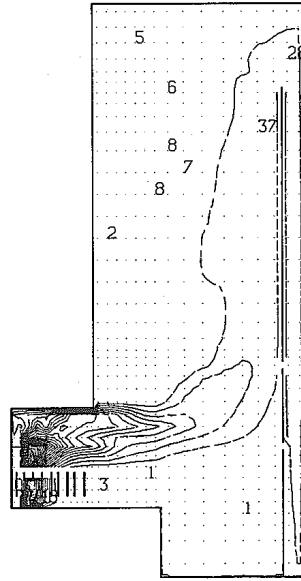
J = 15  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



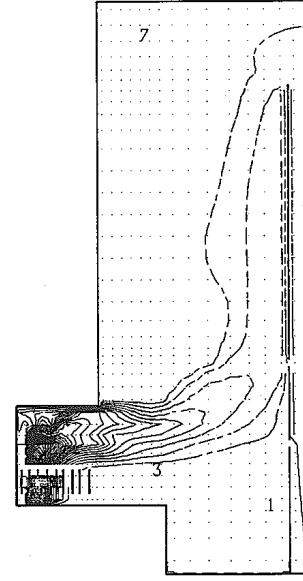
J = 16  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



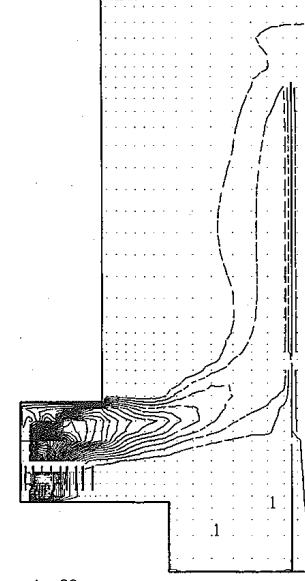
J = 17  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



J = 18  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

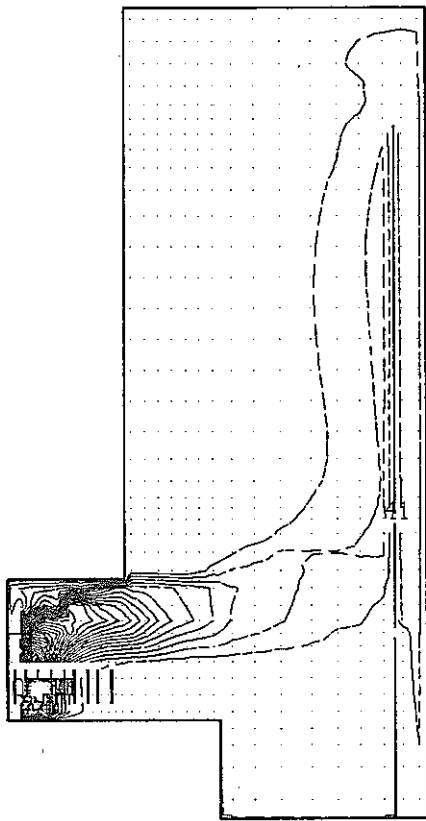


J = 19  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



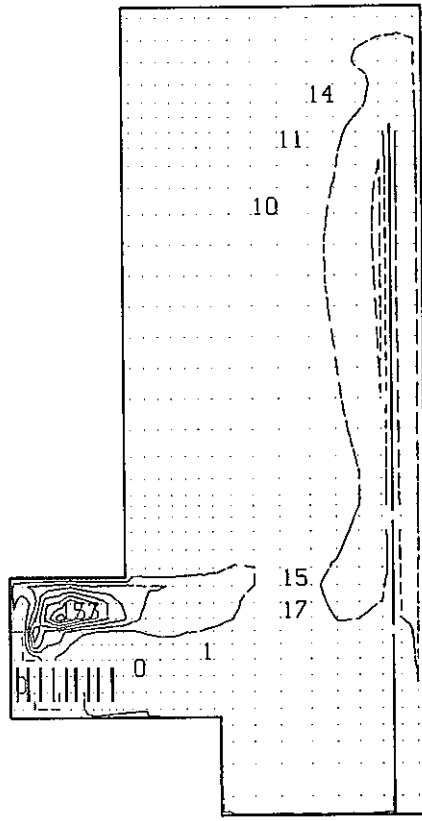
J = 20  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. G. 1 (Continued)



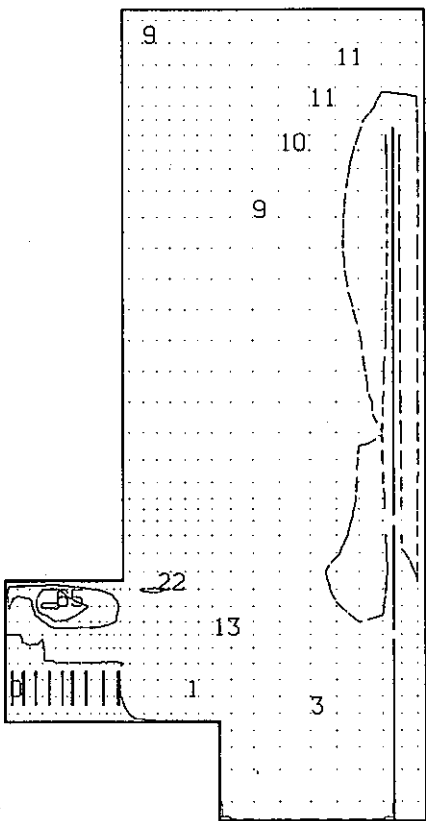
J = 21

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



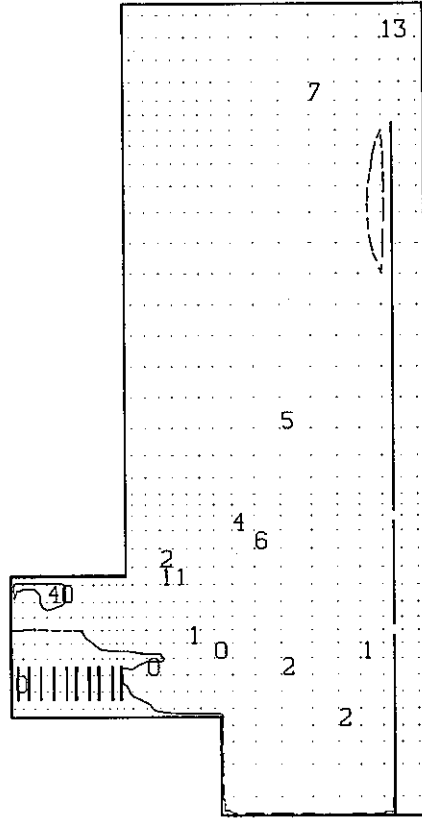
J = 22

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



J = 23

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



J = 24

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. G. 1 (Continued)

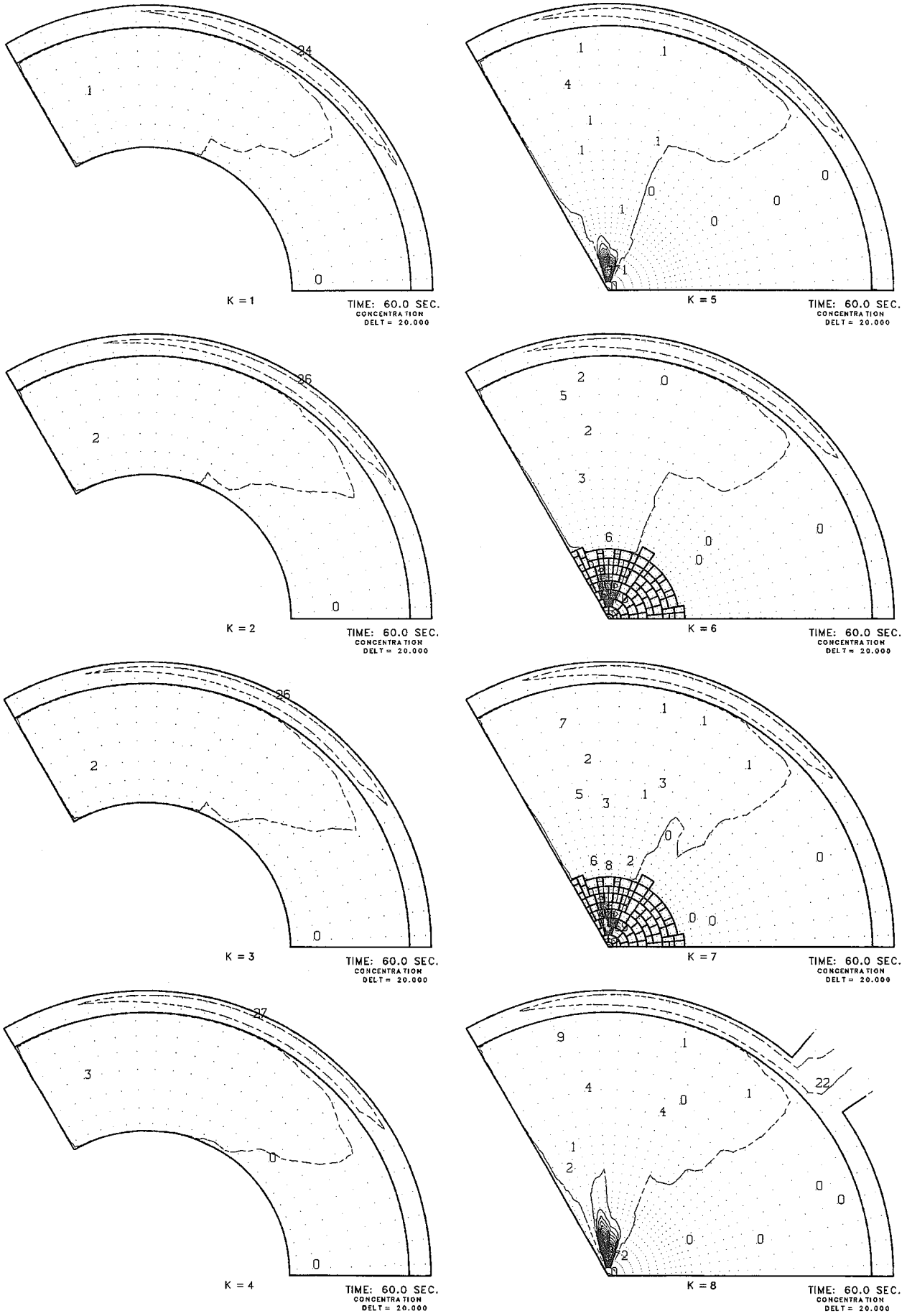


Fig. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition

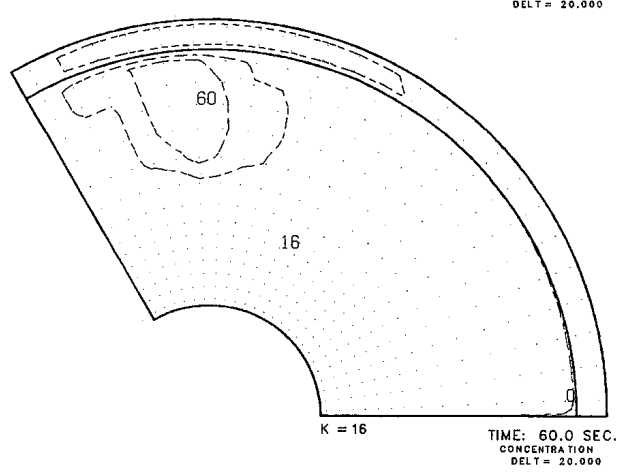
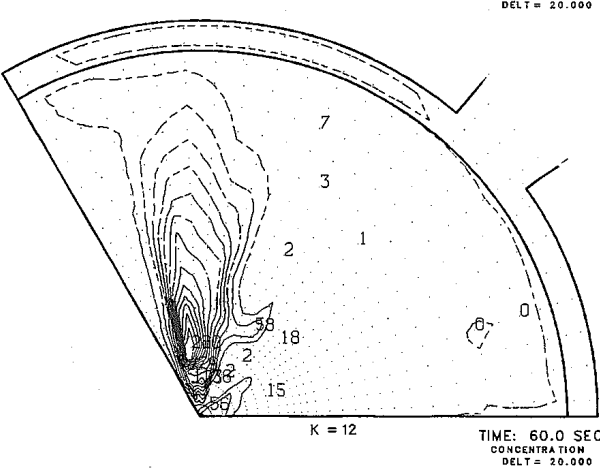
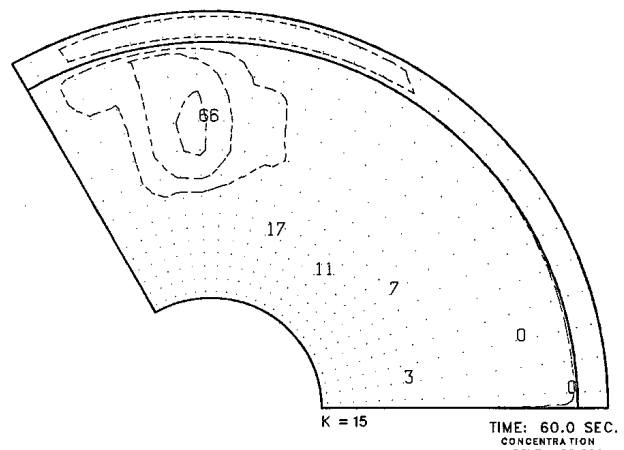
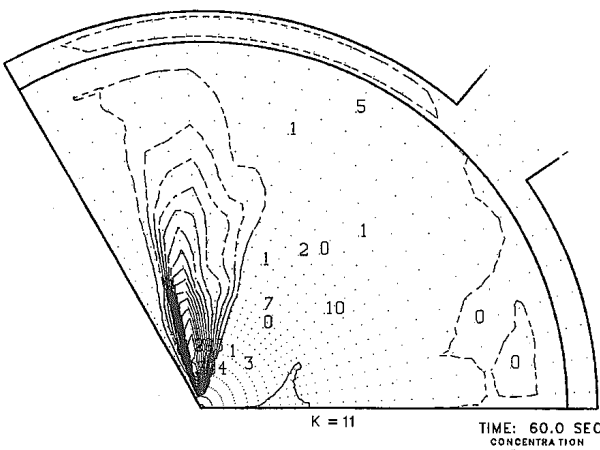
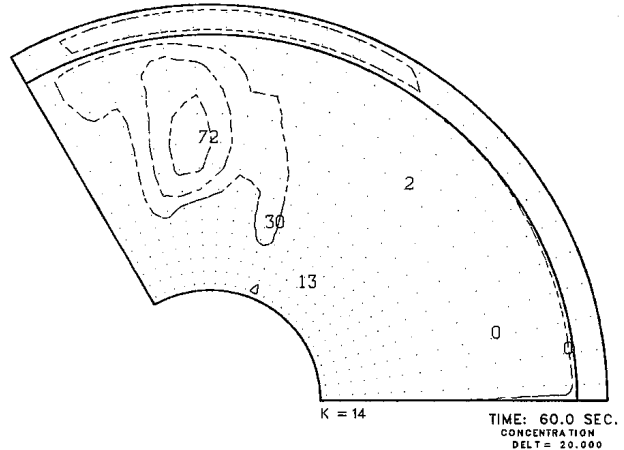
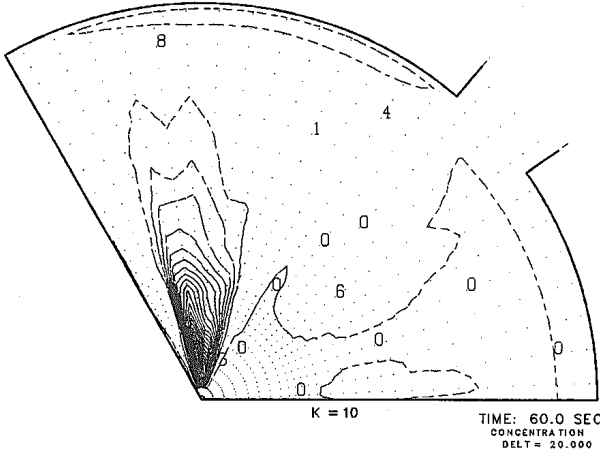
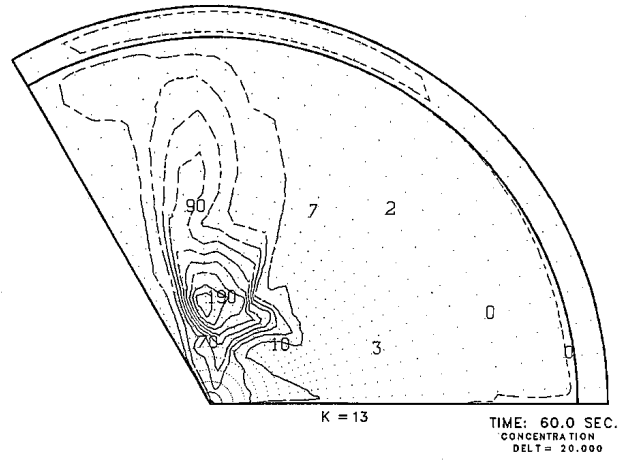
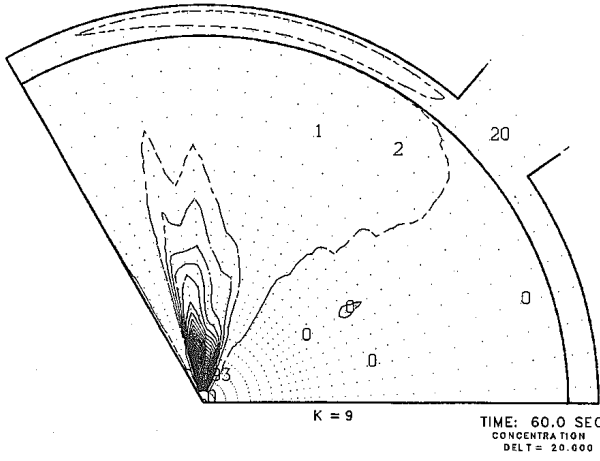
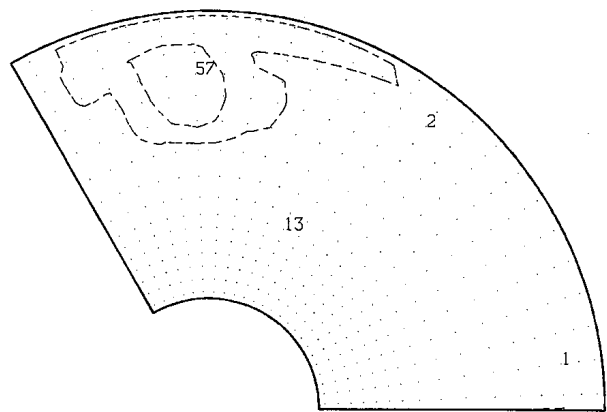
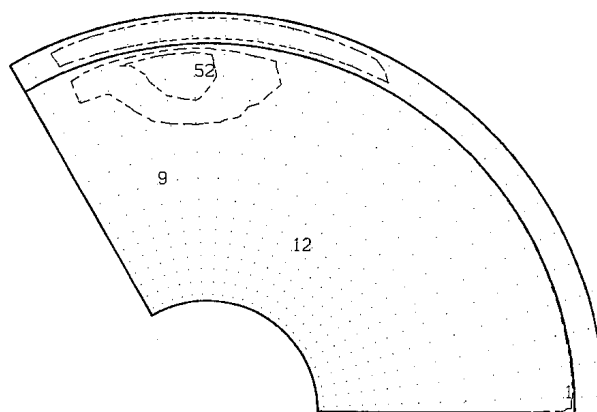


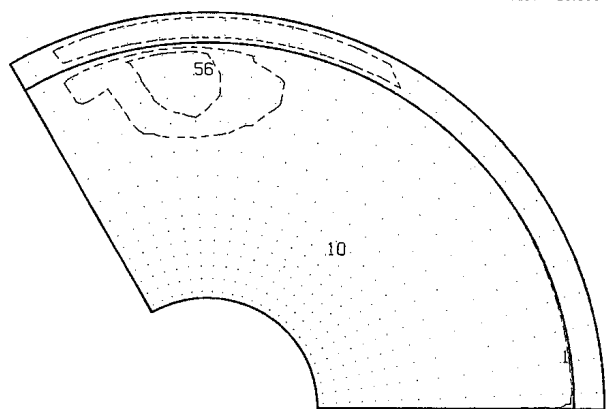
Fig. G. 2 (Continued)



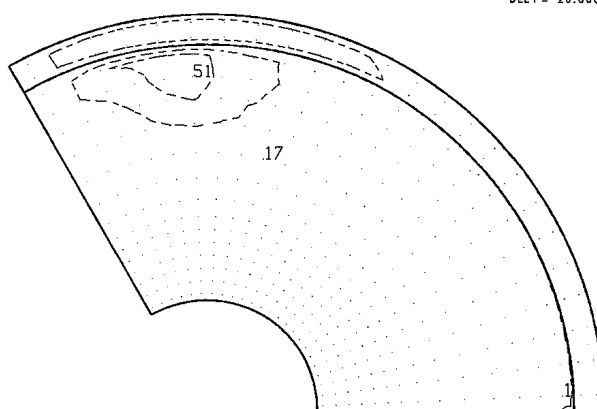
K = 17  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



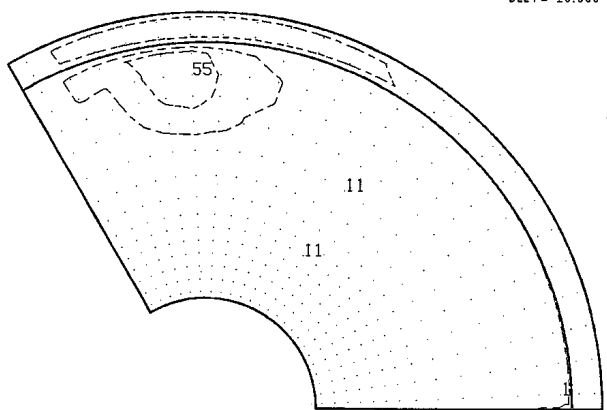
K = 21  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



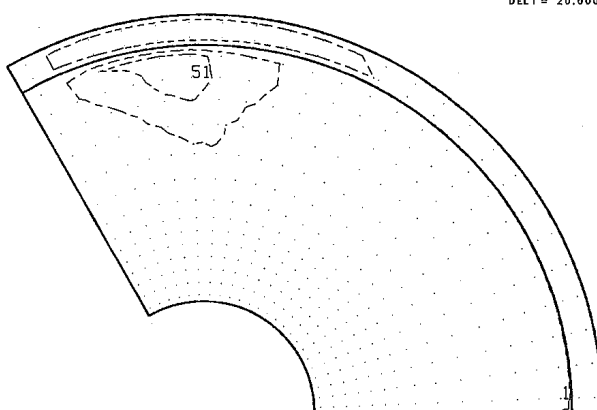
K = 18  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



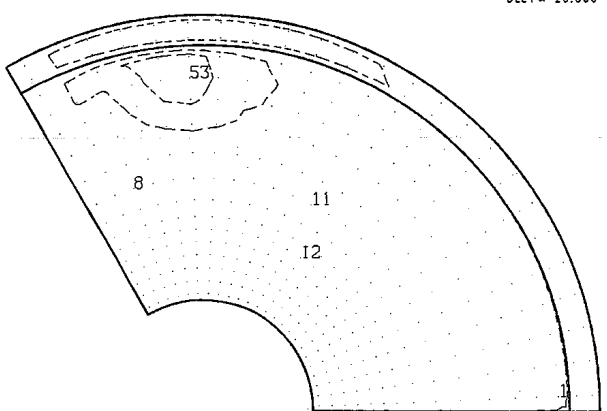
K = 22  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



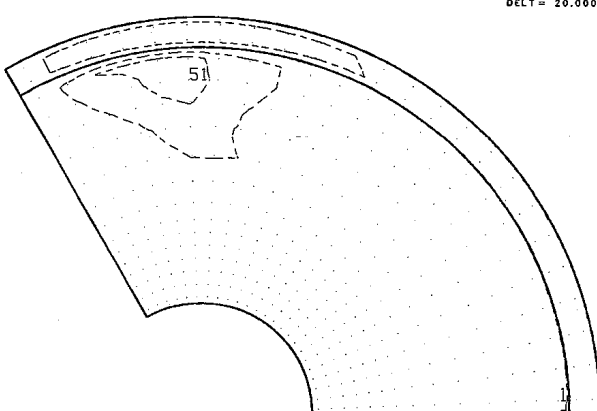
K = 19  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



K = 23  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



K = 20  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



K = 24  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. G. 2 (Continued)



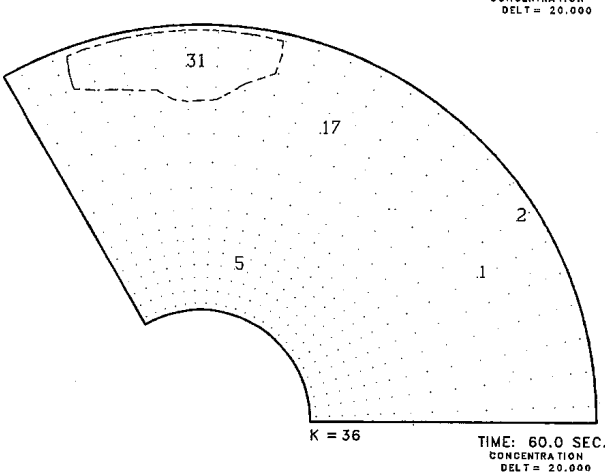
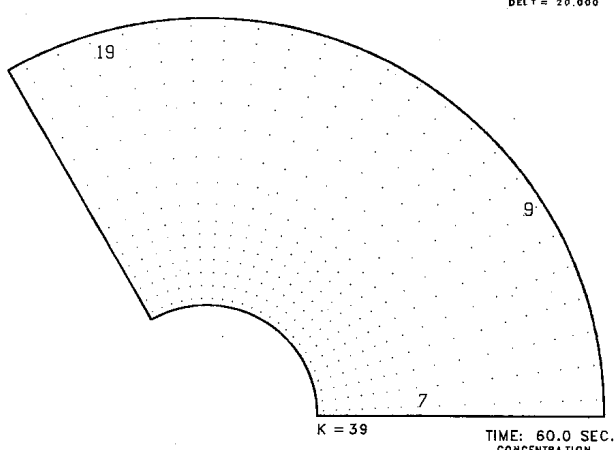
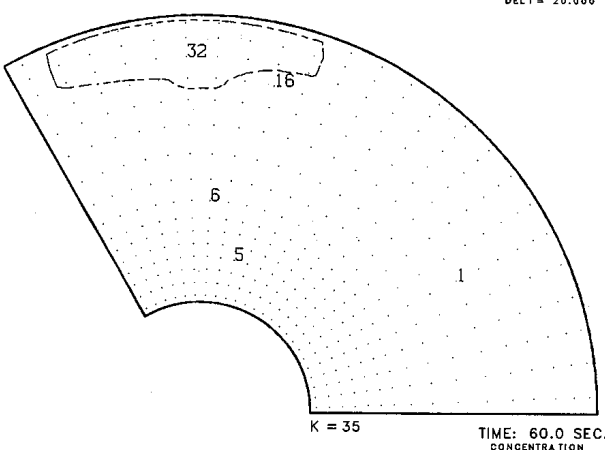
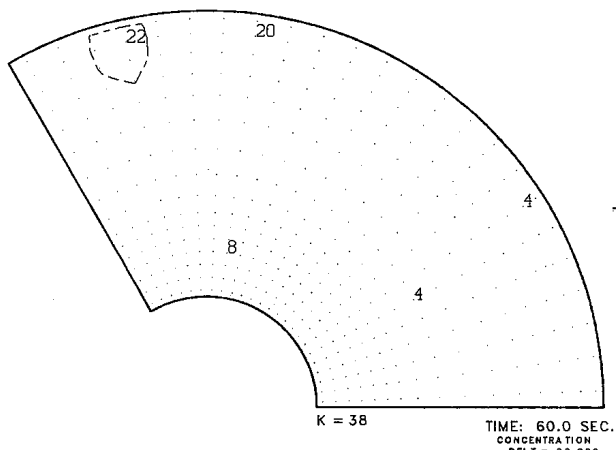
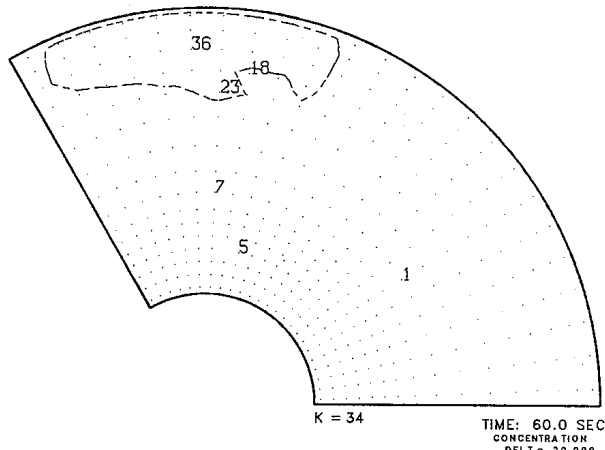
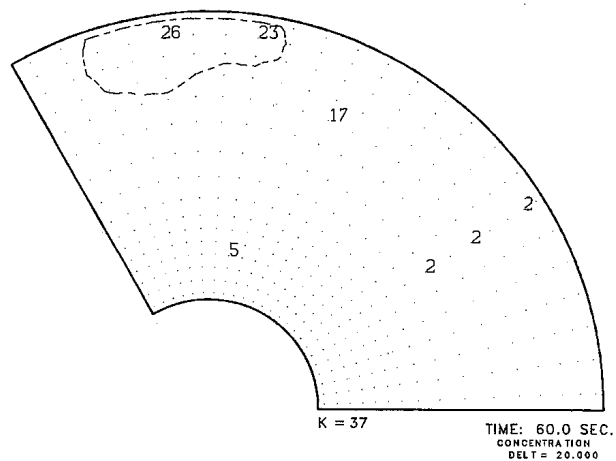
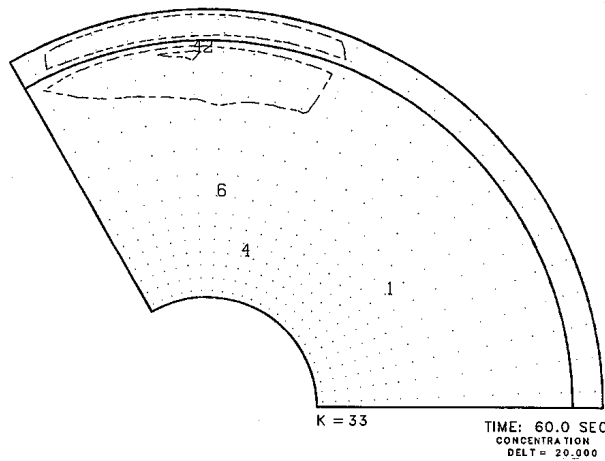


Fig. G. 2 (Continued)



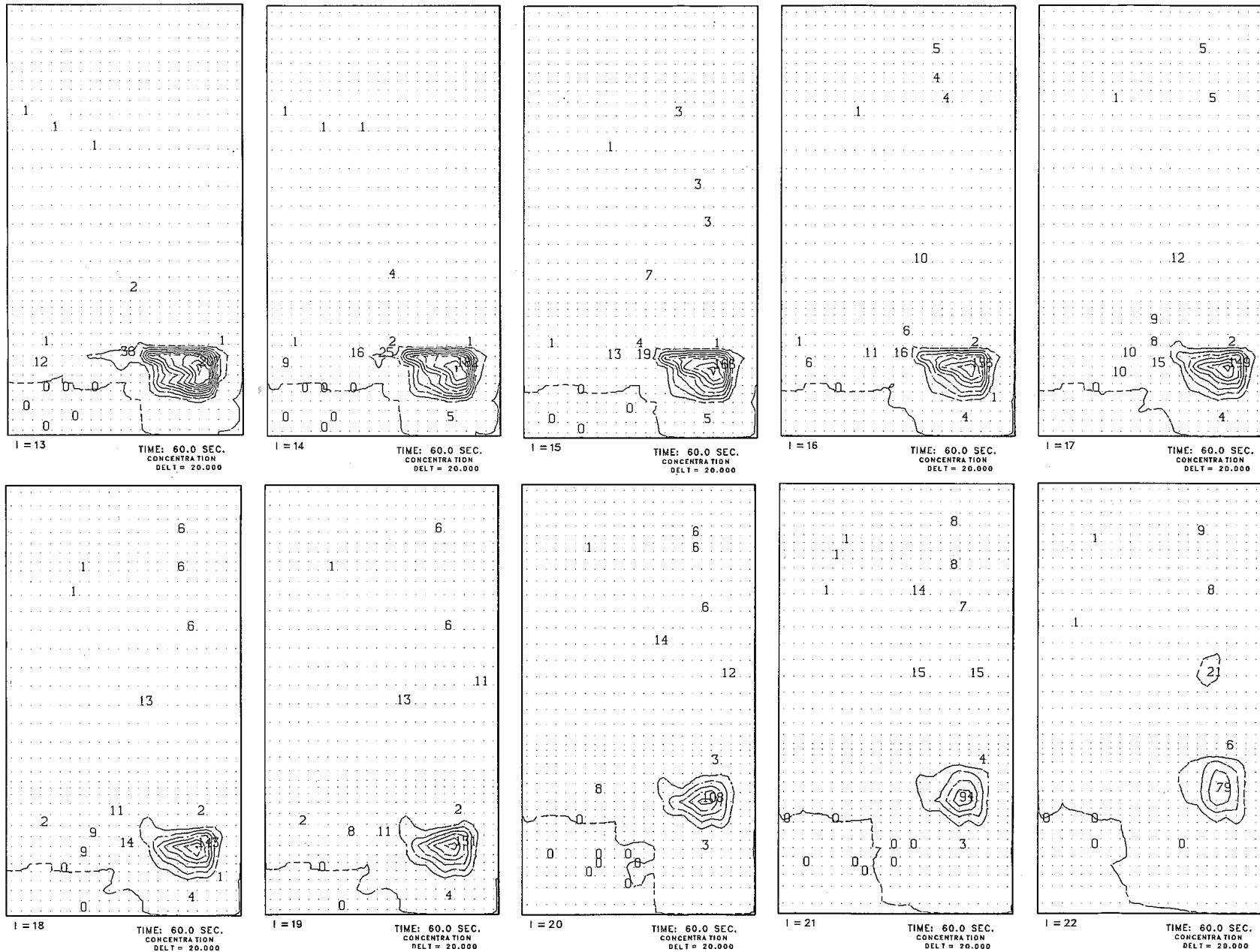
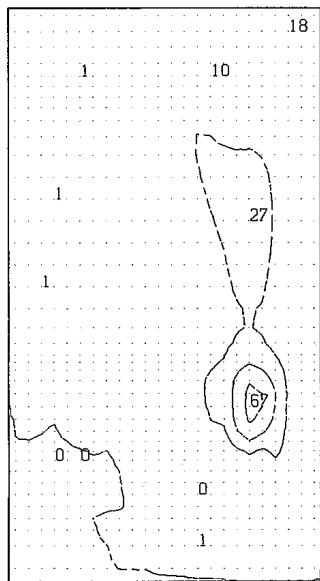
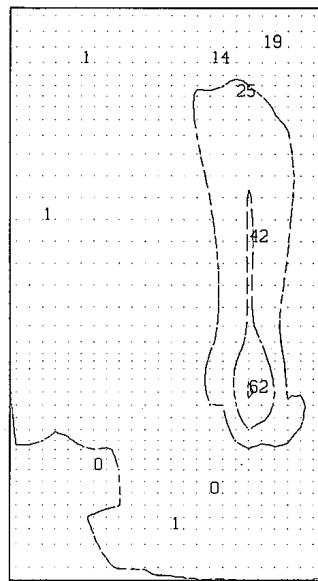


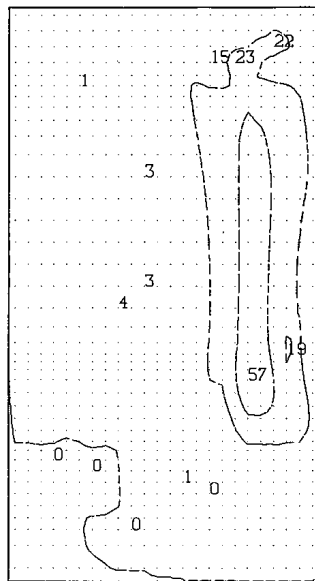
Fig. G. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta$ -z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition



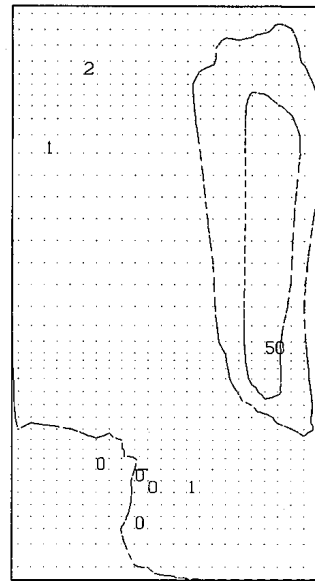
I = 23  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



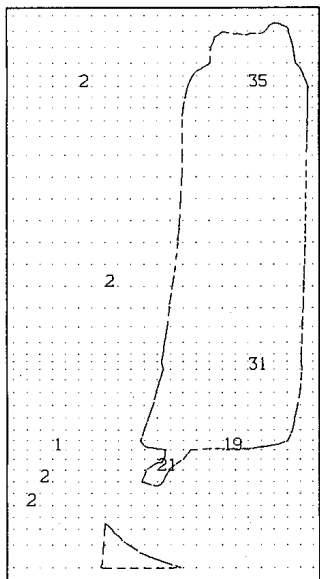
I = 24  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



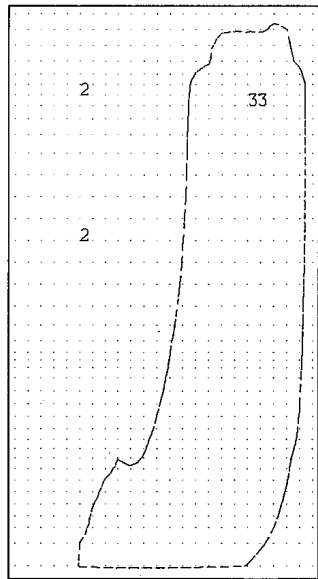
I = 25  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



I = 26  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



I = 27  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



I = 28  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000

Fig. G. 3 (Continued)

付録H DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性  
(ケース 2)

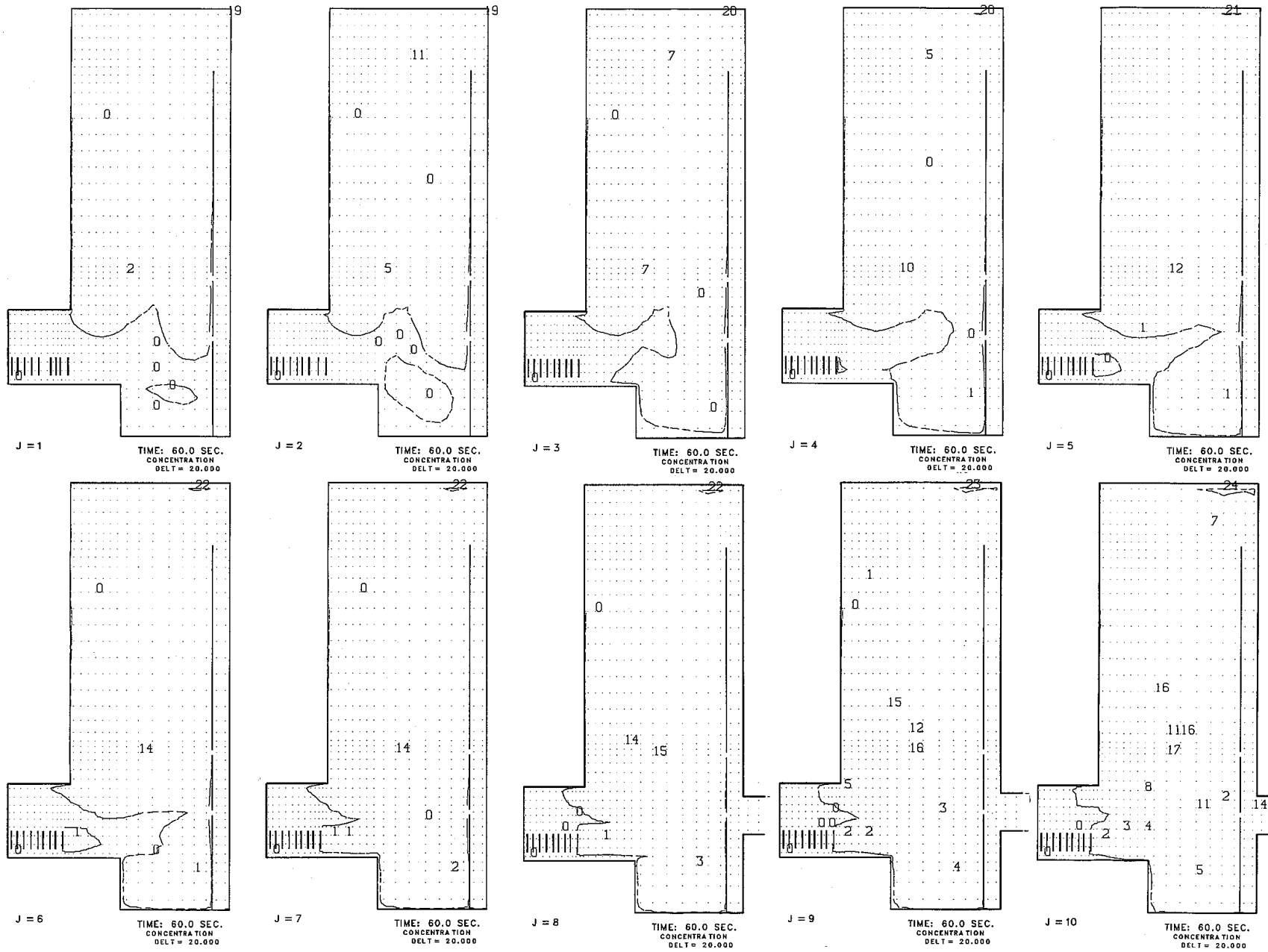
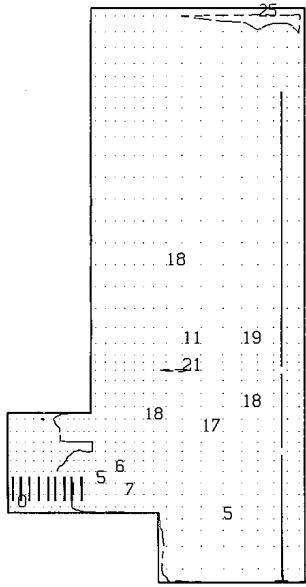
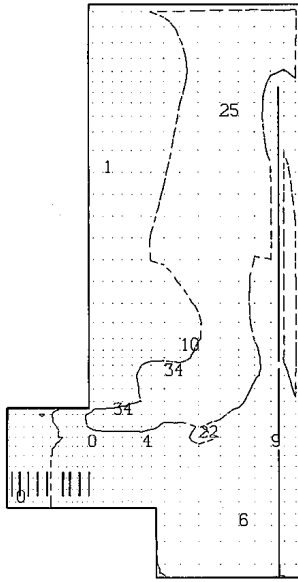


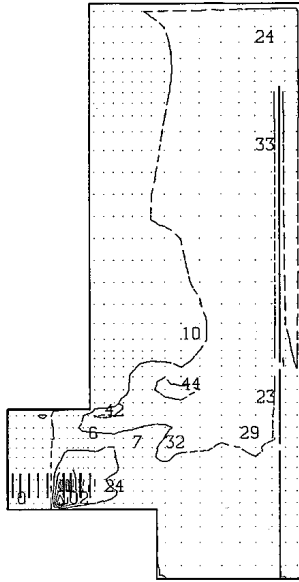
Fig. H. 1 DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition



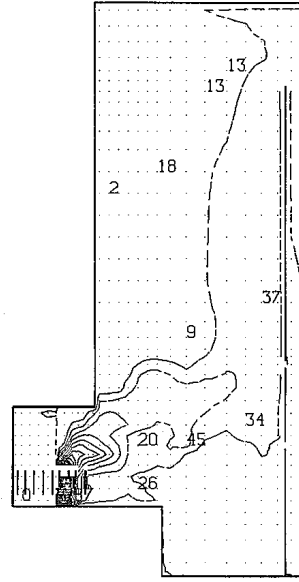
J = 11  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



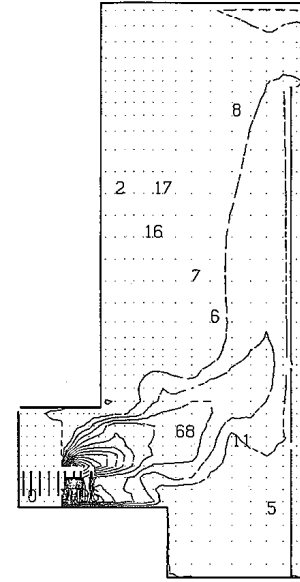
J = 12  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



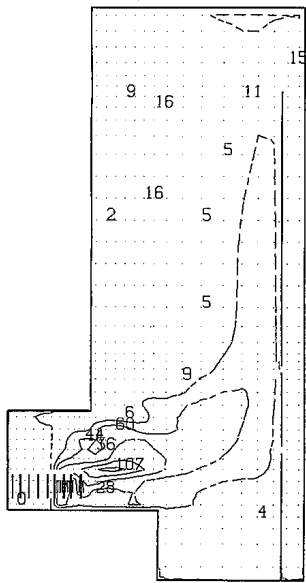
J = 13  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



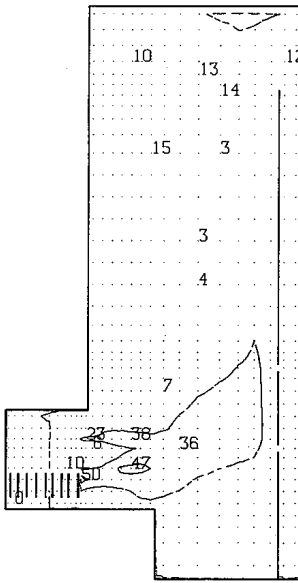
J = 14  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



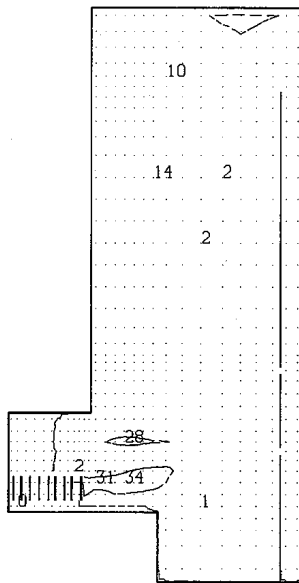
J = 15  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



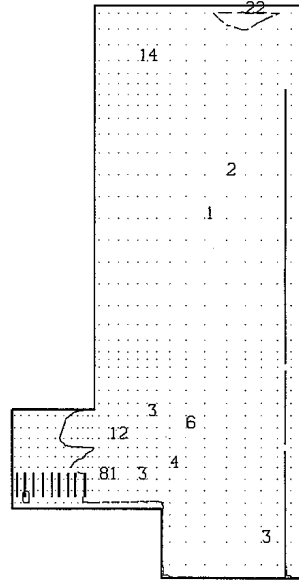
J = 16  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



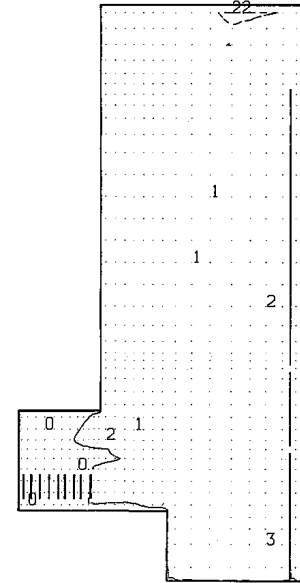
J = 17  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



J = 18  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

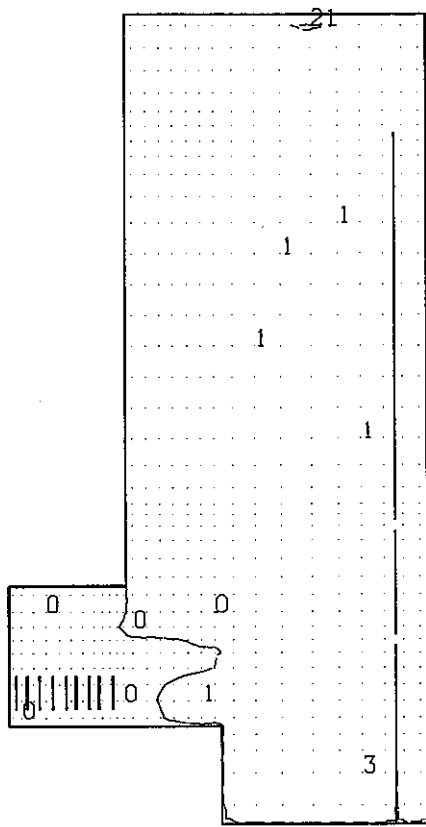


J = 19  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



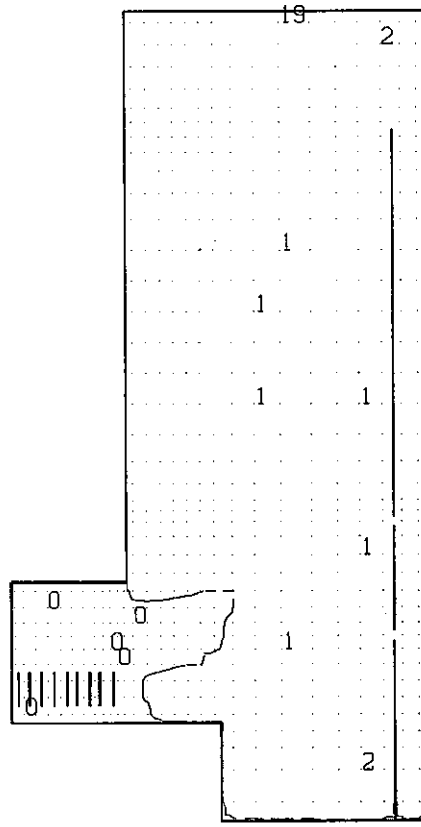
J = 20  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. H. 1 (Continued)



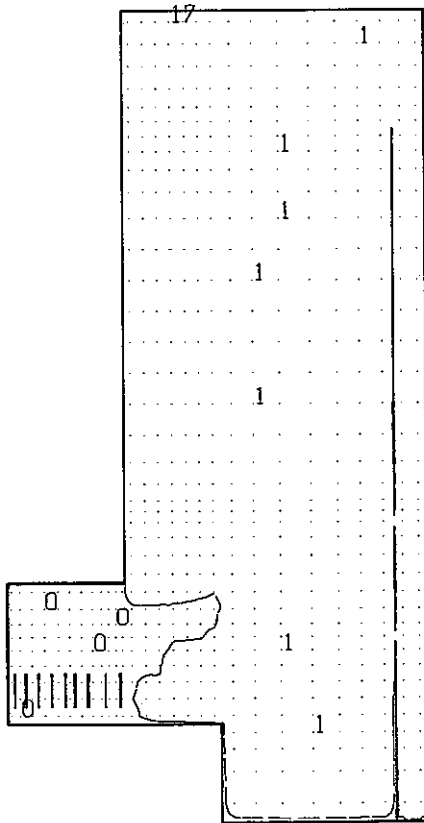
J = 21

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



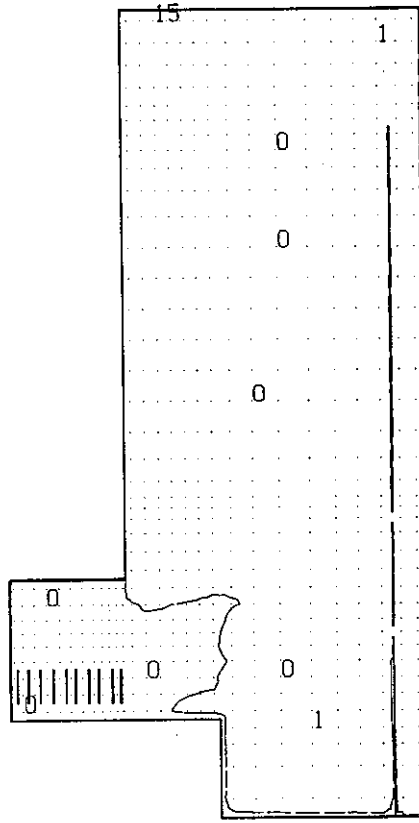
J = 22

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



J = 23

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



J = 24

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. H. 1 (Continued)

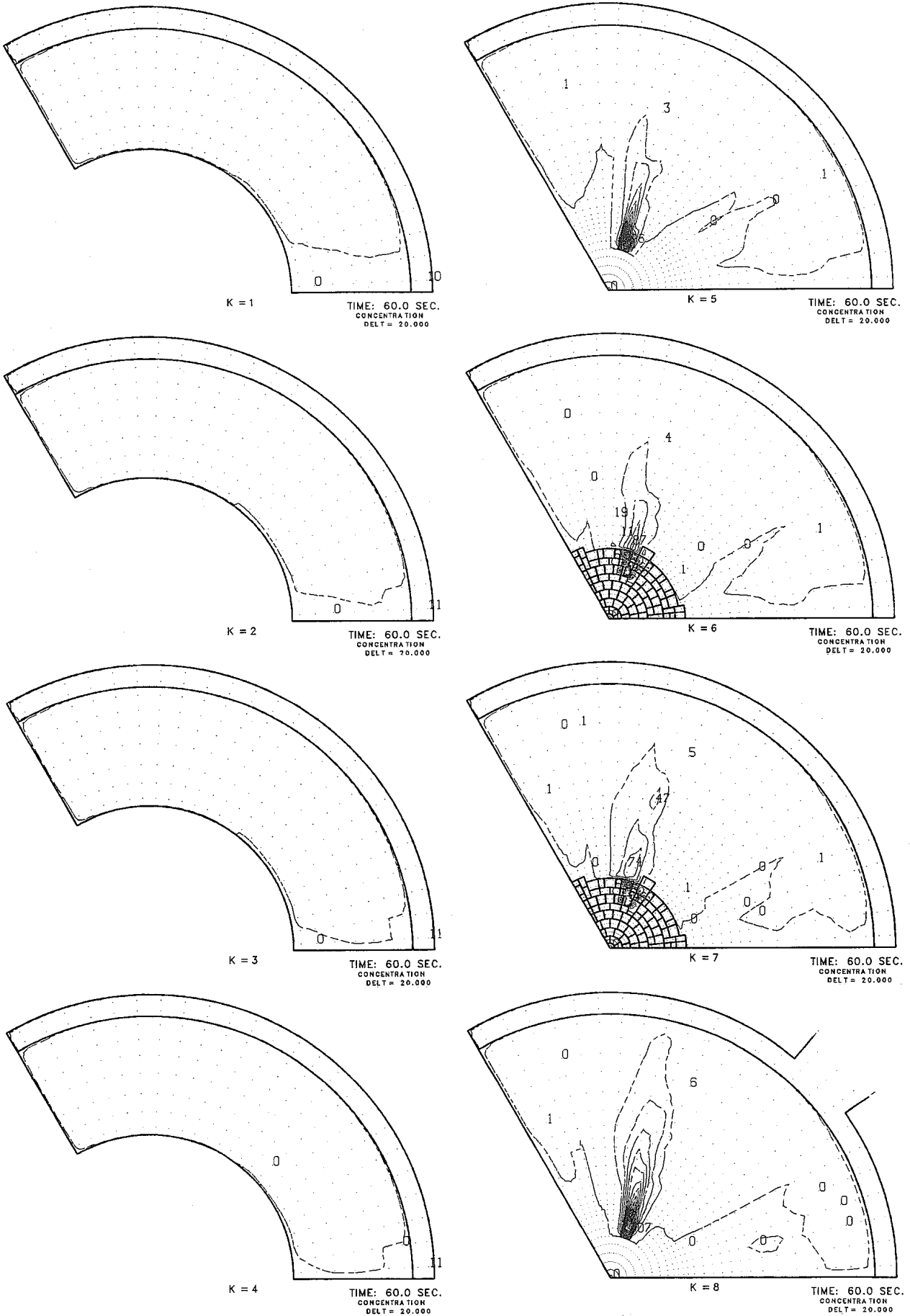
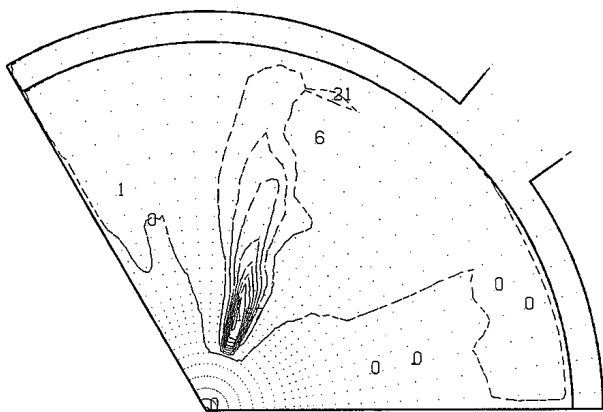
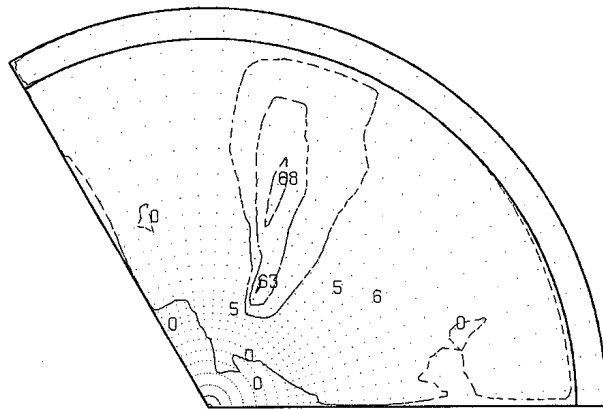


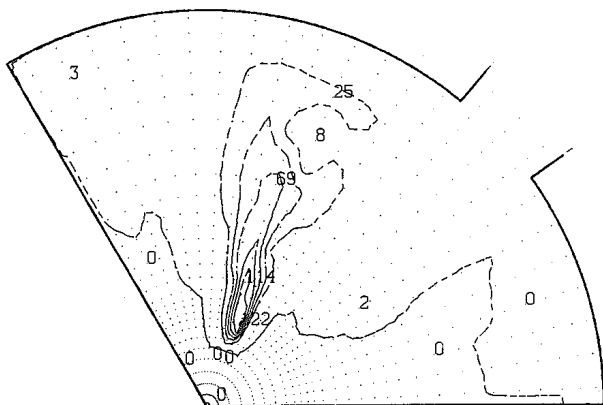
Fig.H. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition



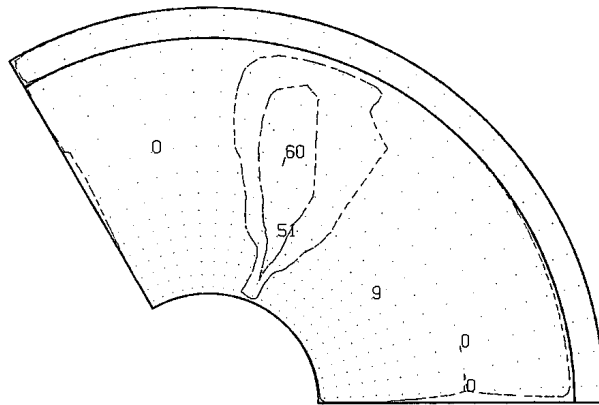
K = 9  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



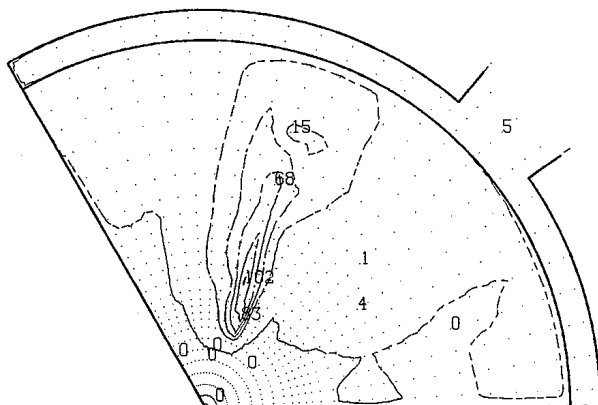
K = 13  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



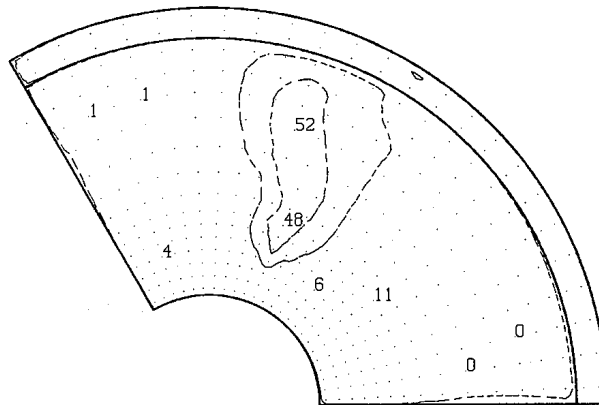
K = 10  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



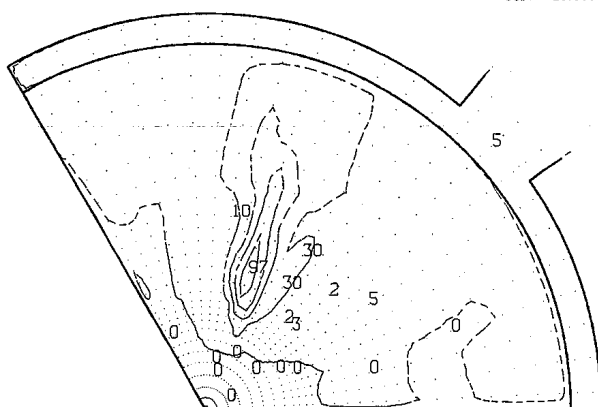
K = 14  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



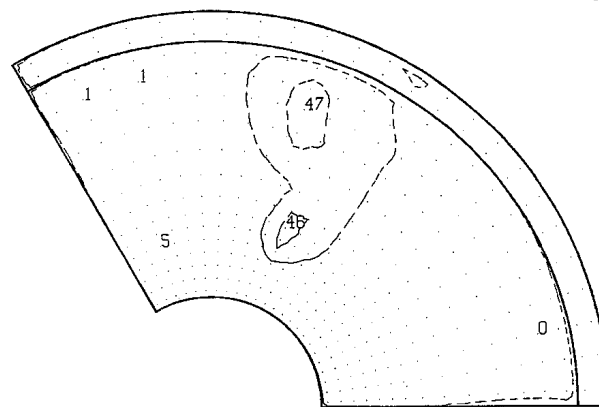
K = 11  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



K = 15  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



K = 12  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



K = 16  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. H. 2 (Continued)



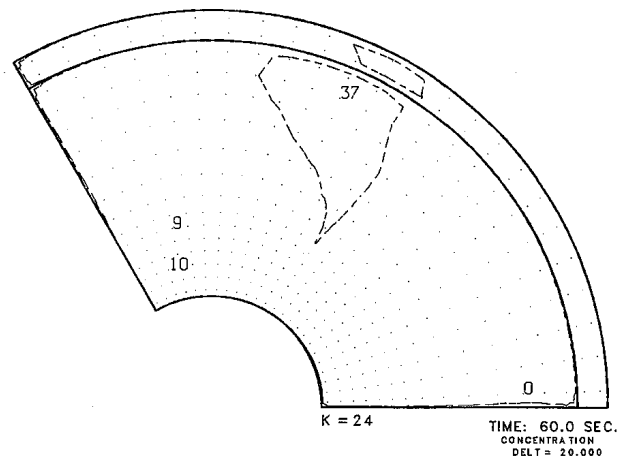
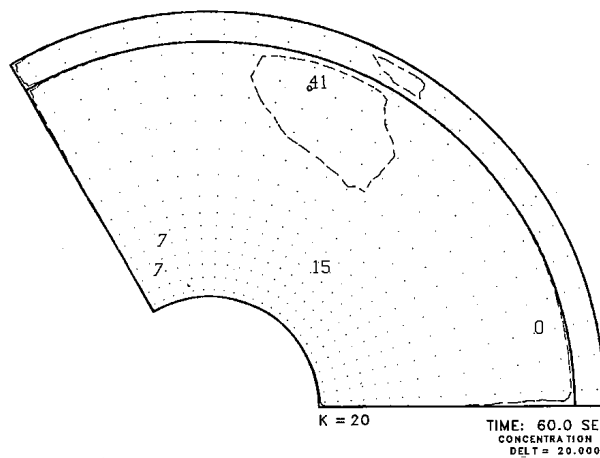
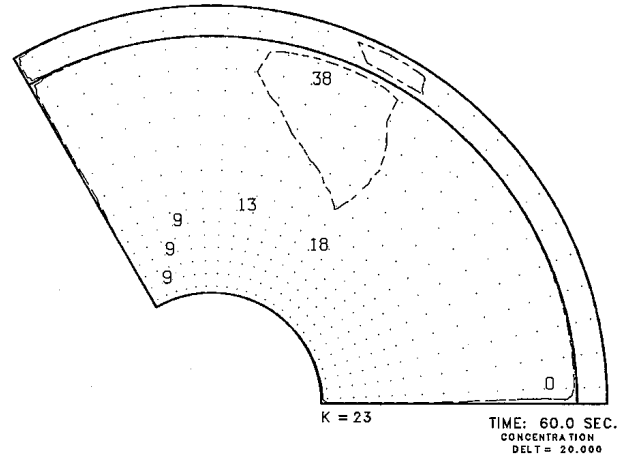
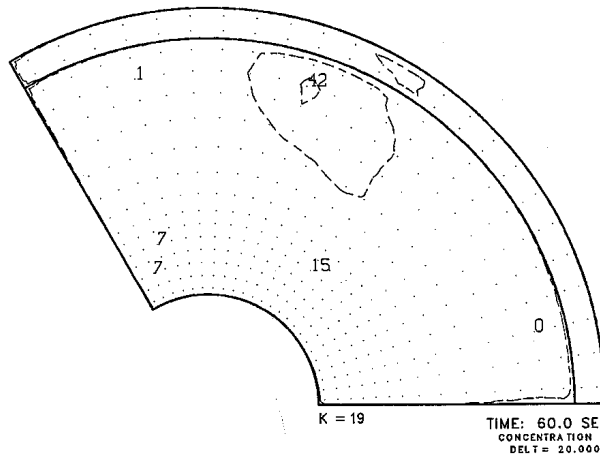
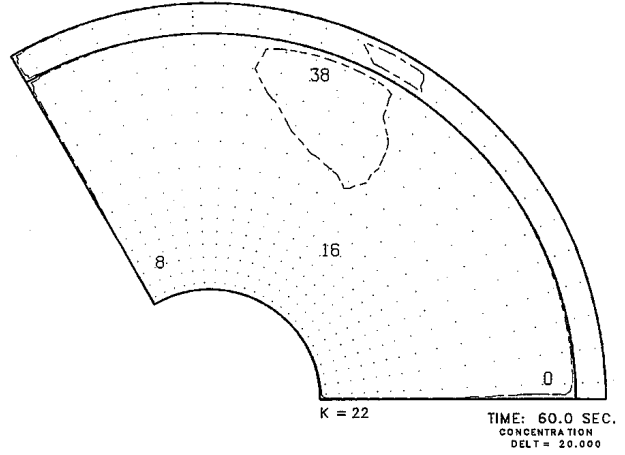
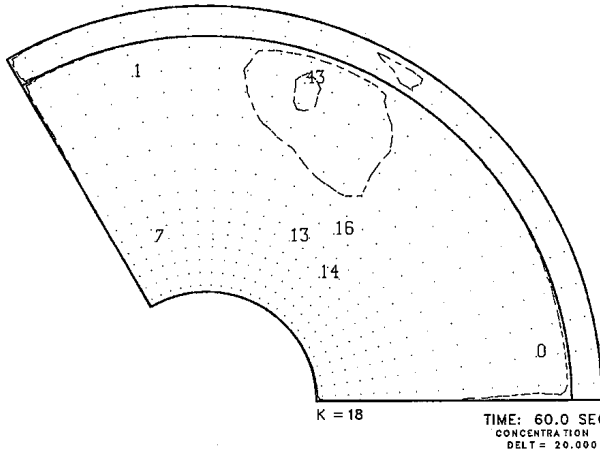
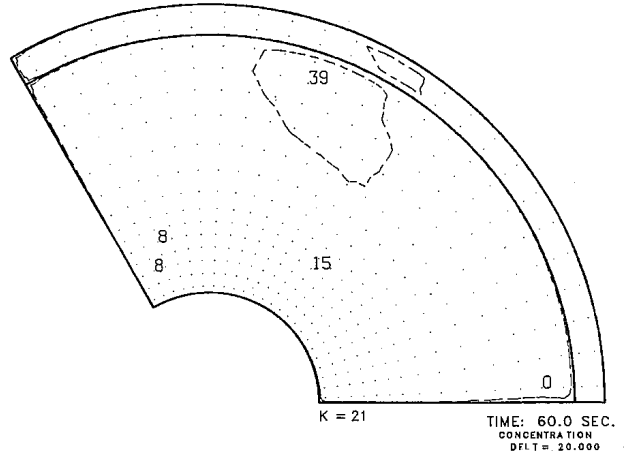
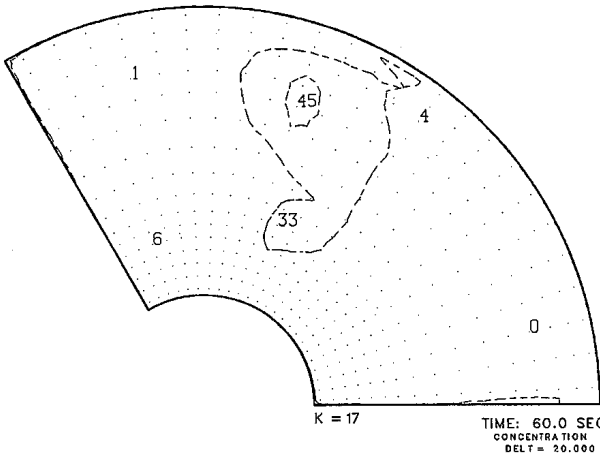


Fig. H. 2 (Continued)

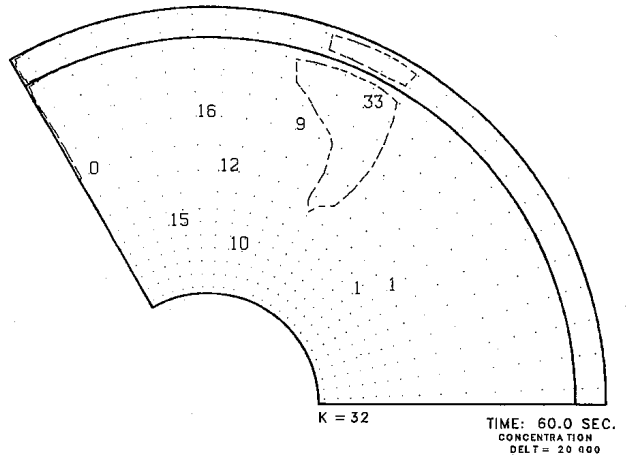
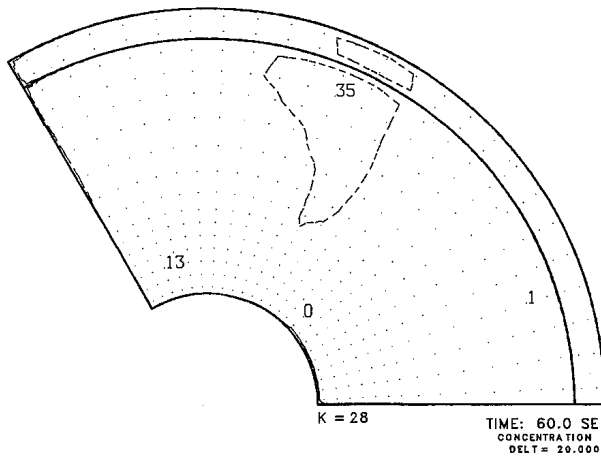
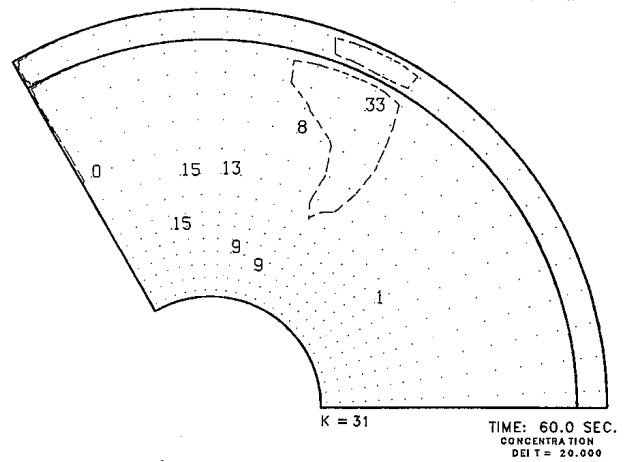
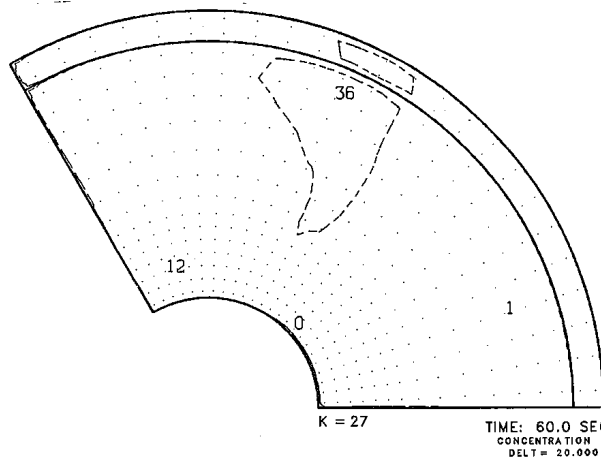
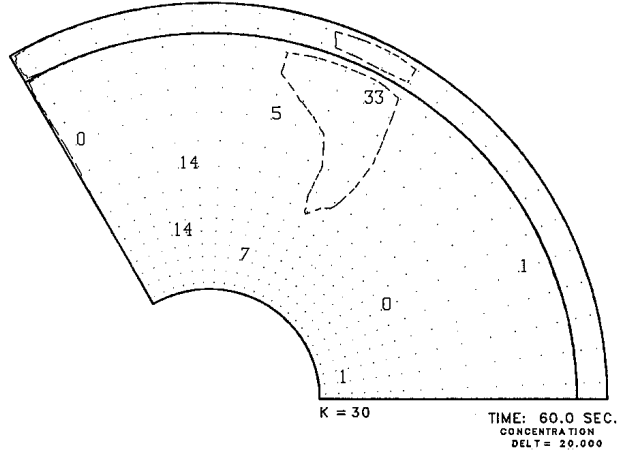
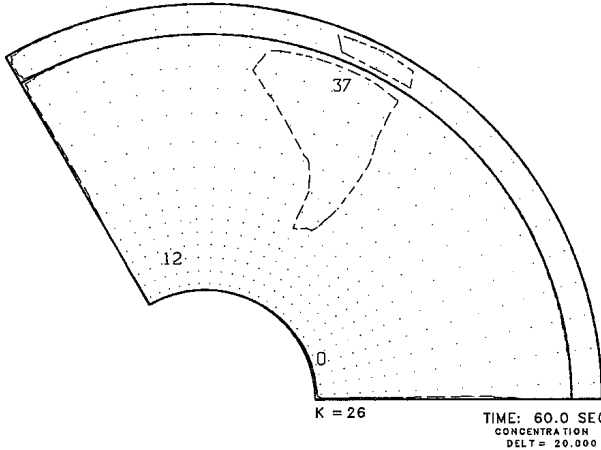
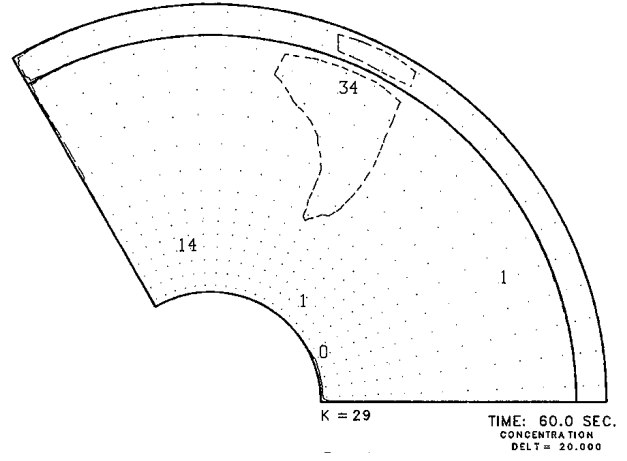
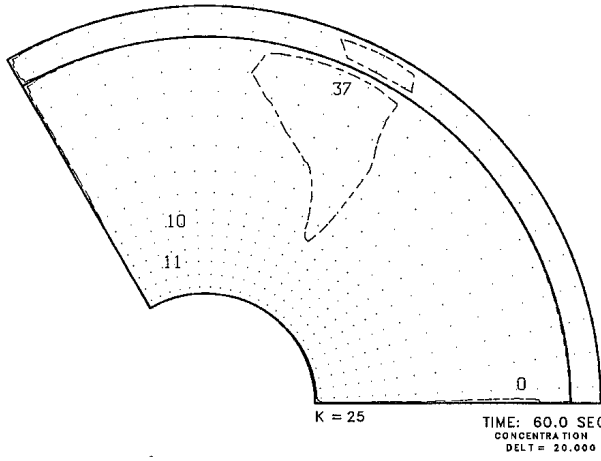


Fig. H. 2 (Continued)

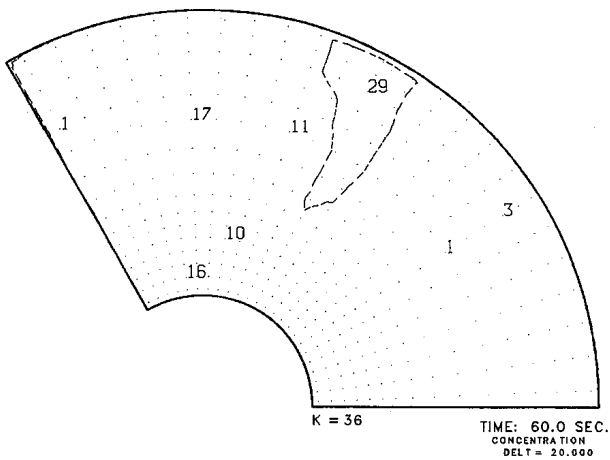
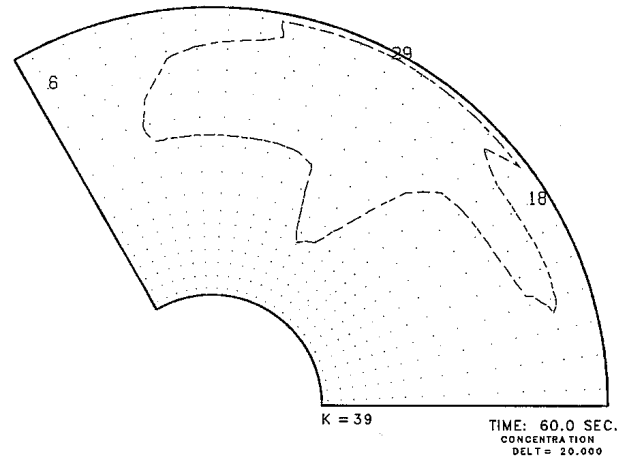
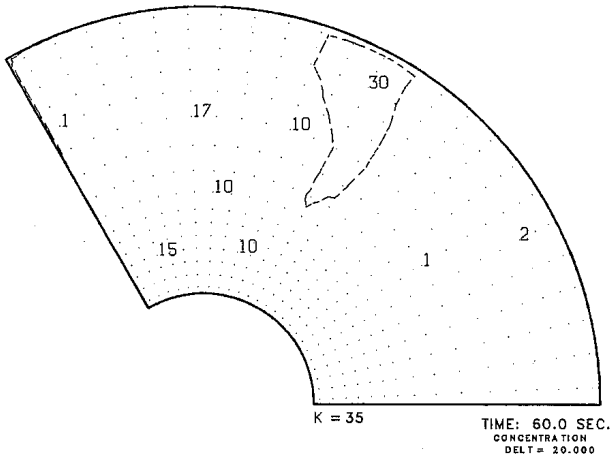
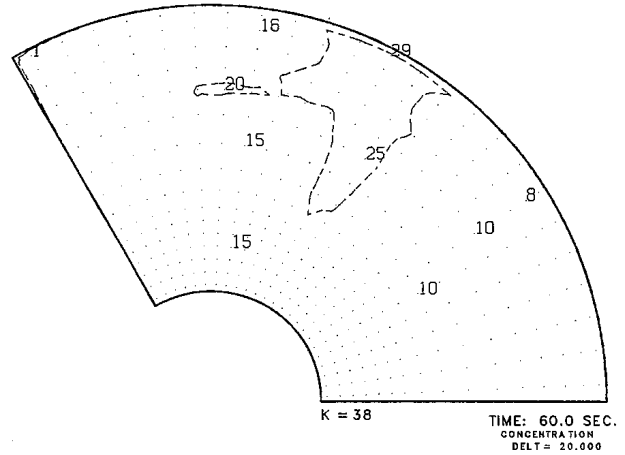
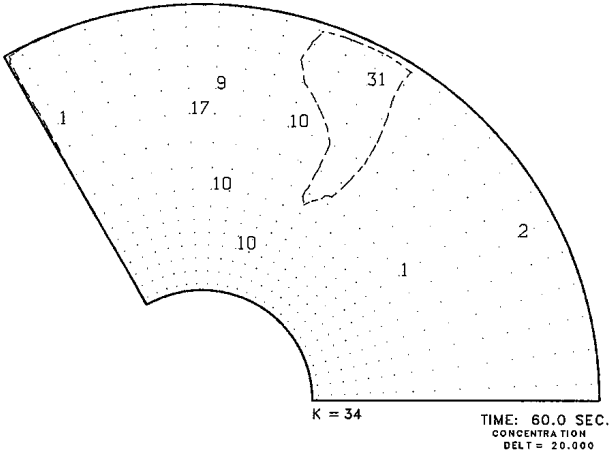
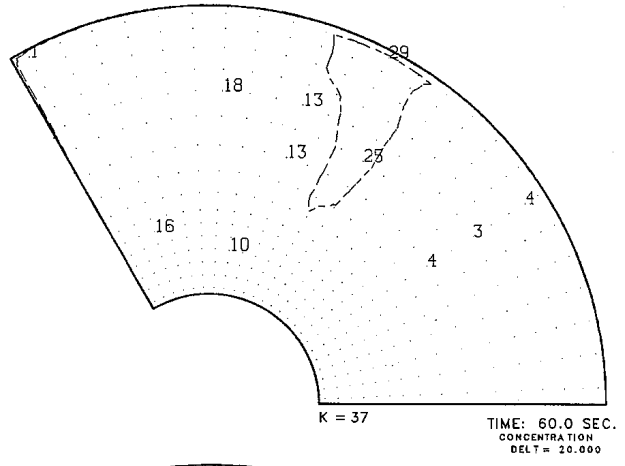
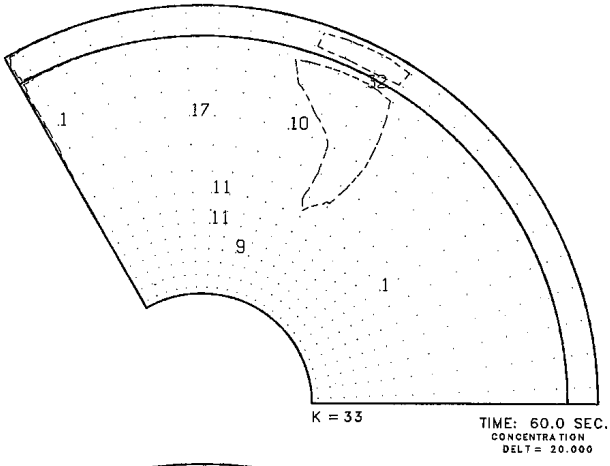
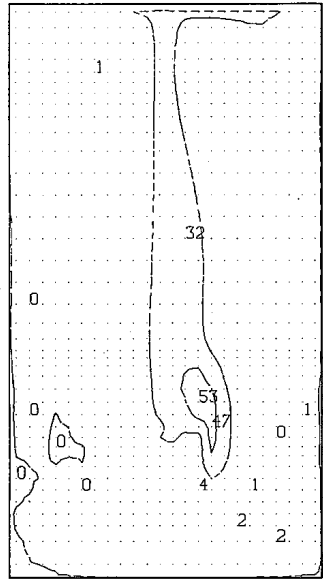
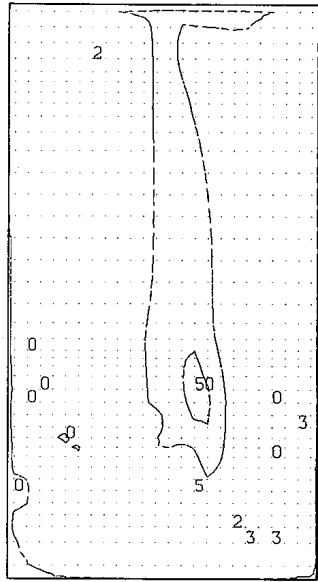


Fig. H. 2 (Continued)

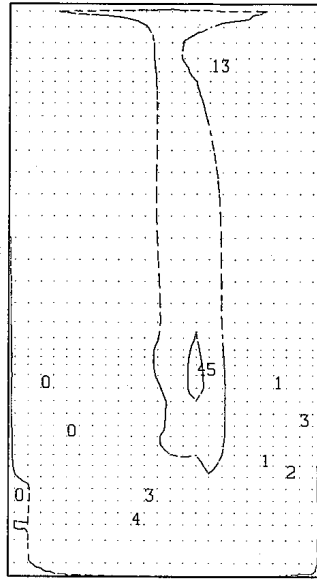




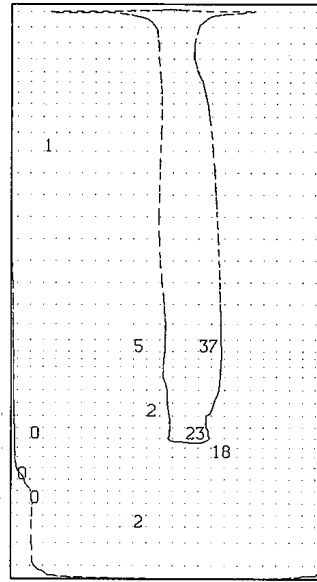
I = 23  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



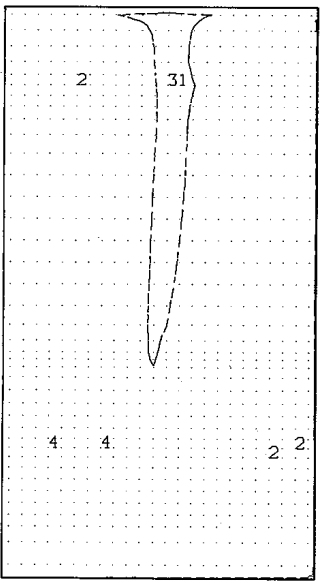
I = 24  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



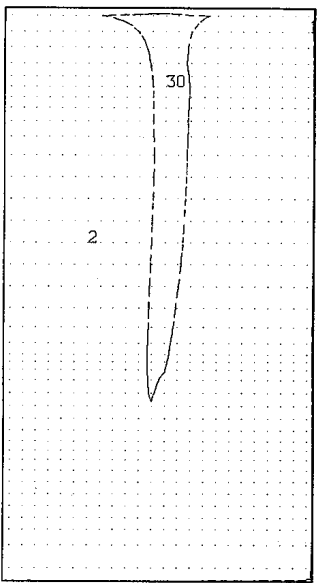
I = 25  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



I = 26  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



I = 27  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



I = 28  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. H. 3 (Continued)

付録 I DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性  
(ケース 3)

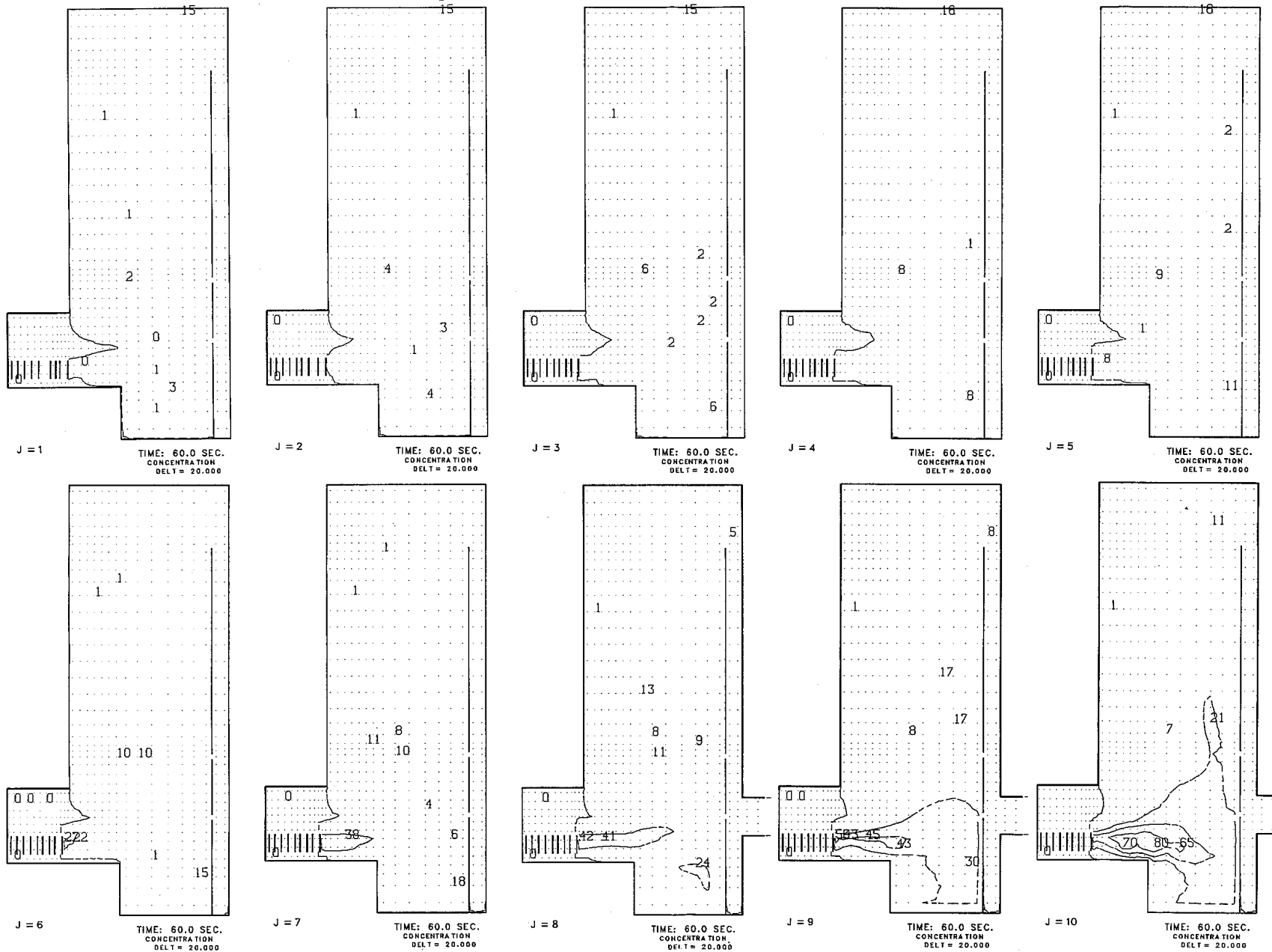
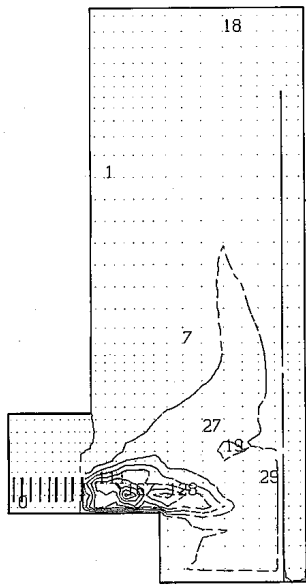
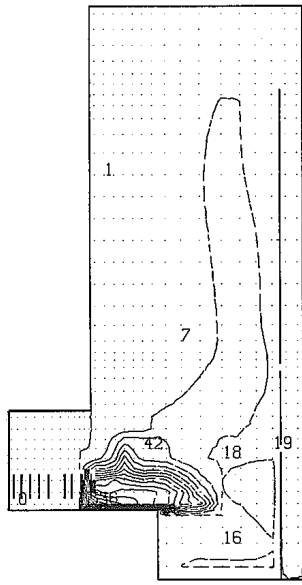


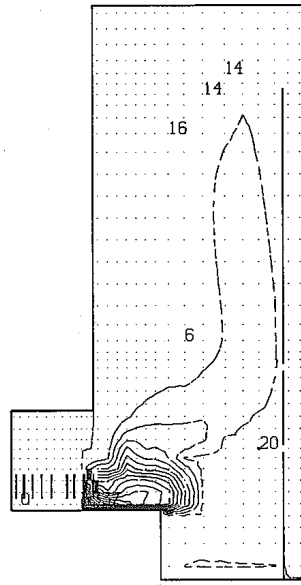
Fig. I. 1 DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition



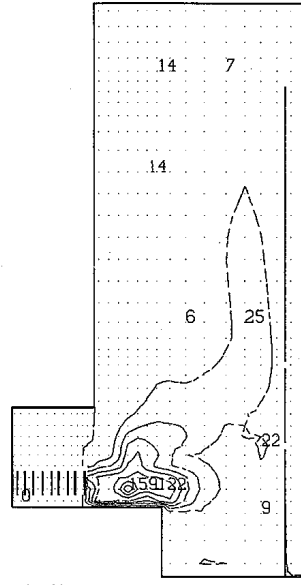
J = 11  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



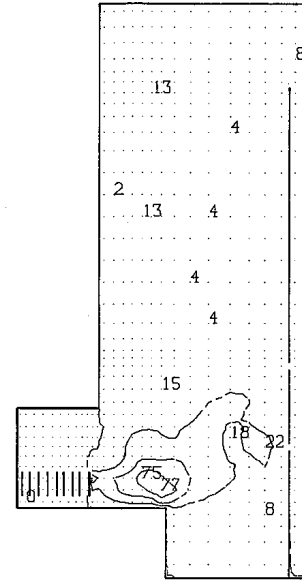
J = 12  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



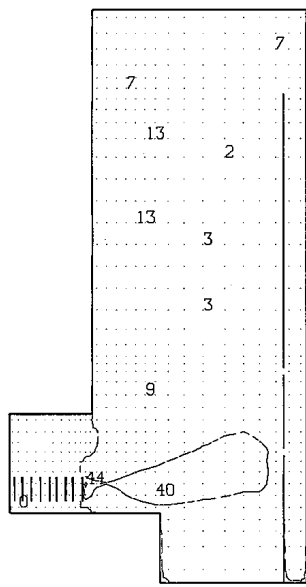
J = 13  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



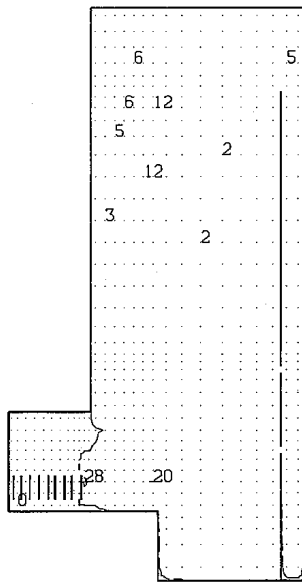
J = 14  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



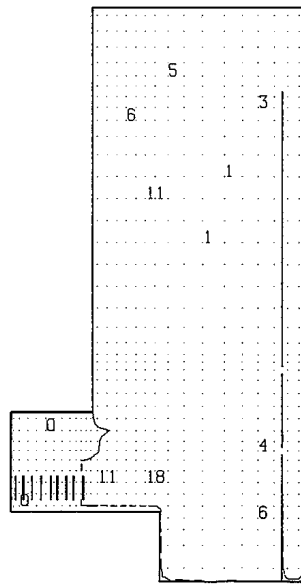
J = 15  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



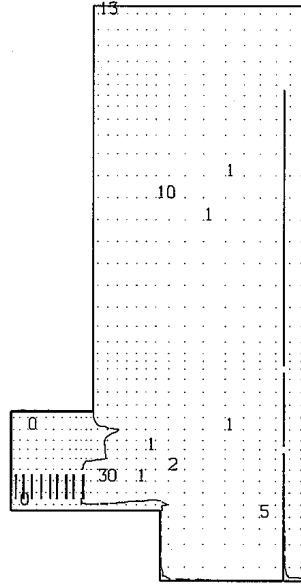
J = 16  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



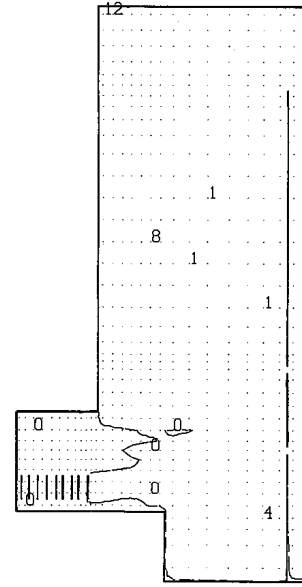
J = 17  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



J = 18  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



J = 19  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000



J = 20  
 TIME: 60.0 SEC.  
 CONCENTRATION  
 DELT = 20.000

Fig. 1 (Continued)





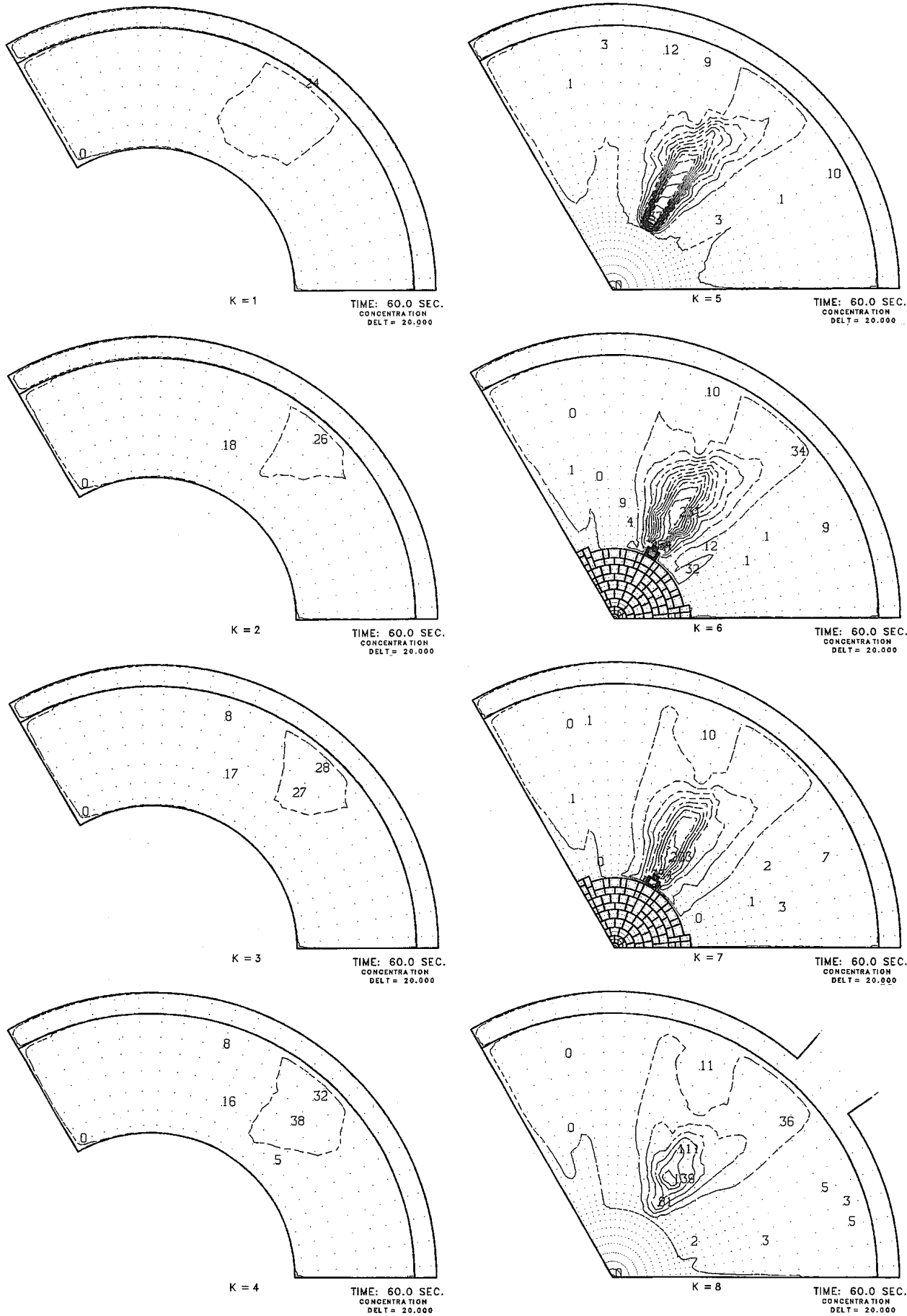
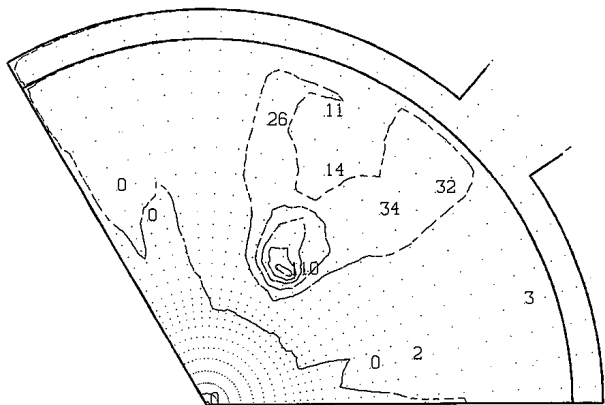
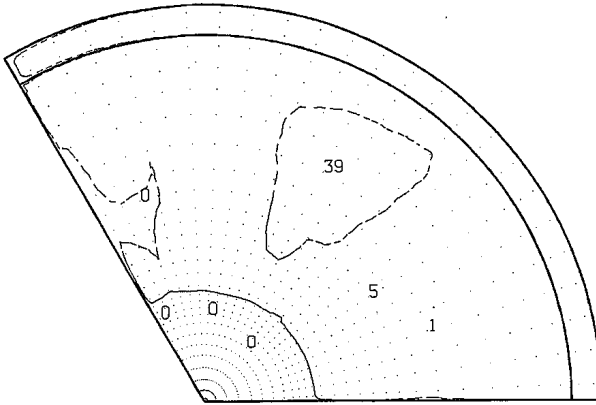


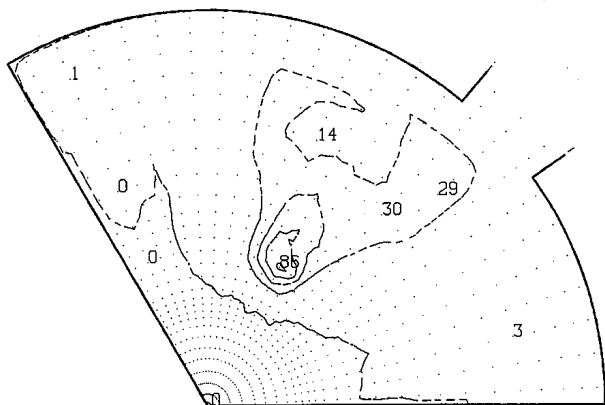
Fig. 1. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition



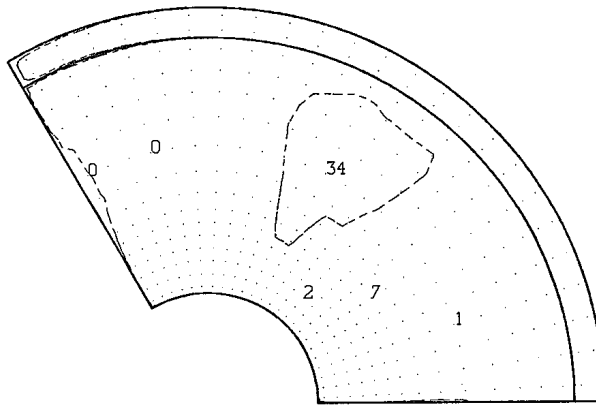
K = 9  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



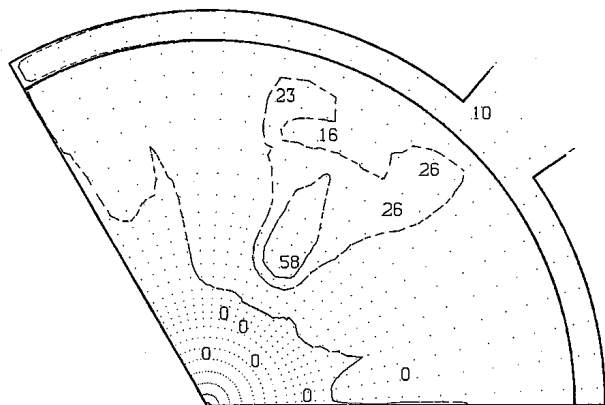
K = 13  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



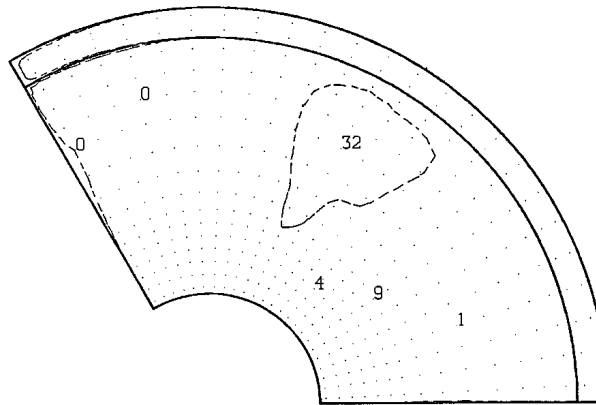
K = 10  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



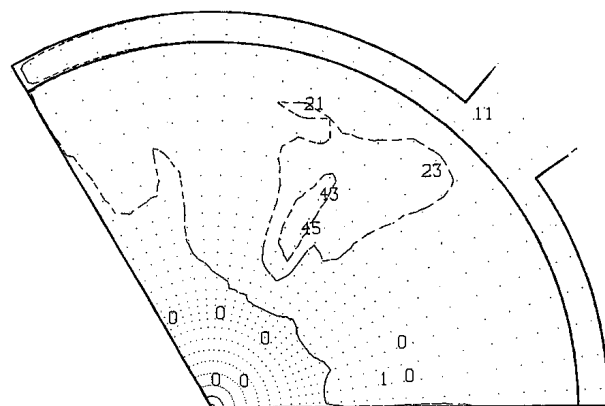
K = 14  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



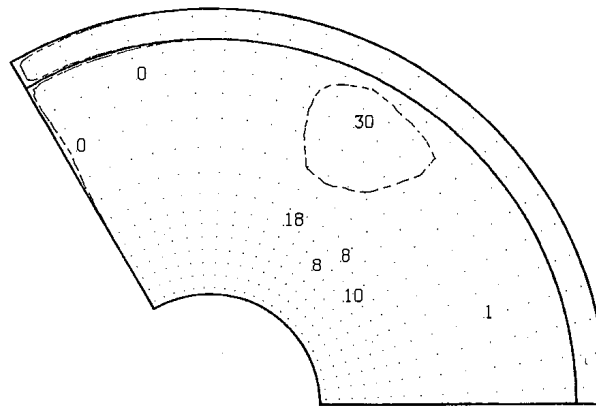
K = 11  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



K = 15  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



K = 12  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



K = 16  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. I. 2 (Continued)

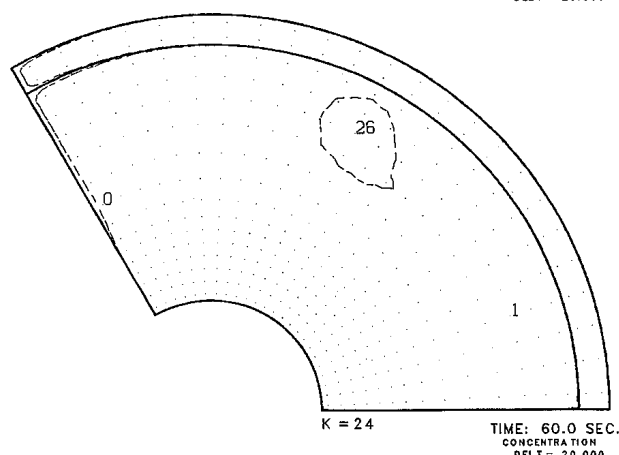
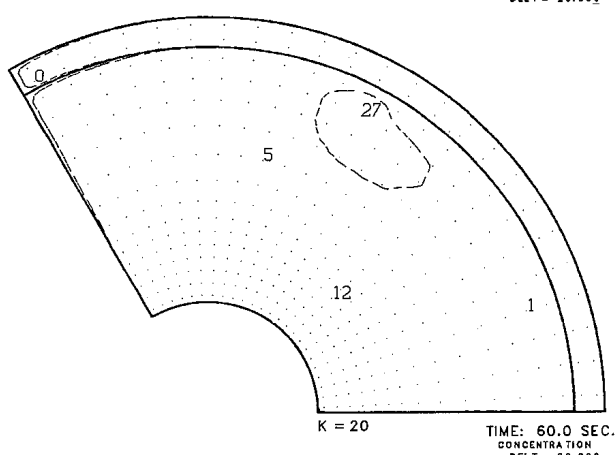
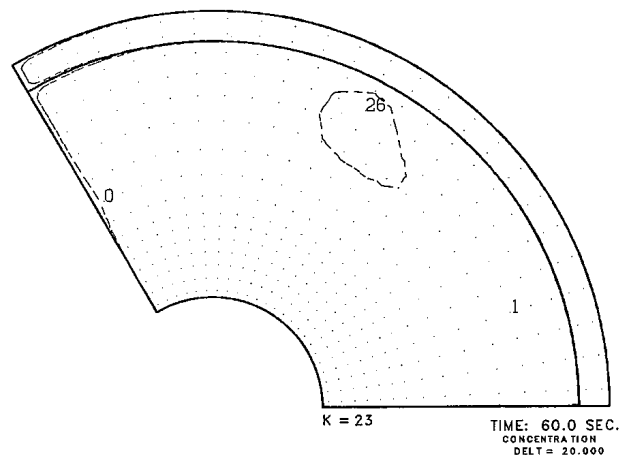
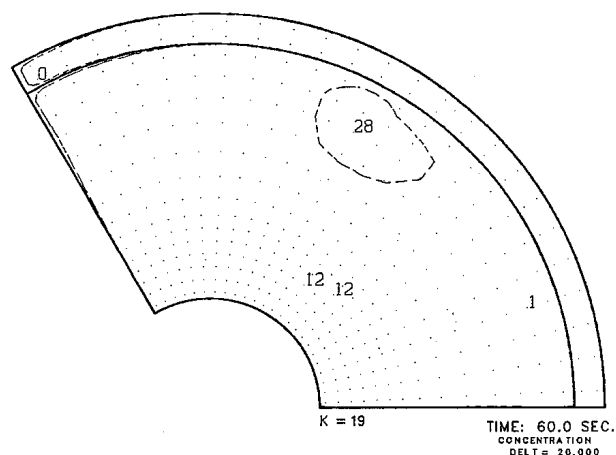
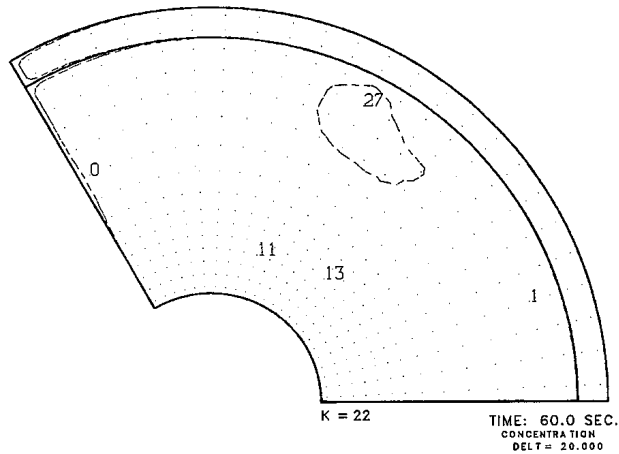
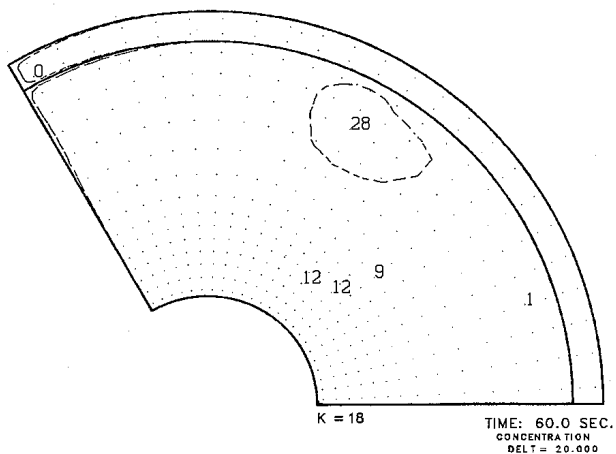
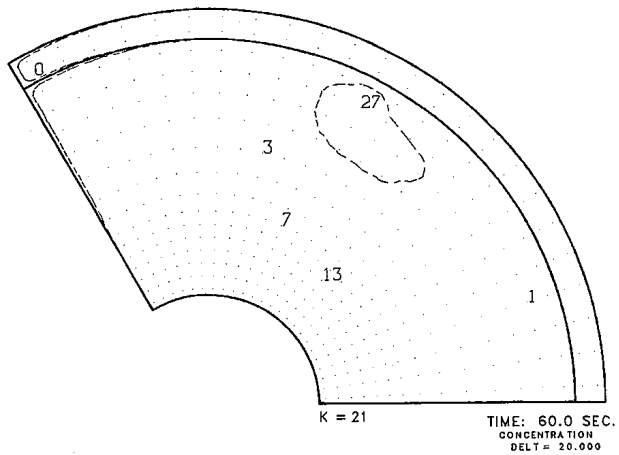
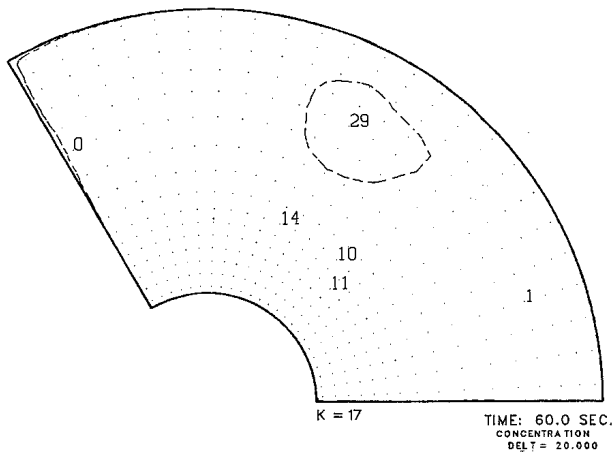


Fig. I. 2 (Continued)

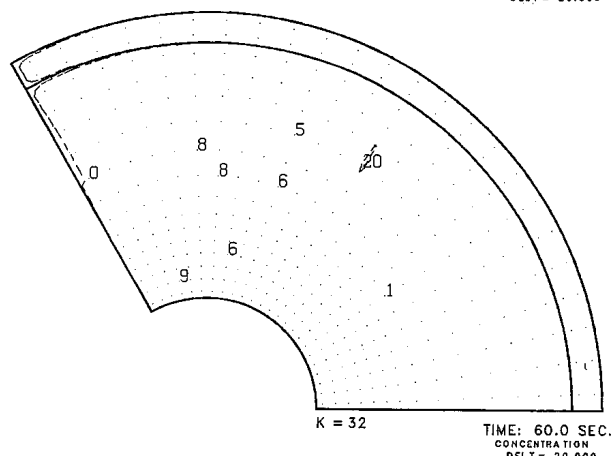
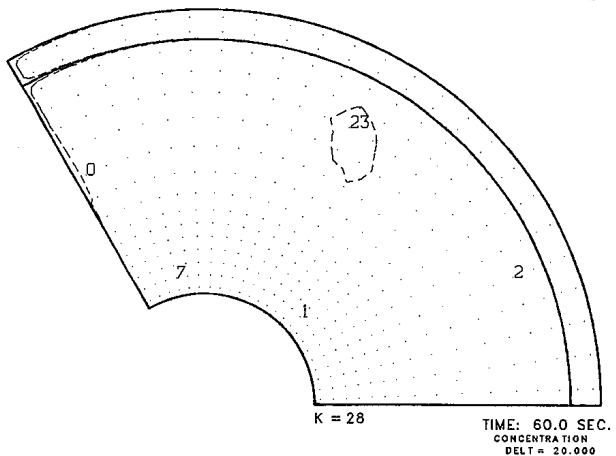
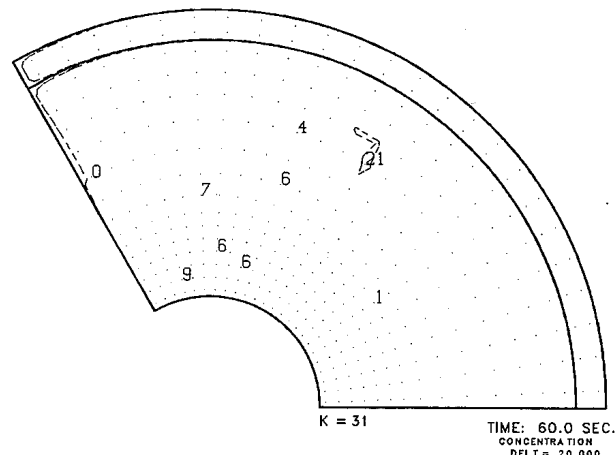
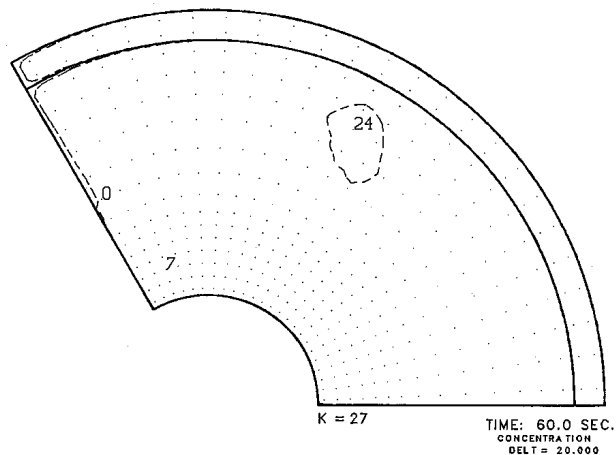
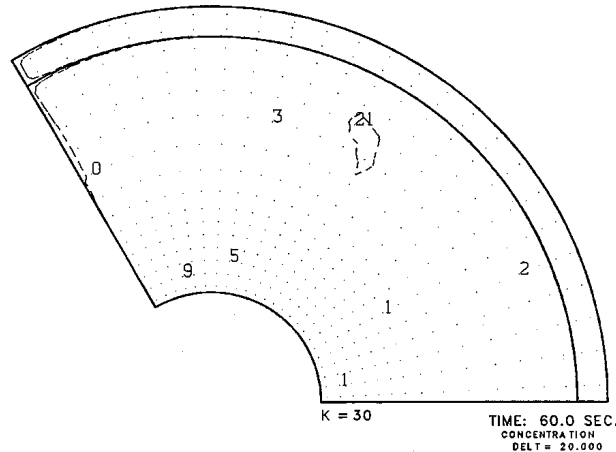
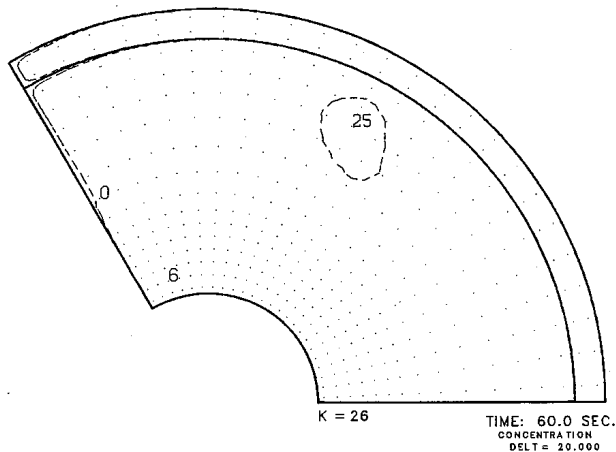
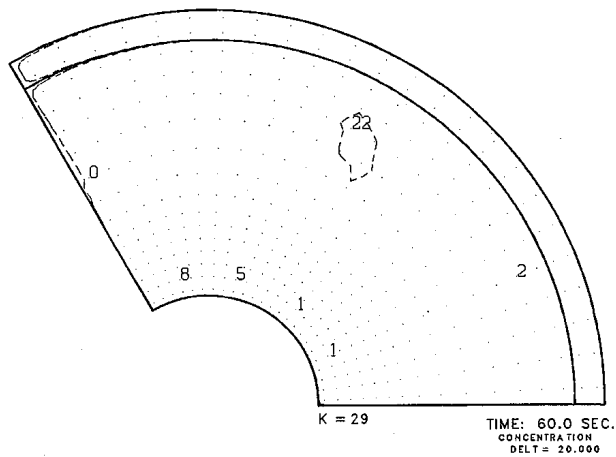
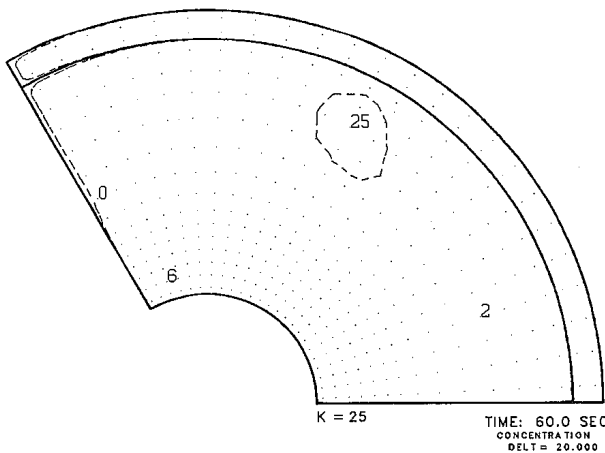


Fig. I. 2 (Continued)

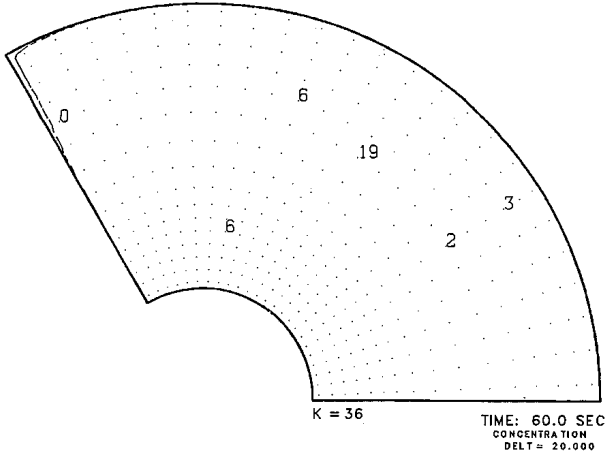
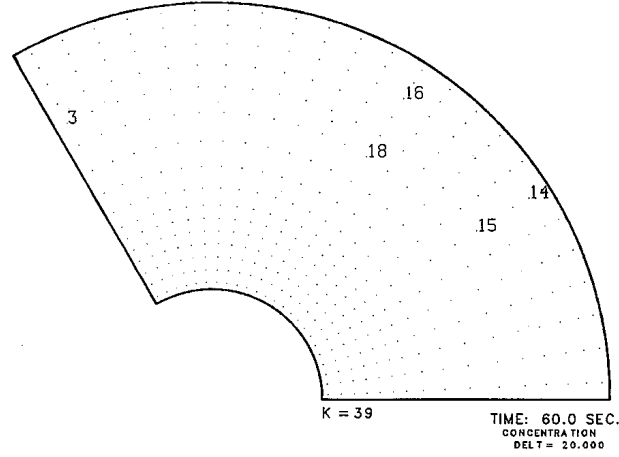
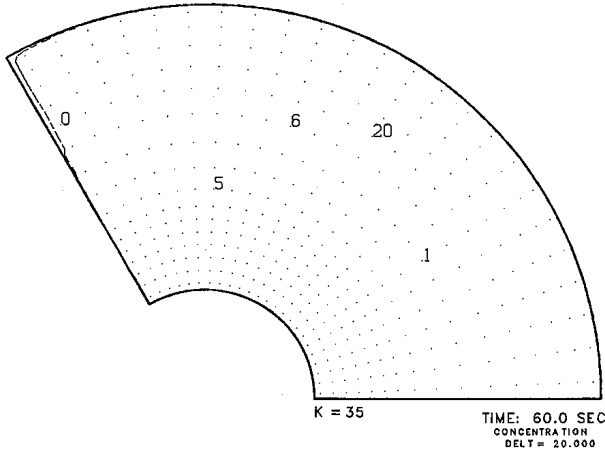
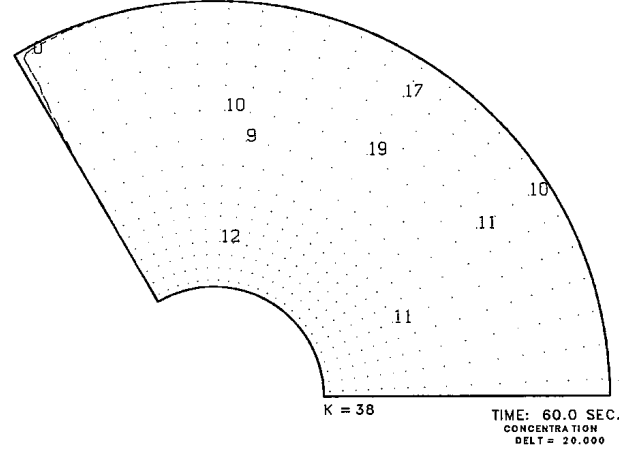
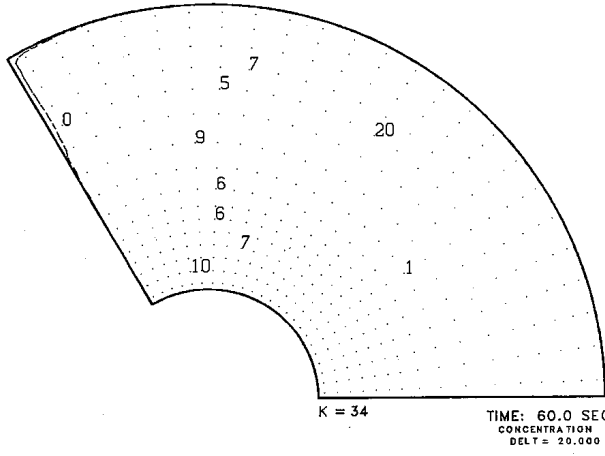
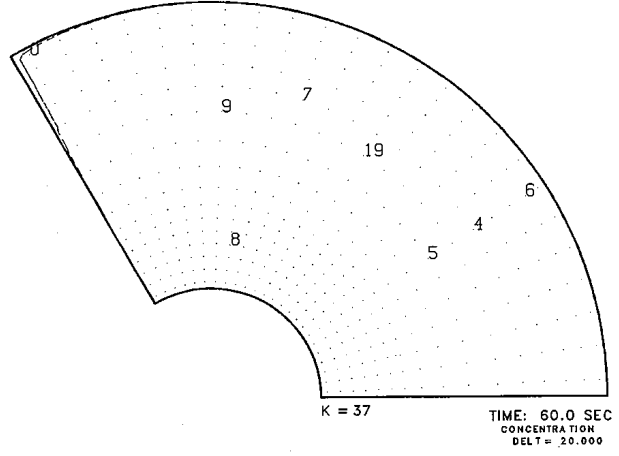
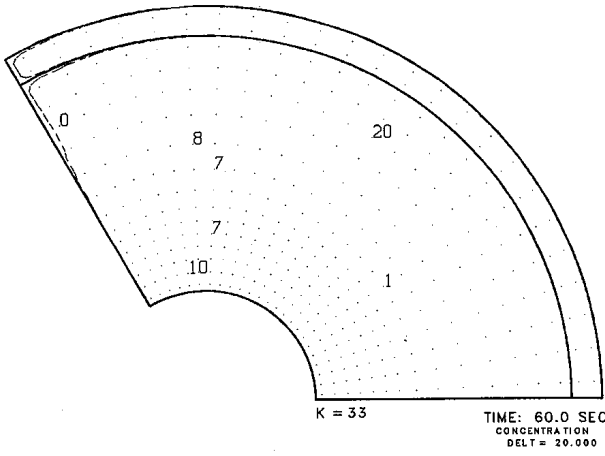


Fig. I. 2 (Continued)

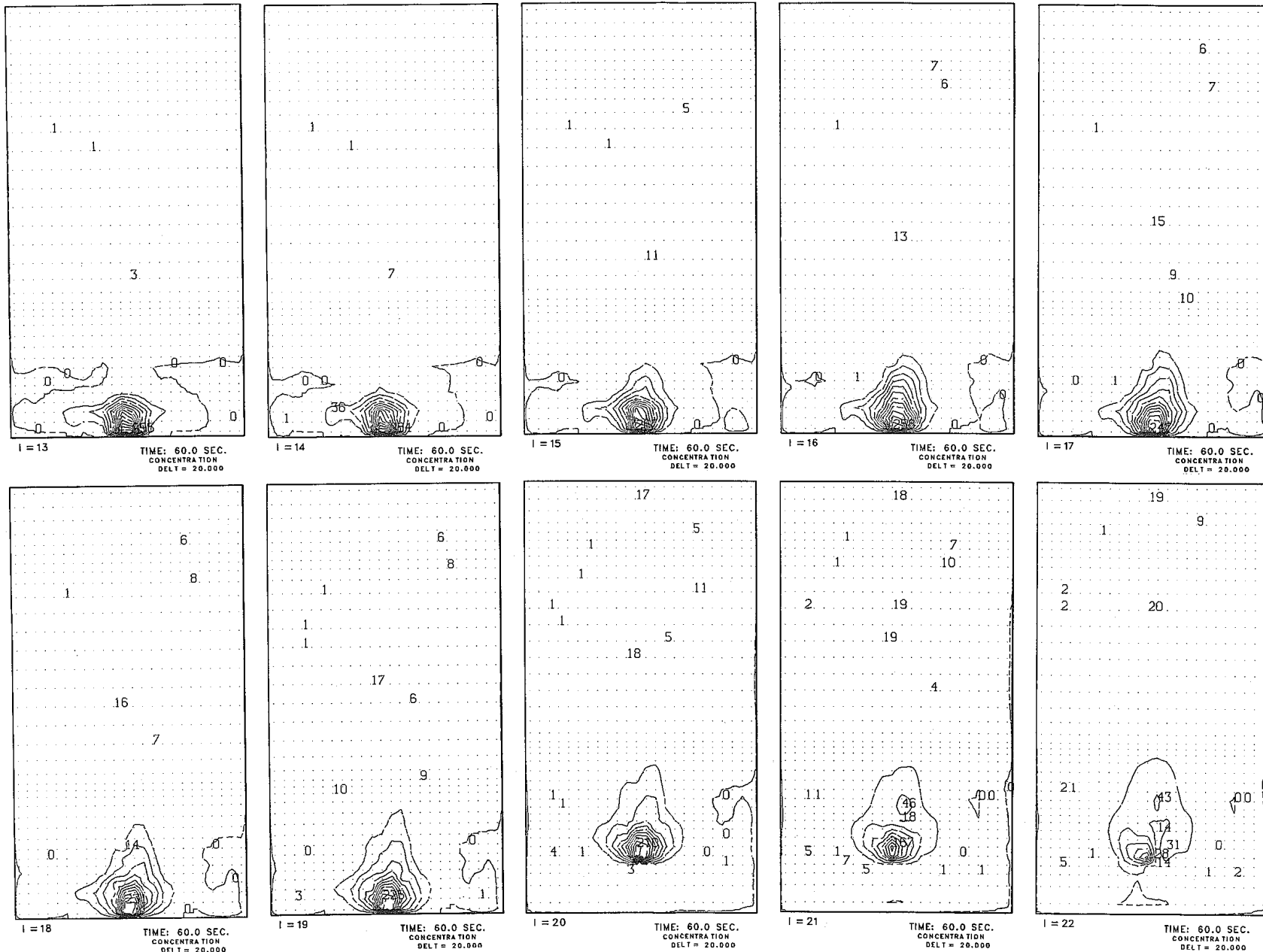


Fig. I. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta$ -z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition





付録J DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性  
(ケース 4)

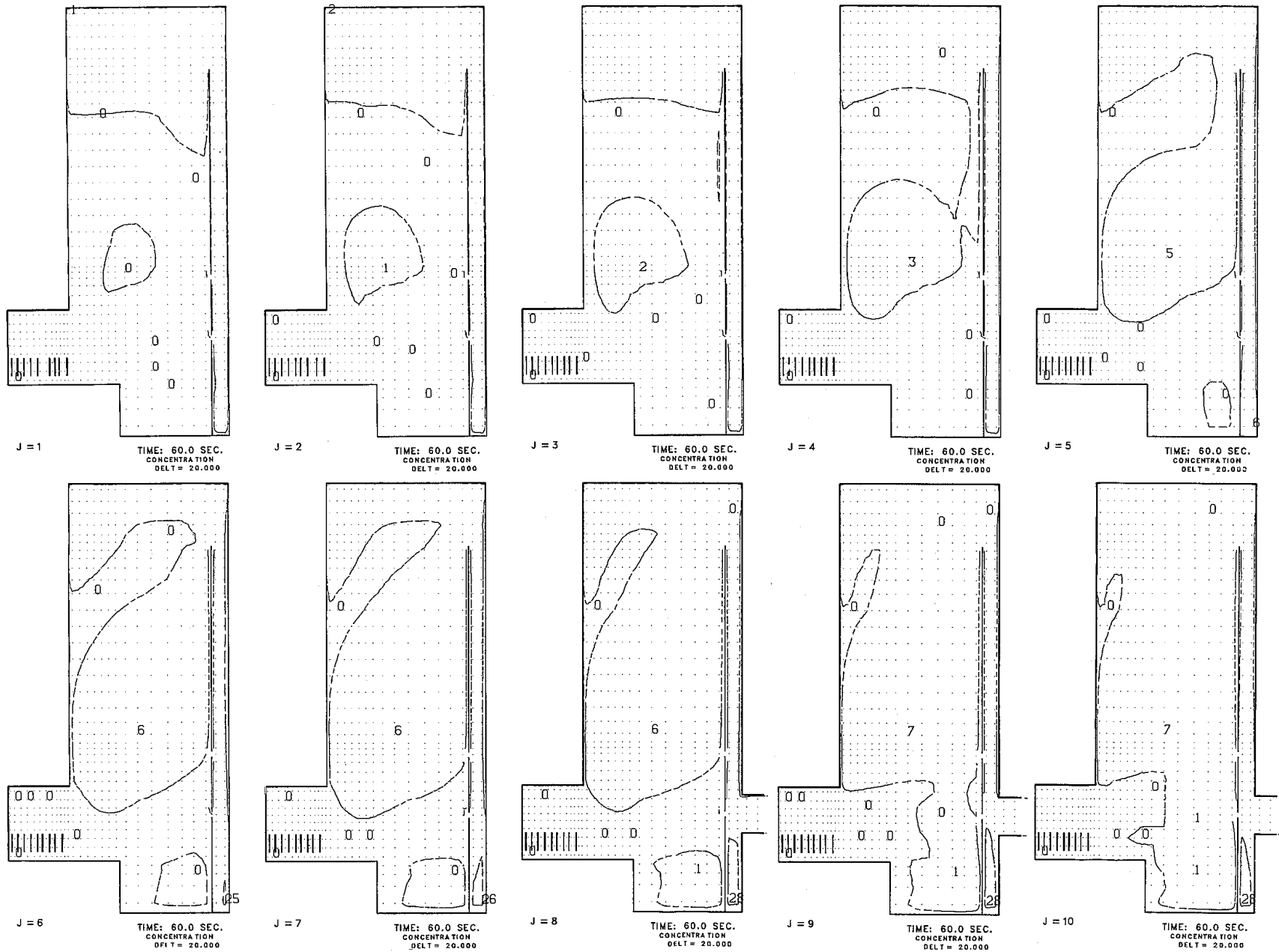
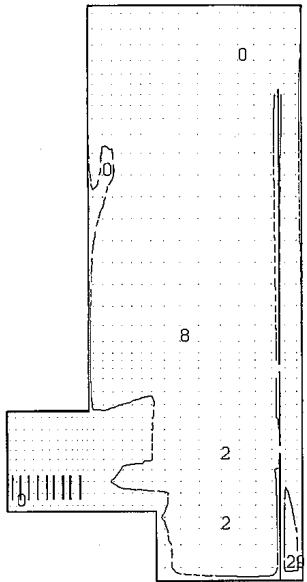
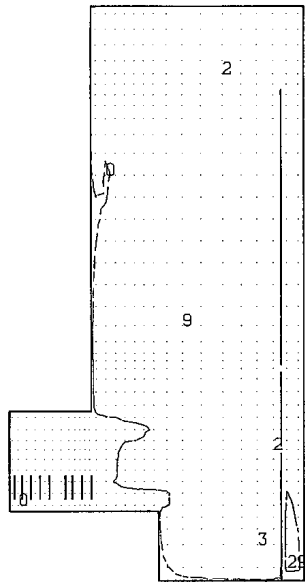


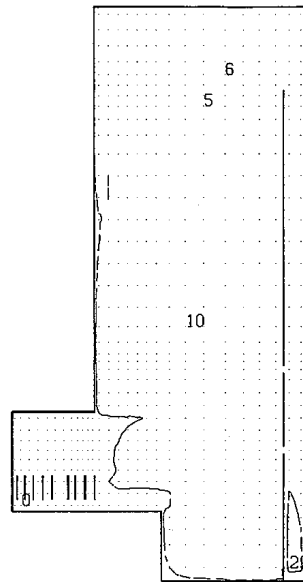
Fig. J. 1 DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition



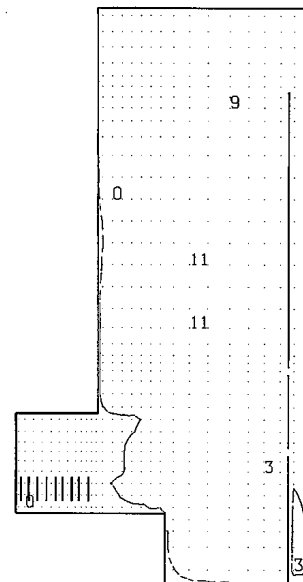
J = 11  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



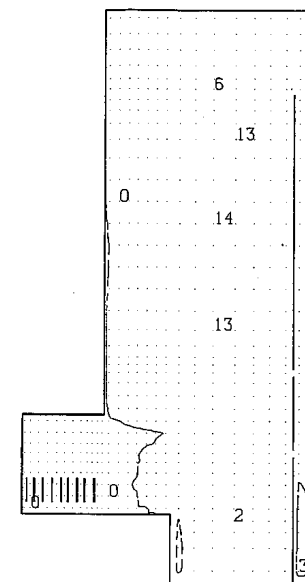
J = 12  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



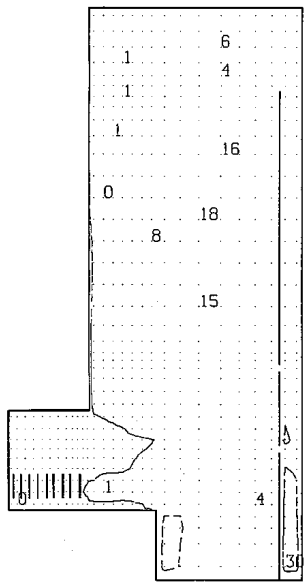
J = 13  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



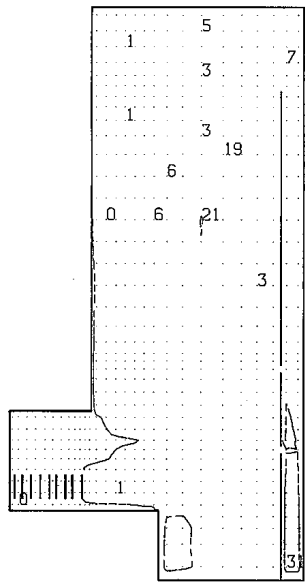
J = 14  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



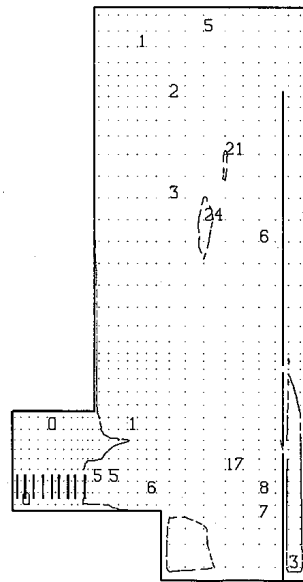
J = 15  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



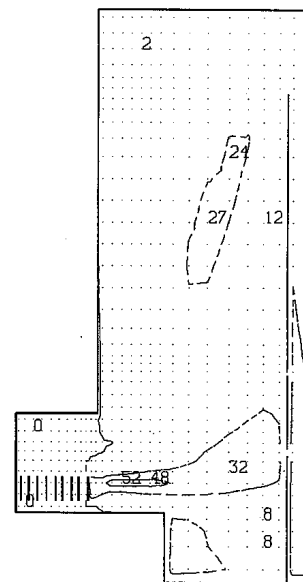
J = 16  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



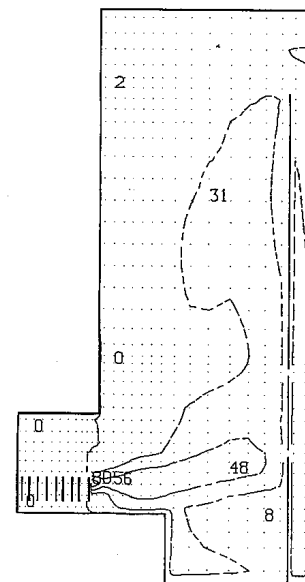
J = 17  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



J = 18  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

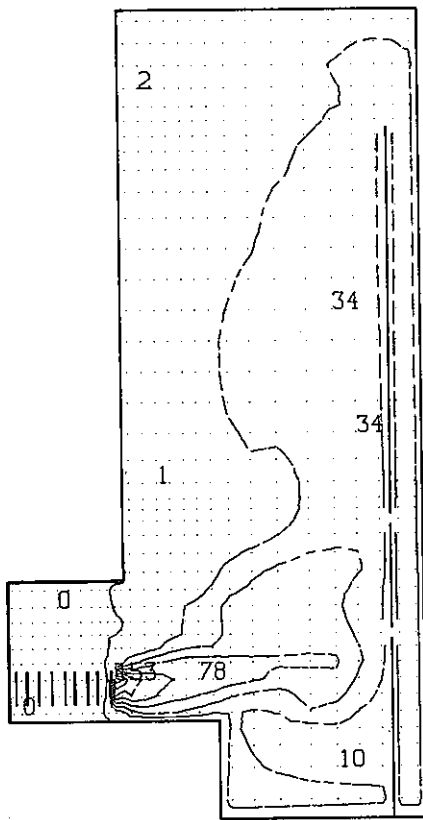


J = 19  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



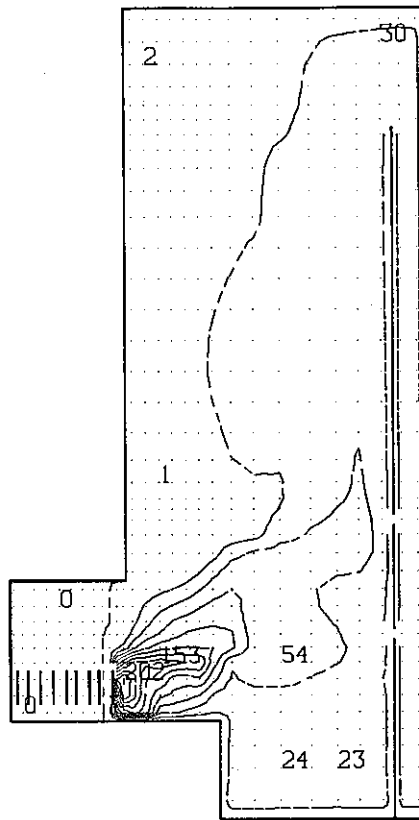
J = 20  
TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. J. 1 (Continued)



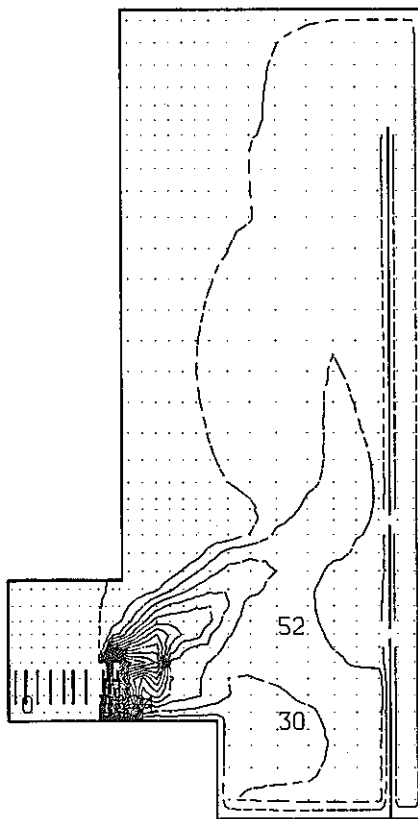
J = 21

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



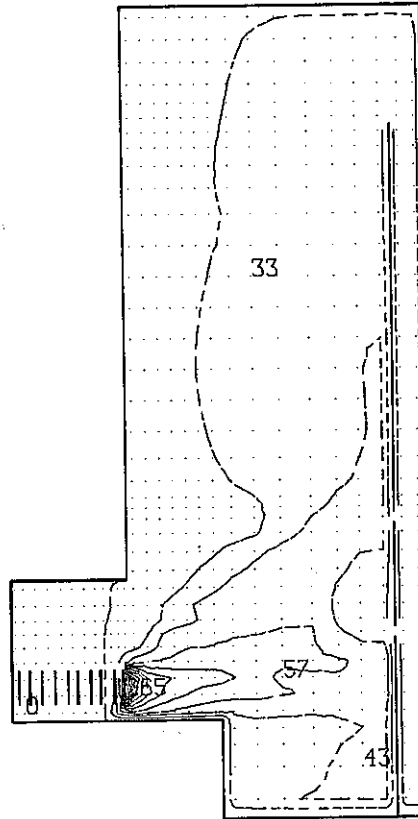
J = 22

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



J = 23

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000



J = 24

TIME: 60.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 20.000

Fig. J. 1 (Continued)

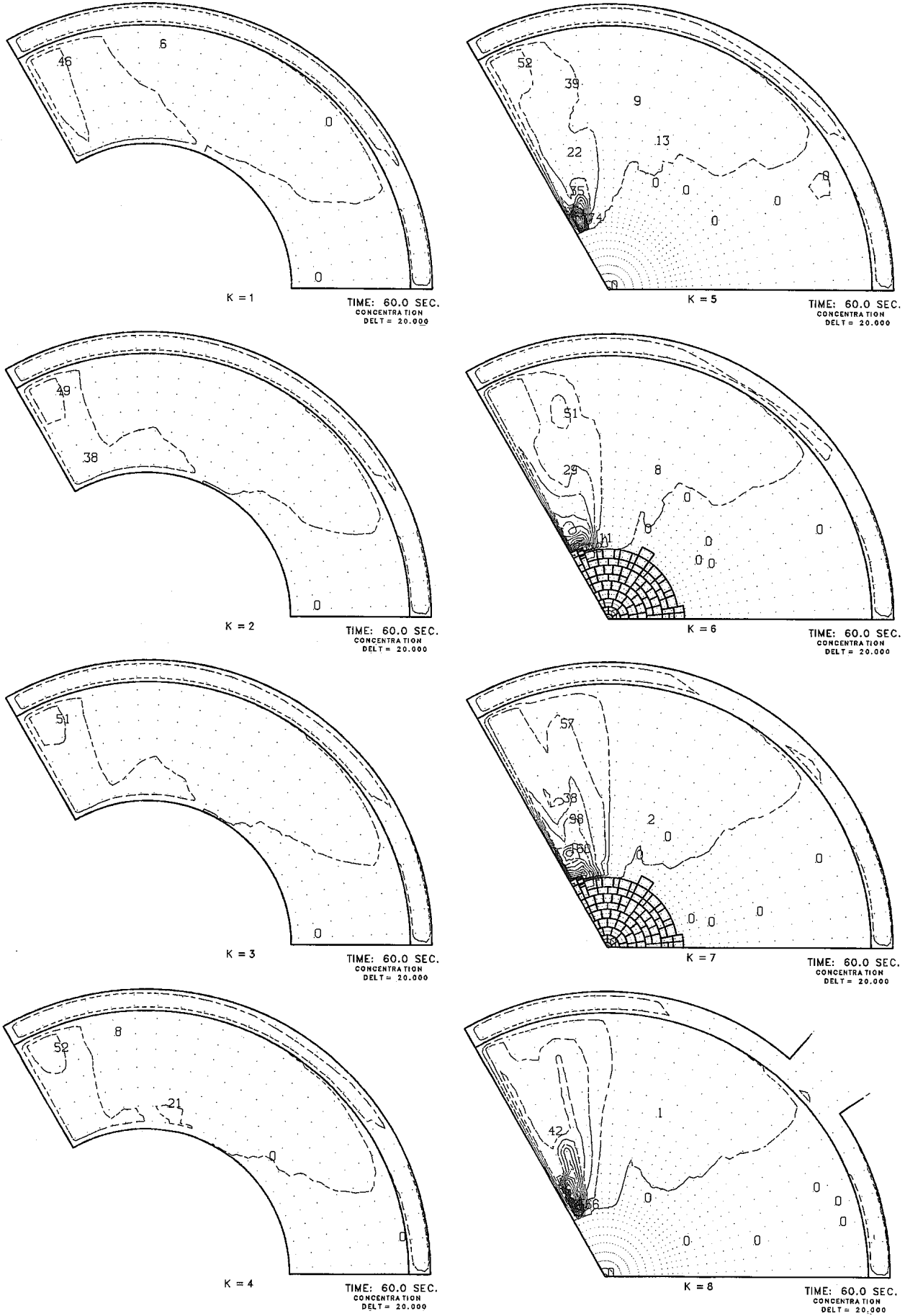


Fig. J. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition

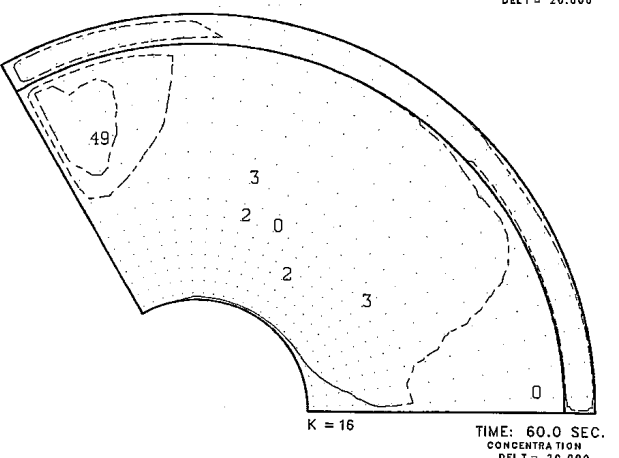
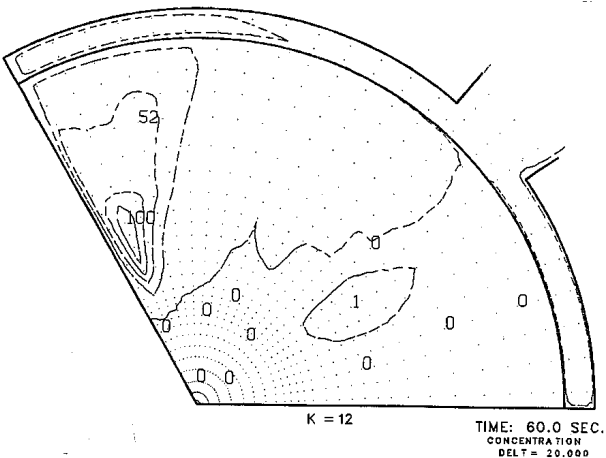
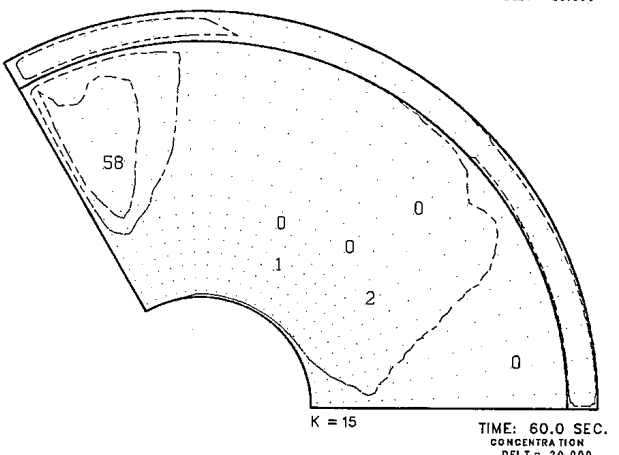
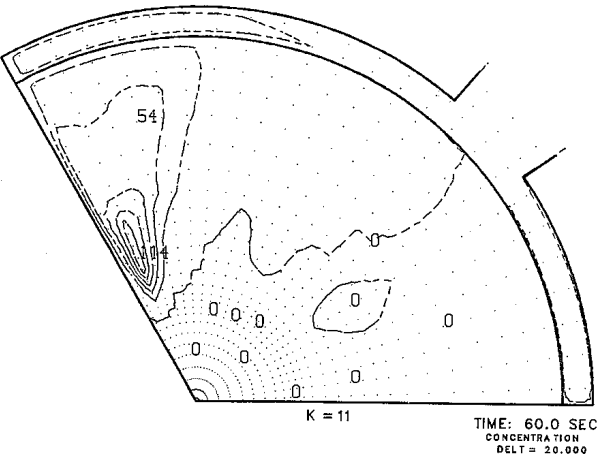
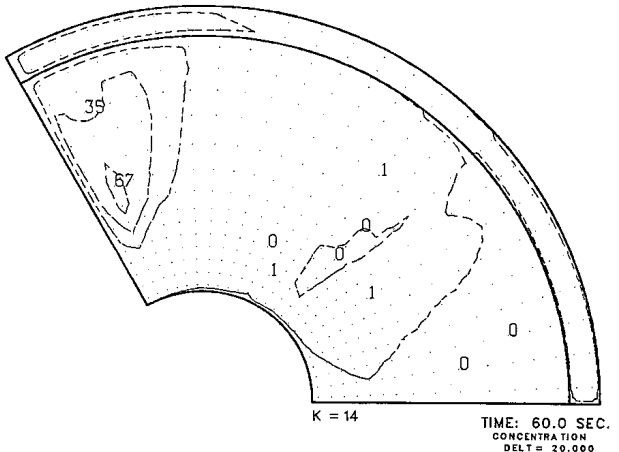
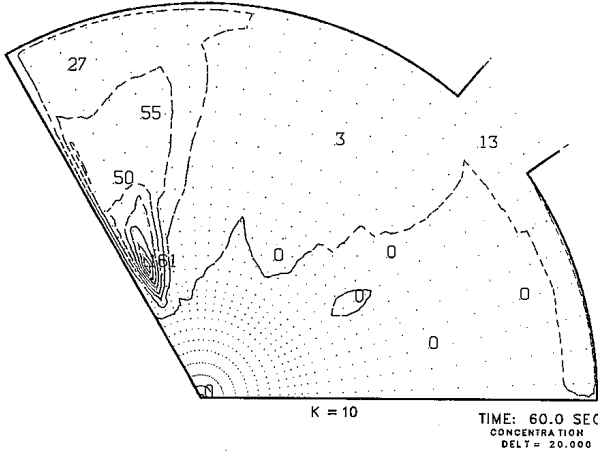
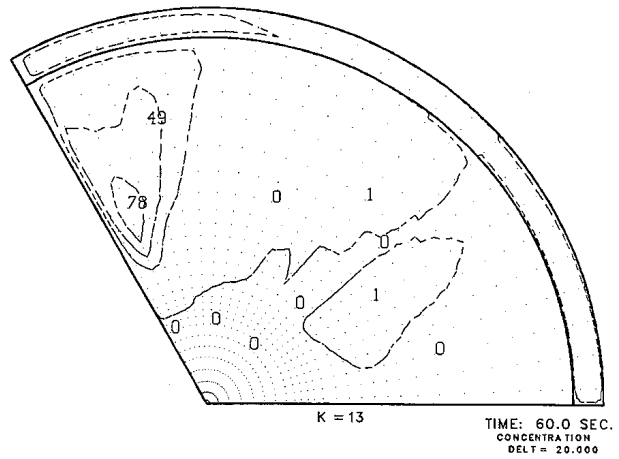
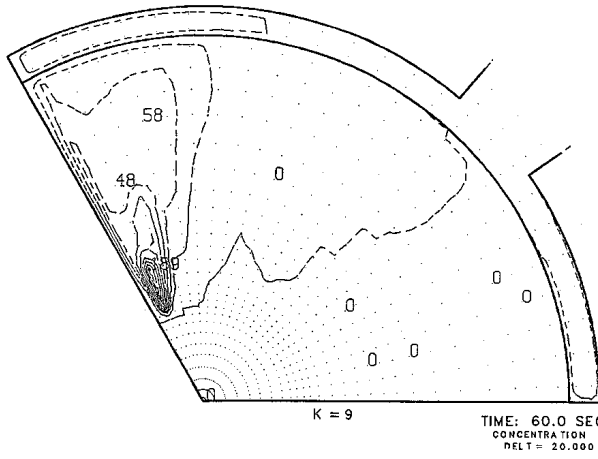


Fig. J. 2 (Continued)

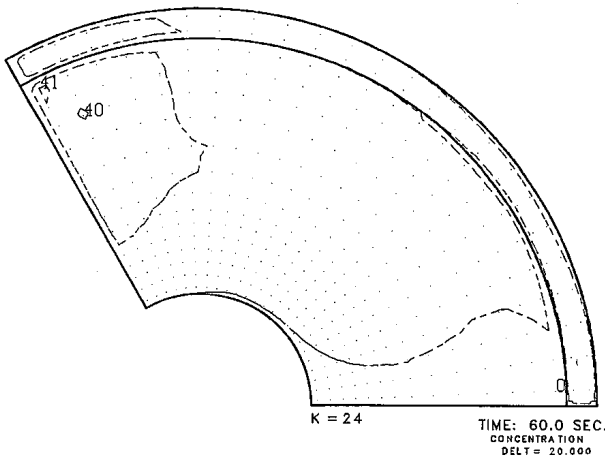
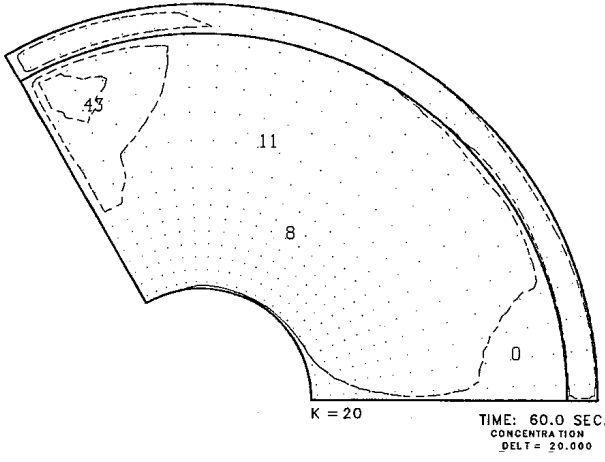
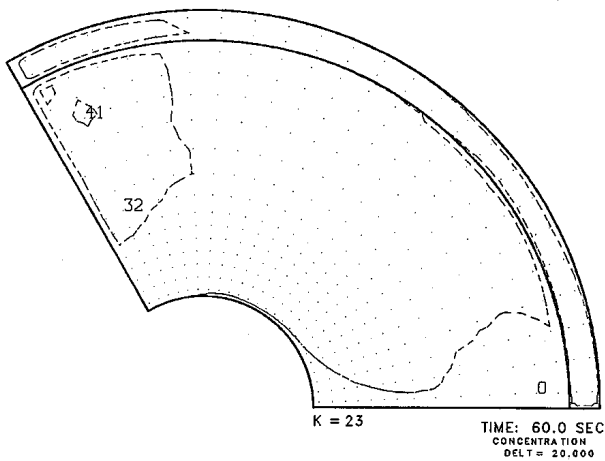
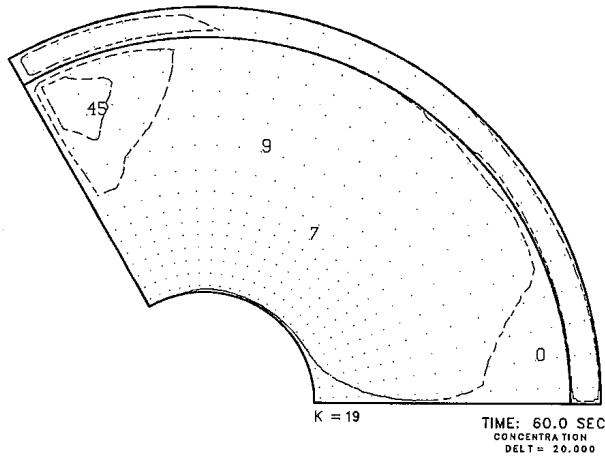
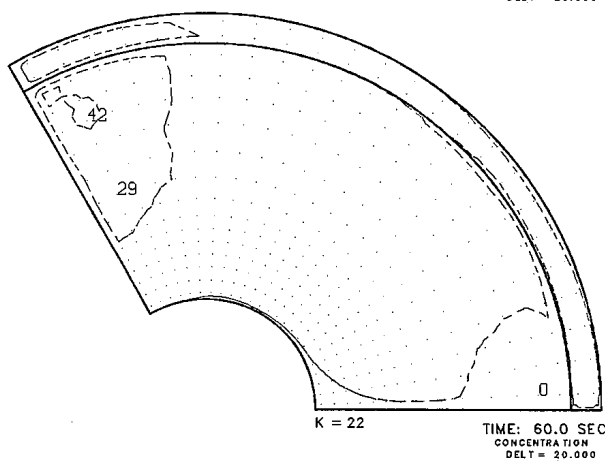
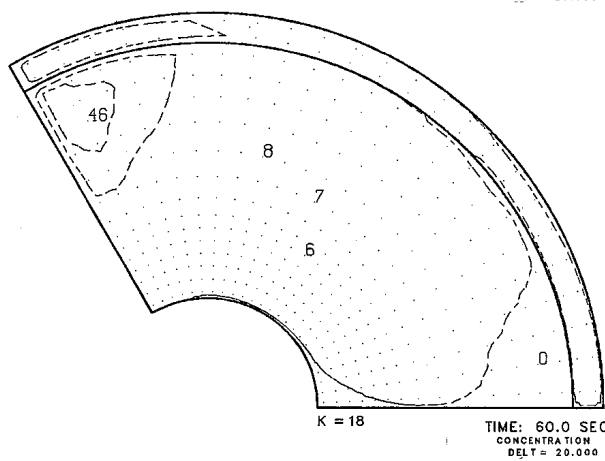
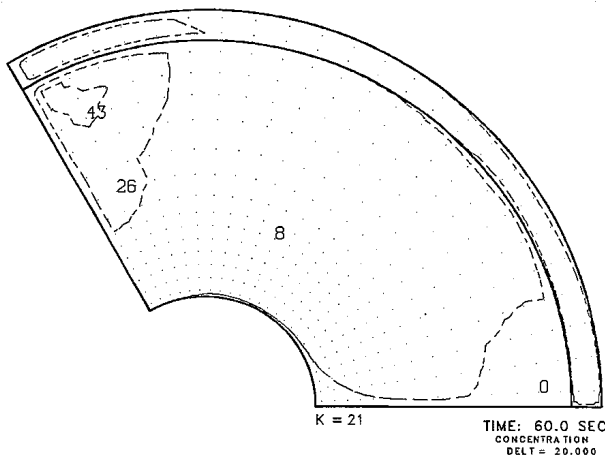
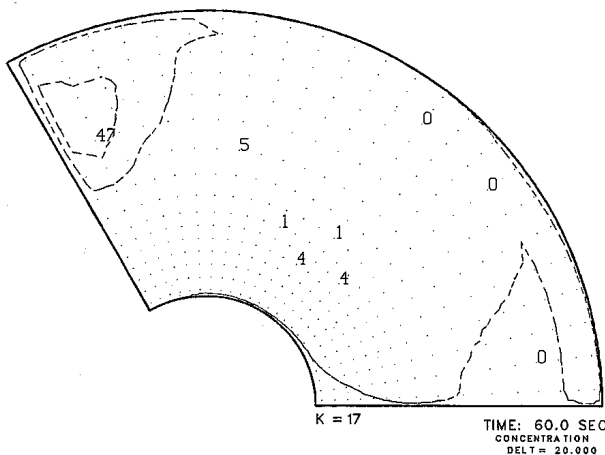


Fig. J. 2 (Continued)

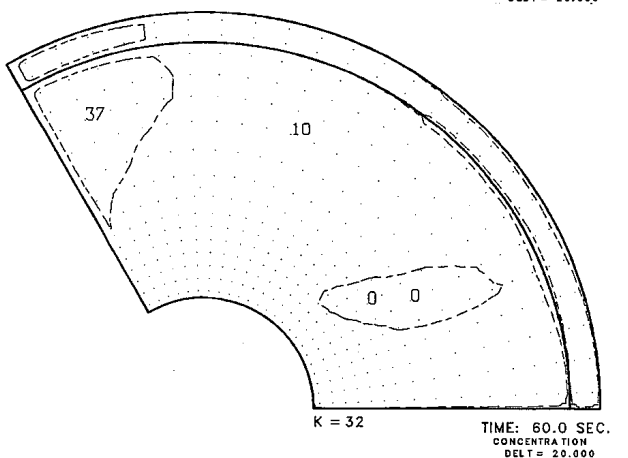
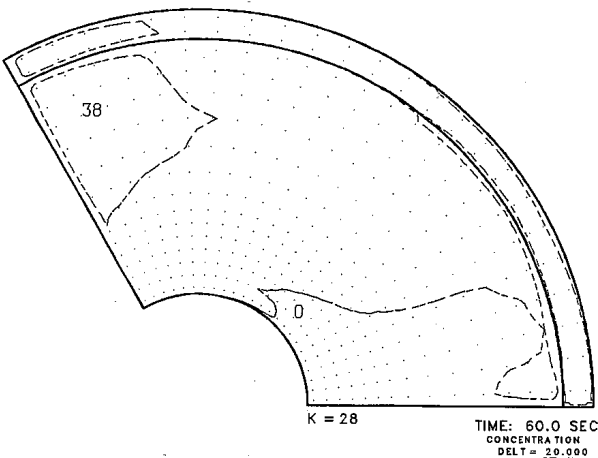
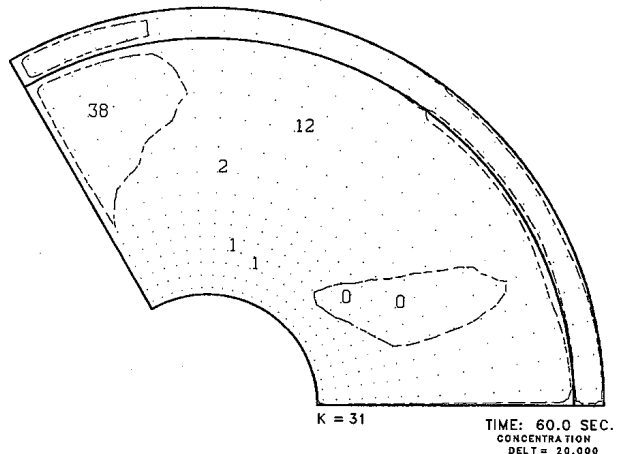
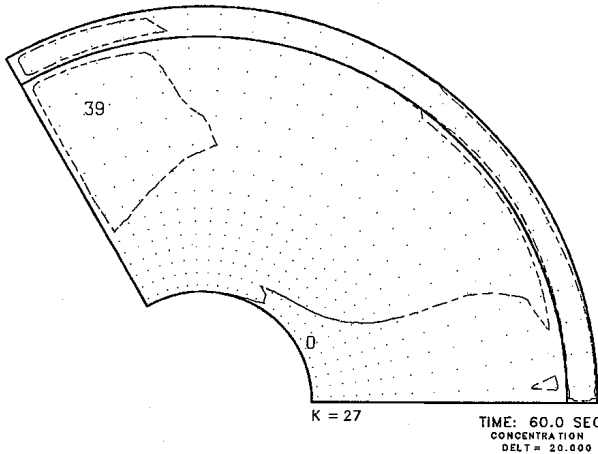
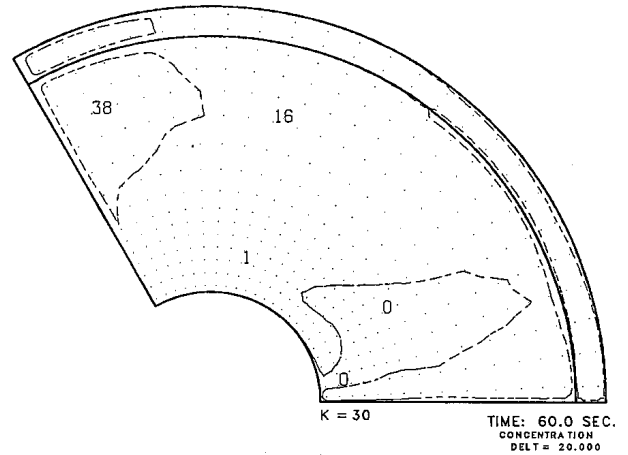
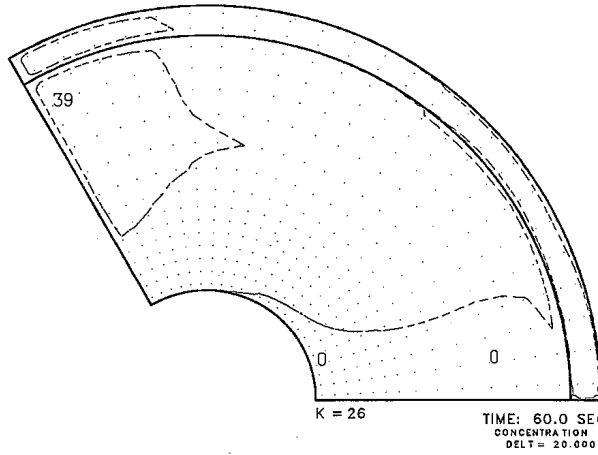
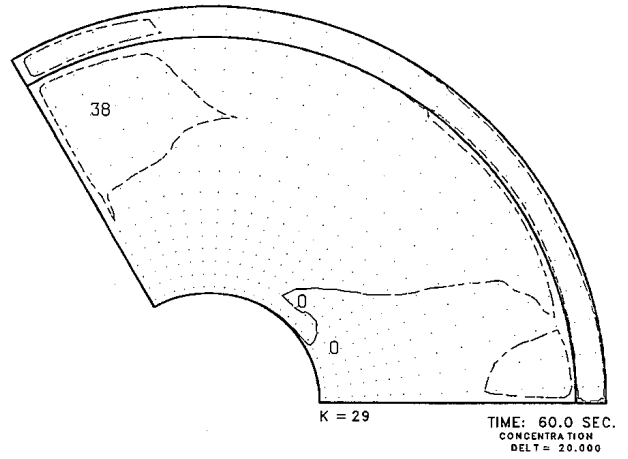
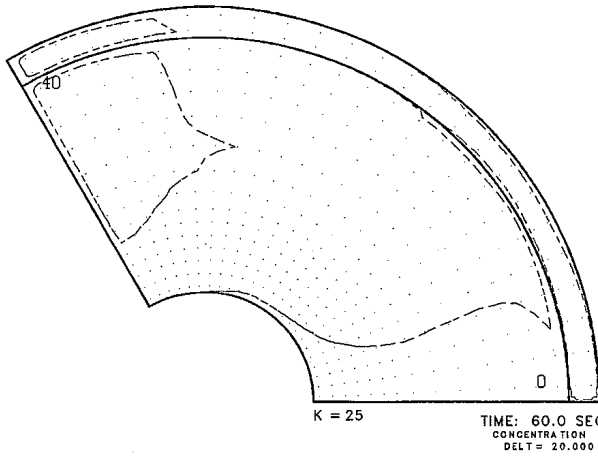


Fig. J. 2 (Continued)



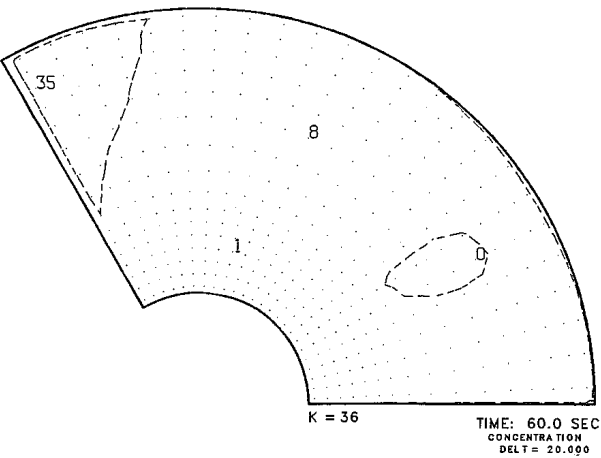
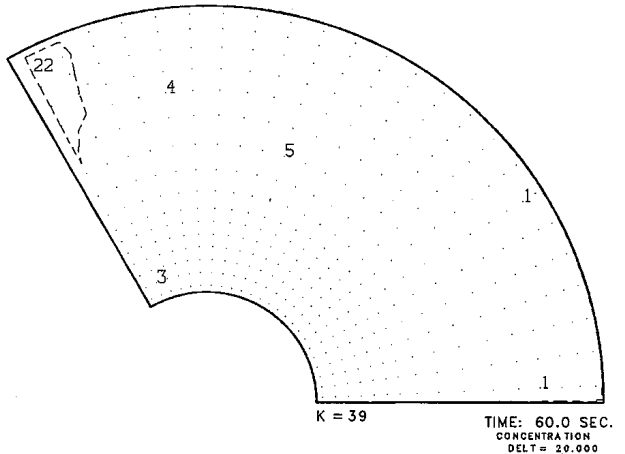
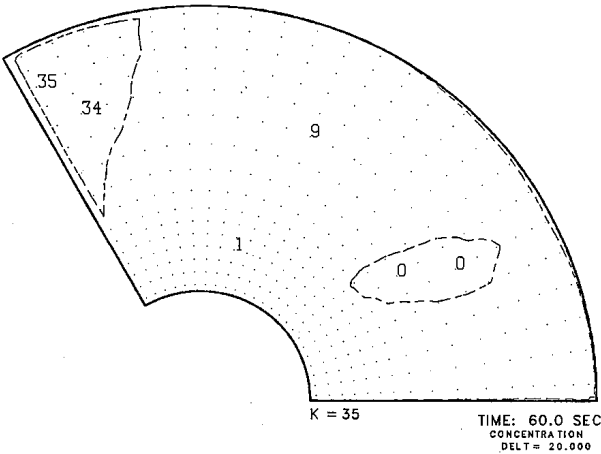
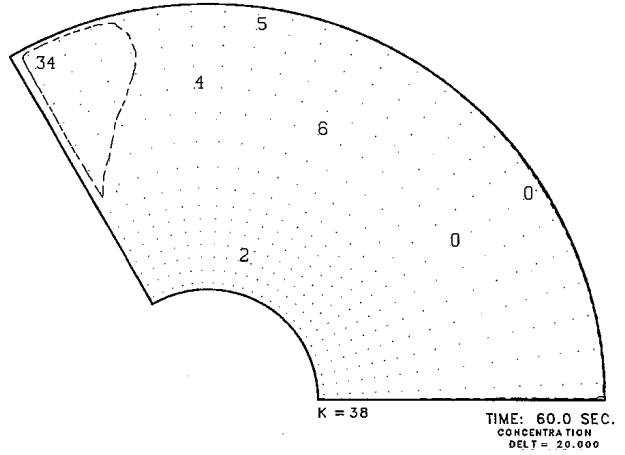
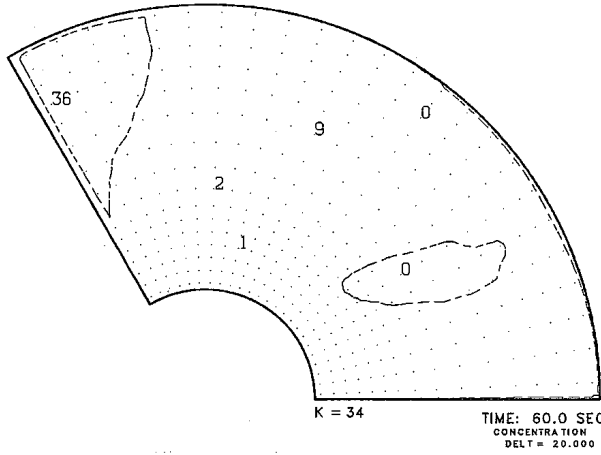
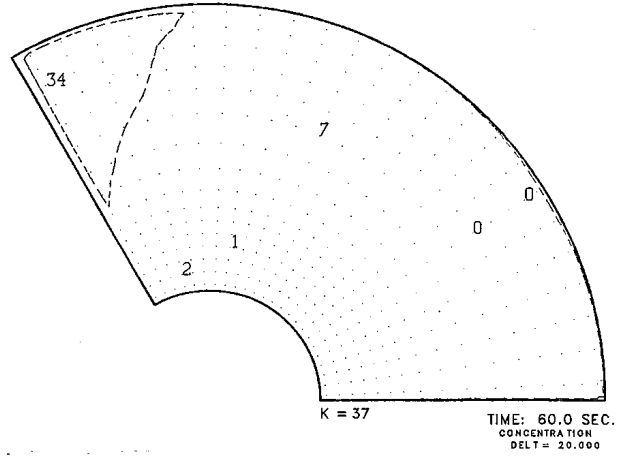
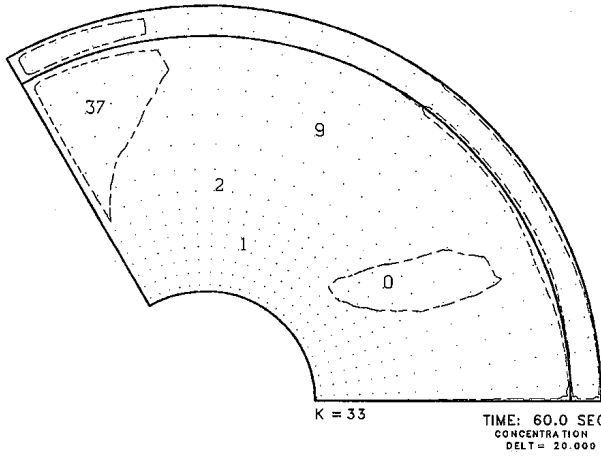


Fig. J. 2 (Continued)

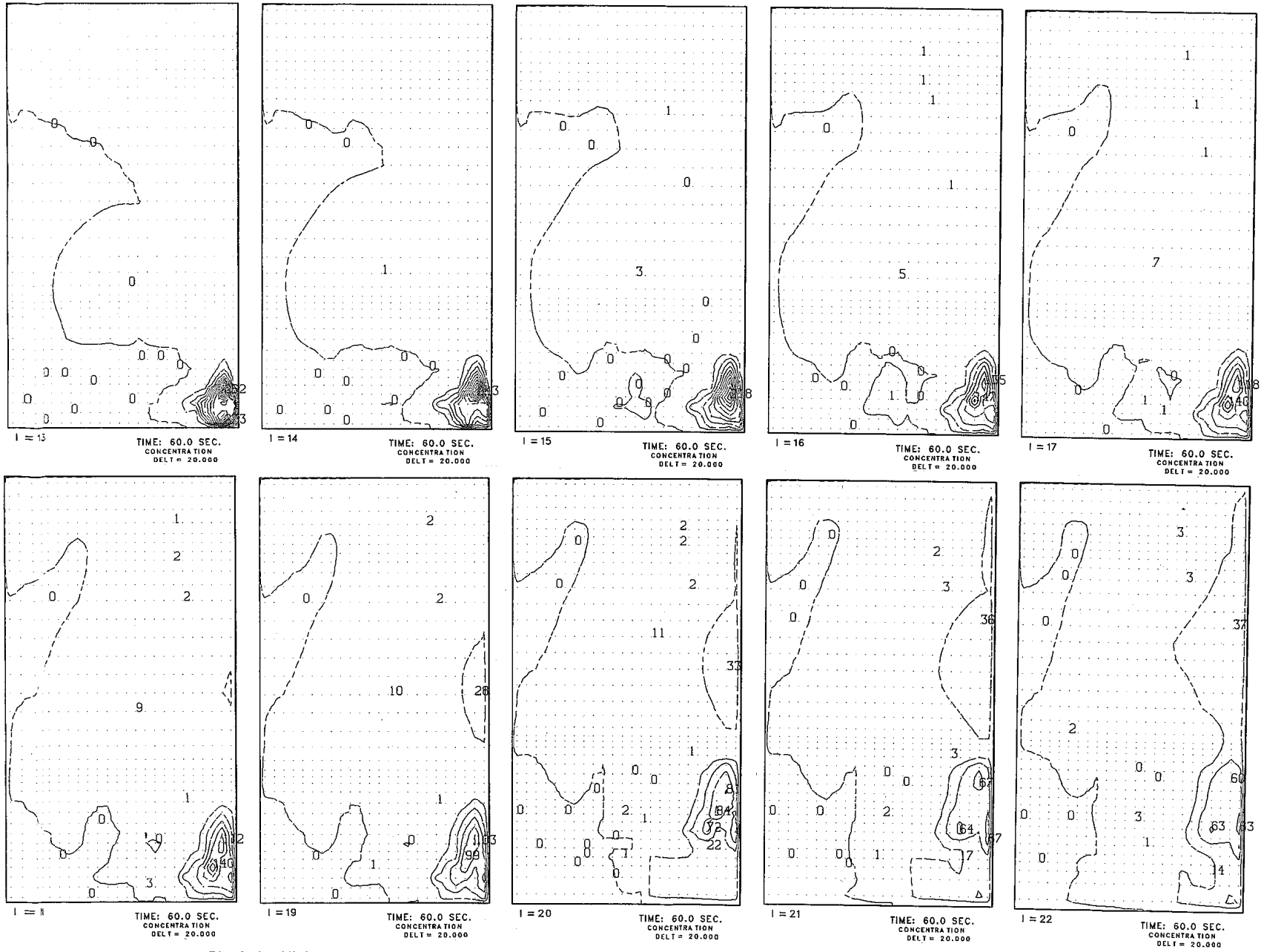


Fig. J. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta$ -z Planes in 60 seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition



付録K DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性  
(ケース 1)

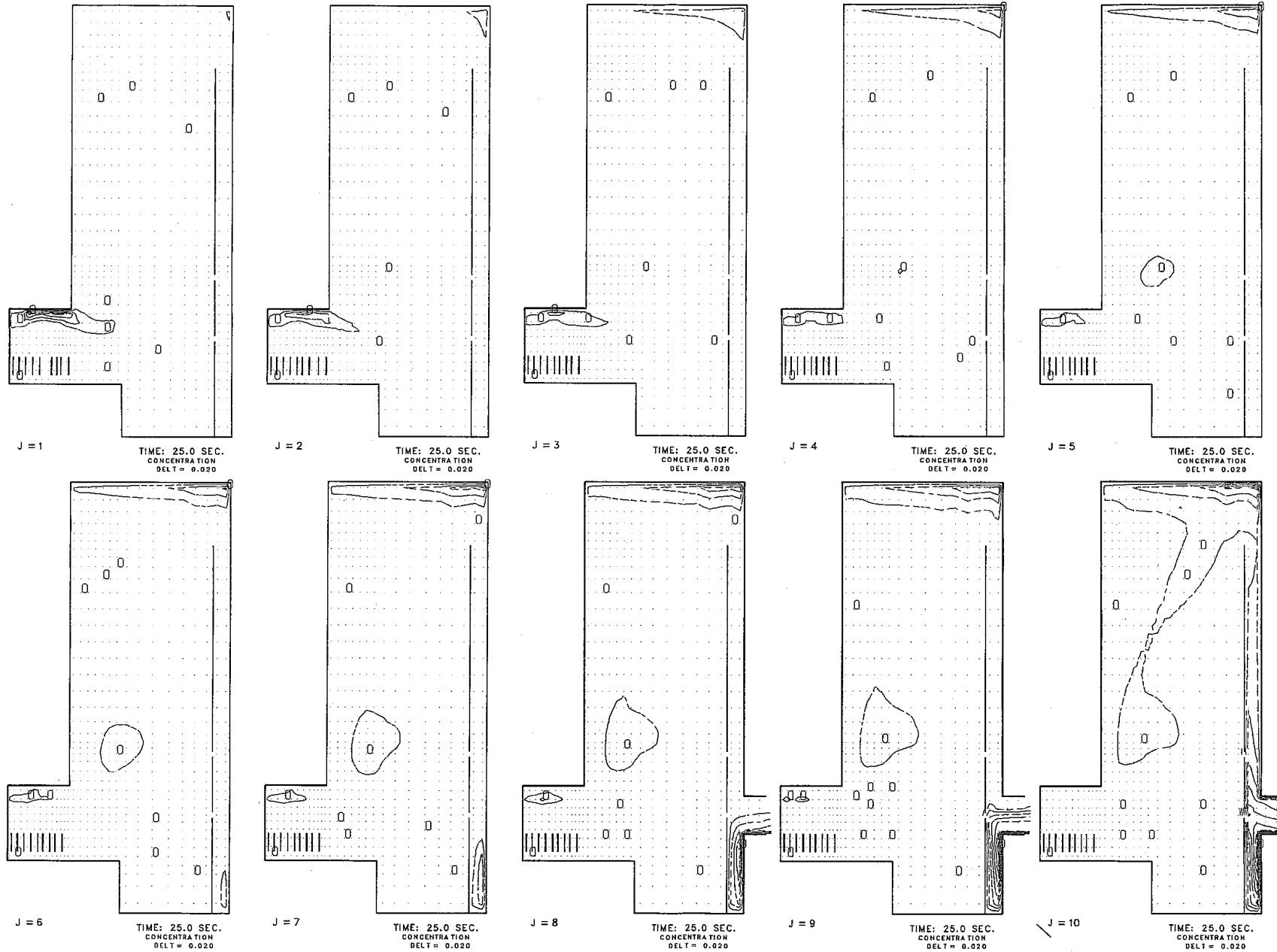


Fig. K. 1 DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition (Release Mode : Step Profile)

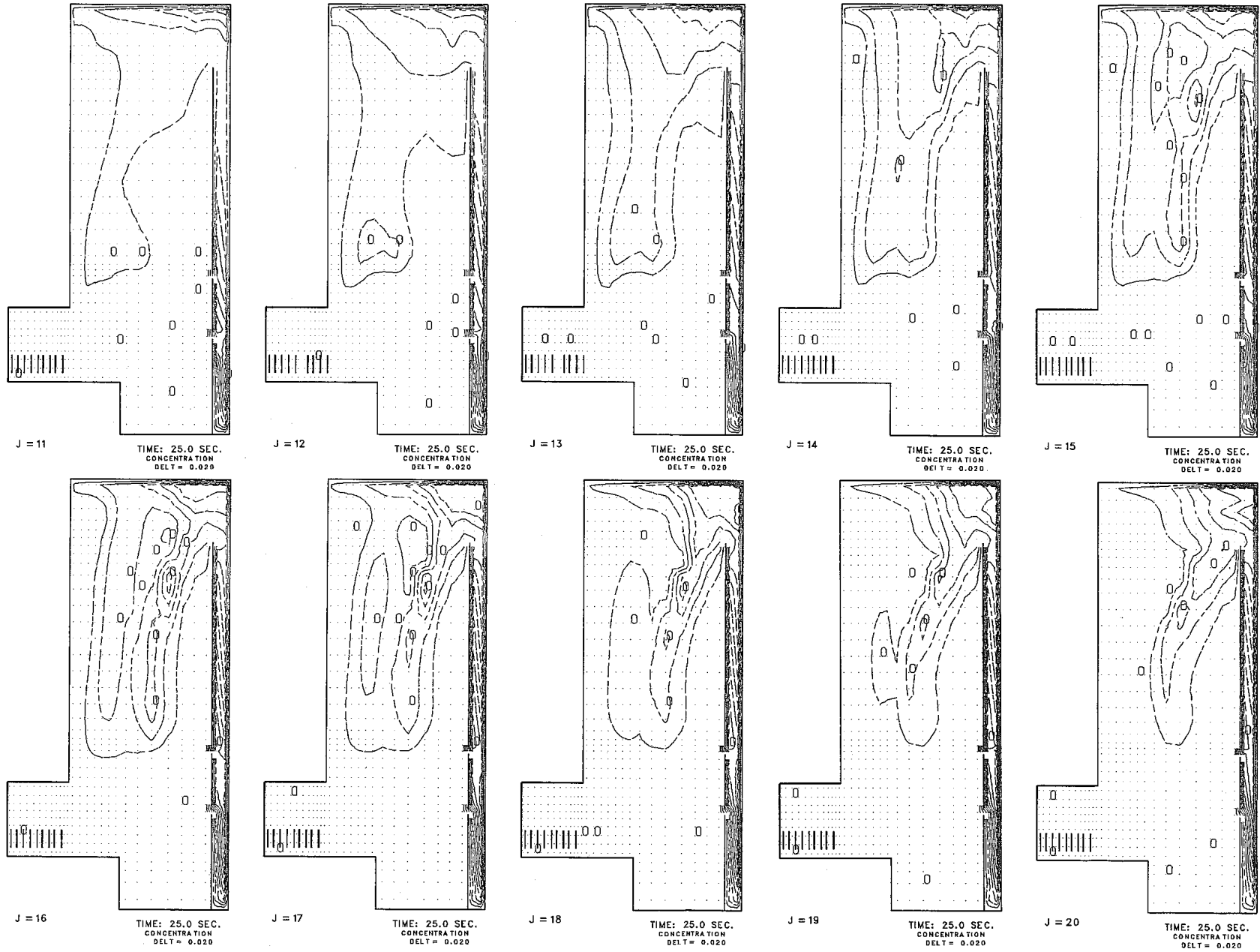
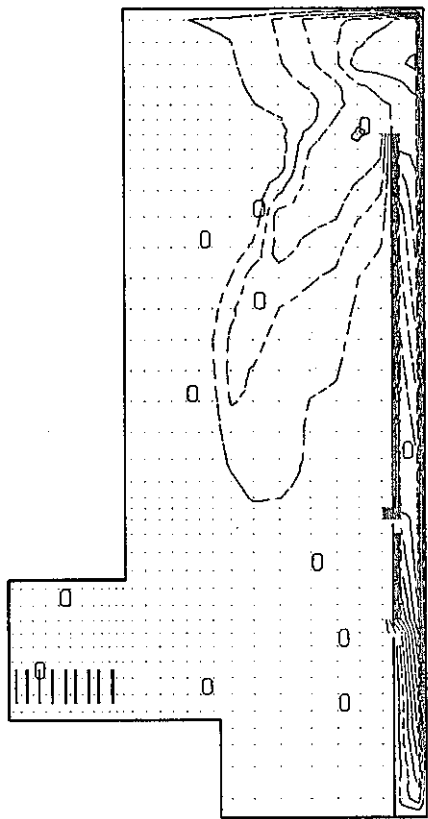
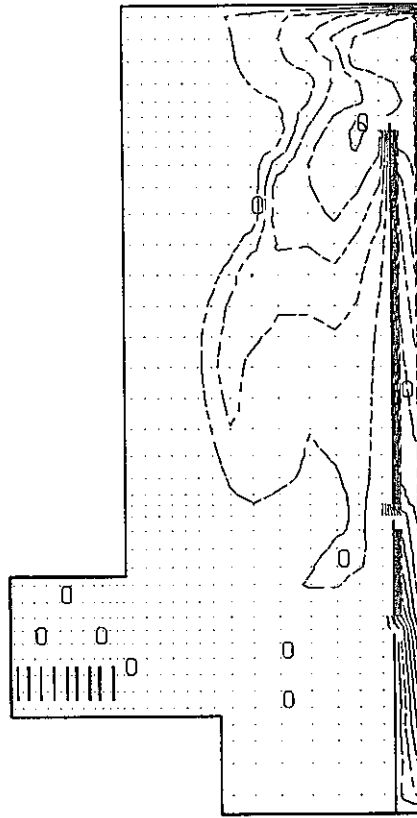


Fig. K. 1 (Continued)



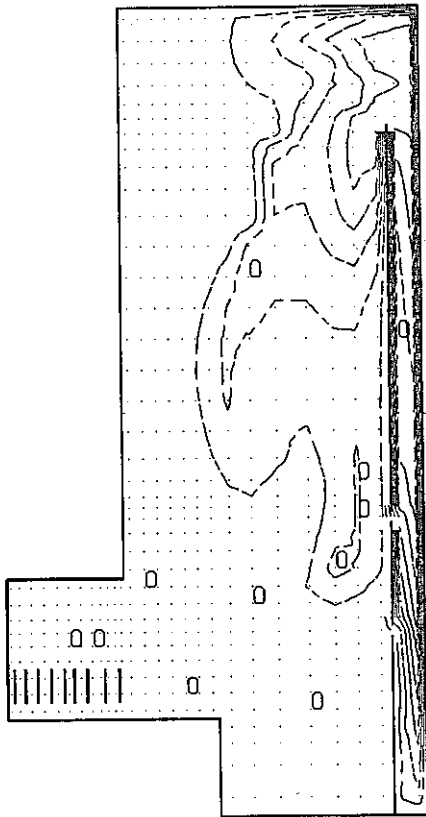
J = 21

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



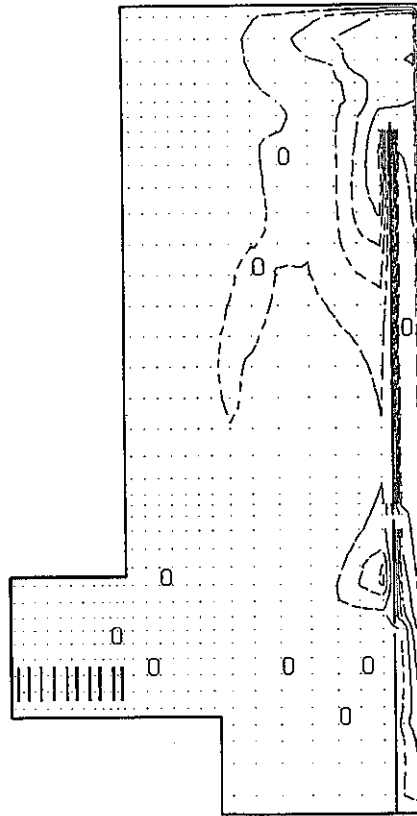
J = 22

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 23

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 24

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. K. 1 (Continued)

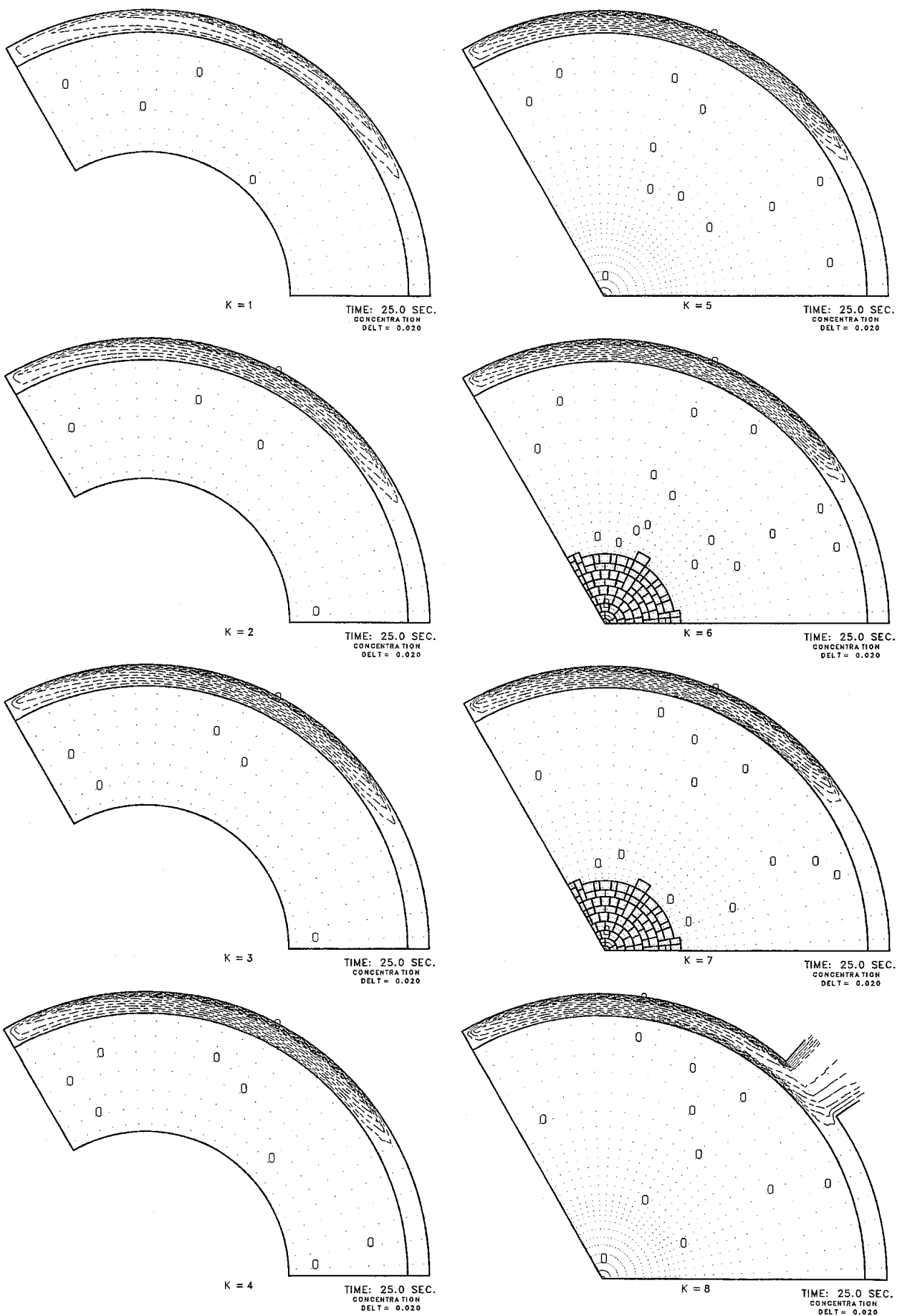


Fig.K. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition (Release Mode : Step Profile)



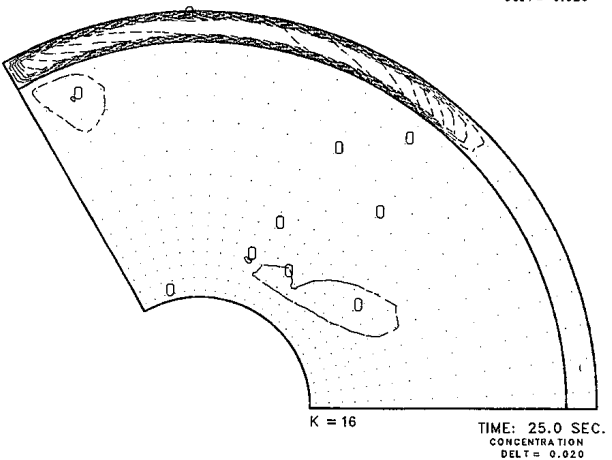
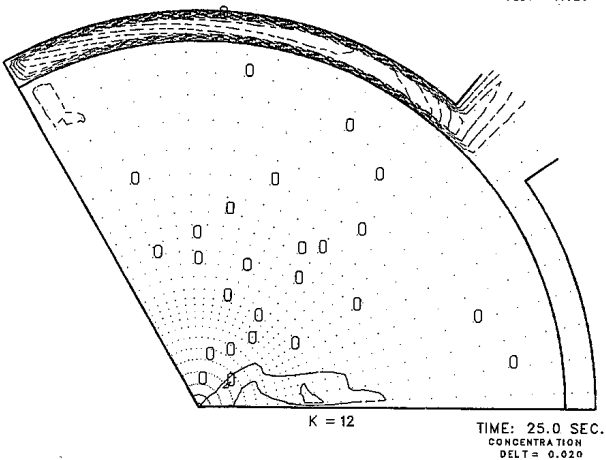
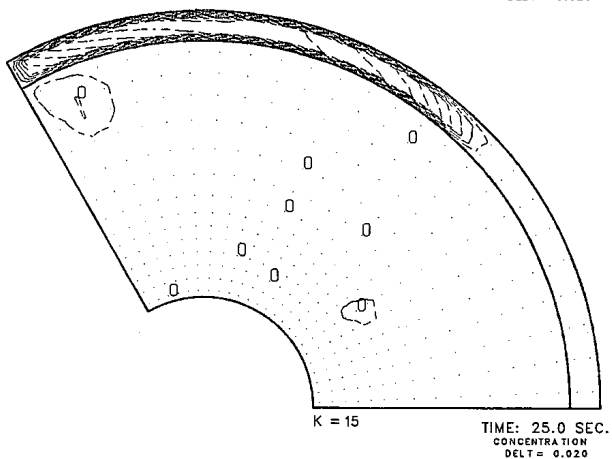
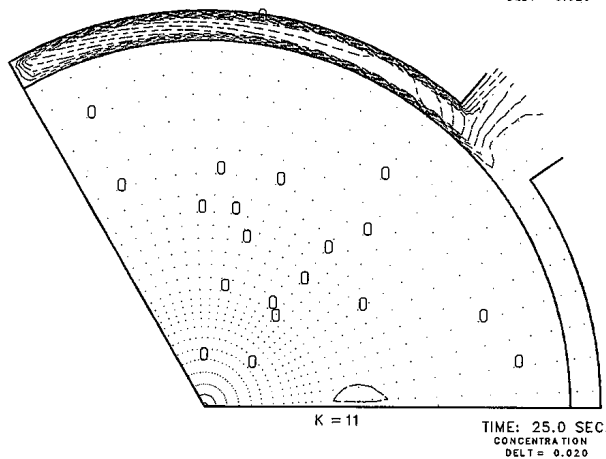
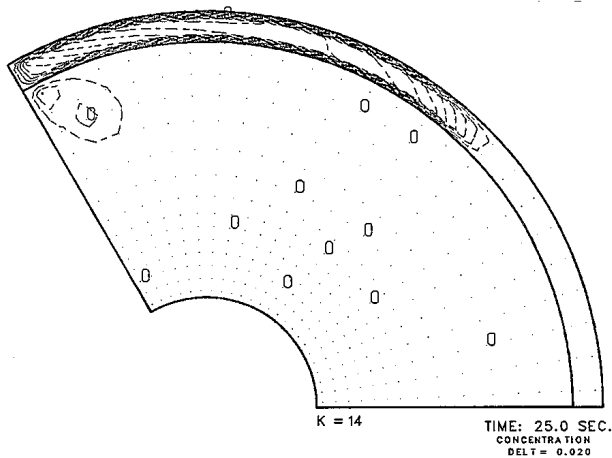
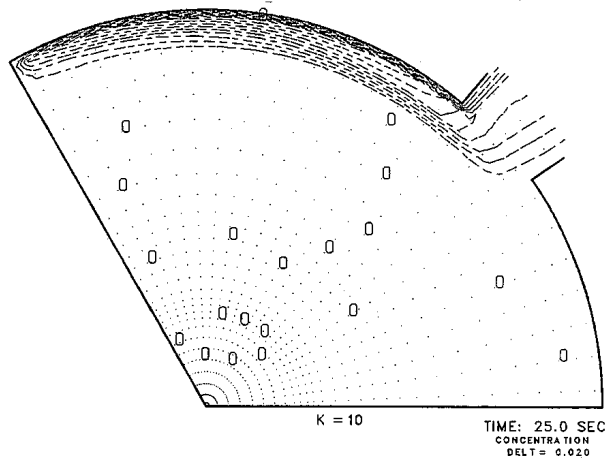
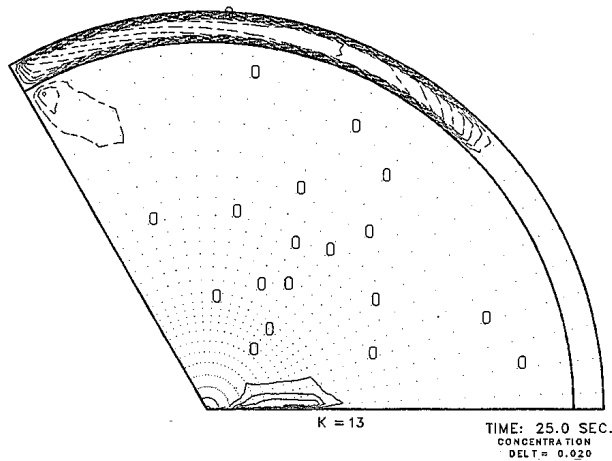
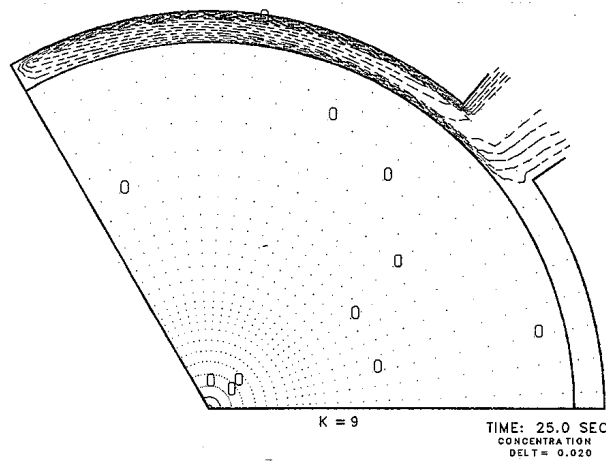


Fig. K. 2 (Continued)

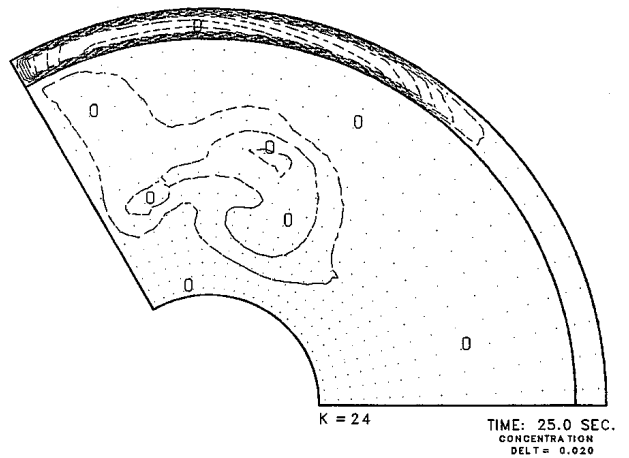
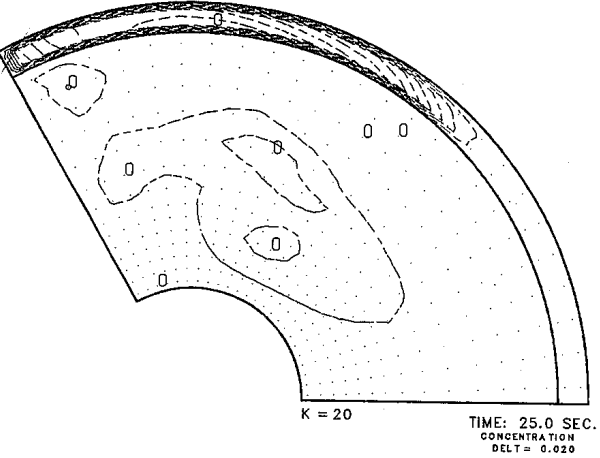
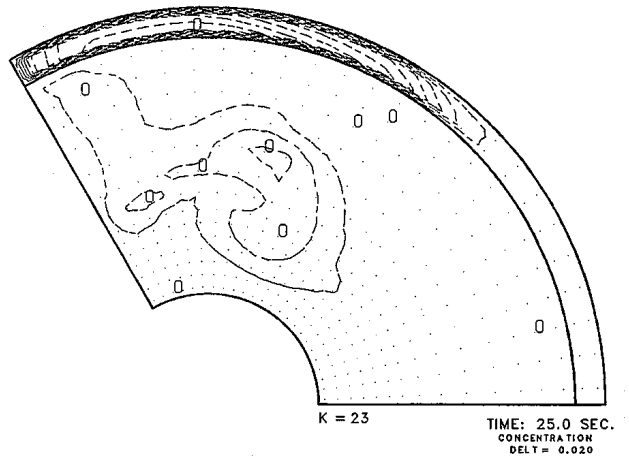
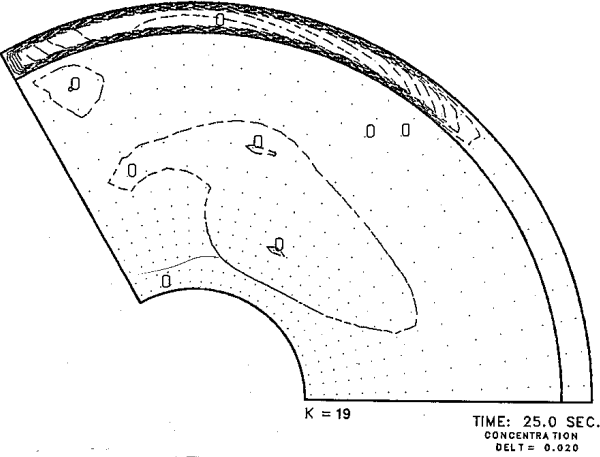
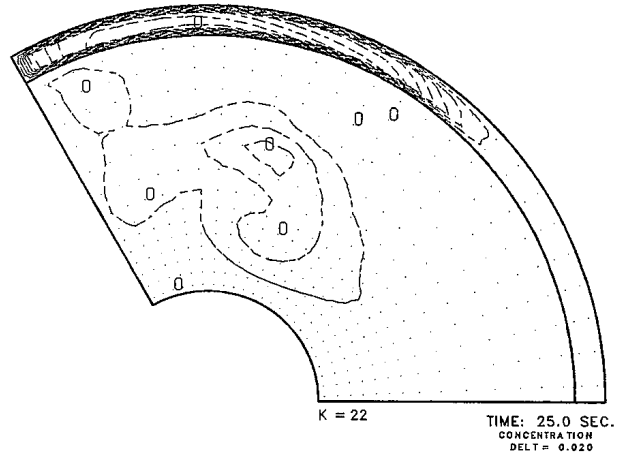
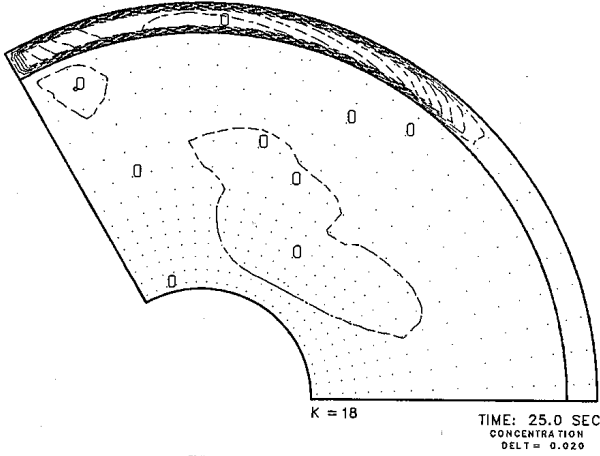
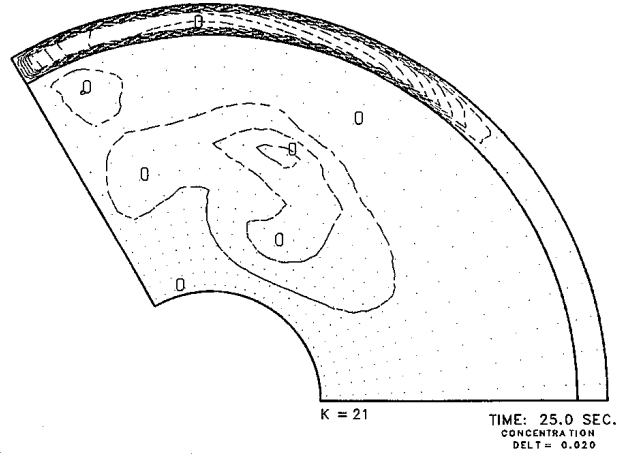
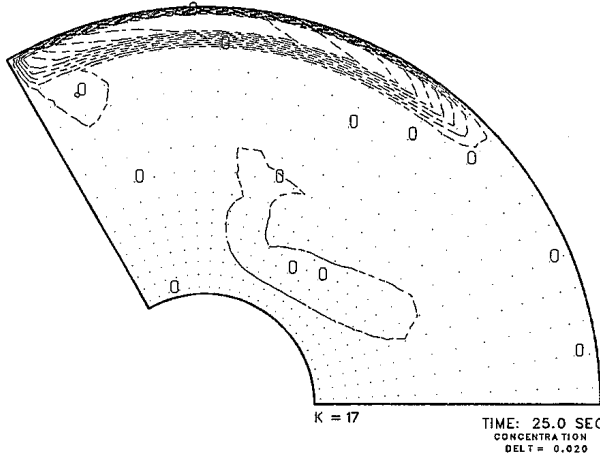
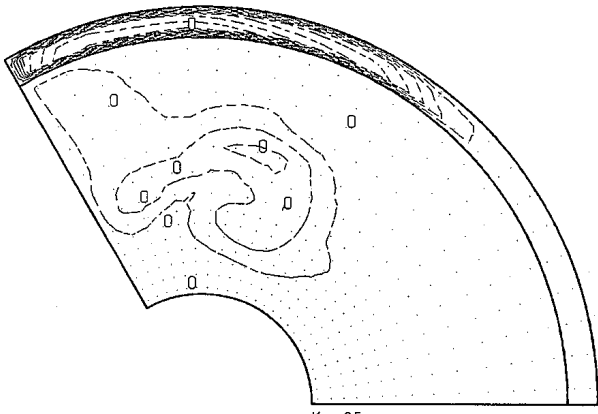
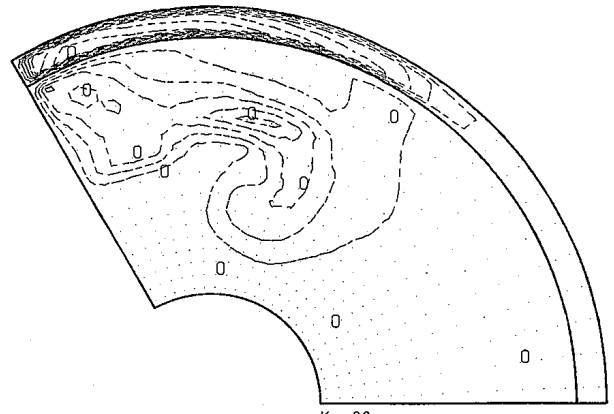


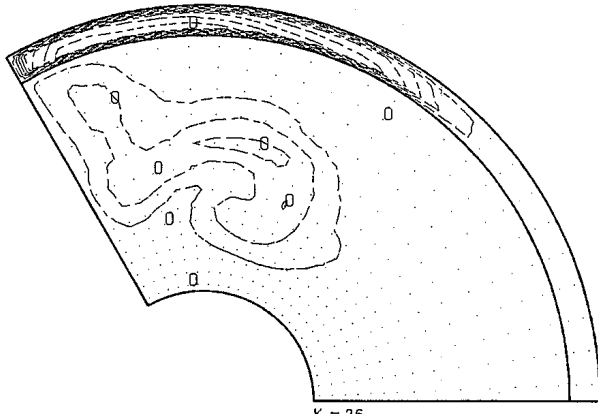
Fig. K. 2 (Continued)



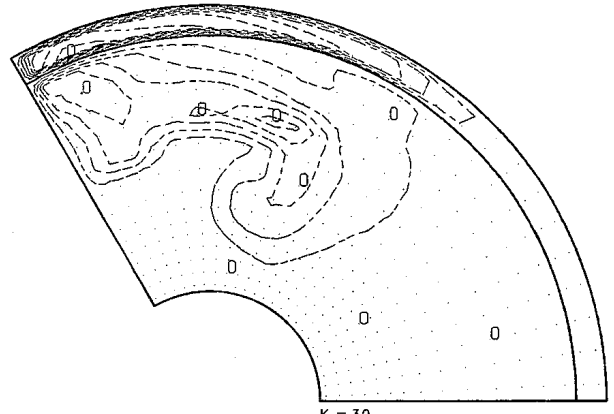
K = 25  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



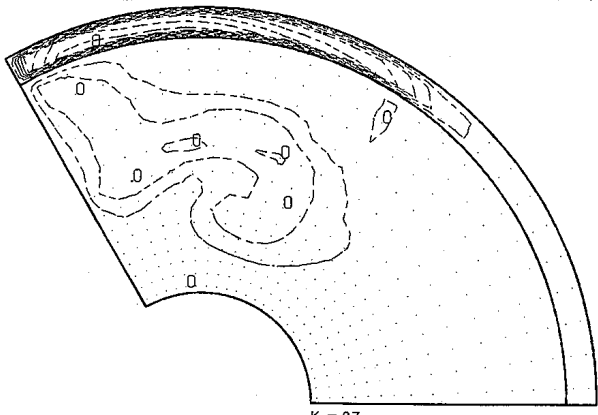
K = 29  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



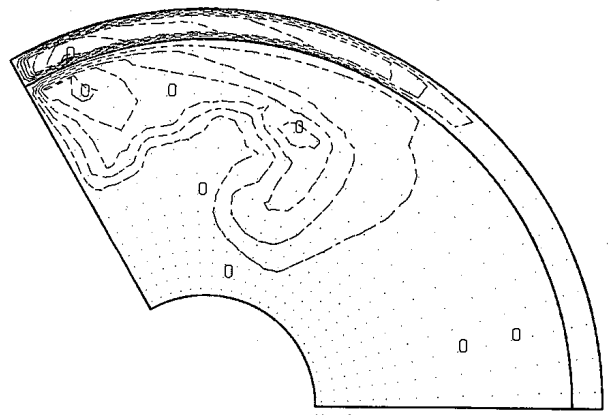
K = 26  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



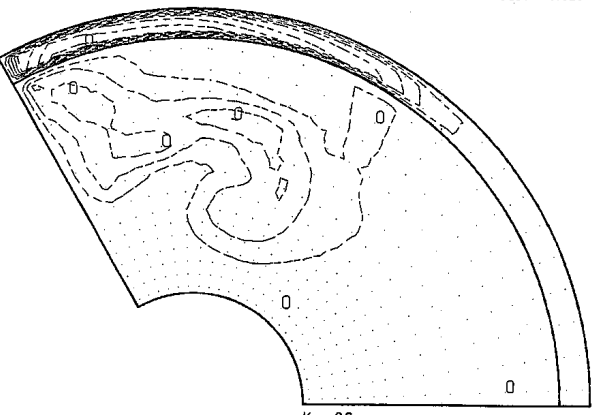
K = 30  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



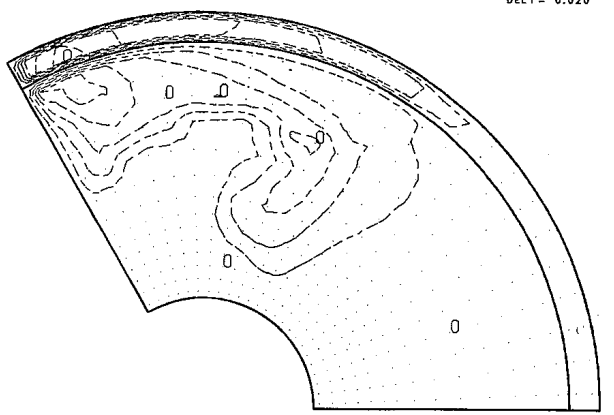
K = 27  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 31  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 28  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 32  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. K. 2 (Continued)

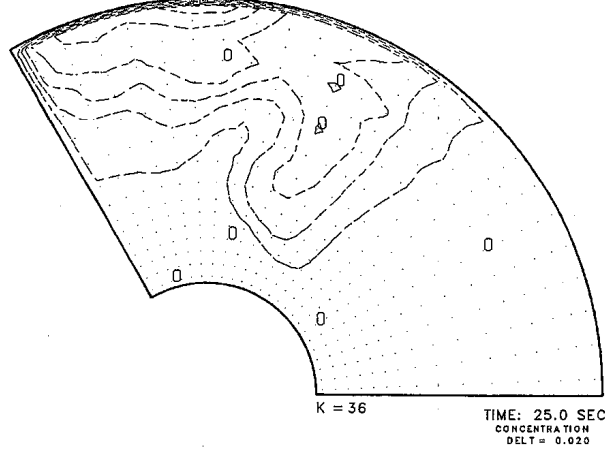
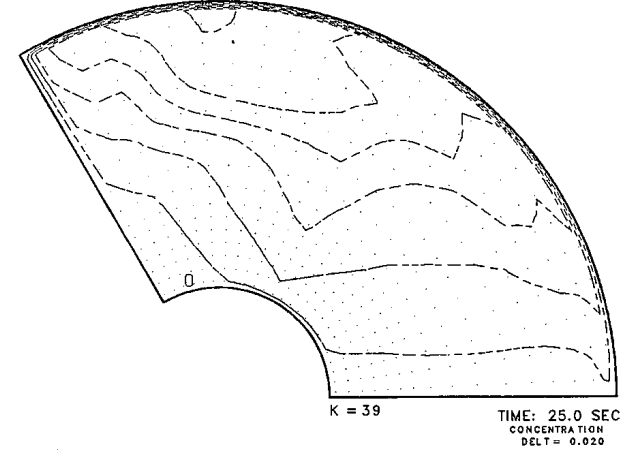
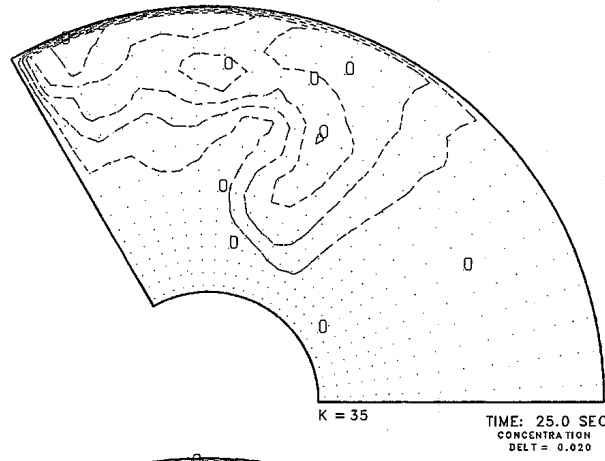
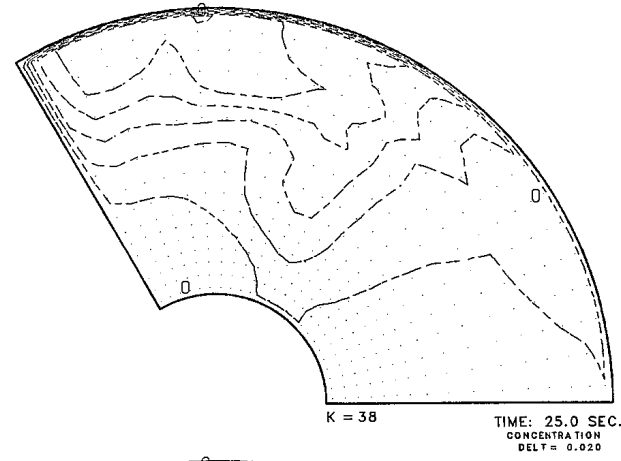
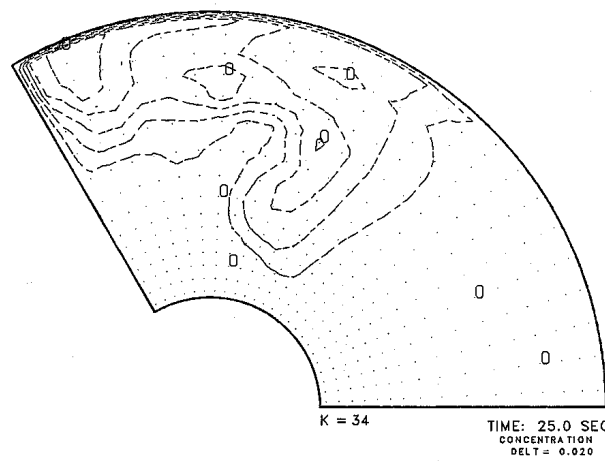
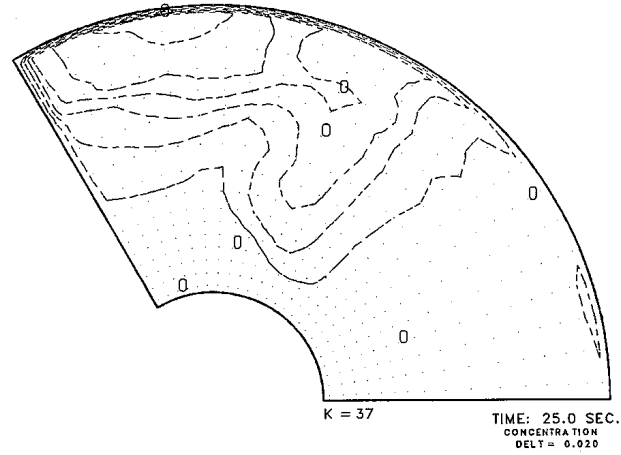
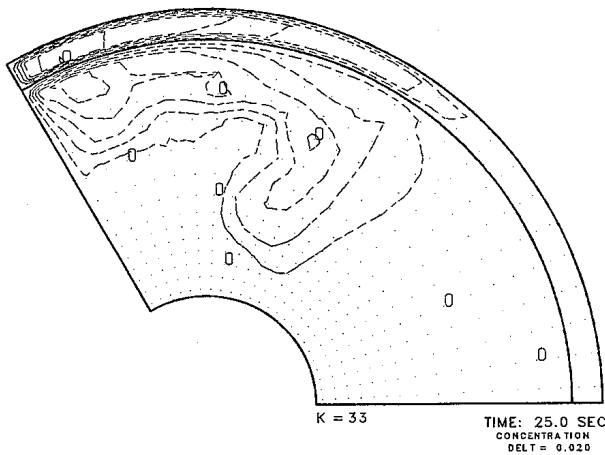


Fig. K. 2 (Continued)

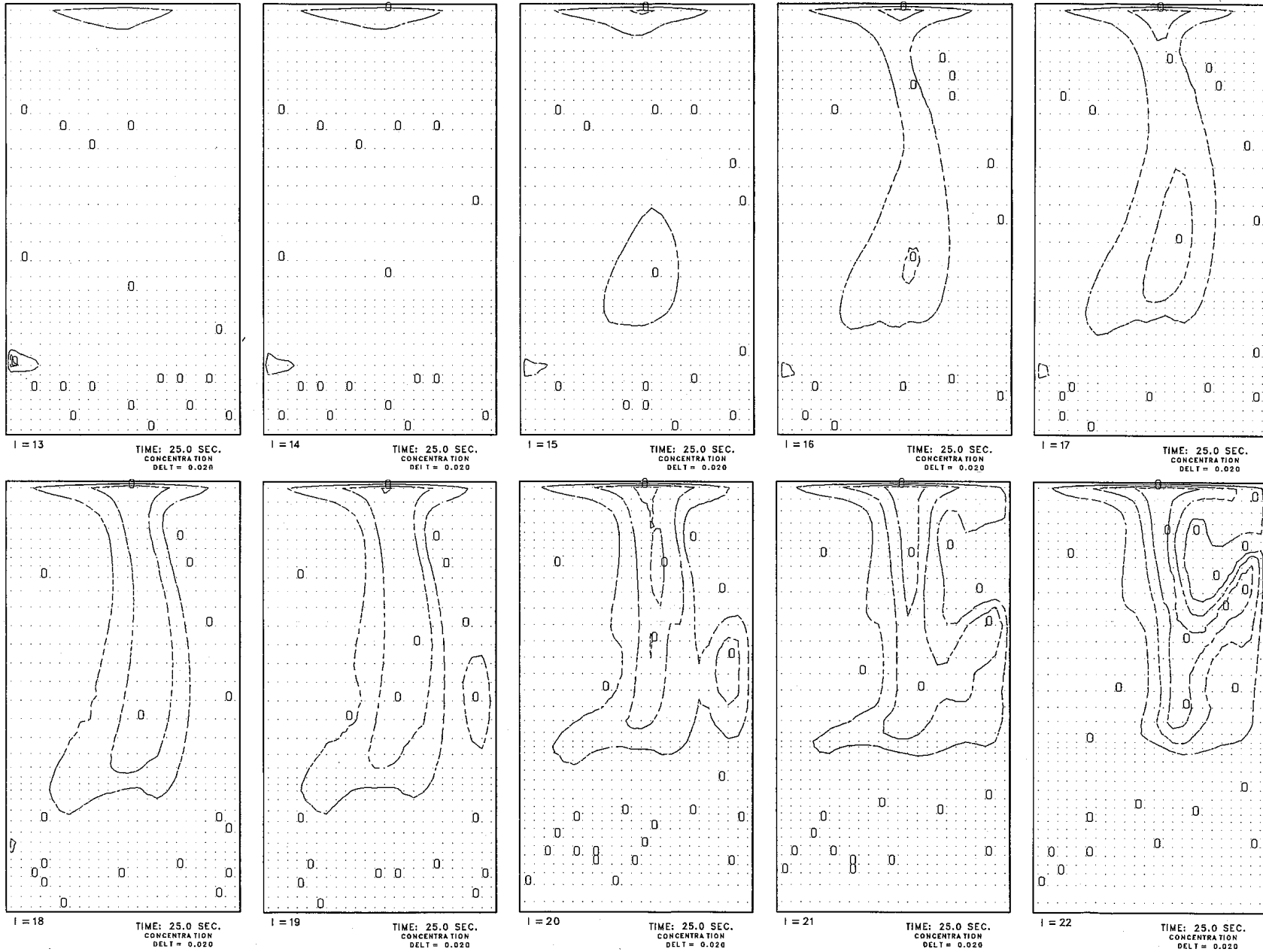
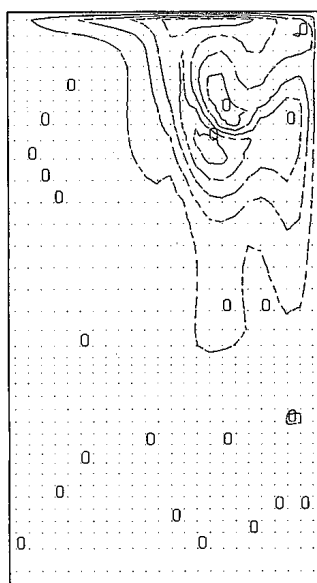
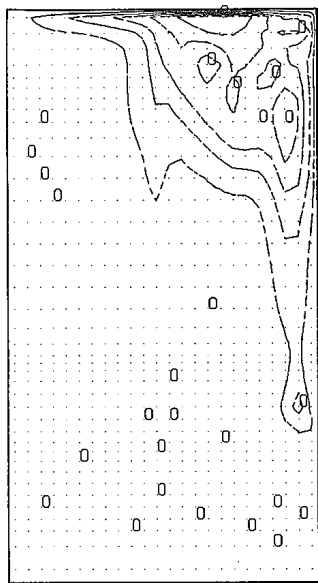


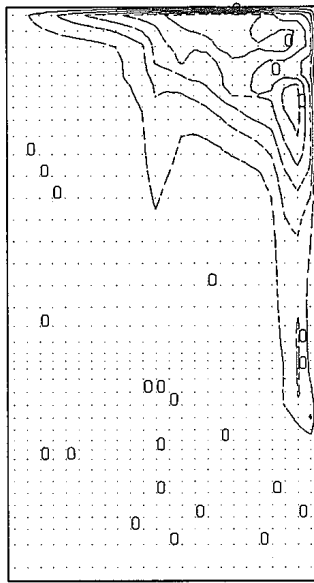
Fig. K. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta$ -z Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 1 Condition (Release Mode : Step Profile)



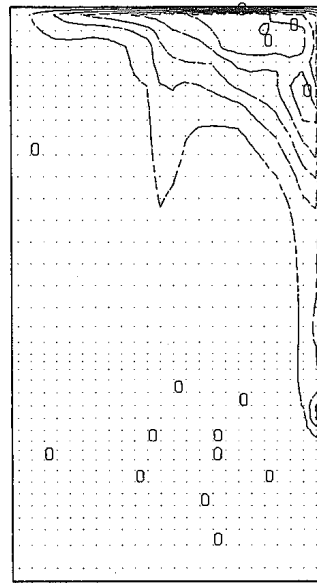
I = 23  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



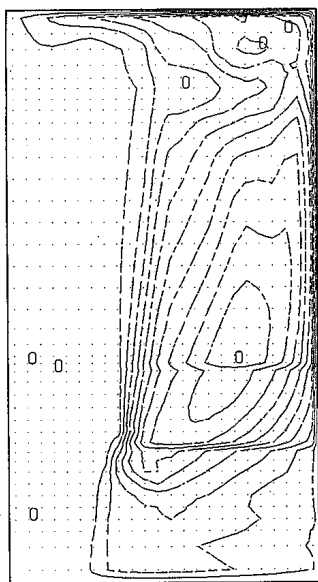
I = 24  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



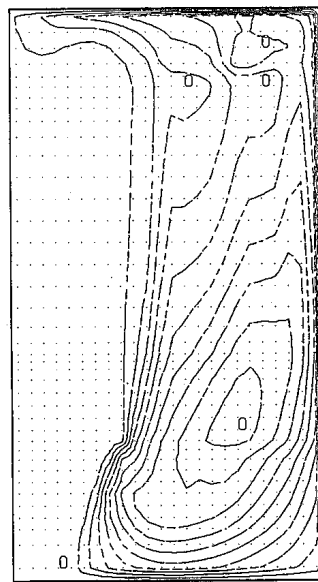
I = 25  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



I = 26  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



I = 27  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



I = 28  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. K. 3 (Continued)

付録L DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性  
(ケース 2)

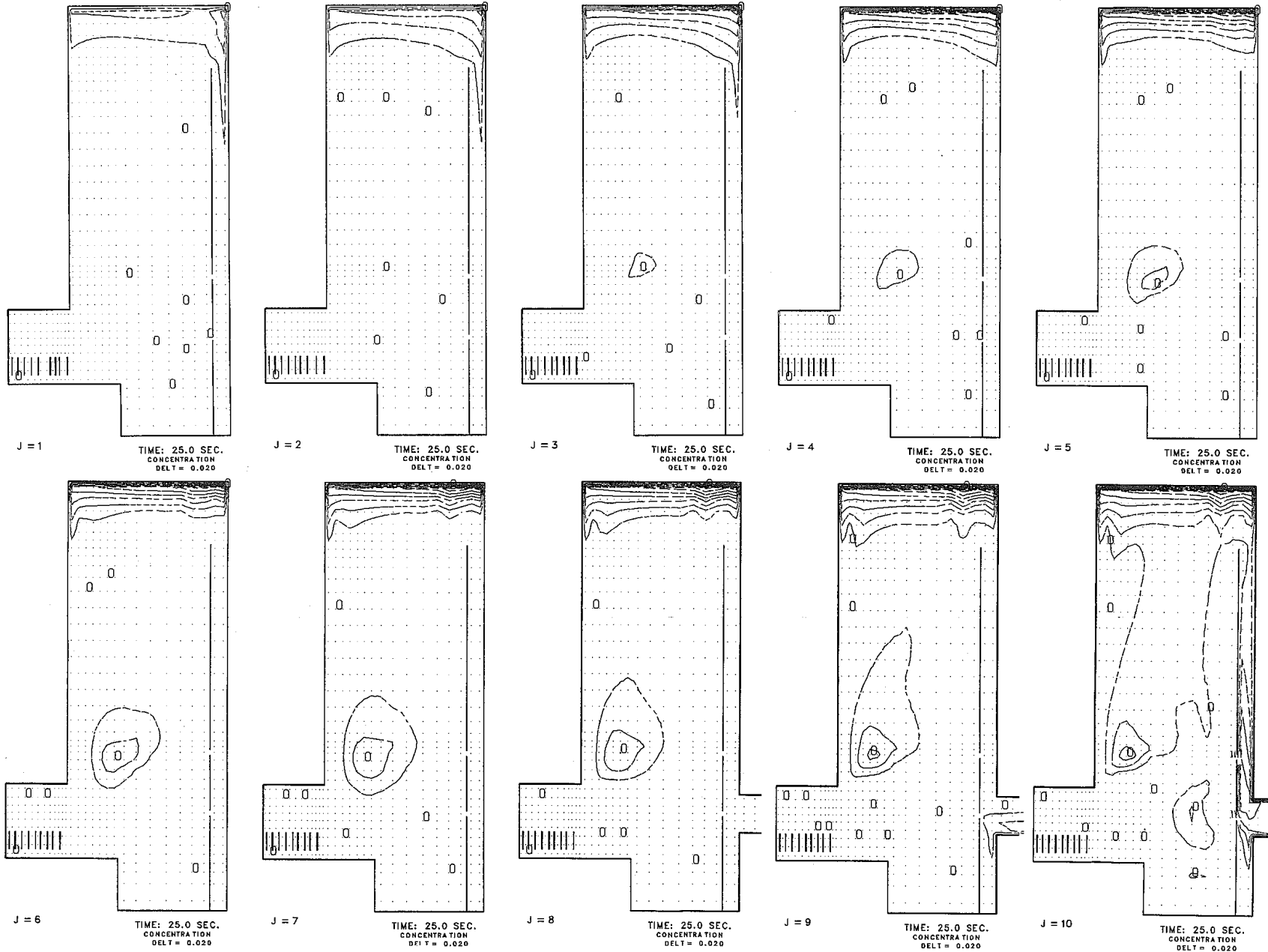
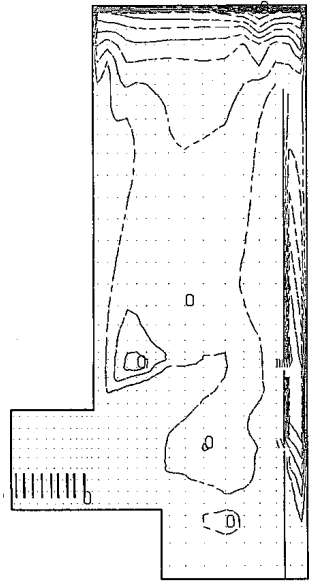
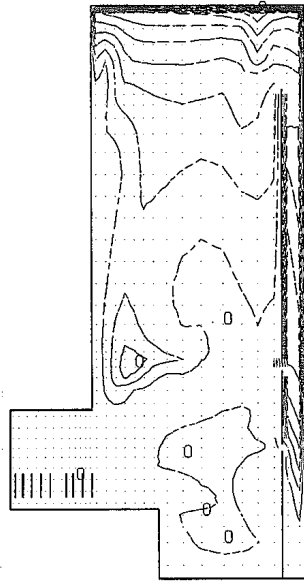


Fig.L. 1 DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition (Release Mode : Step Profile)

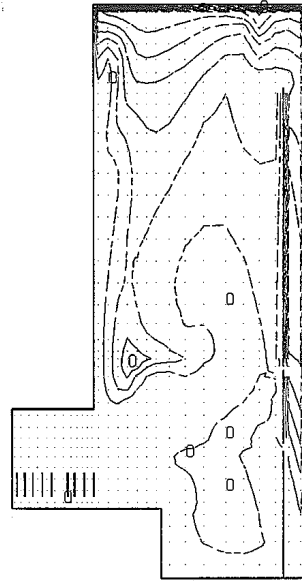




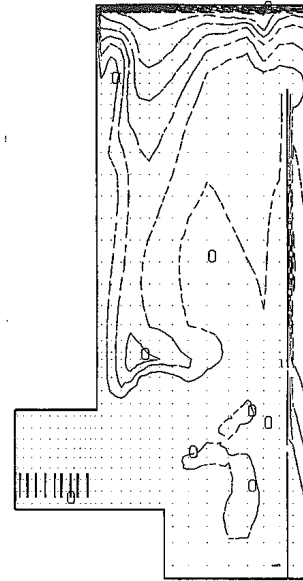
J = 11  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



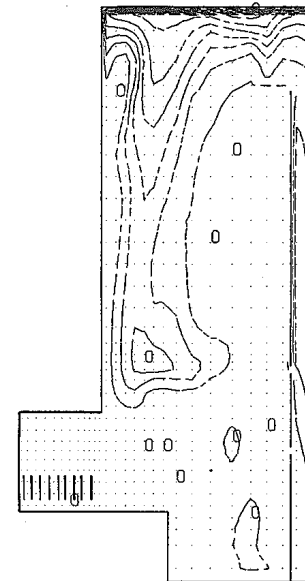
J = 12  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



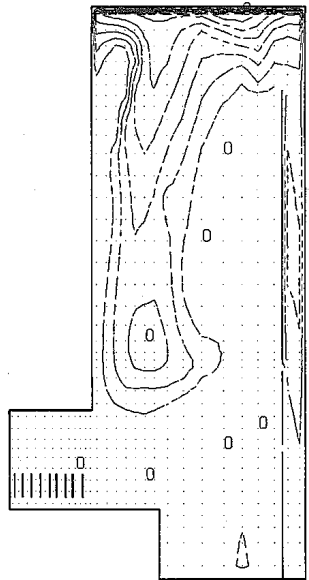
J = 13  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



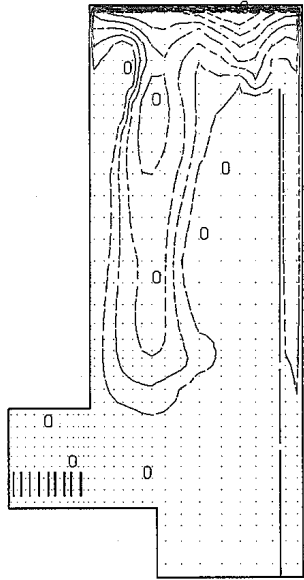
J = 14  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



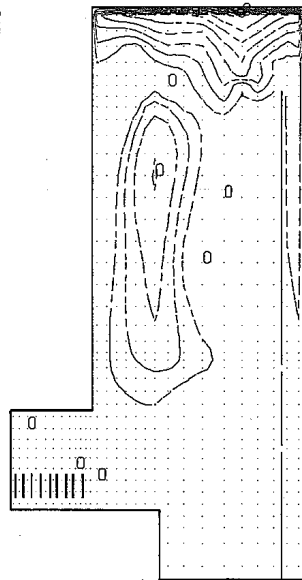
J = 15  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



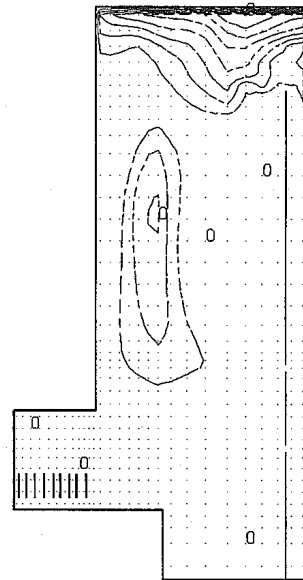
J = 16  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



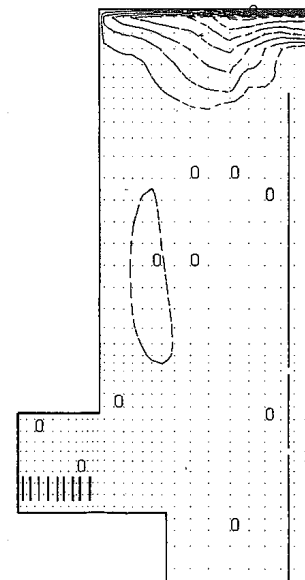
J = 17  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 18  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

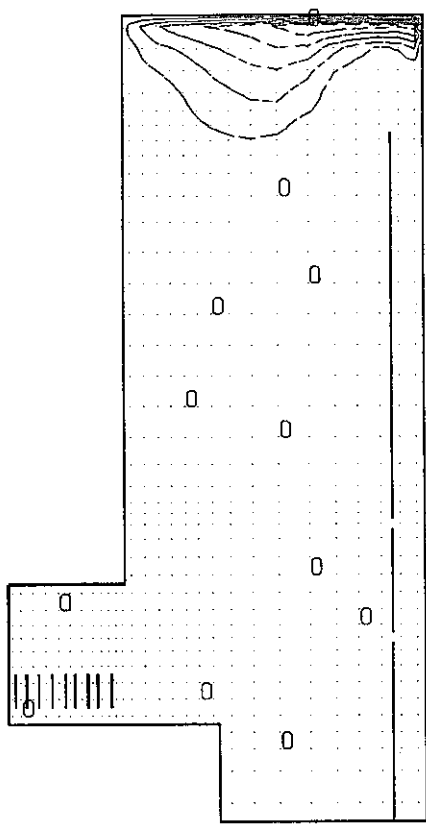


J = 19  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



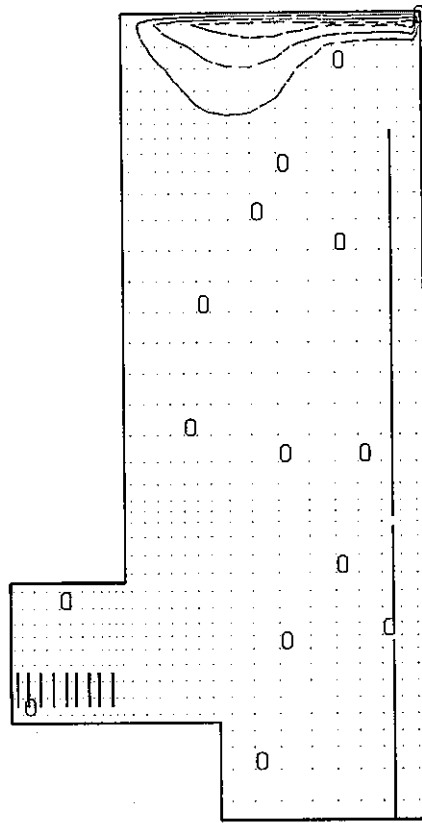
J = 20  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. L. 1 (Continued)



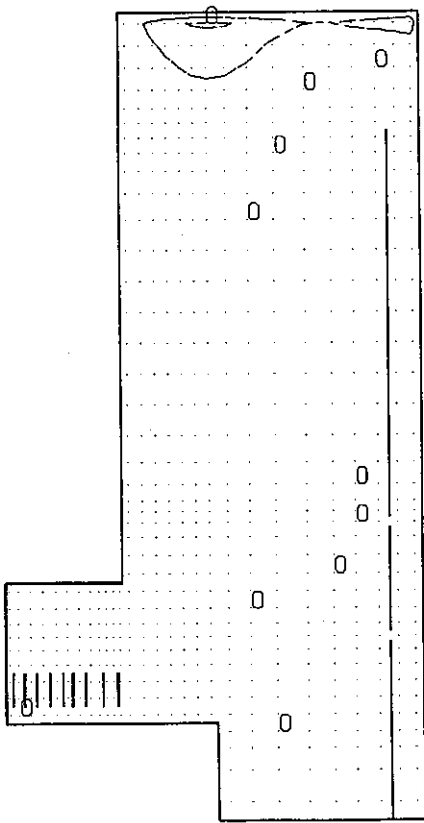
J = 21

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



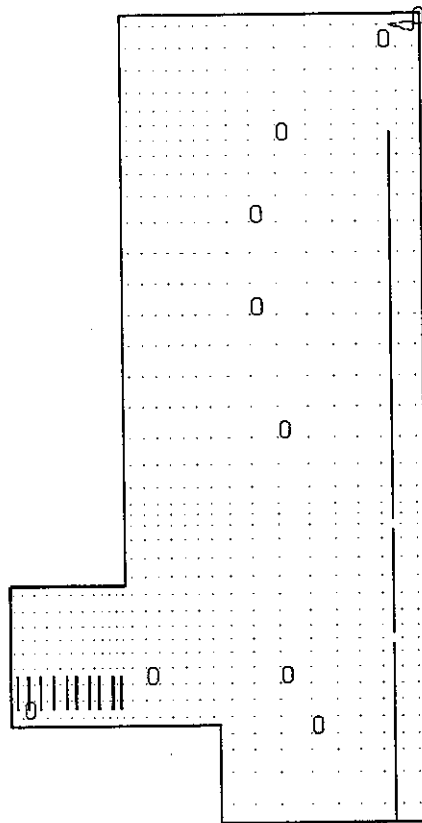
J = 22

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 23

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 24

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. L. 1 (Continued)

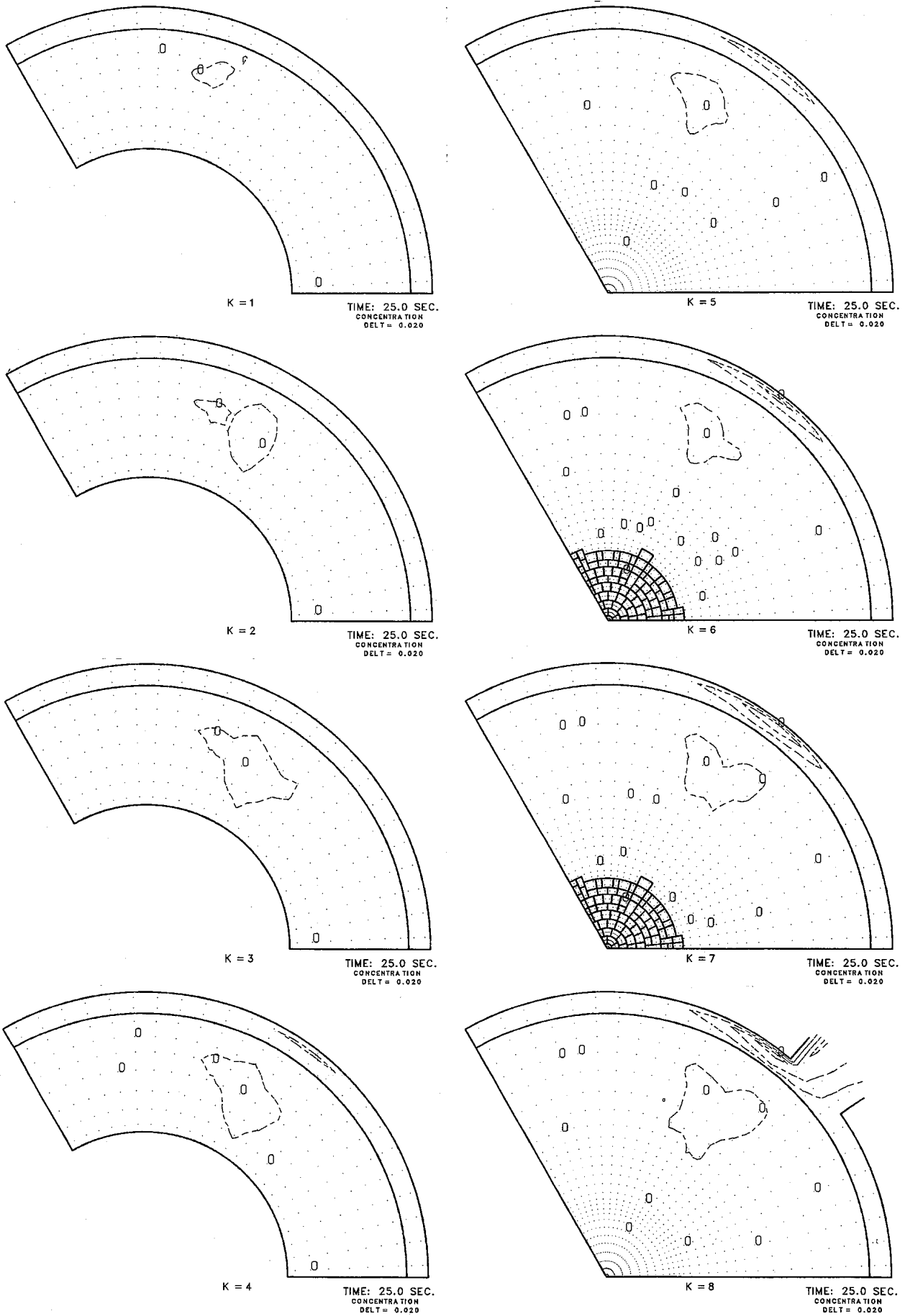
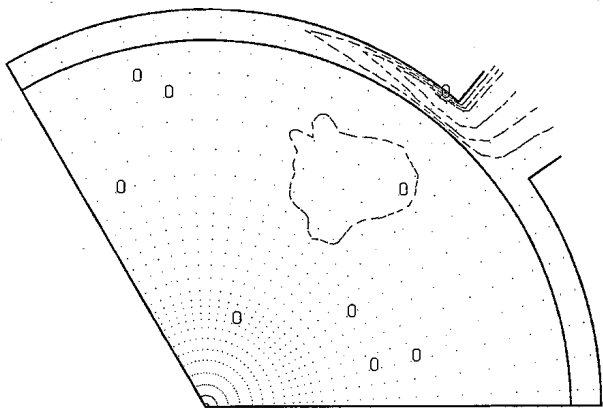
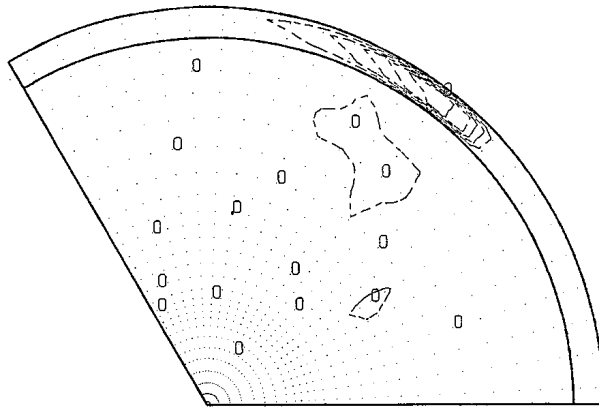


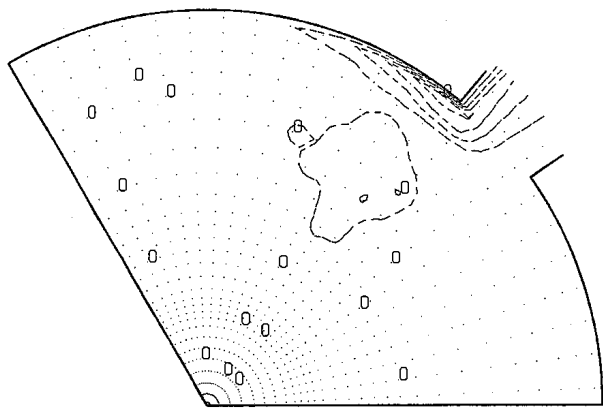
Fig.L. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition (Release Mode : Step Profile)



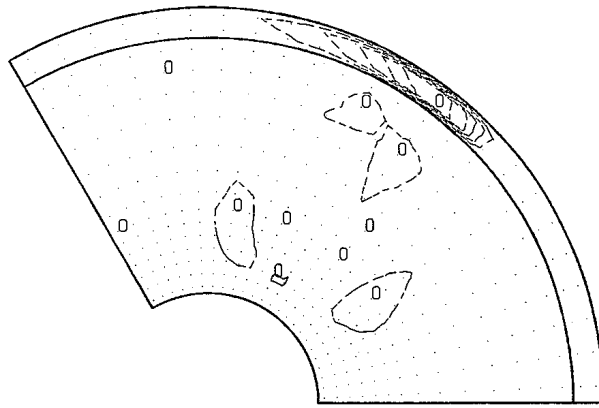
K = 9  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



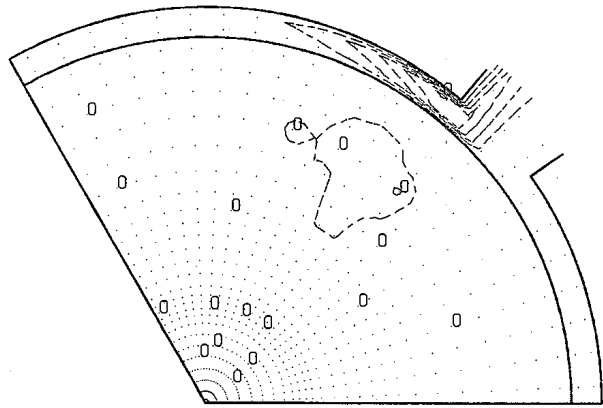
K = 13  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



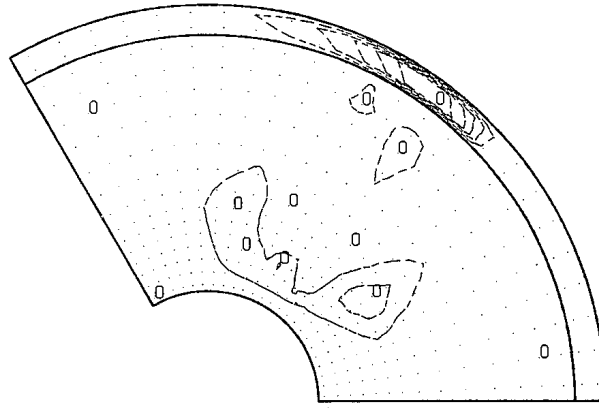
K = 10  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



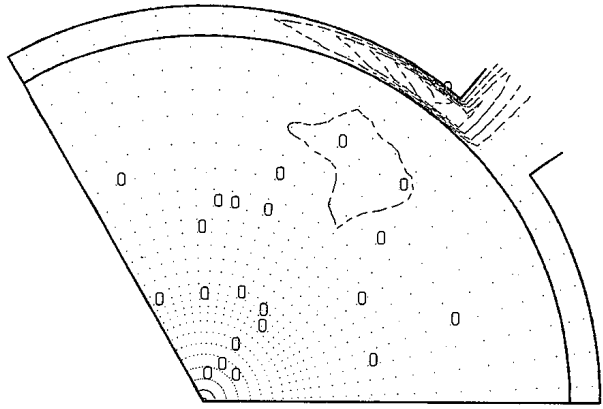
K = 14  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



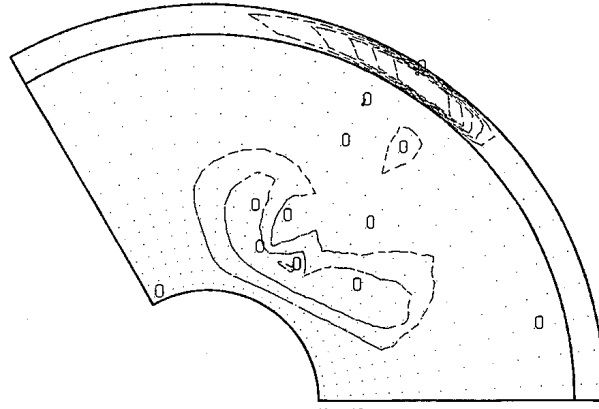
K = 11  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 15  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 12  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 16  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. L. 2 (Continued)

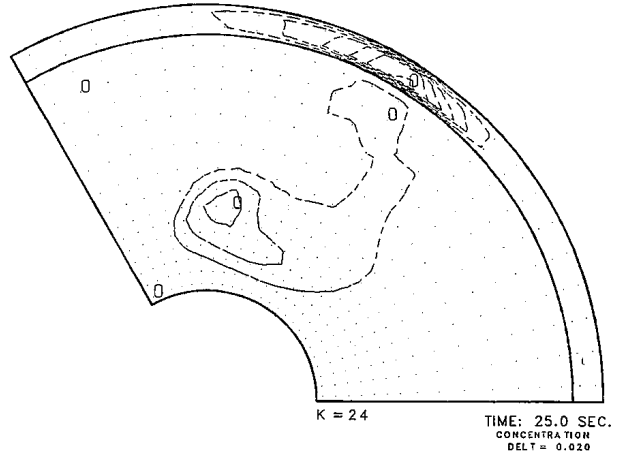
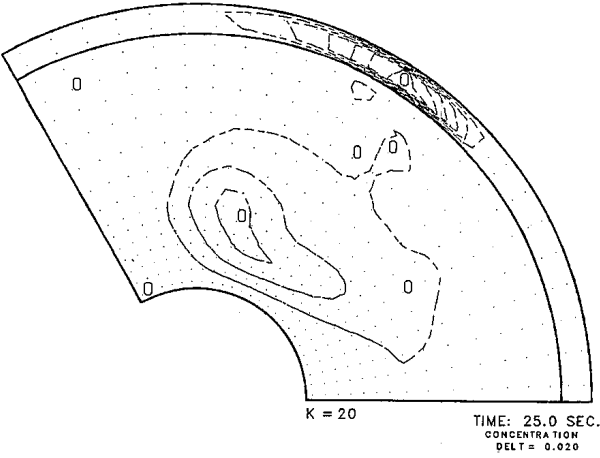
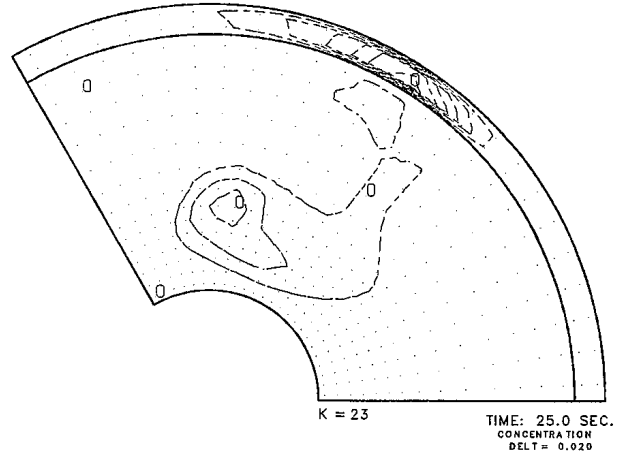
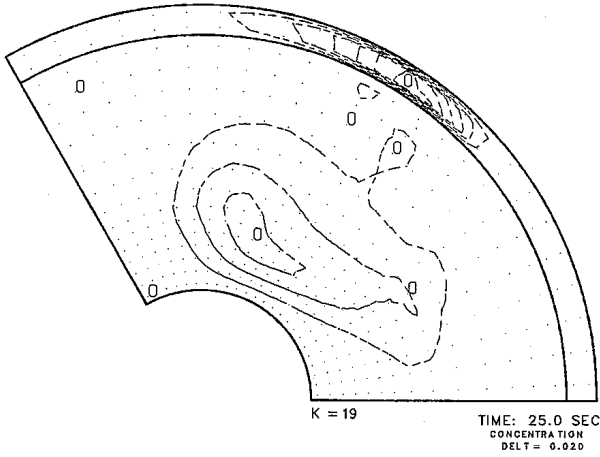
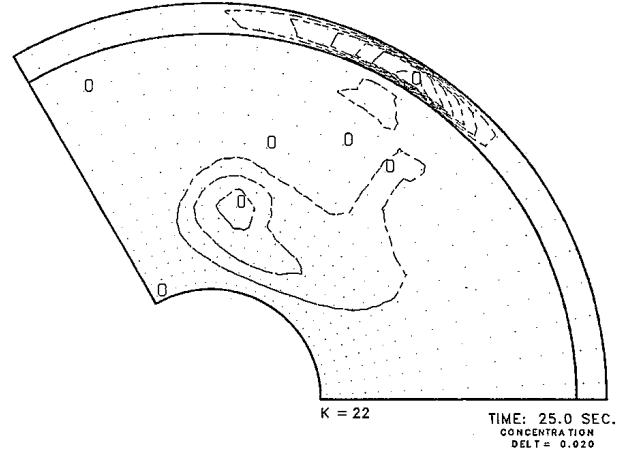
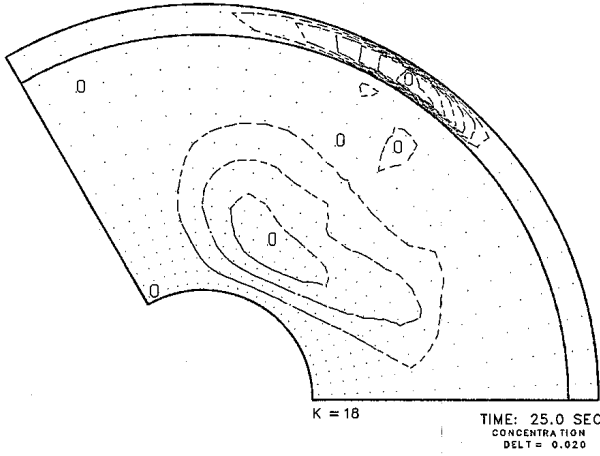
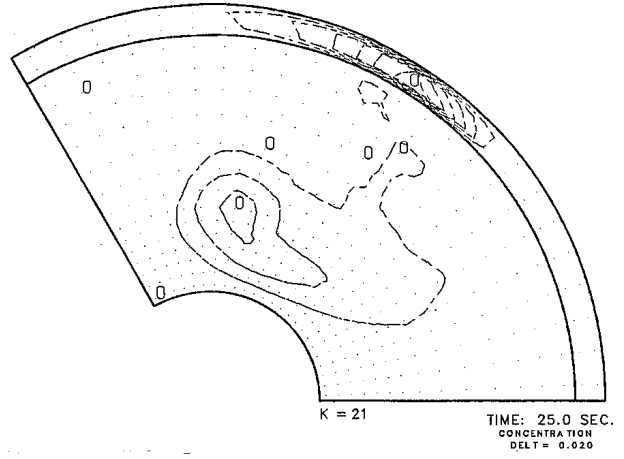
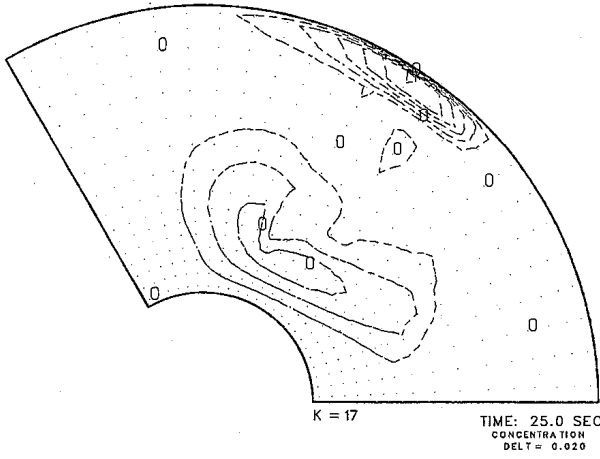
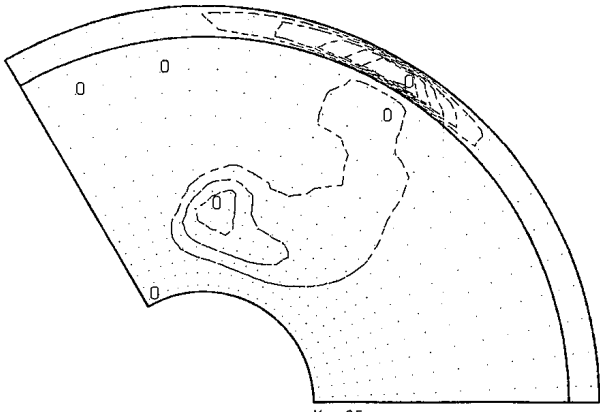
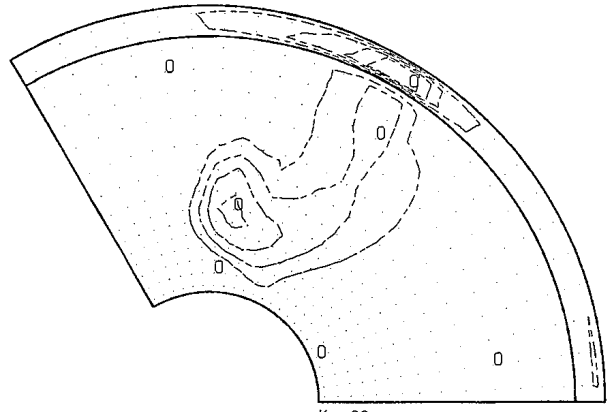


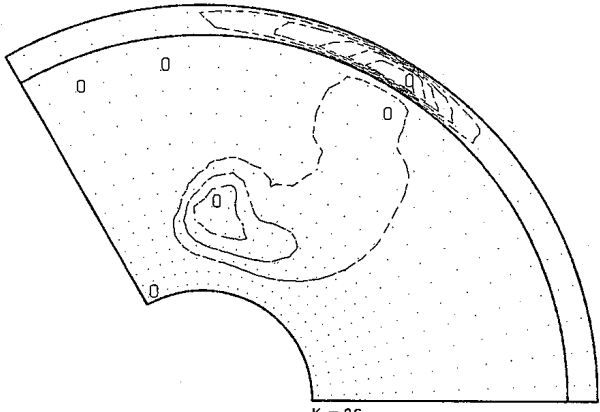
Fig. L. 2 (Continued)



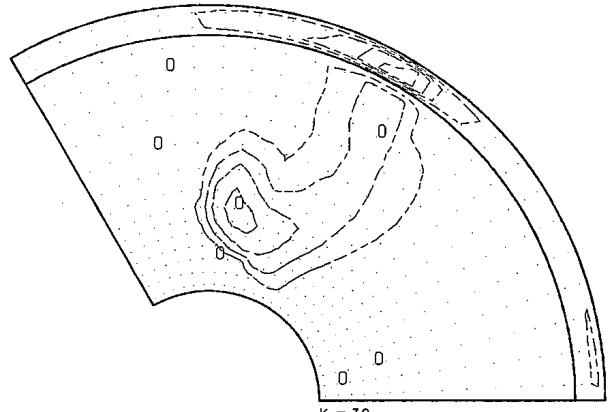
K = 25  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



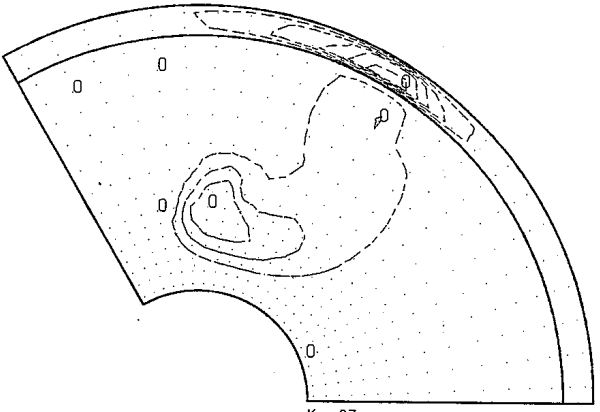
K = 29  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



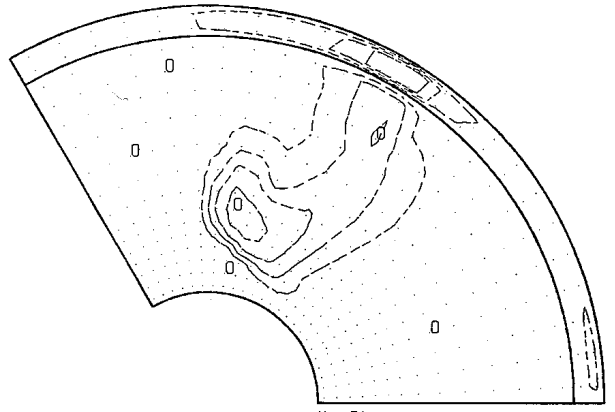
K = 26  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



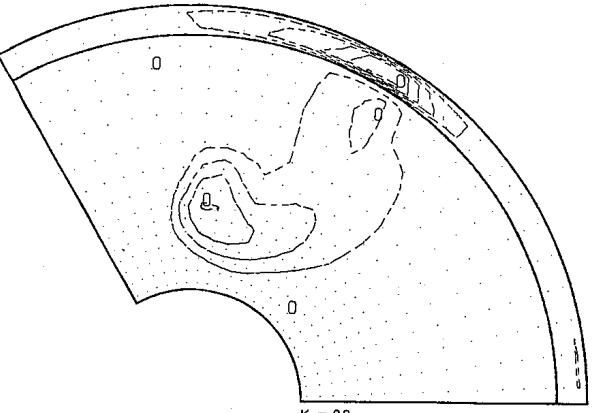
K = 30  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



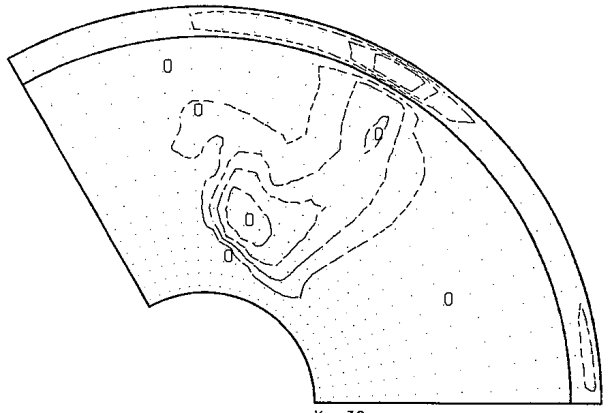
K = 27  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 31  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 28  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 32  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. L. 2 (Continued)

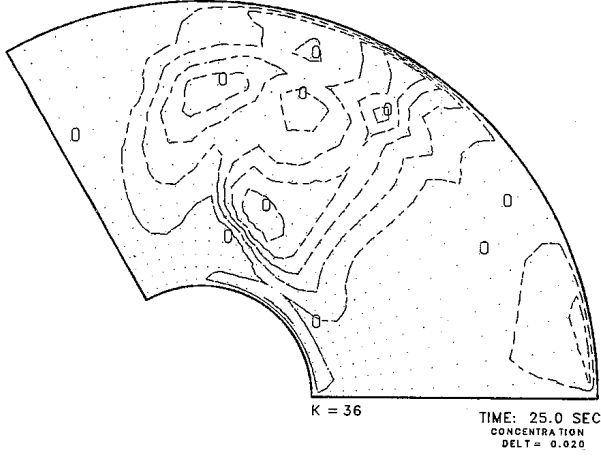
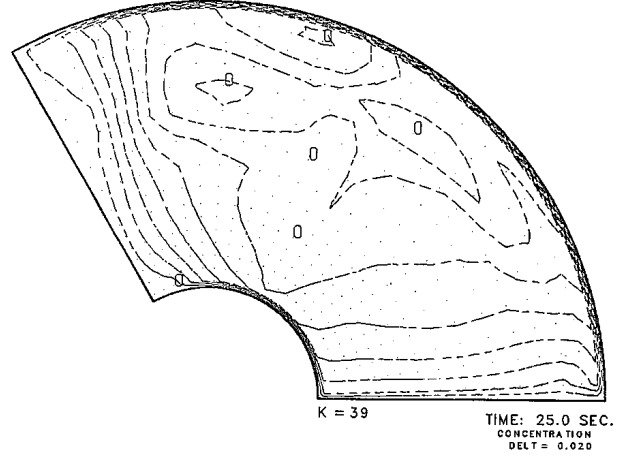
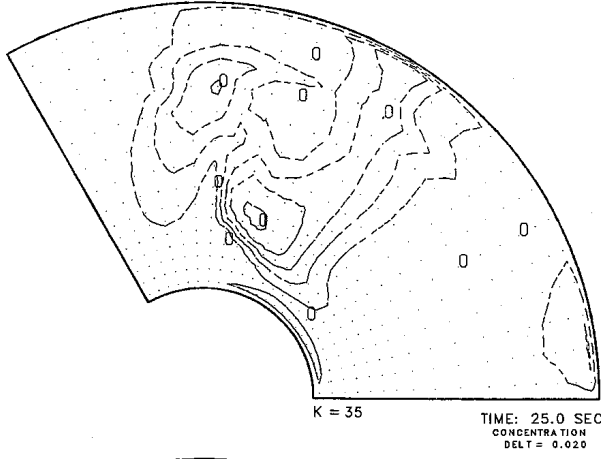
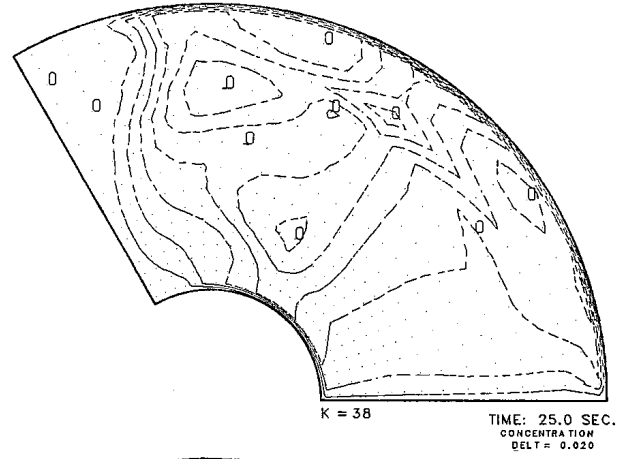
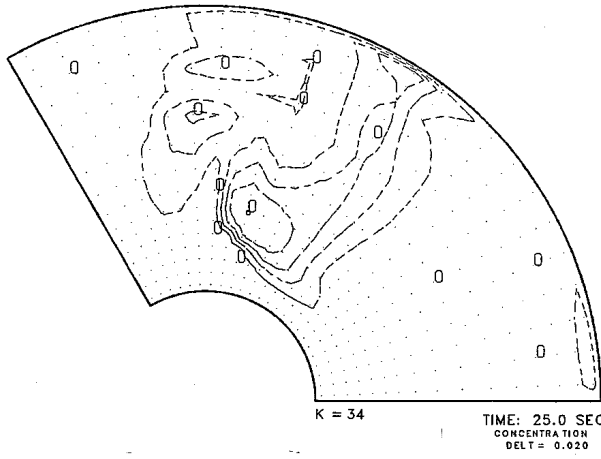
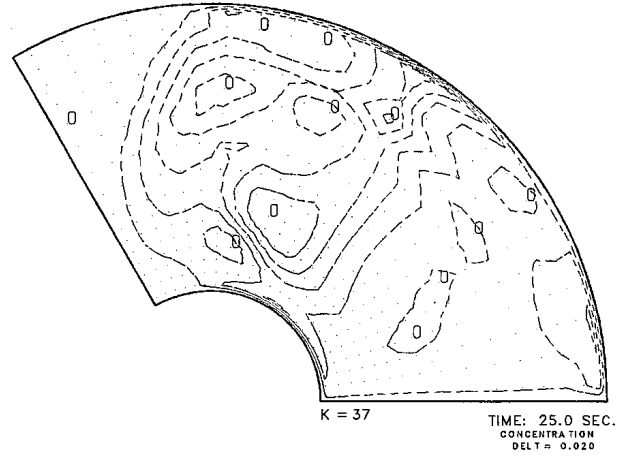
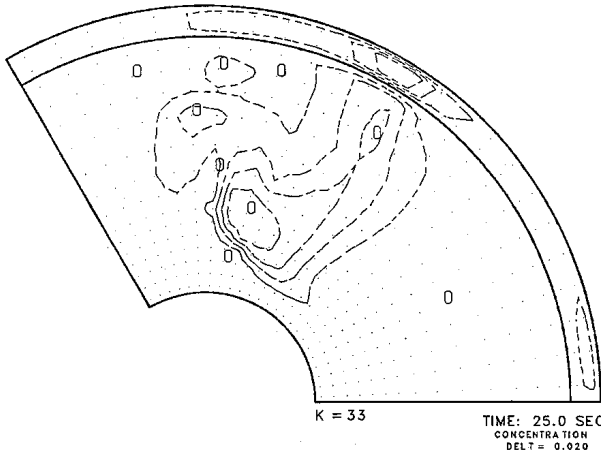


Fig.L. 2 (Continued)

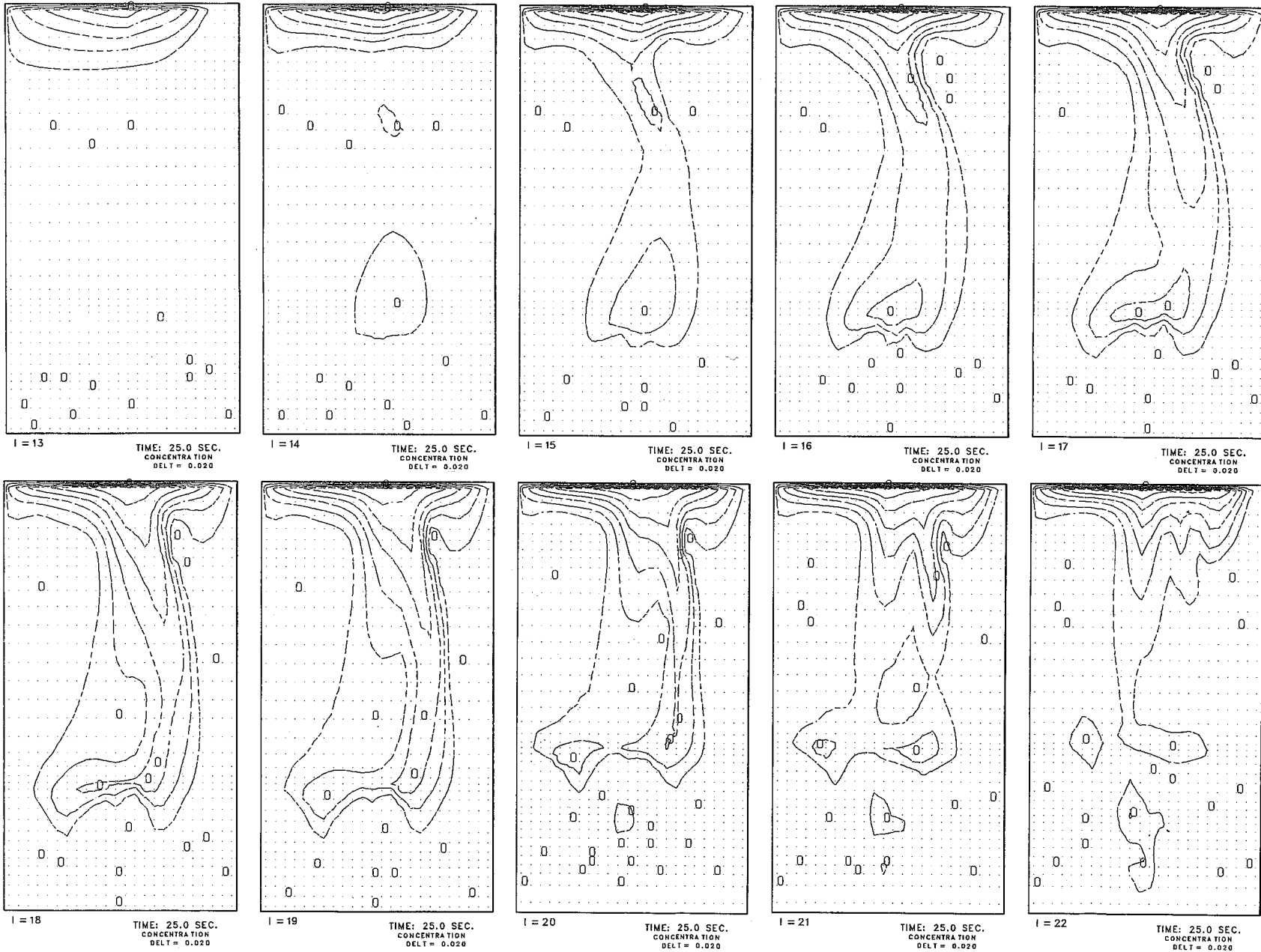


Fig. L. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta$ -z Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 2 Condition (Release Mode : Step Profile)



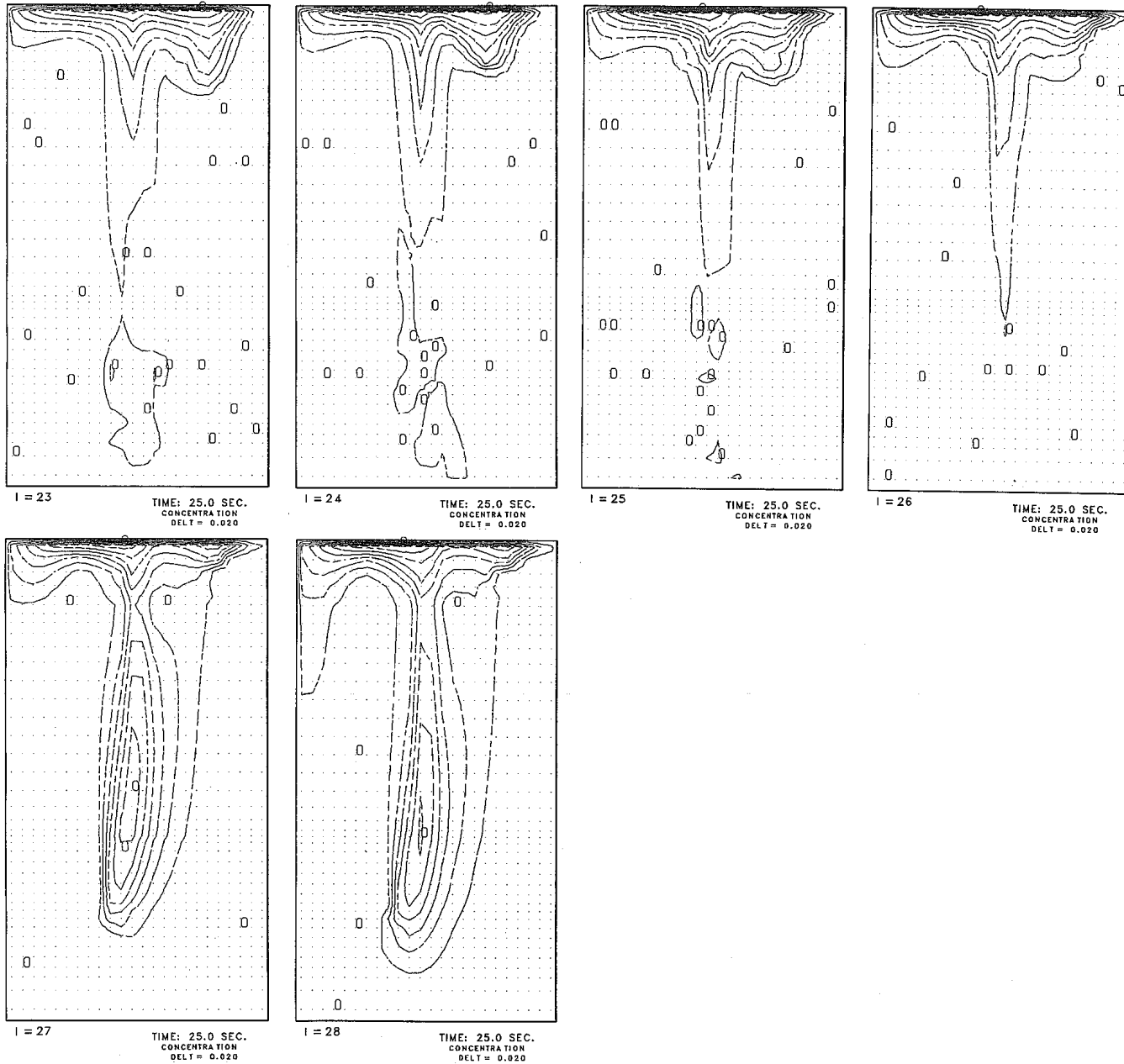


Fig. L. 3 (Continued)

付録M DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性  
(ケース 3)

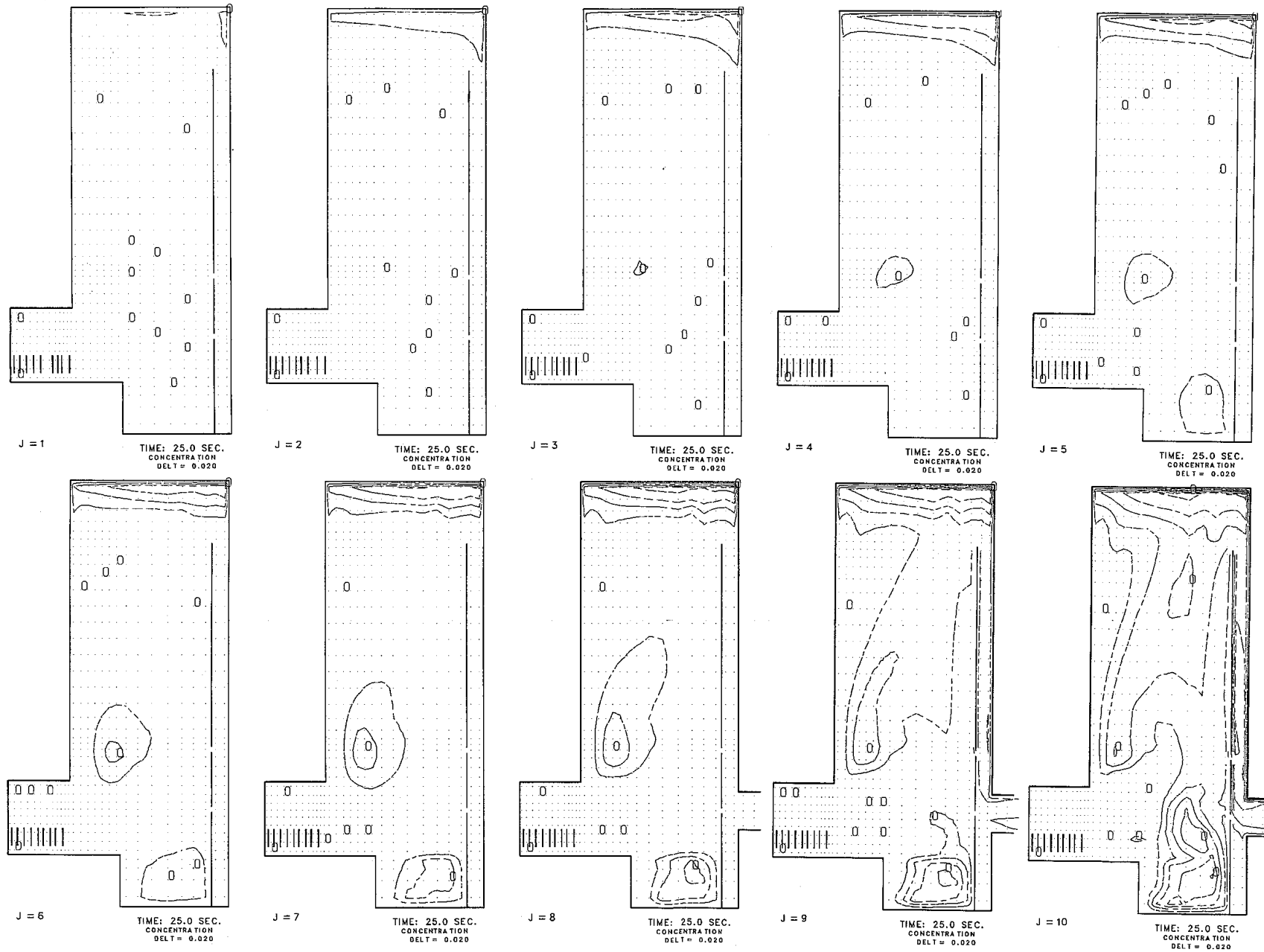


Fig.M. 1 DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition (Release Mode : Step Profile)

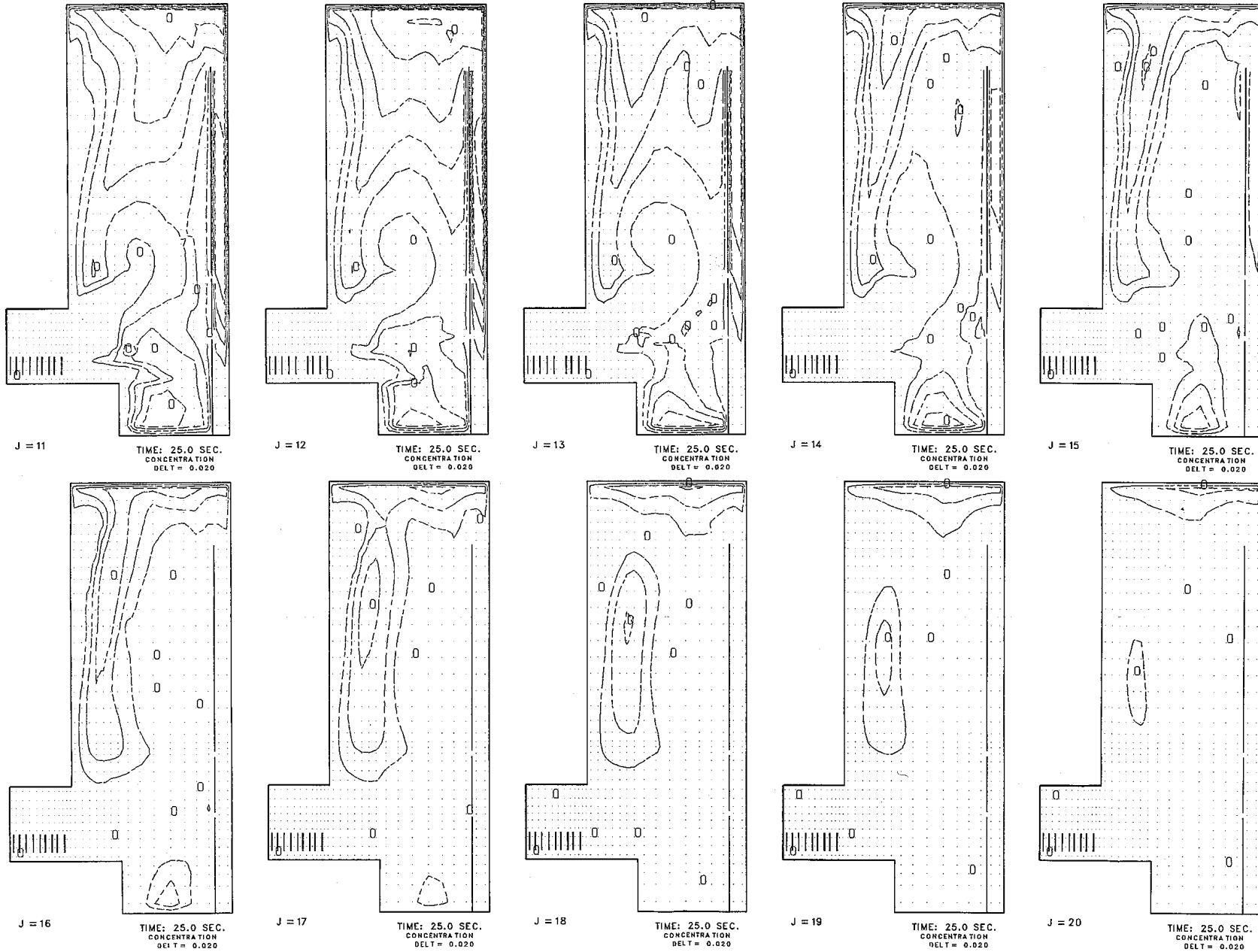
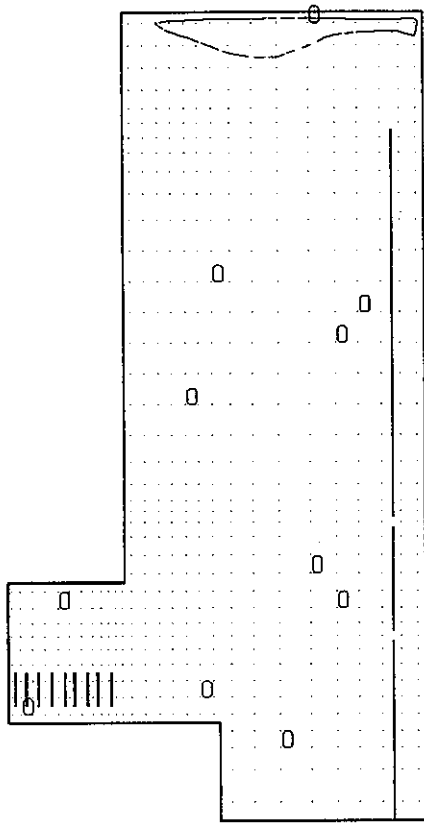
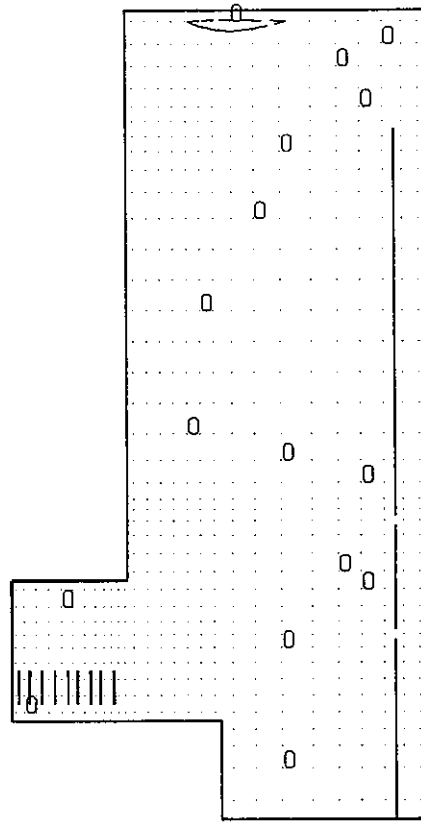


Fig. M. 1 (Continued)



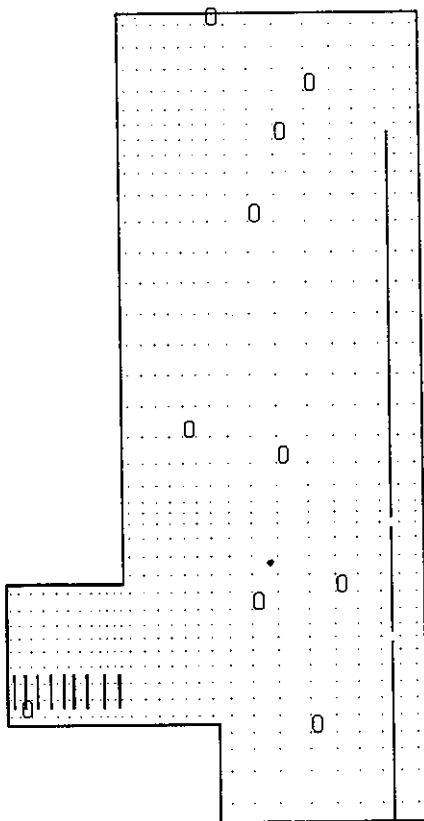
J = 21

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



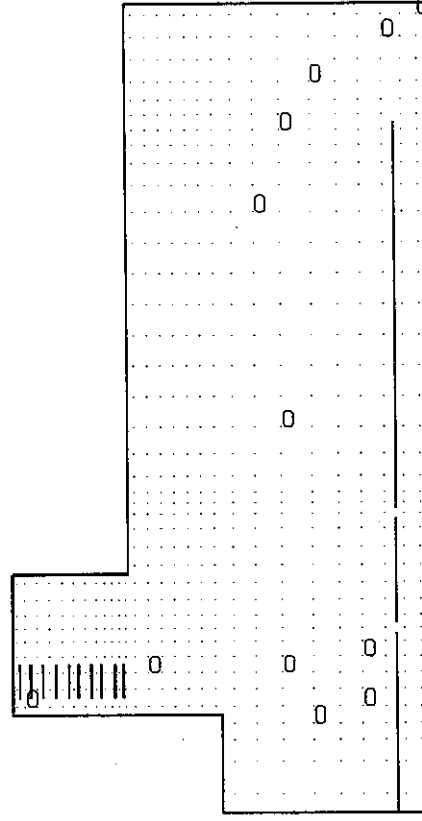
J = 22

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 23

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 24

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. M. 1 (Continued)

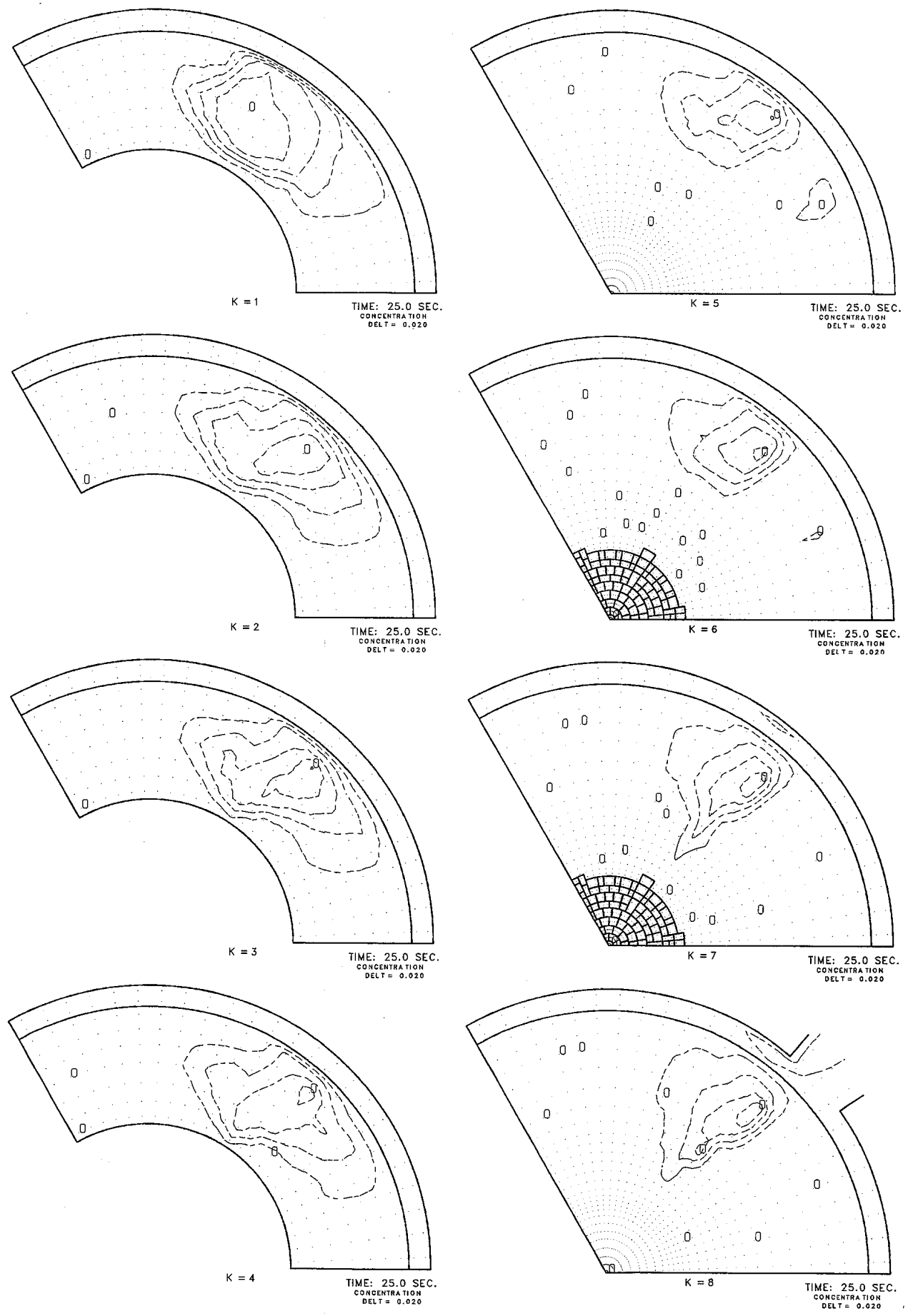
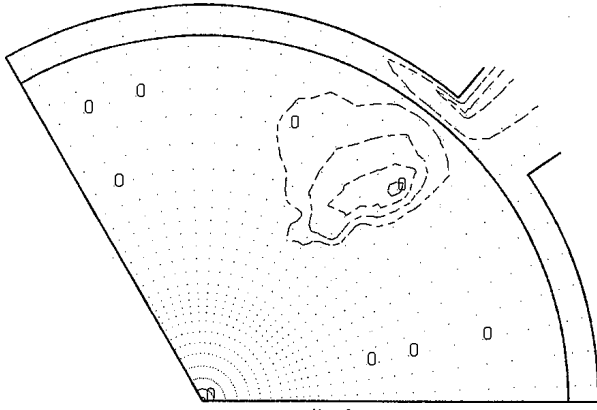
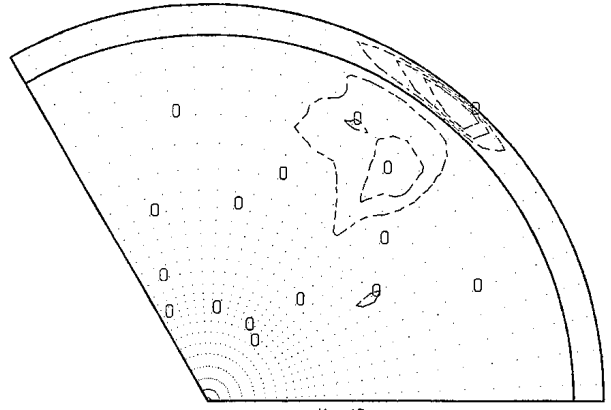


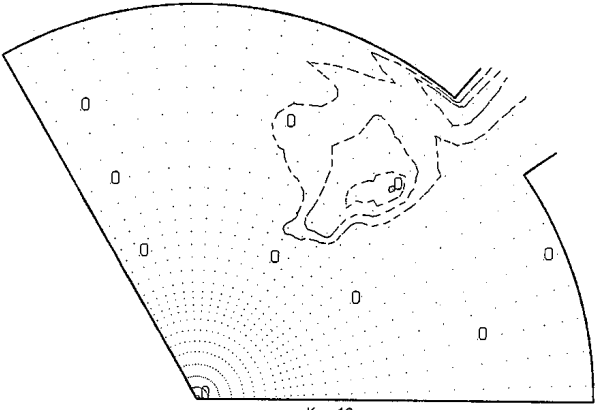
Fig. M. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition (Release Mode : Step Profile)



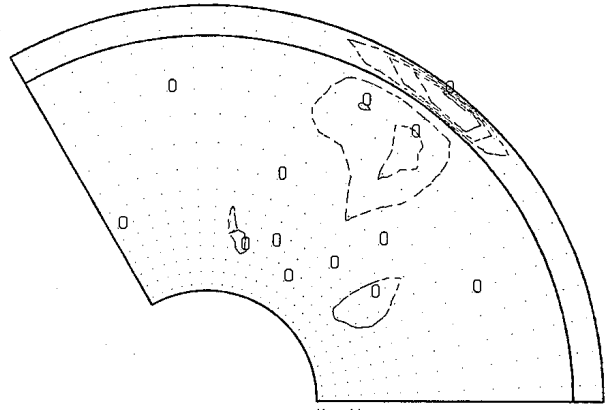
K = 9  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELT = 0.020



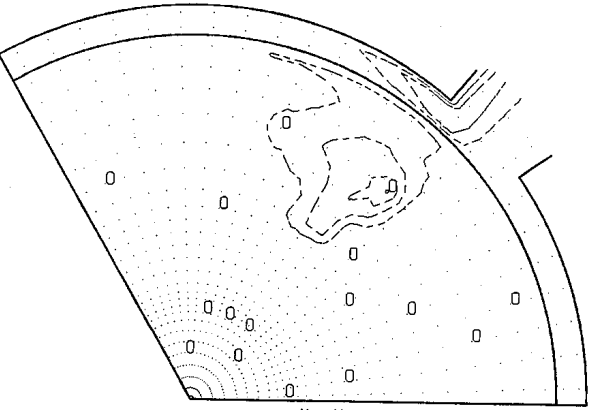
K = 13  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELT = 0.020



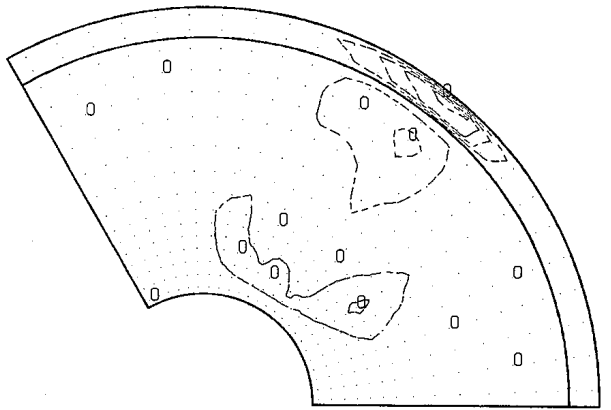
K = 10  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELT = 0.020



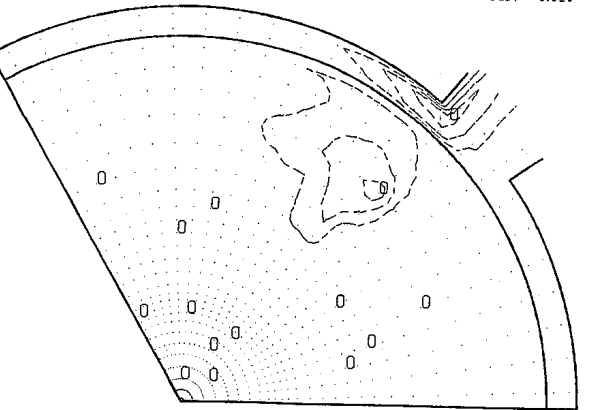
K = 14  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELT = 0.020



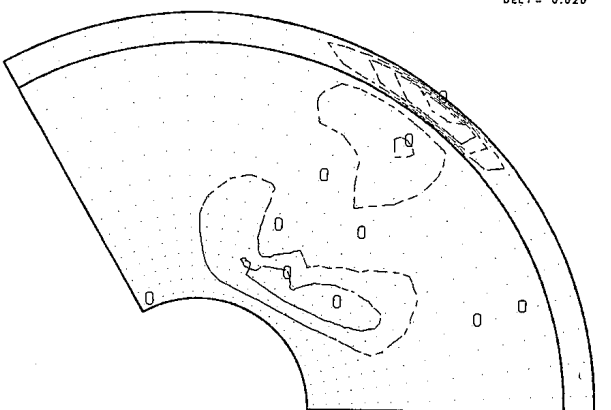
K = 11  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELT = 0.020



K = 15  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELT = 0.020



K = 12  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELT = 0.020



K = 16  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELT = 0.020

Fig. M. 2 (Continued)

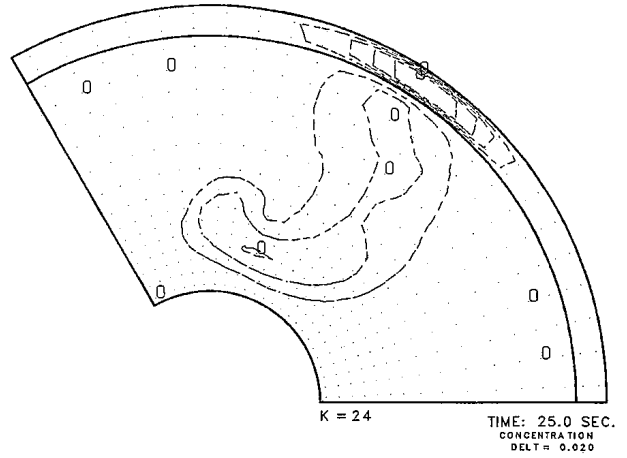
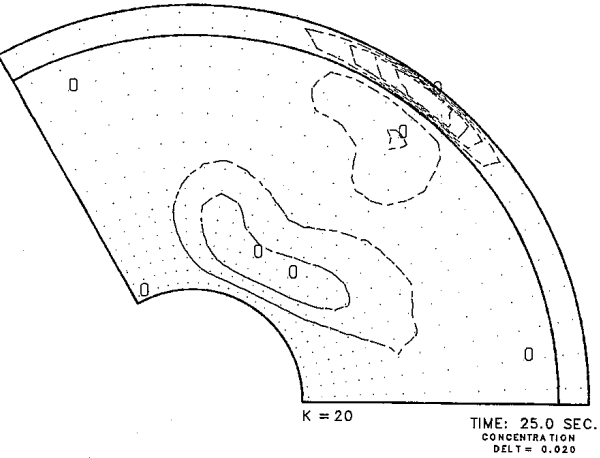
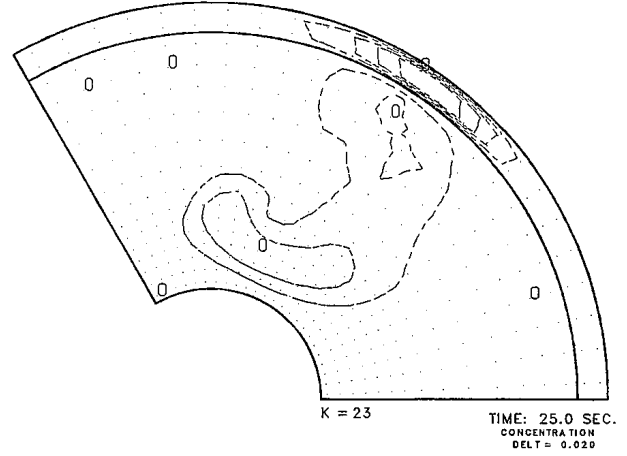
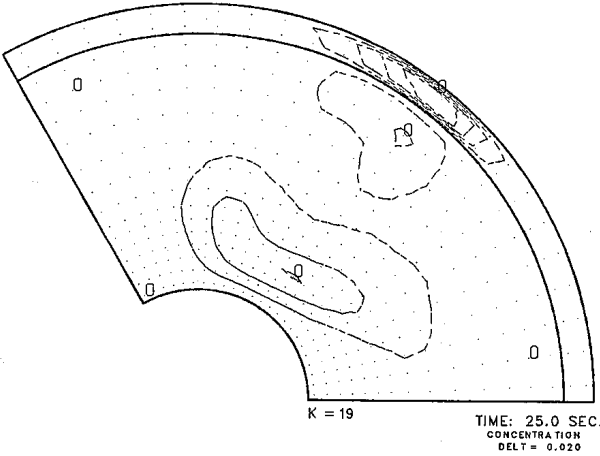
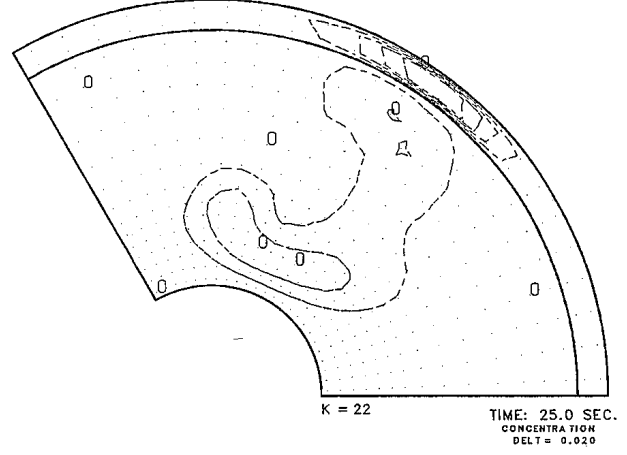
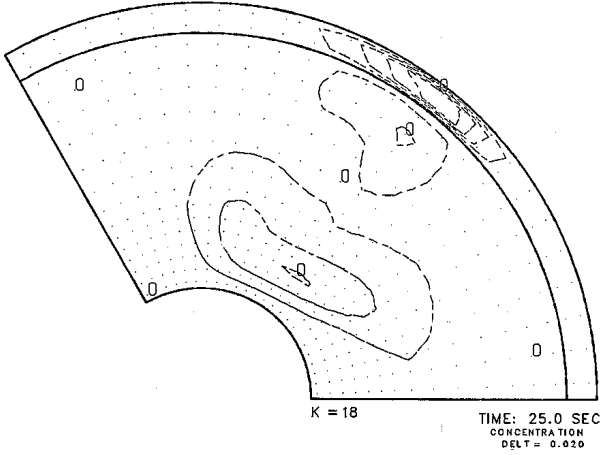
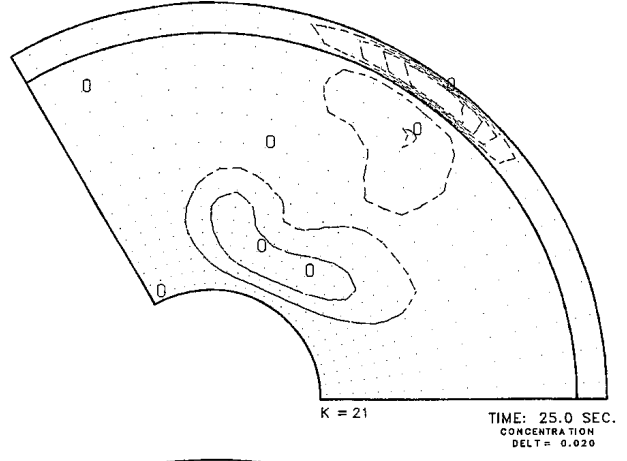
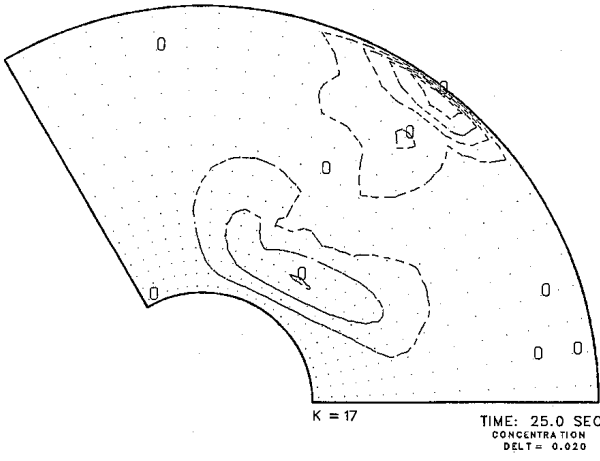
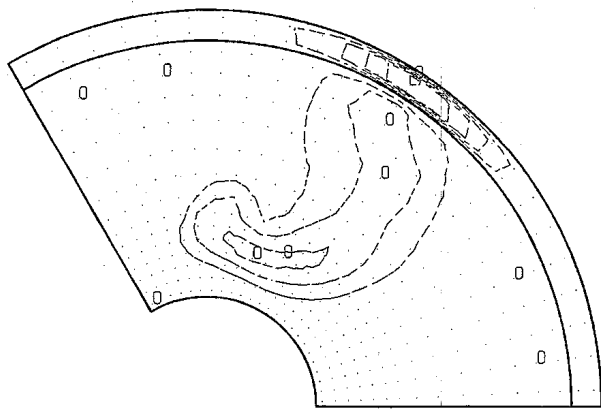
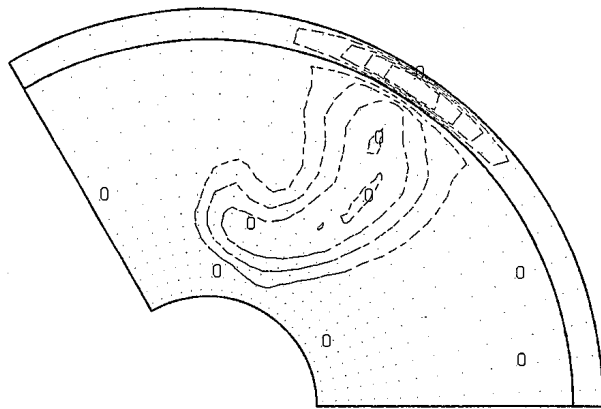


Fig. M. 2 (Continued)

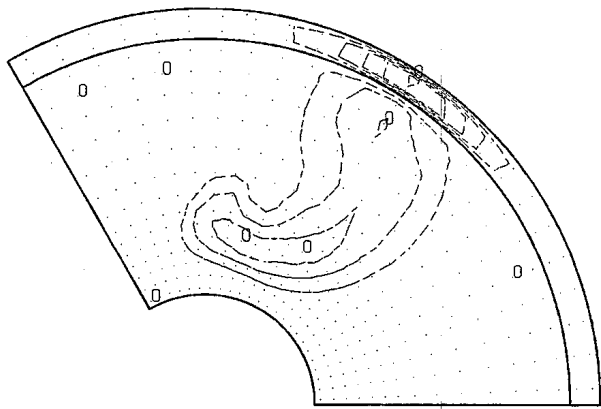




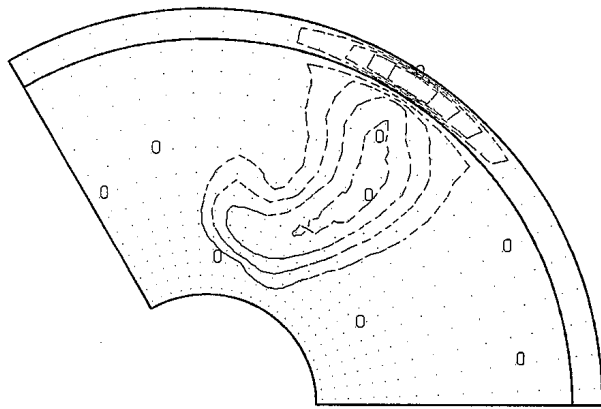
K = 25  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



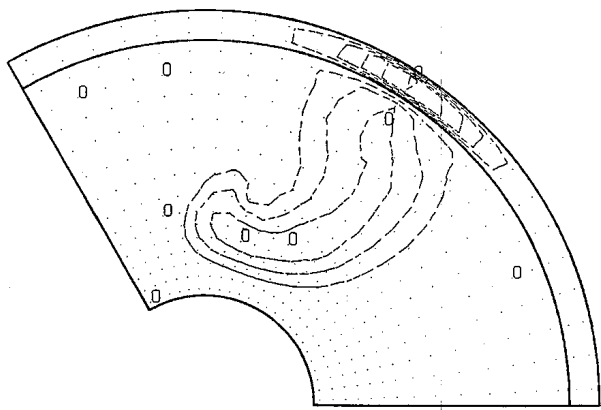
K = 29  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



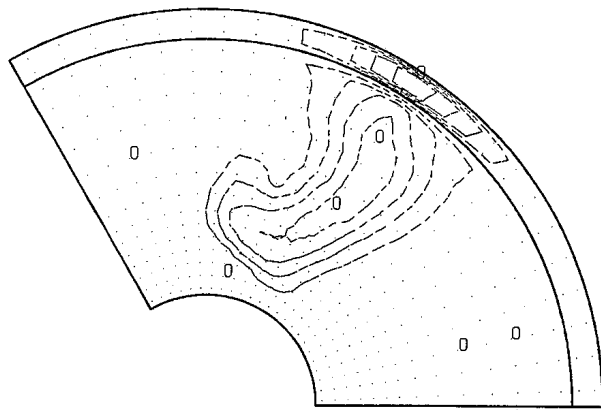
K = 26  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



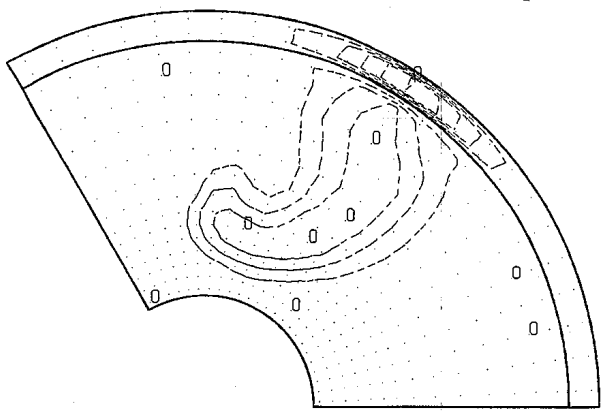
K = 30  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



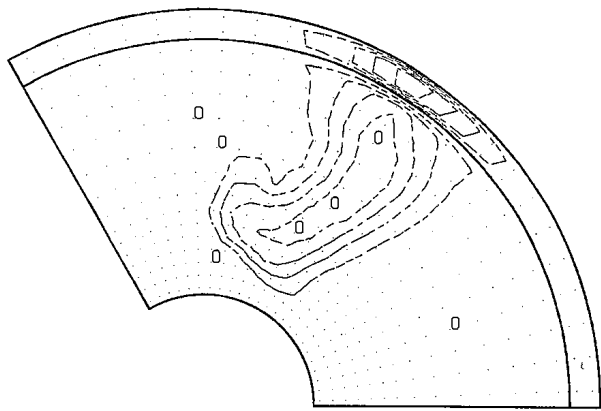
K = 27  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 31  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 28  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



K = 32  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. M. 2 (Continued)

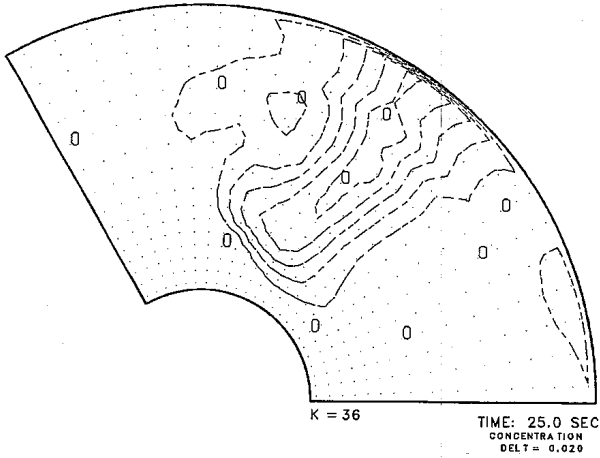
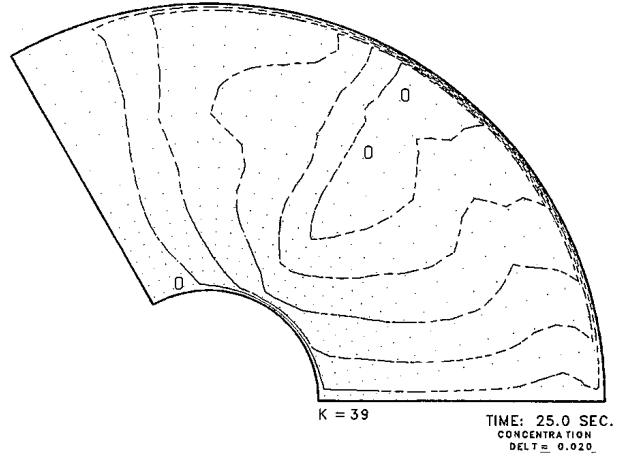
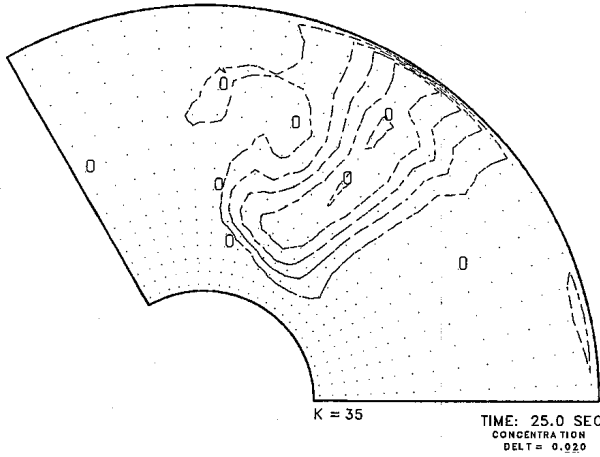
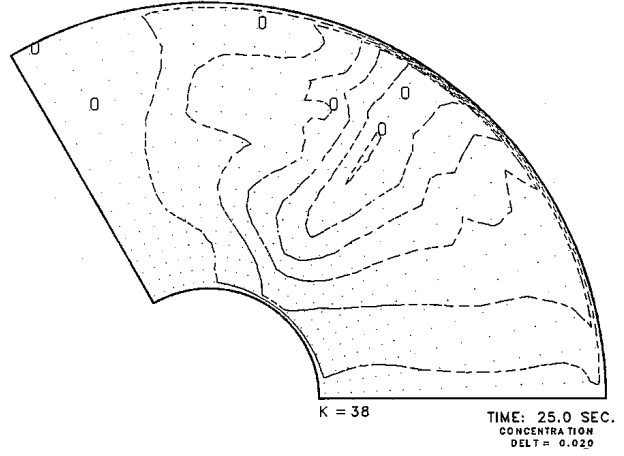
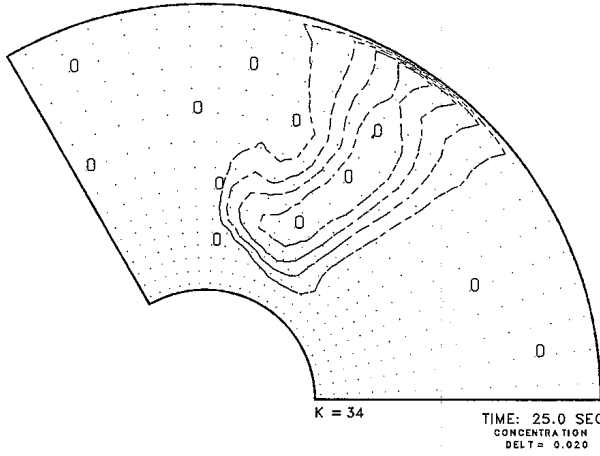
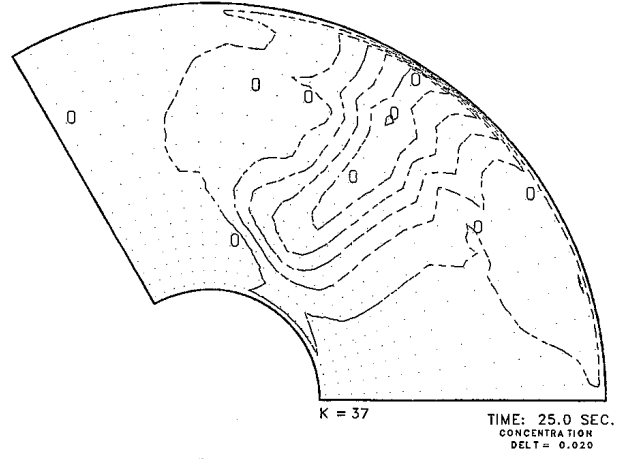
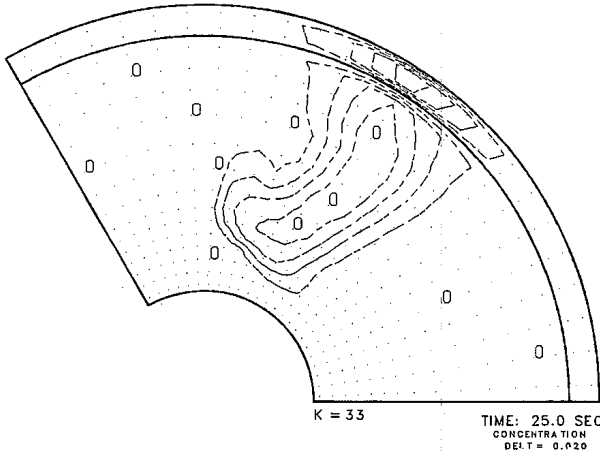


Fig. M. 2 (Continued)

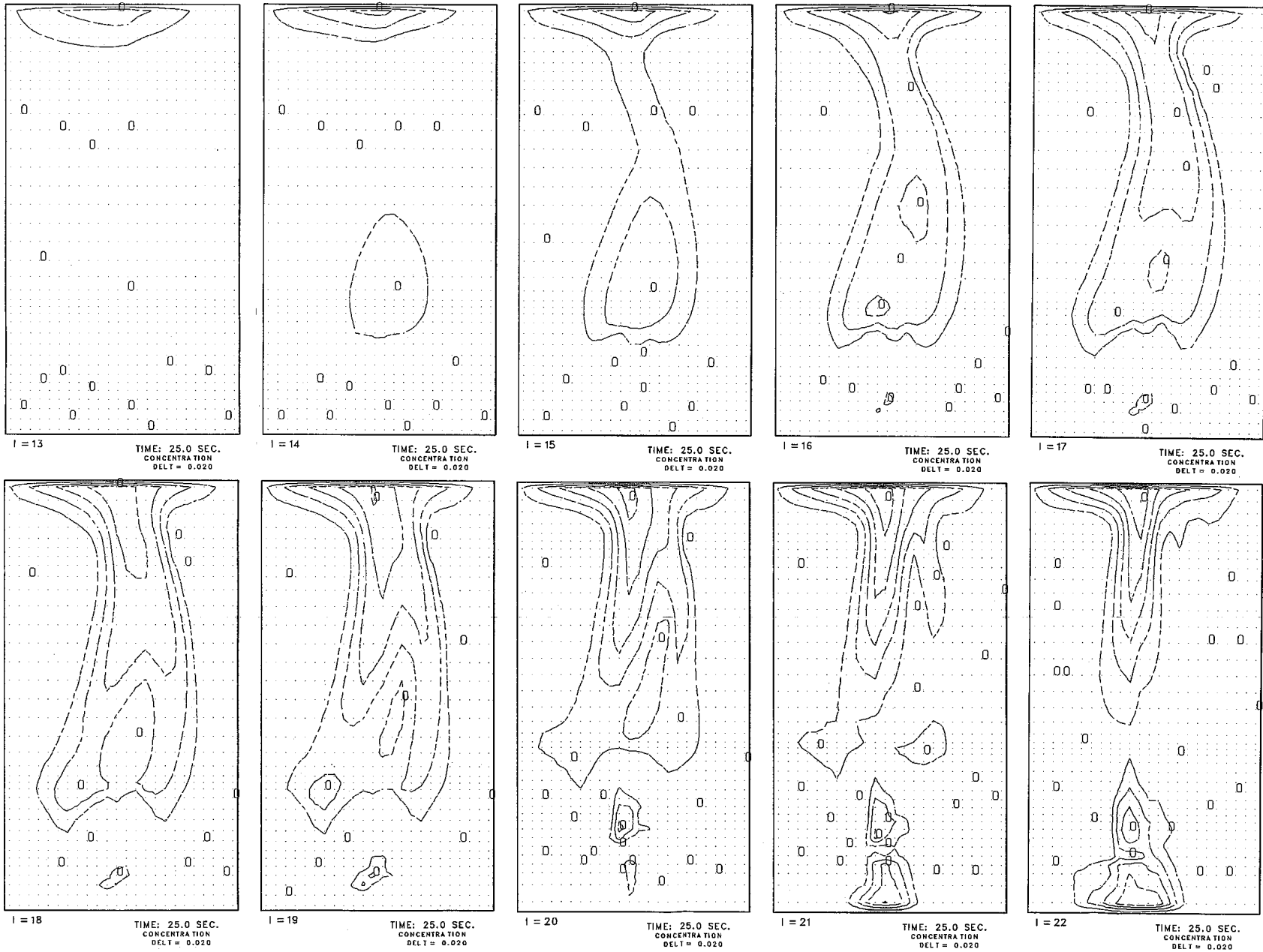


Fig. M. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta$ -z Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 3 Condition (Release Mode : Step Profile)

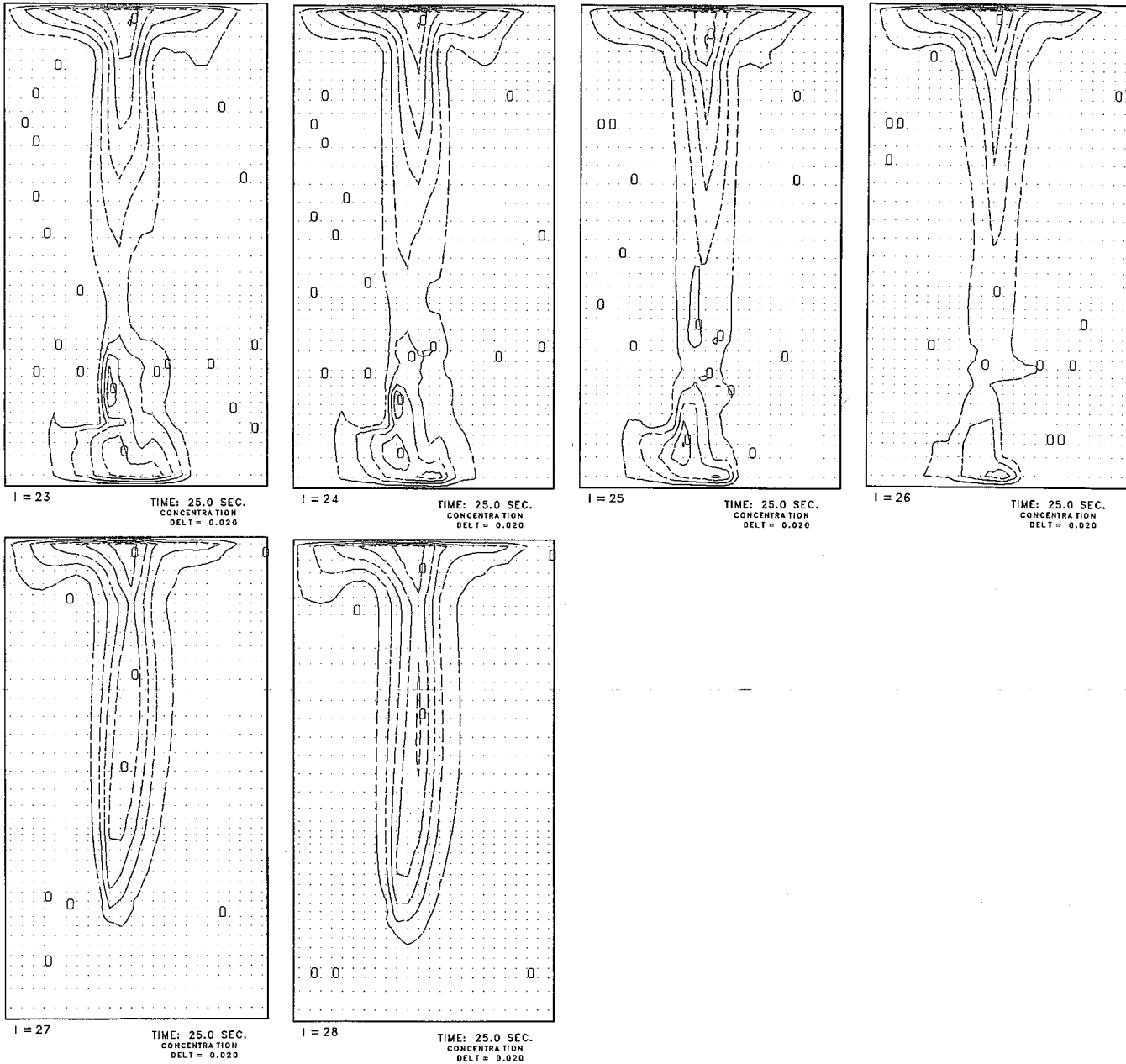


Fig. M. 3 (Continued)

付録N DN先行核濃度放出時の上部プレナム内拡散特性  
(ケース 4)

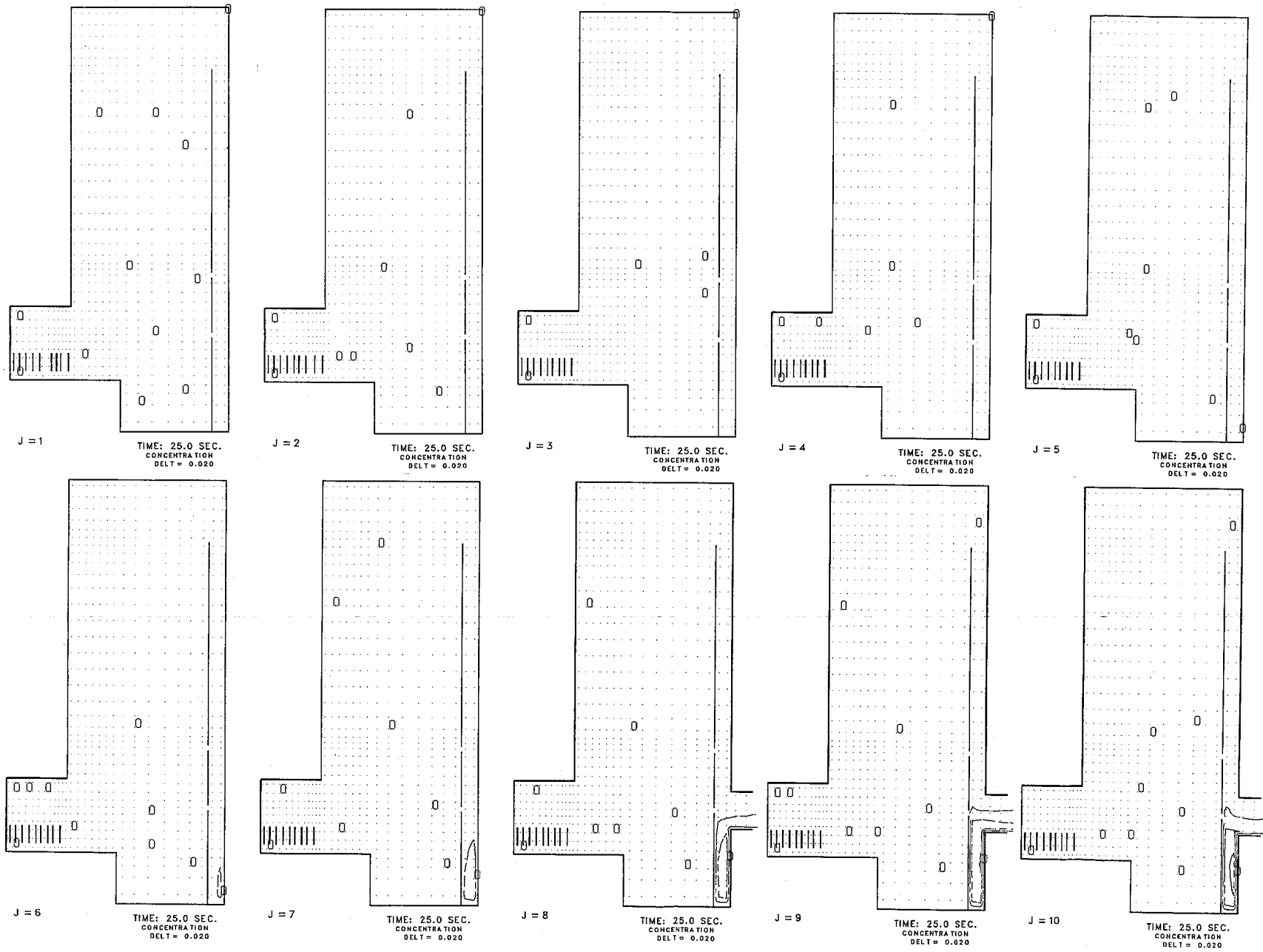
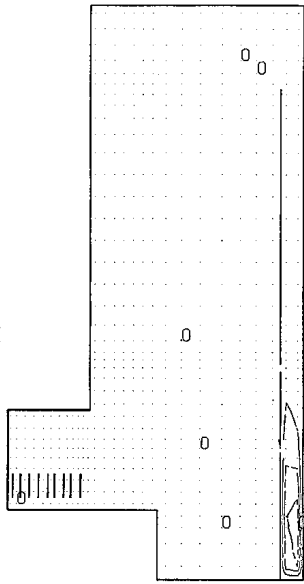
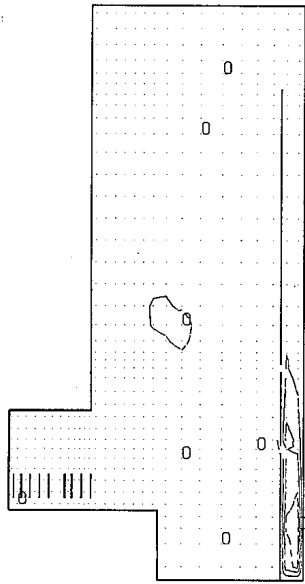


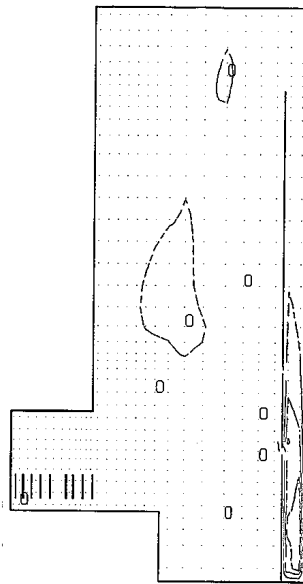
Fig.N. 1 DN Concentration Field Plots for r-z Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition (Release Mode : Step Profile)



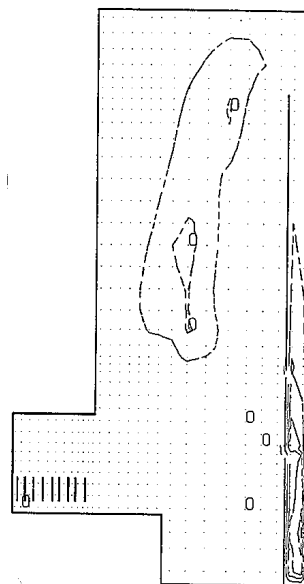
J = 11  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



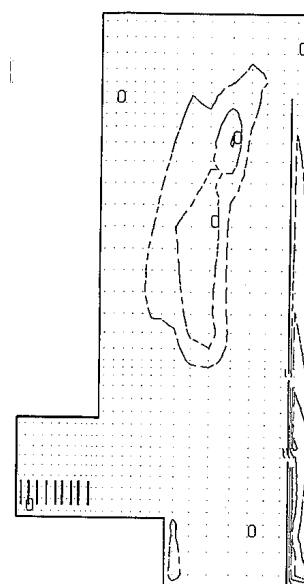
J = 12  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



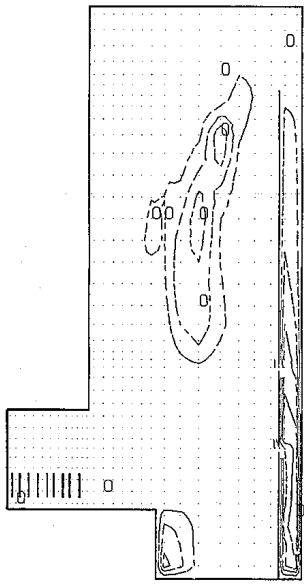
J = 13  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



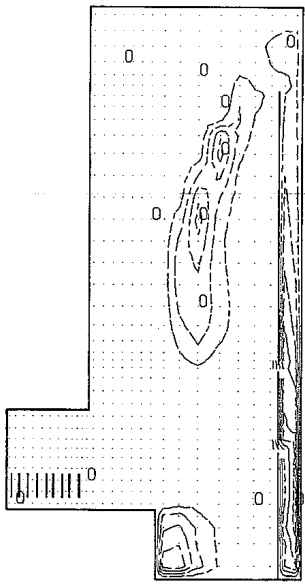
J = 14  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



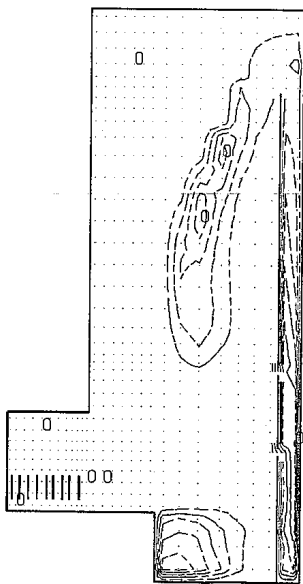
J = 15  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



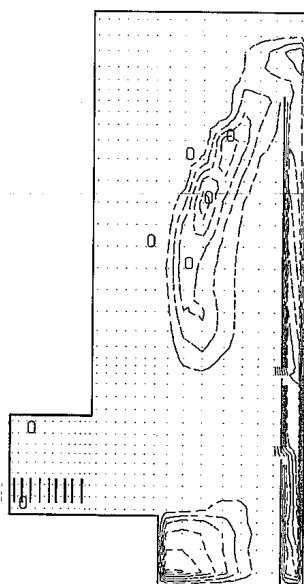
J = 16  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



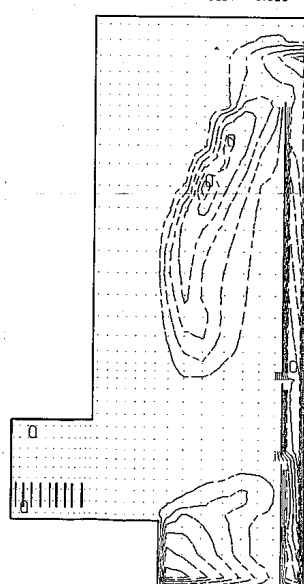
J = 17  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 18  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

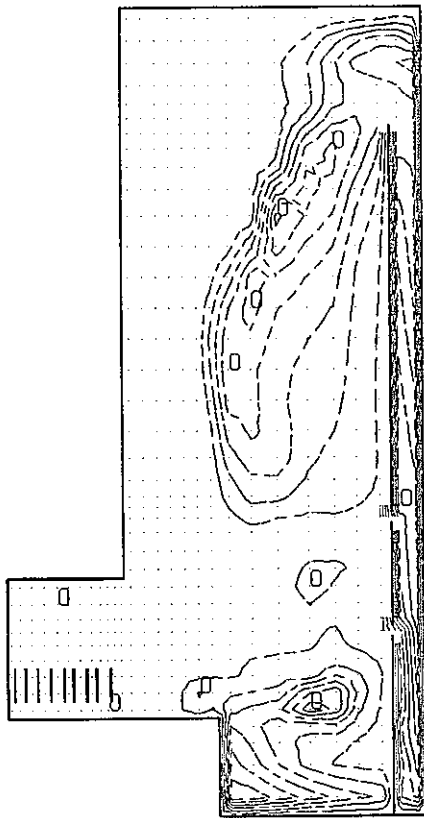


J = 19  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



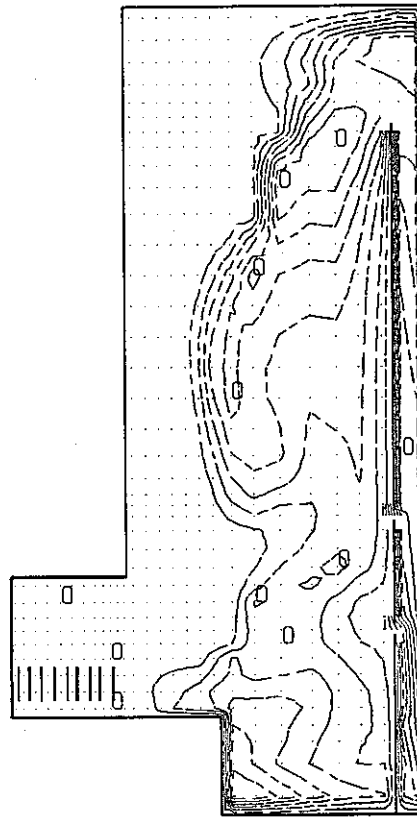
J = 20  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. N. 1 (Continued)



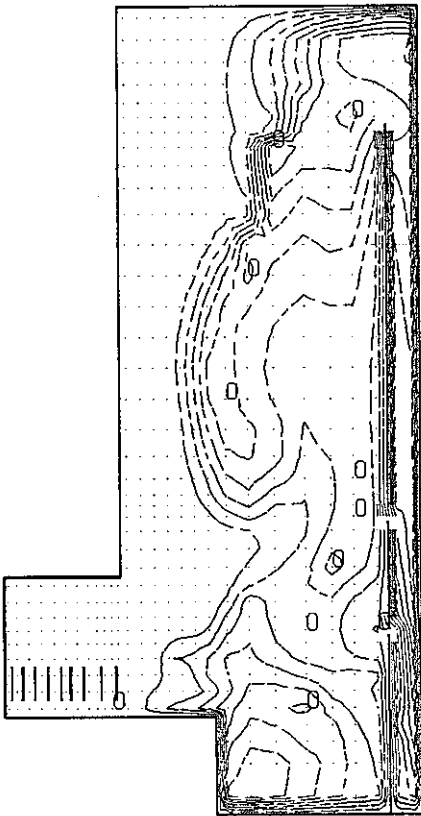
J = 21

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



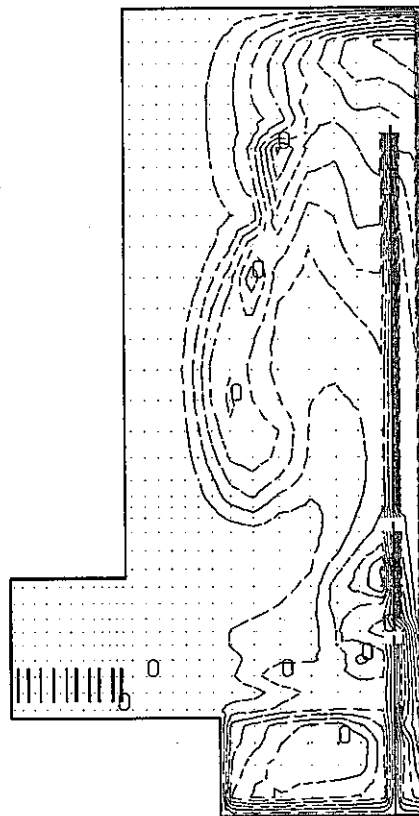
J = 22

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 23

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



J = 24

TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. N. 1 (Continued)



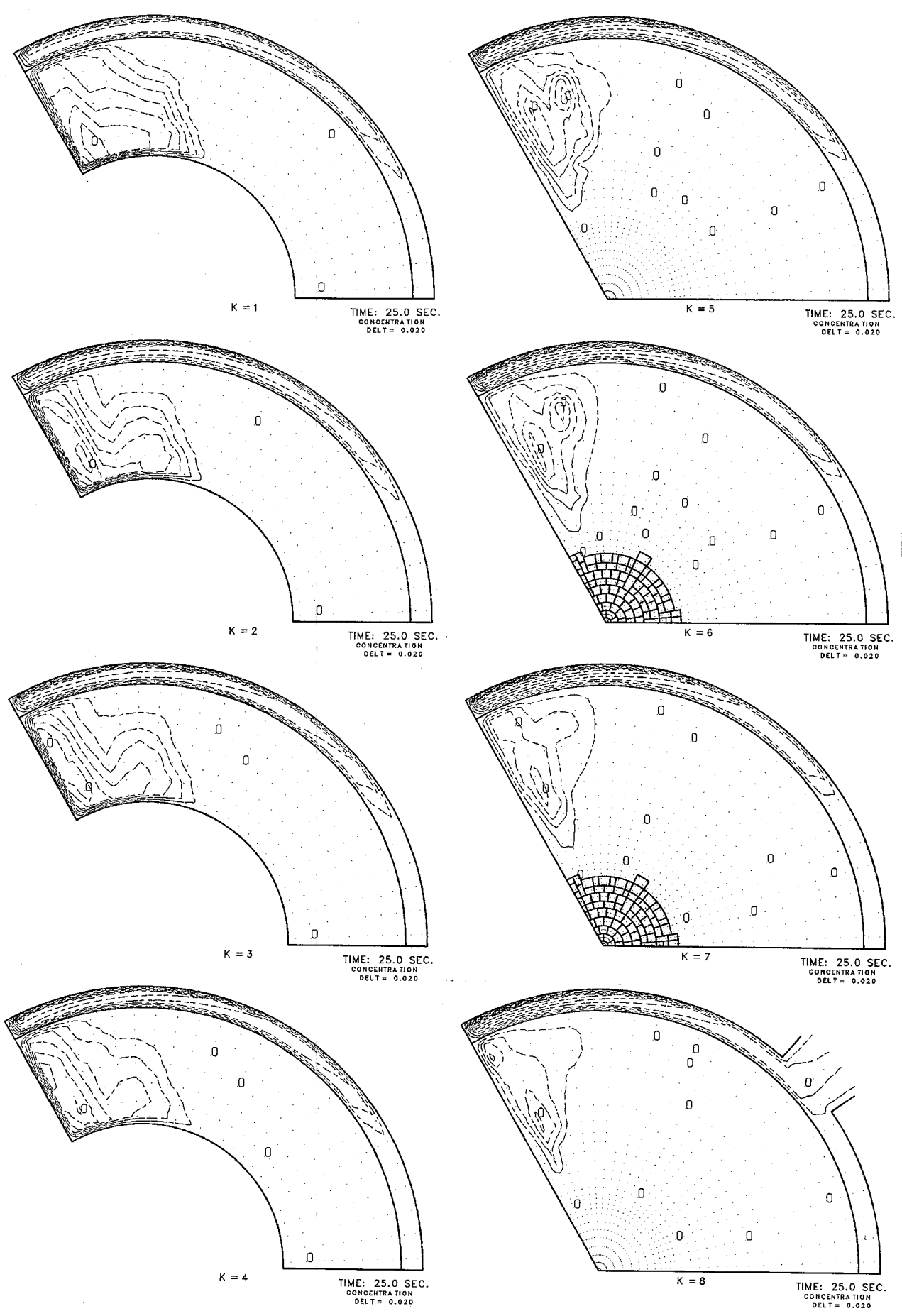


Fig. N. 2 DN Concentration Field Plots for  $r-\theta$  Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition (Release Mode : Step Profile)

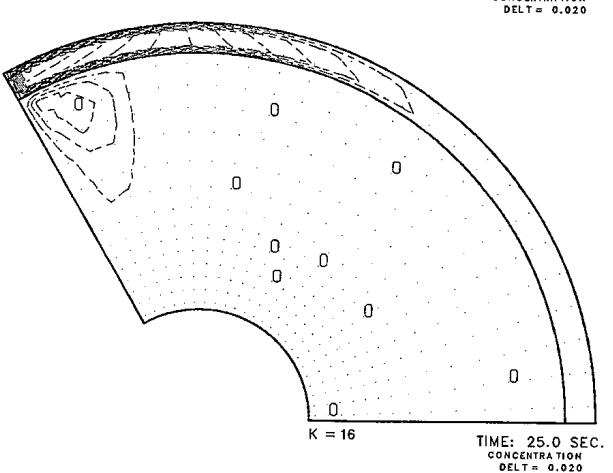
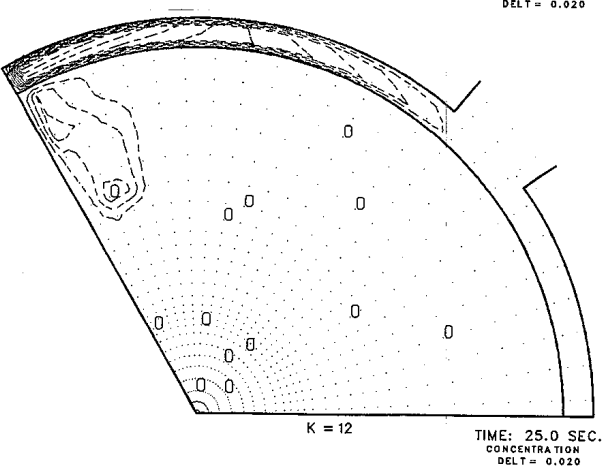
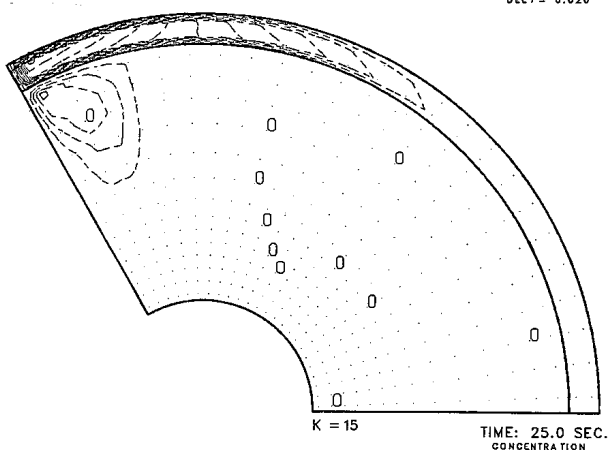
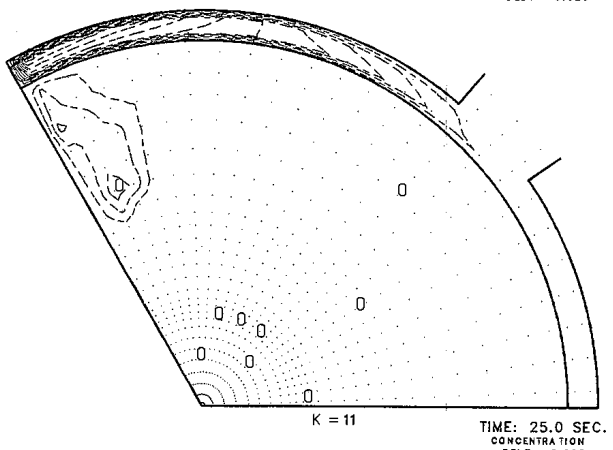
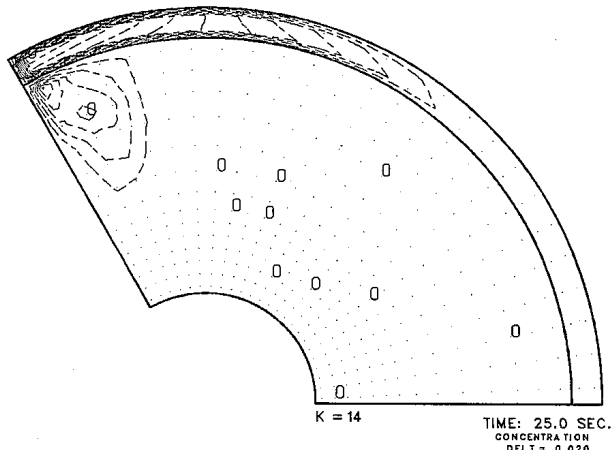
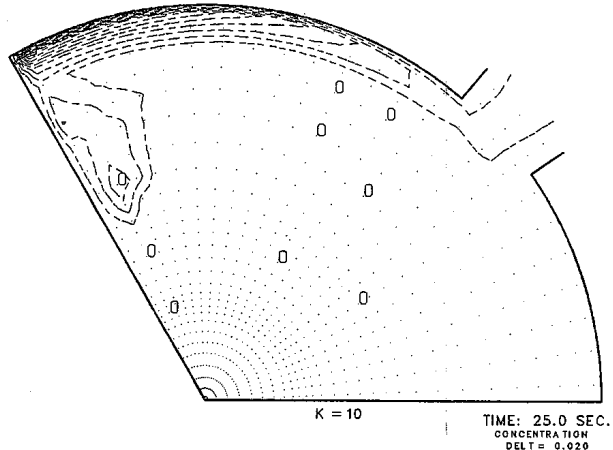
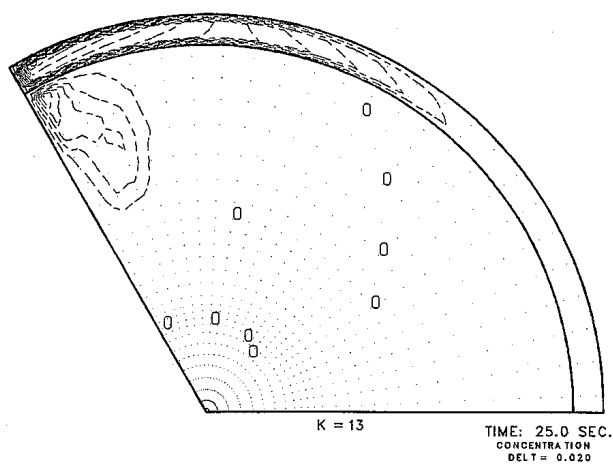
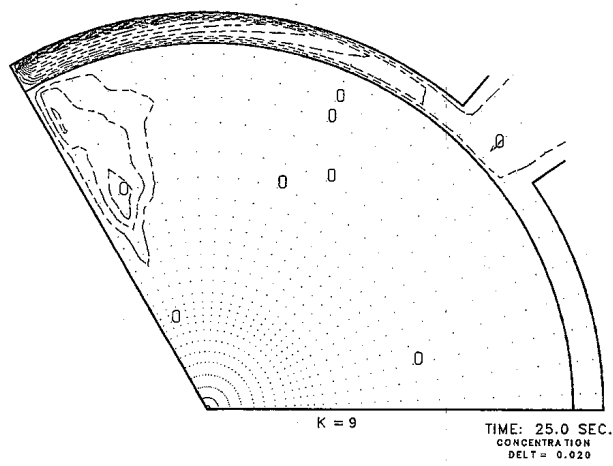


Fig. N. 2 (Continued)

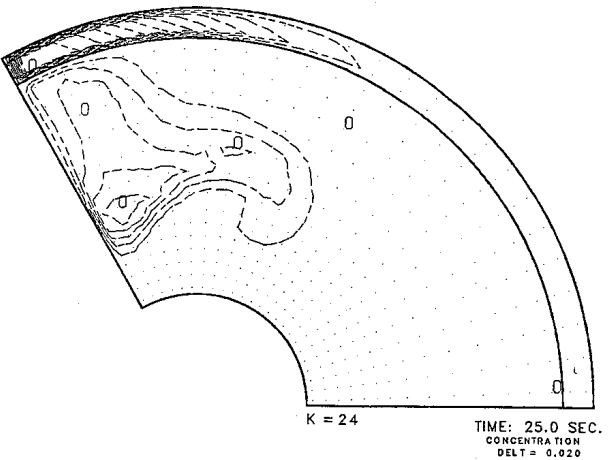
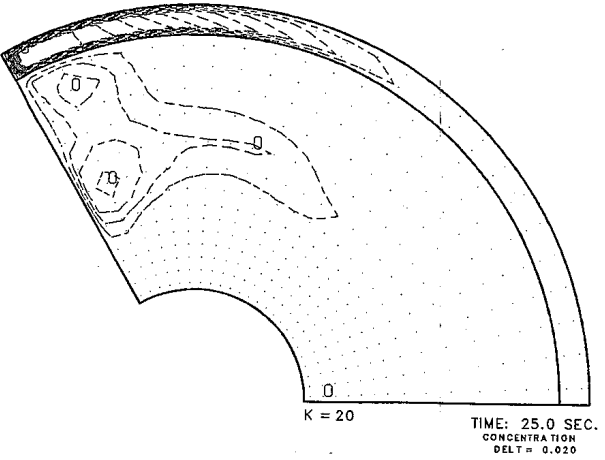
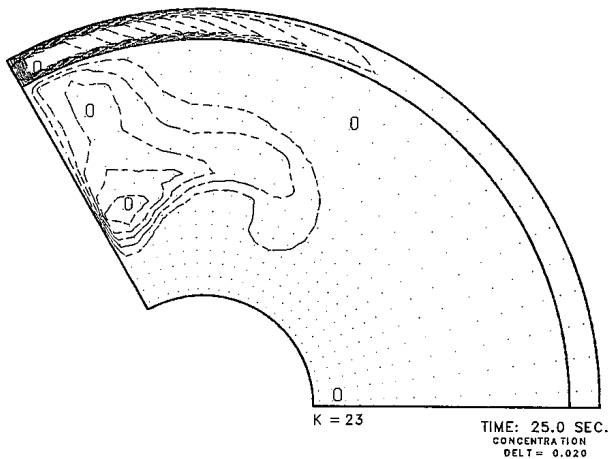
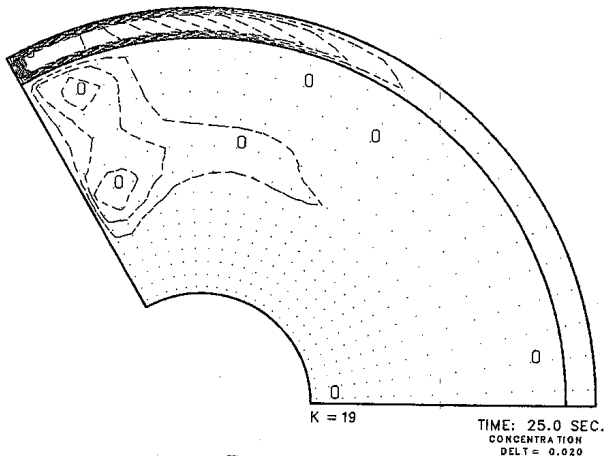
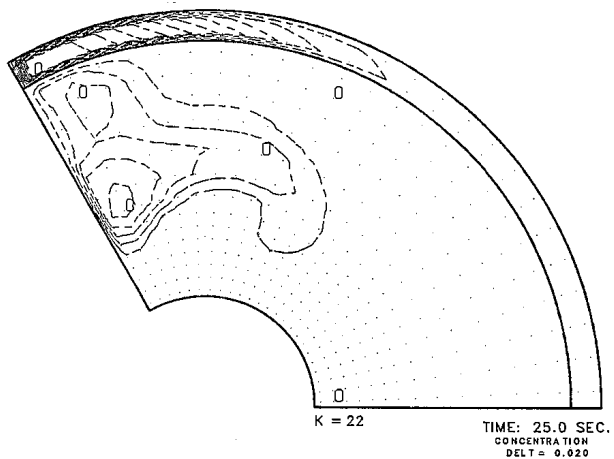
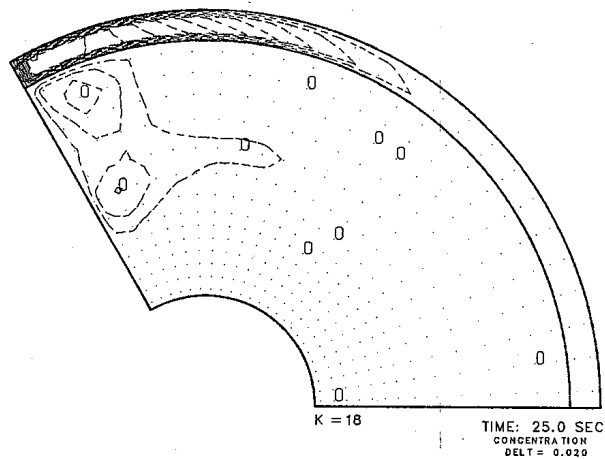
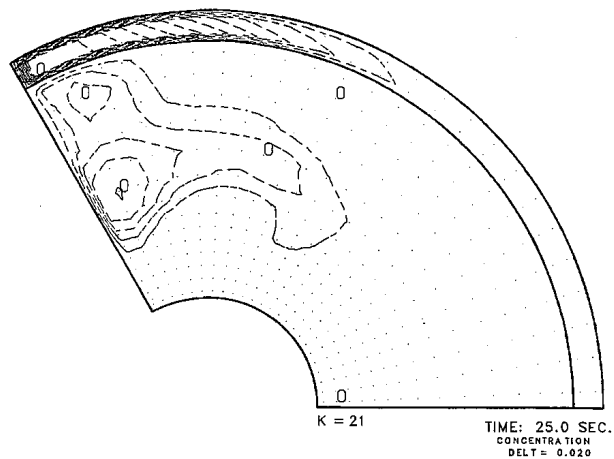
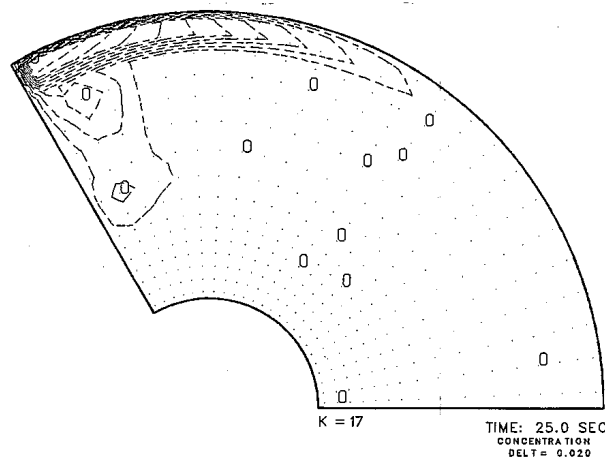


Fig. N. 2 (Continued)

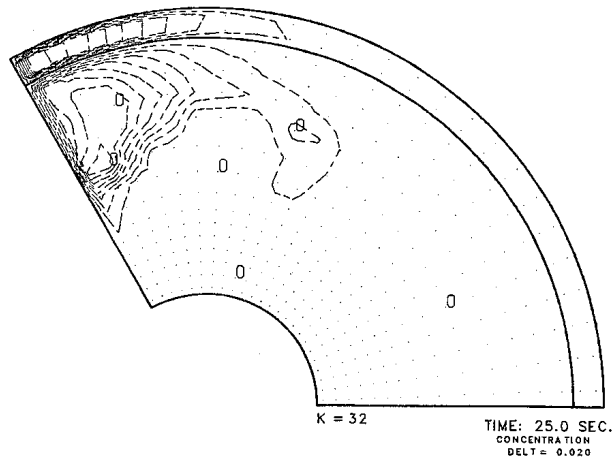
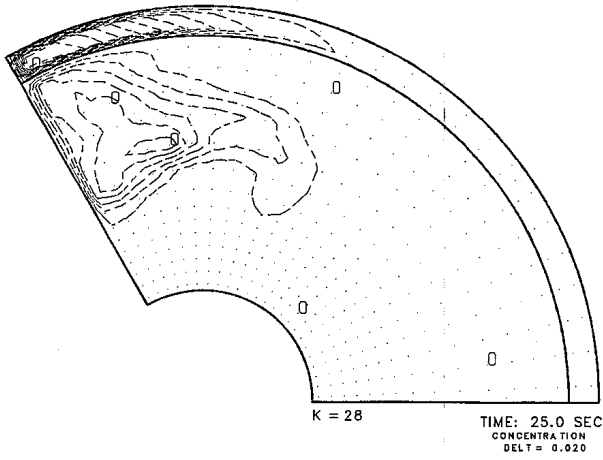
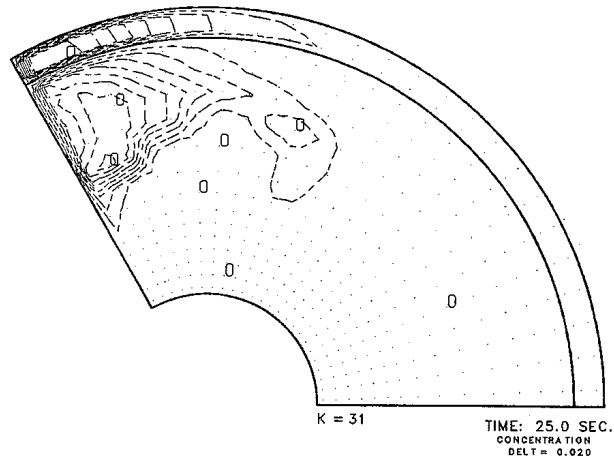
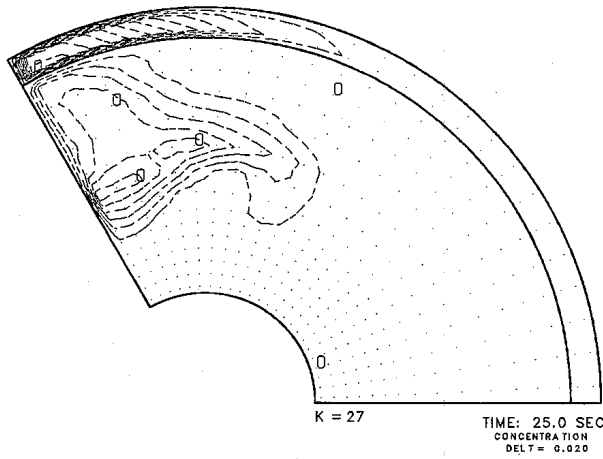
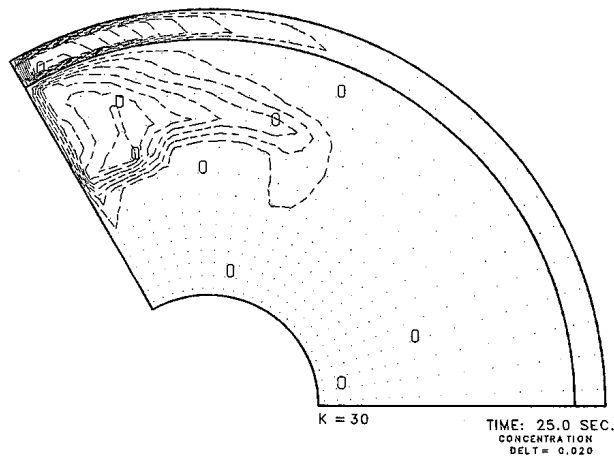
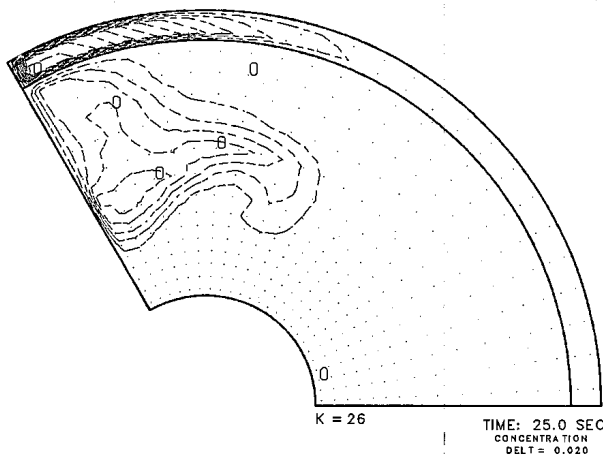
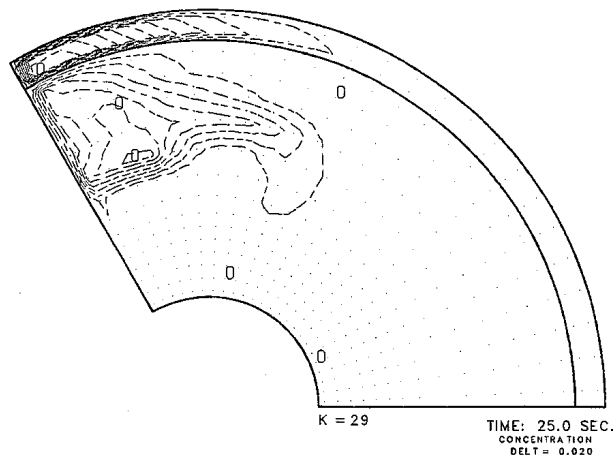
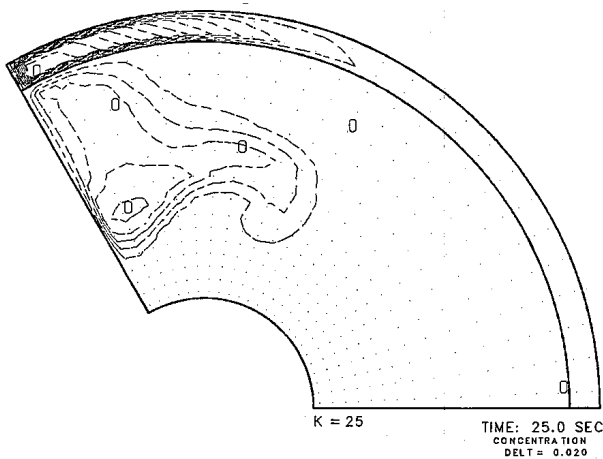


Fig. N. 2 (Continued)

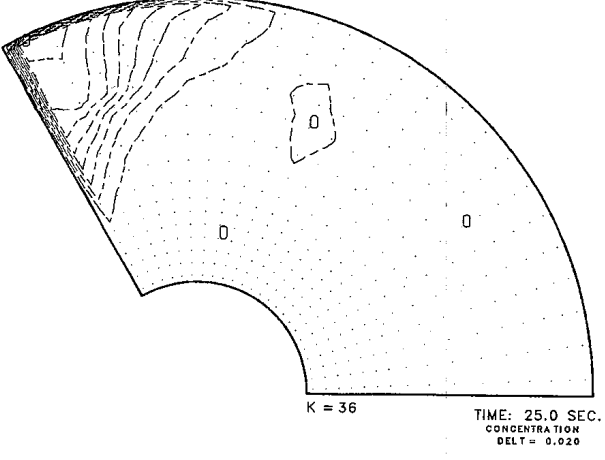
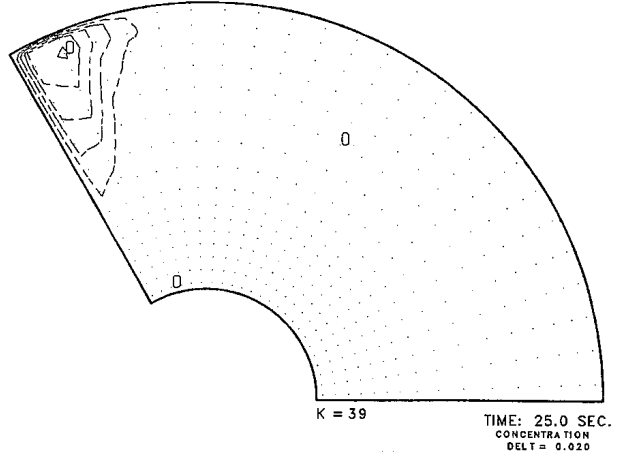
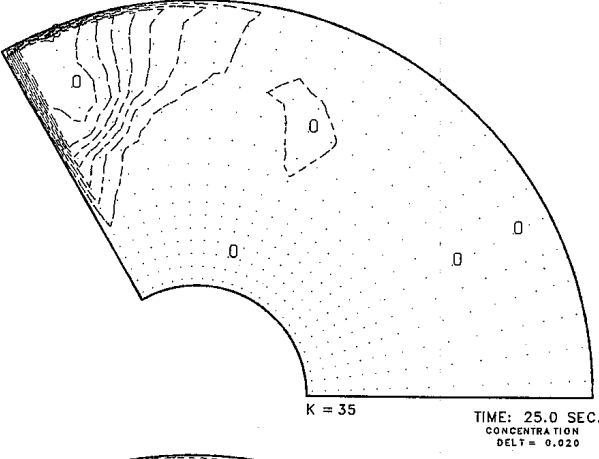
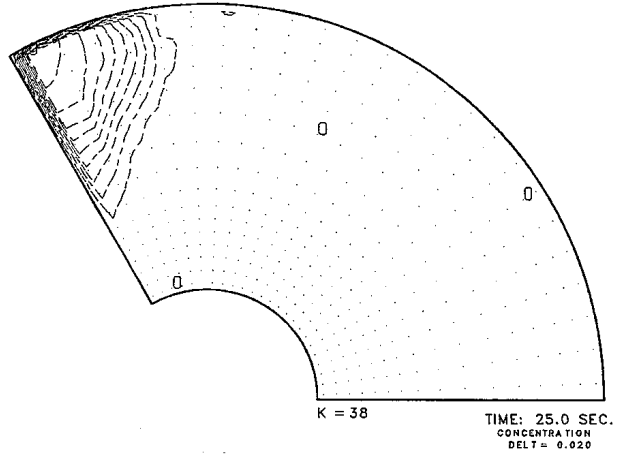
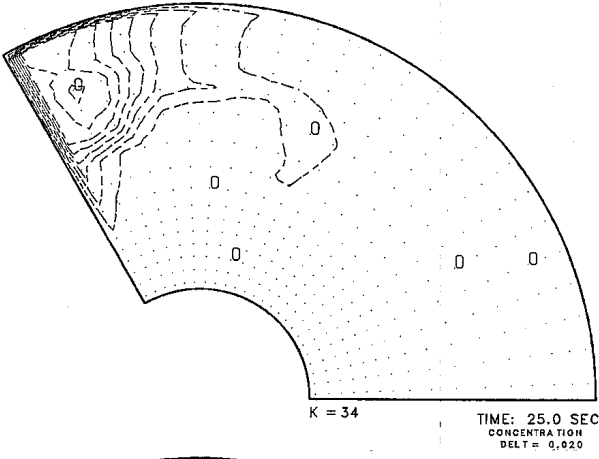
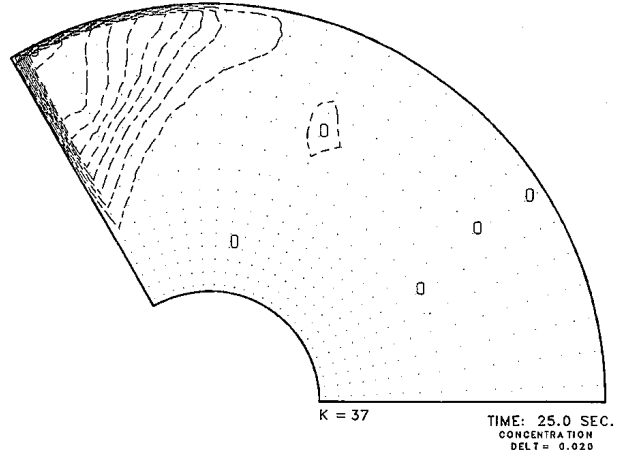
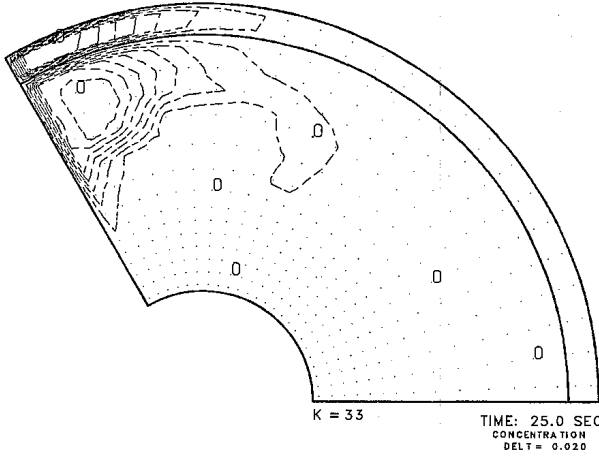


Fig. N. 2 (Continued)

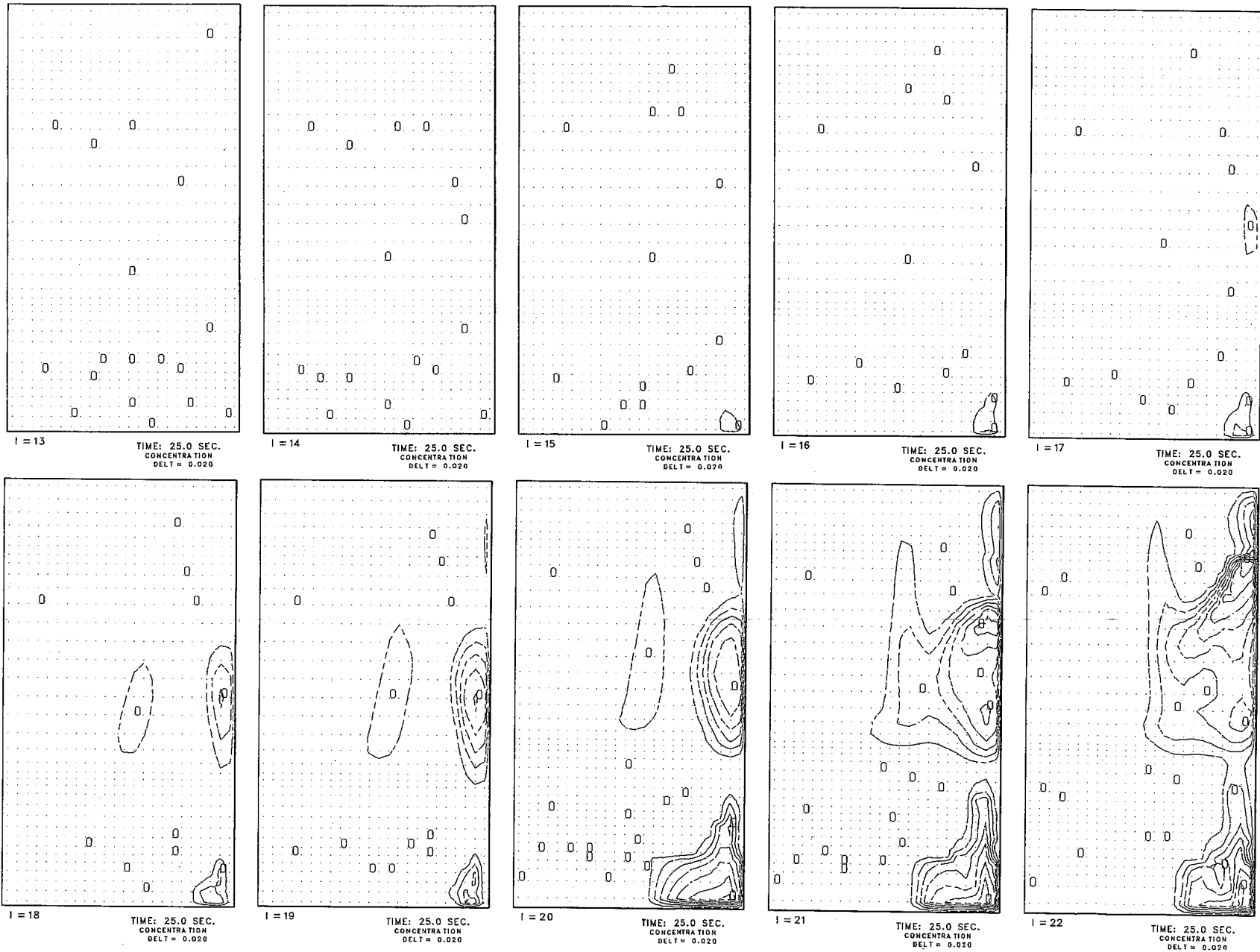
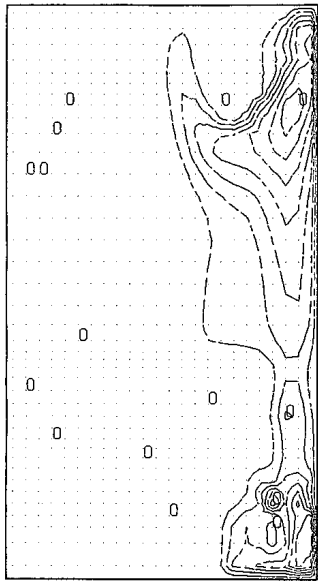
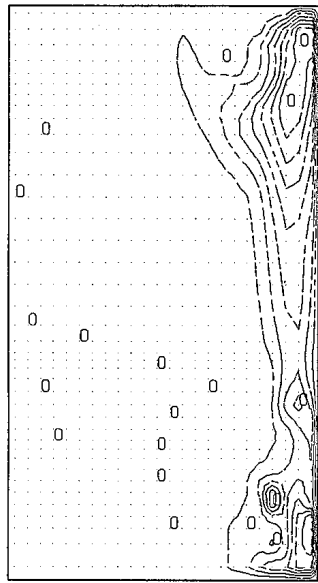


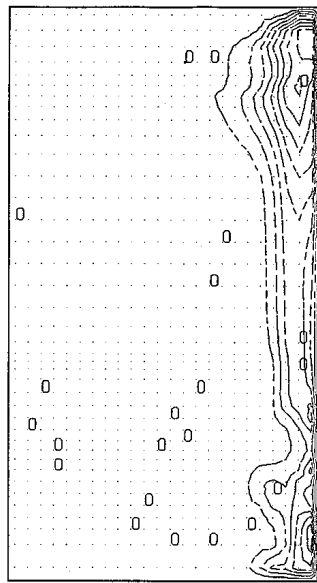
Fig. N. 3 DN Concentration Field Plots for  $\theta$ -z Planes in 25 seconds after Onset of Pin Failure under Case 4 Condition (Release Mode : Step Profile)



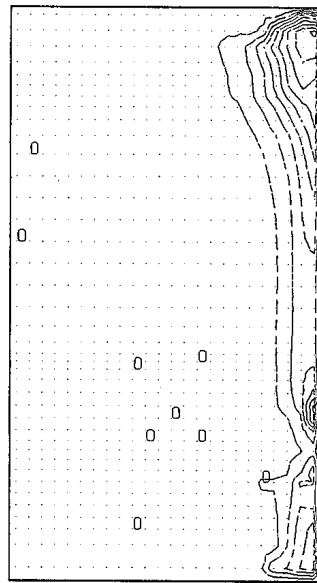
I = 23  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



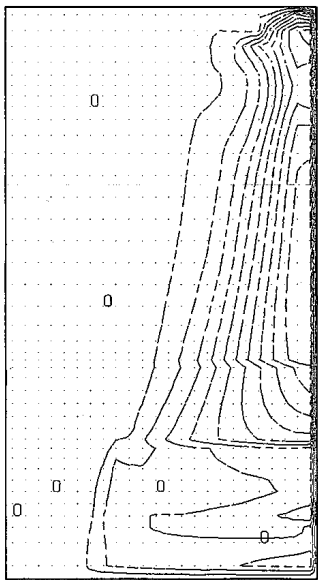
I = 24  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



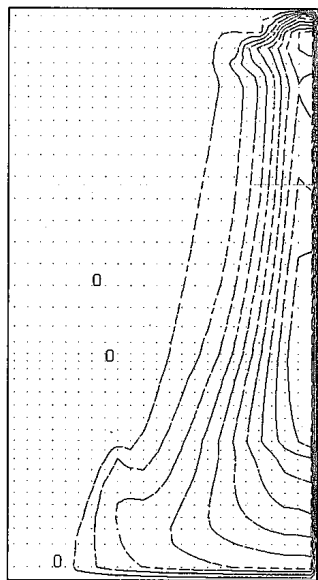
I = 25  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



I = 26  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



I = 27  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020



I = 28  
TIME: 25.0 SEC.  
CONCENTRATION  
DELTA = 0.020

Fig. N. 3 (Continued)