

JAERI-M
86-093

熱流体解析コードSTREAMを用いた
容器内3次元流動解析

1986年 7月

井川 博雅・功刀 資彰・神永 雅紀
数土 幸夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

熱流体解析コードSTREAMを用いた容器内3次元流動解析

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部

井川 博雅・功刀 資彰⁺・神永 雅紀・数土 幸夫

(1986年6月3日受理)

本報告書は、3次元熱流体解析コードSTREAMを用いて行ったJRR-3改造炉一次冷却系に設置される¹⁶N減衰タンク内の定常状態における流動特性解析についてまとめたものである。¹⁶N減衰タンクの設計では、炉心内で発生した¹⁶Nを効果的に減衰させるために、タンク内の流体の流れを可能な限り均一にして、かつ滞留時間を長くする必要がある。

解析結果から、JRR-3改造炉の遮蔽上の観点から充分満足できる滞留時間を確保できる容器の構造、流路断面積等を決定することができた。

Three Dimensional Analysis of Flow in Vessel Using
Thermal-hydraulic Analysis Code "STREAM"

Hiromasa IKAWA, Tomoaki KUNUGI⁺, Masanori KAMINAGA
and Yukio SUDO

Department of Research Reactor Operation
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 3, 1986)

By use of thermal-hydraulic analysis code "STREAM", numerical calculations were carried out on the steady-state fluid flow in the ¹⁶N decay tank which is to be installed in the primary cooling system of upgraded JRR-3.

This report presents the analytical results of numerical calculations for the ¹⁶N decay tank. For the design of ¹⁶N decay tank, it is necessary to realize as uniform a flow distribution in the tank as possible so as to prolong staying time of fluid in the tank, for effectively decaying in the tank ¹⁶N which was produced in the core.

As the results, the configuration, the flow area and so on of the tank could be obtained which can satisfy the staying time of fluid in the tank which is required from the viewpoint of shielding of the upgraded JRR-3.

Keywords: Thermal-Hydraulic, Analysis Code, Numerical Calculation,
3-D Flow Distribution, Design of Decay Tank, JRR-3 Reactor,
Primary Cooling System

+ Heat Transfer Laboratory

目 次

1. 序	1
2. ^{16}N 減衰タンクの概要および解析モデル	1
2.1 ^{16}N 減衰タンクの概要	1
2.2 解析モデル	2
2.2.1 主要な解析条件	2
2.2.2 多孔板の抵抗係数	2
3. ^{16}N 減衰タンク内の流動解析	7
3.1 2次元解析	7
3.1.1 解析条件	7
3.1.2 定常状態の確認	7
3.1.3 流速分布	8
3.2 3次元解析	18
3.2.1 解析条件	18
3.2.2 流速分布	18
3.2.3 滞留時間の評価	20
3.2.4 圧力損失	49
4. 結 言	58
謝 辞	58
参考文献	58
付録 汎用3次元熱流体解析コードSTREAMの概要	59

Contents

1. Introduction	1
2. ^{16}N Decay Tank and Model for Analysis	1
2.1 Description of ^{16}N Decay Tank	1
2.2 Model for Analysis	2
2.2.1 Major Condition for Analysis	2
2.2.2 Loss Coefficient Factor of Perforated Plate	2
3. Analysis of Flow Characteristics in ^{16}N Decay Tank	7
3.1 2-Dimensional Analysis	7
3.1.1 Condition for Analysis	7
3.1.2 Check of Steady States	7
3.1.3 Flow Distribution	8
3.2 3-Dimensional Analysis	18
3.2.1 Condition for Analysis	18
3.2.2 Flow Distribution	18
3.2.3 Staying Time in the Tank	20
3.2.4 Pressure Loss	49
4. Conclusion	58
Acknowledgments	58
References	58
Appendix Outline of STREAM Code	59

List of Tables

Table 2.2.1	Loss Coefficient Factor of Perforated Plate and Inner Pipe
Table 3.1.1	Time Step of 2-Dimensional Calculation Model
Table 3.1.2	Acceleration Coefficient and Maximum Error of 2-Dimensional Calculation Model
Table 3.1.3	Cross-section Coefficient \bar{f} and Loss-coefficient Factor k in Each Case
Table 3.2.1	Parameters in Each Case
Table 3.2.2	Staying Time in ^{16}N Decay Tank for CASE3A
Table 3.2.3	Staying Time in ^{16}N Decay Tank for CASE3C
Table 3.2.4	Staying Time in ^{16}N Decay Tank for CASE3E
Table 3.2.5	Staying Time in ^{16}N Decay Tank for CASE3E'

List of Figures

- Fig. 2.1.1 Flow Diagram of Primary Cooling System
- Fig. 2.1.2 Description of ^{16}N Decay Tank
- Fig. 2.2.1 $k_g, \bar{\epsilon}_0^{\text{Re}}$ and τ for Calculation of Thickned Grid Loss Coefficient
- Fig. 3.1.1 Geometry of ^{16}N Decay Tank on 2-Dimensional Calculation Model
- Fig. 3.1.2 Effect of Inner Pipe
- Fig. 3.1.3 Effect of Grid 2
- Fig. 3.1.4 Effect of Slit
- Fig. 3.1.5 Effect of Elapsed time (CASE D)
- Fig. 3.1.6 Effect of Elapsed time (CASE B)
- Fig. 3.1.7 Effect of Open V
- Fig. 3.2.1 Geometry of ^{16}N Decay Tank on 3-Dimensional Calculation Model
- Fig. 3.2.2 Regions of Flow Area after Inner pipe
- Fig. 3.2.3 Flow Pattern of CASE3A
- Fig. 3.2.4 Flow Pattern of CASE3B
- Fig. 3.2.5 Flow Pattern of CASE3C
- Fig. 3.2.6 Flow Pattern of CASE3B'
- Fig. 3.2.7 Flow Pattern of CASE3D
- Fig. 3.2.8 Flow Pattern of CASE3D'
- Fig. 3.2.9 Flow Pattern of CASE3E
- Fig. 3.2.10 Flow Distribution in ^{16}N Decay Tank in CASE3C
- Fig. 3.2.11 Flow Distribution in ^{16}N Decay Tank in CASE3E
- Fig. 3.2.12 Geometry of ^{16}N Decay Tank on 3-Dimensional Calculation Model of CASE3E'
- Fig. 3.2.13 Flow Distribution in ^{16}N Decay Tank in CASE3E'
- Fig. 3.2.14 Imaginary Flow Path in ^{16}N Decay Tank
- Fig. 3.2.15 Accumulation Frequency Curve of CASE3A
- Fig. 3.2.16 Probability Density Curve of CASE3A
- Fig. 3.2.17 Accumulation Frequency Curve of CASE3C
- Fig. 3.2.18 Probability Density Curve of CASE3C
- Fig. 3.2.19 Accumulation Frequency Curve of CASE3E
- Fig. 3.2.20 Probability Density Curve of CASE3E
- Fig. 3.2.21 Accumulation Frequency Curve of CASE3E'
- Fig. 3.2.22 Probability Density Curve of CASE3E'
- Fig. 3.2.23 Loss Coefficient k for Circular Cross-Section Diffuser
- Fig. 3.2.24 Model of Reverse Area
- Fig. 3.2.25 Loss Coefficient of Intake

1. 序

日本原子力研究所において建設が進められているJRR-3改造炉の1次冷却系には、遮蔽上の観点から冷却材をタンク内に一定時間滞留させて炉心内で発生する冷却材中の放射性核種である ^{16}N を減衰させるため ^{16}N 減衰タンクが設けられている。この、 ^{16}N 減衰タンクは既存の原子炉建家内の限られたスペースに設置されるため、その体積には制限があり約 30 m^3 である。このため、限られた体積(30 m^3)のタンクにおいて、十分な滞留時間が得られるかどうかを把握しておく必要がある。現在、このようなタンク内の流動解析が可能なコードとして汎用3次元熱流体解析コードSTREAM^{*})がある。このコードは、機器設計等に有用な熱流体解析を行うことができる。

そこで、このSTREAMコードを用いて ^{16}N 減衰タンク内の滞留時間を評価し設計の妥当性を確認するため、タンク内の流動解析を行った。すなわち、タンク内の流れが極力均一になり遮蔽上の滞留時間として十分であることを確認した。本報告書は、その流動解析結果について述べるものである。

解析は、 ^{16}N 減衰タンクの2次元モデルおよび3次元モデルを対象として行った。2次元モデルによる数値計算は主として主要パラメータの効果を調べるために行い、滞留時間については3次元モデルにおいて評価した。併せて、圧力損失も評価した。

その結果、遮蔽上の平均滞留時間として遮蔽設計上十分な43.0秒を得ることができた。

2. ^{16}N 減衰タンクの概要および解析モデル

2.1 ^{16}N 減衰タンクの概要

JRR-3改造炉は、定格出力20 MWtの軽水冷却プール型原子炉であり、炉心にて発生された熱の大部分はFig. 2.1.1に示す1次冷却系にて除去される。

^{16}N 減衰タンクは、1次冷却系の炉心下流側に設置され、1次冷却系を流れる冷却材を一定時間(約40秒)滞留させることにより、炉心にて発生した1次冷却材中の放射性物質 ^{16}N を減衰させるものである。JRR-3改造炉では、原子炉建家内の冷却系機器の設置場所の制約から ^{16}N 減衰タンクの外形寸法が制限され、Fig. 2.1.2に示すようになる。また、JRR-3改造炉の現設計では1次冷却系においてはポンプ吸込側の圧力が低く、配管が破損した場合に空気を吸込むような大気圧以下の部分が存在する。このような時、タンク内の流速の遅い部分にて空気

*) 汎用3次元熱流体解析コード"STREAM"は、当研究所が開発を進めている多目的高温ガス炉の大型機器実証試験ループであるHENDELの伝熱流動特性解析用に昭和60年6月に導入された。STREAMは株式会社クレイドルが開発した汎用3次元熱流体解析コードであり、非圧縮単相流を対象とし、乱流解析も可能である。

1. 序

日本原子力研究所において建設が進められているJRR-3改造炉の1次冷却系には、遮蔽上の観点から冷却材をタンク内に一定時間滞留させて炉心内で発生する冷却材中の放射性核種である ^{16}N を減衰させるため ^{16}N 減衰タンクが設けられている。この、 ^{16}N 減衰タンクは既存の原子炉建家内の限られたスペースに設置されるため、その体積には制限があり約 30 m^3 である。このため、限られた体積(30 m^3)のタンクにおいて、十分な滞留時間が得られるかどうかを把握しておく必要がある。現在、このようなタンク内の流動解析が可能なコードとして汎用3次元熱流体解析コードSTREAM^{*})がある。このコードは、機器設計等に有用な熱流体解析を行うことができる。

そこで、このSTREAMコードを用いて ^{16}N 減衰タンク内の滞留時間を評価し設計の妥当性を確認するため、タンク内の流動解析を行った。すなわち、タンク内の流れが極力均一になり遮蔽上の滞留時間として十分であることを確認した。本報告書は、その流動解析結果について述べるものである。

解析は、 ^{16}N 減衰タンクの2次元モデルおよび3次元モデルを対象として行った。2次元モデルによる数値計算は主として主要パラメータの効果を調べるために行い、滞留時間については3次元モデルにおいて評価した。併せて、圧力損失も評価した。

その結果、遮蔽上の平均滞留時間として遮蔽設計上十分な43.0秒を得ることができた。

2. ^{16}N 減衰タンクの概要および解析モデル

2.1 ^{16}N 減衰タンクの概要

JRR-3改造炉は、定格出力20 MWtの軽水冷却プール型原子炉であり、炉心にて発生された熱の大部分はFig. 2.1.1に示す1次冷却系にて除去される。

^{16}N 減衰タンクは、1次冷却系の炉心下流側に設置され、1次冷却系を流れる冷却材を一定時間(約40秒)滞留させることにより、炉心にて発生した1次冷却材中の放射性物質 ^{16}N を減衰させるものである。JRR-3改造炉では、原子炉建家内の冷却系機器の設置場所の制約から ^{16}N 減衰タンクの外形寸法が制限され、Fig. 2.1.2に示すようになる。また、JRR-3改造炉の現設計では1次冷却系においてはポンプ吸込側の圧力が低く、配管が破損した場合に空気を吸込むような大気圧以下の部分が存在する。このような時、タンク内の流速の遅い部分にて空気

*) 汎用3次元熱流体解析コード“STREAM”は、当研究所が開発を進めている多目的高温ガス炉の大型機器実証試験ループであるHENDELの伝熱流動特性解析用に昭和60年6月に導入された。STREAMは(株)ソフトウェア・クレイドルが開発した汎用3次元熱流体解析コードであり、非圧縮単相流を対象とし、乱流解析も可能である。

が滞留するのを防ぐため、Fig. 2.1.2 に示すようにタンク内に仕切板を設け、冷却材が下から上に流れるような構造となっている。

また滞留時間を確保するために、タンク内に入口ディフューザ、インナー・パイプ、多孔板、仕切板および出口ノズル等を設け、タンク内の流速分布の均一化を図っている。

2.2 解析モデル

ここでは、STREAMコードにより、 ^{16}N 減衰タンク内の流動解析を行うために設定した仮定、計算条件、計算モデル、主要入力データについて述べる。

2.2.1 主要な解析条件

本解析においては、2次元、3次元のモデルを用いて流速、圧力のみについて計算を行なった。2次元モデルについては、主要なパラメータの影響を調べると共にコードの特性および ^{16}N 減衰タンク内の基本的な流動特性を知るために解析を行ない、3次元モデルにて詳細な流動解析を行った。ここでは、両モデルに共通する主要な解析条件を述べることで、計算体系および各モデルの詳細な解析条件は後述する。

(1) 計算手法

- 乱流解析 ($k - \epsilon$ モデル)
- 解法……… S. O. R法 (u, v, w の流速各成分と圧力補正のポアソン方程式)

(2) 境界条件

- タンク入口条件……… 流速規定
- タンク出口条件……… 圧力規定
- 壁面境界条件……… すべり壁*

2.2.2 多孔板の抵抗係数

多孔板は、STREAMコードに組み込まれた格子抵抗モデルに開孔率と抵抗係数を与えることで模擬できる。多孔板の抵抗係数 k は、多孔板孔内の流速の関数として以下のように与えられる¹⁾。

$$a) \text{Re} = \frac{v_o \cdot d_h}{\nu} \geq 10^5 \text{ のとき}$$

$$k = k_o + \lambda \frac{\ell}{d_h}$$

$$b) \text{Re} < 10^5 \text{ のとき}$$

$$k = (k_\phi + \epsilon_o^{-\text{Re}} k_o + \lambda \frac{\ell}{d_h})$$

* 水の場合、粘性が小さくこのような大口径のタンク内の乱流解析では壁面上ですべりを許しても、壁面上で速度=0とおいた場合と大きな差異はない。又、全体のスケールに対し、壁近傍を細く切って取り扱うことが困難なこと、及び乱れの主成分が主流の反転によるものであることを考慮したものである。

但し

- k : 孔における流速 v_0 を基準とした多孔板の抵抗係数
 \bar{f} : 多孔板の開孔率
 v_0 : 孔における流速 (m/s)
 d_h : 孔径 = 0.03 (m)
 ℓ : 板厚 = 0.012 (m)
 λ : 孔の壁面摩擦係数
 k_0 : $(0.5 + \tau\sqrt{1-\bar{f}})(1-\bar{f}) + (1-\bar{f})^2$
 τ : Fig. 2.2.1 参照
 k_ϕ : "
 ϵ_0^{-Re} : "
 ν : 流体の動粘性係数 (m²/s)
 Re : 孔におけるレイノルズ数

上記のようにして得られた開孔率と抵抗係数の関係を Table 2.2.1 に示す。抵抗係数は、多孔板の孔内流速と開孔率によって決まる。このため、Table 2.2.1 に示されるようにインナー・パイプと多孔板では同じ開孔率に対しても抵抗係数が異ってくる。

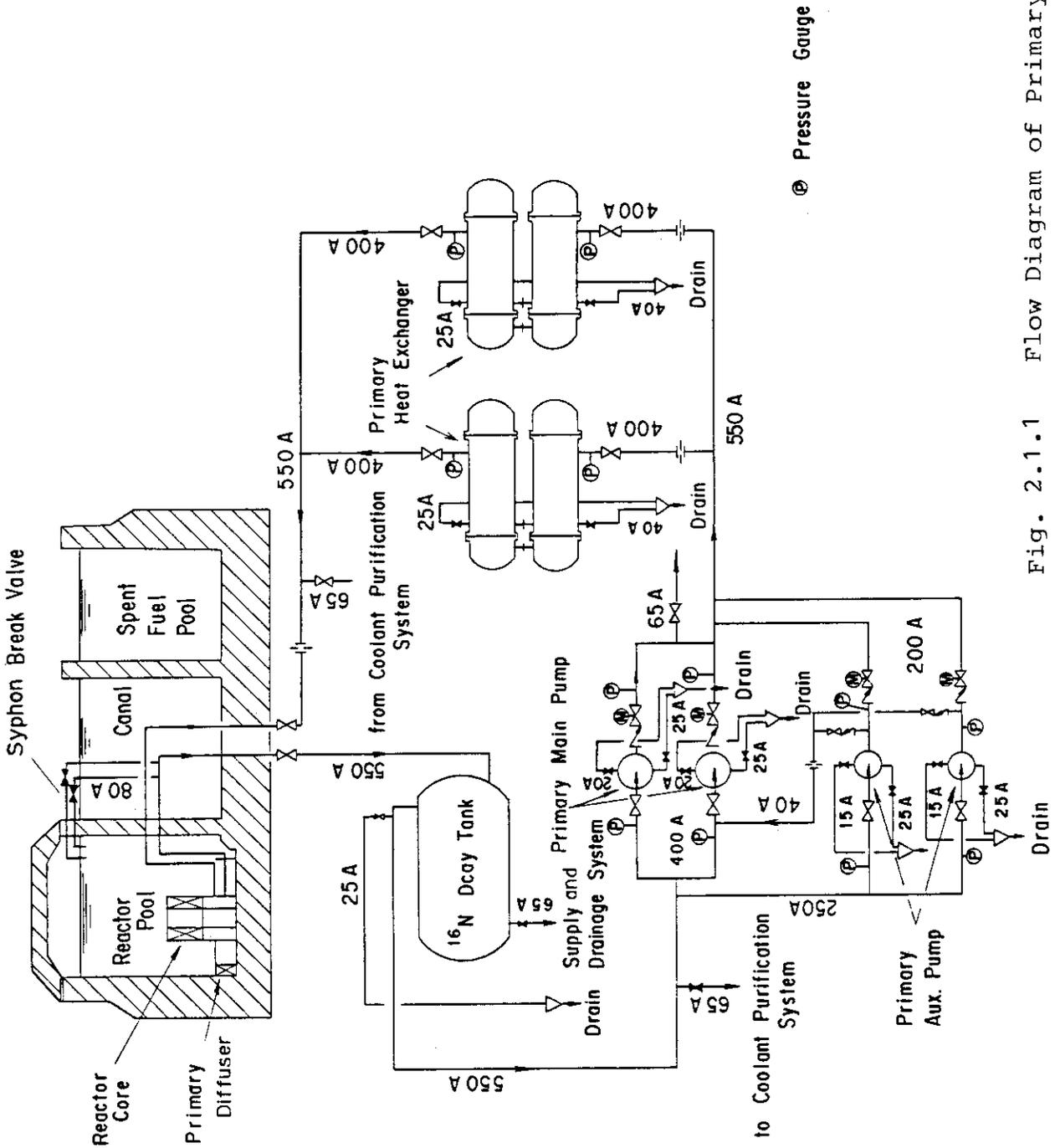


Fig. 2.1.1 Flow Diagram of Primary Cooling System

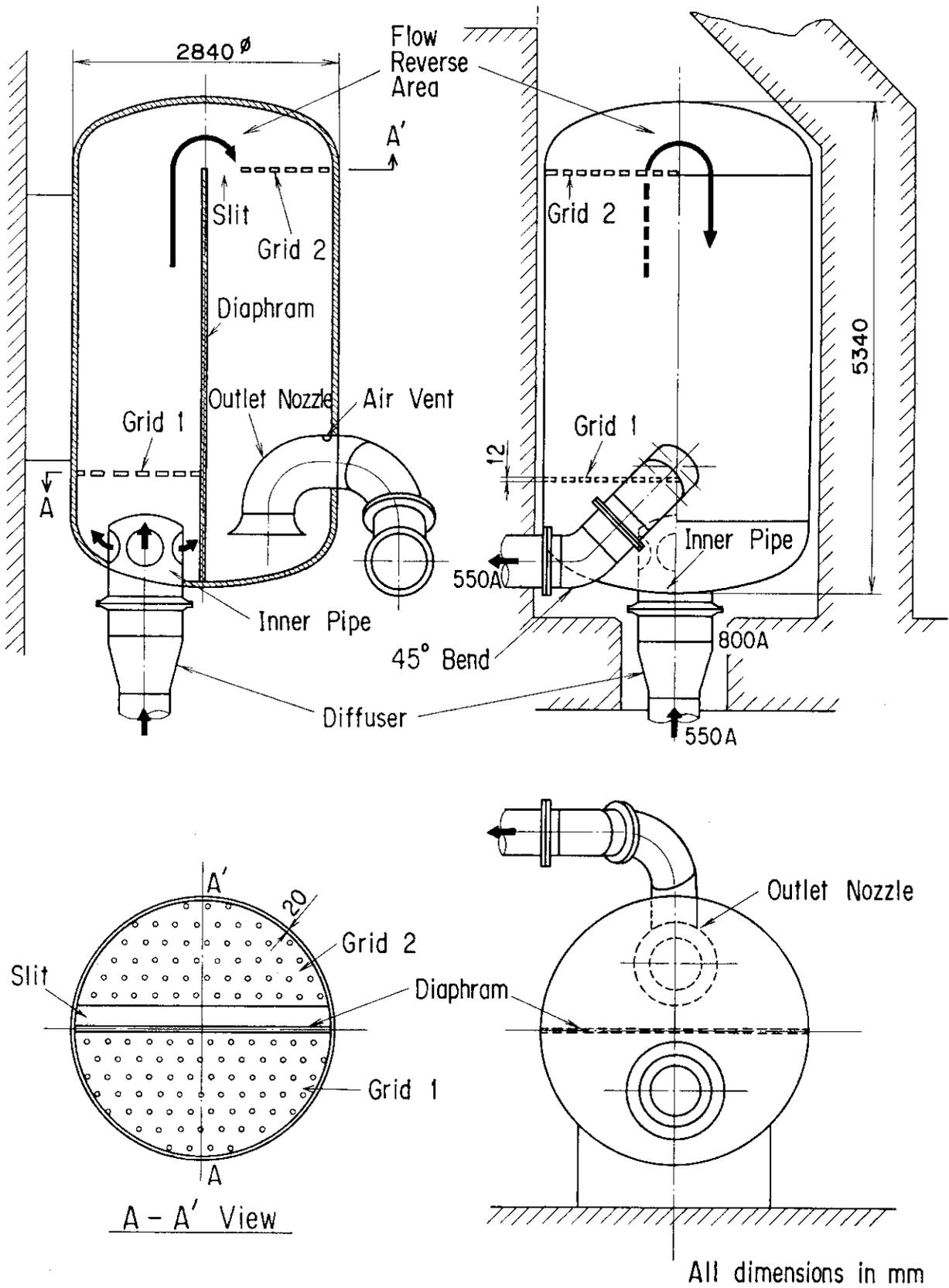
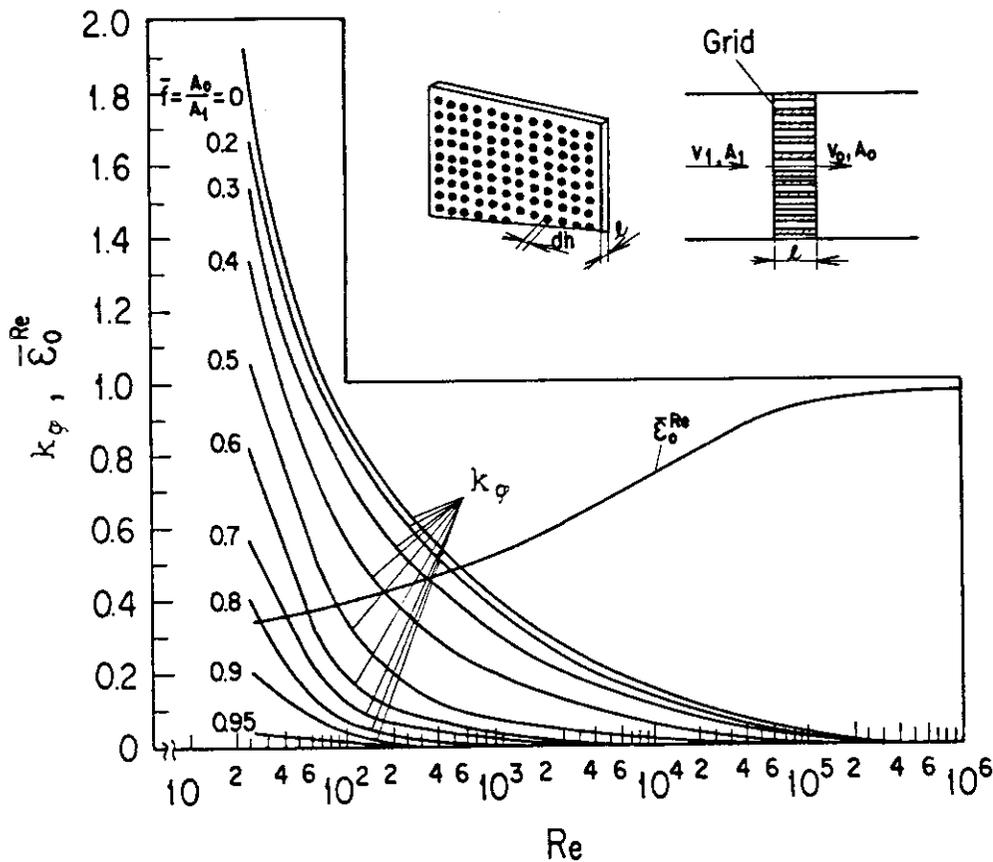


Fig. 2.1.2 Description of ^{16}N Decay Tank

Table 2.2.1 Loss Coefficient Factor of Perforated Plate and Inner Pipe

	Cross-section Coefficient \bar{f}	Loss Coefficient Factor K_c
Grid	0.20	1.80
	0.30	1.40
	0.67	0.40
Inner Pipe	0.18	1.89
	0.20	1.82
	0.22	1.75
	0.25	1.64
	0.30	1.50
	0.32	1.40
	0.35	1.30
	0.38	1.20
	0.40	1.10
	0.50	1.00



l/d_h	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.4	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
τ	1.25	1.22	1.10	0.84	0.42	0.24	0.10	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 2.2.1 $k_g, \bar{\epsilon}_0^{Re}$ and τ for Calculation of Thickened Grid Loss Coefficient

3. ^{16}N 減衰タンク内の流動解析

3.1 2次元解析

3.1.1 解析条件

2次元解析は、2.2に述べたようにSTREAMコードの特性および ^{16}N 減衰タンク内の基本的な流動特性を知ることが目的として、Fig. 3.1.1に示すように、減衰タンクの中央断面をモデル化して行った。鏡部については流体占有率を考慮している。なお、流量に関しては、タンク内直流路部の平均流速 $\bar{v} = 0.216 \text{ m/s}^{(*)}$ になるように入口流速を規格化して与えた。

本解析では、タンク内の流速分布を均一にするために設置されるグリッド、インナー・パイプ等の多孔部の影響を調査すると共に、計算開始から定常解を得るまでに必要な経過時間 (elapsed time) および流体の体積占有率の影響を調べた。また、計算を進めるためには、加速係数、収束誤差、計算時間間隔をどの程度にとれば良いかについても検討した。Table 3.1.1、Table 3.1.2に2次元解析に用いた加速係数、最大収束誤差および計算時間間隔を示す。

3.1.2 定常状態の確認

STREAMコードは、非定常計算コードであり、定常解を求める場合においても、準定常状態の解を求めることになる。このため、求められた解が、準定常状態に達していることを確認する必要がある。

そこで、本解析では、計算開始からどの程度の時間が経過すれば、ほぼ定常状態になっているかを調査した。Fig. 3.1.5に計算開始から10秒、60秒、120秒経過した時点におけるタンク内の流速分布を示す。Fig. 3.1.5より、計算開始から10秒後と60秒後の時点においては壁近傍の流速に違いが見られるが、60秒後と120秒後では、流速分布はほとんど同じであることがわかる。両者の流速の差は約1%程度であり、ほぼ定常であるといつて良い。

しかし、渦が生じるような場合においては、渦の大きさが時間の経過と共に変動し、流れが周期的になるような傾向が見られた。参考のために、Fig. 3.1.6に渦が生じているケースの流速分布の時間変化を示す。

従って、本解析においては計算開始から60秒後の計算結果(準定常解)について、主流部における渦の発生をできるだけ抑制する方法を検討した。

$$(*) \quad \bar{v} = \frac{Q}{A} = \frac{2400/3600}{\left(\frac{\pi}{4} \cdot 2.8^2\right)/2} \cdot \left(\frac{\text{m}^2/\text{s}}{\text{m}^2}\right) \doteq 0.216 \text{ (m/s)}$$

Q: タンク内流量

A: タンク内直流路部断面積

3.1.3 流速分布

(1) 多孔板の効果

^{16}N 減衰タンクでは、タンク内における滞留時間を確保するためにFig. 3.1.1に示すようにタンク内に多孔板にて構成された多孔板およびインナー・パイプを設けて流速分布の均一化を図っている。

そこで、多孔板およびインナー・パイプの効果を調べるために、Table 3.1.3に示す各ケースについてパラメータ解析を行った。

1) インナー・パイプの効果

CASE Aにおいては、多孔板1のみを設けた解析を行った。これは、多孔板1なしのケースでは入口直後に渦が生じることが予想されたためである。しかし、多孔板1を設けたにもかかわらずFig. 3.1.2に示すように多孔板1の下流域と流れが反転した後に渦が発生した。

そこで、CASE Bのようにインナー・パイプを設けた解析を行った。その結果、多孔板1の下流域では流れは一様となり、渦の発生が抑制されることがわかった。しかし、流れの反転後の渦は依然として残った。

2) 多孔板2の効果

CASE A, Bで、流れの反転後に渦が生じることがわかった。そこで、この部分に生ずる渦をなくすためにCASE Cに示すように流れが反転した直後に多孔板2を設けた。しかし、Fig. 3.1.3のように、多孔板2を設けても渦は小さく偏平にはなるものにならないことがわかった。

3) スリットの効果

CASE Cにおいて反転後に渦が生ずる原因としては、反転部において外回りに比べて内回りの流れの圧損が大きく、反転直後の内回りの部分の圧力が低下するからであると考えられる。この渦の発生を防止するための方法は幾通りか考えられるが、ここでは、タンクの製作上の簡易さを考慮してFig. 3.1.4 CASE Dに示すように多孔板2の下部に約20 cm 程度のスリットを設けることにした。この結果、Fig. 3.1.4のように、反転後においても流れはほぼ均一となり、渦は見られなくなった。

以上、2次元解析の結果、CASE Dのようにインナー・パイプ及び多孔板を設けることにより、流れはほぼ均一となり大きな渦は生じなくなることがわかった。これは、実際には小さな渦は生じているものの流れ全体に対する影響は小さく、従って本計算で用いた大きさの計算メッシュでは渦が見られなくなったものと考えられる。

(2) 流体占有率の影響について

STREAMコードでは、流体占有率を与えることにより複雑な形状の境界に対してもある程度対応できるように考慮されている。

そこで本解析においても、Fig. 3.1.1に示すようにタンクの鏡部に流体占有率を与えて計算してきたが、流体占有率を与えないモデルについても計算を行い、その影響について調べた。Fig. 3.1.7に示すCASE D'は、CASE Dと同一条件で流体占有率を与えないケースであり、これをCASE Dと比較した。Fig. 3.1.4, Fig. 3.1.7から本解析においては両者の間には、流体占有率を与えた計算領域に若干流れ方向、流速の違いが見られたものの主流部の流れに対し

では殆んど相違がないことがわかった。

本解析のように境界条件がすべり壁でしかも形状が比較的簡単な場合においては、流体占有率の影響はきわめて小さいことがわかった。

しかし、一般に複雑な形状の境界を持つ解析領域を取り扱う場合に対しては流体占有率が有用となることも多いと考えられる。

Table 3.1.1 Time Step of 2-Dimensional Calculation Model

Calculation Step	Δt (s)
1 ~ 1000	0.001
1001 ~ 4900	0.01

Table 3.1.2 Acceleration Coefficient and Maximum Error of 2-Dimensional Calculation Model

	Acceleration Coefficient	Maximum Error
u-Equation	1.8	1.0×10^{-6}
v-Equation	1.8	1.0×10^{-6}
p-Equation	1.8	1.0×10^{-6}
k-Equation	1.8	1.0×10^{-3}
ϵ -Equation	1.8	1.0×10^{-3}

Table 3.1.3 Cross-section Coefficient \bar{f} and Loss-coefficient Factor k in Each Case

	Grid 1	Grid 2	Inner Pipe	Remark
CASE A	0.67/0.4*			
CASE B	0.67/0.4		0.35/1.3	
CASE C	0.67/0.4	0.20/1.8	0.35/1.3	
CASE D	0.67/0.4	0.20/1.8	0.35/1.3	Grid 2 with Slit
CASE D'	0.67/0.4	0.20/1.8	0.35/1.3	Grid 2 with Slit Non-Open V Model

* \bar{f} / k

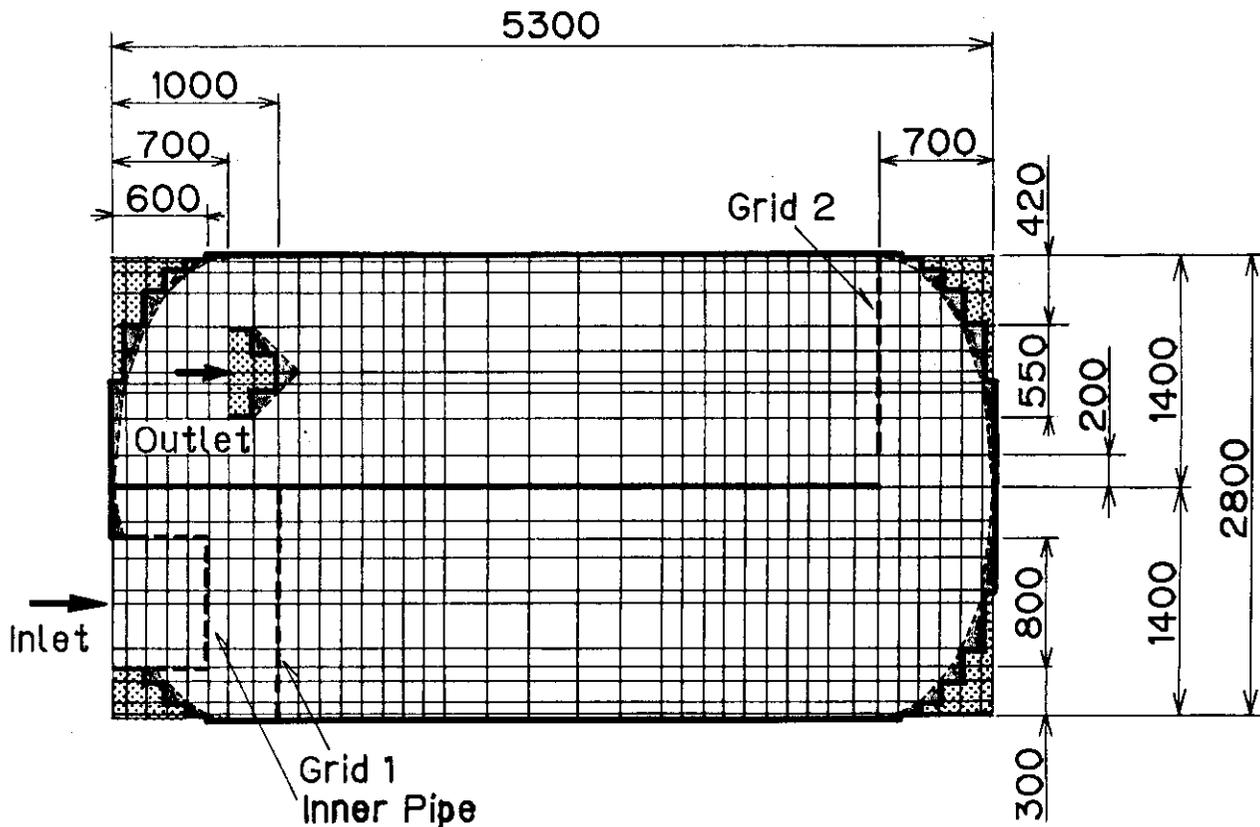


Fig. 3.1.1 Geometry of ^{16}N Decay Tank on 2-Dimensional Calculation Model

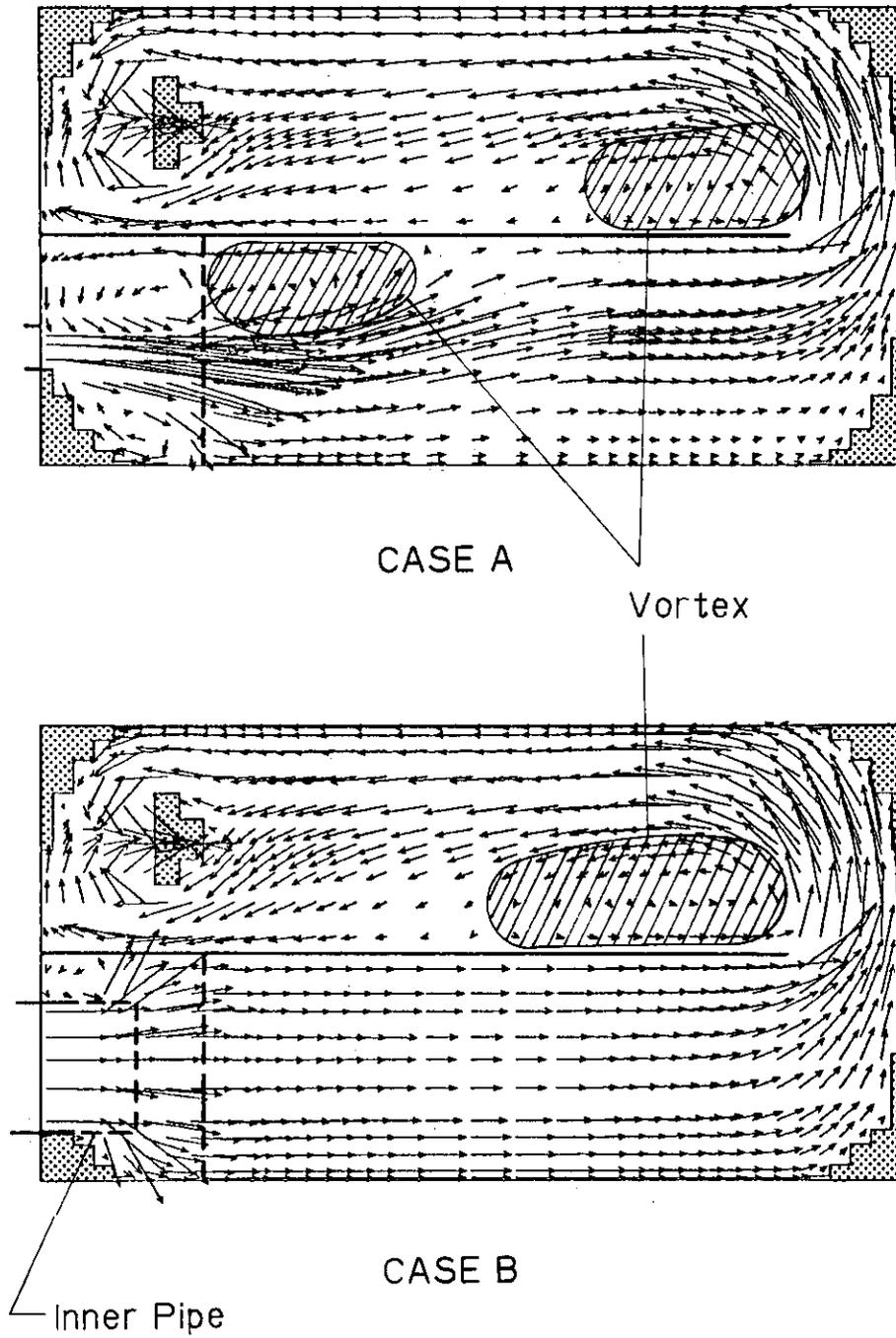
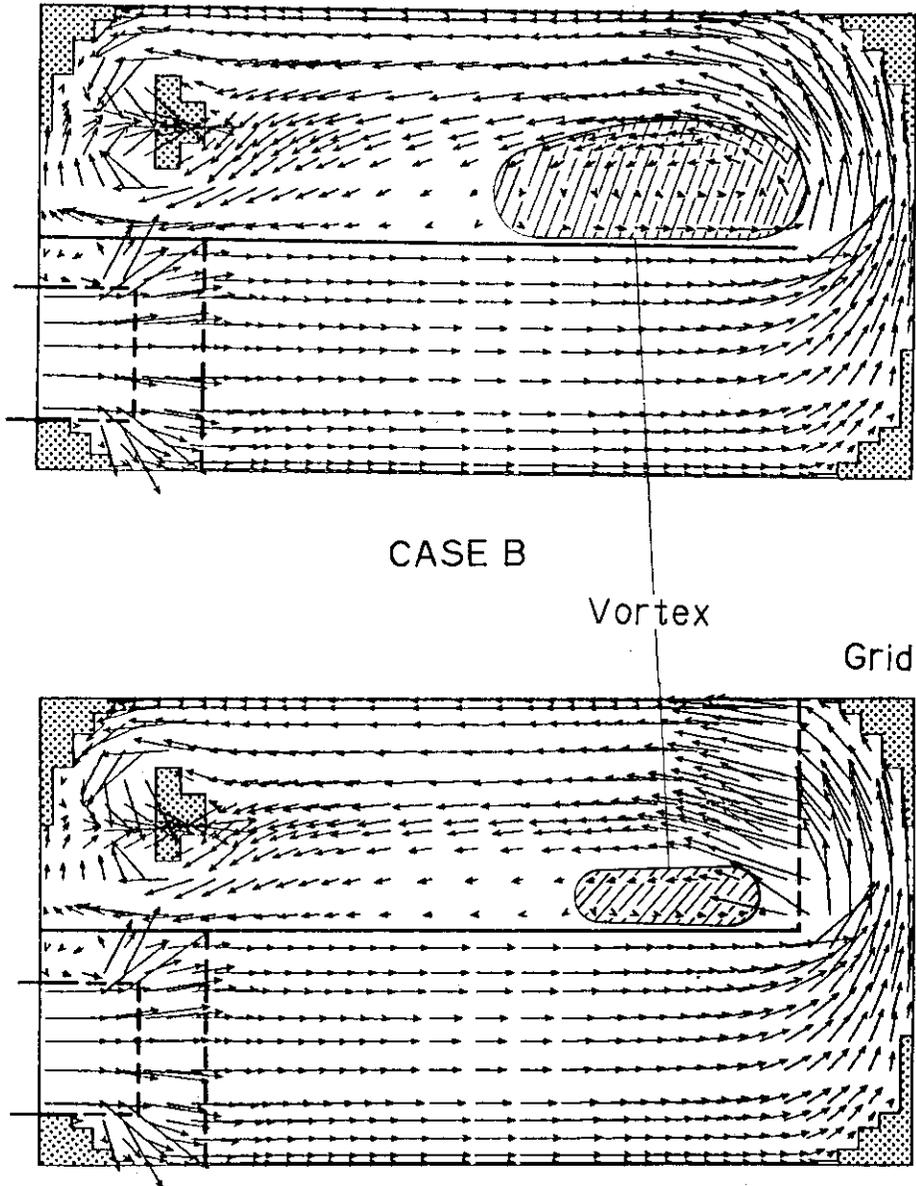


Fig. 3.1.2 Effect of Inner Pipe



CASE B

Vortex

Grid

CASE C

Fig. 3.1.3 Effect of Grid 2

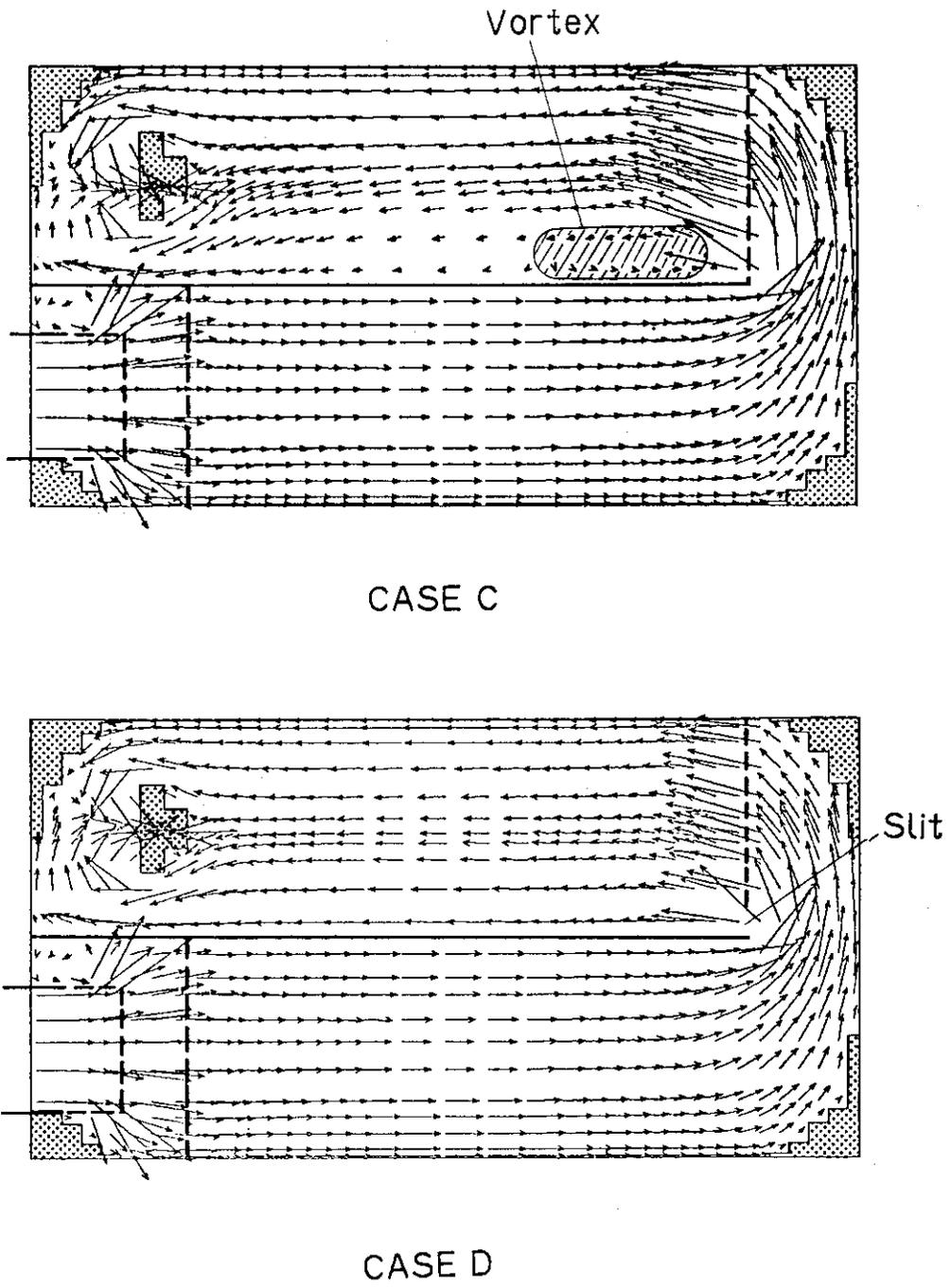


Fig. 3.1.4 Effect of Slit

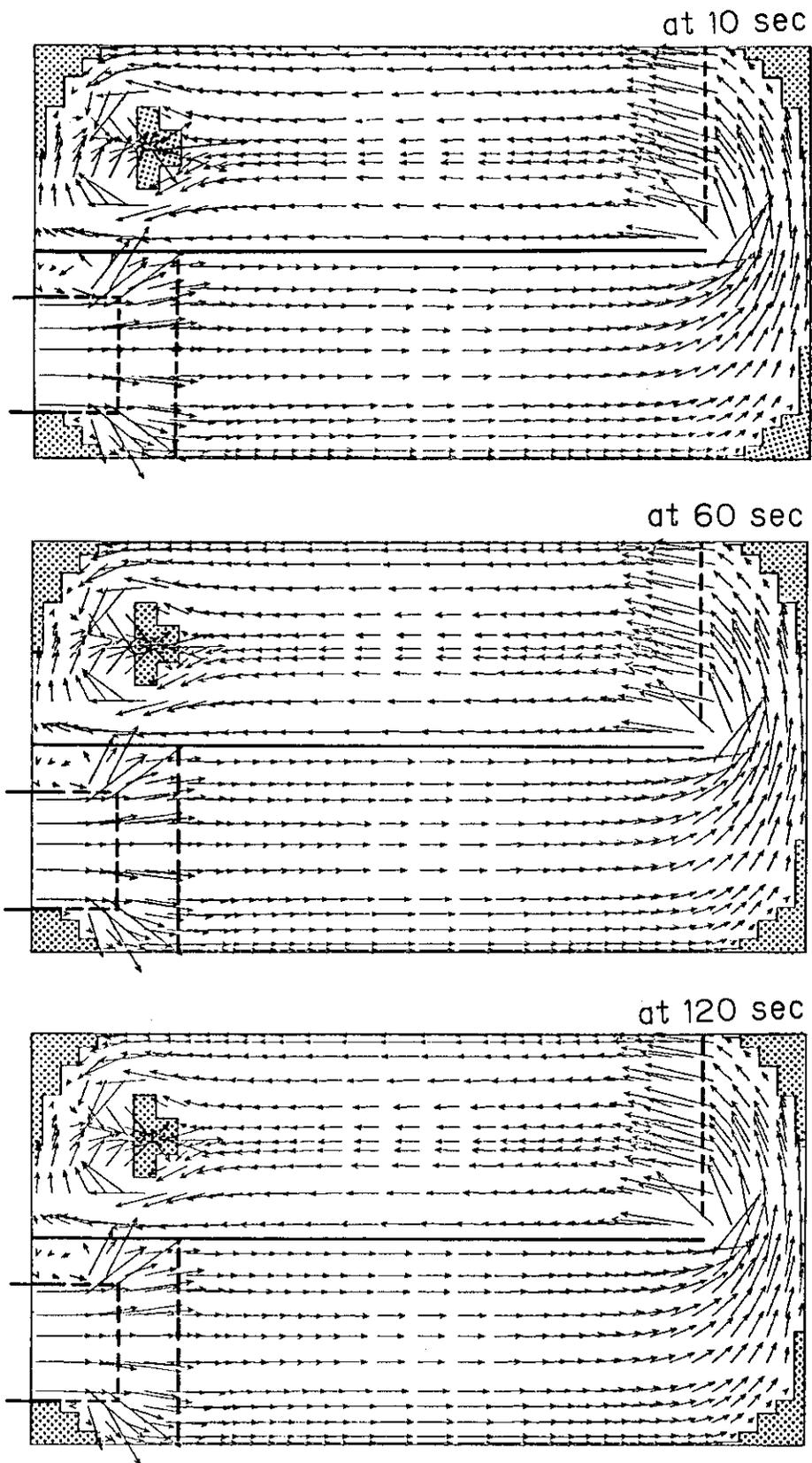
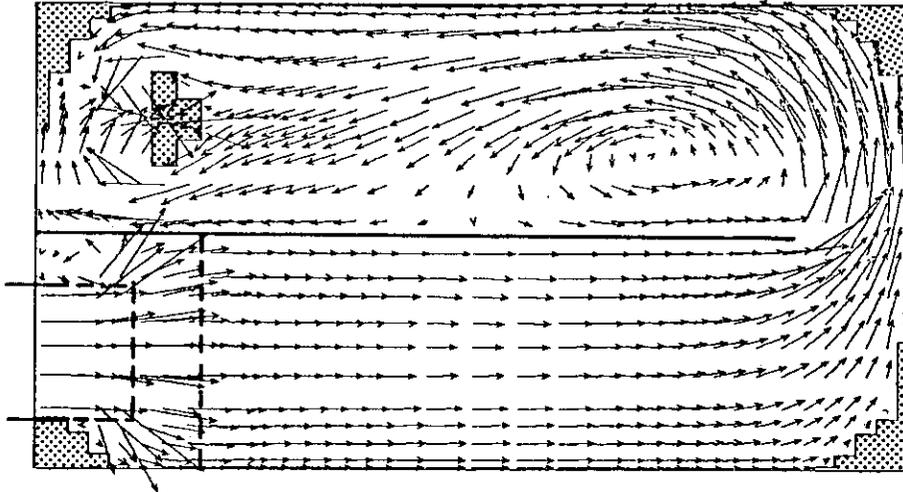
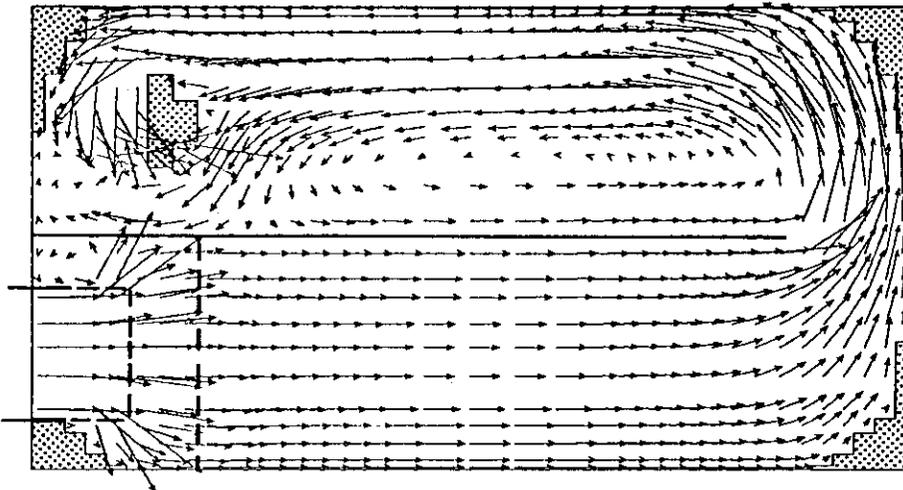


Fig. 3.1.5 Effect of elapsed time (CASE D)

at 10 sec



at 30 sec



at 60 sec

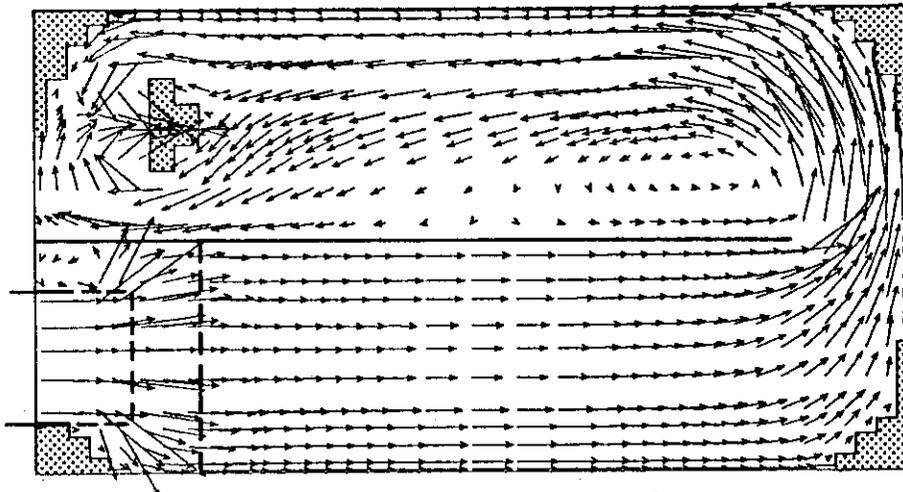
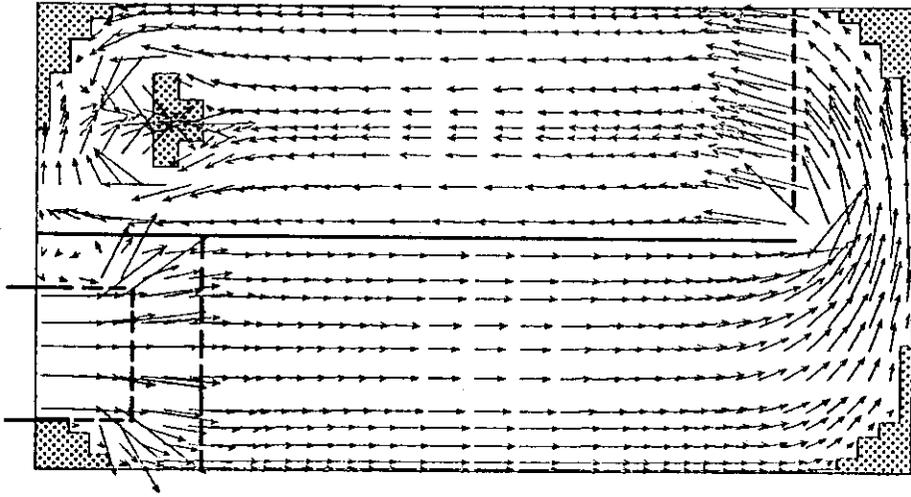
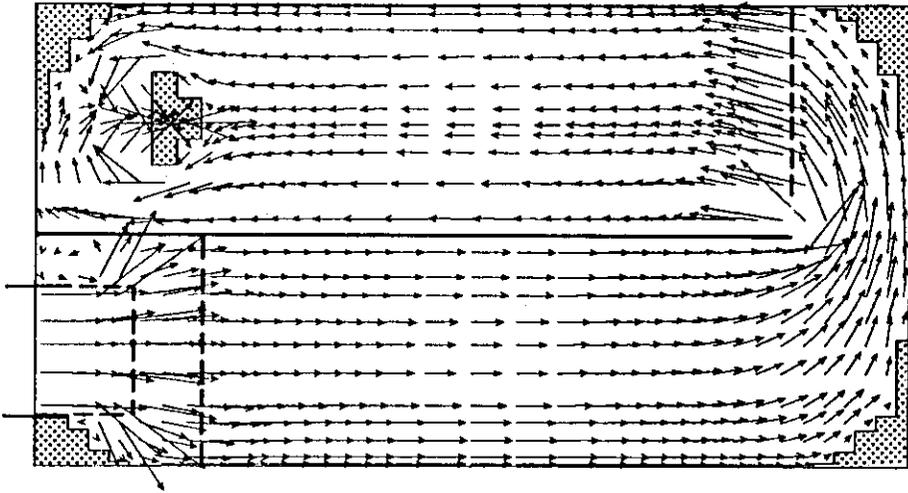


Fig. 3.1.6 Effect of elapsed time (CASE B)



CASE D



CASE D'

Fig. 3.1.7 Effect of Open V

3.2 3次元解析

3.2.1 解析条件

3次元解析は、2次元解析で得られた結果に基づき、Fig. 3.2.1に示すようにインナー・パイプ、多孔板、スリットを考慮して¹⁶N減衰タンクをモデル化して行った。インナー・パイプ及び出口ノズルは、実際にはFig. 2.1.2に示すように円筒形であるが、計算コード及び解析モデル上の制約からFig. 3.2.1のような形に模擬した。流量は、JRR-3改造炉の1次冷却系流量2400 m³/hに等しくなるように入口流速を規格化して与えた。計算対象としたモデルの流路断面積は、Fig. 3.2.1に示すように実際の断面積よりやや大きく、1.09倍になっている。

本解析では、インナー・パイプ、多孔板の開孔率が、流速分布、滞留時間にどのような影響を与えるかを調査し、滞留時間に対して最も良い結果を与えるケースに対しては圧力損失の検討も行った。

Table 4.2.1に解析を行った各ケースのインナー・パイプ及び多孔板の開孔率と抵抗係数を示す。

計算時間間隔、加速係数については、2次元解析と同じものを用いる。(Table 3.1.1, Table 3.1.2 参照) 最大収束誤差は、 u, v, w および p の方程式についてのみ計算時間節約のため、それぞれ $\frac{u \Delta V}{\Delta t}$, $\frac{v \Delta V}{\Delta t}$, $\frac{w \Delta V}{\Delta t} = 1 \times 10^{-5}$, $\Delta A \cdot u = 1 \times 10^{-5}$ とした。ここで、 $\Delta V, \Delta A$ は計算領域内で最も微小な要素の体積及び面積である。

3.2.2 流速分布

タンク内における滞留時間を確保するためには、タンク内の流速分布をできるだけ均一にする必要がある。そこで、3次元解析では、2次元解析で得られた最適ケースの条件をベース・ケース (CASE 3A) とし、均一な流速分布を得るために、インナー・パイプおよび多孔板の開孔率に対するパラメータ解析を行った。

(1) インナー・パイプの効果

1) CASE 3A (ベース・ケース)

CASE 3Aは、2次元解析結果のうち最もタンク内流速分布が均一であったCASE Dと同一の条件にて3次元解析を行ったものである。CASE 3Aの流速分布をFig. 3.2.3に示す。Fig. 3.2.3より、多孔板2の下流では、2次元解析結果と同様に多孔板およびスリットの効果で流速分布が比較的均一であるのに対し、多孔板1の下流では流速のばらつきが大きく、Fig. 3.2.2に示す領域1, 2付近の流速が高く、領域4, 5の流速が比較的低いことがわかる。これは、3次元モデルにおいては、インナー・パイプの断面積とタンク主流部の断面積の比が2次元モデルに比べて大きく、また、上下横方向でその比が異っていることによるものであると考えられる。

従って、ここでは、流速分布が均一になるようなインナー・パイプ1, 2, 3および4の開孔率を策定する。

2) CASE 3B

ベース・ケースの解析結果より、インナー・パイプの開孔率を全て0.35とした場合には、領域1, 2の流速が高く、領域4, 5の流速が低いことがわかった。そこで、CASE 3Bでは、インナー・パイプ上面(インナー・パイプ2)を全閉とし、流路面積を確保するためにインナー・パイプ側面(インナー・パイプ3)の開孔率を0.5と大きくした。本ケースの解析結果をFig. 3.2.4に示す。Fig. 3.2.4から、インナー・パイプ2を全閉としたことにより、CASE 3Aとは逆に領域1, 2付近の流速が極端に低下し、多孔板1直後に渦が生じていることがわかる。また、5, 8における流速も大きくなっている。これは、インナー・パイプ2の開孔率を小さく、インナー・パイプ3の開孔率を大きくとりすぎたためであり、流速分布を均一にするための最適な開孔率は、インナー・パイプ2については0~0.35、インナー・パイプ3については0.35~0.5の範囲にあることがわかった。

3) CASE 3C

上記2ケースの結果を基に解析を進め、試行錯誤の結果最も均一な流速分布を得たのがCASE 3Cである。本ケースでは、インナー・パイプ2, 3の開孔率をそれぞれ0.2, 0.4としたのに対し、インナー・パイプ4の開孔率を0.32とやや小さくしたことにより、領域1, 2の流速はやや低いもののFig. 3.2.5に示すようにはほぼ均一な流速分布を得た。

(2) 多孔板1の効果

3.2.2(1)では、インナー・パイプの開孔率が流速分布に及ぼす影響を調査したが、多孔板1の開孔率を小さくすることにより、多孔板1直後の流速分布を均一にすることも考えられる。そこで、多孔板1の開孔率を0.3としたケースについて解析を行い、多孔板1の開孔率が0.67の場合と流速について比較検討した。

まず、多孔板1の開孔率が0.3、他の条件はCASE 3Bと同じであるCASE 3B'について解析を行った。Fig. 3.2.6にCASE 3B'の流速分布を示す。CASE 3B(Fig. 3.2.4参照)では、3.2.2(1)に述べたように多孔板1直後の領域1の部分にて渦が発生しているのに対し、CASE 3B'ではFig. 3.2.6に示すように多孔板直後の流速分布がかなり改善されることがわかる。

上述のようにCASE 3Bでは、多孔板1の開孔率を0.3と小さくすることにより、タンク内の流速分布を均一にする効果があることがわかったが、以下に示すCASE 3Dのように多孔板1の開孔率を小さくすることが必ずしも良い結果を与えないケースもある。CASE 3DはCASE 3Cを策定する途中のケースの一つであるが、領域1, 7の流速が高く、領域5の流速がやや低いものの多孔板1直後に渦の発生はみられない。(Fig. 3.2.7参照)しかし、多孔板1の開孔率を0.3としたCASE 3D'では、Fig. 3.2.8に示すように領域4に渦が発生していることがわかる。

一般に、多孔板は開孔率が小さい方が整流効果が大きいですが、本解析では多孔板1の開孔率を変化させることにより、小さな渦の発生を抑制し多孔板1直後の流速分布をある程度均一にできることがわかった。しかし、多孔板1の開孔率の効果はインナー・パイプ1, 2, 3および4の各面の流量バランスが、多孔板1直後の流速分布に及ぼす影響より小さい。これは、インナー・パイプと多孔板1の位置が接近しており、インナー・パイプ前面(インナー・パイプ1)から流出する流体が多孔板1と干渉する効果がインナー・パイプの他の面に比べて大きいため

である。したがって、インナー・パイプの各面の流量バランスが重要となる。インナー・パイプと多孔板1の距離を大きくとれば多孔板1後の整流効果は大きくなるが、タンクの大きさが制限されているために多孔板1後の直流路部が短くなり滞留時間という観点からみて不利である。従って本解析では、圧力損失をできるだけ小さくすることも考えて多孔板1の開孔率は0.67とし、3.2.2(1)のようにインナー・パイプの開孔率により流速分布の均一化を図った。

以上、3次元解析の結果インナー・パイプ各面の開孔率をCASE 3Cのようにとると、タンク内の流速分布はほぼ均一となり、渦の発生を防止できることがわかった。CASE 3Cの流速分布をFig. 4.2.10に示す。また、多孔板1は本解析モデルにおいては小さな渦を抑制する効果を示したが、多孔板1下流域での流速分布の均一化にはインナー・パイプ各面の流量配分が重要であることがわかった。

以上のように流速分布がほぼ均一となる結果を得たが滞留時間を考えた場合、流速分布を更に調整することにより、滞留時間を改善できると考えられる。滞留時間については次節に述べる。

3.2.3 滞留時間の評価

(1) 滞留時間の定義

前述のCASE 3Cのように流路内に渦が見られない場合、タンク内の流体の流れはFig. 3.2.14に示すような面積比のほぼ等しい仮想流路に分割して考えることができる。この各仮想流路における滞留時間の評価を行うときに、本解析モデルでは直流路部（反転前；パス1，反転後；パス2）と反転部（パス3）の2つに大別することができる。前者は、要素内をほぼ均一にX方向に流れるため比較的簡単に流路内での流体の滞留時間を評価できるが、後者は、流れが反転するため、滞留時間を評価することが難しい。また遮蔽設計に用いるためには ^{16}N の減衰を考慮して滞留時間を評価する必要がある。そこで以下のように流路内の流体の滞留時間を定義した。

1) 直流路部

直流路部は、Fig. 3.2.10のようにX方向にはほぼ一様な流れとなっている。従って各仮想流路の滞留時間は、次のように各要素ごとの滞留時間の和として定義した。

$${}^1t_{j,k}, {}^2t_{j,k} = \left| \sum_i \frac{x_{i,j,k}}{u_{i,j,k}} \right| \quad (3.2.3-1)$$

ここに 1t ：パス1の滞留時間 (s)

2t ：パス2の滞留時間 (s)

x ：X方向要素幅 (m)

u ：要素内X方向平均流速 (m/sec)

添 字

i ：X方向要素番号

j ：Y方向要素番号

k ：Z方向要素番号

なお、本解析においては直流路部の範囲を渦の生じていない部分として、パス1についてはインナー・パイプ前面から反転部まで、パス2については多孔板2から出口ノズル先端までとする。

2) 反転部

反転部では、Fig. 3.2.10 に示すように X-Y 面にほぼ平行な流れとなる。また、X 方向、Y 方向については流れの向きが変わり、内回りの流速は大きく、外回りの流速は小さくなる。しかし、反転部において直流路部と同様に流れに沿って仮想流路を設定し、滞留時間を評価することは極めて困難である。そこで以下に示すように、反転部ではパス1およびパス2の直流路部を構成する要素の中央の間を流体が Y 方向にまっすぐ流れ、その平均流速は、Y 方向成分の最も大きい反転部中央における流速の $\frac{1}{2}$ であると仮定して滞留時間を定義し、その平均値が反転部の平均滞留時間 (= 4.31 秒)^(*) に等しくなるように規格化した。

$${}^3t_{j,k} = \frac{y_{j,k}}{\frac{1}{2} \cdot v_{j,k}} \cdot \bar{t} \quad (3.2.3-2)$$

ここに

${}^3t_{j,k}$: 反転部滞留時間 (s)

$y_{j,k}$: パス1とパス2を構成する要素の中央間の距離 (m)

$v_{j,k}$: 反転部中央における流速 (m)

$v_{j,k}$ は、反転部中央における流速の計算値のうち最も外側の流速 v_o と最も内側の流速 v_i の間を線型補間して求めた。

$$t_{ave} : y_{j,k} / \frac{1}{2} v_{j,k} \text{ の平均値} = \sum_j \sum_k \left(\frac{y_{j,k}}{v_{j,k}} \right) \cdot A_{j,k} / \sum_k \sum_j A_{j,k} \text{ (s)}$$

添字

j : Y 方向要素番号

k : Z 方向要素番号

3) 全滞留時間

$$t_{j,k} = {}^1t_{j,k} + {}^2t_{j,k} + {}^3t_{j,k}$$

ここに $t_{j,k}$: 全滞留時間 (s)

$$(*) \bar{t} = \frac{V}{Q} = \frac{(\frac{4}{3} \pi a^2 b) / 2}{Q} = 4.31 \text{ (s)}$$

ここに a : タンク内半径 (= 1.4 m)

b : 反転部長さ (= $\frac{a}{2} = 0.7$ m)

V : 反転部の体積 (m³)

Q : タンク内平均流量 = 2400 (m³/h) = 0.667 (m³/s)

但し、V は長径-短径比が 2 : 1 の回転円体とした。

4) 遮蔽を考慮した滞留時間

タンク入口における¹⁶Nのmol濃度を C_{in} とすると、タンク出口ではその平均滞留時間 \bar{t} を用いて $C_{out} = C_{in} \cdot e^{-\lambda \bar{t}}$ と表わすことができる。このとき、

$$C_{out} = C_{in} e^{-\lambda \bar{t}} = \int_0^{\infty} C_{in} e^{-\lambda t} f(t) dt \quad (3.2.3-3)$$

ここに

$$\lambda : ^{16}\text{Nの減衰定数} = \frac{\ell_n 2}{\tau_{1/2}} = \frac{\ell_n 2}{7.13} = 0.0972$$

$$\tau_{1/2} : ^{16}\text{Nの半減期} = 7.13 (\text{s})^2$$

$f(t)$: 滞留時間の確率密度関数

従って、平均滞留時間 \bar{t} は次のように表わせる。

$$\bar{t} = -\frac{1}{\lambda} \ell_n \left[\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} f(t) dt \right] \quad (3.2.3-4)$$

(2) 滞留時間の検討結果

3.2.3(1)で述べた方法に基づいて滞留時間を評価する。評価ケースとして3.3.2で述べたCASE 3A, CASE 3Cに加え、滞留時間の観点から更に流速分布に検討を加えたCASE 3Eの3ケースについて滞留時間を評価する。滞留時間は、前述のように流路内に渦が見られず流れが各仮想流路内をなめらかに通っていく場合にのみ定義できるが、参考のためにベース・ケースであるCASE 3Aについても評価した。またCASE 3Eは、流速分布をできるだけ均一にしたCASE 3Cに対して、反転部にて内回りになる仮想流路と外回りになる仮想流路における滞留時間を近づけ、平均の滞留時間が長くなるようにインナー・パイプの開孔率を調整し流速分布を更に改善したケースである。

1) CASE 3A

上記のように滞留時間は流路内に渦が生じているような場合には定義できないが、参考のため本ケースについての評価も行った。なお、逆流している部分及びその付近の流速は、他の仮想流路に比べて非常に小さく滞留時間が大きくなる。この部分については近接する流路の流速を用い滞留時間を計算し評価した。

Table 3.2.2に(3.2.3-1), (3.2.3-2)式で求めたパス1, パス2, 反転部及び流路全域の滞留時間を各仮想流路について、その平均値と共に示す。表より滞留時間の最小値は28.8秒、平均値は42.3秒であることがわかった。Fig. 3.2.15は、Table 3.2.2に示した全滞留時間から得られた滞留時間の累積相対度数 $F(t)$ である。累積相対度数は、各仮想流路の面積の合計が1になるように規格化し、滞留時間の小さいものから累積した。この累積相対度数より、1秒ごとの確率密度分布関数 $f(t)$ を算出し、(3.2.3-4)式により、遮蔽上の平均滞留時間を求めた。その結果をFig. 3.2.16に示す。(3.2.3-4)式から求まる遮蔽上の平均滞留時間は、本ケースでは35.5秒であった。

2) CASE 3C

流速分布を検討した結果、最も流速分布の均一なCASE 3Cについて滞留時間の評価を行っ

た。Table 3.2.3にパス1, パス2, 反転部及び流路全域の滞留時間を示す。CASE 3Cの滞留時間は、最小値が34.7秒, 平均値が40.2秒である。表に示した全滞留時間を基に得られた滞留時間の累積度数分布 $F(t)$ および確率密度関数 $f(t)$ をFig. 3.2.17, Fig. 3.2.18にそれぞれ示す。(3.2.3-4)式より得られた遮蔽上の平均滞留時間は、本ケースでは40.7秒であった。

3) CASE 3E

CASE 3Cのように直流路部の流速分布をほぼ均一にした場合, Table 3.2.3に示すように全滞留時間は反転部において内回りとなる仮想流路($j=6$)のものが外回りとなる仮想流路($j=1$)のものに比べて短くなった。この原因は、反転部において内回りのものほど仮想流路の長さが短く、流速が大きいためであると考えられた。そこで、CASE 3Eのようにパス1において内回りの仮想流路の流速を小さく、外回りの流速が大きくなるようにインナー・パイプ各面の流量配分を開孔率により変化させた。その結果、Table 3.2.1に示すCASE 3Eのようにインナー・パイプ上面および側面の開孔率を小さくとれば、渦が発生しない程度に内回りの流速を小さく、外回りの流速を大きくできることがわかった。CASE 3Eの流速分布をFig. 3.2.11に示す。次に滞留時間の評価を述べる。Table 3.2.4に各仮想流路ごとおよび平均の滞留時間を示す。滞留時間の最小値は34.7秒, 平均値は40.7秒である。表に示した滞留時間より得られた累積度数分布 $F(t)$ および確率密度関数 $f(t)$ をFig. 3.2.19およびFig. 3.2.20にそれぞれ示す。同図を用いて(3.2.3-4)式より得られた遮蔽上の平均滞留時間は41.4秒である。

4) 考 察

滞留時間について以上3ケースについて評価した結果、以下の値が得られた。

	最小滞留時間(秒)	平均滞留時間(秒)	遮蔽上の平均滞留時間(秒)
CASE 3A	28.8	42.3	35.5
CASE 3C	34.7	40.2	40.7
CASE 3E	34.7	40.7	41.4

CASE 3Aに比べると流速分布を改善したCASE 3CおよびCASE 3Eは最小滞留時間が改善されている。また、遮蔽上の平均滞留時間は、CASE 3Cに比べ、CASE 3Eがわずかながら改善されているのがわかる。CASE 3Aで、平均滞留時間が大きいにもかかわらず遮蔽上の平均滞留時間は小さくなっている。これは以下のような理由によると考えられる。Fig. 3.2.16に示すようにCASE 3Aでは、他の2ケースに比べて各仮想流路の滞留時間がきわめて広い範囲に存在し、またその最小値が小さい。一方、滞留時間が小さい仮想流路では、(3.2.3-4)式における滞留時間の重みを表わす $e^{-\lambda t}$ の項が大きいため、滞留時間の小さい領域における $f(t)$ の効果が大きくなる。従って、遮蔽上の平均滞留時間を大きくするためには、平均滞留時間のみでなく、その最小値を大きくすることが重要である。

なお、以上述べた3次元解析では、直流路部の断面積が実機と若干異なっていたため、滞留時間の評価においては断面積の違いを補正した。

そこで、直流路部の断面積を実機に合わせたモデルにおいて、上記の3次元解析において最も良い結果が得られたCASE 3Eと同じ開孔率、抵抗係数を用いCASE 3E'として解析を行った。但し、反転部については、3.2.3と同様に平均滞留時間にて補正した。Fig. 3.2.12に解析モデル図を示す。解析結果を以下に示す。

① 流速分布

CASE 3E'の流速分布をFig. 3.2.13に示す。Fig. 3.2.11に示したCASE 3Eの流速分布と比較すると、インナー・パイプと多孔板1の間の領域の外側($k=5, 6$)の部分に小さな渦が見られる他はCASE 3Eと同様にはほぼ均一な流速分布であることがわかる。

② 滞留時間

前述のようにCASE 3E'においては、インナー・パイプと多孔板の間の領域において小さな渦があるため、渦がある部分については近接する仮想流路の流速を用いて滞留時間を計算した。

Table 3.2.5に各仮想流路および平均の滞留時間を示す。滞留時間の最小値は36.4秒、平均値は42.4秒である。表に示した滞留時間より得られた累積度数分布 $F(t)$ および確率密度関数 $f(t)$ をそれぞれFig. 3.2.21、およびFig. 3.2.22に示す。Fig. 3.2.22に示した確率密度関数を基に(3.2.3-4)式を用いて計算した遮蔽上の平均滞留時間は43.0秒である。

ケース名	最小滞留時間(秒)	平均滞留時間(秒)	遮蔽上の平均滞留時間(秒)
CASE 3E'	36.4	42.4	43.0

以上の結果より、3次元解析においてはCASE 3E'が最も良い結果となっていることがわかった。

Table 3.2.1 Parameters in Each Case

CASE	Grid 1	Grid 2	Inner Pipe			
			1	2	3	4
CASE3A	0.67/0.4*	0.20/1.8	0.35/1.3	0.35/1.3	0.35/1.3	0.35/1.3
CASE3B	0.67/0.4	0.20/1.8	0.35/1.3	-	0.50/1.0	0.35/1.3
CASE3B'	0.30/1.4	0.20/1.8	0.35/1.3	-	0.50/1.0	0.35/1.3
CASE3C	0.67/0.4	0.20/1.8	0.35/1.3	0.20/1.82	0.40/1.1	0.32/1.4
CASE3D	0.67/0.4	0.20/1.8	0.35/1.3	0.30/1.5	0.40/1.1	0.35/1.3
CASE3D'	0.30/1.4	0.20/1.8	0.35/1.3	0.30/1.5	0.40/1.1	0.35/1.3
CASE3E	0.67/0.4	0.20/1.8	0.35/1.3	0.18/1.89	0.35/1.3	0.32/1.4

* f / k

Table 3.2.2 Staying Time in ¹⁶N Decay Tank for CASE3A

	$\frac{k}{j}$	1	2	3	4	5	6	7	Weighted Average
Pass	1	13.7	13.8	14.1	19.0				20.9
	2	19.8	17.9	17.1	31.0	26.5			
	3	29.1	21.5	18.8	22.4	21.5	22.4		
	4	21.5	18.9	17.8	22.9	20.2	21.1		
	5	11.6	11.5	13.0	36.1	19.1	19.0	19.3	
	6	9.1	9.3	10.0	14.3	16.3	17.4	18.3	
Pass	1	15.7	15.2	16.0	14.2				17.1
	2	17.4	16.9	17.5	15.6	15.2			
	3	19.9	19.3	19.7	17.5	16.3	16.1		
	4	21.2	20.6	21.0	18.5	17.0	16.5		
	5	20.7	20.3	19.5	17.8	16.5	16.2	16.1	
	6	19.3	18.9	18.3	16.8	15.7	15.6	15.8	
Reverse Area	1	12.8	12.1	12.3	12.7				4.3
	2	8.7	8.7	8.8	9.0	11.1			
	3	6.1	6.1	6.1	6.2	7.2	6.7		
	4	3.9	3.9	3.9	3.9	4.3	4.2		
	5	2.1	2.0	2.0	2.1	2.2	2.1	1.8	
	6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
Total	1	41.4	41.1	42.3	45.9				42.3
	1	45.9	43.6	43.3	55.5	52.8			
	3	55.1	46.8	44.6	46.0	45.0	45.2		
	4	46.6	43.4	42.7	45.3	41.5	41.8		
	5	34.4	33.8	34.6	56.0	37.8	37.3	37.1	
	6	29.0	28.8	28.9	31.7	32.7	33.6	34.7	

□: minimum

(in seconds)

Table 3.2.3 Staying Time in ^{16}N Decay Tank for CASE3C

$\frac{k}{j}$	1	2	3	4	5	6	7	Weighted Average
Pass 1	1	15.5	15.7	16.4	22.2			
	2	17.8	17.2	17.1	21.1	18.6		
	3	17.9	16.9	16.2	17.2	15.7	15.9	
	4	16.9	16.1	15.8	17.3	15.7	16.1	
	5	15.8	15.6	15.9	20.2	17.1	16.7	17.5
	6	26.2	25.7	25.5	28.9	18.6	17.4	17.9
Pass 2	1	15.7	15.3	16.0	14.3			
	2	17.3	16.8	17.4	15.6	15.4		
	3	19.4	18.9	19.4	17.5	16.6	16.6	
	4	19.7	19.4	20.0	18.5	17.4	17.1	
	5	18.5	18.4	18.1	17.6	17.2	17.1	17.1
	6	16.9	16.8	16.7	16.6	16.5	16.7	17.0
Reverse Area	1	12.2	12.3	12.4	12.6			
	2	8.8	8.8	8.8	9.0	11.1		
	3	6.0	6.1	6.1	6.2	7.1	6.6	
	4	3.9	3.9	3.9	3.9	4.3	4.1	
	5	2.1	2.0	2.0	2.1	2.2	2.1	1.8
	6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Total	1	43.4	43.2	44.8	49.1			
	2	43.9	42.8	43.4	45.8	45.0		
	3	43.3	41.8	41.7	40.9	39.4	39.1	
	4	40.4	39.3	39.7	39.1	37.5	37.4	
	5	36.4	36.0	36.1	39.8	36.4	36.0	36.4
	6	43.6	43.1	42.9	46.0	35.7	34.7	35.5

 : minimum (in seconds)

Table 3.2.4 Staying Time in ^{16}N Decay Tank for CASE3E

$\frac{k}{j}$	1	2	3	4	5	6	7	Weighted Average
Pass 1	1	13.3	13.1	13.5	19.1			
	2	13.9	13.4	13.8	20.4	20.7		
	3	13.5	13.1	13.3	17.4	17.8	19.1	
	4	13.1	13.0	13.8	18.8	18.6	19.7	
	5	13.4	13.9	15.5	26.1	21.1	20.7	21.8
	6	20.8	21.4	23.0	30.4	23.2	21.6	22.3
Pass 2	1	15.9	15.5	16.2	14.5			
	2	17.5	17.1	17.6	15.8	15.5		
	3	19.6	19.1	19.7	17.6	16.6	16.5	
	4	20.3	19.8	20.4	18.5	17.2	16.8	
	5	19.3	19.0	18.6	17.7	16.6	16.3	16.2
	6	17.7	17.5	17.3	16.6	15.8	15.7	15.9
Reverse Area	1	11.8	11.9	12.0	12.5			
	2	8.6	8.7	8.7	8.9	11.3		
	3	6.0	6.0	6.1	6.1	7.3	6.9	
	4	3.9	3.9	3.9	3.9	4.4	4.3	
	5	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	1.8
	6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Total	1	41.1	40.5	41.8	46.1			
	2	40.0	39.2	40.1	45.1	47.5		
	3	39.1	38.2	39.0	41.1	41.7	42.4	
	4	37.3	36.7	38.1	41.2	40.1	40.7	
	5	34.7	35.0	36.2	45.9	39.9	39.3	39.8
	6	39.0	39.5	40.9	47.6	39.6	37.9	38.7

 : minimum (in seconds)

Table 3.2.5 Staying Time in ^{16}N Decay Tank for CASE3E'

	$\frac{k}{j}$	1	2	3	4	5	6	Weighted Average
Pass 1	1	14.0	14.6					19.9
	2	14.8	15.2	23.8	22.4			
	3	15.8	12.7	16.8	19.2	22.3		
	4	16.0	14.2	16.1	18.7	20.6		
	5	15.1	14.7	17.2	20.0	21.5	25.7	
	6	24.7	24.2	25.2	26.2	26.8	27.2	
Pass 2	1	24.1	17.4					18.2
	2	20.3	18.1	16.5	15.7			
	3	17.7	20.4	18.6	17.8	17.8		
	4	18.4	21.3	19.9	19.2	19.0		
	5	19.7	19.1	18.7	18.4	18.0	17.6	
	6	17.0	16.9	16.7	16.4	16.2	16.0	
Reverse Area	1	14.5	12.5					4.3
	2	10.7	9.6	9.8	11.7			
	3	7.3	6.8	6.7	7.6	6.2		
	4	4.7	4.5	4.4	4.7	4.3		
	5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.6	
	6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	
Total	1	52.6	44.5					42.4
	2	45.9	42.9	50.0	49.8			
	3	40.8	39.9	42.1	44.6	46.4		
	4	39.1	40.0	40.5	42.6	42.1		
	5	37.3	36.4	38.3	40.8	42.9	45.8	
	6	42.5	41.8	42.6	43.3	43.8	44.0	

 : minimum (in seconds)

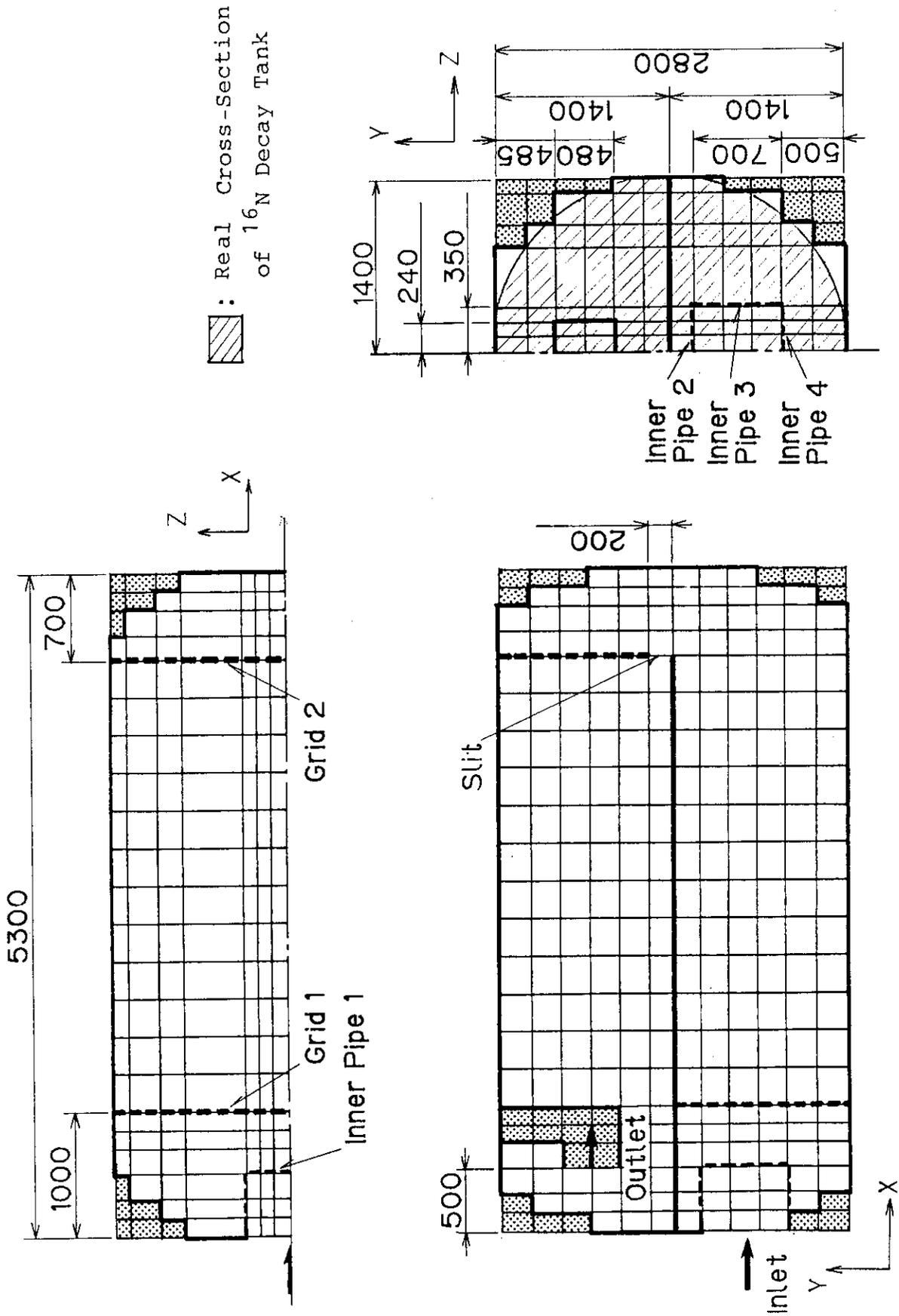


Fig. 3.2.1 Geometry of ^{16}N Decay Tank on 3-Dimensional Calculation Model

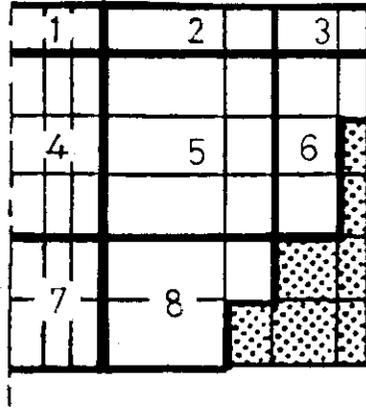


Fig. 3.2.2 Regions of Flow Area after Inner pipe

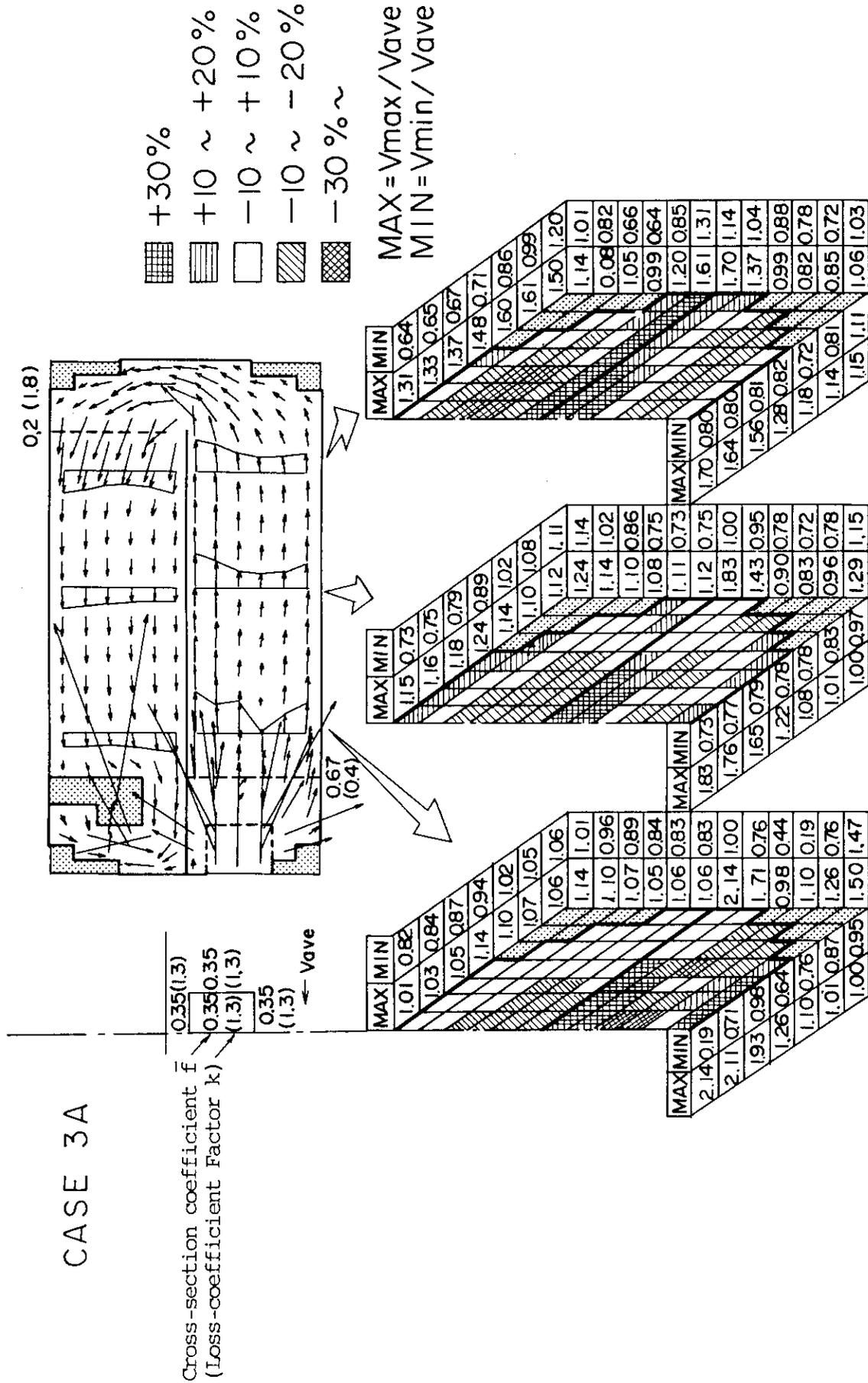


Fig. 3.2.3 Flow Pattern of CASE3A

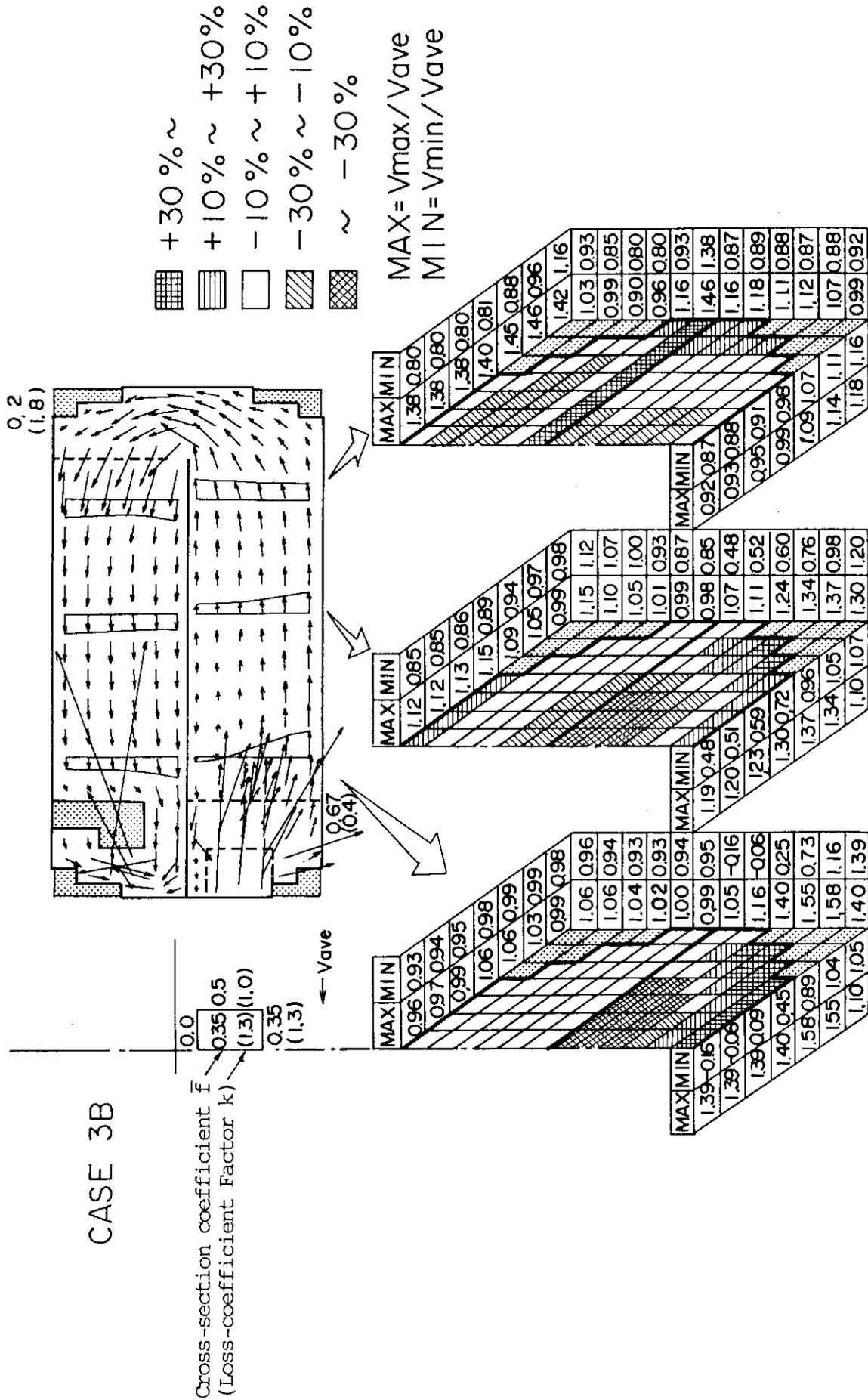


Fig. 3.2.4 Flow Pattern of CASE3B

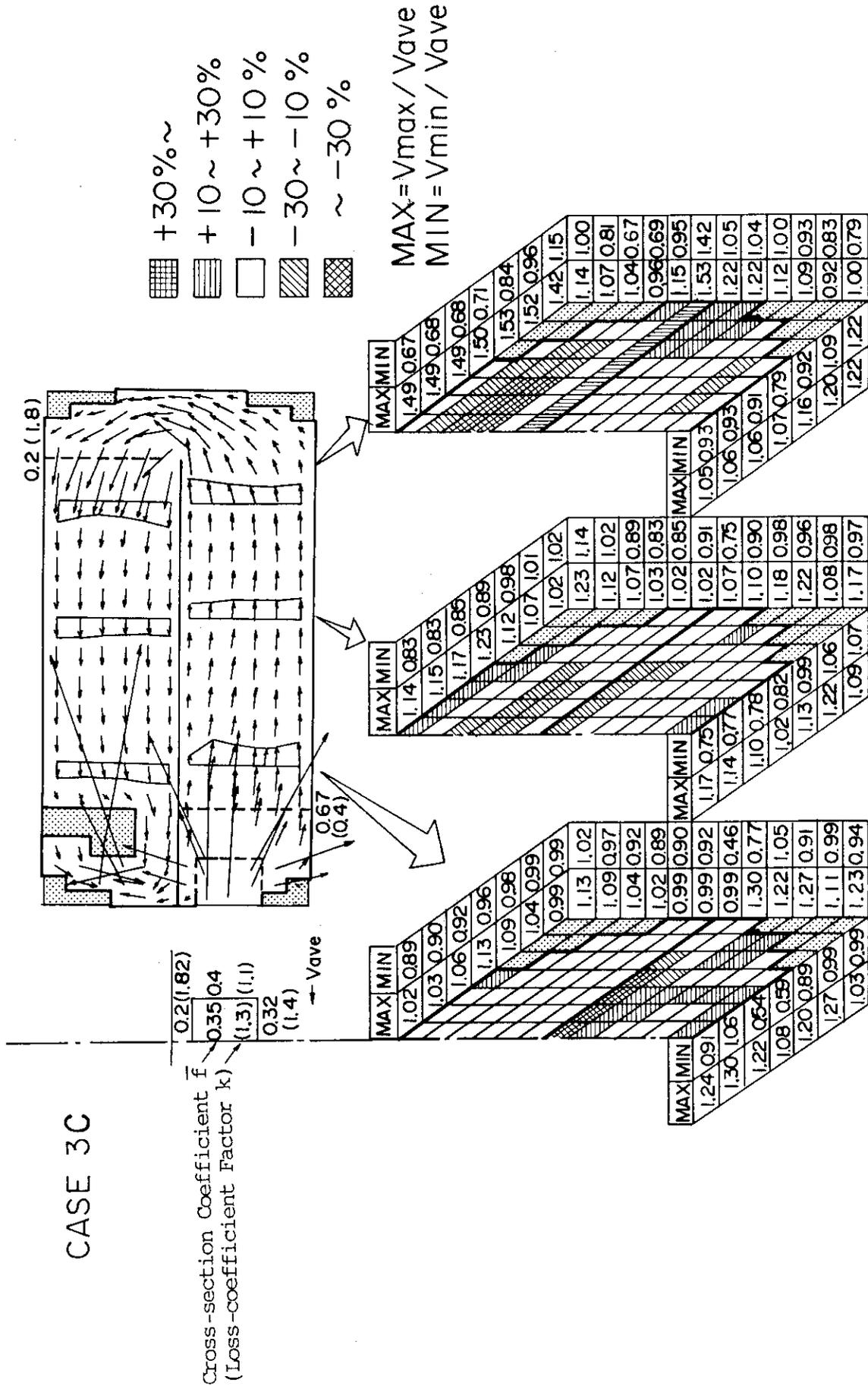


Fig. 3.2.5 Flow Pattern of CASE3C

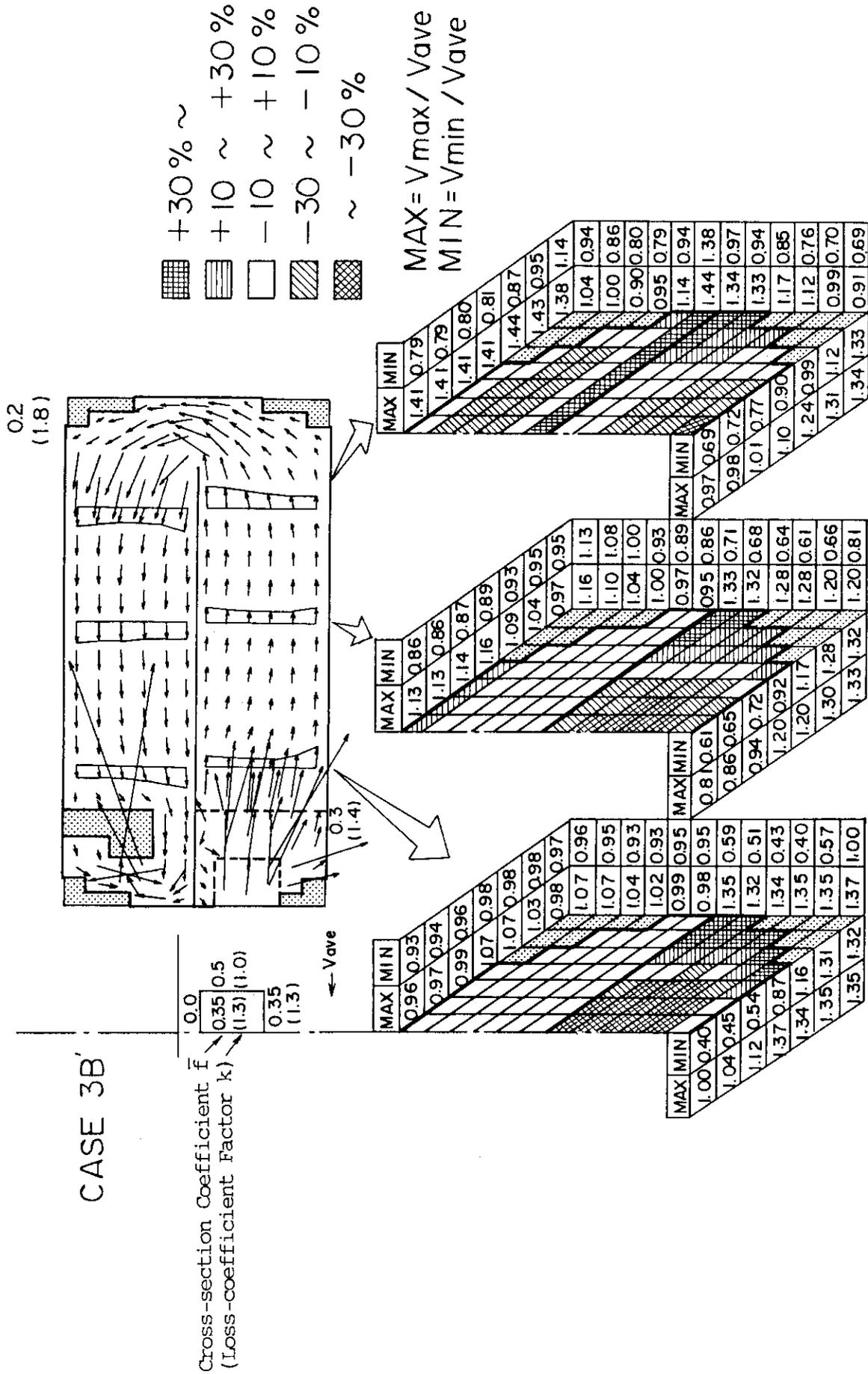


Fig. 3.2.6 Flow Pattern of CASE3B'

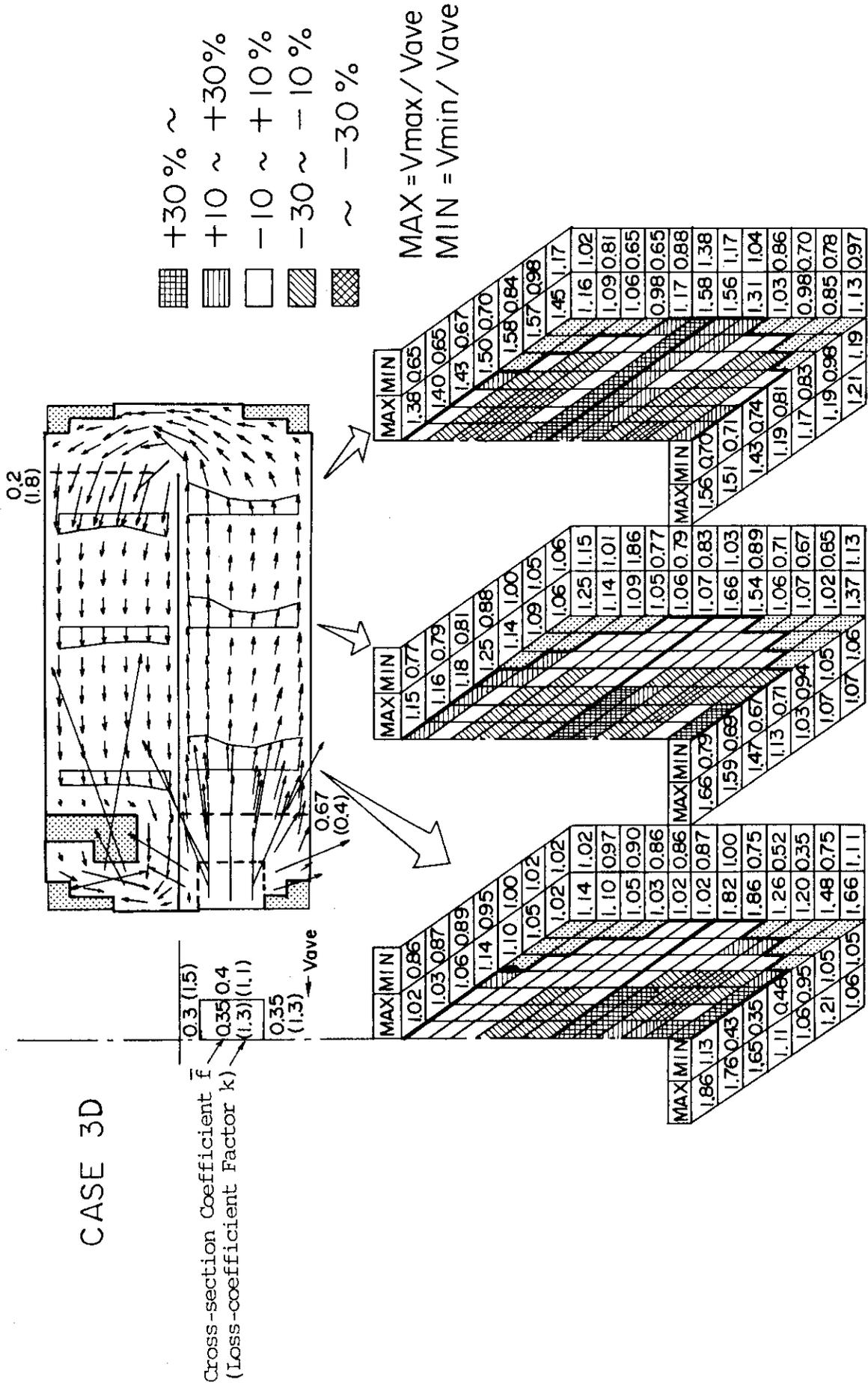


Fig. 3.2.7 Flow Pattern of CASE3D

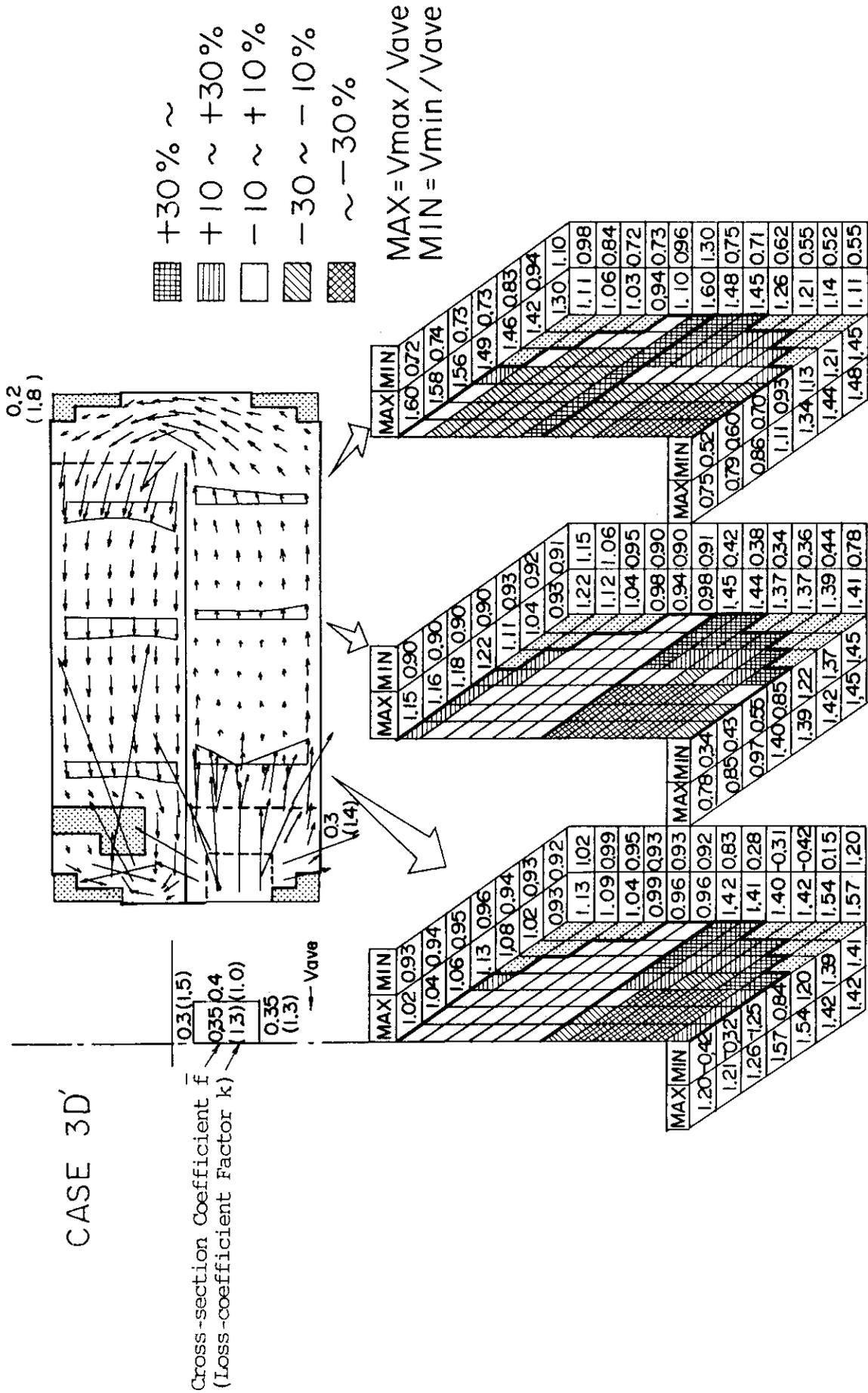


Fig. 3.2.8 Flow Pattern of CASE3D'

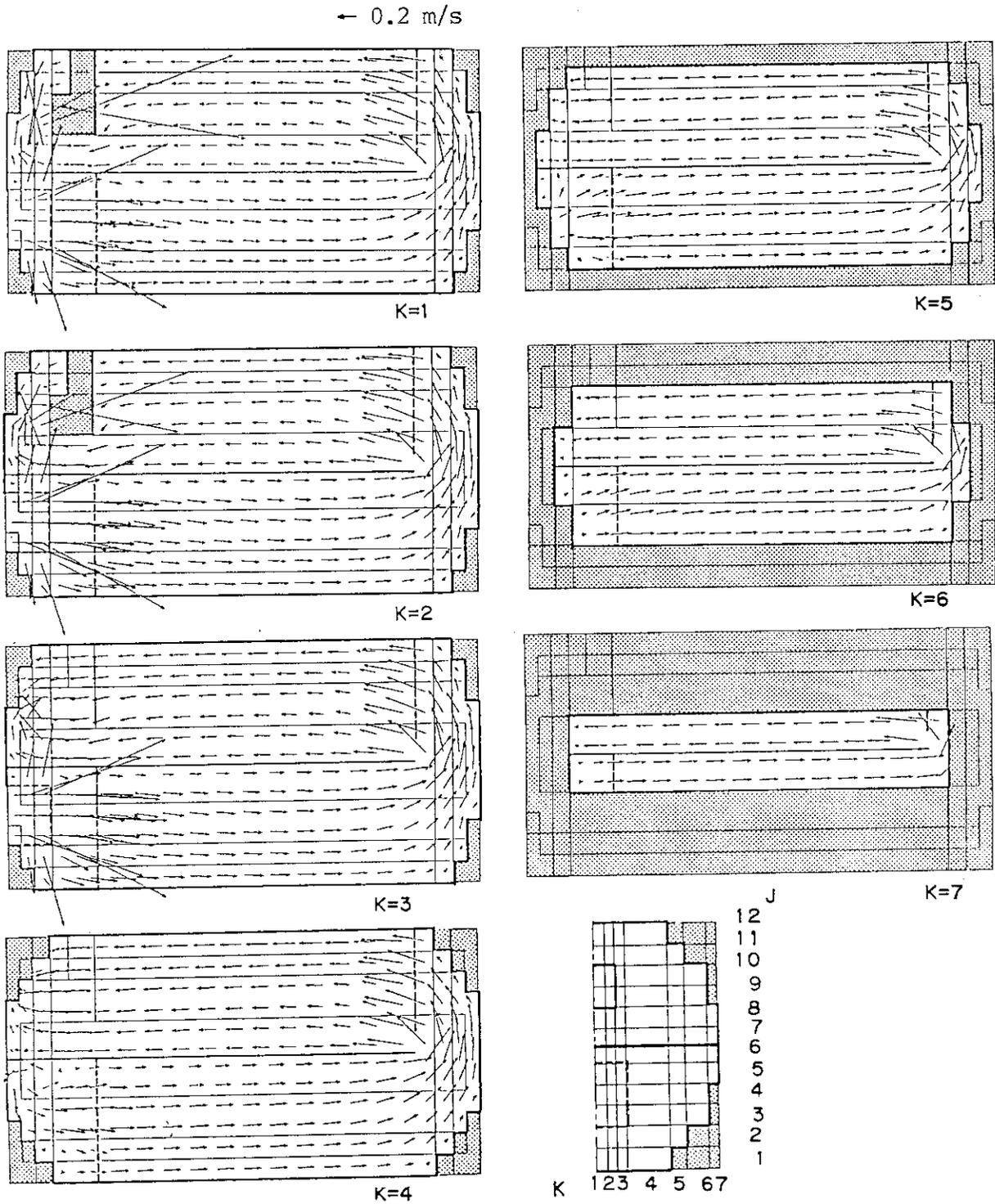


Fig. 3.2.10 Flow Distribution in ^{16}N Decay Tank in CASE3C

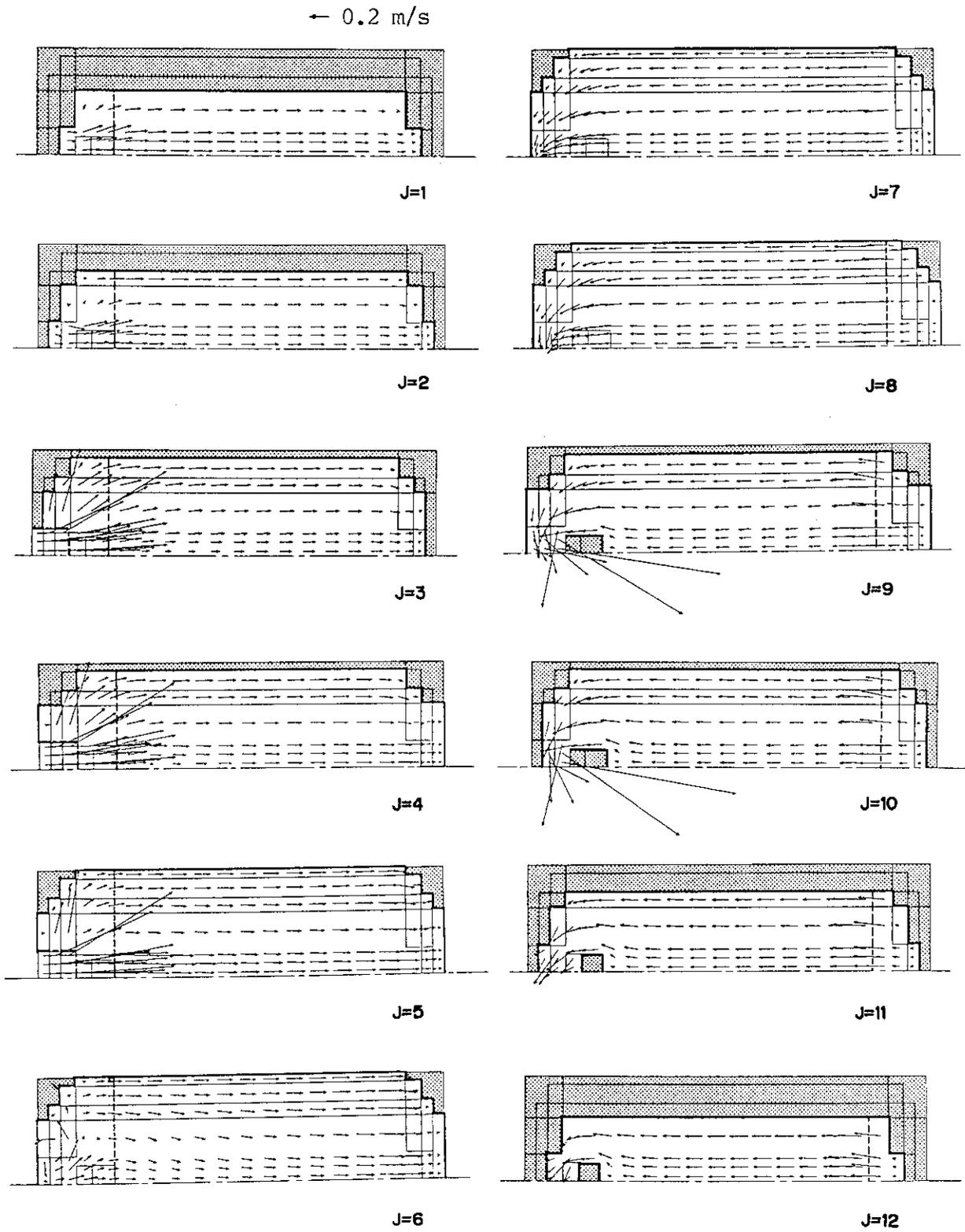


Fig. 3.2.10 (continued)

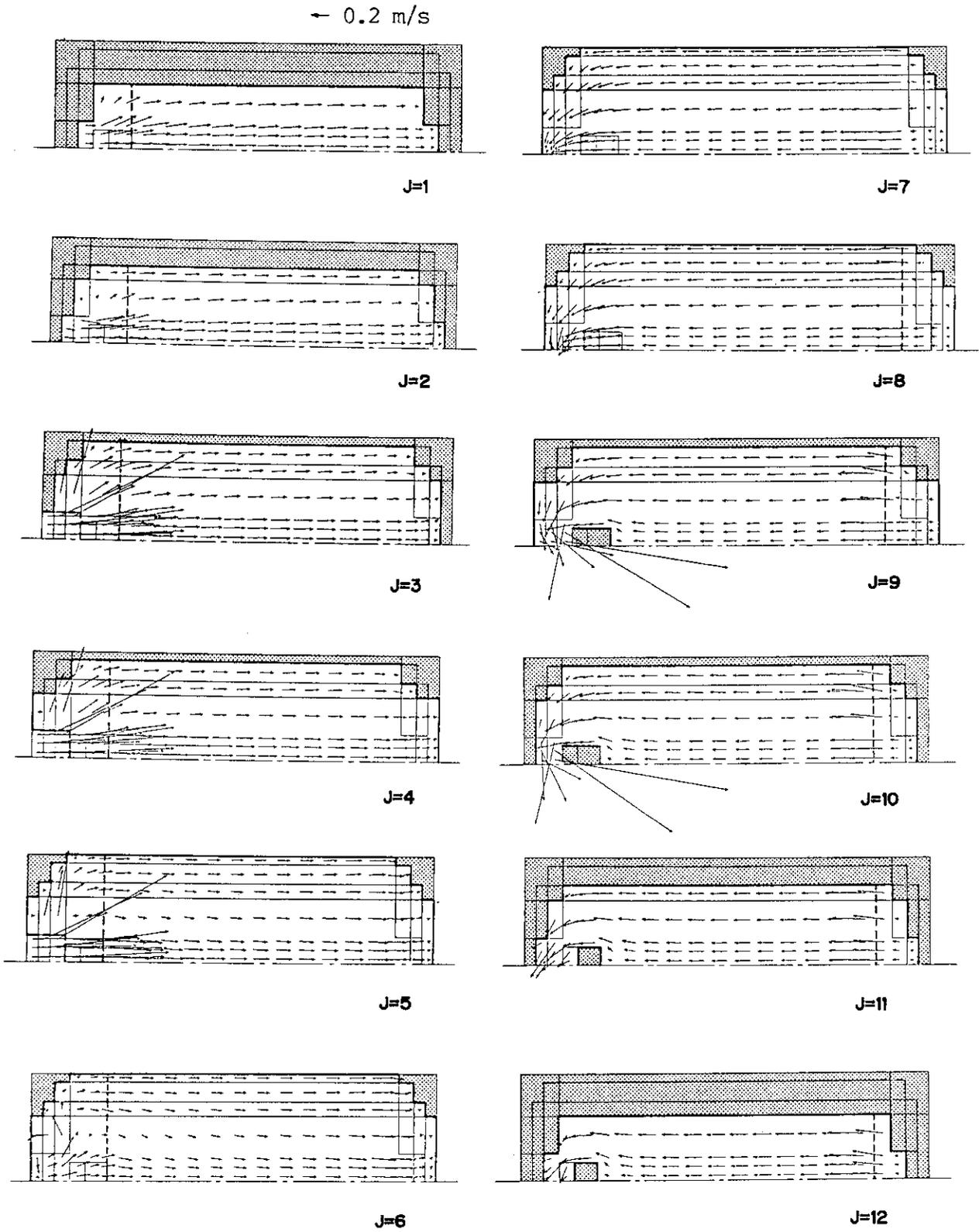


Fig. 3.2.11 (continued)

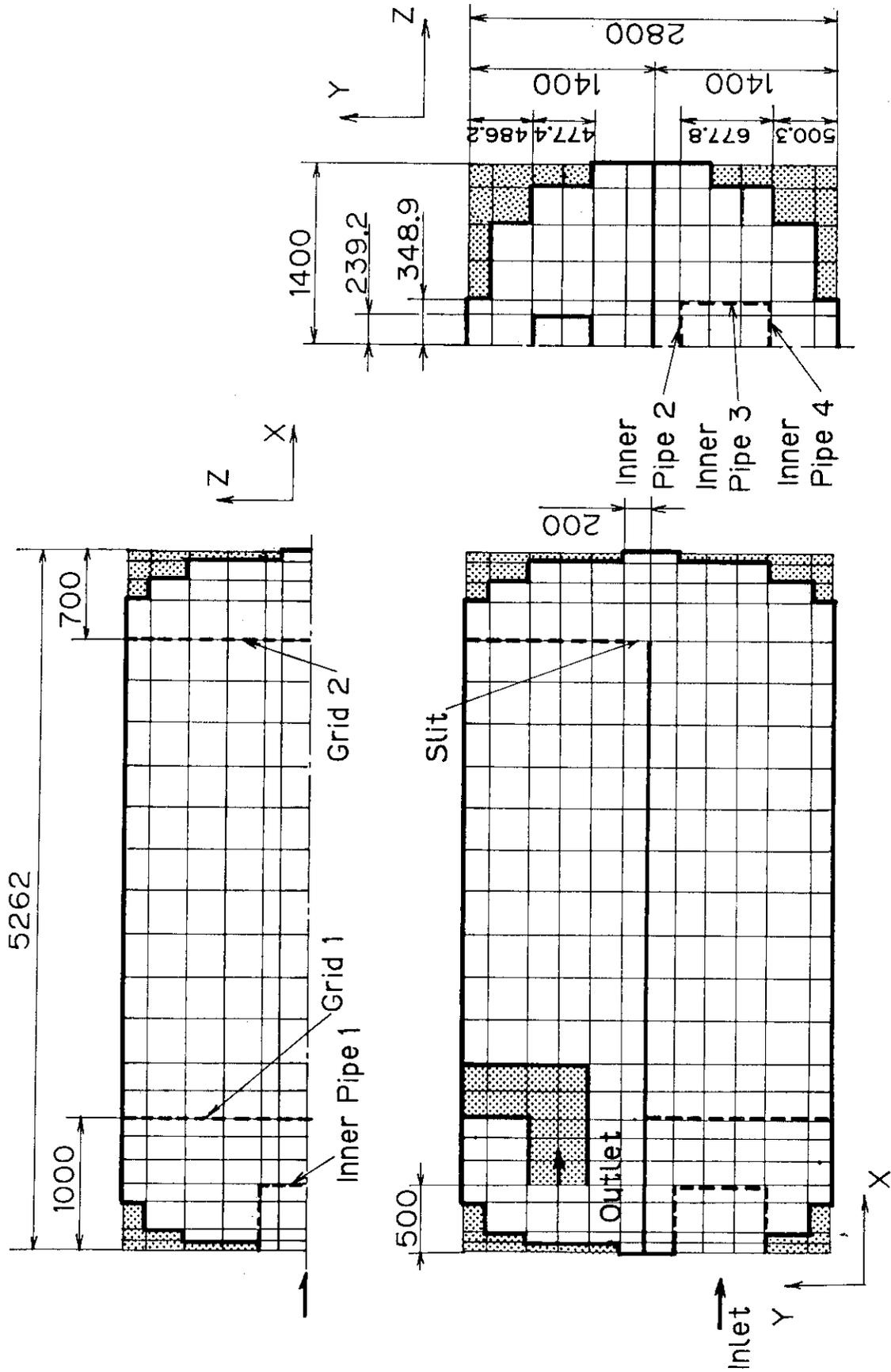


Fig. 3.2.12 Geometry of ^{16}N Decay Tank on 3-Dimensional Calculation Model of CASE3E'

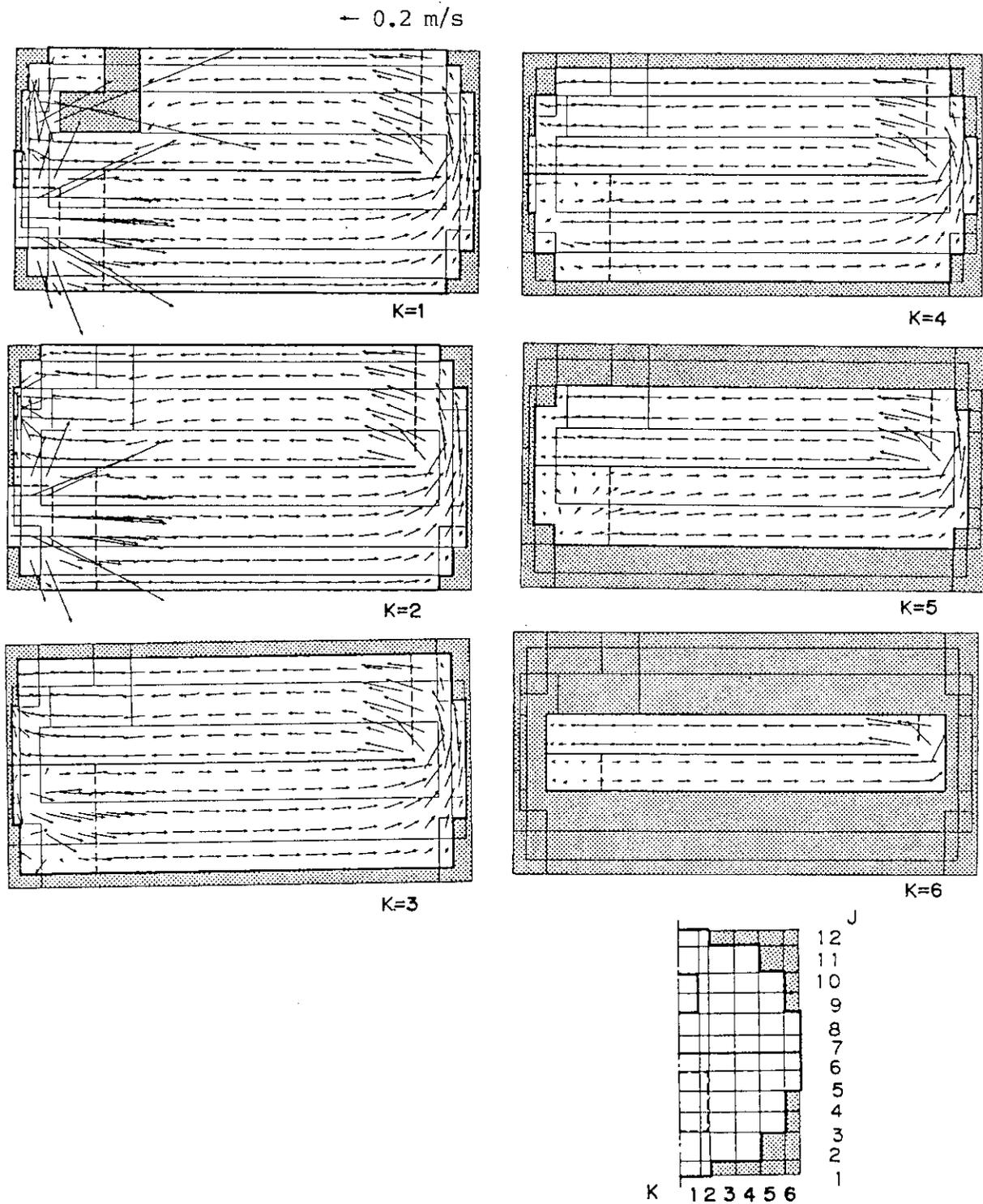


Fig. 3.2.13 Flow Distribution in ^{16}N Decay Tank in CASE3E'

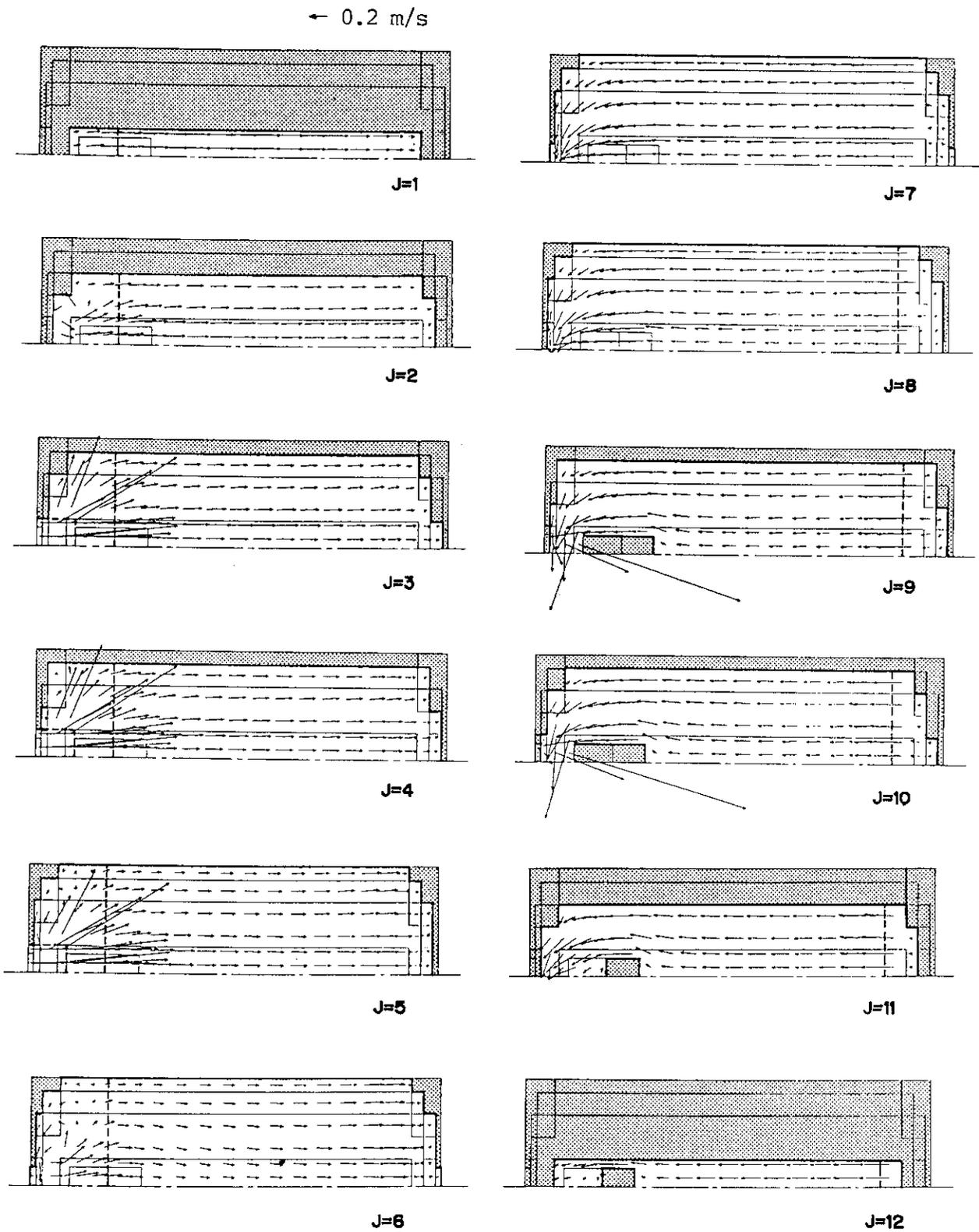


Fig. 3.2.13 (continued)

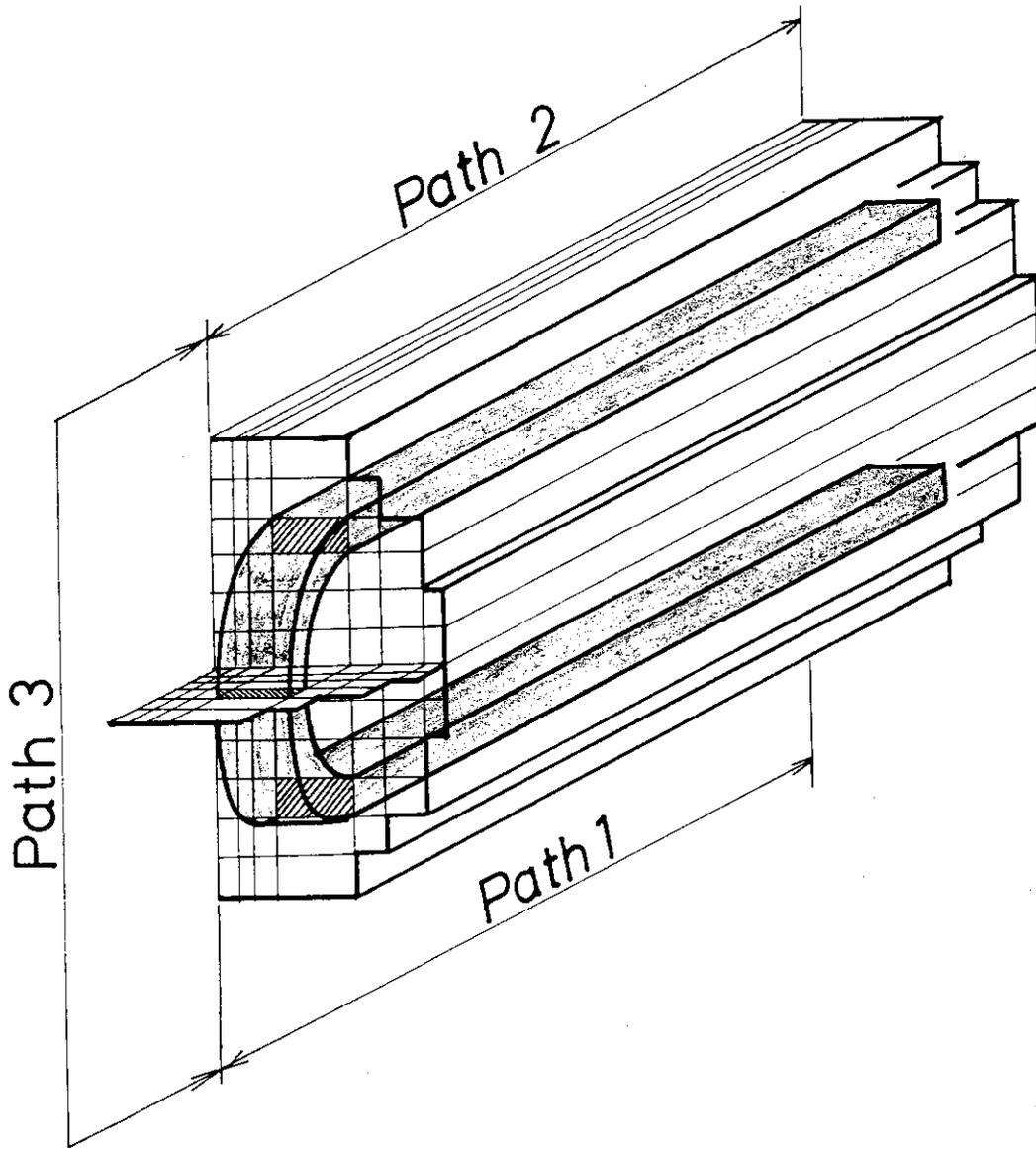


Fig. 3.2.14 Imaginary Flow Path in ^{16}N Decay Tank

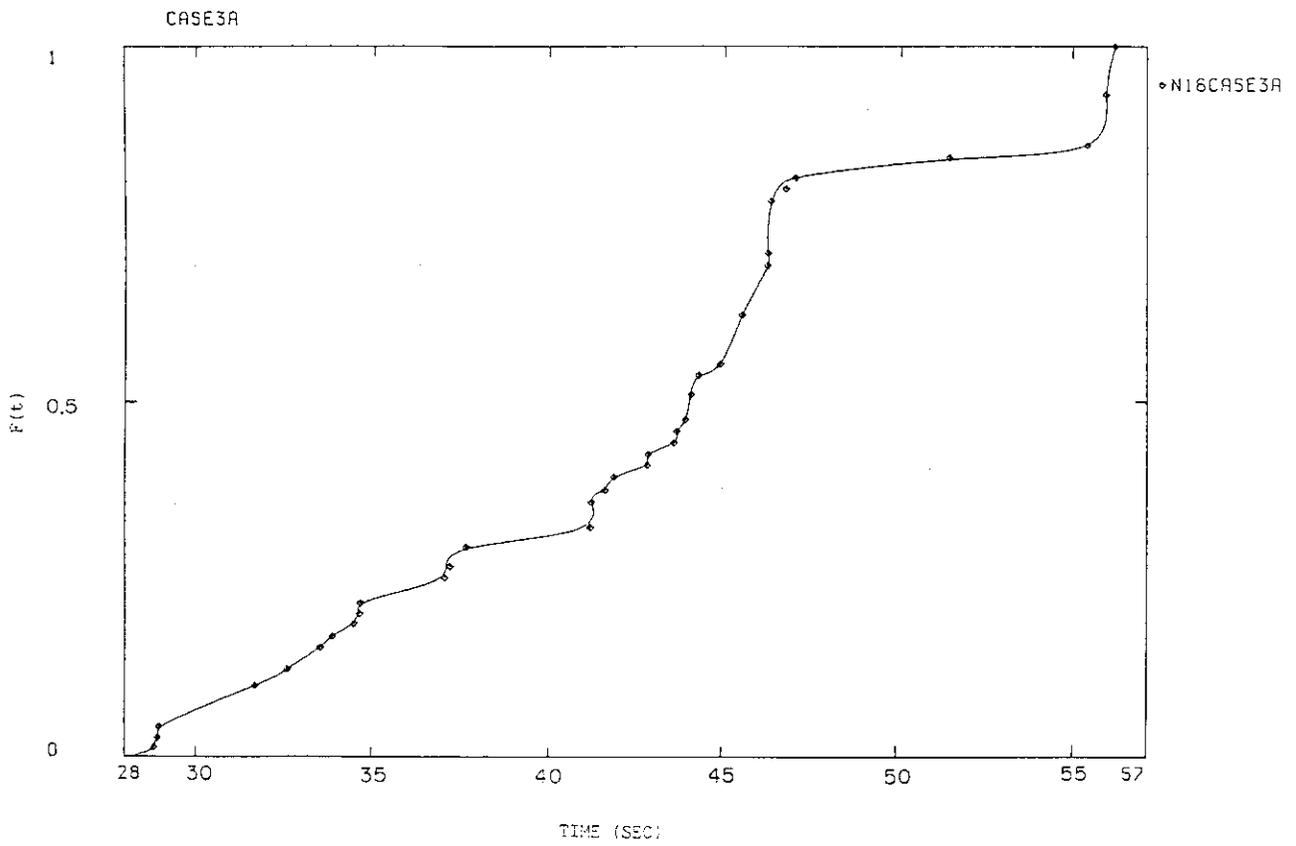


Fig. 3.2.15 Accumulation Frequency Curve of CASE3A

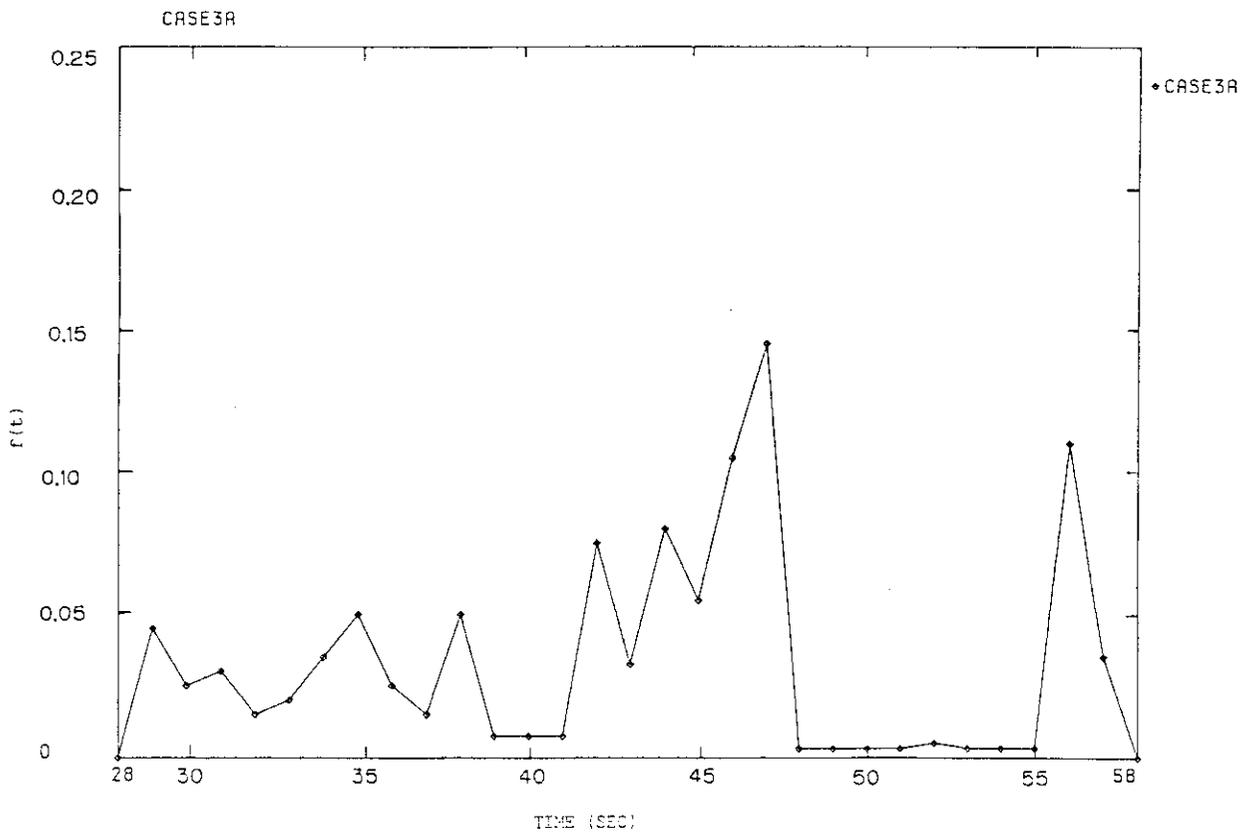


Fig. 3.2.16 Probability Density Curve of CASE3A

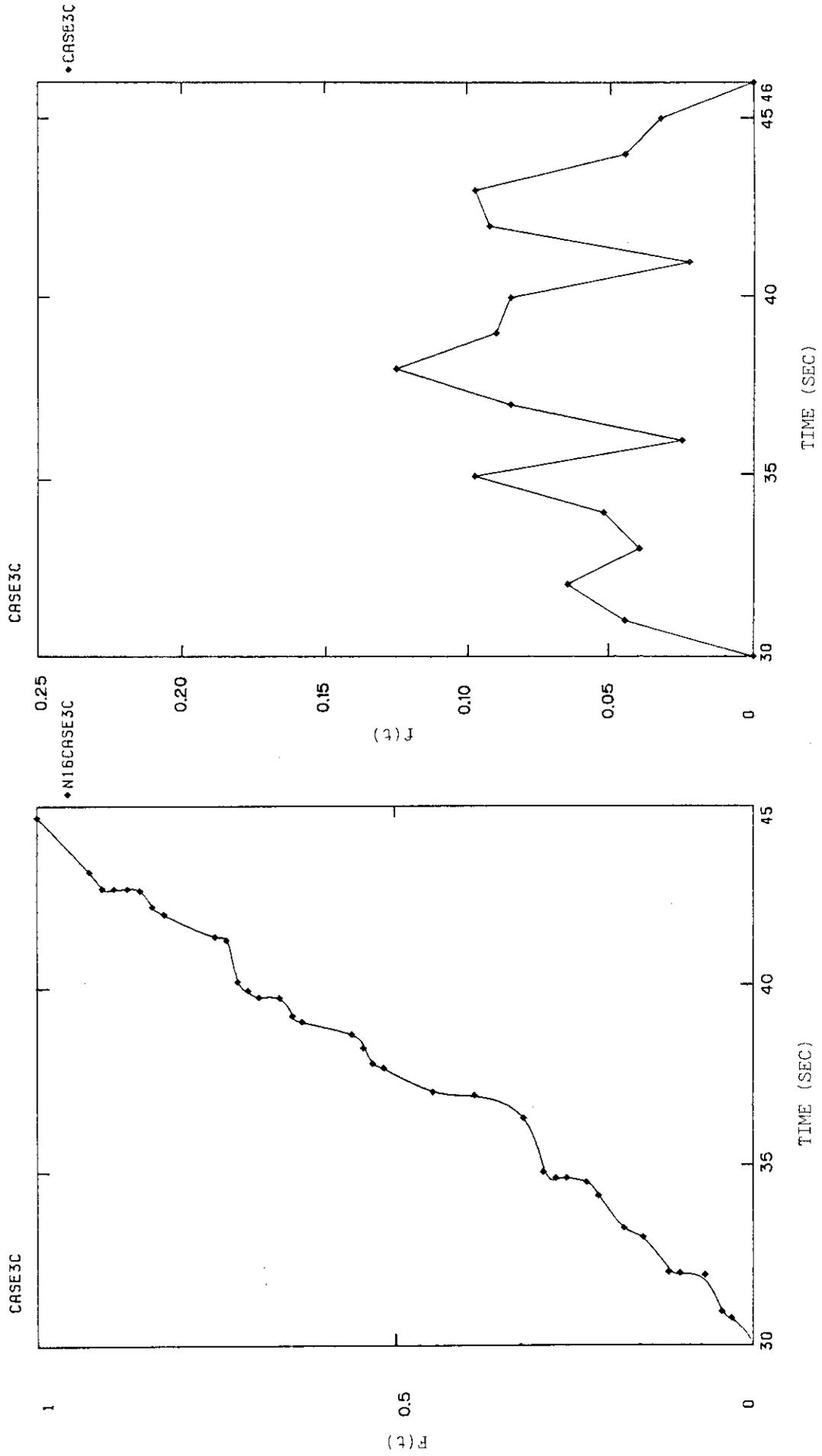


Fig. 3.2.17 Accumulation Frequency Curve of CASE3C

Fig. 3.2.18 Probability Density Curve of CASE3C

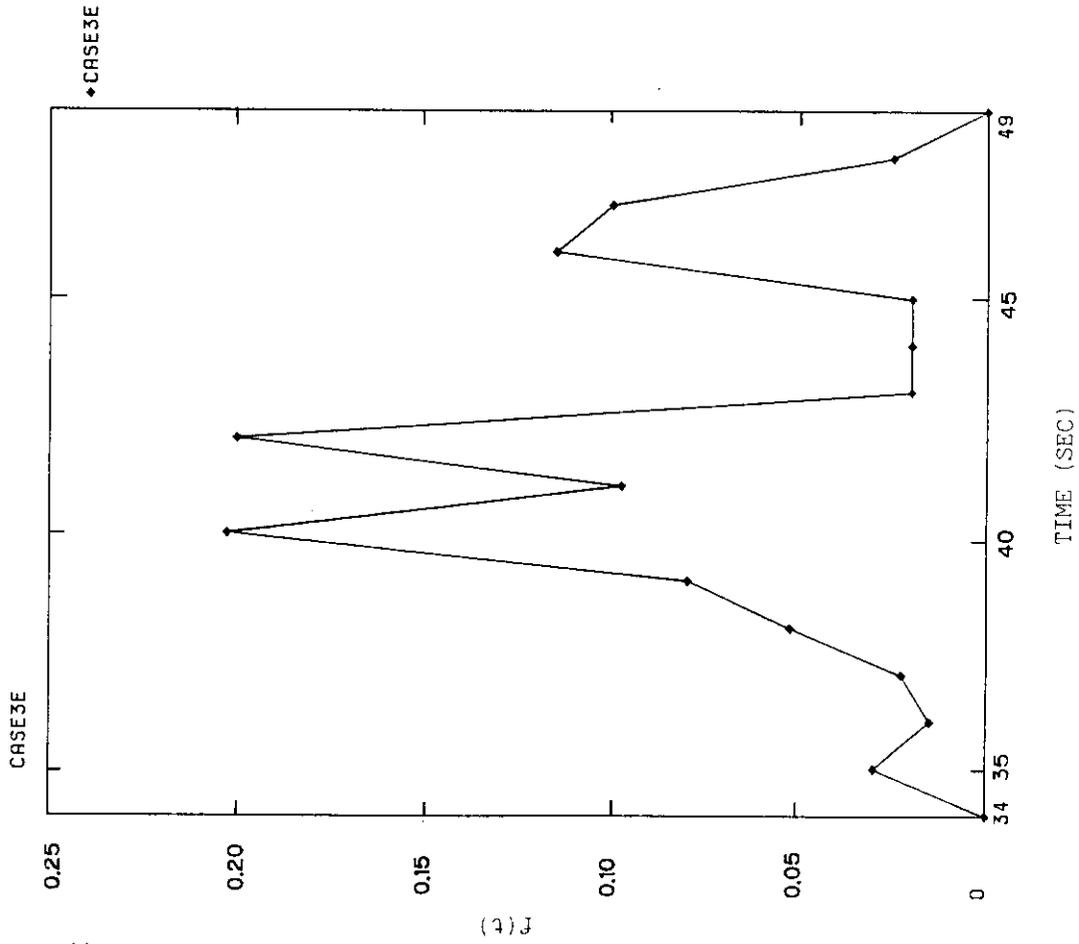


Fig. 3.2.20 Probability Density Curve of CASE3E

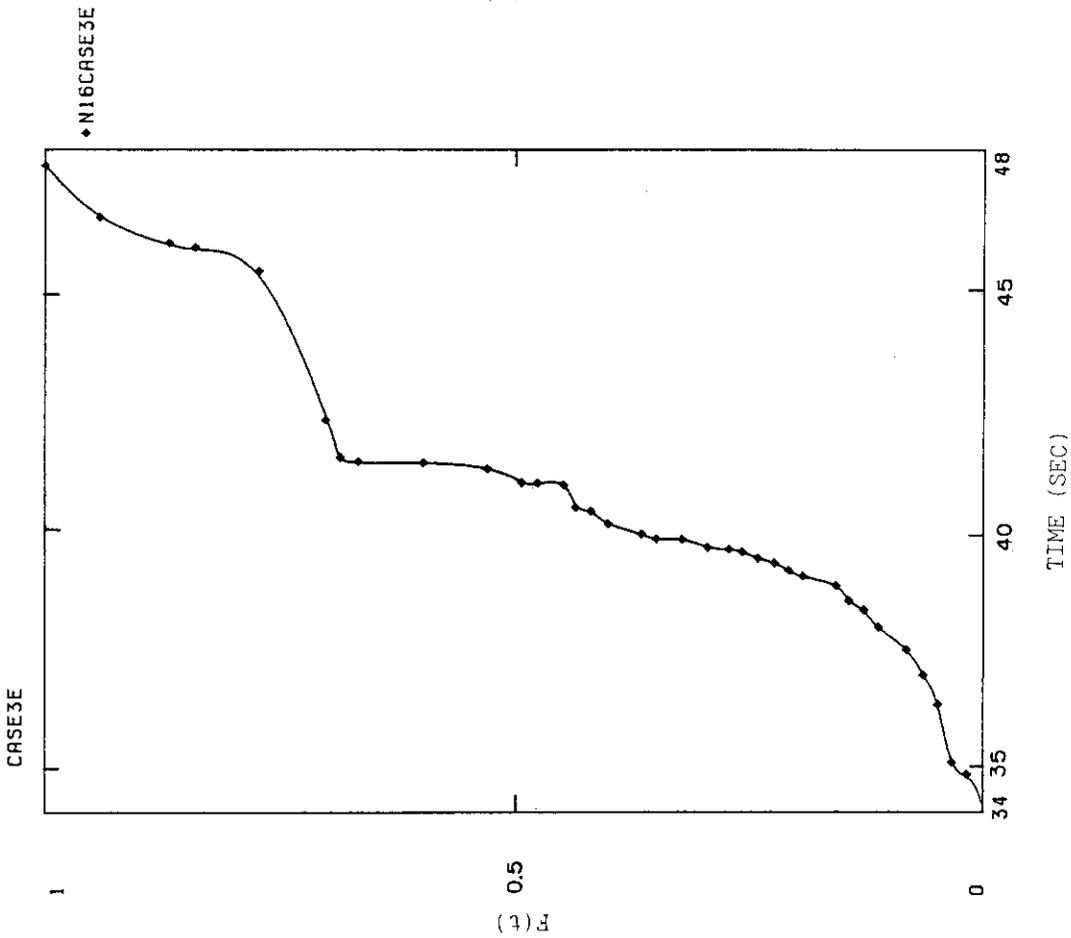


Fig. 3.2.19 Accumulation Frequency Curve of CASE3E

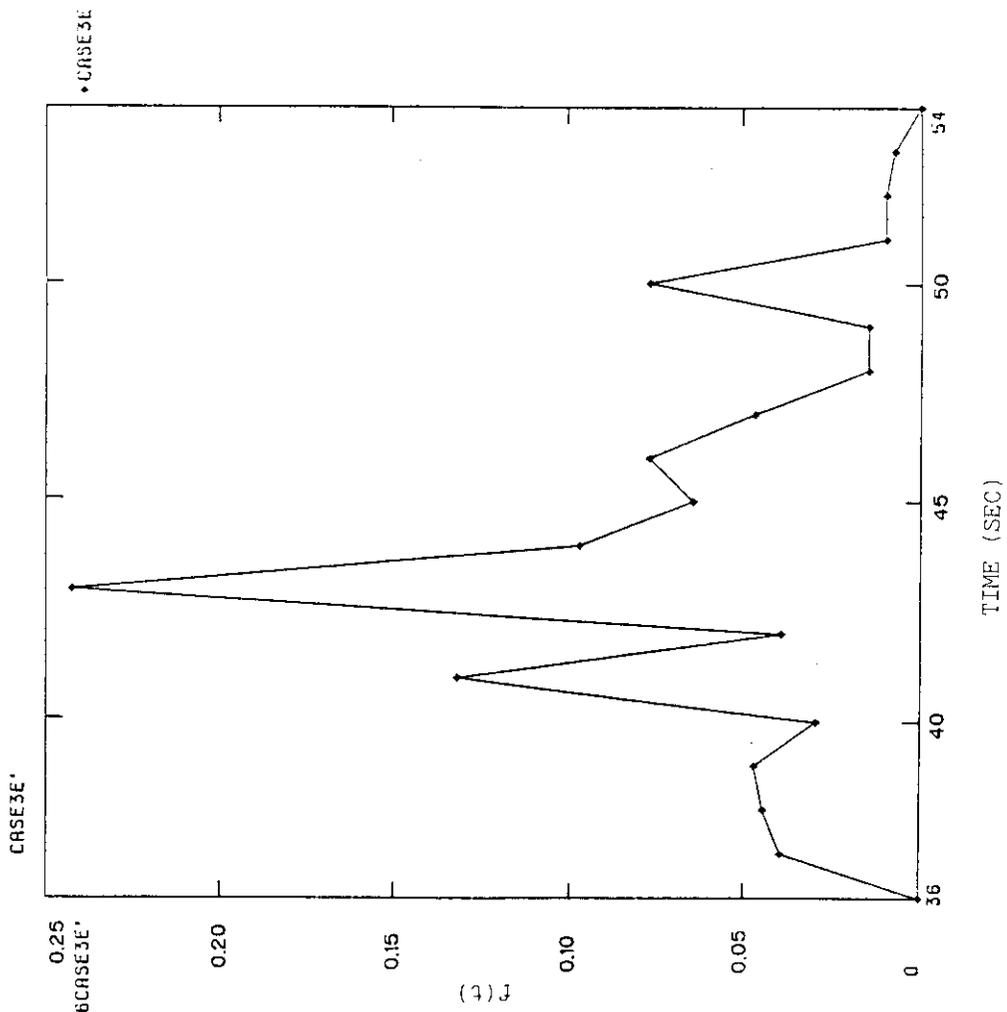


Fig. 3.2.22 Probability Density Curve of CASE3E'

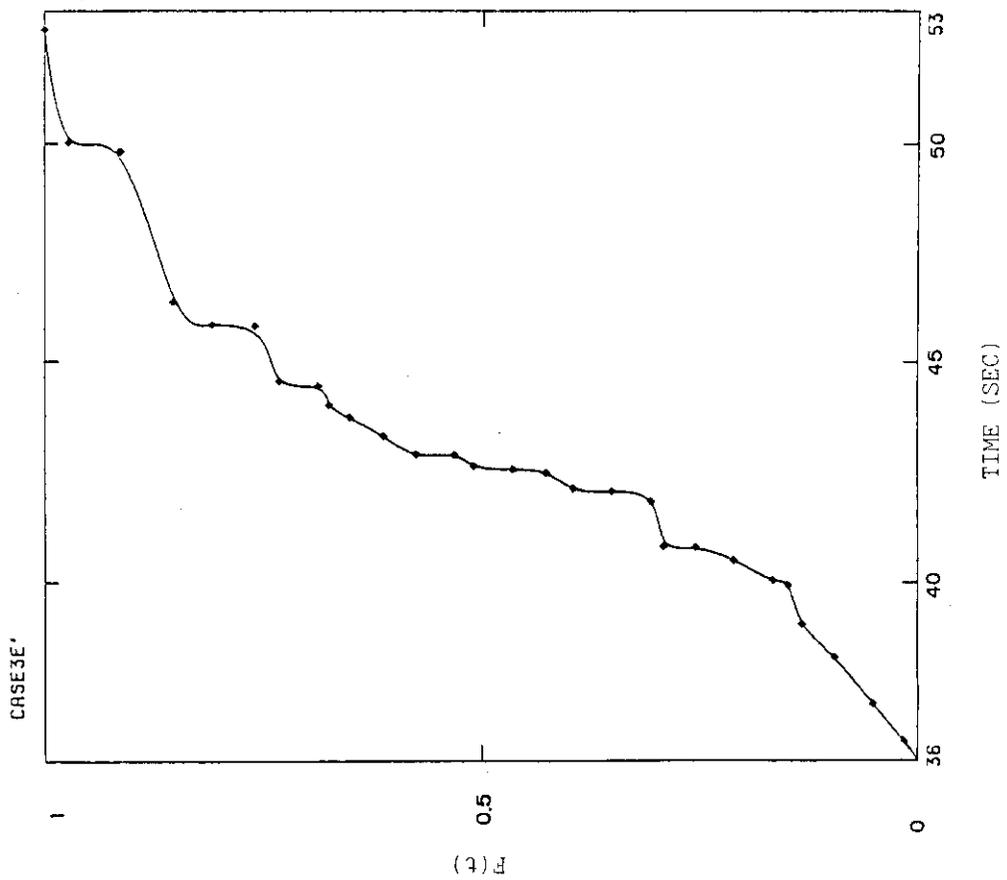


Fig. 3.2.21 Accumulation Frequency Curve of CASE3E'

3.2.4 圧力損失

^{16}N 減衰タンクは、1次冷却系の主ポンプ吸込側に位置する。JRR-3改造炉では、20 MW定格運転時に主ポンプで冷却材を吸収して定格流量を得ているため、1次冷却材主ポンプの吸込側圧力が低くなる。 ^{16}N 減衰タンクの圧力損失が大きければ、吸込側圧力がより低くなる。このため、 ^{16}N 減衰タンクの圧力損失を検討することは、1次冷却材主ポンプのキャビテーションおよびポンプ吸込側破断時の空気のまき込み防止という観点から非常に重要である。

そこで本解析のCASE 3Eについて圧力損失を簡易なモデルで求め、数値解析結果と比較する。

(1) 簡易モデルによる圧力計算

^{16}N 減衰タンクにおいては、大きく分けて以下に示す5つの部分による圧力損失が考えられる。

- ① 入口ディフューザ部
- ② インナー・パイプ部
- ③ 多孔板1
- ④ 反転部
- ⑤ 多孔板2
- ⑥ 出口ノズル

そこで、定格流量 $2,400 \text{ m}^3/\text{h}$ における上記各部の圧力損失を算出し、その合計値を ^{16}N 減衰タンクの圧力損失とする。

1) 入口ディフューザ部

入口ディフューザの圧力損失 ΔP_1 は次のようにして求めることができる。

$$\frac{\Delta P_1}{\gamma \cdot g} = k_1 \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (3.2.4 - 1)$$

ここに、

- g : 重力加速度 ($= 9.81 \text{ m/s}^2$)
- v_1 : ディフューザ上流側流速 (m/s)
- ΔP_1 : ディフューザ部における圧力損失 (Pa)
- k_1 : ディフューザの損失係数 (—)
- γ : 比重 ($= 0.992 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 40°C)

ディフューザ上流側 (1次冷却系配管: 550 A) の流速 v_1 は、1次冷却系配管の内径 $D_0 = 0.54 \text{ m}$ 、1次冷却材流量 $Q = 2,400 \text{ m}^3/\text{h}$ より

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{Q}{3600} \bigg/ \left(\frac{\pi}{4} D_0^2 \right) \\ &= \frac{2400}{3600} \bigg/ \left(\frac{\pi}{4} \cdot 0.54^2 \right) \\ &= 2.911 \text{ m/s} \end{aligned}$$

である。また、ディフューザの損失係数は、以下のようにして求めることができる。

^{16}N 減衰タンク入口のディフューザーの径の呼びは550A×800Aであるので、開き角は 12° となり、Fig. 3.2.23より

$$k_1 = 0.23$$

である。従って、入口ディフューザーの圧力損失 ΔP_1 は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_1}{\gamma \cdot g} &= k_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} \\ &= 0.23 \times \frac{2.911^2}{2 \times 9.81} \\ &= 0.099 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta P_1 = 0.967 \times 10^3 \text{ Pa}$$

2) インナー・パイプ部

インナー・パイプは、現在内径787mm ϕ 、長さ350mmのパイプで設計されている。Table 3.2.1に示すCASE 3Eの場合、平均開孔率 \bar{f} は、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \bar{f} &= \frac{\bar{f}_1 \cdot A_1 + (\bar{f}_2 + 2 \cdot \bar{f}_3 + \bar{f}_4) \cdot \frac{A_2}{4}}{A_1 + A_2} \\ &= \frac{0.35 \times 0.486 + (0.18 + 2 \times 0.35 + 0.32) \cdot \frac{0.867}{4}}{0.486 + 0.865} \\ &= 0.32 \end{aligned}$$

となる。

$$\text{ここに } A_1 : \text{インナー・パイプ前部の全面積} = \frac{\pi}{4} 0.79^2 = 0.486 \text{ m}^2$$

$$A_2 : \text{インナー・パイプ周部の全面積} = \pi \cdot 0.79 \times 0.15 = 0.865 \text{ m}^2$$

$$\bar{f}_1 : \text{インナー・パイプ1の開孔率} = 0.35$$

$$\bar{f}_2 : \text{インナー・パイプ2の開孔率} = 0.18$$

$$\bar{f}_3 : \text{インナー・パイプ3の開孔率} = 0.35$$

$$\bar{f}_4 : \text{インナー・パイプ4の開孔率} = 0.32$$

従って、インナー・パイプ平均の開孔率は0.32となり、平均抵抗係数Kはインナー・パイプ4と同じ1.4とする。この時孔内における流速 v_0 は次式から求まる。

$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{Q}{3600 \cdot (A_1 + A_2) \cdot \bar{f}} \\ &= \frac{2400}{3600 (0.486 + 0.865) \times 0.32} \\ &= 1.54 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ここに Q : 1次冷却材流量 = 2400 m³/h

従って、インナー・パイプの圧力損失は、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= k \cdot \frac{v_0^2}{2g} \cdot \gamma \cdot g \\ &= 1.4 \cdot \frac{1.54^2}{2 \times 9.81} \times 0.992 \times 10^3 \times 9.81 \\ &= 1.647 \times 10^3 \text{ Pa} \end{aligned}$$

3) 多孔板 1

多孔板 1 はインナー・パイプを通った流れを更に整流するものであり、その開孔率 \bar{f} および損失係数 k は Table 3.2.1 に示すようにそれぞれ $\bar{f} = 0.67$ 、 $k = 0.4$ である。

また孔内の流速 v_0 は次式から求まる。

$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{Q}{3600 \cdot A \cdot \bar{f}} \\ &= \frac{2400}{3600 \cdot 3.08 \cdot 0.67} \\ &= 0.324 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ここに A : 多孔板 1 の孔内合計面積

従って、多孔板 1 の圧力損失は以下ようになる

$$\begin{aligned} \Delta P_3 &= k \cdot \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \cdot \gamma \cdot g \\ &= 0.4 \times \frac{0.324^2}{2 \times 9.81} \times 0.992 \times 10^3 \cdot 9.81 \\ &= 0.021 \times 10^3 \text{ Pa} \end{aligned}$$

4) 反転部

¹⁶N 減衰タンク内で、流体は多孔板 1 を通過して非常に遅い流速でタンク内を流れた後に Fig. 2.1.2 のように反転する。この部分の圧力損失は、曲げ半径が減衰タンクの相当直径の $\frac{1}{2}$ に等しい 180° 曲り管 (Fig. 3.2.24 参照) の圧力損失にて模擬した。まず、減衰タンクの等価直径 De を算出する。

$$\begin{aligned} De &= 4 \times \frac{A}{P} \\ &= 4 \times \frac{3.08}{7.20} = 1.71 \text{ m} \end{aligned}$$

ここに

De : 減衰タンクの相当直径 (m)

$$A : \text{減衰タンク内平均流路断面積} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{1}{2} = \frac{\pi}{4} \times 2.8^2 \cdot \frac{1}{2} = 3.08 \text{ m}^2$$

$$D : \text{減衰タンク内径} = 2.8 \text{ m}$$

$$P : \text{減衰タンク内平均ぬれぶち長さ} = \pi \cdot D \cdot \frac{1}{2} + D = \frac{\pi}{2} \cdot 2.8 + 2.8 \\ = 7.20 \text{ m}$$

1次冷却系流量 $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{h}$ における減衰タンク内平均流速 v_1 は

$$v_1 = \frac{Q}{3600 A} \\ = \frac{2400}{3600 \times 3.08} \\ = 0.217 \text{ m/s}$$

となる。従って、Re数は以下のようにして求めることができる。

$$\text{Re} = \frac{v_1 \cdot \text{De}}{\nu} \\ = \frac{0.217 \times 1.71}{0.658 \times 10^{-6}} \\ = 5.64 \times 10^5 \\ \therefore \text{Re} (\text{De}/R)^2 = 5.64 \times 10^5 \times 2^2 \\ = 2.26 \times 10^6$$

ただし

$$\text{De}/R = 2 \quad (\text{Fig. 3.2.24 参照})$$

$\text{Re} (\text{De}/R)^2 > 364$ の場合の 180° 曲り管の損失係数 k は以下のように与えられる³⁾。

$$k_4 = 0.00431 \cdot \alpha \cdot \theta \cdot \text{Re}^{-0.17} (R/d)^{0.84}$$

ここに

$$\text{Re} : \text{レイノルズ数} = 5.64 \times 10^5$$

$$R : \text{曲り管の中心線の半径} = \frac{\text{De}}{2} = 0.86 \text{ m}$$

$$d : \text{曲り管内径} = \text{De} = 1.71 \text{ m}$$

$$\theta : \text{曲り角度} = 180^\circ$$

$$\alpha : \text{係数} = 1 + 5.06 (R/d)^{-4.52} = 117.1$$

$$\therefore k_4 = 0.00431 \times 117.1 \times 180 \times (5.64 \times 10^5)^{0.84} \\ = 5.34$$

従って、反転部における圧力損失 ΔP_4 は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 \Delta P_4 &= k_4 \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \cdot g \\
 &= 5.34 \times \frac{0.217}{2 \times 9.81} \times 0.992 \times 10^3 \times 9.81 \\
 &= 0.125 \times 10^3 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

5) 多孔板 2

多孔板 2 には、スリットを設けているが、ここでは、多孔板 1 と同様のスリットなしのモデルにて圧力損失を算出する。多孔板 2 の開孔率 \bar{f} および損失係数 k は Table 3.2.1 よりそれぞれ $\bar{f} = 0.2$ 、 $k = 1.8$ である。孔内流速 v_0 は次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 v_0 &= \frac{Q}{3600 \cdot A \cdot \bar{f}} \\
 &= \frac{2400}{3600 \cdot 3.08 \cdot 0.2} \\
 &= 1.08 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

従って、多孔板 2 の圧力損失は、以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 \Delta P_6 &= k \cdot \frac{v_0^2}{2g} \cdot \gamma \cdot g \\
 &= 1.8 \times \frac{1.08^2}{2 \times 9.81} \times 0.992 \times 10^3 \times 9.81 \\
 &= 1.041 \times 10^3 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

6) 出口ノズル損失

出口ノズルの損失は、パイプの入口損失、摩擦損失およびエルボの損失が考えられる。パイプは、内径 D が 0.54 m (550 A)、長さ L が 1.4 m とする。パイプの摩擦損失係数 λ は、ムーディ線図³⁾より $\lambda = 0.014$ 、パイプ入口の損失係数は Fig. 3.2.25 に示すような管路入口のうち(d)のような形状を用いて、 $k_1 = 0.56$ とする。エルボの損失係数は $k_2 = 0.30$ とした³⁾。パイプ内流速 v は以下のようになるので

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{Q}{3600 \times \frac{\pi}{4} D^2} \\
 &= \frac{2400}{3600 \times \frac{\pi}{4} \times 0.54^2} \\
 &= 2.911 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

となる。従って、出口ノズルの圧力損失は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta P_6 &= \left(\lambda \frac{L}{D} + k_1 + k_2 \right) \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \cdot g \\ &= \left(0.014 \times \frac{1.4}{0.54} + 0.56 + 0.3 \right) \times \frac{2.911^2}{2 \times 9.81} \times 0.992 \times 10^3 \times 9.81 \\ &= 3.767 \times 10^3 \text{ Pa} \end{aligned}$$

7) タンク直流路部の摩擦損失

^{16}N 減衰タンクは等価直径が 1.71 m と大きく、タンク内の平均流速は 0.217 m/s と非常に遅いため、摩擦損失は無視する。

8) 全圧力損失

以上の減衰タンク各部における圧力損失 $\Delta P_1 \sim \Delta P_6$ を合計すると、全圧力損失は以下の値となる。

$$\begin{aligned} \Delta P &= \sum_{i=1}^6 \Delta P_i \\ &= (0.967 + 1.647 + 0.021 + 0.125 + 1.041 + 3.767) \times 10^3 \\ &= 7.568 \times 10^3 \text{ Pa} (= 0.771 \text{ mAq}) \end{aligned}$$

(2) CASE 3E 解析結果との比較

CASE 3E の STREAM による解析結果において入口から出口までの全圧力損失は 4.22×10^3 Pa である。ただし、これは、3.2.4(1)の1)入口ディフューザーの圧力損失および6)出口ノズルのうちパイプの摩擦損失ならびにエルボの損失は含まない。入口ディフューザーの圧力損失は $\Delta P_1 = 0.967 \times 10^3$ Pa である。出口ノズルのパイプ摩擦損失とエルボの損失の合計は、3.2.4(1)6)と同様に

$$\begin{aligned} \Delta P_6' &= \left(\lambda \frac{L}{D} + k_2 \right) \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \cdot g \\ &= \left(0.014 \times \frac{1.4}{0.54} + 0.3 \right) \times \frac{2.911^2}{2 \times 9.81} \times 0.992 \times 10^3 \times 9.81 \\ &= 1.414 \times 10^3 \text{ Pa} \end{aligned}$$

従って ^{16}N 減衰タンクの全圧力損失は

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_{\text{STREAM}} + \Delta P_6' \\ &= (0.967 + 4.22 + 1.414) \times 10^3 \\ &= 6.601 \times 10^3 \text{ Pa} (= 0.673 \text{ mAq}) \end{aligned}$$

この値と 3.2.4(1)の簡易モデルによる計算値との差は、水頭にして約 10 cm 異なるだけで非常に良い一致を示している。

なお、直流路部の断面積を実機に合わせて解析した CASE 3E' の圧力損失について以下に示す。

CASE 3E' の STREAM 解析結果より得られたタンク入口から出口までの全圧損は、 $5.82 \times$

10^3 Pa である。従って、3.2.4(2)と同様に、これに、入口ディフューザの損失 $\Delta P_1 = 0.099 \times 10^3$ kg/m² 出口ノズルの損失のうちパイプの摩擦損失 $\Delta P_1 = 0.967 \times 10^3$ Pa ならびにエルボの損失の合計 $\Delta P'_6 = 1.414 \times 10^3$ Pa を加えたものである。

$$\begin{aligned}\therefore \Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_{\text{STREAM}} + \Delta P'_6 \\ &= (0.967 + 5.82 + 1.414) \times 10^3 \\ &= 8.201 \times 10^3 \text{ Pa} (= 0.836 \text{ mAq})\end{aligned}$$

この値と3.2.4(1)の簡易モデルによる計算結果との差は、水頭にして約7 cmAq 程度であり、良い一致を示している。

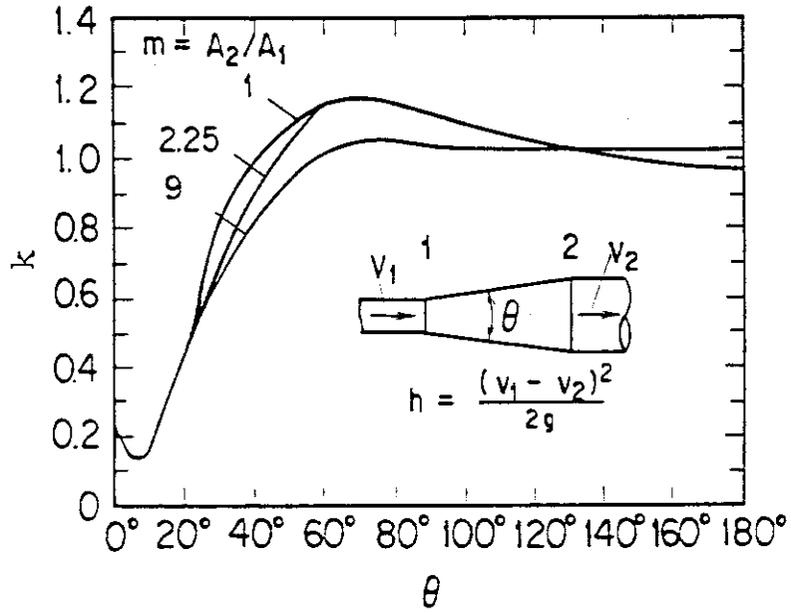


Fig. 3.2.23 Loss Coefficient k for Circular Cross-Section Diffuser ³⁾

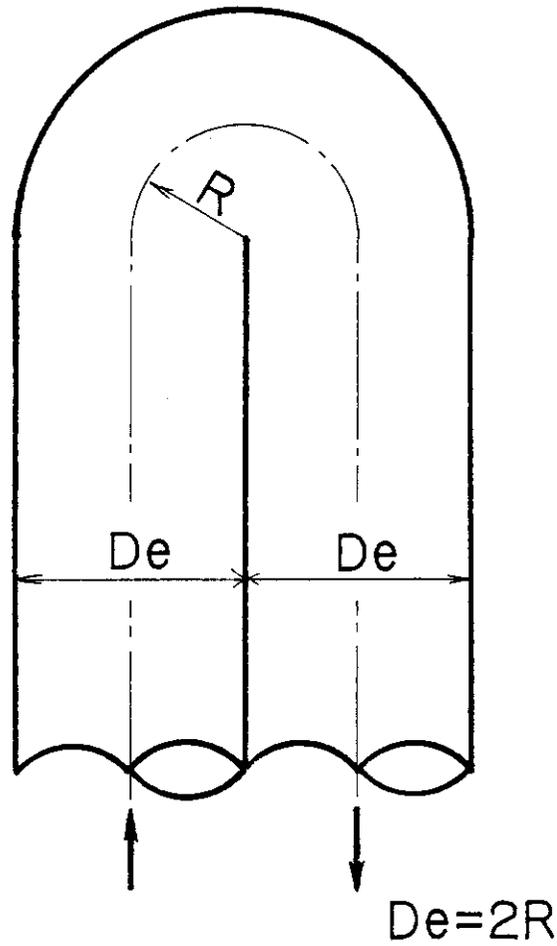


Fig. 3.2.24 Model of Reverse Area

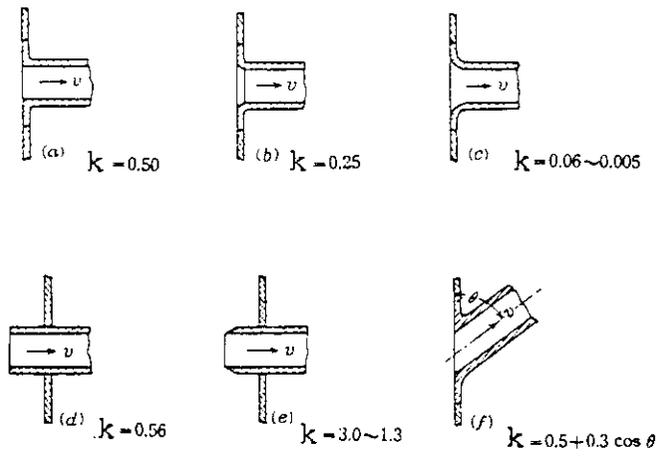


Fig. 3.2.25 Loss Coefficient of Intake 3)

4. 結 言

JRR-3改造炉1次冷却系に設置される ^{16}N 減衰タンク内の流速分布、滞留時間および圧力損失を、3次元熱流体解析コードSTREAMを用いて算出し評価した。JRR-3改造炉では、原子炉建家内の冷却系機器の設置場所の制約から ^{16}N 減衰タンクの外形寸法が制限されている。このため、JRR-3改造炉の1次冷却系の遮蔽設計上要求される滞留時間に対して十分な滞留時間を確保するために、タンク内の構造を工夫した。解析の結果、インナー・パイプ、多孔板、スリットを設け、更にそれらの開孔率等を工夫することにより、平均滞留時間として42.4秒、遮蔽上の平均滞留時間として43.0秒を得ることができた。これは、JRR-3改造炉の1次冷却系の遮蔽設計を充分満足するものである。

更に、本解析で得られた2次元、3次元のフローパターンおよび流束分布等は物理的にも充分妥当なものであり、本解析のようなタンク内の流動解析に、STREAMコードは有用であることも併せて知ることができた。

謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、終始御鞭達いただいた研究炉管理部大西信秋研究炉開発室長、安藤弘栄安全性特性解析グループリーダーに深甚なる謝意を表す。また、STREAMコードの使用に当っては前高温工学部河村洋HENDEL開発室長に多大な御援助および貴重な意見を戴いた。さらに研究炉開発室原子炉技術グループ亀山巖氏にはJRR-3改造炉1次冷却系に関する貴重な資料および意見を、安全性特性解析グループ丸尾毅研究員には遮蔽設計に関する貴重な意見を戴いた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) I. E. Idel' Chik : "Hand book of Hydraulic Resistance", AECTR-6630, (1966).
- 2) C. M. Lederer, V. S. Shirley : "Table of Isotopes", 7th ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, (1978).
- 3) 日本機械学会編 : "機械工学便覧(改訂第6版)", 第8編水力学及び流体力学, 日本機械学会, (1977).

4. 結 言

JRR-3改造炉1次冷却系に設置される¹⁶N減衰タンク内の流速分布、滞留時間および圧力損失を、3次元熱流体解析コードSTREAMを用いて算出し評価した。JRR-3改造炉では、原子炉建家内の冷却系機器の設置場所の制約から¹⁶N減衰タンクの外形寸法が制限されている。このため、JRR-3改造炉の1次冷却系の遮蔽設計上要求される滞留時間に対して十分な滞留時間を確保するために、タンク内の構造を工夫した。解析の結果、インナー・パイプ、多孔板、スリットを設け、更にそれらの開孔率等を工夫することにより、平均滞留時間として42.4秒、遮蔽上の平均滞留時間として43.0秒を得ることができた。これは、JRR-3改造炉の1次冷却系の遮蔽設計を充分満足するものである。

更に、本解析で得られた2次元、3次元のフローパターンおよび流束分布等は物理的にも充分妥当なものであり、本解析のようなタンク内の流動解析に、STREAMコードは有用であることも併せて知ることができた。

謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、終始御鞭達いただいた研究炉管理部大西信秋研究炉開発室長、安藤弘栄安全性特性解析グループリーダーに深甚なる謝意を表す。また、STREAMコードの使用に当っては前高温工学部河村洋HENDEL開発室長に多大な御援助および貴重な意見を戴いた。さらに研究炉開発室原子炉技術グループ亀山巖氏にはJRR-3改造炉1次冷却系に関する貴重な資料および意見を、安全性特性解析グループ丸尾毅研究員には遮蔽設計に関する貴重な意見を戴いた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) I. E. Idel' Chik : "Hand book of Hydraulic Resistance", AECTR-6630, (1966).
- 2) C. M. Lederer, V. S. Shirley : "Table of Isotopes", 7th ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, (1978).
- 3) 日本機械学会編 : "機械工学便覧(改訂第6版)", 第8編水力学及び流体力学", 日本機械学会, (1977).

4. 結 言

JRR-3改造炉1次冷却系に設置される ^{16}N 減衰タンク内の流速分布、滞留時間および圧力損失を、3次元熱流体解析コードSTREAMを用いて算出し評価した。JRR-3改造炉では、原子炉建家内の冷却系機器の設置場所の制約から ^{16}N 減衰タンクの外形寸法が制限されている。このため、JRR-3改造炉の1次冷却系の遮蔽設計上要求される滞留時間に対して十分な滞留時間を確保するために、タンク内の構造を工夫した。解析の結果、インナー・パイプ、多孔板、スリットを設け、更にそれらの開孔率等を工夫することにより、平均滞留時間として42.4秒、遮蔽上の平均滞留時間として43.0秒を得ることができた。これは、JRR-3改造炉の1次冷却系の遮蔽設計を充分満足するものである。

更に、本解析で得られた2次元、3次元のフローパターンおよび流束分布等は物理的にも充分妥当なものであり、本解析のようなタンク内の流動解析に、STREAMコードは有用であることも併せて知ることができた。

謝 辞

本報告書をまとめるに当り、終始御鞭達いただいた研究炉管理部大西信秋研究炉開発室長、安藤弘栄安全性特性解析グループリーダーに深甚なる謝意を表す。また、STREAMコードの使用に当っては前高温工学部河村洋HENDEL開発室長に多大な御援助および貴重な意見を戴いた。さらに研究炉開発室原子炉技術グループ亀山巖氏にはJRR-3改造炉1次冷却系に関する貴重な資料および意見を、安全性特性解析グループ丸尾毅研究員には遮蔽設計に関する貴重な意見を戴いた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) I. E. Idel' Chik : "Hand book of Hydraulic Resistance", AECTR-6630, (1966).
- 2) C. M. Lederer, V. S. Shirley : "Table of Isotopes", 7th ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, (1978).
- 3) 日本機械学会編 : "機械工学便覧(改訂第6版)", 第8偏水力学及び流体力学, 日本機械学会, (1977).

付録 汎用3次元熱流体解析コード STREAMの概要

本コードは、3次元の連続の式、運動方程式及びエネルギー式を連成させることによって非圧縮性粘性流体の熱流動現象の数値解析を行うことができる。また、現象論的乱流モデルであるk-εモデルを用いた乱流解析も可能である。

取り扱う基礎方程式群は、以下の通りである。

<連続の式>

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

<運動の式>

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u} - (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + \vec{f} - \vec{g} \beta (T - T_{ref}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

<エネルギー-保存式>

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = \nabla^2 K T - (\vec{u} \cdot \nabla) \rho C_p T + \dot{q} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 \vec{u} は速度ベクトル、Reはレイノルズ数を表す。又、温度変化に伴う浮力の効果はBoussinesq近似を用いている。これらの式に現れる変数の意味と単位は以下の通りである。

- x_i : 位置座標 (m)
- u_i : x_i 方向の流体速度 (m/s)
- t : 時間 (s)
- ρ : 流体か固体の密度 (kg/m³)
- P : 流体の圧力 (N/m²)
- ν : 動粘度 (m²/s)
(= $\nu_l + \nu_t$: 分子動粘性係数+渦動粘性係数)
- f : 体積力 (m/s²)
- g : 加速度 (m/s²)
- β : 体膨張率 (1/°C)
- T : 流体か固体の温度 (°C)
- T_{ref} : 流体の基準温度 (°C)
- C_p : 定圧比熱 (J/kg・°C)
- K : 熱伝導率 (J/m・s・°C)
- \dot{q} : 発熱量 (J/m³・s)
- $\vec{()}$: ()内の変数のベクトル表示

運動方程式は速度と圧力を未知数として含んでおり、式(1)-(2)を数値解析し易い式形に定式化する。定式化の方法には、

- (1) 速度と圧力を用いる方法 (原始変数 [primitive variable] 法)
- (2) 渦度と流れ関数を用いる方法
- (3) 速度と渦度を用いる方法

などがある。本コードでは、(1)の方法で定式化されている。すなわち、式(2)の保存形と、式(2)の発散をとって式(1)を代入して得られる圧力のポアソン方程式

$$\nabla^2 P = -\nabla \cdot \{(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u}\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

を連立して解く方法である。これらの非線形方程式を解く際には、反復法(たとえば、SOR法)がよく用いられる。反復法で解く場合、各ステップごとに誤差が累積し、この誤差の累積を小さくするため収束判定条件を厳しくする必要がある。しかし、これは反復計算を増大させ、多大の計算時間を必要とする。このような数値計算上の特性を回避するため、反復計算に対する収束判定条件が緩くても時間進行に対して誤差が累積しない方法がいろいろ考えられている。その一つに圧力補正法があり、本コードはこの方法を用いている。以下に、圧力補正式の導出過程を示す。

式(2)を Euler 法で陽的に離散化すると、

$$\frac{\vec{u}^{n+1} - \vec{u}^n}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla P^{n+1} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u}^{n+1} - (\vec{u}^{n+1} \cdot \nabla)\vec{u}^{n+1} + \vec{f}^n - \vec{g} \beta (T^n - T_{ref}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式では圧力は陰的に{(n+1)時刻で}取り扱っている。また、圧力について陽的に(n時刻で)取り扱い、この圧力場に対応する予測速度ベクトルを \tilde{u} として表すと

$$\frac{\tilde{u} - \vec{u}^n}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla P^n + \frac{1}{Re} \nabla^2 \tilde{u} - (\tilde{u} \cdot \nabla)\tilde{u} + \vec{f}^n - \vec{g} \beta (T^n - T_{ref}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。もちろん、予測速度ベクトルは真の圧力と異なる圧力 P^n を用いているので、連続の式を満足していない。式(5)より式(6)を差引くと、圧力補正量 $\delta P = P^{n+1} - P^n$ について次式が得られる。

$$\frac{\vec{u}^{n+1} - \tilde{u}}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla \delta P + \frac{1}{Re} \nabla^2 (\vec{u}^{n+1} - \tilde{u}) - \{(\vec{u}^{n+1} \cdot \nabla)\vec{u}^{n+1} - (\tilde{u} \cdot \nabla)\tilde{u}\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、発散をとると、

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \frac{\vec{u}^{n+1} - \tilde{u}}{\Delta t} &= -\frac{1}{\rho} \nabla^2 \delta P + \frac{1}{Re} \nabla^2 [\nabla \cdot (\vec{u}^{n+1} - \tilde{u})] - \\ &\quad - \nabla \cdot \{(\vec{u}^{n+1} \cdot \nabla)\vec{u}^{n+1} - (\tilde{u} \cdot \nabla)\tilde{u}\} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

となり、(n+1)時刻において速度場が連続の式を常に満足する。すなわち、 $\nabla \cdot \vec{u}^{n+1} = 0$ となるように次式から圧力補正量が決定される。

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 \delta P = \nabla \cdot \tilde{u} / \Delta t + \nabla \cdot \{(\tilde{u} \cdot \nabla)\tilde{u} - \frac{1}{Re} \nabla^2 \tilde{u}\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $\Delta t \rightarrow 10^{-3}$ のオーダーであるから、右辺第一項に比べて第二、三項は小さいので、これらを省略する。第二、三項は、速度に対する圧力補正の間接的な影響を表しているが、この影

響を省略すると言う意味でも本解法は部分的な陰解法となっている。

従って、最終的な圧力補正式は次式のようにになる。

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 \delta P = \nabla \cdot \tilde{u} / \Delta t \quad \dots\dots\dots (10)$$

本コードでは、式(1)、式(2)、式(10)及び式(3)を解くことになる。ポアソン方程式の解法としてはSOR法を用いている。差分化は時間方向に前進差分、移流項の取り扱いには上流差分とし、干鳥格子(Staggered mesh)を用いた有限体積法(FVM)で定式化してある。

以下、本コードの実際の取り扱いについて述べる。

<境界条件>

境界について特別に指定を行わなければ、以下の条件が自動的に設定される。

- a) 流体と固体、流体と境界外が接する面は、流体の流入出がない。
- b) 流体と固体、流体と境界外が接する面は、すべり壁(Free-slip wall)である。
- c) 流体と境界外、固体と境界外が接する面は、断熱壁(Adiabatic wall)である。

• ユーザーによる個別の境界条件の指定方法

- a) 境界面に垂直な流速成分(流速規定)
- b) 外部圧力を指定する(圧力規定)
- c) 周期境界条件(z方向のみ)
- d) No-slip wall
- e) 対数壁法則
- f) 流体、固体部分での発熱
- g) 流体-固体界面での熱伝達率

• 乱流の取り扱い

乱流モデルとしてk-ε型二方程式モデルを用いている。レイノルズ方程式は、テンソル表示で、以下のようになる。ここで添字はEinsteinの総和規約に従うものとする。

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \rho \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' u_i'} \right) + \rho f_i \quad \dots\dots\dots (11)$$

時間平均したエネルギー保存式は、

$$\frac{\partial \rho C_p \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \rho C_p \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho C_p \overline{u_j' T'} \right) + \dot{q} \quad \dots\dots (12)$$

で表される。式(11)、式(12)のレイノルズ応力項及び乱流熱流束項は以下のように渦粘性係数 μ_t 及び乱流熱伝導率 k_t を用いた勾配拡散形のモデルによって記述される。

$$- \rho \overline{u_j' u_i'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad k = \frac{1}{2} \overline{u_k' u_k'} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$-\rho C_p \overline{u_j T'} = K_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}, \quad K_t = \frac{\mu_t C_p}{Pr_t}, \quad \text{ここで, } Pr_t \text{ は乱流プラントル数} \dots\dots\dots (14)$$

• k - ε 方程式

乱流エネルギーを k, 乱流エネルギーの散逸速度を ε とし, 次式で定義する。

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \dots\dots\dots (15)$$

$$\epsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} \dots\dots\dots (16)$$

k - ε 方程式は, 時間平均の (-) を省略すると次式のように表される。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_S + G_T - \epsilon \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_S + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \dots\dots\dots (18)$$

ここで, G_S はせん断力による k の生成項, G_T は浮力による生成項であり, 次式で表される。又, ε 式中の R_f は Flux Richardson Number であり, G_S に対する G_T の比を表す。

$$G_S = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \dots\dots\dots (19)$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \dots\dots\dots (20)$$

$$R_f = -G_T / (G_S + G_T)$$

浮力の効果は, 係数 C₃ で調整し, 鉛直自然対流の場合 C₃ = 0, 水平自然対流の場合 C₃ = 1 に近づくべきであると言われている (Rodi: Turbulence Models and Their Application in Hydraulics - A State of the Art Review, University of Karlsruhe, pp.30, 1980)。

本コードでは, C₃ = 0.8 を用いている。又, 渦動粘性係数 ν_t は, k, ε から次式で計算される。

$$\nu_t = C_t \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots (21)$$

以下に, k - ε モデル定数を示す。

σ _k	σ _ε	C ₁	C ₂	C ₃	C _t
1.0	1.3	1.44	1.92	0.8	0.09

• k - ε 方程式の境界条件

境界面での k, ε の値を規定する方法は、以下の中から選択する。

- (1) 流入境界：流入する場合は境界外から流入する k, ε の値を与える。
- (2) すべり壁条件：特に指定しなければこの条件が入る。
- (3) 対数壁法則を使う場合、次式で k, ε の値を与える。

$$k = u_*^2 / \sqrt{C_t} \dots\dots\dots (22)$$

ここで、u_* は壁面に平行で、流れの方向の摩擦速度。

$$\epsilon = u_*^3 / (\kappa y) \dots\dots\dots (23)$$

ここで、y は壁面に垂直方向の距離。

壁法則は、30 < y+ < 1000 の範囲で成り立つものとし、y+ < 30 では層流、y+ > 1000 では y+ = 1000 としている。壁法則の成立範囲においては、Newton Raphson によって摩擦速度 u_* を求め、τ = ρu_*² によりせん断力を求めている。

• 流体占有率

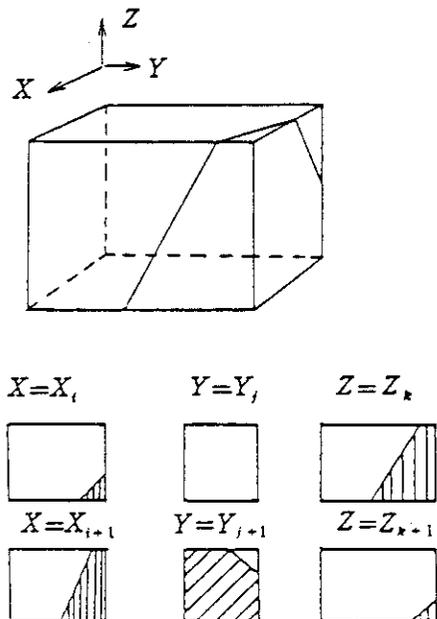
直交座標系を用いたコードでは、現実の任意の形状を持つ解析領域に直接適用することができないが、本 STREAM コードでは直方体の要素を次のように取り扱うことによってこの点を改善している。

要素境界面に開口率 (OPNX, OPNY, OPNZ) を与え、要素内部では流体占有率 (OPNV) を与える。開口率が 1 である場合にはその面は全開、0 である場合には全閉、その中間にある場合には、例えば今回の解析例のような多孔板を取り扱うことができる。ただし、多孔板を取り扱う場合には、多孔板によって生じる圧力損失を考慮するための抵抗係数を入力する必要がある。

要素 (i, j, k) は図のような場合、要素を取り囲む 6 面の面積 A_i 及びその体積を ΔV は、次式から求まる。

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (Y_{j+1} - Y_j) \times (Z_{k+1} - Z_k) \times OPNX_{i,j,k} \\
 A_2 &= (Y_{j+1} - Y_j) \times (Z_{k+1} - Z_k) \times OPNX_{i+1,j,k} \\
 A_3 &= (X_{i+1} - X_i) \times (Z_{k+1} - Z_k) \times OPNY_{i,j,k} \\
 A_4 &= (X_{i+1} - X_i) \times (Z_{k+1} - Z_k) \times OPNY_{i,j+1,k} \\
 A_5 &= (X_{i+1} - X_i) \times (Y_{j+1} - Y_j) \times OPNZ_{i,j,k} \\
 A_6 &= (X_{i+1} - X_i) \times (Y_{j+1} - Y_j) \times OPNZ_{i,j,k+1} \\
 \Delta V &= (X_{i+1} - X_i) \times (Y_{j+1} - Y_j) \times (Z_{k+1} - Z_k) \\
 &\quad \times OPNV_{i,j,k}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 &\leq OPNX \leq 1 \\
 0 &\leq OPNY \leq 1 \\
 0 &\leq OPNZ \leq 1 \\
 0 &\leq OPNV \leq 1
 \end{aligned}$$



以上の指定は、流体が存在するところで意味を持つ。流体占有率を指定した要素内の非流体部分は、領域外とみなされ特別な指定を行わない場合の境界条件（すべり壁条件）が適用される。従って、図の斜線部へは流体や熱の流入流出がなく、流体と接する面はすべり壁として取り扱われる。ただし、熱伝導については開口率が0であっても全開とみなして計算される。断熱条件を設定したい場合には、「熱伝達境界を与える」という境界条件を指定し、熱伝達率を0.0と置くようにする。

• 3次元図化

STREAMコードには、原研の計算センターのカルコンプ図形処理ルーチンを利用した三次元の流速ベクトル図、温度、圧力、乱流量のコンター図を描くプログラムが別途用意されている。

• 計算のフローシート

以下に、STREAMコードのフローシートを示す。

