

分置

ナトリウム冷却炉における電磁ポンプの検討  
－ 1次系主循環ポンプへの適用検討 –  
(研究報告)

2005年8月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122(代表)  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：[jserv@jnc.go.jp](mailto:jserv@jnc.go.jp)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2005

JNC TN9400 2005-044  
2005年8月

ナトリウム冷却炉における電磁ポンプの検討  
－1次系主循環ポンプへの適用検討－

近澤佳隆<sup>\*1</sup>、相澤康介<sup>\*1</sup>、此村守<sup>\*1</sup>、荒邦章<sup>\*2</sup>

要旨

ナトリウム冷却炉実用化に向けて、一次冷却系に係る機器の物量削減、床面積削減、バウンダリ面積削減が重要な課題として挙げられている。これらを実現するための方策の一つとして、主循環ポンプを中間熱交換器に組込んだ機器が検討されている。本研究では、実用化戦略調査研究で検討されている機械式ポンプ組込型中間熱交換器の代替案として、電磁ポンプ組込型中間熱交換器を採用した場合の適用性を検討した。

電磁ポンプ組込型中間熱交換器の構造概念検討を行い、機械式ポンプ組込型中間熱交換器の場合と寸法をほとんど変更せずに電磁ポンプを中間熱交換器に適用する見通しを得た。また、電磁気解析、流動解析の結果、目標の流量および揚程を満足すること、および上部プレナム内隔離防止のため設置するフローガイドの有効性を確認した。

更に電磁ポンプ組込型中間熱交換器に設置する電磁流量計の成立性の検討を行い、電磁ポンプダクト部の環状流路において流量測定に必要な出力電圧を得られることが明らかになった。

---

\*1 大洗工学センター システム技術開発部 FBRシステムグループ

\*2 大洗工学センター 要素技術開発部 次世代機器研究グループ

JNC TN9400 2005-044  
August, 2005

Study of Electro Magnetic Pump  
in a Sodium Cooled Reactor

Yoshitaka Chikazawa<sup>\*1</sup>, Kousuke Aizawa<sup>\*1</sup>,  
Mamoru Konomura<sup>\*1</sup>, Kuniaki Ara<sup>\*2</sup>

Abstract

In the feasibility study of JNC, an intermediate heat exchanger with a mechanical pump aiming to reduce material mass and floor area has been investigated.

In this study, as an alternative of the intermediate heat exchanger with a mechanical pump, adaptability of an intermediate heat exchanger with electro magnetic pumps is investigated.

An intermediate heat exchanger with electro magnetic pumps for a medium scale sodium cooled reactor is designed. An electromagnetic analysis is performed to determine basic specifications of electro magnetic pumps. A 3-D flow analysis shows the flow stability of the electro magnetic pump outlet and the importance of flow guide.

Furthermore, a magnetic field analysis of an electro magnetic flow meter is performed, and it is confirmed possibility to apply the flow meter to the main cooling system.

---

1) FBR System Engineering Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

2) Innovative Component System Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

## 目次

1. はじめに	1
2. 検討経緯	3
2.1 ナトリウム冷却中型炉概要	3
2.2 電磁ポンプ概要	6
2.3 大容量電磁ポンプ試験	7
2.4 本研究の目的	9
3. 電磁ポンプ組込型中間熱交換器の検討	10
3.1 概要	10
3.2 構造概念	11
3.3 板厚・物量評価	17
3.4 特性評価	20
3.5 上部プレナム近傍の流動解析	30
3.6 電磁ポンプ組込型と機械式ポンプ組込型の概念比較	48
3.7 開発課題の検討	52
3.8 まとめ	55
4. 電磁流量計の検討	56
4.1 概要	56
4.2 要求条件および型式	57
4.3 磁場解析評価	62
4.3.1 M タイプ電磁流量計	62
4.3.2 U タイプ電磁流量計	63
4.4 まとめ	75
5. おわりに	76
参考文献	77
謝辞	78

## 表リスト

表 2.1-1	ナトリウム冷却中型炉の基本仕様	• • • • 4
表 2.3-1	160 m <sup>3</sup> /min 大容量電磁ポンプの主要仕様	• • • • 8
表 3.2-1	電磁ポンプの設計条件	• • • • 14
表 3.3-1	電磁ポンプステータの試設計による概算重量	• • • • 18
表 3.3-2	ケーシング板厚 25mm としての概算重量、引張応力	• • • • 19
表 3.6-1 (1/3)	機械式ポンプ組込型中間熱交換器と電磁ポンプ組込型中間熱交換器 の概念比較	• • • • 49
表 3.6-1 (2/3)	機械式ポンプ組込型中間熱交換器と電磁ポンプ組込型中間熱交換器 の概念比較	• • • • 50
表 3.6-1 (3/3)	機械式ポンプ組込型中間熱交換器と電磁ポンプ組込型中間熱交換器 の概念比較	• • • • 51
表 4.2-1	電磁流量計に対する設計条件	• • • • 58
表 4.2-2	M タイプ電磁流量計の基本寸法	• • • • 59
表 4.2-3	U タイプ電磁流量計の基本寸法	• • • • 59

## 図リスト

図 1-1 機械式ポンプ組込型中間熱交換器	2
図 2.1-1 ナトリウム冷却中型炉の系統概念図	5
図 3.2-1 電磁ポンプ組込型中間熱交換器	15
図 3.2-2 バイパスフロー流路概念図	16
図 3.4-1 コイルの結線図	23
図 3.4-2 電磁ポンプの解析モデル	24
図 3.4-3 電磁ポンプの解析メッシュ	25
図 3.4-4 Q-H 特性の解析結果	26
図 3.4-5 電磁ポンプ環状流路中の磁束密度分布	27
図 3.4-6 ステータ鉄心部の磁束密度分布	28
図 3.4-7 電磁ポンプの電磁力分布	29
図 3.5-1 電磁ポンプ組込型中間熱交換器の上部構造分布	33
図 3.5-2 (1/2) 上部プレナム解析メッシュ	34
図 3.5-2 (2/2) 上部プレナム解析メッシュ	35
図 3.5-3 上部プレナムの出入口境界条件	36
図 3.5-4 (1/3) 流速分布図 (矢視 A)	37
図 3.5-4 (2/3) 流速分布図 (矢視 A)	38
図 3.5-4 (3/3) 流速分布図 (矢視 A)	39
図 3.5-5 (1/3) 流速分布図 (矢視 B)	40
図 3.5-5 (2/3) 流速分布図 (矢視 B)	41
図 3.5-5 (3/3) 流速分布図 (矢視 B)	42
図 3.5-6 (1/2) 径方向および鉛直方向流速分布図 (フローガイドなし)	43
図 3.5-6 (2/2) 径方向および鉛直方向流速分布図 (フローガイドあり)	44
図 3.5-7 (1/3) 圧力分布図	45
図 3.5-7 (2/3) 圧力分布図	46
図 3.5-7 (3/3) 圧力分布図	47
図 3.7-1 電磁ポンプ運転状態による各損失	54
図 4.2-1 M タイプおよび U タイプ電磁流量計の概略図	60
図 4.2-2 M タイプ電磁流量計の寸法	61
図 4.2-3 U タイプ電磁流量計の寸法	61
図 4.3-1 M タイプ電磁流量計の解析モデル図	65
図 4.3-2 M タイプ電磁流量計の解析メッシュ図	66
図 4.3-3 U タイプ電磁流量計の解析モデル図	67
図 4.3-4 U タイプ電磁流量計の解析メッシュ図	68
図 4.3.1-1 M タイプ電磁流量計の磁極中心線上の流路内 Y 方向磁束密度	69

図 4.3.1-2 M タイプ電磁流量計の流路内磁場解析結果	··· ··· 70
図 4.3.1-3 M タイプ電磁流量計の磁極間の流路内 X 方向磁束密度	··· ··· 71
図 4.3.2-1 U タイプ電磁流量計の磁極中心線上の流路内 Y 方向磁束密度	··· ··· 72
図 4.3.2-2 U タイプ電磁流量計の流路内の磁場解析結果	··· ··· 73
図 4.3.2-3 U タイプ電磁流量計の磁極間の流路内 X 方向磁束密度	··· ··· 74

## 1. はじめに

ナトリウム冷却炉実用化に向けて、一次冷却系に係る機器の物量削減、床面積削減、バウンダリ面積削減が重要な課題として挙げられている。これらを実現するための方策の一つとして、主循環ポンプを中間熱交換器に組込んだ機器が検討されている。本報告書は、実用化戦略調査研究で検討されている機械式ポンプ組込型中間熱交換器（図 1-1 参照）の代替案として、電磁ポンプ組込型中間熱交換器を採用した場合の適用検討をまとめたものである。

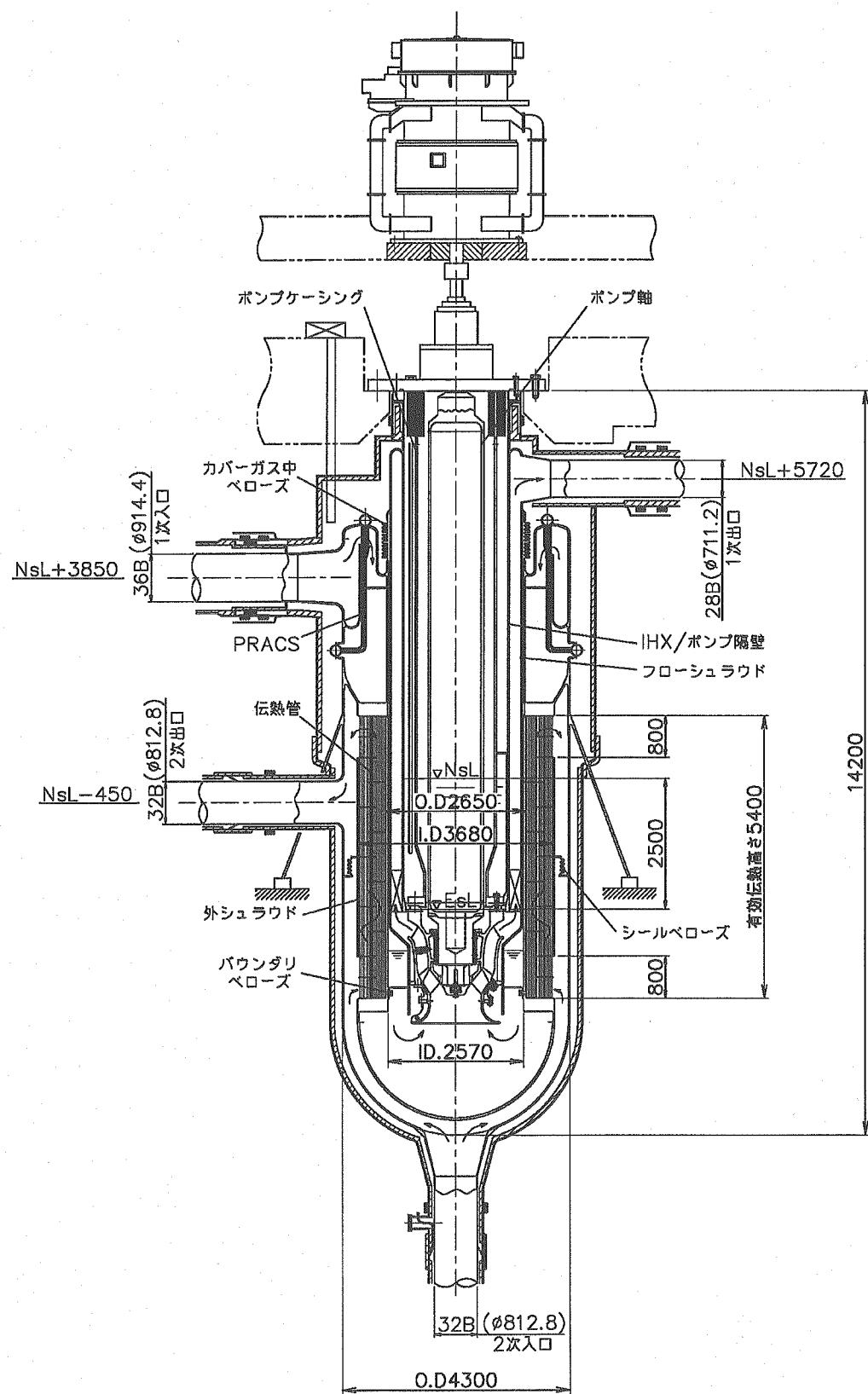


図 1-1 機械式ポンプ組込型中間熱交換器

## 2. 検討経緯と目的

### 2.1 ナトリウム冷却中型炉概要

FBR サイクル実用化戦略調査研究の一環として検討を行っているナトリウム冷却中型炉の基本仕様を表 2.1-1 に示し、系統概念図を図 2.1-1 に示す。ナトリウム冷却中型炉は、経済性において大型炉を凌ぐことはできないが、比較的短期間の研究開発によって技術の実現が見込まれ、開発期間や開発プロセスの妥当性において、その必要性は大型炉に優るとも劣らないと考えられている。

本研究では、上記のナトリウム冷却中型炉への電磁ポンプ組込型中間熱交換器の適用検討を行う。

表 2.1-1 ナトリウム冷却中型炉の基本仕様

項目	基本仕様
原子炉型式	ナトリウム冷却ループ型炉
電気出力（発電端）	750 MWe × 4 モジュール
熱出力	1785 MWt
1次系ループ数	2
2次系ループ数	1
1次系流量	$1.64 \times 10^4 \text{ t/h}$
2次系流量	$2.73 \times 10^4 \text{ t/h}$
1次系Na温度	550°C / 395°C
2次系Na温度	520°C / 335°C
タービン発電機	T C 4 F - 54 (高圧タービン+中圧タービン+低圧タービン × 2) 基数: 2基 3000 MWe プラント
プラント稼働率	95.6%
炉心燃料	混合酸化物燃料
遮蔽体外接円径	5320 mm
燃焼度	150 GWd/t
主蒸気温度/圧力	495°C / 16.67 MPa
給水温度/流量	240°C / $2.84 \times 10^4 \text{ t/h}$ モジュール
増殖比	1.1 ~ 1.2 (導入期) 1.04 (平衡期)
中間熱交換器	縦置無液面斜行流式直管型 (1次主循環ポンプ合体)
1次系主循環ポンプ	機械式ポンプ
蒸気発生器	一体貫流型縦置有液面2重管直管蒸気発生器
2次系主循環ポンプ	機械式ポンプ
崩壊熱除去系	P R A C S × 2 系統 + D R A C S × 1 系統
Na漏えい対策	容器: ガードベッセル、配管: 外管 (2次系はエンクロージャ)
原子炉格納施設	鋼製ライナコンクリート格納施設
プラント運転サイクル	26ヶ月 4バッチ方式
燃料減衰待貯蔵	E V S T 貯蔵方式 (E V S T + 水プール)
炉内燃料交換	マニプレータ式燃料交換器
炉内/外燃料移送	炉内中継装置 + 燃料出入機 (レールレス台車)
免震	水平免震
プラント寿命	60年
原子炉建屋	約 28.8 万 m³ (4 モジュール、3000 MWe)

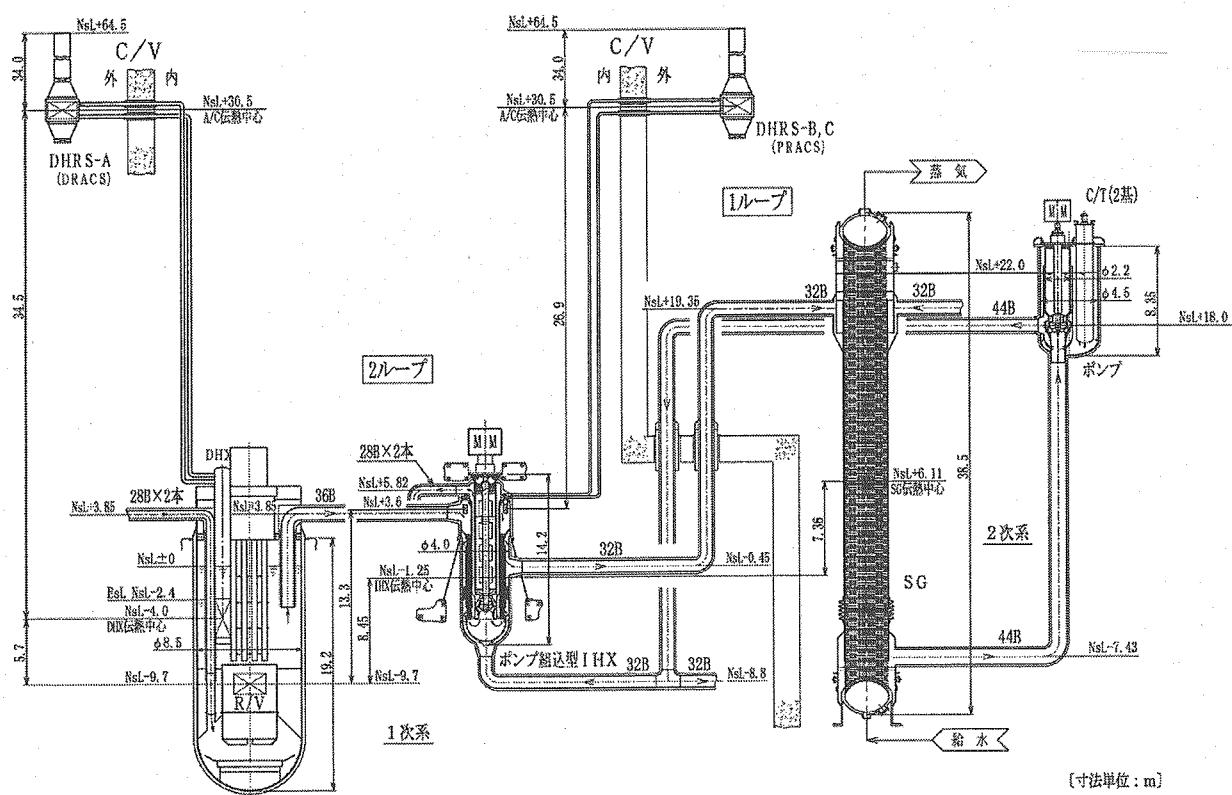


図 2.1-1 ナトリウム冷却中型炉の系統概念図

## 2.2 電磁ポンプ概要

電磁ポンプの基本動作原理[1]は、磁界中におかれた導電性流体に電流を通電し、両者の相互作用から流体自身に発生する力（フレミングの左手の法則）によりナトリウムを駆動する。電磁ポンプは静的機器であり、信頼性、保守性、耐キャビテーション性に優れている、また機械的慣性力がないため運転制御性がよい、など優れた特性を有している。

電磁ポンプは、液体への通電方法で 2 種類に大別でき、外部から流体に直接電流を通電する導電型と、移動磁界によって流体内に電流を誘起する誘導型があり、前者は比較的に流量が小さい時に用いられ、後者は比較的に流量が大きい時に用いられる。誘導型電磁ポンプには、ナトリウムが流れるダクトが矩形断面構造のフラット・リニア・インダクション型 (FLIP) とダクト内に内部鉄心が置かれ同心の二重管により環状流路を形成するアニラ・リニア・インダクション型 (ALIP) がある。FLIP は薄肉であるダクトが矩形断面のため、内圧、曲げ応力、熱衝撃に対する考慮が特に必要である。ALIP はダクト形状が円筒形であり構造健全性上有利であるが、内部鉄心を必要とし構造が複雑になる。

### 2.3 大容量電磁ポンプ試験

ナトリウム冷却中型炉の主循環ポンプは、大容量（約  $300\text{m}^3/\text{min}$ ）であり、高温条件化（約  $400^\circ\text{C}$ ）で連続運転を行えることが必要である。このような大容量高温電磁ポンプについて、90-96 年の日本原子力発電株式会社での  $44\text{ m}^3/\text{min}$  中容量電磁ポンプ[2]および 97-02 年の  $160\text{ m}^3/\text{min}$  大容量電磁ポンプ[3]の開発試験を通じた研究開発が行われた。

中容量電磁ポンプ試験により、約 10000 時間の運転実績を得るとともに、ポンプ大容量化に向けた製作技術の見通しを得た。この成果を踏まえて、大容量電磁ポンプ試験が実施された。開発された  $160\text{ m}^3/\text{min}$  大容量電磁ポンプの主要仕様を表 2.3-1 に示す。大容量電磁ポンプ試験により、 $160\text{ m}^3/\text{min}$  という大容量電磁ポンプは良好な流量制御性を得られることが明らかになり、また約 2500 時間のナトリウム試験後に行った解体検査により、電気特性および構造機能に問題がないことを確認した。これらにより大容量電磁ポンプの設計製作技術を確証することができ、また大容量電磁ポンプのプラントへの適応性は十分にあることを確認することができた。

表 2.3-1 160 m<sup>3</sup>/min 大容量電磁ポンプの主要仕様

型式	ダブルステータ型 ALIP
流量	160 m <sup>3</sup> /min
揚程	0.245MPa
定格ナトリウム温度	335°C
ポール数	14 ポール
コイル数	84×2 (内側と外側)
ステータ長さ	4.4m
ケーシング外径	1.9m
ダクト流路幅	75mm
端子電圧	1350V
相電流	884A
周波数	20Hz

## 2.4 本研究の目的

本研究では、実用化戦略調査研究において検討されている機械式ポンプ組込型中間熱交換器の代替案として電磁ポンプ組込型中間熱交換器の概念設計を行う。過去に開発試験が行われた  $160 \text{ m}^3/\text{min}$  の大容量電磁ポンプを基に、ナトリウム冷却中型炉の中間熱交換器に組み込んだ場合の流量  $318 \text{ m}^3/\text{min}$  の電磁ポンプの概念設計を実施し、機械式ポンプ組込型中間熱交換器と同等の配置寸法において設計された電磁ポンプ組込型中間熱交換器において必要な電磁ポンプ性能が得られることを電磁気解析により確認する。また、電磁ポンプ組込型中間熱交換器の上部プレナムでは電磁ポンプ吐出方向と配管方向が直行するため、流れを適正化する構造を検討し、剥離を防止するためのフローガイドの性能を3次元流動解析により確認する。

電磁ポンプ組込型中間熱交換器を採用する場合は、電磁ポンプダクト部が非磁性体であり流れも安定していると考えられるため、電磁ポンプダクト部においてナトリウム炉で実績のある電磁流量計により流量測定が行える可能性がある。本研究では電磁ポンプダクト部の環状流路において流量測定が可能な電磁流量計の概念設計を行い、3次元電磁場解析によりその成立性を確認する。

### 3. 電磁ポンプ組込型中間熱交換器の検討

#### 3.1 概念

実用化戦略調査研究で検討されている機械式ポンプ組込型中間熱交換器の代替案として、電磁ポンプ組込型中間熱交換器を採用した場合の基本構成概念検討、電磁ポンプの電磁気設計、および組込機器の上部プレナム近傍の流動解析を実施した。

### 3.2 構造概念

実用化戦略調査研究によって機械式ポンプ組込型中間熱交換器が設計された（以下、現状設計と記す）。電磁ポンプ組込型中間熱交換器を設計するにあたり、ポンプのみを変更できる構造を前提としたため、現状設計の中間熱交換器、中間熱交換器据付位置、PRACS伝熱管位置、ポンプ半径方向寸法を変更しないことにした。電磁ポンプ単体の設計条件はシステム側の条件より表 3.2-1 に示され、大容量が必要とされることがわかる。本研究で検討する電磁ポンプは、2.3 節で述べた  $160 \text{ m}^3/\text{min}$  大容量電磁ポンプを基に、ナトリウム冷却中型炉に適用するように検討された。

以上を検討条件とした電磁ポンプ組込型中間熱交換器の構造概念図を図 3.2-1 に示し、電磁ポンプ組込型中間熱交換器の構造概念の特徴を以下に示す。

#### (1) 基本構造

現状設計の荷重支持方法は 3 段の床面に分散して据付けられているが、電磁ポンプの場合では機械式ポンプで用いる駆動用電動機床（上部床）は不要であり、また電磁ポンプは回転機器ではないため振動の観点からの中間熱交換器管束からの振動隔離は不要である。従って、電磁ポンプ組込型中間熱交換器の支持方法は下部床スカート 1 箇所にすることができる。据付床が一箇所になることにより、現状設計に比べて現地据付作業が大幅に簡素化されると考えられる。

電磁ポンプは信頼性を向上させるために、上下 2 段直列に配置した。また、メンテナンス性を向上させるために、電磁ポンプは単体で引抜き可能な構造とした。このため、電磁ポンプと出入口流路との取合いは直接接合をせず、プレナムを介して接続する。電磁ポンプダクト材質は非磁性体を適用する必要があるが、電磁ポンプと配管を構造的に分離できることから配管の材質を制限することはない。非磁性体である電磁ポンプ上部フランジと磁性体である中間熱交換器上部フランジの異材継ぎ手は、下記に示すフリーズシール方式を採用する。電磁ポンプと電磁ポンプ電源、計測系ケーブルは全て電磁ポンプ上部のフランジから取出す。

#### (2) フリーズシール

電磁ポンプ最上部フランジと中間熱交換器最上部フランジのバウンダリ構成はナトリウムフリーズシールを適用している。また、ナトリウム一次系のバウンダリの信頼性を向上させるために、フリーズシール+メタルオーリング+リップシール構成とした。フリーズシールのために、中間熱交換器最上部には断熱層、冷却層、予熱・融解用ヒーター、フリーズシール用ガス系を設置する。

#### (3) バウンダリベローズ

現状設計の一次/二次バウンダリベローズの設置位置はポンプ挿入部下端に位置し、その

部分の挿入空間を狭くする。機械式ポンプの場合は入口吸込み部に相当し、入口吸込み部が絞られていることからベローズとの干渉がない。しかし、電磁ポンプの外形形状は均一直径の円筒であるため、現状設計のベローズ設置位置では下部で干渉する。電磁ポンプの設置位置を上方に移動させることにより干渉を避けることは可能であるが、機器全体の全長が大きくなるため好ましくない。そこで、中間熱交換器一次系入口プレナムの上流側にガスプレナムを設け、その領域にベローズを内圧型として設置した。これにより、電磁ポンプを挿入する空間の確保、電磁ポンプを引抜かずにガス側からベローズの検査を行うことが可能になった。また、ガスプレナムを設置することにより、一次系ナトリウムの高温側と低温側が熱的に分離することにより、組込型機器外側ケーシングの熱応力緩和が期待できる。

#### (4) バイパスフロー

電磁ポンプの内部では、運転時にコイル・鉄心等でジュール熱が発生する。この熱の約70~80%は電磁ポンプダクトを介して電磁ポンプで駆動する冷却材のナトリウムにより冷却される。残りの約20~30%は電磁ポンプケーシングを介してナトリウムで冷却させる。電磁ポンプケーシングはナトリウム流路中に存在しないため、ケーシングを冷却するためには積極的にナトリウムを流すバイパスフローが必要である。よって、熱負荷を低減させるため、および熱を回収して電磁ポンプの効率を上昇させることを目的に図3.2-2に示すバイパスフローを構成した。

外側ステータ外側ケーシングと中間熱交換器内側シュラウドの間には円環状のギャップAを設けている。このギャップAは外側ステータ外側ケーシング冷却バスとして利用されるだけではなく、電磁ポンプ構造材(SUS)と中間熱交換器構造材(フェライト鋼)との半径方向熱膨張差吸収および中間熱交換器中心部への電磁ポンプ挿入時における干渉緩和としても利用される。電磁ポンプから吐出されたナトリウムの一部を出口プレナムから上記ギャップAへ導入し、外側ケーシングを冷却しながら最下端で電磁ポンプ入口プレナムへ開放する。この時の流量は、電磁ポンプ吐出圧とギャップAの流動抵抗および流路断面積に依存する。設計の際にはこれらの他に、必要除熱量およびナトリウム許容温度を考慮する。

内側ステータ内側ケーシングとセンタープラグ円筒胴の間にも円環状のギャップBを設けており、下端は電磁ポンプ入口プレナムに接続されている。電磁ポンプから吐出されたナトリウムは電磁ポンプ出口プレナムの天井部分に設置された小口径配管によりギャップBへ導入される。導入されたナトリウムは内側ケーシングを冷却しながら電磁ポンプ入口プレナムに開放される。この時の流量はギャップAと同一の考え方だが、更に考慮すべき項目は、ナトリウム中のArガス気泡分離である。ギャップBに存在するナトリウムは自由液面を持つ概念のため、ナトリウムの流速を下げて気泡を分離する必要がある。但し、センタープラグ部分は自由な用途に使用できるため、ギャップBを広げることができ、ナトリ

バイパスフロー流量は全体で定格流量の 2%以下程度である。

(5) ガス抜き法

一次系ナトリウムを充填する方法は加圧法で行われるのが一般的であり、加圧法の場合は、上に凸がある空間にガスが溜まるためガス抜き法を考慮する必要がある。電磁ポンプ組込型中間熱交換器の場合は、電磁ポンプ出口側にある電磁ポンプ出口プレナムおよびその外側のアニュラス状出口プレナムのガス抜きを考慮する必要がある。

アニュラス状出口プレナムの天井高さは電磁ポンプ出口プレナム天井より低く設計し、両プレナムを仕切る隔壁最上部にガス抜き穴を周方向に複数設置する。これにより、アニュラス状出口プレナムのガスは全て電磁ポンプ出口プレナムに流れ込む。電磁ポンプ出口プレナムに集められたガスは内側ケーシング冷却のためのバイパスフロー(ギャップ B)によりナトリウムと一緒にセンタープラグ周囲の冷却バスへ排出される。

表 3.2-1 電磁ポンプの設計条件

項目	75 万 kWe
定格温度	395 °C
定格流量	318 m³/min
定格揚程	70 mNa
最高使用温度	415 °C
最高使用圧力	0.8 MPa

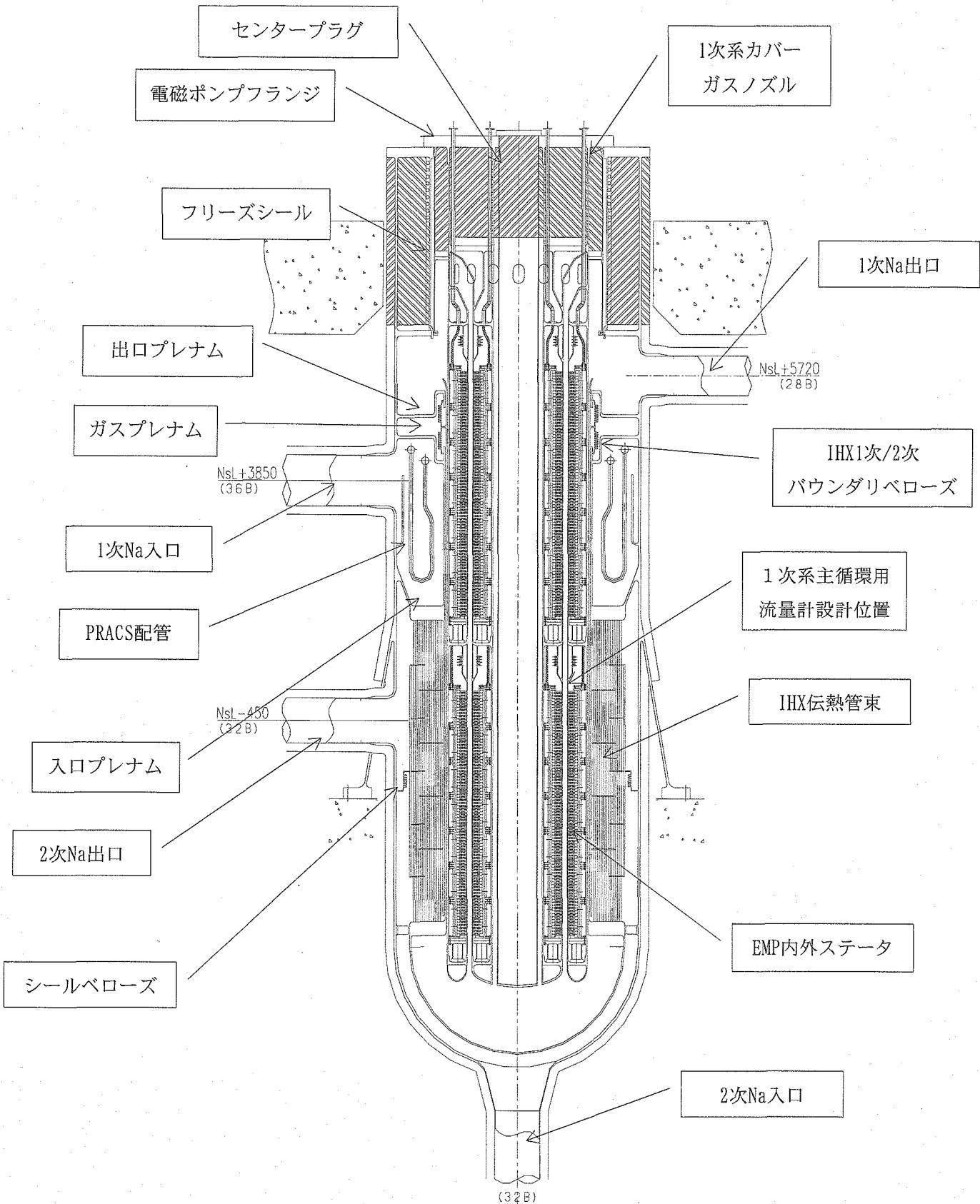


図 3.2.1 電磁ポンプ組込型中間熱交換器

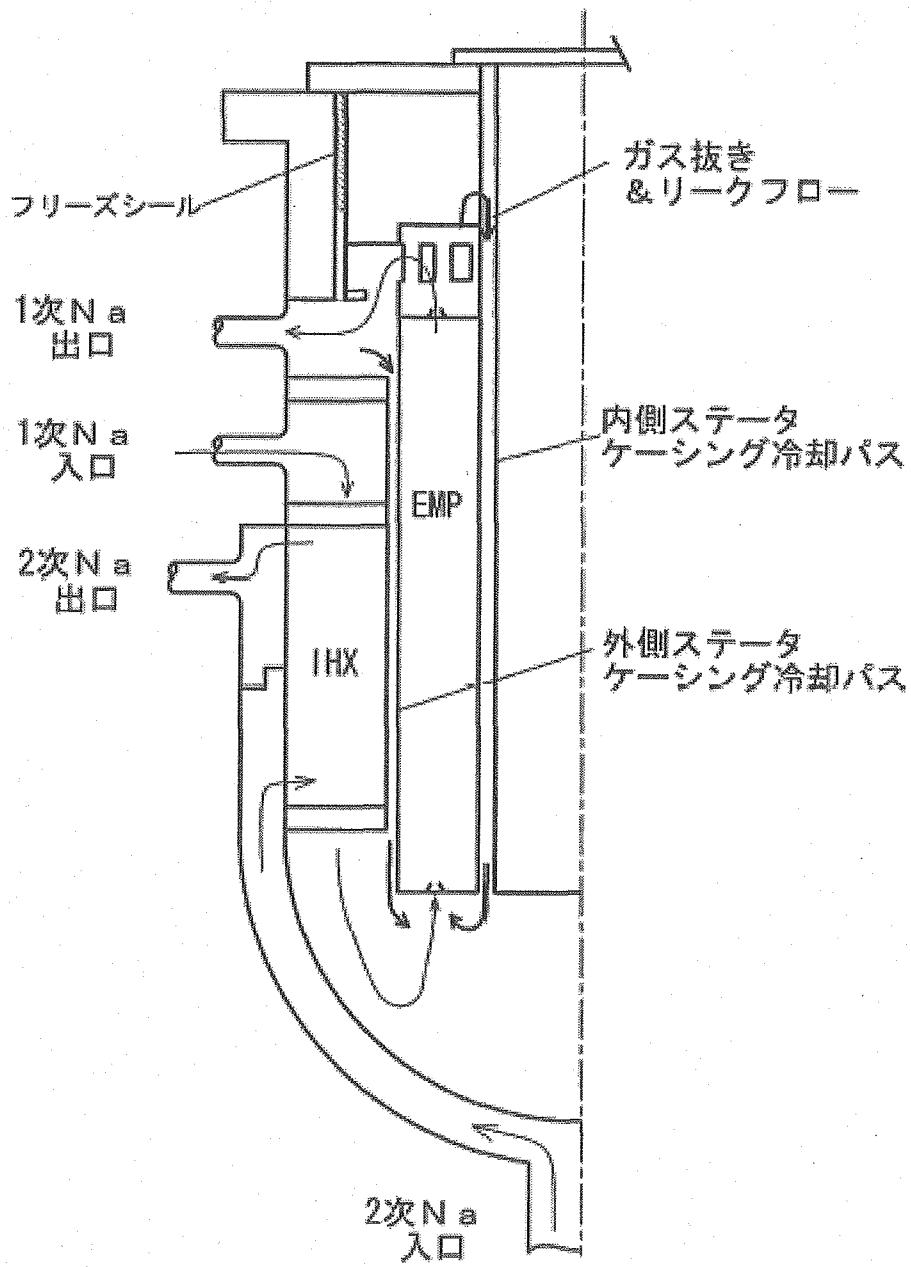


図 3.2-2 バイパスフローセンソーラー

### 3.3 板厚・物量評価

中間熱交換器に組込む電磁ポンプは前節で述べたように上下 2 段直列であり、各々内外ステータから構成される。電磁ポンプステータの試設計による概算重量を表 3.3-1 に示す。これより、電磁ポンプの重量は鉄心およびコイルで 80% を占めていることがわかる。

電磁ポンプステータの荷重支持は、外側ステータは外側ステータケーシング、内側ステータは内側ステータケーシングが主要構造である。そこで、ケーシングが電磁ポンプを安全に支持できるかを確認するため、ケーシング板厚を 25mm として概算重量、引張応力を求めた。結果を表 3.3-2 に示す。表より、ステータ重量による概算応力は十分に低いことがわかった。また、ケーシングを含めた電磁ポンプの総重量は 163ton になることがわかった。

詳細設計を行う場合は、中間熱交換器との相互干渉条件、熱過渡条件、事故時を含めた圧力条件等を考慮した解析を行い、評価をする必要がある。

表 3.3-1 電磁ポンプステータの試設計による概算重量

電磁ポンプの部位	電磁ポンプ 2 台分 (1 ループ分) 重量 (ton)	備 考
外側ステータ 鉄心	38.3	電磁鋼板
外側ステータ 内部構造材	10.0	SUS、他
外側ステータ コイル	20.9	銅線、絶縁材
外側ステータ ダクト	3.6	SUS 板厚 10mm
外側ステータ 合計	72.8	外側ケーシング含まず
内側ステータ 鉄心	20.6	電磁鋼板
内側ステータ 内部構造材	5.0	SUS、他
内側ステータ コイル	14.1	銅線、絶縁材
内側ステータ ダクト	3.1	SUS 板厚 10mm
内側ステータ 合計	42.8	内側ケーシング含まず

表 3.8-2 ケーシング板厚 25mm としての概算重量、引張応力

## 外側ステータ

	電磁ポンプ 2 台分 (1 ループ分)	備 考
外側ステータケーシング、中間フランジ、上部プレナム部、他重量	36.0ton (ケーシング 25.1ton)	ケーシング板厚 25mm ケーシング長さ 16m
外側ステータ総重量	108.8ton	最上部フランジ含まず
外側ケーシング静荷重引張応力	6 MPa	ステータ重量による応力

## 内側ステータ

	電磁ポンプ 2 台分 (1 ループ分)	備 考
内側ステータケーシング、中間フランジ、上部プレナム部、他重量	11.3ton (ケーシング 6.6ton)	ケーシング板厚 25mm ケーシング長さ 16m
内側ステータ総重量	54.2ton	最上部フランジ含まず
内側ケーシング静荷重引張応力	10 MPa	ステータ重量による応力

### 3.4 特性評価

本節では、システム側の条件である定格流量、定格揚程を達成することができる電磁ポンプの設計を行い、電磁気解析によって設計した電磁ポンプの特性評価を行った。

#### (1) 電磁気設計

前節でも述べたように、電磁ポンプの型式は中間熱交換器に設置するためにコンパクト化が図れるダブルステータ型 ALIP とした。このダブルステータ型とはナトリウム流路を挟んで両側にコイルおよび鉄心等を設置する方法である。

定格流量は表 3.2-1 に示したようにシステム側の条件より  $318\text{m}^3/\text{min}$  である。また、ダクト内のナトリウム流速はこれまでの電磁ポンプについて研究開発から設計の見通しが得られている  $12.3\text{m/s}$  とした[3]。

定格揚程は同じく表 3.2-1 に示したようにシステム側の条件より  $70\text{mNa}$  ( $=0.74\text{MPa}$ ) であり、本ポンプ構成は 2 台直列方式を取るため、ポンプ 1 台あたりの揚程は  $0.37\text{ MPa}$  となる。この揚程を達成するためにポンプ 1 台当たり 14 ポールとした。ポールピッチは  $312\text{mm}$  としたためステータ全長はポール倍数となり、 $4.34\text{m}$  となる。なお、本電磁ポンプは 2 台直列のため、この 2 倍のステータ長さ  $8.68\text{m}$  となる。ただしこのステータ長さには電磁ポンプ上部のベローズと下部の脚部の寸法が含まれていない。

流動不安定の防止の観点から、 $\text{Rem} \times S$  (磁気レイノルズ数  $\times$  すべり) の条件は  $160\text{ m}^3/\text{min}$  大容量電磁ポンプ試験結果に基づき  $1 \sim 1.2$  の範囲で設定した。また、ダクトの入口側には断面積が大きい電磁ポンプ入口プレナムがあるので、電磁ポンプ流路は偏流の生じない均等性を持った構造とする。

鉄心の磁束密度は磁気飽和回避のため  $1.5\text{T}$  未満とした。目標の揚程を達成するために必要な磁束密度を得るために内外ステータコイルの外径はそれぞれ約  $1.4\text{m}$ 、約  $2\text{m}$  とした。これは  $160\text{ m}^3/\text{min}$  大容量電磁ポンプコイルと比較して 3 割程度大きい径である。

ステータ材料は高温電磁ポンプ用に開発した以下の材料を使用する。

コイル導体	:	アルミナ分散強化銅
コイル絶縁	:	アルミナクロス裏打ちマイカテープ
鉄心	:	積層電気銅板 (けい素銅板)
ダクト・ケーシング	:	SUS304

コイルの結線方式を図 3.4-1 に示す。2 台直列の電磁ポンプ全体としては、図の結線回路が 2 つある構成になる。本ポンプの結線は、端子電圧を低下させるため並列回路を多くし、かつ全体が  $\Delta$  結線となるように設計した。内外ステータをそれぞれ 3 相に分けて、各相毎に 28 コイルとし、これを更に 4 並列回路に分けて、回路内で 7 コイルを直列に接続した。その結果、全体として  $\Delta$  結線の 8 並列回路構成となった。コイル数はポンプ 1 台あたり、

内外ステータそれぞれ 84 コイルとなる。

内側コイルおよび外側コイルの各相の回路端子はそれぞれ電磁ポンプ外部へ引き出し、内外コイルの結線は外部で行うこととする。よって、ポンプ 1 台の内外ステータからは各 6 本、合計 12 本の回路端子が電磁ポンプ外部に出てくる。2 台直列電磁ポンプ全体では、合計 24 本の回路端子となる。

## (2) 電磁気解析

### (a) 解析手法

設計した電磁ポンプについて、ポンプの Q-H 特性が定格揚程を満足していること、また鉄心中の磁束密度が飽和磁束密度以下であることを確認するために、電磁流体解析コード EAGLE[4]を用いて解析を行う。EAGLE は電磁場解析と流動解析をカップリングしたコードであり、また本解析では電磁ポンプを r-z2D 軸対称モデルとして扱う。図 3.4-2 に電磁ポンプの解析モデルを示す。解析モデルは、内外ステータのコイル、鉄心、ダクトおよびナトリウムを考慮している。解析メッシュを図 3.4-3 に示す。解析メッシュ数は径方向に約 100、軸方向に約 400 で、総メッシュ数は約 40000 である。

### (b) 解析結果

駆動周波数を 4Hz から定格周波数である 23.4Hz まで約 4Hz 毎に変化させた Q-H 特性の解析結果を図 3.4-4 に示す。図より設計条件である流量  $318\text{m}^3/\text{min}$ において、電磁ポンプの揚程はシステム側の要求である 2 台直列で 0.74MPa (0.37MPa/1 台) を満足することを確認した。また、V/f=一定制御において定格点ならびに部分運転点は、常に安定した流量制御特性が得られる Q-H 特性の右下がり部分にあることがわかった。

図 3.4-5 に電磁ポンプ環状流路中の磁束密度分布の解析結果を示す。磁束密度の最大値は約 0.12T であることがわかり、また検討している電磁ポンプは軸方向に長尺となっているため磁束密度の平坦部が長く、端部効果が相対的に小さくなっていることがわかる。

図 3.4-6 に内外ステータ鉄心部の磁束密度分布の解析結果を示す。鉄心の飽和磁束密度は 1.5T であり、鉄心部の最大磁束密度は 1.5T 以下である必要がある。鉄心部の磁束密度は鉄心ティースとヨークの付け根部で最大値を示し、外側鉄心では最大 1.0T となり制限値を満足していることを確認した。内側鉄心では端部において 1.5T を超えている点があるが、これは検討している電磁ポンプではコイルのターン数を減らす等の端部効果を考慮していないために生じたものであり、端部効果を考慮すると十分に 1.5T 以下になると考えられる。

図 3.4-7 に環状流路中のナトリウムに働く電磁力分布の解析結果を示す。電磁ポンプの出入口部分では負の推力が現れているが、これは端部効果によるものであるが、ステータ部分の電磁力の大きさ（正の面積）に比べて十分に小さい。また、電磁力のほとんどが吐出圧力（揚程）となる軸方向に働いており、揚程に対して無効となる径方向電磁力は、軸方向電磁力と比較して非常に小さいことを確認した。

(3) まとめ

システム側の条件である定格流量、定格揚程を達成することができる電磁ポンプの電磁気設計を行い、その電磁気解析を行った。その結果、設計条件である定格流量において、電磁ポンプの揚程はシステム側の要求を満足することを確認した。また、 $V/f=1$ 一定制御において定格点ならびに部分運転点は、常に安定した流量制御特性が得られる Q-H 特性の右下がり部分にあることがわかった。また、電磁力のほとんどは軸方向に働くており、揚程に対して無効になる、つまり電磁ポンプの効率を下げる径方向電磁力は非常に小さいことを確認した。

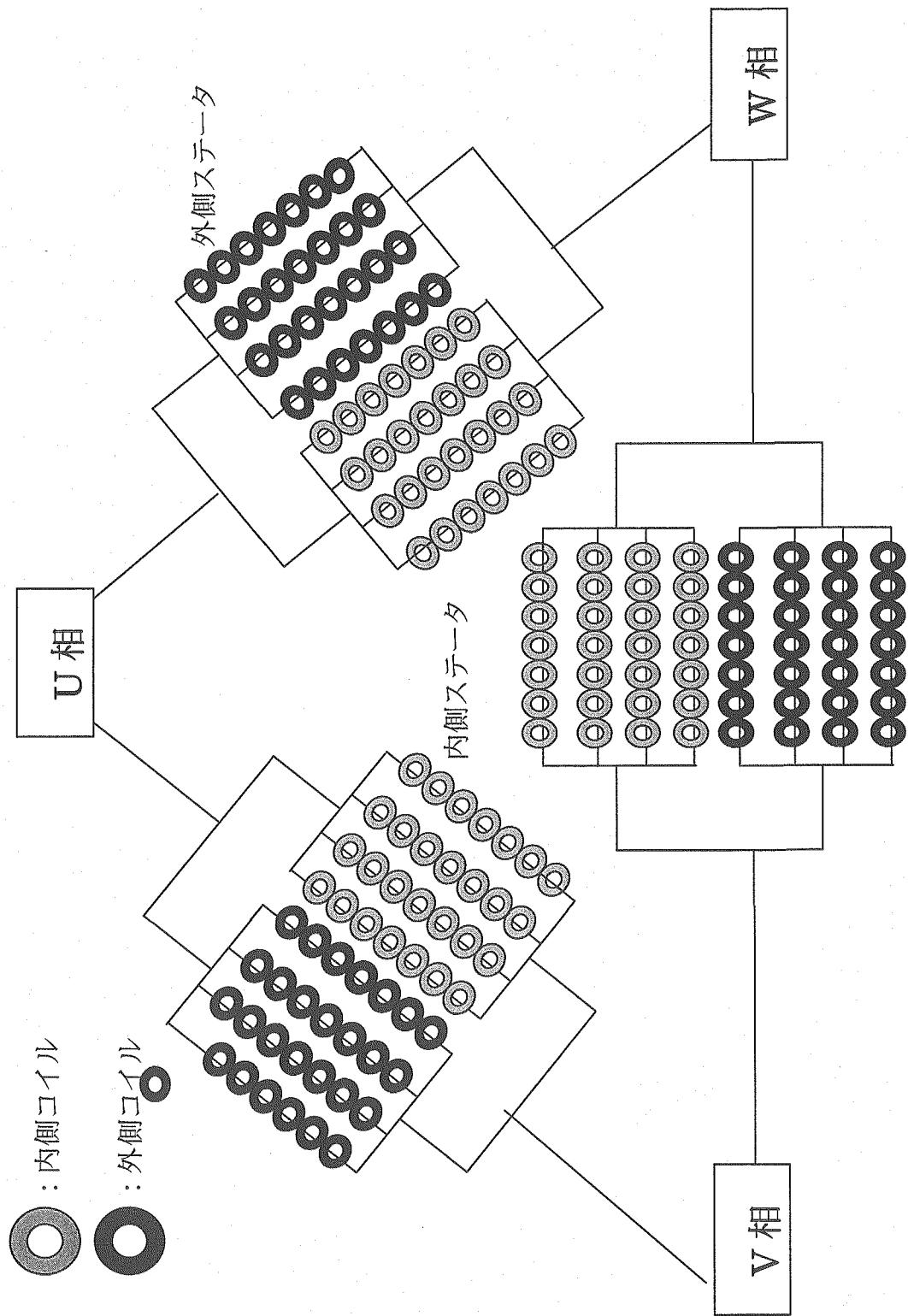


図 3.4-1 コイルの結線図

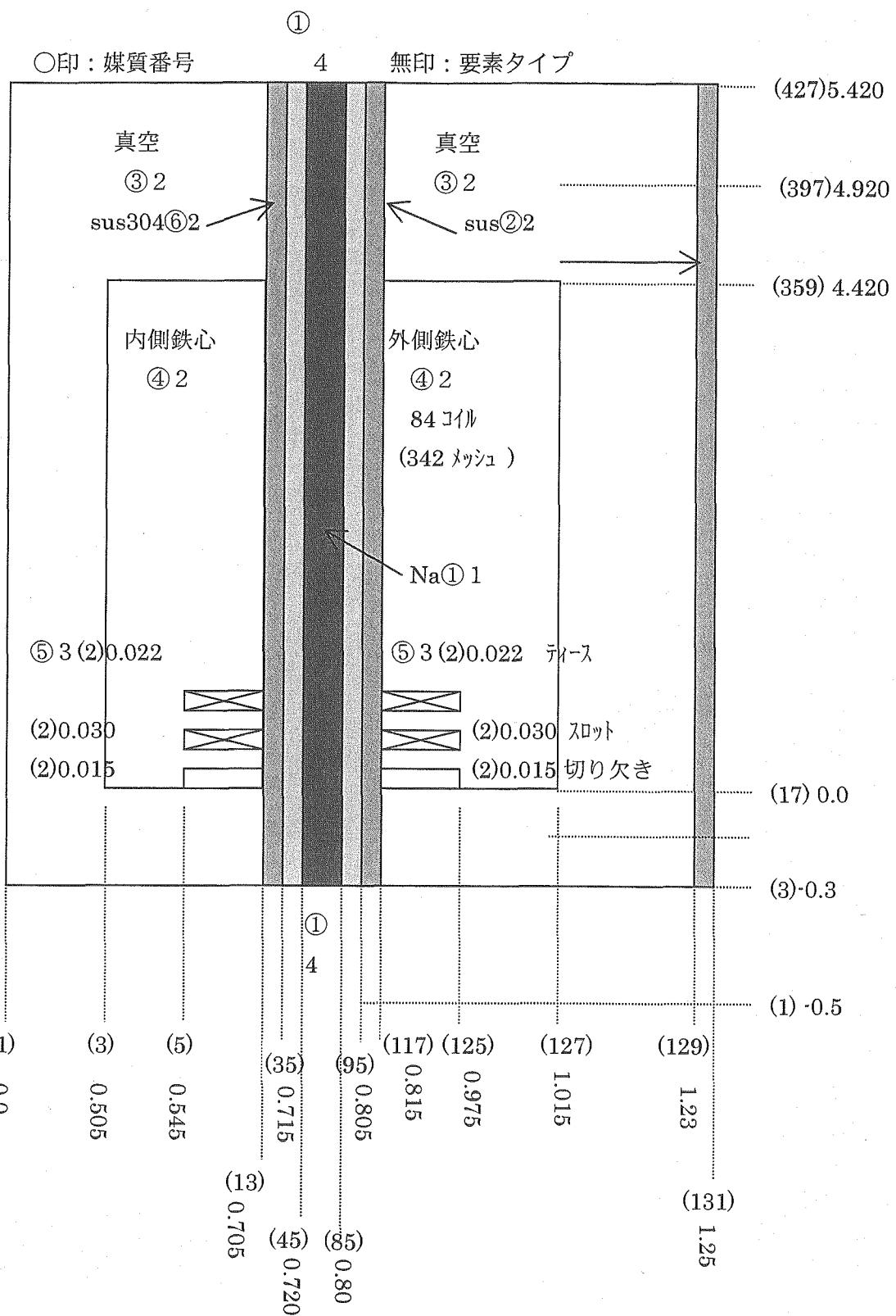


図 3.4・2 電磁ポンプの解析モデル

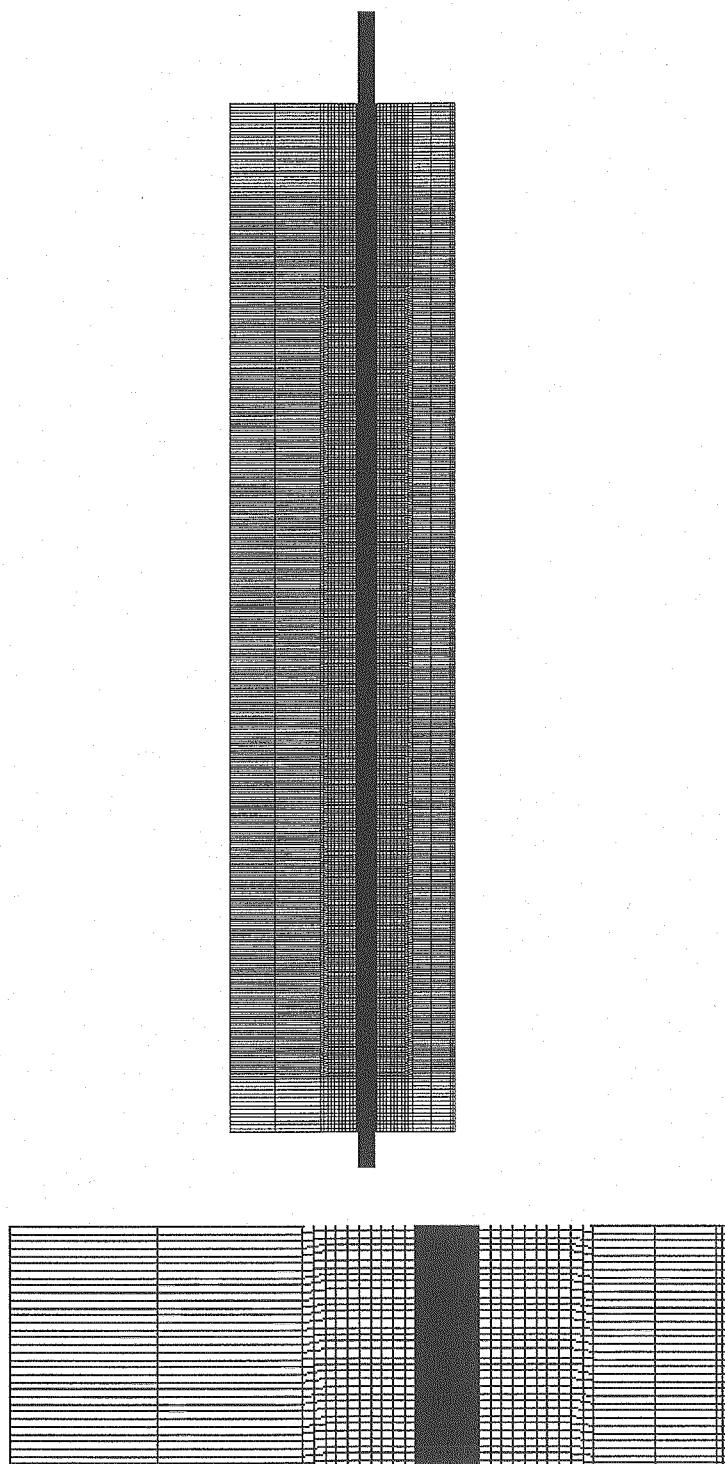


図 3.4-3 電磁ポンプの解析メッシュ

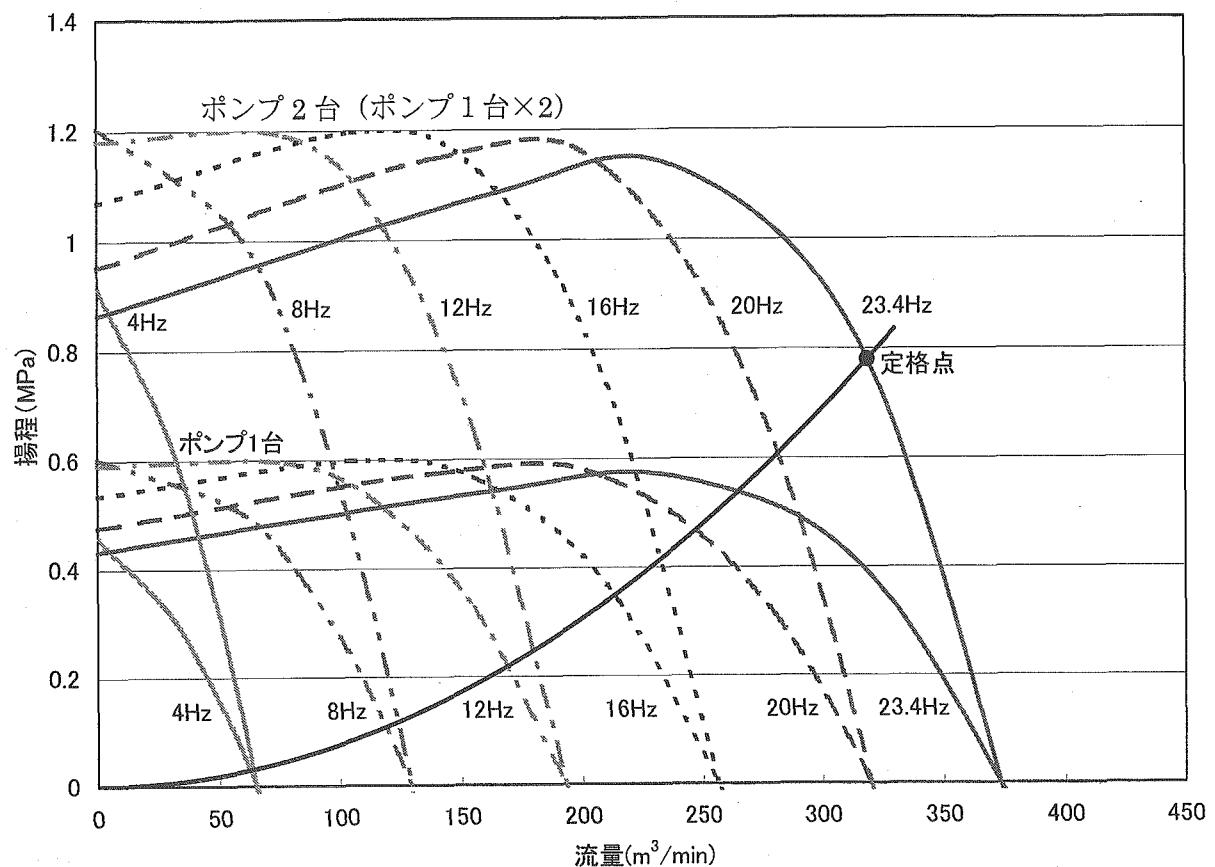


図 3.4・4 Q-H 特性の解析結果

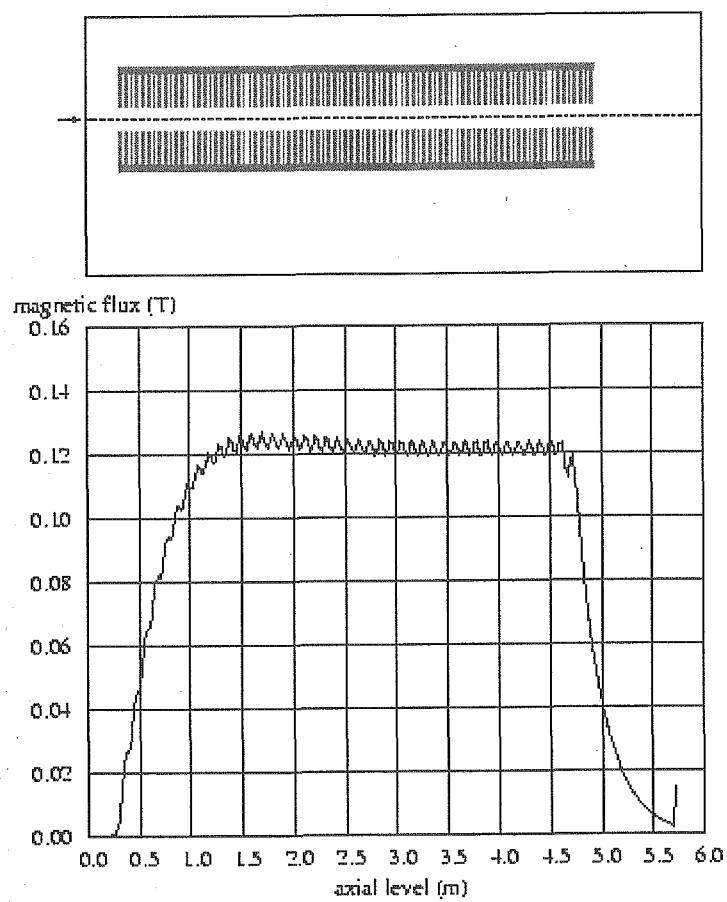


図 3.4-5 電磁ポンプ環状流路中の磁束密度分布

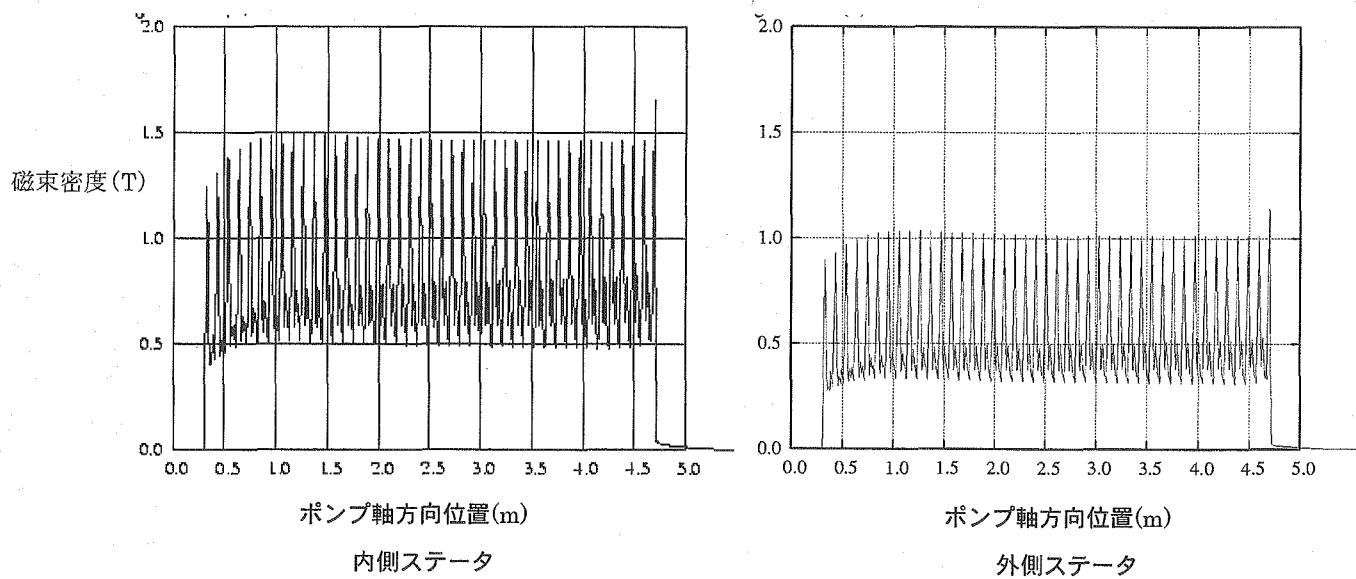
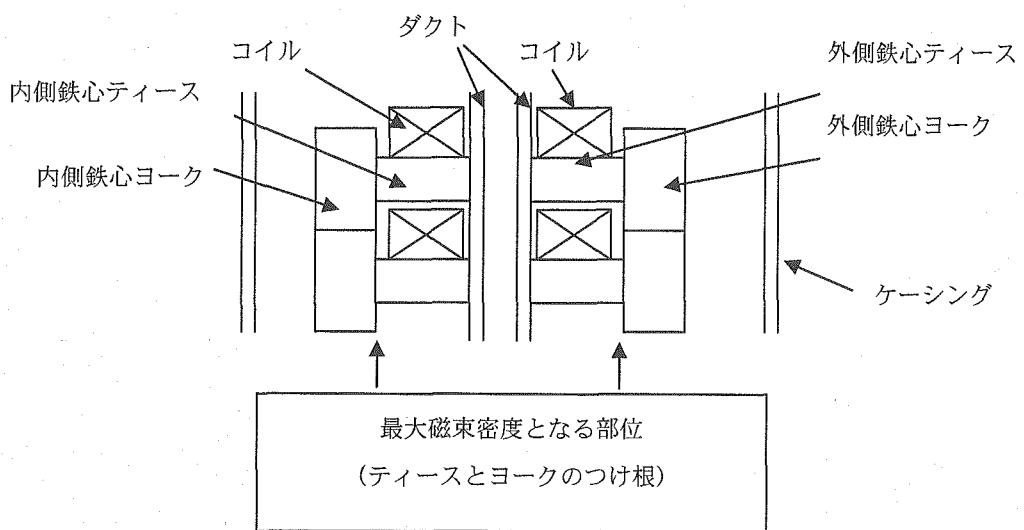


図 3.4-6 ステータ鉄心部の磁束密度分布

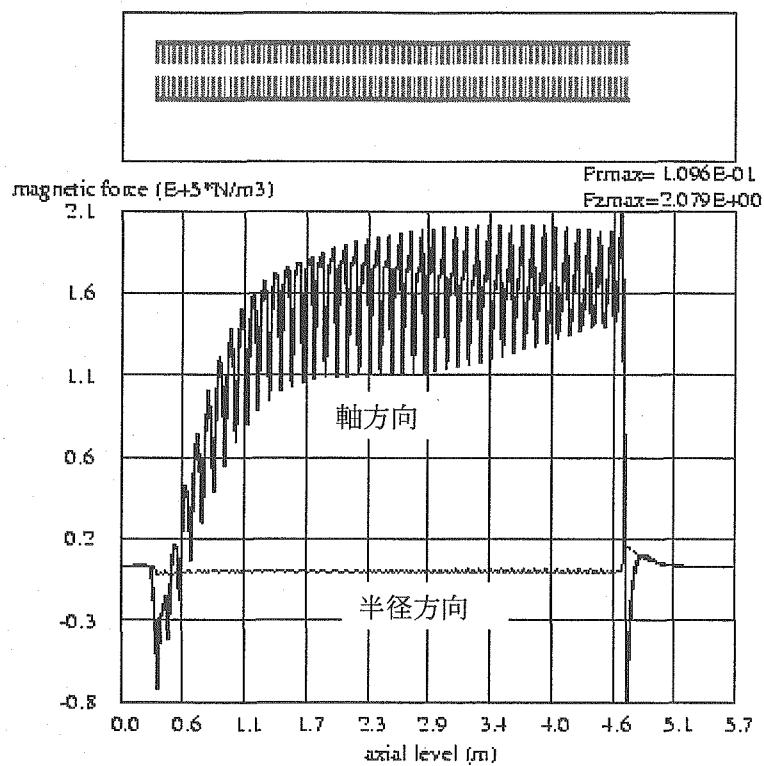


図 3.4-7 電磁ポンプの電磁力分布

### 3.5 上部プレナム近傍の流動解析

実用化戦略調査研究で検討されている機械式ポンプ組込型中間熱交換器の代替案として、電磁ポンプ組込型中間熱交換器を採用した場合の上部プレナム近傍の流動解析を実施し、上部プレナム内で剥離を防止するために設置するフローガイドの有効性と上部プレナム内の流れの状態を調べる。

#### (1) 解析手法

電磁ポンプ組込型中間熱交換器の上部プレナムでは電磁ポンプ吐出方向と配管方向が直行するため、流れを適正化する構造を検討した。検討した電磁ポンプ組込型中間熱交換器の上部構造寸法を図 3.5-1 に示す。上部プレナム入口は環状流路であるが、その上をスカート状として断面積を大きくすることで、流速を小さくして圧力損失を低減するようにした。また、窓部外側のアニュラス部には配管出口より均一に流出することを目的に絞り部を設置した。スカート状になっている角度が大きいため、流れが不安定になり、なおかつ剥離が生じることが予測される。このため流れを安定にし、剥離を防止し、窓部に向かう流路を形成するために図に示すようなフローガイドを設けた。また図に示すように、上部プレナム部とアニュラス部の間には窓が 16 箇所あり、出口配管が 2 箇所あるため上部プレナムより流入した流れが窓部を通過し、アニュラス部を通り、出口配管より流出するまでを解析上で模擬するためには 3 次元でモデル化する必要がある。なお解析は出口配管の位置関係から左右対称となる 1/2 セクタを対象とする。解析メッシュを図 3.5-2 に示す。本検討では、フローガイドの有効性を評価するために、フローガイドの有無により 2 通りのモデルを作成した。

図 3.5-3 に出入口境界条件を示す。流入部は上部プレナム入口、流出部は配管出口である。流入条件は、電磁ポンプ組込型中間熱交換器は電磁ポンプの上流側に中間熱交換器があり、管板や伝熱管を通過する際に圧力損失が生じ、電磁ポンプ入口において整流されていると推定されるので、上部プレナム入口部は一様流速分布を仮定した。また、環状流路を上昇する際に発達する乱流を模擬できるように助走長さを確保した。

入口流速  $U_{in}$  は以下で与えられる。

$$U_{in} = \frac{Q}{\pi/4(D_0^2 - D_1^2)} = \frac{5.3}{\pi/4(1.61^2 - 1.43^2)} = 12.3(m/s)$$

ここで記号は以下の通りである。

$D_0$  : 環状流路外径 (m)

$D_1$  : 環状流路内径 (m)

$Q$  : 定格運転時流量 ( $m^3/sec$ )

また、入口温度は定格運転時の条件より 395°C である。流出条件は、出口配管部において圧力一定とした。

解析コードは、汎用熱流動解析コードである STAR-CD (Ver3.15) を用いた。解法は以下のとおりである。

- (a) 乱流モデル :  $k$ - $\varepsilon$  高レイノルズ数モデル
- (b) 解析方法 : 定常解析 (SIMPLE 法)
- (c) 空間離散化 : QUICK (高次風上差分法)

## (2) 解析結果

### (a) 流速分布

図 3.5-2 で示した矢視 A 方向からの断面の流速分布を図 3.5-4 に示す。図より、フローガイドなしの場合、上部プレナム入口より流入した流れは環状流路を通り、スロート部の壁面に沿って上昇し窓部に向かう流れが主流となり、フローガイドありの場合、環状流路を上昇した流れはフローガイドに沿って上昇する流れが主流であることがわかる。また、フローガイドの有無にかかわらず、上部プレナム内で循環流が発生しているが、フローガイドありの場合は、フローガイド内のみに循環流が発生しているので、フローガイドなしの場合と比較して循環流が小さいことがわかる。また、窓部を通過する際に、フローガイドなしの場合は下から上に向かう流れが主流であるが、フローガイドありの場合は上から下に向かう流れが主流である。窓部を通過した後、流路はアニュラス部を垂直に下降するので、フローガイドなしの場合では、窓部の端で大きな剥離が発生し、大きな圧力損失が生じていると考えられる。図 3.5-4 (3/3) に断面 30 度 (出口配管中心) の流れを示すが、アニュラス部を下降する流れは絞り部を通過して出口配管に向かっており、フローガイドの有無にかかわらずほぼ同じ流速分布となっていることがわかる。

図 3.5-2 で示した矢視 B 方向からの断面の流速分布を図 3.5-5 に示す。この図で断面 A は最上部、断面 B は窓上部、断面 C は窓中心、断面 D は窓下部、断面 G は絞り部、断面 H は出口配管中心部である。図 3.5-5 (1/3) より、フローガイドなしでは断面 C、断面 D の流速が大きいが、フローガイドありでは断面 B、断面 C の流速が大きい。これは断面 B、断面 C ではフローガイドから外側に向かう流速が大きい流れが生じており、フローガイドからの流れが流入することで窓上部の流速が大きくなっていると考えられる。また図 3.5-5 (2/3) より、窓部より下部の流速分布を比較すると、図 3.5-4 に示したように、フローガイドなしでは壁面での流速が大きいが、フローガイドありではフローガイド側面の流速が大きくなっている。図 3.5-5 (3/3) より出口配管中心および上部プレナムの最上部の流速分布を比較すると、断面 H より出口配管中心部の流速分布はフローガイドの有無にかかわらずほぼ同じであることがわかる。断面 A よりフローガイドなしでは外側から中心に向かう流れが生じているが、フローガイドありではフローガイドにより主流の流入を抑制するためほとんど流れはないことがわかる。

図 3.5-6 は、位置 g1 (上部プレナム入口)、位置 g2 (絞り部) における鉛直方向流速分布、また位置 c (窓中心)、位置 h (出口配管中心) における径方向流速分布を示す。位置

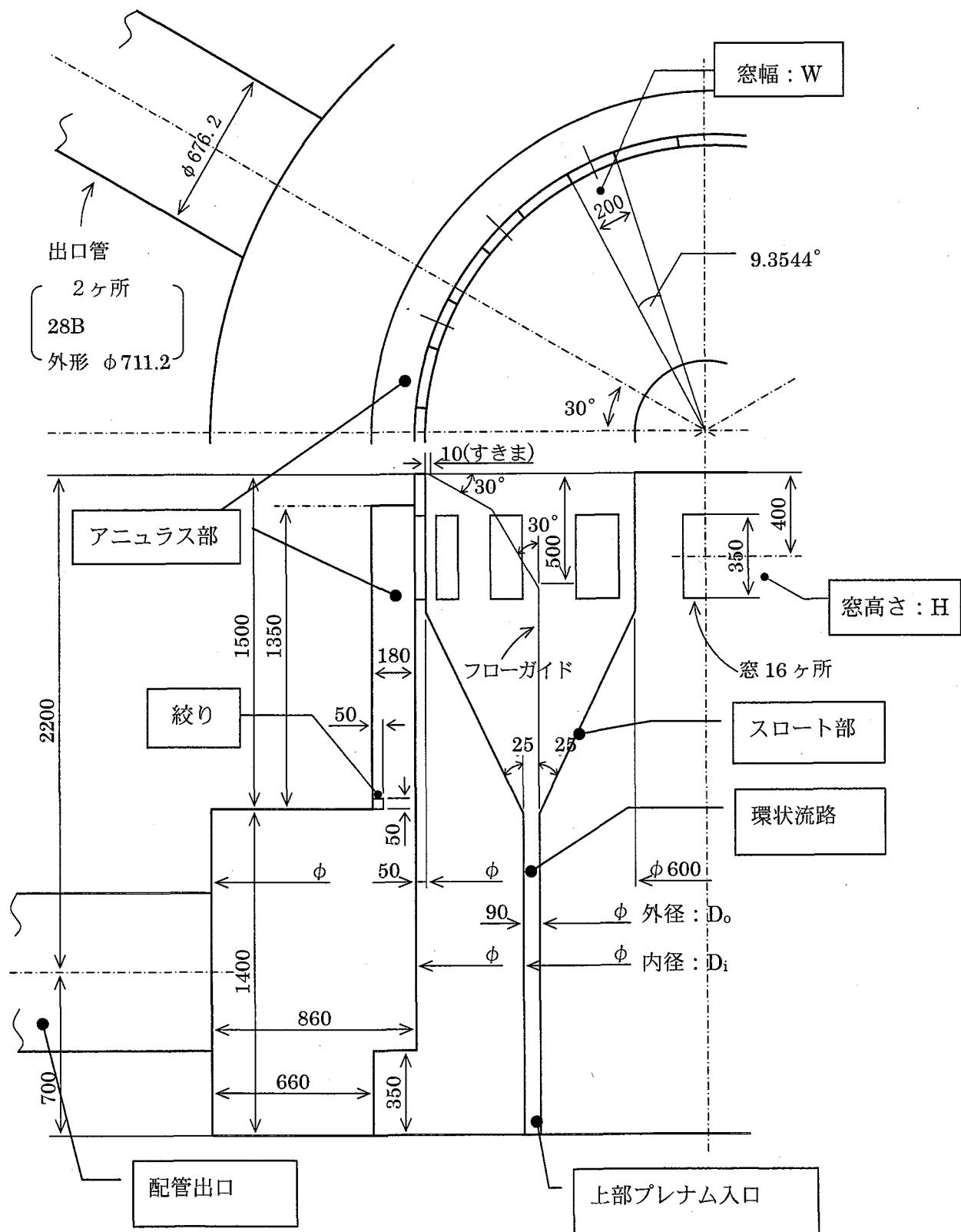
$g_1$  ではフローガイドの有無にかかわらず鉛直方向流速分布は周方向均一である。位置  $c$  のグラフより、フローガイドなしと -90 度方向の流速が大きく、60 度方向の流速が小さくなっていることがわかる。フローガイドありでは各々の窓での流速分布がほぼ等しいことがわかる。位置  $g_2$  ではピークの流速が 8 箇所あり、これは窓と窓の中心であることがわかる。また流速分布は、90 度および -90 度に比べて 30 度付近で大きくなっているが、これは 30 度に設置されている出口配管の影響であると考えられる。これらの傾向はフローガイドの有無によらず同じである。位置  $h$  では、出口配管部（30 度）における流速が最大で約 7m/s であるが、この流速分布はフローガイドの有無によらずほぼ同一である。

### (b) 圧力分布

図 3.5-2 で示した矢視 A 方向からの断面の圧力分布を図 3.5-7 に示す。図より、絞り部を通過した後出口配管に向かうまでの圧力分布はフローガイドの有無によらずほぼ同一であることがわかる。窓を出た後、フローガイドありだと下向きの圧力が高いが、フローガイドなしと窓の上の方で圧力が高いことがわかった。これは、図 3.5-4 に示したように、これらの部分では流速が大きく動圧が高いことに起因すると考えられる。また、本解析では出口圧力を一定としているので、入口圧力の差が入口から出口までの圧力損失の差になる。図 3.5-7 よりフローガイドありだと、フローガイドなしと比べて 18000Pa 程度低いことがわかる。つまり、フローガイドを用いることによって 18000Pa 程度圧力損失を低減できることがわかった。フローガイド有無による圧力損失の差は、上部プレナム内の循環流の大きさ、窓部付近の剥離の大きさに起因すると考えられる。

### (3) まとめ

電磁ポンプ組込型中間熱交換器を採用した場合の上部プレナム内の 3 次元流動解析を実施し、上部プレナム内で剥離を防止するために設置するフローガイドの有効性と上部プレナム内の流れの状態を調べた。解析の結果、図 3.5-1 に示したフローガイドを設置することにより、上部プレナム内に発生する循環流を抑制されることがわかり、窓部において剥離が抑えられることが示唆された。また、フローガイドを用いることによって、上部プレナム入口から出口配管における圧力損失が 18000Pa 程度低減することがわかった。今後は、電磁ポンプ組込型中間熱交換器の詳細設計をする段階で、フローガイドの最適化を検討する必要があると考えられる。



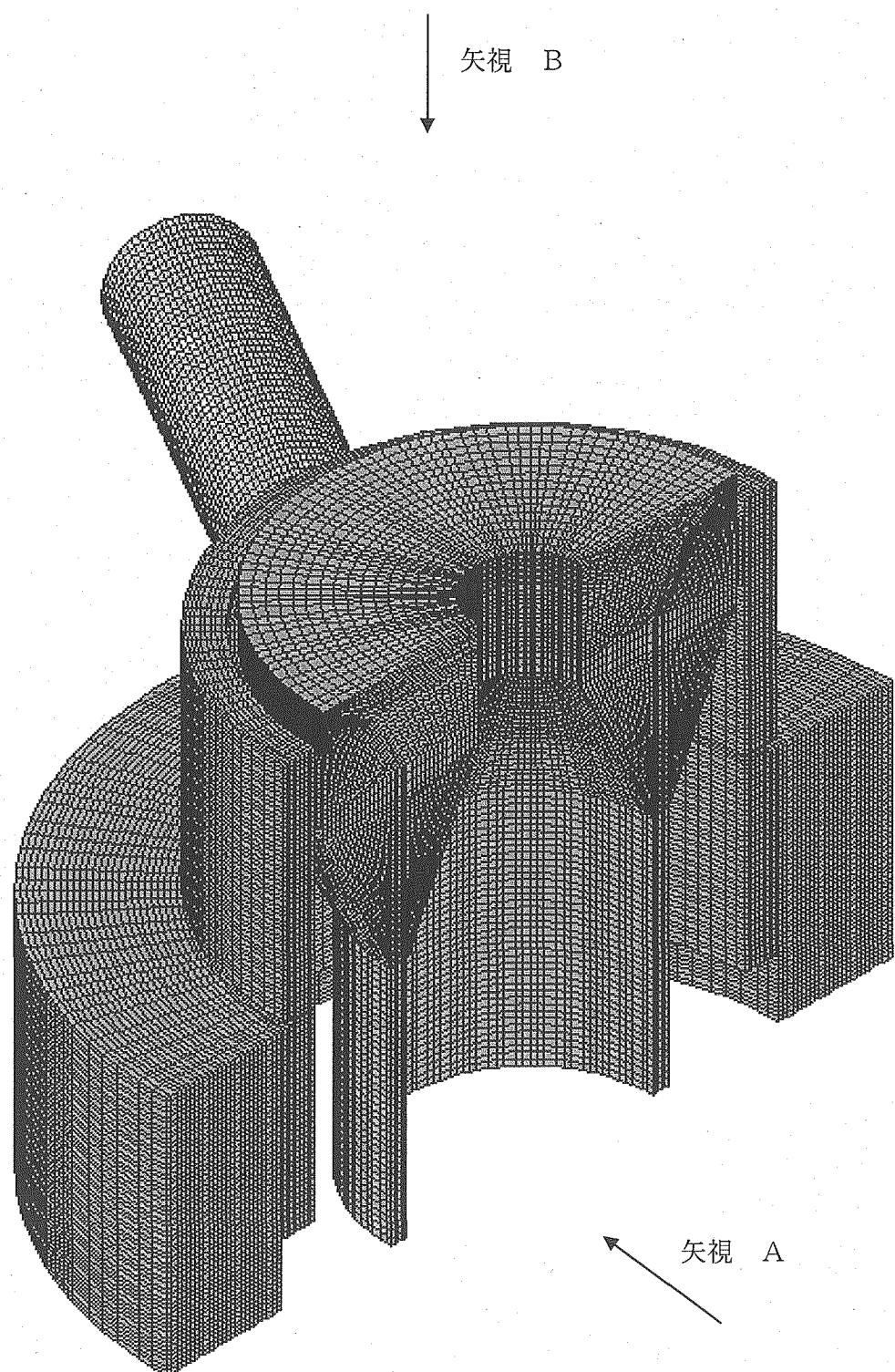


図 3.5-2(1/2) 上部プレナム解析メッシュ

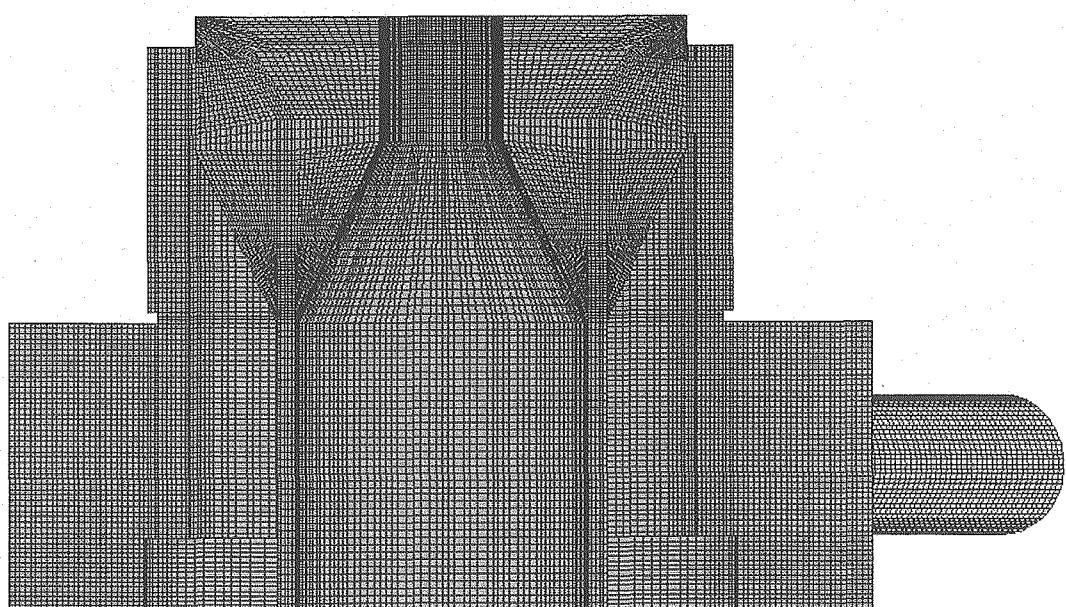
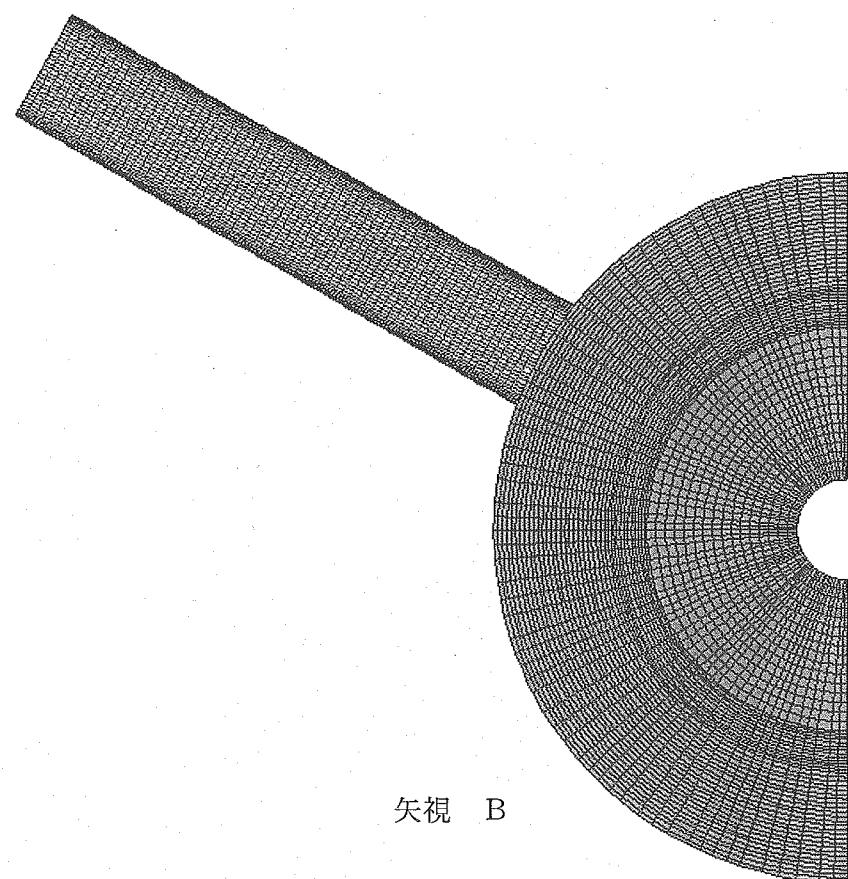


図 3.5-2(2/2) 上部プレナム解析メッシュ

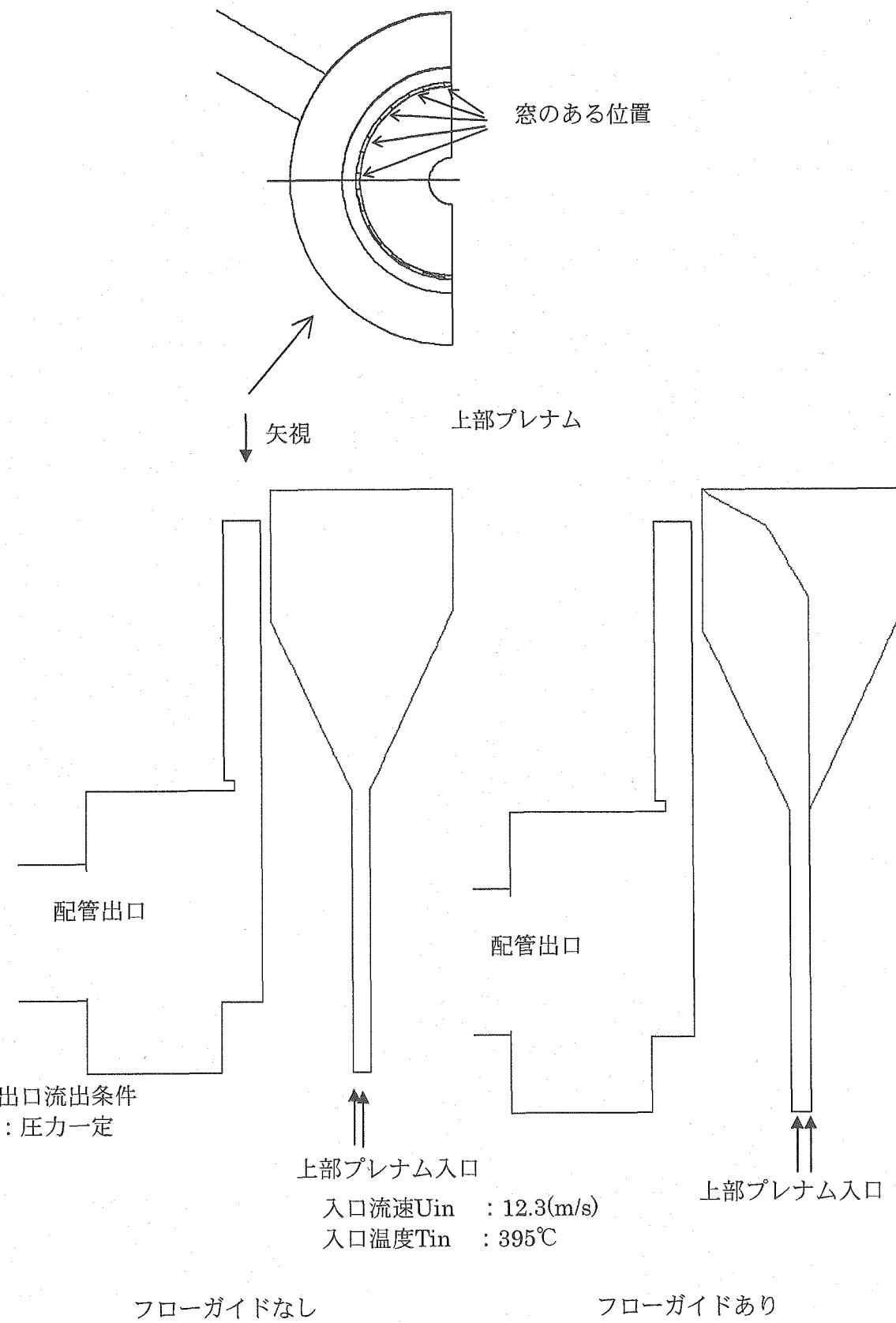


図 3.5・3 上部プレナムの出入口境界条件

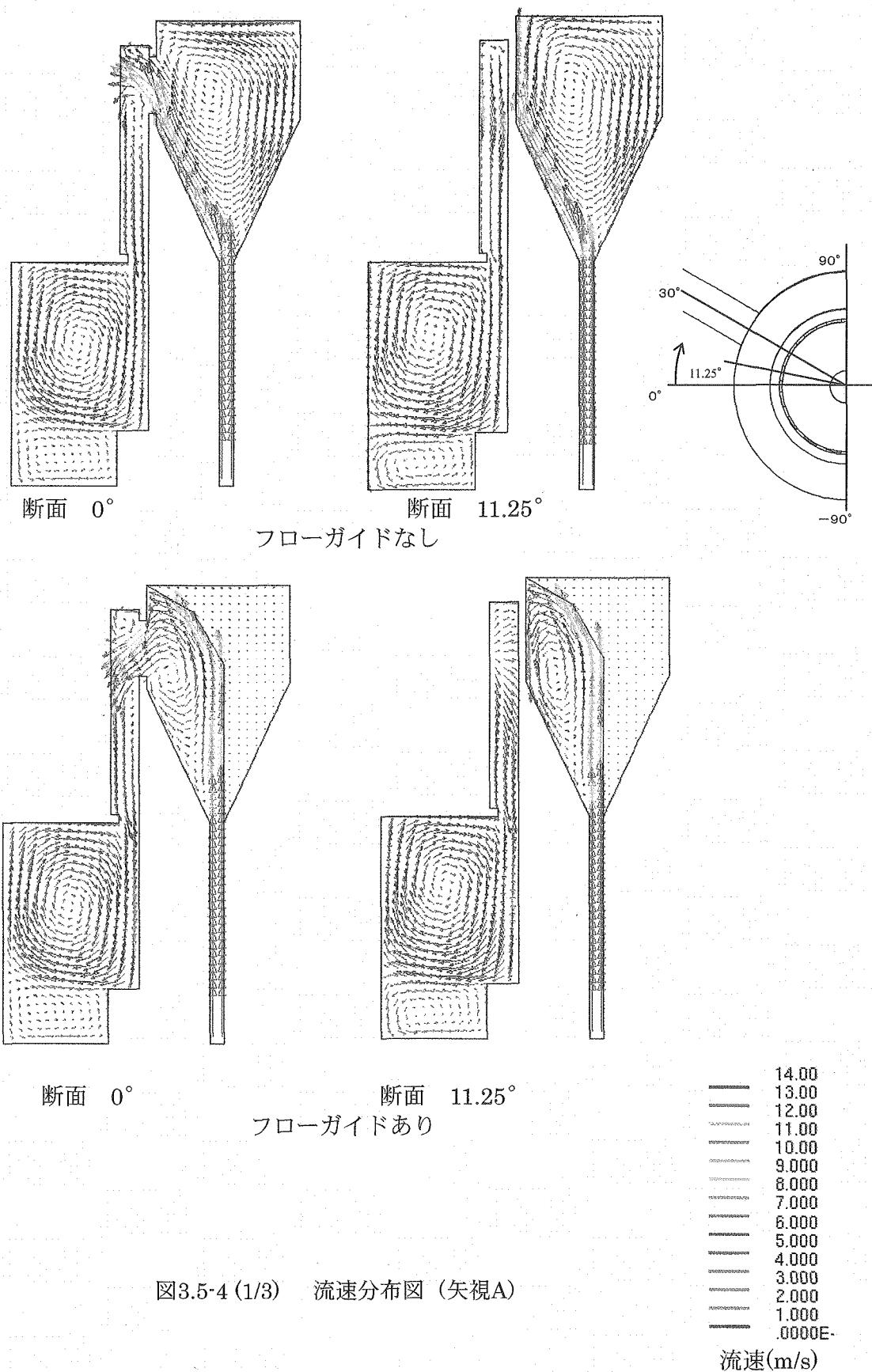
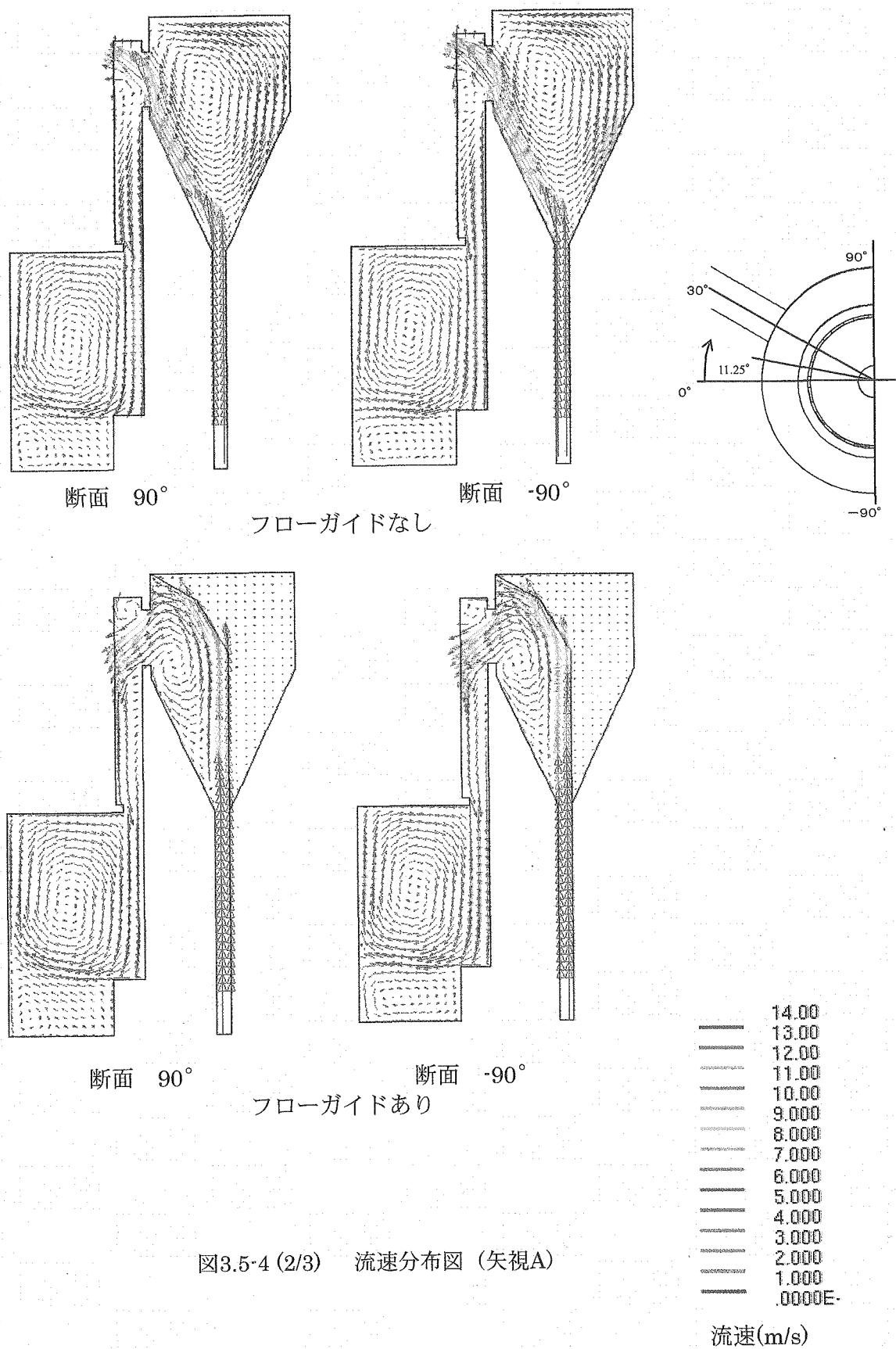


図3.5-4 (1/3) 流速分布図(矢視A)



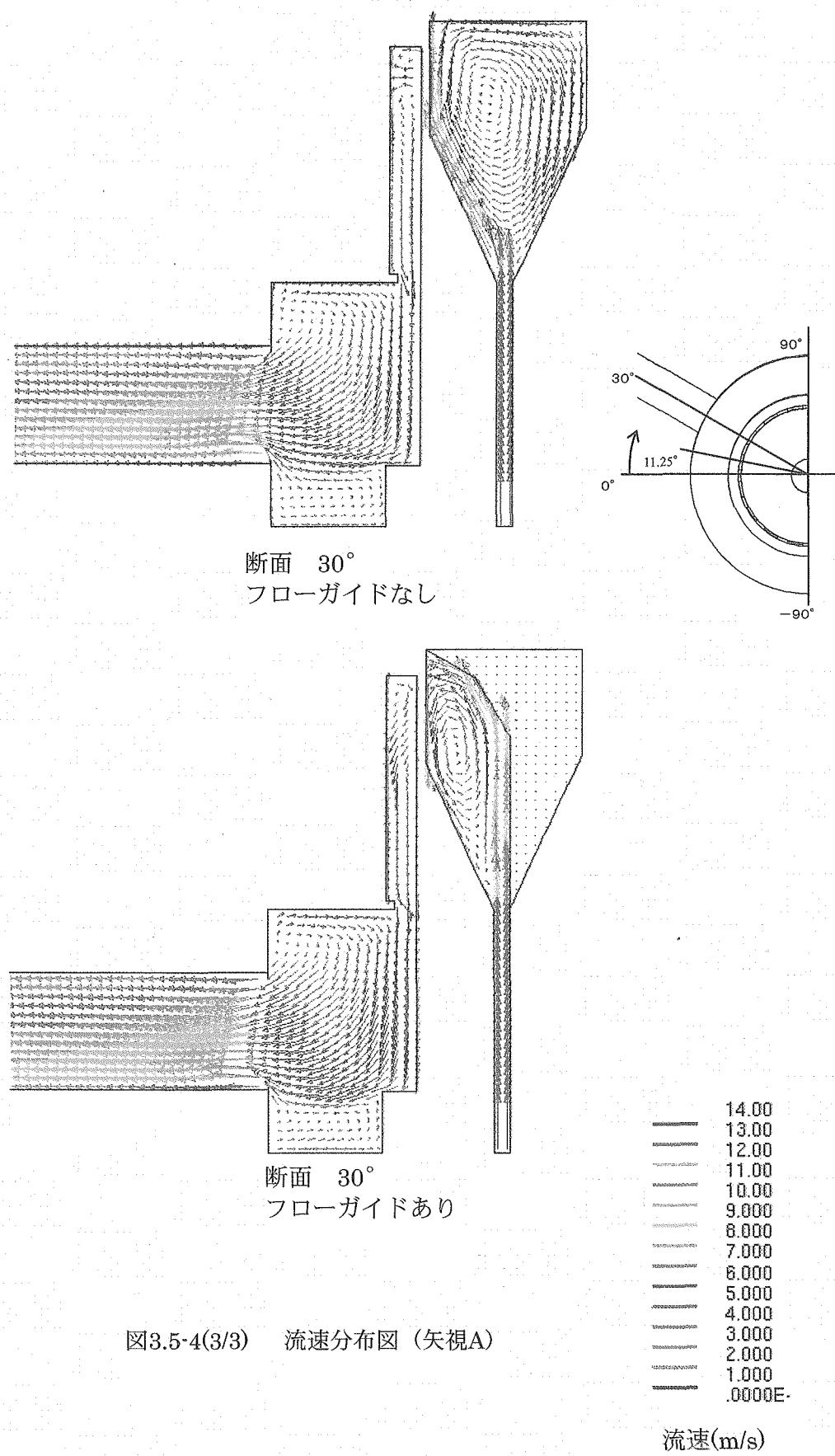
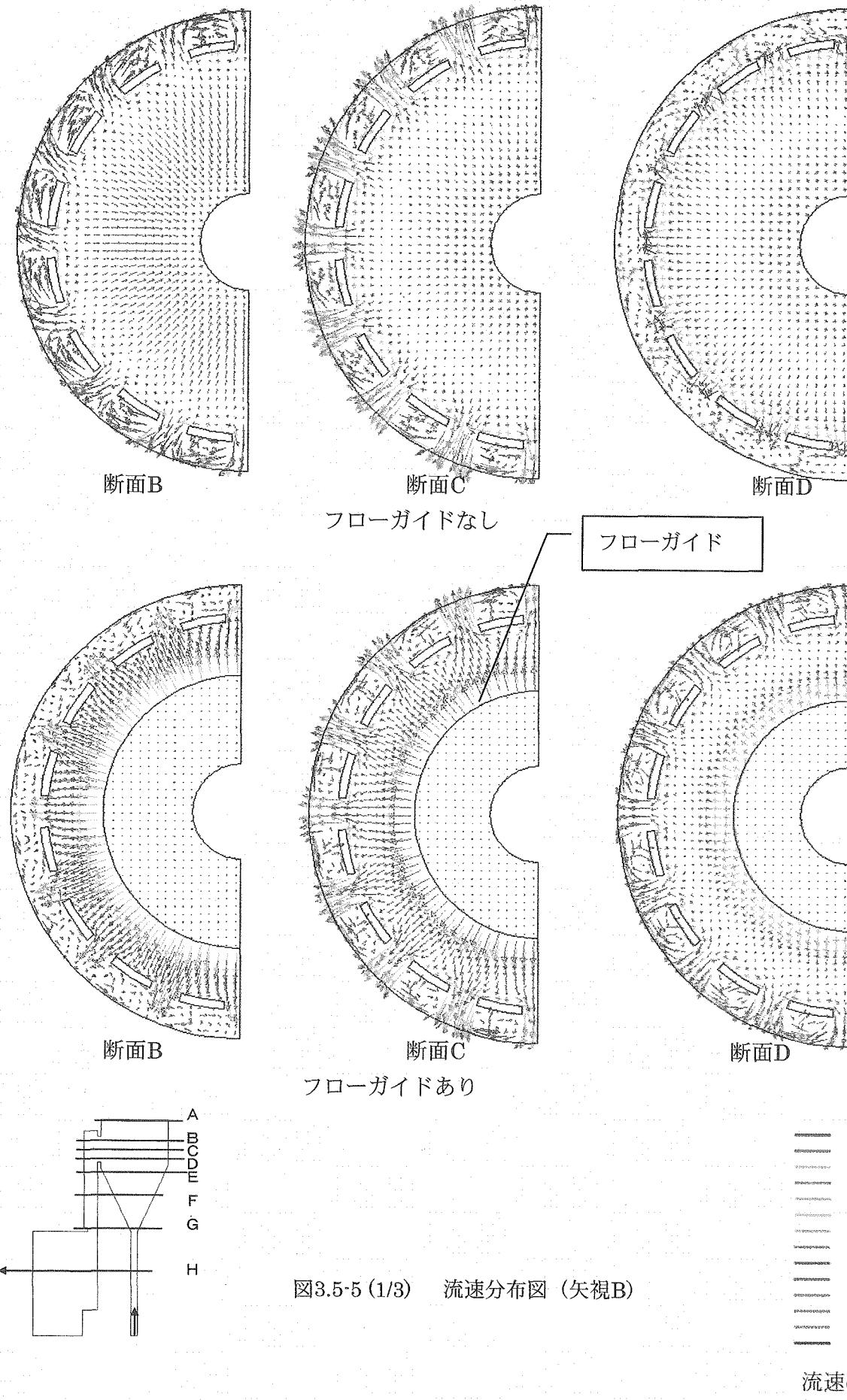
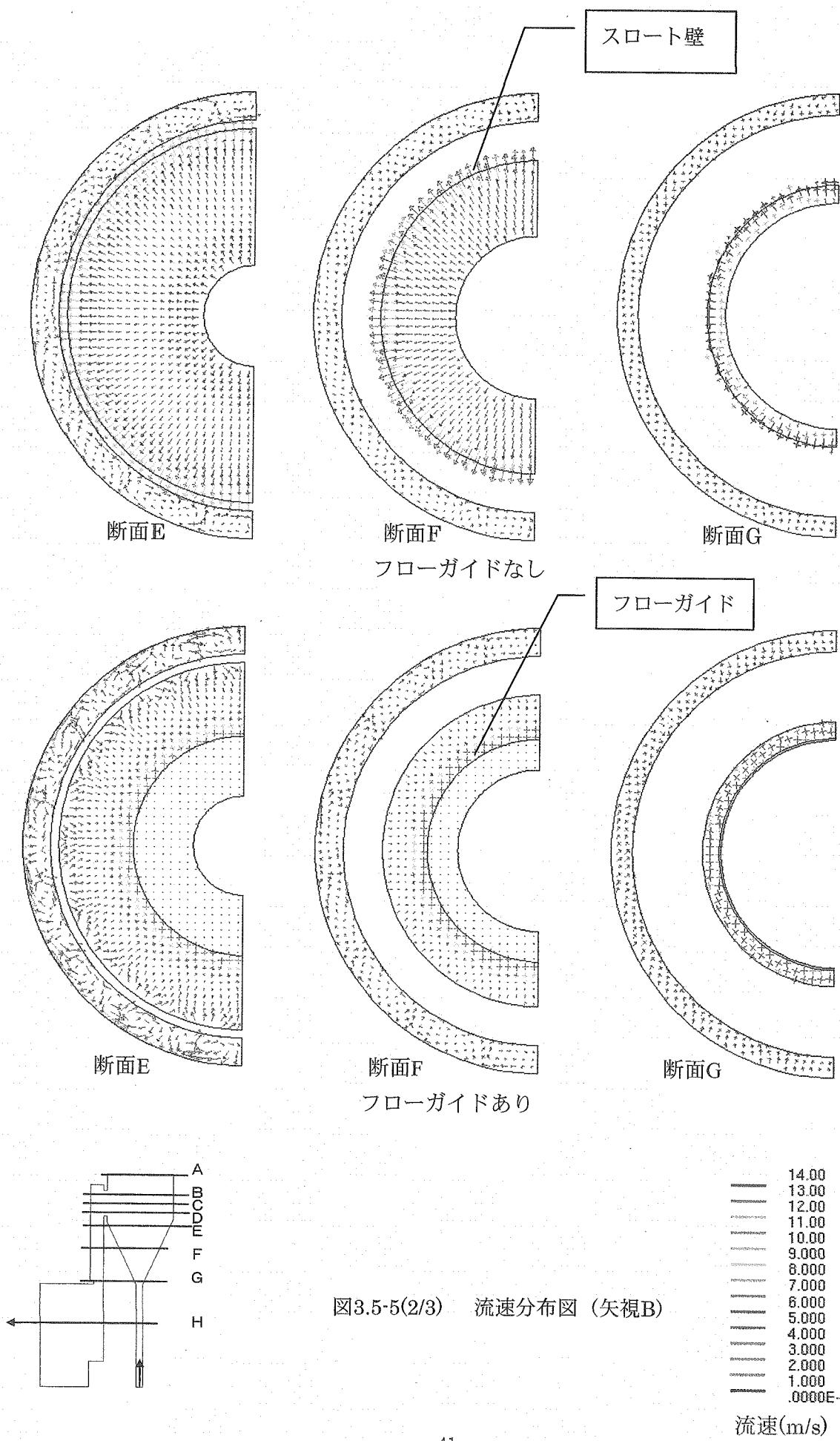
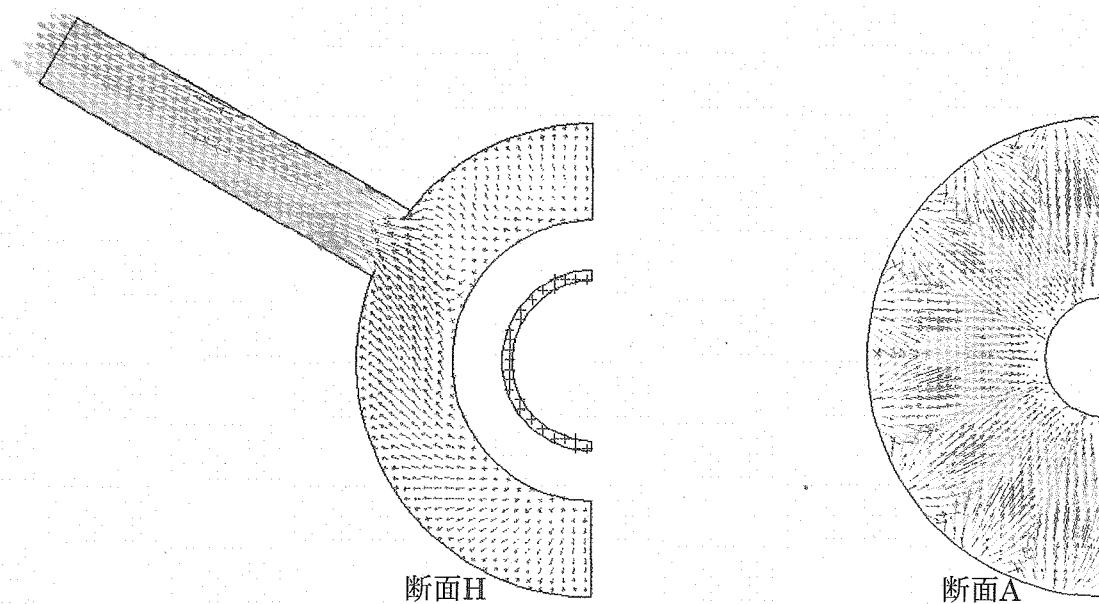


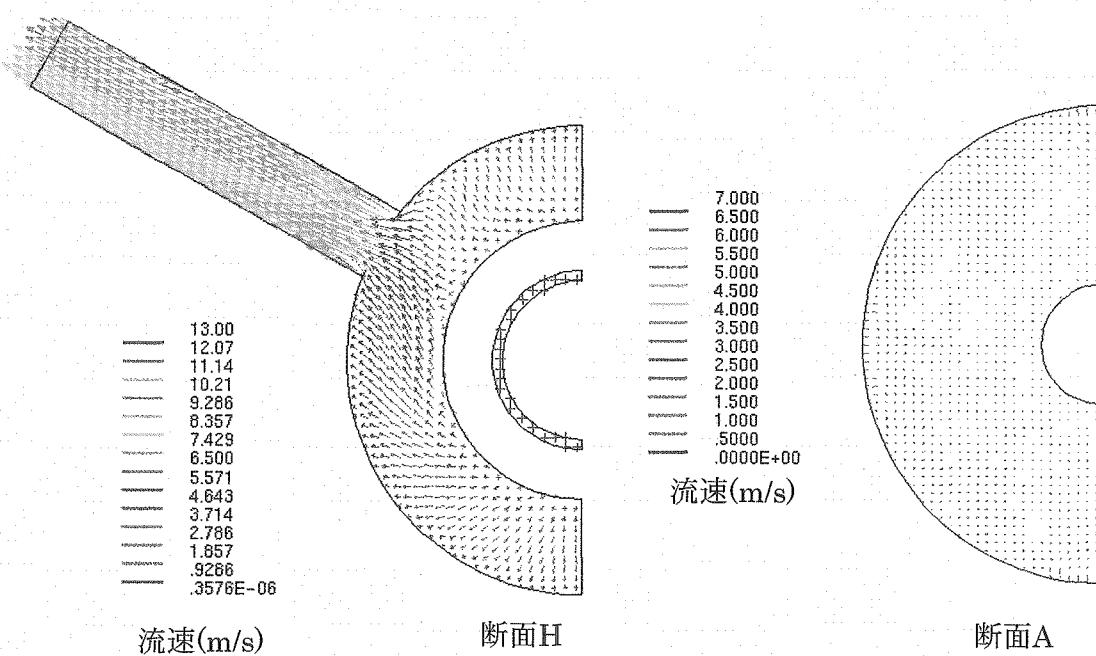
図3.5-4(3/3) 流速分布図(矢視A)







フローガイドなし



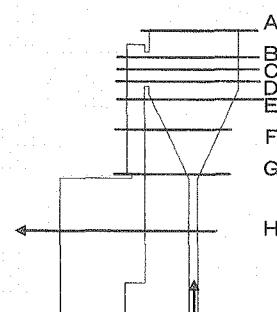
流速(m/s)

断面H

断面A

フローガイドあり

図3.5-5 (3/3) 流速分布図(矢視B)



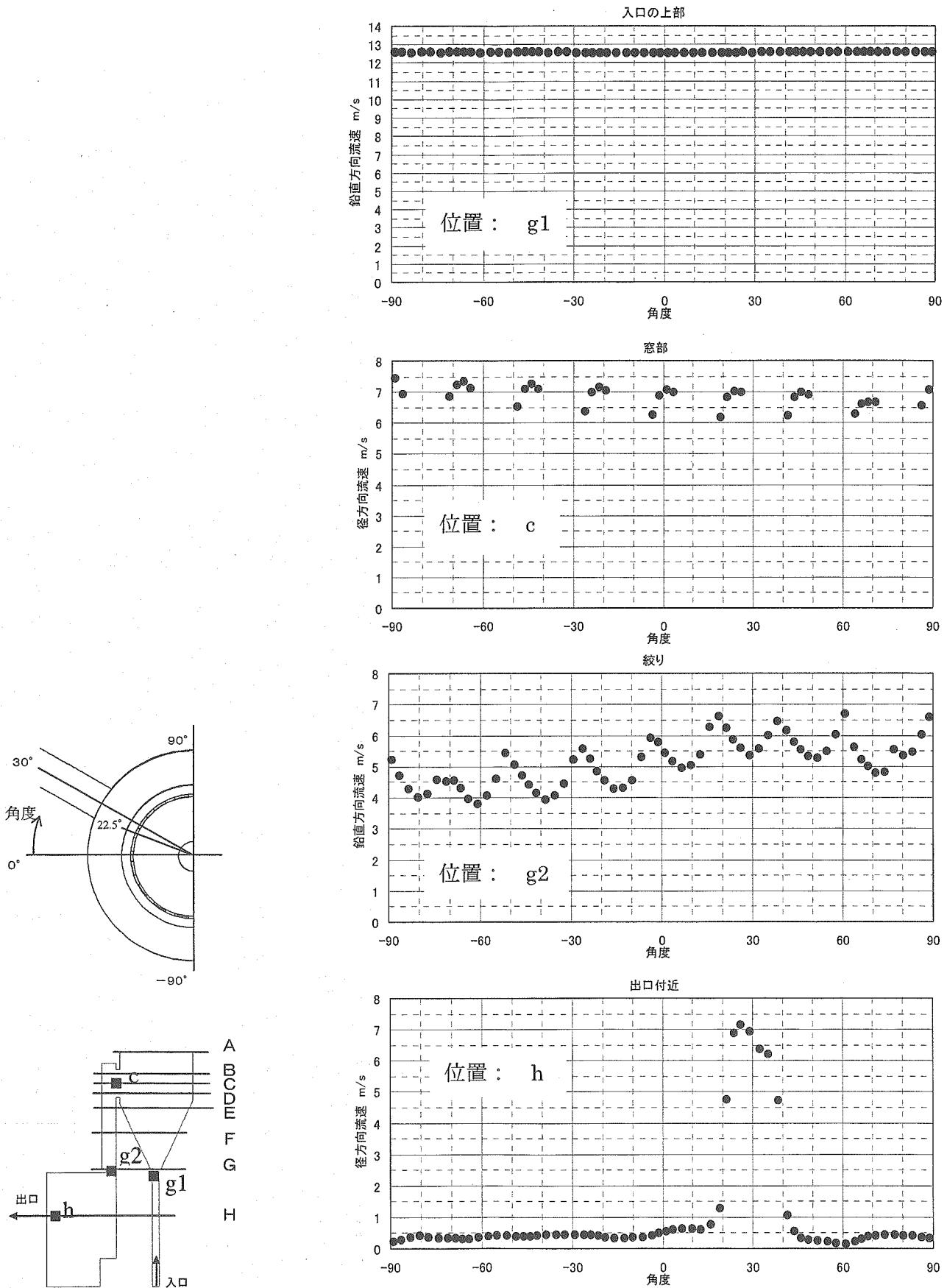


図3.5-6(1/2) 径方向および鉛直方向流速分布図（フローガイドなし）

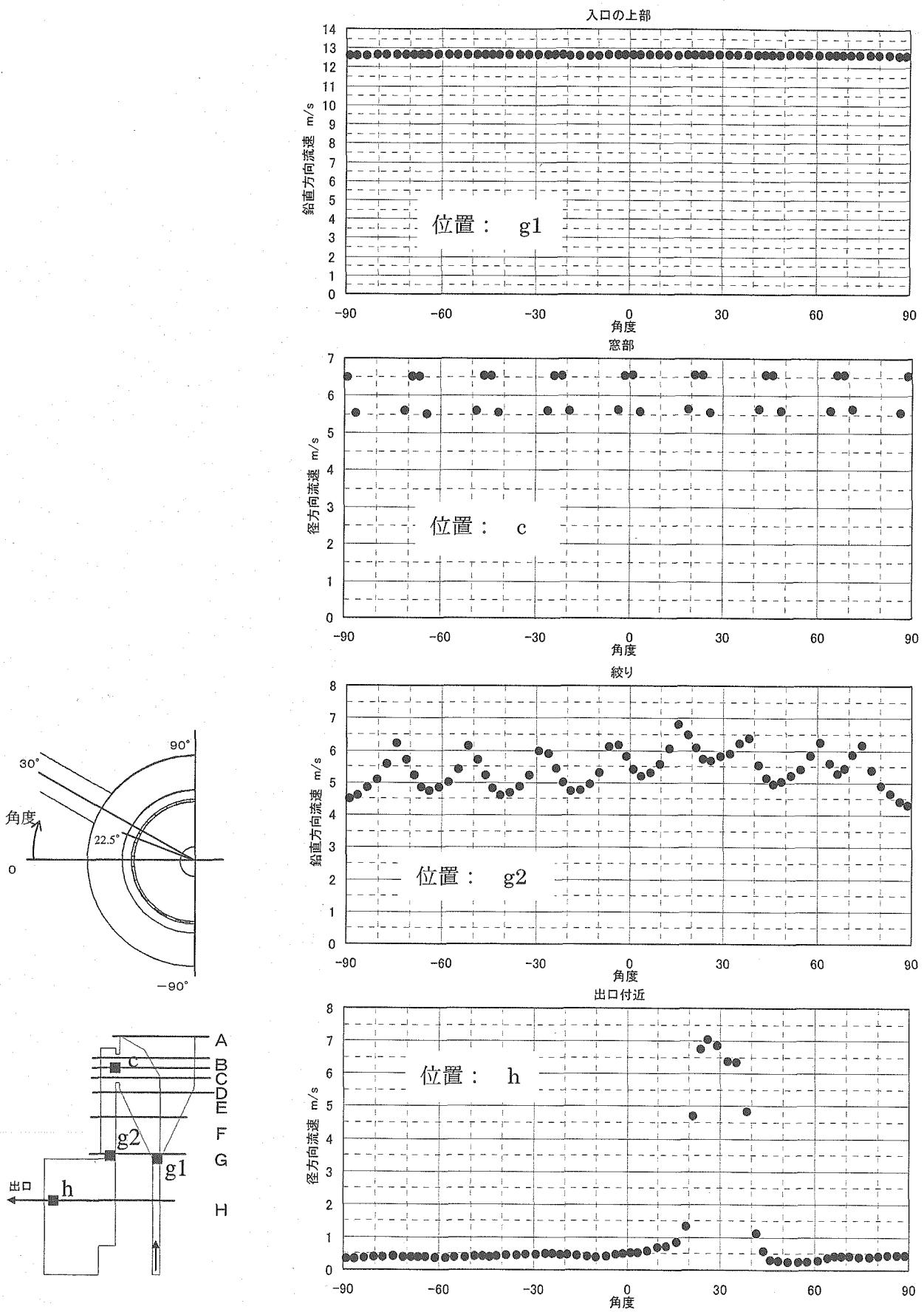
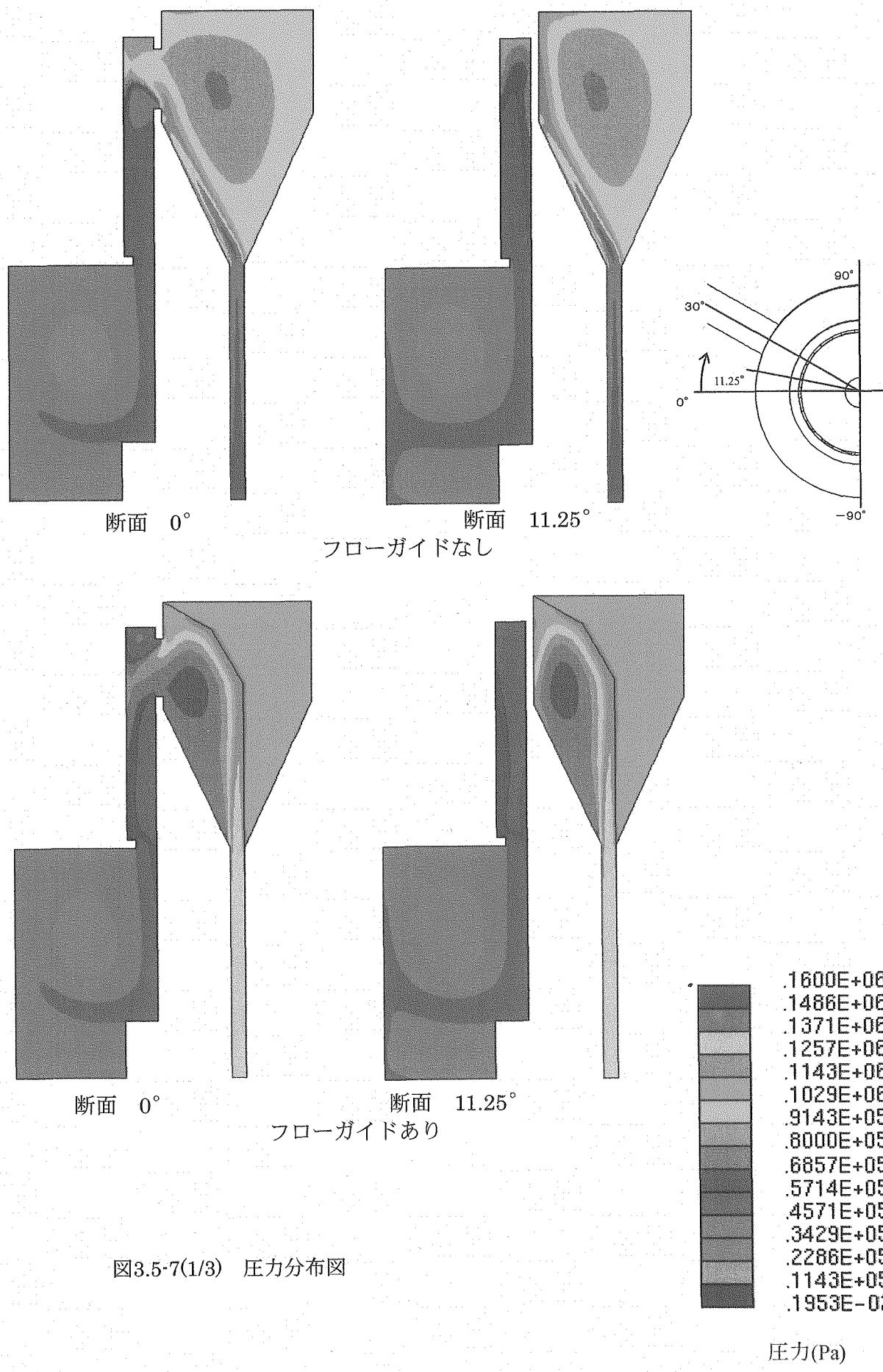


図3.5-6(2/2) 径方向および鉛直方向流速分布図 (フローガイドあり)



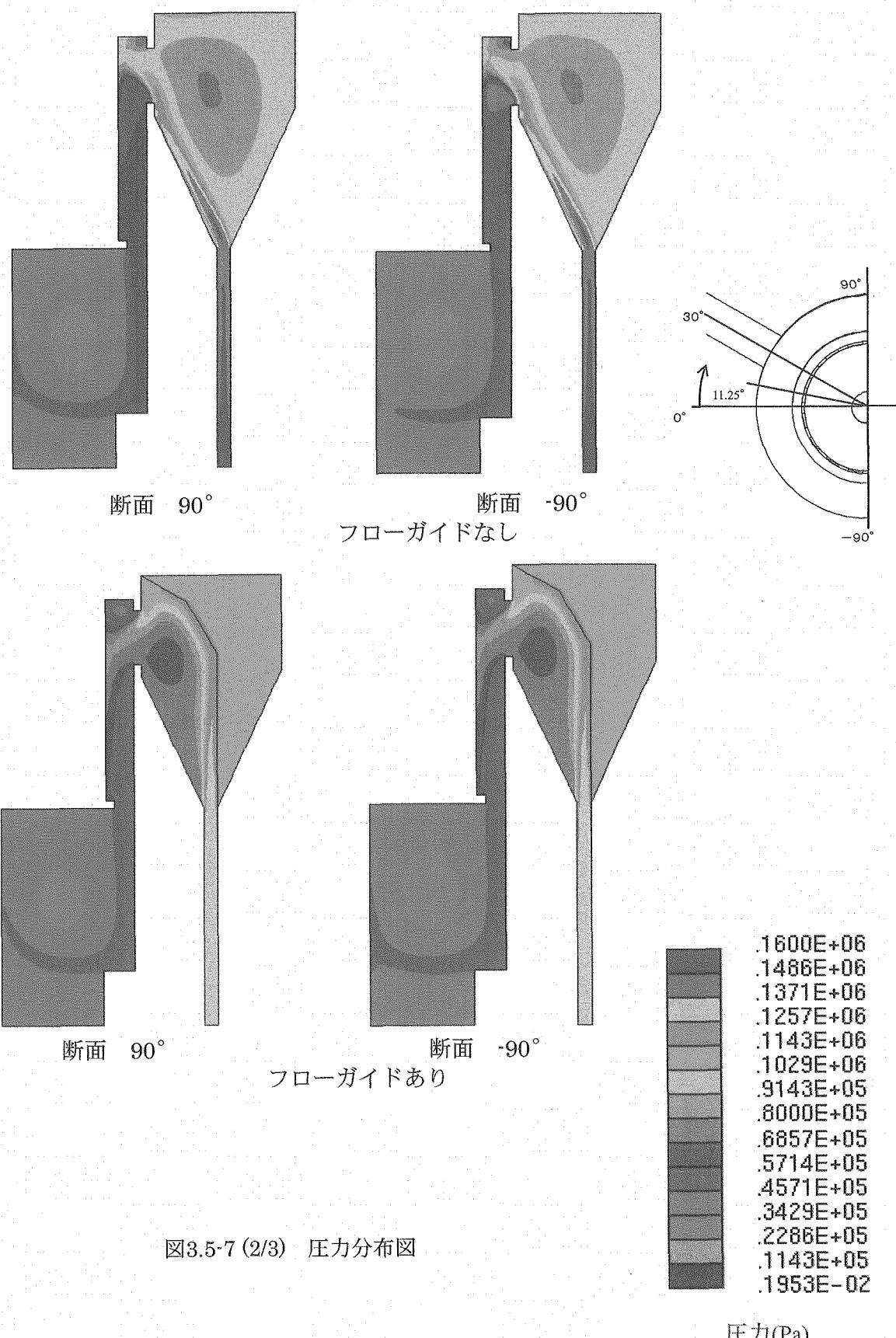


図3.5-7 (2/3) 圧力分布図

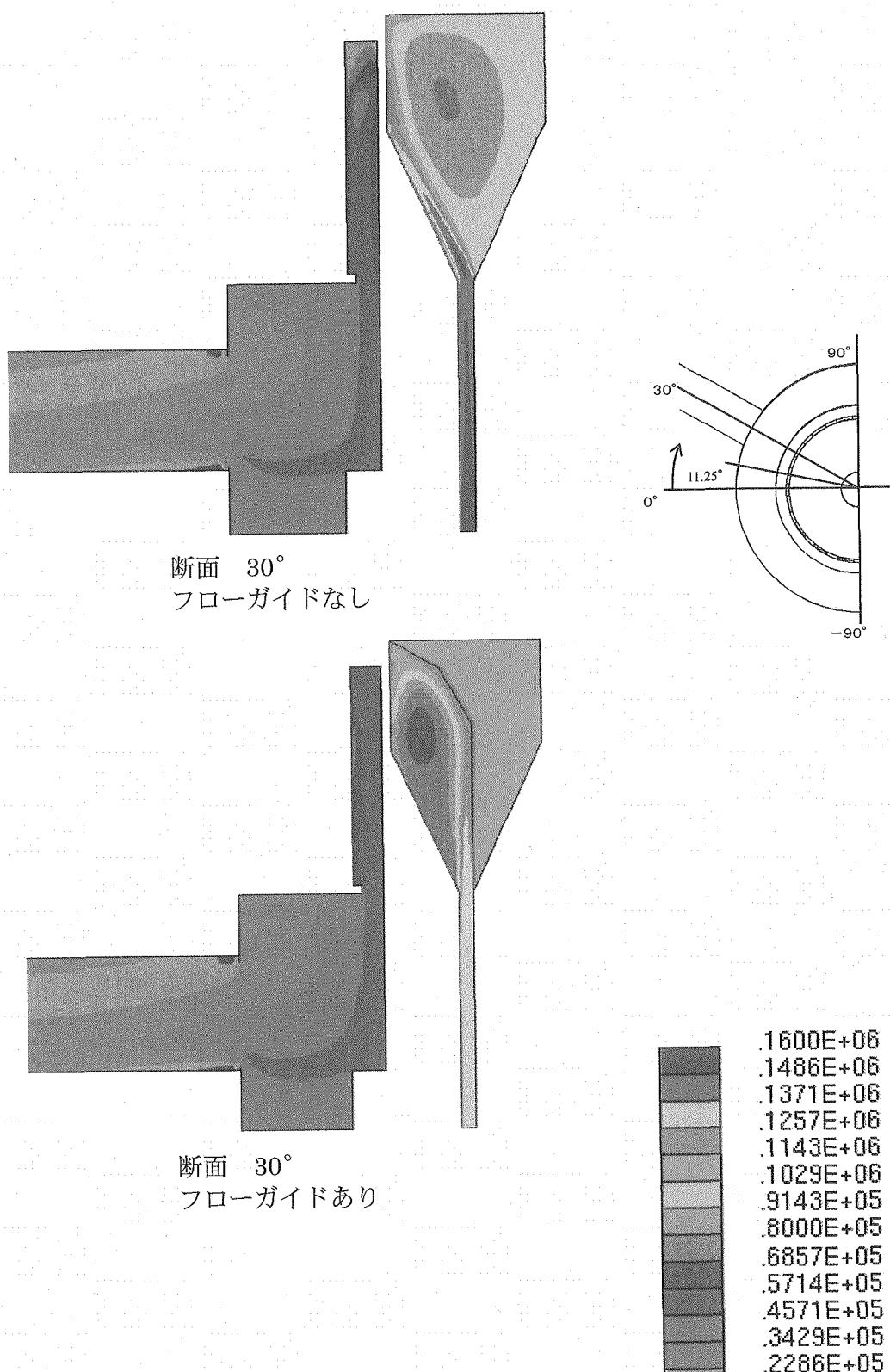


図3.5-7(3/3) 圧力分布図

### 3.6 電磁ポンプ組込型と機械式ポンプ組込型の概念比較

電磁ポンプ組込型中間熱交換器と機械式ポンプ組込型中間熱交換器の概念比較を表3.5・1に示す。表に示したように、電源容量、大容量化、Na隔壁信頼性、およびプラントにおける実績については機械式ポンプ組込型が優位であると考えられるが、保守・点検、振動対策、熱過渡対策等については電磁ポンプ組込型が優位である。

原子力発電プラントは長時間運転を行い、かつ信頼性が高くなければいけないので、疲労破壊に大きな影響を及ぼす振動が電磁ポンプでは発生しないというのは非常に大きな利点であり、また、経済性といった観点からも保守・点検が簡易にできることは大きな利点である。機械式ポンプ組込型の方が優位な点、電源容量、大容量化、Na隔壁信頼性、およびプラントにおける実績等についても、次節で述べるように今後十分に克服できると考えられる。ただ、大容量電磁ポンプ試験を行うには、大規模なナトリウムループ試験装置が必要であり莫大な費用がかかるので、研究開発費を考慮すると、大容量では電磁ポンプ組込型より機械式ポンプ組込型の方が優位になると考えられる。

表 3.6-1(1/3) 機械式ポンプ組込型中間熱交換器と  
電磁ポンプ組込型中間熱交換器の概念比較

項目	MP	EMP	備考
電源容量	○	△	EMP のポンプ効率～40%。但し、浸漬型 EMP の場合、電源入力のほとんどを熱として回収可能。その結果、MP のポンプ効率～75% の場合と実質の所内負荷率で比較すると差は殆ど無いと推定する。
補助系	△	○	MP は油潤滑・冷却系、Ar ガスプローダウン・排気系が必要。 Ar ガスを消費せず循環させる場合、VT、完全シール型ガス循環器の寿命に課題があり、定期的な点検/交換を考慮する必要がある。
空調負荷	△	○	MP の電動機放熱分が空調負荷になる。 1 ループ当たりで、電動機 4.4MW の損失分を 2% とすると 88kW の空調負荷が増大する。
振動対策	△	○	MP は回転体としての振動対策必要 特に、IHX 伝熱管の共振防止考慮が重要
消耗品	△	○	メニカルシール、潤滑油、Ar ガス（シャフトプローダウンガス） 1 台当たりガス消費量 : 4l/min とすると 2,100m <sup>3</sup> /y
運転制御性	△	○	MP は危険回転数回避の為の制限有り。又、ポンプ回転体（電動機、慣性体含む）の慣性力が大きいため急速な運転点変更が容易でない。 フローコーストダウンは、両者とも機械系の回転慣性力をを利用して成行きの減衰であるが、EMP の場合は必要に応じて減衰曲線を制御する事が可能。
NPSH <sub>req</sub>	△	○	EMP はキャビテーションが MP より発生しにくい。 現状設計の 1 次系 Ar ガス圧は機械式ポンプのキャビテーション制限から設定されている。
ポンプ内リークフロー処理	△	○	IHX の中に合体させた場合 MP のリークフロー処理方法、リークフロー-Na 中気泡除去方法に課題が大きいと推定される。 EMP リークフローの場合は EMP の外周・内周に設置する円環状流路を活用して EMP ケーシングを冷却しながら入口プレナムへ戻す。

表 3.6-1 (2/3) 機械式ポンプ組込型中間熱交換器と  
電磁ポンプ組込型中間熱交換器の概念比較

項目	MP	EMP	備考
保守/点検	△	○	MP はメカニカルシールの交換が必須で、また、大型回転体である機械系の保守/点検は現場に於ける作業になり、放射線遮蔽対策が必要。 EMP は静止機器のため日常的な現場点検は不要と推定される。
大容量化	○	△	ALIP 型 EMP は大容量化すると中心部の円筒空間(無駄空間)が過大になり、機械としてのバランスが悪くなる。 EMP の試作・Na 試験の実績は最大 160m <sup>3</sup> /min で、更に大容量化する場合は電磁気・構造の詳細設計、製作・組立法、運搬法等の検討を行い課題の摘出・対応法を確認する必要がある。 大容量の場合、IHX を EMP の中心に設置する概念が有効になる可能性がある。
熱過渡対策	△	○	MP は長尺の回転体のため、軸中心変形の許容値が非常に小さい。従って、回転体周りの構造物は周方向温度分布許容幅が非常に小さい条件を満足させる必要がある。 EMP は静止機器であるため、熱過渡対策については比較的容易と推定する。
プラントにおける実績	○	×	浸漬型 EMP のプラントにおける実績は皆無。 小型 EMP はプラント補助系では実績は多数ある。 主循環ポンプとしてのプラントにおける実績は MP のみ。 電源系、保護系を含めた EMP システム(主循環ポンプとして使用する条件)の長期運転の経験・蓄積が必要。

表 3.6-1 (3/3) 機械式ポンプ組込型中間熱交換器と  
電磁ポンプ組込型中間熱交換器の概念比較

項目	MP	EMP	備考
Na 隔壁信頼性	○	△	EMP のポンプ効率向上のためダクト部は薄肉構造が好ましい。ダクト部が破損した場合は流入する Na が内蔵している電気部品へ到達し、地絡事故に繋がる。また、薄肉ダクトの内面にはステータ構造物(積層鉄心)が密着しており、このような構成に対する適用設計基準の必要性を含め整備が必要と考える。但し、ステータ内へ流入した Na は EMP 内に留まり雰囲気への Na 漏洩は無い。
一次系用流量計の設置	×	○	EMP 出口部は均質な流れが期待でき、設置スペースの確保も出来ることから電磁流量計などの設置が可能。現状設計では MP に流量計を設置するのは困難。 但し、適用できる電磁流量計は既存の形式と異なり円環状流路が対象で、高温・放射線環境のため特性、信頼性などの確認のため開発が必要。

### 3.7 開発課題

電磁ポンプと機械式ポンプを中間熱交換器へ組込んだ合体機器の概念比較をした結果、機械式ポンプの方が優位な点を、電磁ポンプの開発課題とし、以下に示し検討を行う。

- 電源容量（ポンプ効率）
- 大容量化
- ナトリウム隔壁構造の信頼性
- プラントにおける実績

#### (1) 電源容量（ポンプ効率）について

これまでの電磁ポンプの研究開発から、大容量化（数十  $m^3/min$  以上）するとポンプ効率が向上し、約 40% という結果が得られている。

電磁ポンプの損失は、コイル抵抗損、ナトリウム抵抗損、ダクト抵抗損、ポンプ中流体抵抗損等からなり、図 3.7-1 に示すように電磁ポンプの運転状態により各損失の割合が変化する。これらの損失の中で、コイル抵抗損、ナトリウム抵抗損の大部分は、熱として回収可能である。熱の回収を考慮した電磁ポンプの効率は約 75% になり、機械式ポンプと比較するとほとんど差はない。ダクト抵抗損は、そのダクト中に誘導電流が誘起される為に発生する損失であり、熱として回収できない。よって、ポンプ効率を上昇させるにはダクト抵抗損を削減すればよい。ダクト抵抗損を削減するためには、ダクトに電流が流れないようにする、つまりダクト材質を絶縁体（セラミック等）に変更すれば可能であるが、現状の材料技術では適用可能な材質はない。また他の損失についても、電磁ポンプ設計の最適化、運転条件の調整により若干の改善が期待できるが、大幅な改善は無いと考えられ、ポンプ効率は最大で 75% 程度であると考えられる。この値は機械式ポンプより若干劣る程度である。ダクト材質を絶縁体に変更することができれば、機械式ポンプの効率を上回ることも十分可能であると考えられる。

#### (2) 大容量化

電磁ポンプの試作・ナトリウム試験の実績は最大  $160m^3/min$  であり、更に大容量化する場合は電磁気・構造の詳細設計、製作・組立法等の検討を行い課題の摘出・対応方法を確認する必要があるが、技術的には可能であると考えられる。しかし、大容量電磁ポンプ試験を行うには、大規模なナトリウムループ試験装置が必要であり莫大な費用がかかるので、研究開発費を考慮すると、大容量では電磁ポンプ組込型より機械式ポンプ組込型の方が優位になると考えられる。

#### (3) ナトリウム隔壁構造の信頼性

電磁ポンプの特徴として、ナトリウム駆動部（ダクト部）は薄肉構造でダクト背面に積

層鉄心が密着している。積層鉄心をダクトへ密着させる主な理由は、内外ステータの鉄心間距離を短くすると共に、コイルで発生するジュール熱等を効率よくダクトを介してナトリウムへ伝達させるためである。ダクトが破損した場合はナトリウムが電磁ポンプステータ内へ流入し、コイル絶縁を破壊して地絡・短絡を引き起こす。

ナトリウム隔壁構造の信頼性を向上させるためには、薄肉円筒ダクトの背面に積層鉄心ブロックを密着させた状態で、ヒートサイクル、加圧試験を実施し、ダクト、積層鉄心ブロック支持構造の耐久性を評価し、また加振台を用いて加振試験を実施し、各部応答を計測して設計解析手法を検討する必要がある。

#### (4) プラントにおける実績

電磁ポンプを主循環ポンプとしてプラントに適用した実績は無く、プラント設計研究にとどまっている。電磁ポンプをプラント主循環ポンプとして適用するには、ポンプ特性がプラントに適合すると共に信頼性が十分に有する必要がある。電磁ポンプのポンプ特性に関しては、小容量から  $160 \text{ m}^3/\text{min}$ までの設計・製作・ナトリウム試験の経験を蓄積しているが、容量が数百  $\text{m}^3/\text{min}$ 以上の長時間運転実績は非常に少ない。よって実プラントへ適用する前に、ほぼ同一規模・特性の電磁ポンプを製作してプラントでの運転条件を模擬したナトリウム試験を実施し、ポンプ特性、電磁ポンプ構造・電源制御系の信頼性評価を行う。その後、ナトリウム試験装置における電磁ポンプの長時間運転によるポンプデータの蓄積・運転実績を基に、実プラント（例：もんじゅ）へ電磁ポンプを導入し、プラントにおける実績を作ることが必要である。

電源容量（ポンプ効率）、大容量化、ナトリウム隔壁構造の信頼性、プラントにおける実績を電磁ポンプの開発課題とし、検討を行った。現状の技術で困難と考えられるのは、ポンプ効率を上昇させるために用いる絶縁体のダクト材質の開発のみであり、他は試験・実験を行うことにより克服できると思われる。また、例え絶縁体のダクト材質の開発が無理であっても、電磁ポンプのポンプ効率は機械式ポンプと比較して、若干劣る程度である。

よって、上記で示した開発課題は十分に克服できるものと考えられる。

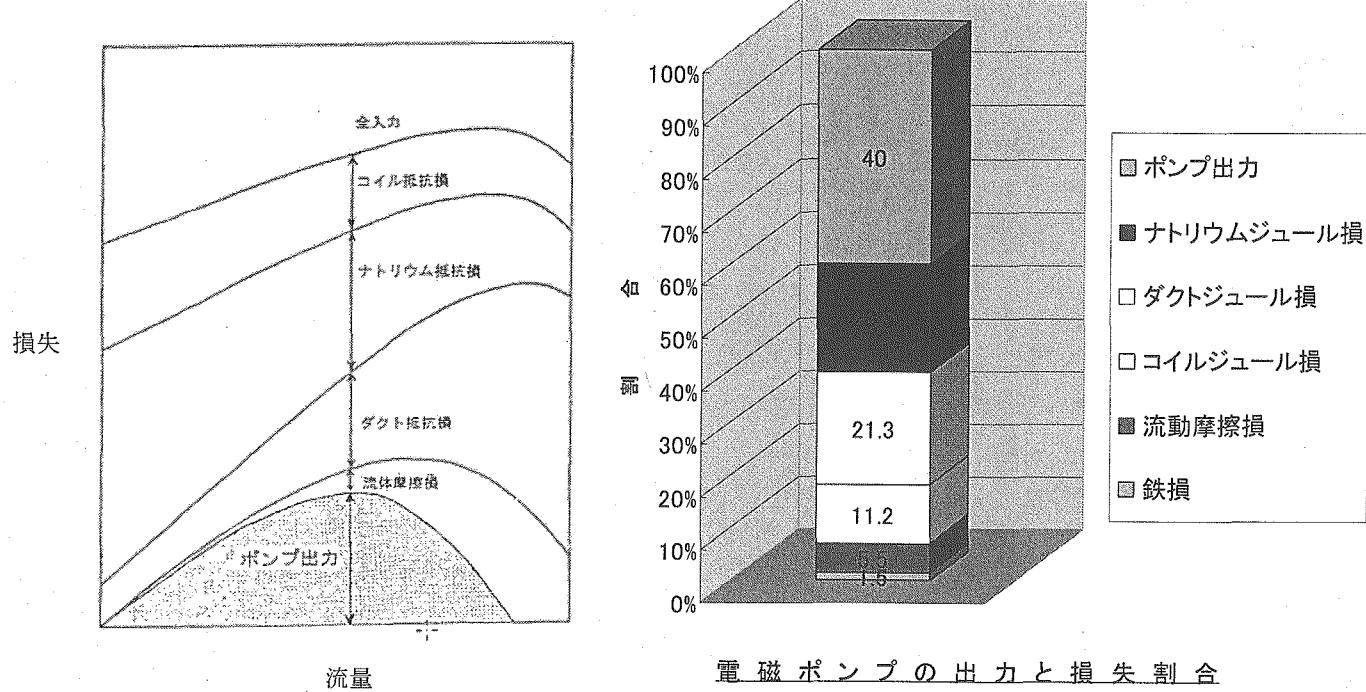


図 3.7-1 電磁ポンプ運転状態による各損失

### 3.8 まとめ

現状設計の主配管取合い、伝熱中心高さ、中間熱交換器管束形状で電磁ポンプ組込型中間熱交換器の構造概念検討を行った。その結果機械式ポンプ組込型中間熱交換器の場合と寸法をほとんど変更せずに電磁ポンプを中間熱交換器に適用する見通しを得た。

システム側の条件である定格流量、定格揚程を達成することができる電磁ポンプの電磁気設計を行い、その電磁気解析を行った。その結果、設計条件である定格流量において、電磁ポンプの揚程はシステム側の要求を満足することを確認した。また、 $V/f = \text{一定}$  制御において定格点ならびに部分運転点は、常に安定した流量制御特性が得られる Q-H 特性の右下がり部分にあることがわかった。また、電磁力のほとんどは軸方向に働くており、揚程に対して無効になる、つまり電磁ポンプの効率を下げる径方向電磁力は非常に小さいことを確認した。

電磁ポンプ組込型中間熱交換器を採用した場合の上部プレナム内の 3 次元流動解析を実施し、上部プレナム内で剥離を防止するために設置するフローガイドの有効性と上部プレナム内の流れの状態を調べた。解析の結果、フローガイドを設置することにより、上部プレナム内に発生する循環流を抑制されることがわかり、窓部において剥離が抑えられることが示唆された。また、フローガイドを用いることによって、上部プレナム入口から出口配管における圧力損失が 18000Pa 程度低減することがわかった。

電磁ポンプ組込型と機械式ポンプ組込型の概念比較を実施し、電源容量、大容量化、ナトリウム隔壁の信頼性、およびプラントにおける実績といった点が開発課題として挙げられた。これらの検討を行った結果、開発課題は克服できるという見通しを得た。

#### 4. 電磁流量計の検討

##### 4.1 概要

実用化戦略調査研究におけるナトリウム冷却炉ではフェライト鋼を用いた配管短縮、機械式ポンプ組込型中間熱交換器により冷却系の合理化を検討している。流量計は安全保護系として重要であるが、フェライト鋼は磁性体のためナトリウム冷却炉で実績のある電磁流量計を用いることは困難である。そのため、超音波流量計の採用を検討している一方、機械式ポンプ組込型中間熱交換器（図 1・1 参照）の代替案として電磁ポンプ組込型中間熱交換器（図 3.2・1 参照）を採用した場合は、電磁ポンプダクト部が非磁性体部分であるため、これを用いて電磁流量計を設置することができる。以下に電磁ポンプ組込型中間熱交換器に設置する電磁流量計の成立性を評価した。

#### 4.2 要求条件および型式

電磁ポンプ組込型中間熱交換器に設置する電磁流量計の設計条件を表 4.2-1 に示す。また電磁流量計が設置されケーブルが敷設される現場環境においては～1 mV 程度の電磁気的なノイズは避け難いので、定格流量で 10mV 以上の出力電圧を得ることが必要である。

電磁ポンプダクトは環状流路となっているため、円管流路に用いる電磁流量計では環状流路内磁束密度が小さくなり正確な測定ができない。よって、環状流路に設置するのに適した電磁流量計を検討しなければいけない。そこで、環状流路内磁束密度を大きくなるよう、コイル、ヨーク、鉄心を配置した、図 4.2-1(a)に示す M タイプおよび図 4.2-1(b)に示す U タイプの 2 つを検討した。M タイプ電磁流量計の基本寸法を表 4.2-2 および図 4.2-2 に、U タイプ電磁流量計の基本寸法を表 4.2-3 および図 4.2-3 に示す。

表 4.2-1 電磁流量計に対する設計条件

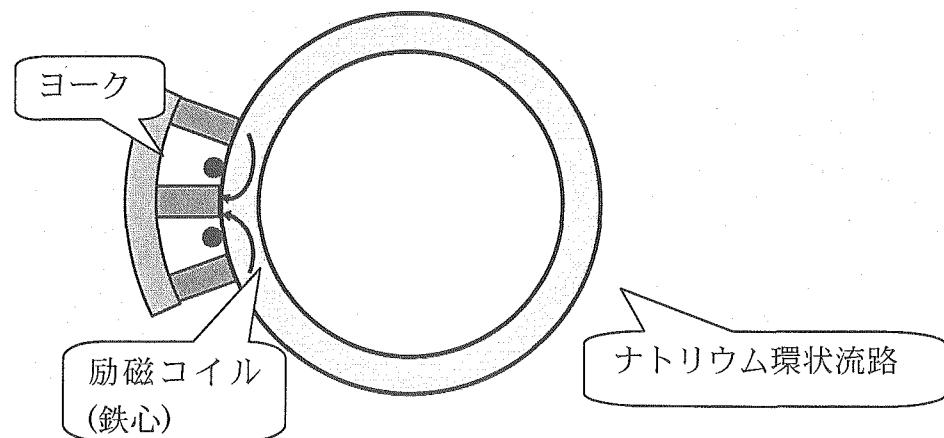
条件	項目	設計条件	
機能条件	運転監視	通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、及び自然循環運転時の1次系流量が監視できること	
	原子炉制御	1次系流量制御のプロセス信号として流量を計測できること	
	原子炉保護	多重性・系統分離設計とし安全保護系設備に流量低信号を発信できること ① 流量減少事象に対する後備炉停止系作動 ② 部分負荷出力上昇事象に対する後備炉停止系作動	
	保守	検出器は交換できること 原則として原子炉運転中の試験・健全性確認ができること	
設計条件	安全	安全設計審査指針を満足すること	
	構造	温度	550°C (最高使用温度)
		流速	12.3m/s (定格平均流速)
	放射線	$\sim 1.5 \times 10^3 \text{Gy/h}$ ( $1.5 \times 10^5 \text{R/h}$ )	
設置条件	耐震クラス	Aクラス	
	設置位置	EMP組込み IHXのポンプ出口部	
	ダクト口径	外ダクト外径 : 1630mm、厚さ : 10mm 内ダクト外径 : 1430mm	
	流路高さ	90mm	
運転条件	ダクト材質	ステンレス鋼	
	流量測定範囲	0 % (15%) ~ 130% (0 ~ 約 420m³/min)	
	定格運転流量	318m³/min/ループ	
	定格運転温度	395°C	
安全保護系要求条件	自然循環運転流量	約 2 ~ 3 % (約 6 ~ 10m³/min)	
	精度 (目標)	検出器	計測チャンネル
		± 2 % FS (10 ~ 130% 定格流量) 要求なし (0 ~ 10% 定格流量)	± 3.5 % 定格運転流量 (暫定)
	流量ゆらぎ (目標)	± 5 % 定格運転流量	
要求条件	流量計出力直線近似精度 (目標)	± 1 %	
	応答時間 (目標) (計測チャンネル)	$\tau_0$ (むだ時間) : 0.3 秒以下 $\tau_1$ (1 次遅れ時定数) : 1 秒以下 (ゆらぎ軽減用フィルタ時定数)	

表 4.2-2 M タイプ電磁流量計の基本寸法

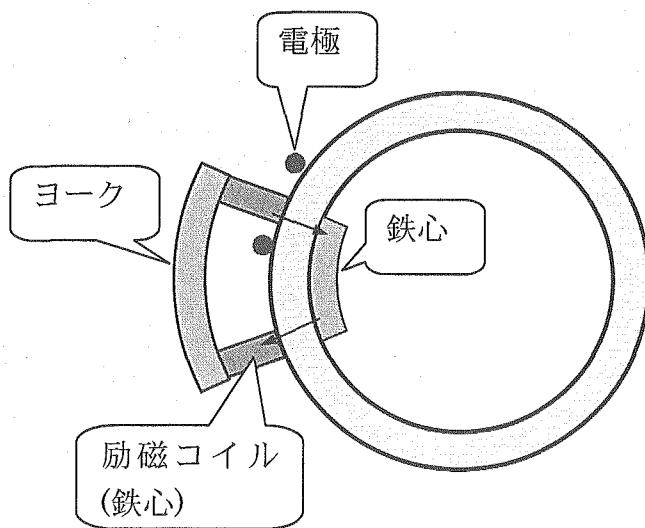
鉄心	磁極幅	200mm (中央鉄心)、100mm (左右鉄心)
	磁極高さ	110mm
	磁極間距離	162mm
ヨーク	高さ	30mm
	長さ	500mm
外ダクト	外径	1630mm
	厚さ	10mm
内ダクト	外径	1430mm
	厚さ	10mm
コイル	素線寸法	2mm×6mm
	配列	10列×8段 80T/コイル
	断面	幅 40mm×65mm
電源	電圧	24V
	電流	20A

表 4.2-3 U タイプ電磁流量計の基本寸法

鉄心	磁極幅	200mm
	磁極高さ	110mm
	磁極間距離	249mm
ヨーク	高さ	30mm
	長さ	500mm
内ダクト鉄心	高さ	40mm
	長さ	500mm
外ダクト	外径	1630mm
	厚さ	10mm
内ダクト	外径	1430mm
	厚さ	10mm
コイル	素線寸法	2mm×6mm
	配列	10列×8段 80T/コイル
	断面	幅 40mm×65mm
電源	電圧	24V
	電流	20A



(a) Mタイプ電磁流量計



(b) Uタイプ電磁流量計

図 4.2-1 MタイプおよびUタイプ電磁流量計の概略図

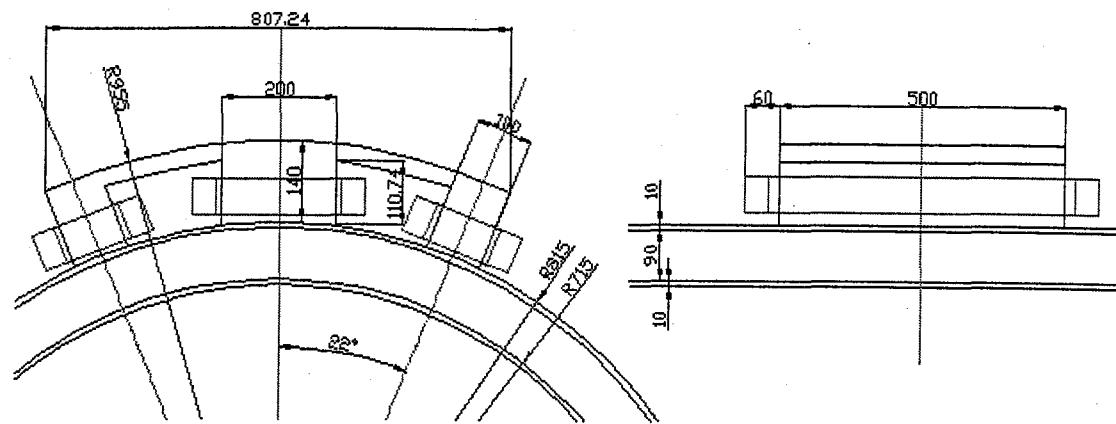


図 4.2-2 Mタイプ電磁流量計の寸法

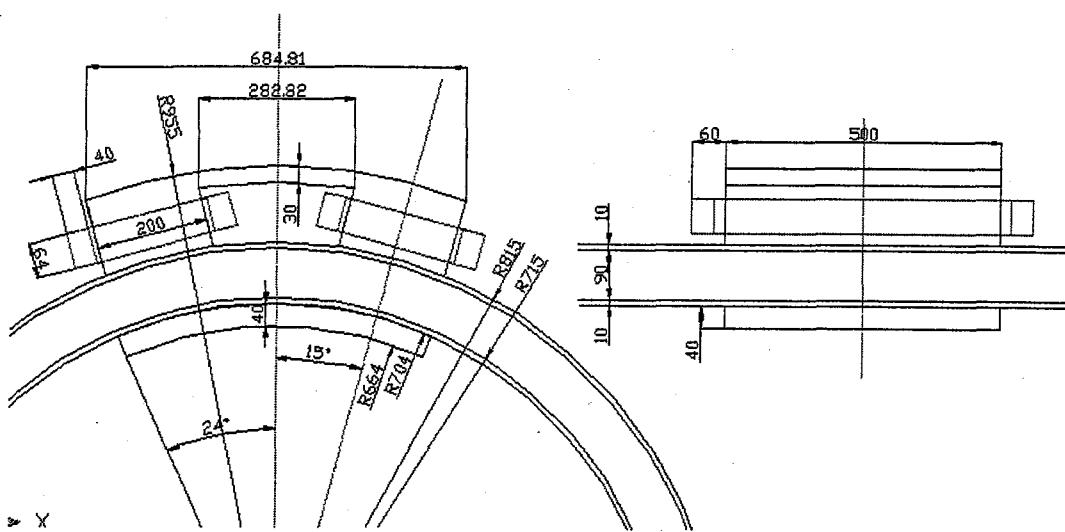


図 4.2-3 Uタイプ電磁流量計の寸法

### 4.3 磁場解析評価

図 4.3.1、4.3.2 に M タイプ電磁流量計の解析モデル図、メッシュ図を各々示す。また、図 4.3.3、4.3.4 に U タイプ電磁流量計の解析モデル図、メッシュ図を各々示す。ここで、Y 軸は流路内の半径方向であり、Z 軸は流路の流れ方向であり、X 軸は Y 軸と Z 軸に直交する方向である。M タイプ電磁流量計および U タイプ電磁流量計について、3 次元電磁場解析プログラム「OPERA-3D」を使用して、磁場解析評価を行った。

#### 4.3.1 M タイプ電磁流量計

##### (1) 外ダクト一対電極の場合

外ダクトに電極を一対設置する場合を検討する。外ダクト一対電極は Y 方向磁束密度による起電力を計測するものである。

図 4.3.1-1 に磁極中心線上（図の橙色線上）の流路内磁束密度を示す。横軸は流路内の半径方向（Y 方向）の位置であり、縦軸は Y 方向磁束密度である。外ダクト近傍は 0.0130T の磁束密度が得られ、内ダクトに近づくにつれて磁束密度が小さくなり、内ダクト近傍では 0.0089T になる。

図 4.3.1-2 に流路内の磁束密度ベクトル分布図、磁束密度分布図、等磁束密度線図を示す。中心コイルの両側にコイルを設置することにより、環状流路内に磁束が入っていることがわかる。中心コイルの両端近傍、左右のコイルの中心コイル側の端近傍では、磁束密度が大きくなっていることがわかる。また、磁極の端近傍では Y 方向磁束密度が大きく、磁極間では X 方向磁束密度が大きく Y 方向磁束密度は小さくなっている。

外ダクト一対電極型 M タイプ電磁流量計の出力電圧概算値は、以下のとおりである。

Y 方向磁束密度  $B=0.011T$  (図 4.3.1-1 より)

流速  $V=12.3m/s$  (表 4.2-1 より)

電極間距離  $L=0.3m$  (中央磁極の両側に電極を設置するとして)

よって、出力電圧  $E=B \cdot V \cdot L=40mV$  となる。前章で述べたように、10mV 以上の出力電圧があれば十分な精度を得られることから、外ダクト一対電極型 M タイプ電磁流量計を用いることにより流量測定に必要な出力電圧を得られることが明らかになった。

##### (2) 外ダクト内ダクト対向電極の場合

電極を外ダクトと内ダクトに対向して設置する場合を検討する。外ダクト内ダクト対向電極は X 方向磁束密度による起電力を計測するものである。

図 4.3.1-2 より、磁極間での X 方向磁束密度が大きいことがわかったので、磁極間に電極を対向させることにする。図 4.3.1-3 に磁極間（図の橙色線上）の流路内磁束密度を示す。横軸は流路内の半径方向（Y 方向）の位置であり、縦軸は X 方向の磁束密度である。外ダクト近傍は 0.0168T の磁束密度が得られ、内ダクト近傍では 0.0076T になる。

対向電極型 M タイプ電磁流量計の出力電圧概算値は、以下のとおりである。

X 方向磁束密度  $B=0.012T$  (図 4.3.1-3 より)

流速  $V=12.3m/s$  (表 4.2-1 より)

電極間距離  $L=0.09m$  (対向電極)

よって、出力電圧  $E=B \cdot V \cdot L=13mV$  となる。外ダクト一対電極の場合とほぼ同程度の磁束密度を得られたが、電極間距離が短いために出力電圧は減少した。また、外ダクト一対電極の方が外ダクト内ダクト対向電極より設備が簡素であることから、外ダクト一対電極の方が優位であると考えられる。

#### 4.3.2 U タイプ電磁流量計

##### (1) 外ダクト一対電極の場合

図 4.3.2-1 に磁極中心線上（図の橙色線上）の流路内磁束密度を示す。横軸は流路内の半径方向（Y 方向）の位置であり、縦軸は Y 方向の磁束密度である。外ダクト近傍から内ダクト近傍まで  $0.017T$  程度の磁束密度が得られており、M タイプと比較して均一度が良いことがわかる。

図 4.3.2-2 に流路内の磁束密度ベクトル分布図、磁束密度分布図、等磁束密度線図を示す。各々のコイルの端から端までの流路内では、均一性の良い Y 方向磁束密度が得られている。これより、内ダクトに鉄心を配置することにより、外ダクトのコイルから流路内に効果的に磁束が入り、均一度が良く大きな Y 方向磁束密度が得られることがわかった。また、磁極間では X 方向磁束密度が得られるのが、その絶対値は小さいことがわかる。

外ダクト一対電極型 U タイプ電磁流量計の出力電圧概算値は、以下のとおりである。

Y 方向磁束密度  $B=0.017T$  (図 4.3.2-1 より)

流速  $V=12.3m/s$  (表 4.2-1 より)

電極間距離  $L=0.3m$  (磁極の両側に電極を設置するとして)

よって、出力電圧  $E=B \cdot V \cdot L=50mV$  となる。外ダクト一対電極型 U タイプ電磁流量計を用いることにより流量測定に必要な出力電圧を得られることが明らかになった。

##### (2) 外ダクト内ダクト対向電極の場合

図 4.3.2-2 より、磁極中心線上より磁極間における X 方向磁束密度が大きいと考えられるので、磁極間に電極を対向させることにする。図 4.3.2-3 に磁極間（図の橙色線上）の流路内磁束密度を示す。横軸は流路内の半径方向（Y 方向）の位置であり、縦軸は X 方向の磁束密度である。外ダクト近傍は  $0.0089T$  の磁束密度が得られ、内ダクト近傍では  $0.0008T$  になる。

対向電極型 U タイプ電磁流量計の出力電圧概算値は、以下のとおりである。

X 方向磁束密度  $B=0.005T$  (図 4.3.2-3 より)

流速  $V=12.3m/s$  (表 4.2-1 より)

電極間距離  $L=0.09m$  (対向電極)

よって、出力電圧  $E=B \cdot V \cdot L=5\text{mV}$  となる。U タイプの場合は、内ダクトに鉄心を入れているため Y 方向磁束密度が大きく、X 方向磁束密度が小さい。よって、対向電極においては流量測定に必要な出力電圧を得られないことがわかった。

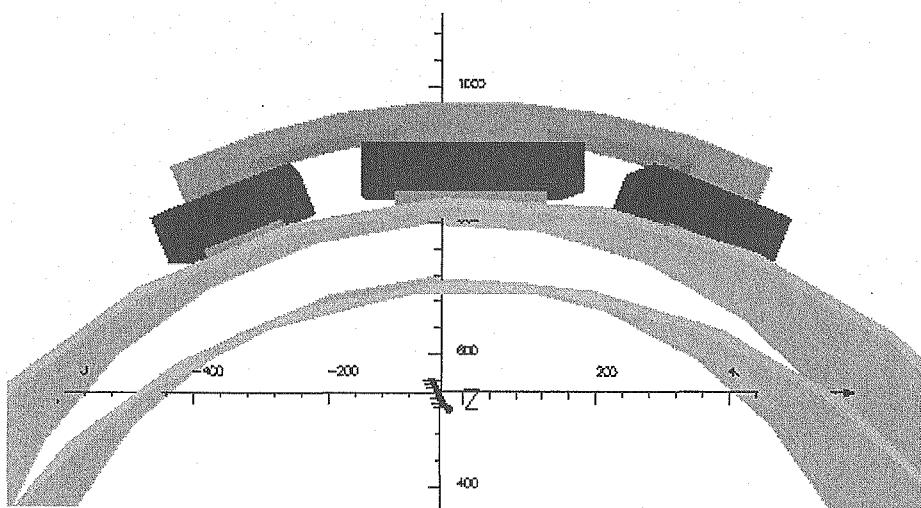
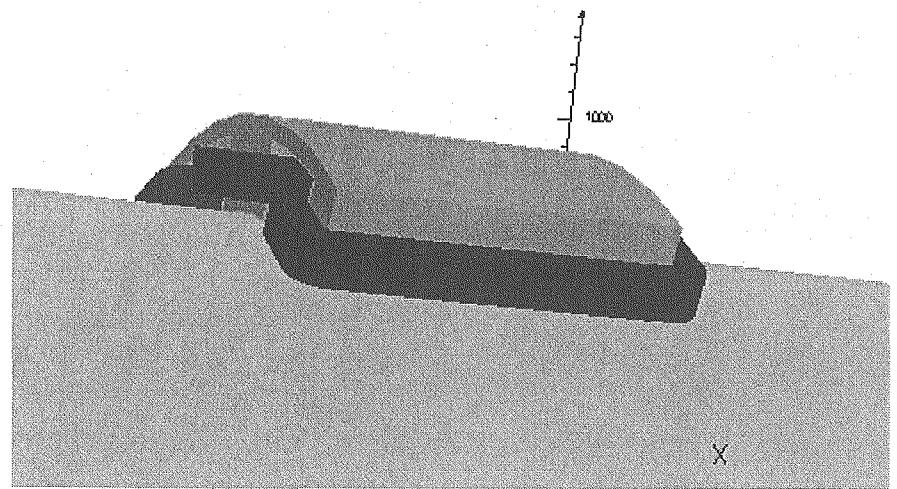


図 4.3-1 Mタイプ電磁流量計の解析モデル図

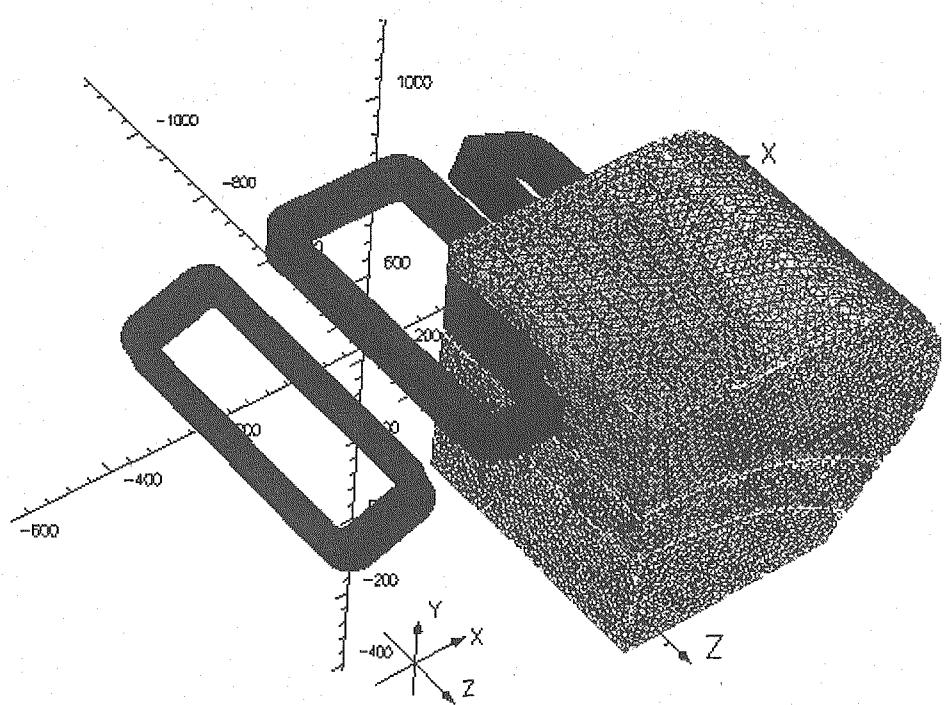


図 4.3-2 Mタイプ電磁流量計の解析メッシュ図

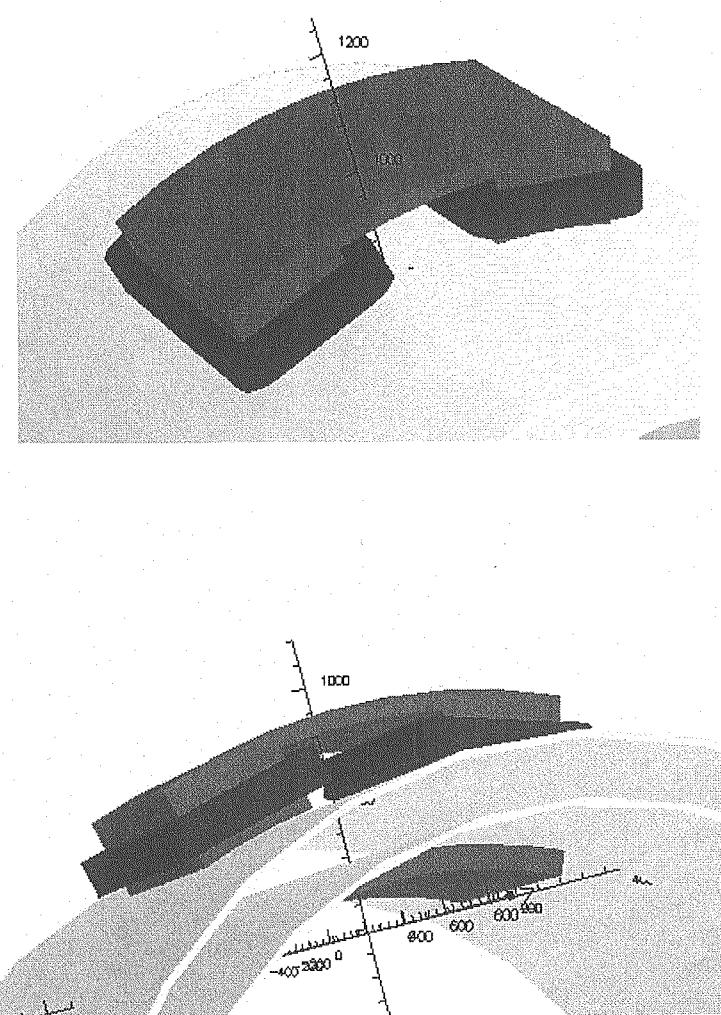


図 4.3・3 Uタイプ電磁流量計の解析モデル図

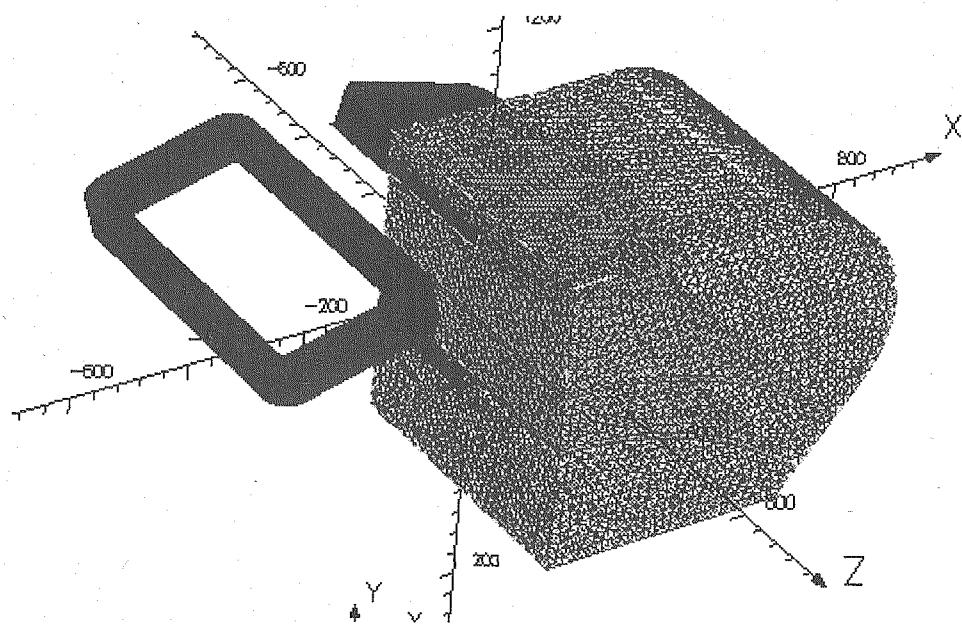


図 4.3-4 U タイプ電磁流量計の解析メッシュ図

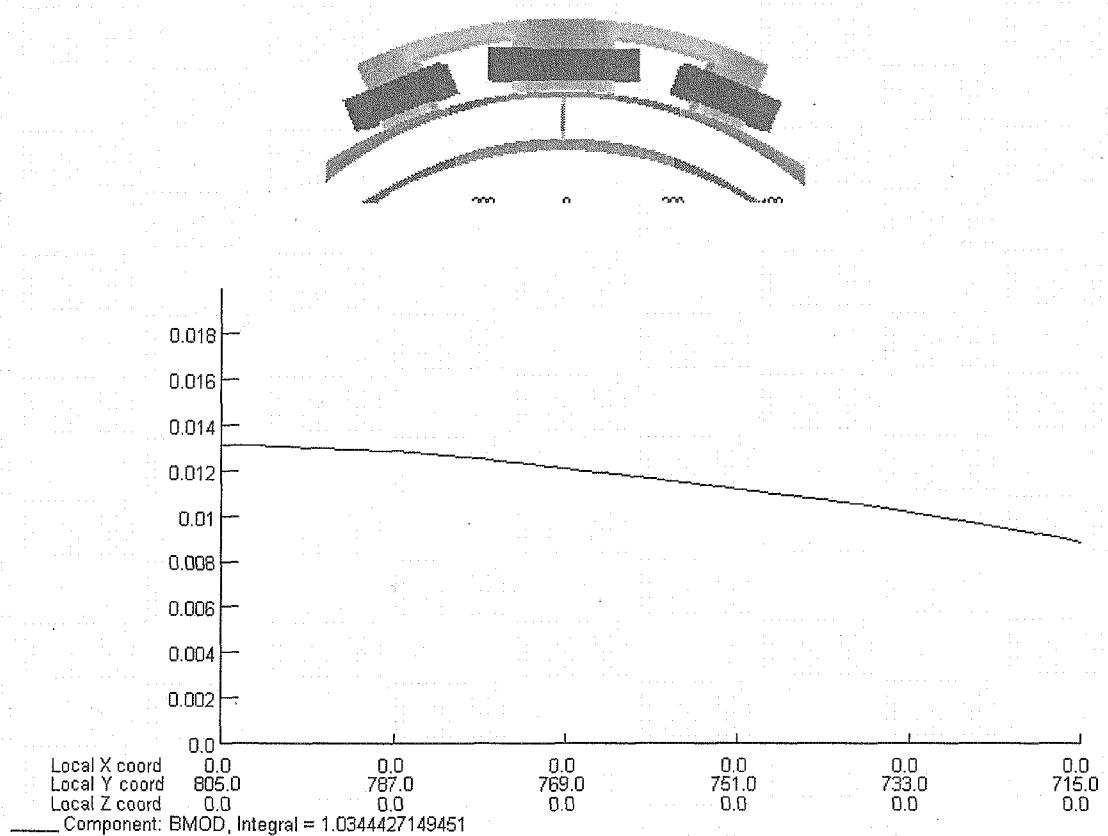
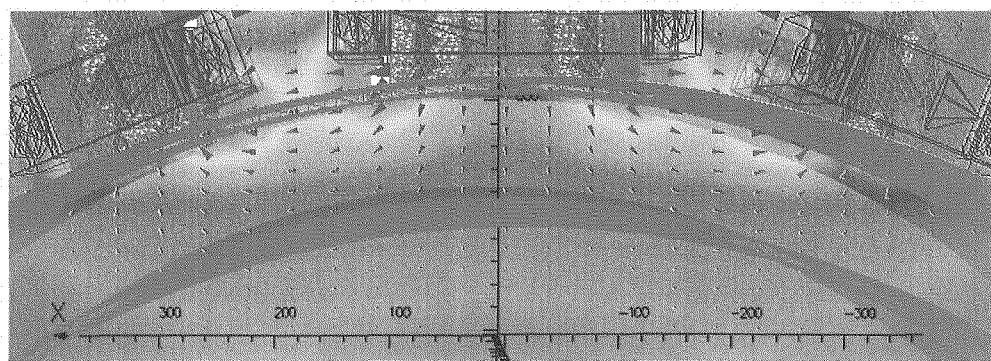
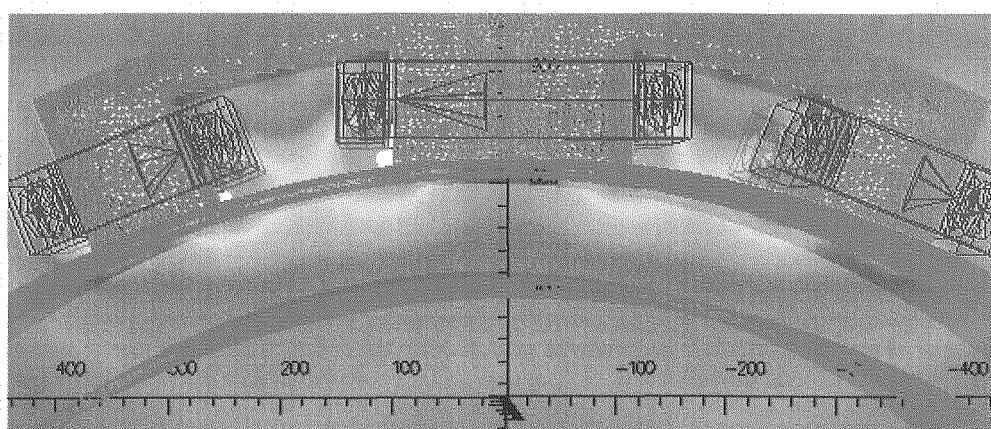


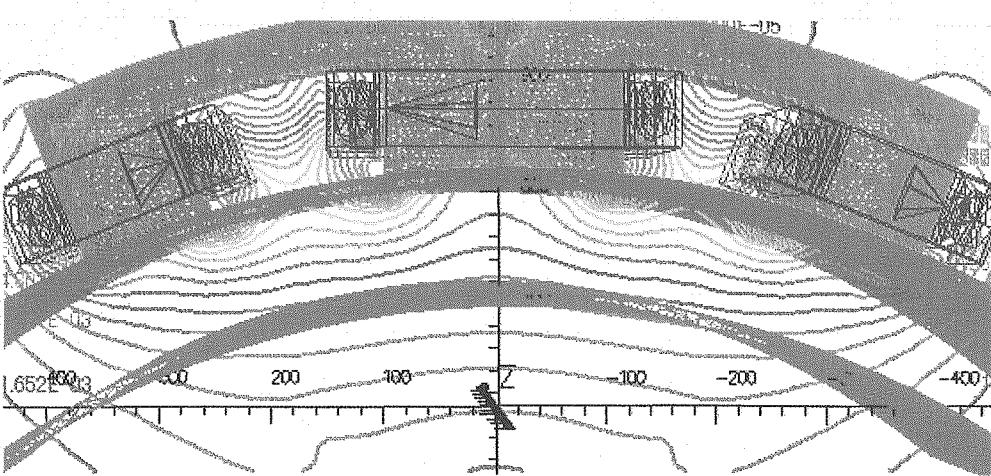
図 4.3.1-1 Mタイプ電磁流量計の磁極中心線上の流路内Y方向磁束密度



B < 0.03 T で表示制限 25×25 分割  
(a) 流路内の磁束密度ベクトル分布図



B < 0.03 T で表示制限  
(b) 流路内の磁束密度分布図



B < 0.03 T の範囲を 20 分割で表示  
(c) 流路内の等磁束密度線図

図 4.3.1-2 M タイプ電磁流量計の流路内磁場解析結果

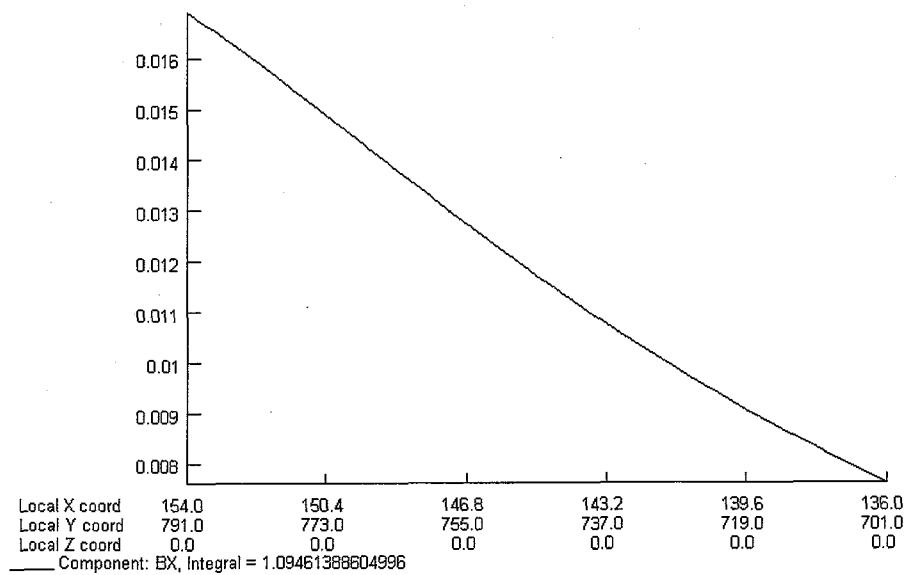


図 4.3.1-3 Mタイプ電磁流量計の磁極間の流路内X方向磁束密度

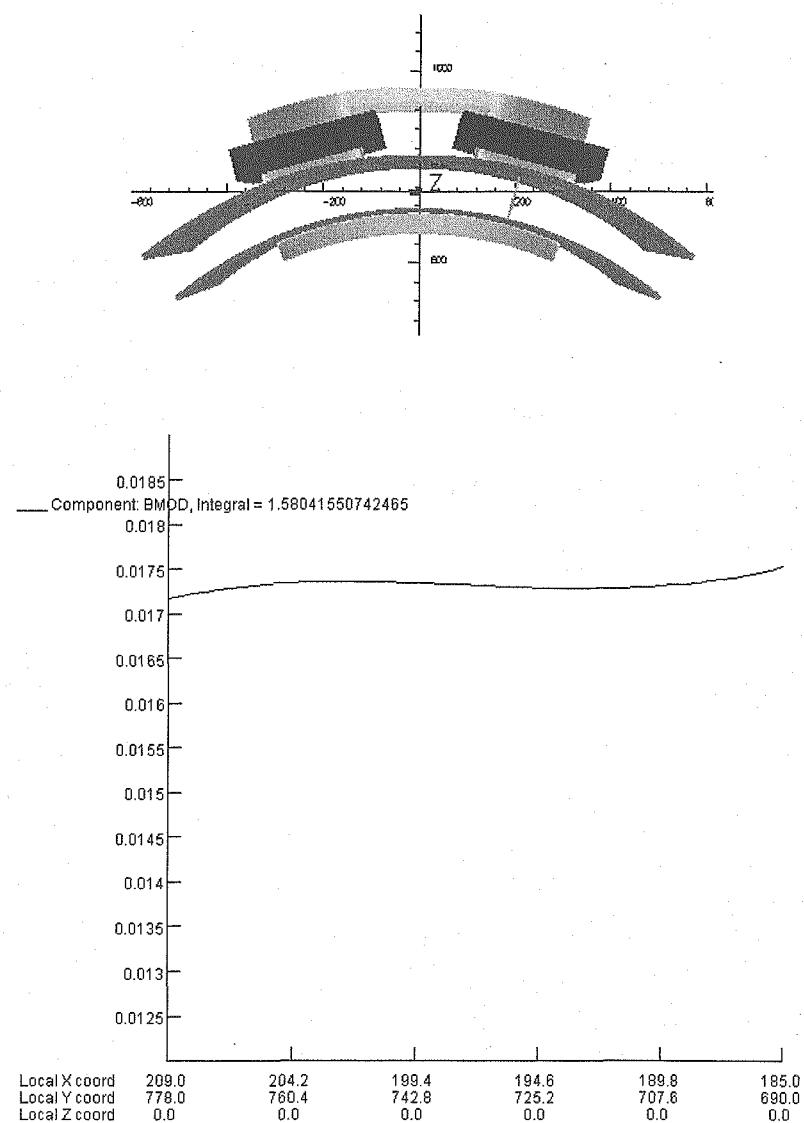
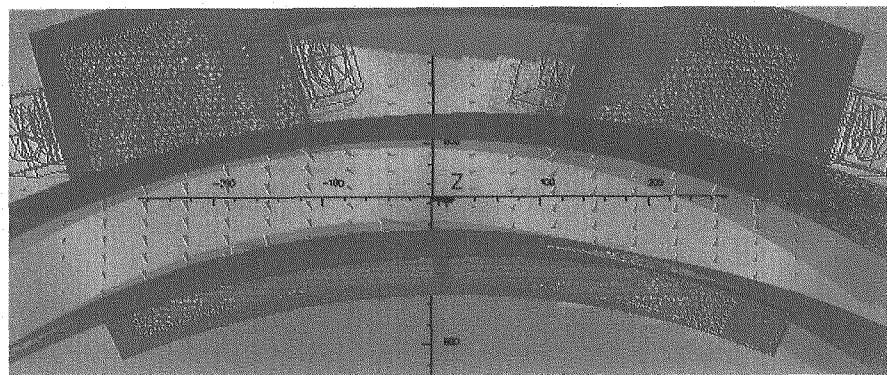
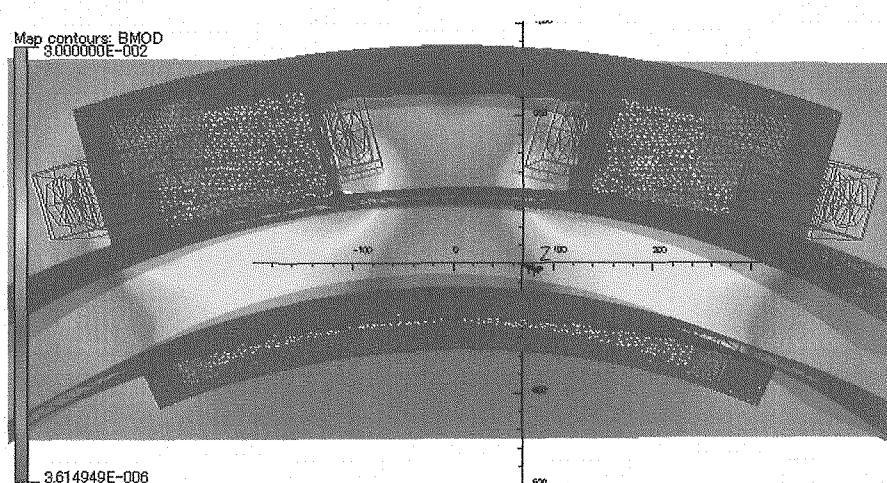


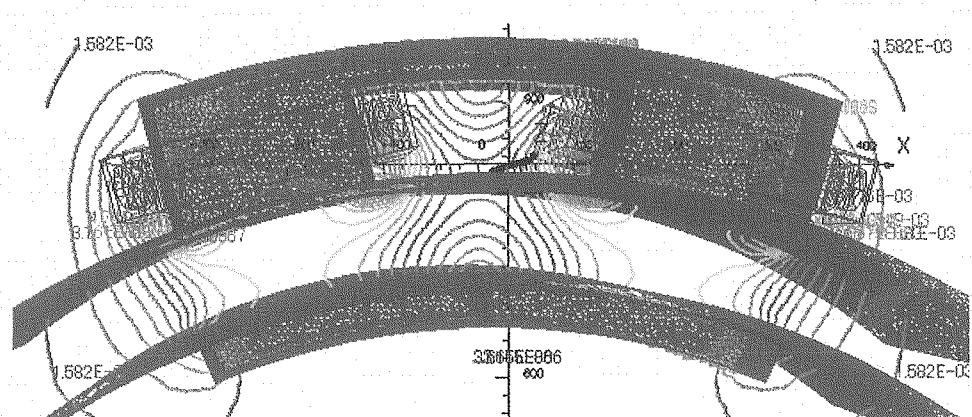
図 4.3.2-1 U タイプ電磁流量計の磁極中心線上の流路内 Y 方向磁束密度



B < 0.1 T で表示制限 25×25分割  
(a) 流路部の磁束密度ベクトル分布図



B < 0.03 T で表示制限  
(b) 流路内の磁束密度分布図



B < 0.03 T の範囲を 20 分割で表示  
(c) 流路内の等磁束密度線図

図 4.3.2-2 U タイプ電磁流量計の流路内磁場解析結果

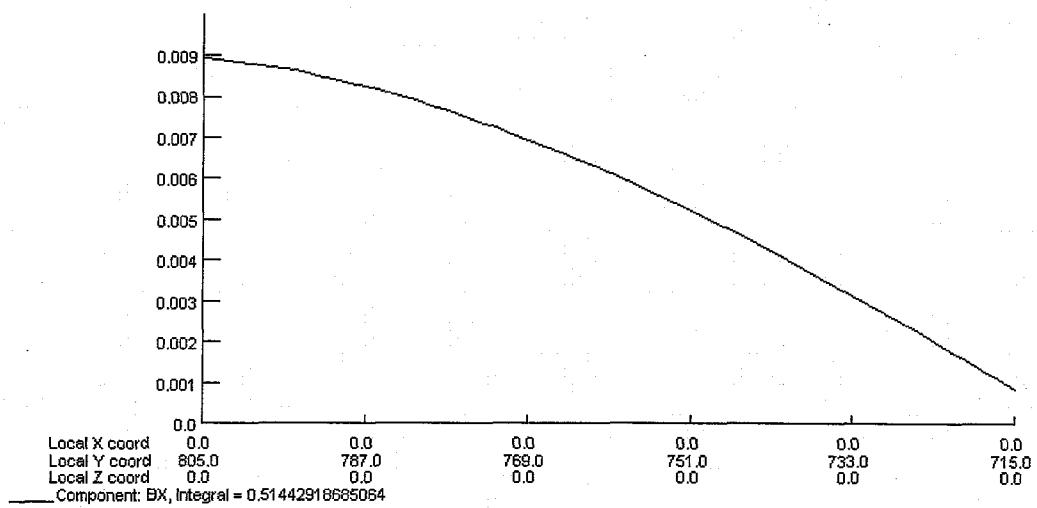


図 4.3.2-3 U タイプ電磁流量計の磁極間の流路内 X 方向磁束密度

#### 4.4 まとめ

磁場解析の結果、環状流路内磁束密度を大きくなるように、コイル、ヨーク、鉄心を配置したMタイプおよびUタイプの外ダクト一対電極型電磁流量計を用いることにより、電磁ポンプダクト部の環状流路において流量測定に必要な出力電圧を得られることが明らかになった。Uタイプの方がMタイプと比較して、磁束密度が均一であり、また出力電圧が大きくなることがわかった。しかし、Mタイプは、全ての構成要素が外ダクトにあることから、保守面においてUタイプより優れていると考えられる。また、電極を外ダクトと内ダクトに対向して設置すると、MタイプおよびUタイプにおいて出力電圧が低下することがわかった。

今後は磁束密度の流量依存性等を評価し、安全保護系としての機能の確認が必要であると考えられる。また、本解析は電磁流量計出力電圧の概算であり、電磁流量計出力特性解析コードを用いて詳細な検討を行う必要がある。

## 5. おわりに

本報告書では実用化戦略調査研究で検討されている機械式ポンプ組込型中間熱交換器の代替案として、電磁ポンプ組込型中間熱交換器を採用した場合の適用性を検討した。また電磁ポンプ組込型中間熱交換器に設置する電磁流量計の成立性を評価した。

機械式ポンプ組込型中間熱交換器の主配管取合い、伝熱中心高さ、中間熱交換器管束形状で電磁ポンプ組込型中間熱交換器の構造概念検討を行った。その結果機械式ポンプ組込型中間熱交換器の場合と寸法をほとんど変更せずに電磁ポンプを中間熱交換器に適用する見通しを得た。

システム側の条件である定格流量、定格揚程を達成することができる電磁ポンプの電磁気設計を行い、その電磁気解析を行った。その結果、設計条件である定格流量において、電磁ポンプの揚程はシステム側の要求を満足することを確認した。また、 $V/f = \text{一定}$  制御において定格点ならびに部分運転点は、常に安定した流量制御特性が得られる Q-H 特性の右下がり部分にあることがわかった。また、電磁力のほとんどは軸方向に働くことにより、揚程に対して無効になる、つまり電磁ポンプの効率を下げる径方向電磁力は非常に小さいことを確認した。

電磁ポンプ組込型中間熱交換器を採用した場合の上部プレナム内の 3 次元流動解析を実施し、上部プレナム内で剥離を防止するために設置するフローガイドの有効性と上部プレナム内の流れの状態を調べた。解析の結果、フローガイドを設置することにより、上部プレナム内に発生する循環流を抑制されることがわかり、窓部において剥離が抑えられることが示唆された。また、フローガイドを用いることによって、上部プレナム入口から出口配管における圧力損失が 18000Pa 程度低減することがわかった。今後はフローガイドの形状最適化、および材料力学的な観点からの検討を行う必要がある。

電磁流量計の成立性を評価するために磁場解析を行い、環状流路内磁束密度を大きくなるように、コイル、ヨーク、鉄心を配置した M タイプおよび U タイプの外ダクト一対電極型電磁流量計を用いることにより、電磁ポンプダクト部の環状流路において流量測定に必要な出力電圧を得られることが明らかになった。U タイプの方が M タイプと比較して、磁束密度が均一であり、また出力電圧が大きくなることがわかった。しかし、M タイプは、全ての構成要素が外ダクトにあることから、保守面において U タイプより優れていると考えられる。電極を外ダクトと内ダクトに対向して設置すると、M タイプおよび U タイプにおいて出力電圧が低下することがわかった。今後は磁束密度の流量依存性等を評価し、安全保護系としての機能の確認が必要である。

参考文献

- [1]堀雅夫 「基礎高速炉工学」 動力炉・核燃料開発事業団 (1993)
- [2] W. Kwant, A.W.Fanning, Y.Dayal, et al., "In-sodium testing and performance of a 43.5m<sup>3</sup>/min electromagnetic pump for LMR application," Proc. ICONE5, Nice, France, May 26-30, 1997, ICONE5-2553,(1997)
- [3] Hiroyuki. OTA, et al., "Development of 160m<sup>3</sup>/min Large Capacity Sodium-Immersed Self-Cooled Electromagnetic Pump" Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol.41,No.4,p.511-523 (2004)
- [4] M.Nakazaki, H.Matsuzawa, R.Aizawa, et al., "Performance evaluation of sodium-immersed self-cooled electromagnetic pump, "Proc. ICON5, Nice, France, May 26-30, 1997, ICON-2330 (1996)

謝辞

本報告書をまとめるにあたり広範な調査をしていただいた（株）東芝の香月健治殿、田口淳三殿、竹島徳幸殿、相澤利枝殿に感謝します。