



JAEA-Research

2006-017



JP0650378

JAEA  
Research

# ナトリウム冷却炉の上部プレナム流動特性の研究

—水流動試験の検証解析と渦予測手法の適用性検討—

Study of Hydraulic Behavior for Reactor Upper Plenum  
in Sodium-cooled Fast Reactor

— Verification Analysis of Water Experiment and  
Applicability of Vortex Prediction Method —

藤井 正 近澤 佳隆 此村 守 上出 英樹  
木村 暢之 中山 王克 大島 宏之 成田 均\*  
藤又 和博\* 糸岡 聰\*

Tadashi FUJII, Yoshitaka CHIKAZAWA,  
Mamoru KONOMURA, Hideki KAMIDE,  
Nobuyuki KIMURA, Ohkatsu NAKAYAMA,  
Hiroyuki OHSHIMA, Hitoshi NARITA\*,  
Kazuhiro FUJIMATA\* and Satoshi ITOOKA\*

次世代原子力システム研究開発部門  
FBRシステム設計グループ

FBR System Design Group  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

March 2006

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポート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下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

ナトリウム冷却炉の上部プレナム流動特性の研究  
—水流動試験の検証解析と渦予測手法の適用性検討—

日本原子力研究開発機構  
次世代原子力システム研究開発部門 F B R システムユニット  
藤井 正・近澤 佳隆・此村 守<sup>+1</sup>  
上出 英樹<sup>+2</sup>・木村 暢之<sup>+2</sup>・中山 王克<sup>+2</sup>・大島 宏之<sup>+3</sup>  
成田 均\*・藤又 和博\*・糸岡 聰\*

(2006年1月30日受理)

実用化戦略調査研究で概念設計を進めているナトリウム冷却大型炉では、従来設計よりも高流速条件となる炉上部プレナム内の流動特性を把握するため、縮尺水流動試験が実施されている。

本報告では、汎用熱流体解析プログラムを用いて水試験体系を対象とした流動解析を実施し、実機体系でのプレナム内流況と気泡を伴う水中渦の評価に対する適用性を検討した。

- (1) 1/10 縮尺プレナム試験を対象に、フルード数一致条件での定常解析を実施した。解析では、炉心上部機構内部から炉容器壁に向かう噴出し流れや、切込み部からの上昇噴流等の上部プレナムでの特徴的なフローパターンを再現できる見通しを得た。また、実機体系での全体流況が水試験体系と定性的に一致することを確認するとともに、解析における数値解法や境界条件等の設定がフローパターンに及ぼす影響が明らかとなった。
- (2) 伸長渦理論に基づく渦予測評価手法を用いて、1/10 縮尺試験のディッププレート下方領域における渦の分布を評価した。実機流速一致条件の場合には、水試験と同様、コールドレグ配管壁からホットレグ配管に吸込まれる2本の渦を、気泡を伴う水中渦（キャビテーション）として同定した。この結果より、上部プレナム内で定常的に発生する水中渦を渦予測評価手法により同定できることを確認した。

---

大洗研究開発センター（駐在）：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

+1 次世代原子力システム研究開発部門

+2 F B R 安全・先進ユニット

+3 F B R 信頼性ユニット

\* (株) 日立製作所

Study of Hydraulic Behavior for Reactor Upper Plenum in Sodium-cooled Fast Reactor  
- Verification Analysis of Water Experiment and Applicability of Vortex Prediction Method -

Tadashi FUJII, Yoshitaka CHIKAZAWA, Mamoru KONOMURA<sup>+1</sup>  
Hideki KAMIDE<sup>+2</sup>, Nobuyuki KIMURA<sup>+2</sup>, Ohkatsu NAKAYAMA<sup>+2</sup>, Hiroyuki OHSHIMA<sup>+3</sup>  
Hitoshi NARITA\*, Kazuhiro FUJIMATA \* and Satoshi ITOOKA \*

FBR System Engineering Unit  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 30, 2006)

A conceptual design study of the sodium-cooled fast reactor is in progress in the “Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems”. Reduced scale water experiments are being performed in order to clarify the flow pattern in the upper plenum of the reactor which has higher velocity condition than the past design. In this report, the hydraulic analyses of the water experiments using the general-purpose thermal hydraulic analysis program (STAR-CD) were executed; and the applicability to evaluation of flow pattern and vortex cavitations for the designed reactor was examined.

- (1) Steady-state analyses under the Froude number similar condition were carried out for the 1/10<sup>th</sup> reduced scale plenum experiments. Analyses results reproduced the characteristic flow patterns in the upper plenum, such as gushed flow from the inside of the upper internal structure to reactor vessel wall and the jet flow from the slit of the upper internal structure. Further, it was confirmed that the calculated flow pattern of a designed reactor system agreed with that of the water experiment qualitatively. Moreover, the influence which setting of numerical solution and boundary condition etc. in analyzing causes to flow pattern in the plenum became clear.
- (2) The distribution of the vortices under the dipped plate region in the 1/10<sup>th</sup> plenum model was evaluated using the prediction method of a submerged vortex which is based on the stretching vortex theory. In case of the same velocity condition as the reactor, it identified the two vortices which were sucked into the hot leg piping from the cold leg piping wall as the submerged vortex cavitations. From this analysis result, it confirmed that the submerged vortex cavitations, which may occur in the reactor upper plenum steadily, could be identified using this prediction method.

Keywords: Sodium-cooled Reactor, Reactor Upper Plenum, Water Experiment, Hydraulic Analysis, Submerged Vortex, Cavitation

---

+1 Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

+2 FBR Safety & Innovative Technology Unit

+3 FBR Systems Reliability Research Unit

\* Hitachi Ltd.

## 目 次

1. 緒言 .....	1
2. 炉上部構造と水流動試験 .....	2
2.1 実機設計での炉上部プレナム構造 .....	2
2.2 水流动試験の概要 .....	6
3. 1/10 縮尺プレナムモデル試験解析 .....	13
3.1 各種解析モデルによる流況評価 .....	13
3.2 湍流予測評価手法の適用性 .....	59
4. 結言 .....	71
参考文献 .....	73
付録 上部プレナム流动解析データベース .....	75

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Reactor Upper Structure and Hydraulic Experiments .....	2
2.1 Summary of Upper Plenum Structure in Designed Reactor .....	2
2.2 Summary of Hydraulic Experiment Results .....	6
3. Experiment Analysis of 1/10 Scale Plenum Model .....	13
3.1 Evaluation of Flow Fields using Various Models .....	13
3.2 Applicability of Predicting Method for Submerged Vortex Cavitations .....	59
4. Conclusions .....	71
References .....	73
Appendix Database of Hydraulic Analysis in Upper Plenum .....	75

## 表リスト

表 3.1.1-1	1/10 縮尺プレナムモデル試験解析条件	24
表 3.2-1	水中渦予測評価での解析条件	63

## 図リスト

図 2.1-1	大型炉の原子炉構造概念図 (H15 年度設計)	4
図 2.1-2	DP ラビリンス構造	5
図 2.2-1	炉上部プレナム水流動試験装置	9
図 2.2-2	1/10 プレナムモデル試験での流況	10
図 2.2-3	HL 配管近傍での水中渦発生状況	11
図 2.2-4	液面部の流況 (切込み部近傍)	11
図 2.2-5	流動適正化構造	11
図 2.2-6	液面部分モデルでの流況観察	12
図 2.2-7	ガス巻込み発生限界マップの一例 (周方向流速 - 液位)	12
図 3.1.1-1	解析体系全体図	25
図 3.1.1-2	解析体系平面図	26
図 3.1.1-3	切込み部、HL 配管拡大図	27
図 3.1.1-4	DP 近傍拡大図 [Case1-4]	27
図 3.1.1-5	流動適正化構造適用モデル [Case1-5]	28
図 3.1.1-6	鉛直断面流速ベクトル図 (0-180 度)	29
図 3.1.1-7	鉛直断面流速ベクトル図 (90-270 度)	30
図 3.1.1-8	鉛直断面流速ベクトル図 (15-195 度)	31
図 3.1.1-9	水平断面流速ベクトル図 (z=113.5)	32
図 3.1.1-10	水平断面流速ベクトル図 (z=270)	33
図 3.1.1-11	水平断面流速ベクトル図 (z=575)	34
図 3.1.1-12	多孔板を通過する噴流の流速分布 (多孔板模擬方法の比較)	35
図 3.1.1-13	多孔板周りの径方向流速分布の比較	36
図 3.1.1-14	炉壁近傍での流速分布の比較	37
図 3.1.1-15	多孔板を通過する噴流の流速分布 (流動適正化構造の影響)	38
図 3.1.1-16	流速計測値との比較 (UIS 外周 - 燃料出入機案内管)	39
図 3.1.1-17	流速計測値との比較 (UIS 外周 - HL 配管)	40
図 3.1.1-18	流速計測値との比較 (HL 配管 - 炉壁)	41
図 3.1.2-1	2 重ディッププレート体系解析モデル	46
図 3.1.2-2	鉛直断面流速ベクトル図 (0-180 度)	47

図 3.1.2-3	鉛直断面流速ベクトル図（90-270 度）	48
図 3.1.2-4	HL 配管貫通部近傍の流速ベクトル図	49
図 3.1.2-5	FHM プラグ貫通部近傍の流速ベクトル図	50
図 3.1.2-6	燃料出入機案内管貫通部近傍の流速ベクトル図	51
図 3.1.2-7	上下 DP 隙間領域でのフローパターン	52
図 3.1.2-8	液面近傍の流速分布の比較	53
図 3.1.3-1	解析体系全体図	55
図 3.1.3-2	鉛直断面流速ベクトル図（1/2）	56
図 3.1.3-3	鉛直断面流速ベクトル図（2/2）	57
図 3.1.3-4	水平断面流速ベクトル図	58
図 3.2-1	ポンプ吸込水槽体系での水中渦予測評価例	64
図 3.2-2	解析体系全体図	65
図 3.2-3	鉛直断面流速ベクトル図	66
図 3.2-4	水平断面流速ベクトル図	67
図 3.2-5	炉壁近傍での流速分布（Case2-1）	68
図 3.2-6	渦予測手法によるキャビテーション判定結果（Case2-1）	69
図 3.2-7	渦予測手法によるキャビテーション判定結果（Case2-2）	70

This is a blank page.

## 1. 緒言

実用化戦略調査研究で概念設計を進めているナトリウム冷却大型炉（以下、大型炉と略称）<sup>[1]</sup>では、主要コストダウン方策の一つとして、炉心設計の高度化と燃料取扱系の簡素化によりコンパクト化された原子炉容器を採用している。

大型炉の出力は実証炉設計の約 2.5 倍に増加しているが、炉容器の直径を実証炉設計と同等の約 10m としているため、実証炉設計と比べると炉上部プレナムを通過するナトリウム流量が増大する。また、過渡時におけるナトリウム混合容積を確保する観点で、炉心上部機構（UIS）は従来設計で採用されていた外胴を削除し、炉心を出たナトリウムが UIS 内部を通過できるように制御棒案内管と多孔水平板で構成されたコラム型を採用している。コラム型 UIS の水平板には、燃料交換機（FHM）のアーム及びグリッパユニットが炉心中心部まで進入できるように切込みを設けている。

このようにコンパクト化された原子炉構造を採用したことに伴い、炉上部プレナム内の流速は従来設計と比べて大幅に増加する。また、炉上部プレナム内の機器配置や UIS 切込み部からの上昇流の形成等、炉上部プレナム内の流況は非対称となることが想定された。このため、液面からのカバーガス巻込みを抑制する構造として、自由液面下方に二重のディッププレート（DP）を設置する設計としている。

この炉上部プレナム内の流況を把握し、DP の有効性確認、並びに流動適正化方策を検討する目的で、木村ら<sup>[2][3]</sup>や中山ら<sup>[4]</sup>は 2 種類の水流動試験を実施してきている。これまでの試験結果から、ガス巻込み防止に対する DP の有効性が確認されるとともに、ホットレグ（HL）配管近傍で生じる気泡を伴う水中渦を抑制する流動適正化構造が提案され、実機設計に反映されている。

今後、実機体系の流動特性を評価するにあたっては、縮尺水試験装置と実機とのスケールの違いや、冷却材物性の違い等を考慮した上で、試験結果との比較で妥当性を確認した流動解析モデルを用いることが有効である。そこで、平成 14 年度から主として水流動試験体系を対象とした流動解析を実施してきた。本報告では、解析領域、メッシュ分割、数値解法の選定等をパラメータとした試験体系での流況の比較結果や、プレナム全体流動解析結果から伸長渦モデルに基づき渦の同定やキャビテーションの判定を行う渦予測評価手法の適用性について述べる。

## 2. 炉上部構造と水流動試験

### 2.1 実機設計での炉上部プレナム構造<sup>[1]</sup>

平成 15 年度設計における大型炉の原子炉構造概念図を図 2.1-1 に示す。原子炉容器の形状は、内径 9.7m、軸長 20m、胴部の板厚 30mm となっている。前述のように、炉心設計の高度化、及び単回転プラグとマニプレータ式 FHM を組合せた燃料交換方式によって炉容器径をコンパクト化している。

炉上部プレナム内には、以下の機器・配管類が配置されている。

- ・直接炉心冷却系熱交換器 (DHX) : 1 基
- ・コールドトラップ (CT) : 2 基
- ・切込み付きコラム型 UIS
- ・二重 DP
- ・1 次冷却系 HL 配管 : 2 本
- ・1 次冷却系コールドレグ (CL) 配管 : 4 本
- ・燃料出入機案内管

特に UIS と DP の構造・形状が、もんじゅや実証炉設計と異なっており、炉上部プレナムの流动特性に大きく影響するものと考えており、以下にその特徴を述べる。

#### (1) 切込み付きコラム型 UIS

免震技術を採用した Na 炉では、先行炉のように UIS を円筒胴構造として剛性を確保する必要性が小さい。そこで、FHM のアーム、グリッパユニットが進入できる切込み方式との整合性、手動トリップ等の過渡時における耐熱性向上 (UIS 内部にスタグナント領域を設けない) の観点で、円筒胴を削除し、6 枚の多孔水平板と 55 本の制御棒 (CR) 案内管で構成されるコラム型を採用している。

最下段の水平板は、燃料集合体出口温度計装用の熱電対や破損燃料検出用のサンプリング管等を支持する炉心計装取付板 (CIP)、その他 5 枚はバッフル板 (BP : 下部から BP-1~BP-5) と呼称している。各水平板は、燃料集合体の配置に合わせて、各集合体出口と同軸上にフロー孔 (水平板全体での開口率 30%) を有しており、炉心を出た流れが UIS 内部を通過できる構造としている。

#### (2) 二重 DP

ガス巻込みを防止するための二重 DP は、自由液面の下方 1.4m の位置に設置されている。燃料交換時には、UIS を回転させる必要があるため、DP は内側 (UIS と一体化) と外側に分割している。

ている。

上部プレナムに配置される機器・配管類は、DP を貫通して設置されるため、貫通部のギャップを通過するナトリウム流速を低減する目的で、DP を上下に二重化している。また、図 2.1-2 に示すように、DP 貫通部にラビリンスを形成するための L 字板やリブ等を設置する。さらに、内側 DP には FHM を挿入するための貫通孔を設けているが、後述の水流動試験結果を反映して、通常運転時には円筒状のプラグ（以下、FHM プラグ）を第 4 BP (BP-4) の高さまで挿入して、切込み部からの上昇流を抑制し液面部へのナトリウム流入量を制限する。

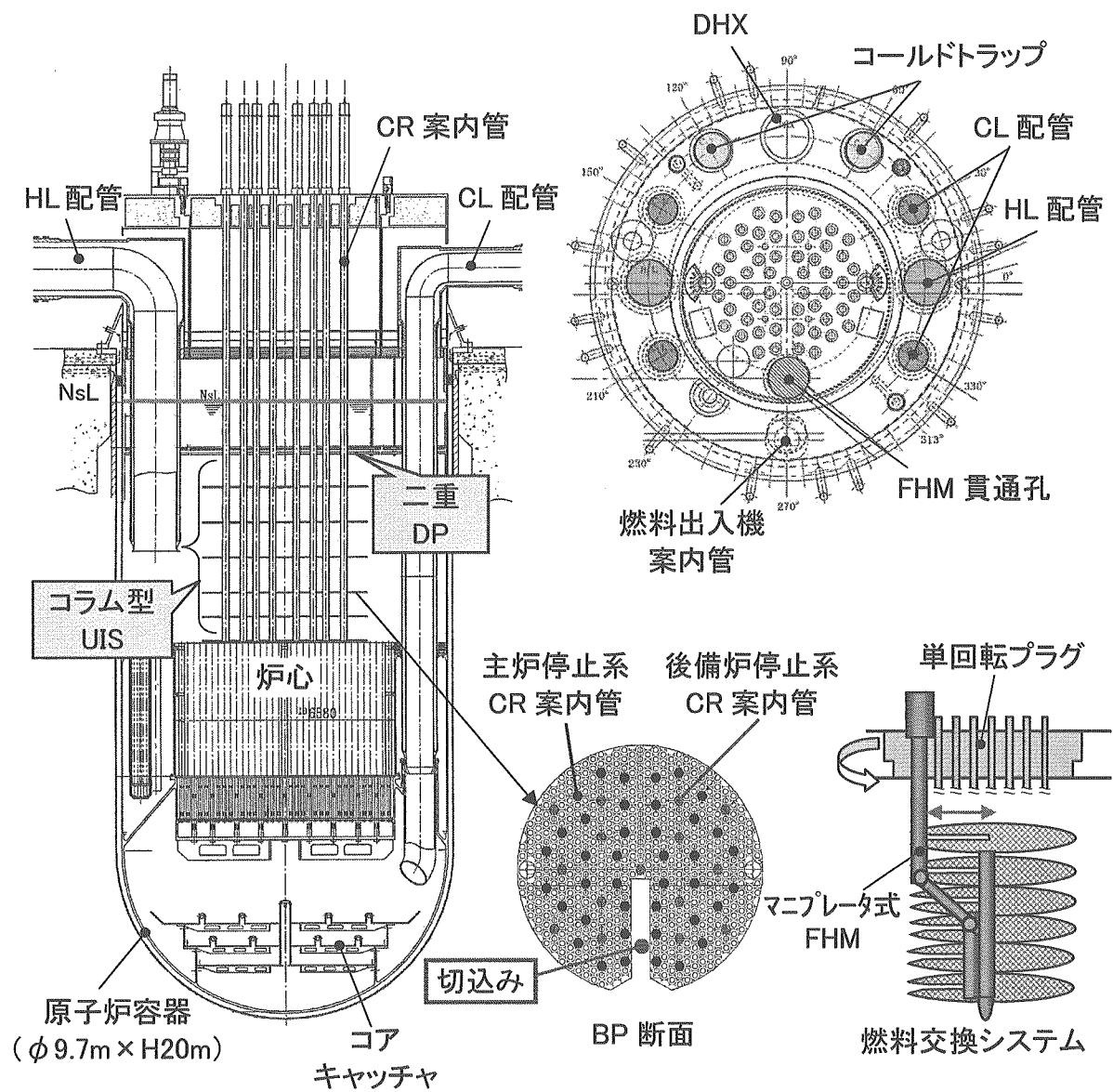
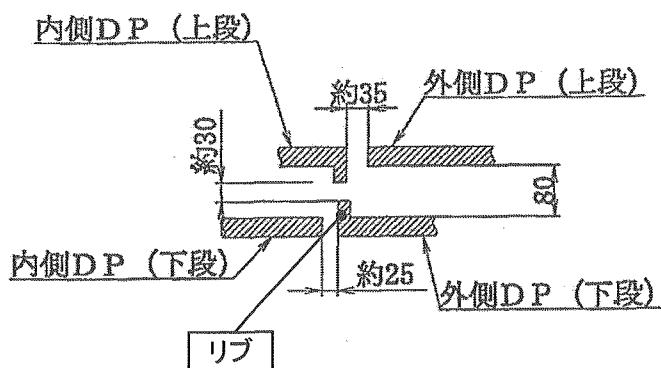
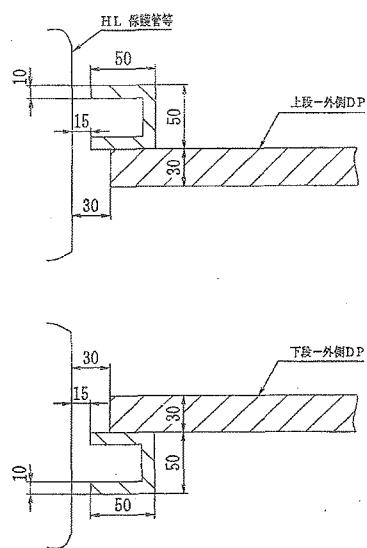


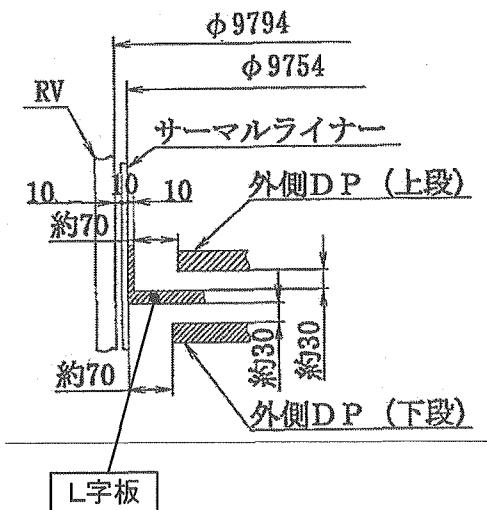
図 2.1-1 大型炉の原子炉構造概念図(H15 年度設計)<sup>[1]</sup>



(a) 内外DP間



(b) 外側DPとHL配管間



(c) 外側DPとライナ間

図 2.1-2 DPラビリンス構造<sup>[1]</sup>

## 2.2 水流動試験の概要

炉上部プレナム内の流動現象を把握し、流動場の適正化を図る構造を見出すことを目的として、2種類の試験装置（1/10 縮尺プレナムモデル、1/1.8 縮尺液面部分モデル）を用いて、水流動試験を実施している。

### (1) 試験装置<sup>[5]</sup>

試験装置を図 2.2-1 に示す。1/10 縮尺プレナムモデルは、平成 13 年度設計の大型炉構造を模擬したもので、内径 960mm、高さ 1200mm のアクリル製円筒容器内に、主要な炉内構造物（UIS、DP、主配管、DHX 等）を配置している。

試験では、脱気された常温水を用いており、流速条件としては、(1)液面形状が実機と相似になる Fr 数一致条件、(2)実機流速一致条件の 2 ケースを設定している。この実機流速一致条件は、実証炉体系での試験<sup>[6]</sup>に基づいてガス巻込み発生の判断基準の一つとして設定されたものである。

一方、液面部分モデルは、DP 上面—自由液面間での流動特性に着目したもので、ガス巻込みに至る可能性が高いと推定される下降流が観察された HL 配管を中心に、90 度セクタの領域をガス巻込み現象のスケール依存性を緩和するよう 1/1.8 スケールでモデル化している。特に、主配管を横切る周方向流速や、DP と主配管及び内外 DP 間のギャップを通過する流速を独立して設定できる構成としており、DP 上の液位とギャップ部の下降流速の関係など、ガス巻込みの発生限界を評価できるように考慮している。

このように、比較的小型で容易に形状が変更できる 1/10 プレナムモデルと境界条件をある程度自由に設定できるよう工夫した大型の液面部分モデルを組合せることで、設計が流動的な段階での効率的かつ合理的な開発ができる設備とした。いずれの装置においても、可視化による流況観察、粒子画像流速計測法（PIV）及び超音波流速分布モニタ（UVP）による定量的計測により流速場を把握している。

### (2) 試験結果の概要

#### (i) 1/10 プレナムモデル試験結果

まず、Fr 数一致条件の下で観察されたプレナム内の全体流況<sup>[2]</sup>（流動適正化構造なし）を図 2.2-2 に示す。なお、実機設計では、概念設計の進捗に伴い炉内機器の配置変更等も予想されたため、水試験では当初 DP 形状を 1 枚構造として簡素化を図っている。また、図 2.1-2 に示したような DP ラビリンス構造は設けず、DP と主要構造物とのギャップ幅を縮尺比で模擬している。流況の主な特徴を以下に述べる。

##### (a) DP 下方領域（炉心出口—DP 下面）

##### 1) 切込み部

炉心出口からの上昇流は、切込み部を上昇しつつ径向外側（炉壁側）に向かい、DP 下面に

衝突する。その後、DP 下面に沿う水平流となって切込み側 CL 配管と UIS の間を通過し、切込み側 CL 配管と HL 配管の間の領域で下降し、HL 配管に吸込まれる。

## 2)UIS 内部

UIS 内部では、炉心出口からの上昇流は、最下段の CIP を通過し、大部分は BP-1 下面、あるいは BP-2 下面から径方向外側へ流出する。この BP-1、BP-2 から径方向外側へ流出した流れは、炉壁に到達して合流した後、周方向に転回して HL 配管へ吸込まれる。

なお、中心部では BP-2 を通過する流れも見られ、BP-3 から径方向外側へ流出するが、その流れは僅かであり、上部の BP-4、BP-5 から外周への吐出流れはほとんど見られなかった。

## 3)DHX 側

切込み側と同様に、UIS 内部 (BP-1、BP-2 レベル) からの吐出流れは炉壁に衝突した後、周方向に転回し、HL 配管に吸い込まれる。しかしながら、DHX 側から HL 配管に吸込まれる流れは、切込み側からの下降流を避け、HL 配管の下部を通り、一部は、切込み側 CL 配管付近で旋回し上昇しながら HL 配管に吸い込まれていた。

## 4)水中渦の要因

上記の UIS 切込み側からの下降流と、DHX 側からの上昇流が HL 配管と炉壁の間の領域に渦を形成し、HL 配管へ加速されながら吸込まれる。このため、HL 配管吸込み流速を増加させた場合、図 2.2-3 に示す炉壁から HL 配管へ繋がる「気泡を伴う水中渦」(キャビテーションの一種、以下水中渦と称す) が形成されたと考えている。

また、HL 配管付近では、UIS 内部からの吐出流れは、直接 HL 配管に吸込まれる流れとなっていた。しかし、HL 配管吸込み部 (BP-3 レベルとほぼ一致) と CL 配管との間の領域では、UIS 内部からの吐出流れが炉壁と衝突して循環を形成した上で、HL 配管へ吸込まれていた。この流れに、DP 下面からの下降流が連行されて、HL 配管の吸込み流速を増加させると、この循環が CL 配管から HL 配管吸込み部につながる水中渦に発達すると考えている。

### (b)DP 上部領域 (DP 上面ー液面)

UIS 切込み部からの上昇流が DP 下面に衝突する近傍において、DP 隙間部 (内外 DP のギャップ、炉壁と DP のギャップ) に強い上昇流が見られた。DP 隙間部からの上昇流は、その後、HL 配管側へ向かう周方向流れとなり、切込み側 CL 配管と UIS の間を通過し、一部は HL 配管周辺で下降する。その他は、HL 配管を通り過ぎ、DHX 近傍で転回して UIS 中心に向かって流れ、UIS 切込み部付近で発生する上昇流に連行される流れを形成していた。

切込み部近傍の自由液面部の写真を図 2.2-4<sup>[2]</sup>に示す。Fr 数一致条件では、液面は比較的静定している。一方、実機流速一致条件では、DP 隙間部からの強い上昇流により液面が盛り上がる様子が観察されたが、HL 配管吸込み部に到達する連続的なガス巻込み現象は発生していない。

この UIS 切込み部から HL 配管に向かう周方向流れは、DP 隙間部からの上昇流と DHX 側か

ら UIS 中心を通って上昇流に連行される流れの和となっており、DP 隙間部を上昇・下降する流れ（流量）に比べ、大きくなっていると考えられる。この強い周方向流れのために、液面に局所的な循環が生じにくく、実機流速一致条件においても旋回渦によるガス巻込みが発生しないと推測している。

以上のような可視化観察及び流速場の計測結果より、炉上部プレナムの全体流況として次の点が明らかとなった。

- ・ DP は液面の安定化に大きな効果を有し、実機流速一致条件においても顕著なガス巻込みは生じない。
- ・ UIS 切込み部を通る上昇流が、DP 隙間部を通して自由液面に到達する。
- ・ HL 配管に吸込まれる速い流れに回転が加わることにより、渦の中心の圧力が低下し水中渦が顕在化する。

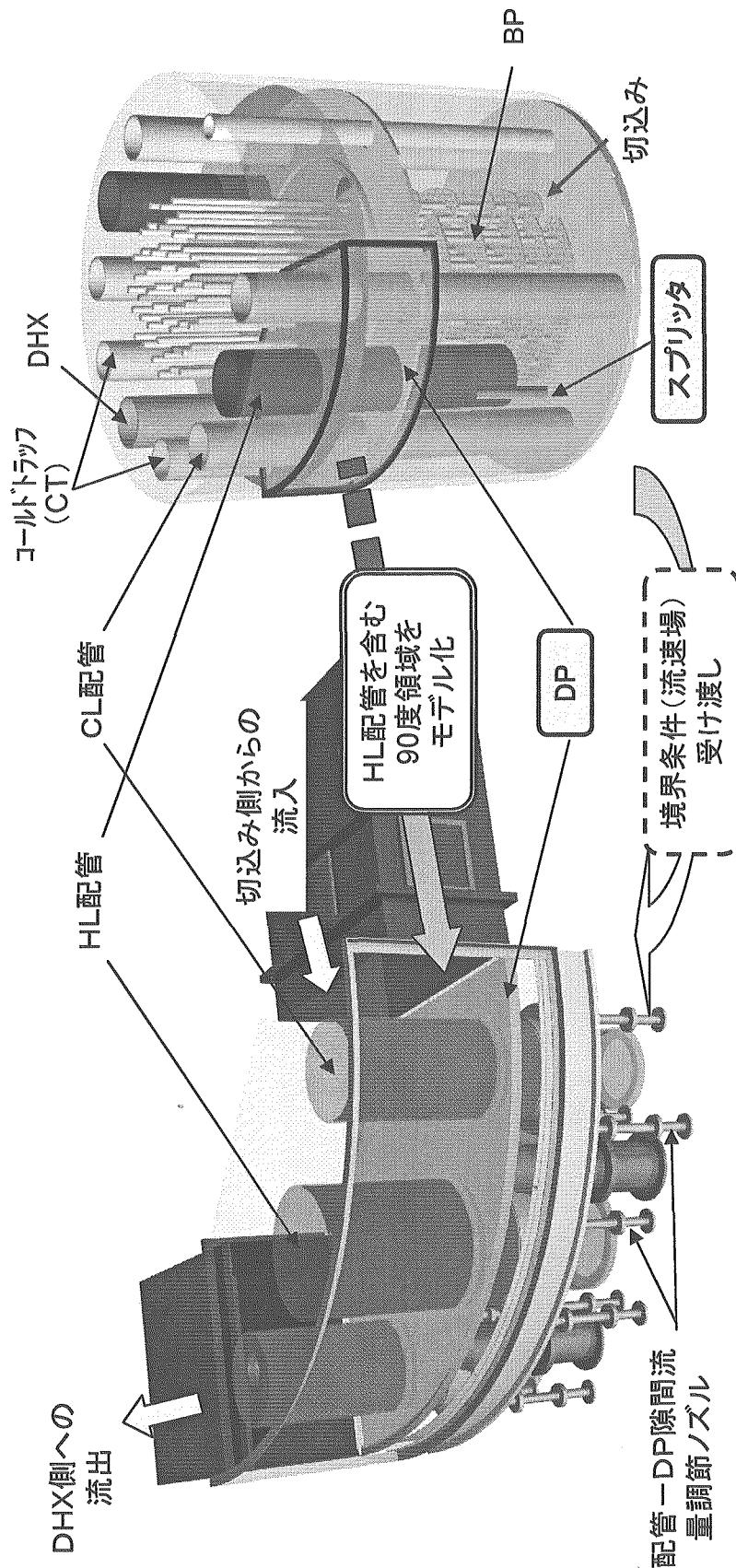
上記の課題を解決する手段として、試験結果に基づき、図 2.2-5 に示すような UIS 切込み部からの上昇流を抑制する FHM プラグと HL 配管近傍の流れを整流するスプリッタが提案<sup>[5]</sup>され、実機設計に反映した。

## (ii) 液面部分モデル試験結果

1/10 プレナムモデルで計測された流速場に基づいて設定された実機流速一致条件の下で、液面部分モデルでの流況を観察<sup>[6]</sup>した（図 2.2-6）。

その結果、液面部分モデルにおける定格試験条件の下では、ガス巻込みは発生しないことがわかった。さらに、ガス巻込みの発生限界を把握するため、主配管等を横切る切込み部からの周方向流速、ギャップ部の下降流速、DP 上方の液位等をパラメータとした試験を実施<sup>[7]</sup>している。ガス巻込みの発生限界を示すマップの一例を図 2.2-7 に示す。ガス巻込みの発生に関しては、DP 上の液位（DP 上面から液面）が高い条件（定格の 40%以上）では周方向流速が支配的であり、ギャップ部での下降流速の影響は小さい結果となっている。

このように、DP 上の液位を十分に確保し、かつ二重 DP と流動適正化構造により液面流速を抑制している現行設計は、ガス巻込みに対して大きなマージンを有することが明らかとなっている。



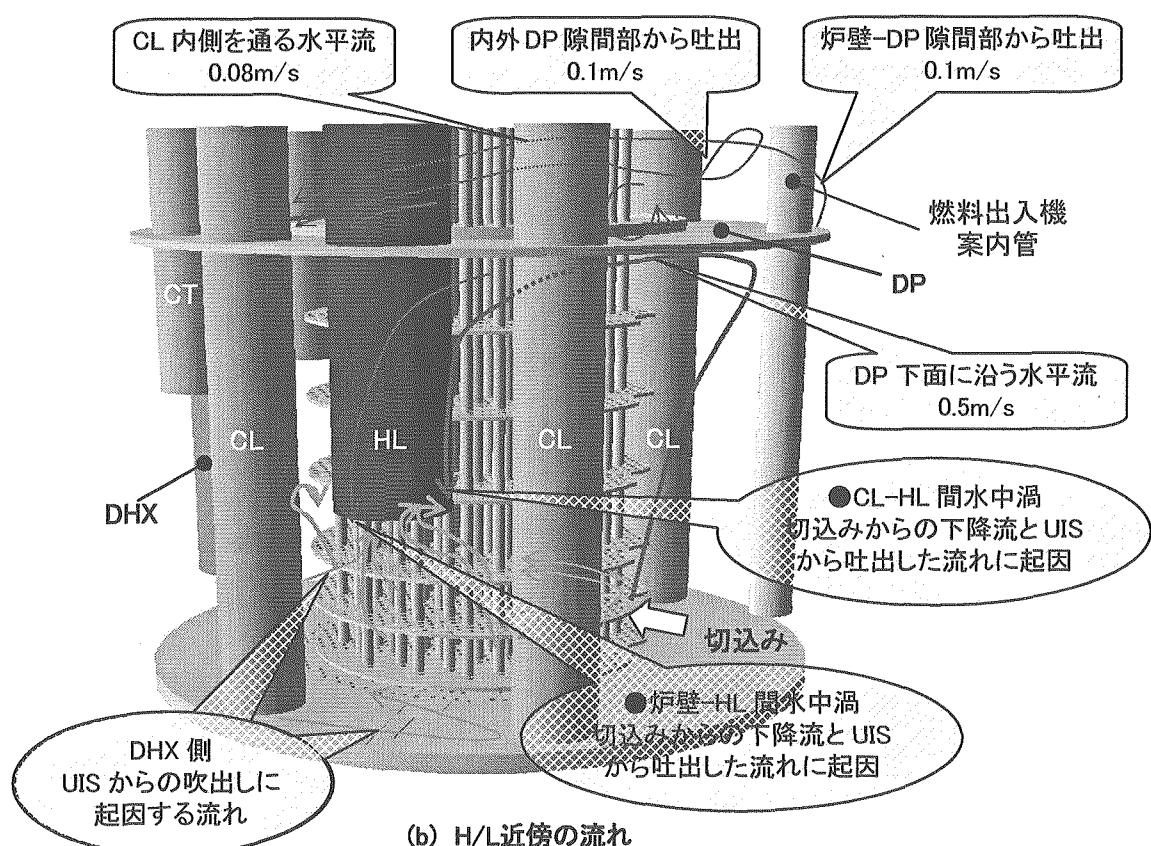
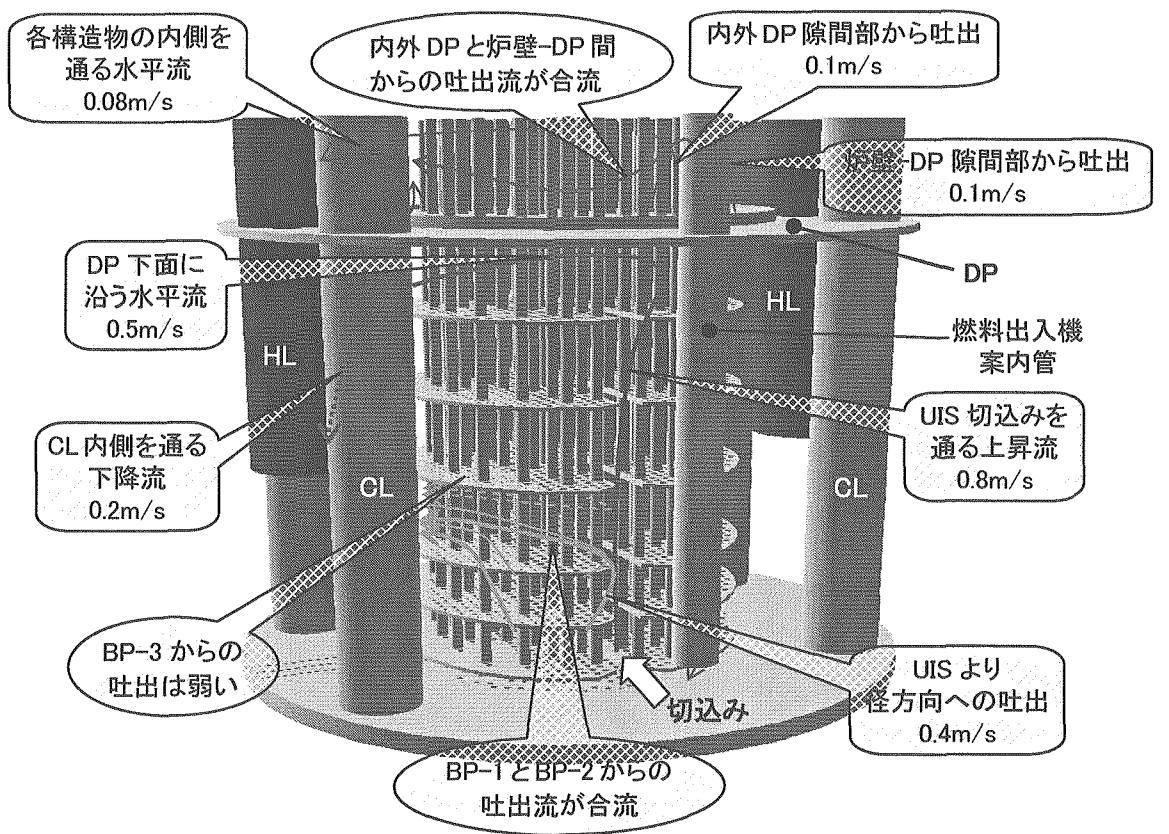
## 1/1.8 縮尺液面部分モデル

- ・スケール効果を含め、実規模での現象把握
- ・柔軟な境界条件(配管隙間部の流量)の設定  
⇒下降流速等のガス巻込み発生限界の評価

## 1/10 縮尺プレナムモデル

- ・上部プレナム全体での流動現象把握  
⇒切込み／HL配管吸込み部の定量的計測
- ・液面部分モデル試験への境界条件設定

図 2.2-1 炉上部プレナム水流動試験装置<sup>[5]</sup>

図 2.2-2 1/10 プレナムモデル試験での流況<sup>[2]</sup>

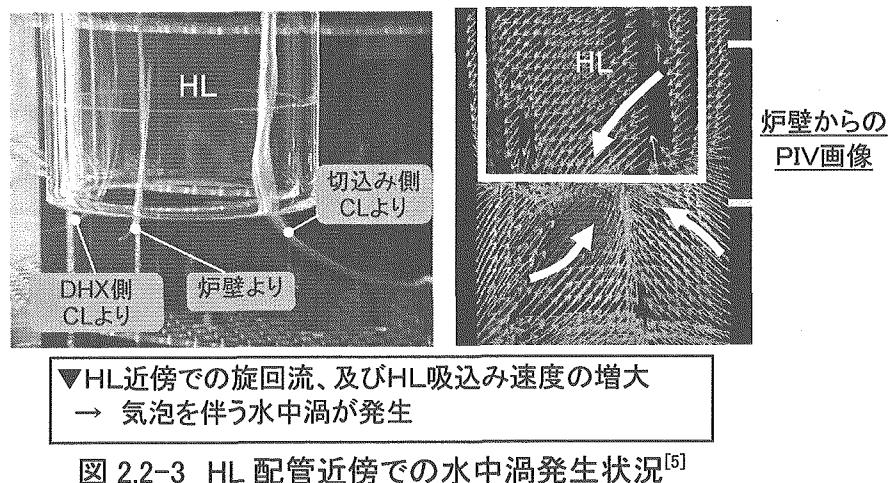


図 2.2-3 HL 配管近傍での水中渦発生状況<sup>[5]</sup>

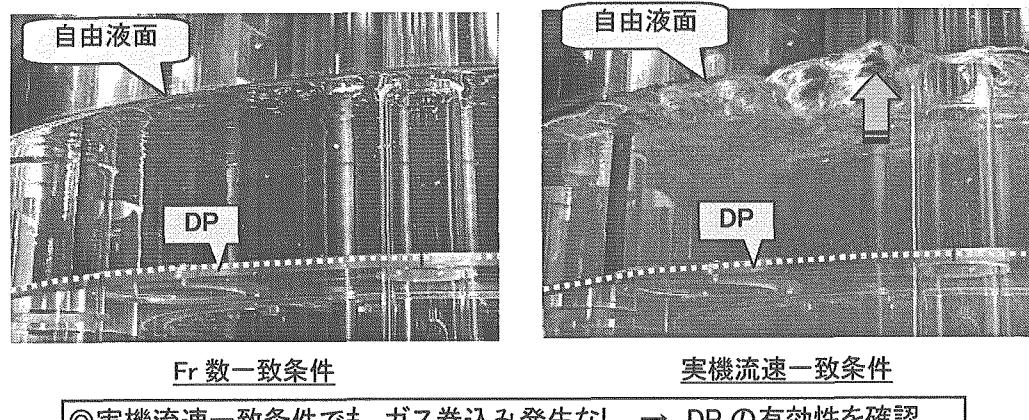


図 2.2-4 液面部の流況(切込み部近傍)<sup>[2]</sup>

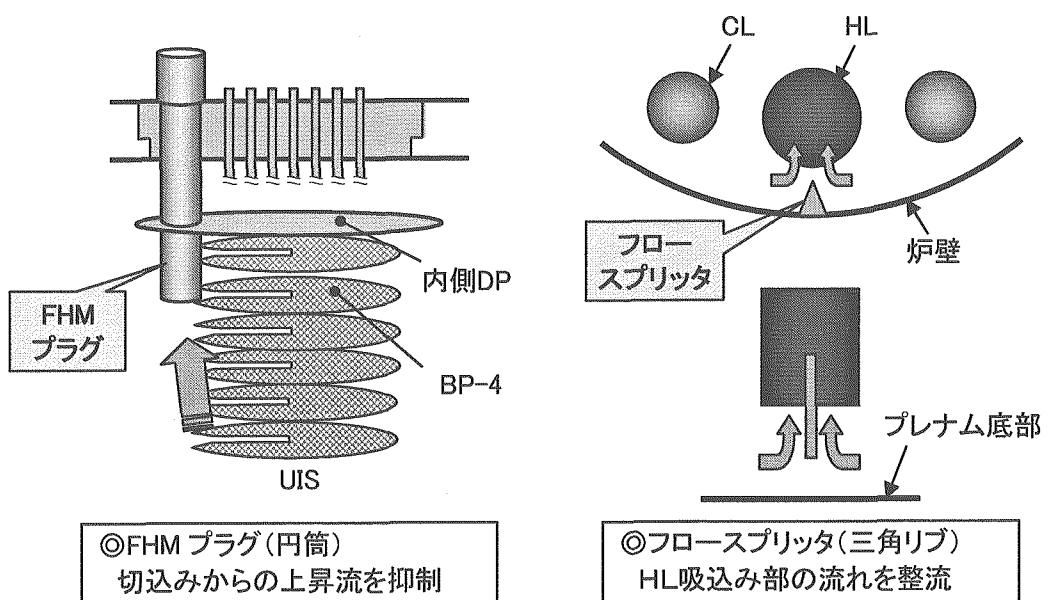
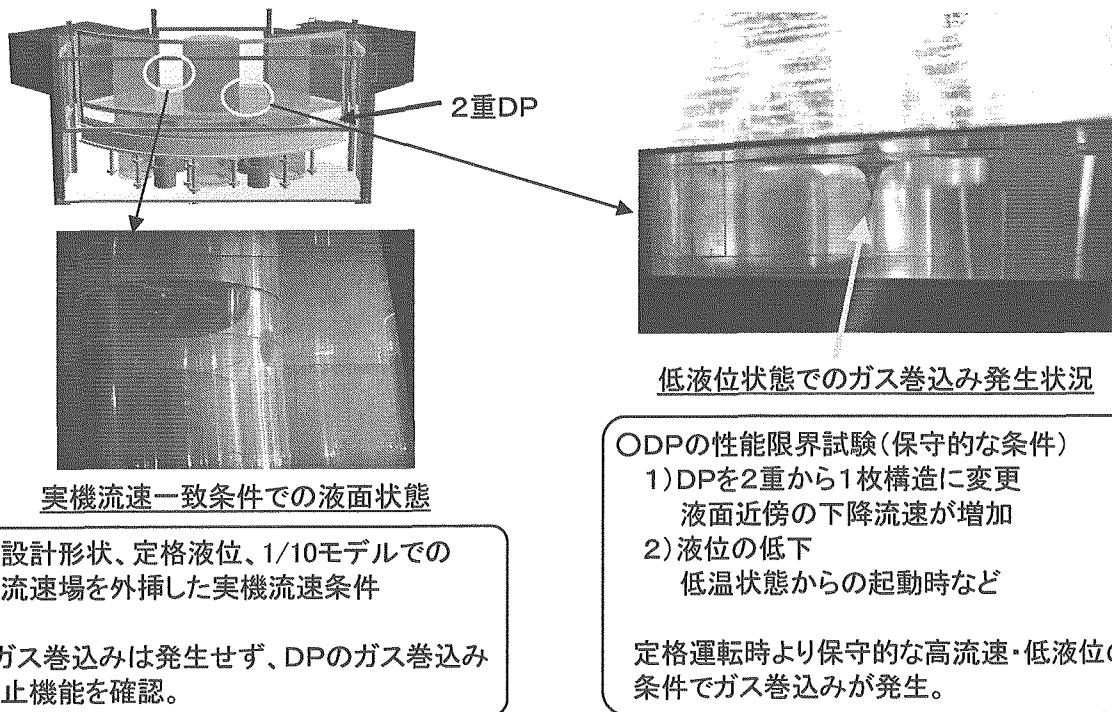
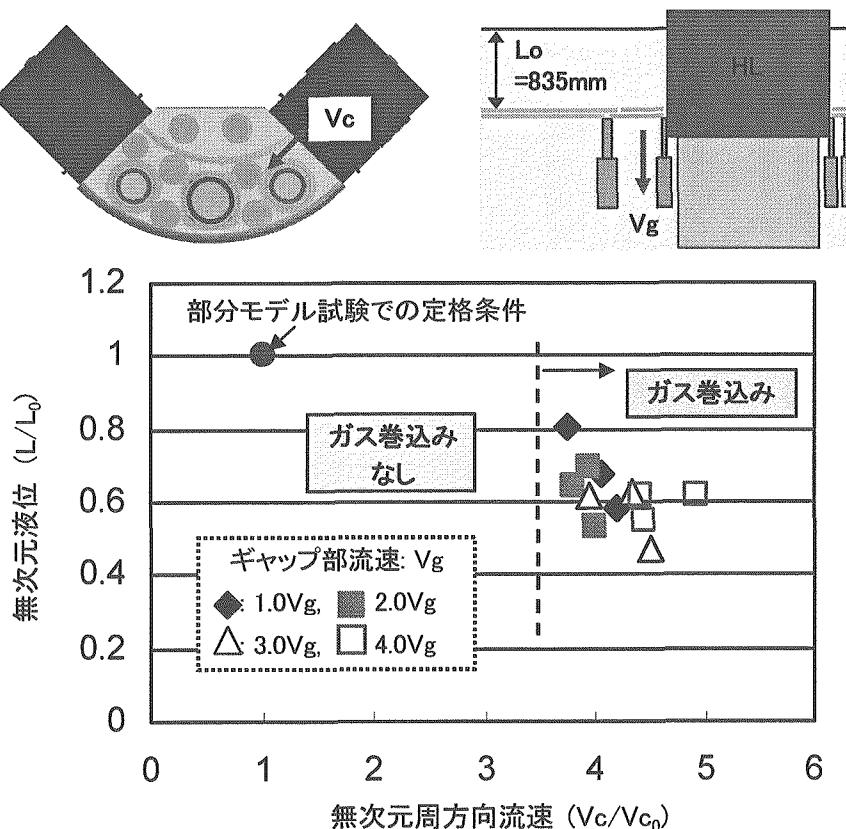


図 2.2-5 流動適正化構造

図 2.2-6 液面部分モデルでの流況観察<sup>[3]</sup>図 2.2-7 ガス巻込み発生限界マップの一例(周方向流速－液位)<sup>[7]</sup>

### 3. 1/10 縮尺プレナムモデル試験解析

#### 3.1 各種解析モデルによる流況評価

本節では、上部プレナムの流況評価に大きく影響すると考えた以下の項目に着目して 1/10 プレナムモデル試験体系のパラメータ解析を行い、水試験で得られた流況や流速場と比較して、解析モデルの妥当性を検討した。

##### ① 解析領域とメッシュ分割の影響確認

試験体系の流況を再現するためには、どの程度の解析モデルが必要となるかの判断材料を得る観点で、まず解析領域とメッシュ分割の影響を確認した。2.2 節で述べたように、Fr 数一致条件の試験においては、DP 下方領域（炉心出口—DP 下面）では UIS 切込み部や HL 配管吸込み部において高流速の流れ場となっている。一方、DP 上方領域（DP—液面）では、DP で仕切られたことにより UIS 切込み上部を除いて液面部は静止している。このため、次節で述べる水中渦の予測評価等の観点で、解析領域を DP 下方領域に限定した体系と液面領域まで含む体系を比較して、DP による領域分離の可能性を検討した。

また、炉心出口からの流れは UIS 多孔板を通過して HL 配管に吸込まれるため、UIS 多孔板のモデル化が解析結果に大きく影響すると考え、フロー孔の模擬方法やメッシュ分割をパラメータとした評価を実施した。

さらに、HL 配管近傍で発生した水中渦を抑制するために流動適正化構造（スプリッタ、FHM プラグ）が提案されたが、その有効性を確認するため、流動適正化構造の有無をパラメータとした解析を実施した。

##### ② DP 形状の影響確認

平成 14 年度当初の水試験では、内外 DP 各 1 枚の体系で実施されていたが、平成 15 年度より設計に準拠して 2 重 DP 体系に変更<sup>[4]</sup>になった。これに伴い、上下 2 枚の DP 間での流況を把握するとともに、全体流況については従来の 1 重 DP 体系と大きな相違がないことを確認するため、2 重 DP 体系での定常解析を実施した。

##### ③ スケール・流体物性値の影響確認

水試験体系の解析モデルをベースとして、実機スケールで流体をナトリウムに変更した場合の影響を確認するため、Fr 数一致条件での試験解析結果と実機体系の解析結果を比較した。

試験体系の解析には、有限体積法非構造メッシュによる汎用熱流体解析プログラム STAR-CD を用いた。STAR-CD は、完全不連続メッシュ等の機能の採用により、複雑形状の流れ場の模擬性に優れ、定常／非定常解析、圧縮性／非圧縮性流体の計算が可能となっている。また、様々な乱流モデルの使用が可能で、ソルバの安定性や、定常解の収束性の向上等も図られている。

### 3.1.1 解析領域とメッシュ分割の影響

#### (1) 解析モデルの概要と解析条件

水流動試験でのフローパターンを再現する解析モデルを構築する手順として、以下の点に着目して、数種類の解析モデルを作成した。

- ①解析対象領域の影響
- ②メッシュ幅の影響
- ③UIS 多孔板のモデル化
- ④流動適正化方策の適用

解析条件を表 3.1.1-1 に示す。以下に、各ケースの目的、パラメータ設定根拠を述べる。

##### (i) Case1-1

レファレンスケースとした Case1-1 は、DP 下方の全周領域 ( $\phi 960\text{mm}$ 、高さ  $585\text{mm}$ ) を対象としてモデル化した。解析体系の全体図を図 3.1.1-1(a)に、平面図を図 3.1.1-2(a)に示す。

解析領域については、DP 上方領域と下方領域の流動特性が DP によって分離して扱うことができると仮定し、UIS 内部からの噴出しや HL 配管近傍で観察された水中渦に至る旋回流れを詳細に検討する観点から、炉心出口-DP 下面までをモデル化範囲とした。

また、装置に配置された構造物の形状は可能な限り忠実に模擬している。構造物のモデル化の一例として、図 3.1.1-3 に UIS 切込み部と HL 配管の拡大図を示す。HL 配管吸込み部には、端部でのキャビテーションを抑制するためベルマウスが設置されており、ベルマウス部の曲率 ( $R=10\text{mm}$ ) も模擬している。

メッシュ分割に関しては、計算機メモリ及び計算時間を勘案し、水平方向で約  $1\sim 7\text{mm}$ 、鉛直方向で約  $1\sim 8\text{mm}$  に設定し、総メッシュ数は約 800 万となった。

UIS 多孔板 ( $\phi 496\text{mm}$ 、板厚  $5\text{mm}$ ) のモデル化方法としては、図 3.1.1-2(b)に示すように、556 個のフロー孔 ( $\phi 11\text{mm}$ ) について流路面積が等価になるように、 $4\times 4$  の流体メッシュ (16 角形) で直接模擬している。

##### (ii) Case1-2

Case1-2 は、メッシュ分割の違いがフローパターンに及ぼす影響に着目したもので、図 3.1.1-1(a)に示す DP 下方の全周領域を約 360 万メッシュでモデル化した。

本ケースでは、Case1-1 に対して、UIS 内部を約  $1/2$ 、UIS 外周部を約  $2/3$  の分割数に設定し、メッシュ幅は水平方向で約  $1\sim 10\text{mm}$ 、鉛直方向で約  $1\sim 10\text{mm}$  となっている。UIS 多孔板のモデル化としては、図 3.1.1-2(b)に示すように、Case1-1 より粗く各フロー孔を  $2\times 2$  の流体メッシュ (8 角形) で模擬した。

##### (iii) Case1-3

Case1-3 は、従来の多次元流動解析で用いられていたポーラスモデルにより UIS 多孔板を模擬した場合のフローパターンの相違に着目したものである。解析領域・メッシュ幅は、Case1-1 と同等であり、DP 下方の全周領域を約 800 万メッシュでモデル化している。

実機並びに試験装置における UIS 多孔板の開口率は 30%に設定されており、本ケースでは制御棒案内管部を除く多孔板面積に対するフロー孔の流路面積の比を 30%とし、各多孔板での圧損係数を 0.5 として与えている。

#### (iv) Case1-4

Case1-4 は、解析領域を炉心出口から液面まで拡大したものである。DP 下方領域に限定した Case1-1 でのフローパターンとの比較により、DP による領域分離の妥当性を確認する。

メッシュ幅及び UIS 多孔板のモデル化に関しては Case1-1 と同等であるが、軸方向の解析領域（高さ 730mm）が増加したため、本ケースでは図 3.1.1-1(b)に示すように UIS 切込み-DHX 方向を対称とした 180 度セクタモデルとして扱い、総メッシュ数は約 600 万となった。また、液面の境界条件としてはスリップ条件としている。

なお、2.2 節で述べたように試験では当初 1 重 DP 体系としており、DP ラビリンス構造（リブ、L 字板）は考慮していない。このため、実機での 2 重 DP 体系での流況を模擬できるように、試験装置では、内側 DP と外側 DP 間のギャップを通過する流量を制限するため、内外 DP の境界部に段差と仕切り板（高さ 15mm）を設置していた。そこで、DP 近傍については、図 3.1.1-4 に示すように装置形状を模擬して内外 DP の段差や仕切り板をモデル化している。

#### (v) Case1-5

Case1-5 は、水流動試験で提案された流動適正化構造（FHM プラグとスプリッタ）を取り込んだ場合の流況に着目したもので、解析モデルを図 3.1.1-5 に示す。試験装置と同様に、FHM プラグ（ $\phi 80\text{mm}$ ）の下端は BP-4 位置に設定し、細い三角柱形状のスプリッタ（張出し高さ 10mm、長さ 300mm）を HL 配管に面した炉壁部分に設置している。

なお、解析領域・メッシュ幅・多孔板の模擬方法は、Case1-1 と同等であり、DP 下方の全周領域を約 800 万メッシュでモデル化している。

#### (vi) その他の解析条件

各ケース共通の解析条件は、以下のように設定した。

乱流モデルに関しては、炉内の流れや乱れが BP や液面等で流れ方向を拘束され、等方性乱流の仮定が成立しないと考え、二方程式乱流モデルの中から非等方性を考慮した RNG  $k - \epsilon$  モデルを使用した。

対流項の空間離散化手法は、単調移流再構成スキーム(MARS : Monotone Advection and

Reconstruction Scheme)を使用した。MARS は、多次元全変分量減少 (TVD : Total Variation Diminishing)スキームを用いて計算され、セルの流れの物理量と勾配から 2 次精度の空間離散化が定義される。MARS の使用により、解析精度のメッシュ構造とひずみ依存性が小さくなるという特性を有している。

流入条件としては、試験と同様  $Fr$  数一致条件 ( $=243\text{m}^3/\text{h}$ ) を想定し、装置で設定された流量配分 (内側／外側炉心領域 95%、径プランケット領域 5%) に応じて、各領域での平均流速 (炉心領域の場合約  $1.7\text{m}/\text{s}$ ) を入口境界条件として与えた。出口境界条件としては、HL 配管上端位置での圧力一定で規定した。また、壁面の境界条件は対数則条件とした。

## (2) 解析結果の検討

### (i) 全体流況の比較

代表的な鉛直／水平断面における流速ベクトル図を 5 ケース比較して、図 3.1.1-6～図 3.1.1-11 に示す。これらの図では、ベクトルの色が流速値 (流速のレンジ :  $0 \sim 1\text{m}/\text{s}$ ) を、矢印の向きが流れ方向を表している。

今回の解析ケースはいずれも数百万メッシュの体系となっており、一例として、図 3.1.1-6(1) に示す Case1-1 の左半分の領域は全メッシュのベクトルを表示している。しかし、HL 配管吸込み部近傍のようにメッシュを集中させた部分では、ベクトルが重なり合って流況が判別できることもあるため、全体流況を比較するにあたっては、右半分の領域のようにメッシュの一部を間引いて表示している。

#### (a) 鉛直断面

##### 1) 0-180 度断面

図 3.1.1-6 は、2 本の HL 配管中心を通る 0-180 度方向での流速ベクトル図、並びに水流動試験において計測された HL 配管近傍での PIV 画像を示す。

ポーラスモデルで多孔板を模擬した Case1-3 を除き、この断面での各ケースの流況はほぼ一致している。特に、UIS 内部に着目すると、燃料集合体に相当する 556 個の流出孔 (以下、炉心出口と表記) から出た噴流は、CIP、BP-1 のフロー孔を通過して BP-2 に至る。しかし、BP-2 より上方では流速が低下し、DP に向かうような上昇流は見られない。UIS 外周部に着目すると、BP-1 と BP-2 の外周側からの吐出流れが合流して HL 配管吸込み部へ向かう左右対称の上昇流が支配的となっている。

また、上部プレナム内の流速に比べて HL 配管内の平均流速は  $2.5\text{m}/\text{s}$  程度と大きい。この HL 配管での強い吸込みに伴って、BP-3 より上方の領域では HL 配管に沿って下降する流れや、BP-3 に沿って水平方向に HL 配管に引き込まれる流れが見られる。これらの特徴は、図 2.2-2 に示した流況観察結果や PIV 画像での流速分布の傾向とほぼ一致している。

一方、ポーラスモデルを用いた Case1-3（他のケースとの比較のため、右半分の領域には多孔板の位置を破線で表示）は、BP-1 を通過する上昇流が UIS 内で平均化された流れ場となっている。このため、BP-1 の上方では他のケースよりもやや流速が低下する傾向を示す。しかし、BP 外周部から HL 配管に向かう吸込み流れのパターンは他のケースと定性的に一致している。

HL 配管内の流れに着目すると、各ケースとも、BP-1 と BP-2 からの吐出流れによって、吸込み部の流れはやや炉壁側に偏心している。また、ベルマウスによる絞り効果により吸込み部直下の UIS 側では死水域が生じる傾向が見られる。なお、実機設計では、水試験で見られたベルマウス部でのキャビテーションを防止する観点で、ベルマウス形状の見直しが実施されている。

## 2)90-270 度断面

UIS 切込み部と DHX を通る 90-270 度方向での流速ベクトル図（左側：切込み部、右側：UIS 内部-DHX）、並びに切込み部外周近傍での PIV 画像（FHM プラグの挿入位置を変更したケースを比較）を図 3.1.1-7 に示す。

DHX 側では、各ケースとも BP-1 外周からの吐出流れが炉壁側に向かって DHX 下端に衝突し、DHX 側壁に沿う上昇流と DHX 下面に沿う水平流に分離している。なお、上記の 0-180 度断面と同様に、UIS 内部では、BP-2 上方の流速が低下する傾向となっている。

一方、切込み側では、水試験と同様に、各ケースとも炉心出口から DP に向かう噴流が形成されており、流動適正化構造である FHM プラグの挿入レベルによりフローパターンは大きく異なっている。

流動適正化前（FHM プラグ下端が DP レベル）の水試験で計測された PIV 画像では、BP-3 外周での流速が最大（約 0.8m/s）となっており、切込み部からの噴流の境界は BP-1 外周と燃料出入機案内管の DP 付根を結ぶ直線となっている。

解析においては、多孔板でのフロー孔を直接模擬したケース（Case1-1、Case1-2、Case1-4）では、噴流の最大値が 0.8m/s 程度とほぼ水試験と一致しているが、噴流の境界は炉壁側にやや傾斜している。ポーラスモデルを用いた Case1-3 の場合には、噴流の最大値が約 1m/s と他のケースより増加しているが、噴流の境界はほぼ水試験と一致している。このような噴流の境界（上昇角度）に差が生じた原因については後述する。

次に、FHM プラグを BP-4 レベルに挿入した試験での PIV 画像では、噴流が FHM プラグ下端に一旦衝突して DP 下面に向かう上昇流を抑制している。その後、FHM プラグ下面に衝突した流れと炉心出口からの噴流が合流して燃料出入機案内管の側壁に衝突し、燃料出入機案内管に沿って上昇するフローパターンが形成されている。

FHM プラグを挿入した Case1-5 の結果では、噴流の境界がやや炉壁側に傾斜しているが、噴流が FHM プラグ下端に一旦衝突して燃料出入機案内管に沿って上昇する傾向が再現できている。

### 3) 15-195 度断面

HL 配管-CL 配管間で発生する水中渦に着目して、HL 配管と CL 配管の中間を通る断面での流速ベクトルを図 3.1.1-8 に示す。なお、この断面に相当する PIV 画像は試験では取得されていない。

HL 配管と炉壁間の水中渦を抑制するスプリッタを設置している Case1-5 も含めて、各ケースとも、主に BP-1 の外周側からの吐出流れが炉壁側に向かい、BP-3 レベルで炉壁側から UIS 側に反転するような大きな旋回渦が左右対称に形成されている。この旋回渦が HL 配管での強い吸込みによって、渦中心での圧力が低下し水中渦に至るものと考えられる。したがって、HL-CL 間の水中渦をさらに抑制する必要が生じた場合には、バッフル板外周部から炉壁に向かう流れを抑制するような構造（例：UIS 外周に多孔洞を設置する）を採用することが有効と考えられる。

#### (b) 水平面

##### 1) BP-1 上方位置

BP-1 上方（炉心出口からの距離： $z=113.5\text{mm}$ ）での流速ベクトル図（ $u, v, w$  流速成分の合成ベクトル）を図 3.1.1-9 に示す。なお、右側の HL 配管近傍は全メッシュのベクトルを表示している。各ケースとも、破線で示す BP 外周部から炉壁側に向かう放射状の流れが明確に現れている。特に、CL 配管の内側領域（HL 配管に面する側面）ではやや流速が増加しており、吸込みの影響を受けていると考える。ポーラスモデルを用いた Case1-3 では、炉壁側へ向かう放射状の流速が他のケースよりも小さい結果となっている。

##### 2) BP-3 上方位置

次に、HL 配管吸込みレベルのやや下方に相当する BP-3 上方（ $z=270\text{mm}$ ）での流速ベクトル図を図 3.1.1-10 に示す。この断面では、HL 配管での吸込みにより、0-180 度方向において UIS 内部から HL 配管に向かう加速流れが見られるとともに、HL 配管と両側の CL 配管との間の流速が著しく増加している。

代表的な Case1-1 の結果より、切込み側 CL 配管の内側領域では、HL 配管に最も近接した配管壁を起点として炉壁側から UIS 側に向かう流れが見られる。これに対して、DHX 側 CL 配管の内側領域では、HL 配管に最も近接した配管壁を起点に UIS 側から炉壁側に向かう流れが見られる。このフローパターンは、図 3.1.1-8 に示した HL 配管と CL 配管の中間ににおける鉛直断面の流速ベクトルと対応しており、HL 配管を中心として両側の CL 配管との間で逆方向の旋回渦が形成されている。

なお、液面部を含む 180 度セクタモデルの Case1-4 では、切込み側 CL 配管近傍において、UIS 内部から炉壁側に向かう流れがやや優勢となっている。

一方、流動適正化構造を適用した Case1-5 の場合には、両側の CL 配管壁近傍の流速が他のケ

ースよりも低減しており、高流速の領域は HL 配管近傍に限定されている。この要因は、炉壁に設置したフロースプリッタによる整流効果に加えて、FHM プラグを挿入したことにより切込み部の噴流が抑制され、DP 下面に衝突した後の水平流や切込み側 CL 配管に沿う下降流等が相対的に弱まったことによるものと考える。ただし、切込み側 CL 配管の近傍では、切込み方向の配管壁と BP 外周のすきまを廻り込むように HL 配管に向かう流速が他のケースより増加する傾向にある。

### 3) DP 下面近傍

最後に、切込み部からの噴流が衝突する DP 下面近傍 ( $z=575\text{mm}$ ) での流速ベクトル図を図 3.1.1-12 に示す。流動適正化構造を適用した Case1-5 を除き、各ケースとも切込み部先端と燃料出入機案内管の間の領域では、DP 下面に衝突した流れが水平方向に反転して、両側の CL 配管に向かう一対の周方向流れ（最大流速  $0.4\text{m/s}$  程度）が支配的となっており、流況観察結果とほぼ一致している。なお、ポーラスモデルを用いた Case1-3 の場合には、図 3.1.1-7 に示した切込み部からの上昇流が PIV 計測結果と同様にあまり炉壁側に傾斜せず、炉容器中心側で DP 下面に衝突する傾向を示している。このため、DP 下面においても、切込み部の中央から BP 外周に相当する領域での水平方向流速（最大流速  $0.45\sim0.5\text{m/s}$  程度）がフロー孔直接模擬のケースよりもやや増加している。

FHM プラグを挿入した Case1-5 では、燃料出入機案内管と CL 配管の間の周方向流速が低減しており、切込み部からの噴流を抑制した効果が示されている。FHM プラグと燃料出入機案内管の間では、燃料出入機案内管に沿った上昇流が DP に衝突し、FHM プラグ側に向かう流れが生じている。なお、HL 配管と CL 配管の間では、炉壁側から UIS 側に向かう流速が他のケースよりも増加する傾向を示す。

なお、各ケースとも、DHX 側では図 3.1.1-7 に示した DHX 下端に衝突して DHX 側壁に沿って上昇する流れが、DP 下面に当たって水平方向に反転して、DHX と CT の間を UIS 内側に向かう流れが見られる。

### (c) 全体流況のまとめ

代表的な鉛直／水平断面における全体フローパターンを比較した結果、以下の点が明らかになった。

- ・ メッシュ分割の異なる Case1-1 と Case1-2 においても、各断面でのフローパターンは定性的に一致しており、300 万メッシュ程度でも上部プレナムの主要なフローパターンを再現できる見通しがある。
- ・ 多孔板をポーラスモデルで模擬した Case1-3 では、UIS 内部や切込み部の噴流の挙動が、フロー孔を直接模擬した他のケースとやや異なる。この要因については、次項で検討する。

- ・炉心出口から液面部までを解析領域とした Case1-4 の結果は、炉心出口から DP 下面までを対象とした Case1-1 とほぼ一致している。このため、DP 下方領域の流動挙動に着目する場合には、DP 上部から液面までの領域を含めない解析モデルでも評価可能である。
- ・流動適正化構造を適用した Case1-5 の結果は、切込み部からの噴流を抑制する FHM プラグ近傍のフローパターンがほぼ水試験の結果と一致する。
- ・全ケースとも、HL 配管-CL 配管の間の鉛直断面では BP-1 の外周側からの吐出流れが炉壁側に向かい、BP-3 レベルで炉壁側から UIS 側に反転するような大きな旋回渦が左右対称に形成されている。この旋回渦が、HL 配管の吸込み流速の増加により、水中渦に至るものと考える。

#### (ii)多孔板の模擬方法に関する比較

UIS を構成している多孔板を通過する流速等を定量的に比較することで、多孔板模擬方法の妥当性について検討した。

初めに、切込み部を含む 90-270 度方向において、BP-1、BP-3、BP-5 を通過する際の軸方向流速分布を図 3.1.1-12 に示す。横軸は、UIS 中心からの距離をとっており、グラフの左側が切込み側、右側が UIS 内のフロー孔領域となっている。

グラフ右側のフロー孔領域においては、フロー孔を直接模擬した Case1-1 ( $4 \times 4$  メッシュ) 及び Case1-2 ( $2 \times 2$  メッシュ) では、各フロー孔を通過して上昇する流れが顕著に現れている。特徴的な BP-1 通過後の流速は、Case1-1 では中心部で最大  $0.8\text{m/s}$  に達し、外周部では約  $0.7\text{m/s}$  とやや低下する傾向を示している。

また、メッシュ分割を粗く設定した Case1-2 でも、バッフル板を通過する流速分布の全体的な傾向は Case1-1 と同様である。しかし、BP-1 通過後の各フロー孔からの流速は Case1-1 よりもやや低下しており、最大流速は約  $0.74\text{m/s}$  程度、外周部では約  $0.5\text{m/s}$  となっている。

フロー孔領域をポーラスモデルで模擬した Case1-3 では、前述のように各フロー孔からの流出を平均的に扱うために、BP-1 通過後の流速は約  $0.2\text{m/s}$  程度で一様になっている。

一方、切込み側の流速は、Case1-1 及び Case1-2 に比べて、Case1-3 の結果が増加している。特に、BP-1 通過後においては、Case1-1 及び Case1-2 では切込み先端（中心部から  $30\text{mm}$ ）の位置で約  $0.8\text{m/s}$  のピークを示し、外周側では  $0.68\text{m/s}$  程度となっている。Case1-3 では、中心部から  $70\text{mm}$  程度の位置で最大  $0.95\text{m/s}$  となり、外周部の  $230\text{mm}$  位置でも  $0.8\text{m/s}$  となっている。この BP-1 通過後の流速分布の相違は、上方の BP-3、BP-5 の流速分布にも影響しており、切込み側ではいずれも Case1-3 の流速が最大となっている。また、BP-5 通過後の流速分布では、Case1-1 と Case1-2 でも相違が見られている。

次に、各多孔板の外周部において、UIS 内部から炉壁側に向かう径方向の流速分布を図 3.1.1-13 に比較する。横軸は、多孔板の周方向位置（ $0, 180$  度 : HL 配管、 $90$  度 : DHX、 $270$  度 : 切込み）

を示しており、縦軸には径方向流速（UIS 内部から炉壁側への噴出しを正、UIS 内部への吸込みを負）を示す。

最下段の CIP を除くと、各ケースとも BP-1 から上方に向かって多孔板周りの径方向流速が徐々に低下する傾向を示している。

BP-1 周りの径方向流速は、270 度の切込み部近傍を除いて、Case1-1 と Case1-2 では約 0.6m/s、Case1-3 では約 0.45m/s 程度となっている。その上方では、3 ケースで大きな差は見られず、BP-2 周りでは 0.3m/s 程度となっている。BP-3 周りについては、HL 配管近傍の 0 度、180 度では HL での吸込みの影響で 0.2m/s まで増加し、切込み部でも 0.2m/s まで増加している。BP-4 及び BP-5 周りでは、径方向流速は低下し、一部は UIS 内部への吸込みも見られるが、切込み部近傍では 0.2m/s の噴出し流速となっている。

3 ケースの差が最も顕著に現れているのが、最下段の CIP 周りであり、Case1-1 では 0.1m/s 程度の吸込み、Case1-2 では 0.1m/s 程度の噴出し、Case1-3 では 0.5m/s 程度の噴出しとなっている。なお、水試験の観察では、CIP 周りは UIS 内部から炉壁側への噴出し流れになっている。

以上の結果より、フロー孔のモデル化の差異によって、切込み部とそれ以外のフロー孔領域を流れる流量バランスに差が生じたものと考える。

すなわち、フロー孔側壁の影響を排除するために  $4 \times 4$  メッシュで模擬した Case1-1 では、CIP を通過する際の流速をやや過大評価したものと考えられ、CIP フロー孔を通過する噴流に引き込まれるように CIP 周りでは UIS 内部に流体を吸込んでいる。その結果、BP-1 を通過する各フロー孔の軸方向流速も増加するが、相対的に切込み部の軸方向流速が低下し、噴流の上昇角度も炉壁側に傾斜したものと推定される。

フロー孔を  $2 \times 2$  メッシュで模擬した Case1-2 では、フロー孔側壁の抵抗の影響が現れ、Case1-1 よりも CIP を通過する流速が低下したと考えられる。その結果、CIP 周りでは炉壁側への噴出し流れとなり、BP-1 を通過する軸方向流速は Case1-1 より低下したものと考える。

これに対して、ポーラスモデルで模擬した Case1-3 では、ポーラス部の圧力損失によってフロー孔を通過する流量が制限され、より圧力損失の小さい切込み側に流れが集中する。この結果、最下段の CIP 周りでは水試験と同様、炉壁側への噴出しが見られ、さらに BP-1 通過時の切込み側軸方向流速も他のケースより増加し、噴流の上昇角度がより鉛直方向に向かったものと考える。

このように、流動解析結果の精度をさらに向上させるためには、多孔板のフロー孔を通過する際の流速の評価が重要なポイントであり、フロー孔側壁の影響や圧損等を考慮したモデル化が必要であることがわかった。

### (iii) 流動適正化構造の効果

HL 配管 - 炉壁間の水中渦と UIS 切込み部からの噴流を抑制する観点で採用された流動適正化構造の効果を、Case1-1 と Case1-5 の結果を比較して評価した。

図 3.1.1-14 に、炉壁近傍( $r=475\text{mm}$ )における  $\theta - z$  面の半周分を展開した流速ベクトル図を比較して示す。Case1-1 の場合、HL 配管下端レベルよりやや下方において、水中渦の要因になると考えられる旋回渦が見られる。この HL 配管近傍の水中渦の同定については、伸長渦理論に基づく渦予測評価を実施しており、次節でその詳細を述べる。一方、スプリッタを設置した Case1-5 では、HL 配管下端レベルでの旋回渦は見られない。

また、図 3.1.1-15 には、切込み部を含む 90-270 度方向において、BP-1、BP-3、BP-5 を通過する際の軸方向流速分布を示す。図 3.1.1-12 と同様、横軸は UIS 中心からの距離をとっている。下方の BP-1 と BP-3 では、バッフル板を通過する流速は両ケースで一致している。しかし、Case1-5 では、FHM プラグ下端が BP-4 レベルに設定されているので、BP-5 レベルでは、切込み側の 220mm 位置より炉壁側では軸方向流速が 0 となっている。この結果、図 3.1.1-12 に示したように、DP 下面に衝突する噴流を抑制していることが明らかになった。

#### (iv) 試験結果との比較

水試験では、代表的な箇所で流速が計測されている。ここでは、本解析モデルでの予測精度がどの程度あるのかを確認するため、流動適正化構造を適用する前に計測された流速値と、Case1-1、Case1-2、Case1-3、Case1-4 の 4 ケースの結果を比較した。

まず、UIS 切込み部からの噴流に着目して、UIS 外周部と燃料出入機案内管の中間領域 ( $y=-342\text{mm}$ ) で軸方向に 3 箇所計測された流速値との比較結果を図 3.1.1-16 に示す。横軸は  $x$  方向中心からの距離をとり、縦軸には炉心出口流速(約  $1.7\text{m/s}$ )で規格化した軸方向の流速成分をとっている。 $z=151\text{mm}$  (BP-2 レベル) においては、 $x=200\text{mm}$  以上の領域でやや流速を過小評価しているが、4 ケースともほぼ計測値の傾向と一致している。 $z=270\text{mm}$  (BP-3 レベル) では、計測値には  $x=40\text{mm}$  位置を境に 2 つのピークが見られる。解析では、各ケースとも  $x=40\text{mm}$  までの中心領域ではやや流速を過大評価し、 $x=40$  から  $80\text{mm}$  の領域で過小評価する傾向にあるが、 $x=120\text{mm}$  以降ではほぼ計測値と一致している。 $z=395\text{mm}$  (BP-4 と BP-5 の中間レベル) においても、 $x=40$  から  $80\text{mm}$  の領域で計測値より過小評価しているが、 $x=120\text{mm}$  以降では計測値と概ね一致している。

次に、HL 配管への吸込み流れに着目し、UIS 外周と HL 配管の中間領域( $x=278\text{mm}$ )で計測された流速値との比較を図 3.1.1-17 に示す。横軸には  $y$  方向位置を、縦軸は炉心出口流速で規格化した軸方向流速成分を示す。4 ケースの解析結果は、各軸方向レベルで同様の傾向を示しており、 $z=395\text{mm}$  のレベルでは、ほぼ試験結果と一致している。一方、 $z=151\text{mm}$ 、 $270\text{mm}$  のレベルでは、試験結果のばらつきが比較的大きく、部分的には一致する領域が見られる。この HL 配管近傍では、図 3.1.1-13 に示したように UIS 外周からの噴出し流れが相対的に大きく、計測値のばらつき等から判断すると、実現象としても流速の変動が大きい領域にあると考えられる。したがって、定常解析として評価する以上、この程度の流速値の差異が生じたものと推定する。

最後に、HL 配管と炉壁の中間領域 ( $x=460$ ) で計測された流速値との比較を図 3.1.1-18 に示す。横軸には  $y$  方向位置を、縦軸は炉心出口流速で規格化した軸方向流速成分を示す。この炉壁近傍では、4つの解析ケースの差が他の計測領域よりも大きく現れている。 $z=151\text{mm}$  レベルにおいて、試験結果では  $y$  方向中心位置 (HL 配管中心) で流速がピークを示し、両側の CL 配管方向に向かって減少していく傾向となっており、4 ケースの解析結果も部分的に一致している。

しかし、 $z=270\text{mm}$ 、 $395\text{mm}$  のレベルでは、ポーラスモデルを用いた Case1-3 の結果が計測値の傾向と概ね一致している。特に、 $z=395\text{mm}$  では流速計測値が下降流となっており、Case1-3 のみが下降流の結果となっている。このような相違は、フロー孔のモデル化の差異によって、BP-1 及び BP-2 の外周からの吐出流れが合流して炉壁や HL 配管吸込み部へ向かう上昇流の強さに依存したものと考える。すなわち、フロー孔を直接模擬した 3 つのケースでは、BP-1 及び BP-2 の外周からの吐出流れを過大評価しており、その結果、炉壁に沿う上昇流が HL 配管吸込みレベルよりも上方まで達したことによるものと考える。

また、 $z=270\text{mm}$  において、計測値と解析結果との差異が大きいことは、HL 配管と炉壁の間の狭い領域でのメッシュ分割が必ずしも十分ではなかったものと考える。

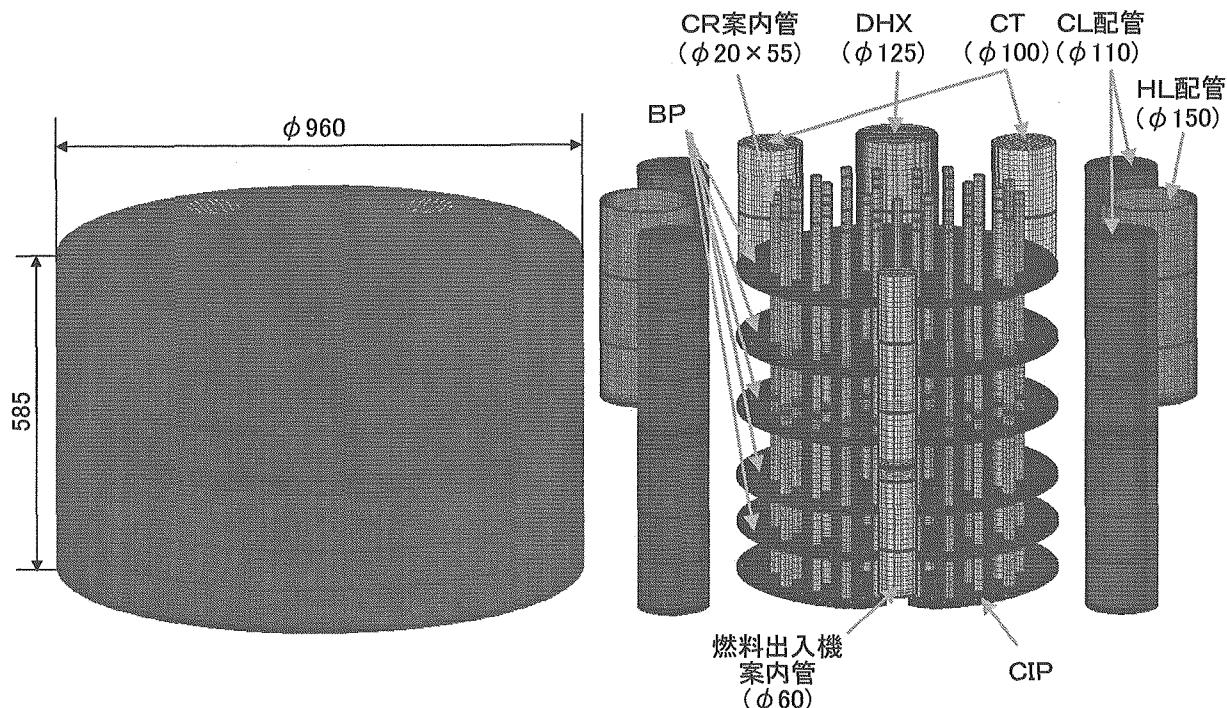
したがって、今回設定した解析モデルでは、主流の一つである切込み部の噴流等の流速計測値と一致する結果が得られた。しかし、局所的な流速場についてさらに解析精度を向上させるためにも、流速 0 の炉壁から急激に加速される HL 配管近傍のような狭い領域でのメッシュ分割を詳細化していく必要があることがわかった。

表 3.1.1-1 1/10 縮尺プレナムモデル試験解析条件

	解析範囲	総メッシュ数	UIS 多孔板模擬	備考
Case1-1	炉心出口ーDP 下面	約 800 万	フロー孔直接模擬 4×4メッシュ	
Case1-2	炉心出口ーDP 下面	約 360 万	フロー孔直接模擬 2×2メッシュ	
Case1-3	炉心出口ーDP 下面	約 800 万	ポーラスモデル 開口率 30% 形状圧損係数 0.5	
Case1-4	炉心出口ー液面	約 600 万	フロー孔直接模擬 4×4メッシュ	180 度セクタモデル
Case1-5	炉心出口ーDP 下面	約 800 万	フロー孔直接模擬 4×4メッシュ	流動適正化構造 (FHM プラグとスプリッタ)を設置

共通の解析パラメータ

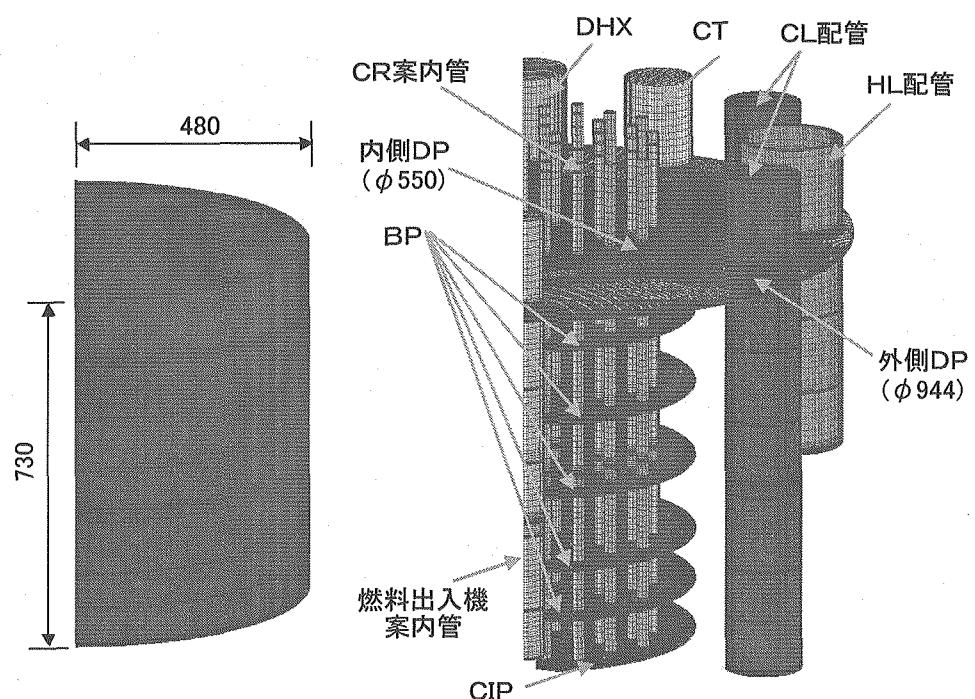
- ・乱流モデル : RNG k-ε モデル
- ・空間離散化手法 : MARS
- ・壁面境界条件 : 標準壁関数(対数則)
- ・流入条件 : Fr 数一致条件( $=243\text{m}^3/\text{h}$ )  
(流配:内側/外側炉心 95%、その他:5%)
- ・流体物性 : 水(常温)



<流体メッシュ鳥瞰図>

<解析体系図(構造材のみ)>

(a)炉心出口-DPまでの領域 [Case1-1, 1-2, 1-3, 1-5]



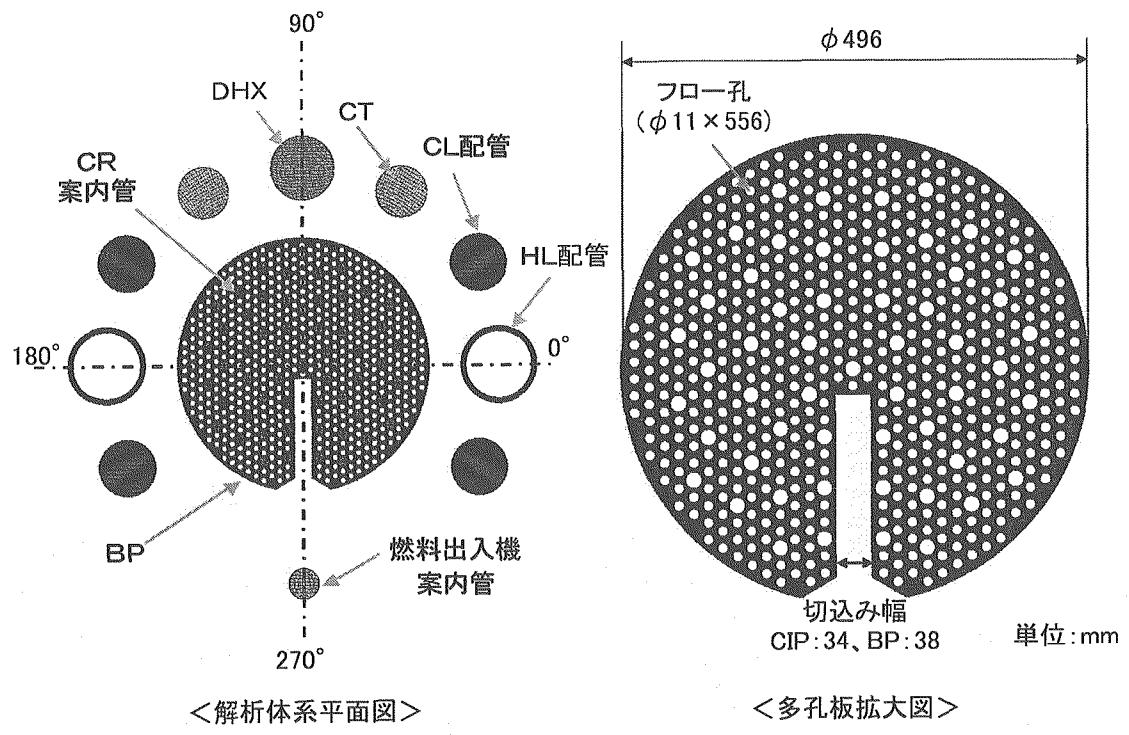
<流体メッシュ鳥瞰図>

<解析体系図(構造材のみ)>

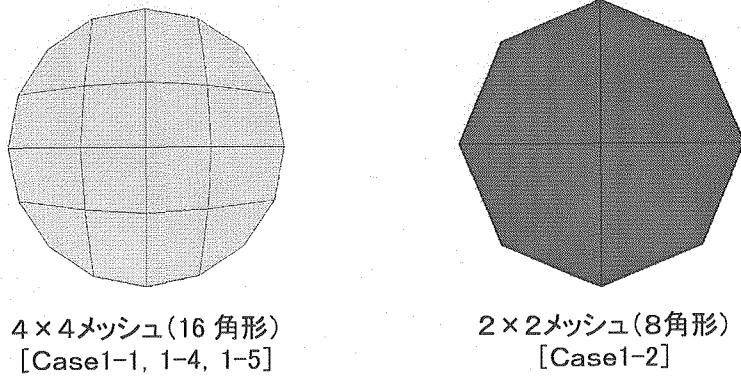
(b)炉心出口-液面までの領域 [Case1-4]

単位:mm

図 3.1.1-1 解析体系全体図



(a)機器・配管類の平面配置 (フロー孔直接模擬)



(b)フロー孔のメッシュ分割

図 3.1.1-2 解析体系平面図

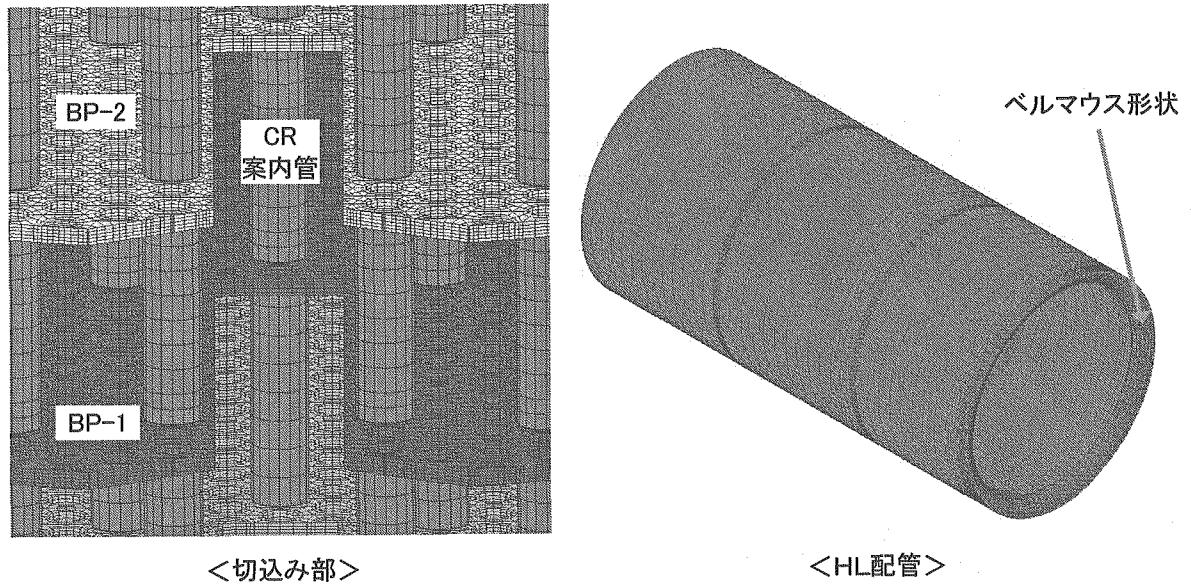


図 3.1.1-3 切込み部、HL配管拡大図

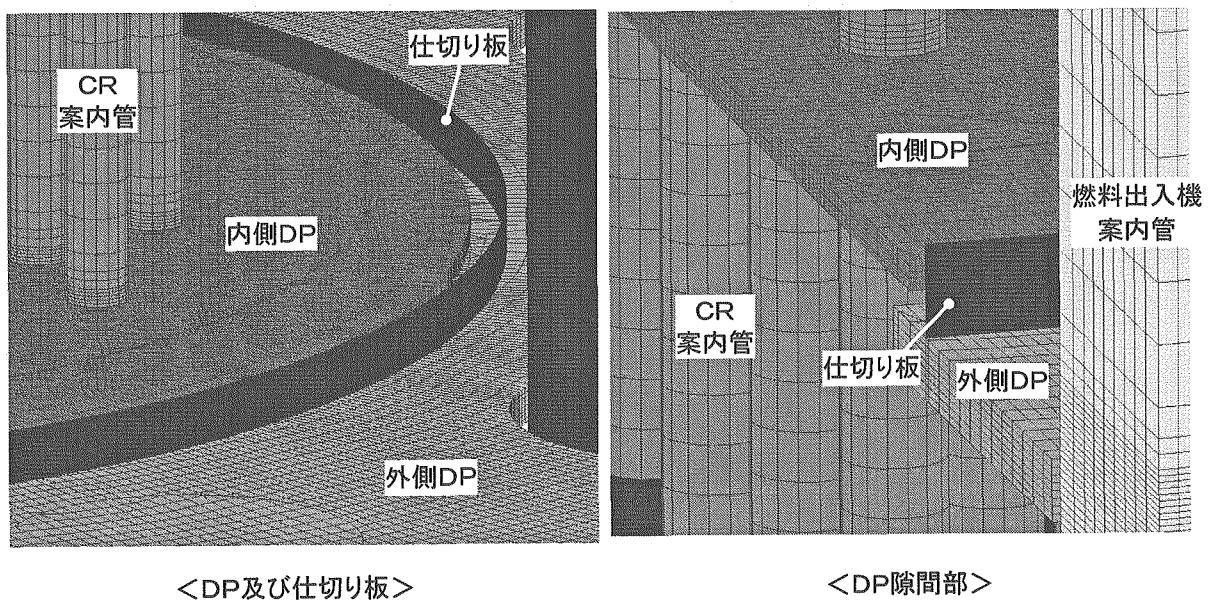


図 3.1.1-4 DP近傍拡大図 [Case1-4]

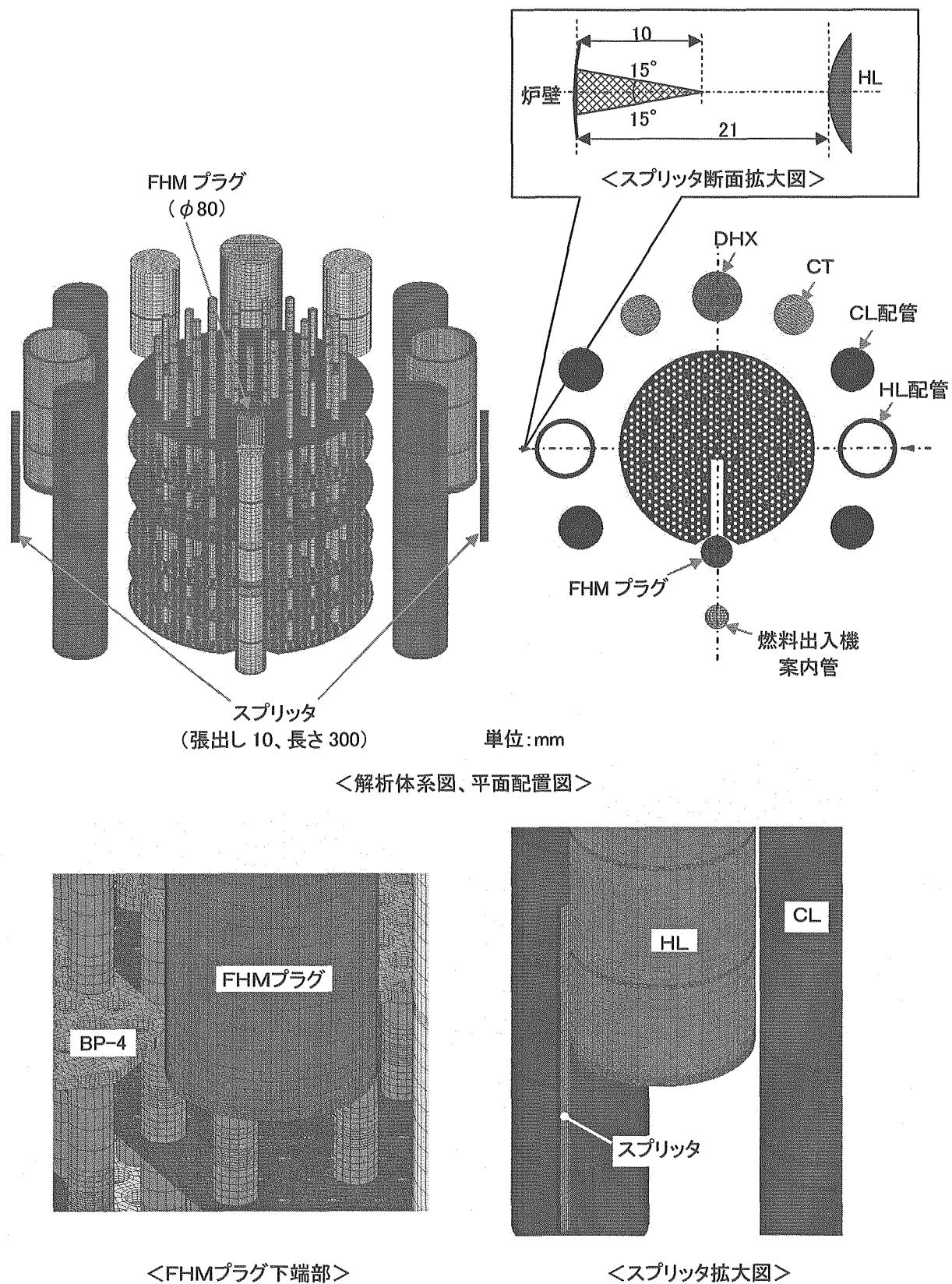
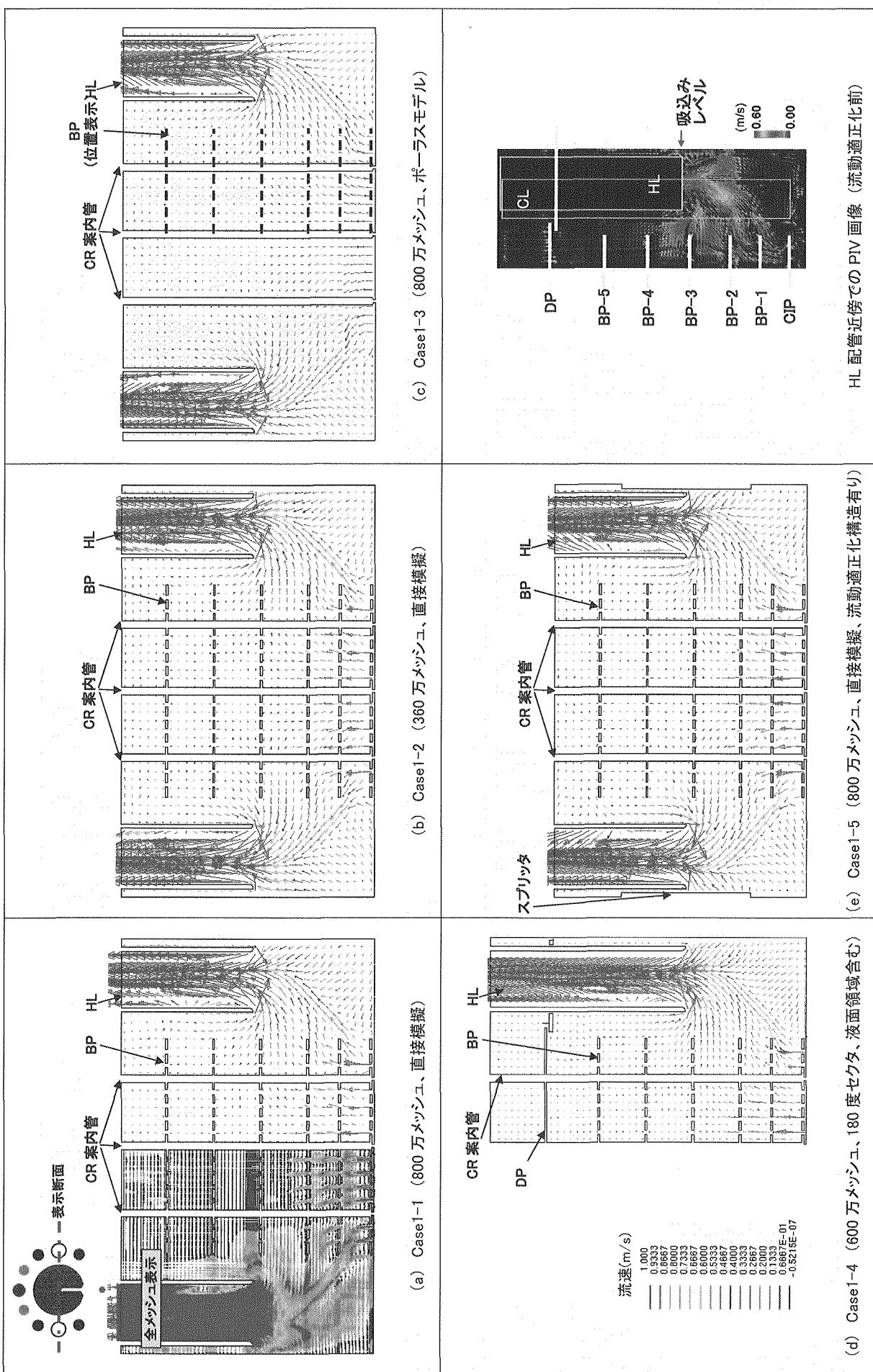


図 3.1.1-5 流動適正化構造適用モデル [Case1-5]



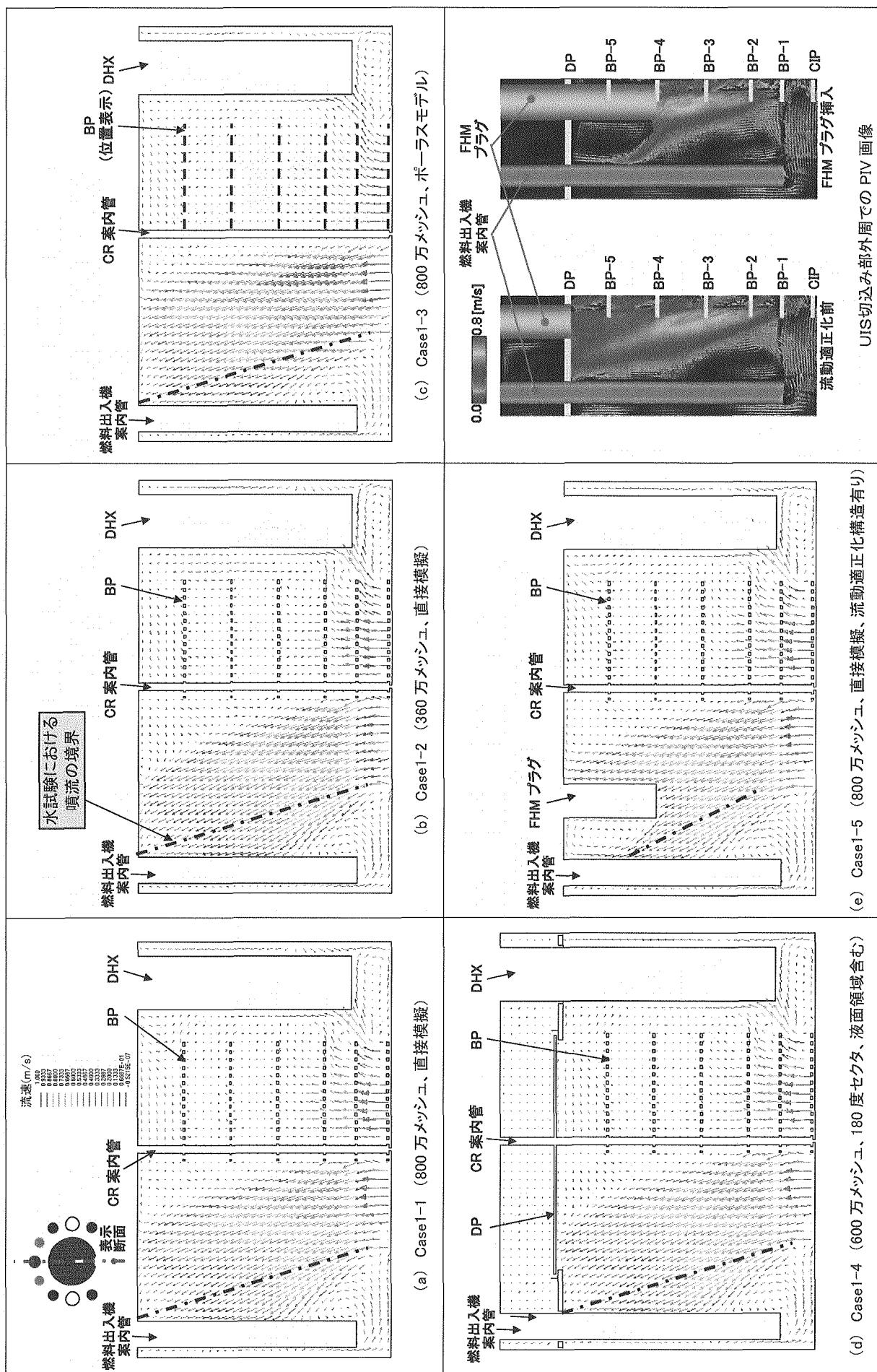


図 3.1.1-7 鉛直断面流速ベクトル図 (90-270 度)

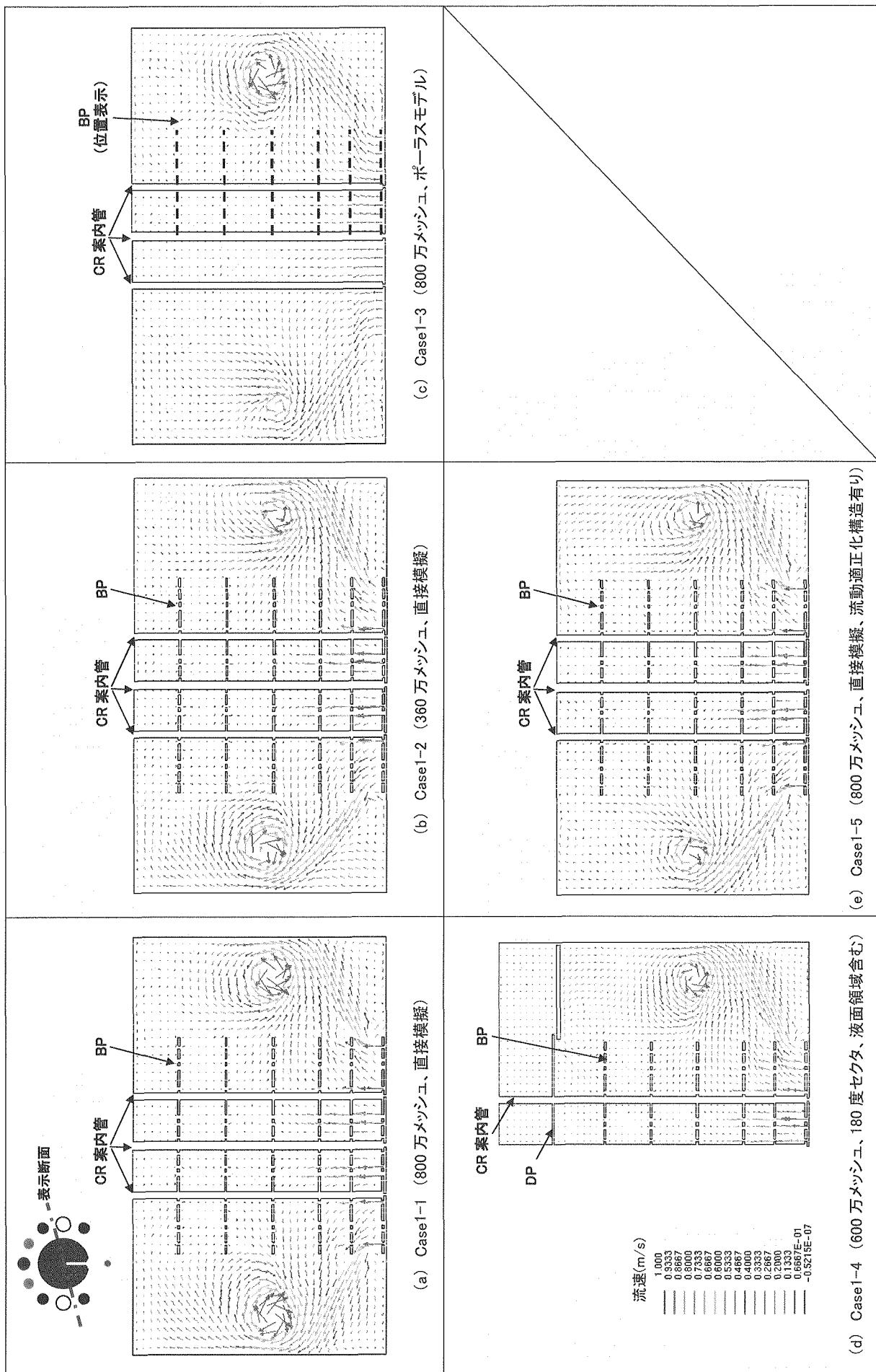
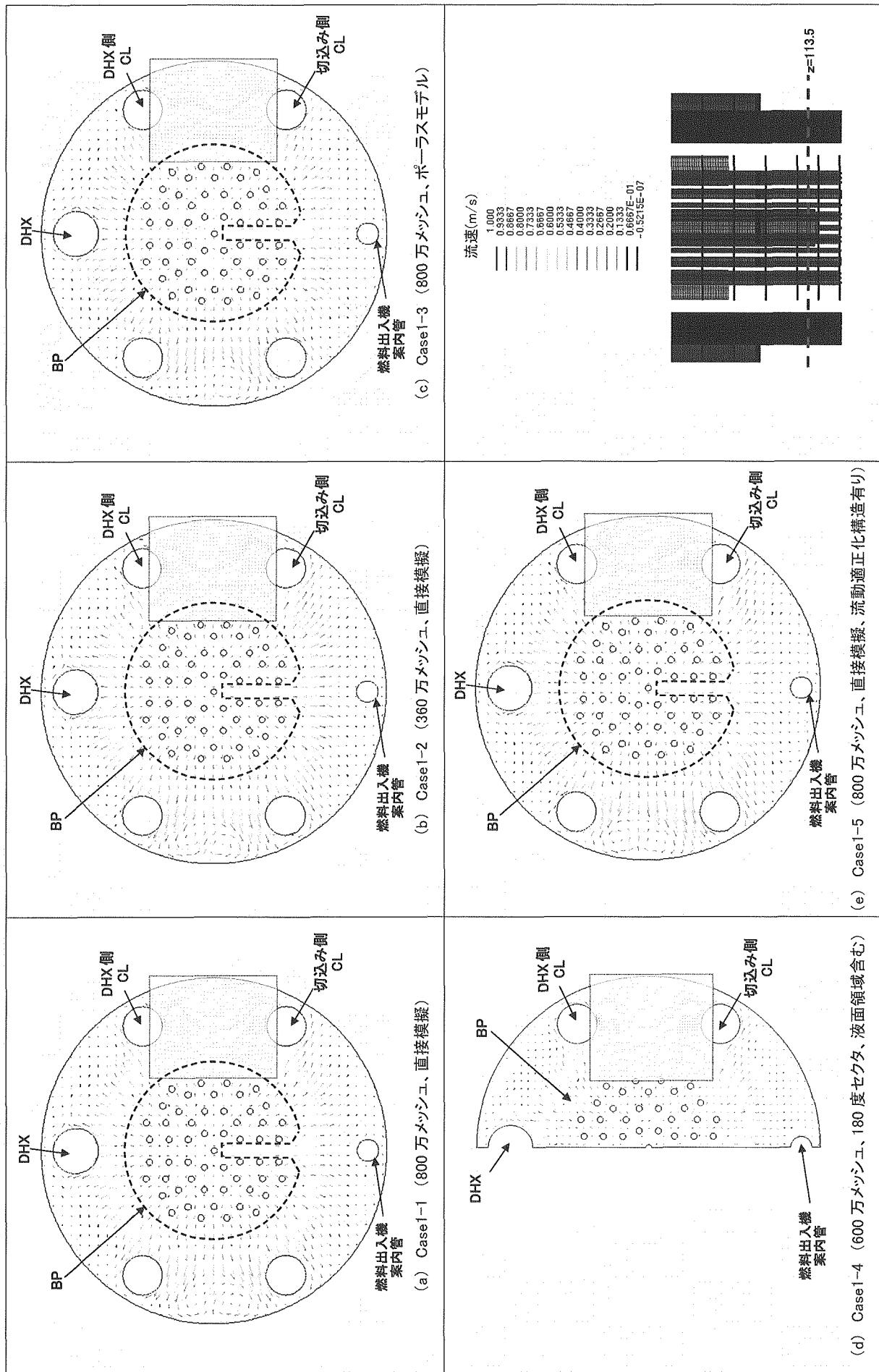


図 3.1.1-8 鉛垂直面流速ベクトル図 (15-195 度)

図 3.1.1-9 水平断面流速ベクトル図 (BP-1 上方:  $z=113.5$ )

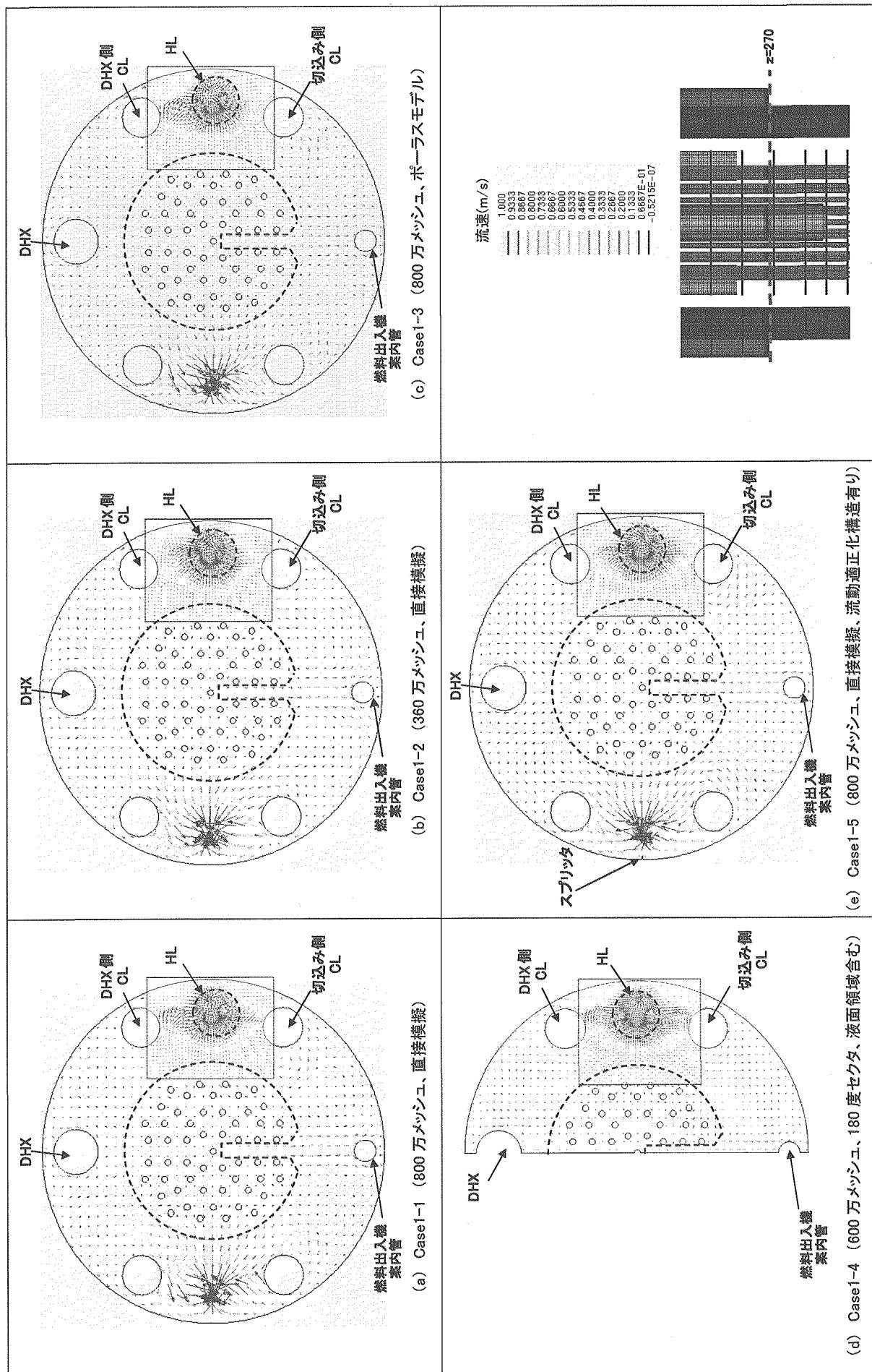


図 3.1.1-10 水平断面流速ベクトル図 (BP-3 上方:z=270)

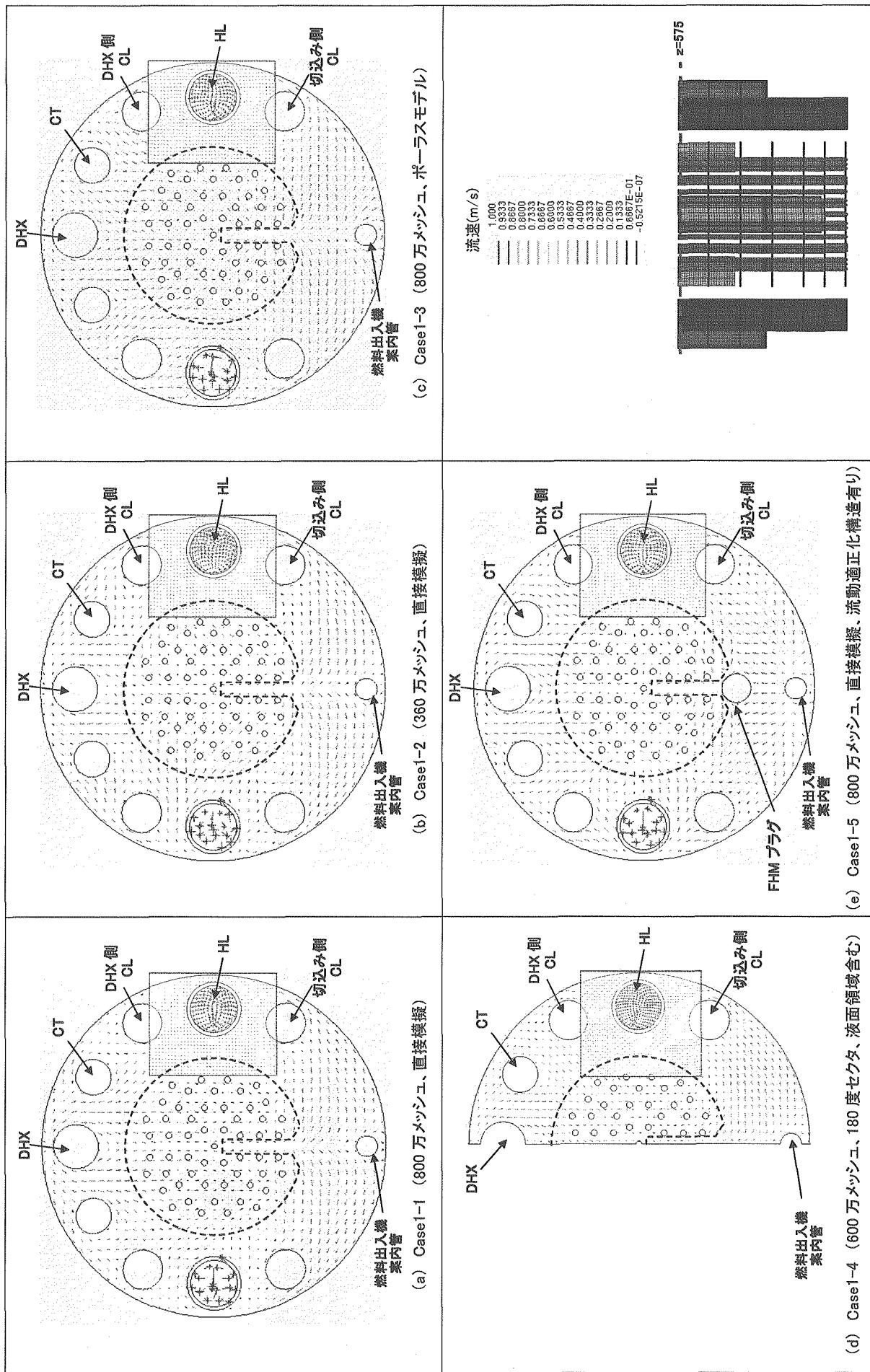


図 3.1.1-11 水平断面流速ベクトル図 (DP 下面近傍・z=575)

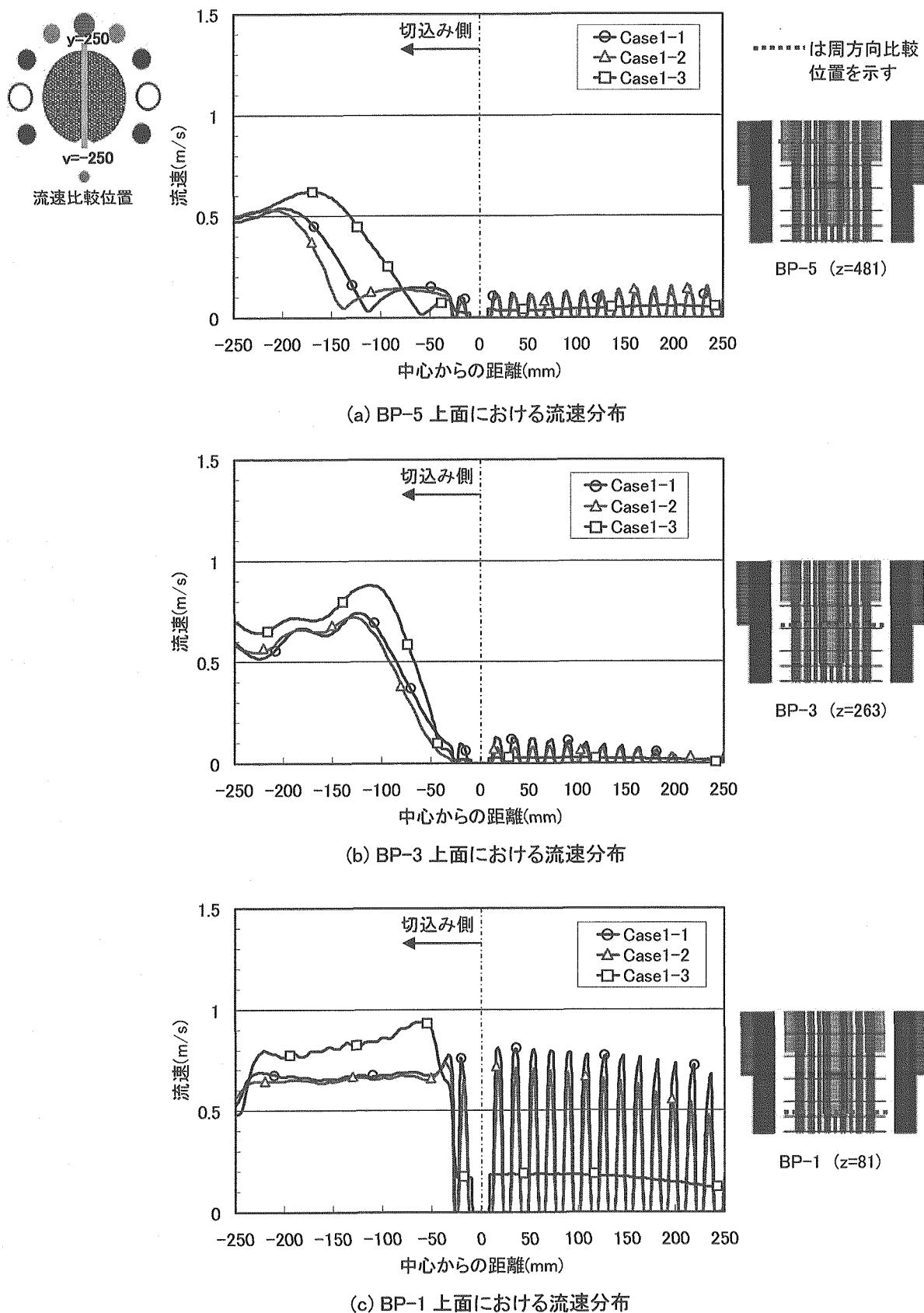


図 3.1.1-12 多孔板を通過する噴流の流速分布（多孔板模擬方法の比較）

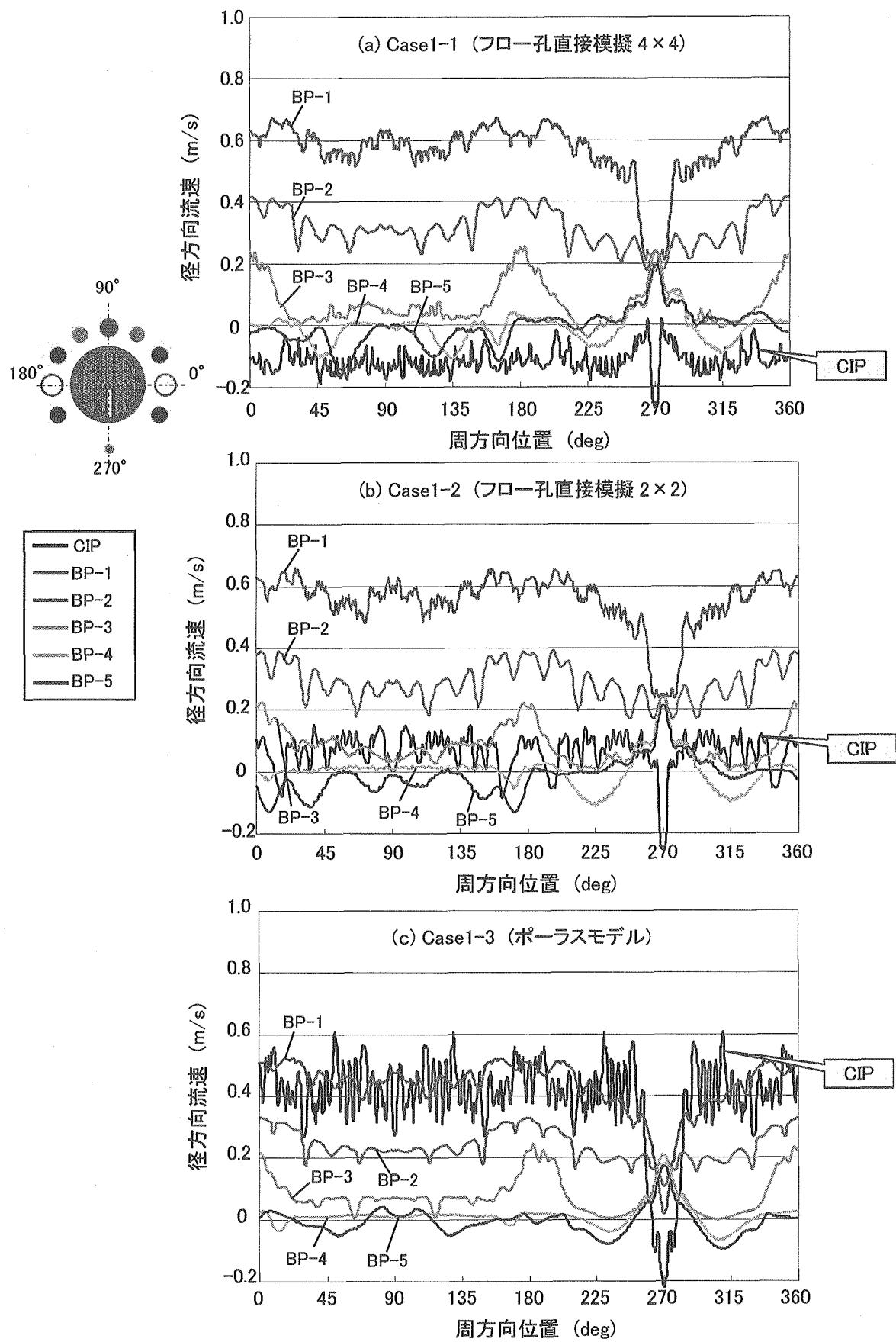


図 3.1.1-13 多孔板周りの径方向流速分布の比較

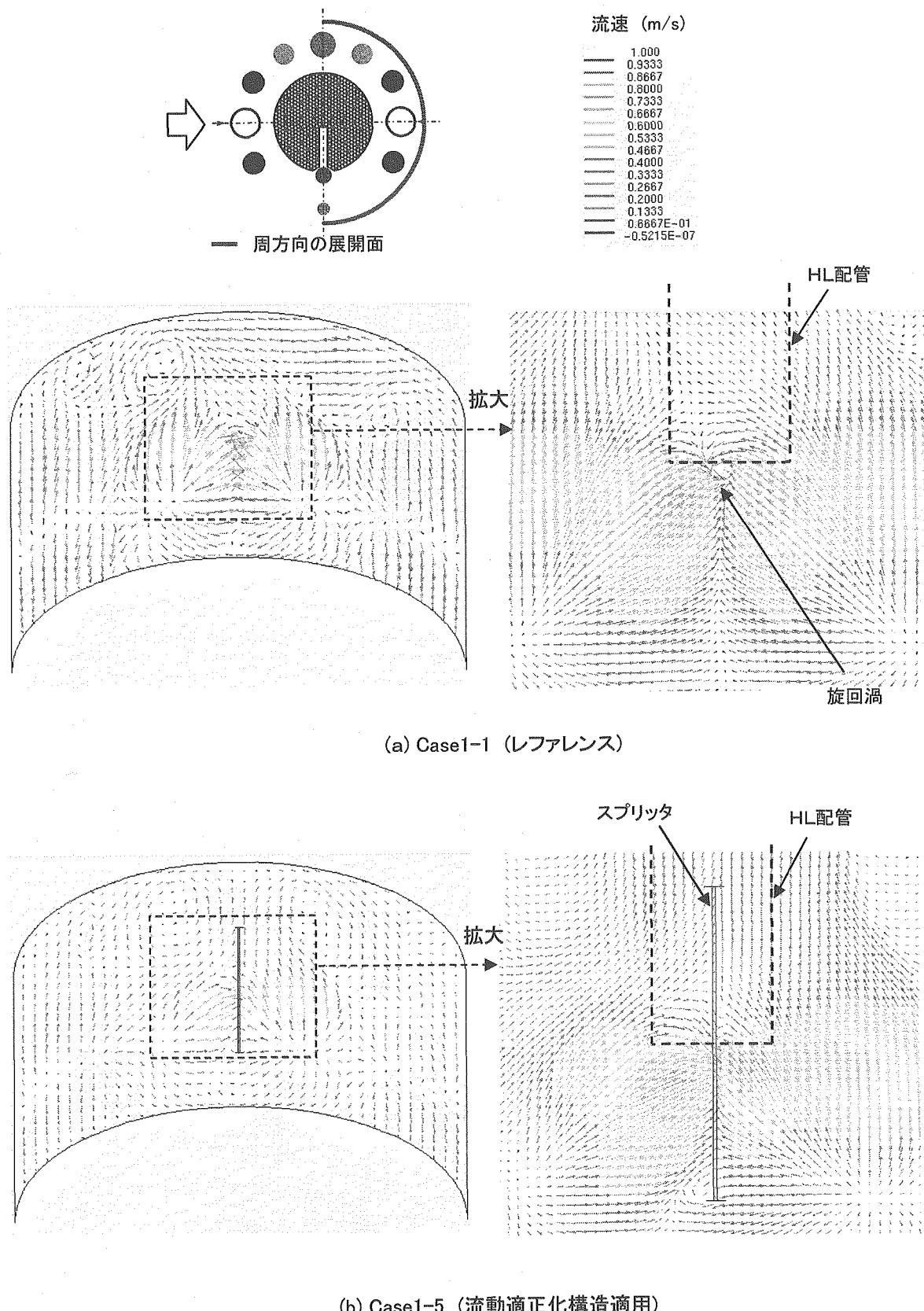


図 3.1.1-14 炉壁近傍での流速分布の比較

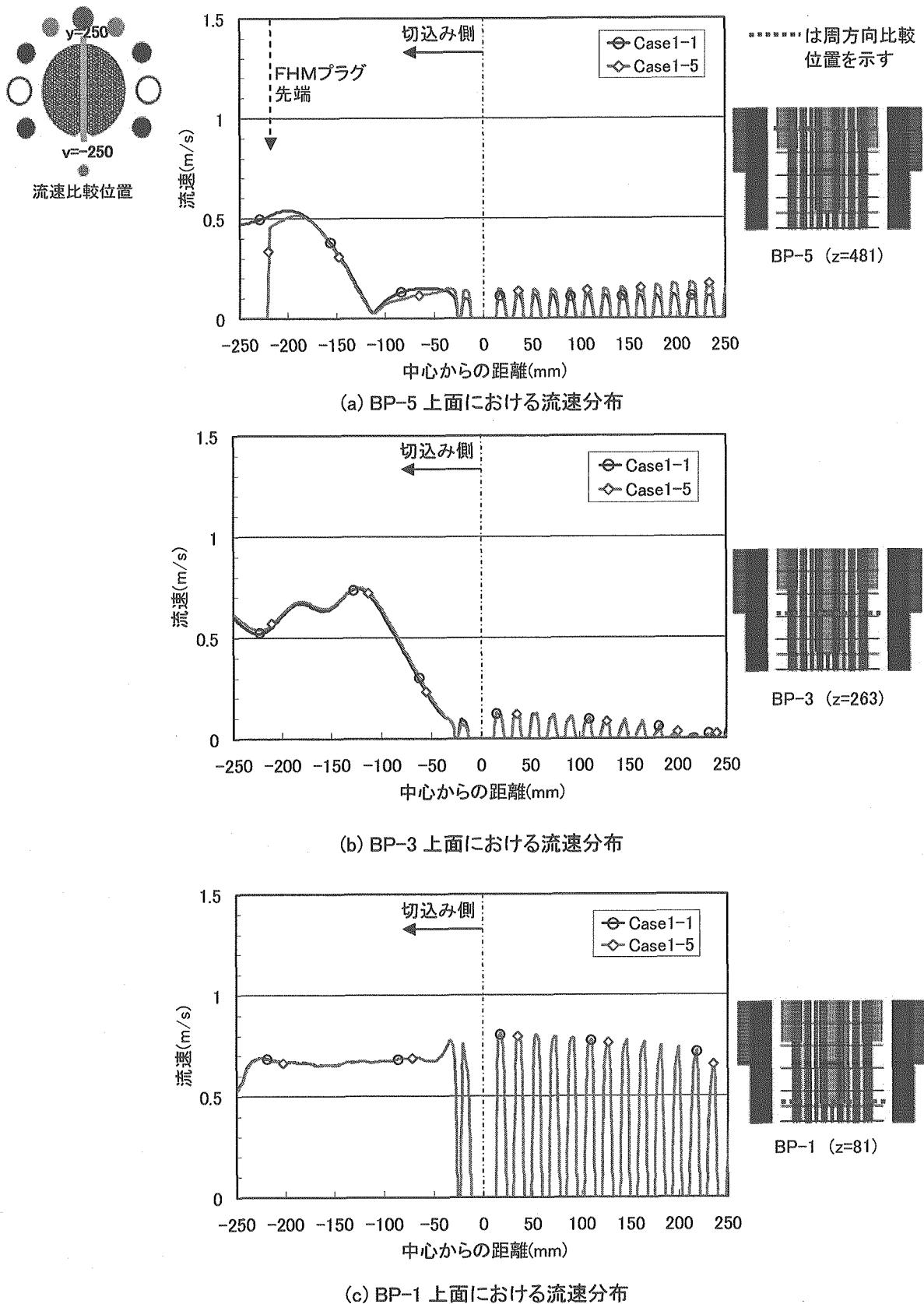


図 3.1.1-15 多孔板を通過する噴流の流速分布（流動適正化構造の影響）

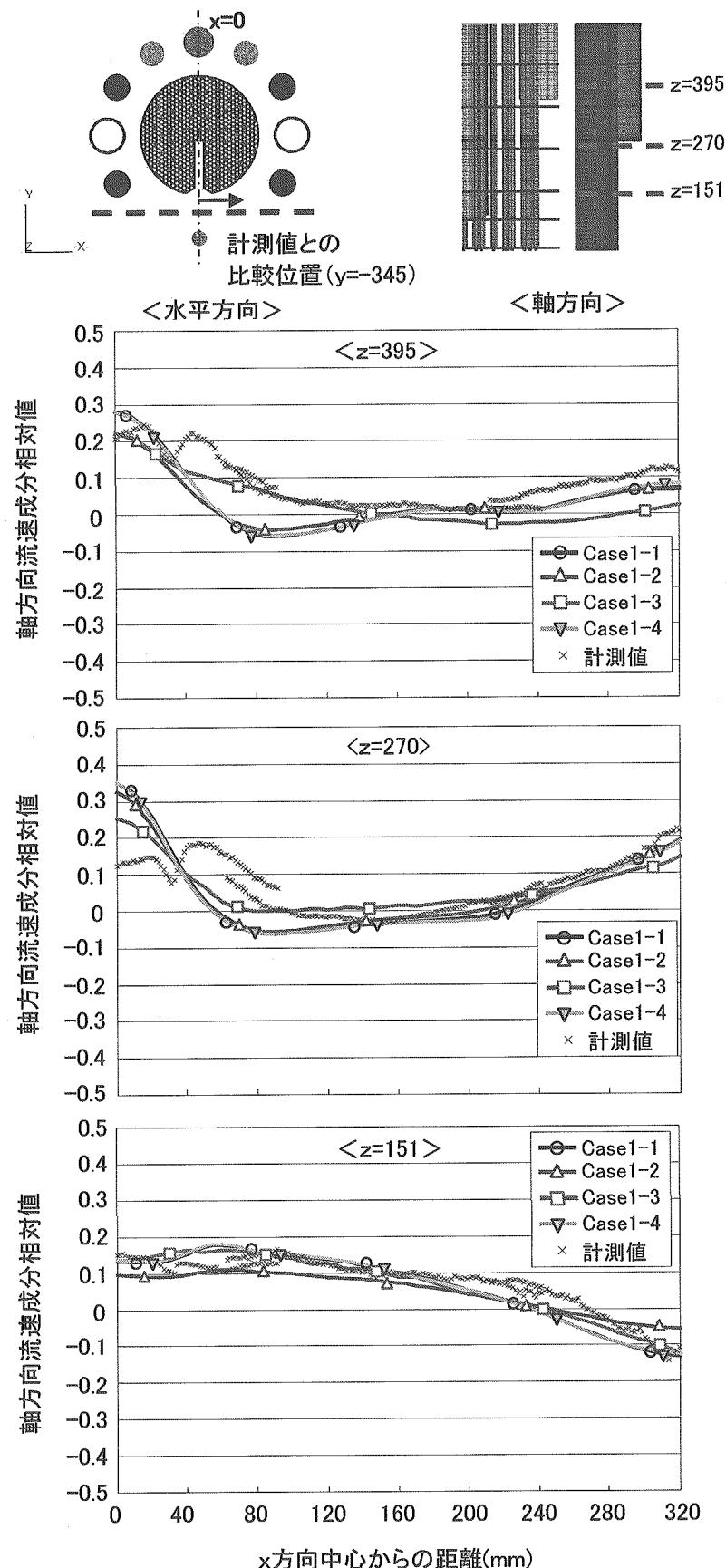


図 3.1.1-16 流速計測値との比較 (UIS外周一燃料出入機案内管)

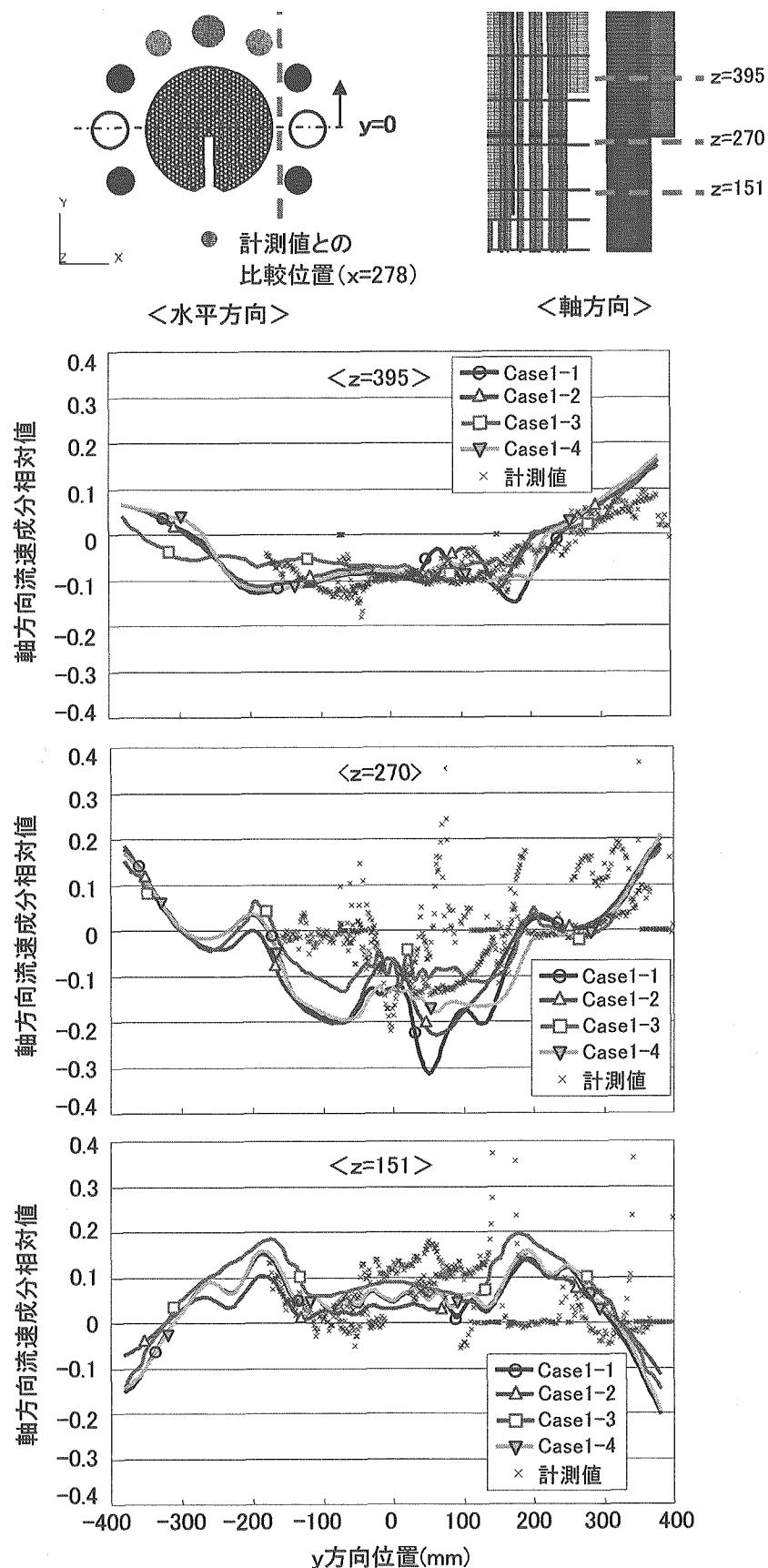


図 3.1.1-17 流速計測値との比較 (UIS外周ーHL配管)

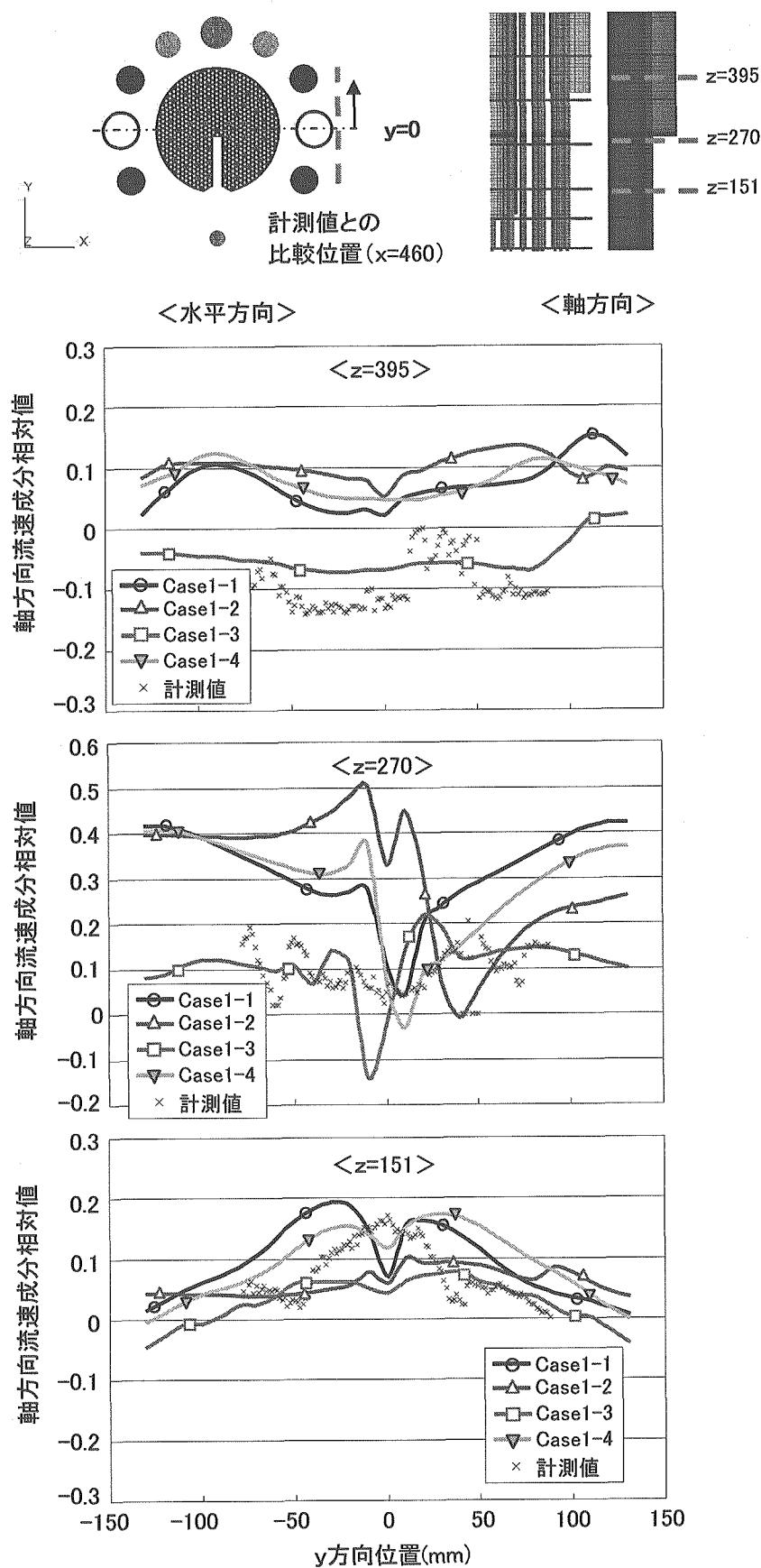


図 3.1.1-18 流速計測値との比較 (HL配管 - 炉壁)

### 3.1.2 二重ディッププレート体系での流況

#### (1) 解析モデルと解析条件

前述のように、試験装置における DP 形状が当初の 1 重体系から設計に準拠した 2 重 DP 体系に変更<sup>[4]</sup>になった。これに伴い、上下 2 枚の DP 間での流況を把握するとともに、全体流況に関して從来の 1 重 DP 体系と大きな相違がないことを確認するため、2 重 DP 体系での定常解析を実施した。

図 3.1.2-1 に、解析モデルを示す。解析領域は、炉心出口から液面までとし、DHX一切込み部を対称とした 180 度セクタモデルで扱っている。メッシュ幅は、水平方向で約 1~17mm、鉛直方向で約 1~20mm に設定し、総メッシュ数は約 210 万メッシュとなった。

また、UIS 切込み部からの噴流を抑制する FHM プラグについては、設計に準拠した段差付き構造が試験パラメータとして検討された。FHM プラグ下端に衝突した噴流の一部はプラグに沿って上昇し DP 貫通部に至る。その際に、FHM プラグに設けた段差（2 枚の DP 中間高さに設定）によって噴流を上下 2 枚の DP 間隙間に流れる水平流に向きを変えて、液面部に達する流速をより低減することを図っている。解析モデルでも、試験体系での段差部の曲率(5mm、当初の実機設計では 30mm)、プラグと DP との間隔等を模擬している。本解析での FHM プラグ挿入レベルは BP-4 であり、前項の Case1・5 と同様、三角柱形状のスプリッタもモデル化している。

乱流モデルに関しては、前項と同様、RNG  $k - \epsilon$  モデルを使用した。対流項の空間離散化手法に関しては、定常解の収束性を向上させる観点からサーベイを行い、ここでは一次風上差分を使用した。

流入条件としては、Fr 数一致条件 ( $=243\text{m}^3/\text{h}$ ) を想定し、装置で設定された流量配分（内側／外側炉心領域 95%、径プランケット領域 5%）に応じて、各領域での平均流速を入口境界条件として与えた。出口境界条件としては、HL 配管上端位置での圧力一定で規定した。また、壁面の境界条件は、自由液面部をスリップ条件とし、その他の壁面はノンスリップ条件とした。

#### (2) 解析結果の検討

##### (i) 全体フローパターン

代表的な鉛直断面での流速ベクトル図を、従来の 1 重 DP 体系での解析結果（DP 以外は、図 3.1.2-1 とほぼ同じモデル）と比較して図 3.1.2-2～図 3.1.2-3 に示す。

UIS 中心と HL 配管中心を通る 0-180 度断面での流速ベクトル図を図 3.1.2-2 に示す。DP 体系に依存せず、炉心からの噴流は UIS 内で CIP、BP-1、BP-2 を通過するにつれて流速が低下しており、BP-1 外周から HL 配管へ向かう流れが主流となっている。また、スプリッタ近傍の HL-炉壁の隙間では DP 下面から HL 配管吸込み口に向かう下降流となっている。

UIS 切込み部と DHX を通る 90-270 度断面における流速ベクトル図（左側：切込み部、右側：UIS 内部-DHX）、並びに切込み部外周近傍での PIV 計測結果<sup>[4]</sup>を図 3.1.2-3 に示す。DHX 側で

は、前項での解析結果と同様、BP-1 外周からの吐出流れが DHX 下端に衝突し、DHX 側壁に沿う上昇流と DHX 下面に沿う水平流に分離している。また、UIS 内部では、BP-2 上方の流速が低下する傾向となっている。

切込み側でも同様に、切込みからの噴流の境界がやや炉壁側に傾斜している。しかし、噴流の一部が FHM プラグ側面に衝突して FHM プラグに沿って DP に向かう上昇流や、FHM プラグ下端に一旦衝突して燃料出入機案内管に沿って上昇する傾向が再現できている。これらの結果より、DP 形状によらず、DP 下方領域での流況は両者ほぼ一致していることがわかった。

#### (ii) DP 貫通部近傍

次に、主要構造物が DP を貫通する部分での流況を比較した。

##### (a) HL 配管貫通部

HL 配管貫通部近傍での流速ベクトル図を図 3.1.2-4 に示す。炉壁側の隙間部においては、DP 形状によらず、外側 DP-炉壁、HL 配管-外側 DP の間でいずれも下降流となっている。UIS 側の隙間については、外側 DP-HL 配管の間で下降流（最大 0.14m/s）となっており、HL 配管での吸込みの影響が及んでいると考える。

なお、2重 DP の場合には、上段-内側 DP と下段-外側 DP に設けられたリブによって、内側 DP-外側 DP の隙間部でラビリンスを形成するように工夫している。その結果、上段 DP からの下降流の流れの向きが変えられ、下段-外側 DP のリブに衝突した流れの一部は、下段-外側 DP に沿って HL 配管側に向かう上下 DP 間の水平流れも見られる。

1重 DP の場合では、外側 DP 上の仕切り板と内外 DP 間の上下方向のギャップが設けられている。これにより、仕切り板からの下降流が内外 DP 間に流入して DP 下方に向かうフローパターンが形成され、2重 DP 体系でのラビリンス構造と同等の機能を果たしていると考える。

##### (b) FHM プラグ貫通部

FHM プラグ貫通部近傍での流速ベクトル図を図 3.1.2-5 に示す。図の右側が内側 DP との隙間部、左側が外側 DP との隙間部を示している。

2重 DP 体系の場合には、FHM プラグを段差付き構造としている。これにより、UIS 切込み部からの噴流が FHM プラグの下端や側面に衝突して DP に向かう強い上昇流が FHM プラグと内側 DP 間に形成される。しかし、FHM プラグに設けた段差により、プラグ壁面に沿った上昇流が向きを変えられて、上段-内側 DP 下面に沿って UIS 中心部に向かう水平流れが形成される。

ただし、試験体系では、段差部の曲率 (5mm) や FHM プラグ-内側 DP 間の隙間 (5mm) が、実機設計に対する縮尺比よりも大きく設定されているため、上段-内側 DP と FHM プラグの隙間から液面部に向かう上昇流（最大 0.2m/s）も見られる。この結果より、液面部への通過流量をさらに低減するためには、FHM プラグ段差部の曲率や FHM プラグ-DP 間のギャップ幅を調整

すること対応可能であると考える。一方、外側 DP との隙間部においては、段差によってプラグに沿った上昇流がほとんど上下 DP 間の水平流れとなる傾向を示している。

これに対して、1重 DP の場合には、内側 DP とプラグ間の隙間部を最大 0.35m/s 程度で通過し、そのまま液面部に上昇していく傾向を示している。

#### (c)燃料出入機案内管貫通部

燃料出入機案内管貫通部近傍での流速ベクトル図を図 3.1.2-6 に示す。図の右側が FHM プラグ側の隙間部、左側が炉壁側の隙間部を示している。

この断面でも、DP 形状によらず、隙間部のフローパターンはほぼ一致している。燃料出入機案内管に沿って上昇する流れは、FHM プラグ側の隙間部で約 0.3m/s、炉壁側の隙間部で約 0.2m/s 程度となっている。

なお、図 3.1.2-3 に示した PIV 計測結果では、燃料出入機案内管に沿って液面に向かう上昇流は 0.1m/s 以下となっている。この相違については、解析における切込みからの噴流の上昇角度がやや炉壁側に傾斜する傾向を示し、その結果、噴流が燃料出入機案内管に衝突する範囲が拡大し、試験結果よりも案内管に沿って DP 側に向かう流速を過大評価したものと考えている。

#### (d)上下 DP 間水平断面

2重 DP 体系を対象として、上下 DP 間中間位置での水平断面におけるフローパターンを図 3.1.2-7 に示す。この図は、水平方向の流速成分をベクトルで、軸方向の流速成分をカラーで表示している。

各構造物と DP との隙間を通る軸方向流速に関しては、FHM プラグ及び燃料出入機案内管の UIS 切込み側に面する部分で上昇流（約 0.3m/s）が顕著となっている。炉壁一外側 DP 間については、HL 配管を中心として両側の CL 配管までの領域で下降流、DHX-CL 配管及び燃料出入機案内管-CL 配管までの領域では上昇流となっている。なお、内外 DP 隙間部では、わずかに下降流となっている。

水平方向流れについては、段差を設けた FHM プラグ貫通部からの流入が支配的となっている。また、内外 DP の隙間近傍や切込み側 CL 配管近傍での炉壁一外側 DP 隙間部、さらに DHX や CT 貫通部周りからの流入も見られる。なお、燃料出入機案内管周りの上昇流は、図 3.1.2-6 に示したように上段 DP を通過するため、この領域での水平方向流速は非常に小さくなっている。このような水平流は、HL 配管貫通部等を通過して DP 下方に戻る流れが形成されている。

以上のように、2重 DP 体系の場合、FHM プラグの段差構造により、DP 下方領域から液面部に向かう上昇流の一部を DP 間の水平流に変更して液面部への流入量を抑制できる見通しが得られ、解析上も二重 DP 構造と段差付き FHM プラグの有効性を確認した。

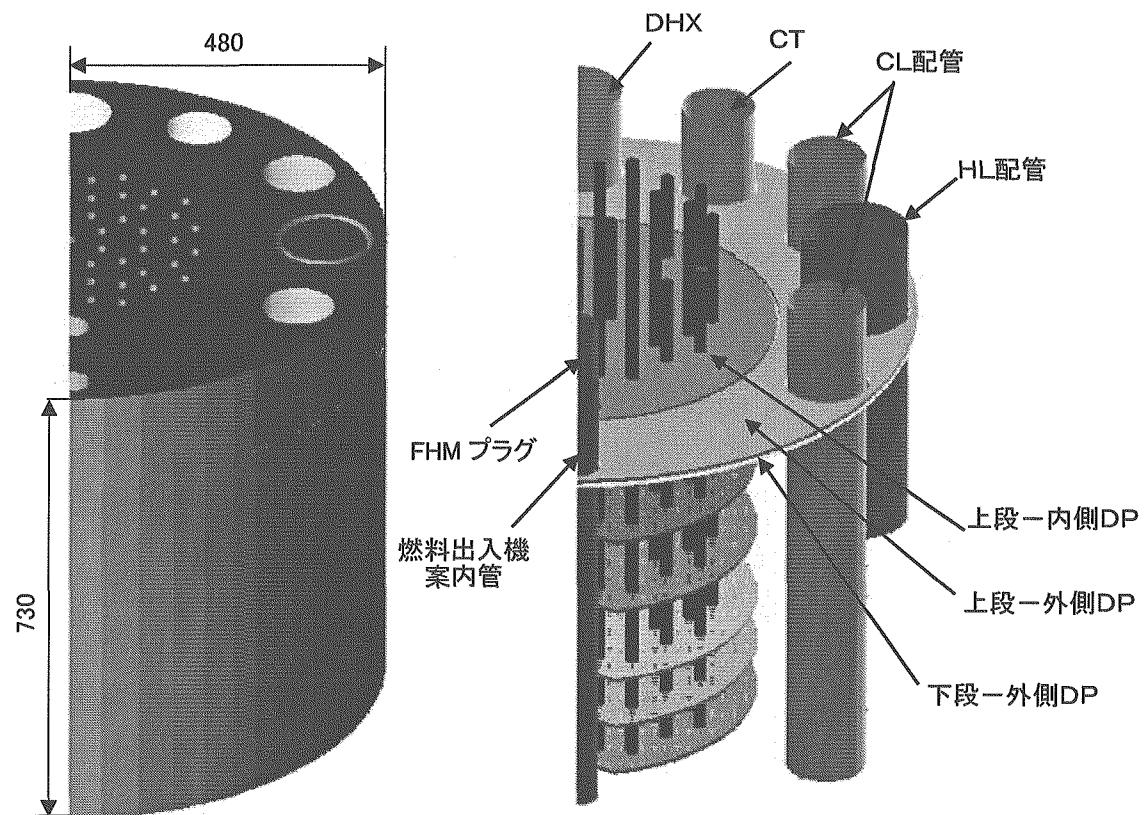
### (iii) 液面近傍での流速分布

2重DP及び1重DP体系の液面近傍(液面レベルより1cm下)における流速分布を図3.1.2-8に比較して示す。

1重DP体系の場合、燃料出入機案内管と炉壁の隙間部からの流れとFHMプラグからの噴出し流れが合流する部分で最大流速約0.13m/sを示している。一方、FHMプラグを段差付き構造とした2重DP体系では、図3.1.2-5に示したように、FHMプラグに沿ってDP隙間部を上昇する流れを抑制できることから、最大流速は約0.12m/sとなり、1重DP体系よりもわずかに液面流速を低減できる結果となった。この液面部においても、両者のフローパターンに大きな相違は見られなかった。

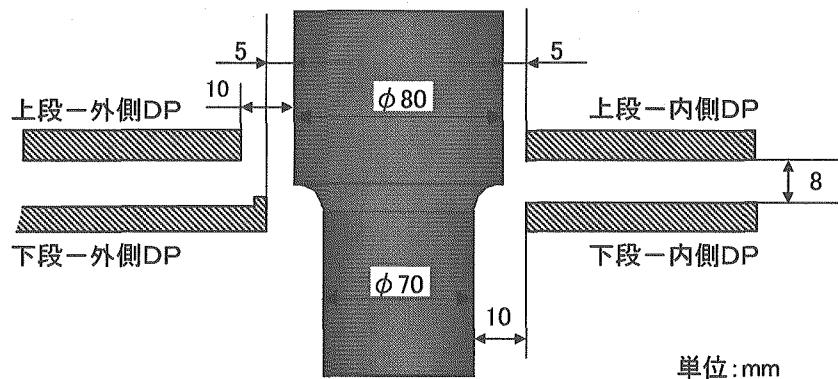
なお、1/10縮尺プレナム試験では、前述のようにDP貫通部のギャップ幅等は実機設計の縮尺比よりも大きめに設定されており、さらにラビリンス構造の一つである炉壁-外側DP隙間部に設けるL字板を設けていないため、液面部への流入量は実機体系よりも過大となっていると考えている。

また、今回の試験結果から、FHMプラグ段差部の曲率が上下DP間の水平流れの形成、さらには液面部への通過流量に影響することが明らかになった。そこで、試験結果を反映して、最新の実機設計では、プラグ段差部の曲率を30mmから5mmまで縮小し、FHMプラグに沿って上昇する流れを確実に上下DP間の水平流れとして導けるようにFHMプラグ形状の見直しを図っている。



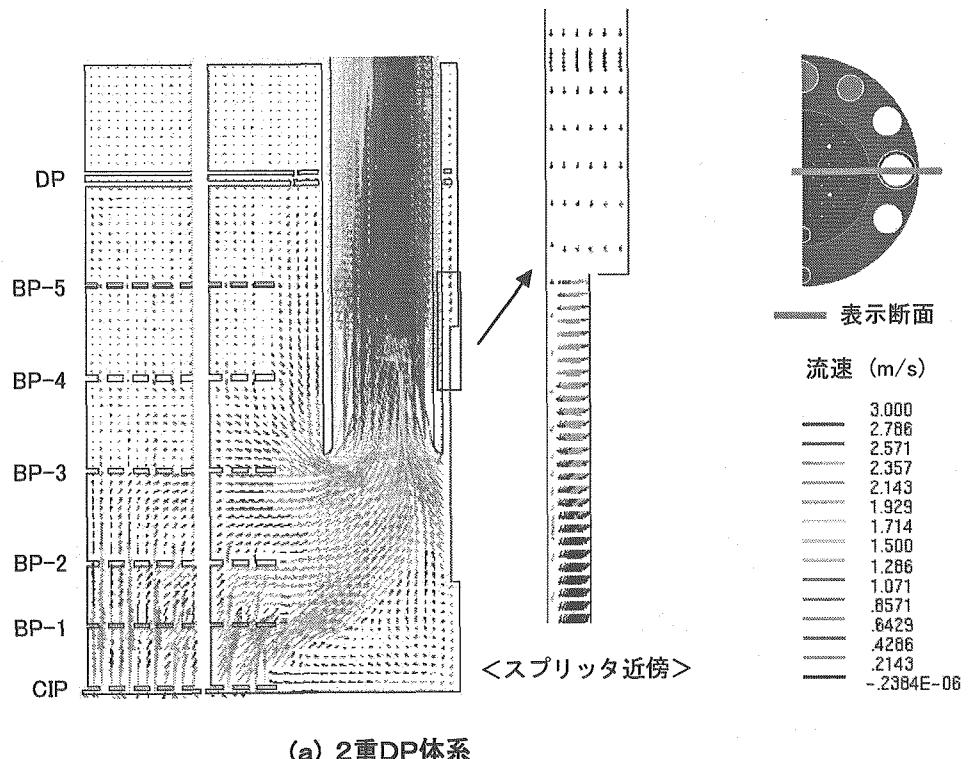
<流体メッシュ>

<解析体系図(構造材のみ)>

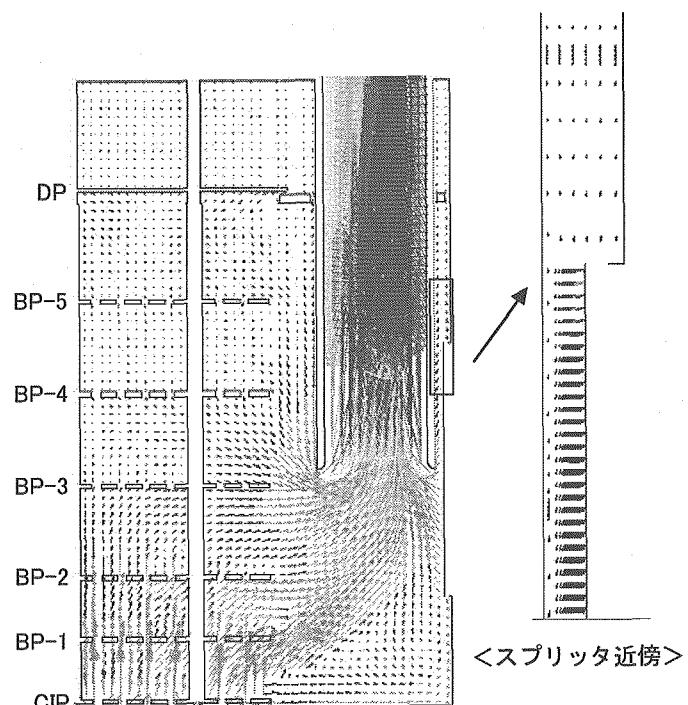


<段差付きFHMプラグ>

図 3.1.2-1 2重ディッププレート体系解析モデル



(a) 2重DP体系



(b) 1重DP体系

図 3.1.2-2 鉛直断面流速ベクトル図 (0-180 度)

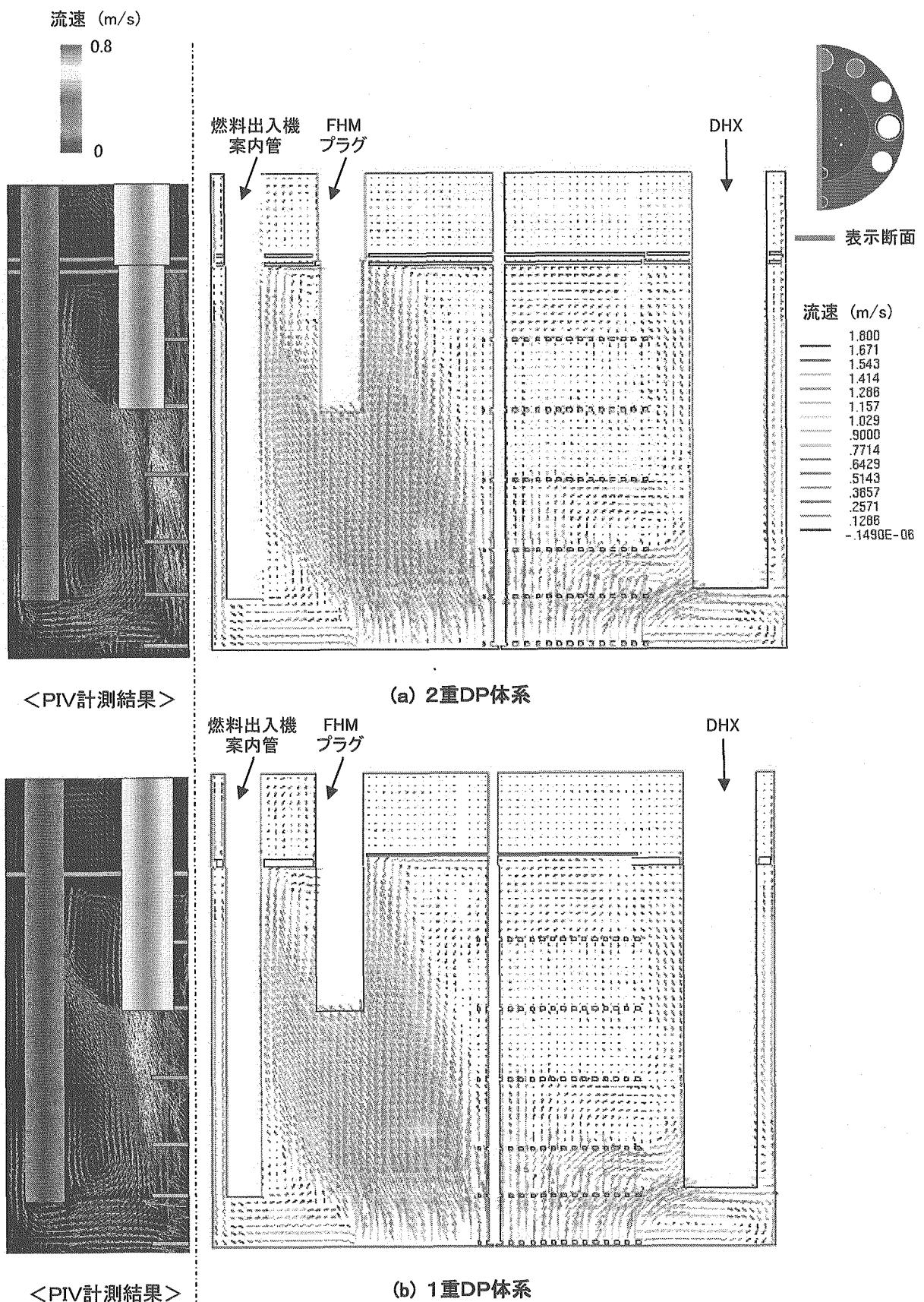


図 3.1.2-3 鉛直断面流速ベクトル図 (90-270 度)

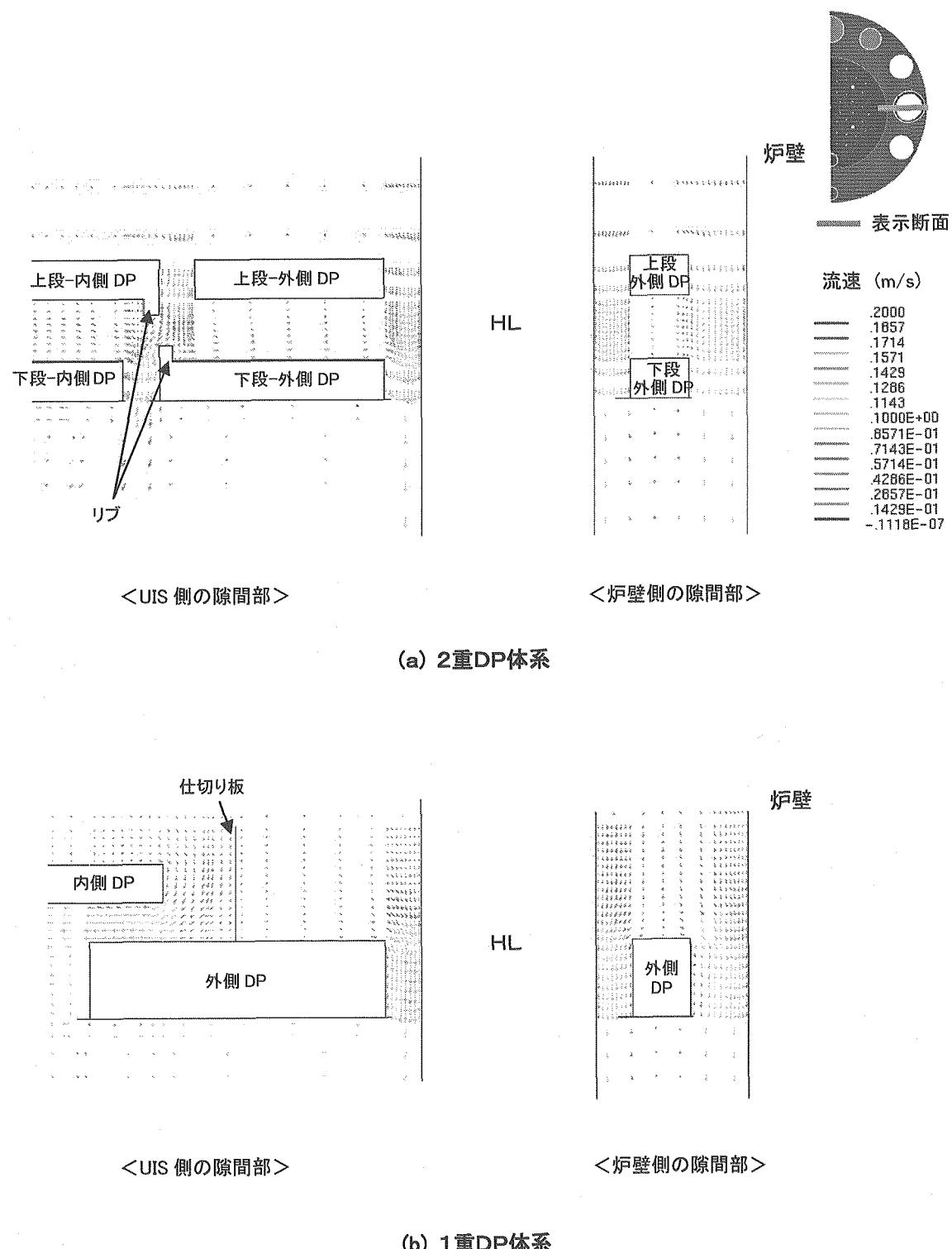


図 3.1.2-4 HL配管貫通部近傍の流速ベクトル図

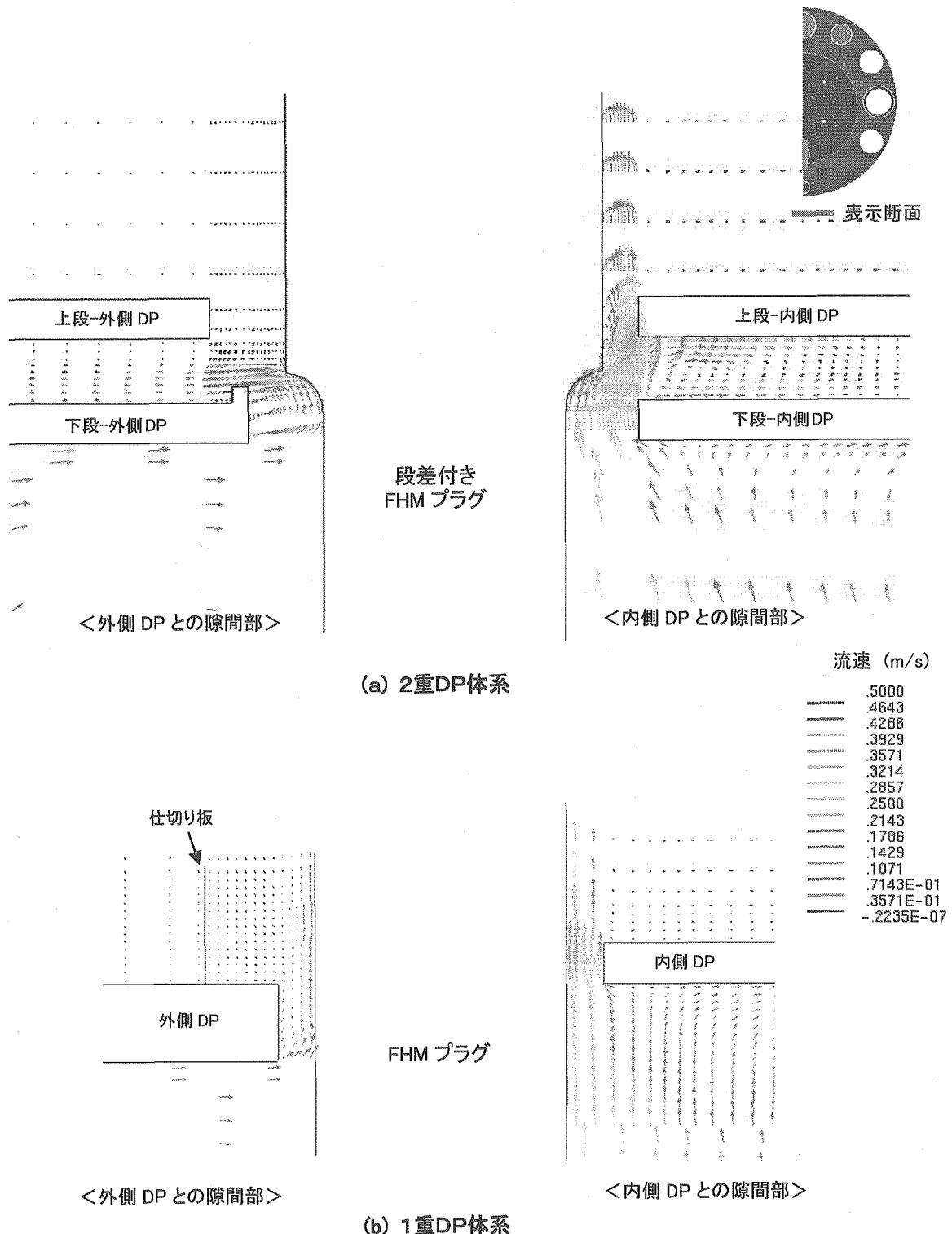


図 3.1.2-5 FHMプラグ貫通部近傍の流速ベクトル図

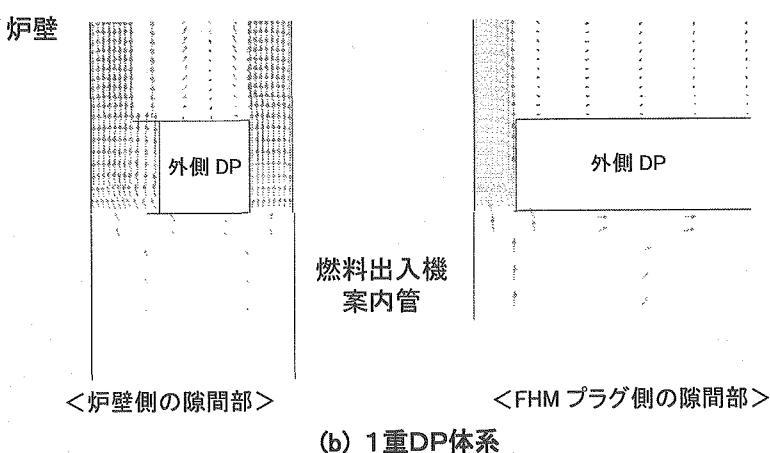
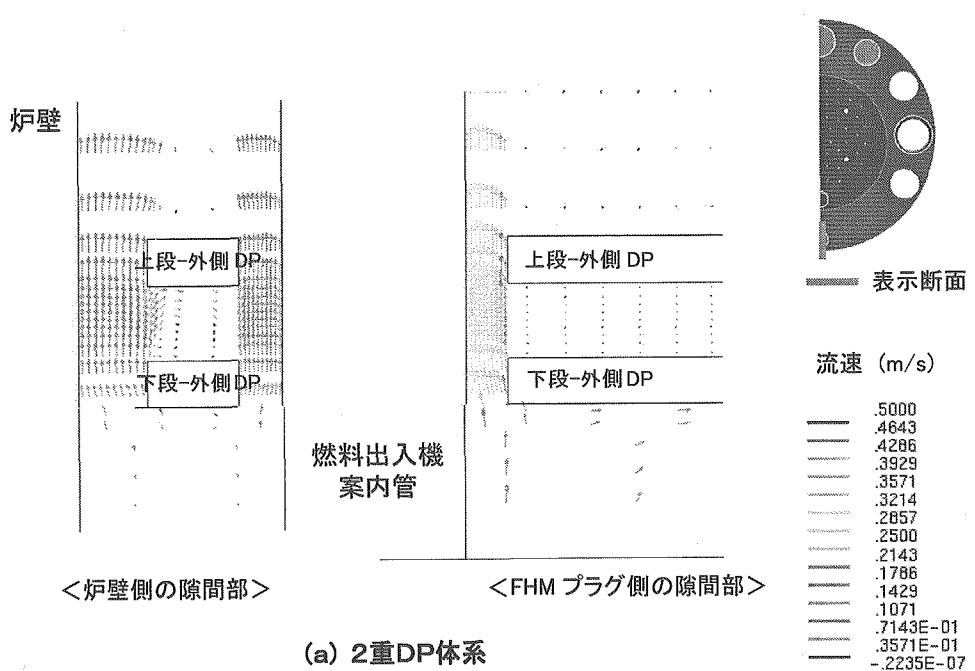


図 3.1.2-6 燃料出入機案内管貫通部近傍の流速ベクトル図

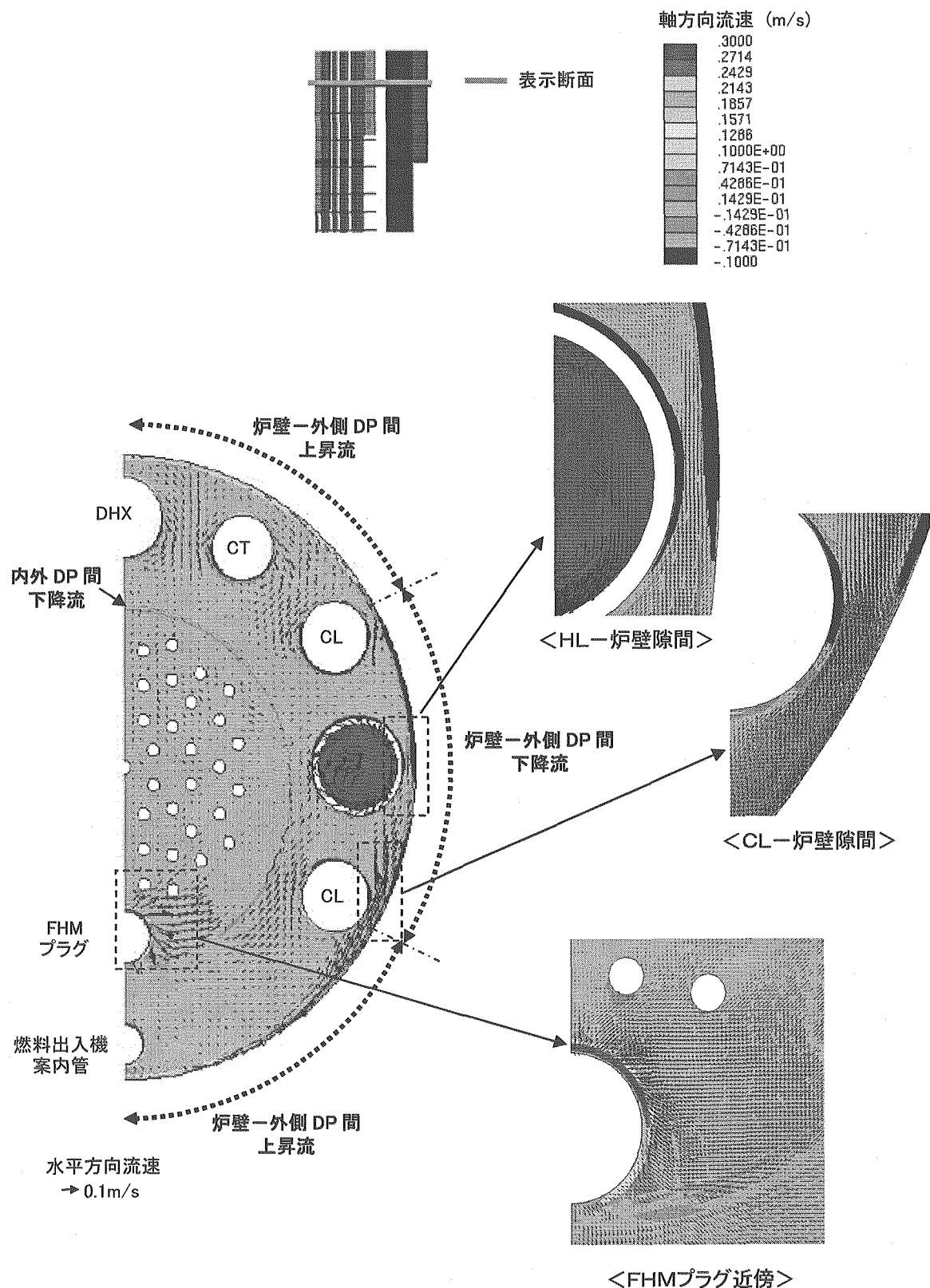


図 3.1.2-7 上下DP隙間領域でのフローパターン

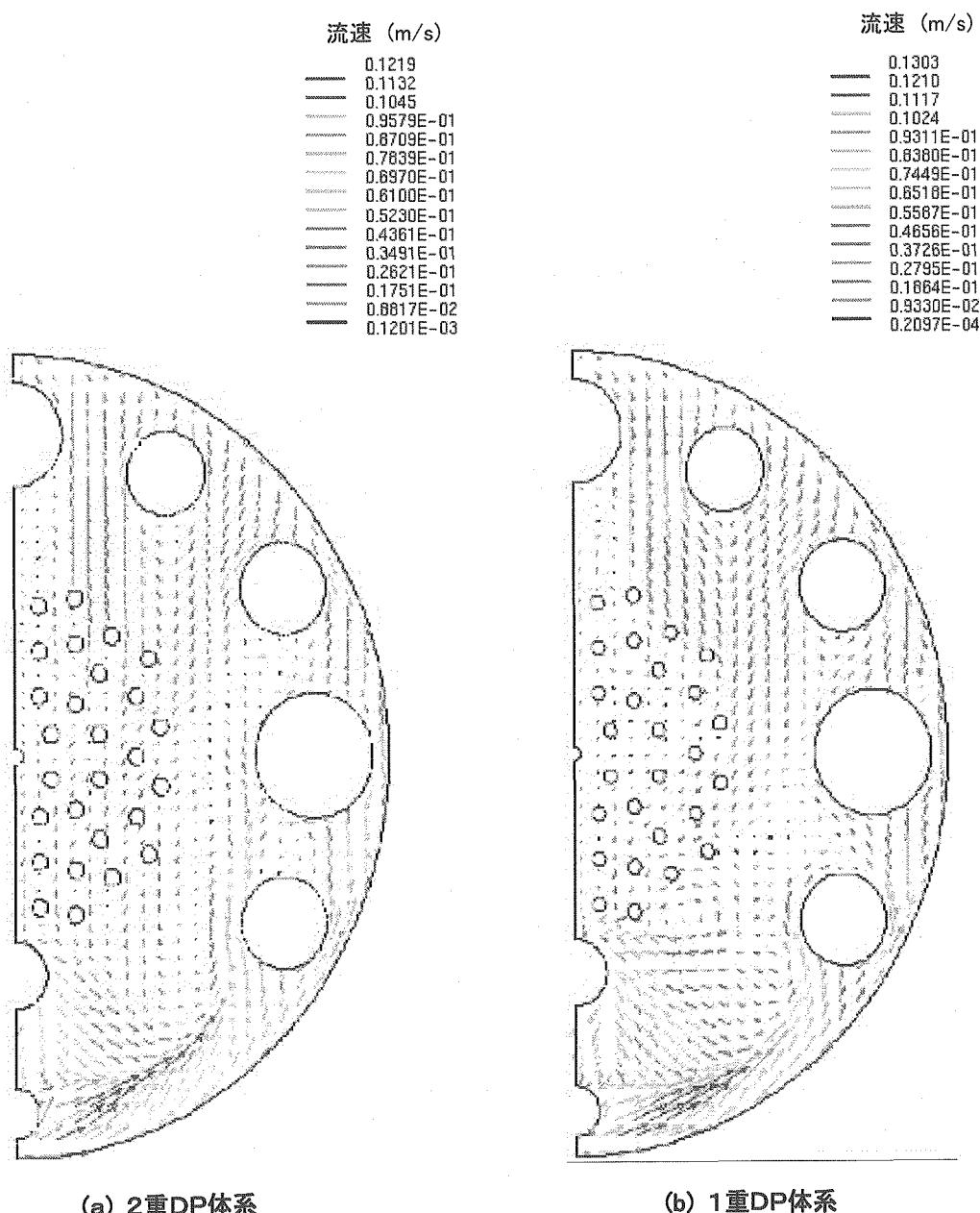


図 3.1.2-8 液面近傍の流速分布の比較

### 3.1.3 実機体系での解析との比較

スケール効果や流体物性値の影響を確認する観点から、1/10 縮尺水試験体系の解析モデルをベースに、スケールを 10 倍、流体をナトリウム、実機流量としたモデルを作成し、実機体系と 1/10 水試験体系 ( $Fr$  数一致条件) での代表断面でのフローパターンを比較した。

図 3.1.3-1 に解析モデルを示す。解析領域は、炉心出口から DP 下面まで (180 度セクタモデル) としており、全メッシュ数は約 60 万である。数値解法は、乱流モデルを  $k - \varepsilon$ 、離散化手法を 1 次風上 (UD) としている。

図 3.1.3-2～図 3.1.3-4 に、代表的な鉛直／水平断面での流速ベクトル図を示す。入口境界となる実機体系での炉心出口流速は、試験体系での約  $\sqrt{10}$  倍となっている。図よりわかるように、HL 配管吸込み部近傍や、UIS 切込み部-DHX 断面での鉛直断面でのフローパターンは、ほぼ一致する結果となっている。また、UIS 内部から HL 配管側への流入や DP 下面でのフローパターンもほぼ一致している。

このように、上部プレナム内の主要な流況は実機体系と水試験体系で定性的に一致しており、今回の解析では、スケール効果や流体物性の相違はほとんど影響しない結果となった。

なお、1/10 縮尺水試験体系では、装置スケールの観点から、実機で配置される炉内計装関連の構造物（液位計や中性子計装案内管等）に加え、図 2.1-2 に示した DP のラビリンス構造も模擬していない。したがって、これらの構造物に関しても今後解析モデルに追加していくことで、本報告で検討した解析モデルが実機体系の詳細評価に適用できると考える。

さらに、付録として、境界条件（出口部、入口部、フロー孔壁面）の設定方法や、UIS 水平板のフロー孔模擬方法、数値解法（乱流モデルと空間離散化手法の組合せ）等をパラメータとしたサーベイ結果をまとめた。フロー孔口径の大小や離散化手法の選択によって、全体流況が変化する傾向を示すことがわかり、流動解析モデル作成に関する有益な知見を得た。

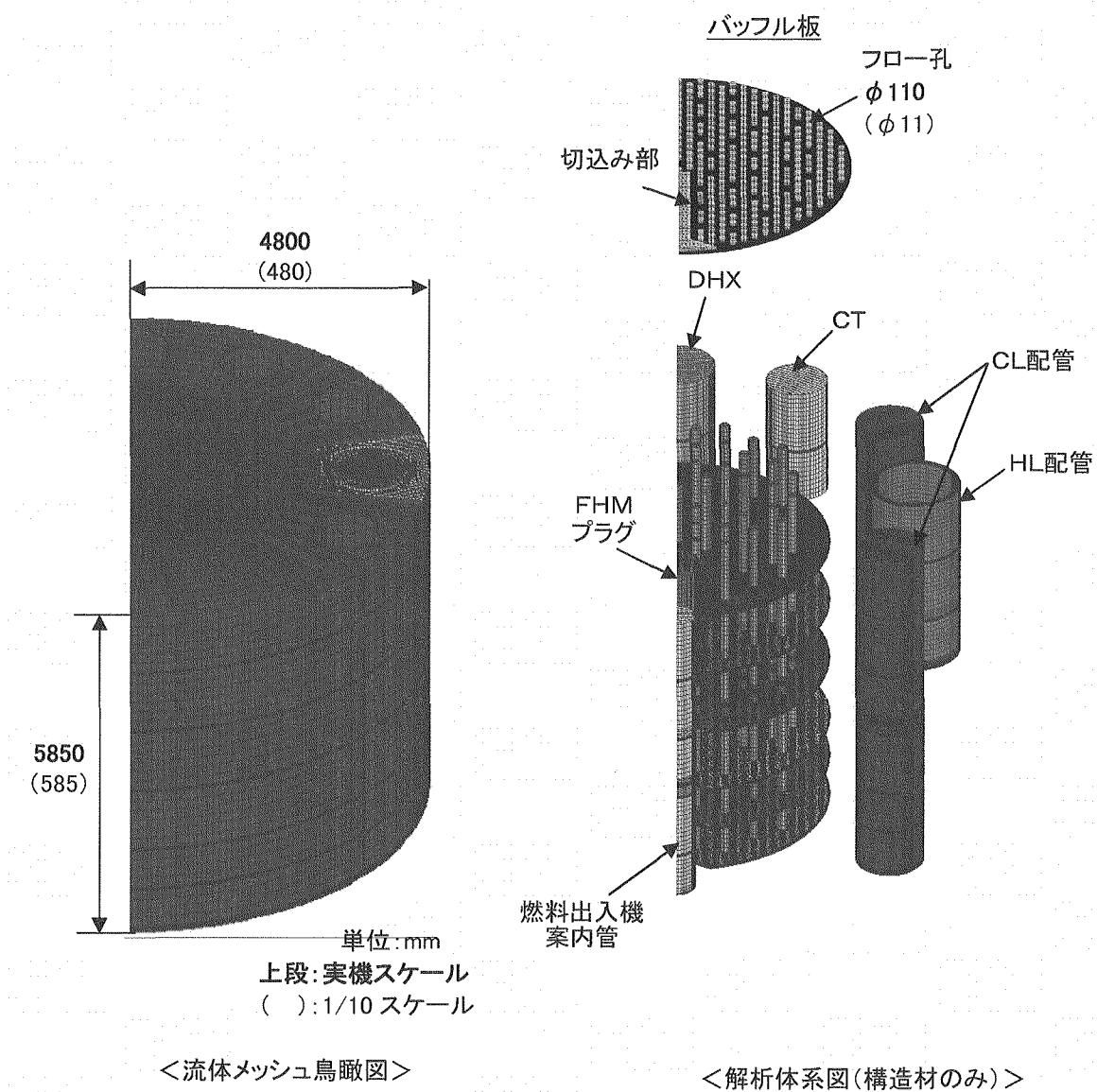


図 3.1.3-1 解析体系全体図

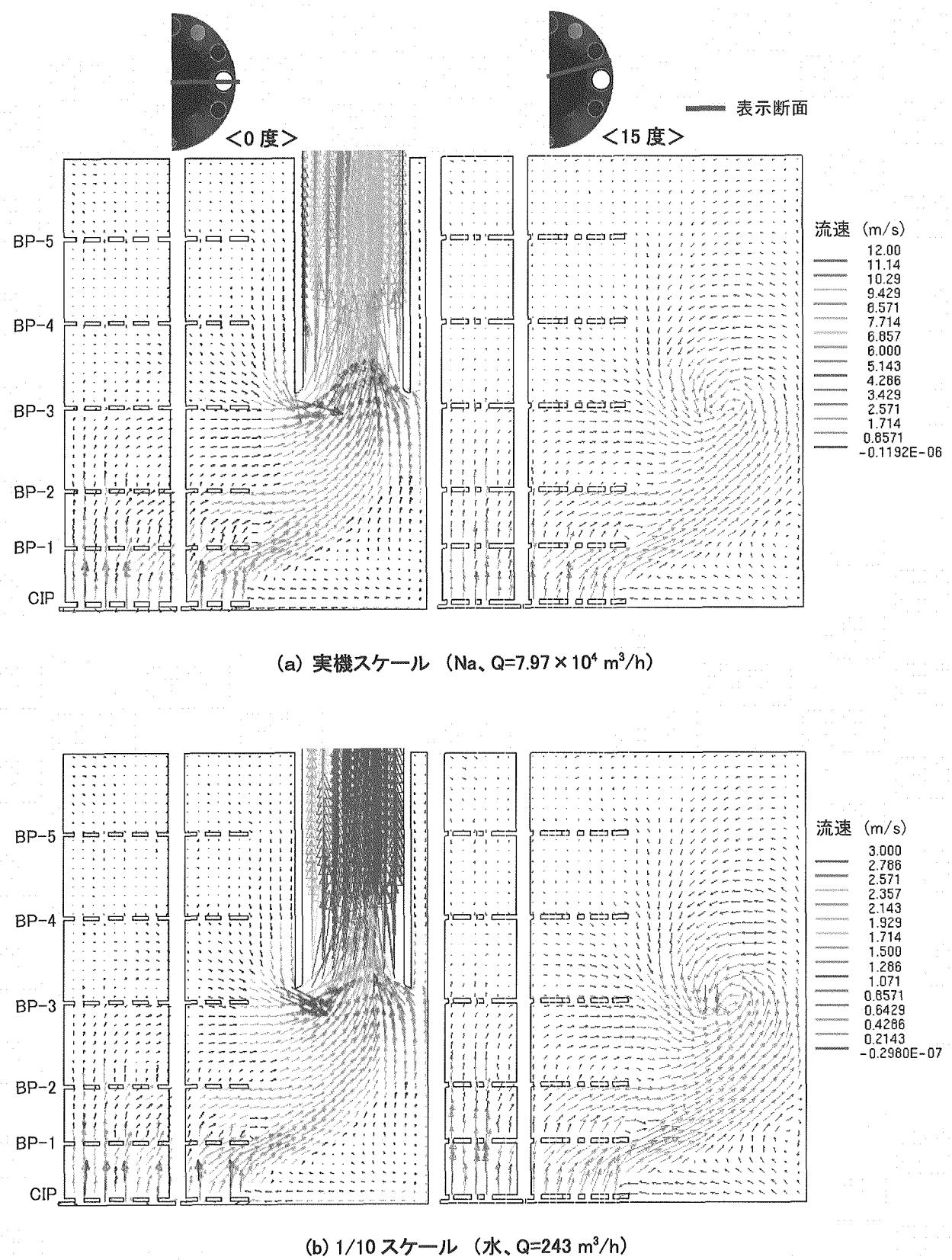


図 3.1.3-2 鉛直断面流速ベクトル図 (1/2)

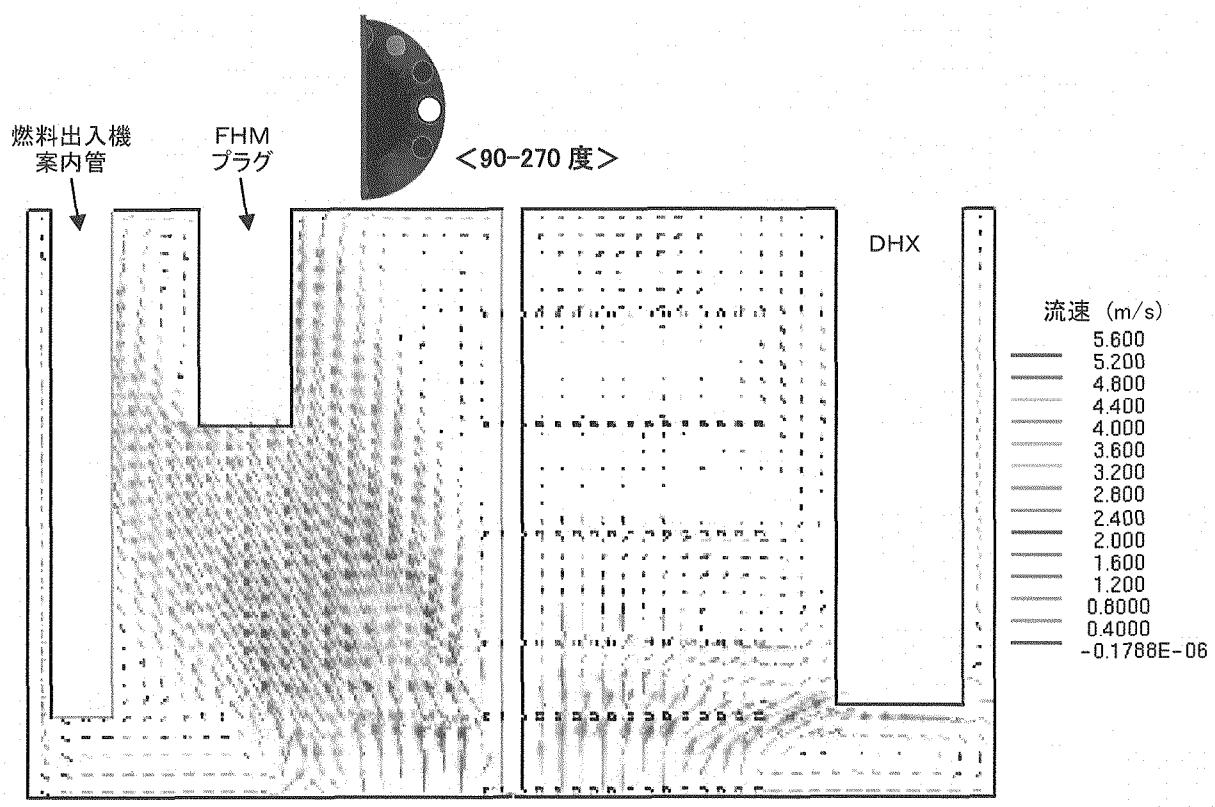
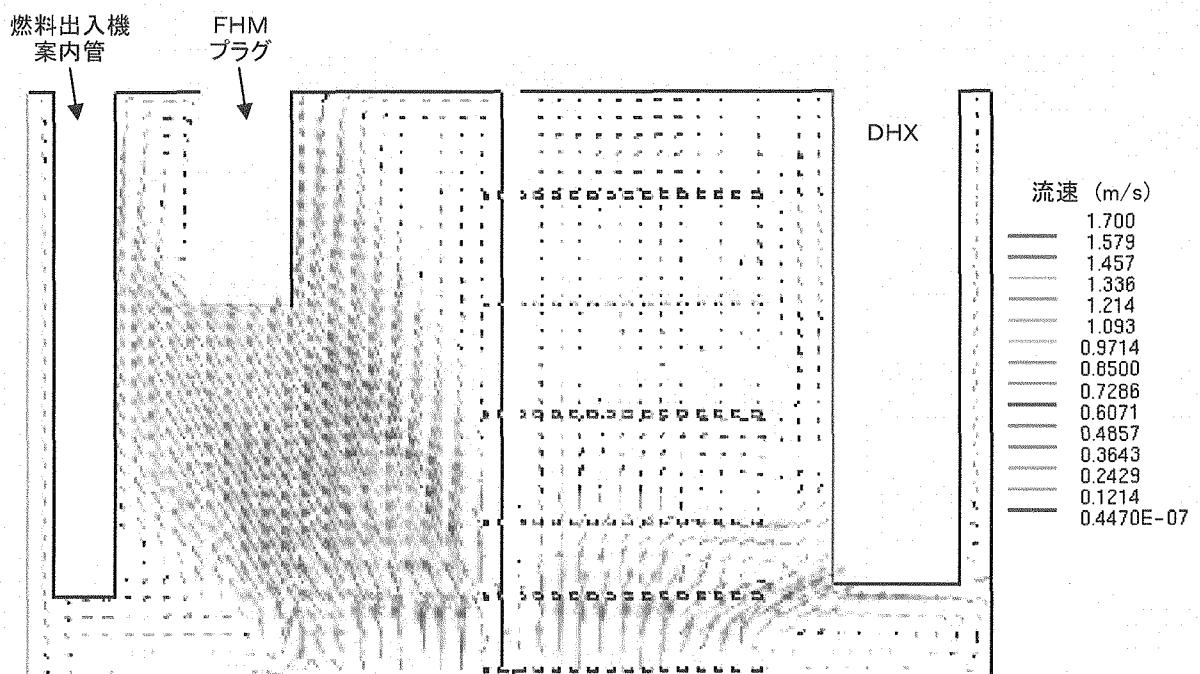
(a) 実機スケール ( $\text{Na}, Q=7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ )(b) 1/10 スケール (水,  $Q=243 \text{ m}^3/\text{h}$ )

図 3.1.3-3 鉛直断面流速ベクトル図 (2/2)

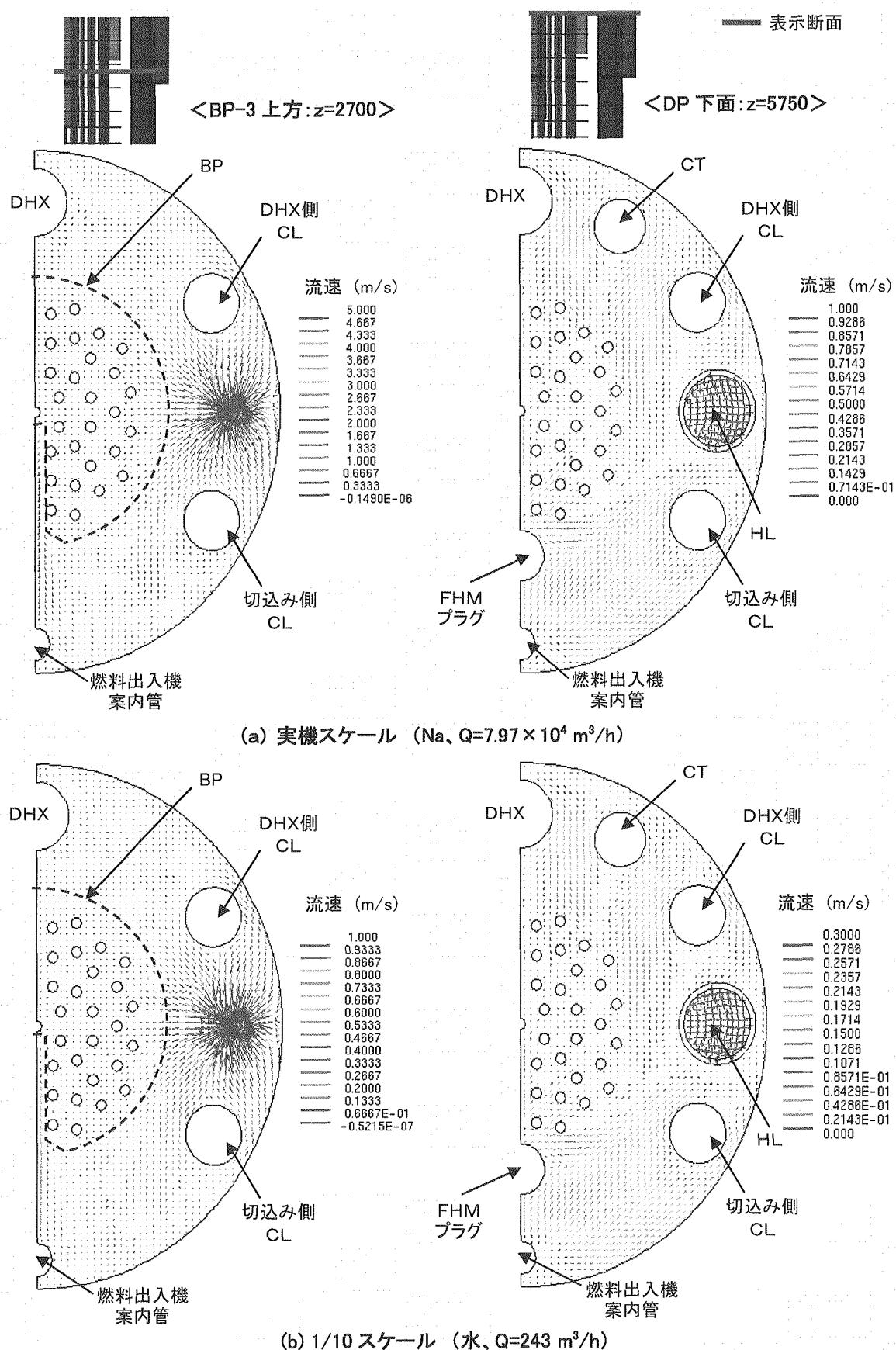


図 3.1.3-4 水平面流速ベクトル図

### 3.2 涡予測評価手法の適用性

1/10 縮尺プレナムモデル試験においては、図 2.2-3 に示したように、HL 配管の吸込み流速増加に伴って、HL 配管近傍に気泡を伴う水中渦が発生した。水試験体系は、縮尺試験のため HL 配管吸込み部の静水頭圧も小さく、かつ大気開放となっているため、実機でのカバーガス加圧環境よりもキャビテーションが発生しやすい条件となっている。しかし、実機条件においても HL 配管吸込み部近傍で気泡を伴う液中渦が発生するかを予測することは重要な課題となっている。

近年、実証炉でのガス巻込み試験研究で参考にされたポンプ吸込水槽においても、建設コスト低減の観点から、大容量化のニーズが高まっている。その結果、ポンプ吸込み流速は増大する傾向にあり、吸込水槽内に旋回流が生じた場合にはポンプへ向かう加速流中で細く強い渦に発達して、液面からの空気吸込渦や気泡を伴う水中渦の要因になっている。このような吸込水槽での流動特性や水槽内で発生する渦を評価するため、多次元流動解析の適用が進められている。しかし、実用計算のレベルでは解析格子の空間分解能の不足や数値粘性などが原因となり、渦中心の圧力低下を精度良く評価できないため、吸込水槽全体の流動解析結果から渦の発生を定量的に予測することは困難であった。

そこで、ポンプ吸込水槽の開発時における模型試験の一部を代替することを目的に、3 次元流動解析により求めたポンプ廻りの流速・圧力データを用いて、全体流動解析における渦の解像度不足を伸長渦モデルにより補正し、水中渦の初生を予測する手法<sup>[8]</sup>が開発されている。また、伸長渦モデルを用いた本手法は、ポンプ吸込水槽の空気吸込渦予測にも適用<sup>[9]</sup>されている。

本節では、岩野らの渦予測評価手法を適用して、1/10 縮尺プレナム試験解析での流速・圧力データから、HL 配管近傍で発生する水中渦の予測が可能かを検討した。

#### (1)評価手法の概要と適用例

以下に、渦予測評価手法の概要を示す。なお、詳細については、参考文献<sup>[8][9]</sup>を参照されたい。

##### (i)渦評価手法の流れ

###### (a) 3 次元流動解析の実施

まず、対象とする領域での流速・圧力場を求める 3 次元全体流動解析を実施する。ベースとなる全体流動解析では、水中渦の原因となるような渦を示す旋回領域を再現できる空間精度を有している必要がある。

###### (b)渦中心位置の同定

全体流動解析の結果として得られた流速分布から渦中心位置の同定を行う。渦中心位置の同定については、渦中心線を解析的に決定できる方法を用いている。この方法は格子点での流速分布データから螺旋軌道を描く部分を抽出し、その軌道の回転軸を渦中心とする方法である。

###### (c)伸長渦理論モデルによる圧力降下量の予測

同定された渦中心位置の座標データと流速及び圧力分布を基に、渦中心近傍の流れを渦モデル

で近似し、この渦モデルに関する渦中心近傍の流速分布を求め、その分布と流体密度から渦中心より離れた位置の圧力(渦遠方圧)を基準として渦中心の圧力を算出する。

#### (d) キャビテーション発生の判定

水中渦については、(c)項にて算出された渦中心圧と渦中心にキャビテーションが発生したときの圧力に相当する設定圧力（飽和蒸気圧）とを比較し、算出した渦中心圧が飽和蒸気圧以下に下がったときにキャビテーションが発生したと判定する。

#### (ii) ポンプ吸込水槽での適用例

吸込水槽の模型試験体系を対象として渦予測評価手法を適用した結果を図 3.2-1 に示す。模型試験は、無液面の 2 つの水路から異なる流速でポンプに流入する単純な体系で実施されており、ポンプ吸込み口と直下の底面との間に、間欠的ではあるがほぼ垂直に水中渦が発生することが観察されている。

この体系を 3 次元全体流動解析で評価した結果、流速の大きい水路 A 側から流入した旋回流れがベルマウス直下に強い渦を形成し、加速しながらポンプに吸込まれる流況となっている。また、ベルマウス近傍での流速場データから渦中心位置を評価した結果、底面から発生する渦の位置は試験結果とよく一致しており、底面からベルマウス下端に向けて気泡を伴う水中渦が発生していると言う判定結果が得られている。本評価手法での精度については、定常的に存在する水中渦の発生限界流速（キャビテーションの初生条件）に関し、予測結果と実験結果は 15% で一致することが報告されている。

### (2) 渦予測評価手法による解析結果

#### (i) 解析モデル、解析条件

ベースとなる 3 次元全体流動解析モデルを図 3.2-2 に、解析条件を表 3.2-1 に示す。3.1.1 項での Case1-4 と同様、解析領域は炉心出口から液面までとし、DHX-切込み部を対称とした 180 度セクタモデルで扱っている。メッシュ幅は、水平方向で約 1~7mm、鉛直方向で約 1~8mm に設定し、総メッシュ数は約 620 万メッシュとなった。

UIS 多孔板は、各フロー孔を  $4 \times 4$  メッシュで直接模擬している。DP 形状は 1 重体系であり、水中渦を抑制するためのスプリッタや FHM プラグはモデルには含めていない。また、本節では特に HL 配管での吸込み流量を増加したことによる水中渦の発生状況に着目しているので、流入条件として実機流速一致条件と Fr 数一致条件の 2 ケースを設定した。

なお、乱流モデル、離散化手法、壁面の境界条件等は、3.1.1 項と同様である。

#### (ii) 全体流況の比較

図 3.2-3 に、代表的な鉛直断面における流速ベクトルを 2 ケース比較して示す。図の左側が HL

配管中心を通る 0 度断面、右側が HL 配管と DHX 側 CL 配管の中間を通る 15 度断面を示す。実機流速一致条件の Case2-1 の場合、0 度断面では BP-1、BP-2 の外周からの吐出流れが合流して HL 配管吸込み部へ向かう上昇流が支配的となっている。また、15 度断面では BP-1、BP-2 外周からの吐出流れが炉壁側に向かい、BP-3 レベルで炉壁から UIS 側に反転するような旋回渦が形成されている。このフローパターンは、流速の絶対値は異なっているが、Fr 数一致条件の Case2-2 の結果とほぼ一致している。

図 3.2-4 に、代表的な水平断面における流速ベクトルを比較して示す。図の左側が HL 配管吸込み部近傍となる BP-3 上方位置( $z=270\text{mm}$ )、右側が液面近傍位置( $z=720\text{mm}$ )を示す。Case2-1 の場合、BP-3 上方位置では HL 配管と両側の CL 配管の間で著しく流速が増加しており、切込み側 CL-HL 間では炉壁側から UIS 側、DHX 側 CL-HL 間では UIS 側から炉壁側への流れが顕著に現れている。また、液面近傍では、燃料出入機案内管の後方から切込み側 CL 配管に向かう周方向流れが支配的であり、さらに DHX 後方の炉壁側から CT に向かう周方向流れも見られている。なお、水流動試験では、実機流速一致条件の場合、図 2.2-4 に示したように UIS 切込み部からの噴流が炉壁と外側 DP の隙間を上昇し、燃料出入機案内管近傍で液面が盛り上がっていることが観察されている。しかし、今回の解析では、自由液面の形状を取り扱える VOF(Volume of Fluid)法は考慮していない。この水平方向断面のフローパターンについても、流速の絶対値は異なっているが、Fr 数一致条件の Case2-2 と一致していることがわかった。

また、Case2-1 については、炉壁近傍( $r=470\text{mm}$ )における  $\theta - z$  面の半周分を展開した流速ベクトルを図 3.2-5 に示す。HL 配管下端レベルよりやや下方において、水中渦の要因となる旋回渦が生じており、3.1.1 項の図 3.1.1-14 に示した Case1-1 と同様のフローパターンとなっている。

これらの結果より、上部プレナム全体の主要なフローパターンは、実機流速一致条件と Fr 数一致条件において、解析上大きな相違がないことを確認した。

### (iii) 水中渦の同定とキャビテーション評価

Case2-1 での流速・圧力データを用いて、外側 DP 下面-試験体底部の領域について渦中心位置を同定し、さらに渦中心での減圧量からキャビテーションの発生を判定した結果を図 3.2-6 に示す。図中の各点が渦の中心位置、色が渦中心の圧力を示しており、圧力が負の値を取るとキャビテーション発生として判定する。

ここで示した外側 DP 下方の領域では、燃料出入機案内管から切込み側 CL 配管に向かう渦糸や試験体底部を起点とした HL 配管直下での渦糸等、多くの渦が見られるが、それらの渦中心の減圧量は小さくキャビテーションとは判定していない。今回の評価では、切込み側及び DHX 側の CL 配管壁を起点として、HL 配管吸込み部に至る 2 本の渦において、キャビテーションに至るという判定結果となっている。水流動試験では、Fr 数一致条件から流量を増加するにつれて、最初に炉壁-HL 間の水中渦が発生したが、今回の評価では炉壁-HL 配管の渦糸に対してはキャビ

テーションが発生しないという判定となっている。

この判定誤差については、次のような原因が考えられる。水流動試験では、炉壁-HL 配管の水中渦の炉壁側の起点は、時間的・空間的に変動していることが観察されている。一方、HL-CL 間の水中渦は、CL 配管壁を起点とする渦の発生位置はあまり変動が見られなかった。このため、時間平均の挙動を扱う定常流動解析での流速・圧力データで、炉壁-HL 配管での水中渦のような非定常性の強い渦の発生位置を同定するには適用上の限界があると考えている。また、試験体系では、炉壁-HL 配管のギャップ幅が 21mm と小さいが、壁面（流速 0）から HL 配管内部（実機流速一致条件では平均流速 9.2m/s）に至るまで急激に流速が増加する。このような速度勾配が大きい箇所に対して、今回の全体解析モデルでのメッシュ分割は 10 メッシュ程度であり、渦を同定するためには十分ではなかつた可能性がある。

一方、Fr 数一致条件での Case2-2 を対象とした渦の同定結果を図 3.2-7 に示す。実機流速一致条件とした Case2-1 と同様に、HL-CL 間では CL 配管壁を起点とする水中渦が見られるが、キャビテーションには至らない判定結果となった。また、試験体底部から HL 吸込み口に向かって 2 本の縦渦を同定しているが、キャビテーションには至らない結果となっている。したがって、HL 吸込み流速の増大に伴って渦中心圧力が低下し、実機流速条件では HL-CL 間でキャビテーションに至るという水試験の結果が再現できている。

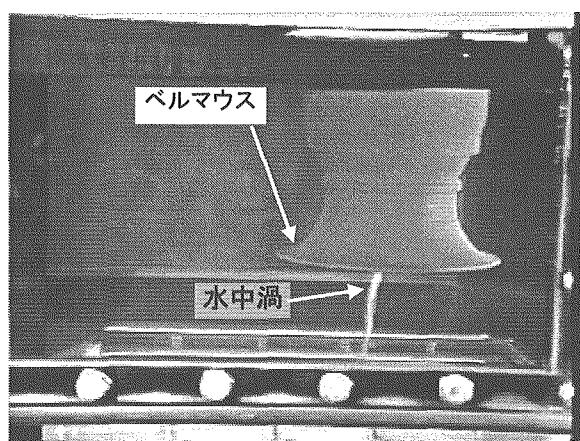
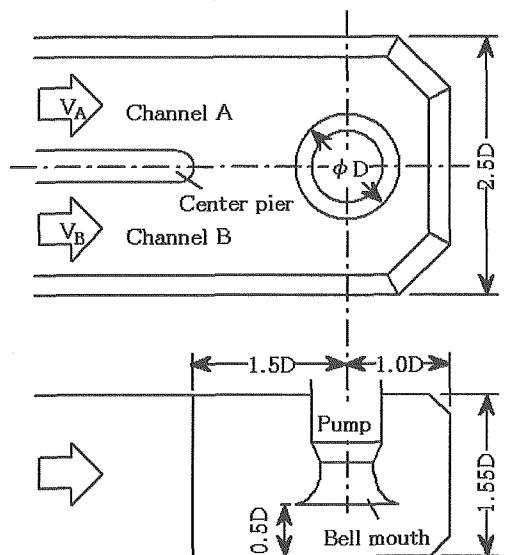
このように、ベースとなる全体流動解析の精度にも依存しているが、ポンプ吸込水槽と比較して非常に複雑な流況となる上部プレナム内の流動場についても、渦予測評価手法が適用でき、HL-CL 間のような定常的な水中渦に対しては、渦中心位置を同定してキャビテーション発生の有無を判定できる見通しが得られた。

表 3.2-1 水中渦予測評価での解析条件

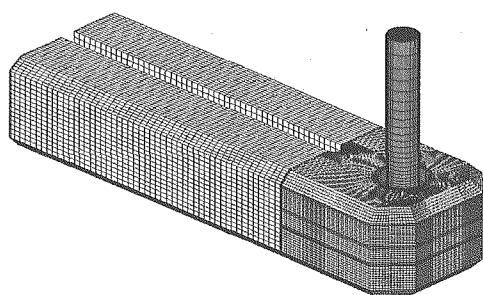
	解析範囲	総メッシュ数	UIS 多孔板模擬	流入条件
Case2-1	炉心出口-HL 上端 180 度セクタ	約 620 万	フロー孔直接模擬 4 × 4メッシュ	770m <sup>3</sup> /h (実機流速一致条件)
Case2-2	炉心出口-HL 上端 180 度セクタ	約 620 万	フロー孔直接模擬 4 × 4メッシュ	243m <sup>3</sup> /h (Fr 数一致条件)

共通の解析パラメータ

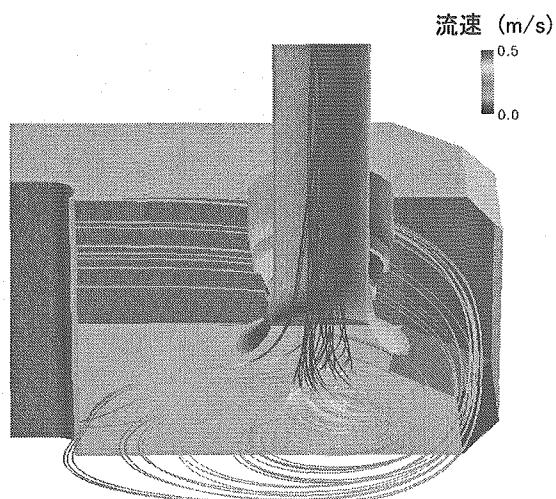
- ・乱流モデル : RNG k-ε モデル
- ・空間離散化手法 : MARS
- ・壁面境界条件 : 標準壁関数(対数則)
- ・流体物性 : 水(常温)



<模型試験体系>  
 $D=0.205\text{m}$ ,  $V_A:V_B=8:2$

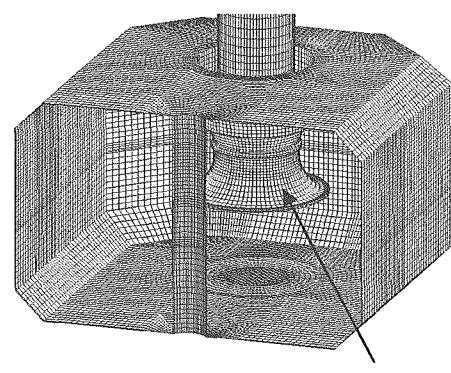


<水中渦の発生状況>

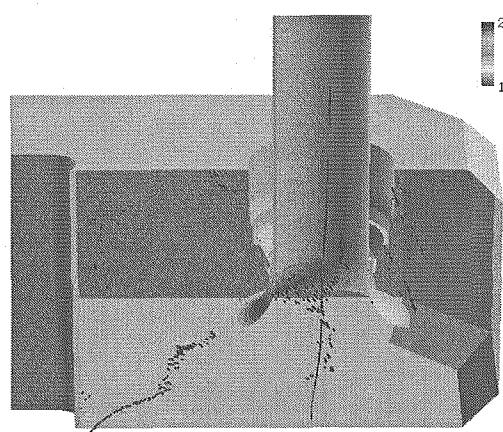


<流線>

無次元限界流速 (-)



<3次元流動解析モデル>



<渦中心の同定結果>

無次元限界流速 <1で気泡を伴う水中渦発生

図 3.2-1 ポンプ吸込水槽体系での水中渦予測評価例<sup>[8]</sup>

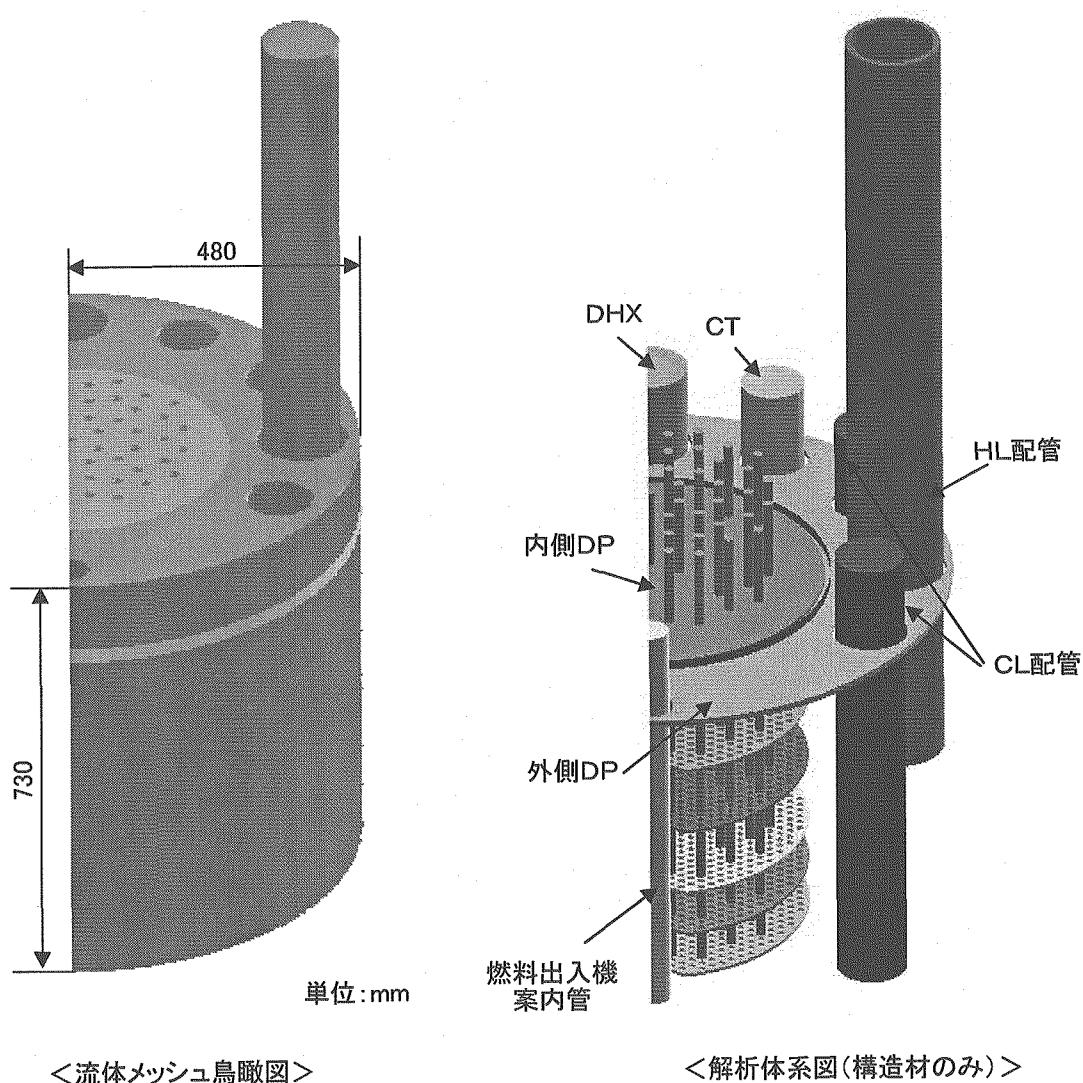
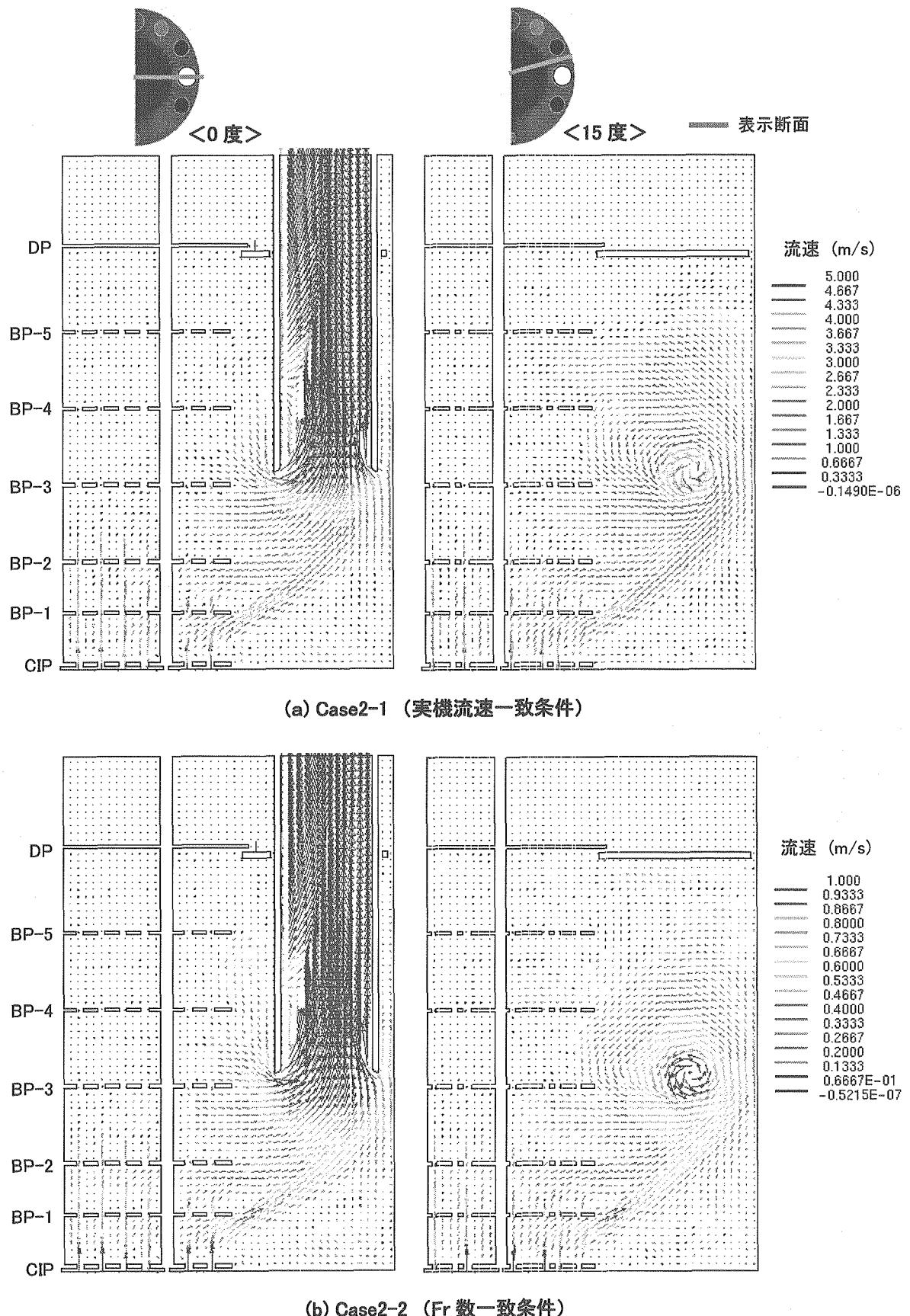


図 3.2-2 解析体系全体図



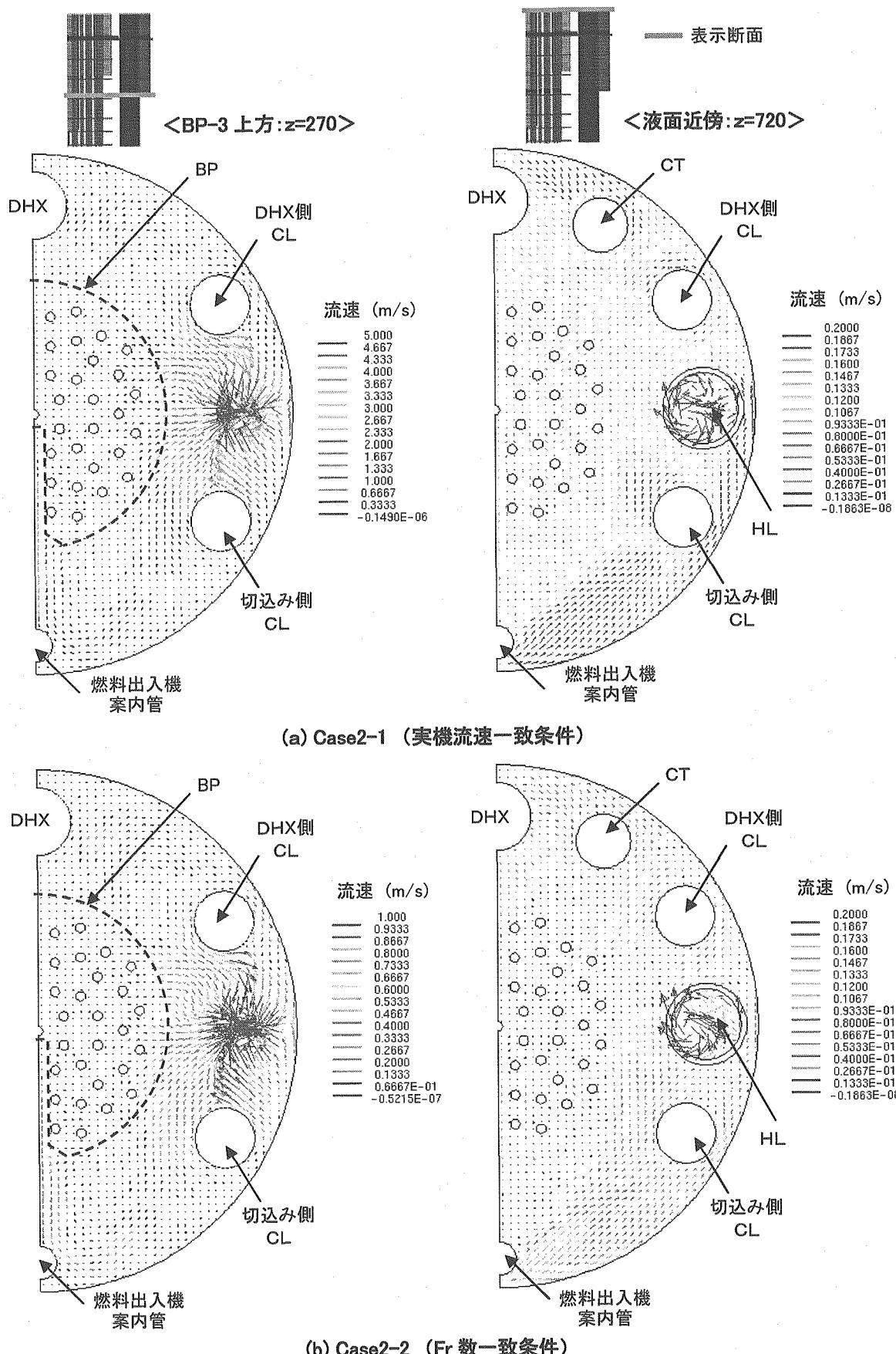


図 3.2-4 水平断面流速ベクトル図

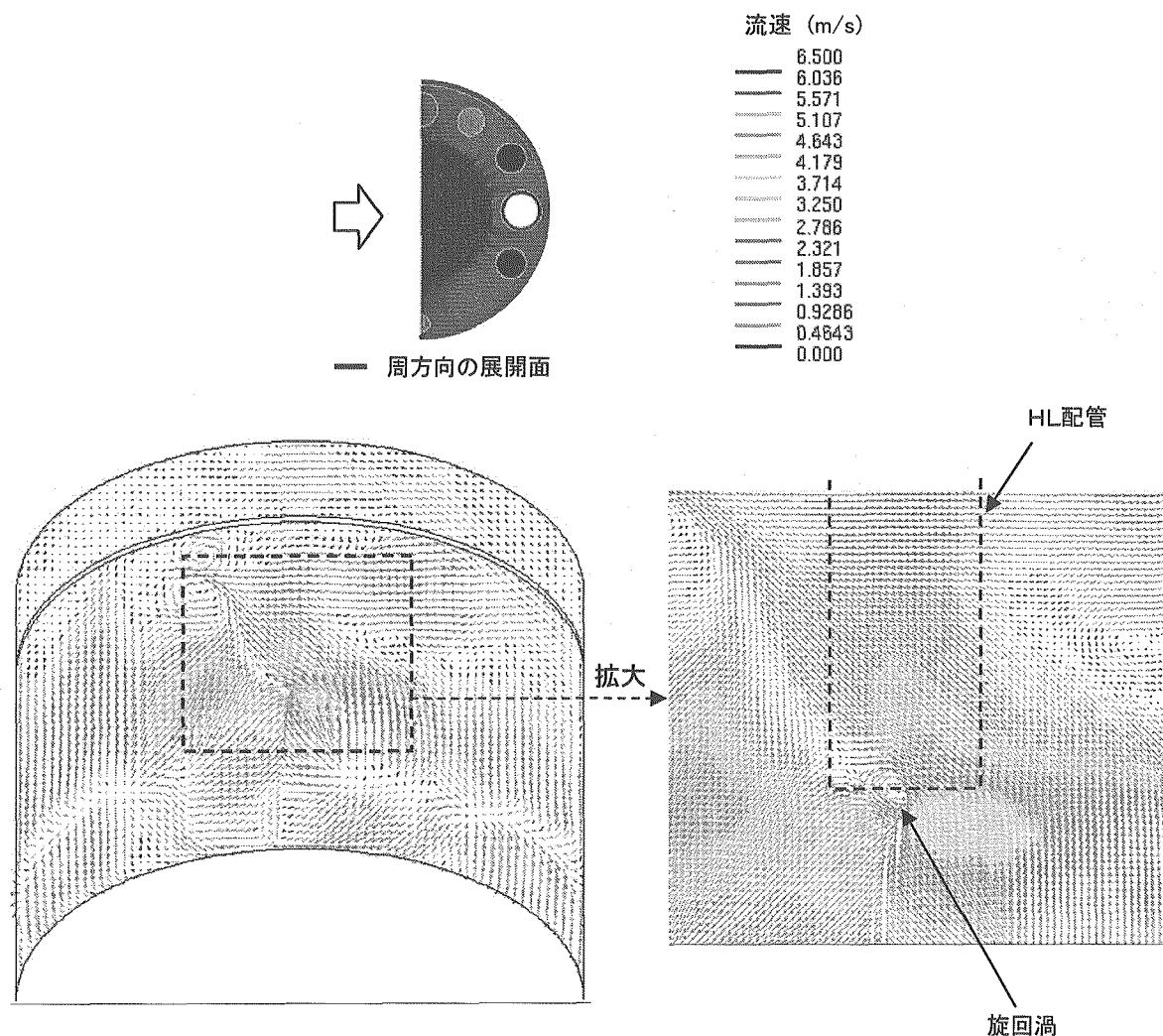


図 3.2-5 炉壁近傍での流速分布 (Case2-1)

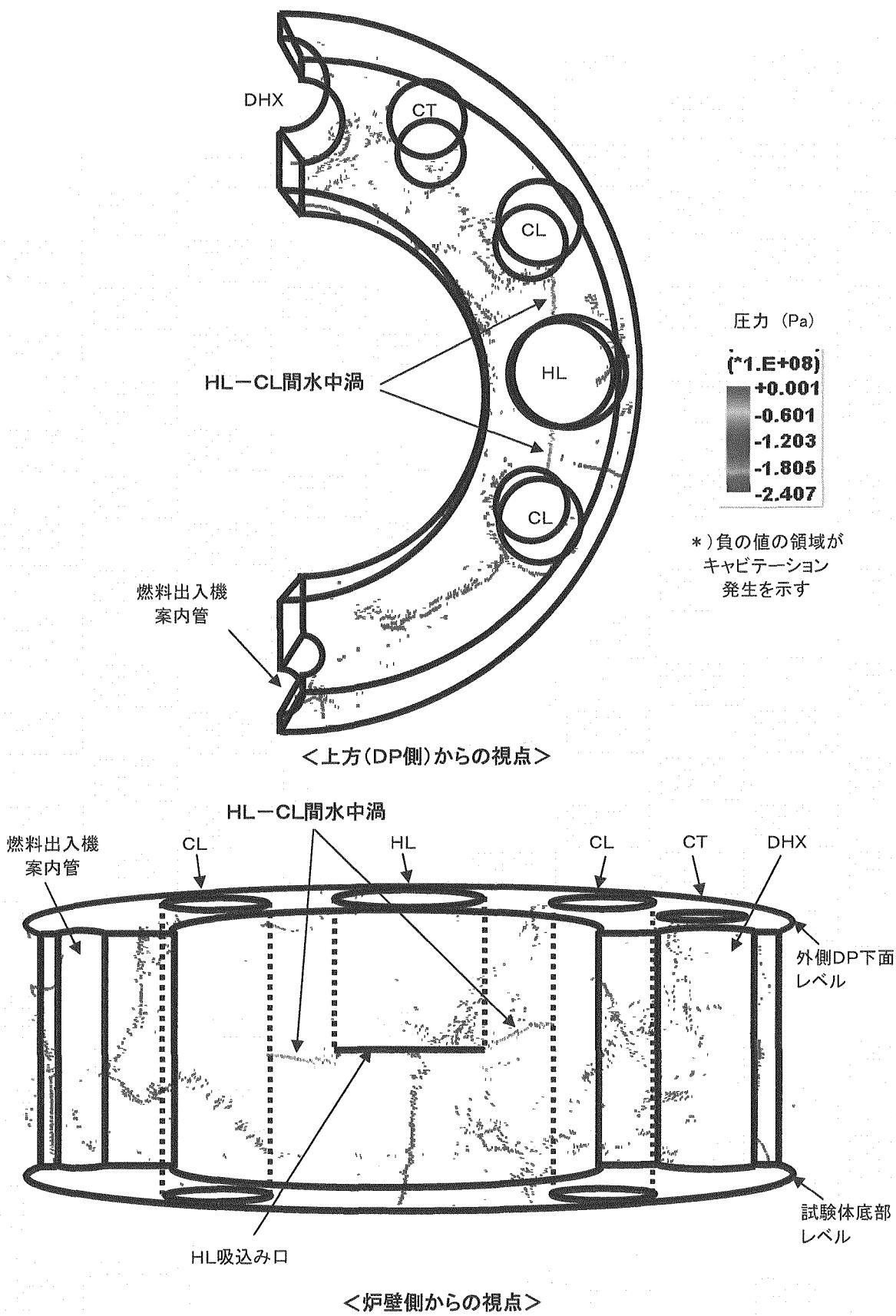
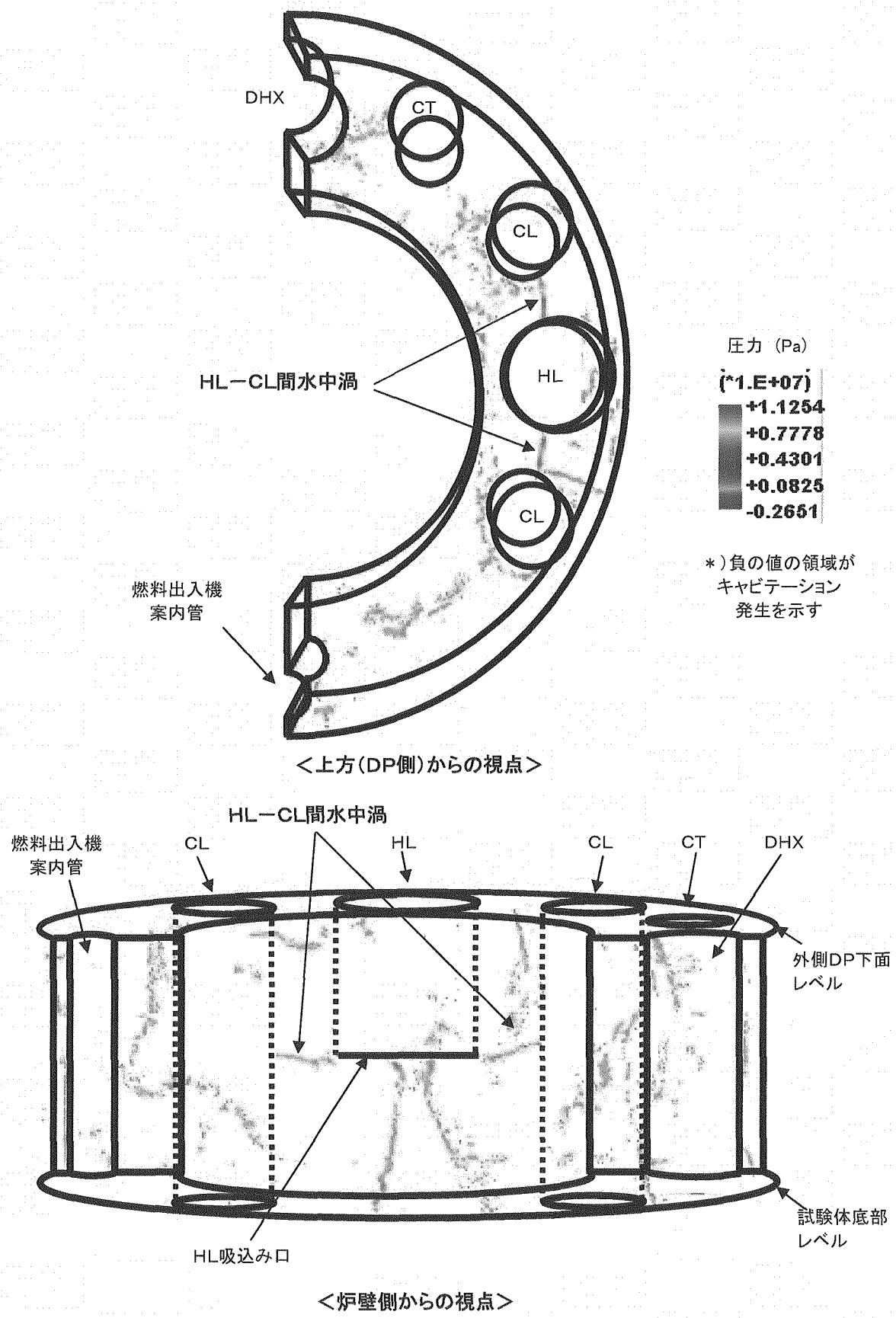


図 3.2-6 潟予測手法によるキャビテーション判定結果 (Case2-1)



#### 4. 結言

ナトリウム冷却炉の上部プレナムにおける流動特性評価手法を確立する一環として、汎用熱流体解析プログラム（STAR-CD）を用いて、1/10 縮尺プレナム試験解析を行い、解析モデルの妥当性を検討した。また、伸長渦モデルに基づく渦予測評価手法を用いて、プレナム全体流動解析結果から、渦の同定やキャビテーションの評価を実施した。

##### (1)各種モデルによる流況のサーベイ

水試験体系での流況を再現できる解析モデルを作成する上での判断材料を得る観点から、装置内に配置された各種構造物の形状を詳細に模擬した解析モデルを作成し、解析領域、メッシュ分割、UIS 多孔板の模擬方法、流動適正化構造の有無をパラメータとして、Fr 数一致条件での定常解析を実施した。

各ケースとも、UIS 内部から炉容器壁に向かう噴出し流れや、切込み部における上昇噴流等の特徴的なフローパターンを再現できることとともに、切込み部近傍の流速分布は計測値とほぼ一致する結果を得た。また、HL 配管-CL 配管において水中渦に至ると考えられる旋回渦の存在や、流動適正化構造の有効性についても、解析により確認することができた。

ただし、HL 配管-炉壁間のような局所的な領域では、試験の傾向とは異なる流速場となっており、速度勾配の大きい領域についてより詳細なメッシュ分割が必要と考える。

##### (2)DP 形状の影響

水試験での DP 形状が当初の 1 重から 2 重体系に変更されたことに伴い、上下 2 枚の DP 間の流況や 1 重体系での流況と大きな相違がないことを確認するため、流況を比較した。

段差付きの FHM プラグと 2 重 DP 体系を組合せた場合、DP 下方領域から液面領域に向かう上昇流の一部を段差構造によって DP 間の水平流に変更し、液面領域への流入量を抑制できる見通しが得られ、解析上も二重 DP 構造と段差付き FHM プラグの有効性を確認した。また、DP 下方領域における全体流況は、両者ほぼ一致しており、DP 形状の相違は影響しないことがわかった。

##### (3)実機体系での流況

スケール効果や流体物性値の影響を確認する観点から、1/10 縮尺水試験体系の解析モデルをベースに、スケールを 10 倍、流体をナトリウム、実機流量としたモデルを作成し、実機体系と試験体系（Fr 数一致条件）でのフローパターンを比較した。上部プレナム内の全体流況は実機体系と水試験体系で定性的に一致しており、今回の解析では、スケール効果や流体物性の相違はほとんど影響しない結果となった。

今後、本報告で検討した解析モデルに、装置スケールの観点から試験体系では模擬しなかった

炉内計装関連の構造物や DP のラビリンス構造等のモデルを追加していくことで、実機体系の詳細評価に適用できると考える。

#### (4)渦予測評価手法の適用性

ポンプ吸込水槽の設計評価用に開発された伸長渦理論に基づく渦予測評価手法を上部プレナム領域での流動場に適用し、試験で観察された HL 配管近傍における水中渦の予測が可能かを検討した。

実機流速一致条件での解析結果（流速・圧力）を用いて、DP 下方領域での渦の分布を評価した結果、切込み側及び DHX 側の CL 配管壁を起点として HL 配管吸込み部に至る 2 本の渦において、キャビテーションに至るという判定結果を得た。

したがって、ポンプ吸込水槽と比較して非常に複雑な流況となる上部プレナム内の流動場についても、渦予測評価手法が適用でき、HL-CL 間のような定常的な水中渦に対しては、渦中心位置を同定してキャビテーション発生の有無を判定できる見通しが得られた。

#### (5)まとめと今後の課題

形状模擬性に優れた汎用熱流体解析プログラムを用いて、ナトリウム冷却炉の上部プレナム領域を模擬した水試験体系での流動特性を評価した。主流部のフローパターンは水試験とほぼ一致しており、解析モデルの妥当性を確認した。また、試験体系の解析モデルをベースとした実機体系の全体流況は水試験体系の流況と定性的に一致する結果を示しており、本報告で検討した解析モデルが実機体系の評価にも適用可能であると考える。

さらに、伸長渦理論に基づく渦予測評価手法が、上部プレナムのような複雑な流動場に対しても適用でき、定常的な水中渦を同定できることを確認した。

今後、実機体系の詳細評価を進めるにあたっては、局所的な領域での解析精度向上を図るため、高次の空間離散化モデルの適用と、それに対応した高品質なメッシュ分割が必要と考える。また、配管後方での流れ場・渦の非定常的な変動を精度よく評価できるモデルを検討していく必要がある。

## 参考文献

- [1] 此村守、小川隆、他：“高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ中間報告－原子炉プラントシステム技術検討書－”、JNC TN9400 2004-035、(2004)
- [2] 木村暢之、林謙二、他：“炉容器コンパクト化に関する流動特性試験－炉内流況の把握と流動適正化方策の考案－”、JNC TN9400 2003-032、(2003)
- [3] 木村暢之、飛田昭、他：“1/1.8縮尺部分モデルによる原子炉容器内ガス巻き込み特性の評価－ガス巻き込み現象の把握－”、JNC TN9400 2004-067、(2004)
- [4] 中山克、木村暢之、他：“炉容器コンパクト化に関する流動特性試験－ディッププレートの2重化とU I S脇の効果－”、JNC TN9400 2005-032、(2005)
- [5] 此村守、上出英樹、他：“高速増殖炉の要素技術開発(1)－各冷却材個別の技術開発－”、サイクル機構技報、No. 24 別冊、JNC TN1340 2004-003、(2004)
- [6] 山本一彦、江口譲、他：“トップエントリー方式ループ型炉の中間熱交換器ガス巻込み試験”、日本機械学会論文集B編、第59巻第565号 (1993)
- [7] 中山克、江連俊樹、他：“ナトリウム冷却高速炉のガス巻き込みに関する研究(4)－ガス巻き込み初生条件の把握－”、日本原子力学会 2005年春の年会 予稿集 H13 (2005)
- [8] 岩野龍一郎、柴田貴範、他：“流れ解析によるポンプ吸込水槽内の水中渦予測手法の開発（予測モデルの定常解析への適用）”、日本機械学会論文集B編、第68巻第667号 (2002)
- [9] 長原孝英、岩野龍一郎、他：“ポンプ吸込水路の空気吸込渦発生予測シミュレーション”、日本機械学会茨城地方講演会講演論文集 (1996)

This is a blank page.

## 付録 上部プレナム流動解析データベース

本文 3.1.1 節では、UIS フロー孔のモデル化やモデル化領域等をパラメータとした解析結果を述べたが、以下のパラメータについても着目し、全体流況に及ぼす影響を調べた。

### 1. 境界条件の影響

- ・出口部に関しては、境界条件の種類（流出境界／流速一定／圧力）や出口境界位置（HL 鉛直管の高さ）を変更したが、全体流況への影響は小さい。
- ・流入部については、入口境界の位置変更や炉心流配の設定有無を検討したが、全体流況への影響は小さい。
- ・UIS 水平板のフロー孔壁面については、slip／non-slip 条件を比較したが、全体流況への影響は小さい。

### 2. フロー孔の模擬方法の影響

- ・フロー孔の形状を円と等価な面積となる四角形とした場合、全体流況への影響は小さい。
- ・フロー孔の口径を仮想的に拡大した場合、UIS 水平板を通過する流れに変化が見られ、全体流況への影響は大きい。
- ・フロー孔のメッシュ分割については、入口境界の流入口メッシュと相違させたものや、分割数を変更（ $2 \times 2 / 4 \times 4 / 8 \times 8$ ）しても、全体流況への影響は小さい。

### 3. 数値解法の影響

- ・乱流モデルとして、標準  $k - \varepsilon$  と  $k - \varepsilon$  RNG を比較したが、全体流況への影響は小さい。
- ・空間離散化手法については、2 次精度の MARS と 1 次精度の UD を比較した場合には、HL-RV 隙間の流れ方向や定常解の収束性に差が生じた。なお、MARS と 2 次精度の QUICK、SFCD、GAMMA を比較しても、顕著な相違は見られなかった。

### 4. モデル化範囲／全体メッシュ分割の影響

- ・モデル化範囲として DP 上方の液面領域の有無を比較したが、DP 下方領域の流況への影響は小さい。
- ・全体メッシュ分割数を変更した場合、切込み部の噴流等に相違が見られ、全体流況に影響する。

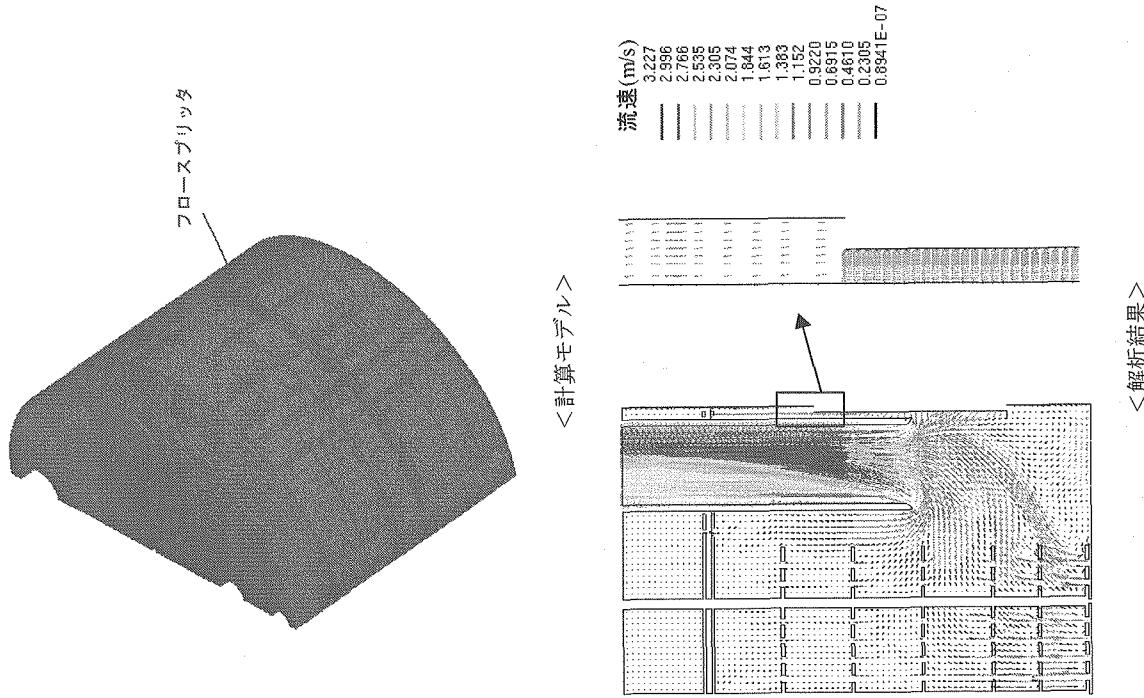
### 5. スケールと物性値の影響

- ・同一メッシュ分割で、1/10 縮尺水試験体系（流量： $Fr$  数一致）と、実機 Na 体系（流量：実機炉心流量）を比較したが、全体流況は定性的に一致する傾向にある。

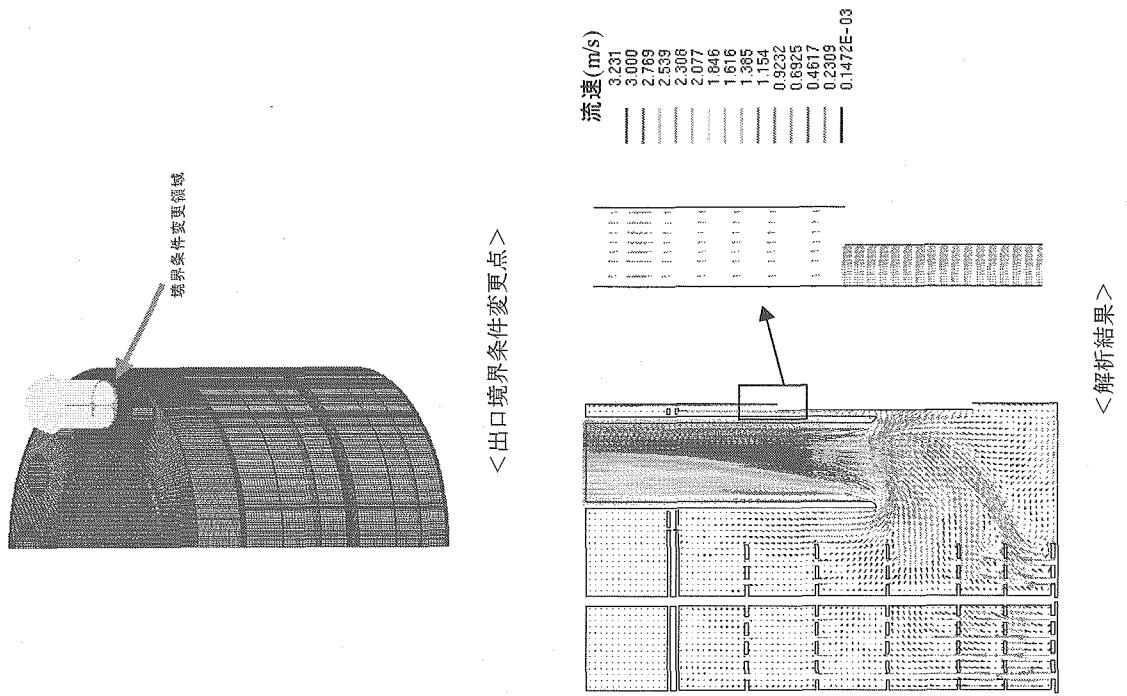
表 解析データベース一覧

ケース名	項目	着眼点	スケール	模擬範囲	流体	備考
N01-1	2重DP体系	2重DP体系の流動特性確認	1/10縮尺	炉心出口～液面	水	レファレンスケース
BD1-1	出口境界条件	出口境界条件(流速一定)の違いによる影響確認	1/10縮尺	炉心出口～液面	水	
BD1-2	流入境界条件	流入境界条件設定位置の違いによる影響確認	1/10縮尺	炉心出口～液面	水	
BD1-3	フロー孔壁面境界条件	フロー孔の壁面境界条件の違いによる影響確認	1/10縮尺	炉心出口～液面	水	
FH1-1	フロー孔形状	フロー孔形状の違いによる影響確認	1/10縮尺	炉心出口～液面	水	
FH1-2	フロー孔形状	フロー孔の口径拡大による影響確認	1/10縮尺	炉心出口～液面	水	
FH1-3	フロー孔メッシュ分割	フロー孔と流入口のメッシュ分割を変えることによる影響確認	1/10縮尺	炉心出口～液面	水	
CP1-1	数値解法	数値解法の組合せによる影響確認( $k - \epsilon$ RNG, UD)	1/10縮尺	炉心出口～液面	水	
CP1-2	数値解法	数値解法の組合せによる影響確認(k - ε RNG, UD)	1/10縮尺	炉心出口～DP下端	水	
FH1-4	フロー孔メッシュ分割	フロー孔メッシュ分割数の影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	DP下方領域でのベースモデル
SG1-1	解析領域	DP下方領域のフローパターンに着目	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG1-2	流入境界条件	切込みを通過する噴流の上昇角度に寄与するパラメータの検討	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG1-3	フロー孔形状	フロー孔の口径拡大による影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG1-4	流入口形状	流入口の口径縮小による影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG1-5	流入口形状	流入口の口径縮小による影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG1-6	数値解法	流入口の口径縮小及び数値解法の組合せによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG1-7	数値解法	出口境界条件及び数値解法の組合せによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG1-8	出口境界条件	出口境界条件設定位置変更による影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG1-9	乱流モデル	乱流モデルの違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG2-1	全体メッシュ分割	全体メッシュ分割の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	SG1-1より粗メッシュ体系
SG2-2	数値解法	数値解法の組合せによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG2-3	リスタート計算	リスタート計算による影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG2-4	フロー孔壁面境界条件	壁面境界条件の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG2-5	数値解法	離散化手法(SFCD)の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG2-6	数値解法	離散化手法(GAMMA)の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG2-7	数値解法	離散化手法(UD)の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG2-8	数値解法	離散化手法(MARS)の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG3-1	出口境界条件	粗メッシュ体系 出口境界条件設定位置変更による影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG3-2	数値解法	粗メッシュ体系 数値解法の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG3-3	数値解法	粗メッシュ体系 亂流モデルの違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG3-4	数値解法	粗メッシュ体系 離散化手法の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG3-5	数値解法	粗メッシュ体系 数値解法の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG3-6	出口境界条件	粗メッシュ体系 出口境界条件の違いによる影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG3-7	流入境界条件	炉心流量配分設定による影響確認	実機	炉心出口～DP下端	Na	
SG3-8	対称境界条件	対称境界条件設定による影響確認	1/10縮尺	炉心出口～DP下端	水	
SG4-1	スケール及び流体物性	縮尺体系における影響確認	1/10縮尺	炉心出口～DP下端	水	
SG4-2	スケール及び流体物性	縮尺体系における影響確認(乱流モデル)	1/10縮尺	炉心出口～DP下端	水	

ケース名	N01-1																												
項目	H16 年度 2重DP 体系(レアレンスケース)																												
着眼点	2重DP 体系の流動特性を確認する。																												
比較対象ケース	一																												
内容	H15 年度解析モデルをベースに、2重DP及びフロースプリッタを追加した。																												
解析条件	<p>1. 体系</p> <table> <tr> <td>解析対象範囲</td> <td>: 炉心出口～液面(1/2セクタモデル)</td> </tr> <tr> <td>メッシュ数</td> <td>: 4,980,000</td> </tr> <tr> <td>スケール</td> <td>: 1/10縮尺試験体系</td> </tr> <tr> <td>DP形状</td> <td>: 2重DP</td> </tr> <tr> <td>流動適正化策</td> <td>: フロースプリッタ、ベルマウス模擬</td> </tr> <tr> <td>流体</td> <td>: 水</td> </tr> <tr> <td>流入口メッシュ</td> <td>: 4×4分割 (口径9mm相当)</td> </tr> <tr> <td>フロー孔メッシュ</td> <td>: 4×4分割 (口径11mm相当)</td> </tr> </table> <p>2. 数値解法</p> <table> <tr> <td>乱流モデル</td> <td>: <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)</td> </tr> <tr> <td>離散化手法</td> <td>: MARS</td> </tr> </table> <p>3. 境界条件</p> <table> <tr> <td>流入流量</td> <td>: 243m<sup>3</sup>/h</td> </tr> <tr> <td>出口条件</td> <td>: 流出境界</td> </tr> <tr> <td>液面境界条件</td> <td>: slip</td> </tr> <tr> <td>フロー孔壁面</td> <td>: non-slip</td> </tr> </table>	解析対象範囲	: 炉心出口～液面(1/2セクタモデル)	メッシュ数	: 4,980,000	スケール	: 1/10縮尺試験体系	DP形状	: 2重DP	流動適正化策	: フロースプリッタ、ベルマウス模擬	流体	: 水	流入口メッシュ	: 4×4分割 (口径9mm相当)	フロー孔メッシュ	: 4×4分割 (口径11mm相当)	乱流モデル	: $k - \epsilon$ RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)	離散化手法	: MARS	流入流量	: 243m <sup>3</sup> /h	出口条件	: 流出境界	液面境界条件	: slip	フロー孔壁面	: non-slip
解析対象範囲	: 炉心出口～液面(1/2セクタモデル)																												
メッシュ数	: 4,980,000																												
スケール	: 1/10縮尺試験体系																												
DP形状	: 2重DP																												
流動適正化策	: フロースプリッタ、ベルマウス模擬																												
流体	: 水																												
流入口メッシュ	: 4×4分割 (口径9mm相当)																												
フロー孔メッシュ	: 4×4分割 (口径11mm相当)																												
乱流モデル	: $k - \epsilon$ RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)																												
離散化手法	: MARS																												
流入流量	: 243m <sup>3</sup> /h																												
出口条件	: 流出境界																												
液面境界条件	: slip																												
フロー孔壁面	: non-slip																												

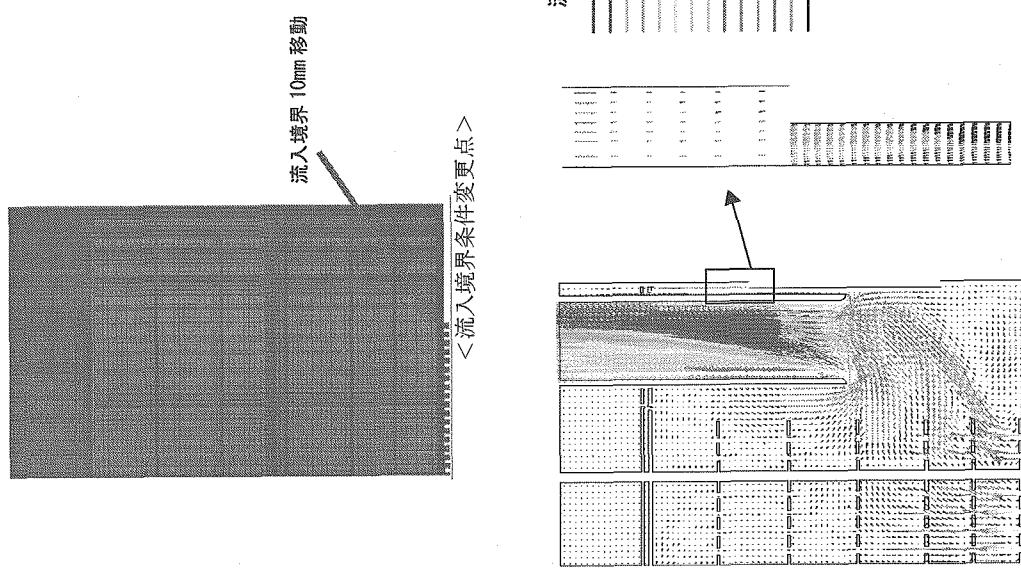


&lt;解析結果&gt;

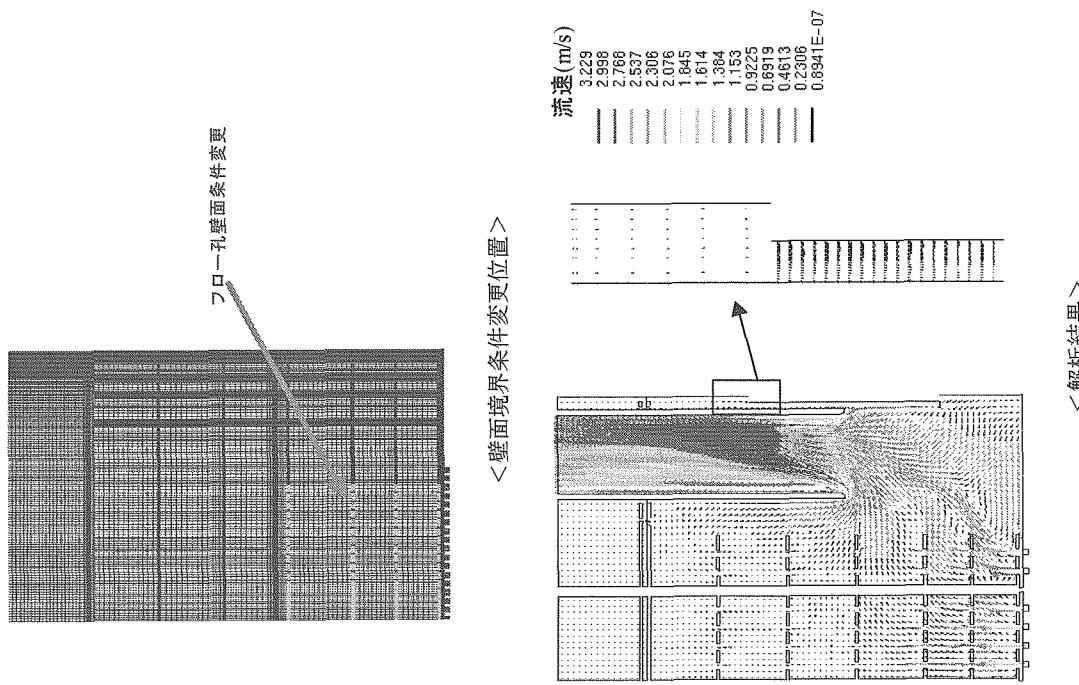


ケース名	BDI-1
項目	出口境界条件
着眼点	出口境界条件の違いによる影響確認
比較対象ケース	N01-1
内容	ケース N01-1 に対して、出口境界条件を流速一定条件とした。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～液面(1/2 セクタモデル) メッシュ数 : 4,980,000 スケール : 1/10 缩尺試験体系系 DP 形状 : 2 重 DP 流動適正化策 : フロースプリッタ、ベルマウス模擬 流体 : 水</p> <p>2. 数値解法 流入口メッシュ : 4×4 分割 (口径 9 mm 相当) フロー孔メッシュ : 4×4 分割 (口径 11 mm 相当)</p> <p>乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)</p> <p>離散化手法 : MARS</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : 243 m<sup>3</sup>/h 出口条件 : 流速一定 液面境界条件 : slip フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース N01-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに変化はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に有意な差異はない。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となる</li> </ul> <p>結論 出口境界条件の種類を変えてても、プレナム全体流況に及ぼす影響は小さい。</p> <p>備考 :</p>

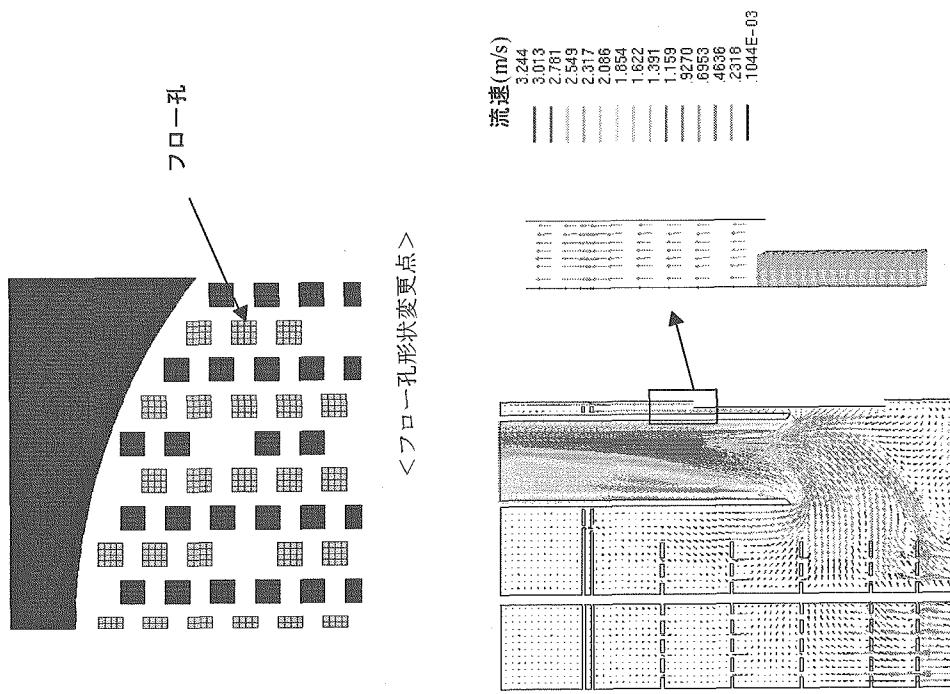
ケース名	BD1-2
項目	流入境界条件
着眼点	流入境界条件設定位置の違いによる影響確認
比較対象ケース	BD1-1
内容	ケース BD1-1に対して、流入境界条件を 10mm 下げた形状とした。
解析条件	<p>1. 体系 解分析範囲 : 炉心出口～液面(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 4,980,000 スケール : 1/10縮尺試験体系 DP形状 : 2重DP 流动直正化策 : フロースプリッタ、ベルマウス模擬</p> <p>2. 数値解法 流体 : 水 流入口メッシュ : 4×4分割 (口径 9 mm 相当) フロー孔メッシュ : 4×4分割 (口径 11 mm 相当)</p> <p>3. 離散化手法 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)</p> <p>MARS</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : 243m<sup>3</sup>/h 流入境界位置 : 10mm 下方に移動 出口条件 : 流速一定 液面境界条件 : slip フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース BD1-1と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに変化が見られる。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に有意な差異はない。</li> <li>HL-RV隙間領域の流れは BD1-1 と比べて流速が小さくなるが、上昇流に変わりはない。</li> </ul> <p>流入境界条件の設定位置を変えても、プレナム全体流況に及ぼす影響は小さい。</p>
結論	
備考	



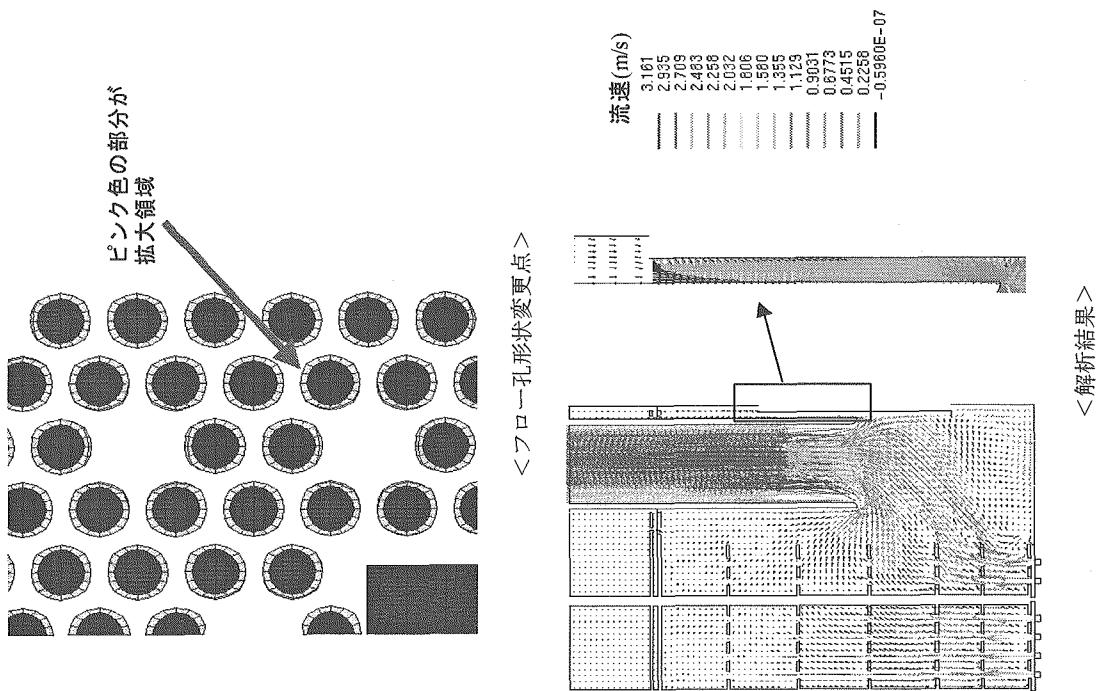
&lt;解析結果&gt;



ケース名	BD1-3
項目	フロー孔壁面境界条件による影響確認
着眼点	フロー孔の壁面境界条件の違いによる影響確認
比較対象ケース	BD1-2
内容	ケース BD1-2に対して、CIP, BP-1, 2, 3 のフロー孔壁面境界条件を slip 条件とした。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～液面(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 4,980,000 スケール : 1/10縮尺試験体系 DP形状 : 2重DP 流動適正化策 : フロースプリッタ、ベルマウス模擬 流体 : 水 流入口メッシュ : 4×4分割 (口径9mm相当) フロー孔メッシュ : 4×4分割 (口径11mm相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)</p> <p>離散化手法 : MARS</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : 243m<sup>3</sup>/h 出口条件 : 流速一定 液面境界条件 : slip フロー孔壁面 : slip (CIP, BP-1, 2, 3)</p>
結果	<p>ケース BD1-2と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通してする流れに変化が見られる。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に有意な差異はない。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れはわずかではあるが下降流となる。</li> </ul> <p>結論 フロー孔の壁面条件を変えてても、プレナム全体流況に及ぼす影響は小さい。</p> <p>備考 ・フロー孔境界条件を変更し、BD1-2の結果を引き継いで計算を実行</p>

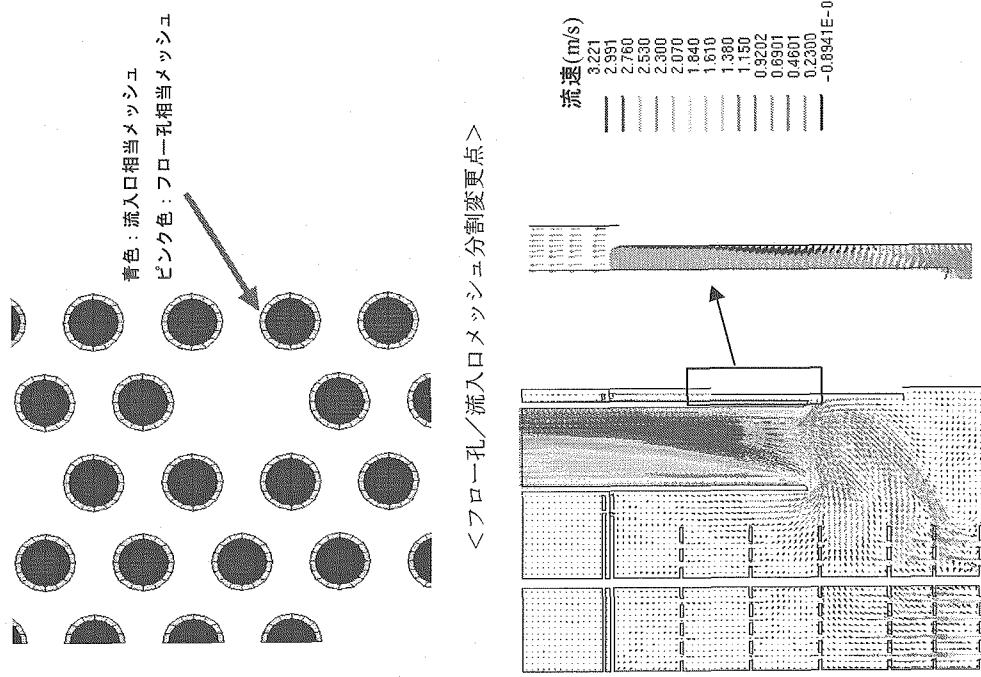


&lt;解析結果&gt;



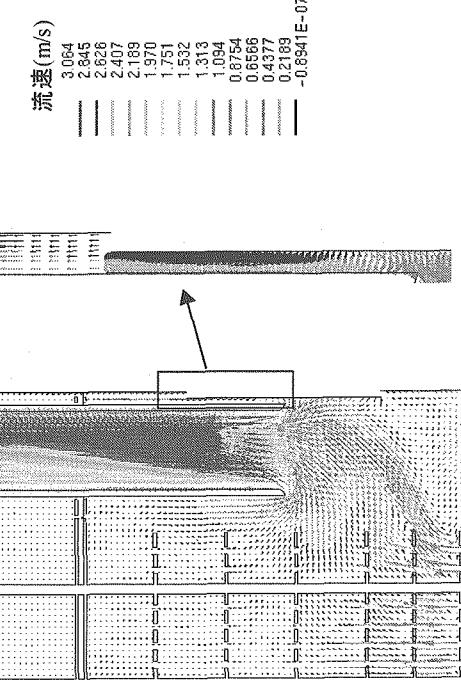
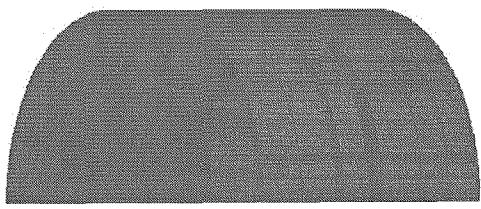
ケース名	FH1-2																												
項目	フロー孔形状																												
着眼点	フロー孔口径拡大によるフローパターンへの影響確認。																												
比較対象ケース	BD1-3																												
内容	ケース BD1-3 に対して、フロー孔口径を拡大した。																												
解析条件	<p>1. 体系</p> <table> <tr> <td>解析対象範囲</td> <td>: 炉心出口～液面(1/2セクタモデル)</td> </tr> <tr> <td>メッシュ数</td> <td>: 4,980,000</td> </tr> <tr> <td>スケール</td> <td>: 1/10縮尺試験体系系</td> </tr> <tr> <td>DP形状</td> <td>: 2重DP</td> </tr> <tr> <td>流動適正化策</td> <td>: フロースプリッタ、ベルマウス模擬</td> </tr> <tr> <td>流体</td> <td>: 水</td> </tr> <tr> <td>流入口メッシュ</td> <td>: 4×4分割 (口径 9mm相当)</td> </tr> <tr> <td>フロー孔メッシュ</td> <td>: 4×4分割 (口径 12mm相当)</td> </tr> </table> <p>2. 数値解法</p> <table> <tr> <td>乱流モデル</td> <td>: <math>k-\epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)</td> </tr> </table> <p>離散化手法</p> <table> <tr> <td></td> <td>: MARS</td> </tr> </table> <p>3. 境界条件</p> <table> <tr> <td>流入流量</td> <td>: 243m<sup>3</sup>/h</td> </tr> <tr> <td>出口条件</td> <td>: 流速一定</td> </tr> <tr> <td>液面境界条件</td> <td>: slip</td> </tr> <tr> <td>フロー孔壁面</td> <td>: non-slip</td> </tr> </table>	解析対象範囲	: 炉心出口～液面(1/2セクタモデル)	メッシュ数	: 4,980,000	スケール	: 1/10縮尺試験体系系	DP形状	: 2重DP	流動適正化策	: フロースプリッタ、ベルマウス模擬	流体	: 水	流入口メッシュ	: 4×4分割 (口径 9mm相当)	フロー孔メッシュ	: 4×4分割 (口径 12mm相当)	乱流モデル	: $k-\epsilon$ RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)		: MARS	流入流量	: 243m <sup>3</sup> /h	出口条件	: 流速一定	液面境界条件	: slip	フロー孔壁面	: non-slip
解析対象範囲	: 炉心出口～液面(1/2セクタモデル)																												
メッシュ数	: 4,980,000																												
スケール	: 1/10縮尺試験体系系																												
DP形状	: 2重DP																												
流動適正化策	: フロースプリッタ、ベルマウス模擬																												
流体	: 水																												
流入口メッシュ	: 4×4分割 (口径 9mm相当)																												
フロー孔メッシュ	: 4×4分割 (口径 12mm相当)																												
乱流モデル	: $k-\epsilon$ RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)																												
	: MARS																												
流入流量	: 243m <sup>3</sup> /h																												
出口条件	: 流速一定																												
液面境界条件	: slip																												
フロー孔壁面	: non-slip																												
結果	<p>ケース BD1-3 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに変化が見られる。</li> <li>切込みを通過する噴流は鉛直方向へ流れている。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは下降流となる。</li> </ul> <p>結論</p> <p>フロー孔口径は、プレナム全体流況に及ぼす影響が大きい。</p> <p>備考</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>.</li> </ul>																												

ケース名	FH1-3																																										
項目	フロー孔のメッシュ分割																																										
着眼点	フロー孔と流入口のメッシュ分割を変えることによるフローパターンへの影響確認																																										
比較対象ケース	FH1-2																																										
内容	ケース FH1-2に対して、流入口メッシュ分割とフロー孔メッシュ分割を異なるものとした。																																										
解析条件	<p>1. 体系</p> <table> <tr> <td>解析対象範囲</td> <td>:</td> <td>炉心出口～液面(1/2セクタモデル)</td> </tr> <tr> <td>メッシュ数</td> <td>:</td> <td>4,980,000</td> </tr> <tr> <td>スケール</td> <td>:</td> <td>1/10縮尺試験体系</td> </tr> <tr> <td>DP形状</td> <td>:</td> <td>2重DP</td> </tr> <tr> <td>流動適正化策</td> <td>:</td> <td>フロースプリッタ、ベルマウス模擬</td> </tr> <tr> <td>流体</td> <td>:</td> <td>水</td> </tr> <tr> <td>流入口メッシュ</td> <td>:</td> <td>4×4分割 (口径9mm相当)</td> </tr> <tr> <td>フロー孔メッシュ</td> <td>:</td> <td>6×6分割 (口径12mm相当)</td> </tr> </table> <p>2. 数値解法</p> <table> <tr> <td>乱流モデル</td> <td>:</td> <td><math>k-\epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)</td> </tr> <tr> <td>離散化手法</td> <td>:</td> <td>MARS</td> </tr> </table> <p>3. 境界条件</p> <table> <tr> <td>流入流量</td> <td>:</td> <td>243m<sup>3</sup>/h</td> </tr> <tr> <td>出口条件</td> <td>:</td> <td>流速一定</td> </tr> <tr> <td>液面境界条件</td> <td>:</td> <td>slip</td> </tr> <tr> <td>フロー孔壁面</td> <td>:</td> <td>non-slip</td> </tr> </table>	解析対象範囲	:	炉心出口～液面(1/2セクタモデル)	メッシュ数	:	4,980,000	スケール	:	1/10縮尺試験体系	DP形状	:	2重DP	流動適正化策	:	フロースプリッタ、ベルマウス模擬	流体	:	水	流入口メッシュ	:	4×4分割 (口径9mm相当)	フロー孔メッシュ	:	6×6分割 (口径12mm相当)	乱流モデル	:	$k-\epsilon$ RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)	離散化手法	:	MARS	流入流量	:	243m <sup>3</sup> /h	出口条件	:	流速一定	液面境界条件	:	slip	フロー孔壁面	:	non-slip
解析対象範囲	:	炉心出口～液面(1/2セクタモデル)																																									
メッシュ数	:	4,980,000																																									
スケール	:	1/10縮尺試験体系																																									
DP形状	:	2重DP																																									
流動適正化策	:	フロースプリッタ、ベルマウス模擬																																									
流体	:	水																																									
流入口メッシュ	:	4×4分割 (口径9mm相当)																																									
フロー孔メッシュ	:	6×6分割 (口径12mm相当)																																									
乱流モデル	:	$k-\epsilon$ RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)																																									
離散化手法	:	MARS																																									
流入流量	:	243m <sup>3</sup> /h																																									
出口条件	:	流速一定																																									
液面境界条件	:	slip																																									
フロー孔壁面	:	non-slip																																									
結果	<p>ケース FH1-2と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな相違はない。</li> <li>切込みを通過する噴流は斜め上方へ流れている。</li> <li>HL-RV隙間領域の流れは上昇流となる。</li> </ul> <p>フロー孔を流入口と異なるメッシュ分割に設定しても、プレナム全体流れに大きな相違はない。</p>																																										
結論																																											
備考																																											



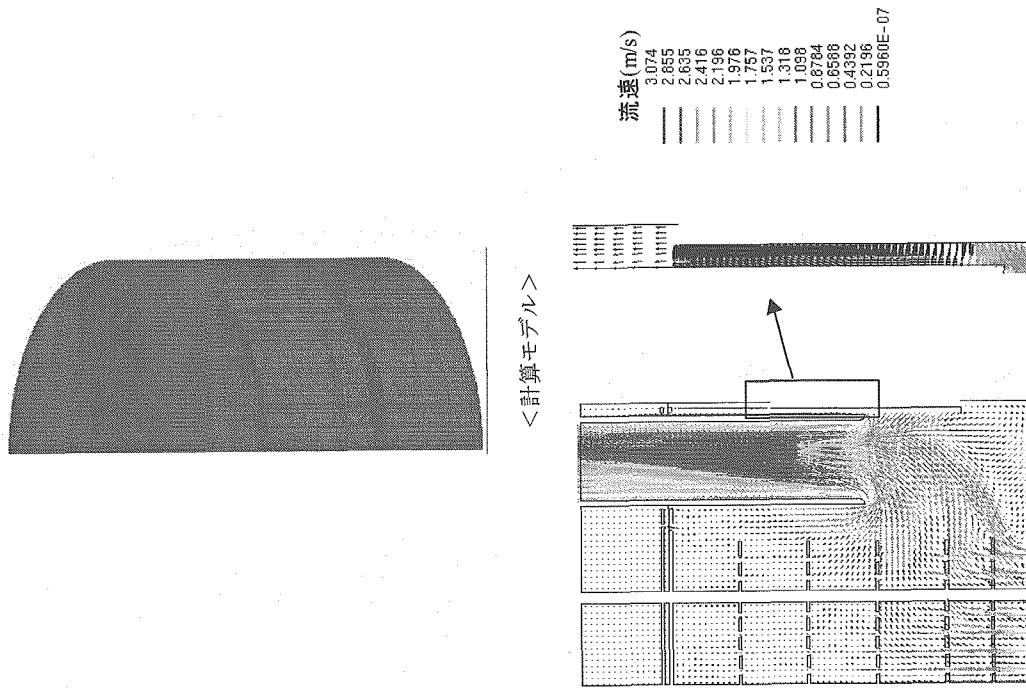
&lt;解析結果&gt;

ケース名	CP1-1
項目	数値解法
着眼点	乱流モデルと離散化手法の組合せによる影響確認
比較対象ケース	BD1-1
内容	ケース BD1-1 に対して、乱流モデルを $k-\epsilon$ 、離散化手法を UD に変更した。
解析条件	<p>1. 体系            解析対象範囲 : 炉心出口～液面(1/2 セクタモデル)            メッシュ数 : 4,980,000            スケール : 1/10 缩尺試験体体系            DP 形状 : 2 重 DP            流動適正化策 : フロースプリッタ、ベルマウス模擬            流体 : 水            流入口メッシュ : 4×4 分割 (口径 9 mm 相当)            フロー孔メッシュ : 4×4 分割 (口径 11 mm 相当)</p> <p>2. 数値解法            乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> モデル            (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)            離散化手法 : UD</p> <p>3. 境界条件            流入流量 : 243 m<sup>3</sup>/h            出口条件 : 流速一定            液面境界条件 : slip            フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース BD1-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな相違はない。</li> <li>切込みを通過する噴流は斜め上方へ流れている。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となる。</li> </ul> <p>結論            解析に用いたメッシュモデルでは、<math>k-\epsilon</math> と UD の組合せでも HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となる。</p> <p>備考</p>



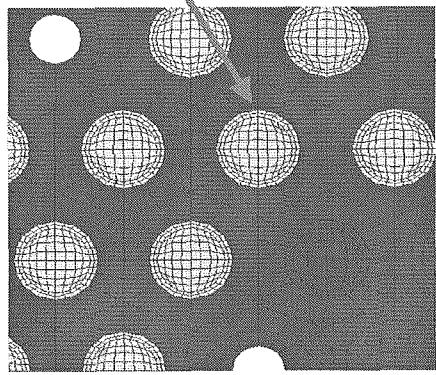
&lt;解析結果&gt;

ケース名	CP1-2
項目	数値解法
着眼点	乱流モデルと離散化手法の組合せによる影響確認
比較対象ケース	CP1-1
内容	ケース CP1-1 に対して、乱流モデルを $k - \epsilon$ RNG とした。
解析条件	<p>1. 体系            解析対象範囲 : 炉心出口～液面(1/2 セクタモデル)            メッシュ数 : 4,980,000            スケール : 1/10 縮尺試験体系            DP 形状 : 2 重 DP            流動適正化策 : フロースプリッタ、ベルマウス模擬</p> <p>2. 流体            水            流入口メッシュ : 4×4 分割 (口径 9 mm 相当)            フロー孔メッシュ : 4×4 分割 (口径 11 mm 相当)</p> <p>3. 数値解法            乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル            (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)            UD            離散化手法            境界条件            流入流量 : 243m<sup>3</sup>/h            出口条件 : 流速一定            液面境界条件 : slip            フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース CP1-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな相違はない。</li> <li>切込みを通過する噴流は斜め上方へ流れている。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となる。</li> </ul> <p>結論            解析に用いたメッシュモデルでは、<math>k - \epsilon</math> RNG と UD の組合せでも HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となる。</p> <p>備考            • 大きな改善が見られないため、計算途中で打ち切り</p>

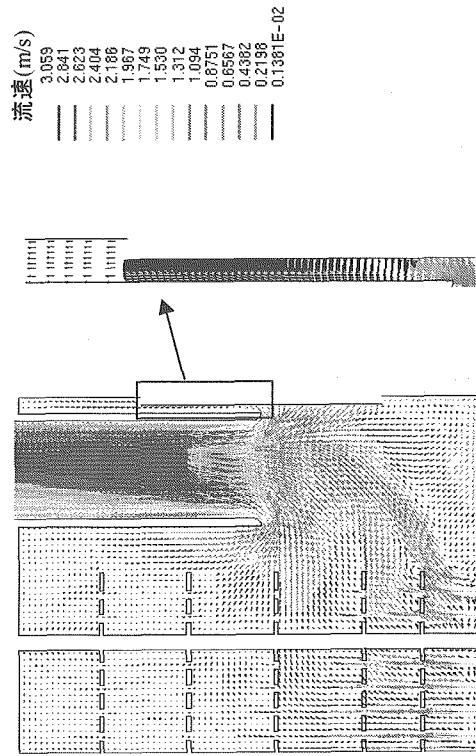


&lt;解析結果&gt;

ケース名	FH1-4
項目	フロー孔メッシュ分割
着眼点	フロー孔メッシュ分割数の影響確認
比較対象ケース	CP1-1
内容	ケースCP1-1に対して、DP上部領域を削除し、体系下端から上端までのフロー孔メッシュを詳細化した。
解析条件	<p>1. 体系            解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル)            メッシュ数 : 6,200,000            スケール : 1/10縮尺試験体体系            DP形状 : 一            流動適正化策 : フロースプリッタ、ベルマウス模擬            流体 : 水            流入口メッシュ : 4×4分割 (口径9mm相当)            フロー孔メッシュ : 8×8分割 (口径11mm相当)</p> <p>2. 数値解法            乱流モデル : <math>k-\varepsilon</math> モデル            (乱流強度0.1、代表長さ0.001)            離散化手法 : UD</p> <p>3. 境界条件            流入流量 : 243m<sup>3</sup>/h            出口条件 : 流速一定            フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケースCP1-1と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS水平板を通過する流れに大きな相違はない。</li> <li>切込みを通過する噴流は斜め上方へ流れている。</li> <li>HL-RV隙間領域の流れは上昇流となる。</li> </ul>
結論	解析に用いたメッシュモデルでは、 $k-\varepsilon$ とUDを組合せてフロー孔メッシュ分割を詳細化しても、HL-RV隙間領域の流れは上昇流となる。
備考	.

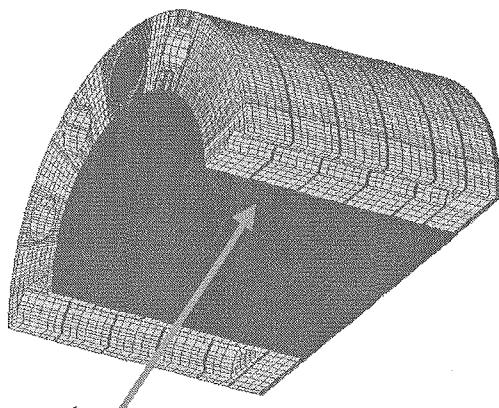


体系下端から上端まで  
メッシュ分割を詳細化

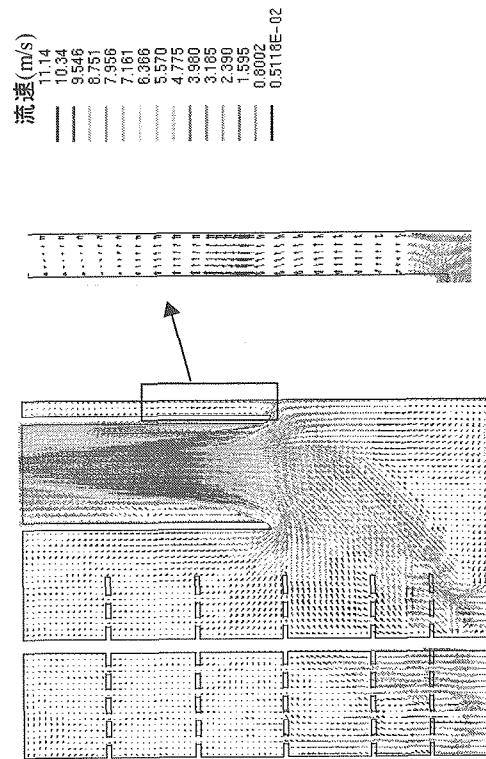


<解析結果>

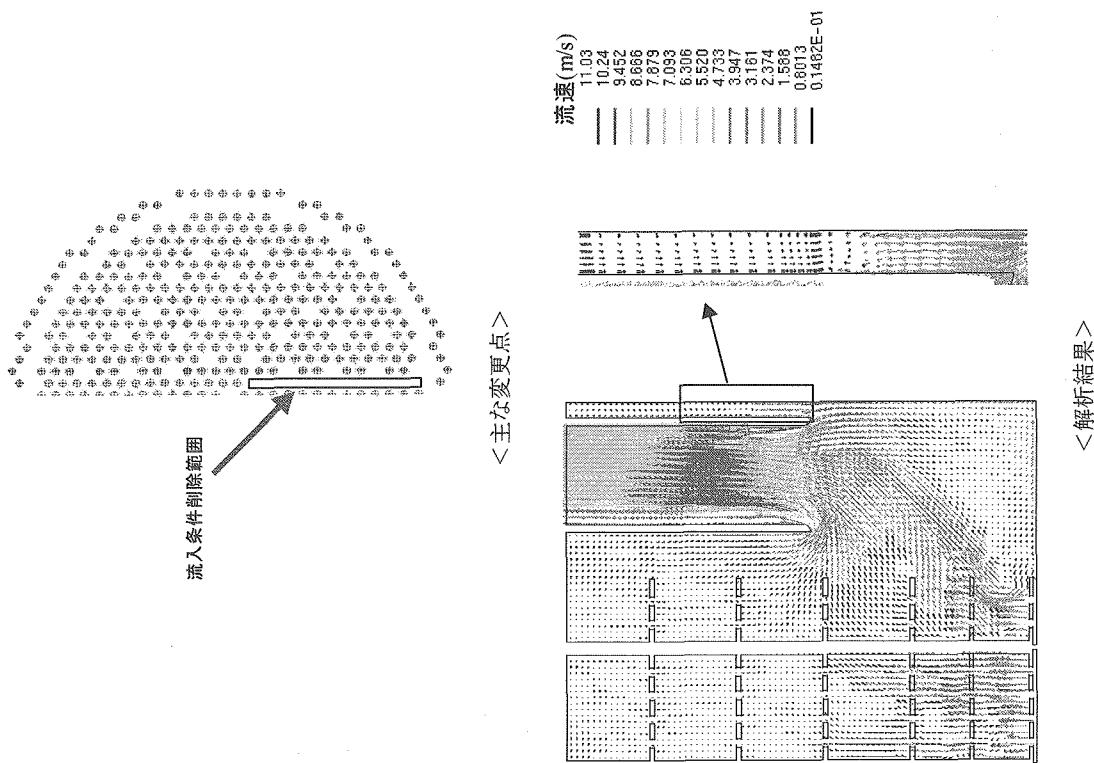
ケース名	SG1-1
項目	DP下方領域のフローパターン確認
着眼点	DP下方領域のフローパターンに焦点を絞り、より多くの項目について検討する。
比較対象ケース	N01-1
内容	N01-1に対して、DP上部領域を削除し、実機スケールかつ流体をナトリウムに変更したモデルとした。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 730,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬 流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径90mm相当) フロー孔メッシュ : 4×4分割 (口径110mm相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \varepsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)</p> <p>離散化手法 : MARS</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース N01-1と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS水平板のフロー孔を通過する流れだけでなく、プレートに沿う横方向流れが生じている。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度が横方向に向いている。</li> <li>HL-RV隙間領域の流れは上昇流となっている。</li> </ul> <p>結論 全体のメッシュ分割を粗く設定したことにより壁面の影響を大きく受け、フロー孔の流れが減少する。</p> <p>備考</p>



FIM貫通孔プラグ

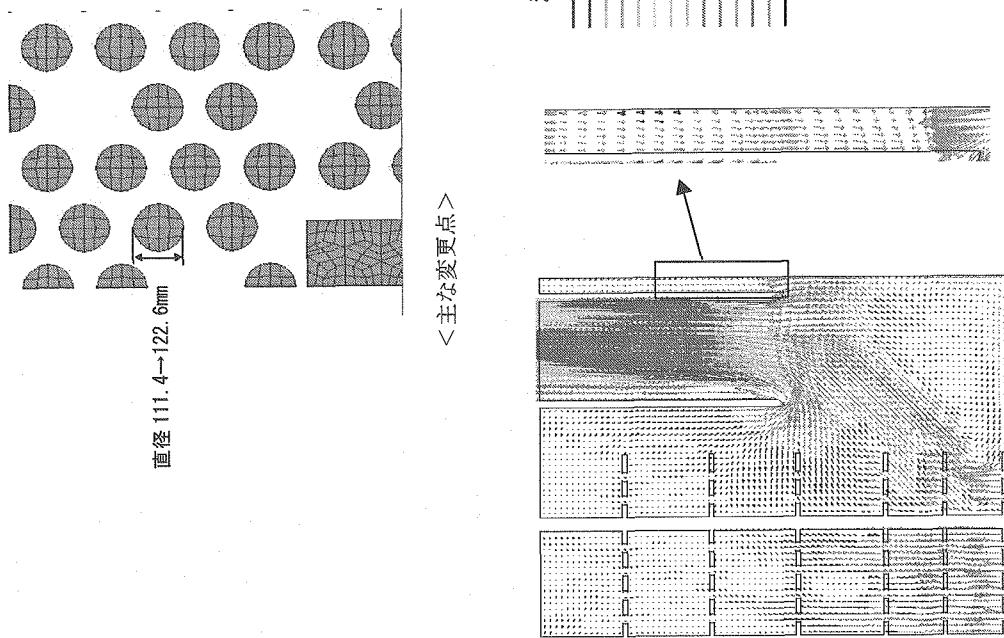


&lt;解析結果&gt;

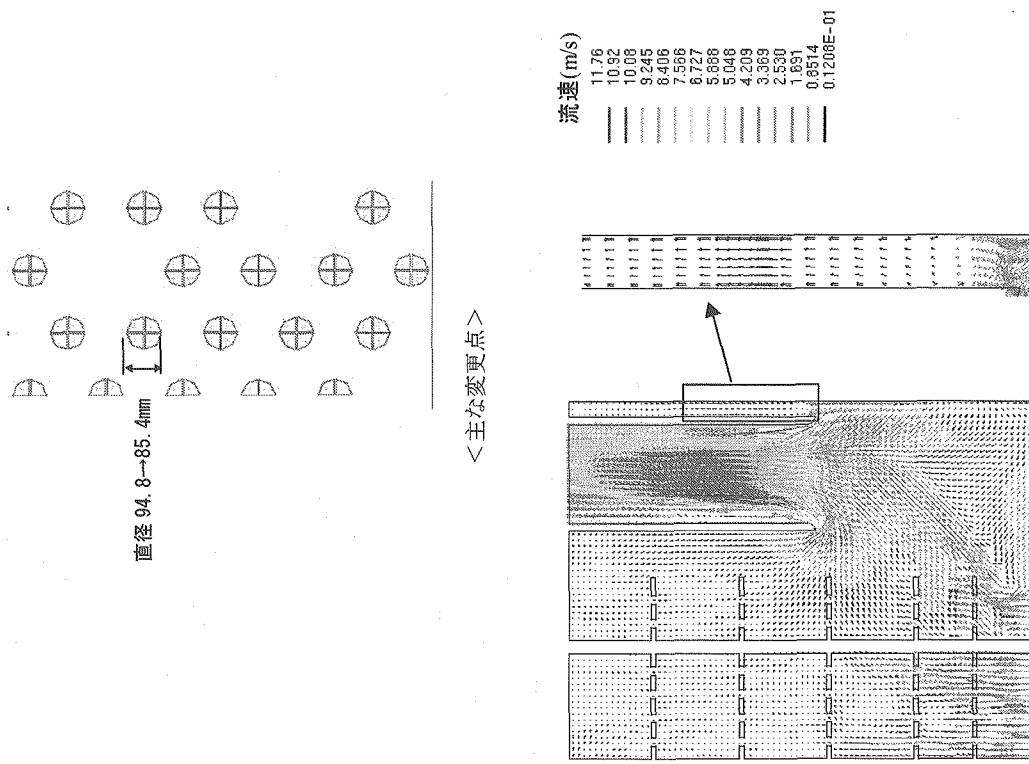


ケース名	SG1-2
項目	流入境界条件
着眼点	切込みを通過する噴流の上昇角度に寄与するパラメータの検討
比較対象ケース	SG1-1
内容	ケース SG1-1 に対して、切込み近傍の流入条件(CIP のフロー孔に 対応していない部分)を削除了。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP 下端(1/2 セクタモデル) メッシュ数 : 730,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP 形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬</p> <p>流体 : ナトリウム</p> <p>流入口メッシュ : 2×2 分割 (口径 90mm 相当) フロー孔メッシュ : 4×4 分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)</p> <p>離散化手法 : MARS</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース SG1-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板のフロー孔を通過する流れだけでなく、プレートに沿う横方向流れが生じている。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度が若干鉛直方向側に改善された。</li> <li>HI-RV 隙間領域の流れは上昇流となっている。</li> </ul> <p>結論 CIP のフロー孔と対応していない流入口からの流れは、切込みを通過する噴流に影響を及ぼす。</p> <p>備考</p>

ケース名	SG1-3
項目	フロー孔形状
着眼点	フロー孔口径拡大による影響確認
比較対象ケース	SG1-1
内容	ケース SG1-1 に対して、フロー孔口径を約 1 割拡大した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 730,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 流動適正化策 流体 流入口メッシュ : ナトリウム フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当) 4×4分割 (口径 121mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法 MARS</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース SG1-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板のフロー孔を通過する流れに変化が見られる。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度が若干鉛直方向側に改善された。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは下降流となる。</li> </ul> <p>結論 フロー孔の口径は水平板を通過する流れのフローパターンに影響を及ぼし、それによりプレナム全体流況も影響を受ける。</p> <p>備考</p>

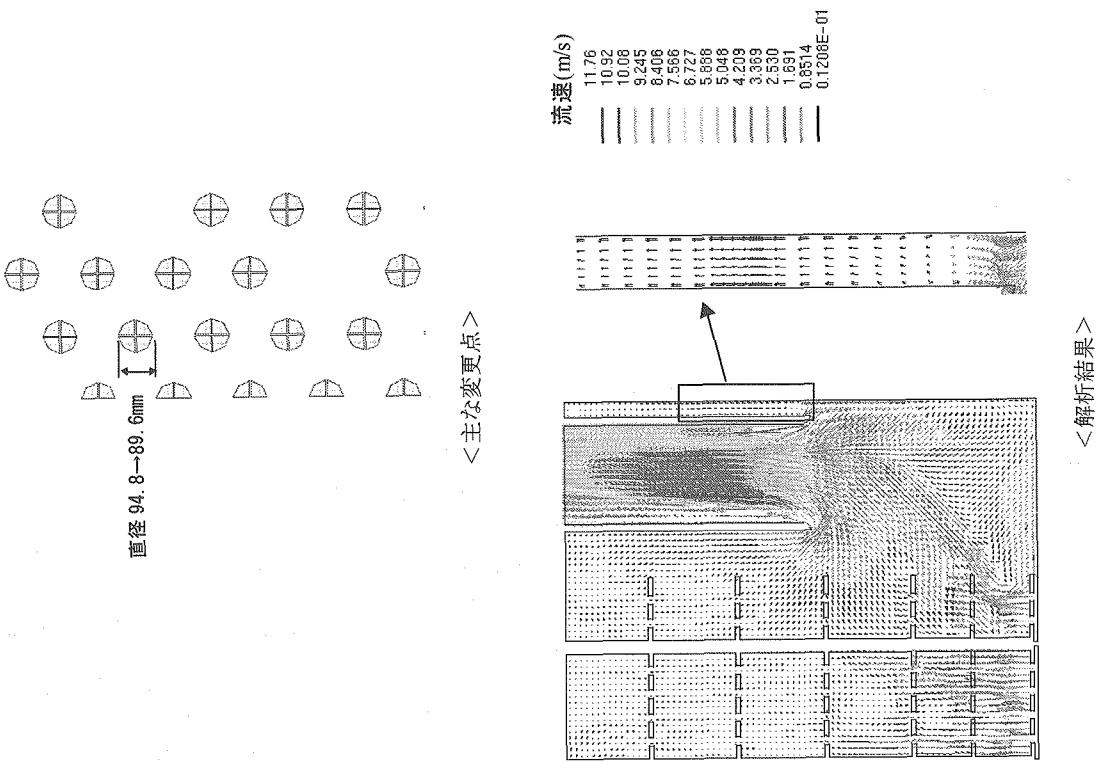


ケース名	SG1-4
項目	流入口形状
着眼点	流入口口径縮小による影響確認
比較対象ケース	SG1-1
内容	ケース SG1-1 に対して、流入口径を約 1 割縮小した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 730,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 流動適正化策 流体 流入口メッシュ : ナトリウム 2×2分割 (口径 81mm 相当) フロー孔メッシュ : 4×4分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法 : MARS</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース SG1-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板のフロー孔を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度が鉛直方向へ多少変化する。</li> <li>HL-RV 間隙領域の流れは上昇流となる。</li> </ul> <p>流入口径を小さくしたことによるフローパターンへの影響は、切込みを通過する噴流の上昇角度に多少影響を及ぼすものの、一口口径のようにプレナム全体流況に影響を及ぼす程ではない。</p>
結論	
備考	

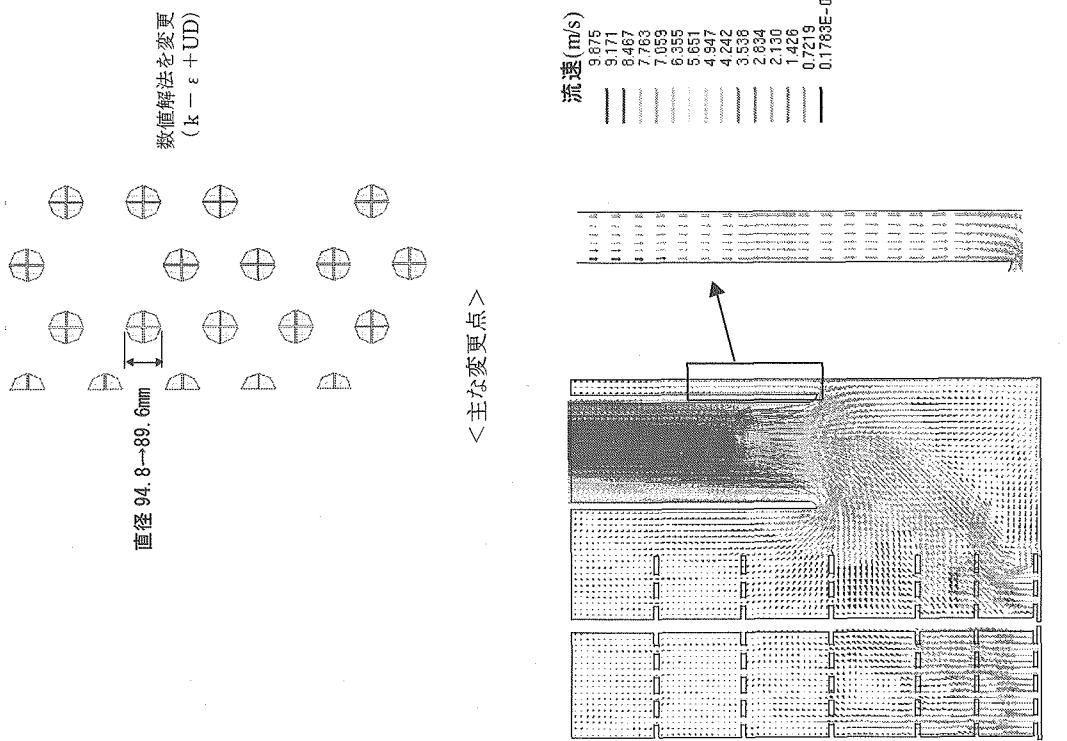


&lt;解析結果&gt;

ケース名	SG1-5
項目	流入口形状
着眼点	流入口径を小さくすることで給直方向流れを促進する
比較対象ケース	SG1-1, SG1-4
内容	ケース SG1-1 に対して、流入口径を縮小した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 730,000 スケール : 実機スケール DP形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬 流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 85mm 相当) フロー孔メッシュ : 4×4分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法 : MARS</p>
3. 境界条件	<p>流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース SG1-1 と比較し、下記を確認した。            • UIS 水平板のフロー孔を通過する流れに大きな差異はない。            • 切込みを通過する噴流の上昇角度は鉛直方向へ変化する。            • HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となる。</p>
結論	流入口径を小さくしたことによるフローパターンへの影響は、切込みを通す喷流の上昇角度に多少影響を及ぼすものの、一口口径のようにプレナム全体流況に影響を及ぼす程ではない。
備考	•

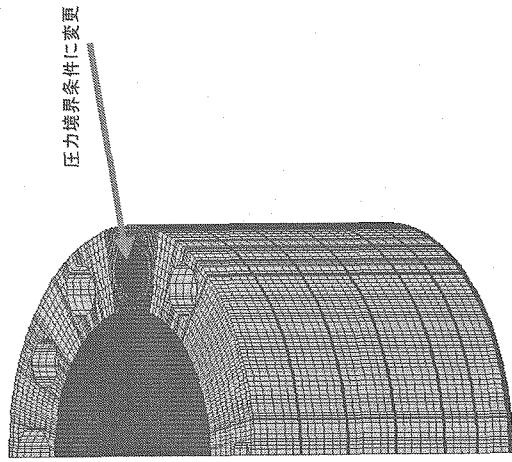


ケース名	SG1-6
項目	数値解法
着眼点	流入口口径縮小及び数値解法の組合せによる影響確認
比較対象ケース	SG1-5
内容	ケース SG1-5 に対して、 $k - \epsilon$ と UD の組合せに変更した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 730,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 流動適正化策 : ベルマウス模擬</p> <p>流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 85mm 相当) フロー孔メッシュ : 4×4分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法 : UD</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース SG1-5 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板のフロー孔を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>HL 内流れの偏りが解消される。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度は鉛直方向へ変化する。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは下降流となる。</li> </ul> <p>結論 数値解法の組合せを変えることで、収束性が良くなりプレナム全体のフローパターンが改善される。</p> <p>備考</p>

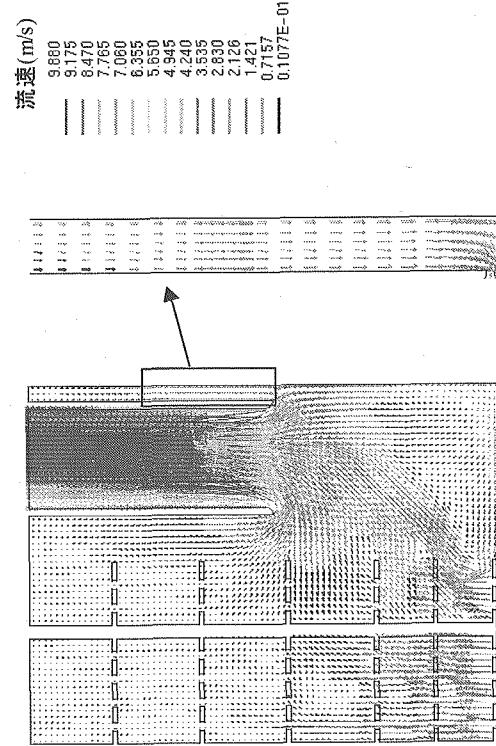


&lt;解析結果&gt;

ケース名	SG1-7
項目	数値解法
着眼点	出口境界条件及び数値解法の組合せによる影響確認
比較対象ケース	SG1-1, SG1-5
内容	ケース SG1-1 に対して、 $k - \varepsilon$ と UD の組合せに変更し、さらに出口境界条件を圧力境界条件に設定した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 730,000 スケール : 実機スケール DP形状 : 一 流動直正化策 : ベルマウス模擬 流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当) フロー孔メッシュ : 4×4分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \varepsilon</math> モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01) 離散化手法 : UD</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 圧力境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース SG1-5 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板のフロー孔を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>HL 内流れの偏りが解消される。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度は鉛直方向へ変化する。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは下降流となる。</li> </ul> <p>数値解法の組合せを変えることで、収束性が良くなりフローパターンが改善される。なお、出口境界条件を変更した影響は小さい。</p>
結論	
備考	



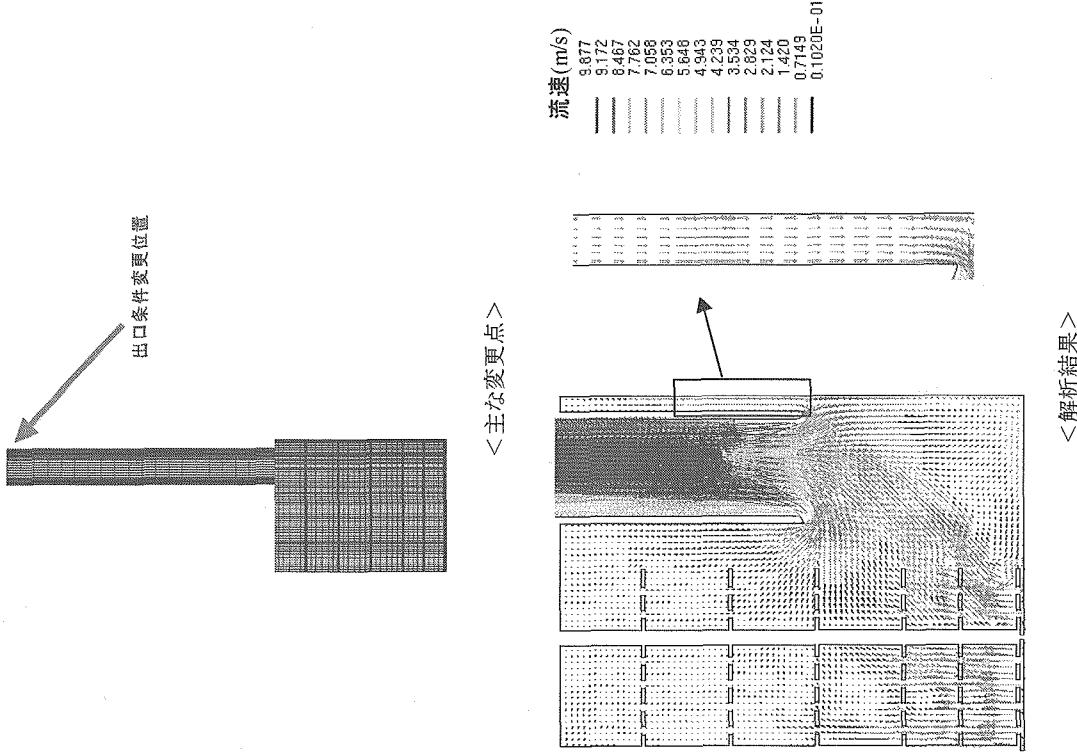
圧力境界条件に変更



&lt;主な変更点&gt;

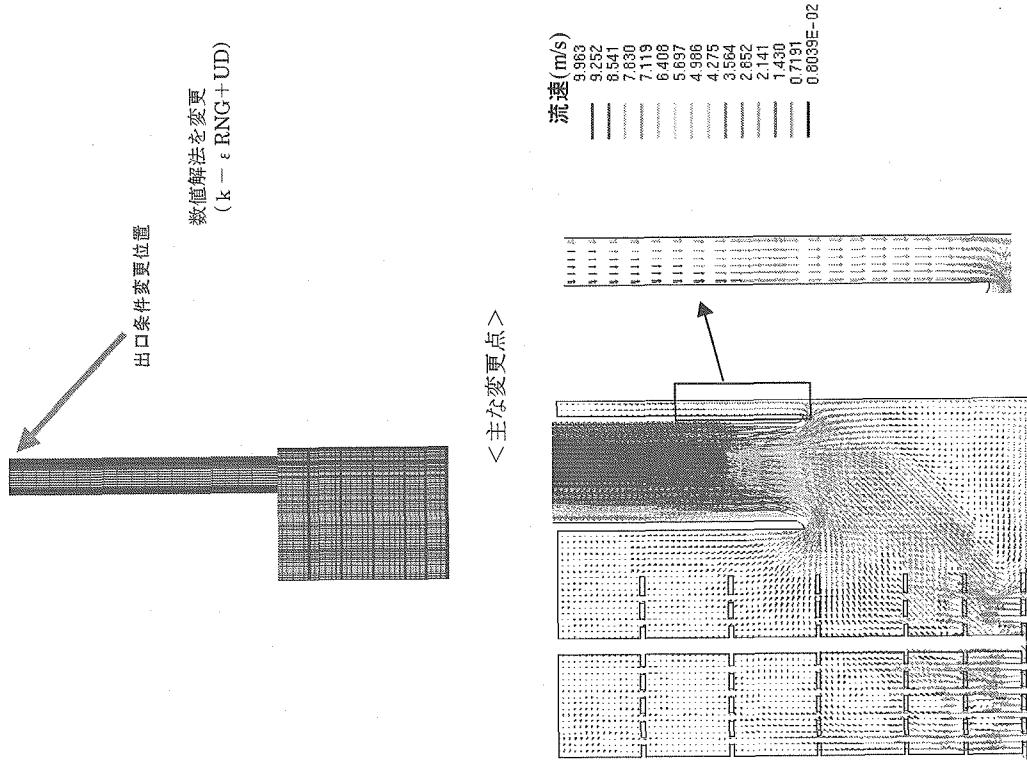
&lt;解析結果&gt;

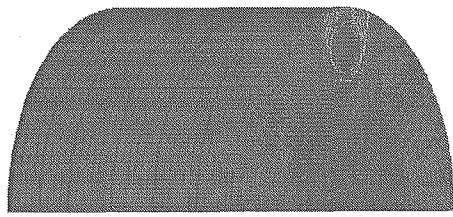
ケース名	SG1-8
項目	出口境界条件
着眼点	出口境界条件設定位置変更による影響確認
比較対象ケース	SG1-1, SG1-7
内容	ケース SG1-7 に対して、出口境界条件の設定位置を上方へ変更した。



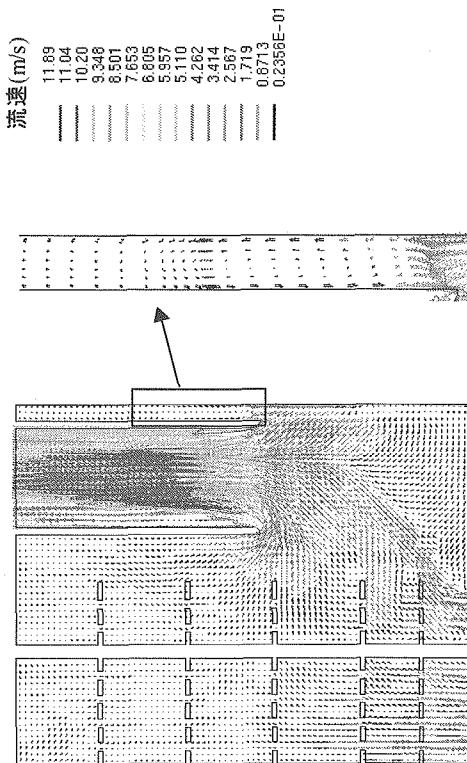
解析条件	1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 730,000 スケール : 実機ケーブル DP形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬 流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当) フロー孔メッシュ : 4×4分割 (口径 110mm 相当)
	2. 数値解法 乱流モデル : k-ε モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01) 離散化手法 : UD
	3. 境界条件 流入流量 : $7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 出口条件 : 圧力境界 フロー孔壁面 : non-slip
結果	ケース SG1-1 と比較し、下記を確認した。 • UIS 水平板のフロー孔を通過する流れに大きな差異はない。 • HL 内流れの偏りが解消される。 • 切込みを通過する噴流の上昇角度は鉛直方向へ変化する。 • HL-RV 間領域の流れは下降流となる。
結論	数値解法の組合せを変えることで、収束性が良くなりフローパターンが改善される。なお、出口境界条件を変更した影響は小さい。
備考	•

ケース名	SG1-9
項目	乱流モデル
着眼点	乱流モデルの違いによる影響確認
比較対象ケース	SG1-1, SG1-8
内容	ケース SG1-8 に対して、乱流モデルを $k-\epsilon$ RNG に変更した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 730,000 スケール : 実機スケール DP形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬 流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当) フロー孔メッシュ : 4×4分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01) 離散化手法 : UD</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 圧力境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース SG1-8 と比較し、下記を確認した。            • UIS 水平板のフロー孔を通過する流れに大きな差異はない。            • 切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。            • HL-RV 隙間領域の流れは下降流となる。</p> <p>結論 乱流モデルを変更しても、プレナム全体流況に及ぼす影響は小さい。</p> <p>備考</p>



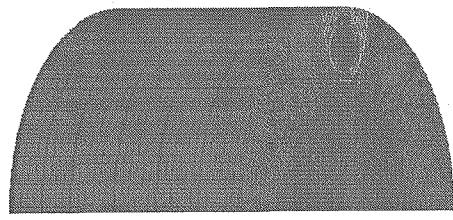


ケース名	SG2-1
項目	全体メッシュ分割
着眼点	異なるメッシュモデルを用いて、全体メッシュ分割の違いによる影響を確認するとともに、粗メッシュ体系において、多くの項目について検討する。
比較対象ケース	SG1-5
内容	ケース SG1-5 に対して、メッシュ分割数を低減して、約 58 万とした。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP 下端(1/2 セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 実機スケール DP 形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬 流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2 分割 (口径 85mm 相当) フロー孔メッシュ : 2×2 分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01) 離散化手法 : MARS</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース SG1-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>切込みを通過する噴流は、同じ DP 下方領域モデルでも SG1-1 より鉛直方向に近い角度となつた。</li> <li>HL-RV 隅間領域の流れは上昇流となつてている。</li> </ul> <p>結論 メッシュモデルの違いにより、プレナム全体流況の傾向は異なる。</p> <p>備考</p>

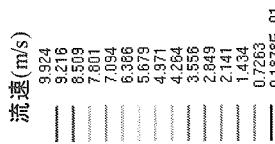
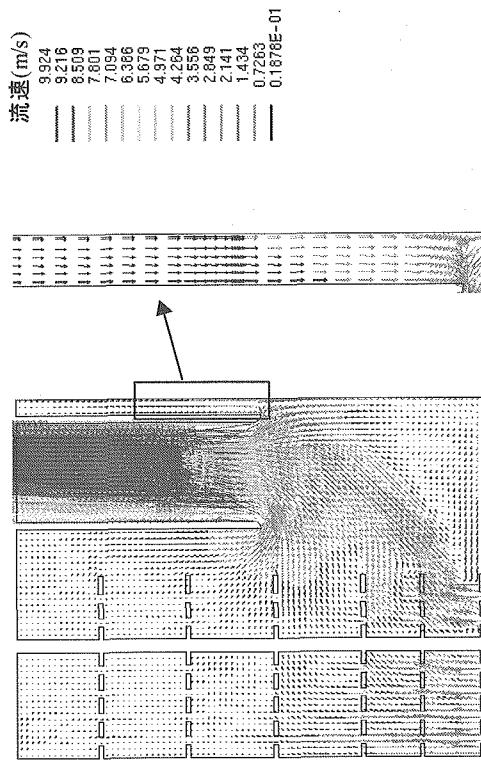


&lt;解析結果&gt;

ケース名	SG2-2
項目	数値解法
着眼点	乱流モデルと離散化手法の組合せによる影響確認
比較対象ケース	SG2-1
内容	ケース SG2-1 に対して、 $k - \epsilon$ と UD を適用した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 実機スケール DP形状 : 一 流動直正化策 : ベルマウス模擬</p> <p>流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 85mm 相当) フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01) UD</p> <p>離散化手法</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : non-slip</p>
結果	<p>ケース SG2-1 と比較し、下記を確認した。            • 切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。            • HL-RV 間領域の流れは下降流となっている。</p>
結論	粗メッシュ体系であっても、 $k - \epsilon$ と UD の組合せでは HL-RV 間領域の流れは下降流となる。
備考	•



数値解法を変更  
( $k - \epsilon + \text{UD}$ )



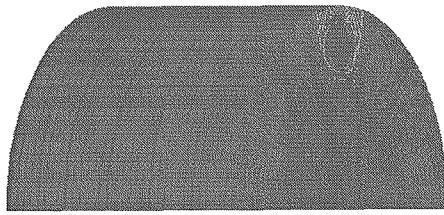
0.1678E-01

<解析結果>

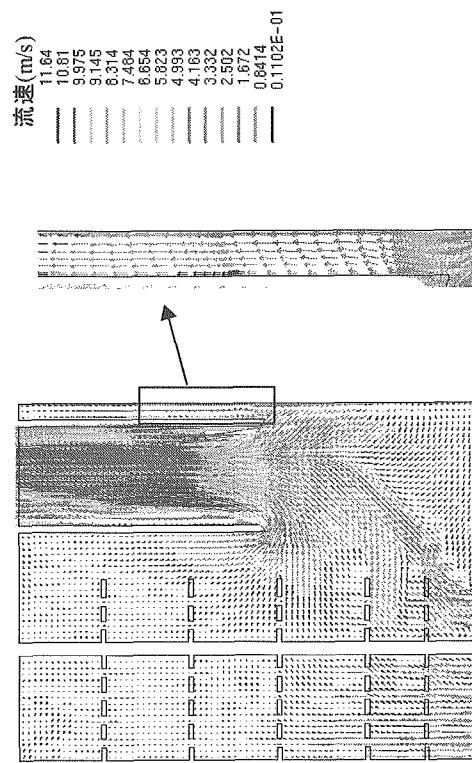
<解析モデル>

9.924  
9.216  
8.509  
7.801  
7.094  
6.386  
5.679  
4.971  
4.264  
3.556  
2.849  
2.141  
1.434  
0.7263  
0.1678E-01

ケース名	SG2-3						
項目	リスタート計算						
着眼点	リスタート計算による影響確認。						
比較対象ケース	SG2-1						
内容	ケース SG2-2 に対して、リスタート計算時に数値解法を $k - \epsilon$ RNG と MARS に変更した。						
解析条件	<p>1. 体系            解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル)            メッシュ数 : 580,000            スケール : 実機スケール            DP形状 : —            流動適正化策 : ベルマウス模擬</p> <table> <tr> <td>流体</td> <td>: ナトリウム</td> </tr> <tr> <td>流入口メッシュ</td> <td>: 2×2分割 (口径 85mm 相当)</td> </tr> <tr> <td>フロー孔メッシュ</td> <td>: 2×2分割 (口径 110mm 相当)</td> </tr> </table> <p>2. 数値解法            乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル            (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法 : MARS</p> <p>3. 境界条件            流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math>            出口条件 : 流出境界            フロー孔壁面 : non-slip</p>	流体	: ナトリウム	流入口メッシュ	: 2×2分割 (口径 85mm 相当)	フロー孔メッシュ	: 2×2分割 (口径 110mm 相当)
流体	: ナトリウム						
流入口メッシュ	: 2×2分割 (口径 85mm 相当)						
フロー孔メッシュ	: 2×2分割 (口径 110mm 相当)						
結果	<p>ケース SG2-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 隅間領域の流れは下降流となっている。</li> </ul>						
結論	<p><math>k - \epsilon</math> と UD の組合せで定常解を求めた後、<math>k - \epsilon</math> RNG と MARS の組合せでリスタート計算を実施した場合には、HL-RV 間領域の流れは上昇流となる。</p>						
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>SG2-2 の結果からリスタート計算として実行</li> </ul>						

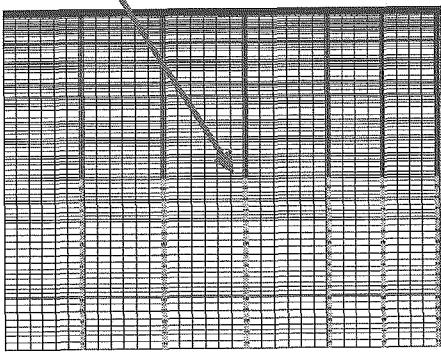
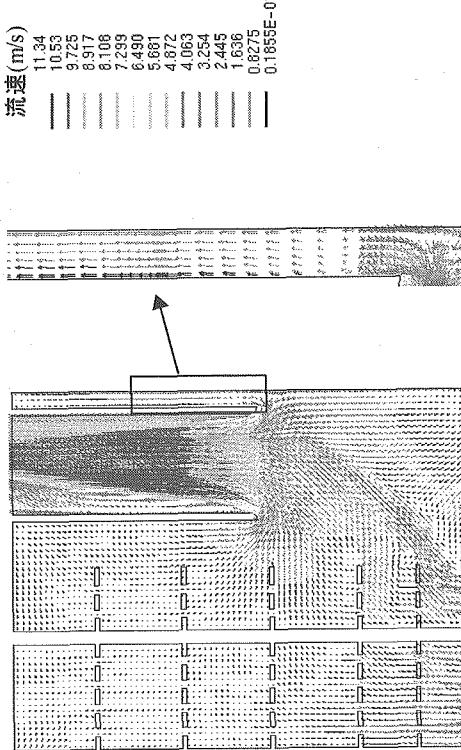


リスタート時に  
数値解法を変更  
( $k - \epsilon$  RNG + MARS)



<解析結果>

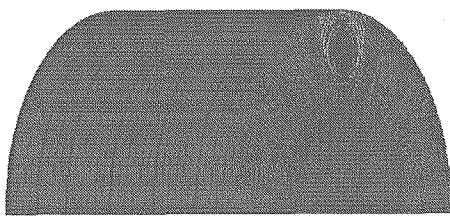
ケース名	SG2-4
項目	フロー孔壁面境界条件
着眼点	粗メッシュ体系にてフロー孔壁面条件の影響を確認する。
比較対象ケース	SG2-1
内容	ケース SG2-3 に対して、フロー孔壁面条件を slip 条件とした。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP 下端(1/2 セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP 形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬</p> <p>流体 : ナトリウム</p> <p>流入口メッシュ : 2×2 分割 (口径 85mm 相当) フロー孔メッシュ : 2×2 分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法 : MARS</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG2-3 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となっている。</li> </ul>
結論	フロー孔壁面条件を変更しても、プレナム全体流況に及ぼす影響は小さい。
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>SG2-3 の結果からリストア計算として実行</li> </ul>

フロー孔壁面条件  
変更領域

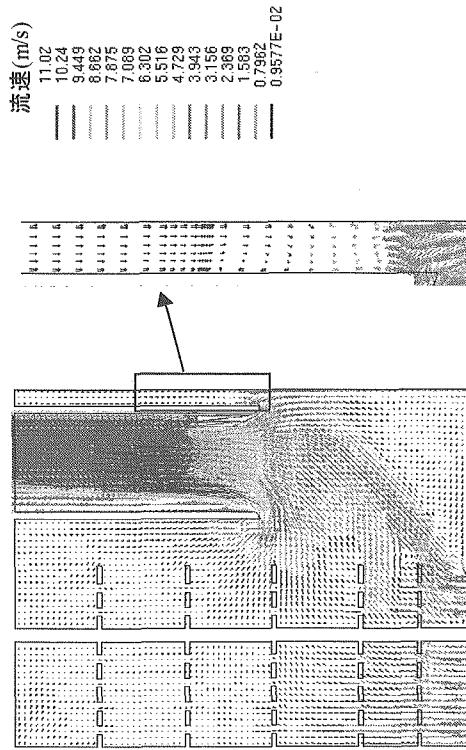
&lt;主な変更点&gt;

&lt;解析結果&gt;

ケース名	SG2-5
項目	数値解法
着眼点	離散化手法(SFCD)の違いによる影響確認
比較対象ケース	SG2-4
内容	ケース SG2-4 に対して、離散化手法を SFCD とした。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 流動適正化策 流体 : ベルマウス模擬 ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 85mm 相当) フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法 : SFCD</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG2-4 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となっている。</li> </ul> <p>結論 このメッシュモデルでは SFCD と MARS の間に大きな相違はない。</p> <p>備考 SG2-2 の結果からリスタート計算として実行</p>



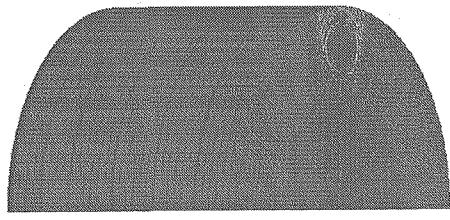
数値解法を変更  
( $k - \epsilon$  RNG + SFCD)



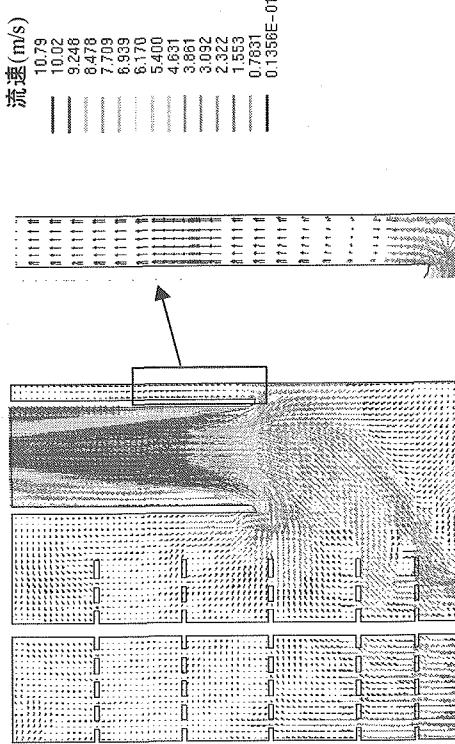
<主な変更点>

<解析結果>

ケース名	SG2-6
項目	数値解法
着眼点	離散化手法 (GAMMA) の違いによる影響確認
比較対象ケース	SG2-4
内容	ケース SG2-4 に対して、離散化手法を GAMMA とした。
解析条件	<p>1. 体系            解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル)            メッシュ数 : 580,000            スケール : 実機スケール            DP形状 : 一            流動適正化策 : ベルマウス模擬            流体 : ナトリウム            流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 85mm 相当)            フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法            乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル            (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)            GAMMA            離散化手法</p> <p>3. 境界条件            流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math>            出口条件 : 流出境界            フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>解析結果を次ページに示す。ケース SG2-4 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となっている。</li> </ul> <p>結論            このメッシュモデルでは GAMMA と MARS の間に大きな相違はない。            備考            SG2-2 の結果からリストア計算として実行</p>

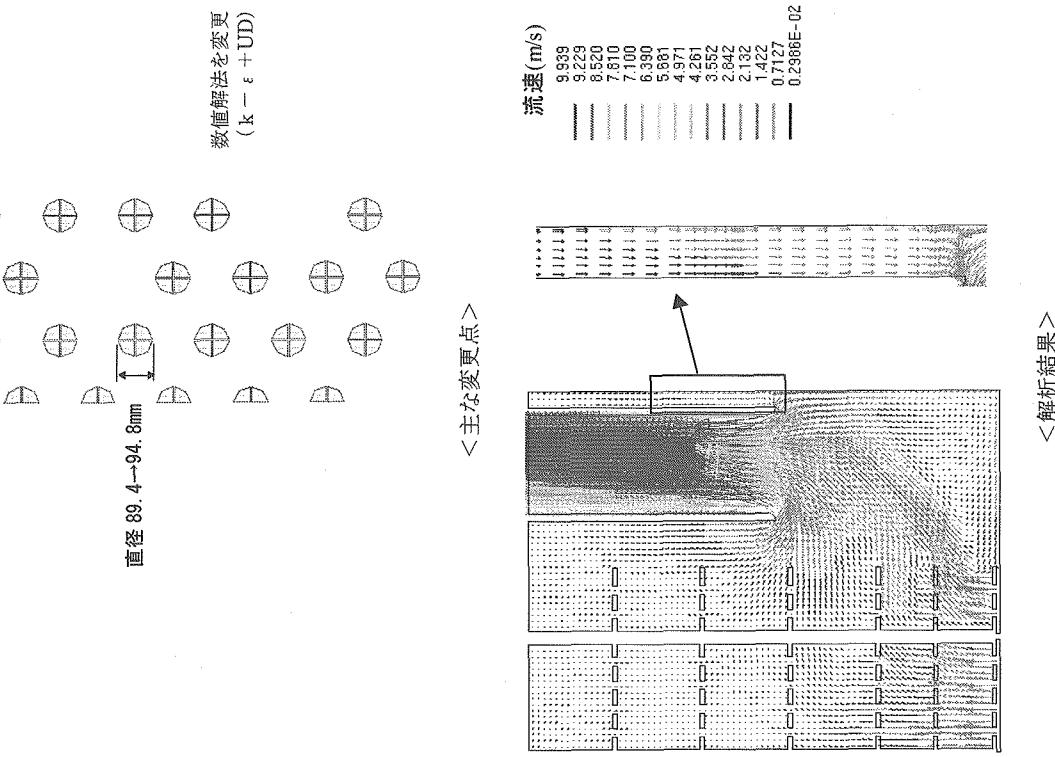


数値解法を変更  
( $k - \epsilon$  RNG+GAMMA)



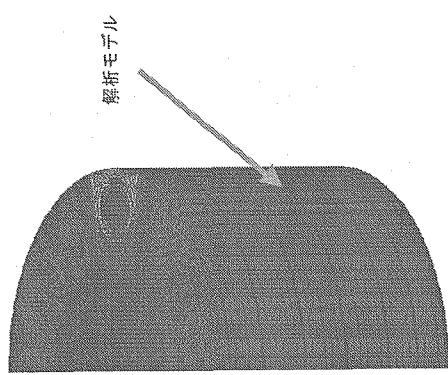
<主な変更点>

<解析結果>



ケース名	SG2-7	
項目	数値解法	
着眼点	粗メッシュ体系において、流入口形状と数値解法 ( $k - \epsilon$ 、UD) の影響確認	
比較対象ケース	SG2-2	
内容	ケース SG2-2に対して、流入口を 85mm から設計寸法 90mm に修正し、数値解法を $k - \epsilon$ 、UD の組合せとした。	
解析条件	1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 實機スケール DP形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬 流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当) フローポジション : 2×2分割 (口径 110mm 相当)	
	2. 数値解法 乱流モデル : $k - \epsilon$ モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01) 離散化手法 : UD 3. 境界条件 流入流量 : $7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 出口条件 : 流出境界 フローポジション : slip	
結果	ケース SG2-2 と比較し、下記を確認した。 <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは下降流となっている。</li> </ul>	
結論	粗メッシュ体系でも、 $k - \epsilon$ と UD の組合せでは HL-RV 隙間領域の流れは下降流となる。また、流入口寸法差 (約 5mm) の影響は小さい。	
備考	SG2-2 の結果からリストアート計算として実行	

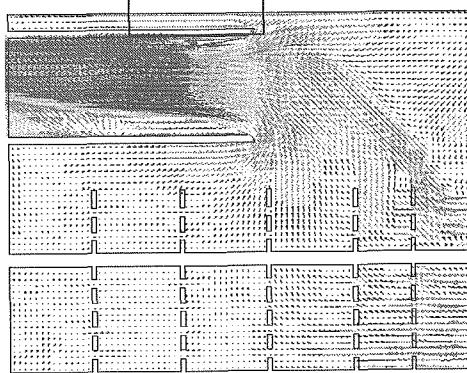
ケース名	SG2-8
項目	数値解法
着眼点	粗メッシュ体系において、数値解法 ( $k-\epsilon$ RNG、MARS) の影響確認
比較対象ケース	SG2-7
内容	ケース SG2-7 に対して、数値解法を $k-\epsilon$ RNG、MARS の組合せに変更した。
解析条件	<p>1. 体系            解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル)            メッシュ数 : 580,000            スケール : 実機スケール            DP形状 : 一            流動適正化策 : ベルマウス模擬            流体 : ナトリウム            流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当)            フローポンメッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法            乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> RNG モデル            (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)            離散化手法 : MARS</p> <p>3. 境界条件            流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math>            出口条件 : 流出境界            フローポン壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG2-7 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない、</li> <li>切込みを通す噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 障害領域の流れは上昇流となっている。</li> </ul> <p>結論            粗メッシュ体系において、流入口径を 90mm とし、<math>k-\epsilon</math> RNG モデルと MARS の組合せでは HL-RV 障害領域の流れは上昇流となる。</p> <p>備考</p>



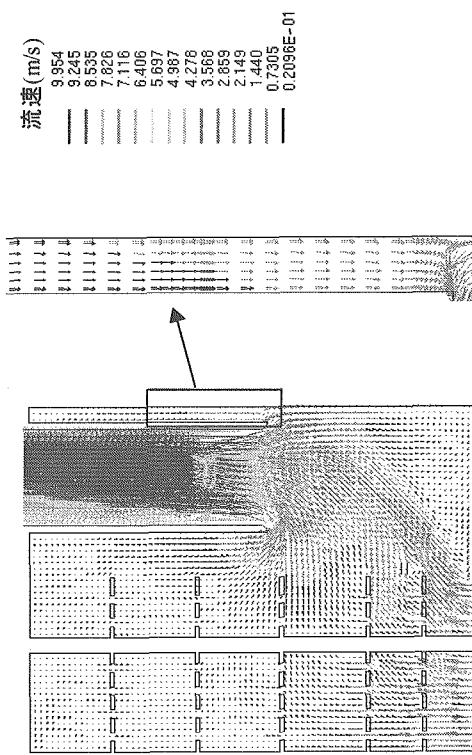
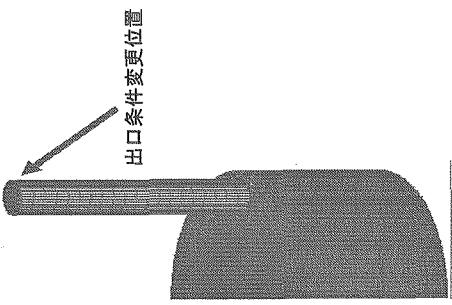
数値解法を変更  
( $k-\epsilon$  RNG+MARS)



<主な変更点>

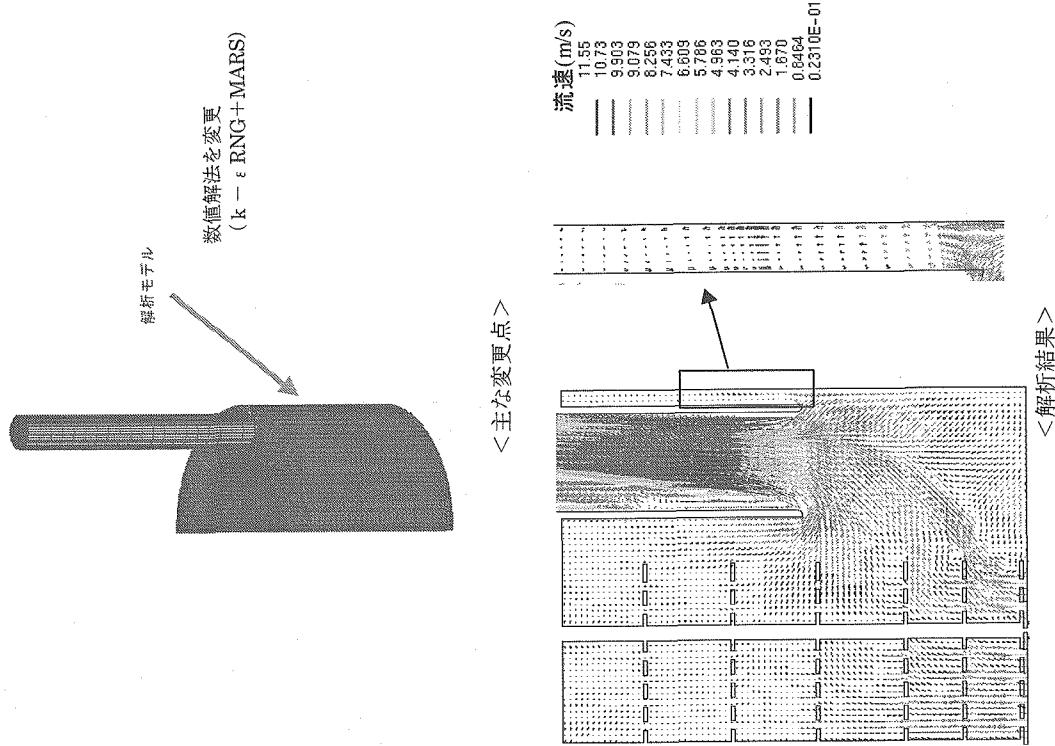


<解析結果>

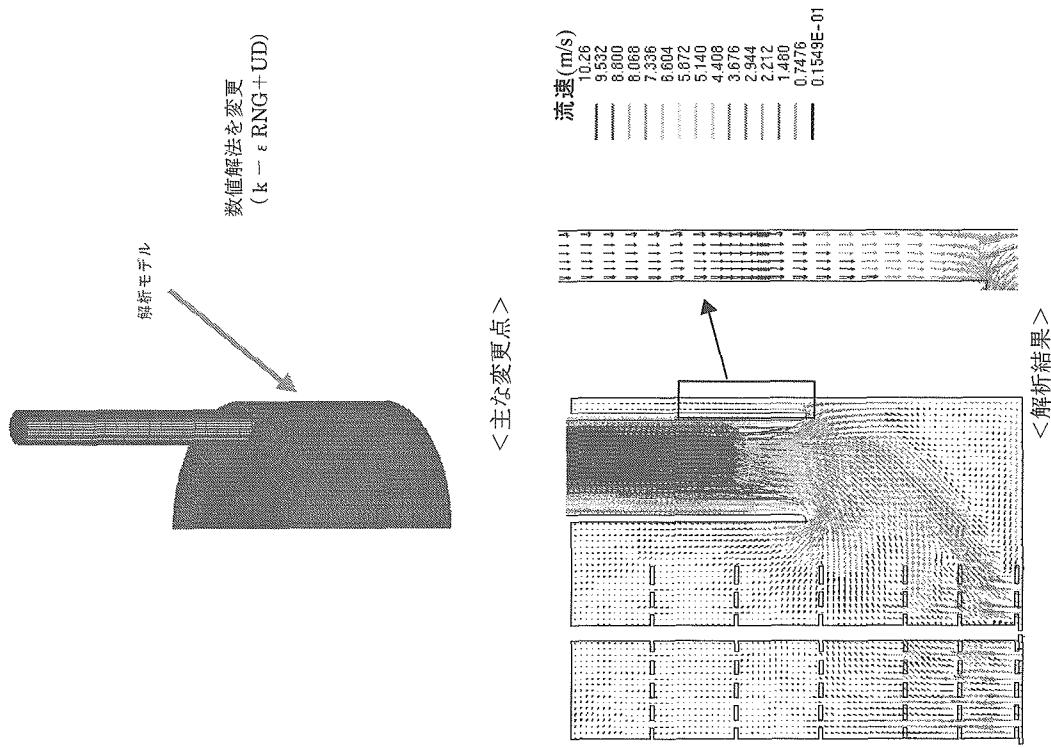


&lt;解析結果&gt;

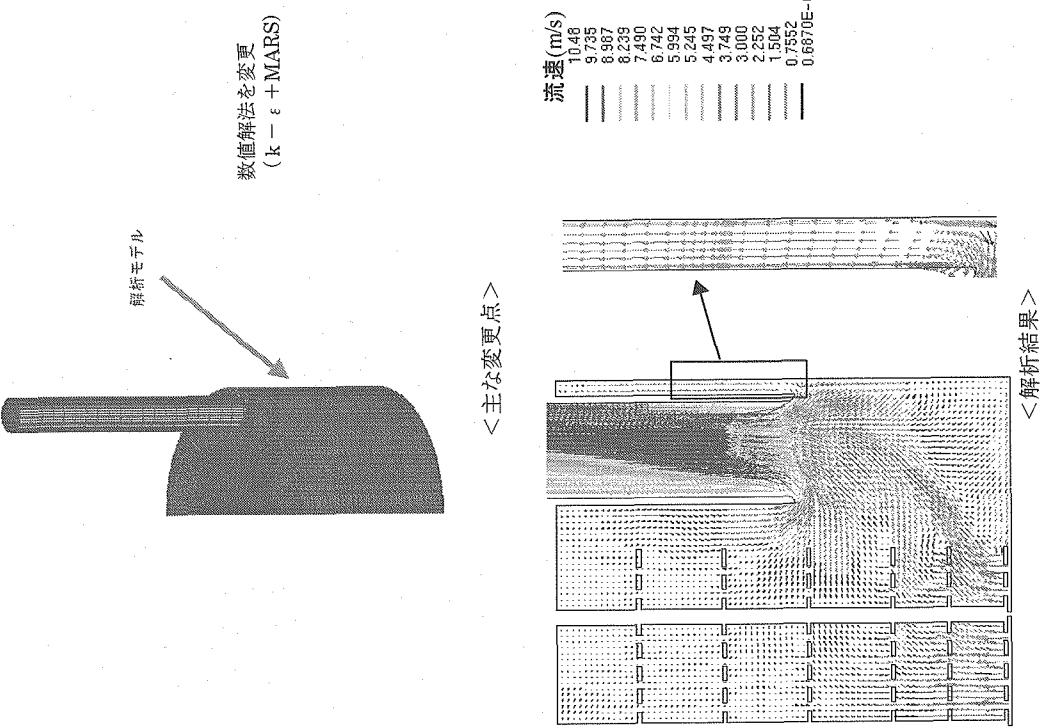
ケース名	SG3-1
項目	出口境界条件
着眼点	粗メッシュ体系において出口境界条件設定位置の影響確認
比較対象ケース	SG2-7
内容	ケース SG2-7 に対して、出口境界位置を上方へ移動した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬</p> <p>流体 : ナトリウム</p> <p>流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当)</p> <p>フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>UD : 離散化手法</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流速一定 フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG2-7 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通して噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 隅間領域の流れは下降流となっている。</li> </ul> <p>粗メッシュモデルにおいて出口境界条件を流速一定とし、上方へ移動してもフローバターンに大きな差異はない。</p> <p>参考 :</p>



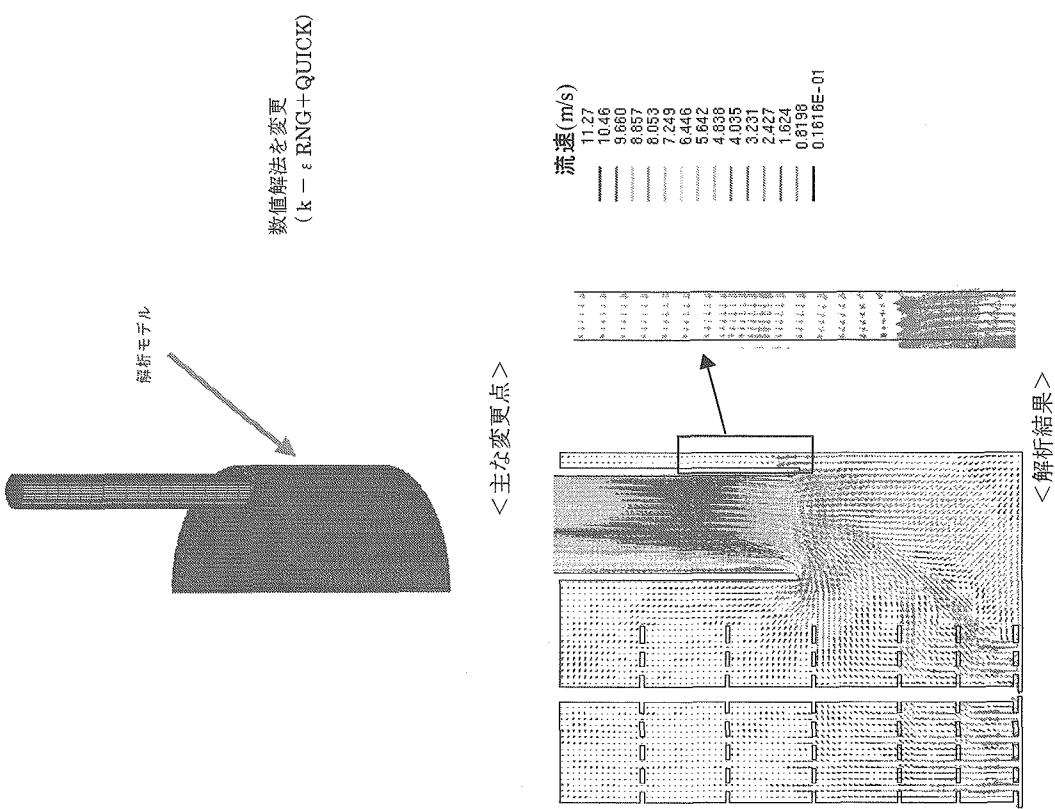
ケース名	SG3-2
項目	数値解法
着眼点	粗メッシュ体系における乱流モデル及び離散化手法の違いによる影響確認
比較対象ケース	SG3-1
内容	ケース SG3-1 に対して、 $k-\epsilon$ RNG と MARS の組合せに変更した。
解析条件	<p>1. 体系</p> <p>解析対象範囲 : 火心出口～DP下端(1/2セクタモデル)</p> <p>メッシュ数 : 580,000</p> <p>スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 : 一</p> <p>流動適正化策 : ベルマウス複数</p> <p>流体 : ナトリウム</p> <p>流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当)</p> <p>フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法</p> <p>乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>MARS</p> <p>離散化手法</p> <p>3. 境界条件</p> <p>流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math></p> <p>出口条件 : 流速一定</p> <p>フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG3-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>HL 内流れに漏りが生じる。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 領間領域の流れは上昇流となっている。</li> </ul> <p>粗メッシュ体系において、<math>k-\epsilon</math> RNG モデルと MARS の組合せを用いた場合には、HL-RV 領間領域の流れは上昇流となる。</p>
結論	
備考	



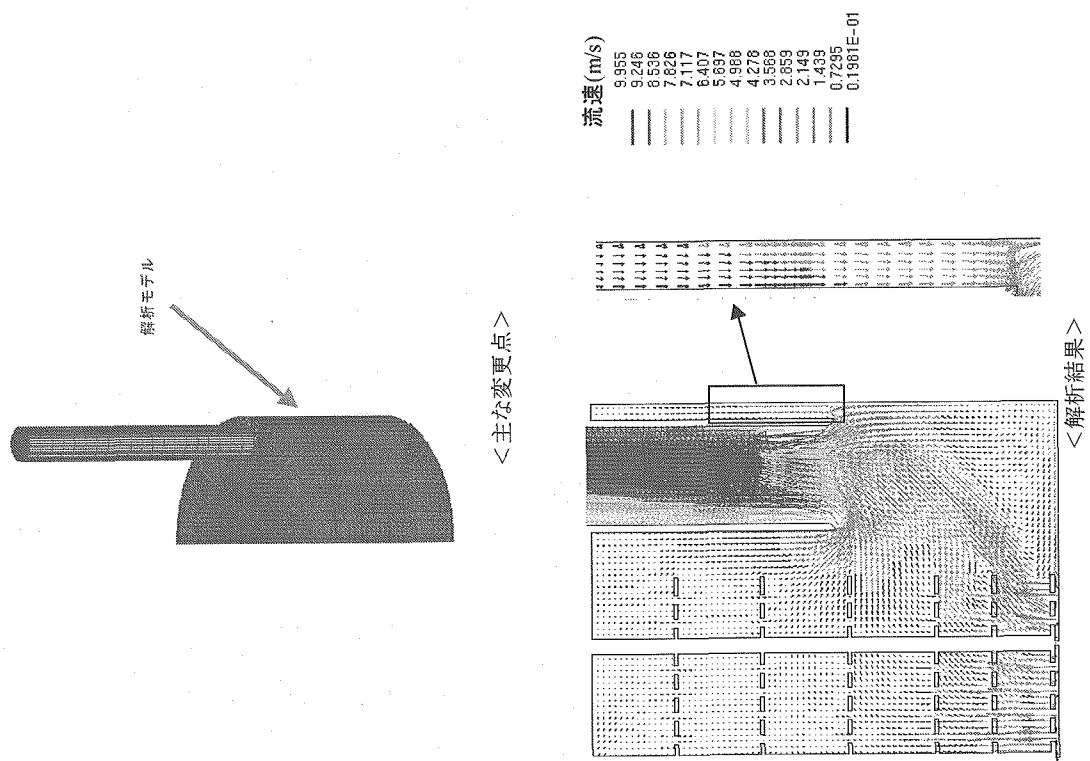
ケース名	SG3-3
項目	数値解法
着眼点	粗メッシュ体系における乱流モデルの違いによる影響確認
比較対象ケース	SG3-1
内容	ケース SG3-1に対して、乱流モデルを $k - \epsilon$ RNG に変更した。
解析条件	<p>1. 体系</p> <p>解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル)</p> <p>メッシュ数 : 580,000</p> <p>スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 : 一</p> <p>流動適正化策 : ベルマウス模擬</p> <p>流体 : ナトリウム</p> <p>流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当)</p> <p>フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法</p> <p>乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法 : UD</p> <p>3. 境界条件</p> <p>流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math></p> <p>出口条件 : 流速一定</p> <p>フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG3-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RW 間領域の流れは下降流となっている。</li> </ul> <p>結論</p> <p>粗メッシュ体系において、乱流モデルを <math>k - \epsilon</math> RNG に変更しても、ブレナム全体系流況に大きな差異はみられない。</p> <p>備考</p>



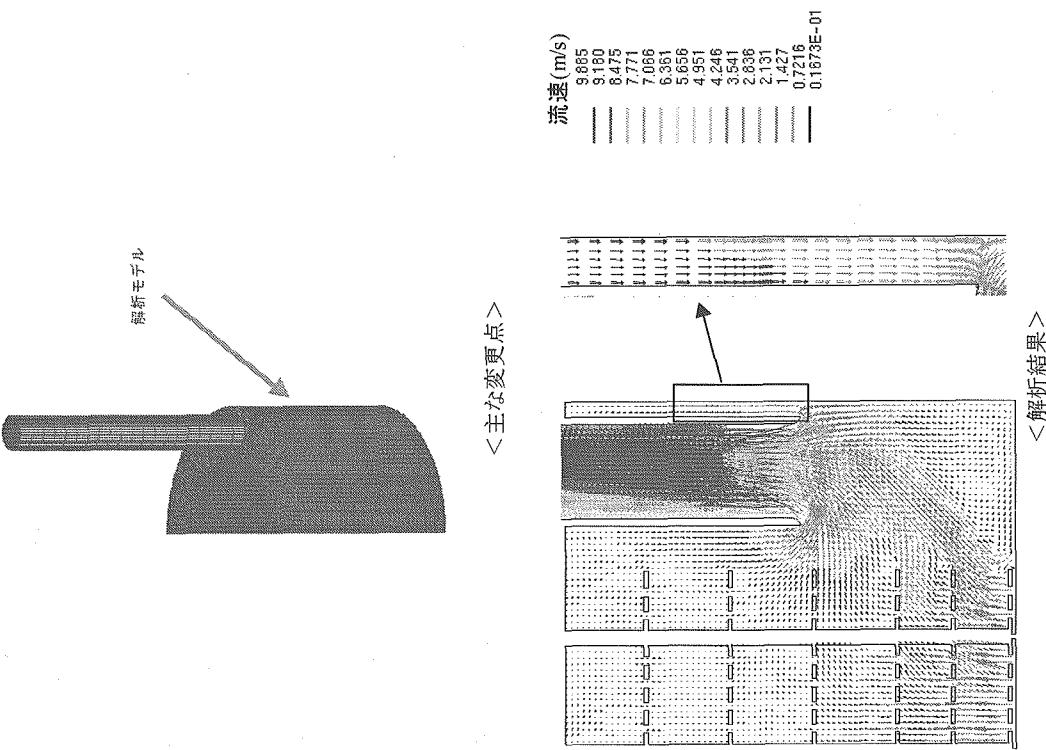
ケース名	SG3-4
項目	数値解法
着眼点	粗メッシュ体系における離散化手法の違いによる影響確認
比較対象ケース	SG3-1
内容	ケース SG3-1 に対して、離散化手法を MARS に変更した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状</p> <p>流動適正化策</p> <p>流体</p> <p>流入口メッシュ : ベルマウス模擬 ナトリウム</p> <p>フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当) 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法</p> <p>乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法</p> <p>3. 境界条件</p> <p>流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流速一定 フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG3-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となっている。</li> </ul>
結論	粗メッシュ体系において、出口境界条件を流速一定とし上方へ移動しても、MARS を用いた場合、HL-RV 隙間領域の流れは上昇流となる。
備考	.



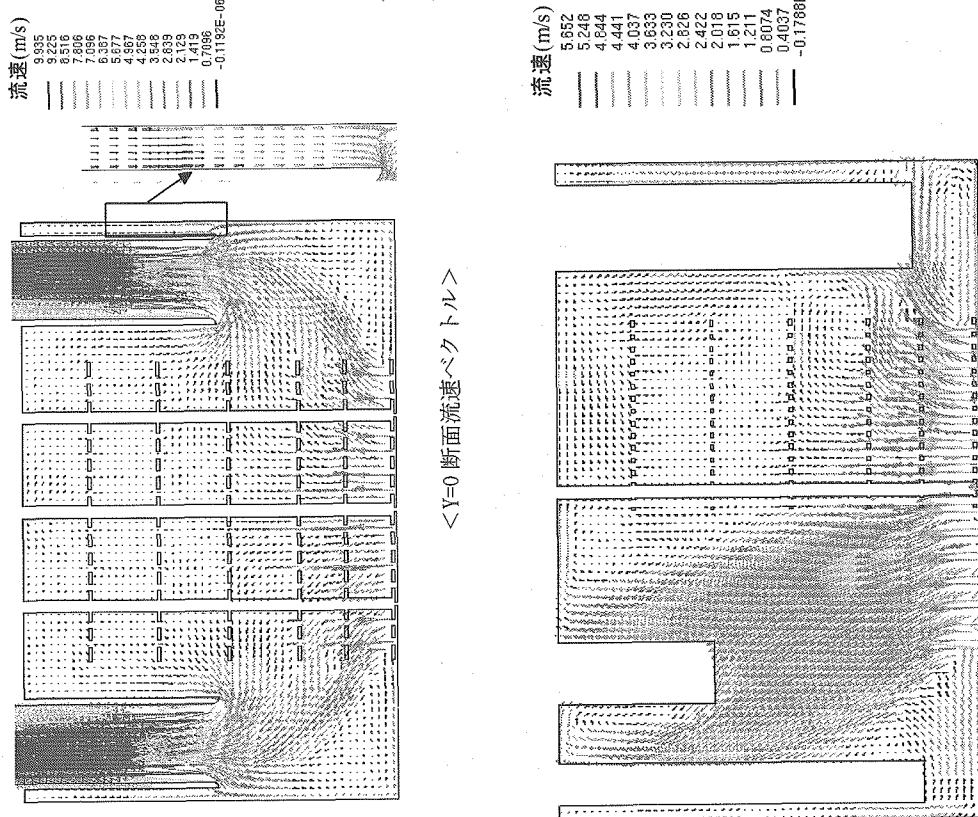
ケース名	SG3-5
項目	数値解法
着眼点	粗メッシュ体系における乱流モデル及び離散化手法の違いによる影響確認
比較対象ケース	SG3-1
内容	ケース SG3-1 に対して、 $k-\epsilon$ RNG と QUICK の組合せに変更した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬</p> <p>流体 : ナトリウム</p> <p>流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当)</p> <p>フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01)</p> <p>離散化手法 : QUICK</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流速一定 フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG3-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 間隙領域の流れは上昇流となっている。</li> </ul> <p>粗メッシュ体系において、QUICK を用いた場合、MARS と同様のプローブパターンとなる。</p>
結論	
備考	



ケース名	SG3-6
項目	出口境界条件
着眼点	出口境界条件の違いによる影響確認
比較対象ケース	SG3-1
内容	ケース SG3-1 に対して、出口境界条件を変更した。
解析条件	1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 実機スケール DP形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬 流体 : ナトリウム 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 90mm 相当) フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)  2. 数値解法 乱流モデル : $k-\epsilon$ モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01) 離散化手法 : UD  3. 境界条件 流入流量 : $7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : slip
結果	ケース SG3-1 と比較し、下記を確認した。 <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 領域の流れは下降流となっている。</li> </ul>
結論	出口境界条件を流速一定条件から流出境界条件に変えるも、プレナム全体流況に大きな差異はみられない。
備考	

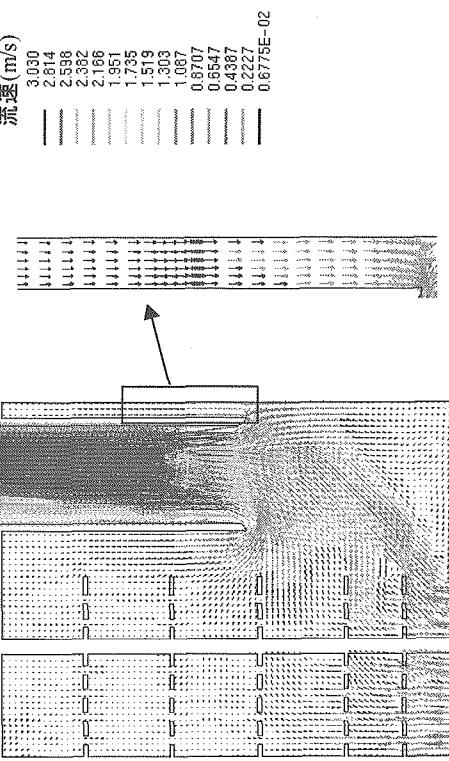
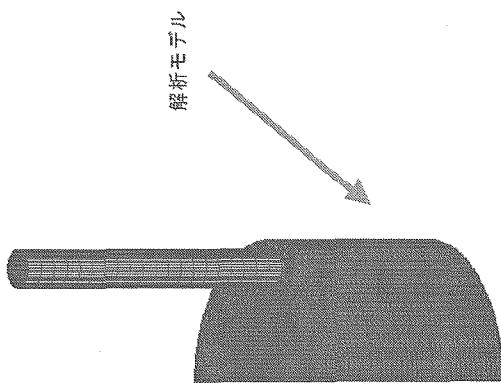


ケース名	SG3-7	
項目	流入境界条件	
着眼点	炉心流量配分設定による影響確認	
比較対象ケース	SG3-1	
内容	ケース SG3-1 に対して、炉心領域の流量配分を設定した。	
解析条件	1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～D P下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 実機ケーブル D P形状 : ベルマウス模擬 流動適正化策 : ナトリウム 流体 : 2×2分割 (口径90mm相当) 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径110mm相当) フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径110mm相当)	
2. 数値解法	乱流モデル : $k - \epsilon$ モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01) 離散化手法 : UD	
3. 境界条件	流入流量 : $7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : slip 流量配分 : 実機での領域区分	
結果	ケース SG3-1 と比較し、下記を確認した。 • UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。 • 切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。 • HL-RV 隔間領域の流れは下降流となっている。	
結論	流入境界条件として領域毎の流量配分を設定しても、プレナム全体流況に大きな差異はみられない。	
備考		



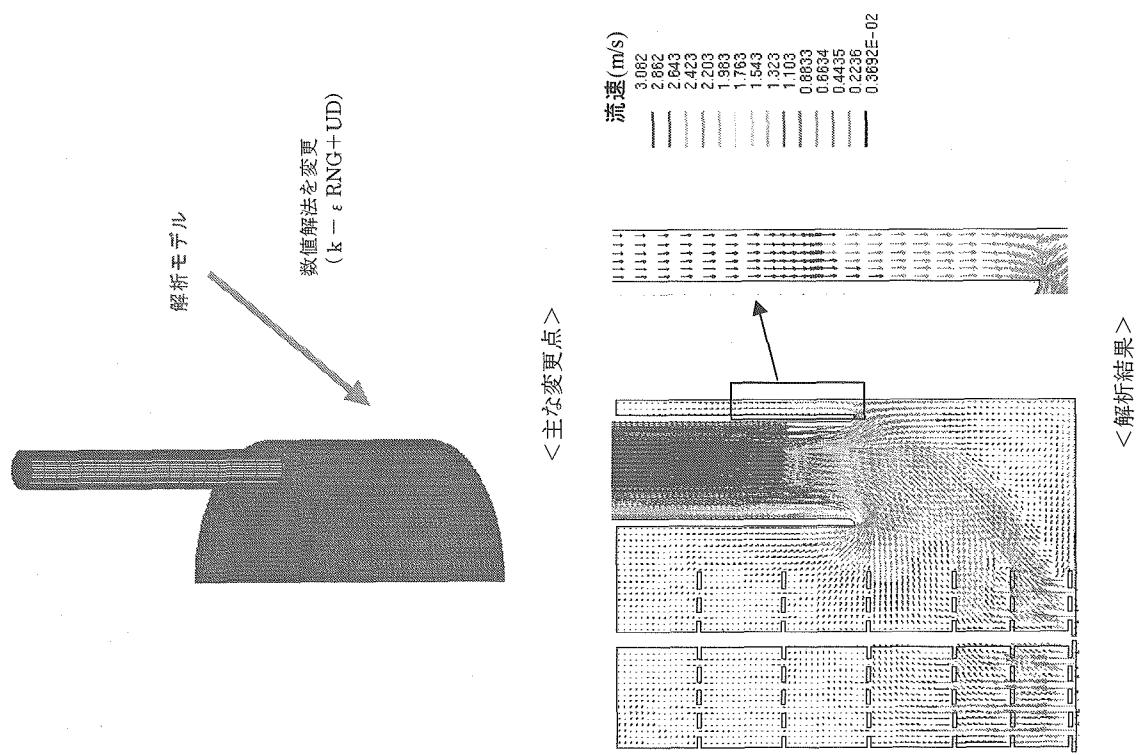
ケース名	SG3-8
項目	対称境界条件
着眼点	対称境界条件設定の切込部噴流上昇角度に対する影響を確認
比較対象ケース	SG3-3
内容	1/2 セクタのケース SG3-3 をフルセクタモデルに変更
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(フルセクタモデル) メッシュ数 : 1,160,000 スケール : 実機スケール</p> <p>DP形状 流動適正化策 流体 流入口メッシュ : ベルマウス模擬 ナトリウム 2×2分割 (口径 90mm 相当)</p> <p>フローポケットメッシュ : 2×2分割 (口径 110mm 相当)</p> <p>2. 数値解法 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.01) UD</p> <p>離散化手法</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : <math>7.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}</math> 出口条件 : 流出境界 フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG3-3 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HI-RV 隅隅領域の流れは下降流となっている。</li> </ul> <p>結論 フルセクタモデルにおける切込みを通す喷流のフローパター ンは、1/2 セクタモデルで対称境界条件を用いたケースと大き な違いはない。</p> <p>備考</p>

ケース名	SG4-1
項目	スケール及び流体物性
着眼点	縮尺体系における影響確認
比較対象ケース	SG3-1
内容	ケース SG3-1 に対して、スケールを 1/10 縮尺、流体を水に変更した。
解析条件	<p>1. 体系            解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル)            メッシュ数 : 580,000            スケール : 1/10 縮尺試験スケール            DP形状 : 一            流動適正化策 : ベルマウス模擬            流体 : 水            流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 9mm 相当)            フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 11mm 相当)</p> <p>2. 解析パラメータ            乱流モデル : <math>k-\epsilon</math> モデル            (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)            離散化手法 : UD</p> <p>3. 境界条件            流入流量 : <math>243\text{m}^3/\text{h}</math>            出口条件 : 流速一定            フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG3-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 間領域の流れは下降流となっている。</li> </ul> <p>結論            縮尺及び流体物性の違いがあつても、同一解析モデルであれば、            流速の絶対値は異なるが、プレナム全体流況は定性的に一致する。</p> <p>備考 :</p>



&lt;主な変更点&gt;

&lt;解析結果&gt;



ケース名	SG4-2
項目	スケール及び流体物性
着眼点	縮尺体系における、乱流モデルの影響を確認する。
比較対象ケース	SG4-1
内容	ケース SG4-1 に対して、乱流モデルを $k - \epsilon$ RNG に変更した。
解析条件	<p>1. 体系 解析対象範囲 : 炉心出口～DP下端(1/2セクタモデル) メッシュ数 : 580,000 スケール : 1/10縮尺試験スケール DP形状 : 一 流動適正化策 : ベルマウス模擬</p> <p>流体 : 水 流入口メッシュ : 2×2分割 (口径 9mm 相当) フロー孔メッシュ : 2×2分割 (口径 11mm 相当)</p> <p>2. 解析パラメータ 乱流モデル : <math>k - \epsilon</math> RNG モデル (乱流強度 0.1、代表長さ 0.001)</p> <p>離散化手法 : UD</p> <p>3. 境界条件 流入流量 : 243m<sup>3</sup>/h 出口条件 : 流速一定 フロー孔壁面 : slip</p>
結果	<p>ケース SG4-1 と比較し、下記を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UIS 水平板を通過する流れに大きな差異はない。</li> <li>切込みを通過する噴流の上昇角度に大きな差異はない。</li> <li>HL-RV 隙間領域の流れは下降流となっている。</li> </ul> <p>結論 HL-RV 隙間領域の流れは下降流となる。</p> <p>備考</p>