

ヘリウムガス冷却炉被覆粒子燃料層内における  
詳細熱流動解析  
(研究報告)



2001年6月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,

Japan

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

2001

## ヘリウムガス冷却炉被覆粒子燃料層内における詳細熱流動解析 (研究報告)

永田 武光\*、大島 宏之\*

### 要旨

実用化戦略調査研究では、将来の実用化を見据えた新しい高速炉概念の構築を行っている。そこでは、ナトリウム冷却炉の他にガス冷却炉及び重金属冷却炉等様々な候補概念を検討しているが、ヘリウムガス冷却炉についてはその燃料形態として被覆粒子型燃料が提案されている。燃料体は同心環状管のコンパートメントから構成され、コンパートメント内のアニュラー部には被覆粒子燃料が充填されているが、この被覆粒子燃料層内を流れるヘリウムガスの冷却特性評価及び被覆粒子燃料を構成する材料の健全性評価は重要な課題の一つとなる。

本研究では、被覆粒子層内における冷却材挙動及び被覆粒子燃料内の温度分布評価を目的として、被覆粒子燃料層内詳細熱流動解析を汎用流体解析コード FLUENT を用いて実施した。対象とした解析体系は、面心立方格子を流れ方向に 5 つ連結させたものである。解析の結果、被覆粒子燃料層内冷却材温度分布について、局所的に極端なピーク温度は発生しないことを確認した。被覆粒子燃料に関しては、燃料核以外は総じて上流側から下流側にかけてほぼ直線的に上昇する温度分布となる。一つの被覆粒子燃料表面の温度分布に着目すると、隣接する粒子の接触点にて急激な温度変化が認められ、下流側の接触点にて最高温度に達する。また、燃料体内におけるマクロ解析を実施する上で必要となる被覆粒子燃料層内圧力損失相関式の整備を目的として、FLUENT コードによる解析値と充填層内圧力損失相関式である Ergun の式の比較を実施し、両者が  $2 \leq Re \leq 154$  の範囲にて -11% ~ 20% で一致することを確認した。

---

\*大洗工学センター要素技術開発部流体計算工学研究グループ

実用化戦略調査研究 WBS 番号 : I-1-E①

## **Thermal-Hydraulic Analysis in Local Fuel Region of Helium Gas-Cooled Fast Breeder Reactor with Coated-Particle-Type Fuel**

Takemitsu NAGATA\*, Hiroyuki OHSHIMA\*

### **Abstract**

Feasibility Study is being carried out at JNC to generate new concepts for commercialized fast breeder reactors. In this study, a helium gas-cooled reactor with coated-particle-type fuel is proposed, as one of the candidates for fast breeder reactors. Each fuel assembly has a compartment of an annular duct shape and the annular space of the compartment is filled with coated-particle-type fuels. The assessment of heat removal capability of coolant flowing in the coated-particle-fuel region and the endurance of fuel particle is one of the important issues in the reactor safety.

In the present study, a thermal-hydraulic analysis was carried out in order to clarify flow and temperature fields in a local coated-particle-fuel region as well as in-particle temperature distributions. The FLUENT code was applied to this numerical analysis and the simulations were performed using five face-center cubic unit cells, which were combined with one another in the flow direction. Through the analysis, it was confirmed that the extreme temperature peak in coolant did not appear in the local coated-particle-fuel region and the temperature in a coated fuel particle rises along the flow direction almost linearly except fuel core region. With respect to the surface temperature of a coated fuel particle, the maximum and the minimum temperatures appear at the downstream and the upstream contact points with neighboring particles, respectively. Further, the calculation results by FLUENT were compared with Ergun's correlation in order to verify the applicability of it to the pressure drop estimation in the coated-particle-fuel region. The friction coefficient estimated by FLUENT agreed with that by Ergun's correlation with errors from -11% to 20% for  $2 \leq Re \leq 154$ .

---

\*Thermal Hydraulic Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

## 目 次

1. 緒言	1
2. 被覆粒子燃料層内詳細解析	3
2.1 解析体系	3
2.2 解析条件	3
3. 解析結果及び考察	6
3.1 5ユニット体系における主要解析結果	6
3.2 被覆粒子燃料層内の冷却材挙動	7
3.3 被覆粒子燃料の温度分布	8
3.4 充填層内圧力損失相関式に関する検討	11
4. まとめ	15
5. 謝辞	17
参考文献	18
付録 1 被覆粒子燃料の物性式	68
付録 2 ヘリウム冷却材の物性式	71
付録 3 解析体系内におけるエネルギー輸送の概算	73

表リスト

表 1-1 被覆粒子型ヘリウムガス高速増殖炉の炉心の主要スペック	19
表 1-2 燃料体及びコンパートメントの主要スペック	19
表 1-3 被覆粒子燃料の主要スペック	19
表 3-1 冷却材に関する解析結果 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)	20
表 3-2 被覆粒子燃料に関する解析結果 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)	20
表 3-3 被覆粒子表面に関する解析結果 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)	21
表 3-4 冷却材に関する解析結果 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	21
表 3-5 被覆粒子燃料に関する解析結果 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	22
表 3-6 被覆粒子表面に関する解析結果 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	22
表 3-7 被覆粒子表面の最低、最高温度 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)	23
表 3-8 被覆粒子表面の最低、最高温度 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	23
表 3-9 冷却材断面平均圧力、流速 (入口部冷却材流入流速 0.05 [m/s] の解析ケース)	24
表 3-10 冷却材断面平均圧力、流速 (入口部冷却材流入流速 0.1 [m/s] の解析ケース)	24
表 3-11 冷却材断面平均圧力、流速 (入口部冷却材流入流速 0.5 [m/s] の解析ケース)	25
表 3-12 冷却材断面平均圧力、流速 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)	25
表 3-13 冷却材断面平均圧力、流速 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	26
表 3-14 冷却材断面平均圧力、流速 (入口部冷却材流入流速 3.0 [m/s] の解析ケース)	26

図リスト

図 1-1 被覆粒子燃料型ヘリウムガス高速炉の炉心構成図	27
図 1-2 コンパートメント概略図（垂直断面）	28
図 1-3 コンパートメント概略図（水平断面）	29
図 1-4 被覆粒子燃料断面図	29
図 2-1 单一流路ユニット（面心立方格子）のメッシュ分割図	30
図 2-2 解析体系（5ユニット）全体図	31
図 2-3 中央水平断面（ $y=0.0[\text{mm}]$ 断面）図	31
図 2-4 中央と外側の中央水平断面（ $y=0.7[\text{mm}]$ 断面）図	32
図 2-5 外側水平断面（ $y=1.47072[\text{mm}]$ 断面）図	32
図 3-1 5ユニットの流路ユニット分割図	33
図 3-2 $y=0.0[\text{mm}]$ 断面内の流速ベクトル拡大位置	34
図 3-3 $y=0.7[\text{mm}]$ 断面内の流速ベクトル拡大位置	34
図 3-4 $y=1.47072[\text{mm}]$ 断面内の流速ベクトル拡大位置	35
図 3-5 第1ユニットの $y=0.0[\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図 （入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）	36
図 3-6 第1ユニットの $y=0.0[\text{mm}]$ 断面内冷却材温度センター図 （入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）	37
図 3-7 第1ユニットの $y=0.7[\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図 （入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）	38
図 3-8 第1ユニットの $y=0.7[\text{mm}]$ 断面内冷却材温度センター図 （入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）	39
図 3-9 第1ユニットの $y=1.47072[\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図 （入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）	40, 41
図 3-10 第1ユニットの $y=1.47072[\text{mm}]$ 断面内冷却材温度センター図 （入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）	42
図 3-11 第1ユニットの出口部断面内冷却材温度センター図 （入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）	42

図 3-12 第 1 ユニットの $y=0.0[\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	43
図 3-13 第 1 ユニットの $y=0.0[\text{mm}]$ 断面内冷却材温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	44
図 3-14 第 1 ユニットの $y=0.7 [\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	45
図 3-15 第 1 ユニットの $y=0.7 [\text{mm}]$ 断面内冷却材温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	46
図 3-16 第 1 ユニットの $y=1.47072 [\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	47, 48
図 3-17 第 1 ユニットの $y=1.47072 [\text{mm}]$ 断面内冷却材温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	49
図 3-18 第 1 ユニットの出口部断面内冷却材温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	49
図 3-19 第 4 ユニットの $y=0.0[\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	50
図 3-20 第 4 ユニットの $y=0.0[\text{mm}]$ 断面内冷却材温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	51
図 3-21 第 4 ユニットの $y=0.7 [\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	52
図 3-22 第 4 ユニットの $y=0.7 [\text{mm}]$ 断面内冷却材温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	53
図 3-23 第 4 ユニットの $y=1.47072 [\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	54, 55
図 3-24 第 4 ユニットの $y=1.47072 [\text{mm}]$ 断面内冷却材温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	56
図 3-25 第 4 ユニットの出口部断面内冷却材温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	56
図 3-26 第 4 ユニットの $y=0.0[\text{mm}]$ 断面におけるよどみ領域の概要図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)	57
図 3-27 第 1 ユニットの $y=0.0 [\text{mm}]$ 断面内被覆粒子燃料温度センター図 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)	58

図 3-28 第 1 ユニットの $y=0.7$ [mm]断面内被覆粒子燃料温度センター図 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]の解析ケース)	58
図 3-29 第 1 ユニットの $y=1.47072$ [mm]断面内被覆粒子燃料温度センター図 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]の解析ケース)	59
図 3-30 第 1 ユニットの出口部断面内被覆粒子燃料温度センター図 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]の解析ケース)	59
図 3-31 第 1 ユニットの $y=0.0$ [mm]断面内被覆粒子燃料温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s]の解析ケース)	60
図 3-32 第 1 ユニットの $y=0.7$ [mm]断面内被覆粒子燃料温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s]の解析ケース)	60
図 3-33 第 1 ユニットの $y=1.47072$ [mm]断面内被覆粒子燃料温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s]の解析ケース)	61
図 3-34 第 1 ユニットの出口部断面内被覆粒子燃料温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s]の解析ケース)	61
図 3-35 被覆粒子燃料最高温度に関する無次元温度上昇 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]の解析ケース)	62
図 3-36 被覆粒子燃料最高温度に関する無次元温度上昇 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s]の解析ケース)	62
図 3-37 第 1 ユニット内中心部に位置する被覆粒子燃料表面温度センター図 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]の解析ケース)	63
図 3-38 单一流路ユニット内における被覆粒子燃料表面のグリッド図	64
図 3-39 被覆粒子燃料表面と冷却材断面平均温度の流れ方向分布 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]の解析ケース)	64
図 3-40 第 1 ユニット内中心部に位置する被覆粒子燃料表面温度センター図 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s]の解析ケース)	65
図 3-41 被覆粒子燃料表面と冷却材断面平均温度の流れ方向分布 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s]の解析ケース)	66
図 3-42 被覆粒子燃料表面最高温度に関する無次元温度上昇	66
図 3-43 5 ユニット内の断面番号	67
図 3-44 FLUENT による解析値と Ergun の式の比較	67

図 A-1 入口部冷却材流入流速 1.0[m/s]の解析ケースにおけるエネルギー輸送

77

図 A-2 入口部冷却材流入流速 2.0[m/s]の解析ケースにおけるエネルギー輸送

77

## 1. 緒 言

実用化戦略調査研究においては、新しい高速炉概念として炭酸ガス冷却炉、ヘリウムガス冷却炉、鉛及び鉛-ビスマス冷却炉といった様々な炉型が検討されている。この中でヘリウムガス冷却炉については、その燃料形態として高温化による熱効率向上を目的とした被覆粒子燃料型ヘリウムガス冷却炉が提案されている。

被覆粒子燃料型ヘリウムガス高速炉の炉心構成図を図1-1に、主要スペックを表1-1に示す。炉心の燃料体は194体であり、燃料体は1体のコンパートメントから構成されている(H12現在の概念設計段階)。燃料体及びコンパートメントの主要スペックを表1-2に、概略図を図1-2～図1-3に示す。コンパートメントは内管及び外管肉厚が2[mm]の同心環状管であり、内管と外管にはさまれた空間に被覆粒子燃料が充填率6割で設置されている。ヘリウム冷却材はコンパートメント内管下部より流入し、炉心被覆粒子燃料部において内管表面から径方向外側に向かって燃料層内を流れ、外管表面からコンパートメントの外側へ流出することにより被覆粒子燃料層内の熱除去を行う。被覆粒子燃料の主要スペックを表1-3に、被覆粒子燃料内構造を図1-4に示す。被覆粒子燃料は、燃料核と5層の被覆材により構成され、燃料核直径は1.5[mm]、燃料粒子直径は1.94[mm]、燃料核体積当たりのピーク出力密度は $5.55 \times 10^{-1} [\text{W/mm}^3]$ となっている。

以上のような燃料体スペックに対して、被覆粒子燃料層内を流れるヘリウムガスの冷却特性及び被覆粒子燃料を構成する材料の健全性評価は重要な課題項目の一つとなっている。

流体グループでは、被覆粒子燃料型ヘリウムガス高速炉の燃料体内における熱流動特性を明らかにすることを目的とした二つの解析を実施した。一つは、多次元熱流動解析コードAQUA<sup>[1]</sup>を用いた燃料体全体の解析であり、主に被覆粒子燃料層部における流動場、温度場の特性の把握を目的とする。もう一つは、汎用流体解析コードFLUENT<sup>[2]</sup>を用いた被覆粒子燃料層内局所の詳細熱流動解析であり、局所的な熱流動場及び被覆粒子燃料内の温度分布の把握と、マクロ解析において必要となる被覆粒子燃料層内伝熱流動相関式の適用性の確認を目的としている。

本件においては、後者の汎用流体解析コードFLUENTを用いた被覆粒子燃料層内における詳細熱流動解析について報告する。解析では、除熱に関する保守側評価の観点から、充填率74%の面心立方格子を單一流路ユニットとし、計算機容量の制限からこれを流れ方向に5つ連結させた体系(本報告では5ユニットと称する)を対象としている。従って今回の解析は、これら仮想的体系内の詳細熱流動解析であり、実際の被覆粒子燃料層内における

る局所的な流動場特性と被覆粒子燃料内部もしくは被覆粒子燃料表面の温度分布に関して半定量的な把握を行うためのものである。

以下、2章において汎用流体解析コード FLUENT を用いた詳細解析に関する解析体系、境界条件について示し、3章にて今回の解析体系を構成する單一流路ユニット（面心立方格子を単位流路ユニットとし、これを下流側に半ユニットずらした流路ユニット）ごとの冷却材挙動、被覆粒子燃料と、單一流路ユニットの中心に位置する一つの被覆粒子燃料表面の温度分布について報告する。さらに、被覆粒子燃料層部全体のマクロ解析に必要となる充填層内圧力損失相関式、Ergun の式の適用性について検討を行う。ここでは、充填層内における圧力損失係数について、非発熱条件にて求めた FLUENT の解析結果と Ergun 式による予測値との比較を実施する。さらに 4 章にて、今回の詳細解析のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 被覆粒子燃料層内詳細解析

被覆粒子燃料型ヘリウムガス高速炉燃料体内における、被覆粒子燃料層内流動場、温度場についての半定量的な把握を目的として、汎用流体解析コード FLUENT<sup>[2]</sup>を用いた局所詳細解析を実施した。

### 2. 1 解析体系

解析では、除熱に関する保守側評価の観点から面心立方格子（充填率：74%）を単位流路ユニットとし、これを流れ方向に連結させた体系を解析体系としている。この解析体系では、今回使用した計算機記憶容量の制限から、一辺の長さが 2.941[mm]の単位流路ユニットを 5 つ連結させている（以下、解析体系を 5 ユニットとする）。單一流路ユニットのメッシュ分割図を図 2-1 に、5 ユニットの解析体系図を図 2-2 に示す。5 ユニットに設定した座標系は、x 軸と y 軸については 5 ユニットの側面と平行に、z 軸は流れ方向と逆向きにとっている。さらに、3 章での解析結果の出力断面として採用する、流れ方向と平行な中央水平断面 ( $y=0.0[\text{mm}]$  断面)、中央と外側の中央水平断面 ( $y=0.7[\text{mm}]$  断面)、外側水平断面 ( $y=1.472[\text{mm}]$  断面) を図 2-3～2-5 に示す。また、図 2-3～2-5 の図中では、流体と被覆粒子燃料の境界線も同時に示している。

### 2. 2 解析条件

#### a) 5 ユニットの入口部、出口部

解析では、入口部に一定温度、一定流速を、出口部に一定圧力を境界条件として与えている。冷却材入口温度については原子炉入口温度を、冷却材出口部圧力は原子炉冷却材圧力を参照した。また、入口部での冷却材平均流速の設定については、既に実施されている燃料コンパートメント全体熱流動解析により得られた被覆粒子層内径方向流速を参照した。そこでは、平均流速を  $1.5[\text{m/s}] \sim 2.0[\text{m/s}]$  と報告していることから、今回の解析では入口部冷却材流入流速を  $1.0 [\text{m/s}]$  及び  $2.0 [\text{m/s}]$  と設定した 2 つの解析を実施した。本解析において設定した、具体的な値は次の通りである。

冷却材流入流速、 $V_{in}$  :  $1.0, 2.0 [\text{m/s}]$

冷却材入口温度、 $T_{in}$  :  $460 [\text{°C}]$

冷却材出口圧力、 $P_{out}$  : 6.0[MPa]

b) 5ユニットの側面部

側面部については対称境界条件を採用し、流れ場についてはフリースリップ条件を、温度場については断熱条件にて行った。

c) 被覆粒子燃料

(i) 被覆粒子燃料内構造

被覆粒子燃料は、現在の概念設計段階では燃料核と5層の被覆材により構成されているが、解析では被覆層について内側から1番目の低PyC層は変更せず、2番目と3番目のPyCとZrC層は一括して扱い、また4番目と5番目のSiC層を一つの層として取り扱っている。従って、燃料核と、被覆粒子燃料の被覆部を低PyC層、PyC+ZrC層、SiC層の3層に設定していることとなる（以下、低PyC層、PyC+ZrC層、SiC層をそれぞれ第一被覆、第二被覆、第三被覆とする。図2-1参照）。また、現設計段階での被覆粒子燃料径は1.94[mm]であるが、今回の詳細解析では前回の概念設計段階での粒子径に基づき作成したメッシュを使用していることから、粒子径は2.08[mm]としている。

(ii) 燃料核体積当たりの平均出力密度

燃料核体積当たりの平均出力密度については保守側評価の観点から、H12現在の概念設計段階における燃料核体積当たりのピーク出力密度を採用し、 $5.55 \times 10^{-1} [\text{W/mm}^3]$ と設定した。

(iii) 燃料被覆材の物性値（熱伝導率、比熱、密度）

被覆粒子燃料を構成する各材料の物性値を付録1に示す。被覆材2層目のPyC+ZrC層の熱伝導率については実際の熱通過率に一致するように設定し、密度、定圧比熱については体積を重み関数とした平均値を採用した。

(iv) 被覆粒子燃料内熱伝導

被覆粒子燃料内については、燃料核及び被覆層の熱伝導方程式を解き内部の温度分布を求めている。

(v) 被覆粒子燃料表面熱伝達

熱伝達相関式は使用せず、温度境界層内にメッシュ分割が行われるように被覆粒子燃料表面近傍の垂直方向メッシュ幅を $30[\mu\text{m}]$ と設定した。ガス流体については、温度境界層 > 速度境界層となるため速度境界層幅より小さなメッシュ幅を設定すれ

ば良い。この速度境界層としては、流れ場中に単一球が存在する場合の速度境界層を想定している。

(vi) 被覆粒子燃料間の接触断面積

$2.5 \times 10^{-4} [\text{mm}^2]$ と設定。隣接する燃料粒子間の接触断面積については、被覆粒子燃料を一個ずつ炉心高さ分積み上げた際に、最下段の粒子にかかる重量から求めた接触断面積を暫定的に採用した。

d) 作動流体

作動流体はヘリウムであり、付録2に示した物性値を使用した。また、被覆粒子燃料層内におけるマッハ数  $Ma$  を、被覆粒子層内の径方向流速を  $1.0 [\text{m/s}]$  のオーダーとして概算すると  $Ma$  数  $\approx 10^{-3}$  となることから、非圧縮性流体として扱っている。また、解析では乱流モデルは使用していない。

### 3. 解析結果および考察

今回の予備解析では、面心立方格子を単位流路ユニットとした 5 ユニットを解析体系としている。以下では入口部と出口部の影響を考慮し、単位流路ユニットを下流側に半ユニットずらした流路ユニットごとに解析体系内の冷却材挙動及び被覆粒子燃料内の温度分布を把握する。これらの流路ユニットについては、以後使用する流路ユニット番号の明記を兼ねて、図 3-1 に示した。

#### 3. 1 5 ユニット体系における主要解析結果

最初に、予備解析の対象とした 5 ユニット体系の冷却材、被覆粒子燃料、及び被覆粒子表面に関する主な解析結果を示す。表 3-1～表 3-3 と表 3-4～表 3-6 に、それぞれ、入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]、2.0 [m/s] の解析ケースにおける、各流路ユニット内の冷却材、被覆粒子燃料、被覆粒子表面に関する解析結果を示した（各表中の冷却材、被覆粒子燃料、被覆粒子表面の温度差は、各流路ユニットの最高温度と最低温度の差を示している）。

5 ユニット体系において、一様な流速で流入した冷却材は熱膨張による効果から、下流部ユニットにおいておよそ 1.5 倍の流速に増大している。また、冷却材、被覆粒子燃料とも隣接するユニット間の体積平均温度の差は、上流領域よりも下流領域の方が小さくなっている（各ユニット内の最高温度と最低温度の差についても、同様な傾向を示している）。これについては、下流側から上流側に向けて各ユニットの境界を跨ぐ被覆粒子燃料内の熱伝導による熱輸送が行われており、被覆粒子内においては熱伝導が比較的有効な熱輸送の手段として働いているためと考えられる（対流以外の熱輸送については、被覆粒子内の熱伝導による熱輸送とヘリウム冷却材の熱伝導によるものが考えられるが、この中でヘリウム冷却材の熱伝導による寄与は極めて小さい。例えば、被覆粒子燃料の構成要素の中で第三被覆の熱伝導率は、冷却材の熱伝導と比較すると数百倍となっている）。実際、流量を 2 倍にした入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケースでは、対流輸送による熱除去が相対的に大きくなっている。これらの被覆粒子内における熱輸送を把握するため、入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]、2.0 [m/s] の解析ケースの各流路ユニット内における熱輸送の概算を付録 3 に示した。

他方、ピン型ガス冷却炉の被覆粒子燃料表面温度と冷却材体積平均温度の差（膜温度差）は数百°Cであるが、被覆粒子燃料表面温度と冷却材体積平均温度の差は数十°C程度であり、被覆粒子燃料型の方がかなり小さな値となっている。

以下、詳細な解析結果について、被覆粒子燃料層内の流速場・温度場と被覆粒子燃料の温度分布に分けて示す。

### 3. 2 被覆粒子燃料層内の冷却材挙動

図 3-5～図 3-10 に、入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケースの、第 1 ユニット内における  $y=0.0, 0.7, 1.47072 [\text{mm}]$  断面内冷却材流速ベクトル図と各断面内の拡大冷却材流速ベクトル図、及び冷却材温度分布図を示す（図 3-2～図 3-4 に、各断面の流速ベクトルの拡大部を点線で囲んだ枠内で示した）。図では、流速及び冷却材温度について最小流速から最大流速まで、もしくは最小温度から最大温度までを青から赤にて凡例化している。流速ベクトル図より、各断面とも燃料粒子間の大きな空隙部において高い流速を示していることが分かる。また、拡大図から流速分布は被覆粒子燃料表面に沿った流れ場を形成しており、被覆粒子燃料後方部において熱除去の観点から懸念されるよどみ領域は確認されない。冷却材温度分布に関しては、各断面内の温度センター図から局所的な温度ピークは認められずユニット内の冷却材最高温度は出口部の被覆粒子燃料に接する位置に発生している。ユニットの出口部縦断面内の冷却材温度センター図を、図 3-11 に示す。さらに、ここでは第 2、3、4 ユニット内の各水平断面内冷却材流速ベクトル図、拡大冷却材流速ベクトル図、及び冷却材温度センター図と出口部断面内冷却材温度センター図は省略するが、これらのユニットについて、解析体系入口部縦断面を 1.0 [m/s] の断面平均流速で流入した冷却材は熱膨張による効果から流速は増大するものの（第 2 ユニット～第 4 ユニットの体積平均流速は、それぞれ 1.48 [m/s]、1.63[m/s]、1.78[m/s] となっている）、被覆粒子燃料表面に沿った流れ場であり被覆粒子燃料後方部においてよどみ領域は形成されず、各ユニットの冷却材最高温度は出口部の被覆粒子燃料に接する部分となる。

また、図 3-12～図 3-18 に入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケースについて、第 1 ユニット内における  $y=0.0, 0.7, 1.47072 [\text{mm}]$  断面内冷却材流速ベクトルとその拡大冷却材流速ベクトル図、及び冷却材温度センター図と出口部断面内冷却材温度センター図を示す。各断面図とも、燃料粒子間の大きな空隙部において高い流速を示している。第 1 ユニット以降、被覆粒子燃料後方領域にわずかなよどみ領域の発生を認めることができるが（第 1 ユニット～第 4 ユニットの体積平均流速は、それぞれ 2.35[m/s]、2.51[m/s]、2.66[m/s]、2.81[m/s] となっている）、冷却材温度分布に関しては入口部冷却材流入流速 1.0[m/s] の解析ケースと同様に、各断面内とも局所的な温度ピークは確認されず、各ユニットの冷却材

最高温度は出口部の被覆粒子燃料に接する位置にて形成される。図 3-19～図 3-25 に、第 4 ユニット内における  $y=0.0, 0.7, 1.47072 [mm]$  断面内冷却材流速ベクトルとその拡大冷却材流速ベクトル図、及び冷却材温度センター図と出口部断面内冷却材温度センター図を、図 3-26 に、第 4 ユニットの  $y=0.0 [mm]$  断面におけるよどみ領域の概略図を示す（第 2、3 ユニット内における、 $y=0.0, 0.7, 1.47072 [mm]$  断面内冷却材流速ベクトル図、拡大冷却材流速ベクトル図、及び冷却材温度センター図と出口部断面内冷却材温度センター図については省略）。

### 3. 3 被覆粒子燃料の温度分布

最初に流路ユニット内における被覆粒子燃料内部の温度分布について示す。次に、流路ユニットの中心に位置する、一つの被覆粒子燃料表面の温度分布について把握する。

#### (a) 被覆粒子燃料内部の温度分布

図 3-27～図 3-30 に、入口部冷却材流速 1.0 [m/s] で流入した解析ケースの第 1 ユニット内における  $y=0.0, 0.7, 1.47072 [mm]$  断面内被覆粒子燃料温度センター図と各出口部縦断面内被覆粒子燃料温度センター図を示す（図では、最低温度から最高温度までを青から赤にて凡例化している）。各断面内の被覆粒子燃料とも、燃料核についてはほぼ球状の温度分布を与えており、被覆層については上流側から下流側にかけてほぼ直線的に上昇する温度分布を示しており、ユニット内の最高温度は、出口部縦断面内における燃料核中心部となっている。またここでは、第 2、3、4 ユニット内における  $y=0.0, 0.7, 1.47072 [mm]$  断面内被覆粒子燃料温度センター図、各出口部縦断面内被覆粒子燃料温度センター図については省略するが、各ユニットとも被覆粒子燃料内部の温度分布、及びユニット内最高温度の形成位置は第 1 ユニット内と同様となった。

さらに、図 3-31～図 3-34 に入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] で流入した解析ケースの第 1 ユニット内における  $y=0.0, 0.7, 1.47072 [mm]$  断面内被覆粒子燃料温度センター図と出口部縦断面内被覆粒子燃料温度センター図を示す。各水平断面内の被覆粒子燃料とも、入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケースと比較し緩やかな温度上昇となるが、定性的には同等な温度分布を示しており、ユニット内の最高温度は出口部縦断面内の燃料核中心位置となっている。また、第 2、3、4 ユニット内の被覆粒子燃料内部温度分布に関しても、第 1 ユニット内の解析結果と同様であることを確認した（第 2、3、4 ユニット内における  $y=0.0, 0.7, 1.47072 [mm]$  断面内被覆粒子燃料温度センター図、各出口部縦断面内被覆粒子燃料温度

コンター図については省略する)。

さらに、被覆粒子燃料層部全体のマクロ解析を実施する上で、解析から得られた各位置の冷却材温度よりそこでの被覆粒子燃料の最高温度を予測することは重要なことであり、これらをある無次元数にてまとめたダイアグラムを作成することは有意義なこととなる。そこで、今回の詳細解析の結果を用いて、各流路ユニット内の被覆粒子燃料最高温度を  $T_{s,\max}$ 、各流路ユニット内の冷却材体積平均温度を  $T_f$ 、各流路ユニットの入口部冷却材断面平均温度を  $T_{f,in}$ 、各流路ユニットの出口部冷却材断面平均温度を  $T_{f,out}$  とし、 $T_{s,\max}$  の無次元温度上昇  $(T_{s,\max} - T_{f,in}) / (T_{f,out} - T_{f,in})$  を各ユニット内の Re 数にてまとめた。但し Re 数については、代表流速を見かけの流速(各ユニットの断面平均流入流速を  $v_{in}$ 、空孔率を  $\varepsilon$  とすると、 $\varepsilon v_{in}$ )、代表長さを被覆粒子燃料径とした。

被覆粒子燃料最高温度  $T_{s,\max}$  に関する無次元温度上昇の図を、入口部冷却材平均流速 1.0 [m/s] 及び 2.0 [m/s] の解析ケースについて、それぞれ図 3-35、図 3-36 に示す。 $T_{s,\max}$  の無次元温度上昇の値は、入口部冷却材平均流速 1.0 [m/s] のケースでは Re 数が 37~47 の範囲において 4.14~3.53 の値を、2.0 [m/s] の解析ケースでは Re 数が 87~99 の範囲において 6.38~5.81 の値を示している。

このように、 $T_{s,\max}$  の無次元温度上昇の値については、Re 数にてまとめることは不可能であり、現時点での汎用性のある冷却材平均温度と被覆粒子燃料最高温度に関するダイアグラムを提示することは困難である。従って、図 3-35、図 3-36 を用いて、マクロ解析から得られた各位置の被覆粒子燃料温度より最高温度を予測する際には、ここでの同一の境界条件下での解析値を使用すること推奨する。

### (b) 被覆粒子燃料表面の温度分布

表 3-7 と表 3-8 に、入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]、2.0 [m/s] の解析ケースの、各流路ユニット中心部に位置する、一つの被覆粒子燃料表面の最低、最高温度とその温度差を示す。上流側の被覆粒子燃料表面においてより大きな温度変化を示しているが、温度差は数十℃であり、流量が 2 倍の入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケースになると被覆粒子燃料表面温度差はおよそ 0.5 倍となっている。

また、被覆粒子燃料表面の温度分布を把握するため、図 3-37 に、入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] で流入した解析ケースの第 1 ユニット内の中心部に位置する被覆粒子燃料表面温度コンター図を示す(一つの被覆粒子燃料表面温度について、最低温度から最高温度までを青から赤にて凡例化している)。図では、上流側斜め方向から見た場合と下流側斜め方向

から見た被覆粒子表面を表示している。図より、全体的に上流側から下流側にかけてほぼ直線的に上昇する温度分布を示しているが、特に隣接する被覆粒子燃料の接触点近傍において比較的急激な温度変化が確認され、この上流側の接触点と下流側の接触点が一つの被覆粒子燃料表面の最低温度と最高温度位置となっている。また、第2、3、4ユニット内の中心部に位置する被覆粒子燃料表面温度センター図については省略するが、各ユニットとも第1ユニット内における被覆粒子燃料表面の温度分布と同様である。

この被覆粒子表面の温度分布を理解するため、図3-39に被覆粒子燃料表面と冷却材断面平均温度の流れ方向の温度分布図を示す。図では、各ユニット内の中心に位置する一つの被覆粒子燃料表面とその周辺の被覆粒子燃料表面、及び冷却材についての流れ方向の断面平均温度を図示している（單一流路ユニット内の中心に位置する被覆粒子と、その周辺の被覆粒子を図3-38の被覆粒子燃料表面のグリッド図にて示す）。但し、周辺の被覆粒子燃料表面の断面平均温度については、被覆粒子中心位置に関して同じz座標をもつ周辺粒子をまとめて断面平均をとっている。この温度分布図において、被覆粒子燃料表面の流れ方向の温度勾配は冷却材のそれと比較すると小さな値を示しており、これは前述したように、被覆粒子燃料の最外被覆の熱伝導率が冷却材の熱伝導率の数百倍であることに原因がある。従って、一つの被覆粒子燃料表面の最低温度と最高温度は、それぞれ上流側隣接球との接触部と下流側隣接球の接触部で発生することになる。

また、図3-40に、入口部冷却材流入流速2.0[m/s]で流入した解析ケースの第1ユニット内中心部の被覆粒子燃料表面温度センター図を示す。各ユニット内の被覆粒子表面とも、入口部冷却材平均流速1.0[m/s]の解析ケースと定性的に同じ温度分布を示し、隣接する被覆粒子燃料の接触点近傍において急激な温度変化が確認できる。流量の増大により被覆粒子燃料表面の温度変化は減少するが、依然上流側の接触点と下流側の接触点において確認される。第2、3、4ユニット内の被覆粒子燃料表面の温度分布についても、第1ユニット内の解析結果と同様な結果となった（第2、3、4ユニット内中心部の被覆粒子燃料表面温度センター図については省略）。

図3-41に、入口部冷却材流入流速2.0[m/s]の解析ケースにおける被覆粒子燃料表面と冷却材断面平均温度の流れ方向の分布を示す。図3-39と同様に、被覆粒子の中心位置について異なるz座標をもつ粒子表面の断面平均温度は、同じz座標上において異なる値を示しているが、その差と温度の変化率については減少していることが分かる。

さらに、被覆粒子燃料層部全体のマクロ解析を実施する上で、解析から得られた各位置の冷却材温度よりその領域周辺の被覆粒子燃料表面平均温度と最高温度を予測することは

重要なことであり、これらを無次元数にてまとめたダイアグラムを作成することは有意義なこととなる。そこで、今回の詳細解析の結果を用いて、各ユニット内の被覆粒子燃料表面平均温度を  $T_w$ 、各ユニット内の被覆粒子燃料表面最高温度を  $T_{w,\max}$ 、各流路ユニット内の冷却材体積平均温度を  $T_f$ 、各流路ユニットの入口部冷却材断面平均温度を  $T_{f,in}$ 、各流路ユニットの出口部冷却材断面平均温度を  $T_{f,out}$  とし、 $T_w$  及び  $T_{w,\max}$  の無次元温度上昇  $(T_w - T_{f,in})/(T_{f,out} - T_{f,in})$ 、 $(T_{w,\max} - T_{f,in})/(T_{f,out} - T_{f,in})$  を各ユニット内の Re 数にてまとめた。但し Re 数については、代表流速を見かけの流速（各ユニットの断面平均流入流速を  $v_{in}$ 、空孔率を  $\varepsilon$  とすると、 $\varepsilon v_{in}$ ）、代表長さを被覆粒子燃料径とした。

被覆粒子燃料表面に関する無次元温度上昇の図を、入口部冷却材平均流速 1.0 [m/s]、2.0 [m/s] の解析ケースについて、それぞれまとめて図 3-42 に示す。 $T_w$  の無次元温度上昇の値は、入口部冷却材平均流速 1.0 [m/s] のケースでは Re 数が 37~47 の範囲において 0.668~0.651 の値を、2.0 [m/s] の解析ケースでは Re 数が 87~99 の範囲において 0.723~0.717 の値を示し、 $T_{w,\max}$  の無次元温度上昇の値は、入口部冷却材平均流速 1.0 [m/s] のケースでは Re 数が 37~47 の範囲において 1.12~1.15 の値を、2.0 [m/s] の解析ケースでは Re 数が 87~99 の範囲において 1.19~1.22 の値を示している。

$T_w$  と  $T_{w,\max}$  の無次元温度上昇の値については、Re 数にてまとめることが可能であり、これらの無次元温度上昇は Re 数と共にほぼ比例していることが認められる。従って、マクロ解析から得られた各位置の冷却材温度から被覆粒子燃料表面平均温度と最高温度を予測する際に、Re 数が 37~99 の範囲に対して図 3-42 を参照することは有用であると思われる。

以上より、面心立方格子を単位流路ユニットとする被覆粒子燃料層内冷却材挙動については、局所的な温度ピークは形成されずユニット内での最高温度は冷却材出口部の被覆粒子燃料に接する位置となった。また、各ユニットの被覆粒子燃料内部について、被覆粒子燃料核については球状の温度分布となるが、被覆層については上流側から下流側にかけてほぼ直線的に上昇する温度分布を示し、最高温度は単位流路ユニット出口部断面内における燃料核中心部となった。さらに各ユニットの中心に位置する一つの被覆粒子燃料表面の温度分布に着目すると、総じて上流領域から下流領域にかけて直線的に上昇する温度分布を示すが、隣接する被覆粒子燃料の接触点近傍において急激な温度変化が確認された。

### 3. 4 充填層内圧力損失相関式に関する検討

被覆粒子燃料層部を含む全体の流力特性を把握する上で、精度の観点から信頼性ある被

覆粒子燃料層（充填層）内圧力損失相關式が必要となる。充填層内を流れる流体の圧力損失評価式として、Ergun の式<sup>[3]</sup>を挙げることができる。

Ergun の式は、粒子層を通過する流れの抵抗を粘性エネルギー損失と運動エネルギー損失の和で表した圧力損失相關式であり、充填層内における圧力損失を評価する際に広く用いられている。Ergun は、粘性エネルギー損失を充填層内における特徴的なエネルギー損失とすることにより圧力損失を無次元化し、さらに、充填層を構成する粒子として表面の粗いコークスを用いた試験データから、以下の相關式を開発している。

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu V_m^2}{D_p^2} + 17.5 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho V_m^2}{D_p} \quad (1)$$

粘性エネルギー損失      運動エネルギー損失

もしくは、

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} \left\{ \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \frac{D_p^2}{\mu V_m} \right\} (\equiv f) = 150 + 17.5 \left( \frac{Re}{1-\varepsilon} \right) \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho D_p V_m}{\mu} \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon$  は空孔率、 $D_p$  は充填物代表直径、 $\rho$  は冷却材密度、 $\mu$  は冷却材の粘性係数、 $V_m$  は冷却材の見かけの流速（充填層流入流速を  $V_{in}$  とするとき  $\varepsilon V_{in}$ ）、 $f$  は圧力損失係数である。

ここでは、FLUENT コードによる非発熱条件での解析と Ergun の式から求めた圧力損失係数について、 $Re/(1-\varepsilon)$  をパラメータとして比較する。被覆粒子型ヘリウムガス冷却炉の概念設計段階における原子炉冷却材圧力 (=6.0[MPa])、原子炉入口部 (=460[°C])、出口部冷却材温度 (=850[°C]) と、被覆粒子燃料層内の冷却材流速として 2.0[m/s]未満を想定すると、 $Re/(1-\varepsilon)$  の範囲はおよそ  $Re/(1-\varepsilon) \leq 273$  となる。ここでの非発熱条件による解析では、この  $Re/(1-\varepsilon)$  範囲を考慮し今回の解析で使用している空孔率及び被覆粒子燃料径を用いて求めた冷却材流速を参考することにより、以下の 6 つの解析ケースを実施している（但し、Ergun の式との比較に際し、冷却材流入流速が 3.0 [m/s] よりも大きい範囲の解析値については、流速分布が未発達であることが明らかであったため採用はしていない）。

冷却材流入流速、 $V_{in}$ [m/s]	: 0.05、0.1、0.5、1.0、2.0、3.0
冷却材流入レイノルズ数、Re	: 2.7、5.3、26.6、46.9、104.3、154.5
冷却材入口温度、 $T_{in}$ [°C]	: 460
冷却材出口圧力、 $P_{out}$ [MPa]	: 6.0

非発熱条件による各解析ケースの結果を、表 3-9～表 3-14 に示す。表では、5 ユニットを構成する各面心立方格子の入口部及び出口部断面における冷却材断面平均圧力、隣接する断面間の差圧及び断面平均流速を示している。また、図 3-43 に、表 3-9～表 3-14 で使用している流路断面番号を示す。これらの表より、隣接する断面平均圧力の差（圧力損失）自体には 1[Pa]以下の差が、断面平均流速については  $10^{-4}$  [m/s]以下の差は確認されるものの、各ユニット区間の中で比較的発達した領域は断面 2 から断面 5 の領域（上流より 2 番目のユニットから 4 番目のユニットの領域）となっている。従って、Ergun の式の適用性の検証については、FLUENT コードによる 2 番目のユニットから 4 番目のユニットについての解析結果を用いて実施する。これらの解析値には、各断面平均流速から判断し十分に発達していない領域での値（特に、高い冷却材流入流速 ( $V_{in} = 3.0$ [m/s]) の解析ケース）、もしくは数値誤差が含まれた値となっているため、必ずしも理想的な解析値ではないが暫定的にこれらのデータを用いて圧力損失の評価を行うこととする。

ここで、(2)式の差圧  $\Delta P$  及び Re は、次のように定義した。

$$\Delta P = |P_{in} - P_{out}| \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho D_p V_m}{\mu} \quad (5)$$

ここで、 $P_{in}$ 、 $P_{out}$  はそれぞれ断面 2 と断面 5 の断面平均冷却材圧力、 $D_p$  は被覆粒子燃料粒子径、 $V_m$  は見かけの流速 ( $\varepsilon V_{in}$ )、 $\rho_{in}$ 、 $\mu_{in}$  はそれぞれ断面 2 の断面平均冷却材温度、断面平均冷却材圧力にて見積もった冷却材密度及び粘性係数である。

図 3-44 に、Ergun の式と FLUENT コードによる解析値から求めた圧力損失係数の比較図を示す。Ergun の式は FLUENT の解析値とほぼ同じ Re 数依存性を示しているが、Re 数が  $Re = 2.7, 5.3, 26.6$  の領域においては Re 数の減少と共により低く評価する傾向を示しており、Ergun の式と解析ケースとの差は、それぞれ-11%、-7%，-1%となっている (FLUENT の解析値を基準)。一方、Re 数が  $Re = 46.9, 104.3, 154.5$  の領域においては Re 数の増大

と共により高く評価する傾向を示しており、解析値との差は、それぞれ 12%、12%、20% となっている（FLUENT の解析値を基準）。

Re 数が  $Re = 2.7 \sim 26.6$  の領域における Ergun の式と FLUENT の解析値との開きについては、比較の際に採用した圧力損失データ値に数値誤差が含まれていることによる原因か、もしくは、データ値が完全な発達領域でのデータではないため、入口助走区間において考慮に入れるべき圧力損失の分だけ FLUENT が高く評価することが原因として考えられる。一方、Re 数が  $Re = 46.9 \sim 154.5$  領域での Ergun の式と FLUENT による解析値との開きについては、Ergun の式は充填層を構成する粒子として表面の粗いコークスを用いた試験データから開発されており、Nikuradse による粗面円管内圧力損失係数の測定で得られた結果<sup>[4]</sup>と同様に、乱流領域において粗面の効果が現れはじめ平滑球を充填層内構成粒子とした FLUENT による解析値よりも高くなることが原因の一つとして考えられる。

以上により、面心立方格子を単位流路ユニットとした被覆粒子燃料層内の解析データを用いて、 $2 \leq Re \leq 154$  の範囲にて Ergun 式の適用性の検討を実施し、Ergun 式と解析結果との Re 数依存性は同等であり、両者が -11%~20% で一致することを確認した。比較の際採用した解析値に含まれている数値誤差により、または完全な発達領域での解析データを使用していないことにより生じる、両者の定量性に関する不一致は認められるが、Ergun の式は、被覆粒子燃料層部を含む燃料体全体のマクロ解析を行う上で、被覆粒子燃料層内圧力損失相関式としての適用性を有するものと考えられる。

## 4. まとめ

被覆粒子燃料型ヘリウムガス高速炉の燃料体内における局所的な熱流動場及び被覆粒子燃料内の温度分布の把握と、マクロ解析において必要となる被覆粒子燃料層内圧力損失相関式の適用性の検討を目的として、汎用流体解析コード FLUENT を用いた被覆粒子燃料層内詳細熱流動解析を実施した。

除熱に関する保守側評価の観点から充填率 74% の面心立方格子を單一流路ユニットとしこれを流れ方向に 5 つ連結させた体系を対象とした。また、別途実施した燃料体全体のマクロ解析の結果を参考し、解析体系入口部冷却材流入流速を 1.0 [m/s] と 2.0[m/s] と設定した 2 つのケースの解析を行った。解析の結果、被覆粒子燃料層内の冷却材流速は熱膨張により増大し、解析体系入口部冷却材流入流速が 2.0[m/s] の解析ケースでは、被覆粒子燃料後方領域によどみ領域が確認された。しかしながら、総じて局所的な冷却材の温度ピークは確認されず、各ユニットの最高温度は冷却材出口部の被覆粒子燃料に接する位置となった。被覆粒子燃料核については球状に近い温度分布を形成するが、被覆層については上流領域から下流領域にかけてほぼ比例する温度上昇を示した。ユニットごとの最高温度は冷却材出口断面内の燃料核中心部となった。一つの被覆粒子燃料表面に着目すると、その温度分布は全般的に上流領域から下流領域にかけてほぼ比例する温度上昇を示すが、隣接する被覆粒子燃料の接触点近傍において比較的急激な温度変化が確かめられた。最高温度は下流側に隣接する被覆粒子間の接触点に、最低温度は上流側に隣接する被覆粒子間の接触点にて確認された。また、被覆粒子燃料表面温度と冷却材体積平均温度の差はおよそ数十℃となった。

さらに、FLUENT コードによる被覆粒子燃料層内の解析データより、 $4 \leq Re/(1-\varepsilon) \leq 209$  ( $\varepsilon$  : 空孔率) の範囲にて被覆粒子燃料層（充填層）内圧力損失相関式として Ergun の式の適用性の検討を実施した。解析結果は Ergun の式と同じ Re 数依存性を示し、両者が -11%~20% で一致することが確認された。従って、Ergun の式は、被覆粒子燃料層部を含む燃料体全体のマクロ解析を行う上で、被覆粒子燃料層内圧力損失相関式として適用できると考えられる。

以上は仮想的体系から得られた結果であるが、実際の被覆粒子燃料層においては、径方向に向かって流路断面積が増大することにより熱膨張による流速の増大は抑制され、加えて現在の概念設計段階での被覆粒子燃料層内充填率は、ここで対象とした 74% よりも低いことから、熱除去の観点から懸念される流れのよどみ領域の形成の可能性はより低くなるものと考えられる。また、当解析は、解析体系内の輻射による熱輸送を考慮していない。

輻射の効果により解析体系内の温度分布はより一様な分布を形成することが予測されるこ  
とから、今回の解析は温度分布の観点から保守側の評価に相当すると考えられる。

今後は、被覆粒子燃料層内における熱伝達相関式の調査を実施し、摘出された相関式の  
適用性の検討を行う必要がある。但し、ここでの解析から被覆粒子内の熱伝導による熱輸  
送が無視できないことが判明したため、充填層内を流れる状況での熱伝達評価の際にはこ  
の点に関して注意する必要がある。

## 5. 謝 辞

本調査報告において、要素技術開発部流体計算工学研究グループの山口グループリーダーはじめ村松主研、堺副主研には研究会等を通して数多くのご助言を頂いた。また、要素技術開発部新技術開発試験グループの田中副主研より閉塞物内の対流現象に関する数々の助言を頂戴している。さらに、今回の解析で採用した被覆粒子燃料及びヘリウム冷却材の物性値については、システム部炉心・燃料システムグループより提示していただいたい物性式を使用した。これらの方々に謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 村松 壽晴 他、单相多次元熱流動解析コード AQUA ~ 乱流モデル利用手引書 ~、  
PNC ZN9460 94-003、1994 年 6 月
- [2] FLUENT INC, "FLUENT NEWS," NEWSLETTER Volume. 9, Issue 1 Spring/Summer 2000.
- [3] S. Ergun, "Fluid Flow Through Packed Columns," Chem. Eng. Progress Vol. 48, 2, p89, 1952.
- [4] J. Nikuradse, "LAWS OF FLOW IN ROUGH PIPES," 1950, Translation NACA TM 1292.

表 1-1 被覆粒子型ヘリウムガス高速増殖炉の炉心の主要スペック

原子炉熱出力 [MWt]	1800
炉心高さ [cm]	320
炉心等価直径 [cm]	380

表 1-2 燃料体及びコンパートメントの主要スペック

燃料体全長 [mm]	6800
炉心高さ [mm]	3200
軸ブランケット長 [mm:上/下]	600/600
燃料コンパートメント長 [mm]	5800
燃料コンパートメント数/燃料体	1
外管外径 [mm]	53.8
外管内径 [mm]	49.8
内管外径 [mm]	27.7
内管内径 [mm]	23.7

表 1-3 被覆粒子燃料の主要スペック

燃料核体積当たりのピーク出力密度 [W/mm <sup>3</sup> ]	0.555
コンパートメント内燃料粒子充填率 [%]	66
被覆粒子燃料径 [mm]	1.94
燃料核 (MOX) 直径 [mm]	1.5
低密度 PyC 被覆厚 [ $\mu\text{m}$ ]	110
高密度 PyC 被覆厚 [ $\mu\text{m}$ ]	10
ZrC 被覆厚 [ $\mu\text{m}$ ]	10
SiC 被覆厚 [ $\mu\text{m}$ ]	40
SiC 被覆厚 [ $\mu\text{m}$ ]	120

表 3-1 冷却材に関する解析結果（入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）

流路 ユニット	冷却材体積 平均温度 [°C]	冷却材最低、 最高温度 [°C]	冷却材温度差 [°C]	冷却材体積 平均流速 [m/s]
1	617.8	551.1 684.7	133.6	1.327
2	721.1	786.7 650.8	135.9	1.484
3	822.5	884.8 754.2	130.5	1.638
4	915.9	964.5 854.9	109.6	1.781

表 3-2 被覆粒子燃料に関する解析結果（入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）

流路 ユニット	被覆粒子燃料 体積平均温度 [°C]	被覆粒子燃料 最低、最高温度 [°C]	被覆粒子燃料 温度差 [°C]
1	669.3	580.7 929.8	349.1
2	773.1	684.2 1036.7	352.5
3	874.4	786.2 1137.8	351.6
4	966.1	884.2 1218.7	334.5

表3-3 被覆粒子表面に関する解析結果（入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]の解析ケース）

流路 ユニット	被覆粒子表面 平均温度 [°C]	被覆粒子表面 最低、最高温度 [°C]	被覆粒子 温度差[°C]
1	632.6	574.4 684.5	110.1
2	735.3	678.0 786.5	108.5
3	835.7	780.6 884.6	104.0
4	926.8	879.4 964.4	85.0

表3-4 冷却材に関する解析結果（入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s]の解析ケース）

流路 ユニット	冷却材体積 平均温度 [°C]	冷却材最低、 最高温度 [°C]	冷却材温度差 [°C]	冷却材体積 平均流速 [m/s]
1	528.8	495.9 566.2	70.3	2.351
2	580.8	546.4 617.9	71.5	2.506
3	632.6	598.4 669.1	70.7	2.661
4	682.8	650.1 714.6	64.5	2.811

表 3-5 被覆粒子燃料に関する解析結果（入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース）

流路 ユニット	被覆粒子燃料 体積平均温度 [°C]	被覆粒子燃料 最低、最高温度 [°C]	被覆粒子燃料 温度差[°C]
1	575.4	514.1 803.0	288.9
2	627.9	565.9 858.7	292.8
3	680.1	616.9 913.3	296.4
4	729.9	668.8 961.2	292.4

表 3-6 被覆粒子表面に関する解析結果（入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース）

流路 ユニット	被覆粒子 表面平均温度 [°C]	被覆粒子表面 最低、最高温度 [°C]	被覆粒子表面 温度差[°C]
1	540.0	507.4 566.1	58.8
2	591.7	559.0 617.8	58.8
3	643.2	611.2 669.0	57.8
4	692.5	662.8 964.5	51.7

表 3-7 被覆粒子表面の最低、最高温度（入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース）

流路 ユニット	被覆粒子燃料表面 最低温度 [°C]	被覆粒子燃料表面 最高温度 [°C]	被覆粒子燃料表面 温度差[°C]
1	606.5	658.8	52.3
2	709.5	761.1	51.6
3	810.9	860.7	49.8
4	906.5	947.6	41.0

表 3-8 被覆粒子表面の最低、最高温度（入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース）

流路 ユニット	被覆粒子燃料表面 最低温度 [°C]	被覆粒子燃料表面 最高温度 [°C]	被覆粒子燃料表面 温度差[°C]
1	527.0	553.2	26.2
2	578.7	604.9	26.2
3	630.4	656.3	25.9
4	681.0	704.3	23.3

表 3-9 冷却材断面平均圧力、流速（入口部冷却材流入流速 0.05 [m/s] の解析ケース）

断面	冷却材断面平均 圧力 [Pa]	差圧 [Pa]	冷却材断面平均 流速 [m/s]
1	6000008	1	0.0500
2	6000007	2	0.0468
3	6000005	1	0.0468
4	6000004	2	0.0468
5	6000002	2	0.0468
6	6000000	*	0.0485

表 3-10 冷却材断面平均圧力、流速（入口部冷却材流入流速 0.1[m/s] の解析ケース）

断面	冷却材断面平均 圧力 [Pa]	差圧 [Pa]	冷却材断面平均 流速 [m/s]
1	6000017	3	0.1000
2	6000014	4	0.0936
3	6000010	3	0.0936
4	6000007	3	0.0936
5	6000004	4	0.0936
6	6000000	*	0.0976

表 3-11 冷却材断面平均圧力、流速（入口部冷却材流入流速 0.5 [m/s]の解析ケース）

断面	冷却材断面平均 圧力 [Pa]	差圧 [Pa]	冷却材断面平均 流速 [m/s]
1	6000104	22	0.5000
2	6000082	20	0.4658
3	6000062	21	0.4658
4	6000041	20	0.4658
5	6000021	21	0.4658
6	6000000	*	0.5073

表 3-12 冷却材断面平均圧力、流速（入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]の解析ケース）

断面	冷却材断面平均 圧力 [Pa]	差圧 [Pa]	冷却材断面平均 流速 [m/s]
1	6000256	99	1.0000
2	6000157	39	0.8229
3	6000118	39	0.8229
4	6000079	39	0.8229
5	6000040	40	0.8229
6	6000000	*	0.8229

表 3-13 冷却材断面平均圧力、流速（入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース）

断面	冷却材断面平均 圧力 [Pa]	差圧 [Pa]	冷却材断面平均 流速 [m/s]
1	6000662	134	2.0000
2	6000528	131	1.8284
3	6000397	132	1.8284
4	6000265	131	1.8284
5	6000134	134	1.8285
6	6000000	*	2.1013

表 3-14 冷却材断面平均圧力、流速（入口部冷却材流入流速 3.0 [m/s] の解析ケース）

断面	冷却材断面平均 圧力 [Pa]	差圧 [Pa]	冷却材断面平均 流速 [m/s]
1	6001191	240	3.0000
2	6000951	237	2.7091
3	6000714	237	2.7092
4	6000477	237	2.7093
5	6000240	240	2.7094
6	6000000	*	3.1586

- 内側炉心燃料集合体 : 84 体
- ◆ 外側炉心燃料集合体 : 114 体
- 径プランケット集合体 : 174 体
- ▲ 制御棒 : 19 体
- 可動反射体 : 138 体

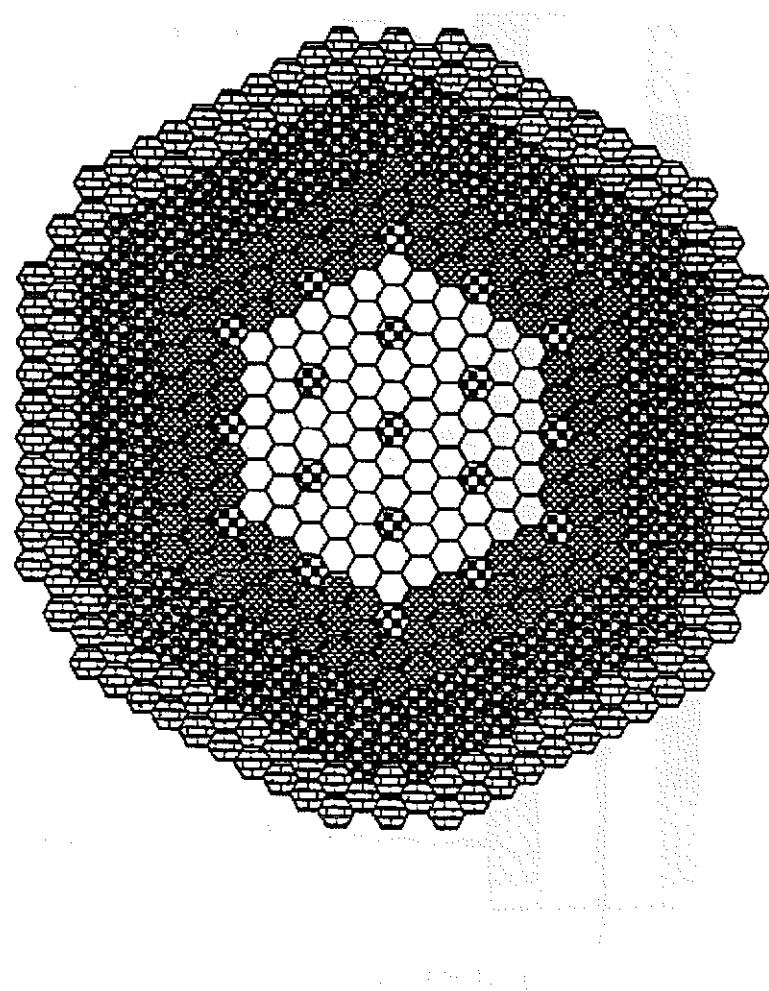


図 1-1 被覆粒子燃料型ヘリウムガス高速炉の炉心構成図

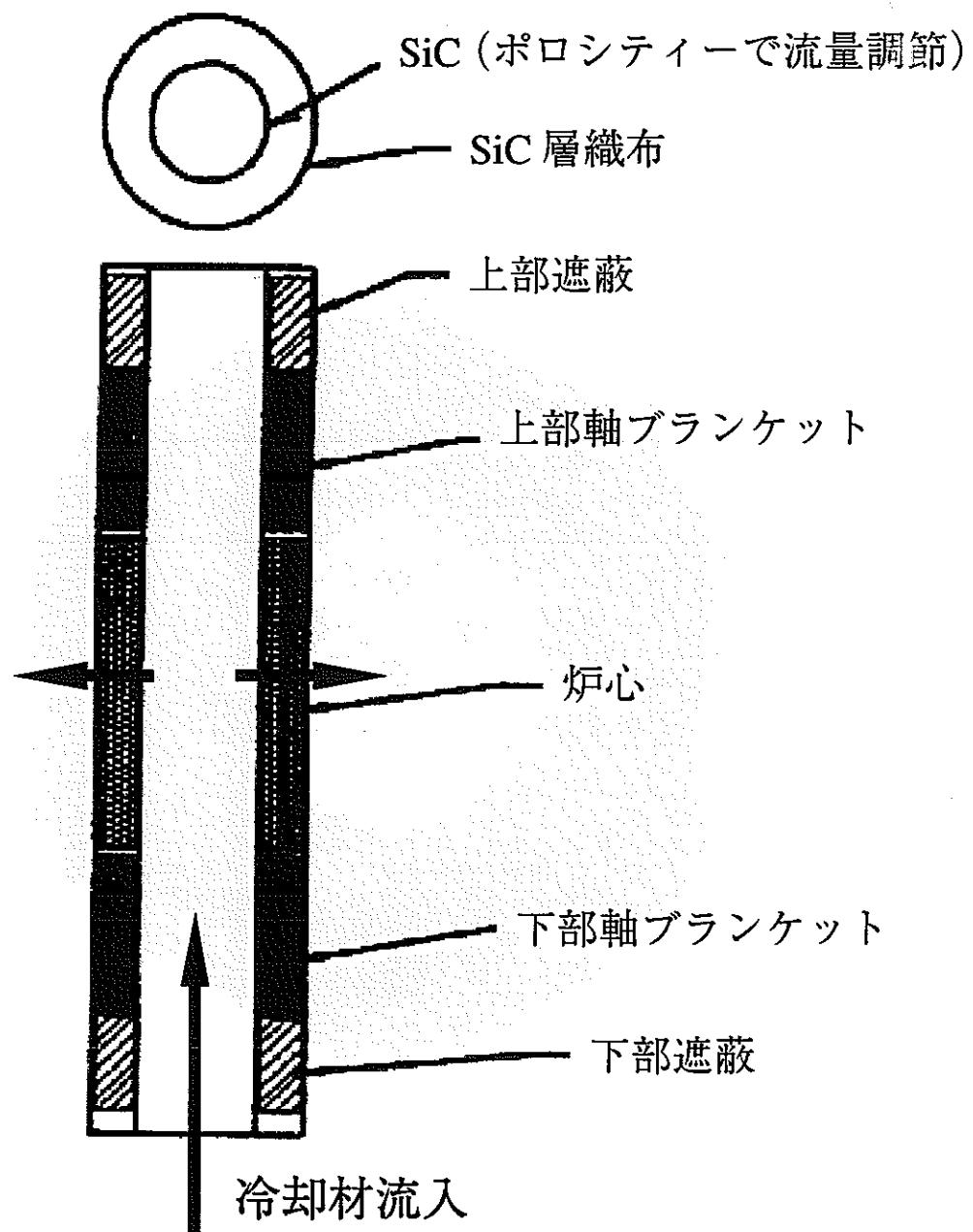


図 1-2 コンパートメント概略図（垂直断面）

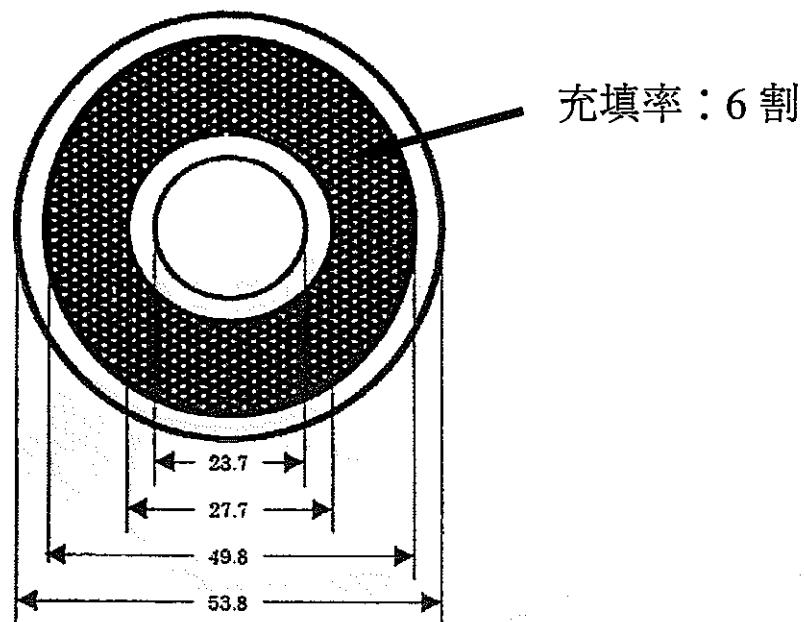


図 1-3 コンパートメント概略図（水平断面）

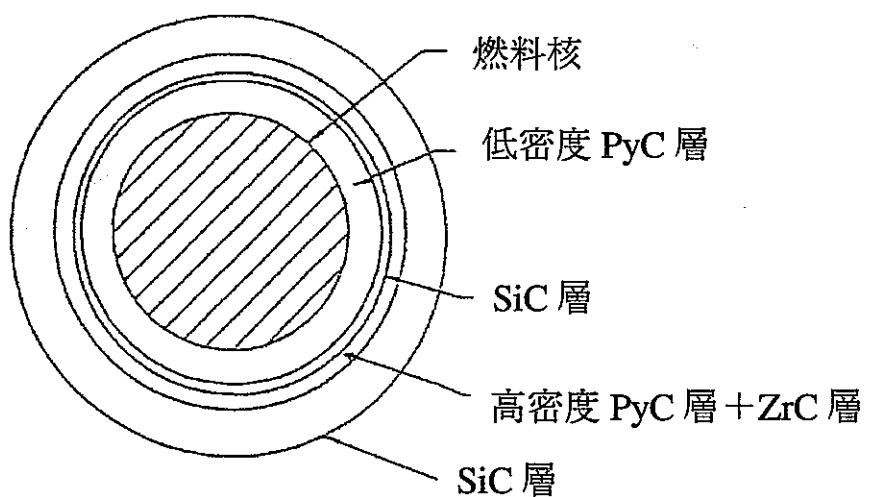


図 1-4 被覆粒子燃料断面図

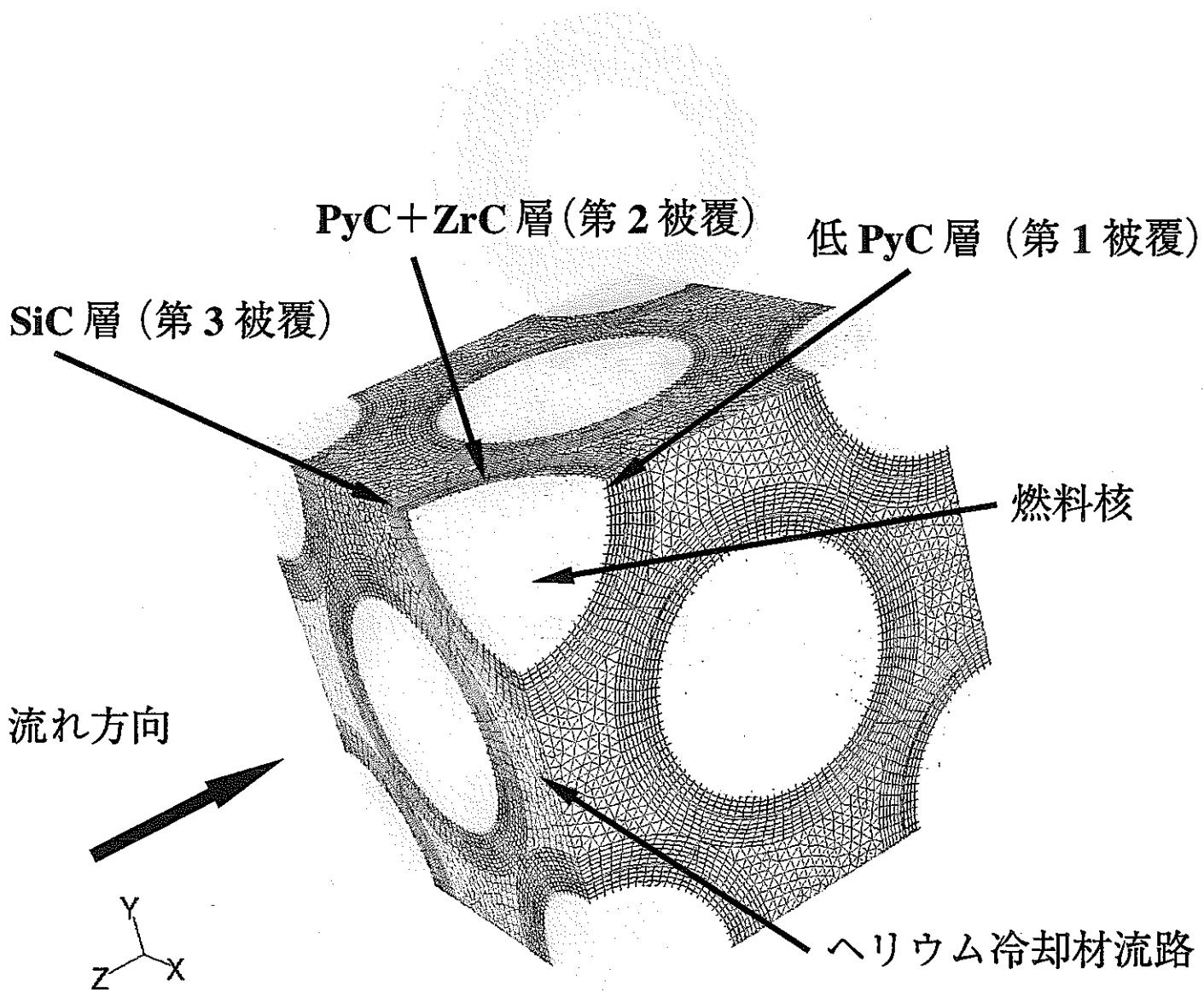


図 2-1 单一流路ユニット（面心立方格子）のメッシュ分割図

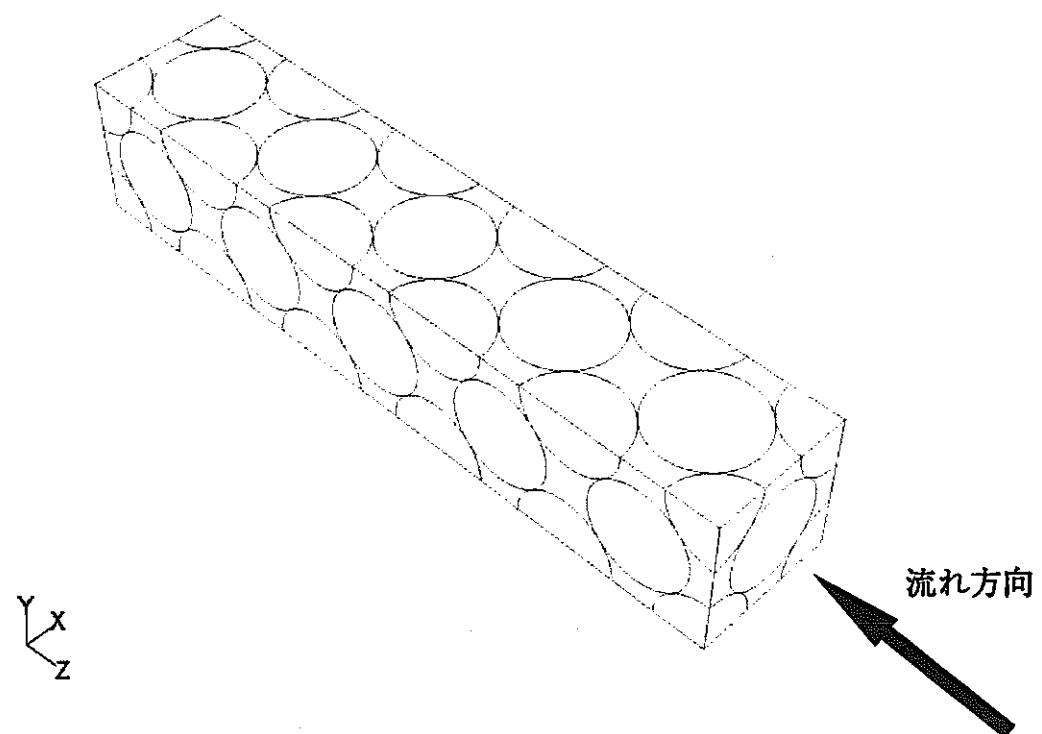


図 2-2 解析体系 (5 ユニット) 全体図

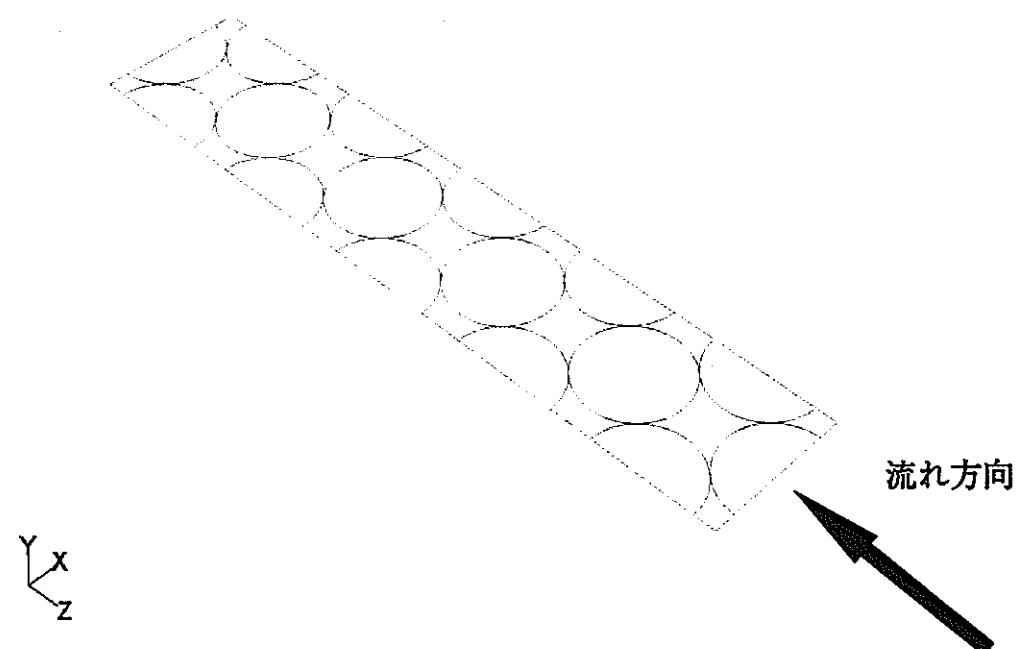


図 2-3 中央水平断面 ( $y=0.0[\text{mm}]$ 断面) 図

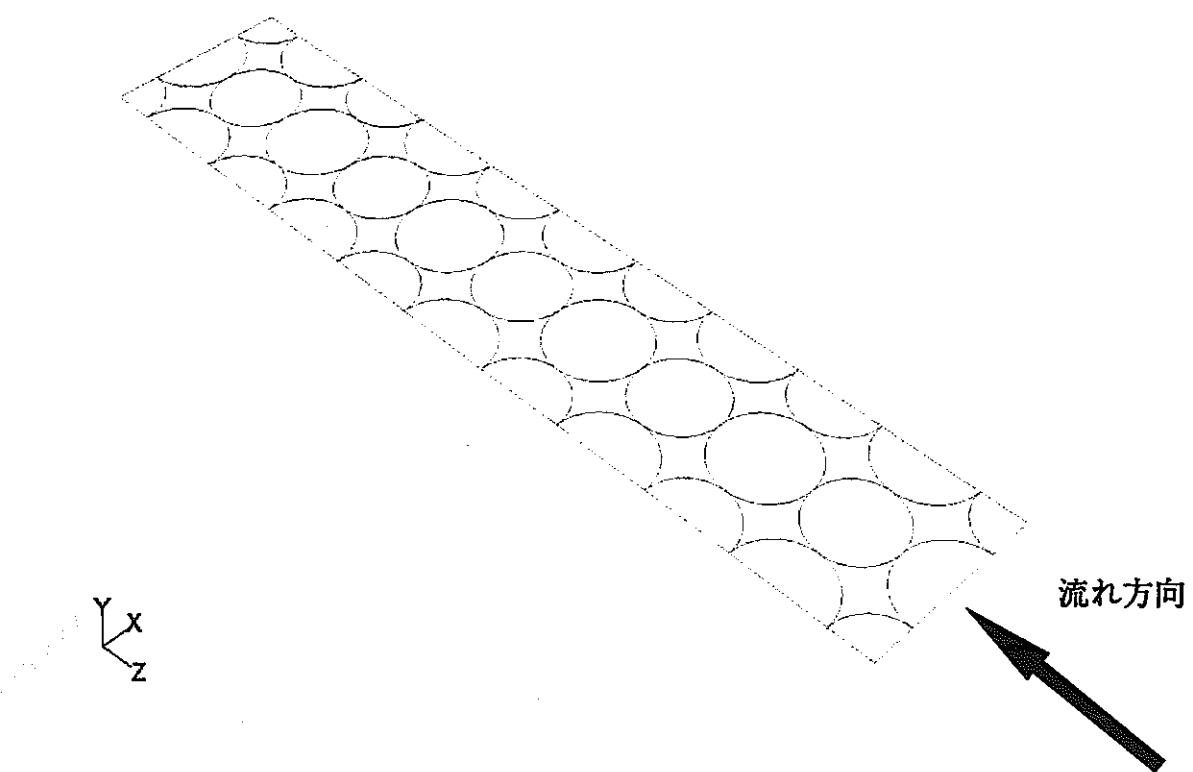


図 2-4 中央と外側の中央水平断面 ( $y=0.7[\text{mm}]$ 断面) 図

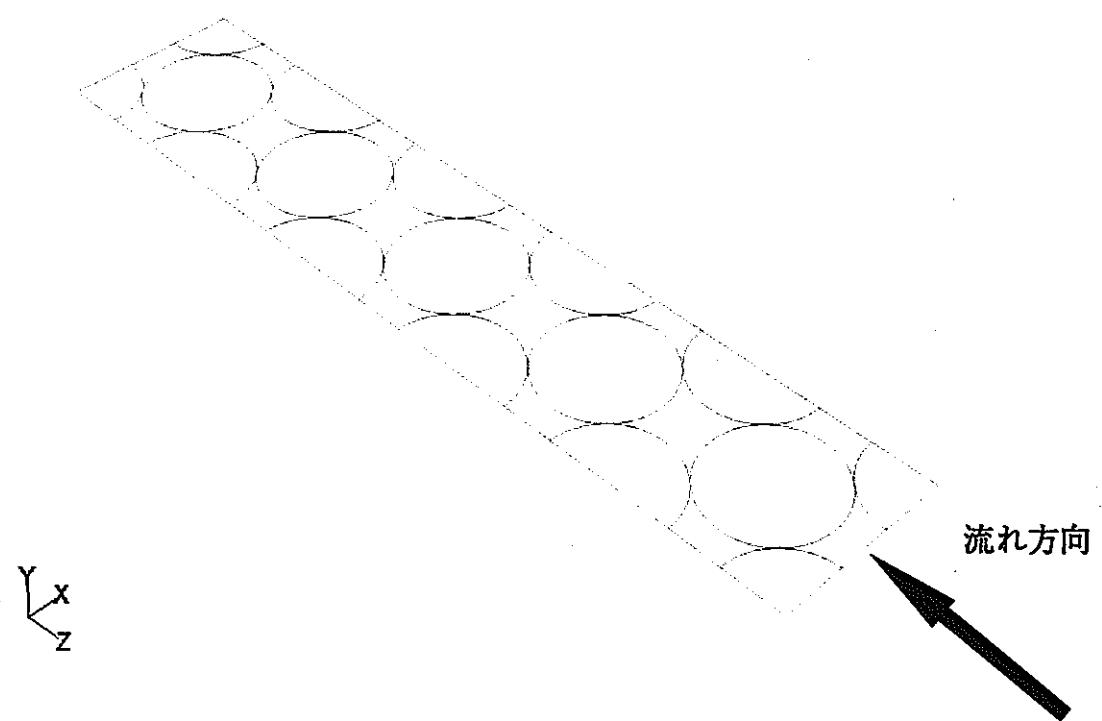


図 2-5 外側水平断面 ( $y=1.47072[\text{mm}]$ 断面) 図

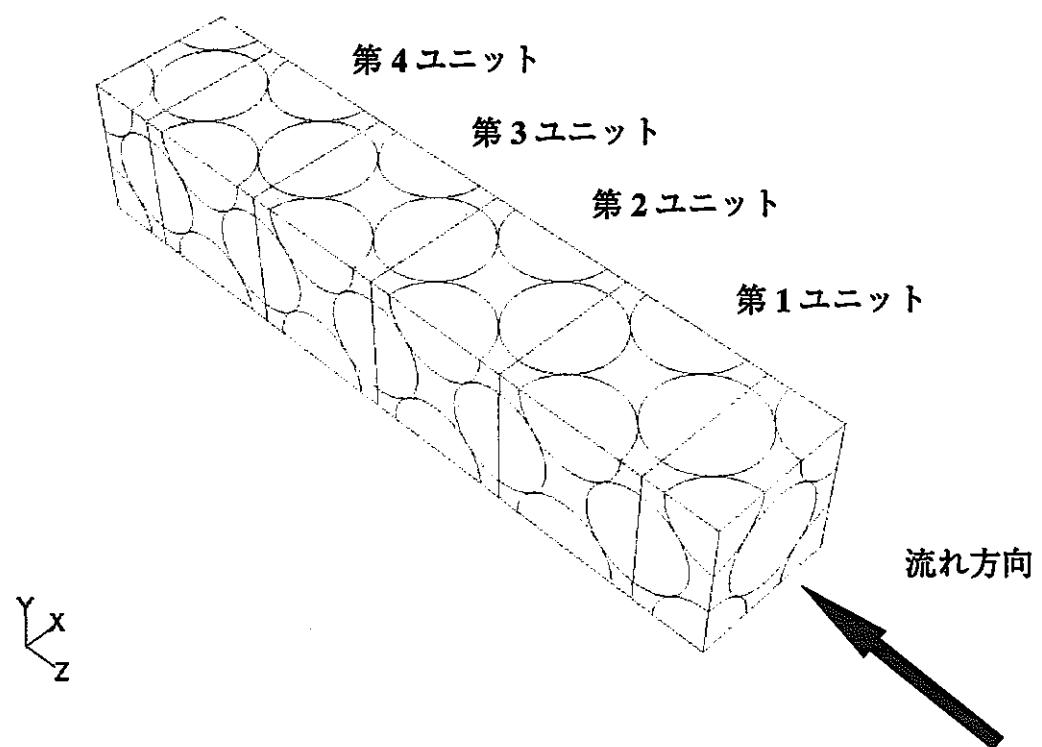


図 3-1 5 ユニットの流路ユニット分割図

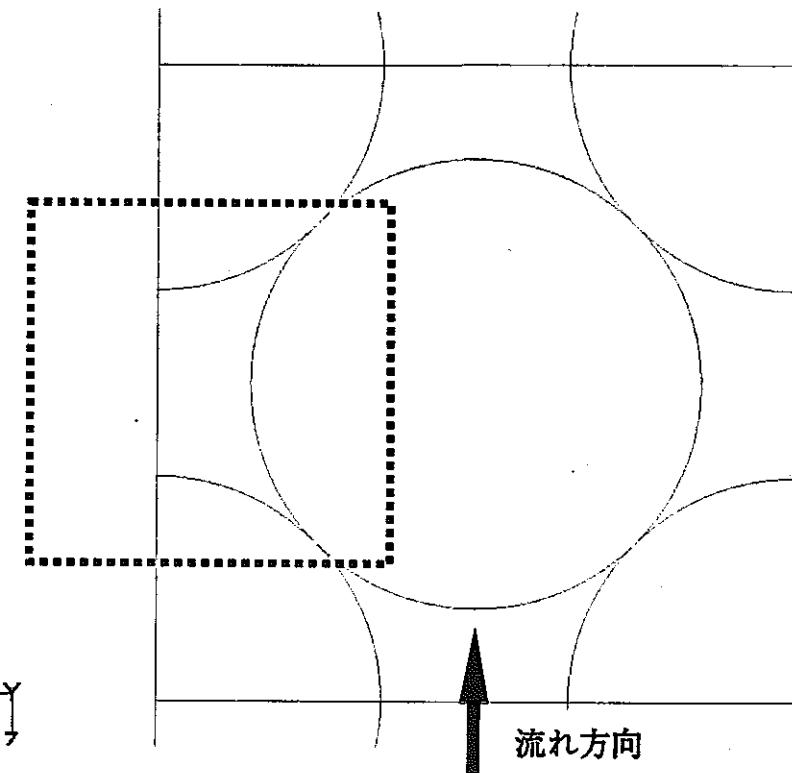


図 3-2  $y=0.0[\text{mm}]$ 断面内の流速ベクトル拡大位置

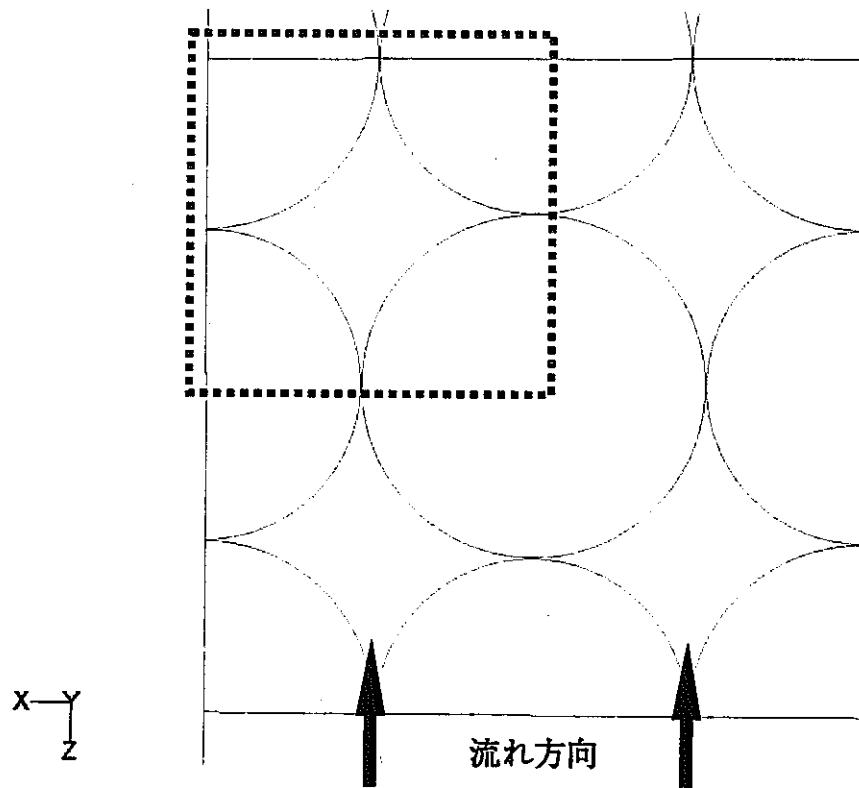


図 3-3  $y=0.7[\text{mm}]$ 断面内の流速ベクトル拡大位置

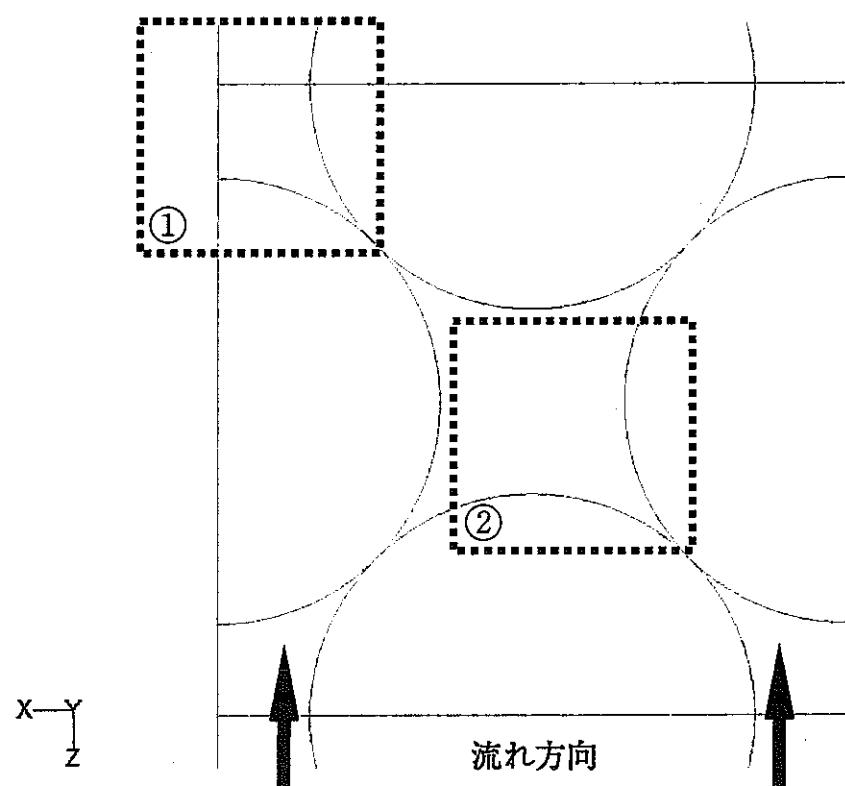


図 3-4  $y=1.47072[\text{mm}]$ 断面内の流速ベクトル拡大位置

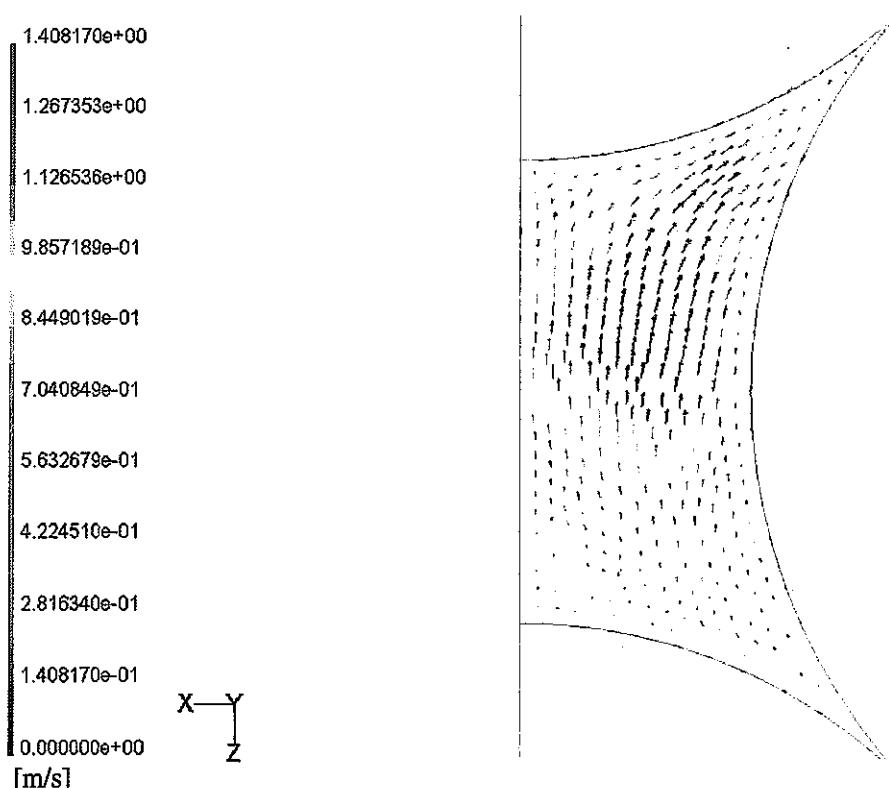
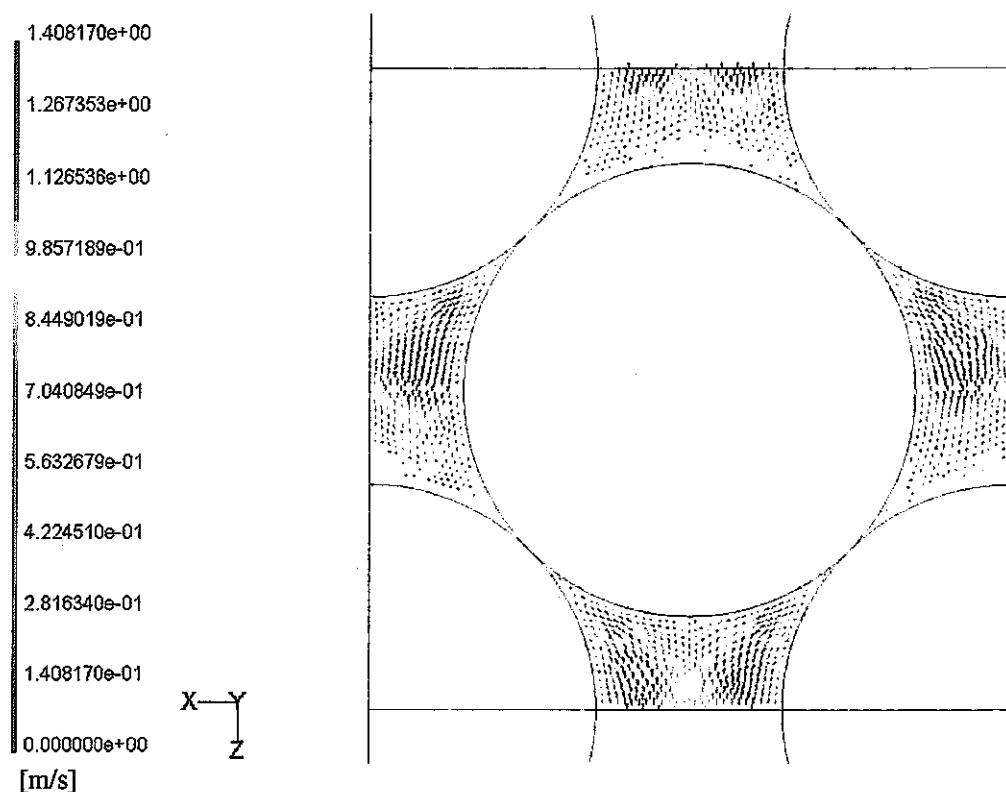


図 3-5 第 1 ユニットの  $y=0.0[\text{mm}]$  断面内流速ベクトル図

(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

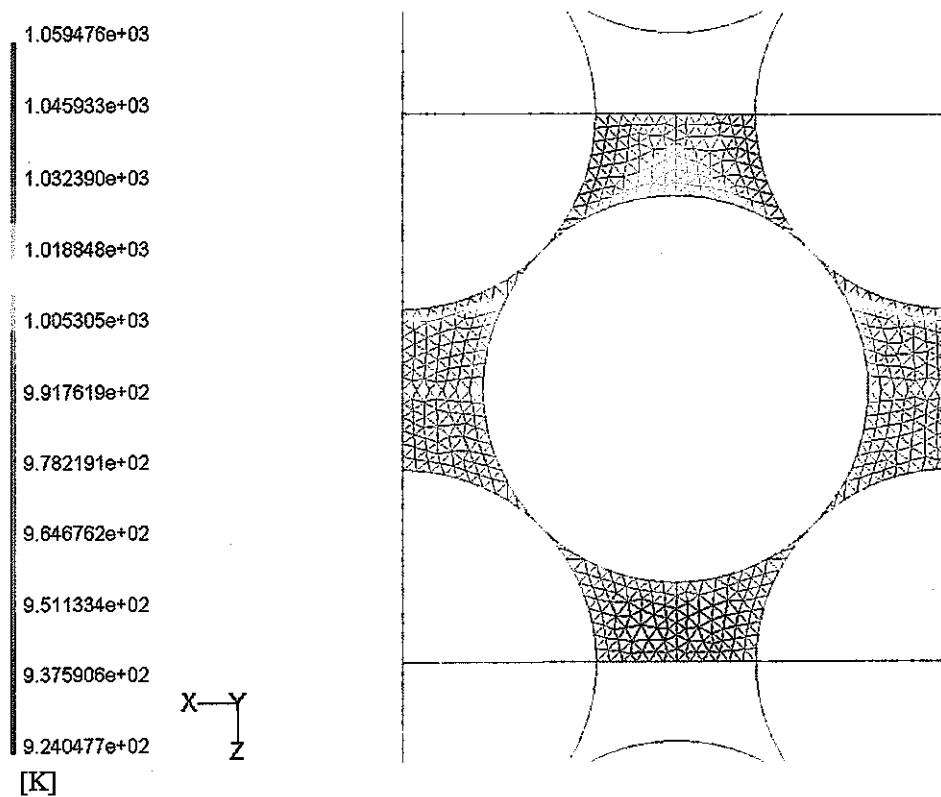


図 3-6 第 1 ユニットの  $y=0.0[\text{mm}]$  断面内冷却材温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

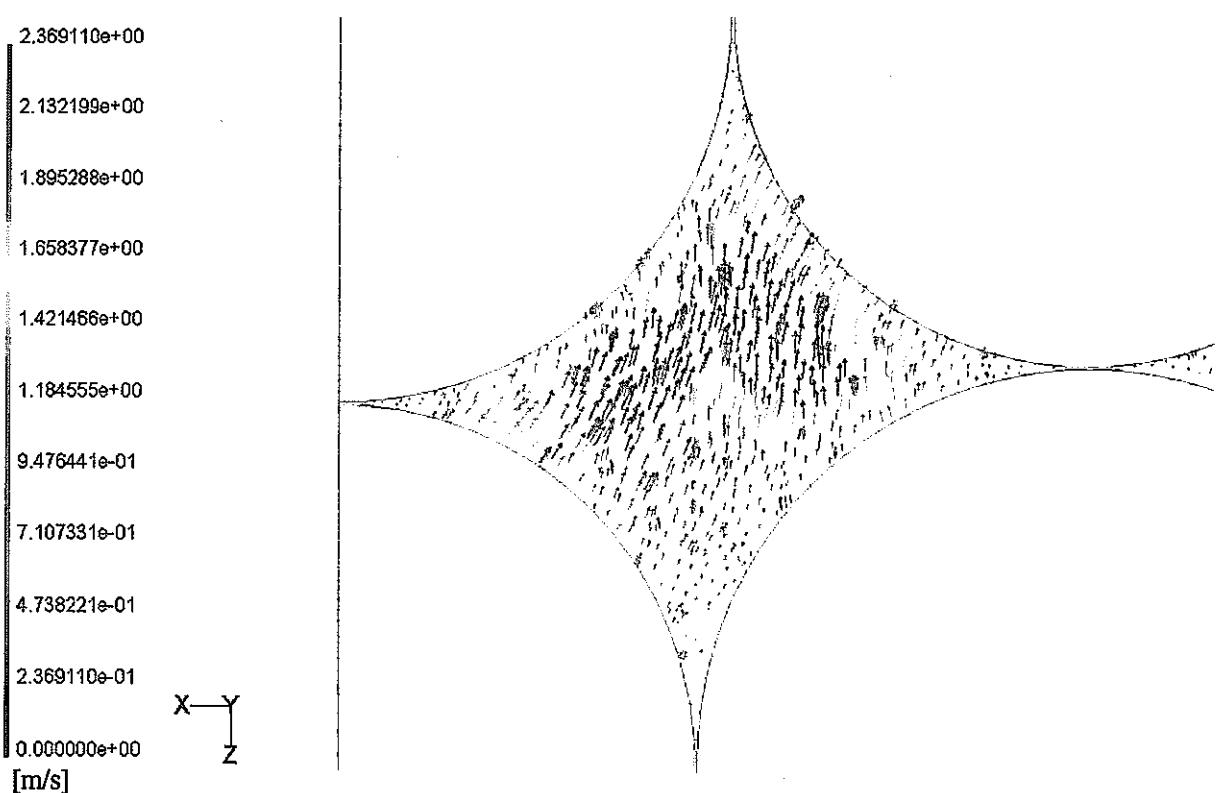
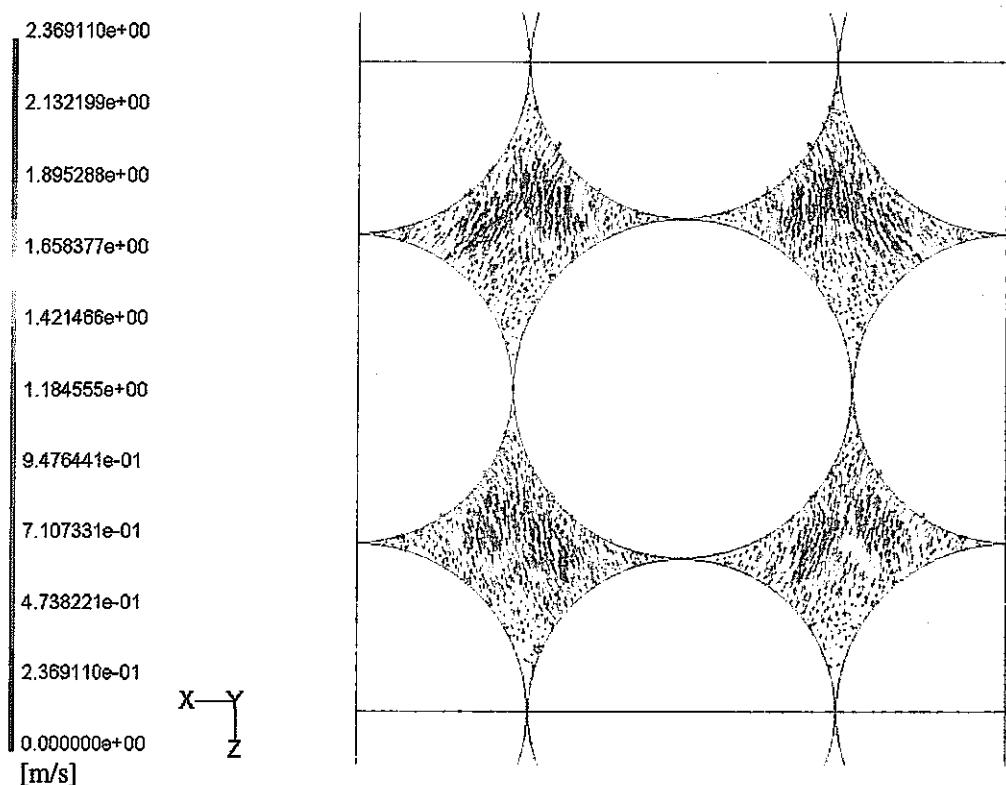


図 3-7 第1ユニットの  $y=0.7\text{[mm]}$ 断面内流速ベクトル図

(入口部冷却材流入流速  $1.0\text{[m/s]}$  の解析ケース)

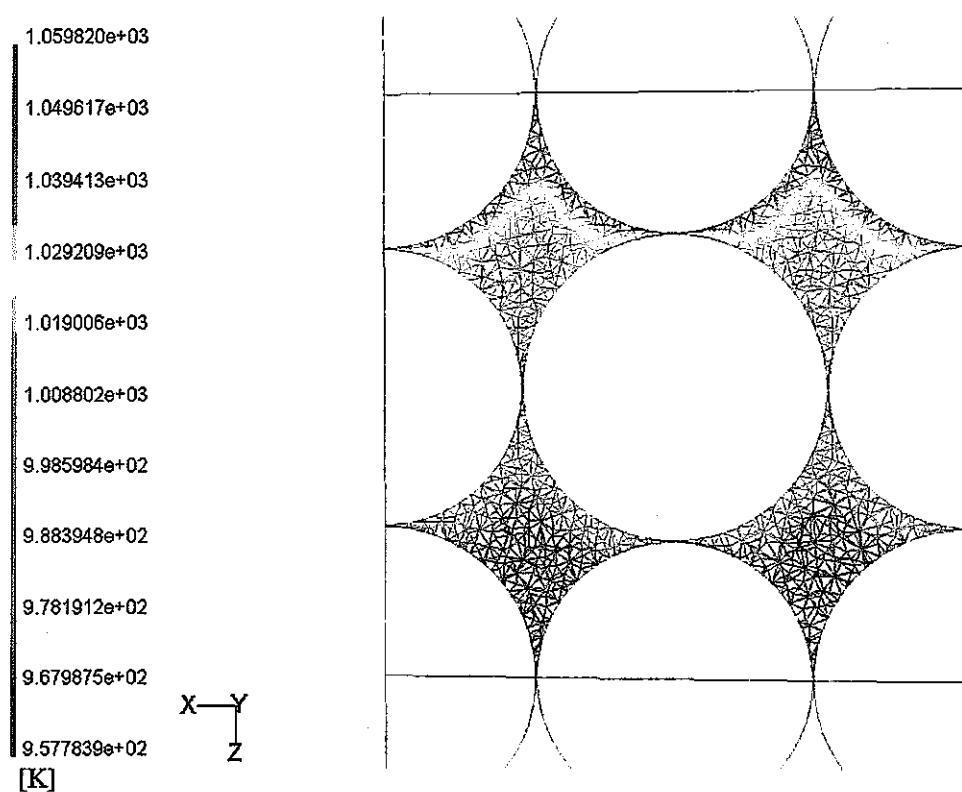


図 3-8 第 1 ユニットの  $y=0.7[\text{mm}]$  断面内冷却材温度センター図  
(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

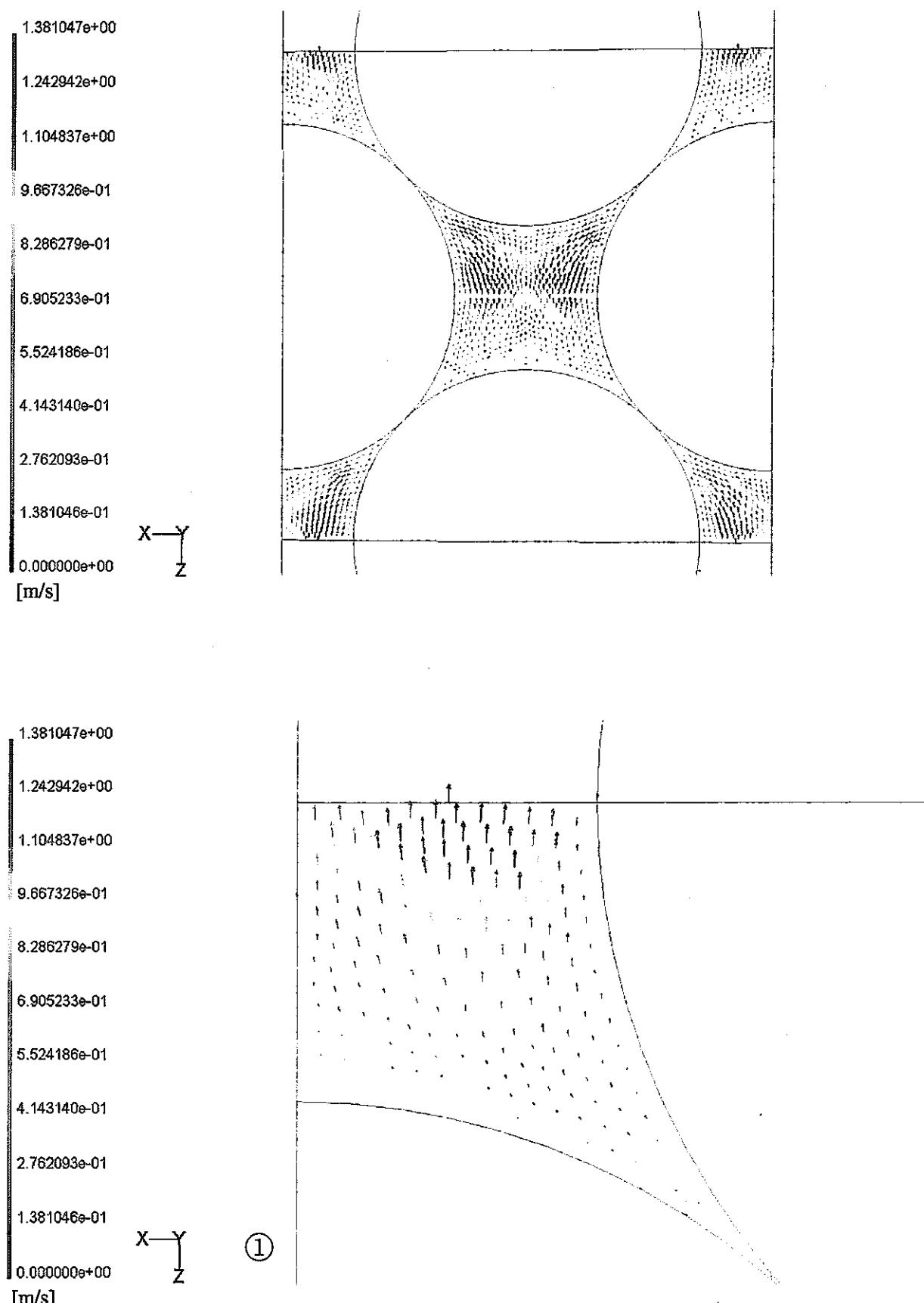


図 3-9 第 1 ユニットの  $y=1.47072$ [mm]断面内流速ベクトル図

(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

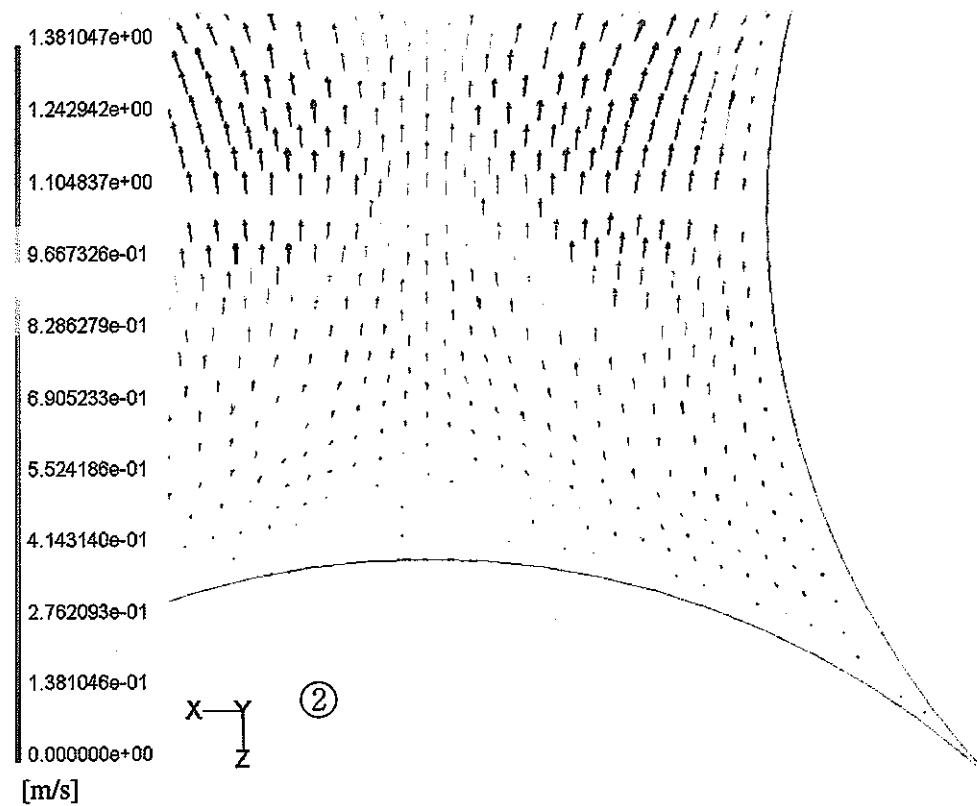


図 3-9 第 1 ユニットの  $y=1.47072[\text{mm}]$  断面内流速ベクトル図  
(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

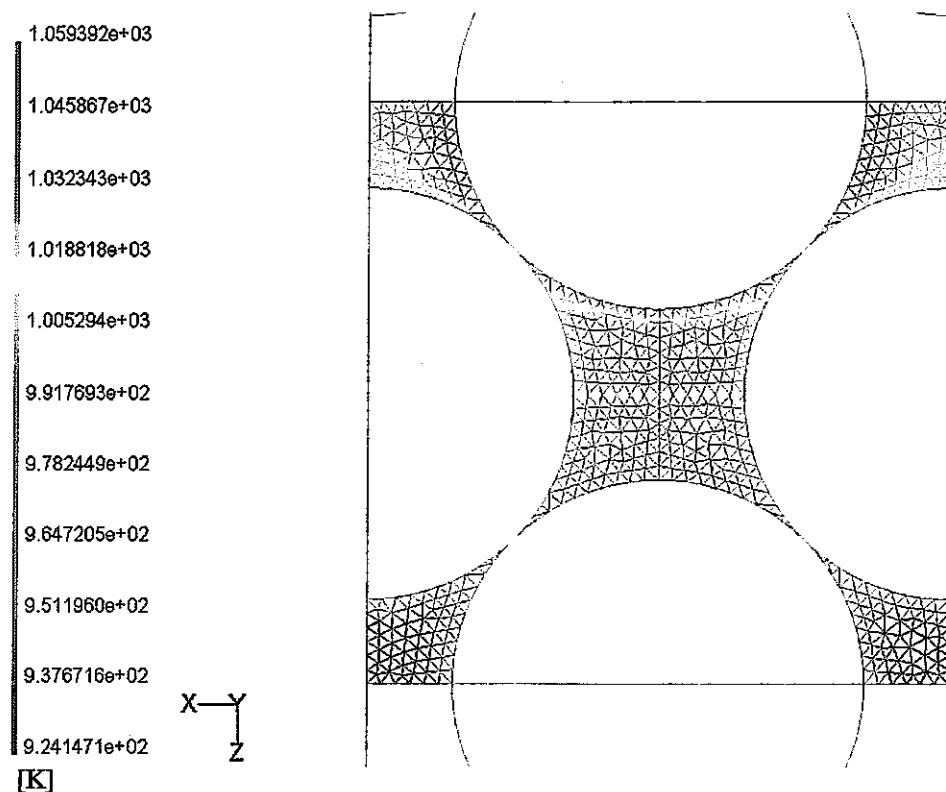


図 3-10 第 1 ユニットの  $y=1.47072\text{[mm]}$  断面内冷却材温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

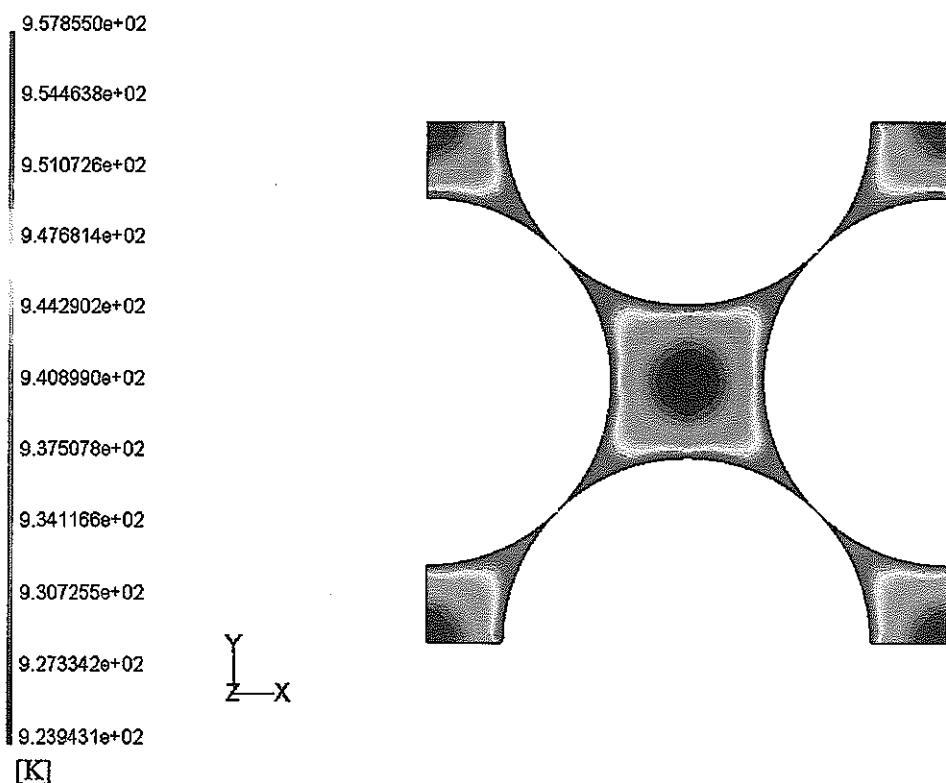


図 3-11 第 1 ユニットの出口部断面内冷却材温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

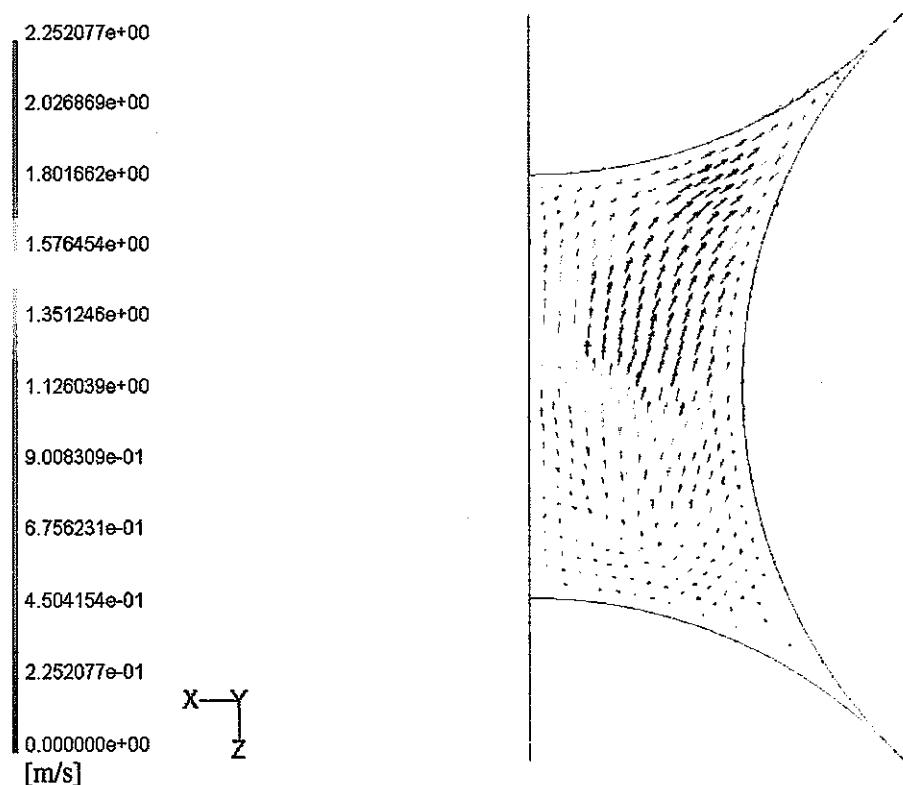
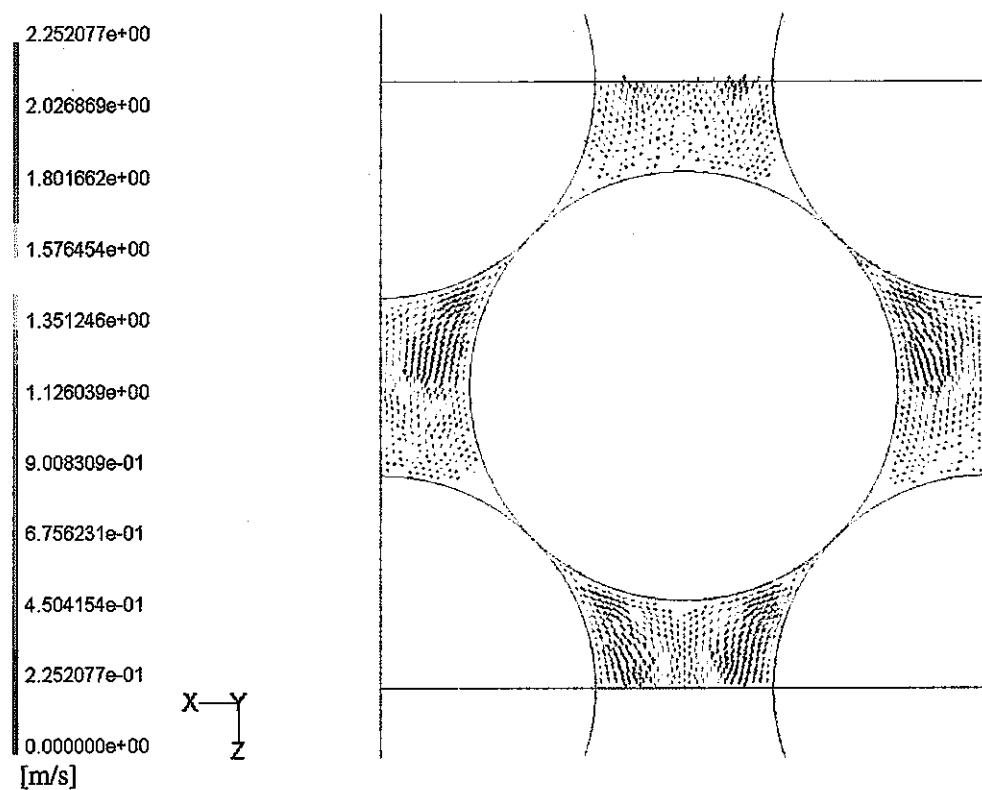


図 3-12 第 1 ユニットの  $y=0.0$  [mm] 断面内流速ベクトル図

(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

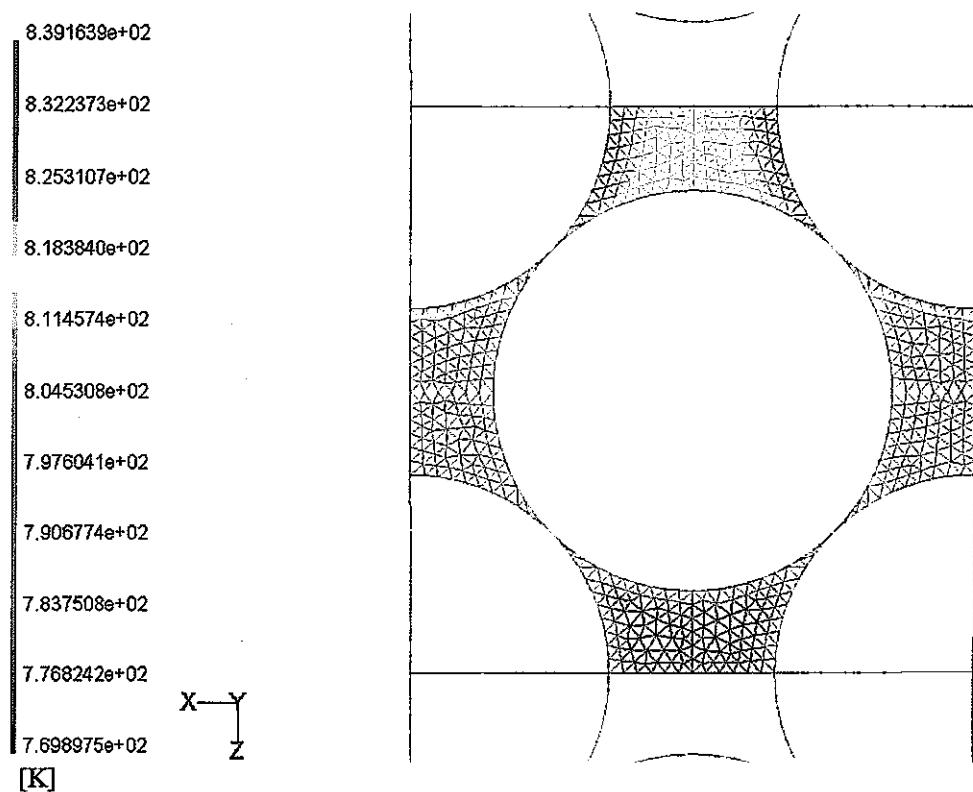


図 3-13 第 1 ユニットの  $y=0.0[\text{mm}]$  断面内冷却材温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

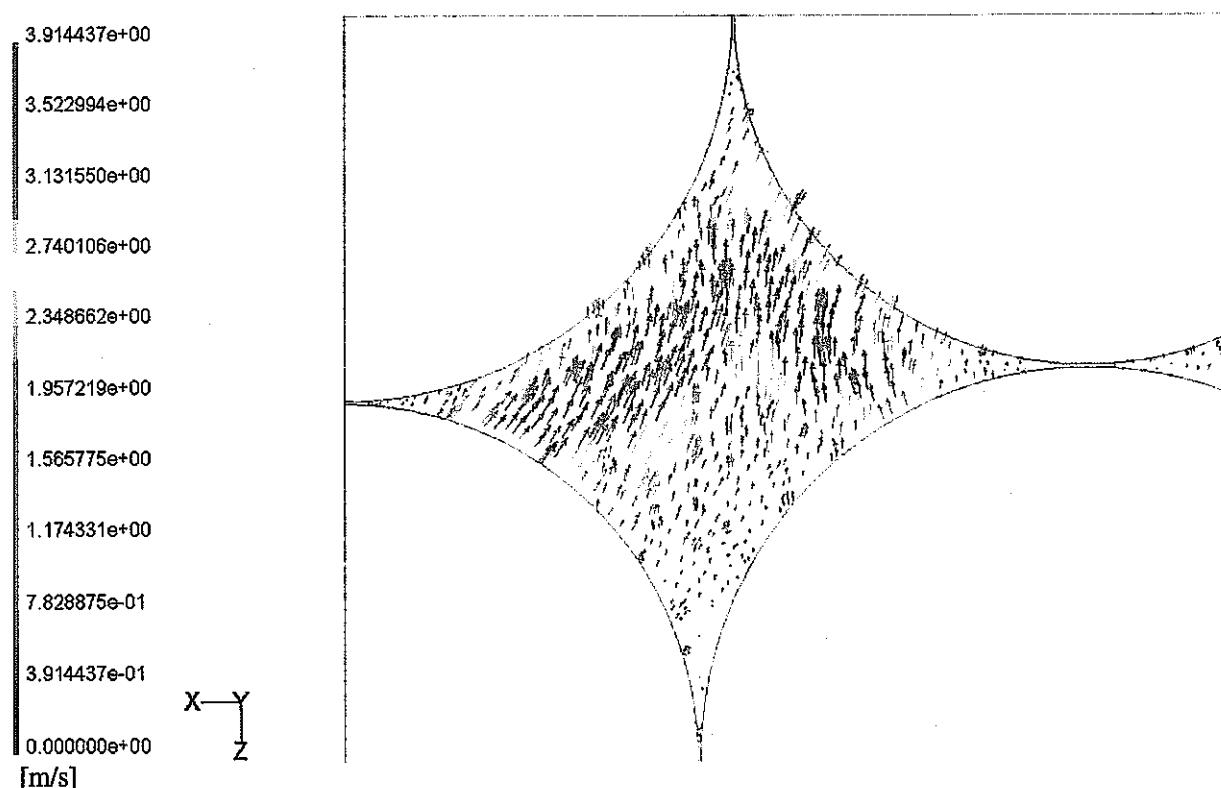
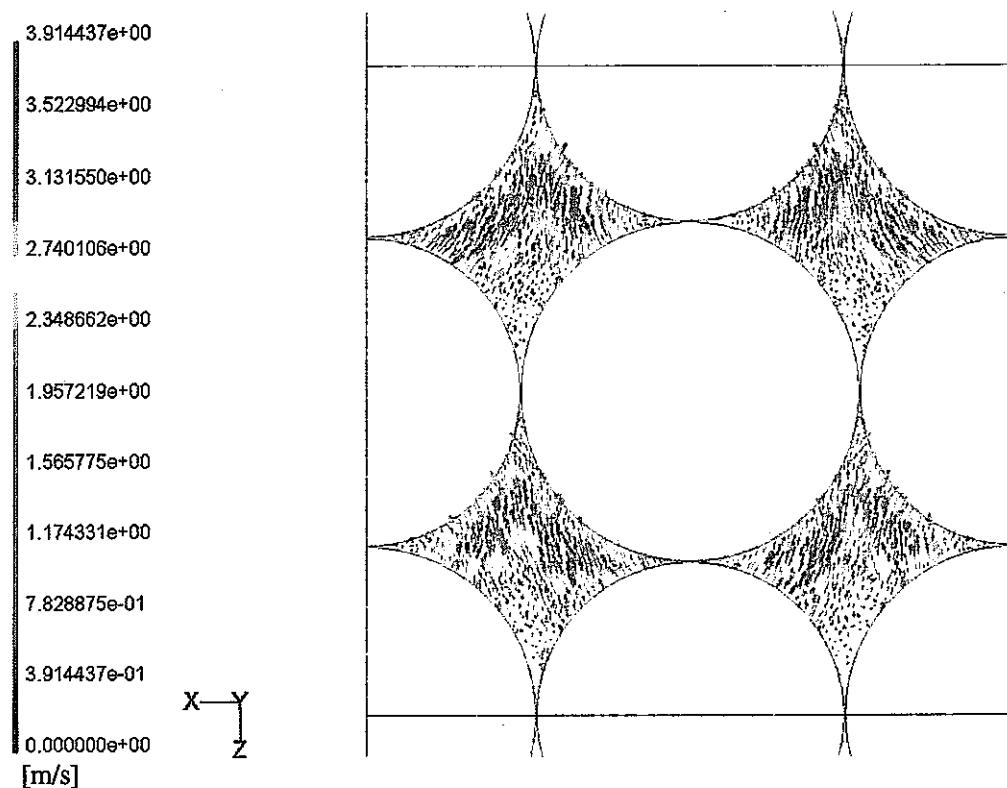


図 3-14 第 1 ユニットの  $y=0.7$  [mm] 断面内流速ベクトル図

(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

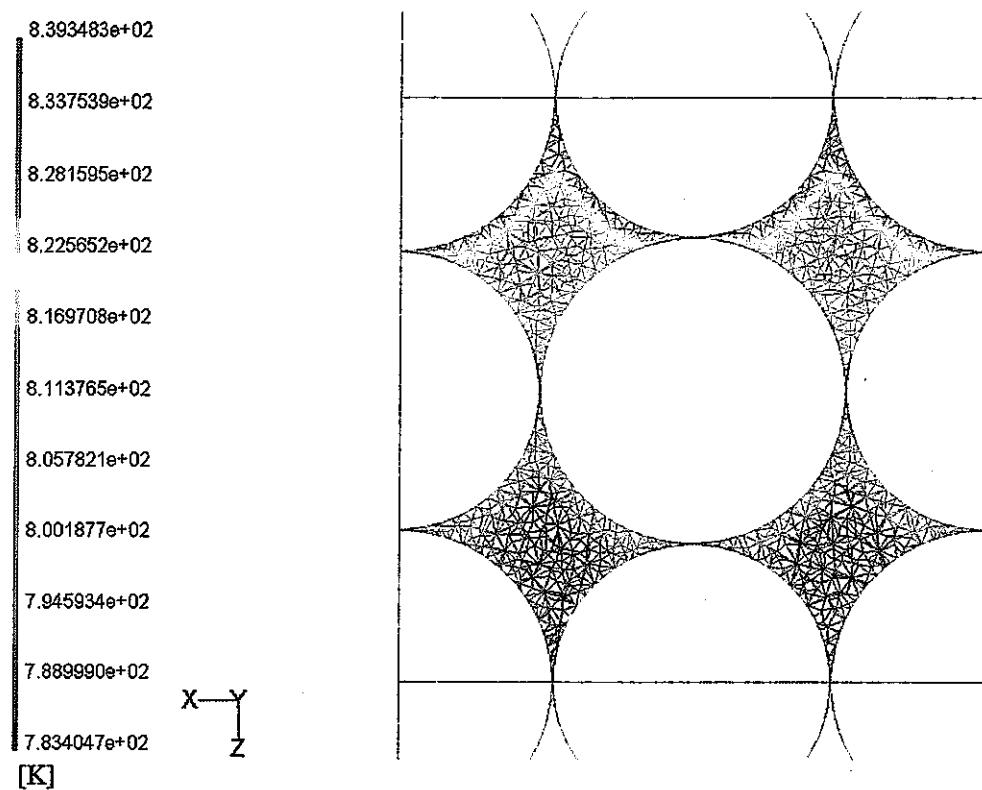


図 3-15 第 1 ユニットの  $y=0.7[\text{mm}]$  断面内冷却材温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

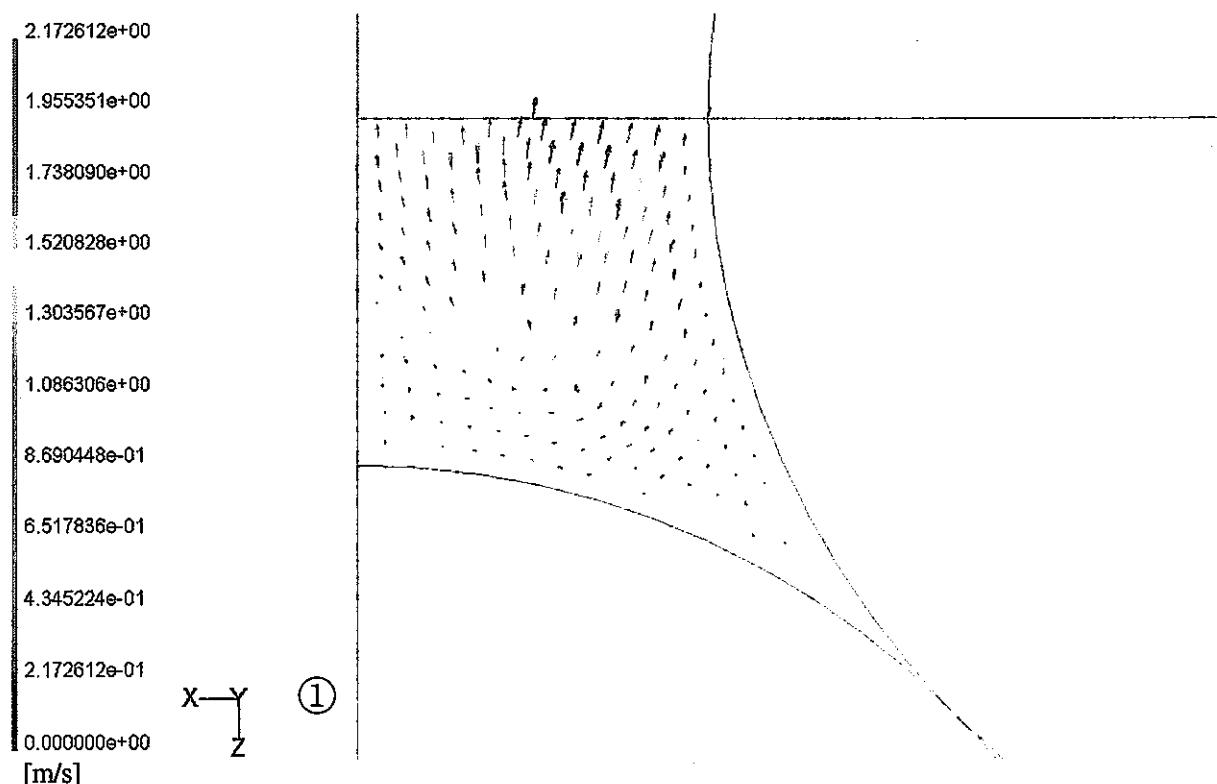
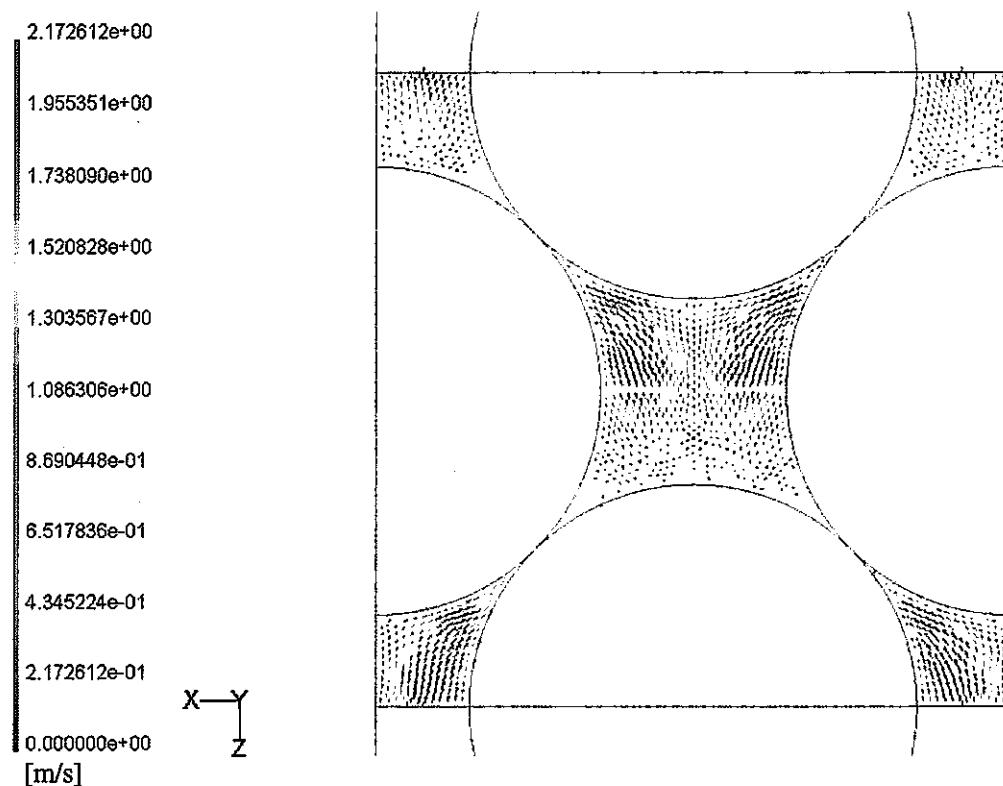


図 3-16 第 1 ユニットの  $y = 1.47072$  [mm] 断面内流速ベクトル図

(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

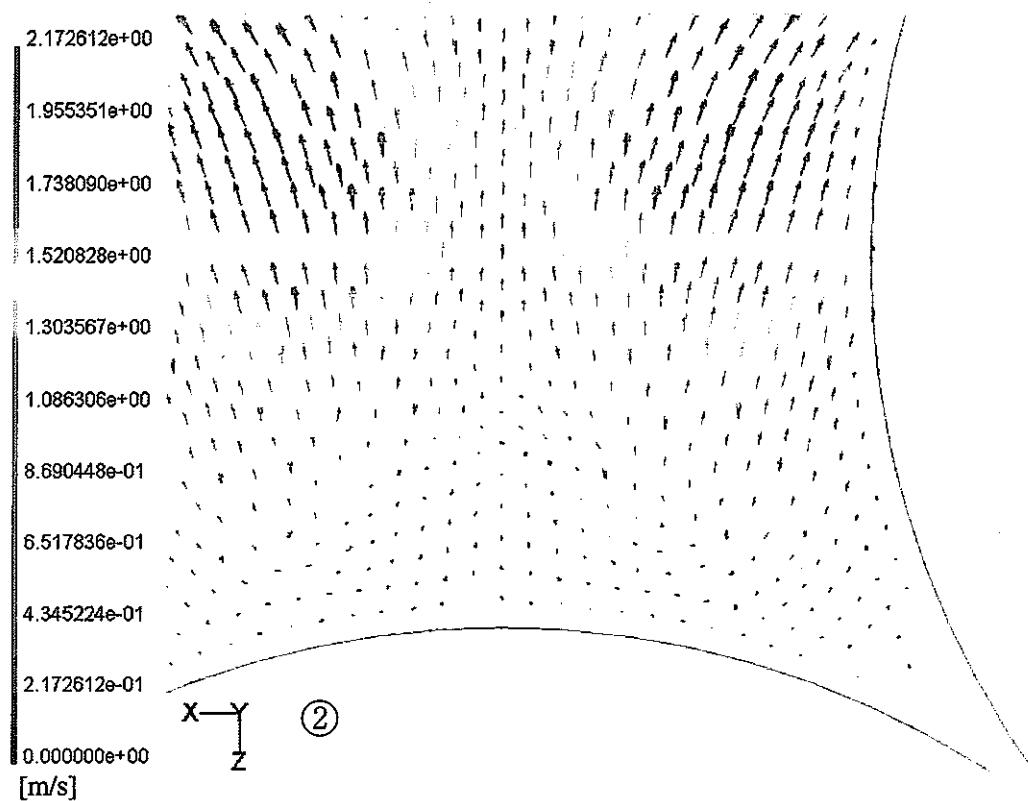


図 3-16 第 1 ユニットの  $y=1.47072[\text{mm}]$  断面内流速ベクトル図  
(入口部冷却材流入流速  $2.0 [\text{m}/\text{s}]$  の解析ケース)

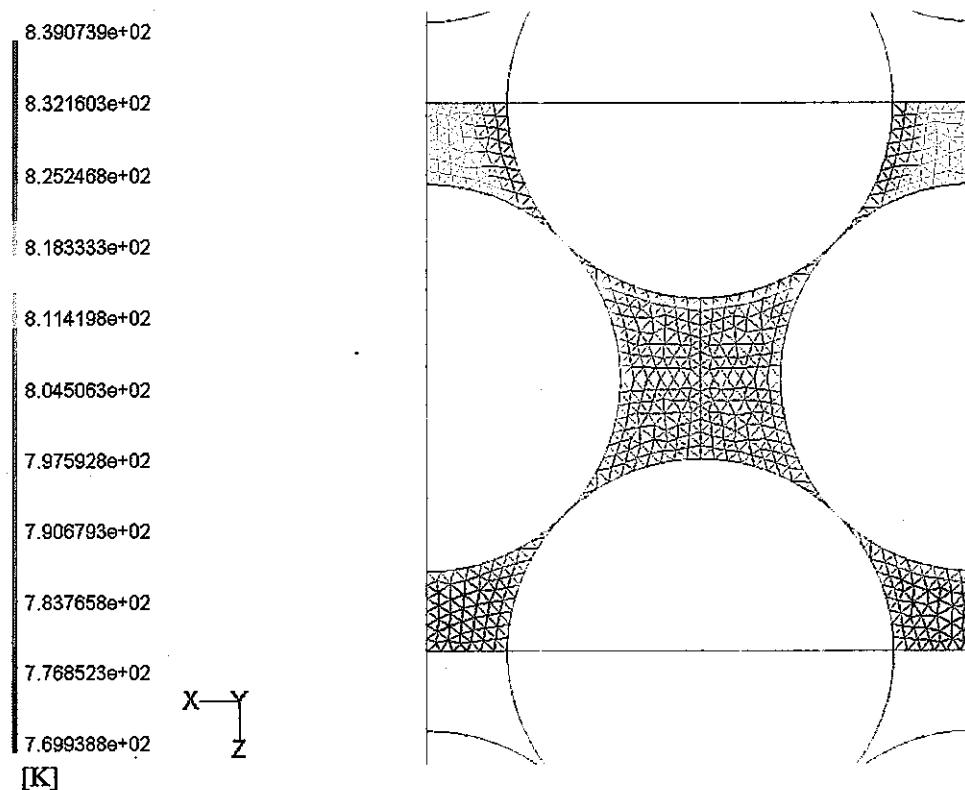


図 3-17 第 1 ユニットの  $y=1.47072[\text{mm}]$  断面内冷却材温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

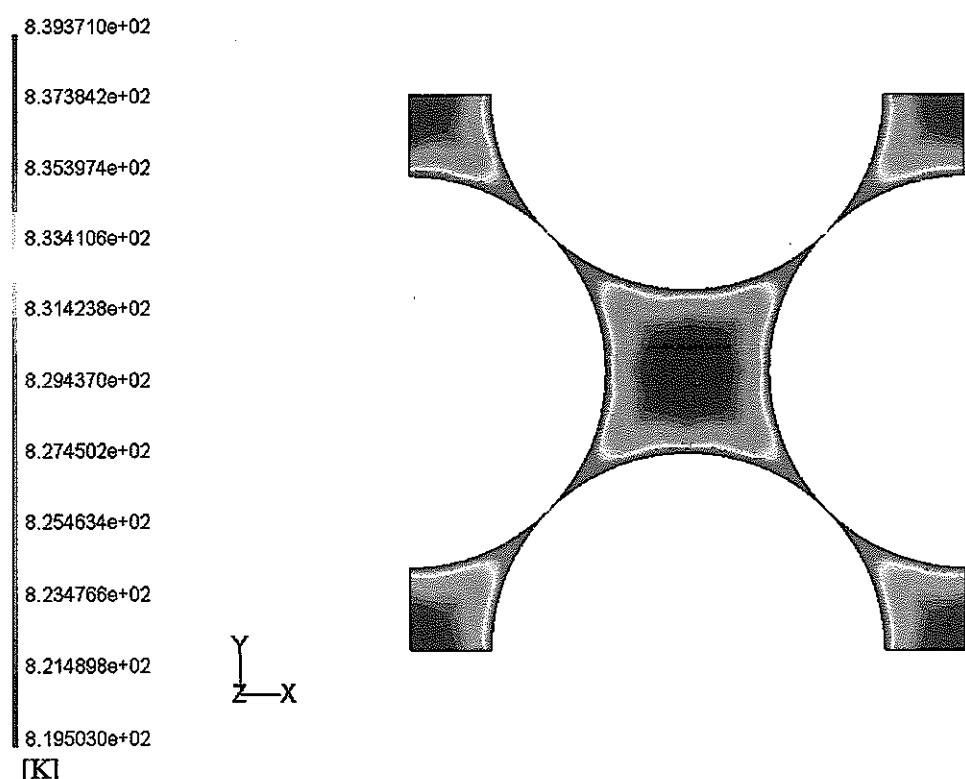


図 3-18 第 1 ユニットの出口部断面内冷却材温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

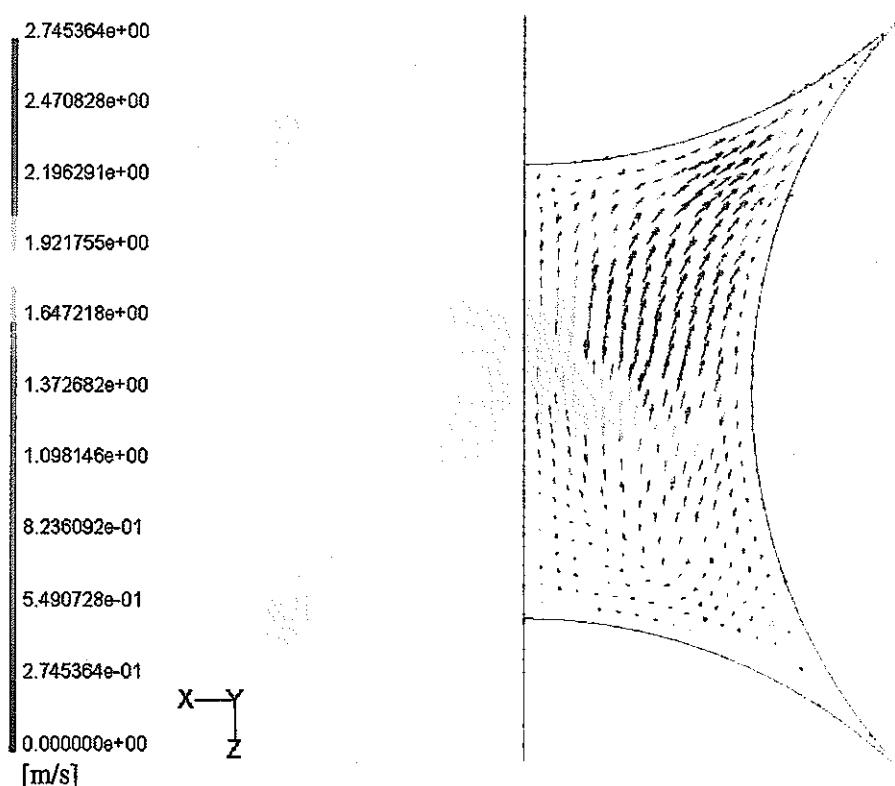
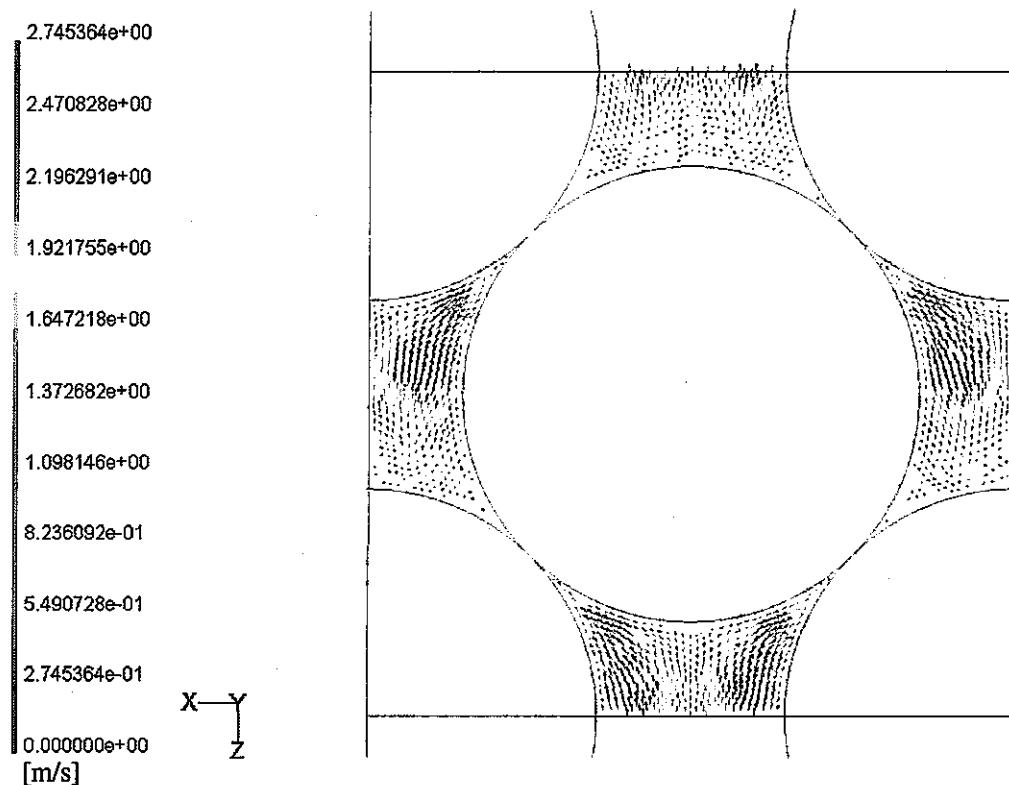


図 3-19 第4ユニットの  $y=0.0[\text{mm}]$  断面内流速ベクトル図

(入口部冷却材流入流速  $2.0 [\text{m/s}]$  の解析ケース)

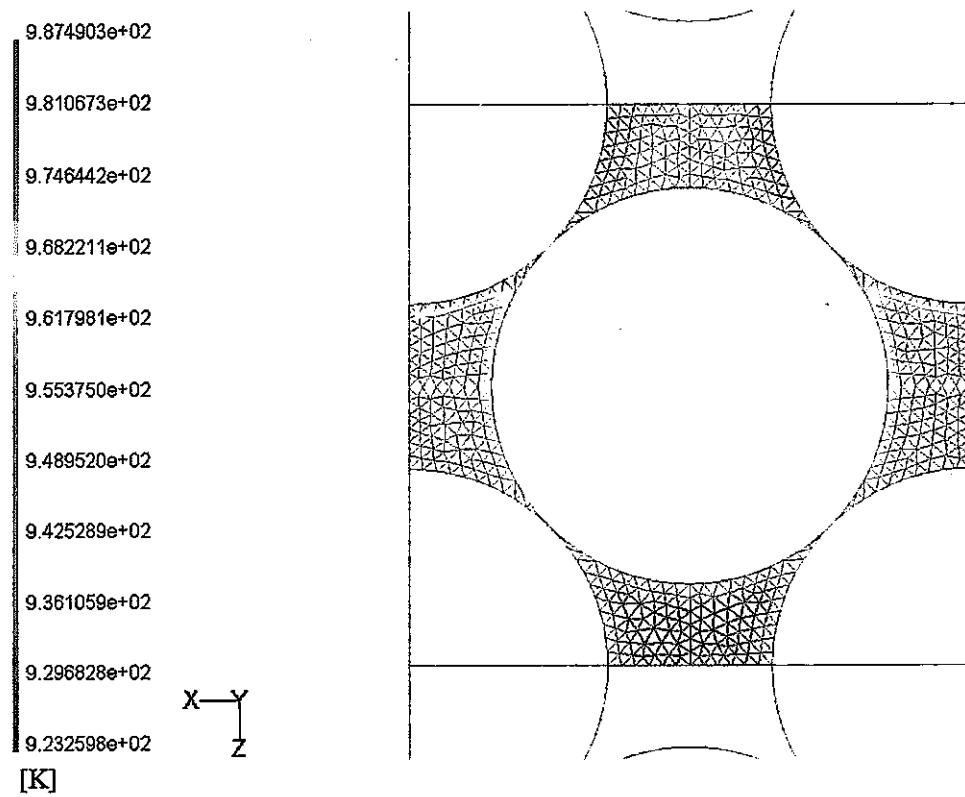


図 3-20 第 4 ユニットの  $y=0.0$ [mm]断面内冷却材温度センター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

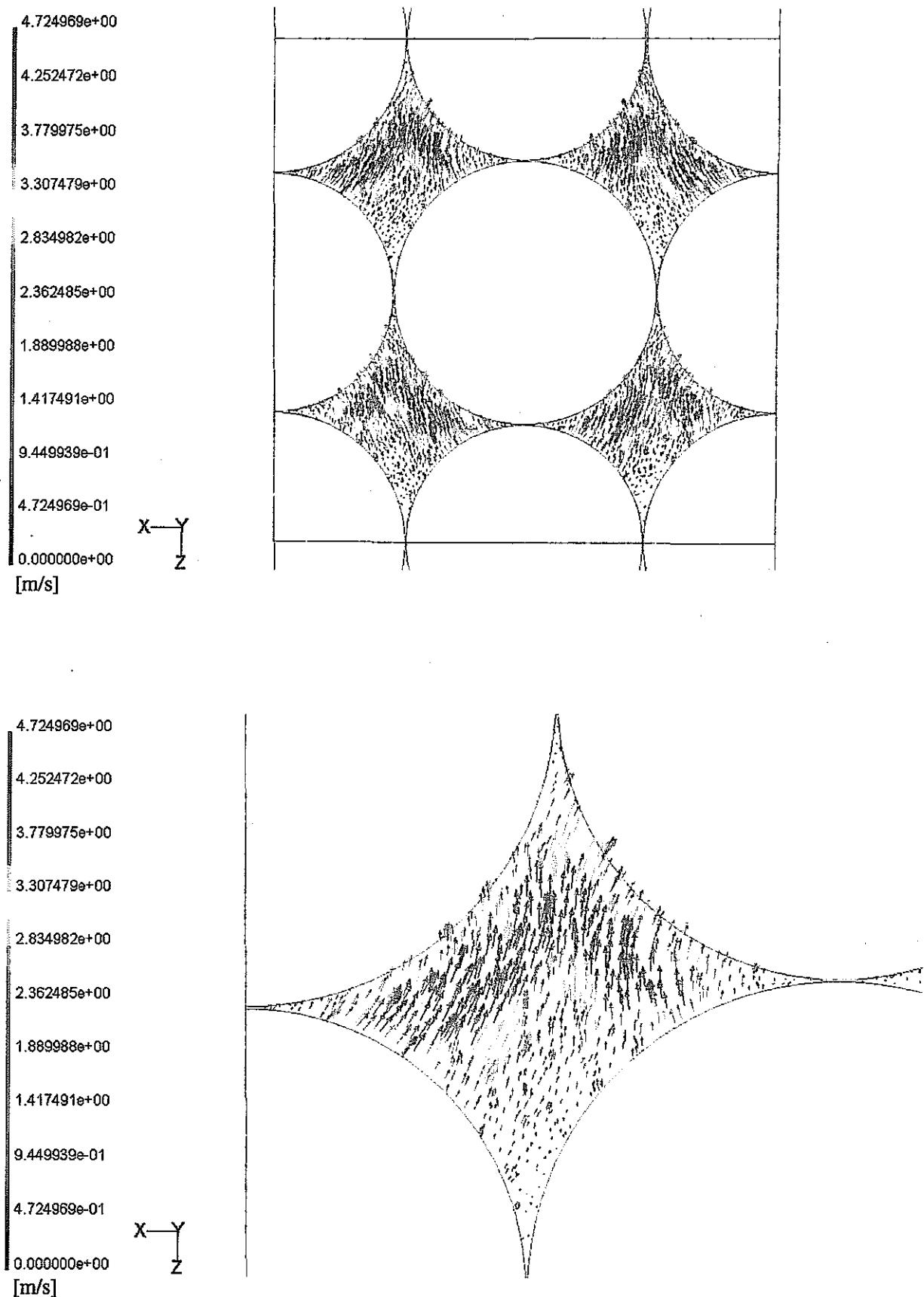


図 3-21 第4ユニットの  $y=0.7[\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図

(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

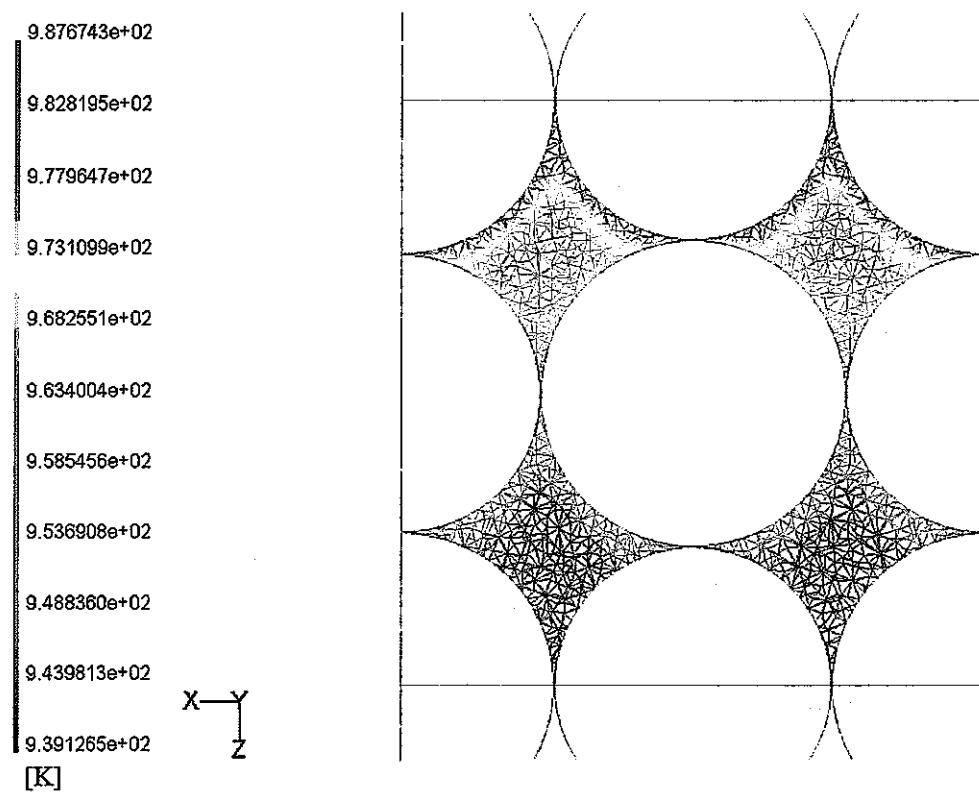


図 3-22 第 4 ユニットの  $y=0.7$  [mm] 断面内冷却材温度センター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

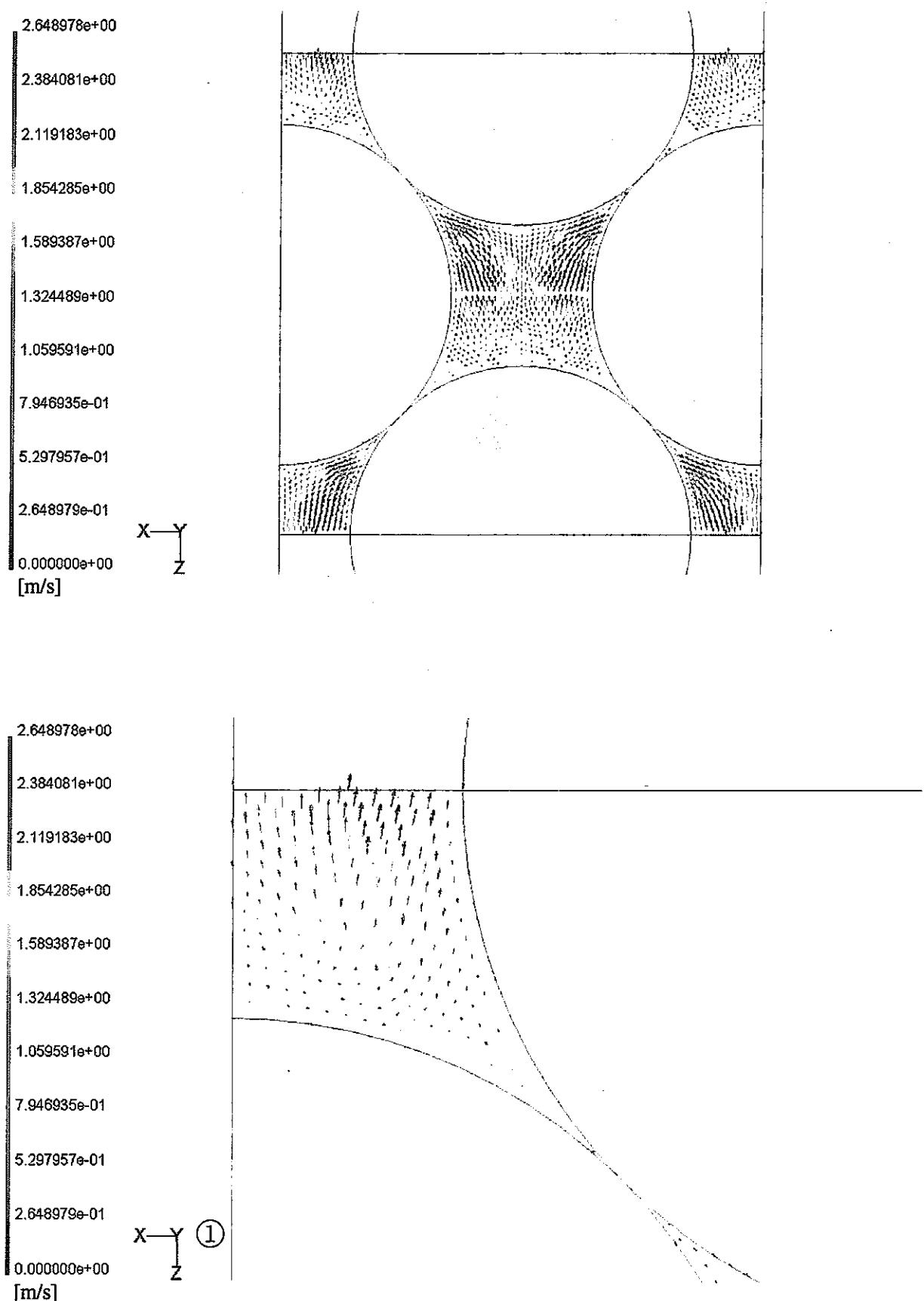


図 3-23 第 4 ユニットの  $y=1.47072$ [mm]断面内流速ベクトル図

(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

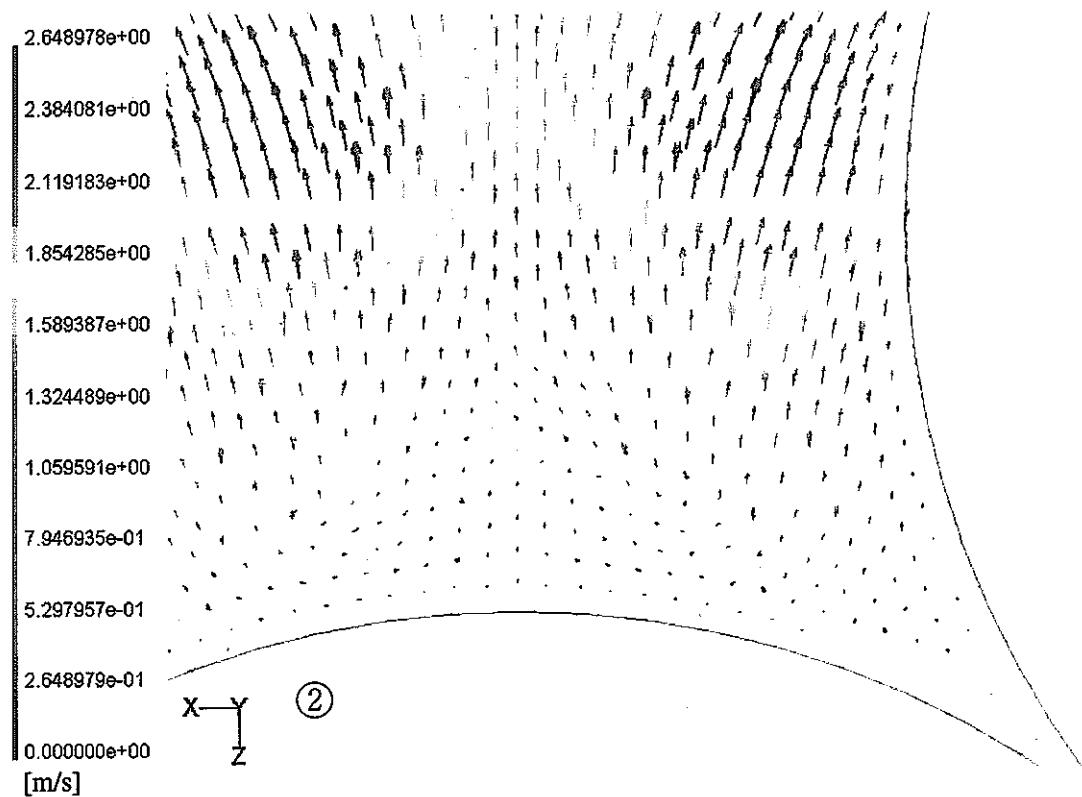


図 3-23 第4ユニットの  $y=1.47072[\text{mm}]$ 断面内流速ベクトル図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s]の解析ケース)

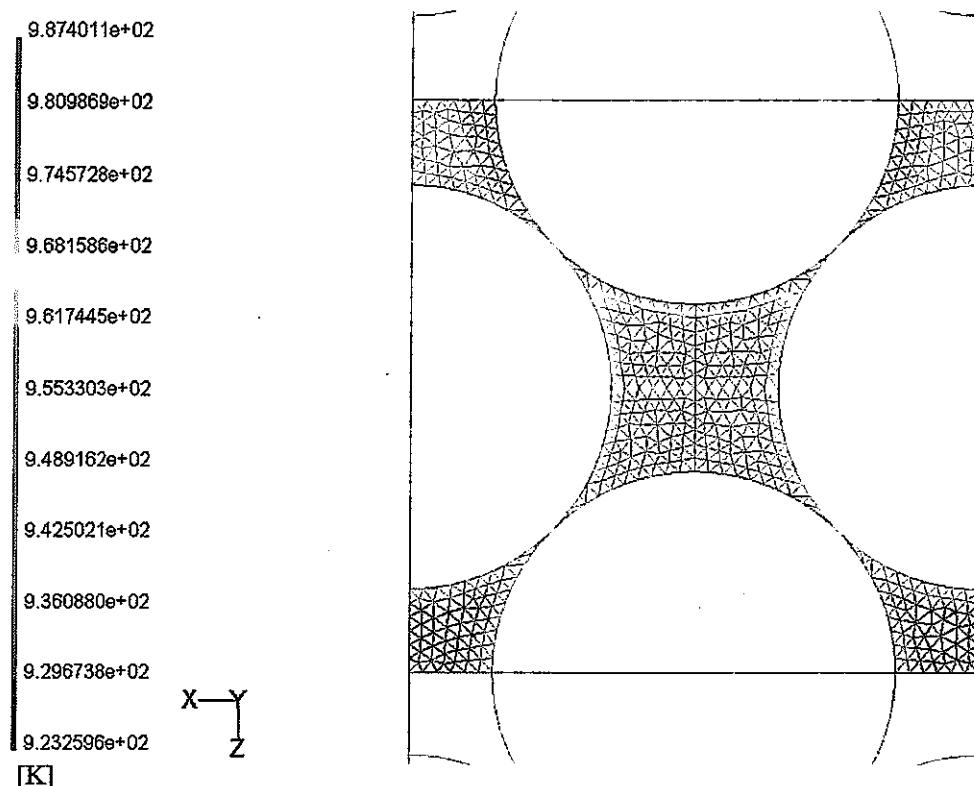


図 3-24 第 4 ユニットの  $y=1.47072$  [mm] 断面内冷却材温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

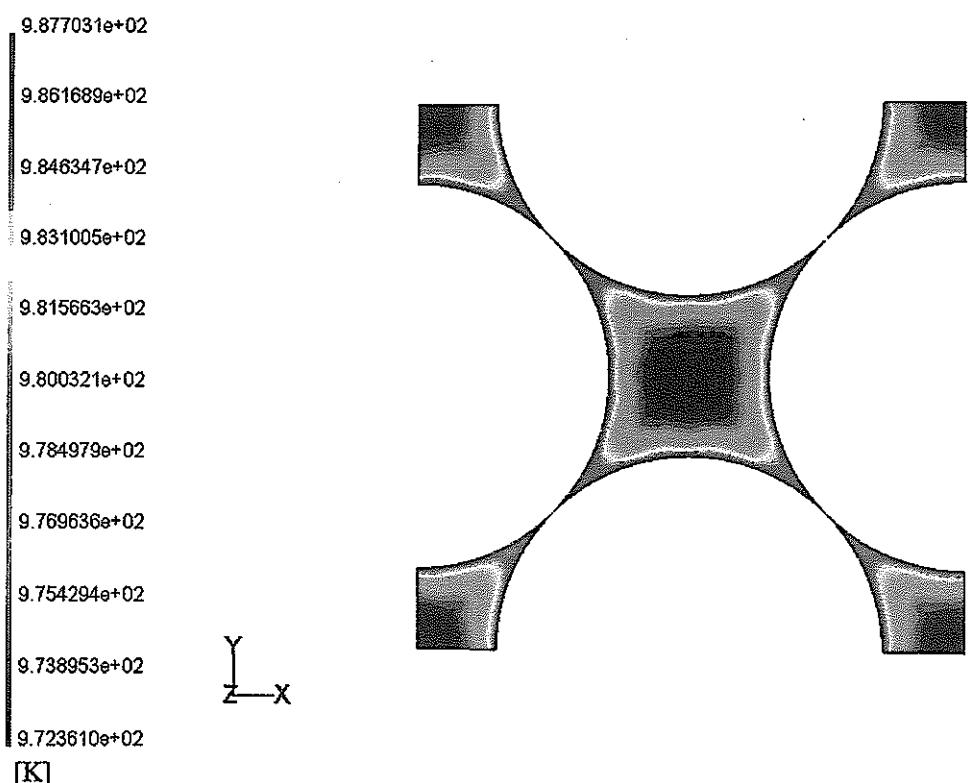


図 3-25 第 4 ユニットの出口部断面内冷却材温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

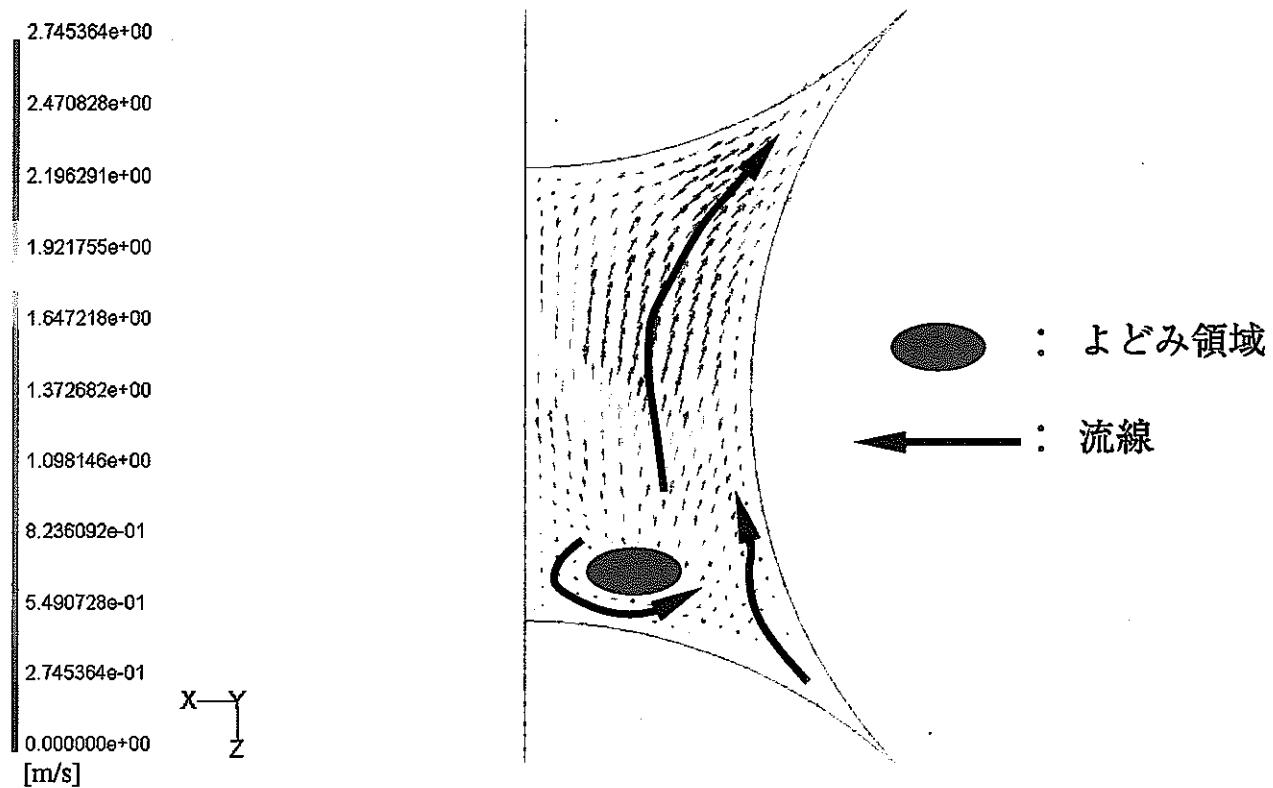


図 3-26 第 4 ユニットの  $y=0.0$  [mm] 断面におけるよどみ領域の概略図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

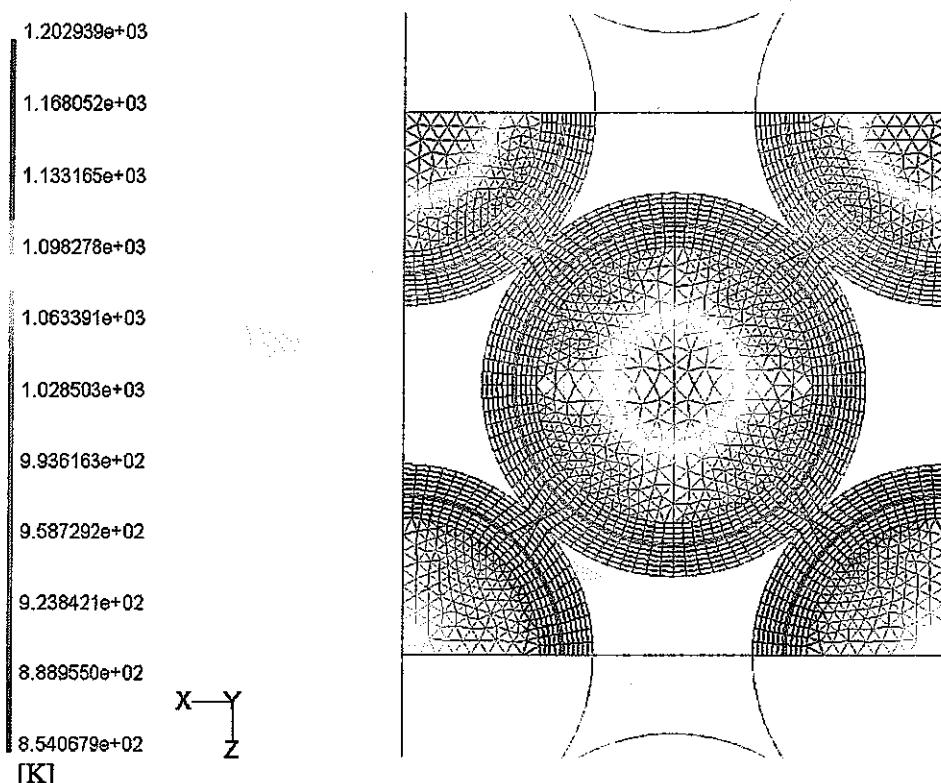


図 3-27 第 1 ユニットの  $y=0.0$  [mm] 断面内被覆粒子燃料温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速  $1.0$  [m/s] の解析ケース)

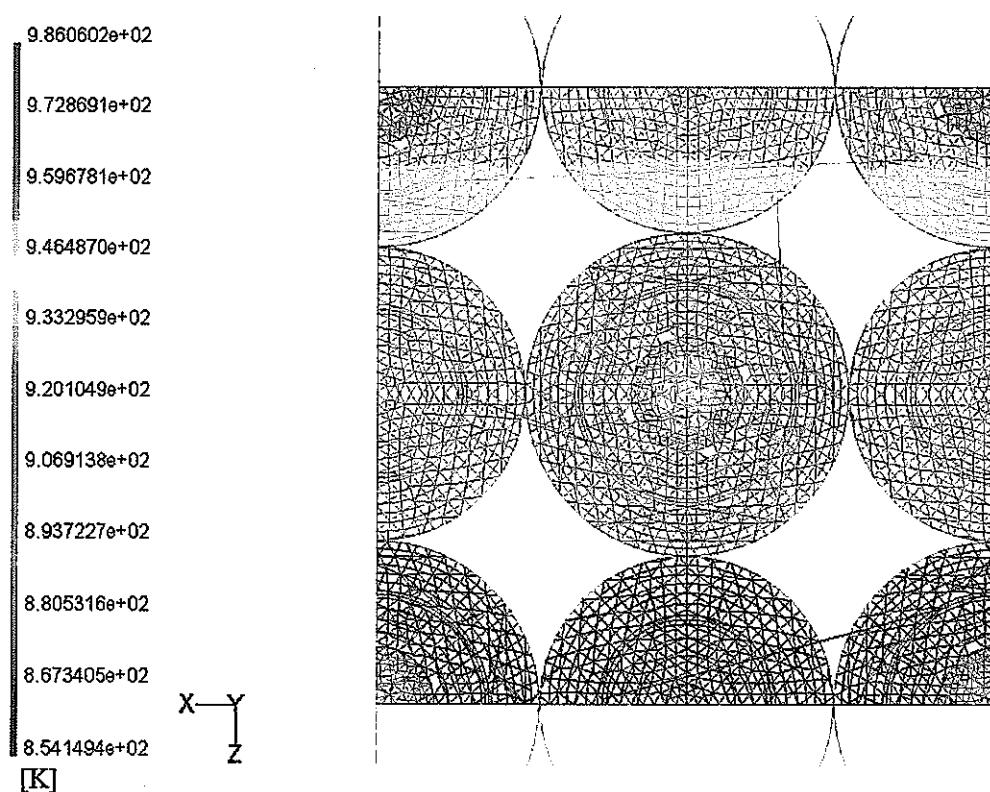


図 3-28 第 1 ユニットの  $y=0.7$  [mm] 断面内被覆粒子燃料温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速  $1.0$  [m/s] の解析ケース)

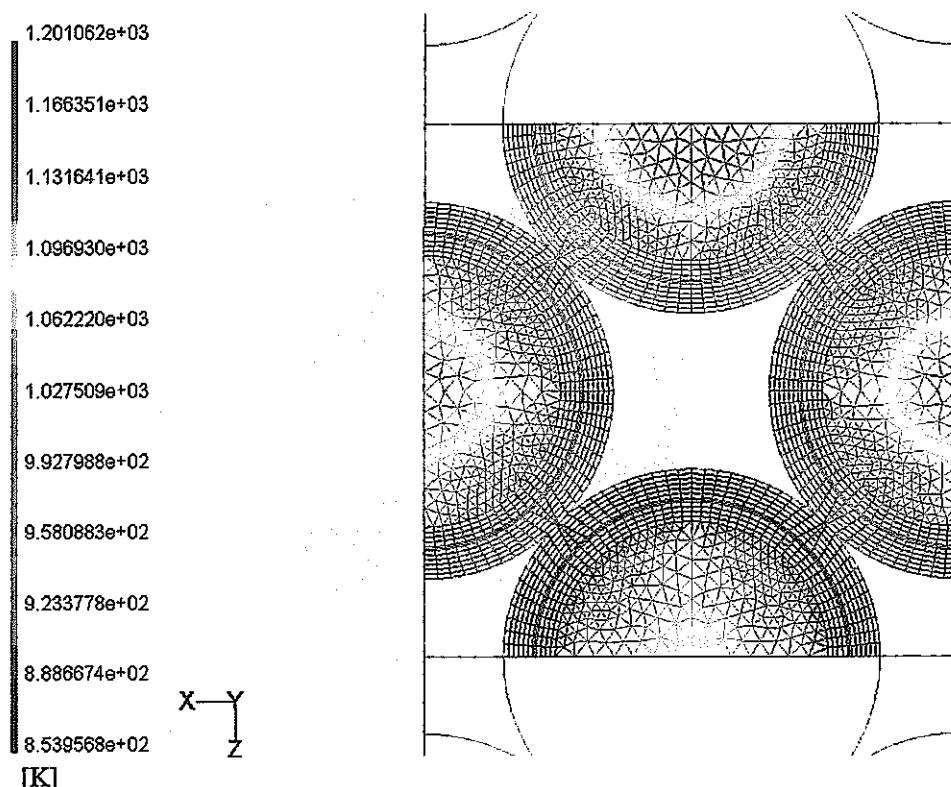


図 3-29 第 1 ユニットの  $y=1.47072[\text{mm}]$  断面内被覆粒子燃料温度センター図  
(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

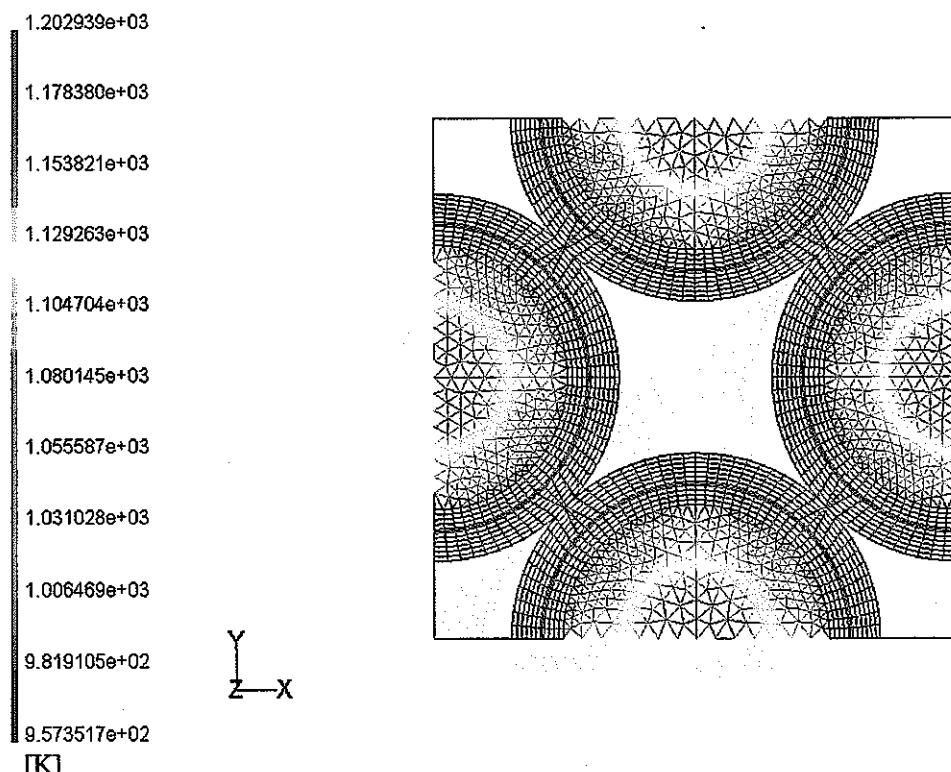


図 3-30 第 1 ユニットの出口部断面内被覆粒子燃料温度センター図  
(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

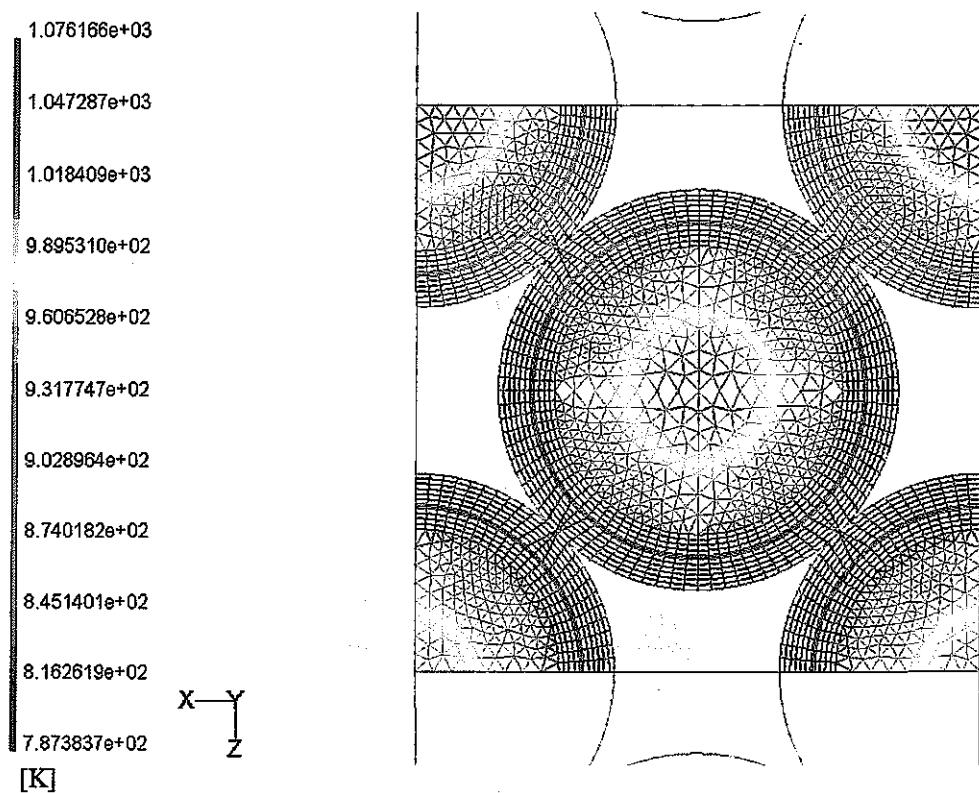


図 3-31 第 1 ユニットの  $y=0.0[\text{mm}]$  断面内被覆粒子燃料温度センター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

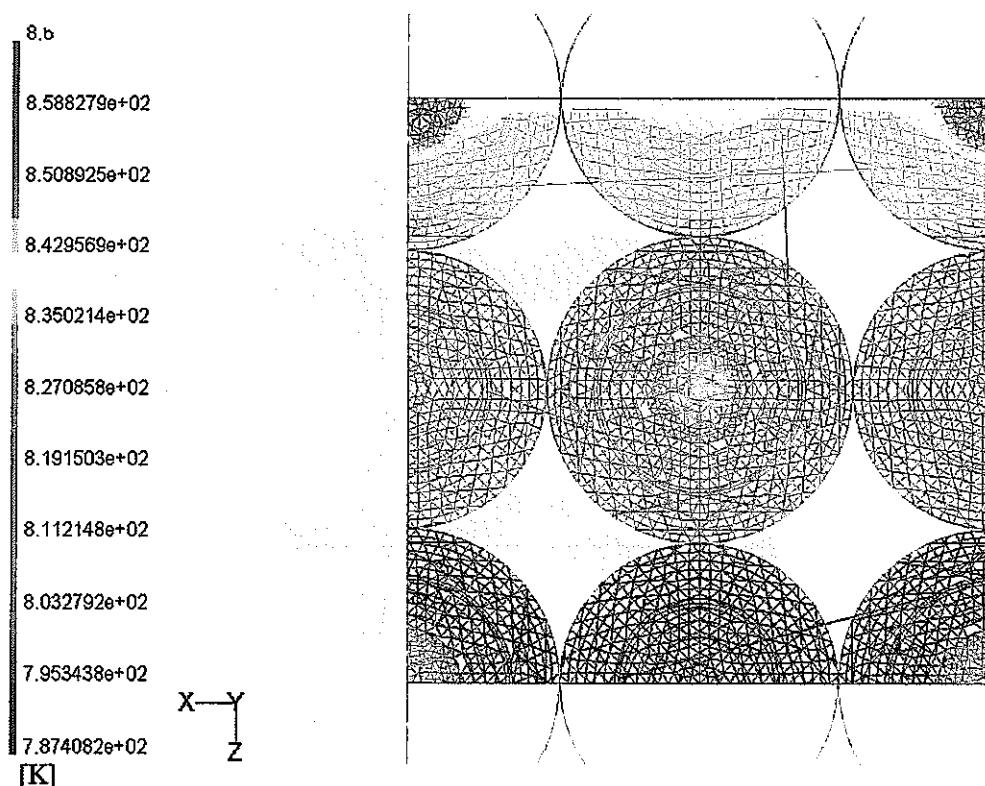


図 3-32 第 1 ユニットの  $y=0.7[\text{mm}]$  断面内被覆粒子燃料温度センター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

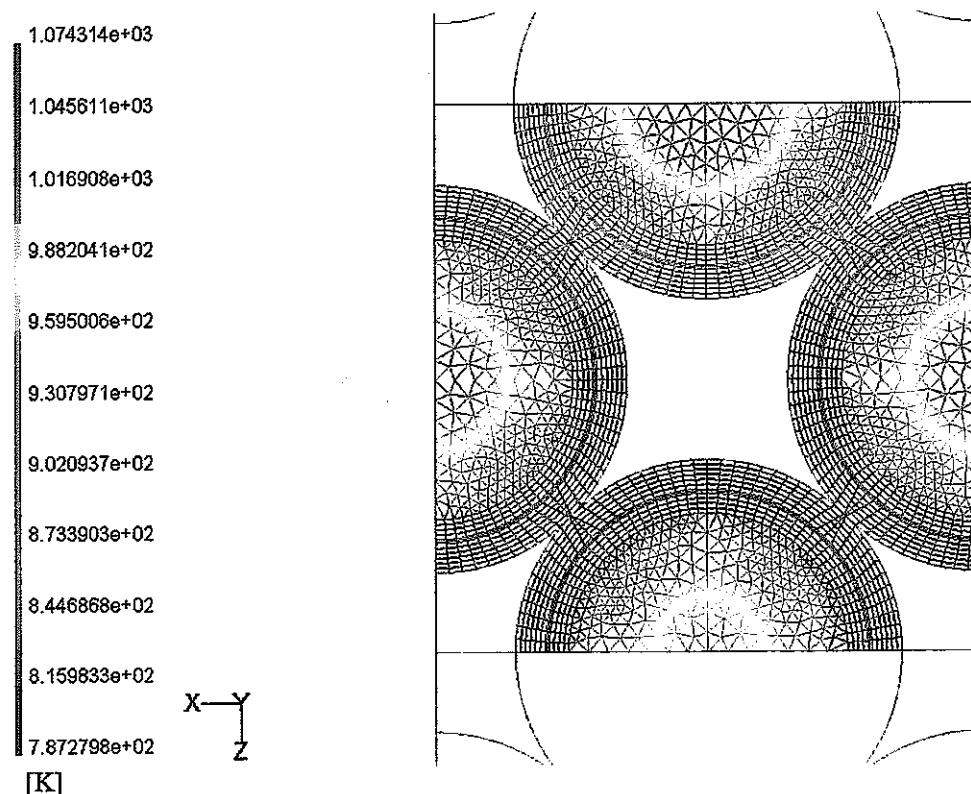


図 3-33 第 1 ユニットの  $y=1.47072[\text{mm}]$  断面内被覆粒子燃料温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

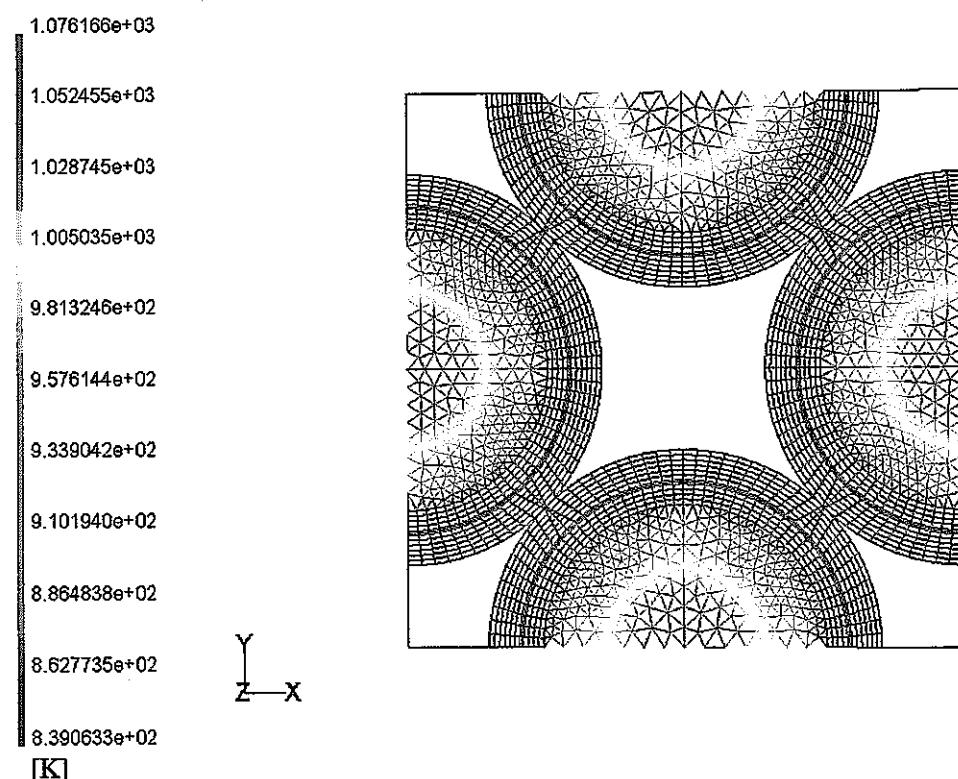


図 3-34 第 1 ユニットの出口部断面内被覆粒子燃料温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

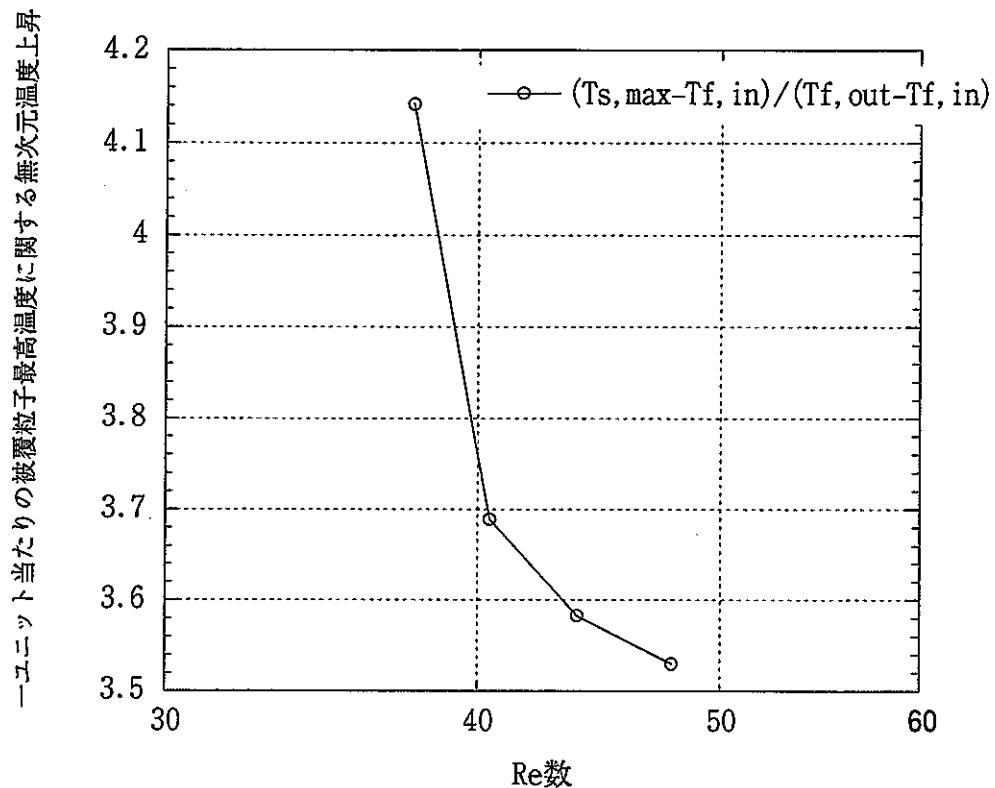


図 3-35 被覆粒子燃料最高温度に関する無次元温度上昇  
 (入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

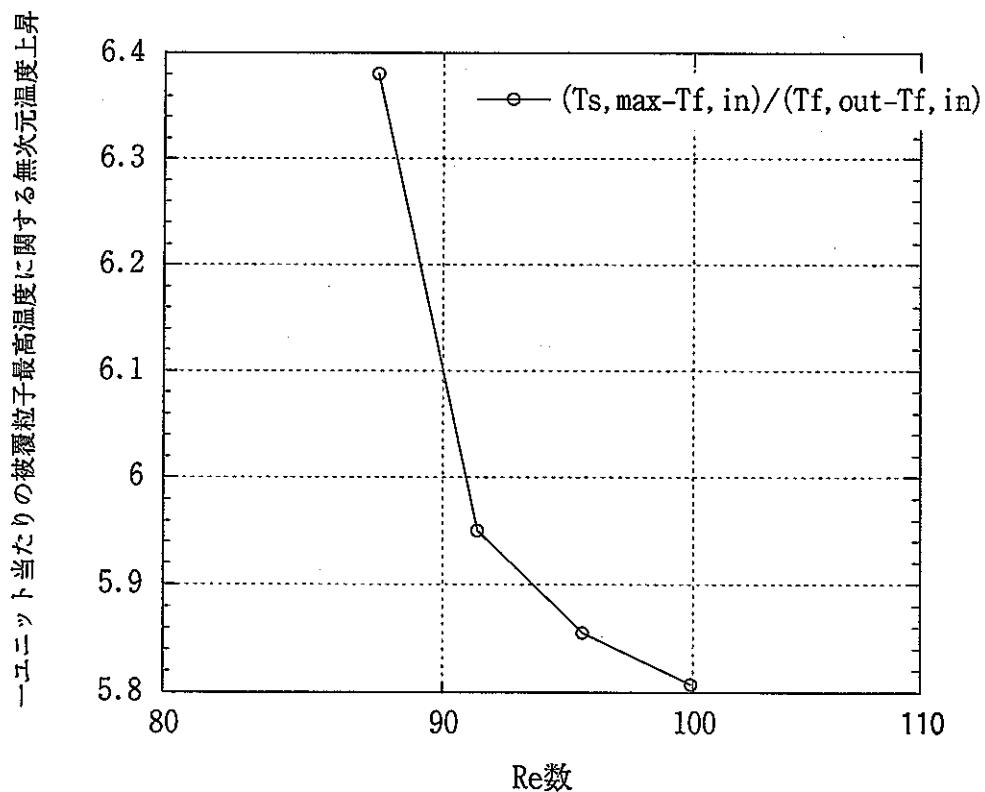
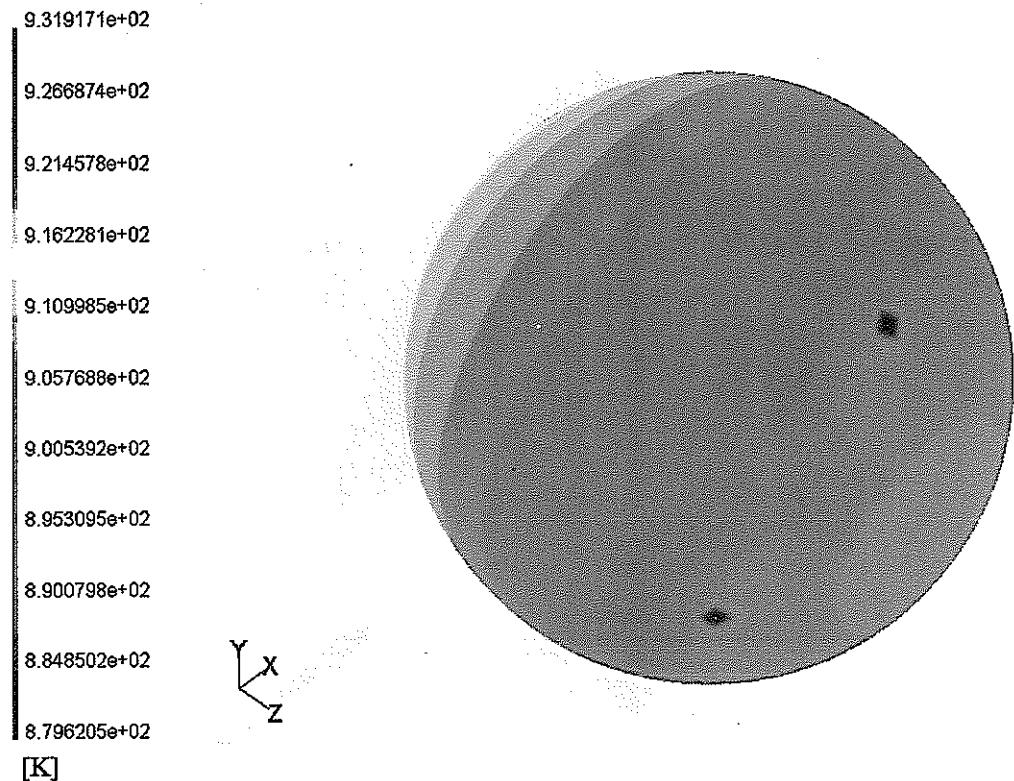
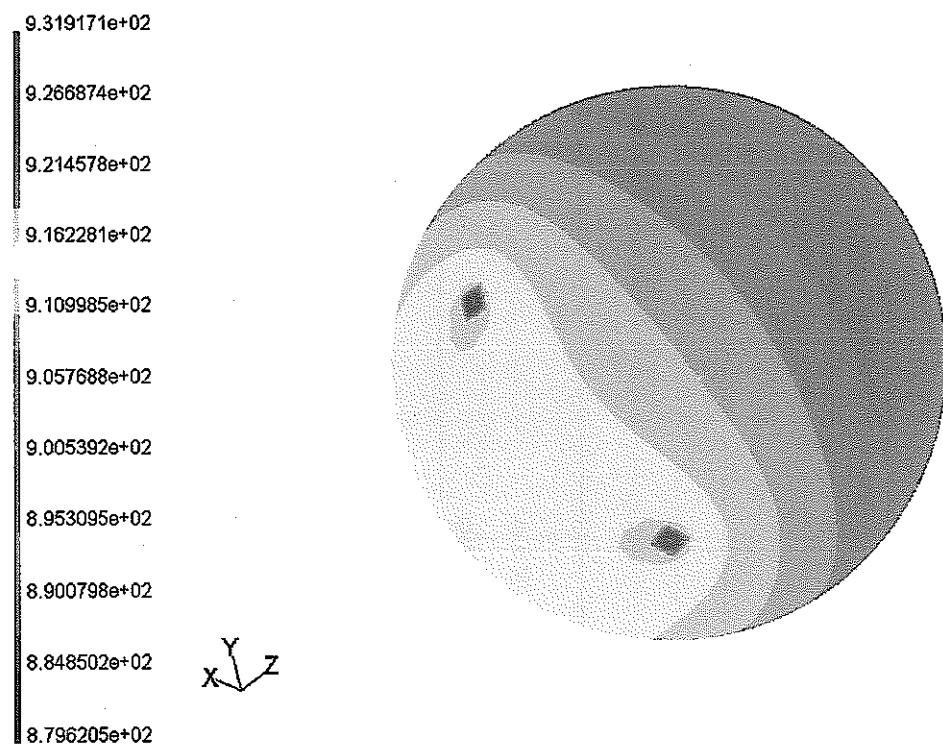


図 3-36 被覆粒子燃料最高温度に関する無次元温度上昇  
 (入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)



(上流側斜め方向から見た被覆粒子燃料)



(下流側斜め方向から見た被覆粒子燃料)

図 3-37 第 1 ユニット内中心部に位置する被覆粒子燃料表面温度コンター図  
(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)

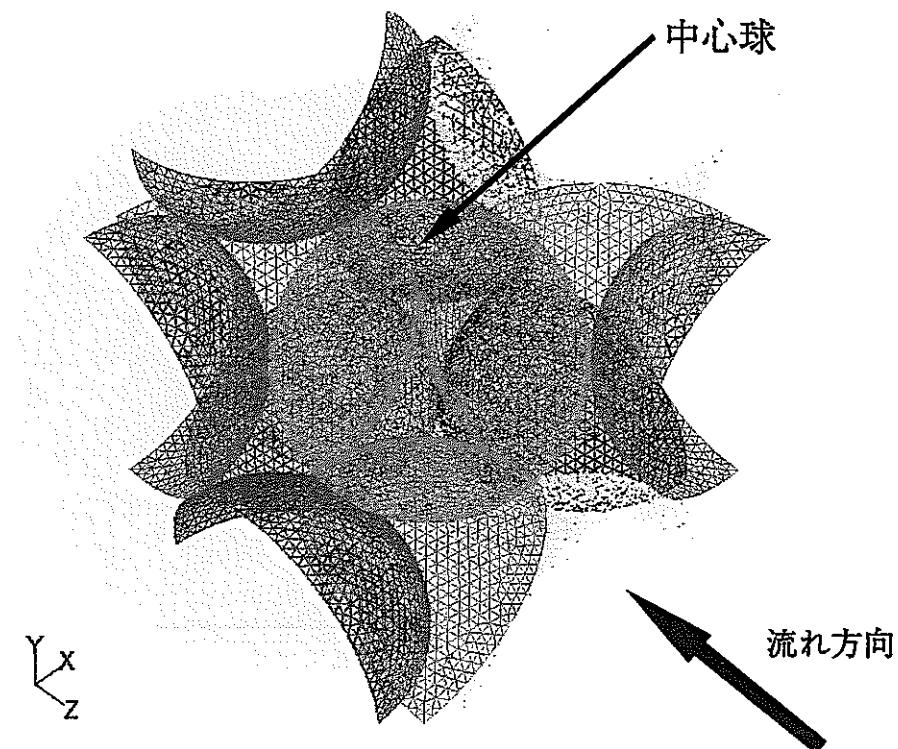


図 3-38 单一流路ユニット内における被覆粒子燃料表面のグリッド図

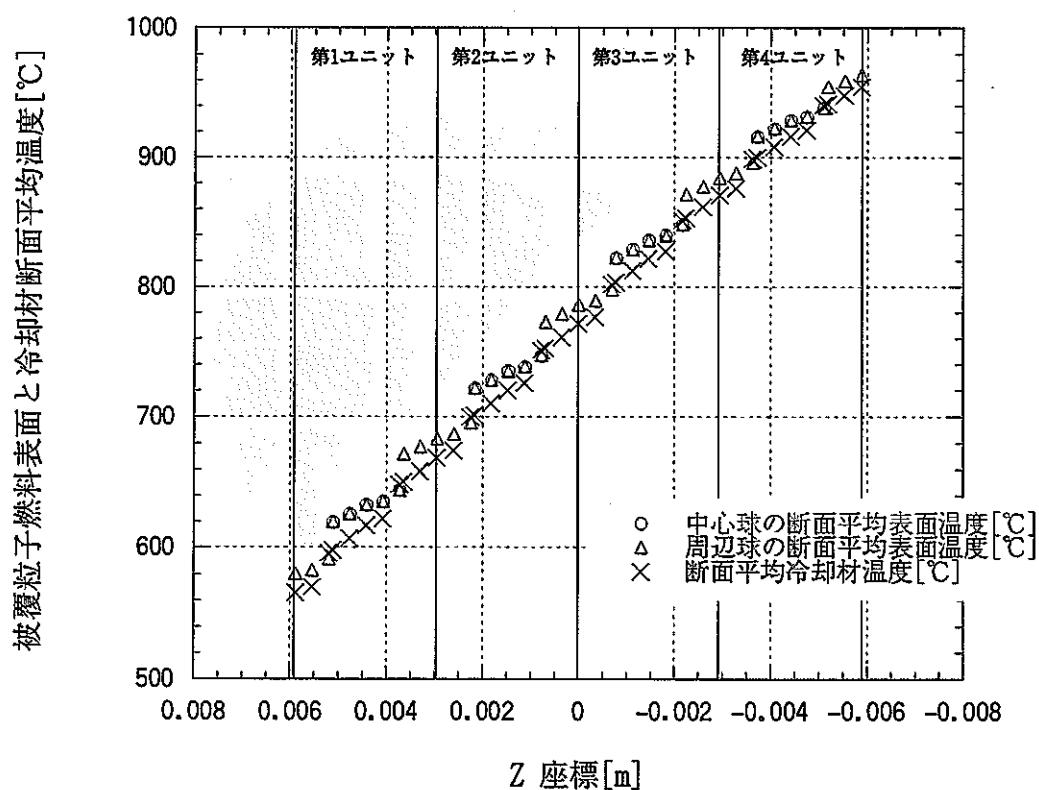
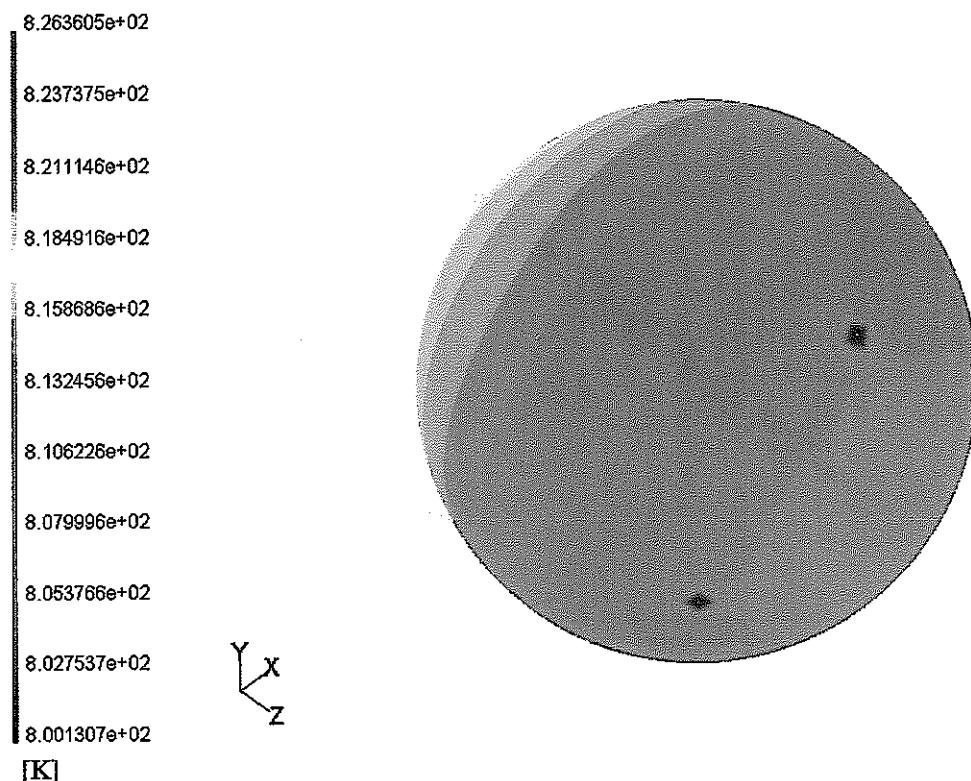
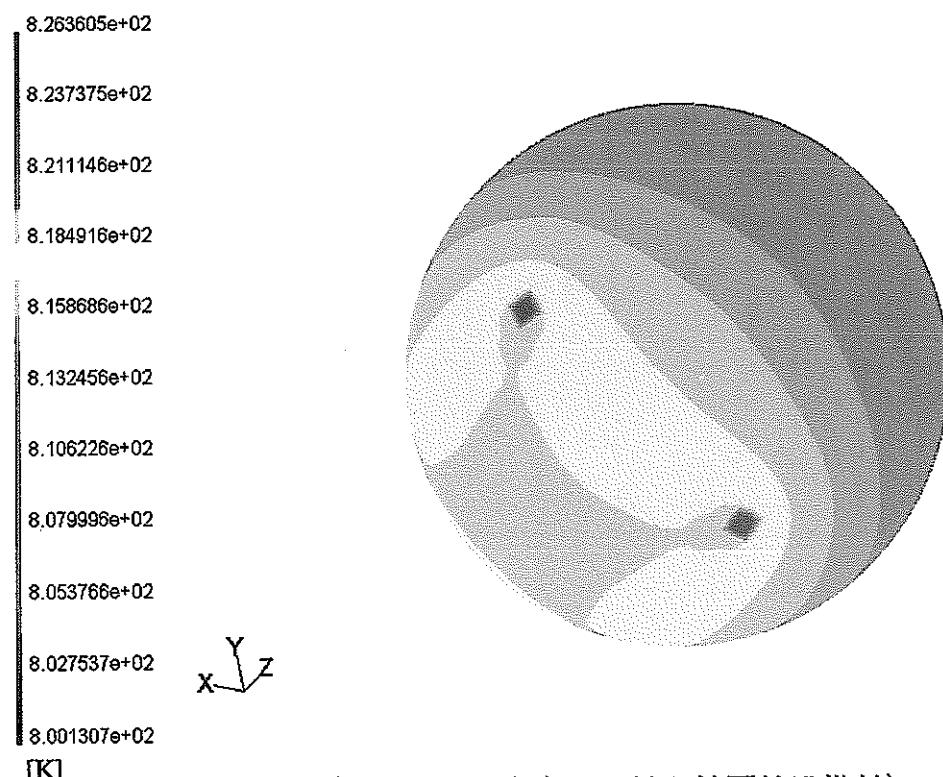


図 3-39 被覆粒子燃料表面と冷却材断面平均温度の流れ方向分布  
(入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケース)



(上流側斜め方向から見た被覆粒子燃料)



(下流側斜め方向から見た被覆粒子燃料)

図 3-40 第 1 ユニット内中心部に位置する被覆粒子燃料表面温度センター図  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

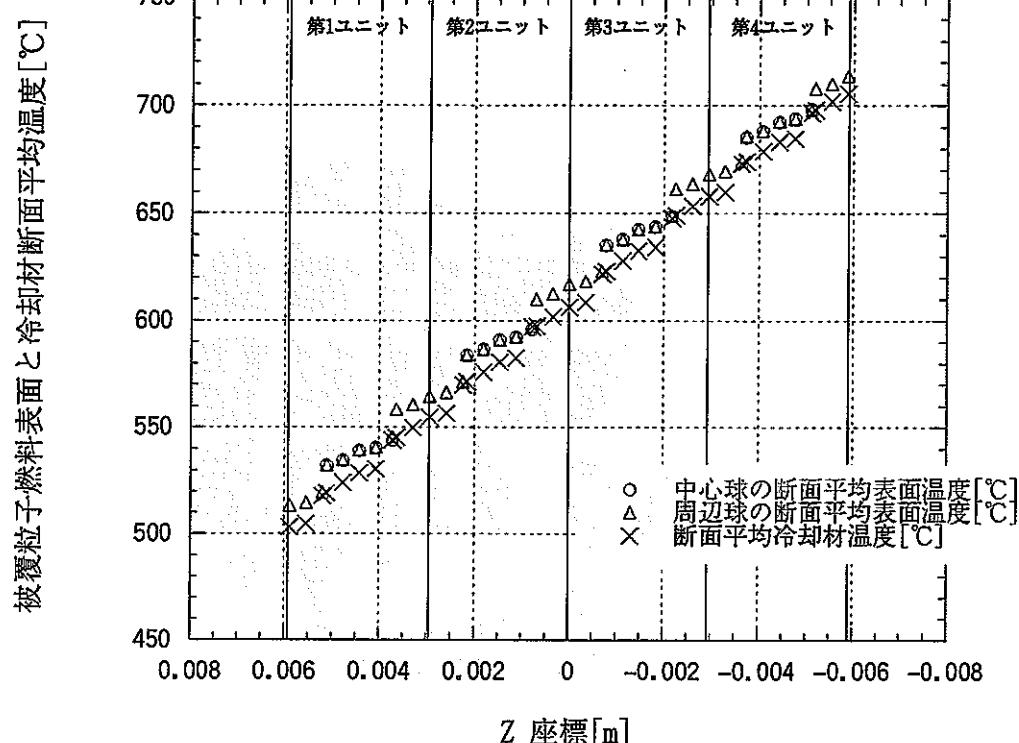


図 3-41 被覆粒子燃料表面と冷却材断面平均温度の流れ方向分布  
(入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース)

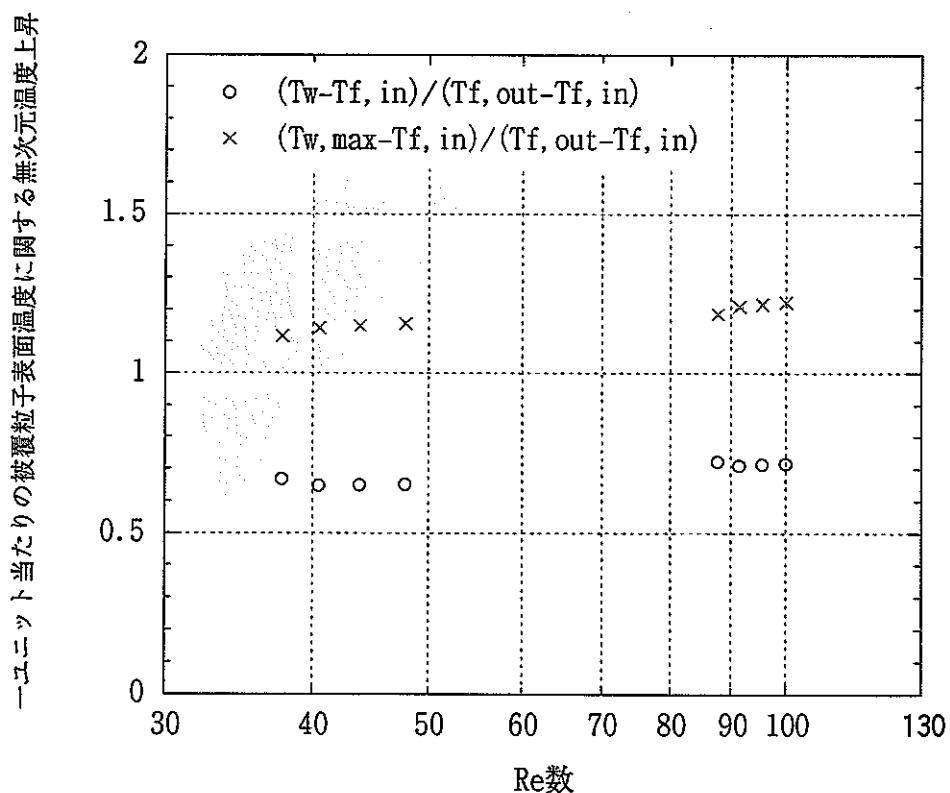


図 3-42 被覆粒子燃料表面最高温度に関する無次元温度上昇

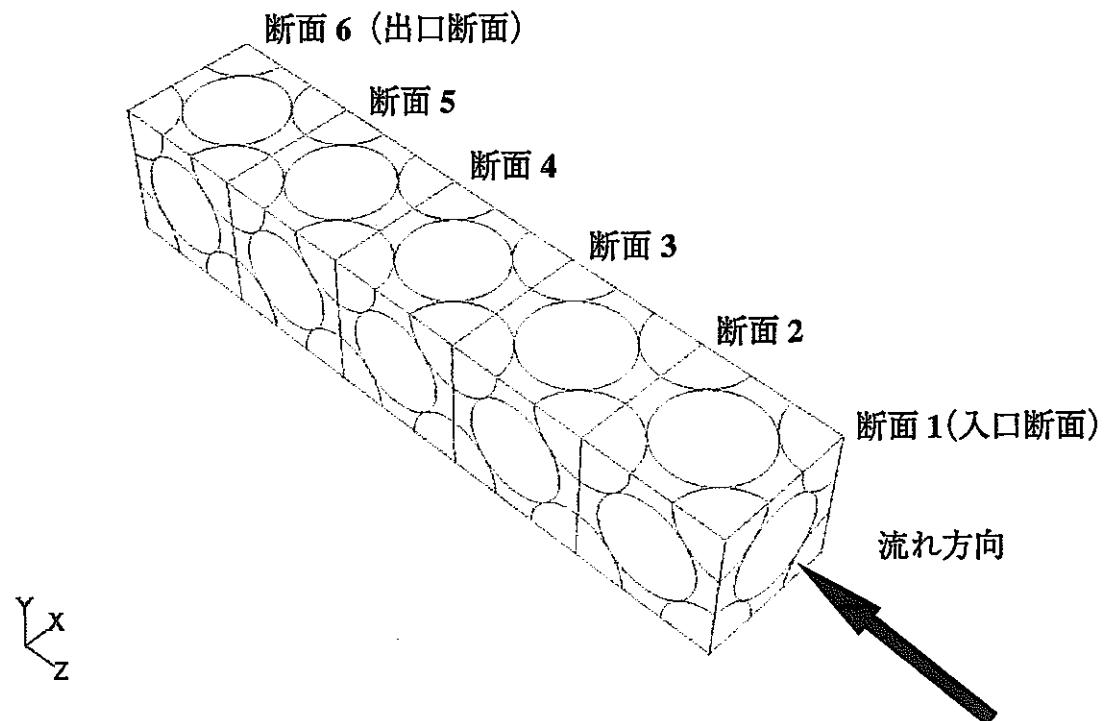


図 3-43 5 ユニット内の断面番号

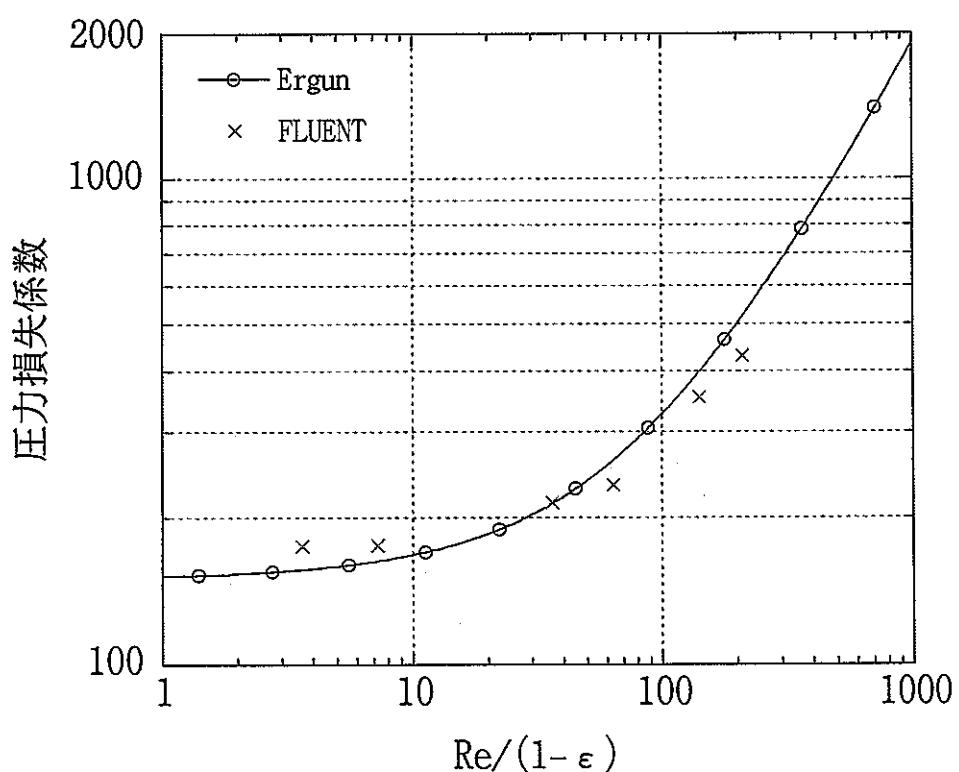


図 3-44 FLUENT による解析値と Ergun の式の比較

**<付録1>**

**被覆粒子燃料の物性式**

## 1. 燃料核 (MOX 燃料)

密度 :  $\rho$

$$\rho = \rho_0 \times A \text{ [g/cm}^3]$$

$\rho_0 = 0.48Y + 10.96 - 2.5(2.00 - X) \pm 0.01$  : 理論密度 [g/cm<sup>3</sup>] (第 4 項 ± 0.01 は不確定値)

$A$  : 理論密度比 (= 0.95)

$X$  :  $O/M (= 1.98)$

$Y$  :  $Pu$  富化度 (= 0.25)

定圧比熱 :  $C_p$

$$C_p = 12.54 + 0.017T - 0.117 \times 10^{-4} T^2 + 0.307 \times 10^{-8} T^3 \text{ [cal/mol/K]}$$

$T$  : 温度 [K]

熱伝導度 :  $k$

$$k = 0.01169 + \frac{1}{\{(0.06717 + 0.02226(1-A)/(X-1.90))T\}} + 7.214 \times 10^{-13} T^3 \text{ [W/cm}^2/\text{°C]}$$

$A$  : 理論密度比 (= 0.95)

$X$  :  $O/M (= 1.98)$

$T$  : 温度 [°C]

## 2. 被覆粒子燃料第一被覆 (低密度 PyC)

密度 :  $\rho$

$$\rho = 1.95 \times 0.4 \text{ [g/cm}^3]$$

定圧比熱 :  $C_p$

$$C_p = 695 \text{ [J/kg/K]} \quad (T < 300K)$$

$$C_p = 2.386 \times 10^2 + 1.521T \text{ [J/kg/K]} \quad (300K \leq T \leq 1000K)$$

$$C_p = 1760 \text{ [J/kg/K]} \quad (T > 1000K)$$

$T$  : 温度 [K]

熱伝導度 :  $k$

$$k = 13.8 \text{ [W/m/K]} \quad (T < 300K)$$

$$k = 1.688 \times 10 - 1.028 \times 10^{-2} T \text{ [W/m/K]} \quad (300K \leq T \leq 1273.15K)$$

$$k = 3.8 \text{ [W/m/K]} \quad (T > 1273.15K)$$

$T$  : 温度 [K]

### 3. 被覆粒子燃料第二被覆 (高密度 $PyC$ 、 $ZrC$ )

密度 :  $\rho$

$$\rho = 4.281 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

定圧比熱 :  $C_p$

$$C_p = 951.82 \text{ [J/kg/K]}$$

$T$  : 温度 [K]

熱伝導度 :  $k$

$$k = 16.777 \text{ [W/m/K]}$$

$T$  : 温度 [K]

### 4. 被覆粒子燃料第三被覆 ( $SiC$ )

密度 :  $\rho$

$$\rho = 3.2 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

定圧比熱 :  $C_p$

$$C_p = 837 \text{ [J/kg/K]}$$

$(T < 400K)$

$$C_p = 6.803 \times 10^2 + 3.919 \times 10^{-1}T \text{ [J/kg/K]}$$

$(400K \leq T \leq 2000K)$

$$C_p = 1464 \text{ [J/kg/K]}$$

$(T > 2000K)$

$T$  : 温度 [K]

熱伝導度 :  $k$

$$k = 121 \text{ [W/m/K]}$$

$(T < 400K)$

$$k = 1.498 \times 10^2 - 7.2 \times 10^{-2}T \text{ [W/m/K]}$$

$(400K \leq T \leq 1600K)$

$$k = 34.6 \text{ [W/m/K]}$$

$(T > 1600K)$

$T$  : 温度 [K]

<付録2>

ヘリウム冷却材の物性式

密度 :  $\rho$

$$\rho = PM / RT \times 0.99 \text{ [kg/m}^3]$$

$M = 4.0 \times 10^{-3}$  : 分子量 [kg/mol]

$R = 8.314 \times 10^{-6}$  : 気体定数 [MJ/mol K]

$P$  : 圧力 [MPa]

$T$  : 温度 [K]

適用範囲は、  $5MPa \leq P \leq 10MPa$  、  $480K \leq T \leq 1300K$  。

定圧比熱 :  $C_p$

$$C_p = 5.191 \times 10^3 \text{ [J/kg K]}$$

適用範囲は、  $5MPa \leq P \leq 10MPa$  、  $480K \leq T \leq 1300K$  。

粘性係数 :  $\eta$

$$\eta = 3.639 \times 10^{-8}T + 1.029 \times 10^{-5} \text{ [Pa s]}$$

$T$  : 温度 [K]

適用範囲は、  $5MPa \leq P \leq 10MPa$  、  $480K \leq T \leq 900K$  。

熱伝導率 :  $\lambda$

$$\lambda = 3.366 \times 10^{-3}T^{0.668} \text{ [W/m K]}$$

$T$  : 温度 [K]

適用範囲は、  $573K \leq T \leq 1573K$  。

<付録3>

解析体系内におけるエネルギー輸送の概算

本研究では、被覆粒子燃料層内の熱流動特性に関する半定量的把握を目的とした予備解析を実施した。ここでは、予備解析での解析体系内において、どのようなエネルギー輸送が行われているかを把握する。以下、2. 3節と同様に、図3-1に示した各流路ユニットごとのエネルギー輸送に着目する。

一つの流路ユニットに対して、以下のエネルギー収支が成立する。

$$Q_{convection} + Q_{fluid, conduction} + Q_{solid, conduction} = Q_{source} \quad (A-1)$$

ここで、 $Q_{convection}$ は冷却材の対流輸送によるエネルギー、 $Q_{fluid, conduction}$ は冷却材の熱伝導輸送によるエネルギー、 $Q_{solid, conduction}$ は被覆粒子燃料の熱伝導輸送によるエネルギー、 $Q_{source}$ は一つの流路ユニット内における総発熱量である。(A-1)式では、 $Q_{convection}$ は流れ方向を正に、 $Q_{fluid, conduction}$ 及び $Q_{solid, conduction}$ は下流側から上流側を正とした。

さらに、各々のエネルギー輸送は、次のようにして求められる。下付き文字の*upper*と*lower*は各流路ユニットの上流側境界断面と下流側境界断面を示し、例えば、 $Q_{convection, upper}$ については流路ユニットの上流断面を通過する対流エネルギー輸送を表す。

$$Q_{convection} = Q_{convection, lower} - Q_{convection, upper} \quad (A-2)$$

$$Q_{fluid, conduction} = Q_{convection, upper} - Q_{convection, lower} \quad (A-3)$$

$$Q_{solid, conduction} = Q_{solid, conduction, upper} - Q_{solid, conduction, lower} \quad (A-4)$$

これら流路ユニットの境界断面を通過する各エネルギー輸送の概算値は、以下のような近似を用いて求めた。上流側境界断面を例にとり示す。

$$Q_{convection, upper} \cong \bar{\rho}_{fluid, upper} \times C_p \times \bar{T}_{fluid, upper} \times A_{fluid, upper} \quad (A-5)$$

$$Q_{fluid, conduction, upper} \cong -k_{fluid} (\bar{T}_{fluid, upper}) \times \left( \frac{dT_{fluid}}{dZ} \right)_{upper} \times A_{fluid, upper} \quad (A-6)$$

$$Q_{solid,conduction,upper} \equiv \sum_l \left( -k_{solid,l}(\bar{T}_{solid,l,upper}) \times \left( \frac{dT_{solid}}{dZ} \right)_{l,upper} \times A_{solid,l,upper} \right) \quad (A-7)$$

$\bar{\rho}_{fluid,upper}$	: 上流側境界断面における冷却材断面平均密度
$C_p$	: 冷却材比熱 ( $= 5.191 \times 10^3$ )
$\bar{T}_{fluid,upper}$	: 上流側境界断面における冷却材断面平均温度
$k_{fluid}(\bar{T}_{fluid,upper})$	: $\bar{T}_{fluid,upper}$ より求めた冷却材の熱伝導率
$A_{fluid,upper}$	: 上流側境界断面における流路断面積
$l$	: 被覆粒子燃料の各構成要素（燃料核、第一被覆、第二被覆、第三被覆）の識別子
$\bar{T}_{solid,l,upper}$	: 上流側境界断面における被覆粒子燃料の各構成要素 $l$ の断面平均温度
$k_{solid,l}(\bar{T}_{solid,l,upper})$	: $\bar{T}_{solid,l,upper}$ より求めた被覆粒子燃料構成要素 $l$ の熱伝導率
$A_{solid,l,upper}$	: 上流側境界断面における被覆粒子燃料構成要素 $l$ の断面積

各境界断面での温度勾配 ( $dT_{fluid} / dZ$ 、もしくは  $dT_{solid} / dZ$ ) については、境界断面から上流側と下流側 0.05[mm]における冷却材、燃料核、各被覆層の断面平均温度より求めた。

図 A-1 と図 A-2 に、入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s]、2.0 [m/s] の解析ケースについて、流路ユニット内の各エネルギー輸送の概算を示す。但し、各エネルギー輸送の概算値は、一つの流路ユニット内における総発熱量  $Q_{source}$  にて規格化している。

入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケースの場合（図 A-1）、上流から下流領域の流路ユニットにかけて、被覆粒子燃料の熱伝導によるエネルギー輸送の占める割合は大きくなり、第 4 ユニットにおいては  $Q_{source}$  の内約 15%～20% を占めている。これは、被覆粒子燃料層内を流れる流量がある程度低くなると、被覆粒子内の熱伝導による熱輸送が比較的有効なヒートパスとして働くためと考えられる。他方、ヘリウム冷却材の熱伝導による寄与は極めて小さく、ほぼ無視できる値となっている（被覆粒子燃料の構成要素の中で、第三被覆の熱伝導率は冷却材の熱伝導と比較すると数百倍の値となっている）。また、流量を 2 倍にした入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケース（図 A-2）では、この傾向は緩和さ

れ、対流のエネルギー輸送による熱除去の割合は増大していることが分かる。

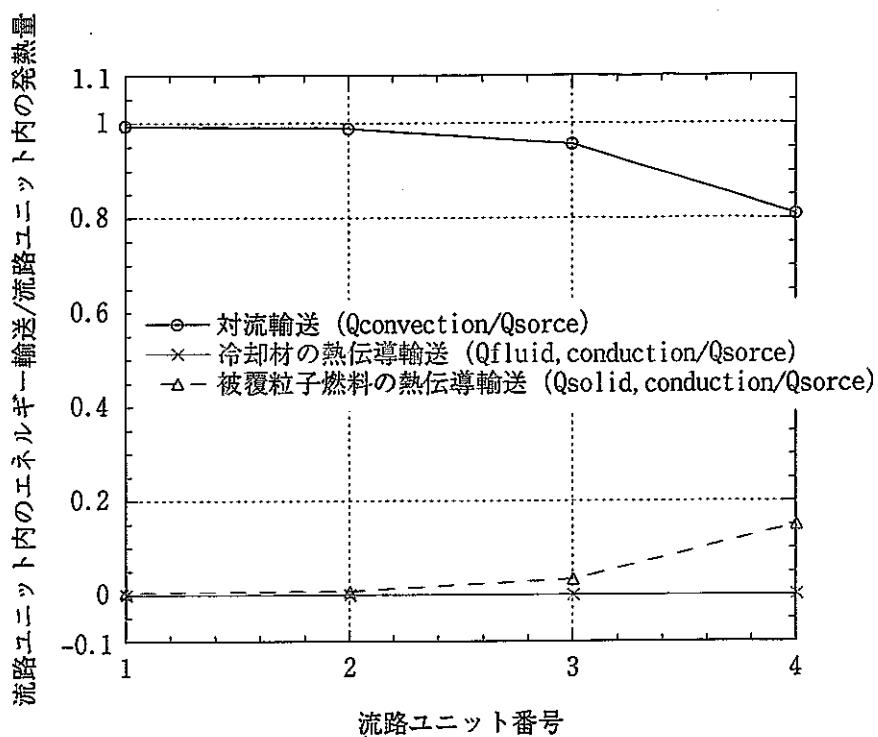


図 A-1 入口部冷却材流入流速 1.0 [m/s] の解析ケースにおけるエネルギー輸送

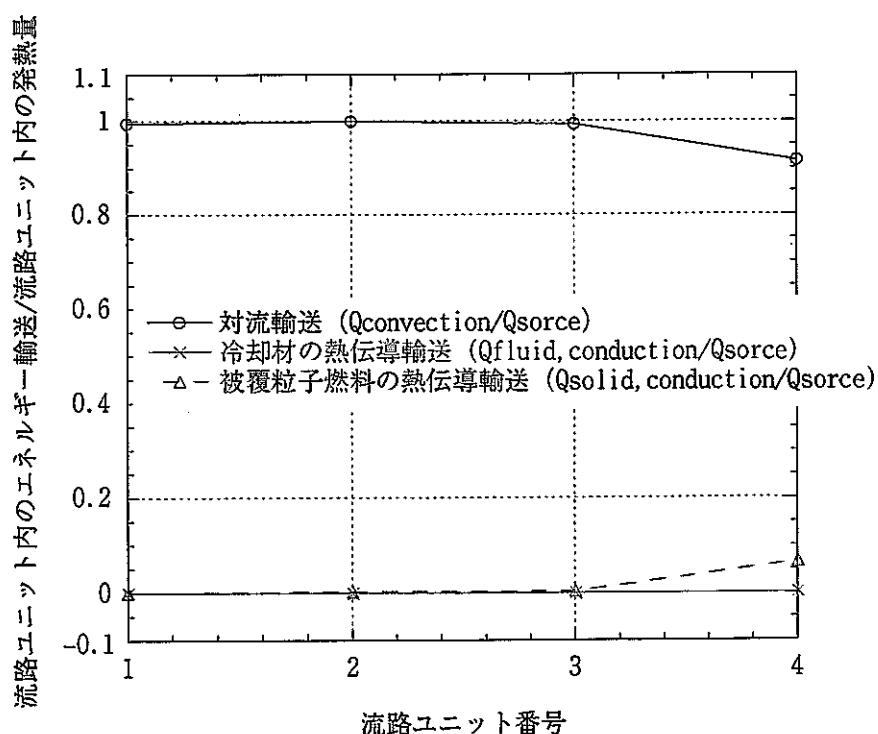


図 A-2 入口部冷却材流入流速 2.0 [m/s] の解析ケースにおけるエネルギー輸送