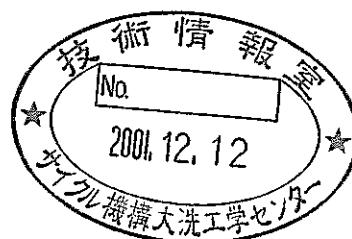


乾式リサイクルシステム解析コードの開発（その2）
一カソードプロセッサ蒸留解析コードの適用検討と
プロセスセル冷却系検討及び除熱評価－
(研究報告)



2001年7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

乾式リサイクルシステム解析コードの開発（その2）
—カソード・プロセッサ蒸留解析コードの適用検討とプロセスセル冷却系検討及び除熱評価—
(研究報告)

伊崎 誠*、戸澤克弘*、掛樋 獻**

要 旨

本研究は、従来の Purex 再処理法と異なるシステム概念の乾式リサイクルシステム（乾式再処理）・金属電解法について、主要機器であるカソードプロセッサ（蒸留器）の蒸留挙動を模擬し、処理時間及び物質収支などを把握するための蒸留解析コードの検証、及びプロセスセルの冷却挙動解析をパーソナルコンピュータ上で実施できるように作成した解析モデルを用いた冷却系のパラメータサーバイを実施したものである。これらは、乾式リサイクルシステム・金属電解法の構築、評価のためのシステム解析ツール（設計ツール）開発の一環として行ったものである。

蒸留解析コードについては昨年度開発したコードについて、Cd の蒸留挙動の内、主として蒸発量に関して理論値と比較した検証を行った。その解析結果は、適切なメッシュサイズ、時間ステップ等を入力することにより比較的良い一致を示すことが確認され、今後の蒸留装置の設計ツールとして使用できる目途を得ることが出来た。

冷却系のパラメータサーバイは今後のセル内冷却系の設計及び評価に資するため、乾式再処理セル内の冷却方式4ケースに対して、通常状態及び低流量状態の除熱性について定常解析を行った。その結果、セル冷却については下部には各発熱機器を冷却する流れを必要最小限確保し、上部にはバルクのセル冷却を確保するような冷却方法とすることが望ましいと考えられることがわかった。

*大洗工学センター システム技術開発部 再処理システムグループ

**元 大洗工学センター システム技術開発部 再処理システムグループ

Development of system analysis code for pyrochemical process using molten salt electrorefining part2

— cathode processor calculation code with distillation process and parameter surveys
using developed analytical model for cooling system of pyrochemical process cell —

M.IZAKI*, K.TOZAWA*, I.KAKEHI**

Abstract

This report describes accomplishment of development of a cathode processor calculation code to simulate the mass and heat transfer phenomena with the distillation process and parameter survey using developed analytical model for cooling behavior of the pyrochemical process cell on personal computers. The pyrochemical process using molten salt electrorefining would introduce new technologies for new fuels of particle oxide, particle nitride and metallic fuels.

Evaporation calculations using cathode processor calculation code with distillation process, which was developed in 2000, were evaluated. By selecting proper input data (time step, mesh size etc.), the results showed that the present code agreed well for the evaporation rate of cadmium., and the capability of the distillation process design and simulation with the code has been confirmed.

Parameter surveys using developed analytical model were performed for the purpose of reflection of cooling system design of the pyrochemical process cell. 4 cases of cooling flow patterns were surveyed at the normal and low flow rate conditions. From the result of parameter surveys, it was shown that the cooling pattern with direct cooling for heating facilities in the lower cell and bulk cooling for upper cell is desirable.

*Reprocessing System Engineering Group, System Engineering Technology Division,
O-arai Engineering Center, JNC

**Former, Reprocessing System Engineering Group, System Engineering Technology
Division, O-arai Engineering Center, JNC

目 次

第Ⅰ編 カソードプロセッサ蒸留解析コードの適用検討

1. 緒言	I - 1
2. 蒸留解析コードの概要	I - 2
2.1 概要	I - 2
2.2 基礎式	I - 2
3. 理論式による Cd 蒸発量の計算	I - 3
4. 蒸留解析コードによる Cd 蒸発量の検証計算	I - 4
4.1 計算条件	I - 4
4.2 計算結果	I - 4
5. 検証結果	I - 5
6. 解析コード適用時の留意点	I - 6
7. まとめ	I - 7
8. 参考文献	I - 8
添付資料 カソードプロセッサ蒸留解析コードの基礎式	添-1(I - 31)

第Ⅱ編 プロセスセル冷却系検討及び除熱評価

1. 検討のねらいとセル冷却系の除熱方式及び冷却系基本概念	II - 1
2. 解析モデルの概要	II - 4
3. 流量パラメータ解析	II - 11
3.1 ケース 1 の解析結果	II - 11
3.2 ケース 2 の解析結果	II - 20
3.3 ケース 3 の解析結果	II - 29
3.4 ケース 4 の解析結果	II - 38
3.5 解析結果のまとめ	II - 47
4. まとめ	II - 51

5. 参考文献----- II -52

添付資料 照明高発熱条件での除熱特性 ----- 添-1(II -53)

図表リスト

第 I 編 カソードプロセッサ蒸留解析コードの適用検討

表 3-1 理論計算フォーマット (液面温度 350°C-30Torr)	I-9
表 4-1 Ar ガス中の Cd 蒸発量計算結果	I-10
図 3-1 衝突積分値	I-11
図 3-2 Cd の蒸気圧	I-11
図 4-1 解析コード入力データ設定値例 (液面温度 350°C-600Torr、10×10 メッシュ)	I-12
図 4-2 解析コード計算結果 (液面温度 350°C-30Torr)	I-18
図 4-3 解析コード計算結果 (液面温度 450°C-30Torr)	I-18
図 4-4 解析コード計算結果 (液面温度 550°C-30Torr)	I-19
図 4-5 解析コード計算結果 (液面温度 550°C-30Torr、30×30 メッシュ)	I-19
図 4-6 解析コード計算結果 (液面温度 350°C-100Torr)	I-20
図 4-7 解析コード計算結果 (液面温度 450°C-100Torr)	I-20
図 4-8 解析コード計算結果 (液面温度 550°C-100Torr)	I-21
図 4-9 解析コード計算結果 (液面温度 600°C-100Torr)	I-21
図 4-10 解析コード計算結果 (液面温度 600°C-100Torr、30×30 メッシュ)	I-22
図 4-11 解析コード計算結果 (液面温度 350°C-600Torr)	I-23
図 4-12 解析コード計算結果 (液面温度 350°C-600Torr、30×30 メッシュ)	I-23
図 4-13 解析コード計算結果 (液面温度 450°C-600Torr)	I-24
図 4-14 解析コード計算結果 (液面温度 550°C-600Torr)	I-25
図 4-15 解析コード計算結果 (液面温度 550°C-600Torr、30×30 メッシュ)	I-25
図 4-16 解析コード計算結果 (液面温度 700°C-600Torr)	I-26
図 4-17 解析コード計算結果 (液面温度 700°C-600Torr、30×30 メッシュ)	I-26
図 4-18 解析コード計算結果 (液面温度 700°C-600Torr、るっぽ開放)	I-27
図 5-1 理論計算と解析計算結果の比較 (容器内圧力 30、100、600Torr)	I-28
図 5-2 理論計算と解析計算結果の比較 (容器内圧力 600Torr)	I-29
図 5-3 液面上の拡散係数・質量分率分布 (液面温度 700°C-600Torr)	I-30

第II編 プロセスセル冷却系検討及び除熱評価

表 1-1 アルゴンガスセル霧囲気冷却方式の比較	II-2
表 3.5-1 流量パラメータ解析結果	II-49
表 3.5-2 セル内流配パターンの評価	II-50
付表-1 照明高発熱条件での解析結果	II-54

図 1-1 セル内ガス温度非定常解析結果（照明レベルでの高発熱燃料側機器中心の短辺方向中心部のガス温度の時間変化）	II-3
図 2-1 セル解析体系（モデル1）	II-6
図 2-2 セル解析体系（モデル2）	II-7
図 2-3 セル解析体系（モデル3）	II-8
図 2-4 セル解析体系（モデル4）	II-9
図 2-5 CASE1,2 の解析メッシュ	II-10
図 2-6 CASE3,4 の解析メッシュ	II-10
図 3.1-1 CASE1 高流速条件の各部の温度（1／2）	II-12
図 3.1-1 CASE1 高流速条件の各部の温度（2／2）	II-13
図 3.1-2 CASE1 高流速条件の各部の流況（1／2）	II-14
図 3.1-2 CASE1 高流速条件の各部の流況（2／2）	II-15
図 3.1-3 CASE1 低流速条件の各部の温度（1／2）	II-16
図 3.1-3 CASE1 低流速条件の各部の温度（2／2）	II-17
図 3.1-4 CASE1 低流速条件の各部の流況（1／2）	II-18
図 3.1-4 CASE1 低流速条件の各部の流況（2／2）	II-19
図 3.2-1 CASE2 高流速条件の各部の温度（1／2）	II-21
図 3.2-1 CASE2 高流速条件の各部の温度（2／2）	II-22
図 3.2-2 CASE2 高流速条件の各部の流況（1／2）	II-23
図 3.2-2 CASE2 高流速条件の各部の流況（2／2）	II-24
図 3.2-3 CASE2 低流速条件の各部の温度（1／2）	II-25
図 3.2-3 CASE2 低流速条件の各部の温度（2／2）	II-26
図 3.2-4 CASE2 低流速条件の各部の流況（1／2）	II-27
図 3.2-4 CASE2 低流速条件の各部の流況（2／2）	II-28
図 3.3-1 CASE3 高流速条件の各部の温度（1／2）	II-30
図 3.3-1 CASE3 高流速条件の各部の温度（2／2）	II-31
図 3.3-2 CASE3 高流速条件の各部の流況（1／2）	II-32
図 3.3-2 CASE3 高流速条件の各部の流況（2／2）	II-33
図 3.3-3 CASE3 低流速条件の各部の温度（1／2）	II-34
図 3.3-3 CASE3 低流速条件の各部の温度（2／2）	II-35

図 3.3-4 CASE3 低流速条件の各部の流況 (1 / 2)	II-36
図 3.3-4 CASE3 低流速条件の各部の流況 (2 / 2)	II-37
図 3.4-1 CASE4 高流速条件の各部の温度 (1 / 2)	II-39
図 3.4-1 CASE4 高流速条件の各部の温度 (2 / 2)	II-40
図 3.4-2 CASE4 高流速条件の各部の流況 (1 / 2)	II-41
図 3.4-2 CASE4 高流速条件の各部の流況 (2 / 2)	II-42
図 3.4-3 CASE4 低流速条件の各部の温度 (1 / 2)	II-43
図 3.4-3 CASE4 低流速条件の各部の温度 (2 / 2)	II-44
図 3.4-4 CASE4 低流速条件の各部の流況 (1 / 2)	II-45
図 3.4-4 CASE2 低流速条件の各部の流況 (2 / 2)	II-46
付図 1-1 CASE1 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (1 / 2)	II-55
付図 1-1 CASE1 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (2 / 2)	II-56
付図 1-2 CASE1 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (1 / 2)	II-57
付図 1-2 CASE1 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (2 / 2)	II-58
付図 2-1 CASE2 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (1 / 2)	II-59
付図 2-1 CASE2 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (2 / 2)	II-60
付図 2-2 CASE2 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (1 / 2)	II-61
付図 2-2 CASE2 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (2 / 2)	II-62
付図 3-1 CASE3 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (1 / 2)	II-63
付図 3-1 CASE3 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (2 / 2)	II-64
付図 3-2 CASE3 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (1 / 2)	II-65
付図 3-2 CASE3 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (2 / 2)	II-66
付図 4-1 CASE4 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (1 / 2)	II-67
付図 4-1 CASE4 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (2 / 2)	II-68
付図 4-2 CASE4 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (1 / 2)	II-69
付図 4-2 CASE4 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (2 / 2)	II-70

第Ⅰ編 カソードプロセッサ蒸留解析コードの適用検討

1. 緒言

溶融塩電解技術を適用した高速炉燃料乾式リサイクルシステム（以下、乾式再処理）は、経済性、環境負荷低減等の期待が大きい先進的なりサイクルシステムである。

この乾式再処理法には、米国アルゴンヌ国立研究所（ANL）が開発した金属電解法、ロシア原子炉科学研究所（RIAR）が開発した酸化物電解法及びフッ化物の蒸気圧の差を利用するフッ化物揮発法等がある。

この内の金属電解法に関して、カソードプロセッサ（蒸留器）はシステムの重要機器であり、溶融塩電解で回収した燃料物質に付随した溶融塩あるいは液体電極（カドミウム：Cd等）で回収する場合は電極に使用する液体電極材、を蒸留して精製された燃料物質を得るものである。

従って金属電解法による乾式リサイクルシステム全体を構築するためにはカソードプロセッサ（蒸留器）の特性を十分把握することが必要である。

この目的のため、カソードプロセッサの蒸留挙動を解析する解析コードを昨年度作成し、その結果が報告されている。²⁾

上記研究報告では、2次元キャビティ内での自然対流問題を、ベンチマークデータとして公開されている結果と比較して温度、速度に関する空間分布及び最大速度の値、発生場所がよく一致し、また電解精製プロセスで使用するカソードプロセッサを模擬した円筒状の密閉容器の体系にて Cd の蒸留挙動がシミュレーションできることが確認されている。

本研究では次のステップとして、今後の解析で蒸発データの精度検討にバックデータとして必要な Cd の蒸留挙動の内、主として蒸発量に関して理論値と比較した検証計算を実施、解析数値の信頼性を明らかにすると共に、併せて解析コード適用時の留意点について示すものである。

2. 蒸留解析コードの概要

2.1 概要

蒸留解析コードはカソードプロセッサについて、蒸留炉寸法、運転条件（温度、圧力）、処理物質組成及び処理物種類を入力条件とした蒸留挙動を模擬する、多成分2次元解析コードであり、以下の特徴を有する。

- ① 軸対象圧縮性ナビエ・ストークス方程式に基づく直接数値解析法(DNS)を採用。
- ② 重力項(浮力)の影響を考慮しており、熱対流問題への適用が可能。
- ③ 多成分の濃度拡散を考慮可能。(最大7種)
- ④ 流体に関しては、理想気体の状態方程式を満たすものとする。
- ⑤ 各種蒸発成分の蒸発量は、液面における蒸発成分の分圧の飽和蒸気圧と等しいとする。

また、装置内壁での各種蒸発成分の凝縮量は、壁での蒸発成分の分圧を飽和蒸気圧と仮定し、壁方向に拡散する蒸発成分は全て壁面にて凝縮するものとする。

また本コードは以下の事項が計算できる機能を有している。

- ① 各蒸発成分の蒸発量と時間変化
- ② 各蒸発成分の空間濃度分布と時間変化
- ③ 各蒸発成分の装置壁凝縮量の時間変化
- ④ 装置内部の混合ガス温度分布と時間変化
- ⑤ 装置内部の混合ガス速度分布と時間変化

2.2 基礎式

参考文献2)に示されているものを、添付資料に再掲する。

3. 理論式による Cd 蒸発量の計算

検証データのレファレンスとする Cd 蒸発量の理論式（これは計算コードの基礎式でもある）は参考文献 1) に記載されており、検証用の計算パラメータもこの資料に準じて設定した。

具体的には、蒸発液面から凝縮面までの距離を 0.2m、凝縮面の温度 320℃の条件で、容器内の真空度 30Torr、100Torr 及び 600Torr の 3 ケースについて蒸発液面温度をパラメータに、Ar ガス中の Cd 蒸発量を計算した。

Cd 蒸発量の理論計算フォーマット及び理論計算結果を、各々表 3-1 及び表 4-1 に示す。

表 3-1 はエクセルの計算機能を使用して液面温度、凝縮面温度、容器内圧力（真空度）等をインプットすることにより、蒸発量が計算できるようにしたものである。

Cd 蒸発量計算に必要な、衝突積分値 (Ω) と Cd の温度に対する蒸気圧は各々参考文献 1) に示す値を図 3-1 及び図 3-2 の通り内挿したものを使用している。

また表 4-1 は、理論計算と解析コードによる計算結果が比較できるように、次項に示す蒸留解析コードによる Cd 蒸発量及び拡散係数の値も併記した。

4. 蒸留解析コードによる Cd 蒸発量の検証計算

4.1 計算条件

理論式による Cd 蒸発量の計算と比較するための検証計算用の計算条件を以下に示す。

入力データの設定値例の詳細は、図 4-1 に示す。

(液面温度 350°C、容器内圧力（真空度）600Torr、 10×10 メッシュの場合)

- ① 2 次元円筒座標により計算領域の格子生成は、理論式での計算領域数は 1 点のみであることを考慮して、比較的単純な 10×10 メッシュを基本とした。
- ② 円筒座標中心の、左壁は断熱境界とそれ以外の温度境界は原則として凝縮面と同じ 320 °Cとした。
- ③ 液面から液面上部の凝縮面までの距離は、理論計算ケースと同一の 0.2m とし、単位面積当たりの蒸発量を比較するため、液面表面積が 1m^2 となる様につぼの内径を設定する。また計算領域は凝縮面以外の、右壁及び下面（床）の凝縮への影響が無視出来る程度と考えられる半径 1m、高さ 1m とした。
- ④ つぼ縁の高さは、理論計算体系と同様に液面と上部凝縮面が 1 対 1 に対応する様高さを高く（上面との隙間 0.05m）設定した。
- ⑤ 液面から凝縮面への蒸発量を理論式と単純に比較できる様、バッフル板は無い物として取り扱った。

4.2 計算結果

解析コードによる Ar ガス中の Cd 蒸発量に関する各計算結果を図 4-2～図 4-18 に示す。

表 4-1 には Cd 蒸発量の他拡散係数についても、理論計算結果と解析結果を比較して示した。

蒸発量は、各圧力（真空度）とも液面温度が低い場合には短時間で飽和する傾向を示し、高温の場合では今回のシミュレーション時間（15 又は 30sec）内ではほぼ一定の蒸発挙動を示した。

表 4-1 に示す Cd 蒸発量の解析値は、飽和傾向を示す場合は立ち上がり部の傾きから求めた。

また解析コード計算における拡散係数値は液面上部近傍のメッシュにおけるものとした。

5. 検証結果

真空度及び液面温度をパラメータとした、Ar ガス中の Cd 蒸発量の理論式計算と、解析計算結果の比較を図 5-1 及び図 5-2 に示す。

図 5-1 は容器内圧力（真空度）30、100、600Torr の 3 ケースの場合について示しており、図 5-2 は 600Torr の場合について、 10×10 メッシュと 30×30 メッシュの両方の解析結果を示している。

これらより以下のことがわかった。

- ① いずれの真空度においても、液面温度が比較的低い範囲では両者は比較的よく一致しているが液面が高温になる程理論計算と解析結果の差が広がる（解析結果の方が小さい）傾向を示した。
- ② 同一条件で、計算メッシュを細分化した場合（ 10×10 から 30×30 メッシュに増加）には解析結果による蒸発量の値は大きくなり、計算メッシュが粗い場合と比べ理論計算との相違は小さくなり、蒸発量はより理論値に近づくことがわかった。
- ③ 但し拡散係数については表 4-1 からわかるように、どのケースでも理論式計算と解析結果との間に、蒸発量の差ほど大きな差は無い。
- ④ また拡散係数については計算メッシュ数の相違によっても、蒸発量の差ほど大きな差は出なかった。

図 5-3 は液面温度 700°C、圧力（真空度）600Torr における 10×10 と 30×30 メッシュの Cd の拡散係数と質量分率の液面上空間分布を示したものであるが、これより計算メッシュ数の相違が質量分率の空間分布の差となり、蒸発量の差に大きな影響を及ぼしている様に推測される。

- ⑤ その他蒸発量に影響を及ぼす可能性のあるいくつかのパラメータを変えた結果は以下の通りである。

a. 計算メッシュ数の影響

②に示した様に計算メッシュを細分化した場合（ 10×10 から 30×30 メッシュに増加）には、蒸発量は数倍増加し理論計算により近い傾向を示した。

但しメッシュの細分化に伴い計算時間ステップも 0.01 から 0.005sec に小さくしてあり次項に示す影響も含まれていると思われる。

b. 計算時間ステップの影響

同一計算メッシュ（ 10×10 ）で液面温度 700°C、圧力（真空度）600Torr で、タイムステップ 0.01sec の基準条件に対し、タイムステップを半分の 0.005sec とした場合、蒸発量は約 15% 多く計算された。

c. るつぼ縁の影響

るつぼ縁の高さは、理論計算体系と同様に液面と上部凝縮面が 1 対 1 に対応する様、高さを高く（上面との隙間 0.05m）設定しているが、蒸発液面を開放系として流れ等による蒸発量への影響を計算したが、液面温度 600°C-容器内圧力（真空度）600Torr で

蒸発量の増加は約10%程度（図4-16及び図4-18参照）と、ほとんど変化は無かった。

- ⑥ 凝縮量が蒸発量より大きくなる計算結果が得られる場合があったが、そのほとんどは10×10メッシュの場合であり、最低限ある程度のメッシュ数が必要である、と思われる。

6. 解析コード適用時の留意点

本検証計算を通して判明した、解析コード適用時の留意点を以下に示す。

- ① 現象を適切に捉えるのに必要なメッシュ数、適当なタイムステップが存在すると思われる所以、初期においては同一体系で複数ケース計算を実施し、計算結果の挙動を吟味する。
 - ② 解析コードの使用方法については参考文献2)に示されているが、データ入力時の留意点を以下の通り補足する。
 - ・ パラメータサーバイ等において入力データは通常既存データを修正、あるいは修正後別のホルダに再保存して使用する。このときパソコン画面からは「ファイル」－「パラメータ読み込み」により「格子生成パラメータ」、「固体・領域パラメータ」を「開く」により呼び出しが、この後「保存」メニューが開かれ、任意のファイル名を指定して保存することができる。デフォルトでは fort.10 であるが、このファイルでは再計算不可であり、ここではキャンセルを選択する。
 - ・ 入力したデータを保存して、後日、再計算に利用する場合には、「ファイル」－「パラメータ保存」－「格子生成パラメータ」他でファイル名を指定して保存する。（固体・液体領域パラメータ、計算条件パラメータも同様。ファイル名は格子生成パラメータの場合は grdprm、固体・液体領域パラメータでは objprm、計算条件パラメータでは cndprm である。）
 - ・ 計算結果の出力ファイルが自動生成されるが、デフォルトで1ステップ毎作成されるので膨大な容量となってしまうので、計算の前に出力タイミングを指定すること。必要な設定場所は「計算」－「計算条件設定」、「モニター」－「速度ベクトル表示設定」、「ツール」－「定点データ出力指定」、「ツール」－「流束データ出力指定」、「ツール」－「アスキーデータ出力」の5ヶ所である。
- また、これらの出力ファイルは、上書きされずにデータとして書き加えられていくので以前のファイルが残っている場合は、予め消去する必要がある。
- ・ 蒸発・凝縮量時間変化モニタグラフ（「表示」－「グラフウインドウ」で表示させる）の時間軸、蒸発・凝縮量のスケールは、「モニター」－「モニターグラフ設定」で入力するが、計算途中で変更することができる。この場合「計算」－「停止」で一旦計算を中断させ、スケール変更操作を行う。

7. まとめ

昨年度作成した、パーソナルコンピュータのWindows（NT）環境で実行可能な円筒状密閉容器内における多成分混合気体の対流・拡散現象を対象とする2次元数値シミュレーション解析コードにつき、Cdの蒸留挙動の内主として蒸発量に関して理論値と比較した検証計算を実施した。

その結果、蒸発量について以下に示す通り、理論計算と解析結果は、適切なメッシュサイズ、時間ステップ等を入力することにより比較的良い一致を示すことが明らかになり、今後の蒸留装置の設計ツールとして使用できる目途が得られた。

- ① いずれの真圧度においても、液面温度が比較的低い範囲では両者は比較的よく一致しているが液面が高温になる程理論計算と解析結果の差が広がる（解析結果の方が小さい）傾向を示した。
- ② 同一条件で、計算メッシュを細分化した場合（ 10×10 から 30×30 メッシュに増加）には解析結果による蒸発量の値は大きくなり、計算メッシュが粗い場合と比べ理論計算との相違は小さくなり、蒸発量はより理論値に近づくことがわかった。
- ③ 拡散係数については理論式計算と解析結果との間に、相違蒸発量の差ほど大きな差は無い。

8. 参考文献

- 1) 河西、掛樋他, “先進的核燃料リサイクルシステムの設計研究”, JNC TN9400 98-003,
1998年10月
- 2) 戸澤、松本、掛樋, “乾式リサイクルシステム解析コードの開発”, JNC TN9400 2000-
052, 2000年4月

表3-1 理論計算フォーマット(液面温度350°C-30Torr)

拡散係数

$$D_{ab} = \frac{1.8583 \times 10^{-7} * (T^3 (1/M_a + 1/M_b))^{1/2}}{p \sigma_{ab}^2 * \Omega_D}$$

*1

*2

*3

inputするセル
物性値
主要計算結果

T	623.15 [K]	*1	350 °C	*3	$D_{ArCd} =$	1.07E-03 m ² /S
Mar	*2	39.948 kg/kmol	分子量			
MCd	*2	112.411 kg/kmol	分子量			
p	0.0394737 [atm]	圧力	*1	30 Torr		
σ_{ab}	3.19835 Å	衝突直径				
$\varepsilon_{AB} =$	$(\varepsilon_A * \varepsilon_B)^{1/2}$					
	ε_{Ar}/k	*2	124			
	ε_{Cd}/k		1511.721 = 1.15 Tb	Tb: 沸騰温度		1314.54 K
	ε_{ArCd}/k		432.9588941			
	T		623.15			
	kT / ε		1.439282132 →	$\Omega_D =$	1.236	y = 1.4684x ^{-0.4739} (if 1 < Ω < 3)

$$\sigma_{ab} = 1/2(\sigma_a + \sigma_b)$$

$$\begin{array}{lll} \sigma_{Ar} & *2 & 3.418 Ar \\ \sigma_{Cd} & *2 & 2.9787 \end{array} \quad \boxed{\sigma_{ArCd}} \quad 3.19835$$

拡散速度算出

液面温度	350 °C	=	623.15 K		
雰囲気温度	335 °C	=	608.15 K	凝縮面高さ	0.2 m
凝縮面温度	320 °C	=*1	593.15 K		

液面蒸気圧 (液面温度から)	0.612104264 Torr	=	0.000805401 atm	$Y_{cd,1}$ モル分率	0.020403
凝縮面蒸気圧 (凝縮面温度から)	0.348243739 Torr	=	0.000458216 atm	$Y_{cd,2}$ モル分率	0.011608

$$*3 Cf \quad 7.92E-01 mol/m³$$

Ncd	3.77524E-05 mol/m ² /sec	=	3.77524E-09 mol/cm ² /sec	
蒸発重量	4.24379E-06 kg/m ² /sec	= *3	4.24379E-07 g/cm ² /sec	

表4-1 Arガス中のCd蒸発量計算結果

計算条件:凝縮面温度320°C／液面・凝縮面間距離0.2m

雰囲気圧力	液面温度	理論手計算(g/cm ² /sec)	解析コード条件	解析コード(g/cm ² /sec)	蒸発量(コード/理論)	拡散係数(m ² /s) (理論/コード)	備考
30Torr	350°C	4.24 * E-7	10×10メッシュ	2.5 * E-7	59%	1.07E-3 / 1.0E-3	
	450°C	7.76 * E-6	10×10メッシュ	2.6 * E-6	34%	1.43E-3 / 1.2E-3	
	550°C	1.47 * E-4	10×10メッシュ	1.2 * E-5	8%	1.85E-3 / 7.0E-4	
			30×30メッシュ	6.7 * E-5	45%	1.85E-3 / 1.2E-3	
	350°C	1.26 × E-7	10×10メッシュ	7.0 * E-8	56%	3.20E-4 / 3.1E-4	
	450°C	2.20 * E-6	10×10メッシュ	6.7 * E-7	30%	4.29E-4 / 3.9E-4	
100Torr	550°C	2.13 * E-5	10×10メッシュ	4.4 * E-6	21%	5.55E-4 / 3.7E-4	
			10×10メッシュ	1.8 * E-5	21%	6.23E-4 / 7.0E-4	
			30×30メッシュ	5.5 * E-5	64%	6.23E-4 / 4.0E-4	
	600°C	8.54 × E-5	10×10メッシュ	2.2 * E-8	105%	5.34E-5 / 5.2E-5	
			30×30メッシュ	6.7 * E-8	320%	5.34E-5 / 5.1E-5	
600Torr	350°C	2.09 × E-8	10×10メッシュ	1.3 * E-7	36%	7.16E-5 / 7.1E-5	
			30×30メッシュ	3.3 * E-6	21%	9.24E-5 / 7.8E-5	
	450°C	3.61 * E-7	10×10メッシュ	6.7 * E-7	106%	9.24E-5 / 6.5E-5	
			30×30メッシュ	1.7 * E-5	15%	1.29E-4 / 1.0E-4	
	550°C	3.12 * E-6	10×10メッシュ	6.5 * E-5	56%	1.29E-4 / 1.5E-4	
	700°C	1.18 × E-4	10×10メッシュ				

コード算出の拡散係数値の場所は液面上部近傍の、10×10メッシュではj=9, i=3,4を、30×30メッシュではj=25, i=10とした。

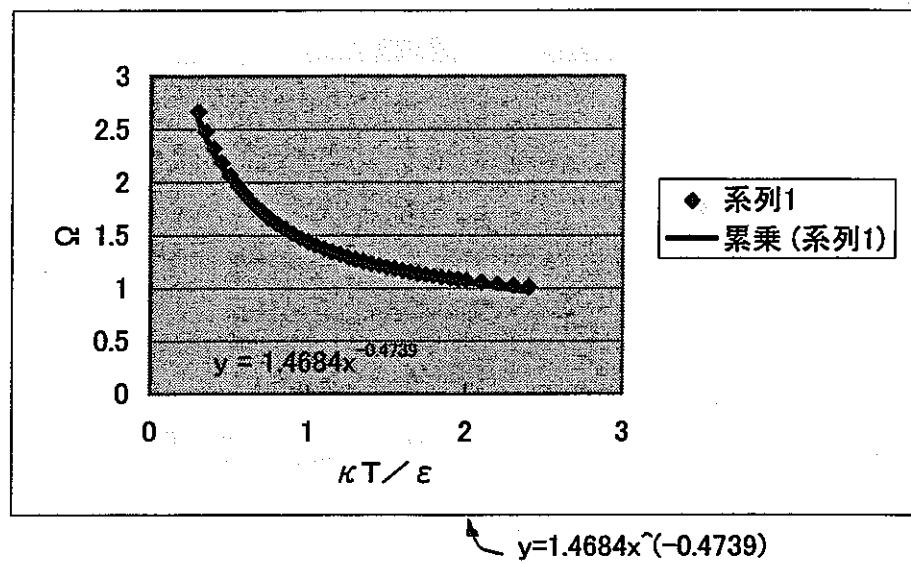


図 3-1 衝突積分値

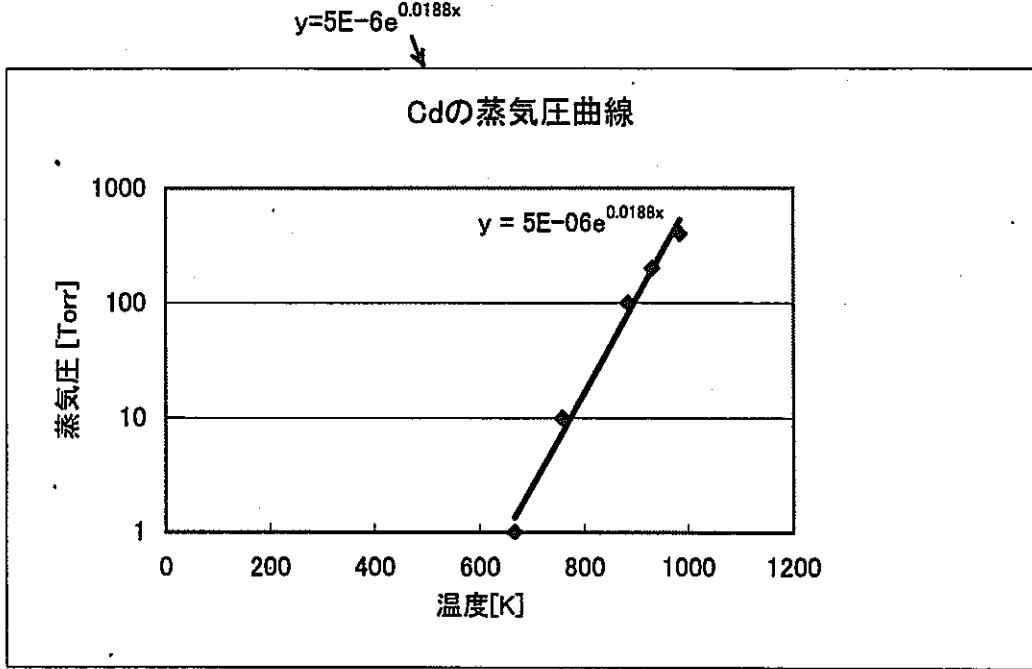


図 3-2 Cd の蒸気圧

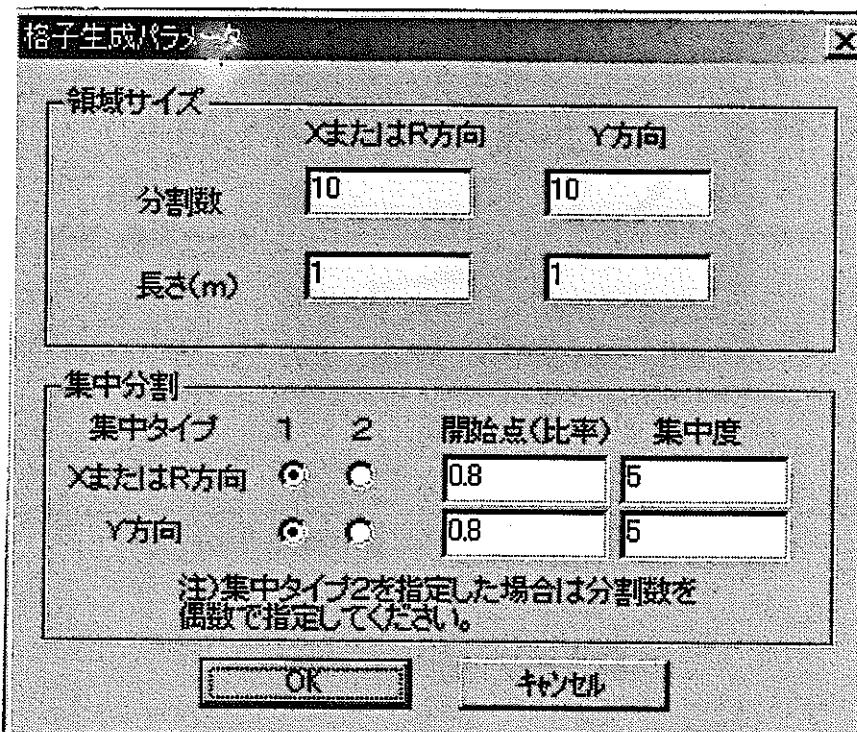


図4-1 (1/6) 解析コード入力データ設定値例
(液面温度 350°C-600Torr、10×10 メッシュ)

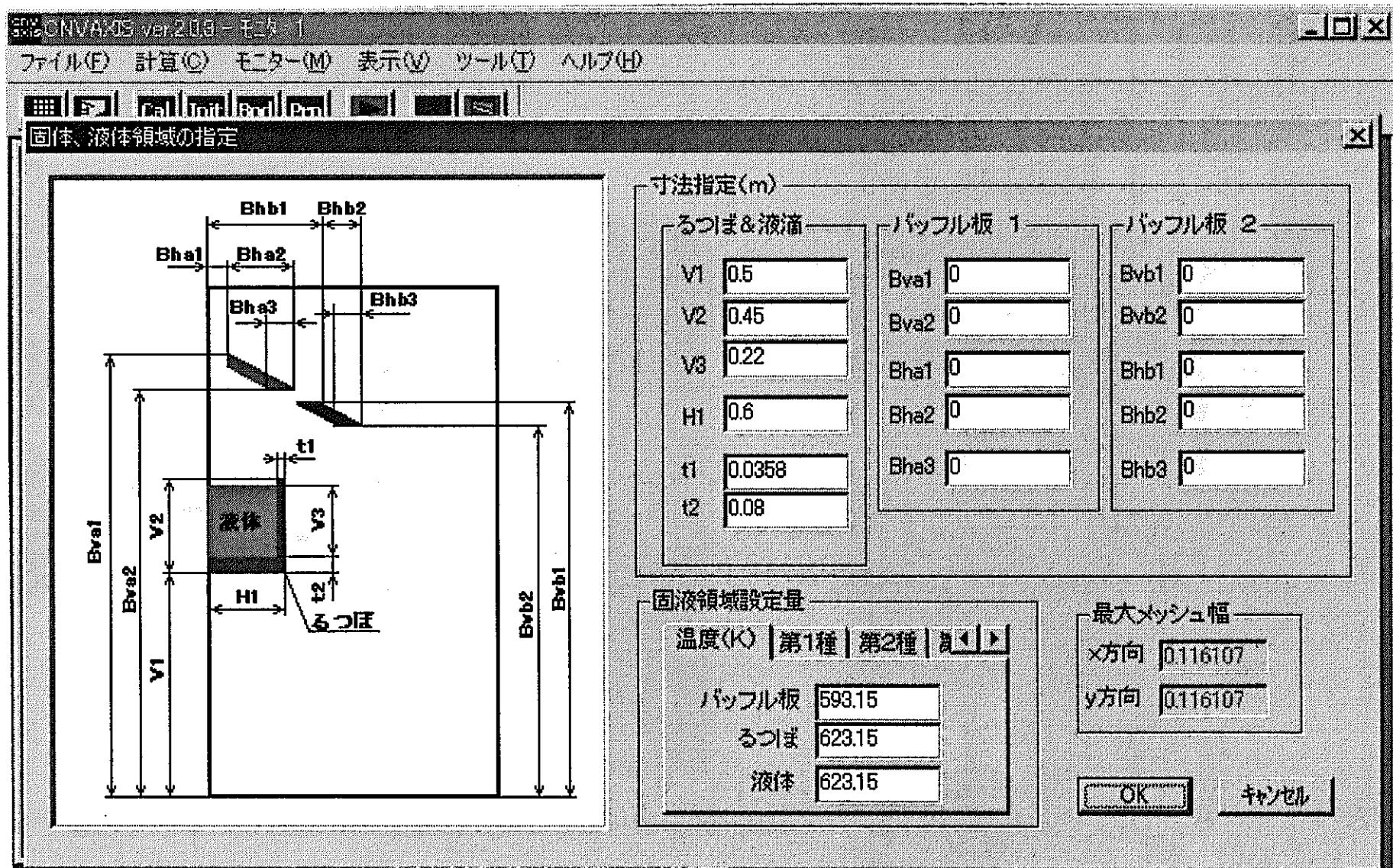


図4-1 (2/6) 解析コード入力データ設定値例
(液面温度 350°C - 600Torr、10×10 メッシュ)

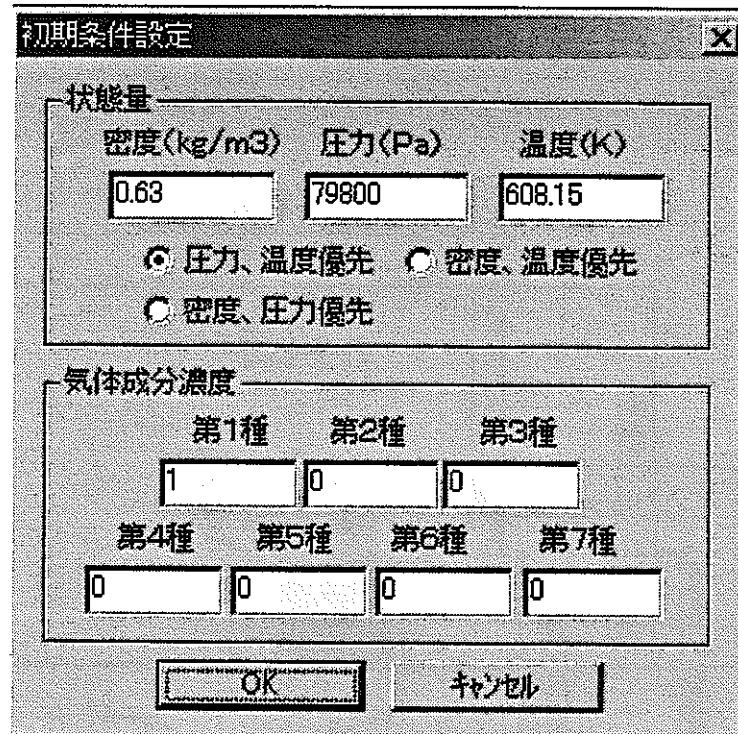
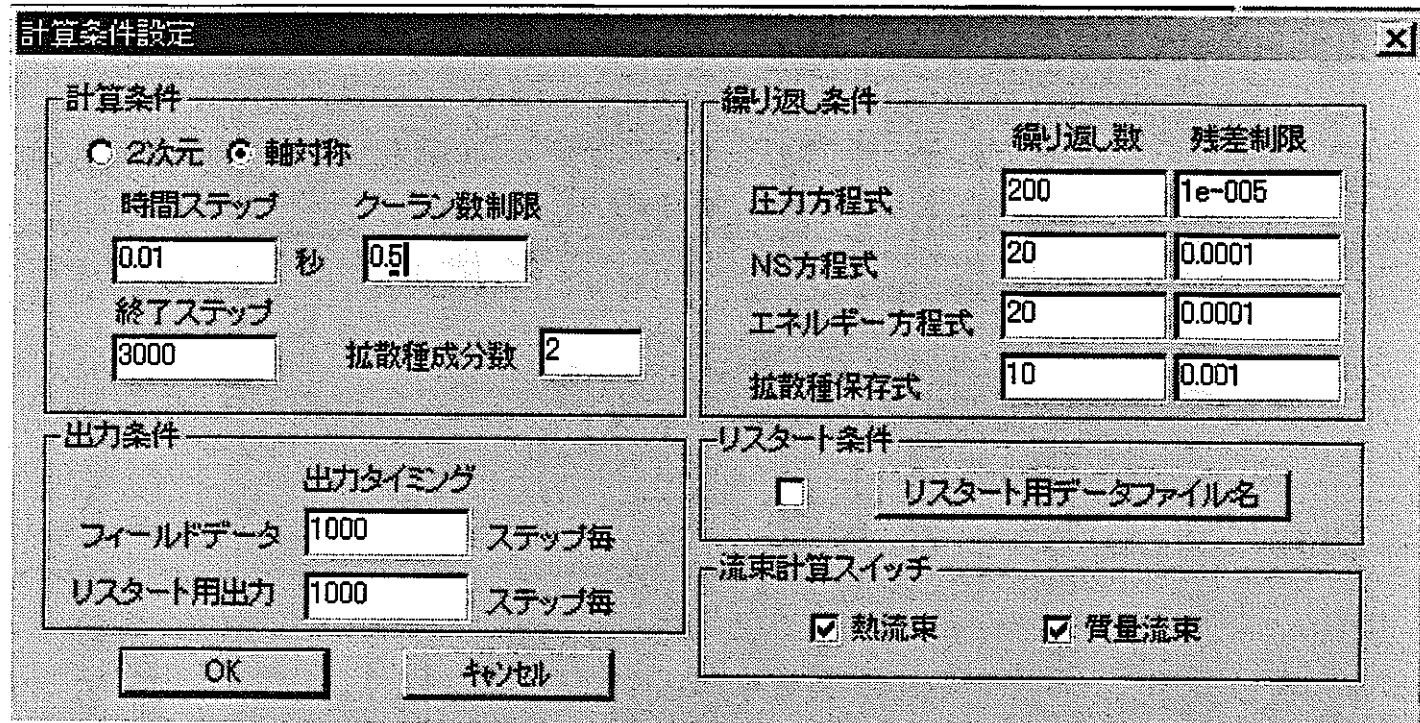


図4-1 (3/6) 解析コード入力データ設定値例

(液面温度 350°C - 600Torr, 10×10 メッシュ)

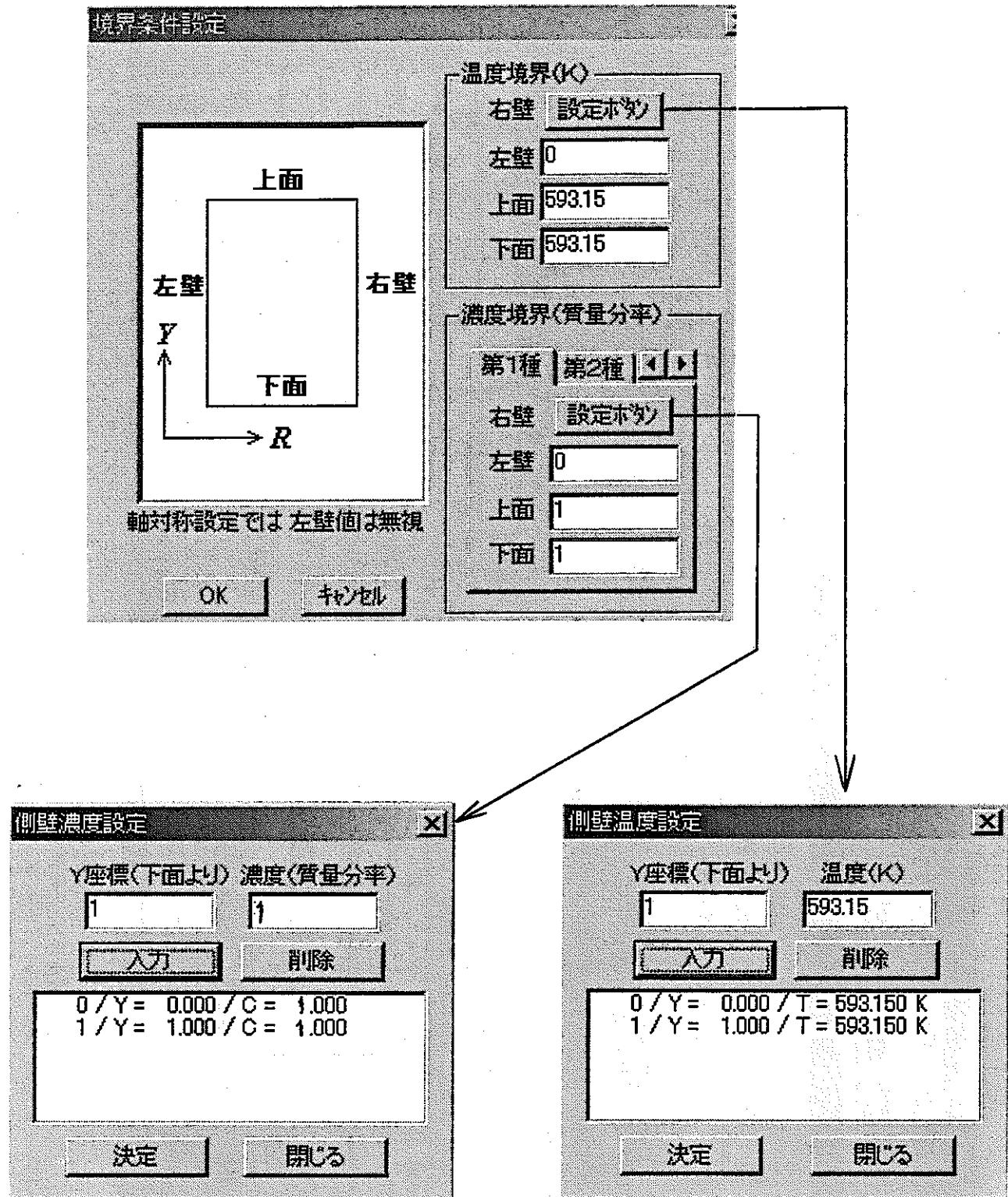


図4-1 (4/6) 解析コード入力データ設定値例
(液面温度 350°C - 600Torr、10×10 メッシュ)

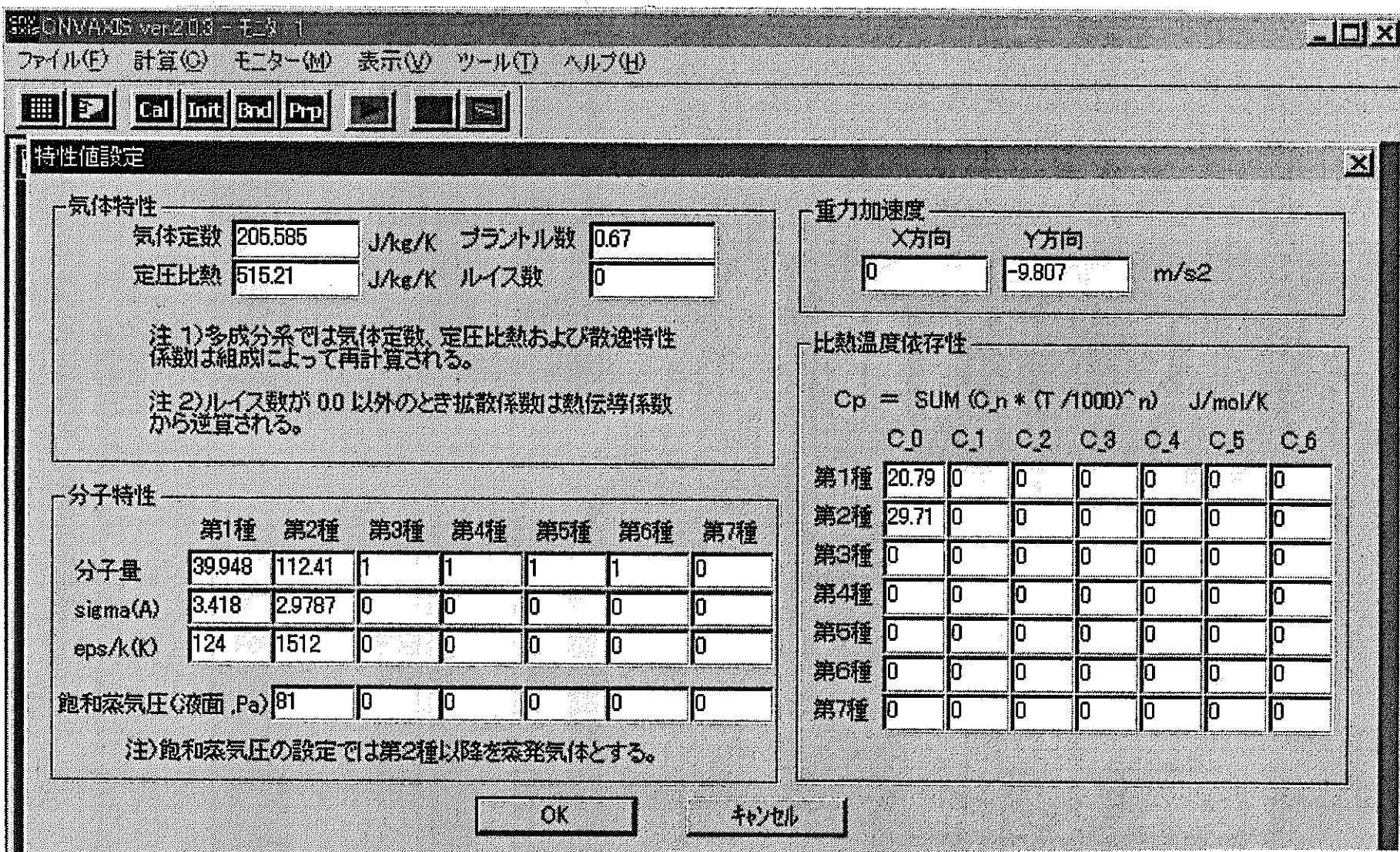


図 4-1 (5/6) 解析コード入力データ設定値例
(液面温度 350°C - 600Torr, 10×10 メッシュ)

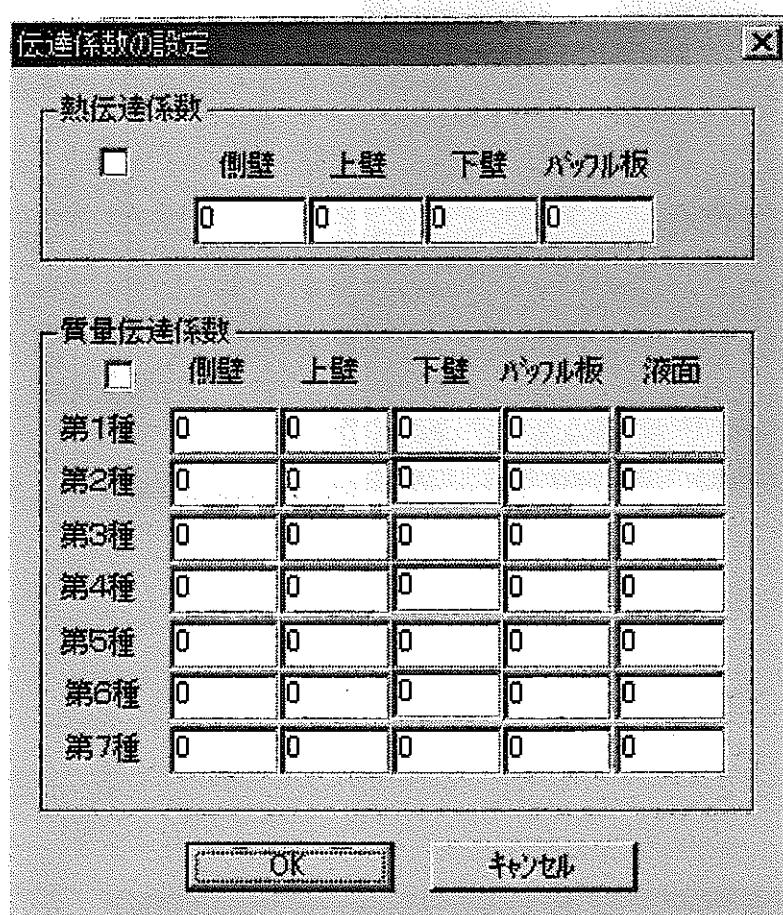
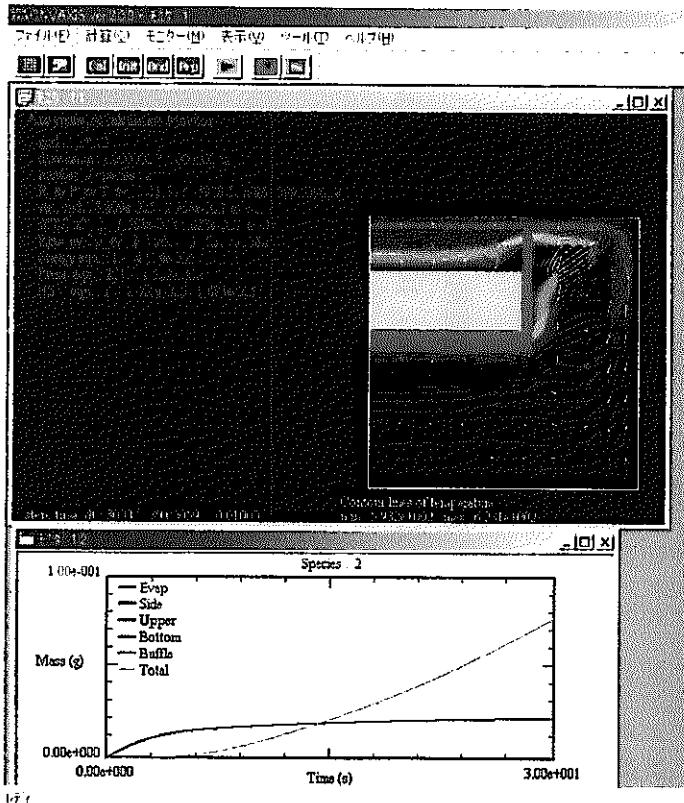
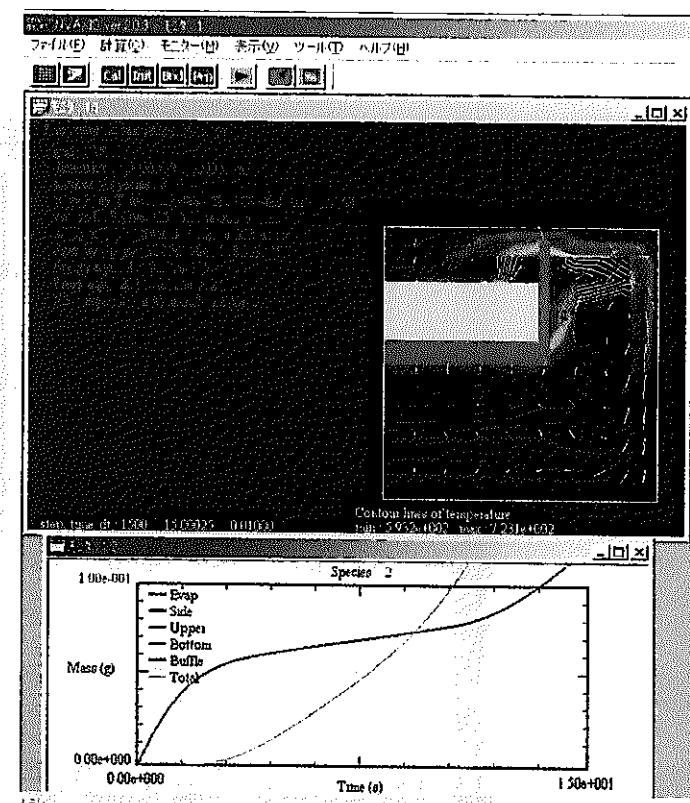


図4-1 (6/6) 解析コード入力データ設定値例
(液面温度 350°C - 600Torr、10×10 メッシュ)



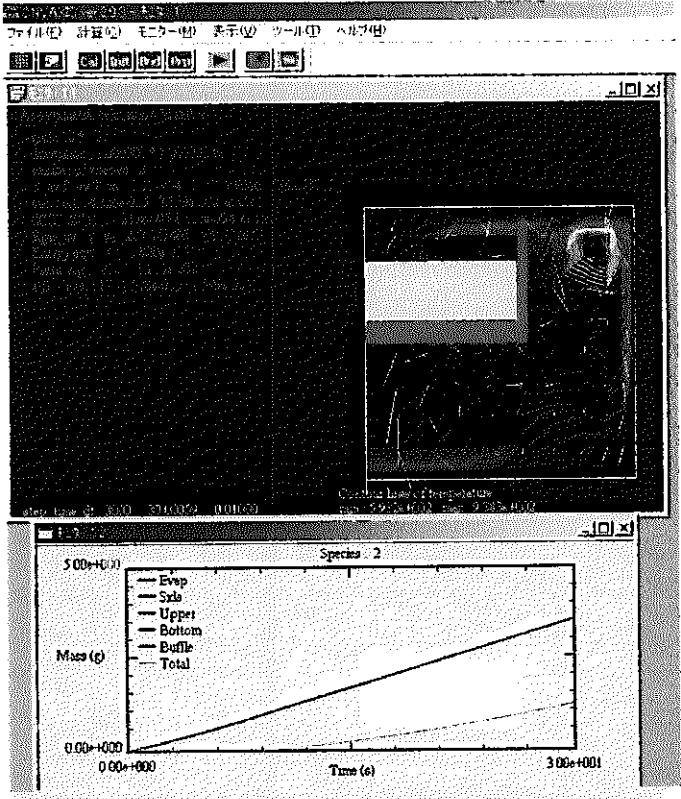
$$\text{蒸発量} : 0.015\text{g}/6\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 2.5\text{E}-7\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-2 解析コード計算結果（液面温度 350°C-30Torr）



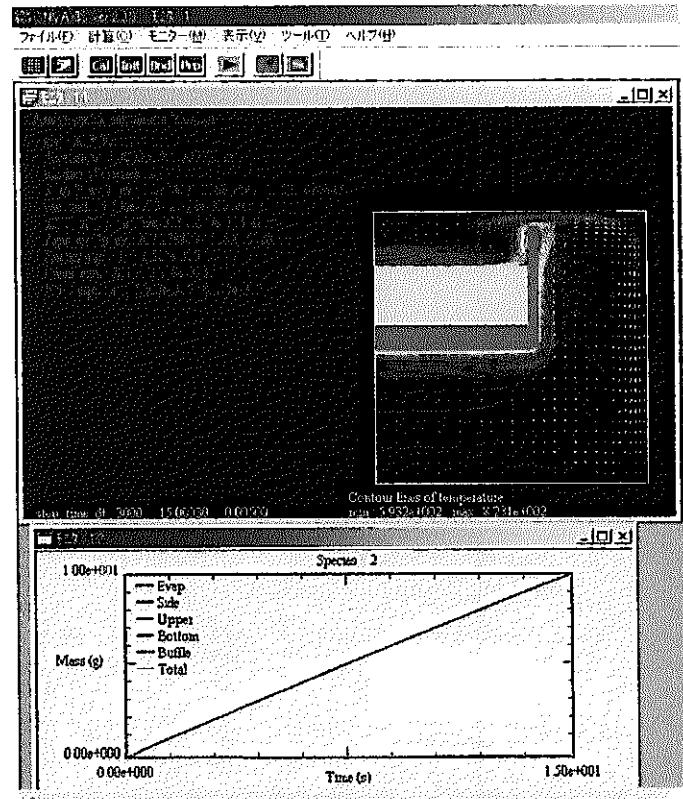
$$\text{蒸発量} : 0.1\text{g}/3.8\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 2.6\text{E}-6\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-3 解析コード計算結果（液面温度 450°C-30Torr）



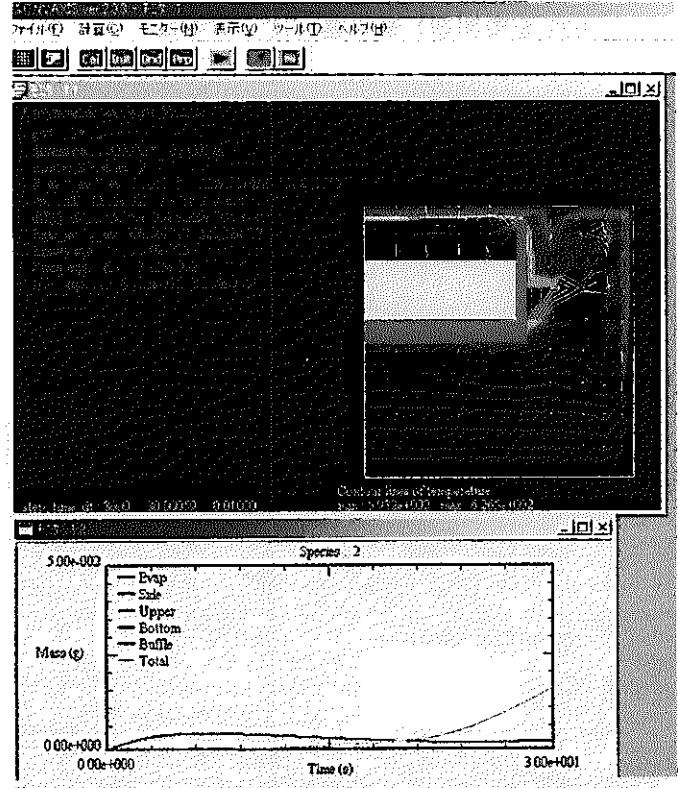
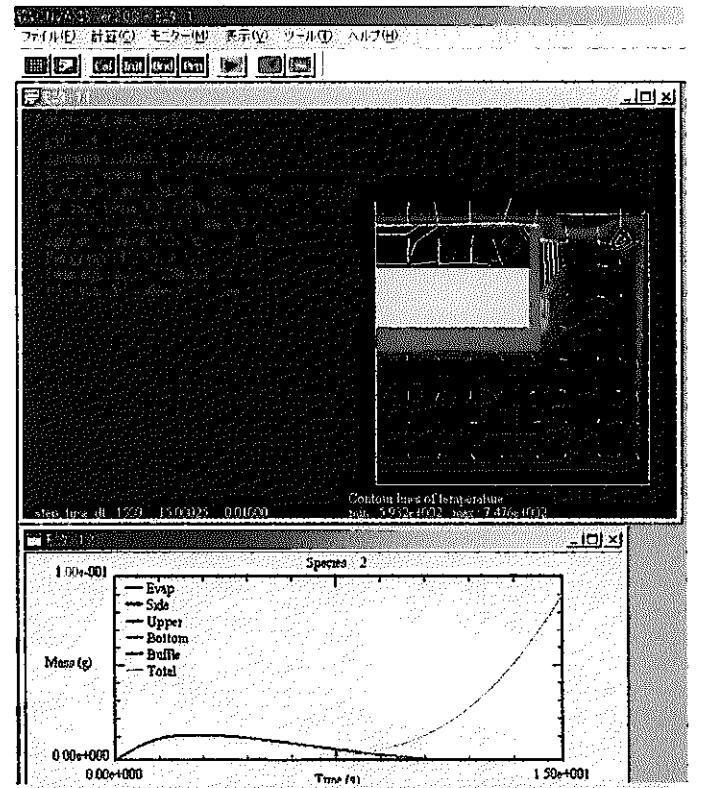
$$\text{蒸発量: } 3.5\text{g}/30\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 1.2\text{E}-5\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

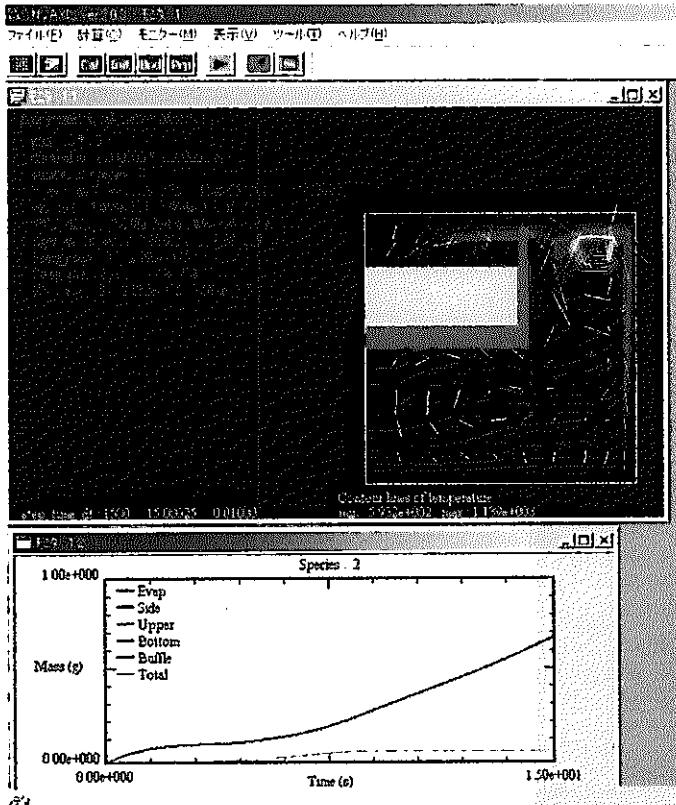
図4-4 解析コード計算結果（液面温度 550°C-30Torr）



$$\text{蒸発量: } 10\text{g}/15\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 6.7\text{E}-5\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

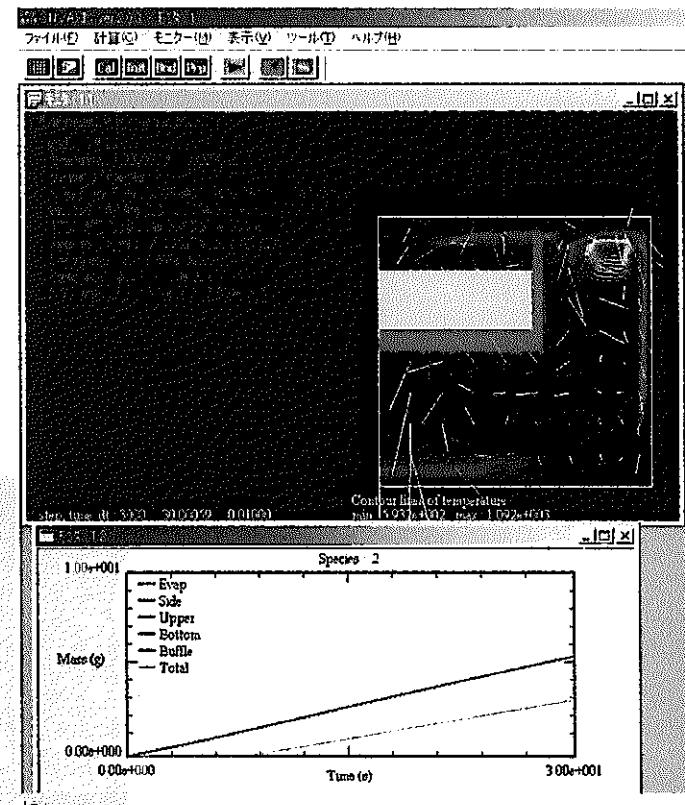
図4-5 解析コード計算結果（液面温度 550°C-30Torr、30×30 メッシュ）

図 4-6 解析コード計算結果（液面温度 350°C - 100Torr）図 4-7 解析コード計算結果（液面温度 450°C - 100Torr）



$$\text{蒸発量} : 0.1\text{g}/2.25\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 4.4\text{E}-6\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-8 解析コード計算結果（液面温度 550°C-100Torr）



$$\text{蒸発量} : 5.3\text{g}/30\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 1.8\text{E}-5\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-9 解析コード計算結果（液面温度 600°C-100Torr）

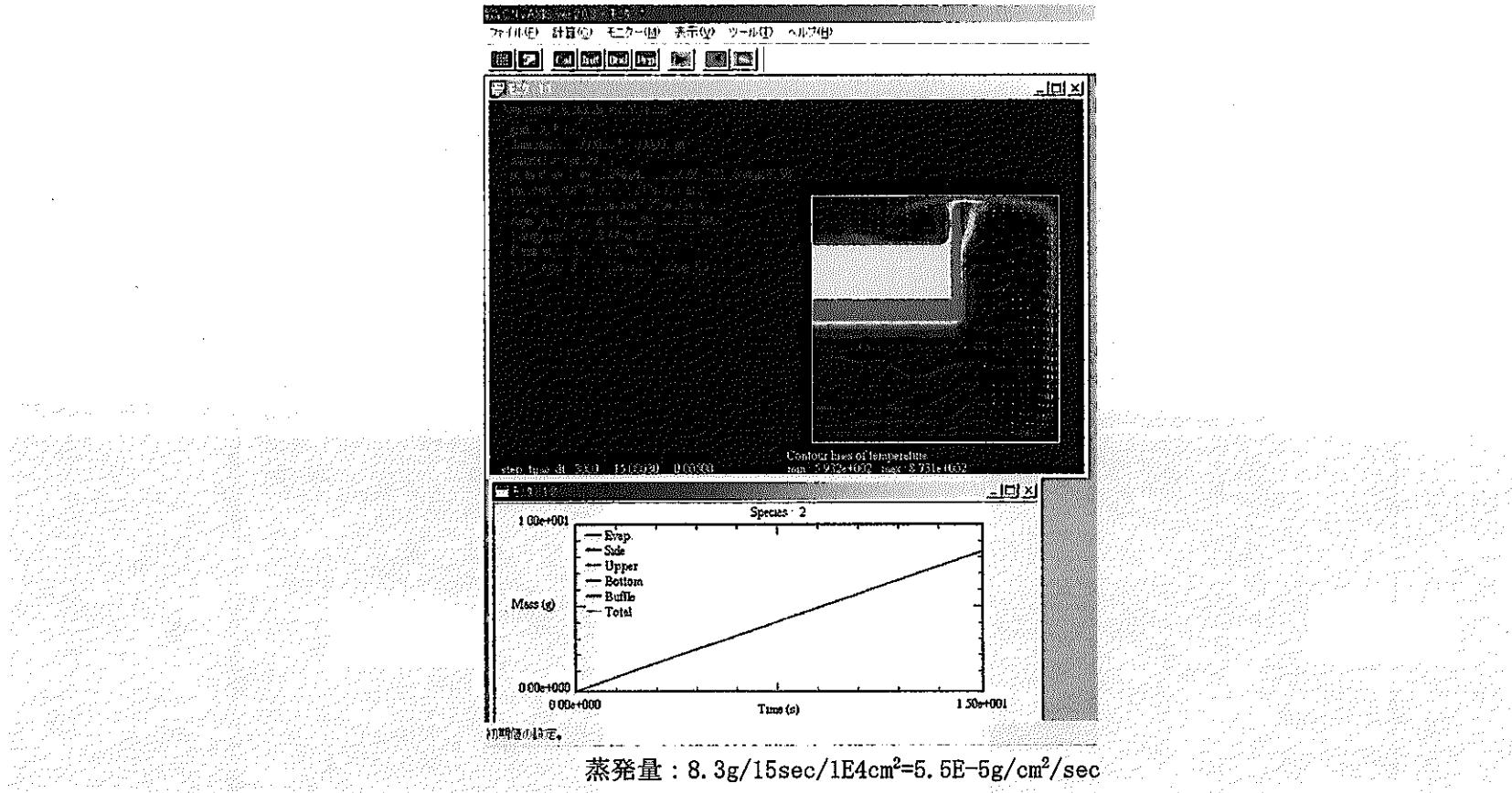
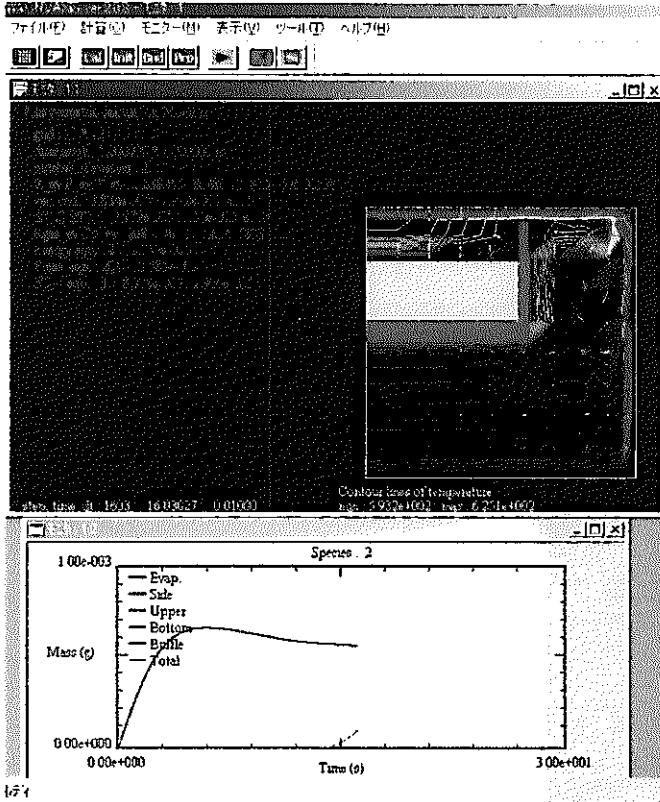
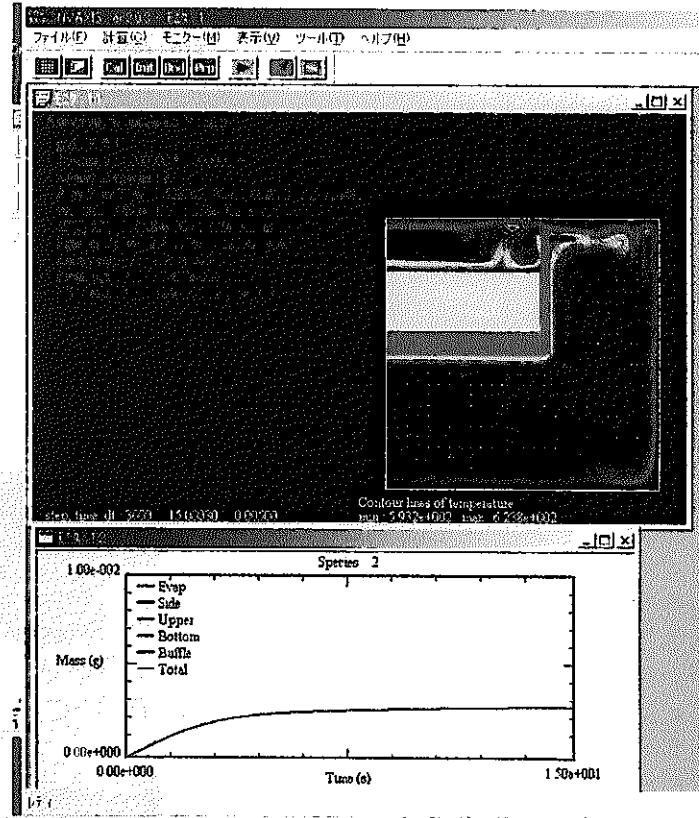


図 4-10 解析コード計算結果（液面温度 600°C-100Torr、30×30 メッシュ）



$$\text{蒸発量} : 0.001\text{g}/4.5\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 2.2\text{E}-8\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-11 解析コード計算結果(液面温度 350°C - 600Torr)



$$\text{蒸発量} : 0.02\text{g}/3\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 6.7\text{E}-8\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-12 解析コード計算結果(液面温度 350°C - 600Torr
、30×30 メッシュ)

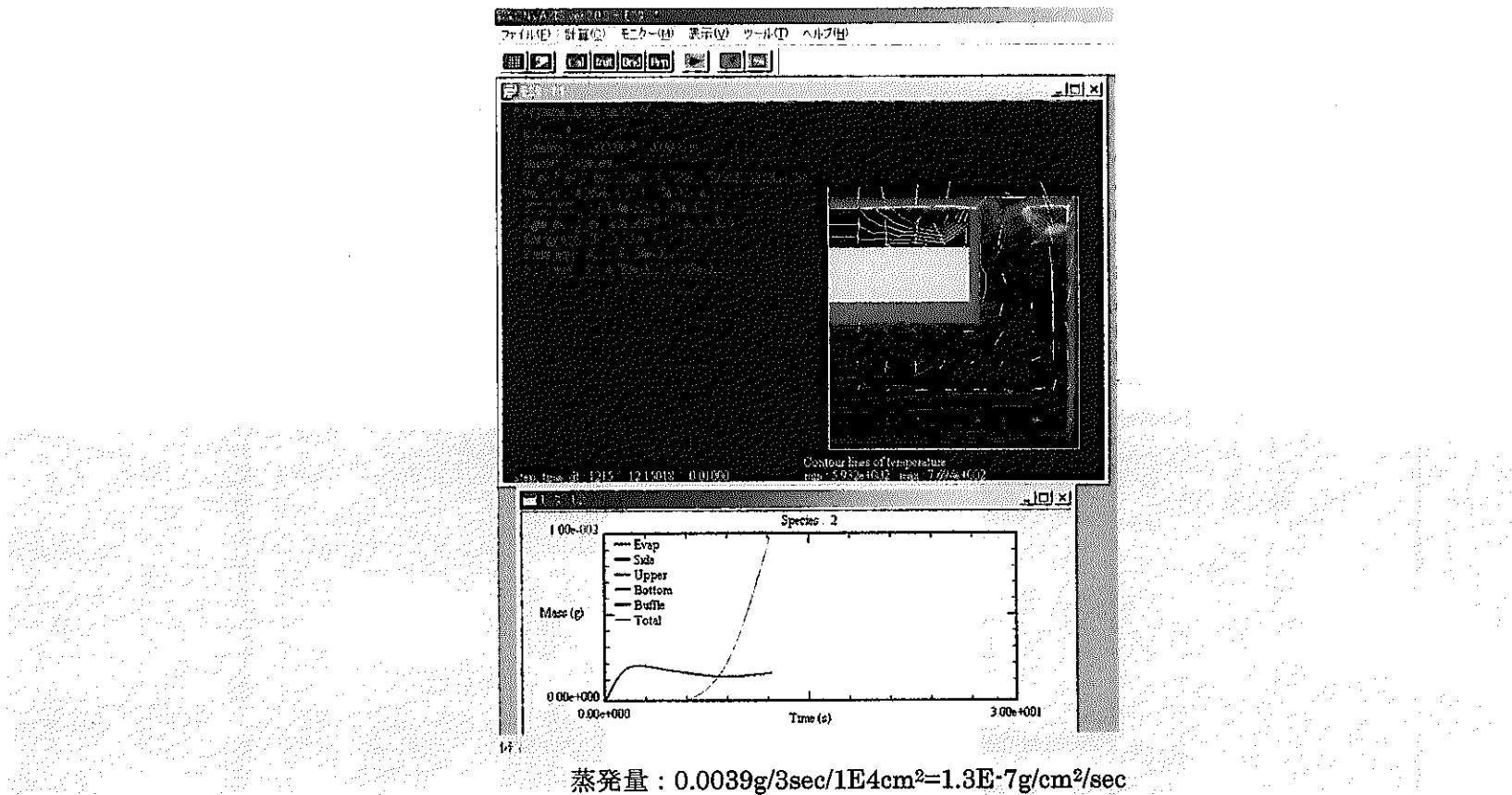
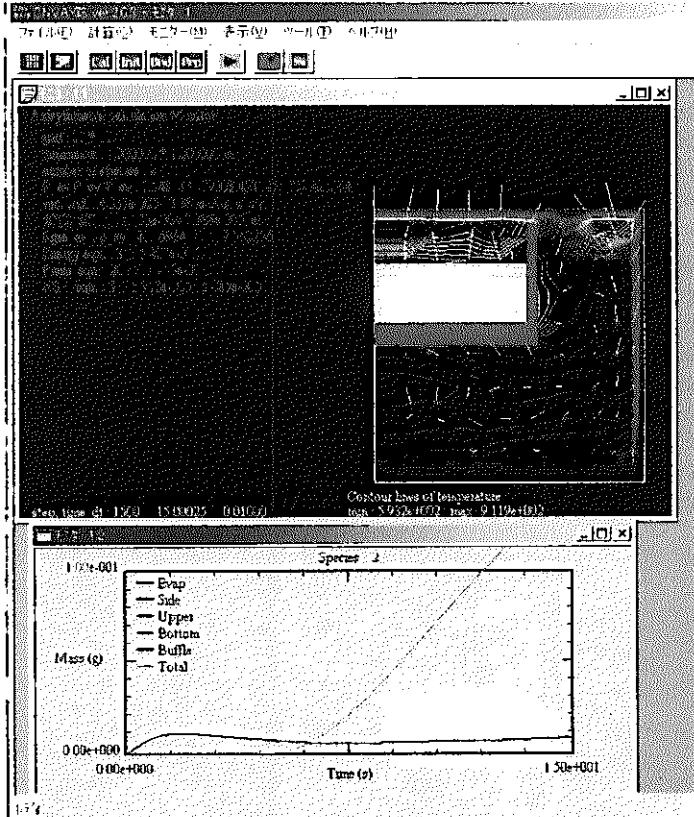
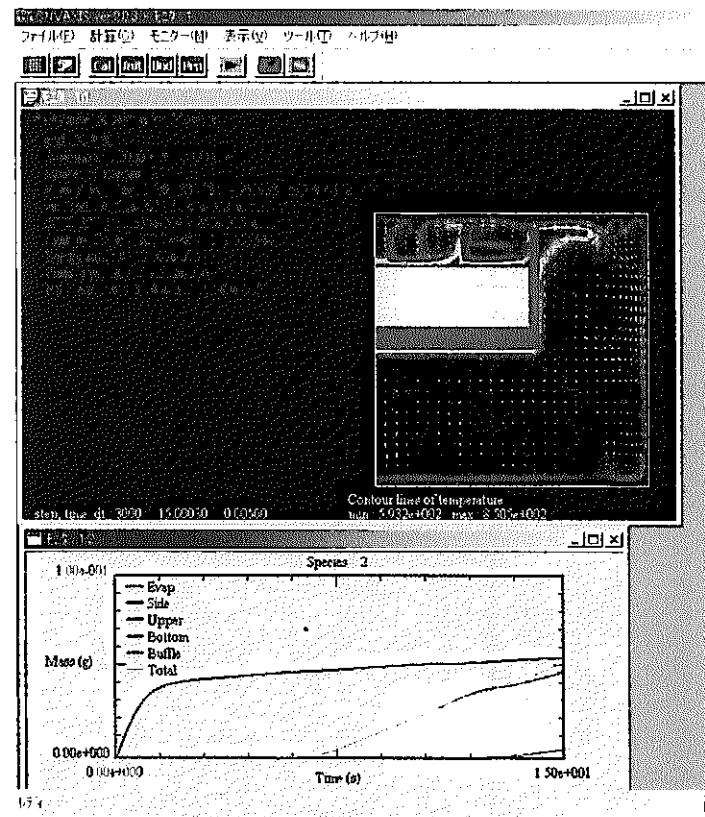


図 4-13 解析コード計算結果（液面温度 450°C - 600Torr）



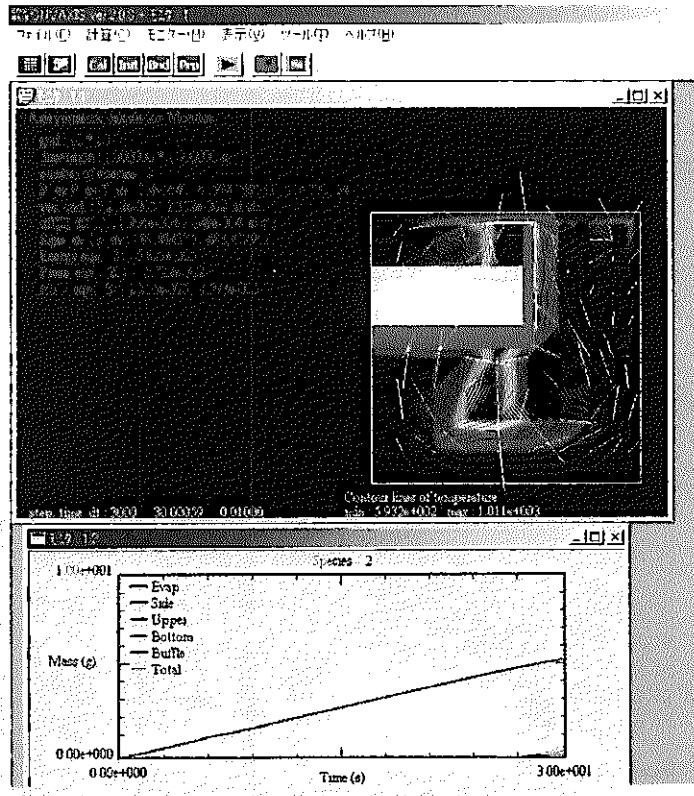
$$\text{蒸発量} : 0.01\text{g}/1.5\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 6.7\text{E}-7\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-14 解析コード計算結果（液面温度 550°C-600Torr）



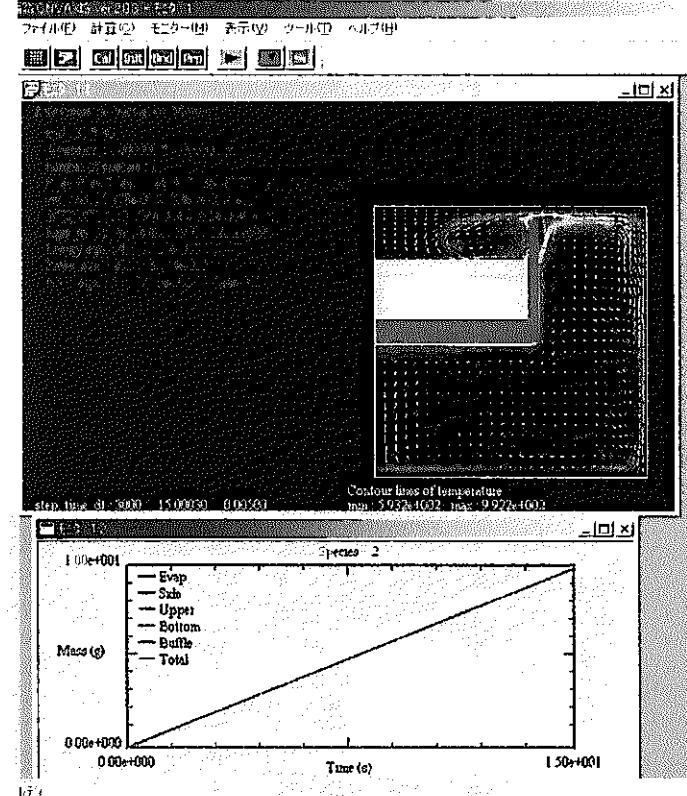
$$\text{蒸発量} : 0.1\text{g}/3\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 3.3\text{E}-6\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-15 解析コード計算結果（液面温度 550°C-600Torr
、30×30 メッシュ）



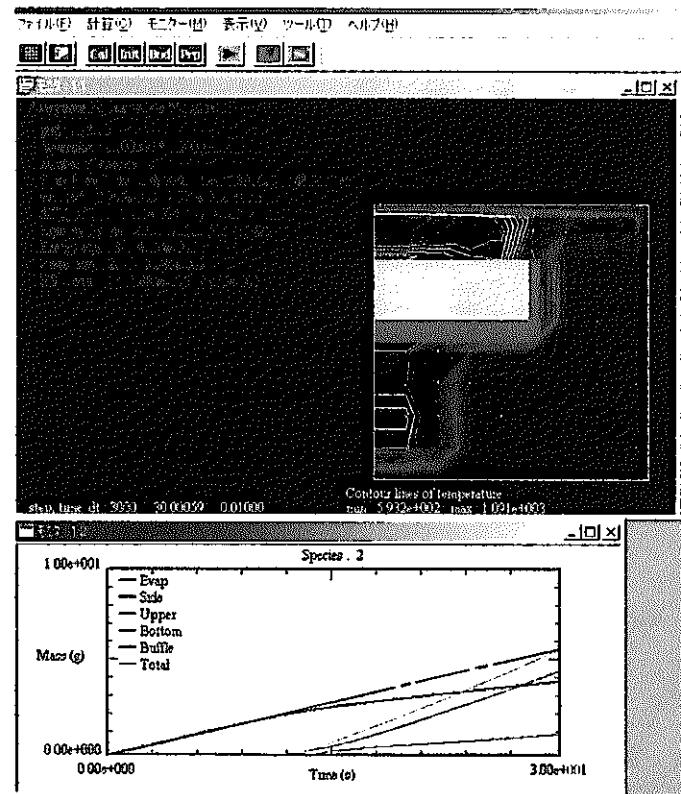
$$\text{蒸発量: } 5.2\text{g}/30\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 1.7\text{E-}5\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-16 解析コード計算結果（液面温度 700°C – 600Torr）



$$\text{蒸発量: } 9.8\text{g}/15\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 6.5\text{E-}5\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-17 解析コード計算結果（液面温度 700°C – 600Torr、
30×30 メッシュ）



$$\text{蒸発量} : 5.6\text{g}/30\text{sec}/1\text{E}4\text{cm}^2 = 1.9\text{E}-5\text{g/cm}^2/\text{sec}$$

図 4-18 解析コード計算結果（液面温度 700°C - 600Torr、るつぼ開放）

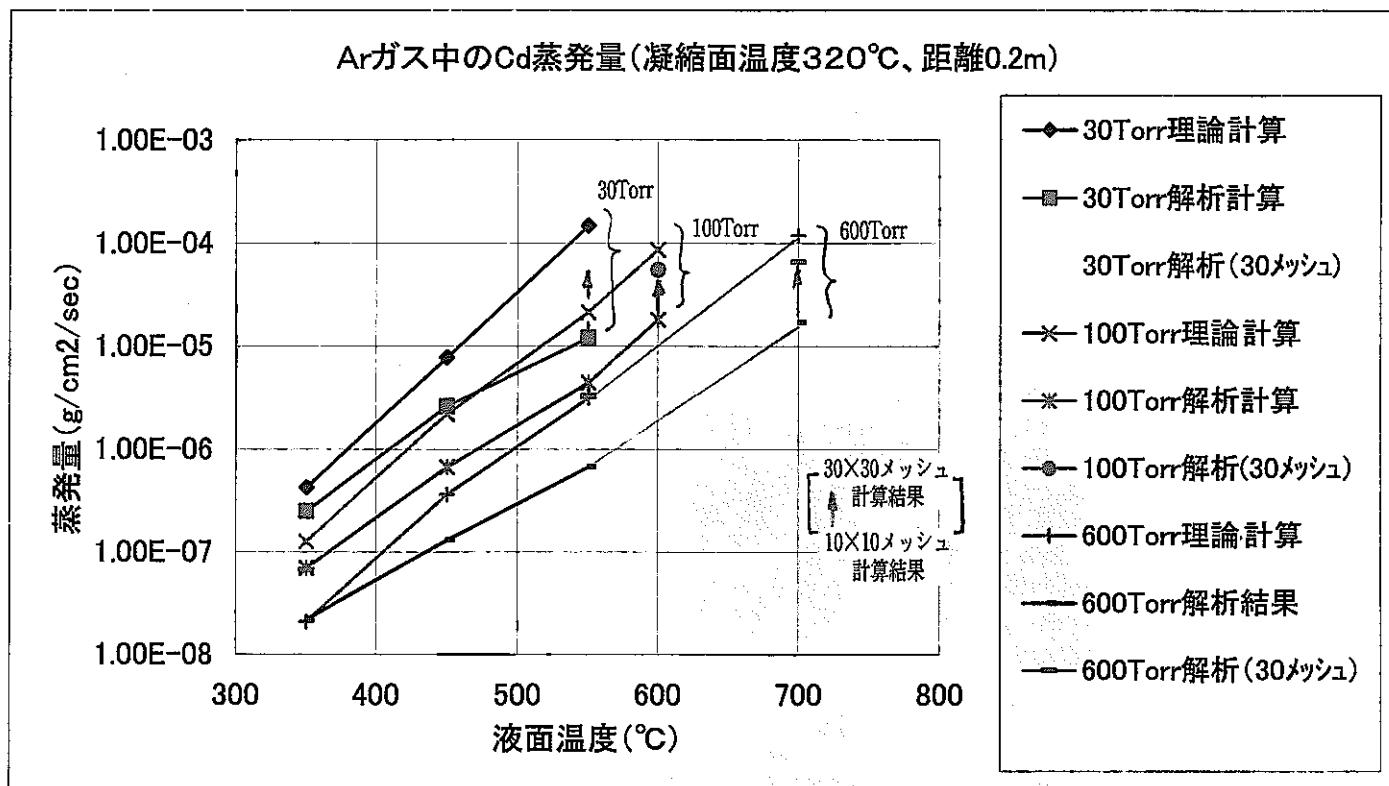


図 5-1 理論計算と解析計算結果の比較 (容器内圧力 30、100、600Torr)

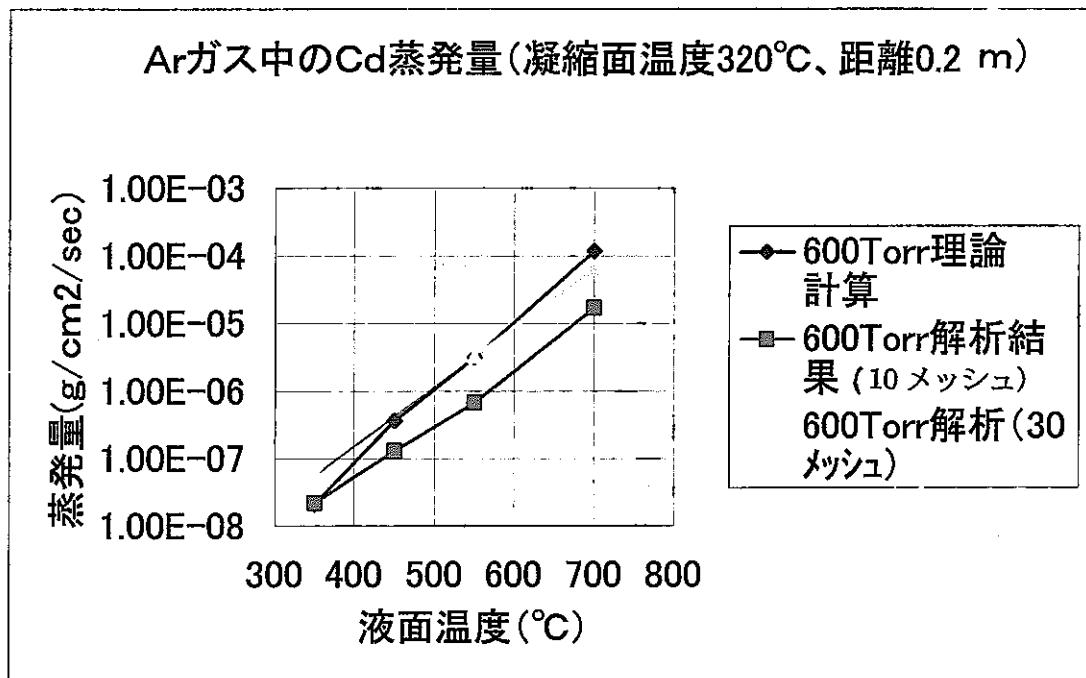


図 5-2 理論計算と解析計算結果の比較 (容器内圧力 600Torr)

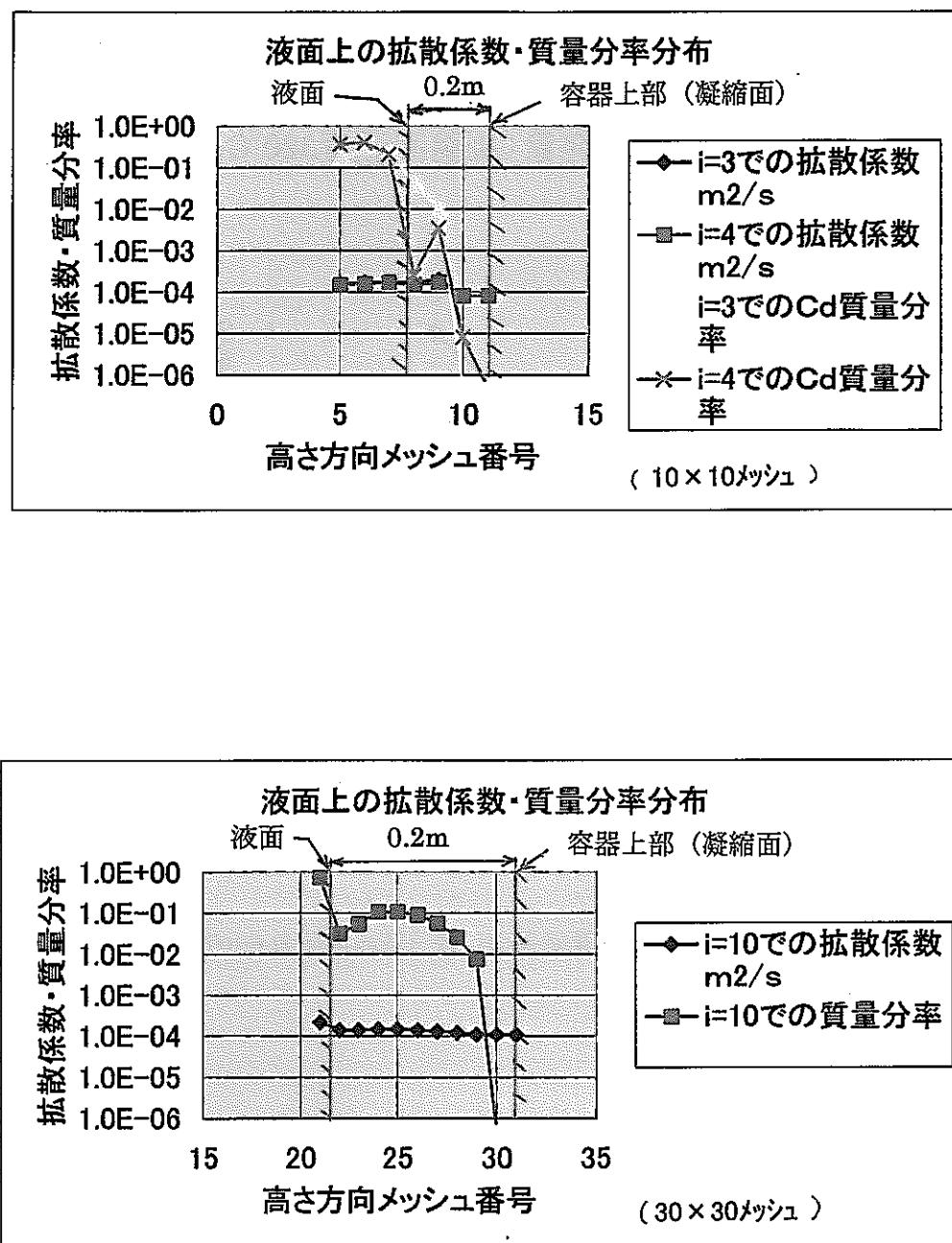


図 5－3 液面上の拡散係数・質量分率分布（液面温度 700°C – 600Torr）

添付資料

カソードプロセッサ蒸留解析コードの基礎式²⁾

カソードプロセッサ蒸留解析コードの開発

1 蒸留解析コードの計算領域

カソードプロセッサ体系に対する本蒸留解析コードの計算領域を図-1に示す。図示する通り本コードでは、るつぼ液面からの蒸発物質の蒸発挙動に着目したものであり、蒸発物質は蒸発面から自然対流及び物質移動（拡散）によりバッフル板、装置上面、装置側壁面へ移動し、それぞれの箇所での蒸発物質の凝縮量が求められる。また、本コードでは、カソードプロセッサ下部は断熱壁と想定しているため、実機体系での回収るつぼは想定していない。

本解析コードは、蒸発面での飽和蒸気圧及び固体壁温度を境界条件とし、装置内での対流・拡散挙動についてのみ評価を行なう。

2 プログラム概要

本計算プログラムは、円筒状密閉容器内における多成分混合気体の対流・拡散現象を再現する数値シミュレーションコードである。

名称：CNVAXIS（実行ファイル：cnvaxis.exe）

(1) 主な仕様

①軸対称圧縮性ナビエ・ストークス方程式に基づく直接数値解析法（DNS）に基づく。（ただし、圧力伝播に関しては0マッハ数近似を用いているため、高速流問題への適用は困難である。）

②重力項（浮力）の影響を考慮しているため熱対流問題への適用が可能である。

③多成分の濃度拡散を考慮している。（最大7種の成分まで設定可能である。）

④流体に関しては、理想気体の状態方程式を満たす气体とする。

(2) カソードプロセッサのモデル化

① 境界条件

・本コードにて蒸発成分の物質移動及び温度分布を計算するための境界条件としては、以下の項目を設定し、入力条件とした。

（温度）

るつぼ液面温度

るつぼ外表面温度

装置上壁温度

装置横壁温度

装置下壁温度

（蒸発成分濃度）

るつぼ液面での各蒸発成分の濃度

装置上壁での各蒸発成分の濃度

装置横壁での各蒸発成分の濃度

装置下壁での各蒸発成分の濃度

* 各蒸発成分の濃度 : n_i^0 は、以下の式に基づき各蒸発成分の飽和蒸気圧から求める。

$$n_i^0 = \frac{P_i^0 V}{RT} \quad (P_i^0 : \text{各蒸発成分のある温度における飽和蒸気圧})$$

本コードでは、液面及び壁面での気-液平衡を仮定している。

②物質移動のモデル化

- ・るつぼ液面（気・液界面）においては、蒸発成分は気-液平衡に達しているとみなし、蒸発成分は液面において濃度勾配による拡散のために上方の気体境界層に移動した後、対流及び気体中の拡散により空間中に移動する。
- ・液面上の空間（気体中）に移動した蒸発成分は、容器内の空間全体における温度差及び濃度差に起因する密度差によって誘起される拡散、対流により空間を移動する。
- ・空間内に広がった蒸発成分は、装置壁面に形成された気体境界層に至り、境界層内の対流と拡散及び装置壁面（正確には凝縮液膜表面；ただし、本コードでは液膜の厚さ及び熱抵抗は無視）での濃度勾配による拡散により気相中から壁面へ移行する。
- ・装置壁面での各種蒸発成分の凝縮量は、壁面での蒸発成分の分圧を飽和蒸気圧と仮定し、計算によって求まる壁面での蒸発成分の濃度が、この蒸気圧から求めた濃度以上になった場合（以下の式の関係を満たす場合）、蒸発成分は全て壁面に凝縮する。

$$n_i' > n_i^0 = \frac{P_i^0 V}{RT}$$

n_i' : 計算によって求まる蒸発成分の濃度

n_i^0 : 平衡蒸気圧より求まる蒸発成分の濃度

- ・蒸発速度 (g/s) は、各蒸発成分について拡散係数 (cm²/s) (式(8)参照) を算出し、この拡散係数に各蒸発成分の密度及びるつぼ液面面積を掛けることにより求められる。
(式 (13) 式参照)

③マスバランスのモデル化

- ・体系全体での蒸発成分のマスバランスに関しては、液面からの蒸発量から容器壁面での凝縮量を差し引いた残りが空間中に気相で存在する蒸発成分の量とする。

④温度分布のモデル化

- ・るつぼと装置壁面の間の空間での半径方向温度分布は、るつぼ外表面に設定した温度と装置壁面に設定した温度を境界条件として、空間内の蒸発成分の対流熱輸送及び熱伝導、気体と装置壁面間の対流熱伝達からなる伝熱により、温度分布が決定される。

⑤蒸気圧と液体組成のモデル化

- ・本コード内では、蒸気圧（分圧）と液体組成を考慮した関係式は含んでいない。
- ・多成分溶液系での解析を実施する場合は、液体混合系を想定しラウル則を用いて各蒸発成分の飽和蒸気圧に各蒸発成分の重量割合を掛け、補正した飽和蒸気圧を入力条件とすることで対応できる。

(3)動作環境

①CPU

Intel Pentium を使用するパーソナルコンピュータとする。(CPU : 200MHz、メモリ
ー : 64M で起動確認済み)

②OS

Windows 95/98 及び NT4.0 とする。(ただし、Windows95 では、OpenGL ライブラ
リーがインストールされていることが必要である。)

(4)記号表

本計算プログラムで使用する記号を以下に示す。

C	モル濃度
C_p	定圧比熱
D	2体拡散係数
D	拡散係数(多成分系)
g	重力ベクトル
m	分子量
p	圧力
R	普遍気体定数
T	温度
t	時間
u	流速ベクトル
X	モル分率
Y	質量分率
λ	熱伝導率
μ	分子粘性係数
Ω	衝突積分
χ	体積粘性係数
ρ	密度
σ	衝突径

3 基礎式

① 流れ場の支配方程式

容器内の対流拡散現象を支配する方程式は以下の通りである。

質量保存式

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot u \quad (1)$$

運動量保存式

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \left(\chi - \frac{2}{3} \mu \right) (\nabla \cdot u) \delta_{lk} + \mu \left(\frac{du_l}{dx_k} + \frac{du_k}{dx_l} \right) \right\} + \rho g \quad (2)$$

エネルギー保存式

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

化学種質量保存式

$$\rho \frac{DY_i}{Dt} = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) \quad (4)$$

ただし、体積粘性率 χ は、ストークスの関係式を用いて 0 と仮定した。

状態方程式に関しては

$$p = \rho RT \sum_i \left(\frac{Y_i}{m_i} \right) \quad (5)$$

なお、上記支配方程式は、一般的な記述を用いて表記されたものであり、プログラム内部では、軸対象 2 次元座標系で記述されている。

② 混合気体の輸送特性

化学種ごとの輸送係数（粘性係数、熱伝導係数、拡散係数）の計算には、分子動力学に基づく算出式^{1), 2), 3)}

$$\mu_i = 2.6693 \times 10^{-5} \times \frac{\sqrt{m_i T}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}} \quad [\text{g/cm}\cdot\text{s}] \quad (6)$$

$$\lambda_i = 1.9891 \times 10^{-4} \times \frac{\sqrt{T/m_i}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}} \quad [\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{K}] \quad (7)$$

$$D_{ij} = 1.8583 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{T^3 \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)}}{p \sigma_{ij}^2 \Omega_{ij}^{(1,1)}} \quad [\text{cm}^2/\text{s}] \quad (8)$$

を用いている。ここで、 D_{ij} は 2 体拡散係数で、多成分混合系での拡散係数 D_{ij} とは厳密には異なるものであるが、両者のずれは 10 % 以内であることが知られているため、 $D_{ij} \approx D_{ij}$ とした。

混合気体系での粘性係数、熱伝導係数計算には、それぞれ Wilke⁴, Manson and Saxena⁵による近似公式、

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{1 + \frac{1}{X_i} \sum_{j \neq i} \Phi_{ij} X_j} \quad (9)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{1 + \frac{1.065}{X_i} \sum_{j \neq i} \Phi_{ij} X_j} \quad (10)$$

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(1 + \frac{m_i}{m_j} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{m_i}{m_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \quad (11)$$

を用いた。

また、多成分系での有効拡散係数 D_i は、

$$\frac{1}{D_i} = \sum_{j \neq i} \frac{X_j}{D_{ij}} \quad (12)$$

とした。

なお、溶融金属（組成 i ）の液面からの蒸発量は、上記有効拡散係数 D_i と液面近傍での i 種気体濃度勾配から、 i 種の質量流速 M_{fluxi} として求めることができる。

$$M_{fluxi} = \rho D_i \times \frac{dY_i}{dn} \quad [\text{g}/\text{s}/\text{cm}^2] \quad (13)$$

混合気体の定圧比熱は、

$$C_{p,i} = A_0 + A_1 \bar{T} + A_2 \bar{T}^2 + A_3 \bar{T}^3 + A_4 \bar{T}^4 + A_5 \bar{T}^5 + A_6 \bar{T}^6 \quad [\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}] \quad (14)$$

$$C_p = \sum_i^N Y_i C_{p,i} \quad (15)$$

より求める。ただし、 $\bar{T} = T/1000$ とする。

(3) 計算手法

(1) 圧力ポワソン方程式

前節で示した流れ場の各種保存式（質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、化学種質量保存式）の解法は、差分法による直接数値シミュレーションに基づいて行われる。特に本解法では、運動量保存式より圧力場に関するポワソン方程式、

$$\nabla^2 p = -\rho \frac{d(\nabla \cdot u)}{dt} - \rho \nabla \cdot (u \cdot \nabla) p + \frac{1}{\rho} \nabla \rho \cdot \nabla p + \nabla \cdot \rho g \quad (15)$$

を導き出し、速度ダイバージェンスに関しては、

$$\nabla \cdot u = -\frac{C_p - R}{C_p p} \frac{Dp}{Dt} + \frac{1}{\rho C_p T} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (16)$$

を用いている。上式は、質量保存式、エネルギー保存式、状態方程式より得られるものであり、この式の導入により、エネルギー輸送の効果を圧力場の変化に反映させている。

(2) 離散化

差分法における離散化は、時間積分にオイラー陰解法、対流に関する空間微分項には3次精度風上差分法⁶⁾、それ以外の空間微分項には2次精度中心差分法を用いている。それぞれの離散化に関する表記は以下の通りである。

オイラー陰解法

$$\frac{df}{dt} = \frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta t} = L[f^{n+1}] + O(\Delta t) \quad (17)$$

3次精度風上差分法

$$u_i \frac{df}{dx_i} = u_i \frac{-f_{I+2} + 8f_{I+1} - 8f_{I-1} + f_{I-2}}{12\Delta x_i} + |u_i| \frac{f_{I+2} - 4f_{I+1} + 6f_I - 4f_{I-1} + f_{I-2}}{4\Delta x_i} + O(\Delta x_i^3) \quad (18)$$

2次精度中心差分法

$$\frac{df}{dx_i} = \frac{f_{I+1} - f_{I-1}}{2\Delta x_i} + O(\Delta x_i^2) \quad (19)$$

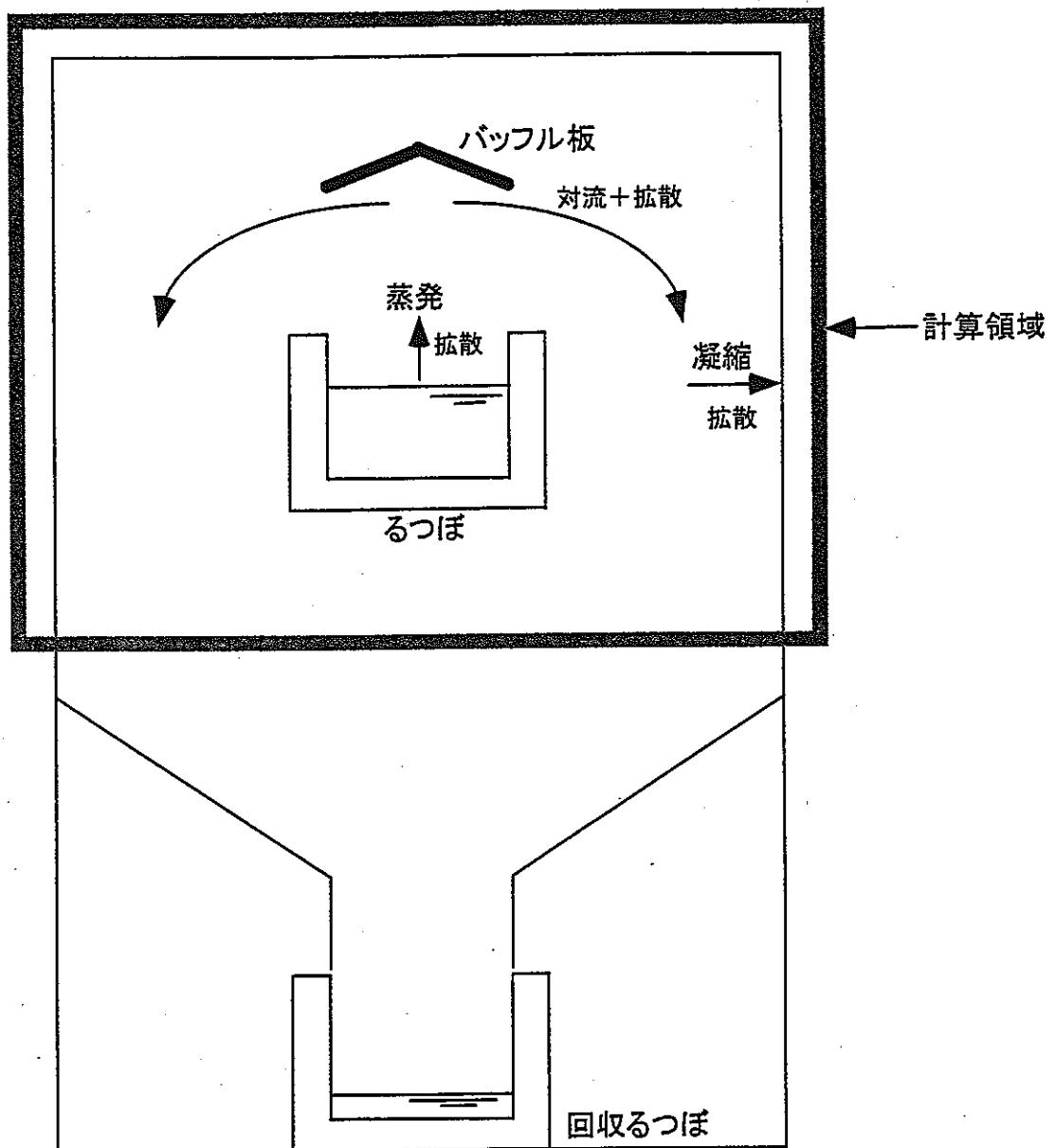


図-1 蒸留解析コードの計算領域

第Ⅱ編 プロセスセル冷却系検討及び除熱評価

1. 検討のねらいとセル冷却系の除熱方式及び冷却系基本概念

(1) 本検討のねらい

乾式リサイクルシステムでは、ホットセル中での高温プロセスとなる。具体的には金属電解法の燃料処理セルでは溶融塩電解槽及びカソードプロセッサが 500°C～1400°Cといつた高温で運転し、酸化物電解法でも溶融塩電解槽が 600°C程度の高温で運転する。このため、こうした高発熱機器からの放散熱により機器表面の雰囲気温度が上昇するとともに、セル内の照明による発熱とあいまって、セル雰囲気全体の温度が上昇することとなる。

このため、機器周辺のローカルな過度の温度上昇を防止するとともにセル全体の温度を効率よく低下でき、かつダクト配置や物量増加にも配慮したセル内雰囲気の調整方法が課題となる。セル雰囲気調整系については定常時のセルの冷却フローによってセル内の温度分布が異なり、高発熱機器の表面温度が高くなることから表面温度を低減するためになんらかの対応が必要であると考えられる。

このため、本検討では、セル内の複数の冷却パターンについてセル内温度及び流況の変動傾向について解析コード PHOENICS を用いてパラメータサーベイし、冷却方式についての指針を得ることをねらいとした。

(2) セル除熱方式

セル冷却系の方式については表 1-1 に示すとおり、高風量循環方式と低風量循環方式の 2 方式がある。セル内の発熱量が多い乾式再処理セルにおいて低風量循環方式をとる場合には表 1-1 に示すように乾式再処理セルのようにセル内発熱量が多い体系では多数の冷却ユニットが必要になり、セルスペースへのインパクトが大きい。このため、ANL などと同様にセル雰囲気冷却系により循環除熱する高風量循環方式を基本とした概念で冷却系の基本概念を検討する。

(3) 冷却系基本概念

平成 11 年度の検討結果¹⁾から、図 1-1 に示すとおり非定常時には機器表面のガス温度は電気品の制限温度 80°C を越える例がある。したがって、高流速、低流速のそれぞれで全体の温度を低減するとともに、過渡時でもセル内温度を維持するには、定常の高流速、低流速条件それぞれで同一流量でも最高温度を低く維持しホットスポットが生じないだけでなく、高流速、低流速条件の間の流況が大きく変化しないことが有利となる。

また、除熱に必要な冷却ガスのダクトの配置についてもセル構造と整合した構造であることが重要である。

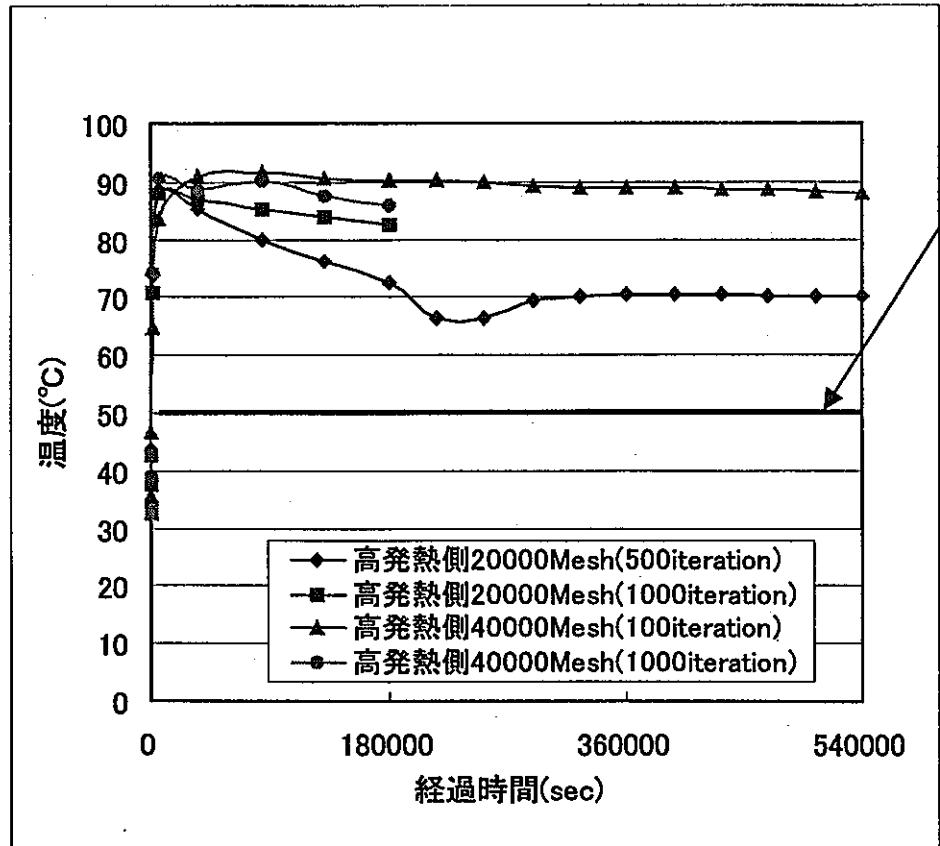
以上を考慮して、効率の良い、配置等の整合性を配慮した冷却方式概念を設定することが重要である。したがって、複数の冷却パターンについて同一流量での除熱性とセル配置との整合性について整理し、セル冷却系の基本概念を明らかにすることを目的として、パラメータサーベイを行う。

表1-1 アルゴンガスセル霧囲気冷却方式の比較

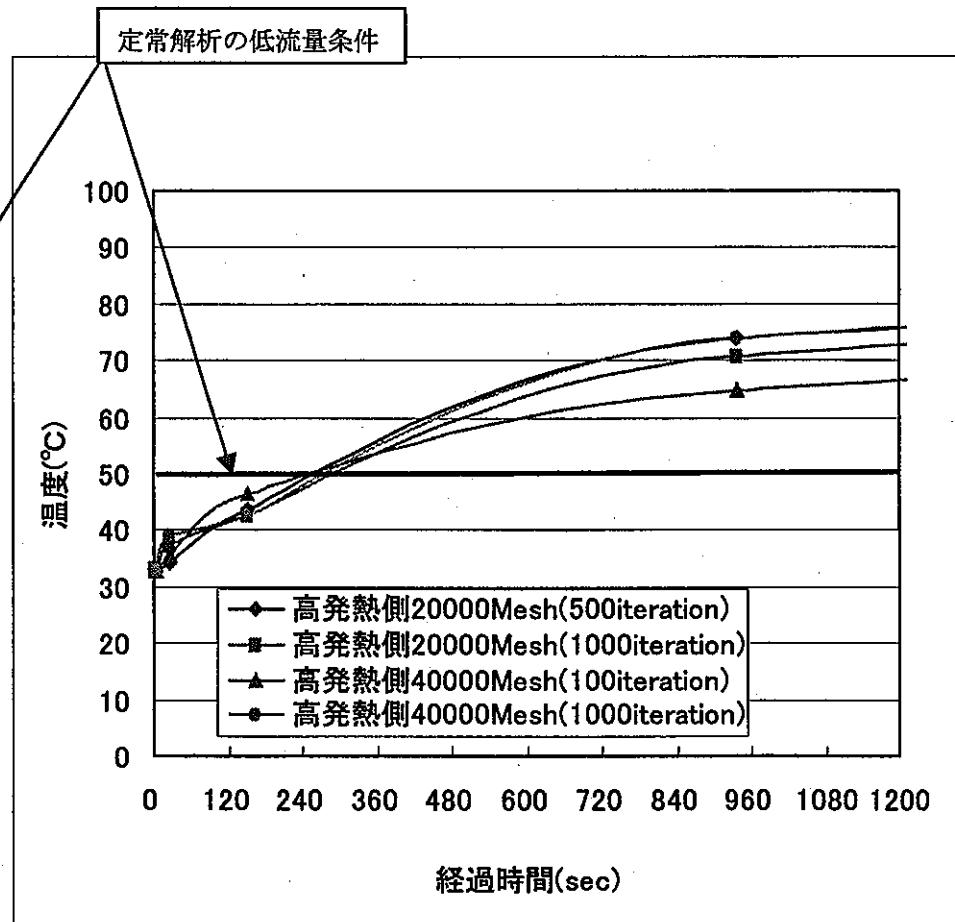
特徴	高風量循環方式 セル内の循環風量を冷却に必要な風量で設定する方式	低風量循環方式 循環は浄化に必要な風量とし、冷却はセル内冷却ユニットにて行う方式
循環系統の物量	▲ 循環風量 主ダクト寸法 フィルタ-ユニット数	○ 80000m ³ /h*1 直径150cm相当 40ユニット（全量）又は4ユニット（部分流量） 800m ³ /h*1 直径15cm相当 1ユニット
セル内の物量	○ (セル内冷却ユニット無し) 多重機・予備機はセル外設置 大口径ダクト引き回し	▲ セル内冷却ユニット 25kW/基×14基*1 冷却ユニットのセル内専有面積大 (幅2m×長28m) ／多重機・予備機含まず) 多重機・予備機はセル内設置 (但し、プロセス運用を考慮することで、 冷却ユニット数削減の余地) 小口径ダクト引き回し
セル境界構造	▲大型隔離ダンパ要 ▲ダクト貫通部ストリーミング対策 一サブセル（フィルタ-ユニット設置）の隣接設置	▲冷媒、給電ペネトレーション追加 ▲冷媒配管コネクタ部の漏洩対策
汚染領域	▲循環ラインの汚染対策 (部分流量フィルタリング時)	○極小化の可能性 (フィルタ-ユニットをセル内に設置)
採用例	FCF アルゴンガス霧囲気セル(ANL)	RETF 試験セル(PNC)

注1：数值はJNC TN9400 98-003先進的燃料サイクルシステムの設計研究より

注2：(○：長所 ▲：短所)



全体グラフ



初期値拡大

図 1-1 セル内ガス温度非定常解析結果（照明レベルでの高発熱燃料側機器中心の短辺方向中心部のガス温度の時間変化）

2. 解析モデルの概要

除熱体系としては通常時は循環冷却系によるセル内通風での強制冷却を想定し、非常時の条件としては、ANL の想定と同様に金属燃料火災に伴う放射性物質の拡散防止と過圧防止、過熱防止のため、SES（安全排気系）に相当するものを設置して、通常時の 1/10 程度の流量を確保することを想定する（もしくは閉ループの自然循環系により除熱を確保することを考慮する）。

また、機器の発熱については通常時は溶融塩電解槽は FP の蓄積分崩壊熱を考慮して他の機器崩壊熱より約 6kW 高い崩壊熱として、セル内総発熱量を 300 kW（照明 100kW, 機器 200kW）となるよう調節した。非常時の条件としては上記の溶融塩電解槽は FP の蓄積分崩壊熱のみで他の機器は崩壊熱を考慮しない微少発熱として合計発熱が通常時の 1/10 を想定し、過熱によりセル内が過圧になって放射性物質の拡散しないような条件を維持する対応を考慮する。

・解析モデル

想定する基本流配パターンとしては以下に示すようなパターンを検討し、冷却効率その他の観点から評価する。

① モデル 1（ケース 1：図 2-1）

入口：天井中央部、各機器の短辺方向側面、

出口：セル長手方向上部側面、各機器の短辺方向側面

② モデル 2（ケース 2：図 2-2）

入口：各機器上部側面、出口：各機器下部側面

③ モデル 3（ケース 3：図 2-3）

入口：天井中央部、出口：セル長手方向側面

④ モデル 4（ケース 4：図 2-4）

入口：天井部各機器直上、出口：各機器短辺方向側面

・解析モデル体系

発熱部の非対称性を考慮できるよう 1/2 対称モデルとする。解析コードとして 3 次元汎用解析コード PHOENICS を用いる。

モデルについてはチェック解析に示した条件が解析できるようにメッシュを考慮して作成する。なお、メッシュの精度は平成 11 年度の解析モデル¹⁾と同等の精度（4 万メッシュ × 2 モデル並）とした。図 2-5 に解析モデル 1、2 のメッシュを、図 2-6 にモデル 3、4 のメッシュを示す。

(2) 解析条件

下記のパラメータサーベイを行なう

- ・冷却ガス：常圧アルゴンガス

・ガス流量：初期（高流速）条件 $80000 \text{Nm}^3/\text{h}$ （入口ガス温度 25°C ）
低流速条件 $8000 \text{Nm}^3/\text{h}$ （入口ガス温度 25°C ）
ただし、1/2 対称モデル化する際の左右の流配は暫定的に発熱量比例とする。即ち

$$\text{高流速条件 } 80000 \text{Nm}^3/\text{h} \times (15\text{kW} \times 3 + 9.1\text{kW} \times 7) / (15\text{kW} \times 3 + 9.1\text{kW} \times 17) = 43545 \text{Nm}^3/\text{h} \rightarrow 13.603 \text{m}^3/\text{s}(\text{at}25^\circ\text{C})$$

$$\text{低流速条件 } 8000 \text{Nm}^3/\text{h} \times (6\text{kW} \times 3 + 0.1\text{kW} \times 7) / (6\text{kW} \times 3 + 0.1\text{kW} \times 17) = 7593 \text{Nm}^3/\text{h} \rightarrow 1.9942 \text{m}^3/\text{s}(\text{at}25^\circ\text{C})$$

ケース 2 については天井上部の入口に 1/3、下部の入口に 2/3 の流量を与える

・発熱量

初期（高流速）条件：合計 300kW

高発熱機器 $15\text{kW}/\text{基} \times 3$ 基、低発熱機器 $9.1\text{kW}/\text{基} \times 17$ 基

（それぞれ表面から均一発熱、ただし、下から 100mm は非発熱）

照明発熱 100kW （天井面から 3.5m 下で均一面の体系、1/2 モデルでは 50kW ）

低流速条件：合計約 40kW

高発熱機器 $6\text{kW}/\text{基} \times 3$ 基、低発熱機器 $0.1\text{kW}/\text{基} \times 17$ 基

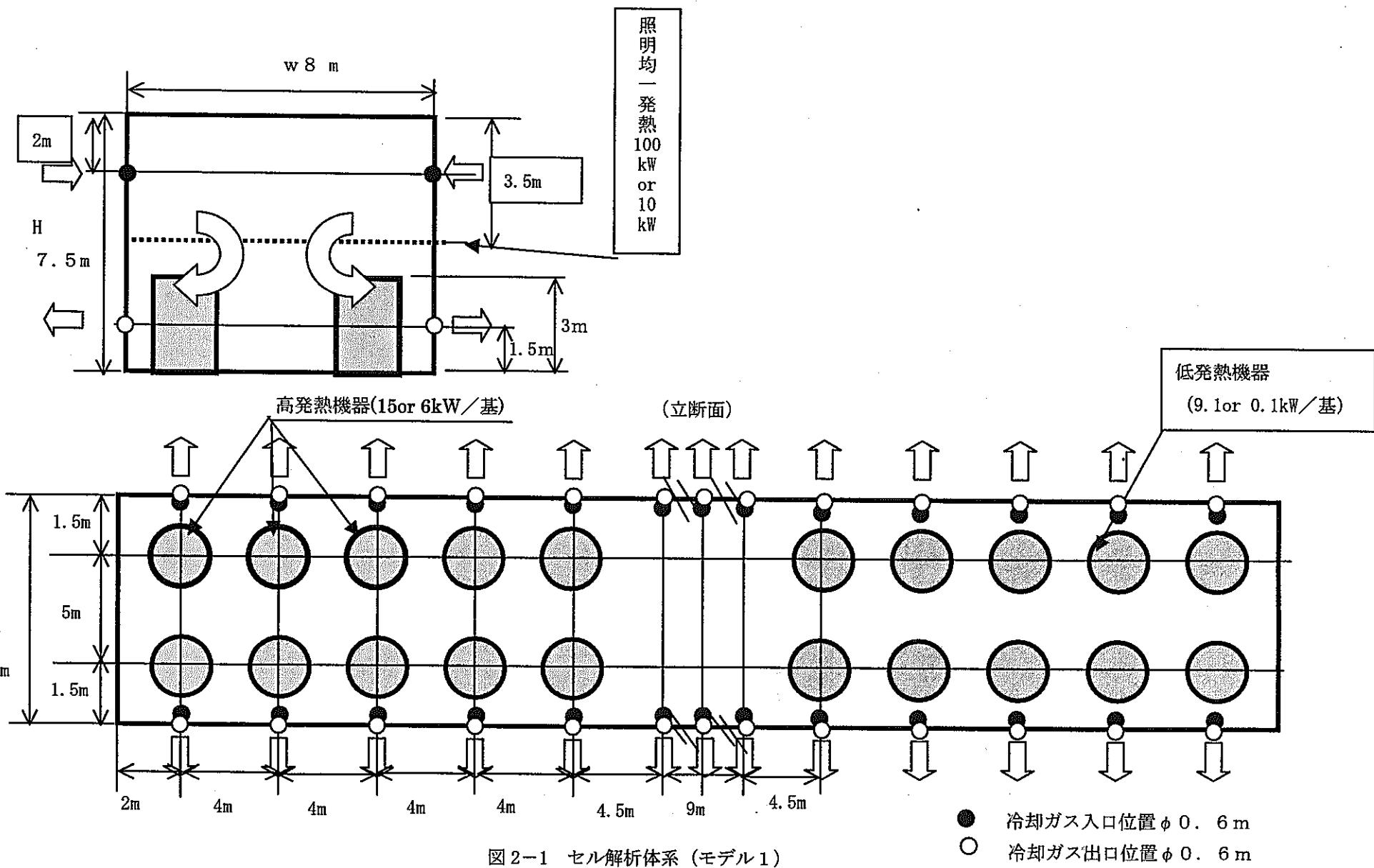
（それぞれ表面から均一発熱、ただし、下から 100mm は非発熱）

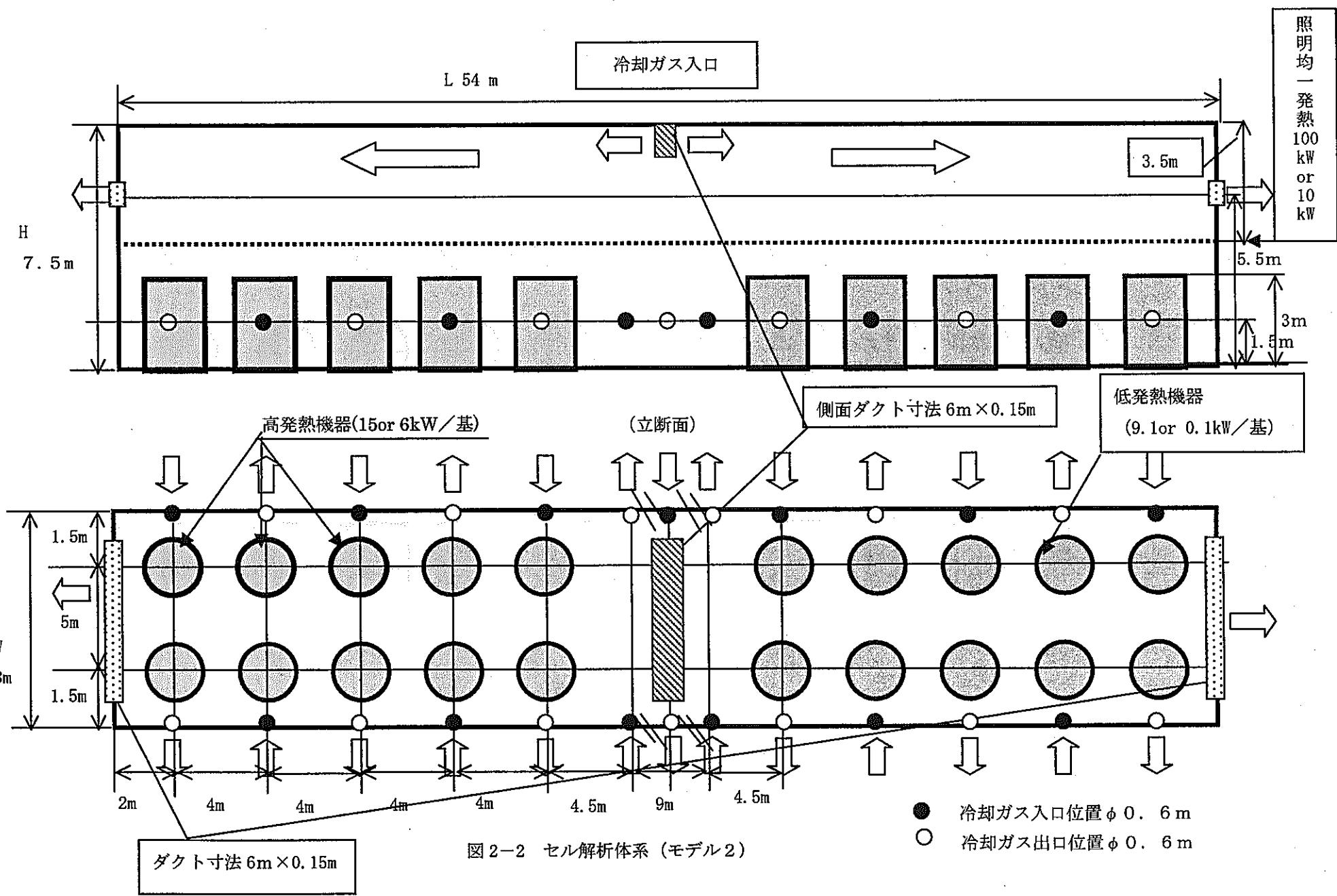
照明発熱 19kW （天井面から 3.5m 下で均一面の体系、1/2 モデルでは 9.5kW ）

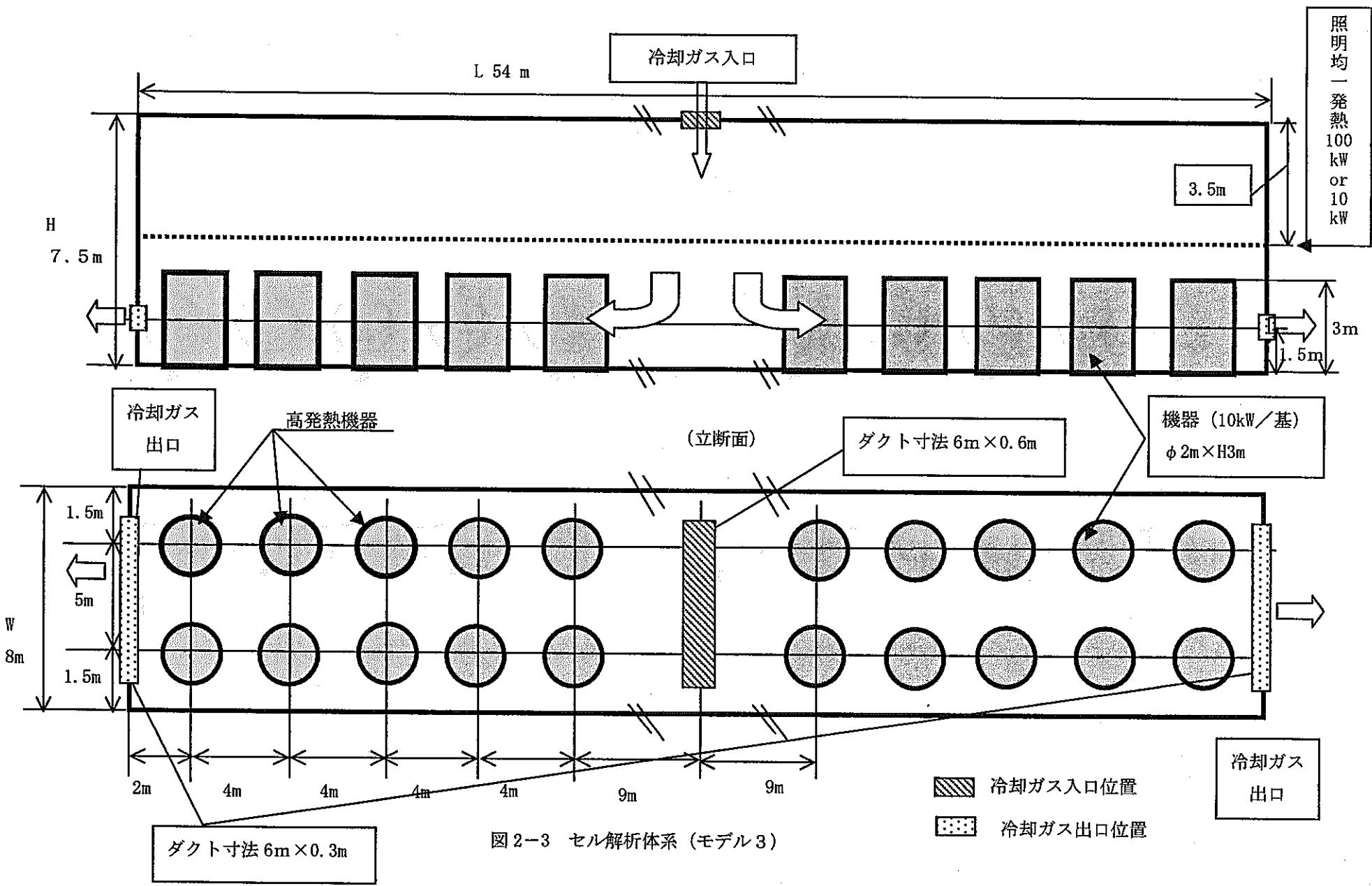
以上の条件からバルクで見ると平均的な出口温度は以下となる

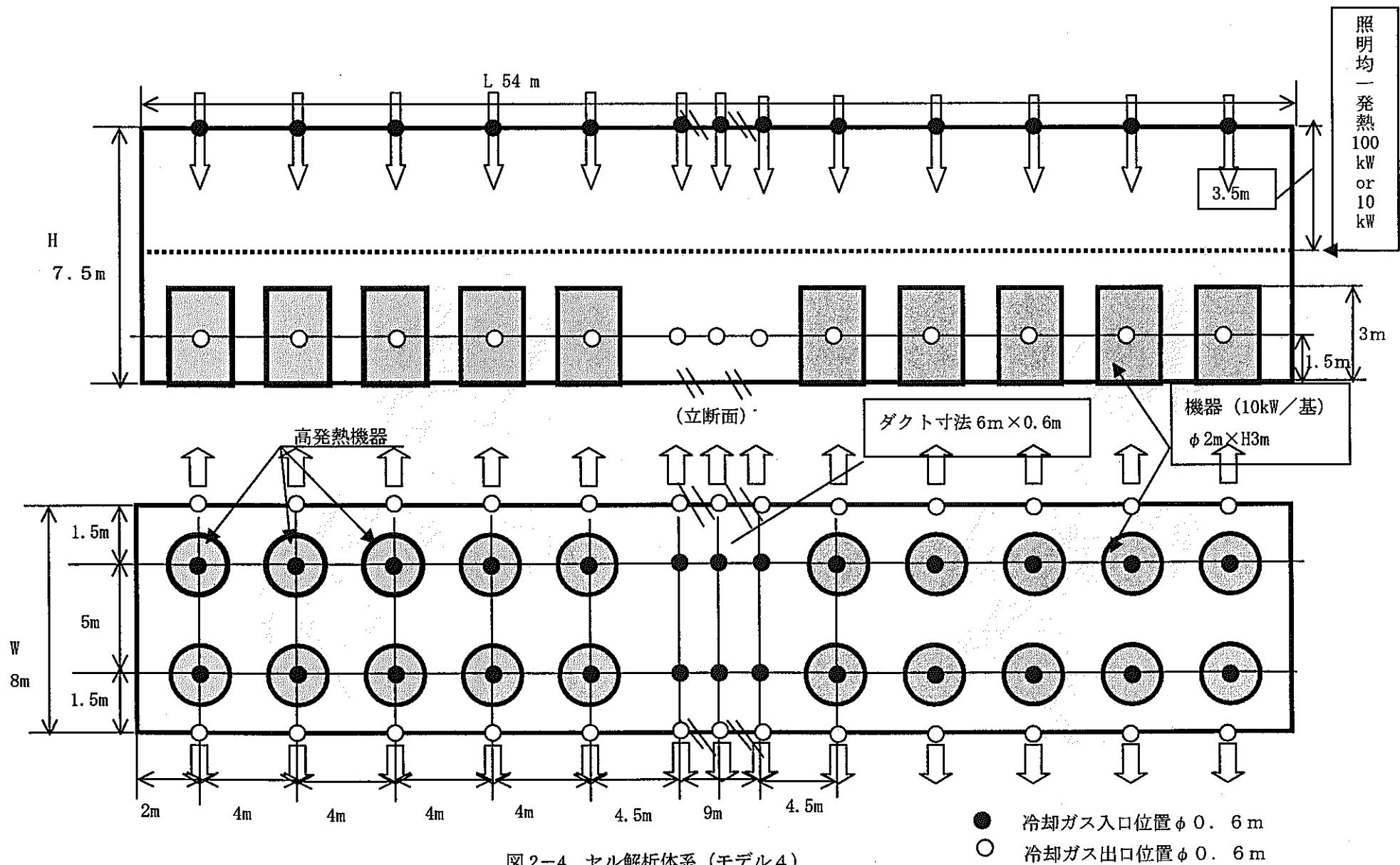
初期（高流速）条件： 38.64°C

低流速条件 : 41.53°C









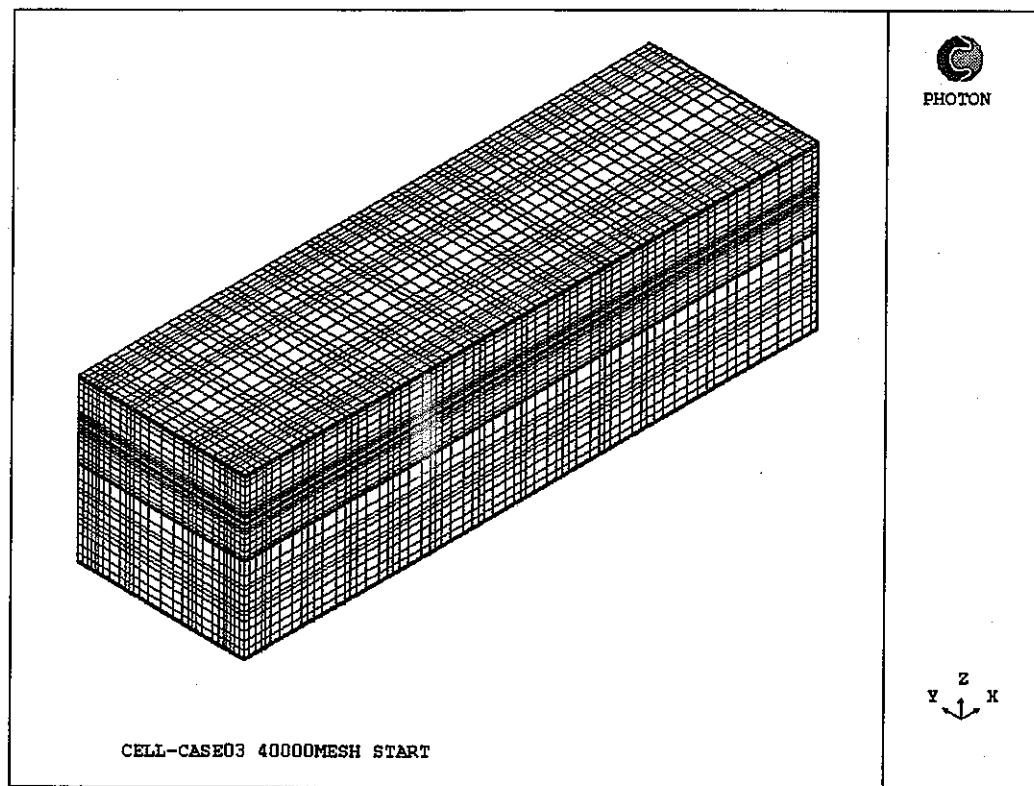


図 2-5. CASE1、2 の解析メッシュ

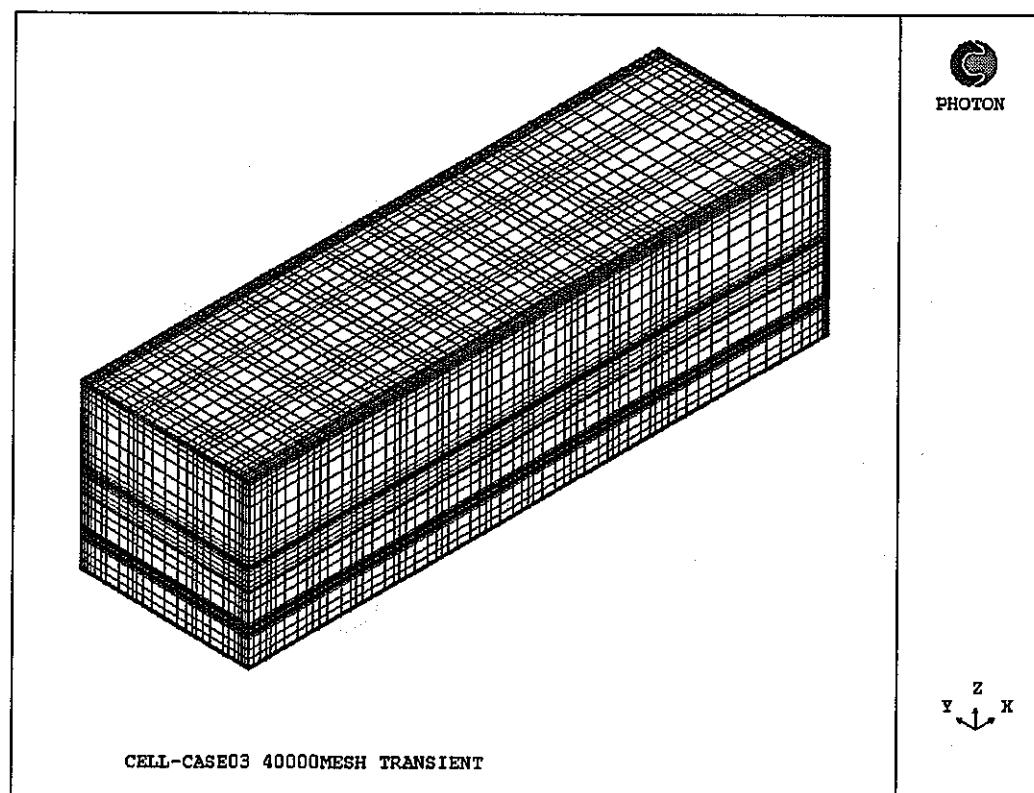


図 2-6 CASE 3, 4 の解析メッシュ

3. 流量パラメータ解析

高流量条件、低流量条件のそれぞれについて、各モデルについて同一流量条件でのガス温度及び流況分布を比較した。

3. 1 ケース 1 の解析結果

解析モデル 1(ケース 1)について初期条件(高流速条件)のケースで解析を行った結果を図 3. 1-1 に温度分布、図 3. 1-2 に流速分布を示す。また、低流速条件の結果を図 3. 1-3 に温度分布、図 3. 1-4 に流速分布を示す。

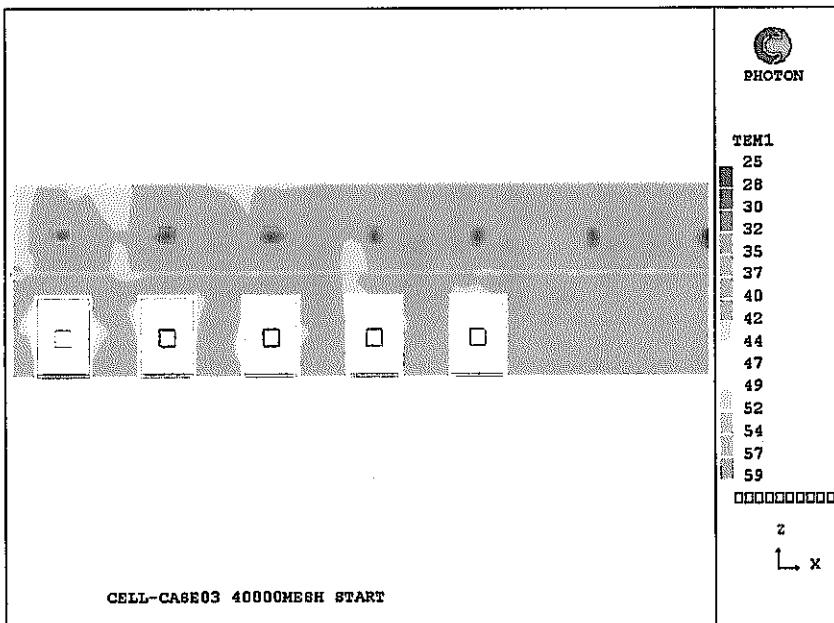
全体流況は、高流速では図 3.1-2(4)に示すように各機器上部壁面からの流れが中央部でぶつかり合って、左右に広がり、上部への流れと、下部への流れに分かれ、下部への流れは出口から流出する流れになっている。高発熱側の機器上部は上昇流があるため、高発熱機器側の流れが若干上に押しやられ、反対側の流れが逆に下向きの流れになって高発熱機器を冷却する状態になって、温度分布の均一化に寄与していると考えられる。この際、高発熱機器側の流れが全般に横に広がり、低発熱機器側の流れとそれ違う形になっている。一方、発熱の差のない低発熱機器部及び機器のない部分では左右の壁からの流れが比較的対称に近くなっている、特に機器のない部分ではぶつかり合った流れがそのまま上下左右に広がっている。

低流速では側面壁からの流れがすぐに下降流となって発熱機器に直接当たる流れとなっている。照明位置より上の領域は、高流速条件に比べてスタグナントに近い温度分布となっているが、上記のとおり、機器へ直接に冷却ガス流がかかっているために、スタングナントな領域でもガス温度 50°C 前後とそれほど上がっていない。

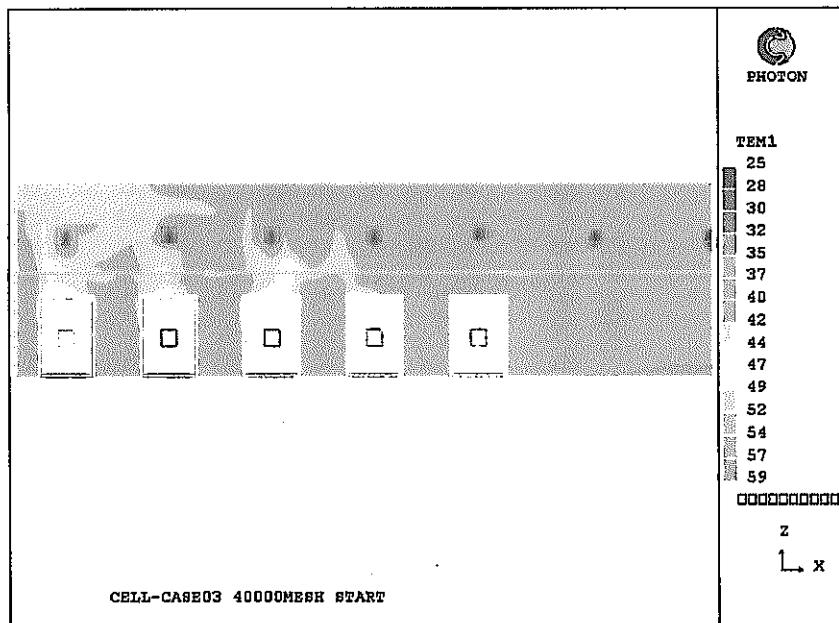
最高温度は高流速条件では 58.9°C で位置は図 3. 1-1 の(1)の最も左側の高発熱機器側面位置であった。一方、低流速条件では 54.2°C と発熱量は高発熱機器に集中したにもかかわらず逆に低くなっている。これは高流速条件では流速が早いために壁から離れてもそのまま直進し、反対側からの流れとぶつかってから下降に転じるのに対して、低流速では側面壁からの流れの流速が遅いために周囲のガス温度との比重差で沈み込む下降流となり、ちょうど直接高発熱機器にかかるよう流れになっているためと考えられる。

ここから、直接高発熱機器に冷却ガス流が当たるような流れを作る条件が重要であることがわかる。そういう観点では、高流速条件でも左右の流速を調整することで高発熱機器に直接冷却ガス流が当たるような流れを作ることは可能であり、そうした微調整をすることで高流速条件でもさらに最高温度が低減できる可能性があると考えられる。

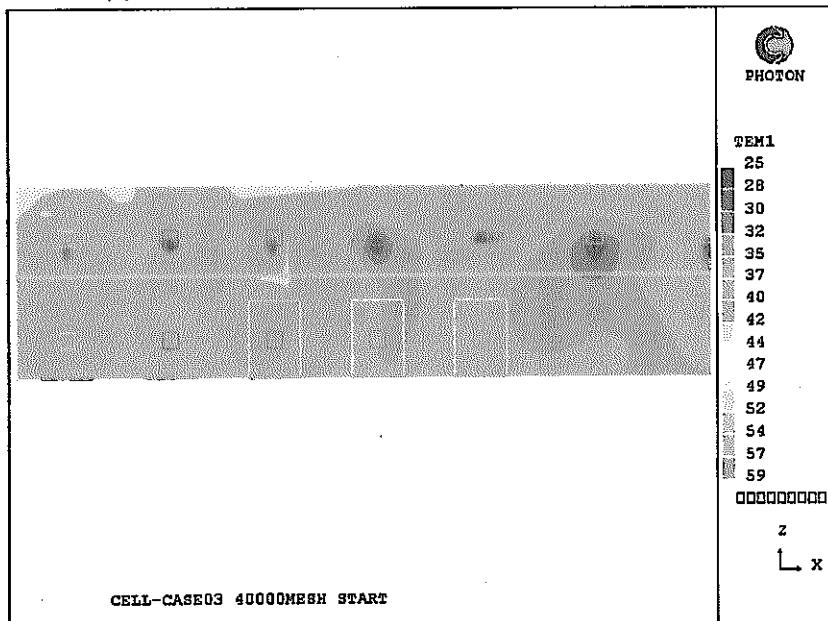
ただし、高流速と低流速の条件の比較から、高流速では壁の流出口の反対側の機器を冷却しているのに対して、低流速機器では壁の流出口側の機器を冷却することになることがわかる。したがって、高流速から低流速に変化する過渡状態では冷却対象が変化するために過渡的に温度が高くなる要因があり、安全上、信頼性上の課題があると考えられる。



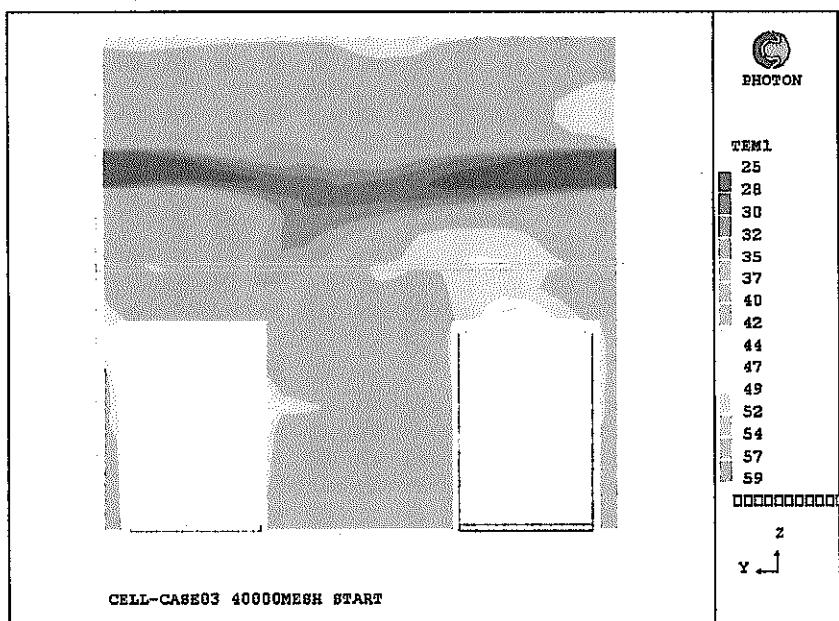
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

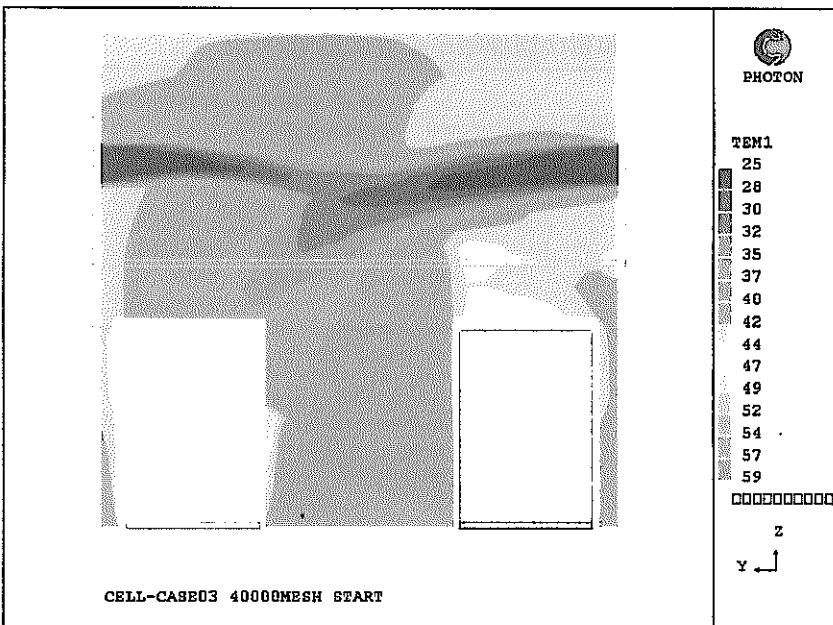


(3)対称面の長手方向断面の温度

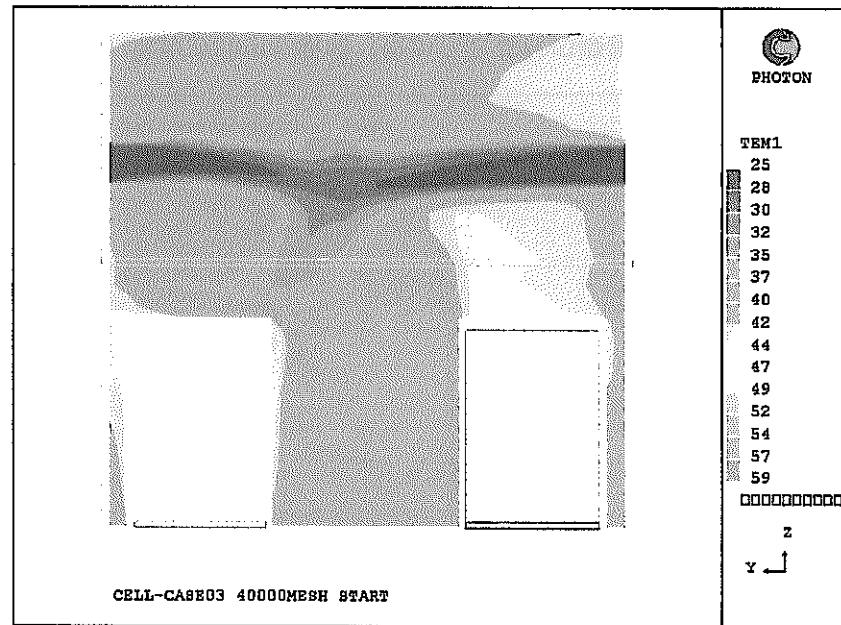


(4)短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

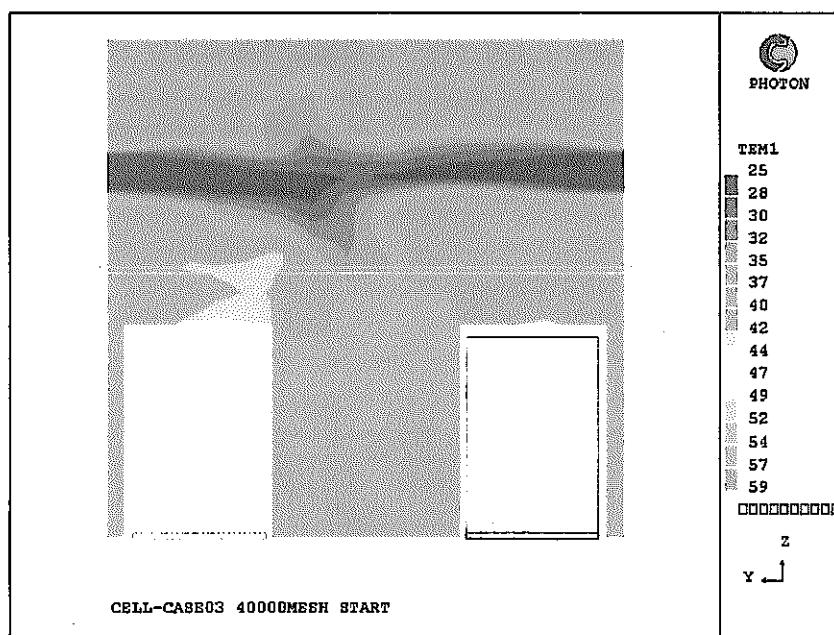
図3. 1-1 CASE1 高流速条件の各部の温度 (1/2)



(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度



(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

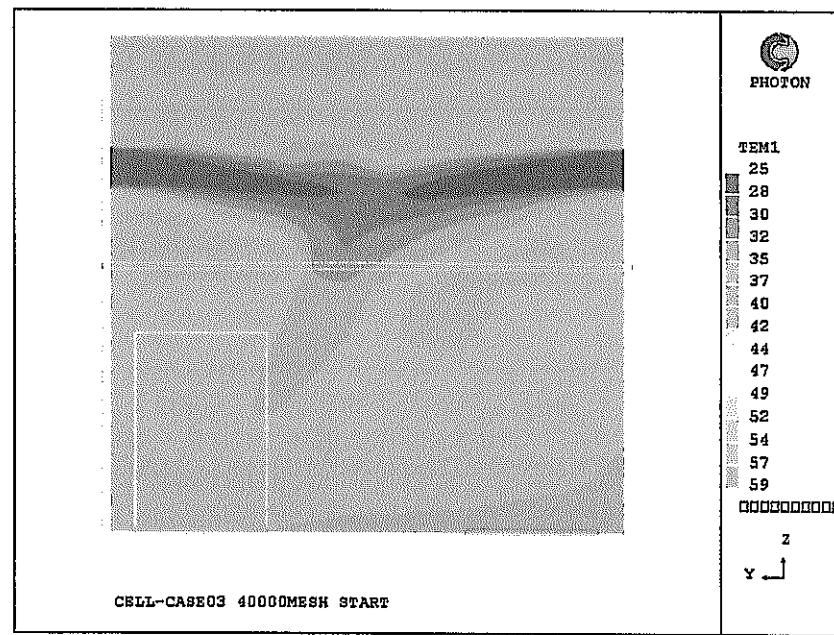
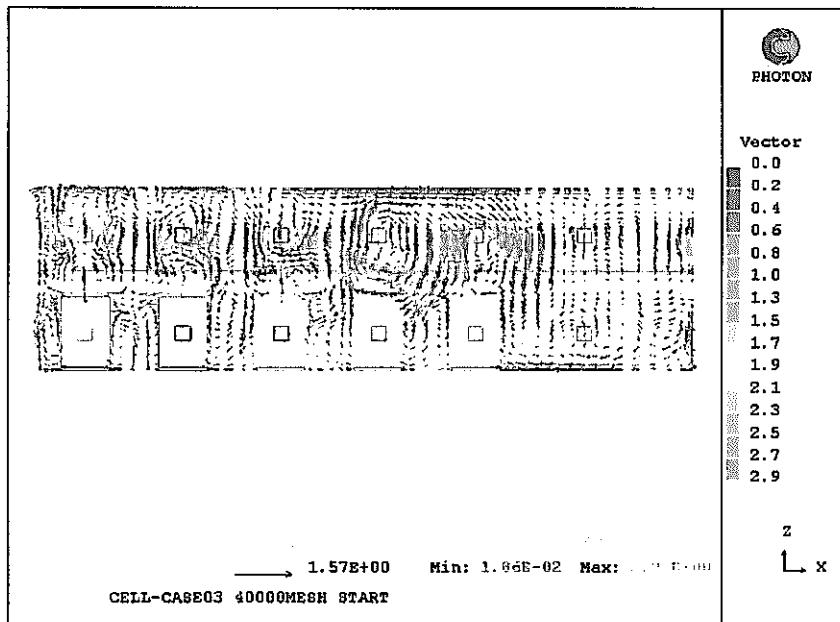
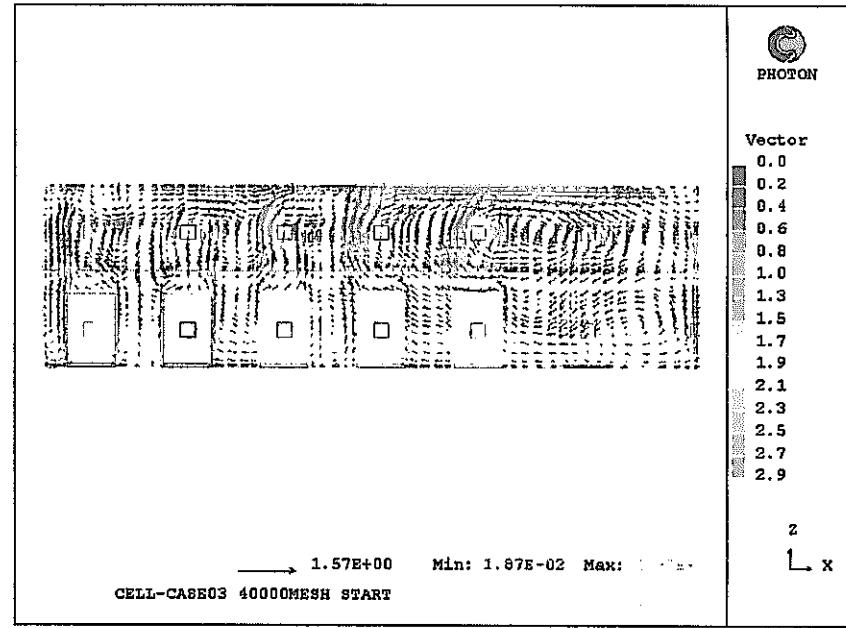


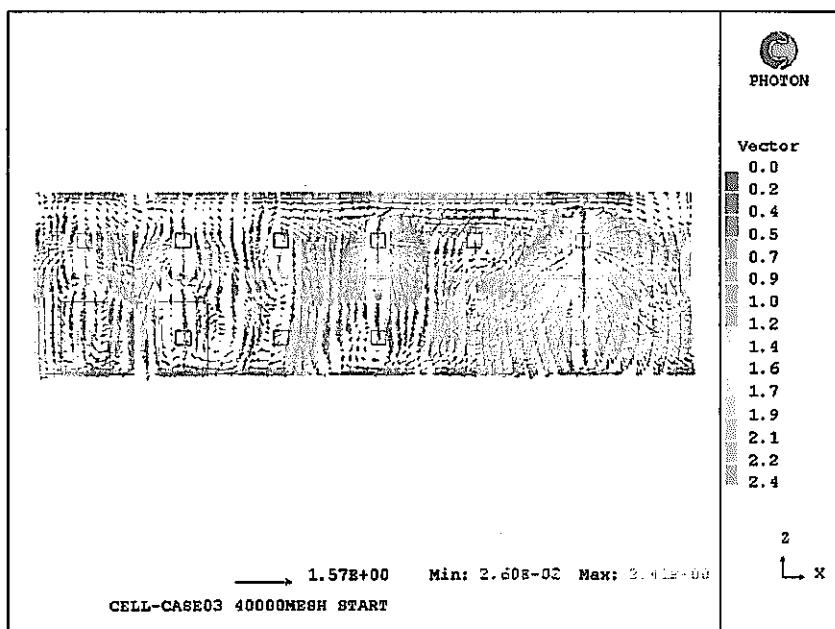
図 3. 1 – 1 CASE1 高流速条件の各部の温度 (2 / 2)



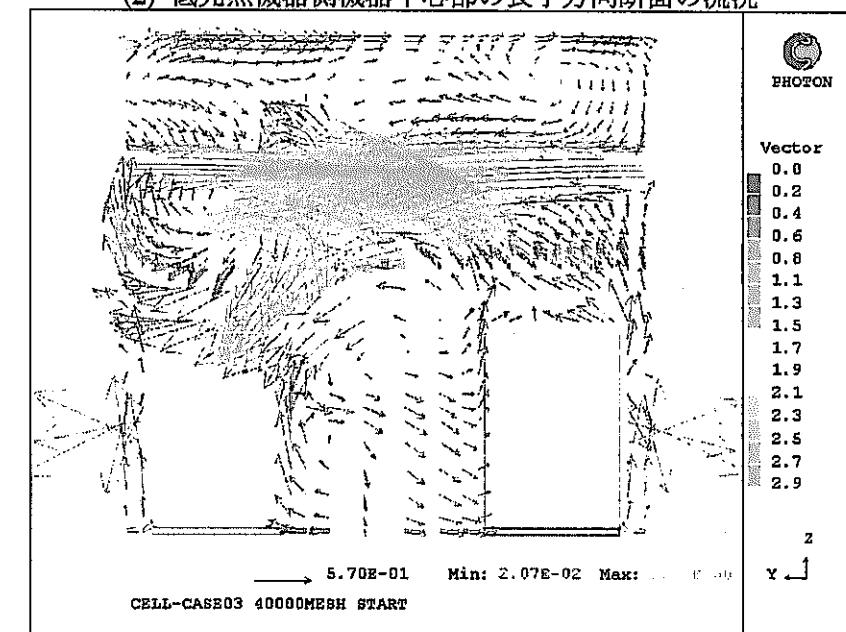
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

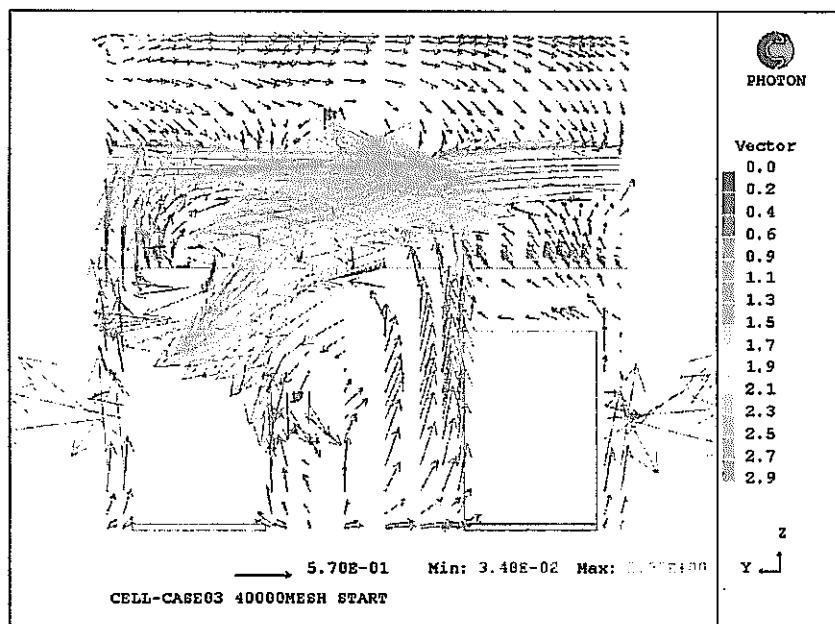


(3)対称面の長手方向断面の流況

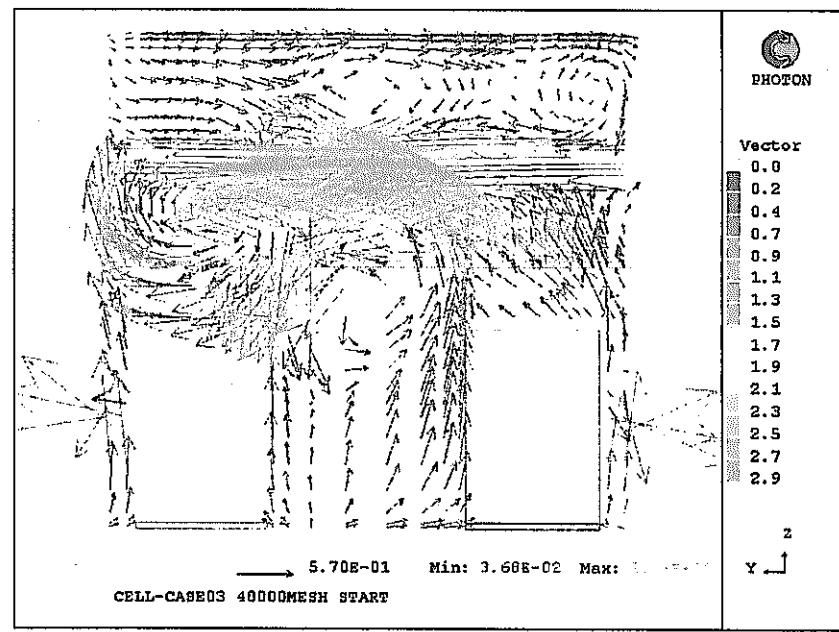


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

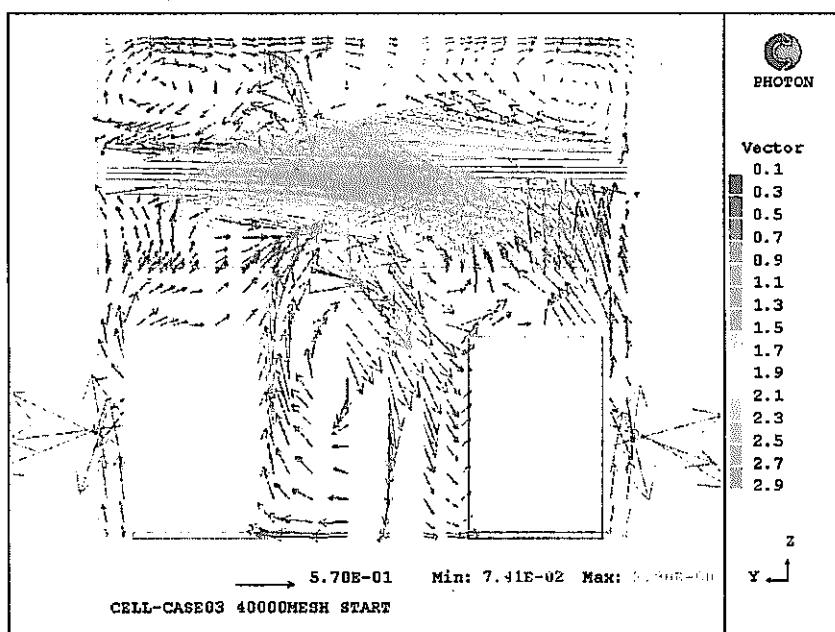
図3. 1-2 CASE1 高流速条件の各部の流況 (1/2)



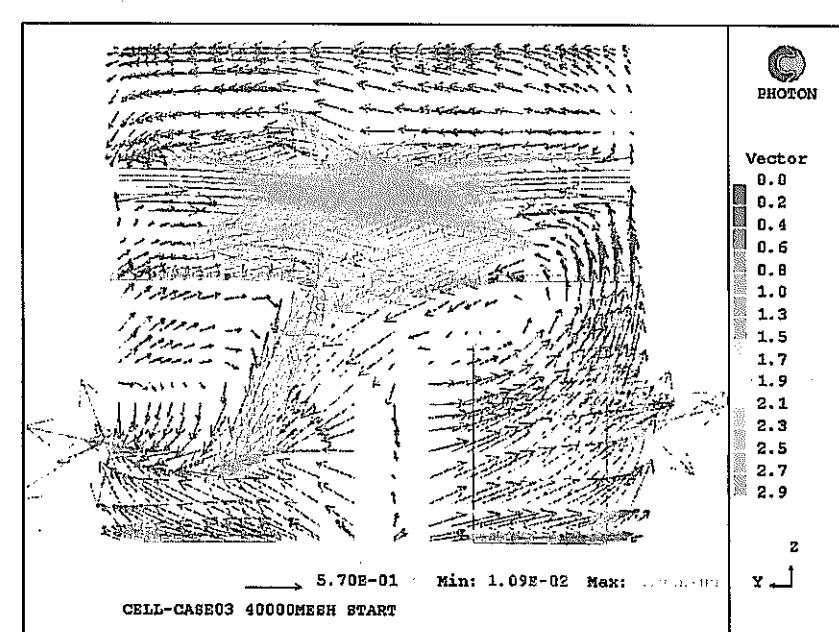
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況

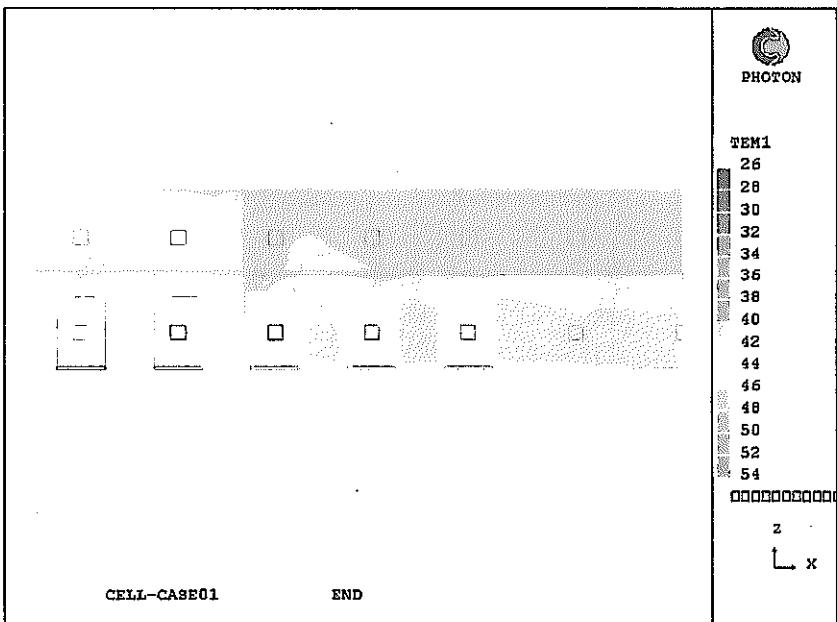


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況

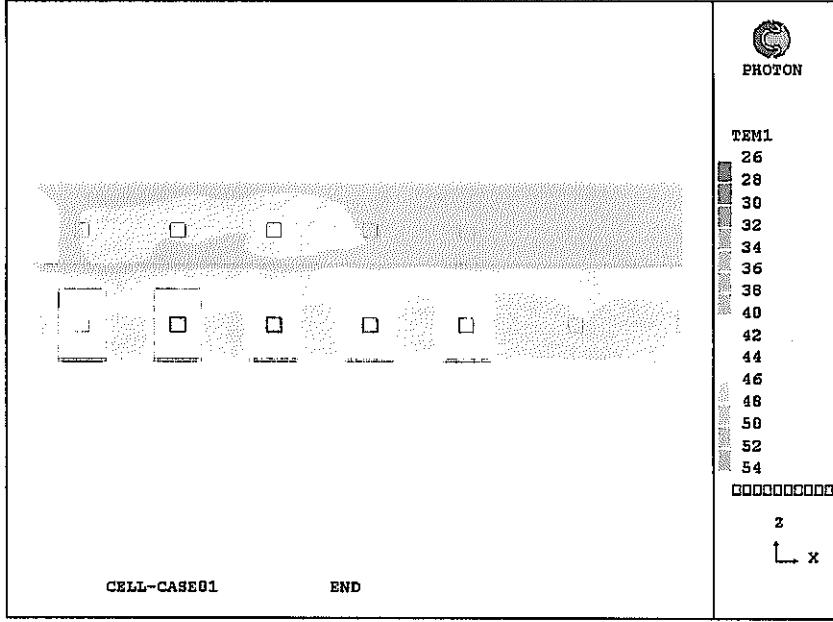


(8) 短辺方向の対称面の流況

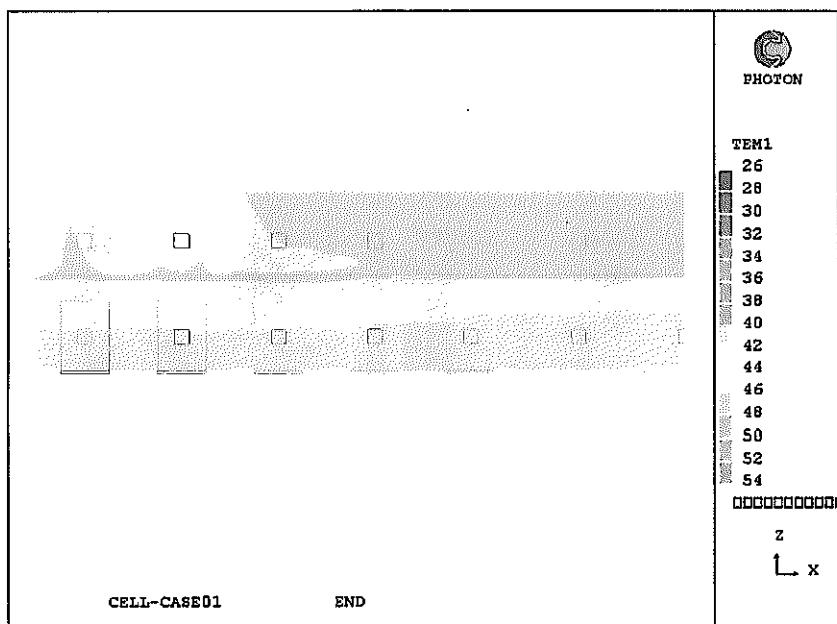
図 3. 1 - 2 CASE1 高流速条件の各部の流況 (2 / 2)



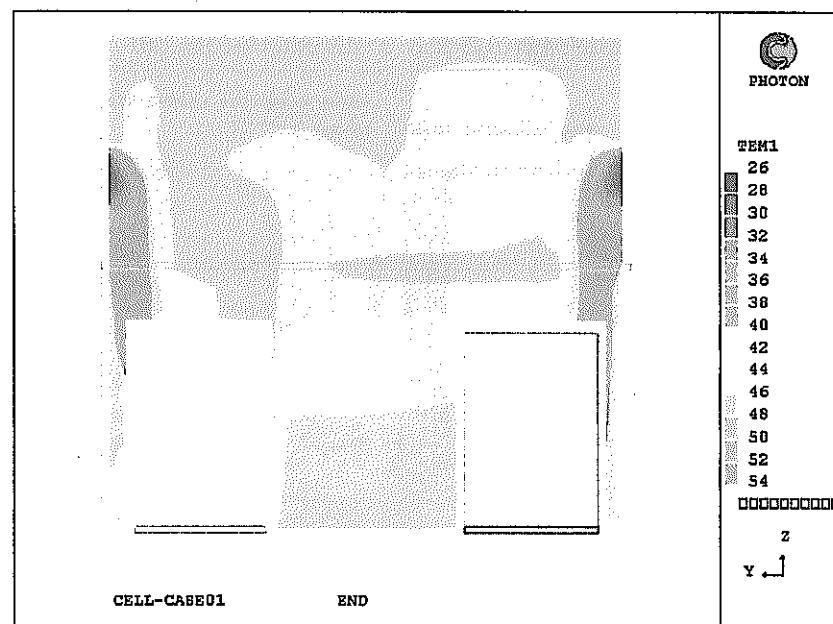
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

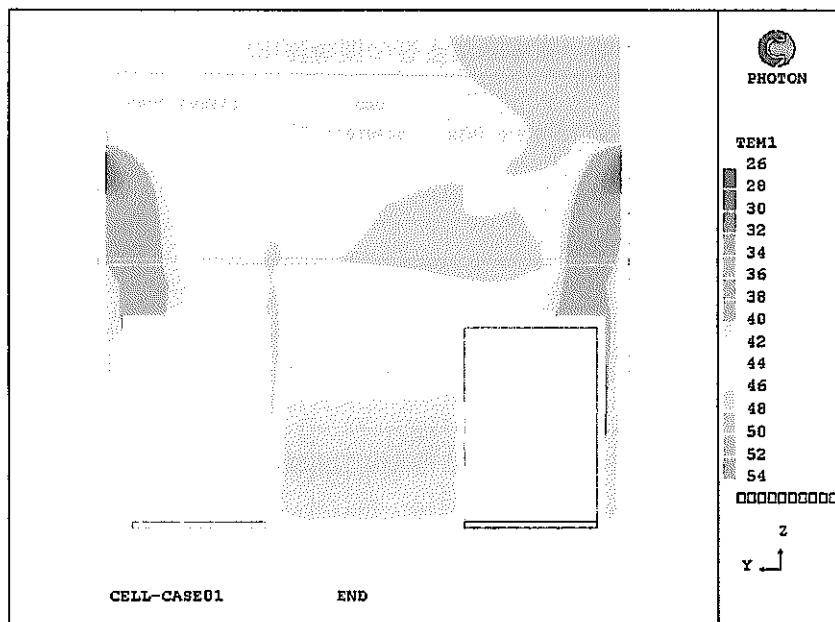


(3) 対称面の長手方向断面の温度

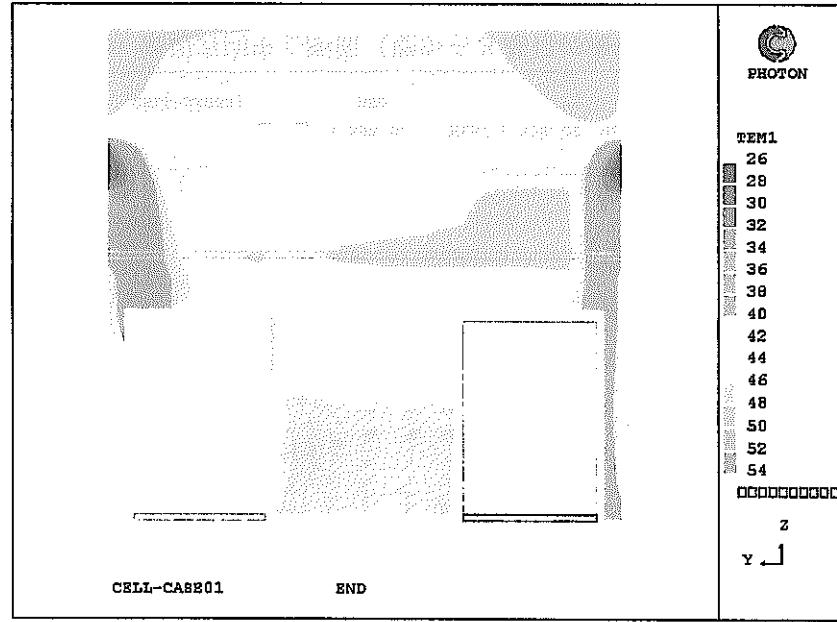


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

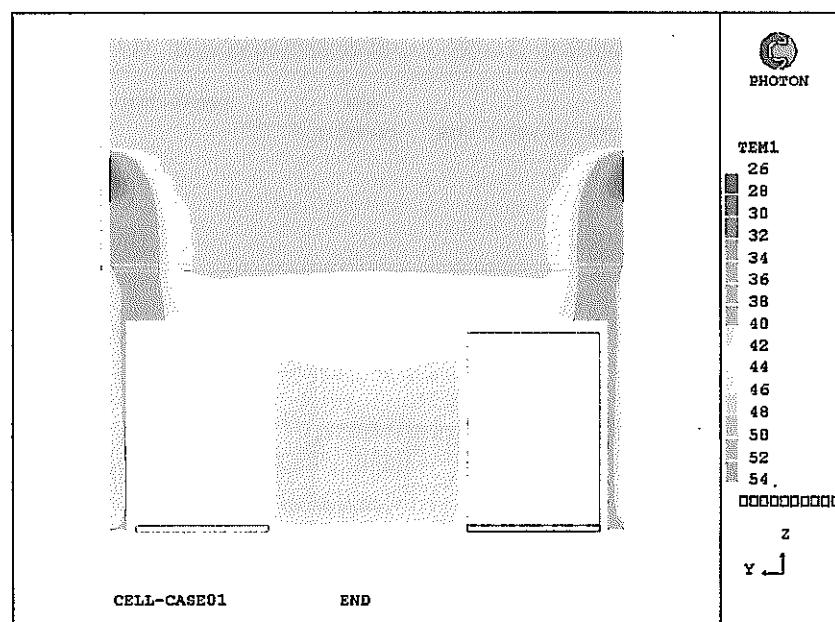
図3. 1-3 CASE1 低流速条件の各部の温度 (1/2)



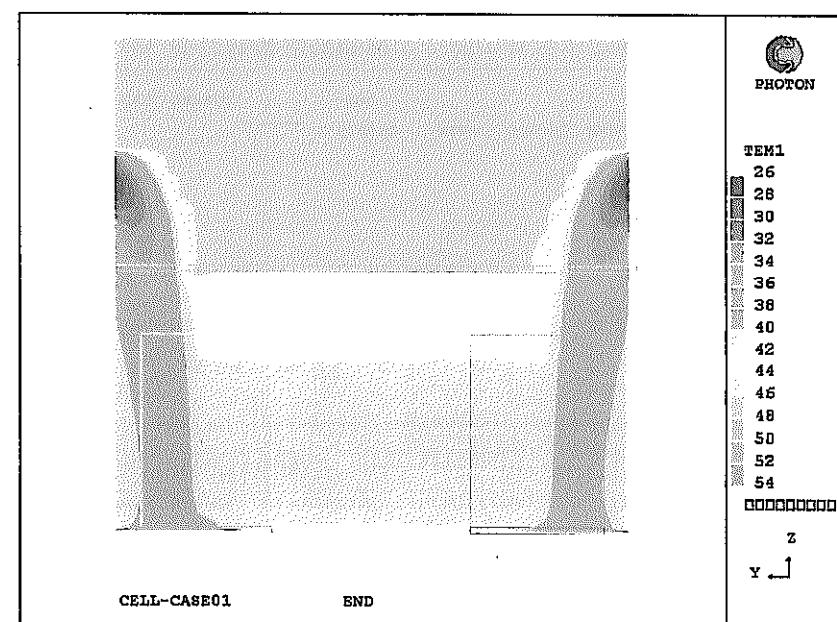
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



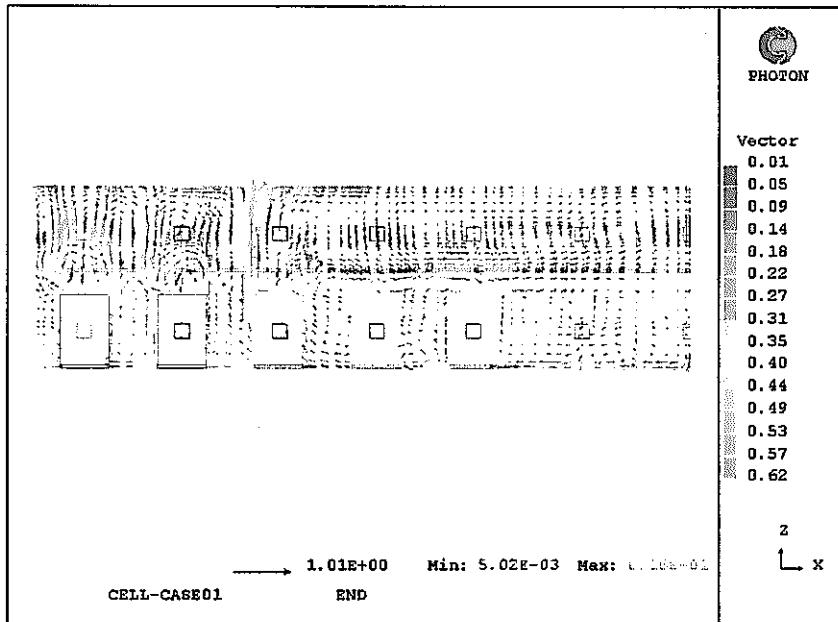
(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度



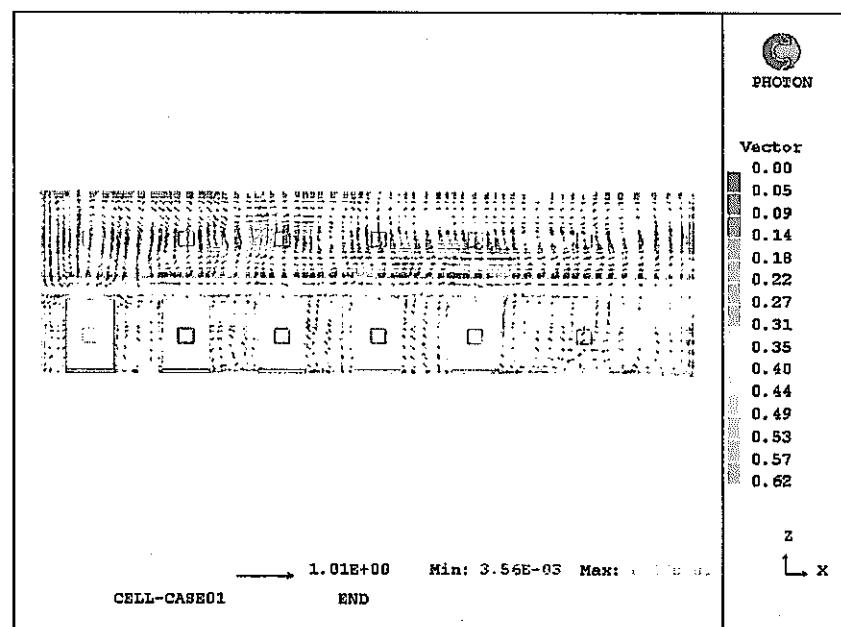
(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度



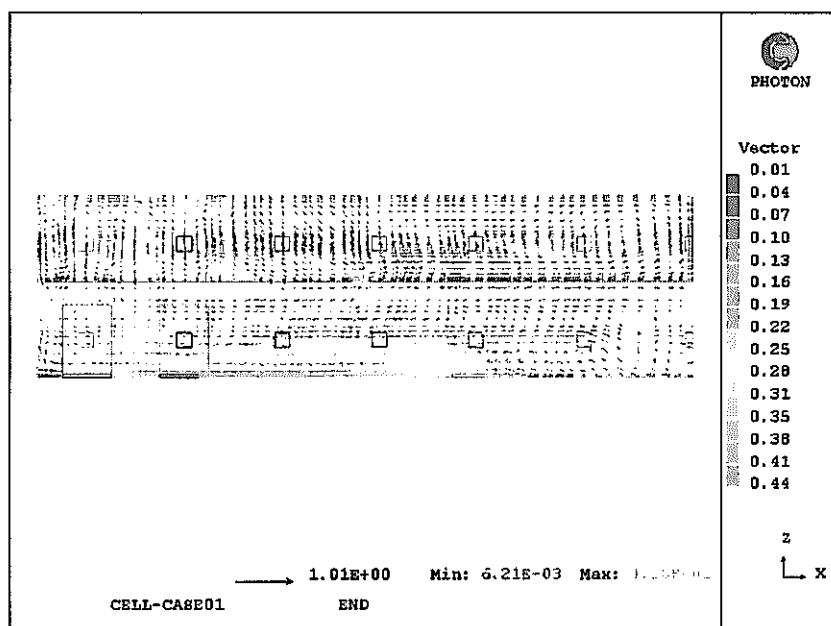
(8) 短辺方向の対称面の温度



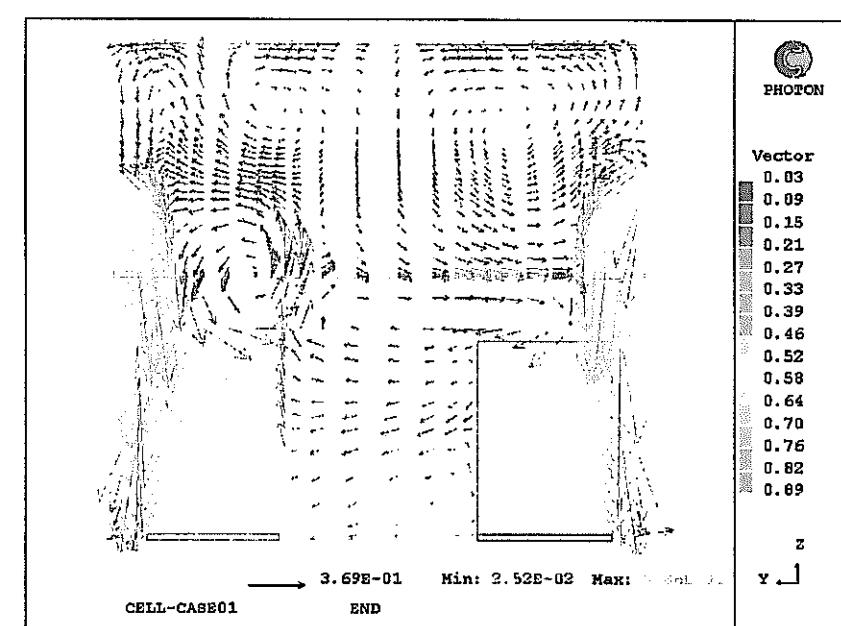
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

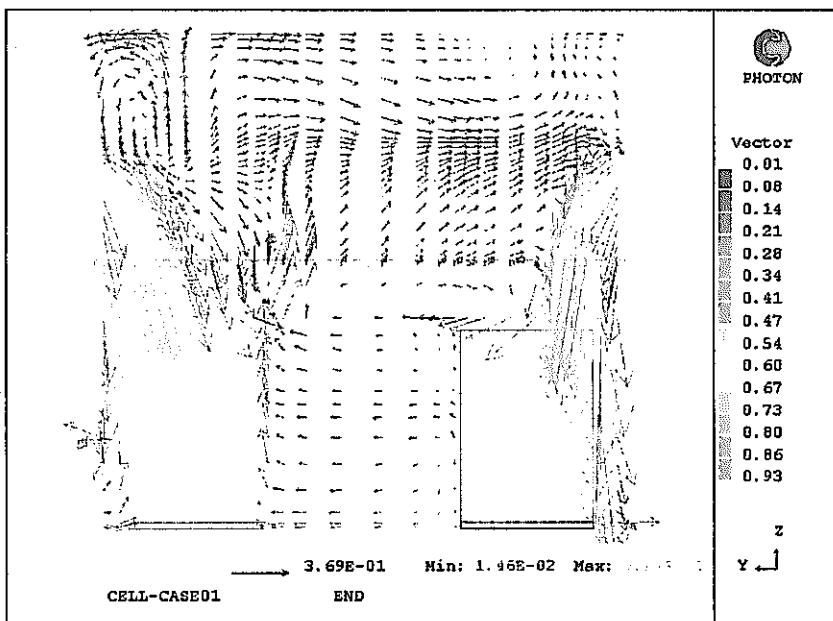


(3) 対称面の長手方向断面の流況

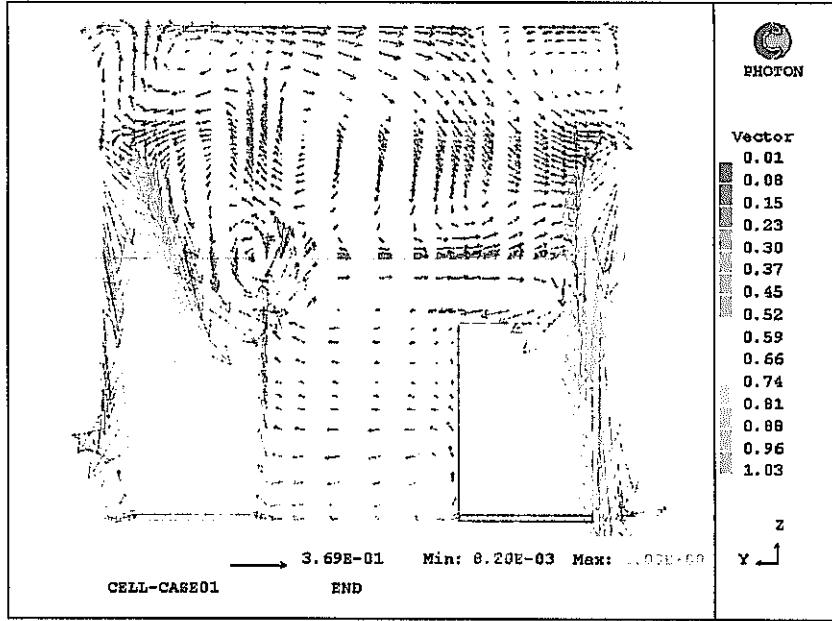


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

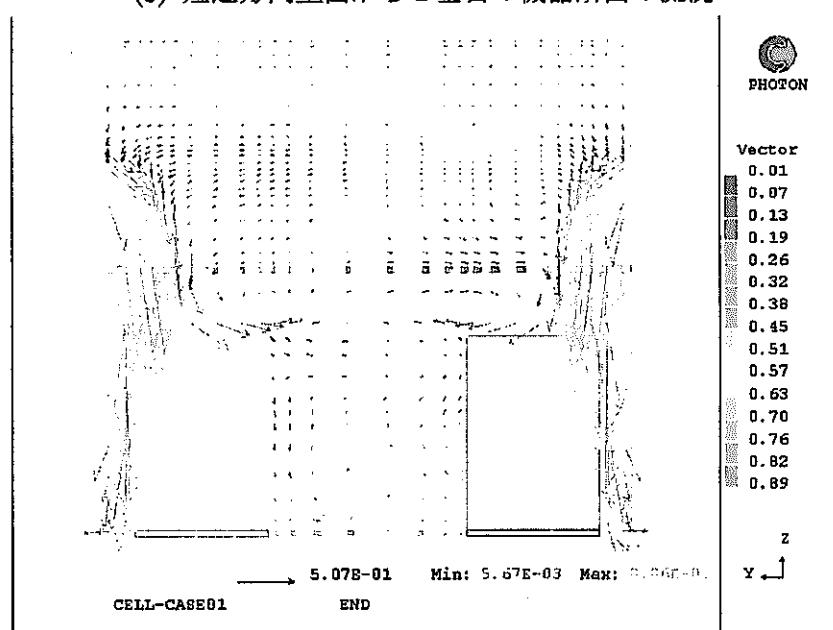
図3. 1-4 CASE1 低流速条件の各部の流況 (1/2)



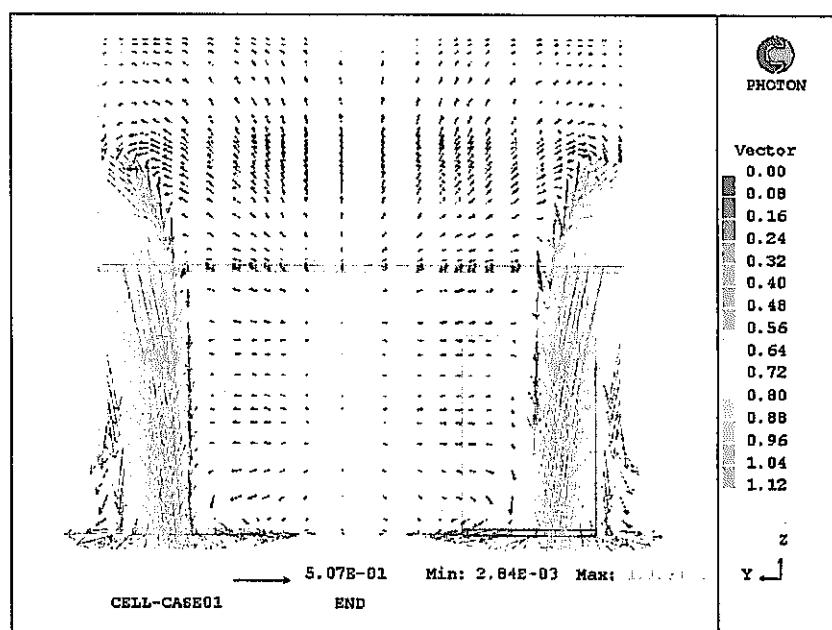
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況



(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況



(8) 短辺方向の対称面の流況

図 3. 1 - 4 CASE1 低流速条件の各部の流況 (2 / 2)

3. 2 ケース 2 の解析結果

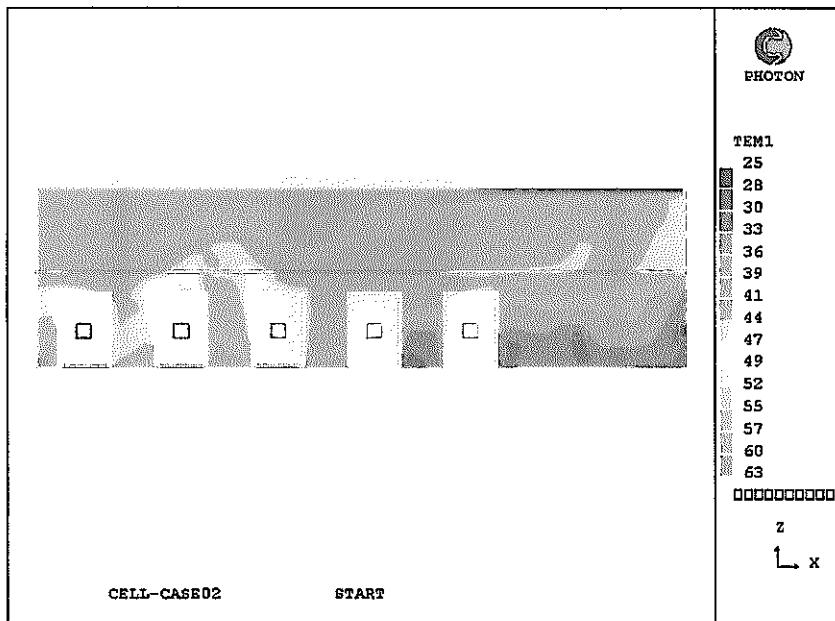
解析モデル 2(ケース 2)について初期条件(高流速条件)のケースで解析を行った結果を図 3. 2-1 に温度分布、図 3. 2-2 に流速分布を示す。また、低流速条件の結果を図 3. 2-3 に温度分布、図 3. 2-4 に流速分布を示す。

高流速条件の全体流況は、機器側面の壁からの交互の流れは、機器の間を縫って反対側の壁に流れ込む流れと機器の壁に反射してとなりの機器の流出口から流れ出る流れの組み合わせになっており、発熱機器側面は効率よく冷却されていることがわかる。一方、セル対称面上端から縦方向に流れる流れは縦方向中央部を中心に流れ、発熱機器手前で下降して高発熱機器で上昇する全体流況となっている。高発熱機器付近で上昇したガスはセル対称面上端方向へ流れて下降する循環流が起きている。

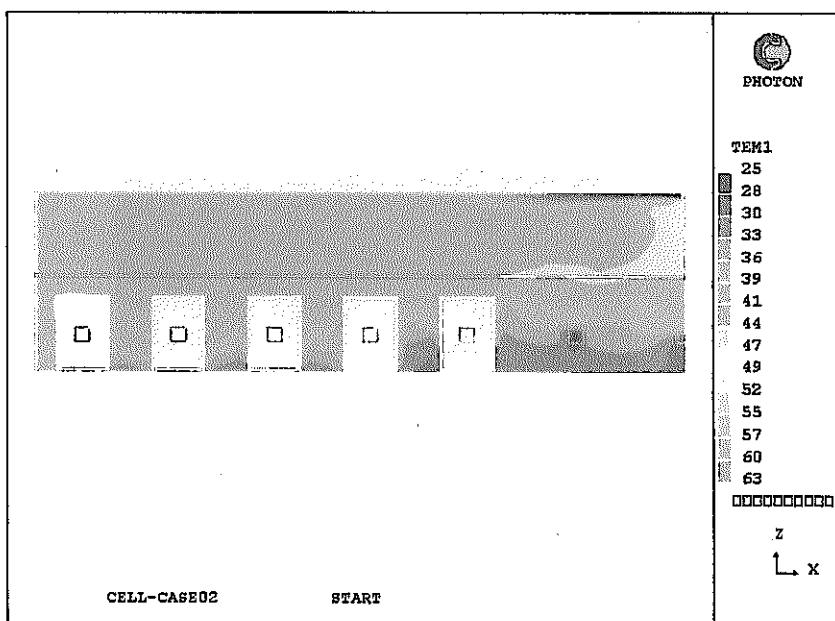
低流速条件の全体流況は、機器側面の流れは高流速条件と類似しているものの、セル上部から縦方向の流れは、機器の領域に至る前に比重差で下降流となって、機器中央部の通路を通って反対側の壁の出口まで流れる流況である。

最高温度は高流速条件、低流速条件ともに高発熱機器のうちの真ん中の機器の上面部に発生している。高流速条件では 6.3 °C とピークは若干高いがセル上部のガス空間の平均温度 4.0 °C 程度と全般的には低く抑えられている。低流速条件ではピーク温度が 4.6 °C、セル上部の平均温度 4.2 °C 程度と十分低い温度に維持されている。これは高流速ではセル対称面上部からの流れが主に照明より上の領域を流れるのに対して、低流速では対称面上部からの流れが下降流となり、直接高発熱機器を冷却する形になるため、高発熱機器周辺温度が下がって最高温度も低下するものと考えられる。

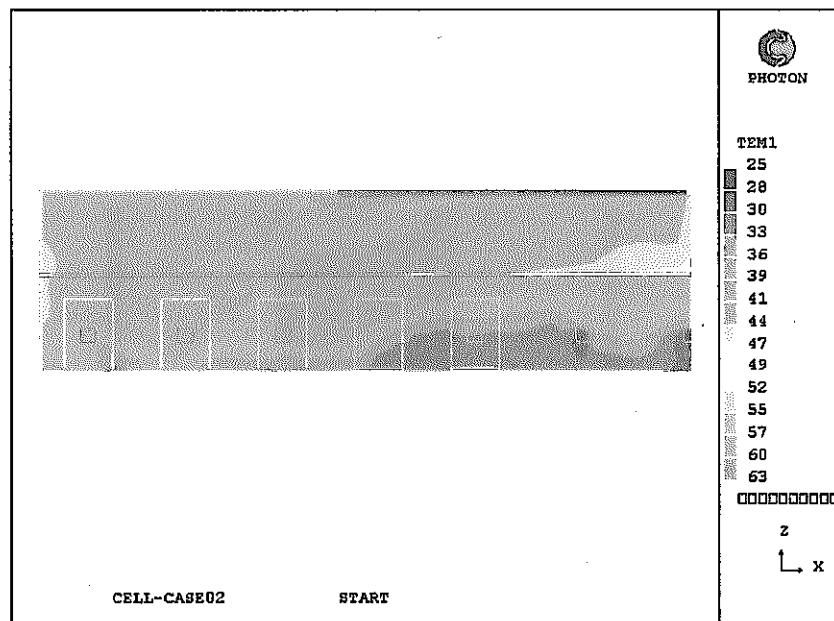
この結果からみると、機器自体の冷却に加えてセル全体の冷却を組み合わせるケース 2 は冷却効率に優れていると言うことができる。特に、温度ピークのできることが予想される高流速から低流速に変化する過渡時に、機器を直接冷却する流れが増加することは、過渡時の温度ピークを抑えるために有利であると考えられる。



(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

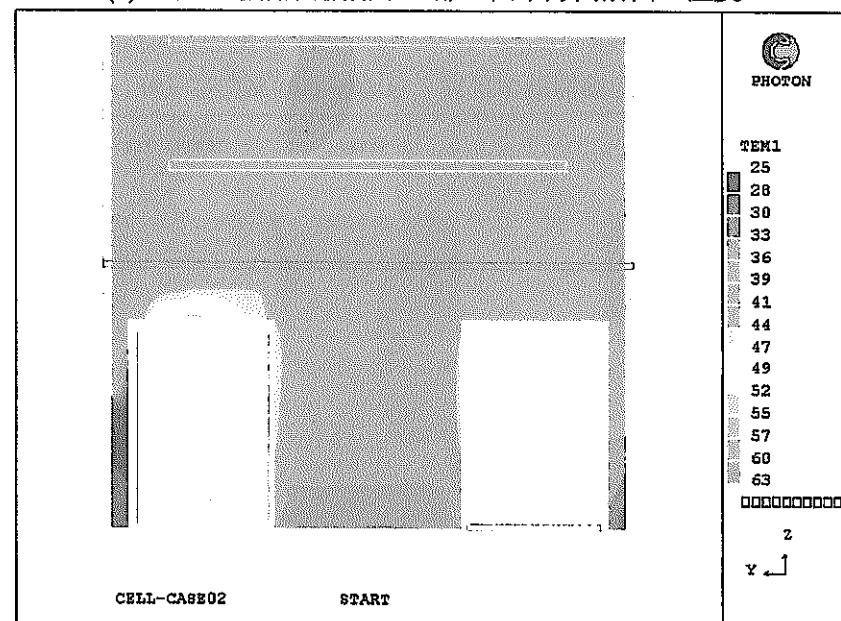


(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

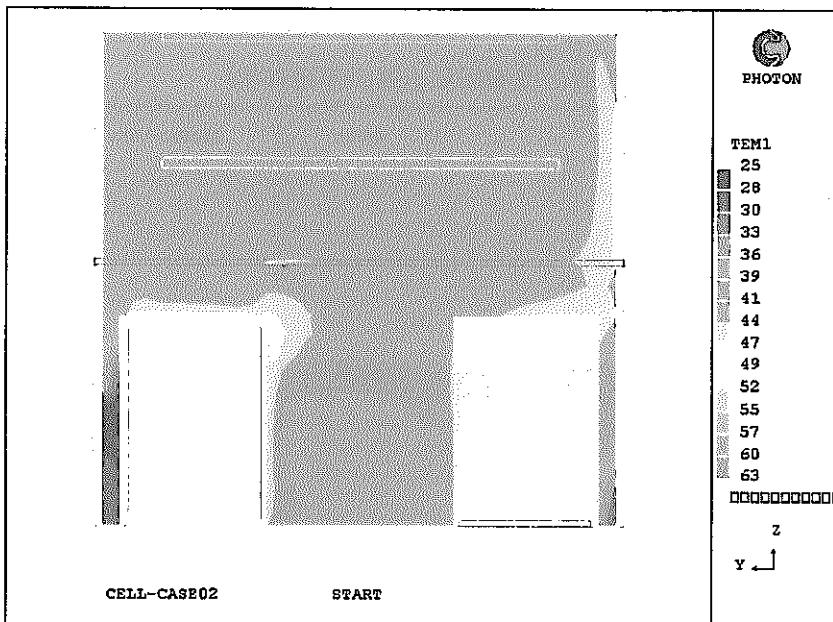


(3) 対称面の長手方向断面の温度

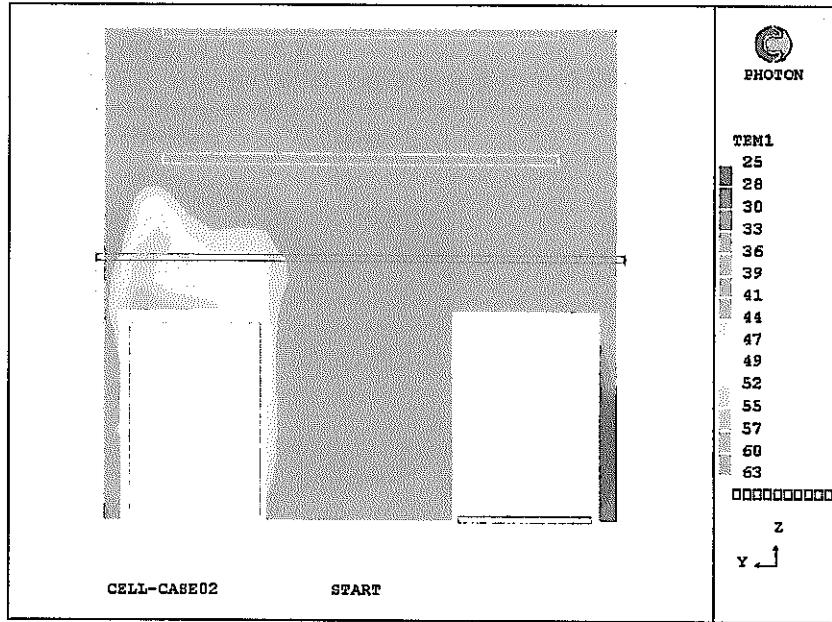
図3. 2-1 CASE2 高流速条件の各部の温度 (1/2)



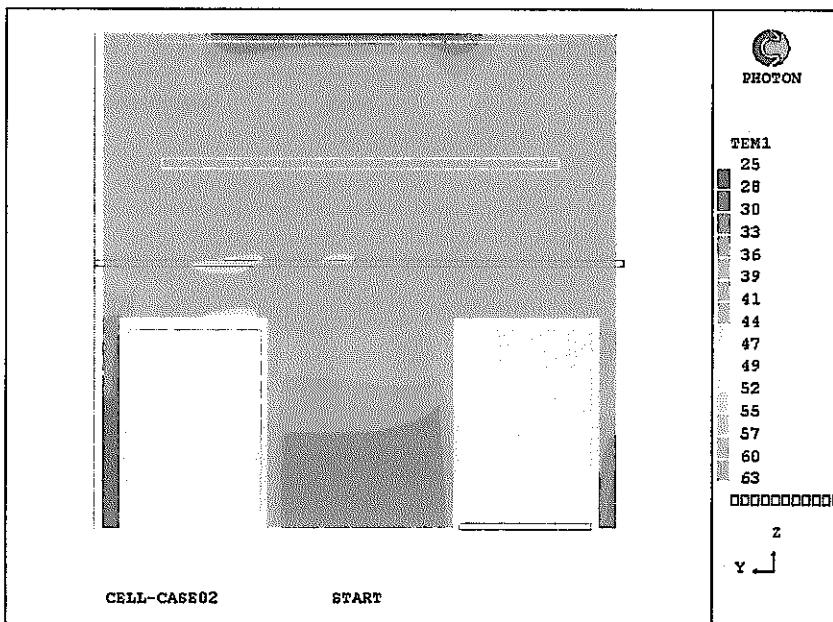
(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度



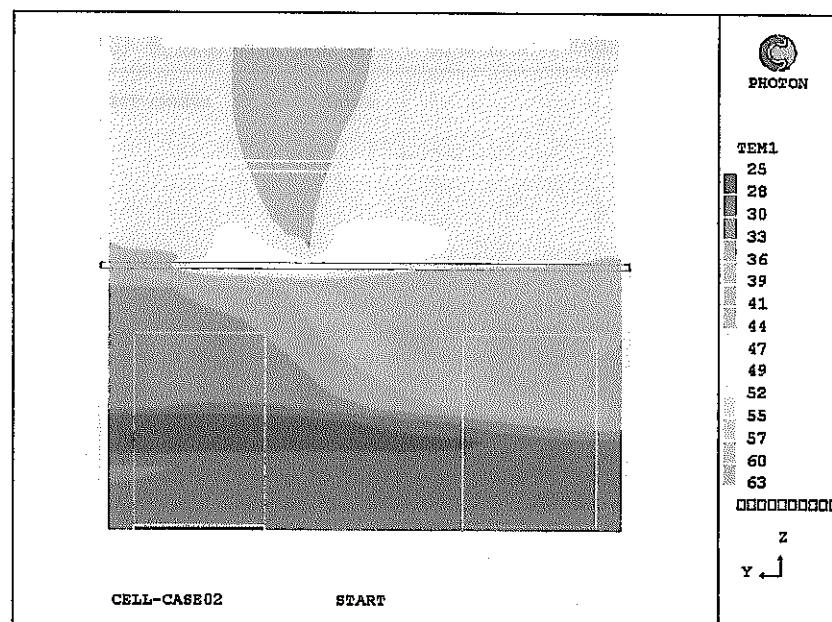
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度

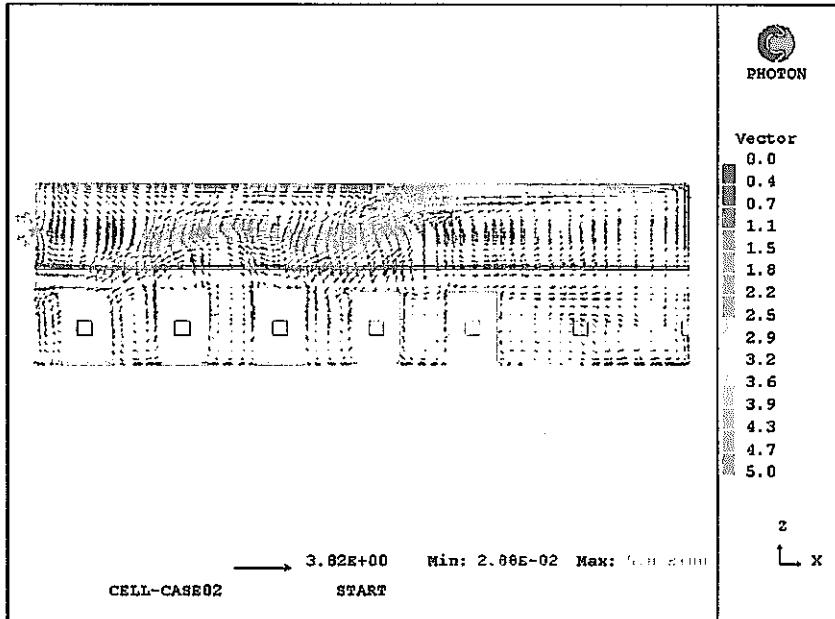


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

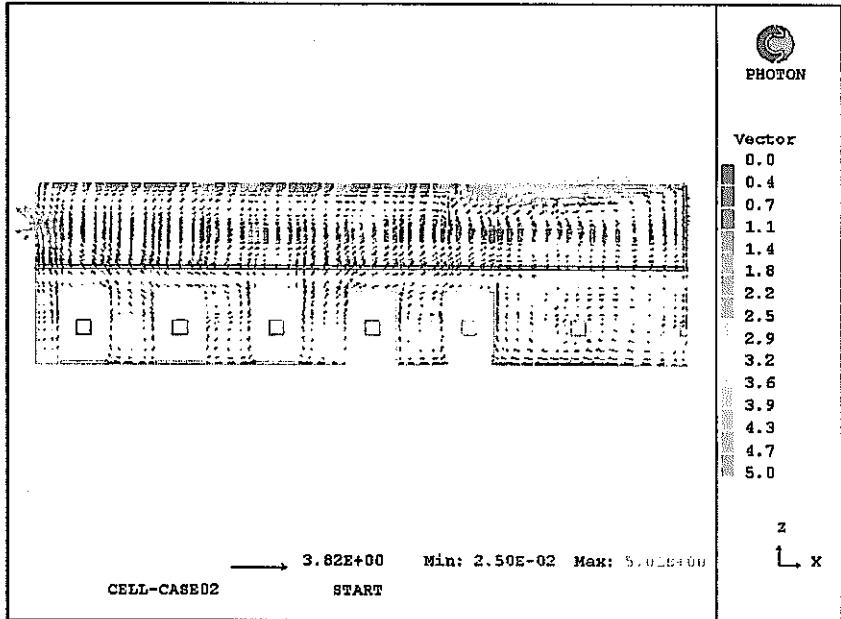


(8) 短辺方向の対称面の温度

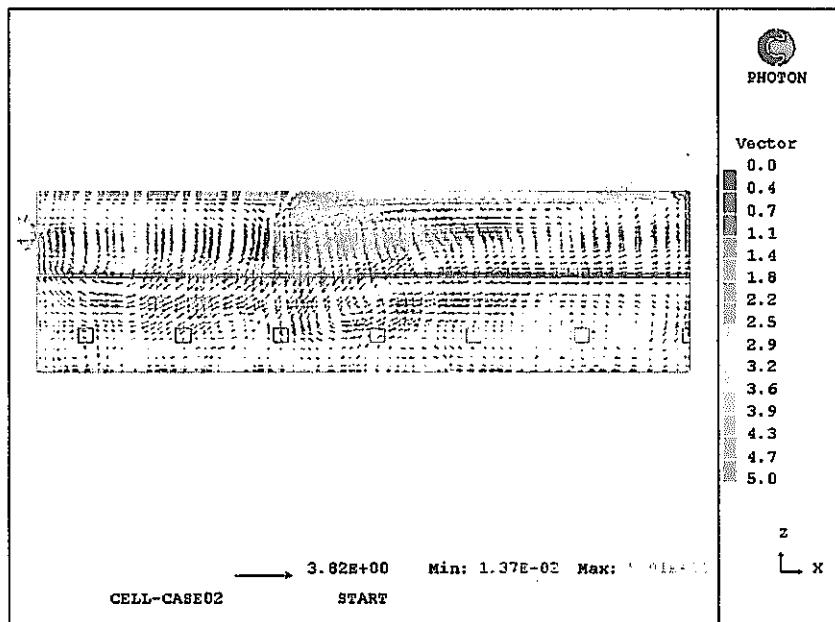
図 3. 2 - 1 CASE2 高流速条件の各部の温度 (2 / 2)



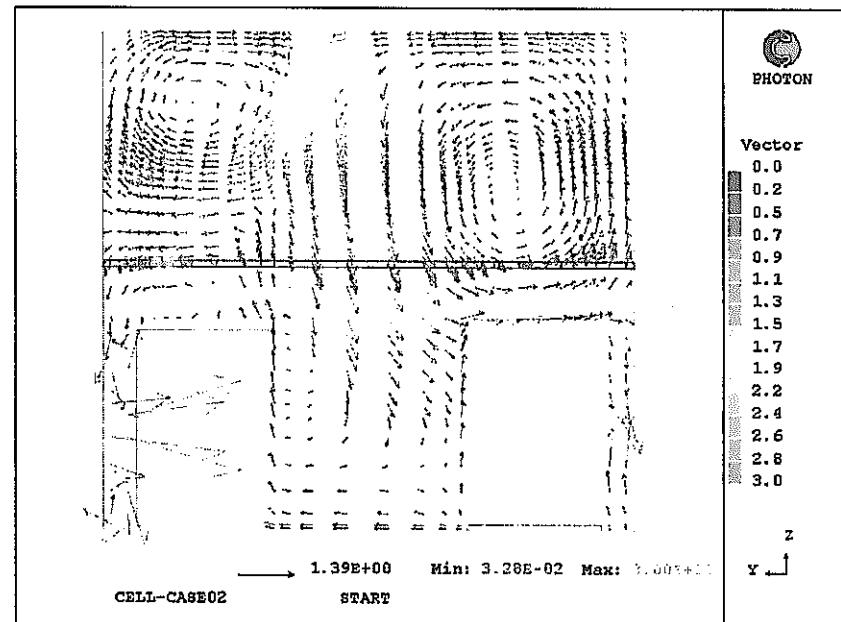
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

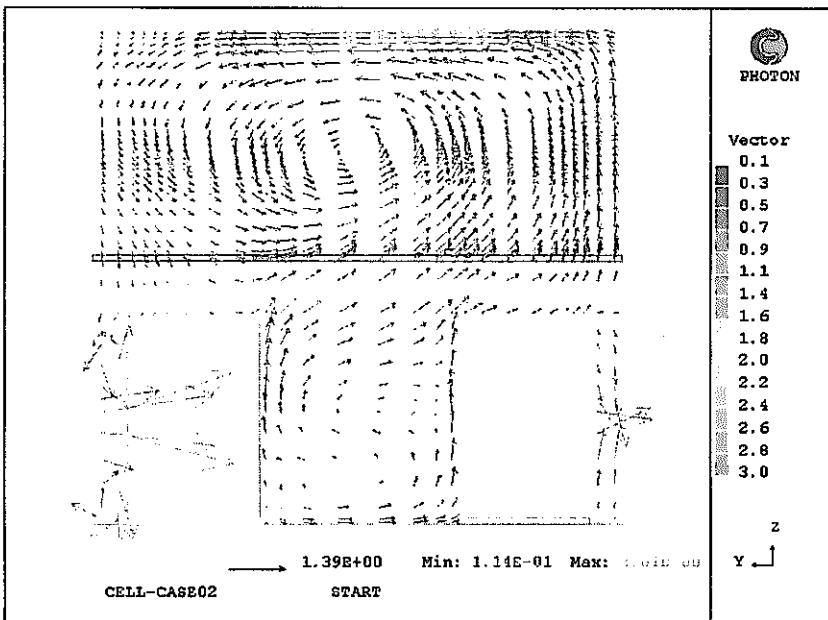


(3) 対称面の長手方向断面の流況

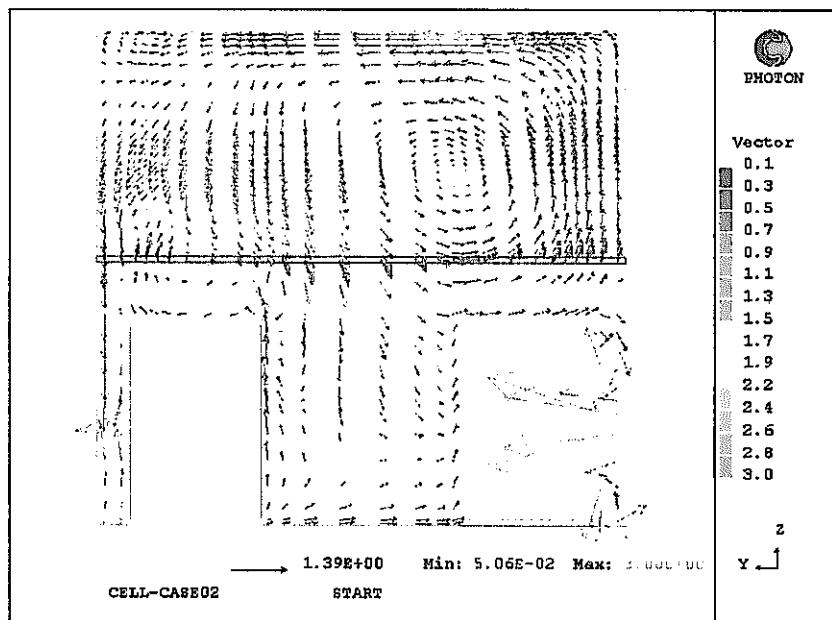


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

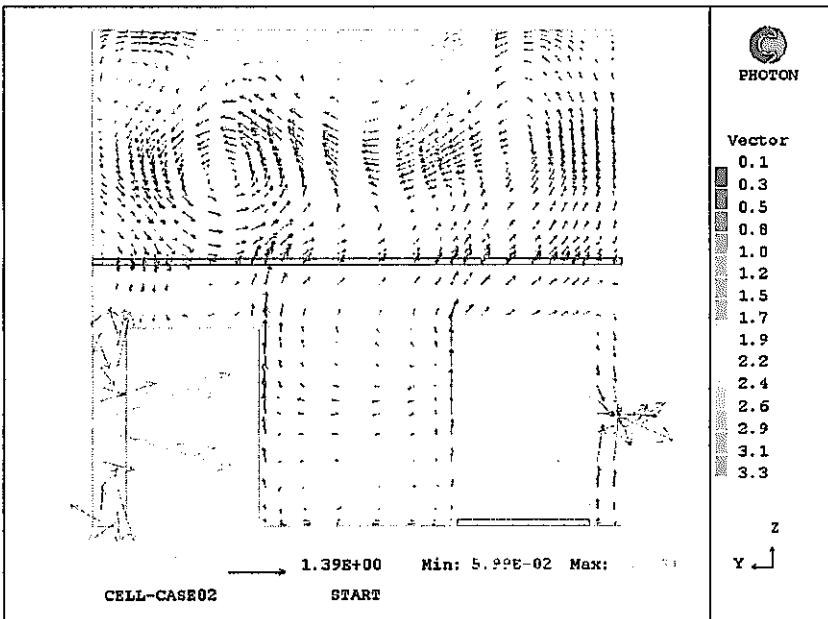
図3. 2-2 CASE 2 高流速条件の各部の流況 (1/2)



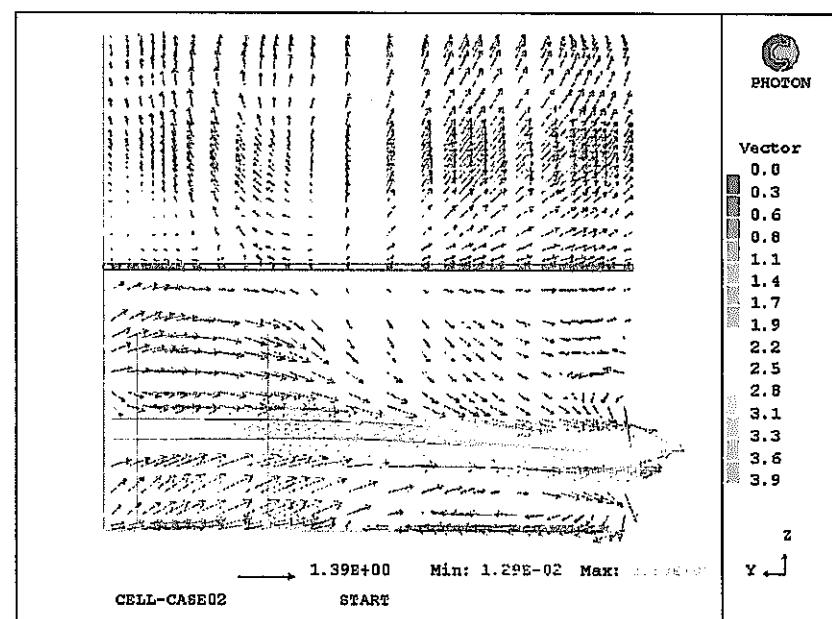
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



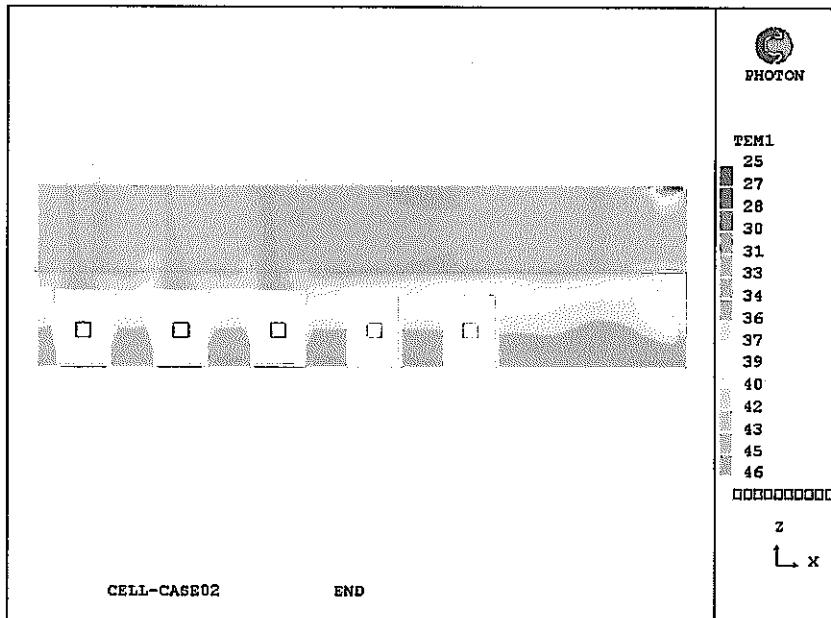
(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況



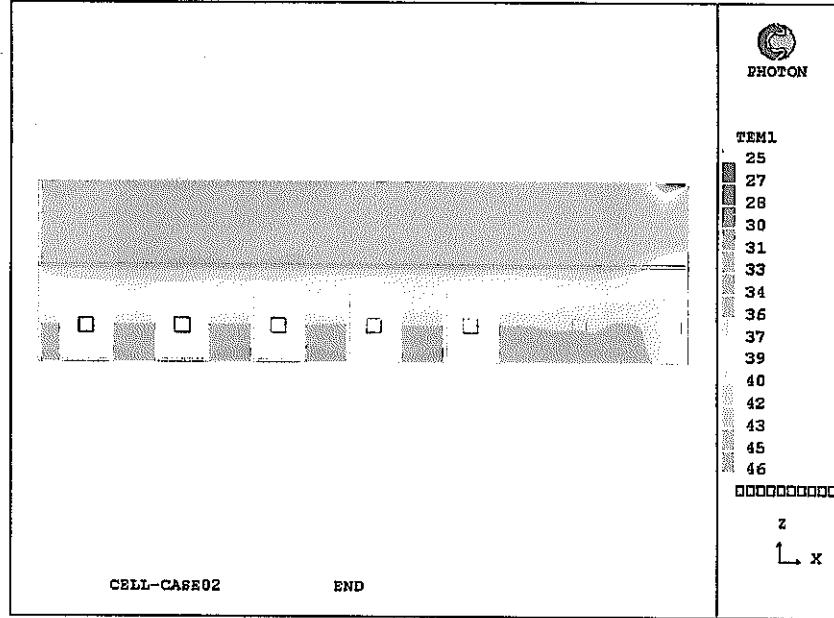
(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況



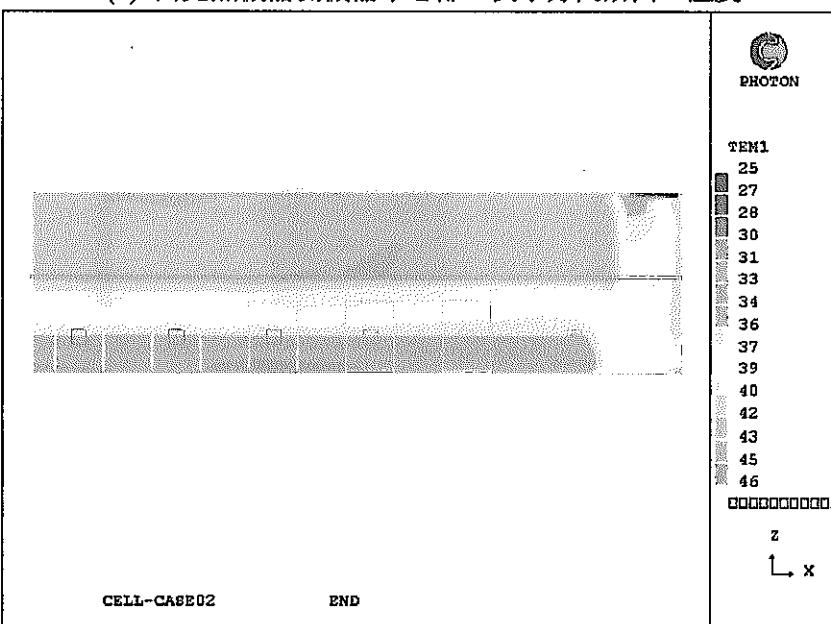
(8) 短辺方向の対称面の流況



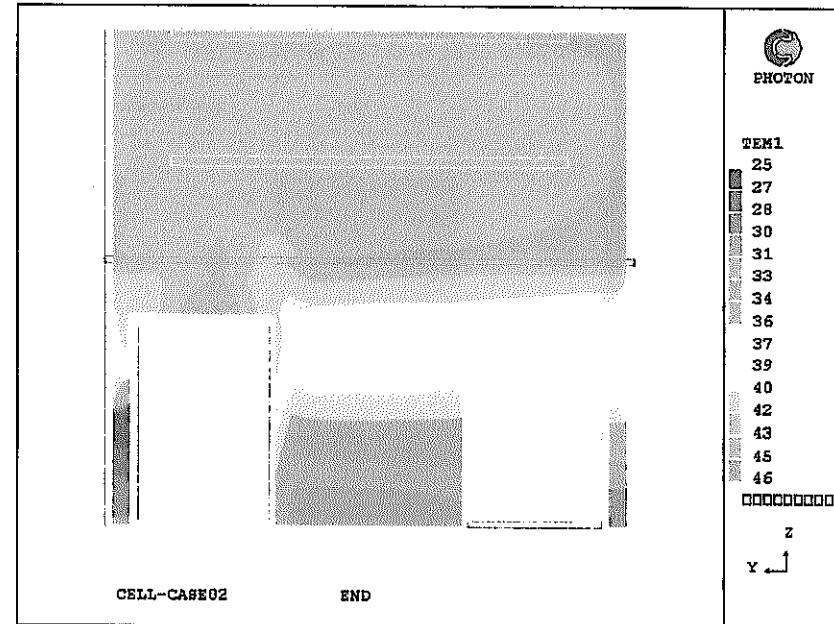
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

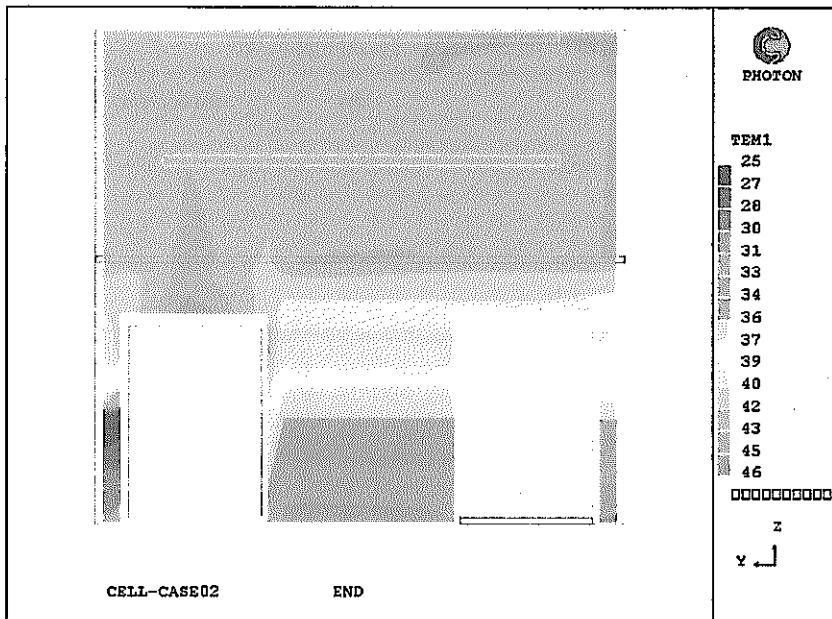


(3)対称面の長手方向断面の温度

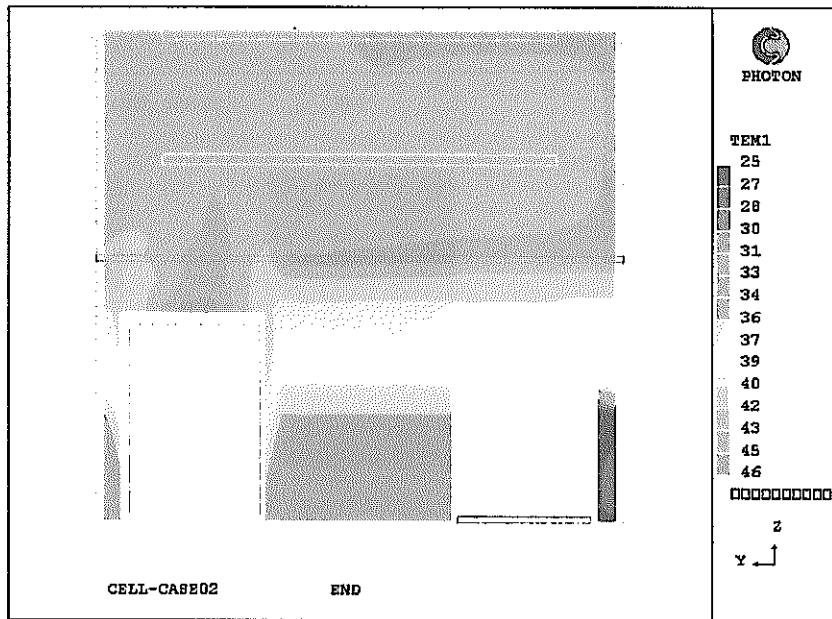


(4)短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

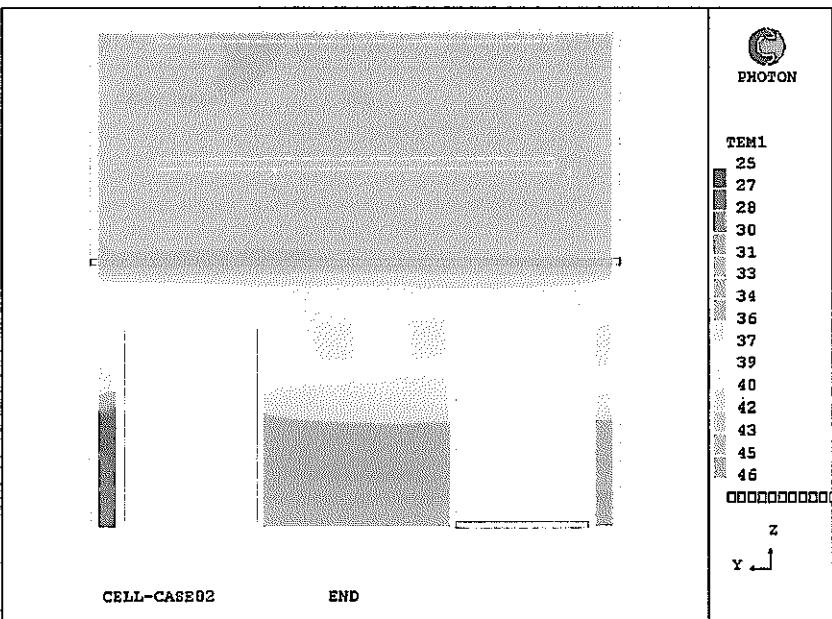
図3. 2-3 CASE2 低流速条件の各部の温度 (1/2)



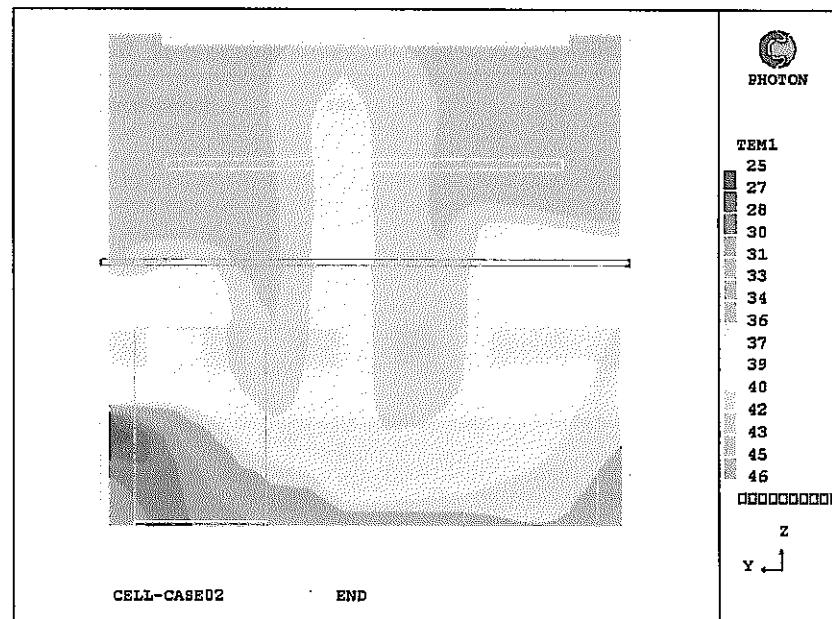
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度

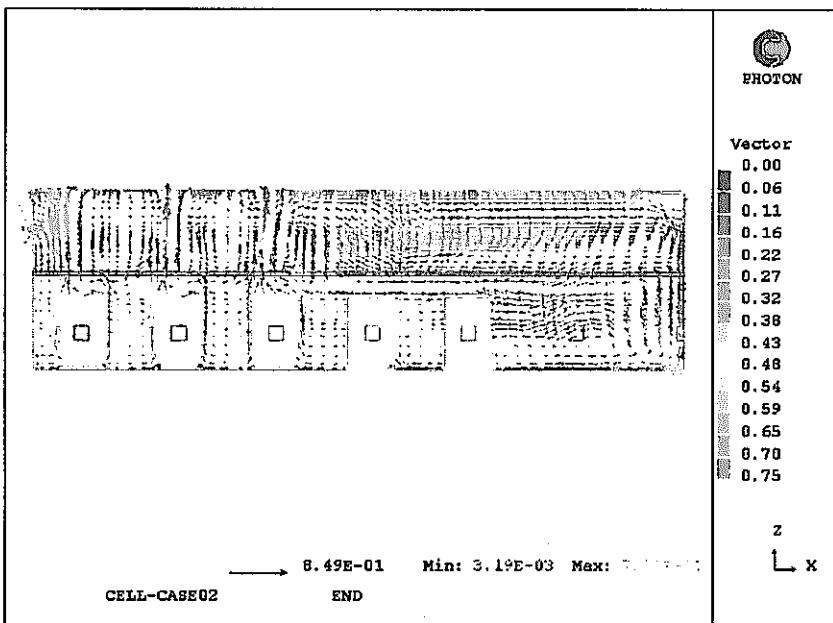


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

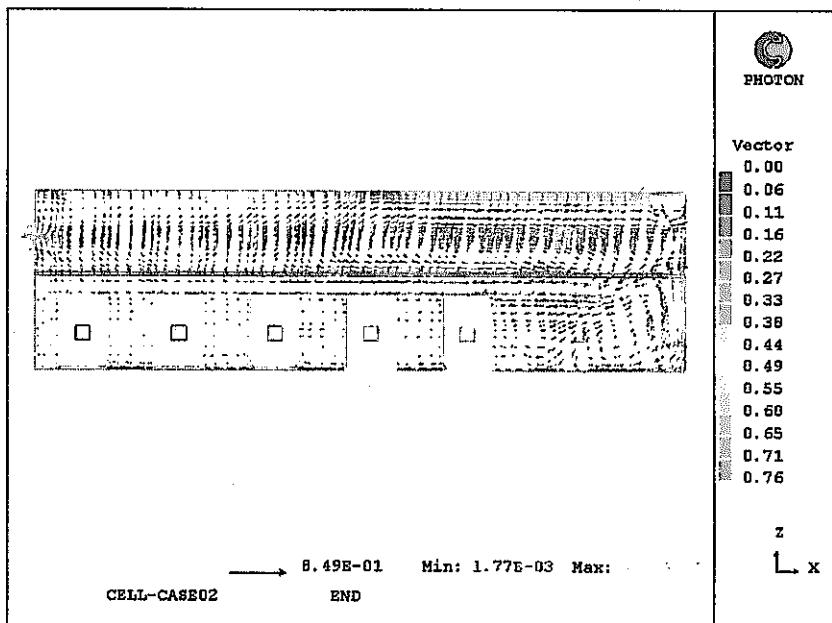


(8) 短辺方向の対称面の温度

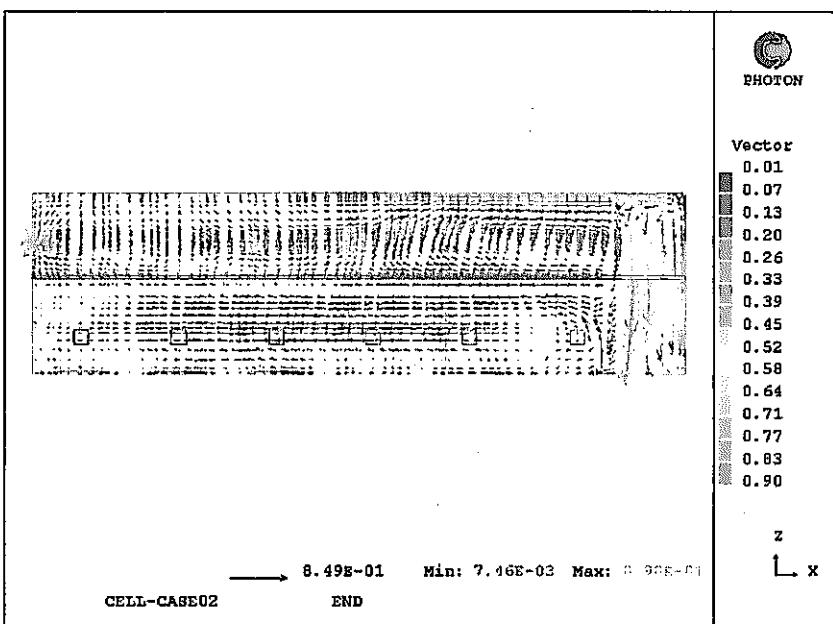
図 3 . 2 - 3 CASE2 低流速条件の各部の温度 (2 / 2)



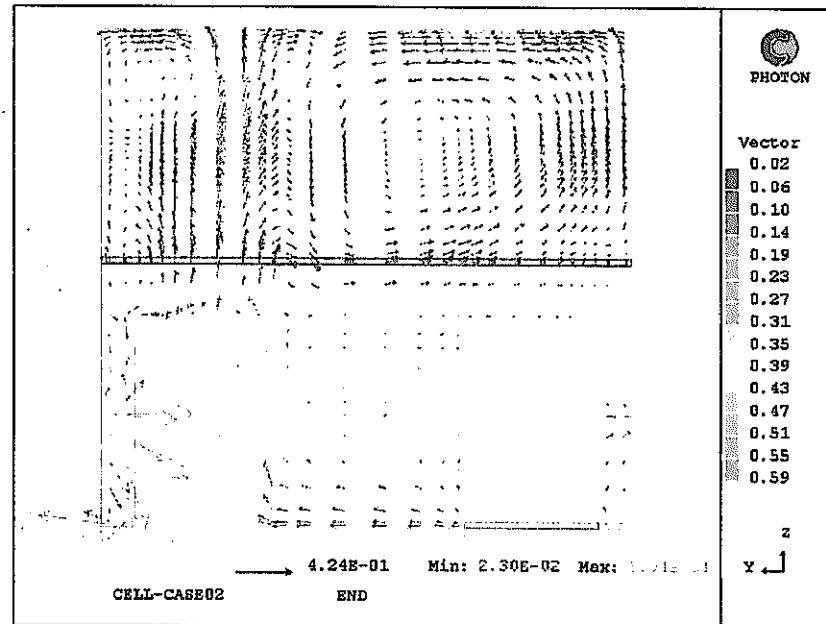
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(3) 対称面の長手方向断面の流況



(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

図3. 2-4 CASE 2 低流速条件の各部の流況 (1/2)

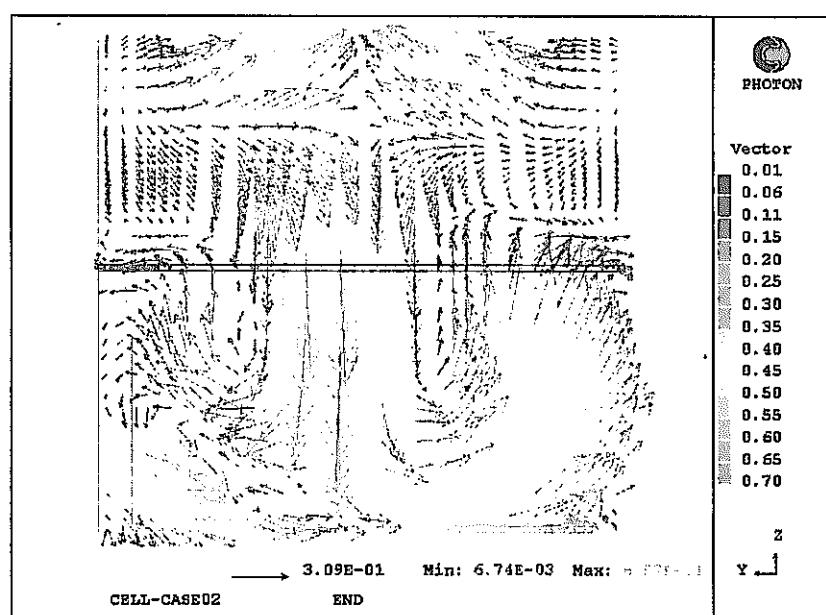
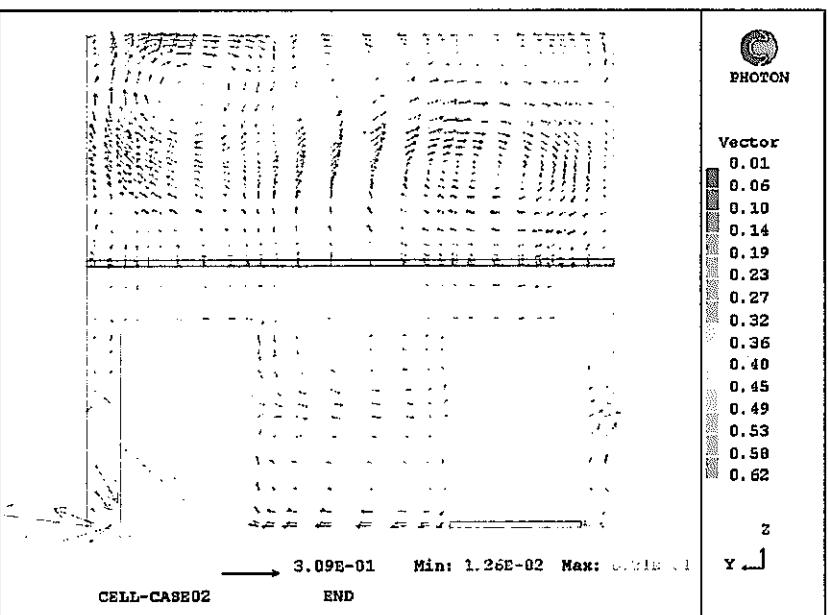
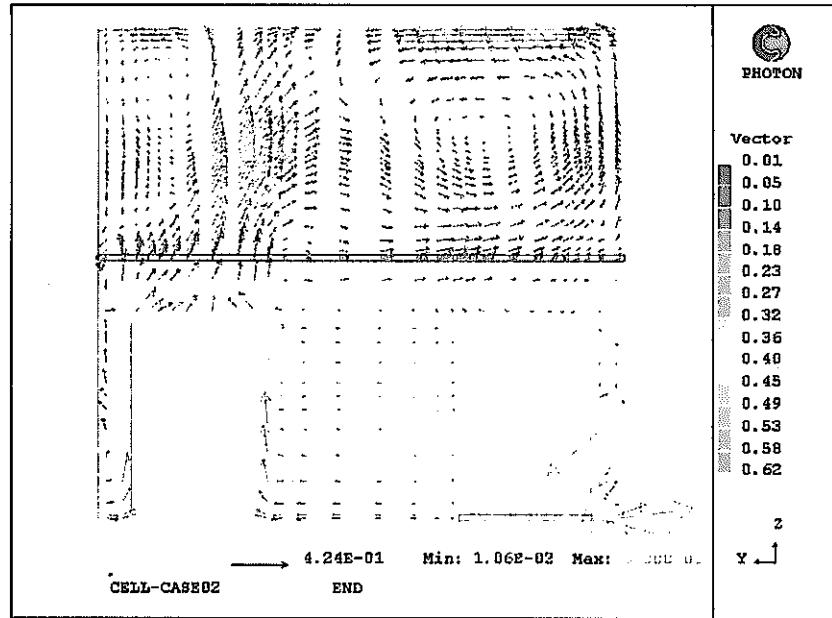
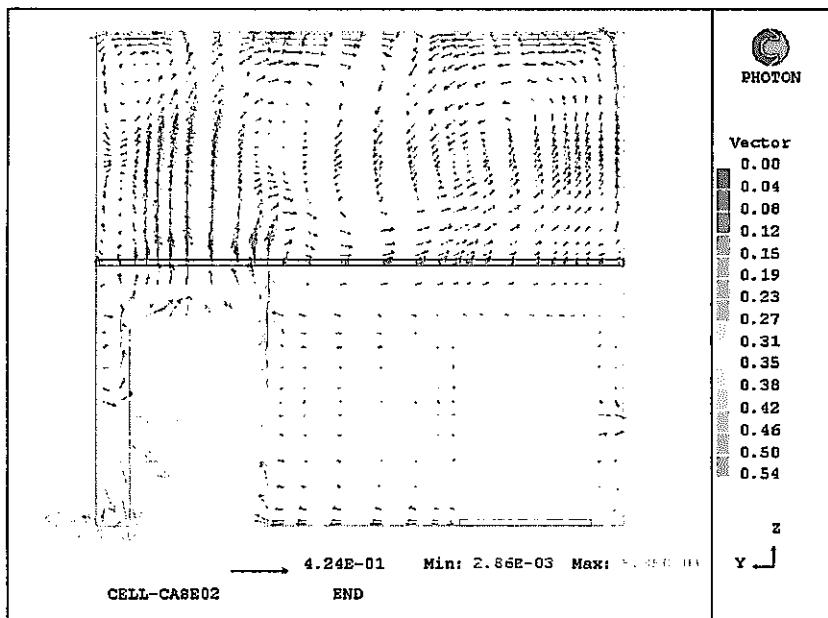


図 3. 2 - 4 CASE 2 低速条件の各部の流況 (2 / 2)

3. 3 ケース 3 の解析結果

解析モデル 3(ケース 3)について初期条件(高流速条件)のケースで解析を行った結果を図 3. 3-1 に温度分布、図 3. 3-2 に流速分布を示す。また、低流速条件の結果を図 3. 3-3 に温度分布、図 3. 3-4 に流速分布を示す。

高流速条件の全体流況は、セル中央からの下降流が床に当たって、床面近傍を流れる水平流となりのない側面の壁及び中央の通路を通り、長手方向の流出口から流れ出している。水平流の一部は機器に当たって上昇し、中央付近の空間部分に大きな循環流を作っている。

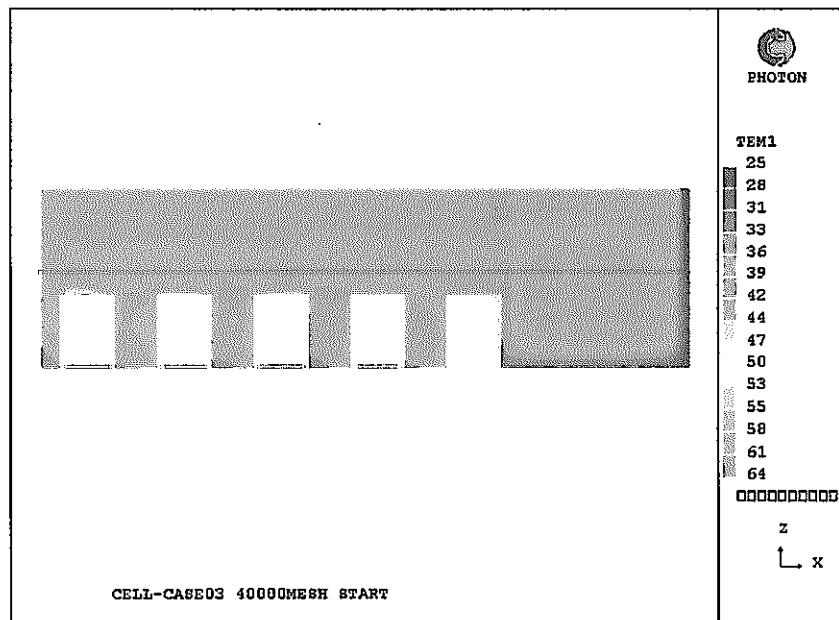
したがって、高流速条件でのセルの最高温度は最も下流側(長手方向壁側)になる高発熱機器上面部に発生し、約 64°C と若干他のケースより高めである。ただし、セル全体の循環流量は大きく高発熱機器上面付近とセル中央下降流部分以外はほぼ均一な温度分布となっている。

一方、低流速の場合にも基本的な流況は同様であるが、全体流量が減って低発熱機器と高発熱機器の発熱量の差が大きくなるため、短辺方向では高発熱機器から低発熱機器への流れができている。さらに照明レベルより上での流れが少なくなり、スタグナントに近い条件となっている。

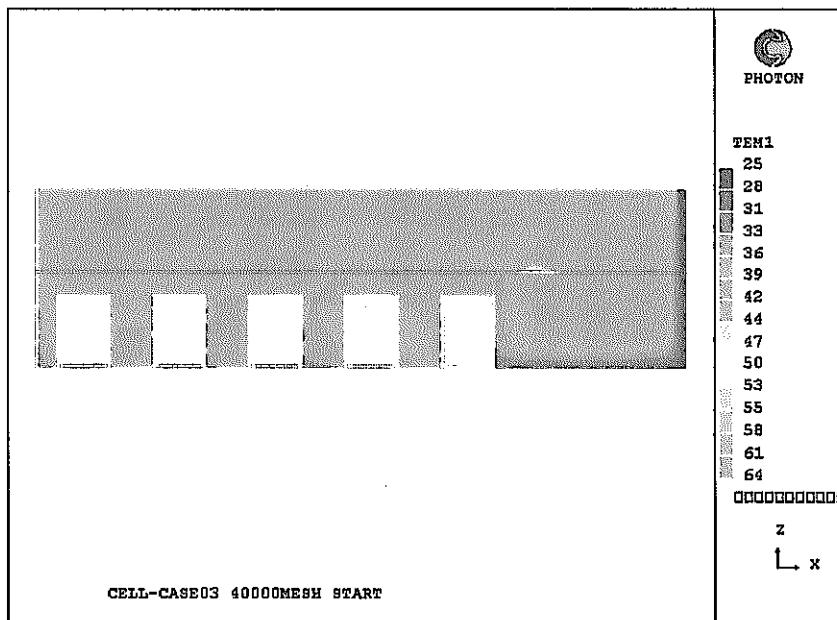
このため、温度分布は照明レベル以上が均一化して 50°C 以上となっており、最高温度は高発熱機器 3 基の上面で約 54°C となっている。

以上のことから部屋全体をバルクで冷却する流れにした場合にはやはり個々の機器の冷却が十分でなくなり、相対的に発熱量が高い場合にピーク温度が高くなる傾向が見られた。同時に本体系ではセル上部のガス空間に冷却の主流がないことから、平成 11 年度の過渡解析⁽¹⁾において見られたような過渡時の不安定性(渦のでき方により、循環流が起きたり、成層化が発生したりする現象)が発生する可能性が高く、安全上、信頼性上望ましくないと考えられる。こうしたことを防止するためには、この体系にさらにケース 2 のようなセル上部の水平流を追加する、高発熱機器のみは直接冷却流を側面から追加する、などの方法が考えられる。

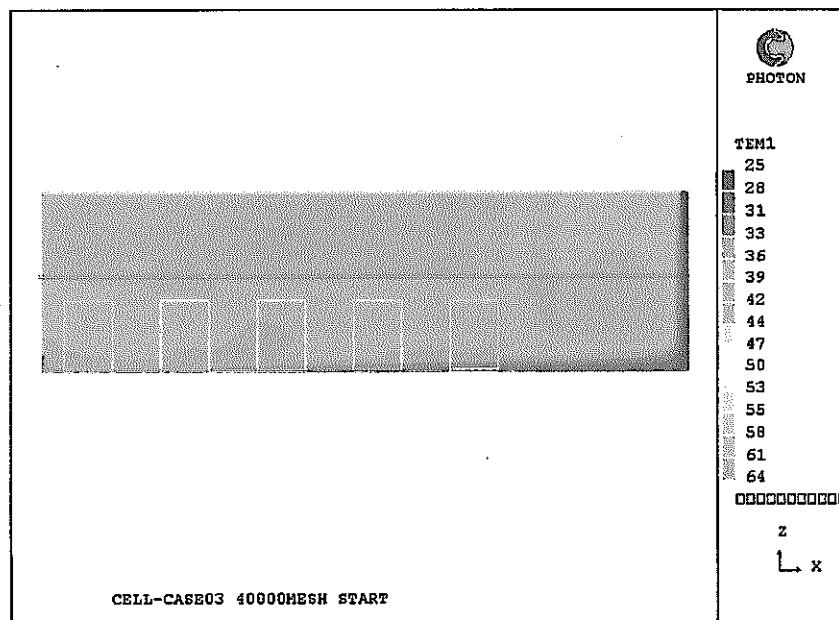
なお、本解析での評価温度が平成 11 年度の定常解析結果⁽¹⁾(高流速で 45°C、低流速で 50°C) に比べて大きく上昇しているが、これは平成 11 年度の解析⁽¹⁾ではガス流量配分を大きく取りすぎていたことを今回見直したことに起因するものである。



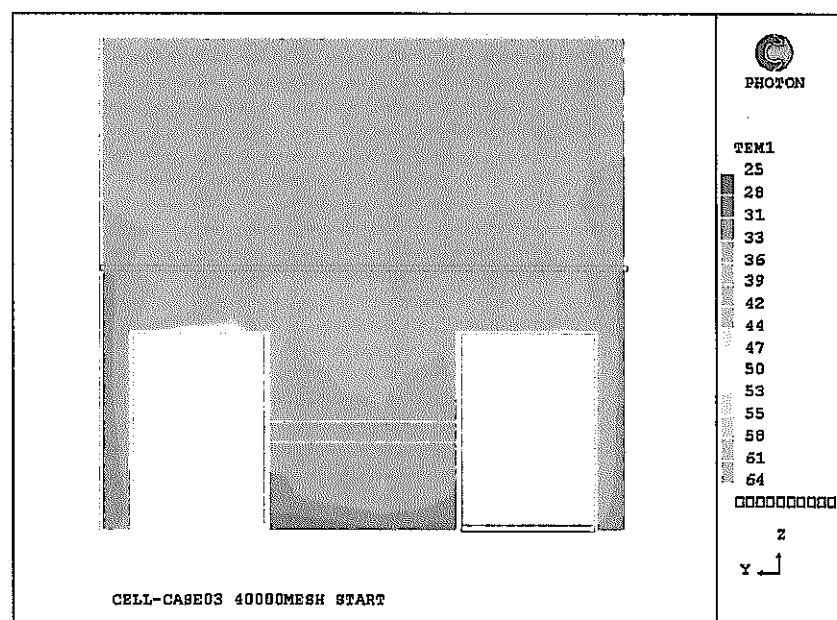
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

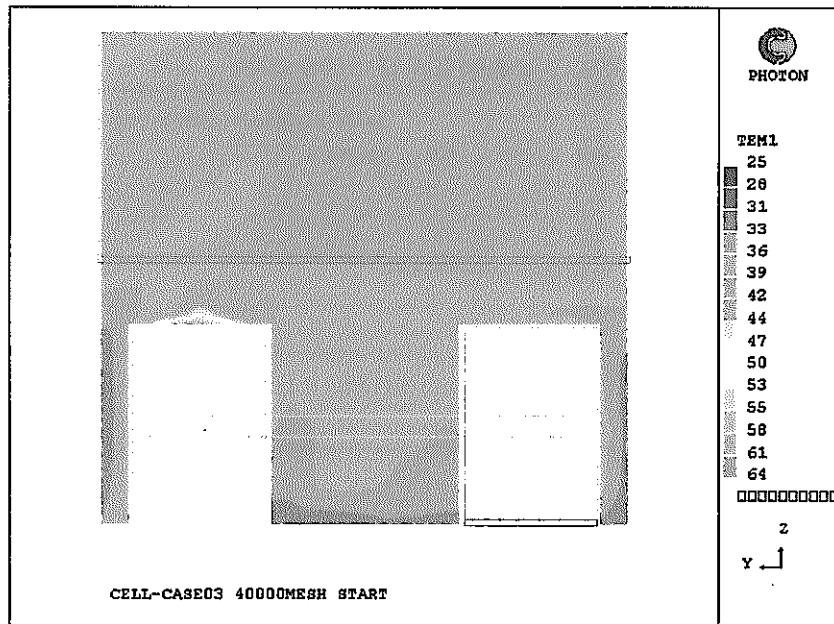


(3)対称面の長手方向断面の温度

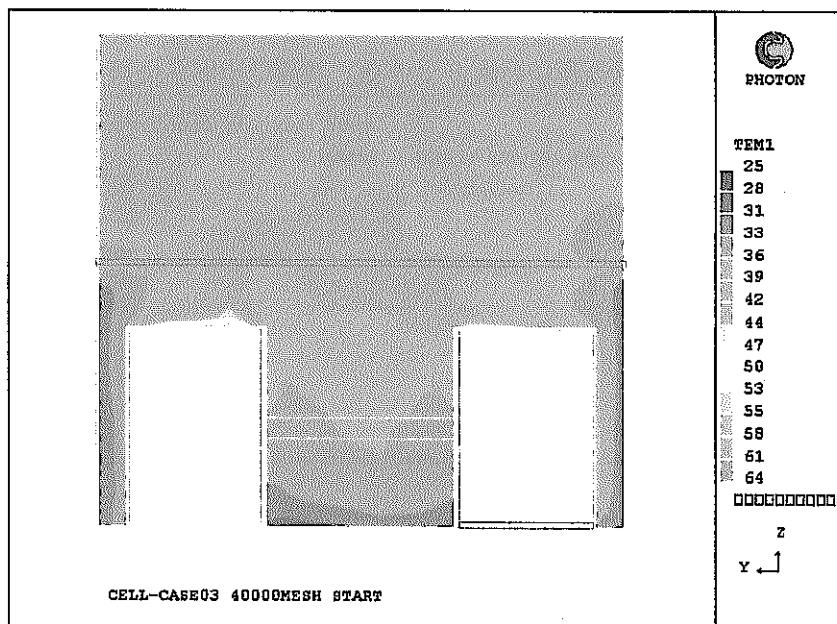


(4)短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

図3. 3-1 CASE 3 高流速条件の各部の温度 (1/2)



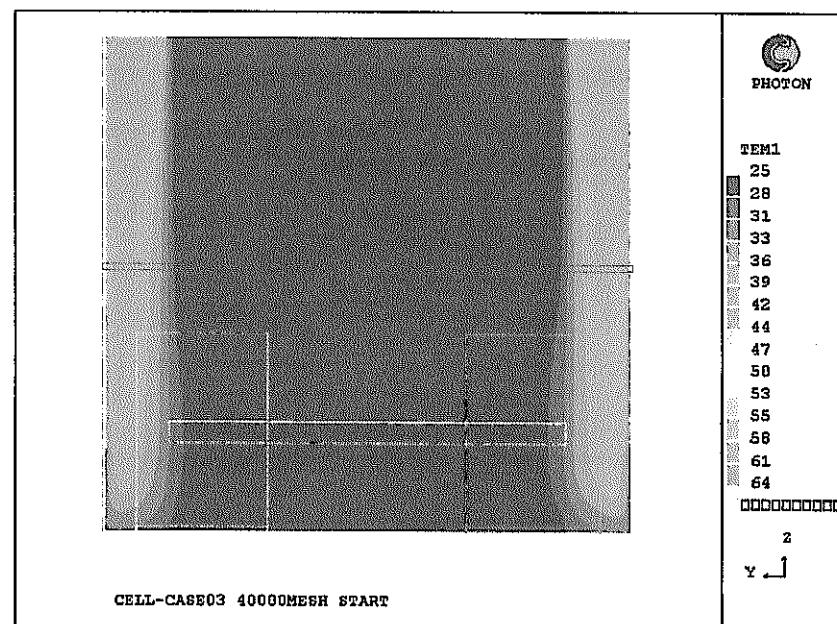
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度

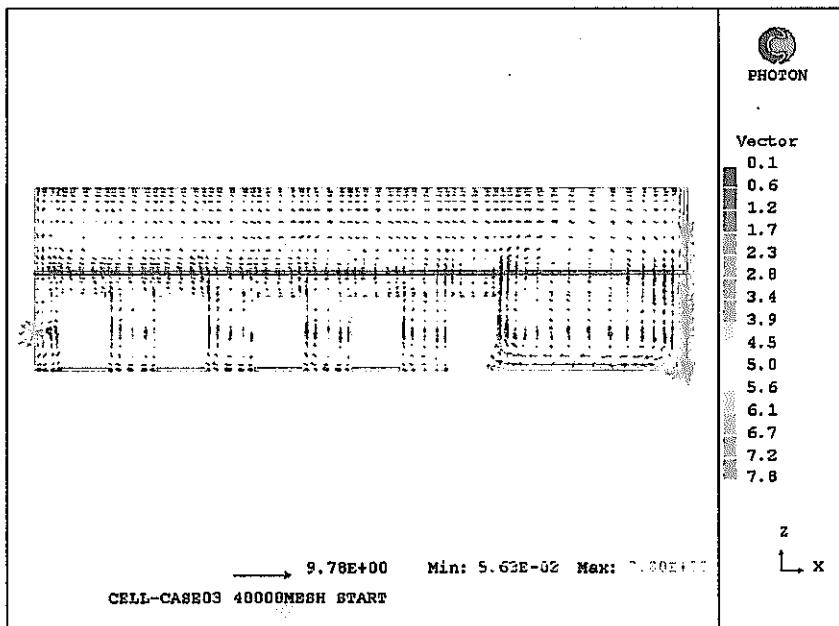


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

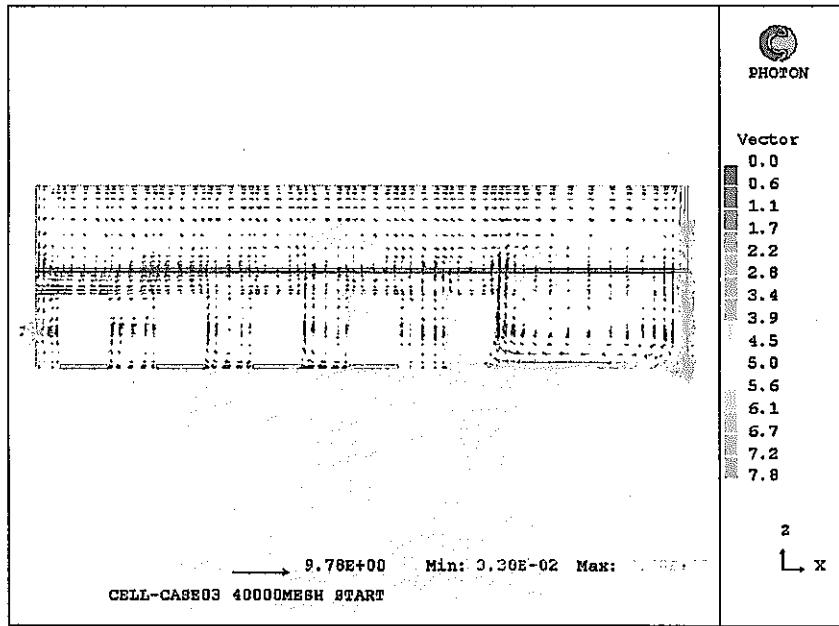


(8) 短辺方向の対称面の温度

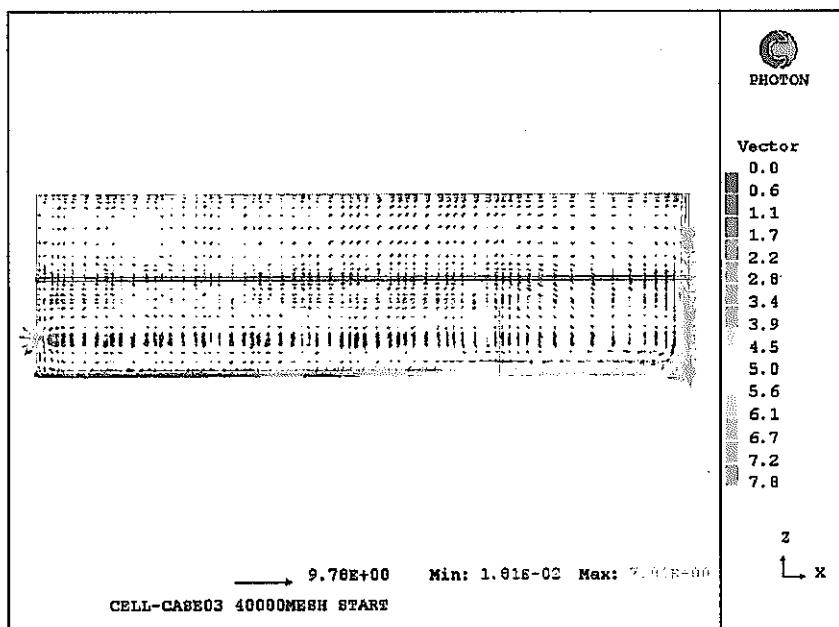
図 3. 3 - 1 CASE 3 高流速条件の各部の温度 (2 / 2)



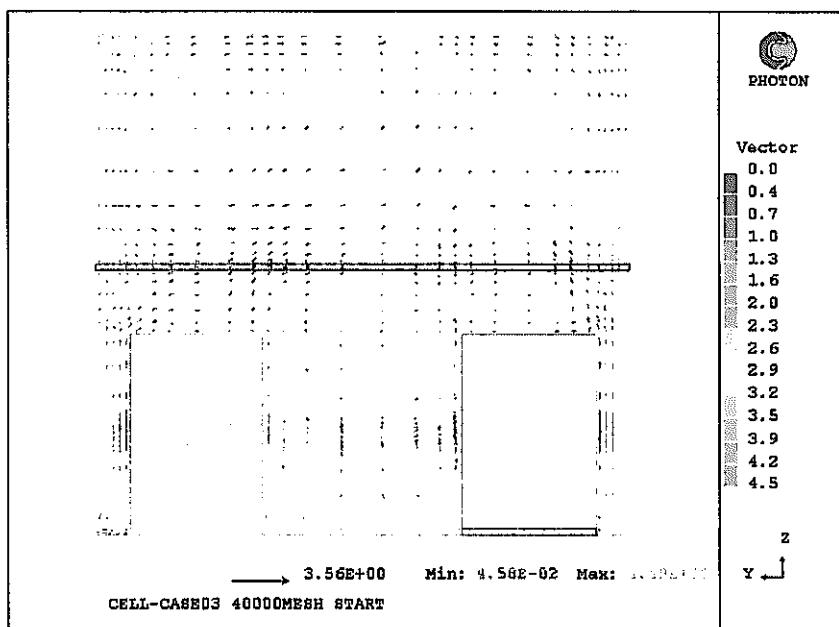
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

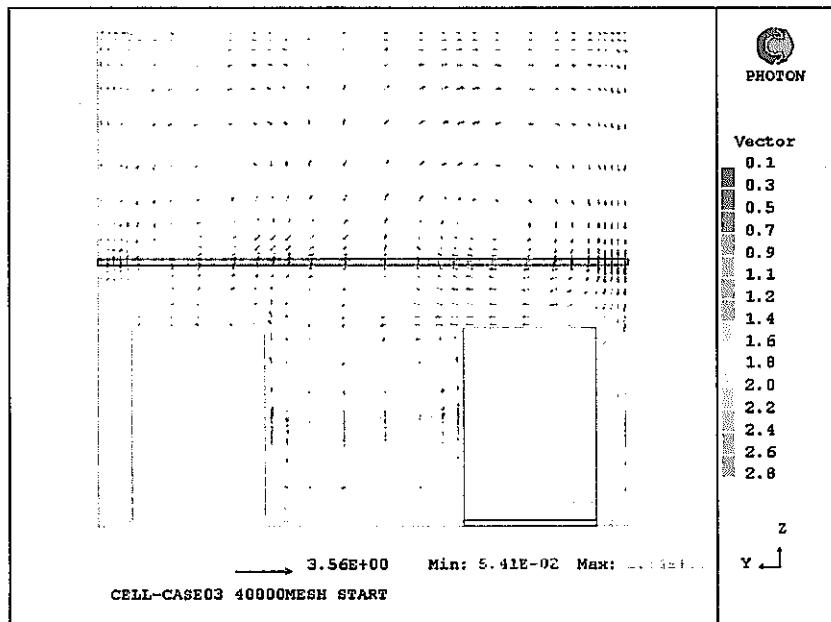


(3) 対称面の長手方向断面の流況

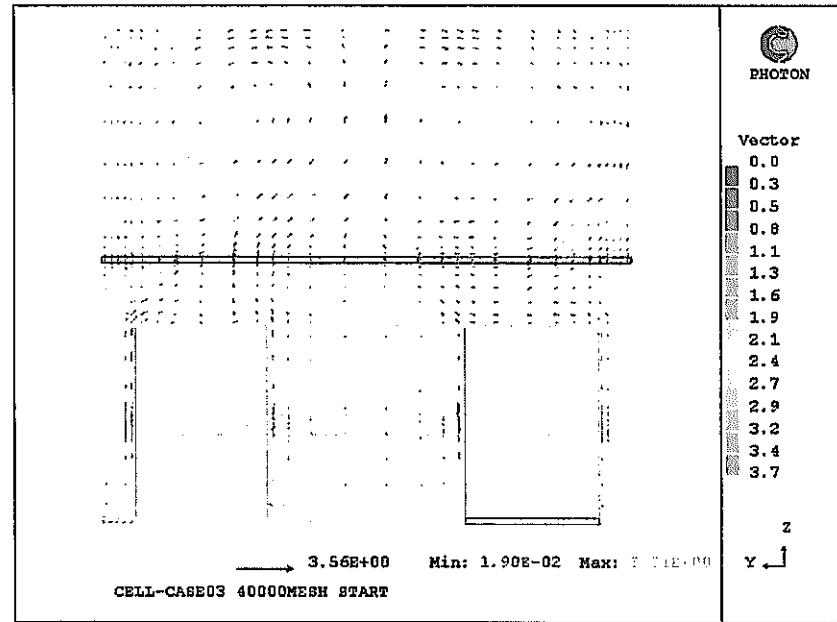


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

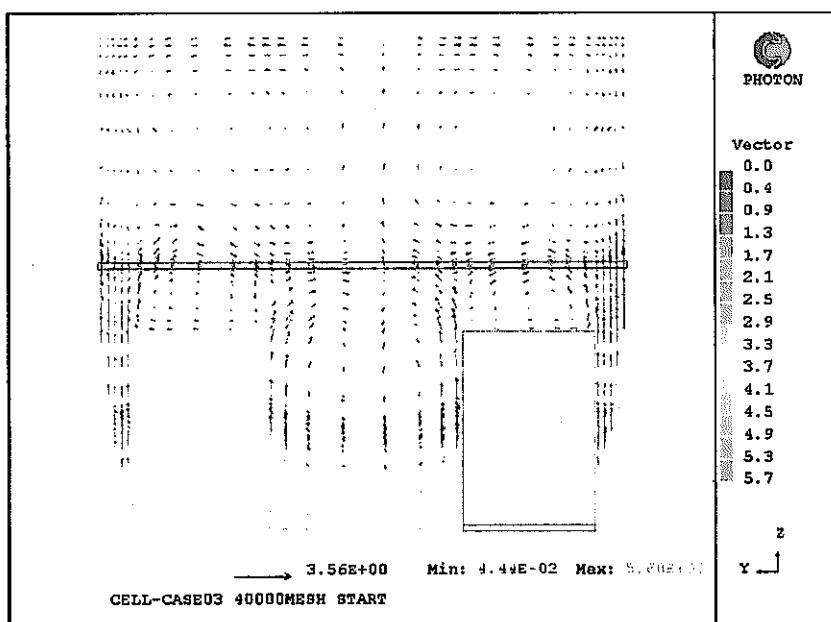
図3. 3-2 CASE 3 高流速条件の各部の流況 (1/2)



(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況



(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況

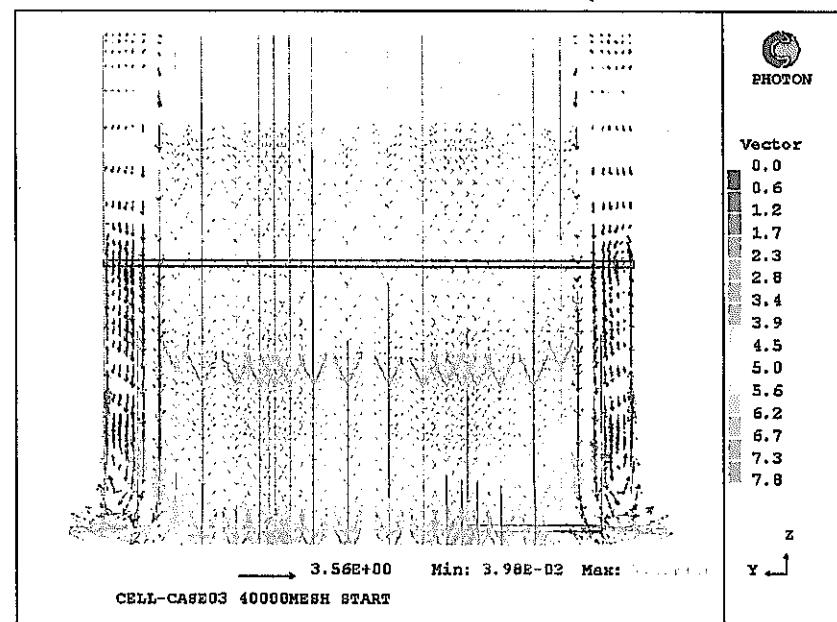
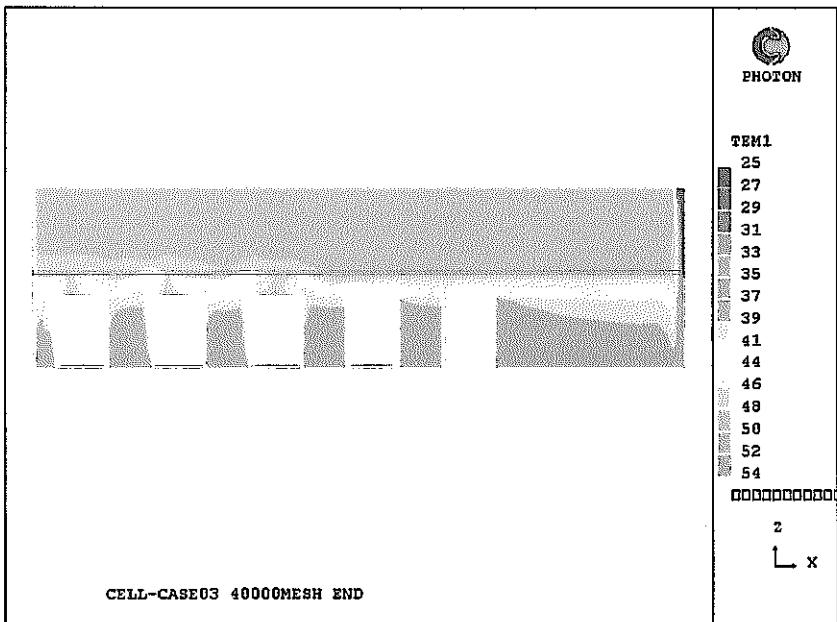
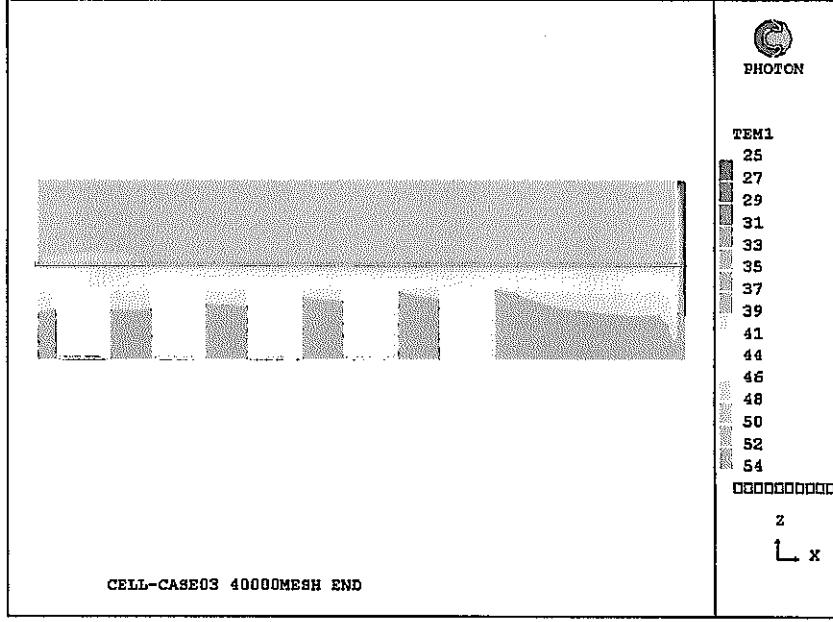


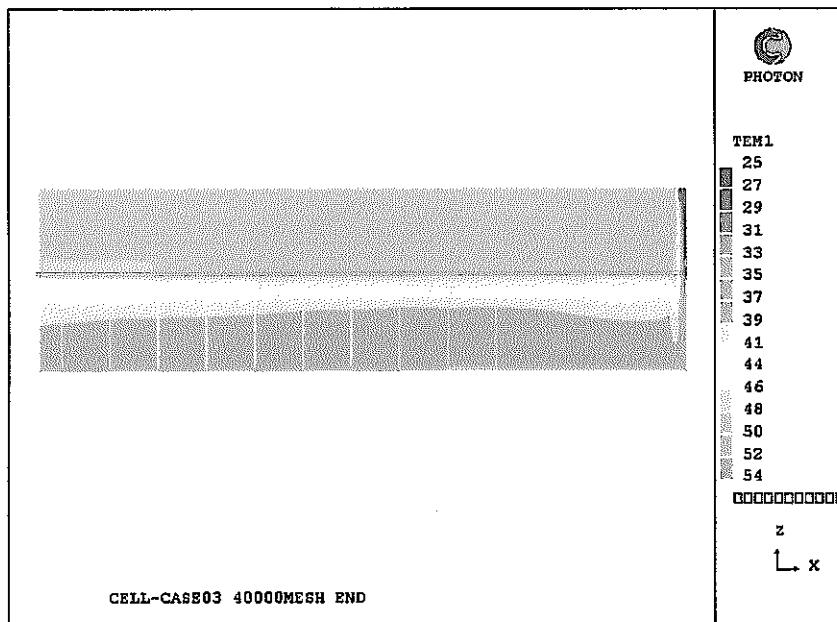
図 3. 3-2 CASE 3 高流速条件の各部の流況 (2 / 2)



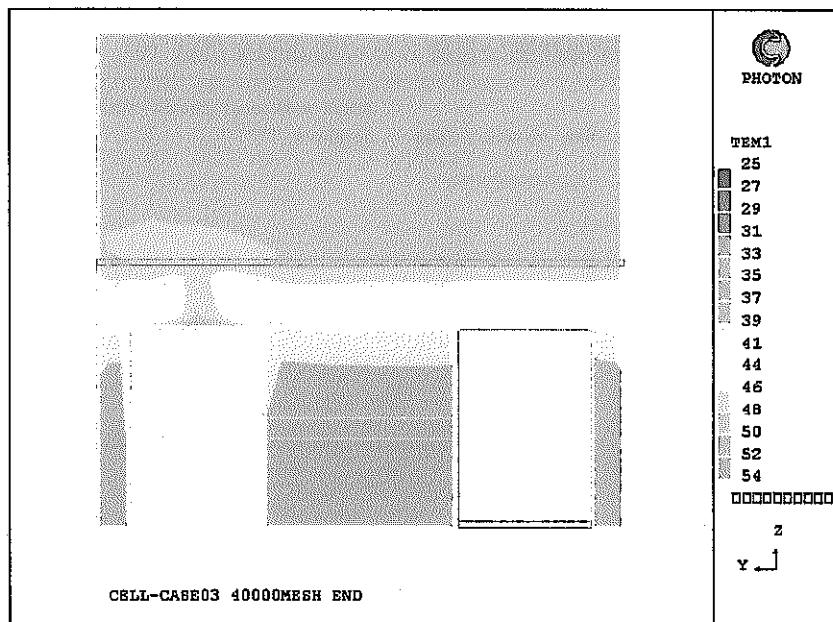
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

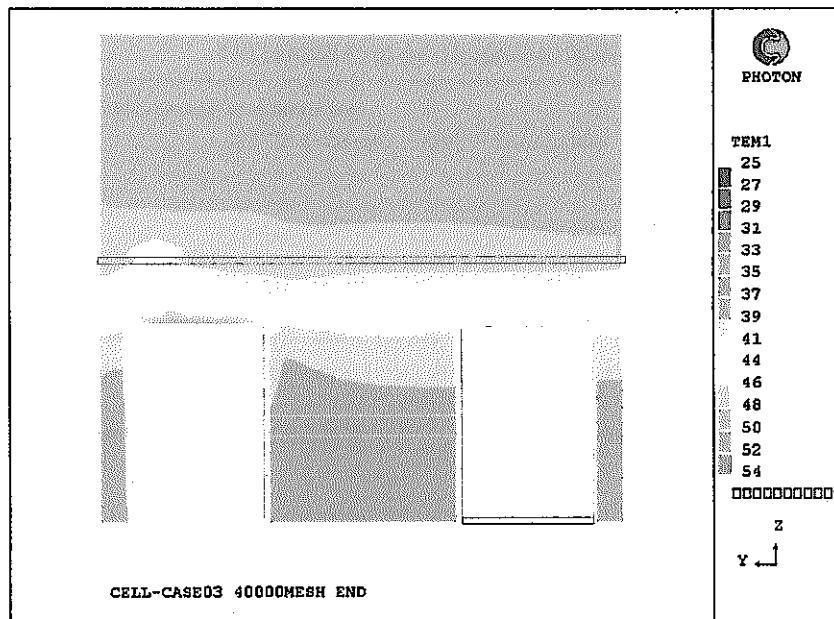


(3) 対称面の長手方向断面の温度

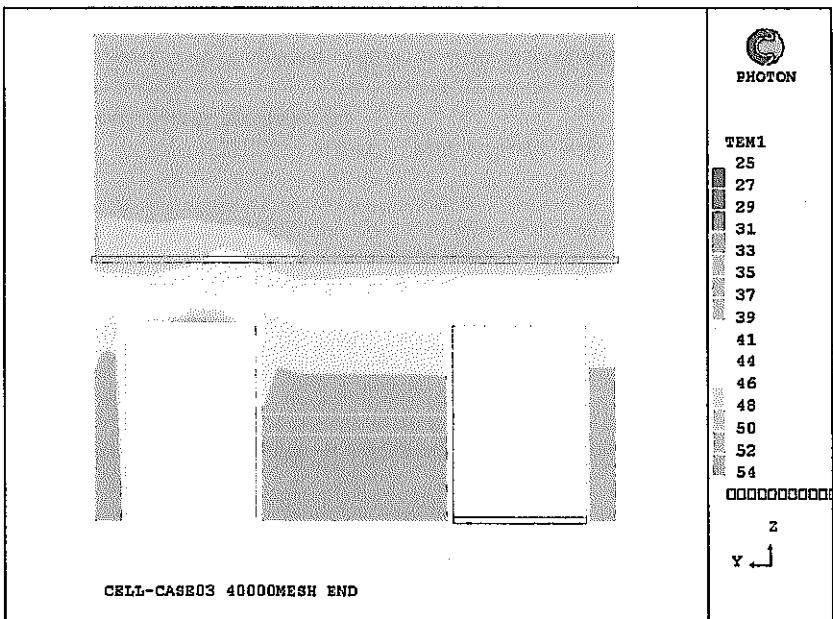


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

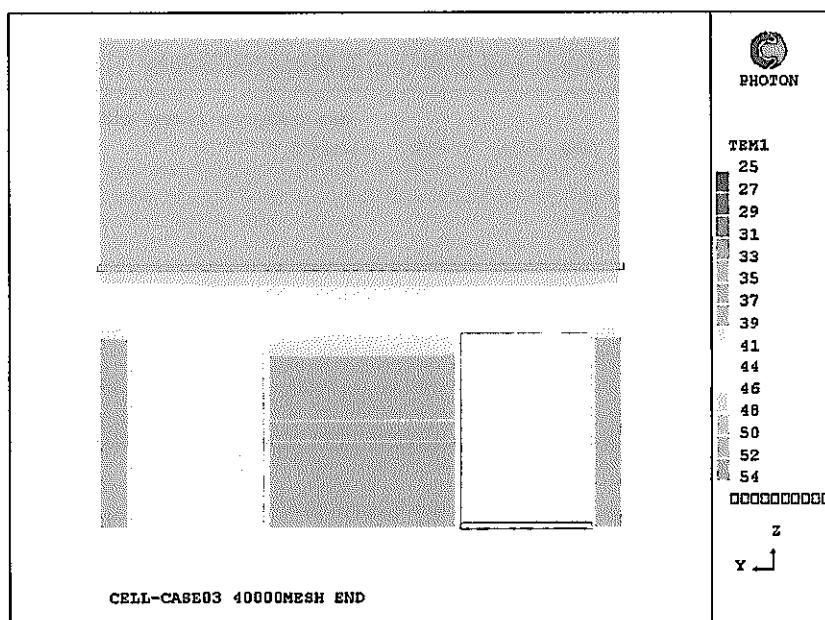
図 3 . 3 - 3 CASE 3 低流速条件の各部の温度 (1 / 2)



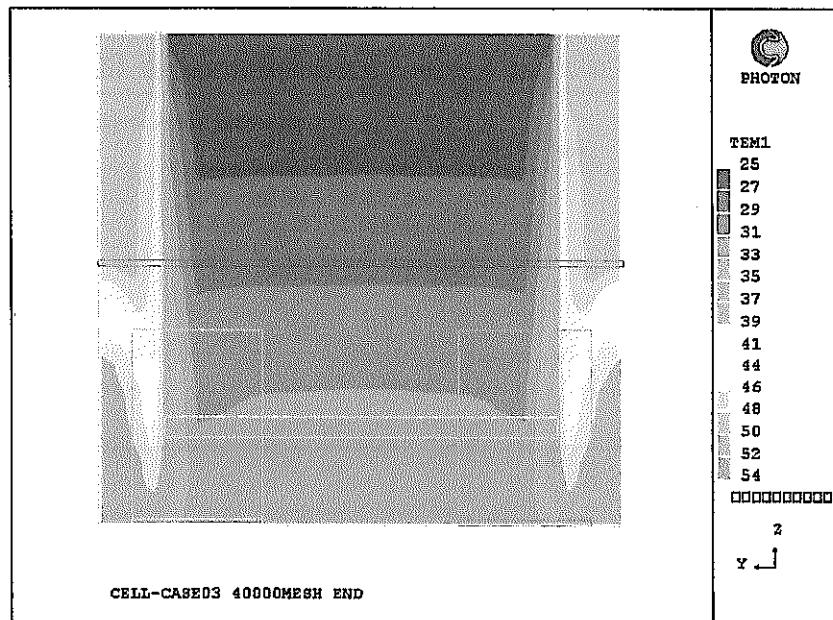
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度

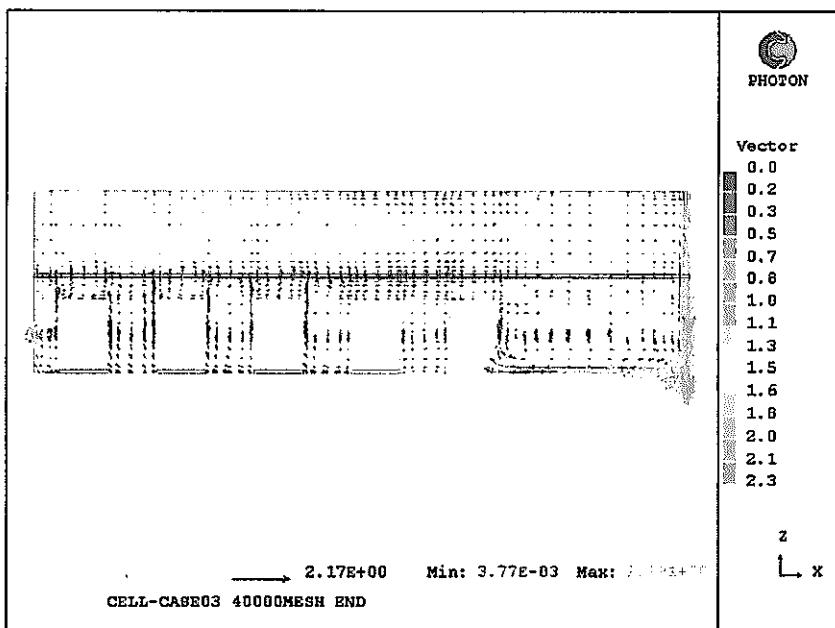


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

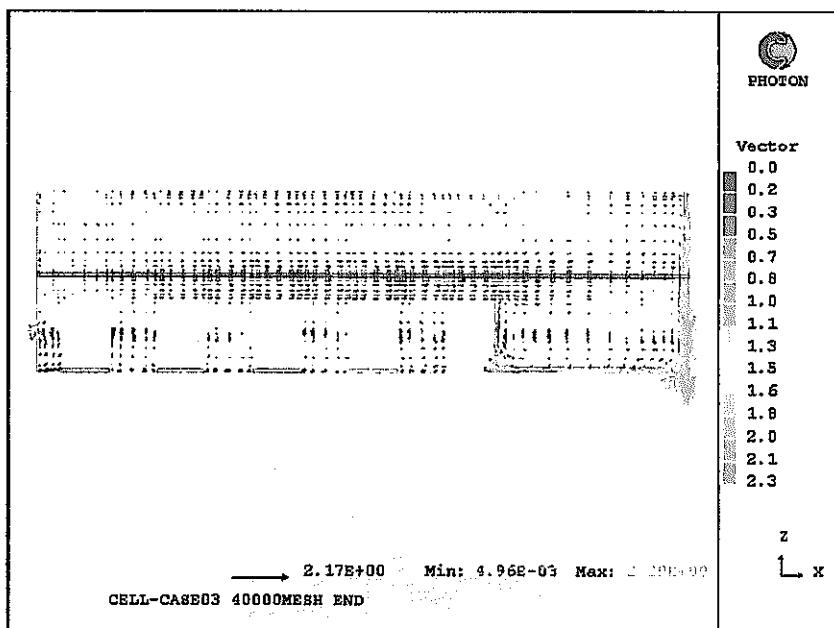


(8) 短辺方向の対称面の温度

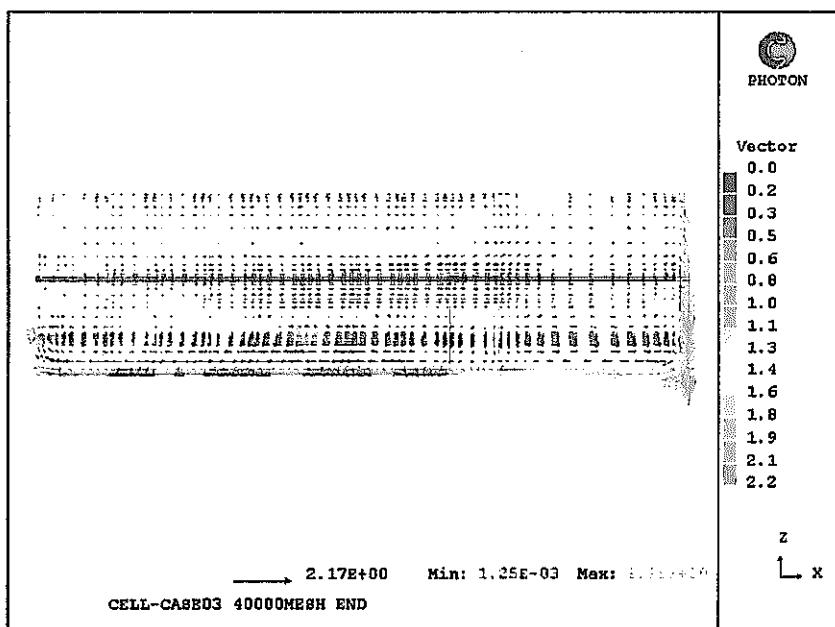
図 3. 3 - 3 CASE 3 低流速条件の各部の温度 (2 / 2)



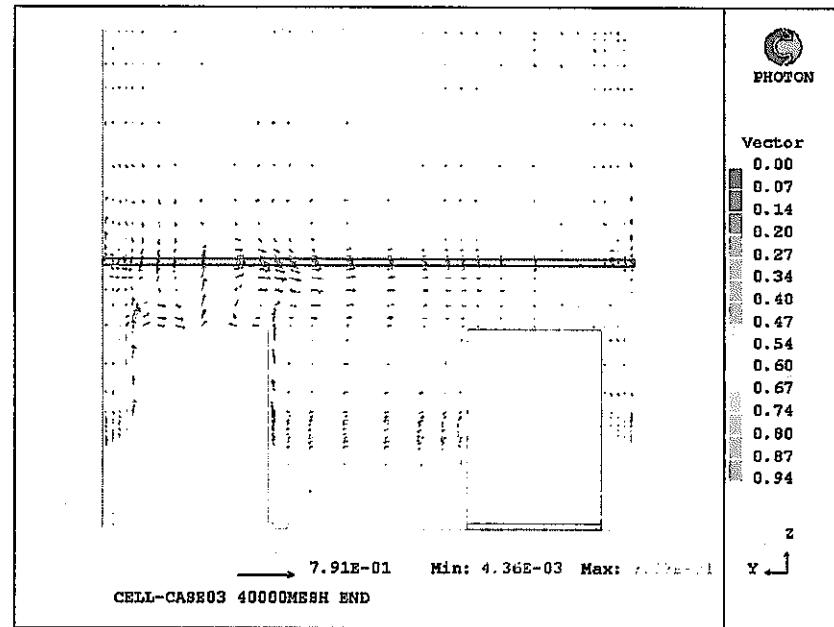
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



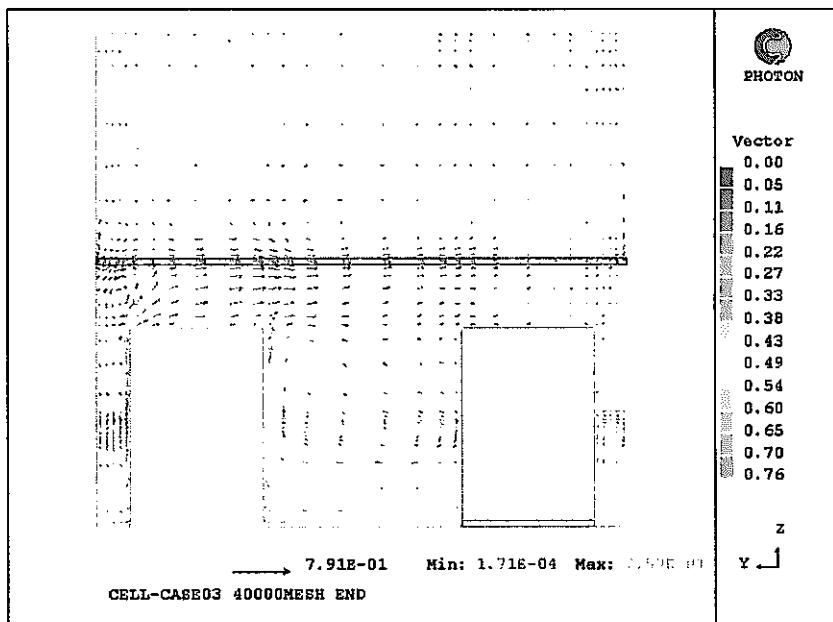
(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



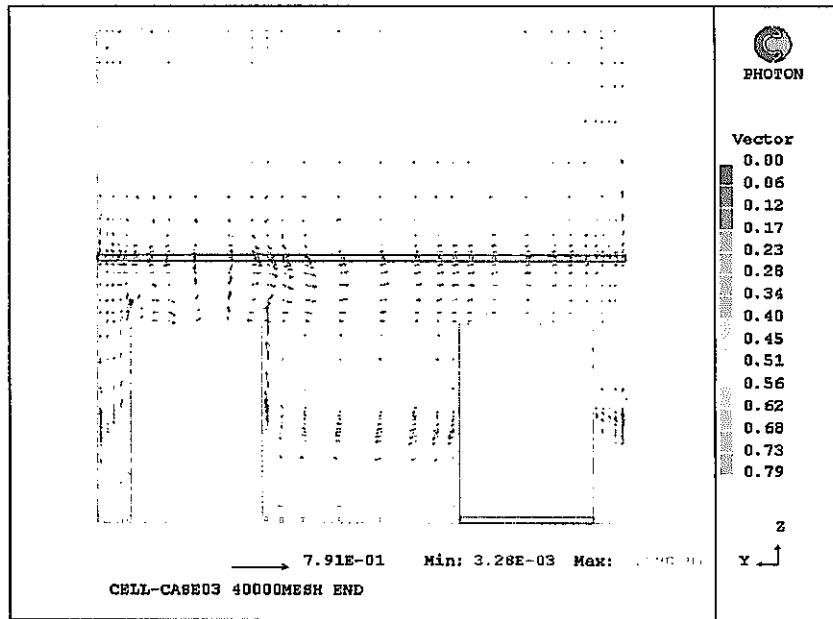
(3) 対称面の長手方向断面の流況



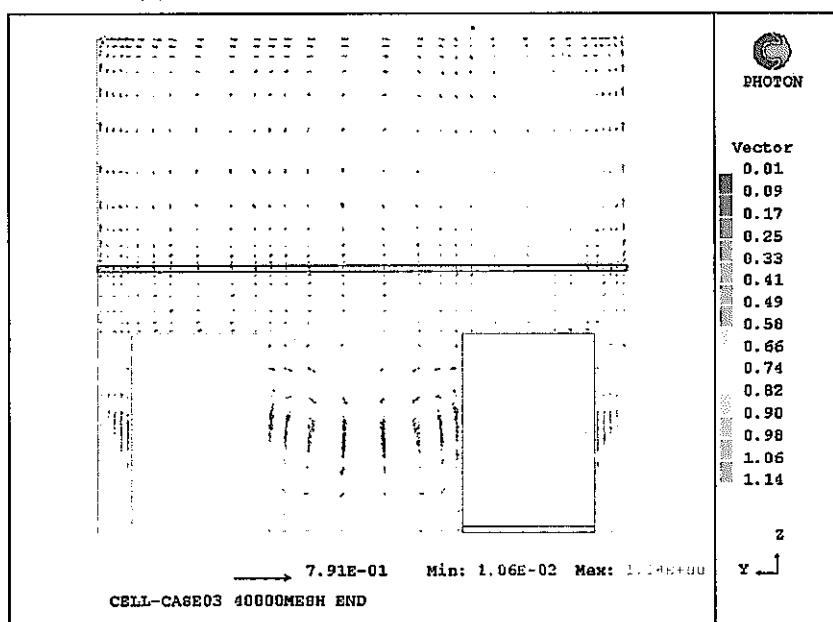
(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況



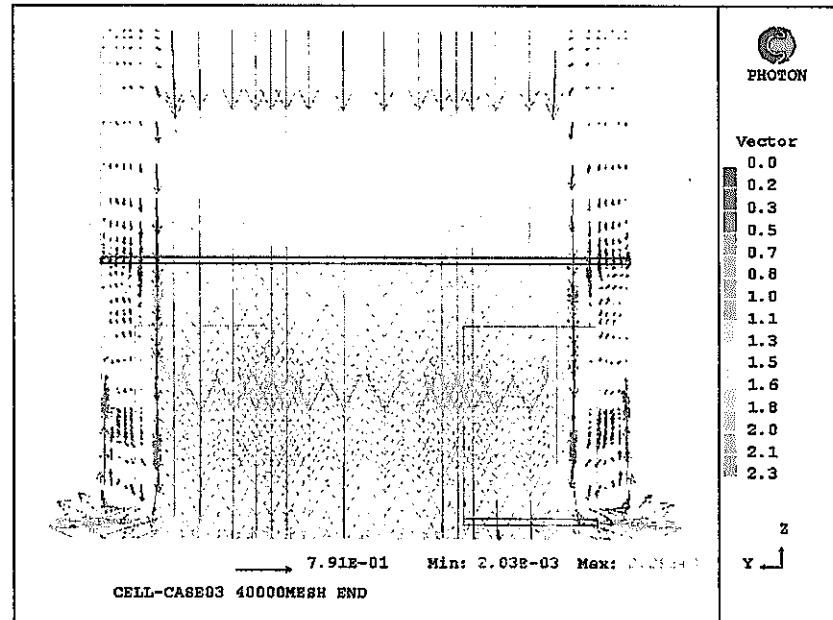
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況



(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況



(8) 短辺方向の対称面の流況

図 3. 3-4 CASE 3 低流速条件の各部の流況 (2 / 2)

3. 4 ケース4の解析結果

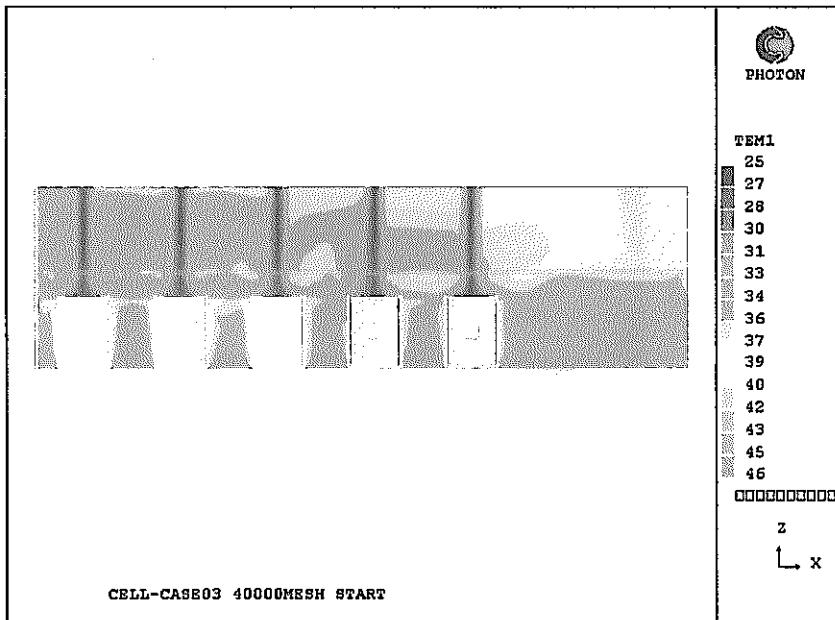
解析モデル4(ケース4)について初期条件(高流速条件)のケースで解析を行った結果を図3.4-1に温度分布、図3.4-2に流速分布を示す。また、低流速条件の結果を図3.4-3に温度分布、図3.4-4に流速分布を示す。

高流速条件の全体流況は、天井からの下降流が個々の機器の上面に当たり、横に広がった後、側面の流出口から流れ出ている。このため各機器上面は低温になっており、セル内最高温度は高発熱機器の側面に発生しているが、最高温度は46.3°Cと個別に冷却している効果もあり、4つのケースの中で最も小さくなっている。また、セル上部の平均的な温度も下降流として冷却していることもあり、37°C程度と低くなっている。一方、冷却流がないセル中央部の照明上方の領域も温度が高くなっている、熱だまりに近い状態になっていることが考えられるが、これについてはこの部分に冷却材の出口を設けることで改良されると考えられる。

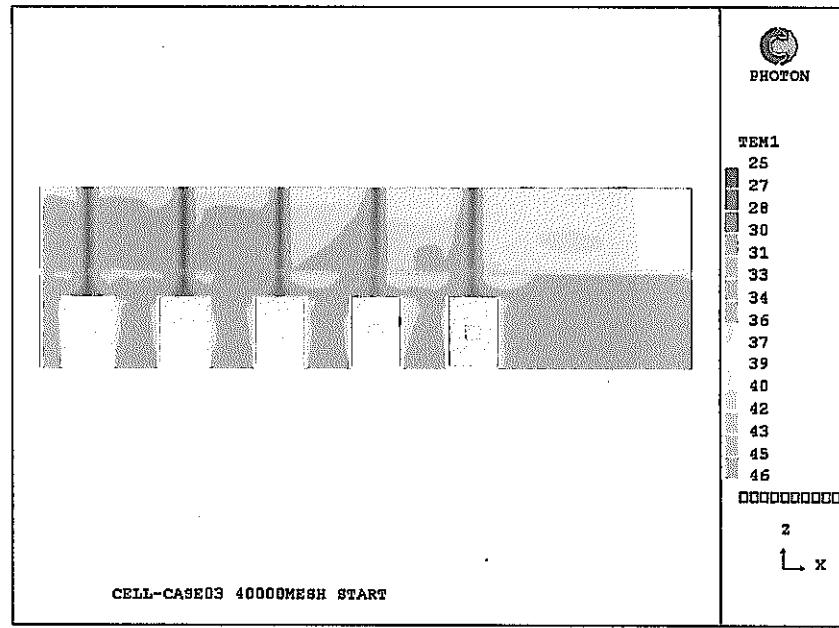
一方、低流速条件では流況は大きく異なり、高発熱機器のうち壁から1基目と2基目の機器では発熱による上昇流が大きく発生し、下降流が上昇流に押されて低発熱機器側に流れるような流況が見られる。これは、高発熱機器の発熱量が下降流に対して大きく集中しているためと考えられる。このため、最高温度は壁から1基目と2基目の高発熱機器に上面に発生しており、50.6°Cという値となっている。

以上からわかるように本ケースの冷却体系では、個別に機器の冷却材入口を持つことで効率的な冷却が可能となることがわかる。高流速と低流速の流況の差も冷却対象が変わらわけではないので、過渡時の温度ピークを高くする方向にはならないと考えられる。低流速条件での高発熱機器の冷却についても、例えば冷却ガス入口を側面として天井側から流出させるようにするなど、流入出口を入れ替えることでその問題は解決できる可能性もある。

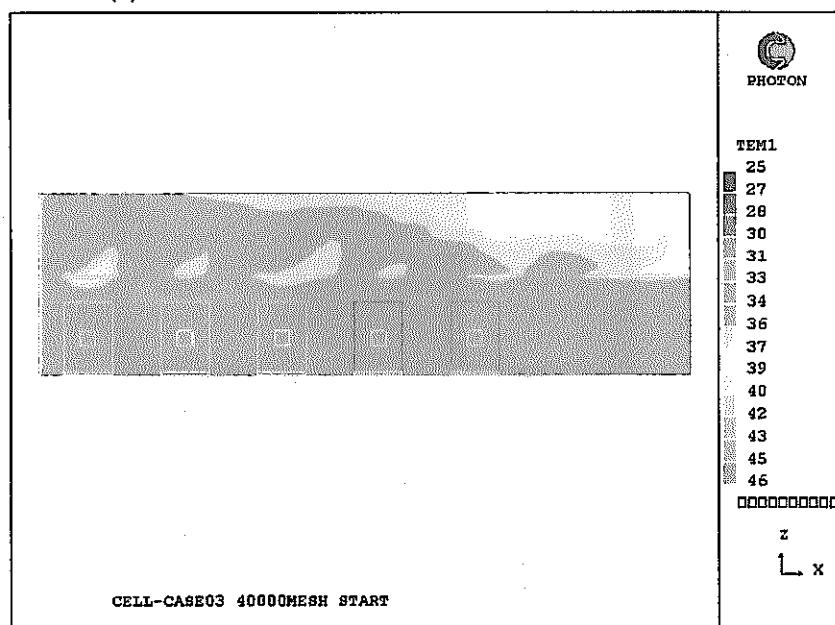
しかしながら、セル内で現実的な冷却を考えた場合、機器上部にインセルクレーンが停止している可能性もある。この場合には下降流がクレーンに妨げられて機器まで届かないことも予想され、その場合にはその部分の機器が過熱する可能性がある。



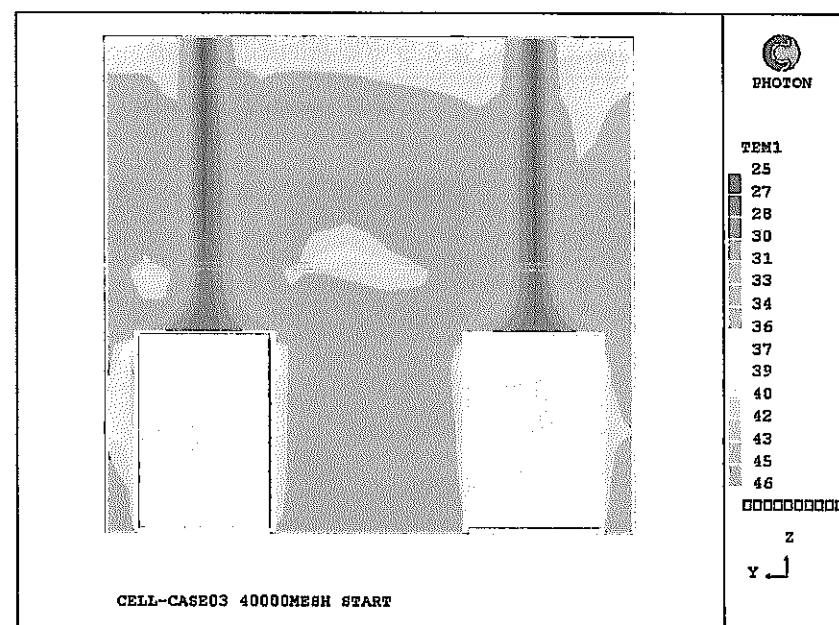
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

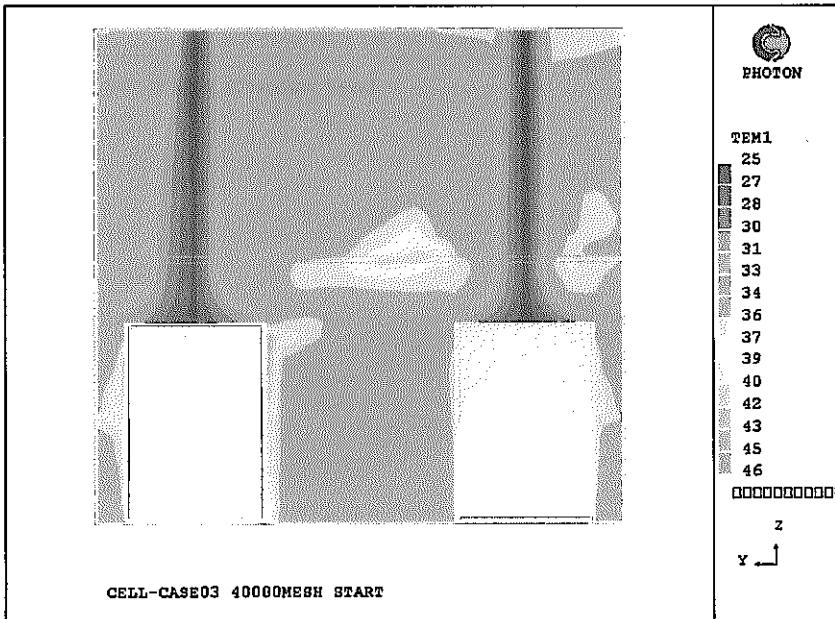


(3)対称面の長手方向断面の温度

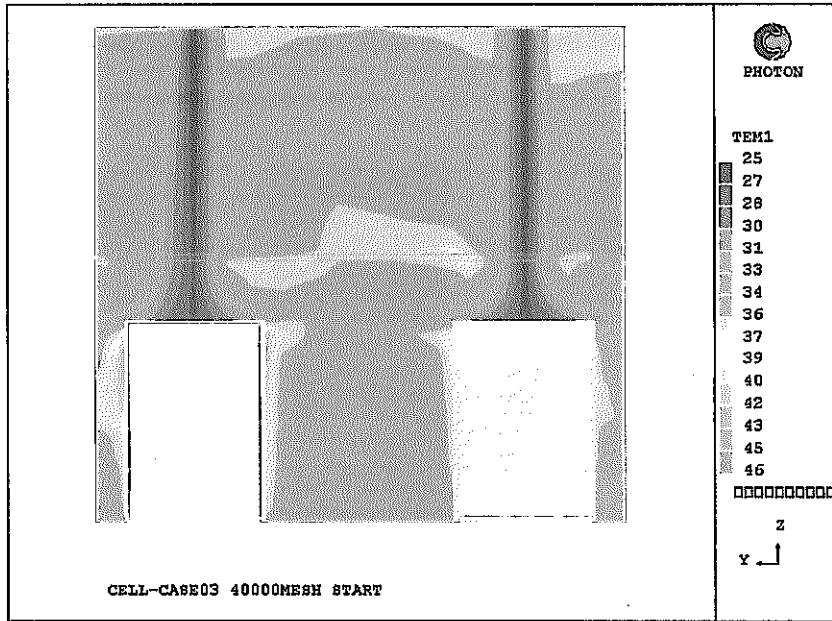


(4)短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

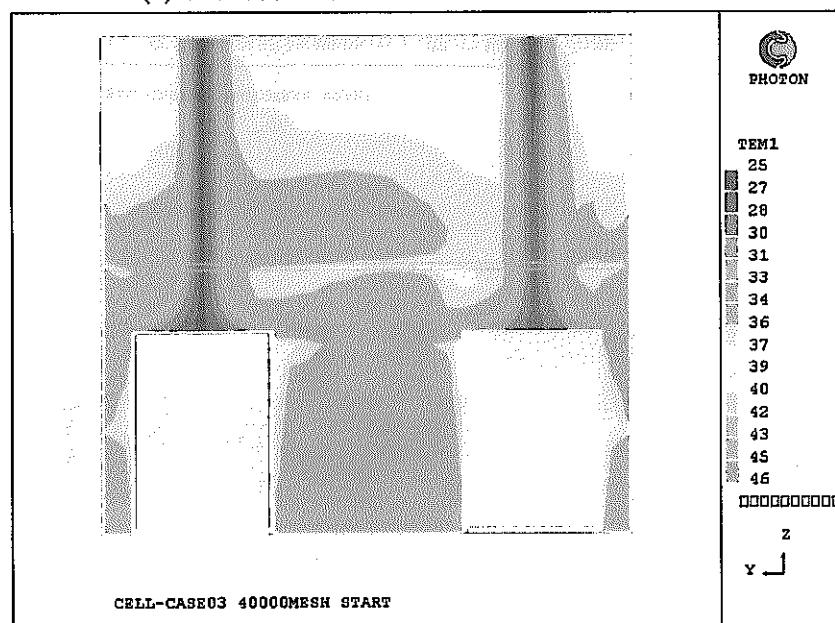
図3. 4-1 CASE 4 高流速条件の各部の温度 (1/2)



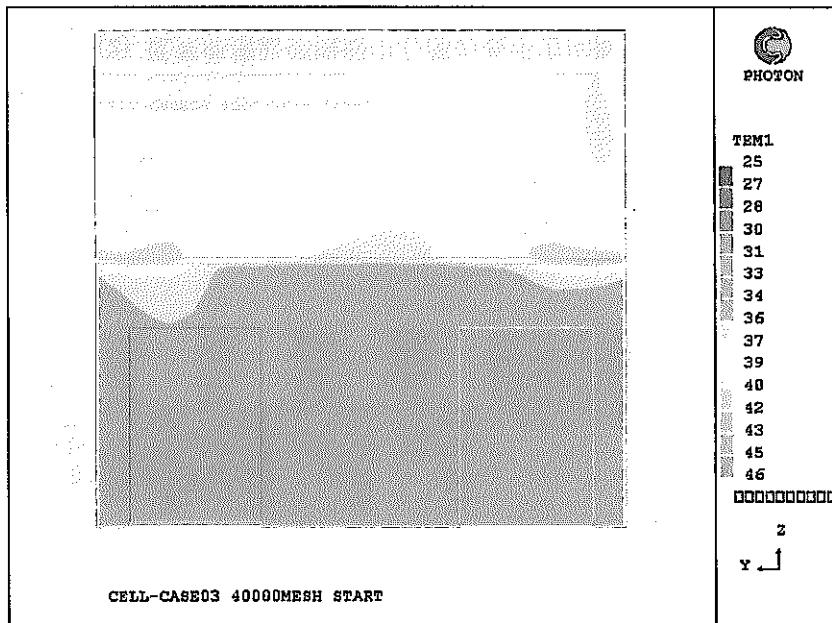
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



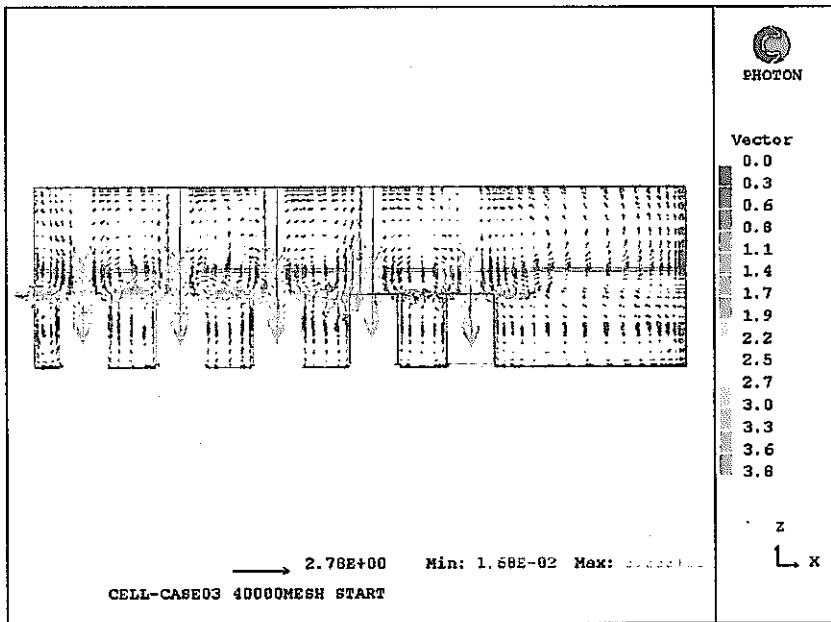
(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度



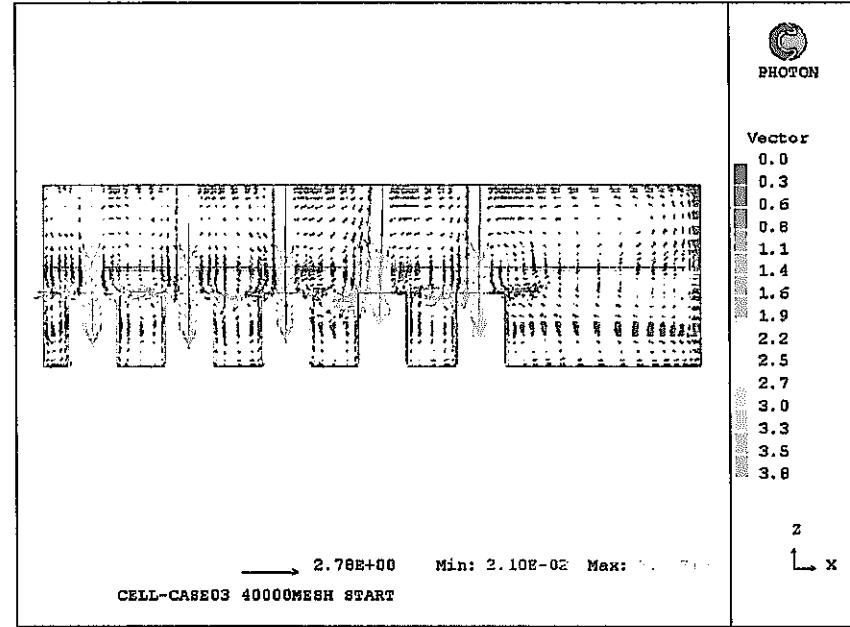
(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度



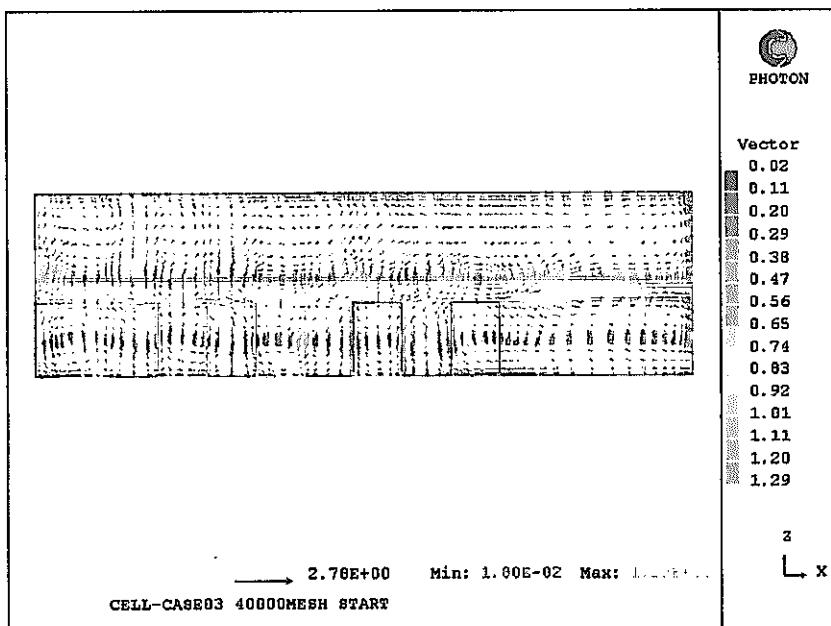
(8) 短辺方向の対称面の温度



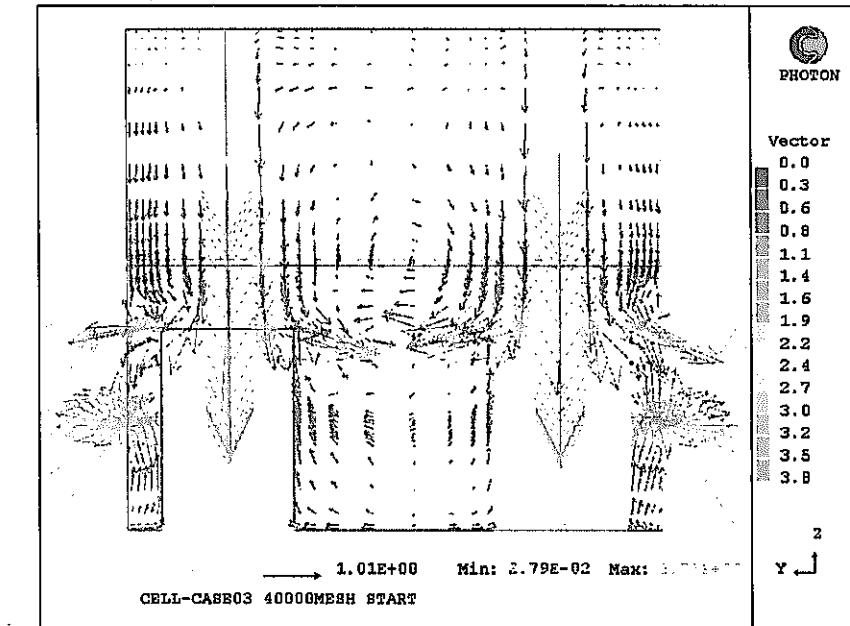
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

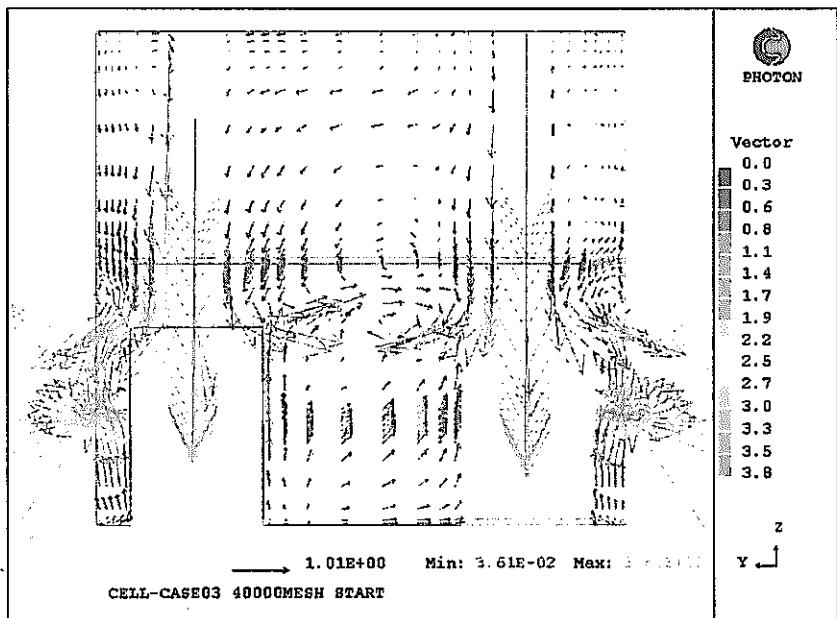


(3) 対称面の長手方向断面の流況

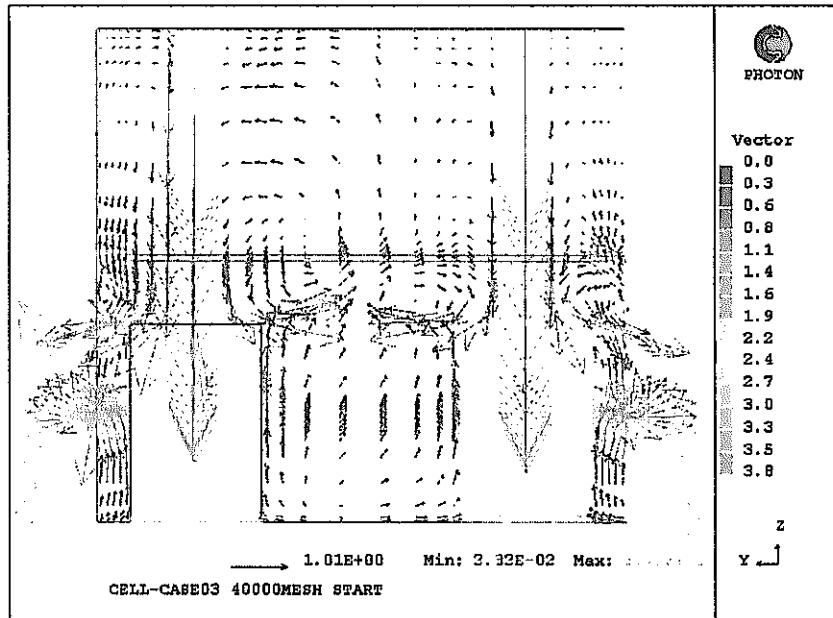


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

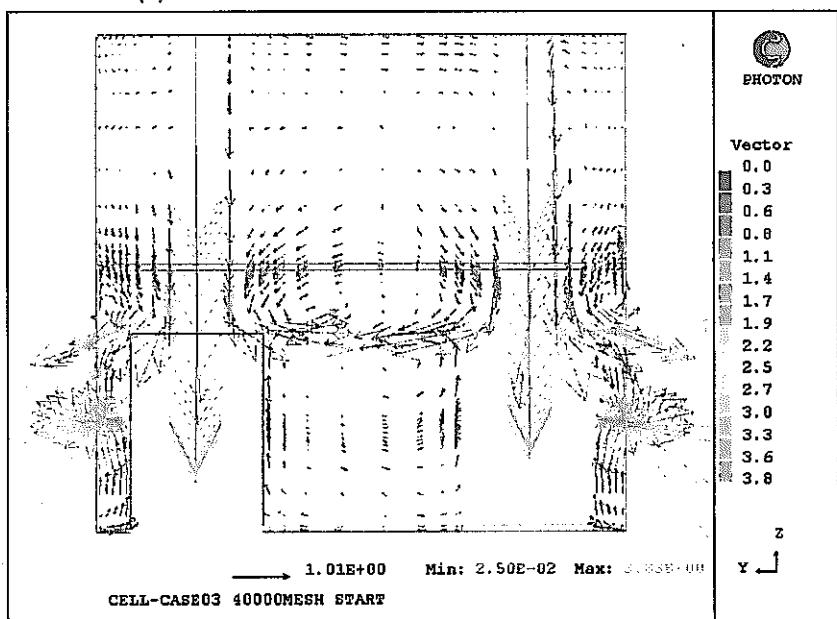
図3. 4-2 CASE 4 高流速条件の各部の流況 (1/2)



(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況



(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況

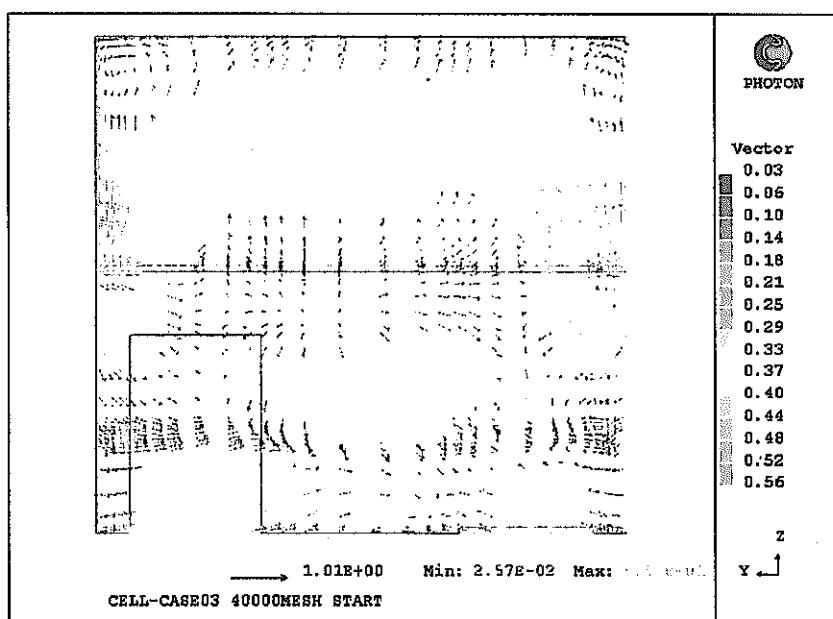
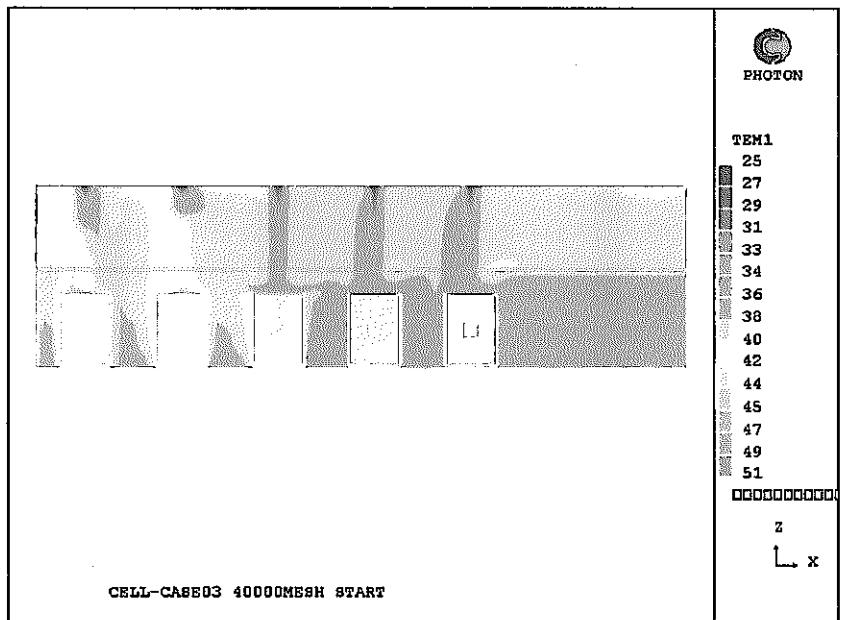
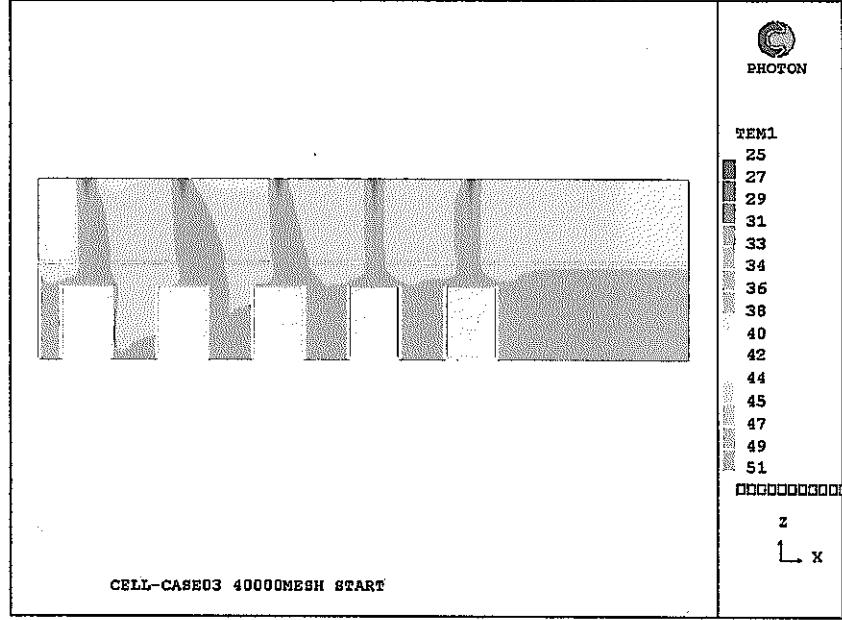


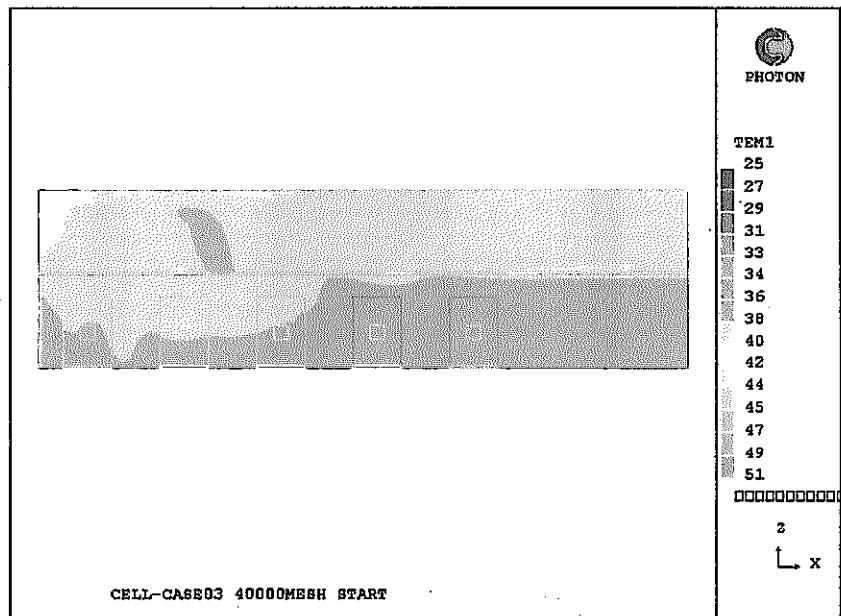
図 3. 4-2 CASE 4 高流速条件の各部の流況 (2 / 2)



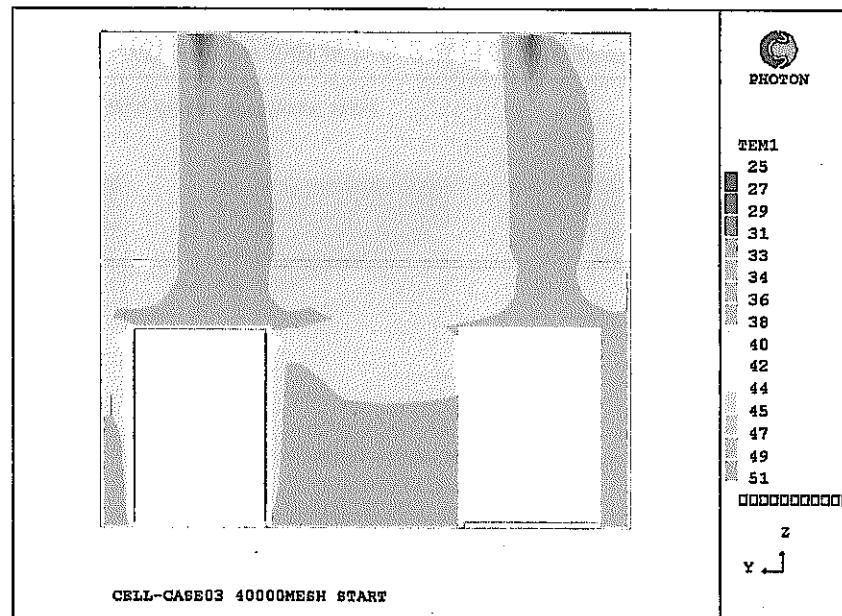
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

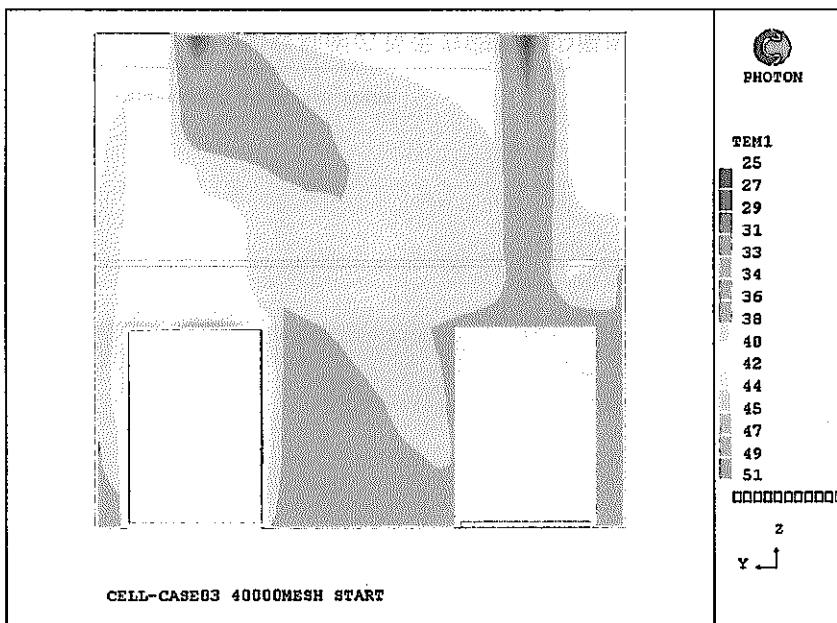


(3) 対称面の長手方向断面の温度

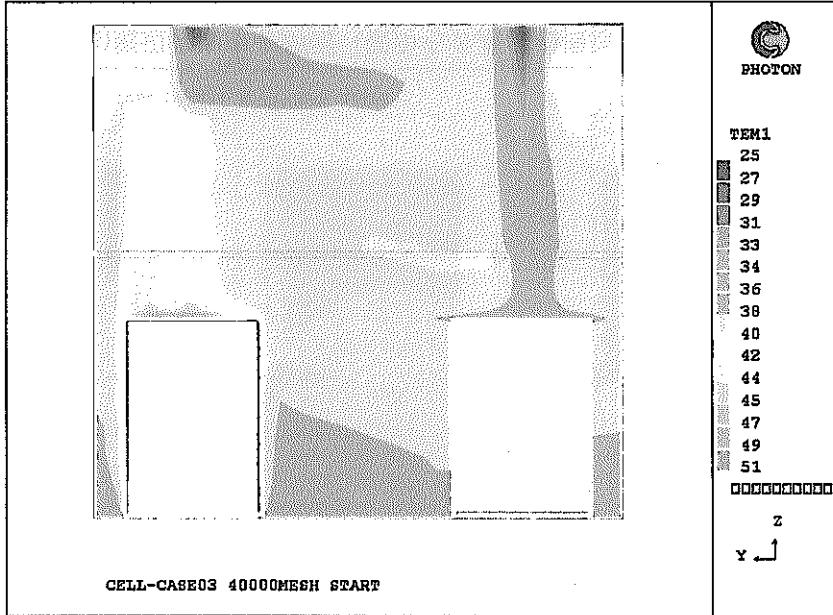


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

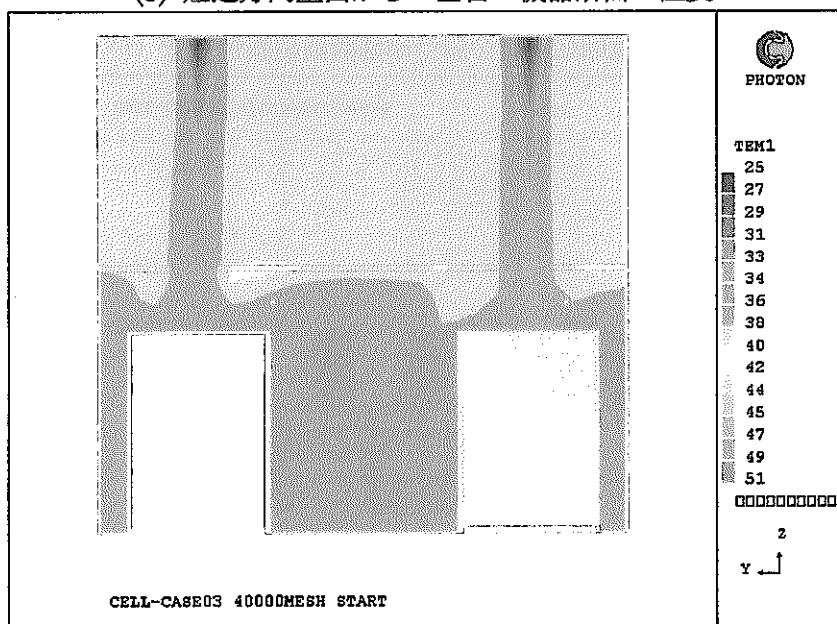
図3. 4-3 CASE 4 低流速条件の各部の温度 (1/2)



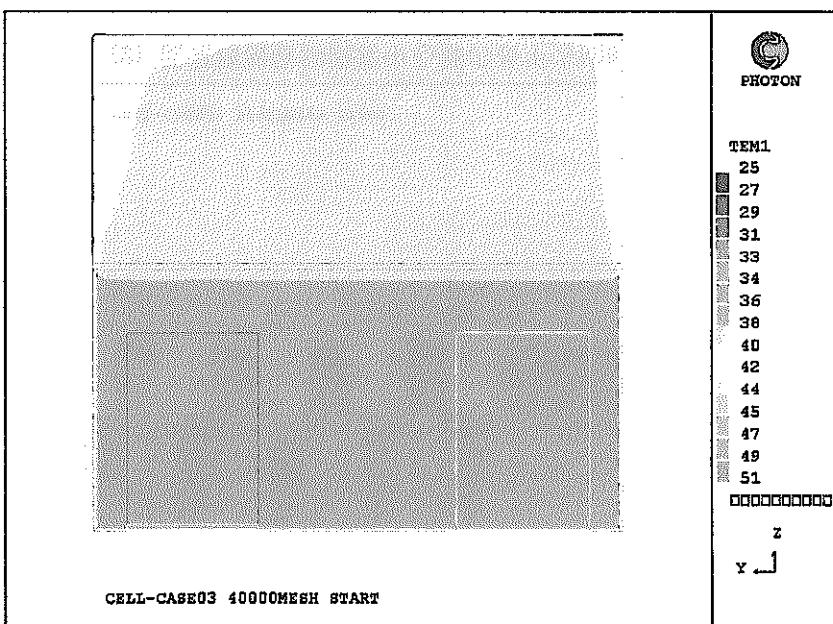
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度

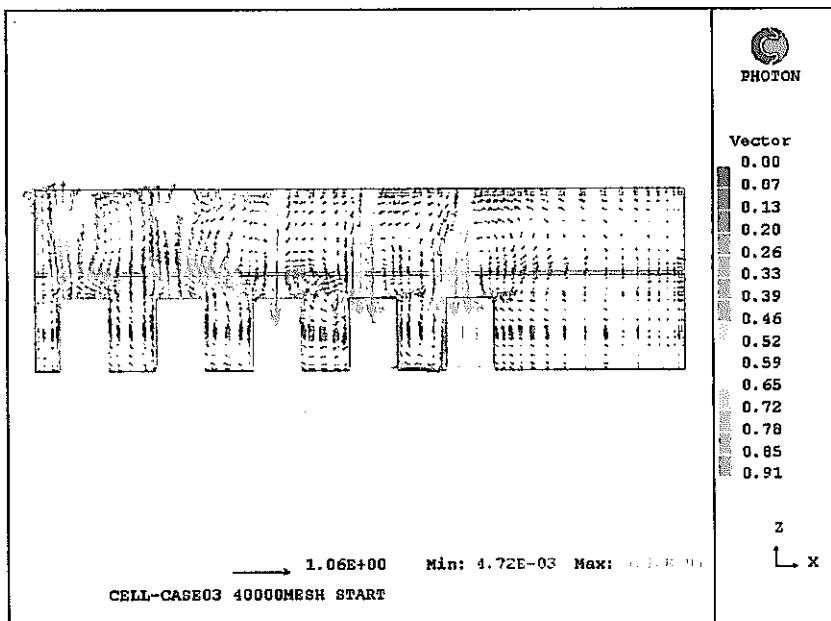


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

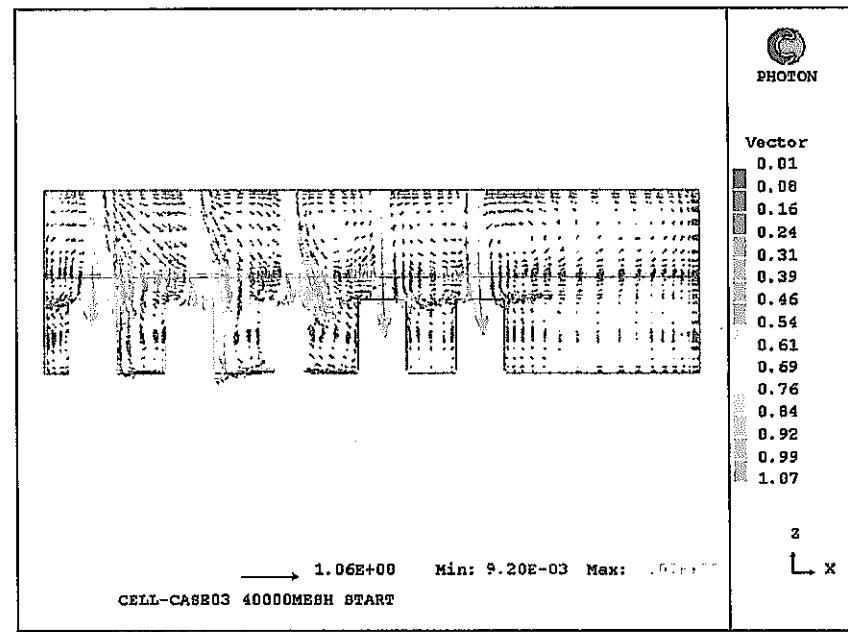


(8) 短辺方向の対称面の温度

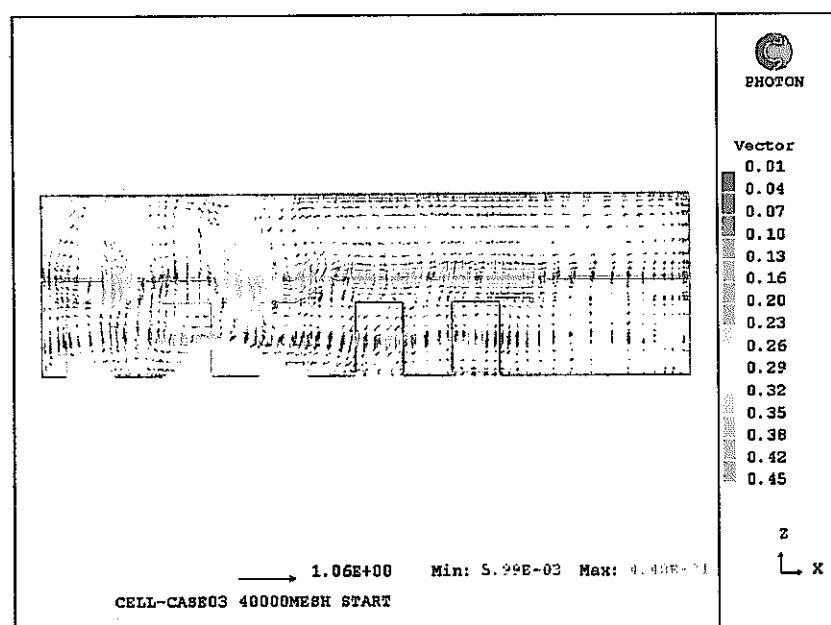
図 3. 4-3 CASE 4 低流速条件の各部の温度 (2 / 2)



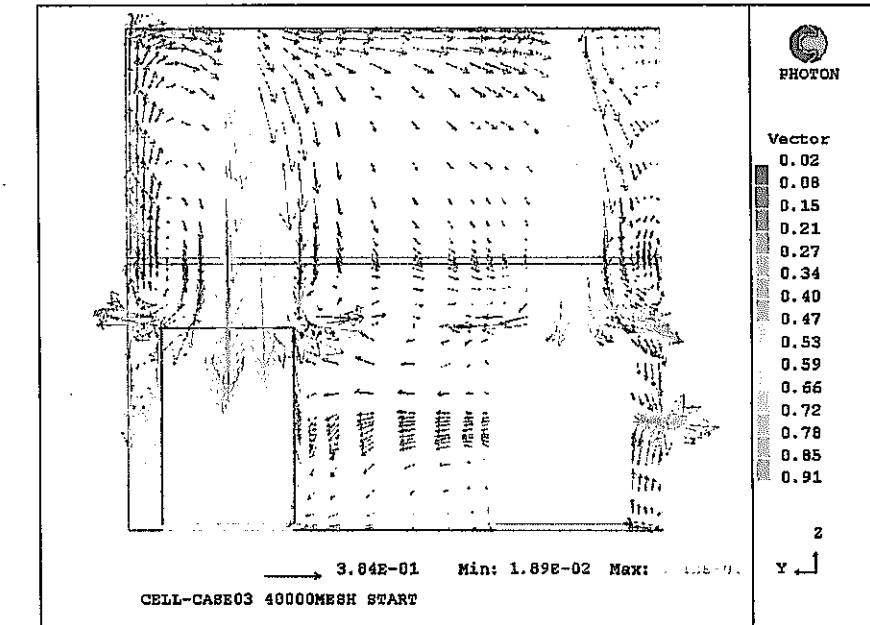
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(3) 対称面の長手方向断面の流況



(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

図3. 4-4 CASE 4 低流速条件の各部の流況 (1/2)

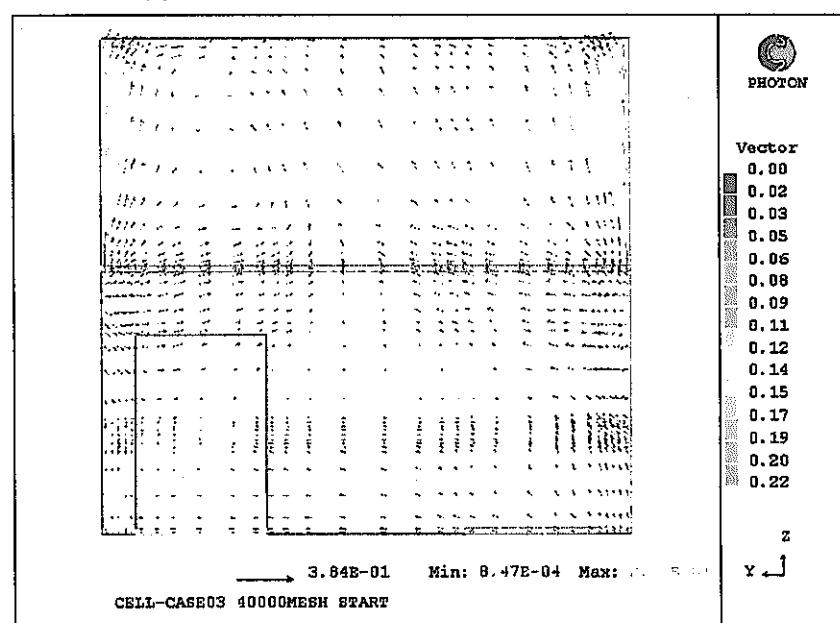
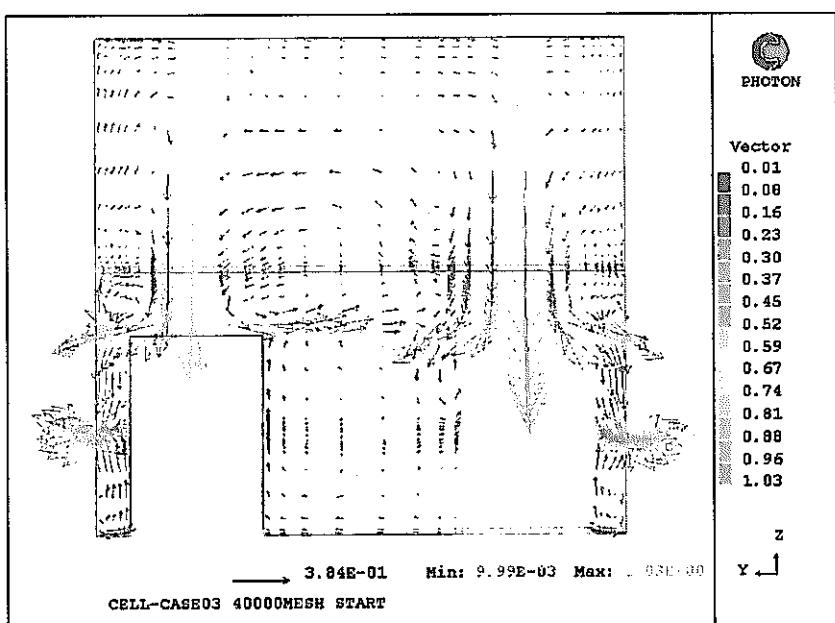
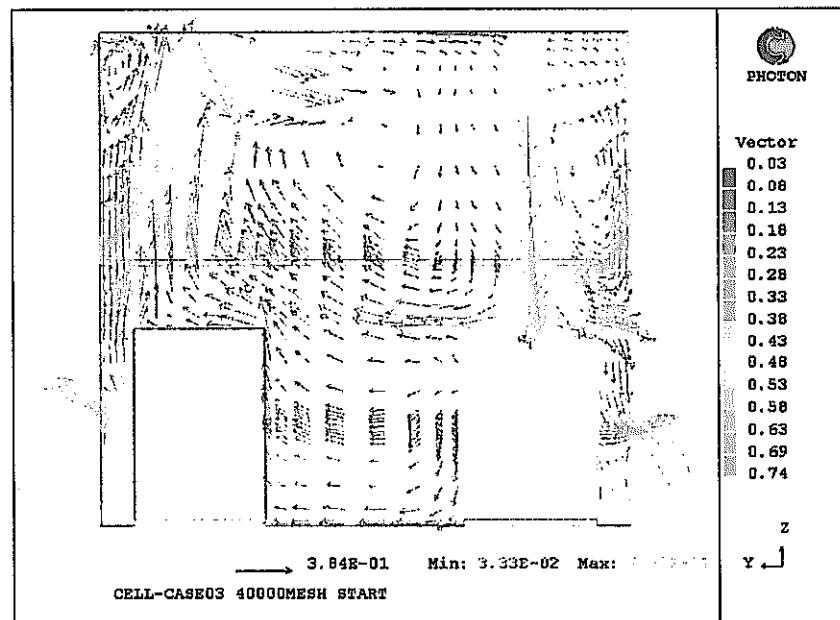
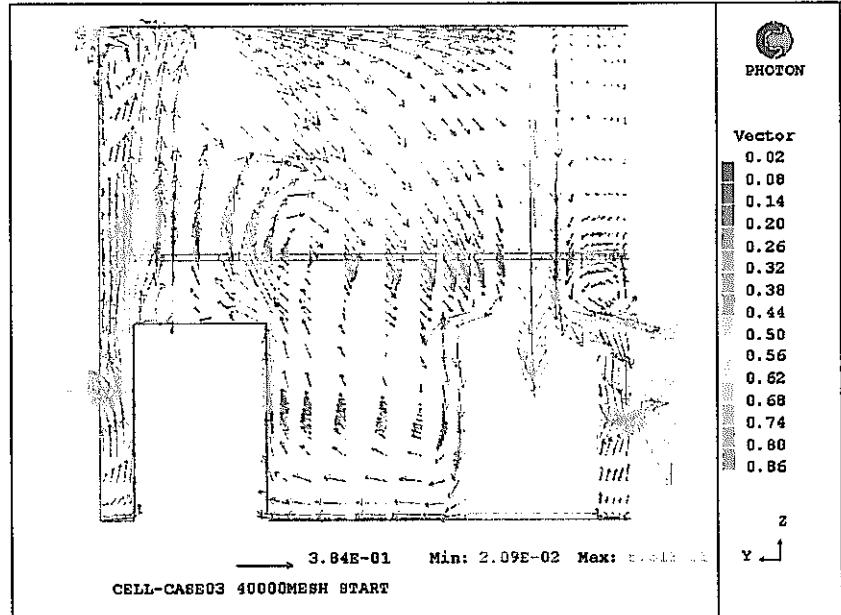


図3. 4-4 CASE 4低流速条件の各部の流況 (2/2)

3. 5 解析結果のまとめ

表3. 5-1には各ケースのセル内ガス最高温度と位置をまとめて示す。また、表3. 5-2には全部の評価結果と、流配パターン自体の評価結果を示す。

(1) ケース1 (モデル1)

モデル1は、高流速では側面壁からの流れがちょうど高発熱機器に落ちかかる形になるため低温となる。低流速では、冷却流がすぐに下降流になるため、セル上部はスタグナントに近くなり、セル上部の温度は高めになる。定常条件では比較的冷却効率が高いものの、機器への直接冷却流は流速により流況パターンが大きく変化し、冷却対象となる機器が変化するため、過渡時のピークを考慮した場合、信頼性上不利となる。また、セル及び冷却系設計の観点からは、配管引き回しも機器毎に2カ所のダクトが必要であり貫通部が増えてセル設計の課題が増える。貫通部を減らすためヘッダをセル内に設置した場合にも、流配方法の課題やセル面積増加の課題があることがわかった。

(2) ケース2 (モデル2)

モデル2は、高流速ではセル上部は均一に冷却され、機器周辺も個々の機器が直接冷却されるため、安定した冷却が可能である。低流速では対称面上部からの流れが下降流となり、直接高発熱機器を冷却する形になるため、温度が下がると考えられる。このため、モデル1よりもさらに冷却効率が良く、特に低流速条件でローカルな機器周辺の最高温度もセル照明上部の平均温度も低い。全体流況も高流速と低流速で大きく変化せず、過渡時にも安定した特性が得られることが期待される。ダクトの配管引き回しも各機器1カ所の冷却口のため、モデル1, 4などに比べれば相対的に楽になり、推奨できる。

(3) ケース3 (モデル3)

モデル3は高流速では照明以上の領域にも大きな循環流が発生しており、比較的冷却されている。ただし、機器の冷却流の下流側では冷却流の陰になる部分の温度ピークが高くなる。低流速では照明以上の領域はスタグナントで、成層化が起きている。これらから他の冷却体系に比べ冷却効率が低い。同時に昨年度までの検討結果からも、冷却の主流がない広いガス空間を有する体系では非定常時に不安定な挙動を示すことが予想されるため、望ましくないと考えられる。しかしながら、本方式では冷却派に館の引き回し等は個々の機器用の冷却口なしで行えることから現実的なレベルで可能であり、メリットが大きい。このため、モデル2にあるような天井付近での水平流を追加した体系で、必要に応じた部分冷却（高発熱機器のみ側面から冷却するなど）を考慮した概念も、今後の検討価値があると考えられる。

(4)ケース4（モデル4）

モデル4については高流速時には高発熱機器上面を冷却しているため側面が高温となるが、全体的には効率よく冷却可能である。低流速時には高発熱機器の上昇流で冷却流が届かなくなることから高発熱機器上面が高温となる。高流速と低流速で基本的な冷却パターンも変化しないことから、過渡時のピークも発生しにくいことが予想される。

以上から冷却効率は高いことがわかったが、天井から床への流れのため、インセルクレンにより冷却流が遮られてホットスポットが発生する可能性もあること、配管配置上もモデル1と同様に数が多くなることから引き回しが大変になることなどから。

以上から、セル冷却についてはモデル2のように下部には必要に応じて各発熱機器を冷却する流れを確保し、上部にはバルクのセル冷却を確保するような冷却方法とすることが望ましいと考えられる。冷却効率も考慮すれば、モデル3の天井付近に冷却流を追加した体系も考慮することが考えられる。

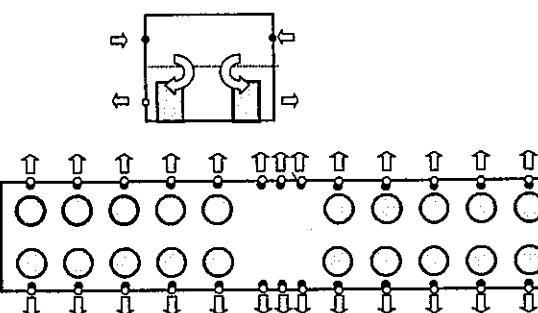
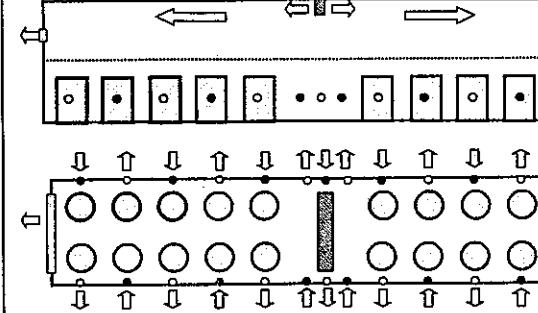
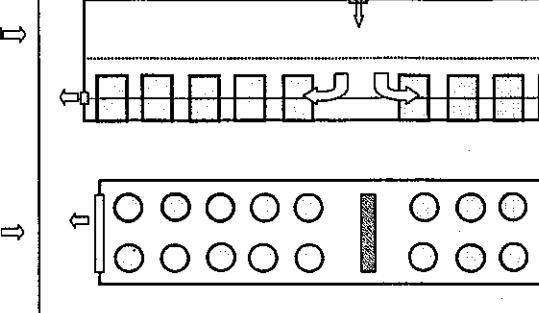
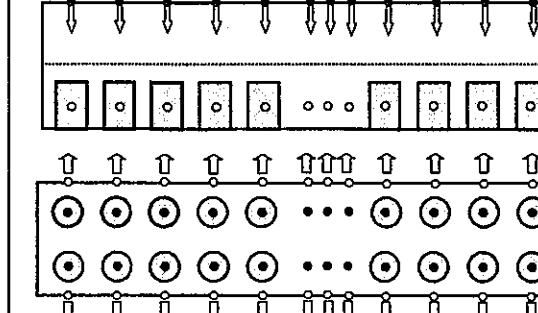
なお、モデル2については事故時を想定して、流れが高流速から低流速に切り替わる過渡時に特別のピークが発生しないことを確認しておくことが望ましいと考える。

また、添付資料に示すように照明発熱量が大きい条件を考慮すると、セル上部にガスの流れがない体系では、熱だまりが発生しやすくのぞましくないこと、セル上部に流速がある体系の中でもさらにセル上部に出口有するケース2のような体系が望ましいことから、その面でもモデル2の条件ないしはモデル3に天井冷却流を追加したような体系が望ましいと考えられる。

表3. 5-1 流量パラメータ解析結果

	高流量条件			低流量条件			備考
	セル照明上部平均温度	ガス最高温度	最高温度発生位置	セル照明上部平均温度	ガス最高温度	最高温度発生位置	
ケース1 (モデル1)	40°C	58.9°C	中央高発熱機器の内側表面	48°C	54.2°C	中央高発熱機器の内側表面及び低発熱機器上部照明位置	高流速では側面壁からの流れがちょうど高発熱機器に落ちかかる形になるため低温となる。低流速では、冷却流がすぐに下降流になるため、セル上部はスタグナントに近くなり、セル上部の温度は高めになる。
ケース2 (モデル2)	40°C	62.8°C	中央高発熱機器の上面	42°C	45.9°C	中央高発熱機器の上面	高流速ではセル上部は均一に冷却され、機器周辺も個々の機器が直接冷却されるため、安定した冷却が可能である。 低流速では対称面上部からの流れが下降流となり、直接高発熱機器を冷却する形になるため、温度が下がると考えられる。
ケース3 (モデル3)	40°C	63.5°C	下流側（長手方向壁側）高発熱機器上面	49°C	53.7°C	高発熱機器上面	高流速では照明以上の領域にも大きな循環流が発生しており、比較的冷却されている。ただし、機器の冷却流の下流側では冷却流の陰になる部分の温度ピークが高くなる。 低流速では照明以上の領域はスタグナントで全体に高温になる。
ケース4 (モデル4)	37°C	46.3°C	内側高発熱機器側面	39°C	50.7°C	壁側から1基目及び2基目の高発熱機器の上面	高流速時には高発熱機器上面を冷却しているため側面が高温となるが、全体的には効率よく冷却可能である。 低流速時には高発熱機器の上昇流で冷却流が届かなくなることから高発熱機器上面が高温となる。

表3. 5-2 セル内流配パターンの評価

項目	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
流配パターン	入口：天井中央部、各機器の短辺方向側面 出口：セル長手方向上部側面、各機器の短辺方向側面 	入口：各機器上部側面 出口：各機器下部側面 	入口：天井中央部 出口：セル長手方向側面 	入口：天井部各機器直上 出口：各機器短辺方向側面 
流配のねらい	各機器の冷却を側面から行い、直接的な機器冷却によりローカルクーラー的な除熱を行う。	上部空間は横流れでバルクの除熱を行い、各機器には短辺方向の直接流で冷却する	機器への横流れ中心に冷却する	機器の個々に対応する直接流により冷却する
流況解析結果	○ 高流速では側面からの流れが中央でぶつかり合い、流れが下方に曲げられ直接冷却することで温度分布が均一化されている。低流速では側面からの流れが比重差で下向きに替わり、機器を直接冷却するため、高発熱機器は更に低温となる。 最高温度（ホットスポット約 59°C/54°C）は中央高発熱機器の内側に発生する。	○ セル下部の各機器への冷却流はスムーズに流れしており、側面は十分に冷却されている。セル上部の水平流は特に低流速では下降流となっているため、機器表面温度がさらに低下する傾向となっている。 最高温度（ホットスポット約 63°C/46°C）は中央高発熱機器の上面に発生する。	○ ガスの出口側機器の雰囲気温度は高めになる。低流速条件では照明より上部が成層化し、高温となることがわかっており、セル全体でのヒートマスマルチバランスのみの流量で設定した冷却条件では制限温度を超える。 最高温度（ホットスポット約 64°C/54°C）はガス出口近傍の機器の上面に発生する。	○ 上面から側面への流れに変化するため、流れがスムーズではないが、バルクの必要流量で十分制限温度以下にできる。 最高温度（ホットスポット約 46°C/51°C）は内側高発熱機器の側面に発生する。
安全性・信頼性（非定常変動の見通しを含む）	△ 未評価だが、上部の対流空間を直接冷却できるため過渡的なピーク温度は低減できると考えられる。ただし、高流速と低流速で流況が大きく替わり、流速によって流れの角度が変化し、機器の冷却効率が変化するため、過渡的な温度上昇が出やすくなる可能性がある。	○ 未評価だが、上部の対流空間を直接冷却できるため過渡的なピーク温度は低減できると考えられる。 また、高流速と低流速での流況の変化も小さくその面からも有利である。	△ 上部の対流空間が事故時の非定常条件などでは不安定性をもたらすため、その観点では望ましくない。 また、過渡的なピーク温度は上昇する傾向にある（過去の解析結果より）ため、さらに高い温度となり厳しくなる。	△ 未評価だが、高温になると予想される後発熱機器直上部を直接冷却できるため、必要なガス流量を確保できればケース3より過渡温度は低くできると考えられる。 ただし、上部から下部への流れのため、インセルクレーン（またはロボット）により流れが遮られ、部分的に高温化する可能性がある。
ダクト引き回し整合性	△ 機器毎にダクトを設置するため、ダクト数が多くなり引き回しスペース確保にはセル内にヘッダを設置して給排気する等の工夫が必要（長辺方向はマニピュレータ操作等のためダクトは設置できない）。その場合、4系統に分割するとしてヘッダの等価直径は375mm程度である。下部出口側にはダクト出口が置けないため、その程度のセルスペース増加が必要。	○ 機器毎にダクトを設置するため、ダクト数が多くなり引き回しスペース確保にはセル内にヘッダを設置して給排気する等の工夫が必要（長辺方向はマニピュレータ操作等のためダクトは設置できない）。上部横流れに1/3、下部の流れに2/3を割り当てるすると、セル内設置の4系統分割の場合ヘッダ等価直径は306mm程度となる。下部出口側にはダクト出口が置けないため、その程度のセルスペース増加が必要。	○ 部屋の中央部及び短辺方向の側面にダクトを集中配置可能であり、ダクト配置の課題は少ない。その場合のダクトの等価直径は入口側で1500mm、出口側で530mm程度となる。	△ 機器毎にダクトを設置するため、ダクト数が多くなり引き回しスペース確保にはセル内にヘッダを設置して給排気する等の工夫が必要（長辺方向はマニピュレータ操作等のためダクトは設置できない）。その場合、4系統に分割するとしてヘッダの等価直径は375mm程度である。下部出口側にはダクト出口が置けないため、その程度のセルスペース増加が必要。
評価	△ 冷却効率は比較的良好が、1つの機器に2カ所のダクトが必要となり、配管の引き回しが大変である。また、過渡的な流況の変化も大きく、冷却効率もケース2を上回るものではない。	○ ダクトの配置はケース1に比べれば容易となり、高流速条件、低流速条件ともに最高温度も低くでき、過渡時の冷却性も含めて冷却効率も良いことが予想されるため、推奨できる。	△ ガス出口近傍の下流にホットスポットができる。また、上部の対流空間が事故時の過渡条件での不安定性を起こすため、その領域を直接冷却できる冷却方式を追加する必要があり、冷却効率が悪い。このため、天井付近にケース2のような水平流を追加するとともに、高発熱機器についてローカルクーラー相当の冷却口の追加が必要	△ 天井からの冷却は効率は良いが、クレーンなどにより遮られるとホットスポットが発生しうる体系となる、配管の引き回しが大変になることなどから、望ましくないと考えられる。

4.まとめ

(1)解析結果に基づく評価結果

今後の乾式リサイクルシステム評価に資するため、乾式再処理セル内の冷却方式について、冷却パターンを4ケース用いて、通常状態及び低流量状態の除熱性についてパラメータサーバイを行った。その結果、以下の結論を得た。

- ① セル上部空間に冷却ガスの主流のない領域がある体系（モデル3）は、セル上部空間に発生する循環流による不安定、または成層化が発生する可能性があるなど望ましくないと考えられる。
- ② 事故を想定して、高流量から低流量への過渡時を考慮すると全体流況のパターンが大きく変化しない体系（モデル2）が有利と考えられる。
- ③ 冷却ガスの主流がぶつかり合うような体系（モデル1）では流量により流れのパターンが大きく変わることとなり、不安定を引き起こす要因になりうる。
- ④ 天井から下方の個々機器へ直接冷却する体系（モデル4）では冷却効率も良く、流速による変化も少ないため通常時には優れているが、天井クレーンなどにより流れが遮られる場合、機器にホットスポットが現れる可能性があり、推奨できない。
- ⑤ 以上から、セル冷却については下部には各発熱機器を冷却する流れを確保し、上部にはバルクのセル冷却を確保するような冷却方法（モデル2）とすることで、低流量条件でも高流量も冷却効率が良く安定した冷却が可能であり、配管ダクト引き回しも比較的楽になると考えられる。配管ダクト引き回しの容易さを考慮するとモデル3概念にモデル2を部分的に組み合わせた概念（セル上部への水平流を組み合わせ、高発熱機器のみ側面から直接冷却する）も考えられる。

なお、モデル2については事故時を想定して、流れが高流速から低流速に切り替わる過渡時に特別のピークが発生しないことを確認しておくことが望ましい。

(2)実機乾式リサイクルシステムへの反映事項

解析評価結果に基づく実機設計への反映事項は以下のとおりと考えられる。

- ① 冷却方法については、セル上部空間と下部の機器空間をそれぞれ冷却できるような冷却方式が冷却効率や信頼性の面で望ましい。解析モデルで言えば、モデル2もしくはモデル3にモデル2を組み合わせた概念が考えられる。
- ② 冷却体系では個々の機器について冷却する場合には移送機等により冷却ガスが遮られないようにする必要がある。
- ③ 定常状態の冷却においては、セル内ガス流量は発熱量に対応した流量を流すことで、機器周辺のガスのホットスポット温度でもガス出口温度（本解析例では約40°C）+25°C程度に抑えられる見通しが得られた。

5. 参考文献

- 1) 戸澤、松本、掛樋, “乾式サイクルシステム解析コードの開発”, JNC TN9400 2000-052,
2000年4月

添付資料 照明高発熱条件での除熱特性

1. 解析モデル

本文に記載の非常時を想定した低流速条件では、機器の電源喪失等により機器発熱が崩壊熱のみとなって、1/10となると同時に、照明についても非常灯のみとなって1/10になることを想定している。しかしながら、事故時の復旧を考慮すると、セル内照明については、事故時についても通常時と同等の照明を確保するということも考えられる。このため、その場合にセル内温度がどう変化するかについて追加解析を行った。

解析モデルとしては、本文に記載の4ケースを基準として、低流量時に照明発熱が低下しなかったケースを想定した。変更点は以下のとおり。

・ガス流量

照明高発熱条件：8000Nm³/h（入口ガス温度 25°C）

ただし、1/2 対称モデル化する際の左右の流配は暫定的に発熱量比例とする。即ち

$$\text{低流速条件 } 8000 \text{ Nm}^3/\text{h} \times (6 \text{ kW} \times 3 + 0.1 \text{ kW} \times 7) / (6 \text{ kW} \times 3 + 0.1 \text{ kW} \times 17) = 7593 \text{ Nm}^3/\text{h} \rightarrow 1.9942 \text{ m}^3/\text{s}(\text{at } 25^\circ\text{C})$$

ケース2については天井上部の入口に1/3、下部の入口に2/3の流量を与える

・発熱量

照明高発熱条件：合計 120kW (1/2 モデルでは 70kW)

高発熱機器 6kW/基 × 3 基、低発熱機器 0.1kW/基 × 17 基

(それぞれ表面から均一発熱、ただし、下から 100mm は非発熱)

照明発熱 100kW(天井面から 3.5m 下で均一面の体系、1/2 モデルでは 50kW)

2. 解析結果

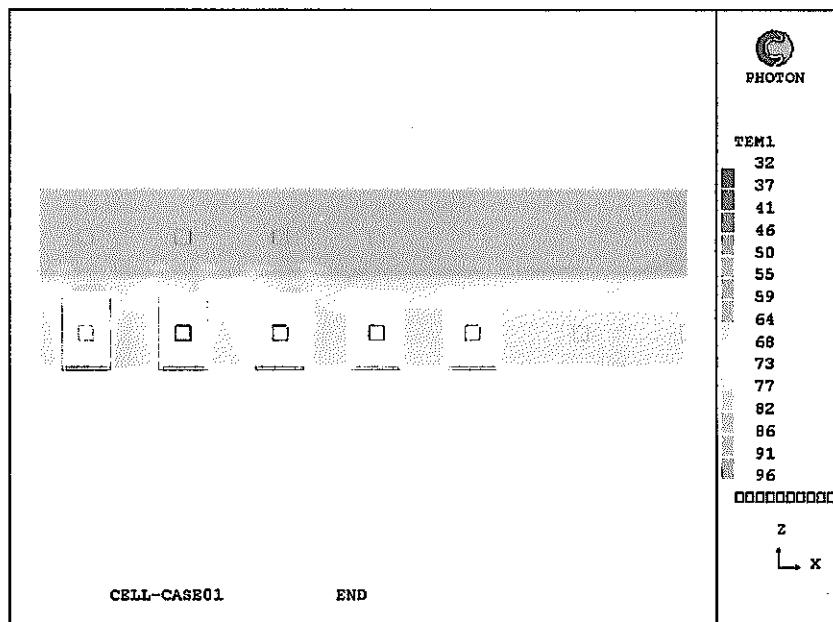
case1～4までの結果をまとめて付表-1に示す。また、各ケースの解析結果を付図1-1～付図4-2に示す。

付表-1に示すとおり、照明発熱が高くなると、照明以上のセル部分の流動が小さいケース1、3は照明部以上の領域が大幅に温度が上昇し、電機品の目安温度である80°Cを越える結果となった。一方、ケース2、4は低流量条件でもセル上部のガス流速が確保できているため、セル上部の温度上昇が少なく、目安温度以下に維持できることがわかった。特にケース2は発熱量が大幅に増加 (1/2 モデルで 28kW → 70kW : 約 2.5 倍) しているにも係わらず、温度上昇は約 20°C 増 (25°C → 46°C) から約 40°C 増 (25°C → 64°C) で収まっている。これはガス出口がセル上部にあることからそこからのガスが流れ出て効率的に冷却されたためと考えられる。

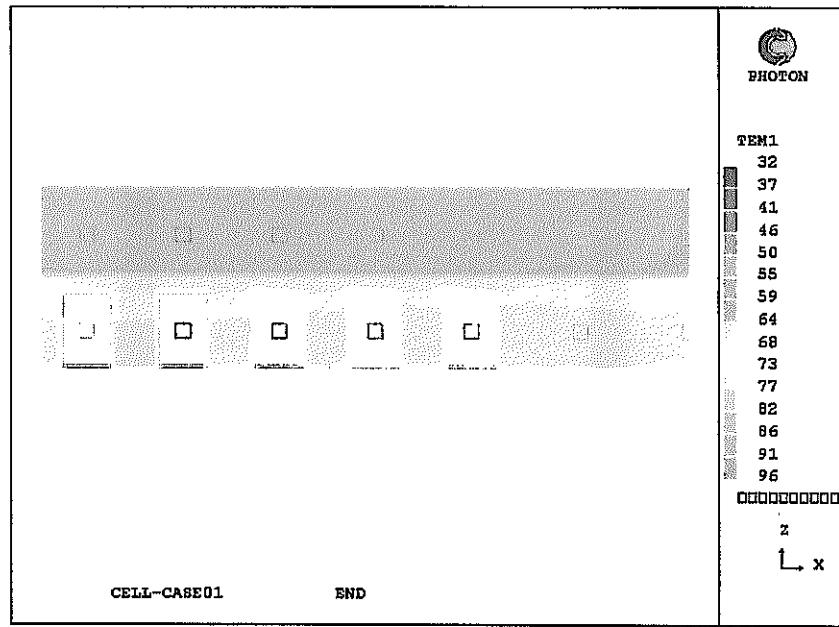
以上から、照明などセル上部に高発熱源がある条件では、セル上部にガスの流れがない体系では、熱だまりが発生しやすくのぞましくないこと、セル上部に流速がある体系の中でもさらにセル上部に出口有するケース2のような体系が望ましいことがわかった。

付表-1 照明高発熱条件での解析結果

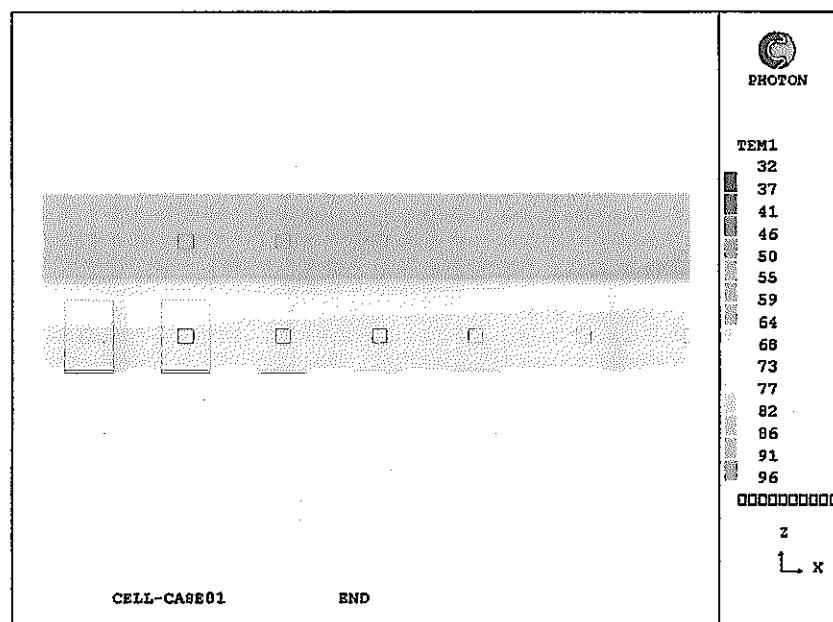
	照明高発熱条件			照明低発熱条件(参考)			備考
	セル照明上部平均温度	ガス最高温度	最高温度発生位置	セル照明上部平均温度	ガス最高温度	最高温度発生位置	
ケース1 (モデル1)	8.6°C	95.4°C	長手方向対称部の照明発熱レベル	4.8°C	54.2°C	中央高発熱機器の内側表面及び低発熱機器上部照明位置	冷却流がすぐに下降流になるため、セル上部はスタグナントに近くなり、流れがほとんどないことから、照明高発熱時にはセル上部温度が大幅に上昇し、目安温度の80°Cを越える結果となった。
ケース2 (モデル2)	6.1°C	63.7°C	高発熱機器上部の天井付近	4.2°C	45.9°C	中央高発熱機器の上面	対称面上部からの下降流があるため、セル上部の流れを確保でき、最高温度も60°C台で最も低くなる。直接高発熱機器を冷却する形になるため、温度が下がると考えられる。
ケース3 (モデル3)	9.5°C	98.2°C	照明上部のセル全体均一レベル	4.9°C	53.7°C	高発熱機器上面	照明以上の領域はスタグナントで全体に高温になる現象は低発熱と同様だが、目安温度80°Cを大きく越えて90°C以上になる。
ケース4 (モデル4)	6.9°C	73.0°C	長手方向対称部の天井付近	3.9°C	50.7°C	壁側から1基目及び2基目の高発熱機器の上面	低発熱時には高発熱機器の上昇流で冷却流が届かなくなることから高発熱機器上面が高温となっていたが、照明高発熱条件では吹き出し口のない長手方向対称部の天井付近が最も高温となるが、ケース2について低い温度に維持できる。



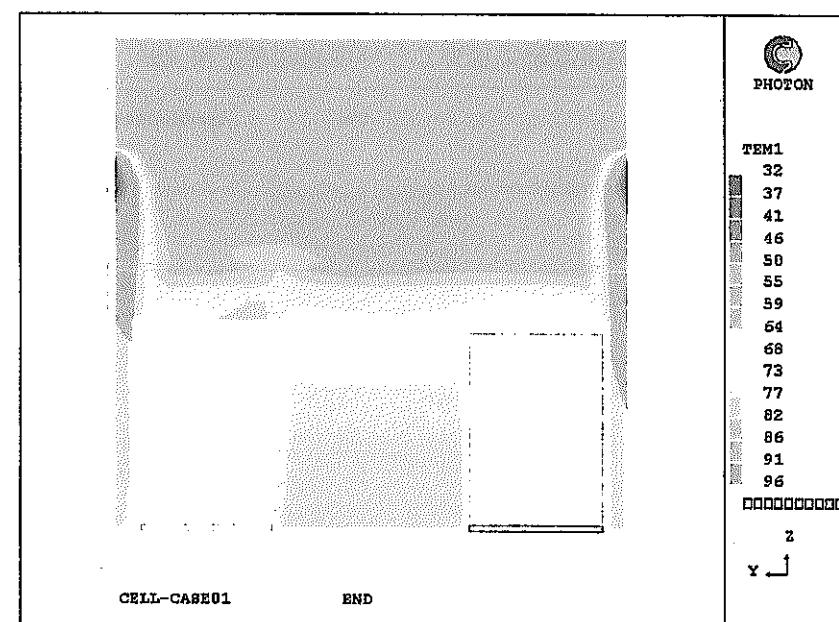
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

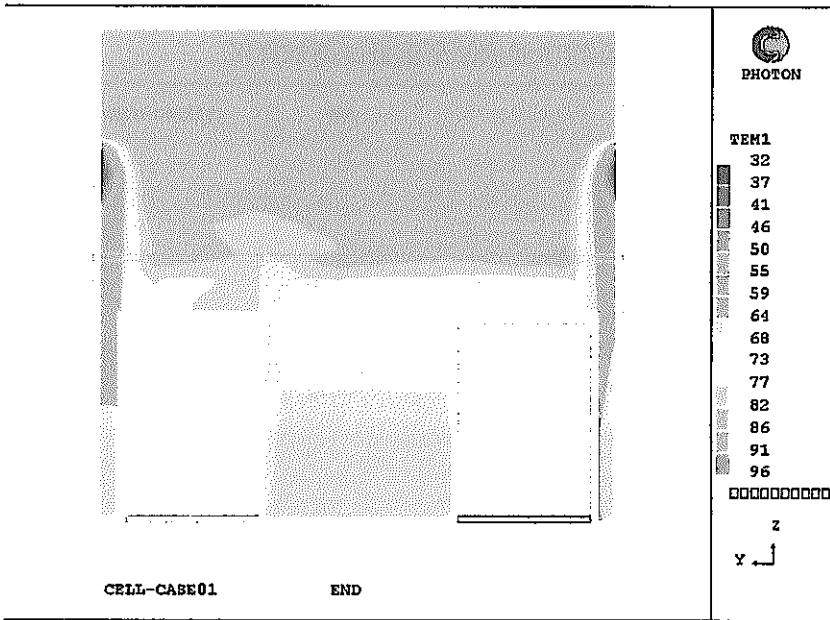


(3) 対称面の長手方向断面の温度

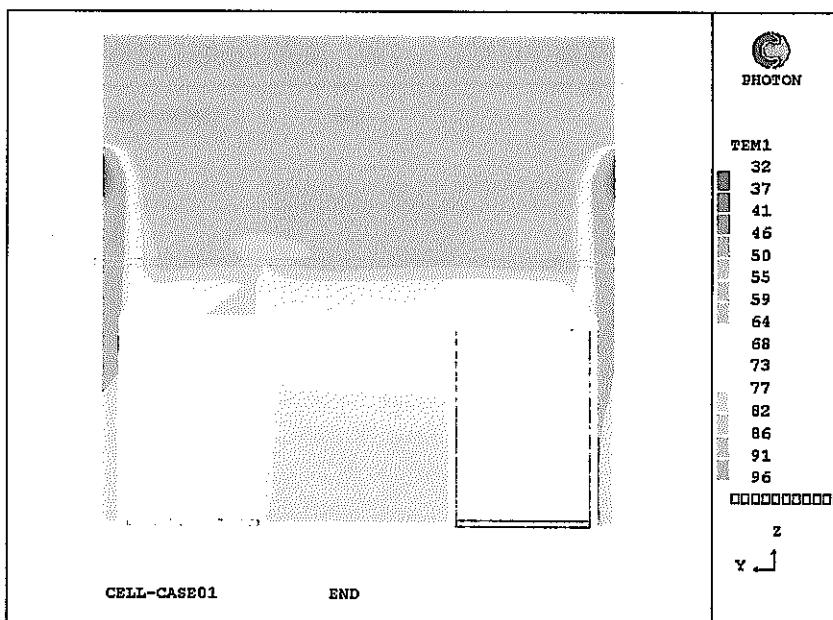


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

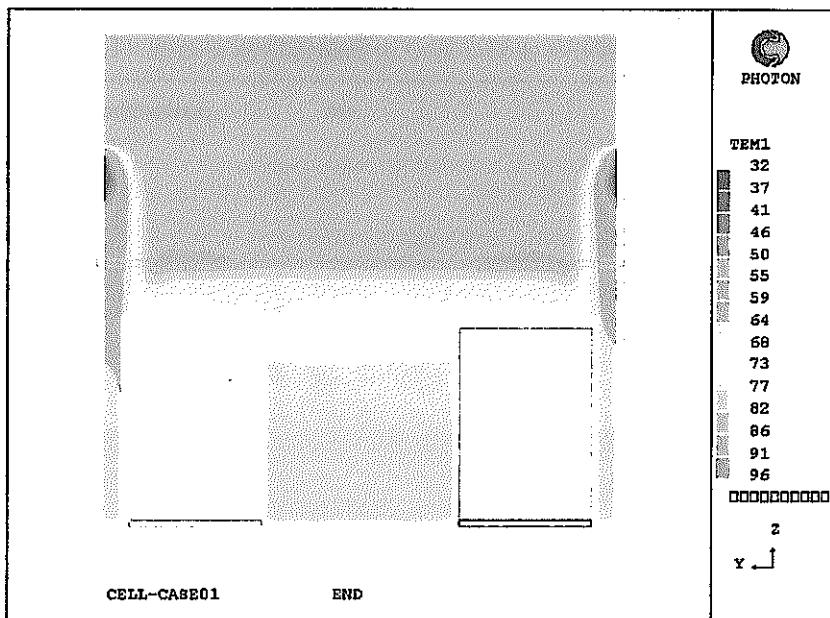
付図 1 - 1 CASE 1 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (1 / 2)



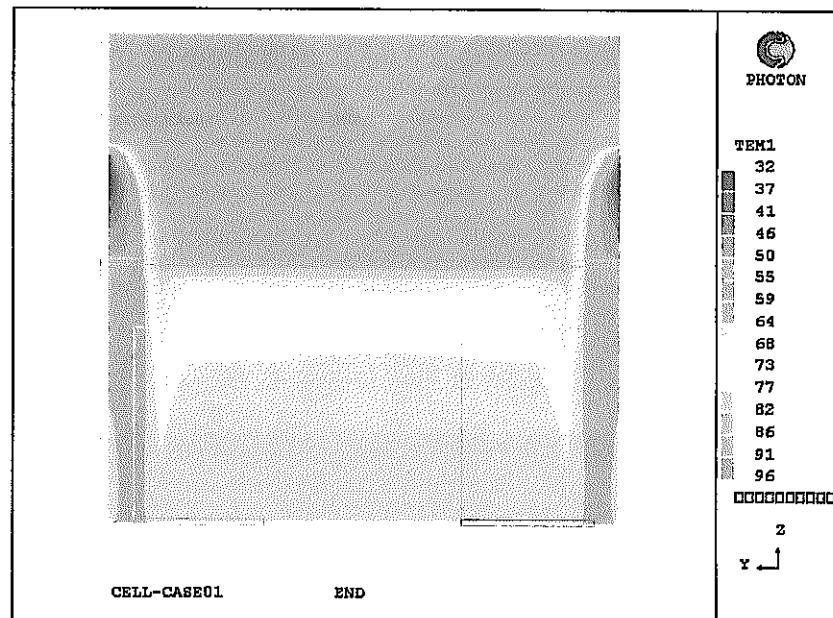
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度

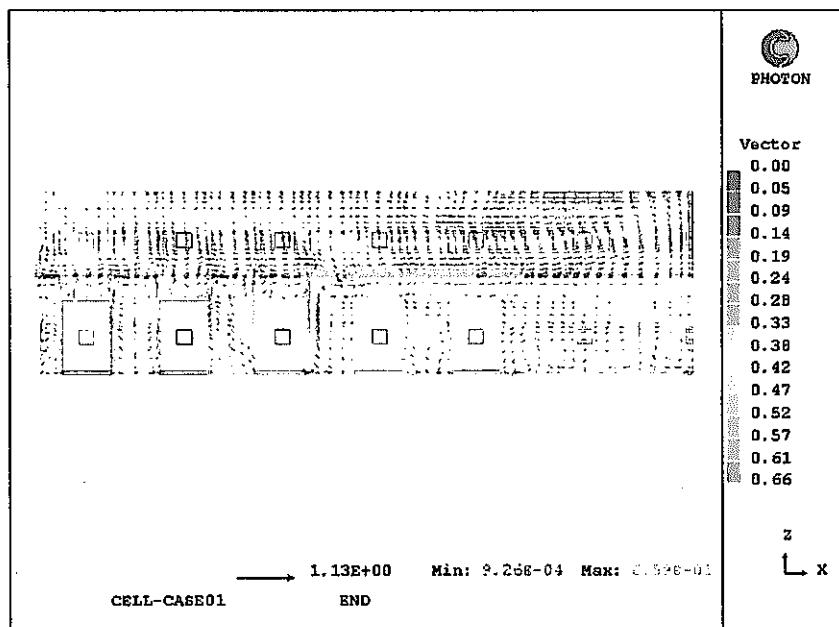


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

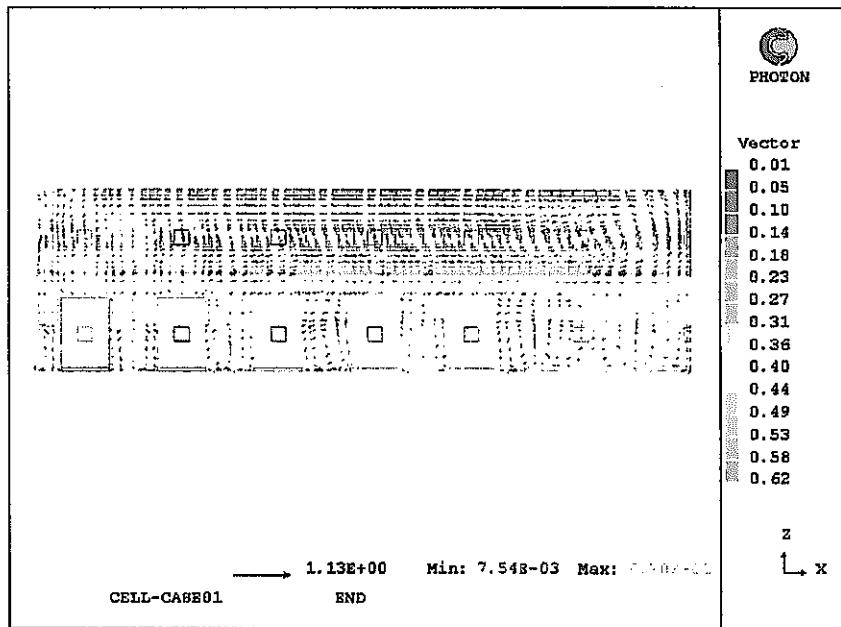


(8) 短辺方向の対称面の温度

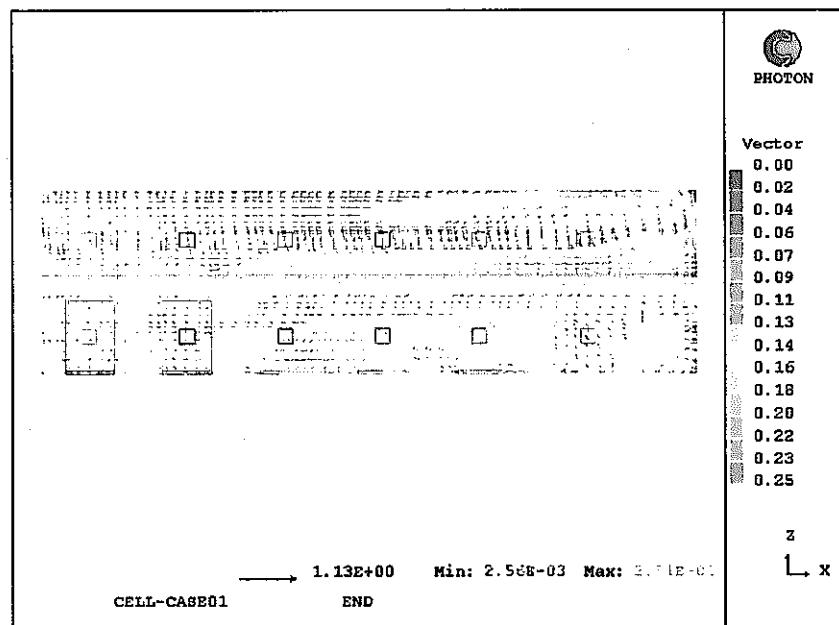
付図 1 - 1 CASE 1 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (2 / 2)



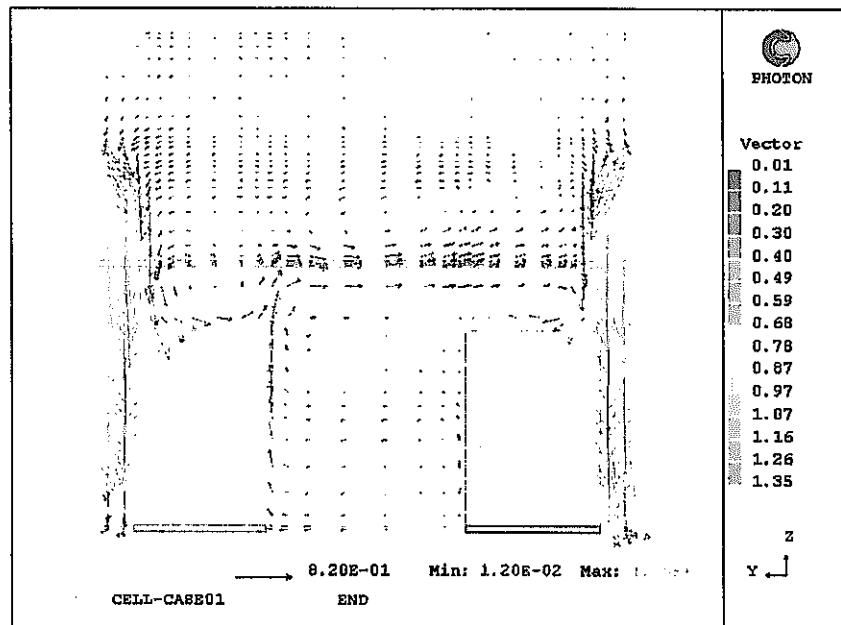
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

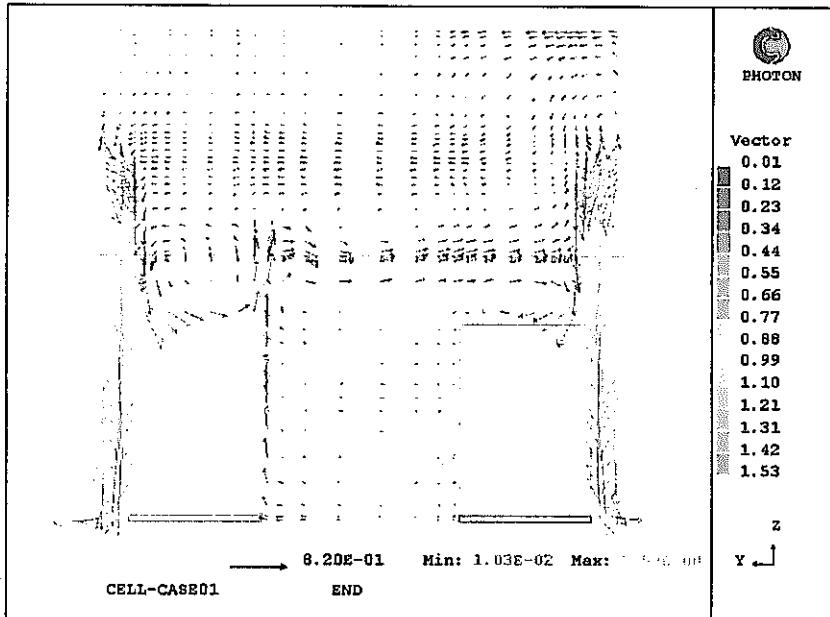


(3) 対称面の長手方向断面の流況

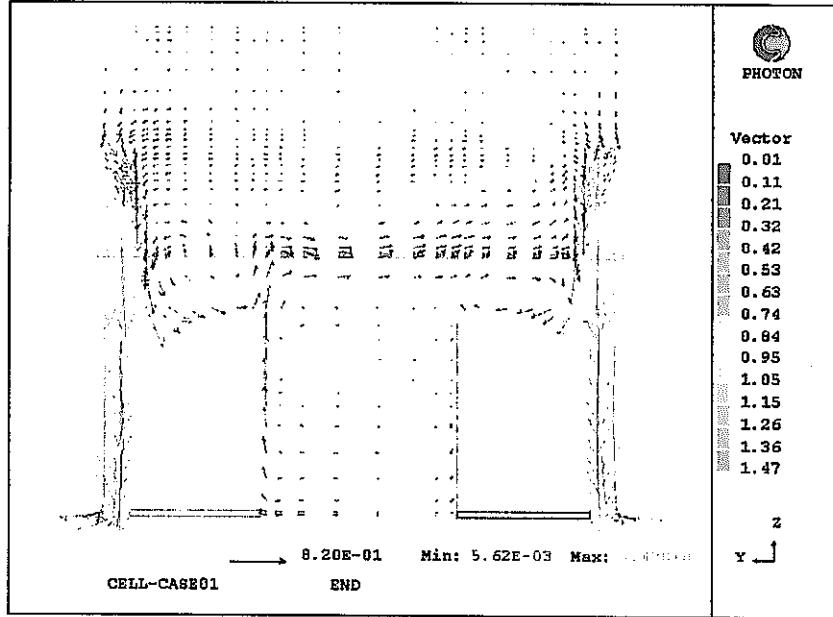


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

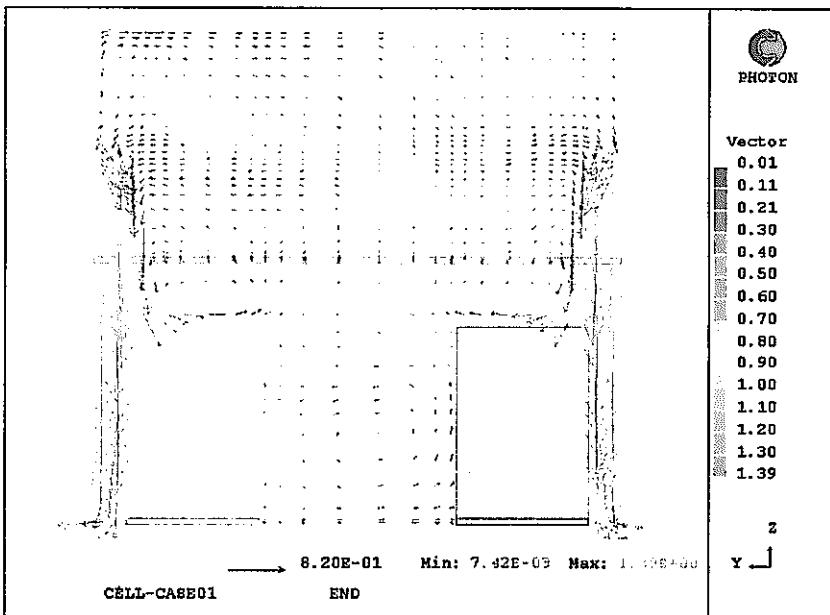
付図 1-2 CASE 1 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (1 / 2)



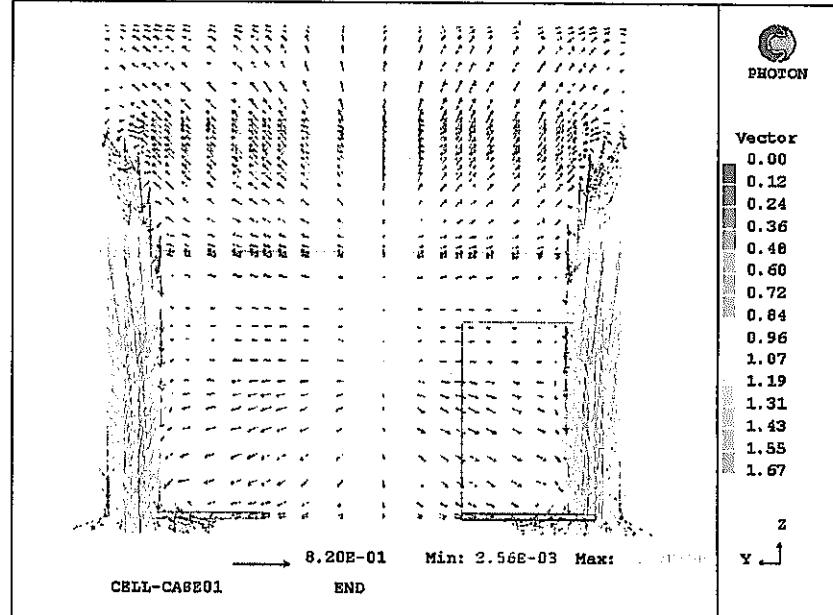
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況

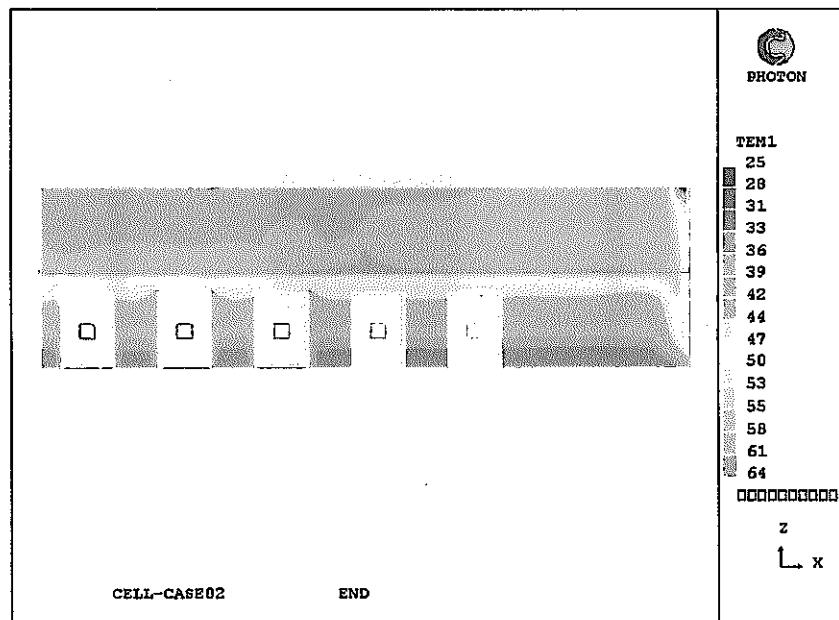


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況

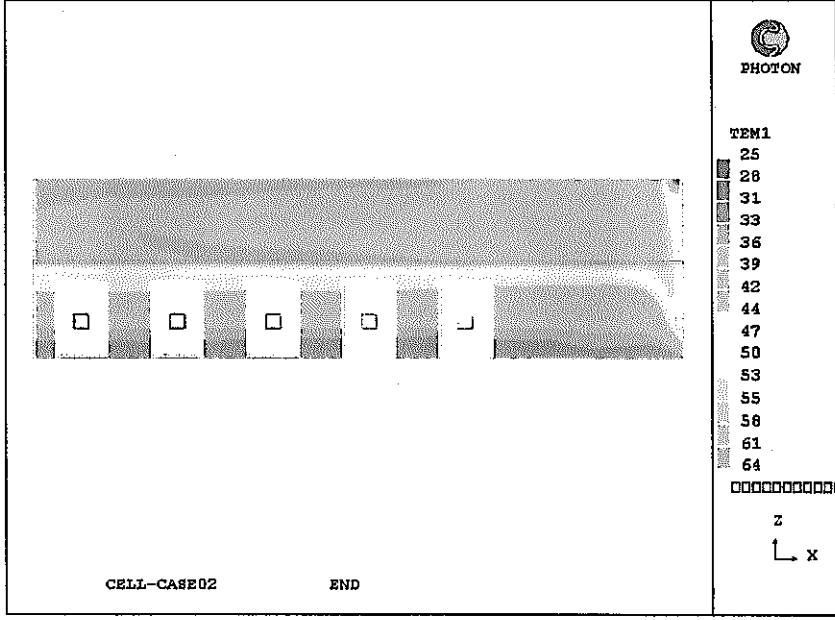


(8) 短辺方向の対称面の流況

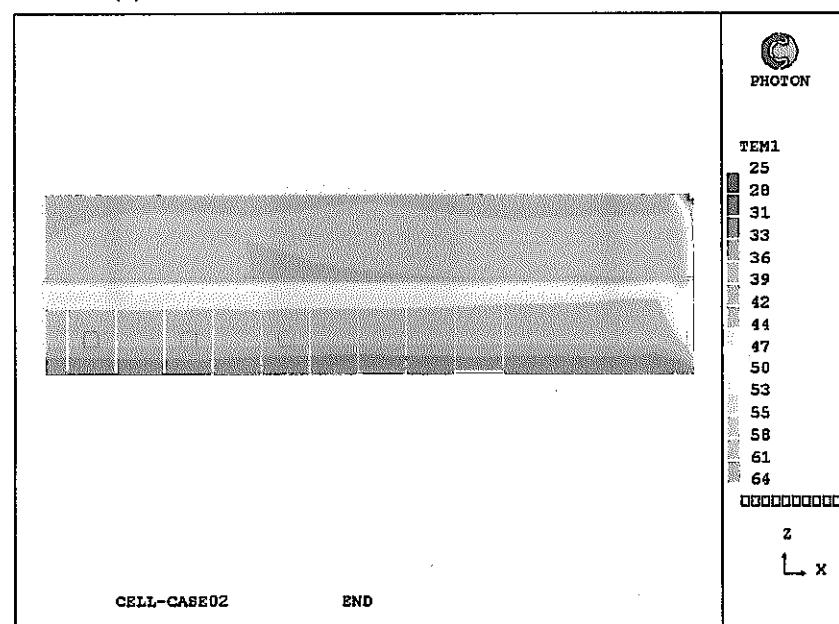
付図 1-2 CASE 1 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (2 / 2)



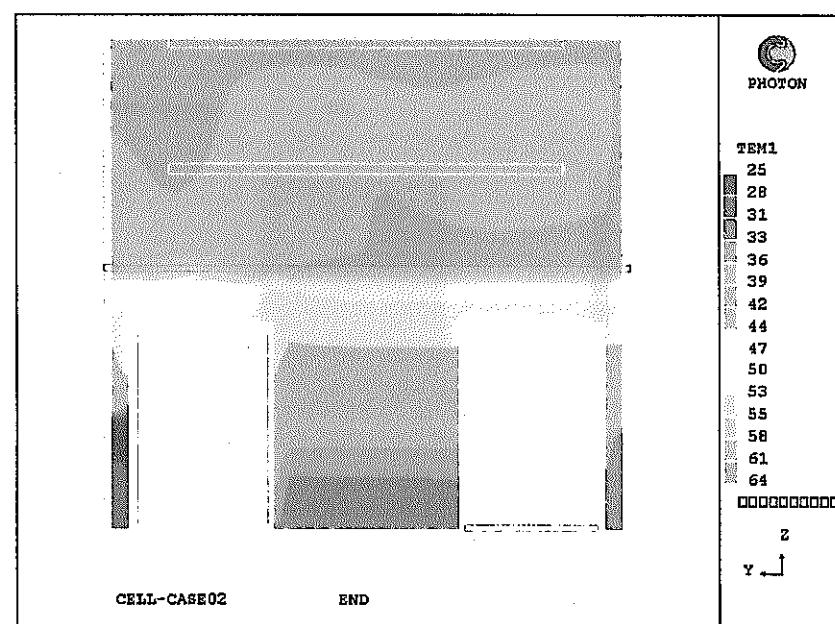
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

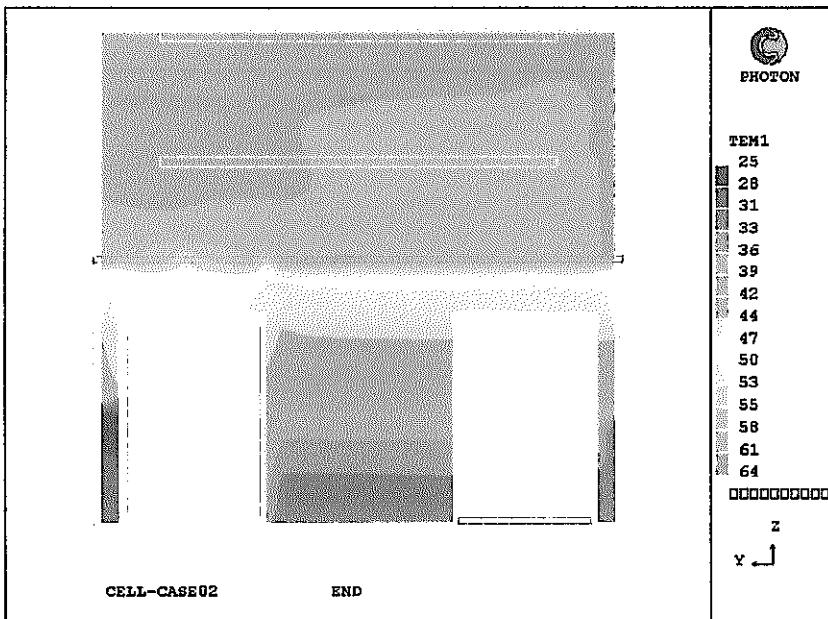


(3)対称面の長手方向断面の温度

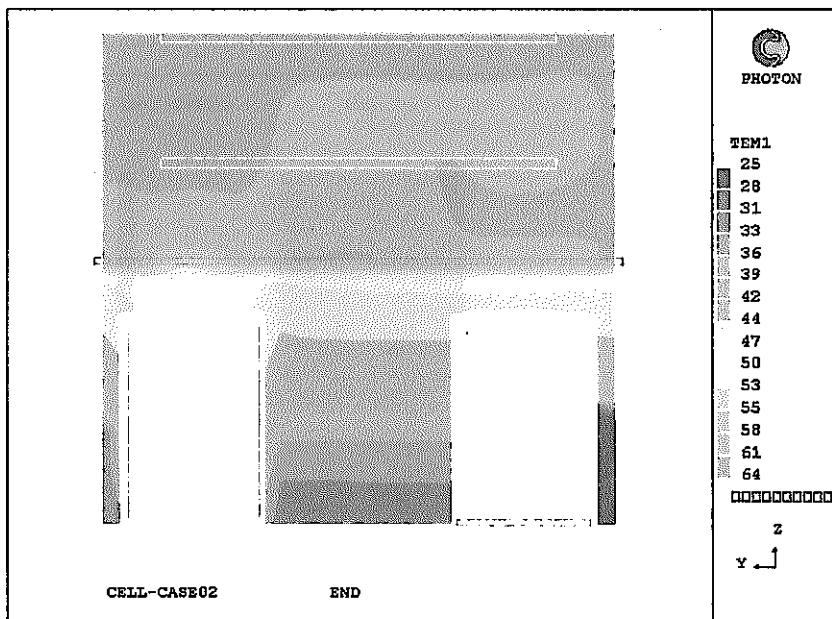


(4)短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

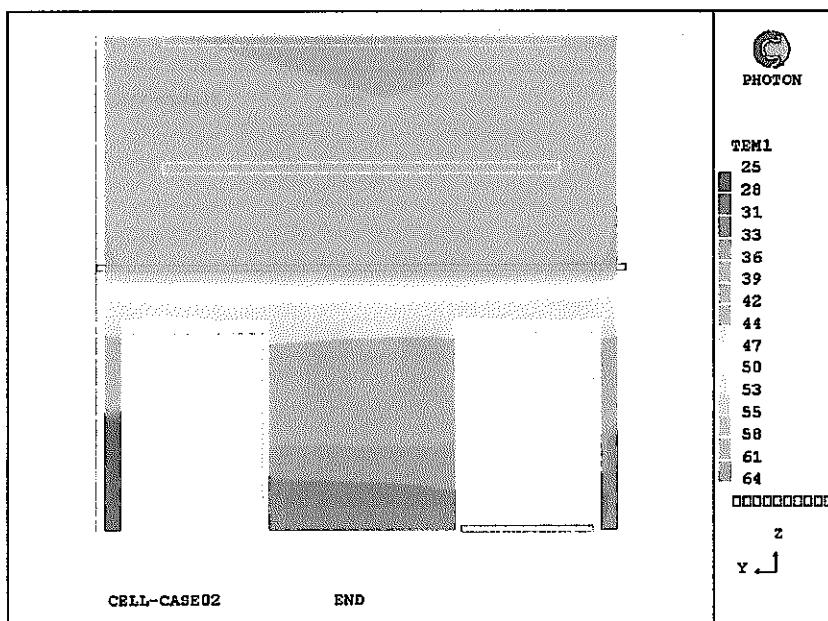
付図 2－1 CASE 2 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (1 / 2)



(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度

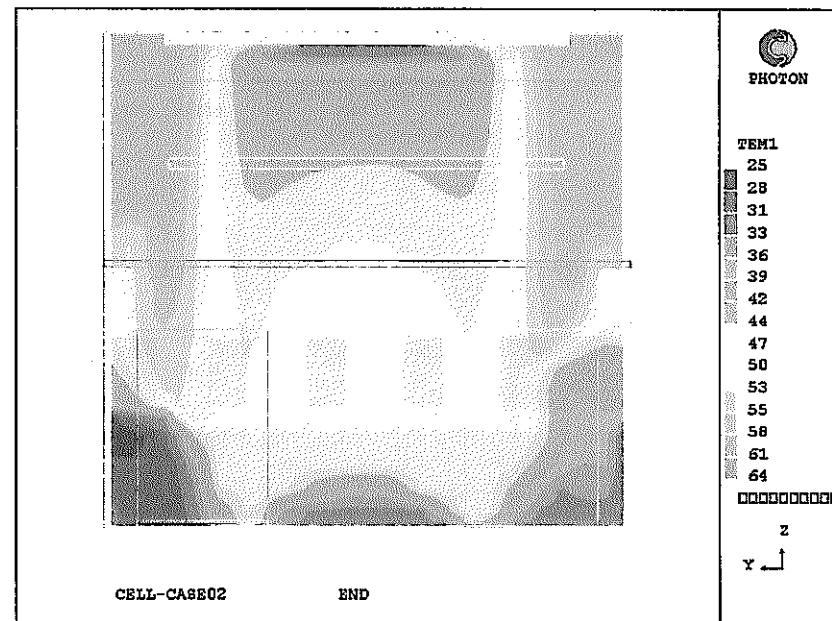


(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度

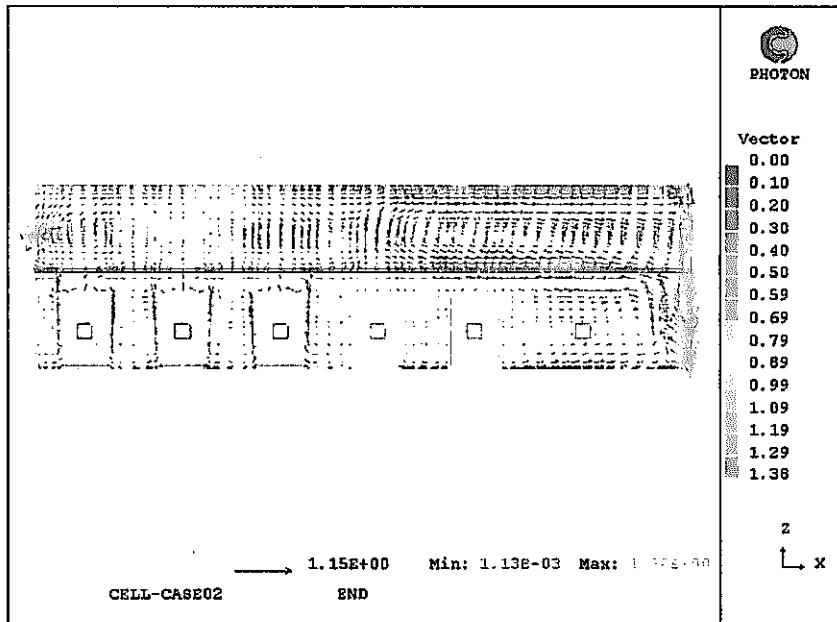


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

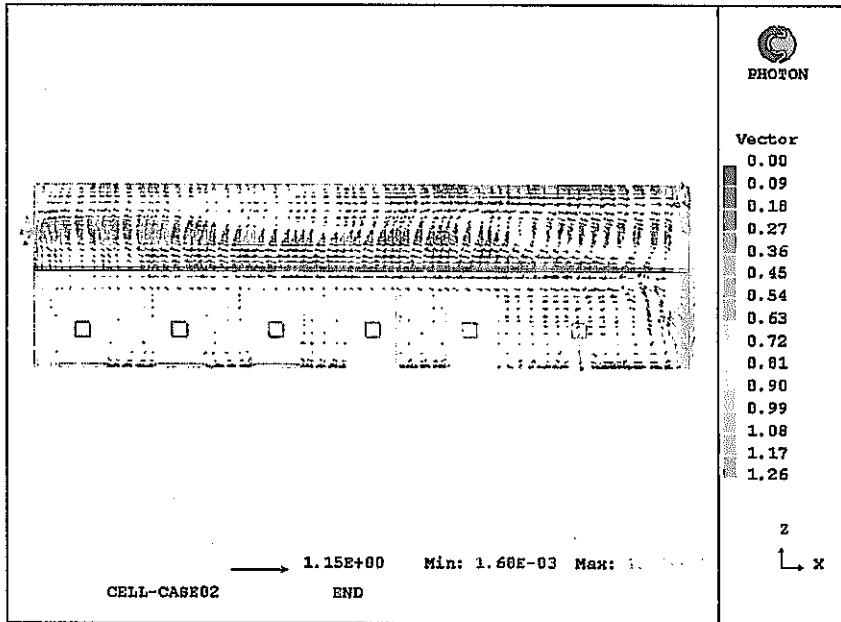
付図 2-1 CASE 2 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (2 / 2)



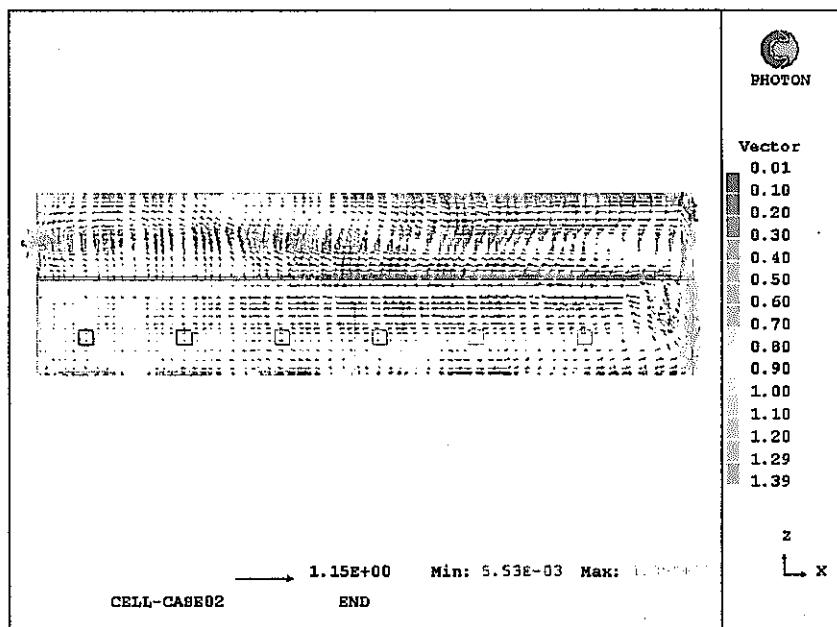
(8) 短辺方向の対称面の温度



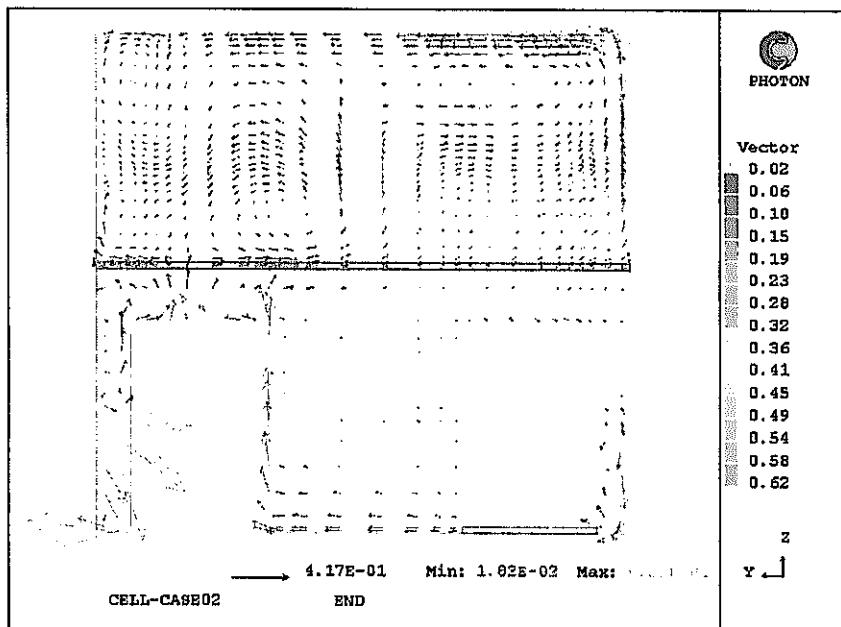
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

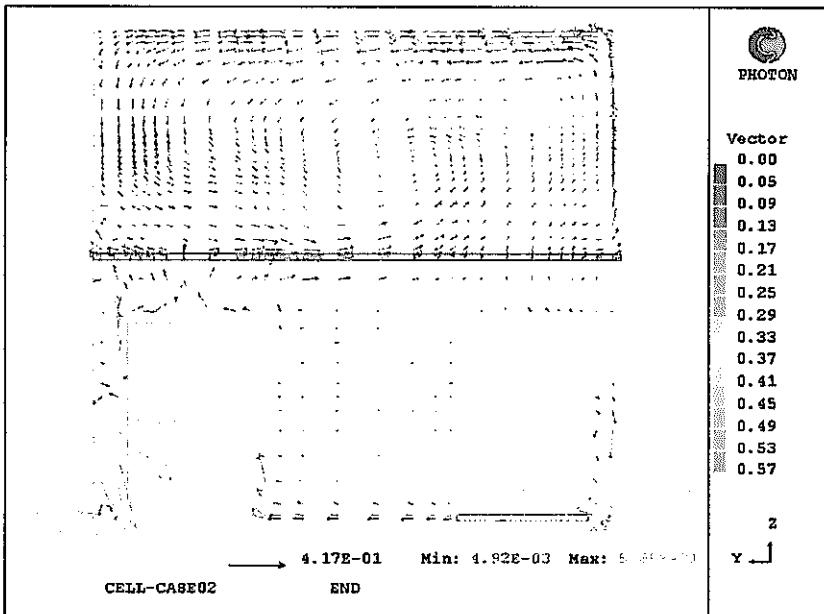


(3) 対称面の長手方向断面の流況

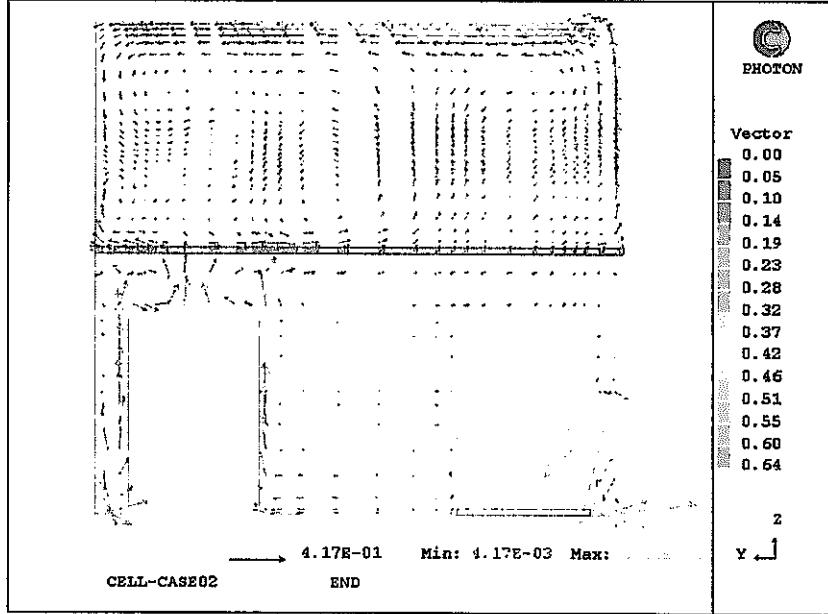


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

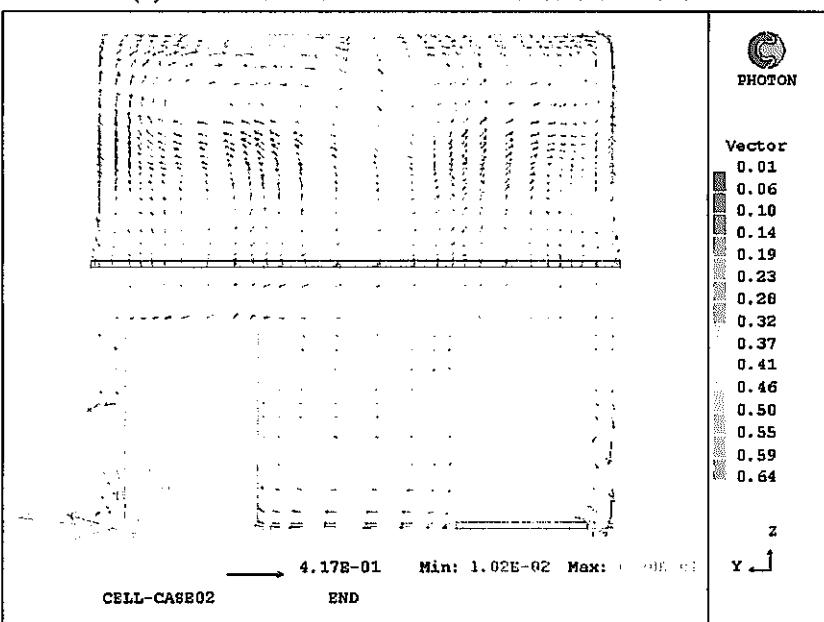
付図 2-2 CASE 2 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (1/2)



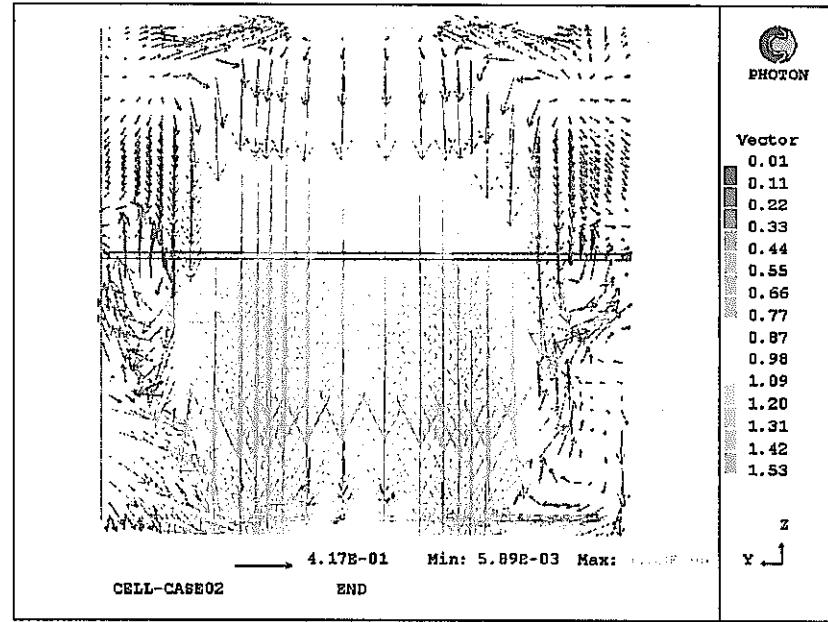
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



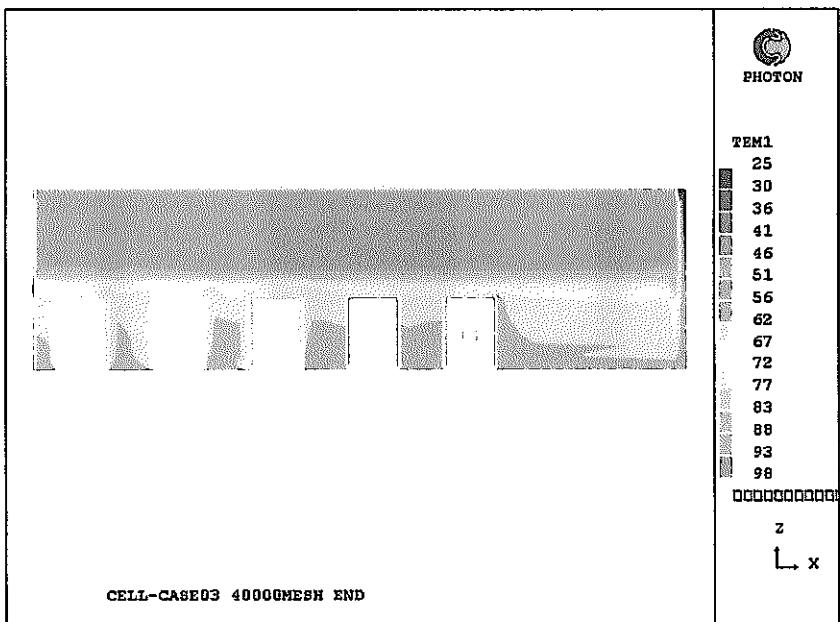
(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況



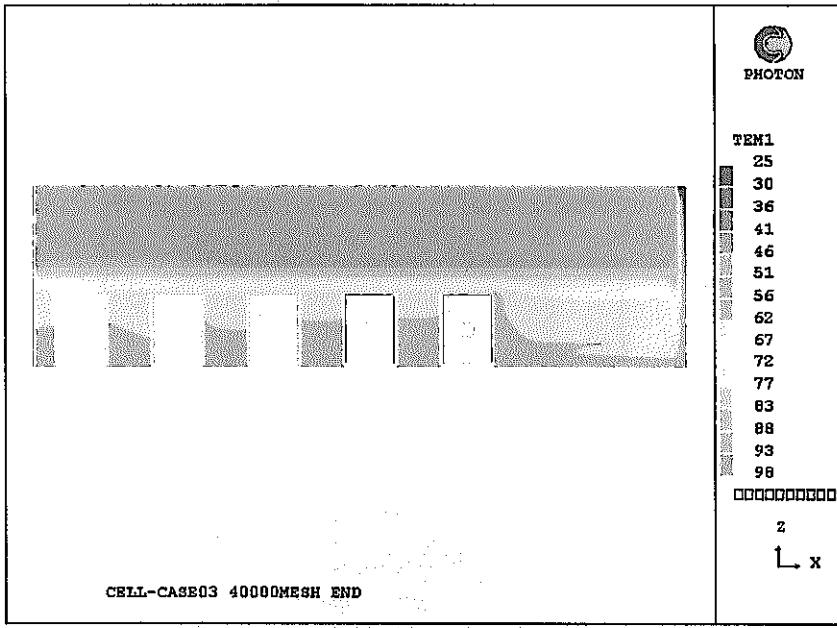
(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況



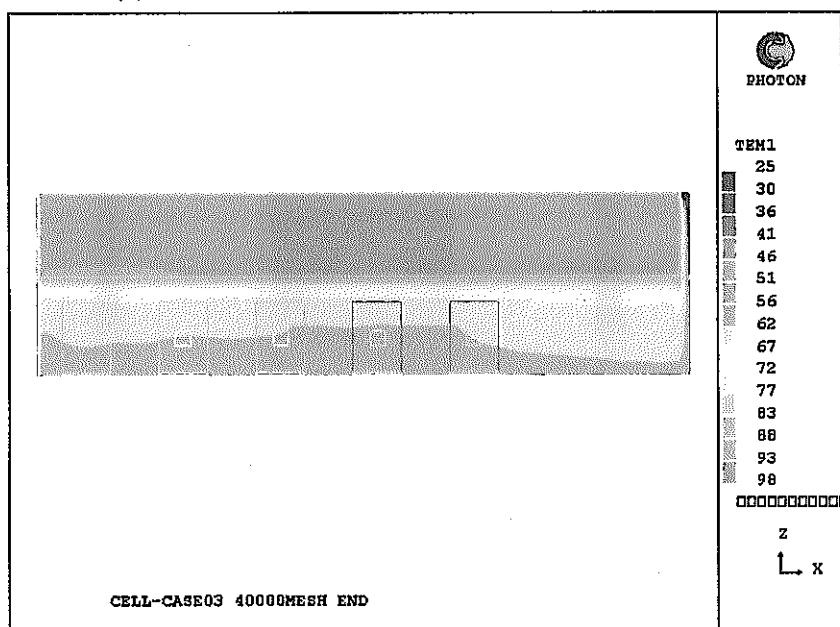
(8) 短辺方向の対称面の流況



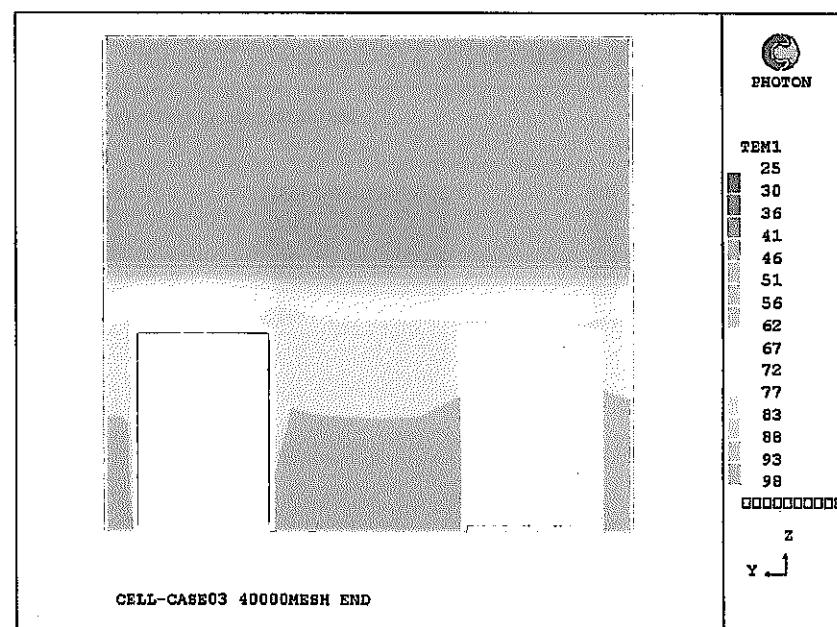
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

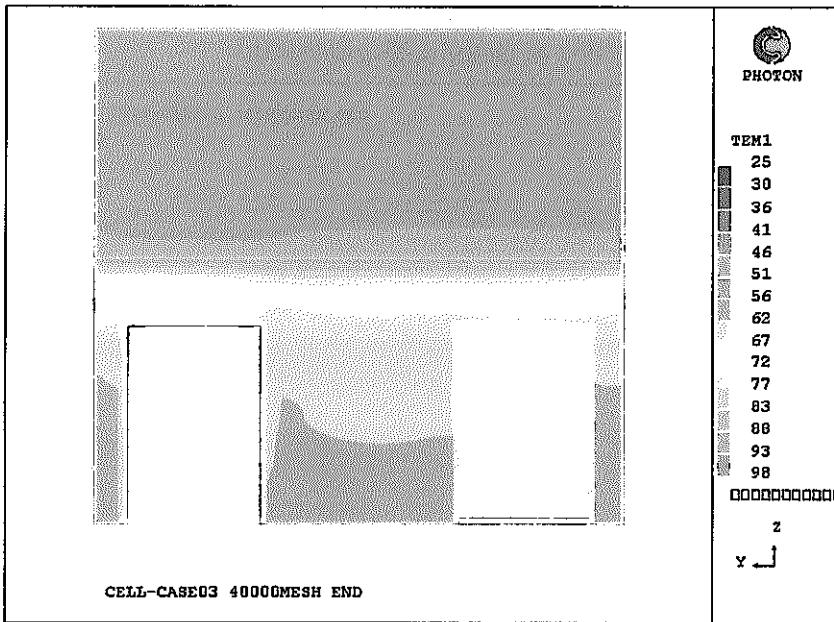


(3) 対称面の長手方向断面の温度

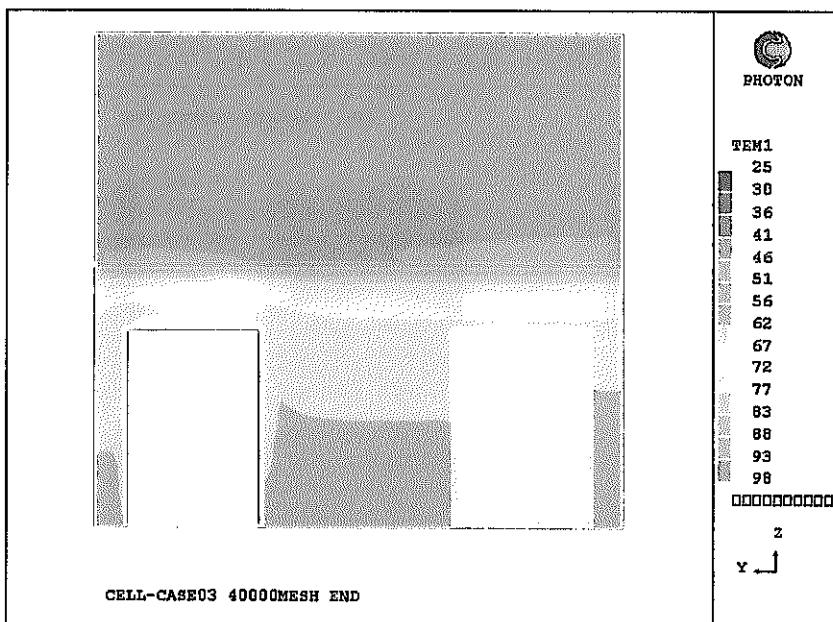


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

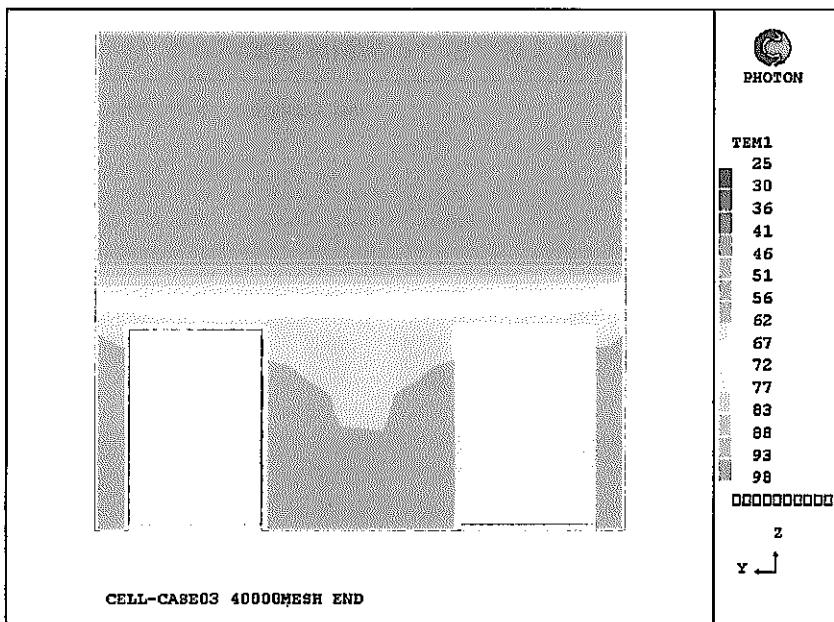
付図 3-1 CASE 3 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (1 / 2)



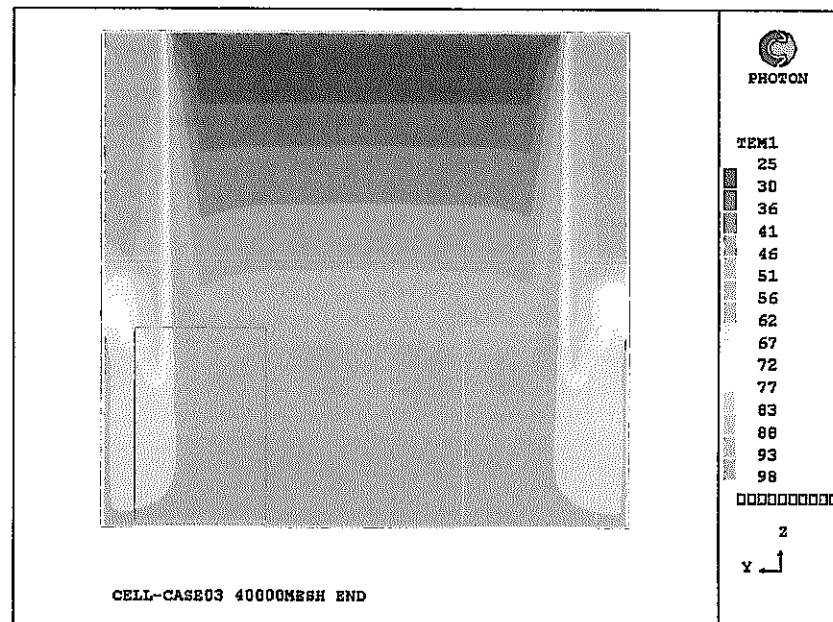
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度

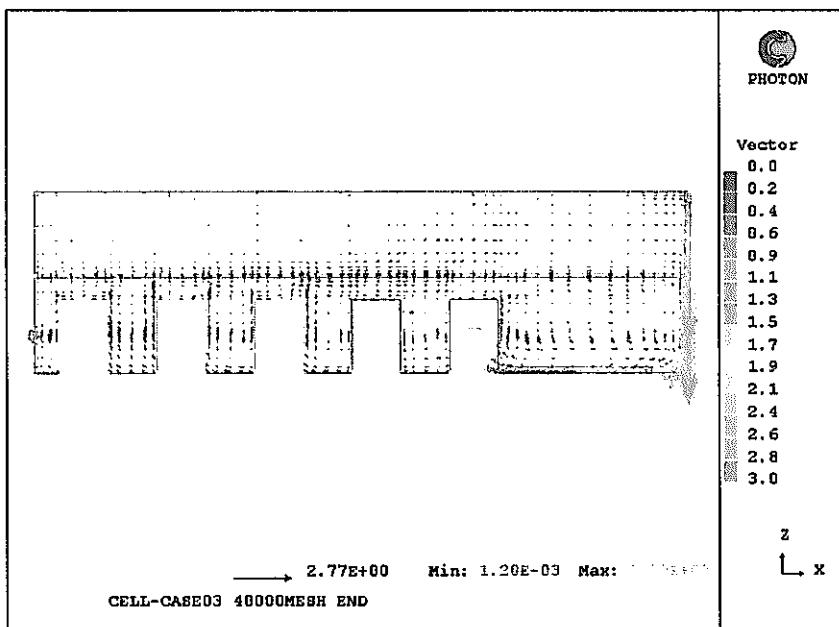


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

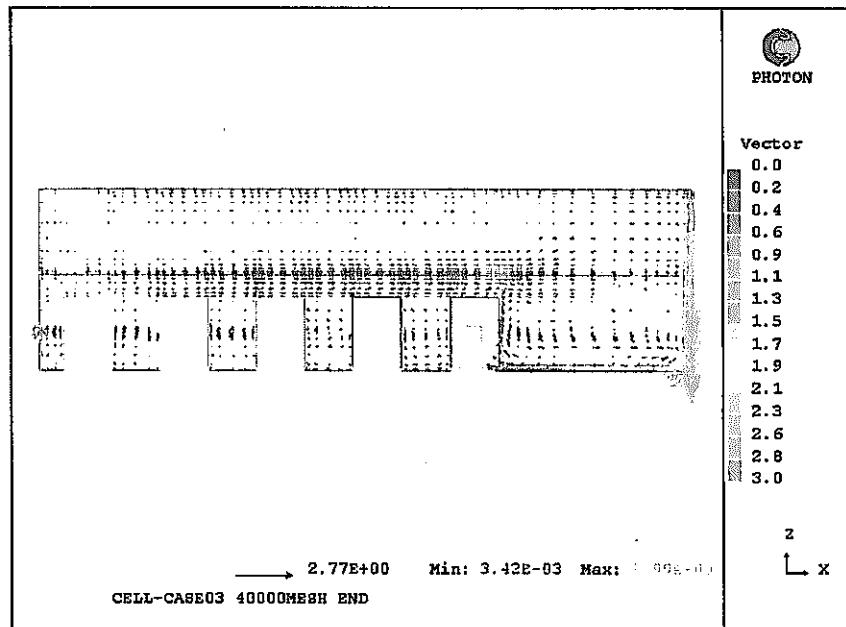


(8) 短辺方向の対称面の温度

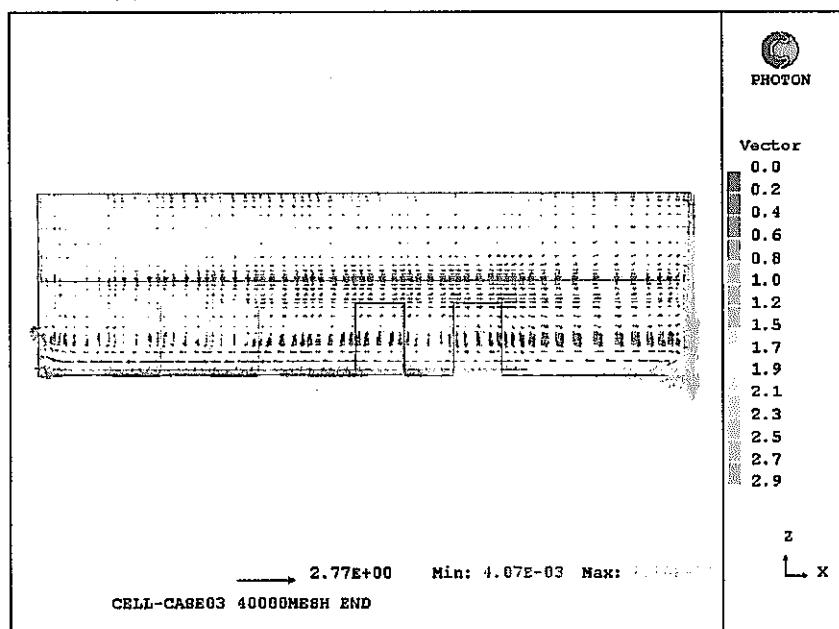
付図 3-1 CASE 3 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (2 / 2)



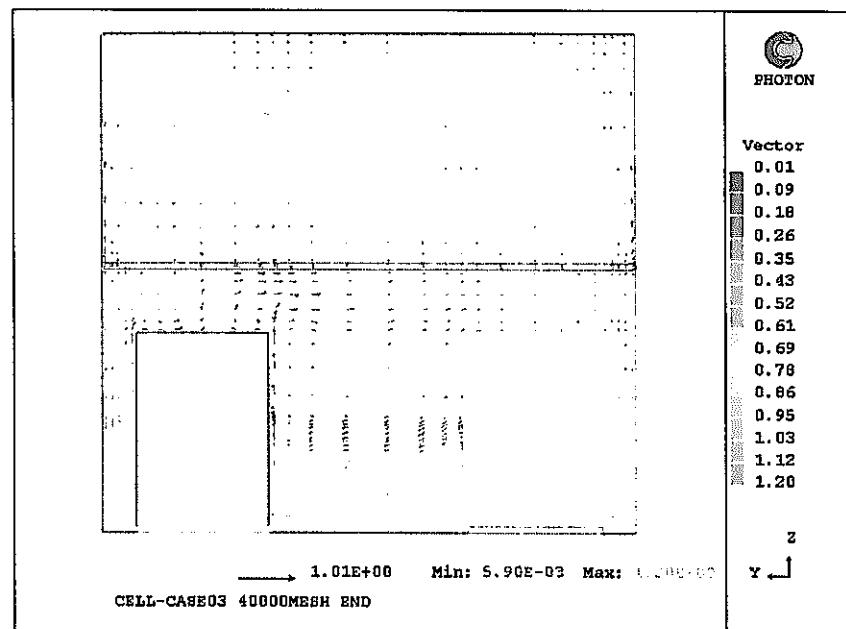
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

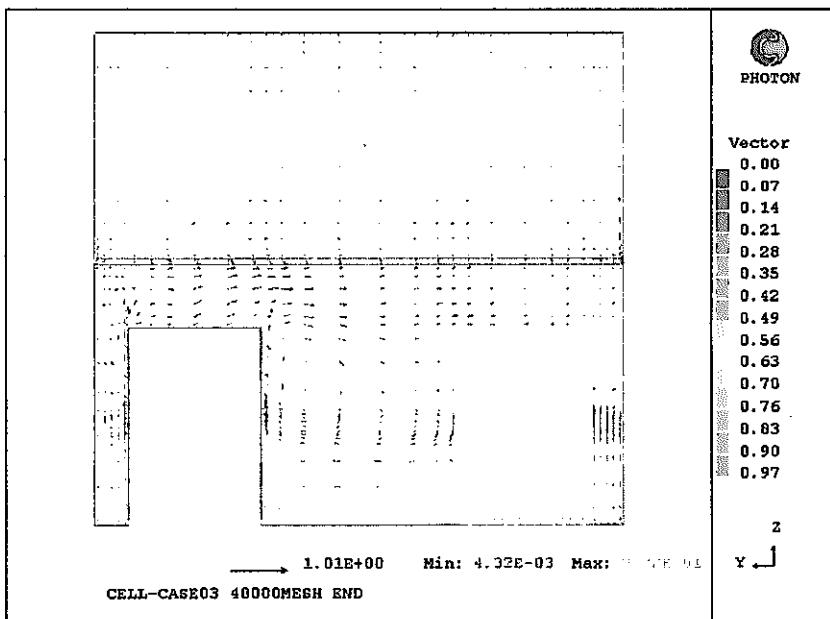


(3) 対称面の長手方向断面の流況

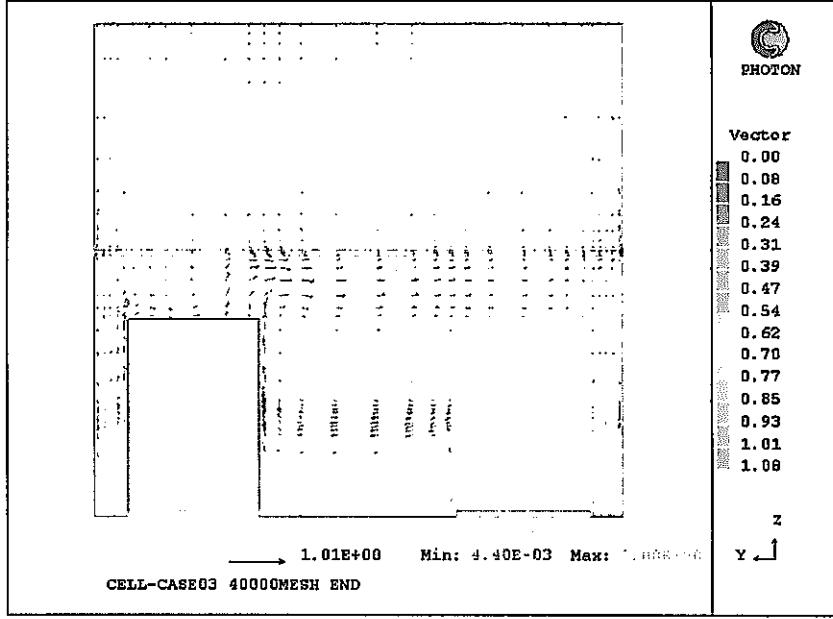


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

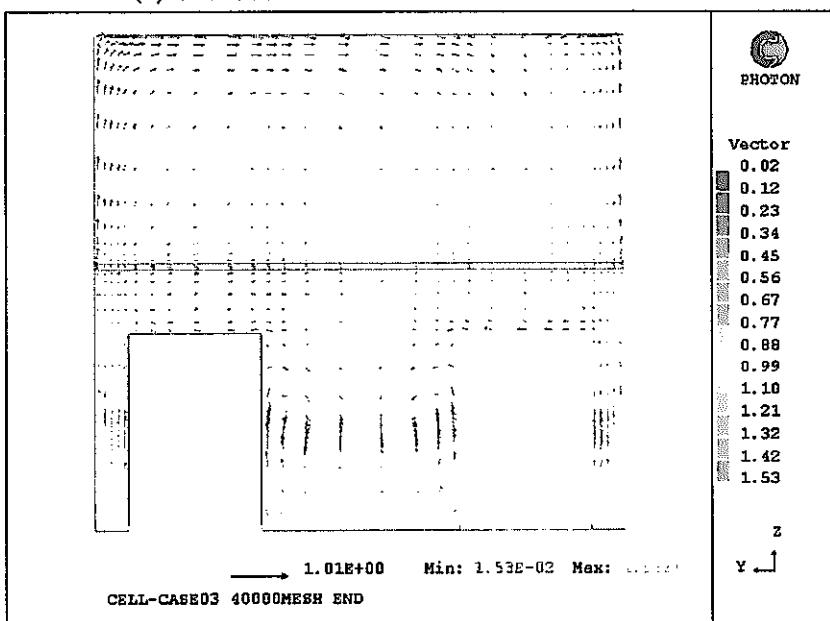
付図 3-2 CASE 3 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (1 / 2)



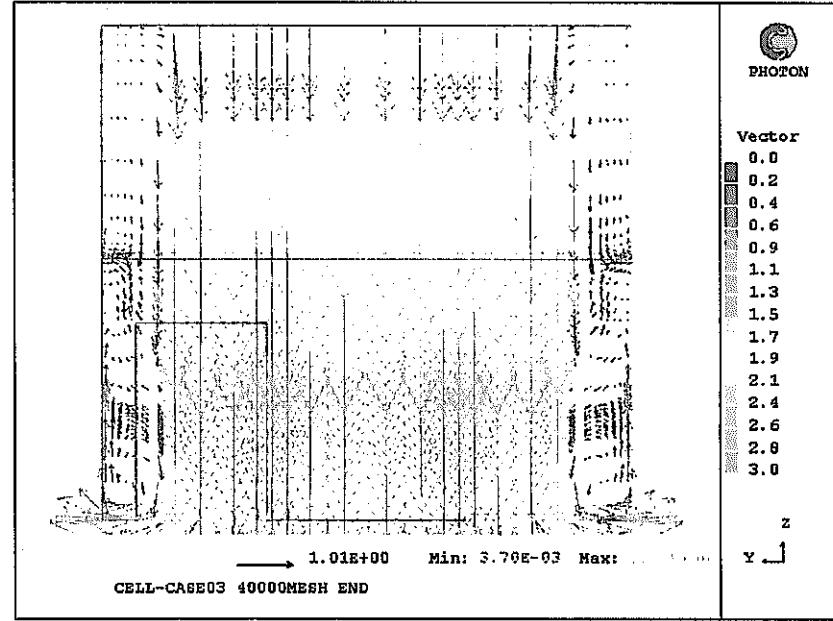
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況

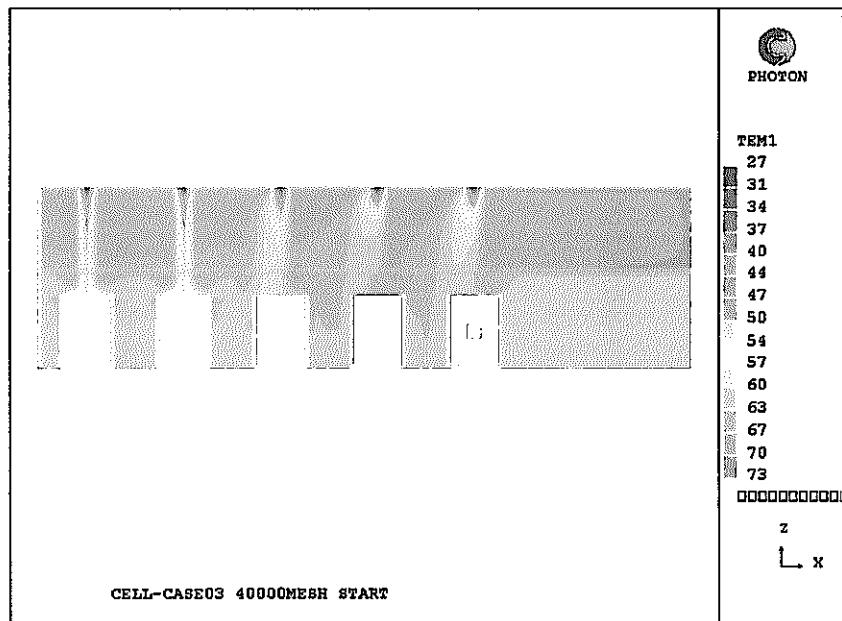


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況

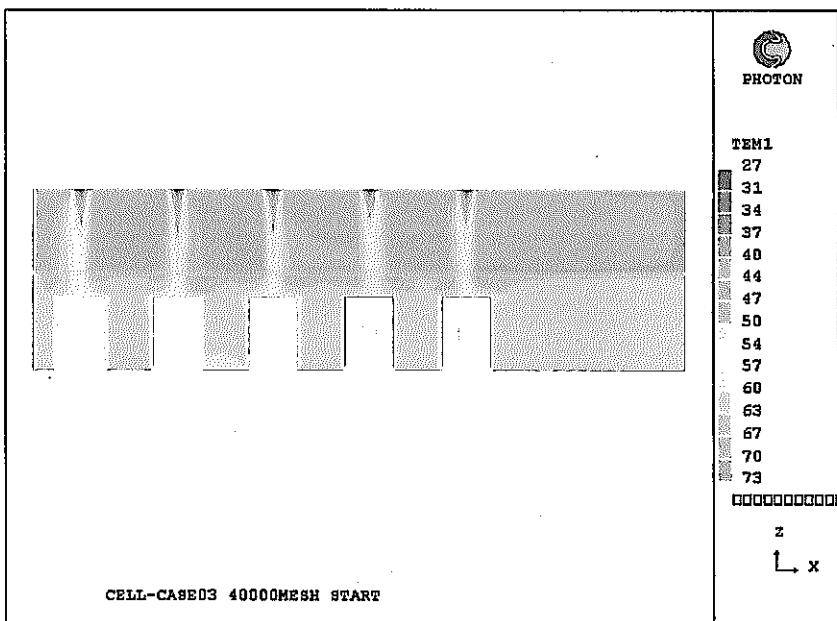


(8) 短辺方向の対称面の流況

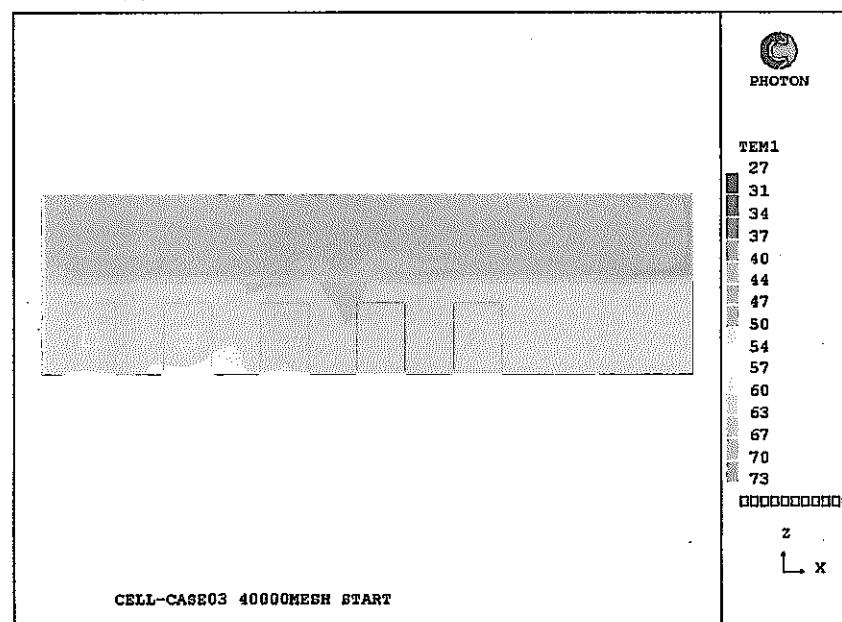
付図 3-2 CASE 3 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (2 / 2)



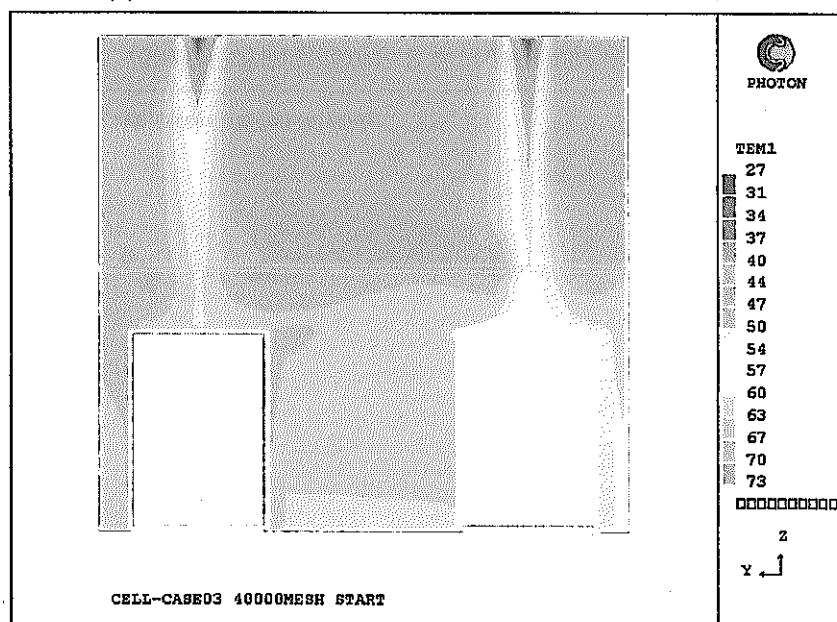
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

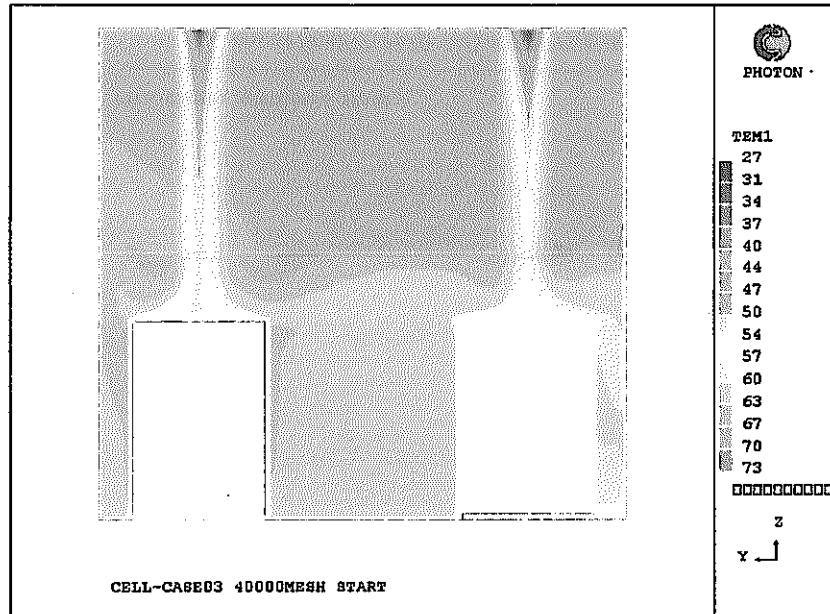


(3) 対称面の長手方向断面の温度

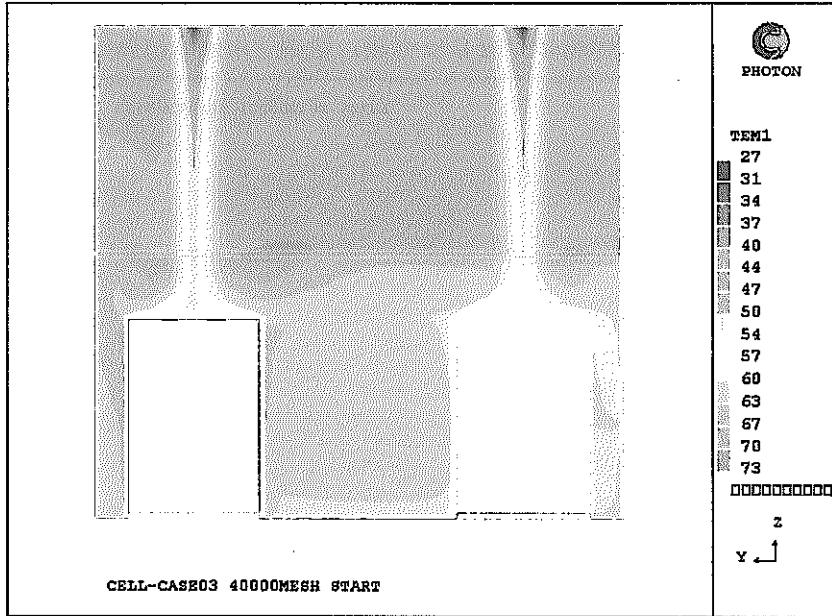


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の温度

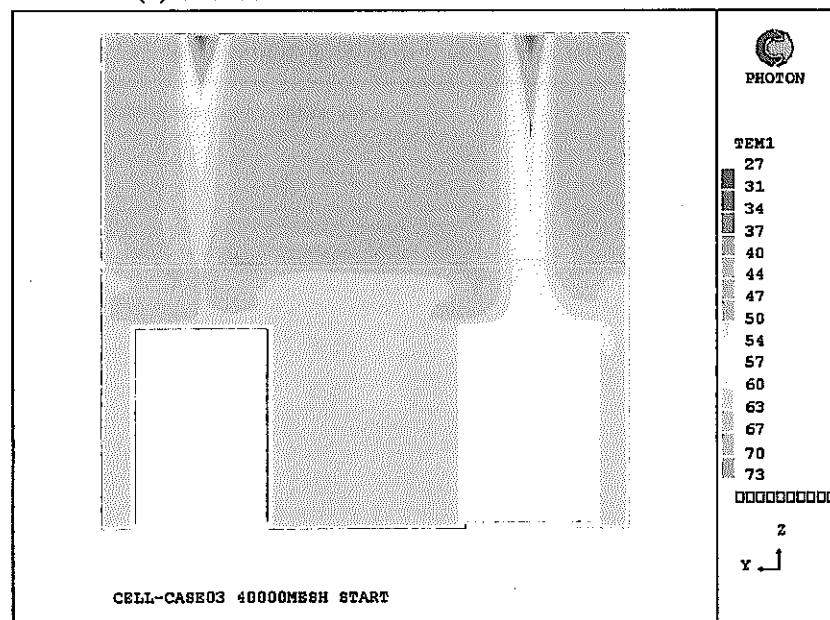
付図4-1 CASE 4 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (1 / 2)



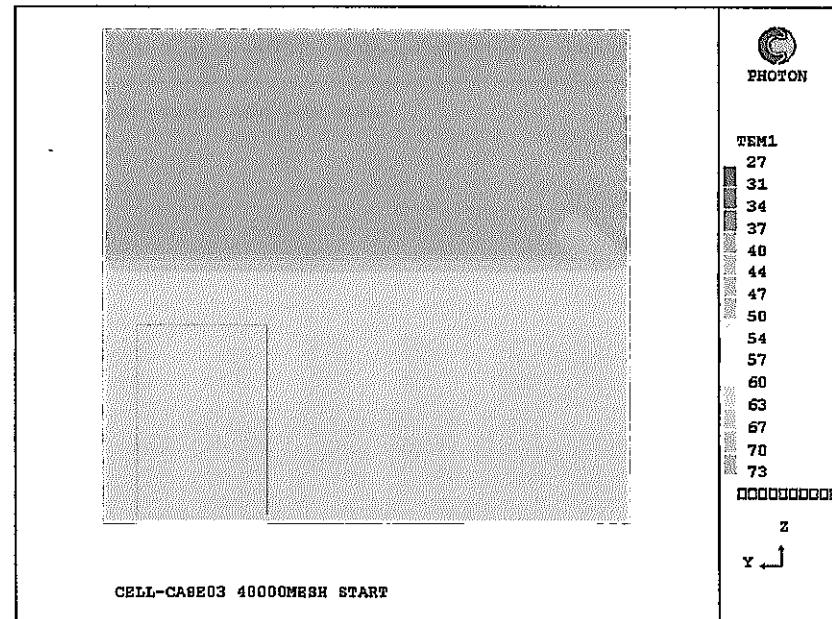
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の温度



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の温度

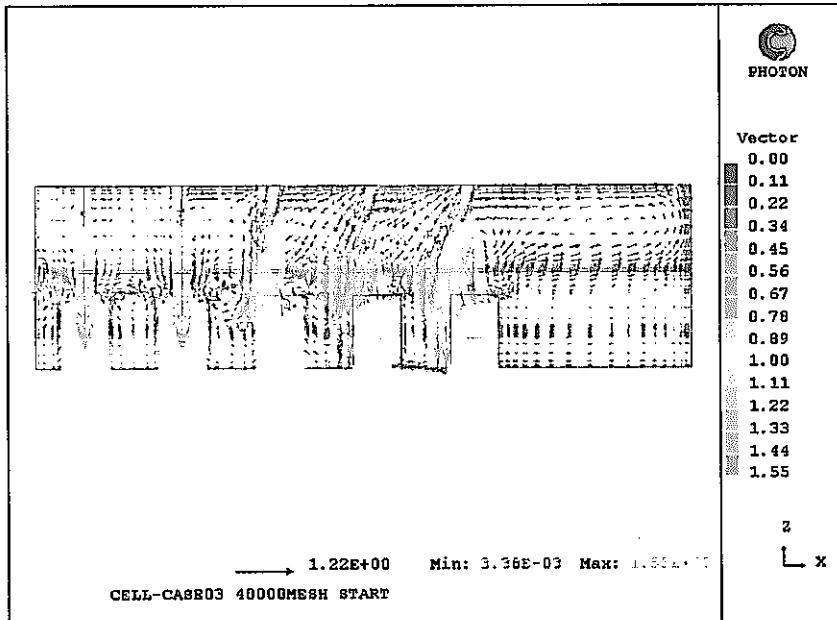


(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の温度

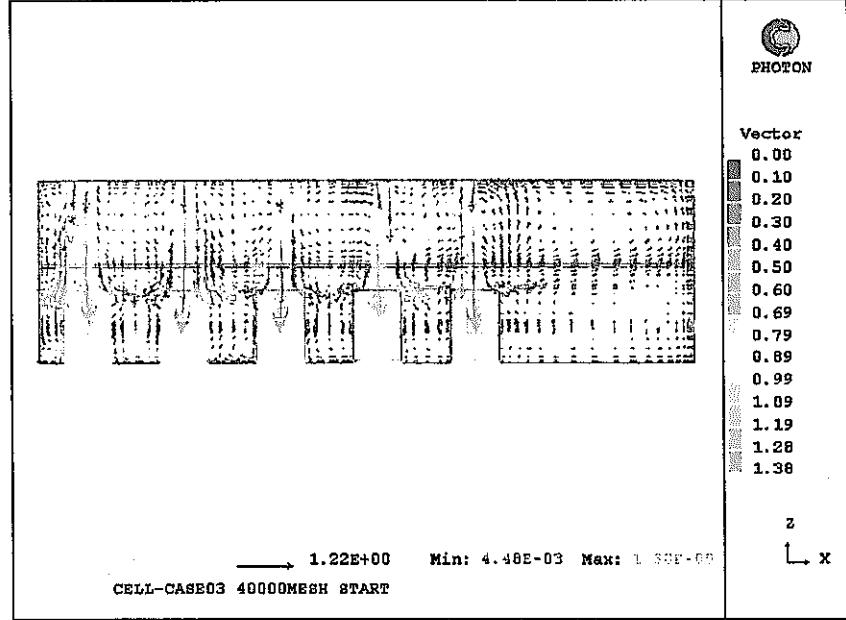


(8) 短辺方向の対称面の温度

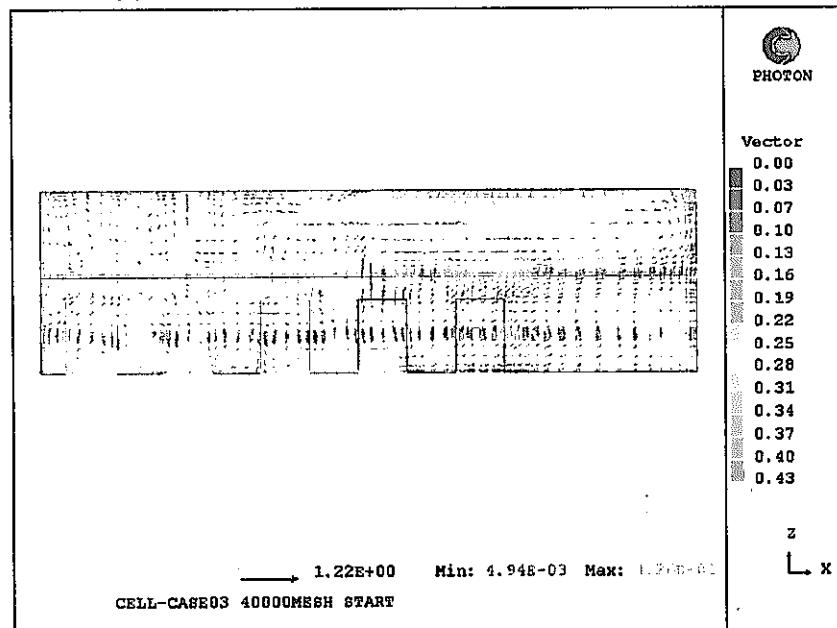
付図 4-1 CASE 4 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の温度 (2 / 2)



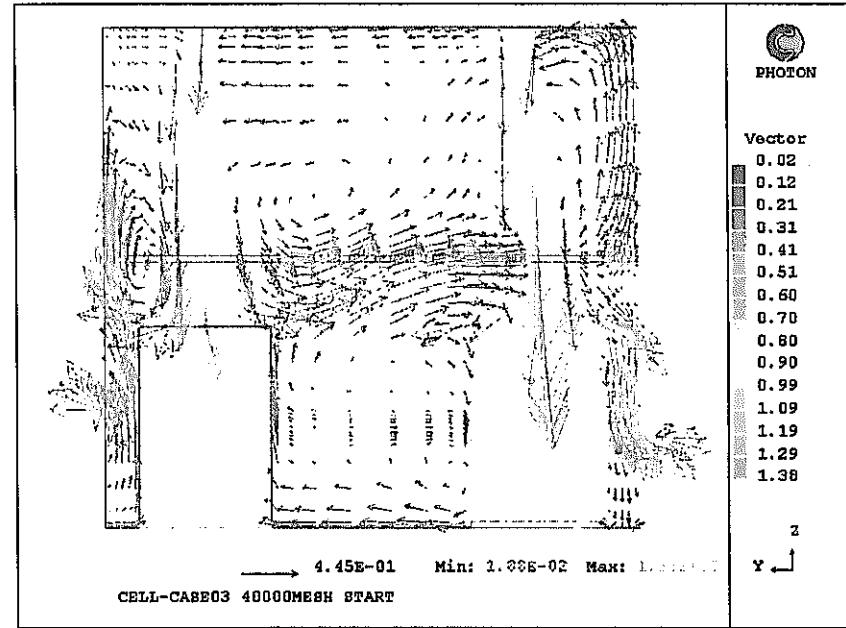
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

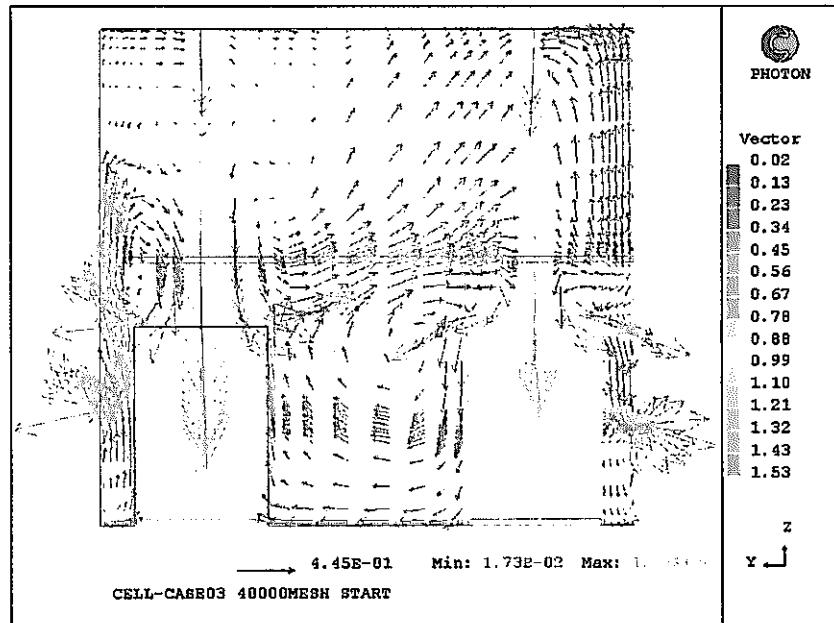


(3) 対称面の長手方向断面の流況

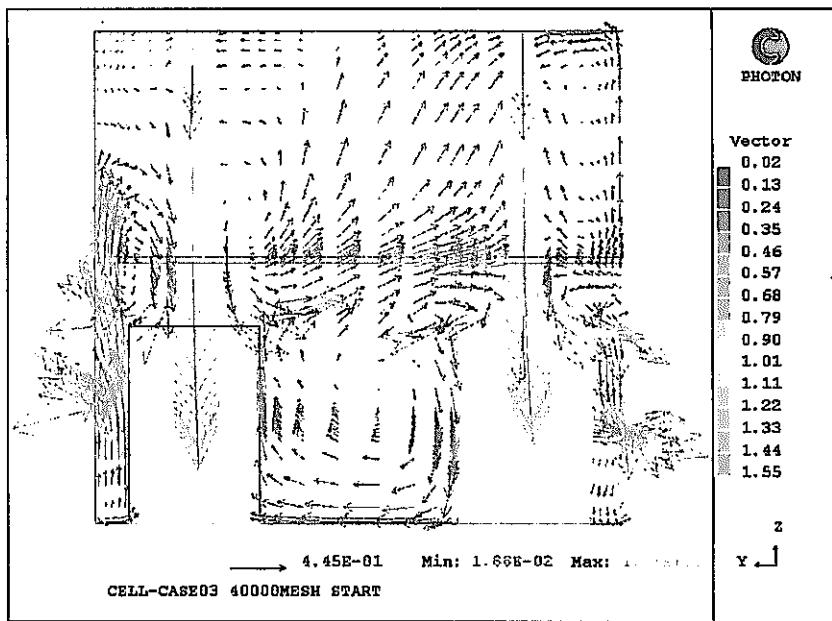


(4) 短辺方向中心断面（壁から3基目の機器断面）の流況

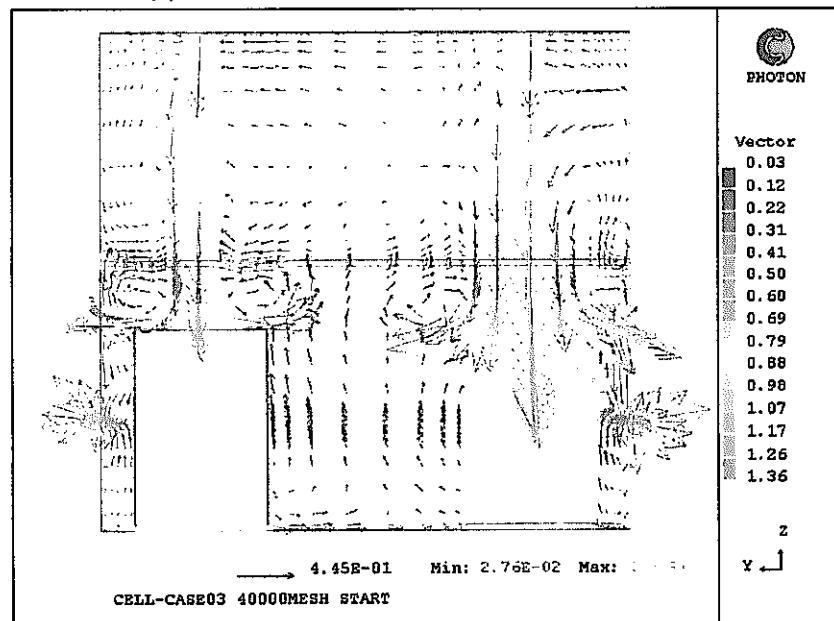
付図4-2 CASE 4 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (1/2)



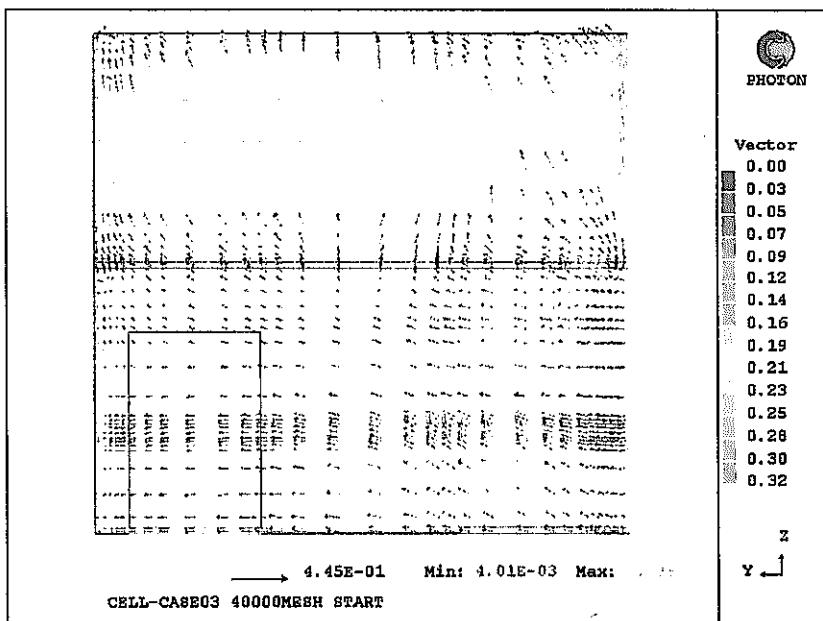
(5) 短辺方向壁面から 1 基目の機器断面の流況



(6) 短辺方向壁面から 2 基目の機器断面の流況



(7) 短辺方向壁面から 5 基目の機器断面の流況



(8) 短辺方向の対称面の流況

付図 4-2 CASE 4 低流速条件で天井発熱 100kW の場合の各部の流況 (2 / 2)