

ガラス溶融炉の白金族堆積物による電流密度の集中と
電極溶融温度の検出性に関する数値解析

(研究報告)

2004年8月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 4 9
核燃料サイクル機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：iserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

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

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

ガラス溶融炉の白金族堆積物による電流密度の集中と 電極溶融温度の検出性に関する数値解析

(研究報告)

堺 公明^{*1}, 河村拓己^{*2}, 三浦昭彦^{*3}, 岩崎 隆^{*2}

要 旨

2002年3月、東海再処理工場のガラス溶融炉において、主電極の侵食によるものと考えられる故障が発生した。これまでの原因調査から想定される電極損傷要因として、「局所的な電流密度の集中による交流電極反応」、及び、「局所的な温度上昇による電極材料の溶融」等が挙げられている。いずれの要因も、酸化ルテニウム(RuO_2)等の電気伝導度の高い白金族粒子が炉底部に堆積し、炉内の直接通電電流が白金族粒子の堆積領域に集中することが発端と考えられる。

そこで、本検討では、白金族粒子が堆積した場合の電極への影響を評価するため、損傷が発生したと考えられる電極角部への電流密度の集中について数値解析による評価を行い、最高温度を推定するとともに、電極内の温度分布に関する数値解析を行い、熱電対による溶融温度検出性に関する検討を実施した。

その結果、ガラス溶融炉内の電流密度は、堆積物と電極が接する箇所集中し、電流の経路ではインコネル材の溶融温度 1360 に達する可能性があることが明らかになった。また、電極内の温度分布に関する数値解析の結果、電極損傷想定箇所が溶融温度に到達した場合でも熱電対による温度検出は困難であることが示された。以上より、損傷発生時の電極熱電対温度に異常は観察されなかったが、電極の角部は溶融温度に到達していた可能性があることが明らかになった。

*1 大洗工学センター 要素技術開発部流 流体計算工学研究 Gr.

*2 株式会社 NESI

*3 東海事業所 再処理センター 環境保全部 処理第三課

Numerical Analysis for electrode temperature increase by current density concentration caused by noble metal accumulation in the glass melter

(Research document)

Takaaki SAKAI^{*1}, Takumi KAWAMURA^{*2}, Akihiko MIURA^{*3}, Takashi IWASAKI^{*2}

Abstract

Main electrode failure occurred in the TVF(Tokai Vitrification Facility) glass melter at the Tokai reprocessing center in March, 2002. Electric corrosion by current concentration and melting by temperature increase were expected as possible causes. Both causes were derived from the noble metal accumulation at the bottom of the glass melter. The noble metal sediments have high electric conductivity. Therefore, the current density in the melt glass was supposed to be concentrated to the noble metal sediments.

In this study, three dimensional numerical analysis was performed to investigate the electric current concentration to the contact area between the electrode and the noble metal sediments. The maximum temperature was evaluated by the simplified model for the current path. In addition, three dimensional temperature profile inside the electrode was calculated numerically, in order to evaluate the possibility to detect the temperature increase by the thermocouple which was settled in the electrode.

As a result, current density in the melter showed high concentration at the contact area between the electrode and the sediments. It was found that the maximum temperature at the current path had a possibility to increase more than melting temperature of 1360 . In addition, the thermocouple inside the electrode scarcely showed sensitivity to the melting temperature at the edge of the electrode header where the failure might occur. In conclusion, the possibility of the electrode melting by the temperature increase can not be excluded as a cause of the failure.

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

*2 NESI Inc.

*3 Vitrification Technology Section, Tokai Reprocessing Center, Tokai Works, JNC

青色の項目をクリックすると当該ページへジャンプします

目 次

1 . 緒言	1
2 . 解析項目	3
3 . 解析内容	5
3.1 白金族粒子堆積による電流密度集中に関する数値解析	5
3.2 主電極内詳細温度分布及び熔融温度検出性に関する数値解析	5
4 . 解析結果	7
4.1 白金族粒子堆積による電流密度集中に関する数値解析	7
4.2 主電極内詳細温度分布及び熔融温度検出性に関する数値解析	37
5 . 結言	67
参考文献	69

表リスト

表 4.1.1-1	ガラス溶融炉運転条件	-----9
表 4.1.1-2	解析モデルの Property 分割及び体積	-----10
表 4.1.2-1	ガラス溶融炉運転条件	-----17
表 4.1.3-1	ガラス溶融炉運転条件	-----25
表 4.2.1-1	ガラス溶融炉運転条件	-----39

図リスト

図 4.1.1-1	炉底部における白金族堆積状況モデル	-----13
図 4.1.1-2	電流密度分布評価用解析メッシュ	-----14
図 4.1.1-3	電流密度分布解析（接触側）	-----15
図 4.1.1-4	電流密度分布解析（接触近接側）	-----16
図 4.1.2-1	電極 堆積物接触面積解析モデル	-----21
図 4.1.2-2	接触面積依存性解析メッシュ（直方体モデル）	-----22
図 4.1.2-3	接触面積依存性解析結果	-----23
図 4.1.2-4	接触面積を変化させた場合の電流密度分布	-----24
図 4.1.3-1	炉底部における白金族堆積状況モデル	-----29
図 4.1.3-2	堆積物形状を模擬した接触面積依存性評価解析メッシュ	-----30
図 4.1.3-3	堆積物形状を模擬した接触面積依存性解析結果	-----30
図 4.1.4-1	最高温度解析モデル	-----33
図 4.1.4-2	ガラス熱伝導率	-----33
図 4.1.4-3	白金族変動ガラスの熱伝導率測定結果	-----33
図 4.1.4-4	円筒内流路内温度分布（熱伝導率依存性）	-----34
図 4.1.4-5	円筒流路内温度分布（外表面温度依存性）	-----34
図 4.1.4-6	最高温度と電流密度の関係	-----34
図 4.2.1-1	主電極構造図	-----43
図 4.2.1-2	インコネル熱伝導率	-----43
図 4.2.1-3 (a)	作成形状（ワイヤーフレーム表示）	-----44
図 4.2.1-3 (b)	作成形状（ソリッド表示）	-----44
図 4.2.1-3 (c)	メッシュ格子図（拡大図，断面図）	-----45
図 4.2.1-4	電極表面温度（FLOWMEL 解析結果（境界条件））	-----46
図 4.2.1-5	温度分布コンター図（評価面：ZX 平面 Y=0mm）	-----47

図 4.2.1-6	温度分布コンター図 (評価面: XY 平面 Z=-40mm)	47
図 4.2.1-7	温度分布コンター図 (評価面: XY 平面 Z=0mm)	48
図 4.2.1-8	温度分布コンター図 (評価面: XY 平面 Z=35mm)	48
図 4.2.1-9	温度分布コンター図 (冷却ヘッドと熱電対)	49
図 4.2.1-10	冷却ヘッド表面の温度分布コンター図	49
図 4.2.1-11	冷却ヘッド周辺の速度ベクトル図	50
図 4.2.1-12	冷却ヘッド周辺のパスライン表示 (時間表示)	50
図 4.2.1-13	冷却ヘッド周辺のパスライン表示 (温度表示)	51
図 4.2.1-14	モデル全体のパスライン表示 (時間表示)	51
図 4.2.1-15	モデル全体のパスライン表示 (温度表示)	52
図 4.2.1-16	実機温度データと解析結果の比較	52
図 4.2.1-17	解析境界温度条件比較 (電極上面)	53
図 4.2.2-1	角部溶融温度ケース (表面温度境界条件)	57
図 4.2.2-2	温度分布コンター図 (評価面: ZX 平面 Y=350mm)	58
図 4.2.2-3	温度分布コンター図 (評価面: ZX 平面 Y=0mm)	58
図 4.2.2-4	温度分布コンター図 (評価面: XY 平面 Z=-100mm)	59
図 4.2.2-5	温度分布コンター図 (評価面: XY 平面 Z=-40mm)	59
図 4.2.2-6	温度分布コンター図 (評価面: XY 平面 Z=0mm)	60
図 4.2.2-7	温度分布コンター図 (評価面: XY 平面 Z=35mm)	60
図 4.2.2-8	温度分布コンター図 (冷却ヘッドと熱電対)	61
図 4.2.2-9	冷却ヘッド表面の温度分布コンター図	62
図 4.2.2-10	冷却ヘッド周辺の速度ベクトル図	62
図 4.2.2-11	冷却ヘッド周辺のパスライン表示 (時間表示)	63
図 4.2.2-12	冷却ヘッド周辺のパスライン表示 (温度表示)	63
図 4.2.2-13	モデル全体のパスライン表示 (時間表示)	64
図 4.2.2-14	モデル全体のパスライン表示 (温度表示)	64

1 緒言

使用済燃料の再処理の過程で発生する高レベル放射性廃液（High Activity Wastes : HAW）は、原子炉での核分裂により生成したストロンチウム及びセシウム等の核分裂生成物を含み、高い放射能を有している。HAW は、物理的、化学的に安定なガラス固化体に処理し、冷却のために 30～50 年間程度貯蔵した後、人間の生活環境から十分離れた地下の深い地層中に処分する方針を採っている。

これまで、東海再処理工場の再処理の過程で発生する HAW を処理するため、ガラス固化技術開発施設（Tokai Vitrification Facility : TVF）を建設し、廃液供給式直接通電型セラミックメルタ（Liquid Fed Ceramic Melter : LFCM）のプラント規模での技術開発が進められてきた。LFCM 方式ガラス溶融炉は、ガラス溶融に耐熱、耐食性に富んだセラミック（耐火レンガ）を用いており、HAW を液体のままガラス原料とともに連続的に供給し溶融する。ガラスは高温状態では電気伝導体であることから、外部からヒーターにより溶融点近くまで加熱し、その後、溶融炉内の電極を介してガラスに直接電流を通し、そのときに発生する熱（ジュール熱）によりガラスを加熱溶融する。TVF では、1995 年度から開発運転を実施し、2002 年度までに 130 本のガラス固化体を製造・保管している。

HAW に含まれるルテニウムやパラジウムなどの白金族元素は、電気伝導率が高く、ガラス中にはほとんど溶解せず分離析出する。そのため、ガラス固化体の製造を繰り返すうちに炉底部に白金族元素が堆積し通電パスを形成することによって、ガラスへの通電不良を生ずることが懸念されている。ガラス溶融炉では、白金族元素の抽出し性を良くするため、炉底部に勾配を有する炉構造とし、さらに溶融炉内の温度分布を最適化（炉底低温運転）することにより堆積を防止するなどの対策が講じられている^[1]。しかし、白金族元素の堆積を完全に防止することは困難であり、平成 14 年 3 月に 1 号炉において、主電極の侵食によるものと考えられる故障が発生した。これまでの原因調査から想定される電極損傷要因として、「局所的な電流密度の集中による交流電極反応」、及び、「局所的な温度上昇による電極材料の溶融」等が挙げられている。いずれの要因も、酸化ルテニウム(RuO_2)等の電気伝導度の高い白金族粒子が炉底部に堆積し、炉内の直接通電電流が白金族粒子の堆積領域に集中することが発端と考えられる。

そこで、本検討では、白金族粒子が堆積した場合の電極への影響を評価するため、損傷が発生したと考えられるインコネル製の電極角部への電流密度の集中について数値解析による評価を行い、最高温度の推定を実施するとともに、電極内の温度分布に関する数値解析を行い、熱電対による温度検出性に関する検討を実施する。

2 解析項目

以下に解析項目について示す。従来の評価では、白金族堆積を考慮した電流密度の集中は1次元の回路モデルで実施していることから、ここでは、3次元の汎用コードを用いて炉内の電場を解析し電流密度の集中を高精度で評価する。さらに、その結果を用いて最高温度に関する評価を行う。

また、溶融の可能性を評価するためには、主電極内の温度分布を精度よく予測する必要がある。従来、主電極内の複雑な冷却空気流路を模擬した解析は実施されていないことから、それらの形状を3次元でモデル化した解析を実施するとともに、推定損傷箇所が溶融温度に達した場合の熱電対位置での温度を数値解析により算定し、検出性について評価する。

2.1 白金族粒子堆積による電流密度集中に関する数値解析

- 2.1.1 主電極近傍の電流密度分布に関する数値解析
- 2.1.2 電流密度に対する電極接触面積の影響評価解析
- 2.1.3 堆積物形状を模擬した最大電流密度評価解析
- 2.1.4 電流密度集中時の温度上昇評価

2.2 主電極内詳細温度分布及び溶融温度検出性に関する数値解析

- 2.2.1 主電極内温度分布予測性に関する検証
- 2.2.2 溶融温度の熱電対による検出性に関する評価

3 解析内容

以下、各解析項目について実施内容を示す。

3.1 白金族粒子堆積による電流密度集中に関する数値解析

3.1.1 主電極近傍の電流密度分布に関する数値解析

白金族粒子の堆積形状を模擬した3次元の電磁解析を行い、電極面近傍での電流密度分布の状況（パターン）を明らかにする。

3.1.2 電流密度に対する電極接触面積の影響評価解析

簡便な3次元の直方体モデルによって、堆積物と電極が接する面積を変化させた解析を実施し、電流密度と接触面積の関係について評価する。

3.1.3 堆積物形状を模擬した最大電流密度評価解析

電極近傍での最大電流密度を評価する観点から、堆積物形状を3次元で模擬した数値解析を実施し、堆積物と電極の接触面の電流密度を評価する。

3.1.4 電流密度集中時の温度上昇評価

電極材料のインコネルが溶融温度に達する可能性について検討するため、前項の最大電流密度を用いて、最高電流密度位置での発熱量を評価するとともに、簡易熱伝導計算モデルによって、最高温度を評価する。

3.2 主電極内詳細温度分布及び溶融温度検出性に関する数値解析

3.2.1 主電極内温度分布予測性に関する検証

主電極内の複雑な冷却空気流路の形状を模擬した3次元解析を実施し、主電極の温度分布を評価するとともに、TVF 1号炉にて測定された電極内熱電対温度との比較により検証する。

3.2.2 溶融温度の熱電対による検出性に関する評価

想定損傷部の温度を溶融温度まで上昇させた場合の解析を実施し、熱電対位置温度への影響を評価することによって、溶融温度の検出性を評価する。

4 解析結果

4.1 白金族粒子堆積による電流密度集中に関する数値解析

4.1.1 主電極近傍の電流密度分布に関する数値解析

白金族粒子の堆積形状を模擬した3次元の電磁解析を行い、電極面近傍での電流密度分布の状況（パターン）を明らかにする。

4.1.1.1 解析手法

有限積分法による電磁場解析コード(MAGNA/FIM: CRC ソリューションズ)^[3]を用いる。MAGNA コードは、電気磁気利用機器の評価を目的とした汎用の解析コードである。3次元解析メッシュの作成には、通常、汎用のプリポストソフトウェアであるFEMAPを用いる。

4.1.1.2 解析条件

(1) 溶融炉運転条件

ガラス溶融炉の運転条件を TVF1_01-02Camp を参考に次のように設定する。

表 4.1.1-1 ガラス溶融炉運転条件

項目	設定値	備考
電圧	40 [V]	解析境界条件
ガラス温度	1100 []	解析物性条件
堆積物温度	860 []	解析物性条件
ガラス液位 ^{*1}	83 mm	解析体系条件

*1：主電極上端からの液位

(2) 白金族堆積状況

図4.1.1-1にガラス溶融炉底部における白金族元素を含んだガラスの堆積状況(解析体系条件)を示す。堆積状況(モデル)は、ファイバースコープによって、TVF1号炉の炉内観察を実施した結果を参考に作成した。

電流密度の集中の程度を評価する観点から、堆積物が電極に接触した場合と堆積物が電極に接触していない場合について比較することとし、両側の電極と堆積物形状の関係を設定した。

(3) 白金族濃度分布

TVF1号炉の堆積物に関する成分は現状不明であることから、MU 号第19キャンペーンに行われた調査より、堆積部中における白金族元素(RuO₂、PdO)濃度は14[wt%]で均一分布と暫定的に仮定した。また、溶融ガラス中に対流する白金族粒

子濃度は流下ガラス中のサンプル測定結果から、暫定的に 0.5[wt%]と設定した。

(4) 物性値用炉内温度

01-2Camp 運転データを参考に、熔融ガラス部温度を 1100[]、炉底部堆積物温度を 860[]とする。

(5) 比抵抗（実験式）

白金族元素を含んだガラスの抵抗率について、RuO₂ 濃度[wt%]とガラス温度を考慮した以下の Shimizu の式を用いる。

$$\log(\eta) = f(RuO_2\%) \times (1/(T - 232.3)) - 1.287$$

$$f(RuO_2\%) = 1730 - 53.54 \times (RuO_2\%)$$

η : 抵抗率 [$\Omega \cdot cm$] T : ガラス温度 []

$RuO_2\%$: RuO₂ 濃度(白金濃度とする) [wt%]

(4.1-1)

4.1.1.3 解析メッシュモデル

不等間隔の 4 面体メッシュを用いた要素数約 2 万 6 千の解析メッシュを作成した。

図 4.1.1-2 に解析メッシュを示す。解析メッシュは 5 種類の Property グループに分割し、各 Property グループに対して、電気伝導度の物性値を定義する。ここでは、対象となる熔融ガラス及び堆積物に対して電気伝導度を与えた。主電極及び補助電極は表面に電位の境界条件を与える。表 4.1.1-2 に各プロパティ分割とその体積を示す。本解析では、不等間隔メッシュジェネレータである G i D を用いている。境界形状の変化が急峻な箇所は詳細なメッシュとなっている。

表 4.1.1-2 解析モデルの Property 分割及び体積

Prop 番号	名前	体積(m ³)
1	ガラス	2.684E-01
2	堆積物	2.479E-02
3	補助電極	4.622E-03
4	主電極 1	4.949E-02
5	主電極 2	4.949E-02

4.1.1.4 解析結果

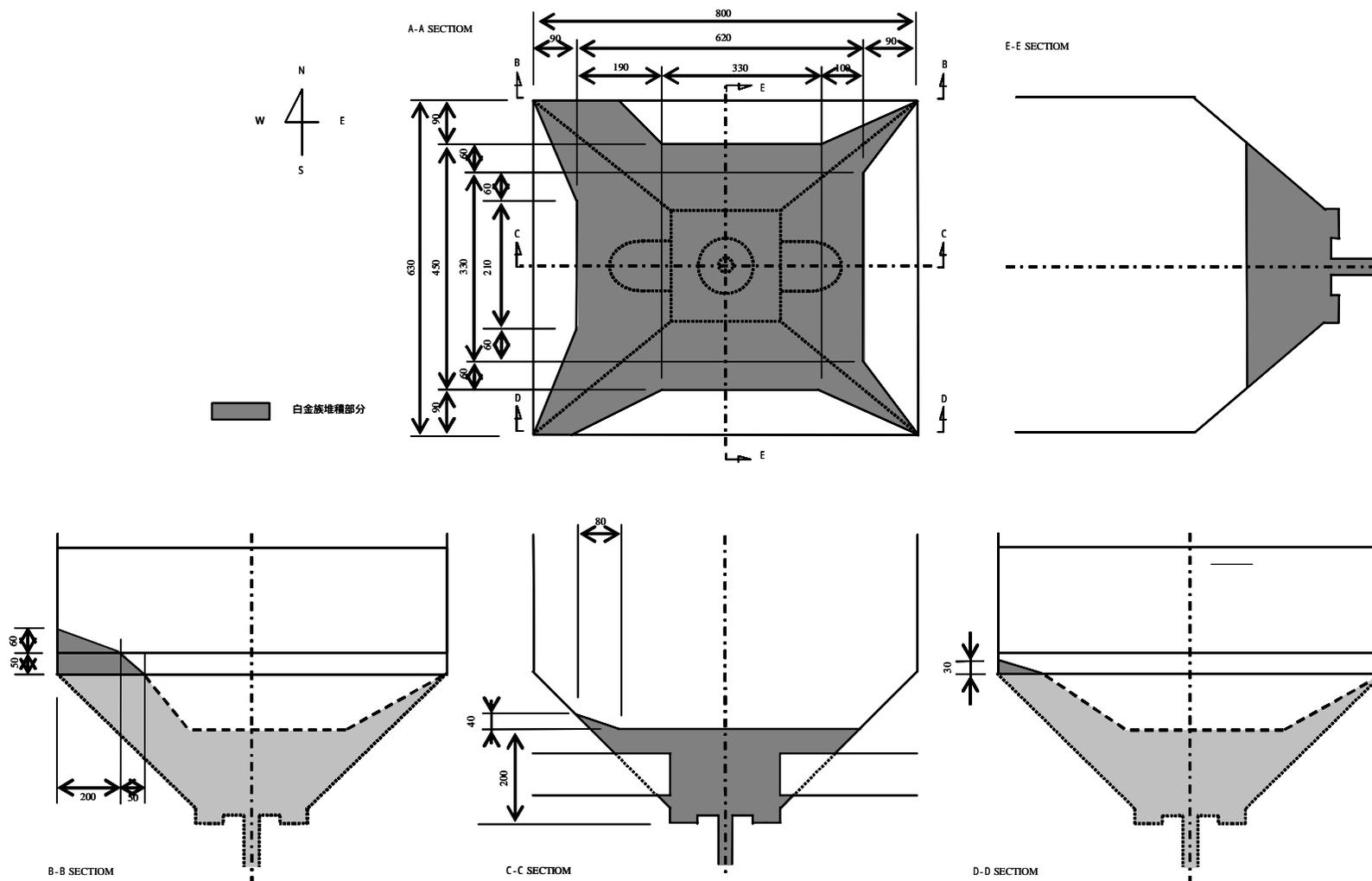
図 4.1.1-3 に堆積物と電極が接した側の解析結果を示す。接触面は 0.06m × 0.2m の

三角形の領域としている。電流密度は、電極下端の堆積物に接した位置で最大となる。堆積物が存在する場合、電極間の電流は導電率の高い堆積物中を主経路として流れ、特に、経路長が最も短く、抵抗値が小さくなる位置に電流が集中する傾向が現れている。また、ジュール発熱も電流密度の高い位置に集中する。一方、図 4.1.1-4 に堆積物と電極が接触近接（堆積物 - 電極間距離：0.02m）した側の電流密度分布を示す。接触近接の場合、堆積物と電極が近づいた位置の電流密度が最も大きくなるが、電流密度の大きな集中は観察されない。また、電極下端は、堆積物が接近していない側も電流密度が大きくなる。局所の電流密度の大きさは、堆積物が接触した場合のほうが相対的に大きくなる。

4.1.1.5 まとめ

白金族粒子の堆積形状を模擬した 3 次元の電磁解析を行い、電極面近傍での電流密度分布の状況（パターン）について、以下が明らかになった。

- ・ 堆積物が炉底に形成された場合、堆積物が主な電流経路となり、堆積物が電極に接した位置の電流密度が大きくなる。特に、電極間の経路長が最短となる位置にピークの電流密度が分布するパターンが観察された。
- ・ 堆積物が電極に接触近接した場合そでの電流密度集中が観察されるが、接触した場合と比較すれば、電流密度の集中は小さい。



(単位mm)

図4.1.1-1 炉底部における白金族元素堆積状況モデル(電流密度分布比較用)

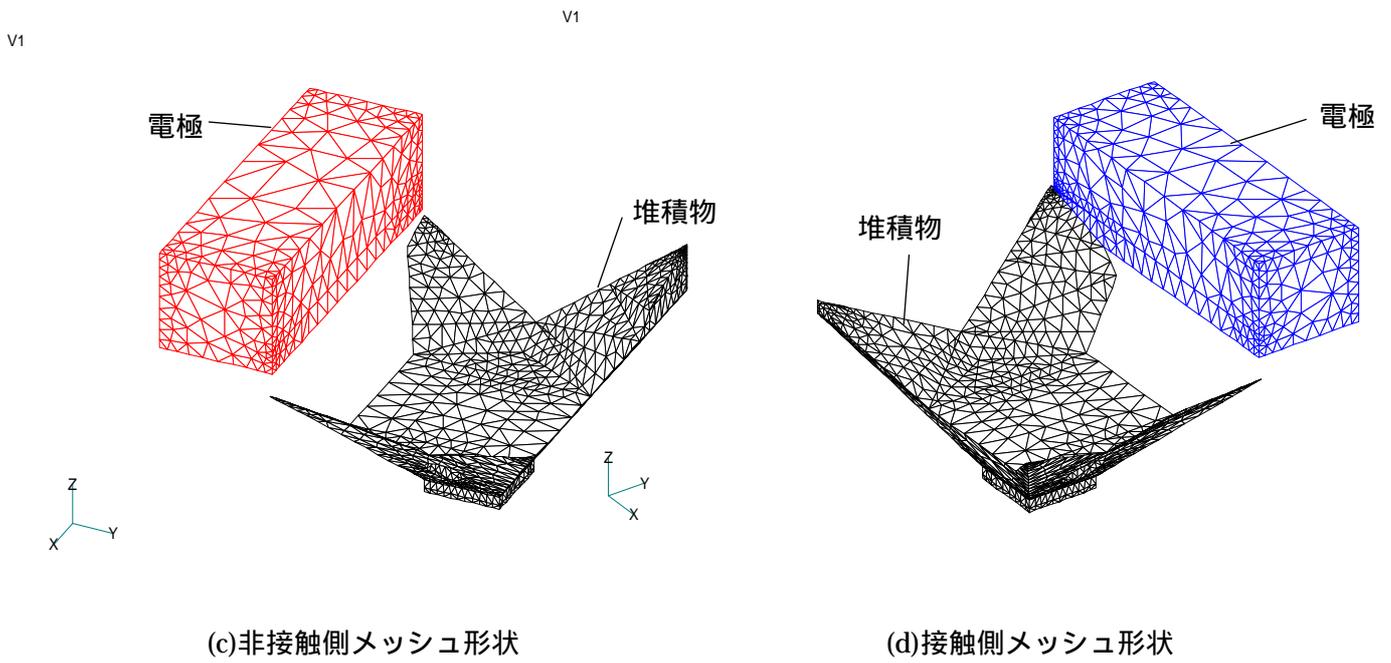
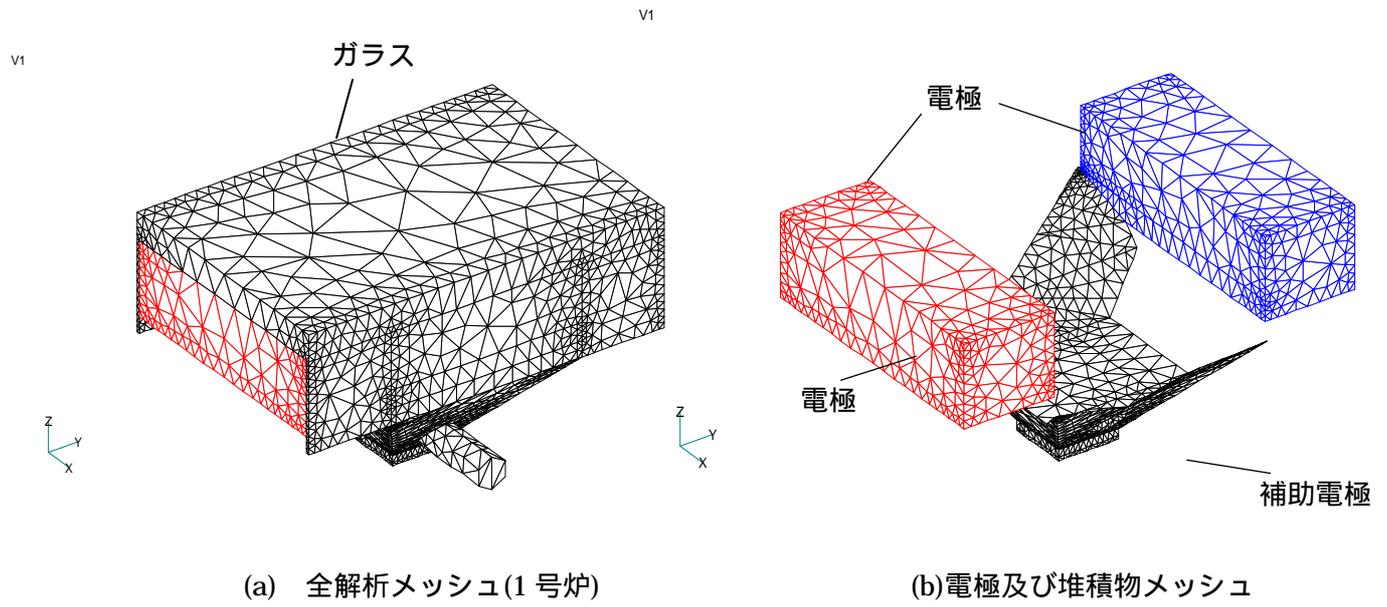
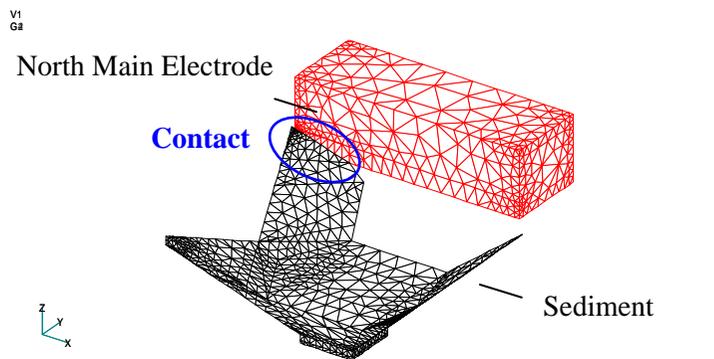
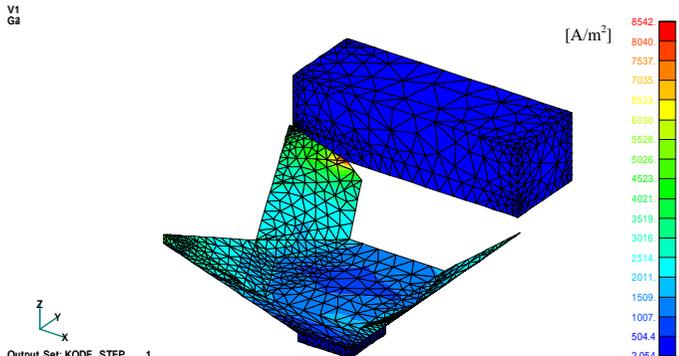


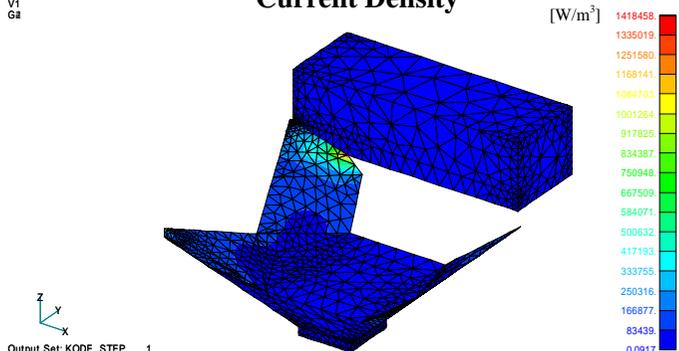
図 4.1.1-2 電流密度分布評価用解析メッシュ



Calculation Model of Sediment & North Main Electrode

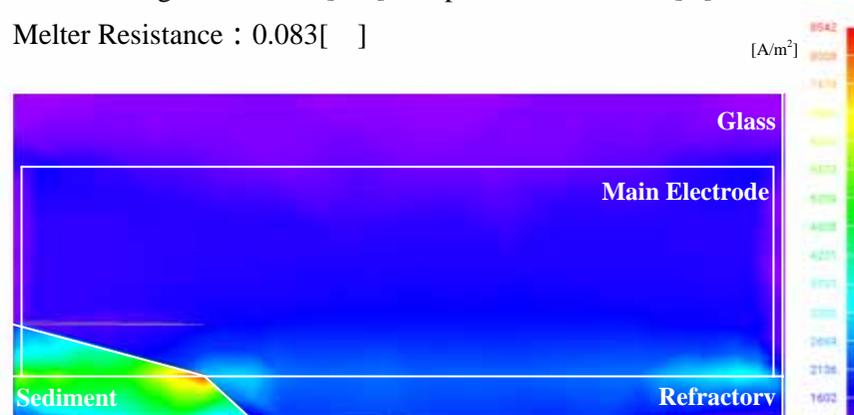


Current Density



Heating Value Density

Applied Voltage : 40.0[V]
 Total Heating Value : 19.3[kW], Output Current : 482.5[A],
 Melter Resistance : 0.083[]

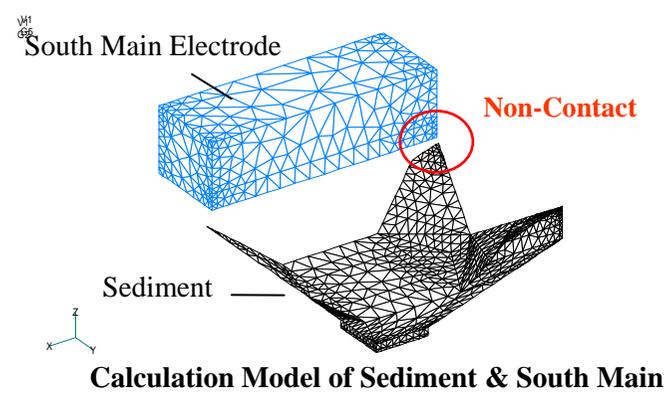


Current Density (Glass near North Main Electrode)



Heating Value Density (Glass near North Main Electrode)

図 4.1.1-3 電流密度分布解析 (接触側)



Applied Voltage : 40.0[V]
 Total Heating Value : 19.3[kW], Output Current : 482.5[A],
 Melter Resistance : 0.083[] [A/m²]

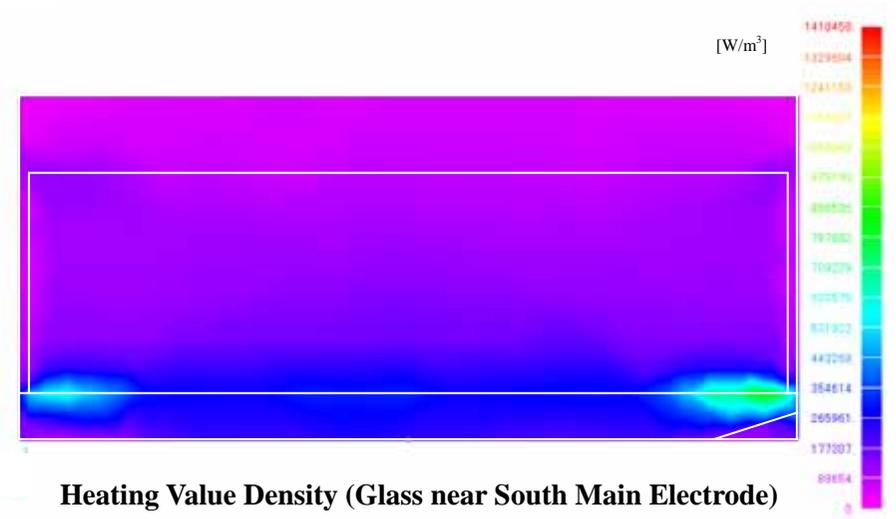
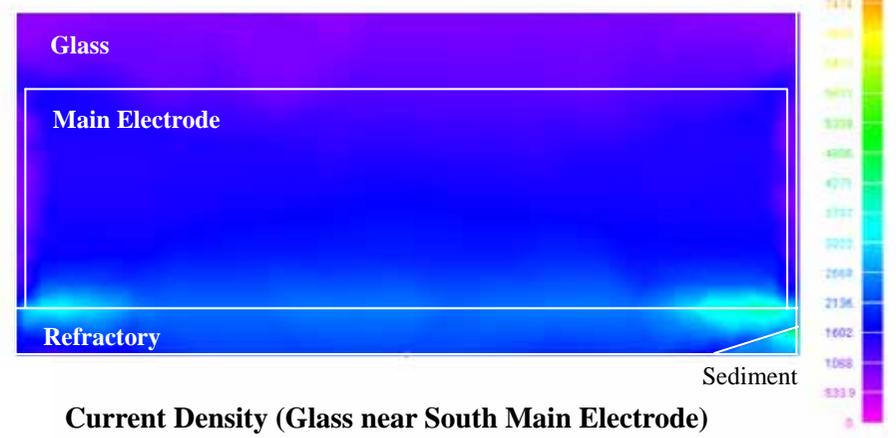
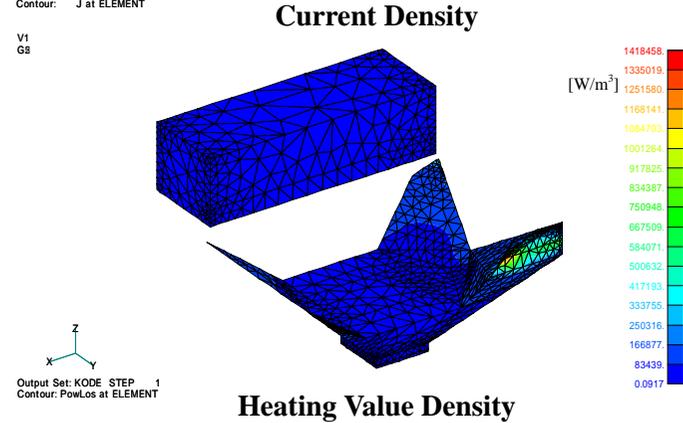
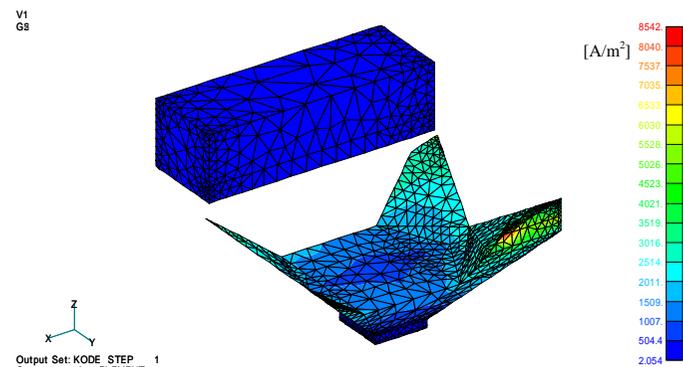


図 4.1.1-4 電流密度分布解析 (接触近接側)

4.1.2 電流密度に対する電極接触面積の影響評価解析

前項の電流密度分布パターンに関する解析結果等から、堆積物と電極が接した箇所に電流密度が集中することが明らかになっている。本項では、堆積物と電極が接する面積が電流密度に及ぼす影響を評価するため、簡便な3次元の直方体モデルを用いた解析を実施する。

4.1.2.1 解析手法

有限積分法による電磁場解析コード(MAGNA/FIM: CRC ソリューションズ)^[3]を用いる。MAGNA コードは、電気磁気利用機器の評価を目的とした汎用の解析コードである。3次元解析メッシュの作成には、通常、汎用のプリポストソフトウェアであるFEMAPを用いる。

4.1.2.2 解析条件

(1) 解析体系

解析は、より簡便に解析モデルを作成可能な直方体モデルを用いる。図 4.1.2-1 に解析モデルの概略図を示す。直方体モデルは炉底の斜面形状を無視し、ガラス溶融炉のガラス体積、堆積物体積、電極間距離、電極面積が実機と一致するように直方体の形状で簡略化した解析体系である。図 4.1.2-1 に示すように、堆積物の両端を電極に接するようにメッシュを作成する。ここでは、接触高さを変化させることによって、接触面積を変化させる。

(2) 溶融炉運転条件

前項と同様に、ガラス溶融炉の運転条件を TVF1_01-02Camp を参考に次のように設定する。

表 4.1.2-1 ガラス溶融炉運転条件

項目	設定値	備考
電圧	40 [V]	境界条件
ガラス温度	1100 []	物性条件
堆積物温度	860 []	物性条件
ガラス液位 ^{*1}	83 [mm]	体系条件

*1: 主電極上端からの液位

(3) 白金族堆積状況

堆積物の体積は、前項の炉停止後の観察結果から作成したモデルと同等とし、 0.244m^2 とする。

(4) 白金族濃度分布

炉抵抗が実機と同等の値の条件で電流密度を比較することを目標とし、溶融ガラス中の白金族濃度及び堆積物中の白金族濃度は解析パラメータとして最適値を求めることとする。溶融ガラス中の白金族濃度は、堆積物がない状態での運転初期の炉抵抗値(約 0.08)から決定する。また、堆積物中の白金族濃度は、運転末期の炉抵抗値(約 0.06)から決定する。

(5) 物性値用炉内温度

01-2Camp 運転データを参考に、溶融ガラス部温度を $1100[]$ 、炉底部堆積物温度を $860[]$ とする。

(6) 比抵抗(実験式)

前項と同様に、白金族元素を含んだガラスの抵抗率について、 RuO_2 濃度(wt%)とガラス温度を考慮した Shimizu の式(4.1-1)式を用いる。

4.1.2.3 解析メッシュ

直方体モデルの解析メッシュを図 4.1.2-2 に示す。電極間の距離は実機と等しく 630mm とし、電極面積及びガラス液位も実機に合わせている。ガラスの体積が実機と等しくなるように奥行き長さ(760mm)を定めている。堆積物と電極の接触面積は、ここでは解析パラメータであるが、レファレンスケースでは前項と同じく 0.06m^2 とし、白金族濃度による炉抵抗値の最適化を実施する。接触面積を変化させる際には、図 4.1.2-1 に示したように接触高さを変化させることによって面積を変化させる。

4.1.2.4 解析結果

まず、炉抵抗値を実機の値と同等に定めるため、溶融ガラス領域の導電率と堆積物領域の導電率の最適化を実施した。ガラスの導電率は、堆積物がない運転初期の炉抵抗値(H14 評価 0.08)となる条件で定めることとし、図 4.1.2-3(a)に示すように、白金族濃度を $1.35\text{w}\%$ と定めた。

次に、堆積物の導電率を定めるため、堆積物中の白金族濃度をパラメータとした解析を実施し、運転末期の炉抵抗値(0.06)となる白金族濃度を図 4.1.2-3(b)に示すように $20\text{w}\%$ と定めた。

参考のため、堆積物と電極が接していない場合の解析結果を同図中に示している。堆積物と電極が接していない場合は、堆積物中の白金族濃度を非常に大きな値まで増

大させても炉抵抗への感度は小さく、0.06 未満の値まで炉抵抗は低下しないが、堆積物と電極が接している場合は、白金族濃度は炉抵抗に対して感度が大きいことが分かる。

本解析の目的は、接触面積が電流密度の大きさに及ぼす影響を評価することにある。図 4.1.2-3(c)に示すように、接触面積の減少にともなって電流密度は増大し、接触面積ゼロ（線接触）の状態にて最大となることが示された。

一方、図 4.1.2-3(d)に示すように、接触面積を低下させた場合でも炉抵抗への影響は比較的小さいことが示された。これは、接触面積を変化させてもガラスを経由する電流と堆積物の経由する電流の比率がほとんど変化しないためと考えられる。したがって、堆積物と電極の接触面積が低下した際には面積の低下によって電流密度が増大すると考えられる。

図 4.1.2-4 に接触面での電流密度の分布を示す。いずれも、最大電流密度は接触面の角部に集中しており、その最大値は、接触部の形状に依存することが推定される。直方体モデルは、接触面が 2 次元的な形状となっており、奥行き長さ方向の形状の影響を受けていることが考えられ、形状に依存して、さらに、電流密度が上昇する可能性があることが推定される。

4.1.2.5 まとめ

堆積物と電極が接する面積が電流密度に及ぼす影響を評価するため、簡便な 3 次元の直方体モデルを用いた解析を実施し、以下が明らかになった。

- ・ 炉抵抗値を実機の値と同等に定めるため、熔融ガラス領域の導電率と堆積物領域の導電率の最適化を実施した。堆積物と電極が接した条件において、TVF1 号炉運転末期の炉抵抗(約 0.06)を再現可能であることを示した。
- ・ 接触面の最大電流密度は接触面積の減少にともなって増大し、接触面積ゼロの条件で最も大きくなる。
- ・ 最大電流密度は、接触面形状に依存していることが推定され、接触形状に依存してさらに大きな値となる可能性がある。

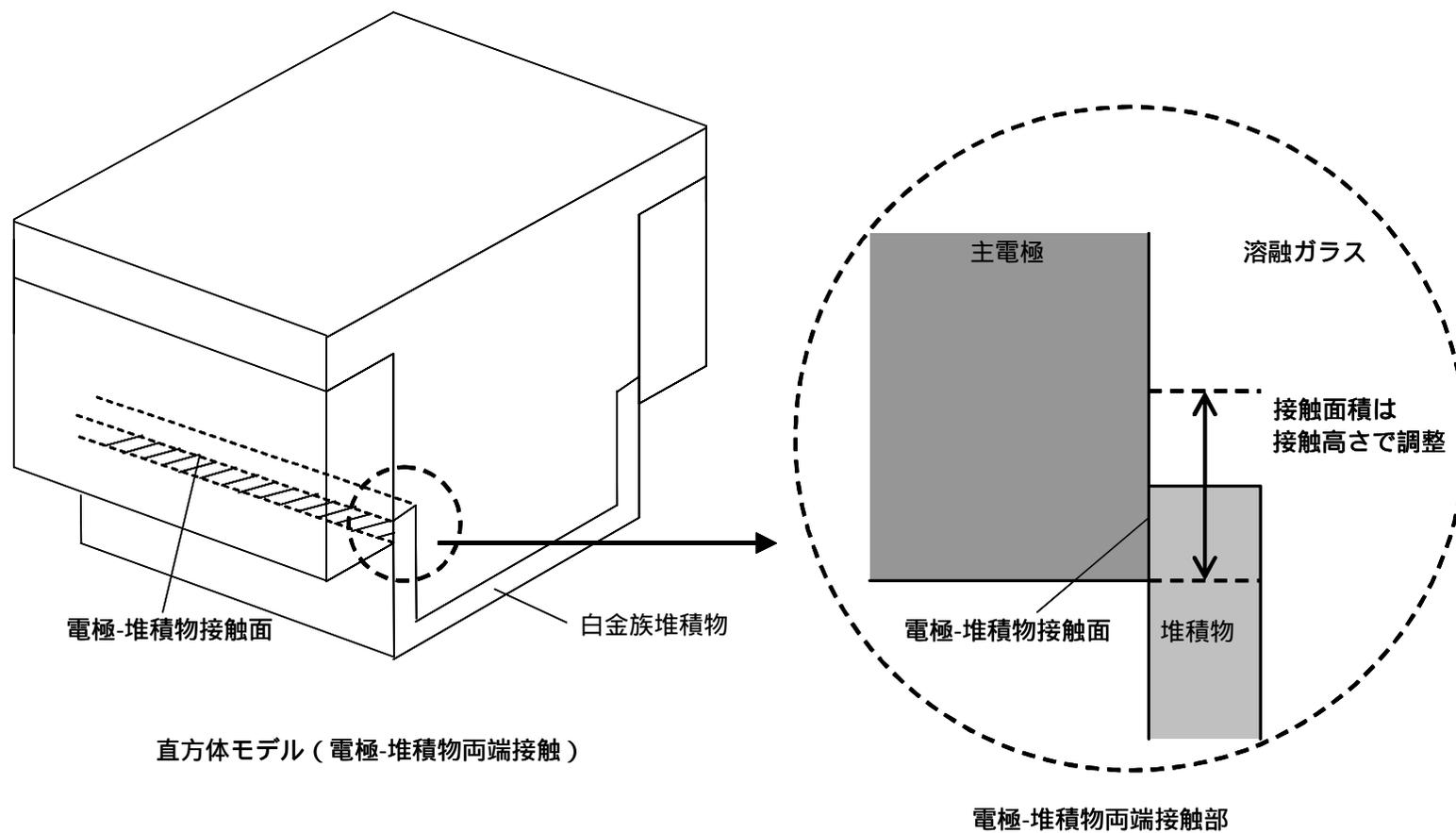
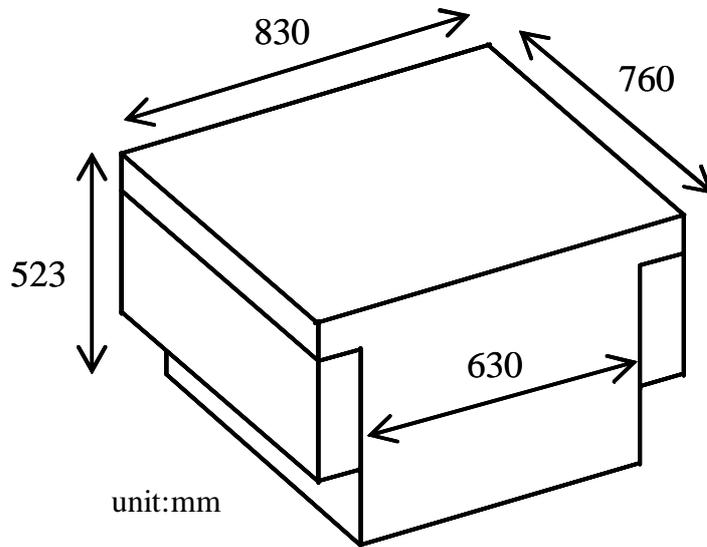


図4.1.2-1 電極-堆積物接触面積解析モデル



Condition

Electrode Surface	0.268 [m ²]	 Molten Glass (1100)
Molten Glass Volume	0.263 [m ³]	 NM Rich Sediment (860)
NM Rich Sediment	0.0244 [m ³]	 Electrode
Ref. Contact area	0.006 [m ²]	

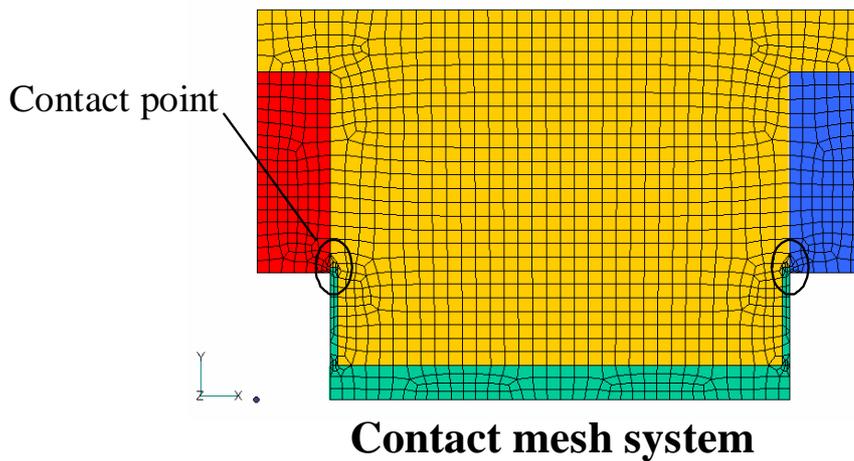
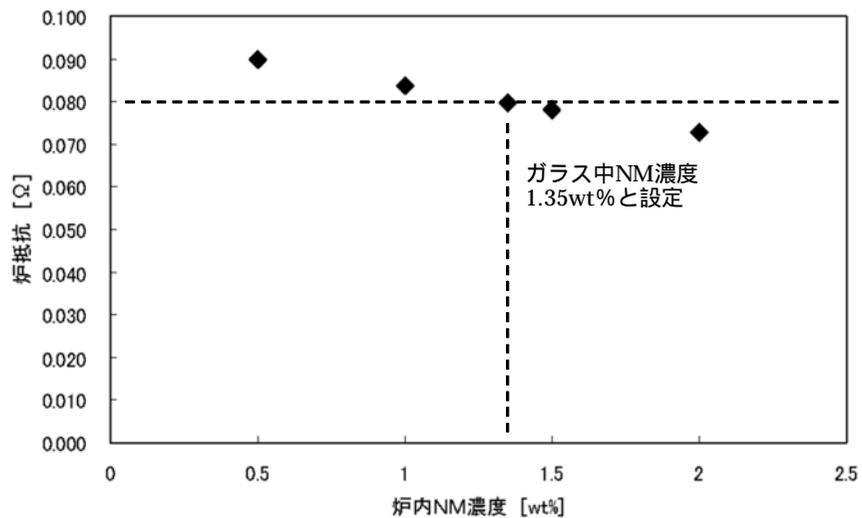
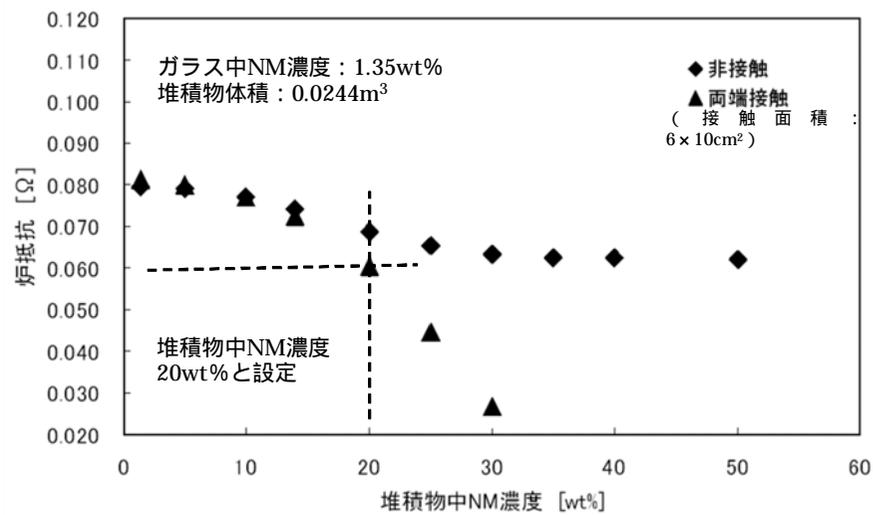


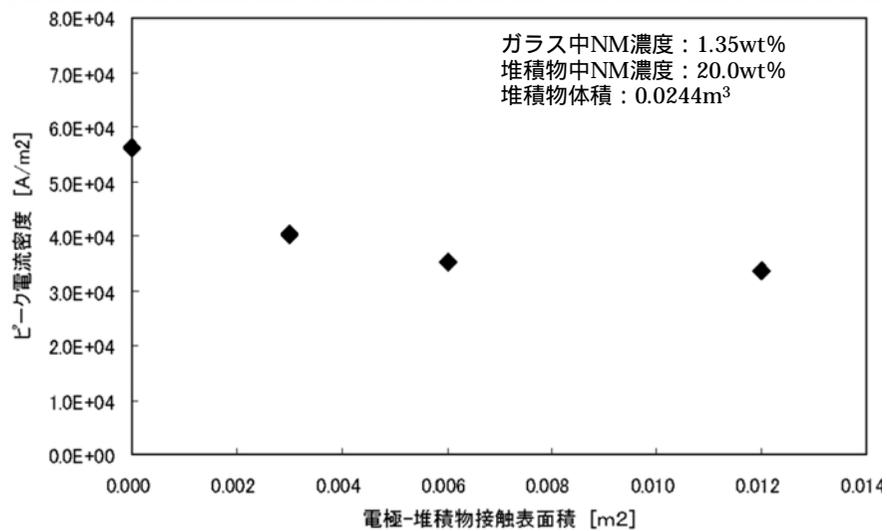
図 4.1.2-2 接触面積依存性解析メッシュ (直方体モデル)



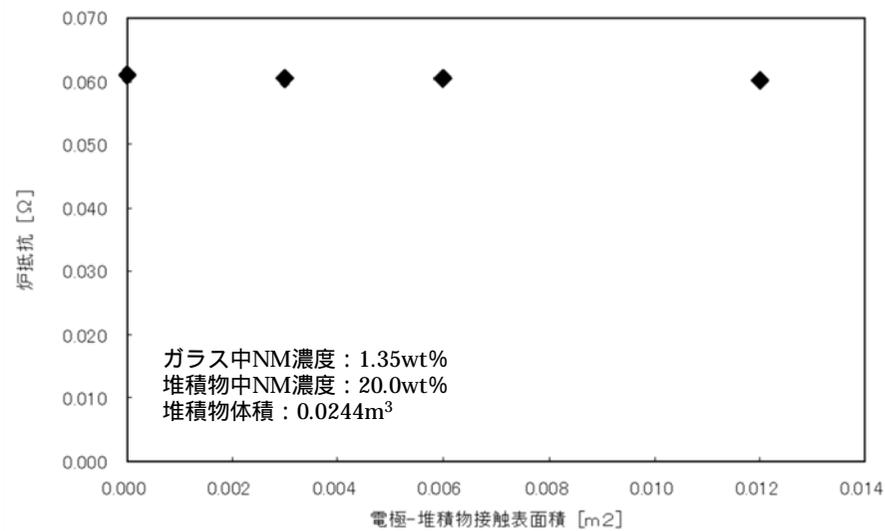
(a) 炉抵抗の炉内均一条件におけるNM濃度依存性



(b) 炉抵抗の堆積物中NM濃度依存性

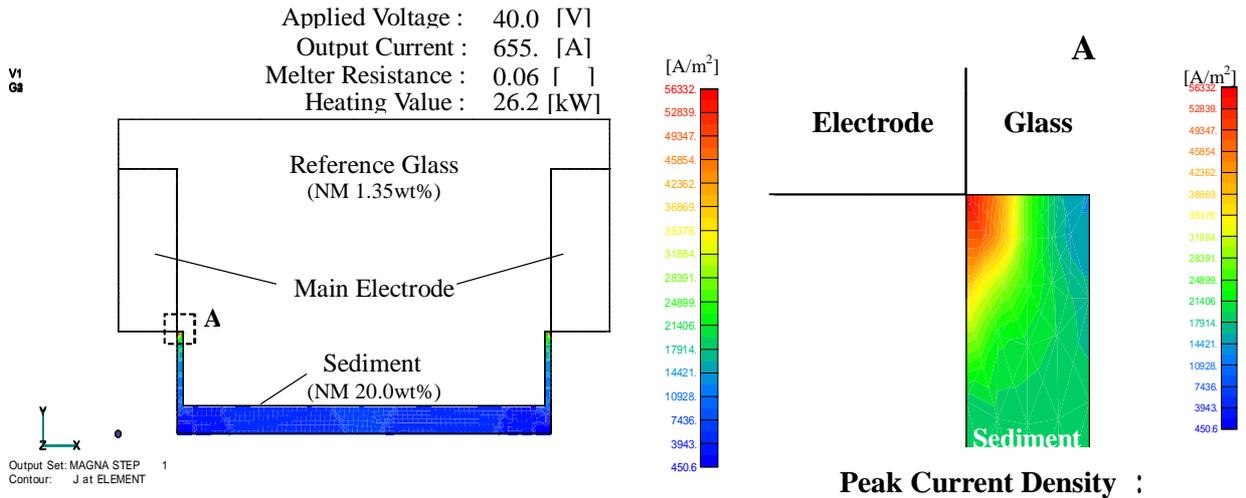


(c) ピーク電流密度の接触面積依存性

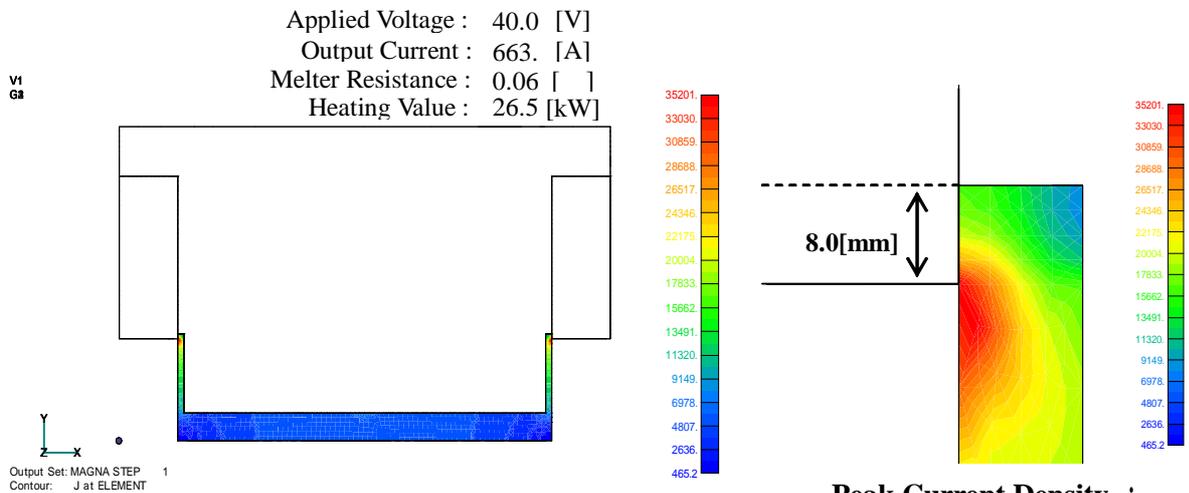


(d) 炉抵抗の接触面積依存性

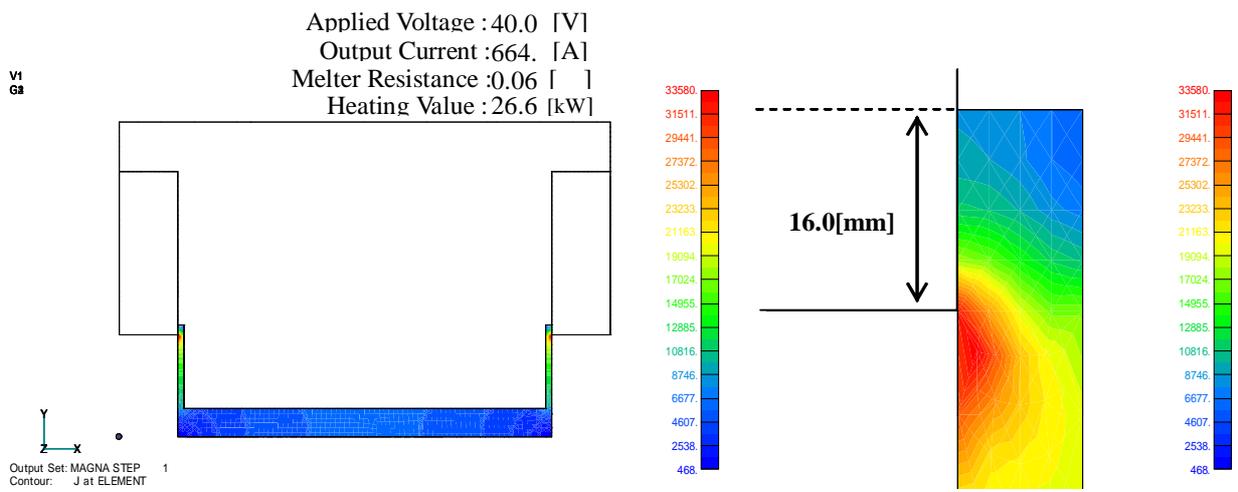
図4.1.2-3 接触面積依存性解析結果



(a) Contact Surface : 0.0[cm²] 5.63[A/cm²]



(b) Contact Surface : 60.0[cm²] 3.52[A/cm²]



(c) Contact Surface : 120.0[cm²] 3.36[A/cm²]

図 4.1.2-4 接触面積を変化させた場合の電流密度分布

4.1.3 堆積物形状を模擬した最大電流密度評価解析

前項の解析によって最大電流密度は、堆積物と電極の接触形状に影響を受け、実際の堆積形状を考慮した際には、電流密度がより集中することが推定された。

本項では、温度評価及び腐食特性評価に反映することを目的として、堆積物形状を3次元で模擬した数値解析を実施し、堆積物と電極接した条件での最大電流密度を評価する。

4.1.3.1 解析手法

汎用熱流動解析コード FLUENT を用いた。3次元の堆積物形状を模擬したメッシュをメッシュジェネレータである GAMBIT により作成した。FLUENT コードは熱流動解析コードであるが、磁場計算を行わない場合、電気伝導問題は流れのない熱伝導問題と方程式系が一致することから、本評価では、メッシュ作成がより簡便な FLUENT コードを用いることとした。尚、解析結果の妥当性については、電磁場解析コード MAGNA との比較により確認した。

4.1.3.2 解析条件

(1) 解析体系

解析体系は、堆積物の形状を模擬した3次元モデルとする。図 4.1.3-1 に堆積物形状を示す。実機の炉抵抗を再現する観点から、堆積物の両端がそれぞれの電極に接しているモデルとする。接触箇所は簡単のため縦横長さ(X)が等しい直角三角形とし、Xを変化させることによって、電極と堆積物の接触面積を変化させる。

(2) 溶融炉運転条件

前項と同様に、ガラス溶融炉の運転条件を TVF1_01-02Camp を参考に次のように設定する。

表 4.1.3-1 ガラス溶融炉運転条件

項目	設定値	備考
電圧	40 [V]	境界条件
ガラス温度	1100 []	物性条件
堆積物温度	860 []	物性条件
ガラス液位 ^{*1}	83 [mm]	体系条件

*1：主電極上端からの液位

(3) 白金族濃度分布

炉抵抗が実機と同等の値(約 0.06)の条件で電流密度を比較するため、前項で評価した白金族濃度を適用する。すなわち、溶融ガラス中の白金族濃度は 1.35[w%] 堆積物中の白金族濃度は 20[w%]とする。

(4) 物性値用炉内温度

01-2Camp 運転データを参考に、溶融ガラス部温度を 1100[]、炉底部堆積物温度を 860[]とする。

(5) 比抵抗(実験式)

前項と同様に、白金族元素を含んだガラスの抵抗率について、RuO₂ 濃度(wt%) とガラス温度を考慮した Shimizu の式(4.1-1)式を用いる。

4.1.3.3 解析メッシュ

図 4.1.3-1 の解析体系に基づき作成した解析メッシュを図 4.1.3-2 に示す。四面体要素を用いて自動メッシュを作成している。接触箇所は簡単のため縦横長さ(X)が等しい直角三角形とし、X を変化させることによって、電極と堆積物の接触面積を変化させる。ガラス及び堆積物は単一の構造物と仮定し、そこでの導電率は均一とした。定常計算によって電流密度分布を計算する。簡単のため、補助電極は無視した。要素数約 30 万程度である。

4.1.3.4 解析結果

堆積物と電極が接する面積が電流密度に及ぼす影響について、解析結果を図 4.1.3-3 に示す。接触面の電流密度は、接触面積が小さい場合に指数的に増大する傾向を示し、最も接触面積を小さくしたケース(面積 1.25E-5m²)では、電流密度は 30A/cm² に達した。さらに接触面積を小さくすれば電流密度が増大することが推定されるが、数値解析上の限界のため実施していない。また、炉抵抗は、接触面積が小さくなるのにしたがって若干上昇する傾向を示している。これは、堆積物形状を模擬した場合、接触面積の低下にともない堆積物経由とガラス経由の電流に若干の再配分が生じていることを示している。

以上より、堆積物の 3 次元的な形状を模擬した場合には、前項の直方体モデルよりも電流密度の集中が増大し、接触面での電流密度は少なくとも 30A/cm² に達する場合があることが明らかになった。

4.1.3.5 まとめ

直方体モデルによる解析結果から、最大電流密度は、堆積物と電極の接触形状に影

響を受け、実際の堆積形状を考慮した際には、電流密度がより集中することが推定された。そのため、本項では、温度評価及び腐食特性評価に反映することを目的として、堆積物形状を3次元で模擬した数値解析を実施し、堆積物と電極接した条件での最大電流密度を評価した。その結果、以下が明らかになった。

- ・ 接触面の電流密度は、接触面積が小さい場合に指数的に増大する傾向を示し、解析上、最も接触面積を小さくしたケース（面積 $1.25\text{E-}5\text{m}^2$ ）では、電流密度は 30A/cm^2 に達した。
- ・ 炉抵抗は、接触面積が小さくなるのにしたがって若干上昇する傾向を示している。これは、堆積物形状を模擬した場合、接触面積の低下にともない堆積物経由とガラス経由の電流に若干の再配分が生じていることを示している。
- ・ 堆積物の3次元的な形状を模擬した場合には、前項の直方体モデルよりも電流密度の集中が増大し、接触面での電流密度は増大する。

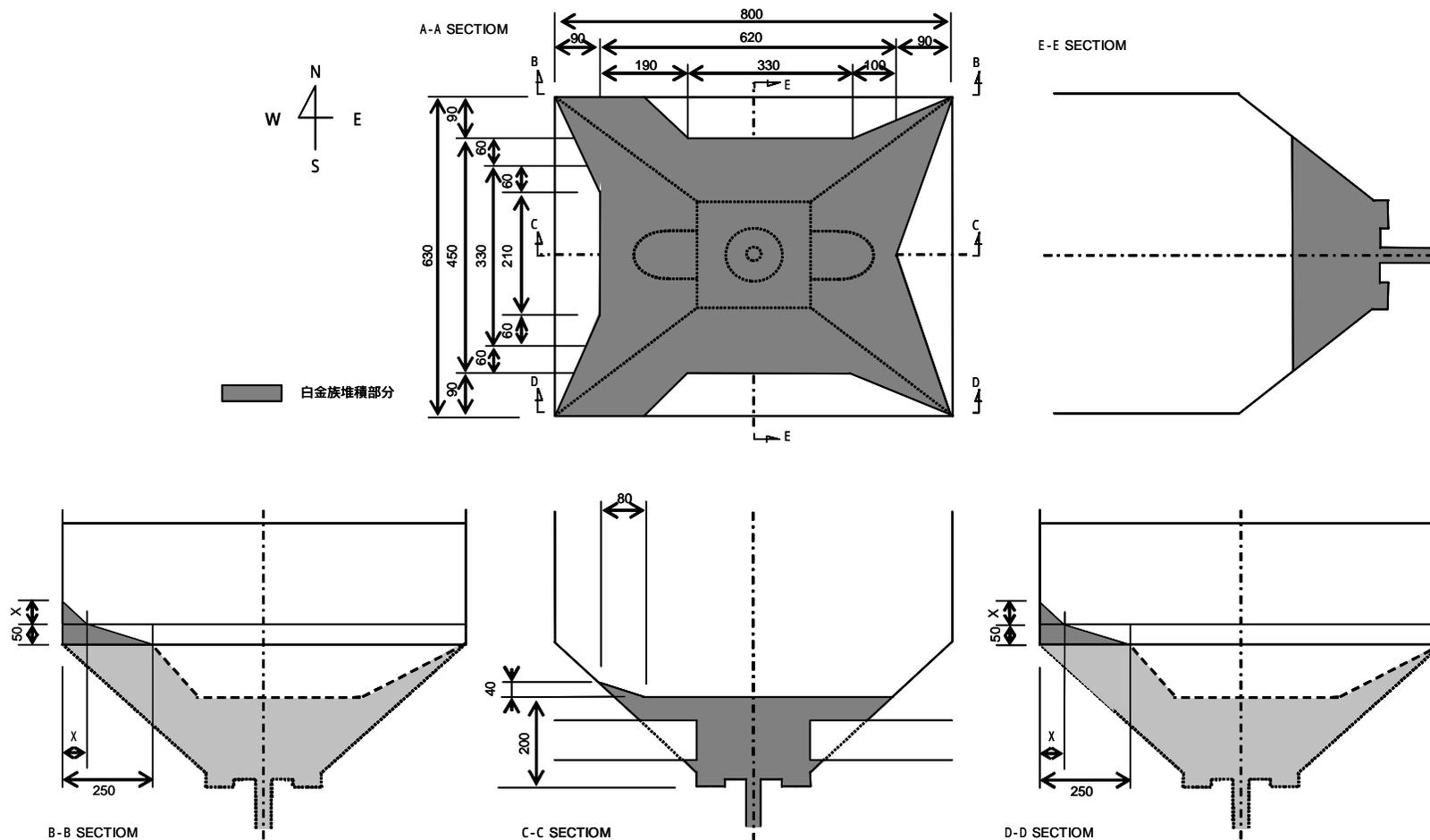


図4.1.3-1 炉底部における白金族堆積物状況モデル (最大電流密度評価用/両端接触モデル)

(単位mm)

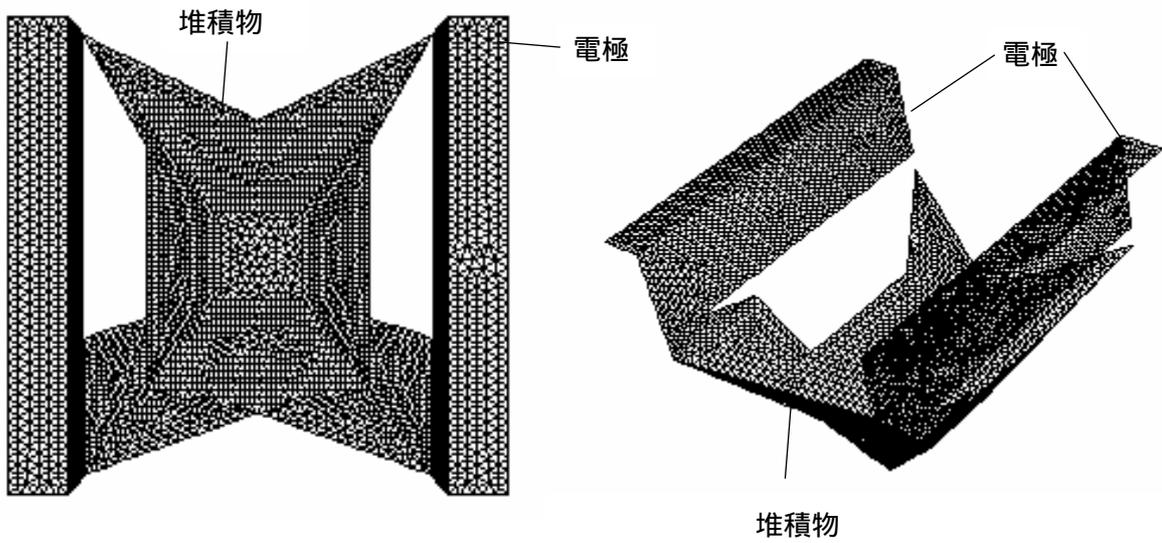


図 4.1.3-2 堆積物形状を模擬した接触面積依存性評価解析メッシュ

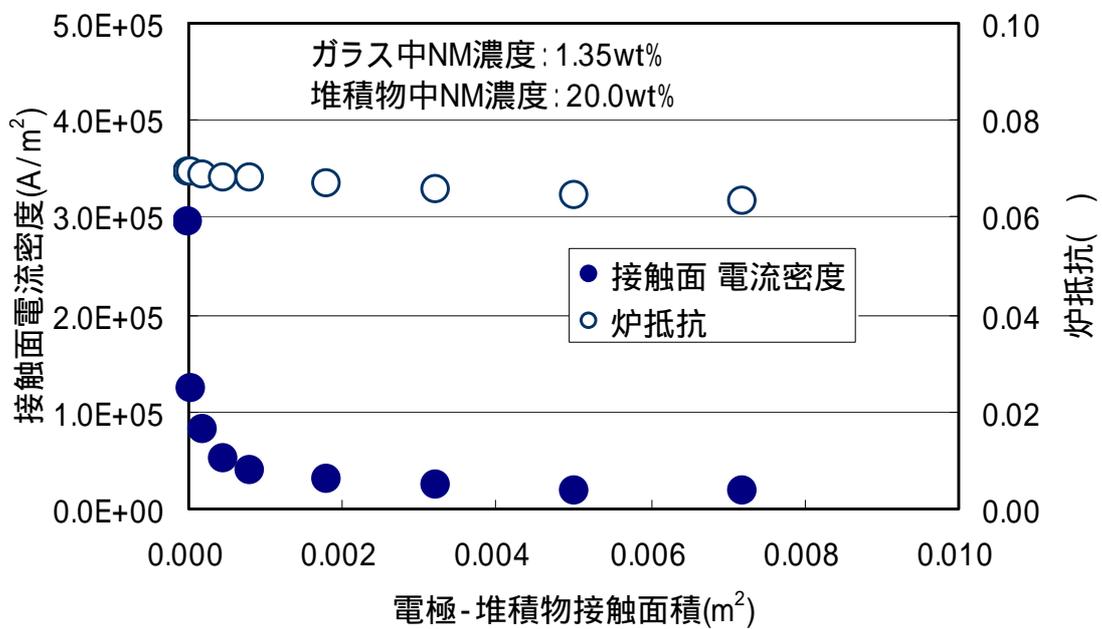


図 4.1.3-3 堆積物形状を模擬した接触面積依存性解析結果

4.1.4 電流密度集中時の温度上昇評価

前項までの電流密度に関する数値解析によって、堆積物の3次元形状を模擬した場合、電流密度の集中が発生することが明らかとなっている。本項では、電極材料のインコネルが熔融温度に達する可能性について検討するため、最大電流密度を用いて、最大電流密度位置での発熱量を評価するとともに、簡易熱伝導計算モデルによって最高温度を評価する。

4.1.4.1 評価手法

正確な最高温度を評価するためには、炉内全域の電磁発熱分布、電極の冷却特性、レンガからの放熱特性、ガラス温度分布、ガラス対流を評価した上で、堆積物の影響を考慮した評価を行う必要がある。これらは計算負荷が大きく、現状、実現できないことから、最大電流密度から簡易的な熱伝導方程式計算によって、最高温度を評価する。

4.1.4.2 評価条件

(1) 解析モデル

前項までの評価から、接触面積と電流密度の関係が明らかになっていることから、接触面積と電流密度を与えた場合に、最高温度が評価可能なモデルを作成する。最大電流の流れる経路を断面積が接触面積に相当する円柱形の流路と仮定すると、図 4.1.4-1 に示すような解析モデルを作成することができる。内部発熱量を $Q[\text{W}/\text{m}^3]$ で与える場合、円柱内の温度分布は、円柱外表面温度 T_1 と半径位置 r の関数となる。発熱量は、電流密度と電気伝導率より求めることができる。外表面温度 T_1 は、電極周辺のガラス温度から定め、その感度を評価する。また、 r_1 は、前項の数値解析で最も小さな接触面積としたケースから決定する。

(2) 境界条件

半径 r_1 は、前項の堆積物形状を模擬した解析の接触面積($1.25\text{E}-5 [\text{m}^2]$)に相当するように 2mm とした。外表面温度 T_1 は FLOWMEL 解析結果等を参照し、 900 , 950 , 1000 の3ケースを行い、感度を確認する。発熱量を求めるための電流密度は、前項の数値解析結果より $30[\text{A}/\text{cm}^2]$ とする。

(3) ガラス熱伝導率

ガラス熱伝導率は、図 4.1.4-2 の Sato^[4]らのデータに示すように、温度の上昇に伴って増大し、約 500 (773K) から 1100 (1373K) の範囲で $1.5 \sim 3.5 [\text{W}/\text{m}/\text{K}]$

の範囲で変化する。熱伝導率は最高温度に対して影響が大きいことから、解析パラメータとし、その影響を評価する。ここでは、保守側（高温側）の温度を与える低めの熱伝導率を与えることとし、1.5, 2.0, 3.0 [W/m/K]の3ケースを比較した。

尚、熱伝導率に白金族含有率の影響があるものと考えられるが、再処理センターにて測定した450 までのデータ(図 4.1.4-3)では、顕著な影響は現れていないことから白金族含有率の影響は考慮しない。

4.1.4.3 解析結果

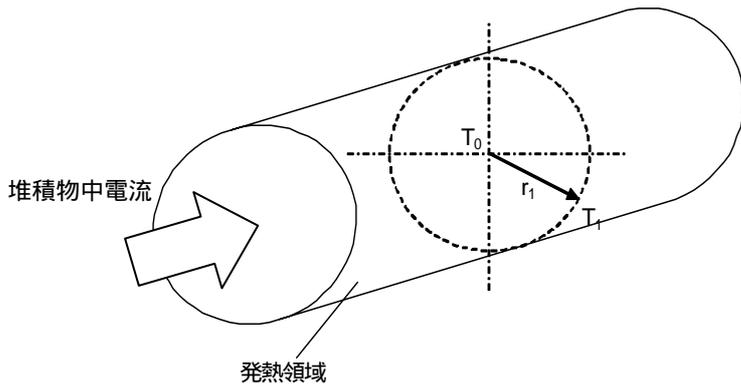
堆積物経路を模擬した解析モデル内の温度分布は、中心部にピークをもつ分布を示し、図 4.1.4-4 に示すように、最高温度は熱伝導率に大きく依存して1250 ~ 1430 の範囲で変化した。円筒通路の外表面境界温度は、図 4.1.4-5 に示すように、最高温度に対して、温度変化分の影響を及ぼす。

電流密度を変化させた場合の最高温度変化を図 4.1.4-6 に示す。熱伝導率に依存するが、最高温度は25[A/cm²]以上にて溶融温度(1360)以上となる可能性があることが明らかになった。

4.1.4.4 まとめ

最大電流密度での発熱量を評価するとともに、簡易熱伝導計算モデルによって最高温度を評価した。その結果、以下が明らかになった。

- ・最大電流密度(30A/cm²)時の最高温度は、熱伝導率に大きく依存するが、1250 ~ 1430 程度となる。
- ・電流密度を変化させた場合、25A/cm²程度以上では、電極材料(インコネル)の溶融温度(1,360)に到達する可能性がある。



$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{Q}{\lambda} = 0 \quad \text{より}$$

$$\frac{4\lambda(T - T_1)}{Q \cdot r_1^2} = 1 - \left(\frac{r}{r_1} \right)^2$$

r=0として 中心温度(最高温度)T0は

$$T_0 = \frac{Q \cdot r_1^2}{4\lambda} + T_1$$

図 4.1.4-1 最高温度解析モデル

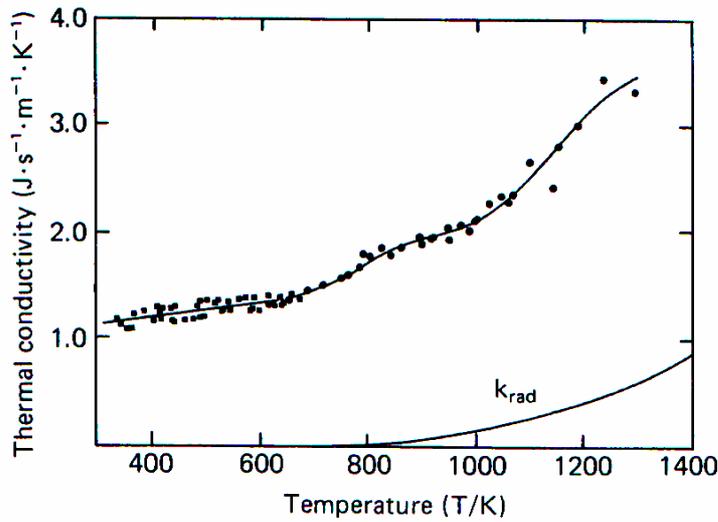


図 4.1.4-2 ガラス熱伝導率

(Seichi Sato, Hiroataka Furuya, Nuclear Technol., Vol.70, 1985)

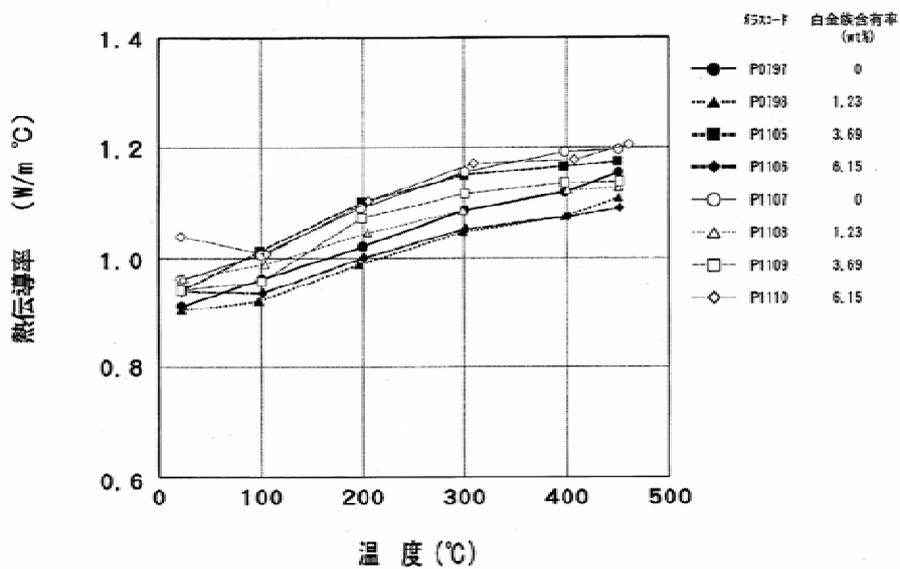


図 4.1.4-3 白金族変動ガラスの熱伝導率測定結果

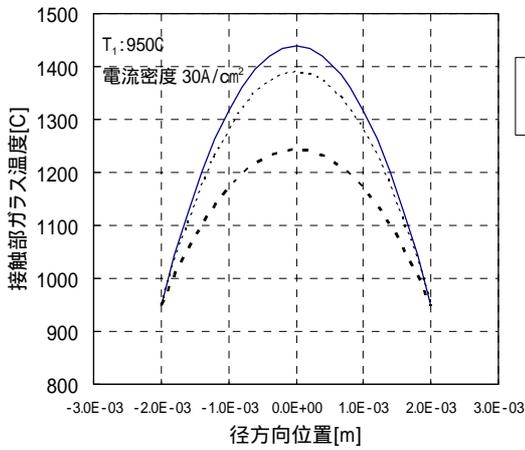


図 4.1.4-4 円筒内流路内温度分布
(熱伝導率依存性)

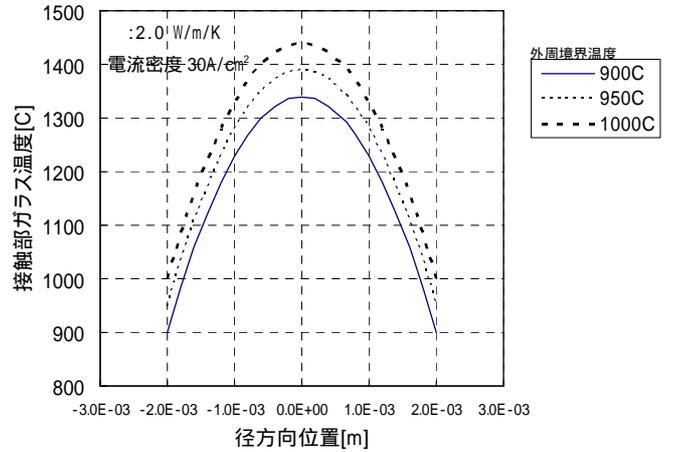


図 4.1.4-5 円筒流路内温度分布
(外表面温度依存性)

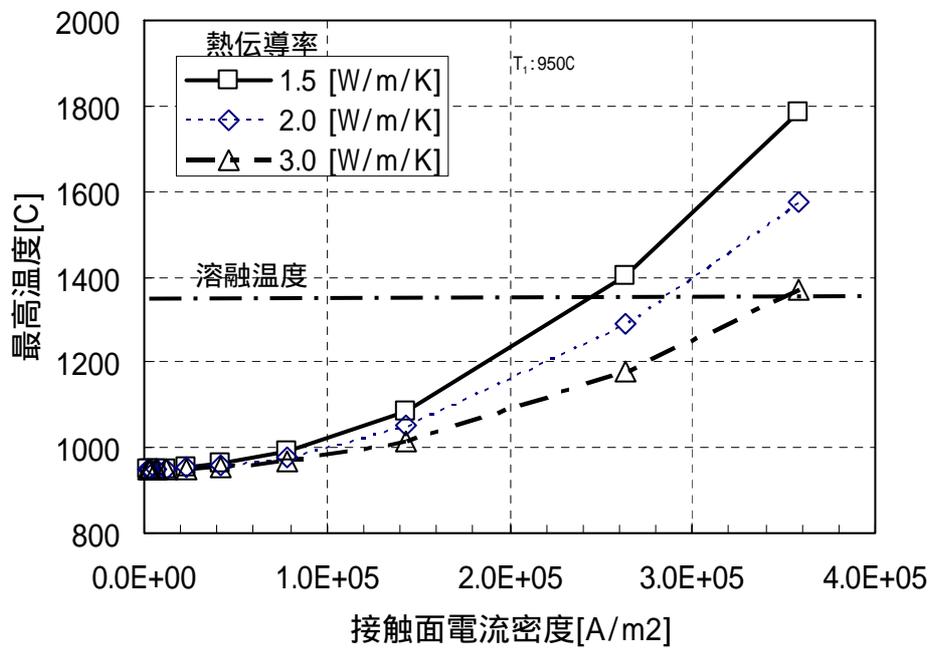


図 4.1.4-6 最高温度と電流密度の関係

4.1.5 白金族粒子堆積による電流密度集中に関する数値解析のまとめ

堆積物による電流密度集中に関して、以下の項目の数値解析を実施した。

- (1)主電極近傍の電流密度分布に関する数値解析
- (2)電流密度に対する電極接触面積の影響評価解析
- (3)堆積物形状を模擬した最大電流密度評価解析
- (4)電流密度集中時の温度上昇評価

その結果、以下が明らかになった。

- ・ 堆積物が炉底に形成された場合、堆積物が主な電流経路となり、堆積物が電極に接した位置の電流密度が大きくなる。特に、電極間の経路長が最短となる位置にピークの電流密度が分布するパターンが観察された。
- ・ 接触面の電流密度は、接触面積が小さくなるのに従って、指数的に増大する傾向を示し、最も接触面積を小さくしたケース（面積 $1.25E-5m^2$ ）では、電流密度は $30A/cm^2$ に達した。
- ・ 堆積物の3次元的な形状を模擬した場合には、2次元的な直方体モデルの場合よりも電流密度の集中が増大し、接触面での電流密度は増大する。
- ・ 最大電流密度($30A/cm^2$)時の最高温度は、ガラスの熱伝導率に大きく依存するが、 $1250 \sim 1430$ 程度となる。
- ・ 電流密度を変化させた場合、 $25A/cm^2$ 程度以上では、電極材料（インコネル）の溶融温度($1,360$)に到達する可能性がある。

以上より、ガラス溶融炉内の電流密度は、堆積物の3次元形状条件に依存し、堆積物と電極が接する箇所に電流密度が集中することが明らかになった。その最高電流密度は、少なくとも $30A/cm^2$ 以上であり、その場合、電流の経路は電極材料（インコネル材）の溶融温度 1360 に達する可能性があることが分かった。一方、電流密度と腐食速度の関係は未解明な部分が多いが、これまでの試験結果によれば、電流密度に依存して腐食減肉が増大する結果が得られており、それらの影響に関する評価も進める必要がある。

4.2 主電極内詳細温度分布及び熔融温度検出性に関する数值解析

4.2.1 主電極内温度分布予測性に関する検証

主電極内の温度分布評価は、従来、2次元モデルによって実施されており、損傷が発生したと考えられる電極の両端部の温度予測性に課題があった。一方、電極内の空気流路についても従来、単純化モデルでの評価に留まっている。本項では、電極のヘッダー部の構造及び主電極内の複雑な冷却空気流路の形状を模擬した3次元解析を実施し、主電極内の温度分布を評価するとともに、TVF 1号炉にて測定された電極内熱電対温度との比較により検証する。

4.2.1.1 解析手法

汎用の熱流動解析コード（FLUENT：FLUENT アジアパシフィック社）を用いる。3次元解析メッシュの作成には、GAMBIT コードを用いる。

4.2.1.2 解析条件

(1) 解析体系

図 4.2.1-1 に解析対象とする電極の構造図を示す。主電極は内部流炉に対称面が存在しないことから、全体を3次元メッシュによって分割するものとする。

(2) 溶融炉運転条件

ガラス溶融炉の運転条件を TVF1_96-02Camp を参照して次のように設定する。主電極温度は、南北の電極で温度差があることから、高温側の南側電極を解析対象とする。

表 4.2.1-1 ガラス溶融炉運転条件

炉出力	40kW	96-2 キャンペーン 40kW 通電時
空気風量（2チャンネル）	74Nm ³ /h *	同上（境界条件）
入口空気温度	30	同上（境界条件）
出口空気温度	415 ± 10	同上（比較用）
50mm 熱電対温度	800 ± 10	同上（比較用）
100mm 熱電対温度	750 ± 10	同上（比較用）

*空気実流量評価： $30 + (400 - 30) / 2 = 215$ [] 平均温度

$74/2 \times (273 + 215) / (273) / 3600 = 74/2 \times 488 / 273 / 3600 = 0.0184$ [m³/s]

(2) 境界条件設定方法

各境界条件について、以下のように定め解析を実施した。

ガラス界面：温度境界：FLOWMEL 解析結果より設定

構造物界面：温度境界：FLOWMEL 解析結果より設定

外部空気界面：30 空気、自然対流熱伝達

空気流路界面：ラビリンス部：温度境界：熱伝導のみ、速度：ノンスリップ

空気供給配管内外の熱通過：考慮する

空気入口温度：当該操作条件より設定

空気入口流量：当該操作条件より設定

(3) 物性値

構造物 (INCONEL690 及び 610)の熱伝導率を図 4.2.1-2 に示す。主電極はガラスに接する面は INCONEL690 を用いているが、内部の流路構成材料は、INCONEL610 を用いており、若干、熱伝導率が異なることから、それぞれの熱伝導率を用いる。測定データが 1000 程度までに限られていることから、それ以上の温度領域においては、一定値を用いている。

4.2.1.3 解析メッシュモデル

電極のメッシュについて、作成したモデルの形状を図 4.2.1-3(a)及び(b)に示す。電極内には 2 本の熱電対が電極正面の表面から 50mm 及び 100mm の位置に設置されている。また、電極構造各位置での格子図を図 4.2.1-3(c)に示す。電極内の冷却空気の流れを精度よく求めるために、3次元の流路形状を模擬したメッシュを用いている。

4.2.1.4 解析結果

境界条件として FLOWMEL を用いて解析した電極表面の温度分布を図 4.2.1-4 に示す。電極の正面の上側に温度の高い領域が観察される。また、電極の左右方向に若干の非対称な温度分布が観察されるが、それらは 3 次元的な対流の影響と考えられる。

以下、図 4.2.1-5 ~ 15 に解析結果を示す。ガラスに接する電極内の温度分布は、電極表面の温度(約 700 ~ 950)と空気流路温度(約 500)を補間するような分布を示している。また、冷却空気は、30 で流入するが、出口では約 430 に達している。

実機の温度と解析結果の比較を図 4.2.1-16 に示す。電極表面から 50mm の位置の熱電対と解析結果 (オリジナル境界温度分布) は比較的よい一致を示すが、100mm の位置での熱電対と解析結果は 40 程度の差を生じている。これは、電極上面側の

境界温度の影響と考えられ、その原因について考察するため、比較用としてパターン化した境界温度分布（メッシュ点温度を 100 単位で設定。図 4.2.1-17 参照）の解析結果を図 4.2.1-16 中に参考として示している。パターン化温度分布で解析した際には、100mm 位置熱電対の 60mm 上の電極上面側の境界温度が 700 と低く設定されていたため、100mm 位置での予測温度が非常に低い値となったことが推定される。したがって、この位置での温度境界条件は、熱電対の温度に対する感度が高く、温度境界条件の予測精度が向上すれば 100mm 位置での予測精度の向上が見込まれる。

一方、出口空気の温度は解析と実機でほぼ一致しており、解析は電極のヒートバランスを実現していると考えられることから、本解析結果は概ね妥当と判断した。

4.2.1.5 まとめ

電極のヘッダー部の構造及び主電極内の複雑な冷却空気流路の形状を模擬した 3 次元解析を実施し、TVF 1 号炉にて測定された電極内熱電対温度との比較により検証を実施した。その結果、以下が明らかになった。

- ・電極ヘッダ内の温度分布は、電極表面の温度(約 700 ~ 950)と空気流路温度(約 500)をそれぞれの位置で補間するような分布を示している。また、冷却空気は、30 で流入するが、出口では約 430 に達している。
- ・解析結果と TVF 1 号炉の実測データを比較した結果、電極表面から 50mm の位置の熱電対と解析結果は比較的よい一致を示す。
- ・100mm 位置の熱電対温度と解析結果は、約 40 の差が生じているが、それらは、境界温度条件の影響と考えられ、出口空気温度の予測性が十分であること等から、本解析は妥当と判断した。

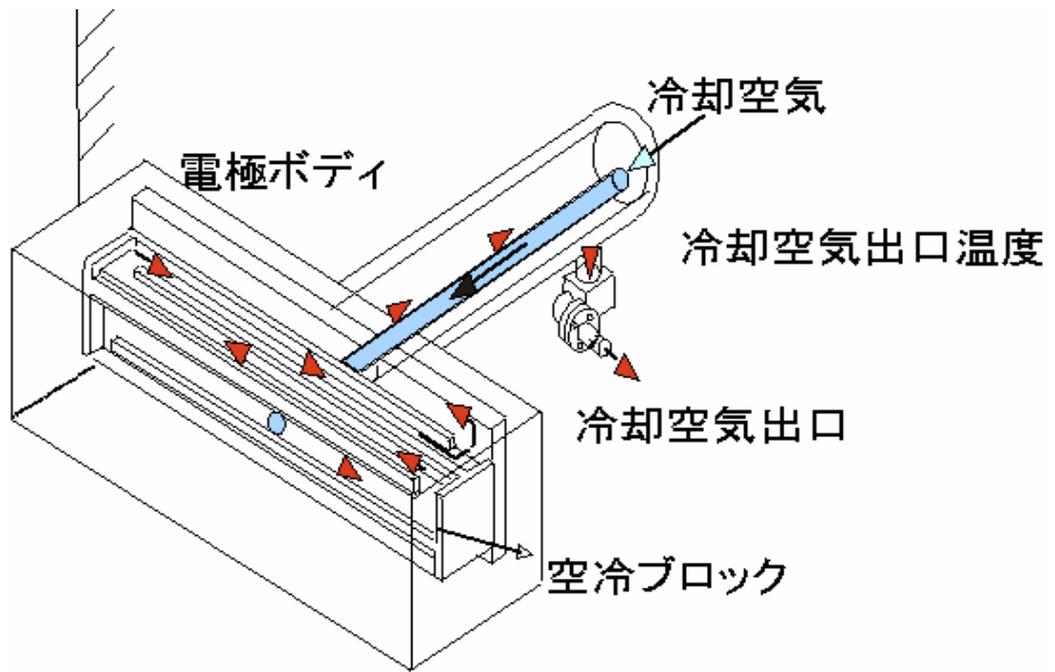


図 4.2.1-1 主電極構造図

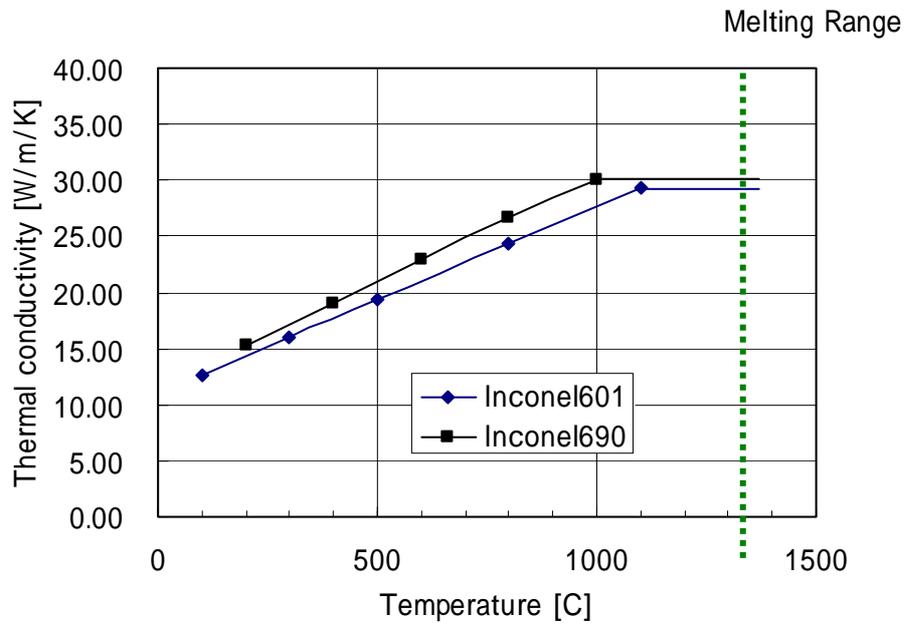


図 4.2.1-2 インコネル熱伝導率

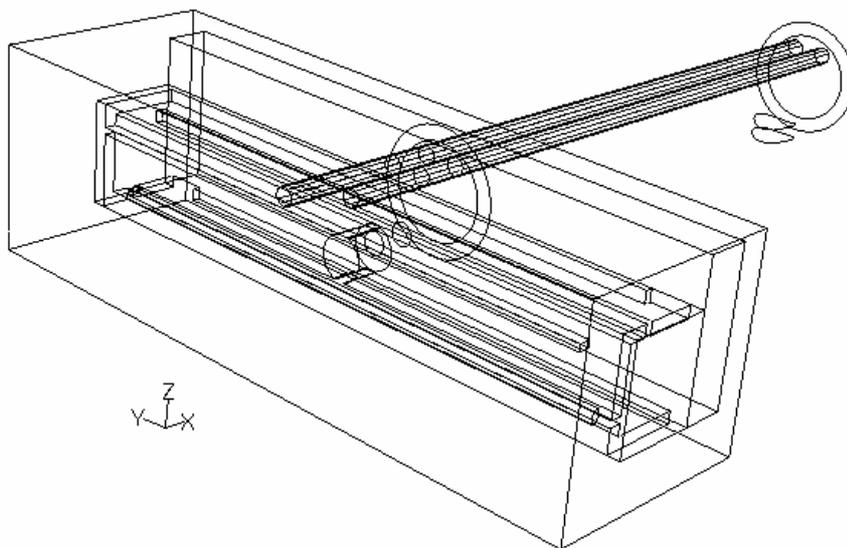


図 4.2.1-3 (a) 作成形状 (ワイヤーフレーム表示)

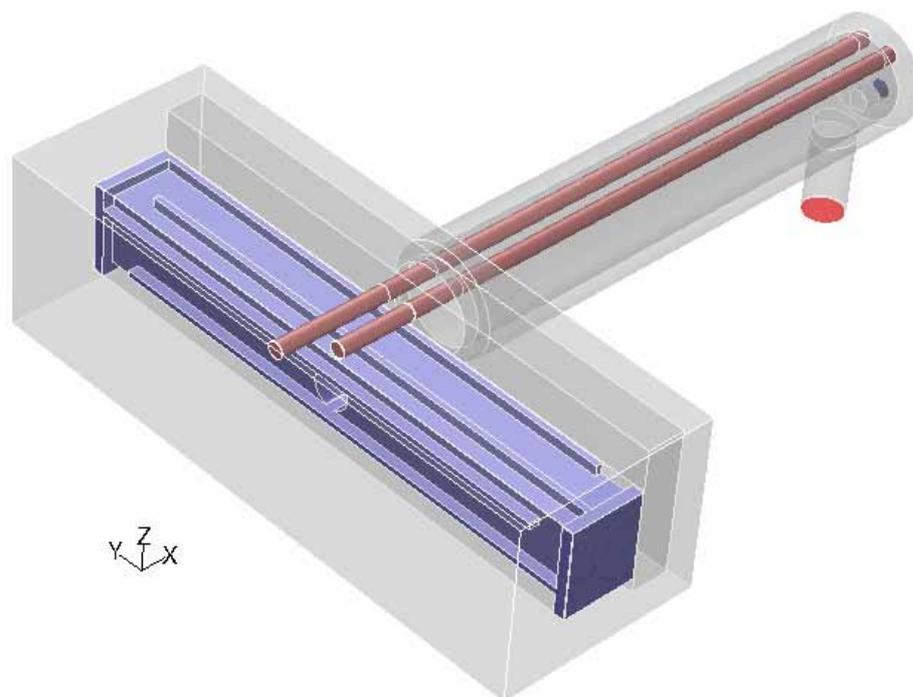


図 4.2.1-3 (b) 作成形状 (ソリッド表示)

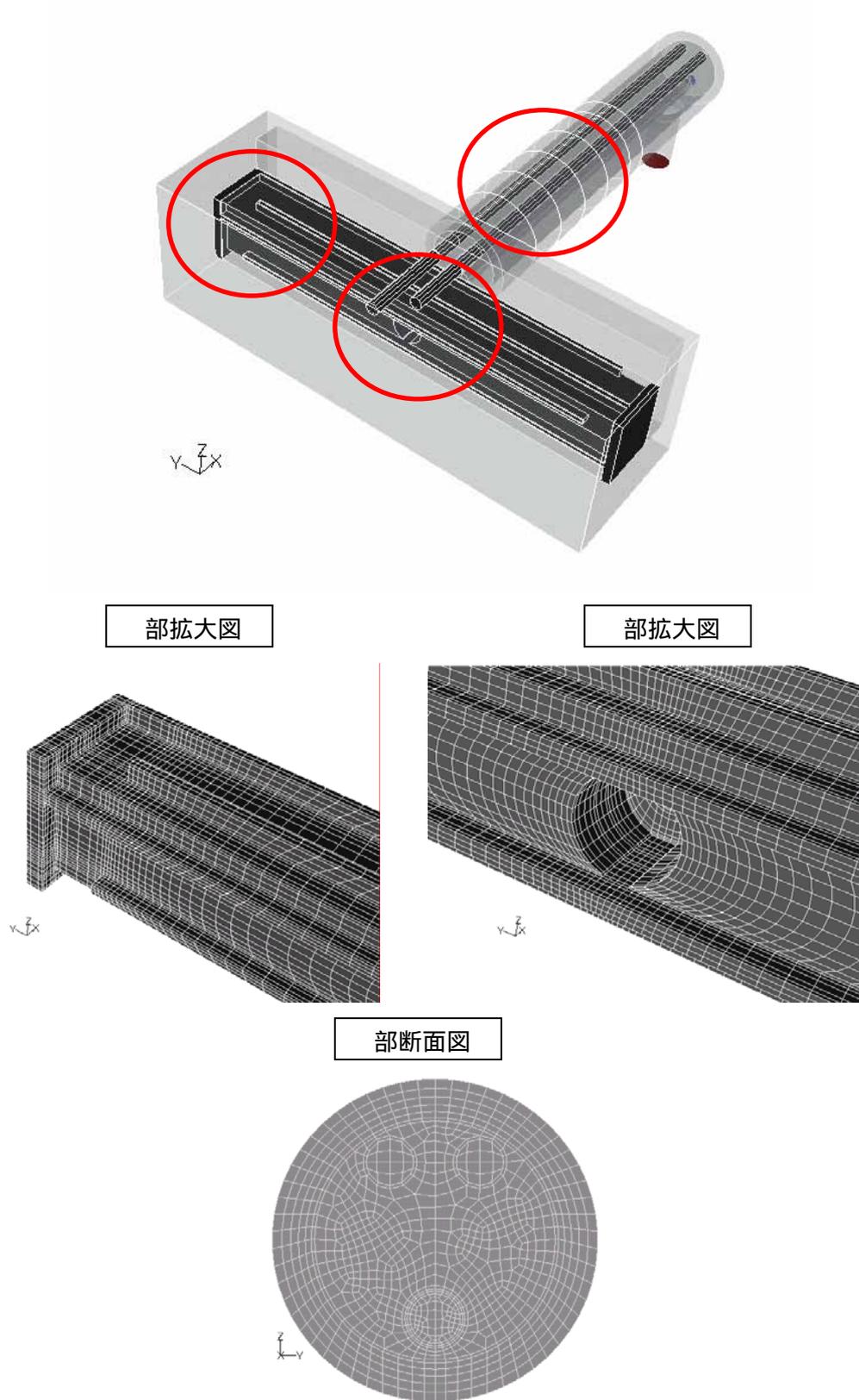


図 4.2.1-3(c) メッシュ格子図 (拡大図, 断面図)

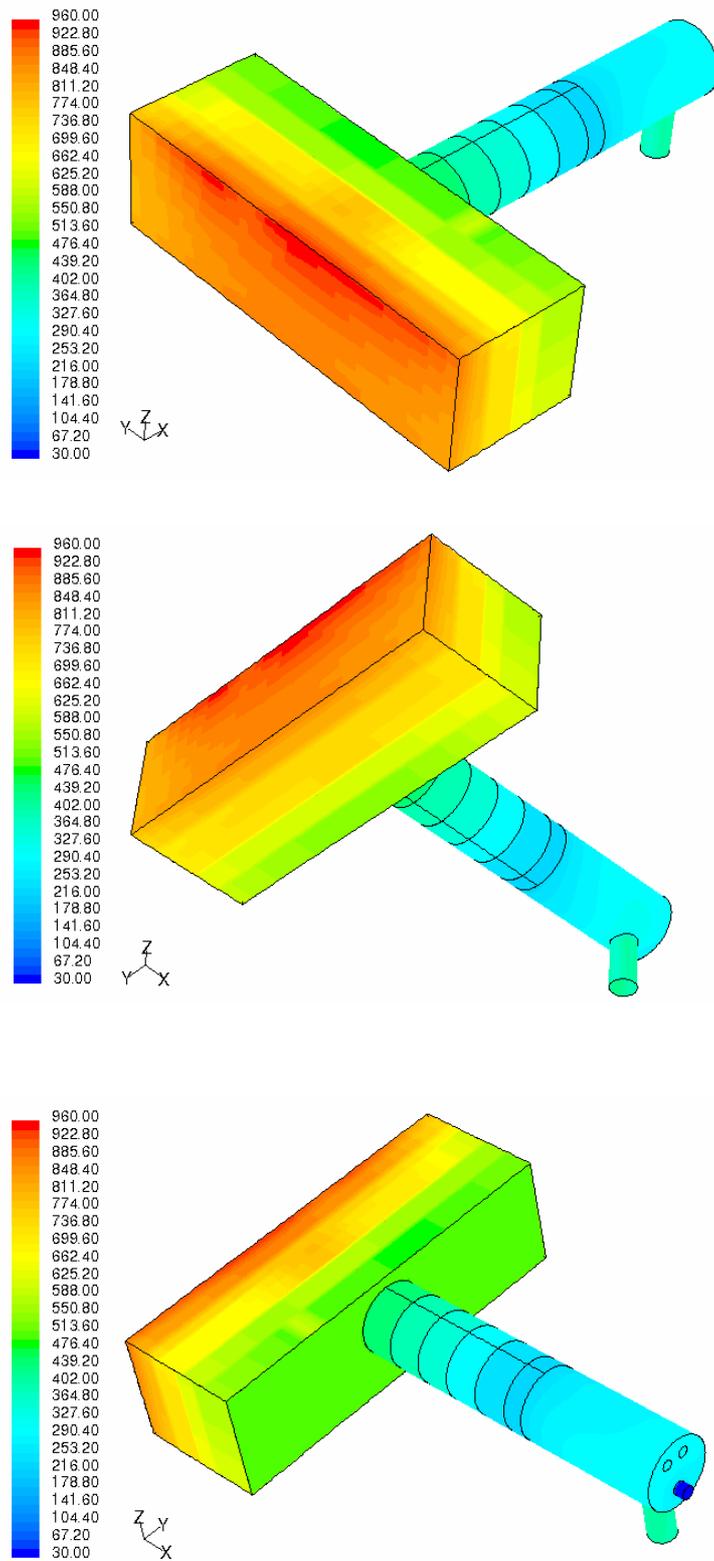


图 4.2.1-4 電極表面温度 (FLOMEL 解析結果 (境界条件))

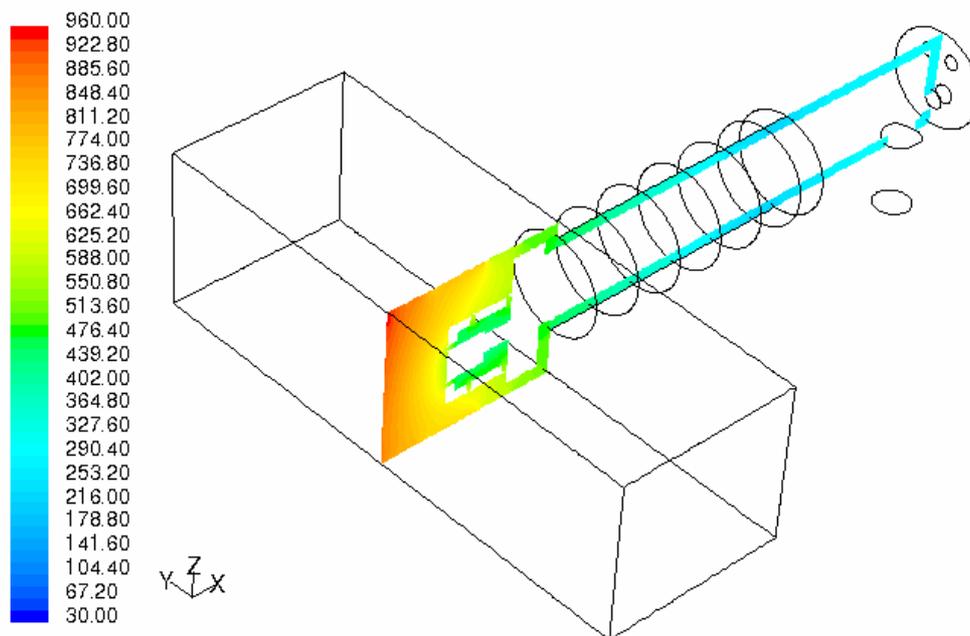


図 4.2.1-5 温度分布コンター図 (評価面: ZX 平面 Y=0mm)

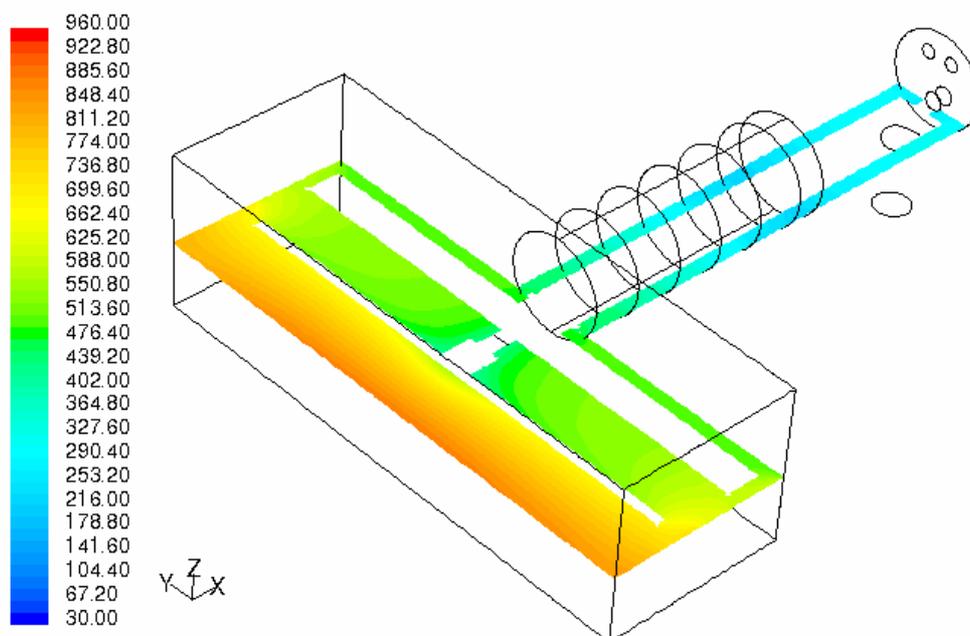


図 4.2.1-6 温度分布コンター図 (評価面: XY 平面 Z=-40mm)

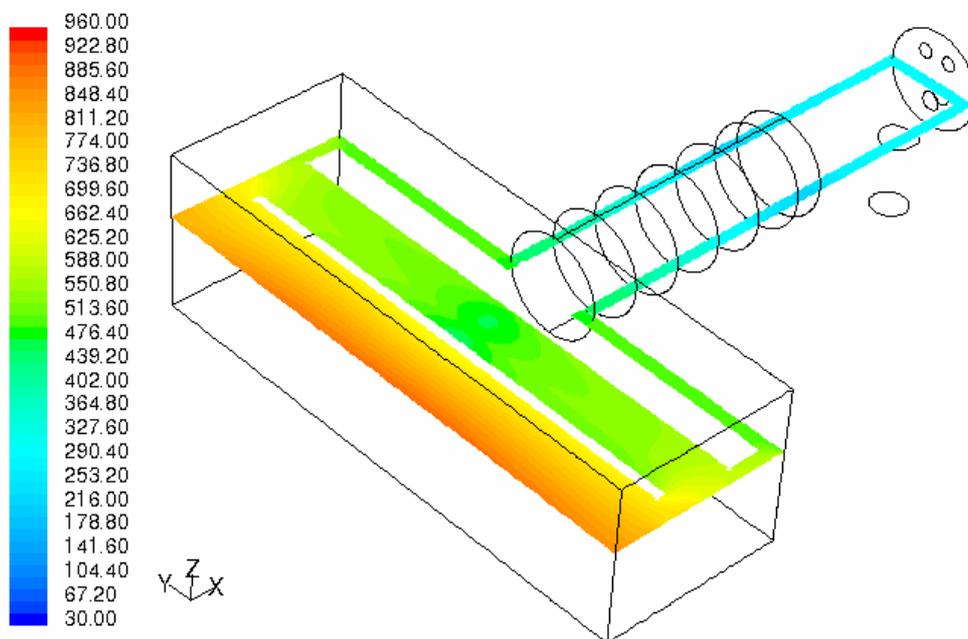


図 4.2.1-7 温度分布コンター図 (評価面 : XY 平面 Z=0mm)

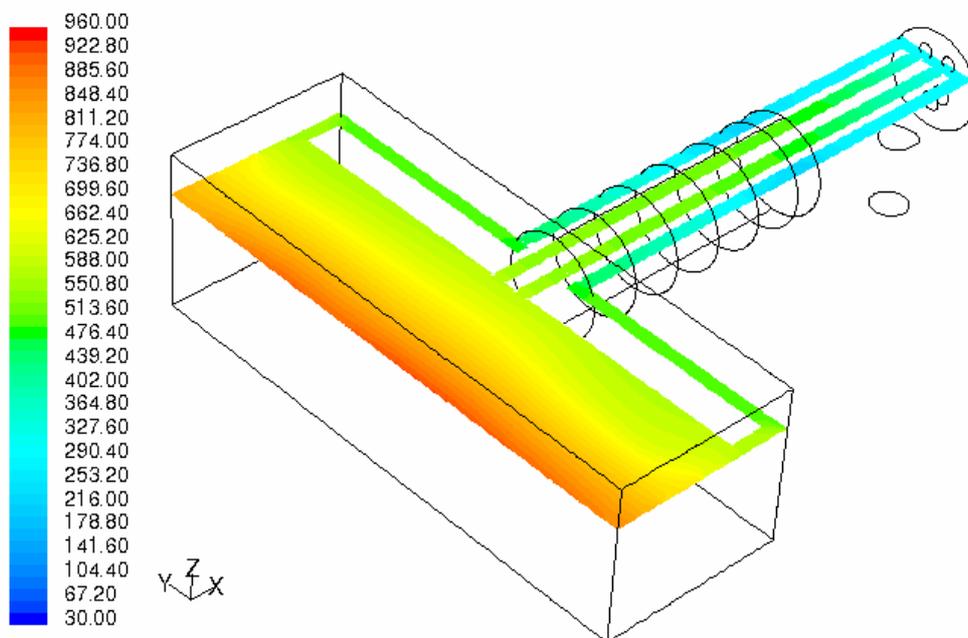


図 4.2.1-8 温度分布コンター図 (評価面 : XY 平面 Z=35mm)

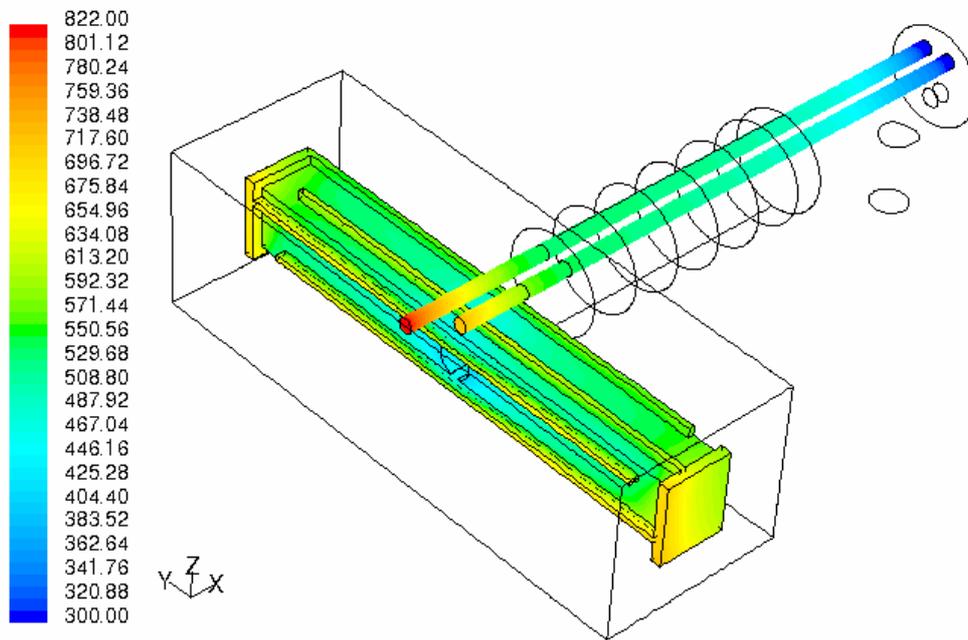


図 4.2.1-9 温度分布コンター図（冷却ヘッドと熱電対）

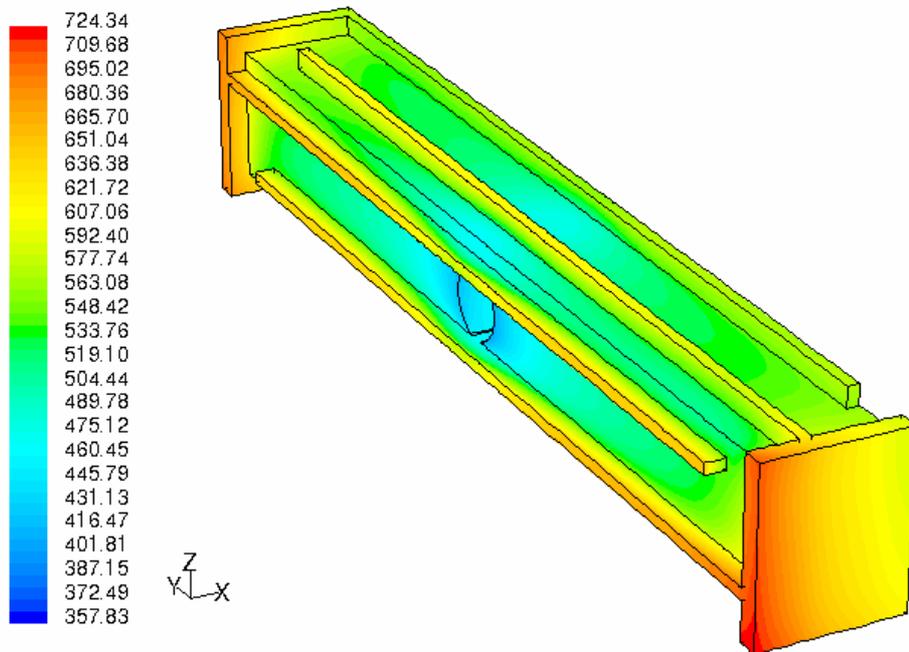


図 4.2.1-10 冷却ヘッド表面の温度分布コンター図

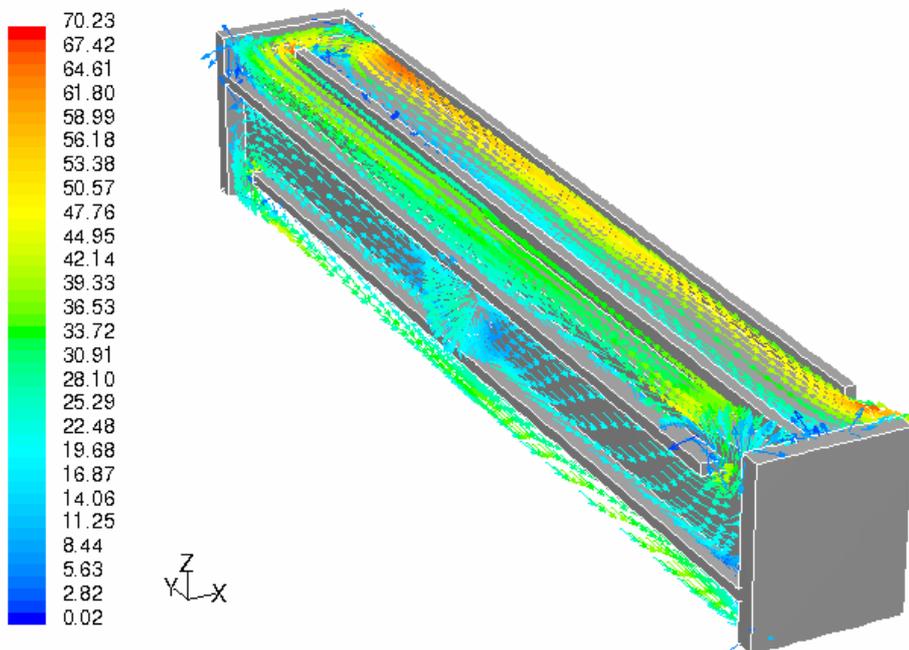


図 4.2.1-11 冷却ヘッド周辺の速度ベクトル図

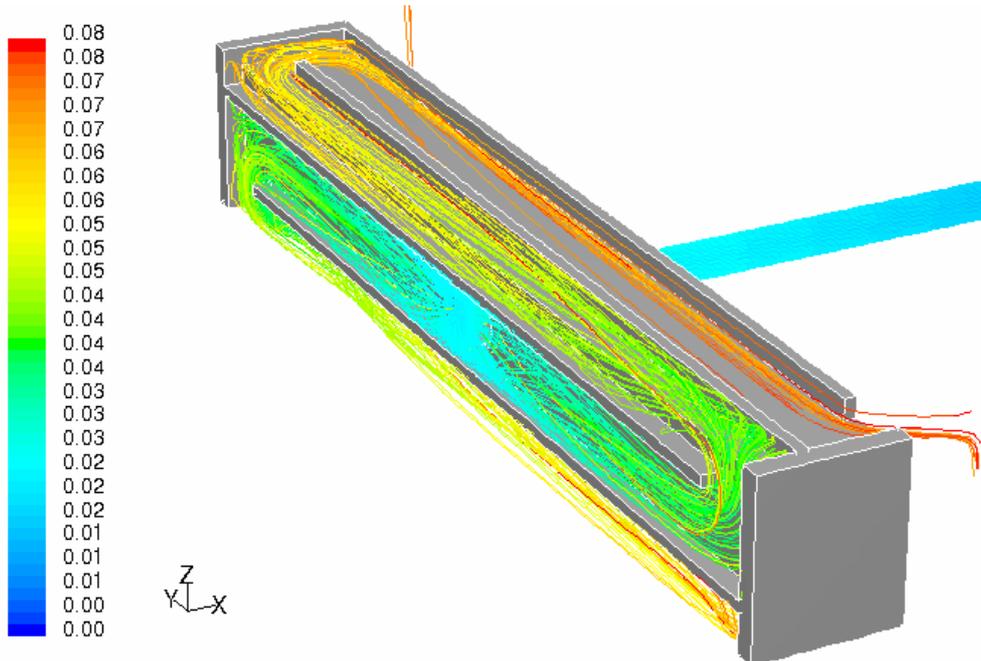


図 4.2.1-12 冷却ヘッド周辺のパスライン表示 (時間表示)

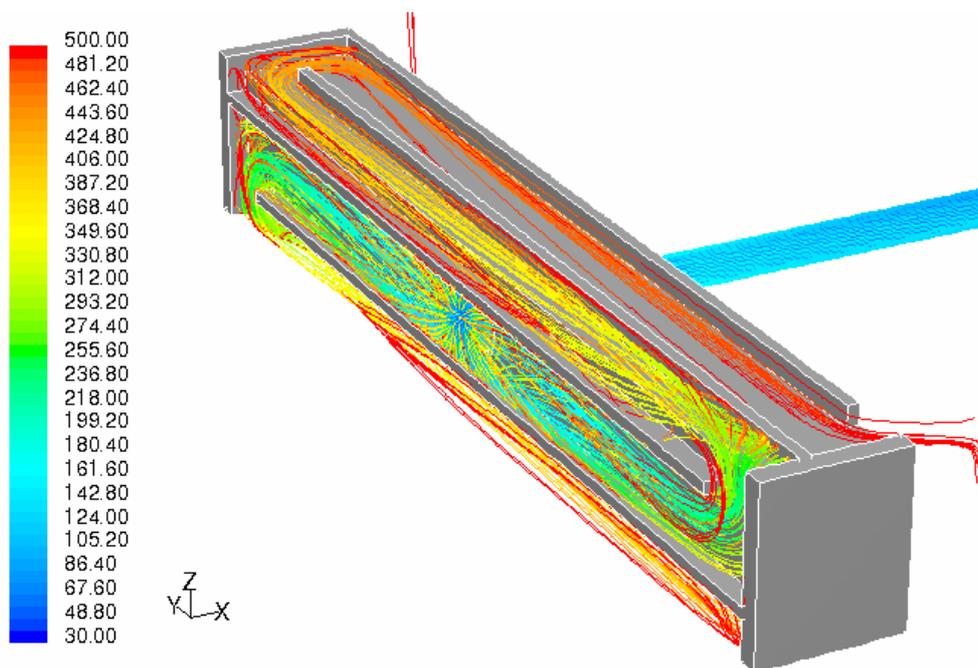


図 4.2.1-13 冷却ヘッド周辺のパスライン表示 (温度表示)

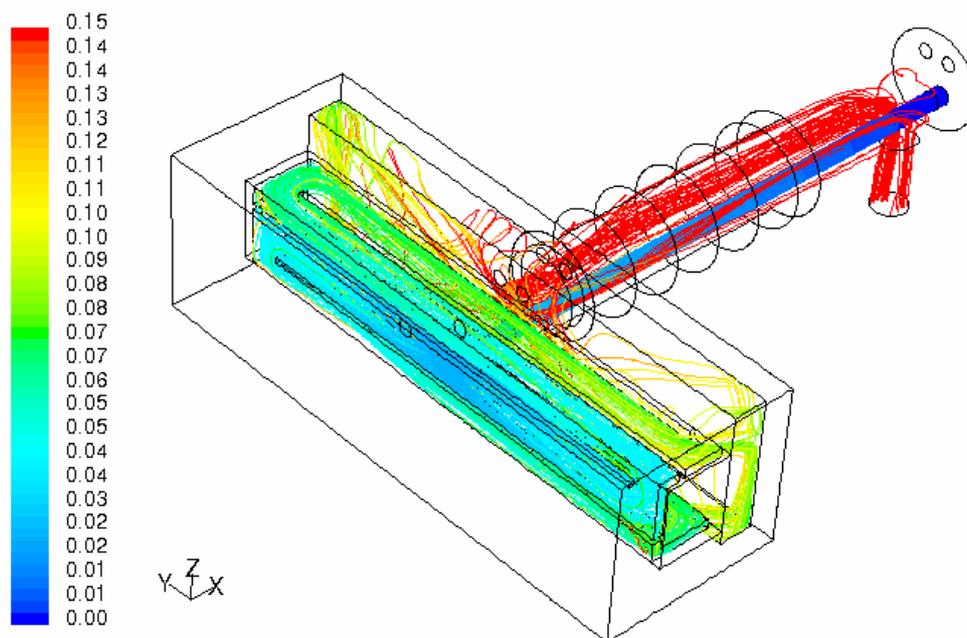


図 4.2.1-14 モデル全体のパスライン表示 (時間表示)

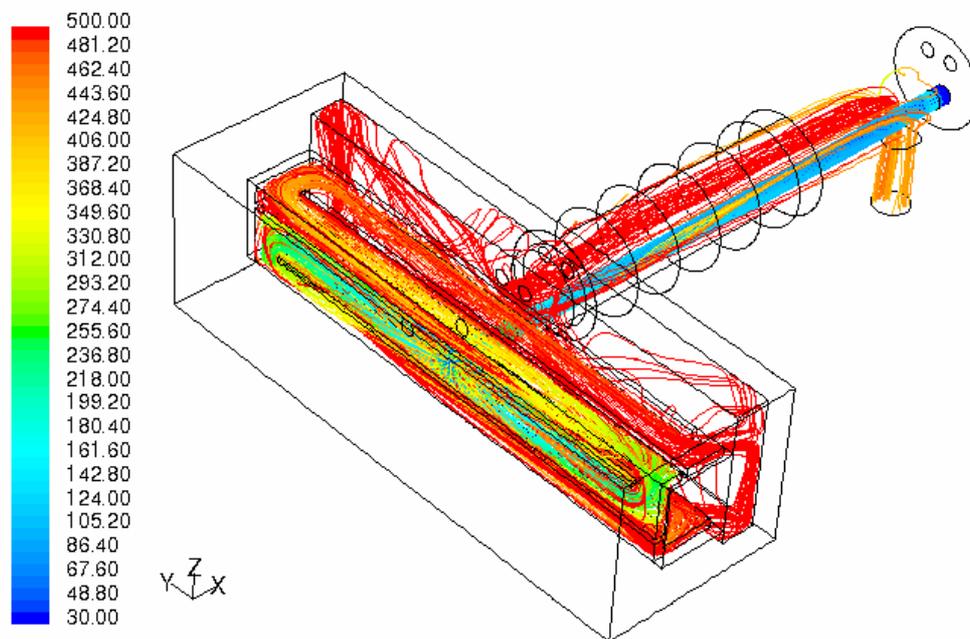


図 4.2.1-15 モデル全体のパスライン表示 (温度表示)

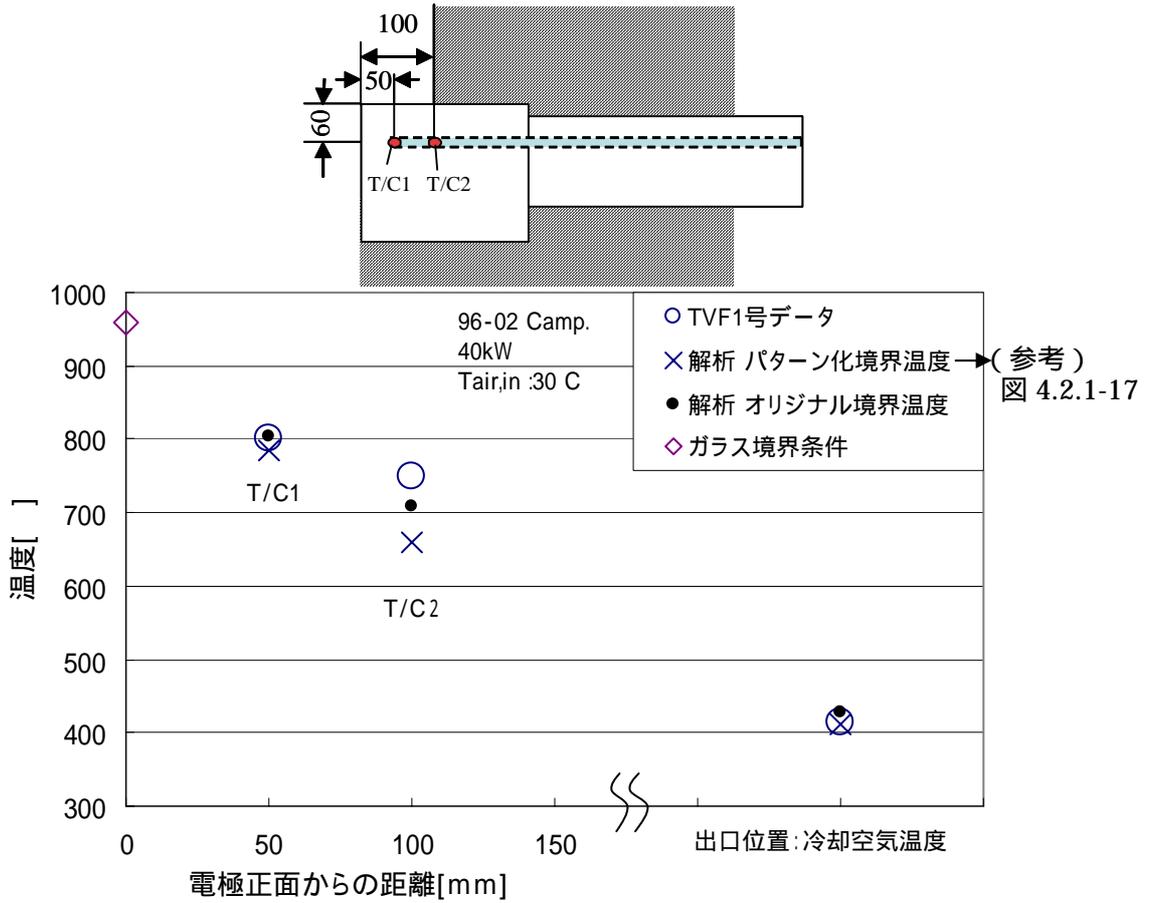


図 4.2.1-16 実機温度データと解析結果の比較

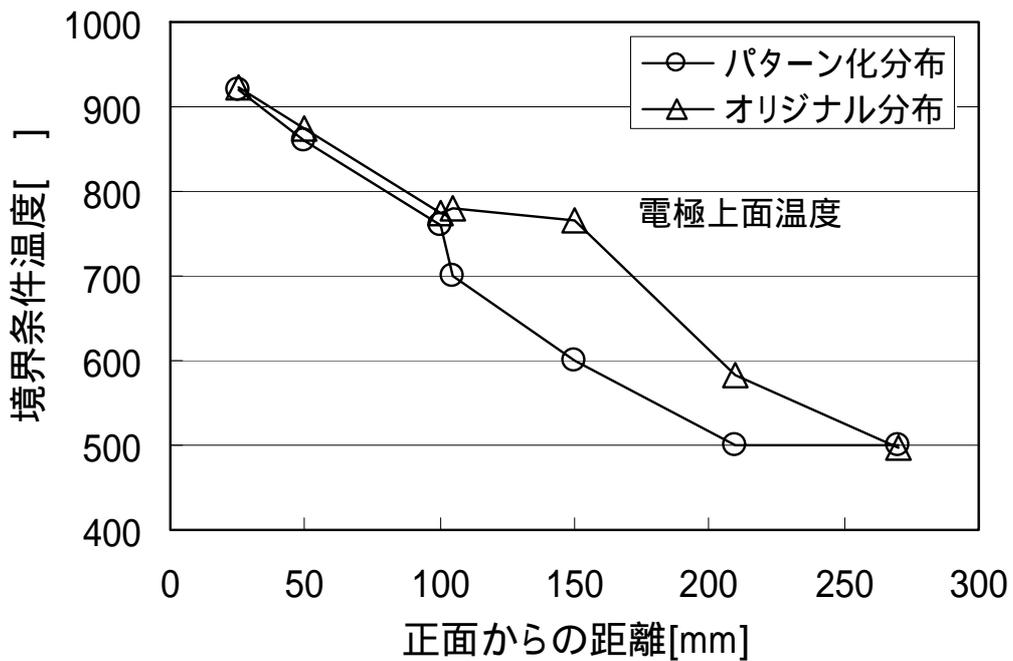


図 4.2.1-17 解析境界温度条件比較 (電極上面)

4.2.2 溶融温度の熱電対による検出性に関する評価

前項にて検証を実施した電極温度分布解析モデルを使用し、想定損傷部の温度を溶融温度まで上昇させた場合の解析を実施し、熱電対位置温度への影響を評価することによって、溶融温度の検出性を評価する。

4.2.2.1 解析手法

前項と同様に汎用の熱流動解析コード（FLUENT：FLUENT アジアパシフィック社）を用いる。3次元解析メッシュの作成には、GAMBITコードを用いる。

4.2.2.2 解析条件

解析体系及び溶融炉運転条件は、前項の電極解析モデルを用いる。溶融温度の検出性を評価する観点から、想定損傷箇所の温度を溶融温度とした場合の境界温度を設定し、電極全域の評価を行う。境界条件とした温度分布を図4.2.2-1に示す。通常時の温度分布(図4.2.1-4)をベースとし、電極前面角部の温度をインコネルの溶融温度1360℃まで上昇させた温度分布を作成し、境界条件として与える。その際の熱電対部温度への影響を調べる。

4.2.2.3 解析結果

図4.2.2-2～図4.2.2-14に解析結果を示す。境界温度を溶融温度まで上昇させた領域の近傍の断面では、電極内部にも一部高温領域が生じる(図4.2.2-2及び図4.2.2-4)。一方、熱電対位置断面での温度分布に高温域は観察されず(図4.2.2-3及び図4.2.2-7)、高温域は角部に限定的に分布することが分かる。

角部を溶融温度まで上昇させた場合と前項の通常時の場合について、熱電対位置の温度を比較した結果、その差は1℃未満であり、温度上昇の影響はほとんど現れないことが分かった。これは電極の熱電対位置から角部までの距離が40cm程度あり熱的な影響が小さいためと考えられる。

以上より、電極正面角部の温度が電極材料（インコネル）の溶融温度(1,360℃)に到達した場合でも、熱電対位置での温度上昇はほとんどなく、熱電対での溶融の検出は困難であったと考えられる。

4.2.2.4 まとめ

想定損傷部の温度を溶融温度まで上昇させた場合の解析を実施し、溶融温度の熱電対での検出性を検討した。その結果、電極正面角部の温度が電極材料（インコネル）

の溶融温度(1,360)に到達した場合でも、熱電対位置での温度上昇はほとんどなく、熱電対での溶融の検出は困難であったことが示された。

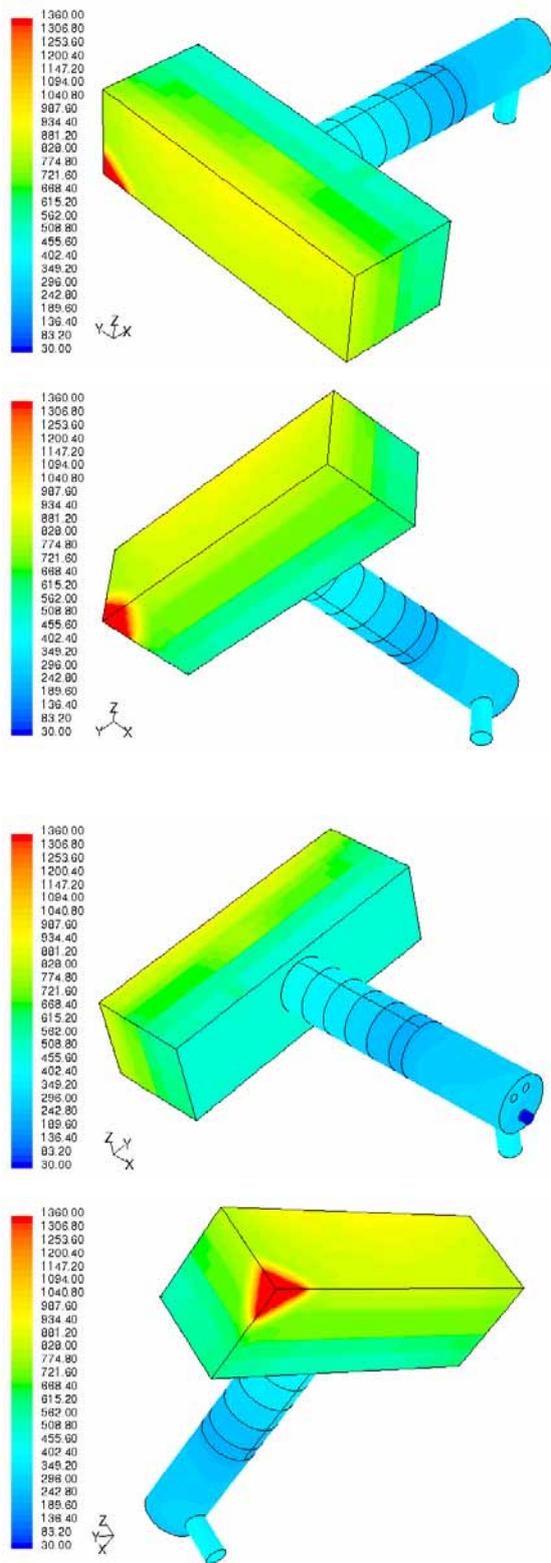


図 4.2.2-1 角部溶融温度ケース（表面温度境界条件）

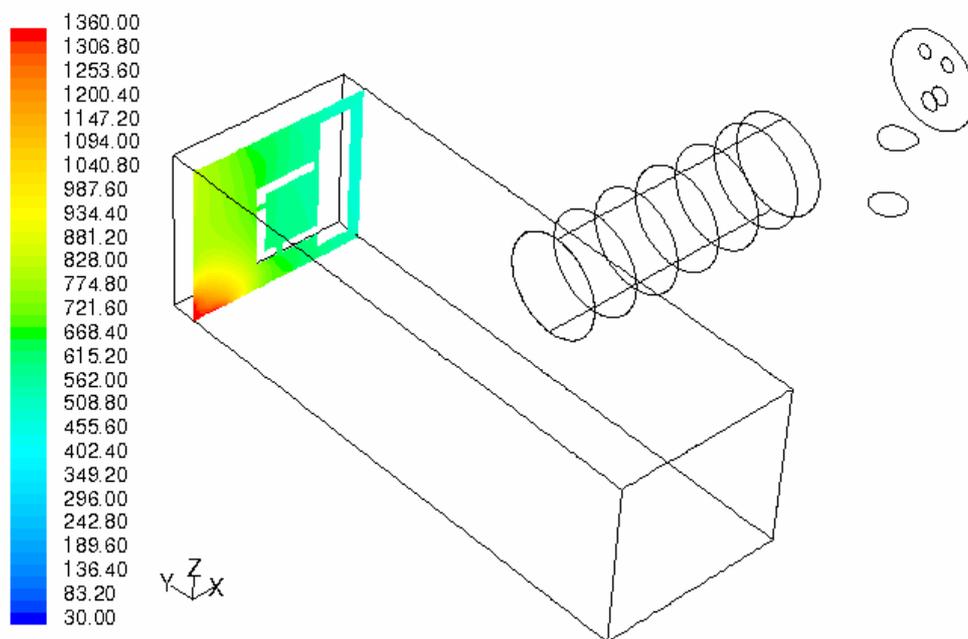


図 4.2.2-2 温度分布コンター図 (評価面 : ZX 平面 Y=350mm)

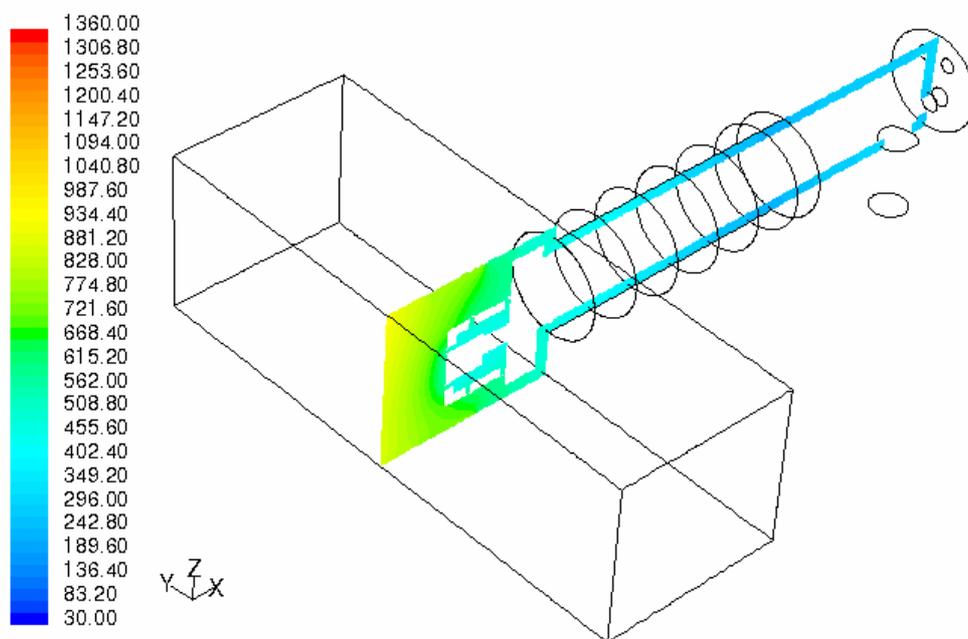


図 4.2.2-3 温度分布コンター図 (評価面 : ZX 平面 Y=0mm)

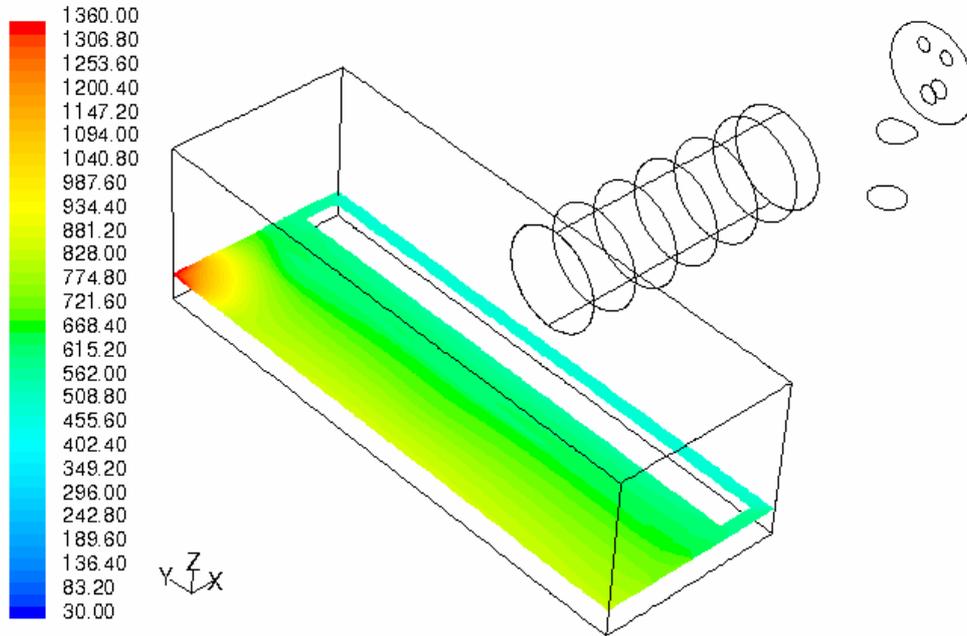


図 4.2.2-4 温度分布コンター図 (評価面 : XY 平面 Z=-100mm)

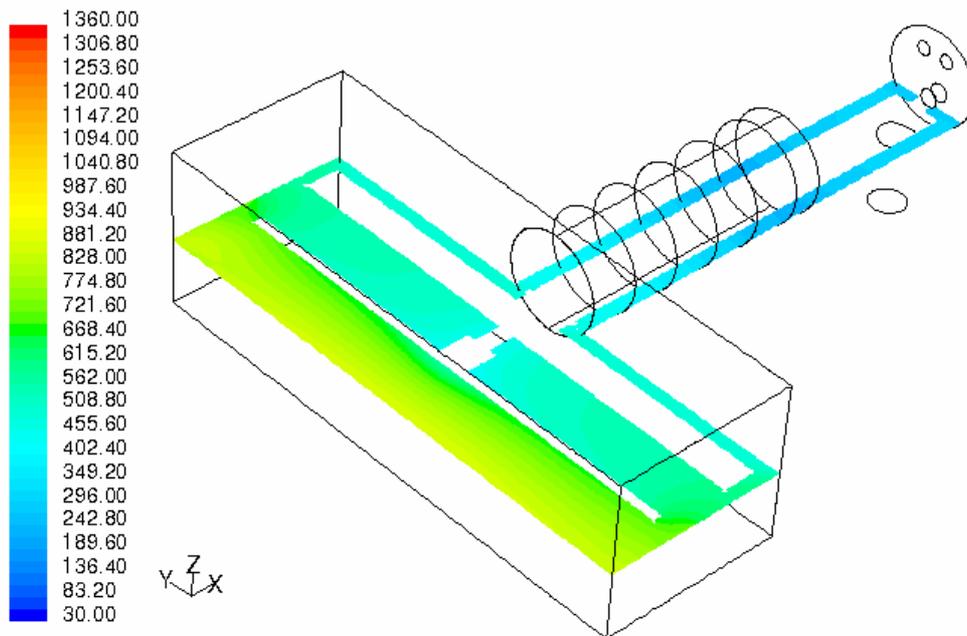


図 4.2.2-5 温度分布コンター図 (評価面 : XY 平面 Z=-40mm)

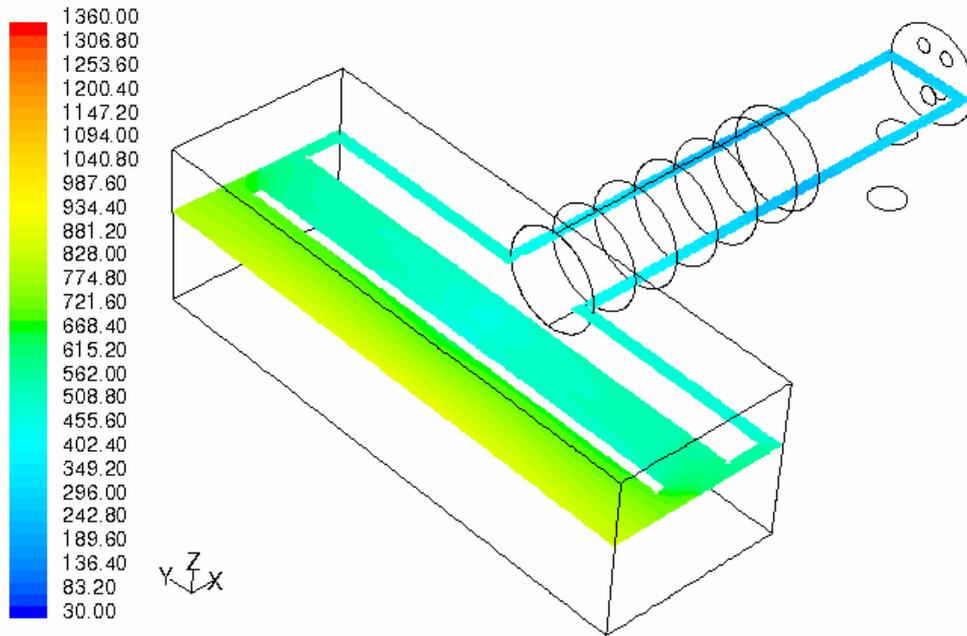


図 4.2.2-6 温度分布コンター図 (評価面 : XY 平面 Z=0mm)

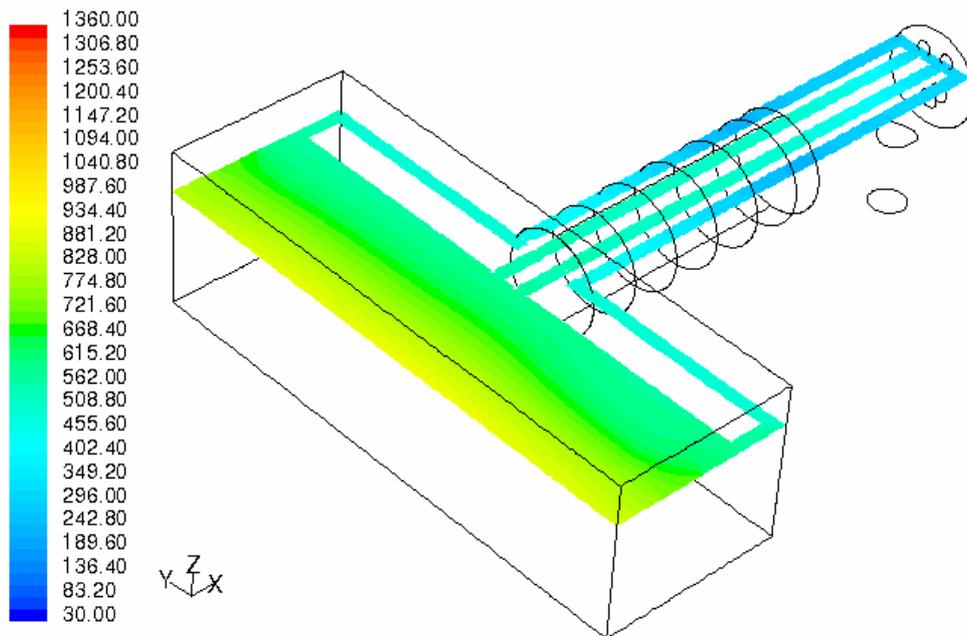


図 4.2.2-7 温度分布コンター図 (評価面 : XY 平面 Z=35mm)

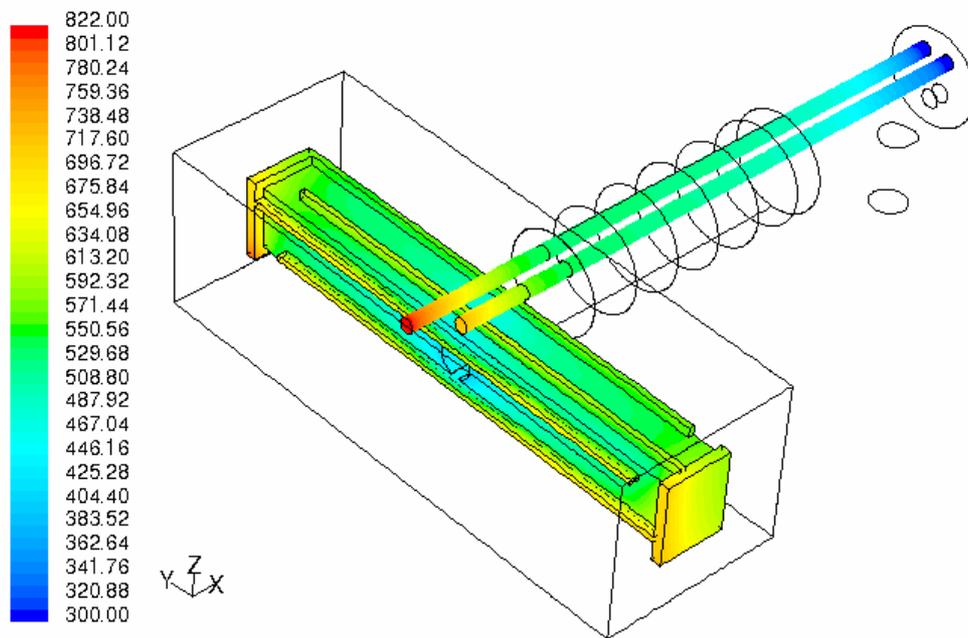


図 4.2.2-8 温度分布コンター図 (冷却ヘッドと熱電対)

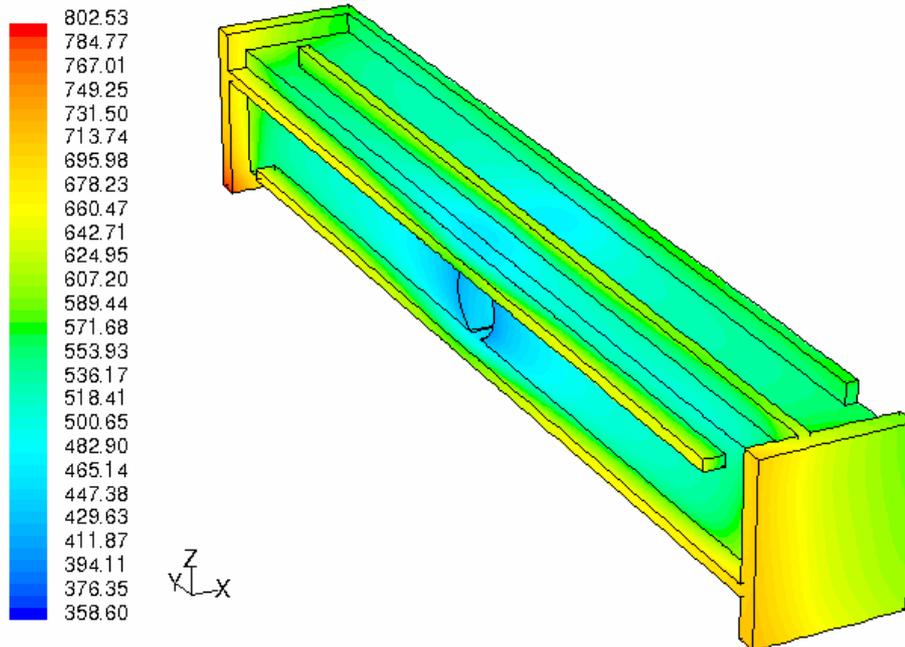


図 4.2.2-9 冷却ヘッド表面の温度分布コンター図

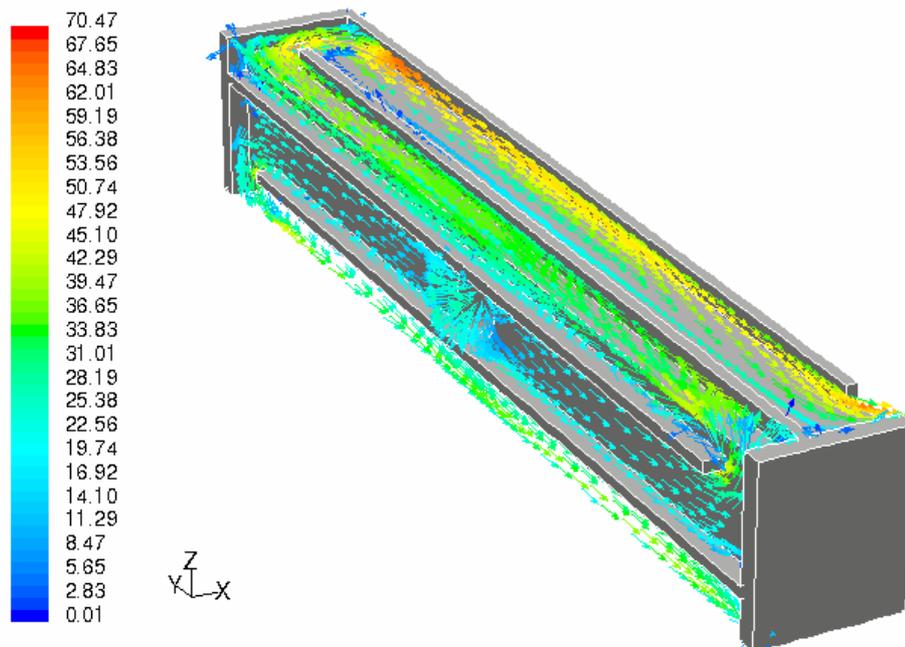


図 4.2.2-10 冷却ヘッド周辺の速度ベクトル図

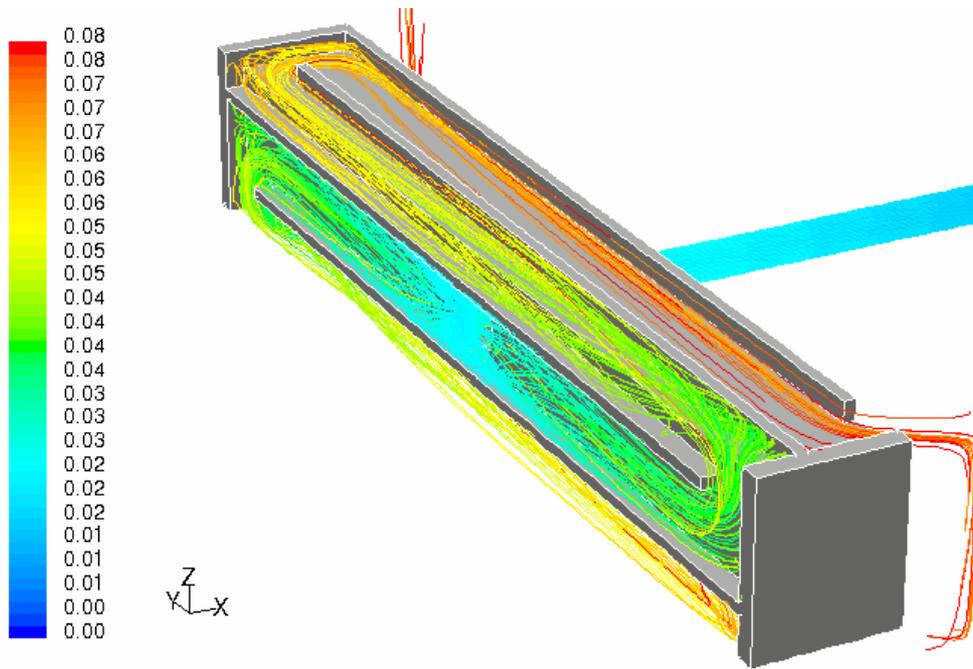


図 4.2.2-11 冷却ヘッド周辺のパスライン表示（時間表示）

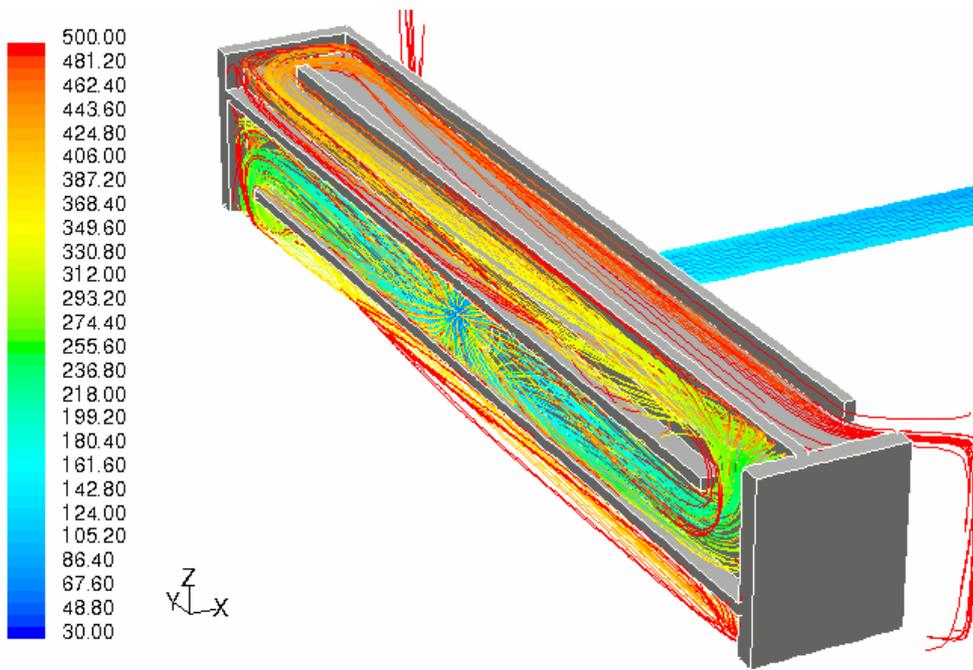


図 4.2.2-12 冷却ヘッド周辺のパスライン表示（温度表示）

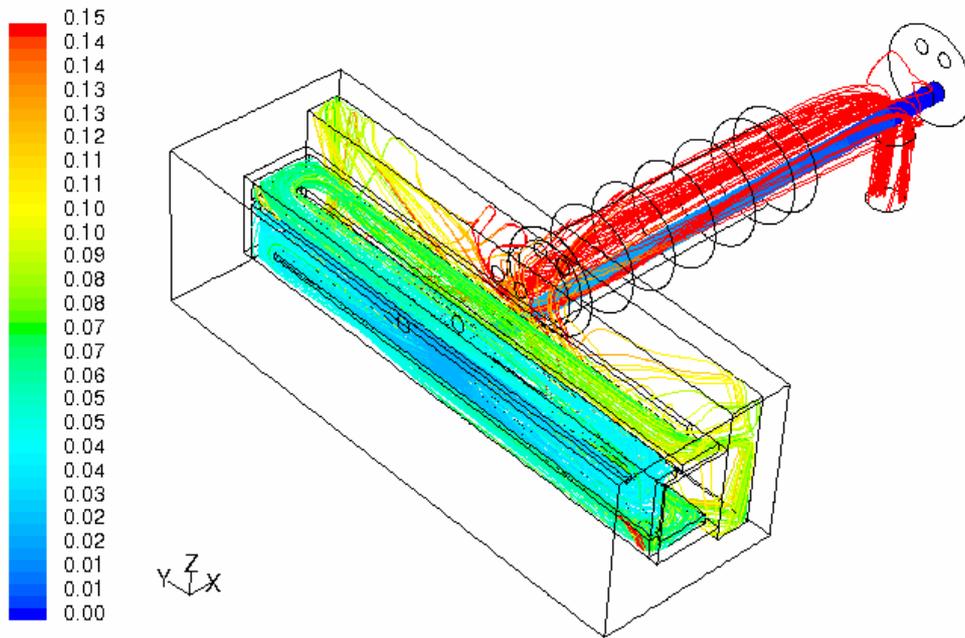


図 4.2.2-13 モデル全体のパスライン表示 (時間表示)

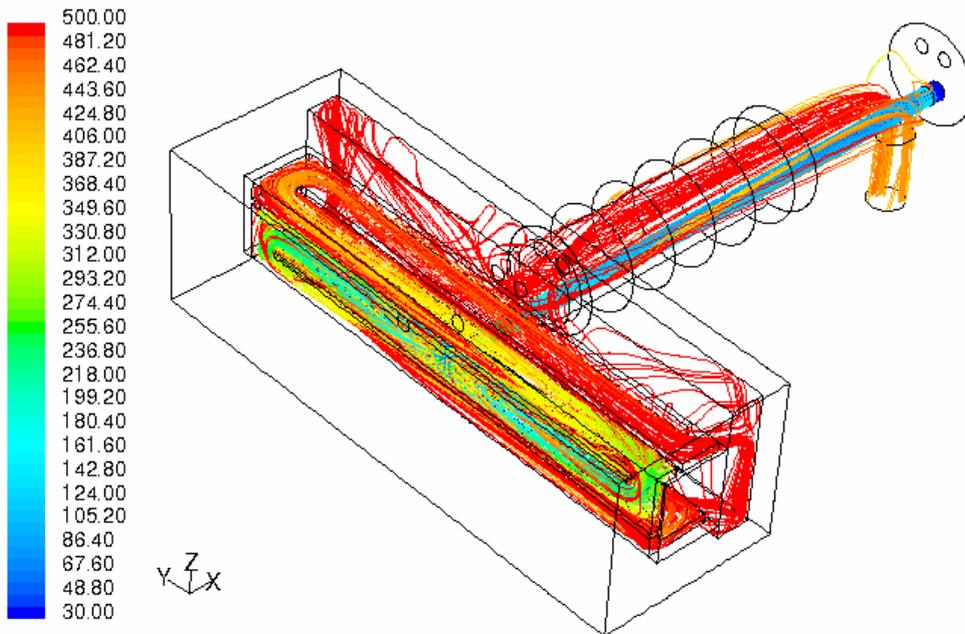


図 4.2.2-14 モデル全体のパスライン表示 (温度表示)

4.2.3 主電極内詳細温度分布及び溶融温度検出性に関する数値解析のまとめ

主電極内の温度分布に関して、以下の項目の数値解析を実施した。

- (1) 主電極内温度分布予測性に関する検証
- (2) 溶融温度の熱電対による検出性に関する評価

その結果、以下が明らかになった。

- ・ 電極ヘッド内の温度分布は、電極表面の温度(約 700 ~ 950)と空気流路温度(約 500)をそれぞれの位置で補間するような分布を示している。また、冷却空気は、30 で流入するが、出口では約 425 に達している。
- ・ 解析結果と TVF 1 号炉の実測データを比較した結果、電極表面から 50mm の位置の熱電対温度と解析結果の温度は比較的よい一致を示す。
- ・ 100mm 位置の熱電対温度と解析結果は、約 40 の差が生じているが、それらは、上面境界温度の影響と考えられ、出口空気温度の予測性が十分であること等から、電極温度分布解析は妥当と判断した。
- ・ 電極正面角部の温度が電極材料(インコネル)の溶融温度(1,360)に到達した場合でも、熱電対位置での温度上昇はほとんどなく、熱電対での溶融の検出は困難であることが示された。

以上、電極損傷想定箇所が溶融温度(1,360)に到達した場合でも熱電対による温度検出は困難であることが数値解析により示された。したがって、損傷発生時の電極温度に異常は観察されなかったが、電極の角部は溶融温度に到達していた可能性がある。

5 結 言

想定される電極損傷要因として、「局所的な電流密度の集中による交流電極反応」、及び、「局所的な温度上昇による電極材料の溶融」等が挙げられている。いずれの要因も、酸化ルテニウム(RuO_2)等の電気伝導度の高い白金族粒子が炉底部に堆積し、炉内の直接通電電流が白金族粒子の堆積領域に集中することが発端と考えられる。

そこで、本検討では、まず、電極材料(インコネル)の損傷が発生したと考えられる電極下部の角部への電流密度の集中について数値解析を行うとともに、最高温度の推定を実施した。その結果、ガラス溶融炉内の電流密度は、堆積物の3次元形状条件に依存し、堆積物と電極が接する箇所に電流密度が集中することが明らかになった。その最高電流密度は、少なくとも $30\text{A}/\text{cm}^2$ 以上であり、その場合、電流の経路は電極材料(インコネル)の溶融温度 1360 に達する可能性があることが分かった。一方、電流密度と腐食速度の関係は未解明な部分が多いが、これまでの試験結果によれば、電流密度に依存して腐食減肉が増大する結果が得られており、それらの影響に関する評価も進める必要がある。

また、電極内の温度分布に関する数値解析を行い、熱電対による温度検出性に関する検討を実施した。その結果、電極損傷想定箇所が溶融温度($1,360$)に到達した場合でも熱電対による温度検出は困難であることが示された。したがって、損傷発生時の電極温度に異常は観察されなかったが、電極の角部は溶融温度に到達していた可能性がある。

参考文献

- [1] 池田秀雄, 遠藤昇, 吉岡正弘, 豊嶋至, 白土克之, 「溶融炉改良に係るガラス固化モックアップ試験の評価」, サイクル機構技報, No.14 (2002). p25-38.
- [2] 青島厚, 小坂哲生, 山本徳洋, 「ガラス固化技術開発施設 (TVF)における溶融炉更新と関連技術開発」, 日本原子力学会「2004年春の年会」F59 (2004), p.806.
- [3] CRC ソリューションズ, 電磁界解析ソフトウェア MAGNA/FIM.
- [4] Seichi Sato, Hirotaka Furuya, "Thermal Conductivity of Simulated Radioactive Waste Glass", Nuclear Technology, Vol. 70, (1985) pp.235-242.