

TVF炉のコールド試験データを用いた熱流動解析

(技 術 報 告)

1 9 9 8 年 1 1 月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

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。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 3 3

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194,

Japan

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

1998

TVF炉のコールド試験データを用いた熱流動解析
(技術報告)

実施責任者 須藤 収
報告者 菅生 徹*²、河村 和廣*¹
小林 洋昭、川又 宏之*³

要 旨

環境保全・研究開発センター 環境保全部 技術開発グループでは、これまでに高レベル放射性廃棄物のガラス固化処理用ガラス熔融炉の開発を進める上でコンピューターシミュレーションを利用した炉内状態の推定を行うために、ガラス熔融炉3次元熱流動解析コード「FLOWMEL」を開発した。これを用いて実炉への適用を目指し、ガラス固化技術開発施設熔融炉(TVF炉)のコールド試験データをもとにコードの検証評価として熱流動解析を行った。

一定条件の解析に加え、モックアップ3号熔融炉の解析において精度向上が認められたパラメータフィッティング手法を参考にして、体膨張係数を変更した解析を行った結果、実測値に近い温度分布が得られた。しかし、解析値が定常状態に至っていない様子が伺われ、体膨張係数以外の条件について、パラメータフィッティング等の検討が今後必要である。

環境保全研究開発センター 環境保全部 技術開発Gr

*1 環境保全研究開発センター 処分研究部 処分材料研究Gr

*2 検査開発(株)

*3 原子力システム(株)

目 次

1. 緒言	1
2. 目的	2
3. 解析モデルおよび解析条件	2
3.1 モックアップ 3 号溶融炉モデルから TVF 炉モデルへの変更点	6
3.2 解析モデルおよび計算上の諸条件	8
3.3 解析対象およびモデルの概要	9
3.4 溶融炉操業条件	10
3.5 境界条件	11
3.6 溶融炉炉構成材	12
3.7 ガラス物性値	13
3.7.1 粘性係数	13
3.7.2 密度および体膨張係数	13
3.7.3 熱伝導率	13
3.7.4 比熱	13
3.7.5 電気抵抗率	13
3.8 計算パラメータ	15
3.9 溶融ガラスの組成	16
4. 計算結果	18
5. 考 察	28
6. 結 言	29

添付資料 1 解析入力に用いたデータ

添付資料 2 境界条件算出時の各データ一覧および算出データ一覧

表リスト

Table.1	モックアップ 3 号溶融炉モデルと TVF 炉モデルの比較	6
Table.2	モックアップ 3 号溶融炉の解析時のパラメータフィッティング用 パラメーター一覧	8
Table.3	解析仕様一覧	9
Table.4	操業条件	10
Table.5	境界条件一覧	11
Table.6	炉構成材物性値	12
Table.7	ガラス物性値	14
Table.8	計算パラメーター一覧	15
Table.9	PF798 組成表	16
Table.10	SW-18 模擬廃液組成表	17
Table.11	実測値と解析結果の温度比較	20
Table.12	解析最終ステップにおける温度差の比較 (CASE1)	27
Table.13	解析最終ステップにおける温度差の比較 (CASE2)	27

図リスト

Fig.1	TVF 炉モデルメッシュおよび炉材構成図 Y-Z 断面図 (炉中央)	3
Fig.2	TVF 炉モデルメッシュおよび炉材構成図 X-Z 断面図 (炉中央)	4
Fig.3	モックアップ 3 号溶融炉メッシュ及び測温位置	5
Fig.4	TVF 炉におけるメッシュの追加箇所	
Fig.5	三角形メッシュから四角形メッシュへの変更	7
Fig.6	炉中心部における溶融ガラス温度の比較	19
Fig.7	TVF 各温度測定点での解析結果比較 CASE1	21
Fig.8	TVF 各温度測定点での解析結果比較 CASE2	22
Fig.9	TVF 炉・コールド試験データ解析 (CASE1) の温度コンター図	23
Fig.10	TVF 炉・コールド試験データ解析 (CASE2) の温度コンター図	24
Fig.11	各測温点での解析温度時系列変化グラフ (CASE1)	25
Fig.12	各測温点での解析温度時系列変化グラフ (CASE2)	26

1. 緒 言

核燃料サイクル開発機構では、これまでに高レベル放射性廃棄物のガラス固化処理用ガラス溶融炉の開発を進めてきた。その成果として、現在、東海事業所内ガラス固化技術開発施設（TVF: Tokai Virtification Facility）において、LFCM型のガラス溶融炉（以下、TVF炉）が運転されている。

ガラス溶融炉は数種類の耐火物とともに電極、金属ケーシング等から構成され、これら溶融炉を構成する材料（炉構成材）によって放射性物質を含む溶融ガラスを炉内に閉じこめるように設計されている。したがって溶融炉を設計し、稼働している溶融炉の閉じ込め安全性を評価するには、溶融ガラスのみならず炉全体の温度分布などを把握する必要がある。また、要求品質を満足するガラス固化体を製造するためのガラス溶融炉の運転性能を評価するには、溶融ガラス温度、流動状態等の把握が必要である。

従来のガラス溶融炉開発は、小規模な実験炉から実機サイズのモックアップ炉にいたるまで数機の試験設備のスケールアップと溶融試験を重ねることにより、温度分布、閉じ込め安全性等のデータ検証を行ってきた。しかし、将来の溶融炉開発においては開発時間の短縮等の効率化の観点から、より迅速なガラス溶融炉設計が望まれる。

またシミュレーションを利用して、炉内状況を推定し、稼働中のガラス溶融炉に反映して、運転条件最適化の指針を得ることも期待される。

このような目的に沿って、ガラス溶融炉3次元熱流動解析コード「FLOWMEL」の開発を行ってきた¹⁾。

2. 目的

これまでのモックアップ3号溶融炉を解析モデルとした解析データを元に、TVF炉に寸法等を合わせた解析モデルを用い、コールド試験データによる解析を行い、TVFでのコード利用に向けて、実測データとの比較検証を行う。

3. 解析モデルおよび解析条件

TVF炉のメッシュ、炉材料構成および測温箇所をFig. 1, 2 に示す。また、モックアップ3号溶融炉のメッシュと測温箇所（溶融ガラス温度1箇所と炉材部10箇所）をFig. 3 に示す。

PC92-1キャンペーン13バッチ目（'93.3.25 10:00）を用いた²⁾。そのデータを資料として本報告書末に添付した（添付資料1）。

凡 例

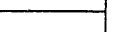
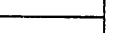
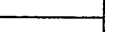
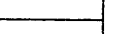
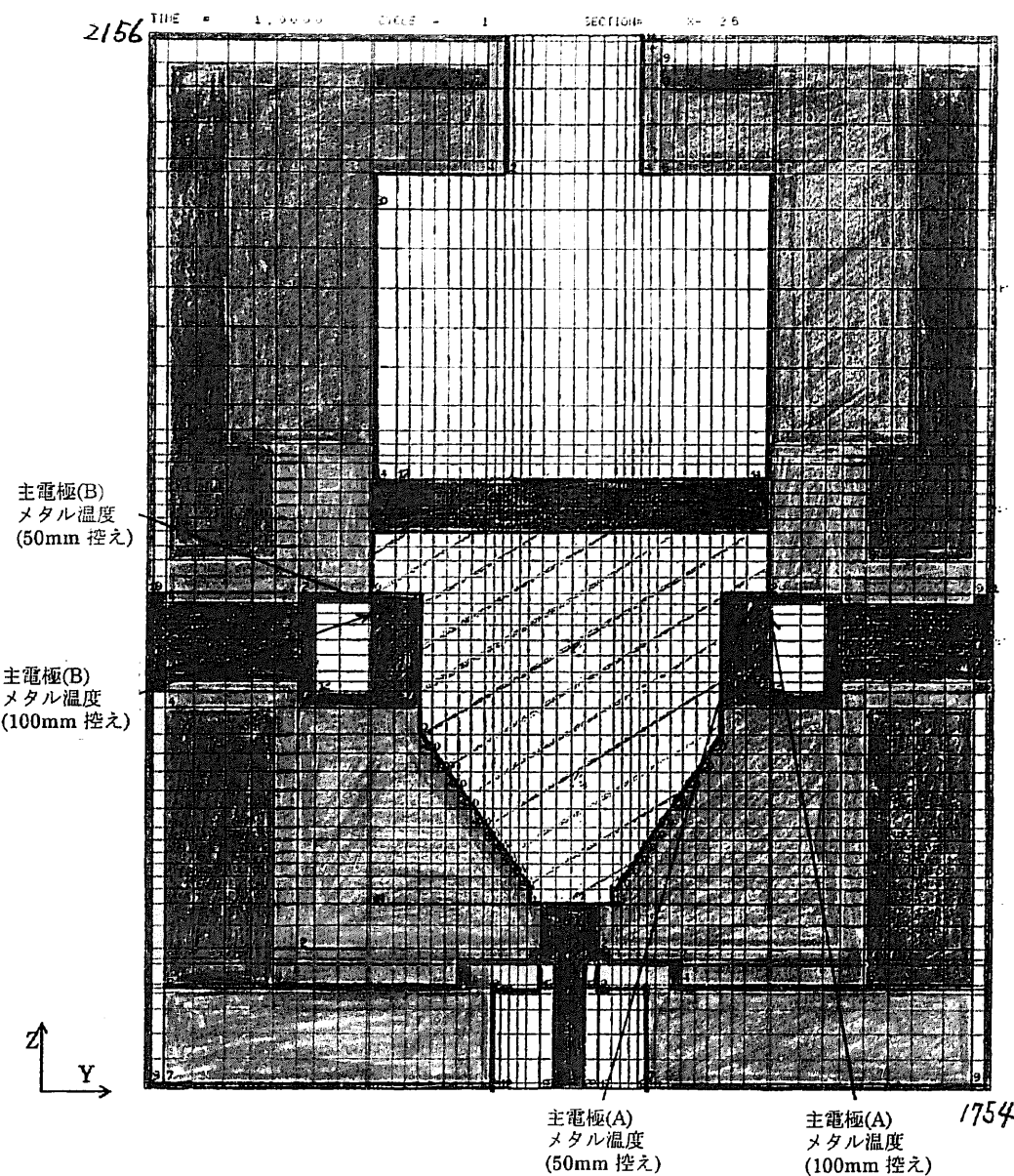
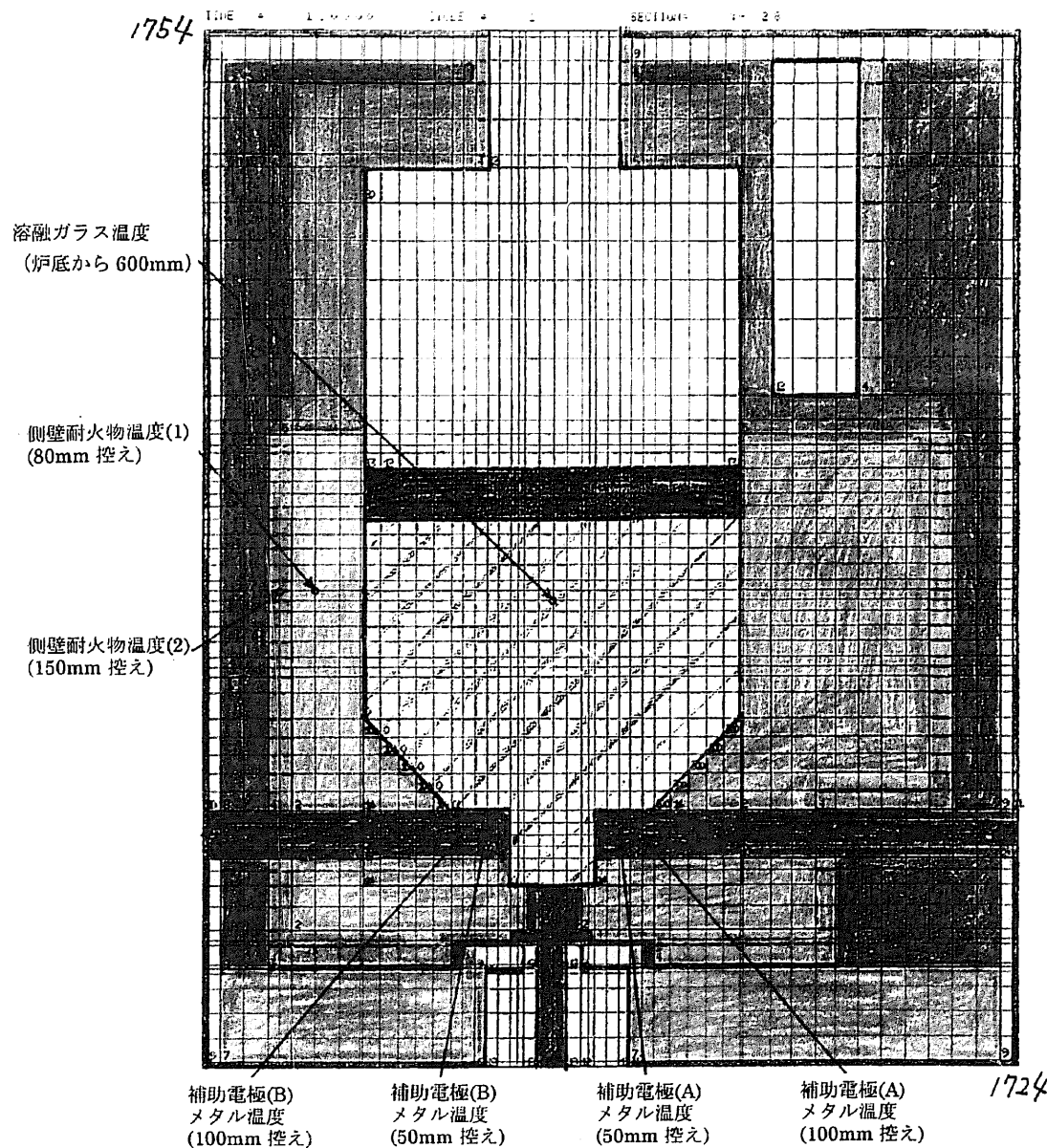
材質番号		材質名称	色
外 部	内 部		
	0	ガラス	
1	11, 12	インコネル690	
2	14	耐食性耐火レンガ(K-3)	
3		耐食性耐火レンガ(CS-5)	
4		耐火レンガ(WRT-70K)	
5		耐火断熱レンガ(AZ-GS)	
6		発熱体遮蔽レンガ(DC-N)	
7		断熱レンガ(C-1)	
8		断熱キヤスタブル(LN-135)	
9		ファイバーボード(イビボード30B)	
10		高アルミキヤスタブル(CA-135)	
11		S U S 3 0 4	
12		空気	
13		空気(プレナム側面)	
14		空気(プレナム側面)	
15		原料熔融層	
16		空気(レベラー層)	
17		空気(ノズル)	
18		空気(ノズル)	
19		空気(ノズル)	
20		空気(プレナム上部)	
21		空気(ノズル)	
22		空気(ノズル)	

Fig.1 TVF炉モデルメッシュおよび炉材構成図
Y-Z断面図(炉中央)



凡 例



材質番号		材質名称	色
外 部	内 部		
	0	ガラス	
1	11, 12	インコネル690	
2	14	耐食性耐火レンガ(K-3)	
3		耐食性耐火レンガ(CS-5)	
4		耐火レンガ(MRT-70X)	
5		耐火断熱レンガ(AZ-GS)	
6		発熱体遮蔽レンガ(DC-N)	
7		断熱レンガ(C-1)	
8		断熱キャストアル(LN-135)	
9		ファイバーボード(イビボード30B)	
10		高アルミナキャストアル(CA-135)	
11		S U S 3 0 4	
12		空気	
13		空気(プレナム側面)	
14		空気(プレナム側面)	
15		原料溶融層	
16		空気(レベラー層)	
17		空気(ノズル)	
18		空気(ノズル)	
19		空気(ノズル)	
20		空気(プレナム上部)	
21		空気(ノズル)	
22		空気(ノズル)	

Fig.2 T V F 炉モデルメッシュおよび炉材構成図
X-Z 断面図 (炉中央)

Mock up III Melter

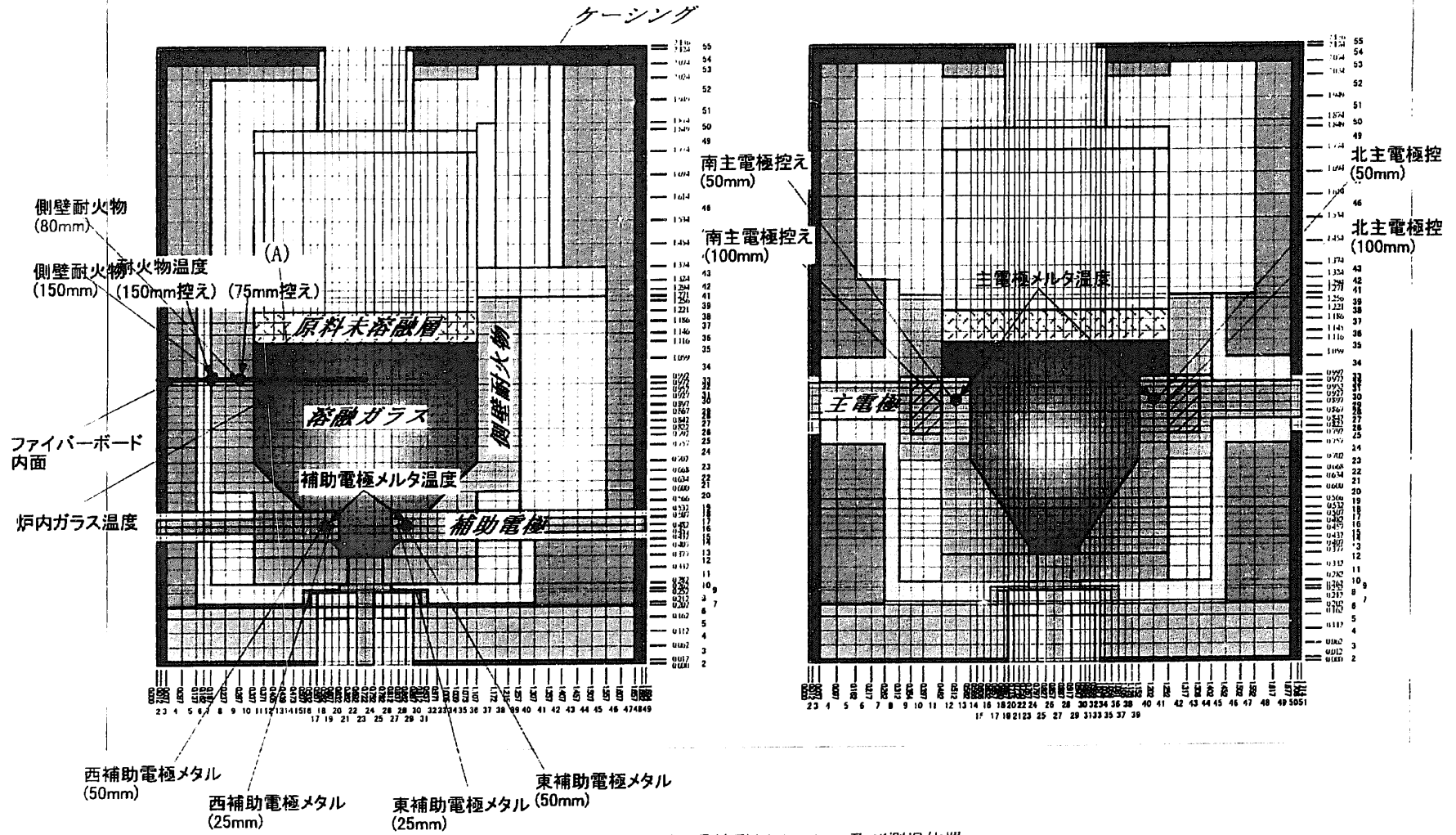


Fig.3 モックアップ3号溶融炉メッシュ及び測温位置

3.1 モックアップ3号熔融炉モデルからTVF炉モデルへの変更点

TVF炉の解析モデルは、モックアップ3号熔融炉モデルを基に作成されている。作成にあたって、以下のTable. 1等に応示するような注意事項、変更事項を考慮している。

①解析領域、解析メッシュ関連

Table. 1 モックアップ3号熔融炉モデルとTVF炉モデルの比較

変更点		モックアップ3号熔融炉モデル	TVF炉モデル
熔融表面積		0.61m ²	0.66m ²
解析領域	X方向	1694mm	1724mm
	Y方向	1714mm	1754mm
	Z方向	2136mm	2156mm
計算メッシュ数 ()内は内部メッシュ	X方向	49(27)	53(29)
	Y方向	51(31)	55(33)
	Z方向	55(24)	59(26)
	合計	137,445(20,088)	171,985(24,882)
主電極上部のガラス液面高さ		124mm	126mm
主電極上部のメッシュ数		2	4
原料熔融層のメッシュ分割数		3	4

②その他の変更点

- ア) 流下ノズル雰囲気部の天井面に薄いメッシュ(10mm)を追加。
- イ) 界面熱抵抗の設定ができるように、X方向に4メッシュ、Y方向に4メッシュ追加 Fig. 4 参照
- ウ) TVFの設計図面には、高アルミナキャストブル(CA-135)は記載していないが、モックアップ3号熔融炉と同様の構成になっているものとする。
- エ) モックアップ3号熔融炉で用いられていた耐食性耐火レンガ(CS-5)は、TVF炉モデルでは Monofrax K-3 とする(設計図面通り)。
- オ) 補助電極真下の三角形メッシュは流動計算が不安定になる原因となるため四角形メッシュに変更。Fig. 5 参照。

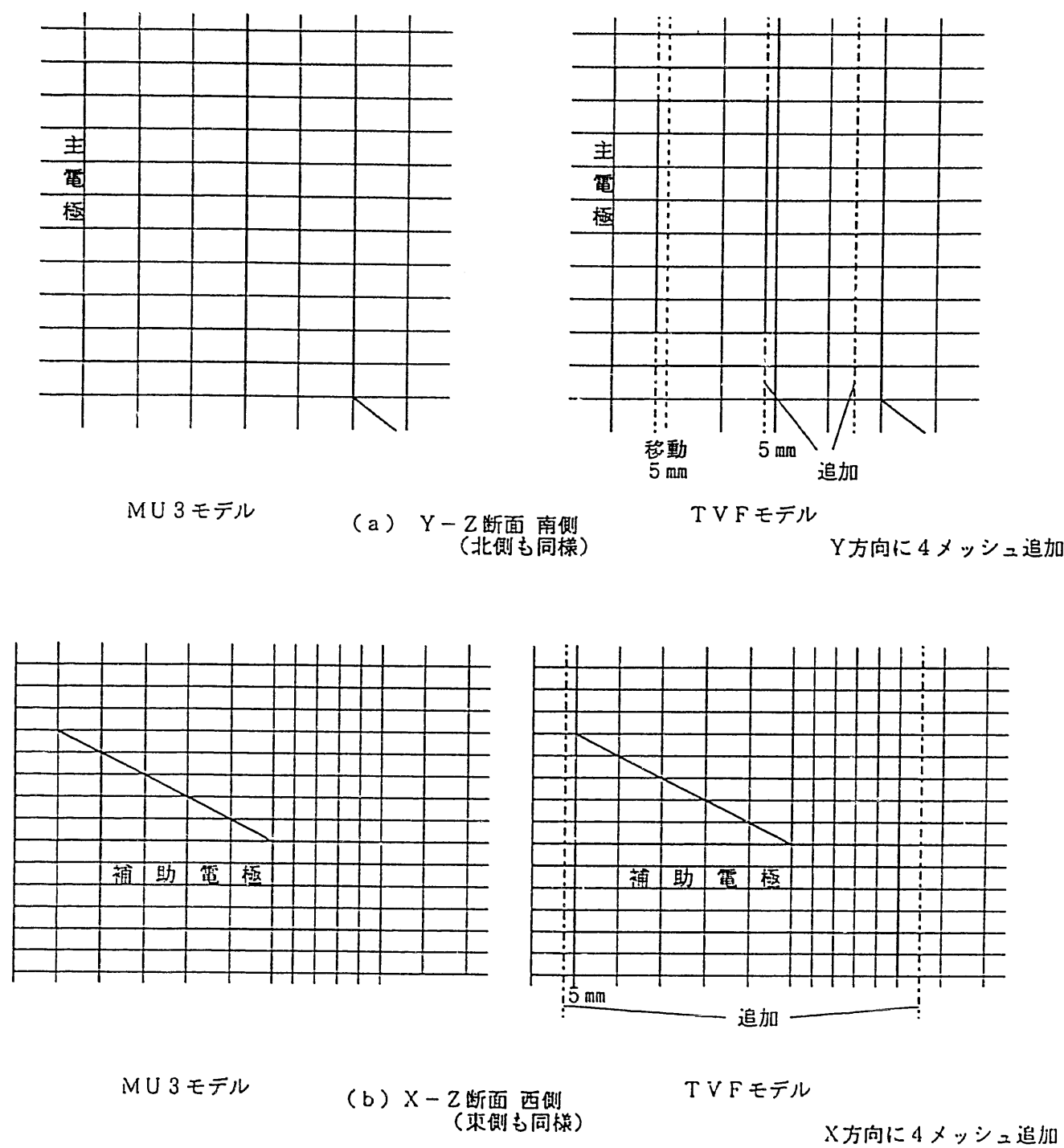


Fig.4 TVF炉におけるメッシュの追加箇所

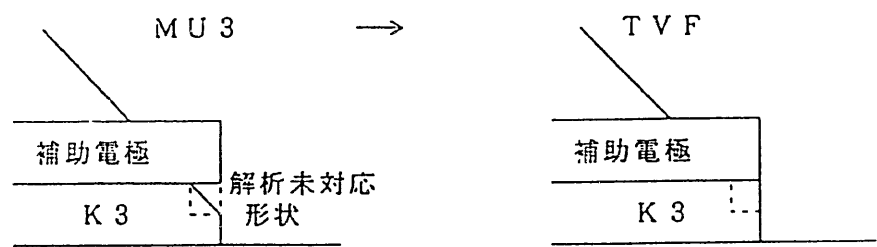


Fig.5 三角形メッシュから四角形メッシュへの変更

3.2 解析モデルおよび計算上の諸条件

再処理センター 環境保全部 処理第三課(以下VTS)より入手したTVF炉のコールド試験データの内、安定した運転状態を示しているPC92－1キャンペーン 13バッチ目('93.3.25 10:00)を CASE1(＝標準値)とする。また、モックアップ3号溶融炉の解析では Table.2 に示すようなパラメータを変更して解析値を実測値に近づける、パラメータフィッティングを行っているが、その中のパラメータとして体膨張係数を用いて1ケースのみパラメータフィッティングを行う³⁾。ここで、CASE1 のデータにおける体膨張係数を1/10にしたデータを CASE2 とした。

Table. 2 モックアップ3号溶融炉の解析時のパラメータフィッティング用パラメーター一覧

溶融ガラス 物性値	体膨張係数
	粘性係数
	比熱
	熱伝導率
ブレナム部温度	
溶融ガラス初期温度	
炉材部熱伝導率	
タイムステップ	
圧力緩和係数	

3.3 解析対象およびモデルの概要

解析対象は現在核燃料サイクル開発機構・東海事業所において稼働中のTVF炉である。溶融炉、解析モデルの概略図を Fig.6 に示す²⁾。

Table.3 に解析の仕様一覧を示す。

Table. 3 解析仕様一覧

項目	内容	
計算コード	FLOWMEL	
計算領域	ケーシングを最外郭とする3次元領域	
計算内容	溶融ガラス部	非定常熱流動解析および電場解析
	炉材部	定常熱伝導解析

3.4 溶融炉操業条件

CASE1およびCASE2の操業条件データを、Table. 4に示す。

Table. 4 操業条件

項 目		単位	モックアップ3号溶融 炉解析データ ¹⁾	CASE1	CASE2 注2)
ガラス製造量		kg	310.58	286.1	←
ガラス製造速度		kg/h	6.25	7.68	←
廃液供給速度		l/h	13.52	14.10	←
廃棄物含有率		Wt%	25.27	26.2	←
未溶融原料層厚さ		m	0.105	0.105	←
ガラスレベル		mm	126	126	←
主電極間通電	電力値	kW	36.0	38.0	←
	電圧値	V	57.0	65.5	←
	電流値	A	668	543	←
補助電極間通電	電力値	kW	0.40	0.24	←
	電圧値	V	12.0	16.2	←
	電流値	A	26.0	13.0	←
主電極(B)-流下ノズル間	電力値	kW	0	0	←
	電圧値	V	0	0	←
	電流値	A	0	0	←
主電極(A)冷却条件	流量	Nm ³ /h	39.5	39.5 (51.0%)注1)	←
	出口温度	℃	391.0	704.5	←
主電極(B)冷却条件	流量	Nm ³ /h	39.2	39.2 (51.0%)注1)	←
	出口温度	℃	395.0	689	←
主電極冷却条件	入口温度	℃	28	40	←
電極の放熱体積		m ³	0.01365	0.01411	←
オフガス出口温度(T925)		℃	149	154.9	←
炉内雰囲気温度		℃	306	342.0	←
外気温度		℃	22	40	←
メルタリーク量		Nm ³ /h	6.4	6.4	←
原料供給バースに空気を供給する空気流量		Nm ³ /h	15.1	10.0	←

注1) TVFには主電極冷却空気流量を測定する流量計が設置されていない。得られるデータは弁の開閉度(%)のみである。そのため、モックアップ3号溶融炉のデータを流用する。

注2) CASE2のデータの内、CASE1と同じデータについては「←」で表示している。

3.5 境界条件

CASE1およびCASE2の境界条件データを、Table. 5に示す。

なお、この境界条件の算出にあたって使用する算出用データと算出されたデータの一覧を本報告書末尾に添付した⁴⁾⁵⁾。

Table. 5 境界条件一覧

項 目			単位	モックアップ 3号 溶融炉解析 データ ¹⁾	CASE1	CASE2 注 2)
主電極冷却部 除熱量	北側		kW/m ²	389.6	406.77	←
	南側			384.8	386.94	←
未溶融原料層 境界条件	未溶融原料層厚さ		m	0.105	0.105	←
	熱伝導率		W/mK	1.40	1.259	←
	未溶融原料層吸熱量		kW	14.77	16.23	←
プレナム空間 境界条件	空間内雰囲気温度		℃	150	244.85	←
溶融炉外壁面 境界条件	熱伝達率	東面		8.75	6.51	←
		西面		8.54	7.73	←
		南面	W/m ² K	8.86	4.36	←
		北面		8.27	4.59	←
		底面		4.60	3.36	←
		天井面		11.25	7.47	←
流下ノズル孔雰 囲気温度			℃	40	40 注1)	←
外気温度			℃	22	40	←

注1) TVFのデータが無いため、モックアップ 3号溶融炉のデータを流用した。

注2) CASE2のデータの内、CASE1と同じデータについては「←」で表示している。

3.6 熔融炉炉構成材

熔融炉の炉構成材物性値データを、Table. 6に示す

なお、Table. 5の外部材質番号は

「Fig. 1 T V F 炉モデルメッシュおよび炉材構成図 Y-Z断面図（炉中央）」

「Fig. 2 T V F 炉モデルメッシュおよび炉材構成図 X-Z断面図（炉中央）」

の外部材質番号に対応している。

Table. 6 炉構成材物性値

外部 材質 番号	材質	モックアップ3号熔融炉 CASE1, CASE2の 解析データ	
		熱伝導率 [W/mK]	熱伝導率設定 温度 [°C]
1	インコネル690	26.560 注1)	800
2	Monoflax K-3	3.138 注2)	1000
3	Monoflax CS-5	3.837 注2)	800
4	MRT-70K	1.987 注3)	800
5	AZ-GS	3.661 注3)	400
6	DC-N	16.854 注4)	400
7	C-1	0.326 注5)	400
8	LN-135	0.334 注3)	600
9	イビボード30B	0.075 注3)	400
1 0	CA-165	0.870 注6)	100
1 1	SUS 304L	15.607 注7)	100

注1) Hantington Alloys社カタログより

注2) 東芝モノフラックス（株）カタログより

注3) JIS R2618-79, (1979). による測定値

注4) 大阪窯業耐火煉瓦（株）カタログより

注5) 丸越工業（株）カタログより

注6) 品川白煉瓦（株）カタログより

注7) 日本機械学会、非弾性構造解析法実用化研究分会：非弾性構造解析法の実用化に関する研究（Ⅱ），J254 79-02, (1979)

3.7 ガラス物性値

以下にT V F 炉で用いられたガラス・P0797のガラス物性値の設定根拠とその出典を示す。
CASE1およびCASE2のガラス溶融物物性値データを、Table. 7に示す。

3.7.1 粘性係数

粘性係数の決定に当たっては、過去の測定結果⁶⁾⁷⁾を参照した。

$$\mu = \exp \left\{ \frac{1809.878}{T - 509.67} + 0.8658 \right\} \quad - (1)$$

μ : 粘性係数 (Pa·s) T : ガラス温度 (°C)

3.7.2 密度および体膨張係数

部内報告書⁸⁾より引用。

$$\rho = 3290.6 - 0.8T \quad - (2)$$

(700°C ≤ T ≤ 1200°C) ρ : 密度 (kg/m³) T : ガラス温度 (°C)

体膨張係数 β は、

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad - (3)$$

の式より、1050°Cの値として

$$\beta = 3.17 \times 10^{-4} \text{ (1/°C)}$$

を用いている。

3.7.3 熱伝導率

外部資料より⁹⁾

$$\lambda = -10.05 + 3.790 \times 10^{-2} T_k - 4.208 \times 10^{-5} T_k^2 + 1.635 \times 10^{-8} T_k^3 \quad - (4)$$

(700 < T_k < 1250 (K))

λ : 熱伝導率 (W/mK) T_k : 絶対温度 (K)

3.7.4 比熱

部内報告書¹⁰⁾より算出式を求めた。

$$C_p = -0.068T + 1605.8 \quad [\text{J/kgK}] \quad - (5)$$

(600 ≤ T ≤ 1100°C)

3.7.5 電気抵抗率

P0797の比抵抗測定結果¹¹⁾より、近似曲線を算出した。

$$R = \exp \left(\frac{9372.84}{T + 273} - 9.19353 \right) \quad - (6)$$

R : 電気抵抗率 (Ω m) T : 温度 (°C)

Table. 7 ガラス物性値

項目	記号	単位	モックアップ 3号溶融炉解析 データ	CASE1	CASE2 注3)
密度	ρ	kg/m ³	$\rho = 2946 - 0.42 T$ (800°C ≤ T ≤ 1200°C) T: ガラス温度 (°C)	$\rho = 3290.6 - 0.8 T$ (700°C ≤ T ≤ 1200°C) T: ガラス温度 (°C)	←
体膨張係数	β	1/K	1.674×10 ⁻⁴ 注2)	3.17×10 ⁻⁴ 注1)	3.17×10 ⁻⁵
熱伝導率	λ	W/mK	実験式を用いて設定 $\lambda = A + BT + CT^2 + DT^3$ A=-10.05 B=3.79×10 ⁻² C=-4.208×10 ⁻⁵ D=1.635×10 ⁻⁸ T: 絶対温度 (K)	実験式を用いて設定 $\lambda = A + BT + CT^2 + DT^3$ A=-10.05 B=3.79×10 ⁻² C=-4.208×10 ⁻⁵ D=1.635×10 ⁻⁸ T: 絶対温度 (K)	←
比熱	C _p	J/kg. K	1.0770×10 ³ 注2)	C _p =AT+B A=-0.068 B=1605.8 (600 ≤ T ≤ 1100) T: 温度 (°C)	←
電気抵抗率	R	Ωm	R=exp (A/ (T-C) +B) A=3261.63 B=-6.09273 C=-255.273 T: 温度 (°C)	R=exp (A/ (T-C) +B) A=9372.84 B=-9.19353 C=-273 T: 温度 (°C)	←
粘性係数	μ	Pa·s	$\mu = \exp (A/ (T-C) +B)$ A=704.923 B=2.5536 C=668.504 T: 温度 (°C)	$\mu = \exp (A/ (T-C) +B)$ A=1809.878 B=0.8658 C=509.67 T: 温度 (°C)	←

注1) 30～300°Cの平均値を使用

注2) 1050°Cの数値を使用

注3) CASE2のデータの内、CASE1と同じデータについては「←」で表示している。

3.8 計算パラメータ

CASE1、CASE2およびモックアップ3号溶融炉解析の計算パラメータを、Table. 8に示す。

Table. 8 計算パラメータ一覧

項 目			単 位	モックアップ3号溶 融炉解析データ	CASE1 注)	CASE2 注)
最終ステップ数			ステップ	20,000	40,000	←
電 位 計 算	計算回数		サイクル	1	1	←
	反復回数		回	100	100	←
	緩和係数		—	1.7	1.7	←
	収束判定値		—	0.001	0.001	←
流 動 計 算	計算間隔		サイクル	1	1	←
	反復回数	運動方程式	回	5	5	←
		圧力緩和式	回	100	100	←
	緩和係数	運動方程式	—	1.0	1.0	←
		圧力緩和式	—	1.7	1.7	←
	収束判定値	運動方程式	m/sec	5×10^{-5}	5×10^{-5}	←
		圧力緩和式	1/sec	0.002	0.002	←
	タイムステップ		sec	1.0	1.0	←
	計算打ち切りサイクル		サイクル	—	—	←
	浮力の生じない基準温度		℃	1050	1050	←
	計算間隔		サイクル	1	1	←
温 度 計 算	反復回数	内部セル	回	20	20	←
		外部セル	回	100	100	←
	緩和係数	内部セル	—	1.0	1.0	←
		外部セル	—	1.7	1.7	←
	収束判定値	内部セル	℃	0.1	0.1	←
		外部セル	℃	1.0	1.0	←

注) CASE2のデータの内、CASE1と同じデータについては「←」で表示している。

3.9 溶融ガラスの組成

解析対象であるTVF炉のPC92-1キャンペーンにおけるガラス原料はPF798（核燃料サイクル開発機構におけるコード）、模擬廃液はSW-18であり、それぞれの組成をTable. 9, 10に示す。

Table. 9 PF798組成表

(wt%)

酸化物成分	組成比
SiO_2	62.3
B_2O_3	19.0
Al_2O_3	6.7
Li_2O	4.0
CaO	4.0
ZnO	4.0

Table. 10 SW-18 模擬廃液組成表

元素	原子量	濃 度		酸化物	分子量	濃 度		廃棄物中の 各酸化物成分のwt%	ガラス固化 体中のwt% W25%
		mol/l	g/l			mol/l	g/l		
H ⁺	1.008	6.7×10^0	6.754	—	—	—	—	—	—
Na	22.990	2.075×10^0	47.704	Na ₂ O	61.979	1.04×10^0	64.458	41.727	10.43
P	30.974	2.56×10^{-2}	0.793	P ₂ O ₅	141.943	1.28×10^{-2}	1.817	1.176	0.29
Fe #1	55.847	2.21×10^{-1}	12.314	Fe ₂ O ₃	159.691	1.10×10^{-1}	17.606	11.397	2.85
Cr	51.996	4.21×10^{-2}	2.189	Cr ₂ O ₃	151.989	2.11×10^{-2}	3.207	2.076	0.52
Ni #2	58.710	6.80×10^{-2}	3.994	Ni O	74.709	6.80×10^{-2}	5.083	3.291	0.82
K #3	39.090	7.40×10^{-2}	0.289	K ₂ O	94.179	3.70×10^{-2}	0.348	0.225	0.06
Cs	132.905	3.43×10^{-2}	4.559	Cs ₂ O	281.809	1.72×10^{-2}	4.847	3.138	0.78
Sr	87.620	1.76×10^{-2}	1.542	Sr O	103.619	1.76×10^{-2}	1.824	1.181	0.30
Ba	137.340	2.10×10^{-2}	2.884	Ba O	153.339	2.10×10^{-2}	3.220	2.084	0.52
Zr	91.220	7.04×10^{-2}	6.422	Zr O ₂	123.218	7.04×10^{-2}	8.675	5.616	1.40
Mo	95.940	6.04×10^{-2}	5.795	Mo O ₃	143.937	6.04×10^{-2}	8.694	5.628	1.41
Mn #4	54.938	1.56×10^{-2}	0.857	Mn O ₂	86.936	1.56×10^{-2}	1.356	0.878	0.22
Co #5	58.933	1.24×10^{-2}	0.728	Co O	74.932	1.24×10^{-2}	0.926	0.599	0.15
Cd	112.400	9.14×10^{-4}	0.103	Cd O	128.399	9.14×10^{-4}	0.117	0.076	0.02
Sn	118.690	5.84×10^{-4}	0.069	Sn O ₂	150.688	5.84×10^{-4}	0.088	0.057	0.01
Se	78.960	1.30×10^{-3}	0.103	Se O ₂	110.958	1.30×10^{-3}	0.144	0.093	0.02
Te	127.600	6.02×10^{-3}	0.768	Te O ₂	159.598	6.02×10^{-3}	0.961	0.622	0.16
R. E #6	—	—	—	R. E	—		31.104	20.135	5.03
合計				合 計			154.475	99.999	24.994

(*1) Ru 分はFeに含まれる。

(*2) Pd 分はNiに含まれる。

(*3) Rb はKで代用している。

(*4) Tc はMn で代用している。

(*5) Rh 分はCo で代用している。

(*6) Gd, Y, Sb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, およびアクチニドはレア・アース（混合希土硝酸塩）で代用している。

4. 計算結果

(1) 実測値と解析結果の温度比較

炉中心部におけるガラス温度を、TVF炉の実測値と解析値CASE1, CASE2をそれぞれ比較したグラフを Fig. 6 に示す。

また、炉材部6点の測温部を比較した表を Table. 10 に、CASE1、CASE2それぞれの解析値と実測値を比較したグラフを Fig. 7, 8 に示す。

さらに、CASE1、CASE2 の温度コンター図を Fig. 9, 10に示す。

(2) 主測温点における解析温度時系列変化

主測温点の熔融ガラス温度等について CASE1,CASE2 それぞれの時系列温度を示したグラフを Fig.11,12 に示す。

主測定点それぞれの 39,000 ステップと 40,000 ステップ間の温度差の表を Table.11,12 に示す。

ちなみに、CASE1 の 40,000 ステップの解析では、CPU タイムで $217376\text{sec} \approx 60.4\text{hour}$ 、実際の解析では、解析に用いるワークステーションの混み具合にもよるが、通常 CPU タイムの2倍以上の時間がかかる。

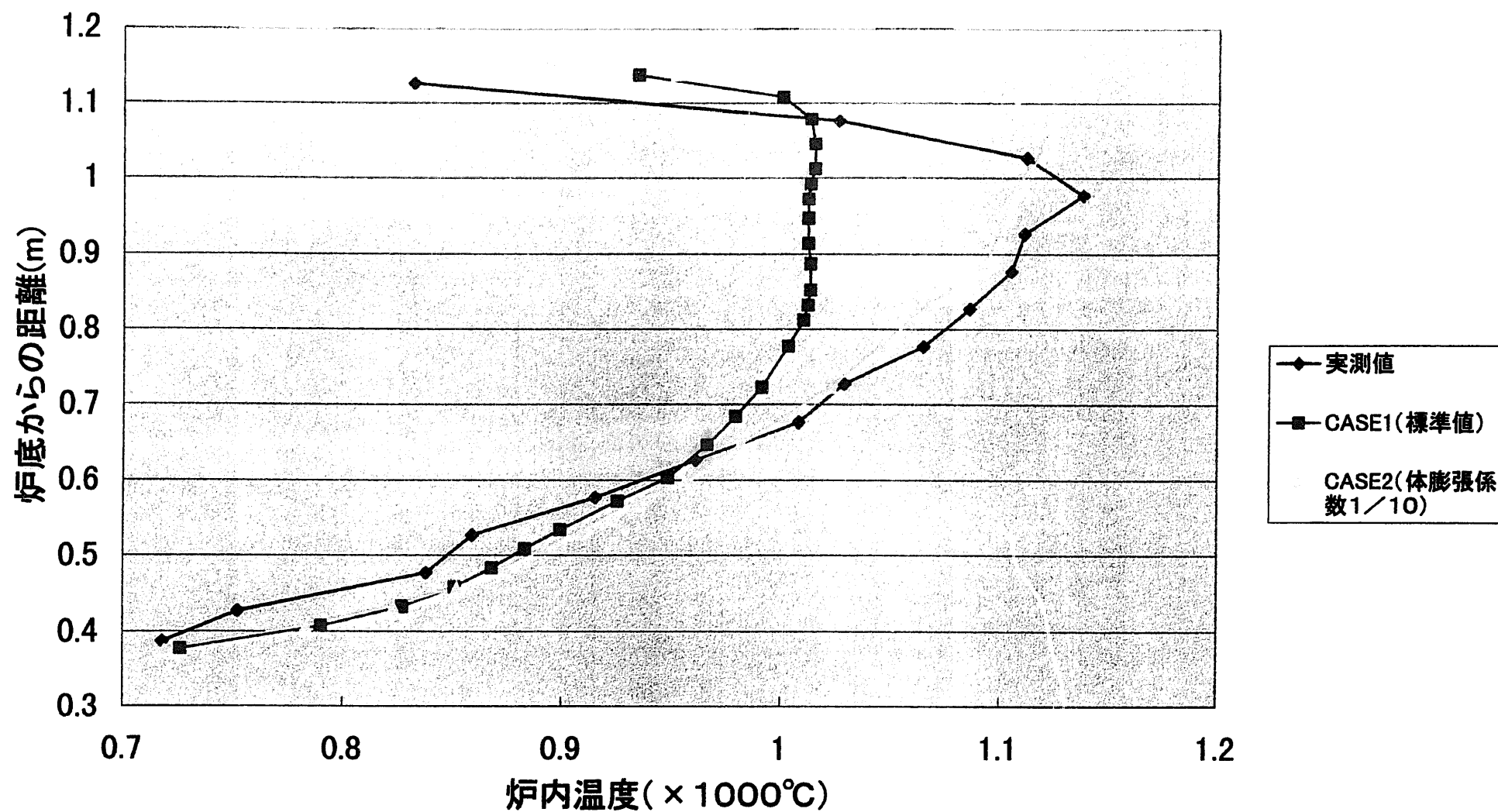


Fig.6 炉中心部における溶融ガラス温度の比較

Table. 11 実測値と解析結果の温度比較

名 称	接点 インデックス	実測値 温度 (°C)	解析値 温度 [°C] CASE1	解析値 温度 [°C] CASE2	実測値 解析値 の差分 [°C] CASE1	実測値 解析値 の差分 [°C] CASE2
主電極(A)メタル温度 (50mm控え)	15, 32, 20 (内部)	836	938	905	102	69
主電極(B)メタル温度 (50mm控え)	15, 2, 20 (内部)	825	937	901	112	76
補助電極(A)メタル温度 (50mm控え)	21, 17, 5 (内部)	812	856.3	854.6	44.3	42.6
補助電極(B)メタル温度 (50mm控え)	9, 17, 5 (内部)	800	853.8	849.7	53.8	49.7
側壁耐火物温度(1) (75mm控え)	8, 28, 33 (外部)	861	883	898	21	37
側壁耐火物温度(2) (150mm控え)	6, 28, 33 (外部)	762	829	836	67	74

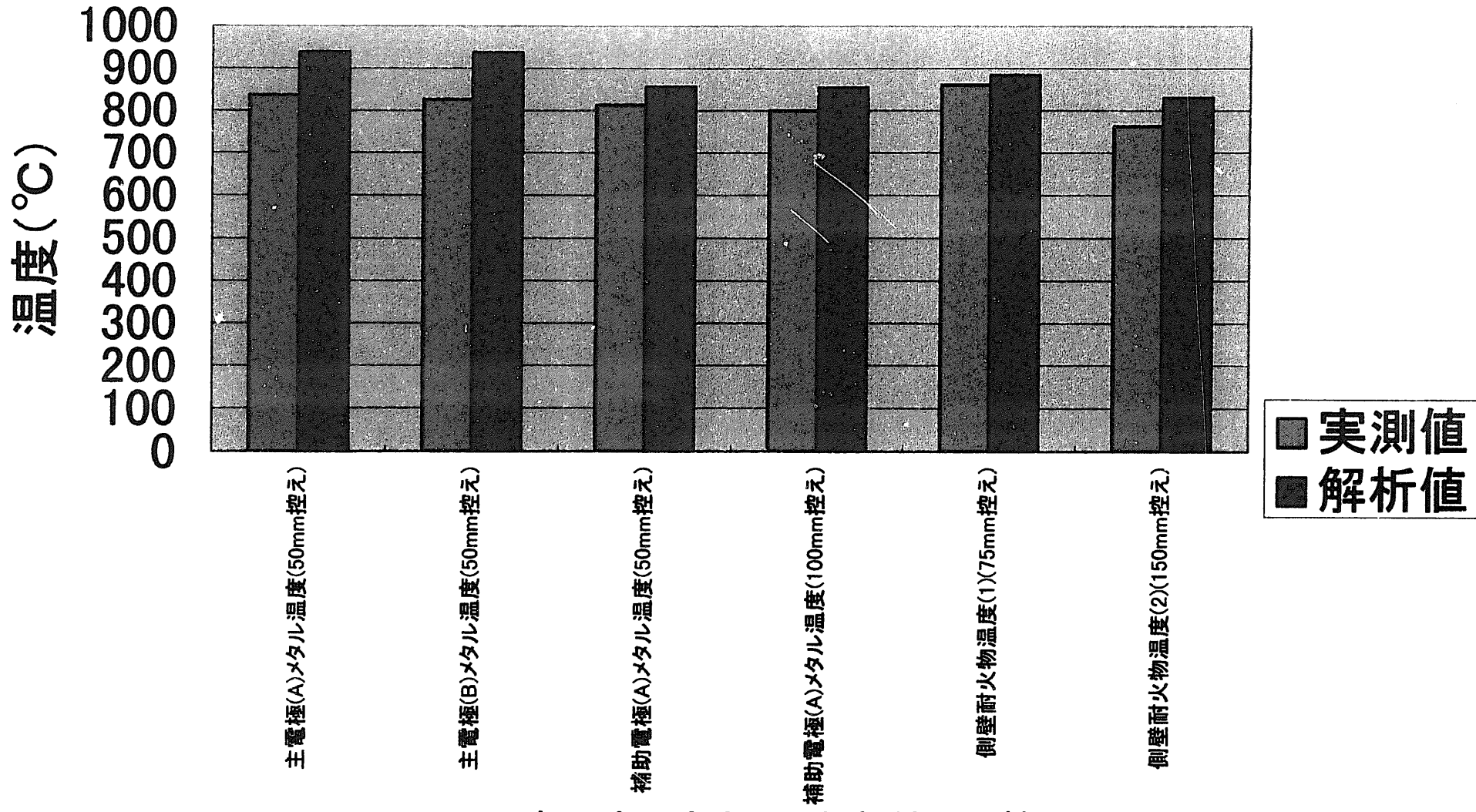


Fig.7 TVF各温度測定点での解析結果比較
CASE1

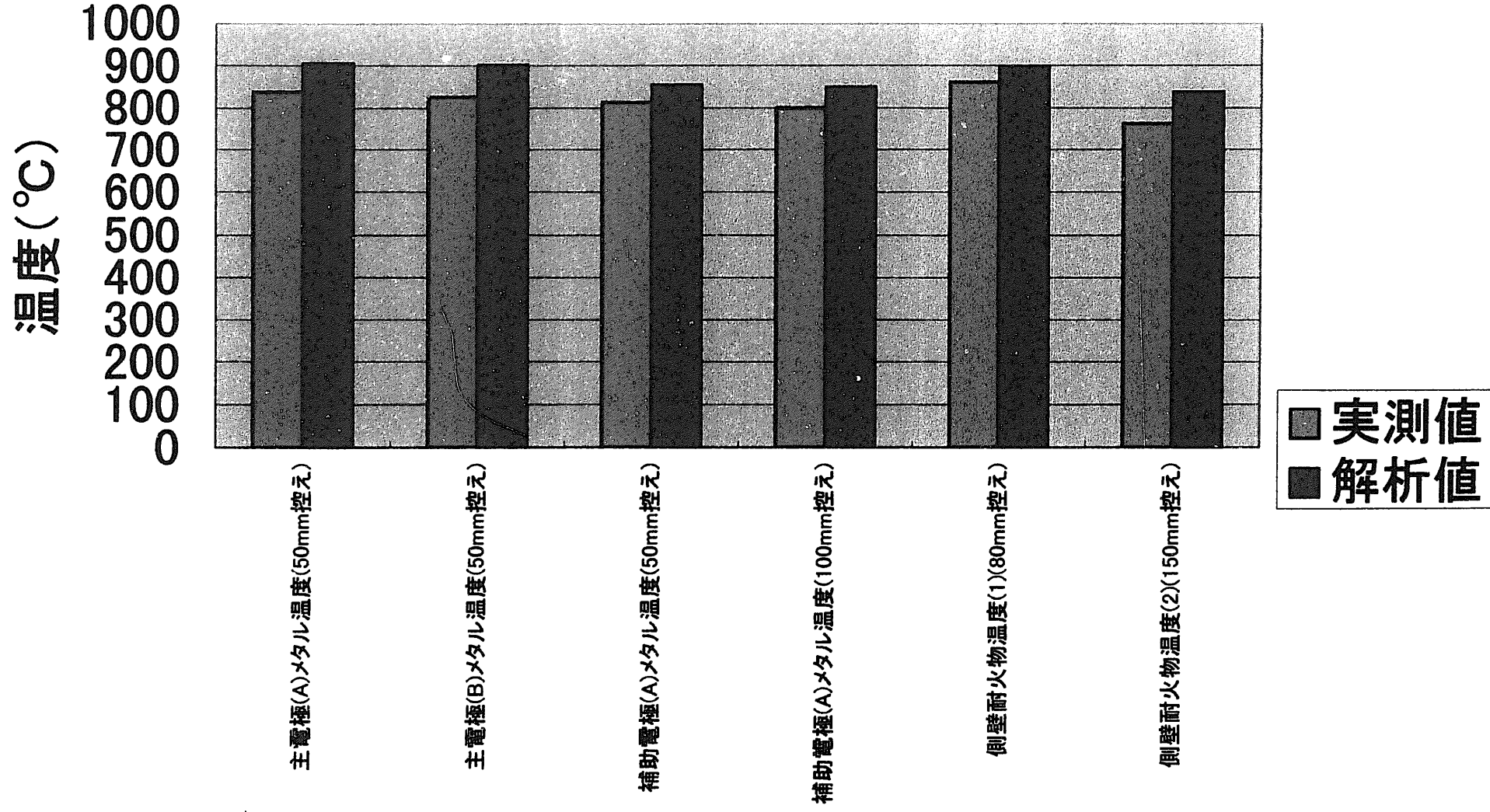


Fig.8 TVF各温度測定点での解析結果比較
CASE2

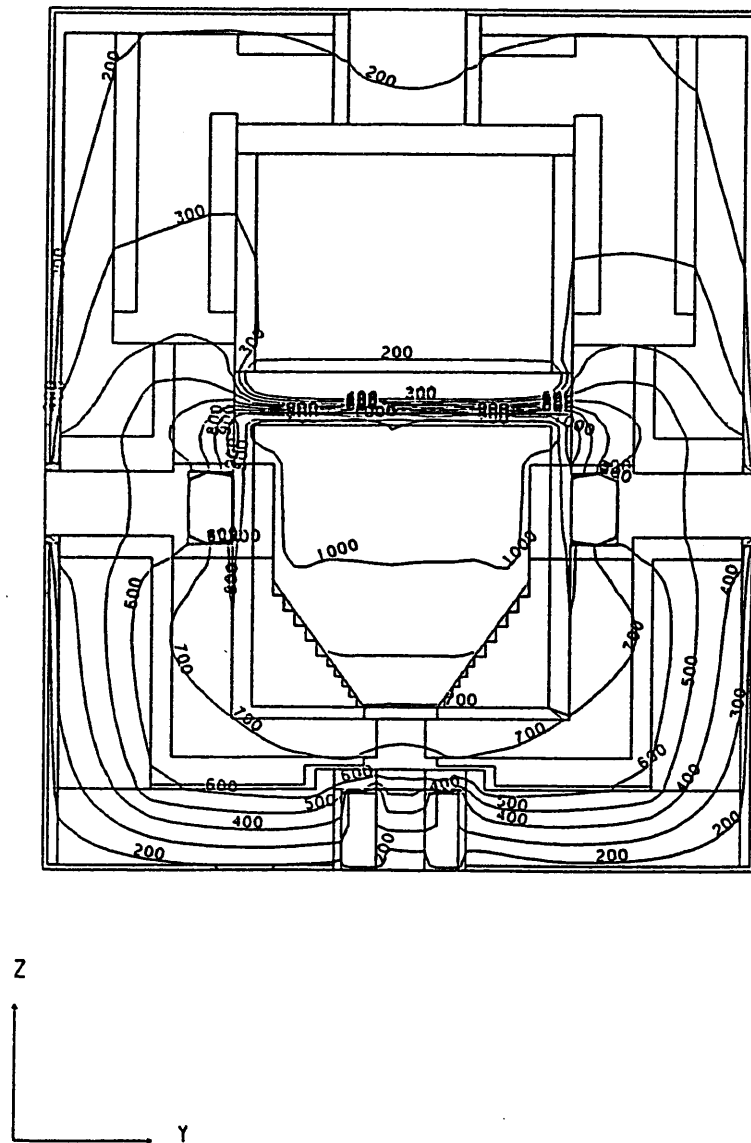


Fig. 9 TVF 炉・コールド試験データ解析(CASE1)の温度コンター図

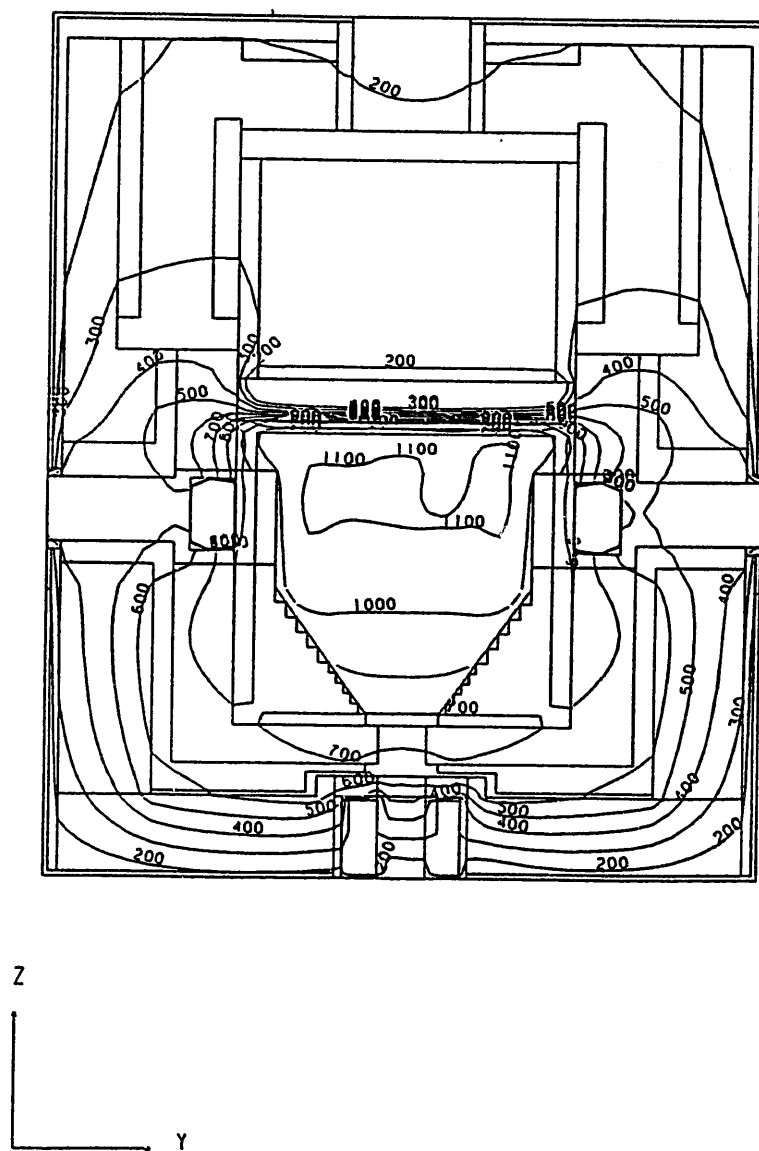


Fig. 10 TVF 炉・コールド試験データ解析 (CASE2) の温度コンター図

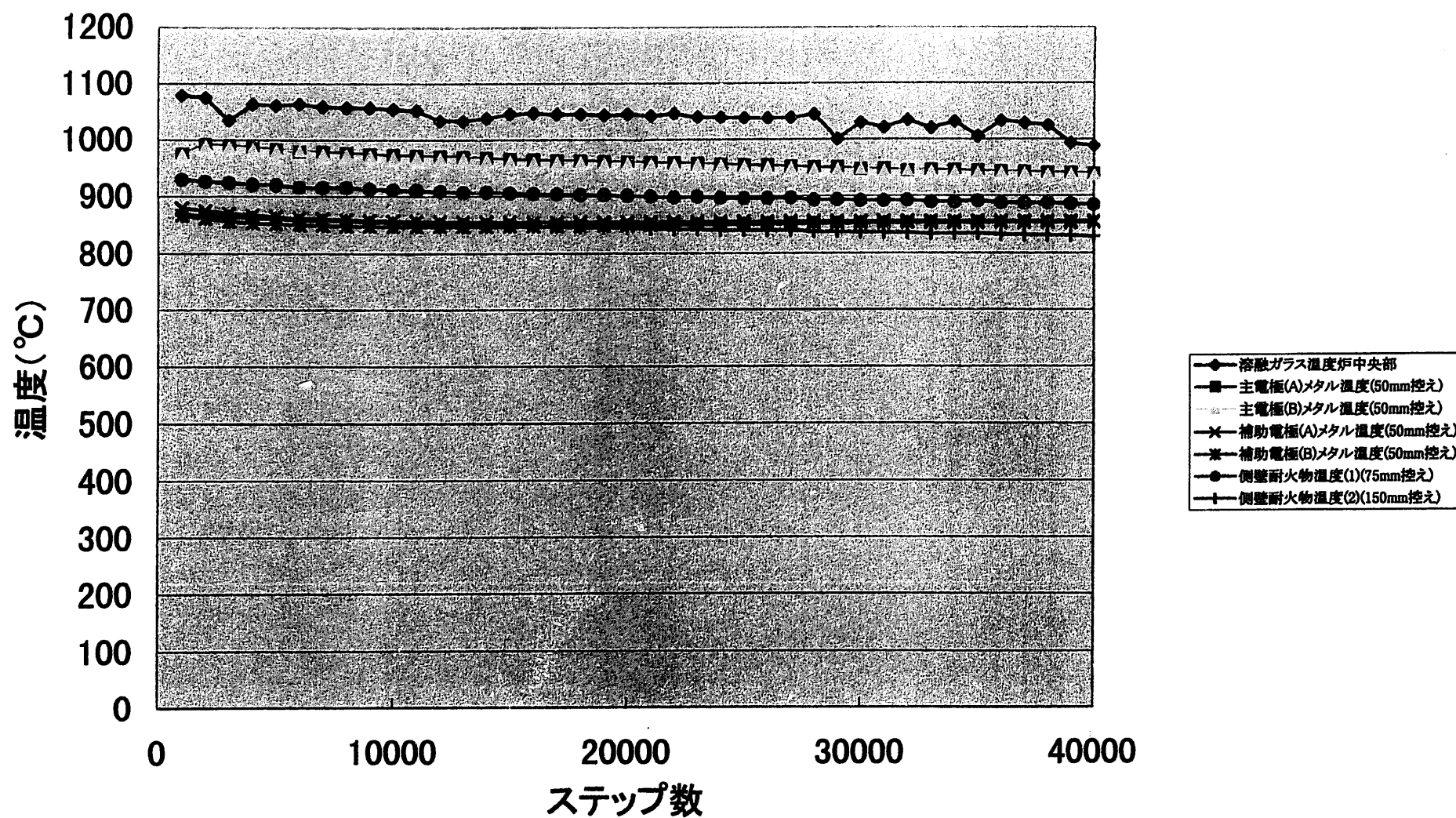


Fig.11 各測温点での解析温度時系列変化グラフ(CASE1)

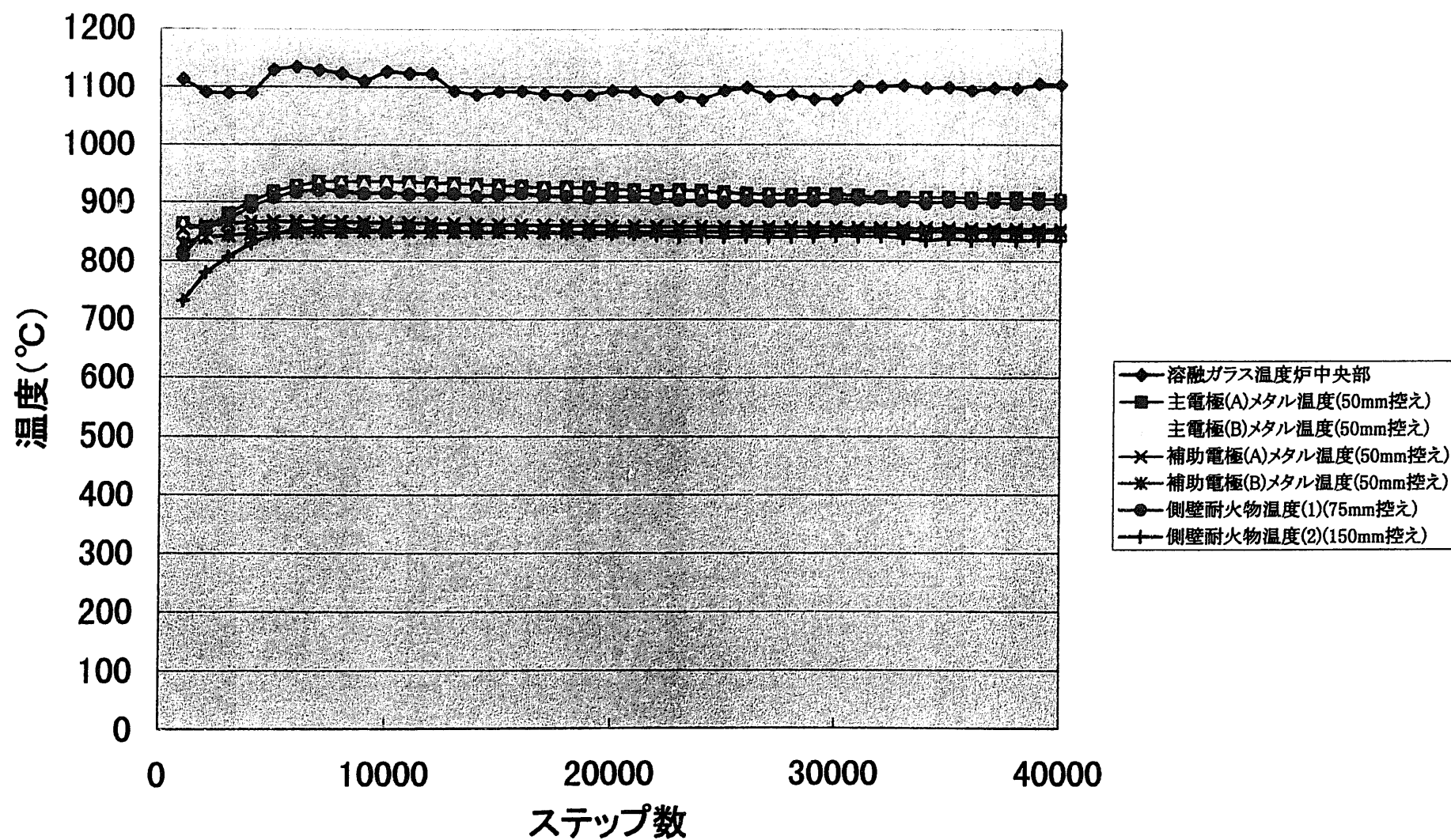


Fig.12 各測温点での解析温度時系列変化グラフ(CASE2)

Table. 12 解析最終ステップにおける温度差の比較(CASE1)

ステップ 数	熔融ガラス 温度炉中央 部(°C)	主電極(A) メタル温度 (50mm控え) (°C)	主電極(B) メタル温度 (50mm控え) (°C)	補助電極 (A)メタル 温度(50mm 控え)(°C)	補助電極 (B)メタル 温度(50mm 控え)(°C)	側壁耐火物 温度 (1)(75mm控 え)(°C)	側壁耐火物 温度 (2)(150mm 控え)(°C)
39000	993.5	939.6	938.8	856.4	853.8	885.6	830.7
40000	988.3	937.9	937	856.3	853.8	883.7	829.1
Δt	-5.2	-1.7	-1.8	-0.1	0	-1.9	-1.6

Table. 13 解析最終ステップにおける温度差の比較(CASE2)

ステップ 数	熔融ガラス 温度炉中央 部(°C)	主電極(A) メタル温度 (50mm控え) (°C)	主電極(B) メタル温度 (50mm控え) (°C)	補助電極 (A)メタル 温度(50mm 控え)(°C)	補助電極 (B)メタル 温度(50mm 控え)(°C)	側壁耐火物 温度 (1)(75mm控 え)(°C)	側壁耐火物 温度 (2)(150mm 控え)(°C)
39000	1105.5	906.9	900.3	854.9	849.9	898.7	836.5
40000	1103.7	905	902.2	854.6	849.7	897.9	835.8
Δt	-1.8	-1.9	1.9	-0.3	-0.2	-0.8	-0.7

5. 考 察

(1) 実測値と解析結果の温度比較

Fig.6 CASE2 に示す様に、体膨張係数を小さくすることによるパラメータフィッティングの効果は顕著であり、実測値に近い温度分布を得られている。体膨張係数が解析結果に影響を与えることは、モックアップ3号溶融炉の解析において既に知られていた事であり、このことからTVF炉を対象とした解析でも、モックアップ3号溶融炉の解析と同様と考えられる。

炉材部の温度は、Fig.7,8 の実測値と解析結果の比較から、特に主電極のメタル温度において、両者には無視できない差がある。この点については、モックアップ3号溶融炉の解析におけるパラメータフィッティングで、熱抵抗を考慮してパラメータを調整し効果を上げた実績があることから、TVF炉の解析においてもその手法を用いることで実測値に近づけることができると考える。

(2) 測温点における時系列温度変化について

モックアップ3号溶融炉／コールド試験データの場合は 20000 ステップで解析値が安定するが、TVF炉／コールド試験データでは 40000 ステップの解析を行ってもまだ若干の温度の動きが見られ、収束しきっていない様子が伺える。これらは、モックアップ3号溶融炉での解析における各パラメータのフィッティング状態をTVF炉の解析でも適用するなど、解析条件を統一した上での検討が必要である。

6. 結 言

TVF炉を解析対象とし、コールド試験データを用いた解析を行った。標準条件で解析を行った結果では、温度分布等について実測値との差は大きい。モックアップ3号熔融炉の解析で行ったように体膨張係数を変えてパラメータフィッティングした結果、実測値に近い値が得られた。このことからTVF炉の解析も、モックアップ3号熔融炉の解析と同様に扱うことで解析精度が向上すると考えられる。しかし、解析値が定常状態に至っていない様子が伺われ、各パラメータのフィッティング等の検討が今後必要である。

参考資料

- 1) PNC技術資料 PNC PN8410 94-219
「ガラス溶融炉3次元熱流動解析技術の開発」
- 2) PNC技術資料 PNC ZN8410 93-174
「ガラス固化技術開発施設(TVF)試験報告(Ⅲ) ガラス溶融炉運転試験(1)」
- 3) HTS室内資料 M-97-6-008
「モックアップ3号メルタ解析モデルの検討③ - メッシュ細分化の影響② -」
- 4) HTS室内資料 M-89-6-021
「モックアップ3号メルタオフガスデータからの炉内雰囲気温度の推定」
- 5) HTS室内資料 M-89-8-014
「ガラス溶融炉熱流動解析コードでのモックアップ3号メルタ解析条件の検討」
- 6) HTS室内資料 G-94-3-074
「粘度測定におけるズリ速度変化の影響把握試験結果」
- 7) HTS室内資料 G-94-3-075
「粘度測定におけるズリ速度変化の影響把握試験結果(追試験)」
- 8) HTS室内資料 G97-3-022
「P0797, P0798ガラスの高温密度測定結果」
- 9) 社外資料
「Sato, Furuya, Thermal conductivity of simulated radioactive
waste glass, etal. Nuclear Technology Vol. 70, 1985」
- 10) HTS技術資料 G-98-3-009
「TVF標準組成ガラスP0797の比熱容量測定結果」
- 11) HTS技術資料 G-96-3-028
「標準ガラスP0797, P0798ガラスの電気抵抗測定(再現性確認)結果」

添付資料 1

解析入力に用いたデータ

PC92-1 キャンペーン 13 バッチ目 ('93. 3. 25 10:00)

測定日	平成4年 9月25日		測定時間	9:16 (13バッチ)	
溶融形態	原料溶融運転		ガラスレベル	積算200kg時	
測定時の溶融炉指条件	主電極間	電圧 E_{VI} 10.1	65.5 V	電流 E_{II} 10.1	543 A
		電力 E_{VIC} 10.1	38.0 kW	抵抗 E_{rI} 10.1	0.15 Ω
	炉底補助電極	電圧 E_{VI} 10.2	16.2 V	電流 E_{IIC} 10.2	13.0 A
		電力 E_{VI} 10.2	0.24 kW	抵抗 E_{rI} 10.2	1.25 Ω
	主電極(A) -コモン ブローブ間	電圧 E_{VI} 10.5	67.0 V	電流 E_{IIC} 10.5	25.0 A
		力 E_{VI} 10.5	2.04 kW	抵抗 E_{rI} 10.5	2.68 Ω
	主電極(B) -流下ノズル間	電圧 E_{VI} 10.1	. V	電流 E_{IIC} 10.1	. A
		力 E_{VI} 10.1	. kW	抵抗 E_{rI} 10.1	. Ω
	炉内雰囲気温度			T_{IR} 10.23	342 $^{\circ}\text{C}$
	側壁耐火物温度 (75mm控え)			T_{IR} 10.24	861 $^{\circ}\text{C}$
	側壁耐火物温度 (150mm控え)			T_{IR} 10.25	762 $^{\circ}\text{C}$
	主電極(A)メタル温度(50mm控え)			T_{IRA} 10.1	836 $^{\circ}\text{C}$
	主電極(B)メタル温度(50mm控え)			T_{IRA} 10.3	825 $^{\circ}\text{C}$
	炉底補助電極(A)メタル温度(50mm控え)			T_{IRA} 10.5	812 $^{\circ}\text{C}$
	炉底補助電極(B)メタル温度(50mm控え)			T_{IRA} 10.7	800 $^{\circ}\text{C}$
	流下ノズル取り付け部上部温度			T_I 10.11	630 $^{\circ}\text{C}$

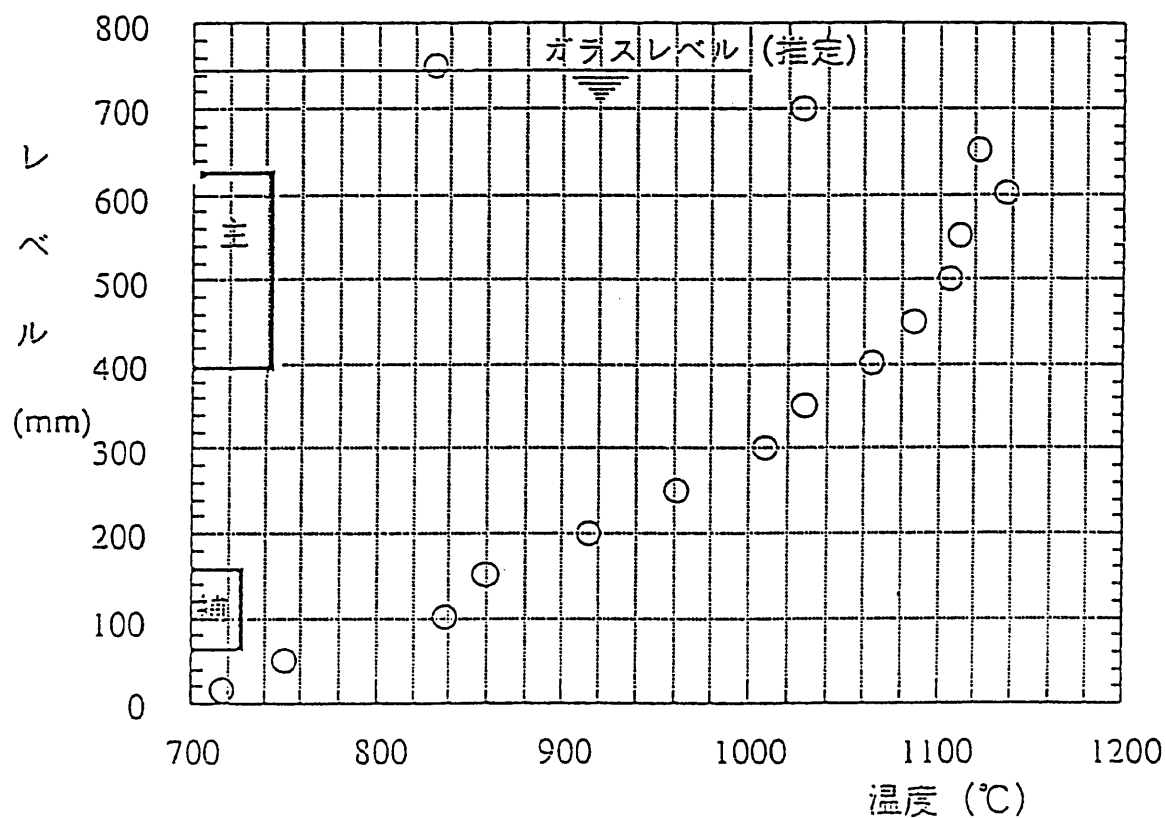


図-4.15 温度分布測定結果 (13バッチ)

添付資料 2

境界条件算出時の各データ一覧 および 算出データ一覧

境界条件算出時のデータ一覧

(1) 炉内雰囲気温度の推定

名称	記号	単位	値	備考
水スプレーパーcentage流量	Fs	Nm ³ /hr	1.5	
原料供給/スプレーpercentage	Ff	Nm ³ /hr	10	
メルタリーク量	F1	Nm ³ /hr	6.4	
廃液供給速度	Fw	Nm ³ /hr	14.1	
プレナム壁炉内雰囲気温度	Tp	°C	342	
Tpの乾き空気定圧比熱	Cp1	kJ/kg・°C	1.055	
Tpの飽和水蒸気定圧比熱	Cp2	kJ/kg・°C	1.931	
オフガス配管の表面積	A	m ²	1.65	
オフガス配管の表面温度	Ts	°C	170	MU3データ
外気温度	T∞	°C	40	
オフガス出口温度	T925	°C	154.9	
(Tw+T∞)/2の空気熱伝達率	λ	kcal/m ² ・hr・°C	0.02726	
(Tw+T∞)/2の動粘性係数	ν	m ² /s	2.30E-05	
重力加速度	g	m/s ²	9.8	
オフガス配管の直径	d	m	0.0891	
体膨張係数	β	1/K	0.002646	
空気のプラントル数	Pr		0.71	
T925の乾き空気定圧比熱	Cp3	kJ/kg・°C	1.018	
T925の飽和水蒸気定圧比熱	Cp4	kJ/kg・°C	2.37	
エアフィルムクーラーエア流量	Fa	Nm ³ /hr	40	
エアフィルムクーラーエア温度	Ta	°C	250	MU3データ
Taの乾き空気定圧比熱	Cp5	kJ/kg・°C	1.036	
SUS304の輻射率	ε		0.3	
ボルツマン定数	σ	kcal/m ² ・hr・K ⁴	4.88E-08	

(2) 主電極放熱量

名称	記号	単位	値	備考
主電極A空気の平均定圧比熱	Cpa	KJ/kg・K	1.033	T=508K時
主電極A空気の平均定圧比熱	Cpb	KJ/kg・K	1.031	T=501K時
主電極A冷却空気流量	Fa	Nm ³ /hr	39.5	MU3データ
主電極B冷却空気流量	Fb	Nm ³ /hr	39.2	MU3データ
空気のモル重量	m	kg/kmol	28.98	
冷却空気入口温度	Ti	K	313	
主電極A冷却空気出口温度	Toa	K	704.5	
主電極B冷却空気出口温度	Tob	K	689	
電極1本あたりの放熱体積	V	m ³	0.014113	
気体のモル体積	Vm	m ³ /kmol	22.4	

(3) ガラス表面伝熱量

名称	記号	単位	値	備考
原料溶融層の厚み	L	m	0.105	
炉内雰囲気温度	Tp	K	517.8492	
炉内雰囲気温度	Tp	℃	244.8492	
廃液の硝酸濃度	nn	mol/l	5	濃縮後
ガラス化に必要な単位重量あたりの熱量	qg	kJ/kg	3060	
ガラス原料の供給速度	Fg	kg/hr	5.76	
廃液中の酸化物成分の供給速度	Fw	kg/hr	1.77942	
廃液供給速度	Fwl	l/hr	14.1	
水スプレーノズル流量	Fs	Nm ³ /hr	1.5	
原料供給ノズル流量	Ff	Nm ³ /hr	10	
メルタリーク量	F1	Nm ³ /hr	6.4	MU3データ
供給廃液中の硝酸の量	Fn	mol/hr	0.0705	
メルタ入り口での水のエンタルピー	hin	kJ/kg	167.452	T=40℃
水100℃のエンタルピー	hout	kJ/kg	419.06	
水蒸気100℃のエンタルピー	h'	kJ/kg	2675.9	T=100℃

水蒸気の平均定圧比熱	Cps	kJ/kg・K	1.931	T=342℃
空気の平均定圧比熱	Cpa	kJ/kg・K	1.055	T=342℃
室温（外気温度）	Tr	K	313	
ガラス原料仮焼面の温度	Tsuf	K	473	MU3データ/推測値
溶融ガラス表面温度	Tm	K	1273	MU3データ/経験値
プレナム壁温度	Tw	K	615	
溶融ガラスの輻射率	ε_g		0.9	T=1000℃ 溶融ガラス厚さ ∞
プレナム壁の輻射率	ε_w		0.75	
ボルツマン定数	σ	W/m ² ・K ⁴	5.67E-08	
溶融表面積	Λ	m ²	0.664	
プレナム壁面1の面積	Λ_1	m ²	0.664	
プレナム壁側面2の面積	Λ_2	m ²	0.5008	
プレナム壁側面3の面積	Λ_3	m ²	0.51958	
各面における形状係数	R1(1)		0.165	
	R1(2)		0.185	
	R1(3)		0.198	
	R2(1)		0.16	
	R2(2)		0.19	
	R2(3)		0.2	
ガラス製造速度	F	kg/hr	7.68	
廃液酸化物濃度	no	kg/l	0.1262	

(4) プレナム壁面熱伝達率

名称	記号	単位	値	備考
動粘性係数	ν	m ² /s	5.70689E-05	
動粘性係数 (水蒸気)		mm ² /s	61.7	T=342℃
動粘性係数 (乾き空気)		mm ² /s	54.62	T=342℃
熱伝導率	λ	W/m・K	0.047626377	
熱伝導率 (水蒸気)		mW/m・K	49	
熱伝導率 (乾き空気)		mW/m・K	46.9	
プラントル数	Pr		0.787442512	
プラントル数 (水蒸気)			0.932	T=342℃
プラントル数 (乾き空気)			0.711	T=342℃
飽和水蒸気の実数	X	kmol	0.716	
乾き空気の実数	Y	kmol	1.354	
重力加速度	g	m/s ²	9.8	
プレナム壁と雰囲気温度の温度差	ΔT	K	97.15076087	
体膨張係数	β		0.002325989	
A1面代表長さ	l1	m	0.815	
A2面代表長さ	l2	m	0.713	
A3面代表長さ	l3	m	0.728	

(5) 溶融炉外壁面熱伝達率

名称	記号	単位	値	備考
輻射率(SUS304)	ε		0.135	
ケーシング表面温度	$twx-z$	K	343.3	MU3データ
	$twy-z$	K	334.7	MU3データ
	$twtop$	K	330	MU3データ
	$twbtm$	K	365.1	MU3データ
空気の平均温度	$Tavex-z$	K	328.15	
	$Tavey-z$	K	323.85	
	$Tavetop$	K	321.5	
	$Tavebtm$	K	339.05	
空気の動粘性係数	$\nu x-z$	m ² /s	0.00001787	
	$\nu y-z$	m ² /s	0.00001796	
	νtop	m ² /s	0.00001786	
	νbtm	m ² /s	0.00001989	
空気の熱伝導率	$\lambda x-z$	W/m・K	0.02787	
	$\lambda y-z$	W/m・K	0.02766	
	λtop	W/m・K	0.02723	
	λbtm	W/m・K	0.02907	
代表長さ	$lx-z$	m	1.975	
	$ly-z$	m	1.99	
	$ltop$	m	1.855	
	$lbtm$	m	1.855	
プラントル数(乾き空気)	Pr		0.71	
体膨張係数(雰囲気温度)	β	1/K	0.003194888	
取り付け長さ	$Lx-z$	m	1.84	
	$Ly-z$	m	1.87	
	$Ltop$	m	1.87	
	$Lbtm$	m	1.87	
フィンの厚さ	$bx-z$	m	0.025	
	$by-z$	m	0.025	
	$btop$	m	0.018	
	$bbtm$	m	0.025	
フィンの枚数	$Nx-z$	m	10	

	Ny-z	m	10	
	Ntop	m	12	
	Nbtm	m	10	
フィン熱伝導率 (SUS304)	λf	W/mK	16	
フィン熱伝導率 (SUS304)	λf	Kcal/mh °C	13.8	
フィン高さ	H	m	0.078	
フィン効率	$\phi x-z$		0.964403547	
	$\phi y-z$		0.259945298	
	ϕtop		0.639629086	
	ϕbtm		0.528615758	
輻射率(SUS304)	ϵ		0.135	

(6) 流下ノズル部熱伝達率

名称	記号	単位	値	備考
輻射率(SUS304)	ε		0.135	
ノズル孔部雰囲気温度	Th	K	313	MU3データ/ 経験値
N面代表長さ	ln	m	0.285	
N1面代表長さ	l1	m	0.145	
N2面代表長さ	l2	m	0.347	
N表面温度	Tn	K	973	MU3データ
N1表面温度	T1	K	923	MU3データ
N2表面温度	T2	K	623	MU3データ
N輻射率	ε_n		0.15	
N1輻射率	ε_1		0.75	
N2輻射率	ε_2		0.75	
N動粘性係数(乾き空気)	ν_n	m ² /s	0.00005884	
N1動粘性係数(乾き空気)	ν_1	m ² /s	0.00005507	
N2動粘性係数(乾き空気)	ν_2	m ² /s	0.00003451	
N熱伝導率(乾き空気)	λ_n	W/m・K	0.048	
N1熱伝導率(乾き空気)	λ_1	W/m・K	0.0466	
N2熱伝導率(乾き空気)	λ_2	W/m・K	0.03748	
Nプラントル数(乾き空気)	Prn		0.713	
N1プラントル数(乾き空気)	Pr1		0.711	
N2プラントル数(乾き空気)	Pr2		0.71	
体膨張係数	β_n	1/K	0.00155521	
体膨張係数	β_1	1/K	0.00161812	
体膨張係数	β_2	1/K	0.00213675	
重力加速度	g	m/s ²	9.8	
各面における形状係数	FN1		0.13	
	FN2		0.445	
	F12		0.37	
	F1N		0.26	
	F2N		0.12	
	F21		0.16	

算出データ一覧

(1) 炉内雰囲気温度の推定

名称	記号	単位	値	MU3データ	備考
炉内雰囲気温度 (推測値)	Tp	°C	244. 8492	150	
A点熱量	QA	kJ/hr	17673. 12		
乾き空気が同伴する熱量	QAD	kJ/hr	8361. 45		
飽和水蒸気が同伴する熱量	QAS	kJ/hr	9311. 668		
オフガス配管からの放熱量	Qc	kJ/hr	9068. 704		
熱伝達率(calorie)	α	kcal/m ² · hr·°C	10. 11443		
熱伝達率(joule)	α_j	kJ/m ² · hr·°C	42. 27834		
水平円柱の自然対流熱伝達率	α_c	kcal/m ² · hr·°C	6. 858077		
輻射による熱伝達率	α_r	kcal/m ² · hr·°C	3. 256358		
水平円柱のヌセルト数	Nudm		22. 4158		
水平円柱のグラスホフ数	Grd		4. 51E+06		
B点熱量	Qb	kJ/hr	16996. 6		
乾き空気が同伴する熱量	Qbd	kJ/hr	11820. 3		
飽和水蒸気が同伴する熱量	Qbs	kJ/hr	5176. 29		
エアフィルムクーラーエアが同伴する熱量	Qa	kJ/hr	13412. 5		

(2) 主電極放熱量

名称	記号	単位	値	MU3データ	備考
北側主電極放熱量	Qn	W/m ³	406.7652	415	
南側主電極放熱量	Qs	W/m ³	386.9432	388	

(3) ガラス表面伝熱量

名称	記号	単位	値	MU3データ	備考
原料溶融層の見かけの熱伝達率	Ks	W/m・K	1.258731	1.4	
溶融表面伝熱量	Qsuf	kW	22.243	26.05	
原料溶融層での吸熱量	Qa	kW	16.23325	17.38	
溶融表面からの放熱量	Qb	kW	6.01098	8.67	
原料溶融熱量	Q1	kW	6.408502	8.16	
水分昇温熱量	Q2	kW	0.985464	1.13	
水分蒸発熱量	Q3	kW	8.839283	8.09	
水蒸気の持ち出し熱量	Q4	kW	1.095506	1.84	
乾燥空気の持ち出し熱量	Q5	kW	1.512883	3.79	
溶融ガラス表面からの輻射損失熱量	Q6	kW	3.402591	3.04	
溶融ガラス表面から	Qr1(1)	kW	1.387989	1.343	
プレナム壁への輻射熱量	Qr1(2)	kW	1.55623	1.492	
	Qr1(3)	kW	1.665586	1.411	
	Qr2(1)	kW	0.420082	0.776	
	Qr2(2)	kW	0.376239	0.857	
	Qr2(3)	kW	0.410893	0.812	

(4) プレナム壁面熱伝達率

名称	記号	単位	値	MU3データ	備考
プレナム壁面放熱量	$\alpha A(1)$	W/m $\cdot$ K	-12.95	-13.91	
	$\alpha A(2)$	W/m $\cdot$ K	-21.29	-14.16	
	$\alpha A(3)$	W/m $\cdot$ K	-21.88	-13.61	
A1面から溶融表面への輻射電熱量	QB(1)	W	420.08	776	
A2面から溶融表面への輻射電熱量	QB(2)	W	376.24	857	
A3面から溶融表面への輻射電熱量	QB(3)	W	410.89	812	
A1面からプレナム部への自然対流による電熱量	QC(1)	W	132.80		
A2面からプレナム部への自然対流による電熱量	QC(2)	W	144.12		
A3面からプレナム部への自然対流による電熱量	QC(3)	W	150.15		
溶融表面からA1面への輻射電熱量	QR(1)	W	1387.99	1343	
溶融表面からA2面への輻射電熱量	QR(2)	W	1556.23	1492	
溶融表面からA3面への輻射電熱量	QR(3)	W	1665.59	1411	
A1面からプレナム部への自然対流熱伝達率	$\alpha 1$	W/m $\cdot$ K	2.0587	1.63	
A2面からプレナム部への自然対流熱伝達率	$\alpha 2$	W/m $\cdot$ K	2.9623	2.05	
A3面からプレナム部への自然対流熱伝達率	$\alpha 3$	W/m $\cdot$ K	2.9747	2.05	
ヌセルト数	Nu1		35.2295		
	Nu2		44.3480		
	Nu3		45.4699		
グラスホフ数	Gr1		3.68×10^8	1.21×10^8	
	Gr2		2.46×10^8	1.34×10^8	
	Gr3		2.62×10^8	1.31×10^8	

(5) 溶融炉外壁面熱伝達率

名称	記号	単位	値	MU3データ	備考
実効熱伝達率	α_{1x-z}	W/m $\cdot$ K	7.7317	8.39	
	α_{1y-z}	W/m $\cdot$ K	4.5920	8.55	
	α_2	W/m $\cdot$ K	7.4668	9.7	
	α_3	W/m $\cdot$ K	3.3559	4.67	
平均熱伝達率 (補正後)	α_{0x-z}	W/m $\cdot$ K	6.6477	7.42	
	α_{0y-z}	W/m $\cdot$ K	3.5511	7.61	
	α_{0top}	W/m $\cdot$ K	6.4488	8.81	
	α_{0btm}	W/m $\cdot$ K	2.1557	3.524	
輻射による熱伝達率	α_{radx-z}	W/m $\cdot$ K	1.0840	0.969	
	α_{rady-z}	W/m $\cdot$ K	1.0409	0.941	
	α_{radtop}	W/m $\cdot$ K	1.0180	0.887	
	α_{radbtm}	W/m $\cdot$ K	1.2002	1.144	
輻射能	ε_{x-z}		32.846		
	ε_{y-z}		22.588		
	ε_{top}		17.306		
	ε_{btm}		62.530		
平均熱伝達率	α_{mx-z}	W/m $\cdot$ K	3.6670	3.941	
	α_{my-z}	W/m $\cdot$ K	3.1765	3.713	
	α_{mtop}	W/m $\cdot$ K	4.0338	7.61	
	α_{mbtm}	W/m $\cdot$ K	1.5644	1.700	
ヌセルト数	N_{ux-z}		259.86		
	N_{uy-z}		228.53		
	N_{utop}		274.80		
	N_{ubtm}		99.827		
グラスホフ数	Gr_{x-z}		2.289×10^{10}	2.641×10^{10}	
	Gr_{y-z}		1.660×10^{10}	2.427×10^{10}	
	Gr_{top}		1.065×10^{10}	1.099×10^{10}	
	Gr_{btm}		2.632×10^{10}	2.712×10^{10}	

(6) 流下ノズル部熱伝達率

名称	記号	単位	値	MU3データ	備考
実効熱伝達率	α_{N1}	W/m $\cdot$ K	18.172	13.46	
	α_{N2}	W/m $\cdot$ K	-3.09002	7.65	
	α_{N3}	W/m $\cdot$ K	-5.36332	-14.05	
平均熱伝達率	α_{mn}	W/m $\cdot$ K	6.34032	6.22	
	α_{m1}	W/m $\cdot$ K	4.4495	4.45	
	α_{m2}	W/m $\cdot$ K	5.5069	5.97	
輻射による熱伝達率	$\alpha_{\text{rad}(N, 1)}$	W/m $\cdot$ K	3.7699	2.17	
	$\alpha_{\text{rad}(N, 2)}$	W/m $\cdot$ K	8.0616	5.07	
	$\alpha_{\text{rad}(1, N)}$	W/m $\cdot$ K	-37.697	-9.30	
輻射による熱伝達率	$\alpha_{\text{rad}(1, 2)}$	W/m $\cdot$ K	30.159	12.50	
	$\alpha_{\text{rad}(2, N)}$	W/m $\cdot$ K	-10.870	-12.68	
	$\alpha_{\text{rad}(2, 1)}$	W/m $\cdot$ K	-0.0006001	-7.34	
ヌセルト数	Nun		37.646		
	Nu1		13.8450		
	Nu2		50.984		
グラスホフ数	Grn		6.7257*10 ⁷	8.249*10 ⁷	
	Gr1		0.9724*10 ⁷	0.9731*10 ⁷	
	Gr2		22.774*10 ⁷	8.729*10 ⁷	