

TVF ガラス溶解炉の炉抵抗予測に関する数値解析

(研究報告)

2004年9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49

核燃料サイクル機構

技術展開部 技術協力課

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

© 核燃料サイクル機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2004

TVF ガラス溶融炉の炉抵抗予測に関する数値解析

(研究報告)

河村拓己^{*1}, 塚 公明^{*2}

要 旨

東海再処理工場の TVF ガラス溶融炉について、白金族元素の堆積検知及び除去を実施する観点から、炉抵抗の測定値などから白金族元素の堆積状況や電流密度分布について推定する手法構築が重要となっている。そのため、本研究では電磁界解析コード MAGNA-FIM による電場解析を実施し、白金族元素の堆積状況及びガラス温度が炉の抵抗に及ぼす影響特性について評価した。また、TVF 1 号溶融炉の運転履歴を解析することにより、炉抵抗と白金族元素の堆積状況の推移について評価する手法を検討した。

その結果、堆積物と電極の接触がない場合、堆積物の白金族元素濃度及び体積は、炉抵抗に顕著な影響を及ぼさないが、堆積物と電極が接触することにより炉抵抗を大きく低下させることわかった。また、接触がない場合、炉底部の堆積物温度は炉抵抗に大きな影響を及ぼさないが、炉上部のガラス温度は接触の有無にかかわらず炉抵抗に対して感度を有することがわかった。これらの評価に基づき、TVF 1 号溶融炉の炉抵抗低下の経緯を予測する解析モデルを構築した。運転データの電極間電圧及び炉内温度を入力とするとともに、堆積物は運転バッチごとに徐々に堆積したと推定し、白金族元素の堆積濃度は、直線的に増加すると仮定した。その結果、炉抵抗の推移を概ね再現することができた。これにより、ガラス溶融炉の抵抗値評価による堆積状況推定について見通しを得ることができた。

*1 株式会社 NESI

*2 大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究 Gr.

Numerical Analysis of Historical Change of the Electric Resistance in the TVF Glass Melter

(Research document)

Takumi KAWAMURA^{*1} , Takaaki SAKAI^{*2}

Abstract

Concerning to the TVF glass melter in the Tokai reprocessing center, it is being planned to detect the deposition of the noble metals in a glass melter and remove them periodically to extend the melter lifetime. Numerical analysis has been performed for the electric resistance evaluation in order to estimate the sedimentation situation and current density distribution from the melter resistance. Electric field analysis was carried out by using MAGNA-FIM code and the influence factors to melter resistance was evaluated concerning to the sedimentation situation and glass temperature. In addition, transitions of the sedimentation and melter resistance were estimated from the operation history of the TVF-1 melter. As a result, the followings were obtained.

From the evaluation of the influence factors to melter resistance, it turns out that the volume and the noble metals concentration of a sediment influence notably to melter resistance when the sediment contacts to electrodes. The sediment temperature at the melter bottom has small sensitivity in case of the non-contact situation. The glass temperature in the melter upper part, however, has big sensitivity in melter resistance irrespective of the existence of contact.

Based on the above sensitivity evaluation, numerical analysis was carried out supposing the sedimentation process which suits to a melter resistance fall during the operation history of the TVF-1 melter. As input conditions, the voltage between electrodes and the temperature in the melter were referred from the operation history data. It was assumed that the noble metals concentration in a sediment increased constantly for every operation batch. As a result, the characteristics of melter resistance history was reproduced successfully in general. Thereby, it became prospective to predict the sedimentation situation by using the new resistance analysis model for the glass melter.

* 1 NESI Inc.

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

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 . 直方体モデルによる炉抵抗の感度解析 | 3 |
| 2.1 解析手法 | 3 |
| 2.1.1 概要 | 3 |
| 2.1.2 解析モデル | 3 |
| 2.1.3 白金族元素を含有したガラスの電気伝導度 | 3 |
| 2.2 堆積物中白金族元素濃度の影響評価 | 7 |
| 2.2.1 概要 | 7 |
| 2.2.2 解析条件 | 7 |
| 2.2.3 解析結果 | 7 |
| 2.3 堆積物と電極の接触面積の影響評価 | 13 |
| 2.3.1 概要 | 13 |
| 2.3.2 解析条件 | 13 |
| 2.3.3 解析結果 | 13 |
| 2.4 堆積量の影響評価 | 19 |
| 2.4.1 概要 | 19 |
| 2.4.2 解析条件 | 19 |
| 2.4.3 解析結果 | 19 |
| 2.5 ガラス及び堆積物の温度の影響評価 | 23 |
| 2.5.1 概要 | 23 |
| 2.5.2 解析条件 | 23 |
| 2.5.3 解析結果 | 23 |
| 2.6 まとめ | 27 |
| 3 . TVF 1号熔融炉運転履歴の炉抵抗値と堆積状況に関する評価 | 29 |
| 3.1 概要 | 29 |
| 3.2 解析条件 | 29 |
| 3.3 解析結果 | 29 |
| 4 . 結言 | 33 |

図リスト

2 . 直方体モデルによる炉抵抗の感度解析

2.1 概要

| | |
|------------------|---|
| Fig.2.1.1 直方体モデル | 5 |
|------------------|---|

2.2 堆積物中白金族元素濃度

| | |
|------------------------------------|----|
| Fig.2.2.1 解析モデル | 9 |
| Fig.2.2.2 炉抵抗の白金族元素濃度依存性（炉内一様濃度条件） | 10 |
| Fig.2.2.3 炉抵抗の白金族元素濃度依存性（堆積物中濃度） | 10 |
| Fig.2.2.4 堆積物-主電極の非接触時の電流・発熱密度分布 | 11 |
| Fig.2.2.5 堆積物-主電極の接触時の電流・発熱密度分布 | 11 |

2.3 堆積物と電極の接触面積

| | |
|---------------------------|----|
| Fig.2.3.1 堆積物-電極接触面積解析モデル | 15 |
| Fig.2.3.2 炉抵抗の接触面積依存性 | 16 |
| Fig.2.3.3 最大電流密度の接触面積依存性 | 16 |
| Fig.2.3.4 接触面積の変化と電流密度分布 | 16 |

2.4 堆積量

| | |
|----------------------|----|
| Fig.2.4.1 堆積量変化解析モデル | 21 |
| Fig.2.4.2 炉抵抗の堆積量依存性 | 21 |

2.5 ガラス及び炉底部の温度

| | |
|------------------------|----|
| Fig.2.5.1 炉抵抗の堆積物温度依存性 | 25 |
| Fig.2.5.2 炉抵抗のガラス温度依存性 | 25 |

3 . TVF 1号溶融炉運転履歴の炉抵抗値と堆積状況に関する評価

| | |
|--------------------------------|----|
| Fig.3.1 TVF1号溶融炉の運転履歴の推定（解析条件） | 31 |
| Fig.3.2 TVF1号溶融炉の運転履歴の推定（解析結果） | 32 |

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。日本では、HAW を物理的、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）方式のガラス溶融炉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（Noble Metals：NM）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 NM が堆積し、通電パスを形成することによりガラスの通電加熱を阻害することが懸念されている¹⁾²⁾。ガラス溶融炉では、NM の拔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。しかし、NM の堆積を完全に防止することは困難であり、溶融炉の能力低下が顕著となる前に堆積を検知し、除去などの対処を施すことが検討されている。

本件では、NM の堆積検知の観点から、炉抵抗の測定値などからガラス溶融炉内における NM の堆積状況や電流密度分布について類推することを目的に電場解析を実施し、炉内の NM の堆積状況やガラス温度などの影響特性について評価をする。また、これらの評価から、TVF 1 号溶融炉の運転履歴から炉抵抗と NM の堆積状況の推移について検討する。

2．直方体モデルによる炉抵抗の感度解析

2.1 概要

2.1.1 概要

炉抵抗の測定値などからガラス溶融炉内のNMの堆積状況や電流密度分布を類推することを目的に、電磁界解析コード MAGNA-FIM (CRC ソリューションズ) による電場解析を実施し、炉内のNMの堆積状況やガラス温度などの影響特性について評価をする。

2.1.2 解析モデル

Fig.2.1.1 に解析モデルを示す。解析には簡便な3次元直方体モデルを用いる。直方体モデルは電極、溶融ガラス、堆積物(白金族濃度が高いガラス)の3つの要素で構成され、総ガラス体積をTVF1号溶融炉のH-L中間ガラス液位時のガラス体積(0.263m³)、電極表面積を主電極表面積(0.268m²)とほぼ等しく設定した。また、炉低部におけるNM濃度が比較的高い堆積物の体積は、TVF1号溶融炉とほぼ同じ構造をもつモックアップ3号溶融炉の第19キャンペーン終了時の炉内観察データを参考に0.0244m³とした。

2.1.3 白金族元素を含有したガラスの電気伝導度

RuO₂を含んだガラスの比抵抗についてRuO₂濃度とガラス温度の関係を考慮した以下の実験式が提案されている。

$$\begin{aligned} \log(\mathbf{h}) &= f(\text{RuO}_2\%) \times (1/(T - 232.3)) - 1.287 \\ f(\text{RuO}_2\%) &= 1730 - 53.54 \times (\text{RuO}_2\%) \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

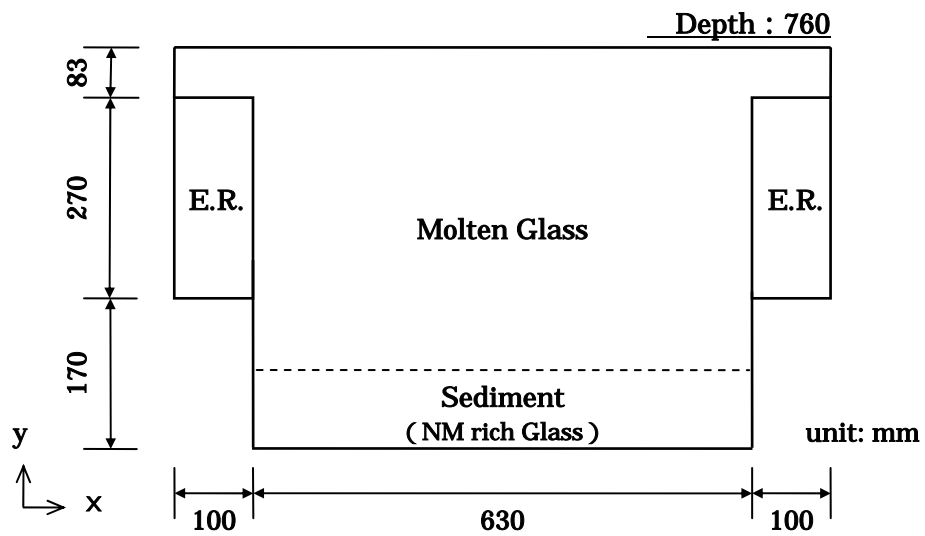
：比抵抗 [Ω·cm], T : ガラス温度 [°C], RuO₂% : RuO₂濃度 [wt%]

よって、ガラスの電気伝導度は次式により求めることができる。

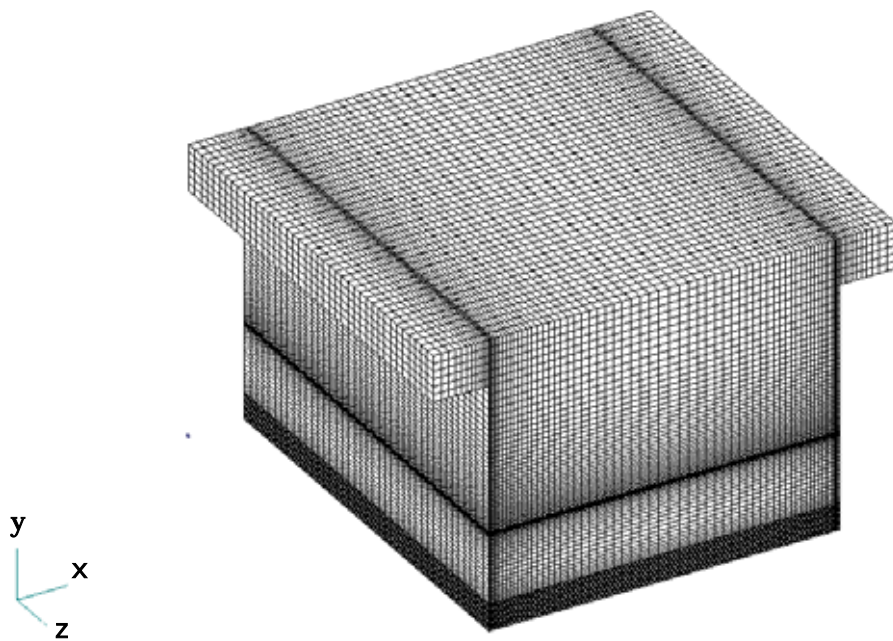
$$\mathbf{s} = 1/\mathbf{h} \quad (2.1.2)$$

s : 電気伝導度 [S/cm]

本件では、RuO₂がNMを代表すると仮定し、NM濃度をRuO₂濃度として換算して、式(2.1.1)及び式(2.1.2)からNMを含んだガラスの電気伝導度を考慮する。



(a) 直方体モデル概要



(b) 直方体モデルメッシュ (ガラス部)

Fig.2.1.1 直方体モデル

2.2 堆積物中白金族元素濃度の影響評価

2.2.1 概要

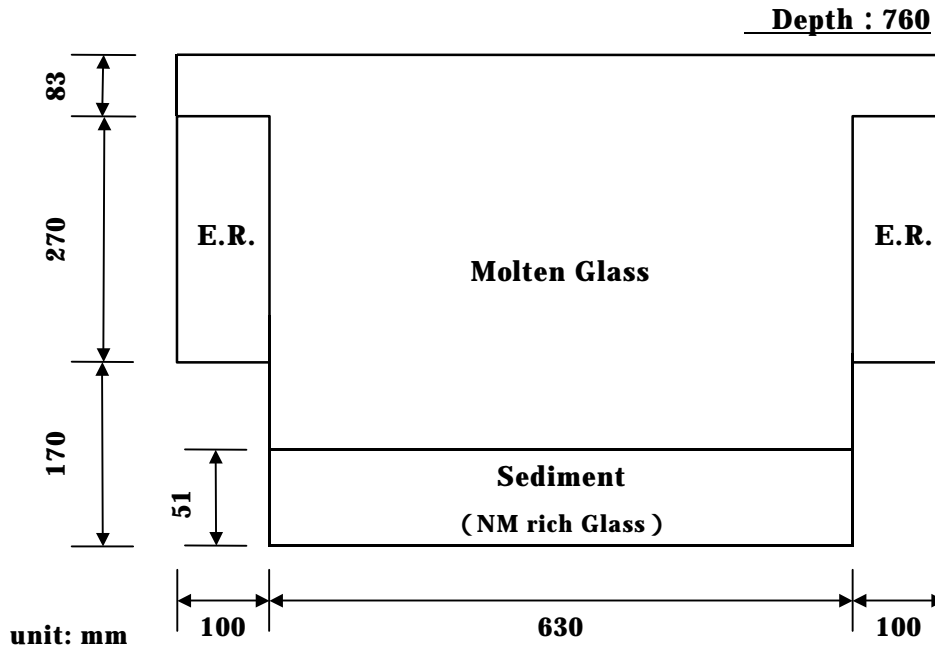
ガラス溶融炉内において、炉底部に NM 濃度の高い堆積物が形成され、通電加熱を阻害することが懸念されている。本件では、ガラス溶融炉をモデル化した直方体モデルを用いて、炉抵抗に対する堆積物中の NM 濃度の影響特性を実施する。

2.2.2 解析条件

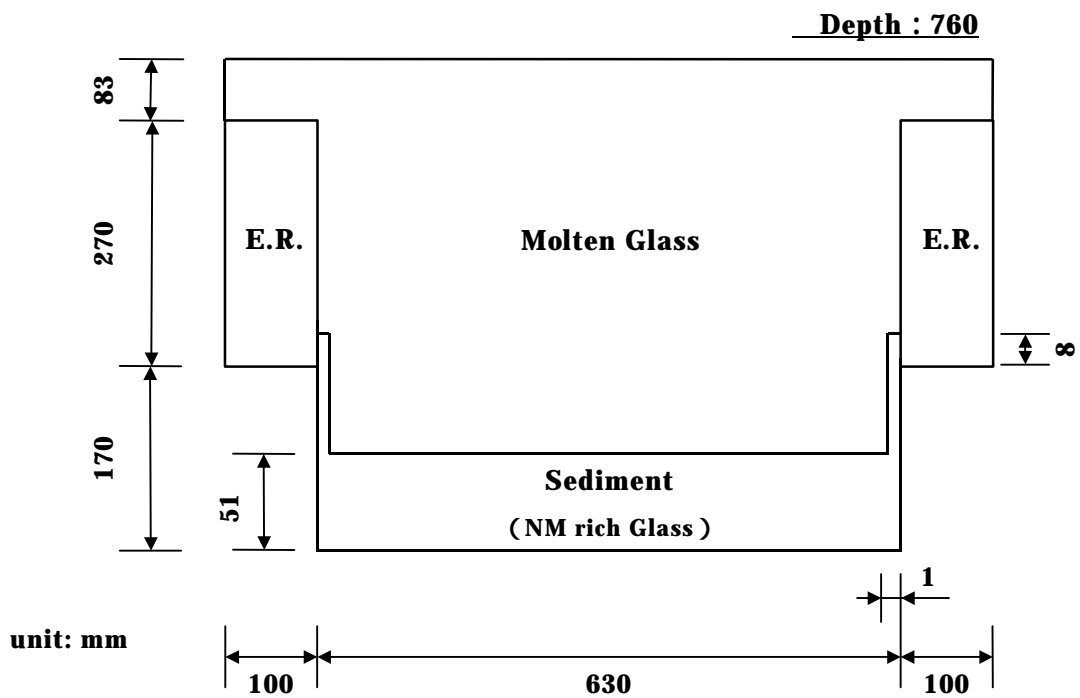
解析は Fig.2.1.1 及び Fig.2.2.1 に示すような直方体モデルを用いる。堆積物形状は電極と堆積物が接触しない体系(a)と接触する体系(b)を考慮し、接触面の面積は、 60cm^2 とした。ガラス温度は TVF1 号ガラス溶融炉の運転実績を参考に溶融ガラス温度を 1100 、堆積物温度を 860 とし、電極間電圧を 40V とした。ガラス中における NM 濃度は未知である。そのため、TVF1 号ガラス溶融炉において NM の堆積が顕著ではない考えられる炉抵抗 (0.08) と一致する濃度をガラス中濃度一様条件解析により決定し、これを溶融ガラス中の NM 濃度とする。

2.2.3 解析結果

Fig.2.2.2 にガラス中の NM 濃度一様条件における炉抵抗を示す。NM 濃度が増加するにつれ、炉抵抗はリニアに低下している。そして、NM 濃度 $1.35\text{wt}\%$ のとき、炉抵抗は 0.08 となった。これにより、NM 濃度 $1.35\text{wt}\%$ を溶融ガラス中の NM 濃度とし、堆積物中濃度をパラメータとした解析を実施した。Fig.2.2.3 に堆積物中の NM 濃度に対する炉抵抗の依存性を示す。解析は堆積物が主電極と接触しない状態と接触する状態の 2 ケースについて行った。堆積物と主電極が接触しないケースでは、炉抵抗は $10\sim 25\text{wt}\%$ で比較的急峻に低下した後、 $30\text{wt}\%$ 以降では 0.061 に漸近し、NM 濃度が増加しても低下しない。一方、堆積物と主電極が接触するケースでは、NM 濃度が増加するにつれ炉抵抗は低下し、 $10\text{wt}\%$ から $35\text{wt}\%$ の間で 0.075 から 0.013 まで急峻に低下し、以降は 0 に漸近する傾向を示す。このことから、接触がなければ、炉抵抗は NM 濃度の増加のみでは極端に低下することなく、ある程度低下した後、一定値に漸近する。しかし、堆積物と主電極の接触することによって炉抵抗は急峻に低下することがわかった。Fig.2.2.4 に堆積物が電極と接しない場合、Fig.2.2.5 に接触する場合の NM 濃度が溶融ガラス中 $1.35\text{wt}\%$ 、堆積物中 $20\text{wt}\%$ における電流密度分布と発熱密度分布を示す。電流密度分布は電極下端及び堆積物中に大きな電流密度が生じているが、堆積物と電極が接触するとその接点にさらに大きな集中が生じることがわかる。また、発熱密度も電流密度と同様、電極下端に大きな集中が見られ、堆積物と電極が接触することにより、より大きな発熱が生じることがわかる。このことから、堆積物と電極が接した場合、その接点に電流密度が集中し堆積物中に大きな発熱を生じると考えられる。



(a) No Contact



(b) Both Side Contact

Fig.2.2.1 解析モデル

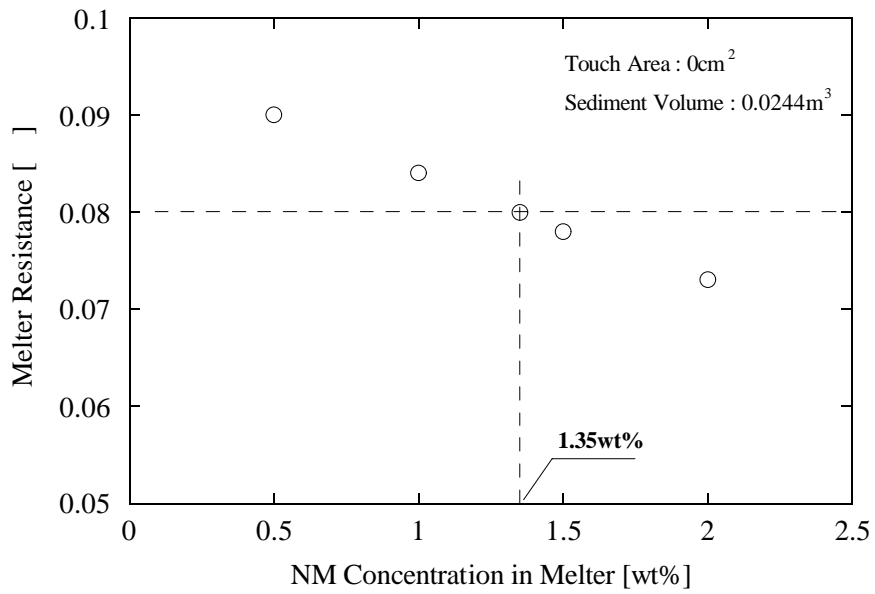


Fig.2.2.2 炉抵抗の白金族元素濃度依存性（炉内一様濃度条件）

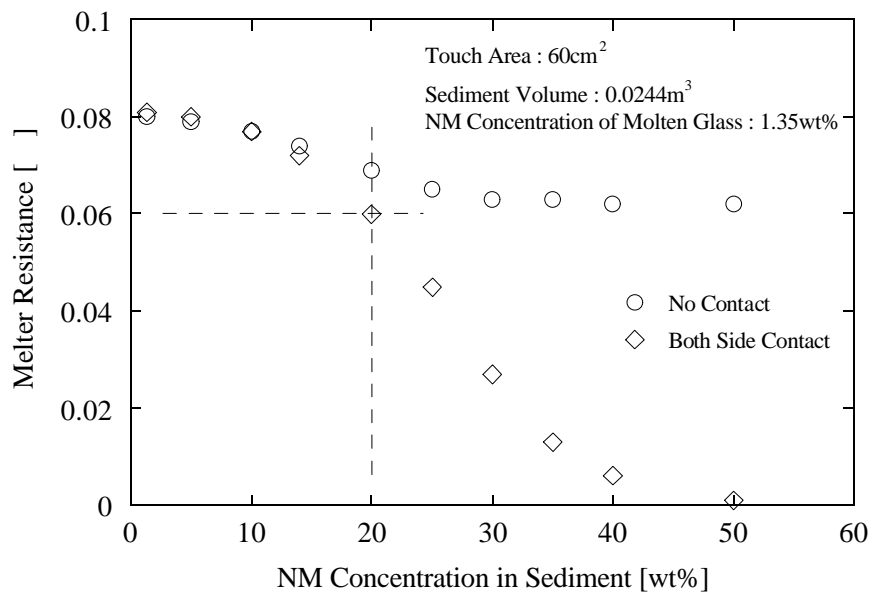
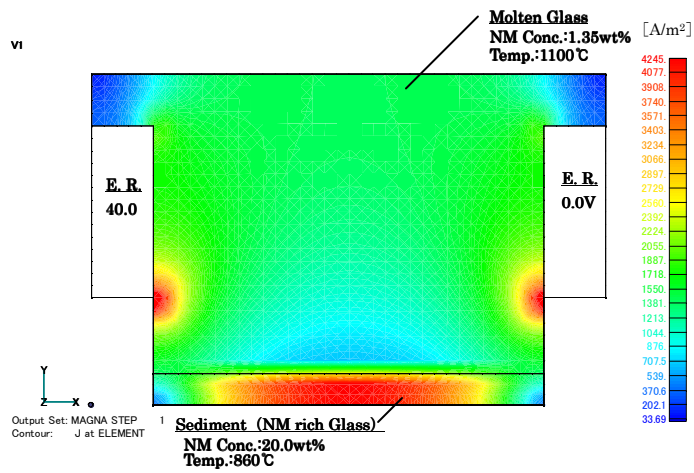
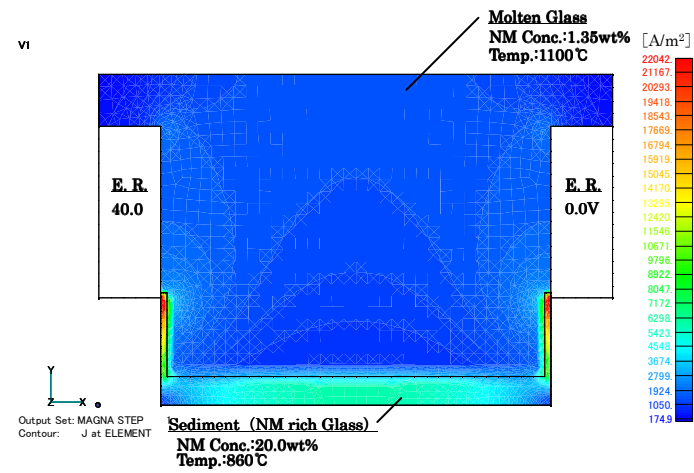


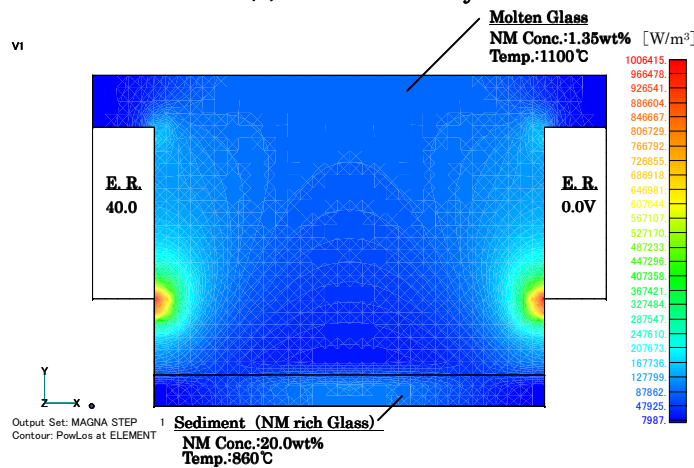
Fig.2.2.3 炉抵抗の白金族元素濃度依存性（堆積物中濃度）



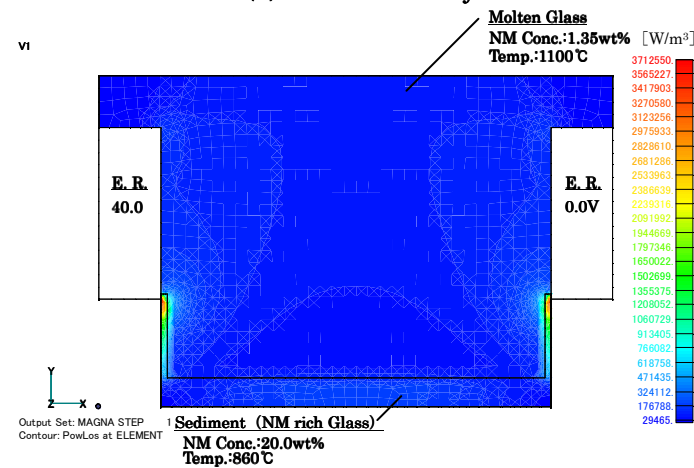
(a) Current Density



(a) Current Density



(b) Joule Heat Density



(b) Joule Heat Density

Fig.2.2.4 堆積物-主電極の非接触時の電流・発熱密度分布

Fig.2.2.5 堆積物-主電極の接触時の電流・発熱密度分布

※Fig.2.2.4 と Fig.2.2.5 はコンターレベルが異なる。

2.3 堆積物と電極の接触面積の影響評価

2.3.1 概要

ガラス溶融炉内において、炉底部に NM 濃度が高い堆積物が形成され通電加熱を阻害することが懸念されている。堆積物が電極と接触した場合、その接点に電流密度が集中し、堆積物中に大きな発熱が生じる。このとき、接触箇所の面積により最大電流密度が変化することが考えられる。最大電流密度は局所的な発熱や腐食の評価の観点から重要な因子の一つとして考えられている。そのため、最大電流密度を評価する観点から、堆積物接触面積と最大電流密度の関係を評価した。

2.3.2 解析条件

解析は堆積物が Fig.2.2.1(b)に示したような電極と接触するモデルを用いる。溶融ガラス温度は 1100 ，堆積物温度を 860 とし、電極間電圧を 40V とする。また、NM 濃度は、溶融ガラス中 1.35wt%、堆積物中 20wt%とした。接触面積は、Fig.2.3.1 に示すように電極との接触部の高さを調節し、0cm²、30 cm²、60 cm²、120 cm²の 4 ケースについて解析を行う。

2.3.3 解析結果

Fig.2.3.2 に最大電流密度の接触面積依存性を示す。接触面積が大きい場合、電流密度は 3.0A/cm² に漸近するような傾向を示すが、接触面積が減少するにつれ最大電流密度は増加し、接触面積ゼロとなったとき最大値 5.63 A/cm² となり、接触面積が減少すると最大電流密度は増大する。炉抵抗の接触面積に対する依存性を Fig.2.3.3 に示す。炉抵抗は接触面積の変化にほとんど感度をもっておらず、0.061 程度で推移している。堆積物と電極が接触点近傍の電流密度分布を Fig.2.3.4 に示す。電流密度は接触面積が変化しても堆積物と電極下端の接点に集中しており、3 次元的な電流の再配分効果は小さく、堆積物と電極の接点に集中する傾向がある。

以上より、堆積物と電極の接触面積は炉抵抗に対してほとんど感度を持っていないが、接触面積が減少に従って、最大電流密度は増大することが明らかとなった。

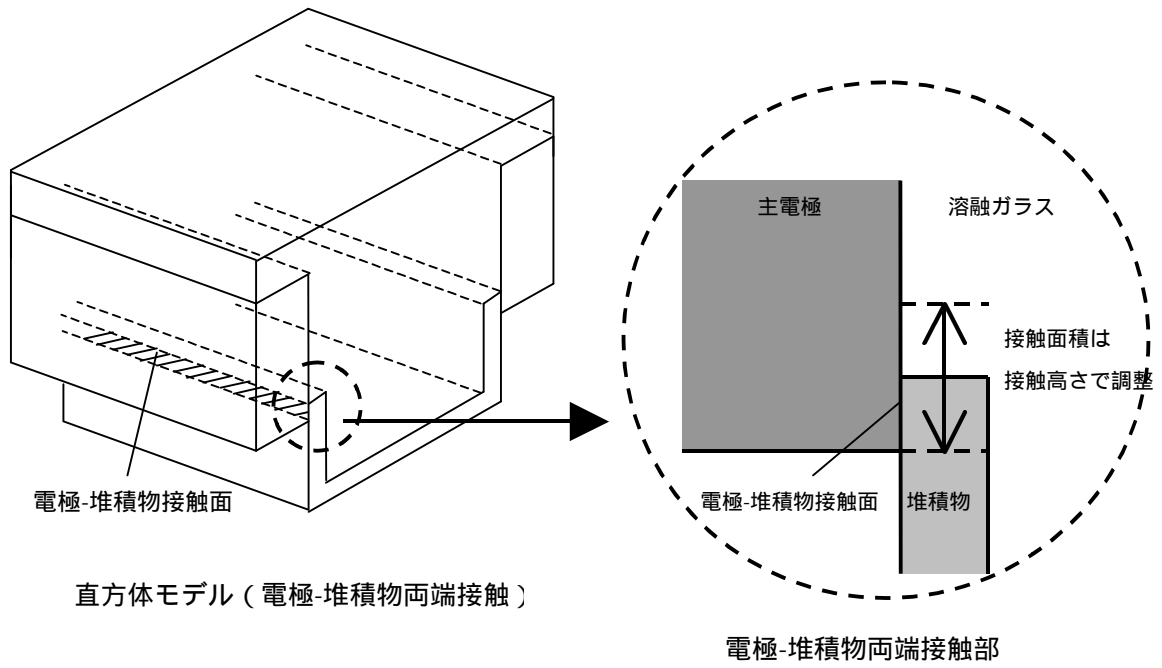


Fig.2.3.1 堆積物-電極接触面積解析モデル

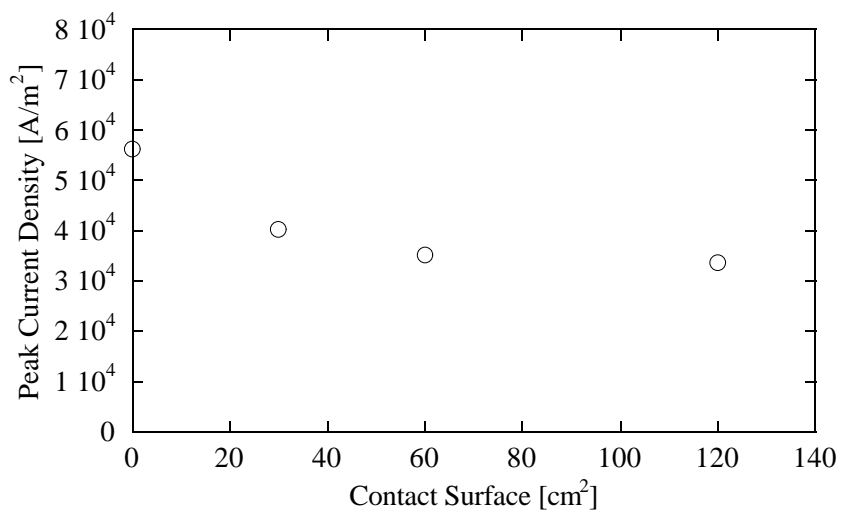


Fig.2.3.2 最大電流密度の接触面積依存性

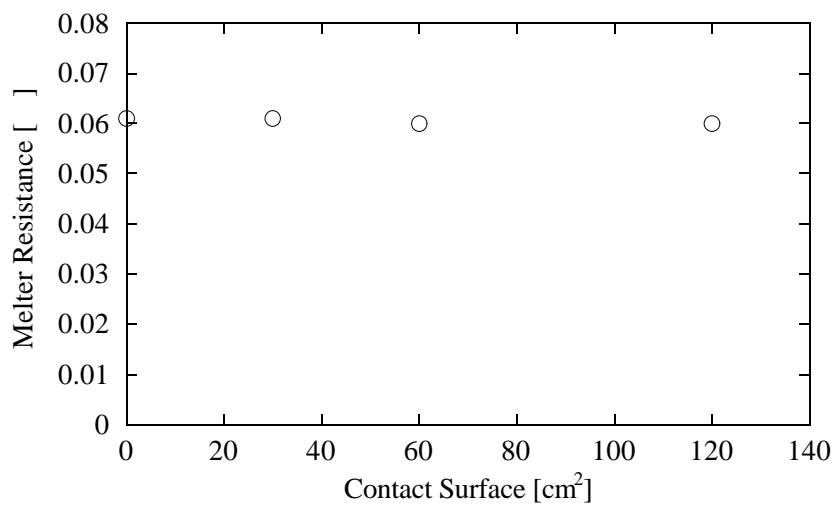


Fig.2.3.3 炉抵抗の接触面積依存性

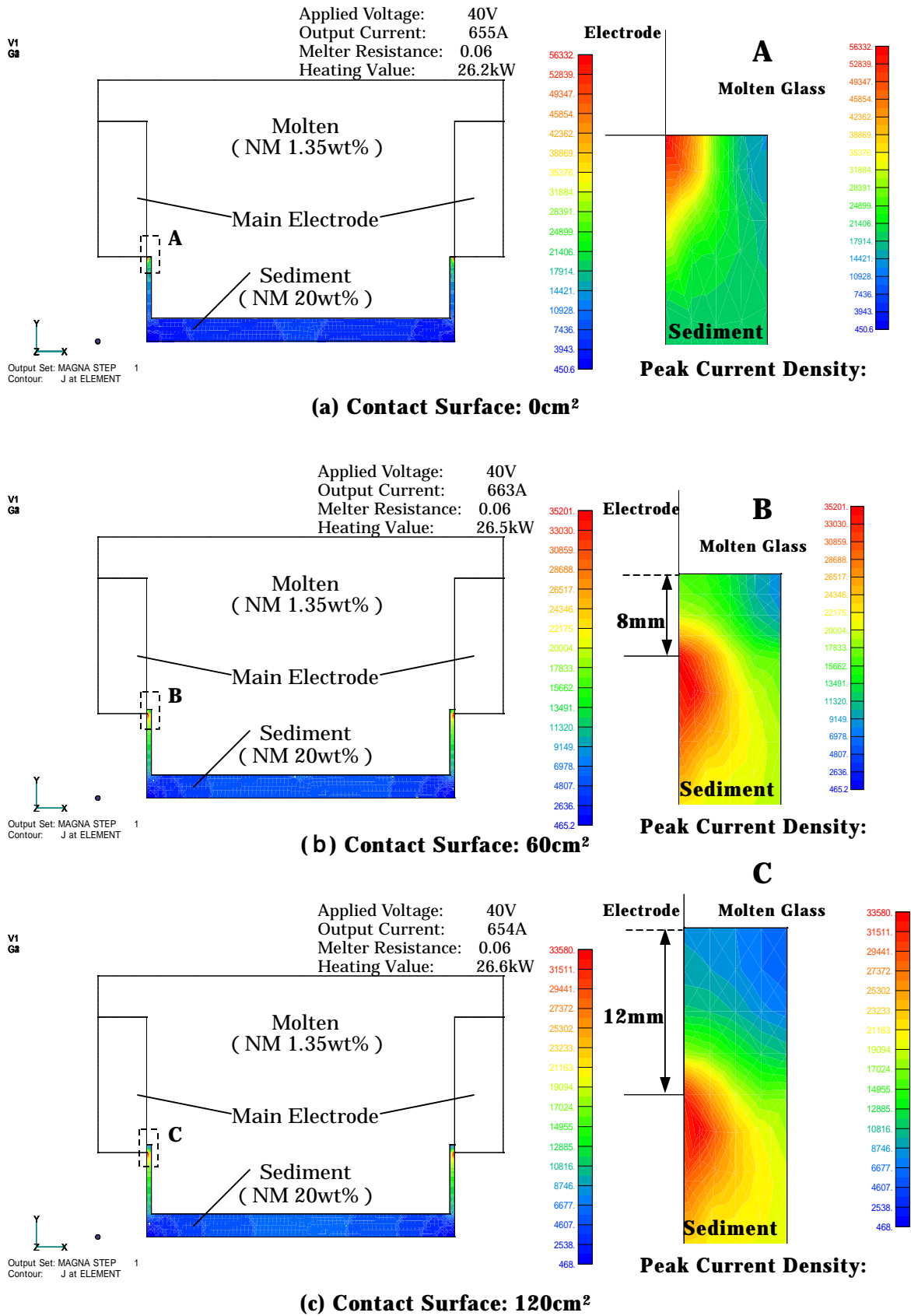


Fig.2.3.4 接触面積の変化と電流密度分布

2.4 堆積量の影響評価

2.4.1 概要

ガラス溶融炉内において、炉底部に NM 濃度が高い堆積物が形成され、通電加熱を阻害することが懸念されている。堆積物の増加は炉抵抗を低下させ発熱量を低下させるため、堆積を検知し必要な処置を講じる必要がある。そのため、本件では、堆積物検知の観点から、堆積量の増大と炉抵抗の関係を評価した。

2.4.2 解析条件

解析体系の概要を Fig.2.4.1 に示す。解析モデルは Fig.2.2.1 に示したような直方体モデルを用い、堆積物と電極が堆積物と電極が非接触、片端接触、両端接触する 3 体系を考慮する。また、NM 濃度は溶融ガラスについては非接触体系で炉抵抗が 0.09 となる濃度 0.5wt% に決定し、堆積物の濃度は両端接触の体系で炉抵抗が 0.06 となる濃度 21.75wt% とした。解析では、各体系の堆積物の高さを変化させることにより堆積量を変化させる。

2.4.3 解析結果

Fig.2.4.2 に炉抵抗の堆積量依存性を示す。炉抵抗は堆積物と電極の接触がない場合、 0.00479m^3 ($h=10\text{mm}$) で 0.083 , 0.01436m^3 ($h=30\text{mm}$) で 0.079 , 0.02394m^3 ($h=50\text{mm}$) で 0.076 と堆積量の増大に対して比較的緩やかに低下する傾向が見られた。堆積物と電極の片側で接触する場合、 0.00606m^3 ($h=10\text{mm}$) で 0.079 , 0.01549m^3 ($h=30\text{mm}$) で 0.072 , 0.02491m^3 ($h=50\text{mm}$) で 0.068 と接触がない場合よりもやや急峻に低下し、両側で接触する場合、 0.00734m^3 ($h=10\text{mm}$) で 0.073 , 0.01661m^3 ($h=30\text{mm}$) で 0.065 , 0.02589m^3 ($h=50\text{mm}$) で 0.060 と比較的急峻に低下した。また、堆積物と電極の接触がない場合、堆積量が 5 倍になっても炉抵抗は 0.007 しか低下しないが、両側で接触する場合、堆積量が 3.5 倍になると炉抵抗は 0.013 低下しており、炉抵抗は堆積物体積が増加するにつれ低下し、堆積物と電極の接触があるほうがより顕著に影響が表れる。しかし、炉抵抗の低下は堆積量の増大よりも堆積物と電極の接触の方が炉抵抗は明らかに大きい。

このことから、堆積量の増大は炉抵抗の低下させるものの、その影響は堆積物と電極の接触の方が顕著に表れることがわかった。

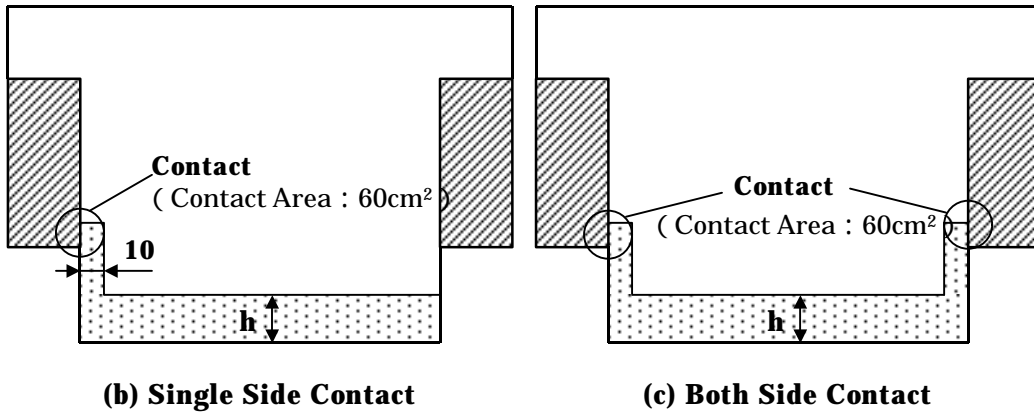
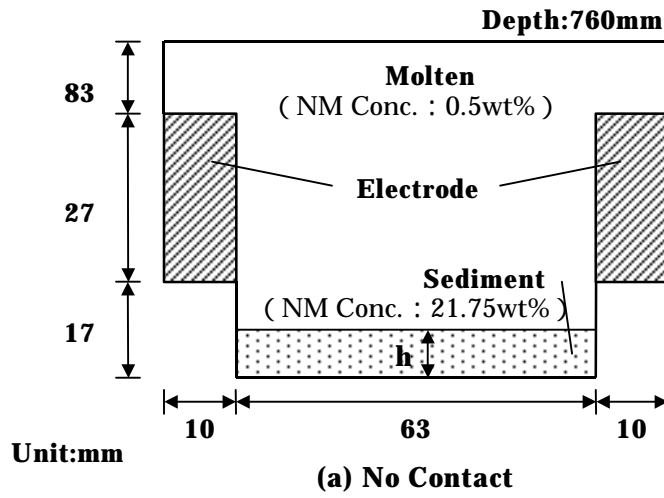


Fig.2.4.1 堆積量変化解析モデル

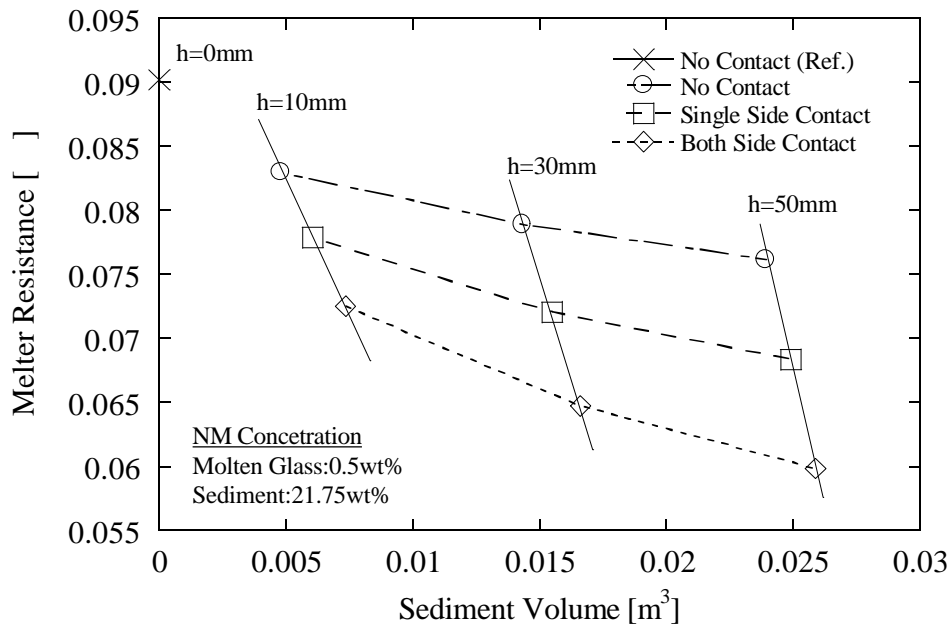


Fig.2.4.2 炉抵抗の堆積量依存性

2.5 ガラス及び炉底部の温度の影響評価

2.5.1 概要

ガラス溶融炉内において、炉底部に NM 濃度が高い堆積物が形成され、通電加熱を阻害することが懸念されている。ガラスの電気伝導度は温度により変化するため、炉内のガラス温度によって炉抵抗が変動する。本件では、堆積物(炉底部)及び溶融ガラス(炉上部)の温度の炉抵抗に対する影響特性について検討する。

2.5.2 解析条件

解析モデルは Fig.2.4.1 と同様のモデルを用い、堆積高さ h を 50mm とする。NM 濃度は、溶融ガラスは非接触体系で炉抵抗が 0.09 となる 0.5wt% に決定し、堆積物の濃度は両端接触の体系で炉抵抗が 0.06 となる 21.75wt% とした。解析における温度条件は、堆積物温度の影響評価では TVF1 号炉における補助電極の温度データを参考に 760、860、960 を考慮した。溶融ガラス温度の影響評価では炉上部温度が 1100 程度で保持されるため、1050、1100、1150 を考慮した。

2.5.3 解析結果

Fig.2.5.1 に炉抵抗の堆積物温度依存性を示す。堆積物と主電極が接しない場合、炉抵抗は堆積物温度 760 で 0.078、860 で 0.076、960 で 0.075 であり、200 の温度変化に対して 0.003 低下と比較的小さい。片側で接触する場合、炉抵抗は 760 で 0.072、860 で 0.068、960 で 0.065 であり、0.008 低下した。また、両側で接触する場合、炉抵抗は 760 で 0.067、860 で 0.060、960 で 0.054 と 0.013 低下しており、炉抵抗低下が大きい。このことから、堆積物温度が上昇することにより炉抵抗は低下するが、主電極に堆積物が接触していない場合、その影響は小さいことがわかる。Fig.2.5.2 に炉抵抗の溶融ガラス温度依存性を示す。堆積物と主電極が接しない場合、炉抵抗は溶融ガラス温度 1050 で 0.10、1100 で 0.076、1150 で 0.060 であり、1050 ~ 1150 の温度変化に対して 0.04 と比較的大きく低下した。片側で接触する場合、炉抵抗は 1050 で 0.086、860 で 0.068、960 で 0.055 であり、0.031 低下した。また、両側で接触する場合、1050 で 0.072、860 で 0.060、960 で 0.050、1050 ~ 1150 の温度変化で 0.022 低下した。このことから、溶融ガラスの温度変化は、電極と堆積物の接触の有無に係らず炉抵抗を大きく低下させることがわかる。炉抵抗はいずれのケースにおいても温度が上昇に対して低下するが、堆積物温度の影響は 760 ~ 960 間の 200 の温度上昇に対して最大 0.013 低下に対して、溶融ガラス温度の影響は 1050 ~ 1150 間の 100 の温度上昇に対して最大 0.04 もの低下が生じており、接触の有無に係らず堆積物温度よりも溶融ガラス温度の変化が炉抵抗に対して顕著な影響を及ぼすことが明らかとなった。

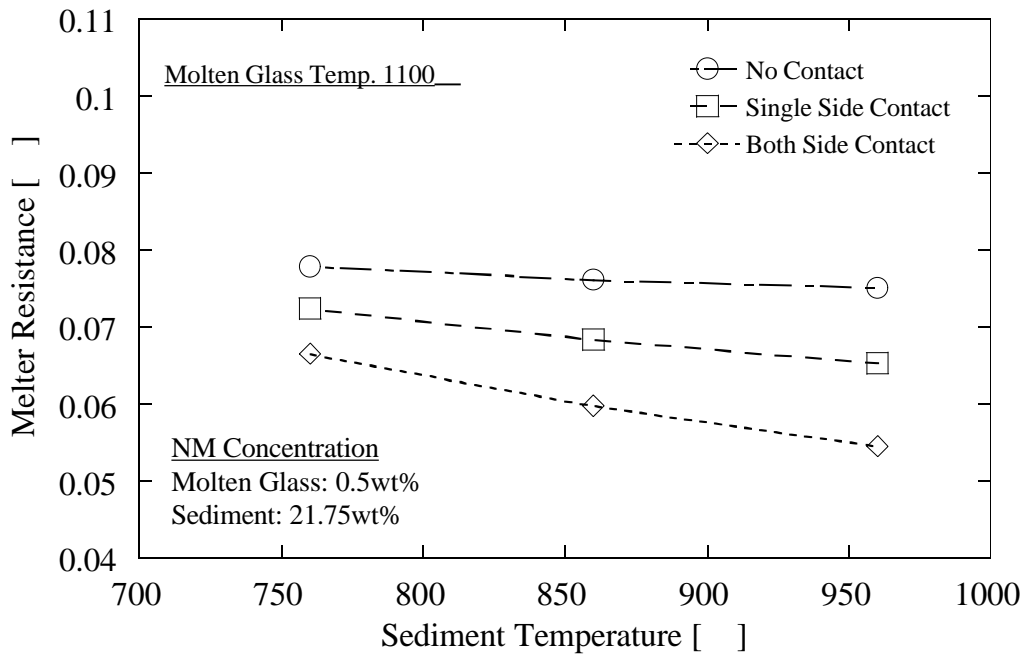


Fig.2.5.1 炉抵抗の堆積物温度依存性

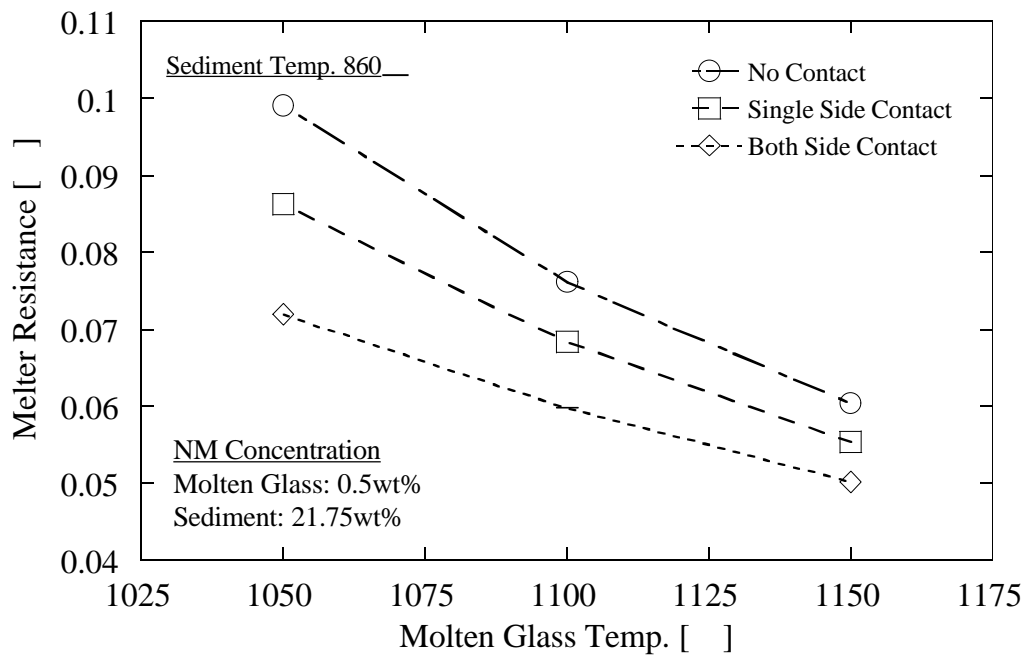


Fig.2.5.2 炉抵抗のガラス温度依存性

2.6 まとめ

ガラス溶融炉の炉抵抗に対する影響因子として、炉底堆積物の状況や堆積量、温度などについて感度解析を実施し、その影響特性について検討を行った。その結果、堆積物中の NM 濃度及び堆積量の増加は堆積物と電極が接触する場合、炉抵抗は大きく低下することがわかった。接触がない場合、これらの影響は比較的小さく、炉抵抗に対して、堆積物と電極の接触の有無が大きく影響する。また、堆積物の温度は堆積物の状況によらず、比較的炉抵抗に対する感度は小さいが、炉上部の溶融ガラス温度は炉抵抗に対して接触の有無にかかわらず大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

最大電流密度は堆積物と電極が接触する場合、接触面積が減少するにしたがって増大し、接触面積ゼロの条件で最大となった。電流密度は堆積物と電極の接触点付近に集中することから、局所的に大きな発熱密度が生じることがわかった。このとき、炉抵抗は接触面積の変化に特に感度を示さなかった。

これらの結果から、炉抵抗に対して“堆積物と電極の接触の有無”と“溶融ガラス温度”が大きな感度を持つことが明らかとなった。また、最大電流密度は堆積物と電極の接触面積が大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

3 . TVF 1 号溶融炉運転履歴の炉抵抗値と堆積状況に関する評価

3.1 概要

TVF ガラス溶融炉における堆積物検知の観点から，炉抵抗に対する影響因子について評価を実施してきた。本件では，これらの評価結果を踏まえ，TVF 1 号溶融炉の運転開始から終了までの炉抵抗と NM の堆積状況の推移について検討した。

3.2 解析条件

運転末期における最も炉抵抗が低下した状況では電流値に激しいハンチングが見られ，堆積物と電極の接触性により電流値が上下したものと推定する。そのため，解析には Fig.2.2.1 及び Fig.2.4.1 に示すような堆積物と電極が非接触及び片側接触，両側接触の 3 つ直方体モデルを用いる。ここで，堆積物の高さ h は 50mm，接触部の面積は 60cm^2 とした。

解析条件は TVF1 号炉運転実績（Hi-On*時の測定データ）に基づいて決定する。Fig.3.1 に TVF1 溶融炉運転データ（主電極間電圧，炉内温度）と NM 濃度を示す。解析における電極間電圧は主電極間電圧，炉上部ガラス温度にはガラス温度（T10.27），炉底部の堆積物温度には補助電極温度（T10.5，T10.7）の平均温度をそれぞれ用いる。溶融ガラス中の NM 濃度は TVF 標準ガラス組成を参考に 1.23wt% とする。また，炉底部における NM の堆積挙動は，運転データなどから堆積のトリガーとなるような現象は見出せないことから，NM はガラスの流下とともに徐々に炉底に堆積したと考えられる。そのため，堆積物中の NM 濃度は，バッチごとに直線的に上昇すると仮定し，運転初期を溶融ガラス中と同じ 1.23wt% とし，末期を両端接触モデルで TVF1 号溶融炉の主電極間抵抗に相当するよう 25wt% とした。

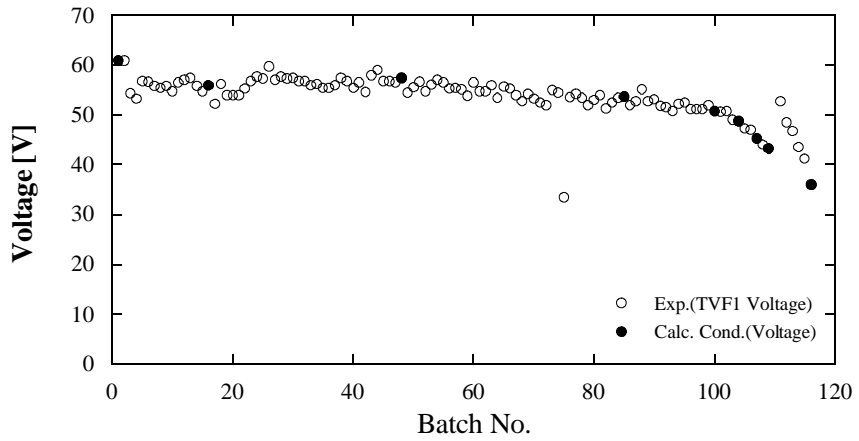
* Hi-On：ガラスレベルが High レベルに達した状態（流下操作の前段階）

3.3 解析結果

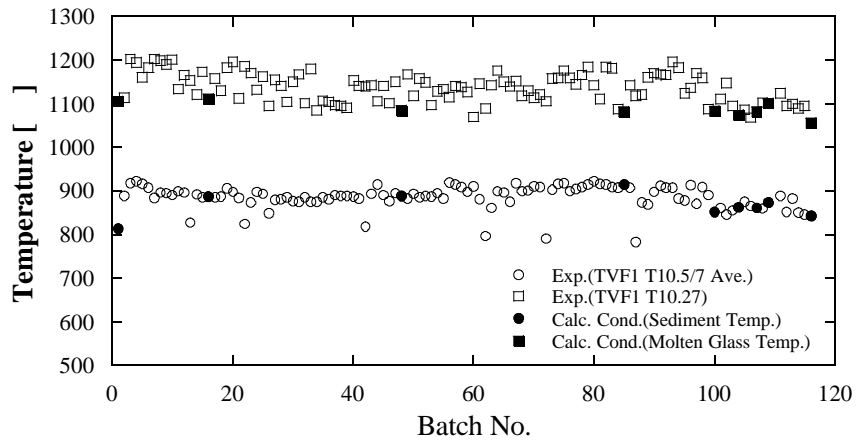
TVF 1 号溶融炉の運転データ（抵抗，電流，電力）と解析結果を Fig.3.2 に示す。運転初期における炉抵抗は広く分布しているがおおよそ 0.09 程度で安定していると考えられ，炉抵抗の低下は 40 バッチ前後から顕著になっている。初期バッチにおいては堆積物中の NM 度が低いため，NM の堆積による炉抵抗の低下は顕著ではないが，バッチを繰り返すうちに濃度が増加し，40 バッチ程度の時点で炉抵抗の低下が顕著となる濃度に達したと考える。炉抵抗は，運転末期の 100 バッチ目付近から急峻に低下するようになる。ここでの急峻な低下では電流値のハンチングも生じていることが報告されており，堆積物と電極が断続的に接触を繰り返していると考えられる。解析では，おおよそ 100～105 バッチに片側，106 バッチ以降は両側接触モデルを適用することにより，この傾向をよく再現できている。接触を考慮しない場合，0.07 程度までしか低下せず，運転データのような急峻な低下を再現できない。このことから，運転末期の炉抵抗の急峻な低下は堆積物と電極の接触が原因と推定される。また，解析の結果得られた電極間電流及び電力についても，解析は運転デ

一夕の傾向をよく再現できていると考える。

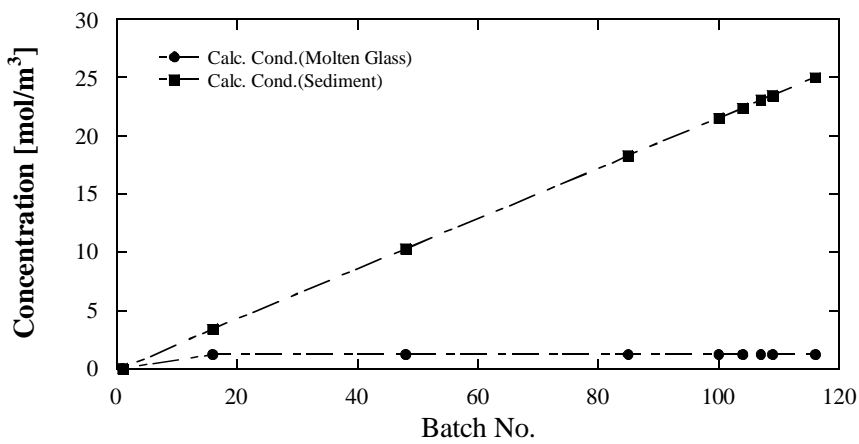
以上、炉底におけるNMの堆積検知の観点から、堆積の増大と炉抵抗の低下の関係について解析評価を実施し、その結果、ガラス溶融炉の炉抵抗予測に見通しが得られた。



(a) 主電極間電圧

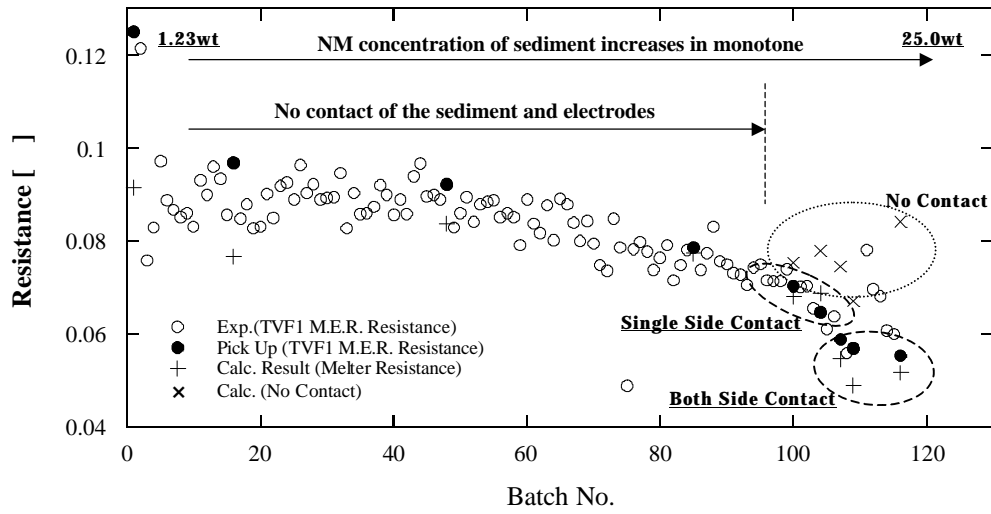


(b) 溶融炉内温度

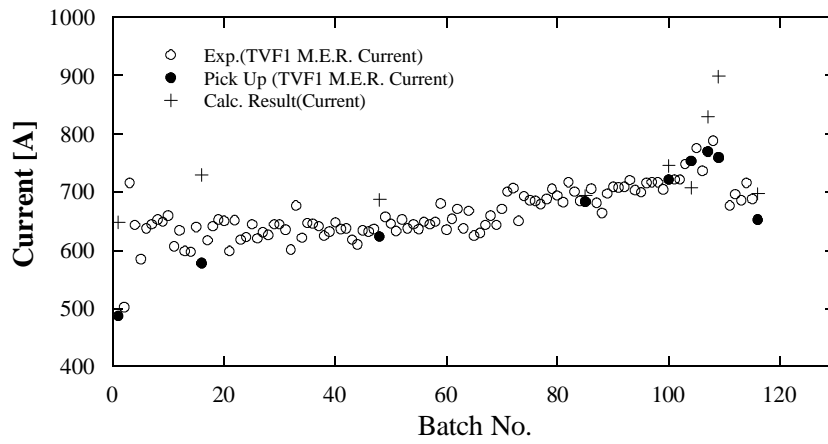


(c) 白金族元素濃度

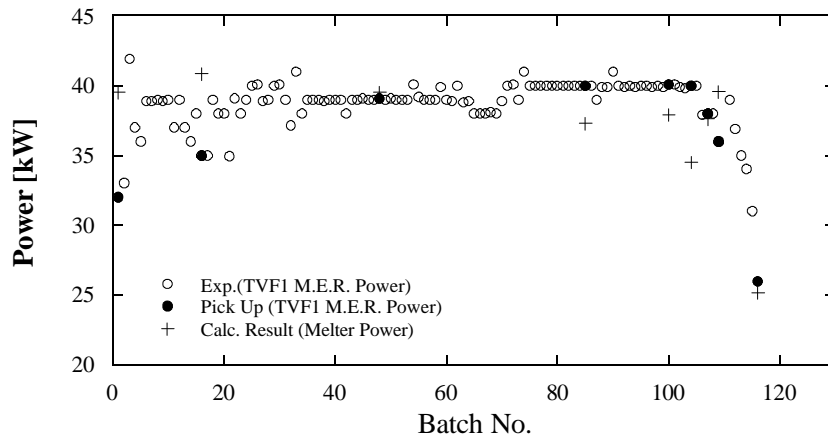
Fig.3.1 TVF1号溶融炉の運転履歴の推定(解析条件)



(d) 主電極間抵抗



(e) 主電極間電流



(f) 主電極間電力

Fig.3.2 TVF1号溶融炉の運転履歴の推定(解析結果)

4 . 結言

NMの堆積検知の観点から，炉抵抗の測定値などからガラス溶融炉内のNMの堆積状況や電流密度分布について類推することを目的に，炉内のNMの堆積状況やガラス温度などの影響特性について直方体モデルにより評価を実施した。その結果，堆積物と電極の接触性について，堆積物のNM濃度や体積の影響は，接触がなければ炉抵抗が大きく低下することはないが，堆積物と電極が接触することにより炉抵抗を大きく低下させることがわかった。また，炉内温度について，炉底部の堆積物温度は接触がなければ大きな影響はないが，炉上部のガラス温度は接触の有無にかかわらず炉抵抗に対して大きな感度を有することがわかった。

以上の評価に基づき，TVF 1号溶融炉の運転履歴の炉抵抗低下の経緯を予測する堆積を想定した解析を実施した。電極間電圧及び炉内温度は運転データを参照し，堆積物は運転バッチごとに徐々に堆積したと推定し，NMの堆積濃度が直線的に増加すると仮定した。その結果，炉抵抗の推移を概ね再現することができた。これにより，ガラス溶融炉の抵抗値予測について見通しを得ることができた。

参考文献

- 1) 吉岡正弘,中山治朗:“ ガラス固化施設の運転技術 ”,JNC TW8419 99-003 ,p 41 (1999)
- 2) 池田秀雄ら :“ 溶融炉改良に係わるガラス固化モックアップ試験の評価 ”, サイクル技報 , No.14 2002. 3 (2002)