

NKK 電気抵抗式灰溶融炉の炉内解析

Electro-magnetic and Thermal Fluid Dynamics Analysis of NKK Electric Resistance Furnace

多田 光宏 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部 主任研究員
岩崎 克博 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部 主任研究員
平岡 英伸 環境技術部 燃焼機器設計室 統括スタッフ
明石 哲夫 環境開発部 開発推進グループ 統括スタッフ
勝呂 洋次 環境技術部 燃焼機器設計室 主査

Mitsuhiro Tada
Katsuhiro Iwasaki
Hidenobu Hiraoka
Tetsuo Akashi
Yoji Suguro

小型炉による灰の溶融実験と電磁場・熱流動解析により、NKK 電気抵抗式灰溶融炉の炉内解析を行った。スラグ浴内では、電極近傍で加熱されたスラグの密度が減少して浮力を発生し、この浮力が流れの駆動力となって、炉内に大きな循環流が形成される。これは、小型炉を用いた実験で観察された結果と一致した。スラグ浴内の温度分布はほぼ均一になっており、スラグ浴の温度は融点より十分高くなっていることが明らかになった。

The small scale furnace experiment and the computational analysis of electro-magnetic field and thermal fluid dynamics of the slag in NKK electric resistance furnace clarified the temperature distribution and the fluid flow in the slag bath. The results are coincident with the observation of the small scale slag electric resistance furnace. The ash is heated by the Joule heat at the each electrode and the heated slag rises along the electrode due to the reduction of its density and diverse at the top of the slag bath from the electrode. The buoyancy is found to be the major driving force of the fluid flow in the bath.

1. はじめに

廃棄物の焼却処理で発生する焼却灰、飛灰を利材化・無害化できる溶融固化処理が期待されている¹⁾。当社では、スラグに交流電場を印加して発生するジュール熱により、焼却灰、飛灰を溶融する電気抵抗式灰溶融炉 (Fig.1) を商品化している²⁾。

NKK 電気抵抗式灰溶融炉の特徴として、

(1) 還元性雰囲気下で溶融処理を行うため、HCl の発生量がほとんどない

(2) 炉内でスラグとメタルが比重分離できるので、高品質のスラグが得られ³⁾、路盤材などに利用できる

(3) 還元雰囲気下での電気抵抗式加熱のため、炉内での排ガス発生量が、他の方式に比較して大変少ない

(4) 溶融飛灰中の亜鉛の含有率が高く、資源化が可能などが挙げられる。

これら多くの特色を有するが、これは炉が密閉構造となっており、炉内を還元雰囲気中に保つことができる点に負うところが多い。密閉構造となっているため直接炉内を見ることができないので、投入した灰の溶解状況やスラグの流れの挙動および炉内の温度分布などを明らかにする目的で、小型の灰溶融炉による灰の溶融実験や電磁場・熱流動解析を行った結果について述べる。

2. 小型灰溶融炉実験

2.1 小型灰溶融炉の概要

小型灰溶融炉の炉体にはグラファイト製のつぼ (内径 100 ~ 250mm) を用い、電極には、グラファイト製棒 (16mm) を用いた。炉体を保温するため、グラファイト製のつぼの周囲に管状の耐火物を設置した (Fig.2)。電極は自動昇降式で 2 ~ 3 本の電極を用い 100kW まで 3 相交流電圧を印加することが可能な仕様とした。排ガス処理システムは、二次燃焼および洗煙塔を設置している。焼却灰 (塩

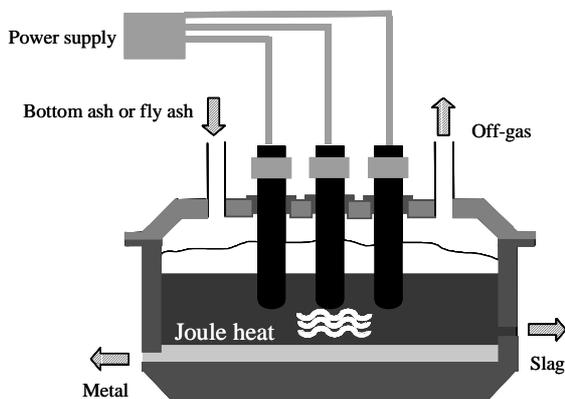


Fig.1 NKK electric resistance furnace

基度, $\text{CaO}/\text{SiO}_2=0.3, 0.6$) を主として用い, 塩基度を変える実験では, 高炉スラグを使用した。灰の投入は, あらかじめ秤量した所定量の灰を上部より投入した。炉内のスラグ挙動を観察するため, 大気雰囲気下で, 炉体および電極の酸化損耗を抑制するため, 窒素ガスで炉内をパージしながら行った。スラグ温度は熱電対で測定したところ概ね 1400 であった。

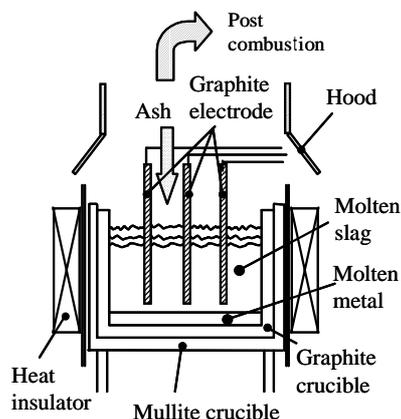


Fig.2 Experimental apparatus

2.2 実験結果および考察

Fig.3 に小型灰溶融炉を用いて焼却灰 (塩基度, $\text{CaO}/\text{SiO}_2=0.6$) を電気抵抗加熱により溶融し, 投入した灰が完全に溶融し, スラグ浴表面の流動状況を観察した一例を示す。スラグは, それぞれの電極がスラグ浴表面と接している部分から, 放射状に流れ, その後, 対向する流れが衝突するのが観察された。塩基度が高い高炉スラグ ($\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.2$) を用いた実験では, スラグの流動性が焼却灰より良好であり, スラグ流れの放射状の円が接するような流れが生成した。塩基度の低い焼却灰 ($\text{CaO}/\text{SiO}_2=0.3$) を用いると, 流動性が低下し, 放射状のスラグの流れ出しが小さくなり, スラグの流れ出す速度も低下するのが認められた。

これは, スラグの塩基度が低下することにより粘性が増加するため, スラグ浴の平均的な流動性が悪くなったため

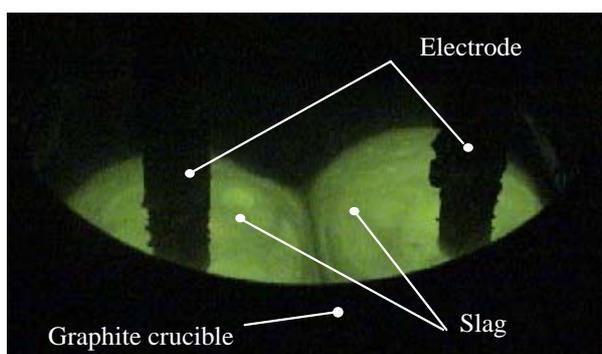


Fig.3 The observation of the small scale slag electric resistance furnace

と考えられる。また, 塩基度が低下することにより, スラグの融点が上昇し, スラグ浴表面で放射により表面近傍のスラグの温度が低下したため, 比較的温度の低いスラグが表面近くに存在し, その部分の粘性が大きくなり, 流動を悪くさせた影響が考えられる。

灰焼結層を観察する目的で, 焼却灰を投入した直後に, 界面部分を急冷し, 回収した灰と溶融スラグとの界面を示す (Fig.4)。投入した灰の下に焼結した層が存在し, その下に半溶融した層が形成された後, 溶融スラグが形成されていた。また, 灰と溶融スラグとの界面には, 微小な気泡が認められた。これは, 灰の溶解に伴って, 灰中炭酸塩の熱分解や灰中の炭素分とスラグが反応して生じた気泡が滞留していたためと考えられる。

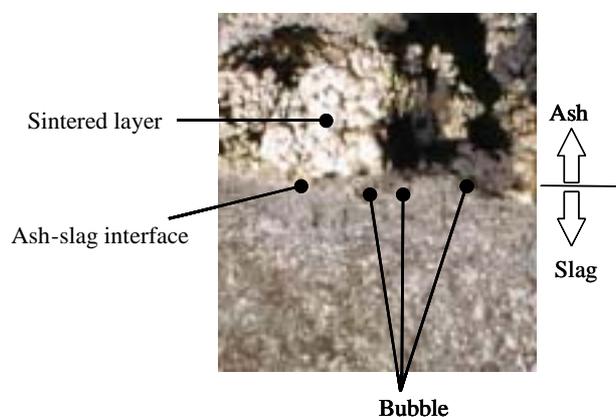


Fig.4 Observation of interface between ash and slag

3. 電磁場・熱流動解析

NKK 電気抵抗式灰溶融炉は, 溶融スラグを伝導媒体として, 3 相交流で 3 本電極からスラグに電力を供給し, 発生するジュール熱によりスラグを直接加熱・溶融している。この炉内について電磁場・熱流動解析を Fig.5 に示す手順を用いて解析した。

計算手順は, 以下のとおりとした。

(1) 汎用電磁場解析コード MAGNA/FIM により \mathbf{A} - (磁気ベクトル・ポテンシャル - 電磁ポテンシャル) 法を用いて, 灰溶融炉内溶融スラグ中の電磁場解析を行う。後述するように誘導起電力は無視しうることがわかったので, 計算の効率化を図るため, 電位分布の計算に際しては, 汎用熱流体解析コード FLUENT の一般化輸送方程式解析の機能を用いた。

(2) 次に, 電位分布から電流密度, ジュール熱を計算し, その値を用いて, 汎用熱流動解析コード FLUENT で灰溶融炉内溶融スラグ中の熱流動解析を行う。

本手法では, FLUENT で計算した温度分布をもとに, MAGNA/FIM もしくは FLUENT での電気伝導率などの温度依存性のある物性値を変更し収束させた。

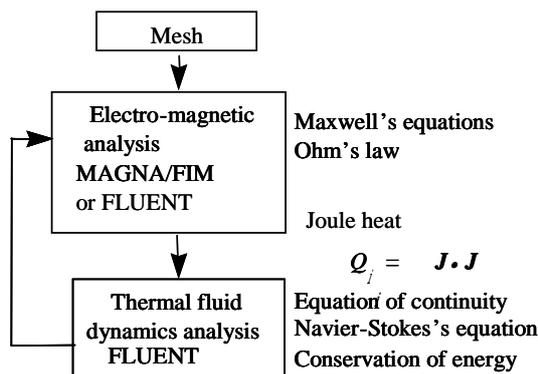


Fig.5 The procedure of electro-magnetic and thermal fluid dynamics analysis

3.1 電磁場解析

灰溶融炉内の溶融スラグ中の電磁場は、マクスウェル方程式により、式(1)-(4)で表せる。NKK 電気抵抗式灰溶融炉は、50 または 60Hz の低周波電源を用いることから、式(3)においては、変位電流項を無視し、準定常電流近似した。

(Gauss の法則) $\text{div } \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$ (1)

(Faraday の法則) $\text{rot } \mathbf{E} = - \text{grad } \phi - \dot{\mathbf{B}}$ (2)

(Ampere の法則) $\text{rot } \mathbf{B} / \mu = \mathbf{J}$ (3)

(磁気単極子の非存在) $\text{div } \mathbf{B} = 0$ (4)

ここで、

\mathbf{E} : 電場ベクトル, \mathbf{B} : 磁束密度ベクトル

\mathbf{J} : 電流密度ベクトル, ρ : 電荷密度, ϕ : 誘電率

μ : 透磁率

オームの法則は、磁場の移動がないことから $\mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$ とし、 $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ を電気伝導度とすると、

$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ (5)

と表せる。また、磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} と電磁ポテンシャル ϕ を次式で定義する。

$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ (6)

$\mathbf{E} = - \text{grad } \phi - \dot{\mathbf{A}}$ (7)

この \mathbf{A} と ϕ を用いて、式(5), (3)に代入すると、

$\text{rot } (\text{rot } \mathbf{A} / \mu) = (- \text{grad } \phi - \dot{\mathbf{A}})$ (8)

となる。また、式(2)の発散をとり、式(5)を代入すると、次式が得られる。

$\text{div } \text{rot } \mathbf{B} / \mu = 0 = \text{div } \mathbf{J} = \text{div } \sigma \mathbf{E}$ (9)

$\text{div } (- \text{grad } \phi - \dot{\mathbf{A}}) = 0$ (10)

電磁場解析において、試行的に MAGNA/FIM を用いて式(8), (10)を基礎方程式として、有限要素法により解析を行った。MAGNA/FIM を用いた計算結果から、誘導起電力は、十分小さく無視し得ることがわかった。

そこで、 $\dot{\mathbf{A}} = 0$ とすると、式(10)は、 $\text{div } \text{grad } \phi = 0$ に関する次式となる。

$\text{div } \text{grad } \phi = 0$ (11)

この式は、 ϕ がスラグ内の位置によって変化しない場合には、ラプラス方程式となる。

計算の効率化を図るため、数値解析を実施するにあたって、式(11)を基礎方程式として、FLUENT の一般化輸送方程式の解析機能を活用して、電位 ϕ を求めた。

電気的境界条件は、以下のとおりとした。電極表面の電位を各極の相電圧を考慮して $\phi = \phi_0$ を与えた。灰溶融炉炉底には、溶融メタルが存在することからスラグの下部では、 $\phi = 0$ とした。また、スラグ面および壁は各面へ電流が流れないことから、各面への法線方向の微分、 $\partial \phi / \partial n = 0$ とした (Fig.6)。

基礎方程式として式(11)を用いて電気的境界条件を与え、電位 ϕ を求めた。電位 ϕ より各メッシュにおける電流密度ベクトルが次式で得られる。

$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = - \sigma \text{grad } \phi$ (12)

得られた電流密度ベクトルから、各メッシュにおけるジュール熱、 Q_i は次式で求められる。

$Q_i = \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}$ (13)

ここで得られたジュール熱は、熱流動解析において、エネルギー方程式の生成項として用いる。

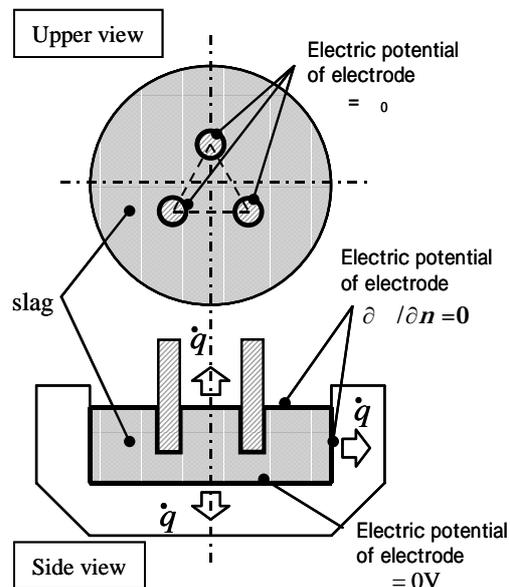


Fig.6 Numerical model of electric resistance furnace

3.2 熱流動解析

熱流動解析においては汎用熱流動解析コード FLUENT を用い、有限体積法による灰溶融炉内溶融スラグの流速ベクトルおよび温度分布を求めた。

支配方程式としては、式(13)-(15)に示す各式を用いた。

ナビエ-ストークスの式(14)において、ブジネ近似を用いて、浮力項 ($-\rho(T - T_0)g$) を右辺に加えてある。

$$\text{div } \mathbf{v} = 0 \quad \dots\dots(14)$$

$$\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{D} \mathbf{v} / Dt = -\text{grad } p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \rho(T - T_0)g \quad \dots\dots(15)$$

$$C_p \rho \mathbf{D} T / Dt = \nabla \cdot \mathbf{Q} + Q_j \quad \dots\dots(16)$$

ここで、各記号は以下の諸量を示す。

- \mathbf{v} : 流速ベクトル, \mathbf{g} : 重力加速度ベクトル
- \mathbf{J} : 電流密度ベクトル, p : 静水圧
- ρ : 溶融スラグの密度, μ : 溶融スラグの粘性係数
- β : 溶融スラグの体積膨張率
- T : 溶融スラグの温度, Q_j : ジュール熱

前項で求めたジュール熱を用い、境界条件として壁および溶融スラグ表面からの熱流束, q_w を与えた。Fig.6 に熱流動解析に用いた境界条件の概略を示した。

解析にあたって小型灰溶融炉などの知見から、溶融スラグの流れが穏やかであることが予想されたため、試行的に層流モデルを用いて数値解析を行った。その結果、体膨張による自然対流伝熱と伝導伝熱のしやすさの比であるレイリー数, Ra は、 $Ra = \sim 10^8$ と比較的大きな値であった。これは、電極近傍での浮力の影響によりスラグ流れが乱流域に近い挙動を示すためと考えられた。そこで、乱流モデルとして、2 方程式モデルである $k-\epsilon$ モデルを用いて熱流動解析を行った。

4. 電磁場・熱流動解析結果および考察

電磁場解析から得られたスラグ浴内の電位分布をスラグ浴横断面について Fig.7 に示した。電位は電極近傍が高く電極から殻状に低くなっており、電極の周囲での等電位面は密になっている。特に電極先端付近での等電位面の変化は大きくなっていった。



Fig.7 The distribution of electric field in the slag

また、スラグ浴内の電流密度ベクトル分布を Fig.8 示した。電流密度ベクトルは電極から放射状に出ており、電極先端近傍において特に大きくなっている。電流密度ベクトルは、等電位面の法線方向に流れることから、Fig.7 における等電位の間隔が狭い部分が電流密度ベクトルの大きさは大きくなっている部分に対応している。



Fig.8 The distribution of electric density vector in the slag bath

Fig.9 にジュール熱の分布を示した。ジュール熱は電流密度ベクトルの大きさの2乗に比例することから電極周囲でのジュール熱の発生が大きく、特に電極先端近傍で大きいことがわかった。したがって、この結果から、電極周囲および電極先端近傍でスラグは加熱され、大きな浮力を発生させていることがわかる。



Fig.9 The distribution of Joule heat in the slag bath

電磁場解析から得られたジュール熱を用いて熱流動解析を行った。Fig.10,11 に流速ベクトルを示す。Fig.10 に灰溶融炉内の側面からみた場合を、Fig.11 に溶融スラグの上部からみた場合を示している。Fig.10 より、溶融スラグの流れは電極近傍から浴表面へと向かって大きな上昇流を形成し、壁近傍では、壁に当り炉底への下降流となり、炉中央部では、反対方向からの流れがぶつかることにより下降流となり、炉底へ溶融スラグが流れ、スラグ流が炉内全域にわたっていることがわかる。全体的には溶融スラグは炉内全域で大きな循環流を形成していることがわかった。

また、Fig.11 より、スラグ上面からみるとスラグは、電極近傍から放射状に広がって流れていることがわかる。塩基度を変えた場合を想定して粘性係数を変化させたところ、電極近傍から放射状に広がる流れの速さは粘性係数が大きくなるほど遅くなる傾向が認められた。これらの結果は、小型灰溶融炉で観察されたスラグ流れと同様である。

電磁場解析の結果から得られたジュール熱分布より、電極の下端近傍に大きな発熱があることから、このジュール熱により加熱された溶融スラグの浮力が上昇流の駆動力となっていると考えられる。



Fig.10 The velocity vector in the slag bath (side view)

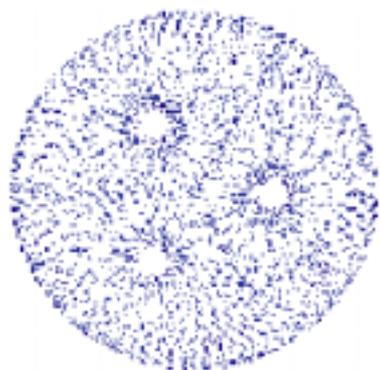


Fig.11 The velocity vector in the slag bath (top view)

Fig.12 にスラグの温度分布を示す。浴表面近傍に電極の周りに比較的溫度の高い部分があるが、ほぼ炉内は均一に加熱されており、概ね 1500℃ になっている。スラグ浴で形成された大きな循環流により炉内にほぼ均一な温度分布が得られたと考えられる。炉底近傍では、スラグとメタルの融点より十分高い温度となっており、炉内全域が溶融状態になっていることがわかった。

熱流動解析結果から、実際の灰溶融炉の操業において、投入した灰は、炉内で完全に溶融してスラグ層やメタル層を形成し、その後、灰溶融炉から排出されることがわかる。また、電気抵抗式灰溶融炉では、スラグ浴内に、特に高温部がなく、灰溶融炉の耐火物や電極の損耗を少なくするのに有利であることがわかる。



Fig.12 The temperature distribution in the slag bath

5. おわりに

小型の電気抵抗式灰溶融炉による灰の溶融実験と電磁場・熱流動解析を行った。

小型灰溶融炉での実験から、電極近傍から放射状に広がる流れが観察された。また、投入した灰は焼結層を形成し溶解していくことがわかった。

電磁場・熱流動解析から、電極近傍でスラグが加熱されて浮力を生じ、炉内全域に大きな循環流が形成され、スラグ浴は、ほぼ均一な温度になっていた。電極近傍から放射状に広がるスラグ流れが計算結果から得られたが、これは小型灰溶融炉で観察した結果と一致した。炉内は、スラグとメタルの融点より十分高い温度となっており、炉内全域が溶融状態であることがわかった。

以上の実験と解析結果から、NKK 電気抵抗式灰溶融炉においては、投入した灰は炉内で完全に溶融し均一なスラグ浴を形成するので、比重分離により良質なスラグとメタルが得られる炉内挙動をしていることが確認できた。

参考文献

- 1) 古角雅行. 東京都の飛灰対策の現状. 廃棄物学会誌. Vol.5, No.1, pp.46-59(1994).
- 2) 明石哲夫ほか. 電気抵抗式溶融による飛灰処理技術の開発. 第 8 回廃棄物研究会発表会講演論文集. pp.635-637(1997).
- 3) 品川拓也ほか. 廃棄物溶融スラグ中の重金属の挙動. pp.163-165(1997).

<問い合わせ先>

エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部

Tel. 044 (322) 6404 多田 光宏

E-mail address : mtada@lab.keihin.nkk.co.jp

環境開発部 開発推進グループ

Tel. 044 (505) 7531 明石 哲夫

E-mail address : akashit@eng.tsurumi.nkk.co.jp