



簡易数学モデルを用いた電気炉における プラズマアークによるスクラップ加熱・反応現象の推定

Simulation of Heat Transfer and Reaction Phenomena of Scrap with Plasma Arc in Electric Arc Furnace by Use of Simple Mathematical Model

山口一良

Kazuyoshi Yamaguchi

東北大学大学院

工学研究科

学術研究員

1 経緯

現在の電気炉における最重要課題は、徹底したコスト削減による競争力維持であり、具体的には、生産性、歩留、エネルギー効率の向上である。換言すれば、経済合理性に基づく「究極のエネルギー効率の達成」であり、(1) 電力、化石燃料、酸素のベストミックス、(2) その結果としてのCO₂排出量削減となる。

高炉・転炉プロセスと比較してCO₂削減プロセスと位置付けられる電気炉において、さらなるCO₂削減を目指して、高価な電力費節減のために代替使用しているC源をカットし、ダスト発生量減少、排ガス量減少による熱ロス低下の解析を行い、課題であるエネルギー効率向上、CO₂排出量削減に資する報告を行った¹⁾。この報告の中で、笹本の東北大学学位論文²⁾の10トン電気炉における種々のスクラップ溶解実験結果を基に、電気炉ダスト発生メカニズムを提示した。10トン電気炉はパイロットプラント規模と認識され、実機(現在>100トン)に比べて詳細な解析が可能である。

しかし1960年代の実機規模は10トンであったため、電気炉の設備・操業改善は、実機を基に行われ、エネルギー効率向上のために、耐火物を含む炉体構造の改善が鋭意実施されてきた。上述した電気炉の諸課題解決のためには、本来ならば小規模電気炉による基礎研究を行い、アークのスクラップへの伝熱・反応(亜鉛、鉄の酸化、ダスト生成)メカニズムを解明すべきであるが、これらに関する報告は見当たらない。また数学モデル構築による基礎研究もほとんどみられない。数学モデルに関しては、熱流体と電磁場を1つのソフトウェアで解析可能なモデル³⁾、超高温プラズマの3次元電磁熱流体シミュレーションモデル⁴⁾等の特定のプロセス解析を対象とした精緻なモデルが開発されている。しかしこれらのモデルは、アークのスクラップ加熱時の現象解明には複雑すぎて適用困難である。

本報告では、アークのスクラップへの伝熱・反応現象を基礎的に解明するために、簡便な数学モデルを構築し、ダスト発生メカニズム解明に資することを目的とした。

2 アークからスクラップへの伝熱方式の導入

アークからスクラップへの伝熱方式として、小西⁵⁾の二面間の放射伝熱式を導入し図1に示す。小さい直径aの円(アーク)から大きい直径bの円(スクラップ)への放射伝熱を考える。図1に記載したA₁, A₂は断面積(m²)、F_{1,2}, F_{2,1}は放射係数、T₁, T₂は温度(K)、hは二面間の距離である。

アークからスクラップへの放射伝熱量Q(W)は式(1)で表される。

$$Q = f_s \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4) \times A \dots\dots\dots (1)$$

ここでf_sは放射係数(式(2))、σはステファン・ボルツマン定数(=5.67×10⁻⁸W/m²/K⁴)である。

$$f_s = 1 / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1) \dots\dots\dots (2)$$

ここでε₁, ε₂は放射率である。

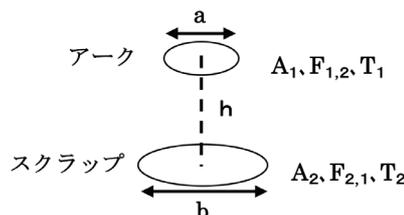


図1 二面間の放射伝熱

3 伝熱モデルを適用するためのアークの構造の構築

野田ら⁶⁾、南條⁷⁾によると、交流 (AC) 炉では他電極からの電磁力によりアークは30°炉壁側に傾く。これを踏まえて、アークの構造を図2に示すように構築した。

電極径 (356mm) の半円が30°炉壁側に傾くとし、半円の円換算径は251.73mmとなる。hはアーク長とし、野田ら⁶⁾のアーク長=1mm/Vを適用し、10トン電気炉の最大二次電圧245Vから245mmとした。アーク放射熱を受けるスクラップの円の径は319.5mmとなる。スクラップの高さは、炉殻内径 (3.353m) に対して最大溶解容量を20トン程度とし600mmと設定した。スクラップ重量は189.2kgと算出され、最大溶解スクラップ重量 (20.85トン) の0.9%となる。

4 アークからスクラップが受ける放射熱量の算出

放射率として $\epsilon_1 = 0.95$, $\epsilon_2 = 0.89$ と設定すると、放射係数 f_s (式 (2)) は0.8502と算出され、 $T_1 = 4000^\circ\text{C}$, $T_2 = 15^\circ\text{C}$ と設定すると、放射伝熱量 Q (式 (1)) は800kWと算出される。この値は最大二次電圧245V、二次電流19.2kAから求められる4704kWの17%に相当する。すなわち、0.9%のスクラップに17%のアークによる放射熱が投入される。

5 アークから受けた放射熱によるスクラップの温度上昇の推定

(株) 八光電機⁸⁾ が提示している「熱の計算；温度上昇計算」を用いた。スクラップ重量 (189.2kg)、スクラップ表面積 (1.443m²；スクラップ粒径100mmとして算出)、スクラップ比熱 = 649J/kg、雰囲気温度 = 15°C、初期温度 = 15°C、対流熱伝達

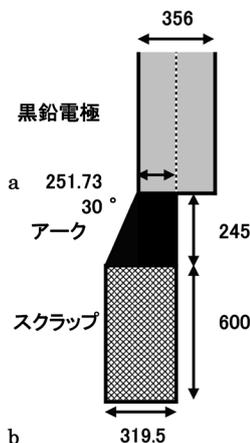
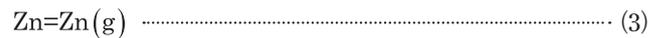


図2 構築したアークの構造

率 = 7W/m²/K、加熱容量 (800kW) を使用して温度上昇の時間変化を求めた結果を図3に示す。この図によると、スクラップ温度は加熱開始8分後に1539°Cに達し、以後1539°Cで一定となる。

6 スクラップ表面で起こる反応とガス生成

アーク放射熱により加熱されたスクラップ表面で起こる反応は下記のとおりである。



ただし、(3) の反応でガス化した Zn (g) は酸化性雰囲気のために直ちに ZnO に再酸化される。また酸素吹き込みを行っている場合は、Zn酸化、Fe酸化に吹き込み酸素が使用されるのでガスは生成しない。酸素吹き込み無しの場合は、空气中酸素で酸化されるため N₂ ガスが生成する。さらに石炭等の C 源添加を行っている場合は、CO₂、H₂O が生成するが、酸素吹き込みの場合は CO₂、H₂O 以外のガス生成がなく、酸素吹き込み無しの場合は N₂ が加わる。

6.1 Znのガス化反応速度

日野ら⁹⁾ により 1600°C 溶鉄からの Zn 揮発速度が下記のように提示されており、この式を用いた。

$$-\ln\left(\frac{[\% \text{Zn}]}{[\% \text{Zn}]_0}\right) = A / V \times k_a \times t \dots\dots\dots (5)$$

ここで [% Zn]₀ は溶鉄中の Zn 初期濃度、A は溶鉄表面積 (cm²)、V は溶鉄体積 (cm³)、ka は総括 Zn 揮発速度定数 (1600°C では 0.032cm/s)、t は反応時間 (s) である。

1600°C よりも温度が低い場合の反応速度を下記のように設定した。式 (3) の平衡定数 (K) は下記のように表される。

$$K = P_{\text{zn}} / a_{\text{zn}} \dots\dots\dots (6)$$

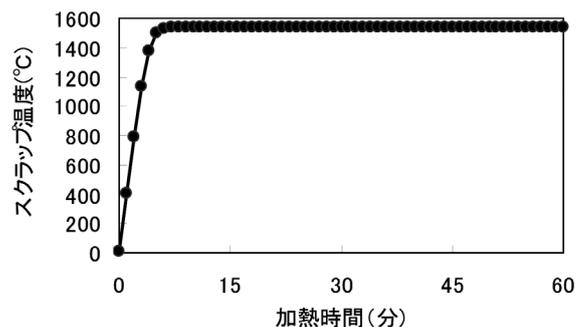


図3 アーク放射熱によるスクラップ加熱、温度上昇の時間変化

α_{Zn} (亜鉛の活量) = 1であるから $K = P_{Zn}$ (亜鉛の分圧) となり、 K は温度の低下とともに減少し 953℃でほぼゼロとなる。 k_a は K (亜鉛の分圧) に比例して減少するとして、図4に示すように k_a に1600℃を1.0とする補正係数を乗じた。

補正係数を乗じた k_a を用いて式 (5) により [% Zn] を算出すると6分 (360秒) 後にゼロとなり、それ以降のZn揮発は起こらないことになり反応速度が速すぎる。これを調整するために、10トン電気炉の実績 (後述) におけるダスト中Zn排出量にほぼ近い値となるように、さらに0.008の補正係数を乗じた。

6.2 Feの酸化速度

Feの酸化速度に関しては、井口ら¹⁰⁾が提示している図5に示す反応速度式を用いた。この直線を外挿すると921℃以上で(3)の反応が起こる。

7 10トン電気炉の運転データを用いたモデルの検証

7.1 個別の運転データを用いたモデルによる推定

装入Zn量が低く溶解期に石炭をほとんど添加せず酸素吹き込み無しの運転データ²⁾を用いて、構築したモデルによる推定を行った。

スクラップ装入量=20.53トン、[% Zn]₀=0.23%、ダスト発生量 (全体) =1.844kg/分の条件において、溶解期に15分ごとに採取したダスト量 (kg/分) を、アーク放射熱を受けるスクラップ量=189.2kgに比例按分した量を対象とした。モデルによるZn, Feの酸化量と、実績値であるZn, Feのダスト中排出量を比較し、溶解期における経時変化を示すと図6が得られる。実績値はダスト採取量がばらついているので変動が大きいが、Znに関しては推定酸化量と実績排出量がかなり近い値となっているのに対して、Feに関しては推定酸化量よりも実績排出量の低い傾向がみえる。

すなわち、Znは揮発、再酸化したZnOがほとんどダスト中に排出されるのに対して、Feは酸化物が全量ダスト中に排出されず、スクラップ表面に残留している。

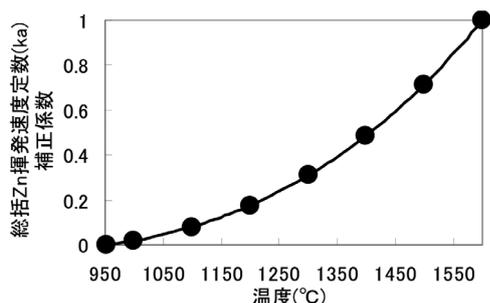


図4 k_a に乘じる補正係数の温度変化

同様に、溶解期に石炭添加、酸素吹き込みを行っている運転データ、溶解期に石炭添加を行い、酸素吹き込み無しの運転データを用いた推定も行ったが、推定結果は図6と同様である。

7.2 推定酸化量と実績排出量のマクロ的な比較

15分ごとのダスト採取量のバラツキが大きいので、溶解期全体で採取量の平均を取り、Zn, Feの推定酸化量に対する実績排出量の比率をダストへの排出比率と定義して算出した。この値が大きいほど酸化物がダストへ移行することになる。図7に示すように横軸に生成ガス量を取ってグラフを作成すると、Zn, Feともに生成ガス量の多いほどダスト中への移行量が多いことが分かる。すなわち、スクラップ表面で生成した酸化物は、生成ガス量が多いほどガスに随伴してダスト中へ移行する。

とくにZnに関しては、生成ガス量が少ない場合でも0.8以上、ガス量が多い場合は1.0を超えてダスト中へ移行する。1.0を超えることは起こらないはずなので、ダスト採取、分析、モデル推定の誤差によるものと思われる。またFeに関しては、ガス量が少ない場合は0.4程度、ガス量が多くなると0.8程度まで上昇するが、全量ダスト中へ移行せずスクラップ表面に残留している。

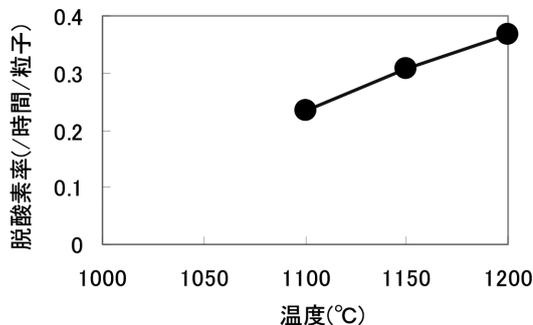


図5 Fe酸化速度の温度変化

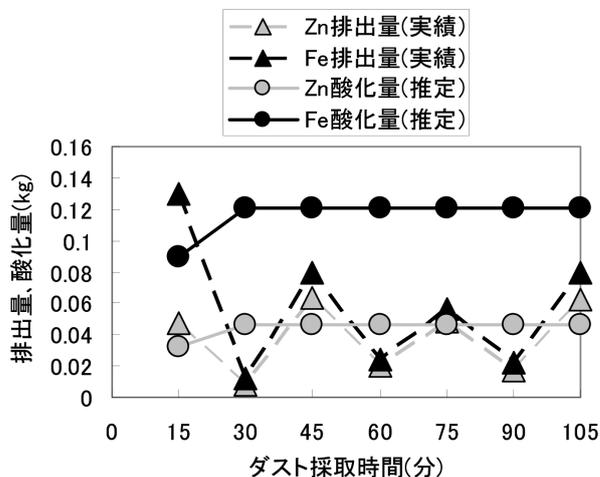


図6 Zn, Feの推定酸化量と実績ダスト中排出量の時間変化

8 考察

今回のモデルによる推定対象は、1本のアークの放射熱を受けるスクラップである。この量は全体のスクラップのわずか0.9%に過ぎないが、アーク熱の17%を受けている。3本のアークで考えると2.7%のスクラップが51%のアーク放射熱を受けていることになる。

推定結果によると、溶解初期よりアーク熱を受けて温度が上昇したスクラップ表面でZn揮発、再酸化によるZnO生成、Fe₂O₃の生成が起こっており、酸化されたZnOの80%以上がダストへ移行している。Fe₂O₃に関しては40~80%程度しかダストへ移行しておらず、スクラップ表面に残留している。Fe₂O₃はスクラップ溶解、スラグ生成後スラグ中へ移行するものと思われる。

ダストへの移行を促進する生成ガス量の影響は大きく、生成した酸化物がガスに随伴してダストへ移行すると考えられる。この現象は笹本²⁾がバブル・バーストによると述べているが、バブル・バーストではなく生成したガスに随伴して移行すると考えて良い。移行する元素はFeだけではなくZnも移行する。

ポイントは、51%のアーク放射熱をわずか2.7%のスクラップが受けて温度が上昇し、溶解初期よりZn、Feの酸化物が生成して、少量の生成ガスに随伴してダストへ移行するというメカニズムがこのモデルで検証されたことにある。残りの大量のスクラップがアーク熱をどのように受けて酸化物生成、ダストへの移行が起こるかは今後の解明課題である。

ダスト中で観察される亜鉛フェライト (ZnO・Fe₂O₃)²⁾ がどの時点で生成するか、Fe₂O₃のダストへの移行を抑制するためには、生成ガス量減少を図ることが必要であるが、酸素使用が効果的であることも、課題解明のために考慮すべき項目である。

9 本報告の纏めと今後の研究の方向性

スクラップの加熱・反応 (Zn揮発、再酸化、Fe酸化) を表現できる簡易モデルを構築し、酸化物のダストへの移行メカニズムに関する検討を行い、下記の結論を得た。

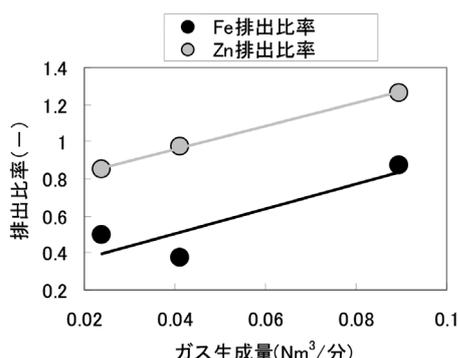


図7 ガス生成量とZn, Feのダストへの排出比率の関係

- (1) 電極のアークからスクラップ表面への放射加熱方式を導入した。伝熱モデルを適用するためにアークを含む放射加熱の構造を構築すると、3本のアークで全体量の2.7%のスクラップが51%のアーク放射熱を受けることになる。
- (2) スクラップの温度上昇量を推定すると、加熱開始8分後に1539℃に達し、以後1539℃一定である。
- (3) この温度の時間変化を踏まえて、加熱開始後15分間隔で反応量を推定した。Znに関しては溶解初期よりZn揮発後直ちにZnOに再酸化され、Feに関しても同様に溶解初期よりFe₂O₃が生成する。
- (4) 10トン電気炉における15分ごとのダスト採取結果と比較すると、Znに関しては生成ZnOの80%以上がダストへ移行した。Feに関しては生成Fe₂O₃の40~80%しかダストへ移行せず、残りはスクラップ表面に残留した。
- (5) Zn, Feのダストへの移行量は生成ガス量増加とともに増加するが、生成ガスに随伴して移行するものと考えられ、移行する元素はFeだけではなくZnも移行する。
- (6) アークのスクラップへの放射加熱により、10トン電気炉の溶解期の実績を表現できたが、これ以外の残りの大量のスクラップ加熱方式は別途検討する必要があり、スクラップ溶解初期から溶解後の酸化期のダスト生成メカニズムの解明は今後も継続する。

謝辞

本報告を投稿するにあたり、東北大学多元物質科学研究所植田滋教授、壱上洋教授、柴田浩幸教授には、数多くの議論を通じて多大なる助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山口一良, 植田滋, 長坂徹也: ふえらむ, 27 (2022) 1, 44.
- 2) 笹本博彦: 東北大学学位論文, (2003年3月24日).
- 3) 佐藤誠: エレクトロヒート, 239 (2021), 1.
- 4) 岩尾徹, 任振威, 根本雄介, 鈴木祐揮, 高本真宏, 森下穂香: エレクトロヒート, 239 (2021), 26.
- 5) 小西克享: 私信, 伝熱工学講義ノート (第8版), 埼玉工業大学工学部機械工学科, (2014), 82.
- 6) 野田孝昭, 和泉喜久磨: 鉄と鋼, 77 (1991) 6, 723.
- 7) 南條敏夫: エレクトロヒート, 153 (2007), 77.
- 8) (株) 八光電機: 熱の計算; 温度上昇計算, <https://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/s01080.htm>.
- 9) 日野光兀, 王社斌, 長坂徹也, 萬谷志郎: 鉄と鋼, 80 (1994) 4, 300.
- 10) 井口義章, 横本祥平: 材料とプロセス, 18 (2005), 10.

(2022年7月26日受付)