

高炉の排滓性におよぼす滴下スラグ中のFeO濃度の影響

西岡 浩樹*・前田 敬之*・清水 正賢*

Effect of FeO in Dripping Slag on Blast Furnace Hearth Drainage

Koki NISHIOKA, Takayuki MAEDA and Masakata SHIMIZU

Synopsis : Japanese iron and steelmaking industry has to reduce CO₂ emission by 10.5% in 2010 relative to the level of emissions in 1990. Stable blast furnace operation is required to reduce energy consumption and CO₂ emission in iron and steelmaking industry. For the stable blast furnace operation, precise controlled drainage is one of the important factors. However, there are many unrevealed phenomena in the hearth to perform the stable operation. Therefore, in this work, the effect of iron and slag dripping pattern, FeO concentration in the dripping slag on the iron and slag surfaces, thermal properties of refractory and brick on drainage temperature, temperature distribution in the hearth, temporal variation of iron and slag drainage rates and interfaces shapes were investigated by using three-dimensional mathematical model.

The results indicate that more than 2 mass% FeO in dripping slag will cause deterioration of slag drainage ability due to high slag viscosity around tapholes. Continuous monitoring of FeO concentration in the tapping slag is effective to prevent deterioration of slag drainage ability. The trends of the other side of tapping taphole temperature were varied dramatically according with FeO concentration in the dripping slag. Even in the case of 0 mass% FeO in the dripping slag, there is a solidified slag near the hearth wall except around the tapholes. A peripheral distribution pattern will result in a stable drainage. Slag, which dripped on near the other side of the tapping taphole, stays around the taphole, and does not drain from the tapping taphole located opposite side.

Key words: iron and slag flow; residual slag volume; numerical simulation; VOF method; blast furnace hearth; ironmaking; FeO concentration; hearth temperature.

1. 緒言

日本の鉄鋼業は2010年に90年比CO₂発生量10.5%削減を目標としているが、目標の達成には低還元材費操業を安定的かつ継続して行う必要がある。そのためには、現在以上に精密に制御された出鉄滓作業が要求される¹⁻⁴⁾。

これまで多くの研究者が模型実験や数値解析により、炉床における溶鉄・スラグの流動・排出挙動を解明すべく研究を進めてきた¹⁻¹¹⁾が、炉内コークス粒径や空隙率分布など解析に必要な不可欠な情報の入手が非常に困難であることもあり、未だ十分に解明されたとは言えない。

著者らは既報¹¹⁾にて、高炉炉床部の3次元非定常流動解析モデルを新たに開発した。この解析モデルは、炉内条件の変化に対応した、気体-スラグおよびスラグ-溶鉄界面形状・出鉄滓速度などを高精度で予測することが可能である。このモデルを使用して、出鉄滓速度・界面形状・最大スラグ高さにおよぼす各種炉内条件の影響に関する検討を行った¹²⁾。

武田らは、羽口斜行ゾンデによるレースウェイ内/周辺のスラグ中FeO濃度の測定を行い、レースウェイ内のFeO

濃度は15%であるが、レースウェイ周辺のFeO濃度は0.3%と出滓中のFeO濃度にはほぼ等しいことを報告している¹³⁾。羽口からの送風圧力により滴下スラグがレースウェイ内部に多量に存在するとは考え難いことを考慮すると、滴下スラグ中の平均FeO濃度は0.3%程度であると推察される。しかし低還元材比操業時には間接還元率の低下に伴い、未還元鉱石や高濃度FeOを含むスラグが多量に滴下してくると予想されている。また杉山らは、高炉の解体調査結果に基づき、高炉炉下部におけるスラグ粘度分布・温度分布の予測を行い、スラグは主として高炉周辺部を滴下していると結論づけた¹⁴⁾。加えてFeOの炭素による直接還元は非常に大きな吸熱反応であるため、滴下スラグ中FeO濃度および滴下スラグ分布は出鉄滓挙動に大きな影響を与えられられる。

そこで本研究では、スラグ表面に滴下するスラグ・溶鉄の滴下分布、滴下スラグ中のFeO濃度、炉底・炉壁煉瓦の熱物性値などが出鉄滓温度、炉床内の温度分布、出鉄滓速度、界面形状などに与える影響について調査を行った。

原著論文: ISIJ Int., Vol. 45 (2005), No. 10, pp. 1506-1514

平成18年4月26日受付 平成18年6月6日受理 (Received on Apr. 26, 2006; Accepted on June 6, 2006; originally published in ISIJ Int., Vol. 45, 2005, No. 10, pp. 1506-1514)

* 九州大学大学院工学研究院材料工学部門 (Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 744 Motooka Nishi-ku Fukuoka 819-0395)

2. 数学モデル

2.1 基礎式

コークスフリースペースにおいては、移流項・拡散項・圧力勾配項を考慮した通常の Navier-Stokes の式を基礎式とした。コークス粒子充填層に関しては、移流項・圧力勾配項および充填層の圧力損失項を考慮した。また充填層における圧力損失は Kozeny-Carman の式¹⁵⁾で評価した。また温度分布および FeO 濃度分布を求めるため、エネルギー収支式、物質収支式も考慮した。

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{u}) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho \mathbf{u})}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\varepsilon \rho \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \{\mu \nabla(\varepsilon \rho \mathbf{u})\} + \mathbf{F} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\mathbf{F} = 180\mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\varepsilon \rho C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \sum_{i=1}^n (\dot{n}_i \Delta H_i) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon C_i)}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\varepsilon C_i) = \nabla \cdot (\varepsilon D_i \nabla C_i) + \dot{n}_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

2.2 界面の追跡

スラグと溶銑は、局所的に異なる物性値を持つ単一の流体として取り扱った。よって各計算セルに、スラグおよび溶銑の存在割合に応じた見かけの物性値を設定する必要があるが、これを実現するには各界面の追跡が不可欠となる。本研究では界面の追跡に VOF 法^{16,17)}を採用した。各セルの物性値は、各セルに存在するスラグと溶銑の存在割合から算術平均で与えた。

2.3 出銑滓速度の推定

出銑口を直径 D (m)、出銑口深度 L (m) の円管であると仮定すると、カルマン式を近似し更に円管の表面粗度 e (m)の影響を含めた際の摩擦係数 f は、次式で表される。

$$f = \frac{0.0626}{\left[\log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、管壁でのせん断力と管入り口（炉内側圧力）と出口（大気圧）の圧力の釣り合いの式

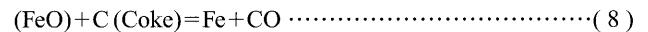
$$\bar{u} = \sqrt{\frac{\Delta P D}{2f \rho L}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

よりトータル排出速度（出銑速度と出滓速度の合計）を求めることができる。通常の高炉操業においては、出銑口内

の圧力損失が炉内圧力損失に比べて非常に大きいため、出銑口が出銑滓速度を決定している。よって出銑滓速度の測定値から、これら3つのパラメータを求めることができる。

2.4 FeOの直接還元反応

以下に示す、スラグ中 FeO のコークスによる直接還元反応を考慮した。



上記反応の反応速度は、宮坂ら¹⁸⁾の式((9),(10)式)で与えた。コークス粒子の比表面積は(11)式で、反応熱量は(12)式を用い温度の関数として与えた。

$$\dot{n}_{\text{FeO}} = k_{\text{FeO}} A (C_{\text{FeO}})^{0.55} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$k_{\text{FeO}} = 0.278 \exp(11.554 - 19980/T) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$A = 6\varepsilon/d_p \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\Delta H_{\text{FeO}} = 155060 + 4.19 \times (-2.85T + 8.5 \times 10^{-4}/T^2 + 2.66 \times 10^5/T) \quad \dots\dots\dots (12)$$

2.5 溶銑とスラグの凝固

本解析では、溶銑とスラグの凝固反応を考慮した。流体の温度が液相線温度と固相線温度の間の値である場合、状態図に基づいた固相率となるとした。すなわち、溶銑とスラグの凝固速度は無限大であるとした。溶銑の凝固潜熱は 272.35×10^3 J/kg とした。溶銑中のカーボン濃度は飽和濃度である 4.0 mass% と仮定し、溶銑の液相線温度は 1423K とした。スラグの凝固は、スラグの温度に応じた見かけの粘度を設定することにより表現した。複数の高炉からサンプリングされたスラグの液相線温度と固相線温度の測定結果に基づき、スラグの液相線温度は 1653K、固相線温度は 1500K に設定した。溶銑とスラグの物性値は組成と温度の関数として与えた²⁰⁾。液相線温度と固相線温度との間の温度でのスラグの見かけの物性値は、折本らのモデルを使用して求めた²¹⁾。

2.6 計算条件

内容積 5000 m^3 、炉床径 14 m、炉底から出銑口までの高さ 3.0 m の高炉を想定し条件を設定した。出銑量は 10000 t/d 、スラグ比は 300 kg/thm とした。出銑口深度は 2.5 m、出銑口表面粗さは 1.0 mm に固定し、出銑口直径のみが時間と共に拡大するとした。初期出銑口直径は 53.0 mm とし、出銑口直径の拡大速度を $1.736 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ とした。スラグ表面の圧力は $4.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ で一定であるとした。出銑口出口側圧力は大気圧 ($1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$) とした。出銑口炉内側圧力には、炉内流動解析モデルから Δt 毎に得られる値を設定した。

初期スラグ組成は、0.3 mass% FeO, 34 mass% SiO₂, 15 mass% Al₂O₃, 42 mass% CaO, 6.5 mass% MgO とした。溶銑

とスラグの滴下温度は1823Kとした。

スラグ層中を滴下する溶銑とスラグ間の相互作用力および熱交換は考慮していない。スラグ表面は断熱であるとした。炉床コークス粒子の温度は、同一セル内に存在する流体の温度と等しいとした。炉壁および炉底煉瓦からのヒートロスは、煉瓦の熱物性値と厚みに応じた総括熱伝達係数と冷却温度を与えることにより考慮し、炉壁・炉底煉瓦内の温度分布は計算していない。冷却水の温度は炉壁・炉底ともに298Kに設定した。

計算格子は $15(r) \times 22(z) \times 32(\theta)$ の不等間隔格子を採用し、時間刻み Δt は数値解析が安定的に行える程度の十分小さな値 (0.001 s) を設定した。溶銑とスラグは180°対角に設置された出銑口より交互に排出し、出銑滓挙動が擬定常状態に達するまで計算を行った。

2.7 計算方法

基礎式に対して有限差分法に基づく差分法を3次元円筒座標系のスタガードグリッド上でを行い、VOF法を適用したHSMAC法^{16,17)}により解を求めた。VOFの解法にはドナー・アクセプタ法¹⁷⁾を使用した。以下の手順により、計算を行った。

- 1) 溶銑を溶銑表面に、スラグをスラグ表面にそれぞれ滴下させる。
- 2) 出銑口に最も近い計算セル内に存在する溶銑とスラグの存在割合から、出銑口内に存在する流体の物性値を算術平均により与える。トータル排出速度を(7)式より求める。
- 3) 2) で求めたトータル排出速度を境界条件として、炉床内流動解析モデルにより炉床内の溶銑およびスラグの速度分布を求める。
- 4) 溶銑とスラグの速度分布に基づき、スラグ・溶銑表面を移動させる。
- 5) 炉床内流動解析モデルにより得られた出銑口炉内側圧力を、出銑口内圧力損失推定モデルの境界条件として設定する。
- 6) スラグ中FeO濃度を求める。
- 7) 溶銑・スラグの温度分布を求める。温度に応じた溶銑の固相率を設定する。
- 8) トータル排出速度に、出銑口に最も近い計算セル内に存在する溶銑とスラグの存在割合をそれぞれ乗じ、溶銑とスラグの排出速度を求める。
- 9) 以上の手順を、スラグ表面が出銑口レベルに到達するまで繰り返す。
- 10) スラグ表面が出銑口レベルに達したら、その出銑口を閉じる。もし出銑滓挙動が擬定常に達していない場合は、反対側の出銑口を開き次のタップに移る。擬定常になるまで以上の手順を繰り返す。計算時間の問題から、最大タップ数は6タップとした。

3. 結果および考察

各種炉内条件下にて、溶銑およびスラグの滴下分布 (均一に滴下、炉壁から2.0mの領域にのみ滴下)、滴下スラグ中FeO濃度 (0, 2, 5, 10 mass%), 炉底・側壁煉瓦の熱物性値 (21.42, 15.0 W/m²·K) が出銑滓温度、炉床温度分布、溶銑・スラグの排出速度、残銑滓量、表面形状の経時変化に与える影響を調査した。ベース条件は、コークス粒径 30 mm の均一充填層、空隙率0.3、溶銑およびスラグの物性値は1773Kの値を使用し、出銑間隔0sの交互出銑とした。

3.1 出銑滓温度の経時変化

滴下スラグ中のFeO濃度を0 mass%, 溶銑・スラグを炉の周辺部に滴下、炉壁の総括熱伝達係数を21.43 W/m²·K (炉壁煉瓦の熱伝導率21.43 W/m·K, 煉瓦厚み1.0m)、炉底の総括熱伝達係数を7.14 W/m²·K (炉壁煉瓦の熱伝導率21.43 W/m·K, 煉瓦厚み3.0m) という条件下にて計算を行った際の最終タップ (6タップ目) における出銑滓温度の経時変化を Fig. 1 に示す。FIMPIT法²²⁾ (Fiber In Metallic tube for Pig Iron Temperature method) により測定された福山3高炉での出銑滓温度の実測値を Fig. 2 に示す。両者の結果は、出銑開始直後に上昇を開始し、1200~1800s程度で最高温度を示した後、時間の経過とともに低下するという共通の傾向を示しており、計算条件の仮定に大きな問題が

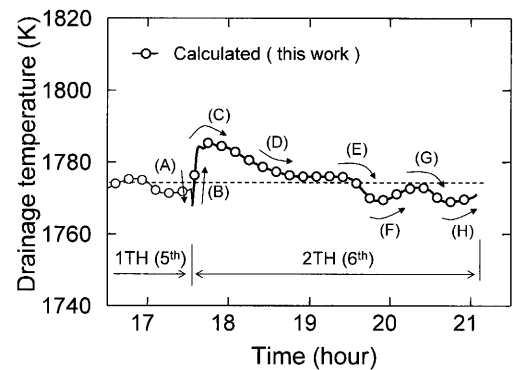


Fig. 1. Temporal variation of drainage temperature in the 6th tap.

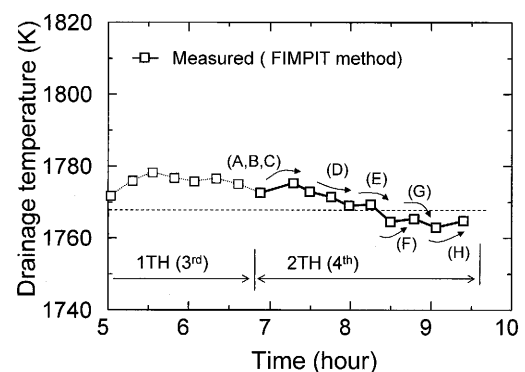


Fig. 2. Temporal variation of drainage temperature measured by "Fiber In Metallic tube for Pig Iron Temperature" (FIMPIT) method.

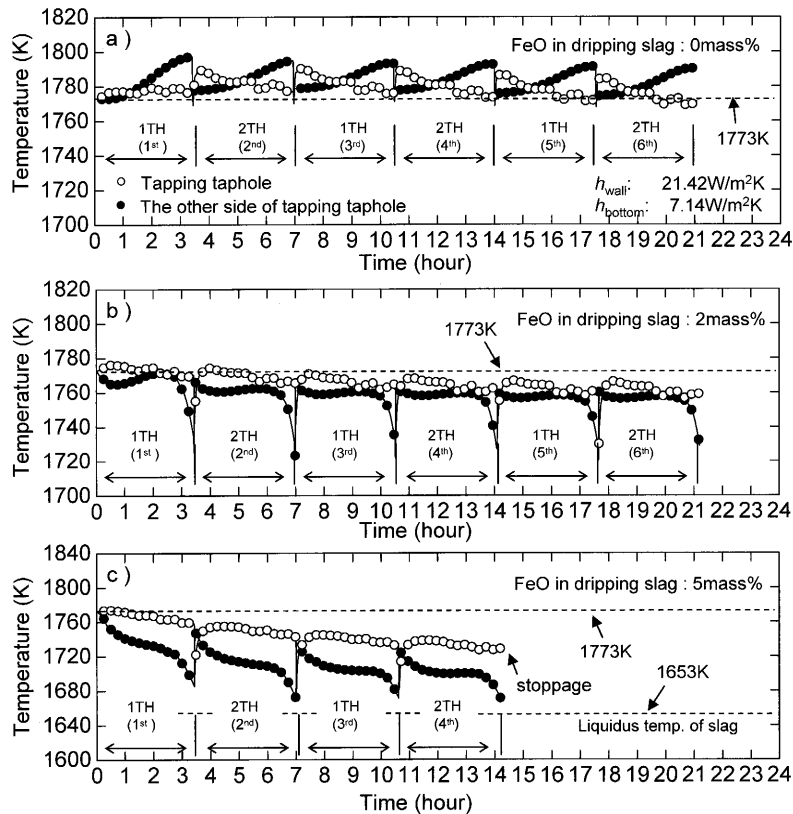


Fig. 3. Effect of FeO concentration in dripping slag on taphole temperatures. Total heat transfer coefficient of wall and bottom are $21.42 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $7.14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, respectively.

ないことが確認された。Fig. 1 に着目すると、出銑口近傍には炉壁からの抜熱により温度の低下したスラグが存在するが、開口直後は主としてこのスラグが排出されるため、出銑滓温度は出銑直後に極短時間ではあるが一度低下する(A)。その後、出銑滓温度が急激に上昇しているが(B)、この時期は主としてスラグが排出されており、重力と流通抵抗とのバランスによりスラグ表面が出銑口に向かって一旦大きく傾斜する。このため、炉内側に存在する、スラグより流通抵抗が小さな高温の溶銑の流出が始まる。出銑滓温度は最高値を示した後(C)徐々に低下し、出銑時間の半ば迄は、ほぼ一定温度を示す(D)。これは、出銑口レベル以下に存在する低温の溶銑の流出量が次第に増加することと、スラグの流出量が一度減少しその後次第に増加するためである。その後炉壁周辺に存在する低温なスラグの流出量が増加するため、出銑滓温度は再度低下(E)する。この時点でスラグ表面の傾斜が再びきつくなり、より内側に存在する高温のスラグが排出されるため、再度温度が上昇する。出銑滓温度が平均温度付近まで上昇した後(G)、出銑口レベル以下に存在する溶銑の排出量が増加するため出銑滓温度は再度低下(H)するが、出銑末期ではスラグ表面が出銑口レベルと非常に近くなるため再度温度が上昇している。

3.2 滴下スラグ中FeO濃度の影響

炉壁の総括熱伝達係数を $21.43 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (炉壁煉瓦の熱

伝導率 $21.43 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、煉瓦厚み 1.0 m)、炉底の総括熱伝達係数を $7.14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (炉壁煉瓦の熱伝導率 $21.43 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、煉瓦厚み 3.0 m) という条件にて計算を行った際の出銑口近傍の温度変化への滴下スラグ中FeO濃度の影響を Fig. 3 に示す。滴下スラグがFeOを含まない場合(a)は、5タップ目で擬定常状態に達しており、出銑滓温度の平均値は約 1773 K であった。滴下スラグ中FeO濃度が $2 \text{ mass}\%$ の場合(b)でも6タップ目で擬定常状態に達したが、 $5 \text{ mass}\%$ の場合は温度低下に伴うスラグ粘度の急激な上昇により5タップ目で出滓不能となった。

滴下スラグ中FeO濃度が上昇しても、出銑滓温度の傾向は大きく変化しない。しかしながら、出銑していない側の出銑口温度は滴下スラグ中FeO濃度の変化に対応して大きく変化する。滴下スラグ中FeO濃度が $0 \text{ mass}\%$ である場合、出銑していない側の出銑口温度は、出銑末期に向けて徐々に上昇する。滴下スラグ中FeO濃度の増加は、特に出銑後期において、出銑していない側の出銑口温度の低下を引き起こす。従って、出銑していない側の出銑口温度を監視することにより、炉内状況の変化をより早く検知できると推察される。

炉壁の総括熱伝達係数を $15.0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (炉壁煉瓦の熱伝導率 $15.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、煉瓦厚み 1.0 m)、炉底の総括熱伝達係数を $5.0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (炉壁煉瓦の熱伝導率 $15.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、煉瓦厚み 3.0 m) という条件にて計算を行った際の、出銑口近傍の

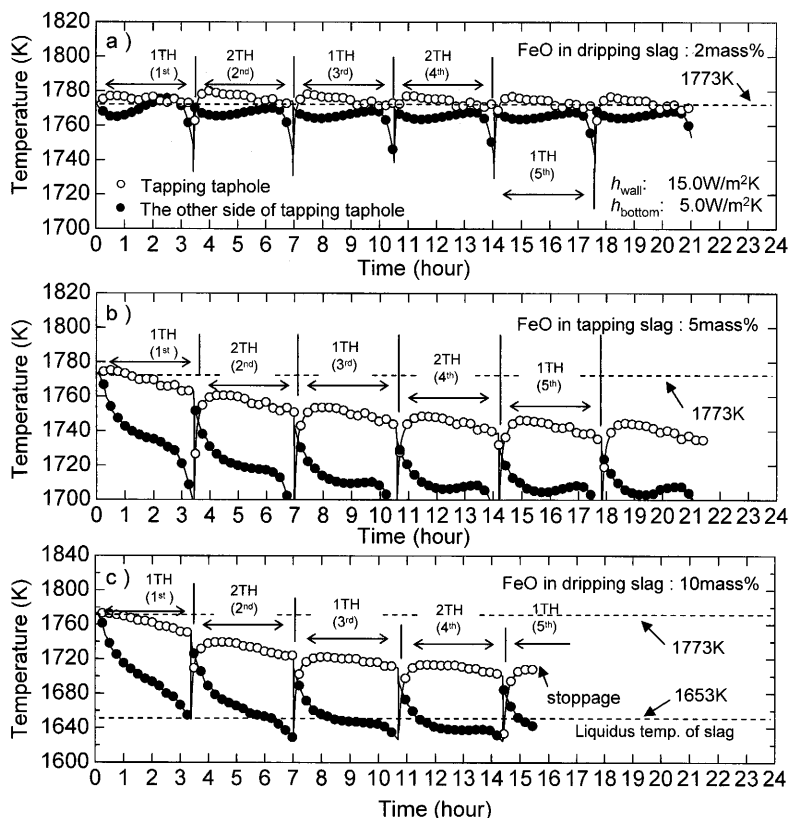


Fig. 4. Effect of FeO concentration in dripping slag on taphole temperatures. Total heat transfer coefficient of wall and bottom are $15.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $5.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, respectively.

温度変化への滴下スラグ中 FeO 濃度の影響を Fig. 4 に示す。これらの総括熱伝達率は、Fig. 3 に示した条件の約 70% となっている。滴下スラグ中 FeO 濃度が 2.0mass% であるとき、出銑滓温度の経時変化は 2 タップ目で擬定常状態に達しており、出銑滓温度の平均値は約 1773K である。しかし滴下スラグ中 FeO 濃度を 5.0mass% としたときは、出銑滓温度の経時変化は 6 タップ目でも擬定常状態には至っていない。また、FeO 濃度を 10mass% とした場合は、炉内温度の低下に伴うスラグ粘度の上昇により、5 タップ目で出滓不能となった。炉壁および炉底の総括熱伝達係数が変化しても、出銑滓温度の経時変化は、基本的には Fig. 3 と同様の傾向を示している。Fig. 4(c) では、出銑口温度がスラグの液相線温度を下回った場合でも、しばらくの間は継続して排出されている。しかし、Fig. 3(c) では、出銑口温度がスラグの液相線温度に到達する前に出銑滓が不能となっている。これは Fig. 3 の条件では、壁面での熱損失が大きいため出銑口直上に存在するスラグの温度が低下し、一部凝固層が形成されているためである。以上の結果より、2mass% を超える FeO が滴下スラグに含まれる場合には、吸熱反応に伴う温度の低下による出銑口近傍のスラグ粘度の上昇のため、安定した出銑滓作業が困難になると予想される。

3.3 排滓中の FeO 濃度

出銑口近傍のスラグに含まれる FeO 濃度の経時変化を

Fig. 5 に示す。スラグ中 FeO 濃度は出銑初期と末期に最大値を示している。これは、スラグ層の厚みが出銑初期と末期に最も薄くなるため、滴下スラグがスラグ表面に滴下してから出銑口より排出されるまでの時間が最小となるためである。スラグ中 FeO 濃度は、すべての条件において、出銑している側の出銑口より、出銑していない側の出銑口でかなり小さな値を示した。これは、出銑していない側の出銑口近傍に滴下したスラグの炉内滞在時間が、出銑している側の出銑口近傍に滴下したスラグより長いためである。安定的に操業している高炉から採取された高炉スラグ中 FeO 濃度が約 0.3mass% であることと、Fig. 3~5 の結果から、安定した高炉操業のためには、滴下スラグ中の FeO 濃度は 2.0mass% 以下とする必要があると考えられる。滴下スラグ中 FeO 濃度が 2.0mass% を超えると、出銑初期・末期における出滓中のスラグ濃度は 1.0mass% を超えるようになる。従って、排滓中の FeO 濃度を監視することにより、炉内状態の変化をより早く検知可能であると予想される。

3.4 滴下スラグ中 FeO 濃度の界面形状および出銑滓速度への影響

炉壁の総括熱伝達係数を $15.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (炉壁煉瓦の熱伝導率 $15.0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 煉瓦厚み 1.0m), 炉底の総括熱伝達係数を $5.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (炉壁煉瓦の熱伝導率 $15.0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 煉瓦厚み 3.0m) という条件にて計算を行った際の、スラグ・

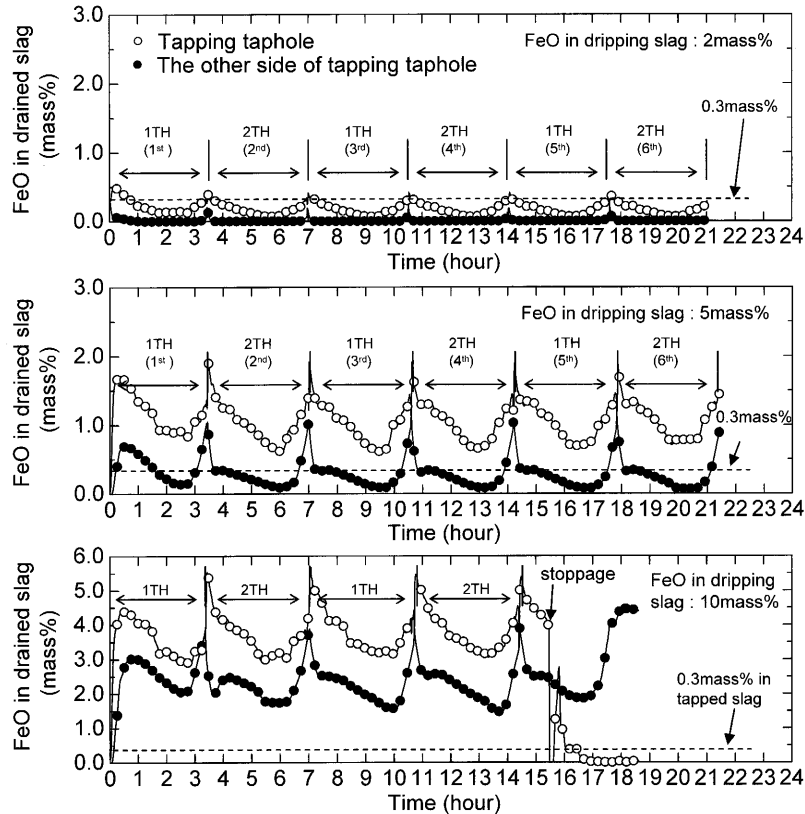


Fig. 5. Effect of FeO concentration in dripping slag on FeO concentration vicinity of tapholes. Total heat transfer coefficient of wall and bottom are $15.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $5.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, respectively.

溶銑表面形状におよぼす滴下スラグ中 FeO 濃度の影響を Fig. 6 に示す。滴下スラグ中 FeO 濃度を 2, 5 mass% とした場合の出銑口レベルを基準とした最大スラグ表面高さはそれぞれ 2.0, 2.1 m であった。滴下スラグ中 FeO 濃度が 2.0 から 5.0 mass% へと増加しても、各表面形状への明確な影響は確認できなかった。しかしながら、滴下スラグ中 FeO 濃度を 10 mass% とした場合は、FeO の C による直接反応に伴う大幅な温度低下、すなわちスラグ粘度の急激な上昇により 5 タップ目にて出銑不能となった。

出銑速度におよぼす滴下スラグ中 FeO 濃度の影響を Fig. 7 に示す。滴下スラグ中 FeO 濃度の上昇に伴い、出銑速度と出滓速度の交点は長時間側にシフトしている。滴下スラグ中 FeO 濃度が 10% の場合は、出銑口近傍に存在するスラグの粘度が非常に高いため、他の条件と比べ出銑速度が非常に不安定であった。また 3800 s 付近で出銑不能となった。

3.5 溶銑およびスラグの滴下量分布の炉内温度分布への影響

スラグと溶銑の滴下分布が炉内温度分布、各界面形状におよぼす影響を Fig. 8 に示す。炉壁の総括熱伝達係数を $21.43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (炉壁煉瓦の熱伝導率 $21.43 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 煉瓦厚み 1.0 m), 炉底の総括熱伝達係数を $7.14 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (炉壁煉瓦の熱伝導率 $21.43 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 煉瓦厚み 3.0 m), 滴下スラグ中 FeO 濃度 0.0% という条件にて計算を行った際の 6 タッ

プ目開始直後の温度分布と表面形状を示している。溶銑とスラグをスラグ表面に均一に滴下した場合 (Fig. 8(b)) は、溶銑とスラグを炉の周辺部に滴下させた場合 (Fig. 8(a)) より、炉の中心部のスラグ温度はより高い値を示しており、一見、均一に滴下させた方が良い様に見える。しかし、均一に滴下させた場合は、炉壁周辺部に緑~青色で示された温度の低い領域がより多く見られる。また平均スラグレベル以上の領域にスラグの液相線温度以下の領域、すなわちスラグの凝固層が確認された。炉の周辺部に滴下させた場合と比較して、非常に不安定な界面形状となっていることもわかる。したがって、溶銑・スラグの滴下分布、すなわち Ore/Coke 分布が出銑挙動に大きな影響を与えていることがわかる。また安定した出銑挙動のためには、炉の周辺部分に溶銑・スラグを滴下させる必要があると言える。杉山らが、レースウェイ周辺に高温領域が形成されるため、スラグは主として炉の周辺部分に滴下していると報告していることから、炉下部に関しては炉の周辺部分に高温領域を形成することが、安定的な操業につながると考えられる。

ベース条件 (溶銑・スラグを炉の周辺部分に滴下, スラグ中 FeO 濃度 0 mass%, 炉壁の総括熱伝達係数を $21.43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, 炉底の総括熱伝達係数を $7.14 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) として計算を行った際の炉内温度分布の経時変化を Fig. 9 に示す。スラグ表面は、出銑開始後 107 min で最も高くなり、214 min

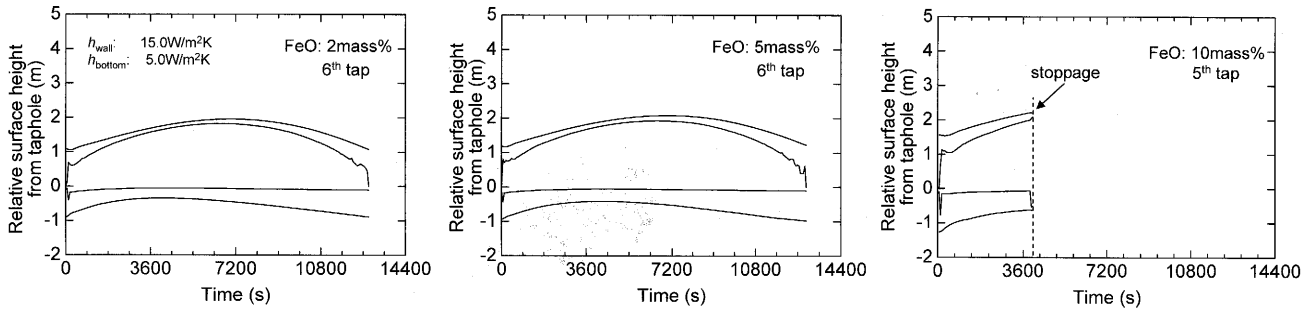


Fig. 6. Effect of FeO concentration in dripping slag on gas–slag and slag–iron interfaces shapes. Total heat transfer coefficient of wall and bottom are $15.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $5.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, respectively.

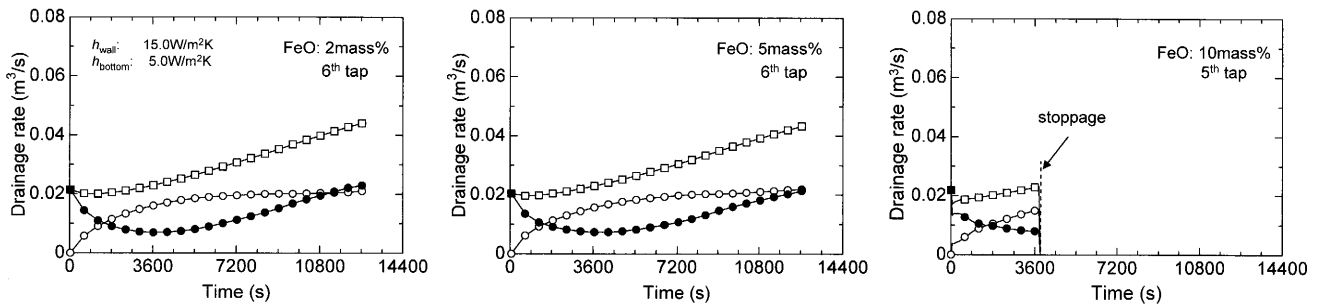


Fig. 7. Effect of FeO concentration in dripping slag on total, iron and slag drainage rates. Total heat transfer coefficient of wall and bottom are $15.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $5.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, respectively.

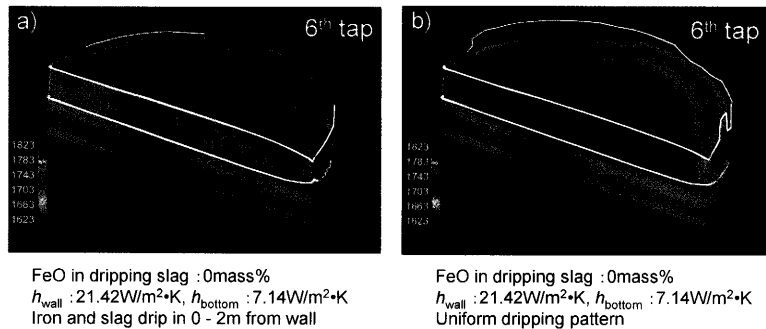


Fig. 8. Effect of dripping pattern of iron and slag on temperature distribution and interfaces shapes.

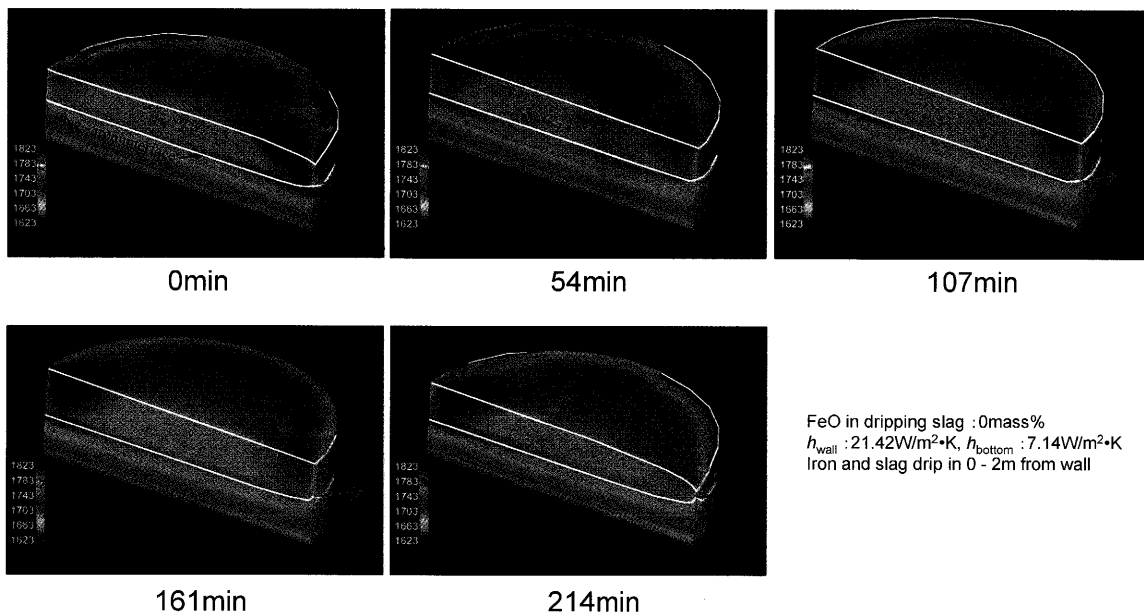


Fig. 9. Temporal variation of temperature distribution and interfaces shapes.

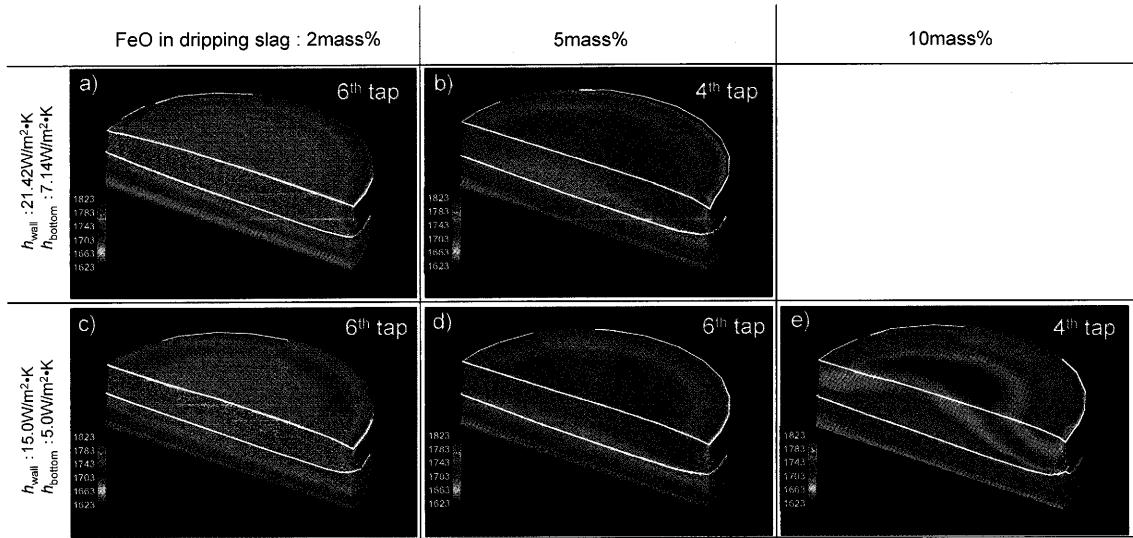


Fig. 10. Effect of total heat transfer coefficient of hearth wall and bottom, and FeO concentration in dripping slag on temperature distribution in the hearth at the beginning of the tap.

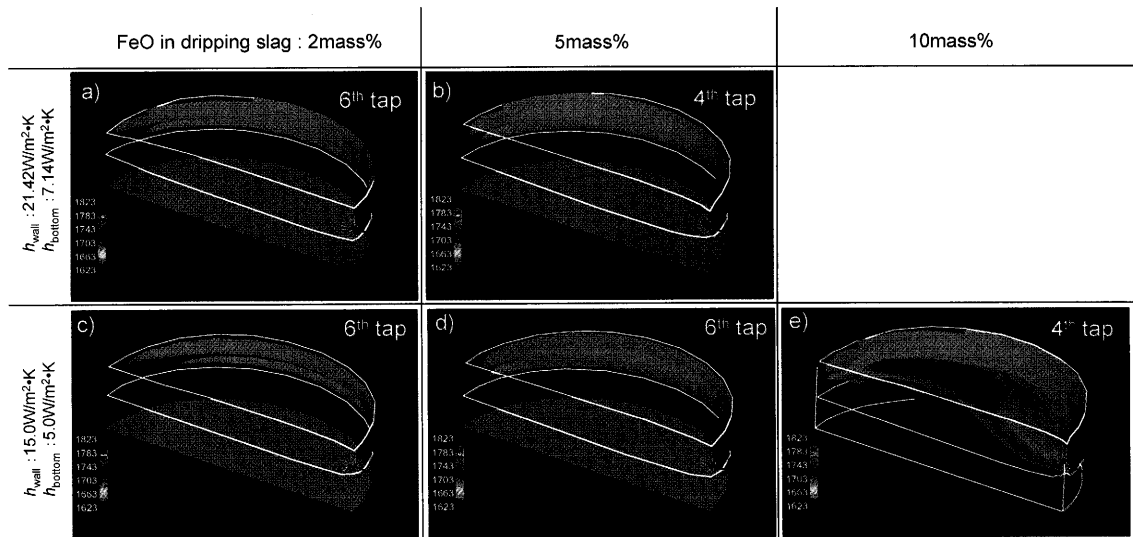


Fig. 11. Effect of total heat transfer coefficient of hearth wall and bottom, and FeO concentration in dripping slag on temperature distribution in the hearth (below liquidus temperature of the slag) at the beginning of the tap.

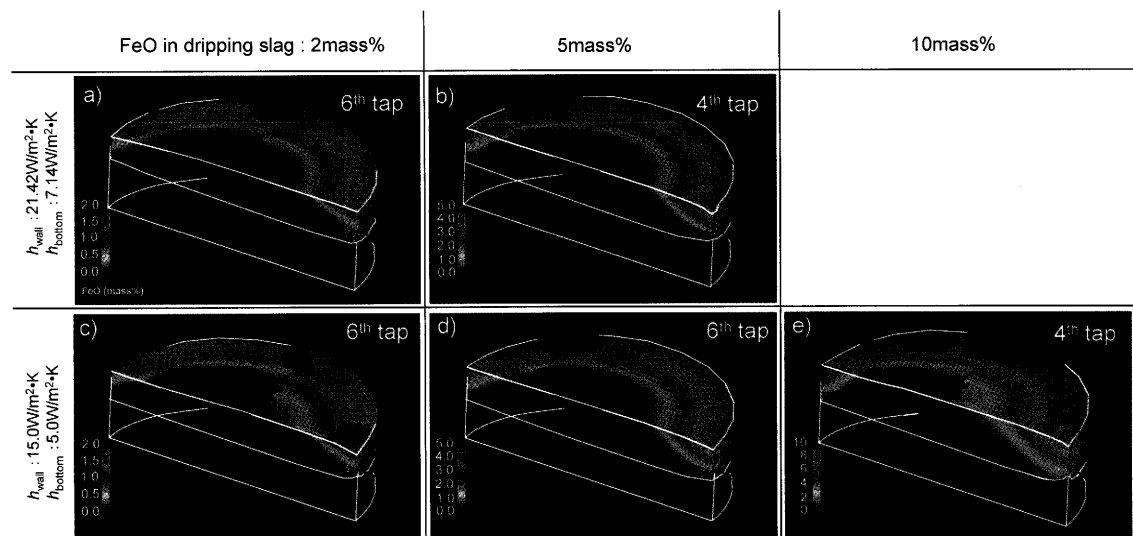


Fig. 12. Effect of total heat transfer coefficient of hearth wall and bottom, and FeO concentration in dripping slag on FeO concentration in the hearth at the beginning of the tap.

後にスラグ表面が出鉄口レベルに到達し、タップが終了している。時間の経過とともに出鉄している出鉄口近傍の温度は次第に低下し、出鉄していない出鉄口近傍の温度は上昇している。タップを通して、周辺部と比較して温度の低いスラグ層の領域が炉の中心部に存在している。これより、出鉄していない出鉄口近傍に滴下したスラグはその領域に留まり、そのタップ中には排出されないということがわかる。したがって、スラグの円周方向の滴下分布に大きな偏差がある場合は、そのまま出鉄口偏差となって観測される可能性が高いと言える。

溶鉄表面の直下に高温の領域が確認される。しかもこの高温領域は界面に沿って形成されており、出鉄していない出鉄口近傍に滴下した溶鉄は、スラグとは異なり、溶鉄表面近傍を通過し、滴下位置とは反対側の出鉄口から排出されていることがわかる。炉壁の極近傍に滴下した一部の溶鉄は炉壁からの冷却により密度が大きくなるため炉底に向かって沈むが、滴下直後の溶鉄の大部分は温度が高く、炉内溶鉄に比べ密度が軽いため不透過層が存在しない場合であっても炉底に沈み込むことなく、溶鉄表面を通り、出鉄口へと到達し、比較的短時間で炉外へ排出されることを示唆している。

3.6 温度分布へのFeO濃度の影響

滴下スラグ中 FeO 濃度および冷却条件の温度分布への影響を Fig.10 に、スラグの液相線温度 (1653K) 以下の温度を持つ領域を Fig.11 に示す。また FeO 濃度分布を Fig.12 に示す。滴下スラグ中 FeO 濃度が 0mass% の場合でも、出鉄口近傍を除き、炉壁周辺にスラグの凝固層が確認される。出鉄口近傍のスラグの凝固層は、出鉄口の切り替えに伴い、生成・消滅を繰り返している。滴下スラグ中 FeO 濃度はスラグの凝固体積に大きな影響を与えていることもわかる。この出鉄口近傍に存在するスラグの凝固層も、出鉄口偏差を含めた出鉄滓挙動に大きな影響をおよぼしていると推察される。

滴下スラグ中 FeO 濃度の増加は、高炉炉下部温度の低下を引き起こし、炉壁近傍において液相線温度以下の温度に低下したスラグの体積を増加させる。炉壁の冷却を強化した場合も、炉壁近傍の凝固スラグ層が増加する。スラグ中 FeO の濃度分布は、炉内での滞在時間と温度分布およびスラグの流動状況に依存する。滴下スラグ中 FeO 濃度の増加は、排滓中の FeO 濃度を増加させると共に炉壁周辺の凝固スラグ層を引き起こすなど、問題が多い。従って、安定した出鉄滓を確保するには、スラグ表面に滴下するスラグ中 FeO 濃度は 2mass% 以下に抑える必要があるといえる。

4. 結言

溶鉄・スラグの滴下分布、滴下スラグ中 FeO 濃度、炉壁・炉底の熱物性値すなわち冷却条件が出鉄滓挙動におよ

ぼす影響について検討を行い、以下の知見を得た。

(1) 滴下スラグ中 FeO 濃度が 2mass% を超えると、炉床温度の低下にともなうスラグ粘度の上昇により、排滓性が悪化する。排滓性の悪化をより早く検知する手段として、出滓中の FeO 濃度の監視が有効である。

(2) 滴下スラグ中 FeO 濃度が変化しても、出鉄滓温度への影響は非常に小さく、出鉄滓温度から炉内状況を判断することは非常に困難である。これに対して、出鉄を行っていない側の出鉄口温度は、滴下スラグ中 FeO 濃度に対して非常に敏感に変化する。従って、この温度を監視することにより、滴下スラグ中 FeO 濃度の増加など、炉内状況を悪化させる各種要因の変化をより早く検知可能であると考えられる。

(3) たとえ滴下スラグ中 FeO 濃度が 0mass% の場合であっても、出鉄口近傍を除き、炉壁部分にスラグの凝固層が確認された。この凝固層は、滴下スラグ中 FeO 濃度の増加に伴い増加した。

(4) 溶鉄・スラグの滴下分布は、均一な分布より炉の周辺部分に集中した分布の方がより安定的な出鉄滓挙動となる。

(5) 出鉄を行っていない出鉄口近傍に滴下したスラグは、その近傍に留まり、主として次の出鉄で排出され、反対側の出鉄口からは排出されない。これに対して、溶鉄は、いずれの出鉄口からも排出される。これも出鉄口偏差を生じる一因となっていると考えられる。

記号

A	: 反応界面積 (m^2)
C_i	: i 成分の濃度 (mol/m^3)
C_p	: 比熱 ($J/kg \cdot K$)
D_i	: i 成分の拡散係数 (m^2/s)
D	: 出鉄口直径 (m)
d_p	: コークス粒径 (m)
e	: 出鉄口内壁の表面粗さ (m)
F	: 体積力 (N/m^3)
f	: 摩擦係数 (-)
ΔH_i	: i 成分のエンタルピー変化 (J/mol)
h_{wall}	: 炉壁の総括熱伝達係数 ($W/m^2 \cdot K$)
h_{bottom}	: 炉底の総括熱伝達係数 ($W/m^2 \cdot K$)
k	: 熱伝導度 ($W/m \cdot K$)
k_i	: i 成分の反応速度定数 ($mol/m^2 \cdot s$)
L	: 出鉄口深度 (m)
n_i	: i 成分の物質質量 (mol)
ΔP	: 出鉄口両端の圧力差 (Pa)
p	: 圧力 (Pa)
Re	: レイノルズ数 (-)
T	: 温度 (K)
t	: 時間 (s)
\vec{u}, \vec{v}	: 速度 (m/s)
ε	: 空隙率 (-)
ρ	: 密度 (kg/m^3)
μ	: 粘度 ($Pa \cdot s$)

文献

- 1) T.Fukutake and K.Okabe: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **16** (1976), 309.
- 2) T.Fukutake and K.Okabe: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **16** (1976), 317.

- 3) F.Tanzil, P.Zulli, J.M.Burgess and W.Pinczewski: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **24** (1984), 197.
- 4) P.Zulli, F.Tanzil, Q.He, B.Wright, I.Bean and R.Nightingale: Proc. 4th Int. Cong. on Science and Technology of Ironmaking, Steel Inst. VDEh, Düsseldorf, (2003), 482.
- 5) S.Watakabe, K.Takeda, Y.Sawa and T.Kawai: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 301.
- 6) J.Torrkulla and H.Saxén: *ISIJ Int.*, **41** (2000), 438.
- 7) H.Takahashi and H.Wakai: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 373.
- 8) A.Shinotake, M.Ichida, H.Ootsuka and Y.Sugizaki: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 388.
- 9) J.Brännbacka and H.Saxén: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 1131.
- 10) T.Nouchi, M.Yasui and K.Takeda: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 175.
- 11) K.Nishioka, T.Maeda and M.Shimizu: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 669.
- 12) K.Nishioka, T.Maeda and M.Shimizu: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1496.
- 13) K.Takeda, S.Taguchi, T.Hamada, H.Kato and T. Nakai: *Tetsu-to-Hagané*, **75** (1989), 243.
- 14) T.Sugiyama, T.Nakagawa, H.Sibaïke and Y.Oda: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 2044.
- 15) P.Carman: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **15** (1937), 150.
- 16) C.Hirt, B.Nichols and N.Romero: Los Alamos Scientific Laboratory Report, LA-5852, (1975).
- 17) C.Hirt and B.Nichols: *J. Comp. Phys.*, **39** (1981), 201.
- 18) N.Miyasaka, M.Sugata, Y.Hara and S.Kondo: *Trans. Iron Steel Inst. Jan.*, **15** (1975), 27.
- 19) Basis of Blast Furnace Process, Verlag Stahleisen mbH, Agne, Tokyo, (1979), 15.
- 20) T.Iida, H.Sakai, Y.Kita and K.Shigeno: *ISIJ Int.*, **40** (2000), S110.
- 21) T.Orimoto, T.Nishimura, S.Matsuzaki and M.Naito: Private communication.
- 22) Y.Hayasaka, A.Sakai, M.Sakurai, H.Wakai, K.Mori and T.Machara: *NKK Tech. Rep.*, **178** (2002), 32.