

高炉レースウェイ深度制御による 出銑口深度安定化技術

松井 良行*・唯井 力造*²・伊藤 健児*²・松尾 匡*²・永井 信幸*³・今井 孝*³

Stabilization of Tapping Hole Length by Controlling Blast Furnace Raceway Depth

Yoshiyuki MATSUI, Rikizo TADAI, Kenji ITO, Tadasu MATSUO, Nobuyuki NAGAI and Takashi IMAI

Synopsis : On facing the high productivity and elongation of life time in blast furnace iron-making, it is essential to protect the peripheral iron flow formed by a free space in the hearth in addition to maintaining the gas and liquid permeability of deadman. Therefore, it is important to stabilize the length of mud (tapping hole length) which is plugged and formed by hole closing refractory (mud materials), but the phenomena of fluctuation of tapping hole length are not clarified. In this paper, variables affecting the tapping hole length including the raceway depth measured by micro wave reflection struck tuyere are discussed under dimension analysis. As the burden weight above the raceway are balanced to upwind gas, the load to the hearth under the raceway is less than that in the furnace center and a high void ratio area or free space is easy to be formed under the raceway. As the result, it is clarified and quantified that the tapping hole length is recovered from shortage of distance by decreasing raceway depth which promotes deadman to sink further into bottom or increase the void ratio of peripheral area in the hearth.

Key words : blast furnace; raceway; micro wave; tapping hole length; mud material rate; furnace life time; deadman.

1. 緒言

国内において粗鋼生産の伸びが飽和し、鉄源の確保として大型高炉への集約が進むなかで、高出銑操業における操業安定性が注視されている。高炉異常炉況は、従来にもまして下工程への悪影響は甚大となる。とくに、近年のトラブル増加の一要因として高炉の大型化と高出銑比操業が指摘されており、とくに注目される。

高炉の大型化と高出銑比操業の観点からは、出銑滓の管理がますます厳格化されなければならない。高炉出銑口閉塞材（以下：マッド材）は、高炉の出銑滓作業にとって重要な耐火物であり、その炉内奥行き方向でのマッド材充填距離（以下：出銑口深度）は、炉底側壁厚みを制御する上で重要な操業管理項目である。マッド材に要求される具備特性は、単なる出銑口の閉塞目的から、安定操業、作業環境の改善、出銑回数低減による原単位低減および出銑口深度の延長による炉底側壁煉瓦保護と炉体寿命の延命化へと変化してきた。したがって、コークス中心装入による炉芯コークスの通気・通液性の確保に加えて、フリースペース形成挙動¹⁾から溶銑環状流を防止するため出銑口深度の維持が重要である。しかしながら、出銑口深度の変動要因については必ずしも明らかになっていない²⁾。

そこで、本研究では、神戸3高炉（三次）（内容積1845 m³、火入れ1983年4月5日）において羽口から入射したマイクロ波（以下μ波）の反射強度からレースウェイ深度を測定し、出銑口深度に及ぼすレースウェイ深度および諸要因の影響について報告し、高炉操業技術の更なる向上の一助としたい。

2. 出銑口深度安定化に向けたレースウェイ制御技術

Fig. 1に神戸3高炉における出銑口深度とその制御手段であるマッド材原単位の時系列推移を上段に示す。中段には、溶銑粘度に影響する溶銑中 [%Si], [%Ti] を、下段には、出銑口深度制御に介入すると考える出銑口上の羽口の送風支管流量および後述のレースウェイ深度の推定値を示す。2003年8月および10月においては出銑口深度の低下に対してマッド材原単位が増量され、出銑口深度が回復している。一方で、11月において出銑口深度の低下に対してマッド材原単位が増量されているが、出銑口深度の回復は遅滞している。したがって、出銑口深度の変化は、マッド材原単位以外の炉内現象に影響されていると考えられる。

マッド材の炉内における挙動は、日常の出銑滓作業で観

原著論文：ISIJ Int. Vol. 45 (2005), No. 10, pp. 1439-1444

平成18年4月28日受付 平成18年7月6日受理 (Received on Apr. 28, 2006; Accepted on July 6, 2006; originally published in ISIJ Int. Vol. 45, 2005, No. 10, pp. 1439-1444)

* (株) 神戸製鋼所技術研究センター(R & D Lab., Kobe Steel Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675-0023)

*² (株) 神戸製鋼所神戸製鉄所 (Kobe Works, Kobe Steel Ltd.)

*³ 神鋼EN&M (株) EIC 本部 (EIC Div., Shinko EN&M Co., Ltd.)

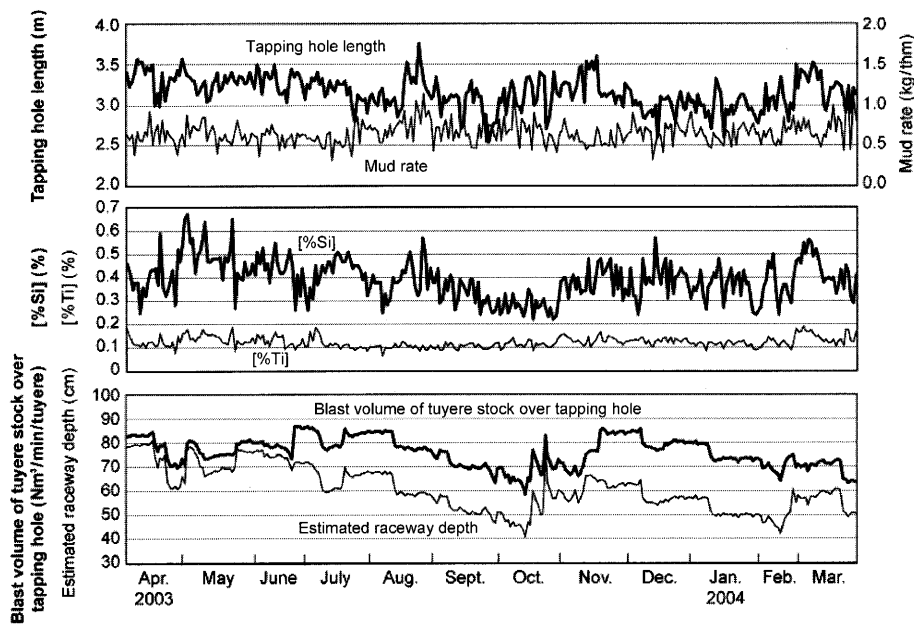


Fig. 1. Changes of operational parameters effecting on tapping hole length.

察される現象、改修時の炉内観察、コアボーリングによるサンプル解析およびシミュレーション炉実験³⁾からある程度は推察することが可能である。加古川2高炉（1次）および1高炉（2次）改修時の炉内調査では、出銑口周辺のマッド材堆積状況は、概ね同形状であることが報告されている⁴⁾。炉内に挿入されたマッド材は、炉内のコークスを押し退けて大きな岩盤を形成している。その堆積状態は、出銑口レベルでは薄く、下部は厚く堆積し、下端部は当初の炉底位置まで下っており、また、出銑口レベルから上部において一体化したマッド材の周辺部には、塊状（ $\phi 20\sim 40\text{mm}$ ）のマッド材が積層して堆積していることが報告されている⁴⁾。

出銑口深度を維持するためマッド材の炉内における挙動を考える上で、重要なことは、上記のマッド材周辺部の塊状（ $\phi 20\sim 40\text{mm}$ ）の積層した堆積あるいは表層内部の風化であり、これらが同一のマッド材原単位における出銑口深度を低下させる。マッド材の比重は、溶銑（ 6600kg/m^3 ）およびスラグ（ 2600kg/m^3 ）に比べて約 2200kg/m^3 と軽いため炉内のコークス間隙に押し込まれないと浮上し、堅牢なマッド材層を形成しない。これが、塊状マッド材の堆積あるいは内部の風化現象であると考えられる。一方で、マッド材を炉内で捕捉するコークスの比重は、 500kg/m^3 と軽いため、炉下部にコークスを着床させる荷重¹⁾が低下するとマッド材前面でのコークス空隙率が增大し、マッド材が浮上し易いため出銑口深度が低下する。レースウェイ部においては、充填荷重が、上昇ガス流れと拮抗するためレースウェイ下には、炉中心部に比べて実荷重は少なく、高空隙率コークス領域あるいはフリースペースが形成されやすい。したがって、出銑口深度の変動は、炉下部にコーク

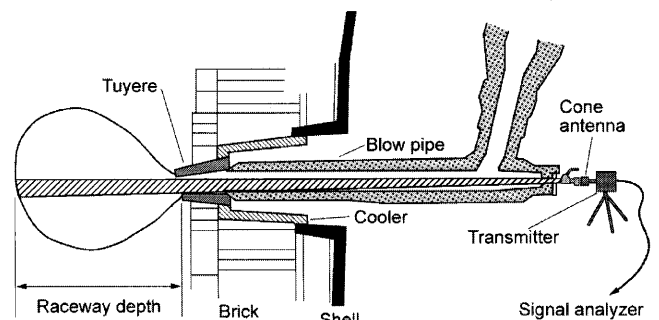


Fig. 2. Micro wave technique to determine the raceway depth.

スを着床させる荷重の変動、すなわち、レースウェイ深度の変動が一因と考えられる。

3. 測定方法および原理

3.1 レースウェイ深度測定方法および原理

Fig. 2に、高炉羽口部からの μ 波入射方法⁵⁾を示す。 μ 波⁶⁾は、導波管から送信され、導波管の先端に設けられた円柱状のアンテナから羽口覗き窓を通して入射される。アンテナは、マイクロ波である送信波を効率よく前方に発射するために、その内部には円錐状の凹部が形成されており、ブローパイプの基端側の羽口覗き窓に隣接するように配置される。

Fig. 3に、測定原理を示す。発生された μ 波の送信波①の一部は、分岐②され、ミキサーに伝送され、レースウェイからの受信波④と合成されビート波を発生させる。ビート波の周波数は、対象物までの距離に相当する周波数成分を持っており、周波数解析⑤によって空間距離が測定できる。

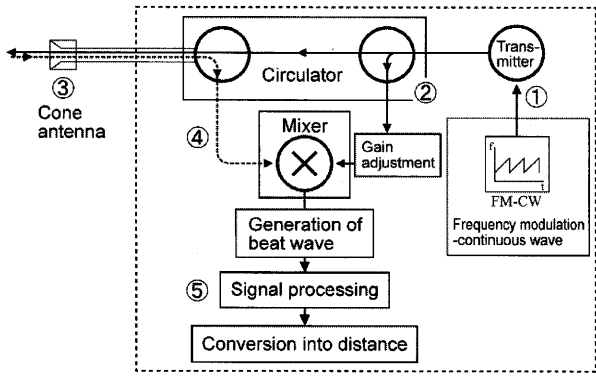


Fig. 3. Principle to determine distance by micro wave reflection.

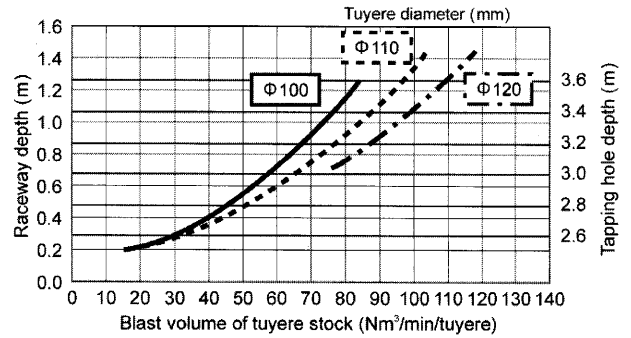


Fig. 5. Relationship between raceway depth and tapping hole depth

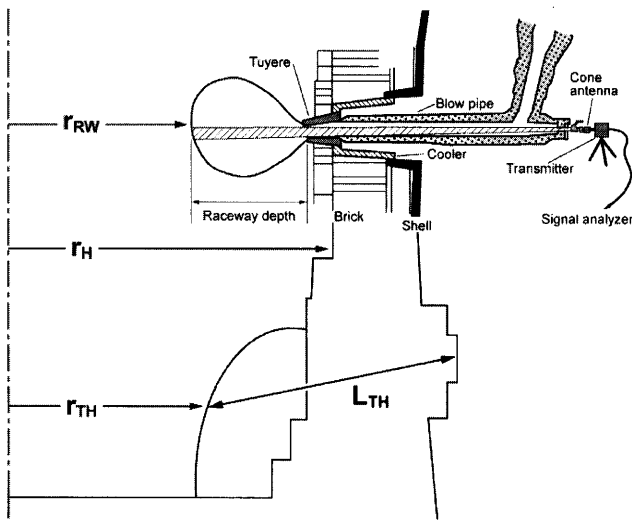


Fig. 4. Micro wave technique to determine the raceway depth and dimension around the tapping hole region.

Fig. 4に、神戸3高炉の炉底構造および高炉羽口部からのμ波入射方法³⁾を示す。本研究においては、μ波反射強度のピーク検出位置からレースウェイ先端位置（以下：レースウェイ深度）を標定することによって炉中心からレースウェイ先端位置までの距離 (r_{RW}) を算出した。出鉄口深度 (L_{TH}) は、出鉄口を開口機で開口する際の開口開始から開口完了までのドリルの侵入長さをドリルの駆動トルクの変化から求めることができる。出鉄口角度から炉内出鉄口位置を算出し、炉中心から炉内出鉄口位置までの水平距離 (r_{TH}) を算出した。

Fig. 5に、神戸3高炉におけるレースウェイ深度に及ぼす送風支管流量の影響（測定値の回帰線）を示す。送風支管流量の低下とともにレースウェイ深度は浅くなる。また、同一の送風支管流量においては羽口径が小さいほど羽口前風速が上昇するためレースウェイ深度は深くなる。同Fig. には、レースウェイ先端と出鉄口先端が一致する出鉄口深度を併記した。送風支管流量が、80 Nm³/min 以上においては、レースウェイ深度は、0.8 m 以上となり、出鉄口深度が3.0 m 以下である場合には出鉄口先端はレースウェイ先

端よりも炉壁側に位置する。

4. 測定結果および考察

4.1 出鉄口深度に及ぼす諸要因の影響評価

上述のように炉内出鉄口位置において炉下部にコークスを着床させる荷重²⁾が低下するとマッド材前面でのコークス空隙率が増大し、マッド材が浮上し易くなるため出鉄口深度が低下する。これは、レースウェイ部においては、充填荷重が、上昇ガス流れと拮抗するためレースウェイ下には、炉中心部に比べて実荷重は少なく、高空隙率コークス領域あるいはフリースペースが形成されやすいためである。したがって、炉下部にコークスを着床させる荷重の変動、すなわち、レースウェイ深度⁵⁾の変化によって出鉄口深度は変動すると考えられる。さらに、炉芯コークス層とマッド材堆積層との境界部における炉芯コークス層の空隙率の大きさに依存してこの境界部を流れる溶銑滓の流量が増加するため、この溶銑滓に晒されて損耗するマッド材堆積層の損耗が助長される。したがって、フリースペース形成による溶銑環状流による炉内堆積マッド材層の損耗は、溶銑の粘性に影響されると考えられる。

そこで、本研究においては出鉄口先端位置 (r_{TH}) に及ぼすレースウェイ先端位置 (r_{RW}) の影響を次式にもとづき次元解析することによって出鉄口深度に及ぼす諸要因の影響を評価した。

$$R_{TH} = C \cdot R_{RW}^\alpha \cdot MR^\beta \cdot [\%Si]^\gamma \cdot [\%Ti]^\delta \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 R_{TH} ：炉床半径 (r_H) 基準の無次元出鉄口先端位置 ($=r_{TH}/r_H$)、 C ：定数、 R_{RW} ：無次元レースウェイ先端位置 ($=r_{RW}/r_H$)、 MR ：マッド材原単位 (kg/thm)、 $[\%Si]$ ：溶銑中 $[\%Si]$ 、 $[\%Ti]$ ：溶銑中 $[\%Ti]$ 。

4.2 出鉄口深度に及ぼすレースウェイ深度およびマッド材原単位の影響

Fig. 6に、レースウェイ先端位置 (R_{RW}) が出鉄口先端位置 (R_{TH}) に及ぼす影響の度合いを表す強度指数 α と R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) との関係を示す。 R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が0.95

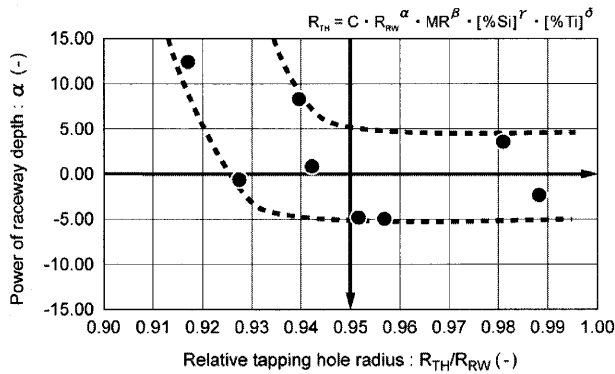


Fig. 6. Effect of raceway depth on tapping hole depth.

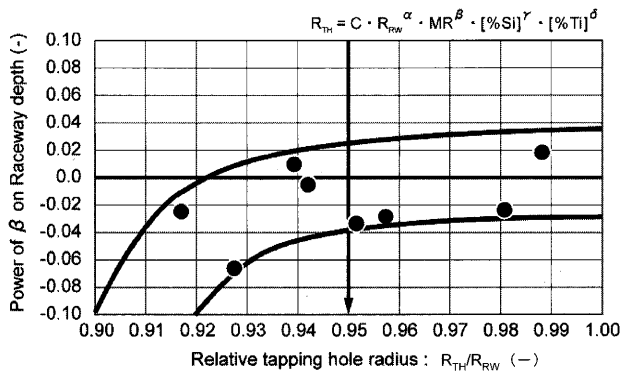


Fig. 7. Effect of mud rate on tapping hole depth.

以上になると α は略0となるので、レースウェイ深度を変化させても出銑口深度は変化しない。

これに対し、 R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が0.95未満では常に $\alpha > 0$ となるので、レースウェイ先端位置 (すなわち R_{RW}) を変化させることによって出銑口深度を変化させることが可能となる。すなわち、 R_{RW} ($=r_{RW}/r_H$) < 1.0 かつ $\alpha > 0$ であるためレースウェイ深度を延長させる、すなわち R_{RW} を低下させることによって出銑口深度を延長させる、すなわち R_{TH} を低下させることが可能となる。

Fig. 7に、マッド材原単位 (MR) が出銑口先端位置 (R_{TH}) に及ぼす影響の度合いを表す強度指数 β と R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) との関係を示す。 R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が0.95以上になると β は略0となるので、マッド材原単位を変化させても出銑口深度の延長効果は少ない。これに対し、 R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が0.95未満では常に $\beta < 0$ となるので、マッド材原単位 (MR) を変化させることによって出銑口深度を変化させることが可能となる。すなわち、 $MR < 1.0$ かつ $\beta < 0$ であるためマッド材原単位を増量させることによって出銑口深度を延長させる、すなわち R_{TH} を低下させる効果が向上する。

したがって、 R_{TH}/R_{RW} が0.95以上となった場合、すなわち出銑口深度 (L_{TH}) が過度に低下した場合には、 r_{TH}/r_{RW} が0.95未満となるように、 r_{RW} を大きくする、すなわち、レースウェイ深度を低下させることが有効であると考えられる。レースウェイ深度を低下させるためには、微粉炭あ

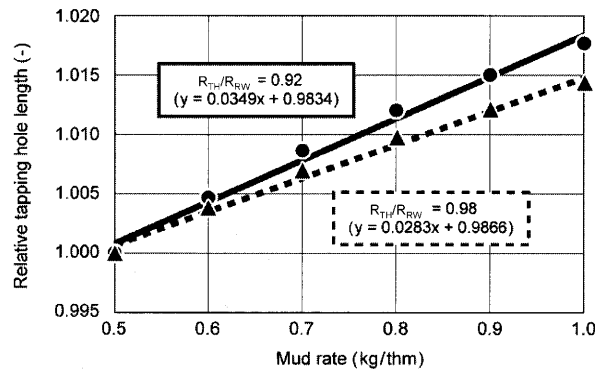


Fig. 8. Effect of raceway depth control on mud rate.

るいは廃プラスチックなどの羽口吹き込み補助燃料の量を増加させる、あるいは、送風支管流量を減少させることが有効である。

羽口吹き込み補助燃料の量を増加させた場合には、コークスの燃焼割合が減少し、常温の補助燃料の燃焼割合が増加するため、羽口前温度が低下し、実ガス流速が低下する結果、レースウェイ深度が低下する⁵⁾。送風支管流量を減少させた場合には、直接的に実ガス流速が低下する結果、レースウェイ深度が低下する。送風支管流量を減少させるためには、羽口を内径の小さなものに取り替える方法が採用できる。全数羽口において一部の羽口の内径を絞ると、炉内羽口前ガス流速は上昇するものの、羽口の圧損が増大して送風支管内の風量が減少し、その結果、レースウェイ深度が減少する⁵⁾。なお、出銑口深度の低下が著しい場合には、羽口を閉塞羽口としてレースウェイ深度を完全に0まで低下させることもできる。

R_{TH}/R_{RW} が0.95未満となった場合、すなわち出銑口深度 (L_{TH}) が適正範囲にある場合には、常に $\alpha > 0$ となるので、レースウェイ深度を変更することによって出銑口深度を変更できる状態にある。したがって、レースウェイ深度を一定に保ちつつ、マッド堆積層の厚みの損耗分を補うだけのマッド材量を維持して出銑口深度を一定に保つ。これによってマッド材量を抑制して操業コストの過度の増大を回避しつつ、出銑口深度をより確実に安定化でき、炉寿命の延長が図れる。

Fig. 8に、マッド材原単位 (MR) と出銑口深度 (L_{TH}) との関係を示す。ここで、出銑口深度は、マッド材原単位0.5 kg/thmにおける出銑口深度を基準とした相対出銑口深度とし、相対出銑口深度に対するマッド材原単位の関係を示した。マッド材原単位が同一の範囲でも、 r_{TH}/r_{RW} が0.92の場合には、 r_{TH}/r_{RW} が0.98の場合に較べて、出銑口深度 L_{TH} の増加率は、23%増加すると推定できる。

以上のことから、出銑口深度に対してレースウェイ深度を低下させることによって、出銑口深度が伸長する。これは、炉内上昇ガス流れによる浮力が減少して炉芯コークス層が炉底に着床し、炉芯コークス層とマッド堆積層との境

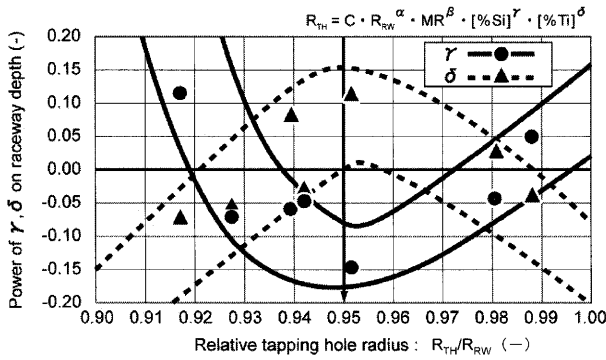


Fig. 9. Effect of [%Si],[%Ti] on tapping hole depth.

界面における炉芯コークス層の空隙率が低下してこの境界部を流れる溶銑滓の流量が減少し、マッド堆積層の損耗量が低下すること、また、炉芯コークス層の炉底への着床によって溶銑環状流も抑制されることによると推定される。

4.3 出銑口深度に及ぼす溶銑成分の影響

Fig. 9に、溶銑中 [%Si], [%Ti] が無次元出銑口先端位置 (R_{TH}) に及ぼす影響の度合いを表す強度指数 γ , δ と R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) との関係を示す。 R_{TH}/R_{RW} に対して γ は、上に凸の曲線をなし、 R_{TH}/R_{RW} が 0.95 付近において最大値を示し、その場合には $\gamma < 0$ となる。また一方、 R_{TH}/R_{RW} に対して δ は、下に凸の曲線をなし、 R_{TH}/R_{RW} が 0.95 付近において最小値を示し、その場合には $\delta > 0$ となる。

R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が 0.95 以下あるいは 0.95 以上になると γ 及び δ は略 0 に漸近するので、溶銑中 [%Si], [%Ti] が変化しても出銑口深度は変化しない。これに対し、 R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が 0.95 付近では常に $\gamma < 0$ および $\delta > 0$ となるので、溶銑中 [%Si], [%Ti] が変化することによって出銑口深度が変化する。

R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が 0.95 においては、溶銑中 [%Si] < 1.0, $\gamma < 0$ および [%Ti] < 1.0, $\delta > 0$ となるので、溶銑中 [%Si] が上昇する、あるいは、[%Ti] が低下することによって出銑口深度は延長、すなわち R_{TH} を低下させる。

このことから、 R_{TH}/R_{RW} が 0.95 においては、炉芯コークス層とマッド材堆積層との境界部における炉芯コークス層の空隙率が低下してこの境界部を流れる溶銑滓の流量が減少するため溶銑粘度の影響を受け易くなるものと推定される。

溶銑粘性に関しては、[%Si], [%Ti] とも溶銑粘度を上昇させると考えられるが⁷⁾、上記の出銑口深度への影響は、溶銑中 [%Si] と [%Ti] は、逆である。これは、炉内における [Si] と [Ti] との間のカップリング⁸⁾の結果と推定される。

Fig.10に、尾上ら⁹⁾による窒素雰囲気中における炭素飽和溶鉄の粘度に及ぼす [%Ti] の影響を示す。各温度ともある [%Ti] 以上で粘度の急激な上昇を示し、この粘度が急激に上昇する [%Ti] は高温になるほど高 [%Ti] 側に移行する

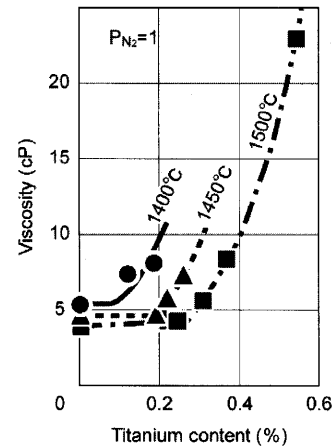


Fig. 10. Effect of titanium on the viscosity of carbon saturated liquid iron after Onoe et al. (1976).

傾向にある。本研究における [%Ti] のレベルは、Fig. 1に示したように、0.10から0.20%程度であり、1400°Cにおける粘度が急激に上昇する [%Ti] のレベルに相当する。したがって、出銑口深度の伸長に影響する炉芯コークス層とマッド材堆積層との境界部を流れる溶銑滓の温度は、炉底冷却の影響を受けて炉外排出される溶銑の温度に較べて低いことが示唆される。

5. 結言

高炉操業において高出銑および長寿命化のためには、炉芯コークスの通気・通液性の確保に加えて、フリースペース形成による溶銑環状流を防止するため出銑口閉塞材(マッド材)によって充填され、形成されるマッド材充填距離(出銑口深度)の安定化が重要である。本研究では、羽口から入射したマイクロ波(μ 波)の反射強度からレースウェイ深度を測定し、出銑口先端位置に及ぼすレースウェイ先端位置の影響を次元解析することによって出銑口深度に及ぼす諸要因の影響を評価し、以下の結論を得た。

(1) レースウェイ先端位置 (R_{RW}) と出銑口先端位置 (R_{TH})との位置関係において R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が 0.95 未満では、レースウェイ深度を延長させる、すなわち R_{RW} を低下させることによって出銑口深度を延長させることが可能となる。

(2) マッド材原単位 (MR) と出銑口先端位置 (R_{TH}) との関係において R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が 0.95 未満ではマッド材原単位を増量させることによって出銑口深度を延長させる、すなわち R_{TH} を低下させる効果が增加する。

(3) したがって、出銑口深度 (L_{TH}) が過度に低下し、 R_{TH}/R_{RW} が 0.95 以上となった場合には、 r_{TH}/r_{RW} が 0.95 未満となるように、レースウェイ深度を低下させることが有効である。

(4) マッド材原単位 (MR) と出銑口深度 (L_{TH}) との関係

においてマッド材原単位が同一の範囲でも、 R_{TH}/R_{RW} が0.95未満の場合には、出銑口深度の増加率は、23%増加することが期待できる。

(5) 溶銑中 [%Si], [%Ti] と出銑口先端位置 (R_{TH}) との位置関係において R_{TH}/R_{RW} ($=r_{TH}/r_{RW}$) が0.95付近では、溶銑中 [%Si] が上昇する、あるいは、[%Ti] が低下することによって出銑口深度は延長する。溶銑の粘性に関しては、[%Si], [%Ti] とも溶銑粘度を上昇させると考えられるが、この出銑口深度への影響は、溶銑中 [%Si] と [%Ti] は、逆であり、これは、炉内における [Si] と [Ti] との間のカップリングの結果と推定される。

今後、さらに低還元材比操業を指向した場合には、炉芯粉率の増加に対する炉芯通気・液性の確保がより一層重要となる。実炉検証による炉芯コークス層と炉底凝固層との

境界部での溶銑滓の流動に関する動的理解の深化とその制御が必要である。

文 献

- 1) M.Shimizu, Y.Kimura, K.Shibata, N.Takahashi and S.Inaba: Proc. of the 6th IISC, (1990), Nagoya, 422.
- 2) N.Tsuchiya, T.Fukutake, Y.Yamauchi and T.Matsumoto: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 116.
- 3) 上仲俊行, 柚久保安正, 下村興治, 寄田栄一, 小原謙吾, 大森平男: *Shinagawa Tech. Rep.*, **32** (1989), 29.
- 4) K.Shimomura: The Third ISIJ and VDEh Technical Exchange Meeting on Refractories, (1987), 173.
- 5) Y.Matsui, Y.Yamaguchi, M.Sawayama, S.Kitano, N.Nagai and T.Imai: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1432.
- 6) C.Shibata and R.Horie: *Tetsu-to-hagané*, **73** (1987), 1096.
- 7) 溶銑・溶滓の物性値便覧 日本鉄鋼協会, (1972), 49.
- 8) K.Mori: *Tetsu-to-hagané*, **47** (1961), 1203.
- 9) 成田貴一, 尾上俊雄, 高田仁輔: 私信 (1976).