

第 114 回講演大会討論会報告

I. 高炉内における装入物の挙動

座長 日本鋼管(株)鉄鋼技術部

齋藤 汎

高炉内における装入物の挙動を明らかにすることによって、装入物品質の最適化をはかり、操業を安定化させるというテーマは、製鉄技術者にとっては最も基本的なテーマであり、従来より数多くの研究がなされてきた。

しかしながら、最近では、急激な円高の進行や NICS の追い上げなどにより、従来にも増して溶銑コストの低減が要求されるようになり、高炉操業においても、上述のような品質の最適化による操業成績の向上と同時に、劣質ではあるが安価な原料あるいは装入物の多量使用技術の開発が急務となつてきており、本討論会の目的もそこにあつた。

今回の討論会においては、かかる観点から見て時宜を得た 6 件の貴重な発表がたされ、活発な討論とあいまつて、討論会参加者に数多くの有益な知見を与えることができた。

以下に、講演及び討論の要旨を記述する。

(討 1) 焼結鉱の還元挙動について

(九州大学工学部 小野陽一ほか)

焼結鉱の還元速度に影響を及ぼす主因子として、1) 気孔の量と分布、2) 構成鉱物の量と分布、3) 還元ガスの種類と不純物ガス、4) 還元条件を挙げ、各因子について、著者らの研究と文献データに基づく検討を行った。

気孔については、これを構成鉱物のグレイン間のマクロ気孔と各グレイン内のミクロ気孔に分類し、このミクロ気孔の大小(還元前)、及びグレイン内の還元生成物の気孔の大小(還元過程)によつて、拡散のメカニズムと速度が異なることを指摘した。鉱物種による還元速度の差については、試薬合成したヘマタイト、マグネタイト、2 成分系カルシウムフェライト 3 種 (CF_2 , CF , C_2F , $C=CaO$, $F=Fe_2O_3$) の還元実験を行い、 C_2F の被還元性が極端に悪いこと、 CF と CF_2 はいずれも還元中期以降で、 $ウスタイト + C_2F \rightarrow Fe + C_2F \rightarrow Fe + CaO$ の過程を経るため、初期の還元速度はヘマタイトとほとんど変わらないが、後半遅くなることを示し、また、この過程で生ずるウスタイトには CaO が固溶しており、純粋なウスタイトでは、 $800^\circ C$ 以下での緻密な鉄の生成による還元停滞が生ずるのに対して、多孔質なスポンジ鉄の生成により還元が促進されることを示した。還元ガスによる差については、未反応核モデルの混合律速プロットにより、界面化学反応速度定数 k_c 、粒内有効拡散係数 D_e とともに、 CO 還元より H_2 還元の方が速いこと ($k_c^{H_2}/k_c^{CO}=2.0$, $D_e^{H_2}/D_e^{CO}=9.1$) を示すと

もに、還元に対するアルカリの促進効果、硫黄の抑制効果を報告した。

この発表に対して、焼結鉱の還元に対する一界面未反応核モデルないしは、混合律速モデルの適用限界、焼結鉱の還元速度モデルの考え方、アルカリの還元促進効果の理由等についての議論があつた。

(討 2) 高炉内容物調査にもとづく焼結鉱品質の評価

((株)神戸製鋼所鉄鋼技術センター 杉山 健ほか)

休風時に炉内(シャフト部、ベリ一部)から採取した試料の調査に基づいて、高炉内の焼結鉱粒径と高炉操業に及ぼす低温還元粉化指数 (RDI) と軟化溶解性状の影響について報告した。

炉内調査では、高炉内の -3 mm 粒子量は、焼結鉱の RDI よりむしろ炉内の温度分布パターンに大きく依存しており、 $950^\circ C$ に至る還元時間が長いほど粉率が高くなり、 $1000^\circ C$ 以上では焼結反応により、それ以上粉化が進行しないことを確認している。また、高炉内状況をシミュレートした荷重還元試験により、高塩基化による焼結鉱の軟化溶解性状の改善効果が、 RDI 上昇による悪影響よりも大きいという知見を得、これに基づいて、高 RDI ・高軟化溶解性状かつ小粒(篩目 $4.5 \rightarrow 3.5\text{ mm}$) の焼結鉱を用いた実操業を行い、良好な通気性と炉況の安定を確認している。

この報告に対して、焼結鉱塩基度上昇による鉄中 Si 濃度の変化、炉内の還元粉化を示す指数としての RDI の有効性、 RDI の管理値と高炉操業条件による変更、 RDI を制御する焼結操業法、装入焼結鉱サイズの下限值等についての質疑応答があつた。

(討 3) 高炉内における焼結鉱の還元粉化挙動

(日本鋼管(株)福山製鉄所 中島龍一ほか)

向流還元試験と実炉内採取試料の調査の結果及びこれらから考察した焼結鉱の還元粉化モデルについて報告した。

向流還元試験によると、焼結鉱の還元粉化温度領域は約 $600 \sim 800^\circ C$ であり、これはヘマタイトの還元温度域と一致する。この結果に基づいて、還元粉化量(比表面積増加量)を還元によるヘマタイト減少速度と荷重による粉化量の関数として定式化した還元粉化モデルを提案している。このモデルに径方向及び高さ方向の実炉条件を入れて計算した結果は、水平ゾンデにより採取した炉内試料粒径と良く一致している。また、この計算結果から、焼結鉱 RDI の上昇は、炉内粉率の上昇を介して通気抵抗を増大させるとともに、周辺流を助長させることを示唆した。

この発表に対して、水平ゾンデによる炉内試料採取時の試料の破壊の程度、粉化の初期粒径依存性のメカニズム、本モデルによる RDI 管理の実態、炉の中心、周辺における粉化量 (ΔS)、ヘマタイト減少量 (ΔH) の違い及び dH/dS の温度依存性等について議論がなされた。

(討4) 高炉内における焼結鉄の還元粉化挙動

(新日本製鉄(株)室蘭技術研究部 相馬英明ほか)

垂直ゾンデによる高炉内焼結鉄の還元粉化挙動の調査、高炉内反応シミュレーター (BIS 炉) による還元反応解析及びこれらの結果を踏まえた焼結鉄 RDI 変更実炉操業試験の結果について報告した。

垂直ゾンデによる炉内調査から、焼結鉄の還元粉化は、RDI と低温域滞留時間によつて左右されること、粗粒ほど粉化率が大きいことなどが判明。また BIS 炉による実験からも、粉化率は 800°C 以上ではあまり増加せず、1000°C くらいからは逆に低下するなど、垂直ゾンデによる調査と同じ結果を得ている。これらの知見をベースにした還元粉化モデルを高炉トータルモデルに導入してシミュレーションを行つた結果、RDI の上昇は、1) シャフト上部での低温域の拡大による還元粉化の増大、2) 炉の中間から周辺部にかけての大きな還元粉化によるシャフト上部での中心流化の促進; の影響をもたらすことが判明。これらの結果を踏まえた室蘭第2高炉における操業試験では、RDI が高いほど、1) ガス灰が増加、2) 炉内通気抵抗の増大、3) ガス流のクロスフロー化による周辺部熱流比の増大など、モデル計算と同様な結果が得られ、装入物分布制御によるこれらの悪影響の低減が必要であることを報告している。

この発表に対して、粗粒焼結鉄と細粒焼結鉄の還元粉化率の差の原因すなわち成分、組織の差、シャフト上部における粉化のシャフト中段部への影響の程度等についての質疑応答があつた。

(討5) 高炉炉頂での装入物挙動の測定と細粒原料使用への適用

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 村川恵美ほか)

細粒鉄石分割装入時の装入物の挙動について、装入物粒度・層厚ゾンデ及びイメージファイバーを用いて測定、解析した結果を報告した。

細粒鉄石分割装入 (鉄石装入を O I と O II に分割し、O II 層へ +3 mm の細粒鉄を混入して炉壁近傍に装入) においては、 n_{O2} (O II 装入時のムーバブルアーマ (MA) 位置) を零に固定している場合、層厚分布は n_C (コークス装入時の MA 位置) により、鉄石粒度分布は n_{O1} (O I 装入時の MA 位置) により制御できるが、細粒比率が 6% 程度の場合、 n_C による層厚分布制御の方が粒度分布制御より、熱流比分布に対して効果が大きいことを確認。一方、炉壁熱損失量は、 n_C による層厚分布の他に炉壁部状況変化 (れんが欠損や不活性帯の消長) の影響も大きく、これは装入物の降下速度の測定により判別できることを示した。また、炉壁での鉄石層厚分率が小さい場合、O II 層が断続的に流動化する現象や、大スリップの直前に多量の微粉が装入物表面を炉中心に向けて流れる現象のメカニズムについても報告している。

この報告に対して、細粒焼結鉄の粒度下限と限界使用

量、炉壁での混合層の存在、ガス流れが不安定な炉壁部に細粒を装入する理由、炉頂での微粉の同定と由来等ほか多数の質疑応答があつた。

(討6) 高炉における粒状体の運動

(住友金属工業(株)総合技術研究所 田中 努ほか)

従来の連続体を前提とし、運動と応力状態を分離したモデルとは異なる、粒子ごとの運動方程式を基本とする新しい高炉内粒子運動モデルの概要とこれによる装入物分布及び炉下部荷下がり現象の解析結果について報告した。

本モデルは、VOIGT-KELVIN 模型を導入した粒子間相互作用方程式と、ガスと粒子の相互作用として ERGUN 式を付加した NAVIER-STOKES 方程式、連続の式及び状態方程式により記述される粒子-ガス相互作用方程式とから成り、これらを解くことにより、粒子集合体の運動とガス流れが求められる。著者らは、本モデルを2次元のホッパー模型及び高炉平板模型実験により検証した後、原料装入過程における細粒の偏析、高炉下部における荷下がり現象の解析に適用し、実操業においてみられる各種の現象と良く一致する計算結果を得ている。

この発表に対して、炉中間部から中心部にかけて細粒の堆積が生じる理由、片側羽口から送風した場合、炉芯停滞域が上方に発達し、左右両羽口からの送風時にはそれが発達しない理由、スラッグの解析における計算の安定性と結果の妥当性の判定基準、実炉制御への適用という点からみた数値解析の精度と適用対象領域等多数の議論がなされた。

以上の6件の講演・討論により、「高炉内における装入物の挙動」のうち、焼結鉄の炉内挙動、なかんずく還元粉化現象について、かなり定量的な把握ができるようになりその結果として、焼結鉄の品質評価基準もある程度明確になつた点は大きな成果と考えられる。また、従来は使用困難と考えられてきた細粒焼結鉄の多量使用技術についても、現象の解明と実際の操業手段の両面で関係者に大きな知見を与え、今後は細粒コークスあるいは劣質コークスの多量使用技術への展開が望まれる。しかしながら、焼結鉄の粒度も含めた適正品質範囲 (限界) については、炉下部挙動との関連においていまだ不明な点が多く、今後の課題といえよう。この点については、前回の討論会「高炉炉下部内現象」の講演が有力な情報であり、これらの知見と今回発表がなされなかつたコークスの挙動と関連させて検討してゆく必要がある。いずれにしても高炉内現象は複雑であり、その解明による操業の安定化、高弾力性化については溶鉄コストの低減のためには今回の講演内容のようなしつかりした地道な研究の積み重ねが重要である。

終わりに、講演者各位、会場で、熱心に討論していただいた方々、講演内容全体についてコメントをお願いし、かつ我々製鉄技術者を激励して下さつた東北大学選鉄製

鍊研究所所長大森教授と川崎製鉄(株)田村 栄氏に厚くお礼申し上げます。

II. タンディッシュメタラジー

座 長 東北大学工学部

菊 池 淳

副座長 住友金属工業(株)総合技術研究所

城 田 良 康

まず座長より、本討論会の開催に際し、主旨説明があった。中国、韓国などの製鉄業の急速な技術力向上と、近年の円高基調の中で、我が国の鉄鋼生産量はしだいに減少しており、この傾向は今後も続くと考えられる。

このような環境の中にあつて、日本鉄鋼業の技術課題は、(1)一般鋼材製造コストの低減、(2)他産業の発展の高度化に起因する鋼材の高品質化要求への対応、および(3)少品種多量生産方式から多品種少量生産方式への鉄鋼プロセスの多様性拡大を旨とする必要がある。

連続铸造が日本に導入されて以来 20 数年が経過し、現在では、連続铸造比率は 86% と非常に高い水準にある。これまでの一連の連続铸造技術の発展は大量生産技術対応を主眼に行われてきたといえる。しかし、先程述べた日本鉄鋼業の三つの課題、とくに(2)の鋼材の高品質化、(3)の生産プロセスの多様性の観点からの連続铸造技術の発展が必要であり、その中の一項目としてタンディッシュの機能が見直されつつあると考えられる。

タンディッシュの機能としては、従来の溶鋼保持器、分配器としての役割に加え、最近では介在物の浮上除去あるいは溶鋼温度制御といった精錬機能の一部がタンディッシュ内で行われ、今後さらに成分調整を含めた精錬容器としての役割が考えられる。

以上のような観点より今回タンディッシュメタラジーとしての①介在物除去技術、②溶鋼加熱、③タンディッシュの役割、及びそれらプロセスメタラジー開発の基礎としての④数値解析、モデル実験手法を本討論会でとりあげ、現在のタンディッシュメタラジーの実態把握及び今後の技術発展方向あるいは問題点を明確にしたい。

(討7) 連続铸造におけるタンディッシュの役割

(新日本製鉄(株)第三技術研究所 佐伯 毅ほか)

タンディッシュの役割として現在次の4項目が考えられる。①溶鋼分配器、②溶鋼保持器、③モールド内への溶鋼流量制御、④介在物浮上。

また近年連続铸造法の生産性向上の観点よりタンディッシュ容量の大型化が図られ、さらに、タンディッシュに精錬能を付与する傾向が増してきている。その例として、タンディッシュ内での介在物低減技術として、溶鋼汚染防止および介在物浮上分離促進技術につきまとめた。

さらに、タンディッシュ内溶鋼加熱技術として、誘導加熱法とプラズマ加熱法について紹介した。

最後に、今後のタンディッシュメタラジーの開発に対し、タンディッシュが連続反応容器であり、ロット内での均一性確保が重要課題であり、またそのために、センサーリング技術、制御技術の向上が必要であることを提言した。

(討8) タンディッシュメタラジーにおける移動速度論の役割

(東北大学工学部 谷口尚司ほか)

タンディッシュ内移動現象に関する従来の研究結果のレビューおよび関連する移動現象の解析法につき検討した。

溶鋼中介在物粒子挙動の運動方程式による取扱い方法、介在物分離の基礎理論として粒子間の衝突凝集、耐火物壁への衝突付着機構およびガス気泡による介在物の捕捉についての解析法と実操業結果との対比を示した。その結果、タンディッシュ内の粒子の凝集プロセスは乱流による粒子間の衝突が大きく寄与し、また介在物はタンディッシュ内より浸漬ノズルの方が付着しやすきことを明らかにした。

(討9) タンディッシュにおける溶鋼清浄化

(日本鋼管(株)京浜製鉄所 松村千史ほか)

実操業における介在物増加要因として、タンディッシュ内への空気侵入による溶鋼の再酸化、タンディッシュ耐火物および取鍋内スラグ流出の影響を述べ、その低減策として、タンディッシュ内溶鋼流動制御、バブリング処理および介在物フィルターによる介在物除去機構につき検討した。

また、水平連続铸造操業において、タンディッシュ内溶鋼の誘導加熱による温度調節能につき述べた。

(討10) タンディッシュ内溶鋼の温度制御と清浄化および成分調整技術

(川崎製鉄(株)千葉製鉄所 大杉 仁ほか)

溝型誘導加熱法による溶鋼加熱原理、温度制御法および加熱時の溶鋼流動解析結果につき報告した。

溶鋼加熱による品質向上効果として、加熱による攪拌効果がノロカミ個数の低減に大きく寄与し、またステンレス鋼の非定常部の表面欠陥も加熱により軽減されることを明らかにした。

成分調整技術として加室制御及びタンディッシュ内でのカルシウム添加による介在物低減効果につき述べた。

今後タンディッシュメタラジーとして、大ロット鋼に対する低コストおよびいつそうの清浄化の追求と、小ロット鋼の溶製に対するタンディッシュ内成分調整技術開発の二極化の方向に進むことを考察した。

(討11) タンディッシュ浴内ガス吹込みによる介在物の浮上分離

(住友金属工業(株)総合技術研究所 中島敬治ほか)

タンディッシュにおける介在物除去機構および Ar ガスバブリング付加による介在物浮上除去促進効果につ