

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㈱

鉄鋼研究所

○村川恵美

田口整司

浜田尚夫

千葉製鉄所

桃川秀行

田村栄

本社

沢田寿郎

1. 緒言

高炉における装入鉱石の下限サイズを低下させ、焼結鉱あるいは塊鉱石の成品歩留りを向上させることは、鉄鉄コスト削減の観点から重要な課題である。ところが装入物の粒度が低下すると、炉内通気性が低下し炉況が悪化する。この解決方法の一つとして、鉱石装入をOⅠとOⅡに2分割し、OⅡ層の方へ高炉篩下粉から回収した+3mmの細粒鉱を混入して炉壁近傍に装入する細粒鉱石分割装入法がある。従来、細粒鉱石分割装入において細粒鉱石の炉況に与える影響については定量的に明確でなかった。そこで、新しく開発した装入物粒度・層厚ゾンデ^{1),2)}を用いて稼働中の高炉における装入物の粒度・層厚分布および降下速度分布を測定し、細粒鉱石分割装入による装入物分布の制御効果について定量的な検討を行なった。また、イメージファイバーによって装入物表面を観測した結果、炉壁近傍での鉱石の流動化および多量の粉が装入物表面上を炉中心に向けて流れる現象が観測された。これらの現象と炉内状態についても検討を加えた。

2. 装入物粒度・層厚計による分布制御効果の測定

2・1 装入物粒度分布

細粒鉱石分割装入におけるムーバブルアーマ（以下MAと略す）位置およびベル開度・開速度の装入物粒度分布に与える影響を求めるために、ベル開度全開（750mm）、開速度Fast（8秒）の操作条件において14回、開度2/3（500mm）、開速度Slow（12秒）の操作条件において10回、各々MA位置を変更しながら測定を行なった。ベル開条件の効果については、Fig 1に示すように2/3開、slowの場合には装入物粒度は炉壁から炉中心に向けてスムーズに増加するが、全開、Fastの場合には炉中間でフラット化する傾向がある。MA位置については粒度分布への影響は確認されなかった。

また、細粒を含むOⅡ層は炉壁近傍においてOⅠ層より粒度が小さいが、炉中間～炉中心ではOⅠ層とOⅡ層の粒度は同程度の大きさになっている。これは炉中間～炉中心に到達するOⅡ層の量が少ないためにOⅡ層の粒度偏析が助長された結果であると考えられる。したがってOⅠ層と細粒を含むOⅡ層との層厚比率を調節して鉱石層粒度を制御する方法は炉壁近傍で効果が大きい。

2・2 装入物層厚分布

細粒鉱石分割装入では通常、OⅠおよびコークス装入時のMA位置（ n_{01} 、 n_c ）によって層厚分布を制御しており、細粒を炉壁近傍へ装入するためにOⅡ装入時のMA位置は最も炉壁寄りの位置（ $n_{02}=0$ ）に固定されている。そこで1985年11月および1986年7月～9月の期間、炉中間と炉壁の二点において n_c および n_{01} を変更しながら層厚測定をおこなった。Fig 2 (a), (b) は測定データを n_c および n_{01} で整理した図である。 n_c を増加してコークスを炉内側に装入すると、鉱石層厚分率は炉中間において低下し炉壁近傍においては逆に上昇している。他方、 n_{01} と鉱石層厚分率とは炉中間、炉壁近傍のどちらにおいても有意の相関がない。この現象は鉱石分割装入に特有なものと

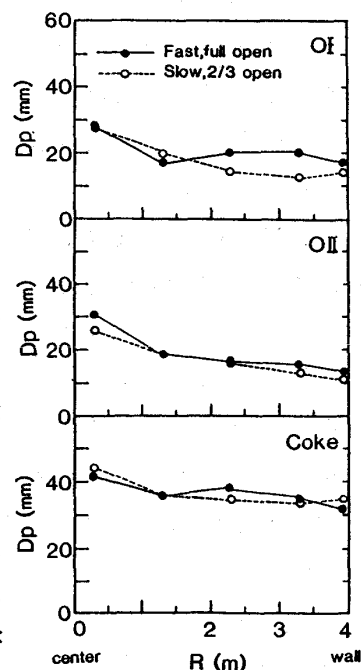


Fig.1 Effect of bell opening condition on particle size distribution

考えられる。即ち、Fig 3 に示すように O I 層の表面形状が変化しても O II 層がその変化を吸収するため、コークス層と鉱石層の境界面は変化しない。したがって、細粒鉱石分割装入において n_{o2} を零に固定している場合、層厚分布は n_c によって決り、 n_{o1} には依存しない。

3 細粒鉱石分割装入における

装入物分布制御

3・1 細粒鉱石の多量使用技術

千葉 5 高炉（内容積；2 5 8 4 m³，装入装置；3 ベル+川鉄式 MA）では細粒原料の多量使用を目的として、1 9 8 3 年 4 月より細粒鉱石分割装入を行っており、さらに 1 9 8 6 年 2 月よりモーゲンセンサイザーを導入して高炉篩下粉からの + 3 mm 細粒焼結鉱を効率良く回収している。この二つの技術により、現在 5 高炉での細粒原単位は約 100 kg/t-pig（全鉱石装入量の 6 % に相当）にまで増加している。

装入物分布制御は炉壁熱損失量および炉頂固定ゾンデによって測定されるガス温度分布を管理することによって行なわれており、細粒鉱石分割装入では炉半径方向の細粒分布調整によってこれらの管理指数をどれだけ任意に制御できるかが重要な課題である。

3・2 細粒鉱石分割装入における分布制御効果の定量化

炉壁熱損失量および炉頂ガス温度分布は熱流比（気相に対する固相の熱含量流束の比）の半径方向分布に支配される。粒度・層厚測定結果より、細粒鉱石分割装入においては層厚分布は n_c によって制御でき、鉱石粒度分布は n_{o1} によって制御できることが判ったので（Fig 3）、ここでは層厚分布制御と鉱石粒度分布制御のどちらが熱流比分布に対してより効果的かを検討する。

層厚分布は当社で開発した装入物堆積分布モデルを用いて、Fig 2 に示した実測値を良く再現するように MA 位置の関数として求めた。

Fig 4 に n_c を 2, 4, 6 と変化させた場合の層厚分布を示す。粒度分布については、MA 位置による粒度偏析の変化は小さいと見なし、Fig 1 に示したデータを含めた合計 2 9 回の測定データを平均化した分布（Fig 5）を用いた。熱流比分布を求めるにあたっては、物性値については 1000℃ での値を用い、固相流速は降下速度が半径方向で均一であると仮定して実操業での装入量から計算した。

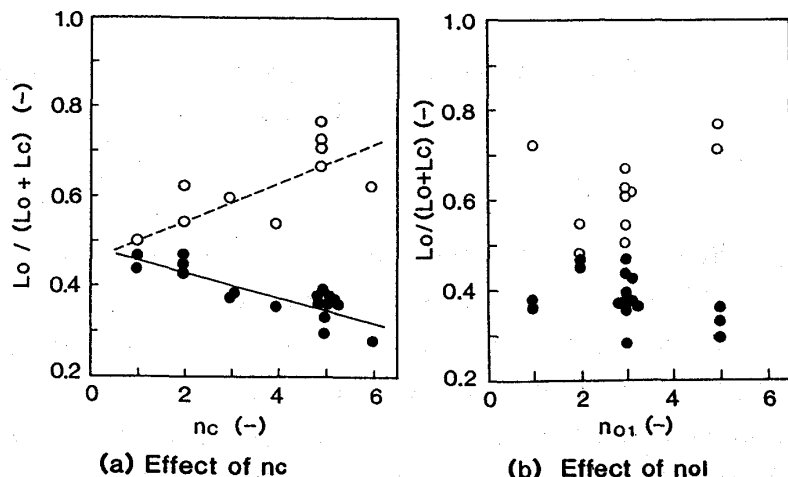


Fig.2 Effect of movable armor positions on thickness ratio of ore layer

---○--- Near furnace wall, ● In the furnace middle

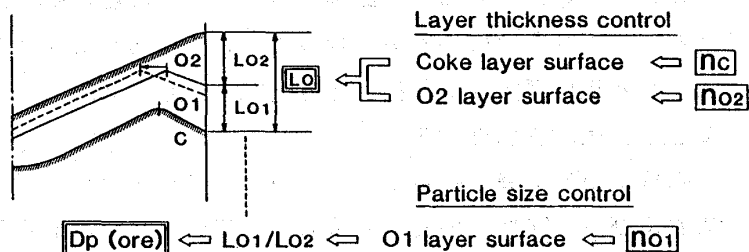


Fig.3 Schematic diagram of the layer thickness control and particle size control of ore.

C : Coke layer O1 : First charged ore layer
O2 : Second charged ore layer which contains small particles

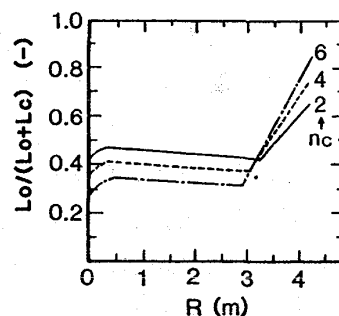


Fig.4 Radial distribution of thickness ratio of ore layer

また、ガス流速の分布については、炉内圧力損失 dp/dl が炉半径方向で一定になるように、装入物の通気抵抗指数 ϕ の半径方向分布に応じてガスが流れると考え、(1)式によって計算した。

$$dp/dl = \phi \cdot \rho_g^{0.7} \cdot \mu_g^{0.3} \cdot V_g^{1.7} \quad (1)$$

通気抵抗指数 ϕ は福武らの実験式を用いて装入物粒度・層厚の分布および高炉充填調査で得た装入物粒度構成指数分布より求めた。装入物層全体の通気抵抗指数 ϕ は各装入物の ϕ を層厚平均して求めた

Fig 6 (a), (b) に n_c , n_{o1} を変化させた場合の熱流比分布の計算結果を示す。細粒比率が6%程度の場合 n_c による層厚分布制御

のほうが粒度分布制御より熱流比分布に対して効果が大きい。層厚分布が炉頂固定ゾンデ温度分布に及ぼす影響を調べると、Fig 7 に示すように炉壁での鉱石層厚分率の上昇と共に炉壁近傍のガス温度は炉中間温度に対して相対的に低下しており、層厚分布調整が温度分布制御に対して有効であることが確認できた。

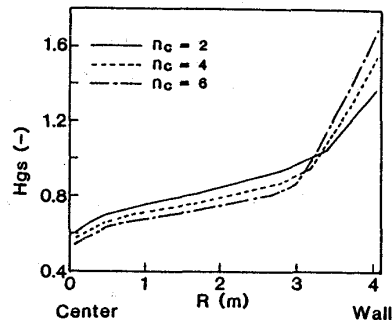
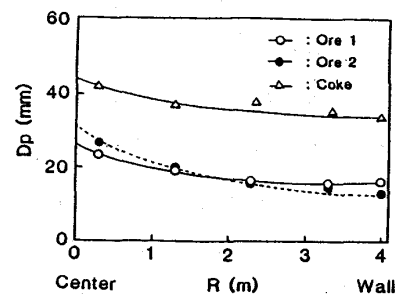
(a) Effect of n_c 

Fig.5 Radial distribution of burden particle size measured by image fiber probe

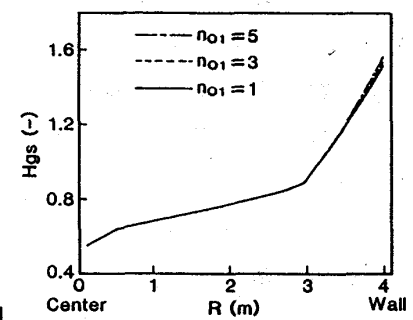
(b) Effect of n_{o1}

Fig.6 Radial distribution of heat flux ratio

4. 炉壁熱損失量と装入物降下速度分布の変化

一方、炉壁熱損失量についてはFig 8 に示すように n_c を増加して炉壁での鉱石層厚分率を上昇させても期待通りに低下しない場合があった(12月中旬以降)。これは炉壁熱損失量が装入物分布だけでなく炉壁レンガの欠損や不活性帯の成長・欠落によっても変化するためと考えられる。炉壁にこのような装入物分布を乱す要因があると、装入物降下速度 V_s が乱れることが予想される⁴⁾。

Fig 9 は層厚ゾンデおよびサウンディング計によって測定した装入物降下速度の結果である。炉中間での降下速度は平均降下速度 V_s^* にほぼ等しいが、炉壁近傍での降下速度は1986年8月・9月の場合平均降下速度の1.8倍程度にまで増加している。実炉での装入物表面プロフィール計測では炉壁近傍での V_s/V_s^* は1.2程度になることが報告されており、この測定値はそれに比較して著しく大きい⁵⁾。

降下速度データを鉱石層厚分率で整理すると、Fig10 に示すように1985年11月では炉壁と炉中間での降下速度が鉱石層厚分率に対して同一の正相関を示すのに対して、1986年8月・9月においては炉壁での降下速度が大きくなっており、この間で炉口に近い場所において炉壁レンガの欠落があったことが判る。したがって装入物降下速度を測定することにより、炉壁熱損失量の増加が装入物分布制御の不適正によるものか、あるいは炉壁部の状況変化によるものかを判別することができる。

5. 炉頂における装入物の挙動

5.1 炉壁での細粒鉱石の流動化

炉壁での鉱石層厚分率が小さい場合($N_c=2$)、炉壁近傍においてO II層が数秒~10秒程度断続的に流

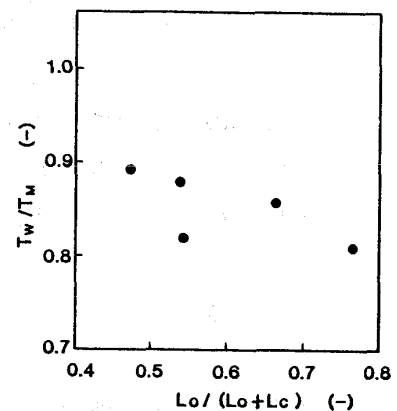


Fig.7 Relationship between thickness ratio of ore layer near furnace wall and the temperature distribution of top gas

T_w : Top gas temperature at $r = 0.8 \sim 1.0$
 T_m : Top gas temperature at $r = 0.4 \sim 0.6$

動化する現象が観測された。同じ時期O I層およびコークス層は流動化しなかった。鉱石およびコークスについて粒径による流動化開始速度の変化をFig11に示す。映像によると流動化している粒子の二軸幾何平均径は9mm程度以下であり、そこでのガス流速が3 m/s程度であればO II層だけが流動化する。ガス流速が炉壁全周にわたり炉壁から30 cm以内において3 m/sであると仮定すると、炉頂を通過するガスの約50%がその領域を流れることになり、炉中心～炉中間の領域での間接還元反応量が保証できなくなる。したがってO II層の流動化は局部的に生じていると考えられるが、炉壁に細粒鉱石を装入する場合この流動化に注意する必要がある。

5・2 炉頂装入物表面上での多量の微粉の流れ

大きなスリップが起る直前の30分程度の間、炉壁近傍の装入物表面から吹き上げられた多量の微粉（平均粒径=2.6 mm^{*}）が装入物表面上を炉中心に向けて流れる特異な現象が観測された。高炉内での微粉の挙動については、融着帯が粉のフィルターの役割することが指摘されている。今回観測された現象は、炉下部で生じた装入物降下異常によって装入物層構造が局部的にくずれ、炉下部に蓄積されていた粉が一度に炉頂まで運ばれて来たものと考えられる。

6. 結言

炉頂半径方向での装入物粒度・層厚分布の測定結果をもとに細粒鉱石分割装入における装入物分布制御方法を定量的に検討した。また、炉壁欠落により炉壁熱損失量の上昇および炉壁近傍での装入物降下速度の増加が生じることが判った。さらに、イメージファイバによって炉頂での鉱石粒子の流動化および多量の微粉の流れを観測し、それらを炉内現象と結びつけて検討した。

参考文献

- 1) 村川ら；鉄と鋼72(4), S49(1986)
- 2) 村川ら；鉄と鋼73(4), S8(1987)
- 3) 福武ら；鉄と鋼57(10), 1627(1971)
- 4) 学振本委員会，神戸製鋼所提出資料；本委-1811(1987)
- 5) 成田ら；鉄と鋼65(1), 44(1979)
- 6) 高谷ら；鉄と鋼73(2), A1(1987)

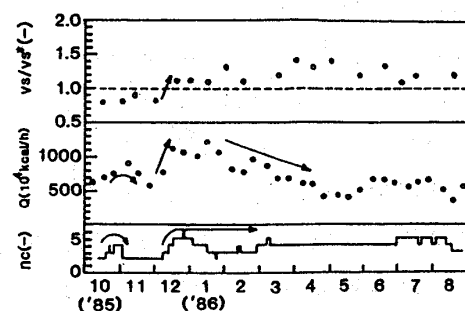


Fig. 8 Trend of Chiba No.5 Blast Furnace operation

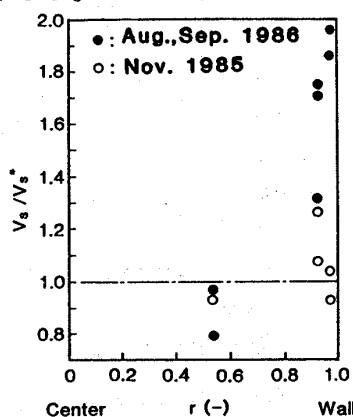


Fig. 9 Effect of movable armor position at coke charge on the distribution of burden descending velocity

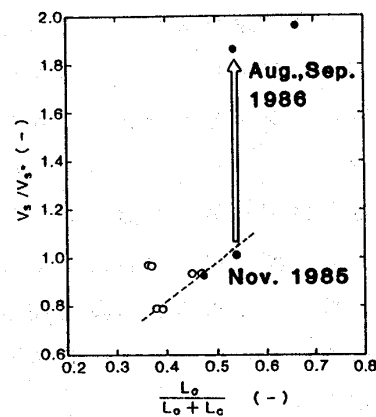


Fig. 10 Relationship between thickness ratio of ore layer and burden descending velocity
● : Near furnace wall
○ : In the furnace middle

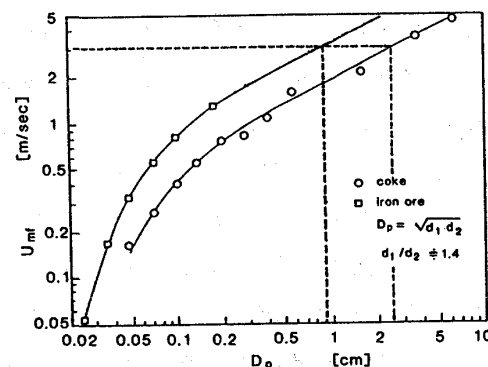


Fig. 11 Minimum fluidization gas velocity of coke and ore