

技術報告

焼結鉍粒度別装入法によるオールコークス
操業の改善

奥野 嘉雄*・入田 俊幸*・磯山 正*²
今井 徹*²・原 義明*²・須沢 昭和*²

Improvement of Oilless Blast Furnace Operation by Applying
Size-segregated Sinter Charging

Yoshio OKUNO, Toshiyuki¹IRITA, Masashi ISOYAMA
Tooru IMAI, Yoshiaki HARA, and Akikazu SUZAWA

Synopsis:

A charging method of sinter segregated into fine and coarse particles was developed, in order to improve the gas flow distribution in a blast furnace under all coke operation. In advance, the characteristics of the distribution of size-segregated sinter at the furnace top was investigated by model tests. The main results obtained are as follows:

(1) The average value of void fraction of sinter separated into fine and coarse particles is higher by 1 to 2% than that of conventional unseparated sinter.

(2) Since the angle of inclination of fine sinter is considerably influenced by gas flow, fine sinter should be charged in the peripheral region of the furnace where the gas velocity is low.

(3) Desirable charging mode is the type of L ↓ ⊙ ↓ because this mode guarantees good gas permeability and stable burden profile.

(4) The thickness of layer which contains the fine sinter layer in the peripheral region should be decreased in order to develop the peripheral gas flow and flatten the radial gas flow distribution.

The charging method was applied to Muroran No. 4 BF without oil injection and proved to be effective for a reduction of coke rate and an improvement of gas permeability. As the result of the measurements by a vertical probe in the furnace, the cohesive zone profile was estimated to be an inverted V type with a low apex and a high root.

1. 緒 言

製鉄所の脱石油エネルギー対策として、オールコークス操業が各所の高炉で実施されている。この操業はコスト低減に寄与するが、反面、操業が不安定となりやすく、また、高コークス比となるのでエネルギー消費量増をもたらす¹⁾。このため、操業の安定とともにガス余剰の製鉄所ではコークス比の低減が要請される。

オールコークス操業の問題点には、炉内周辺部のガス流の衰えとそれに関連して生ずる装入物の炉下部での還元遅れがある^{2)~4)}。この問題を生ずる主因の一つに炉頂部の装入物分布の不均一化があり、また、それに伴って分布制御の幅が狭くなることがあげられる。

このため、著者らは、その改善技術として焼結鉍の粒度別装入法を開発し、オールコークス操業の室蘭第1、4高炉に適用をはかった。本法は細粒と粗粒に区分した

成品焼結鉍を個別に炉内に装入してガス流分布の改善をはかるもので、従来の焼結鉍歩留り向上をねらう焼結粉装入法⁵⁾⁶⁾とは目的も方法も異なる。本法の適用により、通気性の改善とコークス比の低減がえられたが、これは空隙率の高い粗粒および被還元性のよい細粒を望ましい位置に選択的に装入することによつて得られたものである。

2. オールコークス操業の問題点

オールコークス操業が開始されたあと、荷下がり不順、付着物形成や炉熱変動などの問題が顕在化した^{7)~10)}。この発生理由は次の項目にほぼ集約される。

- (i) 鉍石層厚の低下に伴う装入物分布の不均一化。
- (ii) 熱流比の増加に伴う炉壁部と中間部領域のガス温度低下。
- (iii) 羽口先燃焼帯へのコークス供給量増加や燃焼帯

昭和 57 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 1 月 6 日受付 (Received Jan. 6, 1983)

* 新日本製鉄(株)室蘭技術研究部 (Muroran Technical Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Muroran 050)

*² 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp.)

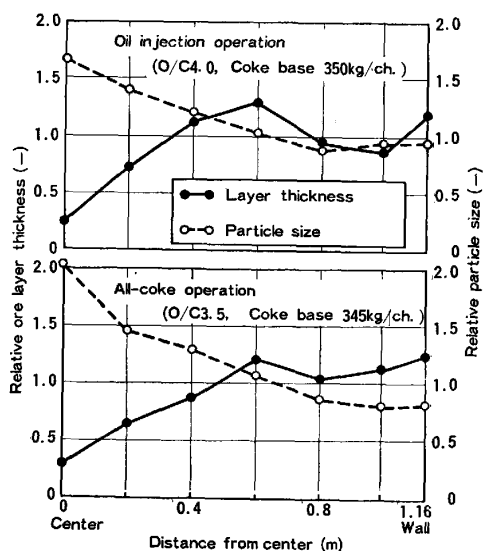


Fig. 1. Burden distribution at the furnace top obtained by cold model experiments.

温度上昇による炉下部状況の悪化。

このうち、(iii)はオールコークス操業自体に付随する現象である。これを解消するには燃料吹き込みなどの代替技術をあらたに必要とする¹¹⁾。(i)、(ii)に対しては、装入物の品質向上や炉内での分布形態の適正化により対処できる可能性がある¹²⁾¹³⁾。後者にかかわる改善を進めるにあたり、事前に炉内の装入物とガス流の分布状況を調査した。

(1) 装入物の炉頂分布形態の変化

熱流比が高いオールコークス操業では、通常、鉄石層を薄く装入することにより炉下部の溶解の安定性が保たれているが、それにより、炉頂部の装入物分布が、重油吹き込み時とは異なるものになる。分布実験装置(後述, Fig. 5)による測定結果を Fig. 1 に示す。本図は、鉄石装入により、層頂のコークスが崩れた後の堆積分布である。図から、オールコークス操業では、相対的に炉壁部と中間部で鉄石層が厚くなり、細粒もこの領域に多く集積することがわかる。このように、鉄石層が絶対値として薄くなつたために分布の不均一が強くなるが、それが炉壁部と中間部のガス流に衰えをもたらすという点で重大な問題を含むことになる。

(2) 炉内ガス流分布の変化

装入物分布形態の変化に伴うシャフト部のガス流分布への影響を知るために、重油吹き込みとオールコークス操業下の室蘭第4高炉の炉壁部(炉口壁面より475mm離れた位置)に垂直ゾンデを挿入した。この挿入位置は、Fig. 1 に示すように鉄石層が厚く、細粒も多い領域と推定される。測定結果を Fig. 2 に示すが、次のよ

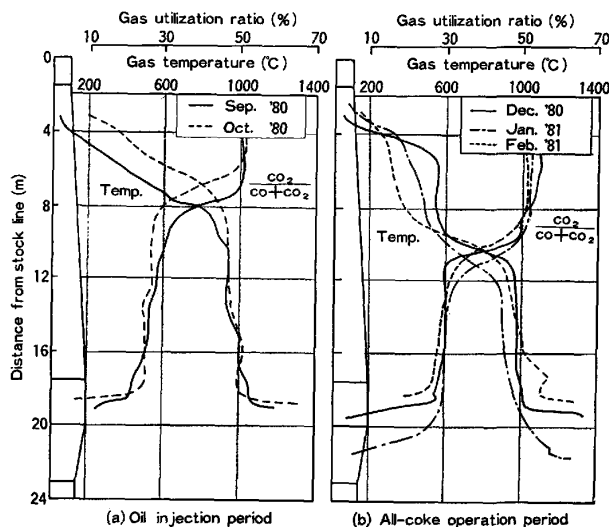


Fig. 2. Temperature and gas utilization in the periphery of the furnace measured by a vertical probe (Muroran No. 4BF).

うな特徴がみとめられる。

(i) 炉内の昇温速度は、装入時の ore/coke が低いにもかかわらず、シャフト上段と中段レベルで小さい。

(ii) 炉壁部の熱流比が高いと考えられる操業では、600°C 前後にあらたな熱保存帯がみられ、昇温曲線も二段に変化するパターンを示す。

(iii) 1000°C 前後の熱保存帯でのガス利用率は重油吹き込み操業時より高めの値を示す。

これらの特徴は、すでに田村⁹⁾や著者ら²⁾の報告にもあるように、いずれも炉壁部近傍の装入物分布変化によつて熱流比が増加し、装入物の昇温、還元に必要なガス流量が不足してきたことを示すものである。このために、装入物の還元遅れと粉化量の増大をもたらし¹⁴⁾¹⁵⁾、装入物降下を不安定なものとする。この問題を改善するには、従来にも増して炉頂部の装入物分布の制御精度を向上させる必要がある。

3. 焼結鉄粒度別装入法の検討

装入物分布状況を改善する手段として、粒度別装入法が次の諸点で有効であると考えた。

(i) 装入物の層厚と粒度が独立に制御できる。

(ii) 空隙率が増加し、通気性が改善される。粗粒は通気性がよいので炉中心部にも厚く装入できる。

(iii) 細粒は被還元性や熱伝達性が良いので、炉壁部に装入することにより、同位置の下部でみられる焼結鉄の還元遅れが軽減できる。

これらの効果を確実に得るために、焼結鉄の粒度別性状と粒度別装入時の分布形態を事前に詳しく検討した。

Table 1. Physical properties of fine and coarse sinter.

	Conventional unseparated sinter	Size-segregated sinter							
		1		1.5		2.3		4	
Coarse to fine ratio (-)		fine	coarse	fine	coarse	fine	coarse	fine	coarse
Mean size of particle (mm)	21.4	13.8	28.6	12.7	26.9	12.1	24.2	8.9	24.1
Size distribution (%)									
-10mm	33.0	57.8	14.3	59.5	17.0	62.4	20.0	76.7	25.4
10~25mm	33.6	28.8	25.3	28.9	33.5	29.5	39.5	21.6	35.4
+25mm	33.4	13.4	60.4	11.6	49.5	8.1	40.5	1.7	39.2
Bulk density (t/m ³)	1.65	1.72	1.53	1.73	1.53	1.74	1.54	1.75	1.59
Apparent specific gravity(-)	3.13	3.21	3.05	3.21	3.06	3.23	3.09	3.27	3.09
Void fraction (%)	47.3	46.4	49.9	46.1	50.0	46.3	50.1	46.5	48.7
Mean value of void fraction (%)	47.3	48.2		48.4		49.0		48.3	
Relative gas flow resistance (-)	1	1.97	0.54	2.28	0.58	2.38	0.66	3.54	0.75

3.1 焼結鉄の粒度別性状

(1) 粒度分布と空隙率

粒度別装入法において、成品焼結鉄を細粒と粗粒に区分する方法には、篩、または輸送コンベア乗り継ぎ時に生ずる粒度分級を利用する方法が考えられる。室蘭高炉では後者を採用した。細粒と粗粒の分級点(すなわち、重量比)を変えて求めた粒度分布、空隙率および相対通気抵抗係数(通常焼結鉄のそれとの相対値)を Table 1 に示す。空隙率はパラフィン被覆法で測定した見かけ比重より求めた。

細粒の重量比を増すと、細粒と粗粒の平均粒径の差は小さくなる。細粒の空隙率は、通常焼結鉄にくらべ、やや劣るが、粗粒では大幅に改善される。細粒と粗粒の重量比で加重平均した空隙率は通常焼結鉄より 1~2% 高

く、細粒の重量比が 30% (粗粒/細粒 2.3) のときに最も高い値を示す。また、細粒と粗粒を炉内に層状装入で堆積させた場合についても細粒の重量比が 30% で、かつ細粒を炉壁部に堆積させたときの通気性が最も良いことを計算で確かめた。

(2) 粒径と品質

焼結鉄の各粒度における化学成分、強度、被還元性および高温性状を測定した。結果を Fig. 3, 4 に示す。粒径が小さくなると、塩基度は低くなる傾向にあるが、被還元性は直線的に向上する。また、荷重軟化試験の結果でも、昇温過程での還元率は高く、溶け落ち時の圧損も低い値を示している。さらに、還元後強度指数(RDI)も細粒ほど小さく粉化しにくいことがわかる。

3.2 粒度別装入時の装入物分布形態

細粒と粗粒の装入方法を検討するために、Fig. 5 に示す実験装置を用いて分布実験を行った。ベルレスタイプの装入も炉頂装置の組み替えで可能である。

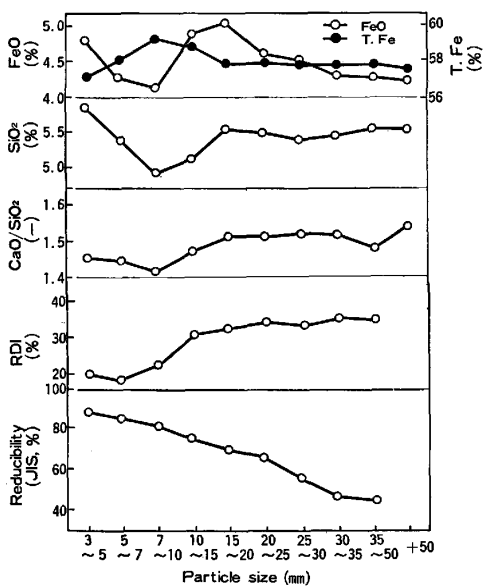


Fig. 3. Relation between the particle size and the qualities of sinter.

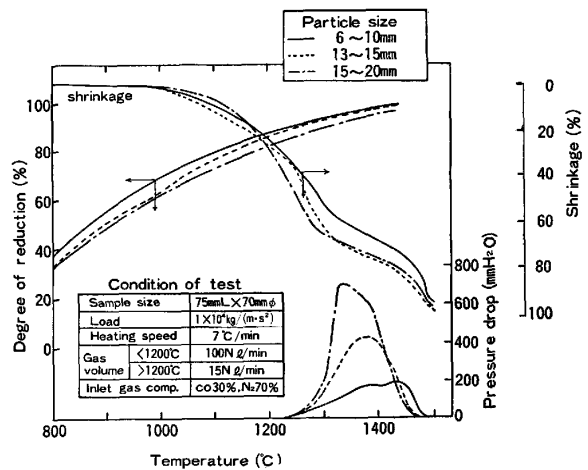


Fig. 4. Relation between the particle size and the high temperature properties of sinter.

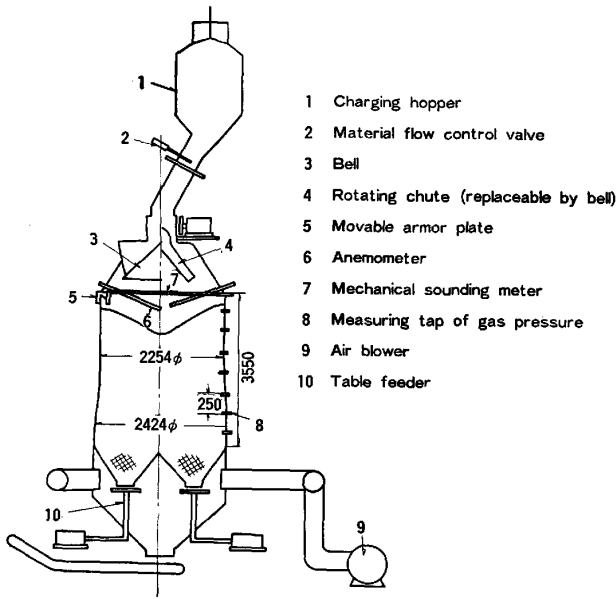


Fig. 5. Experimental apparatus.

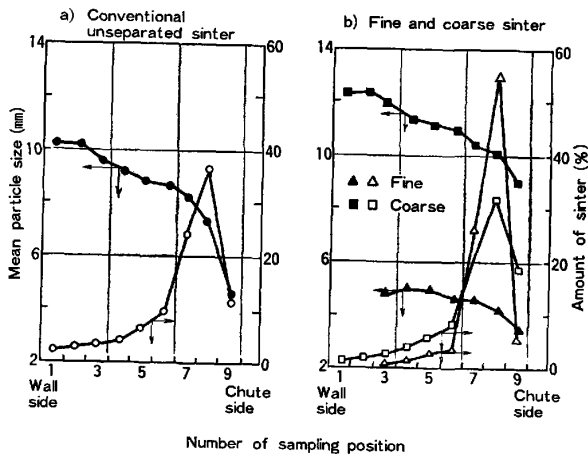


Fig. 6. Distribution of the particle size and the amount of sinter on the falling path from rotating chute.

実験に供した装入物の粒径は、コークス 10~30 mm, 焼結鉱 1~18 mm である。細粒と粗粒の粒径は 1~5 mm と 5~18 mm にした。実験では細粒の重量比をあまり変えないことから粒度を一定とした。送風量は 200m³/min (空塔速度 0.84 m/s), 装入物の降下速度は 25 mm/min である。装入物の分布形状は懸垂式検尺計により、また、層厚は電気抵抗式層厚計によって測定した。粒度分布はパイプ打ち込み法で得た試料より求めた。

以下に実験で得られた知見を述べる。

(1) 細粒と粗粒の落下状況

細粒と粗粒が旋回シュート (ベルレス装置) から落下する際の粒度分級状況を調べた。測定はシュートと装入物堆積面との間に 10 箇所仕切られたボックスを設け、シュートからの落下物を受けることによつて行つ

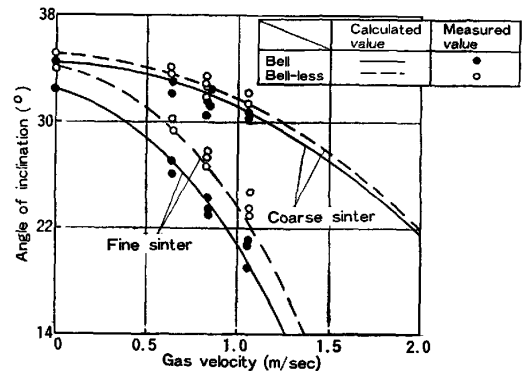


Fig. 7. Relation between the gas velocity and the angle of inclination of sinter.

た。ボックス内に落下した焼結鉱の重量と粒径分布の測定結果を Fig. 6 に示す。細粒は狭い層幅で落下しており、粒度分級が小さいことがわかる。このことから、細粒は所定位置に精度よく投入するのに適しているといえる。

(2) 細粒と粗粒の傾斜角

ガス流速をかえて細粒と粗粒層の傾斜角の変化を調べた。結果を Fig. 7 に示す。ガス流速の大きい領域では、細粒の傾斜角は粗粒の値より著しく小さくなる。ガス流との関係を西尾ら¹⁶⁾と同じ考えで計算した結果も Fig. 7 に示すが、実測値とほぼ合致している。

細粒の傾斜角がガス流の強さによつて大きく変化するのは望ましくない。細粒を安定した形状で堆積させるには、ガス流速が小さい炉壁部に装入するのが有効である。炉壁部に堆積した細粒は粗粒とほぼ同じ 30° 前後の傾斜角を示す。一方、粗粒は炉中心部に多く堆積しても傾斜角がガス流に強く影響されず、安定した形状が保たれる。

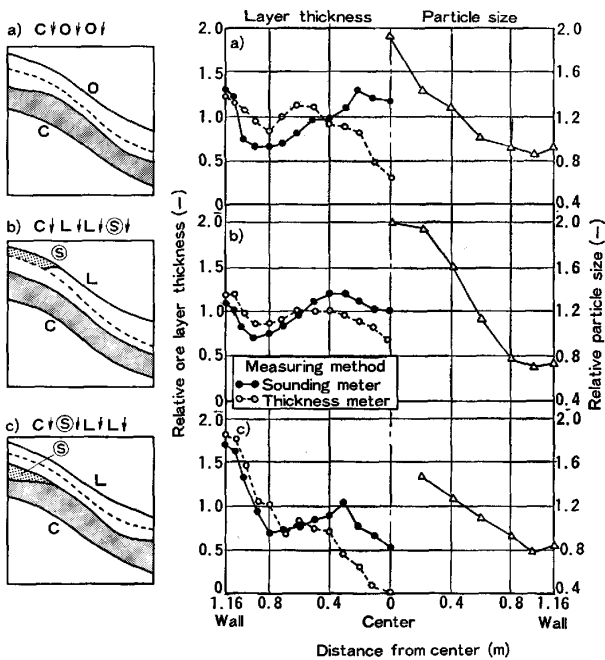
(3) 細粒と粗粒の分布形態

細粒の装入位置については、通気性や分布形状の面から炉壁部が望ましいことは上記したとおりである。

細粒の堆積方法には、粗粒の焼結鉱層上および直接コークス層上に堆積させる 2 種類の型式が考えられる。前者を L ↓ ⊙ ↓ 型、後者を ⊙ ↓ L ↓ 型と呼ぶことにする (L は粗粒, ⊙ は細粒, ↓ 印は炉内への装入を示す)。

従来装入法および両型式の粒度別装入法を適用した場合の分布実験結果を Fig. 8 に示す。図には炉半径方向の相対層厚比 (鉱石/コークス) と相対粒径の分布を示すが、層厚比分布は懸垂式検尺計と電気抵抗式層厚計を用いて測定したものである。

L ↓ ⊙ ↓ 型装入では、両測定計で求めた相対層厚比の差異が小さい。これは、粗粒装入時の炉半径方向のガス流分布変化が他の装入法にくらべて小さいので、コーク



(C : coke, O : sinter, L : coarse sinter, S : fine sinter)
 a) Conventional unseparated sinter charging
 b), c) Size-segregated sinter charging

Fig. 8. Burden distribution in cases of charging conventional unseparated and size-segregated sinter obtained by cold model experiments (Bell type charging).

ス層の崩れが多く生じなかつたものと考えられる。粒径は炉中間部から中心部にかけて急増しており、粒度構成が2分化された特徴を示す¹⁷⁾。これは炉半径方向の各位置での粒度分布幅が縮小されたことを意味しており、空隙率も向上したものと推察される。なお、この型式では、細粒の装入位置を変更する際にもコークスの装入条件を規制しないので、炉壁部の ore/coke を従来法と同様に調整できる利点がある。

一方、S↓L↓型装入では、両測定計より求めた層厚の差異が炉中心部で大きくみられる。これは、細粒を炉壁部に装入するにともない、中間部と中心部のガス流速が急増したので、コークス層の崩れが多く生じたものと考えられる。したがって、細粒の一部が中間部に流れ込む一方、中心部のコークス層が厚く堆積して粗粒の流れ込む距離が短くなるので、粒径分布は従来装入法と大差のないパターンとなつている。この装入法は強い中心ガスを望む場合には有効であるが、中間部や炉壁部のガス流量確保には適さない。

(4) 粒度別装入におけるガス流分布

実験で得られた層厚と粒径の分布から、L↓S↓型装入法および従来装入法における炉半径方向のガス流速分布を計算した。粒度別装入時のガス流速分布は炉壁部に装入する細粒の量と堆積範囲によつて異なるが、従来装

入法にくらべて中間部の値が一般的に大きくなる。一方、炉壁部のガス流速を従来装入法と同程度もしくはそれ以上にするには、炉壁部の細粒を含む鉱石層を薄くする必要がある。これは同時に中間部と中心部の粗粒層を厚くすることを意味するので、ガス流速分布は従来以上に平坦化されてガス利用率の向上が期待できる。

従来装入法では、炉壁面の損傷や熱放散を防ぐために、炉壁側近の鉱石層厚を過大にとるが、細粒を同位置に堆積させる本装入法ではその必要がなくなる。過大な鉱石層が薄くできれば、炉下部での還元遅れは改善される。

以上の検討から、焼結鉱の粒度別装入法では、装入方法の選定により、分布形状の安定と周辺ガス流の助長がはかれることを確かめたので、オールコークス操業のガス流分布改善対策として、本方法を高炉に適用した。

4. オールコークス操業への適用

焼結鉱粒度別装入法は室蘭第1高炉(ベルレス装入)と同第4高炉(ベル装入)のいずれにも適用したが、ここでは第4高炉の結果について述べる。

4.1 操業状況

室蘭第4高炉(炉容、2,239 m³)は2ベルタイプで新日鉄式ムーバブルアーマーを装備している。

本高炉は昭和55年12月にオールコークス操業に切り替えられた。操業当初は、Fig. 2 (b) に示すよう

Table 2. Operating results of Muroran No. 4 blast furnace.

Charging method	Conventional unseparated sinter charging		Size-segregated sinter charging	
	Dec. '80	Feb. '81	May '81	Jul. '81
Production (t/day)	4,337	4,312	4,163	4,218
Sinter ratio (%)	89.6	90.7	88.5	97.0
Ratio of fine sinter (%)	—	—	22.7	23.8
FeO in sinter (%)	5.67	5.63	5.35	5.27
Coke rate (kg/t-p)	468	461	459	448
Ore to coke ratio (-)	3.44	3.47	3.48	3.60
Temperature of top gas (°C)	105	100	89	114
Utilization of top gas (%)	50.5	51.3	51.5	51.9
Corrected utilization of top gas ¹⁾ (%)	50.5	51.4	51.9	51.8
Gas flow resistance, k ^{1/2}	4.15	4.37	3.87	3.41
Blast temperature (°C)	1,129	1,107	1,182	1,202
Blast moisture (g/Nm ³)	19.2	23.0	26.1	22.8
[Si] in pig iron (%)	0.72	0.63	0.72	0.47
Slag volume (kg/t-p)	296	301	299	315
Coke ash (%)	10.65	10.52	10.76	10.55
Direct reduction (%)	33.5	32.0	32.4	32.8
Shaft efficiency (-)	0.93	0.94	0.94	0.98
Corrected coke rate ³⁾ (kg/t-p)	468	468	464	466

*1 The value corrected by the conditions of sinter ratio and pre-reduced pellet ratio.

*2 $K = \{(P_B^2 - P_T^2) / V_G^{1.7}\}$
 P_B, P_T : Blast and top gas pressure (kg/(m²·s²))
 V_G : Bosh gas volume (Nm³/min)

*3 The value corrected by the conditions of blast, charging materials and silicon content in pig iron.

に、炉壁部の昇温速度が小さくて炉下部で還元反応が十分進まない、いわゆる不活性な状態を生ずるのが認められた。このため、粒度別装入法を昭和 56 年 4 月後半より本格的に適用した。主な操業状況を Table 2 に示す。装入方式は L ↓ ⊙ ↓ 型であり、細粒の割合は 22~24% (粗粒/細粒 3.2~3.5) である。Table 2 より明らかかなように、粒度別装入によつてガス利用率が向上し、通気性が改善された。装入原料、送風条件および鉄中 [Si] の差異を補正した両期間の平均コークス比でみると 3 kg/t-p の低減が得られたことになる。

4.2 炉内状況

シャフト上段のガス成分と温度分布を水平ゾンデで測定した結果を Fig. 9 に示す。従来装入法にくらべ、粒度別装入法では、ガス利用率分布はフラットに近いパターンが得られ、そのことが、ガス利用率の向上をもたらしたといえる。温度分布は従来装入法の場合と同様に中心部で高く、中心ガス流は依然として保持されている。

水平ゾンデで得られたガス成分値から、炉中心、中間、壁部のガス流速比を計算した。これはガス成分値から求めた塊状帯での鉄の脱酸素量がガス流量に反比例するとして得たもので、鉄の単位降下量当たりのガス流量の相対分布を示す。各領域のガス流速比を三角ダイヤグラムで図示すると Fig. 10 のようになる。炉中心、中間、壁部の面積比はそれぞれ 7.4%、42.5%、50.1% である。比較のために、従来装入法のガス流速比も示すが、粒度別装入法では周辺ガス流が強められた位置で操業の安定が得られたことがわかる。

周辺ガス流が強められたことによつて、シャフト部の上段から中段にかけて周辺領域でみられた昇温状況の不十分さも改善されたものと考えられる。この点を確認するために、垂直ゾンデを炉壁部に挿入してガス温度と成分分布を測定した。その結果を Fig. 11 に示す。Fig. 2

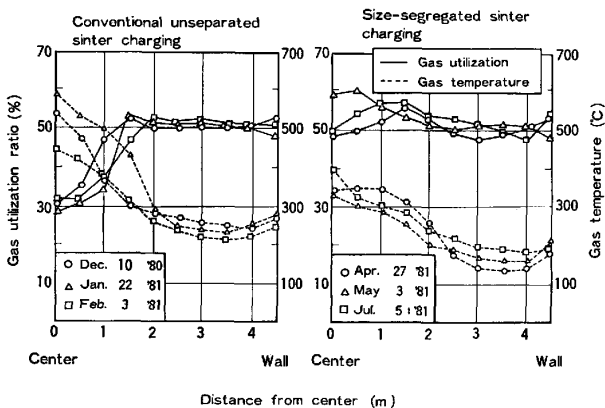


Fig. 9. Results of measurement by upper shaft gas sampling (Muroran No. 4 blast furnace).

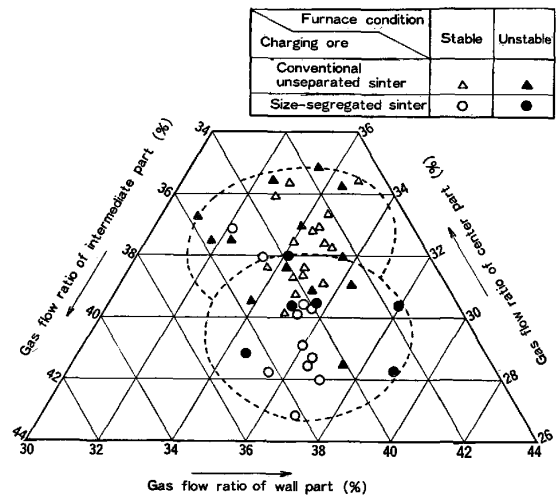


Fig. 10. Diagram of gas flow at the shaft in conventional unseparated and size-segregated sinter charging.

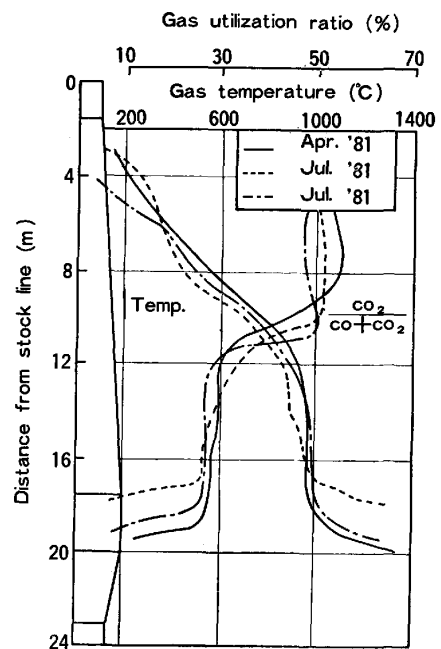


Fig. 11. Temperature and gas utilization ratio in the periphery of the furnace measured by a vertical probe at the period of size-segregated sinter charging (Muroran No. 4 blast furnace).

(b)の結果と比較すると、粒度別装入時には昇温速度が大きくなり、かつ二段に変化する昇温曲線も生じにくくなつており、改善されたことがわかる。

さらに、垂直ゾンデで炉高方向のガスの静圧分布も同時に測定したので、この値から山口ら¹⁸⁾の数式モデルを用いて融着帯形状を推定した。この結果、融着帯形状は粒度別装入法の適用によつて頂部レベルが低下し、根部レベルが上昇する特徴が認められた。根部レベルの上昇は周辺ガス流の増加と良好な溶け落ち性状を示す細粒焼

結鉄によつて得られたものと考えられる。なお、本操業で通気性も改善されたが、これは塊状帯での鉄石層の空隙率増加に加えて、根部レベルと炉芯コークス層面との距離が大きくなり炉下部のガス流抵抗が軽減されたためであろう。

5. 結 言

オールコークス操業下の高炉内では、重油吹き込み操業の場合にくらべ、炉頂部の装入物分布が炉半径方向で不均一であること、および周辺ガス流が十分でないことを事前の検討で確かめた。これを改善する方法として、焼結鉄の粒度別装入法が有効であると考え、その適用をはかつた。適用にさいし、モデル実験によつてその分布特性を調査し、次の知見を得た。

(1) 焼結鉄を細粒と粗粒に区分することにより、粗粒の空隙率は大幅に向上する。焼結鉄の層全体の平均空隙率も1~2%改善される。一方、細粒は被還元性が良く、望ましい溶け落ち性状を示す。

(2) 細粒は装入時に狭い落下層幅を示し、かつ粒度分級も多く生じないので所定位置に精度よく投入できる。

(3) 細粒の傾斜角はガス流の影響を強く受けるが、細粒を炉壁部に堆積させれば、その影響は小さい。

(4) 細粒の装入方式は、通気性の向上と分布形状の安定性の両面から、L↓⊙↓型が望ましい。

(5) 周辺ガス流を保持してフラットなガス流分布を得るには、細粒を含む炉壁部の鉄石層を薄く堆積させる必要がある。

上記の知見をもとに、本装入法をオールコークス操業の室蘭第4高炉に適用した。この結果、通気性が改善されるとともにガス利用率が向上し、補正コークス比で3

kg/t-pの低減が得られた。垂直ゾンデで炉内の状況変化を調べた結果では、周辺ガス流が発達して融着帯根部も上昇する傾向が認められた。

文 献

- 1) 豊田 茂: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1675
- 2) 松岡 宏, 奥野嘉雄, 原 義明, 磯山 正, 入田俊幸: 学振 54 委-No. 1591 (昭和 57 年1月)
- 3) 田村健二, 林 洋一, 松井正昭, 彼島秀雄, 山本崇夫: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 223
- 4) 金森 健, 森下紀夫, 白川充祉, 内田雅敏: 鉄と鋼, 68 (1982), S 46
- 5) 栗原淳作, 高橋洋光, 奥村和男, 竹内 忍, 荻込洋一: 鉄と鋼, 65 (1979), S 91
- 6) 田山 昭, 内藤文雄, 西川 潔, 前川紀之: 鉄と鋼, 67 (1981), S 80
- 7) 中村文二, 梶原義雄, 山縣千里, 水野 豊, 細井信彦, 洪沢進一: 鉄と鋼, 66 (1980), A 129
- 8) 石川 泰, 徳永正昭, 久保 進, 青野昭彦, 島野和好: 鉄と鋼, 67 (1981), S 6
- 9) 高橋洋光, 国分春生, 久保秀穂: 鉄と鋼, 68 (1982), A 1
- 10) 宇野成紀, 塩谷 靖, 市口順亮, 石岡信雄, 八木三夫, 高橋孝一: 鉄と鋼, 68 (1982), S 785
- 11) 川辺正行, 竹村頼二, 和栗真二郎, 梶原豊太, 馬場昌喜, 石川 泰, 長谷川晟, 南 昭二: 鉄と鋼 68 (1982), A 17
- 12) C. THIRION, N. JUSSEAU, and J. BOUGET: Rev. Metall, 78 (1981), p. 857
- 13) J. A. MICHARD, C. BARBIER, J. BOUGET, and N. JUSSEAU: Ironmaking Steelmaking, 7 (1982) 2, p. 59
- 14) N. N. BABARYKIN: Steel in USSR, 11 (1981), p. 126
- 15) 岩永祐治: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 740
- 16) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1878
- 17) 奥野嘉雄, 入田俊幸, 磯山 正, 三国 修: 鉄と鋼, 67 (1981), S 707
- 18) 加瀬正司, 須賀田正泰, 山口一良: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1928