
ベルレス高炉炉頂ホッパーからの原料排出特性

Characteristics of Material Discharging from Top Bunker of Blast Furnace with Bell-less Top

宮川 昌治(Shoji Miyagawa) 武田 幹治(Kenji Takeda) 田口 整司(Seiji Taguchi)
森本 照明(Teruaki Morimoto) 藤田 昌男(Masao Fujita) 藤森 寛敏(Hirotooshi Fujimori)

要旨：

垂直二段式（C F 型）と千葉製鉄所第 6 高炉に代表される並列バンカー式（P B 型）のベルレス高炉の炉頂装入ホッパーの原料排出特性を比較する 1／16.5 模型実験を行った。(1) 排出原料粒径の経時変化, (2) 円周方向での原料排出量の偏差の二つの特性を調べた。P B 型は特性 (1) が, C F 型は特性 (2) がすぐれている。C F 型の鉱石排出時の特性 (1) は上部ホッパーからの原料排出速度が影響し, P B 型と同時の特性を得るに排出速度を大きく低下させる必要がある。ベルレス高炉の特長である炉半径方向の分布制御の点で P B 型が有利である。炉頂装入装置として望ましいものと考えられる。

Synopsis：

Scale model experiments were carried out to examine the difference in material discharging behavior between parallel bunker (PB) type and center feed (CF) type at blast furnace bell-less top. The following results were obtained in respect of two criteria, (1) chronological changes in material size during discharging and (2) circumferential imbalance in discharging weight. The PB type is good for (1), while the CF type is good for (2). In order to make the behavior (1) in the CF type approach in the vicinity of that in the PB type, the discharging rate from the upper hopper must be sufficiently suppressed. As a result, the PB type bell-less top is considered to be superior to the CF type, because burden distribution control in the radial direction at the furnace top is more effective than in the CF type.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Characteristics of Material Discharging from Top Bunker of Blast Furnace with Bell-less Top



宮川 昌治
Shoji Miyagawa
鉄鋼研究所 鉄鋼プロセス研究部製鉄研究室主任研究員(樹長)



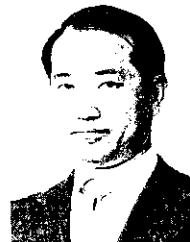
武田 幹治
Kanji Takeda
鉄鋼研究所 鉄鋼プロセス研究部製鉄研究室主任研究員(課長補)



田口 整司
Seiji Taguchi
鉄鋼研究所 鉄鋼プロセス研究部製鉄研究室長(部長補)



森本 照明
Teruaki Morimoto
鉄鋼技術本部 鉄鋼技術部 高炉改修計画室主査(部長補)



藤田 昌男
Masao Fujita
水島製鉄所 設備部設計室 主査(課長)



藤森 寛敏
Hirotohi Fujimori
千葉製鉄所 エネルギー部長

要旨

垂直二段式 (CF 型) と千葉製鉄所第 6 高炉に代表される並列バンカー式 (PB 型) のベルレス高炉の炉頂装入ホッパーの原料排出特性を比較する 1/16.5 模型実験を行った。(1) 排出原料粒径の経時変化, (2) 円周方向での原料排出量の偏差の二つの特性を調べた。PB 型は特性 (1) が, CF 型は特性 (2) がすぐれている。CF 型の鉱石排出時の特性 (1) は上部ホッパーからの原料排出速度が影響し, PB 型と同等の特性を得るには排出速度を大きく低下させる必要がある。ベルレス高炉の特長である炉半径方向の分布制御の点で PB 型が有利であり, 炉頂装入装置として望ましいものと考えられる。

Synopsis:

Scale model experiments were carried out to examine the difference in material discharging behavior between parallel bunker (PB) type and center feed (CF) type at blast furnace bell-less top. The following results were obtained in respect of two criteria, (1) chronological changes in material size during discharging and (2) circumferential imbalance in discharging weight.

The PB type is good for (1), while the CF type is good for (2). In order to make the behavior (1) in the CF type approach in the vicinity of that in the PB type, the discharging rate from the upper hopper must be sufficiently suppressed. As a result, the PB type bell-less top is considered to be superior to the CF type, because burden distribution control in the radial direction at the furnace top is more effective than in the CF type.

1 緒 言

装入物分布制御は高炉の炉内反応を支配し, 操業の良否や操業成績を直接左右する。このため炉内の反応効率が向上する装入方法, あるいは安価原料の多量使用を可能にする装入方法の開発を目標とした研究が行われ, 混合装入や粒度別分割装入をはじめとする多様な装入方法が提案されている。

装入物分布制御の目的は, 炉内反応やガス流れを考慮した上で高炉内の原料を目標とする分布に制御することにある。高炉への原料装入はベルレス装入装置あるいはベル式装入装置によって行われ, 前者は後者に対して分布制御の自由度の向上や高精度化を目的として導入された。近年はベルレス式概念の中に炉頂でのホッパーの設置方法も付加され, Fig. 1 に示すように並列バンカー式 (parallel bunker type, PB 型) から垂直二段式 (center feed type, CF 型) のベルレス高炉へと新たな展開をみせている。

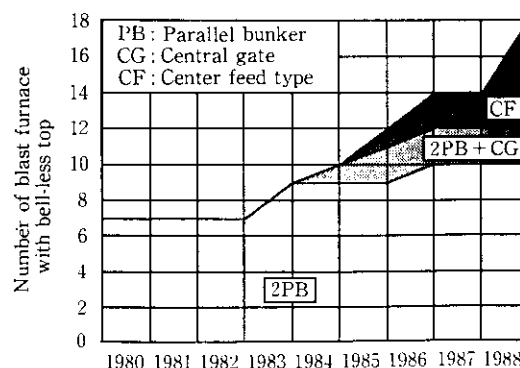


Fig. 1 Transition of number of blast furnaces installed with bell-less top in Japan

* 平成3年4月1日原稿受付

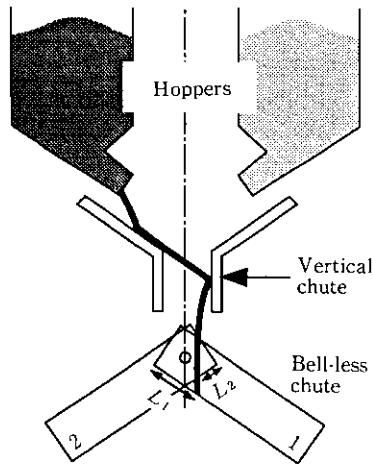


Fig. 2 Schematic representation of falling trajectory in vertical chute

高炉炉頂装入装置に関する課題をここで整理しておく。高炉内への原料の供給は、大別すると供給原料の特性とホッパー系からの供給速度・供給量の2点から議論する必要がある。具体的には次のことが問題となる。

- (1) 炉頂ホッパーから供給される原料の、
 - (a) 平均粒径の経時的な変化
 - (b) 供給速度の経時的な変化
- (2) ベルレスシュートからの炉内に供給される原料流れに対する、
 - (a) 原料粒径の水平断面での均一性
 - (b) 供給量の水平断面での均一性
- (3) 炉頂装入物表面での原料の、
 - (a) 落下堆積位置の制御

ベルレス高炉の特徴は、旋回シュートの傾斜角度を経時的に変えながら原料装入を行うことで炉内半径方向の原料堆積分布を制御する点にあり¹⁾、ベルレス高炉を考えると(1)の(a)は原料供給の開始から終了にむけて平均粒径値が小から大にむけて増加するのが望ましい。その際ホッパーが排出する原料粒径の経時変化はホッパーの形状や構造によっても大きく変わることが指摘されている²⁾。

(1)の(b)に関しては一定であることが望ましいが、PB型ベルレス高炉に固有の欠点として円周方向の偏差がある。これはFig. 2に示すように装入系の装置構成に関係して、原料が炉中心軸を落下しないことに起因する³⁾。これを改善するために炉頂ホッパーでの原料の流れを中心化させる機能弁(central gate)を付加したPB-CG型、さらにはCF型へと新たな展開が図られている。

以上述べたように、高炉内の原料分布を考えるとホッパーからの原料の排出挙動を把握しておくことが重要である。

本報告はベルレス高炉を対象として、種々の型式の炉頂装入装置の排出特性に関する模型実験による基礎研究の結果を述べる。特に、炉内半径方向の装入物分布に対応して排出原料の平均粒径の経時変化(特性1)、円周方向の装入物分布に対応してシュート上の原料排出位置の炉中心軸からの偏心(特性2)の2点に主眼をおいて述べる。

2 実験方法

2.1 実験装置

高炉内に原料を装入する際、原料の輸送過程で粒径や原料の偏析を生じる。このため模型実験においても実機の一連の設備を再現する必要がある。Fig. 3に示すように原料槽、ベルトコンベヤー、サージホッパー、ベルトコンベヤーおよび炉頂装入装置から実験装置を構成した。

実験に用いた炉頂装入装置をFig. 4に示す。PB型炉頂装入装置は千葉製鉄所第6高炉の縮小模型とホッパーの個数と形状を変更したものの2基の模型を用いた。CF型炉頂装入装置は計4基の模型装置を用いた。上部ホッパーに1個の排出口を有するCF1、CF3、CF4と4個の排出口を有するCF2の2種類に大別でき、前者は互いに異なる上部ホッパー構造を有する。実験に用いた装入装置の相似比 s (=模型長さ L_m /実機長さ L_a)は1/16.5である。

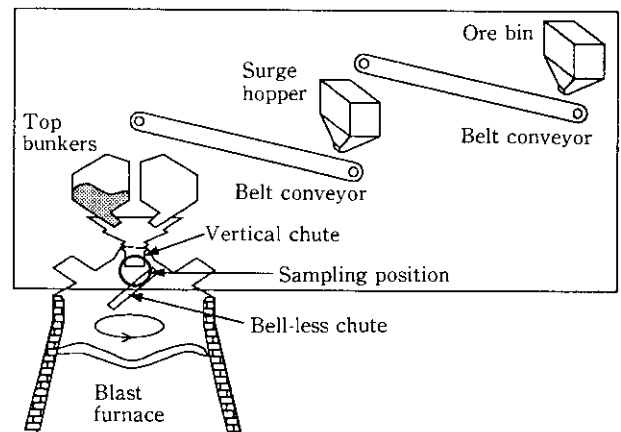


Fig. 3 Schematic representation of experimental apparatus

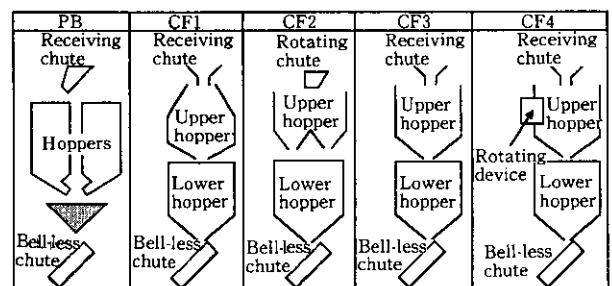


Fig. 4 Schematic representation of charging systems

2.2 実験条件

本研究は重力場での鉱石やコークスの運動を対象とし、系に作用する力は重力と慣性力であって、Froude数で実験条件を相似させればよい。模型装入装置の縮尺比 s で表現した相似条件をTable 1に示す。

実験に供する鉱石やコークスは乾燥・破碎・篩い分け処理を経た鉱石あるいはコークスを配合して用いる。篩い分け試料の配合の割

Table 1 Similarity conditions

		Actual	Model	Ratio
Length	(m)	L_a	L_m	$L_m/L_a=s$
Volume	(m)	V_a	V_m	$V_m/V_a=s^3$
Mass	(kg)	M_a	M_m	$M_m/M_a=s^3$
Time	(s)	T_a	T_m	$T_m/T_a=s^{0.5}$
Charging rate	(kg/s)	w_a	w_m	$w_m/w_a=s^{2.5}$
Discharging rate	(kg/s)			

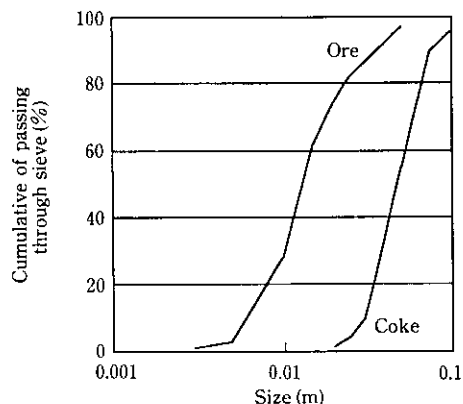


Fig. 5 Size distribution of ore and coke at actual furnace

合は、実高炉に装入される鉱石とコークスの粒度分布 (Fig. 5) から模型装入装置の縮尺比 s にしたがって定めることができる。しかし、ホッパー内での粉体の分級挙動 (3.2 で詳述する) に関する粒径を縮小する相似条件が明確でないことから、模型装入装置の相似比 $s=1/16.5$ に $1/10.0$ と $1/13.5$ の2条件を加えた計3水準での実験をあらかじめ行った。

また模型装入装置の排出口径の設定について、排出口の大きさを模型の幾何学的な縮尺比率にしたがって実機の $1/16.5$ としたとき、そこから排出される試料の重量速度と相似条件が規定する排出速度が一致することを確認するための実験を行った。

2.3 試料の採取方法

ホッパーから排出された試料の平均粒径の経時変化を評価する特性1に関する実験では、模型装入装置の排出口から排出される鉱石あるいはコークス試料を2秒を区切りとして連続的に採取し粒度分析に供した。各試料の調和平均径 (d_p) を算出し、試料全体の調和平均径 (D_p) で無次元化した値 (d_p/D_p) の経時的な変化を調べた。

特性2の原料落下流の中心軸からの偏心に関しては、垂直シュート下端で、垂直シュートから流れ落ちてくる試料を4個の1/4円に分割して採取した。採取位置間の試料重量の標準偏差を求めて各装入ホッパーの排出特性を評価した。

3 実験結果

3.1 ホッパーからの原料排出速度

模型実験における原料排出速度 w_m と実機での原料排出速度 w_a の関係は、Table 1 に示すように (1) 式を満足する必要がある。

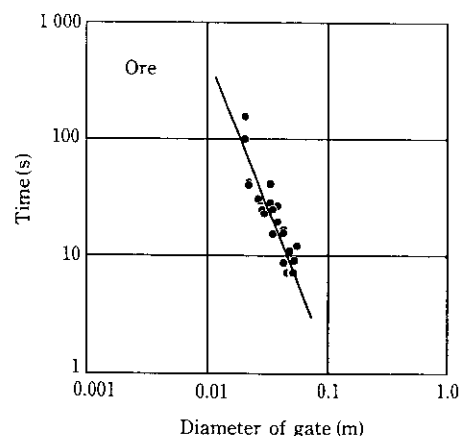


Fig. 6 Relation between discharging rate and opening of hopper gate

ここで s は相似比である。

$$w_m/w_a=s^{2.5} \quad (1)$$

原料排出時間を決める排出口の大きさは (2) 式を満足する必要がある。

$$d_m/d_a=s \quad (2)$$

d_m : 模型装置の排出口の面積相当直径

d_a : 実機装置の排出口の面積相当直径

模型実験の操作条件において、(1) 式と (2) 式を同時に満足することを確認する必要がある。同時に満足できないときは、相似条件間で整合性がくずれるためである。

ホッパー内に原料 (鉱石は 23.4 kg, コークスは 6.9 kg) を装入し、排出に要する時間 t を測定し、ホッパー排出口の開口部面積から求めた面積相当直径 d との関係調べた。Fig. 6 に鉱石の場合の実験結果を示した。 t と d の関係を最小自乗法を用いて定式化すると (3) 式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \log t &= 5.31 - 2.54 \log d \quad (\text{鉱石}) \\ \log t &= 5.54 - 2.51 \log d \quad (\text{コークス}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3) 式を変形すると原料の排出速度 w に関する (4) 式を得る。

$$w \propto 1/t \propto d^{2.5} \quad (4)$$

すなわち、鉱石とコークスのいずれも原料の排出速度は開口部の円相当直径の2.5乗に比例する結果となった。一般に、ホッパー内に蓄えられた粉体の排出速度は排出口の径の2.5~3.0乗に比例することが知られ、今回得た実験結果は妥当といえる。(1) 式の左辺に (4) 式を代入して (5) 式を得る。

$$\begin{aligned} w_m/w_a &= d_m^{2.5}/d_a^{2.5} \\ &= (d_m/d_a)^{2.5} \\ &= s^{2.5} \end{aligned} \quad (5)$$

すなわち、(3) 式が成立するので、(1) 式と (2) 式の条件は同時に満足できる。

3.2 ホッパー内での分級挙動に及ぼす原料粒子径の影響

本研究はホッパーからの原料の排出挙動を対象とするが、ホッパー内での鉱石・コークスの堆積分布が重要であることが多くの研究者から指摘されている⁶⁾。

ホッパー内に供給される原料は、ホッパー内ですでに堆積した原料が形成する斜面上を運動するとき、分級 (percolation) することが知られている⁷⁾。これは堆積した原料粒子が、運動する粒子に対して篩いに相当する効果をおよぼす結果であるが、この分級挙動に

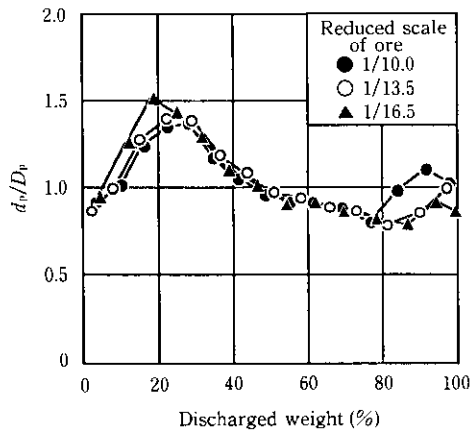


Fig. 7 Changes in size of ore discharged from the lower hopper (CF1)

およぼす原料粒子径の影響が明確でない。このため、装入装置 CF1 を用いて 3 水準の粒径縮尺条件にて特性 1 に関する予備実験を行った。鉱石の場合の実験結果を Fig. 7 に示すが、実験結果に差は認められない。またコークスの場合にも同様に差は認められなかった。

このため、以下の実験は原料粒径の縮尺条件を模型の縮尺比と一致させて 1/16.5 として行った。

3.3 炉頂装入装置の基本的な排出特性

代表的な PB 型である千葉製鉄所第 6 高炉の炉頂ホッパーの実機の鉱石排出特性と模型実験で得た排出特性を Fig. 8 に示す。両者は互いによく一致している。その排出特性の特徴は細粒の排出から開始することであり、PB 型は特性 1 に関してペルレス式炉頂装入装置として望ましい排出特性を有する。

各炉頂装入装置の特性 1 に関する鉱石の実験結果を Fig. 9 に示した。CF 型の下部ホッパーから排出する鉱石の平均粒径の推移は、粗粒の排出から開始し中期以降は細粒を主体とする排出に終始し、先に述べた PB 型の鉱石粒径の経時変化とはきわめて対照的である。同じ CF 型でも上部ホッパーの排出口（ポート）数により排出初期の平均粒径値が異なり、4 ポートの CF2 において粗粒の排出を最も抑制できる。CF1, CF3, CF4 はいずれも 1 ポートであるが経時変化に差は認められない。

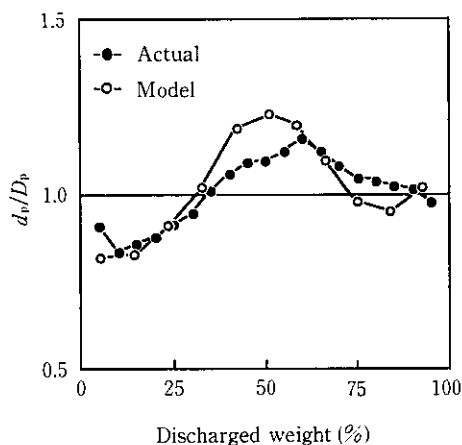


Fig. 8 Changes in size of ore discharged from the hopper (PB type)

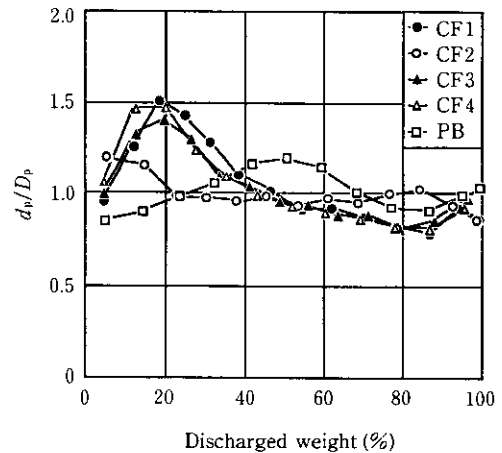


Fig. 9 Changes in size of ore discharged from the hopper

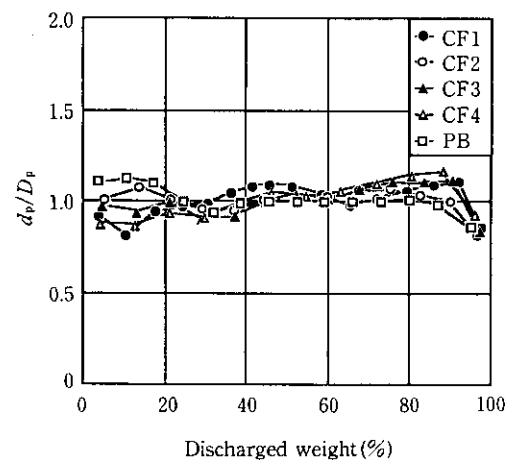


Fig. 10 Changes in size of coke discharged from the hopper

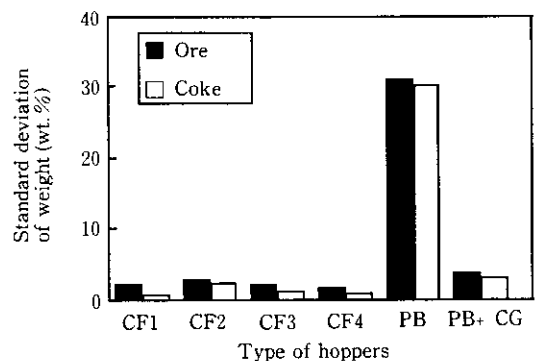


Fig. 11 Deviation of burden weight discharged from hopper systems

一方、Fig. 10 に示すコークスの平均粒径の経時変化はホッパー型式によらず、基本的には PB 型の鉱石排出と同様に細粒を主体とする排出から開始する。ただし、鉱石の場合と比較して粒度偏析の程度は小さい。

排出特性 2 に関しては、Fig. 11 に示すように CF 型は PB 型と比較して鉱石、コークスともに落下流の中心軸からの偏差が小さく、

設備構成上の特徴を反映している。4基のCF型を比較すると大きな差異は観察されない。

4 考 察

炉頂ホッパーの排出特性におよぼす操作因子と排出特性の向上に関して考察する。

4.1 垂直二段式の排出特性

3.3 で示したようにCF型の下部ホッパーからは、粒子径の大きな鉱石が最初に排出され、炉内半径方向の装入物分布に関して適当でない。この原因を明らかにするために装入装置CF1を用いて実験を行った。Fig. 12に示すように装入装置CF1の上部ホッパーから下部ホッパーに鉱石を落下させるときの平均粒径の経時変化は、PB型の排出特性と基本的に同じである。ところが、下部ホッパー内の半径方向の粒子径分布はFig. 13に示すようにホッパー中心で最大の値を示し、通常観察される分布と逆である。すなわち、CF型の排出特性は下部ホッパー内での原料の堆積が影響している。

次いでホッパー内の原料の流れを制御することを目的として、ホッパーの中心軸上に50 100 mmφ×3 mm t の円盤を整流板として設置し、鉱石排出特性に及ぼす影響を調べた。整流板を下部ホッパーに設置した場合の実験結果をFig. 14に示す。ホッパーの排出口直上に、より大きな整流板を置き、ホッパー内の原料のマスフロー化を促進することで初期の粗粒の排出を抑制できる。上部ホッパーに

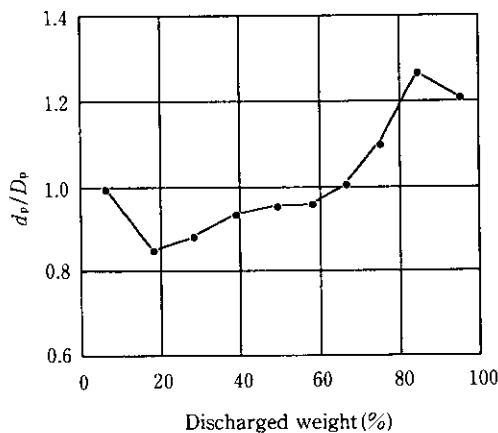


Fig. 12 Changes in size of ore discharged from the upper hopper of CF1

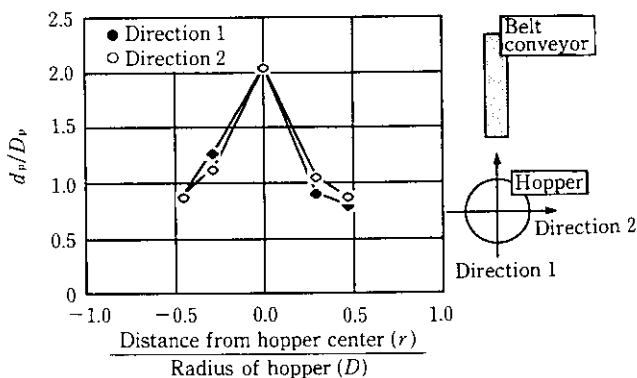


Fig. 13 Size distribution of ore in the lower hopper (CF1)

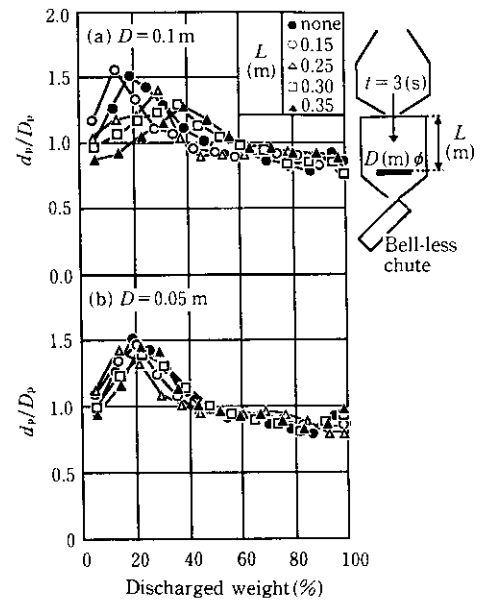


Fig. 14 Effect of insert disc installed in lower hopper on changes of ore size (hopper: CF1)

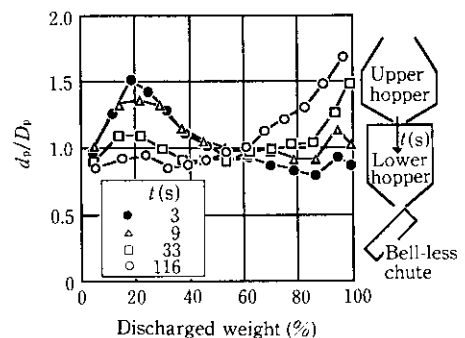


Fig. 15 Effect of discharge time t on changes of ore sizes (hopper: CF1)

対しても同様の実験を行ったが、その効果は下部ホッパーの場合と比較して小さい。整流板の作用はファンネルフローのマスフロー化であるから⁹⁾、実験結果が示すように粒径の経時変化曲線を平坦にするのが限界である。すなわち、CF型の排出特性をPB型のそれに近づけることは原理的に難しい。

下部ホッパーの排出特性は、Fig. 15に示すように上部ホッパーからの原料排出速度にも影響される。下部ホッパー内の原料の堆積形状と粒度分布の変化から堆積時の分級挙動の差によるものとわかった⁹⁾。CF型において初期の粗粒排出を抑制してPB型と同等の特性を得るには、上部ホッパーからの排出速度を1/10に低下する必要がある、これは装入時間の制約から操作上無理がある。

4.2 並列バンカーの排出特性

PB型炉頂ホッパーはCF型に比較して円周方向での偏差が大きい。CF型の実験結果との差はホッパー群の配置構成に由来し、直接的にはFig. 2に示した垂直シュート内での原料の偏流が原因である。したがってPB型の特性2を改善するには、偏流を抑制するために垂直シュートの内径を小さくする、あるいは垂直シュート内を原料で満たす方策を考えればよい。

垂直シュートの下端にゲートを設けてゲートを閉じた状態でバン

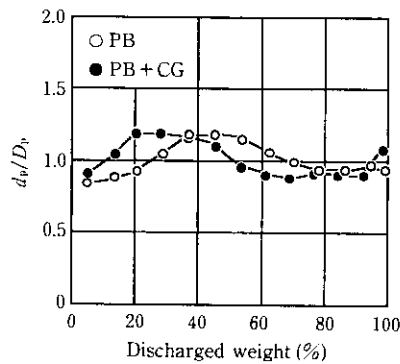


Fig. 16 Effect of discharge method on changes of ore sizes (hopper: PB)

カーから原料を排出し、集合ホッパー (Fig. 4 ハッチング部分) にいったん原料を貯めてからゲートを開にする排出操作を行った。これは PB+CG 型装入装置に相当し、Fig. 11 に PB+CG として示すように、この操作で円周方向の偏差が改善される。しかし、Fig. 16 に示すように、平均粒径の経時特性が最初に粒径の大きなものが排出するように変化して排出特性 1 が悪化する。

結論としては、CG を設けて特性 2 を改善するよりも、ホッパーの使用法の変更による操作上の対策¹⁰⁾により特性 1 と特性 2 の両者を満足させるべきである。

PB 型と CF 型を総合的に比較すると、特性 1 に優れ、特性 2 は装入操作で対応できる PB 型がベルレス高炉の炉頂装入装置として望ましいと考えられる。

5 結 言

千葉製鉄所第 6 高炉に代表される並列バンカー式 (PB 型) と垂直二段式 (CF 型) の種々の型式のベルレス式装入装置の炉頂ホッパーからの原料排出特性を模型実験を行い比較した。炉内半径方向と円周方向の装入分布を考慮して、排出原料の平均粒径の経時変化 (特性 1)、円周方向の偏差 (特性 2) の 2 点から検討して以下の知見を得た。

(1) PB 型の排出特性

- (a) 鉱石の平均粒径は細粒主体から粗粒主体に経時的に変化し、特性 1 はベルレス高炉として望ましい特性である。
- (b) 特性 2 は CF 型と比較して円周方向の偏差が大きい。原料を集合ホッパーにいったん貯める排出操作により改善できるが、同時に特性 1 が悪化する。

(2) CF 型の排出特性

- (a) 鉱石の排出に関して PB 型ときわめて対照的な粒径経時変化を示し、特性 1 はベルレス高炉として望ましくない。
- (b) 整流板を用いてホッパー内の原料の流れのマスフロー化を促進すると初期の粗粒排出を抑制できるが、経時変化曲線を平坦にするのが限界であり、PB 型の鉱石排出の特性 1 は得られない。
- (c) (a) の特性は上部ホッパーからの原料排出速度にも影響され、PB 型と同等の特性を得るには排出速度を 1/10 に低下することが必要であるが、作業上難しい。
- (d) 特性 2 に関しては設備構成の特徴を反映して、PB 型と比較し円周方向偏差が小さい。

PB 型と CF 型を総合的に比較すると、特性 1 に優れ、特性 2 は装入操作で対応できる PB 型がベルレス高炉の炉頂装入装置として望ましいと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会編: 「第 3 版鉄鋼便覧第 II 巻製鉄・製鋼」, (1979), 294, [丸善]
- 2) 福武 剛, 藤田 勉, 田中康雄: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 4, 405-415
- 3) 近藤幹夫, 小西行雄, 野村 真, 田口整司: 鉄と鋼, 68 (1982) 11, S703
- 4) 小西行雄, 田口整司, 福武 剛, 深水勝義, 板谷 宏, 芹沢保文: 川崎製鉄技報, 19 (1987) 2, 80-86
- 5) 三輪茂雄: 「粉体工学通論」, (1981), 124, [日刊工業新聞社]
- 6) 梶原義雄, 神保高生, 上甲忠嗣, 網永洋一, 稲田隆信: 鉄と鋼, 71 (1985) 2, 175-182
- 7) 三輪茂雄: 「粉体工学通論」, (1981), 126, [日刊工業新聞社]
- 8) J. R. Johanson: Powder Technology, 1 (1967/1968), 328-333
- 9) 宮川昌治, 武田幹治, 田口整司, 森本照明, 藤田昌男: 材料とプロセス, 4 (1991) 1, 105
- 10) M. Nomura, S. Taguchi, N. Tsuchiya, and H. Sakimura: Ironmaking Conference Proceedings, 43 (1984), 111-117