
カルダン型原料装入装置によるフェロマンガン堅型炉の装入物分布模型実験

A model Experiment on the Burden Distribution in a Ferromanganese Smelting Furnace with Cardan Type Bell-less Top

小西 行雄(Yukio Konishi) 田口 整司(Seiji Taguchi) 福武 剛(Tsuyoshi Fukutake)
深水 勝義(Katuyoshi Fukami) 板谷 宏(Hiroshi Itaya) 芹沢 保文(Yasunori Serizawa)

要旨：

フェロマンガン製錬炉(SF)では装入物分布制御と高温炉頂ガス温度対策のため、センターフィード型カルダン式ベルレス装入装置を採用した。導入に先立ち、縮尺模型装置を用いて装入物分布特性を調査した。模型実験では SF との相似条件を検討した上で、SF 操業時の適正な分配シュートの傾動角を 8～26° に、10 ポイント選択した。本装入装置の装入物分布特性は炉中心までの流れ込みが少なく、粒度偏析も小さいことであった。その結果を?充時調査で確認した。さらに、模型実験および?充時調査結果を SF 操業に適用し、火入れ後順調な操業を継続している。

Synopsis：

Cardan type bell-less top with double hoppers located vertically on the furnace axis was applied to ferromanganese smelting furnace (SF) for the sake of good burden-distribution controllability and its durability against high top gas temperature. The burden distribution characteristics were examined with a small scale model apparatus before the start of operation to understand the new system. In the model tests, a similarity condition was firstly investigated, and then ten proper tilting angles of the distributing chute for SF operation was determined within the range of 8° to 26° and the burden distribution characteristics of the apparatus were clarified as that the burden movement in the layer surface toward the furnace center was small and the size segregation scarcely occurred at the time of charging. The results were also confirmed in the test at the furnace filling. The application of results of the model experiment and filling test contributed to stable SF operation.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

カルダン型原料装入装置によるフェロマンガン堅型炉の 装入物分布模型実験*

川崎製鉄技報
19 (1987) 2, 80-86

A model Experiment on the Burden Distribution in a Ferromanganese Smelting Furnace with Cardan Type Bell-less Top



小西 行雄
Yukio Konishi

鉄鋼研究所 プロセス
研究部製鉄研究室 主
任研究員(掛長)



田口 整司
Seiji Taguchi

鉄鋼研究所 プロセス
研究部製鉄研究室 主
任研究員(課長)



福武 剛
Tsuyoshi Fukutake

技術研究本部 研究企
画部企画開発室 主査
(部長補)・工博



深水 勝義
Katuyoshi Fukami

川鉄鉱業(株) 水島製
造所技術管理室 課長



板谷 宏
Hiroshi Itaya

鉄鋼研究所 プロセス
研究部製鉄研究室 主
任研究員(課長)



芹沢 保文
Yasunori Serizawa

水島合金鉄(株) 製造
部 部長

要旨

フェロマンガン製錬炉(SF)では装入物分布制御と高温炉頂ガス温度対策のため、センターフィード型カルダン式ベルレス装入装置を採用した。導入に先立ち、縮尺模型装置を用いて装入物分布特性を調査した。模型実験ではSFとの相似条件を検討した上で、SF操業時の適正な分配シュートの傾動角を $8\sim 26^\circ$ に、10ポイント選択した。本装入装置の装入物分布特性は炉中心までの流れ込みが少なく、粒度偏析も小さいことであった。その結果を填充時調査で確認した。さらに、模型実験および填充時調査結果をSF操業に適用し、火入れ後順調な操業を継続している。

Synopsis:

Cardan type bell-less top with double hoppers located vertically on the furnace axis was applied to ferromanganese smelting furnace (SF) for the sake of good burden-distribution controllability and its durability against high top gas temperature. The burden distribution characteristics were examined with a small scale model apparatus before the start of operation to understand the new system. In the model tests, a similarity condition was firstly investigated, and then ten proper tilting angles of the distributing chute for SF operation was determined within the range of 8° to 26° and the burden distribution characteristics of the apparatus were clarified as that the burden movement in the layer surface toward the furnace center was small and the size segregation scarcely occurred at the time of charging. The results were also confirmed in the test at the furnace filling. The application of results of the model experiment and filling test contributed to stable SF operation.

1 緒 言

水島合金鉄(株)のSmelting furnace(以下SFと称す)は炉内容積 398 m^3 のフェロマンガン製造用堅型製錬炉である¹⁾。この製錬炉には石川島播磨重工業(株)およびPaul Wurth(PW)社と共同開発したカルダン型原料装入装置が設置されている²⁾。従来のPW式ベルレス原料装入装置では半円筒状の樋状分配シュートが歯車によって回転しているのに対し、本装置ではテーパのついた円筒状の分配シュートを水平面内で直交する二つの回転軸方向に揺動することにより分配シュートに回転運動を与えている。また、PW式装入装置の大半は駆動装置の上方に炉頂バンカーが2個水平方向並列に設けられているのに対して、本装置では炉の中心軸上に下部ホッパー、

上部ホッパーが2個上下直列に設けられている。この2点が従来のPW式ベルレスとの大きな相違である。新規な駆動機構と分配シュートを採用することにより、装入原料の分配特性および装置の耐熱性を向上させるとともに、ランニングコストの低減を図った。

この方式は初めて導入されたものであり、従来、川崎製鉄で経験を持っているPW式ベルレス原料装入装置と比較して、分配シュート内での原料の運動状態が異なるため、導入に先立ち小型模型装置を用い、本装置の装入物分布特性を調査した。また、填充時には炉内でのサンプリングなどの調査を行い、模型実験結果の妥当性を確認した。これらの概要を以下に報告する。

* 昭和62年2月5日原稿受付

2 カルダン式原料装入装置の概要

2.1 駆動機構

Fig. 1 に駆動機構を模式的に示す。分配シュートは一定の範囲で揺動可能なフレームに、フレームの回転軸 (X 軸) と直角方向 (Y 軸) に回転できるようにピンで固定されている。分配シュートは揺動フレームの回転と動揺フレーム内のリンクによるピンを中心とした傾動との組み合わせにより X, Y 軸交点を固定とした「みそすり運動」を起こす。揺動フレームとリンクの運動は途中で屈曲点を持つ動力伝達シャフトを旋回させることにより起こす。分配シュートの傾動角 θ は傾動用シリンダーを上下させることによって変更される。

以上、述べた傾動運動と旋回運動は単独または同時に分配シュートに与えることができ、炉頂部の任意の位置に原料を分配することが可能である。

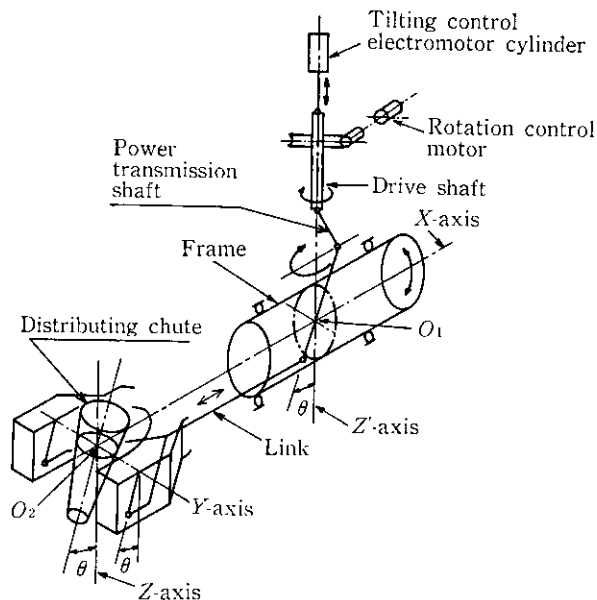


Fig. 1 Drive mechanism

2.2 特徴

カルダン式原料装入装置の特徴は以下のとおりである。

- (1) 駆動機構がシンプルである。
- (2) 主駆動部が炉外に設置されているため、耐熱性が良い。
- (3) 駆動装置の水冷化が容易であり、ガス冷却と比較して冷却に要するランニングコストが低減できる。
- (4) 分配シュートが一巡回する間に分配シュートの下面が円形のシュート断面内で 360° 回転するため、分配シュート内面のライナーの摩耗が均一となり、ライナーの寿命が延び、取り換え頻度が減少する。

これらの特徴は、炉頂温度が高い SF 操業では有利である。

3 縮尺模型実験

3.1 縮尺模型実験に必要な相似条件

実炉大テストで高炉内での装入物の降下状況とガス流れを再現

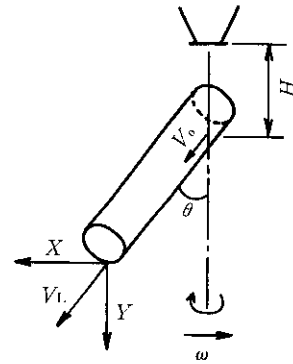


Fig. 2 Explanation of variables used in equations that describe particle motion

し、種々の実験条件を変化させようとすると多大な費用と労力がかさむ。今回これらの条件を幅広く変えて実験する必要がある。SF の 1/7.5 縮尺模型装置を製作した。縮尺模型および実験条件の相似条件は以下のごとくである。

Fig. 2 に示すように、傾動角 θ のシュートから初速度 V_L で飛び出す粒子の落下軌跡は (1) 式で与えられる。

$$Y = X \cot \theta + \frac{gX^2}{2V_L^2} \sin^2 \theta \quad (1)$$

模型シュート長さを L^* 、実機のシュート長さを L とするとき縮尺比 $S = L^*/L$ の空間で上式が相似な軌跡となるためには (2) 式が成り立つ必要がある。

$$SY = SX \cot \theta + \frac{g(SX)^2}{2(V_L^*)^2} \sin^2 \theta \quad (2)$$

したがって、縮尺模型実験でのシュート先端からの飛び出し速度 V_L^* は (3) 式の関係を満たさなければならない。

$$V_L^* = V_L \sqrt{S} \quad (3)$$

一方、回転速度 $\vec{\omega}$ で回るシュート上の質点 (質量 m) の運動は同一速度で回転する座標系 $\vec{r} = (r, \theta)$ において、次式で与えられる⁹⁾。

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = m \vec{g} - m [\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] - 2m \left(\vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} \right) - \vec{R} - \mu |\vec{R}| \times \frac{\frac{d\vec{r}}{dt}}{\left| \frac{d\vec{r}}{dt} \right|} \quad (4)$$

ここで、右辺の 1 項から 5 項はそれぞれ重力、遠心力、コリオリ力、シュート面からの垂直抗力およびシュート面摩擦力であり、 μ は摩擦係数、 t は時間である。

本装置ではシュート内面は先端に向かって絞り角 3 度の円錐状であるが、これを直円筒で近似する。また、(4) 式でコリオリ力に由来するシュート内での円筒に垂直な断面内の運動はシュート長手方向の運動に大きな影響を及ぼさないとすると、シュート長手方向の運動は (5) 式で与えられる。

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = mg \cos \theta + m \omega^2 r \sin^2 \theta - m \mu \sin \theta (g - \omega^2 r \cos \theta) \quad (5)$$

$r=0$ での初期速度を V_0 として、シュート先端部 (長さ L) に達した時の速度 V_L は、(5) 式を積分して、(6) 式で与えられる。

$$V_L = \sqrt{\omega^2 \sin \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) L^2 + 2g (\cos \theta - \mu \sin \theta) L + V_0^2} \quad (6)$$

同様に、縮尺模型でのシュート先端の速度 V_L^* はシュート長さ L^* 、初期速度 V_0^* 、シュート回転速度 ω^* として次式で与えられる。

3.4 落下軌跡の実験結果

Fig. 5 に分配シュートの各々の傾動角とストックライン SL (0, 0.5, 1 m 相当) における装入物の主流落下軌跡と落下位置を示す。コークスおよび鉱石の落下軌跡はほぼ同じである。

Fig. 6 に模型実験で得たシュート先端の装入物の飛び出し速度を縮尺倍し、実機大の PW 式のそれと比較した。装入物の飛び出し速度は分配シュートの傾動角に依存しているが PW 式に比べてカルダ

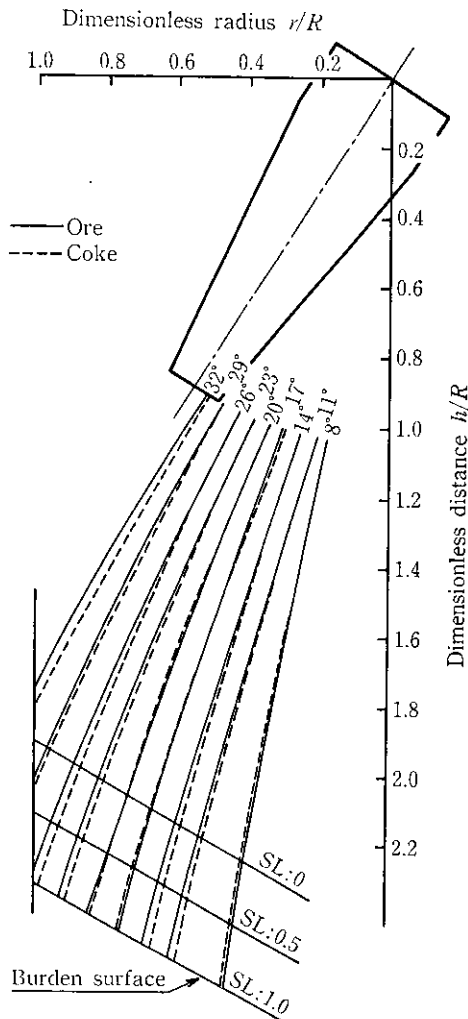


Fig. 5 Falling trajectory of main flow

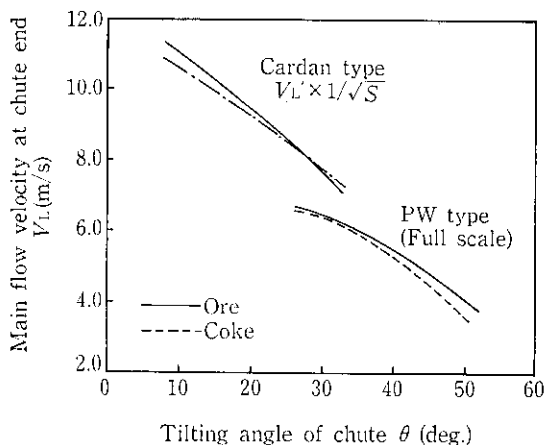


Fig. 6 Relationship between main flow velocity and tilting angle of chute

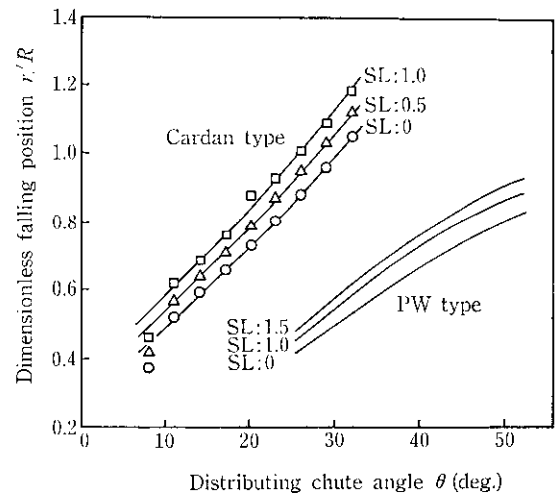


Fig. 7 Relationship between chute angle and falling position of burden (Ore)

ン式の方が速く、落下軌跡は炉壁側になる。

Fig. 7 に分配シュート傾動角と装入物の主流落下位置の関係を PW 式と比較して示す。カルダン式は傾動角が PW 式と比較して小さいにもかかわらず、PW 式と同等の位置に装入物を落下させることができる。これはカルダン式の方が分配シュート先端での装入物の飛び出し速度が大きく、炉口半径に対する分配シュート長さが長いことによる。

3.5 実炉における分配シュート傾動角の選択

カルダン式装入装置では分配シュートの傾動の範囲は $0 \sim 36^\circ$ である。フェロマンガン製鉄炉において、適正な装入物分布を得るために分配シュートの傾動角を以下の条件に基づき $8 \sim 26^\circ$ と選択した。

- (1) 炉壁の摩耗を少なくする。
- (2) PW 式と同位置の装入物の主流が落下する傾動角とする。
- (3) かつ、等断面積になるように 10 ポイント選ぶ。

3.6 カルダン式装入装置による装入物分布の特徴

カルダン式による装入物分布の特徴と SF における適正な装入物分布を得るために Table 1 の条件で堆積実験を行った。

Fig. 8 にカルダン式における堆積分布を PW 式模型実験の場合と比較して示す。装入パターンは PW 式装入装置を付帯している千葉製鉄所第 6 高炉の高コークス比操業時のパターンと装入物の落下位置で相似となるよう設定した。Fig. 8 の堆積形状から、カルダン式では PW 式と同位置に装入物を装入したにもかかわらず、中心部に鉱石が堆積せず、中心方向への鉱石の流れ込みが少ない。また、半径方向でのコークスおよび鉱石の粒径分布は、中間部で大きく、中心部と炉壁部で小さい。これは旋回シュートの傾動を、装入開始から終了までの間に装入物を炉壁から炉中心へ向かって装入するように制御しているため、Fig. 9 に示すホップ排出時の粒径の経時変化が半径方向の分布となって現れたものである。つまり、カルダン式では装入物の中心方向への流れ込みが少ないことから、流れ込みによる粒度偏析りは小さく、堆積時の粒径分布はホップ排出時の粒径挙動に主として依存するという特徴がある。流れ込みが少ない理由は Table 2 に示すように、装入物が装入面へ衝突する速度比 V_x (水平速度成分)/ V_y (垂直速度成分) が PW 式に比べてカルダン式の方が大きいことによる。つまり、カルダン方式では炉壁方向への速度成分が大きいので、逆方向となる炉中心方向への流れ込みが抑

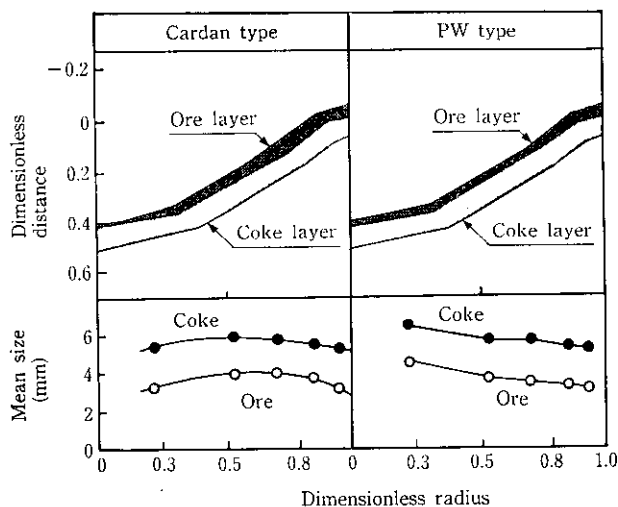


Fig. 8 Distribution of burden materials at furnace top

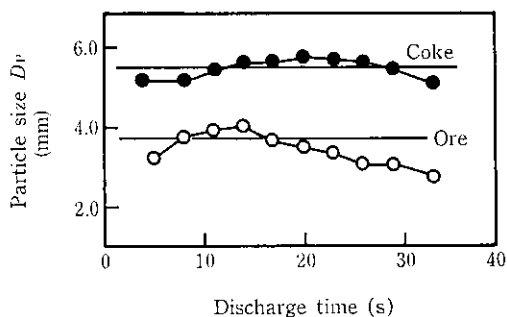


Fig. 9 Transition of particle size in discharge from hopper

Table 2 Comparison of the ratio of V_X/V_Y between Cardan type and PW type

	Cardan type			PW type			
Tilting position	1	6	9	1	6	9	10
Tilting angle (°)	26.0	19.7	13.7	52.0	41.5	31.5	25.5
V_X/V_Y	0.952	1.139	1.272	0.255	0.433	0.591	0.666

制されると推察される。

Fig. 10 にカルダン式で装入パターンを変更した場合の堆積形状、層厚分布およびガス流速分布を示す。カルダン式では、鉱石層厚を均一に分布させるには、中心部まで装入するパターンが必要である。また、従来のPW式では中心部のガス流速はシャープであるのに対して、カルダン式では粒度偏析が小さく、鉱石層厚が薄いことから、ガス流速分布はブロードになっている。

4 填充時調査

4.1 半径方向の装入物分布

填充時の落下軌跡、堆積形状および粒径分布測定は既報³⁾によった。新しい測定として、ホッパからの原料排出時の粒径変化を調査した。すなわち、炉頂マンホール部より分配シュートの旋回ごとに、装入物を採取し、粒度分析を行った。

落下軌跡を Fig. 11 に示し、半径方向の粒径分布を Fig. 12 に、ホッパ排出時の粒径変化を Fig. 13 に示す。これらの結果は模型実験結果と一致しており、上述したカルダン式装入装置による装入物分布特性を確認できた。

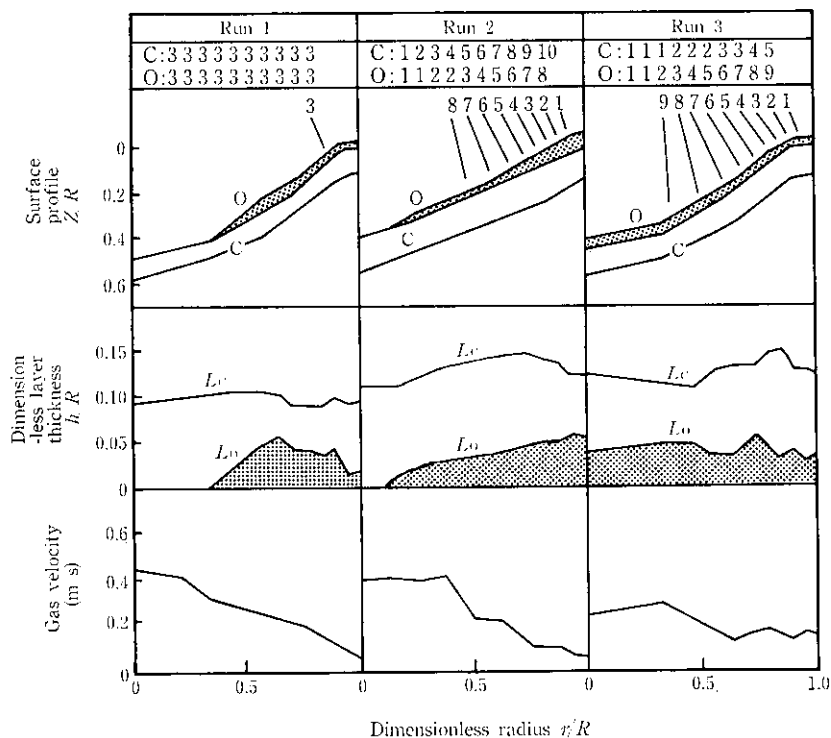


Fig. 10 Distribution of burden materials at furnace top (SL=0.5)

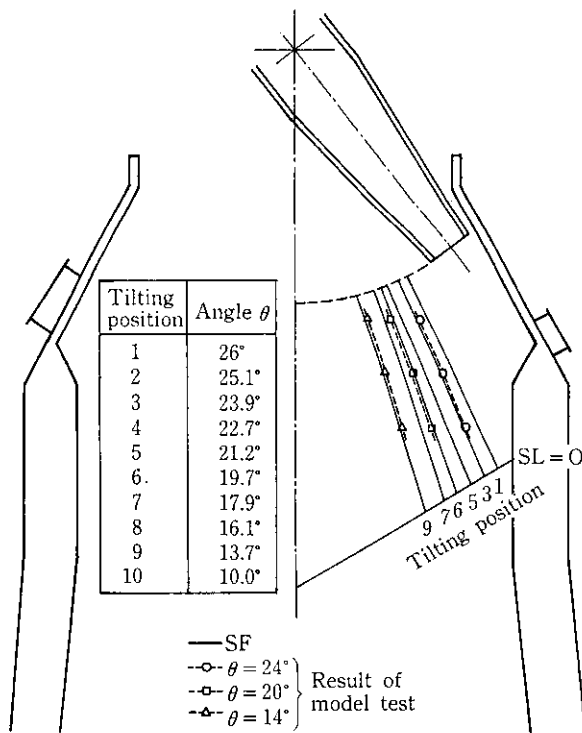


Fig. 11 Falling trajectory of materials in actual furnace at filling

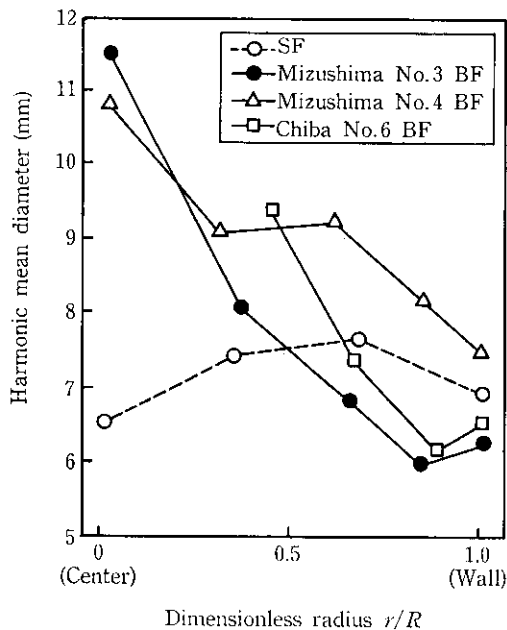


Fig. 12 Size distribution of burden materials

4.2 円周方向の装入物分布

炉頂での装入物分布は、半径方向の制御のほか、円周方向の制御もできるだけ均一にすることが重要である。円周方向の分布の不均一性は装入装置の構造によるところが大きい。例えば、ベル高炉では、装入ベルトコンベア (B.C.) の方向性によると考えられる円周バランスの悪化があり、また並列ホッパ型のPW式ベルレス装置では炉頂ホッパが高炉中心軸上に配置されていないため、装入物の流れおよび粒度偏析に方向性を生じ、円周バランスが崩れる問題があった⁶⁾。そこで、炉の中心軸と同軸で、2段ホッパを有する本設

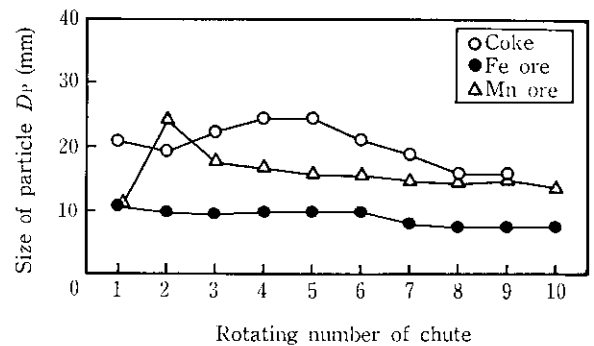


Fig. 13 Transition of particle size in discharge from upper hopper

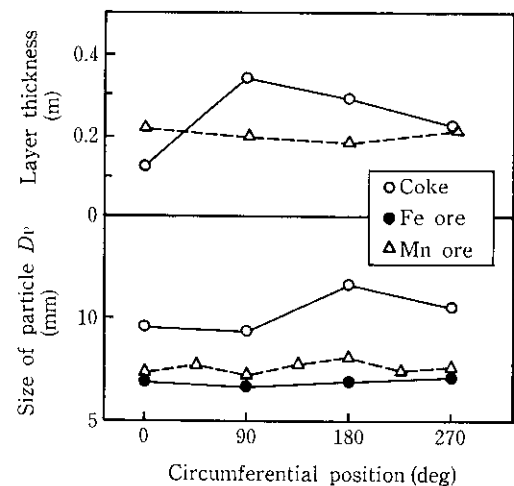


Fig. 14 Circumferential distribution of layer thickness and particle size

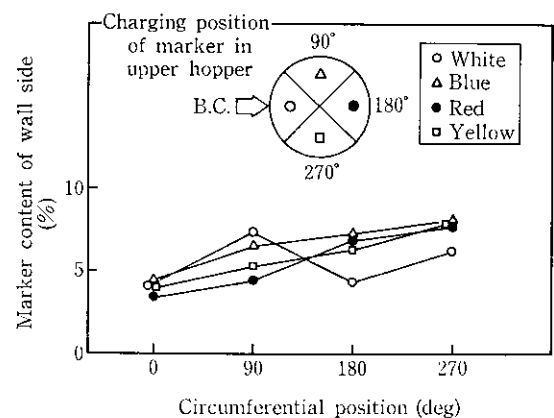


Fig. 15 Circumferential distribution of marker content

備の円周バランスを調査した。

Fig. 14に炉壁部における層厚偏差および粒径偏差を示す。本装置による円周方向の偏差は小さく、均一に分布している。Fig. 15に、4色の着色鉱石を各々等量ずつ上部ホッパ内に投入し、炉頂の炉壁部の円周方向における各着色鉱石の分布を調べた結果を示す。上部ホッパ、下部ホッパおよび分配シュートを経て炉内へ装入された各々の着色鉱石は、上部ホッパ内の異なった位置に投入されたにもかかわらず、炉頂部では良く混合され、均一に分布している。

5 実操業経過

フェロマンガン製錬炉は昭和60年6月24日に火入された。Fig. 16に立ち上げ操業経過を示す。また、Fig. 17に装入パターンの推移を示す。立ち上げ初期には模型実験で提案した鉱石装入時に半径方向で均一な層厚分布を得る装入パターンを指向し、トラブルもなく操業ができた。9月以降の増産期に入り、初期操業時の装入パターンでは炉壁熱負荷の増大と荷下り不良気味となり、模型実験のFig. 10のRun 2に類似した中心流型の装入パターンに移行した。以後、成品成分の変動も少なく、安定した操業を継続している。

6 結 論

フェロマンガン製錬炉(SF)では装入物分布制御によるフェロマンガン操業の安定化とSF特有の高温炉頂ガス温度対策のため、センターフィード型カルダン式ベルレス装入装置を採用した。導入に先立ち、縮尺模型装置を用い装入物分布特性を調査した。模型実験ではSFとの相似条件を検討した上で、SF操業時の適正な分配シュートの傾動角を選定し、また、本装入装置が有する装入物分布特性を明らかにした。さらに、填充時調査で模型実験結果との照合を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 模型実験は $S=1/7.5$ のモデル装置を用い、実炉との相似条件が

$$\frac{\omega^*}{\omega} = \sqrt{\frac{L}{L^*}} = \frac{1}{\sqrt{S}}, \quad \frac{V_0^*}{V_0} = \sqrt{\frac{L^*}{L}} = \sqrt{S}$$

で満足されることがわかった。

- (2) 実炉の配分シュート傾動角は $8 \sim 26^\circ$ が適正である。
 (3) PW式に比べて、カルダン式では分配シュート先端の粒子の径方向速度成分が大きい。そのため、小さい分配シュート角で炉内の広範囲の位置に装入物を装入することができる。

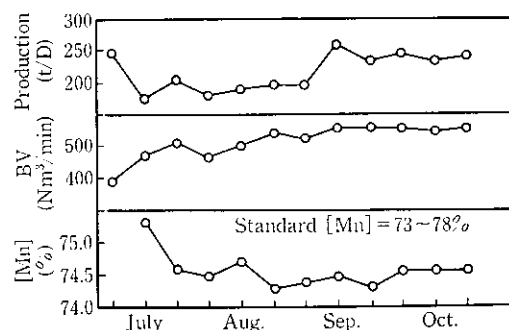


Fig. 16 Operation data of Fe-Mn smelting furnace

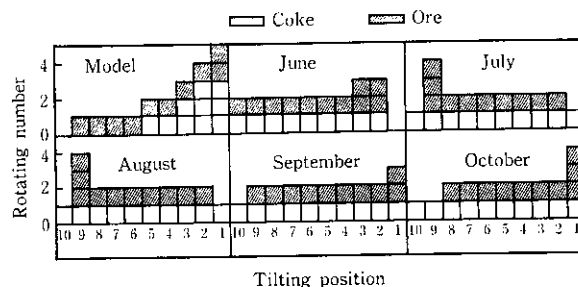


Fig. 17 Typical charging pattern

- (4) カルダン式では炉中心方向への装入物の流れ込みが少なく、粒度偏析が小さい。また、センターフィード型では炉頂部の円周方向偏差は小さい。
 (5) 充填時調査では、装入物分布特性は模型実験結果と良く一致していた。また、円周方向の層厚および粒径偏差は小さく均一に分布していた。
 (6) 模型実験および填充時調査結果をSF操業に適用し、立ち上げおよび安定操業に寄与した。

参 考 文 献

- 吉田和彦, 芹沢保文, 国分春生, 鈴木重康, 増川匡伸, 板谷 宏: 川崎製鉄技報, **19** (1987) 2, 73
- 那須敏幸: 石川島播磨技報, **26** (1986) 1, 56
- 近藤幹夫, 岡部俠児, 栗原淳作, 奥村和男, 富田貞男: 鉄と鋼, **63** (1977) 11, S441
- 三輪茂雄: 「粉粒体工学」, (1972) p. 221, [朝倉書店]
- 山田孝雄, 佐藤政明, 宮崎伸吉, 嶋村鏖郎, 田口整司: 川崎製鉄技報, **6** (1984) 1, 16
- 野村 真, 田口整司, 樋谷暢男, 加藤 明, 田中和晴, 奥村和男: 鉄と鋼, **68** (1982) 11, S702