

還元鉄製造用シャフト炉の装入物分布

論 文

久米 正一*・蜂須賀邦夫*²・杉山 喬*³若林 徹*・香春 陸夫*²・須賀 芳睿*²

Burden Distribution in Shaft Furnace for Direct Reduction of Iron Ores

Shoichi KUME, Kunio HACHISUKA, Takashi SUGIYAMA,
Toru WAKABAYASHI, Rikuo KAHARU and Yoshisato SUGA

Synopsis :

Experiment was conducted with a 45° segment full-scale model to investigate the burden distribution in direct reduction shaft furnaces equipped with the charging pipe. The findings are as follows :

- 1) The charged material moves from the charging pipe first in a pushing flow like a landslide and then in a rolling flow toward the wall.
- 2) Size segregation occurs in the rolling flow through a percolation process, while less segregation in the pushing flow.
- 3) The size distribution can be expressed as relative distance of charged material movement irrespective of throat diameter.
- 4) High content of fine particle in lump ore layer remarkably increases the gas permeability resistance around the charging pipe.

1. 結 言

豎型炉における燃料費の低減は、装入物性状と炉頂部における装入物分布の改善に帰するところが大きく還元鉄を製造するシャフト炉の場合も同様である。

連続式還元鉄製造プロセスにおけるシャフト炉の原料装入方式は PUROFER 法¹⁾を除いて、ARMCO 法²⁾、MIDREX 法³⁾及び NSC-DR 法⁴⁾などは装入筒を採用している。

装入筒による原料の装入では高炉における旋回シュートや、ベルによる装入のごとく間欠的に一定量の装入物が炉頂部に落下して装入物分布が形成されると異なり、原料が連続的に装入され、径方向に分配されることによつて装入物分布が形成される。

一方最近のシャフト炉の製造能力は、1 基で年産 60 万 t を超える規模のものも出現し⁵⁾、更に大型化する傾向にある。この場合、高炉の大型化の際と同様に、シャフト炉本体の大型化に伴い、還元反応効率を高めることのできる装入分布を得ることが重要である。これまで装入筒による直接還元用シャフト炉の装入物分布に関する

研究報告は見当たらない。そこで本報告では、

- (1) 固定装入筒方式による装入物の分布特性
 - (2) 炉口径拡大による原料移動距離の変化と装入物分布への影響
 - (3) ペレットと鉱石の銘柄による装入物分布への影響
 - (4) 装入物分布から推定される炉内径方向の通気抵抗分布
 - (5) 固定装入筒方式での粉率の影響
- についての検討をした。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。装置は実物大で直接還元用シャフト炉の炉口径が最大 2 500 mm、炉中心に設けられた装入筒の外径が 724 mm⁶⁾ 平面は中心の角度が 45° の扇形である。炉内への原料装入は装入筒の外周に設けられた上下移動が可能なパイプゲートの調整によつて行ふ。原料は炉内で約 30° の安息角をもつて層厚 800 mm で堆積すると考え、底板の傾斜を 30° とし、側板高さを 900 mm とした。底板の径方向に設

昭和 58 年 11 月 4 日受付 (Received Nov. 4, 1984)

* 新日本製鉄(株)マレーシア DR プロジェクト推進本部 (Malaysia DR Project, Nippon Steel Corp., 2-6-3 Otemachi Chiyoda-ku 100)

*² 新日本製鉄(株)設備技術本部 (Plant Engineering & Technology Bureau, Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)第三技術研究所 (R & D Laboratories-III, Nippon Steel Corp.)

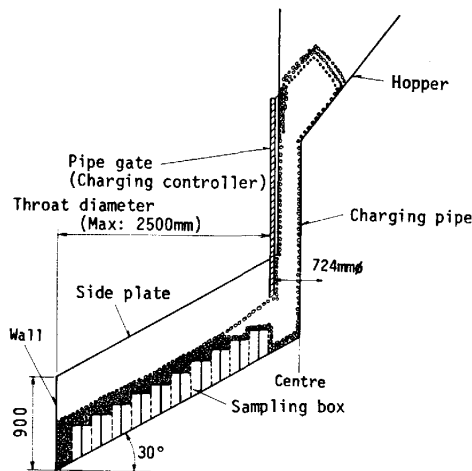


Fig. 1. 45° segment full scale model on burden distribution.

Table 1. Size of burden materials.

Size	%					
	-5mm	5~10	10~15	15~20	20~25	+25
Hirohata pellets	0.4	26.0	71.3	2.3	0	0
Hamersley ore (A)	2.0	28.3	40.5	11.7	13.6	3.9
Hamersley ore (B)**	5.4	25.2	40.1	12.4	13.2	3.7

** Sample for experiment on high content of -5mm particle.

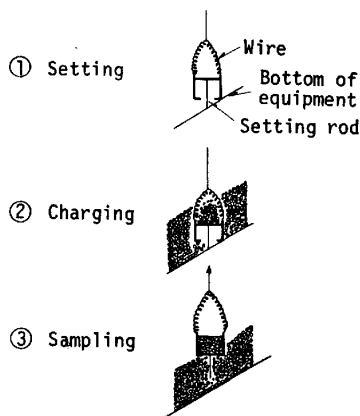


Fig. 2. Sampling method.

けられた原料のサンプリングボックスは高さが 400 mm でそのボックス上に堆積した高さ 400 mm の原料を採取できるように炉内の原料堆積が 800 mm となるまで装入した。炉口径すなわち装入筒外壁から炉口壁までの距離は仕切板を設置して 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m に調整することができる。今回の実験ではいずれの炉口径の場合にもパイプゲートの引き上げ速度は 150 mm/min で一定とした。

実験は、まずパイプゲートを閉めて置き、Table 1 に示す原料を、装置の上部に設けられたホッパーを通して

装入筒内に装入する。この間炉内においてはサンプリングボックスをあらかじめセットしておき、セットが完了できればパイプゲートを徐々に開けて、装入筒から炉内へ原料の流出を開始する。更にパイプゲートを開け炉内の原料層厚がおよそ 800 mm となつたところで Fig. 2 に示す手順に従つて原料を採取する。サンプリングボックスはワイヤー 2 本で取り付けられ、そのワイヤーの端は底板上をはわせて、側板より装置外部に引き出されている。原料が堆積した後、このワイヤーの端を上部のチェーンブロックによつて引き上げる。

3. 実験結果と考察

3.1 固定装入筒方式の装入物分布特性

Fig. 3 に、装入筒の外壁から炉口壁まで原料が移動するときの、移動距離と粒度構成比率との関係を示す。図の横軸は装入筒からサンプリング位置までの距離を、また縦軸は 5 mm 以下の粒子の存在割合 X_n と、5 mm より大きい粒子の割合 $1-X_n$ との比を対数目盛で表示してある。図より装入された原料の 5 mm 以下の粒子の割合は、装入筒に近い中心側で高く、炉壁側に移動するにしたがつて急激に低下する。この関係は三輪のパーコレーション理論⁷⁾のように一本の直線で表されるのではなく、装入筒直下から 800 mm の領域では、緩やかな勾配を呈して 5 mm 以下の粒子割合を減少させ、装入筒から 800 mm 以上になると大きい勾配で減少させるという、2 本の直線で近似できる。これは R. BAAKE⁸⁾ や、磯村、奥野ら⁹⁾ が報告している押し出し流れ (Pushing) と転がり流れ (Rolling) によるものと考えられる。本実験で観察した堆積層表面での原料の移動状況を、Fig. 4 に示す。原料は、堆積層表面の降下にとまつてまず炉中心の固定装入筒から層状に図中の Pushing (a) として流出し、さらに堆積層表面が降下すると、

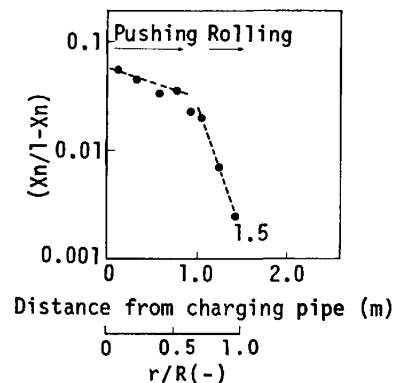


Fig. 3. The relation between distance from charging pipe and $(X_n/1-X_n)$ on pushing flow and rolling flow. X_n : -5 mm fraction (-)

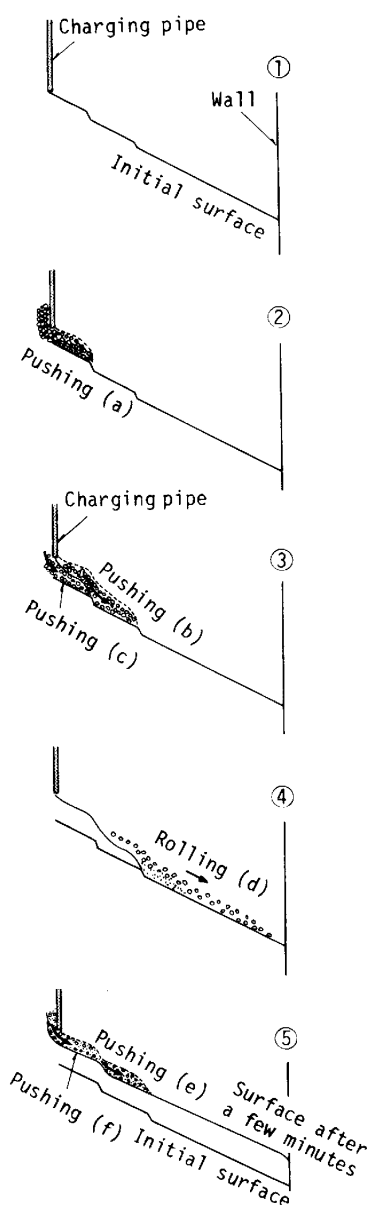


Fig. 4. Mechanism of forming burden distribution at the stockline in a shaft furnace adopting charging-throat system.

図中の Pushing (b), (c)のごとく中間部へ地すべりに押し出される。この押し出し流れは、装入層の先端が装入筒と炉口壁のほぼ中間に達するまで続く。さらに堆積層表面が降下すると、図中の Rolling (d)のごとく、原料の粒子は単体で転がるようにして炉口壁へと流れる。従つて層状で移動する押し出し流れ (Pushing) においては、明確なパーコレーションは行われず、次の転がり流れ (Rolling) となつてからパーコレーションが促進される。その結果、Fig. 3 に示したように原料の移動距離と 5 mm 以下粒子の割合との関係は、押し出し流れにおいては緩やかな減少となり、転がり流れに至つて鋭い減少になるものと考えられる。このことは、10 mm

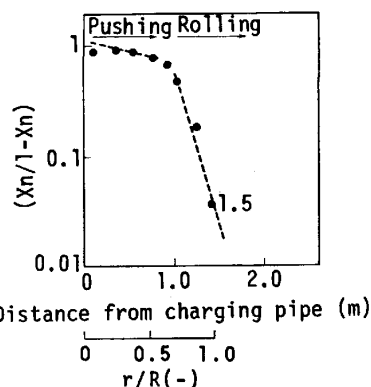


Fig. 5. The relation between distance from charging pipe and $(X_n/1-X_n)$ on pushing flow and rolling flow. X_n : -10 mm fraction (-)

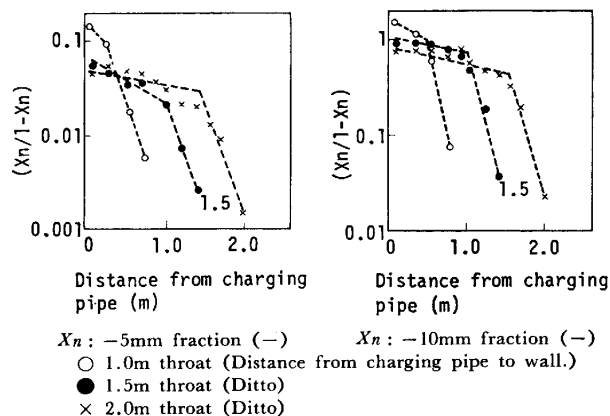


Fig. 6. Relationship between distance from charging pipe and $(X_n/1-X_n)$ at each throat diameter.

以下粒子の割合においても同様の結果が得られた。Fig. 5 に、原料の移動距離と 10 mm 以下粒子の割合の関係を示す。

3.2 原料移動距離と装入物分布

炉口径が拡大して、原料の移動する距離が拡大したときの装入物分布への影響を検討した。Fig. 6 には、固定装入筒の外壁から炉口壁までの距離を 1.0, 1.5 および 2.0 m と変化させた場合の装入物分布を示す。図から、いずれの移動距離においても粒子の構成割合は原料が移動するとともに減少し、特に炉口壁に近づくと急に鋭く減少する。この傾向は Fig. 3 と同様である。しかし炉口径拡大の影響をみると、装入筒近傍の押し出し流れによる 5 mm 以下粒子の割合が緩やかに減少する領域は、炉口径の拡大とともに装入筒から中間部へと拡大する。すなわち装入筒近傍から炉口壁までの距離が 1 m の場合、緩やかに減少する範囲は装入筒から約 0.3 m, 1.5 m の場合は約 1.0 m, そして 2.0 m の場合約 1.5 m となつている。さらに装入筒直下での 5 mm 以下の粒子の割合は、炉口径が大きいほど低い。

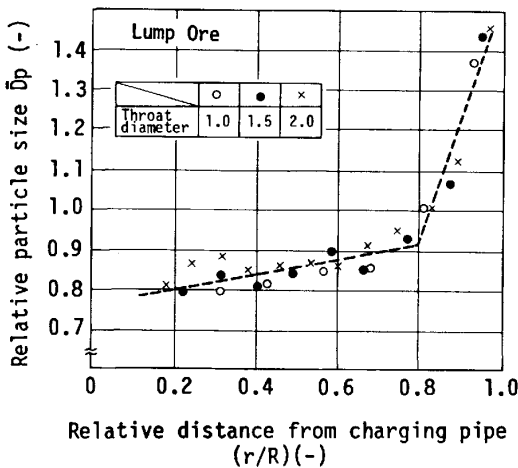


Fig. 7. Relationship between relative distance from charging pipe and relative particle size obtained from 45° segment full scale model.

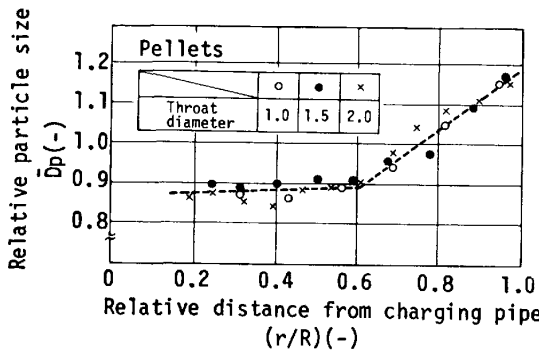


Fig. 8. Relationship between relative distance from charging pipe and relative particle size obtained in the case of pellets.

この炉口径の拡大に伴う装入物分布の変化を、原料が移動する無次元距離 r/R (=原料の移動距離/炉口半径) と相対粒子径 \bar{D}_p (=サンプリング位置の平均粒径/全粒子の平均径) の関係で整理して、Fig. 7 に示す。図より、いずれの炉口径の場合にも相対粒子径 \bar{D}_p は無次元距離が 0.8 までの領域では 0.8 から 0.95 へと緩やかにほぼ直線的に増大し、無次元距離 0.8 から炉壁までの領域では、0.95 から 1.4 へと鋭い勾配の直線に変化することがわかる。このことから相対粒子径 D_p の分布は、炉口径の大小にかかわらず無次元距離によつてほぼ二つの直線に近似でき、緩やかな勾配の範囲が押し出し流れ、鋭い勾配の範囲が転がり流れと考えられる。

3.3 原料銘柄の影響

Fig. 8 に、装入原料にペレットを使用した場合の相対粒子径 \bar{D}_p の径方向分布を示した。Fig. 7 に示す鉱石と比べてペレットの場合、押し出し流れを示す緩やかな勾配の直線範囲が装入筒から無次元距離 0.6 までと狭く、転がり流れを示す鋭い勾配の直線範囲が無次元距

離 0.6 から炉口壁までと拡大されている。これはペレットの方が鉱石よりも転がりやすい、すなわち安息角が小さいため、鉱石と比べて早く押し出し流れから転がり流れへ変化することに起因していると考えられる。また装入筒近傍での D_p のばらつきは各炉口径とも鉱石に比べて小さいが、これは装入ペレット中の 5 mm 以下の粒子が 0.4% と少ないためと考えられる。

3.4 通気抵抗分布の推定

固定装入筒方式のシャフト炉におけるガス流れの分布を知るために、通気抵抗分布 K_i/\bar{K} を検討した。

シャフト炉内の微小面積 S_i を通過する還元ガス量 G_{gi} と通気抵抗係数 K_i との間には、(1) 式が成立する¹⁰⁾。

$$K_1 \cdot G_{g1}^{1.7} = K_2 \cdot G_{g2}^{1.7} = \dots \dots \dots$$

$$K_n \cdot G_{gn}^{1.7} = \bar{K} \cdot \bar{G}_g^{1.7} \dots \dots \dots (1)$$

ここで \bar{G}_g は炉内平均還元ガス流量、 \bar{K} は炉内平均通気抵抗係数であり、 \bar{G}_g は (2) 式で示される。

$$\bar{G}_g = \frac{\sum_{i=1}^n (G_{gi} \cdot S_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} \dots \dots \dots (2)$$

(1) と (2) 式から、炉内の平均通気抵抗係数 \bar{K} と通気抵抗分布 K_i/\bar{K} との間には (3) 式と (4) 式が成立する。

$$\bar{K} = \{1/\sum_{i=1}^n (S_i/S_T) \cdot (1/K_i)^{1.7}\}^{1.7} \dots \dots \dots (3)$$

$$K_i/\bar{K} = (\bar{G}_g/G_{gi})^{1.7} \dots \dots \dots (4)$$

ここで S_T はシャフト炉内のガス通過全断面積を示す。 K_i を原料の銘柄、すなわちペレットと鉱石に分けて求めた通気抵抗係数 K_p と K_L は、(5) 式と (6) 式で表される。(5) 式と (6) 式は、児玉ら¹¹⁾ が高炉におけるペレットと鉱石の通気抵抗係数を推定するため、内径 450 mm、有効高さ 1 125 mm の充填塔を用いて実験し、原料の平均粒度、粒度幅、粉率の影響を統計解析により求めたものである。

$$K_p = \{1/D_p\}^{1.3} \cdot (83 + 3.4 h) + 83 F^{1.5}$$

$$\times 10^3 \dots \dots \dots (5)$$

($\gamma = 0.910^{**}$)

$$K_L = \{1/D_p\}^{1.3} \cdot (104 + 5.1 h) + 390 F^{2.3}$$

$$\times 10^3 \dots \dots \dots (6)$$

($\gamma = 0.993^{**}$)

D_p は 5 mm 以上の粒子の平均粒子径 (mm)、 h は 5 mm 以上粒子の粒度幅 (mm)、 F は 5 mm 以下粒子の割合である。本実験より得られた粒度分布値を (5) と (6) 式に代入し、それぞれのサンプリング位置での通気抵抗係数を求め、(3) 式を用いて平均通気抵抗係数を求める。これにより通気抵抗分布 K_i/\bar{K} と、ガス流量分

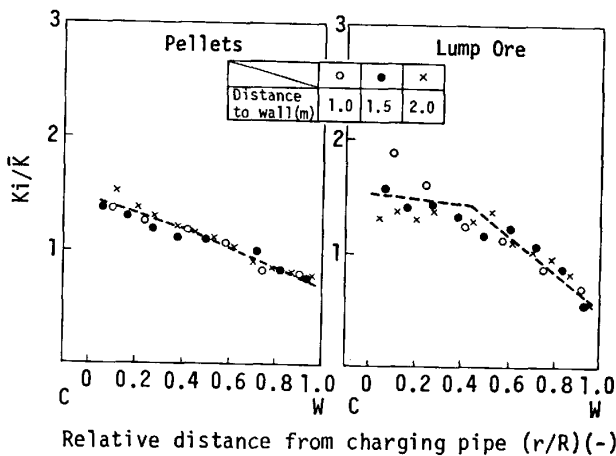


Fig. 9. Relationship between relative distance from charging pipe and gas permeability coefficient K_i/\bar{K} estimated from 45° segment full scale data.

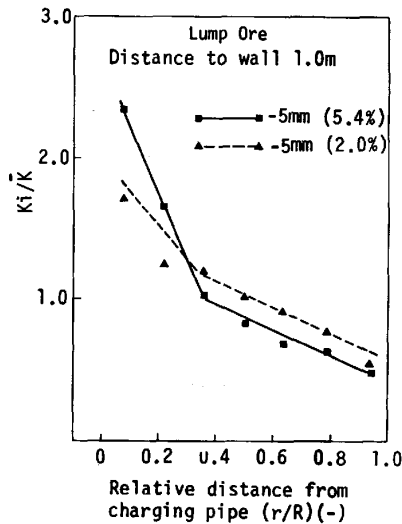


Fig. 10. Effect of fines on distribution of gas permeability K_i/\bar{K} .

布 G_{gi}/G_g が求められる。Fig. 9 には計算結果の 1 例として Fig. 7 と Fig. 8 の鉱石とペレットにおける通気抵抗分布を示す。図よりペレットの通気抵抗分布は、鉱石と比べて装入筒側と炉口壁側との差が小さく比較的フラットな分布である。鉱石の場合の K_i/\bar{K} は装入筒から中間部にかけてペレットより大きく、炉口壁側で急に小さくなる。これは Fig. 4 において述べたように、鉱石の押し出し流れの領域がペレットの場合よりも中間部へと広がっているためである。また 5 mm 以下粒子の割合が多い鉱石の場合で、炉口径が小さい場合は装入筒直下の K_i/\bar{K} の値が大きくなっている。

3.5 5mm 以下粒子の含有率の影響

Fig. 10 に、5 mm 以下粒子の割合を 2% から 5.4% に増加した場合の通気抵抗分布 K_i/\bar{K} を示す。5 mm

以下粒子の割合が 5.4% の実験では、基準である 2% 割合の原料の 5 mm から 10 mm の粒子を破碎して粒度を調整した。図より -5 mm 粒の割合が高くなると装入筒直下の通気抵抗分布 K_i/\bar{K} が大きくなり、中間部より炉口壁にかけては逆に低くなる。このことは、固定装入筒方式では粉率の多少が通気抵抗分布、すなわち炉の中心ガス流量に鮮明に現れ、炉内の還元分布にも強く影響するものと考えられる。

4. 結 言

固定装入筒を用いたシャフト炉の装入物分布を検討した。その結果を以下に要約する。

(1) 固定装入筒から流出する原料は、装入筒から中間部にかけて地すべり的な押し出し流れ (Pushing) を示し、中間部から炉口壁にかけては転がり流れ (Rolling) である。

(2) 押し出し流れの領域では 5 mm 以下粒子の割合が多く、転がり流れの領域ではこの割合が急激に低下し、粒度分配は三輪のパークレーション理論に従う。

(3) 炉口径が小さいと、装入筒直下での -5 mm 粒子の割合が高い。

(4) 径方向の装入物分布状態を原料の無次元移動距離 r/R と相対粒子径 \bar{D}_p の関係で整理すると、炉口径の大小にかかわらず 2 本の直線で表現できる。

(5) 鉱石と比べてペレットの方が、転がり流れの領域が広く炉中心と炉口壁の通気抵抗分布は鉱石より均一である。

(6) 装入鉱石中の -5 mm 粒子の割合が高いと、炉中心と炉口壁との通気抵抗分布はよりいつそう不均一なものとなり、固定装入筒による装入では -5 mm 粒子の割合を厳しく管理する必要がある。

記 号

- G_{gi} : 微小面積 i を通過するガス流量 ($\text{Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
- \bar{G}_g : 通過平均ガス流量 ($\text{Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
- \bar{K} : 平均通気抵抗係数
- K_i : 微小面積 i での通気抵抗係数
- S_T : トータル断面積 (m^2)
- S_i : 微小面積 i の断面積 (m^2)
- \bar{D}_p : 平均粒子径 (mm)
- h : 粒度幅 (mm)
- F : -5 mm 粉率 (-)
- K_p : ペレットの通気抵抗係数
- K_L : 鉱石の通気抵抗係数

文 献

- 1) H. D. PANTKE and G. H. LANGE: ECE Seminar on Direct Reduction of Iron Ores-Technical and Economic Aspects, Bucarest, Romania (1972) Sept.

- 2) H. HOLIDAY and J. W. NEUNAN: IISI Panel Discussion "A new-way from ore to Steel", South Africa (1973) Oct.
- 3) A. J. BOOTE: Preprints of AISE Rolling Mill Conference (1977)
- 4) J. MURAKI, N. NISHIDA, N. OTSUKI, Y. HARA and K. HACHISUKA: Nippon Steel Technical Report No. 12 (1978) Dec.
- 5) Metal Bull Monthly (1983) May, p. 5
- 6) Y. HARA, T. WAKABAYASHI and N. OTSUKI: Preprints of the Eighth Japan-USSR Joint Symposium on Physical Chemistry of Metallurgical Process (1981) June, p. 229
- 7) 三輪茂雄: 粉粒体工学 (1972) [朝倉書房]
- 8) R. BAAKE: Stahl Eisen, 10 (1959), p. 724
- 9) 磯村 清, 奥野嘉雄, 山田龍男, 山本崇夫, 永井忠弘: 製鉄研究 (1976) 288, p. 46
- 10) 児玉惟孝, 堀尾竹弘, 肥田行博: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 295
- 11) 児玉惟孝, 仲 俊也: 八幡製鉄所技術研究所研究報告 (昭和 42 年度 No. 128) (私信)