

© 1992 ISIJ

 ///////////////
 論 文
 ///////////////

溶融還元炉への粉鉱石添加時の飛散抑制条件

 片山 裕之*・桑原 正年*²・大野 剛正*³
 山内 雅夫*⁴・平田 浩*⁵

 Decrease of Carry-over of Fine Ore Added into Smelting Reduction
 Furnace

 Hiroyuki KATAYAMA, Masatoshi KUWAHARA, Takamasa OHNO,
 Masao YAMAUCHI and Hiroshi HIRATA

Synopsis :

In smelting reduction, it is desirable to use fine ore without agglomeration. In order to find the proper condition for fine ore addition to bath without injection, experiments involving a cold model and smelting reduction were performed.

(1) In the cold model test, a stream of fine materials (iron ore or coke) was passed into the gas of the counter flow. The rate of carry-over (g/s) depended on the surface area of the stream. The ratio of carry-over (%) decreased to less than 5% when the rate of supply was increased. Therefore, it is possible to decrease the ratio of carry-over during addition by decreasing the specific surface area of the stream, independent of the sort and size of fine materials.

(2) When fine ore was added through a hole in the shoulder of a 100 t smelting reduction furnace, the ratio of carry-over was negligible when compared with the amount of dust originating from molten metal. So, it has been confirmed that top addition of fine ore without agglomeration is practical.

On the other hand, in the case of a fine carbonaceous material, the ratio of carry-over was high, even with an appropriate method of adding the fine ore.

Key words : smelting reduction ; fine ore ; top addition ; carry-over.

1. 緒 言

鉄あるいはフェロアロイの溶融還元法開発の目的の一つは、鉱石の塊成化工程（焼結法やペレット法）を省略することである。近年、使用できる鉱石はほとんど粉状になっていることから、上記の要求は、鉱石を粉のまま使用できるようにすることを意味する。粉鉱石を直接利用する方法としては、インジェクション法が知られているが、主原料である鉱石を溶融物に吹き込むことは配管摩耗などの設備負荷が大きいこと、またとくに溶融金属中に吹き込む場合には搬送のために多量のガスが吹き込まれることに伴う副作用が問題となる¹⁾。したがって、上方から投入してしかも飛散を許容限度内に抑制できる

方法が開発されることが望まれる。

すでに、著者らが行った 5 t 規模のフェロクロム溶融還元試験において、粉鉱石を上投入して飛散を 2% 以下に抑制できる可能性が見出されている²⁾。本報では、粉原料の飛散を抑制できる上投入条件を明らかにするために行ったコールドモデル試験、および、その上投入法を大型炉にまでスケールアップしても使えるか、また、微粉鉱石（鉄鉱石ペレットフィード）にも適用できるかなどに着目して行った溶融還元炉試験の結果を報告する。

平成 2 年 4 月本会講演大会にて発表 平成 3 年 7 月 9 日受付 (Received July 9, 1991)

- * 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)
- *² 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (現: 浜田重工(株)) (Process Technology Research Laboratories, Now Hamada Heavy Industries)
- *³ 新日本製鉄(株)堺技術研究室 (Sakai R & D Lab., Nippon Steel Corp.)
- *⁴ 新日本製鉄(株)堺製鉄所 (Sakai Works, Nippon Steel Corp.)
- *⁵ 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

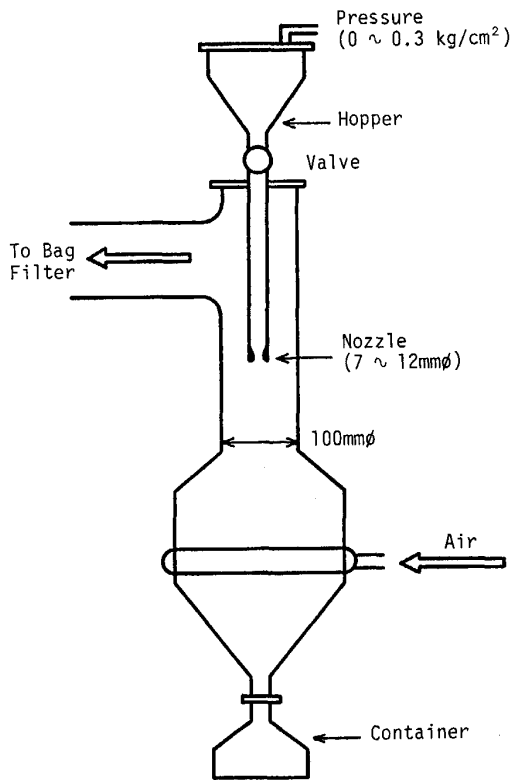


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Conditions of experiments.

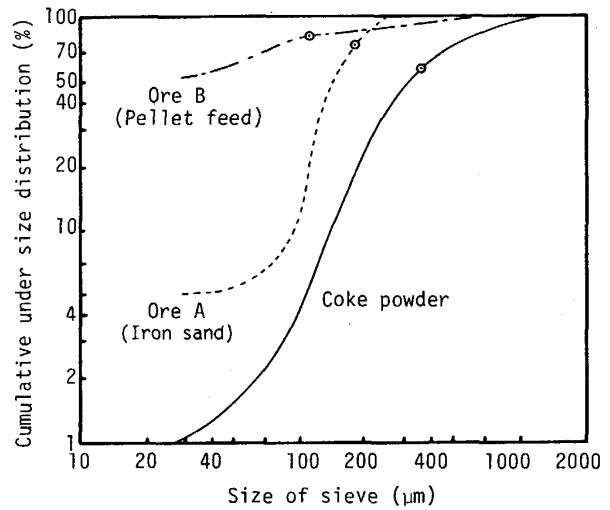
Powder	Iron ore A (Iron sand), Iron ore B (Pellet feed), Coke powder
Velocity of gas (u)	2.3, 3.7, 5.1 (m/s)
Diameter of nozzle	7, 10, 12 (mm)

2. コールドモデル試験

2.1 試験方法

粉体流が上昇ガス流の中を落下する時の、粉の飛散率におよぼす諸要因の影響を、コールドモデルによって調べた (Fig. 1)。容器胴部の周辺から 20 本の羽口を通して Ar ガスを水平方向に吹き込み、直管部に上昇ガス流を作り、そこに粉体流を落下させ、飛散した粉の量を測定した。粉体はホッパーから、バルブを通して供給量を調整し、ノズルから落下させた。試験条件を Table 1 に示す。変更した要因は粉体の種類 (粉鉱石 2 種類、粉コークス)、粉体流の供給速度、上昇ガス流速、および粉体を落下させるノズルの径である。

各粉体の粒度構成を Fig. 2 に示す。各上昇ガス流速に対して飛散の限界粒径 (計算方法は 2.3 に示す) を書き込んでいるが、個々の粒径については 50~70% が飛散する可能性がある条件での試験である。特に鉱石



◎: Calculated critical diameter for carry-over when the gas velocity is 2.3 m/s

Fig. 2. Size distribution of fine materials used for experiment.

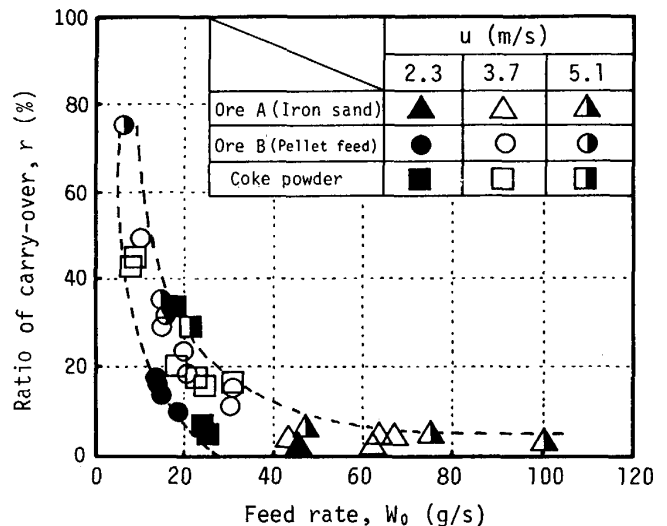


Fig. 3. Relation between ratio of carry-over and feed rate.

A (ペレットフィード) は粒径が小さい。

2.2 試験結果

飛散率 (r) は粉体供給速度が増加すると急激に低下する (Fig. 3)。一方、飛散速度 (W_c) は、Fig. 4 の鉱石 A の場合に顕著に見られるように、供給速度がある値以上では、ほぼ一定になる。これを、ノズル径との関係で示すと (Fig. 5)、飛散率は反比例して減少するのに対して、飛散速度はノズルにほぼ比例して増加している。

Photo. 1 は、粉体流の状況を示す。粉体供給速度が小さいと、(b-1)、(b-2) に示すように粉体流の状況が時間的に変化し、不安定で乱れが大きい。一方、供給速

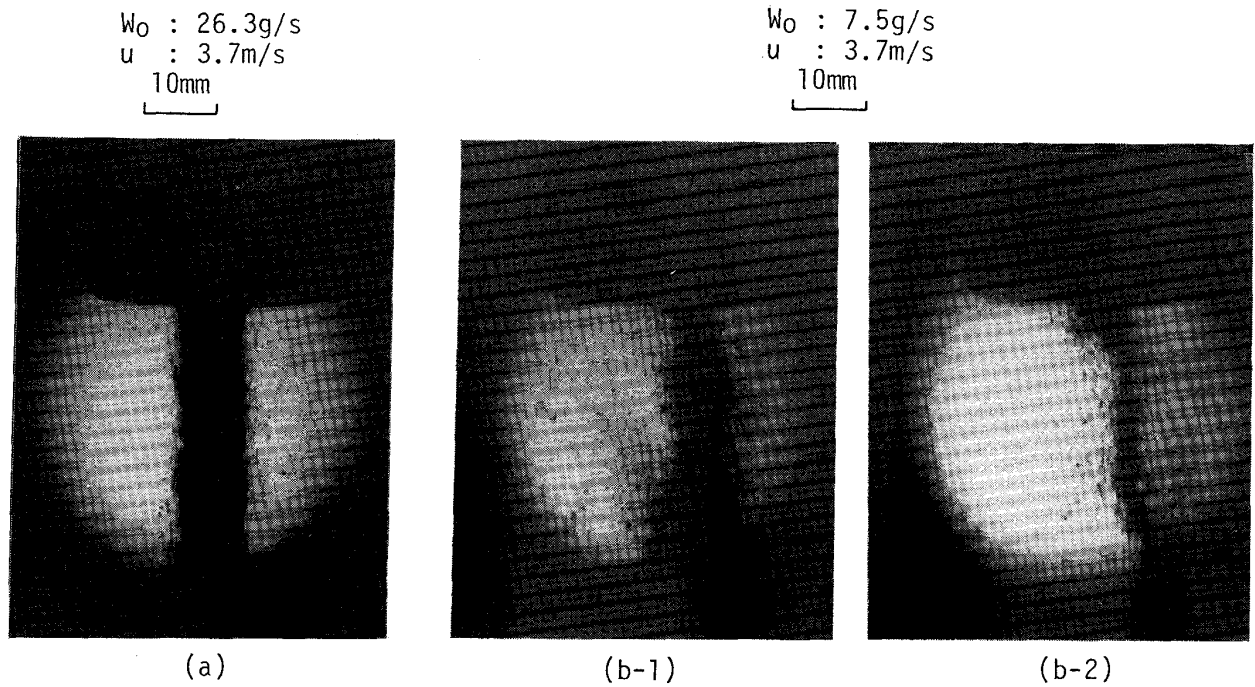


Photo. 1. State of stream of coke powder.

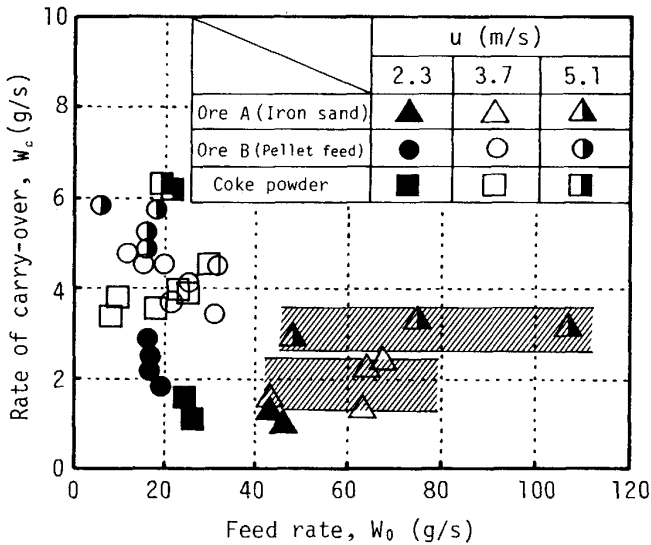


Fig. 4. Relation between rate of carry-over and feed rate.

度が大きくなると粉体流は安定化し、飛散は周辺部で観察されるだけになる。

Fig. 6 は上昇ガス流速 (u) の影響を示す。鉱石 B (ペレットフィード) の場合には、飛散速度は上昇ガス流速に正比例するが、それより粒径の大きい鉱石 A (砂鉄) およびコークス粉の場合には、上昇ガス流速の $3/2$ 乗に比例する。Fig. 6(a) の勾配と粉体の比重の関係を Fig. 7 に示す。見かけ上、同一の上昇ガス流速における飛散速度は、粉体比重の $2/3$ 乗に逆比例してい

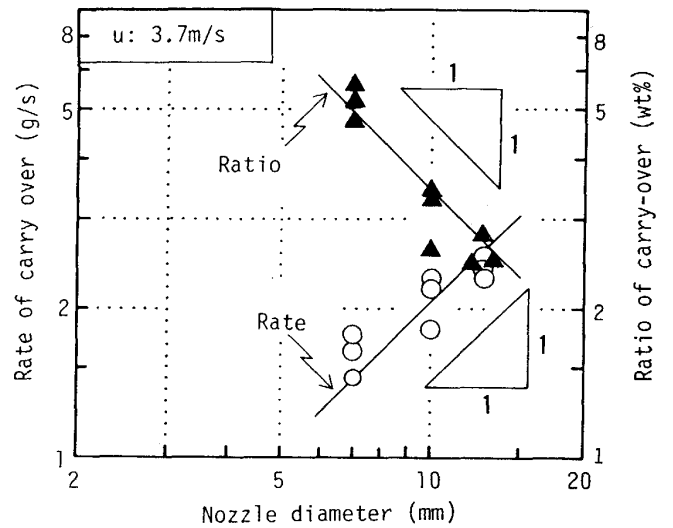


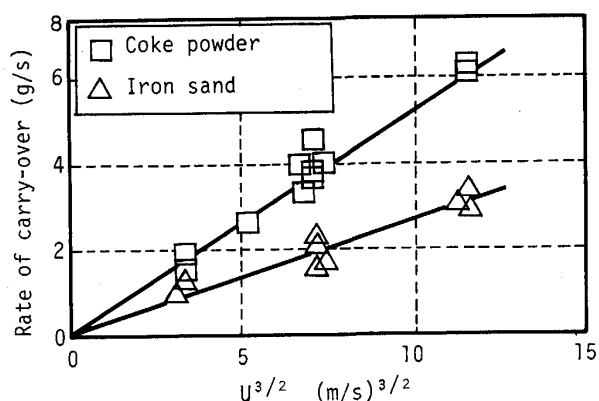
Fig. 5. Influence of nozzle diameter on carry-over (Iron sand).

ることがわかる。

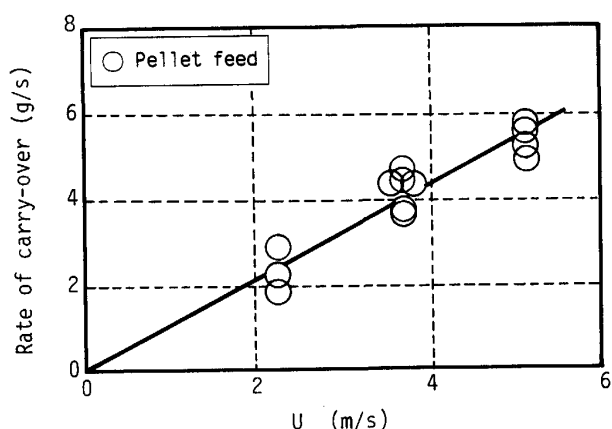
以上のように、コールドモデル実験では、粉体の飛散速度は、粉の比重が小さいほど、また、上昇ガス流速が大きいほど増加するという予想された傾向にあるものの、供給速度を大きくすると、飛散率は急激に低下すること、また、コークス粉の飛散量は粉鉱石の2倍程度であることがわかった。

2.3 考察

上昇ガス流から個々の粉体に働く抗力 (F) は(1)式で表される。



(a) Ore A (Iron sand) & Coke powder



(b) Ore B (Pellet feed)

Fig. 6. Influence of gas velocity on carry-over.

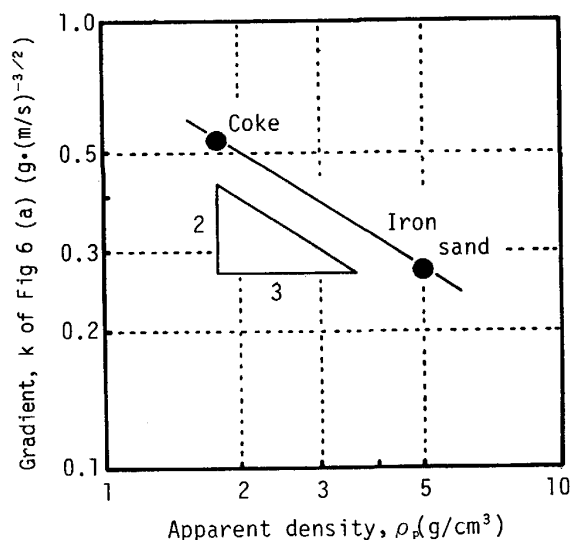


Fig. 7. Influence of apparent density of particle on carry-over.

$$F = 1/8 \cdot \pi \cdot C \cdot \rho_g u^2 \cdot Dp^2 \dots\dots\dots (1)$$

鉱石がペレットフィードのように微粒で、粉粒のまわりの Re 数が 2 以下の場合、(1) 式中の C は(2)式で

表される。

$$C = 24/Re \dots\dots\dots (2)$$

これを(1)式に代入すると、 F は(3)式で表される。

$$F = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot Dp \cdot u \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、この場合、粉体流に働く上昇ガス流速の影響は 1 次に比例することになる。

一方、粒子径が大きい、鉱石 B や粉コークスの場合、粉粒のまわりの Re 数 (Re_p) は 2~500 の範囲にあり、 C は(4)式で表される。

$$C = 10/\sqrt{Re} \dots\dots\dots (4)$$

この場合には、(1)式に代入して

$$F = 5/4 \cdot \pi \cdot \sqrt{\mu \rho_g} (Dp \cdot u)^{3/2} \dots\dots\dots (5)$$

となり、粉体流に働く上昇ガス流速の影響は 3/2 乗に比例する。

以上のように、飛散は粉体に働く上昇ガスの抗力 (F) に比例すると仮定すれば、Fig. 6 の関係を説明できる。

上昇ガス流によって、粉が飛散するか否かは F と(6)式に示される W の大小関係を比較することによって決められる。

$$W = 1/6 \cdot \pi \cdot \rho_p \cdot g \cdot Dp^3 \dots\dots\dots (6)$$

F と W の比較から飛散の限界粒子径; Dp_{cri} を計算すると(8), (9)式のようになる。

$Re_p < 2$ の場合

$$Dp_{cri} = (18 \cdot \mu_p \cdot u/g)^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

$2 \leq Re_p < 500$ の場合

$$Dp_{cri} = (4/30 \cdot \sqrt{\mu \rho / \rho_p \cdot g})^{3/2} \dots\dots\dots (9)$$

(8), (9)式により飛散限界粒子径を計算した結果を Fig. 2 に書き込んでいる。上昇ガス流速が 2.3 m/s の場合でも、60% が飛散しうる条件であった。実際の飛散率は Fig. 3 に示したように粉体供給速度が小さい場合にはこれに近い値であるが、粉体供給速度が大きい場合は 5% 以下であった。

したがって、粉体流では、実際に上昇ガス流にさらされる部分がどれだけかが飛散速度を決めることになる。Fig. 5 で述べた結果は、飛散速度は粉体流の表面積に、飛散率は比表面積に比例していることを表している。

したがって、粉体流からの飛散は近似的に(10)式で表される。

$$\begin{aligned} \text{粉体飛散率} &= \frac{(\text{粉体流の表面積})}{(\text{粉体供給速度})} \\ &\times (\text{飛散限界粒子径以下の比率}) \\ &\dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

粉体が細かいほど、比重が小さいほど、また上昇ガス流速が大きいほど飛散速度は増加するが、粉体流比表面積を小さくすることができれば飛散を抑制できることになる。

粉体流に乱れがなければ、粉体流の比表面積は粉体径に逆比例する。したがって、粉体流比表面積を小さくするには、粉体流の径が大きいこと（粉体供給速度が大きいこと）、粉体流の乱れが小さいこと（供給口の形状が適正であること）および粉体流が短いことが効果がある。今回は粉体流の長さの影響については試験をおこなっていないが、粉体流が長くなると表面積が長さ按比例して大きくなることに加えて、ノズルからの距離が大きくなるにつれて粉体流の広がり、乱れのために加速度的に表面積がふえ、飛散量が増加することが推定される。小林らはコールドモデル試験の結果として、粉体流がある長さになると上昇ガス流によって乱され吹き上げられることを示している⁴⁾。したがって飛散抑制のためには、粉体流を極力乱さないことに加えて、熔融物層までの距離を極力小さくする工夫を併せて行うことが重要である。

3. 熔融還元炉の試験

3.1 試験条件

大型熔融還元試験炉の設備および操業条件はさきに報告されているものとほぼ同じであるが⁵⁾、今回の試験では、Fig. 8 に示すように、炉体上部傾斜部に設けた孔より N_2 ガスキャリアで粉原料を供給している点に特徴がある。吹込み口の角度 (θ) は2種類 (20° , 50°)、吹込み管の外径は2種類 (50 mm, 80 mm; ただし, N_2 流量, 固気比は一定とした) 試験した。

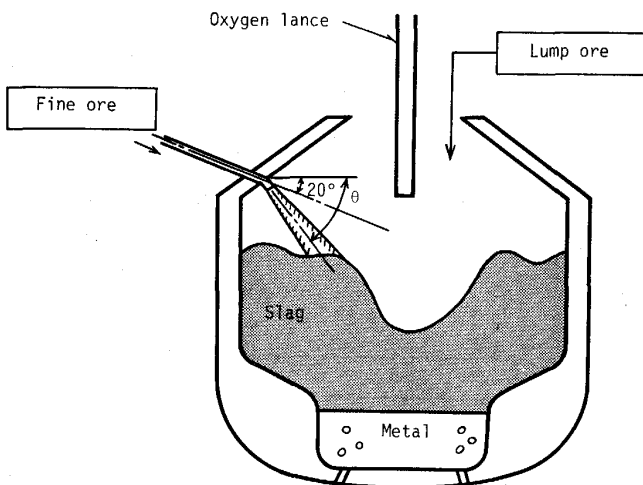


Fig. 8. Schematic drawing of material addition in smelting reduction furnace.

Table 2. Composition and size of added ore (wt%).

	T. Fe (%)	>5.0 mm	5.0-2.0	2.0-1.0	1.0-0.5	<0.25
Lump ore	68.0	98.0	2.0	0	0	0
Pellet feed	68.0	0	8.0	8.8	4.9	83.3
Sinter feed	68.0	0	22.5	21.7	17.0	38.8

用いた鉍石の粒度条件を Table 2 に示す。粉鉍石（シンターフィードおよびペレットフィード）の個々の粒については 90% 以上が飛散するような条件で熔融還元炉は操業された。

鉄系ダスト発生量は集塵水をサンプリングして、その中のダスト重量を成分分析値より求めた。鉄系ダストは鉍石の飛散物とメタルから発生したヒュームおよびバブルバーストダストの和である。その分別定量は容易ではないので、本報では、塊鉍石を使用した場合のダスト中鉄分量と、粉鉍石を使用した場合のそれを比較して、差を鉍石飛散に起因するものと見なした。塊鉍石はその粒度分布から見て、直接飛散はほとんど無視できると思われるからである。

3.2 試験結果

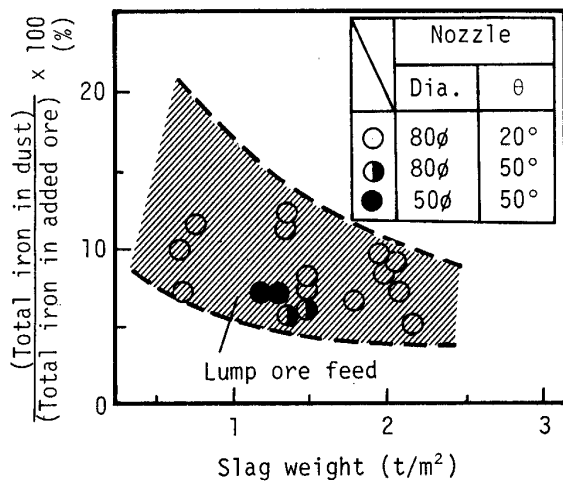
粉鉍石として比較的粒度が大きいシンターフィードを用いた場合の結果を Fig. 9(a) に示す。縦軸は鉍石供給量の中で全鉄飛散量（鉍石飛散のほか、メタルからの発生ダストを含む）が占める割合を表す。この値は塊鉍石の場合の範囲内にあること、かつ、吹込み口の角度が大きいほど小さくなっていること、また、吹込み管の径すなわち流速の影響は小さいことがわかる⁶⁾。

微粉鉍石（ペレットフィード）を用いた場合には (Fig. 9(b)), 吹込み口の角度が小さいと全鉄飛散量が塊鉍石使用の場合より増えていることがあるが、吹込み口角度を 50° にすると、塊鉍石使用時と同レベルになっている⁶⁾。

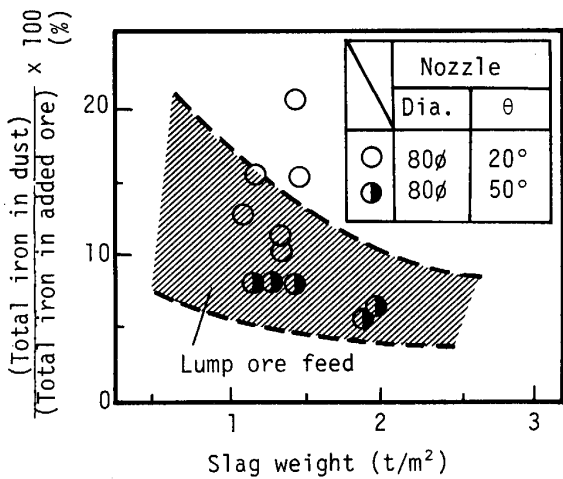
なお、スラグが増えると全鉄飛散量が減少するのは、主として酸素ジェットとメタルの接触によるメタル起因のダスト量が減少するためであり⁷⁾、付加的に鉍石流が短くなって鉍石飛散量が減少したことが効いていると思われる。

以上のように、粉鉍石の場合にも、吹込み口の角度を大きくして、スラグ層に突入するまでの粉鉍石流を短くすれば、大型炉でも鉍石飛散量は無視できる程度に抑制できることが確認された。

一方、粉鉍石と同じ条件で粉石炭 (3 mm 以上; 7 wt%, 3~1 mm; 46 wt%, 1 mm 未満; 47 wt%) を添加



(a) Sinter feed ore



(b) Pellet feed ore

Fig. 9. Comparison of fine ore addition with lump ore addition.

した場合には、投入 C のうちの 30~47% がダストに捕捉された⁹⁾。

3.3 考察

3.3.1 コールドモデル試験結果との関連

溶融還元炉試験では、粉鉱石については、飛散率を 2% 以下程度に抑えることができ、コールドモデル試験結果から予想されたことを実証できた。一方、炭材の場合には同じ添加方法では飛散率は約 1 桁大きい。このように飛散率が粉鉱石と粉炭材で大きく異なることは、コールドモデル試験では見られなかった現象である。この差は、次のように説明できる。粉鉱石の場合は、空間を移行していったんスラグ層に入るとスラグに濡れるために以後の飛散が起りにくいものに対して、炭材の場合にはスラグに濡れないので、炉内に存在している限りは最後まで飛散の可能性がつかまとう。すなわち、粉鉱石

と炭材の飛散率の差は、いったんスラグ層に達してから以後の飛散の差を反映しているものと考えられる。

3.3.2 実用プロセスとしての粉原料の使用法

粉鉱石を直接あるいは予備還元後、粉のまま上方から、飛散を無視できる程度に抑制しつつ添加できることが大型炉でも実証された。これは、溶融還元法の目的の一つである塊成化工程の省略が問題なく行えること示すとともに、スラグによって酸素ジェットとメタルを遮断して行う多量スラグ型操業が粉鉱石の場合にも可能であることを示すものとして意義がある。

それを可能にする必要条件是投入口を極力スラグに近づけて粉鉱石流の比表面積を小さくすることである。今回は、炉体側壁から添加する方法が使えることを示したが、その他にも、上方から筒を差し込むこと、必要によっては流速を大きくすることなど⁸⁾種々の方法が考えられる。その中で、今回の方法は、流速を大きくしなくても飛散が抑制でき、搬送管の摩耗が少ないことなどが長所として挙げられる。

一方、粉炭材については、粉鉱石と同じ方法では飛散を抑制できない。したがって、別のアプローチが必要である⁹⁾。

4. ま と め

粉鉱石を上投入しても飛散を抑制できる条件を見いだすために、コールドモデル実験と大型転炉を用いた溶融還元試験を行い、次の諸点を明らかにした。

(1) 上昇ガス流の中に粉体流を落下させた時の粉体飛散量は、粉体流の表面積に比例する。粉体流の比表面積を小さくすることによって、粉体粒度、比重、上昇ガス流速によらずに飛散を飛散率を抑制することが可能である。

(2) 溶融還元大型試験で、粉鉱石流を短くするように、炉壁に設けた孔からスラグが多い状態の炉内に流し込む方式で、微粉鉱石についても飛散を無視できる程度に抑制できることを確認した。したがって、粉鉱石添加に関しては塊成化は省略可能である。しかし、同じ方法で粉炭材を添加した場合には、飛散率は 30% 以上と高かった。

なお、本論文中「3. 溶融還元炉の試験」は日本鉄鋼連盟溶融還元研究開発委員会の共同研究において得られたものである。

記 号

r: 飛散率—添加した粉原料のうち飛散した割合 (%)
 W₀: 飛散速度—単位時間の飛散量 (g/s)

W_o : 粉体供給速度 (g/s)
 F : 上昇ガス流から粉体に働く抗力
 C : 抵抗係数
 ρ_g : ガス密度 (g/cm³)
 u : 上昇ガス速度 (m/s)
 D_p : 粉体粒子径
 Re_p : 粒の回りのレイノルズ数
 μ : ガスの粘性係数 (g/cm·s)
 ρ_p : 粉の比重 (g/cm³)
 g : 重力の加速度
 $D_{p_{cri}}$: 飛散の限界粒子径

文 献

- 1) 山内雅夫, 茨城哲治, 金本通隆, 片山裕之, 大野剛正: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1172
- 2) 片山裕之, 桑原正年, 平田 浩, 八木次郎, 斎藤 力, 藤田正樹: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1885
- 3) 森 芳郎, 吉田文武: 詳論化学工学単位操作 I (1962), p. 223 [朝倉書店]
- 4) 小林三郎, 徳田昌則: 鉄と鋼, **73** (1987), S750
- 5) 山内雅夫, 茨城哲治, 金本通隆, 松尾充高, 平田 浩, 稲谷捻宏: 材料とプロセス, **4** (1990), p. 1074
- 6) 山内雅夫, 茨城哲治, 金本通隆, 片山裕之, 大野剛正, 緒方征司: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1171
- 7) 大野剛正, 山内雅夫, 茨城哲治, 金本通隆, 片山裕之, 緒方征司: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1170
- 8) 室屋正廣, 菊地一郎, 松原真二, 川上正弘, 高橋謙治, 長谷川輝之: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1168
- 9) 片山裕之, 桑原正年, 小林勝明, 茨城哲治, 金本通隆: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 36