

© 1992 ISIJ

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

高炉内における発生粉の移動と蓄積

一田 守政*・中山 岳志*²・田村 健二*
 汐田 晴是*³・荒木 恭一*³・杉崎 与一*⁴

Movement and Accumulation of Fines Generated in the Blast Furnace

Morimasa ICHIDA, Takeshi NAKAYAMA, Kenji TAMURA,
 Haruyuki SHIOTA, Kyouchi ARAKI and Yoichi SUGISAKI

Synopsis :

Using a half section three-dimensional model of a blast furnace, a tuyere-injection experiment of coke fines was conducted. The following findings were obtained from the analysis of the influence of the injection rate and particle size of the fines on the burden descent and gas permeability and the study of the movement and accumulation behaviors of the fines in the blast furnace. With an increase in the injection rate of fines, the frequency of slips, the gas pressure, and the frequency and extent of the raceway shape variation increased. But the influence of the fines injection was limited when their particle size was much smaller than the size of the charged materials. The injected fines are to be deposited at the surface of the dead-man and near the furnace wall where the burden descent velocity is low. When the high-concentration regions of fines are formed at the surface of the dead-man and near the furnace wall, the burden descent region in the lower part of the furnace reduced and the retention time of the burden decreased. With the V-shaped stock and inadequate central gas flow, fines are likely to be deposited in the center and they descend with the burden.

Key words : ironmaking; blast furnace; cold model; fines; movement; accumulation; dead-man; moving bed.

1. 緒 言

高炉への微粉炭吹込み量の増加にともない、レースウェイ周り(炉芯内)の粉率が増加することが報告^{1)~3)}されている。粉率増加の原因としては微粉炭の多量吹込みにもなう未燃チャー発生量の増加⁴⁾あるいはレースウェイ内でのコークス滞留時間の増加⁵⁾によるコークス粉化量の増加が考えられる。この炉芯内の粉率の増加は、高炉の通気性や通液性に悪影響を及ぼし⁶⁾、装入物の降下とガス流れの状態を不安定にする。したがって、高炉の安定操業のためには、高炉内の粉の挙動を解明することが重要であると推察される。

従来、高炉内の粉の挙動に関する研究として、充填層(固定層)内を対象とした固気2相流に関する山岡の研

究⁷⁾⁸⁾、柴田らの研究⁹⁾が報告され、充填層内での粉の流動特性が解明されている。しかし、高炉のような移動層内における粉の挙動に関する研究例⁶⁾¹⁰⁾は少なく、高炉内の粉の挙動に関しては未解明な部分が多い。

そこで、高炉三次元半裁模型¹¹⁾を用いて、羽口からの粉コークスの吹込み実験を行い、装入物の降下と通気に及ぼす粉吹込み量および粒径の影響を解析すると同時に、移動層内における粉の堆積挙動について考察した。

2. 実 験 方 法

実験に用いた高炉三次元半裁模型¹¹⁾を Fig. 1 に示す。本装置は 4 000 m³ 級の大型高炉の 1/20 縮尺の模型である。炉頂よりコークスを装入し、18本の羽口より常温の空気を送風しレースウェイを形成させた。そして、レー

平成3年10月16日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Oct. 16, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)

* 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)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)

*⁴ 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp.)

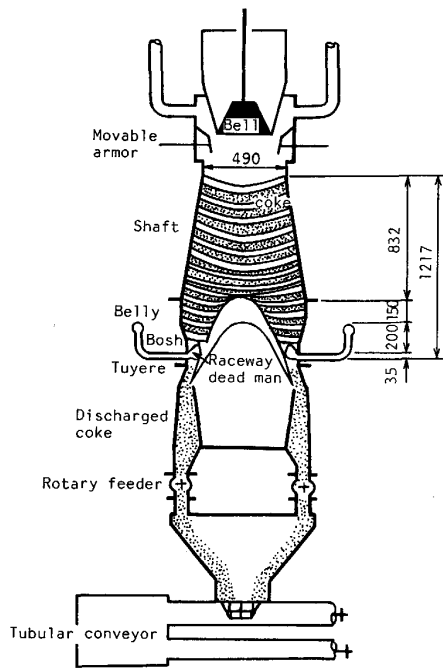


Fig. 1. A half section three-dimensional model of a blast furnace.

スウェイ直下のロータリーフィーダーよりコークスを排出した。粉コークスの吹込みは 18 本の羽口より行った。

実験条件として、コークス排出量を 90 kg/h とし、送風量を 200 Nm³/h とした。ここで、送風量は、装入物の降下挙動に大きな影響を及ぼすレースウェイ形状の実炉と模型の相似を一致させることが最も重要と考えて、(1) 式に示すレースウェイでの Froude 数が実炉と模型でそれぞれ一致するように求めた羽口風速より決定した。

$$Fr = \sqrt{\frac{F_{it}}{F_g}} = u_t \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_c \cdot g \cdot l}} \dots\dots\dots (1)$$

装入物として、1/20 に縮尺したコークス (粒径: 2~4 mm) を用いた。吹込み粉として、粒径の異なる 3 種類 (0.05~0.1 mm (以降 -0.1 mm と呼ぶ)、0.1~0.5 mm、0.1~1.0 mm) の粉コークスを使用し、吹込み量を 10, 20, 30, 40 kg/h と 4 水準変更した。ここで、粉の粒径については、炉下部での Froude 数と抵抗係数が実炉と模型でほぼ一致するように決定した。すなわち、粉の粒径の下限値については、粉コークスの抵抗係数に大きい差がでないように 0.05 mm とした。粉の粒径の上限値については、実炉の粉 (-3 mm) よりも大きい粒径 (10~20 mm) も考慮して 0.5~1.0 mm とした。なお、この粉コークス吹込み量は、実炉でのコークス燃焼量に対応するコークス排出量 90 kg/h の 11, 22, 33, 44% がレースウェイ内および近傍で粉化したことに対

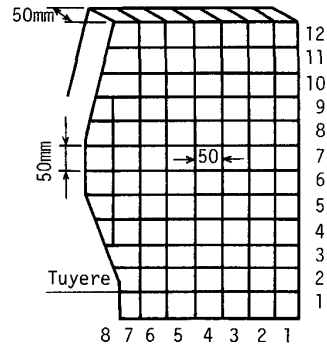


Fig. 2. Dimension of sampling unit.

応している。そして、堆積プロファイルは V 型分布とし、粒径分布は均一粒径分布とした。

実験時には、サウンジングによる装入物の降下状態およびガス圧力を測定した。同時にレースウェイ形状の VTR 撮影データに基づき、レースウェイ形状の変動を測定した。実験終了後に、Fig. 2 に示すように、シャフト下部以下の領域を 50 mm 間隔で吸引法によるサンプリングを行い、炉頂および炉外に排出された粉のサンプリングも行った。そして、採取試料の粒度分析を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 高炉内における粉の挙動

3.1.1 装入物の降下とガス圧力に及ぼす羽口からの粉吹込み量と粒径の影響

装入物の降下に及ぼす粉吹込み量の影響を Fig. 3 に示す。粉 (粒径: 0.1~1.0 mm) 吹込み量が 30 kg/h 以上の場合には断続的なスリップが発生すると同時にレースウェイの拡大・崩壊に起因した周期的な棚吊りが発生する。

ガス圧力に及ぼす粉吹込みの量の影響を Fig. 4 に示し、粒径の影響を Fig. 5 に示す。粉 (粒径: 0.1~1.0 mm) 吹込み量が 10 kg/h、20 kg/h の場合には朝顔部のガス圧力が増加し、30 kg/h 以上の場合には炉高方向全体のガス圧力が増加する。しかし、粉吹込み量が 30 kg/h の場合でも、粒径が -0.1 mm と装入コークスの空隙に対して十分小さい場合には、ガス圧力の増加幅は小さい。

3.1.2 レースウェイ形状に及ぼす羽口からの粉吹込み量の影響

レースウェイ高さや深度の比の変動に及ぼす粉吹込み量の影響を Fig. 6 に示す。レースウェイ形状の変動を示す指標としてとったレースウェイ高さや深度の比の変動 σ_{H_R/D_R} は、粉吹込み量が 10 kg/h 以上で大幅に増加し 20 kg/h 以上でほぼ一定になる。粉吹込み量が 20

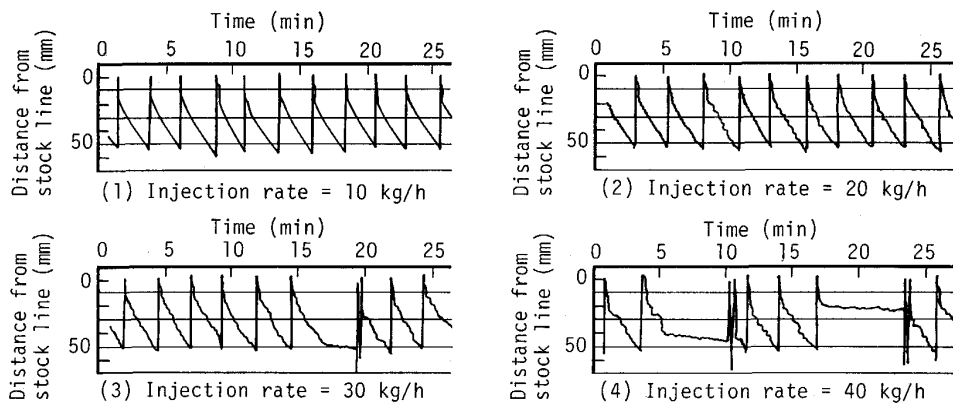


Fig. 3. Influence of injection rate of fines (0.1~1.0 mm) on burden descent.

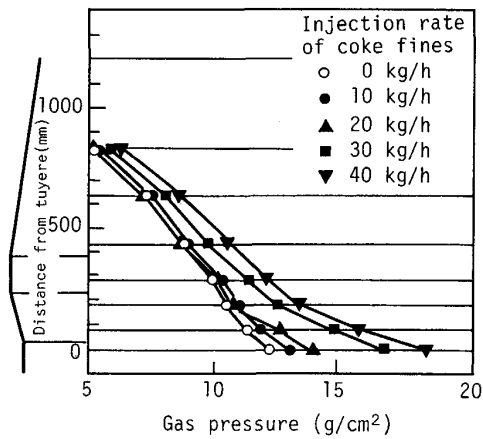


Fig. 4. Influence of injection rate of fines (0.1~1.0 mm) on gas pressure.

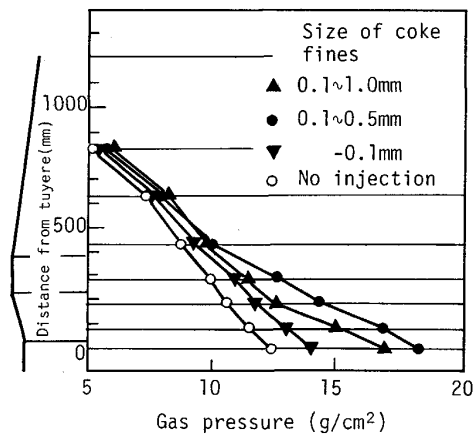


Fig. 5. Influence of size of fines on gas pressure (Injection rate = 30 kg/h).

kg/h 以上では、レースウェイ内およびレースウェイ近傍の通気抵抗が増加するため、レースウェイ形状の変動が増加したと推察される。

3・1・3 粉の堆積挙動に及ぼす羽口からの粉吹込み量および粒径の影響

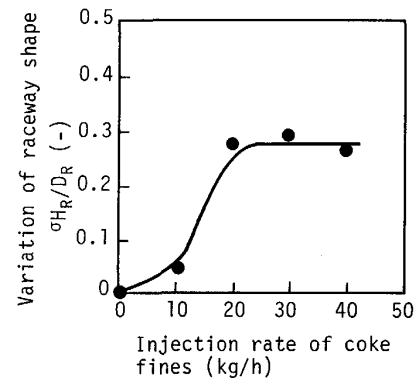


Fig. 6. Influence of injection rate of fines (0.1~1.0 mm) on variation of raceway shape.

炉下部での粉の堆積挙動に及ぼす粉吹込み量の影響を Fig. 7 に示し、粒径の影響を Fig. 8 に示す。粉(粒径: 0.1~1.0 mm)は、炉芯表層部と朝顔部の炉壁近傍に堆積しやすい。そして、粉吹込み量の増加にともない、粉の堆積領域が拡大すると同時に、炉芯表層部と朝顔部の炉壁近傍での粉の高濃度領域(30%以上)が拡大する。しかし、粉吹込み量が 30 kg/h の場合でも、粒径が -0.1 mm とコークス層の空隙に対して十分小さい場合には、粉(粒径: -0.1 mm)はコークス層内を上昇して炉外に排出され、炉芯内の粉の堆積量は少ない。そして、粒径が 0.1~0.5 mm の場合には、Photo. 1 に示すように、コークス層内を上昇した粉の一部は層頂の中心部に堆積し、残りは炉外に排出される。この層頂の中心部に堆積した粉は中心部の粉とコークス層との境界近傍で流動化しながら、コークス層とほぼ同じ速度で降下する。

炉芯コークスが更新されない本模型実験結果と炉芯の更新があり微少なながらも炉芯コークスが動いている実炉では、炉芯表層部近傍での粉の挙動が異なる可能性も考えられるが、従来の実炉の知見も炉芯表層部近傍に粉率のピークが測定¹²⁾されており、本模型実験の結果から

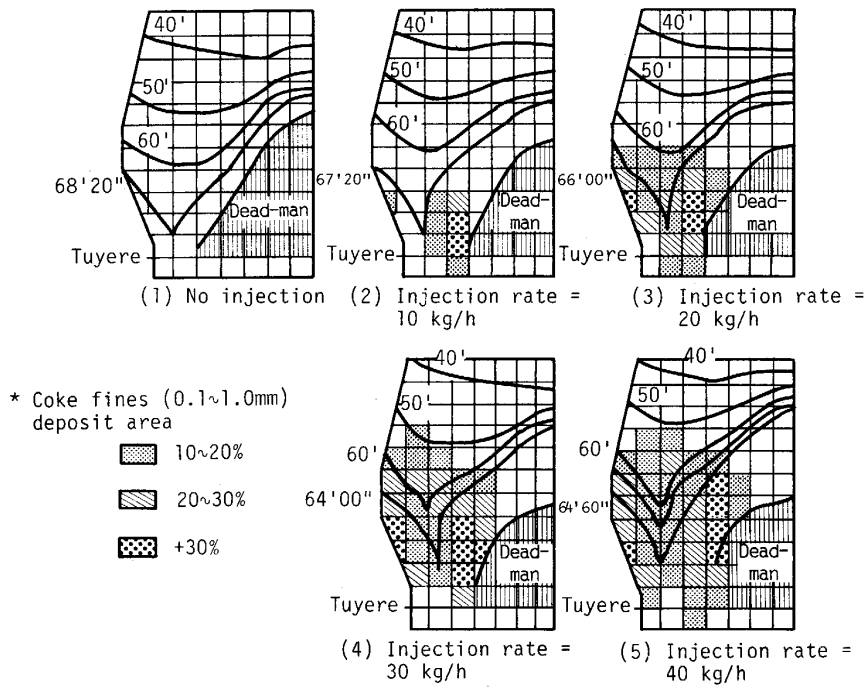


Fig. 7. Influence of injection rate of fines (0.1~1.0 mm) on burden descent and fines deposit behavior.

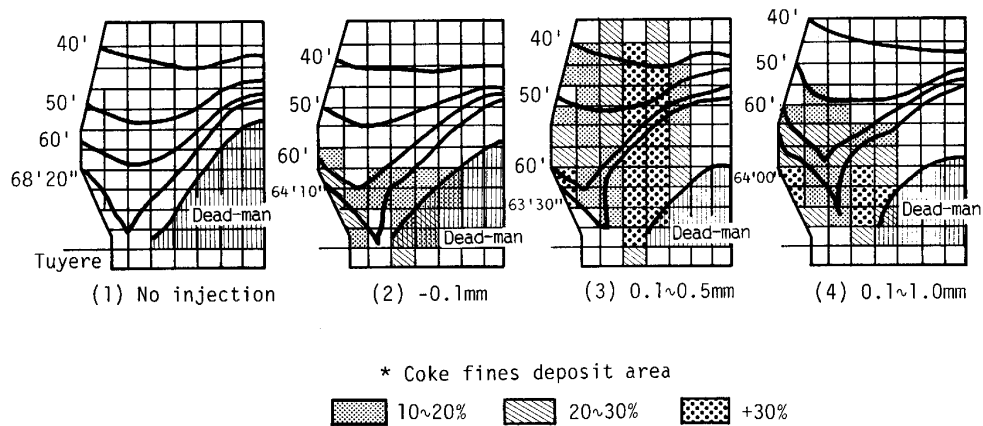


Fig. 8. Influence of size of fines on burden descent and fines deposit behavior (Injection rate = 30 kg/h).

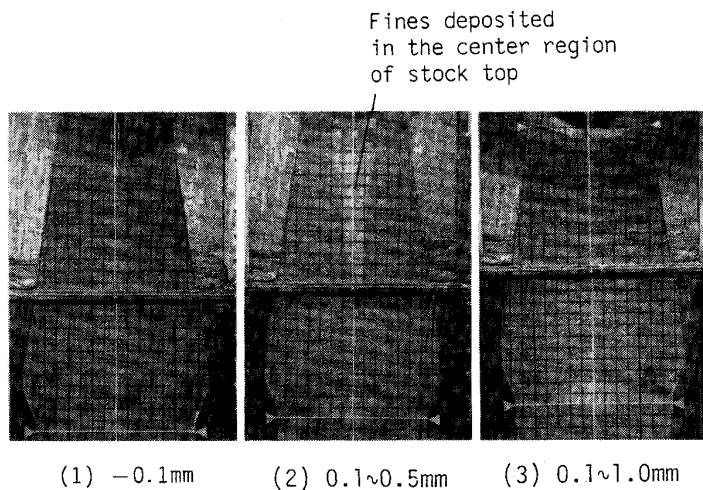


Photo. 1. Relationship between size of coke fines injected through tuyere and deposit behavior of fines.

実炉の炉芯表層部近傍での粉の挙動を推定できると考えられる。

3.1.4 粉の堆積挙動と粉の粒径の関係

前節で述べられたような粉の流動現象とガス流れとの関係を解明するために、(2)式に示す Wen の式¹³⁾より本実験条件での流動化開始速度と粉の粒径の関係を求め、(3)式より終末速度と粉の粒径の関係を求めた。両者の計算結果を Fig. 9 に示す。

$$\frac{d_p \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} = \left\{ (33.7)^2 + 0.0408 \cdot \frac{d_p^3 \cdot \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right\}^{1/2} - 33.7 \dots (2)$$

$$U_t = \left\{ \frac{4 \cdot d_p (\rho_s - \rho_g) g}{3 \cdot \rho_g \cdot C_d} \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (3)$$

$$C_d = 24 / Re_p \quad (Re_p < 0.4) \dots \dots \dots (4)$$

$$C_d = 10 / Re_p^{1/2} \quad (0.4 < Re_p < 500) \dots \dots \dots (5)$$

$$C_d = 0.43 \quad (500 < Re_p < 200\,000) \dots \dots \dots (6)$$

本実験条件では、空塔速度は羽口レベルで 0.30 m/s、炉腹レベルで 0.25 m/s、炉口レベルで 0.59 m/s であり、コークス充填層の空間率を 0.51¹⁴⁾と仮定すると、充填層内での実ガス流速はそれぞれ 0.59 m/s、0.49 m/s、1.18 m/s となる。Fig. 9 より、炉内でのガス流速の最小値である炉腹部レベルの空塔速度で流動化するコークスの粒径は約 1.0 mm であり、炉腹部レベルでの実ガス流速で吹き飛ばされるコークスの粒径は約 0.2 mm である。したがって、終末速度からみた場合には、0.1~0.2 mm の粒径の粉は炉頂まで吹き上げられ、0.2 mm 以上

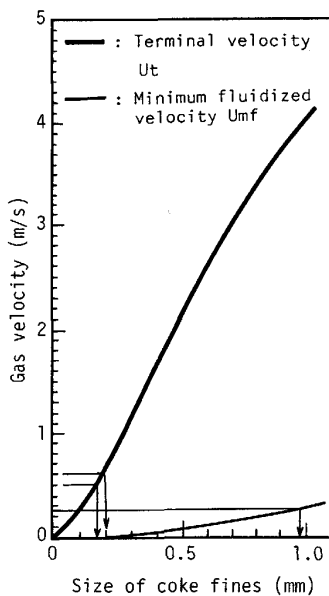


Fig. 9. Relationship between size of coke fines and terminal velocity, minimum fluidized velocity.

の粒径の粉は吹き上げられないが、流動化によりコークス層内を移動(上昇)する可能性がある」と推定される。

一方、球粒子細密充填層の最小空隙を通過できる最大球の径は球粒子の径の 0.155 倍であると計算される。この知見がコークス充填層にも適用できると仮定すると、2~4 mm の粒径のコークス充填層内の最小空隙を通過できる最大粒子径は 0.31~0.62 mm である。したがって、コークス充填層内の空隙径からみると、0.1~0.3 mm の粒径の粉は炉頂まで吹き上げられる可能性が大きく、0.3 mm 以上の粒径の粉はコークス層内を上昇できないと推定される。

炉頂まで吹き上げられた粉はガス流に随伴して V 型の層頂面に直角の方向すなわち中心方向に飛び出し、粉が炉外に排出されるか中心部に堆積するかは終末速度との関係で決まる。炉頂レベルでの空塔速度が 0.59 m/s であるので、炉外に排出される粉の最大径は 0.2 mm 以下の範囲にあり、0.2 mm 以上の粉は炉頂まで吹き上げられたとしても炉外に排出されないで層頂に堆積すると推定される。

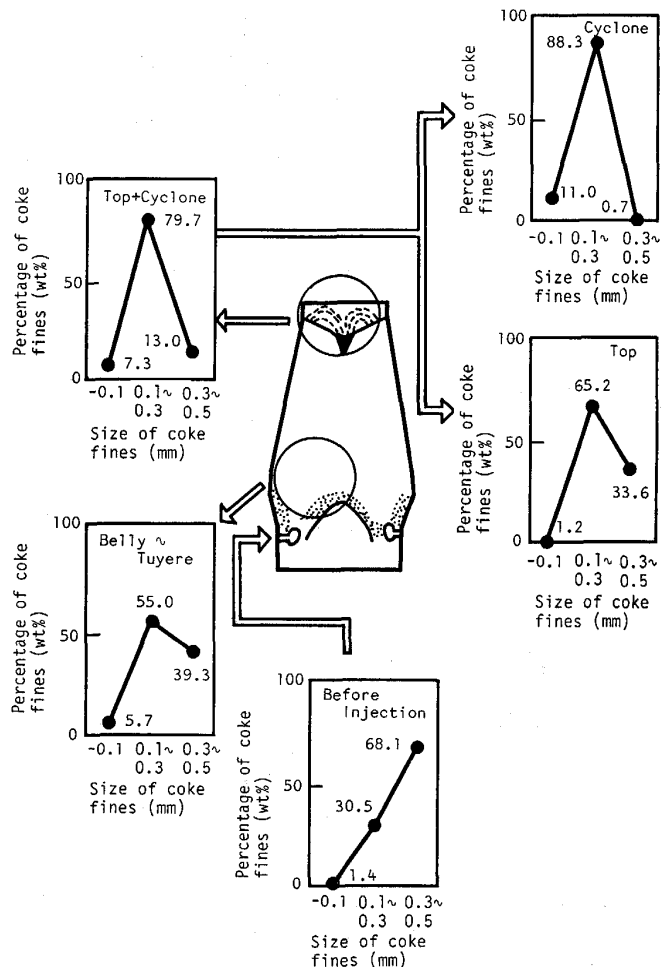


Fig. 10. Size distribution of coke fines.

羽口より 0.1~0.5 mm の粒径の粉を吹き込んだ場合のシャフト下部以下、層頂中心部の堆積粉および炉外排出粉(サイクロンで捕捉された粉)の粒径分布を Fig. 10 に示す。炉下部から炉頂へと上昇するにつれて、0.1~0.3 mm の比率が大幅に増加し、0.3~0.5 mm の比率が大幅に減少する。そして、炉外のサイクロンの粉では、0.3~0.5 mm の比率が 0.7% とほぼ零に近い数値になっている。

3・1・5 粉の堆積挙動と装入物の降下挙動の関係

炉下部での装入物は炉壁と炉芯に囲まれた領域を粒子の配列を変化させながら降下している。したがって、粒子配列の変化時に空隙が瞬間的に形成され、その空隙内にガスが流れ込むため、一時的に空隙内に粉が堆積していてもガスに随伴して上方に移動すると推察される。一方、降下速度が小さく粒子配列の変化の少ない炉芯表層部および朝顔部の炉壁近傍では、空隙が瞬間的に形成される可能性が小さいため、羽口から吹き込まれた粉は一旦空隙内に堆積するとガスに随伴して移動しにくいと推察される。

粒径が -0.1 mm と装入コークス粒径と比較して十分小さい場合に炉芯内に粉の高濃度領域(30%以上)が形成されない理由は、粉がガスに随伴してコークス層の空隙内を上方に移動しやすいためと推察される。

Fig. 7, Fig. 8 によると、装入物は炉腹部以下で粉の高濃度領域を迂回しながら降下するため、装入物の炉下部での降下領域が縮小し滞留時間が短くなる。これは、コークス層内への粉の堆積量の増加に伴い、粉を含むコークス層の内部摩擦角が増大¹⁵⁾し、擬停滞層が形成されるためと推察される。このように、装入物の降下挙動と粉の堆積挙動は相互に密接に関連しており、装入物の安定な降下を確保するためには、粉の高濃度領域を形成させないことが重要である。

3・2 実炉での炉内堆積粉の調査結果

3・2・1 炉頂堆積粉

名古屋 1 高炉では、1989 年 1 月、Fig. 11 の操業推移に示すように、炉頂クロスゾンの中心温度とシャフト上部ゾンの中心部の η_{CO} が同時に低下する現象が顕在化した。そこで、休風時に層頂部を観察した結果、中心部の半径 2 m 以内の領域に粉が堆積していることが判明した。

採取した粉の顕微鏡観察結果によると、粉の大部分(90%以上)は粉コークスであり、一部分(10%以下)が焼結鉱であった。粉コークスは、ほとんどガス化反応が進行していないものと表面がガス化されその周囲に亜鉛がコーティングしているものであり、粉焼結鉱は、未

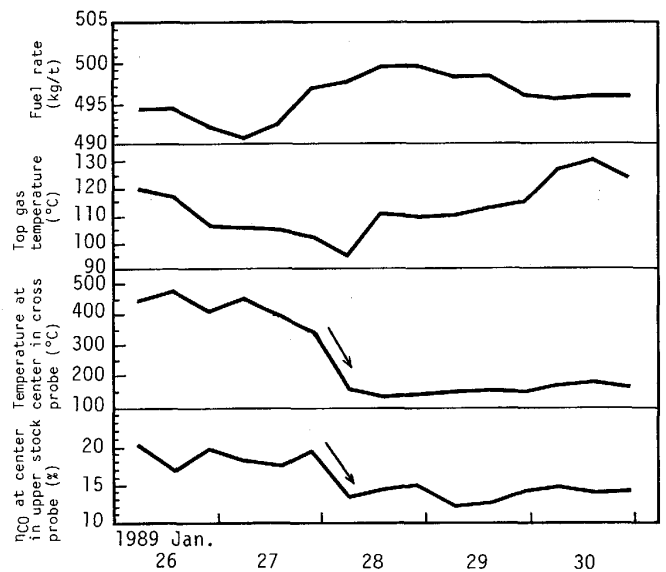


Fig. 11. Operation results of Nagoya No. 1 blast furnace.

Table 1. Size distribution of fines sampled in central region of stock top of Nagoya No. 1 blast furnace.

	Weight (g)	Weight ratio (%)
+ 5 mm	0.2	0
5-3 mm	10.2	1.5
3-1 mm	243.5	35.9
1-0.5 mm	243.7	36.0
0.5-0.1 mm	158.8	23.4
- 0.1 mm	22.0	3.2

還元のものとはマグネタイト段階まで還元されたものであった。したがって、層頂の中心部の粉コークスはコークスの付着粉あるいはシャフト下部でのソリューションロス反応により発生したものと推定された。

粉コークスの粒径分布を Table 1 に示す。粉コークスは 3 mm 以下であり、1 mm 以下が約 60%、0.5 mm 以下が約 25% であった。そこで、3・1・4 項で示した方法と同様に、Fig. 12 に示した名古屋 1 高炉の操業条件での流動化開始速度・終末速度とコークス粒径の関係から名古屋 1 高炉の炉頂での中心部のガス流速を推定した。層頂の中心部に堆積した 0.5 mm、1 mm の粒径の粉コークスの終末速度は 1.4 m/s、2.8 m/s であり、炉口部での平均ガス流速(空塔では約 1 m/s、層頂部近傍の実ガス流速では約 2 m/s)と比較して大きい数値ではなく、中心流がかなり抑制されていると推定された。

以上の知見より、中心部の堆積粉により中心部のガス流速が低下し、粉コークス主体の堆積粉のために、中心部のガス温度と η_{CO} が同時に低下したと推定される。

3・2・2 炉芯堆積粉

室蘭 2 高炉において休風時に羽口コークスサンプラー

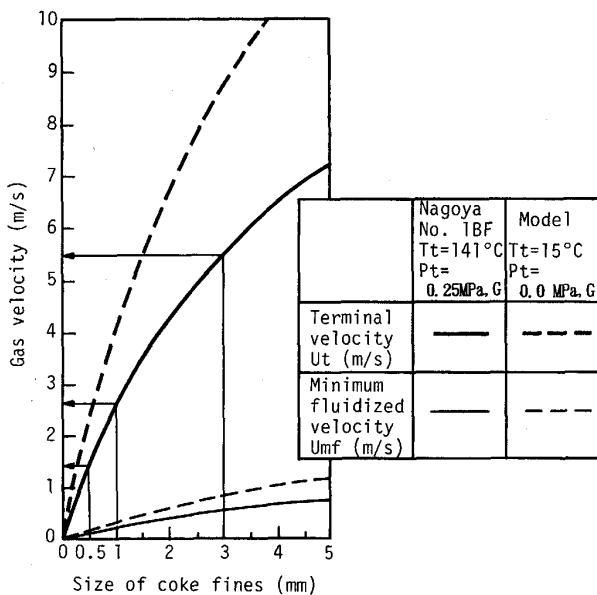


Fig. 12. Relationship between size of coke fines and terminal velocity, minimum fluidized velocity (Superficial velocity = 1.0 m/s).

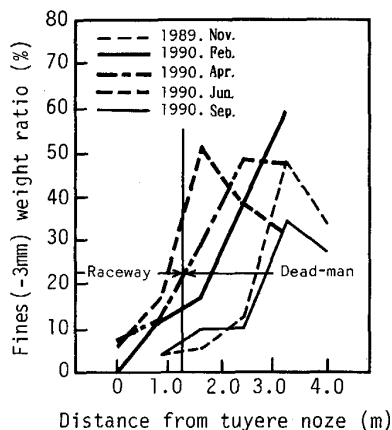


Fig. 13. Radial distribution of fines (-3mm) at tuyere level.

により採取した粉(-3mm)の半径方向分布を Fig. 13 に示す。室蘭2高炉の羽口レベルの粉(-3mm)はレースウェイ先端から炉芯表層部に多く、粉の高濃度領域は Fig. 7, Fig. 8 に示した高炉三次元模型の知見と同様である。そして、その粉率の最大値の位置は半径方向で変化し、高炉の操業が不安定であった期間(1990.2~6)にはその位置が羽口寄りにあり、炉芯が肥大していたと推定される。また、君津4高炉の1本羽口微粉炭多量吹き込み操業試験においても、微粉炭吹き込み量が200kg/t(空気比=0.75)の場合には、未燃チャーが炉芯表層部に堆積していたことが報告⁴⁾されている。

3.3 炉内粉の発生と循環・堆積メカニズム

3.1 節の模型実験の知見および 3.2 節の実炉調査結果

より、炉芯表層部の粉はレースウェイ内および近傍で発生した粉コークスあるいは未燃チャーが堆積したものと推察される。一方、微粉炭多量吹き込みによる高 ore/coke 操業時のように、中心部の ore/coke の増大により中心流が抑制される可能性が大きい場合には、炉芯の上部から降下してきた粉の可能性もあると推察される。Photo. 1 に示したように、炉芯コークスの更新がない高炉三次元半裁模型の知見では、層頂中心部に堆積した粉は装入物とほぼ同じ速度で降下しており、炉芯コークスの更新がある実炉の場合には、この炉芯上部の粉は炉芯表層部だけでなく、炉芯内部にも堆積する可能性があるかと推察される。

その場合の炉芯上部の粉の由来はふたつに大別される。ひとつはレースウェイ近傍での機械的摩耗および炉下部でのソリューションロス反応により発生し、炉芯と融着帯下面の間のコークス層を上昇した粉コークスであり、もうひとつはシャフト下部での還元粉化、ソリューションロス反応により発生し炉頂に吹き上げられ層頂の中心部に堆積した焼結鉍粉・粉コークス、あるいは、装入粉である。

4. 結 言

高炉三次元半裁模型を用いて、羽口からの粉コークスの吹き込み実験を行い、装入物の降下と通気に及ぼす粉吹き込み量と粒径の影響を解析し、以下の知見を得た。

(1) 羽口からの粉の吹き込み量の増加にともない、スリップ・ガス圧力が増大し、レースウェイ形状の変動が増加する。ただし、粉の粒径が装入物の粒径に対して十分小さい場合には、粉吹き込みの影響は小さい。

(2) 羽口から吹込まれた粉は、炉芯表層部と炉壁近傍の降下速度の小さい領域に堆積しやすい。そして、炉芯表層部と炉壁近傍に粉の高濃度領域が形成されると、その領域の装入物の内部摩擦角が増大するため、炉下部での装入物の降下領域が縮小し滞留時間が短くなる。

(3) 中心流が抑制されたV型堆積プロファイルの場合には層頂部の中心部に粉が堆積しやすく、その堆積粉はコークス層との境界近傍で流動化しながら、装入物とともに降下する。

(4) 名古屋1高炉では、炉頂クロスゾンの中心温度とシャフト上部ゾンの中心部の η_{CO} が同時に低下する現象が顕在化した。その原因は、層頂の中心部の半径2m以内の領域にコークス主体の3mm以下の粉が堆積し、中心流が抑制されていたためと推定された。

(5) 室蘭2高炉では、羽口レベルの粉(-3mm)は、レースウェイ先端から炉芯表層部に多い。そして、操業

不安定時の粉率の最大値の位置は羽口寄りにあり、炉芯が肥大していたと推定される。

(6) 炉芯表層部の粉は、レースウェイ近傍で発生した粉コークスが直接堆積したものと推察されるが、微粉炭多量吹込みによる高 ore/coke 操業時のように、中心部の ore/coke の増大により中心流が抑制される可能性が大きい場合には、炉芯の上部から降下してきた粉が堆積した可能性もあると推察される。

記号

C_d : 抵抗係数 (—)
 D_R : レースウェイ深度 (m)
 D_t : 羽口径 (m)
 d_p : 粒子の粒径 (m)
 F_g : 装入物の重力 (N)
 F_{it} : 羽口でのガスの慣性力 (N)
 Fr : フルード数 (—)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 H_R : レースウェイ高さ (m)
 l : 代表長さ (m)
 Re_p : 粒子レイノルズ数 (—)
 U_{mf} : 流動化開始速度 (m/s)
 U_t : 終末速度 (m/s)
 u_t : 羽口風速 (m/s)
 μ : ガスの粘度 ($Pa \cdot s$)
 ρ_c : コークスの見掛け密度 (kg/m^3)
 ρ_g : ガスの密度 (kg/m^3)
 ρ_s : 粒子の見掛け密度 (kg/m^3)

文 献

- 1) K. H. Peters and M. Peters: Proceedings of 17th McMaster Symposium (1989), p. 381
- 2) J. R. Monson and R. R. Willmers: 同上, p. 415
- 3) 大鈴克二, 北山修二, 矢場田武, 清水正賢, 野間文雄: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 100
- 4) 松井 章, 柿内一元, 天野 繁, 山口一成, 上野浩光, 山口一良: 材料とプロセス, 4 (1981), p. 138
- 5) K. Tamura, M. Ichida, H. Ueno and K. Yamaguchi: Proceedings of 19th McMaster Symposium (1991)
- 6) 清水英男, 佐藤憲一, 小島正光, 網永洋一, 中村文夫, 岩永祐治: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 195
- 7) 山岡秀行: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 403
- 8) 山岡秀行: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 2194
- 9) 柴田耕一郎, 清水正賢, 稲葉晋一, 高橋礼一郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, 77 (1991), p. 236
- 10) Y. Ishikawa, M. Kase, Y. Abe, K. Ono, M. Sugata and T. Nishi: Ironmaking Proceeding of AIME, 42 (1983), p. 357
- 11) 一田守政, 西原一浩, 田村健二, 須賀田正泰, 小野 創: 鉄と鋼, 77 (1991), p. 1617
- 12) 田村健二, 一田守政, 斧 勝也, 林 洋一: 鉄と鋼, 70 (1984), A141
- 13) C. Y. Wen and Y. H. Yu: AIChE J., 12 (1966), p. 610
- 14) 一田守政, 田村健二, 磯崎洋一, 林 洋一: 鉄と鋼, 73 (1987), S748
- 15) M. Ichida, K. Tamura, Y. Hayashi and M. Sugata: Ironmaking Proceedings of AIME, 47 (1988), p. 555