

高炉羽口部からの鉍石、フラックスの吹込み  
による低 Si 操業武田 幹治\*・澤 義孝\*・田口 整司\*  
高島 暢宏\*<sup>2</sup>・松本 敏行\*<sup>2</sup>・小幡 昊志\*<sup>2</sup>Reduction of Silicon in Hot Metal by Iron Ore and Flux Injection  
through Blast Furnace TuyereKanji TAKEDA, Yoshitaka SAWA, Seiji TAGUCHI,  
Nobuhiro TAKASHIMA, Toshiyuki MATSUMOTO and Hiroshi OBATA

## Synopsis:

A Multi-Purpose Injection (MPI) System was installed at Chiba No. 5 blast furnace and a test operation on the injection of iron ores and fluxes was conducted twenty one days for the purpose of lowering silicon content in hot metal. The results obtained from the trial are summarized as follows:

1. Reduction of silicon content of 0.08% in hot metal was obtained by the mixed powder injection of iron ore and flux powder of 5.0 kg-CaO/t. It was suggested that the major factor inducing the silicon reduction was the absorption of SiO(g) by the injected powder. That was made on the basis of sampling examination by a sideways tuyere probe.

2. Significant reduction of silicon content was not observed during the iron ore powder injection up to 50.4 kg/t with constant coke rate. On the other hand, increases of (FeO) and [S] indicated that the oxygen potential in a hearth became higher by the iron ore powder injection.

**Key words:** blast furnace; iron ore; flux; powder; injection; silicon content; tuyere; de-siliconization; raceway.

## 1. 緒 言

溶銑脱りん処理が行われる銑鋼一貫プロセスにおいては、溶銑中 [Si] 低下による精錬コストの削減効果が大きい。出銑 [Si] 低下技術の開発、銑脱珪技術の開発が行われてきた。一方、新たな [Si] 低下技術として酸化鉄を高炉羽口から吹き込む操業が各製鉄所で試みられている<sup>1)~5)</sup>。

春ら<sup>1)</sup>は粉鉍石、石灰石 (CaCO<sub>3</sub>) を羽口から吹き込む実験を千葉第 2 高炉の 5 本の羽口で行い、30 kg/t の鉍石吹込みにより、[Si] が 0.72% から 0.57% に低下したと報告している。また、KUSHIMA<sup>2)</sup>、水野<sup>4)</sup>も、羽口から焼結鉍粉を吹き込むことにより、[Si] を低下できることを見出している。

酸化鉄吹込みによる [Si] 低下の機構として、KUSHIMA<sup>2)</sup>、水野<sup>4)</sup>は炉内で溶銑中の [Si] と酸化鉄中の酸

素が直接反応する反応機構を提案している。しかし、酸化鉄吹込み時の炉内での溶銑成分の変化を実測し、脱珪機構を検証した報告はない。一方、著者ら<sup>6)7)</sup>は操業中の羽口近傍の溶銑、溶滓組成の測定を行い、羽口前のスラグ中の酸化鉄と溶銑中 [Si] が直接反応する可能性が小さいことを見出している。

従来の酸化鉄吹込み実験は、実験前 [Si] が 0.5% ~ 0.7% と高い時に、短期間だけ実施されている。最近では、羽口前理論燃焼温度 (Theoretical Flame Temperature, 以下 TFT と略す) の低下などの [Si] 低下技術の進歩により、通常時の [Si] が 0.2% ~ 0.4% に低下している。吹き込んだ酸化鉄中の酸素の脱珪反応に使用される割合は溶銑中の [Si] 濃度の低下により、大幅に低下することが知られている<sup>8)</sup>。したがって、低 [Si] 操業を行っている高炉では、酸化鉄吹込みによる [Si] 低下を期待できない可能性がある。

昭和 62 年 10 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 12 月 12 日受付 (Received Dec. 12, 1990)

\* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

\*<sup>2</sup> 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

羽口への酸化鉄、フラックスの吹込みによる [Si] 低下技術を開発するために、川崎製鉄(株)では、粉鉱石、石灰石等の多種類の粉体を吹き込むことができる多目的粉体吹込み設備 (Multi-Purpose Injection System, 以下 MPI と略す) を千葉製鉄所第 5 高炉に設置した。MPI を用いて 21 日間の粉鉱石および、フラックスの吹込み実験を行った。同時に斜行羽口ゾンデを用いて稼働中の高炉炉内の溶銑、スラグ、ダストの採取を行い、[Si] 低下機構について考察した。

## 2. 粉体吹込み時の高炉操業条件の設計

### 2.1 粉鉱石吹込み時の高炉操業条件の検討

[Si] の低下を考慮しない場合の高炉操業条件の予測を熱、物質収支モデル<sup>9)</sup>を用いて行った。同時に、粉鉱石を焼結鉱にかえて直接使用する際の経済性についても検討した。

Table 1 に計算条件、および計算結果の一例を示す。粉鉱石の吸熱反応として酸化鉄の直接還元反応の反応熱、粉体の顕熱、還元された鉄の溶融熱を考慮し、高炉全体の熱、物質収支から操業諸元を予測した。コークス比一定のもとで、粉鉱石吹込み時に熱補償のため必要な送風温度の上昇量を計算した。Table 1 に示したように、粉鉱石の吹込み量 50 kg/t では、送風温度を 43°C 上昇させる必要がある。また、粉鉱石の吸熱反応を考慮した TFT は粉鉱石吹込みにより、約 60°C 低下する。実験操業では、本計算結果に基づいて送風温度を上昇させた。

粉鉱石吹込み時には、酸素富化操業時と同様に炉頂ガスカロリーは増大し、炉頂ガス潜熱原単位もわずかに増加する。また、送風原単位の低下にもかかわらず、送風温度が大幅に上昇するため、熱風炉の熱量原単位は増加する。両者の変化が相殺され、高炉系全体ではエネルギー発生量がほとんど変化しない。したがって、焼結鉱の製造コストと鉱石粉の吹込みコストの差が、粉鉱石の直接使用のメリットとなる。

Table 1. Estimation of operating conditions during the iron ore powder injection.

|                                                  | Base  | Iron ore powder injection |
|--------------------------------------------------|-------|---------------------------|
| Iron ore injection rate (kg/t)                   | 0     | 50                        |
| Production (t/d)                                 | 5 000 | 5 165                     |
| Blast temperature (°C)                           | 950   | 993                       |
| Blast volume (Nm <sup>3</sup> /t)                | 996   | 993                       |
| Theoretical flame temperature (°C)               | 2 208 | 2 141                     |
| Top gas volume (Nm <sup>3</sup> /t)              | 1 531 | 1 532                     |
| Carolic value of top gas (kcal/Nm <sup>3</sup> ) | 728   | 744                       |
| Latent heat of top gas (Mcal/t)                  | 1 114 | 1 140                     |
| Energy consumption at hot stove (Mcal/t)         | 352   | 372                       |
| Total output heat (Mcal/t)                       | 762   | 768                       |

## 3. 粉体吹込み操業実験

### 3.1 実験方法

種々の粉体を炉内へ吹き込んだ際の高炉操業の変化を検討するため、多目的粉体吹込み設備 (MPI) を用いた。MPI は微粉炭もしくは、粉鉱石とその他のフラックスの混合粉などの各種の粉体を最大 10 t/h まで吹き込むことができる。千葉第 5 高炉の全羽口 30 本のうち通常 7~8 本、最大 12 本の羽口から粉体吹込みを実施した。

実験操業に用いた粉鉱石、フラックスの化学組成と平均粒度を Table 2 に示す。平均粒度 250 μm の粉鉱石を使用し、石灰石、マグネシアクリンカーをフラックスとして粉鉱石に混合して用いた。混合粉自体の平均的な融点だけでなく、吹込み混合粉が羽口前スラグ<sup>6)</sup>と混合した時のスラグの融点が 1 600°C 以下になるように粉鉱石と CaO 源、MgO 源の混合割合を決定した。

粉鉱石の吹込み量に相当する鉱石量を炉頂から装入する鉱石から減らし、コークス比を一定に維持した。溶銑温度の調整を主として送風温度の上昇で行った。石灰石を用いた混合粉吹込み時には、石灰石の吹込み量に応じて焼結鉱の塩基度を変更して出銑されるスラグ中の塩基度を一定に維持した。MgO 源を用いた混合粉の吹込み時には焼結鉱組成の調整を実施していないため、スラグ中の MgO は 6.5% から 7.3% まで上昇した。

Table 2. Chemical compositions and mean sizes of injecting materials.

|                  | T. Fe (%) | FeO (%) | CaO (%) | MgO (%) | SiO <sub>2</sub> (%) | Mean size (μm) |
|------------------|-----------|---------|---------|---------|----------------------|----------------|
| Iron ore powder  | 66.3      | 8.57    | 0.46    | 0.31    | 4.12                 | 250            |
| Limestone        | 0.1       | —       | 54.9    | 0.90    | 0.48                 | 109            |
| Magnesia clinker | —         | —       | 1.98    | 84.2    | 6.98                 | 100            |

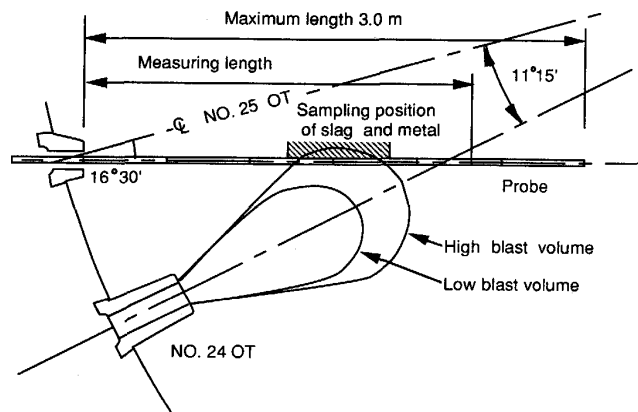


Fig. 1. Effect of blast volume on the distance from the sampling position to the raceway boundary of No. 24 OT.

### 3.2 斜行羽口ゾンデによる粉体吹込み時の炉内測定

粉体吹込み時の [Si] 低下機構を検討するために、粉体吹込みを行っている No. 24 羽口前に形成されるレースウェイ領域の測定を斜行羽口ゾンデを用いて実施した。レースウェイ領域と斜行羽口ゾンデ測定位置の関係を Fig. 1 に示す。斜行羽口ゾンデは、高送風量時にはレースウェイ内を通過するが、低送風量時にはレースウェイ内には入らず、レースウェイ横を通して炉芯部に到達する。スラグ、溶銑の多くは図中斜線で示したレースウェイ外周部で採取される。

## 4. 粉体吹込み実験結果

粉体吹込み実験中の千葉第 5 高炉の各種操業因子の変化を Fig. 2 に示す。1986 年 11 月 10 日の予定休風後に微粉炭吹込み操業から粉体吹込み操業へ移行した。前章で述べたように羽口から吹き込む粉鉍石を含めた燃料比を一定に維持して粉体吹込み操業へ移行した。溶銑温度を一定に保つために、送風温度を 950°C から 1010°C まで上昇させた。送風温度の変化は熱、物質収支モデルによる予測計算に近い結果となった。

### 4.1 粉体吹込みによる溶銑成分の変化

粉鉍石（粒径 250  $\mu\text{m}$ ）の吹込み実験時のタップごと

の溶銑温度と [Si] の関係を、吹込み量 32.0 kg/t と 50.4 kg/t の 2 水準に層別して回帰直線とともに Fig. 3 に示す。また、ペレット用微粉鉍石（粒径 100  $\mu\text{m}$ ）を用いた吹込み実験の結果<sup>5)</sup>を Fig. 4 に示す。

Fig. 3, 4 で明らかなように、粉鉍石吹込みの場合、粉鉍石の粒径、吹込み量によらず [Si] の低下は顕著ではない。

一方、粉鉍石とフラックス（石灰石、マグネシアクリンカー）の混合粉の吹込み実験の結果を Fig. 5 に示す。出銑 [Si] と溶銑温度の関係は、基準時（図中 ○——）から混合吹込み時（図中 ●——: 2.5 kg-CaO/t, ▲——: 5.0 kg-CaO/t, □……: 3.9 kg-MgO/t）へと低下する。また、フラックス吹込み量が増加するにつれ [Si] 低下幅が増大する傾向にあり、混合粉 5.0 kg-CaO/t の吹込みにより、溶銑温度 1490°C で 0.08% の [Si] 低下が可能であった。[Si] 低下に対する MgO 源と CaO 源吹込みの差は明確ではない。

Fig. 2 に示した操業推移図では、粉体吹込み操業時には出銑 [S] が上昇し、同時にスラグ中の (FeO) の上昇、Mn の分配指数 (MnO)/[Mn] の上昇が認められる。これらの変化は、粉体吹込みにより炉床部のスラグ、メタル界面の酸素分圧が上昇していることを示している。

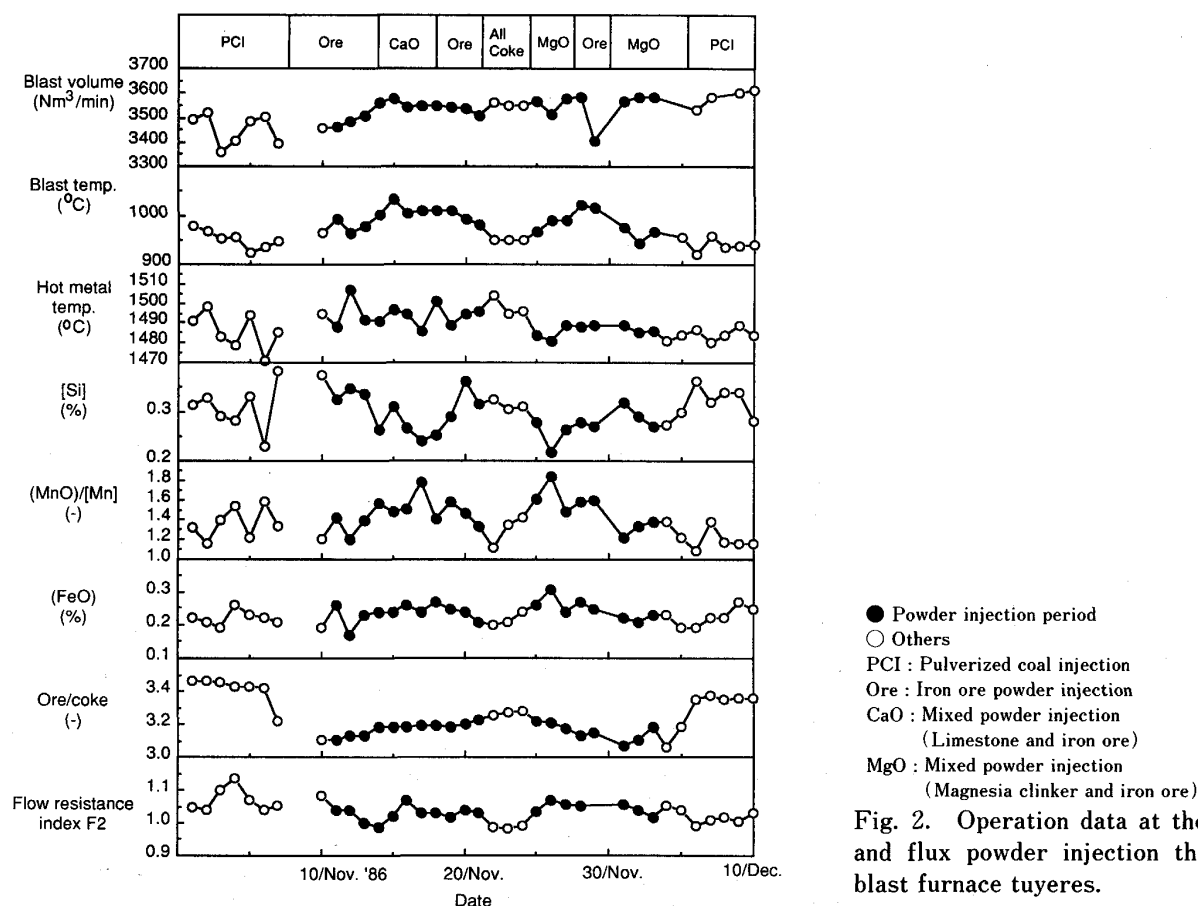


Fig. 2. Operation data at the iron ore and flux powder injection through the blast furnace tuyeres.

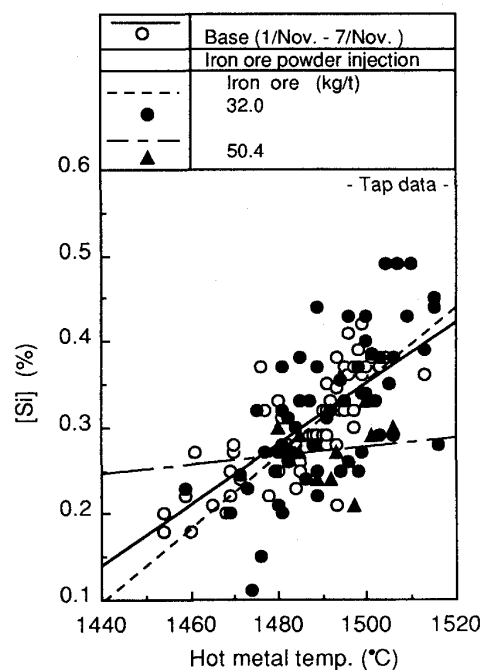


Fig. 3. Relationship between hot metal temperature and Si content with the iron ore powder injection.

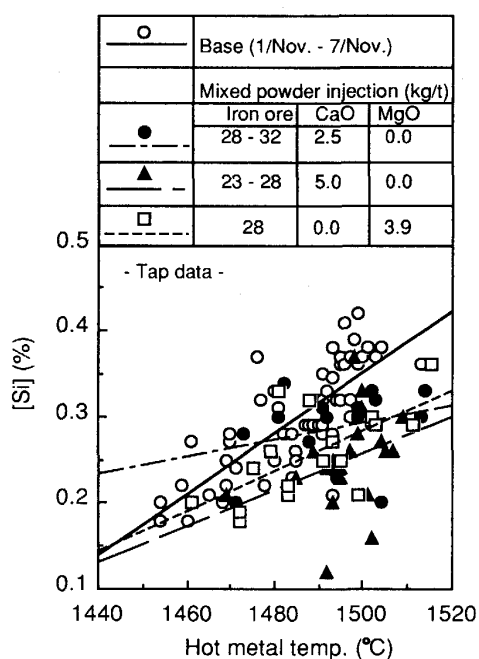


Fig. 5. Relationship between hot metal temperature and Si content with the mixed powder injection.

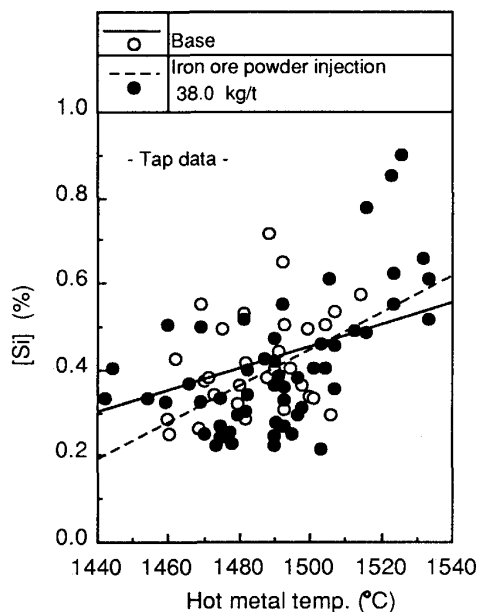


Fig. 4. Relationship between hot metal temperature and Si content with the fine iron ore powder injection (mean diameter  $100 \mu\text{m}$ )<sup>5)</sup>.

#### 4.2 斜行羽口ゾンデの測定結果

粉体吹込みによるレースウェイ近傍のガス組成の典型的な変化を Fig. 6 に示す。粉鉱石吹込み時には、レースウェイ近傍で CO が上昇、N<sub>2</sub> が極度に低下するガス組成分布が得られた。

ボッシュガス中の CO と N<sub>2</sub> の比率は送風条件によ

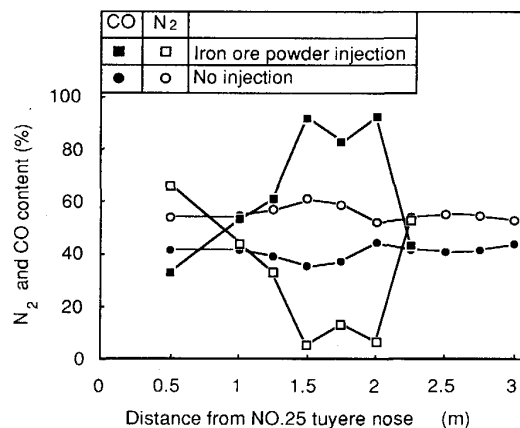


Fig. 6. Change in gas compositions around the raceway with the iron ore powder injection.

り決定される一定値となる。したがって、ガス中の CO/N<sub>2</sub> の増加はその領域で採取したガスに占めるボッシュガスの割合が減少し、直接還元反応で生成した CO の割合が増加していることを示す。つまり、粉鉱石吹込みに伴うレースウェイ近傍での CO/N<sub>2</sub> の顕著な増加は、吹き込んだ鉱石がレースウェイ内に滞留し、レースウェイ近傍の通気性が低下していることを示している。

Fig. 7 には、斜行羽口ゾンデで採取したスラグ中の FeO をその時の粉体吹込み量とともに示す。期間 B の (FeO) は前後の期間に比較すると著しく低く、また、鉱石吹込み量と (FeO) 間には明確な関係が認められな

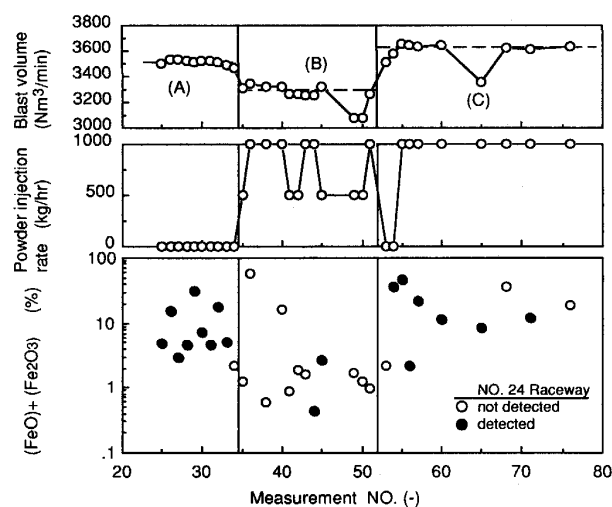


Fig. 7. Change in  $(\text{FeO})+(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  in slag sampled in and around the raceway.

い、ゾンデがレースウェイ内を通過したかどうかをガス分析結果から判断してレースウェイ内を通過したもの（ガス中の  $\text{CO}_2$  濃度が 0.5% 以上）を●印、通過しなかったものを○印で示した。

期間 B では送風量が少なくレースウェイが小さいため、ゾンデはレースウェイ内を通過せずに炉芯に到達している。スラグ採取位置は各期間ともほぼ同一なので、期間 B では、レースウェイ外でスラグを採取していることになる。期間 A では、逆にレースウェイ内のスラグを採取していることになる。これらの結果は、通常時から高  $(\text{FeO})$  スラグがレースウェイ内に存在し、粉鉱石吹込みによる  $(\text{FeO})$  の変化を明確には検出できないこと、また、羽口から吹き込まれた粉鉱石がレースウェイの外部に飛び出して高  $(\text{FeO})$  スラグを生成する割合が少ないことを示している。

斜行羽口ゾンデで採取したダストは炉内の揮発物質、吹込み粉体由来し、吹込み粉体の炉内での挙動を反映している。レースウェイ近傍で採取したダストの X 線回折の結果を Table 3 に示す。ダスト中の物質として同定できたのは、 $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 、 $\text{K}_2\text{Zn}(\text{CN})_4$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 、C などであり、主要な吹込み粉体の成分である  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  を含む化合物は検出されていない。

挿入時にゾンデにかかる推力は、ゾンデ先端でコークスを押し退ける力であり、推力の変化から炉内の装入物の充填状態、通液性を推定できる。Fig. 8 に混合粉吹込み時に認められた典型的な推力の変化と炉内状況の推定図を示す。ゾンデの挿入口である 25 番羽口レースウェイ内では推力はほとんど零に近いが、25 番羽口レースウェイ周辺部で急激に推力が増大する。その後、推力が低下し、24 番羽口前のレースウェイ周辺部で再

Table 3. Results of X-ray diffraction analysis of dust sampled in and around the raceway.

| Injecting materials               | The first peak height ( $\text{s}^{-1}$ ) |                                    |                  |          |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------|----------|
|                                   | $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$        | $\text{K}_2\text{Zn}(\text{CN})_4$ | $\text{NaHCO}_3$ | Graphite |
| Iron ore powder                   | >1 000                                    | 240                                | >1 000           | —        |
| Iron ore powder                   | >1 000                                    | >1 000                             | 400              | >1 000   |
| Iron ore powder                   | >1 000                                    | >1 000                             | —                | >1 000   |
| Mixed powder (Limestone+Iron ore) | >1 000                                    | 210                                | >1 000           | >1 000   |
| Mixed powder (Dolomite+Iron ore)  | >1 000                                    | 340                                | >1 000           | —        |

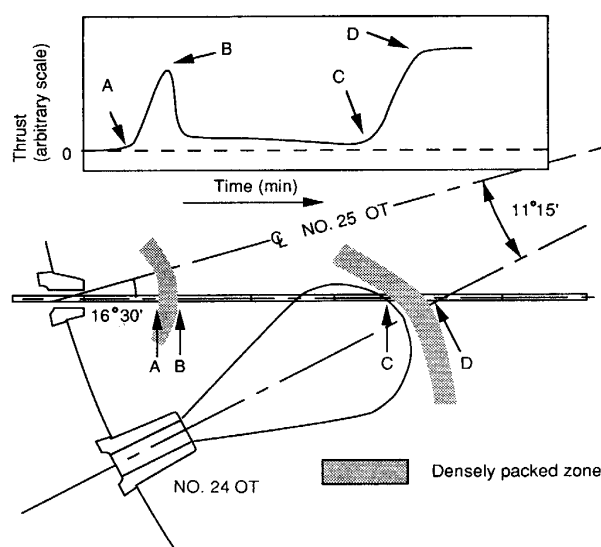


Fig. 8. Typical change in thrust force as measured in the mixed powder injection period.

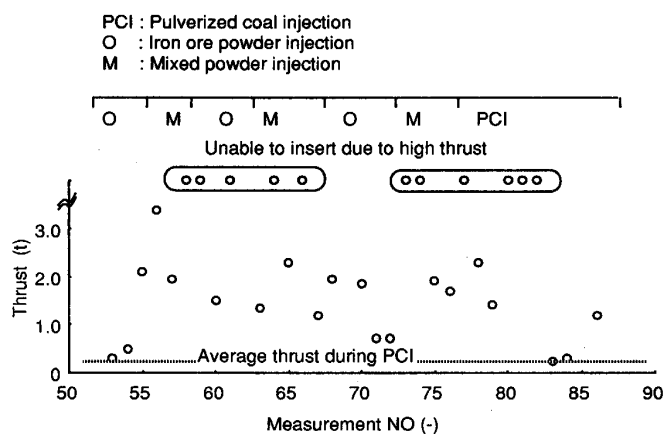


Fig. 9. Change in thrust force at No. 25 tuyere with the iron ore and mixed powder injection.

度推力が増大、炉芯部に到達する。

Fig. 9 に、粉体吹込みによる 25 番羽口前での推力の最大値の変化を示す。混合粉の吹込み時に推力が増大する傾向にある。最大の推力でも挿入できない場合があり、レースウェイ周辺部に高強度の緻密な層が形成されたものと考えられる。このことは、混合粉吹込みにより吹込み羽口である 24 番羽口前に形成されるレースウェイ周

辺だけでなく、羽口レベル全体にわたって通気性を悪化させる層が生成していることを示している。本実験では短期間で実験を終了しているので操業上の悪影響は明確ではない。

### 5. 粉体吹込みによる [Si] 低下機構に関する考察

千葉第 5 高炉での粉体吹込み操業実験の結果、同時に実施した斜行羽口ゾンデの測定結果および、従来から検討してきた小型燃焼炉を用いた粉体吹込み実験の結果<sup>10)</sup>を総合して以下に示す [Si] 低下機構について検討した。

a) 粉鉱石の吸熱反応による TFT の低下

b) (FeO) を含むスラグと溶銑中の [Si] との直接反応

c) スラグあるいは粉体による SiO (g) の吸収

#### 5.1 粉体吹込みによるレースウェイ領域の温度の低下による SiO (g) 発生量の低下

小西ら<sup>10)</sup>は、小型燃焼炉を用いた粉鉱石吹込み実験を行い、粉体吹込み量を 0 から 100 g/Nm<sup>3</sup> に増加すると羽口前の最大温度は 1870 °C から 1685 °C に低下し、炉内での [Si] 吸収量を 3.5% から 0.2% に低下してきたことを見出している。一方、粉鉱石の単独吹込みの結果を示した Fig. 3, Fig. 4 では粉鉱石吹込みにもかかわらず [Si] は低下していない。

実炉と小型燃焼炉との差は以下のように説明できる。実炉実験では、微粉炭吹込みを中止して粉体吹込み操業を行ったため、羽口前での微粉炭の分解熱が減少したこと、および熱補償のため送風温度が上昇したことにより結果的には TFT が低下していない。したがって、今回の実験操業では、TFT の低下による SiO (g) 発生量の低下もなかったものと考えられる。

さらに、熱、物質収支モデルを用いて粉鉱石吹込み時の操業の予測を行った。前述のモデルに、[Si] への操業因子の影響係数<sup>11)</sup>を導入して、送風温度一定の条件下で鉱石吹込みによる [Si] の変化を予測した。

モデルの計算結果を Fig. 10 に示す。吹込み量の増加とともに TFT は低下するものの、コークス比が上昇するため熱流比も同時に低下する。両者の [Si] への影響が打ち消しあって [Si] は吹込み量の増大とともにやや上昇する。したがって、[Si] 低下の手段として、粉鉱石の単独吹込みが効果的ではないことがわかる。

#### 5.2 吹込み粉体に由来する高 (FeO) スラグによる炉内での直接脱珪反応

著者ら<sup>7)</sup>は斜行羽口ゾンデを用いて粉体吹込みを行っ

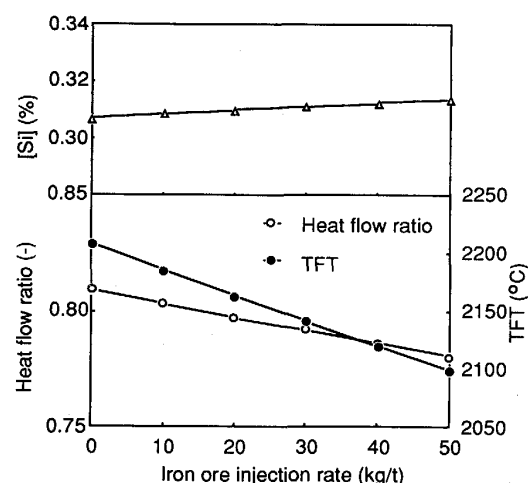


Fig. 10. Change in silicon content with the iron ore powder injection estimated with the heat and mass balance model.

ていない時のレースウェイ領域のスラグ、溶銑の成分および、スラグ、溶銑間の反応について検討し、以下の点を明らかにしてきた。

a) 高 (FeO)、高 [Si] がレースウェイ近傍の溶銑、スラグ成分の特徴である。

b) レースウェイ近傍には、送風中酸素で溶銑が酸化されてできた高 (FeO) スラグが常時存在している。

小型燃焼炉による粉体吹込み実験の結果<sup>10)</sup>は、吹込み酸化鉄による脱珪反応はレースウェイ領域では起こりにくいことを示している。さらに、粉鉱石吹込みによりレースウェイ内スラグ中の (FeO) は増加すると考えられるが、レースウェイ内にはもともと高 (FeO) スラグが存在するため、Fig. 7 に示したように粉鉱石吹込みによる (FeO) の増加を検出できていない。さらに、粉鉱石吹込みによるレースウェイ外のスラグ中 (FeO) の上昇も認められない。以上のことより、粉鉱石吹込みによって高 (FeO) スラグによる直接の脱珪反応を促進するのは困難と考えられる。

(FeO) ≤ 1.0% という低 (FeO) 領域では、固体炭素による (FeO) の還元速度は、(FeO) の低下とともに急激に低下する<sup>12)</sup>。低 (FeO) 領域では還元速度が小さくなるためレースウェイ内スラグ中の (FeO) の上昇により Fig. 2 に示したように炉床の (FeO) 濃度がわずかに増加し、結果として、炉床の酸素分圧が上昇し、[S]が増加するというデメリットのみが現れたものと考えられる。

#### 5.3 粉体吹込み時のフラックス成分による SiO (g) 吸収量の増大

Fig. 11 には Fig. 7 の粉体吹込み時にレースウェイ近

傍で採取したスラグの組成を  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  に三元系で示す。スラグ中の塩基度は鉄鉍石の吹込みの有無によって変化せず、 $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  の減少後に塩基度が上昇する傾向にある。これはレースウェイのごく近傍でコークス中の灰分がスラグ化するためレースウェイ外部に比べてレースウェイ内部のスラグの  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  が低くなることと、レースウェイ内部で  $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  が増加することを示している。石井ら<sup>13)</sup> は、微粉炭と  $\text{MgO}$  源吹込みにより羽口前スラグの  $a_{\text{SiO}_2}$  が低下することにより低  $[\text{Si}]$  化を達成できると報告しているが、本実験では、 $\text{CaO}$  源吹込みにもかかわらず明確に区別できるほどの  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  の変化は認められない。粉体吹込み時 (図中○印) と粉体吹込みなし時 (図中●印)

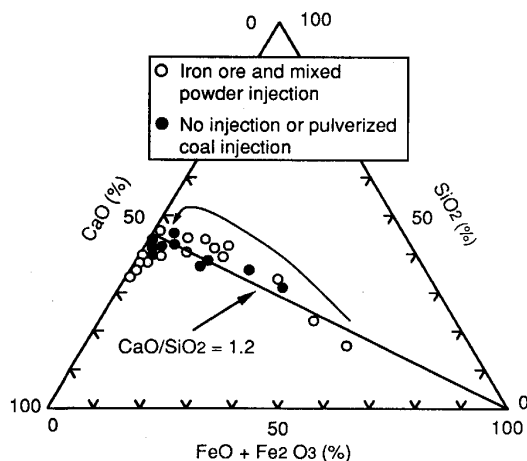


Fig. 11. Change in slag compositions in the raceway region with the iron ore or mixed powder injection.

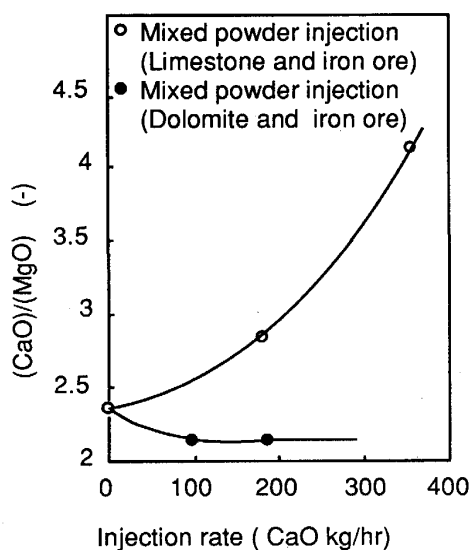


Fig. 12. Change in  $\text{CaO}/\text{MgO}$  of dust with the mixed powder injection.

のスラグ組成の差は小さく、スラグの  $\text{SiO}(\text{g})$  吸収能力の増大は明確ではない。

斜行羽口ゾンデで採取したダスト中の  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  は吹込み粉体に由来している。Fig. 12, 13 には、混合粉吹込み時の  $\text{CaO}$  吹込み量とダスト中  $\text{CaO}/\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  の関係を示す。

石灰石混合粉の吹込みにより、 $\text{CaO}/\text{MgO}$  は顕著に増大する。一方ドロマイト混合粉吹込み時にはドロマイトの  $\text{CaO}/\text{MgO}$  が 2.58 と炉頂装入物中の  $\text{CaO}/\text{MgO}$  より小さいため、 $\text{CaO}/\text{MgO}$  はやや低下している。一方、 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  は石灰石、ドロマイト吹込みにより、 $\text{CaO}$  吹込み量の増大とともに増加している。これらのダスト組成の変化、Table 3 の X 線回折の結果は、吹込みフラックスの一部がスラグ化してダストとして採取されていることを示す。

粉体吹込みとダスト組成の変化を  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  の三元系で Fig. 14 に示す。図中には粉体吹込みがない

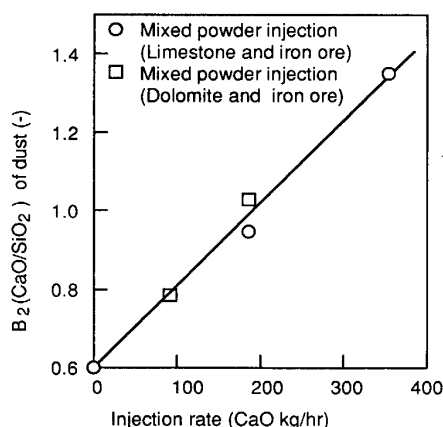


Fig. 13. Change in  $B_2(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$  of dust with the mixed powder injection.

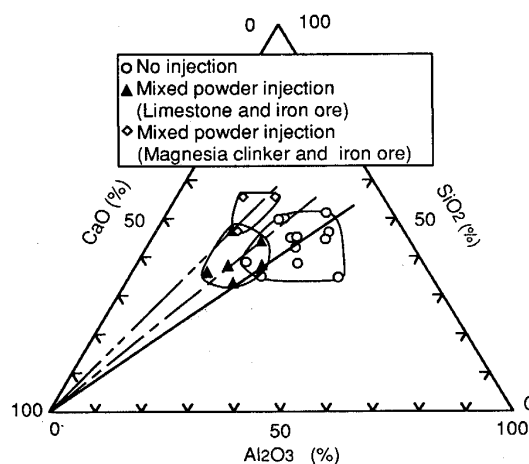
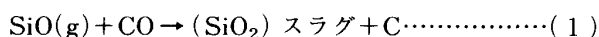


Fig. 14. Change in chemical compositions of dust around the raceway.

場合 (○), 石灰石, ドロマイト等の  $\text{CaO}$  源を吹き込んだ場合 (▲), マグネシアクリンカーを吹き込んだ場合 (◇) についてグループ分けして示した.  $\text{SiO}_2$  濃度の絶対値はコークス灰分の混入量により変化するため  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  を指標としてダスト中の  $\text{SiO}_2$  の変化を評価する. 混合粉吹込みにより  $\text{Al}_2\text{O}_3$  側から  $\text{SiO}_2$  側への移動が認められる. したがって何らかの反応で  $\text{SiO}(\text{g})$  が  $\text{SiO}_2$  となり, ダスト中に採取されたものと考えられる.

粉体吹込みにより,  $\text{SiO}(\text{g})$  が吸収される反応としては (1) 式に示す反応が考えられる<sup>14)</sup>.



(1) 式は  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  の表面で直接  $\text{SiO}(\text{g})$  が  $\text{SiO}_2$  となりスラグ化する反応を示す. Fig. 15 には, (1) 式の反応で  $\text{SiO}_2$  の活量が変化した場合の  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}$  の平衡  $P_{\text{SiO}}$  を示す.

$\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$  の三元系の  $1600^\circ\text{C}$  での  $\text{SiO}_2$  の等活量線<sup>15)</sup> から石灰石吹込み時に採取したダスト中の  $\text{SiO}_2$  の活量を求めると約 0.05 となり, コークス灰分中  $\text{SiO}_2$  に相当する  $P_{\text{SiO}} = 10^{-2.5} \text{ atm}$  では,  $1900 \text{ K}$  で (1) 式が平衡に達する. フラックス中の  $a_{\text{SiO}_2}$  は吹込み時にほとんど零であり, 酸化剤がなくても  $\text{SiO}(\text{g})$  を吸収できる. 吹き込まれたフラックスは高温で直接  $\text{SiO}(\text{g})$  を吸収し, スラグ化して  $a_{\text{SiO}_2}$  を上昇し, レースウェイ外周部で  $a_{\text{SiO}_2} \approx 0.05$  になったものと考えられる. したがって, 混合粉吹込みの場合の  $[\text{Si}]$  の低下はフラックス粉体による  $\text{SiO}(\text{g})$  の直接吸収, スラグ化が主要因であると考えられる.

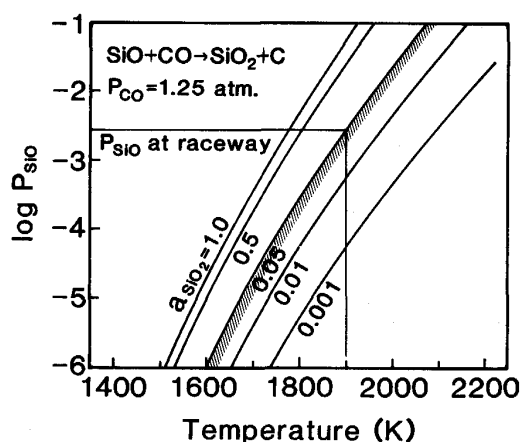


Fig. 15. Relationship among  $P_{\text{SiO}}$ , temperature and  $a_{\text{SiO}_2}$  (equilibrium data).

## 6. 結 言

粉体吹込みによる  $[\text{Si}]$  低下を目的に千葉第 5 高炉で多目的粉体吹込み設備 (MPI) を開発し, 21 日間の操業実験を実施した. その結果より以下の点が明らかになった.

(1) 混合粉  $5.0 \text{ kg-CaO/t}$  の吹込みにより, 約  $0.08\%$  の  $[\text{Si}]$  の低下ができた. 混合粉吹込み時の  $[\text{Si}]$  低下は粉体による  $\text{SiO}(\text{g})$  の直接吸収, スラグ化が主要因と考えられる.

(2) 溶鉄温度を一定に確保しながら, 粉鉱石吹込みにより TFT を低下させ, 低  $[\text{Si}]$  を達成することは, 直接還元熱の補償が必要となるため効果的方法ではない.

(3) コークス比をほぼ一定に保ちながら, 最大  $50.4 \text{ kg/t}$  の粉鉱石吹込みを実施したが, 顕著な  $[\text{Si}]$  の低下は認められなかった. 一方, 粉鉱石の吹込みにより, スラグ中 ( $\text{FeO}$ ),  $[\text{S}]$  が上昇し炉床酸素分圧の上昇が示唆された.

(4) 斜行羽口ゾーンの測定結果によると, 混合粉吹込み時にレースウェイ周辺部に高強度の緻密な層の形成が認められた.

## 文 献

- 1) 春 富夫, 才野光男, 奥村和男, 坂口泰彦, 稲谷稔宏: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 951
- 2) K. KUSHIMA, M. NAITO, K. SHIBATA, H. SATO, H. YOSHIDA, and M. ICHIDA: 47th Ironmaking Conf. Proc., Toronto (1988), p. 457
- 3) Y. de LASSAT and J. A. MICHARD: 7th Process Tech. Conf. Proc., Toronto (1988), p. 203
- 4) 水野 豊, 細井信彦, 元重正洋, 三宅貴久, 中村文夫, 山縣千里: 鉄と鋼, **70** (1984), S35
- 5) M. SAINO, K. OKUMURA, Y. IKEDA and T. MINAKAWA: Iron Steelmaker, **13** (1986) Oct., p. 20
- 6) 武田幹治, 田口整司, 浜田尚夫, 加藤治雄, 中井歳一: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 243
- 7) K. TAKEDA, S. TAGUCHI, T. FUKUTAKE, H. KATO and T. NAKAI: 46th Ironmaking Conf. Proc., Pittsburgh (1987), p. 191
- 8) 成田貴一, 牧野武久, 松本 洋, 彦坂明秀, 勝田順一郎: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1722
- 9) 才野光男, 丸島弘也, 奥村和男, 河合隆成, 一藤和夫, 久保秀徳, 沢田寿郎: 鉄と鋼, **70** (1984), S93
- 10) 小西行雄, 武田幹治, 田口整司, 浜田尚夫: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2004
- 11) K. TANAKA, K. OKUMURA, M. SAINO, T. HARU and M. YASUNO: Iron Steelmaker, **11** (1984) April, p. 28
- 12) 徳田昌則: 第 116・117 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1987), p. 199
- 13) 石井邦彦, 中島龍一, 岸本純幸, 山口 篤, 堀田裕久, 下村昭夫: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 93
- 14) B. OZTURK and R. J. FRUEHAN: Metall. Trans. B, **17** (1986), p. 397
- 15) J. F. ELLIOTT: Trans. Met. Soc. AIME, **203** (1955), p. 485