

## 高炉羽口部からの粉鉱石吹込み量の上限

山口一良\*・上野浩光\*・内藤誠章\*<sup>2</sup>・田村健二\*<sup>2</sup>

## Maximum Injection Rate of Fine Ore through Tuyeres into Blast Furnace

Kazuyoshi YAMAGUCHI, Hiromitsu UENO, Masaaki NAITO and Kenji TAMURA

## Synopsis:

In order to obtain the maximum fine ore injection rate, an experimental apparatus capable of simulating the heat transfer and reaction in the lower part of the blast furnace was built. This apparatus is 0.90 m<sup>3</sup> in inner volume, is a 90° sector in cross section, is one-fifth of the actual blast furnace in height and is equipped with one tuyere.

As a result of the fine ore injection through the lance which was inserted through the blow pipe, the maximum fine ore injection rates at which the desired deadman temperature can be maintained were experimentally determined as shown below. The maximum fine ore injection rate in the actual blast furnace is expected to be higher than those measured here.

- The injection of the 0% prereduced fine ore alone is difficult.
- 70 g/Nm<sup>3</sup> for injection of the 0% prereduced fine ore mixed with the same amount of pulverized coal.
- 175 g/Nm<sup>3</sup> for injection of the 60% prereduced fine ore alone.
- 115 g/Nm<sup>3</sup> for injection of the 60% prereduced fine ore mixed with the same amount of pulverized coal.

**Key words:** ironmaking; blast furnace process; iron ore injection; pulverized coal injection; prereduction of ore; raceway; deadman.

## 1. 緒 言

高炉羽口部からの粉鉱石吹込みの研究は、ラボテスト<sup>1)</sup>、実高炉における数本~10数本の羽口部からの吹込み試験<sup>2)~5)</sup>が行われているが、いずれも吹込み原単位が 50 kg/t-pig 程度にとどまり、溶銑中 Si 濃度低減を目的としたものである。高炉の生産性向上、生産弾力性拡大はますますそのニーズが高まっており、羽口部からの粉鉱石吹込み、とくに 100 kg/t-pig 以上の吹込みは、このニーズに応える手段として非常に有望である。さらに炉頂より装入される焼結鉱減少による焼結鉱生産負荷軽減、微粉炭多量吹込み時におけるシャフト部の鉱石とコークスの装入比率 (Ore/Coke) 軽減の手段にもなる。

しかし粉鉱石 100 kg/t-pig 以上の吹込みの研究は、プラズマアークヒーターによる送風温度上昇を前提とした予備還元鉱石吹込みが行われているのみで<sup>6)</sup>、通常の熱風炉による送風下における研究、とくに吹込み限界に関する研究はほとんど見当たらない。

本報告では、通常の熱風炉による送風下における粉

石吹込みの研究を行うために、高炉下部を模擬できる実験装置を用いた実験結果を解析し、粉鉱石の吹込み限界を決定する要因およびその要因によって決まる限界量について検討した。

## 2. 熱・物質収支モデルによる粉鉱石吹込み限界量の推定

粉鉱石吹込み実験に先立って、高炉の熱・物質収支モデルを作成し、送風条件と粉鉱石吹込み限界量の関係を推定した。Fig. 1 に本モデルで用いた高炉の領域分割を示す。従来の熱・物質収支では、ガスと固体の温度がほぼ等しくなる 1000°C で高炉を上下に 2 分割しているが、今回新たにレースウェイ近傍を一領域とし (Fig. 1 の L ゾーン)、通常の入出熱項目に加えて、この領域の炉体放散熱、および羽口部より吹き込まれた粉鉱石はこの領域で還元溶解を完了するとし、その顕熱、反応熱を考慮した。また炉頂より装入された鉱石の還元溶解は従来の領域 (Fig. 1 の U<sub>A</sub>, U<sub>B</sub> ゾーン) で完了し、L ゾーンでは起こらないとした。

オールコークス時の操業諸元をベースに、炉体放散熱

平成 2 年 9 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 10 月 8 日受付 (Received Oct. 8, 1990)

\* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

Table 1. Maximum injection rate of fine ore estimated by a mathematical model.

| Prereduction degree (%) | Blast temperature (°C) | Blast humidity (g/Nm <sup>3</sup> ) | Oxygen enrichment (%) | Fine ore conc. (g/Nm <sup>3</sup> ) | Fine ore rate (kg/t-pig) | Coke rate (kg/t-pig) | Top gas temperature (°C) |
|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| —                       | 1 100                  | 36                                  | 0                     | 0                                   | 0                        | 500                  | 150                      |
| 0                       | 1 300                  | 5                                   | 0.14                  | 141                                 | 160                      | 492                  | 100                      |
| 33                      | 1 300                  | 5                                   | 0                     | 167                                 | 186                      | 474                  | 100                      |
| 60                      | 1 300                  | 5                                   | 0                     | 206                                 | 220                      | 450                  | 100                      |

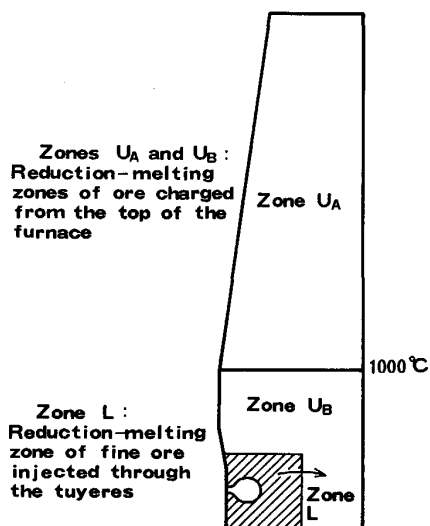


Fig. 1. Division of the blast furnace into zones for developing a mathematical model.

は不変であるとした。また  $U_B$  ゾーンより  $L$  ゾーンに流入するコークス温度はオールコークス時に  $1600^\circ\text{C}$  と計算されるが、この値も不変であるとした。粉鉱石吹込み時に送風温度上昇で熱補償を行い、酸素富化でフレーム温度を調整し、炉頂ガス温度の下限を  $100^\circ\text{C}$  とし、さらにコークス比を調整した。フレーム温度をオールコークス時と同じ  $2100^\circ\text{C}$  とし、送風温度を  $1300^\circ\text{C}$  としたときの粉鉱石吹込み限界量の計算結果を Table 1 に示す。予備還元率を 60% まで上昇させると、原単位で  $220\text{ kg/t-pig}$  (濃度で  $206\text{ g/Nm}^3$ ) と大量に吹き込めることが予想された。

### 3. 実験装置および実験方法

前述した熱・物質収支モデルによって推定された粉鉱石吹込み限界量を検証するために、高炉炉下部の反応伝熱を模擬できる実験装置を製作した。Fig. 2 に装置の概要を示す。本装置は断面が  $90^\circ$  扇形で羽口 1 本を装備している。羽口より上が  $2000\text{ mm}$ 、羽口より下が  $1000\text{ mm}$ 。羽口レベルの奥行きが  $600\text{ mm}$  であり、内容積は約  $0.90\text{ m}^3$  である。本装置の寸法決定に先立ち、 $1550^\circ\text{C}$  のコークス充填層中のスラグ通過時間に及ぼすコークス粒度の影響を調査し、 $8\text{ mm}$  より小さくなると通過時間が急増する実験事実を踏まえ、スラグのコーク

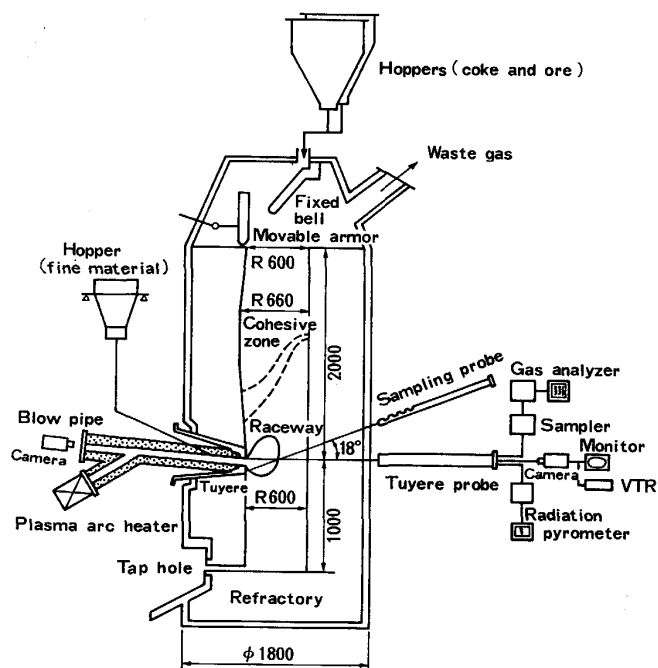


Fig. 2. Schematic illustration of an experimental apparatus.

ス充填層中の通液性を阻害しないコークス粒度として  $10\text{ mm}$  ( $9\sim 13\text{ mm}$ ) を採用した。したがって実高炉のコークス粒度 ( $50\text{ mm}$ ) に対する縮尺は  $1/5$  となり、鉱石粒度は  $4\text{ mm}$  ( $3\sim 5\text{ mm}$ ) とした。羽口より上部の炉体プロフィールは実高炉 (内容積  $3000\text{ m}^3$ ) の  $1/5$  とし、シャフト下段より炉下部を製作した。

炉頂よりコークス、鉱石を装入し、羽口よりプラズマアークヒーターで加熱した熱風を送って製錬を行い、炉底より出鉄滓を行った。粉体粒径は実高炉と同一としたが、供給系の詰まり防止のため全量  $100\text{ }\mu\text{m}$  以下に粉碎し、代表粒径 (重量の 80% が含まれる最大粒径) は約  $50\text{ }\mu\text{m}$  である。ランスを送風支管側壁部より挿入し、ランス先端を羽口先端より  $100\text{ mm}$  手前の位置に設置して粉体を吹き込んだ。羽口には耐火性断熱リング (直径  $30\text{ mm}$ ) を装着し、レースウェイ深度は実測で約  $250\text{ mm}$  である。反羽口側よりゾンデ類を挿入し、测温、ガス分析、観察、試料採取を行った。また羽口視孔部にカメラ、温度計を設置し、レースウェイ観察、测温を行った。

本装置は羽口 1 本のため、後述するように炉芯内温度は実高炉より低い、炉芯角度は  $70^\circ$  で実高炉<sup>7)</sup> とほぼ

Table 2. Experimental conditions.

| Fine material          | Prereduction degree(%) | Blast temp. (°C)                      | Blast humidity (g/Nm <sup>3</sup> ) | Oxygen enrichment(%)         | Fine material conc.(g/Nm <sup>3</sup> ) | Fine material rate(kg/t-pig)          | Coke rate (kg/t-pig)                  | Flame temp. (°C)                                    |
|------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| All coke               | —                      | 1 090~1 120                           | 1~6                                 | 0                            | 0                                       | 0                                     | 593~601                               | 2 392~2 475                                         |
| Ore alone              | 0<br>0                 | 1 220<br>1 320, 1 300                 | 2<br>2, 5                           | 0<br>0, 1                    | 63<br>135, 169                          | 104<br>206, 270                       | 588<br>583, 610                       | 2 337<br>2 238, 2 148                               |
| Ore & coal mixture(*1) | 0<br>0                 | 1 270, 1 285<br>1 330, 1 340, 1 345   | 2<br>2                              | 0<br>0, 2, 5, 4              | 66, 91<br>136, 183, 263                 | 107, 159<br>203, 267, 336             | 518, 525<br>461, 457, 438             | 2 360, 2 286<br>2 225, 2 212, 2 212                 |
| Ore alone              | 60<br>60               | 1 225<br>1 320, 1 315, 1 330          | 6<br>2, 2, 6                        | 0<br>0                       | 79<br>158, 166, 169                     | 142<br>170, 211, 255                  | 603<br>432, 487, 540                  | 2 334<br>2 322, 2 303, 2 288                        |
| Ore & coal mixture(*1) | 60<br>60<br>60         | 1 260<br>1 305, 1 310, 1 310<br>1 320 | 6<br>6, 5, 5<br>1                   | 0.8<br>0, 0, 2, 9<br>0, 3, 6 | 163<br>163, 172, 277<br>177, 274, 349   | 258<br>266, 354, 560<br>294, 368, 395 | 438<br>436, 508, 477<br>428, 385, 362 | 2 171<br>2 163, 2 159, 2 116<br>2 180, 2 157, 2 177 |

(\*1) Mixing rate (weight)=1:1

Blast flow rate = 130 Nm<sup>3</sup>/h

Table 3. Chemical compositions of fine ore and pulverized coal (Dry base; unit, %).

| Material         | T. Fe | M. Fe | FeO   | CaO  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | Prereduction degree |
|------------------|-------|-------|-------|------|------------------|--------------------------------|------|---------------------|
| Fine ore (Ore M) | 68.12 | —     | 0.20  | 0.02 | 0.78             | 0.46                           | 0.13 | 0.0                 |
| Fine ore (Ore R) | 76.65 | 38.72 | 29.91 | 0.30 | 5.61             | 2.78                           | 0.46 | 60.0                |
| Fine ore (Ore C) | 78.33 | 38.41 | 32.20 | 0.43 | 2.93             | 0.93                           | 0.51 | 60.0                |

| Material        | C     | H    | O    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ash  | Volatile matter | Fixed C |
|-----------------|-------|------|------|------------------|--------------------------------|------|-----------------|---------|
| Pulverized coal | 74.10 | 4.70 | 8.50 | 5.41             | 3.10                           | 10.4 | 32.4            | 57.2    |

等しい。また小西らによると<sup>1)</sup>、モデルと実高炉の粉体温度、飛翔時間は概略相似にすることが可能であり、田村らの1次元数学モデル<sup>8)</sup>で確認した。粉体のレースウェイ内滞留時間は、本装置で4 ms、実高炉で9 msと極めて短く、小西らの計算結果<sup>1)</sup>にはほぼ等しい。

実験時の操業条件をTable 2に示す。オールコークス時の送風温度1100°C、送風湿度5 g/Nm<sup>3</sup>、酸素富化0%、フレイム温度2400°C、コークス比600 kg/t-pigを基準とした。粉体吹込み時は熱補償として送風温度上昇を実施し、フレイム温度が2100~2300°Cとなるように酸素富化を行った。なおフレイム温度はRammの式を用い、レースウェイに降下するコークスの温度をフレイム温度の0.75倍として計算したものであり、熱収支をとるときに粉鉱石の還元熱、金属鉄および脈石の昇温溶解熱を考慮した。

Table 3に使用した粉体の化学組成を示す。粉鉱石は予備還元率0%のM鉱石、予備還元率60%のR、C鉱石の3種類、微粉炭は揮発分32.4%の1種類である。なおR、C鉱石の反応伝熱挙動（後述するフレイム温度に対するレースウェイ内コークス温度の比）に差が見られなかったため、以後の解析には種類を明示していない。羽口部より粉体を吹き込むときには、粉鉱石の場合は還元熱、金属鉄および脈石の昇温溶解熱が、微粉炭の場合は分解熱、灰分の昇温溶解熱が必要であり、Table 3より、M鉱石で3.59 MJ/kg-ore、R、C鉱石で2.31

MJ/kg-ore、微粉炭で1.60 MJ/kg-coalと計算される。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 レースウェイ内における熱補償達成時の吹込み限界

###### 4.1.1 レースウェイ内における熱補償達成の判定基準

予備還元率0%の粉鉱石を吹き込むときに熱補償として送風温度上昇を行い、反羽口側よりファイバースコープ搭載ゾンデを挿入して測定した、レースウェイ内および炉芯内のコークス温度をFig. 3に示す。田村ら<sup>9)</sup>の式による計算レースウェイ深度は、粉鉱石吹込み量104 kg/tのとき295 mm、202 kg/tのとき315 mmと若干増加し、実験終了後の炉内容物冷却解体時に測定した実測深度は250 mmであった。コークス温度はレースウェイ先端より炉芯内に入ると急速に低下し、1300°C程度になっている。

送風温度を100°C上昇させ粉鉱石吹込み量104 kg/t（△印、粉体濃度63 g/Nm<sup>3</sup>）の場合は、フレイム温度が138°C低下しているが、レースウェイ内コークス温度はオールコークス時とほぼ同じかむしろ高い。しかし送風温度を200°C上昇させた粉鉱石吹込み量202 kg/t（□印、粉体濃度135 g/Nm<sup>3</sup>）の場合は、フレイム温度が237°C低下し、レースウェイ内コークス温度は大幅に低下した。

| Mark | Fine ore rate (kg/t) | Blast temp. (°C) | Flame temp. (°C) | Coke rate (kg/t) |
|------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| ○ ●  | 0                    | 1120             | 2475             | 601              |
| △    | 104                  | 1220             | 2337             | 588              |
| □    | 202                  | 1320             | 2238             | 573              |

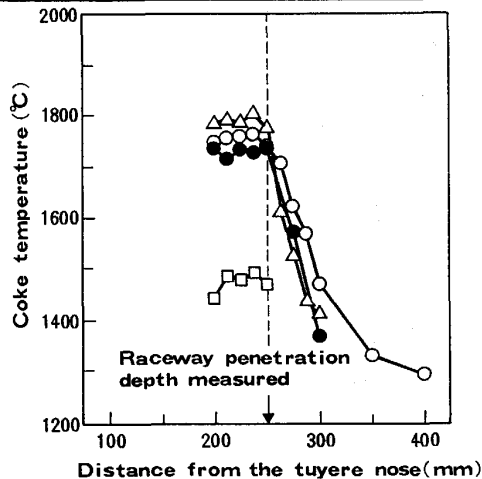


Fig. 3. Coke temperature measured in the raceway and deadman (injection of 0% prereduced fine ore).

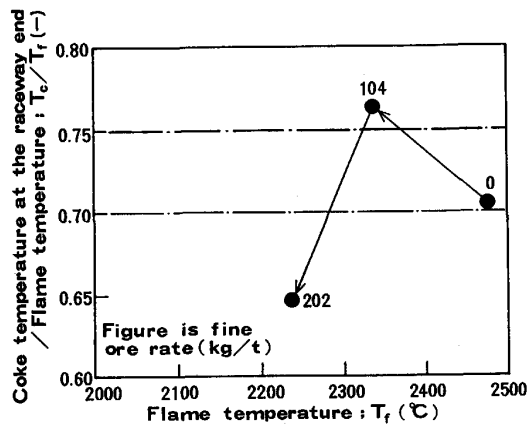


Fig. 4. Relationship between the flame temperature  $T_f$  and the ratio of coke temperature  $T_c$  to flame temperature  $T_f$  ( $T_c/T_f$ ) (injection of 0% prereduced fine ore).

Fig. 3 によると、レースウェイ内コークス温度は羽口先端から 200 mm 位置よりレースウェイ先端 (250 mm) までほぼ一定であるから、代表温度として 200 mm 位置を採用しレースウェイ内コークス温度 ( $T_c$ ) とした。Fig. 4 にフレイム温度 ( $T_f$ ) に対する  $T_c/T_f$  をプロットした。Ramm の式の仮定によると  $T_c/T_f = 0.75$  であり、オールコークス時の実測結果は約 0.70 とやや小さいが、オールコークス時に数回実測した  $T_c/T_f$  は 0.70~0.75 の範囲に入っており、上述の仮定にほぼ一致する。 $T_c/T_f = 0.75$  を満足する (上述の仮定が成立する) ときに、粉鉱石吹込み時のレースウェイ内熱補償

Table 4. Heat balance in the raceway with fine ore injection.

(a) Ordinary heat balance

|                               | Fine ore injection rate |                 |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------|
|                               | 104 kg/t-pig            | 202 kg/t-pig    |
| Increase of blast temperature | 100°C                   | 200°C           |
| Heat input                    | 2.52 MJ/kg-ore          | 2.31 MJ/kg-ore  |
| Increase of coke rate         | 32 kg/t-pig             | 59 kg/t-pig     |
| Heat input                    | 2.69 MJ/kg-ore          | 2.59 MJ/kg-ore  |
| Sum of heat input             | 5.21 MJ/kg-ore          | 4.90 MJ/kg-ore  |
| Heat required (output)        | 3.59 MJ/kg-ore          | 3.59 MJ/kg-ore  |
| Heat (input-output)           | +1.62 MJ/kg-ore         | +1.31 MJ/kg-ore |

(b) Corrected heat balance

|                               | Fine ore injection rate |                 |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------|
|                               | 104 kg/t-pig            | 202 kg/t-pig    |
| Increase of blast temperature | 100°C                   | 200°C           |
| Heat input                    | 2.52 MJ/kg-ore          | 2.31 MJ/kg-ore  |
| Increase of coke rate         | 32 kg/t-pig             | 59 kg/t-pig     |
| Heat input (corrected)        | 1.08 MJ/kg-ore          | 1.04 MJ/kg-ore  |
| Sum of heat input             | 3.60 MJ/kg-ore          | 3.35 MJ/kg-ore  |
| Heat required (output)        | 3.59 MJ/kg-ore          | 3.59 MJ/kg-ore  |
| Heat (input-output)           | +0.01 MJ/kg-ore         | -0.24 MJ/kg-ore |

が達成されたと仮定する。Fig. 4 によると、粉鉱石吹込み量 104 kg/t のときは熱補償が達成されているが、202 kg/t のときは未達成である。

#### 4.1.2 入熱の有効利用率の算出

Fig. 3 における粉鉱石吹込み時にレースウェイ内熱収支をとると、Table 4 (a) に示すように、吹込み量が 104 kg/t、202 kg/t のどちらも粉鉱石の所要熱 (還元熱、金属鉄および脈石の昇温溶解熱) は送風温度上昇とコークス比増加により補償されている。ここでコークス燃焼熱として  $C + 1/2 \times O_2 = CO + 10.25 \text{ MJ/kg-C}$  を採用した。炉頂装入鉄鉱石分のコークス比をオールコークス時と同じとし、残りを粉鉱石分のコークス比増加として計上した。

Fig. 4 において吹込み量が 202 kg/t のときの熱補償未達成を説明するために、入熱が粉鉱石の還元溶解等に全量利用されないと仮定し、送風温度上昇の利用率为 100% としたときのコークス比増加の利用率为算出した。吹込み量 104 kg/t のとき  $T_c/T_f$  が約 0.75 であるから、熱補償達成の限界であるとして入熱=出熱とすると、コークス比増加の有効利用率は 40% と計算される。Table 4 (b) に有効利用率を 40% としたときの修正熱収支を示す。

コークス比増加時はコークス燃焼により CO ガスが生成し、残りの 60% (粉鉱石吹込み量 202 kg/t-pig の場合、 $2.59 \times 0.60 = 1.55 \text{ MJ/kg-ore}$ ) は生成 CO ガスがフレイム

温度まで加熱される必要熱 (1.59 MJ/kg-ore) として利用され、40% だけが粉鉱石の還元溶解等に利用されるという熱精算結果となった。コークス比増加の有効利用率を 40% とし、微粉炭吹込み時の測温結果より同一手法を用いると、微粉炭比増加の有効利用率は 60% と計算される。この値は熱精算結果よりも高く、微粉炭がレースウェイ内に進入する前に一部燃焼して粉鉱石を加熱する効果を反映しているものと思われる。

#### 4.1.3 粉鉱石単味吹込み時の限界

前述した入熱の有効利用率を用いると、レースウェイ内で熱補償が達成される吹込み限界量が計算できる。計算の前提として次に示す条件を仮定した。

1) オールコークス時の送風温度を  $1100^{\circ}\text{C}$  とし、粉鉱石吹込み時に送風温度を上昇する。酸素はフレイム温度 ( $T_f$ ) 調整のために富化し、送風温度  $1200^{\circ}\text{C}$  のときに  $T_f = 2200^{\circ}\text{C}$ 、送風温度  $1300^{\circ}\text{C}$  のときに  $T_f = 2100^{\circ}\text{C}$  とする。

2) 送風温度上昇だけで熱補償が不十分のときにはコークス比を増加する。炉頂ガス温度が一定となるように送風温度とコークス比のバランスをとる。

計算結果を Fig. 5(a), 6(a) に示すが、実高炉で達成可能な送風温度  $1300^{\circ}\text{C}$  では、予備還元率 0% の粉鉱石で  $175\text{ g/Nm}^3$ 、予備還元率 60% の粉鉱石で  $267\text{ g/Nm}^3$  となる。限界量を原単位 (kg/t) ではなく濃度 ( $\text{g/Nm}^3$ ) で表示したのは、燃料比のレベルによって原単

位が異なるためである。Fig. 5(a), 6(a) には、熱補償が達成されたときの実験結果をプロットしてある。予備還元率 0% の粉鉱石吹込み時に計算された限界量にはほぼ等しい実績が得られており、前述した限界量算出の妥当性が示されている。

なおここで計算された吹込み限界量は、前述した熱物質収支モデルで推定された値よりも大きいのが、これはレースウェイ内コークス温度を  $1470\sim 1575^{\circ}\text{C}$  ( $T_f$  の 0.70~0.75 倍) と熱物質収支モデル ( $1600^{\circ}\text{C}$ ) よりも低くしたことによるもので、コークス温度を合わせると両者の推定値はほぼ一致し、熱物質収支モデルの推定は妥当である。

#### 4.1.4 微粉炭との混合吹込み時の限界

粉鉱石に微粉炭を事前に混合して吹き込む有利性については後述するが、前述した方法と同様に混合粉体の吹込み限界量を計算できる。計算の前提として次に示す条件を追加した。

3) 微粉炭吹込み量は、送風温度  $1200^{\circ}\text{C}$  のときに  $84\text{ g/Nm}^3$  (送風原単位  $1200\text{ Nm}^3/\text{t}$  のとき原単位  $100\text{ kg/t-pig}$ )、送風温度  $1300^{\circ}\text{C}$  のときに  $167\text{ g/Nm}^3$  (同  $200\text{ kg/t-pig}$ ) とする。

計算結果を Fig. 5(b), 6(b) に示すが、送風温度

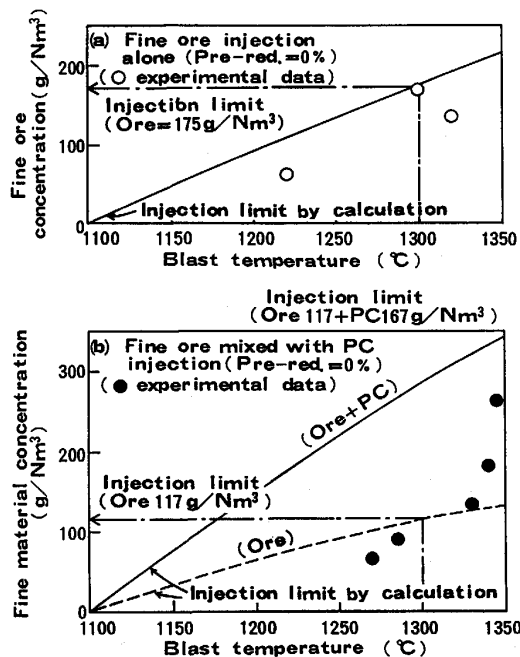


Fig. 5. Maximum injection rate for 0% prereduced fine ore alone and for 0% prereduced fine ore mixed with pulverized coal.

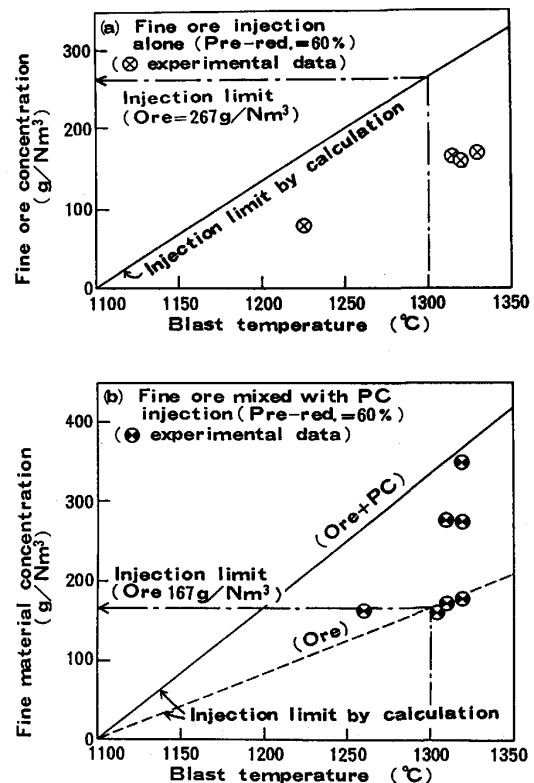


Fig. 6. Maximum injection rate for 60% prereduced fine ore alone and for 60% prereduced fine ore mixed with pulverized coal.

1300°Cでは、予備還元率0%の粉鉱石で117 g/Nm<sup>3</sup>、予備還元率60%の粉鉱石で167 g/Nm<sup>3</sup>となる。粉鉱石と微粉炭を混合して吹き込むことにより、両者を合わせた粉体吹き込み限界量は増加するが、粉鉱石量で比較すると単味吹き込みよりも限界量は低下している。Fig. 5 (b), 6 (b)には、熱補償が達成されたときの実験結果をプロットしてある。粉鉱石と微粉炭の混合割合は重量比率で1:1であり、プロットは両者の合計である。

#### 4.2 炉芯内温度維持可能な吹き込み限界

レースウェイ内で熱補償が達成される操作条件で実験したときに、炉芯内温度が低下する現象がみられた。ここで炉芯内温度はFig. 2において、羽口レベルの羽口先端より600 mm奥（反羽口側の炉壁面位置）に設置した温度計の指示値を採用した。実高炉における炉床径はレースウェイ深度の約6倍であるが<sup>7)</sup>、本装置では約2.5倍と小さいため、上述の炉芯内温度は実高炉における炉芯表層部付近の温度に相当する。

炉芯内温度が低下する原因は、実験終了後の炉内容物の冷却解体時に、レースウェイ奥に粉の堆積がみられることから、吹き込まれた粉鉱石とレースウェイ内で旋回したコークスより発生した粉がレースウェイ奥に堆積し、この部分の通気性を阻害することによると思われる。

実験結果によると、レースウェイ内で熱補償が達成される限界吹き込み量よりも小さい値で炉芯内温度が低下している。よって操作条件としてレースウェイ内で熱補償が達成される条件を採用し、粉体吹き込み量を変化させた実験を実施して、炉芯内温度が低下しはじめる吹き込み量を限界と仮定した。

##### 4.2.1 粉鉱石単味吹き込み時の限界

Fig. 7 (○印)に、予備還元率0%の粉鉱石単味吹き込み時の粉体濃度と炉芯内温度の関係を示す。炉芯内温度は粉鉱石吹き込み1~2 hの安定したときの値を採用した。この図によると、吹き込み量の増加とともに炉芯内温度は単調に低下し、オールコークス時の値を維持できる吹き込み量が存在しない。炉芯内温度が低下しはじめる吹き込み量が限界との仮定に基づくと、予備還元率0%の粉鉱石単味吹き込みは困難である。

一方、予備還元率60%の粉鉱石の場合は、Fig. 8 (⊗印)に示すように、吹き込み量が175 g/Nm<sup>3</sup>まではオールコークス時の炉芯内温度よりも高く、その後温度低下が起こり、この値が吹き込み限界となる。予備還元された粉鉱石がレースウェイ奥に堆積しない理由は、粉鉱石中にFeOが多量に存在するためレースウェイ内に進入する前に一部溶解し（羽口視孔部設置のカメラにより、溶解した粉鉱石が羽口断熱リングに付着する現象を確認）、

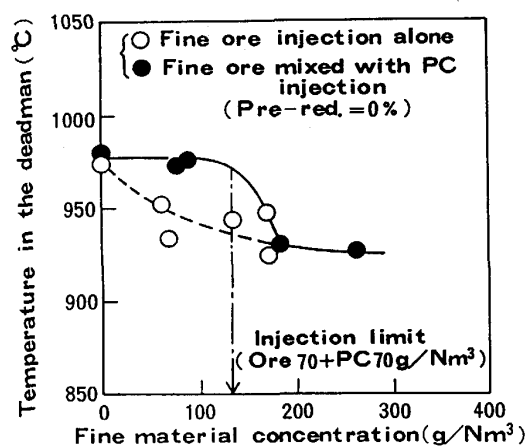


Fig. 7. Relationship between the fine material concentration and the deadman temperature during injection of 0% prereduced fine ore alone or mixed with pulverized coal.

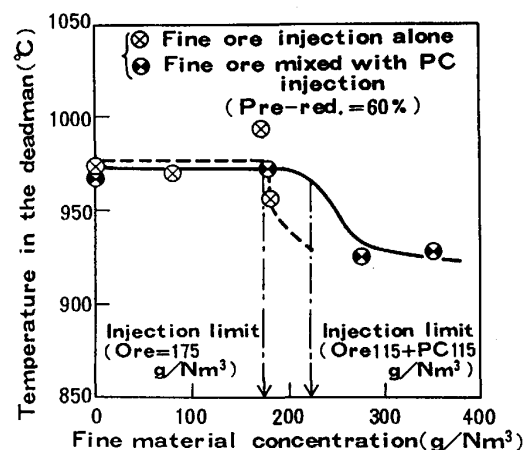


Fig. 8. Relationship between the fine material concentration and the deadman temperature during injection of 60% prereduced fine ore alone or mixed with pulverized coal.

レースウェイ内に進入後速やかに溶解することによると思われる。

##### 4.2.2 微粉炭との混合吹き込み時の限界

Fig. 7 (●印)に示すように、予備還元率0%の粉鉱石に同量の微粉炭を混合して吹き込んだ場合は、オールコークス時の炉芯内温度を維持できる吹き込み量が存在する。限界量を温度維持点と低下開始点の中間点とすると、この値は粉鉱石で70 g/Nm<sup>3</sup>であり、レースウェイ内で熱補償が達成される限界量の約1/2に近い。吹き込み限界量が存在する理由は、混合された微粉炭がレースウェイに進入する前に一部燃焼して高温ガスを生成し、粉鉱石の加熱を促進し、レースウェイ内に進入後の溶解が速やかなことによるものと思われる。

一方予備還元率60%の粉鉱石の場合も、Fig. 8 (●印)に示すように、同量の微粉炭を混合すると、吹

込み量が粉鉱石で  $115 \text{ g/Nm}^3$  まではオールコークス時の炉芯内温度を維持できており、この値が吹込み限界量となる。

実高炉の炉芯内温度は  $1400^\circ\text{C}$  以上あり<sup>7)</sup>、本装置の値 (Fig. 7, 8 によると  $975^\circ\text{C}$  程度) よりも高いが、これは本装置が羽口 1 本のためである。本装置の炉芯内コークス (9~13 mm) の空隙率は 0.47 であり、実高炉の粒径 (35~40 mm 程度)<sup>10)</sup> の空隙率にはほぼ等しく、かつ粉鉱石粒径は実高炉と同じでありコークス空隙に比べて十分に小さいから、炉芯内コークス中への粉の堆積状況は同一と考えられる。したがって、本装置で求められた吹込み限界量は実高炉に適用できるが、実高炉の炉芯熱容量が大きいことを考慮すると、本装置の限界量は最少値であり、実高炉ではより高くなる可能性があるので実高炉での検証が望ましい。

なお本装置で粉鉱石粒度は変化させていないが、前述のように粉鉱石のレースウェイ内滞留時間が極めて短いため、粒度が増大すると溶融が遅れて炉芯内への堆積量が増加し、吹込み限界量が低下する可能性がある。

#### 4.3 微粉炭との混合吹込みの有利性

予備還元率 0% の粉鉱石に微粉炭を混合して吹き込むことにより、ある吹込み量までは炉芯内温度を維持できるといふ、微粉炭との混合吹込みの有利性については前述したが、本節ではそのほかの有利性について述べる。

##### 4.3.1 炉下部通気性の改善

Fig. 9 に、予備還元率 60% の粉鉱石吹込み時の粉体濃度に対する炉下部通気抵抗の関係を示す。炉下部通気抵抗は送風圧力から送風支管内の圧損を差し引いた羽口中心レベルの炉内圧力 (計算値)  $P_1$ 、羽口中心より 500 mm 上の炉壁部炉内圧力 (実測値)  $P_2$ 、ボッシュガス量  $VB$  を用い、 $(P_1^2 - P_2^2)/VB$ <sup>1.7</sup> の式で計算した値を、オールコークス時の値に対する相対値として表示した。この図によると、粉鉱単味吹込み時は  $\otimes$  印に示すように、吹込み量増加に伴う通気抵抗指数増加が著しい。

羽口視孔部に設置したカメラによる観察結果では、吹込み粉鉱石の一部溶解による羽口断熱リングへの付着により、羽口断面積の縮小がみられ、これが通気抵抗指数増加の一因である。そのほかの原因として、Table 3 に示すように吹き込まれた粉鉱石の脈石量が多い (M 鉱石 20 kg/t-Fe に対して、R 鉱石 120 kg/t-Fe) ため、レースウェイ内に進入して上部より落下してくる装入物中の脈石と合体してボッシュスラグ量を増加させた (吹込み粉体濃度  $170 \text{ g/Nm}^3$  のときのボッシュスラグ量は、M 鉱石 260 kg/t-pig, R 鉱石 275 kg/t-pig) ことが挙げられる。これは炉頂よりコークスのみを装入して予備還元

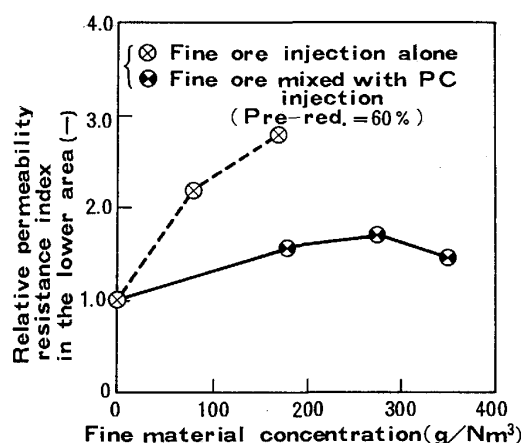


Fig. 9. Relationship between the fine material concentration and the permeability resistance index during injection of 60% prerduced fine ore alone or mixed with pulverized coal.

率 60% の粉鉱石吹込みを行ったときは、羽口断熱リングへの付着はあるものの、Fig. 9 ( $\otimes$ 印) ほど通気抵抗指数が増加しないことによって確認した。

予備還元率 60% の粉鉱石に同量の微粉炭を混合することにより、Fig. 9 の  $\odot$  印に示すように通気抵抗指数が低下し、微粉炭との混合吹込みの有利性が認められた。これは、混合された微粉炭がレースウェイ内に進入する前に一部燃焼して高温ガスを生成し、羽口断熱リングへ付着した粉鉱石を加熱溶解して羽口断面積の縮小を防止する (羽口視孔部に設置したカメラにより確認) とともに、高温ガスがレースウェイ内に進入する前に粉鉱石加熱を促進し、進入後の溶解が速やかになり、レースウェイスラグの流動性が改善されたためと思われる。

なお予備還元率 0% の粉鉱石単味吹込み時には、羽口断熱リングへの付着がなく、脈石量が少ないため通気抵抗指数増加はみられなかった。レースウェイ奥への粉の堆積は炉芯内温度低下 (Fig. 7  $\circ$  印) を招くが、全体の通気抵抗指数増加には至らない程度と思われる。

##### 4.3.2 装入物降性の改善

Fig. 10 に、予備還元率 0% の粉鉱石吹込み時の粉体濃度に対する未溶融鉱石落下頻度の関係を示す。未溶融鉱石落下頻度は、羽口視孔部に設置したカメラで視界に入る未溶融鉱石の落下回数を数え、30 min の落下回数として表示した。この頻度が多いことは、炉頂より装入された鉱石が十分に加熱還元を受けずにレースウェイ内に落下することを示し、装入物降下が不安定であることを意味する。この図によると、粉鉱石単味吹込み時は吹込み量が増加しても落下頻度は変化しないが、同量の微粉炭との混合吹込み時は、吹込み量の増加とともに落下頻度は減少し、装入物降下が安定化している。

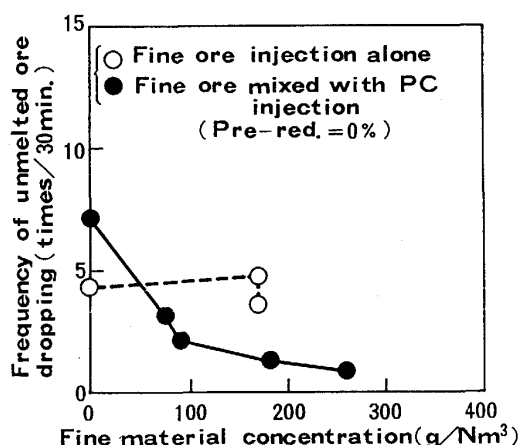


Fig. 10. Relationship between the fine material concentration and the unmelted ore dropping frequency during injection of 60% prereduced fine ore alone or mixed with pulverized coal.

この理由は、微粉炭吹込みにより、固体とガスの熱容量の比率を表す熱流比が低下し（送風温度 1300°C、粉体濃度 170 g/Nm³ のとき、単味吹込み時 0.595、同量の微粉炭との混合吹込み時 0.550；鉄鉱石、コークス、ガスの比熱として、それぞれ 0.21, 0.31 kcal/kg/deg, 0.36 kcal/Nm³/deg を使用）、炉頂より装入された鉱石の加熱還元が十分に行われたことによると思われる。予備還元率 60% の粉鉱石吹込み時にも同様の効果がみられた。

なお微粉炭との混合吹込み時は、実験終了後の冷却時の観察によると、羽口断熱リングの溶損が粉鉱石の予備還元率にかかわらず激しい。本実験ではリング材質としてジルコニアを用いたが、溶損防止のためにはリング材質改善、吹込み位置の変更（ランス先端をさらに羽口先端に近づける）等の対策が必要である。

本装置は羽口径 30 mm と実高炉に比較して小さいが、実高炉でも微粉炭吹込み時に粉体付着がみられるので、結果を実高炉に適用できるものと思われる。また吹込み位置を羽口先端より 15 mm 手前に設置した実験結果では、羽口断熱リングへの付着がなく限界量がほぼ同じであったことから、本装置で求められた吹込み限界量は、リング材質、吹込み位置により変化しないと考えられる。

## 5. 結 言

高炉羽口部からの粉鉱石吹込みの研究を行うために、高炉下部の反応伝熱を模擬できる実験装置を製作して実験を実施することにより、吹込み限界に関する次の結論を得た。

1) 粉鉱石吹込み時のレースウェイ内における熱補償達成が、レースウェイ奥のコークス温度 ( $T_c$ ) とフレー

ム温度 ( $T_f$ ) の比  $T_c/T_f = 0.75$  が満足されたときと仮定し、粉鉱石吹込み時の熱補償方法の有効利用率を計算すると、送風温度上昇を 100% としたときに、コークス比増加は 40%、微粉炭比増加は 60% となる。

2) 上述した有効利用率を用いると、レースウェイ内において熱補償が達成される粉鉱石吹込み限界量が計算でき、実高炉で達成可能送風温度 1300°C の場合に次の値を得た。

○予備還元率 0% 単味……175 g/Nm³

○同微粉炭との混合時…117 g/Nm³ (微粉炭 167 g/Nm³)

○予備還元率 60% 単味…267 g/Nm³

○同微粉炭との混合時…167 g/Nm³ (微粉炭 167 g/Nm³)

3) 上述した吹込み限界量では炉芯内温度が低下するため、実験により炉芯内温度を維持できる吹込み限界量として次の値を得た。ただし実高炉の吹込み限界量はこの値よりも高い可能性がある。

○予備還元率 0% 単味……吹込み困難

○同微粉炭との混合時…70 g/Nm³ (微粉炭 70 g/Nm³)

○予備還元率 60% 単味…175 g/Nm³

○同微粉炭との混合時…115 g/Nm³ (微粉炭 115 g/Nm³)

4) 粉鉱石と微粉炭の混合吹込みは次に述べる有利性をもつことが確認された。

○予備還元率 0% 粉鉱石吹込み時の炉芯内温度維持

○予備還元率 60% 粉鉱石吹込み時の炉下部通気性改善

○装入物降下性の改善 (予備還元率にかかわらず)

## 文 献

- 1) 小西行雄, 武田幹治, 田口整司, 浜田尚夫: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2004
- 2) 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
- 3) 福田隆博, 内藤文雄, 浜田雅彦, 九島行正, 高本 泰, 柴田 清: 鉄と鋼, **71** (1985), S88
- 4) 春 富夫, 才野光男, 奥村和男, 阪口泰彦, 稲谷稔宏: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 951
- 5) 川崎製鉄(株) (私信) 1990 年 9 月
- 6) Y. de LASSAT de PRESSIGNY: Proc. Future Ironmaking Process Symposium, Hamilton, Canada (1990 年 6 月)
- 7) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見影利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, **62** (1976), p. 535
- 8) K. TAMURA, H. UENO, K. YAMAGUCHI, M. SUGATA, S. AMANO and K. YAMAGUCHI: Proc. the 6th International Iron and Steel Congress, Nagoya (1990)
- 9) 田村健二, 一田守政, 脇元博文, 斧 勝也, 林 洋一: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1980
- 10) 小島鴻次郎, 西 徹, 山口徳二, 仲摩博至, 井田四郎: 鉄と鋼, **62** (1976), p. 570