

論 文

高炉操業におよぼす焼結鉄還元粉化性状の影響

岩 永 祐 治*

Influence of Size Degradation of Sinter on the Blast Furnace Operation

Yuji IWANAGA

Synopsis :

Fundamental experiments on the degradation of sinter during reduction were carried out and the correlation between the reducing conditions and the degree of size degradation was evaluated quantitatively. On the basis of these results, the size degradation of sinter in the blast furnace was estimated and the influences of size degradation on the blast furnace operation were investigated.

(1) The effects of reducing conditions can be summarized as follows.

a) At any temperature, the rate of decrease in size is reduced with the increase in reduction degree. When the reducing temperature is below 525°C, the size degradation is related only to the reduction degree and is independent of the reducing temperature.

b) The size degradation becomes remarkable with the increase in initial size before reduction.

c) The CO concentration and the flow rate of reducing gas do not substantially influence the degradation behavior, but exclusively influence the reduction rate.

(2) The decrease in sinter size due to the degradation during reduction lowers the gas permeability in the blast furnace.

(3) When the sinter size in the furnace decreases, the gas utilization becomes worse due to the change in gas flow and the fuel rate increases. On the contrary, when the sinter size becomes excessively large, the fuel rate decreases due to the decrease in reducibility and low gas utilization by the decrease in reduction surface. Therefore, it is expected that the optimum sinter size in the furnace exists.

1. 結 言

高炉操業における低燃料比および安定操業の実現には、装入物の適切なる品質評価に基づく管理が重要な役割を有する。特に配合比率の高い焼結鉄を効果的に使用し、その品質が変動しても安定した炉況に維持する技術の寄与は大きく、高炉操業に対する焼結鉄品質評価技術の確立が望まれている。このためには装入から還元、軟化、滴下を経て鉄生成に至る高炉内における焼結鉄の挙動解明が必要とされる。

さて、高炉の比較的上部で生じる現象として問題となる焼結鉄の還元粉化については、従来から種々の検討が重ねられ多くの研究成果が報告されている^{1)~8)}。しかしながら、いずれも粉化の原因および機構解明を目的としたもので、還元条件と粉化性の関係を定量的に把握するまでには至っていない。一方、高炉内の粉化状況については、高炉の解体調査⁹⁾¹⁰⁾あるいはゾンデ活用による稼動中高炉からの試料採取⁷⁾により検討が加えられている。しかしながら、前者には吹き止め冷却中の粉化およ

び散水による再酸化の影響、後者は採取量の量的制約の面から正確に知ることができていないのが実情である。

著者は高炉内における焼結鉄の粉化挙動解明を目的として、実炉に即した条件下で還元粉化試験を実施し、還元粉化性におよぼす高炉内各要因の影響について系統的に調査し、得られた結果に基づいて還元粉化速度式を導いた。さらに、還元粉化速度式を断面均一高炉モデル¹¹⁾¹²⁾に入力し、高炉内における焼結鉄粒径を算出して、還元粉化性の高炉操業におよぼす影響について検討した。

2. 焼結鉄の還元粉化に関する基礎実験

2.1 実験方法

実験は JIS 還元反応試験装置を使用し試料粒度、還元温度、還元ガス組成、還元ガス流量および焼結鉄の種類を種々変化させ、次の手順で実施した。反応管 (75 mm φ) 内に試料 500 g を充填し、N₂ 雰囲気 (15 Nl/min) 下で所定の温度まで昇温後、反応ガス (CO と N₂ の混合ガス) に切り換えて還元反応をおこなわせる。所定時間経過後 N₂ ガスで室温まで冷却し、ドラム回転試験 (アル

昭和 55 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 56 年 7 月 6 日受付 (Received July 6, 1981)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所波崎研究センター (Hasaki Research Center, Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun 314-02)

Table 1. Characteristics of samples.

| Sample | Chemical composition (%) | | | | | | | | Porosity (%) | RDI (-3 mm%) |
|--------|--------------------------|-----|-----|------------------|-----|-----|--------------------------------|------------------|--------------|--------------|
| | T. Fe | FeO | CaO | SiO ₂ | MgO | MnO | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | | |
| A | 56.3 | 5.6 | 9.6 | 6.5 | 1.7 | 0.2 | 1.7 | 0.4 | 20.5 | 25.7 |
| B | 54.4 | 5.4 | 9.9 | 6.4 | 1.6 | 0.3 | 2.3 | 0.4 | 22.5 | 32.3 |
| C | 54.4 | 4.7 | 8.9 | 7.7 | 1.1 | 0.3 | 2.6 | 0.3 | 23.2 | 39.1 |
| D | 53.9 | 4.5 | 8.9 | 5.6 | 1.3 | 0.3 | 2.1 | 0.4 | 22.9 | 44.1 |

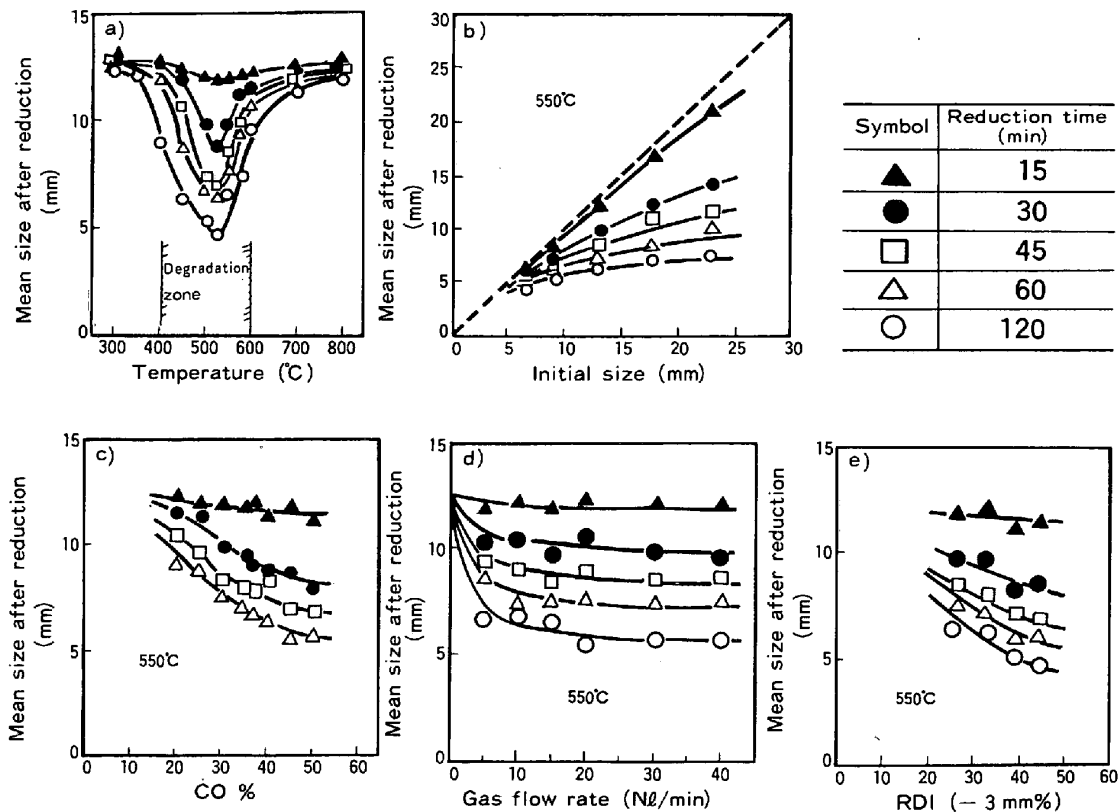


Fig. 1. Effects of reducing conditions on the size degradation of sinter.

ミナ製200 mmφ×220 mm l , 60 rpm×1min) に供した。還元率は回転試験後の試料全量を -3 mm に粉砕してから縮分後, 再度 -200 mesh に粉砕したものの化学分析値から算出した。

実験に供した焼結鉄は四種類で, それらの基礎性状を Table 1 に示す。還元条件の影響調査には焼結鉄 A を用いた。

2.2 実験結果

還元粉化性をドラム試験後の調和平均径で表示して, 還元条件との関係で整理した。結果を一括して Fig. 1 に示す。

2.2.1 還元温度の影響

還元後粒径と温度との関係を, 還元時間をパラメータとして Fig. 1-a) に示す。還元時間が長いほど粉化率が大きいが, いずれの場合も 525°C 近傍における粒径低下が最も顕著で, この温度を境として還元粉化の温度依

存性は逆転している。400°~600°C の温度範囲において, 大きな粒径低下を示す点は従来の報告¹⁾²⁾と一致している。実炉内では, この温度帯における焼結鉄の滞留時間によつて劣化量が支配されることを示唆している。

2.2.2 初期粒径の影響

Fig. 1-b) は初期粒径のみを変化させて実施した還元粉化試験の結果である。還元時間が長くなるとともに粉化が進み, 両者の関係は勾配 45° の直線に対して, だいに下方へ偏倚していく。また, 初期粒径の大きいものほど粒径の低下が顕著で, 還元の進行とともに初期粒径の影響が小さくなり, 粒径均一化の方向に進むことがわかる。一部の解体調査高炉¹⁰⁾において, 層頂部では粒度偏析を生じ, 炉径方向における粒度差が大きいにもかかわらず, 炉下部へ降下するにしたがつて次第に炉径方向の粒度差が小さくなる傾向が認められている。このような変化は, 高炉内では温度分布, ガス流分布に応じた粉

化を呈するが、粗粒部における粒径低下が著しいことに起因しているのではないかと推察される。

2.2.3 ガス組成の影響

シャフト部各レベルのガス組成に対応した粉化量を知るために、初期粒径 10~15 mm, 温度 550°C でガス組成の影響を調べた。還元時間で層別した還元後粒径とガス組成の関係を Fig. 1-c) に示す。CO 濃度の上昇とともに還元粒化性は増大し、その影響は CO 30% 以下の低 CO 濃度領域で大きい。

2.2.4 ガス流量の影響

還元粉化性におよぼすガス流量の影響を把握するために、ガス流量 5~40 Nl/min の範囲で粉化試験をおこなった。結果を Fig. 1-d) に示す。ガス流量が約 10 Nl/min 以上になると、その影響はほとんど認められず一定の粉化量を示すことがわかる。

2.2.5 焼結鉱の種類による還元粉化性の相違

Table 1 に基礎性状を示した四種類の焼結鉱について還元粉化試験をおこなった結果を Fig. 1-e) に示す。還元時間の効果は各焼結鉱とも同様で、還元時間が長くなるほど時間による差が小さくなる。焼結鉱品質としての日常管理値 RDI に着目すると、RDI の高い焼結鉱ほど大きな粉化量を示し、同一還元時間における粒径は小さい。

3. 考 察

3.1 焼結鉱の還元粉化後粒径と還元率との関係

焼結鉱が高炉内各部の温度、ガス組成条件下でどのように破壊されて劣化し、またその粉化量がどの程度なのかを定量的に把握するために、粉化現象を還元率との関係で検討した。結果を Fig. 2 に示す。

いずれの場合も還元後粒径は還元率の増加とともに低下しているが、還元率に対して下に凸な曲線（以下劣化曲線という）となつている。Fig. 2-a) に示すようにこの傾向は低温度になるほど強く、両者の関係は温度に依存して変化する。ただし、還元温度が 525°C 以下ではほぼ同一の曲線で整理され、還元率が等しければ温度に無関係に劣化量が一定となることを示している。換言すれば、劣化量は還元率との関係で一義的に定まり、温度は還元速度を速め粉化を促進させる因子として働いているものと考えられる。

還元進行にともなうこのような粒径変化を、(1)式のように還元率に関する二次式として表すことにする。

$$DS = DS_1 - b \cdot f_s + a \cdot f_s^2 \dots\dots\dots (1)$$

(ただし $dDS/df_s > 0$ のとき $DS = DS_1 - b^2/4a$)

ここで、

DS_1, DS : 還元前および還元後粒径 (mm)

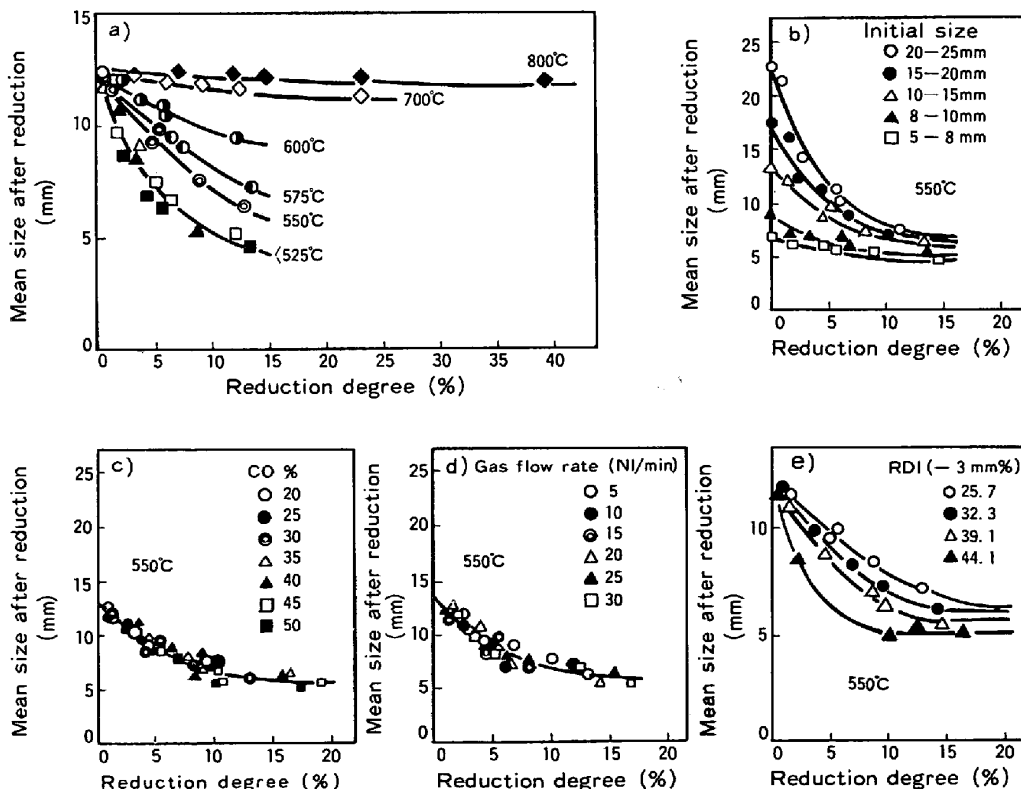


Fig. 2. Relation between the mean size after reduction and the reduction degree.

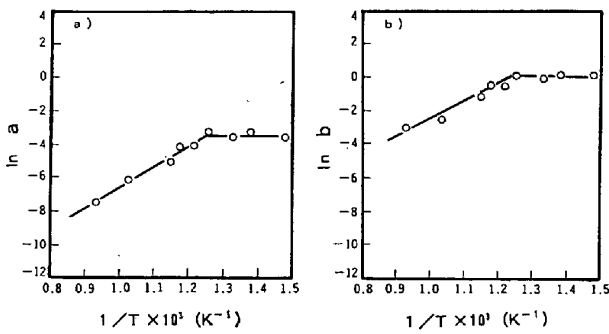


Fig. 3. Effect of reducing temperature on the constants a and b .

f_s : 還元率 (%)

a, b : 焼結鉄の種類, 粒度および還元温度により定まる劣化係数 (-)

各温度における a, b と温度との関係を Fig. 3 に示す。また、これらの関係を表す回帰式として(2)~(4)式が得られた。

$T \geq 798$ で

$$a = \exp(-18.76 + 12\,200/T) \dots\dots\dots (2)$$

$$b = \exp(-12.69 + 10\,210/T) \dots\dots\dots (3)$$

$T < 798$ で

$$a = 0.031 \dots\dots\dots (4)$$

$$b = 1.110 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 T は還元温度 (K) である。

一方、還元粒化性は Fig. 2-b) に示すように初期粒径により異なるために、その効果を補正する必要がある。そこで、初期粒径に差をつけた還元粉化試験結果から(1)式を用いて各初期粒径における劣化係数 a, b を求め、次に初期粒径が 12.75 mm の場合の劣化係数を基準値 ($a_{DS_i=12.75}, b_{DS_i=12.75}$) とし、この基準値との比を求める。この比と粒径比との関係は Fig. 4 に示すように良好な直線関係となることから、初期粒径の効果を(6)、(7)式のように表すことができる。

$$a = a_{DS_i=12.75} \cdot (DS_i/12.75)^{2.31} \dots\dots\dots (6)$$

$$b = b_{DS_i=12.75} \cdot (DS_i/12.75)^{1.89} \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 2-c) によれば、初期粒度、温度およびガス流量が等しい条件下では、CO 濃度が変化してもほぼ同一の劣化曲線で整理される。これらの条件のうち、CO 濃度を増加させた場合には、Fig. 5 に示すように析出炭素の急激な増加が認められた。神原ら¹⁹⁾は炭素析出温度域での保持時間が長いほど還元粉化率が大きいことから、還元粉化の主因は炭素析出であり、これにより還元初期に生じるき裂や気孔が粉化を助長する役割を果たしていると推察している。しかしながら、還元後焼結鉄の顕微鏡観察からは析出炭素が粒の周辺部に多量に沈積している

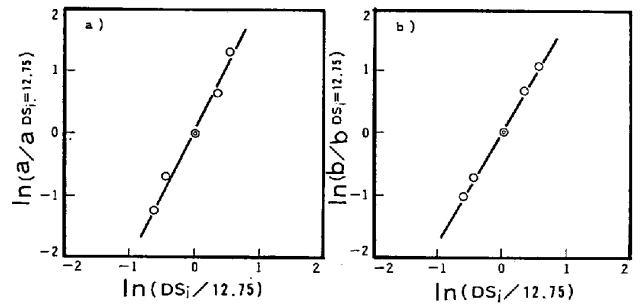


Fig. 4. Effect of sinter size on the constants a and b .

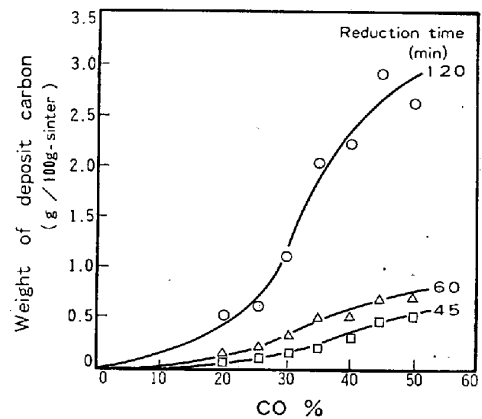


Fig. 5. Relation between the amount of deposit carbon and the CO concentration.

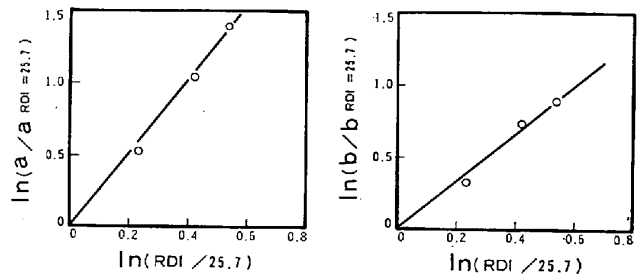


Fig. 6. Difference in constants a and b by the kind of sinter.

が、クラックの奥深くまで達している場合は認められないこと、および Fig. 2-c) に示したようにガス組成が変化しても還元後粒径は還元率との関係で整理できることから、析出炭素の影響は比較的小さいものと判断される。CO 濃度は劣化現象そのものとは本質的に関係なく、単に還元速度のみに影響しているものと推察される。

Fig. 2-e) に示すように、性状の異なる焼結鉄についての劣化曲線によれば、還元率が同じでも RDI の大きな焼結鉄ほど崩壊が著しく、低還元率側で崩壊が終了する傾向が認められる。これまでの場合と同様に、(1)式を適用して各焼結鉄についての劣化係数 a, b を求め、焼結鉄 A (RDI=25.7%) の劣化係数を基準として劣化係

数比と RDI 比の関係を Fig. 6 に示す. 良好な直線関係が認められ, この関係を表す回帰式として (8), (9) 式を得た.

$$a = a_{RDI} = 25.7 \cdot (RDI/25.7)^{2.57} \dots\dots\dots (8)$$

$$b = b_{RDI} = 2.57 \cdot (RDI/25.7)^{1.65} \dots\dots\dots (9)$$

以上より還元劣化曲線は, 還元温度, 初期粒径および焼結鉱の種類の影響を考慮して次式で表すことができる.

$$DS = DS_1 - b \cdot f_s + a \cdot f_s^2 \dots\dots\dots (1)$$

(ただし $dDS/df_s > 0$ のとき $DS = DS_1 - b^2/4a$)

$T \leq 798$ で

$$a = \exp(-18.76 + 12200/T) \cdot (DS_1/12.75)^{2.31} \cdot (RDI/25.7)^{2.57} \dots\dots\dots (10)$$

$$b = \exp(-12.69 + 10210/T) \cdot (DS_1/12.75)^{1.89} \cdot (RDI/25.7)^{1.65} \dots\dots\dots (11)$$

$T < 798$ で

$$a = 0.031 \cdot (DS_1/12.75)^{2.31} \cdot (RDI/25.7)^{2.57} \dots\dots\dots (12)$$

$$b = 1.110 \cdot (DS_1/12.75)^{1.89} \cdot (RDI/25.7)^{1.65} \dots\dots\dots (13)$$

3.2 高炉内における焼結鉱粒径の推定方法

高炉内での焼結鉱の粉化は還元反応および荷重, 摩耗力の影響を受けて生じているものと考えられる. 操業中の粉化量を推定するためには, このような粉化条件を把握した上での粉化速度式を明らかにしておく必要がある. この点に関して, ドラム試験機による粉化試験結果と小倉第二高炉解体調査結果⁹⁾における粉化程度を対比することにより検討した.

3.2.1 粉化速度式

小倉第二高炉吹止め前操業条件⁹⁾に基づいて数式モデルにより計算された炉内温度およびガス組成プロファイルを Fig. 7 に示す. 還元試験をおこなった後, ドラム試験機 (60 rpm) で所定時間回転させた後粒度分布を測定した.

粒径低下率とドラム回転数の関係を Fig. 8 に示す. ドラム回転数を増すごとに粒径低下率は上昇していくが, その上昇の程度は初期において著しく, ドラム回転数が大きい領域ではしだいに小さくなる傾向が認められる. この点を考慮して, 粉化速度の基礎式を (14) 式で与える.

$$dDS/d\theta = -k \cdot DS^n \dots\dots\dots (14)$$

ここで,

θ : ドラム回転数 (-)

k : 粉化速度係数 (-)

n : 定数 (-)

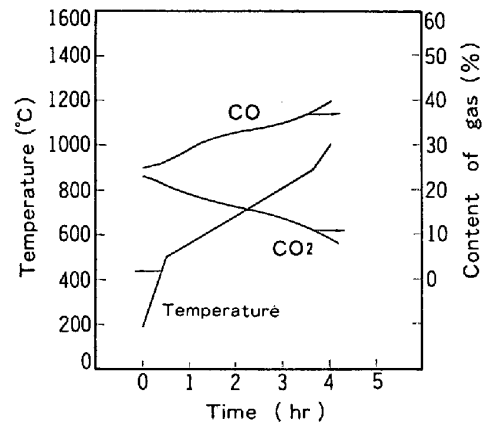


Fig. 7. Experimental conditions.

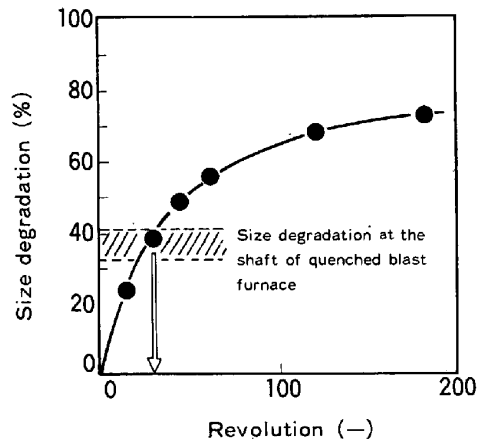


Fig. 8. Relation between the size degradation and the revolution number.

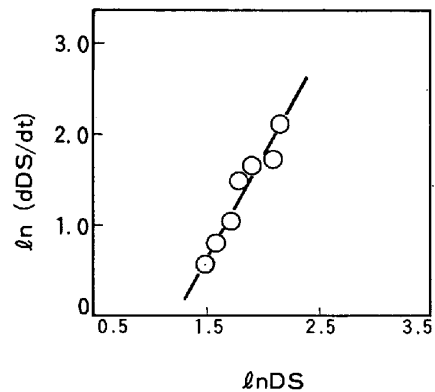


Fig. 9. Relation between the degradation rate and the particle size.

(14)式をドラム回転時間との関係で表すと (15) 式を得る.

$$dDS/dt = -k \cdot r \cdot DS^n \dots\dots\dots (15)$$

ここで, t : ドラム回転時間 (min)

r : ドラム回転速度 (rpm)

実験結果より粉化速度を求め粒径との関係を Fig. 9 に示す. 両者の関係は一つの直線で表され, (15) 式の関

係の成り立つことがわかる。直線の勾配より $n=2.69$ が得られる。

また、(15)式中の粉化速度係数 k は次のようにして導くことができる。(15)式を変形すると、

$$dDS/DS^n = -k \cdot r \cdot dt \dots\dots\dots (16)$$

を得る。初期条件 ($t=0, DS=DS_0$) のもとに上式を積分すると、

$$(DS^{1-n} - DS_0^{1-n}) / (n-1) = k \cdot r \cdot t \dots\dots\dots (17)$$

整理すると、

$$DS = \{DS_0^{1-n} + (n-1)k \cdot r \cdot t\}^{n-1} \dots\dots\dots (18)$$

が求まる。

一方、ドラム回転速度、回転時間一定 ($r=r', t=t'$) 下における粒径の変化は前述の(1)式で表される。したがって、(1)式の右辺は $r=r', t=t'$ のときの(18)式の右辺に等しく、この関係を利用して(1)、(18)式より DS を消去すると、結局 k は(19)式で与えられる。

$$k = \frac{(DS_1 - b \cdot f_s + a \cdot f_s^2)^{1-n} - DS_0^{1-n}}{(n-1) \cdot r' \cdot t'} \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 DS_0 はドラム試験直前の粒径に相当する。ドラム回転試験の前後で粒度分布を測定したところ、粒径と還元率の関係は相対的に不変であることが判明した。この結果 DS_0 は(20)式のごとく還元率に関する二次式として示すことができる。

$$DS_0 = DS_1 - l \cdot (b \cdot f_s - a \cdot f_s^2) \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 l は補正係数 ($=0.4$) である。

このように、(15)式は粉化速度を還元率の関数として表した速度式である。この速度式を時間について積分することにより、その期間中の粉化量を求めることができる。焼結鉱が高炉内で還元されながら炉下部へ降下する時の粉化量を解析する際に利用できるものと考えられる。

3.2.2 高炉内における粉化条件

高炉内における焼結鉱の粉化条件については、ドラム試験による粉化量が解体高炉⁹⁾で得られた値と等量になる回転数をもって、炉内の摩耗条件を再現するものとした。なお検討に際し、次の前提を設けて冷却中の粉化量を算出し、解体調査時の粒径を補正した。

- 1) 吹き止め冷却中の粉化は還元反応のみによつて進行する。
- 2) 吹き止め後の炉内ガス組成は炉頂ガス組成 (CO 11%, CO₂ 14%, N₂ 75%) と同一である。
- 3) 粉化は CO, CO₂ が減少し、O₂ が上昇する吹き止め後 40 h までの還元雰囲気下で進行する。

吹き止め冷却中における粉化量は、(20)式を適用すると還元率の関数として次式のように表される。

$$\Delta DS = l \cdot \{b \cdot (f_0 - f_e) - a \cdot (f_0^2 - f_e^2)\} \dots\dots\dots (21)$$

ここで、

ΔDS : 吹き止め 40h における粒径の低下量 (mm)

f_0 : 吹き止め直後の還元率 (%)

f_e : 解体調査時における還元率 (%)

ところで、解体調査は散水冷却後実施されているために、調査時の実測還元率は再酸化の影響を受けている。そこで、解体調査時の還元率に関しては、散水条件下における再酸化実験結果を用いて(22)式で補正して使用した。

$$f_e' = 1.2 f_e + 4.0 \dots\dots\dots (22)$$

ここで、 f_e' は再酸化の影響を補正した還元率 (%) である。

また、吹き止め直後の還元率および炉内温度分布については、吹き止め前の操業条件に基づいて数式モデルにより得られた計算結果を採用した。なお、冷却中における粉化状況を推定するために冷却パターンが必要となるが、これに関しては Fig. 10 に示すように、放冷による熱放散のみを考慮した非定常伝熱計算の結果を使用した。

以上の諸前提のもとに(22)式を(21)式に代入することにより、吹き止め直前の塊状帯下部 (羽口上 10.2~8.3 m) における粒子径は 8.9~10.5 mm と推定される。粒径劣化率で表すと 31.8~42.2% で Fig. 10 の斜線の領域で示される。この値と劣化曲線の交点から、高炉内の衝撃量はドラム回転数に換算すると 30~50 回転に相当することが判明した。

3.3 高炉操業におよぼす還元粉化性の影響

粉化速度式を高炉モデル¹¹⁾¹²⁾に入力し、鹿島第三高炉の操業データをもとに焼結鉱粒径を算出して、還元粉化性の高炉操業におよぼす影響を通気性および燃料比の面

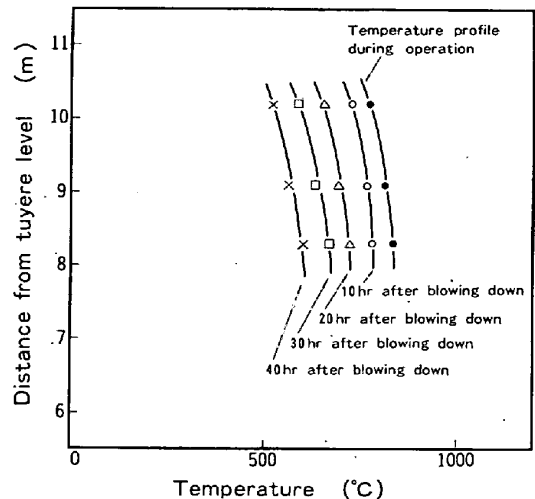


Fig. 10. Cooling pattern after blowing out.

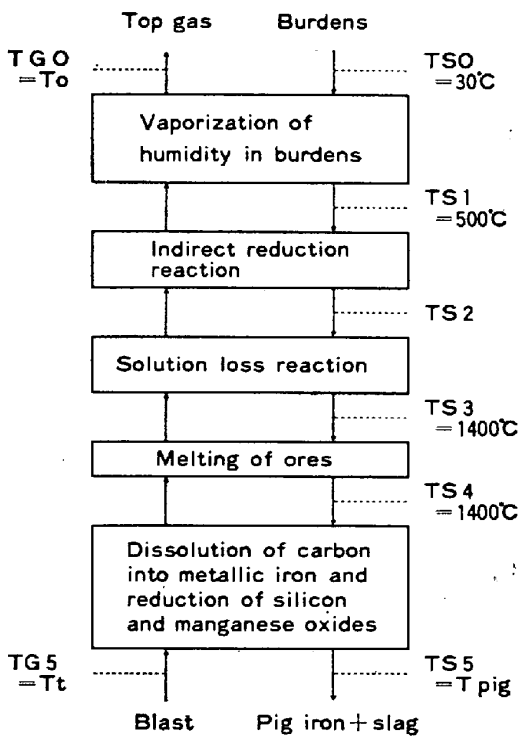


Fig. 11. Schematic diagram of blast furnace simulation model.

から検討した。

今回使用した高炉モデルは、Fig. 11 に示すように半径方向での均一分布を仮定して、高炉を炉内で生じる反応の種類に応じて5段に分割(段間は固体温度で規定)し、各段での熱および物質収支をとることにより高炉高さ方向の内部状態を求めるモデルである。

なお、高炉内焼結鉱粒径を間接還元帯とソリューションロス帯の段間における焼結鉱粒径(以下間接還元帯出口粒径という)で代表させて検討を進めた。

3.3.1 通気性との関係

住友金属工業(株)では、次式で算出されるKR¹⁴⁾を高炉内の通気状況を表す指数として採用している。

$$KR = \frac{\Delta P/L}{\frac{1}{g_c} \left(\frac{215}{0.027} \mu \right)^\beta \cdot \rho^{1-\beta} \cdot u^{2-\beta}} \dots (23)$$

ここで、

- KR : 通気抵抗指数 (1/m)
- ΔP : 高炉内全圧損 (kgf/m²)
- L : 炉高 (m)
- u : 平均ガス流速 (m/s)
- ρ : 平均ガス密度 (kg/m³)
- μ : ガスの平均粘性係数 (kg/m \cdot s)
- g_c : 重力換算係数 (kg \cdot m/kgf \cdot s²)
- β : ガス流れにより定まる定数 (-)

炉内の通気性を左右する要因としては、装入物の性状、ore/coke、炉内熱レベル等の操作条件が考えられる。これらの中、KRにおよぼすコークス性状(DI₁₀₀⁰⁰, DI₃₀₀⁰⁰, 反応後強度 SIR_s)、ore/coke および断面平均溶解体レベル ML の影響を(24)式で補正した DXS は焼結鉱性状に起因した KR の変化を表すものと考えられる。

$$DXS = KR - KR_0 - 4000 \cdot \Delta O/C - 400 \cdot \Delta ML + 700 \cdot \Delta DI_{100}^{00} + 110 \cdot \Delta DI_{300}^{00} + 30 \cdot \Delta SIR_s \dots (24)$$

KR, KR₀ : 実績通気抵抗指数とそれの基準値(1/m)
 $\Delta O/C, \Delta ML, \dots, \Delta SIR_s$: 基準値からの偏差

間接還元帯出口粒径と DXS の関係を Fig. 12 に示す。ムーバブル・アーマーによるガス分布制御等の影響が含まれているために良い相関は得られなかったが、通

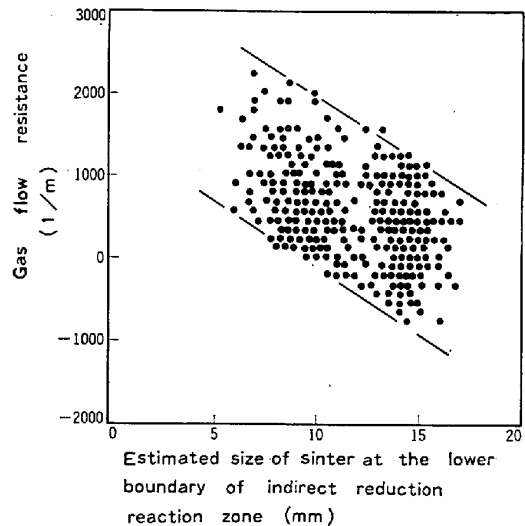


Fig. 12. Effect of sinter size on the permeability.

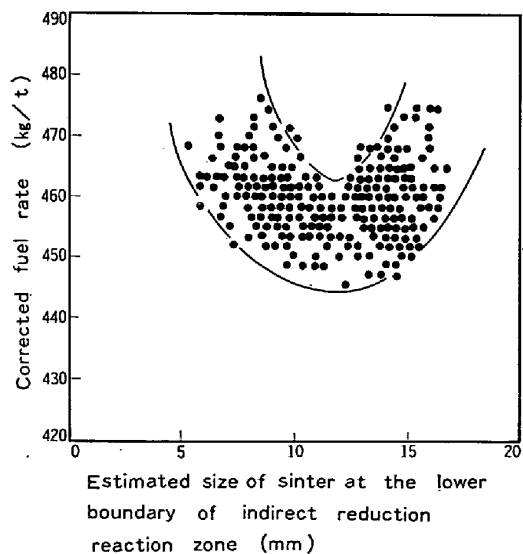


Fig. 13. Effect of sinter size on the fuel rate.

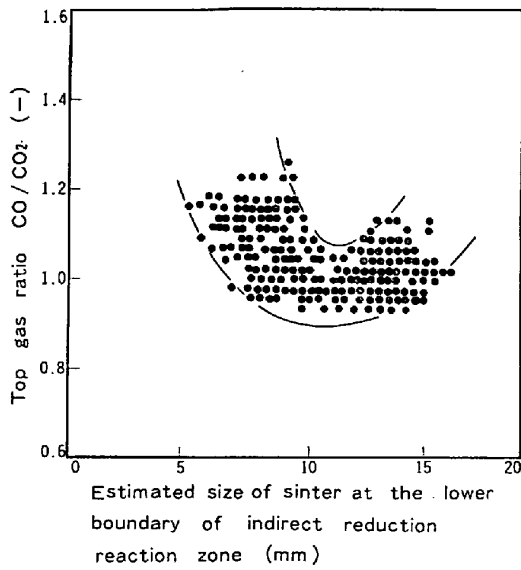
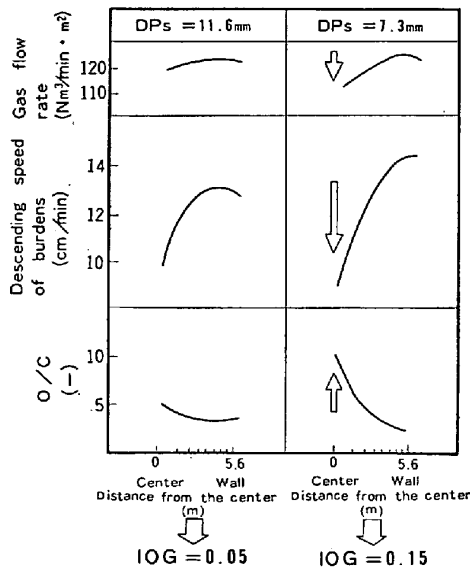


Fig. 14. Effect of sinter size on the gas utilization ratio.



IOG is called as the non-uniformity index and shows the degree of the balance between the gas distribution and the ore distribution.

Fig. 15. Change in distribution of each value in the radial direction by the degradation of sinter.

気性は間接還元帯出口粒径に対して負の相関であり、間接還元帯出口粒径が低下すると通気性が悪化する傾向を示している。

3.3.2 燃料比との関係

間接還元帯出口粒径と補正燃料比の関係を Fig. 13 に、ガス比 (CO/CO₂) との関係を Fig. 14 に示す。燃料比の面からは適正な間接還元帯出口粒径の存在することが示唆され、10~12 mm の時に最も燃料比が低い。この理由は次のように考えられる。間接還元帯における焼結鉄の粒径低下は、Fig. 15 に一例を示すようにガス

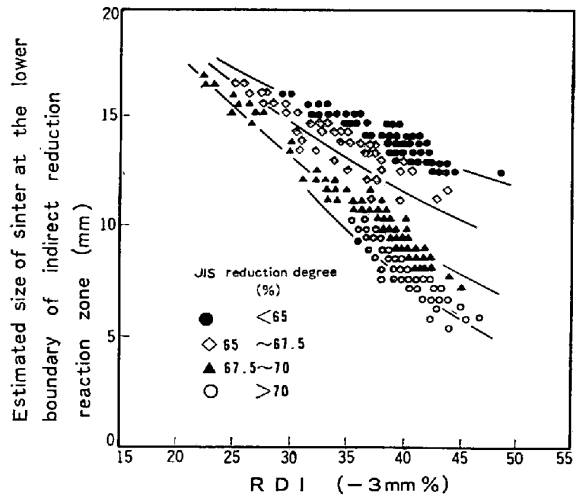


Fig. 16. Relation between the sinter size at the shaft level and RDI.

Table 2. Variations of JIS reduction degree and FeO.

| JIS reduction degree (%) | FeO in sinter (%) |
|--------------------------|-------------------|
| over 70 | below 4 |
| 67.5~70 | 4~5 |
| 65 ~67.5 | 5~7 |
| below 65 | over 7 |

流分布の変化をまねき、中心部荷下がり速度が遅くなつて中心部 ore/coke が高くなるために、不均一性指数 IOG¹⁵⁾ (鉄石とガスの接触度合を示す指標) が悪化する。この結果、CO ガスが有効に活用されなくなり燃料比が上昇する。粒径が過大な場合には、被還元性の低下とともに、粒子比表面積の減少に基づき還元率が低下し、ガス利用率が低下するために燃料比は悪化する。これらの効果が複合された結果、燃料比に極小値が現れたものと考えられる。

3.3.3 高炉塊状帯における焼結鉄品質の評価

間接還元帯出口における焼結鉄粒径は Fig. 16 に示されるように、還元粉化指数 RDI および被還元性の指標である JIS 還元率に密接に関係し、RDI が低いほど、また JIS 還元率が低いほど大きい。したがって高炉の通気性改善を目的とする場合には、間接還元帯出口における焼結鉄粒径は大きいほうが望ましいことから、RDI が低く JIS 還元率も低いことが要求される。

一方、Fig. 13 の検討結果では、間接還元帯出口における粒径が 10~12 mm 程度の場合に燃料比の面で最も有利である。この条件を満たすように RDI および JIS 還元率を管理できれば、燃料比の低下が期待されよう。たとえば、RDI=40% の場合には、JIS 還元率=67.5~70% とするのが適切である。なおこれらの調査をおこなつた期間においては、FeO 以外の焼結鉄化学成分の

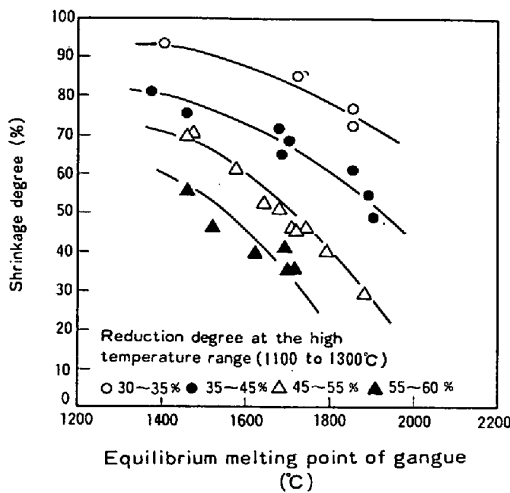


Fig. 17. Effects of equilibrium melting point of gangue and reducibility on the shrinkage degree.

変化はわずかで、JIS 還元率と FeO との関係は Table 2 のようであった。したがって、この対応関係に基づいて FeO に着目すれば、FeO=4~5% の範囲が望ましいものと考えられる。ただし、Fig. 13 における最適粒径は各高炉の置かれた経済的、設備的条件によつて左右され、当然のことながら高炉によつて異なる値となるであろう。

現在のところ焼結鉄製造側では RDI を FeO により制御しており、焼結鉄の被還元性と還元粉化性がお互いに関連し合つて変動しているのが実情で、JIS 還元率に許容変動幅を設ける段階には至っていない。被還元性と還元粉化性を独立に制御できるように焼結鉄製造技術の一層の改善が要望される。

3.3.4 高炉における焼結鉄品質評価法

Fig. 12~Fig. 16 に示した間接還元帯出口粒径と高炉操業との関係は、種々の交絡した要因をできるだけ分離しているものの、焼結鉄の軟化および滴下性状を考慮したものではない。焼結鉄の適正 RDI および被還元性については、本来は軟化収縮あるいは熔融滴下性状におよぼす影響を勘案して決定すべきであろう。

Fig. 17 は高炉内に近似させた還元条件下でおこなつた焼結鉄の荷重軟化試験結果から、収縮率の変化を脈石融点 (脈石成分から CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ 系状態図¹⁰⁾を用いて算出)と高温還元性 (1100~1300°C 間における還元率の変化)を要因として整理したものである。高温還元性の上昇は軟化収縮を抑制する方向に作用しており、軟化融着帯の通気抵抗が減少して高炉全体としての通気性は改善されるものと推定される。

以上は高炉融着帯の通気性からみた被還元性の評価であるが、さらに熔融滴下性状の影響をも含めて塊状帯に

おける評価結果と比較することにより、最終的な評価が可能になるものと考えられる。今後は、焼結鉄品質を示す各指標が高炉内での挙動によつてどのような意味を持っているのかを十分に把握して、高炉操業における焼結鉄品質評価法を確立することが課題となろう。

4. 結 言

焼結鉄の還元粉化に関する基礎実験をおこない、還元粉化性におよぼす高炉内各要因の影響について系統的に調査した。また高炉内における劣化量を推定し、還元粉化性の高炉操業におよぼす影響について検討した。

(1) 還元粉化性におよぼす諸因子の影響は以下のとおりである。

a) 低温の場合ほど還元率の増加にともなう粒径の低下は著しいが、525°C 以下では温度に無関係に還元率に応じた粉化を示す。

b) 細粒に比較して粗粒の方が粉化しやすい。

c) 還元ガス組成と還元ガス流量の影響は認められず、還元率のみによつて粒径低下が決定される。

(2) 還元進行にともなう粒径の低下は、還元率に関する二次式として表すと実験結果を良く整理することができる。

(3) 高炉内における粉化条件は、ドラム回転試験機におけるドラム回転数に換算すると、30~50 回転に相当するものと推定される。

(4) 還元粉化速度式を高炉モデルに入力し、還元粉化性の高炉操業におよぼす影響を検討し以下の知見を得た。

a) 還元粉化に起因する塊状帯における粒径の低下は高炉の通気性を阻害する。

b) 焼結鉄の粒径低下はガス流分布に起因する CO ガス利用率の低下をまねき燃料比を上昇させる。粒径が過大な場合には、被還元性の低下とともに粒子比表面積の減少により還元率が低下し、ガス利用率が低下するために燃料比は悪化する。このために燃料比の面からは適正な粒径が存在する。

今回の検討は種々の交絡した要因をできるだけ分離しているものの、焼結鉄の軟化および滴下性状を考慮したものではない。今後は、焼結鉄品質を示す各指標が高炉内での挙動によつてどのような意味を持っているのかを十分に把握して、高炉操業における焼結鉄品質評価法を確立することが課題である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、終始御指導を賜りました住友金属工業(株)中央技術研究所長西岡邦夫博士、赤松経一波崎研究センタ所長、および有益なる御助

言をいただきました同研究所主任研究員羽田野道春博士、宮崎富夫主任研究員および下田輝久副主任研究員に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 渡辺正次郎, 吉永真弓: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 488
- 2) 安達春雄: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 491
- 3) 藤田慶喜, 沖川幸生: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 495
- 4) 小菅 高, 児玉惟孝, 堀尾竹弘: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 498
- 5) 小菅 高, 石光章利, 菅原欣一, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 501
- 6) 菅原欣一, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 1107
- 7) 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山 正: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1606
- 8) K. GREBE, H. KEDDEINIS, and K. P. S. DUISBURG: *Stahl und Eisen*, 100 (1980), p. 17
- 9) 佐々木寛太郎, 羽田野道春, 渡辺雅男, 下田輝久, 横谷勝弘, 伊東孝夫, 横井 毅: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 580
- 10) 下村泰人, 西川 潔, 有野俊介, 片山 力, 肥田行博, 磯山 正: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 547
- 11) 羽田野道春, 山岡秀行, 山縣千里: 鉄と鋼, 62 (1976), S 391
- 12) 羽田野道春, 宮崎富夫, 岩永祐治: 住友金属, 32 (1980), p. 1
- 13) 神原健二郎, 藤田慶喜, 沖川幸生: 鉄と鋼, 52 (1960), p. 495
- 14) 的場祥行, 下田輝久: 鉄と鋼, 60 (1974), S 354
- 15) 羽田野道春, 栗田興一, 岡根幸司: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 217
- 16) A. MUAN and E. F. OSBORN: *Phase equilibria among oxides in steelmaking*, (1965) [Addison-Wesley]