

討 3 高炉内における焼結鉱の還元粉化挙動

日本鋼管(株) 福山製鉄所 中島龍一 炭竈隆志 脇元一政
長野誠規○川田 仁 桜井雅昭

1. 緒言

高炉シャフト部における焼結鉱の還元粉化特性は炉内通気性、ガス流分布への影響を介して、炉況の安定性および操業成績を左右する大きな要因となっている。そのため従来より、鉱物学的見地に基づいた粉化機構の解明や実炉測定による粉化状況の把握など、多くの研究がなされてきた。しかしながら、高炉内の粉化挙動を定量的に明らかにしたものは少ない¹⁾。筆者らは、既報向流還元試験²⁾ならびに実炉試料採取結果に基づき炉内の任意の位置における焼結鉱の粉化後粒径を推定する還元粉化モデルを作成した。以下にその概要を報告する。

2. 向流還元試験

当社では、高炉内での焼結鉱の還元粉化挙動を解明するため高炉シャフト部の状況をシミュレートできる向流還元試験装置を用い種々の調査を行ってきた。その一例をFig.1に示すが、これら一連の試験より、以下のことが明らかとなった。

- 1) 通常の高炉内条件下では、約600℃で粉率が増加し始め、800℃を越えるとほぼ一定になる。
- 2) 800℃を越えた後の粉率は、供試料のRDI値に応じて差が生じる。
- 3) 同一試料であっても、中心部よりは周辺部温度パターンのもとで還元したほうが高い粉率を示す。

また、試料の還元過程におけるヘマタイト変化量(ΔH)と粉化量(ΔS)との関係を調査した。ここで、粉化量は粒子比表面積の増加量として表わすことができると考え、便宜的に(1)式より求めることにした。ここで、 D_h は調和平均粒径を表わす。

$$\Delta S = (D_h)^{-1} - (D_{h\text{initial}})^{-1} \dots\dots (1)$$

Fig.2は、2種の温度パターンのもとでの ΔH と ΔS を温度に対してプロットしたものである。同図より、温度パターンの違いにかかわらず、ヘマタイトの還元開始および終了時期が粉化のそれと一致していることが判る。また、Fig.3に初期粒径が6.2 μm 、11.1 μm 、および17.5 μm の焼結鉱の還元過程での粒径低下をそれぞれ示すが、同一の還元履歴後ごとの ΔS 値は初期粒径によらず一定となっている。

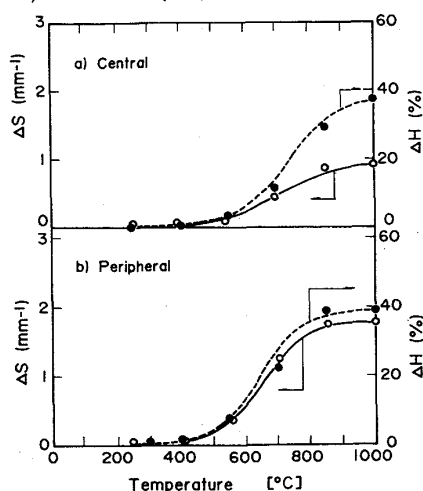


Fig.2 Comparison between ΔS and ΔH as a function of Temperature

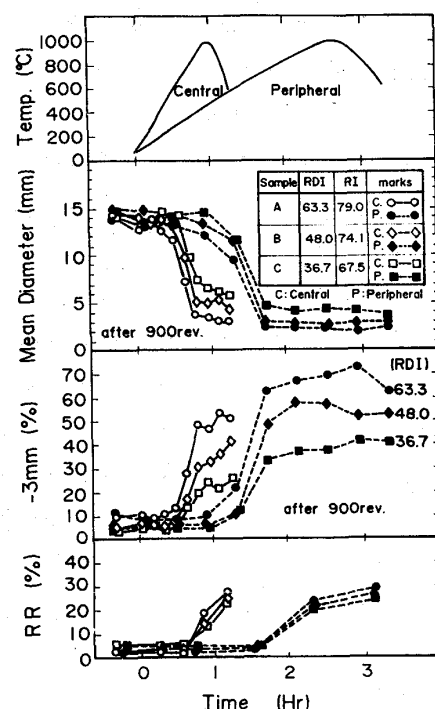


Fig.1 Degradation behavior of sinter²⁾

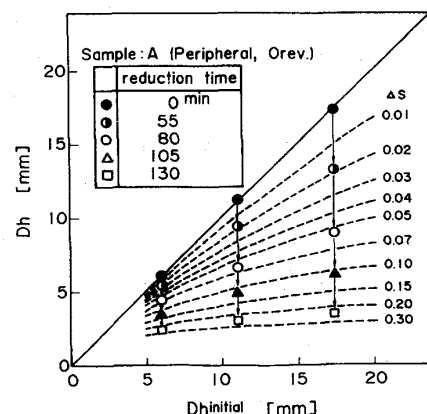


Fig.3 Relationship between initial D_h and D_h after reduction

3. 還元粉化現象のモデル化

高炉内における焼結鉱の粉化は、還元による組織の劣化と、降下過程での粉体圧、摩耗等が同時に作用し進行すると考えられる。そこで、モデル化にあたってはFig. 4に示す粉化曲面を想定した。すなわち、炉内任意の位置での焼結鉱の粉化量（Z軸）は、それまでの還元履歴（X軸）と荷重条件（Y軸）とによって決定されるものと考えた。各軸の代表変数として、X軸にヘマタイト変化量（ ΔH ）、Y軸にドラム回転数（E）実炉モデルではストックラインからの距離（ ΔL ）、Z軸には2章で述べた粉化量（ ΔS ）を用いた。

3.1 向流還元試験のモデル化

3.1.1 荷重条件一定下における劣化曲線の導出（X-Z平面）

Fig. 2に示したように、高度な相関を持つ ΔH と ΔS との関係を定式化するため、実験から得られた ΔH をlogistic曲線により近似した。

$$\Delta H = Hm \cdot (1 - \alpha \cdot e^{-\lambda \cdot t})^{-1} \dots \dots (2)$$

Fig. 5はその微係数である還元速度（ dH/dt ）を温度に対してプロットしたものである。昇温速度の大きい中心流型の温度パターンでは、ヘマタイトの還元ピークは高温側に移行し、その絶対値も増大する傾向が見られる。

次に、実験値よりヘマタイト単位減少量あたりの粉化量（ dS/dH ）を温度に対して整理した。結果をFig. 6に示すが、明瞭な温度依存性を示すとともに、RDIによる差異も認められる。このパラメータは、還元過程における焼結鉱組織の機械的性質を間接的に表わしていると解釈できるが、その温度依存性のメカニズムについては、還元時の相析出形態などを含めた検討が今後必要と思われる。

以上の考えに基づいて還元過程における dS/dt を算出し、それを逐次積算することにより、ある還元履歴後のSe値（ドラム900回転後のS値）を求めた。その計算例および ΔS 、ヘマタイト減少率の実測値（◆, ●）をFig. 7に示す。

3.1.2 同一還元履歴下における粉化曲線の導出（Y-Z平面）

前項の検討は、所定荷重条件下のものであり、炉内での粉化を考えるには荷重

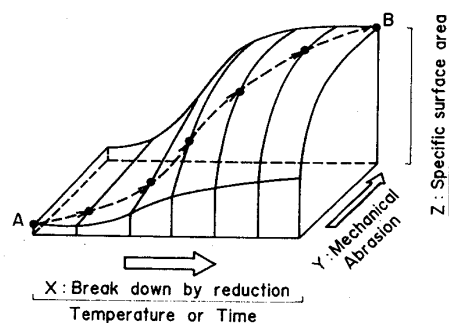


Fig. 4 Concept of sinter breakdown in the blast furnace

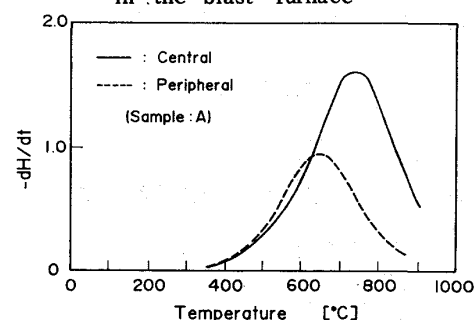


Fig. 5 Reducing rate of hematite as a function of temperature

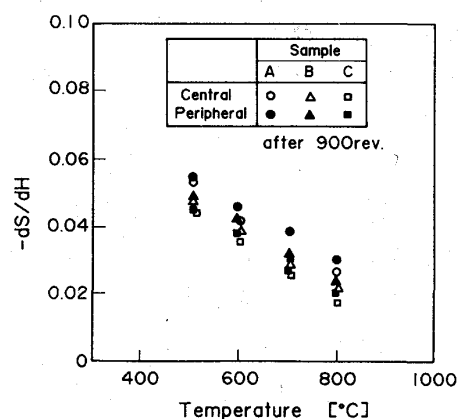


Fig. 6 Relation between dS/dH and temperature

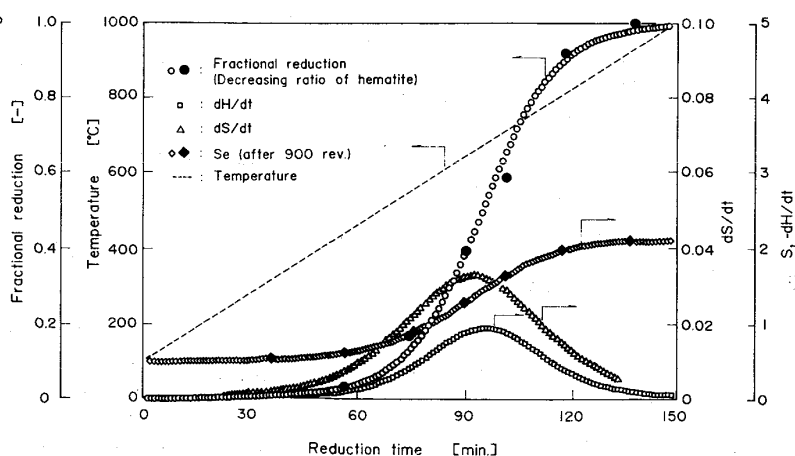


Fig. 7 Calculated results with regard to sinter breakdown

の影響を考慮する必要がある。粉化に関する仕事式はいくつか提案されているが、ここでは限界比表面積 (S_{∞}) を考慮した田中の式⁵⁾を用いた。

$$\Delta S = S_{\infty} \cdot (1 - e^{-K \cdot E}) \dots \dots (3)$$

ここで、 E をドラム回転数とし、実験から得られた各還元段階ごとおよび所定回転数後ごとの ΔS 値から定数項 K を統計的に決定した ($K = 2.42 \times 10^{-3}$)。一方、 S_{∞} は各還元段階ごとにおけるクラックの内在量に依存すると考えられるため、還元段階ごとの S_e より逐次算出することにした。

以上より、向流還元試験による焼結鉱の粉化現象をほぼ定量的にシミュレートできるようになった。

3.2 実高炉への適用

ここでは、上述した焼結鉱粉化モデルの実高炉への適用について述べる。計算フローを Fig. 8 に示す。まず、径方向の所定位置において送り込み式垂直ゾンデ (FVP)⁶⁾ から得られた炉高方向の温度分布、ガス組成分布、および焼結鉱性状を入力項目とする。この FVP のデータより、単位時間ごとに装入物からガス側へ移動する酸素量を求め、還元速度 (dR/dt)、還元率 (RR) を算出する⁷⁾。つづいて、実高炉におけるヘマタイト減少量 (ΔH) を推定するため、実験から求めた還元率とヘマタイト減少率 (f_H) との関係 (Fig. 9 参照) を用いて dH/dt を求める。

以下、計算フローに従い、 dS/dt , S を求め D_h に変換する。なお、荷重は、ストックラインからの距離 (ΔL) で 1 次近似できるものとみなした。また、Fig. 10 に示すように、実高炉から採取した試料の累積重量曲線は、粉化にとりも交差することなく左方に移行する傾向にあることから求められた D_h から粒度分布の推定もできると考え、計算フローの中に織り込んだ。さらに、この粒度分布から算術平均粒径 (D_m)、および田口らの手法⁸⁾を用いて空隙率 (ϵ)、通気抵抗指数 (ϕ) を算出するものとした。

以上の計算を高さ方向に繰り返して軸方向粒度分布を求める。なお、本モデルは温度分布、還元率分布などを求める数式モデルと結びつけて、模擬操業による粉化状況も検討可能である。

3.3 計算例

Fig. 11 に、初期粒径を一定として温度パターンを変化させて計算させた時の炉高方向における D_m 分布を示す。同図より、周辺部のように昇温速度の小さい分布 (Δ) では還元温度域への到達が遅れるため粉化の開始時期は遅れるが、粉

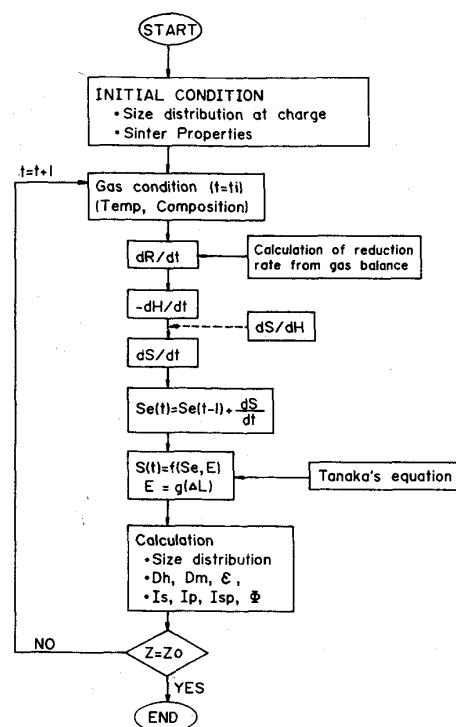


Fig. 8 Calculation flow of sinter degradation model

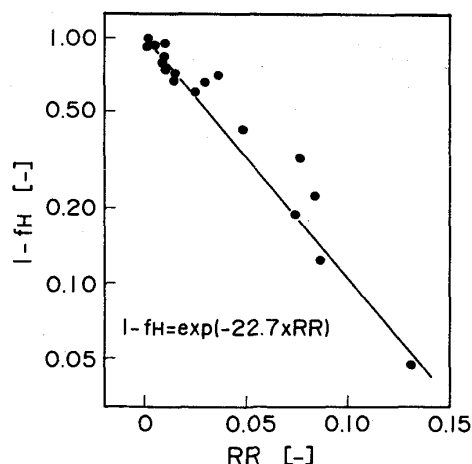


Fig. 9 Relation between f_H and RR

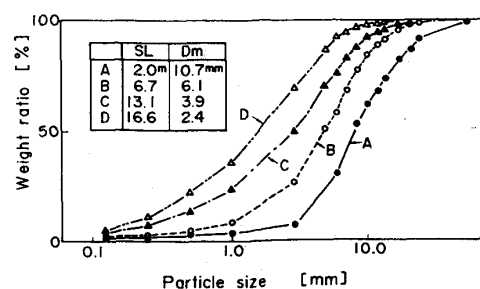


Fig. 10 Cumulative size distribution of sinter sampled at level of the blast furnace

化温度域での滞留時間が長いため、結果として粒径低下は大きいこと(□)がわかる。

なお、図中に、実炉採取試料の D_m をプロットしたが、計算値と実測値はほぼ一致しており、モデルの妥当性が検証された。Fig.12 は、 $RDI=30\%$ 、 50% の2ケースについて計算を行い、炉内断面における $-3\mu m$ 粉率分布を表したものである。なおここで、径方向の温度分布と初期粒径は実測値に基づいて変化させた。また、Fig.13 は、計算で得た ϕ 値から、径方向における無次元ガス流速を求めたものである。これらより、 RDI の上昇は、炉内粉率の上昇を介して通気抵抗を増大させるとともに周辺流助長の傾向を持つことが示唆された。

4. 結言

高炉シャフト部における焼結鉱の還元粉化挙動を調査するため、向流還元試験装置による実験室的検討および実高炉シャフト部からの試料採取を行った。これらの結果に基づいて、炉内任意の位置での焼結鉱粉化状況を推定する還元粉化モデルを作成した。それらの結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 還元粉化温度域は約 $600\sim 800^\circ C$ であり、これはヘマタイトの還元温度域と良く一致する。
- 2) 還元履歴と「 ΔS 」の関係は初期粒径に依存しない。すなわち粉化量を表す指数として ΔS を用いることにより、初期粒径の影響を考慮する必要がなくなる。
- 3) ヘマタイト単位減少あたりの粉化量 (dS/dH) は明確な温度依存性を示す。
- 4) RDI の上昇は、粉化量の増加に起因する通気性の悪化をもたらすだけでなく、径方向のガス流分布にも影響をおよぼすことが示唆された。

本モデルは、今後コスト低減にむけて焼結鉱の品質設計を見直す上で重要な役割を果たすものと考えられる。

< 文 献 >

- 1) 岩永祐治：鉄と鋼，68(1982)，P. 740
- 2) 山本亮二，中島龍一，谷中秀臣，脇元一政，長野誠規，桜井雅昭：学振54委-Ⅱ 1765 (昭和61年2月)
- 3) 山本亮二，中島龍一，谷中秀臣，脇元一政，長野誠規，桜井雅昭：鉄と鋼，72(1986) S1
- 4) 菅原欣一，佐藤勝彦：鉄と鋼，55(1969)，P. 1107
- 5) 田中達夫：化学工学，18(1954)，P. 160
- 6) 梶川脩二，脇元一政，新谷一憲，石井孝治：鉄と鋼，66(1980)，S38
- 7) 山本亮二，中島龍一，炭龍隆志，脇元一政，桜井雅昭：学振54委-Ⅱ 1759 (昭和60年11月)
- 8) 山田孝雄，佐藤政明，宮崎伸吉，嶋村鉄郎，田口整司：川崎製鉄技報，6(1974)，P. 16

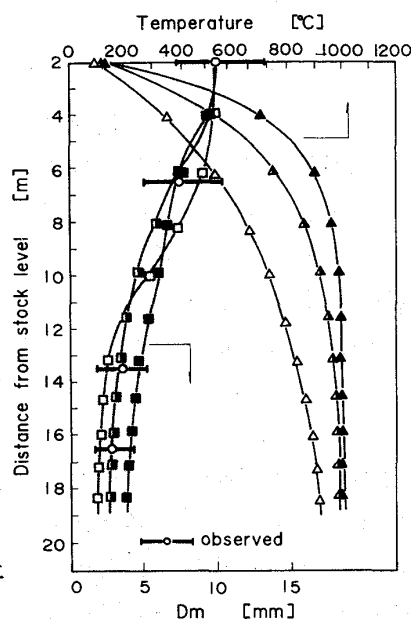


Fig. 11 Mean diameter of sinter calculated by the model

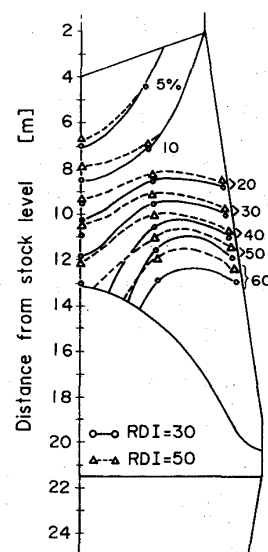


Fig. 12 Distribution of $-3\mu m$ fines for sinters with different RDI

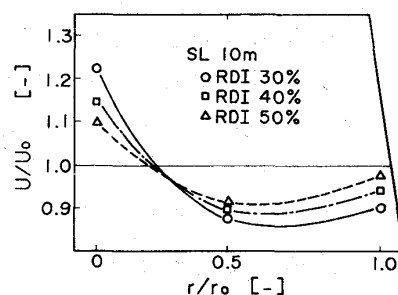


Fig. 13 Change of gas flow distribution