

論 文

高炉シャフト部における焼結鉱の還元粉化挙動

中島 龍一*・炭竈 隆志*・脇元 一政*
長野 誠規*・川田 仁*・桜井 雅昭*

Reduction Degradation Behavior of Sinter in the Blast Furnace Shaft

Ryuichi NAKAJIMA, Takashi SUMIGAMA, Kazumasa WAKIMOTO,
Seiki NAGANO, Hitoshi KAWATA and Masaaki SAKURAI

Synopsis :

Laboratory tests on the reduction degradation behavior of sinter were carried out to clarify the influence of each factor, which includes reduction degradation index (*RDI*), reducibility index (*RI*), and temperature profile. Furthermore, the materials were extracted from the shaft of the working blast furnace to ascertain the validity of the tests results. Based on these information, the sinter degradation model was formulated to describe the sinter breakdown. The findings obtained are as follows ;

1) Sinter breakdown occurs significantly in the temperature range of 600 to 800°C. This range coincides with that of hematite being reduced.

2) Maximum amount of fines degraded during reduction depends on *RDI*, *RI* and temperature profile, under which reduction reaction occurs.

3) Increase of *RDI* leads to the deteriorating gas permeability originated by the increasing amount of fines and it exerts adverse effects on the gas flow distribution in the radial direction of the blast furnace.

Key words : blast furnace ; sinter ; degradation ; reduction ; hematite.

1. 緒 言

近年、溶銑原価の低減を目的として、高炉でより安価な原料を使用することが強く要望され、焼結鉱の品質仕様の見直しなどが必要となつてきている。一方、高炉シャフト部での焼結鉱の還元粉化は通気性、ガス流分布などに大きな影響を与え、ひいては炉況の安定性や操業成績を決める重要な要因である。そのため従来より、粉化原因、機構、炉内粉化状況などの解明が実験や実炉測定を通じて検討されてきた^{1~8)}。しかしながら、稼動中の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⁹⁾。

そこで筆者らは、実高炉における焼結鉱の粉化挙動を定量的に把握し、炉内の任意の位置における粉化後粒径(あるいは、粉率)を推定できる還元粉化モデルを作成することを目的として種々の試験および解析を行った。すなわち、高炉シャフト部の反応を再現できる向流還元試験装置を用いて、還元粉化におよぼす試料の還元粉化指数(*RDI*)、JIS還元率(*RI*)およびシャフト部温度パターンの影響について調査を行い、得られた結果を基にして還元粉化モデルを作成した。さらに、稼動中の高炉

から試料を採取し、還元率、粒度分布などの測定を実施して炉内粉化状態とモデル式に基づく推定粒度との比較を行った。その結果、両者が良く一致していることを確認した。

2. 実 験 方 法

2.1 向流還元試験装置概要

Fig. 1 に装置の概要を示した。本装置は IRSID で開発された BORIS 炉¹⁰⁾と同じ機能を持つもので主に、ガス混合供給装置、還元部およびガス分析装置の3部分から構成されている。還元部はステンレスの充填管(内径 44 mm, 高さ 3 000 mm)と、中心部に 100 mm ϕ の空洞部を持ち、充填管に沿って上下方向に任意の速度(0~2 m/min)で移動させることができる電気炉から成っている。本電気炉の特長は、5 個の発熱体負荷を独立に制御することによつて所定の温度分布を設定できることにある。

2.2 実験手順

実験の手順を Fig. 2 a)~d) に示した。まず、a) の状態で昇温し、炉温が所定温度パターン(たとえば、高炉シャフト部の温度プロフィール)に達した後、充填管

昭和 62 年 3 月 12 日受付 (Received Mar. 12, 1987)

* 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

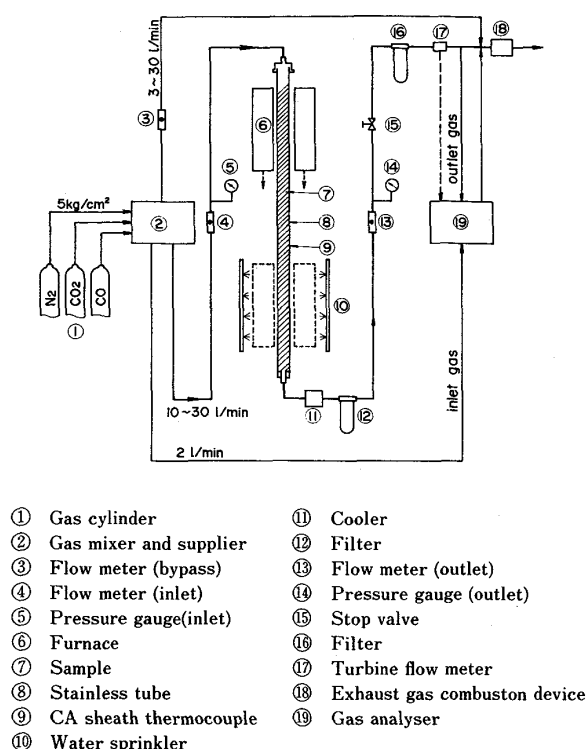


Fig. 1. Schematic diagram of counter current reduction furnace.

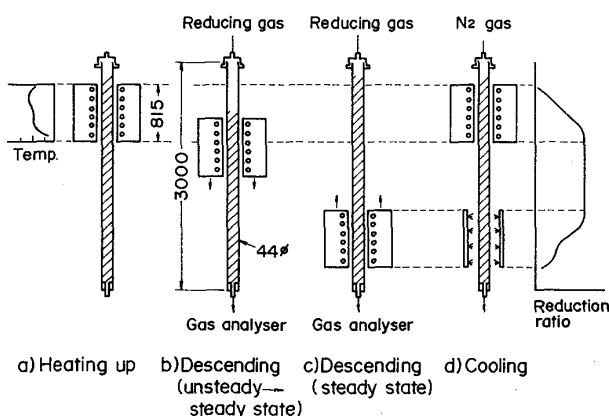


Fig. 2. Operational procedure of counter current reduction furnace.

上部から還元ガスを導入しながら装入物降下速度に対応した一定速度 (25 cm/h, 65 cm/h) で炉を降下させる。なお炉温の設定値と試料内温度が同じになることは事前の実験で確かめた。還元反応は、温度プロファイルと試料の持つ被還元性に従って進行し、しだいに定常状態に達する (b) 参照)。還元反応が定常に達したのち、一炉長に相当する距離だけ炉を降下させ、不活性ガスに切り換える (c) 参照)。次に、その部分を充填管外部から散水冷却する (d) 参照)。その後、この一炉長分の試料を充填管から掻き出し、種々の性状を調査することによって高炉シャフト部における焼結鉄、その他の高炉装入物の被還元性状を把握することができる。

2.3 実験条件の設定

実験条件として、1) 温度パターン、2) 還元ガス組成、および3) 還元ガス流量を設定した。

温度パターンについては、高炉中心部と周辺部の典型的なものを実験条件に組み込む目的で Fig. 3 b) のように決めた。これは、同図 a) に示す福山 4 高炉で実測した炉内温度分布に基づいて設定したものである。ガス組成は、実測値が 1000°C において、中心部も周辺部もともに、ほぼ、30% CO-13% CO₂-55% N₂-2% H₂ であったことに基づいて、本実験においては、32% CO-13% CO₂-55% N₂ とした。ガス流量については、還元ガス比消費量 (単位時間あたりの還元ガス流量と全鉄流量との比) が実高炉と同様の値 (約 2.0) になるように設定した。

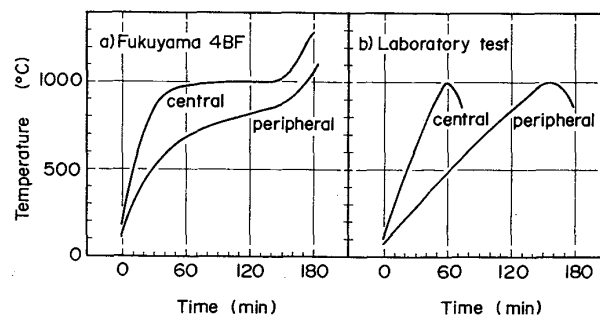


Fig. 3. Temperature profiles.

Table 1. Sinter qualities.

	Size (mm)	Chemical composition (%)							RDI (%)	RI (%)
		T.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂		
A	15.9-19.1	56.1	3.36	6.01	2.04	9.90	1.55	0.30	63.3	79.0
B	15.9-19.1	55.9	5.39	5.92	2.00	9.57	1.54	0.33	48.0	74.1
C	15.9-19.1	56.0	9.21	5.64	2.06	9.04	1.50	0.30	36.7	67.5
D	15.9-19.1	56.3	5.40	5.81	1.93	10.07	1.76	0.30	38.3	73.4
E	15.9-19.1	56.3	7.38	5.86	1.95	10.00	1.78	0.30	52.5	73.7
F	15.9-19.1	55.8	6.10	5.84	2.02	10.07	1.68	0.38	51.4	72.5
G	15.9-19.1	55.9	2.96	5.71	2.01	10.00	1.80	0.37	53.4	80.5

2・4 供試料

RDIの違いによる粉化挙動の差を明らかにするために、焼結鍋試験装置 (300 mmφ×400 mmH) を用いて Table 1 に示した試料を準備した。試料 A, B および C は RDI の差がそれぞれ 10% 以上になることを狙って、粉コークス配合量、粉コークス粒度および石灰石粒度を調整して焼成したものである。RDI は目標どおりのものが得られたが、結果として RI にも差が生じた。試料 D, E は RI が一定で RDI が異なる焼結鉱であり、粉コークス配合量、石灰石粒度のほかに水酸化ナトリウムの添加量を変えて焼成した。さらに、RDI が一定で RI が異なる焼結鉱 (試料 F, G) を粉コークス配合量を変更することにより得た。試料 A-G は 15.9-19.1 mm に整粒して実験に供した。

3. 実験結果

Fig. 4 は、RDI と RI がともに異なる焼結鉱 A, B, C をそれぞれ中心部および周辺部温度パターンのもとで

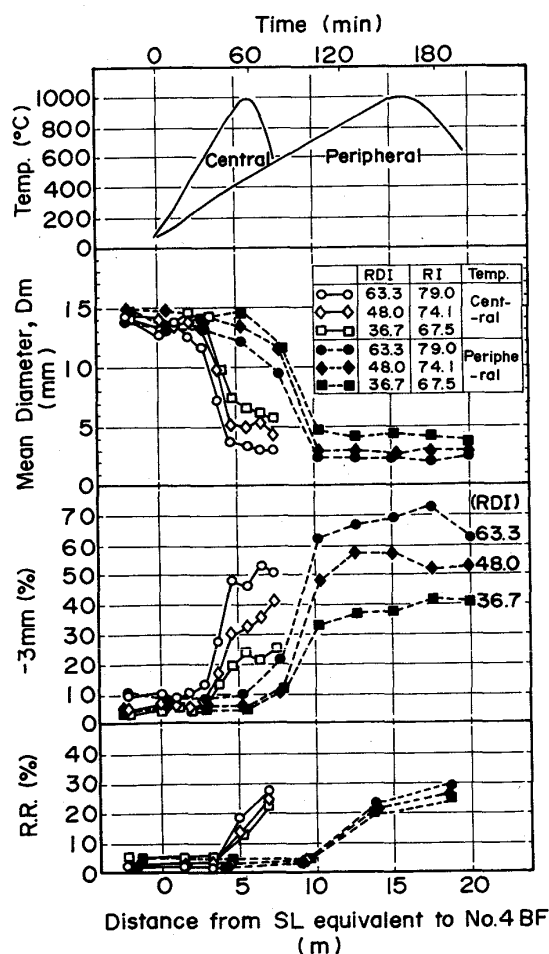


Fig. 4. Degradation behavior of sinter with different RDI and different RI.

還元した場合の結果である。ここに示した平均粒径および-3 mm 粉率は、一炉長分 (815 mm) の試料を 50 mm ごと (約 95 g) に掻き出し、130 mmφ×200 mm のドラムに入れ、900 回転させた後の粒度分布を測定することにより求めた。また、還元率 (RR) は還元後試料の化学分析値から求めた。Fig. 4 によれば以下のことが明らかである。

1) 試料の種類にかかわらず、約 600°C で粉率が増加し始め、800°C を超えるとほぼ一定になった。平均粒径は-3 mm 粉の発生量に応じて変化した。

2) 800°C を超えた後の粉率 (最高到達粉率) は、供試料の RDI の値の大小に対応して差が生じた。

3) 同一試料であつても、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した。すなわち、昇温速度が遅いほうが粉率が高くなった。

4) それぞれの還元条件下において、RR は試料の持つ RI の値の大小に応じて差が生じた。

これらの実験結果により、焼結鉱の還元粉化を現象的に把握できたが、供試料の RDI と RI がそれぞれ異なるため、粉化に及ぼす各因子の影響を分離できなかった。そこで、RI が一定で RDI が異なる焼結鉱 (試料 D, E) および RDI が一定で RI が異なる焼結鉱 (試料 F, G) を用いて同様の実験を行った。結果を Fig. 5 と Fig. 6 に示した。Fig. 5 によれば、粉化現象は上述した結果と一致し、試料の RDI に応じて明瞭な粉率の差が生じることがわかった。また、RI が同じであるため、1000°C 以下における還元率には差が生じなかった。Fig. 6 によれば、RDI が同等であつても粉率が異なり、RI が高いほど粉化しやすいことがわかった。

次に、上記実験結果に基づいて、1000°C までの還元過程における試料中のヘマタイト変化量 (ΔH) と粉化量との関係を調査した^{11)~14)}。なお粉化量を表わすパラメーターを (1) 式より求めることにした。

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

ここで D_h は重量基準調和平均粒径であり、その逆数は単位容積あたりの比表面積に比例する。すなわち (1) 式より求めた ΔS は所定還元履歴後の比表面積の増加量を間接的に表しており、粉化を表す尺度として従来の粒径、粉率に比べ、より適切なパラメーターと考えた。Fig. 7 a), b) は両温度パターンのもとで還元した時の ΔH と ΔS_e (900 回転後の ΔS) を温度に対してプロットしたものである。なお試料中のヘマタイトの定量は X 線回折の内部標準法¹⁵⁾によつた。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わかる。

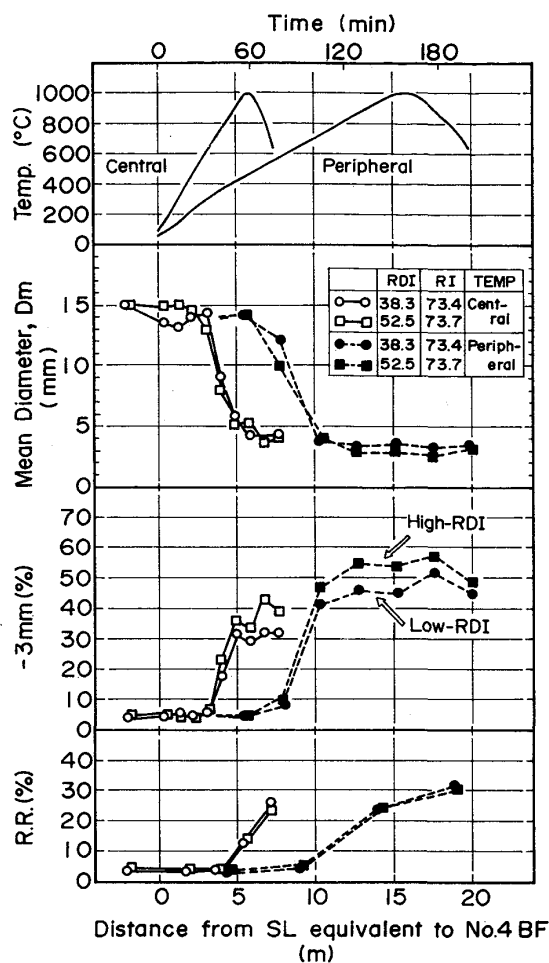


Fig. 5. Degradation behavior of sinter with different *RDI* and same *RI*.

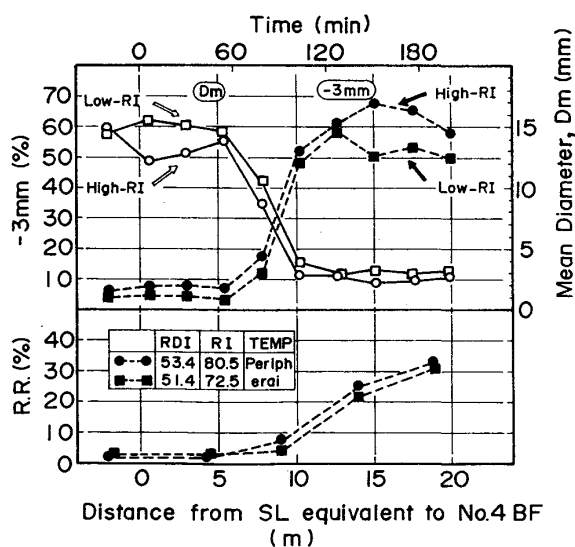


Fig. 6. Degradation behavior of sinter with same *RDI* and different *RI*.

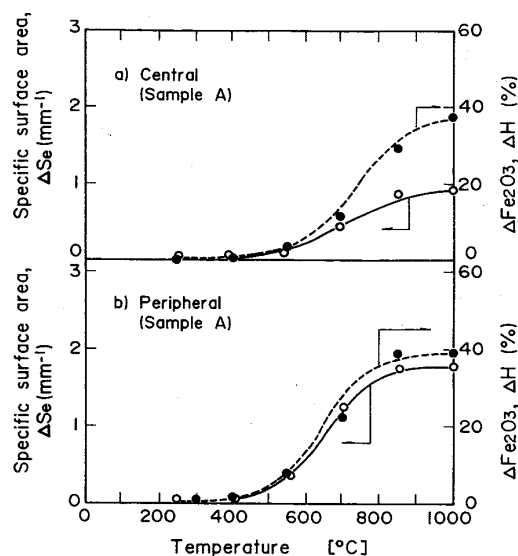


Fig. 7. Change of specific surface area and hematite reduced as a function of temperature.

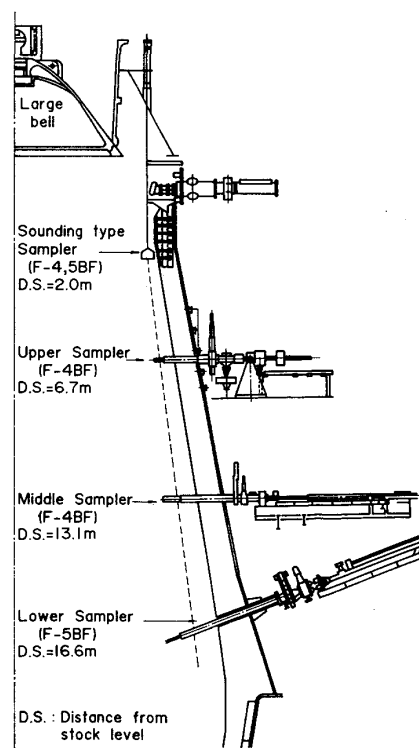


Fig. 8. Schematic representation of shaft samplers at Fukuyama blast furnaces.

4. 実高炉における試料採取結果

実高炉における焼結鉱の粉化挙動を調査するため、操業中に試料採取が可能なサンプラーを福山4、5高炉に設置した。設置状況を Fig. 8 に示す。Fig. 9 は図中に記した固体流線に沿った位置で採取した焼結鉱（計 20

種)の平均累積粒度分布を示しており、ストックライン (SL) 下 2 m の位置から 16.6 m まで降下する間に、算術平均粒径 (D_m) は 10.7 mm から 2.4 mm まで低下していることがわかる。昇温速度を表す指数として θ_R (600-700°C の滞留時間) を用い、中部サンプラーで採取した試料の D_m と RDI の関係について検討を行った。その結果、Fig. 10 に示すように、 θ_R の延長は焼結鉱の粉化を助長させることがうかがえ、前章で述べた実験結果との整合性が得られた。なお、 θ_R は送り込み式垂直

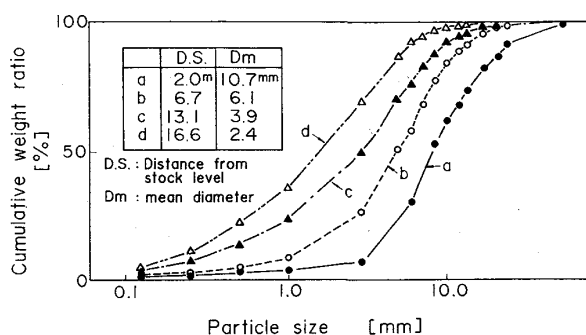


Fig. 9. Cumulative size distribution of sinter sampled at each level of the blast furnace.

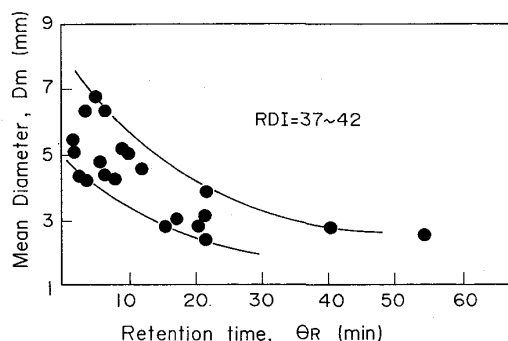


Fig. 10. Relation between retention time (θ_R) and mean diameter (D_m).

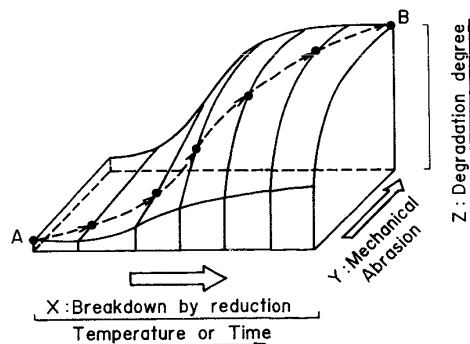


Fig. 11. Concept of sinter breakdown in the blast furnace.

プローブ (FVP¹⁶⁾) による実測値より求めた。

5. 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、装入物の自重による機械的粉化が同時に進行しながら起こると考えられるので、そのモデル化にあたって、Fig. 11 に示す粉化曲面を想定した。すなわち、炉高方向のある位置における焼結鉱の粉化量 (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) またはストックラインからの距離 (ΔL)、 z 軸には 3 章で述べた ΔS を用いた。

5.1 向流還元試験結果のモデル化

5.1.1 荷重条件一定下における劣化曲線の導出 (x - z 平面)

Fig. 7 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¹⁷⁾により近似した。

$$\Delta H = H_m \cdot (1 - b \cdot e^{-\lambda \cdot t})^{-1} \quad (2)$$

ここで H_m は還元前のヘマタイト重量割合 (%), b , λ は係数, t は時間 (min) である。Fig. 12 はその微係数 (dH/dt) を温度に対し整理したものである。昇温速度が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、この還元速度を粉化速度 (dS/dt) に変換するため、ヘマタイト単位減少量あたりの粉化量 (dS/dH) を温度に対してプロットした。結果を Fig. 13 に示したが、明瞭な温度依存性を示す¹⁸⁾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の変化を間接的に表してい

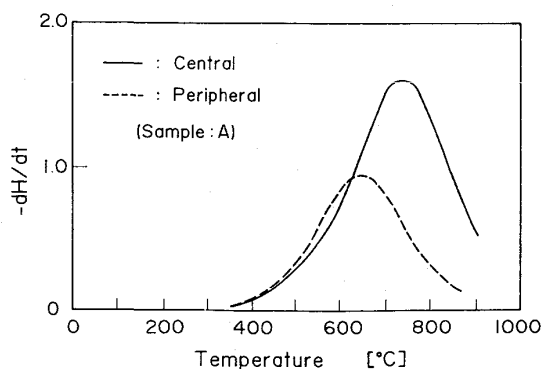


Fig. 12. Reducing rate of hematite (dH/dt) as a function of temperature.

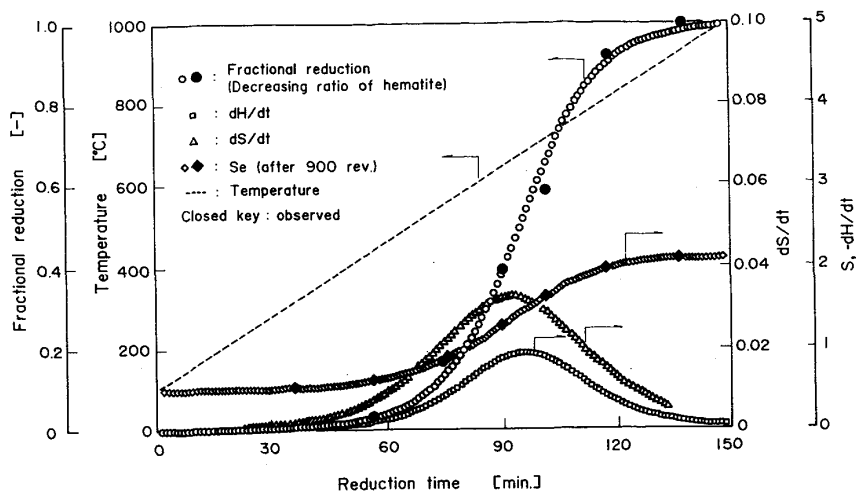
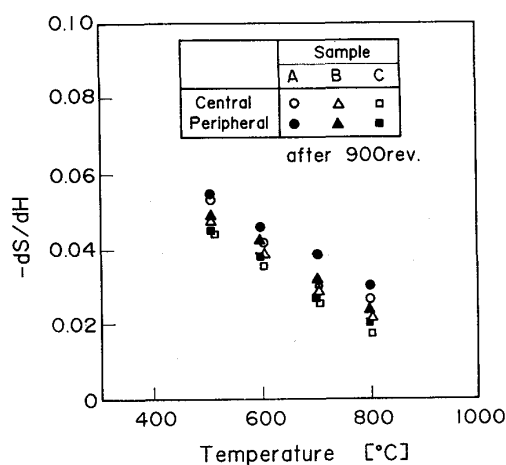


Fig. 14. Calculated results with regard to sinter breakdown.

Fig. 13. Relation between dS/dH and temperature.

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 S_e 値を求めた。その計算例および S_e , ΔH の実測値を Fig. 14 に示した。これによれば、本実験条件下における焼結鉄の粉化状況をほぼ再現していると思われる。

5.1.2 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、ある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¹⁹⁾を用いた。

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

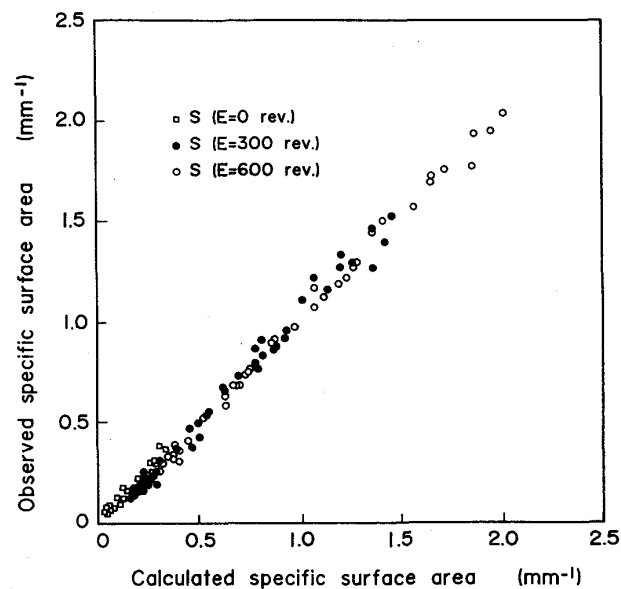


Fig. 15. Comparison of calculated results with laboratory test results with regard to the specific surface area.

ここで、 E をドラム回転数とし、実験から得られた各試料の還元段階ごとに、所定回転後の ΔS 値から定数項 K を統計的に求めた ($K = 2.42 \times 10^{-3}$)。一方、 S_∞ は還元過程におけるクラックの生成量に依存すると考えられるため、 S_e より逐次算出することにした。Fig. 15 は、計算で得られた値が実測値とよく一致を示している。

これにより、向流還元試験による焼結鉄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。

5.2 実高炉への適用

ここでは、上述した焼結鉄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. 16 に示す。まず、径方向の所定位置において FVP から得られた炉高方向

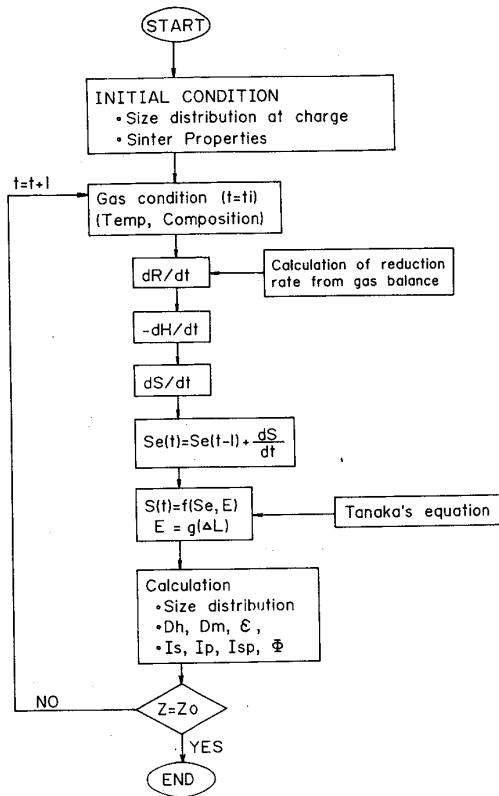


Fig. 16. Calculation flow of sinter degradation model in the blast furnace.

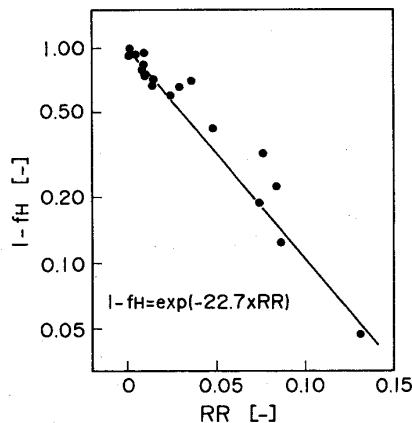


Fig. 17. Relation between hematite reducing fraction (f_H) and reducing rate (RR).

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²⁰⁾²¹⁾。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, 向流還元試験 (試料 A, B, C) から求めた還元率とヘマタイト減少率 (f_H) との関係 (Fig. 17 参照) を用いて

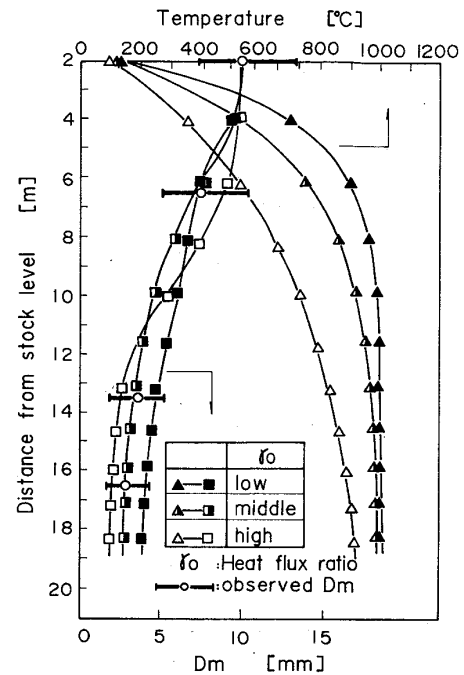


Fig. 18. Mean diameter of sinter calculated by the model in the direction of the blast furnace axis.

dH/dt を求める。以下, 計算フローに従い, dS/dt , ΔS を求め調和平均粒径 (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. 9 に示したように, 実高炉から採取した試料の累積重量曲線は, 粉化にともない互いに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²²⁾の手法を用いて空隙率 (ϵ), 通気抵抗指数 (Φ) を算出するものとした。以上の計算を繰り返して炉高方向粒径分布を求める。なお, 本モデルは温度分布, 還元率分布などを求める他の数式モデル²³⁾と結合させて, 模擬操業による粉化状況も検討可能である。

Fig. 18 に, 初期粒径を一定として温度パターンを変化させ計算した時の炉高方向における粒子の D_m 分布を示した。この図より, 周辺部のように昇温速度の小さい温度分布 (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, 粉化温度域での滞留時間が長いので, 結果として粒径低下は大きいこと ($\square$) 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. 19 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 mm 粉率分

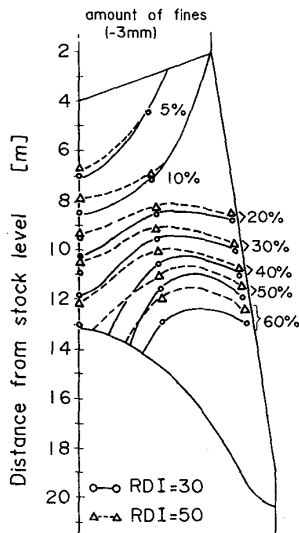


Fig. 19. Distribution of -3 mm fines for sinters with different RDI.

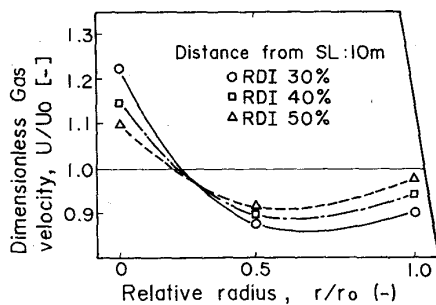


Fig. 20. Change of gas flow distribution at the level 10 m below the stock line.

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. 20 は、計算で得た ϕ の値から、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同時に ϕ 値の相対的な増加率が中心部において大きい。ため周辺流が助長される傾向にあることが示唆された。

6. 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、高炉内反応をシミュレートできる向流還元試験装置を用いて、粉化におよぼす諸因子の検討を実験室的に行うとともに、稼動中の高炉シャフト部からの試料採取による実炉での粉化挙動の調査を行った。これらの結

果に基づいて、還元粉化モデルを作成し、温度分布や RDI などの差による粉化過程の違いを明らかにした。それらの結果、焼結鉱の還元粉化に関して以下のことが明らかになった。

1) 還元粉化温度域は約 600~800°C であり、これはヘマタイトが還元される温度域と良く一致する。

2) 最高到達粉率に関与する因子として、試料 RDI, RI, および温度パターンがある。

3) 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。

文 献

- 1) 岩永祐治: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 740
- 2) 奥野嘉雄, 入田俊幸, 須沢昭和, 松岡 宏, 磯山 正, 南外 孝, 沢 雅明: 鉄と鋼, **69** (1983), S84
- 3) 山口英俊, 森 利治, 金山宏志, 前川昌大, 吉田康夫, 上原輝久: 鉄と鋼, **70** (1984), S96
- 4) K. GREBE, H. de HAAS: Stahl Eisen, **102** (1982), p. 253
- 5) 高田 司, 相馬英明, 入田俊幸, 神坂栄治, 木村春男, 磯山 正, 須沢昭和: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 203
- 6) 佐藤 駿, 重松達彦, 栗山和益: 鉄と鋼, **70** (1984), S83
- 7) 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山 正: 鉄と鋼, **57** (1971), p. 1606
- 8) 岡本 晃, 内藤誠章, 斧 勝也, 林 洋一, 井上義弘: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 1529
- 9) 武田幹治, 田口整司, 福武 剛, 山崎 信: 鉄と鋼, **70** (1984), S99
- 10) R. JON, C. OFFROY, L. RENITE, A. RIST, M. SCHNEIDER and J. M. STEILER: Rev. Métall., **73** (1976), p. 503
- 11) 安達春雄: 鉄と鋼, **52** (1966), p. 491
- 12) 神原健二郎, 藤田慶喜, 沖川幸生: 鉄と鋼, **52** (1966), p. 495
- 13) 小菅 高, 石光章利, 菅原欣一, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, **52** (1966), p. 501
- 14) 小島鴻次郎, 永野恭一, 稲角忠弘, 高木勝博: 鉄と鋼, **55** (1969), p. 757
- 15) 吉越英之, 長岡清四郎, 山岡洋次郎, 小松 修, 寺坂正二: 鉄と鋼, **62** (1976), S57
- 16) 梶川脩二, 脇元一政, 新谷一憲, 石井孝治: 鉄と鋼, **66** (1980), S38
- 17) R. PEARL, L. J. REED, and J. F. KISH: Science, **92** (1940), p. 486
- 18) 菅原欣一, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, **55** (1969), p. 1107
- 19) 田中達夫: 化学工業, **18** (1954), p. 160
- 20) 山本亮二, 中島龍一, 炭竈隆志, 脇元一政, 桜井雅昭: 学振 54 委-No. 1759 (昭和 60 年 11 月)
- 21) 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
- 22) 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
- 23) 福島 勤, 大野陽太郎, 山田 裕, 近藤国弘, 炭竈隆志, 岸本純幸: 日本鋼管技報, **99** (1983), p. 1