

© 1992 ISIJ

論 文

# 粉鉄鉱石の流動化および還元特性に基づく 予備還元流動層の基本設計

有山 達郎\*・磯崎 進市\*<sup>2</sup>・岩崎 敏彦\*<sup>2</sup>・熊坂 晃\*

## Basic Design of Prereduction Fluidized Bed for Smelting Reduction Based on Fluidization and Reduction Characteristics of Iron Ore Fines

Tatsuro ARIYAMA, Shin-ichi ISOZAKI, Toshihiko IWASAKI and Akira KUMASAKA

### Synopsis :

In order to develop the prereduction fluidized bed for smelting reduction process, the fluidization and reduction characteristics of iron ore fines with a wide size distribution, such as sinter feed, were examined. As a result, if the superficial gas velocity is kept over than 2 or 4 times of minimum fluidizing velocity, the segregation of coarse particles can be avoided, and it became clear that the appropriate mean residence time to produce prereduced iron ore of about 20-25% reduction degree was from 30 to 60 minutes. On the basis of these results, a hot model of fluidized bed were so designed that the residence time of fine particles could be controlled by the circulating device, and the characteristics of this hot model were experimentally confirmed. Then, the simulation model considering the elutriation rate of fine particles was made to estimate the operating condition. Furthermore, with the analysis by two-phase model, it was found that the gas interchange coefficient has little influence on reduction behavior, and the fundamental design of the distributor for prereduction fluidized bed was investigated.

**Key words :** smelting reduction ; prereduction ; fluidized bed ; iron ore fines ; sinter feed.

## 1. 緒 言

熔融還元法は現在、次世代の製鉄法として注目され研究開発が活発化している。その方式として種々の方式が提案、研究されているが、安定して入手可能なシンターフィード、すなわち -8 mm 程度の粉鉄鉱石を事前処理なしに流動層に投入して予熱し、FeO までの予備還元を行い、高二次燃焼下の熔融還元炉で最終還元を行うプロセスが簡素な設備構成、所要エネルギー、粉鉄鉱石の直接利用が可能であるなどの点で優れた点を有する<sup>1)</sup>。しかしこのプロセスの実現にはこれらの原料を安定して直接処理するのに適した流動層の開発が不可欠である。流動層は石油プロセスの触媒流動層などで一般に多用され、研究開発されてきたが、その分野の流動層で扱われる原料は主に微粉系（例えば 100 μm 以下）が主体で、粒度範囲も限定されている場合が多い<sup>2)</sup>。また直接製鉄法開発の一環として流動層還元の研究も行われているが<sup>3)</sup>、原料の対象は前述の粉鉄鉱石とは異なる。粗い粒

子を含み、粒度範囲の広い粉鉄鉱石のような系を対象にした流動層の研究、技術開発の例は少なく、基本的な流動化条件など不明な点が多い。粉鉄鉱石の予備還元に関する速度論的研究も少ない。また予備還元流動層では熔融還元炉で発生した高含塵ガスを流動化ガスとして用いるが、ガスの円滑な導入に対して設計上の配慮が必要である。筆者らは粉鉄鉱石を対象に適切な流動化条件、反応速度論的検討に基づく還元条件、熔融還元法に適した流動層の設計に関わる因子の検討を実験、モデル計算により行い、予備還元流動層の開発に有用な知見を得たので以下報告する。

## 2. 流動化・還元特性に基づく操業条件の検討

### 2.1 流動化特性

微粉流動層と粗粒流動層では一般に流動化状態が非常に異なる。微粉流動層では気泡の分裂が活発で粒子の流動性が良く、粒子の混合状態も良好となり、均一で安定

平成 4 年 2 月 3 日受付 平成 4 年 7 月 3 日受理 (Received on Feb. 3, 1992; Accepted on July 3, 1992)

\* NKK 総合材料技術研究所 (Materials and Processing Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

\*<sup>2</sup> NKK エンジニアリング研究所 (Engineering Research Center, NKK Corporation)

な流動化状態が得られやすい。一方、粗粒系の流動層は大気泡系で圧力変動が大きく、粒子の良好な流動性は得られにくく均一な流動状態にはなりにくいとされている<sup>4)</sup>。これらの微粉流動層と粗粒流動層の流動状態の差は Geldard の分類で示されているように<sup>5)</sup>、主に粒子の平均径と粒子密度によって支配される。ここで対象としている約 8 mm の粉鉄鉱石は粗粒系に属する。すなわち安定な流動状態が得られにくい原料であり、基本的な流動化状態に関する検討がまず必要であると考えられ、最小流動化速度と安定な均一流動化条件の調査を行った。

流動層の流動化条件を決定する際には最小流動化速度  $U_{mf}$  の精度の高い推定が重要である。その推定式には種々あるが次の Wen-Yu の式<sup>6)</sup>が一般によく用いられている。

$$Re_{mf} = \{ (33.7)^2 + 0.0408 A_p \}^{1/2} - 33.7 \dots \dots \dots (1)$$

本式は過去の実験例を幅広く相関したものであり信頼性も高いが、あくまでも粒度の狭い系を主体にした経験式であり粉鉄鉱石へそのまま適用できるか明確でない。そこで内径 200 mm、高さ 3 m のコールドモデルを用い、粉鉄鉱石として豪州産ゲイサイト鉱石 A と南米産ヘマタイト鉱石 B を使用し最小流動化速度  $U_{mf}$  を測定した。その際、粒径、粒度分布の影響を調査するために各々を広く変更した。この  $U_{mf}$  の実測値を Fig. 1 に示すが、その代表径は体面積径いわゆる調和平均径として整理した。図中の  $I_s$  は原料粒度分布の 60% 通過粒径と 10%

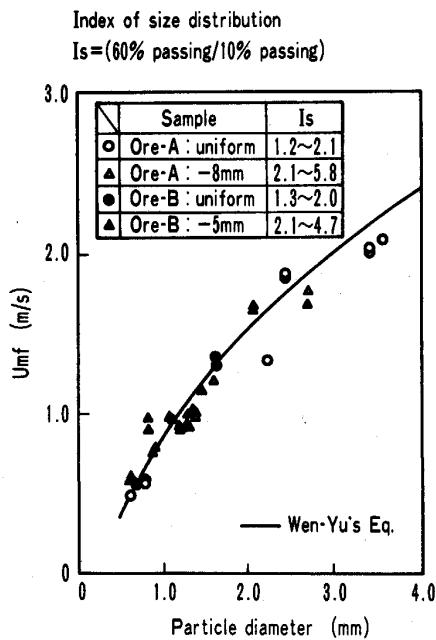


Fig. 1. Relation between minimum fluidizing velocity and particle diameter of iron ore fines.

通過粒径の比で定義した指数であり粒度の広がりに対応する。本図で示したように Wen-Yu の式による  $U_{mf}$  の推定値は広い範囲で実測値と良く合致する。すなわち Wen-Yu の式はここで対象としている広粒度範囲の粉鉄鉱石にも調和平均径を代表値として適用可能であることが確認された。

つぎに粒度範囲が広い原料の場合、流動化が確保されても、粗い粒子の偏析が問題となる。粒鉄鉱石の還元の場合、下層に停滞するとスティッキングの可能性がある。層内の偏析については Nienow らによって層上部の混合度と空塔速度の関係が主に 2 成分系を対象に解析されているが<sup>7)</sup>、ここでは  $U_{mf}$  の測定と同一のコールドモデルを用い、下層の大粒子の運動に注目し大粒子が下層に停滞せず層内全体に均一に運動し始める空塔速度を平均粒径、粒度分布を変更して実測した。その空塔速度を調和平均径基準の  $U_{mf}$  との比で Fig. 2 に示す。この結果から  $U_0/U_{mf}$  を 2 から 4 以上に設定すれば広い粒度に対し偏析を解消させ均一流動化条件を満足できることが判明した。

2.2 還元反応速度から見た操業条件の検討

予備還元流動層の平均滞留時間など操業条件を決定する上で、還元の速度論的データは不可欠である。そこで高 2 次燃焼の熔融還元炉との連結を前提に、すなわち還元ガスの酸化度 OD (Oxidation Degree,  $OD = (CO_2 + H_2O) / (CO + CO_2 + H_2 + H_2O) \times 100$ ) を 50% とし、 $Fe_2O_3$  から  $FeO$  までの還元反応速度をバッチ流動層<sup>8)</sup>を用いて実測した。熔融還元炉からの還元ガスは  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$  で構成され、反応速度は本来、 $CO-CO_2$ ,  $H_2-H_2O$  系で各々、評価されるべきであるが、

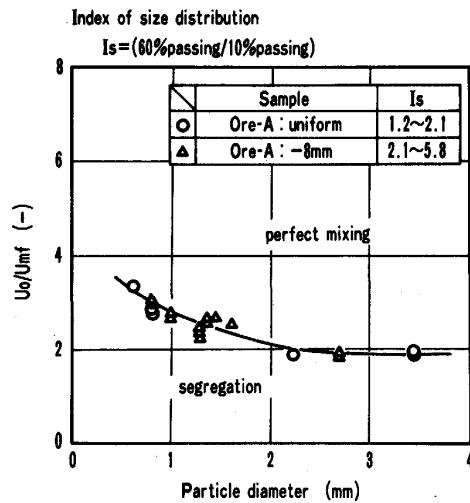


Fig. 2. Perfect mixing and segregation condition of iron ore fines.

高酸化度領域における  $H_2-H_2O$  系の還元実験は困難であり、また指向している系が高  $CO/H_2$  であるため還元ガスを  $CO-CO_2$  系で代表した。本実験の試料粒度は  $2.00\sim 2.83\text{ mm}$  である。そして流動層ではガス-粒子の接触が活発で境膜物質移動抵抗が無視でき、粒子径も相対的に小さいことから、還元反応速度を未反応核モデルで化学反応律速と仮定して解析した。鉱石 B についての反応速度定数は次のように決定された。

$$k_r = \begin{cases} \exp(-2.85 - 2.34 \times 10^4/R_g T) (R < 0.11) & \dots\dots\dots (2) \\ \exp(5.89 - 1.10 \times 10^5/R_g T) (R > 0.11) & \dots\dots\dots (3) \end{cases}$$

次にこれらの測定データをもとに連続系流動層の操業条件と還元率の関係を検討した。連続系の場合には固体側の滞留時間分布を考慮する必要がある。滞留時間分布があり、段階別に還元が進む系では各段階の還元が各粒子の滞留時間に対応して同時に進行するため、定量的な扱いが容易でない。森中ら<sup>9)</sup>は計算を簡単化するため、還元反応を還元率に対し一次反応として扱っているが、この方法では見かけの反応速度を含み、一般性に欠ける。そこでここでは反応速度の表示を反応律速本来の形で残し、各段階の反応を1段階に集約させた方法を取った。すなわち、 $Fe_2O_3 \rightarrow FeO$  の反応速度を律速している式(3)の  $k_r$  で連続流動層内の還元反応を近似した。同時に還元ガスはバッチ流動層と同様に溶融還元炉からの還元ガスの主体をなす  $CO-CO_2$  系で代表させた。すなわち、固体側を完全混合とすれば、製品鉱石の  $Fe_2O_3$  から  $FeO$  への平均部分還元率  $\bar{R}_w$  は次のように求められる。

$$\bar{R}_w = \int_0^\infty R_w \cdot (1/\theta_h) \cdot \exp(-\theta/\theta_h) d\theta \\ = 3/\Phi - 6/\Phi^2 + 6/\Phi^3 \cdot \{1 - \exp(-\Phi)\} \dots\dots (4)$$

ここで

$$R_w = 1 - (1 - \theta/\theta_c)^3 \dots\dots\dots (5)$$

ただし  $\theta > \theta_c$  では  $R_w = 1$

$$\Phi = \theta_c/\theta_h \dots\dots\dots (6)$$

$$\theta_c = r_0 d_0 / \{(C_A - C_A^*) \cdot k_r \cdot (1 + 1/K_e)\} \dots\dots (7)$$

式(7)の  $C_A$  で示される層内の還元ガス濃度の代表値は、ガス側をピストンフローとして扱い、平衡値に還元ガス濃度が漸近的に変化すると考え還元ガス入口、出口濃度の対数平均とした。なお、式(4)~(7)で還元ガス代表濃度、製品還元率の両者が未知数となるが、全体の物質収支と連立させてくり返し計算で各々を求めた。また本モデルは層内の気泡相と濃厚相の分布を考慮せずに

扱った均一相モデルであるが、鉄鉱石の還元は気泡の上昇速度に対し速度が遅く、さらに予備還元では濃厚相の還元ガスの消費が少なくガス交換律速とならないため均一相モデルで操業条件の検討など実用上の精度は十分にあると考えられる。

この計算結果として滞留時間と還元率との関係を Fig. 3 に示す。なお以降の図における還元率は総括還元率で示した。計算条件は福山の溶融還元一貫設備<sup>1)</sup>を想定し、鉱石代表径は  $1.5\text{ mm}$  とした。本研究で目標としている溶融還元法では予備還元率は  $30\%$  以下であり<sup>1)</sup>、目標還元率を  $20\sim 25\%$  に設定すると、この計算結果より層内温度  $800^\circ\text{C}$  の場合、必要な平均滞留時間は約  $30\sim 60$  分になると推定される。さらに入口還元ガスの OD を  $40\sim 60\%$  の範囲で変更した場合の結果を Fig. 4 に示す。同図より入口還元ガスの OD および層内温度と得られる還元率の関係が明確になり、種々の条件に対し平均滞留時間の設定など適正な操業条件を予測できる。

### 3. 流動層設計条件の検討

#### 3.1 実プロセスを想定した小型熱間流動層設備

粉鉄鉱石の幅広い粒度分布を対象に 2・1 で得られた均一流動化条件を考慮して連続流動層の安定流動化条件を決めると、キャリアオーバーされる微粒の量が無視できなくなる。予備還元流動層として目標還元率を得るために飛散する微粒の滞留時間も確保する必要がある。そこで実プロセスを想定した小型熱間流動層として Fig. 5 のような設備とした。すなわち基本的にはバブリング流動層であるが、分級される微粒の滞留時間制御のため

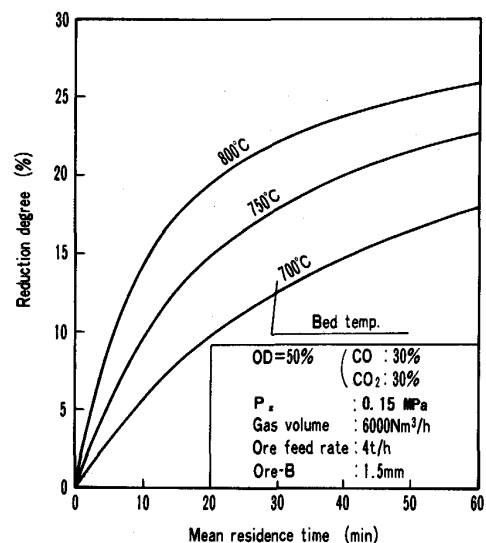


Fig. 3. Relation between reduction degree and mean residence time calculated by simulation model.

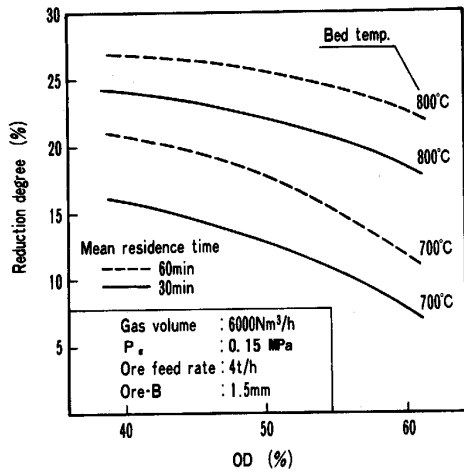


Fig. 4. Influence of oxidation degree and bed temperature on reduction degree calculated by simulation model.

に循環機能も持つ。また本図に示すように製品の予備還元鉱石は流動層本体下部の濃厚層からオーバーフローされる coarse (以下, 粗粒系) と循環系から抜かれる fine (以下, 微粒系) の 2 系統から排出される。ベッド部内径は 105 mm, フリーボード径は分級される微粒系の量を減少させ循環の負荷を減らすために 130 mm と拡大してある。これらの設計の考え方は福山の熔融還元一貫設備の流動層にも生かされており<sup>10)</sup>, 広範囲粒度の原料に対する有効な設備対策である。

3.2 小型熱間流動層実験結果

実験条件を Table. 1 に示す。還元ガスは CO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-N<sub>2</sub> 系で所定の OD に調整した混合ガスで供給した。塔下部層内の空塔速度は分級後の濃厚層構成粒子の代表径で決まる  $U_{mf}$  の 5~5.6 倍の範囲とした。この条件では微粒系, 粗粒系は各々 50% の割合に分かれる。原料鉱石は鉱石 B を用いた。まず -6 mm の鉱石 B に対して粗粒系の平均滞留時間を変更した場合の実験結果を Fig. 6 に示す。本図の還元率は粗粒系, 微

粒系として各々排出された還元鉱石の平均値である。均一相モデルで本条件をシミュレートした結果も同時に示した。両者の結果はほぼ一致し, シミュレーションモデルの妥当性が確認されたと同時に, 本実験結果からも目標還元率約 20~25% に対して適正な滞留時間は 40 分前後となることがわかる。ただし実験結果の還元率は計算値より低めであるが, 本装置上部の熱損失が大きく温度の設定がやや不十分であったためと考えられる。次に製品還元鉱石の粒度別の還元率を Fig. 7 に示す。微粒系と粗粒系の分級点を境に粒度別の環元挙動が非常に異なる。粗粒系は粒径の増加と共に還元率は低くなる傾向が見られるが, 微粒系は分級点近傍で還元率は高, 粒径減とともに一旦小となりさらに細粒になると再び大きくなる傾向がある。本図には粗粒系の滞留時間を変更した結果も同時に示したが, 分級される微粒系の還元率も粗粒の滞留時間に影響され変化する。微粒系の循環の効果を見た結果を Fig. 8 に示す。図中の循環比 (Circulation ratio) は層内に戻る循環量と微粒系として排出される量の比である。本図は循環比を 3 に変更した場合の結果を示す。循環操作により微粒系の還元率が上昇している

Table 1. Experimental condition of hot model.

Feed	Ore B(-6 mm)
Bed temp.	780~800°C
OD	50%
Gas comp.	
H <sub>2</sub>	12%
H <sub>2</sub> O	10%
CO	30%
CO <sub>2</sub>	32%
N <sub>2</sub>	16%
Feed rate	3.2~9.6 kg/h
Bed weight	1.6 kg
Mean residence time of coarse	20~60 min
Gas velocity	
Bed	4.6~5.0 m/s
Free board	3.1~3.3 m/s
$U_o / U_{mf}$	5.0~5.6

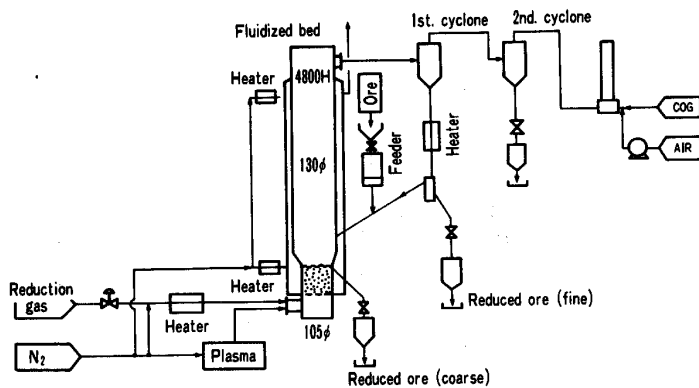


Fig. 5. Hot model of fluidized bed for reducing iron ore fines.

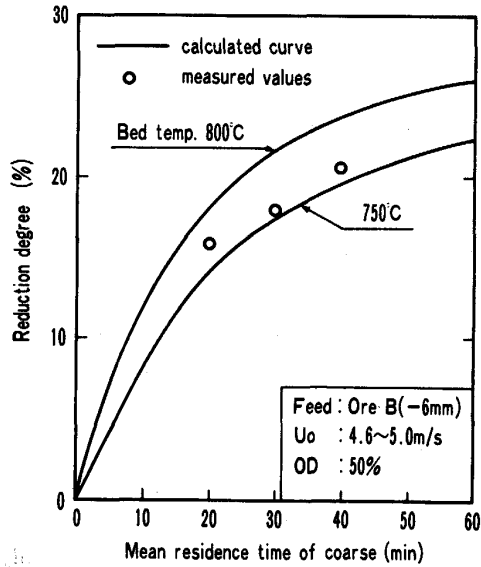


Fig. 6. Comparison of measured values of hot model with results calculated by simulation model.

のが確認できた。以上、粉鉄鉱石の予備還元実験を行い、幅広い粒度に対し本設計による流動層が有効なことを確認するとともに循環などの基本的な特性が明らかになった。

3.3 微粒系の分級と循環を考慮した運転条件の検討

微粒の循環量制御の検討など本流動層の特徴に合ったプロセス解析のためには、微粒系の分級挙動も考慮する必要がある。流動層から分級される粒子の速度論的な挙動については国井らによって Elutriation モデルとしてまとめられている<sup>11)</sup>が、粒度別の還元率の結果はこのモデルの概念と符合する点が多い。例えば、微粒系の滞留時間は粗粒系の滞留時間の影響を受け、循環が無でも微粒系はある程度の還元率が得られている。つまり原料中の微粒は瞬時にガスによってキャリーオーバーされるのではなく、流動層下部の濃厚層内に一旦、滞留し飛散すると考えられる。そこでこの考え方を基礎にさらに微粒系の循環を含めた定式化を行った。概念図を Fig. 9 に示す。すなわち原料中の微粒系も濃厚層に流入するが、飛散する量は注目している微粒の濃度に比例するとする。比例定数が飛び出し速度定数  $K^*$  である。 $K^*$  は粒度によって異なる値を持つ。すなわち、注目粒度の時間当たりの排出量は次のようになる。

$$-\frac{dW_b(d_p)}{d\theta} = A_i \cdot K^*(d_p) \cdot P_b(d_p) = F_2 P_2(d_p) \dots \dots \dots (8)$$

ここで  $W_b(d_p)$ ,  $K^*(d_p)$  は注目している粒度  $d_p$  に対する各値を示す。 $P_i$  は粒度の確率分布である。定常状態を考え、排ガスに同伴される粒子を無視し、循環比を

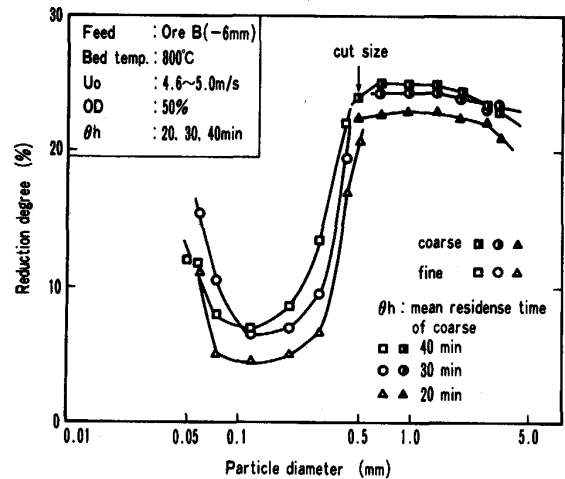


Fig. 7. Reduction degree with particle size in hot model.

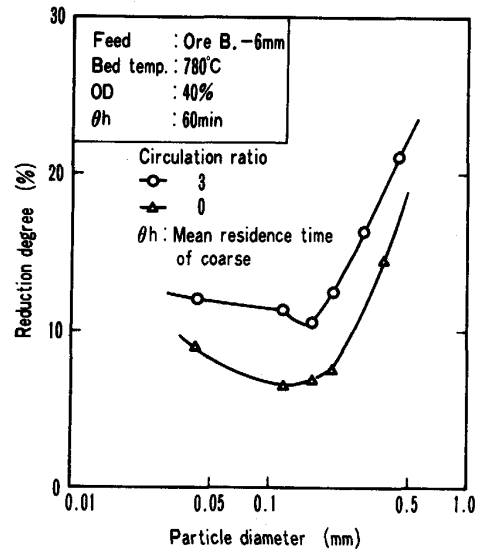


Fig. 8. Effect of circulation on reduction degree in hot model.

$R_c$  とすると次式の関係が得られる。

$$F_2 = F_3 + F_4 \dots \dots \dots (9)$$

$$F_4 / F_3 = R_c \dots \dots \dots (10)$$

濃厚層は完全混合で層内と粗粒系製品の粒度分布は等しいとすると、最終的に循環を考慮した注目粒度  $d_p$  の濃厚層での滞留時間  $\theta_h(d_p)$  は以下のように表される。

$$\theta_h(d_p) = \frac{W_b \cdot P_b(d_p)}{F_1 P_1(d_p) + F_3 P_3(d_p)} = \frac{W_b}{F_1 + A_i \cdot K^*(d_p) / (1 + R_c)} \dots \dots \dots (11)$$

この飛び出し速度定数  $K^*$  は一般に実験式でまとめられており、ここでは  $(U_0 - U_i)$  を飛び出しの推進力

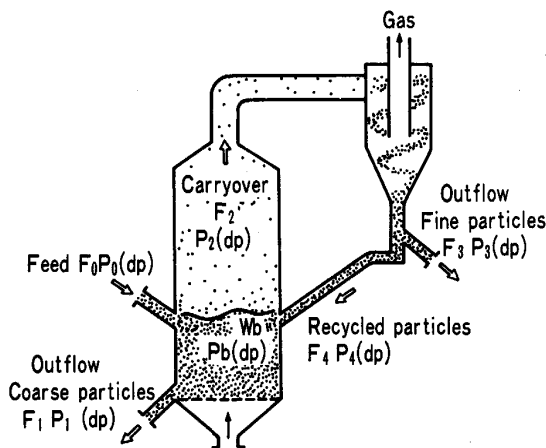


Fig. 9. Material flow of elutriation model.

とした次の矢木らの式<sup>12)</sup>を用いた。ただし本式を 0.1 mm 以下にまで適用すると  $K^*$  は減少する傾向となるが、この範囲でも飛び出しの推進力は持続すると仮定し 0.125 mm 以下で  $K^*$  は一定とした。

$$K^* g d_p^2 / \mu (U_0 - U_t)^2 = 0.0015 R_{ei}^{0.6} + 0.01 R_{ei}^{1.2} \dots\dots\dots(12)$$

以上の定式化によって各粒度の滞留時間が推定できる。計算例を Fig. 10 に示すが、分級点 (0.3 mm) 以上の粗粒系は  $K^* = 0$  となり、その滞留時間は給鉱量と滞留量の比によって定まるいわゆる平均滞留時間に一致する。0.3 mm の分級点以下の径の微粒系は粒径の減少と共に飛び出し速度が大になり、逆に層内の滞留時間は減少する。また微粒系の滞留時間は飛び出し速度と粗粒系の平均滞留時間の両方に依存することがわかる。さらに注目粒度ごとに上式で滞留時間を求め、粒度ごとに均一相モデルによって還元率を計算し、還元ガスと原料全体の酸素収支が合うように収束計算を行えば、粒度別の還元率も推定できる。Fig. 11 に小型熱間流動層を対象にした計算結果を示す。粗粒系の平均滞留時間を変更した場合であるが、ホットモデルの結果と傾向が一致する。すなわち微粒系でも分級点に近い粒子は飛び出し速度が小さいため滞留時間の影響から還元率は大きくなり、0.1 mm 以下の粒子は粒径の効果によって還元率が大きくなる。その中間域の粒子は相対的に還元率は小となる。なお本モデルの計算値より小型熱間流動層実験による微粒系還元率の値が全体に低いのが、これは前述のように装置上部の温度低下の影響が現れていると考えられる。つぎに循環の効果のみを計算結果を Fig. 12 に示す。循環によって微粒系の還元率は上昇するが、微粒系の還元率を粗粒系の平均還元率すなわち約 22% と同程度に調整する場合には循環比を 1~2 程度に設定すれば良いこと

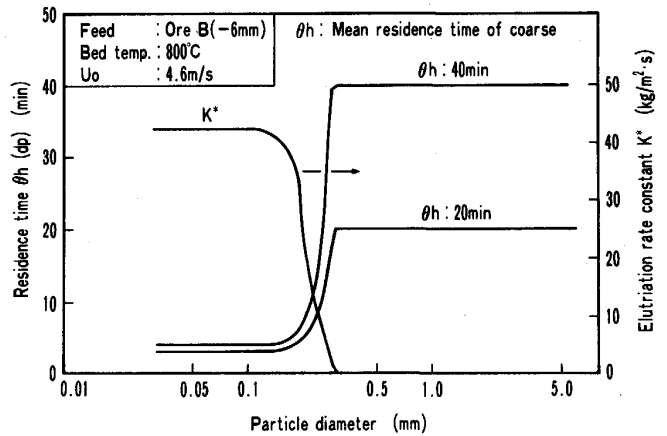


Fig. 10. Elutriation rate and residence time calculated by elutriation model.

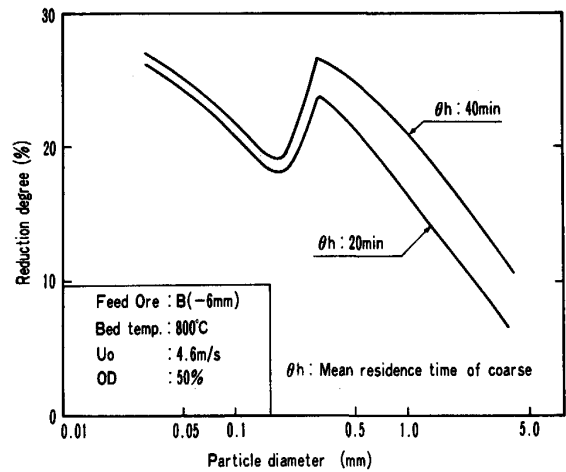


Fig. 11. Calculated reduction degree with particle size.

がわかる。それ以上の循環は効果が少ない。以上のように、分級速度、循環を考慮したモデルにより微粒系、粗粒系の個々の還元挙動の検討が可能になった。

### 3.4 分散板設計条件の検討

流動層に流入する溶融還元炉で発生する還元ガスはサイクロンで除塵するにしてもダスト濃度が高いことが予想される。一般に流動層の分散板はノズル径を小さくし数を増やしたほうが層内のガス分散の均一性の点から好ましい。しかしダストによる閉塞の回避の観点からは径は大きくしたほうが良い。そこで溶融還元の一貫設備である福山の流動層規模を想定し、分散板の設計の考えを整理するためにノズル構造の影響を受ける気泡の挙動が濃厚相、気泡相のガス交換を通じて流動層の還元性能にどの程度影響するかを二相モデルで検討した。還元反応の扱いは 2.2 と同様で、また濃厚相内粒子は完全混合、気泡相はピストンフローとする。基礎式を以下に示す。

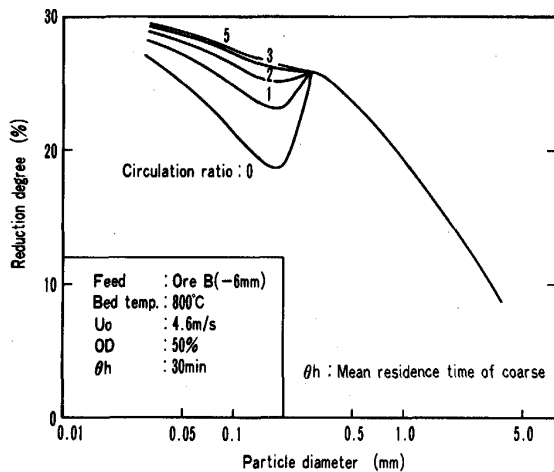


Fig. 12. Effect of circulation on reduction degree calculated by simulation model.

物質収支式

気泡相

$$V_B \frac{U_B}{L_f} \frac{dC_B}{dy} + F_{EB}(C_B - C_E) \dots\dots\dots (13)$$

濃厚相

$$U_{mf} \frac{dC_E}{dy} + \frac{(U_0 - U_{mf}) \cdot L_f}{U_B V_B} \cdot F_{EB}(C_E - C_B) + L_{mf}(1 - \epsilon_{mf}) \cdot \rho_p \lambda(R_w) (C_E - C_E^*) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

ここで

$$\lambda(R_w) = \frac{6}{d_p \rho_p} (1 - R_w)^{2/3} \cdot k_r \cdot (1 + \frac{1}{K_e}) \dots\dots\dots (15)$$

ガス交換速度の計算には次式を用いた<sup>13)</sup>.

$$F_{EB} = (9/2) \pi \zeta \xi U_{mf} D_e^2 \dots\dots\dots (16)$$

高さ方向の気泡径分布は次の Mori-Wen の式<sup>14)</sup>を用いた.

$$\frac{D_{bm} - D_e}{D_{bm} - D_{b0}} = \exp\left(\frac{-0.3 \gamma_0 y}{D_t}\right) \dots\dots\dots (17)$$

基本的には固気反応流動層についての森、鞭らのモデル<sup>13)</sup>と同様に、気泡の合体を含めたガス交換係数のパラメータを  $\zeta \xi$  とした。気泡径は軸方向の分布を Mori-Wen の式で求め代表気泡径モデルの扱いを取った。まずガス交換係数のパラメータ  $\zeta \xi$  について還元率との関係を感度解析した結果を Fig. 13 に示す。鉱石の代表径は 1.5 mm とした。  $\zeta \xi$  は森らの検討により 0.2~0.6 と想定されるが<sup>15)</sup>、この範囲で還元率への影響はほとんどない。また生成する気泡径を変化させ、その際の代表気泡径と還元率との関係を Fig. 14 に示す。本流動層の条件(分散板開口比 3.0%, ノズル内径 10~30 mm)で想定される気泡径の範囲(0.1~0.3 m)に対してやは

り還元率への影響度は小さい。すなわち、濃厚相内の反応速度、還元ガス消費量が小さいためノズルの配置、径によりガス交換が不活発であっても還元率への影響は小さい。通常の流動層では径方向のガスの移動を活発にするためノズル出口方向を横方向に向けたキャップ式を用いることが多い。しかしこの予備還元流動層の場合にはノズルへのダストの付着対策を重視してノズル径を通常の分散板より大に、またストレートタイプとして固気接触がやや不良であっても、流動層内の還元反応がガス交換律速とならないために本流動層の性能にはほとんど影響しないと考えられる。

### 4. 結 論

熔融還元プロセスにおける予備還元流動層開発のための基礎研究を行い、次のような結論を得た。

- 1) 粒度範囲の広い粉鉄鉱石を対象に最小流動化速度の推算を行い、Wen-Yu 式の有効性を確認すると共に偏析を回避できる条件を整理した。
- 2) バッチ流動層で粉鉄鉱石の反応速度定数を求め、さらに均一相モデルによる連続系の操作条件を検討し所定の還元率を得るのに適した滞留時間を求めた。
- 3) 小型熱間流動層で還元実験を行い、基本的にはバブリング流動層として粉鉄鉱石中の粗粒系を処理し、分級される微粒系には循環装置を設けて還元率を制御する方法が粒度範囲の広い粉鉄鉱石に対し有効な設備設計で

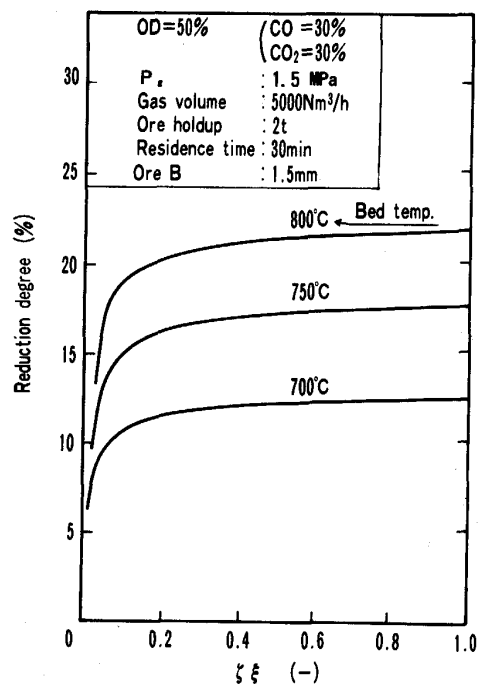


Fig. 13. Influence of gas interchange coefficient on reduction degree calculated by tow-phase model.

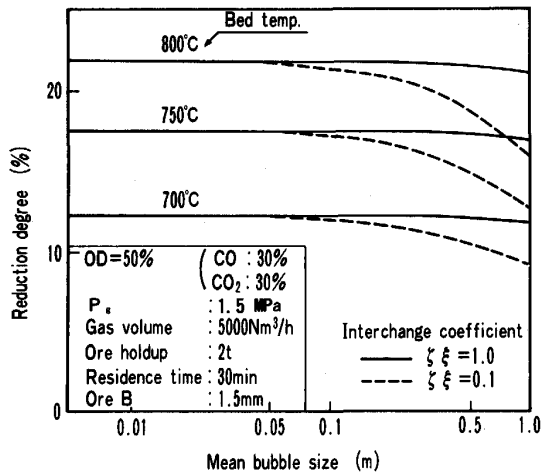


Fig. 14. Influence of mean bubble size on reduction degree calculated by tow-phase model.

あることを確認し、その特性を把握した。

4) 微粒系の分級挙動に注目したモデルを作成し、微粒系の循環を伴う本形式の流動層の操業予測に役立てることができた。

5) 流動層内のガス交換を二相モデルで検討した結果、熔融還元炉からの高含塵ガスによる付着対策を優先したノズル設計をしても流動層の還元性能に与える影響は少ないと考えられる。

記号

- $A_r$ : アルキメデス数(-)
- $A_t$ : 塔断面積( $m^2$ )
- $C_A$ : 還元ガス代表濃度( $kmol/m^3$ )
- $C_A^*$ : 還元ガス平衡濃度( $kmol/m^3$ )
- $C_B$ : 気泡相内還元ガス濃度( $kmol/m^3$ )
- $C_E$ : 濃厚相内還元ガス濃度( $kmol/m^3$ )
- $C_E^*$ : 濃厚相内還元ガス平衡濃度( $kmol/m^3$ )
- $D_e$ : 気泡径(m)
- $D_{bm}$ : 最大気泡径(m)
- $D_{b0}$ : 生成気泡径(m)
- $D_t$ : 塔径(m)
- $d_o$ : 鉱石中被還元酸素濃度( $kmol \cdot O/m^3$ )
- $d_p$ : 粒径(m)
- $F_{EB}$ : 気泡-濃厚相間ガス交換量( $m^3/s$ )
- $F_i$ : 鉱石量( $kg/s$ ) ( $i=0$ ; フィード, 1; 粗粒, 2; 分級粒子, 3; 微粒, 4; 循環粒子)
- $g$ : 重力加速度( $m/s^2$ )
- $I_s$ : 粒度分布指数(-)
- $K^*$ : 飛び出し速度定数( $kg/m^2 \cdot s$ )
- $K_e$ : CO-CO<sub>2</sub>系のFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/FeOの平衡定数(-)
- $k_r$ : 還元反応速度定数( $m/s$ )
- $L_f$ : 流動層高(m)
- $L_{mf}$ : 流動化開始時の層高(m)
- OD: ガス酸化度(%)

- $P_g$ : 層内ガス平均圧力(Pa)
- $P_i$ : 粒度の確率分布(-) ( $i=0$ ; フィード, 1; 粗粒, 2; 分級粒子, 3; 微粒, 4; 循環粒子,  $b$ ; 層内)
- $R$ : 総括還元率(-)
- $R_c$ : 循環比(-)
- $R_{emf}$ : 流動化開始時のレイノルズ数(-)
- $R_{et}$ : 終末速度基準のレイノルズ数(-)
- $R_g$ : ガス定数( $J/mol \cdot K$ )
- $R_w$ : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>からFeOへの部分還元率(-)
- $\bar{R}_w$ : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>からFeOへの製品の平均部分還元率(-)
- $r_0$ : 粒子半径(m)
- $T$ : 温度(K)
- $U_B$ : 気泡上昇速度(m/s)
- $U_{mf}$ : 最小流動化速度(m/s)
- $U_t$ : 終末速度(m/s)
- $U_0$ : 空塔速度(m/s)
- $V_B$ : 気泡体積( $m^3$ )
- $W_b$ : 滞留量(kg)
- $y$ : 無次元高さ(-)
- $y_0$ : 層高(m)
- $\epsilon$ : 空隙率(-)
- $\epsilon_{mf}$ : 流動化開始時の空隙率(-)
- $\zeta$ : 気泡の合体係数(-)
- $\theta$ : 時間(s)
- $\theta_c$ : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>からFeOへの反応完結時間(s)
- $\theta_h$ : 平均滞留時間(s)あるいは(min)
- $\lambda(R_w)$ : 固体側反応推進力( $m^3/kg \cdot s$ )
- $\mu$ : ガス粘度( $Pa \cdot s$ )
- $\xi$ : ガス交換係数(-)
- $\rho_p$ : 粒子密度( $kg/m^3$ )
- $\Phi$ : 無次元時間(-)

文 献

- 1) H. Tanabe, K. Takahashi, T. Ariyama, T. Kitagawa, A. Ozeki and M. Yamaga: Ironmaking Conference Proceedings, 48 (1989), p. 89
- 2) 流動層反応装置(化学工学協会編)(1987), p. 24 [化学工業社]
- 3) 近藤真一: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 1542
- 4) 筒井俊雄, 野崎泰彦: 化学工学, 49 (1985), p. 344
- 5) D. Geldard: Powder Technology, 7 (1973), p. 285
- 6) C. Y. Wen and Y. H. Yu: AIChE J., 12 (1966), p. 610
- 7) A. W. Nienow and N. S. Naimier: Trans. I. Chem. E., 58 (1980), p. 181
- 8) 熊坂 晃, 坂本 登, 有山達郎, 磯崎進市: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 111
- 9) 森中 功, 神谷昂司, 櫻谷和之, 北原宜泰, 尾澤正也, 田中 稔: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 185
- 10) 有山達郎, 磯崎進市, 北川 融, 田辺治良, 川田 仁, 川上正弘: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 113
- 11) D. Kunii and O. Levenspiel: Fluidization Engineering (1969), p. 312 [John Wiley & Sons]
- 12) 矢木 栄, 青木哲男: 化学工学協会秋季大会前刷 (1956), p. 3
- 13) 森 滋勝, 鞭 巖: 化学工学, 34 (1970), p. 510
- 14) S. Mori and C.Y.Wen: AIChE J., 21 (1975), p. 109
- 15) 森 滋勝, 鞭 巖: 化学工学, 34 (1970), p. 516