

循環流動層による粉鉱石の還元

高本 泰*・国友 和也*・江頭 達彦*²・大塚 一*³

Reduction of Fine Iron Ore with Circulating Fluidized Bed

Yasushi TAKAMOTO, Kazuya KUNITOMO, Tatsuhiko EGASHIRA and Hajime OTSUKA

Synopsis : By means of pre-reduction of iron ore fines, productivity of a blast furnace can be increased and iron ore unsuitable for sintering process can be easily used in the blast furnace. As a pre-reduction process a circulating fluidized bed (CFB) has been developed with a pilot plant.

The riser of CFB is 550 mm in inside diameter and 10 m in height. The CFB pilot plant processed iron ore of wide size distribution in the feed rate range of 0.5–1.0 t/h. Test result shows that the reduction degree ranges from 60 to 90% at the reduction temperature of 850–900°C with no sticking problem. The degree of gas utilization (the increase of oxidation degree of gas) was 10% at the superficial gas velocity until 10 m/s. The pressure drop in the riser was 30 kPa at the same condition.

From the analysis of reduction rate the retention time for reducing iron ore to the reduction degree of 60 and 90% are 20 and 120 min at 880°C respectively. The productivity at the reduction degree of 60% is expected to be about 6 times higher than that of the reduction degree of 90%.

Key words: ironmaking; iron ore; blast furnace; fluidized bed; reduction; pressure drop; gas velocity.

1. 緒言

エネルギー消費量が大きく、そのエネルギーを石炭に依存する製鉄工程には、他工程にもまして省エネルギーおよびCO₂発生量削減への期待が大きい。また、良質塊鉱が減少し粉鉱石が増加する、なかでも難焼結性粉鉱石が増加する傾向にある資源動向に対応することが必要である。さらに、エネルギーおよび資源の問題に対応すると同時に、生産性を高め、かつ経済性を向上していくことが製鉄工程には要求されている。

半還元鉱石の製造と高炉での使用が、製鉄技術を現段階から飛躍的にレベルアップするために進められるべき技術の一つに挙げられて久しい¹⁾。高炉原料として半還元鉱石を使うことは、高炉の出鉄比上昇と燃料比低減に効果的である²⁾。高炉の主要装入物である焼結鉱の原料となる粉鉱石のなかには結合水やAl₂O₃が高く焼結性の悪い粉鉱石がある。そのような粉鉱石も、半還元鉱石とすれば、焼結機で処理することなく、高炉製鉄法において容易に使えられると考えられる。

さらに、半還元鉱石の製造プロセスを天然ガスベースで考えれば、現行高炉法で使用している石炭エネルギーの一部を天然ガスに代替することになるので、CO₂発生量の削減が可能である。

しかも、半還元鉱石の製造・使用を含む高炉製鉄法で鉄

製造に必要なエネルギーは、現行高炉製鉄法に必要なエネルギーと比較し、半還元鉱石製造にエネルギーが必要だからといえども、必ずしも増エネルギーとはならず、むしろ省エネルギーとなる可能性があると考えられる。

なぜならば、半還元鉱石製造にエネルギーが消費されるものの、半還元鉱石の高炉使用によって、高炉コークス比低下によるコークス製造エネルギー低減と、焼結鉱またはペレット使用割合減少による焼結鉱またはペレット製造エネルギー低減とが期待できるからである。また、半還元鉱石製造プラントの立地を鉱石山元に求めることが可能であれば、鉱石中の水分と酸素の一部を鉱石山元で除去できるので、鉱石の海上輸送エネルギーが低減できるし、高炉コークス比が低下するので、石炭の海上輸送エネルギーも低減できるからである。

半還元鉱石を製造するプロセスとしては、高炉製鉄法において主要原料である粉鉱石を直接使用することのできる流動層が望ましいと考えられる。流動層で製造した成品は、粉状のまま羽口から高炉内に吹き込んだり³⁻⁵⁾、塊成化して炉頂から高炉内に装入することができる。

流動層としては、気泡流動層 (Bubbling Fluidized Bed: 以下BFBと記す) に比べて、粒度分布幅の大きな粉鉱石が使用可能で、ガス流速が大きく生産性が高い循環流動層 (Circulating Fluidized Bed: 以下CFBと記す) を用いることが有利であると考えられる。

平成12年9月1日受付 平成12年12月11日受理 (Received on Sep. 1, 2000; Accepted on Dec. 11, 2000)

* 新日本製鐵 (株) 鉄鋼研究所 (Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293-8511)

* 2 新日本製鐵 (株) プラント事業部 (Plant & Machinery Div., Nippon Steel Corp.)

* 3 新日本製鐵 (株) 設備技術開発センター (Plant Engineering & Technology Center, Nippon Steel Corp.)

すなわち、BFBでは、粒子径を揃え、粒子の流動化開始速度以上、終末速度以下のガス流速で運転する必要がある。一方、CFBでは、サイクロンの捕集限界の微粒子から、ある程度までは運転ガス流速よりも大きな終末速度を持つ粗粒子までが使用可能であり、また原理的に大きなガス流速で運転されることから、BFBよりも大きな粒度分布幅を持つ粉鉱石が使用可能である。

さらに、CFBでは、高ガス流速条件下でも粒子循環速度を大きくすることにより、ライザー内の粒子濃度を大きくし、かつ安定した流動状態を確保可能であるため、CFBの生産性はBFBより高い。

CFBでは、粒度分布幅の大きな粉鉱石が使用可能であること、BFBよりも生産性が高いことを、ライザー内径100 mm、高さ6 mで電気炉による外熱式の小規模CFBを用いた実験により確認したことを、前報で報告した⁶⁾。

本報では、高炉での使用を前提にした半還元鉱石の効率的な製造プロセス確立のため、小規模CFBによる実験結果を確認し、CFB商用プラントの設計のために必要なデータを得ることを目的として、CFBパイロットプラント⁷⁻⁹⁾を建設し試験操業を実施したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

CFBパイロットプラントは、原料鉱石供給系、CFB本体、成品排出系、還元ガス発生系、冷却水循環系および排ガス処理系とからなっている。

2.1 CFB本体

CFB本体を含むCFBパイロットプラントの概要をFig. 1に示す。CFB本体は耐火物により断熱されており、反応容器であるライザー、一次の粒子循環系を構成する一次サイクロンと一次ダウンカマー、および二次の粒子循環系を構成する二次サイクロンと二次ダウンカマーからなっている。ライザーは、内径550 mm、高さ10 mである。二次サイクロン出側で大気圧+2 kPaになるように圧力制御を行っている。

一次サイクロンまたは二次サイクロンで捕集された粒子はそれぞれ一次ダウンカマーまたは二次ダウンカマーの底部に充填層を形成する。その粒子充填層がガスをシールすることにより、サイクロン捕集効率の維持が可能となる。

一次ダウンカマーまたは二次ダウンカマーの底部に形成した粒子充填層中に少量のN₂を流し、充填層全体またはその一部を流動化させることにより、一次ダウンカマー底部充填層内の粒子はライザーに、二次ダウンカマー底部充填層内の粒子は一次ダウンカマーにそれぞれ循環される。これにより、粒子循環速度が確保され、ライザー内圧損すなわちライザー内粒子滞在量の確保が可能となる。

2.2 原料供給

原料鉱石には焼結原料鉱石 (SF) として用いられている

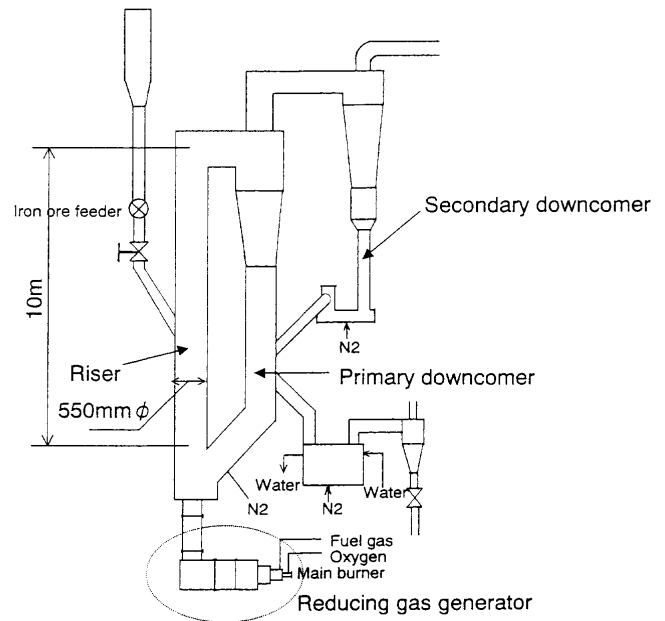


Fig. 1. Schematic drawing of CFB pilot plant.

Table 1. Chemical composition of iron ore (mass%).

T.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	C.W.
56.80	0.57	5.47	2.62	0.14	0.34	7.70

7.70%の結合水と2.62%のAl₂O₃を含むピソライト粉鉱石を使用した。化学組成をTable 1に示す。原料鉱石は事前に乾燥し付着水を1%以下としたが、乾燥処理による結合水含有量の減少はなかった。

主として5 mm以下の鉱石を、ロータリーフィーダーによりライザー中間部に定量供給した。第二回試験操業において約2日間、ロータリーフィーダーでの噛み込み防止のために20 mm以上の挟雑物を除去しただけの焼結原料鉱石 (SF)を使用した。

2.3 成品排出

一次ダウンカマーの粉体シール高さを制御しながら一次ダウンカマー中間部から成品を排出し、冷却水により間接冷却した。冷却した成品を、大気中で容器に保管・秤量するとともに一部を粒度分析と化学分析に供し、粒度分布の変化と成品の還元率を求めた。

2.4 還元ガス

還元ガスはライザーの下に直接取り付けられたガス発生炉により製造され、ライザー底部のノズルからライザー内に吹き込まれる。

還元ガスの製造には、コークス炉ガスとLPG (プロパン) を混合した燃料ガスを使用した。この燃料ガスを酸素により部分燃焼させたあと、N₂ガスを適宜混合することにより、温度1200~1350°C、流量2000~3000 Nm³/hの還元ガスを製造した。

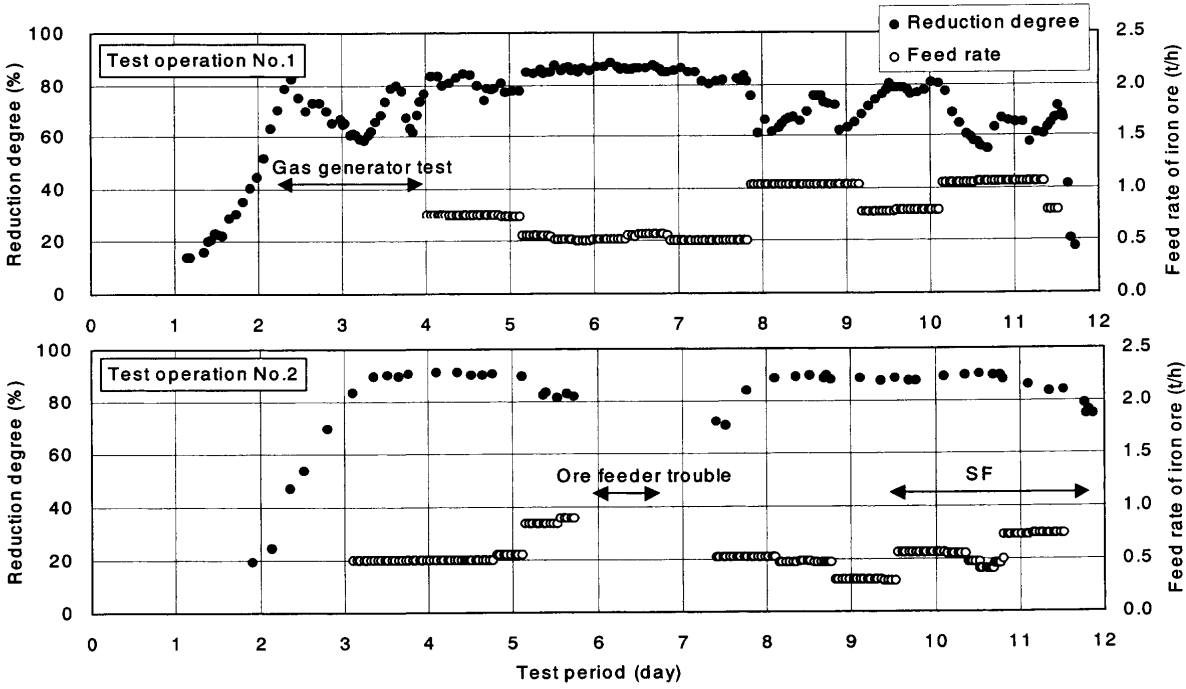


Fig. 2. Trend of reduction degree and riser temperature.

3. 実験結果

第一回および第二回試験操業期間中における鉱石供給速度と成品還元率の推移を Fig. 2 に示す。予熱期間を含めて 12 日間 CFB パイロットプラントを運転した。

還元ガス発生炉の運転条件や還元温度なども変化させたが、鉱石供給速度の変化が成品還元率に与える影響を主に調査した。試験条件の変更に応じて速やかに成品還元率が変化する。実験結果の解析には、試験条件を固定してから約半日経過以降のデータによった。

第二回試験操業において、20 mm 以上の挟雑物を除去しただけの焼結原料鉱石 (SF) を 2 日間使用したが、鉱石供給速度 0.55 t/h で成品還元率約 90%、鉱石供給速度 0.75 t/h で成品還元率約 84% と 5 mm 以下の原料鉱石使用時とほぼ同様であった。

3.1 還元ガス組成

還元ガス組成を Table 2 に示す。式 (1) で定義するガス酸化度 (Oxidation Degree of Gas: 以下 OD と記す) は 11~12% である。

$$OD = \frac{H_2O + CO_2}{H_2 + H_2O + CO + CO_2} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

燃料ガス中の LPG 割合を増やすと、Fig. 3 に示すように還元ガス OD は低下し、還元反応には有利となる。しかし、LPG 割合を増やすにつれてすすの発生速度が増えるので、長期間にわたる試験操業の安定のために、すす発生のない範囲で還元ガスを製造した。

鉱石中の結合水が熱分解することによりガス OD は 1.5~

Table 2. Composition of reducing gas except N₂ (vol%).

H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	CH ₄
52~57	7~10	30~35	2~3	1~2

* N₂: 5-14% of reducing gas.

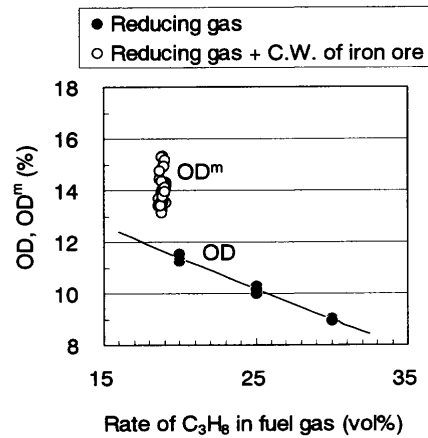


Fig. 3. Composition of reducing gas.

4.0% 上昇する。上昇後の OD を式 (2) に定義する OD^m とする。OD^m は Fig. 3 に示すように 13.0~15.5% であった。

$$OD^m = \frac{Q \times (H_2O + CO_2) + W \times CW \times \frac{22.4}{18}}{Q \times (H_2 + H_2O + CO + CO_2)} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

3.2 還元温度

ライザーと一次ダウンカマーの炉内温度は、粒子の循環により一様になるので、ライザー高さ方向中間部の炉内温度をもって還元温度の代表値とした。

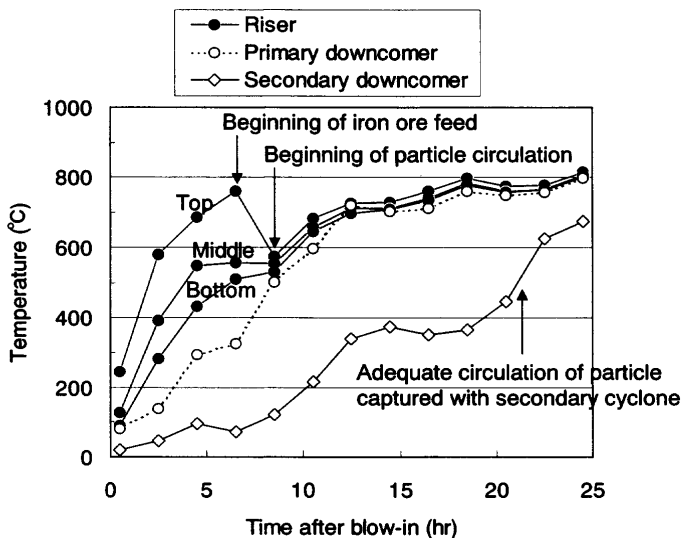


Fig. 4. Trend of temperature in CFB at the beginning of the test operation No. 1.

昇温過程におけるCFB本体の炉内温度変化をFig. 4に示す。粒子循環が生じるまでは、ライザー高さ方向の温度差が大きく、ライザー底部から頂部にかけて温度が250°C程度低くなっている。一次ダウンカマの温度はさらに低くライザー底部温度より約400°C低く、二次ダウンカマ温度はほとんど上昇していない。

鉱石装入開始後、炉内の粒子滞在量が増加し、一次ダウンカマ下部に粉体シールが形成され、粒子が循環し始め、ライザー内の圧力損失が増加するとともに、ライザーの高さ方向の温度分布が均一化した。同時に、一次ダウンカマ温度はライザー温度と等しくなった。主たる還元反応領域であるライザーが均一な温度になることはCFBの反応効率を維持する上で重要である。小規模CFBでは、電気炉による外熱式であるためライザーおよび一次ダウンカマが均一な温度であったが、耐火物製の断熱型のCFBパイロットプラントでも粒子循環によりライザーおよび一次ダウンカマが均一な温度になることが確認できた。

二次ダウンカマ底部の流動化用N₂ガス流量を調節し、二次サイクロン捕集粒子の循環を適正化することにより、二次ダウンカマ底部の炉内温度も上昇し、ライザーの炉内温度よりも100~150°C低めの炉内温度となった。

温度1200~1350°Cで流量2000~3000 Nm³/hの還元ガスを使用し、鉱石供給速度0.5~1.0 t/hでは、熱収支により、還元温度は850~900°Cとなった。

3.3 粒度分布

原料鉱石と成品の粒度分布をFig. 5に示す。成品には粉化による粒径の低下がみられるが、原料鉱石粒度分布の差が成品粒度分布に及ぼす影響はあまりみられない。

5 mm以下の鉱石を使用したときのライザー内の圧力損失と、それ以上の大きさの20 mm以上の挟雑物を除去しただけの焼結原料鉱石(SF)を使用したときの圧力損失はほ

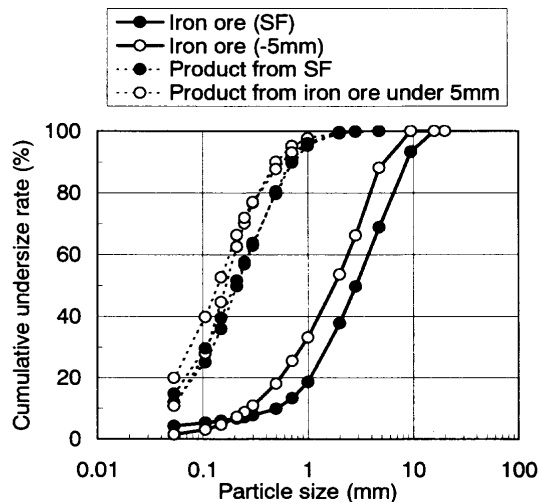


Fig. 5. Particle distribution of iron ore and product.

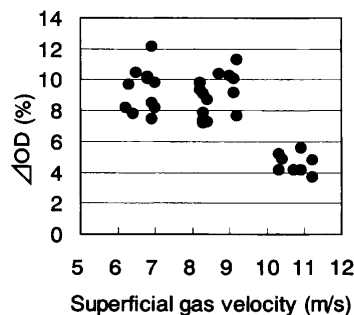


Fig. 6. Gas utilization degree and superficial gas velocity.

んど変わらず、いずれも安定した流動状態であった。これは、粗粒が微粒との運動量の交換によって安定的に流動化するというCFBの特徴に加え、ライザー内で流動化する粒子の大部分が循環粒子であり、その粒度分布は成品粒度分布に相当し、原料鉱石粒度にはあまり影響されないためである。

3.4 ガス利用効率

ガス流量とガス利用効率(以下ΔODと記す)の積が流動層の生産性を決定する重要な因子である。ここで、ΔODは式(3)に示すように、出口ガスOD(以下OD_{exhaust}と記す)とOD^mとの差で、還元反応によるOD増分を意味する。

$$\Delta OD = OD_{\text{exhaust}} - OD^m \dots \dots \dots (3)$$

ライザー内ガス流速とライザー断面積の積がガス流量である。DIOSのCFB要素研究でのライザー内ガス空塔速度は3.9~7.9 m/sであり⁽¹⁰⁾、Circoredでは4~6 m/sである⁽¹¹⁾。本CFBパイロットプラント試験ではガス空塔速度6~9 m/sの範囲内で8~12%のΔODを得ることができた(Fig. 6)。ガス空塔速度変化によるΔODへの影響はみられなかった。10 m/sを超えるガス流速ではΔODの低下がみられた。

また、Fig. 7に示すように10 m/s以下のガス流速では、

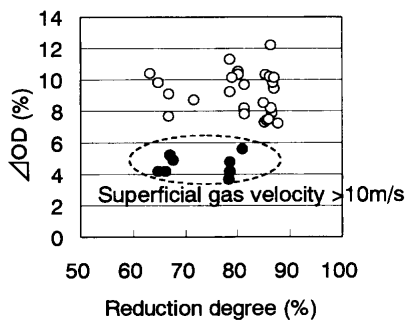


Fig. 7. Gas utilization degree and reduction degree.

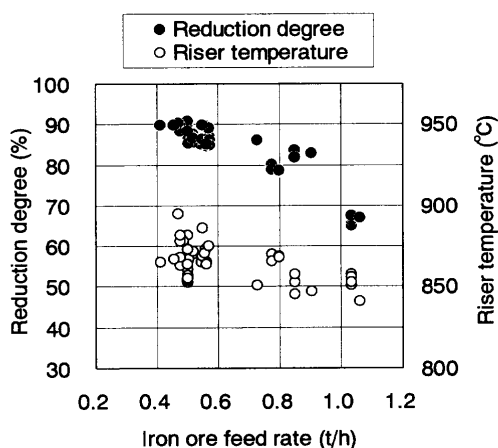


Fig. 8. Influence of iron ore feed rate on reduction degree and riser temperature.

Table 3. Typical conditions and results of the test operation.

Iron ore feed (kg-ore/h)	Riser temperature (°C)	Reduction degree (%)	Productivity (t-product/m ² /h)	Pressure drop in riser (Pa)	Retention time (min)
557	868	88.5	1.63	27000	101.1
785	865	80.4	2.35	31200	81.3
1034	852	66.5	3.24	30000	56.7

ΔODは還元率に関わらず一定であった。

3.5 還元率と生産性

Fig. 8 に示すように、鉱石供給速度 0.5~1.0 t/h で成品還元率は 60~90% であり、鉱石供給速度の上昇に伴い還元率は低下した。

Table 3 に示すように、還元率 89% での成品鉱石生産性は 1.6 t/m²/h であり、還元率 67% での生産性は 3.2 t/m²/h であった。生産性 1.6 t/m²/h での還元温度は 870°C であり、生産性 3.2 t/m²/h での還元温度は 850°C であった。

0.56~1.03 t/h の鉱石供給速度の範囲でライザー圧力損失は約 30 kPa で一定であった。この圧力損失は、ライザー内の粒子滞在量約 0.7 t に相当する。鉱石供給速度が上昇し成品排出速度が増えれば、ライザー内粒子滞在量を成品排出速度で割った粒子平均滞在時間すなわち反応時間は短くなり、成品還元率は低下する。

鉱石供給速度が 0.56 t/h から 1.03 t/h 程度に上昇すると、ライザー内の粒子平均滞在時間は 101 分から 57 分程度に短縮し、還元率は 89% から 67% 程度に低下する。

このとき、鉱石供給速度の上昇に伴い、還元温度も 870°C から 850°C に低下している。これは、成品顕熱増加すなわち出熱増加に応じた入熱増加が図られていないことによる。還元温度が低下すると反応速度が小さくなるため還元率もまた低下する。したがって、鉱石供給速度上昇による還元率低下は、反応時間短縮と還元温度低下の両方に影響されている。

4. 考察

4.1 反応モデル

試験結果で得られた生産性は、反応時間短縮と還元温度低下の両方の影響を受けている。それぞれの生産性に及ぼす影響を定量的に把握するため、反応モデルを用いて検討した。

式 (4) に示す化学反応律速の一界面未反応核モデル¹²⁾を用いる。粒子の還元が完了する時間を t_1 とすれば、式 (4) において、 $t=t_1$ で $R=1$ だから、式 (5) に示すように、反応速度 k は鉱石粒子半径 r_0 、鉱石中被還元酸素濃度 d_0 および粒子の還元が完了する時間 t_1 であらわすことができ、反応時間 t の粒子の還元率 $R(t)$ は式 (6) となる¹³⁾。流動層内で粒子は完全混合であるとすれば式 (7) の滞在時間分布関数 $E(t)$ ¹⁴⁾ を用い、平均滞在時間 τ での平均還元率 $R_m(\tau)$ は式 (8) で表すことができる。

$$r_0 \cdot d_0 \cdot [1 - (1 - R)^{1/3}] = k \cdot t \dots\dots\dots (4)$$

$$k = r_0 \cdot d_0 / t_1 \dots\dots\dots (5)$$

$$R(t) = 1 - (1 - t/t_1)^3 \dots\dots\dots (6)$$

$$E(t) = \exp(-t/\tau) / \tau \dots\dots\dots (7)$$

$$R_m(\tau) = \int_0^\infty R(t) \cdot E(t) dt = \int_0^\infty \{1 - (1 - t/t_1)^3\} \cdot \{\exp(-t/\tau) / \tau\} dt \dots\dots\dots (8)$$

試験操業により得られた成品還元率 R_m とライザー内の粒子平均滞在時間 τ を式 (8) に代入することにより、粒子の還元が完了する時間 t_1 を求めることができる。さらに、鉱石粒子半径 r_0 を成品鉱石の 50% 平均粒子径とし、鉱石中被還元酸素濃度 d_0 を原料鉱石の化学組成から求めることにより、式 (5) から反応速度 k を得ることができる。

なお、得られた反応速度 k の値には温度に加えガス組成および粒子の粒径分布の影響が含まれているが、モデル解析の簡略化のため温度の影響のみ考慮した。反応速度 k に

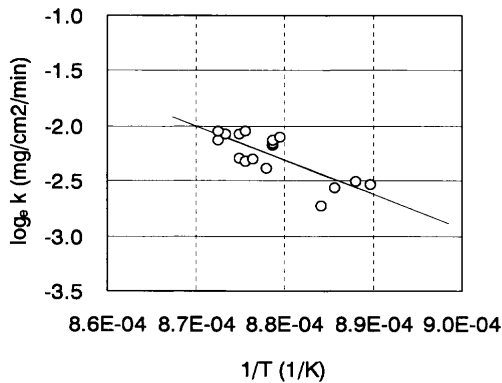


Fig. 9. Effect of temperature T on reduction rate k .

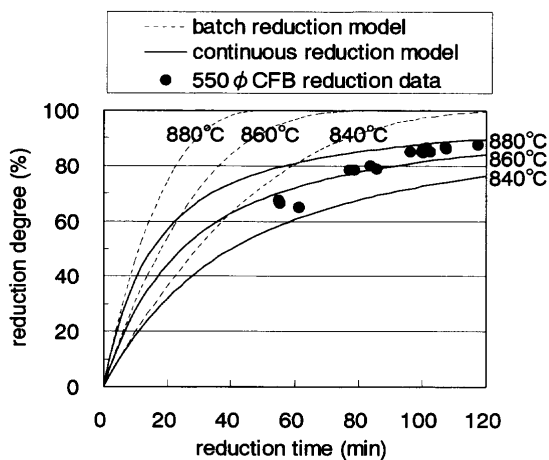


Fig. 10. Effect of temperature on relationship between reduction degree and time.

及ぼす温度 T の影響は、試験結果から得られる反応速度 k と温度 T の関係 (Fig. 9) を用いて求めた。

Fig.10 に示すように、この反応モデルによって、処理速度増減で生じたライザー内平均滞在時間 τ および温度 T の変化と、還元率 R_m との関係、すなわち本循環流動層における還元特性が記述可能である。

4.2 生産性

一般に還元鉄製造コストに占める固定費の割合は大きく、生産性上昇は固定費削減すなわち製造コスト低減への寄与が大きい。還元温度上昇による反応速度上昇と還元率低下とがもたらす反応時間短縮は、生産性の上昇に効果的である。

流動層還元鉄製造プロセスにおいては、スティッキングに伴う操業トラブルによる生産性の低下がもっとも問題となる。電炉用還元鉄の原料鉱石にくらべ、焼結原料鉱石は脈石成分が多いのでスティッキングが起きにくい¹⁵⁾。そのため、焼結原料鉱石を使用すれば、還元温度上昇による反応速度上昇すなわち生産性上昇が可能となる。CFBパイロットプラントの試験結果を速度論的に整理した Fig.10 に示すように、880°C で還元率80%を得るための反応時間は、還元温度840°C で還元率80%を得るための反応時間の

約1/2.5となる。すなわち、840°C から880°C への温度上昇により2.5倍の生産性を得る可能性がある。

スティッキング抑制には還元率の低下もまた効果的である。CFBパイロットプラントでは、焼結原料鉱石の使用により、還元率90%まで、かつ還元温度900°Cまで、スティッキングに伴う操業トラブルはなかった。

一方、還元率低下による反応時間短縮すなわち生産性上昇の効果は、完全混合プロセスである流動層において特に顕著である。Fig.10 に示すように、880°C において、還元率60%に必要な反応時間は、還元率90%に必要な反応時間の約1/6となる。すなわち、還元率60%を得るときの生産性は、還元率90%を得るときの生産性の約6倍となる可能性がある。

還元温度上昇と還元率低下とによる反応時間短縮がもたらす生産性上昇の可能性を実現するためには、ガス流量と ΔOD の積を大きくして、生産性上昇すなわち単位時間あたりの原料鉱石からの奪酸素量の増大に見合った酸素バランスを保證することが必要である。

まず、ライザー断面積あたりのガス流量を増やすことによってガス流量を大きくすることが挙げられる。CFBパイロットプラントの試験結果からは、10 m/s を超えるガス流量で ΔOD が低下した。ノズルからライザーに吹き込まれるガスの流速や方向などがライザー下部の粒子濃厚層でのガスと粒子の接触効率に影響していると考えられるが、ガス流量が大きくなることによってこの接触効率が低下したために ΔOD が低下した可能性が考えられる。 ΔOD の低下は、ガス流量と ΔOD の積を大きくするためには望ましくない。反応容器の加圧化やライザー下部構造の改善を考慮し、 ΔOD が低下しない範囲内で、ライザー断面積あたりのガス流量を増加することが生産性の上昇に効果的である。

つぎに、 ΔOD を大きくすることが挙げられる。 OD_{exhaust} が還元反応の平衡 OD よりも十分小さいことが還元の進行に必要である。CFBパイロットプラントの試験結果では、 OD_{exhaust} はかなり高いレベルにあるので、これ以上 OD_{exhaust} を高くすることを図るよりも OD^m を低下させることが現実的である。流動層還元プロセスにおいて、鉱石の予熱・焙焼設備を設けることは、還元ガスの発生設備、排ガスの循環・精製・予熱設備の規模を小さくし、流動層還元プロセス全体の経済性を高めるのに有効であるが、鉱石中の結合水を事前に除去することも可能であり、 OD^m を低下させるという点でも効果的である。また、還元鉄製造プロセスで、還元ガスの製造工程または循環ガスの精製工程に設置するのが一般的である脱炭酸装置によって、 OD^m を低下させることも可能である。

なお、粒子循環速度増加などによって、ライザー内圧損増加すなわちライザー内粒子滞在量の増加により生産性の上昇が可能になる場合もガス流量と ΔOD の積を相応に大きくすることが必要になる。

還元鉄の脈石成分の上昇と還元率の低下は、製造側での経済性は改善されるが使用側での経済性は悪化する。ただし、電気炉用還元鉄に比較して脈石が高く還元率の低い半還元鉄でも、高炉で使用する場合には、高炉自体が還元・溶解の機能を持つため、電気炉使用時に比べさほど問題にはならないと考えられる。

半還元鉄の高炉使用時の出鉄比上昇と燃料比低下の効果は、還元率がウスタイト以上では、還元率の低下にほぼ比例して小さくなるものの¹⁶⁾、流動層での生産性は飛躍的に大きくなると期待される。そのため、経済的に最適な高炉用半還元鉄の還元率は電気炉用に求められる還元率よりも低いところにあると考えられる。

半還元鉄の還元率を90%よりも高くしようとすると流動層還元プロセスでの生産性が小さくなるため、半還元鉄の製造エネルギーおよびコストが大きくなり、高炉での半還元鉄使用効果を相殺すると考えられる。一方、半還元鉄の還元率が低く金属鉄を含まないとき、すなわち30%程度までは、高炉での半還元鉄使用による燃料比低減効果は期待できない²⁾。コストをかけて半還元鉄を製造するからには鉄分の半量は金属鉄となっていることが望ましいと考えられる。したがって、高炉用半還元鉄の最適な還元率は、経済的諸条件によって変化するため詳細な検討が必要であるが、60%から90%の間であると思われる。

5. 結言

CFBパイロットプラントによる粉鉄石の還元試験を実施した。粒子の循環により、ライザー圧力損失が約30 kPaとなり、ライザーおよび一次ダウンカマの温度は均一になった。、鉄石供給速度0.5~1.0 t/h、還元温度850~900°Cで、スティッキングトラブルはなく、成品還元率60~90%、ガス空塔速度6~9 m/sで ΔOD 8~12%を得た。

5 mm以下の鉄石を使用したときと、20 mm以上の挟雑物を除去しただけの焼結原料鉄石(SF)を使用したときとで、成品鉄石の還元率と粒度分布、およびライザー内の圧損の違いはみられなかった。

還元温度870°Cで、還元率89%の成品鉄石生産性1.6 t/m²/hを得た。還元温度850°Cで、還元率67%の生産性3.2 t/m²/hを得た。

化学反応律速の界面未反応核モデルを適用し、流動層内で粒子は完全混合であるとした反応モデルにより、温度と反応時間とが交絡して還元率に影響している試験結果から、それぞれの還元率に及ぼす影響を分離定量化することができた。

反応モデルから、還元率80%の成品を得るのに、840°Cから880°Cへの温度上昇により2.5倍の生産性となる可能

性があることがわかった。また、880°Cにおいて、還元率60%を得るときの生産性は、還元率90%を得るときの生産性の約6倍となる可能性があることがわかった。

現行高炉製鉄法の発展を可能とする、高効率な高炉用半還元鉄製造CFB商用プラントの設計に必要なCFBの流動・還元特性を把握できた。これにより、半還元鉄使用時の高炉での経済効果と、半還元鉄製造時のCFBでの経済性を考慮して、経済的に最適な高炉用半還元鉄の還元率とその製造プロセスについて定量的に検討することが可能となった。

記号

d_0	: 鉄石中被還元酸素濃度 (mg/cm ³)
r_0	: 鉄石粒子半径 (cm)
t	: 反応時間 (min)
t_1	: 粒子反応完了時間 (min)
τ	: 層平均滞在時間 (min)
CW	: 鉄石中結合水濃度 (mass%)
CO	: CO ガス濃度 (vol%)
CO ₂	: CO ₂ ガス濃度 (vol%)
H ₂	: H ₂ ガス濃度 (vol%)
H ₂ O	: H ₂ O ガス濃度 (vol%)
OD	: ガス酸化度 (%)
OD ^m	: 還元ガス修正酸化度 (%)
OD _{exhaust}	: 二次サイクロン出口ガス酸化度 (%)
ΔOD	: ガス利用効率 (%)
Q	: 還元ガス流量 (Nm ³ /hr)
R	: 粒子還元率 (-)
R_m	: 層平均還元率 (-)
W	: 鉄石供給速度 (kg/hr)

文 献

- 1) S.Hayashi: *Tetsu-to-Hagané*, **54** (1968), 1017.
- 2) 重見彰利: 製鉄ハンドブック, 地人書館, 東京, (1979), 199.
- 3) K.Yamaguchi, H.Ueno, M.Naito and K.Tamura: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 1609.
- 4) Y.Takamoto, K.Kunitomo, K.Yamaguchi, Y.Okuno, T.Yamamoto and T.Egashira: Proc. 1st Int. Cong. on Science and Technology of Iron-making (ICSTI '94), ISIJ, Tokyo, (1994), 146.
- 5) Y.Okuno, K.Yamaguchi, Y.Takamoto and K.Kunitomo: Blast Furnace Injection Symposium, AISE, PA, (1996), 97.
- 6) S.Suzuki, K.Kunitomo, Y.Hayashi, T.Egashira and T.Yamamoto: Proc. 2nd Asian Conf. on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactors, Chin. Inst. Chem. Eng., Taipei, (1990), 118.
- 7) Y.Takamoto, K.Kunitomo, T.Egashira and H.Otsuka: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 116.
- 8) Y.Takamoto, K.Kunitomo, T.Egashira and H.Otsuka: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 122.
- 9) Y.Takamoto, K.Kunitomo and T.Egashira: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 834.
- 10) K.Sato, H.Suzuki, T.Ushijima, H.Momokawa, H.Itaya, S.Taguchi and I.Kobayashi: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 174.
- 11) W.Schlebush: *MPT Int.*, **5** (1997), 48.
- 12) W.H.Mckewan: *Trans. Metall. Soc. AIME*, **212** (1958), 791.
- 13) 重見彰利: 製鉄ハンドブック, 地人書館, 東京, (1979), 90.
- 14) 改訂4版化学工学便覧, 化学工学協会編, 丸善, 東京, (1978), 1462.
- 15) T.Yamamoto, T.Egashira, K.Kunitomo, Y.Takamoto and S.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 83.
- 16) N.Meysson and A.Rist: *Rev. Métall.*, **62** (1965), 1161.