

レースウェイ空間に吹き込まれた 粉鉱石の飛翔還元機構と高速還元方法

野沢 健太郎*・柴田 耕一郎*・清水 正賢*・Heinrich Wilhelm GUDENAU*²

Raceway Smelting Reduction Process with Fine Iron Ore Injection from Blast Furnace Tuyeres

Kentarou NOZAWA, Koichiro SHIBATA, Masakata SHIMIZU and Heinrich Wilhelm GUDENAU

Synopsis : The knowledge on the microscopic reduction behavior of fine iron ore in hot reducing gas flow is indispensable to accurate description of the extremely complex raceway combustion zone induced by PCI(Pulverized Coal Injection) and OI(fine iron Ore Injection) from blast furnace tuyeres. In the studies using the vertical flow reactor and the tube type reactor where fine materials were transported by the pressure difference in the gas chambers, and thereby a short residence time and a rapid heating rate of fine materials in the raceway combustion zone were simulated, the reduction degree of fine iron ore as well as the reduction morphology were investigated in detail under the conditions of the combined injection(PCI+OI) and the carbon coated ore injection. The experimental results revealed that the in-flight reduction degree of fine iron ore was significantly increased mainly by the improved efficiency of contact of fine ore particles with reducing agents. And the carbon coating of the fine ore surface achieved the most excellent condition for promoting the in-flight smelting reduction.

Key words : fine ore injection ; blast furnace ; raceway ; smelting reduction ; carbon coated ore ; pulverized coal injection.

1. 緒言

近年、高炉機能の拡大が指向されるなかで、高炉の生産弾力性強化、原料の事前処理エネルギー低減、資源環境への対応力強化を目的として、高炉羽口から粉鉱石を直接吹き込み、レースウェイ内で飛翔還元を行う操業技術すなわちレースウェイ溶融還元プロセスの開発が進められている^{1)~4)}。本技術確立のためにはレースウェイ内での粉鉱石の高速還元達成が必須であり、これがレースウェイ奥の温度や通気・通液性を良好に保持していくうえでの重要なポイントとなる。こういった観点から、鉱石の予備還元処理²⁾や微粉炭との複合吹き込み試験³⁾も実施されているが、粉鉱石粒子の微視的な還元挙動について検討された例はあまりみられない。著者らは、高炉羽口からの粉鉱石・微粉炭の多量吹き込みプロセスの開発を目的として、羽口から吹き込まれた粉鉱石粒子の微視的な還元挙動の解明、および気流中における高速還元の実現等に関する一連の基礎的研究を行ってきた^{5)~11)}。前報¹¹⁾では、堅型空塔炉による基礎実験と数学モデルを用いた検討により、還元性ガス流中における粉鉱石粒子の熱分解・還元挙動について検討した。その結果、粉鉱石は高温気流中で還元が進行して溶融すると球状化し、マランゴニー効果¹²⁾¹³⁾により中心部にメタル、外周部にウスタ

イトの二層構造を形成することを見出した。この知見から、高温気流中に吹き込まれた粉鉱石をより効果的に還元する方法として、外周部の溶融ウスタイトと還元剤との接触頻度を高めることが有効と考えられる。そこで本研究では、前報¹¹⁾と同様の堅型空塔炉を用いて、粉鉱石と微粉炭の混合吹き込み、および炭素被覆鉱石の吹き込み実験を行い、鉱石の還元速度と固体還元剤共存時の還元メカニズムについて検討した。また、高炉羽口部およびレースウェイ前半部における吹き込み粉体の反応挙動をシミュレートできる差圧誘導型空塔燃焼炉¹⁴⁾を用いて、微粉炭・粉鉱石複合吹き込み時の微粉炭の燃焼性および粉鉱石の還元反応挙動についても検討を行った。

2. 堅型空塔炉による粉体吹き込み実験

2・1 実験方法

2・1・1 実験装置と方法

微粉炭・粉鉱石の混合吹き込み、炭素被覆鉱石の吹き込み実験に用いた堅型空塔炉は、前報¹¹⁾同様、内径0.05m、長さ1.0mの反応管を堅型に配したものである。あらかじめ所定の組成に混合したガス(N₂, CO-CO₂)を本装置の上部より反応管内に流しながら、粉体試料(ハマスレー粉鉱石、微粉

平成5年1月25日受付 平成5年7月2日受理 (Received on Jan. 25, 1993; Accepted on July 2, 1993)

* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675)

* 2 R.W.T.H. Aachen Institut für Eishüttenkunde

炭および炭素被覆鉱石)を同じく装置上部に位置する試料供給装置から連続供給した。これら試料はガス流に随伴され炉内を落下する過程で、昇温、反応する。反応生成物は、炉下部冷却槽で急冷して、反応を停止させた後、ガラスフィルターを内蔵したサンプラーで回収し分析した。

2・1・2 実験条件

Table 1 に実験条件を示す。供試試料としては平均粒径($\bar{d}_p$)48ミクロン($48 \pm 4 \times 10^{-6}\text{m}$)のハマスレー粉鉱石, $70 \times 10^{-6}\text{m}$ 以下の微粉炭(オプティマム炭), および14.0%分の炭素を被覆した炭素被覆鉱石(粒径: $48 \pm 4 \times 10^{-6}\text{m}$)を用いた。なお、本研究に供した炭素被覆鉱石は、連続式流動層^{15)~18)}にて製作したものをを用いた。

堅型空塔炉では、反応管内部の炉壁が熱源となる。前報¹¹⁾でも示した通り、この炉壁温度は、炉の入口より上昇しはじめ、入口から0.5~0.6mの位置で最高温度域(均熱帯: 幅約0.1m)を示し、その後出口に向けて緩やかに降下する。本実験においても、前報同様、均熱帯温度($T_{w,max}$)を1886Kに設定し、また、気流中における粒子間衝突の確率を小さくし、かつ反応管炉壁温度分布がほぼ一定に保たれるように、ガス流量(Q_g)を $2.5 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ 、随伴させる粉体量(気流中固体濃度)を $0.10\text{kg}/\text{m}^3$ と低く設定した。この条件で、粉鉱石の最高温度域での滞留時間は、約0.1sと推算された。粉鉱石を羽口吹き込みした場合のレースウェイ内滞留時間は、さらに短いものと想定されるが、実炉レースウェイ内では粉鉱石の昇温速度が大きく、また、鉱石粒子は激しい乱流場を飛翔するため、粉鉱石の熱分解特性、鉱石粒子と還元性ガスとの総括反応速度等を考慮すると、粒子の初期還元(ウスタイト融出)は迅速に進行する可能性がある。したがって、本研究で得られた粉鉱石粒子の溶融還元特性は実炉レースウェイ領域においても有効に適用できるものと考え

Table 1. Experimental conditions at the Vertical Flow Reactor.

<Set up conditions>

Injection type	Carbon mixing ratio[%]	$T_{w,max}$ [K]	Inlet gas composition	Q_g $10^4[\text{m}^3/\text{s}]$
Ore	0	1886	N_2 , $\text{CO}50\%-\text{CO}_250\%$	2.5
Ore/Coal mixture	13.1~48.2			
Carbon coated ore	14.0			

<Chemical composition of Hamersley specimen> (mass%)

T-Fe	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO
62.94	0.11	89.87	4.4	2.71	0.06	0.06

diameter of ore particles: $(48 \pm 4) \times 10^{-6}\text{m}$

<Proximate analysis of the coal specimen> (mass%)

Moisture	Volatile matter	Fixed carbon	Ash
4.0	30.06	54.08	11.86

diameter of coal particles: $<70 \times 10^{-6}\text{m}$

られる。

2・2 実験結果と考察

2・2・1 微粉炭・粉鉱石混合吹き込み

これまでに報告された微粉炭と粉鉱石を高炉羽口から同時に吹き込む、複合吹き込みの研究において、粉鉱石と微粉炭を併用して吹き込んだ場合には、粉鉱石の還元率が增大することが示されている¹¹⁾⁷⁾。気流中に粉鉱石と微粉炭を共存させる効果としては、

・微粉炭燃焼によるガス温度の上昇、それによる鉱石温度の上昇

・レースウェイ内における還元域の拡大等が考えられている。しかしながら、2・1実験方法の項で示した通り、本実験では堅型空塔炉への供給ガス成分中には酸素が存在しないため、上述したような微粉炭燃焼による効果は期待できないが、

①微粉炭中炭素と CO_2 との反応による CO 発生に伴う雰囲気ガスの還元ポテンシャル増大(供給ガスが $\text{CO}-\text{CO}_2$ の場合)、

②微粉炭熱分解時に発生する還元ガス成分による還元ポテンシャル増大

等により、粉鉱石の還元速度は増大するものと予想される。

Fig. 1 に供給ガス組成が50% $\text{CO}-50\%\text{CO}_2$ の場合の粉鉱石・微粉炭混合吹き込み実験の結果を示す。横軸には次の(1)式で表わす粉鉱石供給量に対する微粉炭中炭素の混合率、縦軸にはサンプラーで回収した鉱石試料の還元率(到達還元率)を示した。

炭素混合率(Carbon mixing ratio)

$$= W_c / (W_c + W_{ore}) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

W_c : 微粉炭混合による系内への炭素供給量 [kg/s],

W_{ore} : 系内への鉱石供給量 [kg/s]。

図中プロットの実測値が示すように、粉鉱石の還元速度は微粉炭を混合することにより大きく上昇した。図中の実線

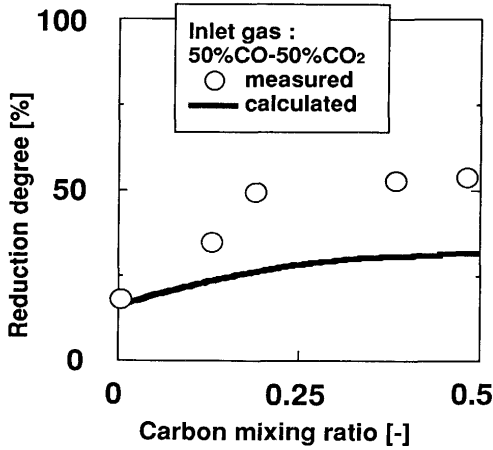


Fig. 1. Relationship between reduction degree of ore and carbon mixing ratio with $\text{CO}-\text{CO}_2$ inlet gas.

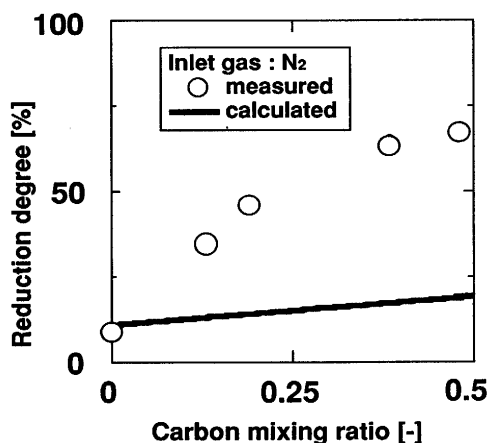


Fig. 2. Relationship between reduction degree of ore and carbon mixing ratio with N_2 inlet gas.

は、先に開発したレースウェイ内反応挙動解析用の一次元数学モデル⁷⁾¹⁰⁾を本系に合せて改造し、推算した結果である。本モデルにおいては、微粉炭混合時に上記①、②の効果によってガス側の組成のみが変化すると仮定した。この場合、実測値は計算値を大きく上回っている。

Fig. 2 は供給ガスとして N_2 を用いた場合の結果である。この条件では、気流中 CO_2 と微粉炭中炭素分の反応による CO 発生、すなわち、上記①の効果を排除することになり、気流の還元ポテンシャルは減少しているはずである。Fig. 2 中の実線で示す計算値は、②の効果のみを考慮したためFig. 1の計算結果よりも小さくなっている。しかし、興味深いことに、Fig. 2の実測結果は計算値を大幅に上回るだけでなく、微粉炭混合率の高い条件ではFig. 1の実測値をも上回る結果となった。これらの事実を考えると、微粉炭を混合することにより、粉鉱石の還元条件が①、②に述べた以外の効果によっても改善されたことが明らかとなった。

Sundaramら¹⁹⁾によると、石炭粒子は急速に昇温され熱分解すると、タール、ガスおよびチャー(固定炭素)を生成する。ここで発生したタールは、さらに昇温が進行すると熱分解し、ガスとチャーを生成する。本実験系の様に、気流中に粉鉱石と微粉炭が分散している場合、微粉炭の熱分解により生成したタールの一部は、更に熱分解した場合、粉鉱石粒子の表面に炭素分を析出・蒸着させる可能性がある¹⁷⁾。

特に、 N_2 雰囲気下における、予想を大きく上回る還元結果を考慮すると、この石炭粒子の熱分解過程が、鉱石の還元速度に深く関係したと考えられる。

一方、著者らによるこれまでの研究結果から、Fig. 3に示すように粉鉱石粒子は気流中で昇温・還元が進行すると溶融球状化し、外部にウスタイト、内部にメタル鉄の二層構造を形成し⁵⁾¹¹⁾²⁰⁾、その内包化メカニズムはマランゴニー効果¹³⁾によることが明らかとなった。さらに、溶融ウスタイトが常に外部を取り囲んだ状態では、ガス境膜等の影響により、還元ガスだけで高速溶融還元を進行させることは困

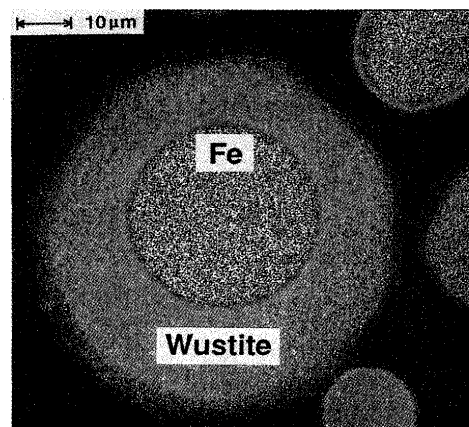


Fig. 3. Cross section image of reduced ore particles (by EPMA).

難であることを前報¹¹⁾で報告した。

しかしながら、固体炭素分の鉱石粒子表面への析出・蒸着が生じると、粉鉱石の昇温・還元により表面にウスタイトが融出した時点で、溶融ウスタイトと析出炭素分との間で効率的に溶融還元が進行することになる。

粉鉱石粒子表面へのタール熱分解による炭素析出が可能となれば、本実験条件のように固体濃度が小さく、気流中における粒子間の衝突が無視できるような場合でも、溶融ウスタイトに固体還元剤(析出炭素)を効果的に作用させることが可能となり、鉱石表面で局所的な還元ポテンシャルを大幅に向上させ得る。

タール分の熱分解による炭素析出を考慮に入れた場合、Fig. 4に示すように堅型空塔炉内部を温度分布と反応状況から次の二つの領域に分類することができる。すなわち、微粉炭の熱分解、発生タールの熱分解と鉱石粒子表面への炭素分の析出・蒸着が生じる約700~1100Kの(a)領域、および粉鉱石の溶融還元が生じる(b)領域である。このような溶融還元プロセスを考えるなら、 $CO-CO_2$ 雰囲気系での実験の場合、微粉炭の熱分解により発生したタール蒸気は CO_2 と優先的に反応し、鉱石表面への炭素析出は大きく減少すると予想される。この結果、固液間溶融還元反応量が減少し、供給ガスが $CO-CO_2$ の場合の到達還元率は、 N_2 ガスの場合に比し小さくなったものと推察された。また、このことから、固体還元剤と溶融ウスタイトの接触頻度が鉱石粒子の高速還元に極めて重要であると言える。

2・2・2 鉱石表面への炭素被覆

この堅型実験炉では炉内試料のその場サンプリングが不可能なので、前述した(a)領域の炭素析出挙動を確認するために、横型の電気炉を用いた基礎実験を行った。Fig. 5に実験装置の概要を示す。長さ1.0m、内径0.05mの炉芯管内に、長さ1.5m、内径0.016mの炉芯管(反応ポート)を設置し炉内を N_2 パージする。ハマスレー鉱石を直径0.008m、厚さ0.0002mの円盤状に加工し、これを試料(鉱石タブレット)としてセラミックポートにのせ、炉中心部で約1100Kに加熱

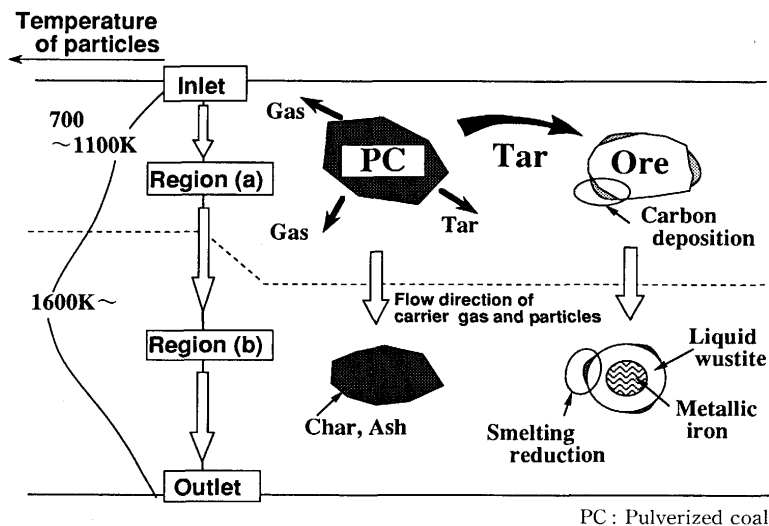


Fig. 4. Schematic representation of rapid reduction of fine ore at ore/coal mixing injection.

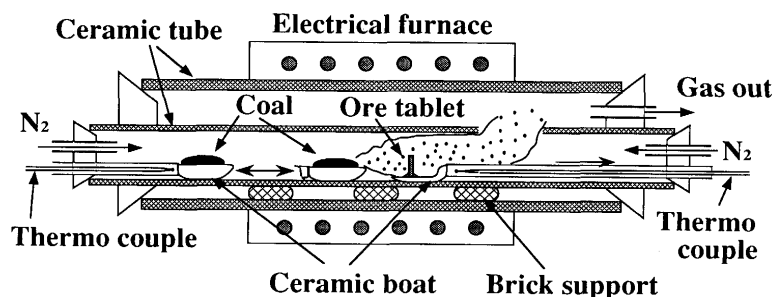


Fig. 5. Schematic representation of the experimental apparatus for carbon deposition on ore surface.

する。鉱石試料と微粉炭試料を保持するセラミックボートには熱電対が接続されており、試料温度を連続測定できる。次に、反対方向の常温部に保持しておいた、約2gの微粉炭試料(混合吹き込み実験に用いたものと同一試料)を炉の中心付近まで迅速に挿入し、N₂キャリアーにより発生タール蒸気を鉱石試料表面に接触させる。微粉炭試料が約900K(昇温速度は約100K/min)に到達した時点で鉱石試料、微粉炭試料の双方を反応ポートの常温帯へ退避させ、N₂ガス量を増加させて急冷した後、鉱石タブレットの断面を走査電子顕微鏡(SEM)で観察した。

Fig. 6にSEM観察の結果を示す。鉱石タブレットの表層部には、微粉炭中のタール蒸気から析出したと考えられる炭素が、非常に密な層を形成していることが判明した。この検証実験により、Fig. 4に示した堅型空塔炉内における鉱石表面への炭素析出メカニズム、および高速還元メカニズムの妥当性が確認された。実炉羽口からの粉鉱石・微粉炭の複合吹き込みを考える場合、微粉炭熱分解により発生したタールは、雰囲気ガス中の酸素と燃焼し、炭素被覆に用いられない懸念はある。しかしながら、実炉レースウェイ内においても、微粉炭吹き込み量の増大にともない、微粉炭フレームの内縁には不完全燃焼部、すなわち、共存する粉鉱石粒子へのタール付着域が存在する可能性は十分に考えられる。

2・2・3 炭素被覆鉱石吹き込み

粉鉱石・微粉炭の混合吹き込み実験の結果から、固体還

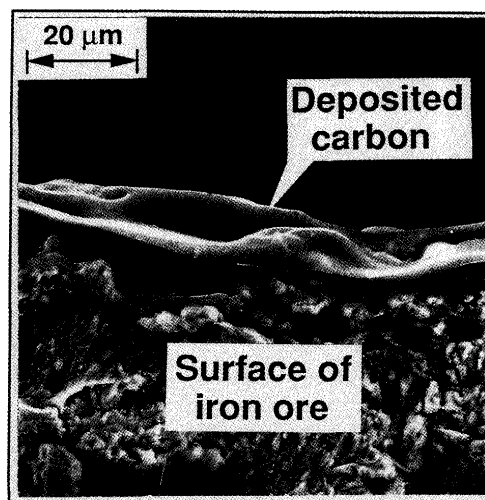


Fig. 6. Deposited carbon layer on the surface of ore tablet.

元剤である析出炭素と粉鉱石粒子との接触により、鉱石の還元速度が大幅に向上することがわかった。この場合、重要となるのは、鉱石の昇温還元により融出する溶融ウスタイトと固体炭素との接触効率である。そこで粉鉱石の表面全体を予め析出炭素で被覆しておけば、理想的な還元条件が達成できるものと考えられる。そこで、重質油の熱分解反応と連続式流動層を利用して作成した炭素被覆鉱石(粉鉱石の表面に重質油のタール由来の炭素を析出・蒸着させたもの)¹⁷⁾を供試試料とし、堅型空塔炉で同様の還元実験を

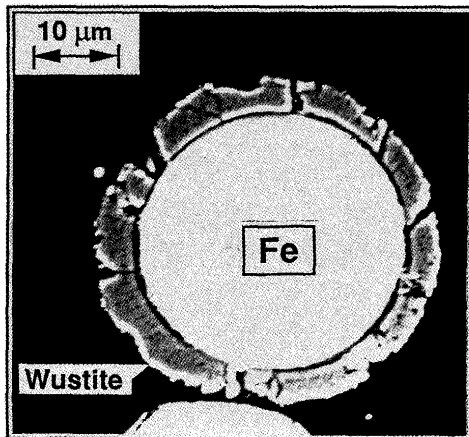


Fig. 7. Cross section image of C coated ore after reduction.

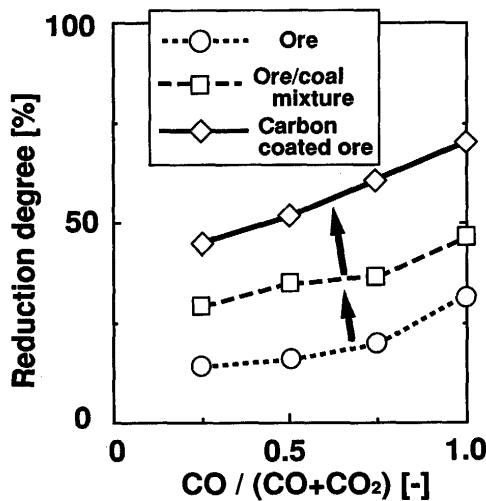


Fig. 8. Reduction behavior of fine iron ore using different injection materials.

行った。

Fig. 7 はサンプラーで回収された試料断面の一例である。ガス還元実験の際に得られたFig. 3 の観察結果と同様、外周部にウスタイトのシェル、内部に還元で生成したメタル鉄が凝集している。Fig. 3 の場合と比較すると、外殻のウスタイトはかなり薄くなり、それに伴い内部の鉄が大きく成長している。この粒子断面観察の結果からも、還元条件が大きく向上していることが推察される。

供給ガスが CO-CO_2 の場合について、炭素被覆鉱石の到達還元率を、粉鉱石・微粉炭の混合吹き込み、粉鉱石単身吹き込みの場合と比較してFig. 8 に示す。なお混合吹き込み時の微粉炭混合率は18.2%であり、これは先に(1)式で定義した炭素の混合率に換算すると約14.0%となり、炭素被覆鉱石の被覆炭素量と対応させてある。Fig. 8 から明らかなように、粉鉱石の還元速度は炭素被覆により、混合吹き込みの場合よりもさらに向上した。

3. 差圧誘導型空塔燃焼炉による粉鉱石・微粉炭の複合吹き込み

3・1 実験方法

次に、差圧誘導型空塔燃焼炉⁸⁾¹⁴⁾による微粉炭・粉鉱石複合吹き込み実験を行った。この空塔燃焼炉では、試料粉体(70~100mg, カラジャス鉱：平均粒径 $75 \times 10^{-6}\text{m}$, 微粉炭：平均粒径 $75 \times 10^{-6}\text{m}$, 揮発分30%)の移送速度は、差圧を利用しているため非常に大きく、高温反応炉(1973K)内における試料滞留時間は約 $10 \sim 25 \times 10^{-3}\text{s}$ と短い。実験では、炉内ガス雰囲気一定(100% O_2)のもとで試料重量のみを変化させた。反応生成物と生成ガスは、それぞれセラミックフィルターとガスサンプリングビンで採取され、実験終了後に分析に供され、微粉炭燃焼率(炭素ガス化率)および粉鉱石の還元率を求めた。

3・2 実験結果と考察

Fig. 9 に粉鉱石・微粉炭複合吹き込み時の、微粉炭の燃焼性を微粉炭単味の場合と比較して示す。重量比で粉鉱石を30%混合した微粉炭の場合、その燃焼性は微粉炭/酸素比 1.1kg/m^3 以下の領域では微粉炭単味時に比べ向上し、それ以上の領域では逆に悪化した。

Fig. 10 は反応生成物の分析値から算出した粉鉱石の還元率である。先のFig. 9 で粉鉱石を混合した微粉炭の燃焼率が単味時に比べ向上する微粉炭/酸素比域(1.1kg/m^3 以下)に対応して、粉鉱石の還元率は著しく増大している。

前述の結果から、急速昇温時の微粉炭熱分解反応に伴う炭素析出により、鉱石粒子表面での還元ポテンシャル向上が考えられる。また、本装置では、縦型空塔炉の場合と異なり、粉体試料は激しい乱流場を移送されるため、密度の異なる粉鉱石粒子と微粉炭粒子の気流中での衝突を無視できない。Fig. 10 より微粉炭の燃焼性と粉鉱石の還元率向上が同時に達成できるような領域では、粉鉱石の還元率が33%を超えていることから、析出炭素の効果に加え、溶融ウス

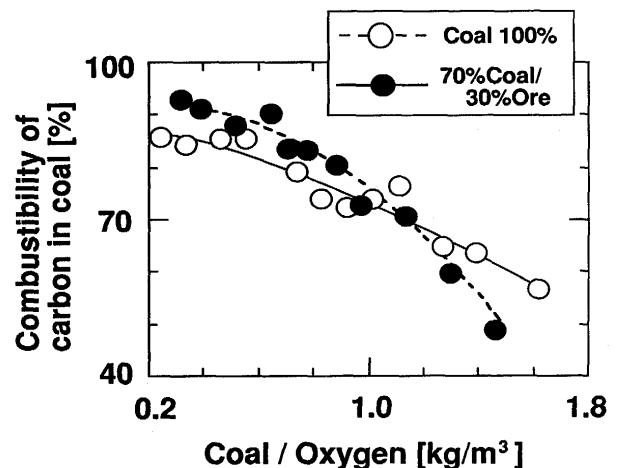


Fig. 9. Combustibility of carbon in coal at ore / coal mixing injection.

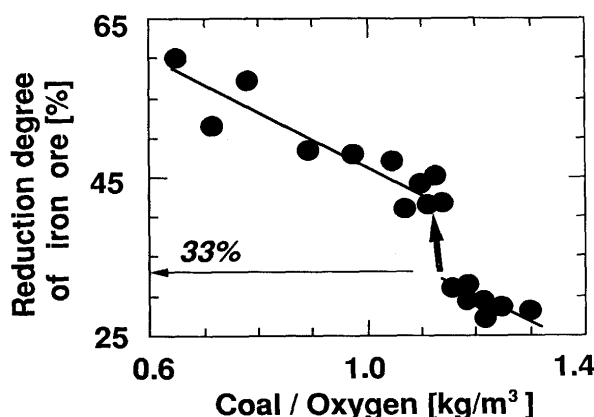


Fig. 10. Reduction degree of iron ore at ore / coal mixing injection.

タイトと微粉炭粒子の気流中での衝突・接触により粉鉱石の高速溶融還元、同時に微粉炭のガス化促進が行われたものと考えられる。また、微粉炭中に30mass%混合された粉鉱石中の酸素が、微粉炭中の炭素ガス化に全量用いられると仮定すれば、その炭素ガス化率は最大約12%向上すると算出される。本実験結果では約4～8%の炭素ガス化率の増加が得られており、このことから、粉鉱石中の酸素は微粉炭中の炭素ガス化に非常に有効に作用したものと推察された。

2章の堅型空塔炉実験の知見と合せて考慮すると、昇温・還元により生じた溶融ウスタイト粒子と固体還元剤(析出炭素および微粉炭中の固定炭素等)との接触により鉱石の溶融還元速度は飛躍的に向上することがわかった。さらに、飛翔粉鉱石の溶融還元を促進することで、共存する微粉炭の燃焼性をも向上させ得ることが明らかとなった。これらの知見より、羽口からの粉鉱石吹き込みによるレースウェイ高速溶融還元プロセスを実現するためには、粉鉱石粒子(特に溶融ウスタイト生成時)と固体還元剤との効果的な接触が不可欠であり、粉鉱石、還元剤の吹き込み位置、吹き込みランス構造、粉体吹き込み条件等に配慮する必要があると考えられる。

4. 結言

高炉羽口から粉鉱石と微粉炭を複合吹き込みする、レースウェイ溶融還元プロセスの開発を目的として、堅型空塔炉、差圧誘導型空塔燃焼炉を用いた基礎実験を行い、固体還元剤共存時の粉鉱石の溶融還元挙動について、以下の知見を得た。

1. 粉鉱石と微粉炭を混合吹き込みすることにより、鉱石の還元速度は増大したが、還元率向上に及ぼす微粉炭混合の効果は、次のようにまとめることができる。

(1) 微粉炭は、昇温され熱分解するとCO、H₂等の還元性ガスを発生し、ガス側の還元ポテンシャルを向上させ

る。

(2) 微粉炭中の固定炭素分は、雰囲気中に酸化ガス成分(O₂、CO₂)が存在する場合は反応してCOを発生し、ガス側の還元ポテンシャルを向上させる。

(3) 微粉炭熱分解時に発生するタール分は、更に昇温、熱分解すると、鉱石表面に炭素を析出させ、これにより溶融ウスタイト融出時の鉱石表面における還元ポテンシャルを大幅に向上させ得る。

(4) 高速乱流場では、微粉炭粒子と粉鉱石粒子との接触頻度が増大し、溶融ウスタイトと微粉炭粒子との直接接触により還元効率を大幅に向上させ得る。

2. レースウェイ内での粉鉱石の高速還元のためには、バルクガスの還元ポテンシャル向上(上記1.(1)、(2))よりも、溶融ウスタイトと固体還元剤との接触(上記1.(3)、(4))がより効果的であると考えられる。

3. 粉鉱石表面に炭素被覆することにより、還元条件を大幅に改善することが可能であり、還元速度を大きく向上させることができる。

文 献

- 1) 山縣千里, 須山真一, 堀坂 修, 池宮洋行, 梶原義雅, 西澤庄蔵, 紫富田浩, 柏田昌宏: 材料とプロセス, 4(1991), p.1020
- 2) 山口一良, 上野浩光, 内藤誠章, 田村健二: 鉄と鋼, 77(1991), p.1609
- 3) 片山英司, 高田至康, 角戸三男, 稲谷稔宏, 浜田尚夫, 樋谷暢男: 鉄と鋼, 69(1983), S105
- 4) 桃川秀行, 澤 義孝, 板谷 宏, 田口整司: 材料とプロセス, 4(1991), p.1024
- 5) 野沢健太郎, 肖 興国, 笹原茂樹, 清水正賢, 稲葉晋一: 材料とプロセス, 4(1991), p.1138
- 6) 肖 興国, 野沢健太郎, 笹原茂樹, 清水正賢, 稲葉晋一: 材料とプロセス, 4(1991), p.1139
- 7) 肖 興国, 野沢健太郎, 笹原茂樹, 清水正賢, 稲葉晋一: 材料とプロセス, 4(1991), p.1140
- 8) 柴田耕一朗, H.W. Gudenau, R.Kiesler, M.Rudack: 材料とプロセス, 5(1992), p.1073
- 9) 野沢健太郎, 清水正賢, 稲葉晋一: 材料とプロセス, 5(1992), p.1074
- 10) 肖 興国, 野沢健太郎, 笹原茂樹, 清水正賢, 稲葉晋一: 鉄と鋼, 78(1992), p.1230
- 11) 野沢健太郎, 清水正賢, 稲葉晋一: 鉄と鋼, 79(1993), p.443
- 12) J. Deng and F. Oeters: Steel Research, 61(1990), p. 438
- 13) 向井楠宏: 金属製練プロセスにおける高温界面移動現象(鉄鋼基礎共同研究会 界面移動現象部会編), (1991), p.209
- 14) H. W. Gudenau, B. Korthas, R. Kiesler and L. Birkhauser: Stahl und Eisen, 110 (1990), p.35
- 15) 足永武彦, 篠原克文, 小野田守: 材料とプロセス, 1(1988), p.129
- 16) 宮川一也, 上条綱雄, 出口幹郎: 材料とプロセス, 1(1988), p.130
- 17) 篠原克文, 足永武彦, 上条綱雄, 出口幹郎, 宮川一也: 材料とプロセス, 1(1988), p.131
- 18) 宮川一也, 上条綱雄, 出口幹郎: 鉄と鋼, 78(1992), p.1258
- 19) M. S. Sundaram, M. Steinberg and P. T. Fallon, "Flash Pyrolysis of Coal in Reactive and Non-Reactive Gaseous Environments", presented at the 186th ACS National Meeting, Division of Fuel Chemistry, Washington, DC, (1983)
- 20) 稲葉晋一, 野沢健太郎, 肖 興国, 清水正賢, 笹原茂樹: 日本學術振興会製鋼第19委員会製鉄第54委員会 合同委員会 第2回研究会資料, (1992), p.1