

鉱石炭材混合粉の高温還元特性

山本 哲也*・澤 義孝*・武田 幹治*

Reduction Behavior of the Mixture of Iron Ore and Carbonaceous Material at High Temperatures

Tetsuya YAMAMOTO, Yoshitaka SAWA and Kanji TAKEDA

Synopsis : Reduction and gasification rates of mixtures of fine iron ore and coal char were measured for some types of coal char and ore at temperature from 940°C to 1340°C. Experiments were carried out with an electric furnace by measuring weight losses of samples and gas composition during reaction. The reduction rates were obtained by separating the weight loss of the fine iron ore reduction from that of the coal char gasification. The overall reduction rate of the mixture was controlled by the coal char gasification at 940°C and by the iron ore reduction at 1340°C. The reduction rate of fine iron ore and the gasification rate of coal char were formulated as functions of the particle size, type of raw material, and temperature.

Key words: direct reduction; ironmaking; iron ore/carbon composite; gaseous reduction; coal char gasification.

1. 緒言

東南アジアなど、今後の経済発展がみこまれる地域や、環境問題などから焼結機、コークス炉の操業が難しくなった先進国などでは電気炉による鉄鋼生産が増加していくことが予想される¹⁾。電気炉では主にスクラップを鉄源として使用するが、高品位スクラップの供給不足およびCu, Snなどのトランプエレメントの問題から、電炉での還元鉄使用量が増加してきている。

現在、還元鉄製造で最も普及しているのはMIDREX²⁾法、HYL³⁾法のように還元剤に天然ガスを用いるプロセスである。最近では、安価で立地条件に対する制約の少ない石炭を還元剤に用いるFASTMET⁴⁾法、REDSMELT⁵⁾法、COMET⁶⁾法などのプロセスが開発されてきている。一方、還元剤に天然ガスを使用するプロセスでは鉄鉱石に塊鉱石またはペレットを使用し、石炭を還元材に使用するプロセスでは高品位のペレット用微粉鉱石を使用している。さらなる原燃料条件の緩和のためには、石炭を還元剤として使用し、微粉鉱石よりも粒度の大きい焼結用粉鉱石（およそ8mm）を使用できる還元鉄製造プロセスが望まれる。このようなプロセスとして、粉鉱石と粉炭材の混合粉をそのまま原料に使用し、回転炉床炉内で見かけ上の直接還元を利用して粉鉱石を還元するプロセスが考えられる。この場合、原燃料の粒度が微粉に比べて大きいので、混合粉への熱供給とともに粉鉱石の還元速度および粉炭材のガス化速度の把握が重要になる。

微粉鉱石と微粉炭材の混合粉の還元については、炭材内装ペレットを対象として数多くの研究が行われている^{7,8)}。

また、粉鉱石の還元についての研究は流動層還元などを対象にして多くなされているが、還元の最高温度が1000°C程度までがほとんどである^{9,10)}。粉鉱石と粉炭材とが混合状態であり、かつ1300°Cを超えるような比較的高温まで対象とした研究は少ない。

本研究では、このような背景の下、粉鉱石と粉炭材との混合粉を用い、鉱石銘柄、鉱石粒径、炭材銘柄、炭材粒径の原燃料条件が混合粉の直接還元速度に及ぼす影響を比較的高温領域まで調査し、反応速度を定式化した。

2. 実験装置および実験方法

Fig. 1に実験装置の模式図を示す。試料の加熱には内径100mm、均熱帯約100mmの縦型炉を用い、内径15mm長さ80mmの黒鉛るつぼを、内径20mm長さ800mmの石英製反応容器に入れた2重構造の反応容器を使用した。縦型炉上部に天秤を配置し、反応容器ごと吊り下げ、反応容器全体の重量変化を測定した。また、発生ガスのサンプリングまでの時間遅れを減少させるためN₂-10%Heの混合ガスを反応容器に導入した。なお、Heはガス発生量を定量するためのトレーサーとして入れた。試料温度の測定には熱電対を用いた。石英反応容器を密封できないことと、重量測定への影響が大きかったことから、温度測定は発生ガスのサンプリングおよび重量測定とは別に行った。

黒鉛るつぼは、灰分や脈石が石英管と反応するのを防ぐために用いた。直接還元反応が吸熱反応であることから十分な熱を供給することと、るつぼ内の混合粉の均一性確保を考慮して、黒鉛るつぼの内径は15mmとした。

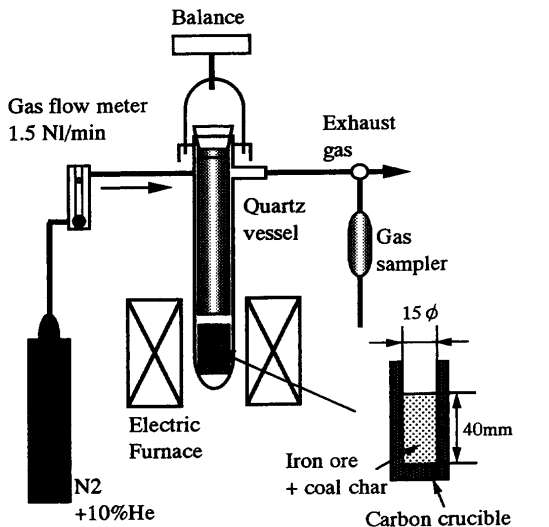


Fig. 1. Schematic drawing of experimental equipment.

Table 1. Chemical composition of ores. (wt.%)

	T.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn	P	S	C.W.
A	62.30	0.11	4.31	2.60	0.04	0.05	0.19	0.075	0.014	3.25
B	58.88	0.13	4.85	1.10	0.03	0.03	0.03	0.036	0.009	8.51
C	57.37	0.10	5.30	2.57	0.52	0.16	0.06	0.042	0.019	7.44

Table 2. Proximate analysis of carbonaceous materials.

	Ash(%)	VM	F.C	total S
coal char	3.6	0.6	95.8	0.32
charcoal	4.8	1.8	93.4	0.34

1350°C以上の高温では、石英反応容器が変質し、900°C以下では粉鉍石と粉炭材の混合粉の還元はほとんど進行しない。そこで、電気炉の炉温は、1000~1350°Cで実験を行った。鉍石の粒度は0.2~8mm、炭材の粒度は0.2~3mmとした。鉍石はあらかじめ500°Cで1時間加熱して結晶水を除き、同様に炭材は1100°Cまで昇温、1時間加熱保持して揮発分を除いたものを使用した。Table 1に使用した鉍石の結晶水を除く前の化学組成を示す。鉍石には、豪州系鉍石の3銘柄を用いた。Table 2に乾留処理後の炭材の工業分析結果を示す。

指定粒度に調整した鉍石7gと炭材3gを混合し、黒鉛るつぽに充填した後、所定の温度に加熱した縦型炉に試料容器を装入した。急速に加熱することで混合粉を反応させ、5秒ごとに試料重量の経時変化を天秤により測定し、約5分ごとにガスサンプリングを行った。サンプリングしたガスはガスクロマトグラフにより分析した。所定の時間、試料を反応させた後、試料容器を炉外に取出して急冷し、秤量および残留物全体のT.Fe, M.Fe, FeOの分析を行った。

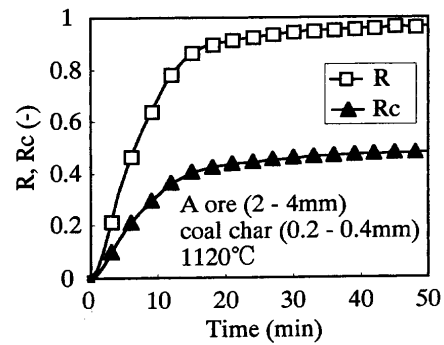


Fig. 2. Typical changes of reduction degree R and gasification degree R_c .

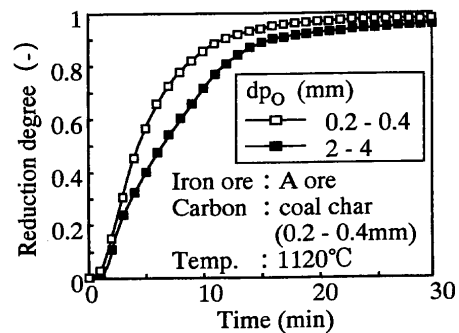


Fig. 3. Effect of iron ore diameter on reduction rate.

3. 実験結果

3.1 実験概況

炭材と鉍石の混合粉の重量は時間に伴って減少し、3.5g程度減少したところで反応はほぼ終了した。反応生成ガス中のCO濃度は時間に伴って減少し、CO₂ガスも無視できない値で検出された。一方、炭材の揮発分および水蒸気と炭材の反応により発生すると考えられるCH₄およびH₂は、ほとんど検出されなかった。したがって、試料の重量減少に対して炭材の熱分解、鉍石中結晶水の分解の影響は無視できる。

実験中、最初の5分程度で試料温度が上昇し、その後、試料温度はほぼ一定で推移した。5分以降においても還元は進行中であり、条件にもよるが5分到達時で還元率は最高でもおよそ50%までであった。なお、鉍石の還元率と炭材のガス化率およびそれらの変化は試料の重量変化と反応生成ガス中のCO、CO₂濃度を用いて求めた。Fig. 2に典型的な還元率およびガス化率の推移を示す。実験後に回収した試料では、化学分析により求めた還元率が95.7%であり、試料の重量変化およびガス組成から求めた還元率(96.5%)とよく一致していた。

3.2 炭材および鉍石粒径が還元速度に及ぼす影響

鉍石粒径を変えた場合の還元率の時間推移をFig. 3に示す。A鉍石と石炭チャーの混合粉を用い、試料温度1120°Cで還元した場合、鉍石の粒径を小さくした方が還元が速く

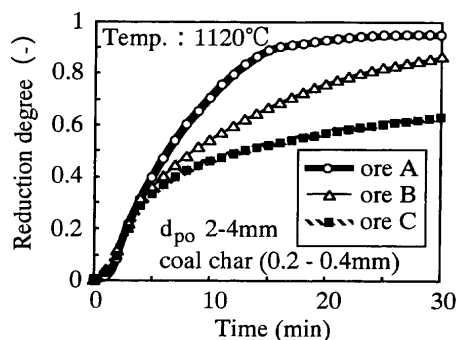


Fig. 4. Change in reduction degree for three kinds of iron ore.

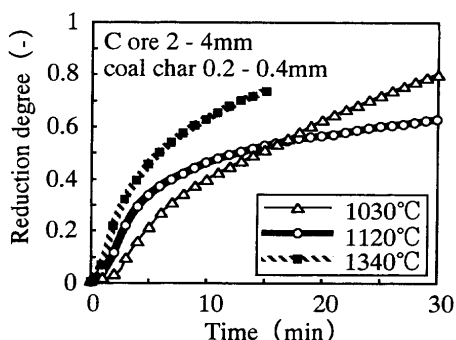


Fig. 5. Effect of temperature on reduction rate for C ore.

なることがわかる。炭材粒径を変えた実験では、炭材の粒径を小さくした方が還元は速くなった。1120°Cでは、鉱石、炭材のいずれも粒径を小さくし、比表面積を大きくすると、それらの混合粉における還元は速くなった。

3.3 還元速度に及ぼす鉱石銘柄の影響

鉱石銘柄を変えた場合の還元率の推移を Fig. 4 に示す。1120°Cでの還元速度は、A 鉱石、B 鉱石、C 鉱石の順に速く、鉱石銘柄によって顕著に異なることがわかった。A 鉱石と C 鉱石の塊鉱石の被還元性 (JIS RI) は、A 鉱石では 56.0、C 鉱石では 71.0 であり、本実験の還元速度は RI とは逆の傾向を示している。

A 鉱石と石炭チャーを用いた場合、還元温度が高くなるにしたがって還元も速くなった。しかしながら、Fig. 5 に示すように C 鉱石を用いた場合、1120°C では途中から還元が停滞し、18 分以後の還元率は、1030°C に比べ低くなっている。さらに高温の 1340°C の条件では、1030°C の場合と比較して同じ還元時間での還元率は高くなった。

1000°C 以上の高温における鉄鉱石の還元については、ウスタイトの周りに難還元性の $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ が生成し還元が停滞することがある⁷⁾。純ヘマタイトペレットを還元すると、まず、ヘマタイトからウスタイトが生成し、ウスタイトから金属鉄が生成する。FeO→Fe への還元段階では、高温において、生成した Fe が焼結を起こしてペレットの微粉粒子間の空隙が減少するため、還元が遅くなることが報告されている⁸⁾。高温では、ペレット中の空隙と同様に反

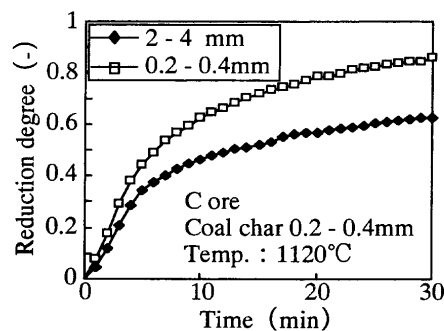


Fig. 6. Effect of diameter on reduction rate of C ore.

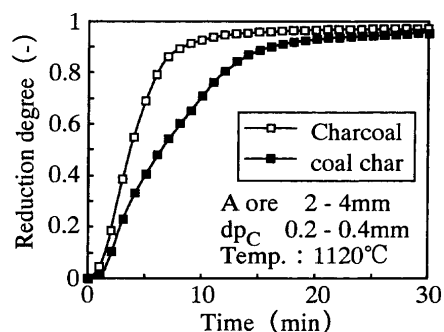


Fig. 7. Change in reduction degree for two kinds of carbonaceous material.

応ガスの流通経路である鉱石中の細孔も閉塞すると考えられる。ウスタイトの周りに難還元性酸化物が形成されること、鉱石中の細孔が閉塞することのいずれか、あるいは両方の原因によって 1120°C では還元が停滞したと考えられる。

一方、C 鉱石のように還元停滞を起こす銘柄を使用した場合でも、Fig. 6 に示すように鉱石粒径を小さくすることで還元は速くなった。

3.4 還元速度に及ぼす炭材種の影響

木炭を炭材に使用した場合の還元率の推移を Fig. 7 に示す。石炭チャーよりも木炭使用の方が還元は速くなっている。Fig. 7 と同じ実験条件でのガス濃度の推移では、木炭を使用の方が $\text{CO}/(\text{CO}+\text{CO}_2)$ が 1 に近くなっていた。それぞれの炭材 (粒径 2-4 mm) を、1100°C で 60 分、5.0 l/min の CO_2 ガス中で反応させたときのガス化率は木炭では 59.5%、石炭チャーでは 32.9% であった。すなわち、木炭を使用の方が炭材のガス化が速く、それによって還元駆動力が高まり、鉱石の還元を速めたものと考えられる。

3.5 鉱石と炭材の混合粉の還元における律速段階

A 鉱石と石炭チャーの混合粉を用い、試料温度 940~1340°C で還元させたときの反応で生成したガス濃度の推移を Fig. 8 に示す。940°C では、反応ガス中の $\text{CO}/(\text{CO}+\text{CO}_2)$ は Fe-FeO 平衡値とほぼ一致することから炭材のガス化反応が律速となっている。一方、1340°C では、 CO_2 は検出されておらず、炭材のガス化反応の平衡値にほぼ一致することからガスサンプリングを行った 3 分後以降では鉱石

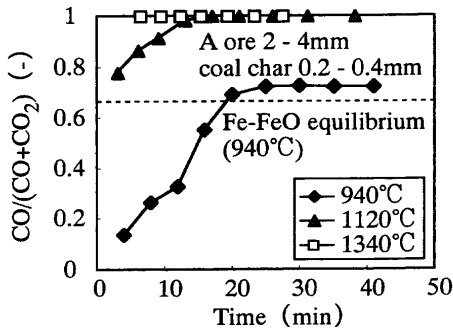


Fig. 8. Effect of temperature on CO/(CO+CO₂).

のガス還元反応が律速となっている。1120°Cでは、CO/(CO+CO₂)は0.8~0.9付近で、鉱石のガス還元と炭材のガス化の混合律速となっている。

4. 鉱石と炭材の混合粉の還元とガス化における総括反応速度の定式化

4.1 炭材のガス化反応速度

炭材のガス化反応は、炭材粒子表面から進行するが、粒子表面だけでなく粒子内部でも表面付近では気孔などを經由して反応が起こっていると考えられる。そこで、粒子表面から $\delta \times dp_c$ (ここで $0 < \delta < 1$)の厚さで反応層を形成すると考えて、反応層での単位体積あたりの反応面積を S_i とすると、粒子内部の反応面積は $3S_i \delta h_c (1-R_c)^{2/3}$ となる。 $3S_i \delta$ を A_c として、次式のようにCO₂に関する1次反応速度式によって炭材のガス化反応速度を整理した。

$$\frac{dn_c}{dt} = \left(A_c H_c + \frac{6h_c}{dp_c} \right) (1-R_c)^{2/3} k_g (n_{CO_2} - n_{CO_2}^*) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 A_c と反応速度定数 k_g が未知数となる。還元率が高くなると、還元速度が低下することからガス中のCO₂濃度が低くなり、データの精度が落ちる。また、実験開始後の5分間は、昇温途中であり試料温度が変化する。そこで、実験初期および後期の値は使用せず、還元率0.4以上0.8以下のデータを用いて解析を行った。

得られた反応速度定数 k_g と温度の関係をFig. 9に示す。炭材のガス化が全体の反応を律速していると考えられる低温側でのデータを主に用いた。Fig. 9より求めた炭材のガス化反応の活性化エネルギーは240 kJ/molであり、従来のコークスのソリューションロス反応の活性化エネルギー210~290 kJ/mol^{11,12)}と同様の結果を得た。

また、 A_c の値は温度によって変わらないとして、同一温度で炭材粒径のみを変えた実験を行い、(1)式より最小二乗法により A_c を求めた。その結果、本実験条件 $h_c = 0.27$ では、 $A_c = 3.2 \times 10^4$ (m²/m³-C)となった。

したがって、石炭チャーのガス化反応速度は次式で表さ

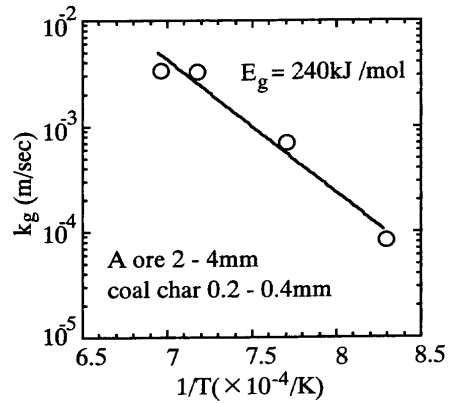


Fig. 9. Arrhenius plot for the gasification rate constant k_g .

れる。

$$\frac{dn_c}{dt} = \left(3.2 \times 10^4 h_c + \frac{6h_c}{dp_c} \right) \times (1-R_c)^{2/3} \times 9.2 \times 10^5 \exp\left(\frac{-240000}{RT} \right) (n_{CO_2} - n_{CO_2}^*) \dots\dots\dots(2)$$

$dp_c = 1 \times 10^{-3}$ (m) の場合、(2)式で粒子表面の反応面積と粒子内部の反応面積の比は約1:5であり、いずれの寄与も無視できない。

4.2 鉱石のガス還元における律速段階

一界面未反応核モデルにおいて鉱石のガス還元反応の律速段階が、反応界面での化学反応、もしくは鉱石内のガス拡散のいずれであるかを検討した。

鉱石のガス還元の反応速度は、化学反応に律速されている場合は(3)式、鉱石内のガス拡散に律速されている場合は(4)式により表わされる。

$$\frac{dn_o}{dt} = \frac{6h_o}{dp_o} (1-R)^{2/3} k_r (n_{CO} - n_{CO}^*) \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{dn_o}{dt} = \frac{12h_o}{dp_o^2} \frac{(1-R)^{1/3}}{1-(1-R)^{1/3}} D_r (n_{CO} - n_{CO}^*) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、鉱石の形状は球形であると仮定した。炭材のガス化速度の場合と同様に、還元率0.4以上0.8以下のデータを用いた。

まず、還元停滞を示さない鉱石Aの場合で解析を行った。鉱石のガス還元が化学反応律速と仮定した場合の、温度 T と鉱石のガス還元反応の反応速度定数 k_r の関係をFig.10に示す。図中の直線の傾きより反応の活性化エネルギーを求めると150 kJ/molとなった。また、同様に鉱石のガス還元が鉱石粒内のガス拡散律速と仮定した場合、粒内ガス拡散係数 D_r の活性化エネルギーは、110 kJ/molとなった。従来の鉱石の還元実験からFeO→FeへのCOガスによる還元の

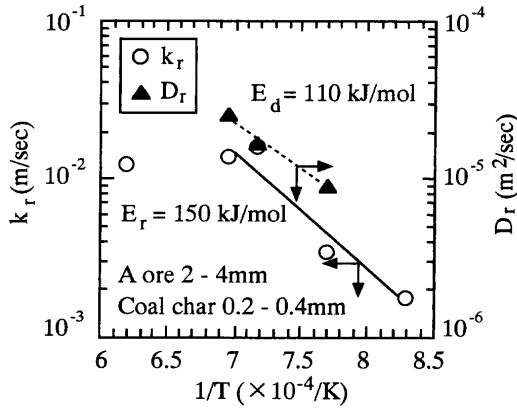


Fig. 10. Arrhenius plot for K_r and D_r .

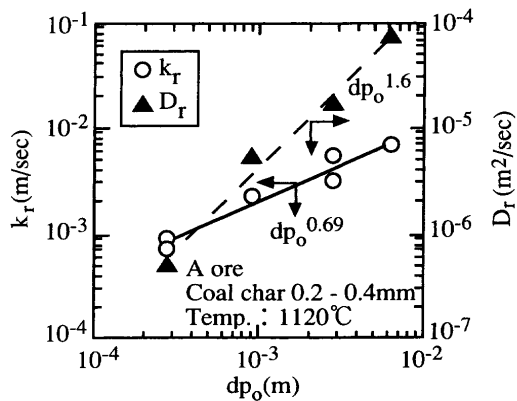


Fig. 11. Relation between k_r , D_r , and dp_0 .

活性化エネルギーはおよそ 63 kJ/mol¹³⁾, 粒内拡散抵抗律速の場合の活性化エネルギーは 4~8 kJ/mol¹⁰⁾であることが報告されている。

Fig.11 に 1120°C で化学反応律速を仮定した場合の粒径と鉍石のガス還元反応の反応速度定数 k_r の関係を示す。未反応核モデルの化学反応律速の場合、化学反応速度定数 k_r は、鉍石の粒径によって変化しないはずであるが、見かけ上 k_r は粒径の増加に伴い大きくなっている。同様に 1120°C で粒内ガス拡散律速を仮定した場合の粒径と粒内ガス拡散係数 D_r の関係においても、還元温度は一定なので、やはり、未反応核モデルに従えば、 D_r は、鉍石の粒径によって変化しないはずであるが、見かけ上、粒径の増加に伴い大きくなった。

高炉原料に比べて鉍石の粒径が小さいことから、完全に未反応核として還元が進行するのではなく、粒子全体が均一に還元されていく要素が含まれているものと考えられる。したがって、粒子内が均一に反応することから粒子内拡散は速く、活性化エネルギーの値とも合わせて、今回の実験条件範囲では化学反応律速として解析を行った。

4.3 鉍石中の反応面積に及ぼす細孔の影響

次に鉍石の還元は化学反応律速であり、高温での還元停滞を細孔の閉塞による反応表面積の減少としてモデル化した。温度、炭材種、炭材粒径を固定した条件で、鉍石 A の

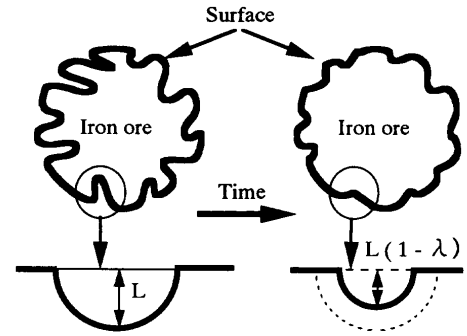


Fig. 12. Schematic drawing of change in pores of reduced iron.

粒径のみを変更した実験を行ったところ、(3)式において $(6h_0/dp_0) \times k_r$ の値は $\alpha + \beta/dp_0$ の形でほぼ整理できた (α, β は定数)。未反応核として還元が進行する場合、定数 $\alpha=0$ となり、均一反応では定数 $\beta=0$ となる。そこで、本実験での反応はその両者の中間にあると考え、(3)式を(5)式のように改めた。

$$\frac{dn_0}{dt} = \left(A_0 h_0 + \frac{6h_0}{dp_0} \right) (1-R)^{2/3} k_r (n_{CO} - n_{CO}^*) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 A_0 は鉍石内の細孔の反応面積を表す値で、高温であるほど、また、長時間高温下におくほど、細孔が塞がり、反応面積が減少するものと考えられる。

細孔の閉塞による反応面積 A_0 の減少は、生成した鉄の拡散によって起こるとしてモデル化した。Fig.12 に示すように鉍石表面の細孔は、初期半径 L の半球と仮定し、反応面積の減少はその半径が減少していくことで表す。鉄原子の拡散により、細孔の半径が $L \rightarrow L(1-\lambda)$ になったと考えると表面積は $2\pi L^2 \rightarrow 2\pi L^2(1-\lambda)^2$ に減少する。この場合、拡散の母体は空隙になるが、仮定の Fe 濃度が 0.9 となる位置を細孔の表面位置と仮定した。初期濃度 0、拡散距離 $L=0.03$ mm、境界での濃度 1 とした場合について非定常拡散方程式(6)を用いて数値解析により細孔半径の減少率 λ の推移を求めた。

$$\frac{\partial n_{Fe}}{\partial t} = \frac{\partial^2 n_{Fe}}{\partial r^2} \dots\dots\dots (6)$$

拡散係数は実験結果に最も一致するように活性化エネルギー、頻度因子を求めた。鉍石 A、鉍石 C についてそれぞれ(7)式、(8)式に示す。

$$D = 4.4 \times 10^{-10} \exp\left(-\frac{85000}{R'T}\right) \dots\dots\dots (7)$$

$$D = 1.1 \times 10^{-9} \exp\left(-\frac{85000}{R'T}\right) \dots\dots\dots (8)$$

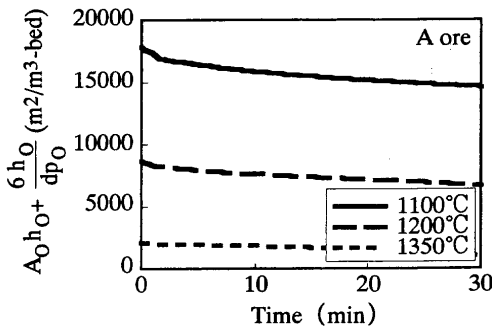


Fig. 13. Change in the reactive surface area for A ore.

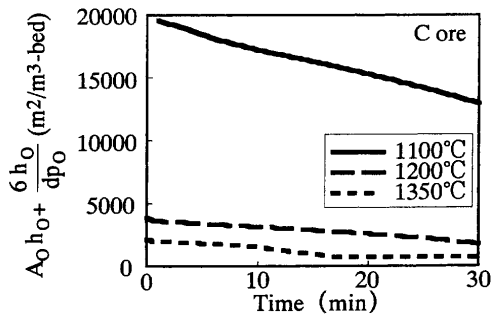


Fig. 14. Change in the reactive surface area for C ore.

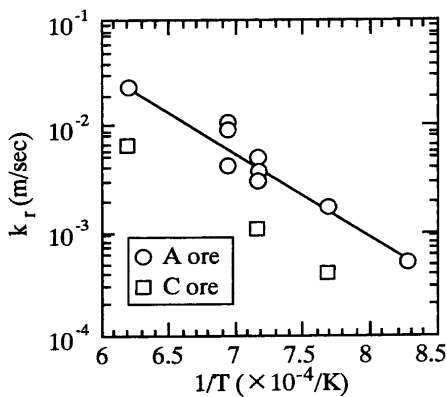


Fig. 15. Arrhenius plot for the reduction rate constant k_r .

Fe原子の自己拡散係数の活性化エネルギーは、65.6kJ/molであり、近い値である。

鉱石Aおよび鉱石Cでの反応面積の推移をそれぞれFig.13, Fig.14に示す。また、反応速度定数 k_r のアレニウスプロットをFig.15に示す。還元停滞を起こす鉱石Cについても、鉱石のガス還元の反応面積をFig.14のように扱うことで実験の挙動を表すことができる。

このような解析の結果、鉱石A, Cに対して次の還元速度式を得た。

鉱石A：

$$\frac{dn_o}{dt} = \left(A_{o,A} h_o + \frac{6h_o}{dp_o} \right) (1-R)^{2/3} \times 3.5 \times 10^3 \exp\left(-\frac{150000}{RT} \right) \times (n_{co} - n_{co}^*) \dots\dots\dots(9)$$

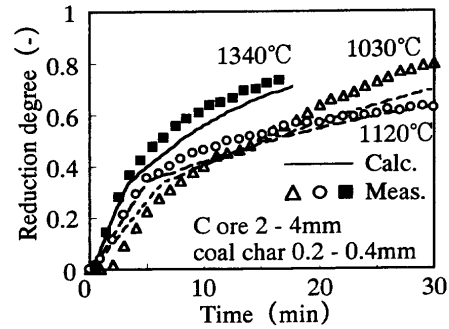


Fig. 16. Change in reduction degree of C ore.

鉱石C：

$$\frac{dn_o}{dt} = \left(A_{o,C} h_o + \frac{6h_o}{dp_o} \right) (1-R)^{2/3} \times 8.6 \times 10^2 \exp\left(-\frac{150000}{RT} \right) \times (n_{co} - n_{co}^*) \dots\dots\dots(10)$$

4.4 得られた速度式と実験結果の比較

得られた速度式がどの程度のバラツキで実験結果と整合するか検証した。得られた式は還元率0.4から0.8までの間のデータを利用している。還元前半はFeOまでの還元であるので、ここでは還元率が0.33までは(9), (10)式での n_{co}^* の値に $Fe_3O_4 \rightarrow FeO$ の還元平衡のガス組成を使用した。

鉱石Cを用い、還元温度を変えた場合の計算結果と実験結果の比較をFig.16に示す。鉱石Cについて、1120°Cでの還元停滞を計算においても示すことができた。また、還元停滞を起こす鉱石においても、還元温度を高くすることで鉱石と炭材の混合粉の還元における総括反応は速くなる現象が計算でも再現できた。

5. 結言

小型電気炉を用いて焼結用粉鉱石と炭材の混合粉の還元実験を行い、原燃料条件が混合粉の還元速度へ及ぼす影響を調査した。また、実験結果を基に混合粉の還元速度の定式化を行い次の結論を得た。

- (1) 1350°C程度の高温では鉱石のガス還元律速、900°C程度の低温では炭材のガス化律速、その間の温度では、これら両過程の混合律速となっている。
- (2) 鉱石銘柄によって鉱石のガス還元速度が顕著に異なる。鉱石によっては1200°C前後の温度で還元停滞を起こす。このような鉱石でも、より還元温度を高くする、もしくは粒径を細かくすることで還元を速くすることができる。
- (3) 粉鉱石の還元は、反応速度への粒子径依存性から、未反応核モデル的な様式と粒子全体が同時に反応する均一反応モデル的な様式との中間にあると考えられる。また、粒子内拡散の影響は小さく、ほぼ化学反応律速と考えられ

る。

(4) 鉍石の還元に対して高温における粒内の細孔構造の経時変化を考慮し、鉍石銘柄ごとの還元速度式を求めた。

記号

- A_C : 炭材の粒子内部の反応面積 (m^2/m^3-C)
 A_C : 鉍石内の細孔の反応面積 (m^2/m^3-O)
 D : 細孔内における金属鉄の拡散係数 (m^2/sec)
 D : 鉍石の粒内ガス拡散係数 (m^2/sec)
 dn_C/dt : 炭材のガス化反応の反応速度 ($mol/m^3-bed\ sec$)
 dn_O/dt : 鉍石のガス還元反応の反応速度 ($mol/m^3-bed\ sec$)
 dp_C : 炭材の初期粒径 (m)
 dp_O : 鉍石の初期粒径 (m)
 h_C : 鉍石炭材混合粉中の炭材の初期体積分率 (m^3-C/m^3-bed)
 h_O : 鉍石炭材混合粉中の鉍石の初期体積分率 (m^3-O/m^3-bed)
 k_g : 炭材のガス化反応の反応速度定数 (m/sec)
 k_r : 鉍石のガス還元反応の反応速度定数 (m/sec)
 L : 細孔の初期平均半径 (m)
 n_C : 混合粉中の炭材に含まれるC濃度 (mol/m^3-bed)
 n_{CO}^* : 鉄酸化物と平衡するCOガス濃度 (mol/m^3)
 $n_{CO_2}^*$: Boudouard反応の平衡CO₂ガス濃度 (mol/m^3)
 n_{CO}, n_{CO_2} : COおよびCO₂ガス濃度 (mol/m^3)
 n_{Fe} : 仮想母体中のFe濃度 (mol/m^3)
 n_O : 混合粉中の鉍石に含まれるO濃度 (mol/m^3-bed)
 r : 細孔の動径方向の距離 (m)
 R : 還元率 (-)
 R' : 気体定数 8.31 (J/mol K)
 R_C : ガス化率 (-), $R_C = \frac{W_{C,0} - W_C}{W_{C,0}}$

t : 反応時間 (sec)

- $W_C, W_{C,0}$: 炭材の重量および初期重量 (g)
 $W_O, W_{O,0}$: 鉍石の重量および初期重量 (g)
 δ : 半径方向での反応層の割合 (-)
 λ : 細孔が動径方向に減少した割合 (-)

文 献

- 1) 稲角忠弘, 小山政夫: 第165・166回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1997), 25.
- 2) *Direct Midrex*, **25** (2000) 2.
- 3) J.Becerra, M.T.Guerra and F.Negrete A.: *Iron Steelmaker*, **26** (1999) July, 37.
- 4) G.E.Hoffman and T.Harada: *Iron Steelmaker*, **24** (1997) May, 51.
- 5) H.J.Lehmkuhler, G.Rath and G.Cavallo: *MPT Int.*, **22** (1998) May, 72.
- 6) J.Borlee, D.Steyls and R.Munnix: 57th Ironmaking Conference Proceedings, ISS, Warrendale, (1998), 869.
- 7) Y.Fukumoto, T.Maeda, T.Murayama and Y.Ono: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 945.
- 8) Y.Ono, T.Murayama and T.Maeda: The 54th Committee (Ironmaking), the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), Rep. No. 2078, (1997).
- 9) T.Ariyama, S.Isozaki, S.Matsubara, H.Kawata, K.Kondo and I.Kobayashi: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 1323.
- 10) H.Itaya, M.Sato and S.Taguchi: *ISIJ Int.*, **34** (1994), 393.
- 11) S.Kobayashi and Y.Omori: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 1081.
- 12) 第3版鉄鋼便覧I, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1981), 98.
- 13) 第3版鉄鋼便覧I, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1981), 95.