

.....
論 文

酸化鉄ペレットの水素還元反応速度*

高橋礼二郎**・八木順一郎***・大森康男***

Rate of Reduction of Iron Oxide Pellets with Hydrogen

Reijiro TAKAHASHI, Jun-ichiro YAGI, and Yasuo OMORI

Synopsis:

In order to analyse the reduction process in the metallurgical reactor, a reduction rate of single iron oxide pellet was expressed by a mathematical model and the rate parameters were determined.

Unreacted core model was employed to the reduction of the iron oxide pellet with hydrogen in the temperature range of 1100°~1400°K.

The activation energy of the pellet used was about 26 kcal/mol. The calculated reduction curves based on this model almost coincided with the observed data under various operating conditions; those are reduction temperatures, diameters of the pellet, and compositions of the reducing gas. Furthermore, in the case where one of the experimental conditions was altered during the reduction, the calculated reduction curves were nearly consistent with the observed data.

It was found from these results that the reduction model in this paper could apply to process analysis of metallurgical reactor.

(Received Nov. 10, 1970)

1. 緒 言

酸化鉄のガス還元反応に関する速度論的研究は1960年代初期に, McKewan¹⁾に代表される化学反応律速, また, Bogdandy and Janke²⁾らによる粒子内拡散律速のように単一の律速過程を仮定する解析法が提唱されたが最近ではガス境界内拡散, 粒子内拡散および化学反応の各過程を考慮した解析法^{3)~6)}が多く用いられるようになった。

現在, 表示された還元速度式のパラメータの決定法に関しては, 固定層および移動層などの反応装置を使用して得られた結果から決定する方法^{10), 11)}あるいは移動層である高炉炉内の直接測定による方法¹²⁾などがとられている。しかしながら, 反応装置により酸化鉄ペレットの還元プロセスを解析する場合, 還元速度式を正確にしかも比較的簡単な形で記述するとともにその速度パラメータは可能なかぎり反応装置の特性を含まないものでなければならない。また, 設定したモデルおよび速度パラメータは工学的に考えられる種々の条件下の還元プロセスを説明するものでなければならない。

このような立場から著者らは, 気固系反応装置の解析の基礎として, 高温度域(1100-1400°K)における単

一酸化鉄ペレットの水素還元反応に対して未反応核モデルに基づく上記3過程を考慮した還元速度式を適用してモデルに含まれる速度パラメータを決定した。ついで, 各種条件下の還元曲線についてモデルに基づく計算値と実測値を比較し還元モデルの反応装置解析への適用性について検討した。

さらに, ヘマタイトの還元過程においては, 中間生成物としてマグネタイトおよびウスタイトが生成するので酸化鉄ペレットをウスタイト段階まで予備還元した試料を用いた場合の還元速度を測定¹³⁾しヘマタイトから直接還元した場合の還元速度と比較検討した。

2. 実 験

2.1 試 料

酸化鉄ペレットは真比重 $d_t=4.93$, 気孔率 $\epsilon_p=0.15 \pm 0.02$ のもので学振54委員会物理測定小委員会主催による鉄鉱石類高温性状試験共同研究のため, とくに(株)神戸製鋼所より提供されたものである。その化学分析値

* 昭和45年10月12日本会講演大会にて発表

昭和45年11月10日受付

** 東北大学選鉱製錬研究所

*** 東北大学選鉱製錬研究所 工博

Table 1. Chemical composition of iron oxide pellets.

Element	T·Fe	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	S
wt(%)	65.07	1.37	4.04	0.62	1.23	0.58	0.004

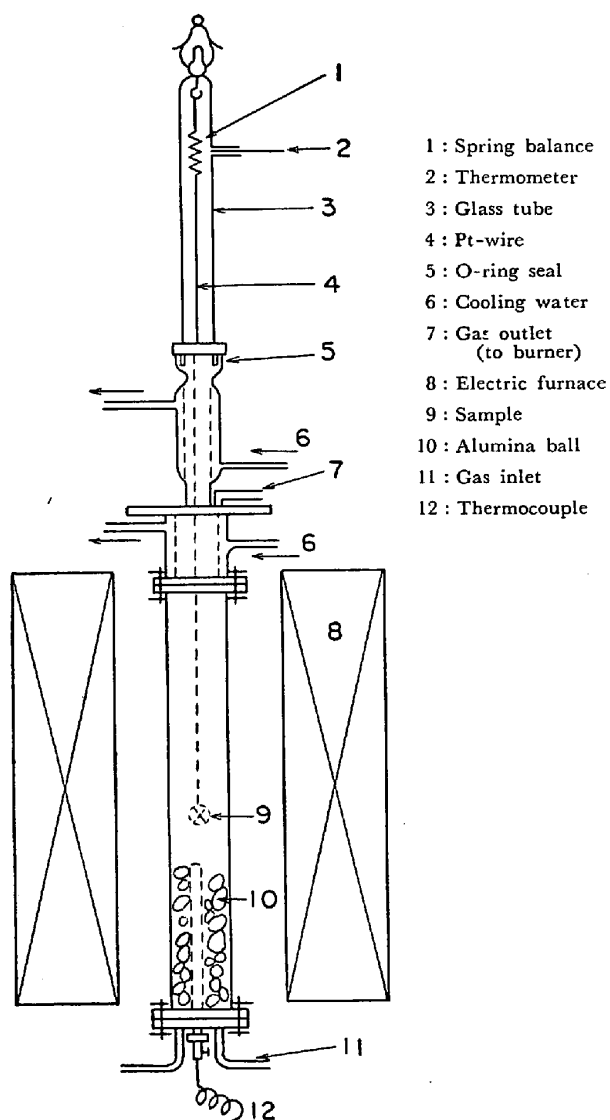


Fig. 1. Experimental apparatus.

は試料調整元の資料により Table 1 のごとく示される。

2.2 実験装置および方法

還元実験には Fig. 1 に示す装置を使用した。

還元ガスは高純度水素ガスをボンベから定圧定流量ゲージを通して反応管に導入し、ガスメータを使用して流量を測定した。還元ガスの導入による反応管内の温度降下を防止するため反応管下部にアルミナボールを充填しガスの予熱を行なった。

反応管として内径 7.7 cm の SUS 42 鋼管を用い、これを上部、中心部、下部に 3 分割して温度制御を行なう SiC 発熱体を用いた電気炉内に設置した。反応管内においてペレットは白金線により石英スプリング（最大荷重 7 g、感量 10 mg）に吊した。昇温は窒素気流中で行ない所定の温度に到達後、所定の割合の窒素によつて希釈した水素ガスに切り換え還元を開始し、還元に伴う重量減少をカセットメータで読み取った。

2.3 実験結果

2.3.1 還元試料の観察

還元条件 $T=1132$, $p_{H_2}=0.4$ ($p_{N_2}=0.6$), $V=50$, $d_p=1.2$ で還元した場合の還元途中におけるペレットの断面を Photo. 1 に示した。Photo. 1 において、いずれの還元率においても反応はトポケミカルに進行しておりウスタイトと金属鉄の境界はシャープな界面を形成している。

一方、還元温度が異なる場合についても各還元率における断面の状況を観察したが Photo. 1 の結果とほとんど同一であった。

2.3.2 還元曲線

各温度における還元曲線の実測値を Fig. 2 に示した。

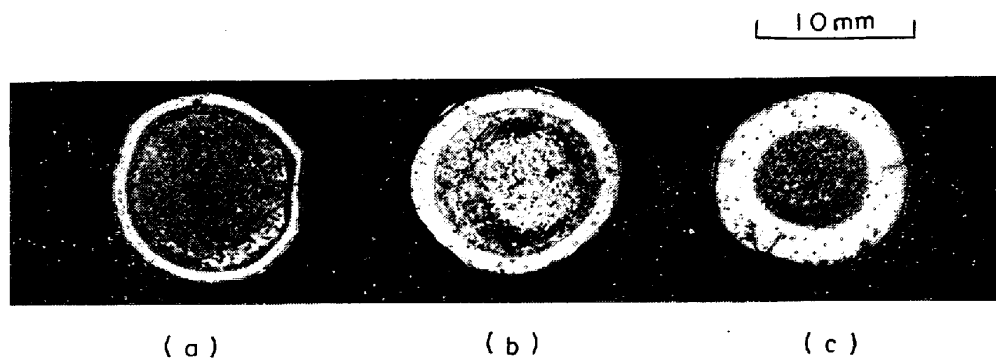


Photo. 1. Cross sections of partially reduced pellets at 1132°K.
(a) $f=0.3$ (b) $f=0.5$ (c) $f=0.8$

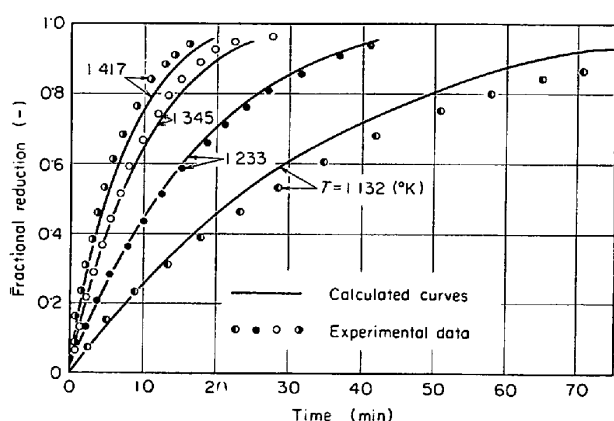


Fig. 2. Comparison of the experimental data with the calculated reduction curves according to the unreacted core model.

Experimental conditions:
 $p_{H_2}=0.4$ ($p_{N_2}=0.6$) (-), $V=50$ (Nl/min),
 $d_p=1.2$ (cm)

Fig. 2 の計算曲線については後述するがここで、還元率 f は還元開始時からある時間内での除去酸素量と試料の化学分析値より計算した除去されるべき総酸素量との比を採った。なお、化学分析値による除去されるべき総酸素量と $T=1417$ で 100% まで還元して減量した酸素量との比較を行なったがその差は約 0.7% であり大きな差は認められなかった。

3. 理 論

酸化鉄ペレットの還元反応は $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow \text{wustite}$ ($Fe_{(1-x)}O$) $\rightarrow Fe$ の各段階が並発的あるいは逐次的に進行すると考えられる。その場合、多界面モデル¹⁴⁾かあるいは各ステップを分離した解析法¹⁵⁾がとられているが本研究においては、前述の観察結果と工学的有用性を考慮して 1 界面の未反応核モデルにより解析を行なった。

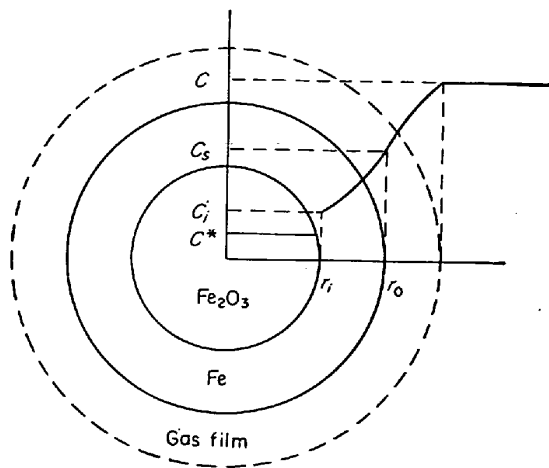
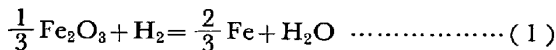


Fig. 3. Unreacted core model.

(1)式に示す反応が Fig. 3 のような未反応核モデルに従うとしガス境膜内拡散、粒子内拡散および化学反応の 3 過程を考慮した総括反応速度はペレット 1 個あたりについて(2)式で示される^{16)~18)}。



$$\bar{R} = (C - C^*) / \left\{ \frac{1}{4\pi r_o^2} \left(\frac{1}{k_f} + \frac{r_o(r_o - r_i)}{r_i D_s} + \frac{(r_o/r_i)^2}{k(1+1/K)} \right) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式を積分し (3) 式の関係を用いて書き換えると (4) 式となり、還元率 f に達するのに要する還元時間 t は上述の各過程が律速する場合の還元時間の和として表わされる。

$$f = 1 - (r_i/r_o)^3 \dots\dots\dots (3)$$

$$t = \frac{3d_o r_o}{C - C^*} \cdot \frac{f}{3k_f} + \frac{3d_o r_o^2}{C - C^*} \cdot \frac{1}{6D_s} \{ 3 - 3(1-f)^{2/3} - 2f \} + \frac{3d_o r_o}{C - C^*} \cdot \frac{1 - (1-f)^{1/3}}{k(1+1/K)} \dots\dots\dots (4)$$

(4) 式においてガス境膜内物質移動係数 k_f を理論的に推算できれば使用する試料の k および D_s を定めることによりモデルに基づいた還元曲線を得ることができる。

4. 速度パラメータの決定

(1)~(4)式に示した未反応核モデルによる速度式の実測値に対する適用性を検討するためには式中の 3 個の速度パラメータ (k_f , D_s および k) を決定する必要がある。本研究では以下に示すように実験条件により定まる k_f は理論的に推算し、試料によって定まる D_s および k はそれぞれ従来の諸家の実測値を整理した実験式および本研究の実測値から決定した。

4.1 ガス境膜内物質移動係数の推算および臨界流量

k_f は(5)式の RANZ-MARSHALL の式¹⁹⁾から推算した。本実験における反応管径は試料粒子径の 6 倍以上ありほぼこの関係が満足されているものと思われる。

$$Sh = 2.0 + 0.6 Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \dots\dots\dots (5)$$

(5)式において、ガスの拡散係数 D は ANDRUSSOW の式¹⁶⁾から、また、混合ガスの粘度については LIGHT-STECHERT の式¹⁷⁾から単一成分の値を求め、WILKE の式¹⁸⁾を採用して推算した。これらの式に基づいて Fig. 2 の実験データから計算した k_f の値を Table 2 に示したが温度上昇に伴い k_f の値は増加している。

Fig. 4 に $T=1233$, $d_p=1.2$, $p_{H_2}=0.4$ ($p_{N_2}=0.6$) の条件でガス流量を変えて還元した場合の還元曲線を示したが $V=30$ の条件で見かけ上の臨界流量が得られて

Table 2. Calculated values of mass transfer coefficient through gaseous film under the various reducing temperatures.

T (°K)	u (cm/min)	d_p (cm)	D (cm ² /min)	Re_p (-)	Sc (-)	Sh (-)	k_f (cm/min)
1 132	4 500	1.20	510	43	0.24	4.5	1 900
1 233	4 900	1.20	600	41	0.24	4.4	2 200
1 345	5 300	1.19	690	39	0.23	4.3	2 500
1 417	5 600	1.19	770	38	0.23	4.3	2 700

Experimental conditions: $p_{H_2}=0.4(p_{N_2}=0.6)$ (-), $D_c=7.7$ (cm), $V=50$ (Nl/min)

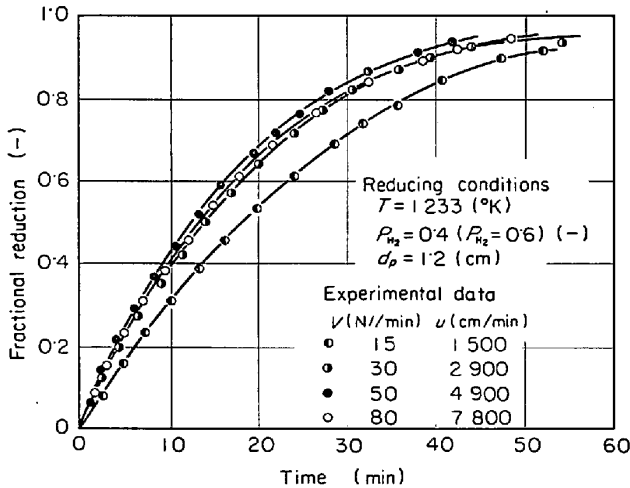


Fig. 4. Effect of the flow rate of gas on the reduction curves.

いる。

k_f の値よりガス境膜抵抗を推算したがその抵抗は流量の増加とともに漸次減少する。しかし、ガス境膜抵抗の大きさは流量のみならず還元温度、希釈ガスの種類および割合、粒子径などの還元条件によつて変化する。したがつて条件によつて臨界流量が異なることになり、得られた臨界流量も見かけ上の値と見なければならぬ。

本研究においては実験条件から理論的に求めたガス境膜抵抗を実測値より差し引いて解析を行なつた。

なお、反応による還元ガスの収支式を立て、反応が定常的に進行する場合その速度が他の過程の速度と等しいと仮定して求めたいわゆる収支抵抗を考慮した例³⁾がある。しかしながら、このような形で求めた抵抗が他の抵抗と同様に取り扱えるか否かは疑問でありここでは収支抵抗を考慮しなかつた。収支抵抗は $4\pi r_0^2/Q$ と表わされる。試みに $T=1233, V=50$ のガス流量で還元する場合の収支抵抗を試算した結果、境膜および収支の両抵抗に対する収支抵抗の割合は5%以下であり、本条件下では無視できることがわかつた。

4.2 反応速度定数

反応速度定数 k は前述の未反応核モデルに実測値を適用して決定した。各温度における実測値の混合律速プロ

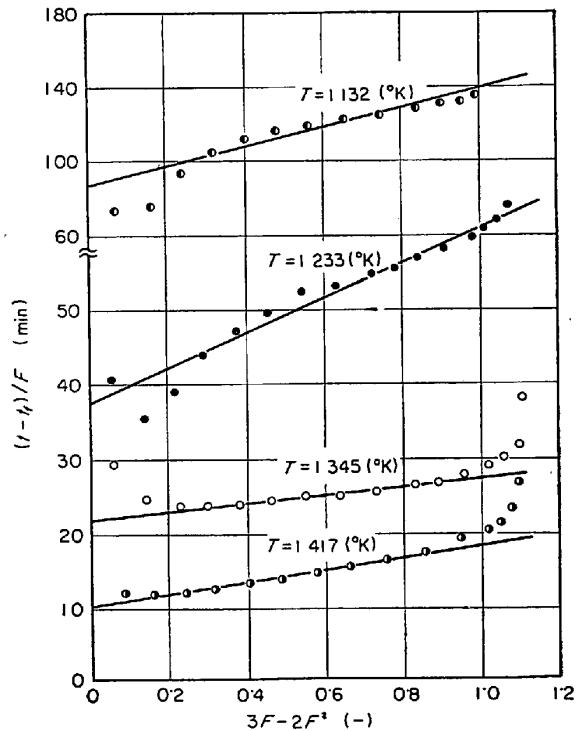


Fig. 5. Plots of the experimental data by $(t-t_f)/F$ vs. $3F-2F^2$ ($p_{H_2}=0.4(p_{N_2}=0.6)$ (-), $V=50$ (Nl/min) and $d_p=1.2$ (cm)).

ット³⁾を示せばFig. 5のようになる。高温度のデータは比較的よい直線性を示すが温度が低くなるにつれて直線性を失い本研究で示した還元モデルからずれる傾向にある。ここではFig. 5に示すごとく還元初期と末期を除いた領域のデータに基づいて引いた直線が $3F-2F^2=0$ の軸を切る切片の値から k を算出した。Fig. 5において t_f は(4)式の右辺第1項 $(\frac{3d_0r_0}{C-C^*} \cdot \frac{f}{3k_f})$ であり、その値は(5)式に基づいて決定した k_f と実験条件から算定した。

求められた k の温度依存性を Fig. 6 に示した。 k の表現として最小二乗法により(6)式が得られ、活性化エネルギーは約 26 kcal/mol であつた。

$$k = \exp(16.2 - 25.7 \times 10^3 / RT) \dots\dots\dots (6)$$

Fig. 6 には比較のために同一のペレットについてCO-

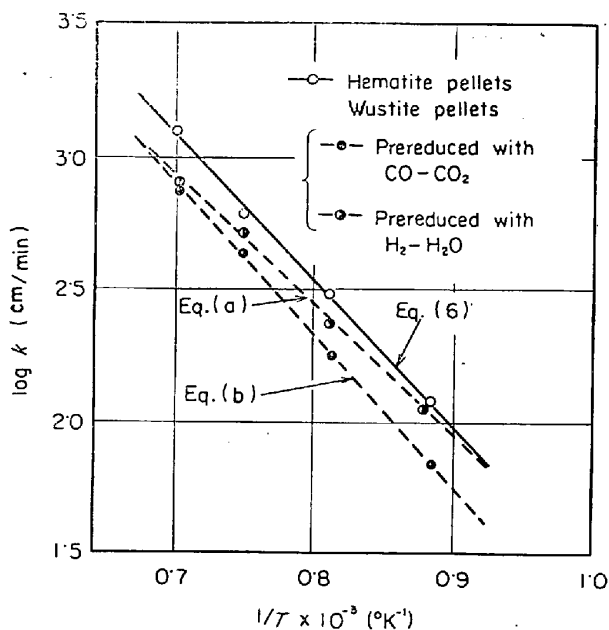


Fig. 6. Temperature dependence of reaction rate constant.

$$k = \exp(13.9 - 20.5 \times 10^3 / RT) \quad (a)$$

$$k = \exp(15.9 - 26.2 \times 10^3 / RT) \quad (b)$$

CO₂ 系ガスおよび H₂-H₂O 系ガスを用い、あらかじめウスタイト (=Fe_{0.95}O) まで還元した試料を本実験と同一条件により還元を行なった場合の化学反応速度定数¹⁸⁾を合わせて示したが、k の値の大きさおよび一般に気固系反応の速度式より得られる活性化エネルギーの精度を考えれば 3 者の間には有意な差はないと考えてよい。

なお、化学反応速度定数を算出する際、(1)式の化学反応の平衡定数 K はウスタイト金属鉄間の平衡関係を熱力学データ²³⁾から求め(7)式で表現した。

$$K = \exp(1.0837 - 1737.2/T) \quad (7)$$

4.3 粒子内拡散係数の推算

粒子内拡散係数 D_s は実測値の混合律速プロットが直線性を示す場合にはその勾配から求めることができる。しかるに、Fig. 5 に示したようにその直線性は必ずしも十分とはいえずそれらの勾配より D_s を決定することは困難であることと一般化の必要性から理論的に(8)式から推算した。

$$D_s = \epsilon_f \cdot \xi \cdot D \quad (8)$$

ただし、ε_f は還元途中で粒子径に変化がないものとする。ε_p と(9)式の関係があり、ξ については高温領域での OLSSON and MCKEWAN¹⁹⁾、低温領域での原ら²⁰⁾の実測データに基づいて求められた(10)式を使用して推算した。

$$\epsilon_f = 0.534 + 0.466 \epsilon_p \quad (9)$$

$$\xi = 4.4 \times 10^{-4} (T - 773.0) + 0.18 \quad (10) \quad (T \geq 773.0)$$

なお、(10)式の実験式を検討するため、問題はあるが Fig. 5 に示された混合律速プロットの各温度における直線の勾配より D_s を算定し、(8)式と(9)式より ε_f を求め(10)式とあわせて Fig. 7 に示した、T = 1345 の場

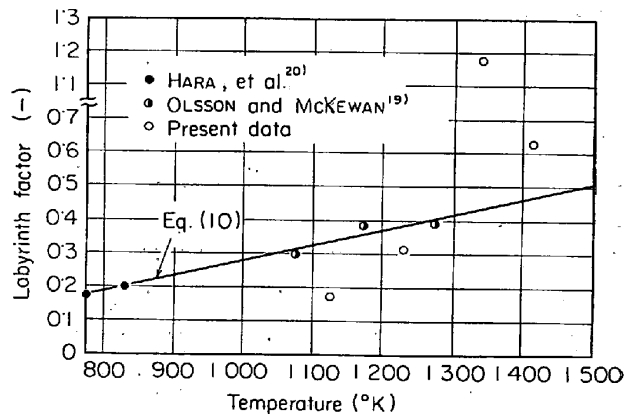


Fig. 7. Relations between labyrinth factor and reduction temperature.

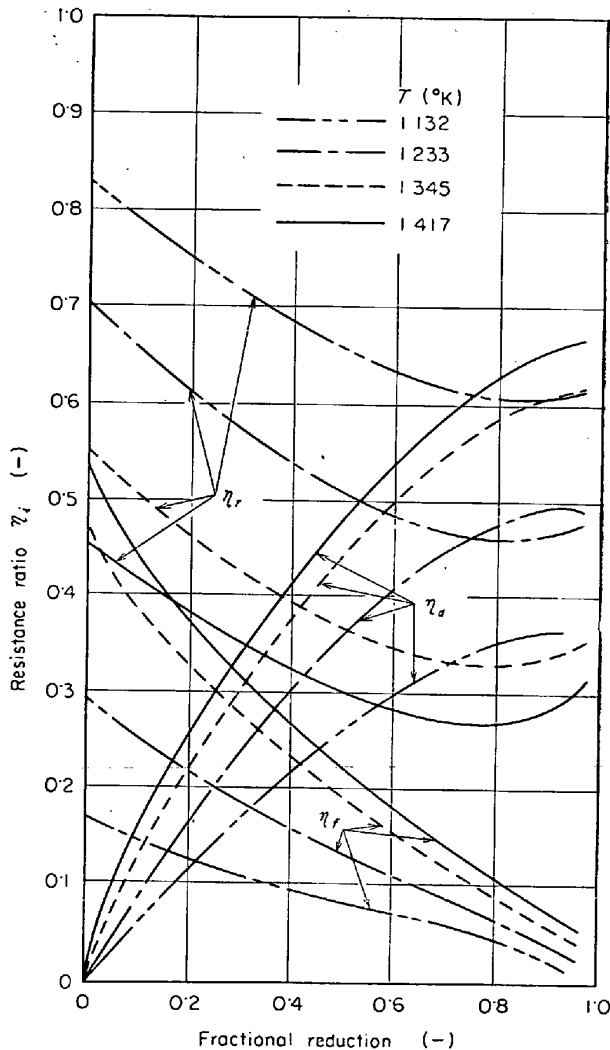


Fig. 8. Resistance of each process of gas film diffusion, intraparticle diffusion and chemical reaction.

合を除いては実験式とほぼ近い値を示している。

4.4 各過程の抵抗の評価

未反応核モデルに基づいて誘導した総括反応速度は(2)式に示したように3過程の抵抗を含んでいる。これら各過程の抵抗の評価については森山ら⁴⁾が理論的に検討しているが、本報では同様の手法を採用して前述の方法で決定した速度パラメータの値を使用し、(2)式の右辺分母の各項で示される抵抗の全抵抗に対する割合をFig. 2に示した実測値に基づいて計算した。その結果をFig. 8に示す。

Fig. 8において、還元の進行に伴い全抵抗に対するガス境膜抵抗および反応抵抗の割合はいずれも減少し、粒子内拡散抵抗の割合は増加し森山ら⁴⁾の結果と同様の傾向を示している。Fig. 8によればとくに、還元温度が高い場合および反応の初期においてはガス境膜抵抗の効果がかなり大きいことがわかる。

5. 還元ガス濃度および粒子径の還元速度に及ぼす影響

還元モデルが有用であるためにはモデルが広範な条件下の還元挙動を表現できることが必要である。本研究においては実用性から考えて、モデルを構成している重要な因子と思われる還元ガス濃度および粒子径の還元速度に及ぼす影響を検討し、還元モデルがこれらの影響をどの程度説明しうるものかを検討した。

5.1 還元ガス濃度の影響

還元ガスを窒素で希釈する場合の還元速度への影響については窒素の反応面への吸着のため²¹⁾、または粒子内拡散抵抗が変化するため²²⁾速度が遅くなることが指摘さ

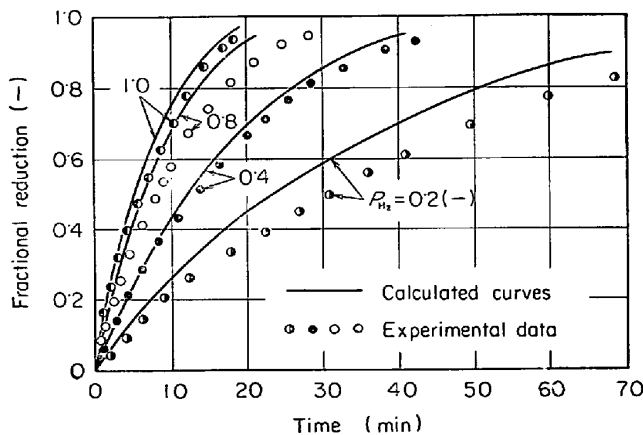


Fig. 9. Comparison of the experimental data with the calculated reduction curves under the various composition of reducing gas. Experimental conditions: $T=1233(^{\circ}\text{K})$, $V=50(\text{Nl}/\text{min})$, $d_p=1.2(\text{cm})$

れている。ここでは(2)式に示したように還元反応は還元ガス濃度の1次反応で表わしうるか否かを検討した。

Fig. 9に $T=1233$, $d_p=1.2$, $V=50$ の還元条件で還元ガスを種々の割合に窒素で希釈した場合の還元曲線の実測値を示した。

(4)式において k および D_s の値が還元ガス濃度の変化に伴って変化しないとすれば、 f が一定の条件で $\log(t-t_f)$ 対 $\log(C-C^*)$ のプロットは勾配が -1 の直線で表わされる。Fig. 10に実測値を用いて $\log(t-t_f)$ 対 $\log(C-C^*)$ をプロットしたがいずれの還元率においても直線関係を示しその勾配はほぼ -1 になっている。したがって、還元速度はガス濃度の1次に比例しており

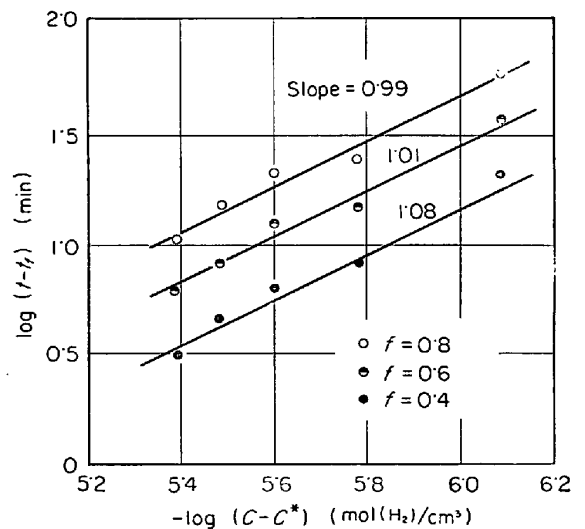


Fig. 10. Relations between $\log(t-t_f)$ vs. $\log(C-C^*)$ at the given fractional reduction.

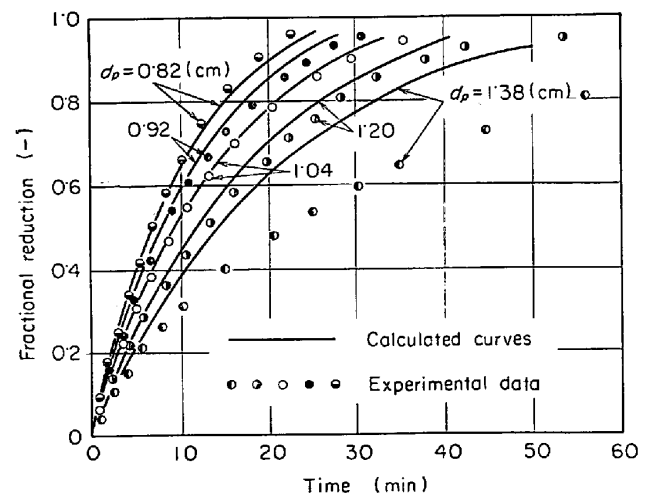


Fig. 11. Comparison of the experimental data with the calculated reduction curves under the various diameters of pellets. Experimental conditions: $T=1233(^{\circ}\text{K})$, $p_{\text{H}_2}=0.4(p_{\text{N}_2}=0.6)$ (-), $V=50(\text{Nl}/\text{min})$

本研究における還元モデルは還元ガス濃度の効果をほぼ表現していると考えられる。

5.2 粒子径の影響

Fig. 11 に $T=1233$, $p_{H_2}=0.4$ ($p_{N_2}=0.6$), $V=50$ の還元条件で粒子径を種々変化させた場合の還元曲線を示したが、粒子径が小さいほど還元速度は速くなっている。

なお Fig. 9 および Fig. 11 の計算曲線については後述する。

6. 還元モデルの適合性

提唱された還元速度式に基づくパラメータの決定に関しては、従来各種の検討がなされてきたが、求めたパラメータを還元モデルに適用し広範な条件下で計算された還元曲線と実測値を比較し、モデルおよびパラメータの有用性について検討した例は少ない。本研究においては(4)式の還元速度式に前述の方法で決定した速度パラメータを適用して各種条件下における還元曲線を計算し、実測値と比較して、還元モデルおよびそのパラメータの適用性を検討した。

6.1 還元温度が異なる場合

還元温度を変化させた場合のモデルに基づいて計算された還元曲線と実測値との比較を Fig. 2 に示した。

Fig. 2 において計算曲線と実測値はかなりよい一致を示しているが還元温度によつては両者の間に約5%程度の差が見られる。このことは実測値より求めた k の温度依存性の直線性から考えて当然予想される差であり全体的に良好な一致を示していると考えられ、前述の還元モデルおよび速度パラメータは酸化鉄ペレットの還元における温度効果を十分表現しているといえる。

6.2 還元ガス濃度および粒子径が異なる場合

還元ガス濃度を変化させた場合のモデルに基づく還元曲線と実測値との比較を Fig. 9 に示したが、前に述べた Fig. 10 の結果とも考え合わせれば、還元モデルはガス濃度の変化が還元曲線に及ぼす影響をほぼ表現していると考えてよい。

一方、粒子径を変化させた場合の両者の比較を Fig. 11 に示した。 $d_p=1.38$ の場合を除いて両者は一致しており、還元モデルは粒子径の効果を表現している。

6.3 還元途中における操作条件変更の場合

還元モデルの適用性をさらに詳しく検討するため還元途中で操作条件の1つを変更した場合についてモデルに基づく計算値と実測値を比較検討した。

(3)式の関係を用いて(2)式を書き換えると(11)式が導かれる。

$$\frac{1}{3} \int_0^f [\alpha\beta + \alpha\{(1-f)^{-1/3} - 1\} + \frac{1}{\delta}(1-f)^{-2/3}] df = \int_0^\theta d\theta \dots (11)$$

ただし

$$\alpha \equiv kr_0/D_s, \quad \beta \equiv D_s/r_0k_f, \quad \delta \equiv 1 + \frac{1}{K},$$

$$\theta \equiv \frac{d_0k(C-C^*)}{3r_0} t$$

還元条件の変更される時間を $t=t_0$ ($\theta=\theta_0$) とすれば、 $t < t_0$ ($\theta < \theta_0$) では(11)式を積分すると θ と f の関係として(13)式を得る。

$$\theta = \frac{\alpha}{3}(\beta-1)f + \frac{\alpha}{2}\{1 - (1-f)^{2/3}\} + \frac{1}{\delta}\{1 - (1-f)^{1/3}\} \dots (12)$$

一方、 $t > t_0$ ($\theta > \theta_0$) で $\alpha=\alpha_1$, $\beta=\beta_1$, $\delta=\delta_1$ に変更されたとすると(11)式を積分して(13)式のような θ と f の関係を得ることができ、(12)式と(13)式を用いて還元途中で操作条件の1つが変更された場合の還元曲線を求めることができる。

$$\theta = \frac{\alpha_1}{3}(\beta_1-1)f - \frac{\alpha_1}{2}(1-f)^{2/3} - \frac{1}{\delta}(1-f)^{1/3} + F_0 + F_1 \dots (13)$$

ただし、

$$F_0 = \frac{\alpha}{3}(\beta-1)f_0 + \frac{\alpha}{2}\{1 - (1-f_0)^{2/3}\} + \frac{1}{\delta}\{1 - (1-f_0)^{1/3}\} \dots (14)$$

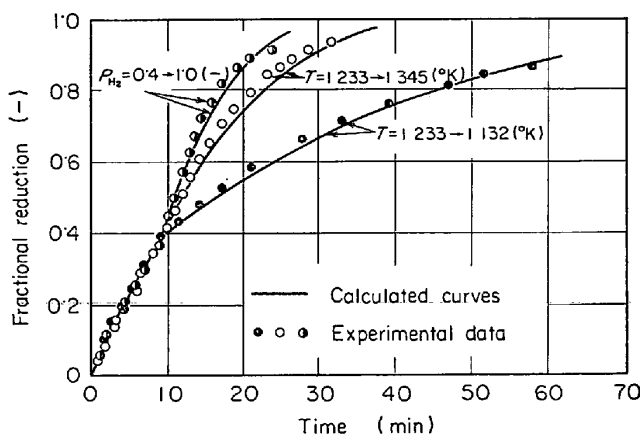


Fig. 12. Comparison of the experimental data with the calculated curves in the case where one of the reducing conditions was altered during the reduction. Experimental conditions: $T=1233$ (°K), $p_{H_2}=0.4$ ($p_{N_2}=0.6$) (—), $V=50$ (Nl/min), $d_p=1.2$ (cm)

$$F_1 = -\frac{\alpha_1}{3} (\beta_1 - 1) f_0 + \frac{\alpha_1}{2} (1 - f_0)^{2/3} + \frac{1}{\delta} (1 - f_0)^{1/3} \dots \dots \dots (15)$$

Fig. 12 にモデルに基づく計算曲線と実測値との比較を示したがいずれの場合も両者はよく一致しており還元モデルは還元途中で操作条件の1つを変更した場合の実測結果を表現している。また、この結果は決定された速度パラメータが非等温条件における還元反応速度をも表現できることを示すものである。

なお、Fig. 12 において実測値は $T=1233$, $p_{H_2}=0.4$ ($p_{N_2}=0.6$), $V=50$, $d_p=1.2$ の条件で 9 min 還元したのちに、試料を窒素気流中に保持し、還元条件の1つを所定の条件に変更し、続いて還元を行なつて得られた結果である。

7. 結 言

工業用酸化鉄ペレットの高温度域での各種条件下における水素還元を行ない、未反応核モデルによる還元速度式の適用性を検討しつぎの知見を得た。

1. 還元過程における試料のウスタイトと金属鉄の境界はシャープな界面を形成し、その反応はトポケミカルに進行する。

2. ヘマタイトペレットについて求められた反応速度定数はウスタイト段階まで予備還元したペレットの反応速度定数と比較して本質的な差は認められない。

3. 還元温度が高い場合および還元の初期においてはガス境膜抵抗の効果が大きく、それを無視することができない。

4. 決定した速度パラメータの値は還元温度、還元ガス濃度および粒子径を変化させた種々の条件下の実測値を説明する。また、還元途中で操作条件の1つを変更した場合の実測値をもきわめてよく説明しており、本研究で示した還元モデルは酸化鉄ペレットの高温度域における還元プロセスを表現し反応装置解析へも十分適用できる。

本研究を進めるにあたり、試料のご提供に種々便宜を賜つた(株)神戸製鋼所中央研究所ならびに実験にご協力を賜つた川崎製鉄株式会社技術研究所、嶋村鎮郎氏、照井敏勝技官に厚くお礼申し上げます。

記 号

C : 還元ガスのバルク濃度 (mol H_2 /cm³)
 C^* , C_i , C_s : 還元ガスの平衡, 反応界面, ペレット外表面濃度 (mol H_2 /cm³)
 D : ガスの拡散係数 (cm²/min)

D_s : 粒子内拡散係数 (cm²/min)
 D_t : 反応管内径 (cm)
 d_0 : ペレットの見かけモル密度 (mol Fe_2O_3 /cm³)
 d_t : ペレットの真密度 (g/cm³)
 d_p : ペレット直径 (cm)
 F : $=1 - (1 - f)^{1/3}$ (-)
 F_0, F_1 : (14), (15)式を示す記号
 f : 還元率 (-)
 K : (1)式の平衡定数 (-)
 k : 反応速度定数 (cm/min)
 k_f : ガス境膜内物質移動係数 (cm/min)
 p_{H_2}, p_{N_2} : 水素および窒素の分圧 (-)
 Q : ガス流量 (cm³/min)
 R : 気体定数 (cal/°K·mol)
 \bar{R} : 還元反応速度 (mol H_2 /min)
 Re_p : 粒子レイノルズ数 ($=d_p u \rho / \mu$) (-)
 r_i, r_0 : 未反応核, およびペレットの半径 (cm)
 Sc : シュミット数 ($=\mu / \rho D$) (-)
 Sh : シャーウッド数 ($=k_f d_p / D$) (-)
 T : 還元温度 (°K)
 t : 還元時間 (min)
 t_f : ガス境膜内拡散過程が律速する場合の還元時間 (min)
 u : ガス流速 (cm/min)
 V : ガス流量 (Nl/min)
 W : ペレットの重量 (g)
 $\alpha, \beta, \delta, \theta$: (12)式に示す無次元項
 ϵ_f, ϵ_p : 還元鉄層のおよび未反応核の気孔率 (-)
 η_f, η_d, η_r : 総括抵抗に対するガス境膜内拡散, 粒子内拡散および化学反応抵抗の割合 (-)
 μ : ガスの粘度 (g/cm·min)
 ξ : 迷宮度 (-)
 ρ : ガスの密度 (g/cm³)

文 献

- 1) W. M. MCKEWAN: Trans. Met. Soc. AIME, 218 (1960), p. 2
- 2) L. BOGDANDY and W. JANKE: Z. Electrochem., 61 (1957), p. 1146
- 3) 原, 土屋, 近藤: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 1297
- 4) 森山, 八木, 鞆: 日本金属学会誌, 29 (1965), p. 528
- 5) T. YAGI and Y. ONO: Trans. ISIJ, 8 (1968), p. 377
- 6) R. H. SPITZER, F. S. MANNING, and W. O. PHILBROOK: Trans. Met. Soc. AIME, 236 (1966) p. 726
- 7) B. SETH and H. U. ROSS: Trans. Met. Soc.

- AIME, 233 (1965), p. 180
- 8) J. FEINMAN, N. D. SMITH, and D. A. MUSKAT: *Indust. Eng. Chem. Process Design and Development*, 4 (1965), p. 270
- 9) H. W. St. CLAIR: *Trans. Met. Soc. AIME*, 233 (1965), p. 1145
- 10) 館, 吉沢, 山村: 学振54委員会資料, 54委-1088 (1967)
- 11) 天辰, 藤, 館, 張, 呉: 鉄と鋼, 56 (1970), S. 338
- 12) 岡部, 浜田, 渡辺: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 764
- 13) 高橋, 八木, 大森: 東北大学選鉱製錬研究所彙報 26 (1970), p. 83
- 14) R. H. SPITZER, F. S. MANNING, and W. O. PHILBROOK: *Trans. Met. Soc. AIME*, 236 (1966), p. 1715
- 15) W. E. RANZ and W. R. MARSHALL: *Chem. Eng. Prog.*, 48 (1952), p. 141
- 16) 佐藤: 物性定数推算法 (1965) [丸善]
- 17) W. LIGHT and D. G. STECHERT: *J. Phys. Chem.*, 48 (1944), p. 23
- 18) C. R. WILKE: *J. Chem. Phys.*, 18 (1950), p. 517
- 19) R. G. OLSSON and W. M. MCKEWAN: *Trans. Met. Soc. AIME*, 236 (1966), p. 1518
- 20) 原, 須賀田, 会田, 近藤: 日本金属学会誌, 31, (1967), p. 207
- 21) W. M. MCKEWAN: *J. Metals*, 16 (1964), p. 781
- 22) N. A. WARNER: *Trans. Met. Soc. AIME*, 230 (1964), p. 163
- 23) O. KUBASCHEWSKI, E. LL. EVANS, and C. B. ALCOCK: *Metallurgical Thermochemistry*, Fourth edition, (1967), [Pergamon Press]