CaO を含むウスタイトの還元速度の還元温度および鉄の α - γ 変態依存性

井口義章* 福永光成** 平尾次郎*

J. Japan Inst. Metals, Vol. 46, No. 8 (1982), pp. 780-786

Dependences of the Reduction Rate of Wustite Containing CaO on the Reduction Temperature and α - γ Transformation of Metallic Iron

Yoshiaki Iguchi*, Mitsushige Fukunaga** and Jiro Hirao*

In order to make clear the mechanism by which CaO brings about the acceleration of the reduction of wustite, the dependences of the reduction rate of wustite containing CaO on the temperature and α - γ transformation of metallic iron were investigated. For the purpose, pellets of pure wustite and wustite containing CaO in several quantity levels were reduced by hydrogen over the temperature range from 873 to 1273 K. The following results were obtained.

(1) Wustite grains are covered by dense layer of metallic iron and intercepted from the reducing gas, when pure wustite is reduced at a higher temperature than 1073 K. The addition of CaO to wustite, however, can yield the metallic iron of such the property that should involve the fine pores open to reducing gas and wustite at any temperature. The fine pores in metallic iron, nevertheless, diminished gradually with increasing the temperature in the range of α -iron. However, when temperature rises from α -iron to γ -iron, the reduction rate increases discontinuously, probably because the sintering of *fcc*-iron is slower than that of *bcc*-iron. The above mentioned phenomena can be shown also by the change in the interfacial chemical reaction rate constant k_r which is estimated by analysing the reduction rate on the basis of the mixed control equation.

(2) The activation energy of the interfacial chemical reaction hardly change by the addition of CaO to wustite. This means that the reduction accelerating effect of CaO may not be catalytic, but it will be caused by the formation of iron of such a property that the direct contact between wustite and gas should be always maintained even under the coexistence of metallic iron.

(Received February 4, 1982)

I. 緒 言

自溶性焼結鉄，自溶性ペレットの被還元性と CaO/SiO₂ 比との関係については、これまでも多くの研究がなされ、CaO/SiO₂ 比の増大とともに被還元性が良くなるとの定性的には一致した結論が得られている。焼結鉄，ペレット中では CaO は SiO₂ との間で slag を生成し、また多くの相が複雑に混り合っているため、被還元性に及ぼす CaO の影響の詳細な研究はなされていない。焼結鉄，ペレットの被還元性を評価するための基礎として、CaO を固溶したマグネタイト，ウスタイトの還元に関する基礎的な研究が必要と思われる。

純粋な酸化鉄に CaO を添加すればその還元速度が速くなることはよく知られている。CaO がウスタイトの還元を

促進する機構についてはいくつかの考え方^{(1)~(4)}が提出されている。それらを 3 つのグループに分ければ、(1) CaO のウスタイトへの固溶によって格子に歪が発生し吸着サイトが創り出される。(2) ウスタイト - 金属鉄の反応界面に近いウスタイト中での CaO の濃化、複合酸化物の析出による歪の発生とき裂の発生に伴う反応面積の増大。(3) ウスタイトに固溶した CaO が $\text{Ca}^{2+} \rightleftharpoons \text{Ca}^+$ の繰返しを行ないコンデンサー的な役割をし、結晶に歪を与え、反応界面の酸化鉄側に濃縮し、還元速度の増大に寄与する。しかしながら、いまだに定説はない。

本研究では 873~1273 K の広い温度範囲にわたって実験し、ウスタイトと接する金属鉄の組織と還元速度の関係を調べることによって、CaO がウスタイトの還元を促進する作用機構を解明する手掛を得ようとするものである。

* 名古屋工業大学金属工学科 (Department of Metallurgical Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya)

** 名古屋工業大学大学院 (Graduate School, Nagoya Institute of Technology, Nagoya)

II. 試料および実験方法

本研究において使用した試料は、 Fe_3O_4 あるいは $\text{Fe}_{0.924}\text{O}$ に CaO を添加し、アルミナ製自動乳鉢中で $1.8 \times 10^3 \text{ s}$ (30 min) 攪拌混合し、適量の水を加えて球状に造粒し、乾燥し、白金ボート中で 90% CO_2 -10% CO あるいは 50% CO -50% CO_2 混合ガス中で焼成したものである。試料の組成、焼成条件を Table 1 に示した。試料の組成は Fe と Ca の全金属原子に対する Ca 原子の原子百分率を秤量時の両酸化物の質量から計算して示した。試料の直径と質量はそれぞれ $8.4 \times 10^{-3} \sim 9.2 \times 10^{-3} \text{ m}$, $1.44 \times 10^{-3} \sim 1.65 \times 10^{-3} \text{ kg}$ である。

実験には従来から使用している熱天秤を使った。マグネタイト試料は、まずマグネタイトからウスタイトへ Table 2 に示した組成の H_2 - H_2O 混合ガスで還元し、引き続いてウスタイトから金属鉄へ還元した。還元は 923~1273 K の範囲の温度で $3.33 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (室温) の水素を流して内径 $1.85 \times 10^{-2} \text{ m}$ の石英製反応管内で行なった。ウスタイト試料は 873~1273 K の範囲の温度で水素によって還元した。

Table 1 Chemical compositions and sintering conditions of the wustite and magnetite pellets used in this study.

Kind of iron oxide	Quantity of CaO (at% of Ca)	Sintering condition
Magnetite	No addition	For $9.0 \times 10^4 \text{ s}$ (25 h) in 10% CO -90% CO_2 at 1273 K
	0.25	
	0.50	
	0.76	
	1.01	
	1.52	
Wustite	3.90	
	No addition	For $9.0 \times 10^4 \text{ s}$ (25 h) in 50% CO -50% CO_2 at 1273 K
	0.50	
	1.52	
	3.90	

Table 2 Composition of the hydrogen-water vapor gas mixtures used in the reduction of magnetite pellets to wustite.

Temperature (K)	Composition
923	63% H_2 -37% H_2O
973	57% H_2 -43% H_2O
1073	47% H_2 -53% H_2O
1173	40% H_2 -60% H_2O
1203	38% H_2 -62% H_2O
1273	35% H_2 -65% H_2O

III. 実験結果

1. ウスタイト試料

ウスタイト試料の 873~1273 K の範囲の温度における還元曲線の一例として 1.52 at%Ca の試料と純粋なウスタイト

Fig.1 Reduction curves of the wustite pellets of composition $N_{\text{Fe}}:N_{\text{Ca}}=194:3$ by hydrogen at various temperatures.

Fig.2 Reduction curves of the pure wustite pellet by hydrogen at various temperatures.

ト試料の結果を Fig.1, 2 に示した。1.52 at%Ca の試料については還元温度の上昇に伴いおおむね還元曲線が高還元率側に移行する。なかでは、1073 K と 1173 K における還元曲線がほとんど一致するかわずかに逆転すること、1173 K から 1193 K, さらに 1273 K への温度上昇によって還元曲線が著しく高還元率側へ移るのが注目すべき点である。3.90 at%Ca の試料も同様の傾向を示す。0.50 at%Ca の試料については、973 K においてわずかに還元の遅滞が起こるが、その他の温度については、1.52 at%Ca 以上の CaO を含む試料とはほぼ一致した傾向を示す。純粋なウスタイト試料については、CaO を含むウスタイトに比べて還元が極端に遅いのが第一の特徴である。温度上昇に伴う変化としては、1073 K で還元が遅滞するため、1073 K での還元が 973 K より遅いこと、 γ 鉄領域の温度に入ると還元が不連続的に遅くなるため、1193 K での還元が 1173 K より遅い。ここで、CaO を含むウスタイトの還元が α 鉄から γ 鉄への変化によって速くなっているのに対して、純粋なウスタイトの還元は顕著に遅くなっているのが特徴的である。

2. マグネタイト試料

マグネタイト試料のウスタイトから金属鉄への 923~

1273 K の範囲の温度における還元曲線の一例として 1.52 at%Ca の試料の結果を **Fig. 3** に示した。1.01 at%Ca 以上の CaO を含むマグネタイト試料は、おたがいにほぼ同じ還元挙動を示す。また、1.52 at%Ca 以上の CaO を含むウスタイトともほぼ同様の挙動を示す。還元温度の上昇に伴い還元曲線は高還元率側に移行する。またウスタイト同様に、1073 K と 1173 K における還元曲線の一致ないしわずかの逆転、 γ 鉄領域での大幅な還元促進が目立つ。一方、

Fig.3 Reduction curves of the magnetite pellet of composition $N_{Fe}:N_{Ca}=194:3$ by hydrogen at various temperatures.

1.01 at%Ca より少ない CaO を含むマグネタイト試料の還元は 973~1073 K で最も高還元率側にあり、さらに温度が上昇すればわずかながらしだいに低還元率側に移行する。純粋な Fe_3O_4 は 973 K 以上の温度において純粋な $Fe_{0.924}O$ と同様の挙動を示した。923 K 以下ではマグネタイトからウスタイトへの還元がきわめて遅く、試料全体を中間生成物のウスタイトまで還元することができなかった。

IV. 部分還元試料の顕微鏡観察結果

873, 973, 1073, 1173, 1193 K において純粋なウスタイト、0.50 at%Ca, 1.52 at%Ca のウスタイト試料を約 50% まで部分還元し、断面の組織を観察した。

断面を肉眼観察した結果、1073 K 以上の温度において部分還元された純粋なウスタイト試料には断面全体に金属鉄が生成しているのが観察された。一方、973 K 以下の温度で部分還元された純粋なウスタイトはトポケミカルに還元されていた。**Photo. 1** (a), (b) に 973, 1073 K において部分還元した純粋なウスタイト試料の断面を示した。純粋なウスタイトは 973 K と 1073 K で還元形態が異なることが分かる。CaO を固溶したウスタイトはすべての還元温度でトポケミカルに還元されていたが、873 K, 973 K で還元されたときやや拡った反応帯を示した。**Photo. 1** (c), (d) に 973

Photo.1 Cross sections of partially reduced pellets, (a) pure wustite at 973 K ($F=0.53$), (b) pure wustite at 1073 K ($F=0.37$), (c) wustite containing 0.50 at%Ca at 973 K ($F=0.47$), and (d) wustite containing 0.50 at%Ca at 1173 K ($F=0.52$).

Photo.2 Microscopic aspects of the cross sections of partially reduced pellets, (a) pure wustite at 973 K, showing the interface between metallic iron shell and wustite core, (b) pure wustite at 1073 K, showing dense metallic iron formed on wustite, (c) wustite containing 0.50 at%Ca at 973 K, showing the interface, (d) wustite containing 0.50 at%Ca at 1173 K, showing metallic iron shell, (e) wustite containing 1.52 at%Ca at 1173 K, showing metallic iron shell, and (f) wustite containing 1.52 at%Ca at 1193 K, showing metallic iron shell.

K と 1173 K で部分還元した 0.50 at%Ca のウスタイト試料の組織を示す。

つぎに部分還元した上述の 3 種類のウスタイト試料の断面のミクロ組織を **Photo.2** に示す。純粋なウスタイトは 973 K (Photo.2(a)) と 1073 K (Photo.2(b)) で著しく異なる。973 K では 1 個のウスタイト粒[†]から微細な還元鉄が形成されその間に微細な気孔が生成されるが 1073 K では大きな組織の微細気孔のない還元鉄が生成されて行く。微細気孔のない大きな組織の還元鉄はウスタイト粒と還元ガスの接触を妨げるためペレット内部まで還元力を有する組成の

ガスが到達し Photo.1(b) のように均一反応型に近い還元進行形態を示すと推定される。一方、CaO を固溶したウスタイトは還元温度に依らず、1 個のウスタイト粒から内部に気孔を有する還元鉄が形成される。CaO を含むウスタイトからの還元ペレットの気孔径分布測定⁽⁵⁾によっても、CaO を含む緻密なウスタイトの還元⁽⁶⁾によっても微細気孔の生成が認められている。そして還元温度の上昇とともにしだいに 1 個のウスタイト粒から形成される還元鉄の気孔が大きくなり数は少なくなっていく。その一例として Photo.2(c), (d) に 0.50 at%Ca のウスタイトの 973 K, 1173 K におけるミクロ組織を示す。

つぎに 1.52 at%Ca の試料の 1173 K と 1193 K における還元組織を比較して Photo.2(e), (f) に示した。顕著な差

[†] 試料内においてウスタイト粒はお互に焼結して繋がっているが、その中から緻密な 1 つの塊を取り出してこのように称する。

は見られないが、還元鉄中の気孔が 1193 K で還元された方がやや明確である。

V. 還元速度の解析

ウスタイトから金属鉄への還元速度の解析は、一界面の未反応核モデルにもとづくガス境膜内ガス拡散、還元鉄層内ガス拡散、界面化学反応およびガス相内における収支効果を考慮した混合律速式、式(1)によって行なった。

$$\frac{C_{H_2}^{(b)} - C_{H_2}^{(e)}}{R_0 d_0} \cdot \frac{t}{f} - \frac{1}{k_F} \cdot \frac{3 - 3f + f^2}{3} = \frac{R_0}{6D_e} (3f - 2f^2) + \frac{1}{k_r(1 + 1/K)} \quad (1)$$

$$\frac{1}{k_F} = \frac{1}{k_r} + \frac{4\pi R_0^2}{Q_T}$$

ここで、 k_F は Ranz-Marshall の関係 $Sh = 2.0 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3}$ から計算して求めた。解析法は Yagi と Ono⁽⁷⁾ によって始められた図的解析法で式(1)の左辺対 $(3f - 2f^2)$ の関係をプロットする方法である。

1. ウスタイト試料の還元速度の解析

一例として、1.52 at%Ca の試料の還元速度の混合律速プロットの結果を Fig. 4 に示す。全体を通じて、 $3f - 2f^2$ が 0.8~1.1 の間で直線関係から低値側に偏倚する傾向がみられる。混合律速プロットで直線関係が得られる場合について、その直線の縦軸の切片と勾配から求められた k_r と D_e を還元温度の関数として Fig. 5, 6 に示した。

873 K, 923 K において求められた k_r の値は CaO を含む

Fig.4 Graphical analyses of the reduction rate of the reduction curves shown in Fig.1 by plotting the left hand side of Eq. (1) vs. $3f - 2f^2$.

実験試料のすべてについてほぼ一致している。この一致は 973 K においても持続している。1073 K において初めて CaO 含有量の多い試料ほど k_r の値が大きいという傾向が見られ、CaO 濃度が小さい試料は温度上昇に伴う k_r の増大傾向が頭打ちになる。1173 K になるとこの傾向はいっそう顕著になり 1.52 at%Ca 以下の試料では k_r が Arrhenius の直線関係から負に偏倚している。しかし、3.90 at% Ca の試料ではその直線関係を維持しながら増大する。

純粋な $Fe_{0.924}O$ の試料については還元初期の速度を混合律速式にもとづく図的解析法で解析して得られた値である。この試料についての k_r も 973 K 以下の温度では CaO を含むウスタイトとはほぼ同じ温度依存性をもって変化する

Fig.5 Dependences of k_r on the reduction temperature and the amount of CaO.

Fig.6 Dependences of D_e on the reduction temperature and the amount of CaO.

が、絶対値は CaO を含む試料の約 1/2 である。1073 K への温度上昇に伴って不連続的に著しく低値側にずれる。ただし、1073 K 以上の温度では厳密には混合律速プロットで直線関係を示さない。

CaO を固溶したウスタイトの還元速度を解析して得られた D_e については、全体的な傾向として、温度上昇に伴い D_e は増大するが、その温度依存性は k_r と比べてかなり小さい。また、 α 鉄域から γ 鉄域の温度に上昇すると、 k_r と同様に、不連続的に D_e が増大する。さらに、 γ 鉄温度域における D_e 増大の温度依存性が α 鉄域のそれより大きい。

2. マグネタイト試料

混合律速プロットで還元速度を解析して得られた k_r , D_e

Fig. 7 Dependences of k_r on the reduction temperature and the amount of CaO.

Fig. 8 Dependences of D_e on the reduction temperature and the amount of CaO.

を還元温度の関数として Fig. 7, 8 に示した。マグネタイト試料についても、ウスタイト試料と同様に、973 K 以下の温度では k_r は事実上 CaO 含有量に依らず $\log k_r$ 対 $1/T$ の表示において直線的に変化するが、973 K より高い温度では CaO の含有量が小さいほど低温からその直線関係から低値側に偏倚する。しかし、 γ 鉄領域では k_r の増加傾向が回復する。

VI. 考 察

1. 973 K 以上の α 鉄域の温度における還元の停滞について

ウスタイト試料の還元についてみれば、純粋なウスタイト試料の還元速度は 923 K から 1073 K への温度上昇に伴って、しだいに減少し、1073 K から 1173 K への温度上昇に伴って顕著に増大し約 1073 K 近傍の温度で最も遅くなっている。この現象は既往の多くの研究⁽⁸⁾において観察されているものと同じと考えられる。すなわち、Photo. 2(a), (b) に示したように、973 K では 1 個のウスタイト粒から微細な気孔を有する還元鉄が生成されるが、1073 K では緻密と推定される還元鉄が生成される。約 1073 K の温度から還元鉄の再結晶、焼結が起こるために、この温度以上ではウスタイト粒を覆った緻密な金属鉄内の酸素の固相拡散過程が新に加わるために還元速度が遅くなる。一方、CaO を固溶したウスタイト試料では、1073 K においても 1 個のウスタイト粒から微細な気孔を有する還元鉄が生成し、この鉄中を還元ガス、還元生成ガスがガス拡散しうる。すなわち、金属鉄内の酸素の固相拡散過程は関与しない。そのため、還元速度が小さくなる現象は起こらない。

CaO を固溶したマグネタイト試料のウスタイトから金属鉄への還元においても還元速度が極小となる現象は観察されず、CaO を固溶したウスタイト試料と同様であった。なお、既往の研究⁽⁸⁾⁽⁹⁾ではマグネタイト試料の還元の遅滞が最も顕著に現われるのは 973~1023 K とされており、本研究の純粋なウスタイト試料では約 50~100 K のずれがみられる。これは製造条件の違いによる試料の性状の差によると推定される。

つぎにウスタイト中に固溶した CaO 量の影響をみる。1.52 at%Ca と 0.5 at%Ca のウスタイト粒の 1173 K における部分還元組織を Photo. 2(e), (f) で比較すると、1.52 at%Ca のウスタイト粒からは 1173 K においてもなお金属鉄中に低温から引き続き微細気孔がみられる。0.50 at%Ca の方には明確には見られない。一方、両試料の還元速度を混合律速式による図のプロットで解析すると α 鉄域のすべての温度ではほぼ直線関係を示し、得られる速度パラメーター k_r の値をみると、CaO 濃度の低い 0.50 at%Ca の試料の方が 1.52 at%Ca の試料よりも低温から頭打ち傾向を示す。このように CaO を固溶したウスタイトは、973~1073 K で純粋なウスタイトにみられる還元停滞は示さないが、

さらに温度が上昇して 1173 K に達すれば CaO 濃度が小さいほど組織的にも 1 個のウスタイト粒からの金属鉄中の気孔が少なくなる。

2. 鉄の α - γ 変態による還元挙動の変化

還元速度を解析した結果をみると, 1073~1173 K にかけての α 鉄領域内において低下傾向のあった k_r が 1183 K 以上の温度の γ 鉄領域内においては回復傾向を示す。1173 K (α 鉄) と 1193 K (γ 鉄) における金属鉄中での鉄の自己拡散係数⁽¹⁰⁾ はそれぞれ $D_{\alpha}^{Fe} = 3.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $D_{\gamma}^{Fe} = 1.6 \times 10^{-17} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ である。焼結理論によれば, 種々提案されている焼結機構のうちで体拡散の機構が優越するものと考えられている。これによれば, 粒子接触部は表面張力の作用を受けているので, その表面直下ではその温度での平衡値の空格子濃度よりも高い。他方, 粒内ではその温度で平衡な空格子濃度となっている。そのため, 両者の間に空格子濃度勾配を生じ, 原子が拡散し, 接触部が肥大する。したがって, 自己拡散係数が小さければ焼結速度が遅い。金属鉄の焼結はウスタイトと還元ガスとの接触を悪くするので両者の接触が保たれている CaO 含むウスタイトの還元では α - γ 変態点近傍の温度では焼結速度の違い γ 鉄領域の温度における方が α 鉄領域におけるよりも還元速度が速いと考えられる。

3. 活性化エネルギーに及ぼす CaO の影響

Fig. 5 に示した, ウスタイト試料の H_2 還元における $\log k_r$ と $1/T$ の関係から, 1073 K 以下の温度での界面化学反応の活性化エネルギーは CaO 濃度にはほとんど依らず平均して $112 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ である。この値は本研究における純粋なウスタイトについての $112 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, さらに従来⁽¹¹⁾における CaO を含まない酸化鉄試料のウスタイトから金属鉄への還元についての $111 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ とよく一致している。この活性化エネルギーは 1073 K あたりから CaO 含有量依存性を示し始め, $1.52 \text{ at}\% \text{Ca}$ の試料については 1073 K から 1173 K にかけて, $0.50 \text{ at}\% \text{Ca}$ の試料については 973 K から 1173 K にかけて減少する。しかし, $3.90 \text{ at}\% \text{Ca}$ の試料については 1073 K までと同じ値となる。 γ 鉄領域の温度範囲においても, 見掛けの活性化エネルギーは α 鉄領域におけるのとほぼ等しく, 平均して $112 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ である。

マグネタイト試料の $\log k_r$ 対 $1/T$ の関係を示す Fig. 7 においても, ウスタイトと全く同様の傾向が窺える。973 K 以下の温度における活性化エネルギーの平均値は $111 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ でウスタイト試料のそれと一致している。

上述のように, k_r の温度依存性から求めた界面反応の見掛けの活性化エネルギーが CaO の固溶の有無および固溶量によらず, ほぼ同じ値をとるということは, CaO のウスタイト還元促進作用が触媒作用でないことを意味する。973 K~1173 K で CaO 濃度が小さいほど k_r がそれより低温での Arrhenius の関係を下回り, 一見, 見掛けの活性化

エネルギーが CaO の固溶によって小さくなったかに見えるのは, CaO の還元の促進作用が温度上昇とともに弱まったと見るべきであろう。3.90 at%Ca の試料では, 973 K~1173 K で依然として 973 K 以下の低温と同じ活性化エネルギーをとることがそれで裏付けている。

VII. 結 論

CaO を含むウスタイト, マグネタイト試料のウスタイトから金属鉄への還元について 873~1273 K の範囲の温度で実験した。純粋なウスタイトは 1073 K 以上の温度で FeO 粒子が緻密な金属鉄で覆われるため還元(特に後期の還元)が遅滞するが, CaO を固溶したウスタイトでは FeO 粒子上に生成される金属鉄が微細気孔を有するためこのような遅滞は現われない。しかし, 還元速度を解析して得た界面化学反応速度定数 k_r は 1073 K~1173 K で CaO 濃度が低いほど低温から頭打ち現象を示す。また γ 鉄の温度域に入ると, 1173 K 近くの α 鉄の温度域で見られた k_r 増大の頭打ちが消え, 973 K 以下での Arrhenius の関係に復する傾向を示す。

見掛けの活性化エネルギーは CaO の有無およびその量に依らず $110 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ となり従来の研究の値とよく一致する。このことは, CaO のウスタイト還元促進作用が触媒作用でないことを意味する。

記 号

- $\text{C}_{\text{H}_2}^{(b)}$: ガスバルク中における H_2 濃度 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)
- $\text{C}_{\text{H}_2}^{(e)}$: 平衡 H_2 濃度 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)
- D_e : 還元鉄層中の有効拡散係数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
- d_0 : 試料中の被還元酸素濃度 ($\text{mol} \cdot \text{FeO} \cdot \text{m}^{-3}$)
- f : 還元鉄層の相対厚さ (-)
- F : 還元率 (-)
- k_f : ガス境界膜内ガス物質移動係数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- k_r : 界面化学反応速度定数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- K : 平衡定数 (-)
- Q_T : 還元ガスの体積流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
- Re : Reynolds 数 (-)
- R_0 : ペレットの半径 (m)
- Sc : Schmidt 数 (-)
- Sh : Sherwood 数 (-)
- t : 還元時間 (s)

文 献

- (1) S.E.Khalafalla and P.L.Weston, Jr.: Trans. Met. Soc. AIME, **239** (1967), 1494.
- (2) R.Piepenbrock, K.Koch, G.Trömel and W.Fix: Arch. Eisenhüttenw., **47** (1976), 141.
- (3) 井口義章, 井上道雄: 鉄と鋼, **65** (1979), 1692.
- (4) 渡辺俊六, 金子泰成: 鉄と鋼, **65** (1979), S612.
- (5) 井口義章, 井上道雄: 鉄と鋼, **65** (1979), 34.
- (6) 井上博文, 桐谷利信, 高橋愛和: 東北大学選鉱製錬研究所集報, **31** (1975), 118.
- (7) T.Yagi and Y.Ono: Trans. ISIJ, **8** (1968), 377.
- (8) J.O.Edström: J.Iron Steel Inst., **175** (1953), 289.
- (9) P.K.Strangway and H.U.Ross: Trans. Met. Soc. AIME, **242** (1968), 1981.
- (10) 日本金属学会編: 金属データブック, 丸善, (1974), 25.
- (11) 高橋礼二郎, 八木順一郎, 大森康男: 鉄と鋼, **57** (1971), 1597.