

© 1992 ISIJ

 ///////////////  
 論 文  
 ///////////////

# 溶融 FeO との反応による高炉炉芯コークス 細粒化現象

砂原 公平\*・稲田 隆信\*・岩永 祐治\*<sup>2</sup>

## Size Degradation of Dead-man Coke by Reaction with Molten FeO in Blast Furnace

Kohei SUNAHARA, Takanobu INADA and Yuji IWANAGA

### Synopsis :

Since particle size of deadman coke greatly affects the permeability of gas and liquid in the lower part of a blast furnace, elucidation of the behavior the replacement of deadman coke is an important subject. This paper describes the degradation of deadman coke by the reaction with molten FeO. With use of a one-dimensional reaction model in which two kinetic parameters were determined from a fundamental experiment, the degradation of the deadman coke in an actual blast furnace was simulated. The effect of FeO in molten slag on the degradation of deadman coke concerns reduction ratio on the melting down of ore temperature, and productivity. It takes about 2 weeks that vertical size distribution of degrading deadman coke is stationary pattern.

**Key words :** ironmaking; blast furnace; coke; deadman; molten slag; FeO; direct reduction.

## 1. 緒 言

高炉炉頂部から鉍石と共に装入されたコークスは、高炉炉下部において羽口前のレースウェイと呼ばれる燃焼領域内で消費される。一方、このレースウェイよりもさらに炉内側の炉中心部にはこのような消費領域が存在しないため、荷下がり速度が遅く比較的長時間停滞する炉芯コークスとよばれる領域が存在する。この炉芯コークスの性状は、高炉操業において融着層から滴下する溶銑滓の通液性、或いはガスの通気性の面から非常に重要な要素の一つである。炉芯コークス更新期間については、トレーサーを用いた直接測定によると3~7日間程度とされている<sup>1)</sup>が、その更新メカニズムについては明らかにされていない。更新機構解明には、燃焼領域への固体流れによるコークスの更新に着目した物理的なアプローチのほかに炉下部における反応によるコークスの劣化に着目した化学的なアプローチが考えられている。本研究では後者の見地から、融着層から滴下する FeO を含む溶融スラグとの固液反応によるコークスの細粒化、及び消滅機構に焦点を当てた基礎検討を行った。

まず、基礎実験より、コークスと溶融 FeO との素反応速度定数、及びコークス充填層を溶融 FeO が滴下する際の反応面積比を評価し、得られた速度パラメータを用いて実高炉条件下におけるシミュレーションを行った。

## 2. 単一球コークスと滞留した溶融 FeO との固液反応の速度解析

### 2.1 素反応に関する基礎実験

コークスと溶融 FeO との素反応について検討するために、単一球コークスと滞留スラグとの基礎反応実験を行った。

#### 2.1.1 実験方法

実験装置としては Fig. 1 に示すような装置①を用いた。反応解析を容易にするため球形に処理したコークス試料を内径 35 mm の MgO ルツボに入れ、N<sub>2</sub> ガスを流しながら、粉焼結鉍をルツボ内へ投入し、急速に加熱、溶解し、反応させる。この間、排ガス組成、流量を測定し、コークスの粒径測定と、コークス内部の Fe 分布の分析を行った。

平成3年11月8日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Nov. 8, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)

\* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

\*<sup>2</sup> 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

2・1・2 実験条件

実験条件を Table 1 に示す。投入する粉焼結鉱は、1000°C に於いて、CO/CO<sub>2</sub> = 68/32 の還元ガス 30 Nl/min で還元率 33.3% (FeO) までの予備還元処理を行った。また、コークスのソリューションロス反応性 (CRI) の影響を明らかにするために CRI の異なる 4 種類のコークスを用い、また基準試料 (高炉用コークス :

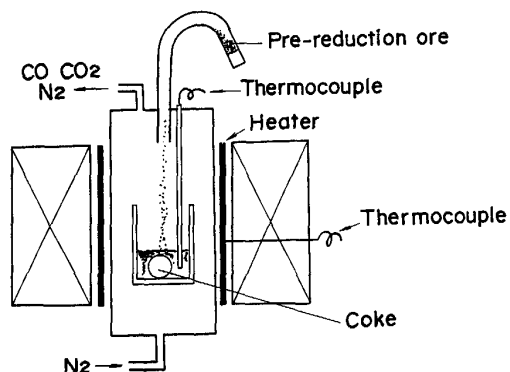


Fig. 1. Experimental apparatus ①.

Table 1. Experimental conditions ①.

Temperature (°C)	1400~1600						
Flow rate of gas (Nl/min)	2.0 (N <sub>2</sub> )						
Diameter of reaction tube (mm)	35						
[Sinter]							
Chemical composition (wt%)							
T. Fe	FeO	M. Fe	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
60.3	66.1	0.2	0.1	11.6	6.7	2.0	1.5
Weight : 15.0 g/ch				Diameter : 0.5~2.0 mm			
[Coke]							
	CRI (%)	Ash (%)	Diameter (mm)				
A	17.8	0.7	18				
B	32.9	11.0	10~18				
C	46.0	10.8	18				
D	48.0	14.5	18				

B) については粒径を数種類変更した。

2・1・3 実験結果

反応中のコークス粒径の経時変化を Fig. 2 に示す。図中の写真は、所定時間 (5 分) ごとに、反応を強制的に打ち切り、取り出し後のコークス断面の様子を示したものである。反応中のコークスは球形を保ちつつ細粒化しており、激しいバブリングの形跡があるにもかかわらず、コークスは表面から一様に反応していることをうかがわせる。

また、Fig. 3 は、反応後のコークス粒内の Fe 原子の拡散状況を X 線強度分布によって調べたもので、コークス断面の中心から半径方向への EPMA による Fe 原子の線分析結果を示したものである。a) は反応前、b) は反応開始から 20 分後の粒内の Fe 原子分布の様子である。反応後のピークが表面から 1.0 mm 以内に集中していることから、溶融スラグからコークス粒内への Fe 原子の拡散はほとんどなく、還元反応は表面近傍で進行し

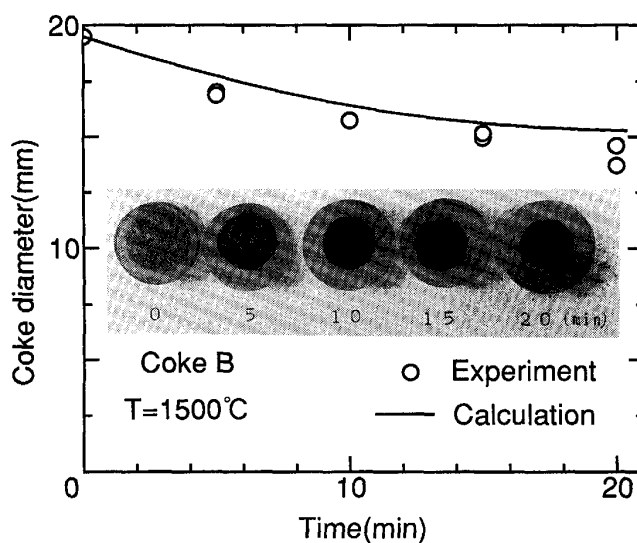


Fig. 2. Change in coke diameter (Photograph : fixed by resin).

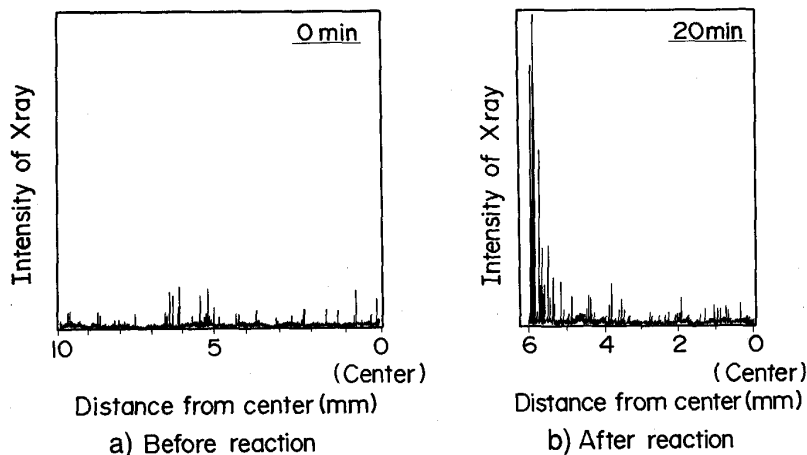
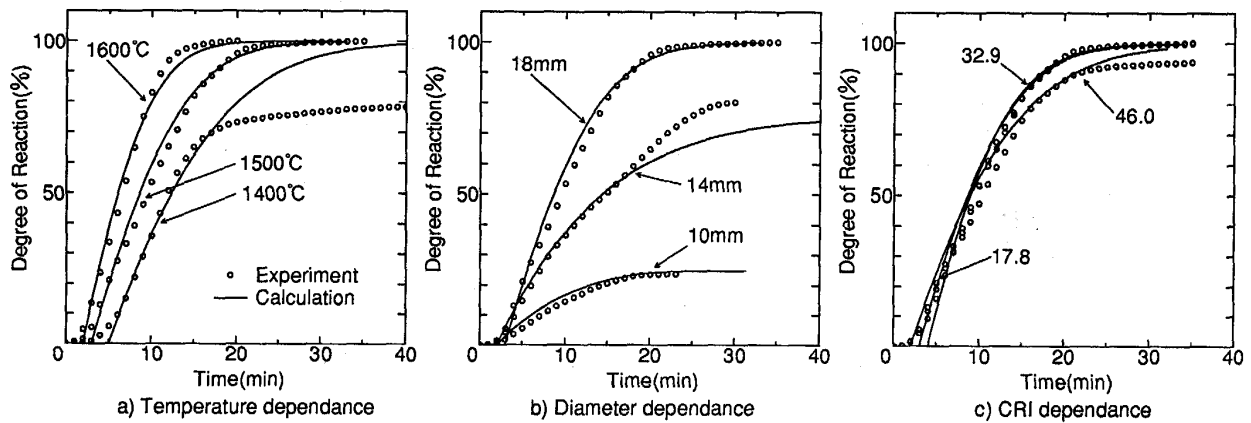


Fig. 3. Fe-distribution in the coke observed by E.P.M.A.



Base :  $T = 1500^{\circ}\text{C}$   $D_p = 18\text{ mm}$   $\text{CRI} = 32.9\%$   
 Fig. 4. The degree of reaction.

ていることを示唆する。

Fig. 4 は反応温度  $1500^{\circ}\text{C}$ 、コークス粒径  $18.0\text{ mm}$ 、 $\text{CRI} = 32.9$  を基準条件として設定し、反応率の温度、コークス粒径、CRI 依存性を示したものである。ここで反応率とは、反応開始後の酸化鉄の酸素除去率を示す。実線は、後述するモデル計算によるパラメータ  $k$  を用いたフィッティング状況を示している。

それぞれの条件を変更した結果、温度が高いほど、粒径が増加するほど反応は促進されるが、CRI に関する依存性は認められなかった。

2.2 モデル解析

2.2.1 解析方法

コークスによる溶融スラグ中の FeO 直接還元反応については数々の報告<sup>2)</sup>がある。徳田ら<sup>3)</sup>は、固液反応界面に生成される気相内の  $\text{CO}_2$  ガスによるコークスのソリューションロス反応の寄与に関する検討を行っているが、本実験では、Fig. 4 c) で明らかなように、CRI 依存性が認められないことから、少なくともコークスのソリューションロス反応は律速にはなっていないと考えられる。そこで、反応解析を行うに当たって次のような仮定をおいた。

仮定 1

- 1) 反応は、 $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$  だけが行われている。
- 2) 反応は表面だけで行われている (Fig. 3)。
- 3) 等温系を仮定する。
- 4) コークスは球形粒子であるとする。

総活反応速度定数  $k$  は、境膜における物質移動定数  $k_m$  および界面反応速度定数  $k_r$  を用いると、次式で与えられる。

$$k = \frac{1}{(1/k_m) + (1/k_r)} \dots\dots\dots (1)$$

Table 2. Total rate constant.

Coke	CRI (%)	$k$ (cm/s)
A	17.8	$18.0 \exp(-148\,400/RT)$
B	32.9	$0.19 \exp(-85\,700/RT)$
C	46.0	$21.0 \exp(-113\,300/RT)$
D	48.0	$93.0 \exp(-95\,700/RT)$

$k_m$  については、このような固液系に Ranz-Marshall の式を適用することにより

$$k_m = \frac{D}{d} (2 + cRe^{1/2}Sc^{1/3}); 0.58 < c < 0.95 \dots\dots\dots (2)$$

と評価できる。また、コークス中のカーボン濃度一定のもとで、溶融スラグ中の FeO 濃度のみに依存するとした一次反応を仮定し、溶融スラグ中の FeO モル濃度  $N_{\text{FeO}}$  とコークス径  $d$  を独立変数とし液側と固体側の物質収支を次式で表した。

$$\frac{d}{dt} (V_s N_{\text{FeO}}) = -\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 R_N \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\pi d^3 \rho_c}{6}\right) = -\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 R_N \dots\dots\dots (4)$$

$$R_N = k N_{\text{FeO}} \dots\dots\dots (5)$$

2.2.2 解析結果

(3)~(5)式をルンゲ・クッタ (Runge-Kutta) 法により差分し、算出した反応率の計算値とフィッティング (Fig. 4) させることによって、それぞれのコークスについて決定された総活反応速度定数  $k$  の値を Table 2 に示し、そのアレーニウス (Arrhenius) プロットを Fig. 5 に示す。なお、フィッティングは反応速度の最も速い部分で行ったので、Fig. 4 では計算上の反応開始時間を調整し測定値に一致させた。また、Fig. 4 a) の  $T = 1400^{\circ}\text{C}$  の場合、反応が後半 (反応率 70% 以上) で停滞しているため計算値とのずれが生じている。スラグの融

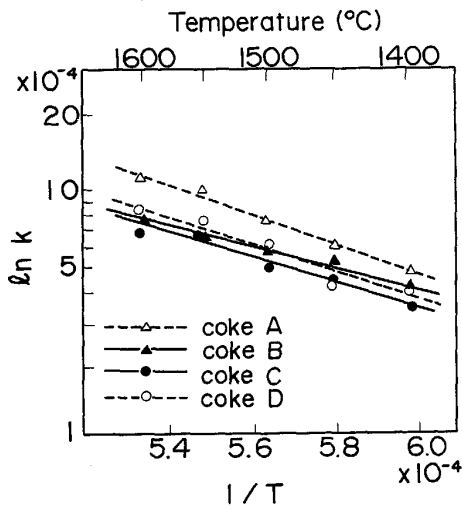


Fig. 5. Temperature dependence of rate constant.

点近傍では状態変化に起因する物性の変化があり、これらが影響しているものと推定される。

Table 2 に示すように、CRI の異なる 4 種のコークスの活性化エネルギーは、ほぼ一定で  $125 \pm 40$  (kJ/mol) と整理でき、直接還元反応は CRI に依存しないことが確認された。

また、コークス B については、粒径変更の明確な差異が認められないことから、反応境膜における物質移動はスムーズに行われ、界面反応過程が律速になっているものと推定される。すなわち、(1)式において  $k_r \ll k_m$  であるので、 $k \sim k_r$  と解釈することができる。そこでパラメータフィッティングにより求めた  $k$  を用いて算出された粒径の経時変化を Fig. 2 の実線で示す。実測値が計算値をやや下回っているのは、実験終了後の冷却過程でも、しばらく反応が進行していたためと考えられるが、計算値は粒径低下の傾向をほぼ再現していることから、モデルは概ね妥当であるものと判断できる。

### 3. コークス充填層に溶融 FeO が滴下する際の固液反応における反応界面積の推定

#### 3.1 滴下反応に関する基礎実験

前節で求めた単一コークスと溶融スラグの素反応における速度定数を用い、反応によるコークス充填層の反応界面積を以下のような基礎実験により推定した。

##### 3.1.1 実験方法

実験装置としては Fig. 6 に示すような装置②を用いた。溶融スラグを滴下させるために、底部に数個の孔をあけた内径 70 mm のルツボ内にコークスを充填し、N<sub>2</sub> ガスを流しながら、Table 1 で示す粉焼結鉄を上部のホッパーからルツボ内へ半連続的に投入し、急速に加熱、

Table 3. Experimental conditions ②.

Temperature (°C)	1450~1600
Flow rate of gas (Nl/min)	2.0~10.0
Diameter of reaction tube (mm)	35, 70
Height of coke-bed (mm)	40, 60
Diameter of coke (mm)	8~15 (Coke B)
Superficial velocity of molten slag (cm/s)	$4.5 \times 10^{-4}$ ~ $3.4 \times 10^{-3}$
Reaction time (min)	15~20

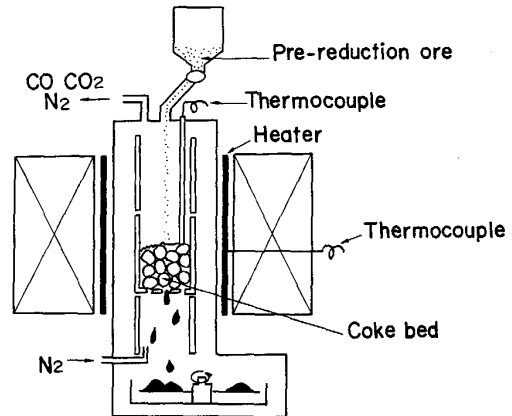


Fig. 6. Experimental apparatus ②.

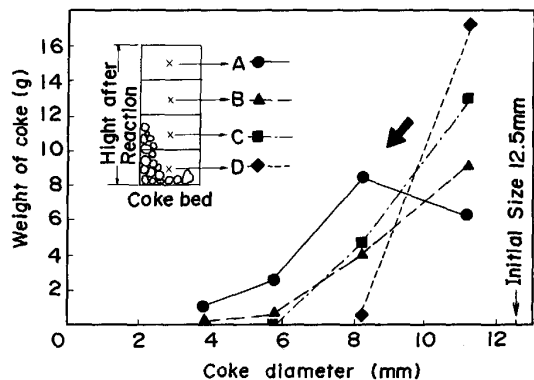


Fig. 7. Size distribution of coke diameter after the reaction.

溶解させ、コークス充填層内を滴下、反応させた。

排ガス分析により反応率を算出し、さらに反応後のコークス充填層高さ方向の粒度分布を測定した。

##### 3.1.2 実験条件

ルツボ内へ充填する試料は、高炉用として用いられるコークス B (CRI=32.8, ash=11%) を用いた。反応温度と滴下溶融スラグの空塔液流速を数種変更した。(実炉におけるスラグの空塔液流速は、約  $3.8 \times 10^{-3}$ ~ $5.3 \times 10^{-3}$  (cm/s))

実験条件の一覧を Tabel 3 に示す。

##### 3.1.3 実験結果

反応後の、コークス層高は 10~30 (mm) 程度沈下するが、ルツボ内では半径方向の粒度偏差は認められなかったため、高さ方向に数分割し、各ゾーンの重量基準

による粒度構成分布を測定した。結果を Fig. 7 に示し、各ゾーンそれぞれの重量平均より算出した高さ方向の粒度分布を Fig. 8 に示す。滴下スラグ中の FeO との反応により、コークス充填層は上部ほど細粒化が進んでいることが確認された。なお、横軸は初期粒径を基準にした無次元粒径をとった。

Fig. 9 は、(6)式で定義されるコークス層全体の反応率曲線である。

$$\text{反応率} = \frac{\text{(排ガス中の炭素モル数)}}{\text{(コークス層内炭素モル数)}} \dots\dots\dots(6)$$

ルツボ内に投入された粉鉱石は、急激に昇温され熔融スラグとしてコークス充填層中を滴下する。この際、上層部ではコークスが優先的に反応を受け、細粒化が進む。これに対して、下層部ではコークスが比較的初期値に近い粒径を保ち、熔融スラグによる反応の影響が上層部に

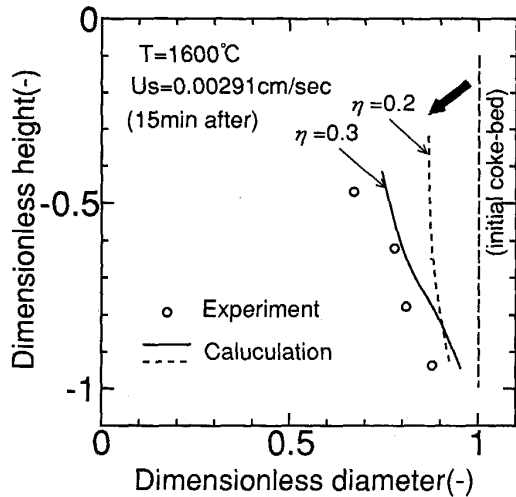


Fig. 8. Vertical size distribution.

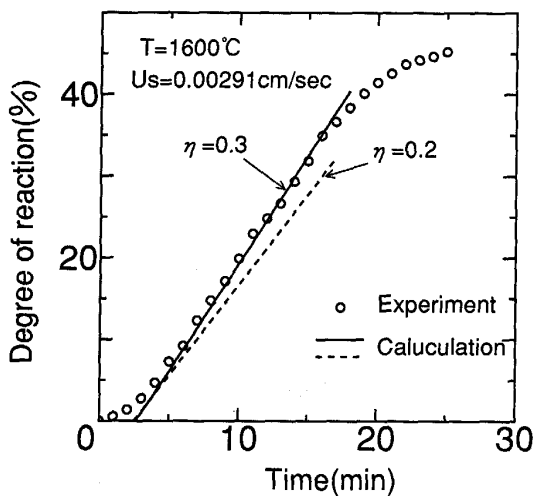


Fig. 9. Degree of reaction.

比べて緩和されており、全体としては、反応速度はほぼ一定で進んでいることがわかる。

3.2 モデル解析

3.2.1 解析方法

コークス充填層を滴下する熔融スラグの反応状況をモデル化する。実験で用いたコークスは球形ではないが、前節のコークスと熔融スラグとの素反応解析の際の仮定 1)~4)が成立するとし、さらに

仮定 2

- 5) 充填層を一次元で扱う。
- 6) 液側に擬定常状態を仮定する。
- 7) 充填層の空隙率は一定。

を設けた。

前節の基礎実験により求めた総活反応速度定数  $k$  を適用し、さらにコークス充填層内において (7) 式で定義する有効反応比表面積  $\eta$  を新たにパラメータとして導入した。

$$\eta = \frac{\text{(滴下熔融 FeO とコークスの反応面積)}}{\text{(充填層内コークスの全表面積)}} \dots\dots\dots(7)$$

上記の仮定に基づき、熔融スラグの流束  $f_{FeO}$  ( $\equiv v_s \cdot N_{FeO}$ ) とコークス体積  $V_c$  を独立変数とすると物質収支式は次式のように表せる。

$$\frac{df_{FeO}}{dz} = -3\eta(1-\epsilon) \left(\frac{4\pi}{3V_c}\right)^{1/3} R_f \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = -\eta \frac{4\pi}{\rho_c} \left(\frac{3V_c}{4\pi}\right)^{2/3} R_f \dots\dots\dots(9)$$

$$R_f = k \frac{f_{FeO}}{U_s} \dots\dots\dots(10)$$

$z$  軸は、充填層最上部を原点とし下向きにとる。また、コークスの細粒化による充填層層高の減少に応じて  $z$  軸方向のメッシュのサイズ ( $DZ$ ) を縮小させた。1メッシュ中単位断面面積あたりのコークスの個数を  $n$  とすると、

$$DZ = \frac{n}{(1-\epsilon)} V_c \dots\dots\dots(11)$$

と表せるが、ここでは  $n$  を一定と仮定し、各ステップで  $DZ/V_c$  を一定に保つようにメッシュサイズを変更した。

3.2.2 解析結果

Fig. 8, 9 に計算結果を示す。(8),(9)式右辺の  $\eta$  をパラメータとし、これらから算出される全反応率 ((6)式) と充填層高さ方向粒度分布が、同時にそれぞれの測定値と一致するように  $\eta$  を決定した。実線で示

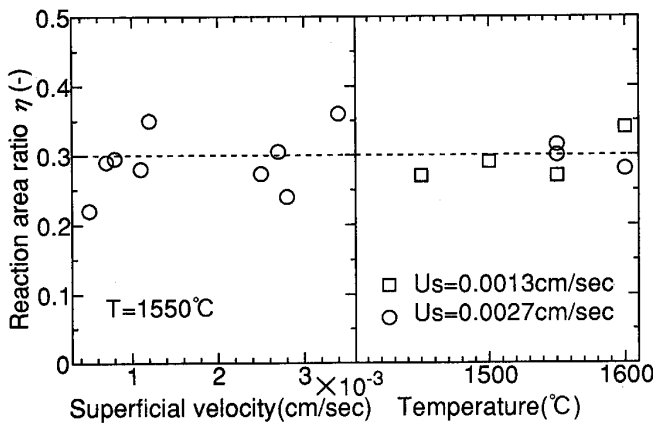


Fig. 10. Temperature and superficial velocity dependence of reaction area ratio.

す  $\eta=0.3$  の場合が測定値によく一致している。粒径の測定値が計算値を下回っているのは所定時間経過後、しばらく反応温度を保っていたためであると思われる。比較のため破線で示している  $\eta=0.2$  の場合は、計算上反応速度が遅くなり充填層上部の反応が遅れ、層全体の反応率も低下することを示している。実施したすべてのケースについて求めた  $\eta$  の値の温度、及び空塔液流速依存性を Fig. 10 にまとめて示した。一般に液体が充填層中を滴下する際の固-液反応面積比は、液体の粘性、ホールドアップ率等に依存するので温度、空塔液流速にも依存する<sup>4)</sup>ものと考えられる。しかしながら、本実験では、 $\eta$  の温度、空塔流速依存性は小さく、ほぼ一定値をとり

$$\eta=0.3 \dots\dots\dots(12)$$

と整理される。

杉山ら<sup>5)</sup>による FeO を含むスラグの粘度推定式によると塩基度が高い場合、スラグの粘性は、1400°C 以下で急激に上昇するが<sup>6)</sup>、本実験に用いた溶融スラグ (wt% FeO=66.1, CaO/SiO<sub>2</sub>=1.73) の場合、粘性の温度依存性は小さく、1.0 poise 以下でほぼ一定の値を保つことが示されている。したがって Fig. 10 の温度範囲の場合、粘性の変化が  $\eta$  に及ぼす影響は小さく、一定の値をとり得ることを示している。

#### 4. 実炉条件下における検討

前節の基礎実験から求められた二つのパラメータである反応速度定数  $k$  と有効反応による炉芯コークスの劣化挙動について試算した。

##### 4.1 計算方法

反応による影響のみを明らかにするために、前節の仮定 1, 2 の成立を仮定し、さらに

Table 4. Calculating conditions.

Case	Inner volume; 3 680 m <sup>3</sup> Hearth diameter; 13.4 m		Reduction degree (%)	Superficial velocity of slag (cm/s) × 10 <sup>-3</sup>
	Productivity (t/day m)	Temperature (°C)		
Base	2.3	1600	90	8.3
I a	—	1500	—	8.3
I b	—	1700	—	8.3
I c	—	1800	—	8.3
II a	2.0	—	—	6.9
II b	1.8	—	—	6.3
III a	—	—	95	6.8
III b	—	—	85	9.9
III c	—	—	80	11.4

##### 仮定 3

- 8) 荷下がりを無視。
- 9) 炉芯コークスの高さを一定に保つようなコークスの連続的な供給を仮定。
- 10) 溶融スラグの滴下中に粘性等による物性変化はないものとする。

とし、基礎式としては (3)~(5) 式を、 $\eta$  の値は (12) を用いた。また、前節と同様に、反応の劣化によるコークス粒径の細粒化と層高減少に応じて高さ方向 ( $z$ ) 軸のメッシュサイズ  $DZ$  を (11) にしたがって縮小させるが、仮定 3-9) により層高減少分に相当する分だけのコークスを供給する機構を導入した。すなわち、初期メッシュサイズを  $DZ_0$  とすると、コークス層高減少分  $DH$  が、

$$DH > DZ_0 \dots\dots\dots(13)$$

を満たす度に上部から  $DZ_0$  のサイズのメッシュ一個ずつ供給することでコークス層全体の初期層高を保った。また、反応を受けるにつれて縮小していく  $I$  番目のメッシュサイズ  $DZ(I)$  が

$$\frac{DZ(I)}{DZ_0} < \delta_{DZ} \dots\dots\dots(14)$$

を満たす度にこの ( $I$ ) 番目のメッシュ内のコークス体積  $V_c(I)$  を、すべて ( $I-1$ ) 番目のメッシュ内のコークス体積  $V_c(I-1)$  に上乘せすることにより、物質バランスを保ち、 $I$  番目のメッシュを消滅させた。以上のメッシュ生成、消滅機構を繰り返すことにより、溶融 FeO との反応によるコークス充填層の細粒化及び消滅挙動を計算することができる。ここで、 $\delta_{DZ}=10^{-4}$  とした。

##### 4.2 計算条件

炉容 3680(m<sup>3</sup>)、炉床径 13.4(m) の高炉を対象として、Table 4 のように出銑量、温度、鉍石溶落時の還元率をそれぞれ数ケース変更させた。Table 4 には、出銑量と鉍石溶落時の還元率で決定される溶融スラグの空塔液流速も併記している。コークスの初期粒径は、充填層内すべて一定で 35(mm) とした。

4.3 計算結果

Fig. 11 にコークス充填層の高さ方向の粒度分布および、滴下する熔融スラグ中の FeO 濃度分布を示す。横軸は初期粒径 35(mm) を基準にした無次元粒径で、縦軸は、充填層上部からの距離である。Fig. 11 中には、滴下をはじめてから 1 日後、7 日後、10 日後の分布を示してある。熔融スラグ中 FeO の滴下によってまず充填層最上部のコークスが反応を受け、スラグ中の FeO 濃度は低下していくと同時にコークスは上から順次細粒化していくが、これに応じた上部からのコークスの供給により最上部では常に初期粒径が保たれる。コークスの細粒化と供給が繰り返されることにより充填層上部から約 1.0(m) あたりの位置でコークスは消滅し、これ以降では未還元 FeO の濃度が希薄になり、やがて零になる。従って反応はある深さ以上では進展せず、10 日以上で

ほぼ一定な粒度分布に落ちつく。

Fig. 12 は、反応によりコークスが初期粒径の 90% 以下に細粒化している領域 (充填層上部からの距離 : Fig. 11 の斜線部分) の経時変化を示したもので、基準値より温度、鉍石溶落時還元率、出鉄比を変更した。温度を下げると反応速度が低下するので滴下する熔融スラグ中の FeO の消費が遅れ、未還元 FeO が充填層のより深くまで滴下するため、コークスが反応の影響を受け細粒化する領域が、より深くまで行きわたるようになる (Case I a)。鉍石溶落時の還元率を下げると、滴下する熔融スラグ中の FeO 濃度が増加するため、反応によるコークスの細粒化の影響は拡大する (Case III c)。また、出鉄比は熔融スラグの滴下量に依存するので Case II b のように出鉄比を下げた場合はコークスの反応による影響は緩和されるが、いずれの場合もコークスの細粒化を受ける領域は、一定の深さに留まることがわかる。

以上のようなコークス細粒化挙動と温度、出鉄比、鉍石溶落時還元率の操作諸元との関係を整理したのが、

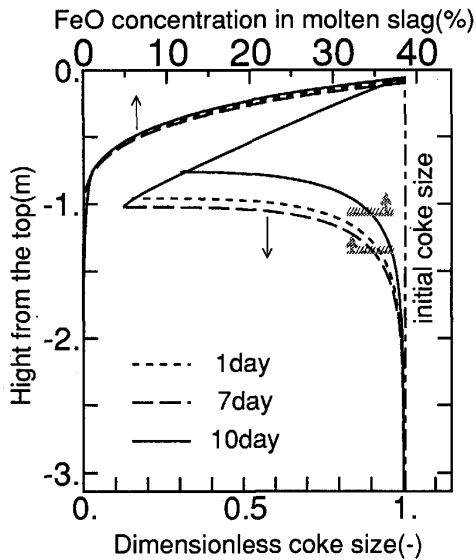


Fig. 11. Vertical coke size and FeO concentration distribution.

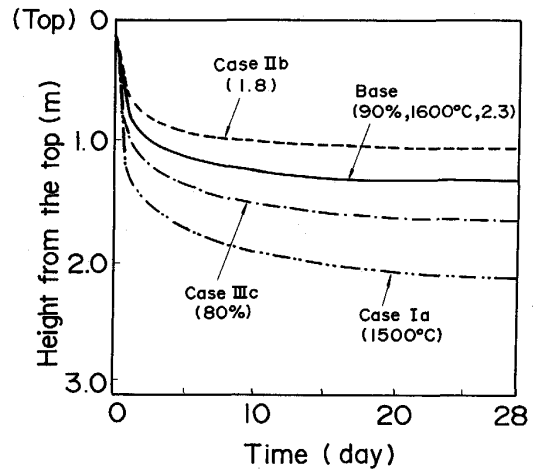


Fig. 12. Change in size degradation zone.

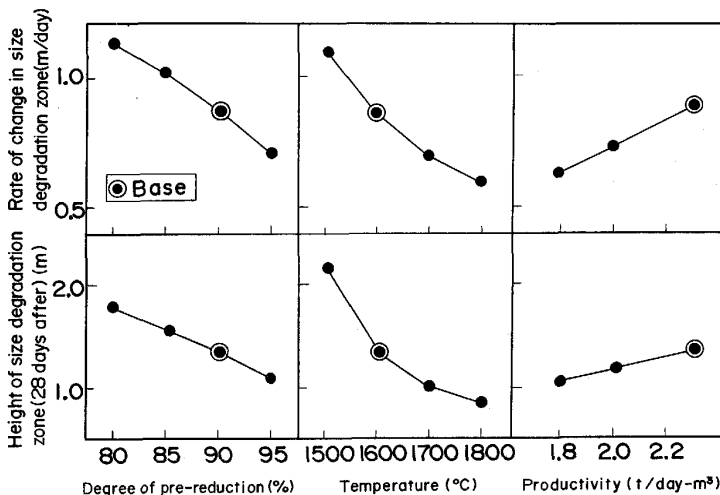


Fig. 13. Effect of blast furnace (inner volume 3 680 m<sup>3</sup>) operating condition on change in size degradation zone.

Fig. 13 である。上段の縦軸には、Fig. 12 において反応を始めてから 24 時間の平均勾配、つまりコークス細粒化領域が充填層の深さ方向に進む速度 (m/day) をとり、下段は高さ方向の粒度分布がほぼ定常状態になる 28 日後の細粒化領域の深さ (m) を示したものである。温度を低下させ、出銑比を増加、または鉱石溶落時の還元率を増加、つまり溶融スラグ中の FeO の濃度を増加させると炉芯コークス粒径は、より下部まで細粒化することになる。逆に温度を上げるとコークス充填層最上部から比較的浅い (約 1 m 以内) 消滅点までの更新を速めることができる。本検討では、炉芯コークスの荷下がりを見無視しているが、このような反応以外による荷下がりを考慮すると滴下溶融 FeO によるコークスの細粒化、消滅及び更新領域はさらに炉芯深くまで浸透する可能性がある。

### 5. 結 言

高炉炉芯コークスが滴下溶融スラグ中の FeO との反応により受ける細粒化現象を定量化するため、基礎実験とモデル解析を行い、以下の結果が得られた。

(1) 溶融 FeO とコークスの反応は、一次の表面反応として扱うことが可能であり、この反応速度は、コークスの反応性 (CRI) には依存しない。

(2) コークス充填層を溶融スラグが滴下する際の有効反応比表面積は、 $T=1450\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 、 $U_s=4.5\times 10^{-4}\sim 3.4\times 10^{-3}\text{ cm/s}$  の範囲では、ほぼ一定値 0.3 をとる。

(3) 実炉条件下におけるシミュレーションによると、融着層から滴下する FeO を含んだ溶融スラグの反応により、炉芯コークスは、上層部 (深さ約 1 m 以内) での更新が促進される。また、この細粒化 (更新) 領域は、約 2 週間で一定となり、温度 ( $1800^{\circ}\text{C}\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ) が低

いほど、融着帯における鉱石還元率 (<85%) が低いほど、出銑比 (スラグ滴下量) が多いほど増大する。

### 記 号

- $D$ : 拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
- $DZ_0, DZ$ : (初期) 計算格子サイズ (cm)
- $N_{\text{FeO}}$ : スラグ中 FeO 濃度 ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
- $Re$ : レイノルズ数 ( $=\rho_s d U_s / \mu_s$ ) (—)
- $R_N, R_f$ : 直接還元反応速度 ( $\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ )
- $Sc$ : シュミット数 ( $=\mu_s / \rho_s D$ ) (—)
- $U_s$ : スラグ空塔液流速 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
- $V_c, V_{co}$ : コークス (初期) 体積 ( $\text{cm}^3$ )
- $V_s$ : スラグ体積 ( $\text{cm}^3$ )
- $d$ : コークス粒径 (cm)
- $f_{\text{FeO}}$ : スラグ中 FeO 流束 ( $\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ )
- $k$ : 総括反応速度定数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
- $k_m$ : 物質移動係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
- $k_r$ : 反応速度定数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
- $n$ : 計算格子中コークス個数 (—)
- $\delta_{DZ}$ : 計算格子消滅判定値 (—)
- $\varepsilon$ : コークス充填層空隙率 (—)
- $\eta$ : 有効反応比表面積 (—)
- $\mu_s$ : スラグ粘度 ( $\text{g}/\text{cm}/\text{s}$ )
- $\rho_c$ : コークス中炭素モル濃度 ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
- $\rho_s$ : スラグ密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 文 献

- 1) 宮谷仁史, 桑野恵二, 堀 隆一, 多田彰吾, 中西敦彦: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1023
- 2) 例えば, 須賀田正泰, 杉山 喬, 近藤真一: 鉄と鋼, **58** (1972), p. 1363  
佐々木 康, 岡本恭典, 相馬胤和: 鉄と鋼, **64** (1978), p. 367 など
- 3) 徳田昌則: 学振 54 委-No. 1814 (昭和 62 年 2 月)
- 4) 恩田格三郎, 竹内 寛, 小山恭章: 化学工学, **73** (1967), p. 126
- 5) 杉山 喬, 中山朝之, 芝池秀治, 小田 豊: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2044
- 6) 笹原茂樹, 稲葉晉一, 富田正博: 学振 54 委-No. 1926 (平成 3 年 1 月)