

© 1992 ISIJ

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

# 微粉炭・粉鉱石複合吹き込みに関する 高炉レースウェイ数学モデル

 肖 興国\*・野沢健太郎\*・笹原 茂樹\*  
 清水 正賢\*<sup>2</sup>・稲葉 晋一\*<sup>2</sup>

## Mathematical Model of Blast Furnace Raceway Zone with Pulverized Coal and Fine Ore Injection

 Xiao XINGGUO, Kentarou NOZAWA, Shigeki SASAHARA,  
 Masakata SHIMIZU and Shin-ichi INABA

### Synopsis :

A mathematical model of blast furnace raceway zone with pulverized coal (PC) and fine ore injection was developed to describe the reaction behaviors of injected PC and fine ore. The model is based on differential balances of mass and heat taking account of the reaction kinetics and heat transfer of PC, coke, fine ore and gases.

The kinetic parameters of thermal decomposition and reduction of fine ore were determined by the laboratory test. The kinetic parameters of PC and coke combustions were determined by applying the model to a experimental combustion furnace and to a actual blast furnace with all coke and PCI operations, respectively.

Furthermore, the raceway phenomena with simultaneous injection of PC and fine ore were predicted and the effects of operating conditions on reaction in a raceway were studied using the model. The results were summarized as follows.

1) The combustion of PC and reduction of fine ore are restrained by the temperature drop of gas occurred by the complex injection of PC and fine ore.

2) The final combustion degree of PC in the raceway is slightly affected by injection rate of fine ore.

3) Increase of blast temperature can make higher reduction degree of ore than oxygen enrichment.

**Key words :** mathematical model; blast furnace; raceway; complex injection; pulverized coal; fine ore.

## 1. 緒 言

近年、高炉の生産弾力性の強化、装入焼結鉱原単位低減などを目的に、羽口から微粉炭と粉鉱石を同時に吹き込む複合吹き込み技術の開発が注目を集めている<sup>1)~8)</sup>。

高炉羽口から多量の原燃料を同時に吹き込むためには、レースウェイ内での反応特性に基づいた最適な吹き込み条件の設定が必要であるが、従来の検討では、ガスと固体粒子が激しく運動するレースウェイ内での流れや伝熱挙動、反応およびその相互作用については明らかでない。これまで、数学モデルを用いたオールコークス操業（以下、AC と呼ぶ）や微粉炭吹き込み操業（以下、

PCI と呼ぶ）における羽口先での燃焼反応解析<sup>9)~11)</sup>、高炉下部における流動と反応の解析<sup>12)</sup>などが幾つか実施されているが、微粉炭と粉鉱石の同時吹き込みにおけるレースウェイでの反応や伝熱挙動についての速度論的な解析は見当たらない。

本研究では、微粉炭と粉鉱石の複合吹き込み（以下、PCOI と呼ぶ）時の、レースウェイでのガス流れ、伝熱の特性を考慮した1次元数学モデルを構築し、高温気流中での粉鉱石の熱分解と還元実験、空塔燃焼実験炉での微粉炭の燃焼実験、実高炉での実測結果を用いて各種パラメータを求め、速度式の妥当性を検討した。さらに、PCOI 時のレースウェイ特性と反応に及ぼす操業条件の

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

\* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

\*2 (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675)

影響について検討した。

## 2. 数学モデル

### 2.1 レースウェイでのガス流れモデル

羽口からの熱風ジェットおよびコークスの燃焼反応により、羽口先には Fig. 1 の (a) に示すような非対称のレースウェイ空間が形成され、その周壁のコークス層からコークス粒子がレースウェイ内に供給されてくると仮定した。高速ガスジェットによりレースウェイ外周部にはガスの循環渦流が形成されると仮定し、渦の中心より上流域でのガスの巻き込み、下流域でのガスの流出を想定した。ガスジェットの広がり、およびガスの循環流量を Fig. 1 の (b) に示すように単純化し、1次元モデルとして構築した。x 方向単位長さの y 方向の循環ガス流量  $F_y$  は、図に示すように x 方向において線形関係にあると仮定した。

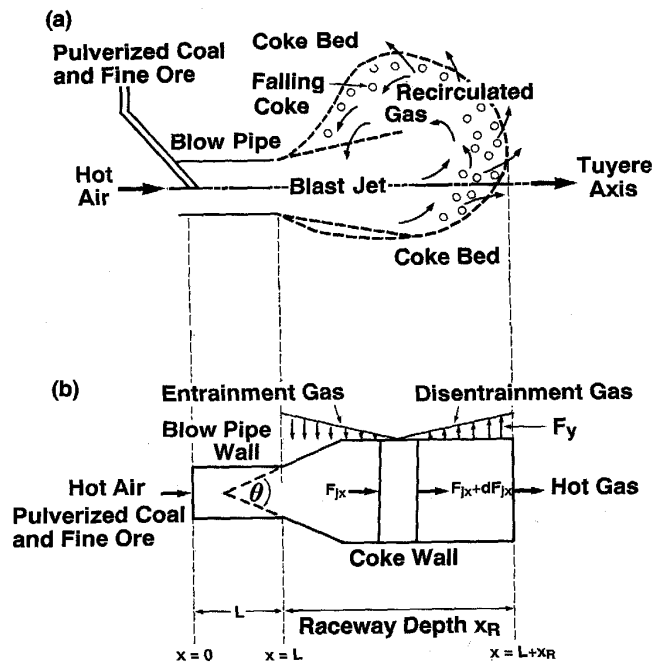
$$F_y = 0 \quad x < L \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$F_y = F_{rc} (0.5x_R + L - x) \quad x > L \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $F_{rc}$  は流入、流出量に関するパラメータである。

### 2.2 素過程およびその速度式

Table 1 に本モデルで考慮した反応とその取扱いを示す。



(a) Raceway zone phenomena  
(b) One-dimensional gas flow model

Fig. 1. Simplification of raceway for one-dimensional model.

### 2.2.1 微粉炭燃焼

レースウェイ内に吹き込まれた微粉炭は急激な昇温とともに揮発分が放出され、粒子の体積が膨張して中空状の多孔質チャーが生成されるとした。放出された揮発分は直ちに  $CO$ 、 $H_2$  および  $N_2$  ガスに変化し、固定カーボンを主体としたチャーが気-固二相反応により燃焼すると仮定した。

1) 揮発分の揮発量および揮発化に伴う微粉炭の膨張  
石炭粒子が 1400 K 以上まで急激に加熱された場合には、揮発量  $V^*$  (有効揮発分と定義する) は工業分析値  $V_m$  より大きい<sup>13)~15)</sup>。そこで、 $V^*$  と  $V_m$  の比を  $Q_m$  とおくと、 $V^*$  は次式で表わされる。

$$V^* = Q_m * V_m \quad \dots \dots \dots (3)$$

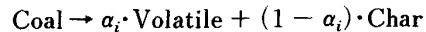
$Q_m$  と揮発化に伴う微粉炭の膨張率  $B$  は炭種、最終の加熱温度などによって変わるが、ここでは、須賀田ら<sup>16)</sup>が提案した(4)、(5)式を採用した。

$$Q_m = 3.27 * 10^{-2} C_b + 1.06 * 10^{-3} (T_b - 273) - 2.51 \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$B = -4.83 * 10^2 d_{pc,0} + 2.7 * 10^{-3} P_b + 0.933 * V_m + 1.19 \quad \dots \dots \dots (5)$$

### 2) 揮発分の放出速度

石炭の揮発速度については、数多くのモデルが発表されているが<sup>17)~21)</sup>、ここでは、以下の 2-step モデルを採用した。



$$dV_i/dx = k_{vi} (V^*_i - V_i) / u_{pc} \quad (i = 1, 2) \dots \dots \dots (6)$$

$$k_{vi} = A_i \exp(-E_{vi}/RT_{pc})$$

Table 1. Main reactions and rate equations.

Sym.	Reactions	Rate equations
$R_v$	Coal = Volatile + Char	2-step model
$R_{n,i}$	$(C)_v = (CO)$ $2(H)_v = (H_2)$ $2(N)_v = (N_2)$	Immediate reaction
$R_1$	$\langle C \rangle (Char) + 1/2(O_2) = (CO)$	He's <sup>10)</sup> : $R_j = k_j C_i$ , $k_j = a_{pc} / (1/k_{f,i} + 1/k_{r,j})$
$R_2$	$\langle C \rangle (Char) + 1/2(CO_2) = 2(CO)$	Author's correction: $R = \eta k C$
$R_3$	$\langle C \rangle (Char) + 1/2(H_2O) = (H_2) + (CO)$	$\eta = (1 - X_{pc})^m$
$R_4$	$\langle C \rangle (Coke) + 1/2(O_2) = (CO)$	Muchi's <sup>33)</sup>
$R_5$	$\langle C \rangle (Coke) + (CO_2) = 2(CO)$	
$R_6$	$\langle C \rangle (Coke) + (H_2O) = (H_2) + (CO)$	
$R_7$	$3\langle Fe_2O_3 \rangle = 2\langle Fe_3O_4 \rangle + 1/2(O_2)$	Author's <sup>31)</sup>
$R_8$	$1/3\langle Fe_2O_3 \rangle + (CO) = 2/3\langle Fe \rangle + (CO_2)$	Muchi's <sup>33)</sup>
$R_9$	$1/3\langle Fe_2O_3 \rangle + (H_2) = 2/3\langle Fe \rangle + (H_2O)$	Muchi's <sup>33)</sup>
$R_{10}$	$\{FeO\} + (CO) = \{Fe\} + (CO_2)$	Tsukihashi's <sup>34)</sup>
$R_{11}$	$\{FeO\} + (H_2) = \{Fe\} + (H_2O)$	Banya's <sup>36)</sup>
$R_{12}$	$(CO) + 1/2(O_2) = (CO_2)$	Howard's <sup>24)</sup>
$R_{13}$	$(H_2) + 1/2(O_2) = (H_2O)$	Kuwabara's <sup>9)</sup>

( ) : Gas    { } : Liquid    < > : Solid

$A_i$  と  $E_{oi}$  については, S. K. Ubhayakar らの値<sup>18)</sup>を用いた.

$$A_1 = 1.34 * 10^{-5} \text{ s}^{-1}, E_{o1} = 74 \text{ kJ/mol}$$

$$A_2 = 1.46 * 10^{13} \text{ s}^{-1}, E_{o2} = 251 \text{ kJ/mol}$$

微粉炭の吹き込み量を  $W_{pc,o}$  とすると, 揮発分の放出速度は次式で表わされる.

$$R_{v,w} = W_{pc,o} dV / A_i dX \dots\dots\dots(7)$$

揮発過程では, 揮発分の組成変化がないものと仮定すると, 揮発による各元素の放出速度  $R_{v,k}$  が算出でき, また, 前述の仮定により, 揮発に伴う  $i$  ガス成分 ( $i = 1 \sim 6$  はそれぞれ  $O_2, CO_2, H_2O, CO, H_2$  および  $N_2$  を表わす) の生成速度  $R_{v,i}$  が求められる.

3) チャーの燃焼反応

チャーの燃焼反応については, 従来の研究<sup>13)19)20)22)29)</sup>と同様に, 境膜内の拡散抵抗と界面化学反応抵抗を考慮して反応ガスに関する一次の反応速度式を採用した. 石炭中の灰分により, 粒内の拡散抵抗が燃焼率の上昇とともに増大すると考えられるため, 本研究では, 燃焼反応速度式に反応効率  $\eta$  を加え,  $\eta$  は未燃焼率の  $m$  乗で表わされると仮定した.

$$R_j = \eta k_j C_i \quad (i = 1 \sim 3, j = 1 \sim 3) \dots\dots\dots(8)$$

$$k_j = a_{pc} / (1/k_{f,i} + 1/k_{j,r}) \dots\dots\dots(9)$$

$$\eta = (1 - \alpha)^m \dots\dots\dots(10)$$

$k_{f,i}$  は Ranz-Marshall 式<sup>30)</sup>,  $k_{j,r}$  ( $j = 1 \sim 3$ ) は文献値<sup>22)25)26)</sup>を用いて推算し,  $m$  は炭種依存のパラメータとした.

$$k_{1,r} = 7260 \exp(-17980/T_{pc}) RT_g \dots\dots\dots(11-1)$$

$$k_{2,r} = 4.1 * 10^9 \exp(-29810/T_{pc}) \dots\dots\dots(11-2)$$

$$k_{3,r} = k'_{3,r} / (1 + k''_{3,r} C_5) \dots\dots\dots(11-3)$$

$$k'_{3,r} = 3.85 * 10^7 \exp(-34260/T_{pc}) \dots\dots\dots(11-4)$$

$$k''_{3,r} = 95.7 \exp(7306/T_{pc}) \dots\dots\dots(11-5)$$

4) コークスの燃焼反応

羽口先でのコークスの反応には, 化学反応, 境膜内の拡散および細孔内の拡散を考慮した鞭らの速度式<sup>9)10)</sup>を採用した.

$$R_j = k_j C_i \quad (i = 1 \sim 3, j = 4 \sim 6) \dots\dots\dots(12)$$

$$k_j = a_{ck} / (1/k_{f,i} + 1/\eta_j k_{j,r}) \dots\dots\dots(13-1)$$

$$k_{4,r} = 7260 \exp(-17980/T_m) RT_g \dots\dots\dots(13-2)$$

$$k_{5,r} = 8.31 * 10^9 (\rho_{bed} / a_{ck}) \exp(-30190/T_m) \dots\dots\dots(13-3)$$

$$k_{6,r} = 13.4 (\rho_{bed} / a_{ck}) T_m \exp(-17310/T_m) \dots\dots\dots(13-4)$$

5) 鉱石の熱分解と還元反応

鉱石中に含有される  $Fe_2O_3$  はある温度以上で熱分解する. 熱分解反応に対しては, 著者らの実験式<sup>31)32)</sup>を

採用した. 熱分解速度を粉鉱石の総括脱酸素速度で表わすと以下のように記述できる.

$$R_7 = (1/9) * F_{or,o} * k_7 * (1 - X_D)^2 / A_i / u_{or} \dots\dots\dots(14-1)$$

$$k_7 = \exp(A - E_D / RT_{or}) \dots\dots\dots(14-2)$$

$$E_D = 20700 / [6.54 - \ln(P_{O_2} / 1.013 * 10^5)] \dots\dots\dots(14-3)$$

$$A = [14.4 + \ln\{(P_{O_2} / (1.013 * 10^5)) * 10^2 / 6.93\}] \dots\dots\dots(14-4)$$

$$T_D = 75600 / [44.6 - \ln(P_{O_2} / 1.013 * 10^5)] \dots\dots\dots(14-5)$$

気-固系の還元反応速度式としては, 鞭ら<sup>33)</sup>の式を採用した.

$$R_j = k_j (y_i - y_i^*) \quad (i = 4 \sim 5, j = 8 \sim 9) \dots\dots\dots(15-1)$$

$$k_j = a_{or} P / RT_{or} / \{ (1/k_{f,i}) + (d_{or}/2) [(1 - X_{or})^{-1/3} - 1] / D_{s,i} + [(1 - X_{or})^{2/3} k_{j,r} (1 + 1/K_j)]^{-1} \} \dots\dots\dots(15-2)$$

$$k_{8,r} = 9.64 * 10^{-2} \exp(-3460/T_{or}) \dots\dots\dots(15-3)$$

$$k_{9,r} = 2.855 * 10^{-2} * T_{or} \exp(-7500/T_{or}) T_{or} < 848 \text{ K} \dots\dots\dots(15-4)$$

$$k_{9,r} = 2.29 * 10^{-2} T_{or} \exp(-7700/T_{or}) T_{or} > 848 \text{ K} \dots\dots\dots(15-5)$$

$k_{f,i}, D_{s,i}$  および  $K_j$  は文献の式で評価した.

溶融還元反応における総括反応速度は数多くの速度論的検討結果<sup>34)36)</sup>から, 次式のように表わされる.

$$R_j = k_j (y_i - y_i^*) \quad (i = 4, 5, j = 10, 11) \dots\dots\dots(16-1)$$

$$k_j = a_{or} P / RT_{or} / \{ [1 - (1 - \rho_{FeO} / \rho_{Fe}) X_{or}] \}^{-2/3} (1/k_{r,i} + 1/k_{j,r}) \dots\dots\dots(16-2)$$

$k_{j,r}$  については, 長坂ら<sup>35)</sup>と萬谷ら<sup>36)</sup>のデータを変形して用いた.

$$k_{10,r} = 6.05 * 10^{-2} T_{or} \exp(-12200/T_{or}) \dots\dots\dots(16-3)$$

$$k_{11,r} = 0.139 T_{or} \exp(-9160/T_{or}) \dots\dots\dots(16-4)$$

6) ガス相の均一酸化反応

$CO$  と  $H_2$  の酸化反応速度はそれぞれ Howard らの式<sup>24)</sup>と桑原らの式<sup>9)</sup>により計算した.

$$R_{12} = 1.3 * 10^{11} C_4 C_1^{1/2} C_3^{1/2} \exp(-15100/T_g) \epsilon \dots\dots\dots(17)$$

$$R_{13} = R_3 + R_6 \quad y_1 > y_{1,b} \dots\dots\dots(18-1)$$

$$R_{13} = 0 \quad y_1 < y_{1,b} \dots\dots\dots(18-2)$$

ここでは,  $y_{1,b} = 0.05$  と設定した.

7) 鉱石の溶融

鉱石の溶融は,  $FeO$  の融点  $T_{m1}$  と  $Fe$  の融点  $T_{m2}$  との間で生じ, 溶融率と温度は線型関係にあると仮定した.

$$x_m = (T_{m1} - T_{or}) / (T_{m1} - T_{m2}) \dots\dots\dots(19-1)$$

2.3 物質と熱収支式

吹き込み位置から任意の距離  $x \sim (x + dx)$  の微小部分に物質と熱の保存則を適用することにより、ガス、微粉炭および粉鉱石に関する物質と熱収支式が得られる。それらをまとめて Table 2, および Table 3 に示す。

2.4 パラメータの計算式

2.4.1 粒子の運動速度

ガス流れ中での微粉粒子の運動速度は、次式<sup>37)</sup>により計算した。

$$du_p/dx = (3/4)(C_D/d_p)(\rho_g/\rho_p)(u_g - u_p)/u_p \dots\dots\dots(20)$$

2.4.2 伝熱係数の評価

1) 粒子とガスの間の対流伝熱係数は Ranz-Marshall の式より求めた。

$$h_{p,g}^c = Nu_p \lambda_b / d_p \dots\dots\dots(21-1)$$

$$Nu_p = 2 + 0.654 Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \dots\dots\dots(21-2)$$

2) 輻射伝熱係数

$$h_{i,j}^r = \phi_{i,j} \sigma (T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j) \dots\dots\dots(22)$$

$\phi_{i,j}$  は  $i, j$  の放射率と視角因子から求められる。微粉炭、粉鉱石、コークス等、固体の放射率は温度依存性が小さく<sup>38)</sup>、本研究では一定と仮定した ( $\epsilon_{pc} = \epsilon_{of} = 0.85$ ,  $\epsilon_{ck} = 0.77$ )。ガス塊の放射率  $\epsilon_g$  は、ガス塊の組成、有効厚さ、分圧および温度などの関数として計算した。

2.4.3 各種物性値と熱量の取扱い

Table 2. Mass balance equations.

Gas	$dF_z/dx = FF_y + A_t \sum_{i=1}^6 r_i, dF_{z,i}/dx = r_i A_t + y_i F_y$ $r_i \sum_{j=1}^{13} \nu_{i,j} R_j + R_{n,i}, y_i = F_{z,i}/F_z$
Coal	$dW_{pc}/A_t dx = -(\sum_k R_{n,k} M_k + \sum_{j=1}^3 R_j M_c), k = H, N, O, C$ $\alpha = (W_{pc,0} - W_{pc}) / (W_{pc,0} - W_{ash})$
Ore	$dX_{or}/dx = A_t (\sum_{j=7}^{11} R_j) M_O / W_{O,0}$

Table 3. Heat balance equations.

Gas	$d(c_g T_g F_x)/A_t dx = c_g T_g F_y / A_t$ $+ \sum_{i=1}^6 Q_{n,i} + \sum_{j=1}^{13} \delta_j Q_j + T_g \sum_{i=1}^6 c_i r_i + \sum_k H_{k,g}$
Coal	$d(W_{pc} c_{pc} T_{pc})/A_t dx = \sum_{j=1}^3 (1 - \delta_j) Q_j$ $- T_{pc} (\sum_k R_{n,k} c_{n,k} + c_c \sum_{j=1}^3 R_j) + \sum_k H_{k,pc}$
Ore	$d(c_{or} T_{or} F_{or})/A_t dx = \sum_{j=7}^{11} (1 - \delta_j) Q_j - c_O T_{or} \sum_{j=7}^{11} R_j + \sum_k H_{k,or} - H_m$ $H_m = F_{or} \Delta H_m [1 / (T_{m2} - T_{m1})] dT_{or} / A_t dx$

混合ガス熱容量、粘度、熱伝導率および拡散係数と粒子の熱容量等を組成と温度の関数として評価した。反応熱と溶融熱に及ぼす温度の影響は無視できると仮定した。

3. 各反応過程でのパラメータの決定とモデルの検証

基礎実験結果および実炉データを用いて各反応過程でのパラメータを決定し、モデルの妥当性を検討した。

3.1 高温気流中での粉鉱石の熱分解および還元過程

ガス流中に落下させた粉鉱石粒子の温度と反応挙動について、その到達反応率の実験値<sup>39)40)</sup>と計算値を Fig. 2 に示す。到達反応率の計算値は実験値とほぼ一致し、粉鉱石の反応に関するモデルの妥当性が検証された。

3.2 微粉炭の高速燃焼過程

微粉炭燃焼に関するパラメータ ( $m$ : 本研究では 0.333) は空塔燃焼炉での実験データ<sup>41)</sup>を用いて求めた。未燃焼率の計算値を実測値と比較して Fig. 3 に示す。微粉炭は高温燃焼空気中で加熱され、羽口先から約 0.1 m の位置で揮発分を急速に放出し、約 0.3 m の位置で揮発化が終了すると、チャーの燃焼段階に入る。未燃焼率の計算結果は三つの方法 (○: CO<sub>2</sub> ガス分析法, □: アッシュ基準分析法, △: Ti 基準分析法) で測定した未燃焼率の軸方向分布とよく一致し、微粉炭燃焼モデルの妥当性が検証された。

3.3 AC 操業と PCI 操業における実炉のレースウェイ挙動

BHP, Newcastle No. 4 高炉の AC 操業と PCI 操業<sup>11)</sup>における操業データを用いてレースウェイ内反応挙動を

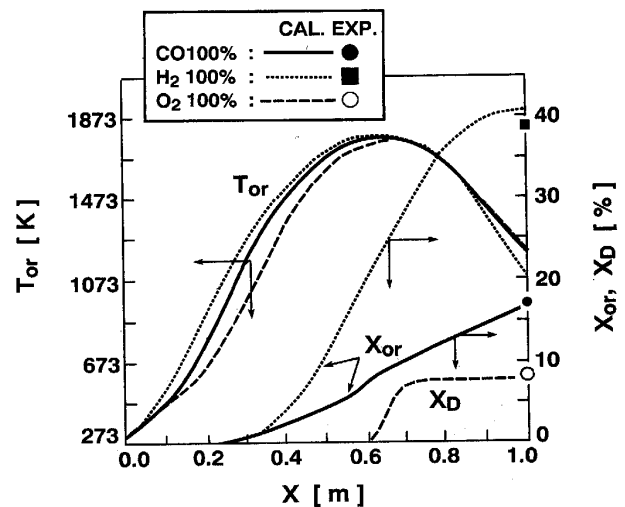


Fig. 2. Comparison of calculated results with measured final reaction degree of fine iron ore in hot gas flow.

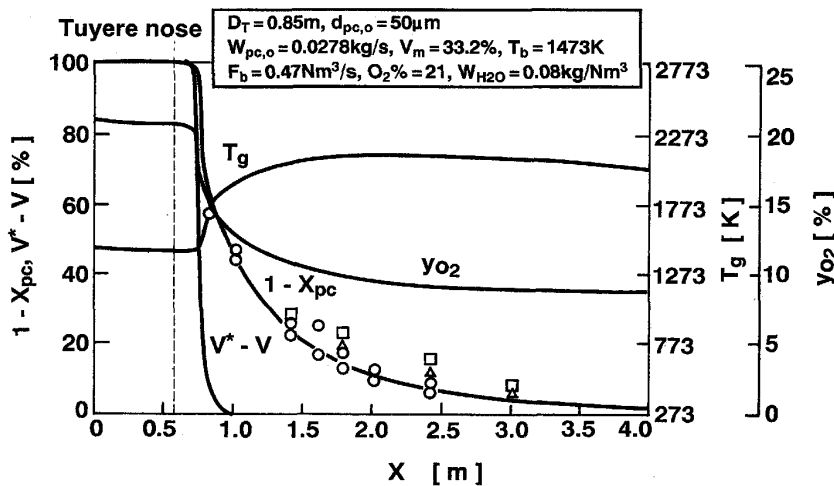


Fig. 3. Comparison of calculated results with measured distribution of unreacted degree of pulverized coal in experimental combustion furnace.

$T_b = 1273K$   $O_2\% = 25$   
 $F_b = 2.0Nm^3/s$  (per tuyere),  $W_{H_2O} = 0.045kg/Nm^3$   
 $W_{pc,o} = 0.0944kg/s$  (per tuyere),  $d_{pc,o} = 50\mu m$ ,  $V_m = 33.2\%$

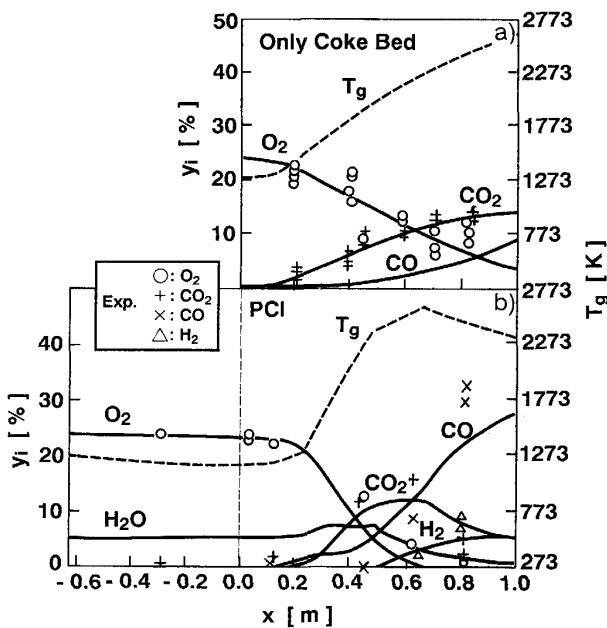


Fig. 4. Comparison of calculated results with measured distribution of gas composition in a blast furnace.

推算した。ガス組成の実測値と計算値を Fig. 4 に示す。計算値と実測値はかなりよく一致しており、本モデルが実高炉にも適用可能であることがわかる。

4. PCOI 操業時のレースウェイ内反応の推定

加古川 No. 2 高炉の送風条件 (Table 4) を基準にして PCOI 操業時のレースウェイでの反応挙動および操業条件の影響を解析した。粉鉱石と微粉炭の組成をそれぞれ Table 5, 6 に示す。

Table 4. Blast furnace and operating conditions.

Blowpipe diameter (inside)	m	0.17
Diameter of tuyere nose	m	0.125
Blast pressure	Pa	$4.1 \times 10^5$
Blast moisture	kg/Nm <sup>3</sup>	0.015
Blast flow rate (per tuyere)	Nm <sup>3</sup> /s	0.047

Table 5. Coal composition (mass %).

Proximate			Ultimate			
Vm	Moisture	Ash	C	H	N	S
35.0	0.9	9.2	74.5	4.8	1.7	0.3

Table 6. Ore composition (mass %).

T. Fe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S
68.6	0.1	1.16	0.93	0.03	0.05	0.002

4.1 レースウェイ域の現象

微粉炭比 150 kg/t-p と粉鉱石比 100 kg/t-p の場合のレースウェイ内での伝熱および反応挙動を Fig. 5 に示す。複合吹き込みにより、熱風温度は羽口先で約 200 K 低下する。粒子は羽口先端に至るまでに約 900 K まで加熱され、レースウェイ域に入ると、コークスの燃焼熱および周囲からの伝熱によって、昇温速度が徐々に増大し、微粉炭の着火が始まる羽口先より約 0.15 m の位置で急速に上昇する。粉鉱石の熱分解と溶融が始まると(羽口先より約 0.3~0.6 m の位置)、昇温が一時的に停滞する。一方、羽口先より約 0.4 m 位置でガス流中の酸素が完全に消費され、還元ガス濃度が急速に上昇し、還元が迅速に進む。

4.2 レースウェイ反応挙動におよぼす操業条件の影響

4.2.1 吹き込み量の影響

レースウェイ挙動におよぼす粉体吹き込み量の影響についてそれぞれ Fig. 6, 7 に示す。粉鉱石比の増大につれ、熱風温度の低下幅が増大し、ガス組成、温度および

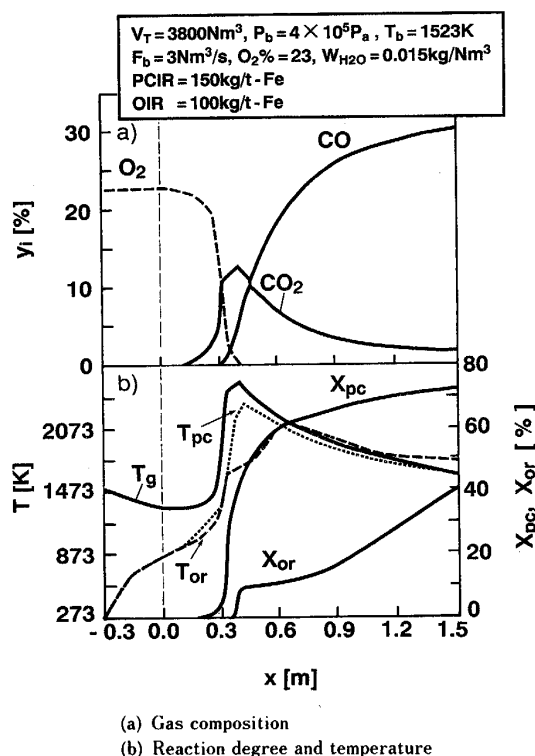


Fig. 5. Predicted raceway phenomena with pulverized coal and fine iron ore.

反応率の分布がいずれもレースウェイ奥側に移行し、粉鉱石の到達還元率が大幅に低下している。微粉炭の到達燃焼率はほとんど変わっていないが、これは粉鉱石から供給される酸素量が増大したためと考えられる。粉鉱石と同様に、微粉炭比の増大につれ、熱風温度の低下幅が大きくなり、微粉炭の到達燃焼率が著しく低下している。

到達反応率におよぼす微粉炭、粉鉱石の吹き込み量の影響を酸素富化率をパラメータとして Fig. 8 に示す。微粉炭比の増大に伴って、到達燃焼率がほぼ直線的に減少するのに対して、粉鉱石の到達還元率は PC 比約 200 kg/t-p までほぼ一定で、それ以上になると加速的に低下する。また、粉鉱石比の増大に伴って還元率は一方的に低下するが、燃焼率は一旦低下してから上昇する傾向にある。これは粉鉱石比の増大に伴う温度低下と持ち込み酸素量増大という相反する効果に起因していると考えられる。

#### 4.2.2 酸素富化と送風温度の影響

到達反応率におよぼす酸素富化率と送風温度の影響を Fig. 9 に示す。酸素富化率と送風温度の増大につれ、到達燃焼率と還元率はともに上昇するが、還元率の増大に対しては、送風温度の上昇が大きな促進効果を有している。これは多量複合吹き込みに伴う熱風温度の低下を送風温度の上昇によって補償し、微粉炭の燃焼反応を早

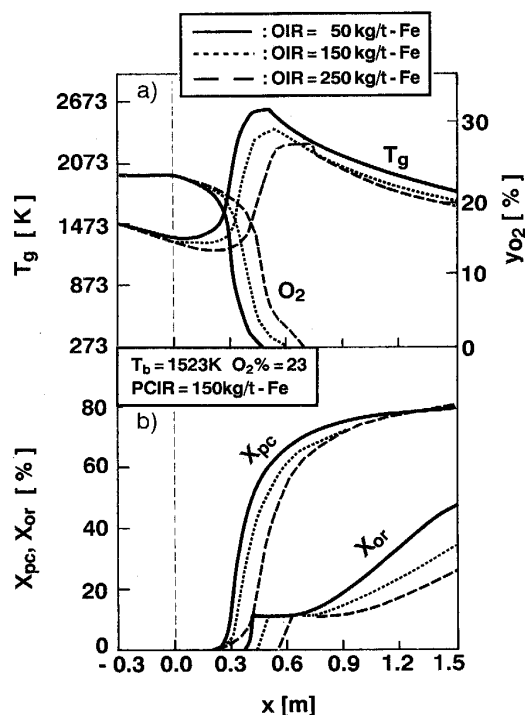


Fig. 6. Effect of injection rate of fine ore on the distributions of process variables in the raceway zone.

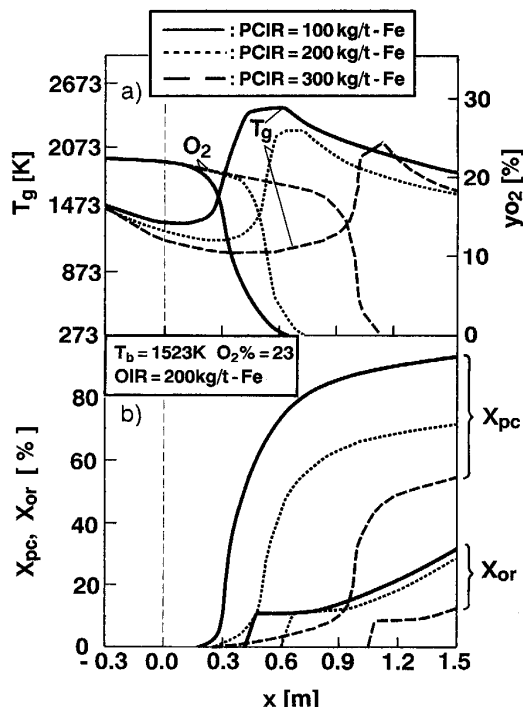
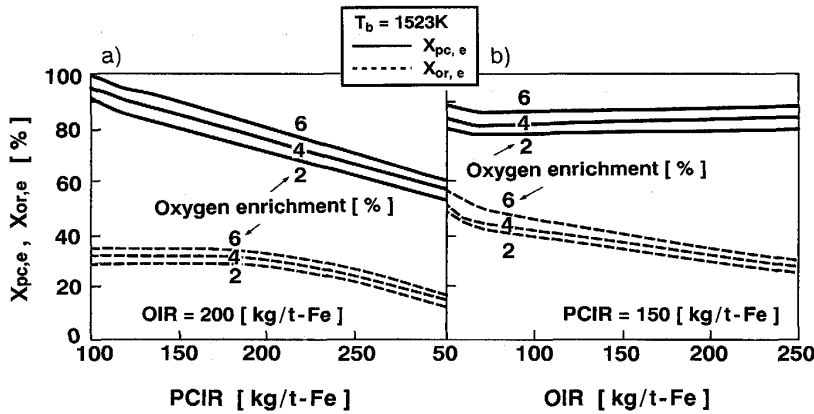
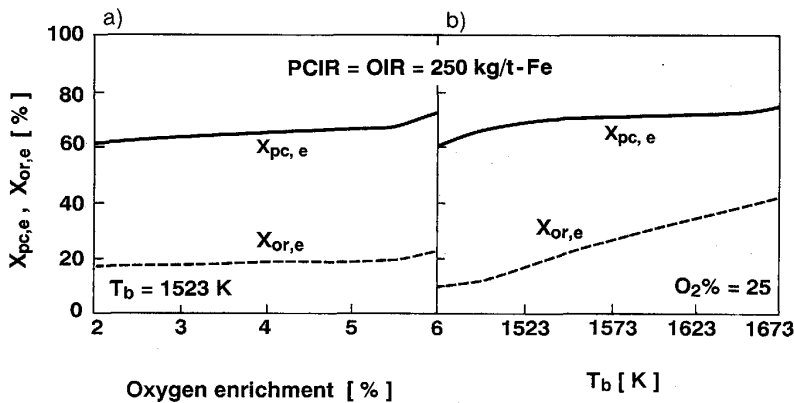


Fig. 7. Effect of injection rate of pulverized coal on distributions of process variables in the raceway zone.

めることによって還元反応が促進されることに起因すると推定される。



(a) Effect of PC injection rate  
(b) Effect of fine ore injection rate  
Fig. 8. Effect of injection rate of PC and fine ore on reaction degree at 1.5 m from tuyere nose with different oxygen enrichment.



(a) Effect of oxygen enrichment  
(b) Effect of blast temperature  
Fig. 9. Effect of oxygen enrichment and blast temperature on reaction degree at 1.5 m from tuyere nose.

### 5. 結 言

PCOI 操業についてレースウェイ内での流れ、伝熱および反応モデルを構築し、レースウェイ内反応特性を解析した。

- 1) 微粉炭および粉鉱石の多量複合吹き込みにとともなう熱風温度の低下はレースウェイ内での温度とガス組成の分布および反応に大きく影響する。
- 2) 微粉炭の到達燃焼率に及ぼす粉鉱石の吹き込み量の影響は小さい。
- 3) 酸素富化により、微粉炭と粉鉱石の到達反応率はともに上昇する。
- 4) 超多量複合吹き込みの場合、レースウェイ内での還元反応の促進に対しては、酸素富化よりも送風温度を高める方が効果が大きいことが推定された。

### 記 号

- A: (14-2)式に現れる因子 (—)
- $A_t$ : 断面積 ( $m^2$ )
- B: 微粉炭の膨張率 (—)
- a: 比表面積 ( $1/m$ )
- $C_i$ :  $i$ 成分の濃度 ( $mol/m^3$ )
- $C_b$ : 石炭中の炭素含有率 (mass%)
- $C_D$ : 抵抗係数 (—)

- c: 比熱 ( $J/K \cdot mol$ )
- $d_{p,c,0}$ : 微粉炭の初期粒径 (m)
- $D_{s,i}$ : 還元鉄相での  $i$ 成分の粒内拡散係数 ( $m^2/s$ )
- $D_T$ : 横型空塔燃焼炉の内径 (m)
- E: 活性化エネルギー ( $J/mol$ )
- $E_D$ : 熱分解反応の温度依存性因子 ( $kJ/mol$ )
- $F_b$ : 送風量 ( $Nm^3/s$ )
- $F_i$ :  $i$ 成分あるいは  $i$ 相の流量 ( $mol/s$ )
- $F_y$ : 単位長さ当たり  $y$ 方向の循環ガス流量 ( $mol/s \cdot m$ )
- $F_{rc}$ : (2)式に現れる循環ガスに関するパラメータ ( $mol/s$ )
- $H_{i,j}$ :  $i$ から  $j$ への伝熱速度 ( $kJ/s \cdot m^3$ )
- $H_m$ : 溶融による吸熱速度 ( $kJ/s \cdot m^3$ )
- $h_{i,j}$ :  $i$ から  $j$ への総括伝熱係数 ( $kJ/s \cdot m^2$ )
- $k_j$ :  $j$ 番目反応の総括速度定数 ( $1/s$ )
- $k_{j,r}$ :  $j$ 番目反応の反応速度定数 ( $1/s$ )
- $k_{f,i}$ : 境界膜での  $i$ 成分の物質移動係数 ( $1/s$ )
- $M_k$ :  $k$ 元素の分子量 ( $kg/kmol$ )
- OIR: 銑鉄1トン当たりの粉鉱石吹き込み量 ( $kg/t-Fe$ )
- P, Pb: 気圧と送風圧 (Pa)
- PCIR: 銑鉄1トン当たりの微粉炭吹き込み量 ( $kg/t-Fe$ )
- $Q_j$ :  $j$ 番目反応の発熱速度 ( $kJ/s \cdot m^3$ )
- R: 気体定数 ( $8.314 J/mol$ )
- $R_j$ :  $j$ 番目反応の総括速度 ( $mol/s \cdot m^3$ )
- $R_{v,w}, R_{v,k}$ : 揮発速度と  $k$ 元素の放出速度 ( $kg/s \cdot m^3$ )
- $R_{v,i}$ : 揮発による  $i$ ガス成分の生成速度 ( $mol/s \cdot m^3$ )
- $r_i$ :  $i$ ガス成分の生成速度 ( $mol/s \cdot m^3$ )
- T: 温度 (K)

$T_b$ : 送風温度 (°C)  
 $T_D$ : 熱分解開始温度 (K)  
 $u_g, u_p$ : ガスと粒子の流速 (m/s)  
 $V_m$ : 石炭の揮発分の工業分析値 (mass%)  
 $V^*$ : (3)式で定義した有効揮発分の揮発量 (mass%)  
 $V_T$ : 炉内容積 (m<sup>3</sup>)  
 $W_{pc,0}, W_{or,0}$ : 微粉炭と粉鉱石の吹き込み速度 (kg/s)  
 $W_{H_2O}$ : 送風中湿分添加量 (kg/Nm<sup>3</sup>)  
 $X_m$ : 粉鉱石の溶融率 (—)  
 $X_{pc}, X_{or}, X_D$ : 燃焼率, 還元率と熱分解率 (—)  
 $X_{pc,e}$ : 微粉炭の到達燃焼率 (—)  
 $X_{or,e}$ : 粉鉱石の到達還元率 (—)  
 $x$ :  $x$ 方向の距離 (m)  
 $x_R$ : レースウェイ深さ (m)  
 $y_i$ :  $i$ ガス成分のモル分率 (—)  
 $V, V_i$ : 放出された揮発分の比率,  $V_i(i=1,2)$ は(6)式の2-stepモデルに対応 (mass%)  
 $y_i^*$ :  $i$ ガス成分の平衡モル分率 (—)  
 $\alpha$ : 微粉炭の燃焼率 (—)  
 $\alpha_i$ :  $i$ 段階の揮発化に関する量論係数 (—)  
 $\eta$ : (10)式で定義した反応効率 (—)  
 $\eta_j$ : コークス反応の有効係数 (—)  
 $\delta_j$ : ガス側への  $j$ 番目反応熱の分配比 (—)  
 $\rho$ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 添え字  
 $or, ck, pc, ash, v, g$ : 粉鉱石, コークス, 微粉炭, 灰分と揮発分, ガス

文 献

- 1) 春 富夫, 才野光男, 奥村和男, 阪口泰彦, 稲谷稔宏: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 951
- 2) 小西行雄, 武田幹治, 田口整司, 浜田尚夫: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2004
- 3) 内藤誠章, 山口一良, 九島行正: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1049
- 4) 山口一良, 上野浩光, 内藤誠章, 田村健二: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1050
- 5) 山口一良, 上野浩光, 内藤誠章, 田村健二: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1051
- 6) 山縣千里, 須山真一, 堀坂 修, 梶原義雅: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 142
- 7) 山縣千里, 須山真一, 堀坂 修, 梶原義雅: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 143
- 8) 山縣千里, 池宮洋行, 須山真一, 堀坂 修, 紫富田浩, 柏田昌宏, 梶原義雅: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 144
- 9) 桑原 守, 謝 裕生, 鞭 巖: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1918
- 10) 赫 冀 成, 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 1847
- 11) A. S. Jamaluddin, T. F. Wall and J. S. Truelove: Ironmaking Steelmaking, **13** (1986) 2, p. 91
- 12) T. Sugiyama, S. Matsuzaki and T. Nakagawa: Proc. Sixth Int. Iron and Steel Congress (1990), p. 414
- 13) M. E. Morgan and P. A. Roberts: Proc. 1st Int. ROIDUC Sym. on Coal Science, **1** (1986), p. 173
- 14) D. B. Anthony, J. B. Howard, H. C. Hottel and H. P. Meissner: Proc. 15th Int. Sym. on Combustion (1975), p. 1303
- 15) 上野浩光, 山口一良, 田村健二: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 136
- 16) 田村健二, 上野浩光, 山口一良, 須賀田正泰, 天野 繁, 山口一成: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 775
- 17) H. Kobayashi, J. B. Howard and A. F. Sarofim: Proc. 16th Sym. (Int) on Combustion (1976), p. 411
- 18) S. K. Ubhayakar, D. B. Stikler, C. W. Von Rosenberg Jr. and R. E. Gannon: Proc. 16th Sym. (Int) on Combustion (1976), p. 427
- 19) F. C. Lockwood and S. M. A. Rizvi: Proc. 20th Sym. (Int) on Combust. (1984), p. 513
- 20) J. S. Truelove: Proc. 20th Sym. (Int) on Combustion (1984), p. 523
- 21) L. D. Smoot: Prog. Energy Combustion Sci., Vol. 10 (1984), p. 229
- 22) M. A. Field, D. W. Gill, B. B. Morgan and P. G. W. Hawksley: Combustion of pulverized coal, BCURA, Leatherhead, England (1967)
- 23) J. B. Howard and R. H. Essenhigh: Proc. 11th Sym. (Int) on Combustion (1966), p. 399
- 24) J. B. Howard, G. C. Willaams and D. H. Fine: Proc. 14th Sym. (Int) on Combustion (1973), p. 975
- 25) S. Dutta, C. Y. Wen and R. J. Belt: Ind. Chem. Process. Des. Develop., **16** (1977), p. 20
- 26) B. Srinivas and N. R. Amundson: AIChE J., **26** (1980), p. 487
- 27) R. E. Mitchell and O. H. Madsen: Proc. 21th Sym. (Int) on Combustion (1986), p. 173
- 28) B. J. Waters, R. E. Mitchell, R. G. Squires and N. M. Lauredeau: Proc. 22th Sym. (Int) on Combustion (1988), p. 17
- 29) R. E. Mitchell: Proc. 22th Sym. (Int) on Combustion (1988), p. 69
- 30) W. E. Ranz and W. R. Marshall: Chem. Eng. Prog., **48** (1952), p. 141
- 31) 肖 興国, 清水正賢, 稲葉晉一: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 141
- 32) 肖 興国, 清水正賢, 稲葉晉一: 鉄と鋼, **78** (1992), p. 536
- 33) I. Muchi: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **7** (1967), p. 223
- 34) 月橋文孝, 加藤公雄, 大塚研一, 相馬胤和: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 750
- 35) 長坂徹也, 井口泰孝, 萬谷志郎: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 204, **75** (1989), p. 74
- 36) 萬谷志郎, 井口泰孝, 長坂徹也: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 1689
- 37) 狩野 武: 粉体粒子の挙動 (1977) [産業技術センター]
- 38) 化学工学便覧改訂四版 (化学工学協会編) (1978), p. 326 [丸善]
- 39) 野沢健太郎, 肖 興国, 笹原茂樹, 清水正賢, 稲葉晉一: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1138
- 40) 肖 興国, 野沢健太郎, 笹原茂樹, 清水正賢, 稲葉晉一: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1139
- 41) 鈴木富雄: 東北大学学位論文 (1986), p. 27