

い到達酸化率を示すという結果を生じたものと考えられる。また到達酸化率の値は鉱石の種類によってもかなりの差が見られる。すなわち、試薬 Fe₂O₃、ブラジル鉱石、ゴア鉱石、コタバト鉱石について得られた値は、Fig. 4のごとくである。これより明らかなようにコタバト鉱石のような褐鉄鉱系の鉱石は高い到達酸化率を示すことがわかった。低温度で還元した鉄粉ほど比表面積が大きいということは周知の事実であるが、その値は試料によって差があるので、本研究において用いた試薬 Fe₂O₃ の還元鉄粉の比表面積を測定した。42~65, 65~100, -250 メッシュの試料を使つて、500°C で還元された鉄粉の比表面積の粒度による影響を調べた結果、いずれも 3.59~3.66 m²/g の範囲内にあり、粒度による差はほとんど見られなかつた。42~65メッシュの試料を使用して還元温度が 400, 500, 600°C のときの比表面積を測定した結果、それぞれ 5.58, 3.66, 1.36 m²/g となり温度上昇とともにほぼ直線的に比表面積が減少する傾向が見られた。また還元温度において長時間保持しても比表面積が大きく変化することもなかつた。

5. 結 言

粉酸化鉄および粉鉄鉱石を還元し、これを低温で O₂-N₂ 混合ガスで再酸化した結果次の結論を得ることができた。

- 1) 還元鉄粉の再酸化は最初急激に進行し、その後は非常にゆるやかに進行する。
- 2) 還元温度を変化させた結果、600°C で還元した鉄粉が最も高い到達酸化率を示す。
- 3) 到達酸化率は、酸素分圧による影響は小さく、還元鉄粉の比表面積と再酸化時における気孔の収縮および気孔の閉塞によつて支配される。
- 4) いったん生成された還元鉄も還元温度より高い温度に加熱するとその特性は速い速度でいちじるしく変化する。
- 5) 各種鉱石の中で褐鉄鉱系の鉱石は高い到達酸化率を示した。

文 献

- 1) 大蔵, 松下: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 11
- 2) 近藤, 他: 鉄と鋼, 第72回講演大会講演概要集, p. S 12

高炉の任意操業における炉内状況の解析*

名古屋大学工学部

工博 鞭 巖・八木順一郎
佐々木恵一・西尾 浩明

Analysis Concerning the Situations in Blast Furnace under Arbitrary Operating Conditions

Dr. Iwao MUCHI, Jun-ichiro YAGI
Keiichi SASAKI and Hiroaki NISHIO

1. 結 言

高炉の操業条件を任意に変化させた場合に、炉内状況

がどのように変化するか、また、実際に操業条件をどの程度まで変化させることができるかという問題は、高炉の実操業において重要な指針となると考えられる。

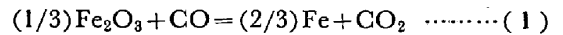
筆者らは、7種類の反応を考慮した羽口上部の数学的モデルを展開したが、ここでは、これら反応のうち5種類の反応の速度に圧力の効果を加味した数学的モデルに基づいて解析した。すなわち、装入物の粒子径、組成、配合比、送風温度、水蒸気や重油の添加比を一定にして、送風量、装入量を変化させた場合に、定常操業が可能かどうか、また、可能な場合には、その炉内状況がどのようになるかを検討した。

2. 方 法

送風量を任意に設定しておき、層頂での粒子装入量を仮定すると、炉全体での総括的な熱収支と物質収支に基づいて、層頂でのガスの流量、組成、密度、ガスと粒子の温度が求められる。これらを初期条件として、前述の数学的モデルにより、層頂より羽口レベルまで計算を行ない、得られた羽口レベルでのガスや粒子の温度の値と層頂と羽口レベルの間で行なつた総括的な熱収支から求められる羽口レベルでのこれらの値とが一致するまで、装入量と層頂レベルのうちいずれか一方を変化させて計算する。

3. 理 論

筆者らがすでに報告した各反応速度 (CO による間接還元反応²⁾ R₁^{*}, カーボンソリュージョン反応²⁾ R₂^{*}, 直接還元反応²⁾ R₃^{*}, 石灰石の分解反応³⁾ R₄^{*}, H₂ による間接還元反応¹⁾ R₅^{*}, C と H₂O の反応¹⁾ R₆^{*}, CO と H₂O の反応¹⁾ R₇^{*}) に圧力 P の効果を考慮した。たとえば、CO による間接還元反応 (1) の速度は (2) 式となる。



$$R_1^* = \frac{273 \pi d_p^2 \phi N_1 P (x - x_e) / (22 \cdot 4t)}{(1/k_{f1}) + [d_{p1} \{ (1 - f_s)^{-1/3} - 1 \} / (2D_{s1})] + 1 / \{ (1 - f_s)^{2/3} k_1 (1 + 1/K_1) \}} \dots\dots\dots (2)$$

$$k_{f1} = (Sh) \cdot D_1 / d_{p1} \quad [m/hr]$$

$$D_{s1} = D \cdot \xi \cdot \epsilon_v \quad [m^2/hr]$$

$$D_1 = 2.592 \times 10^{-6} t^{1.78} / P, \quad t \leq 848^\circ K \quad [m^2/hr]$$

$$D_1 = 2.592 \times 10^{-6} t^{2.0} / P, \quad t \geq 848^\circ K \quad [m^2/hr]$$

$$k_1 = (0.6) \cdot \exp(6.3586 - 3461.4/t) \quad [m/hr]$$

圧力を上昇させると、拡散係数は減少するが、反応の推進力が増加するので、反応速度は増大する。R₂^{*}, R₃^{*} についても同様である。石灰石の分解反応では

$$R_4^* = \frac{\pi d_p^2 \phi N_4 [P_{CO_2}^* / (R^1 t) - P \{ y / (R^1 T) \}]}{(1/k_{f4}) + [d_{p4} \{ (1 - f_e)^{-1/3} - 1 \} / (2D_{s4})] + [P_{CO_2}^* / \{ (1 - f_e)^{2/3} k_4 R^1 t \}]} \dots\dots\dots (3)$$

$$D_4 = 2.236 \times 10^{-6} T^{1.78} / P \quad [m^2/hr]$$

$$P_{CO_2}^* = \exp \{ 16.1438 - (18890/t) \} \quad [atm]$$

となる。なお、直接還元反応は、固液系反応であるから CO と H₂O の反応は平衡を仮定したので、ともに、圧力には影響されない。

次に、層頂と羽口間の総括的な熱収支と物質収支⁴⁾ や炉全体の熱収支²⁾ については、すでに報告した。炉全体の総括物質収支は前報の式³⁾ を一部改良して、次式を求めた。

$$W_p \cdot \alpha_{Fe} + W_D \cdot \gamma_{Fe} = W_C \cdot v_{Fe} + W_C \cdot t_u \cdot s_{Fe} + \dots\dots\dots (4)$$

* 第73回講演大会にて発表 講演番号50 昭和42年5月10日受付

Table 1. Calculated results of over-all heat and material balances.

F_0 [Nm ³ /min]	W_t [t/hr]	x_0 [-]	y_0 [-]	z_0 [-]	w_0 [-]	W_p [t/hr]	W_s [t/hr]	$F_0 \times 10^{-5}$ [Nm ³ /hr]	T_0 [°K]
2942.2	314.1	0.241	0.183	0.521	0.056	145.0	41.2	2.676	583
2942.2	311.0	0.236	0.185	0.524	0.056	143.6	40.8	2.663	620
2942.2	308.0	0.232	0.187	0.525	0.056	141.5	40.4	2.652	656
2867.2	305.0	0.239	0.183	0.522	0.056	140.8	40.1	2.603	590
3042.2	324.8	0.240	0.183	0.521	0.056	150.0	42.7	2.767	587

$$W_{cinder} \cdot u_{Fe} + W_M \dots\dots\dots (3)$$

$$F_{ms,c} + F_{mL,c} + W_{oil} \cdot \beta_C / 12$$

$$= W_p \cdot d_C / (12) + F_0(x_0 + y_0) / (22.4) + F_{mD,C} \dots\dots\dots (4)$$

$$F_0 z_0 = (0.79) \cdot (60F_b) \dots\dots\dots (5)$$

$$F_0 w_0 / (22.4) = (60F_b) \cdot w_{st} / (18000) + W_{oil} \cdot \beta_H / (2) \dots\dots\dots (6)$$

$$(1.5)F_{ms,hem} + (2)F_{ms,mag} + F_{ms,L} + (0.21) \cdot (60F_b) / (22.4) + (60F_b) \cdot w_{st} / (2 \times 18000) + W_p \cdot \{ \alpha_{Si} / (28) + \alpha_{Mn} / (2 \times 54.9) \} \dots\dots\dots (7)$$

$$F_0(x_0 / (2) + y_0) / (22.4) + F_{mD,O} \dots\dots\dots (8)$$

$$x_0 + y_0 + z_0 + w_0 = 1 \dots\dots\dots (8)$$

$$W_s = (60.1)F_{m, SiO_2} + (56.1)F_{m, CaO} + (102.0) \cdot F_{m, Al_2O_3} + (40.3)F_{m, MgO} + (70.9)F_{m, MnO} + (79.9)F_{m, TiO_2} - W_p \cdot \{ (60.1)\alpha_{Si} / (28) + (70.9)\alpha_{Mn} / (54.9) \} \dots\dots\dots (9)$$

上記の式を連立して解くと、層頂での、ガス流量 F_0 、組成 (x_0, y_0, z_0, w_0)、出鉄量 W_p 、出滓量 W_s を求めることができる。なお、ダスト量は $W_D = 0.01622W_t$ とした。

4. 結果および考察

本研究では、現在わが国で稼働中のA高炉について、

炉全体で総括熱収支、物質収支を行ない、 $F_0, x_0, y_0, z_0, w_0, W_p, W_s, Q$ (融解熱)、 T_0 (層頂でのガス温度)を装入量、送風量の関数として、(10)~(19)式を求めた。

$$F_0 = 0.391637W_t + 49.1285F_b \dots\dots\dots (10)$$

$$x_0 = (0.456964W_t - 26.9285F_b) / F_0 \dots\dots\dots (11)$$

$$y_0 = (-0.096548W_t + 26.9285F_b) / F_0 \dots\dots\dots (12)$$

$$z_0 = 47.4F_b / F_0 \dots\dots\dots (13)$$

$$w_0 = 1 - x_0 - y_0 - z_0 \dots\dots\dots (14)$$

$$W_p = 0.461711W_t \dots\dots\dots (15)$$

$$W_s = 0.131316W_t \dots\dots\dots (16)$$

$$Q = 45.9463W_t \dots\dots\dots (17)$$

$$T_0 = \{ -(19.904 \times 10^{-3}W_t + 15.622F_b) + \sqrt{A} \} / \{ 2(0.14406W_t + 30.084F_b) \times 10^{-4} \} \dots\dots\dots (18)$$

$$A \equiv 15.05013 \times 10^2 F_b^2 - (3.29717)F_b \cdot W_t - 4.72830 \times 10^{-2} W_t^2 - 7.8032 \times 10^2 W_t - 1.62959 \times 10^5 F_b \dots\dots\dots (19)$$

A高炉のプロフィールおよび実際操業のデータはすでに報告したとおりである⁵⁾。任意の送風量に対して、粒子装入量を仮定し、総括的な収支を行なった結果をTable 1に示した。

実際の操業データに基づいて炉内状況を解析した結果をFig. 1に示す。反応速度に圧力の効果が加味されているので、前報の結果よりも鉱石の間接還元反応がはやくなり、そのため、還元率 f_s の増加が急速になっている。また、CO、CO₂の各モル分率 x, y の変化も急速になり、 x の最大点がやや層頂に近くなっている。石灰石の分解速度は圧力が増加すると遅くなるので、分解率 f_e は前報に比べて変化がゆるやかになっている。

次に、送風量を一定にして、装入量を変化させた場合層高をいくらにすれば定常操業が保たれるかを検討した。送風量 F_b は実際操業と同じ2942.2Nm³/minとし装入量 W_t を311t/hr(約3tの減少)として、数値計算した結果がFig. 2で、層高は減少して、羽口・層頂間距離は20mになった。Fig. 1に比較すると、層頂温度は装入量の減少のために高くなり、そのため、各反応速度が促進され、鉱石、石灰石ともに反応が早く完結する。温度は早く900°Cに達するため、 x の最大値は層頂に近く、また、小さな値になる。さらに、装入量を3t/hr減少させて計算を行なったのがFig. 3である。Fig. 2に比べ、さらに層頂温度は高くなる。供給される酸素量に対して、装入量が減少するから、相対

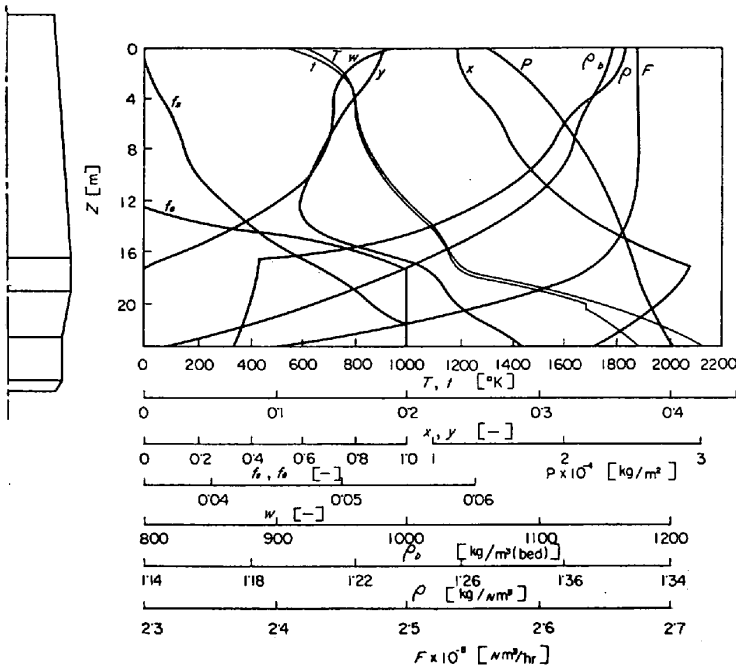


Fig. 1. Analytical results obtained from our mathematical model under actual operating conditions of B.F(A) : $F_b = 2942.2$ [Nm³/min], $W_t = 314.1$ [t/hr]

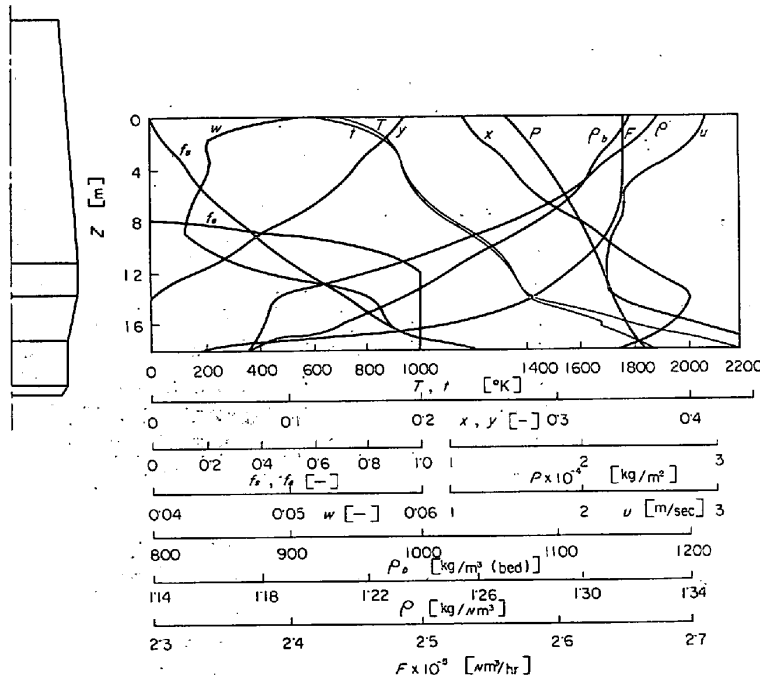
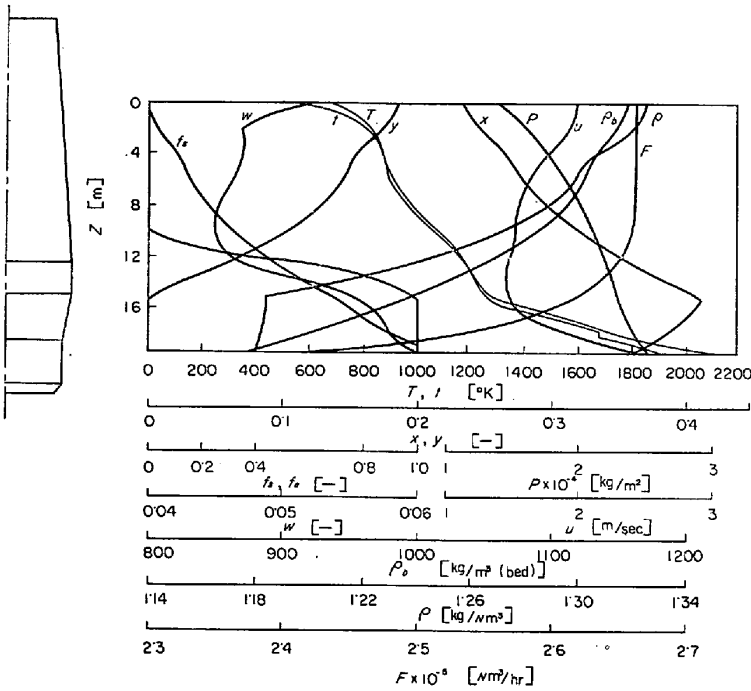


Fig. 2. Analytical results obtained under arbitrary operating conditions of B.F. (A) as follows:
 $F_b = 2942.2$ [Nm³/min], $W_t = 311$ [t/hr]

的に炭素量が少なくなり、 x_0 は下がり、 y_0 は上昇する。しかも温度が高いので、間接還元反応が早く進み、 x と y の変化がさらに顕著になる。定常状態を保つためには、層高がさらに減少して、18m となった。出鉄量は 3413t/day で、実際操作に比べ、日産約 70 t の減産となった。これ以上、装入量を減少させると、層頂温度が高くなり、定常操作を保つためには、さらに層高を短く

しなければならぬが、そのため、粒子の滞留時間は短くなり、羽口レベルで鉱石の還元反応が完結しなくなるので、定常操作が不可能になるものと推察される。

次に、層頂の位置を一定にして、送風量と装入量の関係を検討した結果が Fig. 4, Fig. 5 である。層高が 23m のとき、送風量を減少して、2867.2 Nm³/min にすると、装入量は 305 t/hr のときに、定常操作が得られ、出鉄量は 3380 t/day となつて、日産約 100 t の減産となる。その炉内状況が Fig. 4 に示してある。実際操作 (Fig. 1) に比べ、ガス流量 F が 7×10^3 Nm³/hr 減少している以外は、類似の傾向を示している。Fig. 5 では、層高 23m 一定で、 F_b を 3042.2 Nm³/min に増加させたが、定常操作は、 W_t を 324.8 t/hr に増大したときに得られ、出鉄量は 3600 t/day となり、日産約 120 t の増産が可能となる。Fig. 5 では、Fig. 1 に比べて、 F が 9×10^3 Nm³/hr 増加し、流速が大となっている以外は大きな変化はない。

5. 結 言

一定の送風量に対し、装入量を減少させると、層高が低くなるが、ある減少範囲内では定常操作が可能である。この場合の炉内状況および出鉄量を定量的に求めた。また、層高を一定にして、装入量と送風量の関係を検討した結果、送風量 1% 増加させると、出鉄量が 1% 増加することが定量的に確認でき、炉内状況も同時に求めることができた。

記 号

- D_1, D_4 : 高炉ガス中での CO, CO₂ の拡散係数 [m²/hr]
- D_{s1}, D_{s4} : 還元鉄相での CO の、および CaO 相での CO₂ の粒内拡散係数 [m²/hr]
- d_{p1}, d_{p4} : 鉱石および石灰石の粒子径 [m]
- F_b : 乾燥送風量 [Nm³/min]
- $F_{mD,C}, F_{mD,O}$: ダストに含まれている炭素および酸素のモル流量 [kg mol/hr]
- $F_{ms,C}, F_{mL,C}$: コークスおよび石灰石に含まれている炭素のモル流量 [kg mol/hr]
- $F_{ms,hem}, F_{ms,L}, F_{ms,mag}$: ヘマタイト、石灰石およびマグネタイトのモル流量 [kg mol/hr]
- $F_{m,Al_2O_3}, F_{m,CaO}, F_{m,MgO}, F_{m,MnO}, F_{m,SiO_2}, F_{m,TiO_2}$: Al₂O₃, CaO, MgO, MnO, SiO₂, TiO₂ の各モル流量 [kg mol/hr]
- F, F_0 : ガス流量および層頂でのガス流量 [Nm³/hr]
- f_s, f_r : 石灰石の分解率および鉱石の還元率 [-]
- K_1 : CO による間接還元反応の平衡定数 [-]
- k_1, k_4 : 間接還元反応、石灰石の分解反応の反応速度定数 [m/hr], [kg mol(CO₂)/m²·hr]
- k_{f1}, k_{f4} : 間接還元反応、石灰石の分解反応における境膜内物質移動係数 [m/hr]

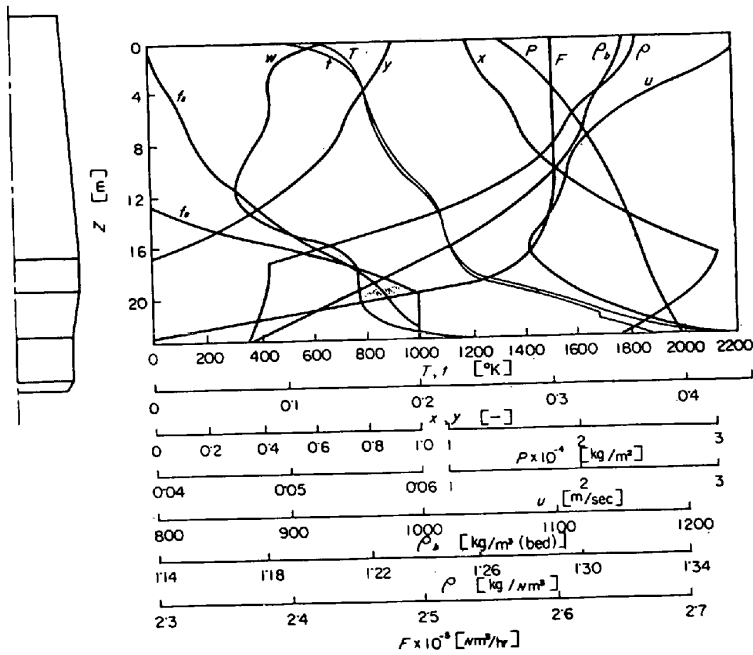


Fig. 4. Analytical results obtained under arbitrary operating conditions of B.F. (A) as follows:
 $F_b = 2867 \cdot 2$ [Nm^3/min], $W_i = 305$ [t/hr]

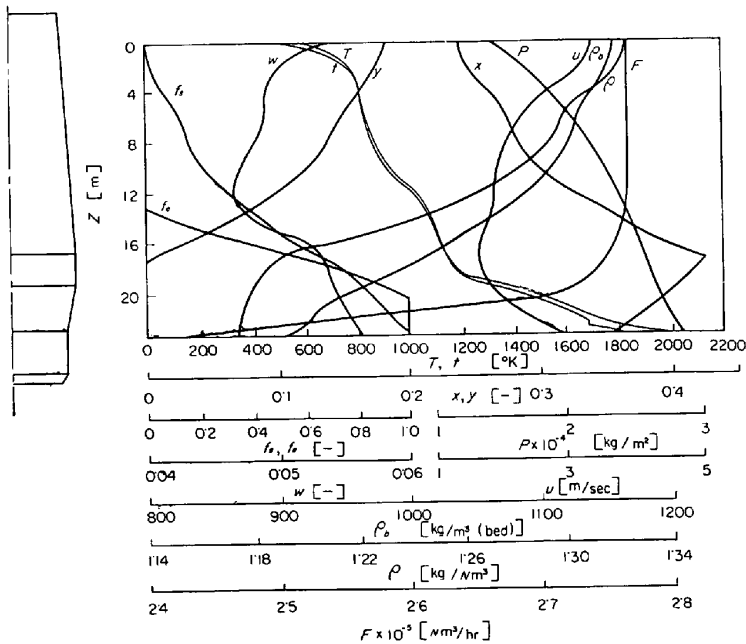


Fig. 5. Analytical results obtained under arbitrary operating conditions of B.F. (A) as follows:
 $F_b = 3042 \cdot 2$ [Nm^3/min], $W_i = 324 \cdot 8$ [t/hr]

N_1, N_4 : 単位 bed 当りの鉱石および石灰石の個数
 [$1/\text{m}^3(\text{bed})$]

P : 絶対圧力 [atm]

$P_{\text{CO}_2^*}$: 石灰石の平衡分解圧 [atm]

Q : 融解熱 [kcal/hr]

S_{Fe} : 灰分中の Fe の質量分率 [-]

Sh : シャーウッド数 $= k_{f1} d_{p1} / D_1$ [-]

T, T_0 : ガス温度および層頂でのガス温度 [$^{\circ}\text{K}$]

t : 粒子温度 [$^{\circ}\text{K}$]

t_a : コークス中の灰分の質量分率 [-]

u : ガスの空塔速度 [m/sec]

u_{Fe} : シンダー中の Fe の質量分率 [-]

v_{Fe} : 鉱石中の Fe の質量分率 [-]

$W_C, W_{\text{cinder}}, W_D, W_M, W_O, W_{\text{Oil}}$: コークス, シンダー, ダスト, 鉱石, 重油の各質量流量 [kg/hr]

W_P, W_S : 出鉄量および出滓量 [kg/hr]

W_i : 全装入量 [kg/hr]

w_{st} : 水蒸気の添加比 [g/ Nm^3]

w, w_0 : 水素のモル分率および層頂での水素のモル分率 [-]

x, x_0 : CO のモル分率および層頂での CO のモル分率 [-]

y, y_0 : CO_2 のモル分率および層頂での CO_2 のモル分率 [-]

z_0 : 層頂での N_2 のモル分率 [-]

z : 層頂からの距離 [m]

$\alpha_C, \alpha_{\text{Fe}}, \alpha_{\text{Mn}}, \alpha_{\text{Si}}$: 鉄鉄中の炭素, 鉄, マンガン, シリコンの各質量分率 [-]

β_C, β_H : 重油中の炭素, 水素の質量分率 [-]

γ_{Fe} : ダスト中の鉄の質量分率 [-]

ϵ_v : 還元鉄相の気孔率 [-]

ξ : 迷路度 [-]

ρ, ρ_b : ガスの密度および粒子のかさ密度 [kg/ Nm^3], [kg/ $\text{m}^3(\text{bed})$]

文 献

- 1) 八木, 西尾, 佐々木, 鞭: 金属学会誌投稿中(1966年11月)
- 2) 鞭, 八木, 田村, 森山: 金属学会誌, 30(1966), p. 826
- 3) 八木, 田村, 鞭: 金属学会誌, 31(1967), p. 103
- 4) 鞭, 田村, 八木, 森山: 金属学会誌, 30(1966), p. 1109
- 5) 鞭, 田村, 八木, 森山: 金属学会誌, 30(1966), p. 1115